

(千葉大学学位申請論文)

積雪地域における連棟ハウスの
融雪システムに関する研究

2006年7月

古野伸典

目 次

第 1 章 緒論	3
第 2 章 温風送風式融雪システムの特徴と課題	
第 1 節 温風送風式融雪システムの構成と特徴	6
1. 温風送風式融雪システムの具体的構成	
2. 温風送風式融雪システムの特徴・優位性	
第 2 節 生産現場における設置事例と課題	11
1. 山形県長井市および鶴岡市の設置事例	
2. 山形県寒河江市の設置事例	
3. 山形県金山町の設置事例	
4. 山形県新庄市の設置事例	
5. 温風送風式融雪システムの課題	
第 3 章 温風送風式融雪システムの能力評価	19
第 1 節 送風方式が融雪能力に及ぼす影響	
はじめに	19
材料および方法	20
1. 連棟ハウスおよび送風方式の概要	
2. 融雪能力の評価	
結果	24
1. 各送風方式の環境条件	
2. 融雪能力	
考察	27
第 2 節 最大融雪能力の推定と能力向上のための試算	
はじめに	31
材料および方法	32
1. 連棟ハウスおよび融雪システムの概要	
2. 屋外実験による融雪量と降雪量の経時的変化の評価	
3. 融雪量推定のための数値計算の概要	
4. 融雪システム稼働中の環境条件の測定	
結果	37

1. 融雪量の実測値と降雪量の推移	
2. 融雪システム稼働中の環境条件	
3. 数値計算による融雪量の推定と実測地との比較	
考察	45
第3節 融雪システムを有する連棟ハウスと単棟ハウスの熱量比較	
はじめに	49
材料および方法	50
1. 連棟ハウスと単棟ハウスの概要	
2. 必要熱量および融雪に必要な熱量の測定・算出方法	
結果	51
1. 調査期間中の気象条件	
2. 融雪に必要な熱量と融雪用暖房機の発熱量の関係	
3. 連棟ハウスと単棟ハウスの必要熱量の比較	
考察	53
第4章 積雪地域における期間暖房負荷の実測と評価	
はじめに	58
材料および方法	58
1. 連棟ハウスと単棟ハウスの実測と算定値との比較	
2. 生産現場での必要熱量の実測と算定値との比較	
結果	60
1. 試験場内での期間暖房負荷の実測	
2. 生産現場での期間暖房負荷の実測	
3. 調査期間中の気象条件	
考察	67
第5章 総合考察	71
総合摘要	75
謝辞	78
引用文献	80
Summary	83

第1章 緒 論

農林水産省農産園芸局野菜振興課（2000）の統計によれば，我が国のガラス室・ハウスの設置実面積は1965年に4,992haであったが，1983年には36,634ha，1999年には53,516haに達している．また，簡易な雨よけ施設も，統計を取り始めた1983年には4,674ha，1999年には13,571haに達している．1999年の品目別割合についてみると，ガラス室・ハウスでは野菜の占める割合が高く70%である．また，雨よけ施設においては，野菜が52%，果樹が40%となり，果樹についても施設栽培が拡大していることが伺える．このように園芸用施設の面積が拡大してきた背景には，今まで施設園芸の中心であった関東以西の西南暖地のみならず，東北地方や北海道などの積雪地域においても急速に増加していることが挙げられる．

施設園芸が普及する以前の積雪地域における農業は，春から秋にかけての水稲，果樹などの露地品目を中心とする経営がほとんどであった．しかし，昭和40年代から始まった構造改善事業などの補助事業の活用を契機に，積雪地域における施設園芸が普及してきた（山形県農林部，1976）．施設園芸が導入され始めた1976年の時点における山形県の施設面積は7.25haに過ぎなかったが，現在ではガラス室・ハウスだけでも1508haに達している（農林水産省農産園芸局野菜振興課，2000）．

積雪地域の施設園芸で取り組まれている品目は，果菜類，花き類から，雨よけ栽培の果樹等と多岐に渡っている．その中でも，近年の特徴は，保温カーテンや暖房設備を装備した施設が増加していることが挙げられる．この第一義的な目的は生育期間の拡大であり，収穫出荷時期の大幅な拡大に寄与している．また，近年は，積雪地域の夏期冷涼な気候を生かして，果菜類やバラ，鉢花などの栽培期間が長期に渡る品目の大規模な産地化が進んでいる（山形県，2005）．栽培期間が長期に渡る品目は，夏期に高品質な生産物を出荷するために冬期間の栽培管理が必要である．このため，積雪地域における長期栽培品目の産地確立も，保温カーテンや暖房設備の増加の一因であり，今後のさらなる拡大が期

待されている。

積雪地域における園芸用施設は、大雪時に雪害を被る危険性を孕んでおり、これまでも数多くの雪害が報告されている（鴨田，1979；岩切，1982；山下ら，1982；奥島ら，1992；濱崎ら，1995；森山ら，1999）。このため、積雪地域において施設園芸を拡大していくためには、雪害対策の徹底が重要である。これまで園芸用施設の雪害対策として、地下水散水による融雪（佐藤ら，1967；大谷，1982；山辺ら，1982；山下ら，1982）や屋根雪の滑落による積雪荷重の軽減（高橋ら，1981；村松，1998）などの検討が行われてきた。しかし、これまで検討されてきた地下水散水による融雪や、屋根雪の滑落による積雪荷重の低減は単棟ハウスに対してのみ有効な技術である。したがって、積雪地域では雪害を回避しやすい単棟ハウスを導入する事例が多い。

しかし、単棟ハウスは、滑落した雪を安全に收容する空間を確保するために隣棟間隔を確保する必要があり、土地利用効率が低い。また、隣棟間隔が広いために、棟間の移動が煩雑となり作業効率が低下する。さらに、単棟ハウスは、被覆面積に対する床面積の比率で示される保温比が小さい場合が多く、保温性が低いことが指摘されている。このため、単棟ハウスは土地利用効率や作業効率、保温性が低い形態のハウスであるといえる。一方、降雪が少なく施設園芸が盛んな関東以西の地域では、連棟ハウスが広く普及している。これは、連棟ハウスの土地利用効率や作業効率が高く、さらに保温性も高いという特徴によるためである。これらの特徴や、積雪地域における近年の暖房設備増加などの影響により、積雪地域においても関東以西で広く普及している連棟ハウスに対する期待が大きい。

積雪地域に連棟ハウスを導入する場合には、屋根谷部への積雪荷重が問題となる（小林，1977）。今日の建築技術の向上により、経済的な制約が無ければ、どのような降雪にも耐えうる園芸用施設を建設することは可能である。しかし、園芸用施設は経済的な生産活動の資本となるため、過剰な設備投資は困難である。このため、概ね園芸用施設の減価償却年数と安全度から再現期間を設定して、園芸用施設の強度を決定している（羽倉，1975）。また、このような考え方

に基づいて園芸用施設安全構造基準（暫定基準）（日本施設園芸協会，1997）が定められている。この園芸用施設安全構造基準（暫定基準）によれば，連棟ハウスの基準積雪荷重は，有効に作動する融雪装置が無い場合は，最大積雪深と単位体積重量の積となり，非常に大きな値となる。しかし，有効に作動する融雪装置を装備する場合は，基準積雪荷重として新積雪重量を適用でき，大幅に軽減することができる。このため，積雪地域において連棟ハウスを導入するためには，有効に作動し，屋根谷部の積雪荷重を軽減できる融雪装置が必要である。

そこで，本論文では，積雪地域における連棟ハウスの融雪装置の一種である温風送風式融雪システムの能力評価と技術確立を目的とし，次の内容について検討した。まず，第2章では温風送風式融雪システムの構成と特徴について述べるとともに，山形県内の建設事例から温風送風式融雪システムの課題と研究方向について言及した。第3章では，温風送風式融雪システムの融雪能力を明らかにするとともに，融雪能力向上のための改善方法について示した。また，積雪地域に広く普及している単棟ハウスとの熱量の比較を行い，燃油消費量の優位性について明らかにした。さらに，第4章では，山形県内に設置された温風送風式融雪システムを有する連棟ハウと一般的な単棟ハウスの期間暖房負荷を実測し，従来示されている平均暖房負荷係数の積雪地域における適応性を明らかにした。最終の第5章では，生産現場での温風送風式融雪システムの実用性について総合的な考察を行った。

第2章 温風送風式融雪システムの特徴と課題

これまで提案されてきた連棟ハウスの屋根谷部の融雪技術は少なく、温湯パイプを屋根谷部へ配管する方式や、屋根面や雨樋部へ地下水を散水する方式が散見される程度である。しかし、いずれの方式とも様々な問題点が指摘されており、十分普及している状況ではない。

一方、筆者らが研究を進めている温風送風式融雪システムは、山形県内を中心に生産現場で導入が進みつつある。しかし、統一した設置基準などが示されていないため、ハウスによって設置状況や方式が異なり、様々な問題が発生している。そこで、本章では温風送風式融雪システムの構成と特徴を述べるとともに、生産現場に導入されている事例を調査し、温風送風式融雪システムの問題点を検討した。

第1節 温風送風式融雪システムの構成と特徴

1. 温風送風式融雪システムの具体的構成

温風送風式融雪システムを有する連棟ハウスの概略図を図2-1に、温風送風式融雪システムの設置状況を写真2-1に示す。温風送風式融雪システムは、園芸用施設の暖房設備として広く普及している温風暖房機を熱源としている（以下、融雪用暖房機と称する）。融雪用暖房機から送風された温風を、フレキシブルダクトを經由して、雨樋付近に設置された送風ダクトへ送り、屋根面へ吹き付ける方式である。なお、ハウス内の暖房を目的とした暖房機（以下、暖房用暖房機と称する）は、融雪用暖房機とは別に設置している。

融雪用暖房機の制御は、暖房機の無電圧接点である外部入力端子に接続できる降雪感知機で行っている。本研究に用いた降雪感知機の概略図を図2-2に示す。降雪感知機としては、電熱線と水センサ、気温センサと制御盤を組み合わせたタイプ（北海バネ製、HBC-S3）を用いた（以下、水タイプ降雪感知機と称する）。水タイプ降雪感知機は、感知部への降雪を電熱線で融かし、水として感知する。降雪と降雨の識別については、温度センサが感知した温度が1.5℃以

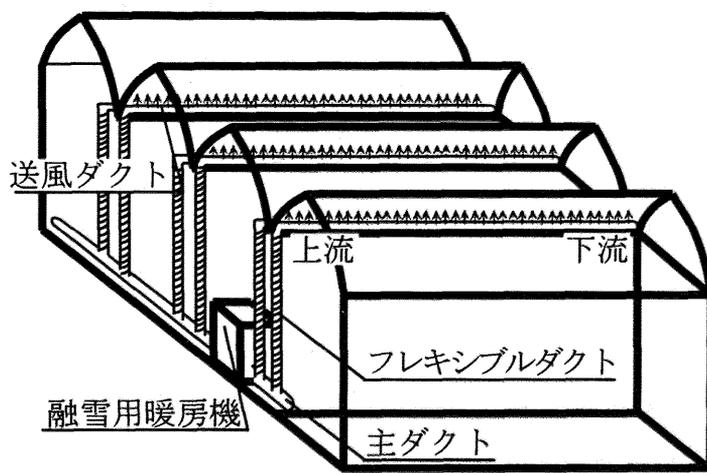


図2-1 融雪システムを有する連棟ハウスの概要（保温カーテンを除く）

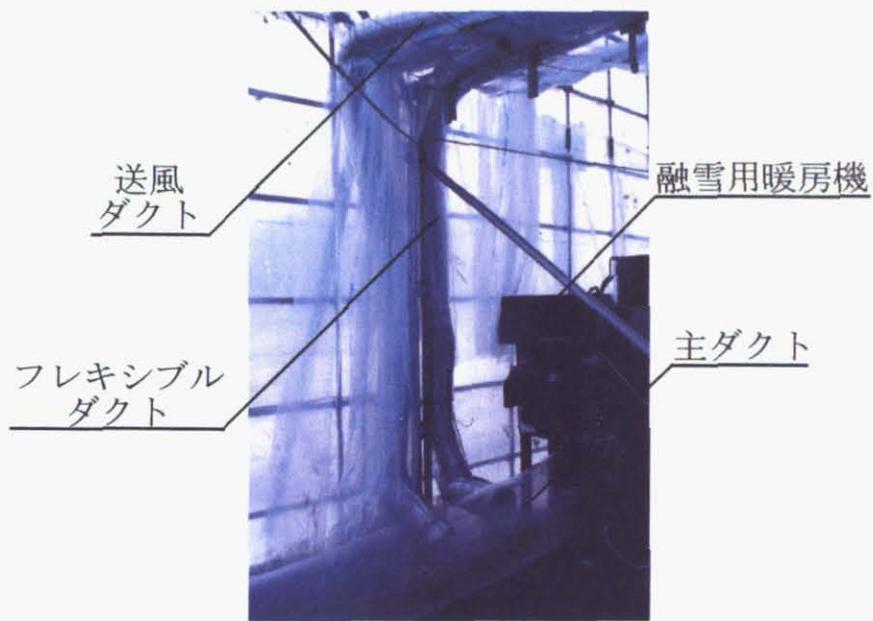


写真2-1 温風送風式融雪システムの設置状況

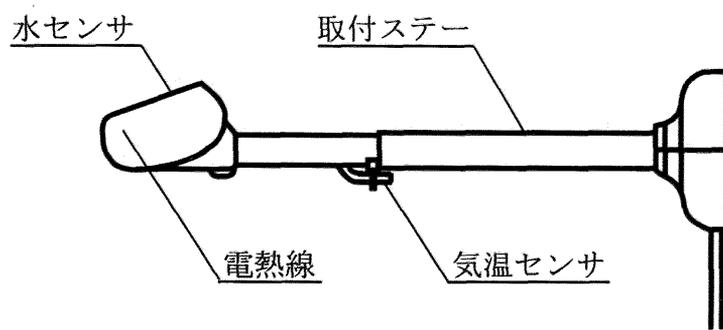


図2-2 降雪感知機の概略図
(制御盤を除く)

下の場合に降雪と判断するように設定した。なお、降雪と降雨の識別温度は制御盤により 0℃から+5℃まで任意に設定可能であるが、本研究を通して 1.5℃とした。また、水タイプ降雪感知機の制御盤には、屋根谷部へ降雪した雪を完全に融雪するための遅延タイマが内蔵されており、5分～3時間まで任意に設定可能である。予備試験の結果、1時間の遅延運転により、概ね屋根谷部への雪が融雪することが確認できたため、本研究を通して1時間とした。

2. 温風送風式融雪システムの特徴・優位性

これまで提案されている連棟ハウスの屋根谷部の融雪方式としては、温湯パイプを雨樋に配管する方式や、地下水を屋根面や雨樋に散水する方式などがあげられる。しかし、温湯パイプを配管する方式は、パイプの周辺のみトンネル状に融雪され、十分な融雪能力が得られない事例や、急激な温度変化によりパイプが破損する事例がみられている。また、地下水を用いた方式では、地域によって水源の確保が困難であること（鴨田，1979；山下ら，1982；濱寄ら，1995）や、水源が確保できたとしても、地下水の水質によってはフィルムが汚れることなどの多くの問題を抱えている。さらに、地下水を屋根面や雨樋部へ散水する方式では、散水量が少ない場合、融雪が不十分となり、散水した地下水を屋根谷部の雪が吸水してしまう現象が発生する。この場合、地下水散水により積雪荷重が増大し、ハウスが倒壊した事例もみられている。

一方、温風送風式融雪システムは、市販の温風暖房機を熱源としているため、地下水を熱源とした場合に問題となる地域的な制限がない。ハウス構造についても、温風暖房機と簡単なダクト類で構成しているため、融雪システムのための専用設計にする必要がなく、低コストに設置できる。また、既存の連棟ハウスへも設置可能である。

融雪システムを運転する場合においても、温風送風式融雪システムでは、すべての部品がハウス内に設置してあるため、温湯パイプを配管する場合に問題となるような急激な温度変化によるパイプの破損の危険性がなく、維持・管理が容易である。また、降雪感知機で融雪用暖房機を制御しているため、降雪と

同時に運転を開始するなどの融雪システムの自動運転が可能であるという特徴がある。

第2節 生産現場における設置事例と課題

屋根面に温風を送風して融雪を行う融雪システムを有する連棟ハウスは、山形県など東北・北海道を中心に建設が進んでいる。しかし、温風送風式融雪システムに関する基礎的な研究がほとんど行われていないため、様々な問題が指摘されている。そこで、本節では、全国的にも最も早く温風送風式融雪システムが導入された山形県の生産現場における代表的な設置事例について、実地調査および聞き取り調査の結果について述べるとともに、問題点・課題や、解決方向について検討した。

1. 山形県長井市および鶴岡市の設置事例

長井市、鶴岡市の事例ともに山形県立園芸試験場（現在、山形県農業総合研究センター生産技術試験場）の現地試験ハウスとして委託したハウスであり、両者のハウス構造および融雪システムの構造は同一である（写真 2-2, 写真 2-3）。規模は、間口 6.5m、奥行 25m の 3 連棟（床面積 488m²、保温比 0.63）とした。融雪用暖房機として 37.2kW（32,000kcal・h⁻¹）の発熱能力を有する温風暖房機を 1 台、入り口妻面側に設置し、水タイプ降雪感知機で制御した。屋根面へ温風を吹き付ける送風ダクトは、折り径 300mm（直径約 200mm）、厚さ 0.05mm のポリダクトを用いた。屋根谷部の雨樋側近に設置し、口径 20mm、500mm 間隔の吹き出し口を開け、屋根面へ吹き付ける方式である。ハウス内の暖房には、融雪用暖房機とは別に設けた同型の温風暖房機を用いた。また、屋根フィルムには農業用ポリオレフィン系フィルムを用いた。長井市の事例における栽培品目は、10月から5月がいちご、6月から9月がアールスメロンであった。鶴岡市の事例における栽培品目は、宿根カスミソウ、スターチスなどであった。

長井市は、非常に降雪量が多い地点であり、降雪中は屋根谷部への雪の堆積がやや見られることもあった。しかし、融雪システムが運転することにより、ハウスが倒壊することなく融雪が行われた。また、効果は判然としないものの、



写真2-2 長井市の設置事例



写真2-3 鶴岡市の設置事例

降雪量が多い場合には、屋根面付近の温度が高まるように保温カーテンを開放するなどの操作も行われた。

鶴岡市は、比較的降雪量が少ない地点であったが、強い季節風の影響で一度融雪した雪が屋根面の途中で再び凍結し、固着する現象が見られた。

長井市と鶴岡市に共通して、融雪用暖房機を設置した入り口妻面側は十分な融雪能力を示した。しかし、融雪用暖房機から離れた反対側妻面では融雪が遅れ、ハウスの奥行き方向によって融雪能力に差が生じる現象が見られた。

2. 山形県寒河江市の設置事例

軽量鉄骨ハウスに温風送風式融雪システムをはじめて導入した事例である。規模は、間口 8.5m、奥行 51m の 2 棟と、間口 8.5m、奥行 63m の 5 棟が連なった計 7 連棟ハウス（床面積 3,545m²、保温比 0.84）である（写真 2-4）。融雪用暖房機として 87.0kW（75,000kcal・h⁻¹）の発熱能力を有する温風暖房機を入り口側と反対側の妻面にそれぞれ 1 台ずつ、合計 2 台設置し、水タイプ降雪感知機で制御した。屋根面へ温風を吹き付ける送風ダクトは、長井市と同様の方式であった。ハウス内の暖房には、融雪用暖房機とは別に設けた 116.0kW（100,000kcal・h⁻¹）の発熱能力を有する暖房用暖房機を 2 台設置した。また、屋根フィルムにはポリエステル系硬質フィルムを用いた。寒河江市の事例における栽培品目は、養液栽培の促成いちごであった。

寒河江市は、山形県内としては降雪量が比較的少ない地域であったが、ハウス建設当初は融雪能力が低く、屋根谷部への雪の堆積が見られた。送風ダクトは、長井市の事例と同様な仕様であったが、当初の設置位置が雨樋直下と低い位置であり、屋根面に温風が届かないことなどが問題であった。このため、後述する研究成果をもとに吹き出し方向へ改良したところ、円滑に融雪されるようになった。また、建設当初は屋根谷部の雨樋へ温湯パイプを配管していたが、急激な温度変化によると考えられるパイプの破損が多発したため、現在は利用されていない。

3. 山形県金山町の設置事例

最も早く本格的な温風送風式融雪システムが導入された事例である。規模は、



写真2-4 寒河江市の設置事例

間口 6.2m, 奥行 40m の 4 連棟 (床面積 992m²) である (写真 2-5)。融雪用暖房機として 34.8kW (30,000kcal・h⁻¹) の発熱能力を有する温風暖房機を入り口側と反対側の妻面にそれぞれ 1 台ずつ, 合計 2 台設置し, 降雪感知機で制御した。屋根面へ温風を吹き付ける送風ダクトは, 折り径 300mm (直径約 200mm), 厚さ 0.05mm のポリダクトを用いた。送風ダクトの設置位置は, 屋根谷部の雨樋側近とし, 口径 20mm, 500mm 間隔の吹き出し口を開け, 屋根面へ吹き付ける方式である。ハウス内の暖房には, 融雪用暖房機とは別に設けた同型の温風暖房機を 1 台, 同じ発熱能力を有するダクトレス温風暖房機を 1 台設置した。また, 屋根フィルムにはフッ素系硬質フィルムを用いた。金山町の事例における栽培品目は, カーネーションなどの鉢花類であった。

金山町は, 降雪量が多い地域であり, 降雪中は屋根谷部への雪の堆積がやや見られることもあった。しかし, 融雪システムが運転することにより, ハウスが倒壊することなく融雪が行われた。また, 建設当初は光センサにより降雪を判断するタイプの降雪感知機を用いていた。しかし, 落ち葉などによる誤作動が多く, 融雪用暖房機による燃油消費量が増大したため, 手動で融雪システムを運転していた。現在は, 後述する研究成果から適正な制御が可能であると判断される水タイプ降雪感知機を利用して自動で運転している。

5. 温風送風式融雪システムの課題

山形県内 5 箇所建設された温風送風式融雪システムを有する連棟ハウスの事例について調査した。その結果, 以下の問題点が明らかとなった。

- ①送風ダクトの設置状況による融雪能力の大幅な低下 (送風方式の最適化)。
- ②ハウスは倒壊しなかったものの, どの程度の融雪能力を示すかが不明 (融雪量の定量的評価)。
- ③保温カーテンの解放などのハウス内条件と融雪能力の関係が不明確 (ハウス内条件と融雪能力の関係解明)。
- ④融雪用暖房機の運転による燃油消費量の増加 (融雪用暖房機の適正制御)。

したがって, 本論文においては, 温風送風式融雪システムの技術確立と能力評価のために以下の課題について検討することとした。



写真2-5 金山町の設置事例

- ①送風ダクトの設置位置，形状の異なる送風方式における融雪能力の比較検討.
- ②屋外実験による融雪量の経時的变化の評価と，数値計算による最大融雪量の推定.
- ③融雪用暖房機の発熱量の評価と，温風送風式融雪システムを有する連棟ハウスと一般的な単棟ハウスの必要熱量の比較.

また，積雪地域においても暖房設備を装備したハウスが増加していることから，燃油消費量の予測が経営上重要な要素である．このため，従来から提案されている暖房負荷に関する算定方法が，気象条件の異なる積雪地域において適用できるかを明らかにすることが必要である．そこで，従来示されている期間暖房負荷の算定値と，積雪地域における実測値の比較を，融雪システムを有する連棟ハウスと一般的な単棟ハウス，および前述の山形県内の生産現場に設置されている実用規模の連棟ハウスを対象に行った．

第3章 温風送風式融雪システムの能力評価

園芸用施設安全構造基準（暫定基準）（日本施設園芸協会，1997）によれば，融雪装置がない場合の連棟ハウスの基準積雪荷重は，最大積雪深と単位体積重量の積となる．しかし，有効に作動する融雪装置を設置することにより，基準積雪荷重として新積雪重量を適用でき，大幅に軽減することができる．このため，積雪地域に連棟ハウスを設置する場合には，屋根谷部への積雪荷重が確実に軽減できる融雪装置の設置が必要である．

従来，研究が進められてきた地下水を用いた融雪装置の場合，融雪能力の評価方法は降雪深（佐藤ら，1967）やハウス側面への堆積量（大谷，1982；山下ら，1982），散水した地下水の温度変化（山辺ら，1982）による手法が主流である．しかし，これらの報告においては，融雪装置によるハウスに対する積雪荷重の軽減効果については言及していない．これは，融雪の熱源が地下水であるため，融雪により発生する水量と地下水との区別が困難であったためと考えられる．

一方，温風送風式融雪システムは，ハウスの内側から熱伝達を行うため，谷樋から流落する水量を融雪量として評価することができる．そこで，本章では，温風送風式融雪システムについて，送風方式が融雪能力に及ぼす影響を検討した．また，融雪能力の経時的変化を調査するとともに，送風方式改善による融雪能力向上の可能性について検討した．さらに，融雪システムを有する連棟ハウスを導入する際に問題となる燃油消費量について，積雪地域に広く普及している単棟ハウスとの比較，評価を行った．

第1節 送風方式が融雪能力に及ぼす影響

はじめに

温風送風式融雪システムは，融雪用暖房機から送風した温風を，屋根内面から吹き付けることで融雪を行っている．このため，屋根面へ温風を吹き付けている送風ダクトの形状や設置位置が融雪能力へ及ぼす影響は大きい．そこで，

本節では本融雪システムの融雪能力の評価を行うことを目的に、送風ダクトの形状や設置位置が融雪能力に及ぼす影響について屋外実験により検討した。

材料および方法

1. 連棟ハウスおよび送風方式の概要

実験は、山形県立園芸試験場内（寒河江市）に建設した間口 6.5m、奥行 18m の 4 連棟ハウス（床面積 468m²）で、1999 年 12 月から 2000 年 3 月まで行った。屋根フィルムにはフッ素系硬質フィルム（旭硝子グリーンテック製，エフクリーン，厚さ 0.04mm），妻面および側面フィルムには農業用ポリオレフィン系フィルム（みかど化工製，スーパーソーラー，厚さ 0.15mm）を展張した。ハウス内には農業用ポリオレフィン系フィルム（みかど化工製，長寿，厚さ 0.1mm）により 1 層の保温カーテンを設置し，開閉は手動で行った。ハウス内ではトマトとイチゴの養液栽培を行っていたため暖房用暖房機として 58.0kW（50,000kcal・h⁻¹）の発熱能力を有する温風暖房機を設置し，暖房を行った。暖房用暖房機の制御は，温度センサによって行い，保温カーテン内の最低気温を 14℃に設定した。暖房用暖房機の能力は，林（1998）の最大暖房負荷算定式に基づいて決定した。

実験を行った 3 種類の送風方式を図 3-1 に，ダクトの設置状況を写真 3-1 に示す。ダクト A 区は，折り径 300mm（直径約 200mm），厚さ 0.05mm のポリダクトを屋根谷部の雨樋側近に設置し，口径 20mm，500mm 間隔の吹き出し口を開けた（ダクト断面積約 0.03m²）。吹き出し方向は上向きとし，雨樋付近の屋根面に垂直に吹き付けた。ダクト下流端は閉鎖し，吹き出し口からのみ送風した。ダクト B 区はダクト A 区と同形のポリダクトを用い，雨樋の上方 500mm の位置に設置した。吹き出し口の口径，間隔および下流端の閉鎖条件は，ダクト A 区と同様とした。ダクト密着区は折り径 1100mm，厚さ 0.1mm のポリダクトが送風により膨張し，屋根面と密着する方式とした。ダクトの取り付けは，軒方向と平行に取り付けたフィルム固定レールを用い，屋根谷部の雨樋付近に 800mm 幅で固定した（ダクト断面積約 0.17m²）。吹き出し口は，口径 20mm，500mm 間隔と

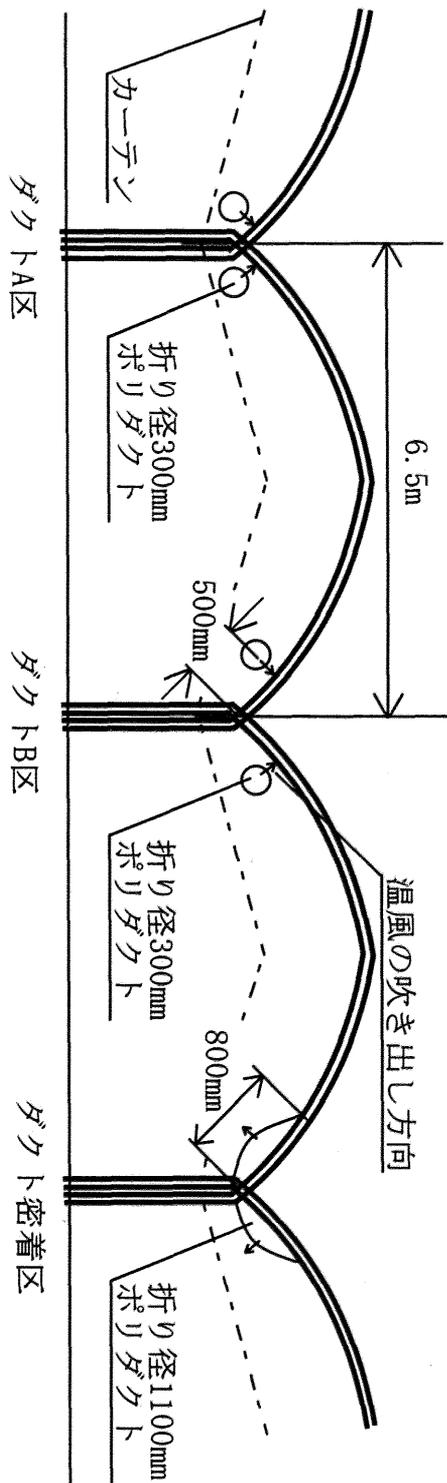
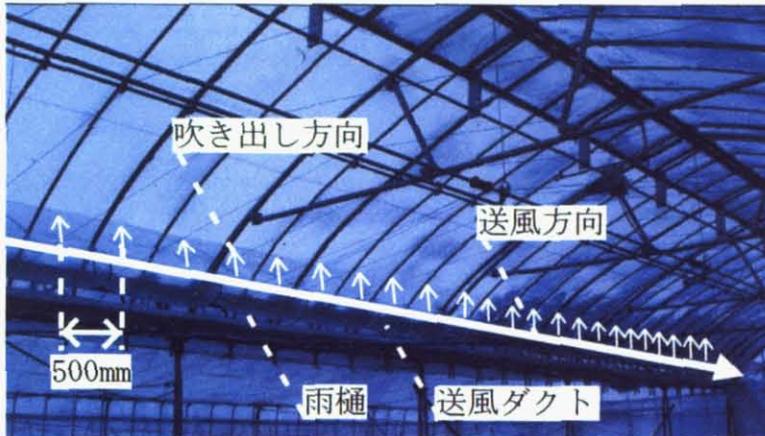
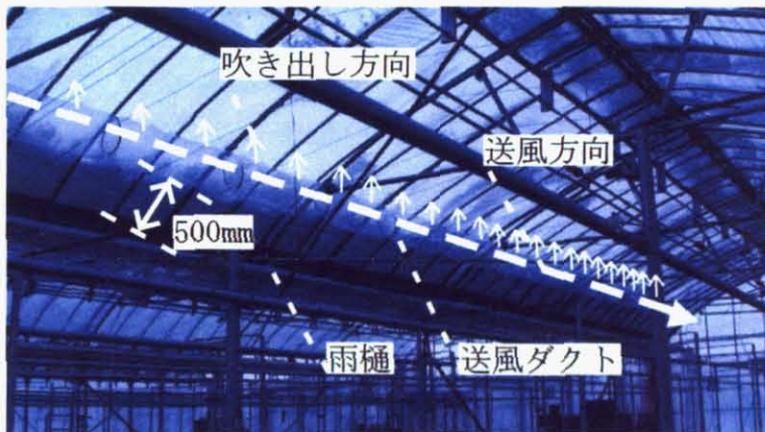


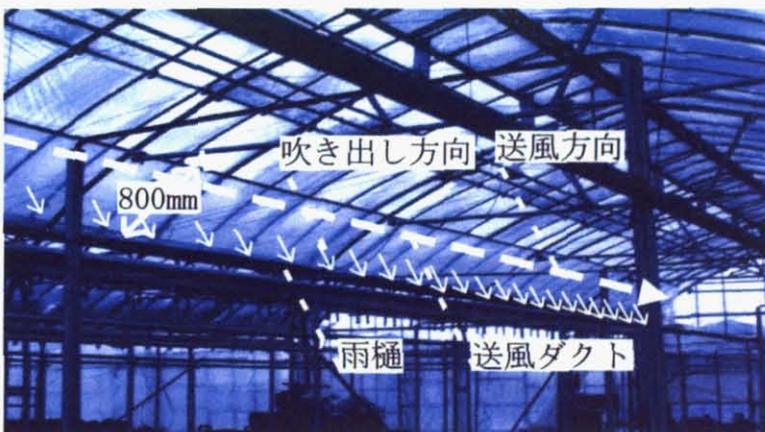
図3-1 送風方式の概要



(1) ダクトA区



(2) ダクトB区



(3) ダクト密着区

写真3-1 各送風方式のダクトの設置状況

し、吹き出し方向はダクトと屋根面が接しているため、ハウスの内側向きとした。下流端は、他区と同様の閉鎖条件とした。

各送風ダクトへは、暖房用暖房機とは別に設けた同型の融雪用暖房機により送風した。融雪用暖房機の主ダクトから雨樋付近の各送風ダクトまでは、内径200mmのフレキシブルダクトにより接続した。なお、フレキシブルダクト内の風速を測定し、各送風方式への送風量がほぼ同じであることを確認した。

各送風方式のダクト内と吹き出し口における30秒間の平均風速を、熱線風速計（日本カノマックス製、ANEMOMASTER MODEL-6621）により測定した。また、ダクト断面中央部の気温を白金抵抗温度計（コーナーシステム製、Kadec US-6）により測定した。なお、平均風速とダクト内気温の測点は、送風方向に対して上流および下流の2点とし、妻面から1.5m離れた位置とした。

融雪用暖房機の制御には、降雪感知機（北海バネ製、HBC-S3）を用いた。制御は、降雪の感知によって融雪用暖房機の運転を開始し、降雪が終了してから1時間後に停止するように設定した。なお、降雪感知機の感知のための温度条件などは第3章と同様とした。また、融雪システム運転中は、融雪用暖房機および暖房用暖房機それぞれの効率向上のために、保温カーテンを閉鎖した。

2. 融雪能力の評価

一般に、12月は密度の大きい雪、2月は密度の小さい雪が降ることが多い。また、その他の気象条件も融雪状況に影響すると考えられる。そこで、降雪時の着雪率の調査を1999年12月21日9:30と2000年2月16日9:30に行った。ここで、着雪率は、融雪システム運転中の屋根面積に対する着雪面積の割合(%)とした。すなわち、屋根谷部から棟部まで着雪している場合、着雪率は100、完全に融雪している場合は0である。なお、保温カーテンを調査時の直前に開放して、目視で調査した。

1999年12月から2000年3月にかけて、降雪が確認された日の融雪量を調査した。雨樋からの融雪水を1時間間隔に1分間採取し、その重量を単位面積、単位時間当たりの融雪量($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)として換算した。なお、着雪率の調査日は、保温カーテンの開放によって屋根面付近の気温などの条件が異なるため、

融雪量の調査日から除外した。

結果

1. 各送風方式の環境条件

各送風方式のダクト内と吹き出し口における平均風速，およびダクト内気温を表 3-1 に示す。ダクト内の平均風速は，いずれの送風方式でも上流と比べて下流で低下した。ダクト A 区は， $3.42\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ から $0.34\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ まで低下し，ダクト B 区もほぼ同じであった。一方，ダクト密着区は， $0.59\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ から $0.03\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ まで低下した。吹き出し口の平均風速は，いずれの送風方式でも，上流，下流ともに約 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であった。

ダクト内気温は，上流ではいずれの送風方式とも 50°C 前後であった。下流では，ダクト A 区は 21°C であったが，ダクト密着区では約 14°C まで低下した。

2. 融雪能力

1999 年 12 月 21 日と 2000 年 2 月 16 日における着雪率の結果を図 3-2 に示す。いずれの送風方式においても，下流で融雪が遅れ，屋根面への着雪が認められた。また，12 月 21 日のダクト A 区とダクト B 区の着雪率は，上流から中流では 20～30% の範囲であったが，下流では 30% 以上と高かった。ダクト密着区の着雪率は，ダクト A 区，ダクト B 区と比べて上流は低かったが，中流から下流にかけては高かった。2 月 16 日のダクト A 区の着雪率は，上流から中流では 0～20% の範囲であり，下流で若干確認できた。ダクト B 区では，いずれの区間でもダクト設置位置と雨樋との間で確認され，上流から下流にかけて 20% 以上であった。また，ダクト A 区と同様に，下流になるほど高かった。ダクト密着区の着雪率は，上流から下流にかけて 10% 以下であった。

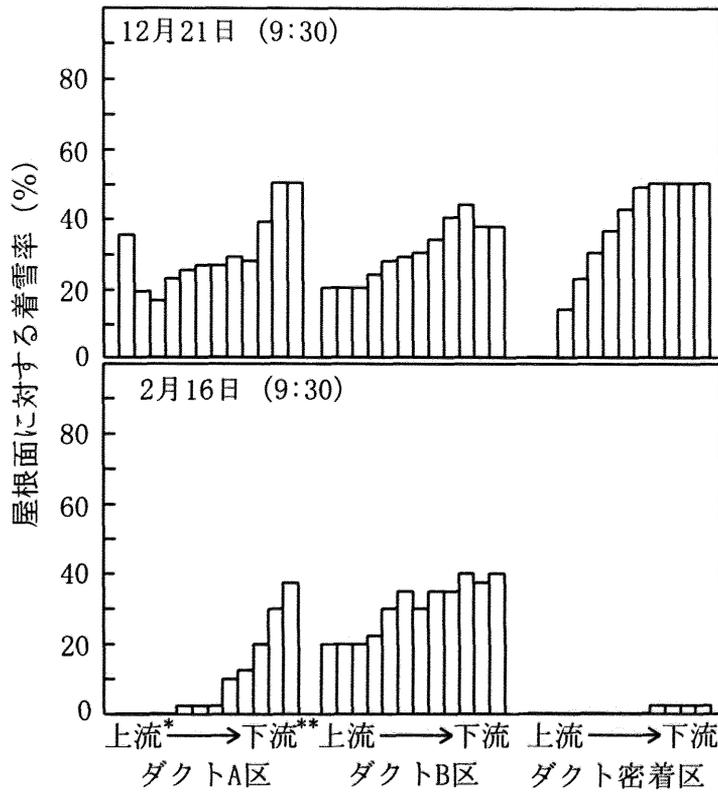
両調査日の着雪率を比較すると，2 月 16 日に比べて 12 月 21 日に，すべての送風方式で高くなった。また，調査日による着雪率の差は，ダクト B 区では小さく，ダクト密着区では大きかった。

なお，両調査日とも，着雪率に差異は認められたものの，屋根面では降雪と融雪を繰り返しながら，融雪システムが停止するまでには，すべて融雪された。

表 3-1 各送風方式の平均風速とダクト内気温

	平均風速				ダクト内	
	ダクト内		吹き出し口		気温	
	上流	下流	上流	下流	上流	下流
	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	($^{\circ}\text{C}$)	($^{\circ}\text{C}$)
ダクトA区	3.42	0.34	11.6	11.9	48.4	21.0
ダクトB区	3.39	0.71	12.8	12.3	※1	※1
ダクト密着区	0.59	0.03	11.6	10.3	51.8	14.1

※1：欠測



* : 送風方向に対して上流
 ** : 送風方向に対して下流

図3-2 送風方向に対して上流から下流にかけての着雪率の分布

1999年12月から2000年3月までの調査期間で、融雪量の最大値を記録した2月17日と2月22日の融雪量の推移を図3-3に示す。融雪量は、いずれの送風方式とも調査時刻によって大きく変動した。しかし、融雪量の最大値は、いずれの送風方式ともに $1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ となり、差はなかった。

着雪率の調査を行った1999年12月21日と2000年2月16日と、融雪量の調査において最大値を示した2000年2月17日と2月22日の屋外気象を表3-2に示す。なお、表中の日降雪量（日降水量から換算、 $\text{kgf}\cdot\text{m}^{-2}$ ）、日降雪深（m）、平均外気温（ $^{\circ}\text{C}$ ）は、試験地から約3km北方向に位置する山形県森林研究研修センターでの観測値を用いた。また、雪の密度は高橋ら（1981）の手法によって、日降雪量と日降雪深から試算した。日降雪量は着雪率の調査を行った12月21日が最も多く、 $17.5\text{kgf}\cdot\text{m}^{-2}$ であったが、他の日は $12\sim 12.5\text{kgf}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。雪の密度は、12月21日が最も大きく0.12であったが、他の日は約0.06であった。外気温は12月21日が最も高く約 0°C であったのに対し、他の日は $-2\sim -4^{\circ}\text{C}$ であった。

考察

いずれの送風方式においても、屋根面への降雪は滑雪を繰り返しながら、送風ダクト付近で融雪された。屋根面の滑雪には、屋根勾配、被覆材質、施設内の気温、雪質などが影響するが（佐藤ら、1967；岩切、1982；山下ら、1982）、特に、施設内を暖房することによって、滑雪が著しく促進される（鴨田、1979；渥美、1981；高橋ら、1981；村松、1998）。また、屋根面の滑雪機構は、被覆材と積雪との接触面にある雪層が施設内からの熱伝達によって融解し、水膜によって雪の摩擦係数が小さくなり落下することが報告されている（山辺ら、1982）。したがって、本システムでは、カーテン上部へ $14\sim 50^{\circ}\text{C}$ の温風を送風していたため、屋根面内側の温度が上昇し、途中で堆積することなく滑雪したと考えられた。一方、地下水散水による融雪と本システムの相違は、前者は地下水と雪の温度差によって融雪するのに対し、後者は屋根面の内側から吹き付ける温風の対流熱伝達によって融雪する。稲葉（1988）は、強制対流は自然対流の2～

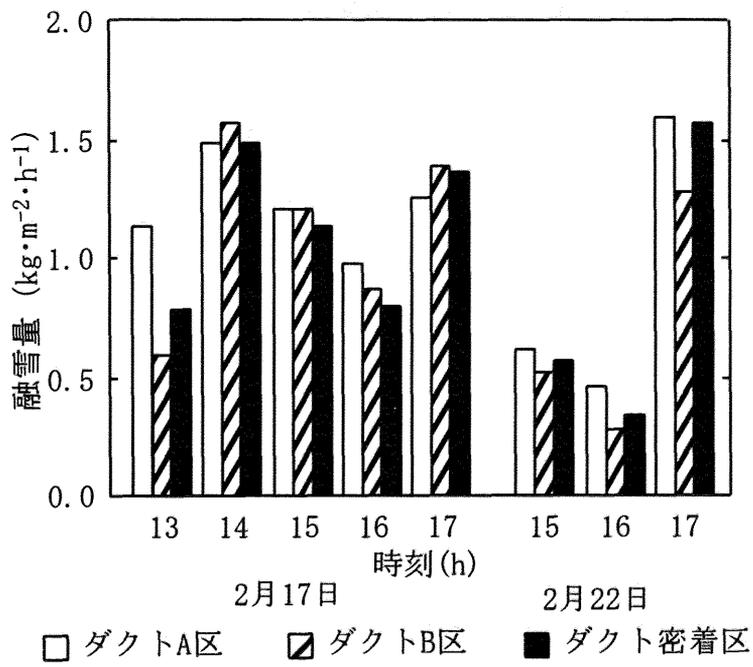


図3-3 融雪量の推移

表 3-2 調査日の屋外気象

	日降雪量 ^{※1} (kgf・m ⁻²)	日降雪深 (m)	雪の密度	平均外気温 (°C)	備考
12月21日	17.5	0.15	0.12	-0.2	着雪率調査日
2月16日	12.5	0.20	0.06	-4.1	//
2月17日	12.5	0.19	0.07	-2.7	融雪量調査日
2月22日	12.0	0.25	0.05	-1.8	//

※1：日降水量から換算

100 倍の熱伝達率となることを報告している。本システムは屋根面へ吹き付ける温風の強制対流によって、雪への熱伝達率が高まり、融雪効果を高めていたと推察された。

それぞれの送風方式の融雪状況を着雪率によって評価すると、いずれの送風方式とも送風方向に対して下流で融雪が遅れた。ダクト A 区、ダクト B 区の吹き出し口の平均風速は、上流と下流に大きな差はなかったが、ダクト内気温は大きく低下した。一方、ダクト密着区のダクト内風速は、上流においてダクト A 区、ダクト B 区よりも低く、下流ではさらに低下した。これは、主にダクト断面積の違いによるものである。また、ダクト密着区でのダクト内気温の低下は、ダクト A 区、ダクト B 区よりも大きかった。したがって、送風方向に対して下流の着雪率が高かった要因として、ダクト A 区、ダクト B 区はダクト内気温の低下、ダクト密着区はダクト内の風速とダクト内気温の低下が影響していたと考えられる。

一方、すべての送風方式において、2 月 16 日と比べて 12 月 21 日の着雪率が高かったが、これは主に屋外気象が影響したと推測される。地下水散水を用いた融雪でも、外気温、屋外風速、降雪量、雪質などの影響を受けることが報告されている（岩切，1982；山辺ら，1982）。また、雪の密度が大きく湿った雪は、屋根面に着雪しやすいという報告もある（岩切，1982）。したがって、12 月 21 日は、他の調査日より降雪量が多く、また、外気温が高かったため、雪の密度が大きくなり、すべての送風方式で着雪率が高くなったと考えられる。

また、ダクト B 区では、調査日間の着雪率の差が小さく、ダクト設置位置と雨樋との間で着雪が多く認められた。これは、ダクトからの温風の吹き付けが屋根面に対して垂直であったため、ダクト設置位置付近でのみ融雪効果が高く、下方の融雪が遅れたことが原因と考えられる。ダクト密着区は、ダクト A 区と比べて調査日間の着雪率の差が大きかった。ダクト密着区とダクト A 区の、送風ダクトの形状および設置位置を比較すると、前者は楕円形で、外周の約半分が屋根面に接しているが、後者は正円形で、屋根面に接していない。このため、ダクト密着区では、降雪量が多く、雪の密度が大きかった 12 月 21 日は、ダク

ト内気温の低下が著しく、融雪が遅れたと推測される。一方、降雪量が少なく、雪の密度が小さかった2月16日は、他区に比べて着雪率が低く、雪質、屋外気象によっては高い融雪能力を示す可能性が考えられる。

それぞれの送風方式に着雪率の差は認められたが、融雪量の最大値には差がなかった。また、本システムが示した最大融雪量は $1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ あり、1日あたりの融雪量に換算すると約 $38\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ となった。この値は、山形における15年再現期間の新積雪重量（日本施設園芸協会，1997）と一致する。しかし、いずれの送風方式とも融雪量は調査時刻により大きく変動していたため、本システムの融雪能力を評価する場合には、降雪量との関係を考慮する必要がある。また、ハウスの暖房によって積雪荷重が軽減されるという報告（村松，1998）や、暖房負荷のうち、被覆面からの放熱負荷が60～100%を占めるという報告（林，1998）がある。本試験では、融雪システムが稼働していたときは保温カーテンを閉じていたものの、最低気温 14°C を目標に暖房を行っていた。このため、本システムでは融雪用暖房機の熱だけでなく、暖房用暖房機の熱が屋根面に伝達していた可能性も考えられる。

以上の結果から、本システムで供試した3種類の送風方式の中では、ダクトA区のように送風ダクトを雨樋の直近に設置し、温風を吹き付ける方式が融雪に適すると考えられる。しかし、ダクトの送風距離が長くなった場合の融雪能力の低下が予想される。したがって、送風ダクトの最適化などについて検討する必要があると考えられる。また、融雪量は調査時刻により大きく変動していたため、降雪量と融雪量の相互関係から、本融雪システムの積雪荷重軽減効果を明らかにする必要がある。

第2節 最大融雪能力の推定と能力向上のための試算

はじめに

本融雪システムの融雪能力は、送風ダクトや降雪強度などの影響を受けるといった問題点が明らかとなった。しかし、これらの問題の全てを屋外実験により解明することは難しく、定量的な融雪能力や熱伝達の評価方法が必要である。

一般に、ハウスの暖房負荷計算には、ハウス内外気温差と暖房負荷係数から暖房必要熱量を求める方法（日本農業気象学会，1977）が用いられてきた。しかし、本融雪システムが稼働している時は、屋根内面への温風送風により熱が屋根面に伝達されるため、暖房必要熱量を求める方法では融雪熱量を評価できない。一方、伝熱工学分野では、各種条件下における空気から壁面への対流熱伝達の数値計算手法が提案されている。このため、これらの手法を応用することにより、本融雪システムの屋根内面からの熱伝達量や融雪量の最大値を推定できると考えられる。そこで、本節では温風送風式融雪システムにおける融雪能力の最大値を推定することを目的に、屋外実験により融雪量と降雪量の経時的变化を評価した。また、数値計算により屋根面からの熱伝達量や融雪量の最大値の推定を行うとともに、融雪能力向上のための改善手法について検討した。

材料および方法

1. 連棟ハウスおよび融雪システムの概要

屋外実験は、前節と同じ山形県立園芸試験場内（寒河江市）に建設した連棟ハウスで、2003年12月から2004年3月まで行った。融雪システムの送風ダクトの概略を図3-4に示す。送風方式は、前節で供試したダクトA区と同様な方式とし、折り径0.3m（直径約0.2m）、厚さ0.05mmのポリダクトを用いた。送風ダクトは、谷樋を中心として左右対称に1対2本設置し、吹き出し口を0.5m間隔で1本当たり36カ所に設けた。なお、送風ダクトについて、前節と同様に融雪用暖房機の直上側を上流、反対側の妻面側を下流と称する。吹き出し口から屋根内面までの距離（m）と、吹き出し口の直径（m）は、生産現場における代表的な条件とし、それぞれ0.15m、0.02mとした。数値計算は、4連棟ハウスのうち、内側の屋根谷部1棟を計算領域として行った。屋根面の棟から軒までの長さは3.7m、屋根面の傾斜角度は 26° である。屋根面にはフッ素系硬質フィルム（旭硝子グリーンテック製、エフクリーン、厚さ0.04mm）を展張した。

融雪システムは、前節と同様に温風暖房機（ネポン製、HK-2025）から送風した温風を、谷樋部に設置した送風ダクトにより屋根内表面に垂直に吹き付ける

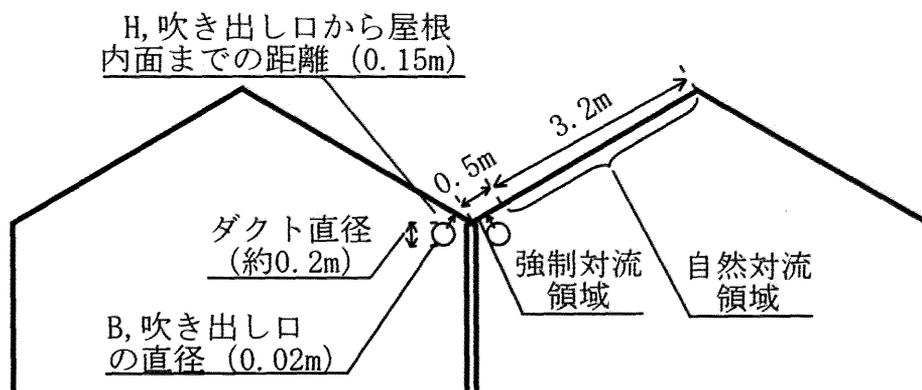


図3-4 送風ダクトの概略

方式である。

また、図中には示していないが、ハウス内には1層の保温カーテンを設置し、暖房設定室温を17℃として融雪用暖房機とは別の温風暖房機（ネボン製、HK-2025）を運転した。

2. 屋外実験による融雪量と降雪量の経時的変化の評価

2003年12月から2004年3月にかけて、本融雪システムの融雪量と降雪量を調査した。融雪量の評価として、谷樋部から流落する水量を計測した。計測にあたっては、パルス式流量計（ディグメサ製、FMIG-HO-OC-4）により1時間の積算流量を電気パルスに変換し、データロガ（KADEC製、KADEC-UP）で記録した。なお、融雪水の氷結を防止するために、雨樋から流量計までの部分について水道の凍結防止帯（カクダイ社製）を巻き付けた。また、降雪量 R ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)は、屋外風速の影響を受けることが報告されている（大野ら、1998）。そこで、屋外実験を行ったハウスと同じ敷地内で計測した降水量 r ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)と屋外風速 u_o ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)を用いて次式より求めた。

$$R = r \times (1 + 0.24u_o) \quad (3-1)$$

3. 融雪量推定のための数値計算の概要

降雪中は天空が雪雲で覆われており、屋根面のかかなりの部分が雪で覆われているため、日射によるハウス内への熱の流入は無視できる。また、融雪システムが稼働することにより、屋根外面では雪が融解されており、屋根面の被覆材が薄いので屋根外面と屋根内面が同一温度となっていると考えられる。そこで、屋根内面を氷の融解温度である0℃で、突起物のない平板であると仮定し、屋根面における熱伝達のモデル化および、融雪量の推定を行った。

屋根面での熱伝達は、送風ダクトの送風により強制対流熱伝達が生じている領域と、送風ダクトによる送風の影響を受けず、自然対流熱伝達が生じている領域に分ける必要がある。そこで、屋根面を送風ダクトの影響を受ける強制対流領域と、それ以外の自然対流領域に分けて熱伝達量を計算した。このため、屋根面全体での熱伝達量 Q_h ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)は、両者の和であるとして、次式より求めた。

$$Q_h = Q_f + Q_n \quad (3-2)$$

ここで、 Q_f ：強制対流領域での熱伝達量 ($W \cdot m^{-2}$)、 Q_n ：自然対流領域での熱伝達量 ($W \cdot m^{-2}$) である。なお、降雪量との比較を容易にするため、両者とも融雪が必要な屋根の投影床面積当たりの熱伝達量として算出した。

また、強制対流領域での熱伝達量 Q_f を次式より求めた。

$$Q_f = \alpha_f (\theta_d - \theta_w) s_f \cdot s_u^{-1} \quad (3-3)$$

ここで、 α_f ：強制対流領域の平均熱伝達率 ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)、 θ_d ：ダクト内気温 ($^\circ C$)、 θ_w ：屋根内面温度 ($0^\circ C$)、 s_f ：強制対流により熱伝達が行われている屋根面積 (m^2)、 s_u ：融雪が必要な屋根面の投影床面積 ($117m^2$) である。なお、 s_f は送風ダクトの長さ (連棟ハウスの奥行、18m) と、噴流が影響している幅から算出した。

本融雪システムは、一列に並んだ吹き出し口から、温風を屋根面に吹き付ける方式であるため、噴流群による熱伝達量の推定が必要である。従来の報告において、噴流群の固有の条件における熱伝達率の分布 (Aaron ら, 1994; Van ら, 1996) や、単一噴流の各種条件における岐点熱伝達率を求める無次元式が示されている (日本機械学会, 1975)。しかし、噴流群の各種条件における平均熱伝達率が求められる無次元式は、甲藤 (1978) の報告が散見できる程度である。ここで、甲藤の報告は、基盤状に配列している噴流群を対象としており、本融雪システムの一列に並んだ噴流群とは完全に一致しない。しかし、本稿は厳密な熱伝達量の推定が目的ではないため、基盤状の噴流群の一列に注目したモデルであると仮定して、強制対流領域での熱伝達率 α_m を次式より求めた。

$$\alpha_f = 0.286 \left(\frac{u_o x}{\nu} \right)^{0.625} \times \frac{\lambda}{x} \quad (3-4)$$

ここで、 u_o ：屋根面における吹き出し口の中心風速 ($m \cdot s^{-1}$)、 x ：吹き出し口の間隔 (m)、 ν ：空気の動粘性係数 ($m^2 \cdot s^{-1}$)、 λ ：空気の熱伝導率 ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$) である。なお、式 (4) は、噴流群全体の平均熱伝達率を求めており、また、縦、横ともに等しい間隔で基盤状に配列している噴流群を対象としている。このため、噴流が影響している幅は吹き出し口の間隔 (x , 0.5m) に等しいとい

う条件で計算した。

一方、自然対流領域での熱伝達量 Q_n を次式より求めた。

$$Q_n = \alpha_n (\theta_c - \theta_w) s_n \cdot s_a^{-1} \quad (3-5)$$

ここで、 α_n ：自然対流領域の平均熱伝達率 ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)、 θ_c ：カーテン上部気温 ($^\circ C$)、 s_n ：自然対流により熱伝達が行われている屋根面積 (m^2) である。なお、 s_n は屋根面全体から s_f を除いた面積とした。 α_n は、傾斜平板と気流による熱伝達率と見なし、次式より求めた (山本, 1988)。

$$\alpha_n = 0.13 \left(Gr \times \frac{v}{a} \right)^{1/3} \times \frac{\lambda}{y} \quad (3-6)$$

$$Gr = \frac{g \cos \phi \beta y^3 (\theta_c - \theta_w)}{v^2} \quad (3-7)$$

ここで、 Gr ：グラスホフ数、 a ：空気の温度伝導率 ($m^2 \cdot s^{-1}$)、 y ：平板の長さ (3.7m-0.5m=3.2m)、 g ：重力加速度 ($m \cdot s^{-2}$)、 ϕ ：屋根面の傾斜角度が垂直となす角度 ($90^\circ - 26^\circ = 64^\circ$)、 β ：空気の体膨張係数である。なお、 y は自然対流により熱伝達を行っている屋根面の長さとし、屋根面の棟から軒までの長さ 3.7m から、強制対流により熱伝達を行っている幅 0.5m を引いた値とした。また、式 (7) は直角となす角度が $0 \sim 40^\circ$ の範囲であれば 10% 以内の誤差で表示できるとしている (山本, 1988)。本研究で供試したハウスの屋根の傾斜角度は 26° であるため、垂直となす角は 64° であり、適用範囲外となる。しかし、 40° と 64° で試算した Q_h の差は、2% に満たないため、 ϕ による誤差は他の要因に対して僅少であると判断した。

4. 融雪システム稼働中の環境条件の測定

強制対流領域の数値計算を行うためには、屋根面における吹き出し口の中心風速 (u_d) とダクト内気温 (θ_d) が、自然対流領域の数値計算を行うには、カーテン上部気温 (θ_c) が必要である。そこで、屋根面における吹き出し口の中心風速として、吹き出し口から 0.15m の距離における 30s 間の平均風速を熱線風速計 (日本カノマックス製, ANEMOMASTER MODEL-6621) を用いて、上流から下流にかけて 10 カ所測定した。また、送風ダクト内の中心風速も同様に測定し

た。ダクト内気温，カーテン上部気温については，降雪強度が強く，融雪システムが稼働した日に，データロガ（KADEC 製，KADEC-UN）を用いて測定した。ダクト内気温の測点はダクト中心部の気温を上流から下流にかけて 10 カ所，カーテン上部気温の測点は屋根フィルムから 15cm 離れた 3 カ所とした。

結果

1. 融雪量の実測値と降雪量の推移

降雪強度が強く，融雪システムが稼働していた 2004 年 2 月 6 日 18 時から 9 日 12 時までの融雪量の実測値と，降雪量の推移を図 3-5 に示す。なお，この期間は，同年度の中でも比較的降雪量が多かった期間である。降雪量は，7 日 0 時と 4 時，8 日 18 時の一時的な時間帯に $2.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ を越える値を記録し，最大では $2.5\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ であった。しかし，それ以外の時間帯は概ね $1.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下となり，変動の幅が大きかった。一方，融雪量の実測値は，降雪量とほぼ同じ傾向で推移したが，降雪量よりも変動の幅が小さかった。融雪量の最大値は，降雪量がピークとなった直後に記録されたが，降雪量よりも少なく， $1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ であった。また，降雪量が断続的に観測された時間帯でも，融雪量は途切れることなく継続して記録された。

2. 融雪システム稼働中の環境条件

屋根面における吹き出し口の中心風速 u_0 とダクト内の中心風速の測定結果を図 3-6 に示す。 u_0 は，最大で $2.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最小で $1.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であったが，上流から下流にかけてほぼ一定であった。このため，数値計算の u_0 として上流から下流までの平均値である $2.12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ を計算に用いた。ダクト内の中心風速は，上流では $1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であったが，徐々に低下し，下流端では $0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ まで低下した。

送風ダクトのダクト内気温の測定結果を図 3-7 に示す。ここで，送風距離は，送風ダクト端から棟方向への距離である（立ち上がり部分のダクト距離は含まない）。ダクト内気温は，融雪用暖房機に近い上流では約 60°C であった。しかし，融雪用暖房機から離れるほど低下し，下流端では約 20°C まで低下した。また，融雪用暖房機からの送風距離（ z , m）とダクト内気温は，次式により近似

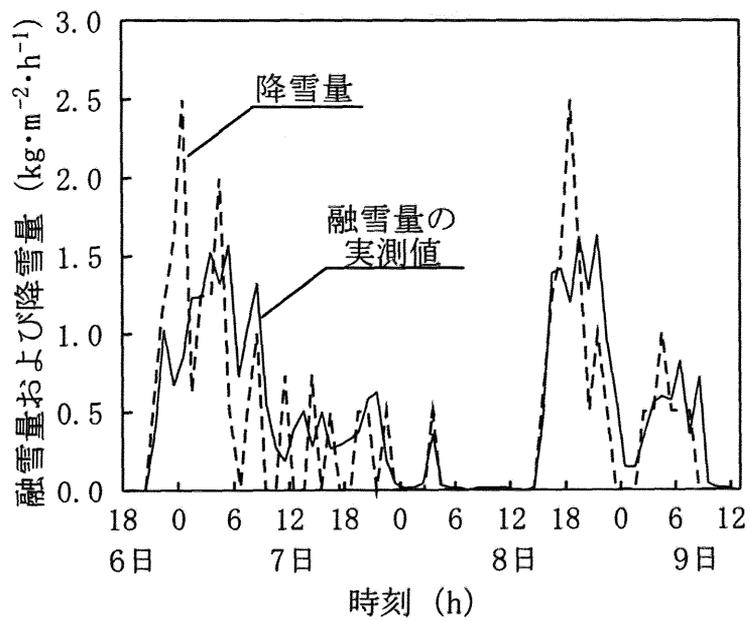


図3-5 融雪量の実測値と降雪量の推移

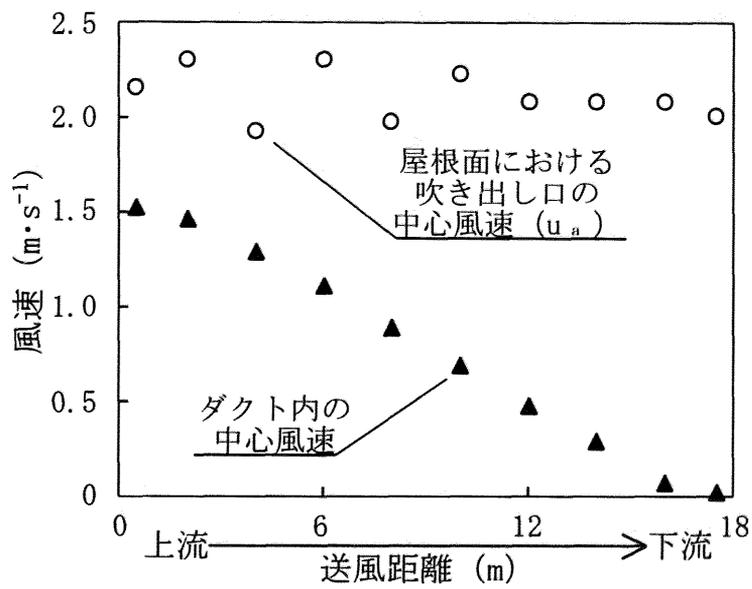


図3-6 送風距離と風速の関係

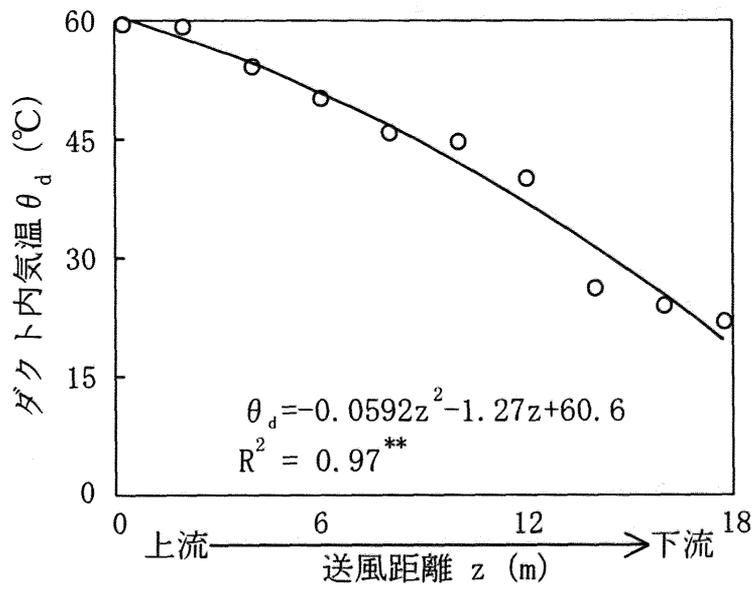


図3-7 送風距離とダクト内気温の関係

** 1%水準で有意

できた。

$$\theta_d = -0.0592z^2 - 1.27z + 60.6 \quad (3-8)$$

$R^2=0.97^{**}$ $^{**}1\%$ 水準で有意

2004年2月6日から9日までにおけるハウス内外の気象条件を表3-3に示す。自然対流領域での熱伝達量を計算するために必要なカーテン上部気温は、調査日により若干の差が見られたものの約15℃となり、カーテン内部気温よりも1.4℃低かった。屋外気象条件である屋外平均風速は、いずれの調査日とも $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下であった。また、期間を通した平均外気温は -2.1℃ であった。

3. 数値計算による融雪量の推定と実測地との比較

式(3-8)のとおり、吹き出し口ごとにダクト内気温が異なる結果となった。このため、強制対流領域での熱伝達量(Q_f)の計算にあたっては、式(3-4)で得られた平均熱伝達率と、式(3-8)で算出したダクト内気温を式(3-3)に代入して、吹き出し口ごとの熱伝達量を算出した。式(3-4)により強制対流領域での平均熱伝達率を計算したところ $21.0\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{℃}^{-1}$ であった。平均熱伝達率とダクト内気温から求めた強制対流領域による熱伝達量の計算結果を図3-8に示す。融雪用暖房機から近い上流側における熱伝達量は $193\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。しかし、融雪用暖房機から離れるほど低下し、下流端の吹き出し口では $66\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ まで低下した。全体の投影床面積当たりでは $140\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ となり、氷の融解熱を用いて融雪量に換算すると、 $1.5\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ に相当した。

自然対流領域での熱伝達量 Q_n の計算にあたっては、式(3-6)で得られた平均熱伝達率と、表3-3で示されたカーテン上部気温を式(3-5)に代入して算出した。

調査日別の融雪量の実測値と推定値を表3-4に示す。降雪量が多かった2月7日と2月8日の融雪量の実測値(最大値)は $1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ となった。一方、強制対流領域における融雪量の推定値は、計算方法から明らかなように、いずれの調査日も一定の $1.5\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ となった。自然対流領域における融雪量の推定値は、カーテン上部気温の関数となっているが、調査日間の差は最大でも 0.5℃ であり、ほとんど差がなく $0.5\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ であった。結果的に、融雪量の

表 3-3 融雪システム稼働中の気象条件

	カーテン 内部気温 (°C)	カーテン 上部気温 (°C)	外気温 (°C)	屋外 平均風速 (m・s ⁻¹)
2月6日	16.6	15.3	-2.1	0.4
2月7日	16.5	15.1	-2.7	0.6
2月8日	16.7	15.2	-2.1	0.3
2月9日	16.9	15.6	-0.8	1.0

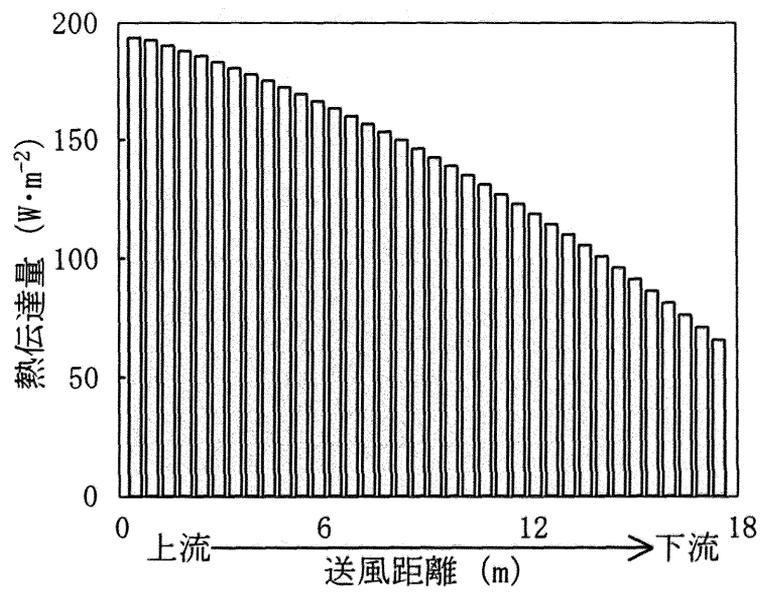


図3-8 強制対流領域による熱伝達量

表 3-4 融雪量の実測値と推定値

	融雪量の 実測値 (最大値)	融雪量の推定値		
		強制 対流	自然 対流	合計
2月6日	1.03	1.52	0.50	2.02
2月7日	1.57	1.52	0.49	2.01
2月8日	1.63	1.52	0.49	2.01
2月9日	0.85	1.52	0.51	2.03

単位はいずれも $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$

推定値は調査日による差はなく、 $2.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ となった。また、強制対流領域における熱伝達量の割合が75%と高かった。

考察

連棟ハウスの融雪システムは、屋根谷部へ雪が堆積することなく、屋根面への降雪と同時に融雪できる能力を有することが望ましい。本融雪システムの降雪量と融雪量の経時変化を屋外実験により実測したところ、両者はほぼ同様に推移した。したがって、融雪量の変動は、降雪量の変動に起因しており、概ね屋根面への降雪と同時に融雪されていたと考えられる。しかし、降雪量は最大で $2.5\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ だったのに対して、融雪量は最大でも $1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ であった。このため、実験に供試した条件における本融雪システムの融雪能力の最大値は $1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ であると推察される。また、降雪量が多い場合には一時的に屋根谷部へ雪が堆積するものの、継続的に融雪が行われているため、降雪強度が弱まるとともに屋根谷部への積雪荷重が軽減されると考えられる。

一方、融雪量の推定値は $2.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ となり、実測値よりもやや多い結果となった。ここで、融雪量の推定値は、屋根面の全面が雪で覆われていることを仮定している。しかし、前節で報告しているように、温風送風式融雪システムを稼働した場合、屋根面への降雪は滑雪を繰り返しながら送風ダクト付近で融雪される。このため、屋根面の全面が常に雪で覆われているわけではない。強制対流領域には雪が堆積しているが、自然対流領域の一部で雪が堆積していないために、屋根面からの熱伝達の一部が融雪に用いられず屋外へ放熱され、結果として推定値が実測値よりも大きくなったと考えられる。

強制対流領域での熱伝達量が占める割合が75%と高かったことから、送風条件を変更することにより、本融雪システムの融雪能力の向上が期待できる。強制対流領域の面積拡大や熱伝達量を増加する手法として、送風ダクトの増設が考えられる。融雪用暖房機の容量を大きくし、送風ダクトも増設すれば、融雪能力の向上は明らかである。しかし、融雪用暖房機の容量を変更せず、送風ダクトのみ増設するだけで融雪能力が向上すれば、その意味は大きい。そこで、

送風ダクトを左右対称に1対2本だけでなく、上方に0.5m間隔で2対4本および3対6本と増設した条件（図3-9）における融雪量の推定を行った。各条件における融雪用暖房機の送風量は同一であり、個々の送風ダクトも同一である。そこで、吹き出し口の中心風速は、吹き出し口の開口数に反比例すると仮定した。また、送風ダクトを増設する分、自然対流領域の面積を減じて数値計算を行った。

送風ダクト増設時の計算条件と融雪量の推定値を表3-5に示す。強制対流領域における融雪量は、送風ダクトを増設するほど多くなり、2対4本の場合では $2.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、3対6本の場合では $2.3\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ となった。また、全融雪量も、1対2本の場合に比べて、2対4本では18%、3対6本では30%増加した。これらの結果はあくまでも1つの計算事例ではあるが、融雪用暖房機の容量を変更しない場合でも、送風ダクトの増設は融雪能力が向上する可能性があると考えられる。しかし、生産現場での実用場面を考えると、送風ダクトの過度の増設は、ハウス内の光条件の悪化や、ダクト設置の複雑化が懸念される。また、前節で示したとおり、本融雪システムを稼働した場合、屋根面への降雪は滑雪を繰り返して谷樋付近へ堆積し、送風ダクト付近で融雪される。特に、谷樋付近への雪の堆積を屋根面に対する着雪率（%）として評価すると、屋根面の長さ（3.7m）の20～30%の範囲となる。つまり、屋根面への降雪は、滑雪を繰り返して谷樋部付近の屋根面0.7～1.1mの範囲に集中する。したがって、送風ダクトの増設は、谷樋部から1.0mまでが強制対流領域となる2対4本が適すと推察される。

強制対流領域での融雪能力は高かったものの、融雪用暖房機から離れた下流ほど熱伝達量が低下した。これは、融雪用暖房機から離れた下流ほど、融雪能力が低下することを示している。この現象は、前節の屋外実験でも確認されており、本融雪システムを奥行き長い連棟ハウスに導入した際に、問題となる点である。融雪能力が低下する原因として、送風ダクト内の気温低下があり、主に送風ダクト表面からの放熱と、送風ダクト下流の中心風速の低下が強く影響していると考えられる。この問題を解消するには、送風ダクトの直径を下流

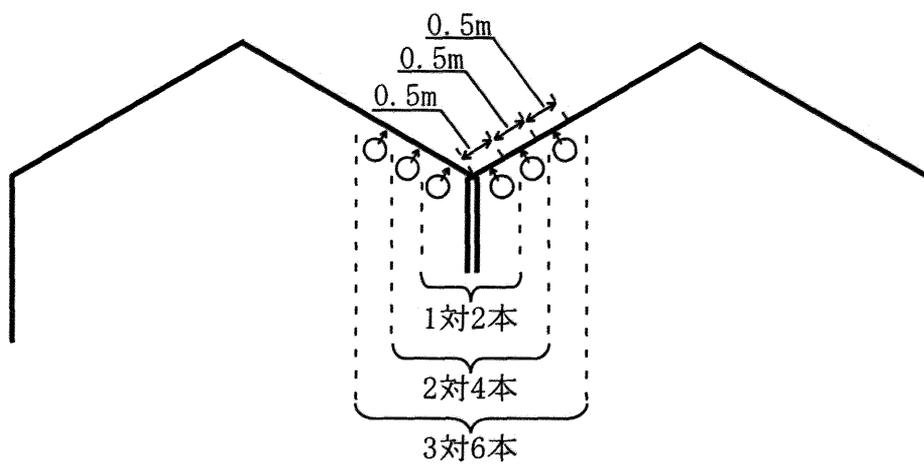


図3-9 送風ダクト増設時の概略

表 3-5 送風ダクト増設時の条件と融雪能力の推定値

	吹き出し口 の開口数 (個)	吹き出し口 の中心風速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	自然対流 領域の面積 (m^2)	融雪量の推定値 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)		
				強制対流	自然対流	合計
1 段 2 列	36	2.12	57.6	1.52	0.50	2.02
2 段 4 列	72	1.06	48.6	1.97	0.42	2.39
3 段 6 列	108	0.71	39.6	2.29	0.34	2.63

ほど細くし、ダクト内の中心風速を一定に保つ方法や、吹き出し口の間隔を下流ほど密にするなどの解決方法が考えられる。

一方、自然対流領域での熱伝達量は少なかった。このため、自然対流領域の温度上昇が期待できる保温カーテンの開放は、融雪能力向上に対する効果は低いと考えられる。例えば、保温カーテンを解放し、ハウス内気温が17℃になった時の融雪量を試算すると、自然対流領域の融雪量は $0.57\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ となり、全融雪量に対して3.5%しか増加しない。また、保温カーテンの開放により保温性が低下し、暖房用暖房機の燃油消費量が増加するため、経費的にも不利な方法であると考えられる。ただし、今回は屋根面に対して垂直に噴流が衝突し、強制対流領域と自然対流領域が互いに影響しない仮定での融雪量の測定と推定である。実際には、吹き出し口からの送風により自然対流領域でも風速が上昇している可能性もあり、自然対流領域での融雪量を過小に評価していることも考えられる。また、生産現場では、吹き付け角度を屋根面に対して垂直よりもややずらして、屋根面全体の風速を高める方式をとっている事例もみられる。このような場合の融雪量の推定は、本手法では困難であり、より高度なCFD (Computational Fluid Dynamics) などの計算手法を用いる必要がある。

以上のことから、現状の送風方式における本融雪システムの融雪能力の最大値は $1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ であるが、送風ダクトの増設などの改良を加えることにより、融雪能力の向上が可能であると考えられる。また、自然対流領域での熱伝達量は少なく、保温カーテンの開放は融雪能力向上にあまり関与しないと考えられる。

第3節 融雪システムを有する連棟ハウスと単棟ハウスの熱量比較

はじめに

前節までにおいて、温風送風式融雪システムが高い融雪能力を示すことが明らかになり、また、送風方式の改良により、さらに融雪能力が向上する可能性が示唆された。しかし、温風送風式融雪システムを導入する場合には、燃油消費量の視点から見た経済性について評価する必要がある。そこで、本節では融

雪に用いた熱量を含めた連棟ハウスの総熱量と、単棟ハウスの暖房必要熱量と比較・評価した。なお、暖房必要熱量は施設内の暖房に用いた熱量であり、融雪に用いた熱量は含まれない。このため、本節では融雪および暖房に用いた熱量の総和を、単に必要熱量と表記する。

材料および方法

1. 連棟ハウスと単棟ハウスの概要

実験は、前節と同じ山形県立園芸試験場内（寒河江市）に建設した融雪システムを有する連棟ハウスと、同じ敷地内に建設した融雪システムを有さず屋根雪がハウス両側へ滑落する一般的な単棟ハウスを用いて行った。連棟ハウスは前節と同様の仕様であり、間口 6.5m、奥行 18m の 4 連棟で、床面積は 468m²、被覆面積に対する床面積の比で示される保温比は 0.61 である。単棟ハウスは間口 7.2m、奥行 18m で、床面積は 130m²、保温比は 0.49 である。単棟ハウスの屋根フィルムおよび妻面にはポリエステル系硬質フィルム（三菱 MKV 製、シクスライトクリーン、厚さ 0.15mm）、側面フィルムには農業用ポリオレフィン系フィルム（みかど化工製、スーパーソーラー、厚さ 0.15mm）を展張した。なお、連棟ハウスと単棟ハウスのハウス内では、トマトの養液栽培を行い、地表面をシルバーマルチで全面被覆した。また、連棟ハウスと単棟ハウスには、農業用ポリオレフィン系フィルム（みかど化工製、長寿、厚さ 0.1mm）により 1 層の保温カーテンを設置した。なお、開閉は手動で行った。

連棟ハウスに設置した融雪用暖房機および暖房用暖房機は前節と同様であり、両者とも 58.0kW (50,000kcal・h⁻¹) の発熱能力を有する温風暖房機（ネポン製、HK-2025, A 重油仕様）である。単棟ハウスには暖房用暖房機として、37.2kW (32,000kcal・h⁻¹) の発熱能力を有する温風暖房機（ネポン製、KA-321, 灯油仕様）のみを設置した。暖房用暖房機の制御は温度センサによって行い、連棟ハウスと単棟ハウスともに保温カーテン内の暖房設定室温を 14℃とした。

2. 必要熱量および融雪に必要な熱量の測定・算出方法

連棟ハウスにおいて、融雪用暖房機の発熱量 (Q_m) を降雪量と比較する場合、

側壁側の屋根半分の雪は滑落するので、対象となる面積として全床面積を用いることは妥当ではない。このため、融雪が必要な屋根の投影床面積 (A_m , 351m^2) を用いて、融雪用暖房機の発熱量 (Q_m) を次式で求めた。

$$Q_m = V_m H_a \eta_m / A_m \quad (3-8)$$

$$A_m = A_t (1 - 1/n) \quad (3-9)$$

ここで、 V_m : 融雪用暖房機の燃油消費量、 H_a : A 重油発熱量 ($3.64 \times 10^5 \text{J} \cdot \text{L}^{-1}$)、 η_m : 暖房機効率 (0.8)、 A_t : 連棟ハウスの全床面積、 n : 連棟数 (4 連棟) である。

一方、連棟ハウスの必要熱量 (Q_t) は、単棟ハウスと比較するため、融雪用暖房機の発熱量 (Q_m) と暖房用暖房機の発熱量 (Q_h) のいずれについても、全床面積 (A_t) を用いて次式で求めた。

$$Q_t = (Q_m A_m + Q_h A_t) / A_t \quad (3-10)$$

$$Q_h = V_h H_a \eta_m / A_t \quad (3-11)$$

ここで、 V_h : 暖房用暖房機の燃油消費量である。

単棟ハウスでは、暖房用暖房機のみを設置していたため、単棟ハウスの必要熱量 (Q_s) を次式で求めた。

$$Q_s = V_s H_k \eta_s / A_s \quad (3-12)$$

ここで、 V_s : 暖房用暖房機の燃油消費量、 H_k : 灯油発熱量 ($3.56 \times 10^5 \text{J} \cdot \text{L}^{-1}$)、 η_s : 暖房機効率 (0.8)、 A_s : 単棟ハウスの全床面積である。

融雪に必要な熱量を、降雪量に氷の融解熱を乗じて求めた。降雪量は、試験地から約 3km 北方向に位置する山形県森林研究研修センターで観測した日降水量とした。なお、降雨であった 1 月 13 日の値は除外した。

なお、調査期間は 1999 年 12 月 24 日から 2000 年 3 月 9 日までとし、7 日ごとに分割して解析を行った。

結果

1. 調査期間中の気象条件

調査期間中の平均外気温と日降雪量の関係を図 3-10 に示す。なお、平均外気

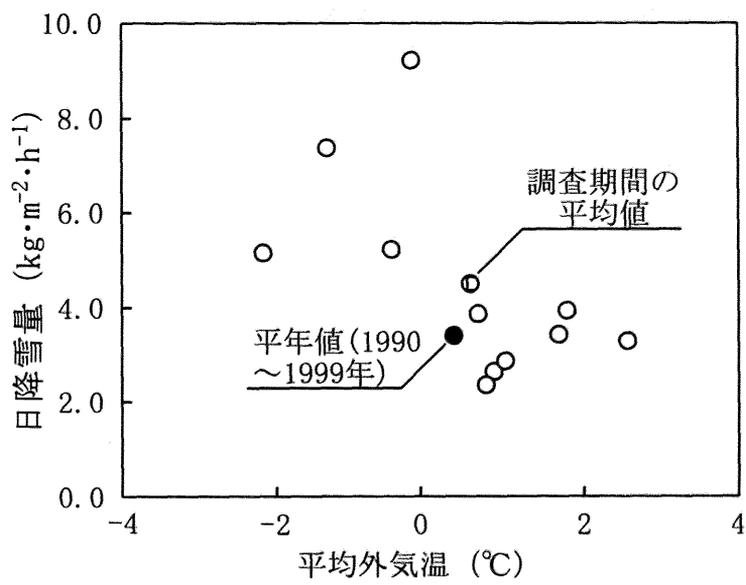


図3-10 平均外気温と日降雪量の関係

温 ($^{\circ}\text{C}$) は連棟ハウスの近傍での観測値, 日降雪量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) は山形県森林研究研修センターでの観測値であり, とともに7日間の平均値である. また, 調査期間中の平均値と, 山形県森林研究研修センターでの過去10年間(1990~1999年)の観測値から求めた平年値もあわせてプロットした. 調査期間を通じた平均外気温は $2.6\sim-2.2^{\circ}\text{C}$ の範囲で推移した. また, 平均値は 0.6°C となり, 平年値とほぼ同等であった. 日降雪量は, $2.4\sim9.2\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ の範囲で推移し, 平均で $4.5\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ であった. 平年値が $3.4\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ であることを考慮すると, やや多雪年であった. また, 平均外気温が 0°C 以上では, 日降雪量が $4\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 以下であったが, 平均外気温が 0°C 以下になると, $5\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 以上となった.

2. 融雪に必要な熱量と融雪用暖房機の発熱量の関係

降雪量から求めた融雪に必要な熱量と融雪用暖房機の発熱量の関係を図3-11に示す. なお, 両熱量は7日間の平均値としてプロットし, あわせて融雪に必要な熱量と融雪用暖房機の発熱量が1:1に対応する直線も記入した. 融雪用暖房機の発熱量は $8.4\sim42.8\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ まで変化し, 融雪に必要な熱量に対して高い正の相関を示した. また, 融雪用暖房機の発熱量は, 融雪に必要な熱量とほぼ1:1に対応した.

3. 連棟ハウスと単棟ハウスの必要熱量の比較

連棟ハウスの必要熱量と, 単棟ハウスの必要熱量の比較を図3-12に示す. なお, 両ハウスの必要熱量は, 7日間ごとの平均値とした. 連棟ハウスの必要熱量に占める融雪用暖房機の発熱量の割合は, $10\sim37\%$ まで変化し, 調査期間中の平均値は約18%であった. また, 連棟ハウスの必要熱量は, 単棟ハウスの必要熱量に比べて, 多い期間もあったが, 調査期間全体では約8%少なかった. 暖房用暖房機の発熱量のみの比較では, 連棟ハウスは, 単棟ハウスに比べて約24%少なかった.

考察

積雪地域における融雪技術としては, 屋根面への散水(佐藤ら, 1967; 山辺

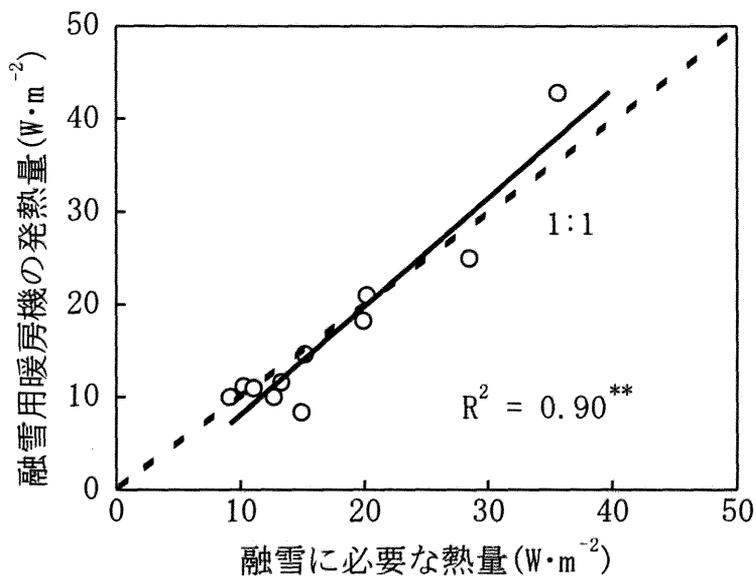


図3-11 融雪に必要な熱量（降雪量から算出）と融雪用暖房機の発熱量（融雪が必要な屋根の投影床面積当たり）の関係

** 1%水準で有意

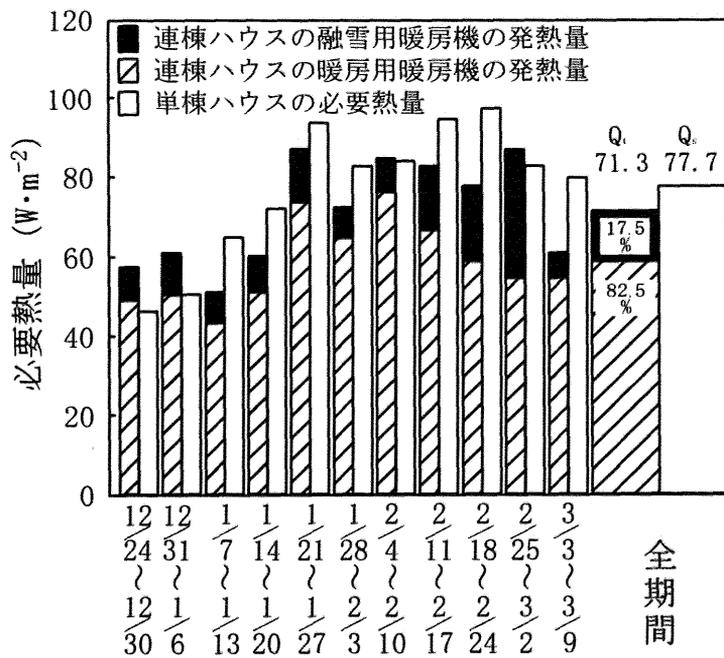


図3-12 連棟ハウスの必要熱量 Q_t と単棟ハウスの必要熱量 Q_s の比較

ら、1982)、軒からハウス側面への散水(大谷、1982;山下ら、1982)などの、地下水を屋外で散水する方式が検討されている。しかし、木村(1974)によれば、屋外で散水する場合、融雪に用いられる熱量は、無風状態では約70%、屋外風速が約 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ では約40%まで低下する。これは、地下水の熱量のうち、30%から60%は融雪に用いられず、屋外へ放熱していることを意味している。一方、本融雪システムでは、融雪用暖房機の発熱量と融雪に必要な熱量は、ほぼ1:1に対応し、ほとんどが融雪に用いられた。これは、送風ダクトをハウス内に設置していたことと、降雪感知機による制御が適正であったことによると考えられる。また、第1節では、屋根面への降雪は、滑雪を繰り返しながら送風ダクト付近で融雪されることを報告した。したがって、融雪システムが稼働している時は、熱源である送風ダクト付近が常に雪で覆われているため、屋外への放熱が少なく、融雪に用いられる熱量の割合が高かったと推察される。

単位床面積当たりの暖房必要熱量は、内外気温差が同一であれば、保温比の逆数である放熱比にほぼ比例する。本試験における連棟ハウスと単棟ハウスの放熱比は、それぞれ1.64、2.04である。連棟ハウスの暖房用暖房機の単位床面積当たりの発熱量は、単棟ハウスに比べて約24%少なかったが、これは放熱比の差とほぼ一致している。したがって、暖房用暖房機の発熱量の軽減は、保温比の違いによるものといえる。また、保温比が大きいことによる発熱量の軽減よりも、融雪に用いられた熱量の増加が小さかったために、連棟ハウスの必要熱量は、単棟ハウスよりもやや少なかったと考えられる。

しかし、このような関係が常に成り立つとは限らない。本試験の調査期間中は、外気温は平年並みであったが、外気温がさらに低い場合や、暖房設定室温が高い場合には、暖房必要熱量が増大する。暖房必要熱量は被覆面積と比例関係にあるため、連棟ハウスと単棟ハウスの暖房用暖房機の発熱量の差はさらに拡大するはずである。また、調査期間中の降雪量は、平年値よりやや多かったが、平年並の $3.4\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ と仮定すると、降雪量と正の相関関係である融雪用暖房機の発熱量は、 $12.0\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ に減少する。この場合、連棟ハウスと単棟ハウスの必要熱量の差は13%まで拡大する。このように、連棟ハウスと単棟ハウスの

必要熱量の関係は、暖房設定室温や、気象条件により変化すると考えられる。

以上の結果から、暖房設定室温が 14℃の条件では、融雪システムを有する連棟ハウスの床面積当たり必要熱量は、融雪システムを有しない単棟ハウスよりもやや少なかった。このため、融雪システムを有する連棟ハウスは、従来の単棟ハウスよりも燃油消費量の点からも有利であると判断される。しかし、両者の関係は暖房設定室温や気象条件の影響を受けると考えられるため、積雪地域における必要熱量の定量的な解析を進める必要がある。

第4章 積雪地域における期間暖房負荷の評価

はじめに

暖房必要熱量である暖房負荷の算定方法に関しては多くの報告があり、施設園芸環境制御基準資料（日本農業気象学会，1977）などにとりまとめられている。また、実用規模の温室を対象に、栽培期間に消費される熱量である期間暖房負荷の実測と、算定方法の検証・解析が行われている（環境制御基準資料調査グループ，1978；林ら，1979；古在ら，1982）。これらの多くは、日暖房デグリアワー（以下，DH）との関係について示されており、汎用性の高い算定方法となっている。ただし、これらの測定は、冬期間に晴天日が多い関東地方を中心に実施されたものである。他方、降雪などの気象条件が異なる積雪地域での期間暖房負荷の実測事例は少なく、外気温が極めて低い北海道の厳寒期に測定した堀口（1984）の報告が散見できる程度である。このため、関東地方で検討された期間暖房負荷の算定方法が、積雪地域でも適用できるかは明らかでない。また、融雪システムを有する連棟ハウスの必要熱量と、DHおよび期間暖房負荷の算定値との関係も未検討である。そこで、本章では、融雪システムを有する連棟ハウスと一般的な単棟ハウス、および生産現場に設置されている実用規模の連棟ハウスを対象に、必要熱量の実測値と日暖房デグリアワー（以下，DH）との関係性を評価した。また、関東地方を中心に検討されてきた従来の算定方法による算定値と、積雪地域における実測値を比較し、適応性について検討した。

材料および方法

1. 連棟ハウスと単棟ハウスの必要熱量の実測と算定値との比較（実験1）

融雪システムを有する連棟ハウスと一般的な単棟ハウスの必要熱量の実測値として第3章第3節の必要熱量のデータを用いて、DHとの関係について評価するとともに算定値との比較を行った。なお、調査期間は1999年12月24日から2000年3月9日までの1シーズンである。

DHの計算方法については多くの報告があるが、本章では林ら（1982）がDH

の実測値として用いた手法に準じた。すなわち、外気温が暖房設定室温より低い時間帯における、外気温と暖房設定室温の温度差の積分値として次式で求めた。

$$DH = \int_{t_1}^{t_2} (T_c - T_o) dt \quad (4-1)$$

ここで、 t_1 ：午前 11 時 45 分、 t_2 ：翌日の午前 11 時 45 分、 T_c ：暖房設定室温（℃）、 T_o ：外気温（℃）である（ただし、 $T_c > T_o$ の時のみ積分）。

暖房設定室温は、暖房用暖房機の設定温度である 14℃とした。また、外気温は連棟ハウスを設置している同じ敷地内において 30 分間隔で測定した値とした。

積雪地域では、冬期間の日照時間が極めて少なく、地中伝熱量は僅少である。このため、期間暖房負荷の算定値は、地中伝熱量を除外し、平均暖房負荷係数、熱節減率（0.35）、保温比と DH の関係から求めた（岡田，1980）。なお、平均暖房負荷係数は、林ら（1979）の報告によれば、最大暖房負荷係数より 25%ほど小さくなる。このため、最大暖房負荷係数と 0.75 の積から算出し、 $4.97\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ とした。

2. 生産現場での必要熱量の実測と算定値との比較（実験 2）

山形県長井市、同鶴岡市、同寒河江市に建設されている温風送風式融雪システムを有する連棟ハウスを対象に、必要熱量と DH の関係について評価するとともに算定値との比較を行った。

長井市、鶴岡市、寒河江市に建設されているハウスの概要は、第 2 章第 2 節で述べている通りである。長井市、鶴岡市における調査は、1999 年 12 月～2000 年 3 月、2000 年 12 月～2001 年 3 月、2001 年 12 月～2002 年 3 月の 3 シーズン行った。寒河江市における調査は 1999 年 12 月～2000 年 3 月の 1 シーズン行った。

必要熱量の算出には、いずれの調査箇所とともに給油伝票を元に計算した燃油消費量を用いた。長井市の連棟ハウスにおける暖房設定室温は、3 シーズンともに 5℃であった。鶴岡市の連棟ハウスにおける暖房設定室温は、栽培品目が

年次により異なったため、2001年12月～2002年3月の1シーズンのみ16℃で、それ以外は5℃であった。寒河江市の連棟ハウスにおける暖房設定室温は、3シーズンともに10℃であった。

DHの計算方法は、実験1と同様に外気温と暖房設定室温から算出した。外気温は、調査を行った連棟ハウスの近傍において小型温度記録装置（T&D社製、TR-52）により30分間隔で測定した値とした。なお、各調査箇所とも給油日の間隔は3～7日だったが、給油時刻の特定は困難であった。このため、いずれの給油日ともに、午前0時に給油したと仮定し、DHとの比較を行った。

期間暖房負荷の算定値は、実験1と同様に、平均暖房負荷係数（ $4.97\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{℃}^{-1}$ ）、熱節減率、保温比とDHの関係から求めた。なお、長井市、鶴岡市の連棟ハウスの保温比は0.63であり、熱節減率は実験1と同様に0.35とした。また、寒河江市の連棟ハウスの保温比は0.84であり、熱節減率は、2層カーテンが設置してあるため0.55とした。

結果

1. 連棟ハウスと単棟ハウスの必要熱量の実測と算定値との比較（実験1）

DHと単棟ハウスの必要熱量の関係を図4-1に示す。なお、両者は第3章第3節と同様に7日間ごとの平均値としてプロットし、あわせて、期間暖房負荷の算定値を示す直線を記入した。

単棟ハウスの必要熱量は、 $64.8\sim 97.3\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ の範囲で推移し、DHが高いほど増加した。また、期間暖房負荷の算定値を示す直線よりもやや低い位置に分布した。

DHと連棟ハウスの必要熱量の関係を図4-2に示す。なお、単棟ハウスと同様に7日間ごとの平均値としてプロットし、図4-1と同様に、期間暖房負荷の算定値を示す直線を記入した。

連棟ハウスの必要熱量は、融雪に用いられる熱量も含んでいるが、DHが高いほど増加した。また、期間暖房負荷の算定値を示す直線付近に分布したが、DHが低い場合にはやや小さく、DHが高い場合にはやや大きかった。

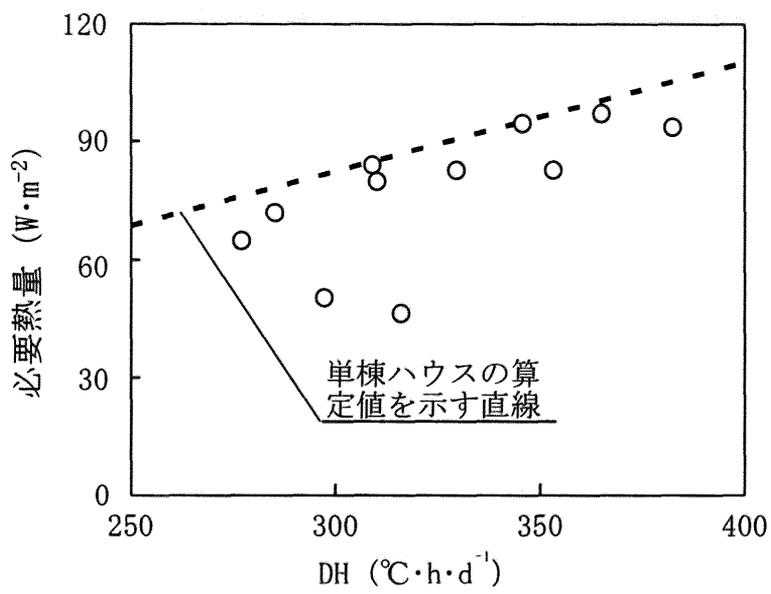


図4-1 DHと単棟ハウスの必要熱量の関係

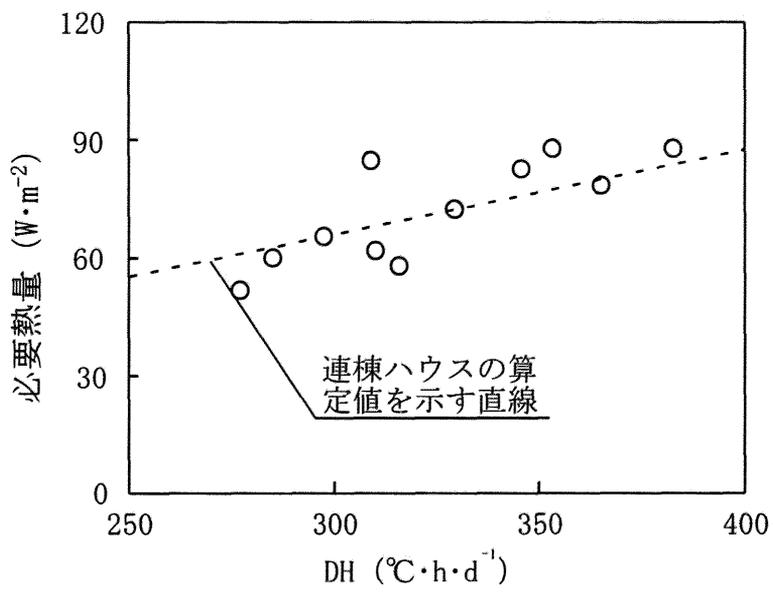


図4-2 DHと連棟ハウスの必要熱量の関係

2. 生産現場での必要熱量の実測と算定値との比較（実験 2）

DH と長井市および鶴岡市に建設されている連棟ハウスの必要熱量の関係を図 4-3 に示す。なお、給油日までの期間の平均値としてプロットし、図 4-2 と同様に期間暖房負荷の算定値を示す直線を記入した。

暖房設定室温が 5℃の場合と 16℃の場合とで大きく 2 グループに分かれ、幅広く分布した。また、すべてのプロットともに融雪に用いられる熱量も含んでいるが、図 4-2 と同様に DH が高いほど増加した。暖房設定室温が 16℃の場合では、鶴岡市の連棟ハウスのみのデータであるが、期間暖房負荷の算定値を示す直線付近に分布した。暖房設定室温が 5℃の場合では、調査箇所により異なる結果であった。鶴岡市の連棟ハウスで暖房設定室温が 5℃の場合には、いずれの調査期間ともに算定値を示す直線よりも高い位置に分布した。長井市の連棟ハウスは 3 シーズンともに暖房設定室温は 5℃であったが、DH が低い場合には算定値を示す直線よりも低い位置に分布し、DH がやや高い場合には算定値を示す直線よりも高い位置に分布した。プロット全体を通しては、概ね算定値を示す直線付近に分布した。

DH と寒河江市に建設されている連棟ハウスの必要熱量と DH の関係を図 4-4 に示す。なお、図 4-3 と同様に給油日までの期間の平均値としてプロットし、期間暖房負荷の算定値を示す直線を記入した。算定値を示す直線は、保温比、熱節減率ともに高かったために、他のハウスよりも低い位置となった。必要熱量は、 $7.4 \sim 66.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ の範囲で推移し、DH が高いほど増加した。また、寒河江に建設されている連棟ハウスにおいても融雪に用いられる熱量も含んでいるが、期間暖房負荷の算定値を示す直線付近を中心に分布した。

3. 調査期間中の気象条件

実験 1 の調査期間中の日照時間について、山形県寒河江市における観測値と、関東地方の代表的な値として千葉県千葉市における平年値を表 4-1 に示す。なお、寒河江市における日照時間 ($\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$) は、山形県森林研究研修センターでの観測値、千葉市における日照時間は、銚子地方気象台が発表した過去 10 年間 (1990~1999 年) の値から求めた平年値である。寒河江市における日照時間は

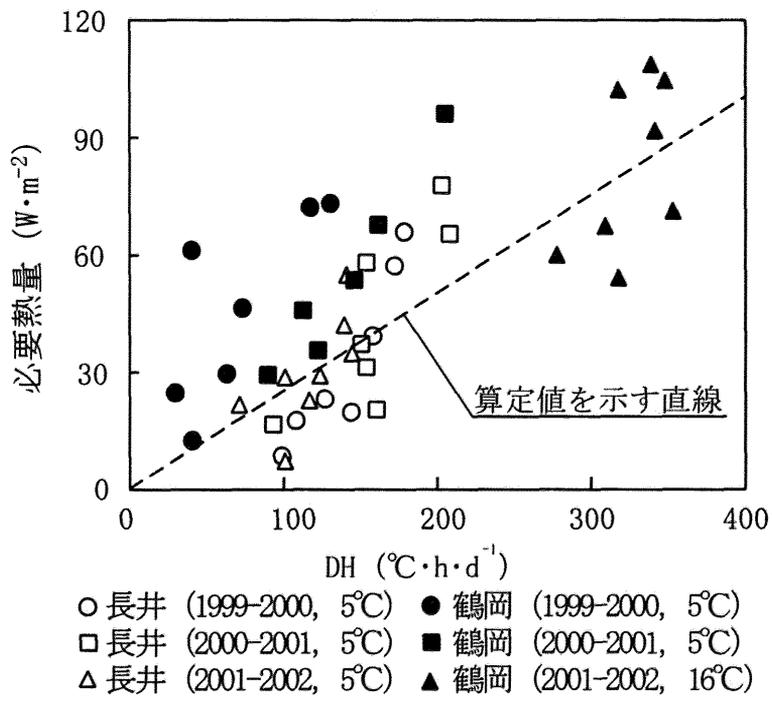


図4-3 DHと現地試験ハウス（長井市，鶴岡市）の必要熱量の関係

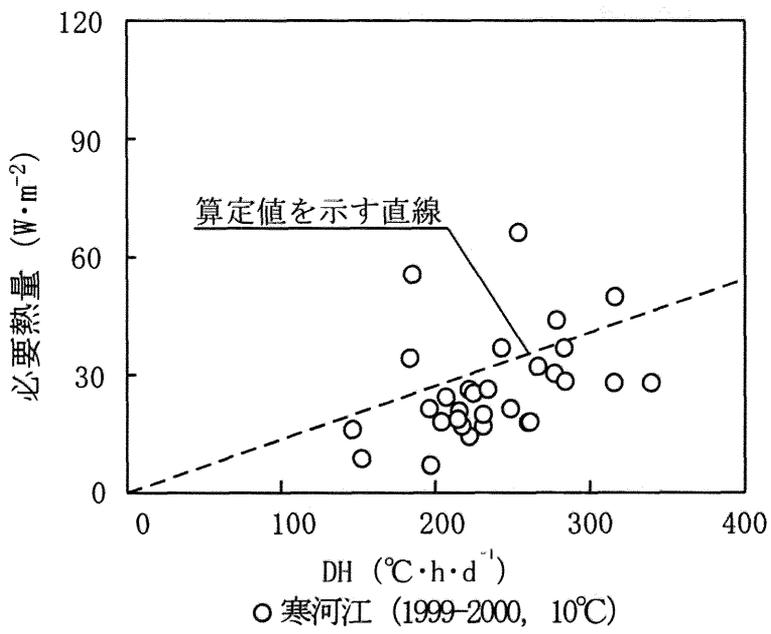


図4-4 DHと現地試験ハウス（寒河江市）の必要熱量の関係

表 4-1 調査期間中の日照時間 (実験 1)

	山形県 寒河江市 ^{※1} (h・d ⁻¹)	千葉県 千葉市 ^{※2} (h・d ⁻¹)
12月24日～12月30日	3.0	5.7
12月31日～1月6日	1.3	6.4
1月7日～1月13日	1.7	5.6
1月14日～1月20日	3.6	5.2
1月21日～1月27日	2.3	6.1
1月28日～2月3日	2.6	6.9
2月4日～2月10日	2.4	6.4
2月11日～2月17日	2.0	6.0
2月18日～2月24日	1.9	6.5
2月25日～3月2日	3.4	5.2
3月3日～3月9日	1.5	6.0
平均値	2.3	6.0

※1：山形県森林研究研修センターでの調査期間中の観測値

※2：銚子地方気象台が発表した過去10年間（1990～1999年）の値から算出した平年値

全期間とも短く、最も長かった期間でも $4\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ に満たなかった。また、調査期間の平均値も $2.3\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ と短かった。一方、千葉市における日照時間は、いずれの期間も $5\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ 以上となり、調査期間の平均値も $6.0\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ であった。この時期の日の出から日没までが約 $10\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ であることを考慮すると、晴天日が多かったといえる。

実験 2 を行った各地点の日照時間について、AMeDAS の観測地点である山形県長井、鶴岡と、寒河江市に最も近い左沢の旬別平年値を表 4-2 に示す。いずれの観測地点ともに短く、平均値では $3.0\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ 以下であった。特に、鶴岡においては、日照時間が $1.0\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ 以下の期間も多く、全期間の平均値も $2.0\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ に満たなかった。

考察

積雪地域における必要熱量の実測は、北海道の厳寒期について堀口（1984）が、従来の算定値よりも小さくなることを報告している。実験 1 の調査結果でも、単棟ハウスの必要熱量は、期間暖房負荷の算定値に比べてやや小さかった。これは、実際の必要熱量が、期間暖房負荷の算定値よりもやや小さく評価される可能性を示している。従来の算定方法については関東地方での研究結果を中心に、日本農業気象学会（1977）や岡田（1980）などにより取りまとめられている。この中で、林ら（1979）は、期間暖房負荷の算定に用いる平均暖房負荷係数は、最大暖房負荷より 25% ほど小さい値であると報告している。ここで、最大暖房負荷の計算は、晴天微風時を対象にしている（岡田，1980）。また、高倉ら（1972）は、温室からの放熱量を実測し、放射によるものは、雲の影響を受けるものの、全体の 35~65% を占めると報告している。これは、関東地方の冬期間は、晴天日が多く、放射による熱損失が大きいためである。林ら（1979）の報告も類似の条件で測定された結果である。しかし、積雪地域では、日照時間が短く雲で覆われている期間が長いため、放射による熱損失が軽減されるはずである。また、山辺ら（1982）によれば、屋根面への降雪は、施設内からの熱伝達によって融解し、水膜の形成により摩擦係数が小さくなり落下する。こ

表 4-2 現地試験地における時期別の日照時間の平年値 (実験 2)

	山形県 長井 ^{※1} (h・d ⁻¹)	山形県 鶴岡 ^{※2} (h・d ⁻¹)	山形県 左沢 ^{※3} (h・d ⁻¹)
12月上旬	1.9	1.6	2.6
12月中旬	1.4	1.0	1.7
12月下旬	1.8	1.5	2.5
1月上旬	1.4	0.9	2.0
1月中旬	2.0	1.2	2.4
1月下旬	1.5	1.0	2.2
2月上旬	2.0	1.4	2.6
2月中旬	2.5	1.6	3.2
2月下旬	0.9	0.6	1.1
3月上旬	3.2	2.5	4.0
3月中旬	4.2	3.2	4.6
3月下旬	4.1	4.2	4.9
----- 平均値	2.4	1.9	3.0

※1～3：いずれもアメダス観測地点。左沢は寒河江市直近の観測地点。

のため、単棟ハウスの降雪時の屋根面では水膜が形成されており、純放射量はさらに軽減すると推察される。一方、必要熱量を軽減する要素として、地中から温室内への伝熱量が上げられる。関東地方での測定結果として、高倉ら(1972)や古在ら(1982)は、地中から温室内への伝熱を報告している。また、林ら(1979)の報告でも、地温が室温よりも1~3℃高かった。これらは、昼間の日射による貯熱に起因している(岡田, 1980)。しかし、表4-1で示したとおり、積雪地域では日照時間が極めて短いことから、温室内への伝熱量は関東地方よりは少ないと考えられる。さらに、北海道での測定結果である堀口(1984)の報告では、地中から温室内への伝熱とは逆方向の、空気から地中へ流れる熱量が多かった。このため、地中から温室内への伝熱により、必要熱量が軽減された可能性は低い。これらから、積雪地域において期間暖房負荷の算定値が過大に評価される要因は、純放射量の軽減であると推察される。ここで、単棟ハウスの必要熱量($77.7\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)と、DHの平均値から求めた平均内外気温差(13.4°C)、熱節減率(0.35)、保温比(0.49)から平均暖房負荷係数を算出すると、 $4.37\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ となる。この値は、最大暖房負荷係数に対して34%ほど小さい。このことは、最大暖房負荷係数に対する平均暖房負荷係数の比が0.66となることを示しており、林ら(1979)が報告した0.75よりも小さい値である。

連棟ハウスにおいて、積雪地域の気象条件から純放射量が軽減される点は、単棟ハウスと同様である。一方、連棟ハウスでは、融雪のための熱量が増加する。第3章第3節で報告したとおり、本実験の調査期間中は、平均外気温が約 0°C 以下で降雪量が多かった。暖房設定室温が 14°C であるため、平均外気温が 0°C の場合のDHは約 $330^\circ\text{C}\cdot\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ である。つまり、降雪量と融雪用暖房機の発熱量には、正の相関があるため、 $330^\circ\text{C}\cdot\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ より低い範囲では、融雪用暖房機の発熱量が少なく、 $330^\circ\text{C}\cdot\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ より高い範囲では、融雪用暖房機の発熱量が多かったといえる。したがって、DHが $330^\circ\text{C}\cdot\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ より低い範囲では、融雪用暖房機の発熱量の増加が少なかったために、算定値に比べてやや小さい値になったと考えられる。また、DHが $330^\circ\text{C}\cdot\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ より高い範囲では、降雪量の増加に伴い、融雪用暖房機の発熱量が増加し、算定値に比べてやや大きい値となった

と考えられる。

実験 2 の生産現場における調査においては、鶴岡市の 2001 年から 2002 年に調査した暖房設定室温が 16℃であった場合のプロットと、寒河江市のプロットが算定値を示す直線付近に分布し、実験 1 と同様な結果が得られた。また、長井市の事例についても、DH によって若干の差はあるものの、概ね算定値を示す直線に分布した。調査箇所である長井市、鶴岡市、寒河江市は、同じ山形県内の都市であるが、日照時間、積雪量などの気象条件が異なる地域である（日本気象協会山形支部、1992）。このため、実験 1 で得られた結論が、積雪地域の様々な気象条件下においても適応できる可能性が示された。一方、鶴岡市の暖房設定室温が 5℃であった場合のプロットでは、いずれも算定値を示す直線よりも高い位置に分布し、他の調査結果と傾向が異なった。ここで、鶴岡市は日本海側に面しており、冬期間の日照時間が極めて少ないことが特徴である。岡田（1980）によれば、日射に起因する地中からの伝熱量は、暖房設定室温が低く内外気温差が小さいほど影響が大きくなることを報告している。したがって、暖房設定室温が 5℃と極めて低い条件において実測値が算定値よりも大きくなった原因は、必要熱量が減少することにより相対的に日射の影響が大きくなったためであると考えられる。

以上の結果から、従来の算定方法を積雪地域に適応した場合、晴天日が少ないことや屋根面への着雪による純放射量の減少から、期間暖房負荷がやや大きく評価される可能性が考えられる。また、暖房設定室温が 10℃以上における融雪システムを有する連棟ハウスでは、降雪量によって融雪に用いられる熱量が増減するものの、期間暖房負荷の算定値とほぼ同等となると考えられる。

第5章 総合考察

積雪地域においても、保温カーテンや暖房設備を装備したハウスが増加し、周年型の農業が展開されている（農林水産省農産園芸局野菜振興課，2000；山形県，2005）。このため、保温性が高く、作業効率や土地利用効率も高い連棟ハウスに対する期待が高まっている。しかし、積雪地域に連棟ハウスを導入する場合には、屋根谷部への積雪荷重が問題となるため（小林，1977）、有効に作動する融雪装置が必要である（日本施設園芸協会，1997）。そこで、本研究では、連棟ハウスの融雪装置の一種である温風送風式融雪システムの能力評価と技術確立を目的とし、第2章で示した以下の問題点について解決を図った。

①送風方式の最適化

温風送風式融雪システムは、温風を屋根面付近へ送風する方式であるため、送風方式が融雪能力に大きな影響を及ぼす。このため、送風ダクトの設置位置や形状を変えて融雪能力を調査したが、現地事例で見られたような融雪能力の大幅な低下や、融雪量の最大値に大きな違いは見られなかった。送風ダクトの形状や温風の吹き付け方式が同じで、設置位置だけが異なるダクトA区とダクトB区の融雪量の最大値がほぼ同程度となることは、屋根面における熱伝達量の数値計算の結果からも明らかである。しかし、ダクトの形状や吹き付け方向が異なるダクト密着区も同程度の融雪量を示したことは、着雪率の結果を考慮する必要があると考えられる。ダクト密着区は、ダクトが屋根面へ密着しているため気象条件の影響を受けやすく、融雪用暖房機に近い上流における着雪率は極めて低い、下流における着雪率が非常に高くなる現象が見られた。つまり、ダクト密着区は、ダクトA区と同じ融雪量を示したものの、上流と下流の融雪能力に差が生じやすく、融雪能力の均一性が低い送風方式であると考えられる。また、ダクトA区は、㊦送風ダクトが屋根面に接していないため送風ダクト内の温度低下が小さいこと、㊧屋根面における風速が下流においても低下しないこと、㊨屋根面の滑雪により降雪中は常に雪で覆われている雨樋付近に送風ダクトが設置されていること等の要因から、融雪能力が高い送風方式であ

ると考えられる。

以上より，ダクト A 区のように送風ダクトを雨樋付近に設置し，屋根内面に温風を吹き付けることにより，高い融雪能力が得られることが明らかとなった。また，数値計算の結果から，送風ダクトを 2 対 4 本に増設することにより，さらに 18% 融雪能力が向上する可能性が示された。

一方，融雪用暖房機から離れた下流ほど融雪能力が劣る現象に関しては，本研究では明確な解決策を示すことができなかった。しかし，送風ダクトの直径を下流ほど細くする方法や，吹き出し口の間隔を下流ほど密にするなどの方法によっても解決できる可能性がある。また，大規模な生産現場の連棟ハウスでは，妻面の両側に融雪用暖房機を設置し，妻面側から中央へ向かって温風を送り，融雪能力の均一性を高める方法をとっている事例もみられる。これらの手法を用いることにより，送風方向に対する融雪能力の均一性は確保され，実用上の大きな問題は生じないと考えられる。

②融雪量の定量的評価

これまで検討されてきた地下水などを用いた融雪装置について，融雪量を定量的に調査した報告は少ない。一方，温風送風式融雪システムは，屋根内面から温風を吹き付ける方式であるため，雨樋から流落する融雪水を測定することで融雪量を評価することが可能である。屋外実験で得られた融雪量の実測値の最大は，いずれの調査においても $1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ であった。また，熱伝達量の数値計算から得られた融雪量の推定値は $2.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ となることも示された。融雪量の実測値，もしくは数値計算で得られた推定値と安全率 0.8 の積から，1 日あたりの融雪量を算出すると両者ともに約 $38\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ となった。これは，園芸用施設安全構造基準（暫定基準）（日本施設園芸協会，1997）が示す山形における 15 年再現期間の新積雪重量と一致する。園芸用施設安全構造基準（暫定基準）によれば，有効に作動する融雪システムを有する連棟ハウスは，積雪荷重として新積雪重量を採用しており，24 時間の降雪量に耐える構造となっている。本融雪システムは，降雪と同時に融雪を開始するため，降雪が長期間継続しても屋根谷部に新積雪重量を超える積雪荷重が生じることはない。したがって，本

融雪システムが示した融雪量は、山形県などの積雪地域において十分実用性が高い値であるといえる。

③ハウス内条件と融雪能力の関係解明

屋外実験で、保温カーテンの開閉条件や暖房設定室温などの細かいハウス内条件ごとに、融雪能力を調査することは困難である。このため、屋根面における熱伝達量の数値計算を行ったところ、自然対流領域における熱伝達量は全体の25%に過ぎず、保温カーテンを解放しカーテン上部気温を高めても融雪能力向上に対する効果が低いことが示された。また、第3章第1節の送風方式の比較実験と、第3章第2節の融雪量と降雪量の経時的変化を調査した実験では、暖房設定室温がそれぞれ14℃と17℃と異なる条件であった。暖房設定室温が異なると、カーテン上部気温も異なると考えられるが、同じ送風方式における融雪量の最大値は、両者とも $1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ と同じであった。この2つの屋外実験の結果は、数値計算で得られたカーテン上部気温の上昇は融雪能力向上に対する効果が低いという結果と一致する。

④融雪用暖房機の適正制御

温風送風式融雪システムを有する連棟ハウスは、暖房用暖房機の他に、降雪感知機で制御する融雪用暖房機を装備している。このため、融雪用暖房機の発熱量を最小限に抑えることは、経営上重要な要素である。融雪用暖房機の発熱量と、降雪量から算出した融雪に必要な熱量を評価したところ、両者は高い正の相関を示し1:1に対応した。地下水を屋外で散水する方式の場合、30%から60%は融雪に用いられず屋外へ放熱している(木村, 1974)ことを考慮すると、本融雪システムは適正な制御が行われていたといえる。また、適正な制御により融雪用暖房機の発熱量が節減されたことで、融雪システムを有する連棟ハウスは、暖房用暖房機しか装備しない単棟ハウスよりも燃油消費量がやや少なくなることが明らかとなった。

以上4点の問題について解決を図ったが、温風送風式融雪システムを有する連棟ハウスは、融雪能力、燃油消費量の点において実用性の高い融雪方式であると考えられる。また、栽培期間中を通じた燃油消費量である期間暖房負荷に

についても、積雪地域における実測値は、従来示されている算定方法で得られる算定値よりもやや小さくなることが明らかとなった。このため、暖房設備が増加している積雪地域において経営上重要となる燃油消費量が、より正確に予測できると考えられる。

これらの研究成果を活用することにより、保温性が低く耐雪強度の強い耐雪型単棟ハウスから、保温性が高く融雪能力の高い融雪型連棟ハウスへ移行し、積雪地域における施設園芸がさらに発展していくことが出来ると考えられる。なお、本研究成果により、山形県においては温風送風式融雪システムを装備すれば、連棟ハウスも補助事業の審査対象となるように制度が定められており、山形県の施設園芸の普及拡大に大きく貢献している。

総合摘要

積雪地域における連棟ハウスの融雪システムの技術確立を目的として行った本研究の要旨は次の通りである。

1. 温風送風式融雪システムの特徴と生産現場における課題

温風送風式融雪システムは、温風暖房機と降雪感知器、フレキシブルダクト、送風ダクト等で構成されており、以下のような特徴がある。

- ①地下水などを熱源として用いる融雪方式と異なり、設置に際して地域的な制限がない。
- ②温風暖房機と簡易なダクト類で構成しているため、低コストで設置が可能であり、既存の連棟ハウスへも設置できる。また、すべての部品がハウス内にあるため、融雪システムの維持・管理が容易である。
- ③降雪感知器で制御しているため、降雪と同時に運転を開始するなどの自動運転が可能である。

生産現場における融雪システムを有する連棟ハウスの設置事例を調査したところ、温風送風式融雪システムの条件や、ハウスの場所によっては十分な融雪能力が得られなかった事例がみられた。このため、送風ダクトなどの諸条件と融雪能力の関係を明らかにする必要があると考えられる。また、融雪システム運転により燃油消費量が増加するため、融雪用暖房機の制御が適正であるか検討するとともに、一般的な単棟ハウスとの燃油消費量の比較が必要であると考えられる。

2. 送風方式の比較検討

ダクトの設置位置や形状が異なる3種類の送風方式について、融雪能力の比較検討を行った。その結果、いずれの送風方式とも送風方向に対して下流で融雪の遅れが見られるものの、融雪システムが停止するまでには屋根谷部の積雪を融雪することができた。

融雪能力の最大値は $1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ となり、送風方式による差はみられなかった。また、気象条件により融雪能力に差がみられ、降雪量が多く、雪の密度が

高い場合に着雪率が高まる傾向であった。送風方式としては、気象条件の影響を受けにくい送風ダクトを雨樋の直近に設置し、温風を吹き付ける方式が融雪に適すると考えられる。

3. 最大融雪能力の推定と能力向上のための試算

連棟ハウスの温風送風式融雪システムにおいて、融雪能力の最大値を推定することを目的に、屋外実験により融雪量の経時的变化を評価するとともに、屋根面からの熱伝達量を数値計算で求めた。その結果、屋外実験で得られた融雪量の実測値は、降雪量の経時的变化とほぼ同様に推移し、最大で $1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ であった。また、数値計算で得られた融雪量の推定値は $2.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ に相当し、強制対流領域による割合が全体の75%を占めた。したがって、強制対流領域の熱伝達に影響する送風ダクトの最適化により、さらに融雪能力が向上すると考えられる。例えば、送風ダクトを2段4列に増設した場合の融雪量を試算すると、1段2列の場合に比べて18%増加した。一方、自然対流領域での熱伝達量が全体に占める割合は低く、保温カーテンの開放は融雪能力の向上にあまり関係しないと考えられる。

4. 融雪システムを有する連棟ハウスと単棟ハウスの熱量比較

積雪地域の冬期間において、融雪システムを有する連棟ハウスと、融雪システムを有さず屋根雪がハウス両側面へ滑落する一般的な単棟ハウスを対象に、必要熱量の検討を行った。調査期間中における、連棟ハウス内に設置した融雪用暖房機の発熱量は、降雪量から算出した融雪に必要な熱量に対して、高い正の相関を示した。また、両者はほぼ1:1に対応した。連棟ハウスの床面積当たり必要熱量は、単棟ハウスの床面積当たり必要熱量よりもやや少なかった。保温比が大きいことによる熱量の減少よりも、融雪に用いられた熱量の増加が小さかったためと考えられる。

5. 積雪地域における期間暖房負荷の実測と評価

従来示されている期間暖房負荷の算定値と、積雪地域における一般的な単棟ハウスと融雪システムを有する連棟ハウス実測値の比較を行った。その結果、期間暖房負荷の算定値に比べて、一般的な単棟ハウスの必要熱量の実測値はや

や小さくなった。融雪システムを有する連棟ハウスの実測値では、融雪に用いられる熱量も含んでいるが、算定値とほぼ同等であった。また、生産現場での調査においても同様な結果が得られた。このため、積雪地域での融雪に用いられる熱量を除いた暖房必要熱量は、従来の算定方法ではやや大きく評価される可能性が考えられる。

謝辞

本論文をとりまとめるにあたり、千葉大学園芸学部生物生産科学科 教授 篠原温博士からは終始懇切な御指導とさまざまな御教示を頂いた。さらに、同教授 田代亨博士，同園芸経済学科 教授 鷹野征じ博士，同生物生産科学科 教授 後藤英司博士，同助教授 丸尾達博士からは本論文が完成するまで有益な御助言を頂いた。ここに謹んで深く感謝の意を表する。

本研究の遂行にあたり、独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 上席研究官 佐瀬勘紀博士，および主任研究官 石井雅久博士からは、多くの御指導を頂くと共に、丁寧な校閲，叱咤激励を頂いた。また、筑波大学農林工学系 助教授 山口智治博士からは、貴重な御助言と適切な御指導を頂いた。さらに、独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 農業施設研究室 室長 奥島里美博士，同 上席研究官 池口厚男博士，同 森山英樹氏からは有益な御助言を頂くと共に、自由な研究室の雰囲気を提供して頂いた。これらの方々からは2001年9月から12月までの依頼研究員研修以来御指導を頂いており、各位との出会いがなければ本研究は成し得なかった。ここに深甚の謝意を表する。

本研究に着手するにあたり、有限会社クリタ園芸 栗田義夫氏からは貴重な御助言を頂いた。山形県農業総合研究センター生産技術試験場 副場長 川村啓造氏，山形県生産技術課 主幹 北川守氏，同 課長補佐 阿部清氏からは本研究の課題を与えて頂くと共に、研究を実施する上で終始懇切な御指導を頂いた。また、元山形県立園芸試験場野菜部（現在 山形県農業総合研究センター生産技術試験場野菜花き研究科）研究員 石山秀峰氏，同 石山新治氏，同 齋藤謙二氏，同 五十嵐美穂氏，および農林業務員諸氏からは、吹雪の中の屋外実験とともに汗を流して頂き、さらに有益な御助言を頂いた。現地適応性試験の実施にあたっては、西村山，西置賜，最上，庄内のそれぞれの農業技術普及課，JA，担当生産者の各位より、本研究遂行上多くの便宜と多大な御協力を頂いた。また、山形県最上総合支庁農業振興課 主幹 高橋道雄氏，庄内総合

支庁 酒田農業技術普及課 課長 大場裕子氏からは本論文の執筆にあたり寛大な御理解と御協力を頂いた。本研究は、こうした方々の助力なしには成し得なかった。ここに感謝の意を表する。

最後に本研究を実施するにあたり、常に最初の校閲者となり支えてくれた妻伸代と家族にも深く感謝する次第である。

引用文献

- 1) Aaron M., Huber and Raymond, Viskanta (1994) : Effect of jet-jet spacing on convective heat transfer to confined, impinging arrays of axisymmetric air jet, International Journal Heat Mass Transfer, 18, 2859-2869.
- 2) 渥美照男(1981):ハウスの雪害防除対策,農業および園芸,56(12),1503-1506.
- 3) 羽倉弘人 (1975) : 園芸用栽培施設の構造設計の考え方, 農業施設, 6 (1), 33-39.
- 4) 濱寄孝弘・岡田益己・小沢聖 (1995) : 1994年1月29日に岩手県北部沿岸で発生したパイプハウスの雪害－構造上の問題点と対策－, 農業気象, 51(1), 53-56.
- 5) 林真紀夫 (1998) : 暖房 (日本施設園芸協会編「四訂版施設園芸ハンドブック」), 日本施設園芸協会, 138-151.
- 6) 林真紀夫・古在豊樹 (1982) : 各種暖房デグリアワー算定値と実測値の比較および暖房デグリアワー線図の提案, 農業気象, 38 (1), 29-36.
- 7) 林真紀夫・岡田益己・小倉孝雄・山中孝一・三原義秋 (1979) : 温室の期間暖房負荷に関する研究 (1) 大型ビニールハウスの平均暖房負荷係数, 昭和54年度日本農業気象学会大会講演要旨, 3.
- 8) 堀口郁夫 (1984) : 北海道の厳寒期における温室暖房負荷の特徴について, 農業施設, 15 (1), 36-41.
- 9) 稲葉英男 (1988) : 強制対流熱伝達, 伝熱工学, 関信弘編, 森北出版, 42-86.
- 10) 岩切敏 (1982) : 「56大雪」による北陸地方の農業雪害とその特徴, 農業気象, 38 (1), 59-64.
- 11) 鴨田福也 (1979) : 北陸地域における施設園芸の問題点－とくに積雪荷重を中心として－, 農業および園芸, 54 (3), 385-391.
- 12) 環境制御基準資料調査グループ (1978) : 大型ビニールハウスにおける暖房負荷の実態調査, 農業気象, 33 (4), 189-193.

- 13) 甲藤良郎 (1978) : 物体のまわりの伝熱, 伝熱概論, 養賢堂, 147-182.
- 14) 木村忠志 (1974) : 屋根雪の融雪, 雪氷, 36 (4), 16-21.
- 15) 小林一雄 (1977) : 施設園芸に対する防風, 防雪対策, 農業および園芸, 52 (1), 221-226.
- 16) 古在豊樹・郡司智子・渡部一郎・林真紀夫・伊東正 (1982) : 温室の日暖房負荷に関する測定と解析, 農業気象, 38 (3), 279-285.
- 17) 森山英樹・豊田裕道 (1999) : 1998年1月の大雪における東北地方南部太平洋側の園芸施設の被災特徴について, 農業施設, 30 (2), 205-214.
- 18) 村松謙生 (1998) : 園芸施設の設計用屋根雪重量の評価, 北陸農業研究資料, 37, 1-15.
- 19) 日本機械学会 (1975) : 衝突噴流による熱伝達および物質伝達, 伝熱工学資料 改訂第3版, 109-112.
- 20) 日本気象協会山形支部 (1992) : 雪, 山形の気象百年, 48-51.
- 21) 日本農業気象学会 (1977) : 施設園芸環境制御基準資料, 農業気象, 33 (特別号), 33-41.
- 22) 日本施設園芸協会編 (1997) : 園芸用施設安全構造基準 (暫定基準), 平成9年版, 日本施設園芸協会, 32-35.
- 23) 農林水産省農産園芸局野菜振興課 (2000) : 園芸用ガラス室・ハウス等の設置状況.
- 24) 岡田益己 (1980) : 暖房, 温室設計の基礎と実際, 第1版 (三原義秋編), 養賢堂, 182-204.
- 25) 奥島里美・奈良誠 (1992) : 施設園芸における災害の傾向 - 園芸施設共済統計表から -, 農業施設, 23 (2), 87-93.
- 26) 大野宏之・横山宏太郎・小南靖弘・井上聡・高見晋一・Thomas Wiesinger. (1998) : 北陸地方における降水量計の固体降水捕捉率, 雪氷, 3, 225-231.
- 27) 大谷博実 (1982) : 積雪地帯におけるパイプハウスの融雪について, 滋賀農試研報, 24, 165-168.
- 28) 佐藤一二・須田雄悦・長松谷正三郎 (1967) : 積雪寒冷地におけるビニール

- ハウス屋根上散水による保温と消雪効果事例，農業および園芸，42（6），919-922.
- 29) 高橋久三郎・小林一雄・村松謙生・大沼匡之・鴨田福也（1981）：園芸施設に対する積雪荷重とその軽減法，北陸農試報，23，197-234.
- 30) 高倉直・岡田益己（1972）：実測による温室暖房負荷係数の決定，農業気象，27（3），93-98.
- 31) Van Treuren, K. and Wang, Z. and Ireland, P. and Jones, T. (1996) : Detailed measurements of local transfer coefficient and adiabatic wall temperature beneath an array of impinging jets. Journal of Turbomachinery, 116, 369-374.
- 32) 山辺守・山本純男・宮田茂之・井ノ山助信・横谷政志・宮野清治（1982）：園芸施設の融雪方法に関する研究，石川農試研報，12，33-51.
- 33) 山形県（2005）：園芸産出額 1,000 億円を超える園芸産地づくり，やまがたの農業・農村，47-60.
- 34) 山形県農林部（1976）：東北六県施設園芸野菜団地の団地リスト一覧表，施設園芸の栽培技術と経営，356-359.
- 35) 山本春樹（1988）：自然対流熱伝達，伝熱工学，関信弘編，森北出版株式会社，87-110.
- 36) 山下進・佐藤義和（1982）：園芸施設の豪雪による被害について，農土試技報，A28，35-60.

Evolution of melting snow system for multi-span greenhouse in snowy areas

Shinsuke FURUNO

Summary

In order to develop a melting snow system for a multi-span greenhouse in snowy areas, one of a melting snow system consisting of heated air through ducts onto the internal roof surface using an air heater was investigated. The data obtained in the present are summarized as indicated below.

1. Characteristics of the melting snow system using heated air, and problems encountered in a producing area.

The melting snow system using heated air consisted of an air heater, a snowfall control unit, and several ducts. Characteristics of this melting snow system were as follows.

- ① The development of a melting snow system using groundwater was associated with several problems. On the other hand, the development of such a melting snow system was hardly restricted by the area.
- ② It was possible to install the melting snow system in an existing greenhouse at a low cost because simple equipment was used, including an air heater, several duct, etc. In addition, this melting snow system could be easily maintained type of equipment used.
- ③ It was possible to operate the melting snow system automatically, including the start when it began to snow, due to the control by a snowfall control unit.

The performance of a melting snow system using heated air install in a multi-span greenhouse was investigated in a producing area. Since the melting snow system

sometimes did not operate well, the relation between the performance snow melting and the duct condition, etc. was examined.

When the melting snow system was used, heat requirement increased. Thus it was necessary to compare the heat requirement of a multi-span greenhouse equipped with the melting snow system with that of a single-span greenhouse locking a melting snow system.

2. Comparison of methods for the supply of heated air

Several methods for the supply of heated air were investigated. The performance of snow melting decreased with the distance from the end of the horizontal duct under the roof in each method. However, when the melting snow system was automatically turned off one hour after the end of snowing, no snow was observed on the roof.

The maximum melting rate of snow during the experiment which was $1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, was the same in all the methods. However, the performance of snow melting varied with the weather conditions. When the snow density and snowfall were high, the performance of snow melting decreased.

3. Estimation of the optimum performance of the melting snow system and suggestions for improvement in relation to the methods of supply of heated air.

In the melting snow system using heated air circulating onto the internal roof surface of a multi-span greenhouse, the maximum melting rate of snow was measured in a field experiment, and was estimated separately for the forced convection area and the natural convection area. The measured melting rate of snow fluctuated with snowfall. The maximum value of the measured melting rate of snow was $1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, while that of the estimated melting rate of snow was $2.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. The amount of heat transferred in the forced convection area was 75% of the total heat, suggesting that optimization of ducts providing heated air onto the

internal roof surface may increase the melting rate of snow. It was shown that the double ducts increased the heat transfer up to 18%, compared with that of a single duct. On the other hand, the heat transfer in the natural convection area was small. Opening of the thermal screens to raise the air temperature close to the roof surface may not be effective in enhancing the melting performance.

4. Comparison of the heat requirement between a multi-span greenhouse with a melting snow system and a single-span greenhouse

The heat requirement was measured and compared between a multi-span greenhouse equipped with a melting snow system and the typical single-span greenhouse lacking a melting snow system. Generally, single-span greenhouses do not require a melting snow system because snow drops off naturally from the roof by gravity.

The results for the multi-span greenhouse showed that the amount of heat provided by a heater for snow melting increased with the increase in snowfall, and there was a high correlation between the two parameters. The heat requirement per unit floor area of the multi-span greenhouse was slightly lower than that of the single-span greenhouse. This suggested that the decrease in heat requirement for internal air associated with the larger floor/surface area ratio of the four-span greenhouse was more significant than the increase in heat requirement for melting snow.

5. Comparison between measured heat requirement and estimated heat load

The measured heat requirement of the single-span greenhouse was slightly lower than the estimated heat load based on a common calculation procedure. The measured heat requirement of a multi-span greenhouse equipped with a melting snow system was equal to the estimated heat load. Similarly, the measured heat requirement in the producing area was equal to the estimated heat load too.

Therefore, it appeared that the measured heat requirement in a snowy area was lower than the estimated heat load based on a common calculation procedure.