

壁面緑化による建築・都市の  
温熱環境改善効果に関する研究

令和4(2022)年11月

鈴木 弘孝



壁面緑化による建築・都市の  
温熱環境改善効果に関する研究

令和4(2022)年11月

鈴木 弘孝





全農ビル(東京都千代田区)の屋上緑化



晴海トリトンスクエア(中央区晴海)の人工地盤緑化



全農ビル(千代田区大手町)の壁面緑化



## ◆ 壁面緑化の事例



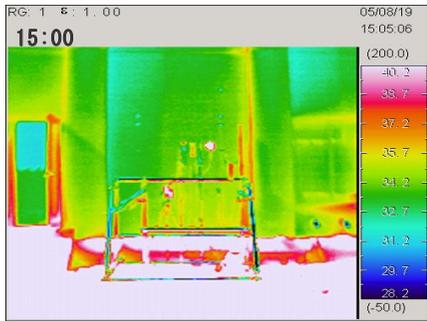
バラなどの多種の樹木による壁面緑化：パソナ本社ビル(千代田区大手町)



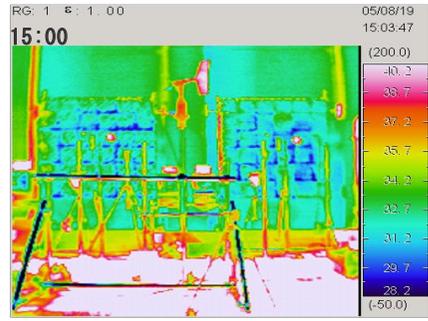
駐車場の壁面緑化の例：流山おおたかの森ショッピングセンター(千葉県流山市内)

大学構内(千葉県東金市)に設置したグリーンカーテン

◆ 壁面緑化とコンクリート壁のサーモグラフィーによる表面温度比較



コンクリート壁面の表面温度



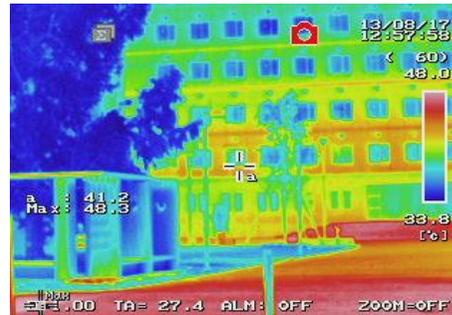
緑化壁面の表面温度



コンクリート壁面(白色)

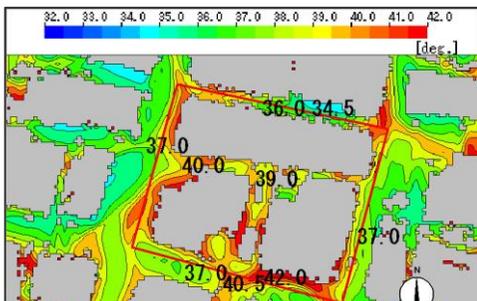


緑化パネル壁面(ヘデラヘリックス/アメリカツルマサキ)

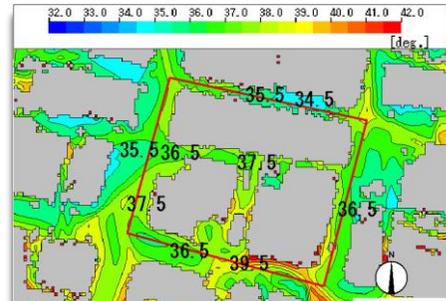


サーモグラフィー(赤外線画像)による表面温度の比較…コンクリート地盤と芝生面との表面温度の差が可視化できる。

◆ 実在街区における温熱環境シミュレーション



緑化なしの場合の MRT 分布



屋上・地表面 20%緑化の場合の MRT 分布

## 序 文

都市部においてコンクリートやアスファルトにより地表面が被覆され、無機的环境が形成されるとともに、都市活動に伴う自動車や工場からの廃熱、業務ビルなどからの空調機器などによる人工廃熱の増加、緑地や水面の減少等により、近年、「ヒートアイランド現象」が顕在化しており、地球温暖化防止対策とともにその対策の強力な推進が必要かつ急務となっている。2004年3月にヒートアイランド対策関係府省連絡会議においてヒートアイランド対策に関する政府の基本方針と実施すべき対策が「ヒートアイランド対策大綱」として体系的にとりまとめられました。この中で、「地表面被覆の改善」策として建物の屋上や壁面等の建物緑化の推進が位置づけられた。

この大綱に先立ち、東京都では2001年4月に条例を改正し、一定規模以上の敷地面積を有する建築物の新築又は改築を行う場合、緑化可能な屋上部の面積の20%以上の緑化を行うことを義務づけている。一方、2004年6月には都市緑地保全法が改正されて、都市緑地法となり緑化地域における緑化率規制（「緑化地域制度」）が導入されるとともに、都市公園法が改正され「立体都市公園制度」が創設される等、都市の立体緑化推進に関する新たな法制度が創設された。これらの緑化に関する制度創設により、都市市街地部における大規模民間敷地の屋上や壁面の緑化、人工地盤上の緑化が推進される制度的な枠組みが強化され、以後、屋上や壁面等の緑化面積は着実に増大が図られてきた。

しかし、ヒートアイランド緩和のための地表面被覆状態を改善していくためには、屋上や壁面等の建物緑化の推進を図る必要があり、中では屋上緑化に比べて施工実績も少なく、研究蓄積も少ない壁面緑化の一層の研究開発が必要と考えられる。

本書では、ヒートアイランド現象の深刻化と都市環境の悪化の状況を踏まえ、地表面被覆改善策として有力視されている建物緑化の中でも、特に壁面緑化に着目して、その暑熱緩和に対する効果を定量的に評価し、得られた基礎数値をもとに、都市住民の生活空間レベルである街区や地区レベルでの敷地内の緑化と壁面等の立体緑化の組み合わせにより温熱環境の変化をシミュレーションし、壁面緑化による温熱環境改善効果を定量的な検証と評価を試みた。

序章では、本研究の背景として、ヒートアイランド対策として重要視されている屋上・壁面等建物緑化についての国の施策の動向と位置づけを整理し、屋

上緑化と壁面緑化の市場での実績，自治体の建物緑化推進のための助成措置の例，等を取り上げた。

第1章では，現在屋上の緑化や開発に取り組んでいる企業とその技術担当者へのアンケート調査結果に基づき，壁面緑化の市場性，普及の可能性等について民間企業と技術担当者の意識を把握し，技術的課題への認識を整理することにより，今後都市部において壁面緑化を推進していく上での技術開発の課題と方向，研究開発分野において重点的に取り組むべき対象等を検討するとともに，既往の行政資料等をもとに壁面緑化を推進していくための制度上の課題について検討を行った。

次に，このアンケート調査結果を踏まえて，第2章と第3章では今後の壁面緑化の普及と開発を図る上で，緑化担当技術者より主要な研究開発課題と提示された「ヒートアイランド緩和に資する温熱環境改善効果の定量的な評価」を目的としてユニットタイプの緑化資材を組み合わせて壁面緑化を構成する「パネル型緑化材」を用いて，長波放射量と短波放射量の放射収支からの正味放射量を算出するとともに，パネル材と緑化植物からの蒸発散量を重量法により計測し，計測値から潜熱フラックスを算出して，熱収支より壁面緑化による建物外部温熱環境への顕熱負荷の低減効果について定量的な検討を行った。

第2章では，壁面緑化による建物外部側での温熱環境改善効果を定量的に把握するため，壁面での放射収支について，実測によりその特性を明らかにするとともに，放射環境を定量的に評価した。具体的には，壁面の表面温度等を計測し，計測により得られた長波・短波放射量の入射量と反射量から導出したMRT（平均放射温度）を表面温度と長波放射量から算出するとともに，グローブ温度計の計測値から導出し，前者により算出した結果との比較により，計算結果の妥当性を検証した。また，体感レベルでの温熱指標としてWBGT（湿球・黒球温度）とSET\*（標準新有効温度）を計測値より導出し，壁面緑化の温熱環境改善効果についての検証を行った。さらには，季節の違いによる壁面緑化パネルを用いた計測と評価，白色コンクリートに対して打ち放しコンクリートの表面温度，アルベド，放射環境についての比較検証を試みた。

次に第3章では，壁面緑化による壁面での蒸発散に伴い，緑化植物の葉面からの蒸散と基盤となる土からの蒸発により，壁面表面部での気化熱が潜熱として消費されることによる建物外部側への温熱環境の緩和の程度を定量的に把握することを試みた。

まず、壁面緑化植物の蒸散作用による建物周辺の温熱環境改善効果を定量的に明らかにしていくことを目的として、実験を行った。実験には、壁面緑化に一般的に使用されているつる植物のヘデラカナリエンスをプランターに植栽したプランタータイプを使用して、重量法による計測値から蒸散量を算出した。

次に、SAT計の計測値から顕熱フラックスを算出するとともに、対流熱伝達率と物質伝達率を得て、蒸発散量の実測値との比から、蒸発のしやすさを示す指数として「蒸発効率」を算出した。

また、蒸発散量を重量法により計測し、計測値から潜熱フラックスを算出して、壁面緑化による建物外部温熱環境への顕熱の低減効果について定量的な検討を行った。さらに、重量法より得た緑化パネル材からの蒸発散量の計測値と気象データから算出した飽差から湿気伝達特性を示すパラメータを算出し、パネルからの蒸発散量を簡易推計式の導出を試みた。

第4章では、近年、小中学校などの教育施設や市役所などの公共施設をはじめ、個人住宅においても夏季酷暑期における暑熱緩和策として普及しつつあるゴーヤ等を使用した「緑のカーテン」を研究対象に取り上げた。ヒートアイランドが顕在化している中心市街地部では、マンションなどの高層住宅の壁面緑化による表面被覆の改善策として「緑のカーテン」を普及させることにより、市街地部の立面緑化の効果を総合的に高めることが期待できる。そこで、マンション等の高層共同住宅のバルコニー部で適用を想定して、大学構内を使用した講義棟のバルコニー部にゴーヤを使用したグリーンカーテンを実験装置として設置して、第2章で検討した表面温度、MRT、WBGT、SET\*に加えてPMVの温熱指標を用いて、主として「緑のカーテン」による屋外バルコニー部での暑熱緩和効果について検証を行った。

第5章では、ヒートアイランド現象が最も顕在化している東京都心部を対象とした実在の街区や地区を事例として、屋上や壁面等の建物緑化の程度の違いによる街区内の温熱環境改善効果について表面温度の差異や第4章までに行った温熱指標であるMRTやSET\*の温熱指標によりシミュレーションし、緑化の違いが街区や地区の温熱環境の違いにどのような影響を及ぼすかについて、定量的な評価を試みた。

第1節では、既存のGIS情報から建物の形状と配置を再現した街区モデルを作成して、過去のアメダス情報から夏期の気象条件を入力条件として与え、上記の放射収支と熱収支の実験計測結果より得られた壁面緑化の日射反射率、対流熱伝達率、蒸発効率等の実測データを入力して壁面緑化等の緑化の程度の

違いによる街区内の温熱環境の緩和にどのように寄与するかについて、風、温度、湿度等を同時に連成して数値解析を行うCFD(Computational Fluid Dynamics)の手法を用いてシミュレーションを行い、温熱環境の改善効果についてMRT、SET\*の体感温熱指標を用いて定量的に評価した。

第2節では、東京都千代田区の実在地区をモデルに、建築敷地内の地上面・屋上や壁面等への緑化条件の相異が地区内の温熱環境改善にどのように寄与するかについてCFD解析の手法を用いてシミュレーションを行った。

第3節では、東京都心部の実在街区をモデルとして、樹木なしの場合に対して、同じ樹木本数の配置方法を集中的に配植した場合と均一に配植した場合、さらに樹木緑化に地上50mまで壁面緑化した場合の4つのケースについてシミュレーションを行い、街区内の夏期の温熱負荷の違いを表面温度、MRT(平均放射温度)、HIP(ヒートアイランドポテンシャル)を算出し、比較検討した。

終章では、第1章から第7章までの検証の結果得られた主な知見を総括的にとりまとめるとともに、ヒートアイランド現象を緩和するための対策ツールとして壁面緑化等の建物緑化を推進していくために、生活空間単位としての街区レベルでの緑化対策による温熱環境改善効果について、より現実に近い再現性と予測性を有するシミュレーション評価を行うための課題について整理するとともに、これらのシミュレーション評価を今後の緑化計画や環境デザインの支援ツールと応用していくための可能性について考察した。

以上が本書の構成である。壁面緑化の温熱緩和効果に関する本研究成果が、今後のヒートアイランド緩和策として壁面緑化を適用し、普及促進等に寄与し、都市部における地表面被覆の一層の改善が図られることを切に願う次第である。

鈴木 弘孝

# 壁面緑化による建築・都市の温熱環境改善効果 に関する研究

鈴木 弘孝

## 目 次

	頁
序 文	
序 章	1
第 1 章 壁面緑化に関する技術開発の動向と課題	14
第 2 章 放射収支から見た壁面緑化による温熱環境改善効果	43
第 3 章 熱収支から見た壁面緑化による温熱環境改善効果	96
第 4 章 温熱指標によるグリーンカーテンの温熱環境改善効果	138
第 5 章 街区・地区レベルにおける建物緑化による温熱環境改善効果のシミュレーション評価	182
終 章	247
Summary (英文)	252
あとがき	261



# 序 章

## 1. 研究の背景

近年都市の中心市街地においてヒートアイランド現象が顕在化し、その対策が急務となっている。このヒートアイランド現象は、都市の市街地の気温が周辺部よりもアイランド状に数度高くなる現象をいう。その原因としては、①都市部への人口と業務機能の集中により緑地や水辺地が消失し、土地利用が変化したこと、②高度な土地利用集積とモビリティが増大に伴い、都市の市街地において地表面が高層建築物群のコンクリートや道路のアスファルト等による無機質な人工材料で被覆されたこと、③集積した建築ビル群からの空調機器による廃熱の増加や自動車からの排出ガスの増大等により熱負荷が増大したこと等が指摘されている<sup>1)</sup>。ヒートアイランド現象の主要な緩和対策として、都市緑化の推進が、国の施策においても有力視されている。2003年に3月に閣議決定された「規制改革推進3カ年計画(再改定)」<sup>2)</sup>において、ヒートアイランド対策を推進するための地表面被覆の改善策として、「屋上・壁面緑化の推進」が位置づけられている。同計画を受け、同年9月には「ヒートアイランド対策関係府省連絡会議」が設置され、2004年3月同会議においてヒートアイランド対策に関する基本方針と実施すべき対策が「ヒートアイランド対策大綱」<sup>3)</sup>として体系的にとりまとめられた。この中で、「地表面被覆の改善」目標として、具体的に「都市域における水と緑の公的空間確保量を2007年度までに約1割増」することが決定している。

都市緑化は、都市公園や道路・河川などの公共施設の計画的整備はもとより、行政機関の庁舎や学校・病院等の公益施設においてもその推進が図られてきた。しかし、高密度化した市街地にあつては、都市公園等の公共施設用地を面的に取得して整備していくことには、土地利用面からも財政面からも自ずと限界がある。都市全体の緑化を推進していくためには、都市市街地において土地利用の大半を占める民有地の緑化を推進していく必要がある。

建築物が林立する都市の市街地において計画的に緑化を推進していく上で、近年ビルなどの屋上・壁面等の建物緑化や人工地盤等の緑化の推進が有力視されている<sup>4)</sup>。東京都では、2001年4月に「自然の保護と回復に関する条例」<sup>5)</sup>を改正し、新築する建築物の地上部とともに屋上等の20%以

上を緑化することを義務付け、屋上緑化等建物緑化の推進の契機となった。

建物緑化のうち、屋上緑化や人工地盤上の緑化については、技術的には相当な蓄積が図られつつあり、民間レベルでも既に普及段階にある一方、壁面緑化の対象空間となる建物の壁面は、垂直面が主となる植物の生育環境としては極めて特殊な条件下にあり、また建築構造との兼ね合いからも竣工後に後付けで設置する場合には施工上も大きな制約を受ける一方、予め建築構造と一体化する場合でも構造上の補強、灌水・排水設備等の追加コストが新たに生じ、施工後も水平面での屋上緑化に比して垂直面での壁面は剪定などの維持管理作業に困難性を伴うことが多い。建築主に対して壁面緑化に伴う財政的負担や維持管理負担に見合うだけの、緑化の必要性和具体的な効果の関係性と合理的な根拠も十分とは言えない。これまで整備されてきた壁面緑化の事例においても、主に建築物の修景を目的とした壁面緑化の事例が多く見られたが、近年は環境保全面での配慮を主要な設置目的として、設計段階から建築外壁の主要構造に一体化された緑化の事例も見られるようになった<sup>6)</sup>。

#### (1) 国の施策における壁面緑化等の位置づけ

##### 1) 「地球温暖化対策大綱」での位置づけ

2002年3月に地球温暖化対策推進本部で決定された「地球温暖化対策推進大綱」<sup>7)</sup>において、CO<sub>2</sub>の吸収・固定を図るため、「都市緑化等については、「緑の政策大綱」や市町村が策定する「緑の基本計画」に基づき、引き続き、都市公園の整備、道路、河川・砂防等における緑化、既存の民有緑地の保全、建築物の屋上、壁面等の新たな緑化空間の創出等を積極的に推進する。」との規定がなされている。

##### 2) 「規制改革3カ年計画(再改訂)」での位置づけ

2003年3月に閣議決定された「規制改革3カ年計画(再改訂)」<sup>2)</sup>では、都市のヒートアイランド現象の解消のため、「人工化された地表面被覆の改善」の具体策として、「建物やアスファルト舗装などによって地表面が覆われることによる蒸発散作用の減少や地表面の高温化を防ぐため、公園・緑地の整備、街路空間の緑化等による緑の確保、屋上・壁面緑化、水面の設置などの対策の導入」を促進することとしている。

##### 3) 「新・生物多様性国家戦略」での位置づけ

2000年3月に閣議決定された「第2次環境基本計画」<sup>8)</sup>を踏まえ、2002年3月に「新・生物多様性国家戦略」<sup>9)</sup>が策定された。新・国家戦略では「保全の強化」、「自然再生」、「持続可能な利用」を三つの柱として、その具体的施策の中で「民有地における緑の創出、屋上緑化・壁面緑化の推進」等

緑地の保全・創出に係る諸施策の推進が規定されている。

#### 4) 「ヒートアイランド対策大綱」での位置づけ

2002年3月に閣議決定された「規制改革推進3ヶ年計画(改訂)<sup>10)</sup>」を受け、同年9月に「ヒートアイランド対策関係府省連絡会議」が設置され、2003年3月に閣議決定された「同計画(再改訂)<sup>2)</sup>」を踏まえ、2004年3月同会議においてヒートアイランド対策に関する基本方針と実施すべき対策が「ヒートアイランド対策大綱」<sup>3)</sup>として体系的にとりまとめられた。この中で、「地表面被覆の改善」目標として、具体的に都市域における水と緑の公的空間確保量を「平成19年度(2007年度)までに約1割増」としている。

#### 5) ヒートアイランド対策大綱の改定(平成25年7月1日)

気温が30度を超える状況の長時間化や熱帯夜日数の増加といった高温化の傾向が続き、熱中症の多発等人の健康への影響が顕著となったことから「ヒートアイランド対策大綱」が改訂され<sup>11)</sup>、従来の取組に加えて、「人の健康への影響等を軽減する適応策の推進」が新たに追加され、「適応策」の例として、「緑のカーテンの取組」が取り上げられた。

#### (2) 建物緑化等に関する法制度の整備・拡充

都市部での民間による自発的な緑化の取り組みを支援する制度として、2001年5月に都市緑地保全法の改正により、建築物の屋上、空地その他の敷地内の緑化施設の整備に関する計画(「緑化施設整備計画」)を市町村長が認定し、支援する「緑化施設整備計画認定制度」<sup>12)</sup>が創設されている。この認定制度に基づいて整備された「緑化施設」については、固定資産税の軽減措置がある。その他、民間事業者、地方公共団体等を対象に、一定の要件を満たすモデル性の高い住宅団地の建設に対して補助を行う「環境共生住宅市街地モデル事業」、地方公共団体との連携による住宅金融公庫の特別加算制度等が既に整備されている。

都市における緑地の保全及び緑化等をより協力を推進し、良好な都市環境の形成を図るため、2004年6月には都市緑地保全法が改正されて、都市緑地法<sup>13)</sup>となり、緑化地域における緑化率規制<sup>13)</sup>が導入されるとともに、都市公園法が改正され立体公園制度<sup>14)</sup>が創設される等、都市の緑化に関する新たな法制度が創設された。これらの、緑化に関する制度創設により、都市市街地部における大規模民間敷地の屋上や壁面の緑化、人工地盤上の緑化が推進される制度的な枠組みが整備されたことから、今後これらの制度を効果的に推進していくために屋上・壁面等の緑化技術の開発をさらに推進していくことが必要となっている。

#### 1) 「緑化地域制度」の創設

用途地域が指定されている区域内で、かつ良好な都市環境の形成に必要な緑地が不足している地域において、地域地区として都市計画に「緑化地域」を定め、緑化地域においては敷地面積が一定規模以上の敷地において建築物を新築・増築する場合には、建築敷地の緑化率の最低限度以上とすることを義務づける制度である。

#### 2) 「立体都市公園制度」の創設

屋上公園や人工地盤公園など従来の都市公園の下部空間に対する制限を緩和し、民間の店舗や駐車場等の施設との一体的整備を可能とし、土地の有効利用を図る立体都市公園の整備を図る制度である。

#### (3) 地方自治体の壁面等建物緑化推進の制度・施策

##### 1) 東京都における屋上緑化の義務化

2000年12月に「東京における自然の回復と保護に関する条例<sup>5)</sup>」を改正され、2001年4月施行された。敷地面積が1000㎡(公共施設は250㎡)以上の建築物を新築等する場合には、地上部について20%以上、屋上について20%以上、接道部について一定割合の緑化を行うことを義務づけた。

##### 2) 自治体の助成・融資制度例

屋上、壁面等の緑化を行う場合に一定の要件を満たした場合には、屋上や壁面を緑化する場合の設置に要する費用の一部について助成する制度の他、敷地の義務づけ緑化面積に算入可とする制度、緑化にかかる費用を融資する制度、緑化にかかる税を減免する制度、建築物の容積率の緩和・割増をする制度等による緑化の支援施策が講じられている。(表1参照)

#### (4) 地表面被覆改善対策としての壁面緑化の必要性

今日、都市の市街地部にあっては、高度な土地利用によりコンクリートとアスファルトに被覆され、緑地や水辺地に代表される自然的な環境が喪失し、ヒートアイランド現象の顕在化する等により人間が生活していく上の基盤となる都市環境を良好な形で維持・改善していく上で、その対策は喫緊の課題となっている。

植物は、蒸散作用による微気象の緩和、炭酸同化作用によるCO<sub>2</sub>の固定・吸収、ガソリンを使用した自動車から排出されるガス中に含まれるNO<sub>x</sub>の吸収等による大気浄化等の都市の環境保全に必要な多様な機能を有している。特に、蒸散作用やCO<sub>2</sub>の吸収・固定等による環境負荷の軽減効果を有効に活用していくため、建物の屋上等とともに垂直方向の壁面に着目して三次元で立体的な緑化を図ることにより、都市公園や街路樹、河川の水辺、人工地盤等の二次元の緑化空間との有機的な連携により、都市の緑とオー

表1 緑化にかかる費用を助成する制度例

自治体名	事業内容
仙台市	屋上・ベランダ（以下「屋上等」）または壁面の緑化に際し、事業費の一部を補助する。対象となるのは、仙台市の緑化重点地区内及び同地区に接する敷地内の建物に対して、屋上等緑化の場合は10m <sup>2</sup> 以上、壁面緑化は建物壁面に沿って3m以上植栽する場合。補助金額は、以下の単価に植栽面積または植栽延長を乗じた額と緑化費用総額の1/2の、いずれか少ない方の額。屋上等緑化300万円、壁面緑化（植栽）10万円、壁面緑化（補助資材）200万円を限度。屋上等緑化5万円/m <sup>2</sup> 、壁面緑化（植栽）千円/m、壁面緑化（補助資材）4千円/m <sup>2</sup> 。
戸田市	建築物の屋上・壁面・ベランダを緑化する場合、工事費用の一部を補助する。対象となるのは、屋上は3m <sup>2</sup> 以上、壁面は2m <sup>2</sup> 以上、ベランダは1m <sup>2</sup> 以上緑化する場合。補助金額は、工事費の1m <sup>2</sup> 当たりの単価が2万円未満のときはその額を、2万円以上のときは2万円を基準額とし、緑化面積を乗じた額の3分の2を補助する。1件当たりの補助金額の上限は50万円。
船橋市	建築物の屋上に3m <sup>2</sup> 以上の樹木を植えた際にかかった経費の2分の1（限度20万円）を助成。また、建築物の壁面に2m以上連続してツタ等を植えた際にかかった経費の2分の1（限度5万円）を助成。
千代田区	屋上緑化、壁面緑化、プランター整備を実施する際に、事業費の一部を補助する。助成額は、工事費の1/2と基準単位（屋上緑化、壁面緑化の場合には緑化面積、プランターの整備の場合には設置基数とする）×助成基準単価（屋上緑化を20,000円/m <sup>2</sup> 、壁面緑化を5,000円/m <sup>2</sup> 、プランター整備を20,000円/基）のいずれか小さい額（限度額10万円）。
中央区	新たに緑地を設ける場合で、一定の基準を満たすと事業費の一部を助成する。助成限度額は50万円とする。接道部緑化は、20,000円/m <sup>2</sup> を限度として、事業に要した経費の1/2。接道部以外の地上部緑化は10,000円/m <sup>2</sup> を限度として、事業に要した経費の1/2。屋上等緑化は、屋上は30,000円/m <sup>2</sup> 、壁面は5,000円/m <sup>2</sup> を限度として、事業に要した経費の1/2とする。
港区	屋上・ベランダ・壁面の緑化に際し、事業費の一部を助成する。対象建築物は、敷地面積250m <sup>2</sup> 未満の新築及び既存の建築物。敷地面積250m <sup>2</sup> 以上で区の緑化基準を超え、さらに建築物上の緑化を行う既存建築物。敷地面積1,000m <sup>2</sup> 以上で東京都の緑化基準を超え、さらに建築物の緑化を行う既存建築物。対象は屋上緑化で3m <sup>2</sup> 以上、ベランダ緑化で1.5m <sup>2</sup> 以上、壁面緑化で10m <sup>2</sup> 以上緑化する場合。助成金額は、助成対象経費の1/2または、以下の単価に緑化面積を乗じた額の、いずれか小さい方の額。屋上緑化30万円、ベランダ緑化15万円、壁面緑化20万円を、同一箇所での一申請あたりの合計限度額は40万円を、それぞれ限度とする。単価：屋上緑化・ベランダ緑化20,000円/m <sup>2</sup> 、壁面緑化15,000円/m <sup>2</sup> 。

(注)都市緑化機構のデータ<sup>補注3)</sup>を基に加工。

プンスペースの多層的なネットワーク形成を図り、総合的に地表面被覆の改善を図ることが有効と考えられる。

### (3) 本研究の位置づけ

記述のとおりヒートアイランド現象緩和のためには、地表面被覆改善策として都市緑化の推進が有効とされているが、その取り組みを具体的に推進するためには公園緑地や街路樹、河川等の公的空間の緑化とともに、市街地面積の大半を占める私有地の緑化が重要な役割を担っている。中でも、地表面をコンクリートとアスファルトで被覆された都市の市街地部にあっては、建物の屋上や壁面の緑化が重要な対策となると考えられるが、これらの緑化を具体的に推進していくためには、住民や企業・団体等の建築主、土地所有者等ステークホルダーの理解と協力が必要不可欠となる。そのためには、緑化による温熱環境改善効果を緑化の担い手となる住民や企業等がわかりやすく理解できることが必要となり、その効果を数値として定量化できる必要がある。本研究では、壁面緑化による温熱環境改善効果を定量的に評価するために、壁面の被覆状態や植物種の違い、緑化工法の違い等による建築壁面における放射収支や熱収支を総合的に検討していくことの必要性に着目した。

## 2. 本書の目的

本研究は、都市部におけるヒートアイランド現象の顕在化等の状況、及び既往研究の動向等を踏まえ、壁面緑化の放射特性および蒸発散による熱収支特性について実験計測により把握し、計測結果から得た数値等を基に実在街区へ適用してCFD解析手法によりシミュレーションし、壁面緑化による建築敷地・街区レベルでの温熱環境改善効果を定量的に評価することを目的とした。

ヒートアイランド現象緩和のためには、地表面被覆改善策として都市緑化の推進が有効とされている<sup>3)</sup>が、その取り組みを具体的に推進するためには公園緑地や街路樹、河川等の公的空間の緑化とともに、市街地面積の大半を占める私有敷地の緑化が必要かつ不可欠となる。中でも、地表面をコンクリートとアスファルトで被覆された都市の市街地部にあっては、建物の屋上や壁面の緑化が重要な対策となりうるが、これらの緑化を具体的に推進していくためには、住民や企業等の建築主の理解と協力が必要不可欠であることから、これらの主体が温熱環境の改善の具体的効果を体感として、あるいは日常の生活空間レベルレベルでわかりやすく認識できるこ

とが必要と考えられる。また、建物緑化による温熱環境の効果を評価していく指標としては、従来から建物の表面温度がよく用いられてきたが、暑熱緩和効果を定量的に評価する場合には、表面温度や気温のみならず、壁面での放射収支や熱収支を総合的に評価していく必要があると考えられる。

そこで、本研究では既往研究において蓄積が十分とは言えない壁面緑化の建築外部空間での温熱環境改善効果を実験計測により実証的に検証し、計測値や温熱指標による定量的な評価を試みた。次に、これらの実験計測より得た基礎データに基づき、都市住民が日常生活を営んでいる街区・地区レベルでの壁面緑化による温熱環境改善効果についてCFD解析を用いたシミュレーションを行い、定量的な評価を試みた。

緑化による温熱環境改善効果をシミュレーションによって得られる3次元画像により立体的・可視的に提示できることは、今後の環境デザインにおける有効な手法としての活用と普及に大いに役立つものと考えられる。

以上のことから、本研究において壁面緑化による街区空間での温熱環境改善効果をシミュレーションし、放射環境や体感レベルでの温熱指標により定量評価することは、以下のような研究上の意義を有するものと考えられる。

第一に、これまで壁面緑化による外部空間側への温熱環境改善効果を実地計測した研究蓄積は未だ十分とは言えず、実験計測により得た壁面緑化植物の有する基礎的データは、ヒートアイランド対策を具体的に進めていく上での有用な基礎資料となりうること。

第二に、これまでの壁面緑化の温熱評価は、表面温度の高低でその効果を論じられることが多かったが、本研究では表面温度のみでは評価できない壁面における放射収支や蒸発散による潜熱消費等の熱収支について、定量的な評価を試みたこと。

第三に、これまでのシミュレーション評価技術としてスーパーコンピューターを用いた都市レベルというマクロスケールでの評価技術が確立しつつある一方、敷地・街区レベルでのシミュレーションについては、画一的なモジュール建物を用いた解析や実在街区においても熱的評価については、放射・対流・伝導が連成されておらず、再現性に課題を有していたが、本研究では実在街区を対象に作成した街区モデルにおいて、本研究による実験計測の結果から得られた壁面緑化による日射反射率、蒸発効率等の基礎的数値を用いて、シミュレーションを行った後、温度と湿度の実測値との比較検証を行い、計算結果について再現性が高いことを確認したこと。

### 3. 研究の対象と方法

#### (1) 研究の対象

本研究では、建築敷地レベル、街区レベルを対象として壁面緑化による建物外部空間での温熱環境改善効果を定量的に把握し、評価することを目的として、建築敷地レベルでの実験計測の結果を踏まえ、街区レベルでのシミュレーションを行った。温熱環境改善効果の評価については、壁面での放射収支と熱収支に着目して、実験計測と数値解析を試みた。図1は建物の壁面における放射収支と熱収支について、概念図で示したものである。同図左側の放射収支概念図より、壁面には太陽からの直達日射と散乱日射が入射日射( $S$ )として入り、壁面表面で反射して反射日射( $S$ )が建物外部側に放射される。大気放射( $L$ )は、大気中に放出される長波(赤外)放射であり、黒体はその温度に応じた最大の放射エネルギーを射出するのに対して、大気中の二酸化炭素やオゾンなどの温室効果ガスは、黒体以下の放射エネルギーしか出さないとされている<sup>56)</sup>。これらの、短波・長波の入射放射量(下向き)と反射放射量(上向き)の収支の総和が放射収支であり、正味放射量( $Rn$ )として以下の式で表すことができる。

$$Rn = (L\downarrow - L\uparrow) + (S\downarrow - S\uparrow)$$

本研究では、緑化パネルを用いた試験体とコンクリート壁面(白色塗装)との比較により、壁面緑化の放射収支特性と温熱環境改善効果について定量的な検証を試みた。次に、図1の右側に、コンクリート壁面と緑化壁面における熱収支を概念図にまとめている。壁面の表面温度が、外気温よりも高いときは、顕熱フラックスとして壁面から大気へ輸送される。逆に、外気温の方が壁面よりも高いときには、大気から壁面へ顕熱フラックスとして輸送されることとなる。

緑化壁面では、以下の熱収支式が成り立つ。

$$Rn = H + LE + G$$

一方、コンクリート壁面では、 $LE=0$ と見なして、

$$Rn = H + G$$

の熱収支式が成り立つ。

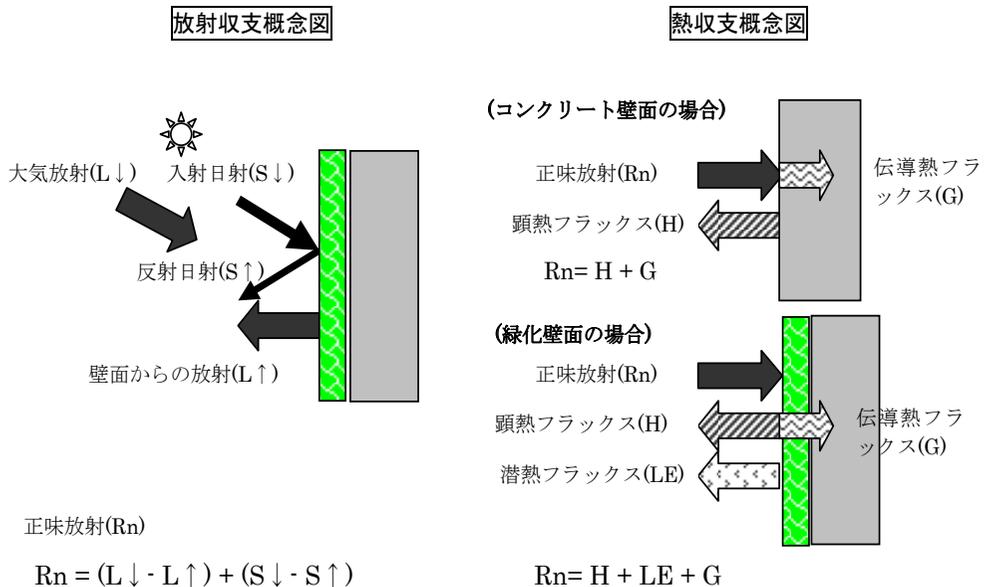
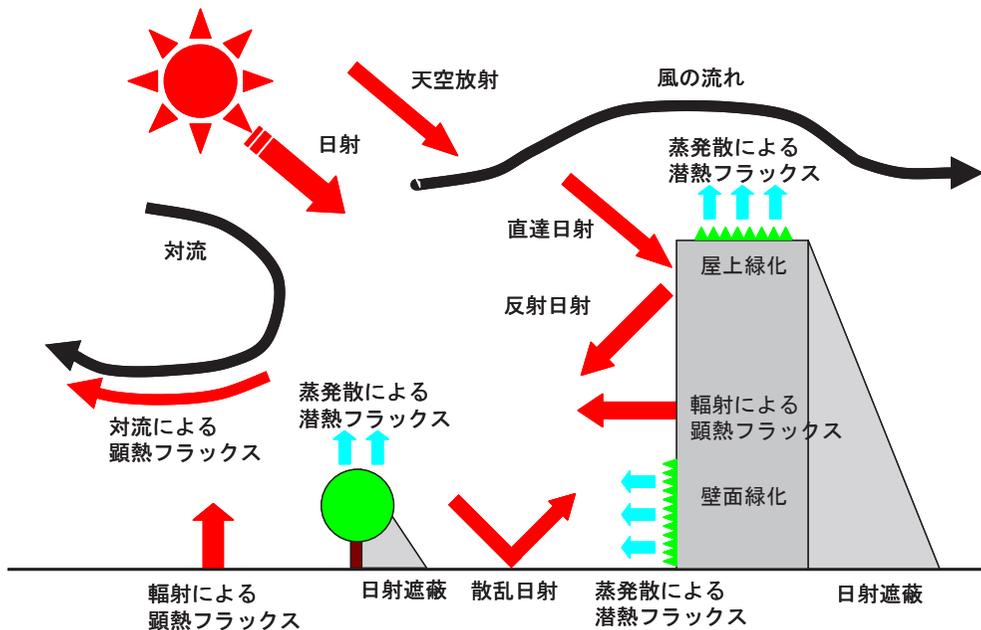


図1 放射収支・熱収支の概念図

本研究では、緑化パネルとプランターを用いた試験体を使用して、重量法によって計測した蒸発散量( $E$ )に気化の潜熱( $L$ )を乗じて潜熱フラックス( $LE$ )を求め、正味放射量( $R_n$ )との関係について検証を試みた。

また、蒸発散による熱収支特性を明らかにするため、対流熱伝達量と物質熱伝達率を計測した風速の関数として算出した後、パネル表面部における飽和水蒸気圧と大気湿度との差(「飽差」という。)と物質熱伝達率を乗じて得た蒸発散量に対する計測した蒸発散量との比から、「蒸発効率( $\beta$ )」を算出した。

次に、壁面緑化における放射収支の実験計測より得た日射反射率(「アルベド」という。)、放射率の数値や、熱収支の実験計測より得た対流熱伝達率、蒸発効率の基礎的データを用いて、実在街区を再現したモデル街区をGISより作成し、アメダスの気象データを入力して、街区内的での温度・湿度・風速・風向を連成してコンピューター上で数値解析を行うCFD(計算流体力学)解析により、シミュレーションを行い、街区レベルでの温熱環境改善効果をシミュレーションした。図2は、屋外での敷地・街区での温熱環境形成メカニズムを概念図で示したものである。太陽からの日射や天空からの放射により建物の表面や地表面に到達した短波・長波の放射熱に



(注)村上<sup>15)</sup>を参考に、作成。

図2 屋外温熱環境形成メカニズム

より、建物や地表面の温度が上昇し、顕熱フラックスとして大気中に輸送される。太陽からの日射量は、地表面に直接達する直達日射と大気中で散乱して入社してくる天空(散乱)日射の合計が全日射量となる。また、大気からの長波放射は、熱建物の壁面や地表面の温度を上昇させ、表面温度は大気側に長波放射を射出し、大気温度(気温)を上昇させることとなる<sup>16)</sup>。

一方、屋上や壁面の植物や土壌から蒸発散により植物の葉面や土壌の表面から水蒸気が放出され、水蒸気が液体から気体へと変化する際に気化熱が潜熱として消費される。潜熱フラックスは、気化熱として液体から気体となるとき熱移動量を意味し、外気温の上昇は招かないが、湿度の上昇に作用するため、温熱環境として見た場合には蒸発散作用が、必ずしも人間環境にとって快適性の向上には繋がるものとは限らない。また、屋外に植栽された樹木(高木)は、日射遮蔽により日陰を作り、地表面の温度の上昇を抑制する。このように、街区での温熱環境改善効果を評価するためには、街区内での温度や湿度、風の相互の気象要因を連成し、そのメカニズムを定量的かつ総合的に解析・評価することが必要となる。

本研究においては、CFD解析の中でも、現在最も一般的に使用されて

いる「標準  $k-\epsilon$  モデル」によるシミュレーション解析を行い、実在の街区と地区を対象とした壁面緑化による温熱環境改善効果について定量的な評価を試みた。

## (2) 研究の方法

本研究は、壁面緑化による建築敷地・街区レベルでの建物外部空間における温熱環境改善効果を定量的に評価することを目的として、一つには壁面緑化の試験体を用いた実験計測と基礎的データの解析と評価を行う研究と、二つには既往の研究成果とともに、本研究での実験計測によって得られた基礎的データを用いて、実在街区での温熱環境シミュレーションを行う研究、から構成される。

前者の実験計測では、筆者が当時勤務していた独立行政法人建築研究所の敷地内にパネル型の壁面緑化試験体を設置し、実験棟のコンクリート壁面と緑化試験体との比較により、表面温度、放射収支についての実験計測を行った。以下に、本研究で扱った 1)放射収支と温熱指標による温熱環境改善効果の検証と定量評価、2) 蒸発散量の計測と潜熱フラックスによる温熱環境改善効果の検証と定量評価、3) 実在街区でのシミュレーションによる温熱環境改善効果の予測と定量評価、について研究の方法を概説する。なお、具体的な実験の実施方法、シミュレーションの解析方法については、第2章以降の各章において、詳述する。

### 1)放射収支と温熱指標による温熱環境改善効果の検証と定量評価

表面温度については、熱電対による計測と赤外カメラによる定点定時撮影による計測を行うとともに、計測した長波放射量と放射率からステファン・ボルツマンの公式を用いて表面温度を補正して、前者の方法との比較検討を行った。放射環境については、計測した長波放射量・短波日射量の計測値からMR T (平均放射温度)を導出し、定量的な評価を試みた。またグローブ温度計を用いた算出方法と比較し、長波放射量から算出する方法の妥当性を検証した。次に、体感温熱指標として使用されているWBGT (湿球黒球温度)計を用いて、熱中症対策の指標となるWBGT値を算出して、壁面緑化の温熱低減効果を検証した。さらに、着衣量と代謝量を仮定して、着衣状態での体感温度を示すSET\* (標準有効温度)を算出し、定量的な評価を行った。

### 2)蒸発散量の計測と潜熱フラックスによる温熱環境改善効果の検証と定量評価

壁面緑化の温熱環境低減効果として、緑化植物や培土からの蒸発散作用による潜熱フラックスにより、水蒸気が気化する際の気化熱を消費し、顕

熱を抑制する効果を定量的に検証するため、蒸発散量の計測値から潜熱フラックスを算出し、正味放射との関係について、検証した。具体的には、プランタータイプの試験体(使用植物は、ヘデラカナリエンシス)とパネル型の試験体(使用植物は、ヘデラヘリックスとアメリカツルマサキ)を用いて、重量法による重量変化量から蒸発散量を計測するとともに、潜熱フラックスを算出して、顕熱抑制の効果を定量的に評価するとともに、パネル型について対流熱伝達量、物質熱伝達率から蒸発効率を算出した。

### 3) 実在街区でのシミュレーションによる温熱環境改善効果の予測と定量評価

東京都心の大手町地区の実在街区を選定し、既存のGIS情報を下にモデル街区を再現し、アメダスデータから入力する気象条件を仮定し、実験計測の結果得られた日射反射率、対流熱伝達率、蒸発効率等の基礎的データを入力条件として、街区内部での壁面緑化や屋上緑化、樹木植栽との緑化条件の相違による温熱環境改善効果を風速・風向、気温、湿度、MRT、SET\*の各項についてCFD解析によるシミュレーションを行い、緑化対策の効果を定量的に評価した。また、計算結果について、対象とした実在街区において気温と湿度を実測し、その妥当性について検証した。

## 引用文献

- 1) 環境省，ヒートアイランド対策ガイドライン（2012）；環境省ホームページ：  
[https://www.env.go.jp/air/life/heat\\_island/guideline/h24.htm](https://www.env.go.jp/air/life/heat_island/guideline/h24.htm)
- 2) 閣議決定，規制改革推進3カ年計画(再改訂)（2003）
- 3) 閣議決定，ヒートアイランド対策大綱(再改訂)（2004）
- 4) 国土交通省，屋上緑化・壁面緑化推進の取り組み；国土交通省ホームページ「公園とみどり」：  
[https://www.mlit.go.jp/toshi/park/toshi\\_parkgreen\\_tk\\_000065.html](https://www.mlit.go.jp/toshi/park/toshi_parkgreen_tk_000065.html)
- 5) 東京都，自然の保護と回復に関する条例（2001）
- 6) 東京都産業労働局農業試験場編，壁面緑化の現況調査(2003) 134 pp.
- 7) 地球温暖化対策推進本部，地球温暖化対策推進大綱（2002）環境省ホームページ：<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/taiko/all.pdf>
- 8) 環境省，第二次環境基本計画（2000）環境省ホームページ：  
[https://www.env.go.jp/policy/kihon\\_keikaku/plan/kakugi121222.html](https://www.env.go.jp/policy/kihon_keikaku/plan/kakugi121222.html)

- 9) 環境省, 新・生物多様性国家戦略の概要 (2002) 環境省ホームページ :  
[https://www.env.go.jp/council/14animal/y140-05/ref\\_02.pdf](https://www.env.go.jp/council/14animal/y140-05/ref_02.pdf)
- 10) 閣議決定, 規制改革推進3か年計画(改定) (2002) 内閣府ホームページ:  
<https://www8.cao.go.jp/kisei/siryo/020329/>
- 11) 環境省, 「ヒートアイランド対策大綱」の見直しについて(お知らせ) (2013)  
環境省ホームページ: <https://www.env.go.jp/press/16849.html>
- 12) 国土交通省, 緑化施設整備計画認定制度(公園とみどり); 国土交通省ホームページ:  
<https://www.mlit.go.jp/crd/park/shisaku/ryokuchi/shisetsuseibi/index.html>
- 13) 国土交通省, 都市緑地法(公園とみどり) 国土交通省ホームページ:  
<https://www.mlit.go.jp/crd/park/joho/houritsu/ryokuchi/>
- 14) 国土交通省, 公園緑地行政の新たな展開-都市緑地法等の改正について-  
<https://www.mlit.go.jp/crd/park/joho/houritsu/ryokuchi/>
- 15) 村上周三 (2000) CFDによる建築・都市の環境設計工学, 東京大学出版会, 東京, 443pp.
- 16) 田中俊六・武田仁・足立哲夫・土屋喬雄 (1999) 最新建築環境工学(改定2版), 院上書院, 317pp

## 第1章 壁面緑化に関する技術開発の動向と課題

都市部においてコンクリートやアスファルトにより地表面が被覆され、無機的环境が形成されるとともに、都市活動に伴う自動車や空調機器などによる人工廃熱の増加、緑地の減少等により、近年、都市の周辺部に比して都市中心部の気温が上昇する「ヒートアイランド現象」が顕在化しており、地球温暖化防止対策とともに都市のヒートアイランド対策の強力な推進が必要かつ急務となっている。

屋上緑化や人工地盤上の緑化については、既に技術的には相当な蓄積が図られつつあり、民間レベルでも普及段階にある。また、制度面からも税制上の優遇措置が図られる等、屋上緑化等を普及していくための技術面・制度面での整備が整いつつある。これに対して、建物の壁面は植物の生育環境としては極めて特殊な条件下にあり、これまでは、主に建築物の修景を目的とした壁面緑化の事例が多く見られたが、最近では環境保全面での配慮を主要な設置目的として、設計段階から建築外壁の主要構造に一体化された緑化の事例も見られるようになった。

そこで、本章では最近の建物緑化に関する国の施策の動向、既往の調査研究の成果等を踏まえ、現在屋上の緑化や利用開発に積極的に取り組んでいる民間企業等へのアンケート調査の結果から、壁面緑化の技術開発の動向と普及の可能性等について、民間企業と技術担当者の意識を把握し技術的課題への認識を整理することにより、今後都市の市街地部等において壁面緑化をさらに普及・促進していく上において、技術開発の方向性、重点的に取り組むべき研究開発分野での対象と範囲等を検討する。

### 1. 調査の方法と着眼点

#### (1) 調査の方法

今回の調査においては、壁面緑化の今後の開発普及の見通し、技術的課題等を明らかにするため、現在屋上緑化や屋上の開発利用に関する技術開発、普及等に、積極的に取り組んでいる企業等を選定することとした。具体的には、屋上緑化の技術開発に組織的に取り組んでいる(財)都市緑化技術開発機構の特殊緑化研究会の会員企業 43 社、また屋上の開発利用に関わる技術開発に組織的に取り組んでいる屋上開発研究会の会員企業 29 社(うち 6 社は特殊緑化共同研究会と重複)を選定した。この他、現在屋上緑化や

表 1.1 アンケート調査の概要

調査日	2004. 2. 16～3. 5		
調査票	企業用と担当者用の2種類		
(1)企業用	配布数： 119社	有効回答数： 62社	有効回答率： 52.10%
(2)技術担当者用	配布数： 119社	有効回答数： 67名	1社あたり平均回答者数： 1.31名（67名/51社）
配布	郵送		
回答	郵送またはインターネット		

壁面緑化に関する緑化資材等を実際に販売している企業として、「建築技術」（2002年6月号）<sup>1)</sup>に掲載された建築物緑化用資材リスト等を参考として、53社を選定した。調査票は企業向けのものとは技術担当者向けのものとの2種類を配布した。調査の実施概要は表 1.1 に示すとおりであり、結果の整理を行った。有効回答数は企業からは62社（有効回答率52.1%）技術担当者からは67名であった

## (2) 調査の着眼点

企業向けと技術担当者向けの各々のアンケート調査における調査項目を一覧表にまとめると表 1.2 に示すとおりである。本アンケート調査においては、民間部門における壁面緑化への取り組みと技術的課題を浮き彫りにするために、以下の3つの観点から調査を行った。

一点目としては、企業へのアンケート調査により、現在の壁面緑化への取り組みと今後の市場性について企業はどのように捉えているかという点から検討を行うことである。

二点目としては、技術担当者へのアンケート調査により、現在壁面緑化技術が抱えている具体的課題と今後の技術開発の発展性についての意識を把握し、壁面緑化の技術的課題の整理を行うことである。

三点目としては、現在実施されている壁面緑化の技法を先行研究や既存文献・事例から、六つのタイプに分類し、緑化のタイプと今後の適用可能

表 1.2 アンケート項目一覧

対象	区分	質問項目	
企業用	1 屋上緑化への取り組み	問 1 どのような部門を専門としているか	
		問 2 施工事例の有無	問 2-1 代表例 3 つ(あると答えた企業)
		問 3 技術開発への取り組みの有無	問 3-1 部門・分野での取り組み年数(M.A.) 問 3-2 独自に開発した技術の有無 問 3-2-1 代表例 3 つ, 特許の有無
		問 4 市場拡大への期待	
	2 壁面緑化への取り組み	問 5 どのような部門を専門としているか	
		問 6 施工事例の有無	問 6-1 代表例 3 つ(あると答えた企業)
		問 7 技術開発への取り組みの有無	問 7-1 部門・分野での取り組み年数(M.A.) 問 7-2 独自に開発した技術の有無 問 7-2-1 代表例 3 つ, 特許の有無
		問 8 市場性は期待できるか	
		問 9 技術開発への取り組み意向	問 9-1 取り組みたい部門(M.A.) 問 9-1.4 取り組みたい分野(M.A.) 問 9-2 取り組みたいと思わない理由(M.A.)
		問 10 その他意見・要望(F.A.)	
技術担当者用	属性	・ 専門分野	
		・ 経験年数(屋上緑化)	
		・ 経験年数(壁面緑化)	
	1 屋上緑化技術	問 1 技術開発の段階	
		問 2 技術開発への関与	問 2-1 技術開発スタッフの数
		問 3 技術的課題の多寡	
		問 4 具体の技術開発上の課題(M.A.)	
		問 5 技術開発上の課題以外の課題(M.A.)	
	2 壁面緑化技術	問 6 技術開発の今後の発展性	
		問 7 技術開発への関与	
		問 8 技術的課題の多寡	
		問 9 具体の技術開発上の課題(M.A.)	問 9-1 定量化すべき効果(M.A.)
問 10 技術開発上の課題以外の課題(M.A.)			
問 11 重点的に緑化すべき方面(M.A.)		① 開発普及の見込み ② 普及が見込める場所(M.A.)	
問 12 タイプ別壁面緑化の普及の傾向(タイプ I ~ タイプ VI まで)		③ 普及が見込める建物(M.A.) ④ 普及が見込める段階(M.A.)	
3 その他	問 13 普及上の留意点(F.A.)	(屋上緑化)	
	問 14 その他意見・要望(F.A.)	(屋上緑化/(壁面緑化))	

性について、対応分析により技術担当者の意識特性の把握を行うことである。ここで、「対応分析 (Correspondence Analysis)」<sup>1)</sup>とは、多変量解析の分析手法の一つで、抽出された要因成分を縦軸と横軸に示しその位置関係から特性を検討するものであり、クロス集計したデータを元に、分析を行うこととした。

## 2. 調査の結果と考察

### (1) 壁面緑化への取り組みの現状と今後の普及に対する意識

#### 1) 企業の取り組み

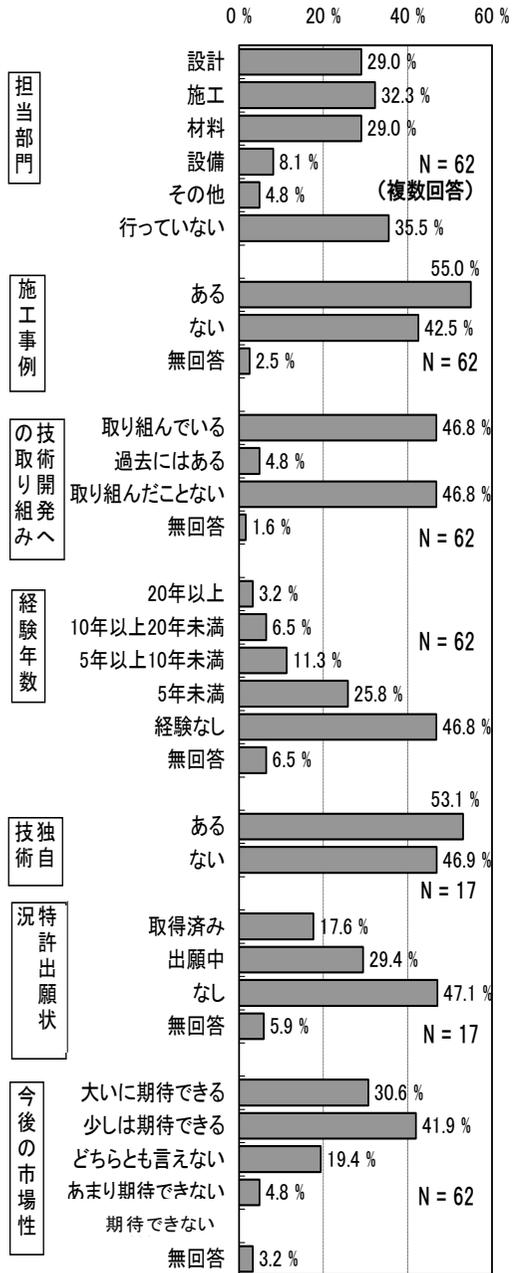
##### ① 現在の取り組み

アンケート調査に回答のあった企業の現在の「担当部門」については、図 1.1 上 1 段に示すとおり、回答のあった企業等のうち壁面緑化のどの部門にもかかわっていない企業が 35.5%を占めていた(複数回答)。かかわっている企業の担当部門としては、設計、施工、材料が各々全体の約 3 割とほぼ同じ割合を占めていた。技術開発への取り組みとしては、図 1.1 上 3 段より、「取り組んでいる」が 46.8%となっており、「過去にはある」の 4.8%と合わせて、壁面緑化に関係しているか又は関係したことがある企業が約 5 割強となっていた。

一方、「取り組んだことがない」と答えた企業も 46.8%となっていた。次に、壁面緑化の技術開発に現在又は過去に取り組んだ経験年数を尋ねたところ、図 1.1 上 4 段に示すとおり、「5 年未満」が 25.8%を占め、「10 年未満」が全体の 37.1%を占めていた。また、「経験なし」として、壁面緑化に現在は直接関係していない企業が約 46.8%と半数近くを占めていた。

これは、今回のアンケート調査の対象企業のうち屋上の開発利用として直接的に緑化とは関係のない業務に関わっている企業と屋上緑化に関わっているが、壁面緑化には関係していない企業で構成される割合を示している。

技術開発に「取り組んでいる」または「過去に取り組んだことがある」と答えた企業に対して、「独自に開発した技術があるか」を尋ねたところ、図 1.1 下 3 段より、「ある」と答えた企業は 53.1%であり、このうち特許を取得または出願申請中の企業は図 1.1 下 2 段より、47.0%と 5 割弱であった。特許を取得している代表的な例としては、表 1.3 に示すとおり、建築物の壁面等につる植物を登攀させる網、雨水のみで低木やつる植物を植栽できる無灌水プランター等があげられる。



(M. A.)

図 1.1 壁面緑化に対する企業の対応

表 1.3 壁面緑化技術の特許出願状況 (2004 年 3 月現在)

技術名	技術の概略	特許出願状況
T U型登攀網	高速道路の遮音壁やコンクリート壁の建築物の壁面などのつる植物による緑化用登攀網	取得済
GREEN CUBU ウォール	ユニット式壁面植栽基盤	出願中
ヤシ成型培土平板	ヤシダスト, チップを主原料とし, ヤシ繊維で包んでプレスした, 屋上・壁面緑化用培土平板	取得済
無灌水プランター	底面に10cm程度の保水空間を設け, 雨水のみで中低木や長尺ツル類等の多様な植物を植栽できるプランター	取得済
Flower Fabric Elegance	光触媒を塗布したケナフ地を用いた意匠性の高い緑花壁面工法	出願中
ヘデラ登攀システム	吸着型ツル植物を, 登攀マットと金網を用い, 早期登攀させるシステム	出願中
壁面緑化システムの取付構造	植生ットを用いた壁面緑化システム	出願中
花壇の自動給水装置	大型プランターを並べ屋上より網を張りヘチマ等つる性植物を植えるもの	取得済
緑化システムコンテナ	雨水の有効利用を図ったコンテナの組み合わせによる壁面緑化	出願中

② 今後の取り組み

企業からの回答により, 今後の壁面緑化への取り組みの意向と市場性に対する意識として, 以下のような回答結果を得た。

(i) 取り組みへの意向

今後壁面緑化の分野への技術開発への取り組みの意向を尋ねたところ, 図 1.2 に示すとおり, 50.0%の企業が「取組んでみたい」と回答している。「取組んでみたい」と回答した企業に対して, 「具体的に取組んでみたいと思う部門」を尋ねたところ, 図 1.3 に示すとおり, 「材料部門」が最も多く, 全体の約7割の企業が答えており, 次いで「設計部門」(48.4%), 「施工部門」(32.3%)の順となっていた。

さらに, 「材料部門」と答えた企業に対して, 具体的な「分野」を尋ねたところ, 図 1.4 に示すとおり, 「プランター等の容器類」が68.2%と最も多

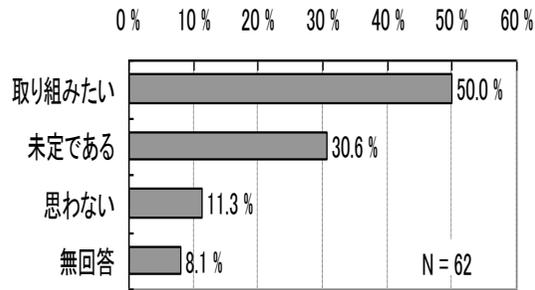


図 1.2 技術開発への取り組みの意向（企業）

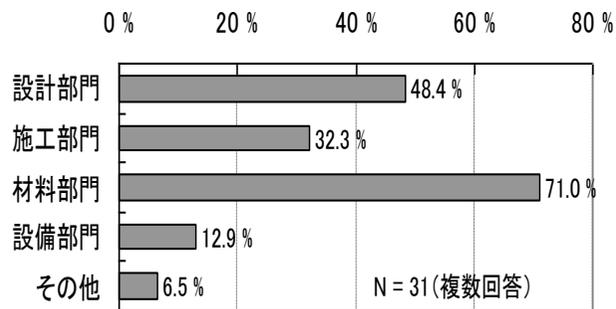


図 1.3 技術開発に取り組みたい部門（企業）

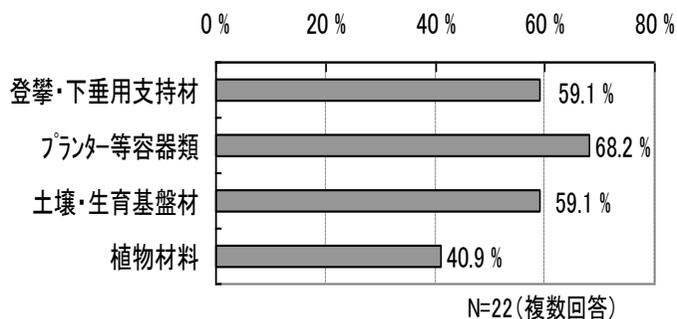


図 1.4 材料部門のうち技術開発に取り組みたい分野（企業）

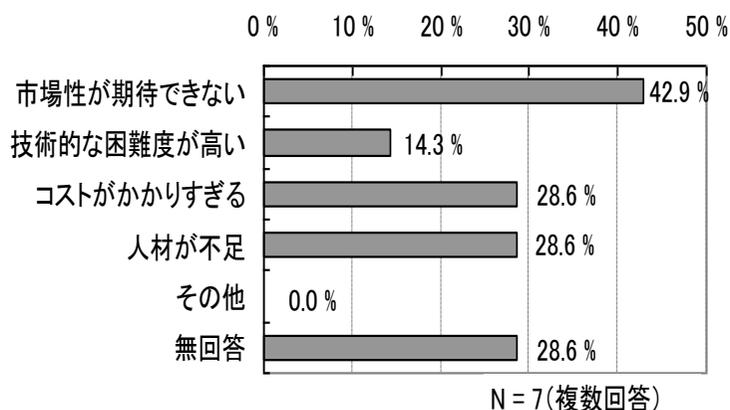


図 1.5 技術開発に取り組みたいと思わない理由

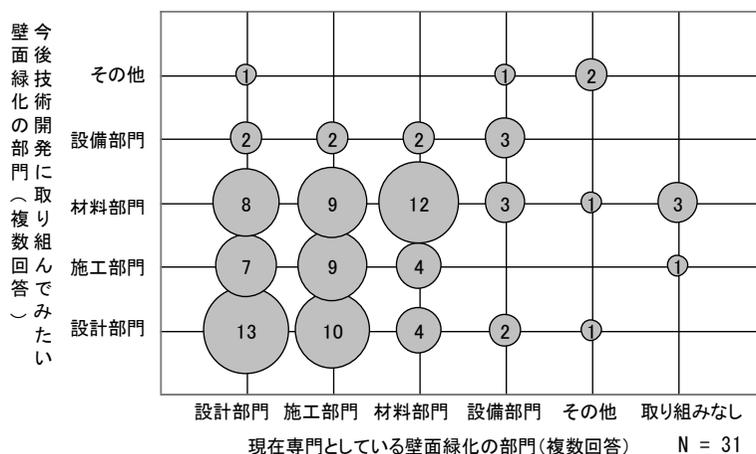


図 1.6 現在の専門部門と今後技術開発に取り組みてみたい部門とのクロス集計

く、次いで「登攀・下垂用の支持材」,「土壌・生育基盤材」が同数(59.1%)であった。一方、「取り組んでみたいと思わない」と答えた企業にその理由を尋ねたところ、図 1.5 に示すとおり「市場性が期待できない」が 42.9%と最も多く、次いで「技術開発にコストが嵩む」(28.6%),「人材の不足」(28.6%)を指摘する意見が多い。

次に、「現在専門としている壁面緑化の部門」と「今後技術開発に取り組んでみたい部門」とをクロス集計した結果は、図 1.6 に示すとおりである。

横軸には「現在専門としている壁面緑化の部門」、縦軸には「今後技術開発に取り組んでみたい壁面緑化の部門」を表している。例えば、横軸の施工部門、縦軸の材料部門の交点の○が「9」となっているのは、「現在壁面緑化の施工部門を専門としている企業で、今後壁面緑化の材料部門の技術開発に取り組んでみたいと思う企業」の数が、9社あることを意味し、○の大きさは、数値に対応している。

今後取り組んでみたい壁面緑化技術の部門として「材料部門」と答えた企業が36社、次いで「設計部門」の30社、「施工部門」の21社の順であった。今後「材料部門」に取り組みたいと答えた企業36社のうち、現在「材料部門」に従事している企業は12社と約1/3であり、「材料部門」以外の企業が約2/3と過半を占めていた。設計部門、施工部門については、現在の担当部門外の回答が約1/2であることから、材料部門については、部門外の比率が相対的に高くなっている。これは、屋上が水平面での緑化であるのに対して、壁面は垂直面の緑化という植物の生育環境としても技術的に困難な環境下にあり、植物の生育する基盤材や支持材といった材料面での技術開発への関心の高さを示しているものと推察される。

#### (ii) 今後の市場性

壁面緑化について、「今後も市場が拡大する」と期待できるかを尋ねたところ、図1.1下1段より、「大いに期待できる」(30.6%)と「少しは期待できる」(41.12%)と答えた企業を合わせると全体の約7割強が「期待できる」と答えており、今後の市場性に対する企業の期待は高くなっている。このことは、最近の自治体レベルでの緑化施策の進展や国のレベルでの施策の拡充も作用していることが推察される。東京都では、2001年4月に「自然の保護と回復に関する条例」を改正し、新築する建築物の地上部とともに屋上の20%以上を緑化することを義務付け、東京都の特別区においても屋上緑化や壁面緑化を行う際に助成金等による独自の支援措置が講じられつつある。また、国のレベルでも2001年5月には都市緑地保全法改正により、建築物の屋上、空地その他の敷地内の緑化施設の整備に関する計画(「緑化施設整備計画」)を市町村長が認定し、支援する緑化施設整備計画認定制度が創設され、「緑化施設」については、固定資産税の軽減措置が講じられている<sup>2)</sup>。

さらに、2004年6月には都市緑地保全法が改正されて、都市緑地法となり、緑化地域における大規模建築敷地において緑化率の最低限度を定める緑化地域制度が導入され、同じく同年6月に都市公園法が改正され、立体公園制度が創設される等、都市の緑化に関する新たな法制度が創設された。

これら国や自治体における新たな緑化施策の拡充により、都市部における建築物の屋上や壁面、人工地盤上の緑化を推進していくための制度的な枠組みが整備され、今後これらの制度を効果的に運用していくために屋上・壁面等の緑化技術の研究開発をさらに推進していくことが必要と考えられる。

## 2) 技術担当者の取り組み

### ① 現在の取り組み

実際に屋上緑化等を担当している企業の技術担当者に対して、専門職種、経験年数、技術開発への取り組み、技術的課題等について質問した結果は、図 1.7、図 1.8 に示すとおりであり、以下のような回答を得た。回答のあった技術担当者の専門職種としては、図 1.7 上 1 段に示すとおり「造園」が 55.2%と全体の半数以上を占め、次いで「建築」が 19.4%であり、両方で全体の約 8 割近くを占めていた。

図 1.7 上 2 段より、技術担当者の壁面緑化に対する経験年数としては、「経験なし」が 38.8%と最も多く、次いで「5 年未満」が 26.9%、「10 年以上 15 年未満」が 11.12%を占め、「10 年未満」が全体の 4 割弱であった。一方、企業からの回答では、図 1.1 上 4 段より「経験なし」が 46.8%と最も多く、次いで「5 年未満」が 25.8%、「5 年以上 10 年未満」が 11.3%を占め、「経験なし」が、企業からの回答の方が約 12%上回っていたが、「10 年未満」が全体の 4 割弱であることは、担当者と同じ比率であった。「経験なし」について、技術担当者からの回答比率と企業からの回答比率との間の差は、担当者からの回答については業務経験年数であるのに対して、企業からの回答は壁面緑化の技術開発への経験年数であること、調査依頼の際に同一の企業から複数の技術担当者からの回答を寄せた企業が 11 社あったこと等によるものと考えられる。

### ② 今後の取り組みと課題

#### (i) 壁面緑化技術の発展性

今後の壁面緑化技術の発展性について技術担当者に尋ねたところ、図 1.7 下 2 段に示すとおり「大いに期待できる」が 26.9%、「少しは期待できる」が 41.11%となっており、「期待できる」と回答した者が全体の約 7 割を占めていた。次に、「建物のどの方位の壁面を重点的に緑化すべき」と考えるかを尋ねたところ、図 1.7 下 1 段に示すとおり「南面」(41.11%)、「できるところは全て」(40.3%)、「西面」(38.8%)が約 4 割を占めた。「北面」と回答した者はいなかった。

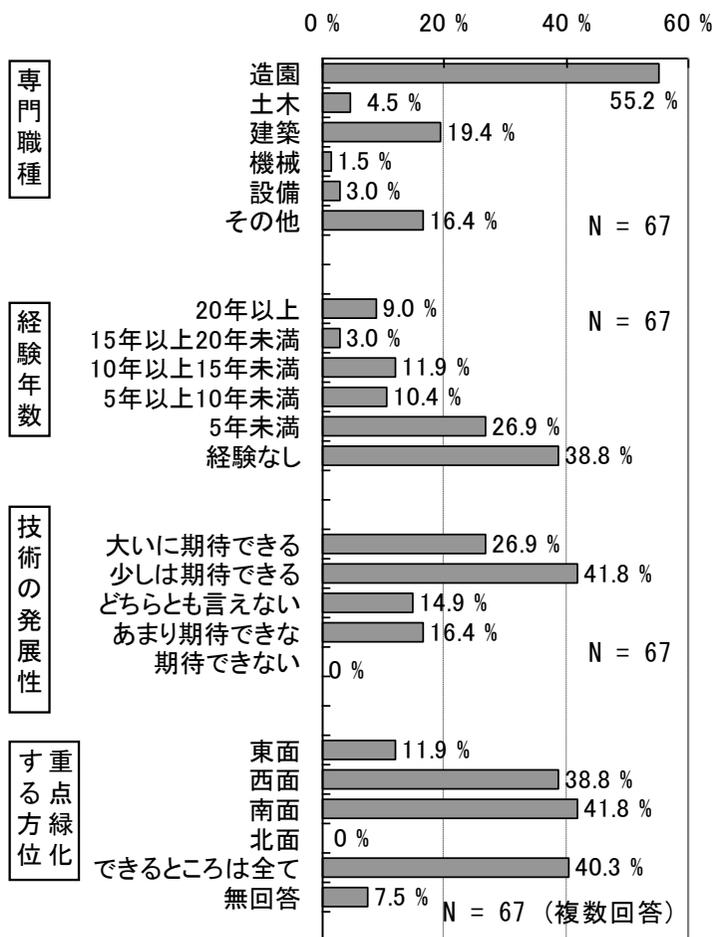


図 1.7 壁面緑化に対する技術担当者の対応

(ii) 技術的課題

「技術的に克服すべき課題は多いと思う」かを技術担当者に尋ねたところ、図 1.8 上 2 段に示すとおり「多い」と答えた者は、56.7%、「どちらかというとも多い」が 17.9%で、両者を合わせると全体の約 3/4 の者が技術的課題は「多い」と答えている。次に、壁面緑化を普及させる上で、「どのような技術開発上の課題」があると思うかを技術担当者に尋ねたところ、図 1.8 下 3 段に示すとおり「環境改善効果の定量化」が 74.6%と最も多く、次いで「建設コストの縮減」(47.8%)、「維持管理の簡便化」(44.8%) 「効率的なかん水システム」(40.3%)の順となっている。

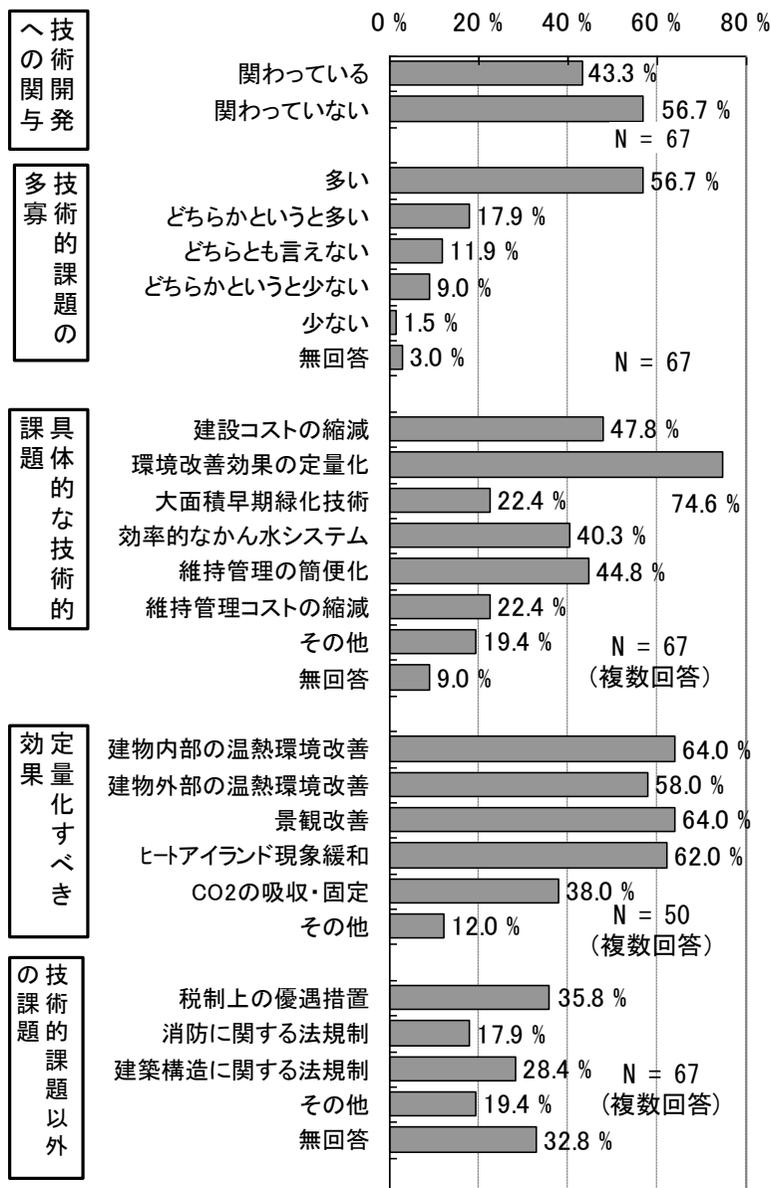


図 1.8 壁面緑化の普及のための課題

上記の技術的課題のうち、「環境改善効果の定量化」と回答した者に対して、壁面緑化の普及にあたり、「今後どのような効果を定量的に明らかにすべき」と考えるかを尋ねたところ、図 1.8 下 2 段に示すとおり「建物内部

の温熱環境改善」と「景観改善」がともに 64.0%と最も多く、次いで「ヒートアイランド現象緩和」(62.0%)「建物外部での温熱環境改善」(58.0%)の順となっている。

以上の結果から、技術担当者が壁面緑化の技術的課題として認識しているア.熱環境の改善，イ.景観改善，ウ.維持管理，エ.灌水システムの4点について，考察する。

#### ア. 熱環境の改善

建物内・外での「温熱環境の改善」と「ヒートアイランド現象の緩和」については、いずれも熱環境の改善効果としてカテゴライズすることができよう。すなわち、熱環境を建物敷地レベルで評価する場合と都市スケールで評価する場合の違いとして捉えることができる。

壁面緑化による温熱環境改善効果についての定量的かつ具体的なデータを施主側に示せることが普及開発上重要な課題であることを技術担当者が強く認識しているものと考えられる。日本政策投資銀行<sup>3)</sup>によると、個別の企業が緑化の効果を生主側に説明する場合においても、その前提となる条件、計測方法等が異なると、施主側でも客観的な比較が困難であるとし、「中立的な立場にある行政が、こうした定量的効果を計測する際の標準的なモデルを示すことが期待される」とし、行政による客観的かつ定量的なデータの整理の必要性を指摘している。

壁面緑化を普及していく上で、温熱環境改善に対する定量的かつ客観的な評価データを個別企業の自助努力により整備していくことには限界があり、公的な機関が中心となって評価に耐えうる基礎的なデータの蓄積を図る必要があると考えられる。

#### イ. 景観改善

「景観改善」について、下村<sup>3)</sup>は、つる植物による被覆そのものと、建築物を含めた部分の外観に1～5点の評価を与え、5段階評価を行った結果、「戸建て住宅、集合住宅で壁面緑化による景観の評価が高く、商業ビルでは低く」なったことを報告している。

(財)都市防災美化協会<sup>4)</sup>によると、写真等を使用した一対比較法と評定尺度法を用いて、道路から見た壁面緑化の景観評価心理実験を行った結果、「壁面緑化を行っていない場合よりも、行っている場合の方が景観的评价が高い」としながらも、「過剰な壁面緑化は、むしろ「鬱陶しい」という評価となってしまいう可能性」のあること、壁面緑化を行う際には、「庭木等とのバランス、石材等を活用した壁材の使用などと、上手に組み合わせるこ

とが、景観的評価の点で重要」であると指摘している。

景観の改善についても、温熱環境と同様に施主に対して改善効果についての客観的な評価指標、定量的なデータを用意していくことが壁面緑化を普及させる上で重視されているものと推察することができる。

#### ウ. 維持管理

次に、壁面緑化の「維持管理」については、灌水設備や登攀・下垂用の支持材等の施設管理と使用されている植物の維持管理に大別される<sup>20)</sup>。灌水設備については、水の出具合や吐出孔のつまり具合、排水孔の落葉による詰まり等の点検が必要となる。また、植物は年々成長を遂げ、変化していくため、壁面を均一に美しく維持していくためには、植物の生育状況に応じた剪定・刈り込み、間引き、施肥、病虫害防除、枯損株の撤去等の作業が、必要となる。

沖中<sup>2)</sup>は大型建物に登攀するつる植物を使用する場合には、「計画的な管理と早めの剪定が必要である」ことを指摘し、アパートなどで、植物の茂りすぎによるうっとうしさに対する拒否反応を減少させるためにも、早めの剪定を実施する必要性を説いている。

ヘデラ類など壁面緑化によく使用される登攀性のつる植物は、そのまま放置した場合、先端部の生長が旺盛な反面、下部が葉の透けた状態となる傾向があるため、これらの植物材料には早期かつ定期的な剪定と枝の誘引等の維持管理が必要になる。また、壁面が高所となった場合には剪定等の維持管理を行うために、足場やクレーン車等による維持管理が恒常的に発生することとなる。これらの維持管理作業に要する施主側への負担を極力低減していくことが、壁面緑化を普及させていく上での課題であると技術担当者が強く受け止めているものと推察される。

#### エ. 灌水システム

「効率的な灌水システム」については、壁面緑化を行う方法や場所によっても技術的課題の内容と程度は差異が生じるものと考えられる。建築物のバルコニーなどでプランター等を用いた人工土壌による生育基盤を使用する場合や、パネル型などの薄層基盤等で高低差のある大規模な面積の壁面を緑化するような場合には、効率的な灌水設備の設置は緑化植物の良好な生育を維持していく上での必要不可欠の要件となるものと考えられる。

日本政策投資銀行<sup>5)</sup>によると、パネル型を使用した壁面緑化の場合には、屋上緑化の場合と異なり、「植栽基盤が垂直となるため、一様な灌水が困難である(上部は乾燥、下部は湿潤となってしまう)。またツタ等を登攀させる場合は、夏の乾期においても枯死しないよう灌水設備等が必要になる場

合がある」ことを指摘している。

植物が生育する基盤材としての土壌等がプランターからパネル等へと薄層化するのにつれて、保水性と透水性のバランスを保ちつつ、安定的な灌水システムの確立を図ることが壁面緑化に使用される植物を生き生きとした状態で維持する必要条件と言えよう。

(財)都市緑化技術開発機構のマニュアル<sup>6)</sup>によると、「壁面緑化では特に維持管理が難しい場所が多いので、できうる限り雨水を利用した無灌水で可能なような植栽基盤や構造とすることが望ましい。」としている。

しかし、雨水利用については、降雨が一定量継続して貯留される必要があり、雨水のみの貯留により灌水を維持していくことは現実的に困難であると考えられる。具体的には、名古屋文化小劇場の壁面緑化に用いられているように、上水に頼らず中水利用を取り入れた灌水方式が、環境への負荷軽減の観点から望ましいと考えられる。また、マンション等共同住宅のバルコニー部での灌水に際しては、風の強い場合などにおける垂直面での灌水については、下層階や周辺に対する十分な配慮が必要とされることは言うまでもない。

### ③ 技術的課題以外の課題

「技術開発以外の課題」について尋ねたところ、図 1.8 下 1 段に示すとおり「税制上の優遇措置」が 35.8%と最も多く、次いで「建築構造に関する法規制」(28.4%)、「消防に関する法規制」(17.9%)となっている。税制上の優遇措置については、現在緑化重点地区内で緑化施設整備計画を策定し、市町村長の認定を受けた場合には、5 年間は固定資産税の減免措置が講じられているが、さらなる拡充等が課題として認識されているものと推察される。

また、建築構造に関する建築基準法等による法規制、消防に関する消防法上の規制について、現行法では特段壁面緑化に関する個別の規定はなく、建築担当主事や消防担当者の判断と裁量に委ねられている部分が多いことから、事務手続きに時間と手間を要していること等が課題と考えられる。このことは、屋上緑化や壁面緑化に関する具体的な技術基準や性能評価基準が未整備であることにも起因しているものと推察される。

#### ア. 税制上の優遇措置の拡充

- ①税制上の優遇措置として、緑の基本計画に定められた緑化地域又は緑化重点地区内で緑化施設整備計画を策定し、市町村長の認定を受けた場合には、5 年間は固定資産税の減免措置が講じられているが、対象地区も緑化地域又は緑化重点地区に限定されており、かつ優遇期間も 5

年間に限定されている。

- ②また、壁面緑化については対象要件となる建築物の緑化面積の算定に際しては、緑化しようとする部分の水平延長に1.0mまでと対象面積の垂直方向への参入条件が限定されている。さらに、事業用以外の緑化施設については、固定資産税の対象となっていない。

#### イ. 自治体の助成制度の拡充

- ①都の緑化率算入対象面積のうち、壁面で基盤を伴う場合には、基盤面積を算入できるが、直植えの場合、垂直方向は1mに限定されている。
- ②建物の屋上や壁面の緑化に対する自治体の助成制度も東京都特別区他相当数の自治体で現在普及しつつあるが、助成の対象について樹木と芝生等で助成額の上限に差を設けている例が見られるものの、整備された緑地の質や一般への公開性等についての評価は行われていない。
- ③助成の対象は緑化施設の設置に要する費用の一部であることから整備段階にとどまり、設置後の維持管理に対する助成措置は講じられていない。維持管理段階に公費を投じることには、限界はあるが、管理段階での具体的なマニュアルや実地指導等のソフト施策の充実、共通部分での公的関与等の施策について、より積極的に検討されていくことが望ましいと考えられる。

#### (3) 建築基準法との調整

一方、建築構造に関する建築基準法等による法規制、消防に関する消防法上の規制について、現行法では屋上緑化、壁面緑化等に関する個別の規定はなく、建築担当主事や消防担当者の判断と裁量に委ねられている部分が多い。建築基準法とも整合がとれた、屋上緑化や壁面緑化に関する技術基準や性能評価基準が未整備である。

#### (4) 壁面緑化の技術的課題

冲中<sup>7)</sup>は、建築等の壁面の緑化とともに、トレリスや棚などの格子面の緑化も含め、「立面緑化」と定義し、つる植物を使用した緑化が最も普遍的な立面緑化の手法であるとしている。そして、建築壁面等への付着可能なつる植物は、被覆面の $\mu\text{m}$ 単位の微細な凹部に細胞単位の植物体により吸盤のように付着する「付着盤型」と根毛が $\mu\text{m}$ 単位の凹部に侵入して付着する「付着根型」の二つのタイプのつる植物に分類している。

いずれのタイプのつる植物も付着器官が建築壁面に侵入して建築の壁体部分を劣化させることは無いとしながらも、誘引や剪定などの人為的管理の必要性を指摘し、そのための管理技術の確立が課題であることを指摘している。

下村<sup>3)</sup>は、つる植物利用上の課題として、①種・品種名の整理が不十分であること、②コンクリート壁面等表面構造と付着力の測定方法とつる植物の生育特性の把握、③つるの誘導を目的とした支柱・ネット等誘引資材の開発と利用可能性の試験、④挿し穂と用土の均一性による均一な苗の生産の必要性、等を指摘している。

一方、武藤<sup>8)</sup>らは、視覚的・心理的な側面から、壁面緑化に関する評価の構造を抽出するため、評価グリッド法を用いたヒアリング調査を実施し、壁面緑化の計画上の課題として、①建物の用途やデザインが調和感に大きく影響すること、②植物が生き生きとして、ボリュームが適度であること、③形状や間隔、壁面デザインとの関係に留意すべきであること、を指摘している。

日本政策投資銀行<sup>5)</sup>によると、パネル式壁面緑化と登攀・下垂型の壁面緑化の課題として、①設置目的を明確化した上での植物種の選定と補助資材の形状、②様な灌水の困難性、③剪定等維持管理の方法を指摘するとともに登攀・下垂型の壁面緑化普及上の課題として、①壁面緑化による定量的機能・効果、②施工時における維持管理の内容・費用等の情報の欠如、③施工後の被覆に要する期間が不明確、④枯死に対する保証・アフターサービスについての統一したルールがないこと、⑤建築物のファサードに配慮したデザインの検討、等を指摘している。これらの先行研究や調査報告等によって得られた技術課題を参考として今回のアンケート調査の回答から得られた技術担当者の意識を踏まえると、今後壁面緑化を普及させる上で以下のような技術的課題を整理することができる。

#### 1) 壁面緑化に適用可能な植物苗の品種・品質・生産量の確保

壁面緑化を普及させていく上で、壁面緑化に使用されるつる植物等の植物苗について、品種・外壁材の種類や使用場所に応じた生育特性等の正確な情報の整備、規格・用土等の植物苗の均質性・品質の確保とともに、生産数量等について安定した供給体制の確立を図る必要がある。

#### 2) 温熱環境改善効果の定量化

壁面緑化による環境改善効果として、客観性のある建物内外への温熱環境改善効果についての基礎的・定量的データの蓄積が必要である。建物内部への熱負荷の軽減については研究蓄積も相当あるが、特に、壁面緑化による建物外部側の温熱環境の改善等については、基礎的なデータは不十分であり、その蓄積が課題である。

#### 3) 施工コストの縮減と費用便益

壁面緑化にかかる施工コストは、川本ら<sup>9)</sup>の報告によると、壁面下部から

つる植物を登攀させた場合は、平均的な施工単価を 19,000 円/m<sup>2</sup>、プランターから登攀又は下垂させた場合には 33,000 円/m<sup>2</sup>、パネル工法では 67,000 円/m<sup>2</sup>と算定している。今後、壁面緑化を普及させる上では、施主側にこれらのコスト負担をしてまで壁面緑化を行うに耐えうる便益の提示とともに、施工コストそのものの縮減が課題と言える。

#### 4) 維持管理の効率化・簡素化

植物は生きた材料であり、設置後に剪定・灌水・施肥・病虫害防除等の管理作業が必要となる。特に、緑化植物による壁面被覆を良好に保つ上で早期の剪定が重要である。継続して発生する施主側の手間と負担が軽減し、簡易かつ効率的に行える管理技術の開発が必要である。

#### 5) 培土等植栽基盤整備技術・灌水技術の開発

壁面という人工的環境において、植物が良好に生育していくための基盤となる土壌材や容器等について、建物構造への負荷の少ない軽量な材料等の開発が必要である。また、植物の生育上必要となる灌水について、雨水・中水の再利用等上水への負担を軽減しつつ、効率的に行うためのシステム開発が課題である。

#### 6) 品質・性能基準の整備

壁面緑化に関する資材や工法等について民間レベルにおいて、様々な製品や技術開発が行われているが、これらの緑化資材や工法についての品質・性能を客観的に評価する評価基準を整備する必要がある。

#### 7) 建築構造等との調整

建築外壁に壁面緑化資材が付加されることによる建築構造への影響や防火対策・風対策上の安全性の確保等建築構造との十分な調整が必要であり、そのための技術基準等の整備が課題と言えよう。

#### 8) 建築外壁材とのデザイン上の調整

どの程度まで壁面緑化することが妥当であるかについて定量的かつ客観的な判断基準は未確立であり、建築デザインそのものも多様であることから、その設定自体極めて困難である。壁面緑化そのものを建築外壁と位置づけることも可能であるが、現実にはコンクリート、タイル、ガラス等の建築外壁材とのデザイン上の調整が必要となる。植物材料与建築外壁材とを調和させるための設計指針、定量的な景観評価基準の整備等が課題と考えられる。

### (3) タイプ別壁面緑化の適用可能性と特性分析

#### 1) 壁面緑化のタイプ別分類

沖中<sup>2)</sup>は、市街地におけるつる植物の事例調査を4年間かけて行い、つる

植物を吸盤型，付着根型，巻ひげ型，巻つる型等に 8 分類し，緑化対象構築物を建築，擁壁，塀・柵・柵等に 15 分類して分析し，つる植物の造園的利用の基本方針をまとめている。このうち建築については，大型建築，大型住宅，バルコニー建築，一戸建て店舗，一戸建て住宅の 5 つに分類している。

ここで，大型建築は「3 階以上の頑丈な壁構造の建物」とし，同じく大型住宅を「3 階建て以上の大型住宅建築」としている。そして，事例調査の解析結果から調査した大型建物・大型住宅とも，吸盤型が最も多く，使用植物はナツツタ 1 種類であったこと，バルコニー建築では，付着根型が最も多く，使用植物はセイヨウキヅタとカナリーキヅタに限られたこと，一戸建て店舗では，吸盤型のナツツタの使用が最も多く，ついで付着根型のセイヨウキヅタとカナリーキヅタの登攀・下垂例が観察されたこと，一戸建て住宅では，上記の吸盤型，付着根型の他，巻ひげ型としてブドウ，ヘチマ等，巻つる型としてアサガオ，アケビ等多くの種類の植物利用が観察されたこと，等を報告している。

これらの事例調査の結果に基づき，造園的利用の基本方針としては，「大型建物につる植物を被覆させる場合には，建物の計画時点からのアプローチが必要」とし，「建物が，つる植物を受け入れるための構造を備えていなければならない。」としている。また，「大型の集合住宅」では，「つる植物の登攀は妻壁のみにとどめるのが無難」とし，「構造的につる植物の接着に適しない建物では，バルコニー等にプラントボックスを設置して，ここからつる植物を下垂させるのがよい。」としている。

この論文がまとめられたのは，今から 40 年以上も前のことであるが，つる植物の生育特性を踏まえた壁面等の立面緑化の方向性が体系的にまとめられ，今日なお普遍性を持ち得ていると言えよう。しかし，緑化タイプの分類は吸盤型，付着根型，巻つる型等つる植物の生育特性に基づいており，建物の壁面を緑化する方法は，地盤から登攀させる方法とバルコニー等でプランターから下垂させる方法に限定されている。

本研究では，沖中らによるこれらの検討を参考に一戸建て建築等を地盤から直接緑化する方法（「自然地盤型」）やバルコニー部からプランターにより植物を登攀または下垂させる方法（「プランター型」），建築に支持材を取り付け，植物を登攀または下垂させる方法（「支持材使用型」），擁壁部から植物を下垂させる方法等に加え，最近の壁面緑化に関する事例<sup>16)</sup>や文献<sup>20,22)</sup>，緑化資材の開発例等を加味し，プランターと支持材を組み合わせたタイプ（「プランター＋支持材組合せ型」），ユニット型のパネルを組

み合わせたタイプ(「パネル型」), 緑化ブロックを組み合わせた擁壁タイプ(「緑化ブロック型」)の6つのタイプに区分を行い, 今後壁面緑化の普及が見込める建物や場所などについてアンケート調査の結果から考察を試みた。なお, 植物の登攀・下垂の別による区分は各タイプで可能であることから, 特には行わなかった。

各緑化タイプの特徴は以下に記すとおりである。(図 1.9, 写真 1.1 参照)

**【タイプⅠ】** 自然地盤型: 地盤面の土壌を植栽基盤として地盤から植物を生育させ, 直接建物を緑化していく方法である。個人の住宅や低層の建物に適している。

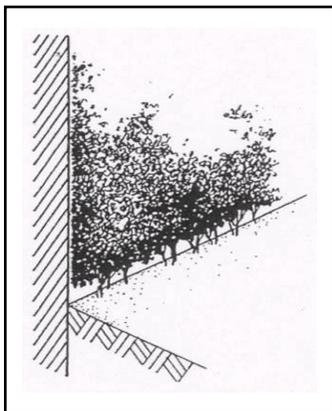
**【タイプⅡ】** 支持材使用型: 建物の壁面に直接支持材を取り付けて, 植物を登攀又は下垂させるタイプである。

**【タイプⅢ】** プランター設置型: 建物のベランダやバルコニー等にプランターを設置し, プランター内の植物を登攀又は下垂させる方法である。建物の設計段階から対応することにより, 予め灌水・排水設備をプランターと一体的に組み込むことが可能である。

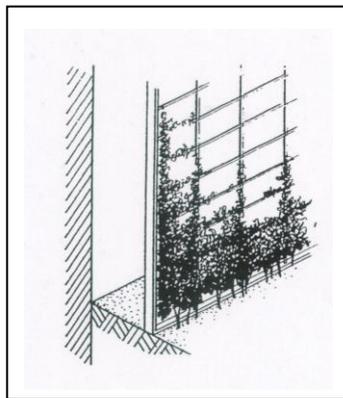
**【タイプⅣ】** プランター+支持材組合せ型: プランターと支持材を組み合わせ, プランター内の植物を支持材に沿って生育させ, 登攀又は下垂させる方法である。建物の構造と一体化を図り, 大規模な壁面を早期に緑化することも可能である。

**【タイプⅤ】** パネル型: 植栽基盤を薄層パネル化し, パネル内に植物を埋め込み, 幾つかのパネルで緑化ユニットを構成し, ユニットを組み合わせ植物を登攀又は下垂させるタイプである。パネルの連続した組み合わせにより, 大規模な壁面を早期に緑化することも可能であるが, パネル単位で基盤となる土層を有することから, 建物の荷重に大きく影響を与え, かつ㎡当りの施工コストは最も大きい。

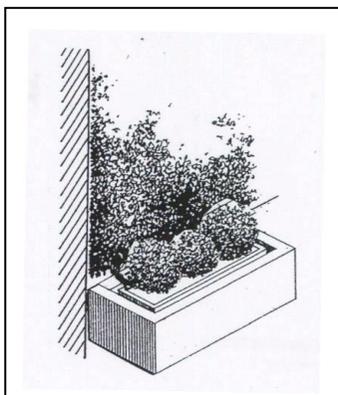
**【タイプⅥ】** 緑化ブロック型: 道路ののり面緑化等に用いられている工法を準用し, 建物の外壁に緑化ブロックを積み上げるタイプである。



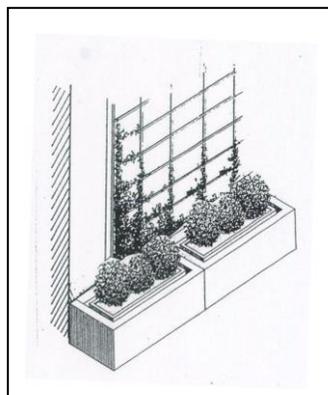
タイプⅠ：自然地盤型



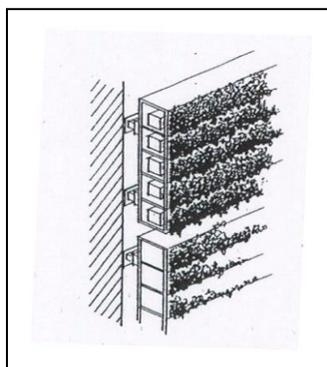
タイプⅡ：支持材使用



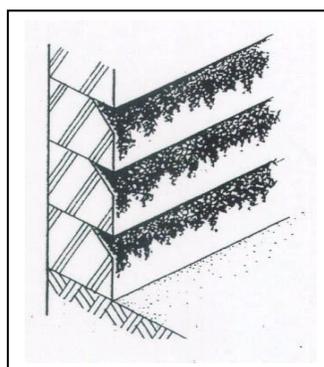
タイプⅢ：プランター設置型



タイプⅣ：プランター＋支持材組合せ型



タイプⅤ：パネル型



タイプⅥ：緑化ブロック型

図 1.9 壁面緑化のタイプ

(注) 引用文献 20) より加工した。



**タイプⅠ 自然地盤型**  
(甲子園球場)



**タイプⅡ プランター型**  
(新丸の内ビル)



**タイプⅢ 支持材型**  
(名古屋市文化劇場)



**タイプⅣ プランター+支持材型**  
(板橋清掃工場)



**タイプⅤ パネル型**  
(三菱信託銀行本店ビル)



**タイプⅥ 緑化ブロック型**  
(道路法面の例)

**写真 1.1 各タイプの壁面緑化事例**

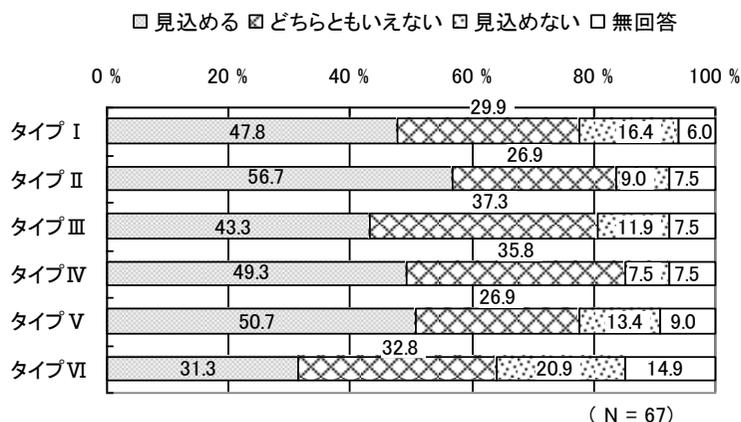


図 1.10 開発普及の可能性

## 2) タイプ別に見た壁面緑化の適応可能性

技術担当者に対して、この六つの壁面緑化のタイプについて、1) 開発普及の可能性、2) 普及が見込める場所、3) 普及が見込める建物、4) 普及が見込める段階、について尋ねた。回答結果は、以下のとおりである。

### ① 開発普及の可能性

図 1.10 に示すとおり、いずれのタイプも、「見込める」が「見込めない」よりも上回っており、タイプ別にはタイプ II (支持材型) が 56.7% と最も多く、次いでタイプ V (パネル型) (50.7%)、タイプ IV (プランター+支持材組合せ型) (49.3%) の順となっている。タイプ VI (ブロック型) は、他のタイプに比べ「見込める」という意見は他のタイプに比べ 31.3% と少なく、「どちらともいえない」とほぼ同数であった。

### ② 普及が見込める場所

表 1.4 に示すとおり、今後壁面緑化の普及が見込める場所として、タイプ I (自然地盤型) では、「道路のり面の擁壁」(75.0%)、「高速道路の垂直面」(62.5%) が多く、次いで、「美術館」(53.1%) 「個人住宅」(50.0%) の順とな。「病院」(60.6%) の公共公益施設とともに「中高層の集合住宅」(69.7%) や「大規模再開発」(57.6%) 等普及対象範囲は最も多様となっている。タイプ V (パネル型) は、「大規模再開発」(82.4%) や「官公庁庁舎」(67.6%) といった大規模建築施設とする意見が多い。タイプ VI (緑化ブロック型) では「道路のり面の擁壁」(76.2%) や「河川構造物の壁面」(76.2%) 「高速道路の垂直面」(47.6%) 等の土木施設での普及を指摘する意見が多くなっている。

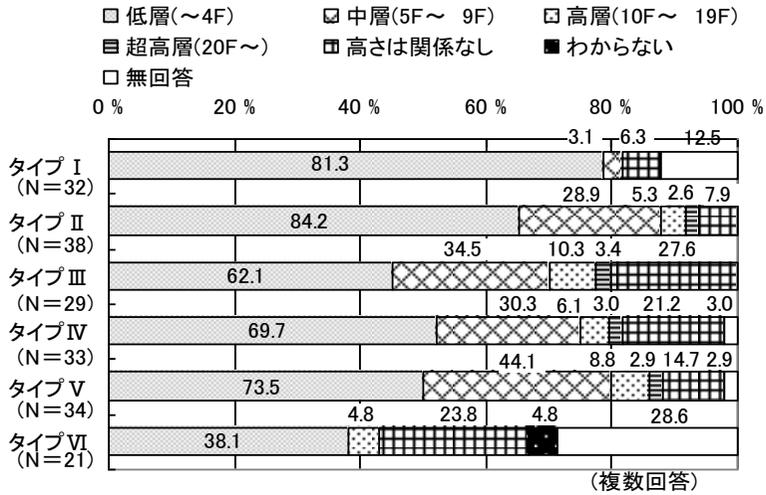


図 1.11 普及が見込める建物

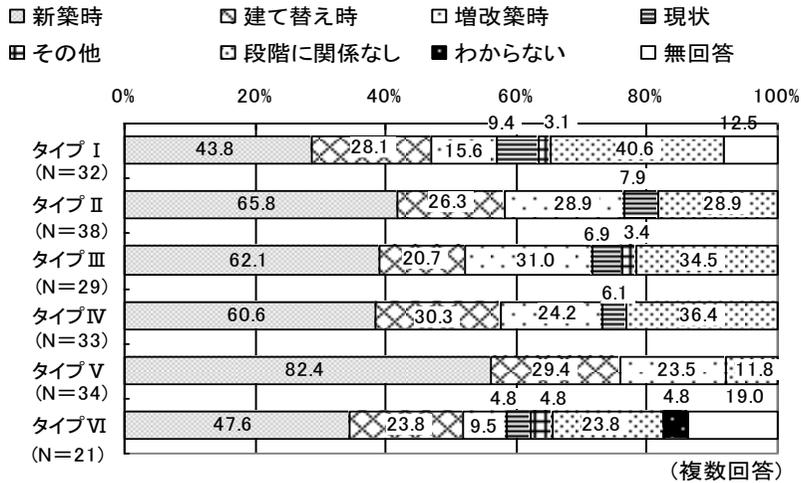


図 1.12 普及が見込める段階

③ 普及が見込める建物

建物の階数により、5階、10階、20階で区切り、4階以下、5階以上9階未満、10階以上19階以下、20階以上の4段階に区分して、タイプ別の普及可能性を尋ねたところ、図 1.11 に示すとおり、タイプ I から V までは 4 階以下での普及が過半を占め、特にタイプ I (自然地盤型) では約 8 割を占めている。いずれのタイプについても、10 階以上での普及を指摘する意見

表 1.4 普及が見込める場所

区分	タイプ I	タイプ II	タイプ III	タイプ IV	タイプ V	タイプ VI
回答数	N=32	N=38	N=29	N=33	N=34	N=21
個人住宅	50.0 %	52.6 %	62.1 %	57.6 %	14.7 %	4.8 %
中高層の集合 住宅	31.3 %	52.6 %	65.5 %	69.7 %	47.1 %	14.3 %
大規模再開発	25.0 %	47.4 %	41.4 %	57.6 %	82.4 %	28.6 %
学校	46.9 %	65.8 %	62.1 %	78.8 %	55.9 %	19.0 %
病院	28.1 %	55.3 %	44.8 %	60.6 %	61.11 %	28.6 %
官公庁庁舎	46.9 %	65.8 %	51.10 %	72.7 %	67.6 %	28.6 %
美術館	53.1 %	65.8 %	41.4 %	54.5 %	50.0 %	28.6 %
体育館	34.4 %	42.1 %	27.6 %	48.5 %	47.1 %	9.5 %
文化会館	43.8 %	52.6 %	37.9 %	51.5 %	64.7 %	28.6 %
工場	46.9 %	55.3 %	31.0 %	51.5 %	38.2 %	33.3 %
高速道路の垂 直面	62.5 %	55.3 %	20.7 %	39.4 %	44.1 %	47.6 %
道路のり面の 擁壁	75.0 %	34.2 %	27.6 %	27.3 %	23.5 %	76.2 %
河川構造物の 壁面	50.0 %	18.4 %	20.7 %	18.2 %	17.6 %	76.2 %
その他	6.3 %	2.6 %	0.0 %	0.0 %	2.9 %	0.0 %
無回答	3.1 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %

(注) グレー塗りつぶしは、各タイプ毎の上位3つを着色している。

は少ない。タイプV(パネル型)は、5階以上9階以下の占める割合が他のタイプに比して高く、4割強を占めている。タイプVI(緑化ブロック型)は「高さに関係なし」とする回答が2割強となっているが、道路等土木施設で既に普及していることが反映していると考えられる。

#### ④ 普及が見込める段階

新築、建て替え、増改築等の建築の段階で壁面緑化の普及可能性を尋ねたところ、図 1.12 に示すとおり、タイプIとVIを除き、「新築時」が過半を占めている。特に、タイプV(パネル型)では、「新築時」で約8割と他の

タイプに比して、高い割合を示した。

一方、タイプⅠ(自然地盤型)については、「段階に関係なし」とする意見の比率が他のタイプよりも高く約4割を占めている。

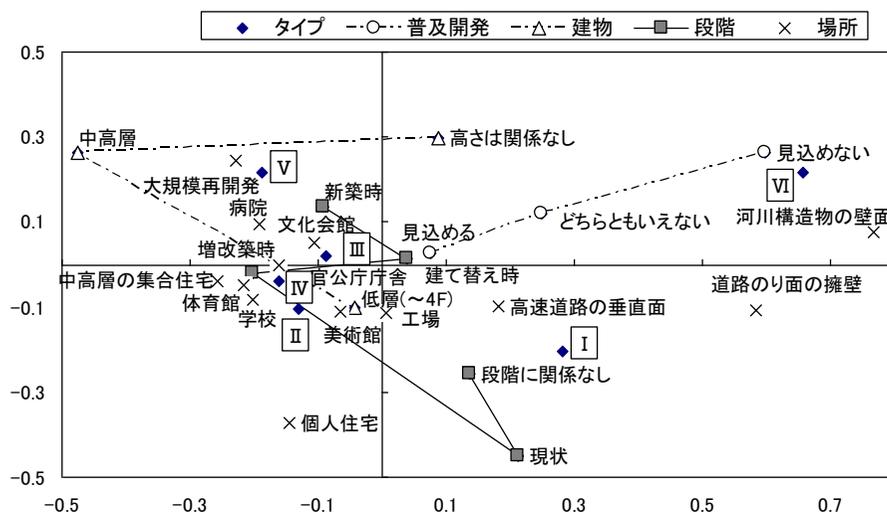
### 3) 壁面緑化タイプと普及可能性の対応分析

本項では、上記の調査結果にみられる壁面緑化タイプ別の特徴から定量的・統計的な根拠に基づくタイプ分類を行うため、表 1.4 の集計結果に基づき、対応分析を試みた<sup>9)</sup>。「対応分析(Correspondence Analysis)」とは上述したとおり多変量解析の分析手法の一つで、クロス集計したデータを元に抽出された要因成分を行と列の要素の相関関係が最大となるよう数量化して、多次元空間(散布図)に表現するものである。様々な壁面緑化のタイプの今後の普及可能性について、技術担当者がどのように認識しているかについて、この分析手法を用いて各緑化タイプと適用可能な建物や場所、建築の段階との関係から、分析を行った。

対応分析の結果は、図 1.13 に示すとおり、互いに無相関ないくつかの次元からなる空間内に、行・列のカテゴリーを布置した図として出力される。本分析では2次元までを採用した。寄与率は、第1次元:62.4%、第2次元:20.3%、累積82.7%とかなり高い。これは、この2次元布置により、もとの集計表にみられる行・列の関連の情報の大部分が表現されていることを意味する。また、対応分析の結果である布置空間上の座標を表す軸のスケールの設定方法にはいくつかの方法があるが、図 1.13 では各カテゴリーの度数を重みとして、各次元とも平均=0、分散=固有値の平方根としている。

この方法によれば、原点からの距離は「 $\chi^2$ 距離」を近似したものとなる。 $\chi^2$ 距離とは、ある行(列)の、列(行)に関する度数の分布が、全体の分布とどの程度異なっているかを統計的に評価したものである。従って、原点から離れた位置に布置されている行(列)ほど特徴的であり、原点付近に布置されている行(列)は一般的といえる。さらに、特徴的な行(列)について、具体的にはどんな特徴があるかを布置図から読みとるには、原点からみて同方向・逆方向に布置されている列(行)を見ればよい。全体的な度数分布と比べたとき、同方向に布置されている列(行)は度数が大きく、逆方向に布置されている列(行)は度数が小さいことを表している。

これらのことに注意して図 1.13 を見ると、原点の近くに布置されているタイプⅡ(支持材使用型)、Ⅲ(プランター型)、Ⅳ(プランター+支持材組合せ型)は一般的、すなわち普及可能性・普及可能な場所・建物・建築段階といった点では大きな違いはみられないと解釈できる。一方、原点から離



(注) I：自然地盤型 II：支持材使用型 III：プランター型 IV：プランター+支持材組合せ型

図 1.13 対応分析の結果

れた位置に布置されているタイプ I (自然地盤型), タイプ V (パネル設置型), タイプ VI (緑化ブロック型) は, それぞれ他のタイプとは異なった特徴があることを表している。

タイプ I (自然地盤型) については, 普及が見込める場所としては, 「高速道路の垂直面」で現状又は建物の段階に関係なく普及が見込めると認識している傾向が認められる。タイプ V (パネル型) についても, 開発普及の可能性は高く, 普及が見込める場所としては「大規模再開発」等で, 段階としては新築時と認識している傾向が認められる。タイプ VI (緑化ブロック型) については, 壁面緑化としては今後の開発普及に消極的な認識を示し, 普及場所も「河川構造物」や「道路のり面の擁壁」等に特化する傾向が認められた。このことは, このタイプの緑化手法が垂直壁面より既にのり面緑化等の技術としても一般化し, 普及していることを反映しているものと解釈できる。

以上のことから, 対応分析により緑化タイプと普及可能性についての技術担当者の意識をみると, タイプ I と V と VI の普及の可能性, 普及が見込める場所, 建物, 段階について, 顕著な違いが見られる一方, タイプ II・

Ⅲ・Ⅳの間には顕著な違いが見られなかった。このことは、今後の壁面緑化技術の普及開発を推進していく上で、建物の高さや、建築の段階、適用する場所等の建築条件に応じて、壁面緑化の様々なタイプの有する特徴や手法の多様性を踏まえた、多様な取り組みと展開が可能であることを示唆しているものと考えられる。

## まとめ

屋上の緑化や利用に関係している民間企業と技術担当者を対象として壁面緑化に関する市場動向と今後の技術課題等についてのどのように見ているかについて、アンケート調査を実施し、先行研究により得られた知見等を踏まえ課題の整理を行った。

この結果、①企業側から見て壁面緑化の今後の市場性拡大への期待の高いこと、また技術担当者にとっても技術開発の発展性は大きいと認識していること、②壁面緑化に関する技術開発をさらに推進していく上で、トータル・コストの縮減、緑化による環境改善効果の定量化、剪定・灌水等管理技術の向上による施主側への負担の軽減等を課題と技術担当者が認識していること、③定量化すべき環境改善効果としては、建物内部の温熱環境改善効果とともに、建物外部の温熱環境改善効果、景観改善効果に対する技術担当者の意識が高いこと、等が明らかとなった。

また、壁面緑化の手法を6つのタイプに区分し、緑化のタイプと普及の可能性に対する技術担当者の意識について対応分析を行った結果、タイプⅠ(自然地盤型)とタイプⅤ(パネル型)、タイプⅥ(緑化ブロック型)は、開発普及の可能性、普及が見込める場所や建物、段階に顕著な違いが認められ、一方、タイプⅡ(支持材使用型)、Ⅲ(プランター型)、Ⅳ(プランター+支持材組合せ型)については普及が見込める場所や建物の段階等についての明確な特性区分はできなかった。

この結果は、あくまで今回の調査回答結果から対象とした技術担当者の意識を分析・整理したものであり、壁面緑化を行う場合の緑化タイプの特性そのものを意味するものではないが、今後壁面緑化を都市の様々な建築物等で普及させる上で、建築物の種類と場所、施工段階、高さ等の条件の違いに応じた多様な壁面緑化を実現していく上で、適する緑化の手法を適する場所と建築施工の段階に応じて選択できるような緑化工法や緑化資材等の技術開発の必要性を示唆していると考えられる。

本調査の結果等を踏まえ、壁面緑化の普及並びに民間企業の技術開発を研

究開発の側面から支援していくため、比較的研究蓄積の少ない壁面緑化等による建物外部の温熱環境改善効果に関する実証的かつ定量的な基礎的研究とデータの蓄積への取り組みが必要と考えられ、第3章以降で具体的な検証を行う。

## 引用文献

- 1) 建築技術, (株)建築技術 (2002), 140-143
- 2) 国土交通省, 緑化施設整備計画認定制度(公園とみどり); 国土交通省ホームページ:  
<https://www.mlit.go.jp/crd/park/shisaku/ryokuchi/shisetsuseibi/index.html>
- 3) 下村 孝, 壁面緑化資材の利用特性と利用上の課題 (2001) 日本緑化工学会誌, 27(2): 399-406
- 4) (財)都市防災美化協会, 壁面緑化の有効性に関する研究 (1986) (財)都市防災美化協会, 78pp.
- 5) 日本政策投資銀行, 都市環境改善の視点から見た建築物緑化の展望(2004) 日本政策投資銀行, 74pp.
- 6) (財)都市緑化技術開発機構編, 特殊空間緑化シリーズ①新・緑空間デザイン普及マニュアル (1995) 誠文堂新光社刊, 84pp.
- 7) 沖中 健, つる植物の造園の利用に関する研究 (1984) 千葉大学園芸学部学術報告 34: 165-236
- 8) 武藤浩・興水肇・原田鎮郎・佐久間護, 建築物の壁面緑化に関する研究その2 一般人の評価構造に基づく計画上の課題の抽出 (2001), 日本建築学会大会学術講演梗概集 F-1 分冊: 683-684
- 9) 大隅 昇, 記述的多変量解析法 (1994) 日科技連出版社, 350pp.

## 第2章 放射収支から見た壁面緑化による温熱環境改善効果

### 2.1 放射収支から見た温熱環境改善効果

壁面緑化による温熱環境改善に関する既往の主な研究例として、梅干野らは、ベランダにつる植物(ヘチマ)を用いた被覆を行い、建築内部への日射遮へい効果として、夏季の日射透過特性と表面温度を計測することで、室温の上昇を抑制する効果を検証し<sup>1),2)</sup>、温度と日射量との相関や日射透過率と建物外壁との温度差の関係について実測を行うことで、ツタによる西日遮へいに関する効果を示している<sup>3),4)</sup>。沖中ら<sup>5)</sup>は、壁面緑化による夏期の壁面の温度上昇の抑止力、屋内への熱の流入の抑止力について、鉄筋コンクリート造の一般住宅を対象に実測により検証するとともに、ツル植物の被覆がコンクリート建物の壁面温度に及ぼす効果の大きさを明らかにしている。

野島らは、壁面緑化による夏期の壁面の温度上昇の抑止効果について、緑被された壁面と植物の無い壁面の壁面温度、壁面での熱流の経時変化を計測し、緑化による温度の低減量が大きくなるにつれて蒸散量が大きくなる傾向があるとしている<sup>6)</sup>。伴らは、壁面緑化が夏期の室内温熱環境に与える影響について、シミュレーションによるケーススタディーを行い、緑化された外壁の温度と熱流を求めている<sup>7)</sup>。近藤らは、ツル植物による構造物緑化の環境効果の定量化について、構造物の表面温度を測定し、緑化された外壁の温度差を求めている<sup>8)</sup>。高尾らは、ポリプロピレンを材料とする基盤材にコケを用いて、乾燥状態と湿潤状態における日射反射率を入射角との関係において比較を行い、乾燥状態で入射角が大きくなるほど反射率が高いことを実証している<sup>9)</sup>。渋谷らは、パネル設置型と下垂型の壁面緑化工法を用いて壁面の表面と裏面の温度、壁面貫熱流量を計測し、パネル型の方が下垂型よりも環境緩和効果の高いことを報告している<sup>10)</sup>。

これら既往の研究例の主たる分析は、建物の室内側への熱の負荷低減に重きが置かれており、壁面外部についても日射の遮蔽と透過等について検証は行われているが、短波(日射)と長波(赤外線)による建物外部の放射環境について、実測により定量的に検証した研究事例はほとんど見られない。

そこで、本章では壁面緑化による建物外部側の温熱環境改善効果の定量的かつ実証的な検討を行うため、植物種類の異なる緑化パネルと、コンクリー

ト壁面(白色塗装と打放し)について日射量, 赤外放射量の入射量と反射量を計測し, 計測結果から表面温度とMR T(平均放射温度)を算出して放射環境についての定量的な分析を行った。次に, 体感温熱指標としてWBG T(湿球黒球温度)とSET\*(標準新有効温度)により, 壁面緑化による建物外部での温熱環境改善効果の定量的な評価を試みた。

## 2.1.1 研究の方法

### (1) 実験装置の設置

建築研究所内の建築環境実験棟 1 階屋上部の南向き建築壁面を使用して緑化パネル試験体 2 基を設置した。試験体は 1 ユニットが縦 30cm×横 30cm×厚さ 4cm のピートモスを基盤材とした緑化パネルを 36 枚並べて, 1.11m×1.11m の試験体を設置した。使用植物は, ヘデラヘリックス(*Hedera helix*)とアメリカツルマサキ(*Euonymus fortunei*)をそれぞれ 1 基づつとし, パネル面は全面がほぼ被覆された状態であった。また, 緑化壁面との比較を行うための無被覆のコンクリート壁面は, 開口部を避けて実験棟のコンクリート外壁面(白色塗装)をそのまま使用することとした。(写真 2.1 参照)

### (2) 計測の方法

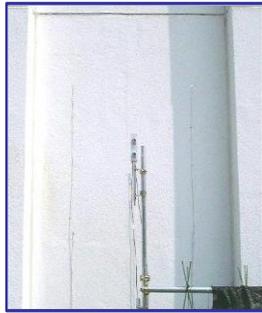
計測の項目と, 使用した計測機, 計測方法は, 表 2.1 のとおりである。各試験体と計測機器の配置は図 2.1 に示すとおりである。緑化パネルは地上 1m に設置し, 建築壁面とは 0.5m の間隔を置いた。長短波放射計は, 計測する壁面から 0.5m 離して計測する試験体のほぼ中央部に位置するように配置した。それぞれ屋上面から約 2m の高さに設置した。また, 試験体の表面温度を計測するため, 四隅と中央部に T 型熱電対を試験体表面 5 地点に設置した。なお, 使用植物の葉面には熱電対の設置部分への直射日射の影響を除くため, ビニールテープで葉の裏面に, コンクリート壁面の設置面はアルミテープにより, それぞれ熱電対の先端部を固定した<sup>11)</sup>。計測間隔は 1 分間隔で記録した。

2004 年 8 月 6 日と 10 日 1.4 日の 3 日間は, 赤外線カメラにより, 5 時から 18 時まで, 1 時間毎に撮影し, 記録した。

### (3) 計測期間と散水条件

緑化パネル, 計測機器は 2004 年 7 月 27 日に設置し, 緑化試験体の養生期間を設けて, 8 月 5 日から 8 月 21 日までの期間を自動計測により行った。

試験植物への灌水は, 試験体に自動灌水装置を設置して, 毎朝 6 時に 10 分間行った。



コンクリート壁



ヘデラヘリックス



アメリカツルマサ

写真 2.1 実験に使用した試験体

表 2.1 計測項目と計測機器・計測方法一覧

項目	計測項目	計測機材	メーカー	型番	計測方法
気象条件	日射量	日射計	ブリード	PCR-02	試験体近傍に計測器を設置し、1分ごとに自動計測した。
	風向・風速	風向・風速計	英弘精機	MA-130	
	気温・湿度	気温・湿度計	VAISALA	HMP35D	
	雨量	雨量計			環境実験棟の屋上に設置されている計測器からのデータを取得した。
壁面/葉面温度	葉面温度	T型熱電対	福音特殊金属	T型 φ 0.2mm	葉面の裏面5ヶ所に貼付し、1分ごとに自動計測した。
	壁面温度	T型熱電対	福音特殊金属	T型 φ 0.2mm	コンクリート壁面5ヶ所に貼付し、1分ごとに自動計測する。
	葉・壁面温度	赤外線カメラ	NEC三栄	TH7102	計測期間のうち3日間は、赤外線カメラを使用し3面の試験体を1時間間隔で定時撮影した。
放射量	日射・放射量	長短波放射計	英弘精機	MR-50	試験体3面の対面に設置し、試験体からの日射量と輻射量を1分ごとに自動計測した。
その他	—	データロガー	江藤電気	サーモタック6	—

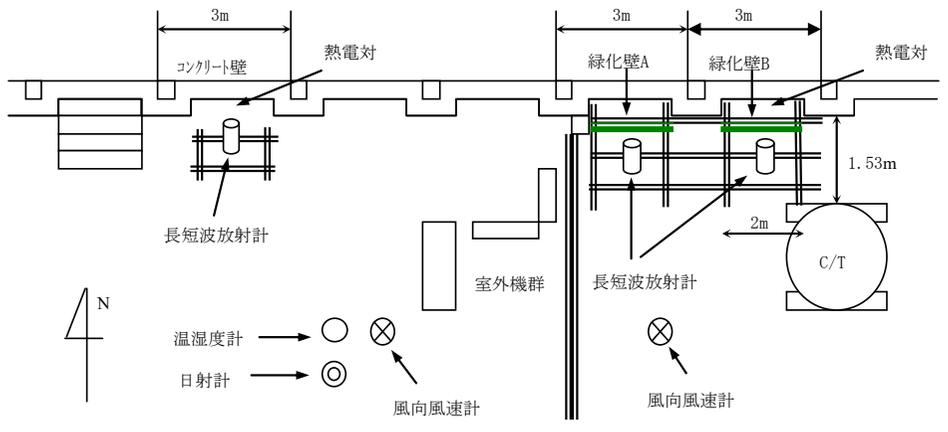


図 2.1 測定機器配置図

## 2.1.2 結果

### (1) 気象概況

図 2.2 は、計測期間(8月5日から8月21日まで)の気象条件として、気温、湿度、日射量、風速の推移をまとめたものである。計測期間中は、天候に恵まれ、最高気温も8月15・16日を除くと、30℃を超える真夏日となっており、相対湿度も高くなっている。8月16日は、台風15号の影響により風が強く、終日曇りであった。また、雨天は8月7・15日のみであった。以下に計測期間のうち、快晴に近く、赤外線カメラにより記録した8月10日を取り上げて、試験体の表面温度、反射日射、輻射熱量についての計測結果を記す。この日の最高気温は33.9℃、最低気温は24.1℃であった。また、日の出は4:52、日の入りは18:35であった。

### (2) 表面温度

緑化パネルに用いた植物の表面温度に関しては、直射日射や、葉面の日向・日陰の分布などの影響で、正確な値を求めることが難しいので、今回は以下に記述する複数の方法で計測を行うとともに、計測した長波放射量を補正して、放射温度の算出を試みた。

#### 1) 赤外線カメラによる表面温度分布

赤外線カメラを用いて測定した結果により、表面温度の分布を1時間毎に記録した。写真2.2は、8月10日における5時、9時、12時、15時の表面温度分布を示したものである。これより、日の出後間もない5時の時点

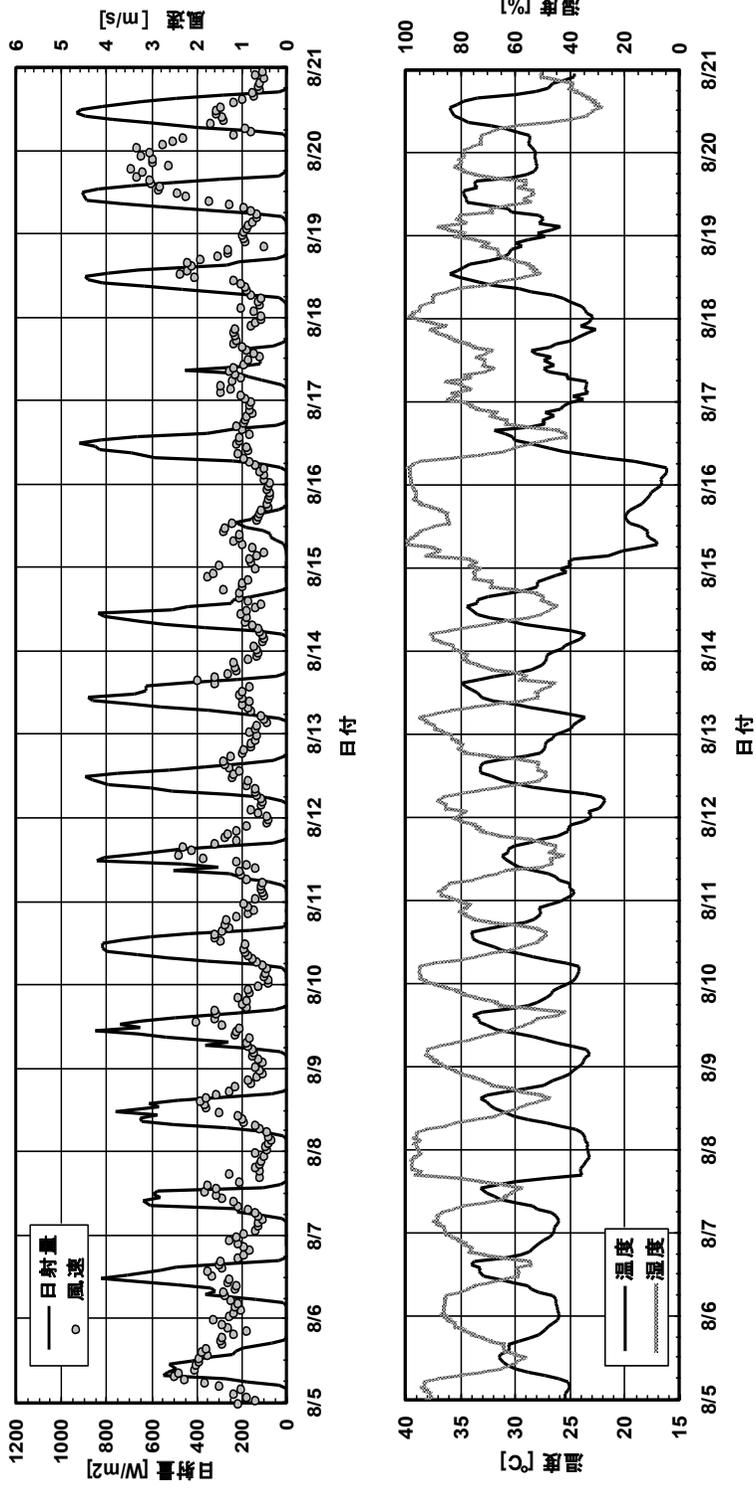


图 2.2 測定期間中の気象概況 (日射量・風速, 気温・湿度)

の表面温度は、緑化パネルがコンクリート面に比べて低温となっていることがわかる。9時及び12時の時点では緑化パネル面のうち、特にヘデラヘリックスの緑化パネルとコンクリート面の表面温度の差が小さくなっている。15時の時点ではコンクリート面が緑化パネル面よりも高温となり、その差が大きくなっている様子がわかる。表面温度の分布に着目すると、5時の時点では緑化パネル、コンクリート面ともに温度分布は均一であるが、日中は葉面が直接日射を受ける度合いにより、緑化パネルにおける表面温度にばらつきが見られ、ヘデラヘリックスでは一部にコンクリート面よりも高温となる箇所が見られた。

## 2) 表面温度の経時変化

熱電対による葉面温度の測定は、緑化パネル、コンクリート面ともに熱電対を5点貼り付けて連続測定を行っている。

8月10日におけるヘデラヘリックスのパネルに設置した5点の測定点における葉面温度とその平均値の経時変化を図2.3に示す。1日の経時変化では、5点の測定点におけるばらつきが大きく、その差は夜間において5℃、日中で10℃程度である。日中のばらつきが大きいのは、葉面が直射日射を受けているか、日陰であるかの違いが現れているものと考えられる。このため、熱電対5地点の温度を平均しても、パネル表面の温度とは合致しない。そこで、赤外放射計で計測した放射量から以下の方法により、緑化パネルの表面温度を算出した。

放射温度  $T_{sr}$ (℃)は下記の式より算出した。なお、放射率に関しては、後述する方法で算出した値(表3-2参照)を用いることとした。

$$T_{sr} = \sqrt[4]{\frac{L \uparrow}{\varepsilon \cdot \sigma}} - 273.15 \quad (1)$$

ここで、 $L \uparrow$  : 上向き長波放射量(W/m<sup>2</sup>)、 $\varepsilon$  : 放射率(未補正時は1.0)、 $\sigma$  : ステファーン・ボルツマン定数

図2.4は、ヘデラヘリックスの緑化パネルを対象として、熱電対5地点の平均、赤外線カメラによる平均値、および放射温度の経時変化を示したものである。ここで、放射温度は、放射率を1とした場合(未補正)と放射率による補正を行ったもの(補正後)を併記した。夜間は補正後の放射温度、赤外線カメラの平均値、熱電対による5点平均値とも、ほぼ同じ値で推移しているが、日中特に午前における違いが大きい。補正後の放射温度と赤外線カメラの平均値との変化の傾向はほぼ同じであるが、この傾向

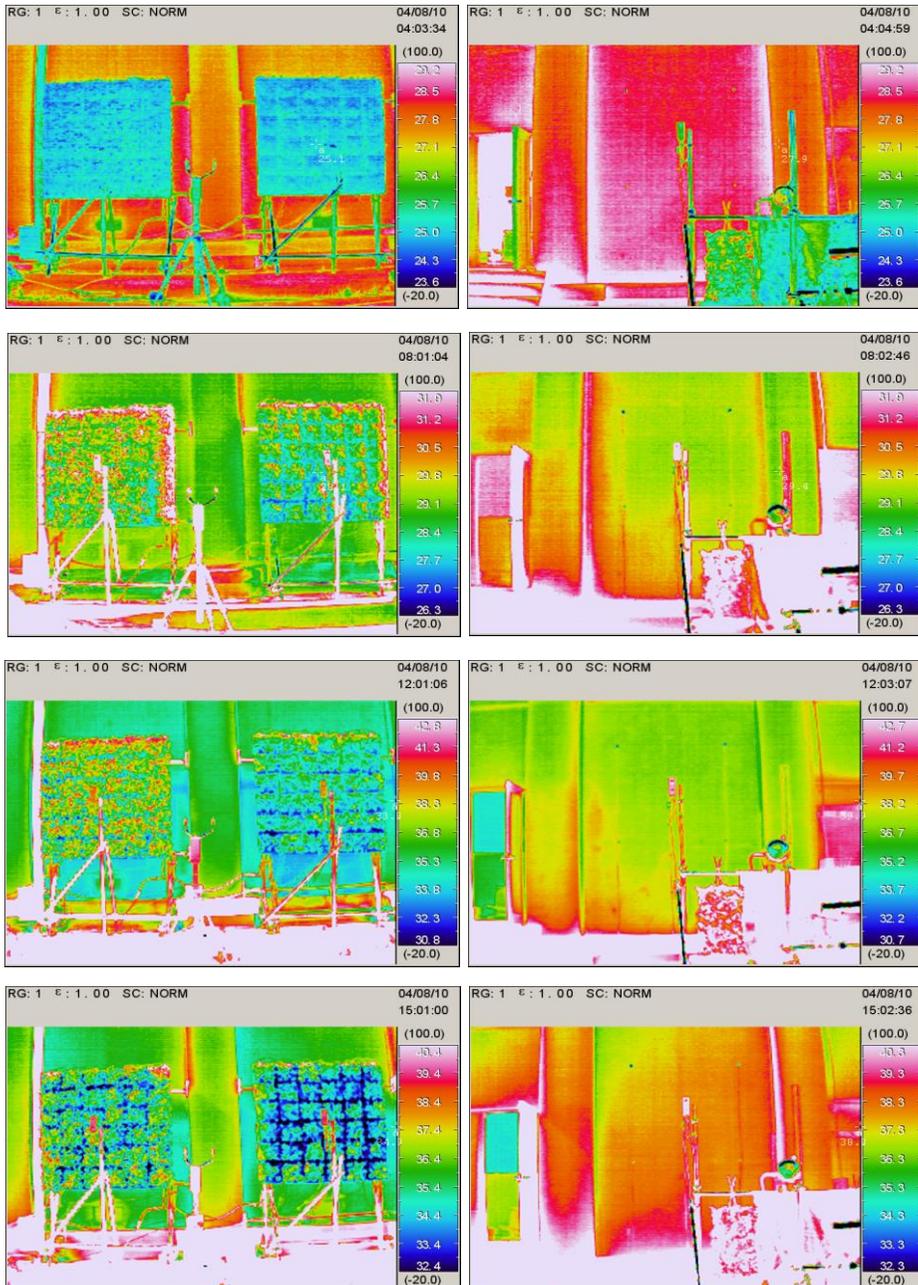


写真 2.2 赤外線カメラによる表面温度測定結果  
(2004年8月10日)

8月10日ヘデラヘリックス

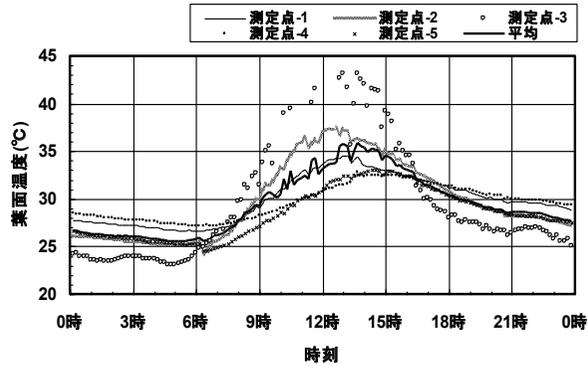


図 2.3 熱電対による表面温度の測定結果  
(8月10日：ヘデラヘリックス)

8月10日ヘデラヘリックス

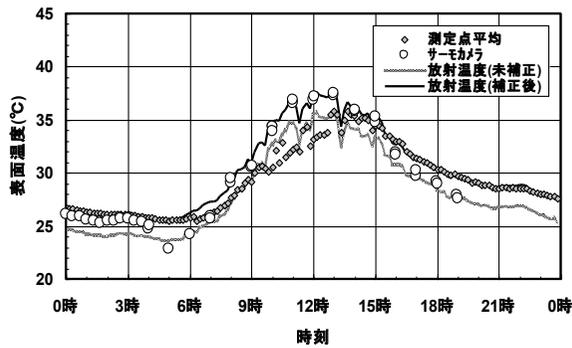


図 2.4 表面温度の複数の測定法による比較  
(8月10日：ヘデラヘリックス)

8月10日

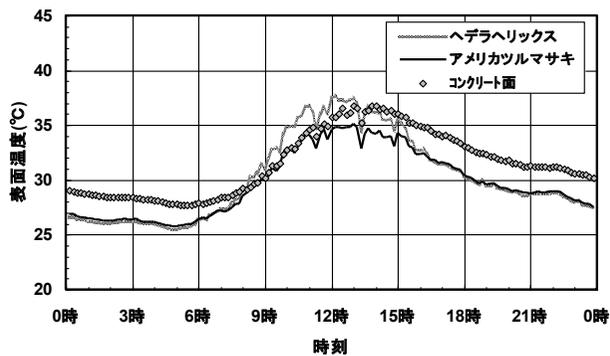


図 2.5 表面温度(補正後)の経時変化 (8月10日)

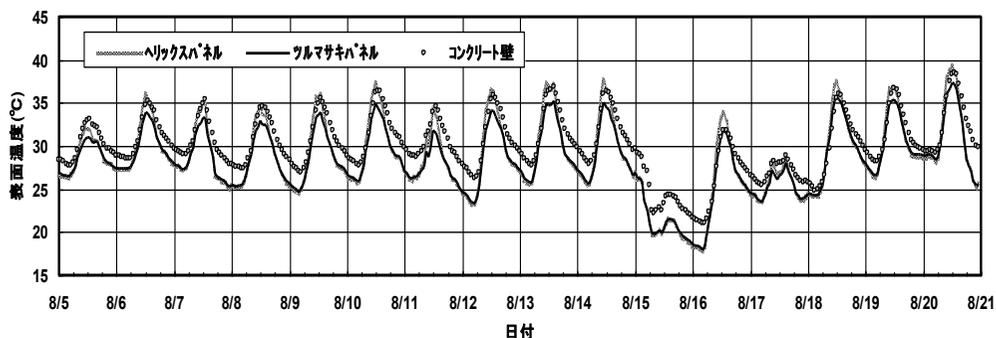


図 2.6 測定期間中における表面温度(補正後)の経時変化(8月5日～20日)

と熱電対 5 点の平均値とでは日中における違いが大きい。これは、緑化パネルでは、葉面温度のばらつきが夜間では小さいものの、日中ではばらつきが大きくなるため、放射温度ではこのばらつきを平均できているが、熱電対 5 点の測定点では分布の差を吸収できなかったことが考えられる。

以上の検討から、以後の緑化パネルの表面温度の評価では、補正後の放射温度を用いて行った。8月10日における表面温度の経時変化を図 2.5 に示す。表面温度の経時変化では、夜間においてはコンクリート面の温度が 3°C 程度緑化パネルより高く推移している。

夜間では緑化パネルは 2 種類ともほぼ同じ温度で、植物種類による差は見られない。一方で、午前中においてはヘデラヘリックスの表面温度が、3つの試験区の中で最も高くなる傾向にあり、12 時付近で最高となり、最高温度は 38°C 近くにまで達し、コンクリート面に比べ 2~3°C 程度高い。13 時過ぎからは再びコンクリート面の表面温度が 3°C 程度高くなっている。一方、アメリカツルマサキは常に 3 つの試験区の中では低い温度を維持できており、植物種による違いが見られた。

図 2.6 には、測定期間中(8月5日～20日)における表面温度の変化を示す。測定期間を通して見られる特徴として、常にアメリカツルマサキの表面温度が低く推移していること、夜間においては 2~5°C 程度コンクリート面に比べて緑化パネルの温度が低いことがあげられる。また、日中の最高温度は、天候が悪い 8月15日を除いて、ヘデラヘリックスとコンクリート面とがほぼ同等で、アメリカツルマサキは約 2°C 低い傾向であった。

以上により、壁面緑化パネルの表面温度は、コンクリート面に比べ夜間は 2~5°C 程度低く推移し、日中は植物種によりその温度差に違いがあるとの結

果が得られた。測定結果から、表面温度で比較をすると、緑化面とコンクリート面での差は、夜間にはコンクリート面が緑化面よりも常に高く、日中では緑化面とコンクリート面の差は植物種により値に差が生じる傾向が見られた。この要因の1つとして壁面での放射特性の違いが考えられるため、放射収支および放射特性についての考察を行った。

### 2.1.3 放射環境の特性分析と評価

#### (1) 放射環境の特性分析

一般に地表面における放射収支は、下記の式で示される。

$$Rn = (S \downarrow - S \uparrow) + (L \downarrow - L \uparrow) \quad (2)$$

ここで、 $Rn$ ：正味放射量( $W/m^2$ )、 $S \downarrow$ ：下向き短波放射(日射)量( $W/m^2$ )、 $S \uparrow$ ：上向き短波放射(日射)量( $W/m^2$ )、 $L \downarrow$ ：下向き長波放射量( $W/m^2$ )、 $L \uparrow$ ：上向き長波放射量( $W/m^2$ )

今回の測定においては、壁面を対象としているため、下向きは壁面に入射する向き、上向きは壁面から放射される向きとし、長短波放射計も、壁面に平行に取り付けて測定を行った。8月10日における各試験体別の放射収支測定結果を図2.7に示す。なお、図中の凡例はわかりやすくするため、 $S \downarrow$ は入射日射量、 $S \uparrow$ は反射日射量、 $L \downarrow$ はそれぞれ大気放射量、 $L \uparrow$ は輻射量とした。次に放射特性値として、アルベド(日射反射率)および放射率を算出した。

#### 1) アルベド(日射反射率)

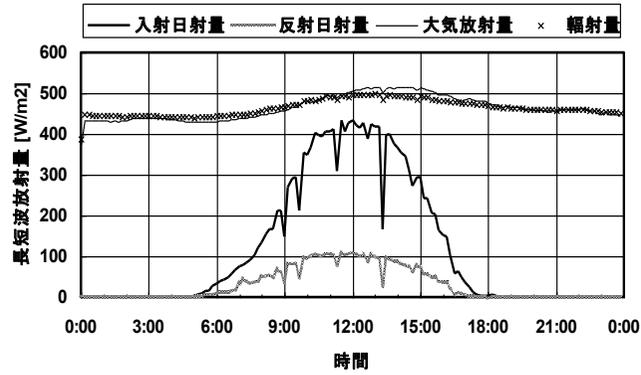
放射収支各項の経時変化から、短波放射(日射量)に着目すると、緑化パネルの反射日射量は最大でも $100W/m^2$ 程度で、コンクリート面の反射日射量は最大約 $300W/m^2$ に達しており、緑化パネルは反射日射を約64%低減している。一方、長波放射量(輻射量)は、日中ではアメリカツルマサキがやや小さく、夜間ではコンクリート面が緑化面より大きくなっていることがわかる。壁面緑化による輻射量の低減効果は、日中では2%程度、夜間でも4~5%程度であった。

アルベド  $albd$  は、次式によって算出される。

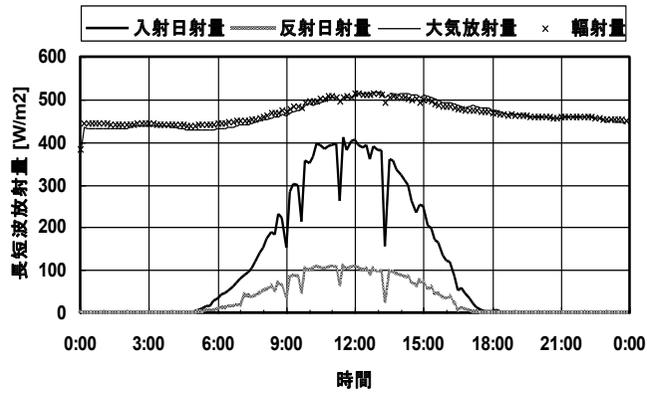
$$albd = \frac{S \uparrow}{S \downarrow} \quad (3)$$

アルベドの経時変化を図2.8に示す。アルベドは、太陽高度の影響を受けるため、日の出・日没前後で大きく、日中で小さくなる傾向がある。16

アメリカツルマサキ



ヘテラヘリックス



コンクリート面

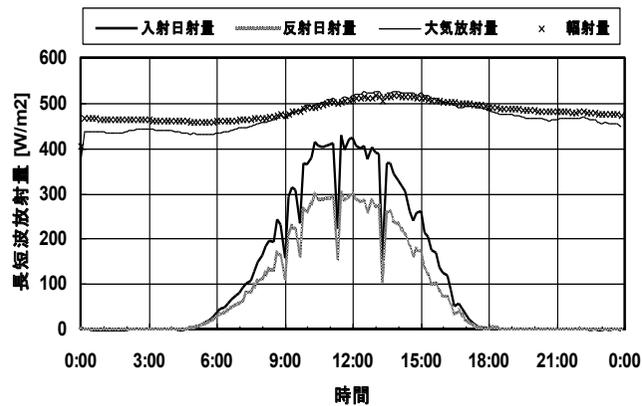


図 2.7 放射収支各項の経時変化(8月10日)

表 2.2 アルベド・放射率の平均値

区分	ヘデラヘリックス	アメリカツルマサキ	コンクリート面
アルベド	0.266	0.245	0.702
放射率	0.975	0.974	0.987

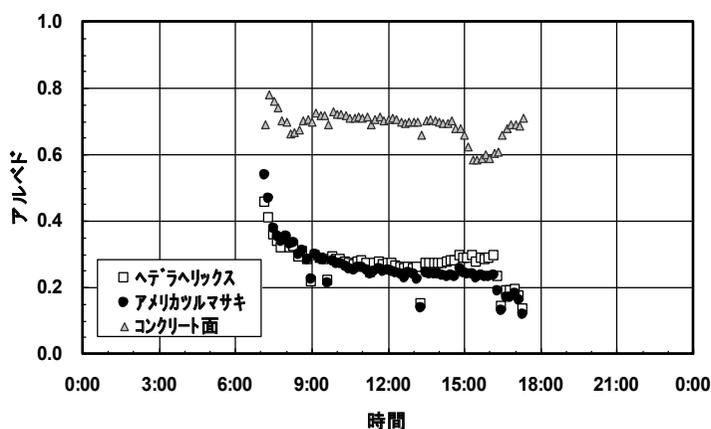


図 2.8 アルベドの経時変化(8月10日)

時に降にアルベドの値が大きく振れているのは、建物の陰になった影響と見られる。表 2.2 より、アルベドはヘデラヘリックスが 0.266、アメリカツルマサキが 0.245、コンクリート面が 0.702 であった。コンクリート面は表面が白色であるため、緑化パネルに比べ 2.8 倍程度と高いアルベドの値となっている。日中の表面温度がコンクリート面で低くなるのは、アルベドが大きく日射を吸収しないためと考えられる。

## 2) 放射率

放射率  $\varepsilon$  は、下記の式より算出した。

$$\varepsilon = \frac{L \uparrow}{\sigma \times (T_s + 273.15)^4} \quad (4)$$

ここで、 $T_s$ : 熱電対で計測した表面温度 (°C)

放射率は、壁面からの長波放射測定値および熱電対による表面温度 5 点

の平均値を用いて算出するが、表面温度測定結果で述べたとおり、日中は日射の影響を受け、測定点による値のばらつきが生じやすいので、夜間の測定値を用いることとした。表 2.2 より、放射率については大きな違いは見られなかった。

## (2) 放射環境の評価

壁面緑化による建物外部の温熱環境改善効果に関して、表面温度や輻射量といった指標では、緑化による効果が明確に見られなかった。そこで、壁面という街区空間での人の生活空間に比較的近い位置での影響を評価する目的で、放射環境に注目して、壁面緑化による放射環境の改善効果を評価するために、MRT(平均放射温度: Mean Radiant Temperature)を算出して、温熱環境の評価を試みた。MRTは、一般にはグローブ温度計を用いて計測することにより算出される。

今回の測定ではグローブ温度計による計測は実施していないが、長短波放射計により短波・長波別の上下(正確には垂直面に設置したため水平方向)4成分の放射量を計測しているため、この値を用いてMRT(平均放射温度)を算出することとした。ただし、グローブ温度計では、入射角による影響を無視することができると考えられるが、今回の測定では放射計を垂直面に設置して放射成分の測定を行っており、その測定値から平均放射温度を算出することでは入射角による影響を無視することはできないが、放射成分を個別に測定していること、壁面という垂直面の違いを評価対象としていること、を考慮し、測定値を用いて算出を行った。

MRT(平均放射温度)は以下の式で算出することとした。ここで、グローブ温度による平均放射温度と同義にするために、短波放射の吸収率、長波放射の放射率はともに1.0とした<sup>12)</sup>。

$$MRT = \sqrt[4]{\frac{S+L}{\sigma}} - 273.15 = \sqrt[4]{\frac{(S\downarrow+S\uparrow)/2+(L\downarrow+L\uparrow)/2}{\sigma}} - 273.15 \quad (5)$$

評価対象とする点は、長短波放射計を設置した壁面から0.5mの点とし、各放射収支項には長短波放射計の測定値を代入して算出した。算出した8月10日の経時変化を図2.9に示す。ここで、MRTの値が高くなる傾向が見られるが、これは、評価対象とした点が壁面より0.5mと近いことや垂直面での測定結果を用いていることなどが理由として推定され、実際の街路において人が壁面より0.5mの位置を歩行することもありうるため、特に形態係数による補正等を行わず、評価を行った。

算出の結果、緑化パネルのMRTがコンクリート壁に比べて常に低く推

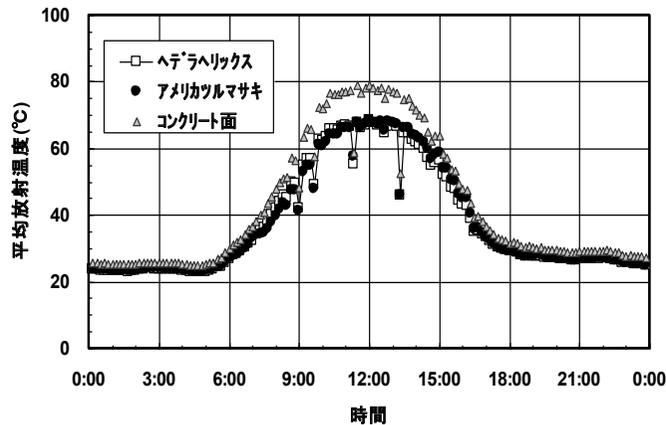


図 2.9 放射量から算出したMRTの経時変化(8月10日)

移している。日の出前および日没後は試験体による差異は小さいが、日中ではコンクリート壁のMRTは緑化パネルより高く推移し、最大ピーク時の12時付近ではコンクリート壁が78.9°Cであるのに対して、緑化パネルは約68°Cで、低減効果は11°Cに達している。このピーク時における壁面緑化のMRT低減効果は、反射日射量がコンクリート面に比べて小さいことの寄与が、約10°C程度に及んでおり、アルベドが小さくなることによる放射環境改善の効果が確認できた。

今回の実験のように、表面温度の差が小さくても、近傍の放射環境に対する影響は無視できず、MRTと86といった放射環境の評価指標を用いることは有効であるといえる。今後は、グローブ温度計による計測を併用することで、短波・長波放射量からの放射温度算出の検証を行う必要があると考えられる。

以上から、平均放射温度(MRT)といった指標を用いることで、表面温度だけでは評価できない壁面緑化の放射環境・温熱環境の改善効果を示すことができた。

## まとめ

壁面緑化による建物外部空間の温熱環境緩和効果を定量的に評価することを目的として、壁面緑化パネルを用いた実験による計測と評価を試みた。

得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 熱電対計測との比較から、長短波放射計による放射量より求めた表面温度の実効性を確認した。コンクリート壁面に対する緑化パネルの表面温度は、夜間で3℃程度低く、日中は、植物による相違が認められた。
- 2) コンクリート壁に対する緑化パネルのアルベド低減率は、日中平均で約62～65%であった。また、放射率には大きな違いは見られなかった。
- 3) 壁面外部の放射環境を評価する指標として、MRTを用いて算出して、比較したところ、日中はコンクリート面が緑化パネルを上回り、コンクリート面に対する緑化パネルの低減率は最大ピーク時の12:00の時点でMRTで約11℃であった。夜間は両者の間にほとんど差は見られなかった。

今回の実験の結果から、コンクリート壁面(白色塗装)と緑化パネルによる建物外部の温熱環境改善効果を定量的に把握するために、日射・輻射の放射環境を総合的に把握し、評価することが必要と考えられ、そのための評価指標としてMRTの有効性が示唆された。今後、壁面緑化のタイプの相違等による環境改善効果の定量化を図るために更なる基礎データの蓄積が必要と考えられる。

## 2.2 コンクリート壁面(打放し)との比較

2.1では植物の種類異なる緑化パネルを制作・設置して、コンクリート壁面(白色塗装)との比較から、表面温度とともに、短波日射量、長波放射量を計測値して放射収支について検討し、MRT(平均放射温度)を算出して放射環境についての定量的な評価を行った。

コンクリート表面が白色に塗装されていたため、入射日射を反射し、表面温度の上昇を抑制したと考えられる。本節では、コンクリート表面が打ち放しの状態にあるコンクリート壁面の場合について、上述の緑化パネル壁面と同じ試験体を用いて、表面温度、放射収支、MRTについて比較・検討を行い、コンクリートの表面の塗装色の違いにより、放射環境がどのように変化するかについて検証を行った。コンクリート壁面は、隣接する実験棟1階部分の南向きコンクリート外壁面をそのまま使用した。

## 2.2.1 表面温度

2.1 で行った実験・計測の結果より、熱電対 5 点の計測値の平均値では、試験体の表面温度と乖離が大きいことから、計測した輻射量( $L\uparrow$ )を放射率で補正して、放射温度( $T_{sr}$ )を下記の式より算出した<sup>13)</sup>。

$$T_{sr} = \sqrt[4]{\frac{L\uparrow}{\varepsilon \cdot \sigma}} - 273.15 \quad (1)$$

ここで、 $L\uparrow$ : 輻射量(W/m<sup>2</sup>)、 $\varepsilon$ : 放射率、 $\sigma$ : ステファン-ボルツマン定数

放射率( $\varepsilon$ )は、下記の式より算出した。

$$\varepsilon = \frac{L\uparrow}{\sigma \times (T_s + 273.15)^4} \quad (2)$$

ここで、 $T_s$ : 熱電対で計測した表面温度(°C)

放射率は、輻射量測定値(L)および熱電対による表面温度 5 点の平均値( $T_s$ )より算出するが、日中は日射の影響を受け、測定点による値のばらつきが生じやすいので、夜間の測定値を用いた。算出した放射率を表-2 に示す。これより、放射率については、コンクリート壁(打放し)の方が、緑化パネルよりもやや高い数値を示したが、試験体別に顕著な差異は見られなかった。2005 年 8 月 30 日における表面温度の経時変化を図 2.10 に、計測結果を表 2.3 に示す。日の出後に日射量の増大するにつれて各試験体の表面温度は上昇していき、コンクリート壁(打放し)と緑化パネルの表面温度の差が縮小していく。最大ピーク時の 11 時には、コンクリート壁(打放し)が 38.8°C を記録したのに対して、緑化パネルではヘデラヘリックスが 35.9°C、アメリカツルマサキが 33.8°C であり、コンクリート壁(打放し)よりも緑化パネルの方が 2~5°C 低減していた。

植物種では、ヘデラヘリックスの方がアメリカツルマサキよりも最大ピーク時に約 2°C 高くなっており、植物種による違いが見られた。これは、後者の方が前者に比べて葉が狭小かつ肉厚であることから、表面温度が前者ほど上昇しなかったためと考えられる。ピーク時を過ぎると再び、コンクリート壁(打放し)と緑化パネルの表面温度は緩やかに下降しつつ、その差を拡大させていく。夜間にはコンクリート壁(打放し)の表面温度は、5~6°C 緑化パネルより高く推移した。緑化パネルでは 2 種類ともほぼ同じ温度で、植物種類による差は見られなかった。

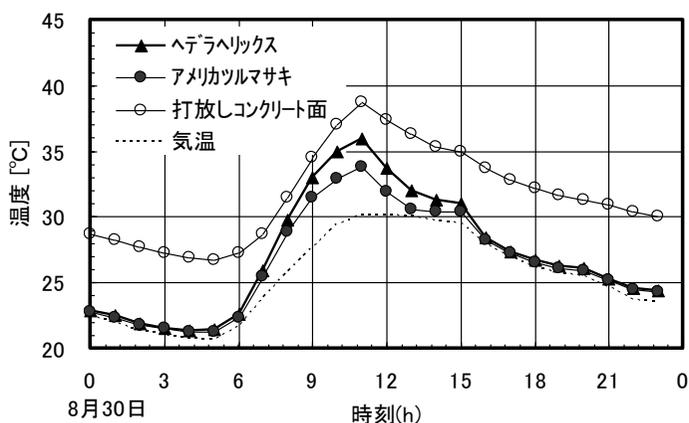


図 2.10 表面温度の経時変化 (8月30日)

表 2.3 表面温度の計測結果 (8月30日)

区分	ヘデラヘリックス	アメリカツルマサキ	コンクリート壁面
日最大	35.9	33.8	38.8°C
日平均	27.1	26.6	31.10°C
日中平均	33.1	31.6	36.3°C
夜間平均	23.7	23.6	29.3°C

以上により、壁面緑化パネルの表面温度は、コンクリート壁(打放し)に比べ、日中ピーク時には 2~5℃、夜間は 5~6℃低く推移した。また、日中は最大ピーク時では、ヘデラヘリックスの方がアメリカツルマサキよりも 2℃高く、植物種による違いが見られた。緑化パネルでは、コンクリート壁(打放し)に比べて夜間に表面温度差が 5~6℃低く推移していることは、ヒートアイランド現象によってもたらされる熱帯夜の緩和に壁面緑化が有効に作用することを示唆している。

### 2.2.2 放射環境の特性分析

一般に地表面における放射収支は、下記の(3)式で示される。

$$Rn = (S\downarrow - S\uparrow) + (L\downarrow - L\uparrow) \quad (3)$$

ここで、 $Rn$  : 正味放射量 ( $W/m^2$ )、 $S\downarrow$  : 入射日射量 ( $W/m^2$ )、 $S\uparrow$  : 反射日射量 ( $W/m^2$ )、 $L\downarrow$  : 大気放射量 ( $W/m^2$ )、 $L\uparrow$  : 輻射量 ( $W/m^2$ )

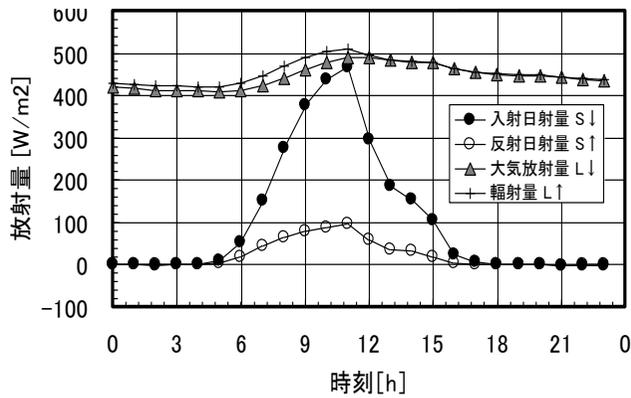
今回の測定においては、壁面を対象としているため、計測に使用した長短波放射計(英弘精機社製：MR-50)も、壁面に平行に取り付けて測定を行った。8月30日における各試験体別の放射収支測定結果を図2.11に示す。放射収支各項の経時変化から、短波日射に着目すると、入射日射量は最大ピークとなる11時には、緑化パネルでは467W/m<sup>2</sup>であるのに対して、コンクリート壁面では381W/m<sup>2</sup>と少なくなっているが、これは植物試験体の設置した地表面がコンクリート打ち放しであったのに対して、コンクリート壁の外構は草地であったため、地表面からの反射日射量の違いにより、入射日射量に差が生じたものと考えられる。反射日射量についてみると、緑化パネルでは最大でも96W/m<sup>2</sup>程度で、コンクリート壁面の反射日射量は最大約113W/m<sup>2</sup>を示し、コンクリート壁の反射日射量の方が大きい傾向を示している。このことを、反射日射量の入射日射量に占める割合である日射反射率(日射反射率)でより詳細に比較する。日射反射率(アルベド：*albd*)は、(4)式によって算出した。

$$albd = \frac{S_{\uparrow}}{S_{\downarrow}} \quad (4)$$

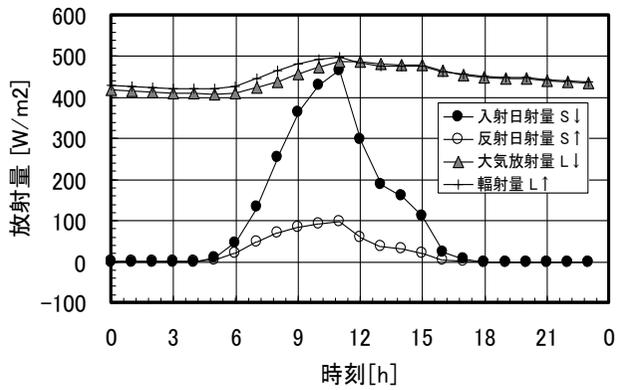
アルベドの経時変化を図2.12に示す。表2.4より、アルベドは日中平均で、ヘデラヘリックスが0.23、アメリカツルマサキが0.22、コンクリート壁面が0.35であった。これより、コンクリート壁面と比較して緑化パネル面ではアルベドが約34%低減している。

2.1におけるコンクリート(白色塗装)での実験計測の結果では、アルベドが0.70を示しており、コンクリート壁面では1/2となっていた。白色塗装されたコンクリート壁に比べて、アルベドが低い分、吸収された日射量は壁体そのものの温度を上昇させ、壁面の表面温度を上昇させることとなる。これに対して、緑化パネルの場合では、吸収された日射量は光合成等の植物の生育に必要な活動に消費される他、気孔を通じた蒸散活動により潜熱が消費され、表面温度がコンクリート壁面と比べると低く維持されているものと考えられる。次に、長波(赤外)放射についてみると、大気放射量(反射)が大気放射量(入射)をやや下回っていた。これに対して、コンクリート壁(打放し)では、輻射量(反射)が大気放射量(入射)を終日上回っていた。

ヘデラヘリックス



アメリカツルマサキ



コンクリート打放し

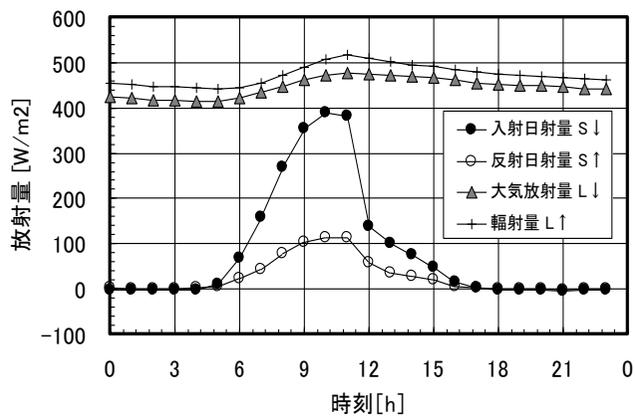


図 2.11 放射収支各項目の経時変化

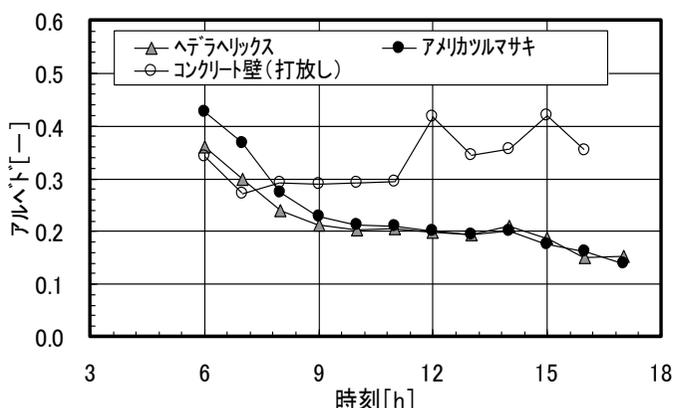


図 2.12 アルベドの経時変化

表 2.4 アルベド・放射率の計測結果

区分	ヘテラヘリクス	アメリカツルマサキ	コンクリート壁面
アルベド	0.228	0.222	0.345
放射率	0.975	0.974	0.987

### 2.2.3 MRT (平均放射温度)による放射環境の評価

MRT (平均放射温度: Mean Radiant Temperature)は、暑さ感を示す体感温熱指標の一つで、周囲の全方向から受ける熱放射を平均化して温度表示したものである。MRTは、放射熱量が気温よりも高いと暑さを感じ、気温よりも低いと涼しさを感じると言われている<sup>14)</sup>。

今回の測定では、長短波放射計により短波・長波別の上下(正確には垂直面に設置したため水平方向)4成分の放射量を計測しているため、この値を用いてMRT(平均放射温度)を算出することとした。今回の測定では放射計を垂直面に設置して放射成分の測定を行っており、その測定値から平均放射温度を算出する場合に太陽高度の違いによる影響を無視することはできない。

本実験計測においては、放射成分を個別に測定していること、壁面という垂直面での違いを評価対象としていることを考慮し、測定値を用いて算出し、直達日射量について特に高度角による補正は行わなかった。具体的には、MRT(平均放射温度)は以下の式で算出することとした。ここでグ

ローブ温度による平均放射温度と同義とするため、短波放射の吸収率、長波放射の放射率はともに 1.0 とした。

$$MRT = \sqrt[4]{\frac{S+L}{\sigma}} - 273.15 = \sqrt[4]{\frac{(S\downarrow+S\uparrow)/2+(L\downarrow+L\uparrow)/2}{\sigma}} - 273.15 \quad (5)$$

緑化パネルでは、各放射収支項には長短波放射計の測定値を代入して算出した。今回の計測では、コンクリート壁(打放し)は、隣接の施設の躯体外壁を対象としたため、MRT 値の算出において入射日射量( $S\downarrow$ )と大気放射量( $L\downarrow$ )は、緑化パネルと同一と仮定して算出した。また、反射日射量( $Sc\uparrow$ )と輻射量( $Lc\uparrow$ )については、表 2.4 で求めた日射反射率と放射率を用いて以下の式で補正した。

$$Sc\uparrow = \lambda_c \cdot Sp\downarrow \quad (6)$$

ここで、 $\lambda_c$ : コンクリートの日射反射率、 $Sc\uparrow$ : コンクリートの反射日射量( $W/m^2$ )、

$Sp\downarrow$ : 緑化パネルの入射日射量( $W/m^2$ )

$$Lc\uparrow = \varepsilon\sigma \cdot (Tsc+273.15)^4 \quad (7)$$

ここで、 $\varepsilon$ : 放射率、 $\sigma$ : ステファン・ボルツマン定数、 $Tsc$ : コンクリート表面温度( $^{\circ}C$ )

緑化パネル面について、計測前に魚眼レンズで壁面を捕捉し、画像の約 80%を緑化パネル面が占有していたことから、形態係数による補正は行わなかった。また、コンクリートの壁面温度は、入射日射量が緑化パネルよりも下回っていたことを考慮すると、同一条件ではさらに表面温度の上昇が考えられ、より正確なデータの捕捉については今後の課題である。

8月30日について、MRTの算出結果を経時変化で表すと、図 2.15 に示すとおりである。これより、日の出後の7時から10時にかけては、緑化パネルとコンクリート壁(打放し)との間ではほとんど温度差は見られないが、入射日射量の増大するにつれて、両者の間の温度差が広がり、最大ピーク時の12時の時点ではコンクリート壁(打放し)が72.4 $^{\circ}C$ を示したのに対して、緑化パネルではヘデラヘリックスが69.3 $^{\circ}C$ 、アメリカツルマサキが68.9 $^{\circ}C$ であり、コンクリート壁(打放し)に比べ緑化パネルの方が3.1~3.5 $^{\circ}C$ 低い値を示した。16時以降、夜間にかけては、両者の温度差は約2 $^{\circ}C$ 程度となり、緑化パネルの方が低い数値のまま推移した。

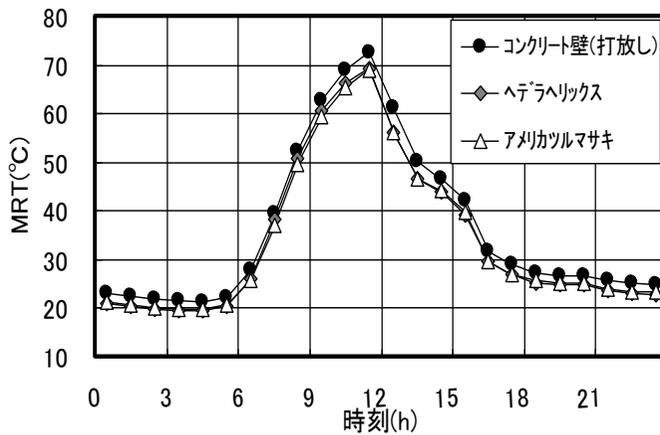


図 2.15 MRT の経時変化

ピーク時に、 $0.4^{\circ}\text{C}$ アメリカツルマサキの方が、ヘデラヘリックスよりも低い値を示した他は、植物種の違いによるMRT値の違いは、ほとんど見られなかった。緑化パネルによるMRT値の低減効果は、アルベド値の比較より明らかなように、反射日射量がコンクリート壁(打放し)の方が緑化パネルよりも大きいこと、夜間も含めて壁面からの放射量についてもコンクリート壁(打放し)が緑化パネルを終日上回っていたことが要因と考えられる。

これより、壁面での短波・長波による放射収支を検討し、緑化パネルでのアルベドが植物の葉面で小さく抑えられることにより壁面緑化による屋外側での放射環境改善効果が定量的に確認できた。今回の実験計測結果から、壁面緑化を行うことによる壁面近傍での放射環境における影響は無視できず、MRTといった放射環境に対する温熱指標を用いてその効果を定量的に評価することができた。

## まとめ

壁面緑化による建物外部空間の温熱環境緩和効果を定量的な評価技術の開発普及に資することを目的として、壁面緑化パネルを用いて実験・計測を試みた。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) コンクリート壁面に対する緑化パネルの表面温度は、最大ピーク時には $2\sim 5^{\circ}\text{C}$ 低く、夜間では $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ 程度低く推移した。

- (2) コンクリート壁面に対する緑化パネルのアルベド低減率は、日中平均で約 34%であった。放射率では、試験体の違いによる顕著な差異は見られなかった。
- (3) 壁面外部の放射環境を評価する指標として、計測した放射量からMR Tを用いて算出して、比較したところ、コンクリート壁面に対して、緑化パネルでは最大ピーク時に約 3℃、夜間では約 2℃低減していた。

今回の実験の結果から、壁面緑化による建物外部の温熱環境改善効果を定量的に評価する上で、表面温度とともに長波・短波の放射収支を総合的に把握する必要性が裏づけられ、その評価指標としてMR Tの有効性が確認できた。今後、壁面緑化のタイプや工法、植物種の相違等に応じて、本報告で試みた実験・計測方法に基づくデータの蓄積と定量的評価を蓄積させることにより、さらに技術の開発と向上を図る必要があると考えられる。

## 2.3 W B G T, S E T \*による壁面緑化の温熱環境改善効果の評価

2.1において、パネル型の緑化試験体とコンクリート壁面(白色塗装)を対象として長波放射量の計測値から表面温度を算出して比較を行った結果、夜間で2~5℃の温度低減が見られた<sup>13)</sup>が、日中の最大ピーク時において両者の間に顕著な差異は見られなかった。これに対して、計測した長・短波放射量より導出したMR T (Mean Radiant Temperature : 平均放射温度)値で比較すると日中の最大ピーク時で約 11℃の差異が認められ、温熱環境評価指標としての有効性が示唆された。導出した数値の客観性と信頼性を高めるためには、グローブ温度計との比較検証が課題として残された。一方、温熱環境改善効果の定量化においては、人間の生活環境において具体的に体感できる指標で評価できることが、数値の意味を認識しやすく、緑化の担い手となる住民や企業等の建築主の理解を得られやすいと考えられる。

本節では、前章と同様長波・短波の放射量から算出したMR T値とグローブ温度から算出したMR T値とを比較し、算出方法の妥当性を検証するとともに、新たにW B G T (湿球黒球温度:Wet Bulb Globe Temperature)値とS E T \* (標準有効温度:Standard Effective Temperature)値による評価を行い、今後壁面緑化の開発普及を図る上で主要な技術課題と考えられる

表 2.5 計測機器一覧

計測項目	計測機器名	メーカー名(型番)	数量
気温 湿度	温湿度計	Vaisala 社製(HMP45D)	1基
風向・風速	風向風速計	小笠原計器製作所製 (CW105)	1基
	超音波風向風速計	英弘精機社製 (MR-130)	2基
日射量	日射計	ブリード社製 (PCR-02)	1基
長波放射量 (壁面からの輻射量)	長短波放射計	英弘精機社製 (MR-50)	3基
入射日射量 (壁面からの反射 日射量)			
黒球温度	グローブ温度計	ブリード社製(BST131)	3基
WBGT	WBGT計	京都電子工業社製 (WBGT-101)	3基

壁面緑化による温熱環境改善効果について、定量的評価を行うために必要な基礎資料を得ることを目的とする。

### 2.3.1 研究の方法

建築研究所の建築環境実験棟 1 階屋上部の南向き建築壁面を使用して、2004 年の夏季の実験装置と同一仕様の緑化パネル試験体 2 基を設置した。計測項目と、使用した計測機は、表 2.5 に示すとおりである。

- 1) 計測結果に基づき、緑化パネルの有無と使用植物の違いによるコンクリート壁面の表面温度の比較・検討を行った。
- 2) 長短波放射計(英弘精機社製:MR-50)により計測した短波・長波放射量から算出する方法と、グローブ温度計(ブリード社製 :BST131)で計測したグローブ温度から求める方法の二通りの方法により、MR T 値を算出し、比較・考察した。
- 3) さらに、WBGT(湿球黒球温度)計(京都電子工業社製:WBGT-101)により計測したWBGT値とSET\*値により、緑化パネルの温熱環境改善効果について定量的な評価を試みた。

## 2.3.2 結果

### (1) 気象概況

計測期間のうち2005年8月16日から8月22日までの7日間の気象条件として、図2.16は気温、湿度、図2.17は日射量、風速の推移をまとめたものである。計測期間中8月16日のみ、前夜から1:00まで降雨があったものの、8月19日から22日にかけての4日間は最高気温が30℃を超える真夏日となった。この期間の最高気温は、8月20日の33.6℃、最低気温は8月17日の21.6℃、期間中の平均気温は27.3℃であった。また、風速は0～1.11m/secであり、風向は南西の風が主であった。8月22日は終日1.0m/secの南西の風を記録した。湿度は、56～97%であり、降雨のあった8月16日を除いた6日間の平均湿度は76.6%であった。以下に、計測期間のうち快晴に近く、終日天候の安定していた8月21日を取り上げて、試験体のコンクリート壁面の表面温度の計測結果、2通りの方法で算出したMRT値、WBGT値の計測結果、SET\*の算出結果を示す。8月21日の日の出は5:02、日の入りは18:23であった。

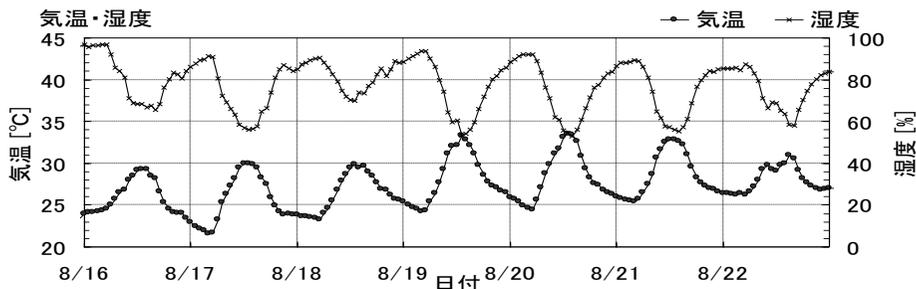


図 2.16 測定期間中の気象概況（気温・湿度）

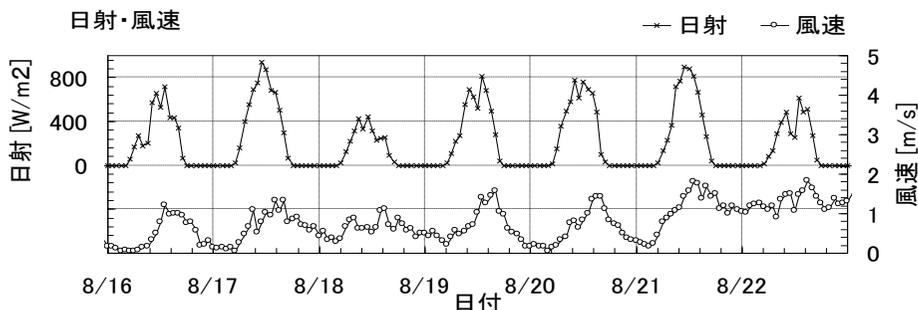


図 2.17 測定期間中の気象概況（日射量・風速）

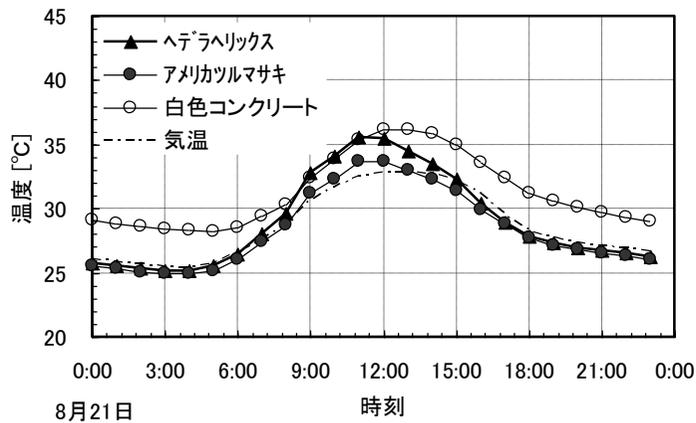


図 2.18 表面温度の経時変化

## (2) 表面温度

図 2.18 は、8 月 21 日におけるコンクリート壁面と緑化パネルの表面温度の経時変化を示したものである。各壁面の表面温度は、計測した長波放射量を放射率により補正して算出した。

これより、9 時から 12 時までにはヘデラヘリックスの表面温度がコンクリート壁面の表面温度とほぼ同じ温度となったが、それ以外の時間帯では緑化パネルがコンクリートよりも 2~4°C 低減し、2.1 で得た計測結果とほぼ同じ傾向がみられた。

緑化パネル材の日射反射率を計測した結果では植物パネルが 0.25 から 0.27 の値を示したのに対して、コンクリート壁では 0.70 と高い数値を記録した。これより、緑化パネルの表面温度がピーク時においてコンクリート壁面と比較して温度差が小さくなるのは、葉面温度そのものの上昇とともにコンクリートの外壁表面が白色に塗装(合成樹脂系塗料)されているために日射を反射し、コンクリート壁面の表面温度の上昇が抑制されたことによると考えられる。緑化パネル試験体では、ピーク時にアメリカツルマサキの方がヘデラヘリックスよりも 1.11°C 低くなっており、使用植物の違いによる表面温度の違いが見られた。

## (3) 温熱環境改善効果の評価

### 1) MRT(平均放射温度)による評価

壁面という街区空間での人の生活空間に比較的近い位置での影響を評価する目的で、放射環境に注目して、MRT 値による温熱環境評価を行った。

MRT ( Mean Radiant Temperature)は、暑さ感を示す体感指標の一つで、周囲の全方向から受ける熱放射を平均化して温度表示したものである。具体的には、3.1.3で行った長短波放射計により計測した長・短波放射量の入射量と反射量の計測値から算出する方法とグローブ温度計を用いたグローブ温度の計測値から算出する方法の2通りの方法で、比較・検討した。

(i)長短波放射計による算出

3.1.3と同じ方法でMRTを算出するもので、長短波放射計(英弘精機社製：MR-50)により長波・短波別の上下(正確には垂直面に設置したため水平方向)4成分の放射量計測値から(1)式により算出した。計測地点は、地上1.11m、対象壁面から0.5mである。短波放射の吸収率、長波放射の放射率は、既往研究<sup>12)</sup>を参考として、ともに1.0と仮定した。

$$MRT = \sqrt[4]{\frac{S+L}{\sigma}} - 273.15 = \sqrt[4]{\frac{(S\downarrow+S\uparrow)/2+(L\downarrow+L\uparrow)/2}{\sigma}} - 273.15 \quad (1)$$

ここで、S↓：下向き日射量，S↑：上向き日射量，L↓：下向き放射量，L↑：上向き放射量，σ：ステファンボルツマン定数

魚眼レンズを用いて、計測地点から緑化パネルを捕捉したところ、レンズ画面の9割以上を試験体が占有しており、かつ周囲はコンクリートの試験体と同じコンクリート壁であったため、形態係数による補正は行わなかった。8月21日の経時変化を図2.19に示す。これより、緑化パネル試験体がコンクリート壁に比べて常に低く推移し、温度の上昇につれてその差は拡大している。最大ピークとなる12:00の時点では、コンクリート壁が81.4℃であるのに対して、緑化パネルはヘデラヘリックスが70.1℃、アメリカツルマサキが69.9℃で、植物の違いによる差異はほとんど見られず、コンクリート壁に比べ緑化パネルでは約11℃低い値を示し、昨年度と同様の結果を得た。

(ii)グローブ温度計による算出

グローブ温度計(ブリード社製：BST131)の黒球グローブ温度( $T_g$ )、乾球温度( $T_d$ )と長音波風向風速計(英弘精機：MA-130)の計測値( $V$ )を用いて、(2)式によりMRTを算出した。

$$MRT = T_g + 2.37\sqrt{V} \times (T_g - T_d) \quad (2)$$

ここで、 $T_g$ ：黒球グローブ温度 [℃]， $T_d$ ：乾球温度 [℃]， $V$ ：風速 [m/s]

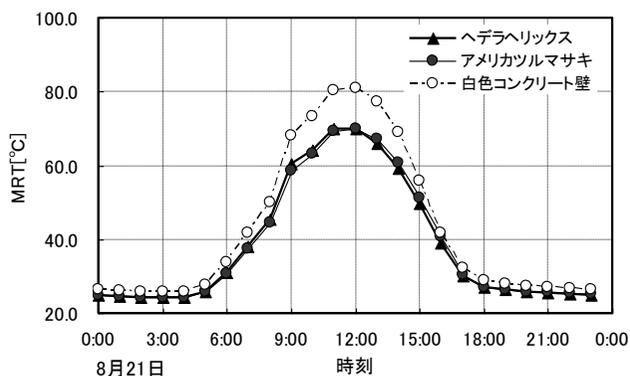


図 2.19 放射量計測値から求めた MRT の経時変化

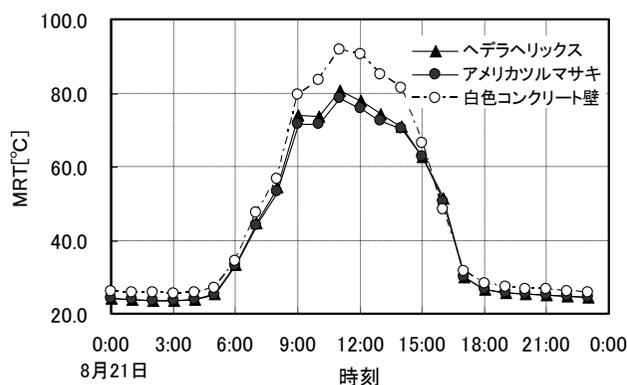


図 2.20 グローブ温度計から求めた MRT の経時変化

8月21日について、算出結果を経時変化で表すと、図2.20に示すとおりである。これより、日中は緑化パネルの方がコンクリート壁よりも絶えず低温で推移し、温度が上昇するにつれ、両者の温度差が拡大している。最大ピークの11:00の時点では、コンクリート壁が91.11°Cであるのに対して緑化パネルのヘデラヘリックスが80.9°C、アメリカツルマサキが約78.5°Cであり、コンクリート壁に比べ約11~13°C緑化パネルの方が低い値を示し試験体による差はほとんど見られない。図2.21は、グローブ温度計と気温・風速の経時変化を示したものである。これより、MRTが最大ピーク時の11:00の時点で91.11°Cという高い数値を示したのは、グローブ温度計が、

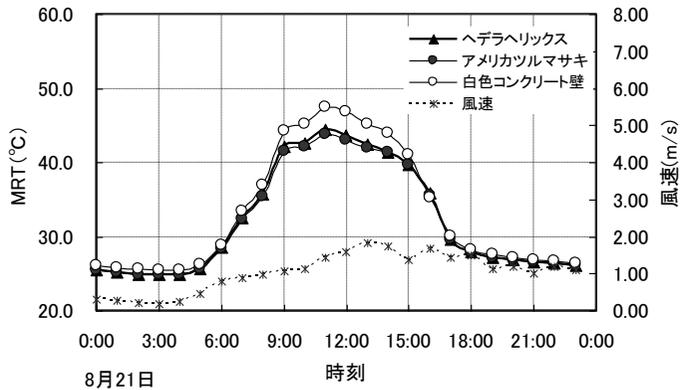


図 2.21 グローブ温度計の経時変化

47.6°Cと高い数値を示し、気温との差も 15.1°Cに達したことによるものである。

(iii) MRT 値の補正

グローブ温度計より (2) 式で求めた数値と比較すると 1.4:00 の時点で約 10°C、長短波放射計により (1) 式で求めた数値の方が低い値を示した。これは、主に長短波放射計で直達日射を計測した際に太陽高度による影響を考慮していないことによると考えられる。そこで、入射日射量について太陽高度による高度角を考慮し、以下の方法で補正した。実験場所は、北緯 36 度 7 分 46 秒、東経 140 度 4 分 23 秒、標高 29.8m の地点である。試験体近傍で日射計(プリード社製 PCR-02)で測定した日射量をもとに、Udagawa モデル<sup>15)</sup>を用いて (3) 式により、直達日射量 ( $I_b$ ) と散乱日射量 ( $I_d$ ) の分離を行った。

$$I G = I b \cdot \sin ( h ) + I d \quad (3)$$

ここで、 $I G$ : 日射量 ( $W/m^2$ )、 $I b$ : 直達日射量 ( $W/m^2$ )、 $I d$ : 散乱日射量 ( $W/m^2$ )

壁面と平行に設置した長短波放射計では、真南に面した垂直の平面に入射する太陽光の強度を測定するため、入射角の影響で直達日射成分が弱く観測される。図 2.22 に示したように、直達日射量の水平成分は、方位角  $A$  と高度角  $h$  を使って、(4) 式により求められる。

$$S b \downarrow = I b \cos h \cdot \cos ( A - 180^\circ ) \quad (4)$$

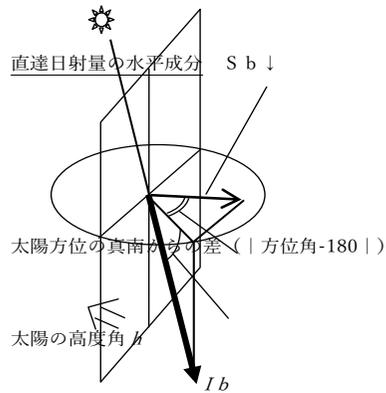


図 2.22 直達日射量の水平成分

ここで、 $S b \downarrow$  : 長短波放射計部が測定する日射量 ( $W/m^2$ )、 $I b$  : 直達日射量 ( $W/m^2$ )、 $h$  : 高度角、 $A$  : 方位角

一方、グローブ球では球面で直達日射を受けるので、日射に対して垂直平面で受ける場合に比して受光量の効率を  $2/3$  と仮定すると、グローブ温度計の受ける直達日射量 ( $I b'$ ) は (5) 式のとおり。

$$I b' = 2/3 I b \quad (5)$$

(4), (5) 式の結果から、補正後の入射日射量 ( $S \downarrow'$ ) は入射日射量 ( $S \downarrow$ ) に対して、(6) 式の補正を行うことで得られる。

$$S \downarrow' = S \downarrow - S b \downarrow + I b' \quad (6)$$

(6) 式により補正した  $S \downarrow'$  を (1) 式に代入して得た補正後の MRT 値と (2) 式より求めた MRT の日中の経時変化を示すと図 2.23 のようになり両者の変化の様子はほぼ同様の傾向を示しており、ピーク時での差も約  $2^\circ C$  に縮小した。この結果、グローブ温度計から求めた MRT 値との差は入射日射量について太陽高度を考慮した高度角と方位角により補正することでグローブ温度の計測値より (2) 式を用いて算出した MRT 値にほぼ近似させることができ、(1) 式により長・短波の放射量計測値から算出する MRT 値の有効性が示唆された。

2) WBG T (湿球黒球温度) による評価

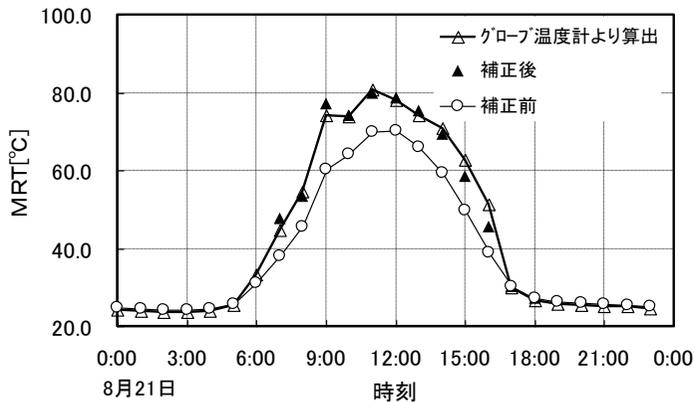


図 2.23 修正後のMRTの経時変化 (ヘデラヘリックス)

次に、建物外部空間での放射環境も考慮して温熱環境を評価する指標として、WBGT値の算出を試みた。WBGT(湿球黒球温度:Wet Bulb Globe Temperature)は、外部空間での労働環境やスポーツ環境として適正な空間であるか否かを示す指標として用いられ、人体の熱収支に影響の大きい湿度、輻射熱、気温の三つを取り入れた温度であり、(7)式で算出される。

$$WBGT = 0.7 \times Tw + 0.2 \times Tg + 0.1 \times Td \quad (7)$$

ここで、 $Tw$ : 湿球温度、 $Tg$ : グローブ温度、 $Td$ : 乾球・湿球温度

1994年に日本体育協会から、WBGTを基準とした「熱中症予防のための運動指針」<sup>16)</sup>が提示されているが、この指針によるとWBGTが28°C以上になると熱中症の危険が高く、「激しい運動は中止」とされ、31°C以上になると「運動は原則として中止」とされている。本研究では、WBGT計(京都電子工業社製:WBGT-101)によりWBGT値の計測を行った。2005年8月21日の日中のWBGTの経時変化を図2.24に示す。この結果、気温の上昇とともにWBGTの値は上昇し、変化の様子もMRTと同様、コンクリート壁が常に緑化パネルより高い値で推移している。最大ピーク時の11.40ではコンクリート壁が33.8°Cであるのに対して、緑化パネルはヘデラヘリックスが32.3°C、アメリカツルマサキが31.10°Cで、コンクリート壁に比べ前者が1.5°C、後者が2.1°C低くなっている。ピーク時においてアメリカツルマサキよりもヘデラヘリックスの方が0.6°C低い値を示したが、

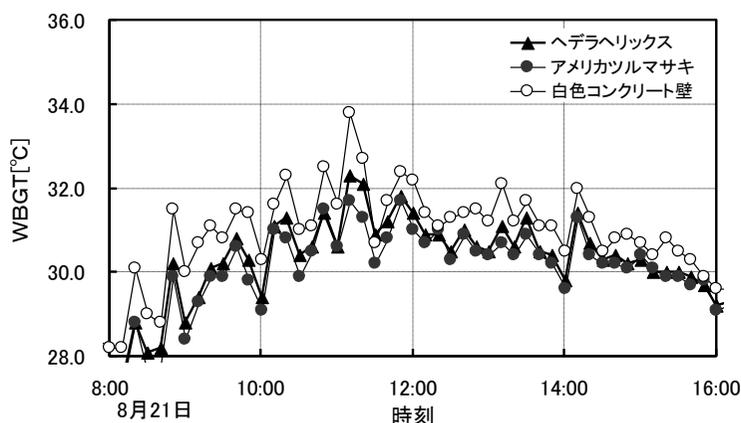


図 2.24 WBGTの経時変化

これは植物の種類の違いによる蒸散量の差異によるものと考えられる。

### 3) SET\* (標準有効温度)による評価

次に、緑化パネルの温熱環境改善効果について、SET\*値による評価を試みた。SET\* (標準新有効温度 : Standard New Effective Temperature)は、人間が着衣の状態で体感できる温度を表す温熱指標として、体感レベルでの温度を数値で表示したものであり、以下の式で与えられる。

$$C + R + Esk = Fcls \cdot fcls \cdot hs \cdot (tsk - SET^*) + w \cdot LR \cdot Fpcl \cdot hcs \cdot (Psk, s - 0.5 \cdot PSET^*, s) \quad (8)$$

ここで、 $C$ :皮膚からの対流熱伝達、 $R$ :皮膚からの伝導熱損失、 $Esk$ :皮膚からの蒸発熱損失、 $Fcl$ :衣服による被覆率、 $fcls$ :衣服の熱伝達抵抗、 $hs$ :総括熱伝達率、 $tsk$ :平均皮膚温度、 $SET^*$ :標準有効温度、 $w$ :皮膚濡れ面積率、 $LR$ :ルイス数、 $Fpcl$ :皮膚の露出率、 $hcs$ :対流熱伝達率、 $Psk, s$ :皮膚温度に対する飽和蒸気圧、 $PSET^*, s$ :温度 $SET^*$ での飽和蒸気圧

具体的には、夏の軽装を想定し、放射率 1.0、着衣量 0.7clo、代謝量 2.0Met と仮定して、Gagge ら(1986)の方法<sup>17)</sup>を用いて求めた。算出結果を経時変化で示すと図 2.25 に示すとおりである。

これより、SET\*値の変化の様子は、緑化パネルの方が終日コンクリ

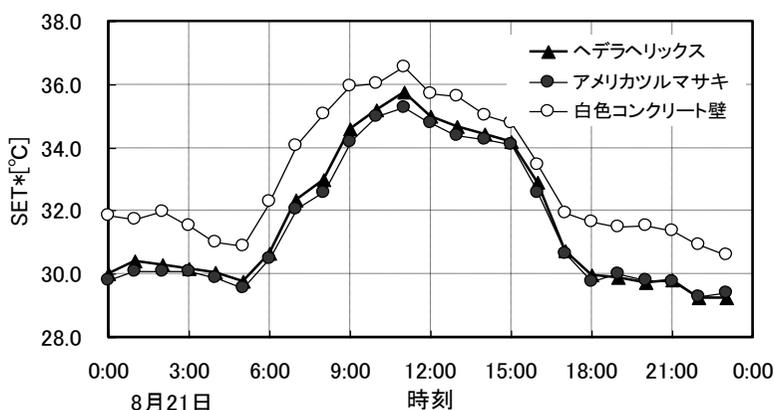


図 2.25 SET\*の経時変化

表 2.6 表面温度・MRT値・表面温度・WBGT・SET\*値の比較

区分	コンクリート壁 (白色)	ヘデラヘリックス	アメリカツルマサキ
MRT 最高値	91.11	80.9	78.5
[°C] 平均値	46.4	42.8	42.1
WBGT 最高値	33.8	32.3	31.10
[°C] 平均値	28.3	27.5	27.4
SET* 最高値	36.6	35.8	35.3
[°C] 平均値	33.1	31.10	31.6

ート壁よりも低い数値で推移し、日中は温度の上昇に伴い上昇している。最大ピーク時の 11:00 の時点でコンクリート壁が 36.6°C、ヘデラヘリックスが 35.8°C、アメリカツルマサキが 35.3°Cであり、コンクリート壁に対して緑化パネルでは SET\*値が約 1°C低下していた。植物の違いによる差異は認められなかった。一方、MRTでは夜間の緑化パネルとコンクリートとの温度差はほとんど見られなかったのに対して、SET\*値では夜間においても、緑化パネルの方がコンクリート壁も約 2°Cほど低い状態を維持していた。SET\*は、もともとは屋内での体感指標として用いられており夏季の屋外での温熱環境を定量的に評価するには限界があり、新たな指標

の開発については、今後の研究課題と言える。表 2.6 に今回の実験計測で得られた各温熱指標の最高値と平均値を示す。

### 2.3.3 考察

ヒートアイランド現象の緩和を図るためには、地表面被覆改善策として講じた緑化対策による定量的な熱環境改善効果を明らかにすることが必要と考えられる。MR T (平均放射温度)に加え、WBGT (湿球黒球温度)、SET\* (有効標準温度)の各温熱指標を用いた、緑化パネルとコンクリート壁(白色塗装)についての検討結果を下に、以下に考察する。

#### (1) MR Tについて

MR Tについては、2.1の実験において壁体への長波放射量と輻射量、短波日射量と反射日射量の計測値より算出したが、数値の客観性を確認するために、本節ではグローブ温度計の黒球温度の計測値から算出し、両者の算出結果の比較検討を行った。

いずれの場合も、コンクリート壁に比べると緑化パネルの方が低い温度で推移し、温度の上昇につれてその差は拡大し、ピーク時で約 11℃の低減効果が見られた。この結果は、昨年度と概ね同じ結果を得た。このような温度差の生じる理由として、コンクリート壁が白色塗装されていることにより緑化パネルと比較すると、アルベド(日射反射率)の差が大きく影響していることを昨年度において明らかにした。

しかし、今回二つの方法で算出したMR T値は、最大で 10℃以上の差が生じた。これは、前者の方法では、長短波放射計を壁面に平行に設置して計測値をそのまま使用しており、太陽高度による入射日射量の違いを考慮していないことによると考えられた。そこで、長短波放射計で計測した入射日射量を高度角と方位角で補正した結果、両者の値はほぼ近似し、ピーク時で約 2℃の差にとどまった。

このことから、長短波放射計による計測値に太陽高度を考慮した補正を加えることで、グローブ温度計による黒球温度より求めた平均放射温度と近似させることができ、MR Tという指標により、緑化による屋外の温熱環境改善効果を定量的に評価できることが示唆された。

#### (2) WBGTについて

WBGTは、屋外のスポーツや労働現場において暑熱環境を評価し、熱中症予防対策に活用されている指標である。この方法は、労働者が活動している一定時間における平均的な熱の影響を評価する場合には適用できるが、快適域に近い熱ストレスの評価には適用できないとされている<sup>18)</sup>。今

回の計測の結果では、コンクリート壁に対して緑化パネルでは、1~2℃低減効果を示した。これは、上記の熱中症対策指針<sup>16)</sup>では、1段階改善に相当する効果を示している。また、山田ら<sup>19)</sup>が異なる地表面状態でWBGTを計測した結果と比較すると、屋外の芝生面とアスファルト面での温度差にほぼ相当している。壁面緑化のみで屋外の作業や運動環境に適した数値を満たすことは限界があるものの、人工地盤や屋上等の他の緑化手法との組み合わせにより、建築敷地の地表面被覆状態を改善させることによる温熱環境改善効果が期待でき、WBGTを指標とする壁面緑化の定量的な温熱環境評価の有効性が示唆された。

### (3) SET\*について

SET\*は、着衣量を代謝量によって修正することにより、異なった条件の温熱環境を比較できるよう標準化した体感指標であり、様々な代謝量における温冷感や快適感の評価を可能としており、上記の二つの指標に比べると気温や放射温度、湿度、風速等の数値が反映されており、最も、体感に近い評価指標と考えられる。今回の計測値より算出したSET\*値では、コンクリート壁に対して緑化パネルが終日1~2℃低い値を示した。特に、夜間においては約2℃の低減効果が見られることは、壁面緑化による温熱環境改善効果として、熱帯夜の改善等ヒートアイランド対策に有用な数値を示しているものと考えられる。

足永ら<sup>20)</sup>によると、「MRT、気温の低下はSET\*の値に対して負の寄与(SET\*を低下させる働き)を示し、逆に風速の低下並びに湿度の上昇はSET\*の値に対して正の寄与(SET\*を上昇させる働き)を示す」ことを指摘している。沖中ら<sup>21)</sup>がナツヅタを用いて蒸散速度から気化熱を算出した結果、1時間当たりでは約73,000cal/m<sup>2</sup>(84.9W/m<sup>2</sup>)の消費熱量を算出しており、気化熱による顕熱の抑制がパネル前面の気温の低減に寄与したと考えられる。これより、壁面緑化による蒸散作用は表面温度及びパネル前面の気温の低減に寄与し、SET\*値に対して負の寄与を示すのに対して、蒸散によりパネル周辺の相対湿度の上昇は、SET\*の値に対して正の寄与を示す。同じ蒸散作用でも一方は負、一方は正となり、体感温熱指標であるSET\*値は、絶対値として温度の低減の幅がMRTの温度差に比して、小さく作用したと考えられる。同じく、足永ら<sup>20)</sup>は「SET\*に対して気温や湿度、風速と比較してMRT値の寄与率が大」であるとしており、SET\*値の低減にはMRTが寄与し、緑化による平均放射温度の低減が体感温度であるSET\*値の低減には有効と考えられる。

しかし、SET\*も本来は屋内の温熱環境を評価する指標として開発さ

れており、今回のような屋外での温熱環境を体感レベルで評価する指標として使用することは、着衣量の仮定や算出の過程も複雑であり、限界を有していると考えられる。具体的な植物の違いや緑被率等緑化条件の違いを反映し、屋外の温熱環境を総合的に評価できる新たな指標の開発については、今後の研究課題である。

## まとめ

壁面緑化による建物外部空間の温熱環境緩和効果を定量的に評価することを目的として、壁面緑化パネルを用いた実験による計測と評価を試みた。本研究において得られた主な結果は、以下のとおりである。

- (1) コンクリート壁面の表面温度は、緑化パネルがある場合には、日中の最大ピーク時で2~4℃程度低下していた。
- (2) 温度の計測値より算出したMRT値と長短波放射量の計測値より算出したMRT値を比較したところ、最大ピーク値で前者が後者を約10℃上回ったが、後者の数値を太陽高度により補正することで、ほぼ近似した値を得ることができ、長短波放射計によるMRT算出方法の有効性が示唆された。
- (3) WBGTを用いて温熱環境を評価したところ、緑化パネルの方がコンクリート壁と比べて、ピーク時で1~2℃低減していた。(4) 温度指標としてSET\*の値を算出したところ、緑化パネルの方がコンクリート壁より約1~2℃低減し、特に夜間では約2℃安定的に低く推移し、壁面緑化の温熱環境改善効果として熱帯夜の改善等に期待できる数値を得た。

以上により、コンクリート壁(白色塗装)との比較により緑化パネルによる建物外部の温熱環境改善効果をMRT, WBGT, SET\*という温熱指標により評価した結果、緑化パネルの屋外での温熱環境改善効果を確認することができた。しかし、MRT値も体感レベルでの指標としては実感しづらく、SET\*は本来屋内環境用に開発された指標であり、WBGTも熱中症対策として作業・労働環境を評価するために有効な指標である。

今後は、建物外部の緑化による温熱環境改善効果を定量的に評価するために、更なる基礎データの蓄積を図るとともに、屋外での温熱環境改善効果を総合的に評価できる新たな指標の開発が課題と考えられる。

## 2.4 季節の違いによる壁面緑化の温熱環境改善効果

都市部においてコンクリートやアスファルトによる地表面被覆の増加と緑地や水面の減少、都市活動に伴う自動車や空調機器などによる人工廃熱の増加等により、ヒートアイランド現象が顕在化しており、2004年3月には「ヒートアイランド対策大綱」が閣議決定されるなど、その対策の強力な推進が必要かつ急務となっている。ヒートアイランド現象の緩和を図るための地表面被覆改善策として、都市の中の緑地面積を増大させることが有効とされているが、高度に土地利用が集積した都市市街地においては、市街地面積の大半を占める民有地において建築物緑化として屋上や壁面の緑化の推進を図る必要がある。

屋上緑化については、技術的にも開発普及が進んでいるのに対して、壁面緑化は屋上緑化に比べると未だ開発途上にある。今後、壁面緑化を開発普及させる上での技術的な課題として、下村<sup>22)</sup>は種・品種名の整理、コンクリート壁面等表面構造と付着力の測定方法と植物の生育特性の把握、均一な苗の生産の必要性等壁面緑化に使用する植物材料の安定供給と生育特性の課題を指摘している。また、武藤<sup>23)</sup>らは、視覚的・心理的な側面から、評価グリッド法を用いたヒアリング調査に基づき、建物の用途、デザイン、植物のボリューム等の形状や間隔等の壁面緑化の計画・デザイン上の課題を指摘している。日本政策投資銀行<sup>24)</sup>によると、壁面緑化の技術的課題として一様な灌水の困難性、剪定等維持管理の方法を指摘しており、また普及上の課題として壁面緑化による定量的機能と効果、施工時における維持管理の内容、費用等の情報の欠如等緑化による定量的な効果や維持管理に関する課題を指摘している。

一方、筆者らが、第1章において屋上や壁面の緑化、利用の開発に取り組んでいる企業等にアンケート調査を行った結果<sup>25)</sup>から、壁面緑化を普及させる上で壁面緑化による環境改善効果の定量化、建設コストの縮減、維持管理の簡便化、効率的な灌水システムを技術的な課題として抽出した。以上のことから、今後壁面緑化を開発普及させる上において、適正植物材料の確保やコスト縮減、維持管理の簡素化とともに、緑化による環境改善効果の定量的な評価が主要課題のひとつであると考えられる。

そこで、本研究は、壁面緑化パネルを用いた実験・計測により冬期と夏期の壁面の表面温度と放射環境について比較・検討を行い、季節の違いによる壁面緑化による温熱環境改善効果について、定量的評価を行うために必要な基礎資料を得ることを目的とする。

## 2.4.1 気象概況

### (1) 冬期の気象概況

図 2.26 は、計測期間のうち 2 月 27 日から 3 月 5 日までの 7 日間の気象条件として、気温、湿度、風向、風速の推移をまとめたものである。各計測点の値は、10 分間平均後の 60 分毎の各時刻の計測値を示している。計測期間中 3 月 3 日は、16 時から 19 時にかけて降雨があったものの、気温が異常値を示したため、欠測と見なした。それ以外の日では、気温は最低気温 $-2\sim-4^{\circ}\text{C}$ から最高気温 $9\sim 12^{\circ}\text{C}$ の範囲で推移し、この期間での最高気温は 2 月 27 日の $12.1^{\circ}\text{C}$ 、最低気温が 3 月 5 日の $-3.3^{\circ}\text{C}$ であった。期間中の平均気温は $4.1^{\circ}\text{C}$ であった。また、湿度は、 $17\sim 92\%$ であり、この期間での最高湿度は 3 月 2 日の $91.10\%$ 、最低湿度は 2 月 28 日の $17.3\%$ であった。期間中の平均湿度は $56.6\%$ であった。風速は $0.5\sim 1.5\text{m/s}$ で変化し、期間中の平均風速は $1.2\text{m/s}$ であった。風向は南から南西の風が主流であった。以下に、計測期間のうち快晴に近く、終日天候の安定していた 2 月 27 日を代表日として取り上げて、解析を行った。

### (2) 夏期の気象概況

図 2.27 は、計測期間のうち 8 月 16 日から 8 月 22 日までの 7 日間の気象条件として、気温、湿度、風向、風速の推移をまとめたものである。計測期間中 8 月 16 日のみ、前夜から 1:00 まで降雨があったものの、8 月 19 日から 22 日にかけての 4 日間は最高気温が $30^{\circ}\text{C}$ を超える真夏日となった。この期間の最高気温は、8 月 20 日の $33.6^{\circ}\text{C}$ 、最低気温は 8 月 17 日の $21.6^{\circ}\text{C}$ 、期間中の平均気温は $27.3^{\circ}\text{C}$ であった。また、風速は $0\sim 1.11\text{m/s}$ であり、風向は南西の風が主流であった。8 月 22 日は終日 $1.0\text{m/s}$ の南西の風を記録した。湿度は、 $56\sim 97\%$ であり、降雨のあった 8 月 16 日を除いた 6 日間の平均湿度は $76.6\%$ であった。以下に、計測期間のうち快晴に近く、終日天候の安定していた 8 月 21 日を代表日として取り上げて、解析を行った。

## 2.4.2 表面温度

### (1) 2 月 27 日の表面温度

図 2.28 は、2 月 27 日におけるコンクリート壁面と緑化パネルの表面温度の経時変化を示したものである。これより、夜間では緑化パネルは気温とほぼ同様に变化し、緑化パネルの表面温度は $0^{\circ}\text{C}$ 以下まで下降しているのに対して、コンクリート壁では緑化パネルよりも $4\sim 6^{\circ}\text{C}$ 高く推移している。日中は、6 時以降気温の上昇とともに緑化パネルの表面温度も急激に上昇しピークとなる 13 時の時点では、ヘデラヘリックスが最も高く $20.1^{\circ}\text{C}$ となり

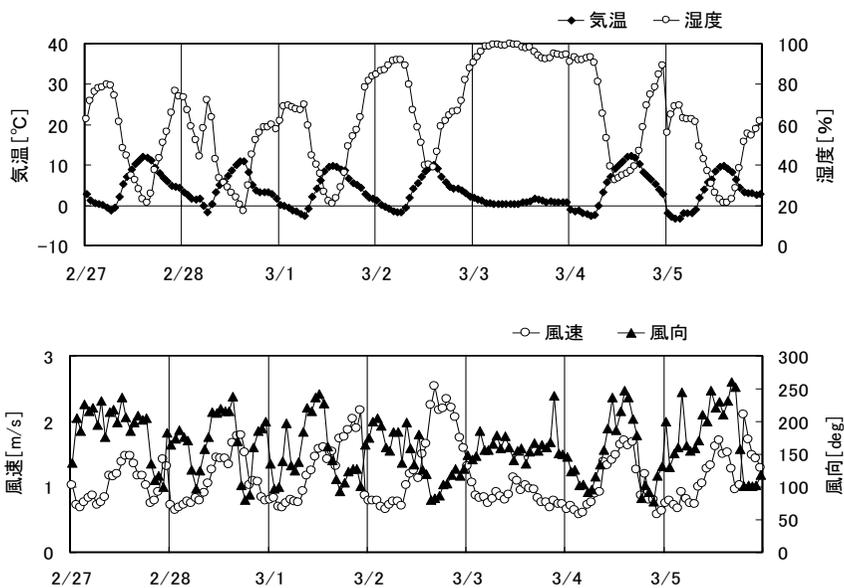


図 2.26 冬期測定期間中の気象概況 (2/27-3/5)

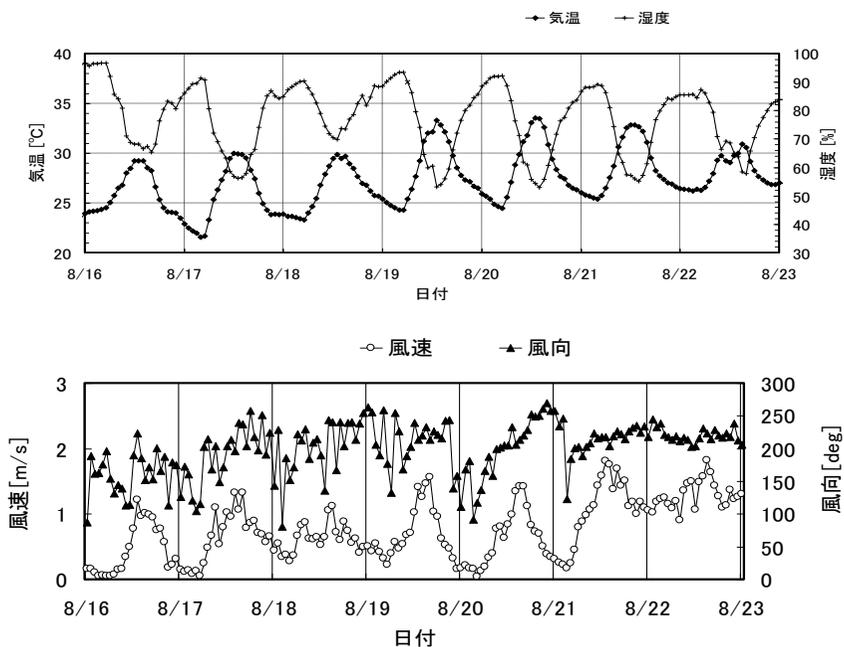


図 2.27 夏期測定期間中の気象概況 (8/16-22)

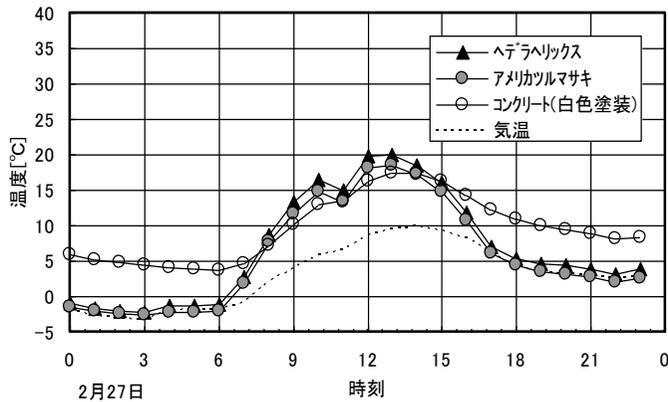


図 2.28 表面温度の経時変化 (2月27日)

気温よりも 10°Cも高くなり、次いでアメリカツルマサキが 18.4°Cを示し、コンクリート壁が 17.4°Cとなり、コンクリート壁よりも緑化パネルが 1~3°C高い数値を示した。これは、緑化パネルとコンクリート壁(白色塗装)の熱伝導率と熱容量の違いが、表面温度の日較差の違いとして現れたものと推察される。

なお、ピークとなる 13 時にアメリカツルマサキの方がヘデラヘリックスよりも 2°C低くなっており、使用植物の違いによる表面温度の違いが見られた。これは植物からの蒸散量の違いの他、表 2.7 に示すアルベドの違い、葉の形状、葉面積密度の違い等使用した植物の葉面特性の違いにより生じたものと推察される。

## (2) 8月21日の表面温度

図 2.29 は、8月21日におけるコンクリート壁面と緑化パネルの表面温度の経時変化を示したものである。

これより、9時から12時までにヘデラヘリックスの表面温度がコンクリート壁面の表面温度との差が縮まり、それ以外の時間帯では緑化パネルがコンクリートよりも 2~4°C低減していた<sup>6),7)</sup>。日中は、5時以降気温の上昇とともに緑化パネルの表面温度も上昇し、ピークとなる 12 時の時点では、コンクリート壁が最も高く 36.2°Cとなり気温よりも 3.4°C高くなるが、次いでヘデラヘリックスが 35.4°C、アメリカツルマサキが 33.7°Cとなり、コンクリート壁とヘデラヘリックスとの表面温度の差が縮まる一方、使用植物の違いによる差異が見られた。

表 2.7 アルベド・放射率の平均値

区分	ヘデラヘリックス	アメリカツルマサキ	コンクリート面
アルベド	0.266	0.245	0.702
放射率	0.975	0.974	0.987

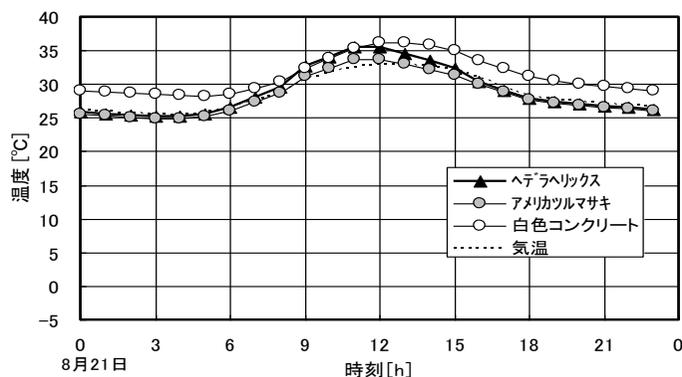


図 2.29 表面温度の経時変化 (8月21日)

ここで、緑化パネルとコンクリート壁面との表面温度差がピーク時において大きくならないのは、コンクリートの外壁表面が白色に塗装(合成樹脂系塗料)されているために日射を反射し、コンクリート壁面の表面温度の上昇が抑制されたことによると考えられる。緑化パネル試験体では、ピーク時にアメリカツルマサキの方がヘデラヘリックスよりも 1.11℃低くなっており、冬期と同様に使用植物の違いによる表面温度の違いが見られた。

### 2.4.3 放射環境の特性分析

#### (1) 2月27日の放射収支

冬季の壁面での放射収支として、2月27日の入射日射量、反射日射量、入射長波放射量、輻射量の各項についての経時変化を図 2.30 に示す。これより、入射日射量は日中時間の経過とともに増大し、12時にピークとなりその後は次第に減少していく。12時には、入射日射量は 825 W/m<sup>2</sup>に達している。また、反射日射量は、ヘデラヘリックスが 203 W/m<sup>2</sup>に対してアメリカツルマサキは 151 W/m<sup>2</sup>を示し、日射反射率(アルベド)でみると、前者が 0.25、後者が 0.18 となり、アメリカツルマサキの方が日射を吸収する割合

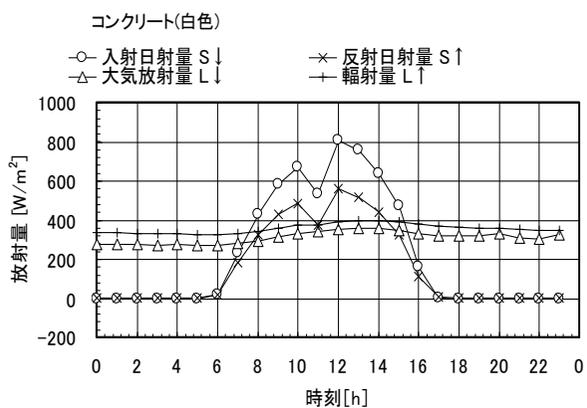
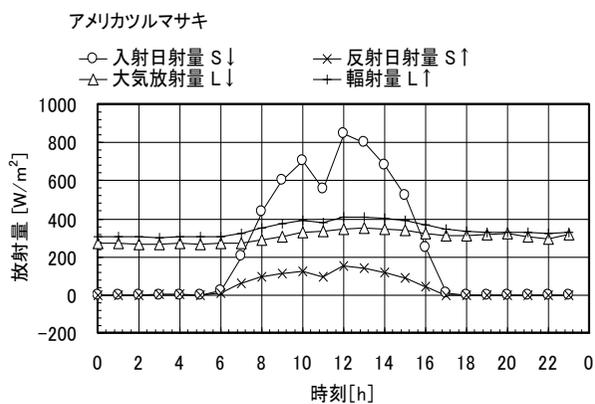
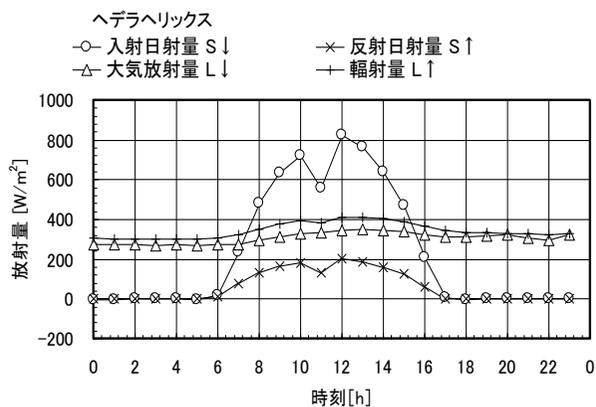


図 2.30 放射収支各項の経時変化 (2005 年 2 月 27 日)

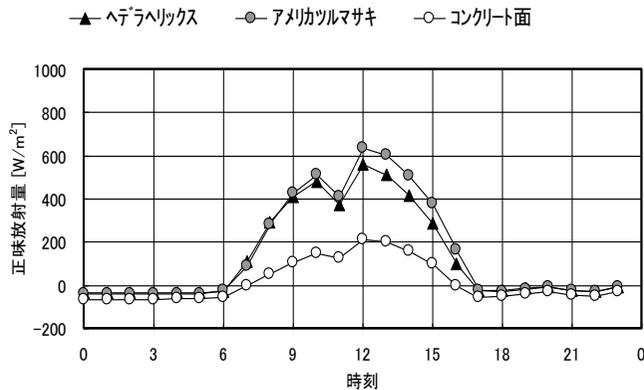


図 2.31 正味放射量の経時変化(2月27日)

が大きい。これに対して、コンクリート壁(白色)では、反射日射量が  $560 \text{ W/m}^2$  となり、アルベドも  $0.70$  と緑化パネルと比較すると  $2.8 \sim 3.8$  倍の数値を示した。

一方、入射長波放射量についてみると、 $270 \sim 350 \text{ W/m}^2$  の間で推移し、コンクリート壁(白色)では、終日輻射量の方が入射長波放射量を  $30 \sim 60 \text{ W/m}^2$  上回っていた。緑化パネルにおいては、輻射量と入射長波放射量との差が日中に拡大する傾向が見られ、12時の時点で入射長波放射量はヘデラヘリックスが  $347 \text{ W/m}^2$ 、アメリカツルマサキが  $345 \text{ W/m}^2$  に対して、輻射量は前者が  $411 \text{ W/m}^2$ 、後者が  $408 \text{ W/m}^2$  を示し、いずれも  $60 \text{ W/m}^2$  以上の差で輻射量が入射長波放射量を上回っていた。

図 2.31 は、2月27日の正味放射量の経時変化を示す。正味放射量は、(1)式より、入射長波放射量と短波日射量との総収支量として表される。これより、ピークとなる12時の時点でアメリカツルマサキが最も高く  $633 \text{ W/m}^2$  を示し、ヘデラヘリックスでは  $559 \text{ W/m}^2$  と  $74 \text{ W/m}^2$  低くなっていた。一方、コンクリート壁では、 $210 \text{ W/m}^2$  と緑化パネルの約  $1/3$  にとどまっていた。いずれの試験体も、長波放射量の収支にはほとんど差のないことから、正味放射量の差は、反射日射量の差を反映したものである。

壁面から屋外の大气側への放射環境について反射日射量と輻射量の総量でみると、8月21日12時の時点でヘデラヘリックスでは  $614 \text{ W/m}^2$ 、アメリカツルマサキでは  $559 \text{ W/m}^2$  に対して、コンクリート壁では  $952 \text{ W/m}^2$  となり、コンクリート壁の方が緑化パネルよりも  $1.5$  倍以上高くなった。

## (2) 8月21日の放射収支

夏期の壁面での放射収支として、8月21日の入射日射量、反射日射量、入射長波放射量、輻射量の各項についての経時変化を図2.32に示す。これより、冬期と同様入射日射量は日中時間の経過とともに増大し、12時にピークとなりその後は次第に減少していく。12時の時点では、入射日射量は $455\text{W}/\text{m}^2$ を示し、2月27日の1/2強にとどまっている。また、反射日射量についても、ピーク時には緑化パネルではヘデラヘリックスが $96\text{W}/\text{m}^2$ 、アメリカツルマサキが $98\text{W}/\text{m}^2$ といずれも2月27日の約1/2に減少し、植物の種類による変化はほとんど見られなかった。これを日射反射率(アルベド)で見ると、いずれも0.21となり、これに対してコンクリート壁(白色)では反射日射量が $311\text{W}/\text{m}^2$ となり、アルベドも0.70と緑化パネルと比較すると3.3倍の数値を示した。2月27日と比較して緑化パネルのアルベド値に差異が見られたのは、パネルに使用した植物の葉色や葉の粗密等の個体差が影響したものと推察される。

一方、入射長波放射量についてみると、 $440\sim 520\text{W}/\text{m}^2$ の間で推移し、コンクリート壁(白色)では、夜間輻射量の方が入射長波放射量を若干上回っていたが、2月27日と比較して両者の差はほとんど見られなかった。これは、気温と表面温度の差が2月27日と比較して小さいためと考えられる。緑化パネルにおいても、輻射量と入射長波放射量との差はほとんど見られなかった。ピーク時の12時の時点で入射長波放射量は $510\sim 516\text{W}/\text{m}^2$ を示した。これに対して、輻射量は緑化パネルではヘデラヘリックスが $512\text{W}/\text{m}^2$ 、アメリカツルマサキが $503\text{W}/\text{m}^2$ 、コンクリート壁では $513\text{W}/\text{m}^2$ を示し緑化パネルとコンクリート壁との間で顕著な差は見られなかった。ヘデラヘリックスとアメリカツルマサキの輻射量の差は表面温度の違いを反映したものである。

2月27日との比較では、8月21日は入射長波放射量が入射日射量を上回っており、ピーク時に入射長波放射量では2月27日より約 $170\text{W}/\text{m}^2$ 高くなり、入射日射量では逆に約1/2に減少していた。これは、入射長波放射量では、大気温度が夏期には高くなるため、大気からの長波放射量が冬期よりも増大すること、同じく大気中の水蒸気濃度(絶対湿度)も上昇することの他、入射日射量では冬期の太陽の高度が夏期に比較して低くなることで壁面への直達日射量が冬期では夏期に比べて増大すること等により差が生じたものと考えられる。

図2.33は、8月21日の正味放射量の経時変化を示す。これより、ピークとなる12時の時点でアメリカツルマサキでは $369\text{W}/\text{m}^2$ 、ヘデラヘリックス

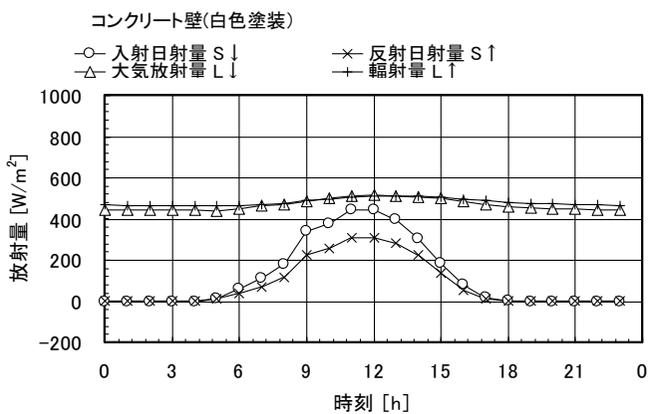
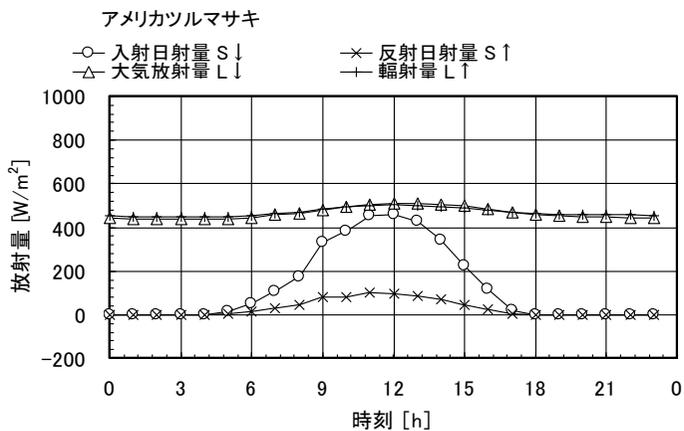
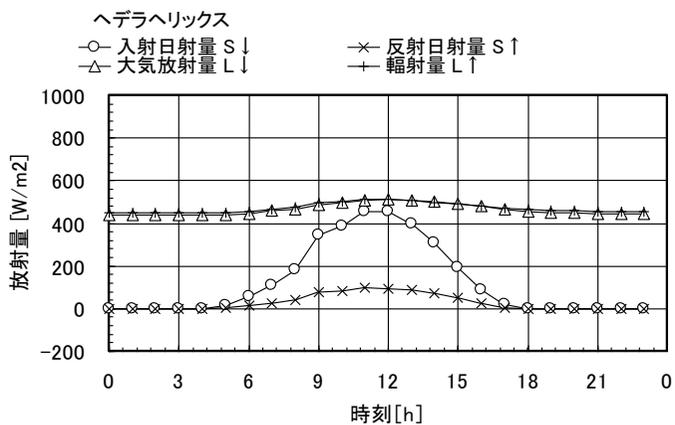


図 2.32 放射収支各項の経時変化 (2005 年 8 月 21 日)

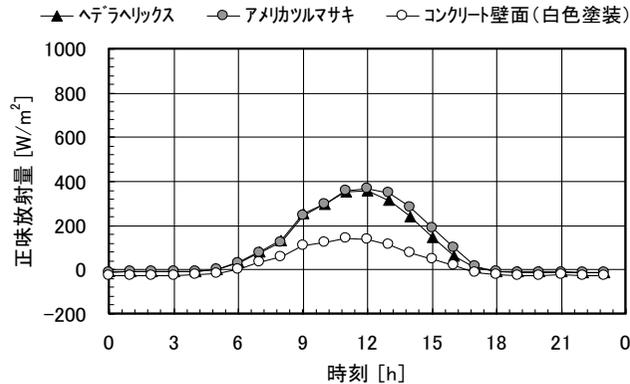


図 2.33 正味放射量の経時変化(8月21日)

では  $358\text{W}/\text{m}^2$ を示し、前者が  $11\text{W}/\text{m}^2$ 上回っていた。これは、輻射量の差が反映しており、葉面温度の差によるものと考えられる。2月27日のピーク時での正味放射量と比較すると8月21日では、約  $2/3$ に減少している。これは、主に入射日射量の差が作用していると考えられる。一方、コンクリート壁では、 $137\text{W}/\text{m}^2$ を示し、緑化パネルの  $1/2$ 以下にとどまっていた。

2月27日と比較すると8月21日の方が緑化パネルとコンクリート壁との正味放射量の差が低減している。これは各試験体とも冬期と夏期でアルベドにほとんど差は生じないことから、2月27日における長波放射の収支の差が作用したものと考えられる。また、いずれの試験体も、長波放射量の収支にはほとんど差のないことから、緑化パネル試験体とコンクリート壁(白色)との正味放射量の差は、反射日射量の差を反映したものと判断される。壁面から屋外の大气側への放射環境について反射日射量と輻射量の総量でみると、12時の時点でヘデラヘリックスでは  $608\text{W}/\text{m}^2$ 、アメリカツルマサキでは  $601\text{W}/\text{m}^2$ に対して、コンクリート壁では  $824\text{W}/\text{m}^2$ となり、2月27日よりその差は縮小するが、コンクリート壁の方が緑化パネルよりも1.3倍以上高くなった。

#### 2.4.4 熱収支の特性分析

##### (1) 2月27日の熱収支特性

図 2.34 は、2月27日の緑化パネルの表面とコンクリート壁面での熱収支の経時変化をそれぞれ示したものである。これより、いずれの試験体も12

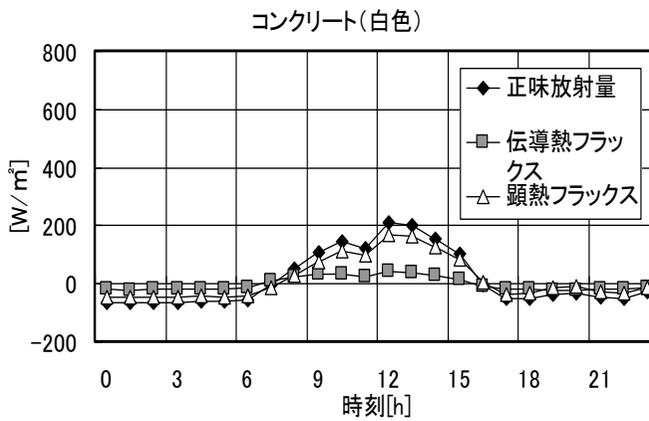
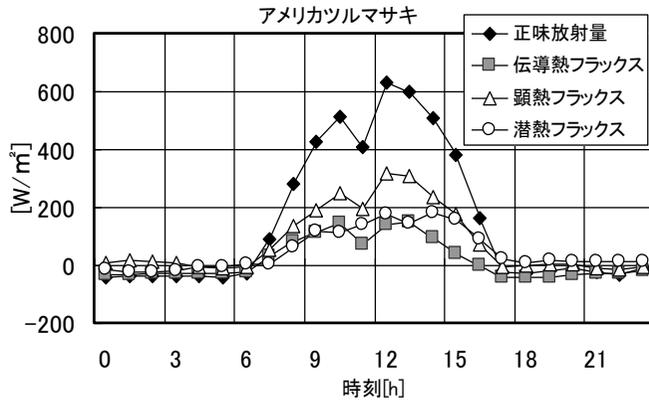
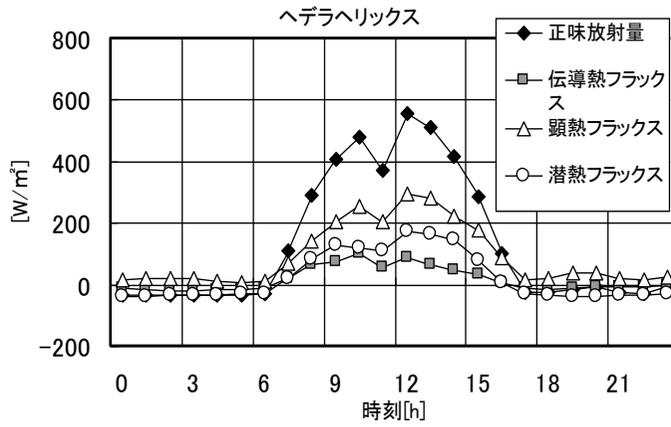


図 2.34 熱収支の経時変化 ( 2 月 27 日 )

時から 13 時にかけて最大ピークを示す。ヘデラヘリックスでは 12 時の時点で正味放射量が  $559 \text{ W/m}^2$  であるが、このうち顕熱フラックスが  $296 \text{ W/m}^2$  と全体の約 53% を占め、次いで潜熱フラックスが  $175 \text{ W/m}^2$ 、伝導熱フラックスが  $88 \text{ W/m}^2$  となっていた。アメリカツルマサキでは、12 時の時点で正味放射量が  $633 \text{ W/m}^2$  であるが、このうち顕熱フラックスが  $318 \text{ W/m}^2$  と全体の約 50% を占め、次いで潜熱フラックスが  $176 \text{ W/m}^2$ 、伝導熱フラックスが  $139 \text{ W/m}^2$  と緑化パネルでは、いずれの試験体も顕熱フラックスが潜熱フラックスを上回っており、この時期は気温も低く蒸散活動も停滞している一方、緑化パネルの表面温度と気温の差から顕熱フラックスが相対的に大きくなったものと推察される。

また、コンクリート壁との比較では、緑化パネルからの顕熱フラックスの方が上回っていたが、これはコンクリート壁では白色塗装されているため、入射日射を反射し、コンクリート壁の表面温度と気温の差が小さく、対流熱伝達率も緑化パネルより小さいためと考えられる。なお、使用植物の違いによる表面温度の違いが見られたが、これは植物からの蒸散量の違いが作用したものと推察される。

## (2) 8 月 21 日の熱収支特性

図 2.35 は、8 月 21 日の緑化パネルの基材表面とコンクリート壁面での熱収支の経時変化を示したものである。これより、いずれの試験体も 11 時から 12 時にかけて最大ピークを示す。ヘデラヘリックスでは、12 時の時点で正味放射量が  $358 \text{ W/m}^2$  であるが、このうち潜熱フラックスが  $198 \text{ W/m}^2$  と全体の約 55% を占め、次いで顕熱フラックスが  $97 \text{ W/m}^2$ 、伝導熱フラックスが  $64 \text{ W/m}^2$  となっていた。また、アメリカツルマサキでは、12 時の時点で正味放射量が  $369 \text{ W/m}^2$  であるが、このうち潜熱フラックスが  $259 \text{ W/m}^2$  と全体の約 70% を占め、次いで顕熱フラックスが  $60 \text{ W/m}^2$ 、伝導熱フラックスがないこと、対流熱伝達率が緑化パネルよりも小さいことにより、植物試験体とコンクリート壁との間で顕熱フラックスの顕著な差異が生じなかったものと推察される。

以上のことから、2 月 27 日と比較すると 8 月 21 日では正味放射量が約 1/3 に低減していた。緑化パネルについて、2 月 27 日は顕熱フラックスが入射日射量の 35~38% を占めるが、潜熱フラックスは 20~21% と顕熱フラックスの占める割合が高い。これに対して、8 月 21 日では顕熱フラックスが入射日射量の 13~21% にとどまる一方、潜熱フラックスが 43~56% を占め、顕熱フラックスよりも高い割合を示した。これは、8 月 21 日には気温の上昇とともに、植物葉面からの蒸散活動が活発となり蒸散量が増大し、気

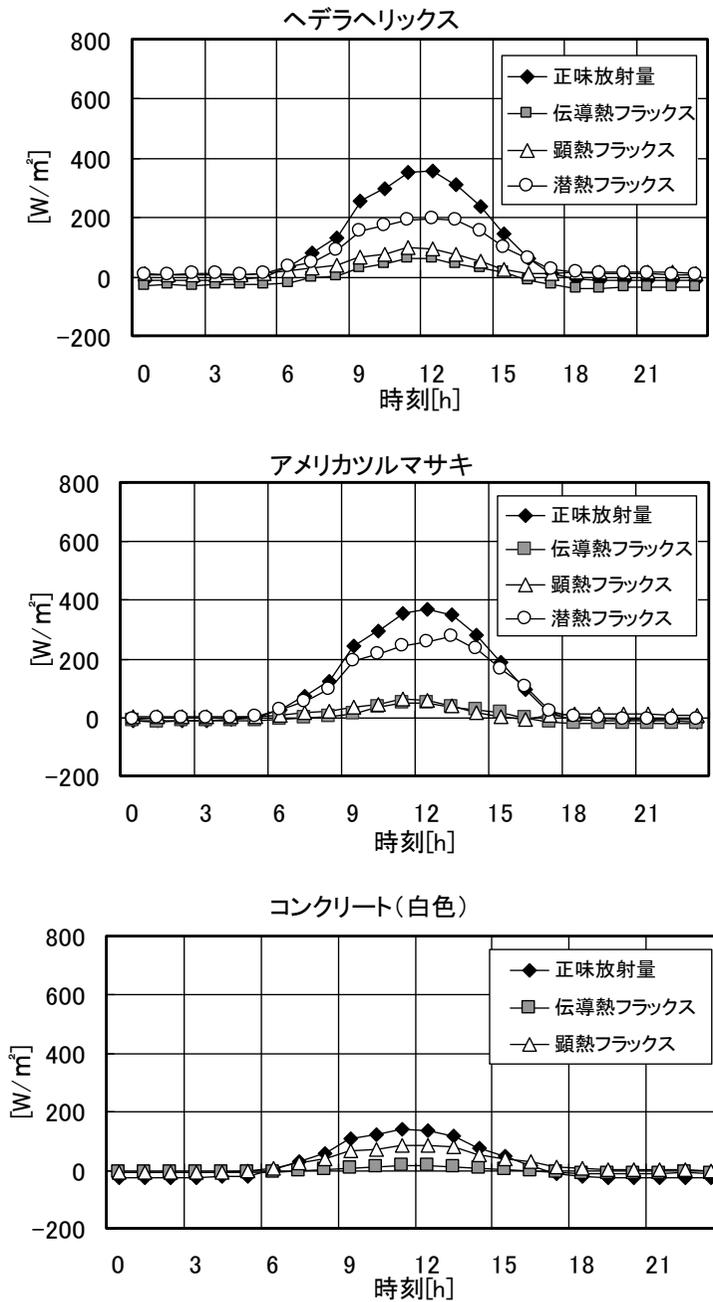


図 2.35 熱収支の経時変化(8月21日)

表 2.8 放射収支・熱収支総括表

項 目	2月27日ピーク時			8月21日ピーク時		
	ヘデラヘ リックス	アメリカ ツルマサ キ	コンク リート壁 (白色)	ヘデラヘ リックス	アメリカ ツルマサ キ	コンク リート壁 (白色)
正味放射量 $Rn$ [ $W/m^2$ ]	559	633	210	358	369	137
放射収支						
入射日射量 ( $S\downarrow$ ) [ $W/m^2$ ]	825	847	807	455	460	446
反射日射量 ( $S\uparrow$ ) [ $W/m^2$ ]	203	151	560	96	98	311
アルベド( $a$ )	0.25	0.18	0.70	0.21	0.21	0.70
長波放射量 ( $L\downarrow$ ) [ $W/m^2$ ]	347	345	355	511	510	516
輻射量 ( $L\uparrow$ ) [ $W/m^2$ ]	411	408	392	512	503	513
熱収支						
顕熱フラックス ( $H$ ) [ $W/m^2$ ]	296	318	168	97	60	121
潜熱フラックス ( $LE$ ) [ $W/m^2$ ]	175	176	—	198	259	—
伝導熱フラック ス( $G$ ) [ $W/m^2$ ]	88	139	42	64	50	16
$H / S\downarrow$	35.9%	37.5%	19.3%	21.3%	13.0%	38.9%
$LE / S\downarrow$	21.2%	29.8%	—	43.5%	56.3%	—
表面温度 ( $T_{sr}$ ) [ $^{\circ}C$ ]	20.1	18.4	17.4	35.5	33.7	36.2
気温 ( $T_a$ ) [ $^{\circ}C$ ]	8.5			32.8		

化熱を潜熱フラックスとして消費したことによるものと考えられる。また、緑化パネルとコンクリート壁との比較では、冬期と夏期のいずれも正味放射量がコンクリート壁では、緑化パネルの約 1/3 となっていた。これは、コンクリート壁では、白色に塗装されていたことにより、壁体内への伝導熱フラックスが低く抑えられ、また直達日射を反射して壁体の蓄熱が少なく、壁面からの顕熱フラックスも低く抑えられたためと考えられる。

以上の結果より、2月27日と8月21日のピーク時における各試験体の放射収支、熱収支、表面温度等の計測値を表 2.8 にまとめた。

## まとめ

季節の違いによる壁面緑化の温熱環境緩和効果を定量的に検証することを目的として、壁面緑化パネルを用いた実験による計測と評価を試みた。本研究において得られた主な結果は、以下のとおりである。

- (1) 表面温度では、2月27日と8月21日のいずれも午前9時からピーク時にかけてコンクリート壁面と緑化パネルの温度差が小さくなるが、それ以外の時間帯では、緑化パネルの方が2~4℃低下した。
- (2) 正味放射量については、緑化パネルでは2月27日ではピーク時に約600 W/m<sup>2</sup>、コンクリート壁では約200 W/m<sup>2</sup>を示したのに対して、8月21日では緑化パネルでは約400 W/m<sup>2</sup>、コンクリート壁では約150 W/m<sup>2</sup>を示し、2月27日の約2/3に低減していた。また、コンクリート壁では緑化パネルと比較して、約1/3に低減していたが、これは日射反射量の相違が大きく作用したものと考えられる。
- (3) 放射収支特性として、入射日射量が8月21日では2月27日の約1/2に低減し、緑化パネル試験体の日射反射率(アルベド)はコンクリート壁(白色塗装)の約1/4~1/3に低減していた。
- 4) 熱収支特性として、2月27日はフラックスが入射日射量の約2割を占め、顕熱フラックスよりも下回るが、8月21日では潜熱フラックスが4割以上を占め、顕熱フラックスよりも高い割合を示した。潜熱フラックスが顕熱フラックスよりも高い値を示すことにより、夏期のヒートアイランド現象に影響を及ぼす顕熱負荷の増大を抑制し、外部環境における温熱負荷の緩和に寄与することが推察された。

以上のことから、季節の違いによる壁面での放射収支と熱収支を検討することで、壁面緑化による外部空間での温熱環境改善効果を定量的に把握することができることが示唆された。今後、使用植物や壁面緑化タイプの違いによる実験・計測データをさらに蓄積させる必要がある。

## 引用文献

- 1) 梅干野晃, 山下富大, ベランダ植栽による日射遮へい効果(植栽の建築環境に及ぼす省エネルギー効果その3)(1983) 日本建築学会九州支部研究報, 133-136

- 2) 梅干野晃, 山下富大. つる植物によるベランダ植栽の日射遮へい効果に関する実験研究 (1983) 日本建築学会建築環境工学論文集 141. 446
- 3) 梅干野晃, 山下富大, ツル植物による植栽スクリーンの日射遮へい効果, 日射透過率と表面温度について (1981) 日本建築学会建築環境工学論文集, 141. 446
- 4) 梅干野晃, 茶谷正洋, 八木幸二, ツタの西日遮へい効果に関する実験研究 (1985) 日本建築学会計画系論文報告集 1. 41. 10
- 5) 沖中健, 野島義照, 小林達明, 瀬戸祐直, つる植物の被覆がコンクリート建物の壁面温度に及ぼす効果 (1994) 千葉大学園芸学部報第 48 号, 125-134
- 6) 野島義照, 沖中健, 小林達明, 坊垣和明, 瀬戸祐直, 倉山千春, 壁面緑化による建築物の壁面温度の上昇抑止効果の実証的研究 (1993) 造園雑誌 56(5) 1. 45-120
- 7) 伴資政, 坂本雄三, 寿浦光晴, シミュレーションによる壁面緑化の熱的效果の研究 (2001) 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 43-44
- 8) 近藤三雄, 鈴木誠孝, 表面温度からみた都市植生の存在効果に関する実証的研究 (1983) 造園雑誌 47(1), 1. 45
- 9) 高尾京子, 谷本潤, 萩島理, ヒートアイランドのパッシブコントロール手法としての軽量壁面緑化コケパネルの開発 新しい基盤材の検討及び熱特性の把握 (2003) 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集
- 10) 渋谷圭助, 佐藤澄仁, パネル設置型および下垂型壁面緑化における温熱環境評価 (2004) 日本緑化工学会誌, 30(1), 211-214
- 11) 渡部一郎, 農業実験法 (1987) サイエンスハウス, 281pp
- 12) 足永靖信, 村上周三, 吉田伸治, 磐田靖子, 大岡龍三, 持田灯, 団地内キャニオン空間の温熱環境の数値予測と実測の比較 対流・放射・湿気連成解析による屋外環境共生空間の研究(その 9) (1999) 日本建築学会大会梗概集
- 13) 鈴木弘孝, 三坂育正, 村野直康, 田代順孝, 壁面緑化による建物外部の温熱環境改善効果に関する研究 (2005) ランドスケープ研究 68(5), 503-508
- 14) 鈴木弘孝, 三坂育正, 水谷敦司, 田代順孝, WBGT, SET\*による壁面緑化の温熱環境改善効果の評価 (2006) ランドスケープ研究 69(5), 441-446
- 15) 日本建築学会編, 拡張アメダス気象データ (2000) 340-341
- 16) 日本体育協会, 熱中症予防のための運動指針 (1993)
- 17) A.P.Gagge, A.P.Fobolets, L.G.Bergland(1986): ASTAND ARDPREDICTIVE INDEX OF HUMAN RESPONSE TO THE THERMAL ENVIRONMENT, ASHRAE Transactions
- 18) 環境省, 平成 16 年度都市緑地を活用した地域の熱環境改善構想の検討(中間報告) (2005) 8-10
- 19) 山田宏之, 養父志乃夫, 中島敦司, 中島史郎, 松本勝正, 異なる地表面状態の屋外空間における夏季温熱環境の評価 (2000) ランドスケープ研究 63(5), 543-546
- 20) 足永靖信, 吉田伸治, 村上周三, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 緑化による屋外温熱環境の緩和効果の検討 (1998) 日本建築学会学術講演梗概集(九州), 939-940
- 21) 沖中健・野島義照・小林達明・瀬戸裕直, つる植物の被覆がコンクリート建物の壁面温度に及ぼす効果 (1994) 千葉大学園芸学部学術報告, No. 48, 125-134

- 22) 下村孝, 壁面緑化資材の利用特性と利用上の課題 (2001) 日本緑化工学会誌, 27(2), 399-406
- 23) 武藤浩・輿水肇・原田鎮郎・佐久間護, 建築物の壁面緑化に関する研究その2 一般人の評価構造に基づく計画上の課題の抽出 (2001) 日本建築学会大会学術講演梗概集 F-1 分冊, 683-684
- 24) 日本政策投資銀行, 都市環境改善の視点から見た建築物緑化の展望 (2004) 日本政策投資銀行, 74pp.
- 25) 鈴木弘孝, 小島隆矢, 嶋田俊平, 野島義照, 田代順孝, 壁面緑化に関する技術開発の動向と課題 (2005) 日本緑化工学会学会誌 31(2), 247-259

### 第3章 熱収支から見た壁面緑化による温熱環境改善

#### 効果

屋上緑化に関しては、すでに民間部門においても技術開発や普及が進んでいる段階にあり、そのヒートアイランド緩和効果に関しても、実験・実測に基づくデータや資料が整備されてきた。

梅干野ら<sup>1)</sup>は屋上緑化による建築への照り返し、焼け込み防止に関する効果について実証実験を行い、夏季の芝生の照り返しは乾いた土と比較して少なく、含水率で成果が左右される土より有効であることを示し、蒸発散量が10%土より多いことで、温度分布の低下から焼け込み防止効果も高いとしている。野島ら<sup>2,3)</sup>は、各種の造園植物の蒸散速度をスーパーポロメーターにより計測し、大気飽差と光量子束密度に基づく蒸散環境変数を用いた回帰式で蒸散速度を推定するとともに、屋上においてカンツバキとカナリーキヅタを用いて、計測した蒸散速度に葉面積指数を乗じることで1 m<sup>2</sup>あたりの蒸散による潜熱フラックスを推定している。

また、山口ら<sup>4)</sup>は、軽量・薄層な屋上緑化施設のもつヒートアイランド緩和効果を定量的に検討するため、芝生とセダム等6種類の緑化試験体を建物屋上に設置して、蒸発散量の計測と熱収支解析等を行った結果、芝区は灌水頻度が減少しても、一定の蒸発散量を維持したのに対して、セダム区では灌水頻度を減らすと蒸発散量の減少が顕著であることを報告している。三坂ら<sup>5)</sup>は、草地を対象として熱収支の比較測定を渦相関法と傾度法等の複数の測定・解析手法を適用して比較・検討を行った結果、いずれの計測方法も日中における潜熱フラックスの大きいことを明らかにし、熱収支解析より、草地からの蒸発散による多量の潜熱消費により、気温の上昇が抑えられていることを報告している。

一方、壁面緑化に使用されている植物を対象とした蒸散効果の評価では、野島ら<sup>6)</sup>の蒸散速度の計測による蒸散量推定の試みがあるが、この推定については実測値との間の整合についての検証が十分になされてはいない。また、萩島ら<sup>7)</sup>の行ったSAT計を用いた実験による蒸散量推定では、壁面緑化における蒸散量の推定が提案されているが、データの蓄積や実証的な検証が十分であるとはいえない。以上のように、建物緑化に関しては屋上緑化での蒸発散量の計測や熱収支について基礎的なデータや解析例は多くあるが、壁面緑化については蒸発散量の熱的效果について、実証的な計測データに基づき検証した例は限られている。

壁面緑化による温熱環境改善効果に関しては、梅干野ら<sup>8)</sup>や沖中ら<sup>9)</sup>が日射遮蔽や建物への貫流熱低減効果について示しているが、これらは建物内への熱負荷低減の効果として評価されるものである。また、ヒートアイランド緩和や周辺温熱環境改善の効果としては、第2章において壁面緑化による放射環境での改善効果を示したが、壁面緑化による主要な温熱環境改善効果の効果として、植物の蒸散作用に伴う潜熱の消費により顕熱を抑制する効果が挙げられ、実験計測による実証的な裏付けの元で定量的な評価を行うことが必要であると考えられる。

本章では、壁面緑化による壁面での蒸発散に伴い、壁面表面部での気化熱が潜熱として消費されることによる建物外部側への温熱環境改善効果を定量的に把握することを試みた。具体的には、プランタータイプの試験体とパネルタイプの試験体を用いて、重量法により蒸発散量の計測を行い、潜熱フラックスを算出して、顕熱の抑制に対する効果を正味放射量との関係から検証を行った。次に、SAT計による対流熱伝達率を求める手法<sup>7)</sup>を用いて、熱収支から蒸発効率を算出した。

### 3.1 プランター＋支持材型の蒸散量の計測と温熱環境改善効果

本節では、壁面緑化に一般的に使用されているつる植物を対象とした重量法による蒸散量の測定を行い、壁面緑化による蒸散効果やそれに伴う温熱環境改善効果を、定量的に評価するための基礎的データをを得ることを試みた。

#### 3.1.1 研究の方法

##### (1) 実験装置

実験は、建築研究所実験施設棟の1階屋上部の南に面した壁に、試験体であるプランター植の植物を並置して行った。各プランターには金属製の支持材を立てて、植物を幅0.5 m、高さ1 mの範囲で完全被覆させた上、プランターは壁面から約600 mm離して設置した。プランターの規格は、タテ400mm、ヨコ700 mm、深さ200 mmであり、培土として保水性の良い黒土を使用した。試験に用いる植物は、ヘデラカナリエンス(*Hedera Canariensis*)とし、プランターは3基設置した。また、土壌蒸発量を単独で測定するために、同じプランターにヘデラカナリエンスと類似した形状のプラスチック製の模造植物を植栽したもの(以下、ダミープランター)を設置した。

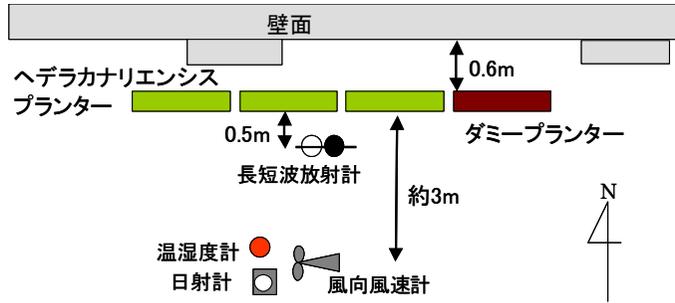


図 3.1 緑化試験体および計測機器設置状況

表 3.1 測定項目と測定機器

区分	計測項目	計測機材	測定機器		点数
気象条件	日射量	日射計	ブリード*	PCR-02	1
	風向・風速	風向・風速計	英弘精機	MA-130	1
	気温・湿度	温湿度計	VAISALA	HMP35D	1
蒸散量	プランタ重量	電子天秤(台秤)	新光電子	CG-60K	1
放射量	長短波放射量	長短波放射計	英弘精機	MR-50	3
葉面状態	葉面積指数	デジタルカメラ	-	-	-

植物試験体の概要について図 3.1 に示す。

## (2) 測定機器と計測方法

測定項目と測定機器について表 3.1 に示す。緑化試験体ならびに計測機器の設置状況に関して写真 3.1 に示す。温度・湿度・風向・風速・日射量といった一般気象状況については、試験体から約 3m の地点に、計測機器を設置し自動計測を行った。また、緑化試験体の表面からの距離 500 mm、屋上面からの高さ 500 mm の地点に長短波放射計を鉛直に設置し、植栽に入射あるいは反射・放出される放射量を計測した。蒸発散量は、日の出直後の 5 時から日没後の 19 時まで、試験体のうち、植物 1 体とダミー 1 体について毎時重量計測を行った。また、1 体の重量測定に時間を要することから、他の 2 体については、5 時と 19 時に測定を行い、1 日間の重量変化を測定した。なお、植栽の葉面積については、計測終了後、植物試験体の 0.25 m 四方よりすべての葉を採取し、スキャナーで葉の面積を読み取ることで、葉



実験計測に使用したプランターと植物(ヘデラカナリエンス)。左の写真の右端は、ダミー植物のプランター。

### 写真 3.1 緑化試験体および計測機器設置状況

面積指数を算出した。

#### (3) 実験スケジュールと散水条件

プランターの設置は 2004 年 7 月 20 日に行い、計測日前日まで毎朝 6 時の定時灌水で養生を行った後、7 月 28 日より連続計測を開始した。重量や蒸散速度の測定については、降雨の影響のないことを確認した上で、2004 年 7 月 28 日、8 月 2 日、6 日の 3 日間を対象に行った。

なお、各プランターへの散水は、重量測定実施日の前日の日没後に行い測定開始時の土壌含水条件を均一にするため、プランター底部から水が漏れるまで十分な量を与え、実験開始までに十分な排水を行った。

#### 3.1.2 計測結果

##### (1) 気象概況および葉面積密度

蒸散実験計測日を含む 7 月 28 日から 8 月 7 日までの 10 日間の日射量と風速、気温と相対湿度の推移について図 3.2 に示す。この期間中における天候は、いずれの日も時折雲がかかったが、7 月 29 日を除くと日中の日射量は  $800 \text{ W/m}^2$  を超えており、最高気温は  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  を超す真夏日であった。風速に関しては、測定期間中を通して夜間は弱く日中にやや強くなる傾向が見られた。計測日の 7 月 28 日と 8 月 2 日、6 日の天候を比較すると、8 月 2 日の日中の風速がやや大きくなっていった点を除けば、日射量、気温、相対

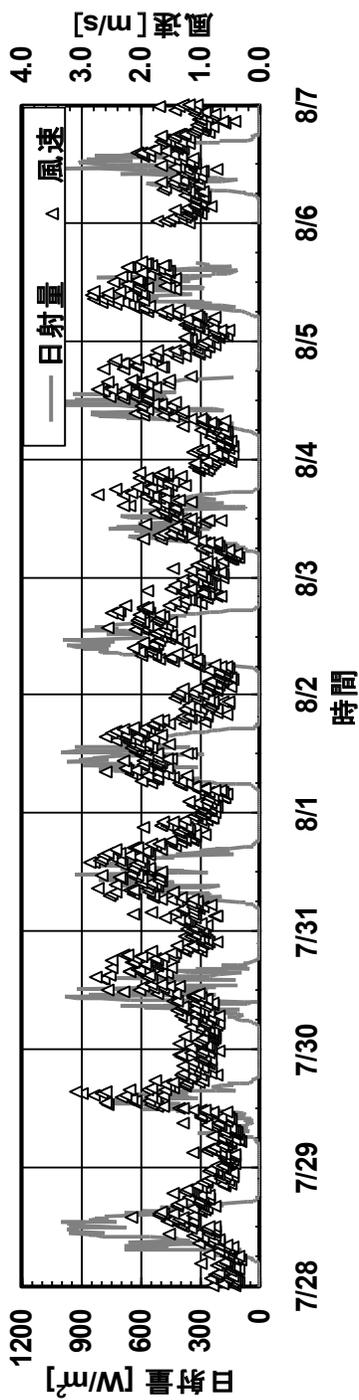
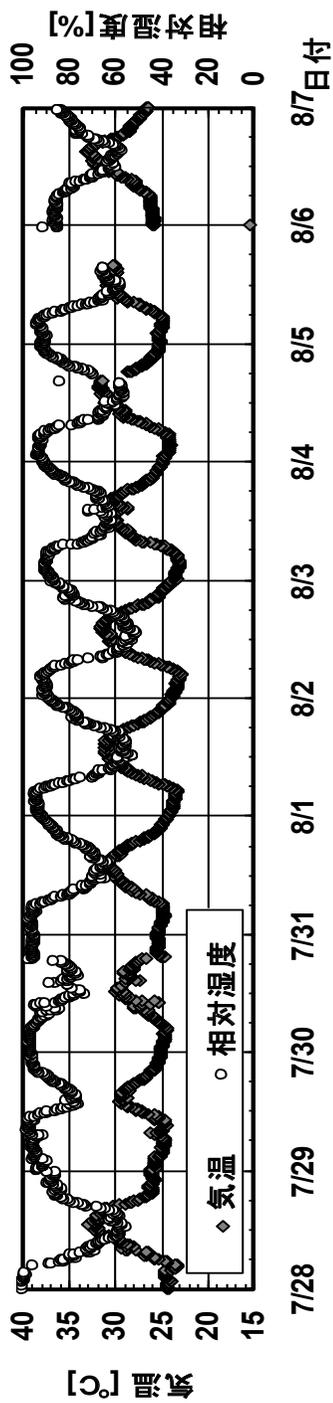


图 3.2 測定期間中の日射量，風速および気温，相对湿度

表 3.2 重量法による日蒸散量(蒸発量)

単位 (kg/m <sup>2</sup> /day)	ヘデラカナリエンス			
	7月28日	8月2日	8月6日	平均(8月2,6日)
プランタ①	2.322	2.804	2.192	2.498
プランタ②	1.636	2.034	1.450	1.742
プランタ③	2.146	2.706	2.318	2.512
平均値	2.035	2.515	1.987	2.251
ダミー	1.764	2.121	1.098	1.610
日蒸散量	0.271	0.394	0.889	0.641

湿度は、ほぼ同等であったと言える。また、重量計測終了後に測定したヘデラカナリエンスの葉面積指数 LAI は、3.43 であった。

#### (2) 重量法による蒸散量の計測結果

重量変化より算出した蒸発散量の計測結果を図 3.3 に示す。壁面緑化植物の葉面からの蒸散量は、植栽したプランターの重量変化からダミープランターの重量変化を差し引くことによって算出した。蒸発散量および蒸散量部時間帯では植栽したプランターの蒸発散量よりも多くなり、植物からの蒸量がマイナスと表示されている。この要因として、ダミープランターの土付近における模造植物による被覆面積が小さく、植栽したプランターの被を十分に再現されず、土壌面での蒸発面積の条件が異なっていたことが考られる。そこで、7月29日以降においては、ダミープランターの土壌部分の植被割合が、他の植栽したプランターとほぼ同等になるように、模造植栽で被覆を行った。8月2日および6日における結果は、模造植栽の修正した後の結果である。

すべてのプランターの重量法で得られた日蒸散量を、表 3.2 に示す。平均値については、模造植栽の修正を行った後の8月2日、6日の平均とした。蒸発散量と蒸発量の変化を見ると、蒸発量の比率が大きく、ダミープランターからの蒸発量が蒸発散量の70%程度と高くなっている。また、壁面緑化植物における葉面からの日蒸散量は、0.6 mm 程度であった。

### 3.1.3 考察

壁面緑化による周辺温熱環境への影響に関して、熱収支評価を試みた。

図 3.4 には、8月2日および6日における長短波放射計で計測した、壁面

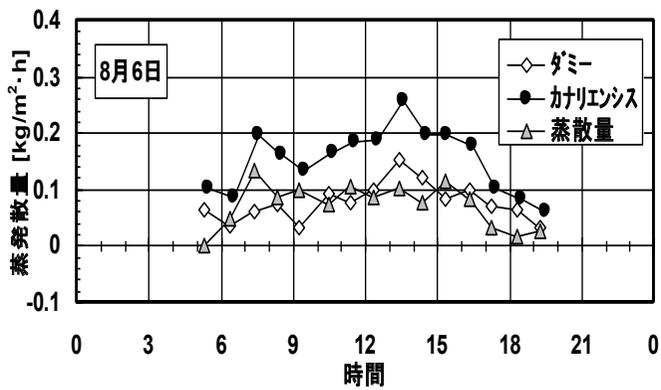
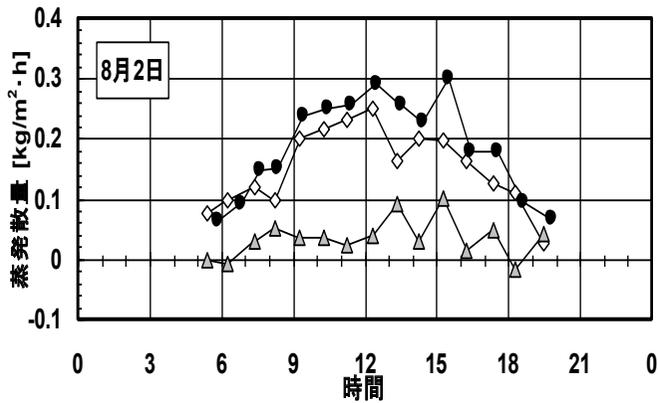
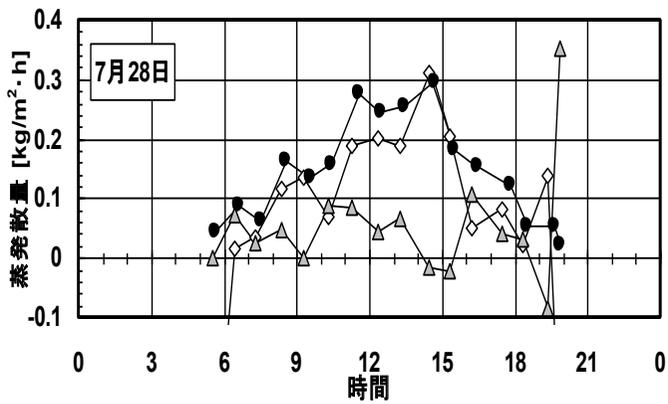


図 3.3 重量法による蒸発散量の経時変化

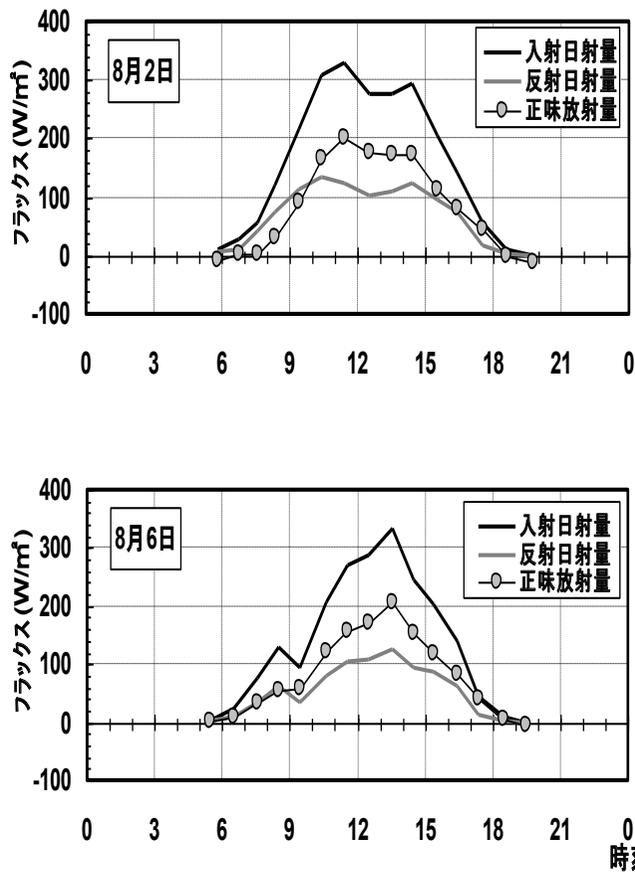


図 3.4 正味放射量と潜熱フラックスの経時変化

への入射・反射日射量と正味放射量(長波・短波放射の収支量)の経時変化を示す。両日とも、南向きの壁面に試験体を設置して実験を行っているために入射日射が小さく、入射日射は最大で  $300 \text{ W/m}^2$  程度、正味放射量は最大で  $200 \text{ W/m}^2$  程度であった。

重量法によって得られた蒸散量  $E(\text{kg/m}^2 \cdot \text{h})$  から潜熱フラックスを算出した。算出に用いた式は以下に示す。

$$LE = L \times E$$

$$L = 2.5 \times 10^6 - 2400 \times \theta_a$$

ここで、 $LE$ : 潜熱輸送量 [ $\text{W/m}^2$ ]、 $L$ : 気化の潜熱 [ $\text{J/kg}$ ]、 $E$ : 蒸発速度 [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$ ]、 $\theta_a$ : 表面、外気温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

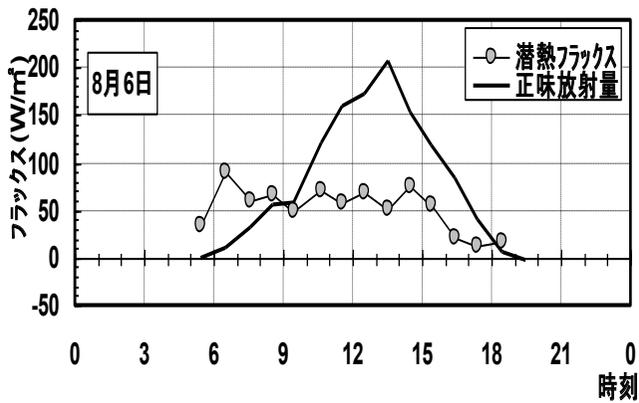
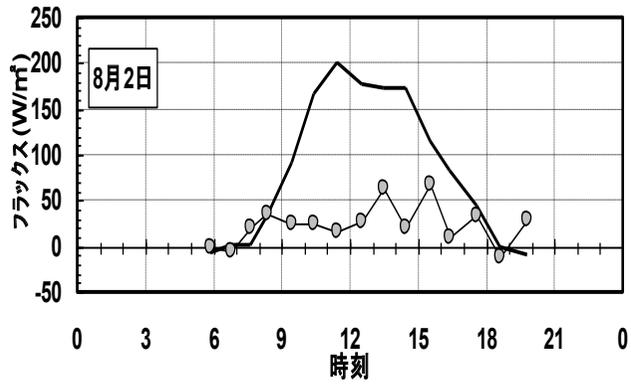


図 3.5 日射量と正味放射量の経時変化

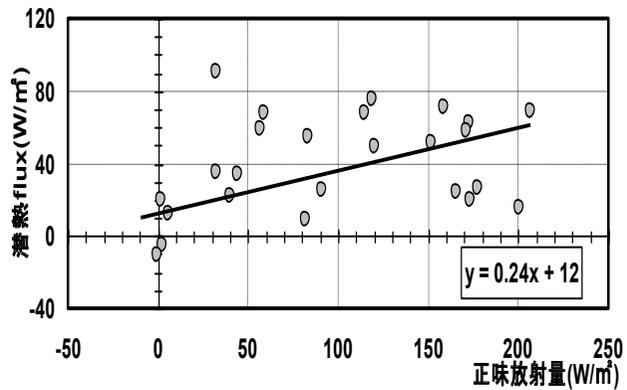


図 3.6 正味放射量と潜熱フラックスの経時変化

潜熱フラックスの経時変化を正味放射量の測定値と併せて、**図 3.5** に示す。経時変化では、日中における潜熱フラックスは最大で  $80\text{W/m}^2$  程度に達している。また、正味放射量と潜熱フラックスの関係を**図 3.6** に示す。正味放射量と潜熱フラックスの関係は、ばらつきは見られるものの、図の傾向から、ヘデラカナリエンスでは正味放射量の約 25%が蒸散による潜熱で消費されていることになる。日蒸散量は  $0.6\text{mm}$  程度であり、その割合に比べると、正味放射量に対する潜熱フラックスの割合が大きいことが特徴的であるといえる。

以上の結果より、壁面緑化を行うことによって、正味放射の約 25%を蒸散に伴う潜熱で消費し、その分壁面からの顕熱フラックスや建物内への貫流熱を低減する効果が期待される。夏季日中では、顕熱フラックス低減による周辺暑熱環境の緩和や、貫流熱低減に伴う空調負荷低減といった効果が期待できるものと考えられる。

## まとめ

壁面緑化で使用されているヘデラカナリエンスを用いた実験を行い、蒸散効果に関する評価を試みた。実験で得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 重量法による計測結果から推計した、つる植物による壁面緑化の日蒸散量は、 $0.6\text{ mm}$  程度であった。
- (2) 壁面緑化の表面における、蒸散に伴う潜熱フラックスは正味放射の約 25 %であった。蒸散による潜熱消費の分、壁面からの顕熱や建物への伝導熱フラックスの低減効果が期待され、夏季日中の周辺暑熱環境の緩和や空調熱負荷を低減する効果が期待できる。

今回の実験で得られた結果は、実験計測期間やデータ数も限定されている等の理由から、さらにデータの蓄積を図ることが必要と考えられる。特に蒸散量の推定法に関しては、他の評価手法（例えば熱収支項の潜熱以外のフラックスを高精度に測定し、蒸散量を残差としての算出など）の検討が必要と考えられる。壁面緑化の蒸散による効果を明らかにすることで、都市の温熱環境改善の定量的な効果計測と評価技術の確立に寄与するものと考えられる。

## 3.2 パネル型の蒸発散量の計測と温熱環境改善効果

建物緑化に関しては屋上緑化での蒸発散量の計測や熱収支について基礎的なデータや解析例は多くあるが、壁面緑化については蒸発散量の熱的效果について、実証的な計測データに基づき検証した例は限られている。

本節では重量法より得たパネル緑化材からの蒸発散量の計測値から潜熱フラックスを算出し、正味放射量との関係から壁面緑化によるパネル前面での温熱環境改善効果について、定量的に評価を行い、今後の壁面緑化の推進に資するための基礎的資料を得ることを目的とする。

### 3.2.1 研究の方法

#### (1) 実験装置

建築研究所実験施設棟の1階屋上部の南に面した壁に、緑化パネル試験体を設置した。

- ① 緑化パネル試験体は1ユニットが縦30cm×横30cm×厚さ8cmのピートモスを基盤材とした緑化パネルを縦、横各6個の計36個のユニットで構成し、縦1.11m×横1.11mの試験体を、パネル裏側での管理作業等を想定し、建物壁面からは約50cm程離すとともに、地表から約1mの地点に設置した。
- ② 緑化パネル試験体の使用植物は、アメリカツルマサキ (*Euonymus fortunei* (Turcs.) Hand. -Mazz.) である。アメリカツルマサキは、常緑つる性植物で登攀性を有するため、壁面緑化植物として使用されており、今回実験に使用した植物は、埼玉県大里郡寄居町の苗圃温室において同一の親木から採取して栽培された2年生のさし穂である。さし穂はタテ40mm、ヨコ40mm、深さ50mmの四角錐のセルトレイ中にピートモスとバーク堆肥、赤土を1.4:8の比率で混合した培土で栽培されたもので、2004年5月にピートモスを素材とするパネルの基盤に1ユニット当たり13個の苗を定植した後、屋外圃場にて寒冷紗で調整された環境下で管理されている。植物の被覆厚は8~12cmであった。
- ③ 緑化パネル試験体を構成するユニットでの植物の繁茂状態を把握するため、計測後に試験体ユニット30cm四方の葉を全て切除し、葉面積をスキャナーで読み取った。
- ④ この緑化パネル試験体(以下「緑化パネル」という。)に隣接した場所に、緑化パネルを構成しているユニットと同等のユニットを重量測定用として設置した。(写真3.2参照)緑化パネルおよび計測機器の設置状を図3.7に示す。



写真 3.2 電子秤を使用した蒸発散量の計測状況

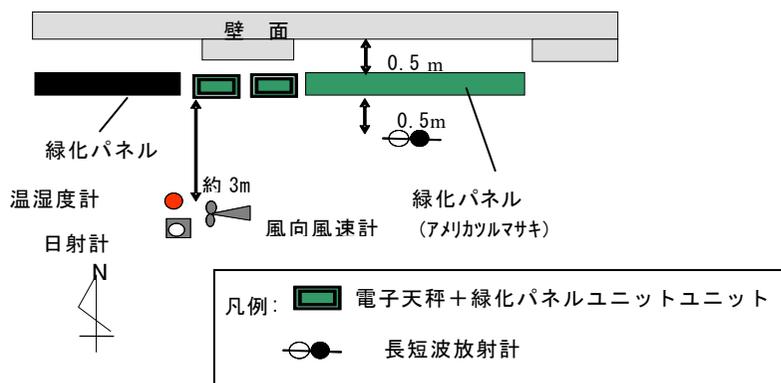


図 3.7 緑化試験体および計測機器設置状況

## (2) 測定機器と計測方法

測定項目と測定機器について表 3.3 に示す。

- ① 緑化パネル試験体から 50 cm ほど離して、高さ約 2 m の地点に長短波放射計 (英弘精機社製:MR-50) を設置した。長短波放射計は水平ではなく、壁面と平行して鉛直方向横向きに設置し、入射放射量(L↓)と反射放射量(L↑)、入射日射量(S↓)と反射日射量(S↑)を計測した。(写真 3.3 右参照)
- ② 温度・湿度・風向・風速・日射量については、緑化パネルから水平方向に約 3 m 離れた地点に、温湿度計、風向風速計、日射計を設置し、自動計測を行った。(写真 3.3 左参照)

表 3.3 測定項目と計測機器

計測項目	計測機器名	型番	数量
気温・湿度	温湿度計	VAISALA 社製 (HMP35D)	1 基
風向・風速	風向・風速計	小笠原計器製作所社製 (CW105)	1 基
日射量	日射計	ブリード社製 (PCR-02)	1 基
入射放射量			
反射放射量			
入射日射量	長短波放射計	英弘精機社製 (MR-50)	1 基
反射日射量			
蒸発散量	電子天秤	新光電子社製 (CGX-60K)	2 台
土壌水分率	土壌水分計	ウイジン社製 (UIZ-SM-2X)	2 基



写真 3.3 気象要因(左)と長短波放射量(右)の計測状況

- ③ 蒸発散量は、重量測定用のユニットを電子天秤に載せて自動計測し、減少した重量より算出した。緑化試験体の環境条件に近づけるため、ユニットの周囲を断熱性の良い発泡スチロールで囲い、試験体に隣接して設置した。
- ④ ユニット培土内の土壌水分は、土壌水分計の電極針(針長 6cm)を培土内に埋設して、試験体の重量と同時に土壌体積含水率を自動計測した。
- (3) 測定期間と灌水条件
- ① 緑化パネルの設置は、2005 年 7 月下旬に行い、計測機器の設置を行った後、気象観測や放射・温度環境は 8 月 1 日より計測を開始した。

- ② 重量測定については、天候状況を見ながら随時行ったが、解析では比較的天候に恵まれた 2005 年 8 月 19 日から 8 月 21 日までの 3 日間を対象とした。このうち、8 月 20 日と 21 日の 2 日間は、試験体のうち 1 体のユニットをポリエチレンで覆い、植物からの蒸散量を重量変化量から算出した。
- ③ 灌水については、試験体設置後降雨状況を考慮しながら、3~4 日に 1 回、5mm 程度の灌水を行った。8 月 17 日に 18 時から 10 分間、ドリップ式の自動灌水で十分に灌水を行った後、解析対象期間である 8 月 19 日から 21 日の期間期間中に灌水は一切行わなかった。

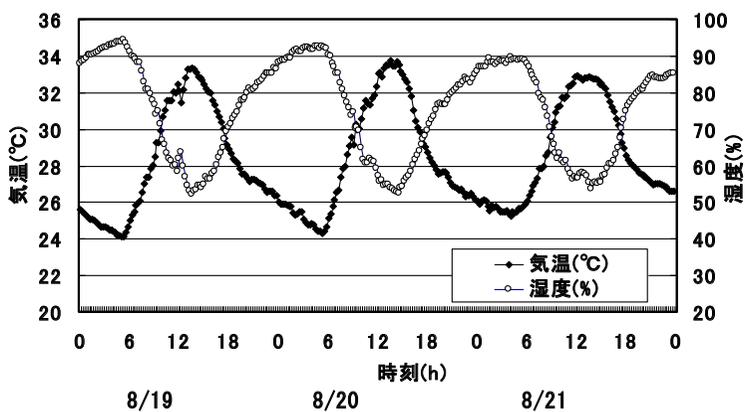
### 3.2.2 計測結果

#### (1) 気象概況および葉面積密度

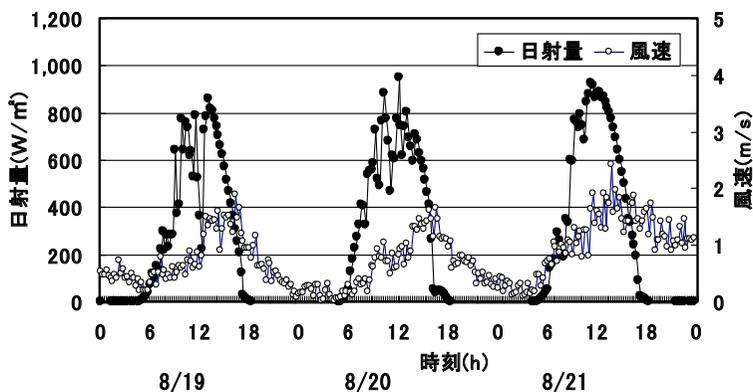
蒸発散の実験計測を行った 8 月 19 日から 21 日までの気象条件として、図 3.8 に気温・相対湿度・日射量・風速の経時変化を示す。この期間中における天候は、いずれの日も時折雲がかかったが、終日晴天が続き、また、気温は日射量の変化と同様の日変化を示し、日最高気温はいずれの日も 30 °C を超す真夏日であり、最高気温の平均は 33.3 °C、また最低気温の平均は 24.6 °C、3 日間の平均気温は 28.4 °C であった。また、相対湿度は最高湿度の平均が 92%、最低湿度の平均が 53 % で、3 日間の平均は 76 % であった。日射量は、日中の最高値が 3 日とも 800 W/m<sup>2</sup> 以上であった。風速は、いずれも午後に風速が大きくなる傾向が見られ、3 日間の中では 8 月 21 日の風速が高く、最高値が 2.4 m/s、日平均では 1.0 m/s を示し、他の計測日より平均して約 0.3~0.4 m/s 大きい値であった。8 月 21 日の日中の風速値を除けば、気温、相対湿度、日射量については、3 日間ともほぼ同様の経時変化を示した。

次に、8 月 19 日から 21 日までの土壌体積含水率の経時変化を図 3.9 に示す。気温と日照が上昇するにつれて、蒸発散量も上昇するため、基材中の土壌水分の減少する割合も大きく、日射量が 0 となる日没後の 19:00 以降は植物からの蒸散も無くなるため、土壌水分率も横ばいで推移している。8 月 19 日の 0 時には灌水後約 30 時間が経過し、54.9% であるが、8 月 20 日の 0 時には 43.9 % となり、24 時間で 11% が減少している。同じく、8 月 21 日の 0 時には 33.6% となり、24 時間で 10.3 % が減少している。

さらに、8 月 22 日の 0 時には 25.5 % となり、24 時間で 8.1 % が減少し、時間の経過とともに土壌体積水分率が小さくなるにつれて、減少率は漸減する傾向にある。3 日間では約 29.4% が減少した。なお、重量法の実験計測後に算出したアメリカツルマサキの葉面積指数は 1.48 であった。



気温・湿度の経時変化



日射量・風速の経時変化

図 3.8 測定期間中の気象条件

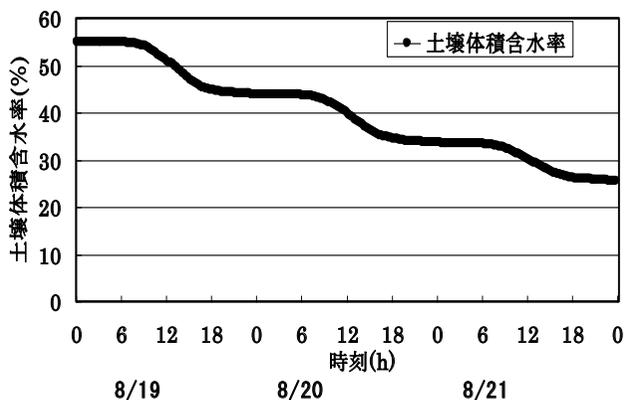


図 3.9 土壌体積含水率の経時変化

### 3.2.3 重量法による蒸散量の計測結果

#### (1) 日蒸発散量

蒸発散量は、アメリカツルマサキを使用した緑化パネルの 1 ユニットの電子天秤に載せ、自動計測により重量変化を 1 分毎に計測したものを、ユニットからの蒸発散量とし、面積比からユニット 1 m<sup>2</sup>あたりの蒸発散量として換算した。なお、重量の測定値については、風の影響による電子天秤の計測値のばらつきを平準化するため、30 分の移動平均をとった。計測期間中の日積算蒸発散量は 0 時から 24 時までの 24 時間の重量変化量から算出した。ユニット 1 m<sup>2</sup>あたりの日中での蒸発散量の経時変化を図 3.10 に示す。計測結果から得られた日積算蒸発散量は、表 3.4 に示すとおりであり、8 月 19 日が最も多く 4,308 g/m<sup>2</sup>となり、8 月 20 日が 4,015 g/m<sup>2</sup>となり、8 月 21 日が 3,833 g/m<sup>2</sup>と漸減している。蒸発散量の減少傾向は、土壌体積含水率の減少傾向に概ね符合している。これより、灌水から中 1 日おいた 3 日間の日蒸発散量は、平均で 4,052g/m<sup>2</sup>であった。

図 3.10 より、いずれの計測日もほぼ同様の日変化を示し、気温・日射量が増大するにつれて増大する傾向を示し、気温・日射量が最大ピークとなる 12:00 に蒸発散量も最高値として時間当たり 457~576 g/m<sup>2</sup>を示した。

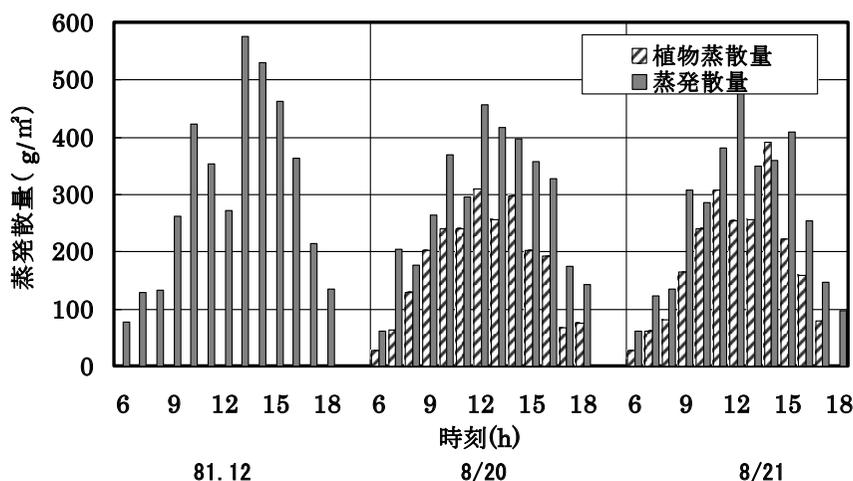


図 3.10 蒸発散量の推移 (8/19-8/21)

## (2) 植物からの日蒸散量

植物材料であるアメリカツルマサキからの蒸散量を計測するため、8月20日と21日の2日間は、使用した緑化パネル試験体のうちの1ユニットをポリエチレンで覆い、蒸散量を算出した。ポリエチレンは、ユニットパネルの基材であるピートモスの周囲を空隙ができないように密閉し、基材から植物の突出部分はビニールテープで固定して、基材からの蒸発が起こらないようにした。計測結果から得られた日蒸散量は、表 3.4 に示すとおりであり、8月20日が2,443 g/m<sup>2</sup>、8月21日が2,434 g/m<sup>2</sup>であり、2日間の平均では2,438g/m<sup>2</sup>であった。蒸散量の最高ピークは、8月20日が12時で311 g/m<sup>2</sup>、21日が14時で392 g/m<sup>2</sup>であり、2日間の平均は351 g/m<sup>2</sup>を示した。これより、植物(アメリカツルマサキ)からの蒸散量は、パネル材からの蒸発散量の約60%に相当する。なお、図 3.10 より8月21日の14時には、植物からの蒸散量がユニットからの蒸発散量を上回る異常値が見られた。これは、この日の風速が大きかったことに加えて、今回の計測において植物からの蒸散量を計測する際に基材の周囲をポリエチレンで覆い、基材からの蒸発量が生じない状態で計測を行ったため、覆わなかった場合よりも基材内の温度が上昇していたことも要因と考えられる。植物からの蒸散量と基材そのものからの蒸発量の計測については、基材の表面温度の計測や同一の灌水条件下で基材のみの重量変化を計測する等、さらに精査を加える必要があると考えられる。

**表 3.4 蒸発散量の計測結果**

区分	項目	8/19	8/20	8/21	平均
ユニット	日蒸発散量 (g/m <sup>2</sup> )	4,308	4,015	3,833	4,052
	ピーク時 (g/m <sup>2</sup> )	576	457	487	507
植物	日蒸散量 (g/m <sup>2</sup> )	—	2,443	2,434	2,438
	ピーク時 (g/m <sup>2</sup> )	—	311	392	351
日蒸散量/日蒸発散量		—	0.61	0.64	0.60

### (3) 潜熱フラックスと正味放射量との関係

重量法による計測値から得られた蒸発散量から、(1)式を用いて潜熱フラックス(輸送量)を算出した。

$$LE = L \times E$$

$$L = 2.5 \times 10^6 - 2400 \times \theta_a \quad (1)$$

ここで、 $LE$ : 潜熱輸送量 [ $W/m^2$ ],  $L$ : 気化の潜熱 [ $J/kg$ ],  $E$ : 蒸発速度 [ $kg/m^2 \cdot h$ ],  $\theta_a$ : 表面・外気温度 [ $^{\circ}C$ ]

得られた結果は表 3.5 に示すとおりである。これより、8月20日の潜熱フラックスの日積算量は、 $9.70 MJ/m^2$ であり、ピーク時は14時で  $304.8 W/m^2$ であった。同じく、8月21日の日積算量は  $9.27 MJ/m^2$ 、ピーク時は12時で  $325.6 W/m^2$ であった。2日間の平均では、潜熱フラックスの日積算量は、 $9.49 MJ/m^2$ であり、ピーク時は  $315.2 W/m^2$ であった。また、植物材であるアメリカツルマサキの蒸散による潜熱フラックスについて、8月20日の日積算量は  $5.90 MJ/m^2$ であり、ピーク時は12時の  $207.5 W/m^2$ であった。同じく、8月21日の日積算量は、 $5.88 MJ/m^2$ であり、ピーク時は14時の  $262.3 W/m^2$ であった。潜熱フラックスの日積算量は、2日間の平均で  $5.89 MJ/m^2$ であり、ユニットの約6割を占め、ピーク時では平均で  $234.9 W/m^2$ であり、ユニットの約7割を占めた。

**表 3.5 潜熱フラックスと正味放射量**

区分	項目	種類	8月20日	8月21日	平均
潜熱フラックス (LE)	日積算 ( $MJ/m^2$ )	(a) ユニット	9.70	9.27	9.49
		(b) 植物	5.90	5.88	5.89
		(b)/(a)	0.61	0.63	0.62
	ピーク時 ( $W/m^2$ )	(a) ユニット	304.8	325.6	315.2
		(b) 植物	207.5	262.3	234.9
		(b)/(a)	0.68	0.81	0.74
正味放射量 (Rn)	日積算 ( $MJ/m^2$ )		7.65	8.72	8.19
	ピーク時 ( $W/m^2$ )		326.3	369.4	347.9

次に、潜熱フラックスによる熱的効果を正味放射量との関係から検討した。正味放射量は、長短波放射計により計測した入射放射量、反射放射量、入射日射量、反射日射量の各計測値の放射収支から、(2)式により算出した。

$$R_n = (S_{\downarrow} - S_{\uparrow}) + (L_{\downarrow} - L_{\uparrow}) \quad (2)$$

ここで、 $R_n$ : 正味放射量[W/m<sup>2</sup>],  $S_{\downarrow}$ : 入射短波放射(日射)量[W/m<sup>2</sup>],  $S_{\uparrow}$ : 反射短波放射(日射)量[W/m<sup>2</sup>],  $L_{\downarrow}$ : 入射長波放射量[W/m<sup>2</sup>],  $L_{\uparrow}$ : 反射長波放射量[W/m<sup>2</sup>]

算出結果は、表 3.5 に示すとおりである。また、潜熱フラックスと正味放射量との経時関係を図 3.11 に示す。これより、潜熱フラックスと正味放射量との 1 日の変化の様子は相似しており、正味放射量の増加につれて潜熱フラックスも増加している。いずれも、12 時から 14 時にかけてピークを示した後、減少している。正味放射量については、6 時から 8 時と 16 時から 18 時にかけては 100 W/m<sup>2</sup>以下となり、潜熱フラックスよりも極度に減少が見られたが、これは、太陽高度が低くなるこの時間帯において短波日射量が急激に減少するのに対して、潜熱フラックスとしてユニットからの蒸発による熱の輸送が持続し、放射収支総量である正味放射量を上回ったためと考えられる。8 月 20 日の日積算量は、7.65 MJ/m<sup>2</sup>であり、ピーク時は 13 時で 326.3 W/m<sup>2</sup>を示した。同じく、8 月 21 日の日積算量は、8.72 MJ/m<sup>2</sup>であり、ピーク時は 13 時で 369.4 W/m<sup>2</sup>を示した。2 日間の平均では、日積算量は 8.19 MJ/m<sup>2</sup>であり、ピーク時は 347.9 W/m<sup>2</sup>であった。

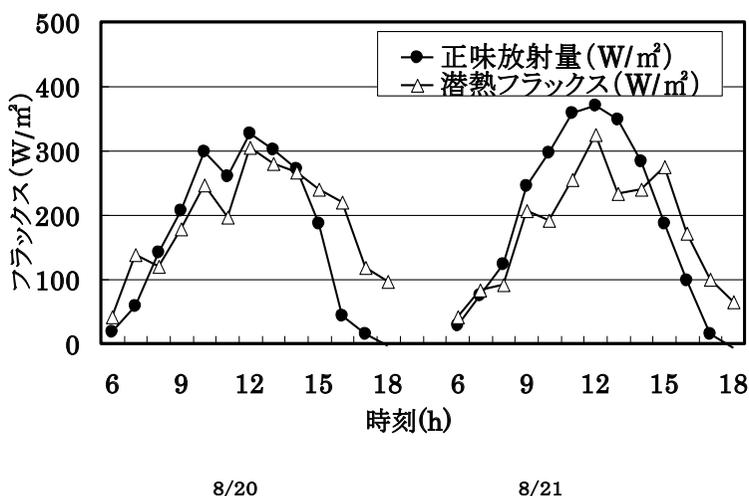


図 3.11 潜熱フラックスと正味放射量の経時変化

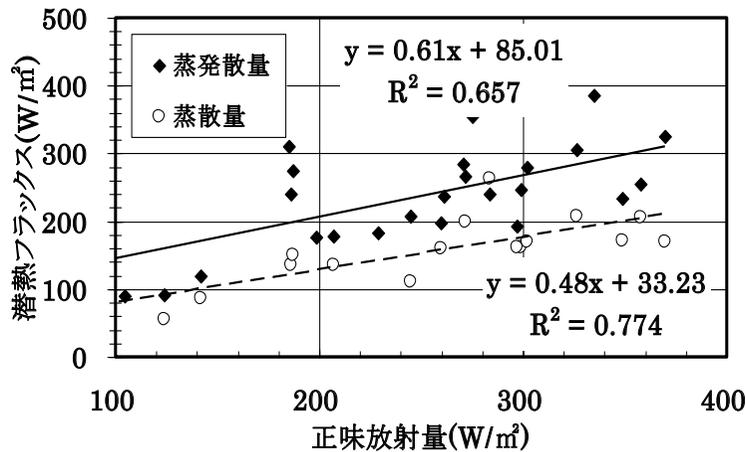


図 3.12 潜熱フラックスと正味放射量の関係

図 3.12 は、潜熱フラックスと正味放射量との関係を示したものである。ここで、蒸発散が安定している正味放射量 100 W/m<sup>2</sup>以上を解析の対象とした。潜熱フラックスと正味放射量との間には、正の相関が認められ、正味放射量の上昇に伴い、潜熱フラックスも上昇する傾向にある。回帰直線の傾きより、ユニットでは正味放射量の増加量の約 60 %が潜熱として消費されていた。同じく、植物材であるアメリカツルマサキからの蒸散による潜熱フラックスと正味放射量との間においても、正の相関が認められ、正味放射量の増加量の約 50 %が潜熱として消費されている。

これより、正味放射量の増加分に対する潜熱フラックスの増加量は植物からの蒸散量による寄与が培土からの蒸発量による寄与よりも高いことが示唆された。正味放射量に対する潜熱フラックスの割合が高いほど、建物外部側に対する顕熱フラックスの上昇を抑止し、温熱環境の改善に寄与していると言える。したがって、蒸発散による潜熱フラックスが正味放射量の大半を占めていることは、緑化パネル材を用いた壁面緑化による顕熱フラックスの低減効果の大きいこと、中でも植物からの蒸散による熱的効果の高いことが示唆された。

### 3.2.4 考察

植物体からの蒸散作用はそのほとんどが葉面の気孔を通じて行われ、気孔以外からの蒸散量は 5%程度と言われている<sup>10)</sup>。緑化パネル材からの蒸

発散作用により大気中に放出された水分が液体から気体へと変化(気化)する際に潜熱として消費される。潜熱は外気温の上昇を招かず、蒸発散量が多いほど潜熱フラックスも増大し、ヒートアイランドの原因となる顕熱フラックスの増大を抑制することが期待できる。

加藤ら<sup>11)</sup>は、アスファルト路面上にプラスチック製のコンテナを設置し軽量土壌とマサ土を培土とし、メキシコマンネングサとティフトンシバの2種の植物を用いて、蒸発散量を土壌水分と日射量との関係で解析した結果、日平均蒸発散量は6.5 mm程度であったことを報告している。

今回の計測結果から得た壁面緑化によるユニットからの日蒸発散量は3.6 mmであった。既往の研究例と比べると、本研究での計測値は低い数値を示したが、これは今回使用した植物の葉面積指数が、1.48と比較的葉量が少なかったこと、重量法での計測期間中は灌水を行っておらず、培土の保水条件も異なっていることが主たる要因と推察される。今後、培土の水分特性や水分張力別の水分量の計測等による培土の保水条件の検討が課題と考えられる。

一方、潜熱フラックスと正味放射量との関係について、緑化パネル材からの潜熱フラックスは、正味放射量に対して約60%を占めていた。4.1においてプランターに配植したヘデラカナリエンス(*Hedera Canariensis*)を用い、重量法により蒸散量を計測した結果では、潜熱フラックスは正味放射量の増加量の約25%であり、今回の計測結果の1/2以下であった。

使用植物も異なっており、単純な比較はできないが、壁面緑化においてプランターを使用した場合よりも緑化パネル材の方が、植物と培土が一体化することにより蒸発散の効率性を高めていることが考えられる。培土条件の違いにより蒸発散量が大きく異なることは、壁面緑化による潜熱フラックスを増大させる上で、植物と一体となった培地・培土の存在と構成が有効であることを示唆している。

## まとめ

実験計測と解析より得られた主な結果は、以下のとおりである。

- 1) ユニットからの蒸発散量は日積算値で約4.1 kg/m<sup>2</sup>(4.1mmに相当)であり、このうち植物からの蒸散量は約2.4 kg/m<sup>2</sup>(2.4mmに相当)となり、ユニット全体の約60%を占めた。
- 2) 潜熱フラックスと正味放射量との間には、正の相関が認められ、蒸発散量に伴う潜熱フラックスの正味放射量の増加量に占める割合は、ユニ

ットが約 60 %，うち植物が 50 %であり，植物からの蒸散量の寄与の高いことが示唆された。

以上の結果から，植物の蒸発散による潜熱消費の分，壁面からの顕熱フラックスや建物への伝導熱フラックスを低減する効果が期待され，夏季日中の暑熱環境を緩和する効果が期待できる。今回の実験計測の結果から，緑化パネル材による顕熱抑制効果は大きく，中でも植物からの蒸散により潜熱を消費する役割の大きいことが示唆された。

### 3.3 パネル型における蒸発散量の推計と熱収支

壁面緑化による蒸発散量の計測について実証的な計測データの蓄積は乏しく，また屋外において蒸散量を正確に捕捉することは難しいこと等から，温熱環境改善効果について定量的に検証した例も限られている。そこで，本節では重量法より得た緑化パネル材からの蒸発散量の計測値と気象データから算出した飽差から湿気伝達特性を示すパラメータを算出して，パネルからの蒸発散量についての簡易推計式を導出するとともに，SAT計を用いて顕熱フラックスを算出し，パネル面での熱収支を検討することで，壁面緑化による温熱環境改善効果を定量的に評価するための基礎的資料を得ることを目的とする。

#### 3.3.1 SAT計の制作・設置

緑化パネル表面の顕熱フラックスを算出するため，緑化パネルを模擬したSAT計ユニットを製作して計測を行った。「SAT計」を用いた計測方法については，建材試験センター規格（JSTM）<sup>12)</sup>で規定されており，主として建物外表面对流熱伝達率の測定を目的として使用されている<sup>13)</sup>。

ここで，「SAT」とは「Sol-Air Temperature(放射空気温度)」の略称で，「建物の周壁近傍の空気の温度に，その壁面に作用する放射の強さをこれと等価な空気の温度に換算して加味した温度。」と定義される<sup>10)</sup>。

この規定と萩島ら<sup>13)</sup>を参考に，図 3.13 に示すとおり SAT計は緑化パネルのユニットと同じサイズとし，使用植物と類似した形状のプラスチック製の模擬植物(市販)を，緑化パネルとほぼ同じ葉面積となるように断熱性の基盤材に固定し，全体をつや消し黒色にて着色した。

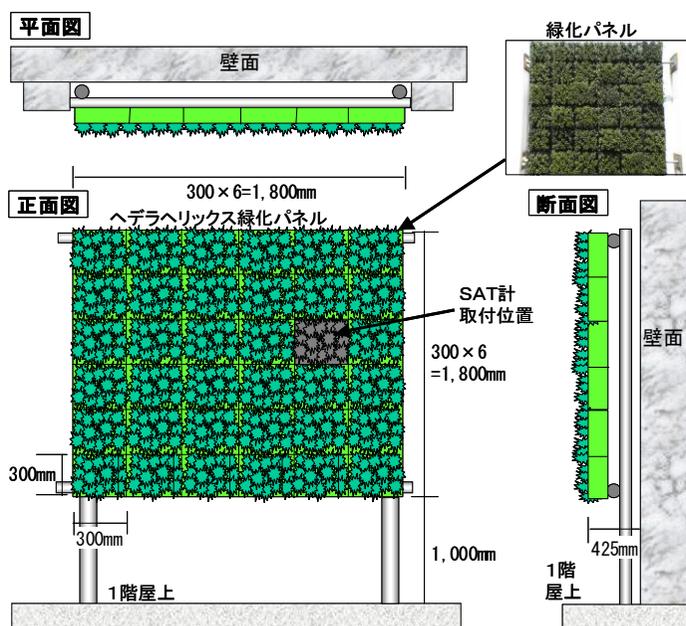


図 3.13 SAT計の取付け位置

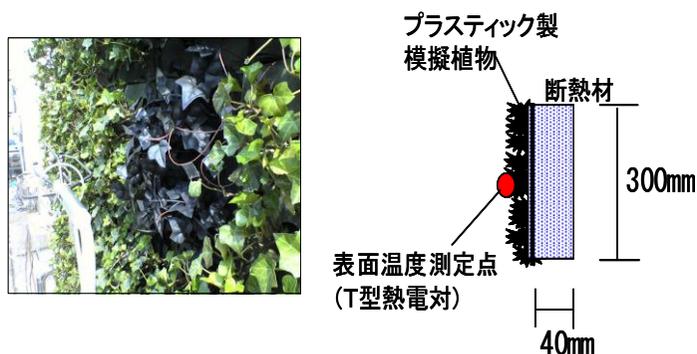


図 3.14 SAT計の概要

製作したSAT計は、緑化パネルの一部としてパネル試験体の中に組込んで測定を行った。表面温度を計測するため、パネル試験体の葉面に5点と基材表面に2点、SAT計の葉表面に1点の計8点にT型熱電対(福音特殊金属社製:  $\phi 0.2\text{mm}$ )を設置した。SAT計の概要を図3.14に示す。SAT計による計測は、2005年8月11日に行った。

### 3.3.2 蒸発散量の推計

試験体ユニットからの蒸発散量(E)は、植物(アメリカツルマサキ)からの蒸散量(E<sub>1</sub>)とユニットの基材からの蒸発量(E<sub>2</sub>)の合計値である。すなわち

$$E = E_1 + E_2 \quad (3)$$

今回の蒸発散量の実験計測では、ユニット全体の重量変化量から蒸発散量(E)を求め、ユニット基材の表面をポリエチレンで覆うとともに、側面と後方を断熱材(発泡スチロール)で覆った試験体の重量変化量から植物からの蒸散量(E<sub>1</sub>)を計測している。

一方、蒸発散量は、緑化パネル材表面部における水蒸気濃度と大気の水蒸気濃度の差である「飽差」によって左右され<sup>14)</sup>、また前者は葉の表面温度での飽和比湿と見なせる<sup>15)</sup>ことから、植物からの蒸発量(E<sub>1</sub>)は(4)式により、またユニット基材からの蒸発量(E<sub>2</sub>)は(5)式で表すことができる。

$$E_1 = A_1 \cdot k_1 (q_l - q_a) \quad (4)$$

ここで、A<sub>1</sub>: 葉面積 [LAI×ユニット面積, m<sup>2</sup>], LAI: 葉面積指数, k<sub>1</sub>: 定数, q<sub>l</sub>: 葉面温度での飽和比湿 [kg/kg], q<sub>a</sub>: 大気の比湿 [kg/kg]

$$E_2 = A_2 \cdot k_2 (q_s - q_a) \quad (5)$$

ここで、A<sub>2</sub>: 基材面積(0.09 m<sup>2</sup>), k<sub>2</sub>: 定数, q<sub>s</sub>: 基材表面温度での飽和比湿 [kg/kg], q<sub>a</sub>: 大気の比湿 [kg/kg]

試験体ユニットからの蒸発散量(E)は、(3)、(4)、(5)式より、

$$E = A_1 \cdot k_1 (q_l - q_a) + A_2 \cdot k_2 (q_s - q_a) \quad (6)$$

ここで、パラメータ k<sub>1</sub> と k<sub>2</sub> は、それぞれ植物の葉面並びにパネル基材面からの湿気伝達のしやすさを示す物性値を表す定数である。(4)式より、k<sub>1</sub> は試験体植物の葉面積(A<sub>1</sub>)と飽差(q<sub>l</sub> - q<sub>a</sub>)の積と計測値より得た蒸散量(E<sub>1</sub>)との単回帰分析による回帰直線の傾きから求めた。

図 3.15 は、E<sub>1</sub> と A<sub>1</sub>×(q<sub>l</sub> - q<sub>a</sub>) の関係を示したものである。これより、k<sub>1</sub> = 103.4 となり、(4)' 式 に示す予測式を導出した。

$$A_1 = 1.48 \times 0.09 = 0.14 \text{ m}^2$$

$$E_1 = A_1 \cdot k_1 (q_l - q_a)$$

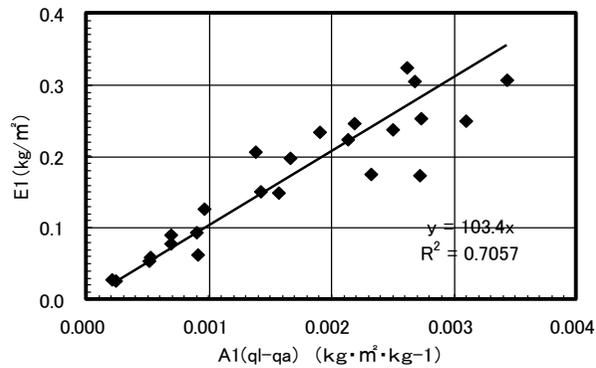


図 3.15 葉面積×飽差と蒸散量(実測値)との関係 (アメリカツルマサキ)

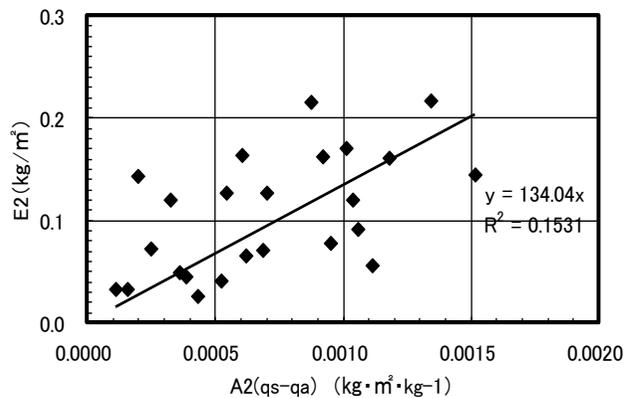


図 3.16 基材面積×飽差と蒸発量の関係(基材)

$$\cong 0.14 \times 103.4 (ql - qa) = 14.4 (ql - qa) \quad (4)'$$

次に、ユニット基材からの蒸発量( $E_2$ )は、(5)'式により算出できる。 $k_1$ と同様に(5)式における $k_2$ は、ユニットの基材面積( $A_2$ )と飽差( $qs-qa$ )の積と(5)'式で求めた蒸発量( $E_2$ )との単回帰分析の回帰直線の傾きとして、求めた。両者の関係を図 3.16 に示す。これより、 $k_2 = 134.0$ となり、ユニット基材からの蒸発量( $E_2$ )は、(5)''式で表すことができる。

$$E_2 = A_2 \cdot k_2 (qs - qa)$$

$$\cong 0.09 \times 134.0 (qs - qa) = 12.1 (qs - qa) \quad (5)''$$

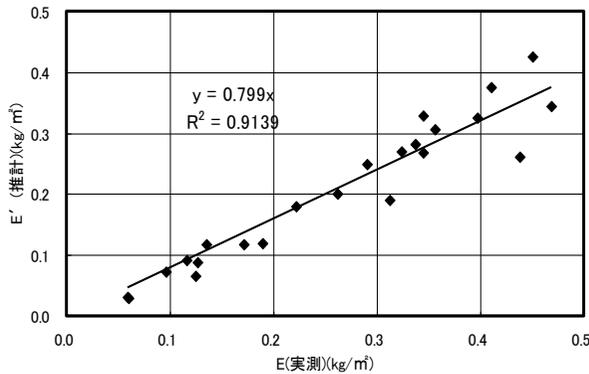


図 3.17 蒸発散量の実測値 (E) と推計値 (E´) との比較

$$E_2 = E - E_1 \text{ (実測値)} \quad (5)'$$

図 3.16 より、基材からの蒸発量が図 3.15 の植物からの蒸散量と比較して、数値のばらつきが大きくなり、飽差との相関も低くなっているのは、基材表面が葉面の裏側にあるため、日の当たる部分と陰になる部分では表面温度に相違が生じ、一様でないことが影響したものと推察される。(4)'、(5)" 式より緑化パネル材からの単位面積当たりの蒸発散量 (E´) は、(6)式で推計することができる。

$$\begin{aligned} E' &= 103.4 \cdot A_1 \cdot (q_l - q_a) + 134.0 \cdot A_2 \cdot (q_s - q_a) \\ &= 11.4 (q_l - q_a) + 12.1 (q_s - q_a) \end{aligned} \quad (6)$$

次に、(6)式を用いて得られた蒸発散量の予測値 (E´) と重量法により実験計測から得られた蒸発散量 (E) との関係について、図 3.17 に示す。これより、予測値と実測値との決定係数 R² は 0.91 となり、予測値は実測値によく近似している。(6)式により植物 (アメリカツルマサキ) とパネル基材の表面における飽差と葉面積指数から、使用材料の湿気伝達特性を反映した k₁、k₂ のパラメータを得ることで、パネルからの蒸発散量を推計することができた。すなわち、壁面緑化に使用される緑化植物や基材について、湿気伝達特性を表すパラメータ (k) についての基礎的データを蓄積させることにより、その都度蒸発散量と葉面積密度を計測しなくても、予め葉面積指数を仮定することで壁面緑化による蒸発散量を推定し、その温熱効果を定量的に予測することが可能になると考えられる。

### 3.3.3 熱収支からの検討

次に、SAT計から得られた顕熱フラックスより対流熱伝達率と物質熱伝達率を導出することで、緑化パネル表面での熱収支から潜熱フラックスを算出した。パネル表面における熱収支および放射収支は、序章の図1に示すとおり、それぞれ(7)式と(8)式で示すことができる。

$$\text{熱収支式} : Rn = H + LE + G \quad (7)$$

$$\text{放射収支式} : Rn = (1-a) \cdot S\downarrow + L\downarrow - \varepsilon\sigma Ts^4 \quad (8)$$

ここで、 $Rn$ : 正味放射量[W/m<sup>2</sup>],  $H$ : 顕熱フラックス[W/m<sup>2</sup>],  $LE$ : 潜熱フラックス[W/m<sup>2</sup>],  $G$ : 伝導熱フラックス[W/m<sup>2</sup>],  $S\downarrow$ : 入射日射量(短波放射量)[W/m<sup>2</sup>],  $L\downarrow$ : 大気から入射する長波放射量[W/m<sup>2</sup>],  $Ts$ : 表面温度[K],  $\sigma$ : ステファンボルツマン定数(=5.670×10<sup>-8</sup>W/m<sup>2</sup>, K<sup>4</sup>),  $a$ : 各試験体日射反射率(アルベド),  $\varepsilon$ : 放射率

図3.14のSAT計では蒸発と伝導が無いと仮定できるため、(8)式で $LE$ ,  $G$ は0となり、 $Rn=H$ と見なすことができる。また、SAT計表面をつや消し黒色で着色したことから、アルベドを0、放射率を1.0と仮定することで(9)式における正味放射量( $Rn$ )は入射日射量( $S$ )と大気放射量( $L\downarrow$ )および表面温度から算出される長波放射量( $\sigma Ts^4$ )より得ることができる。

すなわち、SAT計表面の顕熱フラックス( $H_{SAT}$ )は(9)式より算出できる。

$$H_{SAT} = Rn_{SAT} = S + L\downarrow - \sigma Ts_{SAT}^4 \quad (9)$$

成田<sup>14)</sup>を参考に、得られた顕熱フラックス( $H_{SAT}$ )と表面温度( $Ts_{SAT}$ )と気温( $Ta$ )の関係から、(11)式により対流熱伝達率 $\alpha$ [W/m<sup>2</sup>・K]を算出した。

$$\alpha = \frac{H}{(Ts - Ta)} \quad (10)$$

今回の実験においては、対流熱伝達率は風速との対応関係が良いため風速( $U$ ) [m/s]との回帰式により、以下の式を用いて算出することとした。

$$\alpha = 23.71 \cdot U^{0.6901} \quad (11)$$

次に、測定データとSAT計の実験で得られた対流熱伝達率を用いて(7)式における緑化パネル試験体の熱収支項の算出を行った。正味放射量( $Rn$ )

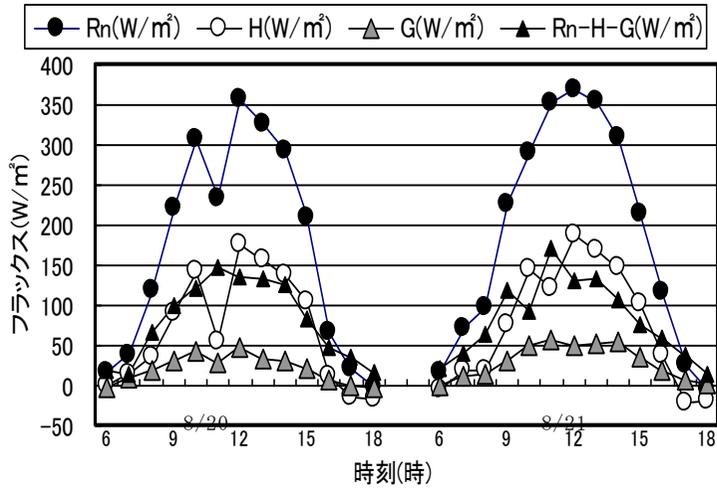


図 3.18 正味放射量と熱収支各項の経時変化

については長短波放射計による測定値，伝導熱フラックス( $G$ ) は熱流計による測定値を用いた。ここで，SAT計の形状は植物パネルを模していることから，両者の伝達率は等しいものと考えることができる。そこで顕熱フラックス( $H$ )は，SAT計より得られる対流熱伝達率((12)式)と緑化パネル表面温度と気温の温度差を乗じることで算出し，熱収支式(8)の残渣から潜熱フラックス( $LE$ )を算出した。すなわち，

$$LE \doteq Rn - H - G \quad (12)$$

図 3.18 は，正味放射量( $Rn$ )と顕熱フラックス( $H$ )伝導熱フラックス( $G$ )並びに(13)式で求めた潜熱フラックス( $LE$ )の経時変化を図示したものである。これより，正味放射量の増加につれて，顕熱フラックスと潜熱フラックスも増加し，顕熱フラックスと潜熱フラックスはほぼ同じような変化を示していること，ピーク時には正味放射量が  $400 \text{ W/m}^2$  近くまで上昇しているのに対して，顕熱フラックスと潜熱フラックスはほぼ同様の変化を示し，ピーク時にも  $200 \text{ W/m}^2$  以下となり，いずれも正味放射量の約  $1/2$  程度にとどまり，潜熱フラックスによる顕熱フラックスを抑制する効果が高いことがわかる。これに対して，伝導熱はピーク時でも  $50 \text{ W/m}^2$  以下にとどまっていた。(6)式で求めた蒸発散量の推計値( $E'$ )を基に，次式より潜熱フラックスの推計値( $LE'$ )を算出した。

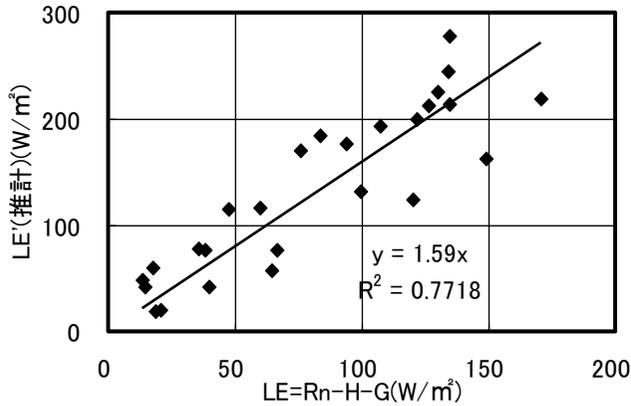


図 3.19 残差から求めた潜熱フラックスと推計値との比較

$$LE = (2.5 \times 10^6 - \theta a) \cdot E' \quad (13)$$

ここで、 $\theta a$  : パネル表面の外気温度 [°C]

(13)式より正味放射量(Rn)から顕熱フラックス(H)と伝導熱フラックス(G)の残差として求めた潜熱フラックス(LE)と、(6)式より算出した蒸発散量の推計値(E')を基に(14)式で求めた潜熱フラックスの推計値(LE')との関係は図 3.19 のようになる。これより、回帰直線の相関も高く、両者はほぼ近似している。このことは、(6)式より得た蒸発散量の推計値の妥当性を裏付けるとともに、この推計値が、緑化パネルからの蒸散量を、(8)式の熱収支式から、正味放射量とSAT計を用いて算出した顕熱フラックスと計測値より得た伝導熱フラックスとの残差により求めた値に、近似できることを示唆している。

壁面緑化の主要な温熱環境改善効果と考えられるパネル表面での蒸発散による潜熱フラックスについては、定量的なデータの蓄積は十分とは言えず、今後これらの基礎的データを蓄積させる上で、本研究で試みた蒸発散量の推計方法やSAT計の計測値により顕熱フラックスを導出して、熱収支から蒸発散による潜熱フラックスを定量化する方法により、緑化の温熱環境改善効果を定量的に評価することができた。

## まとめ

本節の結果より得られた主な知見は以下のとおりである。

- 1) 重量法によって得られた蒸発散量と飽差より蒸発散量の予測式を導出した結果、実測値ともよく近似させることができた。
- 2) この予測式の導出の際、湿気伝達特性を示すパラメータ(k)を設定した。植物の種類毎のパラメータ値を蓄積させることにより、葉面積密度を仮定することで飽差の計測値から壁面緑化における蒸発散量を予測することが可能となることが示唆された。
- 3) 正味放射量とSAT計から求めた顕熱フラックス、伝導熱フラックスの残差として算出した潜熱フラックスは、推計した蒸発散量を基に算出した潜熱フラックスの推計値とも整合した。

### 3.4 蒸発効率を指標とした壁面緑化の蒸発特性

壁面緑化については、前節までで述べたように蒸発散量の実測データの蓄積は不十分であり、壁面緑化による温熱環境改善効果についての解明と定量的な評価を行う上で、実測データに基づく蒸発散の熱収支特性を明らかにしていく必要がある。

蒸発散による熱収支については、成田らが既報<sup>16), 17), 18)</sup>にて算出した方法を参考として蒸発効率を指標とすることにより、壁面緑化による温熱環境改善効果についてシミュレーション評価等を行う場合のパラメータとしての活用が期待でき、実証性の高い定量評価が可能になると考えられる。

そこで、本節では、壁面緑化による温熱環境改善効果を定量的に捕捉することを目的として、壁面緑化に使用されている緑化パネルを試験体として、重量法による蒸発散の実験・計測を行うとともに、SAT計を用いた熱収支から対流熱伝達率と物質伝達率を求め、壁面緑化の蒸発散特性を示す指標として蒸発効率の算出を試みた。

#### 3.4.1 重量法による蒸散量の計測結果

計測結果から得られた日中蒸発散量は、表3.6に示すとおりであり、アメリカツルマサキでは8月19日が最も多く、 $4,308\text{g}/\text{m}^2$ となり、8月21日が $3,833\text{g}/\text{m}^2$ と暫減している。3日間の日中蒸発散量は、3日間平均で $4,052\text{g}/\text{m}^2$  ( $4.1\text{mm}$ に相当)であった。

表3.6 蒸発散量の計測結果

区分	項目	8/19	8/20	8/21	平均
アメリカツルマサキ	日蒸発散量 (g/m <sup>2</sup> )	4,308	4,015	3,833	4,052
	ピーク時 (g/m <sup>2</sup> )	576	457	487	507
区分	項目	8/5	8/6	8/7	平均
ヘデラヘリックス	日蒸発散量 (g/m <sup>2</sup> )	61,110	4,839	3,678	4,899
	ピーク時 (g/m <sup>2</sup> )	674	428	428	510

一方、ヘデラヘリックスでは8月5日が最も多く6,180g/m<sup>2</sup>となり、8月6日が4,839g/m<sup>2</sup>、8月7日が3,678g/m<sup>2</sup>と暫減している。8月5日の蒸発散量が大きくなったのは、前日8月4日の夕刻に十分な灌水を行っており土壌含水率が高かったこと、終日晴れていて最高気温が34.2℃を記録し、他の計測日より日照時間も長かったこと等が要因と推察される。3日間の日中蒸発散量は、3日間平均で4,899g/m<sup>2</sup>(4.9mmに相当)であった。蒸発散量が暫減しているのは、計測期間中に灌水を行わなかったため、土壌中の水分量の減少に伴い、基材からの蒸発量と植物からの蒸散量も減少したと考えられる。いずれの計測日も気温・日射量の最大ピークとなる12:00~13:00に最高値を示し、時間当たりアメリカツルマサキでは457~576g/m<sup>2</sup>、ヘデラヘリックスでは428~674g/m<sup>2</sup>を示した。なお、重量法の実験計測後に算出したヘデラヘリックスの葉面積指数は1.45、アメリカツルマサキの葉面積指数は1.18であった。

### 3.4.2 対流熱伝達率と物質伝達率の算出

緑化パネル表面における熱収支および放射収支は、萩島ら<sup>7)</sup>の壁面緑化における伝熱モデル式を参考として、それぞれ以下の(15)式、(16)式で示される。

$$\text{熱収支式： } Rn = H + LE + G \quad (15)$$

ここで、 $Rn$ : 正味放射量[W/m<sup>2</sup>],  $H$ : 顕熱フラックス[W/m<sup>2</sup>],  $LE$ : 潜熱フラックス[W/m<sup>2</sup>],  $G$ : 伝導熱フラックス [W/m<sup>2</sup>]

$$\text{放射収支式} : Rn = (1-a)S\downarrow + L\downarrow - \varepsilon\sigma Ts^4 \quad (16)$$

ここで、 $a$  : 日射反射率 (アルベド),  $S\downarrow$  : 入射日射量(短波放射量) [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $L\downarrow$  : 大気放射量 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $\varepsilon$  : 放射率,  $\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数 ( $=5.670 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ),  $Ts$  : パネル表面温度 [ $\text{K}$ ]

本節では、対象とする緑化壁面に対して、長短波放射計を壁面に平行に設置して長波・短波の放射量を計測しており、同計測器で計測した入射日射量(短波)を下向き日射量( $S\downarrow$ ), 入射放射量(長波)を下向き大気放射量( $L\downarrow$ )として計測した。入射日射量(短波)( $S_{in}$ )には、太陽からの直達日射だけでなく、散乱日射、地表面で反射した日射量の一部も含まれる。また、入射放射量(長波)( $L_{in}$ )には、天空からの放射と大気放射だけでなく、地表面からの放射量も含まれる。

緑化パネル壁面の最下部と最上部では、地表面と天空部などの形態係数が異なり、入射放射量が異なる可能性があるが、本計測では、長短波放射計を対象とする緑化パネル壁面のほぼ中央部に設置して緑化面への入射放射量も平均化されていると考え、形態係数による補正は行っていない。

一方、計測前に魚眼レンズにて対象とする緑化壁面を捕捉し、対象とする緑化パネル試験体が画面の 8 割以上を占め、かつ地表面からの影響がほとんど見られない設置地点として地上から約 2m, 対象緑化壁面から 0.5m 離れた地点に長短波放射計を設置した。また、計測前に赤外カメラにて、周辺のコクリート壁面(白色塗装)と緑化パネル壁面との表面温度差がほぼ同じであったことを確認し、輻射放射量( $L_{out}$ )についても、形態係数による補正は行わなかった。

なお、地表面からは上向きの放射と顕熱フラックスが生じているが、赤外カメラで捕捉した緑化パネルの表面温度分布はほぼ均一で、高低差が見られなかったため、その影響については考慮していない。壁面への地表面からの顕熱フラックスの影響の程度や地表面からの温度勾配の正確な計測による熱収支メカニズムの解明については、今後の課題としたい。

SAT計では植物の葉は模擬植物であり、ユニット基材は断熱材(スタイロフォーム)で構成しているため、萩島らの先行研究<sup>9)</sup>を参考として、SAT計表面からの蒸発と断熱性基材への伝導は無いと仮定した。また、SAT計表面をつや消し黒色で着色していることから、(16)式においてアルベド( $a$ )を 0, 放射率( $\varepsilon$ )を 1.0 と仮定することで、正味放射量( $Rn$ )は入射日射量( $S_{in}$ )と入射放射量( $L_{in}$ )およびSAT計の表面温度から算出される輻射量( $L_{out}$ )により得ることができる。ここで、SAT計の表面温度( $T_{SAT}$ )は、

熱電対の計測値から算出した。SAT計では蒸発と伝導が無いと仮定できるため、(15)式において潜熱フラックス( $LE$ )、伝導熱フラックス( $G$ )は0となり、 $Rn = H$ と見なすことができる。また、SAT計表面をつや消し黒色で着色していることから、(16)式においてアルベド( $a$ )を0、放射率( $\varepsilon$ )を1.0と仮定することで、正味放射量( $Rn$ )は入射日射量( $S\downarrow$ )と長波放射量( $L\downarrow$ )およびSAT計の表面温度( $T_{SAT}$ )から算出される輻射量により得ることができる。SAT計の表面温度( $T_{SAT}$ )は、熱電対の計測値から算出した。これより、SAT計表面の顕熱フラックスは、(17)式から得ることができる。

$$H = Rn = S_{in} + L_{in} - \sigma T_{SAT}^4 \quad (17)$$

得られた顕熱フラックスと表面温度と気温の関係から、(18)式により対流熱伝達率( $\alpha$ )を算出した。ここで、対流熱伝達とは、壁体表面とその近傍空気との温度差があることに起因する伝熱現象であり、対流熱伝達率は、壁面(個体)と空気(流体)との間の単位時間あたりに壁面から空気へ伝達される熱の割合を示すものである。また、緑化パネル壁面での対流熱伝達率は、「試験体周辺の風速・温度境界層が、周囲と大差ないと見なせる場合<sup>13)</sup>」と判断して、SAT計より算出した対流熱伝達率と等しいと見なした。

なお、パネルの表面温度( $T_{SP}$ )は、長短波放射計により計測した長波放射量を放射率で補正して算出した。

$$\alpha = \frac{H}{(T_{SAT} - T_a)} \quad (18)$$

ここで、 $\alpha$ : 対流熱伝達率 [ $W/m^2 \cdot K$ ],  $H$ : 顕熱フラックス [ $W/m^2$ ],  $T_{SAT}$ : SAT計の表面温度[ $^{\circ}C$ ],  $T_a$ : 気温[ $^{\circ}C$ ]

成田ら<sup>16)</sup>は、熱伝達と物質伝達のアナロジー(ルイス則)を仮定し、顕熱フラックス( $H$ )に基づき、対流熱伝達率( $\alpha$ )と物質伝達率( $kx$ )を算出しており、本研究においてもこの方法に従って、物質伝達率( $kx$ )を算出した。ここでは、物質伝達率は単位時間当たりの水分の移動量を表し、(19)式で与えられる。

$$kx = \frac{\alpha}{(C_p \times Le)} \quad (19)$$

ここで、 $kx$ : 物質伝達率 [ $kg/m^2 \cdot s$ ],  $C_p$ : 空気の比熱 [ $J/kg, K$ ],  $Le$ : ルイス数(ここでは、0.83を用いた。)

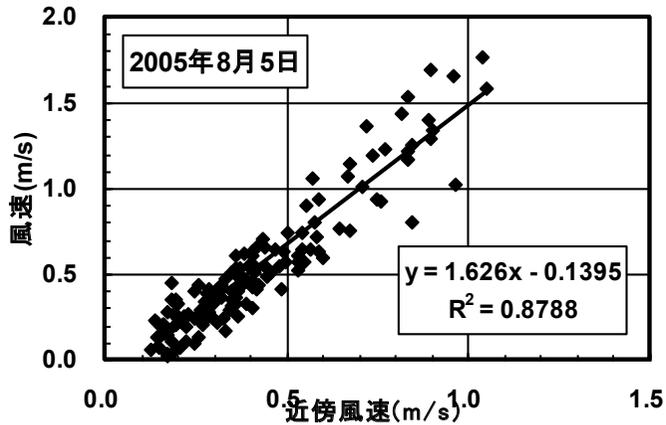


図 3.20 近傍風速と風速の関係(8月5日)

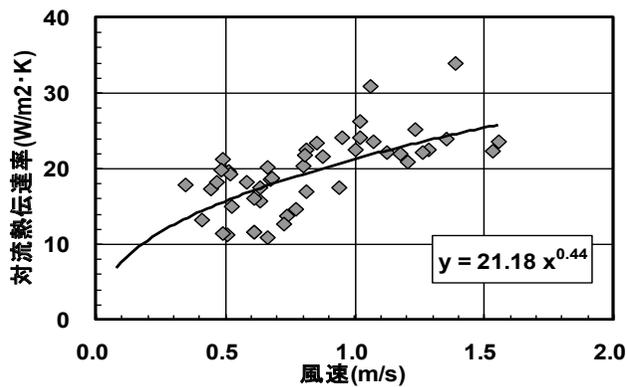


図 3.21 風速と対流熱伝達率の関係 (8月5-6日: アメリカツルマサキ)

またSAT計近傍(約50cm)の風速値と気象条件として壁面から約3m離れ、地表面から2mの高度で計測した風速値との相関を見たところ、図3.20に示すとおり両者に高い相関が見られたことから、蒸発効率の算出では気象条件として計測した風速値を壁面近傍での風速と見なして、対流熱伝達率を算出した。

表面温度と気温の温度差が小さくなる条件では対流熱伝達率の推定誤差が大きくなるため、今回の実験においてはSAT計の表面温度と気温の温度差が5℃以上となる条件において、対流熱伝達率の算出を行った。使用したデータは24時間を対象として1分毎に計測したデータについて10分間

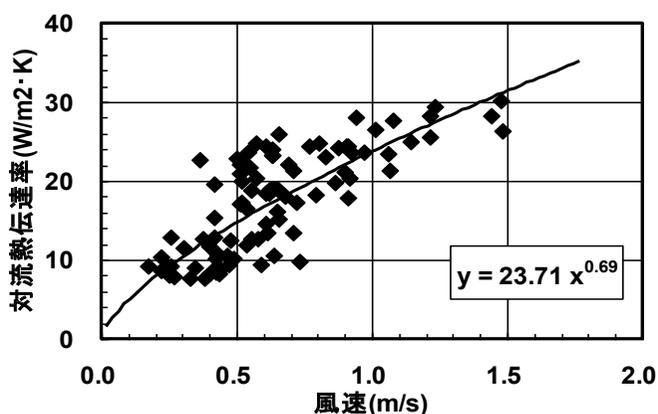


図 3.22 風速と対流熱伝達率の関係 (8月11日:ヘデラヘリックス)

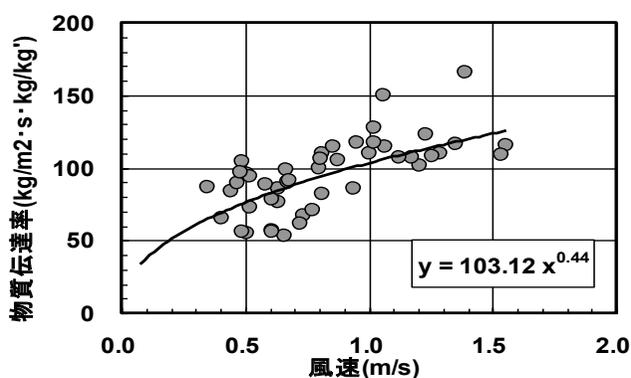


図 3.23 風速と物質熱伝達率の関係 (8月11日:アメリカツルマサキ)

の移動平均を行い 10 分毎に整理した。得られた対流熱伝達率と風速との関係について、アメリカツルマサキについては 8 月 11 日の結果を図 3.21 に、ヘデラヘリックスについては 8 月 5、6 日の 2 日間の結果を図 3.22 に示す。

同じく、物質伝達率と風速との関係を、それぞれ図 3.23 と図 3.24 に示す。対流熱伝達率と物質伝達率は、風速と良好な対応関係が見られたことから、風速の測定値より測定期間中における緑化パネル面での対流熱伝達率および物質伝達率の算出式を導出した。

算出結果は、表 3.7 に示すとおりである。なお、SAT 計近傍(約 30cm)の風速値と気象条件として壁面から約 3m 離れ、地表面から 2m の高度で計測した風速値との相関を見たところ、図 3.20 に示すとおり両者に高い相関が見られたことから、本研究では気象条件として計測した風速値を壁面近

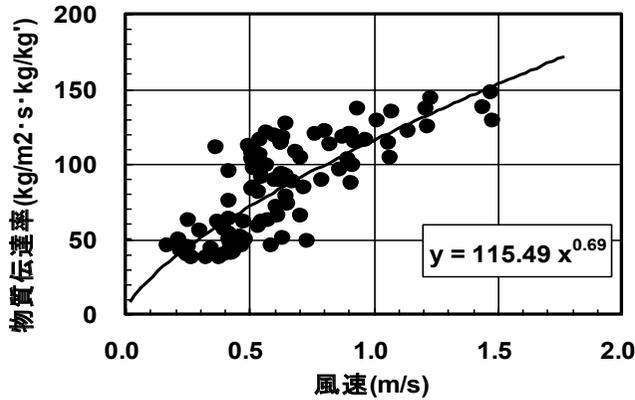


図 3.24 風速と物質伝達率の関係 (8月5-6日:ヘデラヘリックス)

表 3.7 対流熱伝達率と物質伝達率

区 分	ヘデラヘリックス	アメリカツルマサキ
対流熱伝達率(W/ m <sup>2</sup> , K)	$\alpha_1 = 3.712u^{0.6901}$	$\alpha_2 = 21.48u^{0.44}$
物質伝達率 (kg/m <sup>2</sup> , s)	$K_{X1} = 115.49u^{0.6923}$	$K_{X2} = 103.12u^{0.44}$

傍での風速と見なして、対流熱伝達率を算出した。

### 3.4.3 蒸発効率による評価

熱収支の結果から、緑化パネルの蒸発散特性を評価する指標としての「蒸発効率( $\beta$ )」の算出を試みた。具体的にはSAT計で得られた物質伝達率( $kx$ )にパネル表面の飽和絶対湿度( $es_{Ts}$ )と空気の絶対湿度( $ea$ )との差である「飽差」を乗じることによって算出した蒸発散量と、重量法による計測値から得られた蒸発散量( $E$ )の測定値との比から、(20)式により蒸発効率( $\beta$ )の算出を試みた。

$$\beta = \frac{E}{kx \times (es_{Ts} - ea)} \quad (20)$$

ここで、 $\beta$ : 蒸発効率,  $E$ : 蒸発散量[kg/m<sup>2</sup>],  $es_{Ts}$ : 表面温度に対する飽和絶対湿度[kg/kg],  $ea$ : 空気の絶対湿度[kg/kg]

蒸発効率( $\beta$ )は、蒸発の起こりやすさを表す指標として用いられ、0 から 1 までの数値を示す。葉表面の水蒸気が飽和状態では 1 を、乾燥状態で蒸散がない状態では 0 を示す<sup>14)</sup>。蒸散活動が植物の気孔の開閉を通じて行われることから、蒸散が盛んとなり、気孔が開いている状態では、蒸発効率も高くなる一方、気孔が閉じて蒸散活動が少なくなれば、蒸発効率も低い数値を示すこととなる。近藤<sup>14)</sup>によると、表 3.8 に示すとおり、水田では 0.5 ~0.8、牧草地では 0.2~0.4 の数値を報告している。

蒸散量による比較はそのときどきの気象要因の影響を受けて変化するが、蒸発効率を比較することにより、その都度蒸散量を計測せずに植物種や緑化タイプの違い等による蒸発散特性の把握が可能になるものと考えられる。

(20)式で蒸発散量( $E$ )には、重量法により計測した表-2 に示す実測値を用いた。ここで、蒸発散量( $E$ )は、植物からの蒸散量と基材表面からの蒸発量の合計値である。計測した蒸発散量から、(21)式を用いて潜熱フラックス(輸送量)を算出した。

$$LE = L \times E$$

$$L = 2.5 \times 10^6 - 2400 \times \theta_a \quad (21)$$

ここで、 $LE$ : 潜熱輸送量( $W/m^2$ ),  $L$ : 気化の潜熱( $J/kg$ ),  $E$ : 蒸発速度( $kg/m^2 \cdot h$ ),  $\theta_a$ : 表面温度( $^{\circ}C$ )

アメリカツルマサキについては、表 3.6 の計測日のうち 8 月 21 日における蒸発効率と潜熱フラックスの経時変化を図 3.25 に、ヘデラヘリックスについては 8 月 5 日における算出した緑化パネルの蒸発効率と潜熱フラックスの経時変化を図 3.26 に示す。アメリカツルマサキでは、夜間は 0 近傍で推移し、日の出とともに上昇して日中は安定し、15 時頃から徐々に小さくなる傾向が見られる。一方、ヘデラヘリックスでは、日の出後から 9 時ごろまで値の変動が大きく不安定であるが、この時間帯は入射日射量、気温、湿度の気象条件が安定しなかったことが要因と推察される。その後次第に減少し、13 時以降には安定した。

これより、数値の安定していた 9 時から 18 時までについて、緑化パネルの蒸発効率を平均すると、アメリカツルマサキでは 0.21、ヘデラヘリックスでは 0.28 であった。日積算日射量と蒸発効率および日蒸発散量の日変化を、アメリカツルマサキは図-15 に、ヘデラヘリックスは同じく図-16 に示した。日蒸発散量は緑化パネル面積を基準として  $1 m^2$  当たりに換算した

表 3.8 様々な植生地の蒸発効率<sup>14)</sup>

植 生	蒸発効率( $\beta$ )
水田	0.5~0.8
牧草地	0.2~0.4
りんご園	0.3~0.4

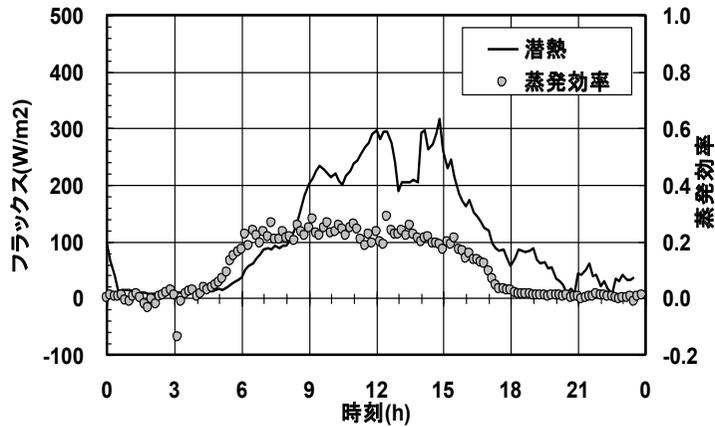


図 3.25 潜熱フラックス蒸発効率の経時変化  
(8月21日:アメリカツルマサキ)

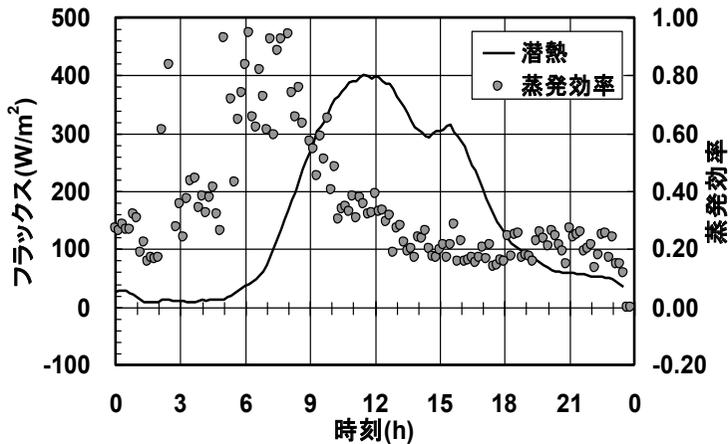


図 3.26 潜熱フラックスと蒸発効率の経時変化  
(8月5日:ヘデラヘリックス)

値である。

今回評価を行った緑化パネルのうち、アメリカツルマサキの日蒸発散量について、天候が良い日においては 4mm 程度であり、測定期間中の最大値は 5.5mm であった。日積算蒸発量は、日積算日射量との間で良好な対応関係が見られたが、蒸発効率との間では顕著な対応関係は見られなかった。蒸発効率は 0.2~0.4 の範囲で変化し、計測期間での蒸発効率の平均値は 0.26 であった。

一方、ヘデラヘリックスの日蒸発散量は、天候が良い日においては 4~5mm 程度であり、測定期間中の最大値は約 5.5mm でアメリカツルマサキとほぼ同様の数値を示した。日積算蒸発散量についても、日積算日射量の変化と相似しており、日積算日射量が多い日ほど蒸発散量が多くなる傾向が見られた。蒸発効率は、0.2~0.4 の範囲で変化し、計測期間での蒸発効率の平均値は 0.25 となった。算出の結果を表 3.9 に示す。

上述した近藤<sup>14)</sup>の計測結果で示されている牧草地0.2~0.4とほぼ同じ範囲の数値を示しており、成田ら<sup>6)</sup>が新宿御苑で行った計測結果による芝生での蒸発効率0.4と比較すると今回得た壁面緑化パネルでの数値はやや下回っていた。これは、芝生面では牧草地よりも草丈が短いことから、土壌からの蒸発量が牧草地よりも大きいことが推察される。また、壁面緑化では本研究に使用した植物種の違いに加えて芝生地が日射を水平面で受けるのに対して垂直面で受けるため、大気放射量、直達日射による放射環境が異なっていること、生育基盤となる土壌が薄層であり、土壌の含水状態が異なること等の違いが影響しているものと考えられる。

なお、萩島ら<sup>13)</sup>によるとSAT計法の短所として「試験体に黒色塗装を施すことで、試験体表面が実際の建物外表面に比べ高温となり、測定対象面の温度境界層を乱す可能性」を指摘している。今回の実験計測では、SAT計を緑化パネル面の一部に設置したため、緑化パネルからの蒸発潜熱の影響により、SAT計単独で計測した場合よりも表面温度は過小に評価されている可能性がある。

また、本節ではSAT計と緑化パネルの境界層での気温が同じと見なし、各々の表面境界層における温度計測は行っていないため、境界層でのより詳細な計測によるデータの捕捉が必要と考えられる。さらに、今後、渦相関法等他の方法による顕熱フラックスの計測値との比較・検討を行う等により、SAT計法により得た顕熱フラックスの計測値の検証と計測精度の向上を図ることが課題である。

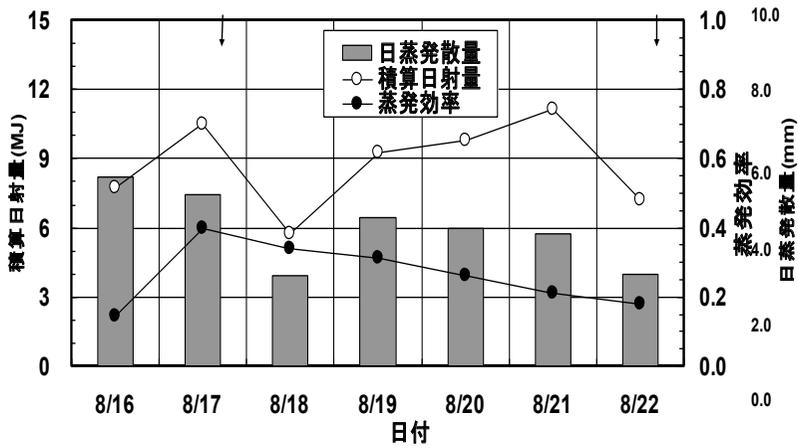


図 3.27 日積算日射量と日蒸発散量，蒸発効率(アメリカツルマサキ)

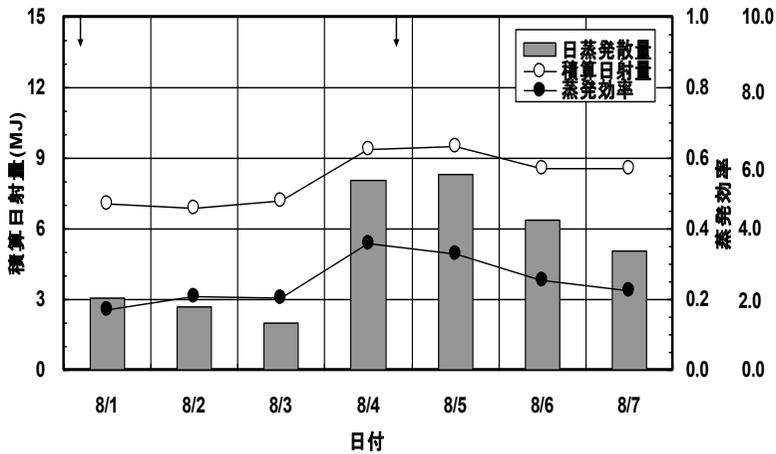


図 3.28 日積算日射量と日蒸発散量，蒸発効率(ヘデラヘリックス)

表 3.9 蒸発効率の算出結果

区 分	蒸発効率
アメリカツルマサキ( <i>Eunymus fortunei</i> )	0.26
ヘデラヘリックス( <i>Hedera herix</i> )	0.25

## まとめ

壁面緑化によるヒートアイランド緩和効果を定量的に評価するために、アメリカツルマサキとヘデラヘリックスを植栽した緑化パネル試験体からの蒸発散に伴う熱収支特性に関する実験・計測を行った。実験・計測により得られた主な結果は、以下のとおりである。

- 1) 対流熱伝達率および物質伝達率については、緑化壁面近傍での風速との強い相関が見られ、風速の関数として導出することができた。
- 2) 蒸発効率は、計測期間での平均値からアメリカツルマサキでは0.26、ヘデラヘリックスでは0.25を示した。
- 3) 今回使用した壁面緑化パネルの日蒸発散量は、いずれの植物でも4～5mmであった。

SAT計により顕熱フラックスを算出するとともに、対流熱伝達率と物質伝達率を得て、壁面緑化の蒸発散特性を示す数値として蒸発散量の実測に基づく蒸発効率を算出することができた。壁面緑化による温熱環境改善効果として、植物の蒸発散に伴う潜熱消費による効果は大きく、実測値から得られた蒸発効率をパラメータとして使用することにより、壁面緑化の温熱環境改善効果をシミュレーション解析する場合等において実証性の高い数値評価が可能となる。今後、植物種や緑化タイプの違い等に応じた蒸発効率についてデータの蓄積が望まれる。

## 引用文献

- 1) 梅干野晁・萩原賢二（1983）屋上の芝生植栽による照り返し防止・焼け込み防止効果，日本建築学会建築環境工学論文集：133-140
- 2) 野島義照・長谷川秀三（1995）夏季における各種造園植物の葉面からの蒸散量，ランドスケープ研究 58(5)：97-100
- 3) 野島義照・沖中健・瀬戸裕直・倉山千春・二階堂稔・高砂裕之（1998）屋上緑化による夏期の建築物および都市の熱負荷の軽減効果の実証的研究，日本緑化工学会誌 20(3)：1681.106
- 4) 山口隆子・横山仁・石井康一郎（2005）軽量薄層型屋上緑化システムにおけるヒートアイランド緩和効果，ランドスケープ研究 68(5)：509-512
- 5) 三坂育正・成田健一（2000）緑化による屋外熱環境の緩和に関する研究-そ

- の1-草地における熱収支特性の実測評価, 日本建築学会学術講演梗概集(東北): 615-616
- 6) 野島義照 (1998) 都市における植生からの蒸散による夏期の温熱環境改善力に関する研究, 京都大学学位論文: 89-133
  - 7) 萩島理・谷本潤・高尾京子 (2005) 壁面緑化システムの熱収支構造に関する屋外観測, 日本建築学会技術報告集 22: 253-258
  - 8) 梅干野晃, 山下富大(1981): ツル植物による植栽スクリーンの日射遮へい効果, 日射透過率と表面温度について: 日本建築学会建築環境工学論文集, 141-146
  - 9) 沖中健, 野島義照, 小林達明, 瀬戸祐直(1994): つる植物の被覆がコンクリート建物の壁面温度に及ぼす効果: 千葉大学園芸学部報第 48 号, 125-134
  - 10) 小谷和行編集 (2001) 朝倉植物生理学講座②代謝, 朝倉書店, 東京, pp1. 105
  - 11) 加藤素子・山本聡・石田均・前中久行 (2001) 土壌水分および日射量測定に基づく薄層土壌の必要保水量について, ランドスケープ研究 64(5): 541-544
  - 12) 建材試験センター規格(2003): JSTM J 6110 S A T 計による建築周壁の放射空気温度測定方法: <<http://www.jtccom.or.jp/hyojyun/jstm.htm>>参照
  - 13) 萩島理・谷本潤・成田健一(2004): 都市表面の対流熱伝達率に関する既往研究のレビュー: 水門・水資源学会誌 17(5), 536-554
  - 14) 近藤純正編著 (1994) 水環境の気象学—地表面の水収支, 熱収支—, 朝倉書店, 東京, 350pp.
  - 15) 坪井八十二編 (1977) 新編農業気象ハンドブック, 養賢堂, 東京, 854pp.
  - 16) 成田健一・野々村善民・小笠頭 (1997): 自然風下における窓面對流物質伝達率の実測 都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その1): 日本建築学会計画系論文集 No. 491, 49-56
  - 17) 成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條毅 (2004): 新宿御苑における蒸発効率と温熱環境の実測: 環境情報科学論文集 18, 253-258
  - 16) 成田健一・三坂育正・国島武史・中山康隆・若林伸介 (2004): 蒸発効率を用いた保水性舗装の性能評価: 日本建築学会技術報告集 No. 201. 1171. 120

## 第4章 温熱指標によるグリーンカーテンの温熱環境改善効果

近年、都市の市街地部で深刻化しつつあるヒートアイランド現象の緩和策として、地表面被覆状態の改善策として建物の屋上や壁面の緑化の推進が国の政策に位置付けられている<sup>1)</sup>。一方で、小・中学校や市町村等の公的施設を中心に、ツルレイシ (*Momordica charantia L. var. pavel* Crantz) 等のつる性植物をネット等で誘引し、夏季の日射遮蔽による暑熱緩和を図る「グリーンカーテン」が普及しつつある。なお、「グリーンカーテン」は、「緑のカーテン<sup>2)</sup>」や「植栽スクリーン<sup>3)</sup>」などと称される場合も見られるが、本稿では「グリーンカーテン」に用語を統一する。特に、2011年3月11日の東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故による影響から、国民の節電意識の高まりもあり、一般住宅においてもグリーンカーテンの普及が広がりを見せている。

グリーンカーテンの設置によって、屋内の温熱環境改善効果を検証した既往研究としては、福田ら<sup>4)</sup>は横浜市内の小学校や保育園等69箇所に設置されたグリーンカーテンについて、表面温度や室内気温の観測によってその効果を確認している。また、成田<sup>5)</sup>は、小学校の校舎に設置されたグリーンカーテンによる教室の温熱環境改善効果について実測し、グリーンカーテンは教室の放射環境の改善に寄与している一方で、通風阻害というマイナスイナス面があること、温熱環境指標 SET\*による評価結果から放射温度による体感温度の低下は通風阻害による上昇量の2倍程度であること、照度の低下は1/3程度となることを明らかにした。同じく、成田ら<sup>6)</sup>は、グリーンカーテンの葉群層から各々約30 cm離れた表面と裏面の気温を比較した結果、有意な温度差は認められず、葉群層を通過した空気が冷却されているという証拠は得られなかったとしている。高山ら<sup>7)</sup>は、一般住宅をモデルとして西側壁面に蔓性植物を使った登攀型のグリーンカーテンを設置した場合におけるガラス窓日射熱負荷軽減量を算定することを目的として、地表面全天日射量に基づく窓面の透過日射熱負荷算定モデルについて検討を行い、窓面の透過日射熱負荷の積算値は概ね観測による実測値と一致し、モデルの有効性を示した。加藤ら<sup>8)</sup>は、集合住宅を利用して、グリーンカーテンの設置量の違いと簾との比較により、グリーンカーテンは簾よりも大きな室温低下傾向があることを確認するとともに、グリーンカ

カーテンの節電効果を算定し、窓の開放時においては通風性と日射遮蔽性を併せ持つグリーンカーテンの体感温度での有利性を指摘している。軸丸ら<sup>9)</sup>は、グリーンカーテンがある場合とない場合の教室内温度の測定を行った結果、室内温度はグリーンカーテンがある場合はない場合に比べて 1～2℃、外気温に対しては 4～5℃低くなっていることを報告している。

グリーンカーテンの温熱環境改善効果は、日射量の軽減によるところが大きく、そのメカニズムについて梅干野ら<sup>12)</sup>は、ベランダにつる植物(ヘチマ: *Luffa cylindrica* (L.) Roem)を用いた被覆を行い、夏季の日射透過特性と表面温度を計測することで、建築物内部への日射遮蔽効果として室温の上昇を抑制する効果を検証している。同じく、梅干野ら<sup>3)</sup>は、ヘチマとアサガオ(*Ipomoea nil* (L.) Roch)を用いた植栽スクリーンを製作し、グリーンカーテンの日射透過特性と表面温度分布について計測した結果、いずれの植物も葉の表側の表面温度は日射量との相関が強く、日射量 300kcal/m<sup>2</sup> h 前後では表面温度は気温とほぼ等しく、日射量がそれ以下では気温より低く、日射量がそれ以上では表面温度が気温よりも 2～3℃上昇することを報告している。

一方で、最近ではベランダの手摺部に予めグリーンカーテンを設置するためのフックやプランター受け等の設備が整備されたマンション<sup>10)</sup>も見られるようになってきた。今後、都市市街地部でのマンション等の集合住宅において、身近に緑に触れあえる空間としてバルコニー部にグリーンカーテンを普及させることにより、都市部の立面緑化の推進にも寄与することが期待できる。

そこで、本章では、大都市市街地部の居住形式として一般化しているマンションなどの高層建築物の壁面緑化を推進する手法として、バルコニー部へのグリーンカーテンの普及を推進していくために、主としてグリーンカーテンの設置によるバルコニー側への温熱環境改善効果を第2章で検証した表面温度、MRT、WBGT、SET\*の温熱指標による評価を行うとともに、新たな評価指標として PMV による評価を試みた。

## 4.1 表面温度と日射量から見たグリーンカーテンの温熱環境改善効果

本節では、省エネ効果が高いとされる熱反射ガラスが使用された大学構内の教育棟バルコニー部を対象として、グリーンカーテンを設置した場合と設置しない場合の日射量の違いと表面温度の違いについて計測による比較を行い、グリーンカーテンの設置による夏季の真夏日での温熱環境改善効果について検証し、評価することを目的とした。

### 4.1.1 研究の方法

#### (1) 計測器の設置状況

千葉県東金市内にある城西国際大学キャンパス内の教育棟の1階及び2階に位置する2教室は同じ場所の上下階の位置関係にあり、建物は南南東向きで、西側は室外、南側がバルコニー、東側が廊下に接していた。教室の大きさは、縦8.7m、横8.3m、高さ3.0mであった。窓面は、横幅8.3mのうち、5.0mがガラス窓となっており、床面から天井面までの全面がガラス面で、使用されたガラス板は厚さ8mmの熱線反射ガラスである。1階バルコニー部は前庭の地上部から1.2mの高さであった。同じ方位と広さ・形状を有する2教室のバルコニー部を計測対象として、1階バルコニー部にはツルレイシの苗を2株ずつ定植したプランター6基を2013年7月5日に設置した。実験計測時には、教室内の空調は作動させず、照明も落とし、窓面は全て閉じた状態で計測した。

計測時のグリーンカーテンの被覆状態は写真4.1に示す通りで、被覆率は96.5%、葉面積指数(LAI)は加藤<sup>13)</sup>の方法により算出し、1.1であった。また、計測器の設置状況は、写真4.2と写真4.3に示すとおりで、使用した計測器は表4.1に示すとおりである。

#### (2) 計測方法

屋外の一般気象状況を把握するため、計測に使用した教育棟南側の前庭に、図4.1、図4.2に示すように温・湿度計、日射計を地面から1.5mの位置に、風向・風速計を2.0mの位置に設置した。

日射計の計測面は、地面と平行にして上に向けて設置した。長短波放射計は計測面をバルコニー床面に垂直方向にして窓ガラス面から30cm程離し、床面から1.5mの高さにガラス面と平行となるように設置した。ここで、グリーンカーテン面が太陽からの日射を直接受ける側を「表側」、バルコニー側を「裏側」とする。温・湿度計は、1階と2階のバルコニー内にグリー



写真 4.1 グリーンカーテンの被覆状況（8月8日）



写真 4.2 気象条件の測定機器設置状況



写真 4.3 2階バルコニー一部の計測器設置状況

表 4.1 計測機器等一覧表

計測項目	計測器	メーカー名	型番	数量
気温・湿度	小型温湿度センサー (3 mケーブル付/0-1v)	Vai Sala	HMP-60HT-03C	3 基
風速・風向	セパレート風向風速 センサー	R. M. YOUNG	CYG-3002	1 基
風速・風向	2成分超音波風速計	R. M. YOUNG	CYG-85000-JK	3 基
短波日射量	日射計 (class 2)	Hukseflux	CHF-LP02-c-JK	2 基
長短波放射量	長短波放射計	Hukseflux	CHF-NR01	2 基
表面温度	インフレクサーモ グラフィ	NEC AVIO	R300	1 台
計測記録	マイクロロガー	Campbell	C-CR1000-4M	2 基
灌水装置	灌水コンピュータ	(株)カクダ イ社製	502-302	1 基

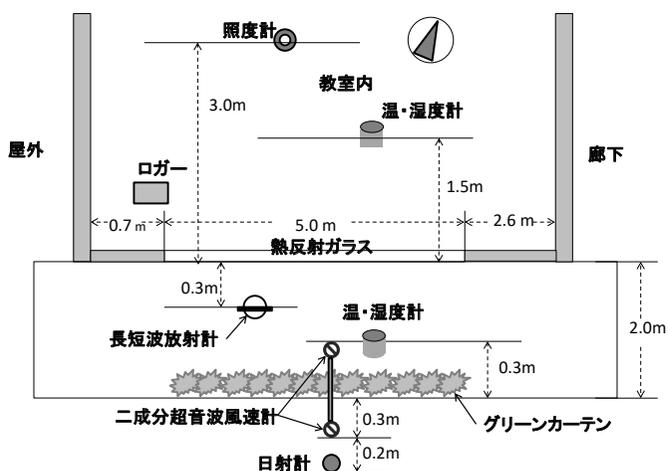


図 4.1 計測機器設置図 (平面図)

ンカーテン面と屋外の手摺部にほぼ平行に並列させ、床面からは1.5mの位置に設置した。さらに、グリーンカーテンの表側には日射計をグリーンカーテンから約50cm離して、計測面をバルコニー床面に垂直方向にして、グリーンカーテン面とは平行となるように表側を向けて設置した。

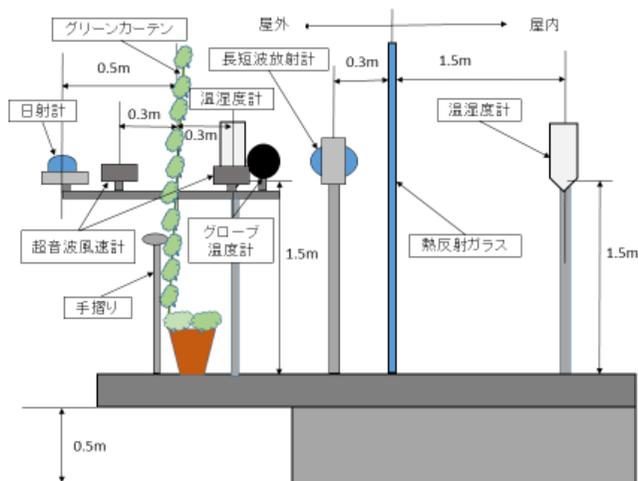


図 4.2 計測機器設置（断面図）

#### 4.1.2 結果

##### (1) 気象条件と解析対象日

計測を行った大学構内の気象条件として、気温と湿度、風向と風速を計測した。図 4.3 は気温と湿度、図 4.4 は風速と風向について、8 月 4 日から 8 月 17 日までの 14 日間の経時変化を示したものである。図 4.3 より、気温について、最高気温は 8 月 11 日の 11 時に 34.1℃、最低気温は 8 月 4 日の 5 時に 23.1℃を記録した。14 日間の平均気温は 28.0℃であった。湿度について、最高値は 8 月 7 日の 7 時に 96.4%，最低値は 8 月 7 日の 14 時に 57.2%を記録し、14 日間の平均湿度は 80.5%であった。図 4.4 より、風速について、最大風速は 8 月 4 日の 14 時に 3.5 m/s を記録した。14 日間の平均風速は 0.9 m/s であった。風向については、230～250 deg（南西から西南西の風）が優勢であったが、深夜 0 時から翌朝 8 時にかけて南東から北東の風まで変動が見られた。以下に、最高気温が連続して 30℃以上の「真夏日」を記録した 8 月 8 日～10 日までの 3 日間を選定して、解析を行った。

##### (2) カーテン表裏の日射量比較

日射量について、グリーンカーテンの表側では太陽からの直射日射と周囲からの散乱日射を受ける。グリーンカーテンの効果として、壁面外壁や窓面が受ける日射量を遮ることで、外壁面や窓面の温度上昇を抑制する効果が指摘できる。入射日射量  $S_1(\text{W}/\text{m}^2)$  はグリーンカーテンにより遮蔽され

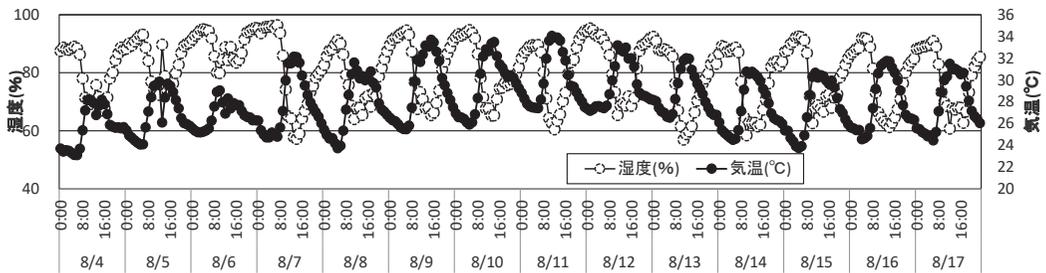


図 4.3 気温・湿度の経時変化

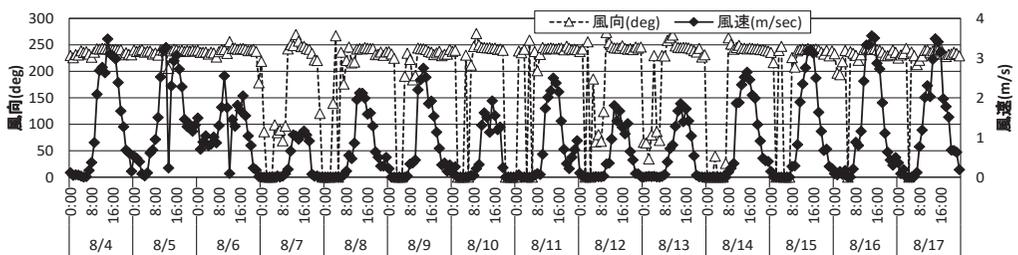


図 4.4 風向・風速の経時変化

るため、グリーンカーテンを透過した日射量  $S_2$  ( $W/m^2$ ) は  $S_1$  より小さな数値になる。図 4.5 は、グリーンカーテンの表側の入射日射量  $S_1$  ( $W/m^2$ ) と裏側でグリーンカーテンを透過した日射量  $S_2$  ( $W/m^2$ ) について 8 月 8 日から 10 日までの 3 日間の経時変化をグラフで示したものである。各計測日の最大値を示したピーク時の数値で比較すると、8 月 8 日は 11 時の時点で最大値を示し、表側では  $452.0 W/m^2$  を示したのに対して、裏側では  $75.8 W/m^2$  と低減している。同様に、8 月 9 日では 12 時にピークとなり表側で  $458.2 W/m^2$ 、裏側で  $101.0 W/m^2$  を示した。8 月 10 日では 12 時にピークとなり、表側で  $464.2 W/m^2$ 、裏側で  $108.2 W/m^2$  を示した。これより日射透過率 ( $\alpha_c$ ) とすると、

$$\alpha_c = S_2 / S_1$$

ここで、 $S_{1\uparrow}$ : グリーンカーテン表側入射日射量 ( $W/m^2$ )、 $S_{2\uparrow}$ : グリーンカーテン裏側透過日射量 ( $W/m^2$ )

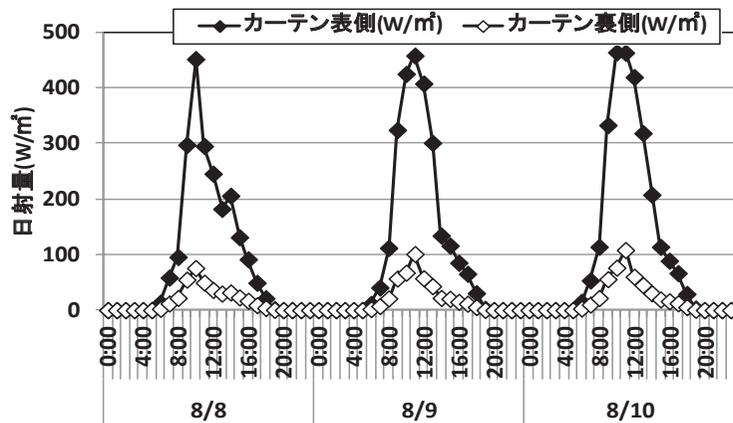


図 4.5 グリーンカーテン表側と裏側の日射量の経時変化

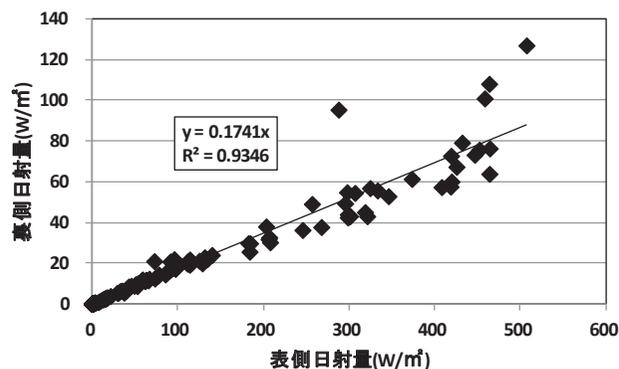


図 4.6 グリーンカーテン表側と裏側の入射日射量の関係

図 4.6 は、グリーンカーテンの表側の入射日射量  $S_1$  ( $W/m^2$ ) とカーテン裏側のベランダにおける透過日射量  $S_2$  ( $W/m^2$ ) との関係を示したものである。両者は強い正の相関 ( $R^2=0.94$ ) を示し、回帰直線の傾きより日射透過率 ( $\alpha$ ) は 0.17 となり、グリーンカーテン表側から入射した日射量は 80% 以上が削減され、透過した日射量はグリーンカーテンの表側から入射した日射量の 20% 以下に低減されていた。

### (3) 熱線反射ガラスの特性

今回、計測に使用した熱線反射ガラスは厚さ 8mm の旭硝子社製のサンルック Ts30 である。この熱線反射ガラスは、板ガラスの表面に極薄の金属膜

表 4.2 熱反射ガラスと普通ガラスとの性能比較<sup>14)</sup>

区分	品名	呼び 厚さ mm	光学的性能(日射)%			熱的性能		
			反射率	透過率	吸収率	遮蔽 係数	日射熱 取得率	放射率
高遮蔽 性能熱 線反射 ガラス	サンルック クス TS30 ガラス	8	14.7	23.5	61.8	0.48	0.43	0.89
普通ガ ラス	フロート 板ガラス	8	7.2	81.5	11.3	0.97	0.85	0.89

をコーティングしたもので、日射を反射し日射の室内流入を遮り、窓際の局所的な昇温やまぶしさを和らげ、冷房負荷を低減し、省エネ効果が期待され、近年は高層ビルなどにも普及が進んでいる。表 4.2 は、今回使用されている熱線反射ガラスと透明の普通ガラスとの光学的性能と熱的特性を比較したものである。

これより、「光学的性能」として、熱線反射ガラスでは同等の厚さを有する透明のフロート板ガラスと比較し、日射の「反射率」では約 2 倍、「透過率」では約 3 割、「吸収率」では 5 倍以上を示し、日射の反射率と吸収率が高くなっている。また、「熱的性能」では「遮蔽係数」と「日射熱取得率」が約 1/2 の低い値となっており、遮熱性が高くなっている。

### (3) 表面温度の算出と比較

表面温度  $T_{sr}$  は、計測した長波放射量よりステファン・ボルツマンの法則式<sup>15)</sup>から式(1)を導出して、算出することができる。長波放射量は、長短波放射計で計測した計測値を用いたが、長短波放射計は計測面から 30cm ほどの直近に設置したため、第 2 章の 2.1 で行った方法<sup>16)</sup>により計測値は計測壁面からの放射量とみなし、形態係数による補正は行わなかった。また、赤外線放射量のすべてを補足できてはいないが、計測した長波放射量と同等とみなした。ここで、緑化面の放射率は、第 2 章の 2.1 で得た数値<sup>16)</sup>を参考として同じつる性植物の 0.98 を使用した。一方、熱線反射ガラス面の放射率は、表 4.2 より、0.89 を使用した。

$$T_{sr} = \sqrt[4]{\frac{L \uparrow}{\varepsilon \cdot \sigma}} - 273.15 \quad (1)$$

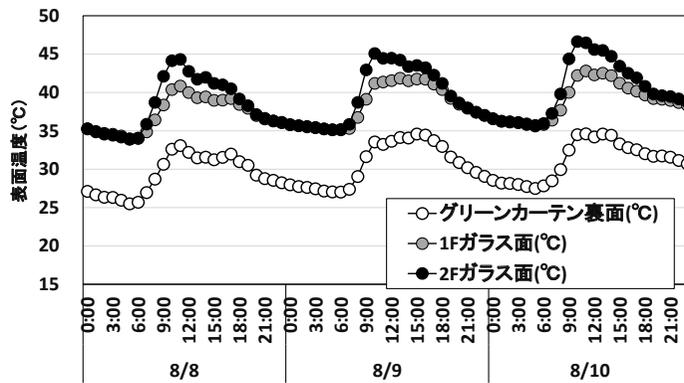


図 4.7 グリーンカーテン裏面とガラス面の表面温度経時変化

ここで、 $L\uparrow$ : 上向き長波放射量( $W/m^2$ ),  $\varepsilon$ : 放射率,  $\sigma$ : ステファン-ボルツマン定数  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [J/S/m^2/K^4]$

図 4.7 は、グリーンカーテンの裏側の葉面温度と 1 階と 2 階のガラス面の表面温度を上式により算出し、経時変化を示したものである。これより、8 月 8 日ではピークとなった 11 時の時点で、2 階ガラス面(グリーンカーテンなしの場合)が  $44.3^\circ C$  に対して、1 階ガラス面(カーテンありの場合)は  $40.9^\circ C$  で  $3.7^\circ C$  低減し、グリーンカーテン裏面では  $33.1^\circ C$  と  $11.2^\circ C$  も低減していた。8 月 9 日ではピークとなった 10 時の時点で、2 階ガラス面で  $45.1^\circ C$  に対して、1 階ガラス面は  $41.2^\circ C$  と  $3.9^\circ C$  低減し、グリーンカーテン裏面では  $33.6^\circ C$  と  $11.5^\circ C$  低減していた。8 月 10 日では、ピークとなった 10 時の時点で、2 階ガラス面で  $46.7^\circ C$  に対して、1 階ガラス面は  $42.2^\circ C$  と  $4.5^\circ C$  低減し、グリーンカーテン裏面では  $34.5^\circ C$  と  $12.2^\circ C$  も低減していた。

一方、最低時についてみると、1 階と 2 階のガラス面ではほとんど差異は見られず、8 月 8 日では 5 時の時点で、 $33.0^\circ C$  を示したのに対して、グリーンカーテン裏面では  $25.5^\circ C$  と  $7.5^\circ C$  低減していた。8 月 9 日では 6 時の時点で、ガラス面で  $35.2^\circ C$  を示したのに対して、グリーンカーテン裏面では  $27.0^\circ C$  と  $8.2^\circ C$  低減していた。8 月 10 日では 5 時の時点で、ガラス面で  $35.6^\circ C$  を示したのに対して、グリーンカーテン裏面では  $27.5^\circ C$  と  $8.1^\circ C$  低減していた。これより、グリーンカーテン裏面の表面温度は、2 階ガラス面の表面温度よりもピーク時には  $10^\circ C$  以上、最低時においても  $8^\circ C$

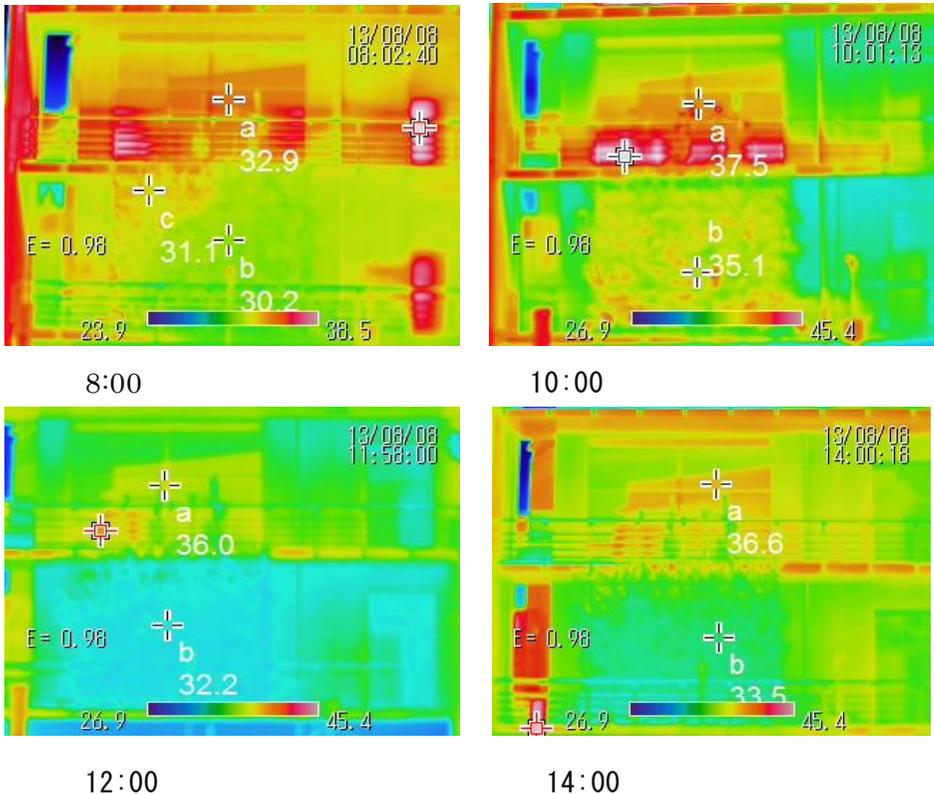


写真 4.4 サーマカメラによる表面温度の推移 (8月8日)

以上の低減が見られた。写真 4.4 は同じく 8 月 8 日のグリーンカーテンとガラス面の表面温度をサーモカメラで定時に撮影したものである。「サーモカメラは画角内の全ての面における表面温度を把握することができるため、対策場所の検討などには有効である。ただし、画角が狭いことが欠点である。<sup>17)</sup>」とされている。写真 4.4 より、10 時の時点では、2 階のガラス面 a 点では 37.5 °C を示しているが、1 階のグリーンカーテン表面では直達日射を受けて 35.1 °C を示した。2 階のガラス面は、熱反射ガラスが使用されていることから、対向の建物からの長波放射を反射しており、表面温度の数値もガラス面の温度をそのまま表示したものではない。

一方、グリーンカーテンの表面温度は、計測器を設置した位置に当たる b 点では 35.1 °C を示した。12 時の時点で、カーテンの表面温度は 32.2 °C に下がったが、これは図 4.5 より同時刻において雲の影響等により日射量が低減したことによると推察される。14 時の時点では再び上昇し、グリーンカーテン表面の b 点では 33.5 °C を示した。これを図 4.7 と比較すると、8

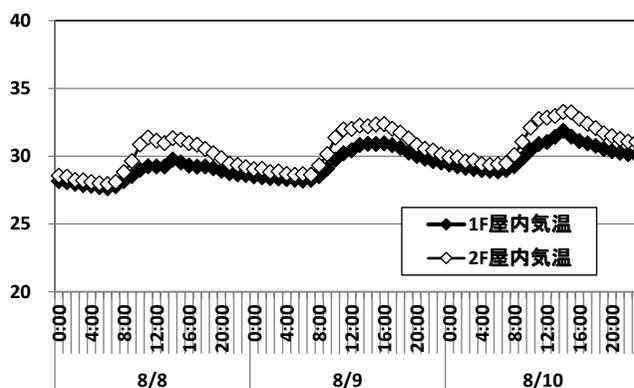


図 4.8 屋内気温比較

月 8 日 10 時の時点で、2 階のガラス面では図 4.7 が 37.2 °C に対して、写真 4.4 が 37.5 °C とほとんど差はないが、グリーンカーテンの葉面では図 4.7 が 33.8 °C に対して、写真 4.4 では 35.1 °C と 1.3 °C の差異が生じている。これは、写真 4.4 がサーモカメラ画像内の定点での温度を示し、面全体の表面温度でないこと、図 4.7 がグリーンカーテン裏面の葉面温度であることによるものと考えられる。

#### (4) 屋内外の気温比較

図 4.8 は、グリーンカーテンありの場合となしの場合、屋内気温の経時変化を示したもの。8 月 8 日ではなしの場合、ピーク時の 11 時に 31.4 °C に対して、ありの場合では 29.3 °C であり、温度差は 2.1 °C であった。8 月 9 日ではなしの場合、ピーク時の 13 時に 32.2 °C に対して、ありの場合では 30.9 °C であり、温度差は 1.3 °C であった。8 月 10 日ではなしの場合、ピーク時の 14 時に 33.3 °C に対して、ありの場合では 31.9 °C であり、温度差は 1.4 °C であった。これより、グリーンカーテンの設置によりピーク時には 1.3～2.1 °C の室内気温の低減が見られた。最低気温については、いずれの日も 6 時頃となり、両者の間にはほとんど気温の差は見られなかった。

図 4.9 は、グリーンカーテンありの場合となしの場合のバルコニー部での屋外気温の経時変化を示したもの。いずれの日もピーク時には両者の間にほとんど差異は見られなかった。

最低時についてみると、8 月 8 日では 5 時の時点で、なしの場合の 24.5 °C に対して、ありの場合では 23.8 °C であり、温度差は 0.7 °C であった。8 月 9 日では、6 時の時点で、なしの場合の 13 時に 26.0 °C に対して、ありの場合

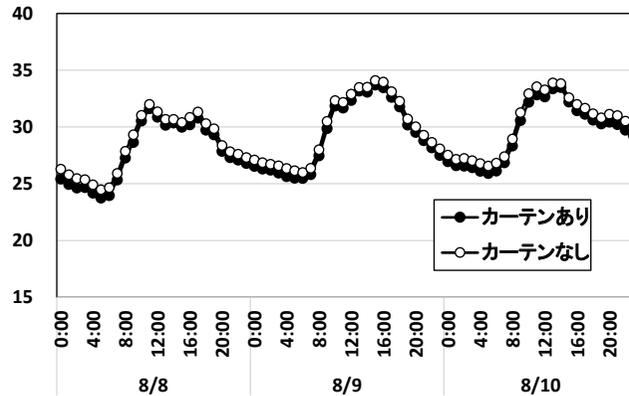


図 4.9 屋外気温比較

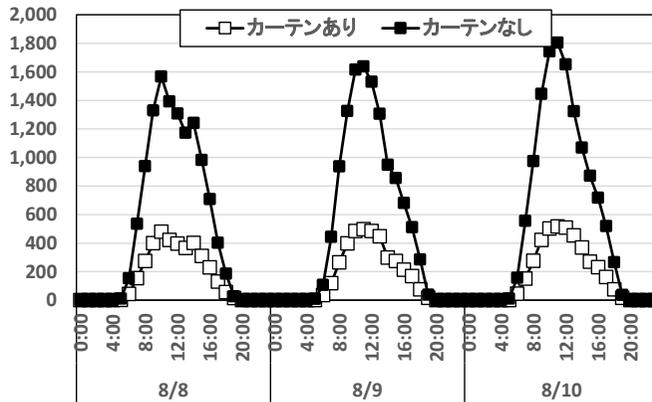


図 4.10 照度の比較

合では 25.5 °C であり，温度差は 0.5 °C であった。8 月 10 日では，5 時の時点で，なしの場合の 26.6 °C に対して，ありの場合では 25.9 °C であり温度差は 0.7 °C であった。これより，グリーンカーテンの設置により，バルコニー部の屋外気温は最低時には 0.5~0.7 °C と 1 °C 未満であるが，わずかに低減が見られた。

#### (5) 照度の比較

屋内の照度について，グリーンカーテンの有無による違いを比較する。図 4.10 より，8 月 8 日ではグリーンカーテンなしの場合，照度のピークは 9 時で 1567 Lx を示したのに対して，グリーンカーテンありの場合には 479 Lx

を示した。同様に、8月9日ではグリーンカーテンなしの場合、照度のピークは10時で1637 Lxを示したのに対して、グリーンカーテンありの場合には497 Lxを示した。8月10日ではグリーンカーテンなしの場合、照度のピークは11時で1805Lxを示したのに対して、グリーンカーテンありの場合には、516 Lxを示した。これより、グリーンカーテンを設置した場合にはなしの場合と比較して入射日射量をグリーンカーテンが遮蔽することにより、照度が1/3以下に低減していた。この結果は、成田らが行った研究結果<sup>5)</sup>と概ね符合している。

JISの照度基準<sup>18)</sup>によると、1,500 Lxは、屋内証明では工場での精密機械、電子部品の製造等の極めて細かい視作業を行う場合の照度である。また、学校の学習環境では、300 Lxは教室での維持照度とされており、図4.10より日中の8時から15時の時間帯ではグリーンカーテンの設置により照度が低下しても教室での維持照度は確保されていた。

#### 4.1.3 考察

本研究では、一般住宅レベルに普及が進みつつあるグリーンカーテンを取り上げ、今後、マンション等のバルコニー部での普及を図ることにより、市街地において一体的かつ総合的な都市の緑化対策が推進されることで都市の暑熱環境改善に期待できることから、入射日射量と表面温度に着目してグリーンカーテンの設置による夏季の真夏日での温熱環境改善効果を検証した。入射日射量については、グリーンカーテンを設置することにより、緑被率95%の下で入射日射量はグリーンカーテン透過後は入射日射量の約80%以上が削減されていた。梅干野ら<sup>3)</sup>によれば、ヘチマを用いたベランダ植栽の日射遮蔽効果に関する分析において、葉の被覆率が60%の場合に日射量は70%程度遮蔽されたことが報告されている。今回の結果では、ツルレイシの被覆率が95%と高いため、日射量の削減率もより高い数値を示したと考えられる。

入射日射量の抑制に伴う屋内照度の変化を比較したところ、グリーンカーテンの設置により教室の中央部では照度が1/3に低減し、この結果は成田ら<sup>7)</sup>の先行研究の結果と概ね整合した結果となった。筆者らの報告<sup>11)</sup>と比較すると、照度の値が大幅に低減しているが、これは筆者らの計測場所が窓際であり、直射日射の影響を受けた照度であるが、本計測では、教室のほぼ中央部での照度であることによるものである。グリーンカーテン設置後の教室屋内の照度は、日中の大半の時間帯で、JISの照度基準<sup>18)</sup>の維持照度である300 Lxは維持されていたため、グリーンカーテンにより日射

が遮蔽されても、教室での日中の学習上は支障が生じない程度の照度は確保されていた。

表面温度については、グリーンカーテンの葉面と熱反射ガラスの表面温度について、計測した長波放射量から「ステファン・ボルツマンの法則式<sup>15)</sup>」に基づき、算出を行うとともにサーモグラフィーによる熱画像と比較を行った。この結果、ピーク時にはグリーンカーテン裏面の葉面温度とグリーンカーテンを設置しない2階ガラス面の表面温度とは10℃以上の差が見られ、またグリーンカーテンの設置によりガラス面の表面温度も4℃前後低減していた。

一方、最低温度時にはガラス面ではグリーンカーテンの設置の有無による差異は見られなかったが、グリーンカーテン裏の表面温度は8℃以上ガラス面の表面温度を下回っていた。今回、表面温度を(1)式により導出していることから、ガラス面とグリーンカーテン裏の表面温度の差は、ピーク時における長波放射量の差と植物面とガラス面の放射率の違いにより顕在化したものと考えられる。今後、素材特性の違いによるヒートアイランド現象緩和の物理的なメカニズムの検証が課題と考えられる。表面温度が低減することにより、屋内気温についてはピーク時に1~2℃の低減が認められ、最低時においては両者の間にほとんど差異は見られなかった。グリーンカーテンの設置により入射日射量が抑制され、ガラス面および周辺部の表面温度の低減が図られることで、野島ら<sup>19)</sup>報告しているように、屋内側への熱流量が抑制され、屋内気温の低減が図られることとなる。以上のことから、日射反射率と遮熱効果の高い熱線反射ガラスを用いられた場合でも、グリーンカーテンと併用することで、屋内側への熱負荷をさらに高める効果を期待できる。

## まとめ

本節では、グリーンカーテンの有無による室外バルコニー部での日射量と表面温度の相違に着目して、大学構内の方位と階数、教室内の規模がほぼ同一の教室を対象として実証実験を行い、夏季の真夏日での温熱環境の違いを評価する目的で解析を行った。

解析の結果得られた主な知見は、以下のとおりである。

- (1) 入射日射量について、グリーンカーテンによる日射透過率は0.17を示し、グリーンカーテンの裏側では表側と比して約80%以上の低減が見られ、両者の間には強い正の相関が認められた。

- (2) 表面温度について、グリーンカーテンの裏側の葉面と熱反射ガラスの表面温度を比較した結果、グリーンカーテン裏側での葉温度とグリーンカーテンを設置しない熱反射ガラス表面との間では、ピーク時には 10℃以上の差異がみられた。ガラス面の表面温度では、グリーンカーテンありの場合にはなしの場合に比してピーク時に 3~4℃低減し最低時は差異が見られなかった。グリーンカーテンの設置によるガラス面および周辺外壁の表面温度の低減により、教室内の気温はピーク時に 1~2℃低減していた。
- (3) グリーンカーテンの設置に伴う日射量の低減により、グリーンカーテンありの場合にはなしの場合に比して教室内の照度は約 1/3 に低減していた。

## 4.2 SET\*, PMVを用いた温熱環境改善効果

本節では、大学構内の教育棟バルコニー部を対象としてグリーンカーテンを設置した場合と設置しない場合の放射環境を計測し、SET\*とPMV (Predicted Mean Vote) の温熱指標を用いて比較検証を行い、4.1で行った実験施設と同様のグリーンカーテンの設置して、SET\*, PMVの温熱指標により屋外での温熱環境改善効果について検証した。

### 4.2.1 研究の方法

#### (1) 計測器の設置

千葉県東金市内にある城西国際大学キャンパス内の 4.1で行った実験と同じ場所である教育棟の1階及び2階のバルコニー部を計測対象として、1階バルコニー部にはツルレイシの苗を2株ずつ定植したプランター6基を2012年7月5日に設置した。

計測に使用した教室の方位と1階と2階のバルコニー部での計測器の位置は図4.11に示すとおりである。計測時のカーテンの被覆状態は写真4.5に示す通りで、被覆率は96.5%、葉面積指数(LAI)は1.4であった。1階と2階のバルコニー部における計測器の設置状況は、写真4.6から写真4.8に示すとおりである。

#### (2) 計測の方法

屋外の一般気象状況を把握するため、計測に使用した教育棟南側の前庭

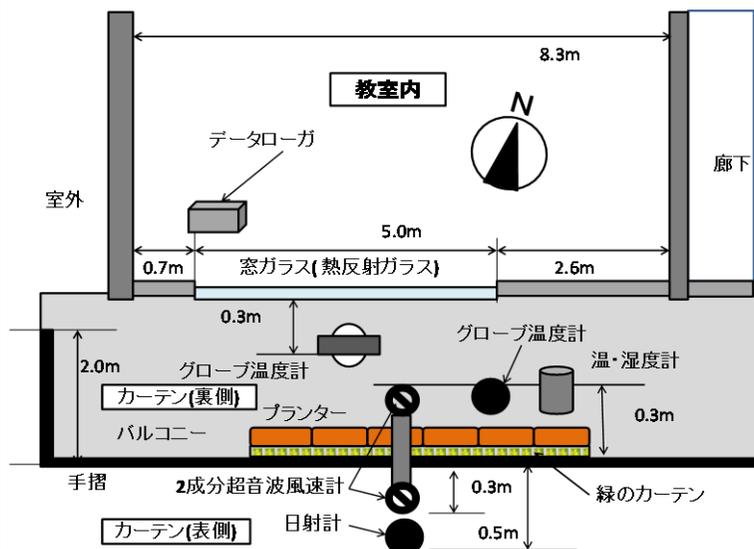


図 4.11 バルコニー1階部の計測機器の設置図



写真 4.5 計測場所の状況 (8月17日)



写真 4.6 一階の計測器設置状況（カーテン裏側）

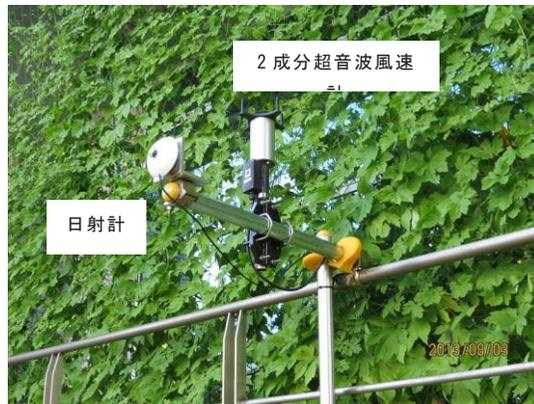


写真 4.7 一階の計測器設置状況（カーテン表側）

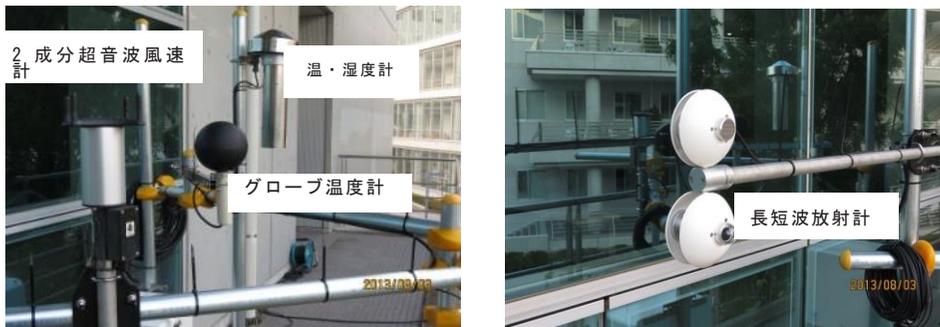


写真 4.8 2階の計測器設置状況



写真 4.9 一般気象の測定機器設置状況

に、写真 4.9 に示すように、温・湿度計，風向・風速計，日射計を設置した。長短波放射計は，窓ガラス面から 50cm 程離し，床面から 1.5m の高さに設置した。カーテン面より南東側を「表側」，カーテン面よりバルコニー側を「裏側」として，カーテン近傍での風速と風向の微細な変化を計測するため，カーテンの表側と裏側に，カーテンから約 30cm 離し，床面から 1.5m の同じ高さで 2 成分超音波風速計を設置した。

グローブ温度計と温・湿度計は，1 階と 2 階のバルコニー内で 2 成分超音波風速計をカーテン面と屋外の手摺部にほぼ平行に並列させ，床面からは 1.5m の位置に設置した。カーテンの表側には日射計を，カーテンから約 50cm 離して超音波風速計と同じ高さで縦方向に設置した。

## 4.2.2 結果

### (1) 気象概況

一般気象条件として，図 4.12 は気温と湿度，図 4.13 は風速と風向について，2012 年 8 月 4 日から 8 月 10 日までの 7 日間の経時変化を示したものである。図 4.12 より，気温について，最高気温は 8 月 9 日の 14 時に 33.7 °C，最低気温は 8 月 4 日の 6 時に 23.1 °C を記録した。7 日間の平均気温は 27.5 °C であった。湿度について，最高値は 8 月 7 日の 6 時に 96.4 %，最低値は 8 月 7 日の 14 時に 57.2 % を記録し，7 日間の平均湿度は 82.5 % であった。図 4.13 より，風速について最大風速は 8 月 4 日の 14 時に 3.5 m/sec

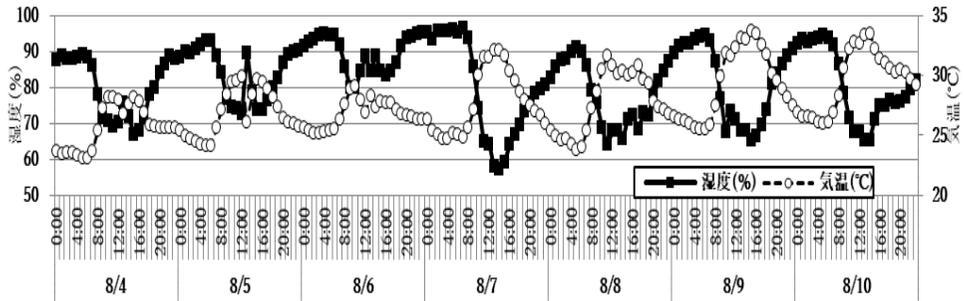


図 4.12 気温・湿度の経時変化

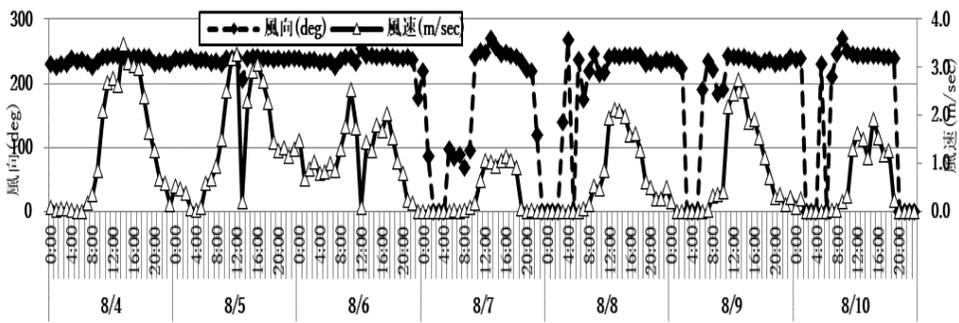


図 4.13 風速・風向の経時変化

を記録した。7 日間の平均風速は 0.4 m/sec であった。風向については 250deg(西北西の風)が優勢であった。8月7日から10日にかけては、深夜0時から翌朝8時にかけて、南東から北の風まで大きく変動した。

#### (2) 日射透過率の算定

日射量について、緑のカーテンの表側では太陽からの直達日射と周囲からの散乱日射を受ける。緑のカーテンの効果として、壁面外壁や窓面が受ける入射日射量を遮ることで、外壁面の温度上昇を抑制する効果が指摘できる。カーテンの表面と裏面の入射日射量を計測し、日射透過率を算出した。日射透過率( $\alpha$ )は、(1)式で表すことができる。

$$\alpha = S_2 / S_1 \quad (1)$$

ここで、 $S_1$ :カーテン表側の入射日射量(W/m<sup>2</sup>),  $S_2$ :カーテン裏側の入射日射量(W/m<sup>2</sup>)

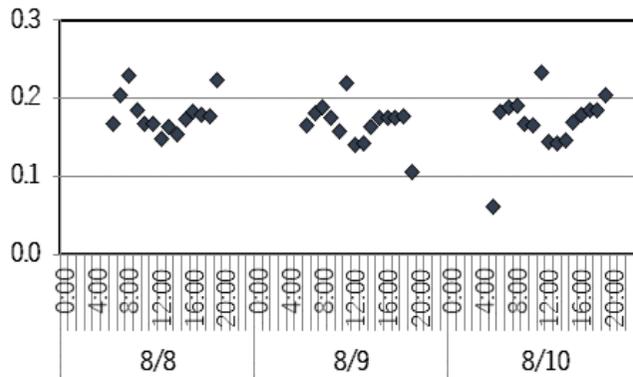


図 4.14 日射透過率の経時変化

日の出から間もない時間帯，日没に近い時間帯は日射の入射角も低いため，数値のばらつきが見られることから，入射日射量の数値が比較的安定している 8:00～18:00 までの日射透過率の経時変化を図 4.14 に示す。日射透過率の 3 日間の計測値を平均すると 0.17 であった。これより，グリーンカーテンの設置により，入射日射量の 83% がカーテン裏側のバルコニー部ではカットされていることとなる。

### (3) 放射収支の比較

図 4.15 は，カーテンを設置しないバルコニー部での短波日射量と長波放射量のそれぞれの入射量(W/m<sup>2</sup>)と反射量(W/m<sup>2</sup>)について，経時変化を示したものである。同様に，図 4.16 は，カーテンを設置した場合のバルコニー部での短波日射量と長波放射量の入射量(W/m<sup>2</sup>)と反射量(W/m<sup>2</sup>)の経時変化を示したものである。両者の比較から，カーテンを設置した場合には入射日射量(S↓)が大きく低減し，ガラス面からの反射日射量(S↑)もほとんどゼロに近い状態となっている。短波日射量と長波放射量の放射収支は(2)式により正味放射量(Rn : W/m<sup>2</sup>)として算出することができる。

$$Rn = (S\downarrow - S\uparrow) + (L\downarrow - L\uparrow) \quad \dots (2)$$

ここで，S↓：入射日射量(W/m<sup>2</sup>)，S↑：反射日射量(W/m<sup>2</sup>)，L↓：入射長波放射量(W/m<sup>2</sup>)，L↑：反射長波放射量(W/m<sup>2</sup>)

(2)式で算出した正味放射量(Rn)の経時変化を図 4.17 に示す。これより，カーテンなしの場合には，正味放射量(Rn)がピーク時には 340.2 W/m<sup>2</sup>から

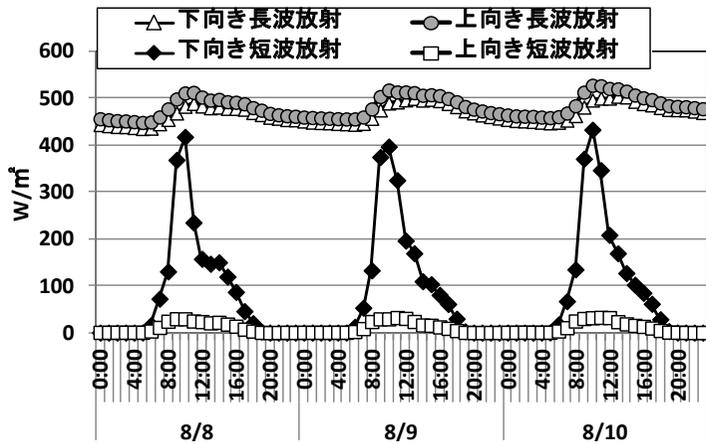


図 4.15 放射収支の経時変化(カーテンなし)

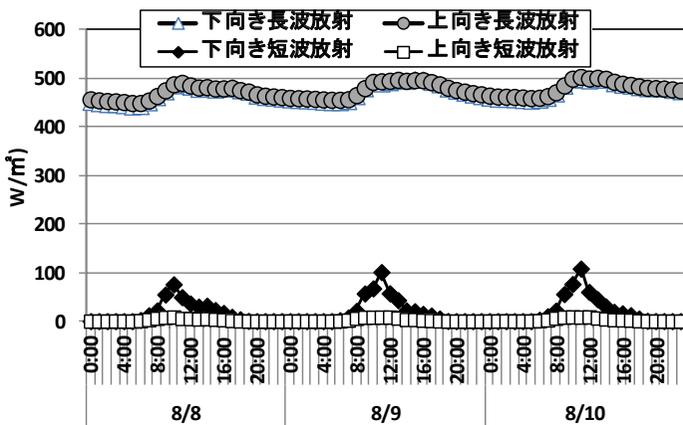


図 4.16 放射収支の経時変化(カーテンあり)

370.0 W/m<sup>2</sup>を示したのに対して、カーテンなしの場合には 69.4W/m<sup>2</sup>から 104.3W/m<sup>2</sup>と大きく低減している。カーテン設置により入射日射量を低く抑えることで、正味放射量(Rn)が 19.3%から 28.2%へと大幅に低減されていることが分かる。正味放射量を抑制することにより、建物側から大気側への顕熱を抑制することができ、暑熱環境改善に寄与する効果を定量的に補足することができる。

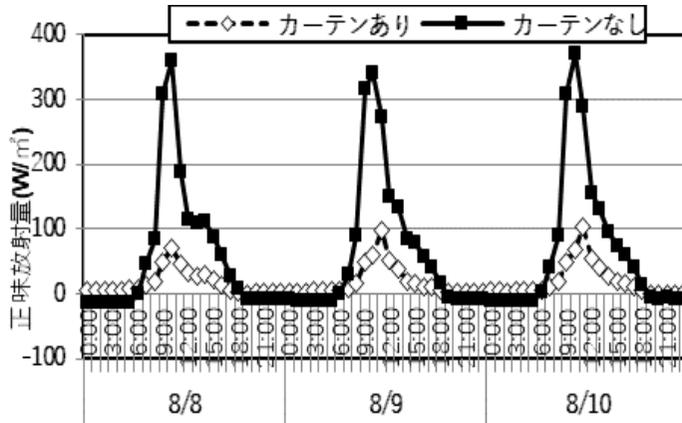


図 4.17 正味放射量の経時変化

#### (4) SET\*による評価

SET\*は、「温熱感覚および放熱量が実在環境におけるものと同等になるような相対湿度 50%の標準環境の気温<sup>21)</sup>」と定義され、体感温度に近い屋外環境を評価する温熱指標として使用されている。SET\*の算出に必要な測定項目は、気温、相対湿度、風速、平均放射温度(MRT)の物理的条件の他に、人間の着衣量(clo)と代謝量(Met)が必要であり、具体的には(3)式により、算出することができる。本稿では、夏の軽装を想定し、既往の研究<sup>9)</sup>と文献<sup>10)</sup>を参考として放射率 1.0、人体からの全熱放射量を算出する際の着衣量を 0.30 clo (半袖・半ズボン)、人体の代謝量を 1.0Met (椅子座位・読書)と仮定して、Gagge ら(1986)の方法<sup>22)</sup>を用いて求めることができる。

$$C+R+Es_k = F_{cls} \cdot f_{cls} \cdot h_s \cdot (tsk - SET^*) + w \cdot LR \cdot F_{pcls} \cdot h_{cs} \cdot (P_{sk,s} - 0.5 \cdot P_{SE T^*,s}) \quad (3)$$

ここで、 $C$ :皮膚からの対流熱伝達[J/m<sup>2</sup>・h・°C]、 $R$ :皮膚からの伝導熱損失[w/m<sup>2</sup>]、 $Es_k$ :皮膚からの蒸発熱損失[w/m<sup>2</sup>]、 $F_{cls}$ :衣服による被覆率[-]、 $f_{cls}$ :衣服の熱伝達抵抗[-]、 $h_s$ :総括熱伝達率[W/m<sup>2</sup>・°C]、 $tsk$ :平均皮膚温度[°C]、 $SET^*$ :標準有効温度[°C]、 $w$ :皮膚濡れ面積率[-]、 $LR$ :ルイス数[-]、 $F_{pcls}$ :皮膚の露出率[-]、 $h_{cs}$ :対流熱伝達率[J/m<sup>2</sup>・h・°C]、 $P_{sk,s}$ :皮膚温度に対する飽和蒸気圧[kPa]、 $P_{SE T^*,s}$ :温度SET\*での飽和蒸気圧[kPa]

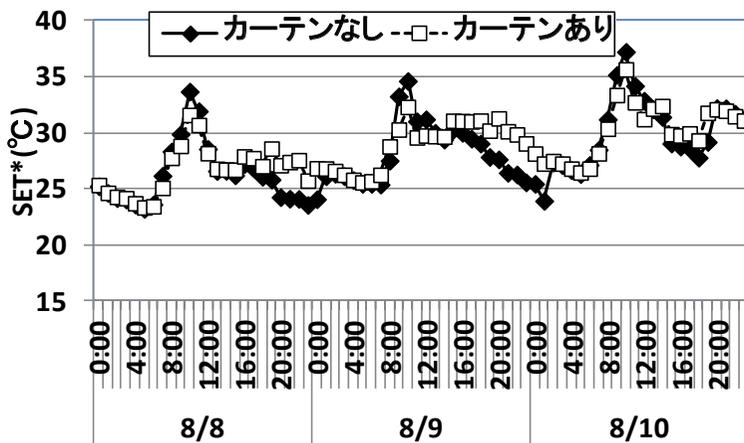


図 4.18 S E T\*の経時変化

図 4.18 は、カーテンの有無によるバルコニー部での S E T\*の経時変化を示したものである。これより、8 月 8 日には 10 時の時点でピークとなり、カーテンなしの場合は、33.7 °C に対して「あり」の場合には 31.6 °C で 2.1 °C 低減していた。16 時から 8 月 9 日の 2 時頃にかけては、カーテンありの方がなしの場合よりも最大で 3.5 °C 上回っていた。8 月 9 日には 10 時の時点でピークとなり、カーテンなしの場合は 34.6 °C に対して、カーテンありの場合には 32.3 °C で 2.3 °C 低減していた。

一方、15 時から 8 月 10 日の 1 時にかけては、カーテンありの方がカーテンなしの場合よりも最大で 3.6 °C 上回っていた。8 月 10 日には 10 時の時点でピークとなり、カーテンなしの場合は 37.2 °C となり、ありの場合には 35.7 °C で 1.5 °C 低減していた。14 時から 20 時にかけて、ありの場合がなしの場合を最大で 1.6 °C 上回っていた。日中のピーク時は入射日射量もピークとなり、カーテンありの場合には、日射量が低減していることが S E T\*の低減に作用しているのに対して、夜間は両者の間で気温と湿度に大きな差異が認められないことから、カーテンの設置により風速が低減していることが S E T\*にプラス側に寄与したと考えられる。

#### (5) PMVによる評価

PMV (Predicted Mean Vote) は、デンマーク工科大学の Fanger が提唱した温熱指標で、暑い～寒いまでの人間の温熱感覚を 7 分割し、+3～-3 の数値を割り振ったものである<sup>23)</sup>。気温・相対湿度・平均放射温度・風速の物理要素に人間の着衣量・代謝量の 6 つの要素を組み合わせ、(4)式により算出することができる。

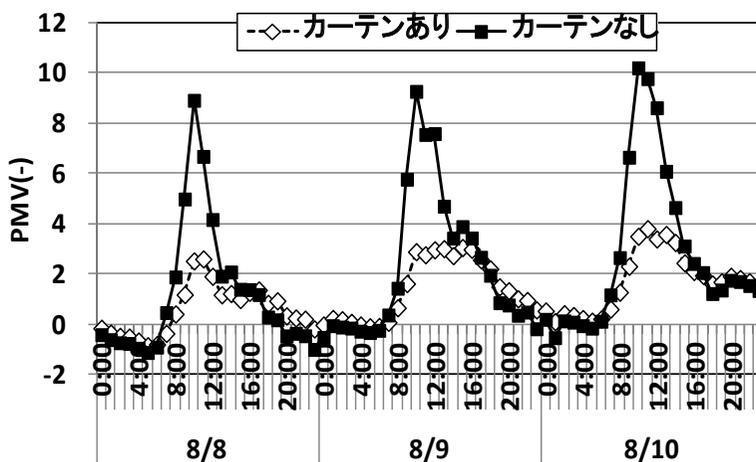


図 4.19 PMVの経時変化

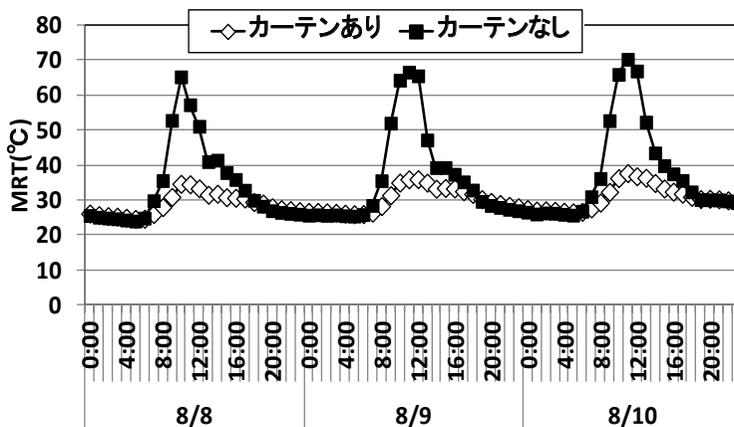


図 4.20 MRT (平均放射温度)の経時変化

$$PMV = f(M) \times S \quad (4)$$

$f(M) = 0.303e^{-0.036M} + 0.028$  : 代謝量Mの関係係数

$S = M - W - Ed - Es - Ere - Cre - R - C$  : 人体の熱収支式

ここで、 $M$ : 代謝量 [W/m<sup>2</sup>],  $Ere$ : 呼吸による潜熱損失量[W/m<sup>2</sup>],  $W$ : 機械的仕事量 [W/m<sup>2</sup>],  $Cre$ : 呼吸による顕熱損失量[W/m<sup>2</sup>],  $Ed$ : 不感蒸泄量[W/m<sup>2</sup>],  $R$ : 放射熱損失量[W/m<sup>2</sup>],  $Es$ : 皮膚面よりの蒸発熱損失量[W/m<sup>2</sup>],  $C$ : 対流熱損失量[W/m<sup>2</sup>]

本節ではSET\*の場合と同様に、着衣量を0.30clo(夏服:半袖・半ズボン)、人体の代謝量を1.0Met(椅子座位・読書)と仮定した。算出の結果を図4.19に示す。これより、カーテンなしの場合、9時から14時にかけてPMV値は+3を大きく上回り、ピーク時には9から10を示した。これに対してカーテンありの場合は、8月9日に12時と14時に+3を上回り、8月10日は10時から14時にかけて+3を上回り、ピーク時の11時には3.8を示し、カーテンなしと比べ60~70%低減していた。PMVは人間の温熱環境の感じ方を7段階で示すものであり、暑いに相当する数値は+3とされる。図中の数値はあくまで、計算上算出された数値であり、3以上の数値は+3として評価される。カーテンなしの場合に+3を大きく上回ったのは、図4.20に示すとおりMRT(平均放射温度)がピーク時に65°C~70°Cを示し、建物のガラス面や床面の表面温度の上昇による輻射熱が高くなったことが主たる要因と考えられる。また、カーテンありの場合にも、ピーク時には「暑く感じる」状態にとどまっていることを示し、これらの時間帯には戸外での活動にとって快適な温熱環境には至らないことを示唆している。

## まとめ

本研究では、緑のカーテンの有無による室外バルコニー部での温熱環境の違いを評価するため、大学構内の教室外バルコニーを対象として実証実験を行い、解析を行った。本研究において得られた主な知見は、以下のとおりである。

- (1) 日射透過率01.10の緑のカーテンでは、カーテンなしの場合に比べ、正味放射量が70~80%低減していた。これは、入射日射量の低減によるもので、顕熱の低減に寄与し、屋外温熱環境の改善効果の高いことを示している。
- (2) 室外バルコニー部での戸外活動の体感温熱環境を評価する指標としてSET\*とPMVを用い、着衣条件(0.3clo)と代謝量(1.0Met)を仮定して、それぞれの数値を算出した。SET\*値については、日中10時から14時にかけてカーテンの設置により約2°C低減したが、日没後の19時から深夜2時頃にかけては、カーテンありがなしの場合よりも最大3°C以上上回っていた。カーテン設置による通風阻害が要因と考えられる。
- (3) PMV値については、カーテンなしの場合、日中10時から14時にかけて+3を大きく上回り、戸外での活動環境としては適さない温熱条件と判断される。一方、カーテンの設置により、PMV値はピーク時には60

～70%低減が図られたが、ピーク時には+3 を上回る傾向がみられ、「暑い」と感じる環境条件を改善するまでには至っていない。カーテンなしの場合に+3 を大きく上回ったのは、平均放射温度がピーク時に 60 度を上回る酷暑環境が作用した結果と考えられる。

以上により、カーテンの設置の有無による教室外のバルコニー部での温熱環境の違いについてSET\*とPMVという温熱指標により評価した結果、日中ピーク時において緑のカーテン設置による体感温度の改善について定量的な評価を行うことができたが、PMV値の屋外環境評価への適用には課題を有しており、室内との違いを考慮した補正が必要と考えられた。

### 4.3 MRT, WBGTによる温熱環境改善効果の評価

本節では、大学の教育棟を対象にしてMRTとWBGTの温熱指標により、カーテンを設置した場合と設置しない場合の教室外バルコニー部での温熱環境を比較し、カーテンの設置による教室内外での温熱環境改善効果について検証を行った。

#### 4.3.1 研究の方法

##### (1) 実験装置の設置

千葉県東金市内にある城西国際大学キャンパス内の同じ方位と広さを有する棟のバルコニー部にはツルレイシの苗を2株定植したプランター8基を2011年6月20日に設置した。G1棟とG2棟の間は約20m離れていた。

図4.21, 図4.22に示すとおり、G1棟とG2棟の教室はいずれも東向きで南側は室外、北側は隣の教室に接していた。教室の大きさは、タテ11.2m, ヨコ7.9m, 高さ3.0mであった。窓面は、東側は横幅7.9mのうち3.4mがガラス窓となっており、床面から天井面までの全面がガラス面で材質は単層のフロート版ガラスであった。南側は、腰高1.4mで、タテ1.12m, ヨコ2.2mのガラス面3面が教室の東端より、0.8mの間隔で配置されていた。床面は教室外の外構広場面から0.8mの高さで、材質はビニール製タイル、色はライトグレーであった。実験計測時には、教室は入口と窓面を全て閉じ、東側のガラス面のブラインドは全面引き上げ、南側はブラインドを下ろして遮光した。教室内の温・湿度計は、窓面から1.5m離し、床面からは1.5mの高

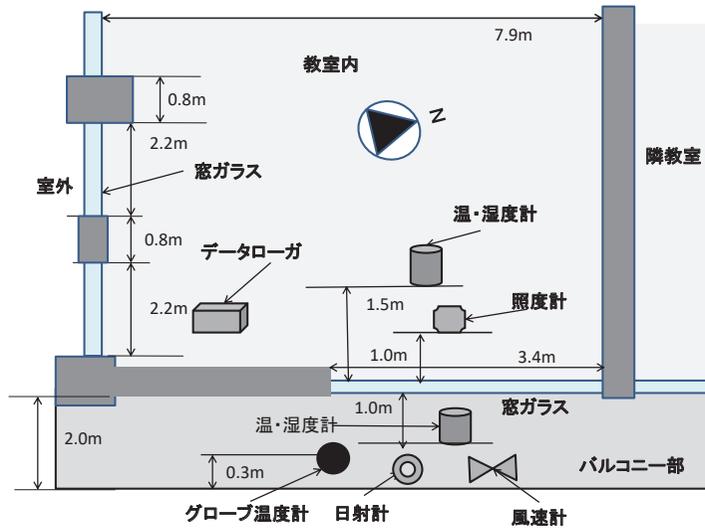


図 4.21 G1 棟の計測器設置図

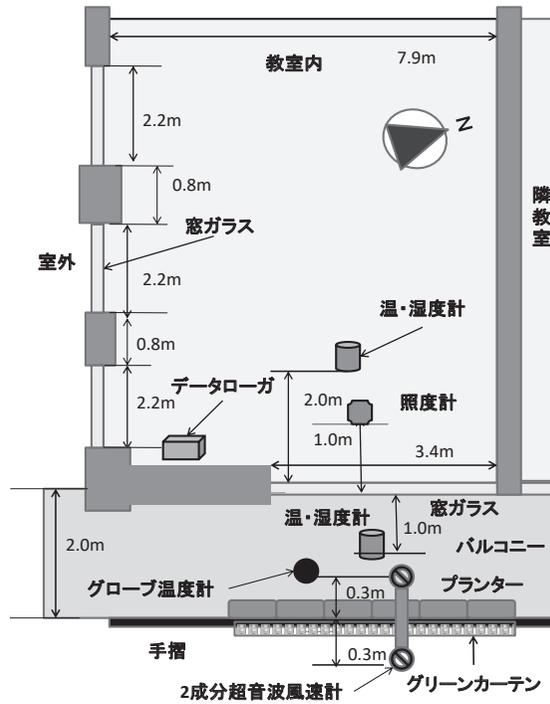


図 4.22 G2 棟の計測器設置図

表 4.3 計測器一覧表

計測項目	計測器	メーカー名	型番	数量
気温・湿度	小型温湿度センサー (0-1v)	Vaisala	HMP-60HT-03C	4基
風速・風向	セパレート風向風速センサー	R. M. YOUNG	CYG-3002	1基
風速・風向	2成分超音波風速計	R. M. YOUNG	CYG-85000-JK	2基
グローブ温度	グローブ温度計	クリマテック	C-BB-15cm-JK	2基
日射量	日射計 (class 2)	Hukseflux	CHF-LP02-c-JK	2基
照度	小型照度計 (教室内用 0-30KLx)	英弘精機	CEK-ML020SI	2基
計測記録	データローガ	Campbell	C-CR1000-4M	2基



写真 4.10 大学構内に設置したグリーンカーテンの生育状況

さに設置した。また、照度計は、窓際での照度を計測するため、窓面から 1.0 m 離して床面に設置した。計測器は 2011 年 8 月 5 日に設置し、学生たちが教室に出入りすることのない夏季休暇中の 8 月 6 日 0 時から 19 日の 24 時までの 14 日間を自動計測により行った。計測に使用した機器は、表 4.3

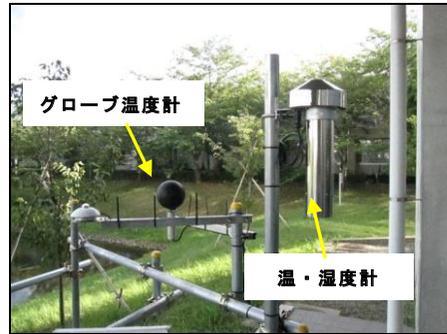


写真 4.11 G1 棟の計測器設置状況



カーテン裏側



カーテン表側

写真 4.12 G2 棟の計測器設置状況

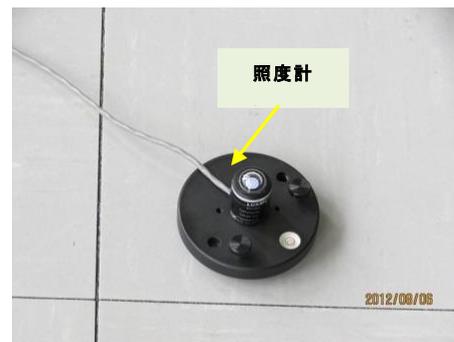


写真 4.13 G1, G2 棟教室内に設置した計測器

に示すとおりである。また、計測期間におけるグリーンカーテンの生育状況と被覆状況は、写真 4.10 に示すとおりである。計測間隔は 1 分とした。

なお、G1棟とG2棟は形状も方位も同じであるが、教室内の温熱環境条件が同一であることを確認するため、本実験後、カーテンを撤去した状態で夏季（2014年8月16～19日）に教室内に黒球グローブ温度と照度の測定を行い、両室の教室内の条件がほぼ同一であることを確認した。計測器は、計測前に全て校正を行った。G1棟とG2棟における計測器の設置状況は、写真4.11から写真4.13に示すとおりである。

### 4.3.2 結果

#### (1) 気象概況

14日間の計測期間のうち1日の最高気温が30℃を上回る「真夏日」が連続した8月16日から8月18日までの3日間を解析対象に選定した。一般気象条件として、気温、湿度の推移を図4.23に、風速、風向の推移を図4.24に、日射量の推移を図4.25に示す。

図4.23より、気温については3日間の最高気温は、8月16日の12時に32.0℃、最低気温は8月17日の5時に23.9℃を記録した。3日間の平均気温は27.5℃であった。湿度については、3日間の最高値は8月17日の5時に95.9%、最低値は8月16日の13時に61.10%を記録し、3日間の平均湿度は82.5%であった。図4.24より風速について、最大風速は8月17日の16時に1.11 m/secを記録した。3日間の平均風速は0.4 m/secであった。風向については、150～200 deg(南東～南南西)の風が優勢であった。

また、図4.25より、日射量については日の出とともに上昇し10時～11

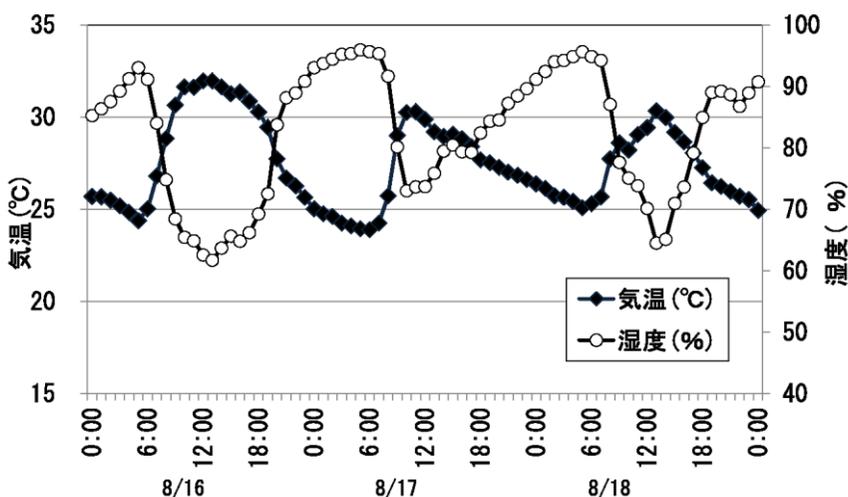


図 4.23 気温と湿度の経時変化

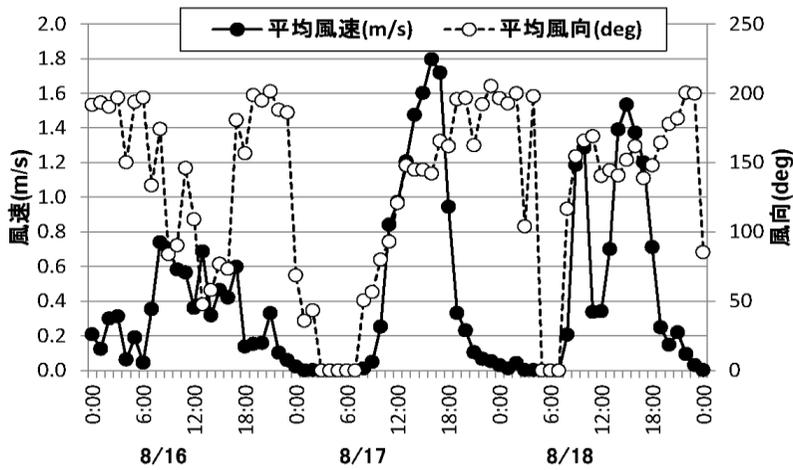


図 4.24 風向と風速の経時変化

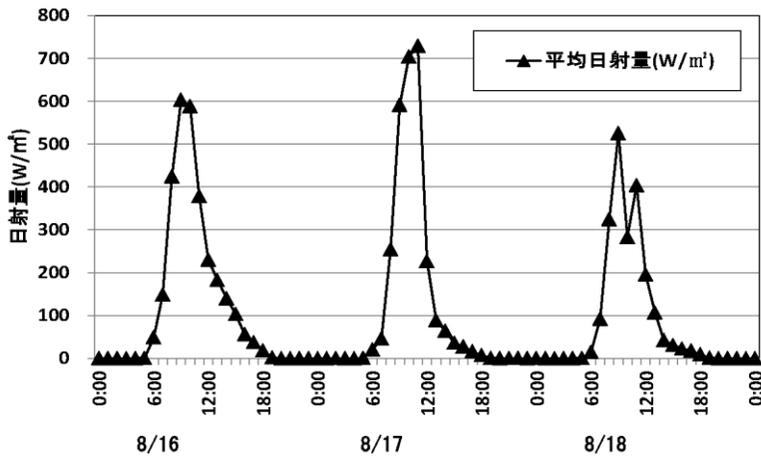


図 4.25 日射量の経時変化

時にピークとなり、日没まで暫減していく。期間中の最大値は 8 月 17 日の 11 時に 729.1 W/m<sup>2</sup>を示した。

(2) 教室外の気温と湿度の変化

図 4.26 は、G1 棟と G2 棟のバルコニー部における気温の経時変化を示したものである。これより、カーテンを設置した G2 棟の方が G1 棟よりも終始、気温が高いまま推移しており、最大差は 8 月 17 日の 4 時に 1.4 °C を示し、3 日間の平均気温差は 0.4 °C となった。これは、カーテン設置による通風の障害が原因と考えられる。また、図 4.27 は、同じく二つの教育棟の

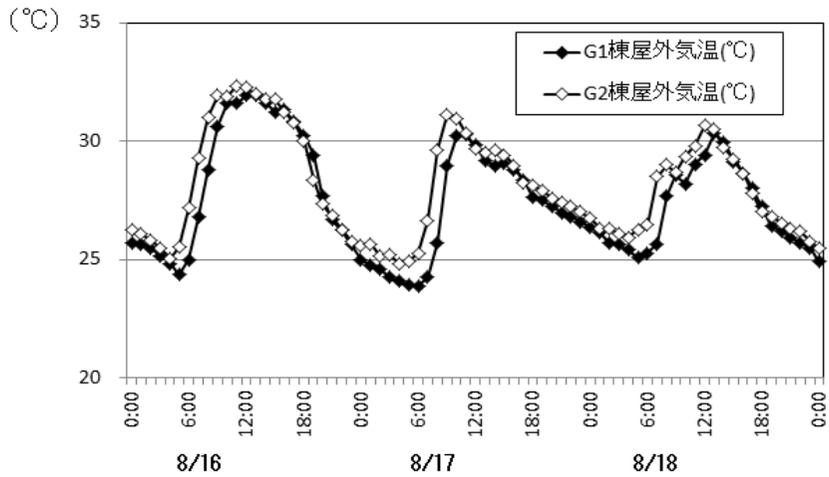


図 4.26 室外気温の経時変化

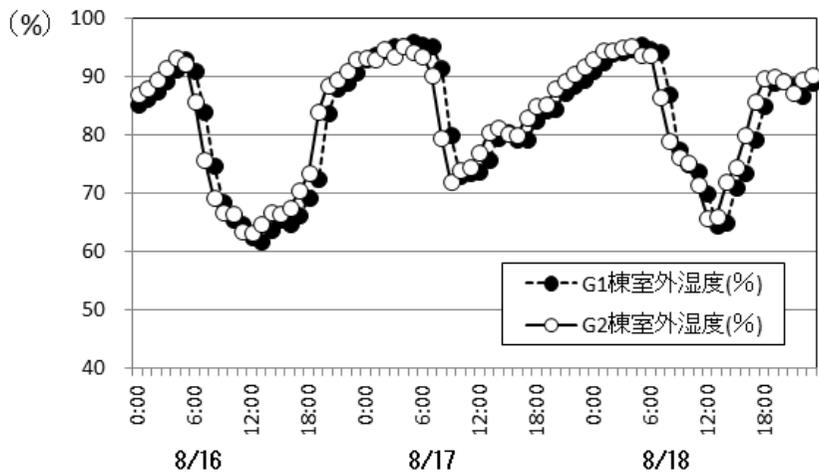


図 4.27 室外湿度の経時変化

バルコニー部における湿度の経時変化を示したものである。これより、6時から9時にかけてはG1棟(カーテンなし)の方が低く推移し、12時前後から夜間にかけては、逆にG2棟(カーテンあり)の方が高くなる傾向が見られ、最大では8月16日の19時に11.6%もの差が生じ、3日間の平均では0.6%程上回っていた。これはカーテン表面からの蒸散作用と通風の障害が影響したものと推察される。

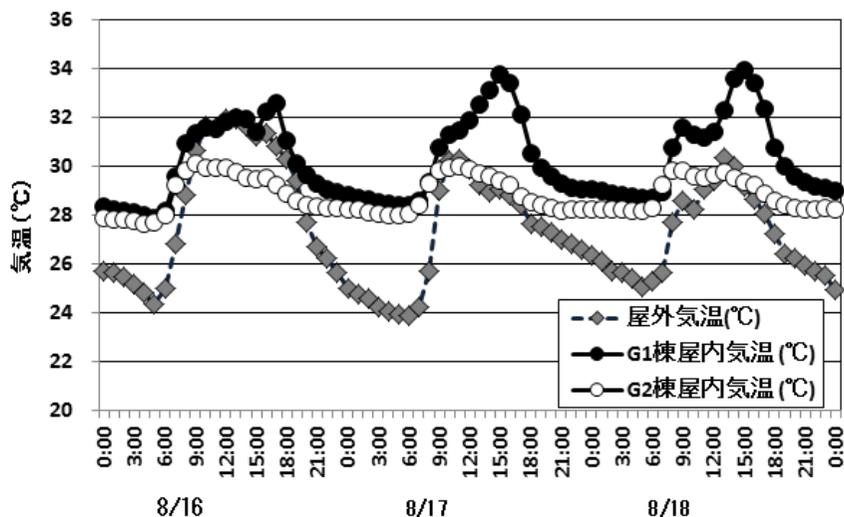


図 4.28 教室外と教室内の気温比較

### (3) 教室内外の気温の変化

図 4.28 は、G1 棟と G2 棟の教室内部と G1 棟教室外のバルコニー部の気温の経時変化を示したものである。カーテンを設置しない G1 棟の場合、教室内部の最高気温は 8 月 18 日の 15 時の時点で 33.9 °C を記録し、最低気温は、8 月 16 日の 5 時に 27.9 °C を計測した。これより、3 日間の最高気温と最低気温の差は、最大で 6.0 °C を記録した。室外気温の推移と比較するとピーク時では最大で 3.6°C の上昇が見られた。これに対して、カーテンを設置した G2 棟の場合には、最高気温はいずれの日も、9~10 時に 29.8~30.1°C となり、以後夜間にかけて緩やかに低減する傾向が見られ 1.11 時以降はほぼ 28°C 付近で安定した。最低気温は、8 月 16 日の 4 時に 27.7 °C を記録した。カーテンなしの場合と比較すると最高気温は最大で 4.1°C 低減し、最高と最低の最大気温差も 2.5°C となり、1/2 以下に緩和された。教室外の最高気温と比較すると、ピーク時では 0.3~1.12°C 低くなっていた。軸丸ら<sup>9)</sup>の報告と比較して、カーテン設置による教室外と教室内との最大の気温差が大きくなっているが、これは、軸丸らの場合は窓部を開放状態で測定していることとの違いによるものである。

### (4) 照度の変化

室内において、窓ガラス面から 1 m 離れた床面に照度計を設置した室内照度の経時変化を図 4.29 に示す。これより、カーテンなしの G1 棟の教室

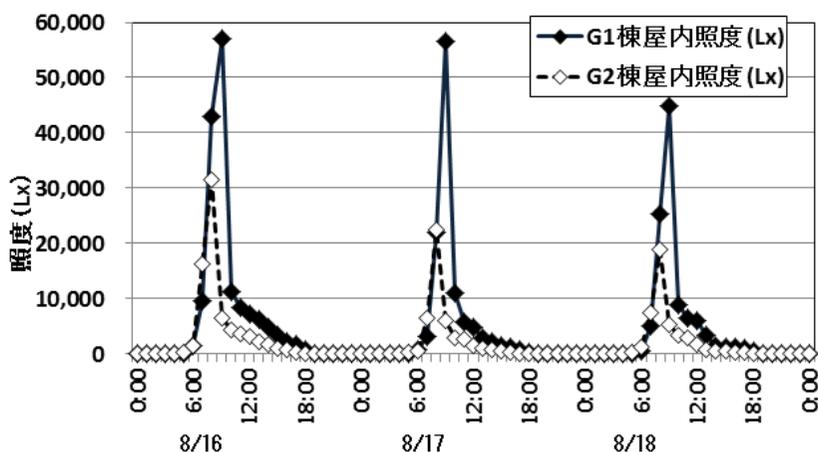


図 4.29 照度の経時変化

内では、日の出とともに東方向から受ける直達日射の影響により、9時にピークとなり 45,000 lx から 58,000 lx を示したのに対して、カーテンありの G2 棟の場合は 8 時の時点でピークとなり 12,000 lx から 31,000 lx となり、約 50~60% 教室内の照度は低減した。低減の比率については、成田らの報告<sup>6)</sup>の 1/3 低減と比較すると大きい。これは成田らが教室の中央部で計測したのに対して、本研究では測定位置を窓側としたことにより直達日射の影響を受けたためである。室内作業の照度基準 (JIS)<sup>18)</sup>では、居間での裁縫などの手元作業に 750~2,000 lx、読書等に 300~750 lx 必要とされている。成田ら<sup>5)</sup>の報告ではカーテンを設置した場合は、教室内の照度が JIS 基準を下回っていたが、今回の窓際での計測では室内での手元作業に必要な照度に対して、ピーク時には 25~29 倍の照度が確保されている他、いずれの日も 7 時~14 時までの間は 750 lx 以上の照度が維持され、14 時以降 16 時頃までは 300 lx 以上が確保されていた。これより、カーテンが日射を遮蔽することにより、窓際では特に日中は照明をつけなくとも読書等の室内での作業には支障を生じない程度の照度は維持されていた。

#### (5) 風速・風向の比較

図 4.30 は、8 月 16 日から 18 日までの 3 日間の G2 棟に設置したカーテンの表側と裏側の風速の変化を示したものである。これより、カーテンの表側では、8 月 17 日の 15 時頃に最大 1.5 m/sec を記録したのに対して、カーテン裏側では 1.4 m/sec となり、約 30% 程度低減していた。3 日間の平均

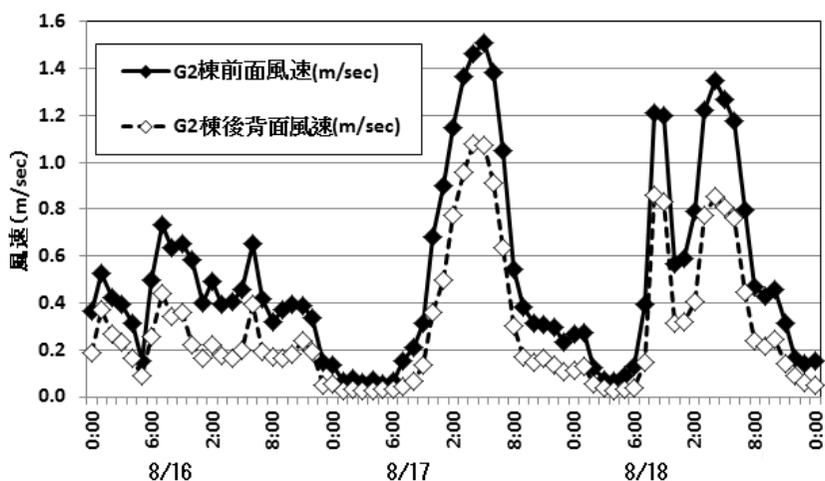


図 4.30 風速の経時変化

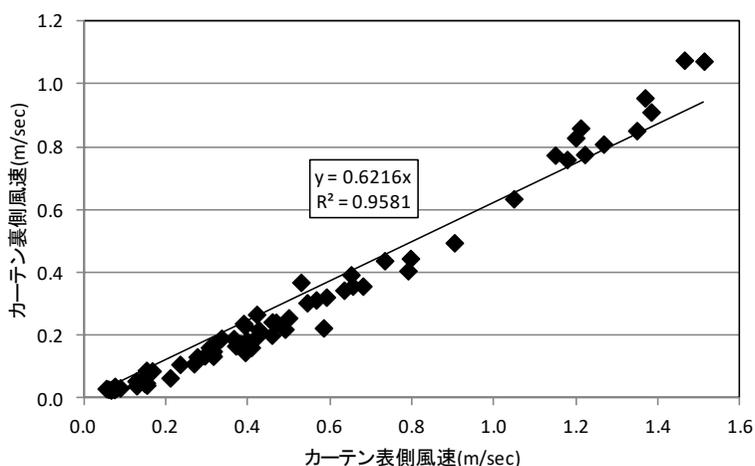


図 4.31 カーテン表側とカーテン裏側の風速の関係

風速で見ると、表側では 0.5 m/sec, 裏側では 0.3 m/sec となり、約 40 % 低減していた。カーテン表側と裏側の風速の関係を示すと、図 4.31 のとおりである。これより、両者の間には強い正の相関 ( $R^2=0.91$ ) が見られ、回帰直線の傾きからカーテン裏側の風速は、表側の風速の 62.2% となり表側の風速に対して 38.8% が減速していた。

一方、図 4.32 は、同じく 3 日間の G2 棟に設置したグリーンカーテンの表側と裏側の風向の変化を示したものである。これより、表側、裏側とも全体

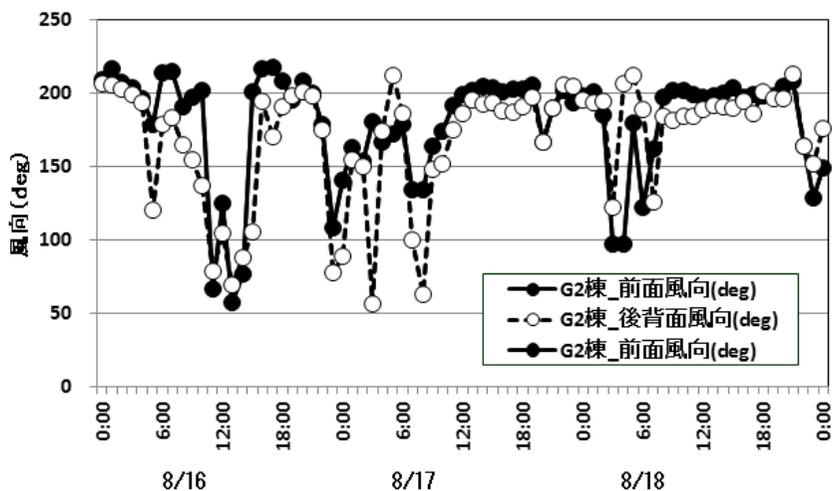


図 4.32 風向の経時変化

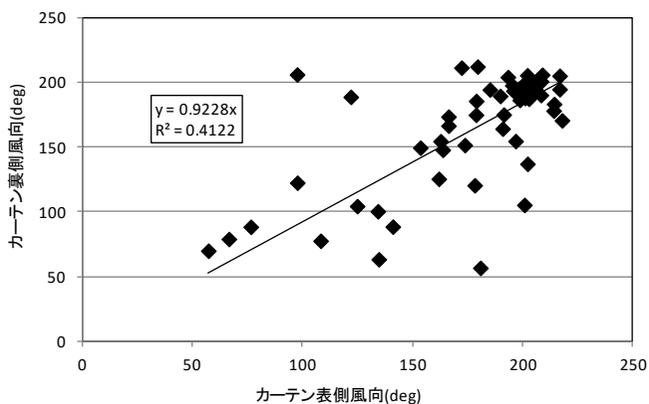


図 4.33 カーテン表側とカーテン裏側の風向の関係

として南南西（200 deg）の風が卓越する傾向が見られた。8月16日の日中には、両側とも北東（50 deg）から東南東（100 deg）の風が優勢となったが1.10日の深夜にかけては、グリーンカーテンの表側で東南東（100 deg）から南（180 deg）の風が優勢となっていたのに対して、裏側では北東（50 deg）から南西（220 deg）の風まで大きく変動していた。

グリーンカーテン表側と裏側の風向の関係は図 4.33 に示すとおりで、両者の間の相関関係は低く ( $R^2=0.41$ ) になっていた。これは、グリーンカーテン

が密に被覆されることで、風の透過が遮られ、カーテン裏側で乱流が形成されたためと考えられる。

### 4.3.3 温熱環境改善効果の評価

#### (1) MRTによる評価

カーテンの設置によりバルコニー部での暑熱環境が具体的にどのように改善されるかを、カーテンに比較的近い位置での影響を評価するため、MRTによる温熱指標を用いて熱環境改善効果を確認した。MRTは、暑さ感を示す温熱指標の一つで、周囲の全方向から受ける熱放射を平均化して温度表示したものである<sup>19)</sup>。具体的には、グローブ温度計により計測した黒球グローブ温度 ( $T_g$ ) と温湿度計により計測した乾球温度 ( $T_d$ )、長音波風速計による風速値 ( $V$ ) を用いて、(1)によりMRTを算出した。

$$MRT = T_g + 2.37\sqrt{V} \times (T_g - T_d) \quad \dots (1)$$

ここで、 $T_g$ : 黒球グローブ温度 [°C]、 $T_d$ : 乾球温度 [°C]、 $V$ : 風速 [m/s]

8月16～18日について、MRTの算出結果を経時変化で表すと図4.34に示すとおりである。これより、室外のバルコニー部では、日中はG2棟（カーテンあり）の方がG1棟（カーテンなし）よりも絶えず低温で推移し、温度が上昇するにつれ、両者の温度差が拡大している。最大ピークの9時の時点では、G1棟（カーテンなし）が67.8～70.2°Cと70°C前後であるのに対して、G2棟（カーテンあり）が42.3～46.3°Cであり、カーテンなしの場合に比して約40%低い値を示した。また、夜間20時以降翌朝5時までの間は両者の間に温度差はほとんど見られず、温度も25～27°Cで安定している。

図4.35は、グローブ温度の経時変化を示したものである。これより、G1棟とG2棟ともに、MRTの変化とほぼ相似的に推移しており、MRT値はグローブ温度に大きく左右されていることが分かる。

#### (2) WBGTによる評価

次に、建物外部空間での放射環境も考慮して温熱環境を評価する指標としてWBGT値の算出を試みた。WBGTは外部空間での労働環境やスポーツ環境として適正な空間であるか否かを示す指標として用いられ、人体の熱収支に影響の大きい湿度、輻射熱、気温の三つを取り入れた温熱指標であり、(2)式で算出される<sup>15)</sup>。

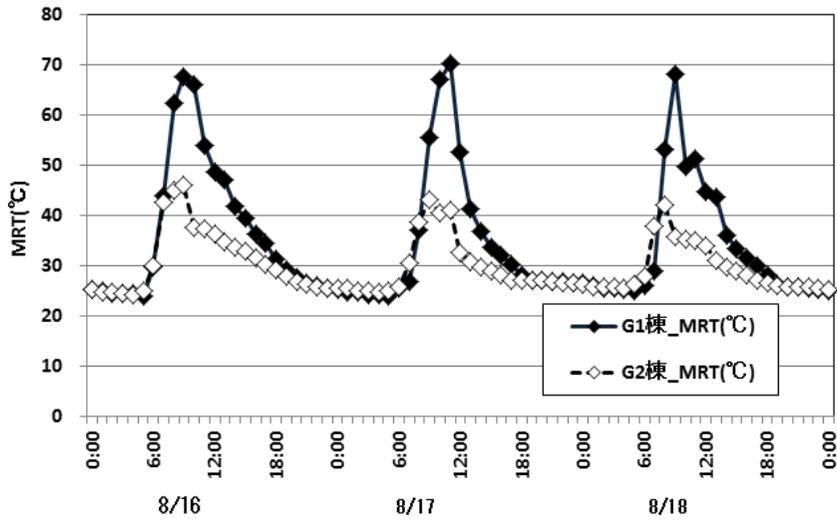


図 4.34 MRTの経時変化

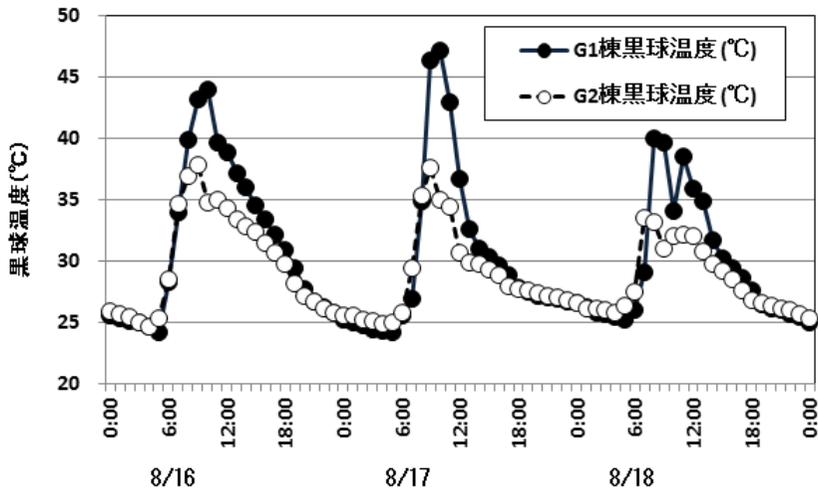


図 4.35 グローブ温度計の経時変化

$$WBGT = 0.7 T_w + 0.2 T_g + 0.1 T_d \quad (2)$$

ここで、 $T_w$ : 湿球温度 (°C),  $T_g$ : グローブ温度 (°C),  $T_d$ : 乾球・湿球温度 (°C)

表 4.4 熱中症予防のための運動指針<sup>20)</sup>

WBGT	運動指針	
31℃以上	運動は原則中止	WBGTが31℃以上では、皮膚温より気温の方が高くなる。特別の場合以外は運動は中止する。
28～31℃	嚴重警戒	熱中症の危険が高いので、激しい運動や持久走など熱負担の大きい運動は避ける。
25～28℃	警戒	熱中症の危険が増すので、積極的に休息をとり、水分を補給する。
21～25℃	注意	熱中症による死亡事故が発生する可能性がある。運動の合間に積極的に水を飲むようにする。
21℃まで	ほぼ安全	通常は熱中症の危険性は小さいが、適宜水分の補給は必要である。

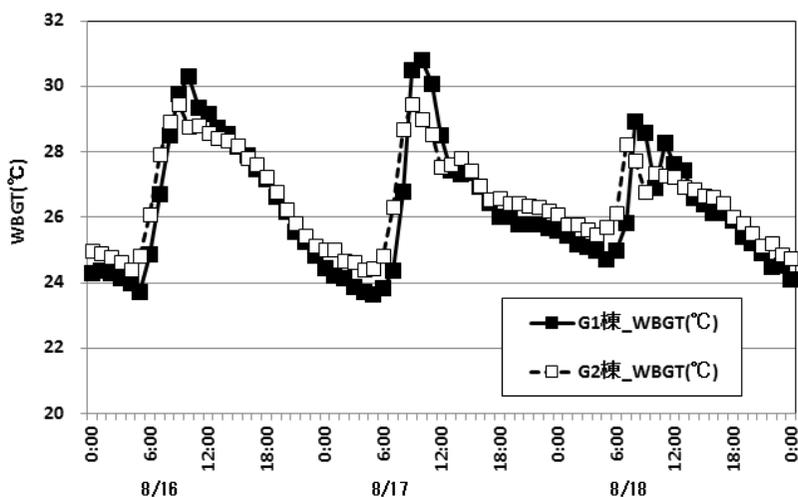


図 4.36 WBGTの経時変化

表 4.4 に示すとおり日本体育協会から、WBGTを基準とした「熱中症予防のための運動指針」<sup>20)</sup> が提示されているが、この指針によるとWBGTが28℃以上になると熱中症の危険が高く、「激しい運動は中止」とされ31℃以上になると「運動は原則として中止」とされている。本研究では計測した気温と湿度を基に、WBGT値を算出した。8月16日～18日についてWBGTの経時変化で表すと、図 4.36 に示すとおりである。ピーク時は9～10時の時間帯でG1棟では28.9～30.8℃を示したのに対して、G2棟では

28.2～29.5℃となり、0.7～1.3℃低くなっていた。一方、夜間から早朝にかけては、逆にG1棟の方がG2棟よりも低くなる傾向が見られた。最低温度を記録した4～6時の時間帯では、前者が23.6～24.7℃に対して後者が24.4～25.5℃となり、日中とは逆に0.7～0.8℃低くなっていた。

#### 4.3.4 考察

本研究では、一般住宅レベルに普及が進みつつあるグリーンカーテンを取り上げ、今後、マンション等のバルコニー部での普及を図ることにより、市街地部において一体的かつ総合的な都市の緑化対策が推進されることで都市の熱環境改善に期待できることから、MRTとWBGTの温熱指標を用いてカーテンの設置による温熱環境改善効果を検証した。

MRTについては、カーテンを設置しない場合に比べると、設置した場合の方が絶えず低い温度で推移し、温度の上昇につれてその差は拡大してピーク時で約27℃と約40%の低減効果が見られた。このような温度差の生じる理由として、カーテンにより直達日射が遮蔽されることで、グローブ温度の比較から建物のバルコニー床面や窓のガラス面、建物の外壁の表面温度の上昇が抑制されること、風速もカーテン裏側では表側に対して約40%が低減されることにより、MRT値が大幅に低減したものと考えられる。第2章の2.1において、壁面緑化の外側での温熱環境をコンクリート壁（白色）との比較で評価した結果<sup>16)</sup>では、壁面緑化によりMRT値が約15%の低減を報告している。緑化の形態が異なるため単純な比較はできないが放射環境が大きく緩和されることにより、夏季のバルコニー等の室外において、ベランダガーデニングやくつろぎ等の室外利用の可能性が高まることが期待できる。また、グローブ温度を計測することで、MRTの値を簡易に近似させることもでき、MRTを用いてカーテンによる戸外の温熱環境改善効果を定量的に評価することの有効性が確認できた。

一方、WBGTは、室外のスポーツや労働現場において暑熱環境を評価し、熱中症予防対策に活用されている指標である。この方法は、労働者が活動している一定時間における平均的な熱の影響を評価する場合には適用できるが、快適域に近い熱ストレスの評価には適用できないとされている<sup>14)</sup>。今回の計測の結果では、カーテンを設置することにより、設置しない場合に比して、ピーク時には約1℃弱低減が確認できたが、顕著な緩和効果は認められず、先の「熱中症予防のための運動指針<sup>20)</sup>」によると、熱中症のリスクを低減するまでの効果は確認できなかった。逆に夜半から早朝にかけてカーテンを設置しない状態の方が、カーテンを設置した場合に比

べると 1 °C弱低くなる傾向が見られた。これは、植物体からの蒸散作用により緑化された面の近傍では相対湿度が高くなり、カーテンを設置した場合に比して、設置しない場合の方が低い温度を記録したものと考えられる。

## まとめ

本研究では、カーテンの有無による室外バルコニー部での温熱環境の違いを評価する目的で、大学構内の方位と階数、教室内の規模がほぼ同一の教室を対象として、実証実験を行い、解析を行った。解析の結果、本研究において得られた主な知見は、以下のとおりである。

- (1) 室外の風速については、カーテンの裏側では表側と比して約 40 %の低減が見られ、両者の間には強い正の相関が認められる一方、風向についての相関は低かった。
- (2) 室外バルコニー部での放射環境を評価する温熱指標としてMRTを用いて評価したところ、カーテンありの場合にはカーテンなしの場合に比して、約 40 % 近くが低減していた。これは、直達日射がカーテンにより遮光されることによる周辺からの放射温度の低下と風速の減速によるものである。
- (3) 室外バルコニー部での作業・生活環境を評価する温熱指標として、WBGTを用いて評価したところ、カーテンの設置による日中ピーク時に 0.7~1.3 °Cの低減が確認されたが、早朝にかけては逆にカーテンありの方がなしの場合よりも、0.7~0.8 °C上回る傾向が見られた。これはカーテン裏側の湿分の上昇が作用したものと考えられる。

以上により、カーテンの設置の有無による教室内外での温熱環境の違いについて、MRT、WBGTという温熱指標により評価した結果、MRT値の比較からカーテンによる放射環境の改善効果を定量的に補足することができた。一方、作業環境としてWBGT値で評価したところ、カーテン設置による日中の低減効果は見られたが、熱中症のリスクを軽減するまでの顕著な効果は認められなかった。通風の確保等による体感温度の低減が課題と考えられる。

## 引用文献

- 1) ヒートアイランド対策推進会議 (2013)ヒートアイランド対策大綱, 21pp.

〈 [http://www.env.go.jp/presss/file\\_view](http://www.env.go.jp/presss/file_view). 〉 2014.9.1 参照

- 2) 鈴木弘孝・加藤真司・桑沢保夫・藤田茂 (2015) SET\*, PMV を用いたバルコニー部における緑のカーテンの温熱環境改善効果, 日本緑化学会誌, 41 (1), 175-180
- 3) 梅干野晁・山下富大 (1984) ツル植物による植栽スクリーンの日射遮蔽効果: 日本建築学会建築環境工学論文集, 第 6 号, 140-145.
- 4) 福田亜佐子・佐俣満夫 (2008) グリーンカーテンの温度低減効果, 横浜市環境科学研究所報, 第 32 号, 22-26.
- 5) 成田健一 (2007) グリーンカーテンが教室の温熱環境に及ぼす効果, 環境情報科学論文集, 21, 501-506.
- 6) 成田健一 (2009) グリーンカーテンは周囲空気を冷却するか?, 環境情報科学論文集, 23, 167-172.
- 7) 高山成・山本晴彦・吉越恆・岩谷潔・原田陽子・山崎俊成・立石欣也 (2011), 蔓植物を使った夏季の壁面緑化による日傘効果とガラス窓日射熱負荷軽減量の算定: 日本建築学会環境系論文集, 76 (661), 247-254.
- 8) 加藤真司・桑沢保夫・石井儀光・樋野公宏・橋本剛・池田今日子 (2012) 集合住宅におけるグリーンカーテンの温熱環境改善効果研究, 日本緑化学会誌, 38 (1), 39-44.
- 9) 軸丸勇士・藤本裕一・島崎卓 (2008) 「グリーンカーテン」の降温効果とその利用, 日本科学教育学会九州・沖縄支部会. 13-20.
- 10) 野村不動産ホールディングス (2012) CSR 報告書 2012, 野村不動産, 39pp.
- 11) 鈴木弘孝・加藤真司・藤田茂 (2015) MRT, WBGT によるグリーンカーテンの温熱環境改善効果の評価, ランドスケープ研究 78(5), 505-510
- 12) 梅干野晁・山下富大 (1983) ツル植物によるベランダ植栽の日射遮蔽効果に関する実験研究, 日本建築学会建築環境工学論文集, 第 5 号, 141-146.
- 13) 加藤真司・持田太樹・島田知幸 (2013) 写真画像に基づく緑のカーテンの LAI 測定方法, 平成 25 年度日本造園学会関東支部大会梗概集 Vol. 31, 112
- 14) 旭硝子ホームページ, 高遮蔽性能熱線反射ガラス JISR3221 熱線反射ガラス「サンルックス®」([http://www.agc.com/products/summary/1174402\\_832.html](http://www.agc.com/products/summary/1174402_832.html)) (2015.12.1 参照) より作成。
- 15) 田中俊六・武田仁・足立哲夫・土橋喬雄 (2002) 最新環境工学, 井上書院, 317pp.
- 16) 鈴木弘孝・三坂育正・村野直康・田代順孝 (2005) 壁面緑化による建物外部の温熱環境改善効果に関する研究, ランドスケープ研究 68(5), 503-508
- 17) 環境省 (2012) 平成 24 年度ヒートアイランド現象に対する適応策及び震災

後におけるヒートアイランド対策，環境省ホームページ：

<https://www.env.go.jp/air/report/h25-02/index.html>

- 18) 日本工業規格，JIS 照度基準 JIS Z9110-1979 「照度基準」付表 7 - 1
- 19) 野島義照・鈴木弘孝（2004）壁面緑化による夏季の壁面から屋内への熱流および熱流量の軽減効果，ランドスケープ研究 67(5)，447-452
- 20) 国土交通省都市・地域整備局公園緑地課緑地環境推進室（2004）記者発表資料：緑による熱環境改善効果に関する調査について.11pp. 国土交通省ホームページ：  
<https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha04/04/040813/01.pdf>, /01.pdf, 2014.9.1 参照
- 24) 日本体育協会，熱中症予防のための運動指針，日本体育協会ホームページ：  
<http://www.japan-sports.or.jp/medicine/tabid/922/2013.4.16更新>，  
2014.9.1 参照
- 20) 空気調和・衛生工学会編（1995）第12版空気調和・衛生工学便覧，467-469
- 21) A. P. Gagge, A. P. Fobelets, L. G. Bergland (1986) ASTAND ARDPREDICTIVE INDEX OF HUMAN RESPONSE TO THE THERMAL ENVIRONMENT, ASHRAE Transactions
- 22) 木下朋行（2006）IT時代における計測制御技術の動向(2) P M V制御による室内環境最適化制御，空気調和・衛生工学，80(3)，35-42

## 第5章 街区・地区レベルにおける建物緑化による温熱環境改善効果のシミュレーション評価

### 5.1 街区レベルにおける温熱改善効果シミュレーション

高度に土地利用が集積した都市市街地においては、都市公園等の公的緑地開発には限界があり、市街地面積の大半を占める建築敷地における緑化技術の向上とともに、その効果を定量的に明らかにすることが重要である。近年の計算機能力の向上により、外部空間での温熱環境シミュレーションについては、多数の研究例が報告されている。梅干野ら<sup>1)</sup>、山村ら<sup>2)</sup>は、各種タイプの街区形態や構成材料が建物外部の熱環境に与える影響を数値シミュレーションにより検討しているが、予測は表面温度を基本としており、風の流れ場や湿度の影響については、連成されていない。萩島ら<sup>3), 4)</sup>は、建物の抗力の影響を流体体積密度と抗力項により表現されたキャノピーモデルを用いて都市高温化の影響因子を調べているが、このモデルは個々の建物形状を忠実に再現しているわけではないため、建物周辺や道路などの局所的な流れの構造や熱的影響の評価は難しい。山村ら<sup>2)</sup>、吉田ら<sup>5), 6)</sup>は、建物数棟により構成された街区モデルを対象に対流・放射・湿気の連成解析を行い、草地や樹木の有無による温熱環境への影響をMRT（平均放射温度）やSET\*（標準有効温度）により評価しているが、解析の対象とした街区は立方体の建物を均等配置した架空の簡易街区モデルである。

しかし、実際の都市の地表面形態は、各種の形状の建物や構造物、道路等により複雑な様相を呈している。建物モデルを規則的に配列した簡易形状の街区モデルにおいて、建物モデルの高さや配列形態を変えた場合でさえ、その街区形状のパターンに応じて異なる乱流構造が形成されることが知られている<sup>7)</sup>。また、天空率・通風率の変化により気流・温熱環境にしても影響を与え<sup>8)</sup>、地表面被覆状況の変化が気流・温度場にも敏感に影響を及ぼす。このため、都市の温熱環境の効果的な改善を目指すためには、対象とする実在街区の地表面被覆状況を忠実に再現して、気流・温度場の相互の関係を連成し、定量的に評価できる予測モデルの開発が有効と考えられる。

建物の配置・形状を考慮した街区のCFD解析例として、大黒ら<sup>9)</sup>は、河川に接する集合住宅計画地を対象として、高反射塗装等や壁面緑化が屋外

の温熱環境に及ぼす影響について解析しているが、周辺が河川に囲まれた特殊な環境下であり、住宅計画地を対象としたもので、比較の対象も壁面と舗装面にとどまっておらず、緑化の効果検証としては十分とは言えない。したがって、実在街区を対象として、屋上緑化・壁面緑化等建物緑化による外部温熱環境改善効果を放射・対流・湿気の連成により、三次元画像により定量的にシミュレーション解析を行った研究例はほとんど例がなく、研究蓄積も十分ではない。建築敷地の個々の建物形状を反映し、緑化の違いによる温熱環境を再現することができれば、都市のヒートアイランド対策の効果を行政・住民・建物所有者等の関係者が、対策の意義と効果を事前に把握・評価することも可能となり、緑化施策の推進に大きく寄与するものと考えられる。

そこで、本章では、東京都心部に実在する街区を対象として、GIS（地理情報システム）の活用により、建築物等の粗度要素を街区モデル上に精緻に再現し、気象条件、緑化条件を境界条件として与え、温度場・流れ場・湿度場を連成したCFD解析の手法によりシミュレーションを行い、外部温熱環境の定量的な評価を試みた。

### 5.1.1 研究の方法

街区の温熱環境形成には、長波放射、短波日射を受けた建物や地表面からの輻射、日射反射の放射収支、顕熱による対流熱や地盤や壁体への熱伝導の熱収支とともに、街区内の風の流れや、湿度等の要素が相互に影響している。これら温度場、流れ場、湿度場の物理現象を総合的に解析するために、大気・熱・湿気の輸送方程式および放射収支・熱収支などをCFD (Computational Fluid Dynamics: 計算流体力学) という手法を用いて連成解析を行った。CFDは、流体の数値解析に用いられ、近年のパーソナル・コンピューター等の計算機の進歩に伴い急速な進歩を遂げている学問分野であり、今日、数値シミュレーションは強力な解析ツールとして認識されている<sup>10)</sup>。CFDにより、人間の居住環境の流れ場、温度場等の時間的・空間的構造を3次的に連成して解析することが可能となった。

本研究では、このCFDを用いた数値シミュレーション解析を行うため、まずは対象とする領域を空間的に有限の大きさを持つ4m四方の格子に分割し、各種の支配方程式や放射収支などを、この格子上で近似表現した差分方程式の解を求めることによって計算を行った。

具体的には、以下の方法によりシミュレーション解析と評価を行った。

1) 街区モデルとして、東京都大手町1丁目の実在街区を対象とした。街

区の再現にあたっては、既存の GIS である国際航業 RAMS-e を用いた。

- 2) 温度・湿度・風向・風速等の気象条件については 2003 年 8 月 5 日 13 時のアメダス情報を入力した。
- 3) 基礎となる熱収支式等を用いて長波放射、短波日射による放射収支と地表面盤及び建物躯体からの放射・対流・伝導の熱収支を数値解析により求めた。自動車からの排出ガスによる熱や建物の空調による廃熱の影響は、今回の数値計算では考慮していない。
- 3) 屋上や壁面の緑化による境界条件を既存の文献や過去のデータ等により設定した。
- 4) 数値計算のケースとして、街区モデルについて緑化なしの場合(ケース 1)、街区地表面と建物屋上の面積の 20%を緑化した場合(ケース 2)、ケース 2 に加えて、建物の南側と西側の壁面を地上から 30m まで壁面緑化した場合(ケース 3)の 3 ケースを設定して、気温・湿度・風速を連成解析した。
- 5) 数値解析により求めた放射・対流・潜熱等の数値を基に、M R T (Mean Radiant Temperature:平均放射温度)および S E T \* (Standard Effective Temperature:標準新有効温度)の温熱指標を用いて、定量的な評価を試みた。

### 5.1.2 本研究で使用した C F D 解析モデル

屋外の温熱環境では、太陽からの日射、天空からの放射により建物表面や地面が熱せられ、高温化した固体表面から大気中に放出された熱が風により運ばれるとともに、植物や土壌からの蒸発散作用により気化熱が潜熱として消費される。風による空気の流れや熱の移動、太陽からの短波日射・長波放射・建物からの日射反射・輻射等の放射収支、湿度の違いや緑化による蒸散作用による湿気伝達等の各物理的現象による温熱環境形成メカニズムを明らかにするため、相互の関連性を考慮するために、流れ場・温度場・湿度場を連成して C F D (計算流体力学)によるシミュレーション解析を行うことが有効である。この C F D 解析とは、我々の環境に取り巻く空気の熱流動現象を連続の式、Navier-Stokes 運動方程式、スカラー輸送方程式(熱、湿度、物質)を用いて予測する手法であり、近年の計算機能力の向上により C F D は温熱環境問題に対し有効な解析ツールとしての地位を築きあげてきている。

現在、C F D 解析に用いられているモデルは、図 5.1 に示すように D N S (Direct Numerical Simulation ; 直接法)モデル、L E S (Large Eddy

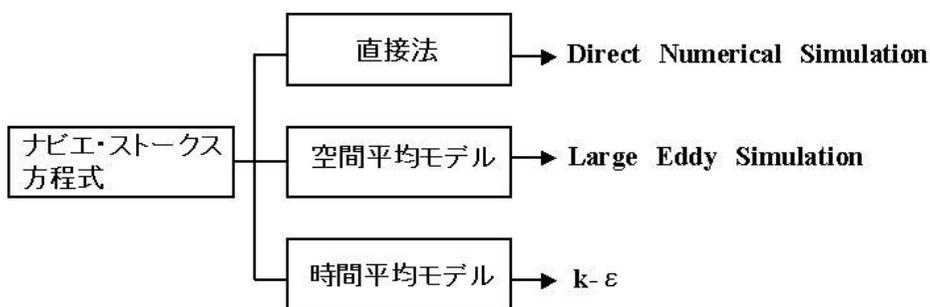


図 5.1 ナビエ・ストークス方程式の各モデル

Simulation ; 空間平均モデル) モデル, R A N S (Reynolds Averaged Navier-Stokes ; 時間平均モデル) モデルの 3 つに大別される。

まず, D N S モデルは, 基礎方程式に対し物理モデルを用いないで直接数値計算を行うものである。ただし, 流体内部での格子スケール以下の微細な渦の影響までを考慮した解像度を必要とするため, かなり詳細に乱流場の特性について調べられるものの, 膨大な格子数の細分化が必要となり今後の計算機能力の発展を考慮しても DNS による数値解析は街区レベルでの数値シミュレーションへの適用は困難と考えられる。

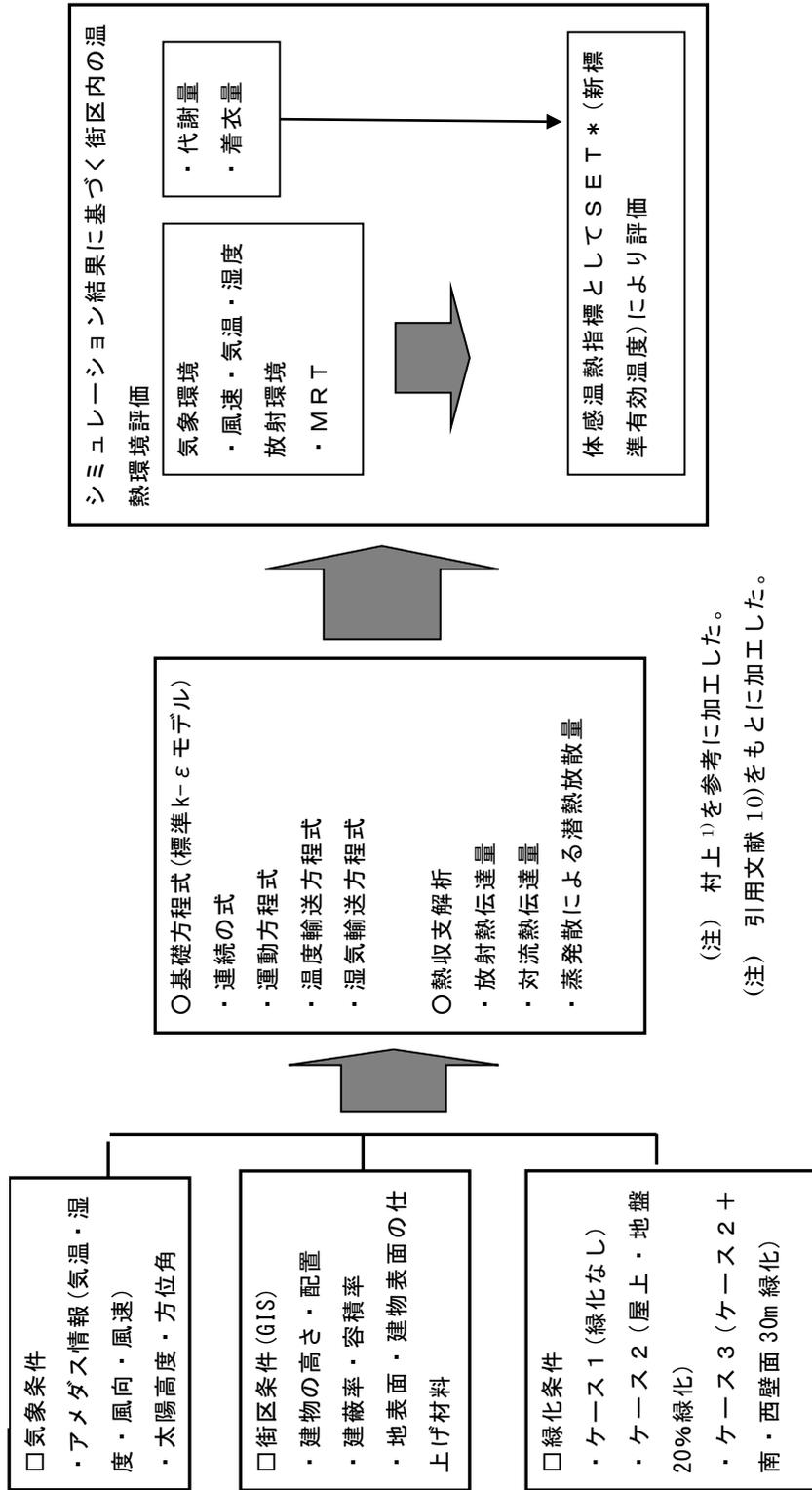
そこで, 比較的粗い格子でも乱流現象の数値解析を行うために開発された乱流モデルとして, 後者の L E S モデルと R A N S モデルの適用が望まれる。このうち, L E S モデルは, 格子スケール以下の渦をモデル化し格子スケール以上の流体现象を直接的に解析していく手法ある。L E S モデルは, 予測精度が高い反面, 格子スケールを小さくとらなければいけないため, やはり計算負荷は大きくなる。これに対して, R A N S モデルは基礎方程式に対してレイノルズ平均操作を施して平均流のみを解析対象とし平均値からのずれの変動成分についてモデル化する手法であり, 前二者と比較すると計算負荷も小さく, 現在 C F D 解析を用いた街区レベルでの数値流体解析において主流となっている乱流モデルである。

この R A N S モデルの中でも, 現在最もよく用いられているモデルとして標準  $k-\varepsilon$  モデルが挙げられる。ここで, 梶島<sup>11)</sup>によると, 標準  $k-\varepsilon$  モデルは, ①モデル定数の推奨値が定着していること, ②実用計算向きである, ③数値計算の安定性が高いことなどの利点があることを指摘しており, 街区レベルでの C F D 解析による数値シミュレーションの適用に最も適した

STEP1 入力条件

STEP2 CFD解析によるシミュレーション

STEP3 結果の定量評価



(注) 村上<sup>1)</sup>を参考に加工した。

(注) 引用文献10)をもとに加工した。

図 5.2 CFDを用いたシミュレーション解析フロー

モデルと考えられる。そこで、本研究では、都市の温熱環境の効果的な改善を定量的に評価するため、対象とする実在街区の建物の配置と形状を既存のGIS情報から忠実に再現した街区モデルにおいて、気流・温度場の相互の関係を連成し、定量的に評価できる解析手法として、上記の予測モデルのうち、現在街区レベルでのCFD解析に最もよく使用されている標準  $k-\varepsilon$  モデルを使用することとした。

図 5.2 に CFD を用いたシミュレーション解析のフローを示す。

### 5.1.3 基礎方程式と境界条件の設定

#### (1) 基礎方程式

CFD解析を行うための使用モデルとして、本研究では新宿副都心での実在街区を対象として実測値との比較を行った Houng ら<sup>12)</sup>他を参考として、標準  $k-\varepsilon$  モデルを使用した。標準  $k-\varepsilon$  モデルにおける基礎方程式は以下に示すとおりである。このうち、風の流れについては (1) 式の連続の式、(2) 式の運動量輸送方程式を用い、温度場を求めるにあたっては (3) 式、湿度場を求めるには (4) 式の方程式を用いた。

$$\text{連続の式: } \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

運動量輸送方程式:

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \nu_t \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - g_i \beta (\langle \theta \rangle - \theta_0) \quad (2)$$

$$\text{温度場の方程式: } \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \langle \theta \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{H_i}{A_i \rho C_p} \right) \quad (3)$$

$$\text{湿度場の方程式: } \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \langle M \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{L_i}{A_i \rho L} \right) \quad (4)$$

ここで、 $A_i$ : 微小面要素  $i$  の面積 [ $\text{m}^2$ ],  $g_i$ : 重力加速度 ( $g_1=g_2=0$ ,  $g_3=9.8\text{m/sec}^2$ ),  $u_i$ :  $i$  方向の風速 [ $\text{m/sec}$ ],  $H_i$ : 対流熱伝達 [ $\text{W}$ ],  $L_i$ : 蒸発潜熱 [ $\text{J/kg}$ ],  $P$ : 圧力 [ $\text{kPa}$ ],  $t$ : 時間 [ $\text{sec}$ ],  $\beta$ : 体積膨張率 [ $1/\text{K}$ ],  $\mu$ : 動粘性係数 [ $\text{m}^2/\text{sec}$ ],  $\theta$ : 温度 [ $(\text{K})$ ],  $M$ : 絶対湿度 [ $\text{kg/kg}$ ],  $\rho$ : 空気密度  $1.2$  [ $\text{kg/m}^3$ ],  $C_p$ : 比熱  $1.0 \times 10^3$  [ $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ],  $\langle \rangle$ : レイノルズ平均操作

また、添え字  $i, j, k$  はアインシュタインの総和規約にしたがい、それぞれ主流、水平および鉛直方向を表す。上記(2)式右辺第2項中の渦動粘性係数  $\nu_t$  は、乱流エネルギー  $k$  [ $\text{m}^2/\text{sec}^2$ ] や散逸率  $\varepsilon$  [ $\text{m}^2/\text{sec}^3$ ] などの2つの輸送方程式により算出される。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad C_\mu : 0.09$$

$$\text{乱流エネルギー輸送方程式} : \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle k}{\partial x_j} = P_k + G_k + D_k - \varepsilon \quad (5)$$

$$\text{散逸率の輸送方程式} : \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k + C_{\varepsilon 3} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) + D_\varepsilon \quad (6)$$

ここで、 $P_k, G_k, D_k, D_\varepsilon$  はそれぞれ乱流エネルギーの生産項、浮力項、拡散項、散逸項を表し、以下の式で与えられる。

$$P_k = -\langle u_i' u_j' \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \quad G_k = -g_3 \beta \langle u_3' \theta' \rangle \quad D_k = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)$$

$$D_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right)$$

計算領域は、主流・水平方向に 1000m、鉛直方向に 500m であり、格子数はそれぞれ 200, 200, 60 である。計算格子はスタッガード格子とし、速度などの変数は格子界面上を定義点とし、圧力・温度・湿度などの変数は格子の中心位置を定義点とする。また、格子サイズは、主流・水平方向については対象街区周辺で 4m、その外部では不等間隔とし、鉛直方向については地盤より高さ 10m までは 1m、それより上空では不等間隔とした。

## (2) 放射計算に基づく屋外熱伝導解析

本研究では吉田ら<sup>5)</sup>の手法と同様、地盤・建物の当該部位に当たる日射を発熱条件として考慮し、屋外空間における放射熱を考え、地表面や建物外表面における放射熱収支を計算して地盤・建物の表面温度を求めた。地表面・建物外表面における熱収支式は(7)式で示される。

$$Si + Ri + Hi + Ci + Li = 0 \quad (7)$$

ここで、 $Si$ : 短波日射取得量 [W],  $Ri$ : 長波放射取得量 [W],  $Hi$ : 対流熱伝達 [W],  $Ci$ : 建物・地中への熱伝導 [W],  $Li$ : 植物の蒸散等による潜熱放射量 [W]

① 短波日射取得量( $S_i$ )

短波日射取得量( $S_i$ )を算出するために必要となる日射エネルギー評価と天空からの大気放射を考慮した放射熱伝達量の算出は、村上<sup>12)</sup>に準拠して以下の(8)式から(14)式を用いて行った。

微小面要素  $i$  への直達日射量( $RD_i$ )は(8)式により算出できる。

$$R_{Di} = A_i \beta_i I_N \cos\theta \quad (8)$$

ここで、 $A_i$ : 微小面要素  $i$  の面積 [ $\text{m}^2$ ],  $\beta_i$ : 面要素  $i$  に直達日射が照射される割合(照射率),  $I_N$ : 法線面直達日射量 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $\theta$ : 着目している微小面要素の外向き法線ベクトルに対する太陽光の入射角 [ $\text{rad}$ ]

さらに、微小面要素  $i$  への天空日射量( $RS_i$ )は(9)式により算出できる。

$$R_{Si} = A_i F_{iS} I_{SH} \quad (9)$$

ここで、 $I_{SH}$ は晴天時の水平面天空日射量であり、(10)式のペルラーゲの式で近似した。

$$I_{SH} = 0.5I_0 \sinh(1 - P^{1/\sinh}) / (1 - 1.4 \ln P) \quad (10)$$

ここで、 $I_0$ : 太陽常数 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] (=1.350),  $h$ : 太陽高度 [ $\text{rad}$ ],  $P$ : 大気透過率

太陽光(直達+天空光)に照射された微小面要素  $i$  の日射吸収率を  $\alpha_i$  とすると直接吸収されるエネルギー  $S_{Di}$  および反射されるエネルギー  $S_{Ri}$  は、それぞれ(11)、(12)式を用いて算出できる。

$$S_{Di} = \alpha_i (R_{Di} + R_{Si}) \quad (11)$$

$$S_{Ri} = (1 - \alpha_i) (R_{Di} + R_{Si}) \quad (12)$$

ここで、 $\alpha_i$ : 微小面要素  $i$  の日射吸収率

微小面要素  $i$  で反射された日射量( $S_{Ri}$ )は、各面で反射されながら天空を含むいずれかの微小面要素に吸収される。微小面要素  $j$  に吸収される短波日射量  $S_{Aij}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] は、固体表面での相互反射を考慮した熱輸送係数であるゲッパート(Gebhart)の吸収係数  $B_{ij}$  を用いて(13)式により算出できる。

$$S_{Aij} = B_{ij} S_{Ri} \quad (13)$$

ここで、 $B_{ji}$ : ゲッパートの吸収係数

各面の寄与を考慮し、微小面要素  $i$  面に吸収される日射量  $S_i$  を(14)式により求めた。

$$S_i = S_{Di} + \sum_{j=1}^n S_{Aji} \quad (14)$$

② 長波放射取得量 ( $R_i$ )

長波放射量 ( $R_i$ ) は(15)式により求めた。

$$R_i = \sum_{j=1}^n B_{ji} (\varepsilon_j A_j \sigma T_j^4) - \varepsilon_i A_i \sigma T_i^4 \quad (15)$$

ここで、 $B_{ji}$ :  $i$  面、 $j$  面間のゲッパートの吸収係数、 $\varepsilon_j$ : 微小面要素  $j$  の長波放射吸収率、 $A_j$ : 微小面要素  $j$  の面積 [ $\text{m}^2$ ]、 $\sigma$ : ステファンボルツマン定数、 $T_j$ : 微小面要素  $j$  の温度 [K]、 $\varepsilon_i$ : 微小面要素  $i$  の長波放射吸収率、 $A_i$ : 微小面要素  $i$  の面積 [ $\text{m}^2$ ]、 $T_i$ : 微小面要素  $i$  の温度 [K]

③ 対流熱伝達量 ( $H_i$ )

対流熱伝達量 ( $H_i$ ) は(16)式を用いて求めた。

$$H_i = A_i \alpha_c (T_{ai} - T_i) \quad (16)$$

ここで、 $A_i$ : 微小面要素  $i$  の面積 [ $\text{m}^2$ ]、 $\alpha_c$ : 対流熱伝達率 [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]、 $T_{ai}$ : 地面・壁体・屋上面等近傍の温度境界層外側の温度 [K]、 $T_i$ : 微小面要素  $i$  の表面温度 [K]

なお、対流熱伝達率 ( $\alpha_c$ ) は、佐々木ら<sup>13)</sup>を参考に、以下の定義式により表されるユルゲスの式を用いた。

$$\begin{aligned} \alpha_c &= 5.3 + 3.6|u| \quad (|u| \leq 5 \text{ m/sec}) \\ \alpha_c &= 6.47|u|^{0.78} \quad (|u| > 5 \text{ m/sec}) \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、 $|u|$ : 地表面および固体表面に隣接するスカラー風速 (m/sec)

④ 建物・地中への熱伝導 ( $C_i$ )

地中への熱伝導量 ( $C_i$ ) は(18)式により求めた。

$$C_i = -A_i \lambda (T_i - T_{bi}) / \Delta z \quad (18)$$

ここで、 $\lambda$ : 地面の熱伝導率 [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ]、 $T_i$ : 面要素  $i$  の表面温度 [K]、 $T_{bi}$ : 深さ  $\Delta z$  [m] の地中温度 [K]

なお、 $\lambda$  は  $1.46\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 、 $T_{gi}$  は  $288\text{K}$ 、 $\Delta z$  は  $1.0\text{m}$  と仮定した。  
次に、建物への熱伝導量 ( $C_i$ ) は (19) 式により求めた。

$$C_i = -A_i K_i (T_i - T_{bi}) \quad (19)$$

ここで、 $K_i$  は総合的な熱伝達係数 [ $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ] を表し、ユルゲスの式により算出した。 $T_{bi}$  は室温で  $301\text{K}$  と仮定した。

⑤植物などの蒸発による潜熱放射量 ( $L_i$ )

樹木など植物の蒸散による潜熱放射量 ( $L_i$ ) は (20) 式を用いた。

$$L_i = A_i \alpha_w \beta_i L (f_a - f_s) \quad (20)$$

ここで、 $A_i$ : 樹冠を構成する葉群の表面積の合計 [ $\text{m}^2$ ] (= 樹冠体積×平均葉面積密度×2)、 $\alpha_w$ : 湿気伝達率 [ $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{sec}\cdot\text{kPa}$ ]、 $\beta_i$ : 蒸発効率、 $L$ : 蒸発潜熱 [ $\text{J}/\text{kg}$ ]、 $f_a$ : 樹冠を含む計算格子内の平均水蒸気分圧 [ $\text{kPa}$ ]、 $f_s$ : 樹冠を構成する葉群表面の平均飽和水蒸気分圧 [ $\text{kPa}$ ]

上記の式に導入する数値について、飽和湿度は気温から求め、湿気伝達率 ( $\alpha_w$ ) は、沖中ら<sup>14)</sup>を参考として  $4\times 10^{-5}\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{sec}\cdot\text{kPa}$  と仮定し、蒸発潜熱は、 $2.5\times 10^6\text{J}/\text{kg}$  とした。また、壁面の輻射率、壁面—空気間の対流熱伝達係数、樹木の遮蔽率などは、既往の研究や文献を参考として、表 5.1 のように仮定した。

一方、気象条件としては、気象庁のアメダスより、2003年8月5日13時の気象データを用いて、気温  $32.7^\circ\text{C}$ 、相対湿度 56%、風向南南西、風速  $2.4\text{m}/\text{sec}$  を入力条件として与えた。なお、気象庁の風速測定点は地上  $70.5\text{m}$  の地点であり、本計算モデルでの流入境界条件として、廣川<sup>18)</sup>より次式を用いて、べき指数 0.25 のべき乗則を適用して、各高さでの風速値を与えた。

$$\frac{U(z_2)}{U(z_1)} = \left( \frac{z_2}{z_1} \right)^{0.25} \quad (21)$$

ここで、 $U(z_1)$ 、 $U(z_2)$ : 高度  $z_1$ 、 $z_2$  における風速 [ $\text{m}/\text{sec}$ ]

表 5.1 シミュレーションに使用したパラメータ

項 目	数 値
① 壁面など躯体輻射率	0.9 <sup>15)</sup>
② 壁面-葉面对流熱伝達係数	1.6J/m <sup>2</sup> sec · °C (ユルゲスの式) <sup>13)</sup>
③ 植物表面からの蒸発量	4 × 10 <sup>-5</sup> kg/m <sup>2</sup> sec <sup>14)</sup>
④ 植物表面ルイス数	16.5 <sup>16)</sup>
⑤ 樹木の遮蔽率	0.750 <sup>2)</sup>
⑥ ツタの遮蔽率	0.768 <sup>17)</sup>
⑦ 葉面の輻射率	0.98 <sup>15)</sup>

⑥ M R T (平均放射温度)の算出

M R T (Mean Radiant Temperature : 平均放射温度)は、周囲の全方向から受ける熱放射量を平均化して温度表示した数値であり、(22)式を用いて算出した。

$$M R T = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n F_i T_{s_i}^4} - 273.15 \quad (22)$$

ここで、 $F_1, F_2, \dots, F_n$  : 周囲各面の形態係数、 $T_{s_1}, T_{s_2}, \dots, T_{s_n}$  : 周囲各面の温度

⑦ S E T \* (標準新有効温度)の算出

体感温度指標である S E T \* (Standard New Effective Temperature : 標準新有効温度)は、周囲の気温、周囲の壁体温度、相対湿度、風速、着衣量、代謝量により決定され、(23)式で定義される。

$$C + R + Esk = Fcls \cdot fcls \cdot hs \cdot (tsk - S E T *) + w \cdot LR \cdot Fpcls \cdot hcs \cdot (Psk, s - 0.5 \cdot P S E T *, s) \quad (23)$$

ここで、 $C$  : 皮膚からの対流熱伝達 [W/m<sup>2</sup> · sec · K] ,  $R$  : 皮膚からの伝導熱損失 [W/m<sup>2</sup> · sec] ,  $Esk$  : 皮膚からの蒸発熱損失 [W/m<sup>2</sup> · sec] ,  $Fcl$  : 衣服による被覆率,  $fcls$  : 衣服の熱伝達抵抗 [m<sup>2</sup> · K/W] ,  $hs$  : 総括熱伝達率 [W/m<sup>2</sup> · K] ,  $tsk$  : 平均皮膚温度 [°C] ,  $w$  : 皮膚濡れ面積率,  $LR$  : ルイス数 [°C/kPa] ,  $Fpcls$  : 皮膚の露出率,  $hcs$  : 対流熱伝達率 [W/m<sup>2</sup> · K] ,  $Psk, s$  : 皮膚温度に対する飽和蒸気圧 [kPa] ,  $P S E T *, s$  : 温度 S E T \* での飽和蒸気圧 [kPa]

具体的には、夏の軽装を想定し、吉田ら<sup>5)</sup>を参考として放射率 1.0、人体からの全熱放射量を算出する際の着衣量を 0.50clo(半袖シャツとズボンの着衣状態に対応)、人体の代謝量を 1.5Met(ゆっくりとした歩行と立位静止時の中間)と仮定して、既往の研究を参考に Gagge ら<sup>16)</sup>の方法に基づき算出を行い、評価した。

#### 5.1.4 街区モデルの設定と計算ケース

##### (1) 街区モデルの設定

本研究において対象とする街区モデルは、都心の業務地区の代表例として東京都千代田区大手町 1 丁目を選定した。当該実在街区の形状は、東西方向約 200m、南北方向約 120m の方形区画であり、街区には高さ約 70m～100m の建築が南側に 3 棟配置され、公開空地が設けられている。また、北側には街区を東西方向に連絡する幅員約 8m の区画道路を挟んで、外周の幹線街路に沿って高さ約 40m の高層建築が配されている。この実在地区における建物の形状や配置形態は、GIS データを用いて忠実に再現したものを用いた。平面図を図 5.3 に示し、その諸元については表 5.2 のとおりである。なお、建物の外壁はコンクリート壁、緑化部位の無い地表面はアスファルトとして取り扱った。

実際の建物表面は、コンクリートやガラス面など各種外壁材で構成され、それらに応じて日射の透過や反射等放射収支や熱収支も異なるものと思われる。ただし、本研究では、実在街区を対象として建築敷地の個々の建物の高さや形状、配置等を計算モデル上に精緻に反映し、屋上緑化・壁面緑化等建物緑化の条件の違いによる外部温熱環境改善効果を評価することを目的として、建物の熱的境界条件を一律にコンクリートと仮定した。

##### (2) 計算ケース

数値解析の実行にあたり、複合した緑化効果の特徴を捉えるため、表 5.3 に示すとおり、緑化無しモデル(ケース 1)、地盤・屋上を各々の敷地面積の 20%緑化したモデル(ケース 2)、ケース 2 に建物の南西壁面の地上から 30m までを壁面緑化したモデル(ケース 3)の 3 つのケースを設定した。それぞれのケースの三次元画像を図 5.4 に示す。

また、ケース 2 の緑化条件のうち、高木植栽については、高さ 6m、樹冠部は 4m のメッシュに適合させた立方体と仮定して、日射遮蔽率は表 5-1 に示すように山村<sup>2)</sup>の既往研究を参考に 0.750 を用いて、街区の外周部の区画沿いに 4m おきに均等配置した。樹木の存在による流体力学的効果については、片岡ら<sup>19)</sup>を参考として、以下のようにモデル化し、この項を(2)式のレ

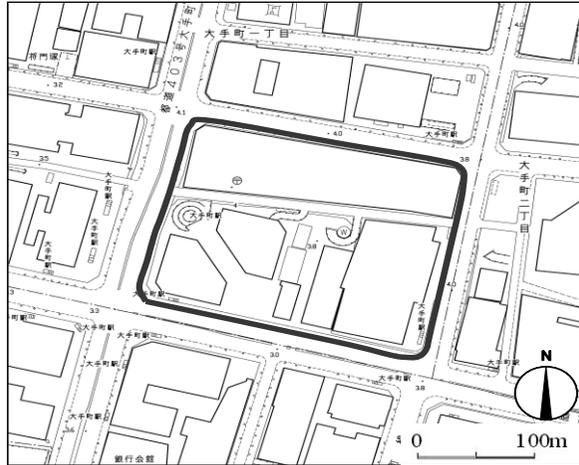


図 5.3 街区モデルの位置

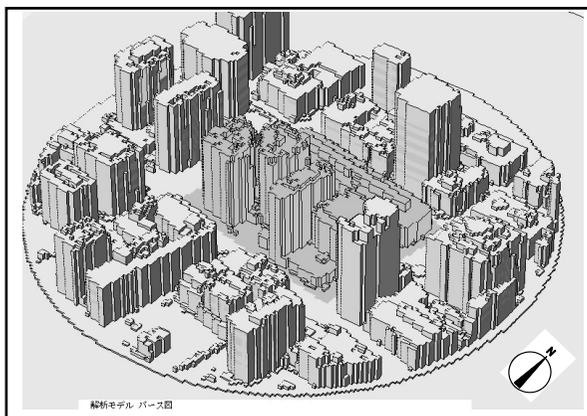
表 5.2 街区モデルの設定条件

項目	数 値
①地区面積	32,356 m <sup>2</sup>
②建築面積	22,317 m <sup>2</sup>
③延床面積	386,026 m <sup>2</sup>
④空地面積	10,039 m <sup>2</sup>
⑤建蔽率	69.0%
⑥容積率	1.493.0%
⑦空地率	31.0%
⑧用途地域	商業地域

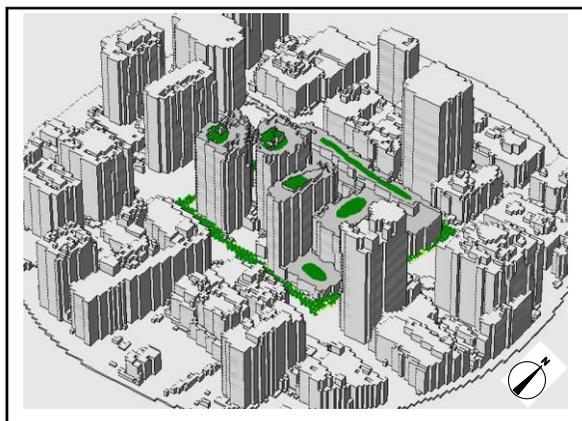
表 5.3 計算ケース

区 分	緑化条件
ケース 1	緑化なし
ケース 2	屋上と地表面の 20%を緑化 (屋上部は、芝生を想定し、地表面は、街区外周に樹高 6m の高木を 5m おきに植栽、他は芝生を想定。)
ケース 3	ケース 2+壁面の南・西側を地表から 30m 緑化

ケース 1(緑化なし)



ケース 2(屋上・地表面  
20%緑化)



ケース 3(ケース 2+壁  
面南側・西側地上 30m  
緑化)



図 5.4 街区モデルと計算ケース

イノルズ平均された運動量輸送方程式の右辺に付加した。

$$F_i = -C_f a \langle u_i \rangle \sqrt{\langle u_j \rangle^2}$$

ここで、 $C_f$ は抗力係数、 $a$ は葉面積密度 [ $\text{m}^{-1}$ ] を表し、本研究においては、神山ら<sup>20)</sup>を参考として、高木樹木(常緑広葉樹)と仮定し、 $C_f=3.12$ 、 $a = 0.5$  [ $\text{m}^{-1}$ ] とした。また、乱流エネルギーおよび散逸率の輸送方程式の右辺にそれぞれ以下の項を付加した。

$$F_k = \langle u_i \rangle F_i \quad F_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{k} C_{\rho\varepsilon} F_k$$

ここで、 $C_{\rho\varepsilon}$ は2.0と仮定した。

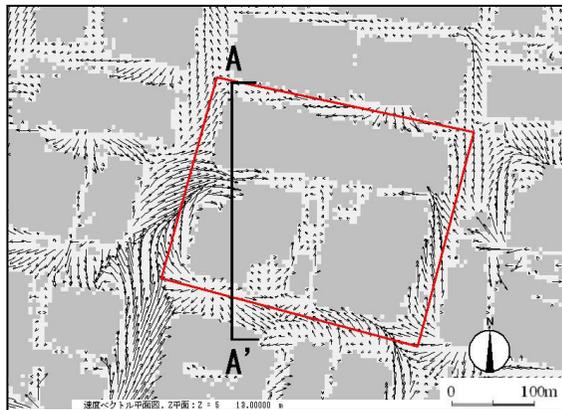
地表面と屋上部には芝生を植栽した場合を想定した。なお、図 5.4 で表示した地表面と屋上の緑化部位は、イメージであり、数値計算における格子面とは直接対応していない。

### 5.1.5 結果と考察

設定した街区モデルにおいて上述した基礎方程式と境界条件を基に連成解析による数値シミュレーションを行った。体感レベルでの温熱環境を評価するために、街区モデルにおける地上 1.5m の地点での風速、気温、相対湿度、MRT、SET\* についての各計算ケースにおける数値解析の結果と考察を以下に記述する。本研究における格子サイズは、主流・水平方向については2~4m、鉛直方向については地盤より高さ 10m までは 1m、それより上空では不等間隔とした。各物理量(風速分布、気温分布など)の評価地点は、各メッシュの中央部であり、地上 1.5m の地点での値は、地盤より 2メッシュ目の値を用いた。

#### (1) 風速分布

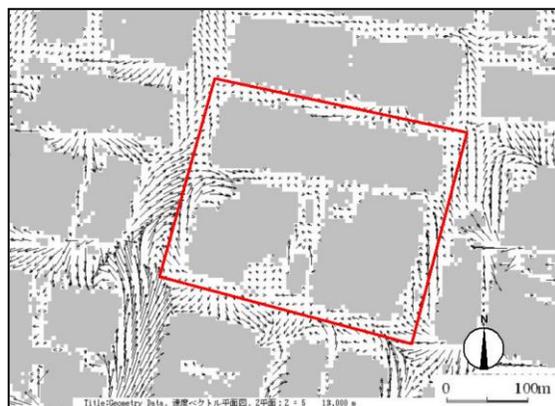
図 5.5、図 5.6 に地上 1.5m における風速ベクトルとスカラー風速をそれぞれ示す。ケース 1 において、対象街区南方からの風の吹き込みにより街区東側および西側の街路では 2.4m/sec を示すものの、街区中心部に向かって取り込まれて急速に減速されるようになり、下流側では 0.8m/sec 程度を示す。また、街区内では、約 100m の高層建物が隣棟間隔約 18m と狭い間隔で建ち並んでいるために中心部では流れが淀み、特に街路に比べて小さく、0.4m/sec 程度の風速を示す。一方、街区南側の風向きに直交する街路に対しても風の吹き込みが生じ、風速 1.6m/sec とやや高い値を示していること



ケース 1 (緑化無)

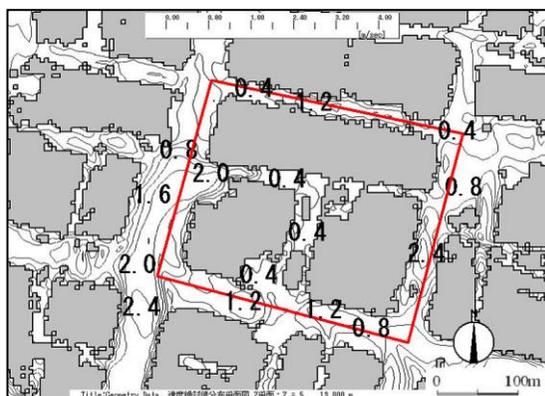


ケース 2 (屋上・地表面 20%)

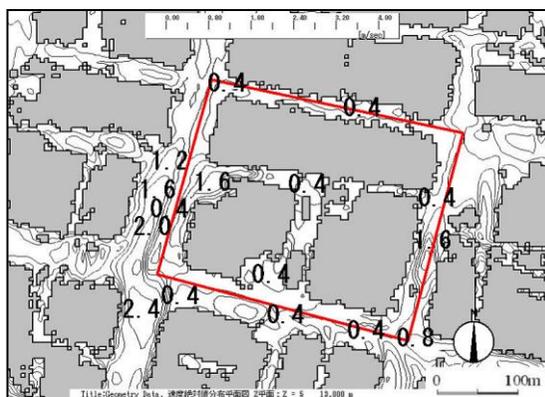


ケース 3 (ケース 2 + 壁面南側・西側地上 30m 緑)

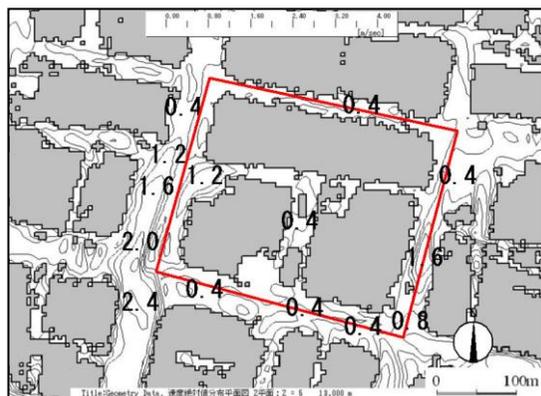
図 5.5 風速ベクトル分布



ケース 1 (緑化無し)



ケース 2 (屋上・地表面 20% 緑化)



ケース 3 (ケース 2 + 壁面南側・西側地上 30m 緑化)

図 5.6 スカラー風速分布

などが分かる。図 5.7 に風速ベクトルの鉛直断面図を示す。断面位置は、図 4 中の A-A' 上としている。対象街区内の高層建物での衝突により吹き降ろしが生じ、物上流側では循環流が形成されている様子が見てとれる。これに対してケース 2 では、街区外周部に高さ 6m の高木を 4m おきに一律に配植したため、木の存在による流れ場への抗力効果により、風速の乱れと大幅な減速が見られる。街区西側および南側の街路では、ケース 1 と異なる流れのパターンを示し、特に街区南側街路では一様に 0.4m/sec を示し、ケース 1 と比較すると約 1/2 となり、顕著な風速の低減効果が認められた。

ただし、街区中心部では 0.4m/sec を示し、ケース 1 とあまり差異は見られなかった。次に、ケース 3 では、ケース 2 の緑化条件に付加して、街区内の建物の南壁面、西壁面について、地上部から 30m を壁面緑化しているが、風の流れのパターン、風速値ともケース 2 の場合と比較して顕著な変化は見られず、ほぼ同様の傾向を示した。これは、今回のシミュレーションモデルでは、壁面緑化植物による壁面粗度が流れ場に与える影響までは考慮していないことによるものと考えられる。

## (2) 気温分布

図 5.8 は、地上 1.5m での気温分布を示している。ケース 1 では、対象街区内の建物に囲まれた中心部ではほぼ一様に 34℃程度を示す。しかしながら、街区南東側の建物南部では 40℃の高温域を示しており、入力値として用いたアメダスデータの気温 32.7℃に対して約 8℃高くなっている。本解析結果において 40℃もの高温域を形成した要因として、一つには建物の壁面を一様にコンクリート壁と仮定したことにより、建物の表面温度が本来より高温となり、建物からの輻射熱や日射反射の影響を強く受けたことが考えられる。本研究では、実在の街区におけるガラス面等の建物表面の状態は忠実に再現していないため、今回の数値解析により得られた値は、実在街区での気温の分布よりも高く出力されている可能性がある。

建物外壁のガラス面等表面仕上げの違い、建物内部の空調廃熱の影響等も考慮したより現実の街区を再現したシミュレーション解析については、今後の課題としたい。

街区北部において建物北側の幹線道路沿いに 31℃の低温域が見られたが、これは建物北側では日射が遮蔽されたことにより、日影の状態にあり地表面アスファルトの表面温度も上昇せず、建物南側の直達日射を受けた高温域に比較して 10℃以上も低い低温域が形成されたと考えられる。吉田ら<sup>21)</sup>は、容積率を一定とした条件下で低層、中層、高層の簡易街区モデルにおいて、建物形状の違いが温熱環境に及ぼす影響を対流・放射・湿気輸送連

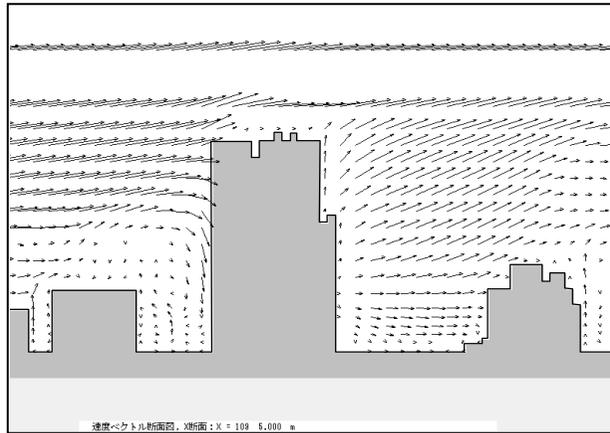


図 5.7 風速ベクトル分布：(図 5-5: A-A' 断面)

成の CFD 解析により検討しているが、この簡易街区では高層の場合は、全般的に風速の低下により建物間に熱が滞留するために、気温が他のケースよりも高くなることを報告している。

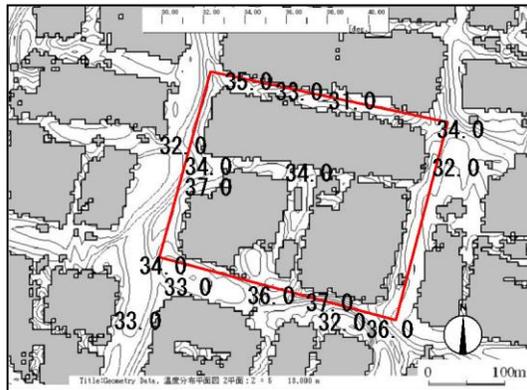
今回の実在街区での解析結果では、街区中央部では気温の上昇が見られたが、建物の形状と配置は均等ではなく、均等配置された簡易モデルでのシミュレーション結果と比べると、局所性の強い気温分布を示した。

ケース 2 では、街区中心部では 33℃を示し、ケース 1 に比べ、1℃程度低下している。また、街区南東側の建物南部では、高木と芝生を植栽したことにより、高木による日射の遮蔽と芝生面での蒸散等の潜熱の消費による地表面温度の低減が、気温の低減に寄与したものと考えられる。また、街区北部の建物北側についても、屋上緑化の影響により緑化なしのケースよりも相対的に低温になった空気が吹きおろされ、32℃程度の低温域がケース 1 よりもさらに広がったものと推察される。

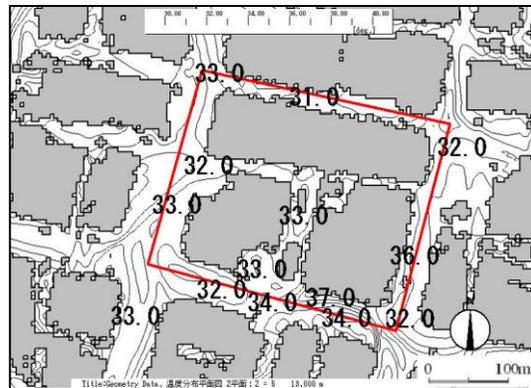
さらに、ケース 3 では、街区中心部では 30℃を示し、ケース 2 に比べて 3℃程度低下している。街区南東側の建物南側においても、ケース 2 に比べて約 2℃低下している。これは、壁面緑化により、直達日射の遮蔽、植物面からの蒸散作用に伴う潜熱消費により、建物外壁の表面温度が低減し、外気温の低下に寄与したものと考えられる。

### (3) 湿度分布

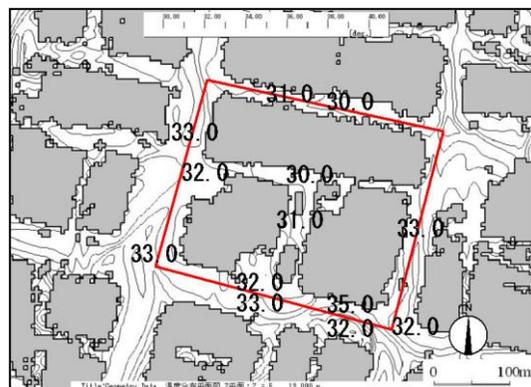
図 5.9 は、街区内での地上 1.5m の地点における絶対湿度の分布を示し、図 5.10 は、同じ地点での相対湿度の分布を示したものである。図 5.9 より、



ケース 1 (緑化無し)

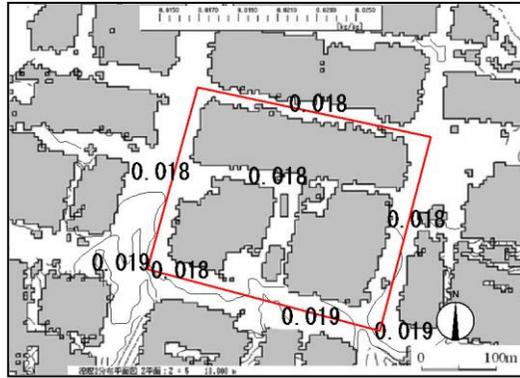


ケース 2 (屋上・地表面 20% 緑化)

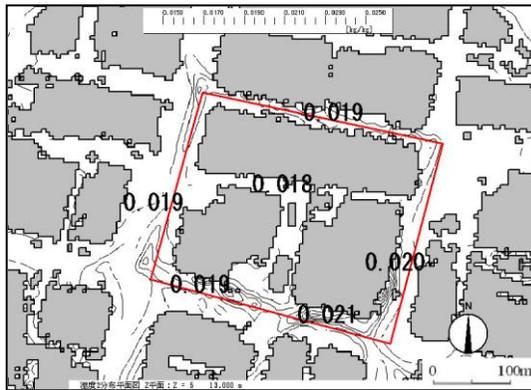


ケース 3 (ケース 2 + 壁面南側・西側地上 30m 緑化)

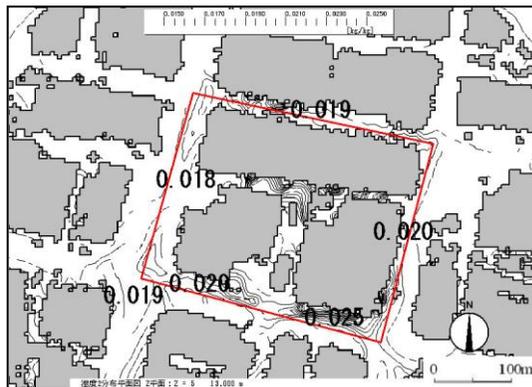
図 5.8 気温分布



ケース 1 (緑化無し)

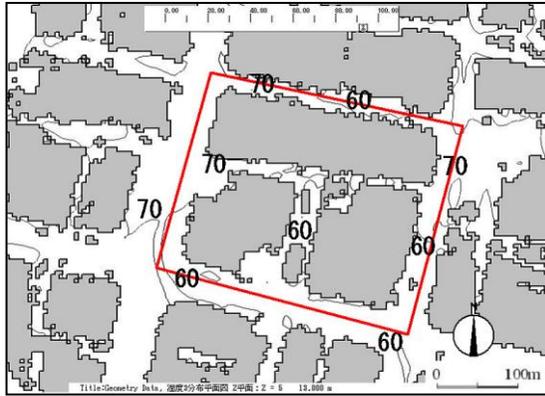


ケース 2 (屋上・地表面 20%緑化)

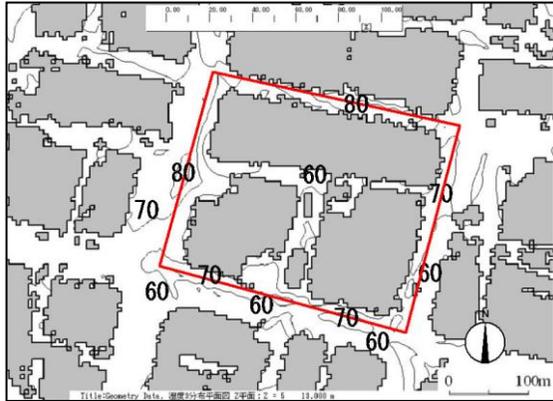


ケース 3 (ケース 2 + 壁面南側・西側地上 30m 緑化)

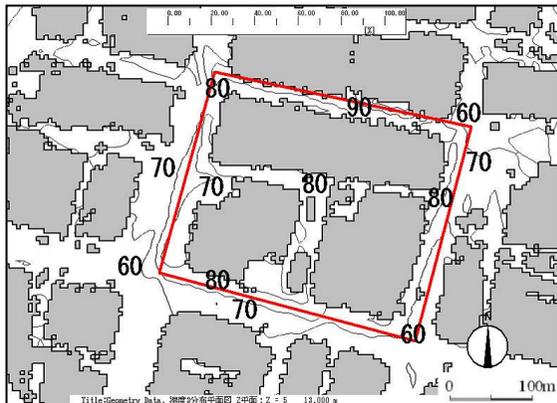
図 5.9 絶対湿度分布



ケース 1 (緑化無し)



ケース 2(屋上・地表面 20%緑化)



ケース 3(ケース 2+壁面南側・西側地上 30m 緑化)

図 5.10 相対湿度分布

ケース 1 では、街区の南西側と西側の外周部で 0.018~0.019kg/kg の範囲を示しているが、街区内ではほぼ均一に 0.018kg/kg を示している。これに対して、ケース 2 では、街区中央部ではケース 1 と同様 0.018 kg/kg 程度を示すものの、街区外周部では、0.019~0.021kg/kg 程度を示すようになる。さらに、ケース 3 では、特に対象街区外周部の南側では 0.020~0.025 kg/kg 程度を示し、湿度の上昇が見られる。

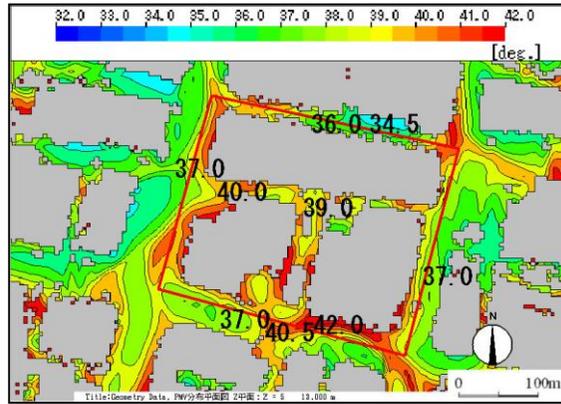
相対湿度の分布でみると、図 5-10 より、ケース 1 では、街区中央部では 45%、その周辺では 45~60%の範囲の分布を示している。ケース 2 では、街区の中央部ではケース 1 と同様 45%を示しているものの、特に対象街区南側の外周部では一様に 55%となり、ケース 1 に比べて約 10%高い数値を示し、絶対湿度の分布とほぼ同様の傾向が見られる。これは、街区外周部に高木を植栽したため、樹木からの蒸散作用により、相対湿度が上昇したことを反映したものと考えられる。

さらに、ケース 3 では、全体的に湿度が上昇し、対象街区内では 55~60%の範囲を示す。絶対湿度の分布に比べるとケース 2 に対して、街区の南側だけでなく、街区内全体で相対湿度の上昇が見られる。ケース 3 では、建物の南側と西側の壁面について地上から 30m まで壁面を緑化したことにより、高木や芝生からの蒸散に加えて、壁面からの植物の蒸散作用により街区内の湿度が全体として上昇したものと考えられる。なお、絶対湿度分布と比較して、図 5.10 の相対湿度の分布において、ケース 3 の場合にケース 1 よりも緑化による湿度の差が大きく現れているのは、相対湿度では表面温度の上昇により飽和水上気圧が下降し、絶対湿度の占める割合である相対湿度が上昇したことも作用していると考えられる。

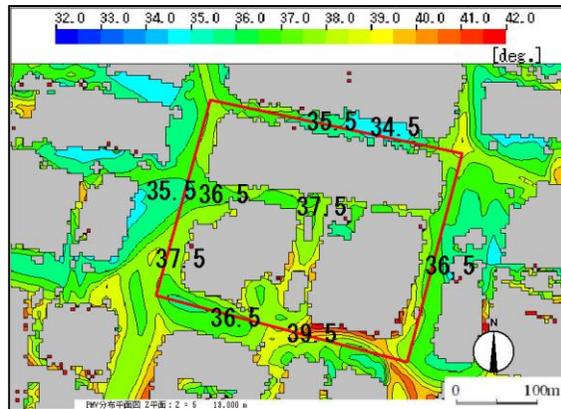
#### (4) M R T 分布

図 5.11 に各ケースの M R T の算出結果を示す。ケース 1 では、対象街区中心部では 39℃程度を示した。また、街区南東側の建物南部および西側では壁面、地表面からの輻射熱の影響により 42℃の高温域が帯状にわたり形成されている。一方で、街区北側の建物北部では、34.5℃を示す低温域も見られたが、これは高層建物により直達日射が遮蔽され、日影部が形成されたことによる影響と考えられる。M R T 分布においても、高さや形状の異なる建築物の混在により日照部と日影部の非均一性が強くなり、街区の北側や南側、隣棟間において局所性の強い分布を示した。

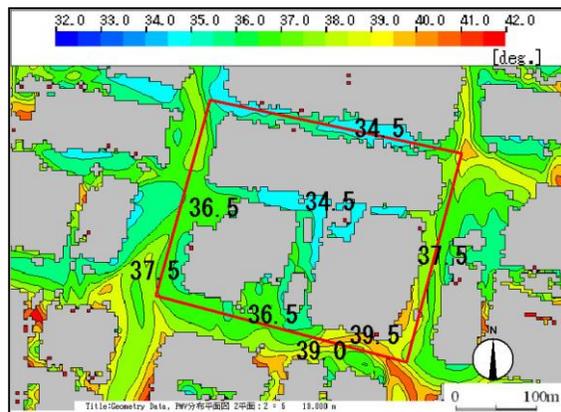
ケース 2 では、街区の中央部では、37.5℃を示しており、街区南東側の建物南部に 40℃以上の高温域が局所的に見られるものの、屋上・地表面の緑化により高温域が大幅に減少し、ケース 1 に比べて 0.5~3.0℃低下して



ケース 1 (緑化無し)

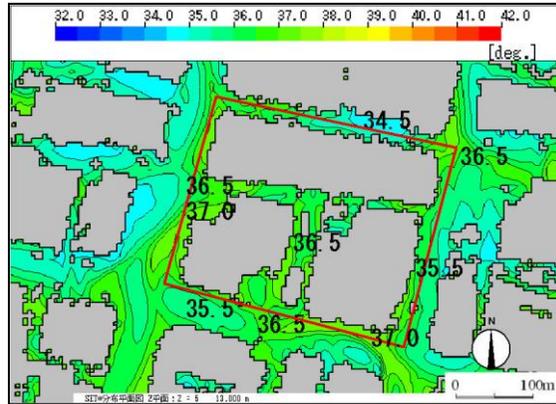


ケース 2 (屋上・地表面 20% 緑化)

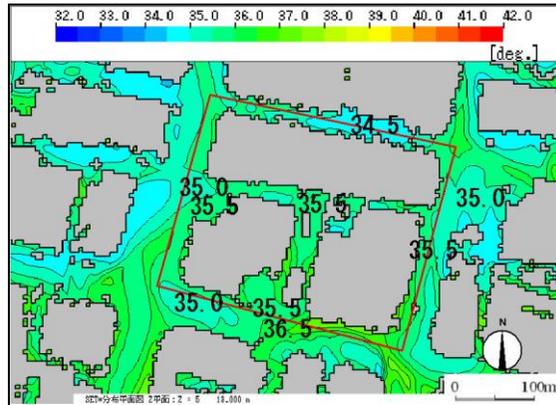


ケース 3 (ケース 2 + 壁面南側・西側地上 30m 緑化)

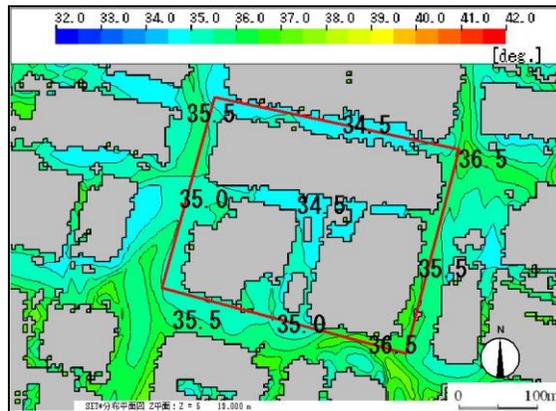
図 5.11 MRT 分布



ケース 1 (緑化無し)



ケース 2 (屋上・地表面 20%緑化)



ケース 3 (ケース 2 + 壁面南側・西側地上 30m 緑化)

図 5.12 SET\* 分布

いる。さらに、ケース 3 では、壁面緑化を加えたことにより街区中心部では 34.5℃の低温域が形成され、ケース 2 に比べると 3℃、ケース 1 に比べると 4.5℃低減している。また、街区南東側の建物南部での高温域の縮小化が見られる。

#### (4) S E T \* 分布

図 5-12 にケース毎に算出した S E T \* 値の分布状況を示す。ケース 1 では、街区内において数値の顕著な差異は生じておらず、約 36.5℃の値を持って一様に分布する傾向を示す。ここで、吉田ら<sup>21)</sup>は、特に高層建物モデルが均等に配置された簡易街区モデルでは、最大で 8℃の S E T \* の値の差が生じると報告しているものの、实在街区では約 2.5℃に留まっており、従来の街区モデルに比べると均一である。これは、实在街区内では高さの異なる建物の混在および縦横に配置された区画街路の存在により、主流方向に加え水平方向に対しても比較的強い風の吹込みが生じるために、街区南東側の建物南部など局所的に高い M R T 値を示しているにもかかわらず S E T \* の上昇を抑制することになり、S E T \* 値は街区内では一様になったものと考えられる。

これより、ケース 1 よりもケース 2 の方が 0.5～2℃低下し、ケース 3 ではケース 2 よりもさらに 0.5～1℃低下し、街区内の最低温度 34.5℃の面積の拡大がみられた。一方、ケース 2 では、街区内では全体的に 34.5～36.5℃の範囲にあり、ケース 1 と比較すると、0.5～2℃の低減が見られる。街区中央部では、35.5℃を示し、ケース 1 に比べて 1℃低下している。また、街

#### まとめ

实在街区をモデルに緑化条件の違いによる街区の温熱環境の相違について、C F D 解析により以下の知見を得た。

- (1) 風速の分布では、緑化なし(ケース 1)に比べ、地表面と屋上緑化(ケース 2)の場合、外周部の高木植栽により顕著な風速の低減効果をもたらし、街区内側では約 1/2 に減速した。壁面緑化(ケース 3)についても、ケース 2 とほぼ同様な傾向を示した。
- (2) 気温の分布では、緑化なし(ケース 1)に比べ、地表面と屋上緑化(ケース 2)では、最大 2.0℃の低減が見られ、壁面緑化(ケース 3)ではさらに 3.0℃低減が見られた。
- (3) 湿度の分布では、緑化なし(ケース 1)に比べ、地表面と屋上緑化(ケース 2)では、高木植栽の影響により街区外周部で 10%の増加が見られ、壁面

- 緑化(ケース3)では、さらに街区全体にわたり、湿度が上昇した。
- (4) MRTの分布では、緑化なし(ケース1)に比べ、地表面と屋上緑化(ケース2)では、最大で3℃の低減が見られ、壁面緑化(ケース3)では、ケース2に比べさらに3℃の温度低下が見られ、街区の緑化とともに壁面緑化による街区の放射環境の改善が見られた。
- (5) SET\*の分布では、緑化なし(ケース1)に比べ、地表面と屋上緑化(ケース2)では、最大1℃の低減が見られ、壁面緑化(ケース3)では、さらに1℃の低減が見られた。

今回の数値シミュレーションの結果から、建物の屋上や壁面緑化の違いによる温熱環境改善効果を定量的に評価できることが示唆された。ただし、本研究では、建物の外壁はコンクリートとしており、実在のガラスなどの表面状態は解析に反映されていない他、建物内からの空調等人工廃熱などについても考慮していない。屋上・壁面等建物緑化の街区における温熱環境改善効果を検証していくためには、これらの課題について改善を図るとともに、屋上・壁面等緑化の熱収支に関する基礎的データの蓄積とシミュレーションへの応用を図ることにより、実在街区モデルでの数値解析の精度を高めていくことが課題と考えられる。

## 5.2 地区レベルでの温熱環境改善効果シミュレーション

近年の急速な都市化の影響により緑地や水辺地が消失する一方、建築物や道路など、コンクリートやアスファルト等による地表面被覆の人工化、自動車や空調機器からの人工廃熱の増加等により、ヒートアイランド現象が顕在化しており、都市環境の改善・保全を図るため、早急な対策が求められている。

一方、東京都では、ヒートアイランド対策を重点的に実施すべき地域として都心部に「ヒートアイランド対策推進エリア」を4地域定めている<sup>14)</sup>。生活空間単位である街区から地区スケールにおいて緑化対策による温熱環境改善効果を定量的に明らかにしていくことは、緑化対策の効果を具体的に認識できるため、緑化の計画・設計を具体化していく上で有効と考えら

れる。近年、コンピュータの計算能力の向上に伴い、パソコンを使用して、街区レベルにおける風・温度・湿度の温熱環境を総合的にシミュレーションすることが可能となっている<sup>5)</sup>。既往の研究例として、山村ら<sup>15)</sup>、吉田ら<sup>16)</sup>は建物数棟により構成された街区モデルを対象に温熱環境解析を行っているが、解析の対象とした街区は立方体の建物を均等配置した架空の簡易街区モデルである。足永ら<sup>1)</sup>は、東京都内の実在団地を対象に、キャニオン空間内の温度・湿度・MRT分布等の計算結果と実測結果とを比較しているが、緑化対策の違いによる効果についての検証は十分なされていない。

筆者らは、東京都千代田区大手町の実在街区を対象として、屋上緑化や壁面緑化の違いによる温熱環境について、CFD (Computational Fluid Dynamics)解析<sup>5)</sup>によりシミュレーションし、風向・風速、気温、湿度を連成して解析を行い、流れ場、温度場等の相互の関係性について検討を行った上で、MRT、SET\*の温熱快適性を評価する指標を用いて緑化による温熱環境改善効果を定量的に評価する<sup>9)</sup>とともに、計算結果の妥当性について気温と相対湿度の実測値との比較により、計算結果が概ね妥当であることを確認した<sup>10)</sup>。

一方、街区内での緑化対策が周辺の道路や街区相互に及ぼす影響については、地区スケール等に拡大した解析が必要となるが、実在の地区を対象として風、気温、湿度を相互に連成し、緑化方法の違いによる地区内での温熱環境改善効果について定量的に評価した研究例はほとんどみられない。

そこで、本研究では、壁面緑化の実験計測から得られた基礎的数値を入力パラメータとして用い、解析対象とする空間スケールを街区スケールからさらに地区スケールへと拡大して、シミュレーションによる比較検討を行うことにより、緑化の程度の違いによる地区スケールでの顕熱負荷量の低減効果について定量的な評価を試みた。

具体的には、東京都千代田区霞ヶ関の実在地区をモデルに建築敷地内の地表面や屋上、壁面等への緑化条件の相異が地区内の表面温度や気温の分布に及ぼす影響についてCFD解析の方法を用いてシミュレーションを行い、表面温度と気温の計算結果から顕熱負荷量を算出した。ここで、街区とは、外周を「道路で囲まれた一まとまりの敷地の集合した空間単位<sup>6)</sup>」であり、本研究では地区を複数の街区より構成されるまとまりのある土地の区域と定義する。

### 5.2.1 調査方法

地区内の温熱環境として、長波放射、短波日射を受けた建物や地表面か

らの輻射放射，日射反射の放射収支，顕熱による対流熱や地盤や壁体への熱伝導，植物からの蒸散による潜熱消費の熱収支により温度場が形成されている。一方，温熱環境には地区内の風の流れや，湿度等の要素が相互に影響している。本研究ではこれら温度，風，湿度の物理現象を総合的に解析するために，運動量，温度，湿度の輸送方程式をCFDにより連成して解き，地区内での風向・風速，表面温度，気温，相対湿度の分布について数値解析を行った。

具体の地区モデルとして，東京都心部のヒートアイランド対策推進エリア内にあり，整形の街区から構成され一団地の官庁街を形成している千代田区霞ヶ関1丁目の実在地区を対象とした。地区内の建物や工作物の再現にあたっては，既存のGISデータである宙テクノロジー（株）社製の宙マップを用いた。また，数値解析には（株）ソフトウェアクレイドル社製のSTREAMを使用した。気象条件については，空気調和衛生工学会の標準気象データ8月5日13時のデータから気温32.4℃，相対湿度55%，風速1.25m/sを設定し，定常状態と仮定して入力した。したがって，時間の推移による蓄熱の影響は考慮していない。また，風向については，東京気象台8月の最大出現風向である南西を入力条件とした。計算資源としてパーソナル・コンピュータ（CPU：3GHz，メモリー：4GB）を1CPUで使用し，計算時間は約80CPU時間を要した。

## 5.2.2 基礎方程式と境界条件の設定

### (1) 基礎方程式

本研究でのCFD解析に用いた標準k-εモデルにおける基礎方程式は以下に示すとおりである。非圧縮性流体を仮定し，圧力補正はSIMPLE法<sup>8)</sup>，移流項の差分スキームは1次精度の風上差分を用いて定常計算を行った。

$$\text{(連続の式)} \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

(Navier-Stokes方程式  $i=1\sim 3$ )

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho g_i \beta (\theta - \theta_0) \quad (2)$$

(乱流エネルギー  $k$  の方程式)

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_S + G_T - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$G_s = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j},$$

$$G_T = g_i \beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \theta}{\partial x_i}$$

(乱流エネルギーの散逸率 $\varepsilon$ )

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_s + G_T) (1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$R_f = - \frac{G_T}{G_s + G_T}$$

(熱の輸送方程式)

$$\frac{\partial \rho C_p \theta}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho C_p \theta}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} K \frac{\partial \theta}{\partial x_j} + q \quad (5)$$

(湿度の輸送方程式)

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial u_j H}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} D_m \frac{\partial H}{\partial x_j} + h \quad (6)$$

式中の添字にはEinsteinの総和規約を適用している。

ここで、 $x_i$ : 位置座標[m],  $u_i$ :  $x_i$ 方向の流体速度[m/s],  $t$ : 時間[s],  $\rho$ : 流体又は固体の密度[kg/m<sup>3</sup>],  $P$ : 流体の圧力[N/m<sup>2</sup>] = [Pa],  $\mu$ : 粘性係数[kg/(m<sup>3</sup>·s)] = [Pa·s],  $g_i$ : 加速度[m/s<sup>2</sup>],  $\gamma$ : 体膨張率[1/K],  $\theta$ : 流体又は固体の温度[K],  $\theta_0$ : 流体の基準温度[K],  $C_p$ : 定圧比熱[J/(kg·K)],  $K$ : 熱伝導率[J/(m·s·K)],  $q$ : 発熱量[J/(m<sup>3</sup>·s)],  $k$ : 乱流エネルギー[m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>],  $\mu_t$ : 渦粘性係数[kg/(m·s)] = [Pa·s],  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_t$ ,  $\sigma_t$ : モデル定数,  $\varepsilon$ : 乱流消失率[m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>],  $D_m$ : 拡散係数[m<sup>2</sup>/s],  $H$ : 絶対湿度[kg/kgDA],  $h$ : 発生水分量[kg/(m<sup>3</sup>·s)]

3次元でのシミュレーションを行うため、直角座標系（直交格子）を用いた。地区内は水平方向（X, Y方向）に2 m間隔の等間隔メッシュを配置した。解析地区内におけるX, Y, Z方向のメッシュ数は、それぞれ255, 287, 109であり、メッシュの総計は7, 977, 165である。鉛直方向（Z方向）には、地表付近の温度分布を詳細に検討するため、地表から10 m付近までを0.5 m間隔とし、それ以上250 mまでは不等間隔とした。また、水平方向では対象地区の外側に約200 mの余裕を取り計算を行い、解析領域端面までは不等間隔メ

表5.4 入力条件として使用した物性値<sup>7)</sup>

区分	項目	入力値	
流体	空気密度( $\rho_a$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	1.206	
	粘性係数( $\mu$ ) [Pa·s]	1.113×10 <sup>-5</sup>	
	定圧比熱( $C_p$ ) [J/kg·K]	1007	
	体膨張率( $\gamma$ ) [K <sup>-1</sup> ]	3.495×10 <sup>-2</sup>	
	熱伝導率( $\lambda$ ) [W/m·K]	2.56×10 <sup>-2</sup>	
固体		建物	地上面
	表層材	珪岩質骨材コンクリート	アスファルト
	厚さ [cm]	200	13.5
	内側温度 [°C]	27	15
	密度( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	2400	2120
	比熱( $C$ ) [J/kg·K]	950	920
	熱伝導率( $\lambda$ ) [W/m·K]	1.5	0.74
	輻射率( $\delta$ )	0.85 <sup>13)</sup>	0.90 <sup>13)</sup>
	日射吸収率	0.65 <sup>13)</sup>	0.85 <sup>13)</sup>

ッシュとした。

(2) 建物外表面・地表面における境界条件

本研究で入力条件として使用した物性値を表 5.4 に示す<sup>9)</sup>。また，流入風速は地表面からの高さにより，次式によって算出される分布を適用した<sup>3)</sup>。

$$V = V_B \left( \frac{Z - Z_0}{Z_B - Z_0} \right)^{1/N} \quad (7)$$

ここで， $V$ : 高さ $Z$ 位置の風速[m/s]， $V_B$ : 規準高さ $Z_0$ の風速[m/s]， $Z$ : 高さ[m]， $Z_0$ : 地表面の高さ[m]， $Z_B$ : 規準高さ[m] (=74.5)<sup>3)</sup>， $N$ : べき指数逆数 (=3)

流入時の乱流量は，次式によって算出される値を適用した<sup>3)</sup>。

$$k = (SV)^2$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{C_t} S^2 V^3}{N(Z - Z_0)} \quad (8)$$

ここで， $k$ : 乱流エネルギー[m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]， $S$ : 乱れの強さ (=0.375，都市内)， $\varepsilon$ : 乱流消失率[m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]， $C_t$ : 乱流モデル定数 (=0.09)

また、流入条件を課した面の境界面（X, Y方向最大面）には抵抗や障害物がなく、境界面直前の流れの状況のまま風が流入すると仮定した。建物及び地表面の応力条件（摩擦）はべき乗測に従うものとし、べき数は3とした<sup>3)</sup>。解析領域上面（Z最大面）は架空壁であるため、フリースリップ（抵抗なし）とした。また、建物内部への熱伝導は壁面の厚さを200 mm、内部温度を27 °C、開口部は無いものと仮定した。計算領域のZ方向最小面（地表から約13.5 cm下方）は、地中温度を想定し、15 °C一定とした<sup>8)</sup>。各表面からの輻射は、モンテカルロ法により形態係数を求め、各面相互の輻射熱移動量を算出した。この際、天空温度は気温と同じ32.4 °Cと仮定した。対象としたモデル地区の緯度は北緯35° 68′，経度は東経139° 77′である。

法線面直達日射量はBouguerの式<sup>7)</sup>により求めた。また、大気透過率定数( $P_0$ )は0.62、大気透過率を求める月別定数( $b$ )は40とした。

各格子微小面における短波放射収支量等から(11)式で定義される熱収支式を基に収支各項を算出した。

$$S_i + R_i + H_i + G_i + LE_i = 0 \quad (11)$$

ここで、 $S_i$ : 微小面  $i$  における短波日射収支量 [ $W/m^2$ ]、 $R_i$ : 長波放射収支量 [ $W/m^2$ ]、 $H_i$ : 対流熱伝達量 [ $W/m^2$ ]、 $G_i$ : 建物及び地中への伝導熱量 [ $W/m^2$ ]、 $LE_i$ : 建物などの蒸発散による放熱量 [ $W/m^2$ ]

なお、緑化植物表面における熱収支については、(11)式をもとに対流熱伝達量( $H_i$ )、蒸散による放熱量( $LE_i$ )について、以下の式より算出した。

$$H_i = a_c(T_a - T_s) \quad (12)$$

ここで、 $a_c$ : 対流熱伝達率 [ $W/m^2 \cdot K$ ]、 $T_a$ : 気温[K]、 $T_s$ : 表面温度[K]

$$LE_i = l\beta a_w(X_a - X_s) \quad (13)$$

ここで、 $l$ : 蒸発潜熱[J/kg]、 $\beta$ : 蒸発効率、 $a_w$ : 物質伝達率 [ $kg/m^2 \cdot s(kg/kg)$ ]、 $X_a$ : 大気の絶対湿度 [ $kg/kg$ ]、 $X_s$ : 葉面の絶対湿度 [ $kg/kg$ ]

また、地表面と建物表面の温度は、図 5.13 に示すとおり固体(地表・建物)側と大気側の各格子中心の定義点における温度と定義点間の距離、熱伝達率を基に、(13)式を用いて算出した。

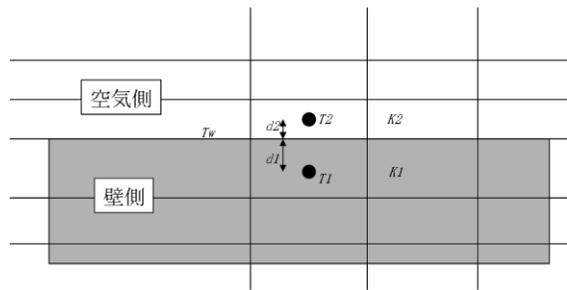


図 5.13 表面温度の算出

$$T_w = \left[ \frac{K1 \cdot T1}{d1} + \frac{K2 \cdot T2}{d2} \right] \left/ \left[ \frac{K1}{d1} + \frac{K2}{d2} \right] \right. \quad (14)$$

ここで、 $T_w$ :表面温度[°C]、 $d1$ 、 $d2$ :定義点から壁表面までの距離[m]、 $T1$ :壁側の1層目の温度[°C]、 $T2$ :空気側の1層目の温度[°C]、 $K1$ :壁の熱伝達率[W/m・°C]、 $K2$ :大気の熱伝達率[W/m・°C]

### (3) 地区モデルの設定と計算ケース

#### 1) 地区モデルの設定

本研究において対象とする地区モデルは、図 5.14 に示すとおり東京都千代田区霞ヶ関 1 丁目の実在地区を選定した。当地区の形状は、東西方向約 500 m、南北方向約 600 m の台形区画 24.4 ha であり、当地区を含む周辺一帯は一団地の官庁街を形成している。対象地区は、地区の中央部分を貫通する国道 1 号線により東西の街区に区分され、西側には A-1 と A-2、東側には B-1 と B-2 の四つの街区に区分される。用途地域は商業地域であり、一団地の官庁施設に指定されている。地区内の法定容積率は 500 %、建蔽率は 50 %となっている。地区内には高さ 100 m を超える超高層の国の中央官庁建築群が林立し、それぞれの街区内には建物群に囲まれた中庭(空地)が設けられている。地区モデルの設定条件を表 5.5 に示す。

#### 2) 計算ケース

数値計算のケースとして、GIS データに基づき作成した地区モデルに対して、表 5.6 に示すとおり緑化なしの場合(ケース 1)、地区を構成する各街区内の地上面を全面芝生緑化し、建物屋上の面積の 20 %を芝生緑化した場合(ケース 2)、ケース 2 に加えて、建物の南側と西側の壁面を地上から各建物高さの 20 %まで壁面緑化した場合(ケース 3)の 3 つのケースを設定した。

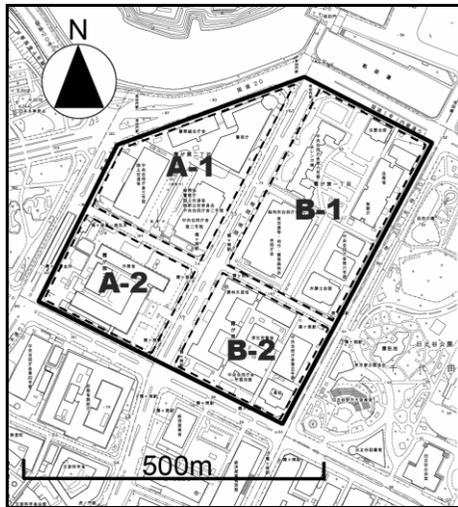


図5.14 地区モデルの位置

表5.5 地区モデルの設定条件

項目	数値
①地区面積	244,000㎡
②建築面積	76,600㎡
③空地面積	167,380㎡
④建蔽率	31.4%
⑤空地率	68.6%
⑥用途地域	商業地域（一団地の官庁施設）

表5.6 計算ケース

区分	緑化条件
ケース1	緑化なし
ケース2	地上面の非建蔽地を全面芝生で緑化し、屋上面の20%を同じく芝生で緑化
ケース3	ケース2+壁面の南・西側において地表から建物高さの20%をつる植物で壁面緑化

表5.7 緑化の入力条件

項目	地表面緑化 (芝生)	壁面緑化 (つる植物)
対流熱伝達率( $a_c$ ) [W/m <sup>2</sup> ·K]	$a_c=5.3+6.3u$ <sup>8)</sup>	$a_c = 23.71u^{0.6901.41}$
	$u$ : 風速 [m/s] ただし $u \leq 5$ [m/s]	
湿気伝達率( $a_w$ ) [kg/m <sup>2</sup> ·s]	$a_w = a/(C_p \times 0.83)$	
蒸発効率 ( $\beta$ )	0.251.4 <sup>1)</sup>	0.251.4 <sup>1)</sup>
みかけの日射吸収率( $a^*$ )	0.35 <sup>4)</sup>	0.46 <sup>4)</sup>
輻射率( $\varepsilon$ )	0.98 <sup>7)</sup>	0.975 <sup>12)</sup>

屋上や壁面の緑化による入力条件については、筆者らが過年度行った実験計測値から得た数値 <sup>12), 13)</sup> をパラメータとして入力した他、既存の文献等を参考として表-4 のように設定した。対象地区内の建物表面はコンクリートと仮定し、窓などの開口部は考慮していない。また、ケース 1 における地上面と道路は一樣にアスファルト面と仮定した。さらに、自動車からの排出ガスによる熱や建物の空調による廃熱の影響についても、今回の数値計算においては考慮していない。設定した地区モデルにおいて、上述した式(1)～(6)の基礎方程式と表 5.4, 表 5.7 の入力条件, 表 5.5 の地区モデルの設定条件等を基に CFD 解析によるシミュレーションを行った。各計算ケースにおける数値解析の結果と考察を以下に記述する。

### 5.2.3 結果と考察

#### (1) 表面温度分布

図 5.15 は、各ケースにおける地表面温度の分布を表示したものである。これより、ケース 1 では、地区内は 40 °C から 50 °C の範囲が大半となっており、地区の北側の国道 1 号線との交差点部分では、48 °C から 50 °C の高温域がみられる。一方、建物の日陰となる部分では、35 °C 前後となり、13 ~ 15 °C と顕著な差が認められる。緑化をしていないケース 1 に対して、地表面を芝生で緑化したケース 2 では、緑化部分の表面温度に明確な違いがみられ、地区内の緑化部分では 34 °C から 38 °C の温度域が大半を占め、ケース 1 と比べると 5 °C から 8 °C の表面温度の低減がみられた。これは、地表面を芝生緑化したことにより、芝生面からの蒸発散の作用により、芝生の表面温度がケース 1 のアスファルト面と比較して低く保たれ、地区内の

温熱環境改善に寄与したためと考えられる。建物北側の日陰部分ではケースの違いによる明確な差はみられない。

ケース2の地上面と屋上緑化に加え、建物壁面の緑化を行ったケース3においては、B-1街区の北西端とA-1街区とA-2街区との間の国道1号線交差点付近でケース2に比して局所的に2℃から4℃の温度の低減がみられた。これは、近傍の建物壁面の表面温度が壁面緑化により低下したため、壁面からの輻射熱の低下により地表面の温度低下につながったものと推察される。ケース2との差異が小さかったのは、シミュレーションを行った対象時刻が13時であるため、壁面に対する直達日射の入射角が最も小さいこと、壁面緑化の範囲を建物高さに対して一律に20%で設定したこと、高さの比較的低い建物では緑化の部位が低く抑えられたため、地区内で温熱効果を発現する緑化面積としては不十分であったこと等が要因として考えられる。

## (2) 気温分布

図5.16は、各ケースにおける地上1.5mの地点での気温の分布を表示したものである。これよりケース1では、地区北側の交差点付近で40℃を超える高温域がみられ、B-1街区の空地並びにA-1街区の南側で同じく39℃以上の高温域がみられる。地表面を芝生で緑化したケース2では、B-1街区の空地の同じ位置において気温が35.5℃と約4℃の低減がみられ、街区周辺も2~3℃の低減域が広がっている。また、A-1街区南側の道路では39.1℃から37.4℃となり、約2℃の低減がみられる。さらに、芝生で緑化されていない道路でも気温の低減がみられたが、これは、緑化部分では地表面温度が低く、気温上昇も抑えられているため、風の影響を受けて対流熱により非緑化部分においても気温が低くなったためと考えられる。

さらに、B-1街区内の空地においても、ケース1の場合の39℃の高温域が、ケース2では35℃台へと約4℃の低減がみられた。これに対して、ケース2に加えて壁面緑化を行ったケース3では、A-1街区の南側街路の建物近傍において局所的に2℃から3℃の低減はみられたものの、地区内での全体的な気温分布に大きな違いはみられなかった。

## (3) 地区内への顕熱負荷量による評価

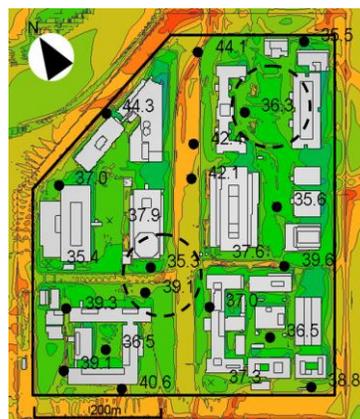
建物や地面がヒートアイランド現象を起こしうる度合いを評価するための温熱指標として、梅干野<sup>2)</sup>が開発した「ヒートアイランドポテンシャル(Heat Island Potential:HIP)」があげられる。HIPは、建物や地面など全ての表面から発生する顕熱の街区面積に対する割合を示し、対象地区のヒートアイランドへの影響度を地表面温度に換算した温熱指標である。土地利用、土地被覆ごとの顕熱流量のポテンシャルを



ケース 1 (緑化なし)



ケース 2 (屋上 20%・地表面緑化)



ケース 3 (ケース 2+壁面南側・西側地上 30m 緑化)

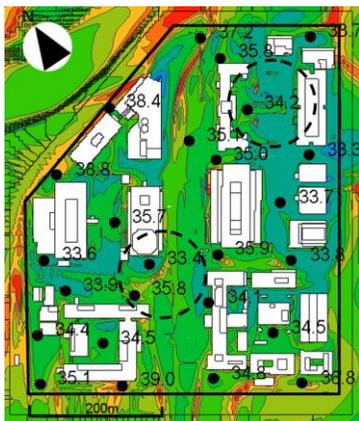
図 5.15 地表面温度分布



ケース1 (緑化なし)



ケース2 (屋上20%・地表面緑化)



ケース3 (ケース2+壁面南側・西側地上30m緑化)

図 5.16 気温分布(地上 1.5m)

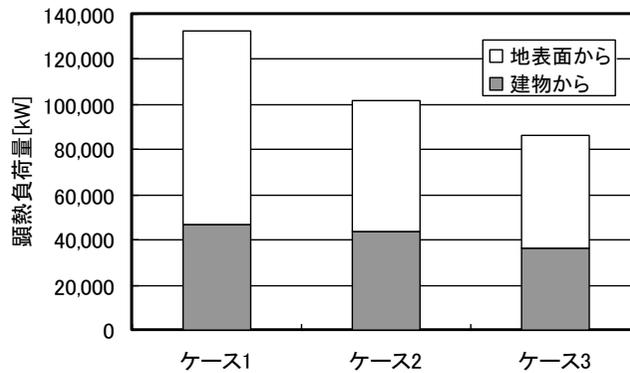


図 5.17 各ケースの顕熱負荷量

表現できるとされている。しかし，HIPでは対流熱伝達率を1.0とみなし，風の影響は考慮されておらず，気温は代表気温とされている。本研究では，CFDにより微小面毎に表面性状に対応した対流熱伝達率を仮定するとともに，表面温度と近傍気温を計算していることから，以下の式により地区内の顕熱総負荷量( $\Sigma H$ )を(15)式により算出した。

$$\Sigma H = \int \alpha_c (T_s - T_a) dS \quad (15)$$

ここで， $\alpha_c$ : 対流熱伝達率 [ $W/m^2 \cdot K$ ]， $T_s$ : 街区内の微小面表面温度 [K]， $T_a$ : 微小面近傍気温 [K]， $dS$ : 微小面

図 5.17 に各ケースの計算結果を示す。これより，緑化をしていないケース1では建物面から約46,810 kW，地表面から約85,948 kWの顕熱があり，顕熱総負荷量は132,758 kWである。建物の屋上20%と各街区内の地表面全体を芝生で緑化したケース2では，建物面から43,754 kW，地表面から約57,789 kWの顕熱があり，顕熱総負荷量は101,543 kWとなり，ケース1に対して約24%低減した。さらにケース2に加えて建物の20%を壁面緑化したケース3では，建物面から36,671 kW，地表面から49,624 kWの顕熱があり，顕熱総負荷量は86,295 kWとなり，ケース2に対して約15%低減した。

これより，ケース1に対してケース3では，顕熱総負荷量が約40%低減した。顕熱の低減量としては，地表面の芝生化により，31,215 kWと低減量全体の約67%を占め，顕熱の低減に最も寄与した。モデル地区

を構成する街芝生の表面温度が低減し、地表面被覆の改善策としての有効性を定量的に捕捉することができた。ケース3において、ケース2よりも地表面からの顕熱負荷量が低減したのは、壁面緑化したことで建物の表面温度が低減するとともに、壁面緑化による短波日射の反射量が低減し、地表面に入射する反射日射量も低減したことにより、建物周辺の地表面温度が低減したことが主な要因と考えられる。

以上の検討結果から、解析の対象スケールを街区スケールから地区スケールへと拡大して解析を行うことにより、緑化方法の違いによる地区内を構成する街区内の表面温度や気温の分布、街区を区分する周辺の幹線道路や街区相互の影響について総合的に解析することができた。また、表面温度と気温の分布をCFD解析を用いてシミュレーションすることにより、地区スケールでの緑化条件の違いによる顕熱の抑制効果を定量的に捕捉することができた。

今後、地区内における緑化の割合や緑化方法の違い、植物の種類による蒸発効率や日射吸収率等について基礎データを蓄積させつつ、入力条件の違いに応じた地区内の温熱環境改善効果について、CFD解析を応用して顕熱負荷量の比較・検討を行うことにより、ヒートアイランド緩和のための具体的な緑化計画や設計への応用可能性が示唆された。

### 5.3 樹木配置の違いによる街区内の顕熱負荷の低減効果

近年の都市化の進行に伴いヒートアイランド現象が顕在化し、都市の暑熱環境が悪化しつつある。その主な要因として、都市表面が舗装面等の人工被覆面で覆われてきたことによる大気顕熱負荷の増大と、建物等からの人工排熱があげられている。屋外での温熱環境を改善していくために建築敷地内での樹木植栽や壁面の緑化等により地表面被覆の改善を図ることが必要とされている。建物敷地における緑化対策を推進していくためには緑化による温熱効果についての基礎となるデータの蓄積と実証的なデータに基づく、実在の街区等に適用した定量的なシミュレーション評価技術の開発が急務である。

萩島らは、街路樹による暑熱緩和効果について、樹冠部による日射遮蔽効果を実測と数値計算から明らかにしている<sup>19),20)</sup>。河田ら<sup>21-22)</sup>、下條ら<sup>23)</sup>、中井ら<sup>24)</sup>は、実測値による日射透過率と葉面積密度についての簡易な推定方法、樹冠の放射減衰に関わるパラメータの同定を試みている。

第2章と第3章において壁面緑化について実験・計測より緑化面の日射反射率、対流熱伝達率、蒸発効率等の基礎的データ<sup>25),26)</sup>を明らかにするとともに、東京大手町の实在街区を対象としてCFD解析を行い、緑化による街区内部での温熱環境効果についてシミュレーションを行った<sup>27)</sup>。しかし、対象とした街区モデルの建物表面性状については、一律にコンクリートとする等、实在街区での建物の表面性状についての再現性は十分とは言えない。

梅干野ら<sup>28),29)</sup>は、建物～街区レベルでの放射環境に着目し、建築外部空間の設計支援を目的として熱収支シミュレーションを行う手法を開発するとともに、全表面から発生する顕熱負荷を評価する指標としてヒートアイランドポテンシャル(H I P)を提案している<sup>30)</sup>。

そこで、本節では、筆者らが行ったこれまでの実験・計測結果や前節までのシミュレーション評価を踏まえるとともに、梅干野が開発した熱収支シミュレーションの手法と評価指標を参考として、東京都心部の港区芝5丁目に实在する街区をモデルに取り上げ、建物や地表面の性状を实在に近い形に再現し、敷地内の空地部における樹木配置方法の違いや壁面緑化による街区内部での表面温度の負荷の違いについてシミュレーションを行い、平均放射温度(MR T)、ヒートアイランドポテンシャル(H I P)の温熱指標により解析し、建築敷地緑化による温熱環境改善効果についての定量的な評価を試みた。

### 5.3.1 研究の方法

本研究では、緑化の熱環境改善効果を予測する数値シミュレーションを行うため、「サーモレンダー(エアンドエー社製)」を用いた。また、全表面の熱収支解析を行うため、市販の設計支援ソフトウェア「Vector Works(エアンドエー社製)」により作成したCADモデルに構成材料情報を入力した。

本研究の実施手順は以下のとおりである。

- 1)対象街区の現況をCADモデル上で再現する。再現する対象は、建物、樹木、土地被覆の空間形状とそれらの構成材料情報である。
- 2)検討する緑化手法としては、敷地内の樹木緑化と建物への壁面緑化を取り上げ、樹木配置と壁面緑化を変化させた4ケース想定し街区のCADモデ

ルに適用する。

3)サーモレンダールを用いて、各ケースの表面温度分布と、屋外生活空間の熱放射環境の評価指標である平均放射温度 (MRT) と大気への顕熱負荷の評価指標であるヒートアイランドポテンシャル (HIP) を算出し、熱環境評価を行った。計算結果は、入力日における 24 時間の経時変化を 15 分毎に出力する。

(1) 表面温度の算出

街区における上記質点系伝熱モデルに基づく熱収支計算実施作成した街区モデルの全表面の質点メッシュにおいて、熱収支計算 (直達日射, 天空日射, 反射日射, 大気放射, 周辺地物との長波長放射の授受, 顕熱輸送 (対流熱伝達), 潜熱輸送) と各面断面方向の 1 次元非定常熱伝導計算を行い、時系列の表面温度を算出した。

各質点メッシュにおける熱収支計算の概要は以下の通りである。熱収支計算の基本式を次式に示す。

(建物・地面の表面における熱収支式)

伝導熱量 = 受熱日射量 + 大気放射量 + 周辺地物との長波長放射の授受 + 顕熱輸送量 + 潜熱輸送量

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = a_{su} (\cos \theta \cdot I_{DR} + F_{sky} I_{RR}) + \varepsilon_s F_{sky} \sigma T_a^4 (a + b\sqrt{e}) + \varepsilon_s \sum_{i=1}^n \varepsilon_i F_i \sigma T_{si}^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4 + a_c (T_a - T_s) + l\beta k (X_a - X_s) \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$ :熱伝導量 [W/mk] ,  $e$ :地表付近の水蒸気圧 [hPa] ,  $T$ :温度 [K] ,  $x$ :一次元断面方向の距離 [m] ,  $s, a$ (下付文字):表面, 空気,  $a_{su}$ :日射吸収率,  $n, i$ (下付文字):長波長放射の授受を計算する周辺地物の質点の数, 番号,  $I_{DR}$ :直達日射量 [W/m<sup>2</sup>] ,  $\theta$ :質点の面に対する直達日射入射角 [rad] ,  $C_p$ :容積比熱 [J/(m<sup>3</sup> K)] ,  $F$ :形態係数 [sky:天空率] ,  $t$ :時間 [s] ,  $I_{SR}$ :天空日射量 [W/m<sup>2</sup>] ,  $l$ :蒸発潜熱 [J/kg] ,  $I_{RR}$ :周辺地物からの反射日射量 [W/m<sup>2</sup>] ,  $\beta$ :蒸発効率,  $\varepsilon$ :長波長放射率,  $k$ :物質移動係数 [kg/(m<sup>2</sup> s(kg/kg'))] ,  $\sigma$ :ステファンボルツマン定数 [W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>] ,  $X$ :絶対湿度 [kg/kg'] ,  $a, b$ : Brunt 式における定数 ( $a=0.52, b=0.065$ )

直達日射量はレイトレーシング法により計算する。法線面直達日射量と、当該面へ光線の入射角と日射吸収率より、受熱日射量を求める。法線面直達日射量は、気象条件データの水平面全天日射量から、直散分離により求める。直散分離の式は、法線面直達日射量については Bouguer の式<sup>補注 1)</sup>,

水平面天空日射量は永田の式<sup>補注 2)</sup>を用いる。天空日射量は、水平面天空日射量と、各質点メッシュの天空率との積により求める。天空率の計算は、天空方向への分散レイトレーシング法<sup>補注 3)</sup>によった。等形態係数となるようにレイを射出し、天空部分に到達したレイの数より、天空率を計算する。レイの射出数は既往研究<sup>31)</sup>をもとに 500 本とした。反射日射量は、鏡面・拡散成分ともに 1 次反射までを計算する。拡散反射は、すべて均等拡散反射で計算する。均等拡散反射の計算も、分散レイトレーシング法による。レイの射出方法は上記の天空率の計算と同様とする。

大気放射量は、全天の大気放射量を Brunt の式<sup>補注 4)</sup>より計算し、天空率を乗ずることで、当該質点メッシュの大気放射量成分を算出する。周辺地物との長波長放射の授受量については以下のとおりである。周辺地物からの長波長放射の受熱成分は、分散レイトレーシング法により周辺地物メッシュの表面温度値を取得し、(1)式より算出する。本計算においては、周辺地物の長波長放射率が 1 であると仮定し、長波長放射の反射成分については計算しない。

顕熱輸送量(対流熱伝達量)の計算において、対流熱伝達率  $\alpha_c$  算出にはユルゲスの式<sup>補注 5)</sup>を用いる。本計算では、低風速日を想定し、対流熱伝達率  $\alpha_c$  算出のための風速と、気温には空間分布がないと仮定して計算を行う。伝導熱量は、一次元非定常熱伝導計算により、表面及び断面の温度分布を計算する。計算方法は後退差分法により、計算時間ステップは 5 分間である。このとき、建物であれば外壁の断面構成を再現する。地表であれば温度の日変化のない 50cm 程度までの材料構成を計算上再現した。室内側の境界条件となる室温は空間分布一様とする。

## (2) 緑化の伝熱モデル

### ① 樹木の伝熱モデル

樹木については、その日射遮蔽効果を予測するために、樹冠部の日射透過特性を計算可能としている。樹木形状を CAD 上で再現し、メッシュ化を行ったうえ、各メッシュに日射透過率を与えることで、日射遮蔽効果を計算する<sup>28)</sup>。単位メッシュあたりの日射透過率は(2)式より算出した。

<日射透過率の計算式>

$$\tau = \sqrt{S_{TR} / 100} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $\tau$ :単位メッシュあたりの日射透過率 [%],  $M$ :透過経路にあるメッシュ数,  $S_{TR}$ :南中時の樹冠下での日射透過率 [%]

樹冠部については、日射透過率 10%<sup>6)</sup>を与えた。また樹幹部の日射透過率は 0 とした。樹冠部の表面温度は、既往研究<sup>32)</sup>の実測から得られている回帰式(3)を用いる。

<樹冠部の表面温度の計算式>

$$T_{TR} = d_{TR} \cdot T_a + a_{TR} \cdot I_{in} - c_{TR} \cdot u + b_{TR} \quad (3)$$

ここで、 $T_{TR}$ : 樹冠の温度 [°C] ,  $I_{in}$ : 入射日射量 [ $W/m^2$ ] ,  $T_a$ : 気温 [°C] ,  $u$ : 風速 [m/s] ,  $a_{TR}$ : 日射量の影響に関する係数(0.003),  $b_{TR}$ : 係数(2.53),  $c_{TR}$ : 風速の影響に関する係数(0.109),  $d_{TR}$ : 気温の影響に関する係数(0.875)

## ②壁面緑化の伝熱モデル

潜熱輸送量の計算において、既往研究の実測結果<sup>33),34)</sup>より以下の実験回帰式(4)を適用した。

$$T_G = a_G \cdot I_{IN} - b_G + T_a \quad (4)$$

ここで、 $T_G$ : 葉群層の温度 [°C] ,  $I_{IN}$ : 入射日射量(直達日射,天空日射,反射日射) [ $W/m^2$ ] ,  $T_a$ : 気温 [°C] ,  $a_G$ : 屋上緑化;生育状況の季節変化による係数(8月:0.015) 壁面緑化;つる植物の係数(0.006),  $b_G$ : 屋上緑化;生育状況の季節変化による係数(8月:1.4) 壁面緑化;つる植物の係数(2.4)

さらに、本研究においては筆者ら<sup>25),26)</sup>の実測結果に基づき、新たに壁面緑化の蒸発散特性を考慮した伝熱モデルを導入した。壁面緑化の伝熱モデルは(5)式のとおりである。

<葉群層における熱収支の計算式>

樹熱日射量+大気放射量+周辺地物との長波長放射の授受量+顕熱輸送量+潜熱輸送量+土壌と葉群層間の熱移動量=0

$$a_{su}(\cos\theta \cdot I_{DR} + F_{sky} I_{SR} + I_{RR}) + \varepsilon_s F_{sky} \sigma T_a^4 (a + b\sqrt{e}) + \varepsilon_s \sum_{i=1}^n \varepsilon_i F_i \sigma T_{si}^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4 + a_c (T_a - T_s) + \beta k (X_a - X_s) + c(T_{ss} - T_{sl}) = 0 \quad (5)$$

本研究において導入した壁面緑化の伝熱モデルは、萩島<sup>35)</sup>らの提案した式と同様、葉群層を熱容量がなく熱抵抗のみの仮想的な層と見なしている。葉群層の蒸発散特性は、物質伝達率  $k$  をルイス則<sup>補注6)</sup>を仮定することで対流熱伝達率から求め、蒸発効率  $\beta$  は実測結果を用いることで予測を行った。蒸発効率は筆者らの実測結果<sup>26)</sup>より 0.25 を用いた。日射反射率についても

同じく実測結果<sup>36)</sup>より 0.27 を用いた。葉群層の熱コンダクタンス  $c$  は、葉群層を熱容量がなく熱抵抗のみの仮想的な層と見なした場合の等価的な値であり、本研究では、萩島ら<sup>35)</sup>の実測結果で得られている風速との関係式（熱コンダクタンス  $c[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]=0.85 \times \text{風速}[\text{m}/\text{s}]+3.84$ ）を用いた。

### (3) MRT の算出

夏場に建物の外部空間において人々が暑さを感じるのは気温ばかりでなく、周囲に存在する地物からの熱放射が大きく影響している。MRT は、人間が周囲から受ける熱放射の影響を全方位で平均化し、温度換算したものである。建物や地面からの熱放射は、その表面温度に依存し、外部空間の空間形態と構成材料により直接的に規定される

ため、対策効果が計りやすい要素であると言え、(6)式により計算できる。  
<MRT の計算式>

$$MRT[t] = \sqrt[4]{\sum_{j=1}^N F_j \cdot Ts_j[t]^4} - 273.2 \quad (6)$$

ここで、 $Ts$ : 街区内の微小面の表面温度 [°C]、 $F_j$ : ある解析メッシュから微小面への形態係数[-]、 $N$ : 参照する微小面の総数、 $t$ : 時刻

### (4) HIP の算出

HIP は、開発等の対象となる敷地や街区が、周囲に及ぼす環境影響の指標として、ヒートアイランドを起し得る度合いを評価するために梅干野ら<sup>30)</sup>が提案したものである。建物や地面など全ての表面から発生する顕熱の敷地または街区の面積に対する割合として定義される。

温度換算して算出することで、敷地や街区が平坦であると仮定したときに、その面が気温より何度上昇するのに相当するかを表す指標であり、(7)式により計算できる。

<HIP の計算式>

$$HIP = \frac{\int (T_s - T_a) ds}{A} \quad (7)$$

ここで、 $Ts$ : 街区内の微小面の表面温度 [°C]、 $Ta$ : 気温 [°C]、 $ds$ : 微小面積 [m<sup>2</sup>]、 $A$ : 街区の（水平面投影）面積 [m<sup>2</sup>]

### (5) CAD モデルと入力データベース

解析対象とした実在地区の概要は表 5.8 のとおりである。計算用の対象地区の CAD モデルを作成するため、図面等の既存情報から得られるデータと現地実測によるものを分類すると表 5.9 のようになる。建物情報は基本

的には公開されている図面等の既存データより整備し、CAD モデル作成に使用した。土地被覆情報は、現地実測により整備した。実測は、2008 年 1 月 25 日に実施した。表 5.10、表 5.11 に断面仕様のデータベースを示す。地盤面の形状、方位については、国土地理院刊行の「数値地図 2500(空間データ基盤)」, データ番号「09LD381」より抽出した。

CAD に取り込んだデータを図 5.19 に示す。地盤面については、対象地区において道路面の傾斜及び、地盤面の隆起などが認められるが、計算メッシュ 1 m という精度を鑑み、一律平坦であると仮定して 2D で作成した。土地被覆分布については、敷地全体をすべて同一のタイルとして仮定した。

#### (6) シミュレーションのケース

対象とした実在街区モデルについて、建築敷地内緑化の条件の違いによ

**表 5.8 対象街区の概要** 補注 7)

区 分	事 項
(1) 所在地	東京都港区芝 5 丁目
(2) 敷地面積	21,280 m <sup>2</sup>
(3) 建築面積	6,370 m <sup>2</sup>
(4) 構造	S 造一部 SRC 造・RC 造
(5) 階数	地下 4 階, 地上 43 階
(6) 建物高さ	180m

**表 5.9 データの整備方法**

データ種別	既存データ	現地調査
(1) CAD 形状モデル	建物：市販書籍情報, 公開 web 情報, 現地調査, 仕様書による 土地起伏：国土地理院 GIS データによる	土地被覆分布：目測, 写真撮影
(2) 断面仕様・材料・物性値データ	建物：市販書籍, 公開 web 情報 壁面緑化：建築研究所資料 <sup>12)</sup> より	土地被覆材料：現地調査

表 5.10 建物面の熱物性値

屋根面			
日射反射率 0.3		長波長放射率0.9	
材料名	厚さ (mm)	B. 容積比熱 (J/(m <sup>3</sup> ・K))	C. 熱伝導率 (W/(m・K))
タイル	10	2000000	1.3
下地モルタル	6	1600000	1.5
押さえコンクリート	50	1900000	1.6
保護モルタル	6	1600000	1.5
アスファルトルーフィング	10	1000000	0.11
コンクリート	180	1900000	1.6
ポリスチレンフォーム	30	4000	0.04
せっこうボード	10	900000	0.15
壁面 アルミパネル			
日射反射率 0.5		長波長放射率0.8	
材料名	厚さ (mm)	B. 容積比熱 (J/(m <sup>3</sup> ・K))	C. 熱伝導率 (W/(m・K))
金属系(カラーアルミ板)	15	2400000	200
空気層	100	1298	0.09
グラスウール10K	140	8400	0.05
空気層	60	1298	0.09
せっこうボード	10	900000	0.15
窓面 ガラス面			
日射反射率 0.3		長波長放射率0.94	
材料名	厚さ (mm)	B. 容積比熱 (J/(m <sup>3</sup> ・K))	C. 熱伝導率 (W/(m・K))
フロートガラス	6	1913862	1

(注) 「空気層」の熱伝導率 c は、熱抵抗値である。

表 5.11 地表面の熱物性値

地表面 アスファルト			
日射反射率	0.1	長波長放射率0.9	
材料名	厚さ(mm)	B. 容積比熱(J/(m <sup>3</sup> ・K))	C. 熱伝導率(W/(m・K))
アスファルト舗装面	130	2000000	0.7
地中モルタル	200	1600000	1.5
地中クラッシューラン	400	1500000	0.6
地中路床	400	1600000	0.6

地表面 タイル			
日射反射率	0.3	長波長放射率0.9	
材料名	厚さ(mm)	B. 容積比熱(J/(m <sup>3</sup> ・K))	C. 熱伝導率(W/(m・K))
タイル	20	2000000	1.3
地中モルタル	30	1600000	1.5
地中コンクリート	150	1900000	1.6
地中クラッシューラン	100	1500000	0.6
地中路床	400	1600000	0.6

表 5.12 シミュレーションのケース

区分	内容
ケース 1	モデル化した対象地区内で緑化なしと仮定した場合。
ケース 2	建築敷地内の空地に樹木を建物南西側に集中して配植したと仮定した場合。
ケース 3	建築敷地の空地に樹木を均一に分散配植したと仮定した場合。
ケース 4	建築敷地の空地に樹木を均一に分散配植し、建物壁面の南面と西面に、地上面から50mまでを壁面緑化したと仮定した場合。

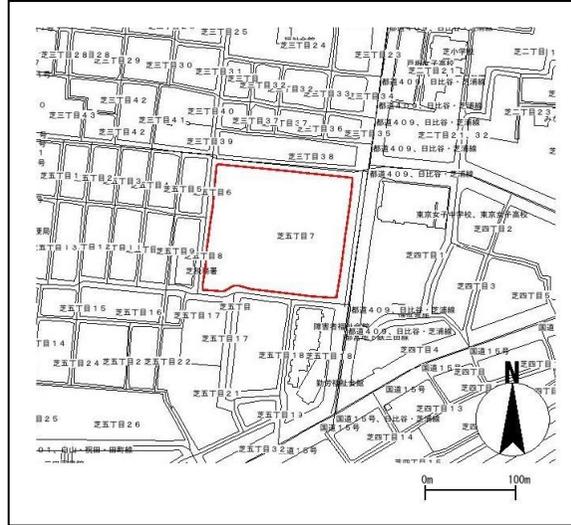


図 5.18 対象街区の GIS データ 補注 8)

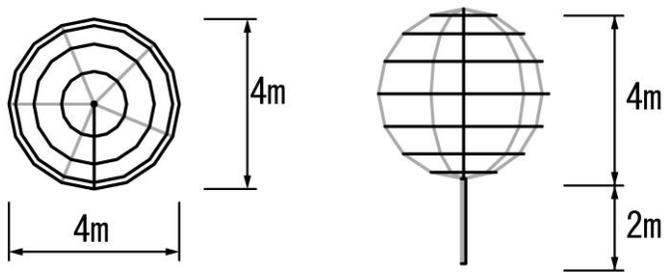


図 5.19 樹木の CAD モデル

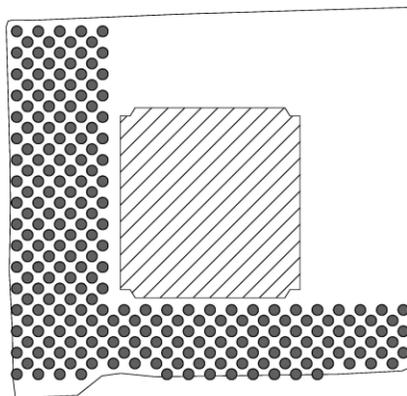


図 5.20 敷地南西側に集中配置(ケース 2:樹木南西集中配置)

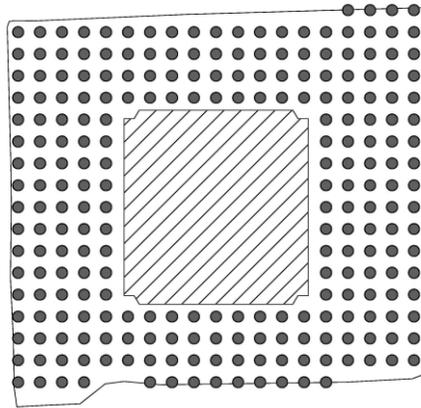
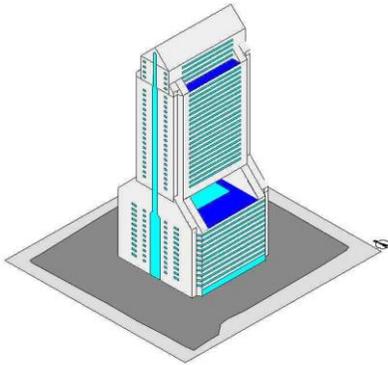
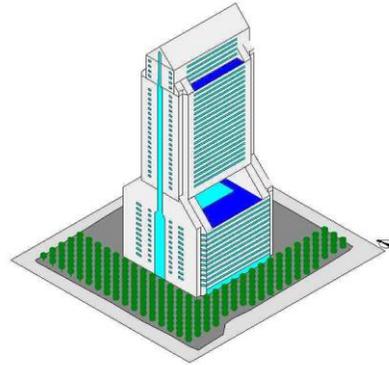


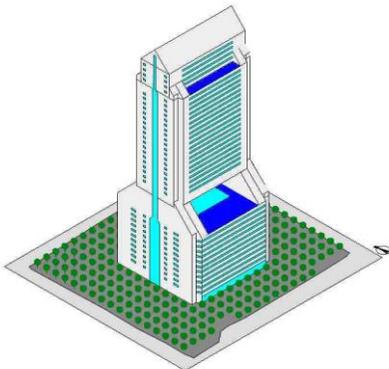
図 5.21 敷地内に均等配置(ケース 3: :樹木均等配置)



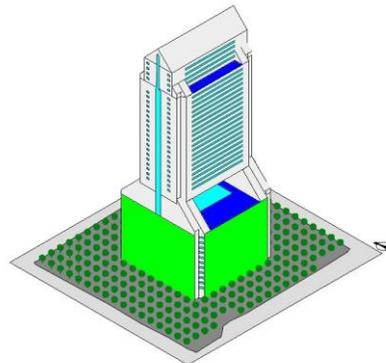
(ケース 1:緑化なし)



(ケース 2:樹木南西集中配置)



(ケース 3:樹木均等配置)



(ケース 4:ケース 3+壁面緑化 50m)

図 5.22 街区モデル図

るシミュレーションを行うために、表 5.12 に示す 4 つのケースを検討した。

#### (7) 樹木の CAD モデル

樹木については樹高 6 m、樹幹直径 0.2m、樹冠高 4m、樹冠幅 4 m、樹幹の形状は柱状体、樹冠の形状は球体とした。樹木モデルはすべて鉛直方向を軸とした回転体として作成した。作成した樹木の CAD モデルを図 5.19 に示す。

樹木の配置方法の違いにより、図 5.20 に示すとおり敷地内の空地部分に 240 本を建物の南西側に集中した場合(ケース 2)と、図 5.21 に示すとおり敷地内に同数の樹木を均一に分散配置した場合(ケース 3)、の二つのケースを想定した。各ケースの街区モデル図(3D)を図 5.22 に示す。

#### (8) 計算条件

##### ① 気象条件

計算に使用する気象データは、空気調和衛生工学会方式の標準気象データから、8月5日のデータを用いた。気温は、日中最高で 32.3℃にまで上昇しており、真夏日である。日射量の日変化からも分かるように、ほぼ快晴日である。直達日射量も最高で 881W/m<sup>2</sup>と強く、表面温度の高温化が予想される条件である。雲量も日中は小さいが、夜間が多いため、大気の放射冷却現象が阻害され、表面温度の低下が起こりにくい条件といえる。快晴条件であるので、天空日射量の割合は小さく、直達日射量の割合が大きいため、面ごとの受熱日射量に大きな差異が生じることが推測される。太陽高度は 12 時の時点で 71 度に達しており、ほぼ真上から太陽が照射している状況である。同日は、風の比較的弱い低風速日である。シミュレーションに使用した月日の気象条件を図 5.23～図 5.25 に示す。

##### ② 室温条件

室温の条件は、業務時間の 7時から 24時は 26℃一定の冷房条件、冷房の切れる深夜帯は自然室温条件で計算した。自然室温条件<sup>補注 9)</sup>では、冷房を使用していない状態の自然室温をあらかじめ計算し、設定した。これは業務施設の室内側条件を反映させるためである。

##### ③ その他の条件

計算は、4日間の助走計算を行い、5日間の結果を日周期定常解として採用した。

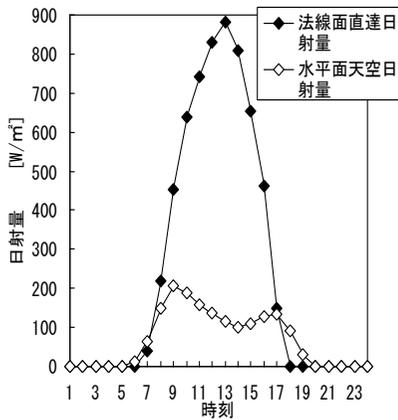


図 5.23 気象条件(日射量)

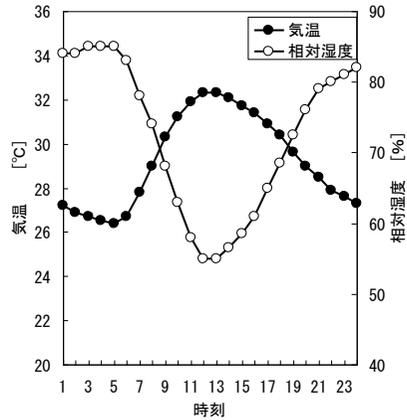


図 5.24 気象条件(気温・相対湿度)

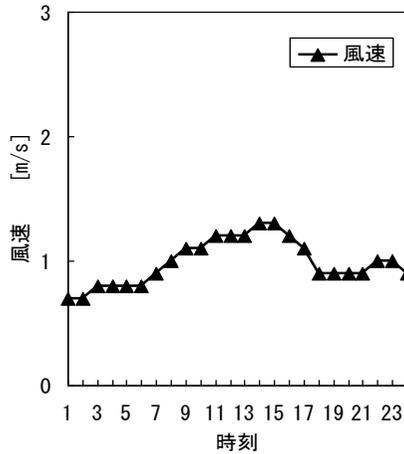


図 5.25 気象条件(風速)

### 5.3.2 解析結果及び考察

#### (1) 表面温度分布

本研究では、24 時間の変化についてもシミュレーション解析を行っているが、本稿では気温のピークとなる 13 時の時点の表面温度分布について計算結果を基に考察する。算出結果を図 5.26，図 5.27 に示す。

<ケース 1：緑化なし>

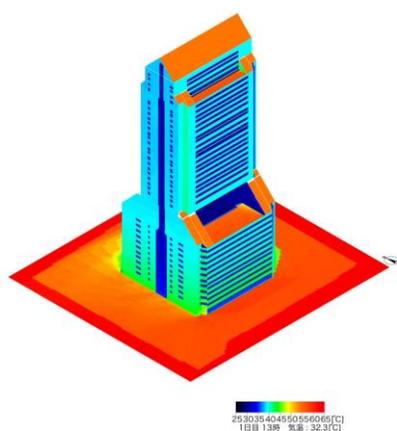
街区敷地外周の道路に着目すると気温 32.3°C に対し、アスファルト舗装面の温度は 60°C 前後になっている。街区敷地内についてみるとタイル舗装

した地表面の東南，南側については午前中から東側より日射が照射すること，樹木等の日射遮蔽物がないことから 58℃前後まで温度が上がっている。北側から北東側に伸びる日影の部分では，30～45℃を示しており，東，南側と比べて表面温度が低くなっている。高層建物であるため，建物により日射遮蔽されて表面温度が相対的に低くなっている範囲は広い。西側については，午前中の時間帯に建物の影となるため，温度の上昇開始が遅く，13時の時点でも 55℃前後である。北東側の建物直近から 15m 付近については，表面温度が 30℃を下回り，気温よりも低い箇所があるが，これは午前中から現時刻までの間は建物の陰となっており，直射日射による影響を受けることなく，表面温度が低く維持されたためと考えられる。西側の建物直近から 15m 付近まで，数度の温度上昇が見られる部分が点在するが，これは建物西面にあるガラス面の反射日射の影響によるものと考えられる。建物に着目すると，太陽方位が南側，太陽高度は 70 度近くであり，低層階，中層階，高層階の屋根および最上階傾斜屋根の南側において約 60℃まで高温化している。これらは，大気側への顕熱負荷の要因となるほか，建物内部への熱負荷の要因となる。壁面においては，日射の影響を受ける南側，西側壁面の温度が 40℃から 45℃に達している。中層階に於ける南西角の温度が高い部分については，壁面の角度による受熱日射量の違いによるものと考えられる。また，低層階の地上から 15m までの部分の表面温度が高いのは，周辺地表面からの長波長放射と反射日射の影響によるものと考えられる。ガラス面は日射吸収率が小さく，さらに建物内部では冷房使用により室温が 26℃に維持されていることにより，表面温度が気温よりも低い箇所が多くなっている。

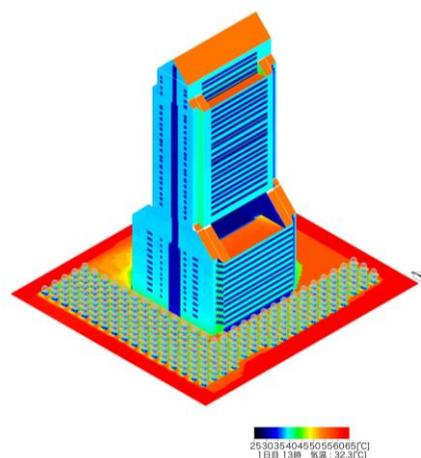
#### <ケース 2：樹木緑化・南西側配置>

街区敷地に着目すると，南，西側に集中的に配置された樹木の日射遮蔽効果により，表面温度は 32～37℃と気温相当～気温+5℃程度の部分が多く形成されている。樹木が配置されていない箇所と比較すると，表面温度の差は 20℃前後に達する。また樹木配置が南西側に偏在しているため，この時間帯は建物の日陰とは重なっていない。

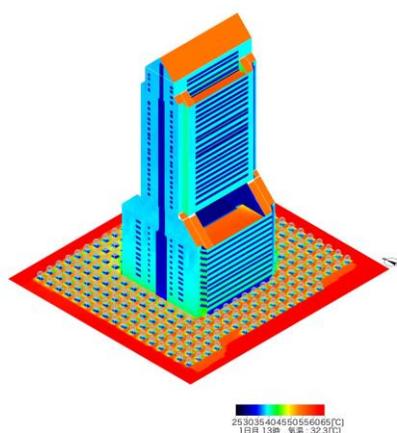
これより，建物による日射遮蔽と樹木の日射遮蔽の双方により，敷地全体の多くの場所で地表面の高温化が抑制されていることが確認できる。ケース 1 において確認した西側の建物直近から 15m ほどに点在していたガラス面からの日射反射による高温部分については，樹木により相当部分が遮蔽されている。建物に着目すると，ケース 1 においてみられた地面からの長波長放射と反射日射による温度上昇部分が，地上から 5m 以内にまで縮小



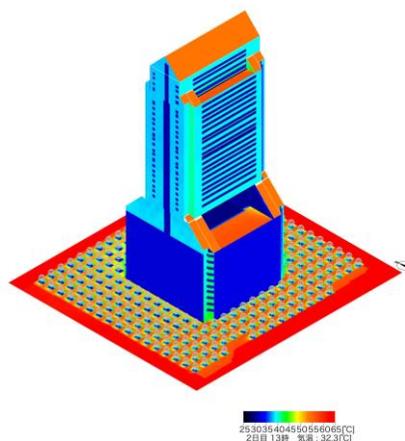
(ケース 1:緑化なし)



(ケース 2:樹木南西集中配置)



(ケース 3:樹木均等配置)



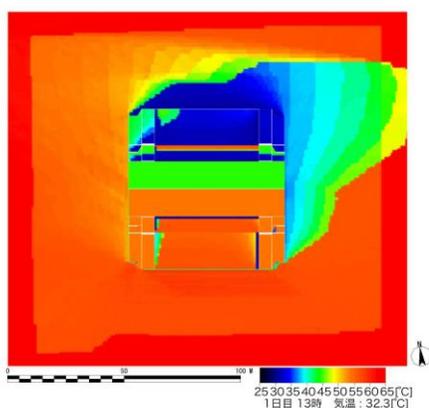
(ケース 4:ケース 3+壁面緑化 50m)

図 5.26 表面温度分布鳥瞰図

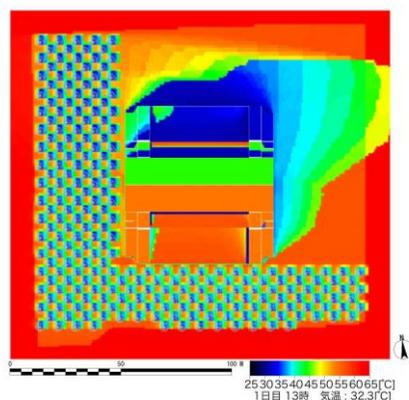
している。これは樹木によるタイル舗装面からの長波長放射の抑制と日射反射の遮蔽によるものと考えられる。

<ケース 3：樹木緑化・全体配置>

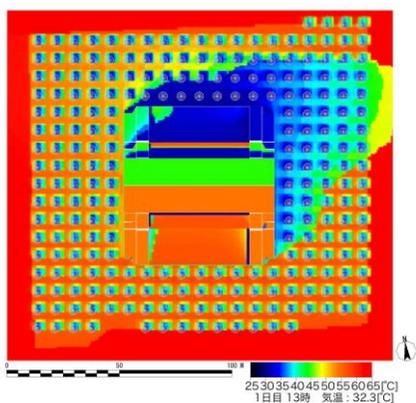
街区敷地内に着目すると、建物の南・西側では、街区内に均等に配置した樹木の日射遮蔽により地表面温度が気温相当の部分が点在しているが、



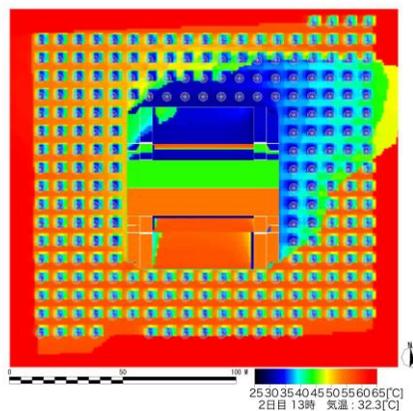
(ケース 1: 緑化なし)



(ケース 2: 樹木南西集中配置)



(ケース 3: 樹木均等配置)



(ケース 4: ケース 3+壁面緑化 50m)

図 5.27 表面温度分布平面図

ケース 2 と比較して樹木間の配置間隔が広いため、樹木の間では地表面温度が 50°C 以上の高温化した箇所も目立っている。建物の北～北東側については、建物の日影部分と樹木による日射遮蔽部分の重なりが多く、樹木による日射遮蔽の直接的な効果は確認できない。ケース 1 において確認した西側の建物直近から 15m ほどに点在していたガラス面の日射反射による高温部分については、ケース 2 には及ばないものの、樹木植栽の効果により低減されている。建物に着目すると、地面からの長波長放射と反射日射に

よる温度上昇部分についても、ケース 2 には及ばないが、地上から 5m 前後の範囲までに縮小している。

#### <ケース 4：樹木緑化・全体配置+壁面緑化・50m>

敷地に着目すると、建物の西側では、均等に配置された樹木により地表温度が気温相当の部分が点在し、樹木間において表面温度が 50℃以上の高温化した箇所も目立っているのはケース 3 と同様であるが、ケース 3 と比較して、建物壁直近から 15m 範囲の温度上昇は抑えられている。建物の南側でも同様にケース 3 と比較して、建物壁直近から 10m 範囲の温度上昇は抑えられている北、北東側については、建物の日影と樹木が重なる部分が多く、樹木単体の日射遮蔽効果はあまり確認できない。効果的な樹木配置という観点からは、ケース 3 と同様、この時間帯については、ある種無駄が生じている配置とも言える。とくに北側の樹木についてはほとんどの時間帯で建物の影になることから、熱環境対策上は、効果は高くない。建物に着目すると、壁面緑化を施した南、西側の地上から 50m 範囲の壁面は壁面緑化を施さなかった部分と比較して温度の上昇が緩やかで、気温+1～2℃の上昇となっている。この時間帯、高い温度上昇抑制効果を示している。

#### (2) MRT 分布

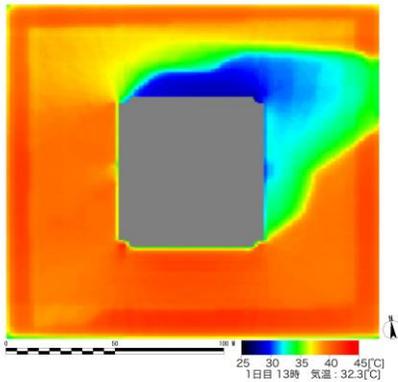
屋外空間における人体の熱的快適性の視点から、熱放射環境の評価指標として平均放射温度MRTを算出した。算出結果を図 5.28 に示す。暑熱環境が最も悪化する時間帯として、時刻は 13 時、高さは地上+1.5m である。  
<ケース 1：緑化なし>

対象地区周辺の道路上は軒並みMRTが高く、40℃にまで達している。敷地内では建物による日射遮蔽部分以外は全般にMRTが高く、40℃近い領域が多くを占めている。気温よりもMRTが5℃以上高い、悪化した熱放射環境が形成されていることが分かる。建物による日影部分に着目すると午前中に日射が照射していた東側よりも、常に日影を保っていた北側において、低いMRTの空間が多く形成されている。MRTが気温より2℃程度低い場所も見受けられる。

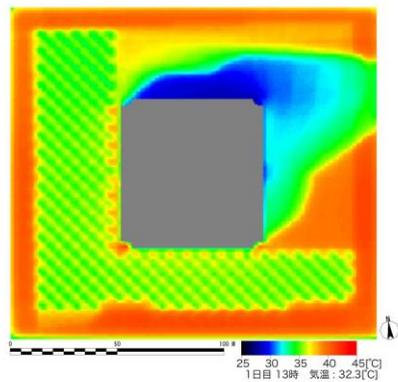
#### <ケース 2：樹木緑化・南西側配置>

街区内の樹木を植栽したエリアでは、MRTが35～36℃を示し、気温+3℃前後が大半を占めている。樹木が集中的に植栽されているため、MRTが37～38℃と気温よりも5℃程度高くなる地点が点在しているのみである。

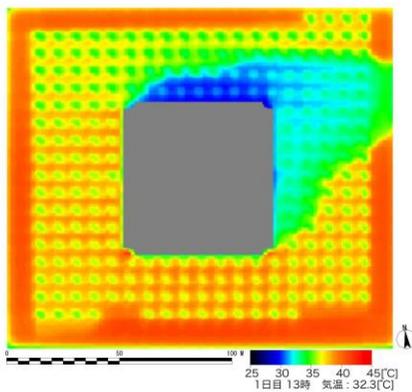
建物の北東側は、建物による日影の影響を受けて、ケース 1 と同様にMRTの高温化が抑制された空間が広がっている。建物の西側5mまでの範囲で38～39℃の高温域が見られるが、これは建物からの日射反射と長波放射



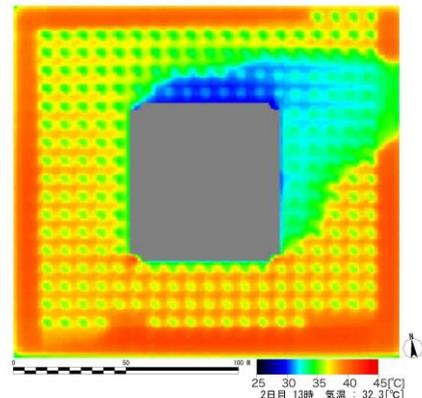
(ケース 1:緑化なし)



(ケース 2:樹木南西集中配置)



(ケース 3:樹木均等配置)



(ケース 4:ケース 3+壁面緑化 50m)

図 5.28 MRT の空間分布

の影響によるものと考えられる。街区全体としてみると、直達日射からの影響を受ける建物東側の一部を除いて、全体的に熱放射環境が悪化した空間が少なくなっている。

<ケース 3: 樹木緑化・全体配置>

敷地全般に MRT が相対的に低い地点が点在するが、樹木間隔が広い配置のため、樹木の間では、37~38℃と気温+5℃前後の部分も多く存在する。これは、樹冠下であっても、周辺の高温化した地表面からの熱放射の影響を受けるためである。また、建物の北側と東側では、建物による日射遮蔽

部分と樹木が重なり、樹木の日射遮蔽の直接的な効果が減じられているエリアが広がっている。

<ケース 4：樹木緑化・全体配置+壁面緑化・50m>

街区敷地全体でのMRTの分布の傾向についてみると、ケース 3 とは大差は見られないが、壁面緑化の効果により壁面から西側 15m までの範囲では樹木間においては 34~35℃の分布が認められ、約 3℃の低減が見られ、さらに 30m 範囲までの間では 1℃前後の低減空間が広がっており、樹木緑化に壁面緑化を行うことによる熱放射環境の改善が見られた。

以上、暑熱環境の最も悪化する時間帯において敷地全体の熱放射環境の観点から効果的であったのは、ケース 2 の南西側への樹木の集中配置の場合であり、敷地内の多くの領域でMRTの高温化が抑えられていた。また、壁面緑化を行うことで樹木緑化による日射遮蔽効果に比べると、その影響範囲は建物近傍に限定されるが、樹木緑化との組み合わせによる暑熱緩和効果が認められた。

### (3) H I P

対象地区全体が周辺環境にどの程度の熱的影響を与えるのかを、大気に与える顕熱負荷の指標H I Pを用いて評価した。H I Pがプラスの値の場合は、街区の全表面から大気側に顕熱を放出しているということであり、マイナスの値の場合は、大気側から顕熱を吸熱している（建物や地面に顕熱が蓄えられてゆく）ことを示している。ケース 1 から 4 のH I Pの日変化を図 5.29 に示す。なお、比較として街区敷地内には建築物は無い状態で全面がアスファルト舗装面のケースと、同じく街区敷地全面が芝生緑化のケースのH I Pもあわせて図中に記載した。

<ケース 1：緑化なし>

H I Pは、13時30分にピークが生じており、23.5℃である。これは、街区内全面をアスファルト舗装した場合のH I Pと比較して約 4.0℃低い数値であり、高温化が確認できる。この時間帯にピークが生じる理由は、地表面温度が高温化しているとともに、建物の西面にも日射が照射し始めることで、建物と地表面の両方で表面温度が高くなることによると考えられ、街区の全表面から大気への顕熱負荷量が大きいことが示された。午後から夕方にかけてH I Pは低下するが、建物と地表面の蓄熱の影響により夜間もH I Pは 0℃を下回らずに、2℃以上を維持している。すなわち、建物と地表面がタイル等の熱容量が大きい材料で構成されているため、一日中顕熱を放出している状況であることがわかる。

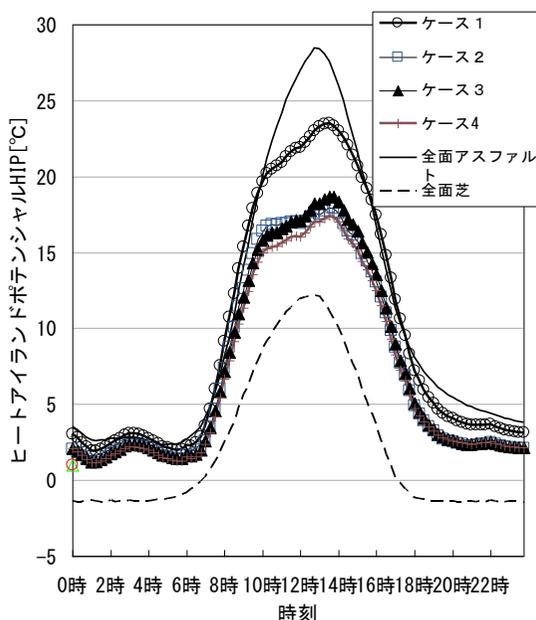


図 5.29 ヒートアイランドポテンシャルHIPの日変化

<ケース 2：南西側集中配置>

ケース 1 の緑化がない場合に比べてHIPが 18.0°Cを示し、5°C以上低下している。HIPのピーク値は、全ケースの中で最も低い。これは、この時間帯の大気に与える顕熱負荷の削減効果が最も高いことを示している。

しかしながら、敷地全面が芝生緑化のケースと比較すると5°C以上も高い。夜間もケース 1 等と比べてHIPは低く推移するが、日中、日射照射のあった建物と地面への蓄熱の影響により、HIPが0°Cを下回ることはない。

<ケース 3：全体配置>

ケース 2 と同様、全体の中ではHIPは低く推移した。HIPのピーク値は、ケース 2 と比べて約1°C高くなっている。これは、ケース 2 では樹木と建物の日影が大きく重ならず、地表面の温度が相対的に低い領域が広いのに対して、ケース 3 では、重複する空間が多いためと考えられる。一方、午前中の傾向は逆転しており、ケース 3 の方がHIPは約1°C程低くなっている。これは、午前中は、建物の陰が西側に伸びるため、ケース 2 の街区西側の緑化部分と建物の陰が重複するためと考えられる。夜間はケース 2 と同程度の値となっている。

<ケース 4：樹木緑化・全体配置+壁面緑化・50m>

樹木緑化に壁面緑化を行うことで、緑化された壁面の表面温度が低減することから、街区内の空地部分に樹木を均等に配置したケース 3 と比較して、日中は1℃前後低減し、ピーク値では、ケース 3 と比べて1.3℃低くなっている。夜間は、その差が深夜にかけて暫減し、0時にはその差はほとんどなくなっている。

以上の結果、街区から大気への顕熱負荷への影響として、日中のピーク値では街区南西側への樹木の集中配置が最も低い結果を得た。また、樹木緑化に壁面緑化を行うことによる建物の表面温度の低減による放射熱環境の改善効果とH I Pの低減効果を定量的に確認することができた。これらの知見は、今後建築敷地において顕熱による温熱負荷を軽減し、ヒートアイランド緩和を図るための緑化計画や設計に応用していくことが可能と考えられる。

## まとめ

東京都港区に実在する街区をモデルとして、樹木緑化と壁面緑化による熱環境改善効果を検討するため、実験・計測より得た基礎数値を入力し、熱収支より表面温度を算出してシミュレーションを行い、M R T、H I Pの温熱指標を用いて熱負荷を評価した結果、以下の知見を得た。

- (1) 表面温度について、13時の時点で街区内に樹木緑化を行った場合(ケース 2, 3)、日射の遮蔽効果により気温+5℃前後の部分が多く形成され、緑化なしの場合(ケース 1)と比較すると約 20℃近く表面温度は低減した。壁面緑化(ケース 4)については、緑化を施した壁面部分の表面温度は気温+1~2℃に抑えられ、壁面直近から 15m 付近までの地表面に対し、表面温度の低減効果が認められた。
- (2) M R Tについて、緑化なしの場合(ケース 1)では、13時の時点で気温よりも5℃以上高いエリアが広範囲に広がっており、熱放射環境の悪化が敷地全体で確認された。敷地全体の熱放射環境の観点から効果的であったのは、樹木を街区の南西側に集中配置した場合(ケース 2)であり、建物の日影の効果とあわせて敷地内の多くの領域でM R Tが気温程度となっていた。壁面緑化(ケース 4)については、熱放射環境への影響は樹木と比べて小さく、表面温度と同様に壁面直近から 15m 付近までに限定された。
- (3) H I Pについて、緑化により大きな顕熱負荷低減効果を示したのは樹木を街区南西側に集中配置した場合(ケース 2)で、日中のピーク時で緑化

なし(ケース 1)よりも 5°C以上低減していた。壁面緑化(ケース 4)は、樹木緑化を行った場合よりもさらに 1°C以上低減しており、樹木緑化ほどではないが街区内の顕熱負荷の削減に寄与することを定量的に確認することができた。

- (4) 樹木の配植の方法としては、街区の南西側に集中的に配置する方が街区内に均等に配置する場合よりも顕熱負荷の軽減に効果的であることが示された。また、壁面緑化を建物の南西面に施すことにより、樹木緑化ほどではないが相乗的な効果を確認できた。これらの知見は、今後温熱環境の負荷の軽減に資する建築敷地緑化の計画・設計に応用していくことが可能であると考えられる。

## 補 注

1. 法線面直達日射量の計算: Bouguer の式

$$J_{dn} = J_0 P^{\frac{1}{\sinh}}$$

2. 水平面天空日射量の計算: 永田の式

$$J_{SN} = J_0 (0.66 - 0.32 \sinh) \times \{0.5 + (0.4 - 0.3P) \sinh\} \sinh(1 - P^{\frac{1}{\sinh}})$$

ここで、 $J_{dn}$ : 法線面直達日射量 [ $W/m^2$ ],  $J_{SN}$ : 水平面天空日射量 [ $W/m^2$ ],  $J_0$ : 太陽定数 [ $W/m^2$ ],  $h$ : 太陽高度角 [°],  $P$ : 大気透過率

3. レイトレーシング法とは幾何光学的理論に基づき送信点から受信点へ到達する電波(レイ)を追跡することにより、伝搬損失(受信レベル)、遅延時間、到来方向を推定する手法であり、「分散レイトレーシング法」はこのレイを複数(多数)射出して光の反射の影響等を計算する手法である。

4. 全天の大気放射量の計算: Brunt の式

$$R_{La} = \varepsilon_s \sigma T_a^4 (a + b\sqrt{e})$$

$$\left( \begin{array}{l} R_{La} : \text{大気放射量 (全天)} \quad [W/m^2] \\ T_a : \text{気温} \quad [K] \\ \varepsilon_s : \text{表面の長波長放射率} \quad [-] \\ \sigma : \text{ステファンボルツマン定数} \quad [W/m^2K^4] \\ a, b : \text{Brunt 式における定数} \quad (a=0.52, b=0.065) \\ e : \text{地表付近の水蒸気圧} \quad [hPa] \end{array} \right.$$

5. 対流熱伝達率の計算:ユルゲスの式

$$\alpha_c = 5.8 + 3.9V(\text{平滑面})$$

$V$ : 風速[m/s] (街区内の代表値)

6. ルイス則は、熱伝達率と物質伝達の相似関係を仮定するものである。ルイス則を仮定することで、以下の式により、対流熱伝達率から物質移動係数を求めることができる。

$$0.83k = \alpha_c / C$$

$$\left[ \begin{array}{l} k : \text{物質移動係数 [kg/(m}^2\text{s(kg/kg}^*))\text{]} \\ \alpha_c : \text{対流熱伝達率 [W/m}^2\text{K]} \\ C : \text{湿り空気の比熱[J/(kg K)]} \end{array} \right]$$

7. 雑誌「新建築」1990年7月号 新建築社、「デジタル画像で見る日本の建築30年の歩み」日経BP社、トップリート投資法人平成19年度決算報告書より参照。

8. この地図の作成に当たっては、国土地理院長の承認（承認番号 平 19 総使，416号）を得て、同院発行の数値地図2500（空間データ基盤）を使用した。

9. 深夜1時から6時までは、順に28.7、28.8、28.7、28.5、28.4、28.4℃の設定である。

## 引用文献

- 1) 梅干野晁，浅輪貴史，高田真人，円井基史(2002) 土地利用と熱環境対策から見た都市街区におけるヒートアイランドポテンシャルの特徴，日本建築学会計画系論文集，第559号，63-70
- 2) 山村真司，梅干野晁，浅輪貴史(2002) 建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱放射環境の予測手法の開発，日本建築学会計画系論文集，第554号，85-92
- 3) 萩島理，谷本潤，片山忠久，大原健志(2001) 改良・建築-都市-土壌連成系(AUSSSM)モデルによる都市高温化要因の構造解析第1報モデルの理論構成および標準解，日本建築学会計画系論文集，第550号，79-86
- 4) 萩島理，谷本潤，片山忠久，大原健志(2002) 改良・建築-都市-土壌連成系(AUSSSM)モデルによる都市高温化要因の構造解析第2報数値実験による都市高温化要因の定量化，日本建築学会計画系論文集，第553号，91.128
- 5) 吉田伸治，大岡龍三，持田灯，富永禎秀，村上周三(2000) 樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討，日本建築学会計画系論文集，第536号，87-94
- 6) 吉田伸治，村上周三，持田灯，大岡龍三，富永禎秀，金相璣(2000) 対流・

- 放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析，日本建築学会計画系論文集，第 529 号，77-84
- 7) 萩島理，片山忠久，谷本潤，森竹千景，江副紀子(2000) 高さの異なる直方体模型群の周辺気流特性に関する風洞実験，日本建築学会計画系論文集，第 538 号，15-22
  - 8) 吉田伸治，村上周三，大岡龍三，原山和也(2000) 街区形状の変化が屋外風系と温熱環境に及ぼす影響の数値解析，第 16 回日本風工学シンポジウム 1.49-124
  - 9) 大黒雅之・村上周三・森川泰成・持田灯・足永靖信・大岡龍三・吉田伸治(2003) 住宅団地を対象とした各種屋外温熱環境改善対策の効に関する C F D 解析，日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)，621-622
  - 10) 梶島岳夫(1999) 乱流の数値シミュレーション，株式会社養賢堂，東京，255pp
  - 11) Hong Huang, Ryoza Ooka, Shinsuke Kato (2005) Urban thermal environment measurements and numerical simulation for an actual complex urban area covering a large district heating and cooling system in summer, Atmospheric Environment 39, 6362 -6375
  - 12) 村上周三(2000) C F D による建築・都市の環境設計工学，東京大学出版会，東京，443pp
  - 13) 佐々木澄・持田灯・吉野博(2001) 公園緑地からの冷気の流出とその熱的効果に関する C F D m 解析，第 15 回数値流体力学シンポジウム
  - 14) 沖中健，野島義照，小林達明，瀬戸裕直(1994) つる植物の被覆がコンクリー建物の壁面温度に及ぼす効果，千葉大学園芸学部学術報告第 48 号，125-134
  - 15) 廣川利男(1997)，構造物の耐風工学，東京電機大学出版局，東京，688pp
  - 16) A. P. Gagge, A. P. Fobolets, L. G. Bergland(1986) ASTANDARD-PREDICTIVE INDEX OF HUMAN RESPONSE TO THE THERMAL ENVIRONMENT, ASHRAE Transactions
  - 17) 日本機械学会(1986) 伝熱工学資料改訂第 4 版，丸善，東京，365pp.
  - 18) 梅干野晁・浅輪貴史・高田真人・円井基史(2002) 土地利用と熱環境対策からみた都市街区におけるヒートアイランドポテンシャルの特徴，日本建築学会計画系論文集，559: 63-70.
  - 19) 萩島理・片山忠久・谷本潤・森竹千景・江副紀子(2000) 高さの異なる直方体模型群の周辺気流特性に関する風洞実験，日本建築学会計画系論文集，第 538 号: 15-22
  - 20) 萩島理・谷本潤・片山忠久・大原健志(2001) 改良・建築-都市-土壌連成系(AUSSSM)モデルによる都市高温化要因の構造解析第 1 報モデルの理論構成

および標準解, 日本建築学会計画系論文集, 第550号: 79-86

- 21) 河田祐二・大岡龍三 (2001) 街路樹による暑熱環境緩和効果に関する研究  
街路樹のモデル化と日射低減効果の同定, 日本建築学会大会学術講演梗概  
集: 269-270
- 22) 河田祐二・吉田伸治・大岡龍三 (2002) 街路樹による暑熱環境緩和効果に関  
する研究(その2) 樹冠の光学的深さ, 葉面積密度の簡易推定方法の提案,  
日本建築学会大会学術講演梗概集: 961.1262
- 23) 下條正貴・吉田伸治・大岡龍三 (2003) 街路樹による暑熱環境緩和効果に関  
する研究 街路樹のモデル化と日射低減効果の同定, 日本建築学会大会学  
術講演梗概集: 269-270
- 24) 中井敦・吉田敦・大岡龍三 (2005) 街路樹による市街地の暑熱環境緩和効果  
に関する研究(その4) 樹木の成長, 樹種の違いが樹冠の葉面積密度, 光学的  
深さに及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集: 685-686
- 25) 鈴木弘孝 (2007) 壁面緑化による建築敷地・街区での温熱環境改善効果に関  
する研究, 建築研究資料 No. 106, 建築研究所: 93pp.
- 26) 鈴木弘孝・三坂育正・田代順孝 (2007) 蒸発効率を指標とした壁面緑化の蒸  
発特性, 日本造園学会誌ランドスケープ研究, 70(5): 401-406
- 27) 鈴木弘孝・阪田升・中山浩成・田代順孝 (2007) C F D解析を用いた建物緑  
化による温熱環境改善効果シミュレーション, 環境情報科学, 35(4): 54-65
- 28) 山村真司・梅干野晁・浅輪貴史 (2002) 建築外部空間デザインの設計支援を  
目的とした熱放射環境の予測手法の開発, 日本建築学会計画系論文集, 第  
554号: 85-92
- 29) 梅干野晁・浅輪貴史・中大窪千晶 (2004) 3D-CAD と屋外熱環境シミュレー  
ションを一体化した環境設計ツール, 日本建築学会技術報告集, 第 20 号:  
1951.128
- 30) 梅干野晁・浅輪貴史・高田真人・円井基史 (2002) 土地利用と熱環境対策か  
らみた都市街区におけるヒートアイランドポテンシャルの特徴, 日本建築学  
会計画系論文集, 第559号: 63-70
- 31) Kazuaki, N, Akira, H. and Takashi, A (2007) Development of support tool  
for outdoor thermal environmental design of urban/ uilding using  
numerical analysis, Building simulation 2007, Proceedings of the 10th  
International Building Performance Simulation Association Conference  
and Exhibition: 1813-1819
- 32) 下川宰司・片山忠久・林徹夫・谷本潤・何平・池沢紀幸 (1996) 樹木のある  
街路の熱環境予測 (その 5) 実測に基づく樹冠部熱特性に関する検討, 日本

建築学会学術講演会梗概集（近畿）：131.432

- 33) 梅干野晁・山下富大（1984）ツル植物による植栽スクリーンの日射遮へい効果一日射透過率と表面温 $^{\circ}\text{C}$ について，日本建築学会建築環境工学論文集，第6号：141.446
- 34) 梅干野晁・何江・堀口剛・王革（1994）芝生葉群層の熱収支特性に関する実験研究 屋上芝生植栽の熱環境調整効果，日本建築学会計画系論文集，第462号，31-39
- 35) 萩島理・谷本潤・高尾京子（2005）壁面緑化システムの熱収支構造に関する屋外観測，日本建築学会技術報告集，第22号：253-258
- 36) 鈴木弘孝・三坂育正・村野直康・田代順孝（2005）壁面緑化による建物外部の温熱環境改善効果に関する研究，ランドスケープ研究 68(5)：503-508

## 終章

本書では、各章での検証の結果、壁面緑化による建築・都市の温熱環境改善効果について実験計測に基づく検証の悔過、以下のような知見を得ることができた。

第1章では、屋上緑化の施工実績を有する企業と担当技術者を対象に行ったアンケート調査の結果から、1)民間企業等として壁面緑化の今後の市場性拡大への期待が高いこと、2)技術担当者の意識として壁面緑化に関する技術開発を推進していく上で、緑化による温熱環境改善効果の定量化と建設コストの縮減、維持管理の簡素・効率化等を課題と認識していること、また3)壁面緑化の6種類のタイプについて対応分析を行った結果、タイプの違いにより適用場所や普及可能性に認識の差異のあること、が明らかとなりました。また、民間企業等の意識として壁面緑化の今後の市場性拡大への期待が高いこと、技術担当者の意識として壁面緑化に関する技術開発を推進していく上で、緑化による温熱環境改善効果の定量化、建設コストの縮減、維持管理の簡素・効率化等を課題と認識していること、また壁面緑化の6種類のタイプについて対応分析を行った結果、適用場所や普及可能性に認識の差異のあることが明らかとなった。

第2章では、長波放射量と短波放射量の入射量と反射量を計測し、放射収支から壁面緑化の温熱環境改善効果を実験により検証した結果、輻射量(長波)では夜間は4~5%程コンクリート壁に対して緑化パネルの方が低減し、日中は植物の種類によって違いが見られた。反射日射(短波)では、常にコンクリート壁よりも緑化パネルが低く、最大ピーク時では62~65%低減された。MRTにより総合的な放射環境を評価したところ、緑化パネルでは約11度低減され、評価指標としての有効性が示唆された。

1)コンクリート壁面に対する緑化パネルの表面温度は、最大ピーク時には2~5℃低く、夜間では5~6℃程度低く推移した。2)コンクリート壁面に対する緑化パネルのアルベド低減率は、日中平均で約34%であった。放射率では、試験体の違いによる顕著な差異は見られなかった。3)壁面外部の放射環境を評価する指標として、計測した放射量からMRTを用いて算出して、比較したところ、コンクリート壁面に対して、緑化パネルでは最大ピーク時に約3℃、夜間では約2℃低減していた。

MRTについて長・短波放射計の計測値と黒球温度の計測値の二つの方法から算出して比較した結果、前者で計測した入射日射量を太陽高度で補正することにより、後者の数値と近似させることができ、緑化パネルではピーク時に約 11℃低減した。また、WBGT値ではピーク時で 1～2℃、SET\*値では終日 1～2℃低減し、各指標により緑化パネルの温熱環境改善効果を定量的に評価することができた。

季節の違いによる壁面緑化の温熱環境緩和効果を定量的に評価することを目的として、壁面緑化パネルを用いた実験による計測と評価を試みた結果、放射収支特性として入射日射量が 8 月では 2 月の約 1/2 に低減し、緑化パネル試験体では日射反射率(アルベド)がコンクリート壁の 1/4～1/3 に低減していた。

また、打ち放しコンクリートの壁面との比較による放射収支を計測した結果、1)コンクリート壁面に対する緑化パネルの表面温度は、最大ピーク時には 2～5℃低く、夜間では 5～6℃程度低く推移した。2)コンクリート壁面に対する緑化パネルのアルベド低減率は、日中平均で約 34%であった。放射率では、試験体の違いによる顕著な差異は見られなかった。3)壁面外部の放射環境を評価する指標として、計測した放射量からMRTを用いて算出して、比較したところ、コンクリート壁面に対して、緑化パネルでは最大ピーク時に約 3℃、夜間では約 2℃低減していた。

第 3 章では。壁面緑化植物の蒸散作用による潜熱消費による建物周辺の温熱環境改善効果を定量的に明らかにするために、壁面緑化植物からの蒸散量を計測するとともに、壁体への熱の伝導、対流、蒸発散による熱収支から、壁面緑化の温熱環境改善効果を実験計測値を下に検証した。

測定の結果、プランター型の実験において、土壌蒸発量を差し引いたヘデラカナリエンスの重量法から推定される日蒸散量は、緑化部分の垂直面積あたり 0.6mm 程度であった。また、日中における蒸散による潜熱フラックスは、正味放射量の約 25%程度であり、この分が顕熱や伝導熱の低減に寄与し、周辺暑熱環境緩和に貢献できるものと期待できる。

次に放射収支で検討した同じパネル型の緑化資材を使用して、緑化植物からの蒸発のしやすさを示すしすうの効果を数値シミュレーションする際の熱収支パラメータとなる蒸発効率を導出した。計測の結果より、1)対流熱伝達率および物質伝達率は、風速との相関が強く、風速の関数として導出式を得た。2)蒸発効率は、計測期間での平均値としてヘデラヘリックスでは 0.25、アメリカツルマサキでは 0.26 を示した。

また、夏期の真夏日において、1)ピートモスを培土とするパネル型の緑化材からの蒸発散量は一日当たり約4.1kg/m<sup>2</sup>(4.1mm)で、このうち植物からの蒸散量は約2.4kg/m<sup>2</sup>(2.4mm)であり、緑化材からの蒸発散量の約60%を占めてた。2)潜熱フラックスと正味放射量との間には正の相関が認められ、緑化材からの蒸発散量による潜熱フラックスは正味放射量の増加分の約60%を示した。さらに3)実験計測値から緑化材からの潜熱フラックスを算出し、熱収支の解析により、壁面緑化による外部温熱環境への顕熱低減効果を定量的に評価できることを裏付けることができた。

次に、パネルからの蒸発散量を算出できる簡易推計式を導出するとともに、パネル面での熱収支を検討した結果、簡易推計式による蒸発散量の推計値は、実測値に近似し、整合性の良いことを確認した。推計値は顕熱フラックスとSAT計の計測値を基に熱収支により算出した潜熱フラックスの数値ともよく整合した。本研究での推計方法と熱収支からの潜熱フラックスの算出し、壁面緑化において蒸発散の及ぼす温熱環境改善効果を定量的に評価できることが裏付けられた。

第4章では、グリーンカーテンを設置した場合と設置しない場合のカーテンの裏面とガラス面の表面温度の違いを計測し、屋内気温への負荷低減について、検証を行った。検証の結果、1)グリーンカーテンの裏面温度とカーテンなしの場合のガラス表面温度との比較では、ピーク時には約4℃の差が生じ、ガラス面の表面温度ではカーテンによりピーク時には6℃低減していた。2)表面温度の低減により、カーテンを設置した場合の屋内気温もピーク時で2℃近く低減していた。また、3)入射日射量は、カーテンの設置により、約8割低減し、屋内照度は1/3に低減したが、教室内の作業には支障のない程度の照度は確保できていた。

計測データを基に8月の真夏日3日間を選定して解析を行った結果、1)屋外の風速については、カーテンの裏側(建物側)で表側(屋外側)と比して約40%程低減が見られ、両者の間には強い正の相関が認められた。2)MRT(平均放射温度)では、カーテンありの場合にはカーテンなしの場合に比して、約30℃(40%)近く低減していた。3)WBGT(湿球黒球温度)では、グリーンカーテン設置により日中ピーク時に0.7~1.3℃の低減が確認されたが、早朝にかけては逆にカーテンありの方がなしの場合よりも、0.7~0.8℃上回る傾向が見られた。

次に、体感温熱指標であるSET\*とPMVを算出して、比較検証を行った結果、1)正味放射量ではカーテンを設置した場合は設置しない場合に比

べると、20%程度に低減していた。2) S E T\*値では、日中はピーク時で 1～2℃低減する一方、夜間の時間帯では最大で 3℃前後上昇が見られた。3) P M V 値では、カーテンを設置した場合でも、「暑い」を示す+3 評価となり、顕著な改善は見られなかった。以上により、S E T\*値による体感温度の差は認められたものの、P M V 値での温冷感の人が「暑い」と感じる範囲にとどまり、暑熱環境下での P M V 値の屋外への適用には課題を残した。

第 5 章では、ヒートアイランド現象が最も顕著に現れている東京都都心部の実在の街区と地区をケーススタディとして、第 2 章と第 3 章で行った実験より得られた壁面緑化の日射反射率、放射率、蒸発効率等の基礎的数値を用いて、建物の敷地内や壁面緑化の違いによる街区内部での温熱環境改善効果についてシミュレーション解析を行った。

第 1 節では、千代田区大手町にある実在の街区をモデルとして C F D (計算流体力学)解析を行った結果、1) M R T (平均放射温度)・S E T\* (体感温度指標) の指標により定量的評価を行った。解析の結果、対象街区での緑化なし(ケース 1)に比べて、地表面・屋上の緑化と壁面緑化を組み合わせた場合、街区中心部で気温では街区中心部で最大で約 4℃の低減、湿度では最大 16%の上昇が見られ、M R T では最大約 4.5℃、S E T\* では最大 2℃低下し、建物緑化・壁面緑化による街区内部での温熱環境の改善効果が見られた。また、2) 実在街区での温度・湿度の実測値との比較から、数値結果は概ね整合し、数値計算の妥当性が示唆された。

第 2 節では、東京都千代田区の霞が関地区をモデルに、建築敷地内の地上面・屋上や壁面等への緑化条件の相異が地区内の温熱環境改善にどのように寄与するかについて C F D 解析の手法を用いてシミュレーションを行った。解析の結果、1) 地区内部での顕熱総負荷量で見ると、緑化なしと比較して地上面の芝生緑化と屋上緑化を行うと 24%低減し、加えて 2) 建物南・西面を壁面緑化した場合にはさらに 15 %の低減がみられ、建築敷地内の緑化の違いによる温熱効果を定量的に把握することができた。

第 3 節では、東京都港区に高層ビルと公開空地を有する実在街区をモデルとして、樹木なしの場合(ケース 1)に対して、同じ樹木本数の配置方法を街区の南西部に集中的に配植した場合(ケース 2)と空地部分に均一に配植した場合(ケース 3)、ケース 3 に加え建物南西面を地上 50m まで壁面緑化した場合(ケース 4)についてシミュレーションを行い、街区内部での夏期の温熱負荷の違いを表面温度、M R T (平均放射温度)、H I P (ヒートアイランドポテンシャル)について算出し、比較検討した。解析の結果、1) ケース 1 に対して、

ケース3ではピーク時でHIPが約5℃低減し、ケース2ではさらに約1℃の低減が見られ、街区の南西部へ樹木を集中的に植栽する方法のピーク時における顕熱負荷低減への有効性が示された。また、2) 樹木緑化に壁面緑化を行うことでケース3よりもさらにHIPは1℃低減し、樹木緑化との相乗的な負荷低減効果を定量的に評価することができ、街区レベルでの熱負荷の少ない緑化の計画・設計への応用可能性が示唆された。

壁面緑化による温熱環境改善効果として、植物の蒸発散に伴う潜熱消費により顕熱を抑制する効果を緑化植物の実測値を基に明らかにしていくことは、壁面緑化の温熱環境改善効果を定量的に評価し、検証していく上において計算結果の基礎数値として意義のあることと思われる。実測値から得られた蒸発効率をパラメータとして使用することにより、壁面緑化の温熱環境改善効果をシミュレーション解析する場合等において、より実証性の高い数値評価が可能と考えられるからである。

# **Study on the Effects of Improving the Thermal Environment of the Building Site and Urban District by Wall Greening**

## **— Summary —**

### **Introduction**

On the background of this study, we have organized the trends and positions of national measures for rooftop and wall greening, which are regarded as important measures for mitigating the heat island phenomenon, and the market trends of rooftop greening and wall greening, and promotion policies of building greening by local governments. Examples of subsidy measures for this were taken up.

Based on the recent policies for mitigating the heat-island phenomenon, this study quantitatively assessed the effects of wall greening on the thermal environment in an urban block and district. We measured the radiation properties, evapotranspiration, and heat balance of wall greening systems, and conducted simulation analyses of the thermal environment by modeling the actual district and using the measured values.

### **Chapter 1 . The Trend and Tasks of the Technology Development on the Wall Greening**

Wall greening is attracting increased attention as an effective method for mitigating the environmental loads in urban areas and thus preventing the heat island phenomenon and global warming. The purpose of this study is to obtain the fundamental data needed for the examination of the direction of technology development for the future promotion of wall greening in urban areas and the object and range to be mainly grappled with in the field of research and development. The investigation was conducted by a questionnaire survey on 119 private companies which are grappling with the greening, development and utilization of rooftop spaces, in order to grasp the consciousness of those companies and their technical staffs about the market of wall greening,

and the possibility of propagation, and sort out the technological tasks. The survey revealed that (1) the companies expect the wall greening market to expand, (2) the technical staffs recognize that the important thing in the technology development for wall greening is the quantification of environmental improvement effects the reduction of the costs of constructing and maintaining the green walls, and (3) the technical staffs also recognize the differ of the sites on which wall greening can be applied and the possibility of propagation among 6 types of wall greening ( ①utilization of natural ground as the base of plants, ②utilization of flames for support as well as natural ground base, ③utilization of planters on each story, ④utilization of planters with flames for support on each story, ⑤installation of greening panels, ⑥utilization of concrete blocks for greening).

## **Chapter 2 . Thermal Environment Improvement Effect from the viewpoint of Radiation Balance**

### **2.1 The Research on the Improvement Effect of Thermal Environment by the Wall Greening**

In order to quantify the effect of the wall greening to improve the thermal environment of the outside of the building, the outdoor experiment was done using greening panels. For the walls covered with the greening panels of different type and the concrete wall painted white, the quantity of radiation was measured by the reflected solar radiation and the long wave radiation. Then MRT was calculated from the result of the measurement and the radiation environment was evaluated. As the result, from the measurement of surface temperature, the difference of the greening panels and concrete wall with white coat is not so significant in daytime. And for the reflected solar radiation, the figure at the wall covered with greening panels were constantly less than those at the concrete wall. At the maximum 62-65 % reduction were observed. Evaluating the comprehensive radiation environment by MRT , MRT was about 11°C reduced by the greening panels. The effectiveness of MRT as the evaluation index was suggested.

## **2.2 Comparison with Concrete (exposed) Wall Surface**

Experiments using wall green panels for the purpose of contributing to the development and dissemination of technology for the quantitative evaluation of the effects of wall greening on thermal environment mitigation of building exterior spaces revealed the following findings: 1) the surface temperature of a green wall was 2–5°C lower at the maximum peak and 5–6°C lower than concrete walls during the night. 2) The rate of albedo reduction by the greening panel on the concrete wall surface was, on average, approximately 34% during the day. No significant difference in emissivity was observed due to the difference in the test specimens. 3) The radiation of the green wall measured using MRT of the green wall, as an index to evaluate the radiation environment outside the wall surface, was compared. The temperature was approximately 2°C lower than the concrete wall during the night.

## **2.3 Estimating the Effects of Wall Greening on Improving the Thermal Environment using the Indexes of WBGT and SET\***

In this study, the temperature control effects of wall greening, which is attracting attention as a countermeasure against the heat island phenomenon in cities, were quantitatively assessed by measuring the temperatures of green panels and concrete walls (painted white) using MRT, WBGT, and SET\* as thermal indices. Comparison of MRT values calculated from head/short-wave radiometer measurements and blackball temperatures showed that the former value could be approximated to the latter by correcting the incident solar radiation monitored by the radiometer by solar altitude. The resultant MRT showed that the green panels lowered the temperature by about 11°C at peak hours. WBGT values showed drops of 1 to 2°C at peak hours, and SET\* values showed drops of 1 to 2°C throughout the day. Thus, these indices were effective for quantitatively assessing the temperature-reducing effects of green panels.

## **2.4 Comparing the Effects of Wall Greening on Improving the Thermal Environment in Different Seasons**

For the purpose of this study, in order to quantitatively evaluate the thermal environment mitigation effect of wall greening due to seasonal differences, we attempted to perform measurement and evaluation in experiments using wall greening panels. As a result, the amount of incident solar radiation was reduced to approximately half that of February in August, and the solar reflectance (albedo) of the green panel was reduced one-quarter to one-third of that of a concrete wall. In addition, as a characteristic of heat balance, it was shown that the latent heat flux is approximately 20% of the incident solar radiation in February, which is lower than the sensible heat flux. In contrast, in August, the latent heat flux is  $\geq 40\%$  higher than the sensible heat flux.

### **Chapter 3 . Thermal Environment Improvement Effect from the Viewpoint of Heat Balance**

#### **3.1 The Study of Cooling Effects for Thermal Environment by Transpiration of Wall Greening Plants**

This study aimed to quantitatively evaluate the effects of thermal environment improvement by transpiration of wall-greening. *Hedera canariensis*, which are commonly used for greening walls, were planted in planters, and their transpiration rates were monitored by weight measurements. As results of experiments, amounts of transpiration value a day is about 0.6mm and the rate of latent heat flux by transpiration to net radiation is about 25%. These results show the latent heat consumption of transpiration at greening system to prevent increase sensible heat and cooling load.

#### **3.2 Estimation of the effects on the thermal environment for pannel-type wall greening system by the evapotranspiration measurement**

This study aimed to quantitatively assess the effects of wall greening systems in mitigating the thermal environment by measuring the evapo-transpiration from wall panels on which *Eurynomys fortunei* was planted, and calculating the latent heat flux from the

evapotranspiration measurements. The analysis showed that 1) the evapotranspiration from the panels, which used peat moss as the growing media, was about  $4.1\text{kg/m}^2(4.1\text{mm})$ , the transpiration from the plants was about  $2.4\text{ kg/m}^2(2.4\text{mm})$ , accounting for 60% of the evapotranspiration, and 2) there was a positive correlation between the latent heat flux and the net emission, and the latent heat flux from the panels was about 60% of the increment in net emission. The study suggests that the effects of wall greening in controlling latent heat and mitigating the thermal environment can be quantitatively assessed by calculating the latent heat flux of panels from measurements and analyzing the heat balance.

### **3.3 Estimation of evapotranspiration and heat budget of wall greening panels**

The purpose of this report is to obtain basic data to quantitatively evaluate the effect of wall greening on the improvement of the thermal environment. The latent heat flux was calculated from the shortwave balance and the heat balance, such as the sensible heat flux calculated using a SAT meter, and its characteristics were examined. As a result, the latent heat flux calculated from the heat balance was found to account for approximately 70% of the net evapotranspiration, and it was possible to quantitatively grasp the effect of improving the thermal environment of wall greening by suppressing the sensible heat flux. A simple estimation formula for the amount of evapotranspiration was derived using the amount of solar radiation as the explanatory variable.

### **3.4 Evaluation of Transpiration Properties of Wall Greening using Evaporation Efficiency Rate as an Index**

In this study, the evaporation efficiency, which is a heat balance parameter necessary for numerical simulation of greening effects, was derived in order to quantitatively evaluate the effects of wall greening panels on improving the thermal environment. The efficiency was determined by monitoring the amount of evapotranspiration from wall greening panels on which either *Hedera helix* or *Euonymus fortunei* was planted, calculating the sensible heat-flux from SAT measurements,

and determining the convective heat transfer rate, material transfer rate and the difference between the measured and calculated amounts of evapotranspiration. The results showed that: 1) both the convection heat transfer rate and material transfer rate were highly correlated to wind speed, and the derived equations for calculating the rates were functions of wind speed, 2) the mean evaporation efficiency for the monitoring period was 0.25 for *Hedera helix* and 0.26 for *Euonymus fortunei*, and 3) the amounts of evaporation from the wall greening panels tested were 4 to 5 mm for both plant species and showed correlations to daily cumulative irradiation.

## **Chapter 4. The Effects of Green Curtain on Improving the Thermal Environment**

### **4.1 The Effects of Green Curtain on Improving the Thermal Environment Estimating Surface Temperature and Solar Radiation**

The purpose of this study is to evaluate the difference of the thermal environment at the outdoor balcony with or without the green curtain, which could be expected to come into wide as a measure of the heat island phenomenon. The actual experiment was carried out for the two classrooms almost as same as the direction, floor and area, and we analyzed measurement data, selecting three days of “Manatsubi” in August, 2013. As a result, the surface temperature of the back side of the green curtain reduced about 4°C, compared with it of the high reflected glass. The difference of surface temperature between with and without the green curtain indicated about 6°C. Because of decrease of the surface temperature, the indoor temperature was also reduced about 2°C with the green curtain, compared with no curtain. The incident solar radiation reduced more than 80%, and the indoor illuminance reduced more than 30%, at the peak in the daytime with green curtain, compared with no curtain, but the recommended level of illuminance could be maintained in most of daytime.

## **4.2 Estimating the Effects of Green Curtain on Improving the Thermal Environment using the Indices of MRT and WBGT**

The purpose of this study is to evaluate the difference of the thermal environment at the outdoor balcony, such as mansions and so on, with or without the green curtain, which could be expected to come into wide as a measure of the heat island phenomenon in the near future. The actual experiment was carried out for the two classrooms almost as same as the direction, floor and area, and we analyzed measurement data, selecting three days of “Manatsubi” in August. As a result, the velocity of the wind reduced 40% behind the green curtain, compared with in front of it, and both values collated strongly. The value of MRT also was reduced about 30°C (40 %) with green curtain, compared with no curtain. The value of WBGT reduced 0.7~1.3°C at the peak in the daytime with green curtain, compared with no curtain, but the former showed tendency to be 0.7~0.8°C more over than the later from midnight to early morning. It was suggested that using the thermal indices of MRT and WBGT, we could evaluate the improving effect of the outdoor thermal environment behind the green curtain.

## **4.3 Estimating the effects of Green Curtain on improving the Thermal Environment at the Outdoor Balcony using the Indices of SET\* and PMV**

This study aims to evaluate the cooling effect of green curtain at the outdoor balcony of mansion which is expected to use as the space of installing vertical green in the near future. We conducted the experiments which had been measured thermal environment of the balconies in university’s building at the situation of with or without the green curtain. At the result, when installing green curtain, the solar transmittance indicated 0.17 and net radiation reduced about 70%. Furthermore, we calculated the indices of SET\* and PMV from measuring data. The value of SET\* was reduced 1.8 °C~1.9 °C at the peak in the daytime with green curtain, compared with no green curtain. Otherwise, the value of SET\* was increased under 2 °C from 6:00 p.m.to 2:00 a.m. with Green Curtain. The value of PMV was rising beyond +3 with no green curtain according to increasing the mean radiant

temperature, and the value of PMV indicated about +3 with green curtain. There is a difference of the value of PMV between these cases, however the biggest value of PMV which human can feel is +3, so that at the value of PMV it is evaluated both cases are same.

## **Chapter 5 . Thermal Environment Simulation for the influence of some types of building greening in a urban block and district**

### **5.1 Numerical analysis for the influence of some types of building greening on temperature and humidity fields in urban block**

This study aims to grasp the effect of the thermal environment improvement by building greening, which is as one of measures to a heat island phenomenon in a city, it was evaluated quantitatively by using indexes of MRT(Mean Radiant Temperature) and SET\*(Standard Effective Temperature) , being applied CFD(Computational Fluid Dynamics) method with coupled simulation of convection, radiation and moisture. As a result, compared with the case of no planting, MRT could reduce 4.5°C and SET\* could also reduce 2°C as the maximum, in the case of the wall greening combined with the ground surface and the roof top greening, thermal improvement effect could be recognized in the model block. Temperature and humidity obtained from the numerical simulation showed good agreement with results of the field experiments.

### **5.2 Simulation analysis of the influences of different building greening methods on sensible heat flux load in an urban district**

This study's purpose is to clarify the effects of differences between greening conditions on building sites, roof-tops and walls of buildings on the thermal environment using CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis, and with the Kasumigaseki district in Chiyoda-ku, Tokyo as the model. As a result, the quantity of total sensible heat flux, was 24% lower in the case of lawn greening and roof-top greening in the district than in the case without greening. In addition, in the case of wall

greening at the south and west side of each building, it was lowered by 15%. In this way, the thermal effect of greening of the building site in the actual district could be grasped quantitatively.

### **5.3 Thermal Environment Simulation in the Different Cases of Tree Planting Method and Combining with Wall Greening in an Actual Block**

In this study, using an existing block in the center of Tokyo as a model, we tried to simulate 4 cases as follows: a block without trees (Case 1); a block in which the trees were placed in the southwestern part of the block (Case 2); a block in which the same number of trees as Case 1 were equally planted in the open space of the block (Case 3); and a block with the conditions of Case 3 in which the southwestern surface of the building was additionally greened to a height of 50 m above the ground (Case 4). The difference in the heat flux load in the block in summertime, was calculated and compared based on the surface temperature, mean radiant temperature (MRT) and heat island potential (HIP). The analysis revealed that—in comparison to Case 1—the HIP value decreased by approximately 5° p at the peak time in Case 3, and further decreased by approximately 1° p in Case 2. The effectiveness of the method, in which trees were intensively planted in the southwestern part of the block, in reducing the sensible heat flux during peak hours was demonstrated. In addition, by performing wall greening in addition to tree planting (Case 4), the HIP is further reduced by 1° in comparison to Case 3. The synergistic load reduction effect with tree planting and wall greening as well as the heat load at the block level could be quantitatively evaluated. It was suggested that these findings could be applied to the planning and design of greening that achieves a greater reduction of heat load.

## あとがき

本書は、筆者が 2008 年度以降に関係学会や筆者が勤務している城西国際大学の紀要に投稿した論文等を基に全体を再構成し、研究成果として一冊に取りまとめたものである。筆者は、これまで主に都心部での公開空地の緑化の実態や建物敷地の屋上・壁面等の緑化によるヒートアイランド現象の緩和に資する暑熱環境改善効果について、実験計測により実証的かつ定量的な評価を試みてきた。また屋上緑化に比べて研究ストックの乏しい壁面緑化による屋外側への環境負荷軽減効果については、実験計測により得られた数値や緒元を基に都市の街区レベルや地区レベルでのシミュレーションを試みることで、今後のヒートアイランド現象の緩和に寄与し、暑熱緩和効果を有効に機能させていくための緑化設計への適用可能性を視野に入れた検討を進めてきた。

本書を編集するに当たって、各章において引用した論文、技術報告は、以下のとおりである。

### 第一章

- ・鈴木弘孝・小島隆矢・嶋田俊平・野島義照・田代順孝（2005）壁面緑化に関する技術開発の動向と課題，日本緑化工学会誌 31(2)，247-259
- ・鈴木弘孝（2006）敷地・街区を対象とした壁面緑化によるにおける温熱環境改善効果に関する研究，平成 18 年度千葉大学大学院自然科学研究科学学位論文，182pp.

### 第二章

- ・鈴木弘孝・三坂育正・村野直康・田代順孝（2005）壁面緑化による建物外部の温熱環境改善効果に関する研究，ランドスケープ研究 68(5)，503-508
- ・鈴木弘孝・三坂育正・水谷敦司・田代順孝（2007）壁面緑化パネルを用いた温熱環境改善効果の評価・計測技術，日本造園学会技術報告集 2007，90-95
- ・鈴木弘孝・三坂育正・水谷敦司・田代順孝（2006）W B G T，S E T \*による壁面緑化の温熱環境改善効果の評価，ランドスケープ研究 69(5)，441-446
- ・鈴木弘孝・三坂育正（2008）季節の違いによる壁面緑化の温熱環境改善効果，日本緑化工学会誌 33(4) 技術報告，587-595

### 第三章

- ・三坂育正・鈴木弘孝・藤崎健一郎・成田健一・田代順孝（2005）壁面緑化植物の蒸散作用による温熱環境改善効果，環境情報科学論文集 No. 19，113-116
- ・鈴木弘孝・三坂育正・田代順孝（2007）蒸発効率を指標とした壁面緑化の蒸発特性，ランドスケープ研究 70(5)，401-406
- ・鈴木弘孝・三坂育正・田代順孝（2006）蒸発散量の計測によるパネル型壁面緑化の温熱環境改善効果，日本緑化工学会誌 32(1)，80-85
- ・鈴木弘孝・三坂育正・本條 毅・田代順孝（2006）パネル型壁面緑化における蒸発散量の推計と熱収支の評価，環境情報科学論文集 No. 20，205-210

### 第四章

- ・鈴木弘孝・加藤真司・藤田茂（2016）表面温度と日射量から見たグリーンカーテンの温熱環境改善効果，ランドスケープ研究 79(5)，537-542
- ・鈴木弘孝・加藤真司・藤田茂（2015）MRT, WBGT によるグリーンカーテンの温熱環境改善効果の評価，ランドスケープ研究 78(5)，505-510
- ・鈴木弘孝・加藤真司・桑沢保夫・藤田茂（2015）SET\*, PMV を用いたバルコニー部における緑のカーテン の温熱環境改善効果，日本緑化工学会誌 41(1)，175-180

### 第五章

- ・鈴木弘孝・阪田升・中山浩成・田代順孝（2007）C F D解析を用いた建物緑化による温熱環境改善効果シミュレーション，環境情報科学 35(4)，54-65
- ・鈴木弘孝・中山浩成・田代順孝（2007）建物緑化の違いが街区内の気温と湿度の分布に与える影響に関する数値解析，日本緑化工学会誌 33(1)，158-163
- ・鈴木弘孝・吉川淳一郎（2008）建築敷地緑化の違いが実在地区内の顕熱負荷に与える影響に関するシミュレーション解析，日本緑化工学会誌 34(1)，97-102
- ・鈴木弘孝（2008）実在街区内での樹木配置・壁面緑化の違いによる温熱環境シミュレーション，日本緑化工学会誌 34(2) 技術報告，399-408

上記の学術論文等の関係学会への投稿に際して，共同執筆者をはじめ，査読いただいた委員の先生方，その他多くの方々のご指導とご助言，ご協力をいただいた。千葉大学名誉教授の田代順孝氏には，筆者が学位論文を執筆するための研究計画と学会への論文投稿に当たり，きめ細かなご指導をいただいた。竹中技術研究所の三坂育成氏（現日本工業大学教授）には，建築環境における放射収支と熱収支からの本研究へのアプローチと方法論について，ご指導とご協力

をいただいた。野島義輝(元建築研究所都市防災対策室長)からは、氏が建築研究所勤務時代にまとめられた壁面緑化に関する研究蓄積とその発展の方向性について丁寧に解説いただくとともに、第一章の元となるアンケート調査において多大のご協力をいただいた。(株)エーイーエスの村野直康氏、水谷敦司氏には実験装置の設置と計測、データの収集に際して、多大のご協力をいただいた。(有)緑花技研代表取締役の藤田茂氏、元建築研究所上席研究員の加藤真司氏には、緑のカーテンの設置と計測、データの解析に際して、多大のご協力をいただいた。また、同カーテンの温熱効果に関する研究では、科学技術研究交付金の助成を得て、実施させていただいた。

その他、多くの方々のご支援とご助言をいただき、関係学会への論文の掲載を継続することで、筆者が行った壁面緑化に関する一連の研究を継続して行うことができたことを、こころからお礼申し上げます。

本書が、今後の持続可能な都市環境の形成を図るために、ヒートアイランド現象の緩和や気候危機に対して、壁面緑化を含む総合的な都市緑化対策の回心を図る上において、その一助となれば本望である。

令和 4 年 11 月 1 日

鈴木 弘孝

## 鈴木 弘孝 プロフィール

**資格：** 博士（農学）・技術士（建設部門；都市及び地方計画）

**専門分野：** 緑地計画・緑地政策・都市緑化・環境デザイン

**主な業績：** 環境情報科学センター学術論文賞・日本造園学会学術論文奨励賞  
日本緑化工学会論文賞

**主な著書：** 『緑と地域計画Ⅱ』（共著，古今書院，2011）・『緩衝緑地整備における事業効果分析と樹林構造の評価』（単著，建築研究所，2008）・『壁面緑化による建築敷地・街区での温熱環境改善効果に関する研究』（単著，建築研究所，2007）・『市民ランドスケープの展開』（共著，環境コミュニケーションズ，2006）・『市民ランドスケープの創造』（共著，公害対策技術同友会，1996）・『造園の事典』（共著，朝倉書店，1995）・『造園施工管理技術編』（共著，（社）日本公園緑地協会，1995）・『都市公園におけるオートキャンプ場計画指針』（共著，（社）日本公園緑地協会，1994）

**社会貢献：** 大網白里市環境審議会会長・東金他三市町清掃組合新ごみ処理施設用地検討委員会委員長・茂原市まちづくり条例策定協議会委員・環境情報科学論文集委員会委員・日本緑化工学会論文集委員会幹事・国土交通省公園緑化技術会議委員

**学位論文：** 「敷地・街区を対象とした壁面緑化による温熱環境改善効果に関する研究」（2006）千葉大学大学院自然科学研究科（人間環境デザイン科学専攻）

**略 歴：** 1979 千葉大学大学院園芸学研究科（修士課程）修了  
1979 建設省（現 国土交通省）入省  
1988 財国際花と緑の博覧会協会 政府出展課長  
1990 建設省九州地方建設局 国営海の中道海浜公園工事事務所長  
1993 建設省都市局公園緑地課 課長補佐  
1996 建設省北陸地方建設局 国営越後丘陵公園工事事務所長  
1998 環境事業団緑地事業部 緑地公園課長  
2001 財2005年日本博覧会協会 会場整備グループ長  
2002 建築研究所住宅・都市研究グループ 上席研究員  
2008 国土交通省 退官  
2008 財国際花と緑の博覧会記念協会 企画部長兼事業部長  
2010 城西国際大学 環境社会学部教授  
2013 城西国際大学 環境社会学部長  
2008 城西国際大学 退職  
2019 千葉大学園芸学部キャリアサポート室キャリアアドバイザー  
現在に至る



