

(千葉大学審査学位論文)

温室における 3D モデルを用いた果菜類の  
受光量および生育の推定

2021 年 1 月提出

千葉大学大学院園芸学研究科  
環境園芸学専攻 生物資源科学コース

大橋 雄太

## 目次

第1章 序論 .....	1
1.1. 研究の背景 .....	1
1.2. 既往の研究 .....	4
1.2.1. 果菜類の栽植方法と収量の関係.....	4
1.2.2. 画像情報を用いた生育および収量のモニタリング.....	5
1.2.3. 光学シミュレーションを用いた植物の受光量の推定.....	6
1.3. 本研究の目的と論文の構成.....	9
第2章 トマト栽培における受光体制および生育の調査.....	10
2.1. 緒言 .....	10
2.2. 材料および方法 .....	10
2.2.1. 供試植物および栽培温室.....	10
2.2.2. 群落受光率の調査.....	17
2.2.3. 生育調査 .....	17
2.2.4. 果実温の測定.....	20
2.3. 結果 .....	22
2.3.1. 群落受光率.....	22
2.3.2. 生育 .....	24
2.3.2.1. 破壊調査.....	24
2.3.2.2. LAIと草丈の推移.....	28
2.3.3. 果実温度 .....	31
2.4. 考察 .....	33
2.4.1. 群落の受光体制.....	33
2.4.2. 生育と収量.....	35
2.5. まとめ .....	39
第3章 3Dスキャナーを用いた果菜類の生育モニタリング.....	40
3.1. 緒言 .....	40
3.2. 試験3-1 3Dモデルを用いた果菜類の生育情報の推定.....	41
3.2.1. 目的 .....	41
3.2.2. 材料および方法.....	41

3.2.2.1. 供試植物および温室.....	41
3.2.2.2. 生育モニタリング.....	43
3.2.3. 結果 .....	48
3.2.4. 考察 .....	55
3.3. 試験 3-2 3D モデルを用いた果実重の推定.....	57
3.3.1. 目的 .....	57
3.3.2. 材料および方法.....	57
3.3.2.1. 供試植物および温室.....	57
3.3.2.2. 果実重の推定.....	57
3.3.3. 結果 .....	62
3.3.4. 考察 .....	64
3.4. まとめ .....	65
第4章 光学シミュレーションを用いた温室内の果菜類の群落受光量の推定.....	66
4.1. 緒言 .....	66
4.2. 試験 4-1 レイトレーサー法による群落内受光量の推定精度.....	67
4.2.1. 目的 .....	67
4.2.2. 材料および方法.....	67
4.2.2.1. 実験植物の栽培および群落内 PPFD の測定 .....	67
4.2.2.2. 群落および温室 3D モデルの作成.....	69
4.2.2.3. 精度確認用の群落内部の PPFD のシミュレーション .....	72
4.2.3. 結果 .....	74
4.2.4. 考察 .....	77
4.3. 試験 4-2 果菜類の畝間と受光量の関係 .....	78
4.3.1. 目的 .....	78
4.3.2. 材料および方法.....	78
4.3.2.1. 実験植物の栽培.....	78
4.3.2.2. 植物群落の 3D スキャンおよび 3D モデルの作成 .....	78
4.3.2.3. 仮想的な群落 3D モデルの作成.....	80
4.3.2.4. 群落の層別受光量の推定.....	84
4.3.3. 結果 .....	88

4.3.3.1. Canopy S の受光量.....	88
4.3.3.2. Canopy M の受光量.....	92
4.3.3.3. Canopy L の受光量.....	103
4.3.4. 考察 .....	113
4.3.4.1. 畝間の受光量への影響.....	113
4.3.4.2. 植物種の受光量への影響.....	113
4.3.4.3. 太陽高度および気象条件の受光量への影響.....	114
4.4. 試験 4-3 葉面積指数と受光量の関係 .....	116
4.4.1. 目的 .....	116
4.4.2. 材料および方法.....	116
4.4.2.1. 実験植物の栽培.....	116
4.4.2.2. 群落 3D モデルの作成.....	117
4.4.2.3. 果菜類の葉の傾斜角と葉長.....	122
4.4.2.4. 群落の受光量のシミュレーション .....	124
4.4.3. 結果 .....	125
4.4.3.1. 各果菜類の葉の傾斜角と葉長.....	125
4.4.3.2. LAI と群落受光量の関係.....	127
4.4.4. 考察 .....	129
4.4.4.1. LAI と群落受光量の関係.....	129
4.4.4.2. 本シミュレーションモデルの利用方法の検討.....	132
4.5. まとめ .....	133
第 5 章 総括 .....	134
5.1. 本論文の摘要 .....	134
5.2. 今後の課題および展望.....	134
5.2.1. 実際の栽培への本シミュレーションモデルの利用.....	134
5.2.2. 収量予測への本シミュレーションモデルの利用.....	135
引用文献 .....	136
謝辞 .....	145

## Nomenclature

3D	Three-dimensional	三次元
3DCG	Three-dimensional computer graphics	三次元コンピュータグラフィック
DAT	Days after transplanting	定植後日数
FSPM	Functional-structural plant model	機能構造植物モデル
HSI	Hue saturation intensity	色相・彩度・強度
HSL	Hue saturation lightness	色相・彩度・輝度
HSV	Hue saturation value	色相・彩度・明度
ICT	Information and communication technology	情報通信技術
LAD	Leaf area density	葉面積密度
LAI	Leaf area index	葉面積指数
LiDAR	Light detection and ranging	光検出と測距
MAE	Mean absolute error	平均絶対誤差
PAR	Photosynthetically active radiation	光合成有効放射
PPFD	Photosynthetic photon flux density	光合成有効光量子束密度
R/Fr	Red/far-red	赤色光/遠赤色光
RGB	Red green blue	赤・緑・青
RMSE	Root mean squared error	平均平方二乗誤差
SFM	Structure from motion	多視点画像からの三次元復元
STL	Standard triangulated language	三次元形状を表現するフォーマットの一つ

## 第1章 序論

### 1.1. 研究の背景

世界人口は、2100年に96–123億人に到達するといわれており (Gerland et al., 2014)、人口増加により、将来的に農作物の需要が増加すると考えられる。また、近年の人件費の高騰により、農作業の効率を高めることも重要である (Quan et al., 2017)。生産者は、少人数で生産性を向上させる方法を必要としている (Puttemans et al., 2017)。したがって、将来的な果菜類の需要の増加に対応するために、効率的に作物を生産する必要がある。果菜類の栽培に温室を利用することで、気候条件の悪い地域、土地や資源が限られた場合でも周期的に生産することが可能である (Shamshiri et al., 2018)。また、インターネット回線を用いた環境制御も低価格で可能となってきた (Serôdio et al., 2001)。すでに施設園芸において、ICT (Information and communication technology) を活用し温室内の環境制御 (CO<sub>2</sub> 施用や飽差管理等) や環境のモニタリングが行われている (中西, 2016; 星ら, 2016)。

さらに効率的に作物生産を行うためには、温室内で植物種ごとに群落受光量や光合成量が増加する栽植密度や LAI (Leaf area index) を明らかにし、栽植面積あたりの収量を増加させることが必要である。温室内で、床面に入射する日射を少なくし植物が受光する日射の割合を増加させることで、栽植面積あたりの受光量や収穫量を向上させることが可能と考えられる。例えば、人工光型植物工場では、照明電力量を抑えて赤系リーフレタスの育成をするために有効な栽植密度、配置、光強度および光質についての研究が行われている (古山ら, 2017)。他方、温室での同様な研究については、日射量や太陽高度が季節や地域によって変化するため、ケーススタディが多様で一般化が難しく事例が少ない。温室栽培において、果菜類の栽培ベンチは一般に 80–160 cm 程の畝間を持っており、畝間が小さく均一に栽植されたイネ等の露地栽培に比べて不均一な栽植状態である。温室でも栽植面積あたりの受光量が最大になる作物の栽植密度や LAI を把握し、その状態を維持する栽培が可能となれば単位面積あたりの生産性の向上が期待できる。

近年、葉物野菜やイチゴにおいて、生産性の向上を目的とした移動ベンチを用いた栽培が始まっている。葉物野菜に関しては、すでに複数の都道府県でホウレンソウやフリルレタス等が移動ベンチを用いて栽培され、スーパー等に出荷されている (ナッパーランドホームページ)。移動ベンチを用いることで栽培管理以外の時間は通路を栽培スペースとして利用できるため、栽植密度を通常よりも高くすることが可能である (van Os et al., 1993)。Hayashi et al. (2011) はイチゴ品種の‘章姫’および‘もういっこ’を移動ベンチを用いて栽培し、

出荷可能な果実の収量が移動ベンチを用いない場合と比較して 2 倍以上であったと報告している。したがって、作物の生育を阻害しない範囲で栽植密度を増加させることで、栽植面積あたりの収量を増加させることが可能である。草丈の低い果菜類は相互遮蔽が小さく、栽植密度や LAI を高めた場合に作物の受光体制に及ぼす影響は小さい。よって、草丈の低い果菜類および葉菜類については、栽植密度や LAI が生育に及ぼす影響が小さいと考えられる。

一方で、トマト等の草丈の高い果菜類は相互遮蔽が大きく畝間や株間が植物の受光量に及ぼす影響が大きい。トマトは、世界で最も主要な果菜類であり (Rothan et al., 2019)、栽植面積は約 480 万 ha で年間約 1 億 8 千万トン生産されている (FAOSTAT, 2018)。また、日本国内のトマト生産量の 78%が施設栽培によるものである (農林水産省, 2020)。トマトの収量を増加させるため、栽植密度と収量の関係を示す報告は存在する (Amundson et al., 2012; Papadopoulos and Ormrod, 1990, 1991; Papadopoulos and Pararajasingham, 1997)。しかし、栽植方法や地域によって作物の受光体制は変化すると考えられるため、既往の研究データを直接実際の栽培に適用することは難しい。光環境はトマトの生産性に最も影響を与える要素であり、温室内の PPFD (Photosynthetic photon flux density) や日照時間が季節等により減少すると収穫量も減少する (Papadopoulos and Pararajasingham, 1997)。東出 (2018) は LAI が過剰になると群落下部の日射が光補償点以下となり、光合成による物質生産に貢献できないだけでなく呼吸によって同化産物を消費すると述べている。また、多くの作物で受光量と乾物生産量の間に関係性がみられる (堀江・桜谷, 1985; Monteith, 1977) という報告もある。したがって、草丈の高い果菜類の栽培を行う際には、群落の層別受光量を把握したうえで摘葉等の栽培管理を行うことが収量を増加させるために重要と考えられる。

これまで、Lambert-Beer の法則を用いた式 1-1 (Monsi and Saeki, 1953, 2005) を用いて群落内の光環境の推定が行われてきた。

$$I = I_0 e^{-K F} \quad (\text{式 1-1})$$

$I$ : 群落内のある高さの光強度

$I_0$ : 群落上の光強度

$K$ : 吸光係数

$F$ : 葉面積指数

式 1-1 を用いると、畝間のない一様の群落において植物種や群落固有の吸光係数、LAI および群落上の光強度を用いて群落内の光強度の推定が可能である。一般的に温室栽培では

畝間が存在し群落が不均一であるため、式 1-1 を用いた群落内光強度の推定は難しいと考えられる。加えて、温室栽培では構造材や被覆資材が作物上に存在しているため、それらの形状や気象条件によっても作物の受光体制は変化する。したがって、温室における果菜類の栽培では、地域、気象条件、栽植方法および植物種等を考慮して受光量を推定する手法が必要である。

様々な環境条件（気象条件、植物種、群落形状および温室形状）下における作物の受光量の推定には、光学シミュレーションが適していると考えられる。光学シミュレーションを用いれば、存在する物体を 3D モデル化し再現することが可能である。したがって、温室形状や植物の形状を考慮し任意の地点の受光量の推定が可能である。上記の手法を用いると仮想的に気象条件や群落形状を変更した場合の受光量の推定も可能となる。以上より、温室内部での果菜類の栽培に利用できる受光量のシミュレーションモデルを作成することが栽培管理や栽植方法の最適化に有用と考えられる。

群落光合成速度を最大化する最適 LAI が存在する (Anten and Hirose, 2001) ことが知られている。その LAI で栽培することが栽植面積あたりの収量を増やすために有効と考えられる。しかし、温室内の果菜類の群落の葉面積を非破壊で短時間の間に把握することは難しい。したがって栽培時、リアルタイムに短時間で生育（葉面積や草丈等）を把握する手法も必要である。実験レベルの栽培では、葉の葉長や葉幅をメジャー等で測定し、それらと葉面積の関係式を用いて簡易的に葉面積を推定する方法 (Blanco and Folegatti, 2003; Cho et al., 2007; Montero et al., 2000) があるが、測定するために時間が膨大にかかることや、測定中の葉へのダメージ等のリスクを考えると、商業的な栽培に適用するのは現実的ではない。非破壊で迅速に生育情報を取得する必要がある。近年、3D モデルを用いて検出した植物個体の個葉の葉面積の推定 (Itakura and Hosoi, 2019) や機械学習を用いたトマト果実の検出 (Yamamoto et al., 2014) に関する研究が行われているが、省力化にはできるだけ多くの情報（葉面積、草丈および収量等）を作物群落中から一度に取得することが有用と考えられる。現在までに、生育と収量を同時に推定した報告は見当たらない。

以上より、温室栽培における 3D モデルを用いた果菜類の生育の推定および光学シミュレーションを用いた受光量の推定技術は収量を増加させるための栽培管理（摘葉等）や栽植方法の最適化につながると考えられる。また、シミュレーションの手法を用いることで一般化が難しい温室における果菜類の栽植方法と群落の受光量の関係等を推定可能となり、気象条件、植物種および温室形状に応じて受光量を増加させる栽培方法や LAI を明らかにでき

ると考えられる。

## 1.2. 既往の研究

### 1.2.1. 果菜類の栽植方法と収量の関係

果菜類の生産性向上のために、様々な地域で各季節における栽植方法と生育や収量の関係が古くからトマトを中心に調査されている。畝間や株間は温室内でのトマト栽培において収量を最大化させるための重要な要素のひとつである (Amundson et al., 2012)。

松岡・福田 (2003) は高糖度トマト栽培において、春季の栽培では総果実収量が株間 10 cm の試験区の方が 12 cm の試験区よりも 20%以上多かったと報告している。一方で、夏季の栽培では、総果実収量が株間 10 cm の試験区の方が 12 cm の試験区よりも 18%減少したとも報告されている。Papadopoulos and Ormrod (1990) は、秋季のトマト栽培において、株間 (23、30、38、45、53、60 cm) が狭いほど総収量は増加したが、春季は株間 38–45cm で総収量が最大であったと報告している。加えて、Papadopoulos and Ormrod (1991) は秋季と比較して、春季のトマト栽培において、着果率が株間の減少に伴い急激に減少したと報告している。Cebula (1995) はパプリカを栽植密度 1.5–8.0 株  $m^2$  の範囲で栽培した場合に、総収量は栽植密度が大きいほど増加したと報告している。収量増加を目的としてトマトの栽培に移動ベンチを利用した報告もある。Jiang et al. (2017) は冬季に移動ベンチ (25–11.1 株  $m^2$ ) を用いた低段密植栽培によるトマト栽培を行い、移動ベンチを用いることで固定ベンチ (14.3 および 10 株  $m^2$ ) での栽培と比較して栽植面積あたりの収量が増加したと報告している。

上述したような栽植方法と収量に関する研究が盛んに行われてきたが、温室栽培において果菜類の栽培ベンチは一般に 80–160 cm 程度の畝間距離を持っており、畝間が小さく均一に栽植されたイネ等の露地栽培と比べて不均一な栽植状態である。栽植方法や地域によって作物の受光体制は変化すると考えられるため、既往の研究データを直接実際の栽培に適用することは難しい。したがって、広い畝間を持つ栽培ベンチを用いる果菜類の栽培では、露地栽培とは異なる方法で群落の受光体制を定式化する必要がある。よって地域や季節に応じて栽植方法と受光量および収量との関係を明らかにするためには、シミュレーションの手法が有効と考えられる。

### 1.2.2. 画像情報を用いた生育および収量のモニタリング

近年、樹木や穀物を中心に 2 次元もしくは 3 次元画像中の植物を検出し、生育や形態を推定する試みが始まっている。Ureña et al. (2001) は、RGB で表現される葉と土を含む画像から、緑のピクセルを抽出し二値化を行うことで、セルトレイに播種された種子（レタス、カリフラワーおよびトマト）の発芽を評価した。Benalcázar (2011) は、HSI (Hue saturation intensity) カラーモデルを用いて背景を含む 2 次元画像からダイズの葉を抽出しそのピクセル数から葉面積を算出した。Casadesús and Villegas (2014) はコムギの複数の画像から緑のピクセルの割合を計算して、LAI と乾物重を推定した。以上より 2 次元画像より植物の検出や葉面積の推定が可能となっている。

Dornbusch et al. (2007) は、イネ科植物を表現する 3D 点群データより葉や茎の形などの形態的な特徴を抽出するためにポリゴンを用いてモデル化した。Hosoi and Omasa (2006) はライダーを用いて構築した樹木のソリッドモデルを用いて LAD (Leaf area density) と LAI を推定した。また、ソリッドモデルは樹木の体積の推定にも用いられている (Hosoi et al., 2013)。Dandois et al. (2015) は LiDAR (Light detection and ranging) を用いて取得した落葉樹林の点群データより群落の高さを推定した。Lati et al. (2013) はトウモロコシおよびワタの植物体を角度の異なる 2 点から撮影し植物のソリッドモデルを作成し、草丈、葉面積および生体重を推定した。2 次元の画像は撮影角度や栽植密度によって生育パラメータの推定精度にばらつきが発生しやすく、3 次元画像を用いることで高い精度での推定が可能であったと報告されている (Lati et al., 2013)。

Hosoi et al. (2011) は、LiDAR を用いてトマト群落を 3 カ所からスキャンして作成したサーフェスモデルのポリゴンの面積から葉面積と LAI を推定した。Itakura and Hosoi (2018) は、LiDAR を用いてアジサイやポトス等のサーフェスモデルを作成し、Watershed アルゴリズムを用いて自動で個葉の分離を行い葉面積の推定を行った。Zhang et al. (2018) は Structure from Motion (SfM) method を用いて構築したサツマイモのサーフェスモデルを用いて草丈、葉枚数および葉面積の推定を行い、実測値と推定値の間に線形関係があり高い精度で各項目の推定が可能であったと述べている。Itakura and Hosoi (2019) は、ナス、レンリソウ、インゲン豆等の葉面積および葉の角度を SfM method を用いて作成したソリッドモデルを用いて推定し、推定葉面積の相対誤差が 8.87%であったと報告している。上記のような植物を画像解析を用いて生育や形態を推定する研究が盛んに行われてきているが、温室栽培において果菜類を対象に画像解析を用いて生育のモニタリングを行った研究事例は少ない。果菜

類の収量を増やすための LAI 管理や摘葉等を最適化するために画像解析を用いた非破壊での生育の推定が有用と考えられる。

また、果菜類の収穫の自動化のために 2 次元および 3 次元画像から果実の検出も行われている。Yamamoto et al. (2014) は、未成熟果を含むトマト果実の検出を、一般的な RGB カメラと機械学習を組み合わせて行った。その際に、色、形、質感および大きさに応じて生成された分類モデルを用いたと報告している。完熟した温室内のトマトを、画像解析と機械学習を組み合わせて自動検出し、96%の精度で果実を検出できたという報告もある (Zhao et al., 2016)。Hashimoto et al. (2012) は、トマト果実表面の色情報を定量的にモニタリングするために、朝から夕方までの太陽光下でカラーキャリブレーションを行うことで、太陽光の影響を排除してトマト果実の色を評価できると報告している。矢口ら (2018) は 3 次元カメラで取得した点群データの色情報を利用して、果実を認識し、ハサミもしくはもぎ取りハンドを搭載したロボットでトマトを 1 個あたり 10 秒で自動収穫した。大森ら (2015) はトマトの低段密植栽培において、植物体の画像から色相、彩度および明度の情報を用いて果実を検出し、それをロボットを用いて収穫した場合に収穫成功率は 76.9%であったと報告している。

当研究グループでは、津村 (2018) が温室内でトマト群落を撮影し植物体とそれ以外を二値化により画像分割し画角内の緑のピクセルの割合から LAI を推定し、短期的なトマト栽培において上述した技術が有効だったと述べている。井上 (2018) は高糖度トマトの安定生産を目的として、画角内の緑のピクセルの割合の変動から葉内水ポテンシャルの推定を行った。

多くの研究で一度に多くの生育に関する情報を同時に取得する試みは行われてない。しかし、農業の省力化、栽培管理および収穫作業の最適化には一度により多くの情報 (葉面積、草丈、群落構造および収量等) を同時に取得できることが有用であり、そのような方法が必要である。

### 1.2.3. 光学シミュレーションを用いた植物の受光量の推定

近年、光学シミュレーション技術を用いた温室内の光環境の推定が行われるようになってきた。光学シミュレーションを用いるメリットは、植物体や温室の 3D モデルを用いて、仮想的な条件下 (地域、栽植密度および天候等) で光環境の推定が可能であることである。シミュレーションを行う際には対象となる物体を、コンピュータグラフィックを用いて 3D モデル化する必要がある。植物の 3D モデルについては、当初植物の成長過程の形態学的な

理解を深めるために作成されていた (de Visser et al., 2002)。

植物の 3D モデリング化の手法の一つとして FSPM (Functional-structural plant model) がある。FSPM とは、植物の生理学的な機能を 3D モデルに付加したもので、周辺の環境によって変化する成長過程を再現しているものである (Vos et al., 2010)。Buck-Sorlin et al. (2011) は、FSPM を用いてバラの 3D モデルを作成し、群落内の異なる層ごとの光強度を推定した。バラの葉ごとの受光量を推定できたため、生産者やコンサルタントの栽培指導にも利用できると報告されている。トマト群落内での光利用効率を増加させるための植物の理想的な形態を、FSPM を用いて探索している研究もある。Sarlikioti et al. (2011) は、節間と葉の形が群落内の光環境に影響を与えていることを明らかにし、光強度の弱い冬に群落下層の光強度の減衰率が大きいため、節間が長く葉の幅が細い形態のトマトが光強度の弱い冬の栽培に適していると報告している。

加えて、光学シミュレーションの利用用途として、補光ランプの効果的な使用法の解析がある。Buck-Sorlin et al. (2010) は、温室の 3D モデルを作成し補光ランプを設置した温室内の光分布を示した。トマトやバラの相互遮蔽による補光の減衰についても調査した。de Visser et al. (2014) は、トマトおよび温室の 3D モデルを作成し、植物葉が受光する自然光および補光による受光量を推定した。推定した結果をもとに、葉および補光ランプの角度が、光利用効率にどのように影響を与えるのか解析している。

当研究グループでは、植物および温室の 3D モデルを作成し、レイトレーサー法を用いた温室内の光環境のシミュレーションモデルの構築を進めてきた。レイトレーサー法とは、物体の反射率や透過率等の光学特性を考慮し光源からの光路を追跡することで、任意の地点の光強度を推定する光学シミュレーションの手法である (Fig. 1. 1)。

当研究グループでは下記の研究を行ってきた。大橋 (2016) はキュウリを、谷野 (2017) はトマトの 3D モデルを複数枚の植物の画像を合成することで作成し、レイトレーサー法を用いて異なる気象条件下における温室内の植物の受光量の推定を行った。斎藤 (2018) は谷野 (2017) が作成したトマト群落の 3D モデルを用いて、拡散性被覆資材がトマト群落の受光量に与える影響を調査した。鳥居 (2020) は 3D スキャナーを用いて作成したトマト群落モデルを用いて、温室形状がトマト群落の受光量や光合成量に与える影響を明らかにした。これまでの研究で、温室や植物の 3D モデルを作成し、レイトレーサー法を用いることで任意の物体の受光量の推定が可能となってきた。

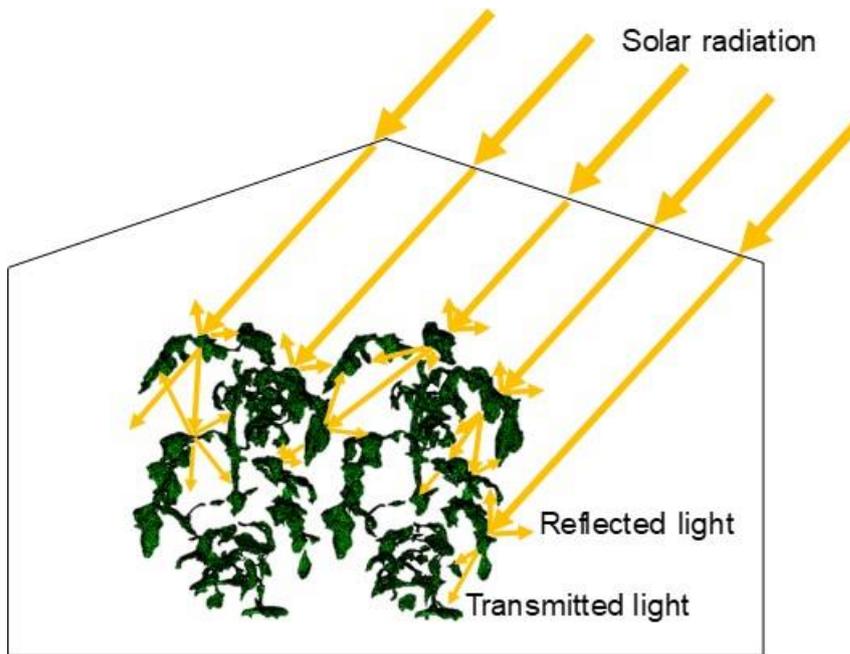


Fig. 1. 1 Diagram of the ray tracing. Ray tracing is one of the optical simulation methods. Ray is traced considering the optical properties of objects to estimate the light environment.

### 1.3. 本研究の目的と論文の構成

本論文では、温室内で果菜類を栽培する際に栽植面積あたりの収量を増加させることを目的とする。一般的に、温室栽培において果菜類の群落は畝間を持っている不均一な群落であるため、作物の受光体制を一般化することは難しいと考えられる。したがって、異なる環境条件下（温室形状、地域および畝間等）において、果菜類の受光体制を把握し収量を増加させる栽植方法（畝間や LAI 等）を明らかにする必要がある。また、栽培時に目標とする LAI や群落形状になるように栽培管理を行うためには、葉面積等の生育情報を非破壊でリアルタイムに把握する必要がある。本論文では、3D モデルを用いた果菜類の生育および光学シミュレーションによる受光量の推定を実施した。

本論文は5章で構成されている。第1章では、研究の背景、目的、既往の研究について述べた。第2章では、光学シミュレーションを用いて受光量の推定を行う前に、実際のトマト栽培における群落の受光体制と生育および収量の関係の調査を行った。第3章では、3D スキャナーを用いて取得した果菜類の点群データより作成した 3D モデルを用いて、葉面積、草丈、群落構造および収量等を推定した。第4章では、果菜類の群落 3D モデルとレイトレーザー法を組み合わせ受光量の推定を行い、栽植方法（畝間や株間）と受光量の関係を示すシミュレーションモデルを作成した。最後に第5章では本研究の総括を行い、生育モニタリングおよび光学シミュレーション技術の果菜類の栽培への利用について今後の展望を述べた。

## 第2章 トマト栽培における受光体制および生育の調査

### 2.1. 緒言

1.1.で述べたように、草丈の高いトマトのような果菜類は隣の群落の相互遮蔽の影響を受けやすいため、太陽高度や気象条件等により受光体制は変化する。また、日本国内のトマト生産量の78%が施設栽培によるものである（農林水産省,2020）ため、温室を用いてトマトを生産することを想定し研究を行う必要がある。トマトの品種や摘葉の有無が群落吸光係数に与える影響を調査した報告（安ら,2018）もあるが、測定位置、群落および温室の形状によってその値は変化すると考えられ、一般化が難しいと考えられる。したがって、果菜類の栽培を行う際に異なる地域や季節の既往の研究データをそのまま使用しても同様の結果が得られるとは限らない。

1.1.で様々な環境条件下における作物の受光量の推定には、気象条件、地域および温室形状等を考慮できる光学シミュレーションが適していると述べた。シミュレーションを行う前に、実際のトマトの受光体制と生育や収量の関係を把握しておく必要がある。また、温室内で果菜類は、一般的に畝を用いて栽培がおこなわれており、その畝間が受光体制に与える影響は詳細に調査されていない。本章は、光学シミュレーションを用いた群落受光量の推定を行う前に、異なる畝間におけるトマトの受光体制と生育や収量の関係を明らかにすることを目的とする。本章では、温室内で畝間の異なる条件下でトマトの栽培を行い受光体制や生育の調査を行った。

### 2.2. 材料および方法

#### 2.2.1. 供試植物および栽培温室

試験は千葉大学松戸キャンパス内の温室（床面積 168m<sup>2</sup>, 南北棟）でトマト（*Solanum Lycopersicum* L.）を夏作（2018年7月9日–9月9日）と冬作（2018年10月20日–2019年3月4日）の2回栽培した。トマト品種は、夏作は麗夏（サカタのタネ（株））、冬作では麗容（サカタのタネ（株））を用いた。使用した温室は、単棟切妻式プラスチックハウスで間口8m、奥行き21m、平均高さ4mであった（Fig. 2.1）。温室被覆資材にはポリオレフィン系フィルムを用いた。

育苗は下記の方法で行った。セル成型培養土（ナプラ養土Sタイプ、ヤンマー農機（株））を72穴セルトレイに充填し、1セルあたり1粒播種した。播種後、60時間は26°Cに設定したインキュベータ（MIR-533, パナソニック）内で発芽処理（暗黒条件下）を行った。発芽

処理後、セルトレイを人工気象室に移動し、Table 2. 1 の環境条件で育苗した。播種後 7 日間のかん水は水道水を用いた。その後のかん水は OAT ハウス肥料 A 処方 1/2 単位培養液 (OAT アグリオ (株)) を用いた。育苗中の様子を Fig. 2. 2 に示す。

温室内でのトマトの栽培は、異なる畝間距離の試験区を用意するために移動ベンチを製作し行った。移動ベンチは、 $\phi 25$  mm の鉄骨と鉄板ホイールゴム巻車輪  $\phi 100$  mm (ハンマーキャスター (株)) を利用し製作した (Fig. 2. 3-A)。移動ベンチは、長さ 4.0 m、幅 0.4 m、高さ 0.3 m になるよう設計した。可動部分のかん水ホースはゴムホースを使用することで、移動に耐えうる仕様とした (Fig. 2. 3-B)。培養液の排水については、それぞれのベンチで集積しゴムホースを用いて排出した。

播種後 3 週間後のトマト苗を温室内でロックウールキューブ (DELTA6.5G, Rockwool B. V.) に移植し、ロックウールスラブ (2075 A2W, Rockwool B. V.) を用いて夏作では株間 22 cm、冬作では株間 33 cm で千鳥になるよう栽培ベンチ上に定植した。栽培ベンチは Fig. 2. 4 のように設置し、夏作では、北側から畝間 1.6 m (F1.6)、畝間可変 (M)、畝間 1.0 m (F1.0) で栽培した。冬作では、北側から畝間 1.6 m (F1.6)、畝間可変 (M)、畝間 1.2 m (F1.2) で栽培した。M 区については、定植時に畝間の距離を最小 (40 cm) に設定した。そして栽培期間中、目視でトマトの成長を確認し、隣のベンチの葉と重ならないように畝間を夏作では 0.8 m、冬作では 1.0 m まで広げた。冬作の F1.2 区で 45 DAT (Days after transplanting) 以降にかん水トラブルが発生し、生育に影響を与えたため F1.2 区の 45 DAT 以降のデータは掲載しない。かん水は自動かん水装置 (養液王 100, 日本オペレーター (株)) を用いて行い、培養液は OAT ハウス肥料 A 処方 1 単位培養液 (OAT アグリオ (株)) を用いた。かん水は 1 時間に 1 回 (7:00–17:00) 行い、1 回あたり 60–100 mL/plant になるよう実施した。

栽培期間中の各試験区の畝間を Fig. 2. 5 に示した。試験期間中の温室内の環境条件は Table 2. 2 に示した。温室内の気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )、相対湿度 (%) および  $\text{CO}_2$  濃度 ( $\mu\text{mol } \mu\text{mol}^{-1}$ ) は統合環境制御装置 (Profarm-Controller, 株式会社デンソー) により、それぞれ 1 分間隔で測定した。1 作目の温室内積算 PPFD は下記の方法で算出した。Profarm-Controller を用いて温室外日射量 ( $\text{W m}^{-2}$ ) を測定した。日射中の PAR (Photosynthetically active radiation, 400–700 nm) の割合は 45 % (Jacovides et al., 2003) と仮定し、放射照度 (400–700 nm) から PPFD への換算係数 4.57 (McCree, 1972; Thimijan et al., 1983) を乗じた。温室屋根面の平均光線透過率を 65% として、温室内積算 PPFD を算出した。2 作目の温室内積算 PPFD は、光量子センサー (ML-020P, 英弘精機 (株)) を温室内に設置し、1 分間隔で測定した PPFD の値を用いて算出

した。定植後（夏作）の様子を Fig. 2.6 に示した。



Fig. 2. 1 The greenhouse for the cultivation located in Matsudo, Chiba, Japan.

Table 2. 1 Environmental conditions for the tomato cultivation during seeding stage.

Light source	White fluorescent lamp
Light period (h d <sup>-1</sup> )	16
PPFD ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	200
Air temperature (light/dark period) (°C)	25 / 20
Relative humidity (%)	60
CO <sub>2</sub> concentration ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )	1000

June 17, 2018



June 28, 2018



Fig. 2. 2 Tomato seedlings grown in the phytotron.

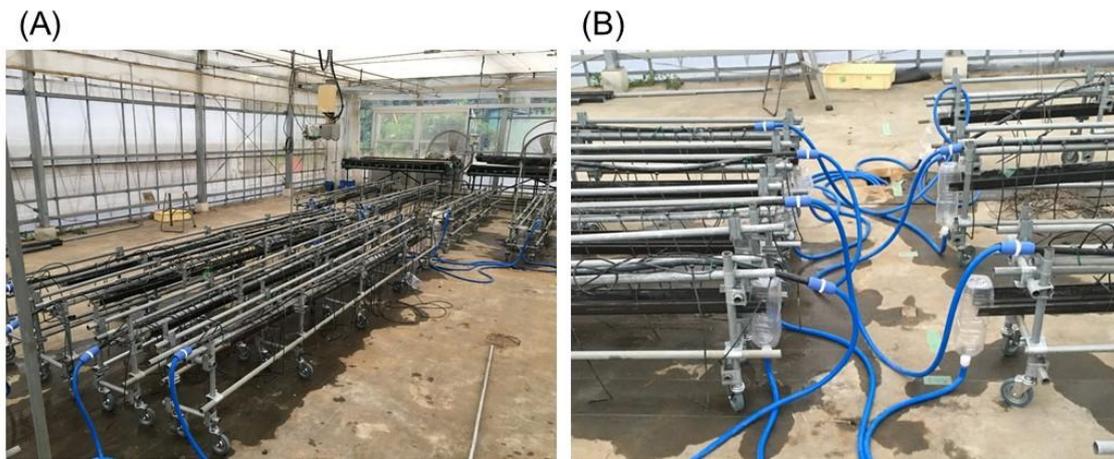


Fig. 2. 3 Movable benches for the tomato cultivation. (A) and (B) show movable benches and the drain system, respectively.

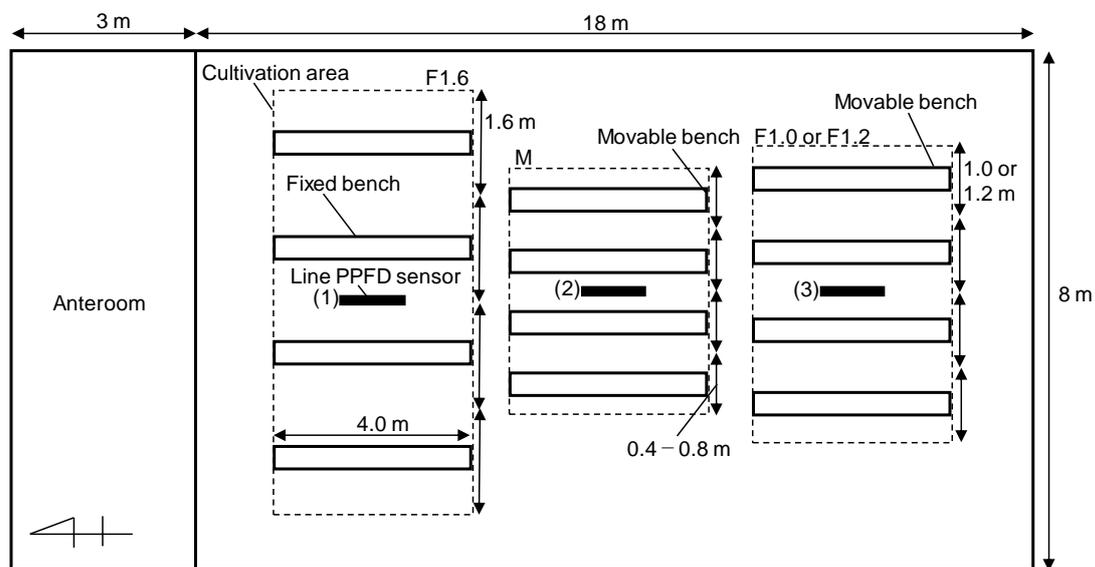


Fig. 2. 4 Experiment layout, including the cultivation benches and the location of the line photosynthetic photon flux density (PPFD) sensor in the greenhouse. The line PPFD sensors 1–3 were used to calculate the percentage of canopy light interception. F1.6, F1.2, and F1.0 treatments were furrow distances of 1.6, 1.2, and 1.0 m, respectively. M treatment, furrow distance was changed depending on the growth stage during cultivation using movable benches.

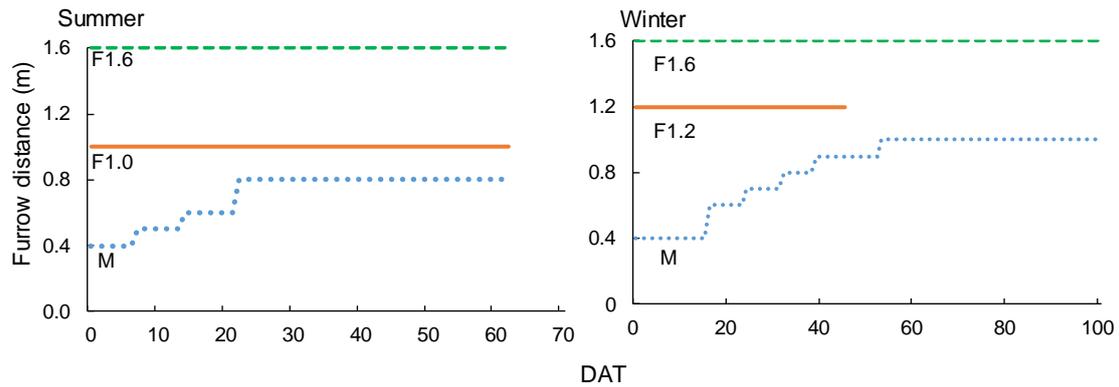


Fig. 2. 5 Changes in furrow distances during tomato cultivation in summer and winter. F1.6, F1.2, and F1.0 treatments were furrow distances of 1.6, 1.2, and 1.0 m, respectively. M treatment, furrow distance was changed depending on the growth stage during the cultivation using movable benches. Tomato plants were planted in the greenhouse on July 9 and October 20, 2018. DAT, days after transplanting.

Table 2. 2 Environmental conditions in the greenhouse during the experiment.

Season	Cultivation period	Time	Integrated PPFD ( $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )	Air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
Summer	2018/7/10	5:00–19:00	23.1	30.6
	–2018/9/9	19:00–5:00	0.0	26.1
Winter	2018/10/20	6:00–17:00	10.6	21.1
	–2019/3/8	17:00–6:00	0.1	15.7

$\text{CO}_2$ concentration ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )	Relative humidity (%)	Vapor pressure deficit (kPa)
370.5	77.0	0.78
376.7	86.4	0.34
360.6	74.4	0.53
404.7	83.6	0.22

The values are averages during the cultivation period. PPFD, photosynthetic photon flux density.

F1.6



M



F1.0



Fig. 2. 6 The tomato canopies under different treatments in the greenhouse on July 12, 2018. F1.6 and F1.0, furrow distances of 1.6 and 1.0 m, respectively; M, furrow distance was changed from 0.4 to 0.8 m during the cultivation using movable benches.

### 2.2.2. 群落受光率の調査

本研究で群落受光率は、温室栽培面に入射した日射を作物が受光する割合と定義する。トマト群落内の畝間(栽培ベンチ間)にライン PPF D センサー(SQ-311, Apogee Instruments Inc.)を地面から約 40 cm の高さに設置し (Fig. 2. 4)、PPFD を 1 分間隔で測定した。ライン PPF D センサーを用いて測定した PPF D を用いて群落受光率を式 2-1 により算出した。

$$\text{Percentage of canopy light interception (\%)} = \left(1 - \frac{\text{PPFD of the bottom of the canopy}}{\text{PPFD of the top of the canopy}}\right) \times 100 \quad (\text{式 2-1})$$

群落受光率が大きいほど温室内に入射する日射を作物が効率的に受光できていると考える。

### 2.2.3. 生育調査

各試験区に定植されているトマトの葉面積および部位別乾物重を破壊調査により、2 回測定し、畝間が生育に与える影響を調査した。測定した部位別乾物重より乾物分配率を算出した。破壊調査時、葉面積は葉面積計 (LI-3100, LI-COR Inc.) を使用して測定した。測定した葉面積と葉の乾物重を用いて比葉重を算出した。処理区間の平均値は、SPSS statistics 24.0 (IBM Inc.) を用いて Tukey-Kramer 検定を行い、5% で有意差検定を行った。夏作は 30 および 62 DAT に、冬作は 45 および 100 DAT に破壊調査を行った。

収量調査は、夏作で 54 DAT に第一果房を、冬作では 91–136 DAT に 1–3 果房の赤熟した果実を対象に行った。畝間が乾物分配に及ぼす影響を調査するため、着果数の制限は行っていない。

葉面積および草丈については、週に 1 度非破壊での調査を行った。葉長と葉幅の測定値と式 2-2 を用いることで葉面積を推定することが可能である (Blanco and Folegatti, 2003; Montero et al., 2000)。

$$\text{Leaf area (cm}^2\text{)} = \text{leaf length (cm)} \times \text{leaf width (cm)} \times a \quad (\text{式 2-2})$$

本研究では、夏作の 30 DAT および冬作の 45 DAT に葉面積、葉長および葉幅を測定（1-17 もしくは 18 葉を対象）し式 2-2 の  $\alpha$  を算出（Fig. 2.7）した。そして算出した  $\alpha$  を葉面積の非破壊調査に利用した。トマトにおける  $\alpha$  の値は夏作で 0.25、冬作で 0.30 であった。

推定した葉面積を用いて各試験区の栽培期間中の LAI の推移を算出した。また、LAI は、各試験区の植物の葉面積を栽培に使用した面積で除して算出した。

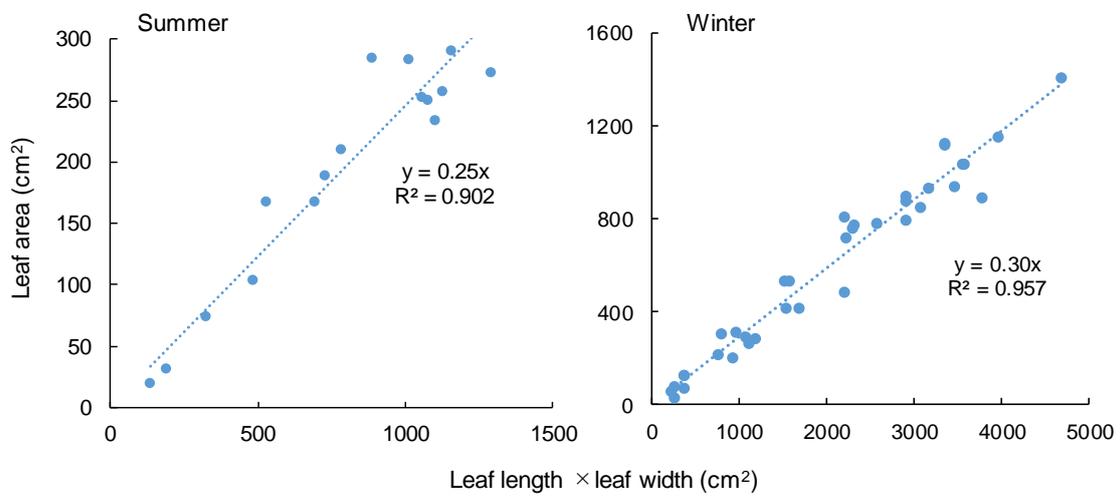


Fig. 2. 7 Relationship between the leaf length × leaf width and leaf area for tomato. Leaf length, leaf width, and leaf area of tomato were measured on 30 and 45 days after transplanting in the summer and winter cultivation, respectively.

#### 2.2.4. 果実温の測定

本試験では異なる畝間間隔の試験区で栽培を行った。畝間間隔が異なることで群落内部の光環境が変化し果実温度に影響を与えたと考えられる。果実温度はトマトやキュウリにおいて光合成産物の転流に影響を及ぼすことが知られている (Tazue and Sakiyama, 1986; 吉岡・高橋, 1981) ため、夏作で果実温度の測定を行った。2018年9月7日-9日に T 型熱電対を F1.6 区および M 区の第一果房の中心部に熱電対の接点がかかるように 3 か所ずつ設置 (Fig. 2.8) し、1 分間隔の果実温度をデータロガー (GL220, グラフテック (株)) で記録した。



Fig. 2. 8 The measurement of the tomato fruit temperature using a T-type thermocouple. Fruit temperature was measured on 60—62 days after transplanting in the summer cultivation.

## 2.3. 結果

### 2.3.1. 群落受光率

夏作および冬作の栽培期間中の群落の受光率を Fig. 2. 9 に示した。群落の受光率は M 区で、栽培開始時から他の試験区と比較して高い傾向にあった。また、M 区で受光率がそれ以上下らない値 (~90%) になるまでの日数が他の試験区と比較して短く、夏作および冬作で 35 DAT 程度であった。夏作では常に受光率が M 区 > F1.0 区 > F1.6 区の順で大きであった。冬作では、M 区の受光率は常に他の試験区よりも大の傾向があり、F1.2 区と F1.6 区については夏作とは異なり F1.2 区 ≒ F1.6 区となっている期間がみられた。夏作および冬作での F1.6 区では、栽培後期になっても受光率は最大で 70–80% 程度であった。

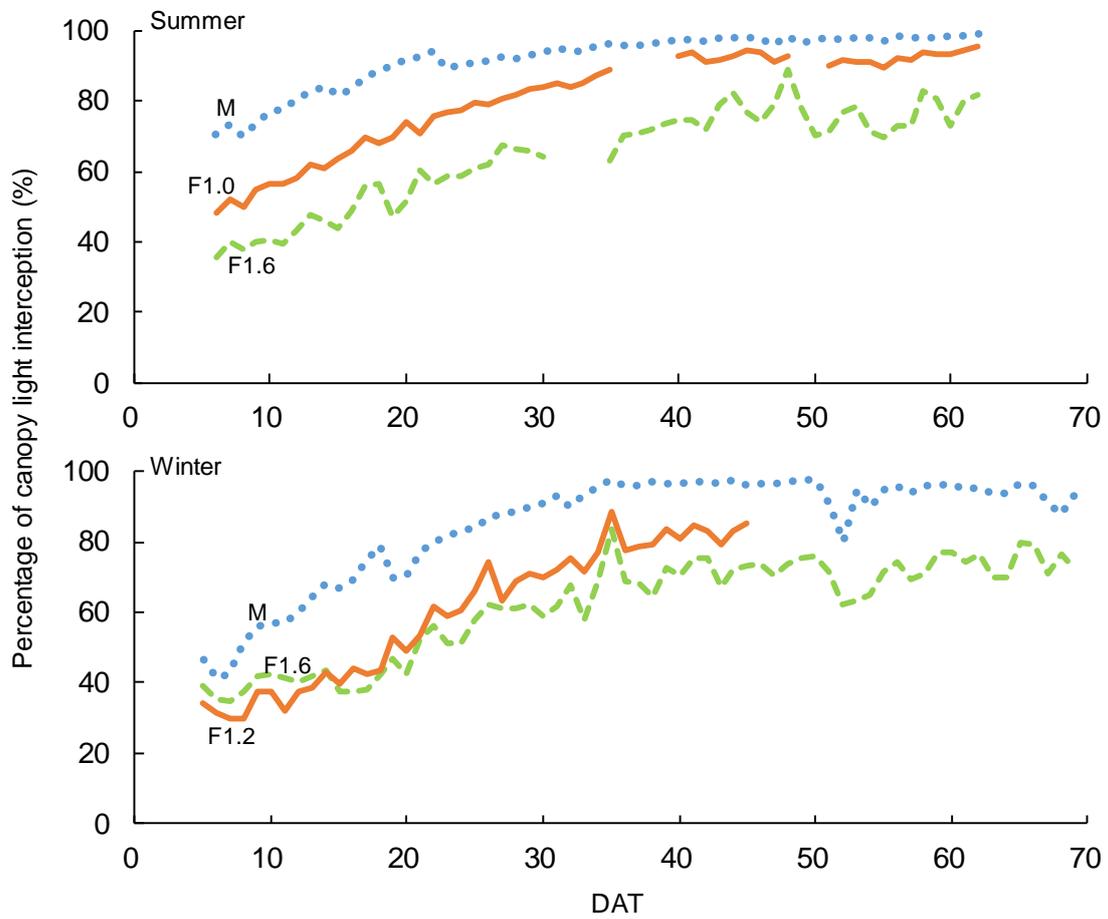


Fig. 2. 9 Daily changes in the percentage of canopy light interception. Tomato plants were transplanted in the greenhouse on July 9 and October 20, 2018. F1.6, F1.2, and F1.0 treatments were furrow distances of 1.6, 1.2, and 1.0 m, respectively. M treatment, furrow distance was changed depending on the growth stage during cultivation using movable benches. DAT, days after transplanting. In the summer cultivation, the missing data occurred due to PPFD sensor troubles in F1.6 and F1.0. In the winter cultivation, the missing data occurred due to the irrigation trouble in F1.2.

## 2.3.2. 生育

### 2.3.2.1. 破壊調査

夏作における生育調査の結果を Table 2.3 に示した。30 および 62 DAT で M 区の葉面積が F1.6 区および F1.0 区と比較して有意に大であった。比葉重は F1.6 区で M 区および F1.0 区より有意に大となっていた。乾物重は 30DAT では M 区で F1.6 区および F1.0 区と比較して大の傾向がみられた。一方で、62DAT の乾物重では、F1.6 区で M 区および F1.0 区と比較して大の傾向がみられた。乾物率は F1.6 区で大となる傾向がみられた。

夏作の生育調査により測定した部位別乾物重を用いて算出した乾物分配率を Fig. 2. 10 に示した。30 および 62 DAT の M 区で F1.6 区および F1.0 区と比較して葉への乾物分配率が M 区より大の傾向がみられた。62 DAT の F1.6 区で果実への乾物分配率が M 区および F1.0 区と比較して大の傾向がみられた。

冬作における生育調査の結果を Table 2.4 に示した。45 DAT の F1.6 区の葉面積が M 区と同程度、F1.2 区と比較して有意に大であった。100 DAT における葉面積については F1.6 区で M 区より大の傾向であった。45 DAT の地上部乾物重が F1.6 区で M 区および F1.2 区と比較して有意に大であった。100 DAT の地上部乾物重は、F1.6 区が M 区と比較して大の傾向であった。45DAT の比葉重は、F1.6 区および F1.2 区で M 区と比較して有意に大であった。

冬作の生育調査で測定した部位別乾物重を用いて算出した乾物分配率を Fig. 2. 11 に示した。45 DAT および 100 DAT の乾物分配率は各試験区間で大きな差はみられなかった。

夏作および冬作の収量調査の結果を Fig. 2. 12 に示した。夏作では栽植面積あたりの収量が M 区>F1.0 区>F1.6 区の順で大の傾向であった。冬作では、栽植面積あたりの収量が M 区>F1.6 区の順で大の傾向であった。

Table 2. 3 Effects of furrow distance on the growth of tomato in the summer cultivation.

DAT	Treatment	Dry weight above ground part (g/plant)	Dry matter ratio (%)	Leaf area (cm <sup>2</sup> /plant)	Specific leaf weight (g m <sup>-2</sup> )
30	F1.6	37.4 a	12.5	2819.4 b	74.6 a
	M	43.7 a	10.6	4351.8 a	62.2 b
	F1.0	36.1 a	11.2	3330.8 b	64.9 b
62	F1.6	134.5 a	11.0	5341.4 b	105.3 a
	M	119.1 a	10.0	10255.1 a	62.2 b
	F1.0	106.3 a	10.4	6784.6 b	78.5 b

Different lowercase letters indicate significant differences among the measurements (n=3) at P<0.05 according to Tukey–Kramer’s test. The growth survey was conducted on August 8 and September 9, 2018, respectively. Tomato plants were transplanted in the greenhouse on July 9, 2018. DAT, days after transplanting.

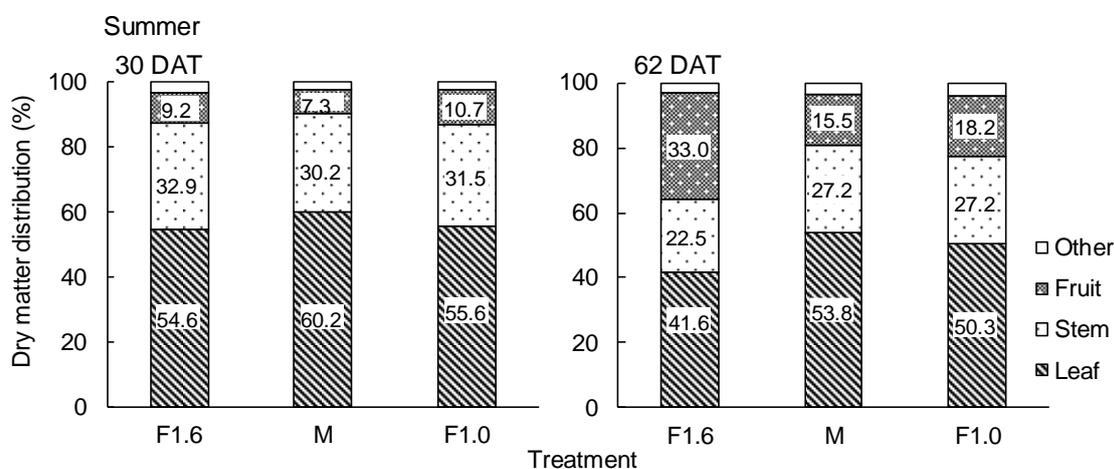


Fig. 2. 10 Effect of furrow distance on the dry matter distribution in summer (n=3). F1.6 and F1.0, furrow distances of 1.6 and 1.0 m, respectively; M, furrow distance was changed from 0.4 to 0.8 m during the cultivation using movable benches. The growth survey was conducted on August 8 and September 9, 2018, respectively. Tomato plants were transplanted in the greenhouse on July 9, 2018. DAT, days after transplanting.

Table 2. 4 Effects of furrow distance on the growth of tomato in the winter cultivation.

DAT	Treatment	Dry weight above ground part (g/plant)	Dry matter ratio (%)	Leaf area (cm <sup>2</sup> /plant)	Specific leaf weight (g m <sup>-2</sup> )
45	F1.6	49.3 a	6.8	10414.0 a	29.9 a
	M	36.5 b	6.7	9545.8 ab	23.5 b
	F1.2	40.1 b	8.8	7916.1 b	31.5 a
100	F1.6	168.5	8.6	20751.5	32.0
	M	115.7	8.6	16999.7	24.9
	F1.2	-	-	-	-

Different lowercase letters indicate significant differences among the measurements (n=3) at P<0.05 according to Tukey–Kramer’s test. The growth survey was conducted on December 4, 2018 and January 28, 2019, respectively. Irrigation trouble occurred in F1.2 after 45 DAT. Tomato plants were transplanted in the greenhouse on October 20, 2018. DAT, days after transplanting.

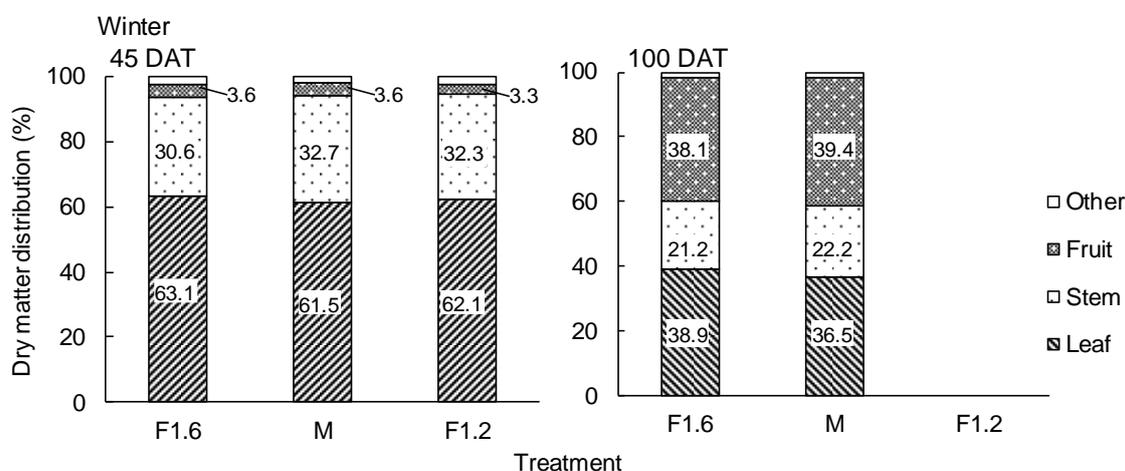


Fig. 2. 11 Effect of furrow distance on the dry matter distribution in winter (n=3). F1.6 and F1.2, furrow distances of 1.6 and 1.2 m, respectively; M, furrow distance was changed from 0.4 to 1.0 m during the cultivation using movable benches. The growth survey was conducted on December 4, 2018 and January 28, 2019, respectively. Irrigation trouble occurred in F1.2 after 45 DAT. Tomato plants were transplanted in the greenhouse on October 20, 2018. DAT, days after transplanting.

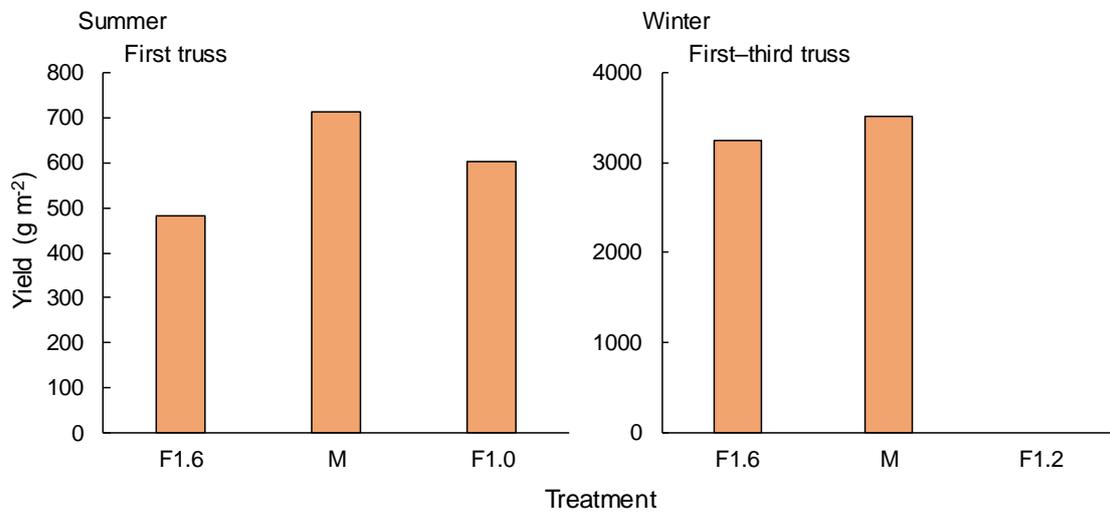


Fig. 2. 12 The yield per area of tomato grown at different furrow distances. Yield survey was conducted on 54 days after transplanting (DAT) in summer cultivation. Yield survey was conducted on 91–136 DAT in winter cultivation. Tomato plants were transplanted in the greenhouse on July 9 and October 20, 2018. F1.6, F1.2, and F1.0 treatments were furrow distances of 1.6, 1.2, and 1.0 m, respectively. M treatment, furrow distance was changed depending on the growth stage during the cultivation using movable benches.

#### 2.3.2.2. LAI と草丈の推移

夏作および冬作の LAI の推移を Fig. 2. 13 に示した。夏作で LAI は、常に M 区 > F1.0 区 > F1.6 区の順で大の傾向であった。M 区、F1.0 区および F1.6 区の LAI はそれぞれ最大で 3.8、2.3、1.5 であった。冬作の LAI は、M 区 > F1.2 区 ≒ F1.6 区の傾向を示していた。M 区、F1.2 区および F1.6 区の LAI はそれぞれ最大で 5.2、1.4 (39 DAT 時) および 3.9 であった。

夏作および冬作の草丈の推移を Fig. 2. 14 に示した。夏作および冬作で、M 区の草丈が他の試験区と比較して栽培期間中に大の傾向がみられた。

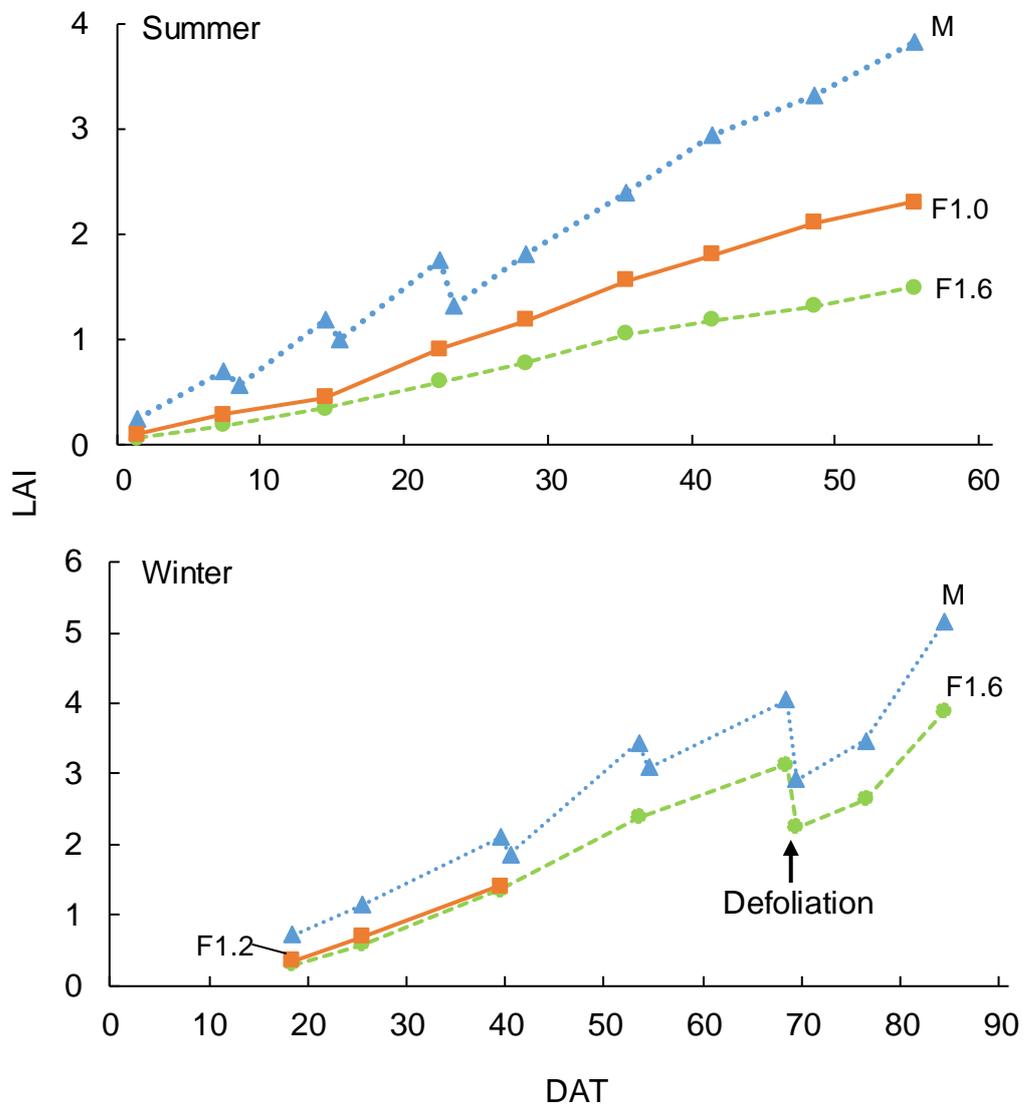


Fig. 2. 13 Changes in the leaf area index (LAI) at different furrow distances (n=3). F1.6, F1.2, and F1.0 treatments were furrow distances of 1.6, 1.2, and 1.0 m, respectively. M treatment, furrow distance was changed depending on the growth stage during the cultivation using movable benches. Tomato plants were transplanted in the greenhouse on July 9 and October 20, 2018. Ten leaves were picked in the defoliation. DAT, days after transplanting.

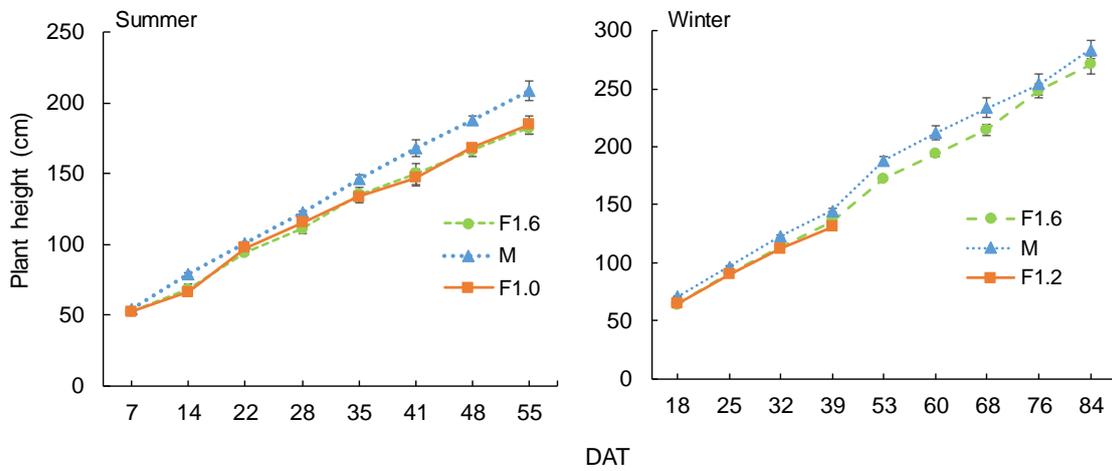


Fig. 2. 14 Changes in plant height of tomato grown at different furrow distances (n=3). F1.6, F1.2, and F1.0 treatments were furrow distances of 1.6, 1.2, and 1.0 m, respectively. M treatment, furrow distance was changed depending on the growth stage during the cultivation using movable benches. Tomato plants were transplanted in the greenhouse on July 9 and October 20, 2018. The error bars indicate standard error. DAT, days after transplanting.

### 2.3.3. 果実温度

夏季の栽培時の果実温度を Fig. 2. 15 に示した。果実温度は昼間の F1.6 区で M 区よりも大の傾向があった。夜間の果実温度は試験区間で差はみられなかった。F1.6 区と M 区で果実温度は最大 4.6°C の差があった。F1.6 区の果実の温度上昇は、空気よりも遅かったが、正午ごろには、気温を上回っていた。

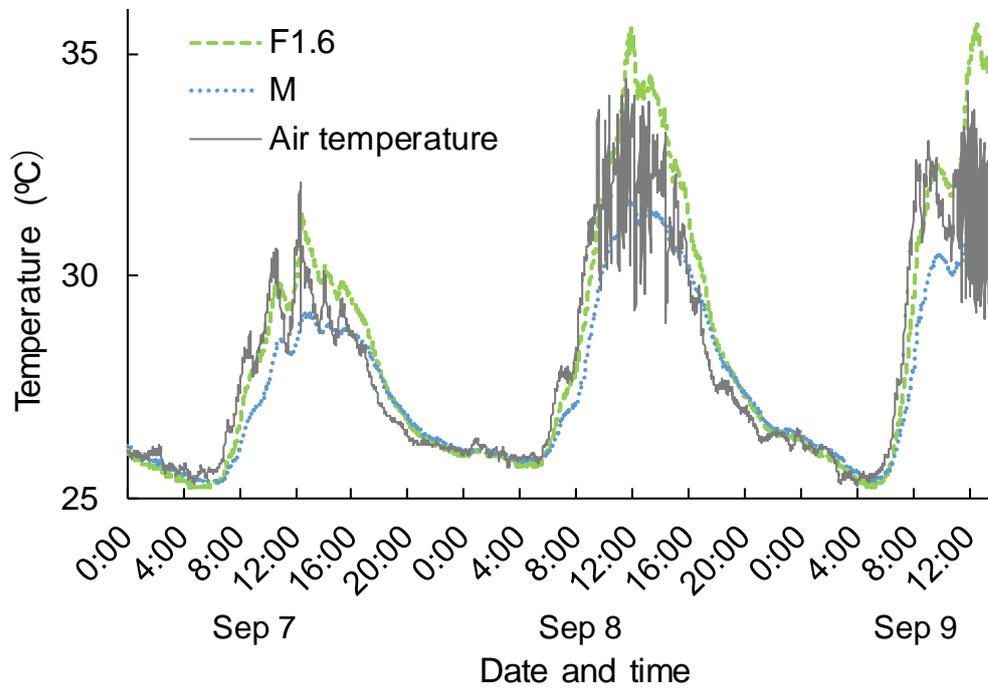


Fig. 2. 15 Changes in fruit temperatures and inside air temperature in the F1.6 and M treatments (n=3). Fruit temperature was measured on 60–62 days after transplanting (DAT). F1.6, furrow distance of 1.6 m; M, furrow distance was changed from 0.4 to 0.8 m during the cultivation using movable benches. Tomato plants were transplanted in the greenhouse on July 9, 2018.

## 2.4. 考察

### 2.4.1. 群落の受光体制

金子ら (2015) は、トマトの単位面積あたりの収量の増加には、群落受光率の増加が重要と述べている。本研究では、M 区で栽植密度の小さい F1.6 区、F1.0 区および F1.2 区と比較すると初期の段階で群落受光率の上昇が大きかった (Fig. 2.9)。したがって、初期生育時から生育に応じて畝間を広げていた M 区で最も温室内に入射する光を無駄なく植物が受光できていた。特に、生育初期は、葉面積が小さく畝間に入射する日射が多いため、栽植密度を高くして LAI を増加させることは日射を植物に効率よく受光させるために有効である。Papadopoulos and Pararajasingham (1997) は畝間や株間を制御することは、群落の受光率を向上させ、植物は日射を効率よく受光できるようになると述べており、受光率を増加させる条件を明らかにして栽培することが重要である。また、温室内の作物の配置のパターンは無数にあるため、光学シミュレーションを用いて仮想的な群落条件下での受光体制を推定することが有用と考えられる。

本試験で対象としたトマト群落は畝間を持っており不均一な群落である。群落受光率は畝間にライン PPFDF センサーを設置し算出しており、畝間および季節により LAI と受光率の関係が変化する。試験区間の受光体制の変化を把握するため、栽培期間中の受光率 (Fig. 2.9) と LAI の推移 (Fig. 2.13) のデータを用いて各試験区間の LAI と受光率の関係を Figs. 2.16 and 2.17 に示した。LAI と受光率の関係は各試験区ごとに変化しており、例えば、夏作で LAI が 1.0 のとき F1.6 区、M 区および F1.0 区で受光率はそれぞれ 70、82 および 78% 程度であった。冬作では LAI が 1.0 のとき F1.6 区および M 区で受光率は 61 および 82% 程度であった。栽培期間中の畝間や太陽高度によって群落の受光体制は変化するため、LAI と受光率の関係が試験区ごとに異なっていたと考えられた。

以上より、受光体制は畝間を持つ不均一な群落では、一般化することが難しい。基本的に温室で果菜類を栽培する際には、群落は畝間を持っており不均一である。したがって、群落形状や温室形状を 3D モデルを用いて再現し、受光量の推定に反映することができる光学シミュレーションを果菜類の栽培に利用することで、各栽培ごとに受光量を増加させる栽植方法を提案できると考えられた。

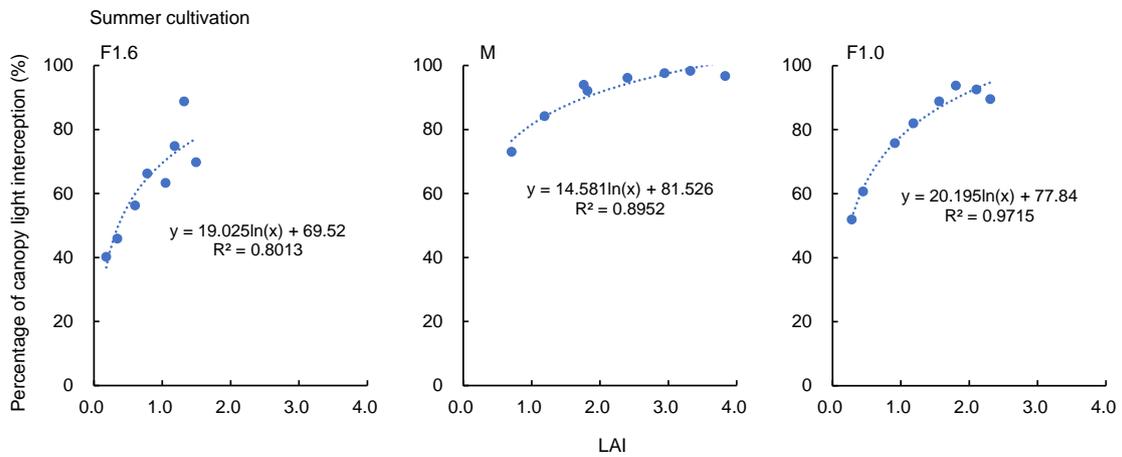


Fig. 2. 16 Relationship between the leaf area index (LAI) and percentage of canopy light interception from 7 to 55 days after transplanting in the summer cultivation. The figure was created using the data from Figs. 2. 9 and 2. 13. F1.6 and F1.0, furrow distances of 1.6 and 1.0 m, respectively; M, furrow distance was changed from 0.4 to 0.8 m during the cultivation using movable benches.

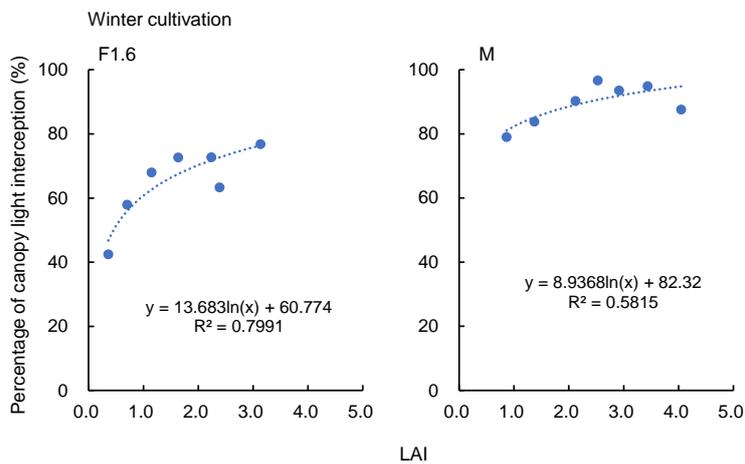


Fig. 2. 17 Relationship between the leaf area index (LAI) and percentage of canopy light interception from 18 to 69 days after transplanting in the winter cultivation. The figure was created using the data from Figs. 2. 9 and 2. 13. F1.6, furrow distances of 1.6 m, respectively; M, furrow distance was changed from 0.4 to 1.0 m during the cultivation using movable benches.

#### 2.4.2. 生育と収量

夏作の M 区で葉面積が他の試験区と比較して大だった (Table 2. 3) のは下記の理由が考えられた。葉の分光特性として、近赤外域 (700–800 nm) の透過率が光合成有効放射域 (400–700 nm) と比較すると大きいことが知られている。Papadopoulos and Ormrod (1988a) はトマト栽培においてより株間を狭くした場合に群落内の R/FR 比が低下することを示している。したがって、より栽植密度の小さい M 区の群落内の R/FR 比は他の試験区よりも小さくなっていると考えられた。Chitwood et al. (2015) は低 R/FR 比が、トマトの葉の柵状組織を大きくし、それが葉面積の拡大につながったと報告している。よって、M 区で避陰反応が誘導され葉面積の増大につながったと考えられた。

草丈について、Papadopoulos and Ormrod (1991) は、春と秋のトマト栽培において植物の間隔が狭くなるにつれて草丈が増加したと述べており、本試験の結果は既往の研究と一致した (Fig. 2. 14)。Cagnola et al. (2012) は低 R/FR 比下で、トマトの茎伸長が促進されたと述べており、葉面積と同様に茎伸長も避陰反応によるものと考えられた。

夏作の 30 DAT の M 区の乾物重が F1.6 区および F1.0 区と比較して大の傾向がみられた (Table 2. 3) のは、上述した避陰反応による葉面積の拡大により受光面積が増加し光合成量が増えたことで、初期成長速度が増加したと考えられた。一方で、62 DAT の F1.6 区の乾物重が M 区および F1.0 区と比較して大の傾向がみられた (Table 2. 3) のは、葉面積の増大とより狭い畝間によって M 区および F1.0 区で相互遮蔽が大きくなり、1 株あたりの受光量が減少し乾物合成量が減少したためと考えられた。

トマト栽培において栽植密度は乾物分配率に影響しない (Heuvelink, 1995) という報告があるが、F1.6 区の果実の乾物分配率が他の試験区と比較して大の傾向であった (Fig. 2. 10)。理由として、F1.6 区の果実温度が他の試験区と比較して高い (Fig. 2. 15) ことが原因の一つと考えられた。トマトにおいて高果実温度は果実のシンク能を高め、光合成産物の転流を促すとされている (吉岡・高橋, 1981)。畝間の大きい F1.6 区で、果実が直達光を受光しやすいことが、果実温度の上昇につながったと考えられた。したがって、畝間の違いによって群落内の光環境が異なることで生じる果実温度の変化は、光合成産物の果実への転流に影響を及ぼす可能性が示唆された。また、果房直下の 3 枚の葉が果房への同化産物の供給源である (フーヴェリンク, 2012) という報告がある。本試験では、M 区および F1.0 区で畝間が狭いことで第一果房直下の葉の受光量が低下し、M 区および F1.0 区の果実への光合成産物の転流が抑制されたと考えられた。冬作では夏作と異なり、F1.6 区と M 区の果実の乾物分

配率に差がみられなかった (Fig. 2. 11) のは、夏作よりも冬作の方の日射量が少ないため、試験区間の果実温度の差が小さいことが原因の一つと考えられた。

冬作の 45DAT の葉面積 (Table 2. 4) について、F1.2 区は F1.6 区と比較すると栽植密度が大きく株あたりの受光量が少ないので光合成産物が減少し葉の展開が抑制されたと考えられた。M 区の葉面積が F1.6 区と同等であったのは、M 区の比葉重が F1.6 区および F1.2 区と比較して小の傾向であったため、夏作と同様に避陰反応により葉面積の拡大が起きていたと考えられた。夏作では M 区の葉面積が最も大きく冬作と傾向が異なっていた (Tables 2. 3 and 2. 4)。冬作の温室内積算 PPFD は夏作の約 46% (Table 2. 2) であったため、F1.2 区および M 区で十分な乾物合成ができず葉の展開が抑制されたと考えられた。

45DAT の総乾物重 (Table 2. 4) については、F1.6 区が M 区および F1.2 区と比較して有意に大となっていた。理由として M 区および F1.2 区の栽植密度が F1.6 区と比較して大きく株あたりの受光量の減少が大であったためと考えられた。

夏作および冬作の M 区で栽植面積あたりの収量が他の試験区と比較して大の傾向がみられた (Fig. 2. 12) のは下記の理由が考えられた。M 区の群落受光率が栽培期間中に他の試験区と比較して大の傾向 (Fig. 2. 9) を示しており、M 区で栽培面に入射する日射を効率よく植物が受光できていたと考えられた。Papadopoulos and Pararajasingham (1997) は、トマトの狭いスペーシングは広いスペーシングと比較すると受光率が増加するため収量が増加すると述べており、上記の報告は本試験の結果と一致していた。また、Fig. 2. 9 に示した各試験区の群落受光率の推移から栽培期間中の積算群落受光量を算出し収量 (Fig. 2. 12) との関係性を Fig. 2. 18 に示した。受光量と収量の間に関係がみられたため、受光量を増加させる栽植方法や LAI を明らかにできれば収量を増加させられる可能性がある。

これまでの研究で、LAI を 3.3、3.6 および 4.1 でトマトを栽培した場合に、いずれも収量は  $66 \text{ kg m}^{-2}$  であったという報告 (Heuvelink et al., 2005) やトマト栽培において LAI が 4 から 5 に増加した場合の受光量の増加は僅かであったという報告もある (東出, 2018)。したがって、栽植面積あたりの収量が飽和し始める LAI は 3-4 程度と考えられる。夏作の M 区の最大の LAI は 3.8 (Fig. 2. 13) であり上述した LAI の範囲に入っていた。しかし、冬作では最大の LAI が 5.2 であり (Fig. 2. 13) LAI が過多となっていたと考えられた。植物間の距離が近すぎると下位葉の光合成量が減少する (Papadopoulos and Ormrod, 1988b) ため、LAI を 3-4 程度なるように畝間を広げるもしくは摘葉することが冬季の栽培では必要であったと考えられた。上記のような LAI と収量の関係を示す報告はみられるが、収量を増加させる

LAIは季節や栽植方法によって変化する受光体制 (Figs. 2. 16 and 2. 17) により変動している可能性がある。したがって、各季節や栽植方法ごとに収量を増加させる栽培条件を探索しその条件で栽培する必要がある。また、LAI管理を行うために群落の葉面積を非破壊で把握し、目的の LAI になるように栽培管理を行う必要がある。

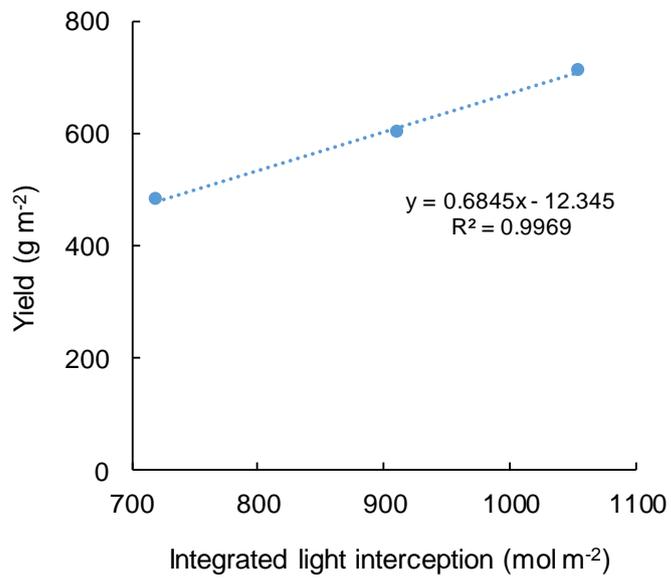


Fig. 2. 18 Relationship between the integrated light interception of the canopy and yield in the summer cultivation. Yield survey of the first truss was conducted on 54 days after transplanting (DAT). Integrated light interception means integrated photosynthetic photon flux density from 6 to 54 DAT.

## 2.5. まとめ

PPFD の測定値より算出した夏作および冬作の群落受光率が M 区で他の試験区と比較して上昇し、栽植面積あたりの収量が増加した。M 区で栽培面に入射する日射を効率よく植物が受光できていたためと考えられた。また、栽培期間中の積算群落受光量と収量との間に線形関係がみられたため、受光量を増加させる栽植方法や LAI を明らかにできれば収量を増加させられる可能性がある。

しかし、異なる畝間の試験区間で LAI と受光率の関係は一定ではなかった。理由として、本試験で使用した群落は畝間を持っており、不均一な群落であり受光体制が群落形状によって変化したためと考えられた。したがって、温室栽培において果菜類の群落の受光体制を一般化することは難しく、異なる環境条件下で受光量の推定が可能な光学シミュレーションが群落の受光体制の把握に有用と考えられた。

## 第3章 3D スキャナーを用いた果菜類の生育モニタリング

### 3.1. 緒言

第2章の結果から受光率が最大になる LAI で果菜類を栽培することが収量を増やすために重要と考えられ、そのような LAI を維持して栽培管理を行うことが重要である。また、Tewolde et al. (2016) は、高栽植密度のトマト栽培で、特に冬の下層の低い受光量が植物の成長を制限すると述べている。よって、群落下層に日射を入射させるための適切なタイミングでの摘葉は収量の増加につながる。現状、植物の生育を目視で判断することは難しく、適切な栽培管理を行うためには、長年の経験と勘に依存している状態である。このように、目標の LAI や群落形状に維持するよう栽培管理をするためには、葉面積等の生育情報を非破壊でモニタリングする技術が必要と考えられる。

近年、3次元画像を用いて植物の生育情報を非破壊で推定する取り組みが始まっている。Hosoi et al. (2011) は、LiDAR を用いてトマト群落を3カ所からスキャンして作成したサーフェスモデルのポリゴンの面積から葉面積と LAI を推定した。Rose et al. (2015) は播種後3週間のトマトの葉面積および草丈を3Dモデルを用いて推定している。

加えて、収穫前の非破壊での収量の予測も重要な課題である (Yamamoto et al., 2014)。温室内に存在する果実の量を植物の3次元情報より抽出できれば、収穫作業前の人員配置、販売計画等の立案に役立つと考えられる。したがって、複数項目の生育情報および収量を同時に推定できれば、栽培管理や収穫作業の最適化に有用と考えられる。

温室栽培において、上述したような葉面積や収量等を個別に画像解析技術を用いて推定する研究は行われているが、複数項目の生育情報や収量を非破壊で同時に推定した研究は見当たらない。本章では、果菜類の複数の生育情報を非破壊で一度に取得することを目的とする。3D スキャナーを用いて取得したトマト、キュウリおよびパプリカの点群データを利用して、葉面積、LAI、草丈、乾物重、群落構造および果実重量 (トマトおよびパプリカ) の推定を行った。

## 3.2. 試験 3-1 3D モデルを用いた果菜類の生育情報の推定

### 3.2.1. 目的

本節では、3D スキャナーを用いて作成した果菜類の 3D モデルから生育情報（葉面積、LAI、草丈、乾物重および群落構造）の取得が可能か検証することを目的とする。3D モデルを生育モニタリングに用いることで、植物群落を 3 次的に扱うことが可能となり、必要な空間の情報のみ抜き出すことができるため、2 次元画像を用いる場合と比較して他の群落の映り込みなどのノイズの排除が容易になると期待できる。

### 3.2.2. 材料および方法

#### 3.2.2.1. 供試植物および温室

第 2 章と同様の南北棟温室（168 m<sup>2</sup>）に播種後約 3 週間のトマト（*Solanum lycopersicum* L., ‘麗夏’, サカタのタネ（株））、キュウリ（*Cucumis sativus* L., ‘フリーダムハウス 2 号’, サカタのタネ（株））およびパプリカ（*Capsicum annuum* L., ‘フルーピーイエローピーマン’, タキイ種苗（株））をロックウールキューブ（DELTA6.5G, Grodan Inc.）とロックウールスラブ（2075 A2W, Grodan Inc.）を用いて 2019 年 3 月 21 日に栽培ベンチ上に定植した（Fig. 3.1）。株間は 33 cm で千鳥になるように定植した。上述した群落は LAI、果実重量および群落構造の推定に用いた。本試験で群落とは、栽培ベンチ上に 6 株の作物が定植されている個体群のことと定義する。

3 月 21 日に、葉面積、乾物重および草丈の推定のためにロックウールキューブにトマト、キュウリおよびパプリカを定植し（Fig. 3.1）、湛液型水耕で栽培を開始した。4 月 2 日以降、植物をロックウール（Granulate, Grodan Inc.）を充填したワグネルポット（NF-5 型、アズロン（株））に移植した。

栽培期間中（3 月 21 日–9 月 5 日）の温室内の平均気温および飽差は 23.6°C および 0.59 kPa であった。温室内平均日積算 PFD は 15.6 mol m<sup>-2</sup> であった。かん水は OAT ハウス肥料 A 処方 1 単位培養液（OAT アグリオ（株））を用いて行った。

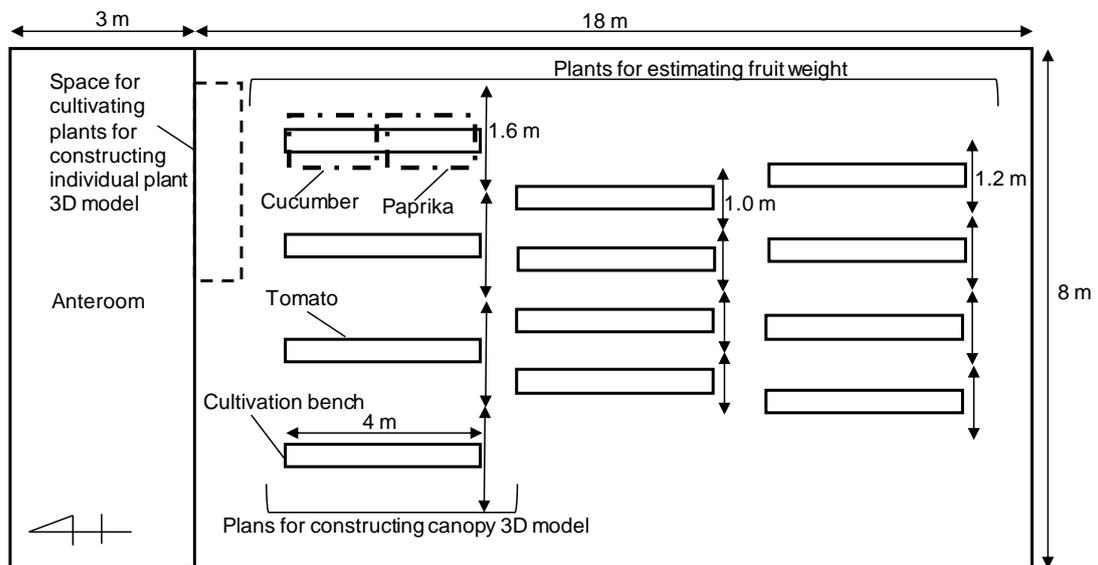


Fig. 3. 1 Location of cultivation benches and plants (tomato, cucumber, and paprika) in the greenhouse. The greenhouse was located in Matsudo, Chiba, Japan.

### 3.2.2.2. 生育モニタリング

#### 3.2.2.2.1. 植物の点群データの取得

本研究の全体像を示すフローチャートを Fig. 3.2 に示した。ワグネルポットに定植したトマト、キュウリおよびパプリカ（葉面積、乾物重および草丈の推定用）を、3D スキャナー（DPI-8X, (株) オーピーティー）を用いて日没時に 1 株ずつ一周スキャンし、植物個体の点群データを取得した。使用した 3D スキャナーの撮影可能距離は 0.6–4.0 m であった (spatial x/y resolution at 2 m: 3.4 mm, depth resolution at 2 m: 12 mm)。各点群は x, y, z 座標を持っている。スキャン後、破壊調査を行い、1 株あたりの葉面積、草丈、果実を除く葉および総乾物重の測定を行った。葉面積は卓上葉面積計 (LI-3100, LI-COR Inc.) を用いて測定した。トマトは 4 月 7 日から 5 月 19 日 (17–59 DAT) まで、キュウリは 4 月 7 日から 5 月 19 日 (5–47 DAT) まで、パプリカは 4 月 7 日から 6 月 12 日 (5–71 DAT) まで異なる生育ステージの植物個体を 1–2 週間に一度スキャンした。

3D スキャナーを用いて LAI および群落構造推定用のトマト、キュウリおよびパプリカ群落の周りを日没時に 1 周スキャンし群落の点群データを取得した。トマトは 4 月 5 日から 5 月 23 日 (15–63 DAT) まで、キュウリは 4 月 3 日から 5 月 23 日 (1–51 DAT) まで、パプリカは 4 月 5 日から 8 月 2 日 (3–122 DAT) まで異なる生育ステージの株を 1–3 週間に一度スキャンした。LAI の推定において葉面積の実測は、2.2.3. に示した式 2-2 を用いる方法で行った。栽培したキュウリおよびパプリカを用いてあらかじめ 2.2.3. に示した式 2-2 の  $\alpha$  を算出し葉面積の測定に利用した。キュウリおよびパプリカの係数  $\alpha$  は 0.87 および 0.59 であった (Fig. 3.3)。トマトの係数  $\alpha$  は 2.2.3. に示した値 0.25 を用いた (Fig. 2.7)。

情報量を減らすために取得した植物の点群データの色情報は削除した。

### Flow chart of this experiment

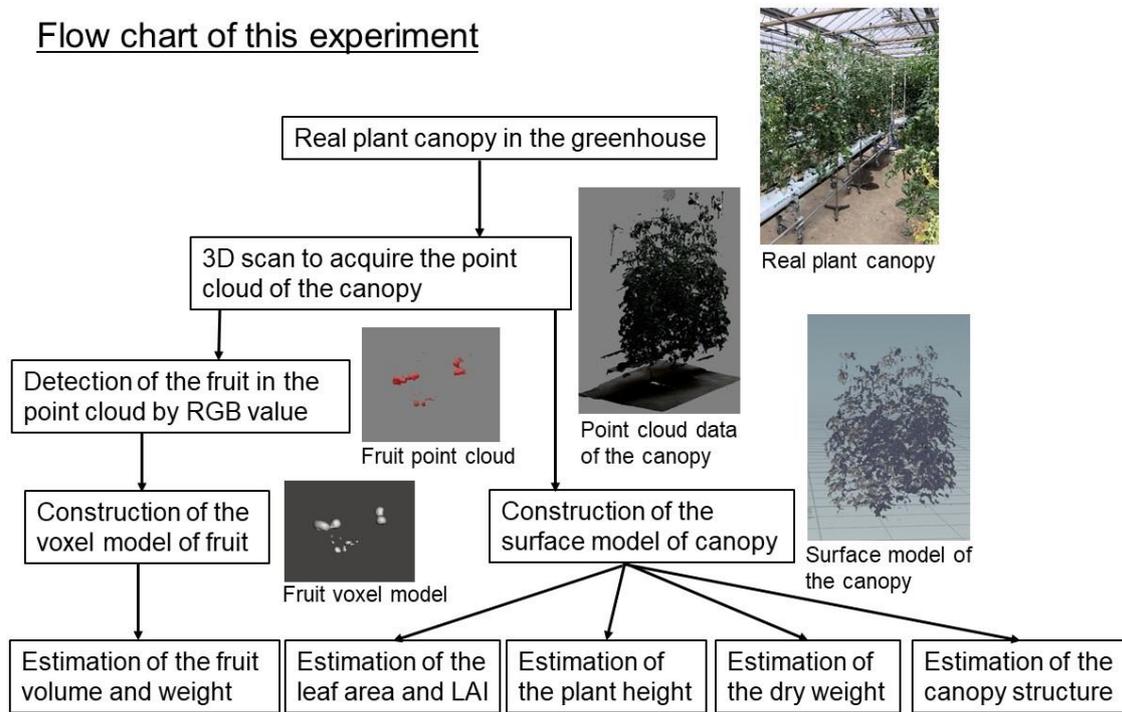


Fig. 3. 2 Flow chart of monitoring of the growth and yield of fruit vegetables using a three-dimensional (3D) scanner. LAI, leaf area index.

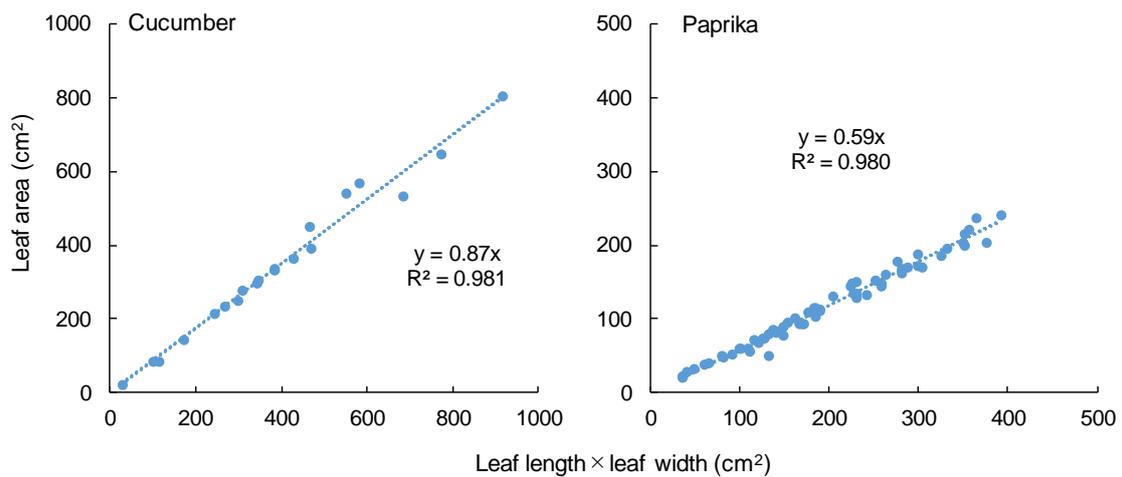


Fig. 3. 3 Relationship between the leaf length × leaf width and leaf area for cucumber and paprika.

### 3.2.2.2.2. 植物のサーフェスモデルの作成

3D 点群処理ソフト (OPT クラウドサーベイ, (株) オーピーティー) に、3.2.2.2.1.で取得した対象植物の個体および群落の点群データを取り込み、3 点の座標 (x, y, z) を持つポリゴンで構成される STL 形式のサーフェスモデルに変換を行った。ポリゴンとは、3DCG を用いて立体を表現する際に用いられる多角形の平面データのことである。通常ポリゴンの形は、三角形が用いられる。理由として、四角形以上のポリゴンを用いると、頂点の座標によってはポリゴンにねじれが生じ、うまく描画できなくなる恐れがあるからである。本試験でも三角形のポリゴンを使用している。サーフェスモデルは、内部が空洞であり、面の集合体で構成されているため、表面積の推定が可能である。変換したサーフェスモデルは、Houdini FX 17 (Side Effects Software Inc.) を用いて不要箇所のトリミングを行った (Figs. 3. 4 and 3. 5)。

トリミングを行ったサーフェスモデルから葉面積を算出するために、3D モデルを構成するポリゴンの面積を計算した。ポリゴンの面積は、下記の手順で算出した。

面積を算出したいポリゴンを $\triangle OAB$  とすると $\triangle OAB$  の面積は $\vec{OA}$ 、 $\vec{OB}$ の外積のベクトルの大きさに 1/2 を乗じると算出できる。ベクトル $\vec{OA}$ および $\vec{OB}$ をそれぞれ $\vec{OA}=(a_1, a_2, a_3)$ 、 $\vec{OB}=(b_1, b_2, b_3)$ とすると $\triangle OAB$  の面積は式 3-1 で計算できる。

$$\Delta OAB = \frac{1}{2} \times \sqrt{(a_2b_3 - a_3b_2)^2 + (a_3b_1 - a_1b_3)^2 + (a_1b_2 - a_2b_1)^2} \quad (\text{式 3-1})$$

上述した計算を植物のサーフェスモデルを構成するすべてのポリゴンに適用し積算することで葉面積の推定を行った。LAI は、植物群落のサーフェスモデルより推定した群落の葉面積を栽植面積で除すことで推定した。

植物個体の乾物重の推定を行うために、まず実測葉面積と実測葉乾物重および果実を除く実測総乾物重の関係を調査した。葉面積と乾物重の間に線形関係があれば、葉面積の推定値から乾物重の推定が可能となる。その後、推定葉面積と実測葉乾物重および実測総乾物重の関係を調査した。

草丈についてはサーフェスモデルを SketchUp 2017 (Trimble Inc.) で読み込み、植物体基部から成長点までの距離をポリゴンの頂点の座標を用いて推定した。

群落構造は群落サーフェスモデルの各高さに存在するポリゴンの面積 (葉面積) を積算し推定した。

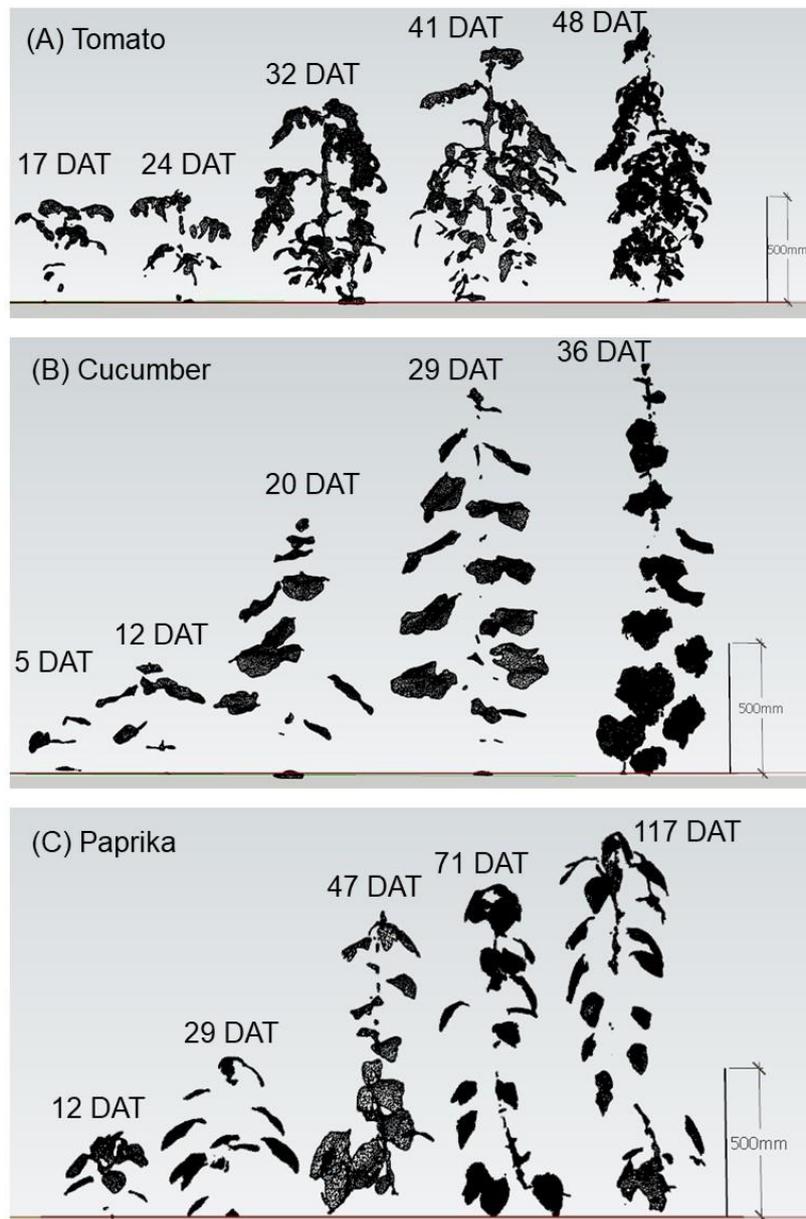


Fig. 3. 4 Surface model of individual plants to estimate leaf area, dry weight, and plant height. Tomato plants were scanned using a 3D scanner (DPI-8X, OPT technologies Co., Ltd.) from April 7 to May 19, 2019 (17–59 days after transplanting (DAT) (A). Cucumber plants were scanned from April 7 to May 19, 2019 (5–47 DAT) (B). Paprika plants were scanned from April 7 to July 28, 2019 (5–117 DAT) (C). Individual plant surface models were prepared using SketchUp 2017 (Trimble Inc.).

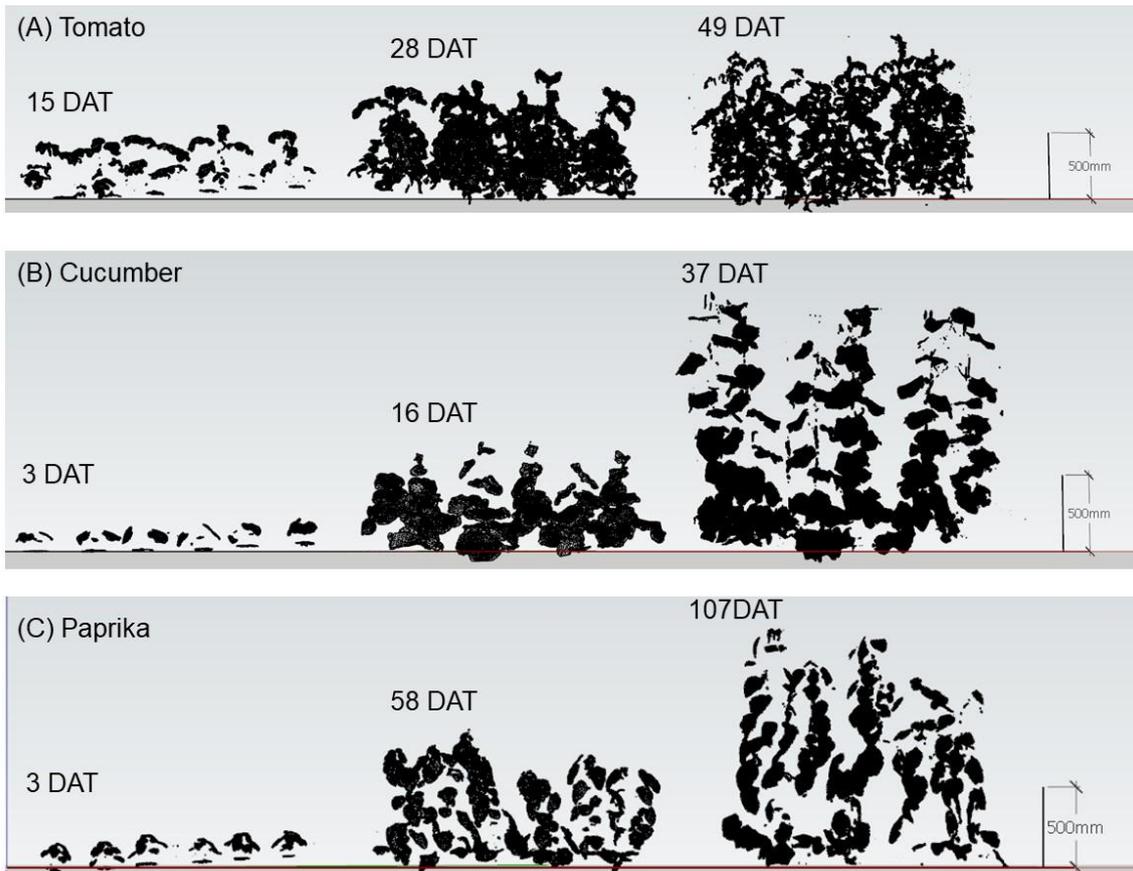


Fig. 3. 5 Surface model of plant canopies for estimation of LAI and plant structure. Tomato canopies were scanned using the 3D scanner (DPI-8X, OPT technologies Co., Ltd.) from April 5 to May 23, 2019 (15–63 days after transplanting (DAT)) (A). Cucumber canopies were scanned from April 3 to May 23, 2019 (1–51 DAT) (B). Paprika canopies were scanned from April 5 to August 2, 2019 (3–122 DAT) (C). Plant canopy surface models were prepared using SketchUp 2017 (Trimble Inc.). LAI, leaf area index.

### 3.2.3. 結果

トマト、キュウリおよびパプリカの1株あたりの実測葉面積と推定葉面積の関係を Fig. 3. 6 に示した。実測値と推定値の間に有意な相関があった。トマト、キュウリおよびパプリカで  $R^2$  値はそれぞれ 0.828 (RMSE = 914.1 cm<sup>2</sup>)、0.970 (RMSE = 533.5 cm<sup>2</sup>) および 0.959 (RMSE = 204.1 cm<sup>2</sup>) であった。

Fig. 3. 7 にトマト、キュウリおよびパプリカの実測 LAI と推定 LAI の散布図を示した。実測値と推定値の間に有意な相関があった。 $R^2$  値は、トマト、キュウリおよびパプリカでそれぞれ 0.600 (RMSE = 0.27)、0.975 (RMSE = 0.39) および 0.934 (RMSE = 0.37) であった。LAI の推定では、特にパプリカで推定値を過小評価する傾向があった。

株あたりの実測葉面積と葉の乾物重の関係を Fig. 3. 8-A に示した。両者の間に有意な相関があった。トマト、キュウリおよびパプリカで  $R^2$  値はそれぞれ 0.906、0.966 および 0.982 であった。株あたりの実測葉面積と総乾物重の関係を Fig. 3. 8-B に示した。両者の間に有意な相関があった。トマト、キュウリおよびパプリカで  $R^2$  値はそれぞれ 0.847、0.959 および 0.927 であった。

株あたりの推定葉面積と葉の乾物重の関係を Fig. 3. 9-A に示した。両者の間に有意な相関があった。トマト、キュウリおよびパプリカで  $R^2$  はそれぞれ 0.801、0.970 および 0.941 であった。株あたりの推定葉面積と総乾物重の関係を Fig. 3. 9-B に示した。両者の間に有意な相関があった。トマト、キュウリおよびパプリカで  $R^2$  はそれぞれ 0.743、0.973 および 0.929 であった。

トマト、キュウリおよびパプリカの草丈の実測値と推定値の関係を Fig. 3. 10 に示した。実測値と推定値の間に有意な相関があった。トマト、キュウリおよびパプリカで  $R^2$  はそれぞれ 0.999 (RMSE = 1.33 cm)、0.999 (RMSE = 2.18 cm) および 0.999 (RMSE = 1.64 cm) であった。

葉面積の垂直分布より作成したトマト (49 DAT)、キュウリ (37 DAT) およびパプリカ (107 DAT) の群落構造を Fig. 3. 11 に示した。葉面積の垂直分布から植物の群落構造の推定が可能であった。

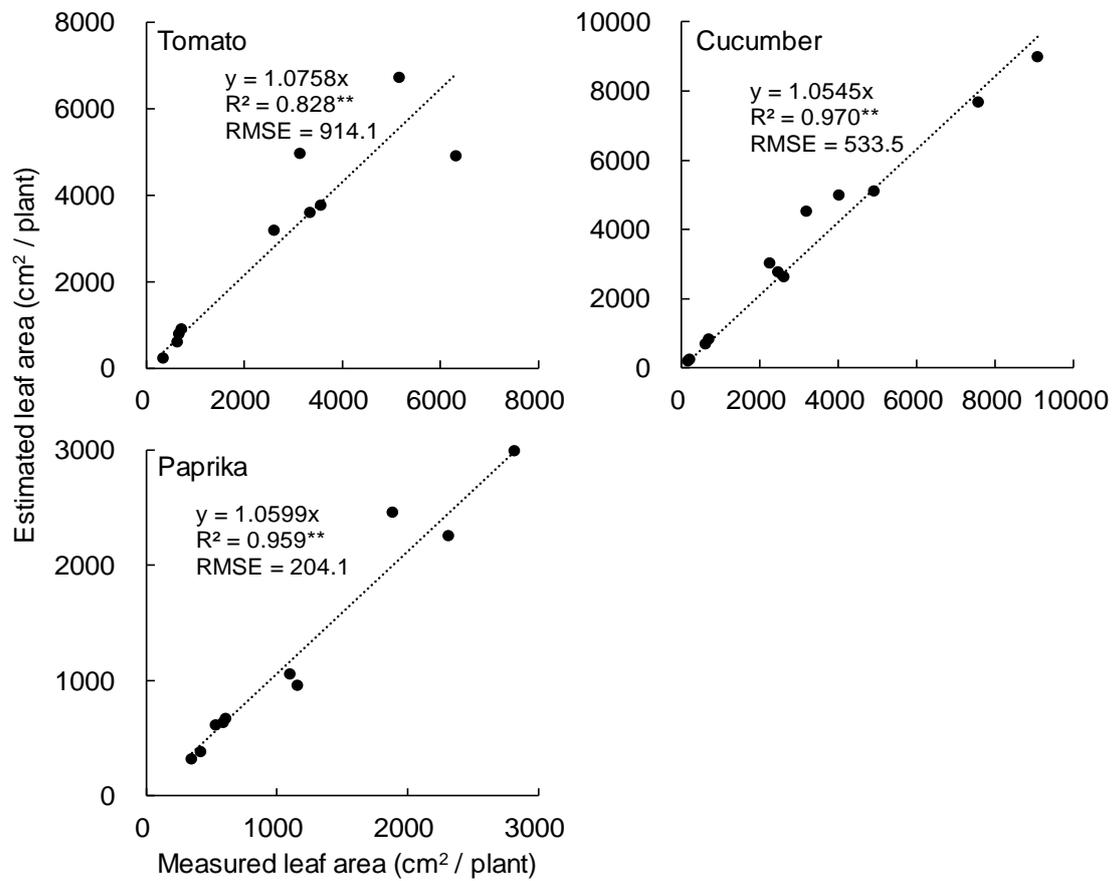


Fig. 3. 6 Relationship between measured and estimated leaf area per plant. The leaf area was measured using an area meter (LI-3100, LI-COR Inc.). The leaf area was estimated based on the area of polygons in the plant surface model. Tomato plants were scanned using a 3D scanner (DPI-8X, OPT technologies Co., Ltd.) from April 5 to May 23, 2019. Cucumber plants were scanned from April 3 to May 23, 2019. Paprika plants were scanned from April 5 to August 2, 2019. \*\* significant at  $P < 0.01$  according to the regression analysis. RMSE means root mean squared error.

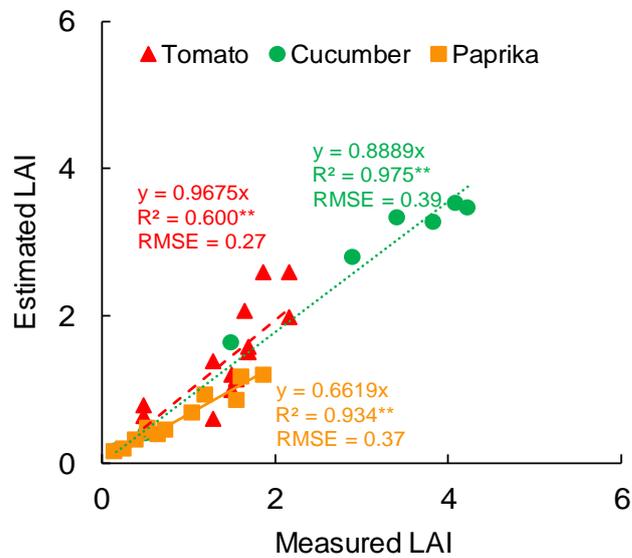


Fig. 3. 7 Relationship between measured and estimated leaf area index (LAI). LAI was measured non-destructively using the leaf area (leaf area = leaf length  $\times$  leaf width  $\times$  coefficient) and cultivation area. LAI was estimated based on the polygon area of the canopy surface model and cultivation area. Tomato and cucumber canopies were scanned using the 3D scanner (DPI-8X, OPT technologies Co., Ltd.) from April 7 to May 23, 2019. Paprika canopies were scanned from April 7 to June 12, 2019. \*\* significant at  $P < 0.01$  according to the regression analysis. LAI, leaf area index. RMSE means root mean squared error.

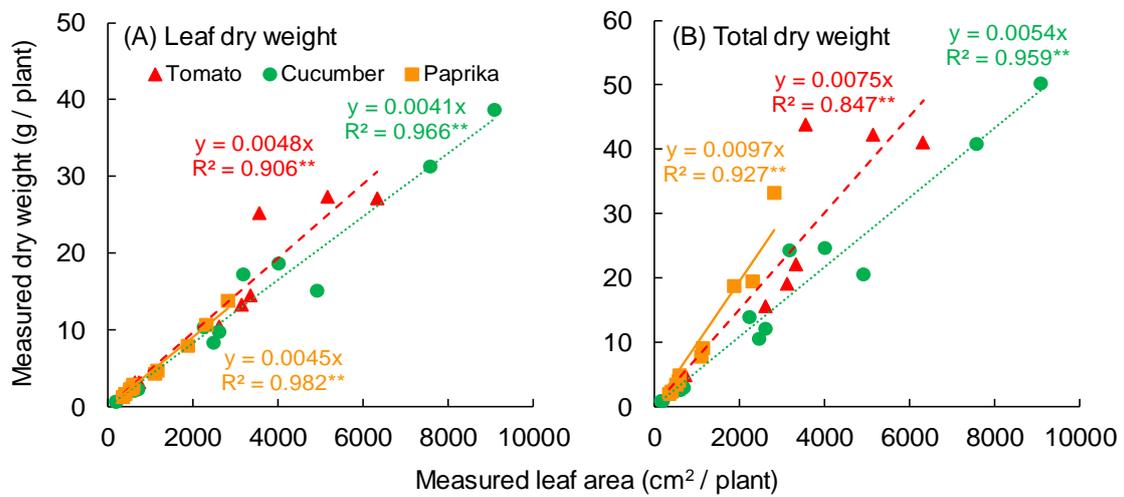


Fig. 3. 8 Relationship between measured leaf area and dry weight (leaf or total). (A, B) show the dry weights of leaf and total, respectively. The total dry weight does not include fruit. The leaf area was measured using an area meter (LI-3100, LI-COR Inc.). Tomato plants were scanned using the 3D scanner (DPI-8X, OPT technologies Co., Ltd.) from April 5 to May 23, 2019. Cucumber plants were scanned from April 3 to May 23, 2019. Paprika plants were scanned from April 5 to August 2, 2019. \*\* significant at  $P < 0.01$  according to the regression analysis.

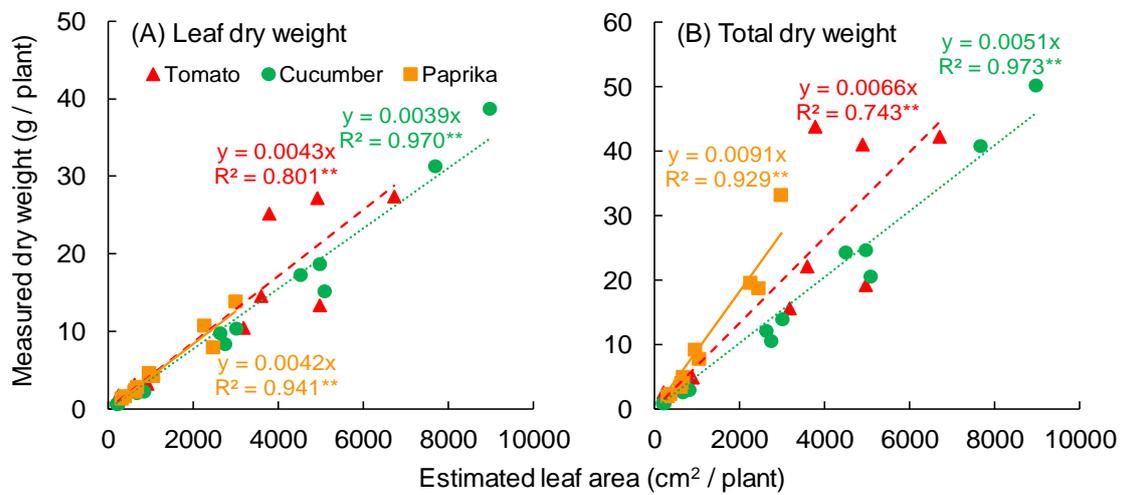


Fig. 3. 9 Relationship between estimated leaf area and measured dry weight (leaf or total). (A, B) show the dry weights of leaf and total, respectively. The total dry weight does not include fruit. The estimated leaf area is the area of polygons in the plant surface model. Tomato plants were scanned using the 3D scanner (DPI-8X, OPT technologies Co., Ltd.) from April 5 to May 23, 2019. Cucumber plants were scanned from April 3 to May 23, 2019. Paprika plants were scanned from April 5 to August 2, 2019. **\*\*** significant at  $P < 0.01$  according to the regression analysis.

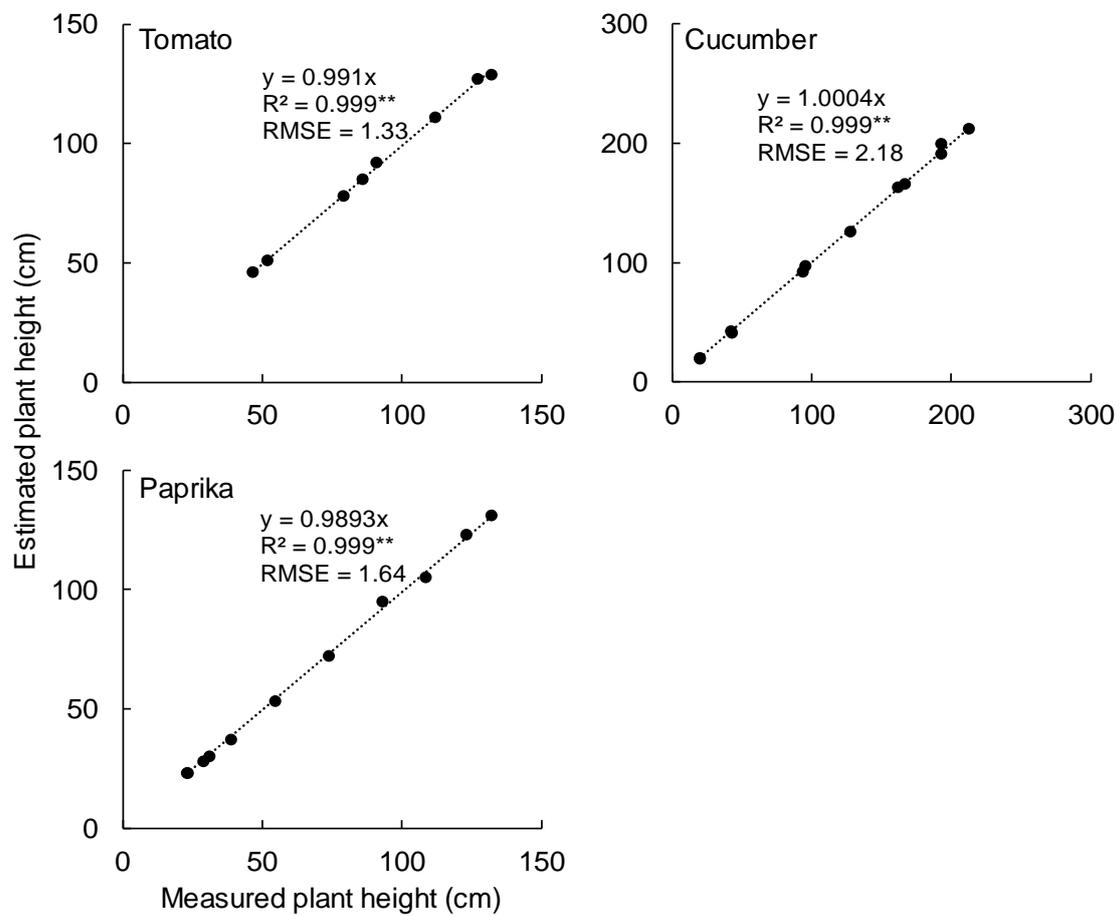


Fig. 3. 10 Relationship between measured plant height and estimated plant height. Plant height was estimated using the measuring tool in SketchUp 2017 (Trimble Inc.). Tomato plants were scanned using the 3D scanner (DPI-8X, OPT technologies Co., Ltd.) from April 5 to May 23, 2019 (A). Cucumber plants were scanned from April 3 to May 23, 2019 (B). Paprika plants were scanned from April 5 to August 2, 2019 (C). \*\* significant at  $P < 0.01$  according to the regression analysis. RMSE means root mean squared error.

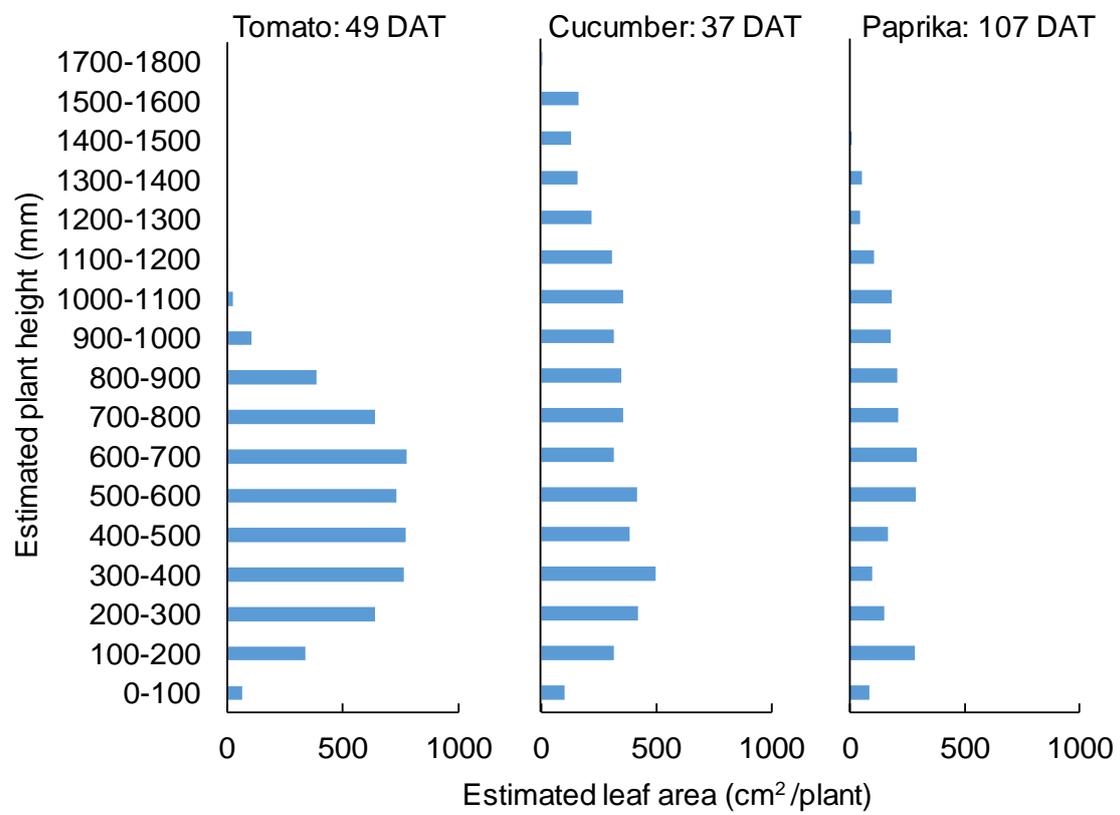


Fig. 3. 11 Plant structure estimated based on the height and polygon area of the canopy surface model. Tomato and cucumber canopies were scanned using the 3D scanner (DPI-8X, OPT Technologies Co., Ltd.) on May 23, 2019. Paprika canopies were scanned on June 12, 2019.

#### 3.2.4. 考察

1 株あたりの葉面積の推定について、トマトで  $R^2$  値がキュウリおよびパプリカと比較すると低い傾向にあった (Fig. 3.6)。理由として、トマトは複雑な小葉を有しており、それをポリゴンで再現することが難しかったためと考えられた。特に推定値が過大評価されている部分については、小葉の隙間にノイズ (不要な点群) による不要なポリゴンが形成されていた。これは Drift point と呼ばれるノイズで、これまでに多くのノイズ除去方法が検討されている (Zhou et al., 2020)。Zhou et al. (2020) は、Non-interactive dual threshold denoising method を利用して Drift point を除去したと報告している。上記のような方法を用いてノイズを除去した後に、ポリゴン化を行うと精度の良いサーフェスモデルの作成が可能と考えられる。一方で、キュウリおよびパプリカは、葉の形が単純なため各個葉のスキャンが容易であった。

LAI 推定時にトマトでキュウリおよびパプリカよりも  $R^2$  値が低かった (Fig. 3.7) 理由は、トマト個体の葉面積の推定と同様に、トマトの葉の形態的な特徴が原因であったと考えられた。また、推定値が過小評価されている部分については、トマト群落内部の点群の取得が難しい部位のポリゴンに欠損が発生したためと考えられた。パプリカについては群落下部の葉の重なりが形態的理由により他の植物と比較して大きかったため、推定値が過小評価される傾向にあった。キュウリは群落になっても葉の重なりが発生しにくく LAI の推定が容易であった。また、3D モデルを利用することで、様々な視点から 3 次元データの取得が可能である (Lati et al., 2013) ため、目的とする植物以外の映り込みによる影響を回避できた。

1 株あたりの実測葉面積と実測葉乾物重および総乾物重の間に有意な相関関係がみられた (Fig. 3.8)。安ら (2015) は、キュウリ葉の生体重と葉面積の間に相関があると報告しており、上述した結果と傾向が一致した。しかし、1 株あたりの推定葉面積と葉の乾物重および総乾物重の関係において、トマトでキュウリおよびパプリカと比較して  $R^2$  値が低かった (Fig. 3.9)。理由として、トマトの 3D モデルの再現性が悪く葉面積が正しく反映されていなかったことが原因と考えられた。キュウリおよびパプリカは、モデルの再現性が高かったため、トマトと比較して  $R^2$  値が高かったと考えられた。また、総葉面積と総乾物重の関係を利用して総乾物重を推定する場合、各器官への乾物分配率が栽培期間中一定である必要があると考えられた。トマト、キュウリおよびパプリカで近似曲線の傾きが異なるのは、植物種間で比葉重や葉以外の部位への乾物分配率が異なるためと考えられた。上記の結果より、実測した総葉面積と総乾物重 (果実を除く) の関係を示す式と推定した総葉面積のデー

タを用いると総乾物重（果実を除く）の推定が可能となる。例えば、本手法を定期的を実施することで果菜類の成長速度を推定することができると考えられた。

トマト、キュウリおよびパプリカの実測草丈と推定草丈の  $R^2$  値はいずれも 0.999 であり、植物種によらず、精度よく推定できていた (Fig. 3. 10)。理由として、株元と成長点付近の点群データの取得には葉の形や重なり等の植物の形態的な影響を受けにくかったためと考えられた。

本試験で、葉面積と草丈の推定が可能であったため、各高さに存在する葉面積の情報を利用することで、群落構造の推定が可能であった (Fig. 3. 11)。Fig. 3. 11 のようなグラフを作成することで植物種によってどの層に葉面積が多く存在しているのかなどを視覚的に表現することが可能となる。加えて、果菜類の群落構造を把握できると、摘葉を行うべき場所の探索や栽培管理を行う作業員への摘葉等の指示を定量的に行うことができる。

以上より、3D スキャナーを用いて果菜類の点群データを取得することで、葉面積、LAI、草丈、群落構造および乾物重の推定が可能となった。複数の生育情報を同時に取得できるため、農業（栽培管理）の省力化および最適化につながると考えられた。

### 3.3. 試験 3-2 3D モデルを用いた果実重の推定

#### 3.3.1. 目的

試験 3-1 で、3D スキャナーを用いて取得した果菜類の群落の点群データを 3D モデル (サーフェスモデル) に変換しポリゴンの座標情報から果菜類の生育情報を推定した。本節では点群データが持つ RGB 値 (RGB カラー画像表現) を利用して果実 (トマトおよびパプリカ) を検出し作成した果実の 3D モデル (ソリッドモデル) より収量を推定することを目的とする。本節では、果実の検出に RGB 値を用いる都合上、収穫時の果実と葉の色が異なるトマトおよびパプリカを試験に用いた。

#### 3.3.2. 材料および方法

##### 3.3.2.1. 供試植物および温室

3.3.2.1. に示す温室内で栽培したトマトおよびキュウリ群落を試験に使用した。

##### 3.3.2.2. 果実重の推定

###### 3.3.2.2.1. RGB 値を用いた群落内の果実の検出

果実重推定のためのフローチャートを (Fig. 3.2) に示した。トマトは 2019 年 8 月 14 日-9 月 5 日 (146-168DAT) に、パプリカは 2019 年 8 月 28 日-30 日 (148-150DAT) に植物群落の点群データを取得するために 3D スキャナー (DPI-8X, (株) オーピーティ) で日没時に群落 (6 株) の周り (特に果実周辺) を 1 周スキャンした (Fig. 3.12)。トマトは、草丈: 150 cm 程度、葉枚数: 20 枚程度、LAI: 3 程度であった。パプリカは、草丈: 160 cm 程度、葉枚数 35 枚程度、LAI: 2 程度であった。トマトは、スキャン後に群落に存在する赤熟した果実 (3-23 個) をすべて収穫し電子天秤を用いて生体重を測定した。この作業を試験期間中複数回繰り返すことで、各群落の点群データとその中に存在する赤熟した果実の生体重のデータセットを作成した。パプリカは、スキャン後に黄熟した果実 2 個を収穫し、その果実の生体重を測定した。その作業を群落に存在する黄熟した果実がなくなるまで繰り返し、各群落点群データ中に存在する黄熟した果実の生体重のデータセットを作成した。トマトとパプリカで果実の生体重の測定方法が異なるのは、パプリカ果実の成熟に要する時間がトマトと比較すると長く、パプリカで群落内に存在する果実数を複数段階用意することが困難であったためである。

本試験で取得した点群データは植物体およびその果実を両方含んでいる。色情報を含む

画像から、果実の色に基づいた果実の分離が可能である (Gongal et al., 2015)。各点群は座標情報 (x, y, z) と色情報 (RGB 値) を持っており、それらの情報を記述したファイルを OPT Cloud Survey ((株) オーピーティ) を用いてテキスト形式 (pts 点群) で出力した。3.2.2.2.1. で、点群の色を示す RGB 値はファイルの軽量化のため削除していたが、本試験では果実の検出のために RGB 値を利用した。Dadwal and Banga (2012) はトマト果実の熟度の推定に RGB 値を用いている。RGB 値とは、色の表現法の一つで赤、緑および青を 0-255 の数字で表現しそれぞれを 256 通りの値で色を表現している。

植物群落の点群データよりトマト果実を抽出する際は、 $R > 140$ 、 $G < 100$ 、 $B < 100$  の条件を満たす点群を抽出し、パプリカの果実を抽出する際は、 $R > 150$ 、 $G > 110$ 、 $B < 50$  の条件を満たす点群を抽出した (Fig. 3. 12)。上記の条件の決定は、色見本を見ながらトマトおよびパプリカの果実抽出に適した条件を探索し決定した。

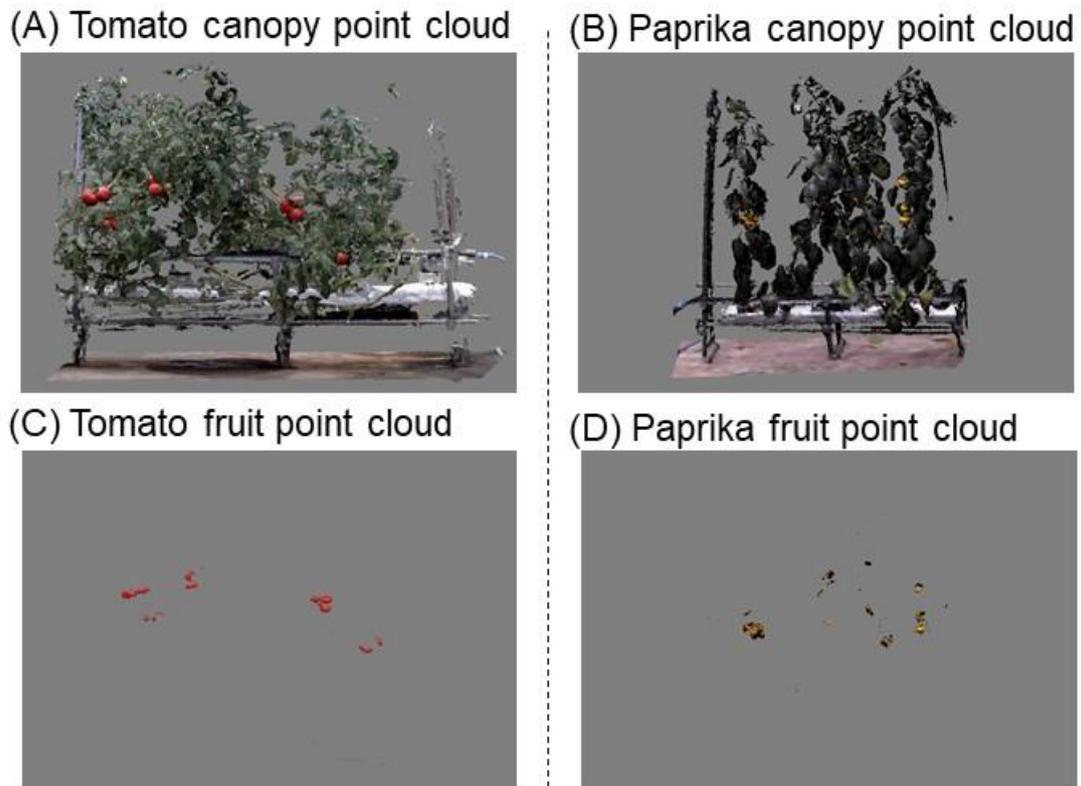


Fig. 3. 12 Plant canopy and fruit point cloud data. Tomato canopies for estimation of fruit weight were scanned using the 3D scanner ((DPI-8X, OPT technologies Co., Ltd.) from August 14 to September 5, 2019 (A). Paprika canopies for estimating fruit weight were scanned from August 28 to 30, 2019 (B). Fruit point cloud data were detected from the canopy point cloud data using the RGB value. Point cloud data of tomato fruits fulfilling  $R > 140$ ,  $G < 100$ , and  $B < 100$  were acquired (C). Point cloud data of paprika fruits fulfilling  $R > 150$ ,  $G > 110$ , and  $B < 50$  were obtained (D). Point cloud data were prepared using OPT Cloud Survey (OPT technologies Co., Ltd.).

#### 3.3.2.2.2. ソリッドモデルを用いた果実重の推定

3.3.2.2.1.で作成したトマトとパプリカ果実の点群データを点群処理ソフト（OPT Cloud Survey）で再度読み込み、果実を示す点群データからサーフェスモデルに変換した（Fig. 3. 13）。果実のサーフェスモデルを 3D モデリングソフトの Meshmixer 3.5（Autodesk Inc.）で読み込みソリッドモデルに変換した（Fig. 3. 13）。ソリッドモデルは、内部がボクセルで満たされているのでボクセル数をカウントすることで 3D モデルの体積を推定することができる（細井・大政, 2014）。ボクセルとは、3D 形状を表現するための立方体である。作成した果実のソリッドモデルを用いて各群落の果実の体積を推定した。推定した果実の体積（ $\text{cm}^3$ ）に果実の密度（ $\text{g cm}^{-3}$ ）を乗じて果実の重量を推定した。果実の密度は、アルキメデスの原理に基づく液体置換法（Concha-Meyer et al., 2018）を用いて簡易的に測定した値を用いた。水を入れたプラスチックビーカーにトマトおよびパプリカの果実を沈め、増加した体積を果実の体積とした。トマトおよびパプリカの果実密度は、それぞれ 0.84 および 0.54  $\text{g cm}^{-3}$  であった（5 果の平均）。トマトおよびパプリカの果実の実際の重量と推定した重量の関係を調査した。

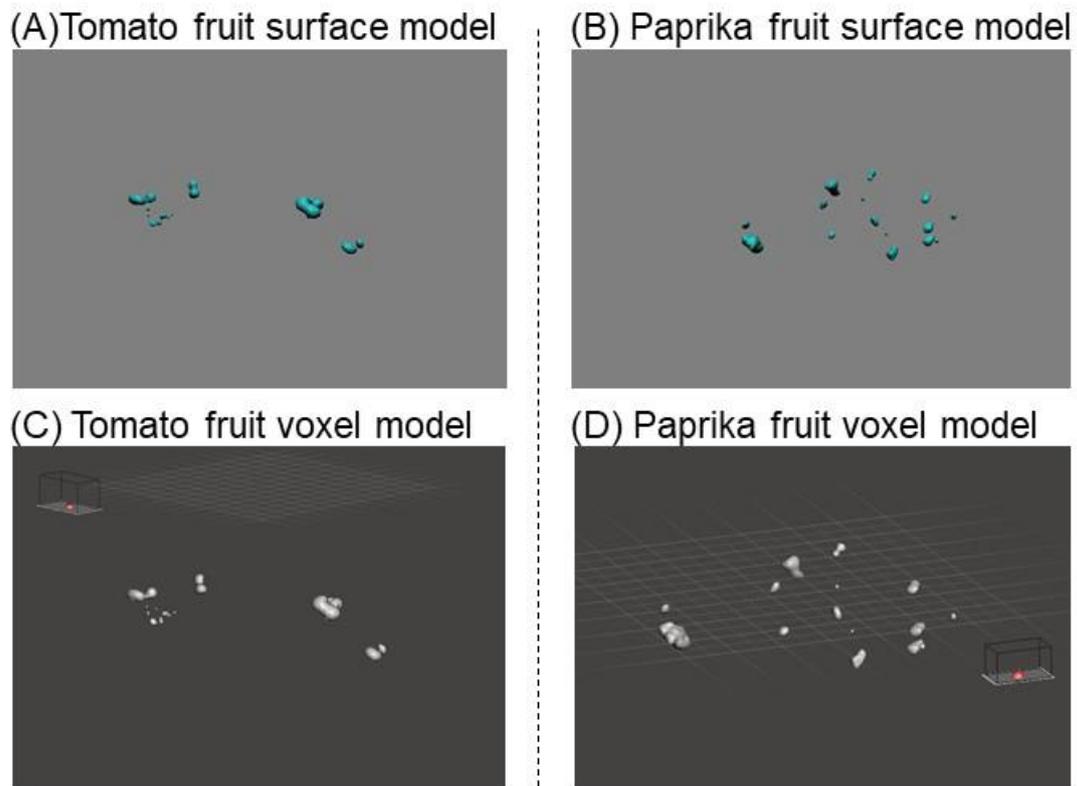


Fig. 3. 13 Fruit surface and voxel models. The fruit surface model was constructed by the fruit point cloud using OPT cloud survey (DPI-8X, OPT technologies Co., Ltd.) (A, B). The fruit voxel model was constructed from the surface model using Meshmixer 3.5 (Autodesk Inc.) (C, D).

### 3.3.3. 結果

Fig. 3. 14 にトマトおよびパプリカの果実の実際重量とソリッドモデルを用いて推定した果実重量の関係を示した。トマトおよびパプリカの実測果実重と推定果実重の間に有意な相関関係がみられた。トマトおよびパプリカで  $R^2$  値は 0.739 (RMSE = 278.2 g) および 0.888 (RMSE = 275.5 g) であった。作成した近似曲線は特にパプリカで推定値を過小評価する傾向にあった。

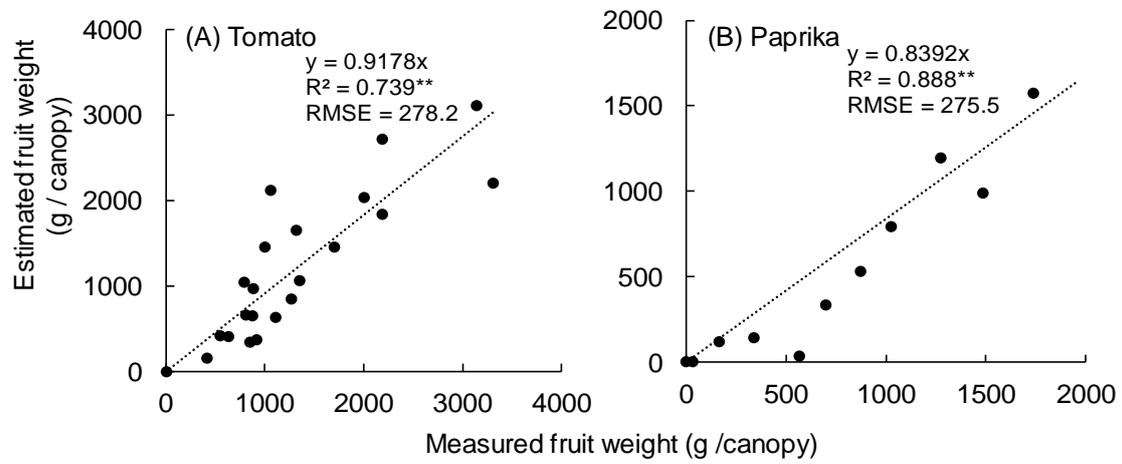


Fig. 3. 14 Relationship between the measured and estimated fruit weight. (A, B) show the fruit weights of tomato and paprika, respectively. Fruit weight was estimated using the volume calculated by the fruit voxel model and density. \*\* significant at  $P < 0.01$  according to the regression analysis. RMSE means root mean squared error.

#### 3.3.4. 考察

果実重量の推定を行う際、トマトとパプリカでパプリカの方が、 $R^2$  値が高かった (Fig. 3. 14)。理由として、パプリカの方がスキャン時の LAI が小さく葉による遮蔽が少なかったため、果実点群データを安定して取得できたと考えられた。また、特にトマトでは果実の一部のみ赤く着色している果実があり、推定重量が過大評価されているプロットについては、それがノイズとして検出されていた。

実測果実重と推定果実重の関係で、近似曲線が推定果実重を過小評価している (Fig. 3. 14) のは下記の理由が考えられた。トマトおよびパプリカの群落構造の都合上、果実の裏側のスキャンのできなかった部分の点群の欠損が果実重量の過小評価を引き起こしたと考えられた。したがって、果実が葉等で遮蔽されないような仕立て方で栽培することで、点群データの欠損を減らせると考えられた。また、果実上部の色温度は時間や天候の影響を受ける (Hashimoto et al., 2012)。暗い画像では色情報が不鮮明になり、色ベースの検出アルゴリズムを用いると、未熟な桃の上部が葉の一部として認識されたという報告もある (Teixidó et al., 2012)。Rose et al. (2016) はブドウの果実を検出するために、日没後に照明 (homogeneous light) を利用して点群データを取得している。Font et al. (2014) は人工照明を用いて夜間に撮影した高解像度画像から、果実表面の鏡面反射のピークを検出し果実個数のカウントを行った。本研究でも夜間に照明設備を利用して撮影すると完熟した果実の検出に効果的であったと考えられた。また、Malik et al. (2018) は、RGB から HSV 色空間に変換すると、色相 (Hue) 成分が周囲の光条件による影響を受けにくいと述べている。また、彩度 (Saturation) も周囲の光条件の影響を受けにくい (Hashimoto et al., 2012)。El-Bendary et al. (2015) は、複数のトマト果実の画像の RGB 値を HSV に変換したのち、機械学習で果実品質の分類を行い、精度は 90.8% だつたと述べている。したがって、今後 RGB 色空間を HSV や HSL 色空間に変換し果実点群の抽出を行うことで、果実検出精度を向上させることができると考えられた。

本試験の結果より RGB 値を含むトマトおよびパプリカの群落点群データから、果実検出および果実重量の推定が可能であると示唆された。試験 3-1 で、果菜類の群落および個体の点群データから葉面積、LAI、草丈、群落構造等の生育情報の取得が可能になった。点群データの取得方法は、試験 3-1 および試験 3-2 で共通であるため、一度群落の点群データの取得を行えば、生育情報に加えて収量の推定も同時に可能になることを明らかにできた。

#### 3.4. まとめ

3D スキャナーを用いて植物個体および群落（トマト、キュウリおよびパプリカ）の点群データを取得しサーフェスモデルの作成を行った。葉面積、LAI、群落構造および草丈の推定を行い、実測値と推定値の間に有意な相関関係がみられ、3D スキャナーを用いた生育モニタリングが可能と考えられた。また、実測した総葉面積と総乾物重（果実を除く）の間に線形関係があったため、葉面積と乾物重の関係を示す関係式を利用することで推定した総葉面積より総乾物重（果実を除く）の推定が可能と考えられた。

加えて、点群データの持つ RGB 値を用いて果実の点群データを抽出し、それを用いてソリッドモデルを作成することで果実重の推定を行った。果実重の実測値と推定値の間に有意な相関関係がみられたため、3D スキャナーを用いることで生育のモニタリングに加え、収量の推定も可能と示唆された。

本研究で、葉面積、LAI、群落構造、草丈および収量の推定について、植物のスキャンから点群データの取得まで共通である。したがって、一度スキャンを行って群落の点群データを取得すると、複数項目の生育情報や収量を同時に推定可能である。したがって、将来的に果菜類の生育および収量のモニタリングに 3D スキャナーの利用が期待できる。また、本試験で作成した果菜類の 3D モデルは、植物の形態を再現できていたため、第 4 章での光学シミュレーションを用いた群落の受光量の推定に利用可能である。

## 第4章 光学シミュレーションを用いた温室内の果菜類の群落受光量の推定

### 4.1. 緒言

温室内で作物を栽培する場合、その収量を決定する要因の一つとして、作物の受光量がある。受光量は、温室形状、地域、植物種および栽植密度等によって変化し、光合成産物量に関与する。多くの植物で受光量と乾物生産量の間には直線性がみられる（堀江・桜谷, 1985; Monteith, 1977）と報告されている。第2章のトマトの栽培試験でも受光量と収量の間には線形関係がみられた。したがって、温室内で作物栽培を行うにあたり、収量を増加させるために作物の受光量を増加させる温室形状や栽植方法等を把握することが重要である。

栽植方法と収量の関係については、トマト等の果菜類で研究が行われている。栽植密度を増加させることで作物の光利用効率を向上させることが可能である（Papadopoulos and Pararajasingham, 1997）。Papadopoulos and Ormrod (1990) は春のトマト栽培では株間を 45 cm、秋のトマト栽培では株間を 38 cm にすると栽植面積あたりの収量が多くなると述べている。Amundson et al. (2012) は、トマトを栽培する際に、株間 45 cm で栽培すると収量もしくは果重に悪影響を及ぼさずに栽培できると述べている。しかし、上記の報告は、特定の地域での栽培試験で得られたものであり、気象条件の異なる他の地域や季節に適用することは難しい。また、一般的に温室において、果菜類を栽培する際には 0.8–1.6 m 程度の畝間があり不均一な群落となる。群落や温室形状が変わると植物の受光体制も変化する。したがって、温室において栽植方法と受光体制の関係を一般化することは難しい。また、様々な環境条件（気象条件、植物種、群落形状および温室形状）下における作物の受光量の推定には、建築分野などで用いられている光学シミュレーションが適していると考えられる。

近年、光学シミュレーションを用いた温室内光環境の推定が可能となってきた。光学シミュレーションを用いた推定のメリットは、地域、植物種および群落構造等を考慮し受光量の推定が可能であることである。シミュレーションを行う際には、対象となる温室および植物体をコンピュータグラフィックで 3D モデル化する必要がある。光学シミュレーション技術を用いることで、温室において異なる気象条件下や群落構造における果菜類の層別受光量を可視化することが可能と考えられるが、そのような報告は少ない。

本章では、光学シミュレーションの手法の一つであるレイトレーサー法を用いて果菜類の栽植方法（畝間や株間）と受光量の間を明らかにするシミュレーションモデルの構築とその応用を目的とする。

## 4.2. 試験 4-1 レイトレーサー法による群落内受光量の推定精度

### 4.2.1. 目的

様々な条件下（畝間、株間および気象条件）で群落の受光量を光学シミュレーションを用いて推定する際に、事前に群落受光量の推定精度を把握しておく必要がある。本節では、群落下層、中層および上層の受光量を実測し、推定値の精度確認を行うことを目的とする。実際の温室内のトマト群落および配置を 3D モデルにより再現し、光学シミュレーションの精度の検証を行った。

### 4.2.2. 材料および方法

#### 4.2.2.1. 実験植物の栽培および群落内 PPFD の測定

2.2.1.で示した温室および冬作のトマト群落を試験に利用した。Fig. 2. 4 に示した F1.2 区の群落を試験に用いた。

群落内光環境の実測値として、群落内の PPFD は、2018 年 11 月 27 日から 11 月 30 日の間、ライン PPFD センサー（SQ-311; Apogee Instruments Inc.）を用いて Fig. 4. 1 に示す位置で、1 分間隔で測定した。ライン PPFD センサーの設置高さは、株元から 0 cm（下層）、50 cm（中層）および 160 cm（上層（植物体上））とした（Fig. 4. 2）。

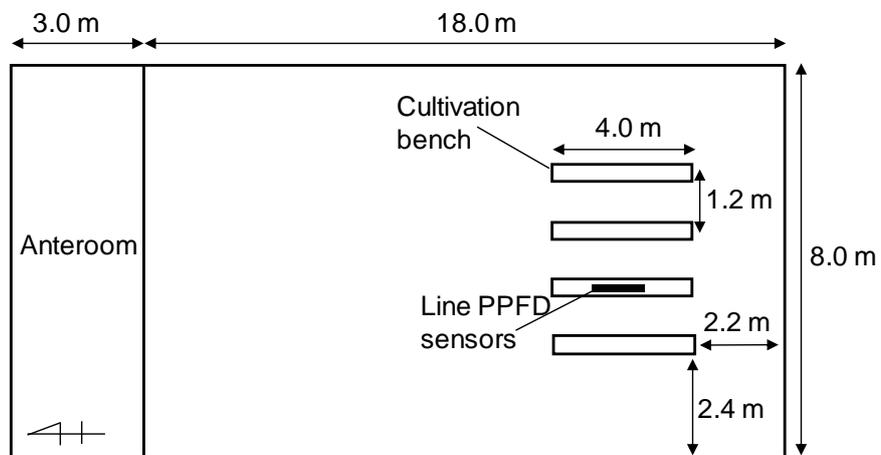


Fig. 4. 1 Layout of cultivation benches and location of the line photosynthetic photon flux density (PPFD) sensors (SQ-311, Apogee Instruments Inc.) in the greenhouse. The greenhouse was built in Matsudo, Chiba, Japan.



Fig. 4. 2 Installation heights of the line photosynthetic photon flux density (PPFD) sensors (SQ-311, Apogee Instruments Inc.) inside the tomato canopy.

#### 4.2.2.2. 群落および温室 3D モデルの作成

トマト群落内光環境のシミュレーションで使用する群落 3D モデルを作成するために、F1.2 区 (Fig. 2. 4) のトマト群落 (6 株) を 3.2.2.2. と同様の方法で 3D スキャナーによりスキャンし点群データを取得した (2018 年 11 月 30 日、葉枚数 : 16 枚程度、草高 : 130 cm 程度) (Fig. 4. 3-A)。点群データからポリゴンで構成される 3D モデル (サーフェスモデル) への変換は 3.2.2.2.2. で示した方法と同様とした (Fig. 4. 3-B)。

3D モデリングソフト (SketchUp 2017, Trimble Inc.) を用いて、設計図を基に構築した対象とする温室の 3D モデルの中に、2018 年 11 月 30 日のトマト群落 (草丈約 130 cm) の 3D モデル (Fig. 4. 4) を実際の位置および栽植密度と同じになるようコピーし設置した (Fig. 4. 5)。

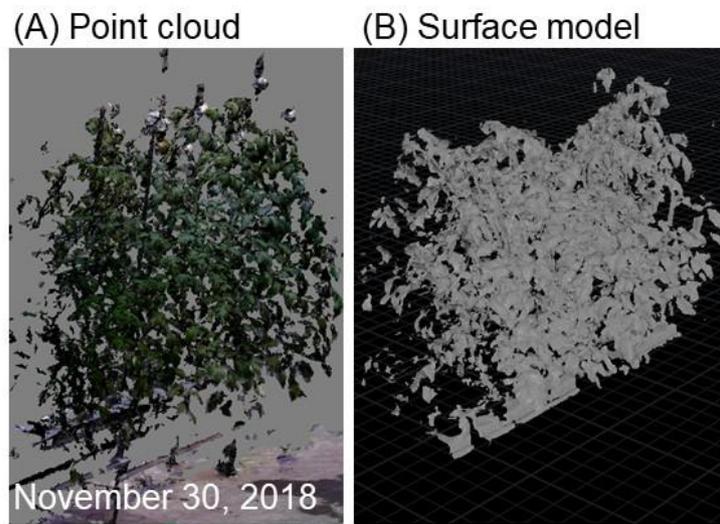


Fig. 4. 3 The point cloud data and 3D model (surface model) of tomato. The surface model (B) was converted from the point cloud data (A) acquired by a 3D scanner (DPI-8X, OPT technologies Co., Ltd.) on November 30, 2018.

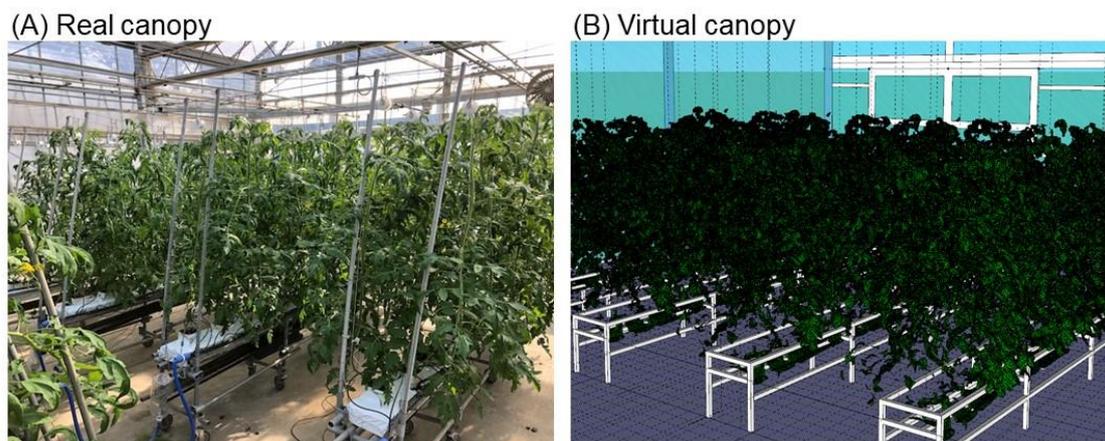


Fig. 4. 4 The real tomato canopy (A) and virtual canopy (B) constructed by polygons. Tomato canopy was scanned by a 3D scanner (DPI-8X, OPT technologies Co., Ltd.) on November 30, 2018.

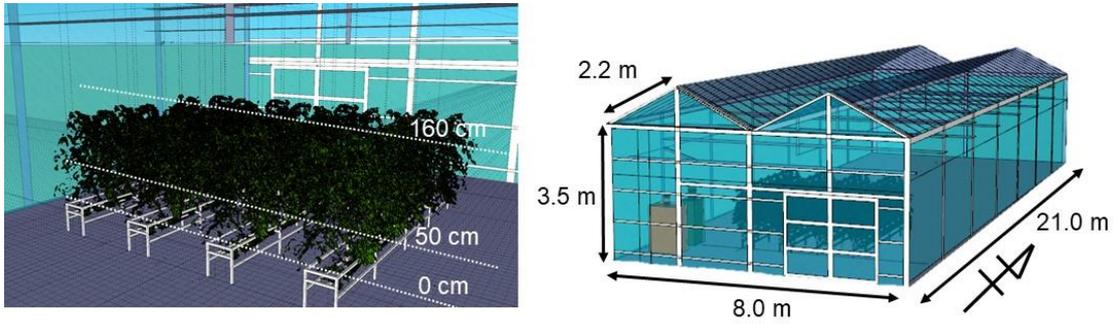


Fig. 4. 5 3D models of the greenhouse and tomato canopy for the optical simulation. These 3D models were constructed by SketchUp 2017 (Trimble Inc.).

#### 4.2.2.3. 精度確認用の群落内部の PPFD のシミュレーション

光環境の推定には、主に建築分野で用いられているレイトレーサー法を用いた光学シミュレーションソフトの Radiance (Berkeley lab) を用いた。Radiance は、光源として太陽光を用いて室内の照度分布を反射および透過する物体の材質を考慮して算出することができる。Maamari et al. (2005) は、Radiance を用いたシミュレーションで、物体の反射率が 80%以上の時を除いて、高い精度で光環境の推定が可能と述べている。また、太陽位置の算出についても検証され問題ないと報告されている (高田ら, 2008)。Radiance では PPFD の推定を行う際に、物体の反射率や透過率等の光学特性および地域 (緯度、経度) を設定し、任意の日時の温室外 PPFD を入力値として利用した。Radiance では、3D モデル上の任意の座標 (x, y, z) の PPFD の推定値を抽出することができる。

温室に用いられている被覆資材の透過特性については、物性値を参考に透過率 70%、透過光中の散乱光割合 20%とした。温室の東西の被覆資材については、透過率は 50%に設定した。葉の反射率および透過率 (400–700 nm) の設定値は、大橋 (2016) が測定した値を用いた (反射率: 7%、透過率: 6%)。葉の反射光および透過光中の散乱光の割合は大橋 (2016) が測定した値 (70%) を用いた。

光環境の推定には 4.2.2.2. で作成した果菜類の群落 3D モデルを使用した (Fig. 4. 5)。群落内のライン PPFD センサーを設置した位置 (Fig. 4. 1) を PPFD の推定地点とした。シミュレーションの入力値として用いる温室外 PPFD は群落内の PPFD を実測した 2018 年 11 月 27 日から 2018 年 11 月 30 日のものを用いた。日射中の直達日射および散乱日射の割合は気象庁が公表しているデータから算出した。Fig. 4. 6 に入力値として用いた温室外 PPFD を示した。PPFD の推定は 1 分間隔で行い、1 時間および 1 日の積算 PPFD を算出した。特に散乱日射の割合の大きい 2018 年 11 月 27 日と直達日射の割合が大きい 11 月 28 日については、1 時間おきの積算 PPFD の推定値と実測値の比較を詳細に行った。さらに、今回のシミュレーションの精度の評価を行うために、1 時間および 1 日の積算 PPFD の実測値と推定値 (2018 年 11 月 27 日–11 月 30 日) を用いて散布図を作成した。

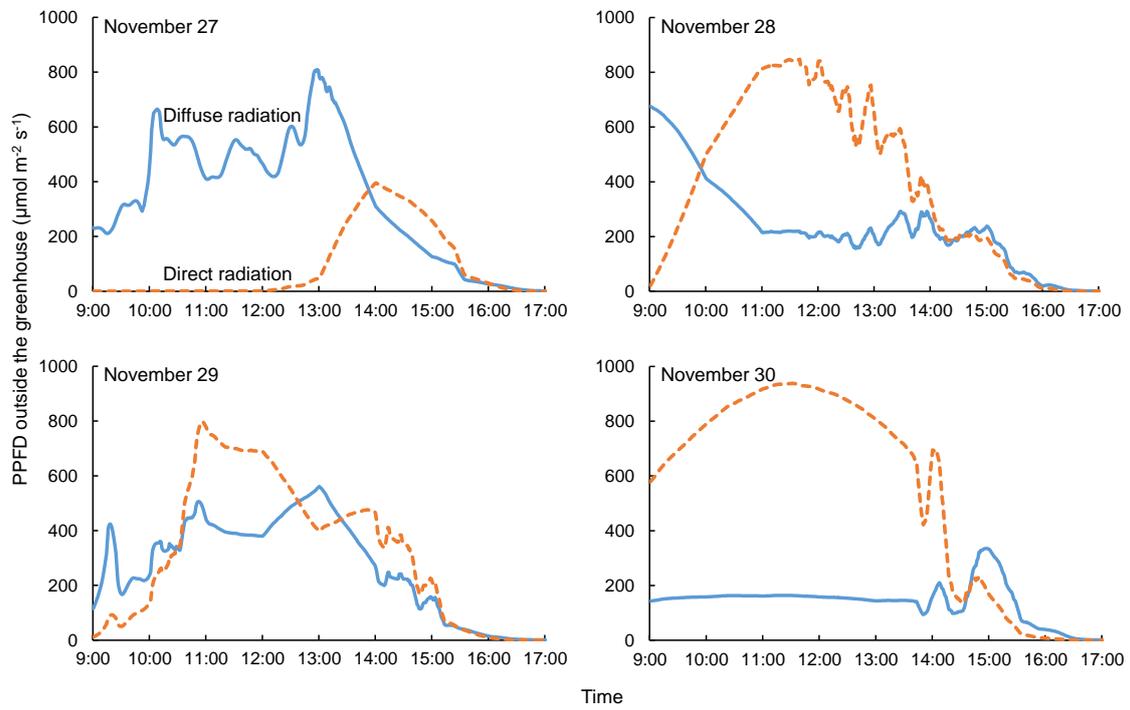


Fig. 4. 6 Photosynthetic photon flux density (PPFD) outside the greenhouse from November 27 to 30, 2018 for the input data of optical simulation. The ratio of diffuse solar radiation to global solar radiation was obtained from Japan Meteorological Agency.

### 4.2.3. 結果

散乱日射が大部分を占める 2018 年 11 月 27 日の 1 時間および 1 日のトマト群落内積算 PPF<sub>D</sub> の実測値および推定値を Fig. 4. 7 に示した。株元から 0 cm の 1 時間の積算 PPF<sub>D</sub> の推定値は、どの時間帯も推定値が過大評価されていた。株元から 50 cm の積算 PPF<sub>D</sub> の推定値は、12:00 以降過大評価されていた。株元から 160 cm (植物上) の 1 時間の積算 PPF<sub>D</sub> の推定値は実測値と同様であった。13:00–15:00 は推定値が過大評価されていた。また、株元から 160 cm の日積算 PPF<sub>D</sub> と 50 cm の日積算 PPF<sub>D</sub> を比較し群落内の光減少率 (植物上部から中層および下層へ入射する光の減少率) を計算すると、実測値は 75.5%、推定値は 69.8% であった。株元から 160 cm の日積算 PPF<sub>D</sub> と 0 cm の日積算 PPF<sub>D</sub> を比較し光減少率を計算すると、実測値は 94.8%、推定値は 89.1% であった。

直達日射が大部分を占める 2018 年 11 月 28 日の 1 時間および 1 日のトマト群落内積算 PPF<sub>D</sub> の実測値および推定値を Fig. 4. 8 に示した。11 月 30 日の全天日射は直達日射が大部分を占めていた。株元から 0 cm および 50 cm の 1 時間の積算 PPF<sub>D</sub> の推定値は多くの時間帯で過大評価されていた。株元から 160 cm (植物上) の 1 時間の積算 PPF<sub>D</sub> の推定値は 11:00–12:00 を除いて過大評価されていた。また、株元から 160 cm の日積算 PPF<sub>D</sub> と 50 cm の日積算 PPF<sub>D</sub> を比較し群落内の光減少率を計算すると、実測値は 71.4%、推定値は 71.5% であった。また、株元から 160 cm の日積算 PPF<sub>D</sub> と 0 cm の日積算 PPF<sub>D</sub> を比較し光減少率を計算すると、実測値は 94.0%、推定値は 90.1% であった。

Fig. 4. 9 に 2018 年 11 月 27 日–11 月 30 日の 1 時間および 1 日の積算 PPF<sub>D</sub> の実測値および推定値の散布図を示した。1 時間の積算 PPF<sub>D</sub> の推定値の MAE は  $0.1 \text{ mol m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  であった。1 日の積算 PPF<sub>D</sub> の推定では、MAE は  $0.7 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  であった。また、実測値と推定値の間に線形関係がみられ、1 時間および 1 日の積算 PPF<sub>D</sub> の  $R^2$  値はそれぞれ 0.93 および 0.99 であった。

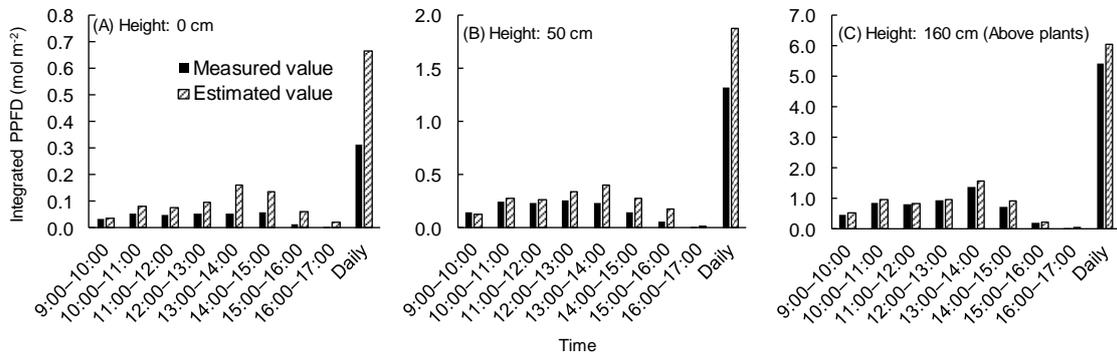


Fig. 4. 7 Estimation of hourly and daily integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) values at different heights of the tomato canopy (November 27, 2018). 0 cm height: bottom of the canopy. 50 cm height: middle layer of the canopy. 160 cm height: above the canopy.

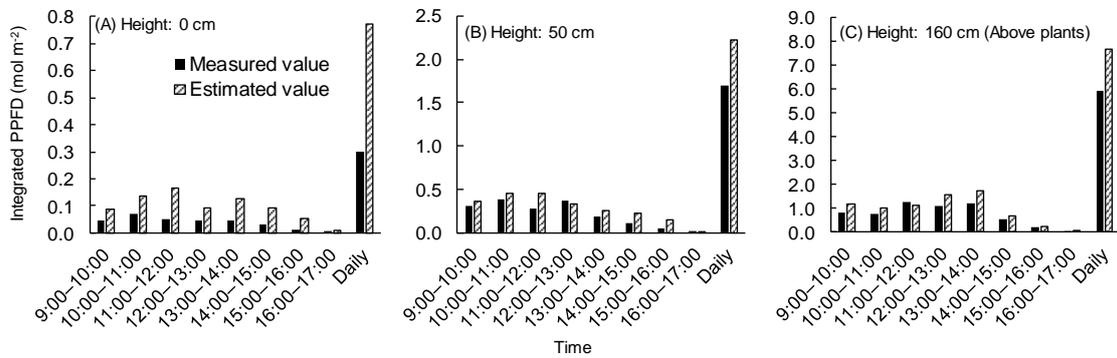


Fig. 4. 8 Estimation of hourly and daily integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) values at different heights of the tomato canopy (November 28, 2018). 0 cm height: bottom of the canopy. 50 cm height: middle layer of the canopy. 160 cm height: above the canopy.

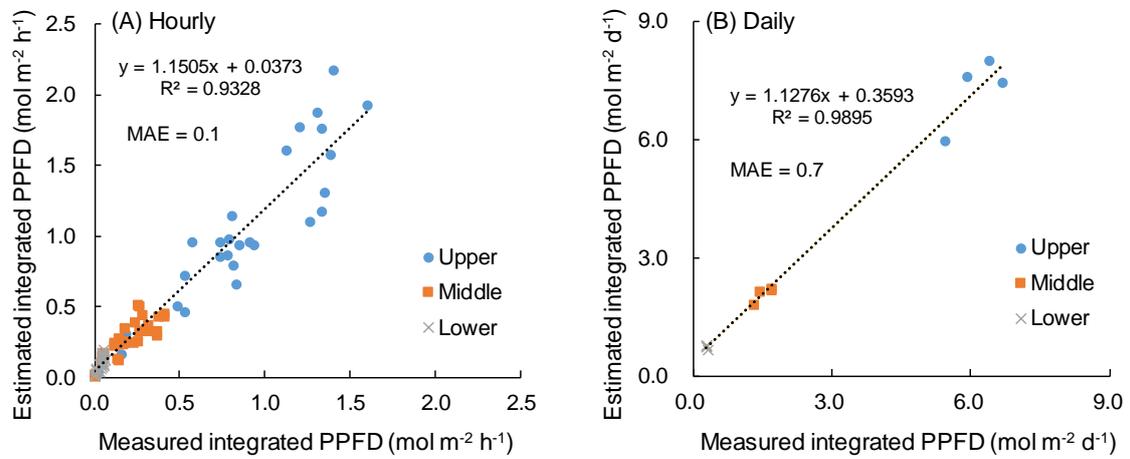


Fig. 4. 9 Relationship between measured integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) and estimated integrated PPFD at different heights of the tomato canopy (November 27–30, 2018). Measured and estimated values were hourly and daily integrated PPFD values from 9:00 to 17:00. The measured and estimated points were 0, 50, and 160 cm in height. 0 cm height: bottom of the canopy. 50 cm height: middle layer of the canopy. 160 cm height: above the canopy.

#### 4.2.4. 考察

11月27日および28日の1時間の積算PPFDの推定値は過大評価されている時間帯が多くみられた (Figs. 4.7 and 4.8)。シミュレーション上で、植物上に再現できていない遮蔽物があると推定値は過大評価される。したがって、本シミュレーションモデルにおいて推定値が過大評価された原因は温室3Dモデルの再現しきれていない遮蔽物 (例えば骨材や細霧ノズルなど) によるものと考えられた。しかし、株元より160 cmから50 cmおよび0 cmの日積算PPFDの減少率は、実測値と推定値の間に差はみられなかったため、作成した群落3Dモデルは植物による光の遮蔽を再現できていた。

加えて、Fig. 4.9に示した1時間および1日の積算PPFDの実測値と推定値の間に線形関係がみられたため、本シミュレーションモデルを用いることで、異なる栽植方法における果菜類の受光量の大小関係を把握することが可能と考えられた。第2章で、トマトにおいて受光量と収量の間に関係がみられた (Fig. 2.18) ため、本シミュレーションモデルで受光量が増加する栽植方法を探索することは、収量を増加させるために有用と考えられた。

### 4.3. 試験 4-2 果菜類の畝間と受光量の関係

#### 4.3.1. 目的

温室内で果菜類を栽培する際、群落は基本的に畝間を持つ不均一な栽植状態となる。したがって、特に草丈の高い果菜類の受光体制は、太陽高度や栽植方法等によって変化するため、一般化することが難しい。植物の受光量を実測する手法として、積算日射計測フィルムを用いて果菜類の葉位別受光量を調査した報告（渡邊ら, 2001）がある。しかし、様々な条件下（栽植密度、太陽高度、植物種および地域等）での作物の受光量を把握するには、3D モデルを用いて仮想的に群落を再現できる光学シミュレーションが適していると考えられる。葉柄が長く水平な葉をもつ種は、葉柄が短く垂直な葉をもつ種よりも周りの植物との間に発生する光の競合には有利に働く（Hikosaka and Hirose, 1997; Hikosaka et al., 2001）という報告がある。したがって、植物の形態は受光体制に影響を与えるため、3D モデルを用いて植物の形状を再現し受光量の推定を行うことは重要である。

本節では、果菜類の栽培時の畝間の決定に寄与しうる、畝間と受光量の間関係を把握することを目的として、光学シミュレーションを用いた方法で、仮想的な群落の各条件（畝間: 5 段階、生育ステージ: 3 段階、植物種: 3 種、日時: 4 種）における受光量の推定を行った。

#### 4.3.2. 材料および方法

##### 4.3.2.1. 実験植物の栽培

供試植物は 3.2.2.1. に示す温室内に定植したトマト、キュウリおよびパプリカとした。栽培期間中（2019 年 3 月 21 日–8 月 2 日）の温室内の平均気温、飽差および平均日積算 PPFD は 22.5°C、0.59 kPa および 16.0 mol m<sup>-2</sup> であった。

##### 4.3.2.2. 植物群落の 3D スキャンおよび 3D モデルの作成

本研究のフローチャートを Fig. 4. 10 に示した。3.2.2.2. と同様の方法で 3D スキャナ（DPI-8X, (株) オーピーティー）を用いて異なる生育ステージのトマト、キュウリおよびパプリカの群落を 6 株ずつスキャンし点群データを取得した。トマトは 21、35 および 63 DAT に、キュウリは 9、16 および 30 DAT に、パプリカは 23、58 および 122 DAT にスキャンした。取得した点群データを 3.2.2.2. に示した方法と同様に OPT Cloud Survey ((株) オーピーティー) を用いてポリゴン化し 3D モデルの作成を行った。そして、その 3D モデルを Houdini 17 (Side Effect Inc.) を用いて不要箇所のトリミングおよびポリゴン数の削減を行った。

Flow chart of this experiment

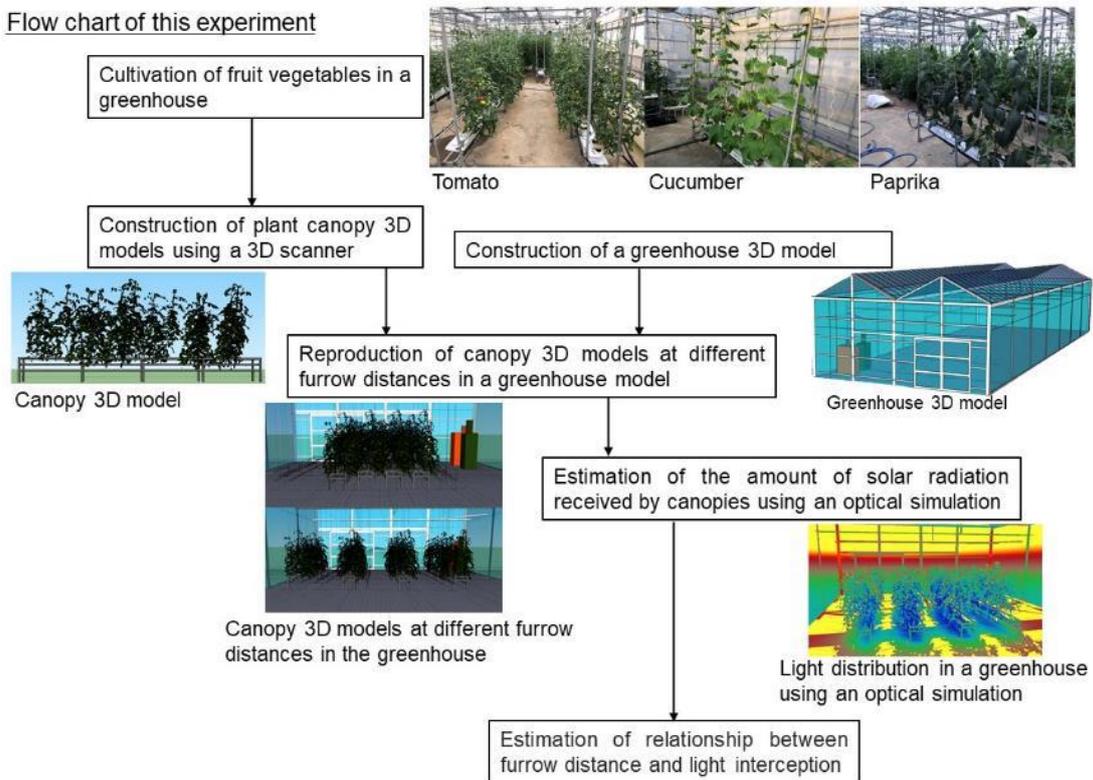


Fig. 4. 10 Flow chart of the estimation of the relationship between the furrow distance and light interception.

#### 4.3.2.3. 仮想的な群落 3D モデルの作成

SketchUp 2017 (Trimble Inc.) を用いて作成した温室 3D モデルの中に 4.3.2.2. で作成した各植物群落の 3D モデルを栽培ベンチあたり 12 株になるように設置した (Fig. 4. 11)。生育ステージによる群落の層別受光量の推定を行うため、本試験で使用する各植物の 3D モデルの生育ステージ (本試験で生育ステージとは草丈を意味する) は 3 段階とし、草丈は 40–60 cm (Canopy S)、80–100 cm (Canopy M) および 150–160 cm (Canopy L) とした (Fig. 4. 11)。上述した植物群落の畝間は 60–160 cm の間で 20 cm ずつ変化するように仮想的に群落の配置を行った (Fig. 4. 12)。また、3D モデルを構成する各ポリゴンの頂点の座標 ( $x, y, z$ ) より計算した各ポリゴンの面積と高さの情報を用いることで、群落の垂直方向の葉面積の分布が算出可能である (3.2.2.2.2.)。本試験に使用する Canopy S–L の各植物種の群落構造 (垂直方向の葉面積の分布) を、群落 3D モデルを構成するポリゴンの面積の垂直分布を用いて Fig. 4. 13 に示した。Fig. 4. 13 で示した群落構造は、群落中の植物 6 株の平均値を示している。群落構造の情報は層別受光量の推定結果について考察を行う際に利用した。

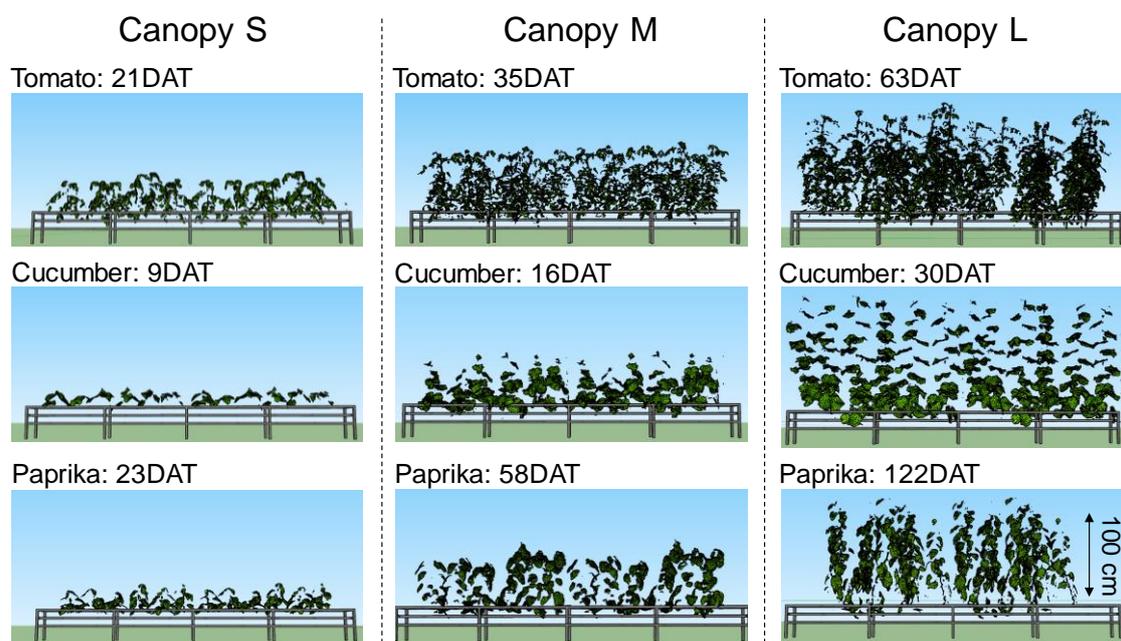


Fig. 4. 11 The 3D model of twelve plants installed on the cultivation bench. Houdini 17 (Side effect Inc.) and SketchUp 2017 (Trimble Inc.) were used as a 3D modeling softwares. Canopy S included plants with a height of 40 to 60 cm. Canopy M included plants with a height of 80 to 100 cm. Canopy L included plants with a height of 150 to 160 cm.

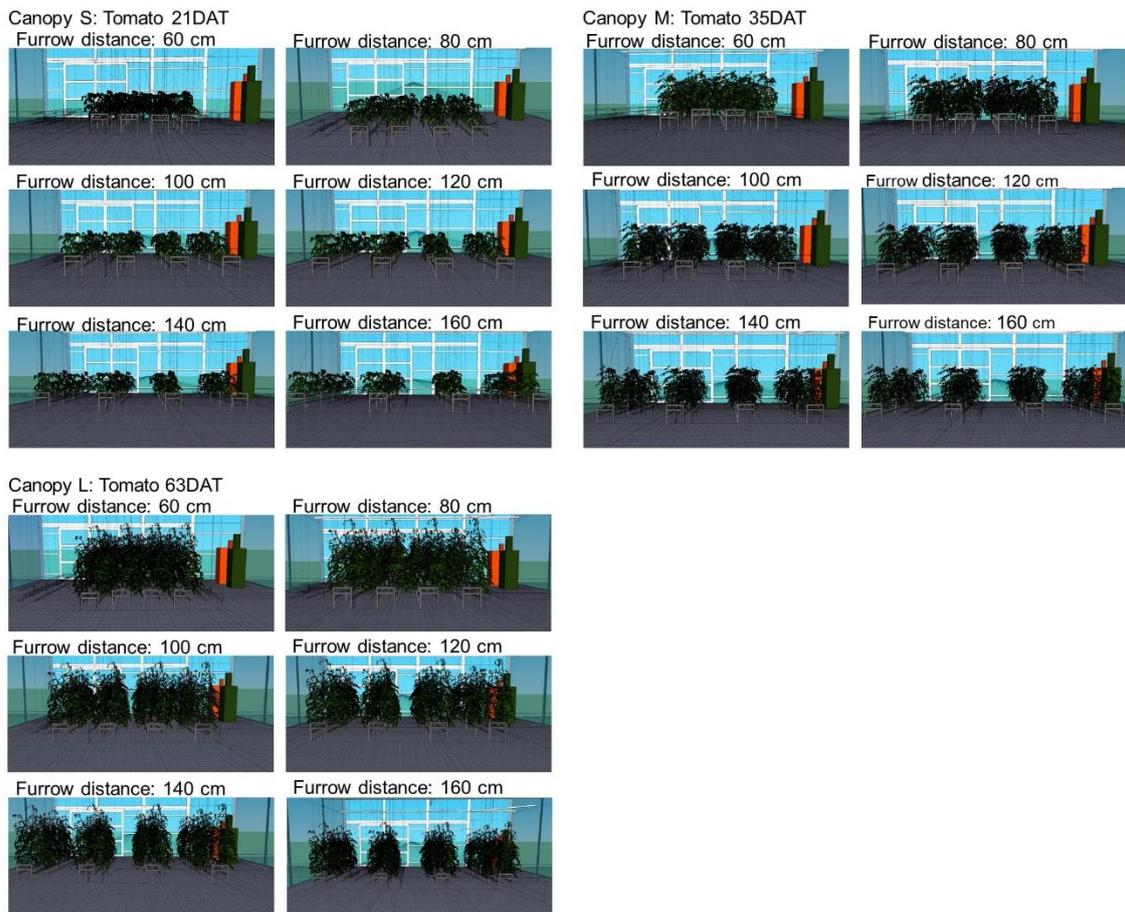


Fig. 4. 12 Canopy 3D models of tomato at different furrow distances. Houdini 17 (Side effect Inc.) and SketchUp 2017 (Trimble Inc.) were used as a 3D modeling softwares. Furrow distance was changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation. Canopy S included plants with a height of 40 to 60 cm. Canopy M included plants with a height of 80 to 100 cm. Canopy L included plants with a height of 150 to 160 cm.

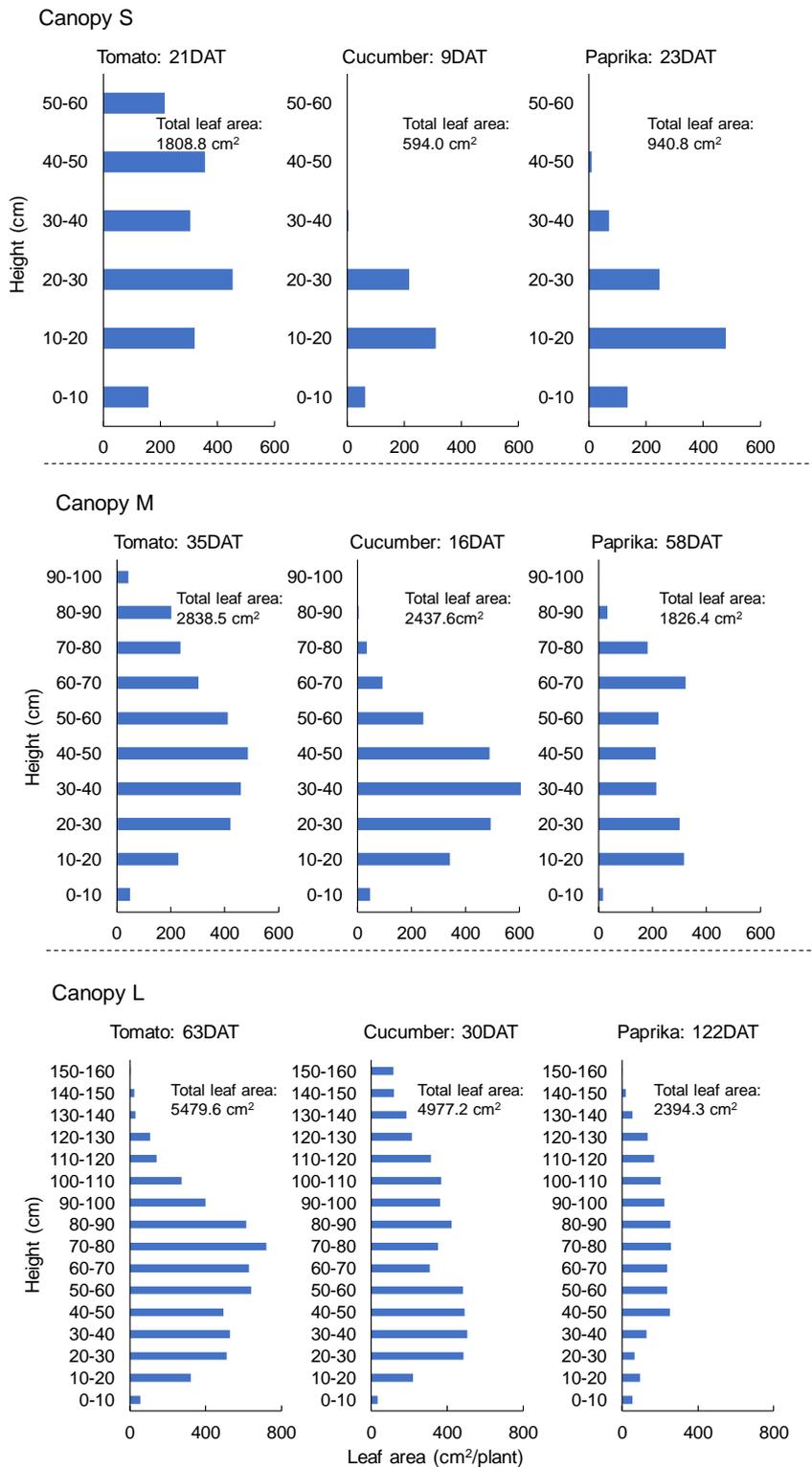


Fig. 4. 13 Plant structure for the optical simulation (tomato, cucumber, and paprika). Canopy S included plants with a height of 40 to 60 cm. Canopy M included plants with a height of 80 to 100 cm. Canopy L included plants with a height of 150 to 160 cm.

#### 4.3.2.4. 群落の層別受光量の推定

光環境の推定には、4.2.2.3.に示した光学シミュレーションソフトの Radiance (Berkeley lab) を用い、同様の方法で行った。

温室に用いられている被覆資材の透過特性は 4.2.2.3.と同様とした。葉の反射率および透過率 (400-700 nm) の設定値は、温室内の各種植物の葉を分光光度計 (V-750, 日本分光 (株)) に積分球ユニット (ISV-922, 日本分光 (株)) を取り付け測定し決定した。トマトの葉は、反射率: 8%、透過率: 3%と設定した。キュウリの葉は、反射率: 8%、透過率: 5%と設定した。パプリカの葉は、反射率: 7%、透過率: 2%と設定した。葉の反射光および透過光中の散乱光の割合は 70%と設定した (大橋, 2016)。

光環境の推定には、4.3.2.3.で作成したトマト、キュウリおよびパプリカ群落の 3D モデルを使用した。群落を構成するポリゴンの各重心の座標を推定点として PPFD の推定を行い、その値に各ポリゴンの面積を乗じることで各植物群落の受光量を推定した (式 4-1)。

$$L = \sum_{i=1}^n (P_i \times S_i) \times T \quad (\text{式 4-1})$$

i: Number of polygons

L: Light interception (mol)

P<sub>i</sub>: The PPFD (mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) on the center of the gravity of the i-th polygon

S<sub>i</sub>: The area (m<sup>2</sup>) of the i-th polygon

T: Time (s)

推定対象の群落 (6 株) については Fig. 4. 14 に示した。Canopy S については、1 株あたりの日積算受光量を推定した。Canopy M と L については、群落を下層、中層および上層に 3 分割し、それぞれの受光量を算出した。Canopy M のトマトとパプリカは、下層 (0-30 cm)、中層 (30-60 cm) および上層 (60 cm-) に 3 分割した。Canopy M のキュウリは、下層 (0-25 cm)、中層 (25-50 cm) および上層 (50 cm-) に 3 分割した。Canopy L は、下層 (0-50 cm)、中層 (50-100 cm) および上層 (100 cm-) に 3 分割した。

推定対象日については、太陽高度の違いがおよぼす影響を確認するため、夏至 (6 月 21 日) および冬至 (12 月 22 日) に近い日の快晴および曇りの日とした (2019 年 6 月 13、21 日、2018 年 12 月 9 および 15 日)。夏至と冬至の松戸市の太陽高度を Fig. 4. 15 に示した。

シミュレーションの入力値として用いる温室外の PPFD を Fig. 4. 16 に示した。

上述した方法を用いて、Fig. 4. 14 に示した位置の 6 株の各植物の受光量（畝間: 60–160 cm）を層別に 1 時間おきに推定し 1 株あたりの日積算受光量を算出した（6:00–18:00）。

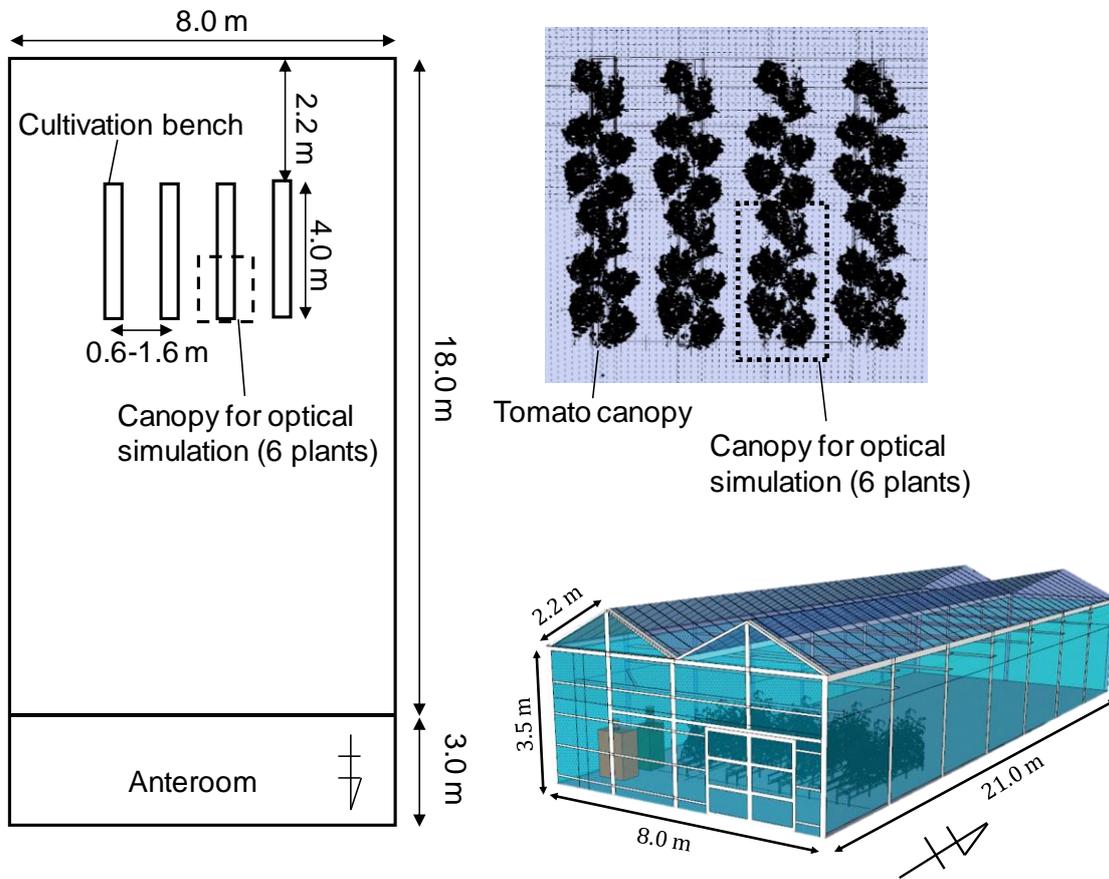


Fig. 4. 14 The layout of cultivation benches and the location of estimated points of the photosynthetic photon flux density in the greenhouse. Furrow distance changed from 0.6 to 1.6 m virtually in the optical simulation.

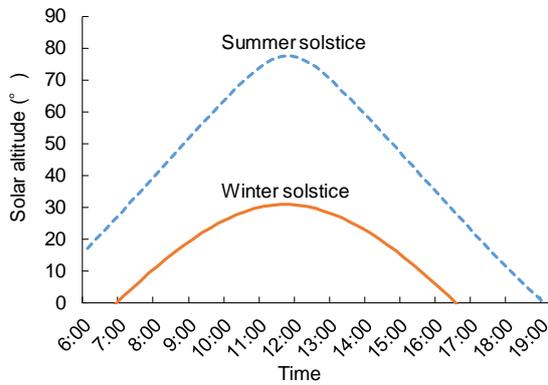


Fig. 4. 15 Daily variation of solar altitude on the summer and winter solstice. Summer and winter solstice were on June 22, 2019 and December 22, 2018 in Matsudo Chiba, Japan, respectively.

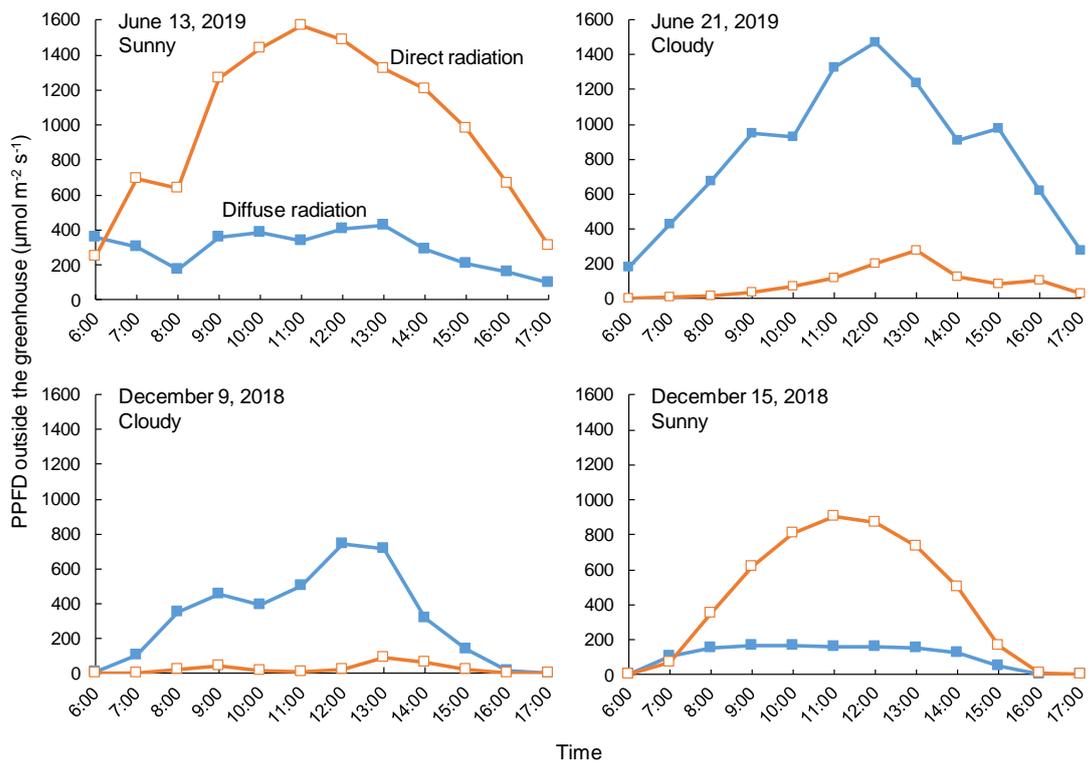


Fig. 4. 16 Photosynthetic photon flux density (PPFD) outside the greenhouse on June 13, 21 2019, December 9 and 15, 2018 for the input data of optical simulation. The ratio of diffuse solar radiation to global solar radiation was obtained from Japan Meteorological Agency.

### 4.3.3. 結果

#### 4.3.3.1. Canopy S の受光量

##### 4.3.3.1.1. 夏至を想定したシミュレーション（6月13日（快晴）と21日（曇天））

6月13日（快晴）および21日（曇天）のCanopy Sの畝間と受光量の関係をFig. 4. 17-ABに示した。キュウリおよびパプリカでは、本研究の畝間の範囲（60–160 cm）で1株あたりの日積算受光量に畝間の影響はみられなかった。6月13日および21日のトマトで畝間60–160 cmの間での1株あたりの日積算受光量の増加率は10.1%および8.7%であった。トマトで畝間80 cm程度で受光量が飽和し始めていた。一株あたりの日積算受光量は、トマト>パプリカ>キュウリの順で常に大であった。

6月13日（快晴）および21日（曇天）のCanopy Sの1時間の積算受光量の推移をFig. 4. 18に示した。トマトで畝間80 cm以下で1時間の積算受光量が各時間帯でその他の畝間よりも小となっていた。キュウリおよびパプリカでは、各時間帯で1時間の積算受光量に畝間の影響はみられなかった。特に6月21日（曇天）においては、積算PPFDの推移（Fig. 4. 18-B）が温室外PPFD（Fig. 4. 16）と同様の推移を示していた。

##### 4.3.3.1.2. 冬至を想定したシミュレーション（12月15日（快晴）と9日（曇天））

12月15日（快晴）および9日（曇天）のCanopy Sの畝間と受光量の関係をFig. 4. 17-CDに示した。キュウリおよびパプリカは、本研究の畝間の範囲内（60–160 cm）では、1株あたりの日積算受光量に畝間の影響はみられなかった。12月15日と9日のトマトについては、60–160 cmの畝間の範囲で、日積算受光量が19.9%および15.0%増加していた。トマトで畝間100 cm程度で、1株あたりの受光量は飽和し始めた。一株あたりの日積算受光量は、夏季と同様にトマト>パプリカ>キュウリの順で常に大であった。

12月15日（快晴）および9日（曇天）のCanopy Sの1時間の積算受光量の推移をFig. 4. 19に示した。トマトで畝間100 cm以下で1時間の積算受光量が各時間帯でその他の畝間よりも小となっていた。キュウリおよびパプリカでは、各時間帯で1時間の積算受光量に畝間の影響はみられなかった。特に12月9日（曇天）において、6月21日（曇天）と同様に積算PPFDの推移（Fig. 4. 19-B）が温室外PPFD（Fig. 4. 16）と同様の推移を示していた。

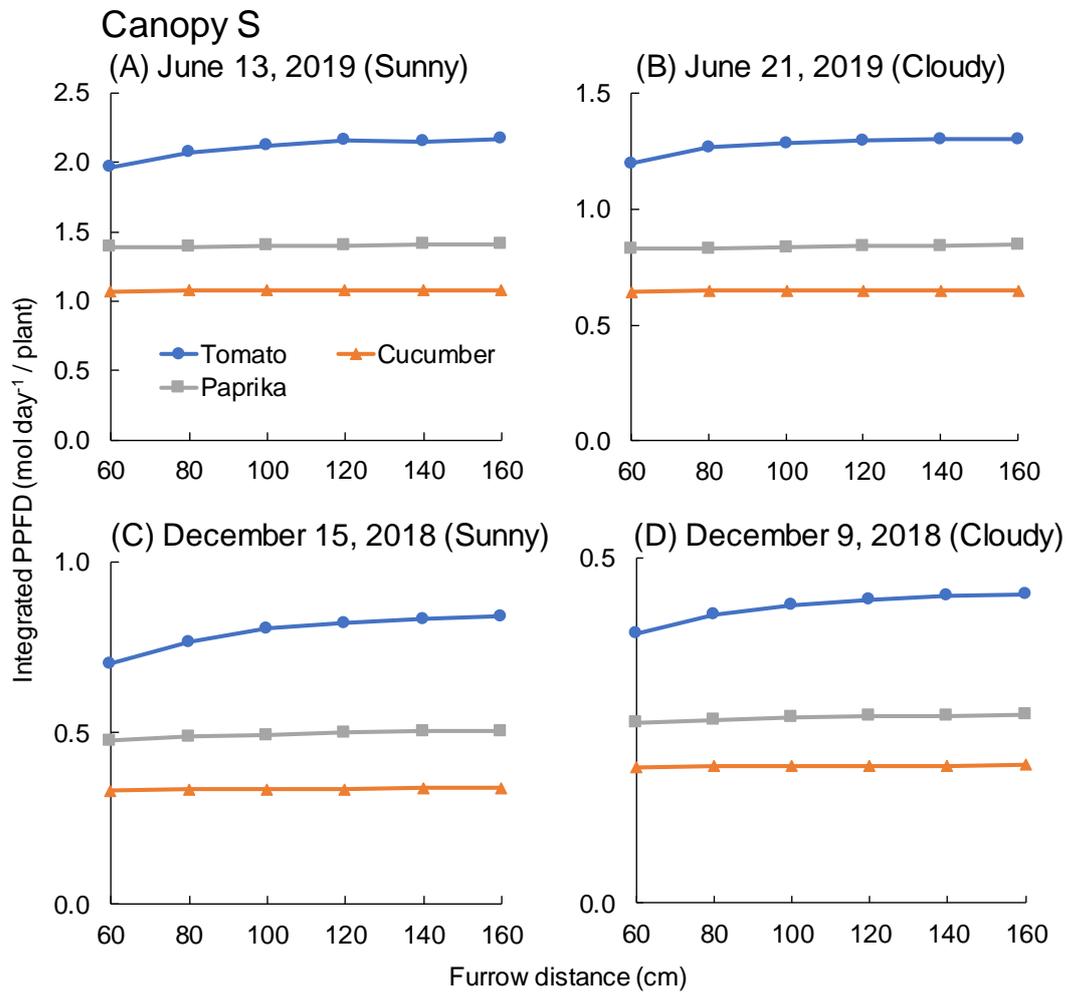


Fig. 4.17 Effect of furrow distance on the daily integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of Canopy S on June 13, 21 2019, December 9 and 15, 2018. Daily integrated PPFDF (6:00–18:00) was estimated. Canopy S included plants with a height of 40 to 60 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

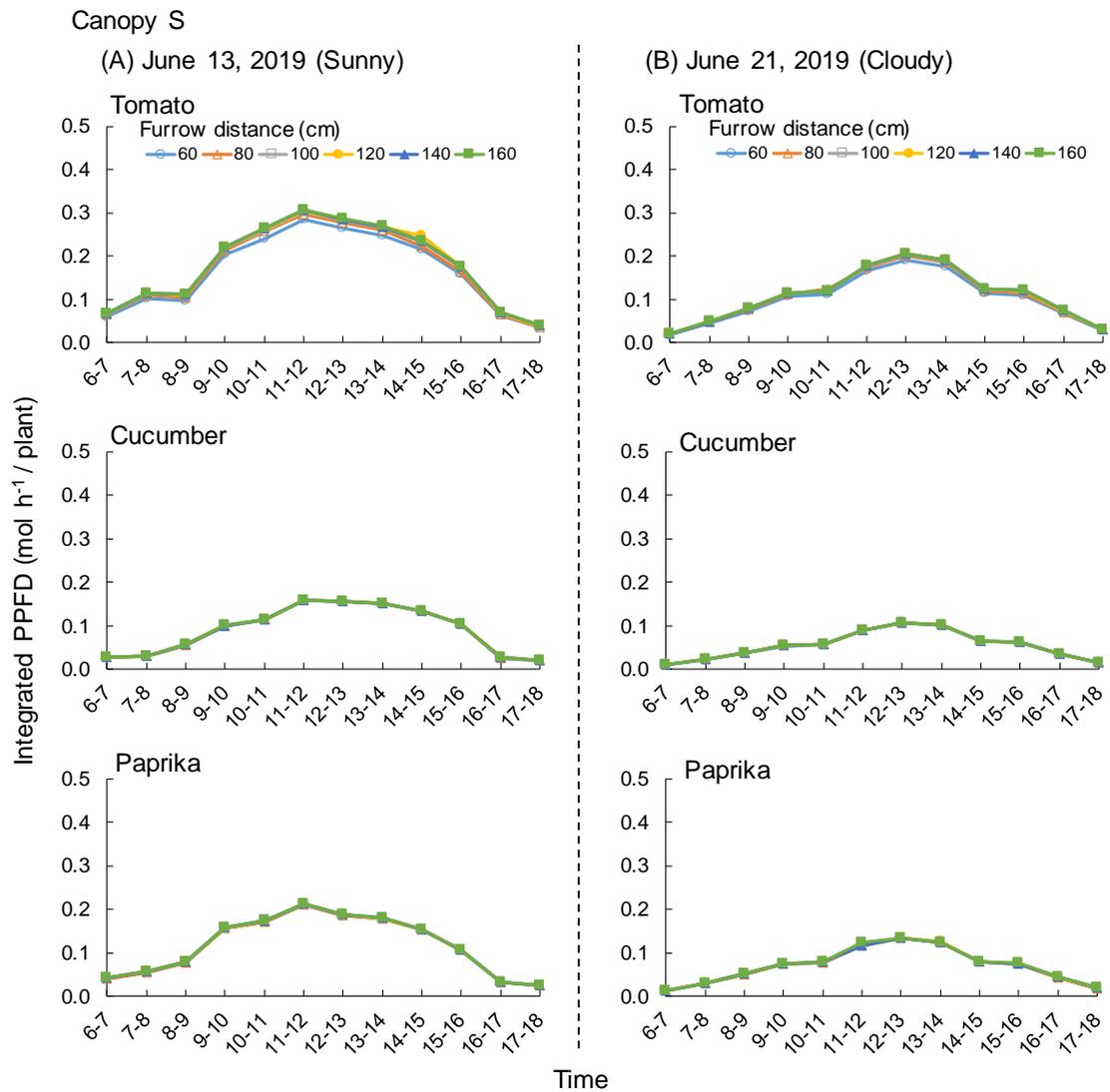


Fig. 4. 18 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of Canopy S at different furrow distances on June 13 (sunny) and 21 (cloudy), 2019. Canopy S included plants with a height of 40 to 60 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

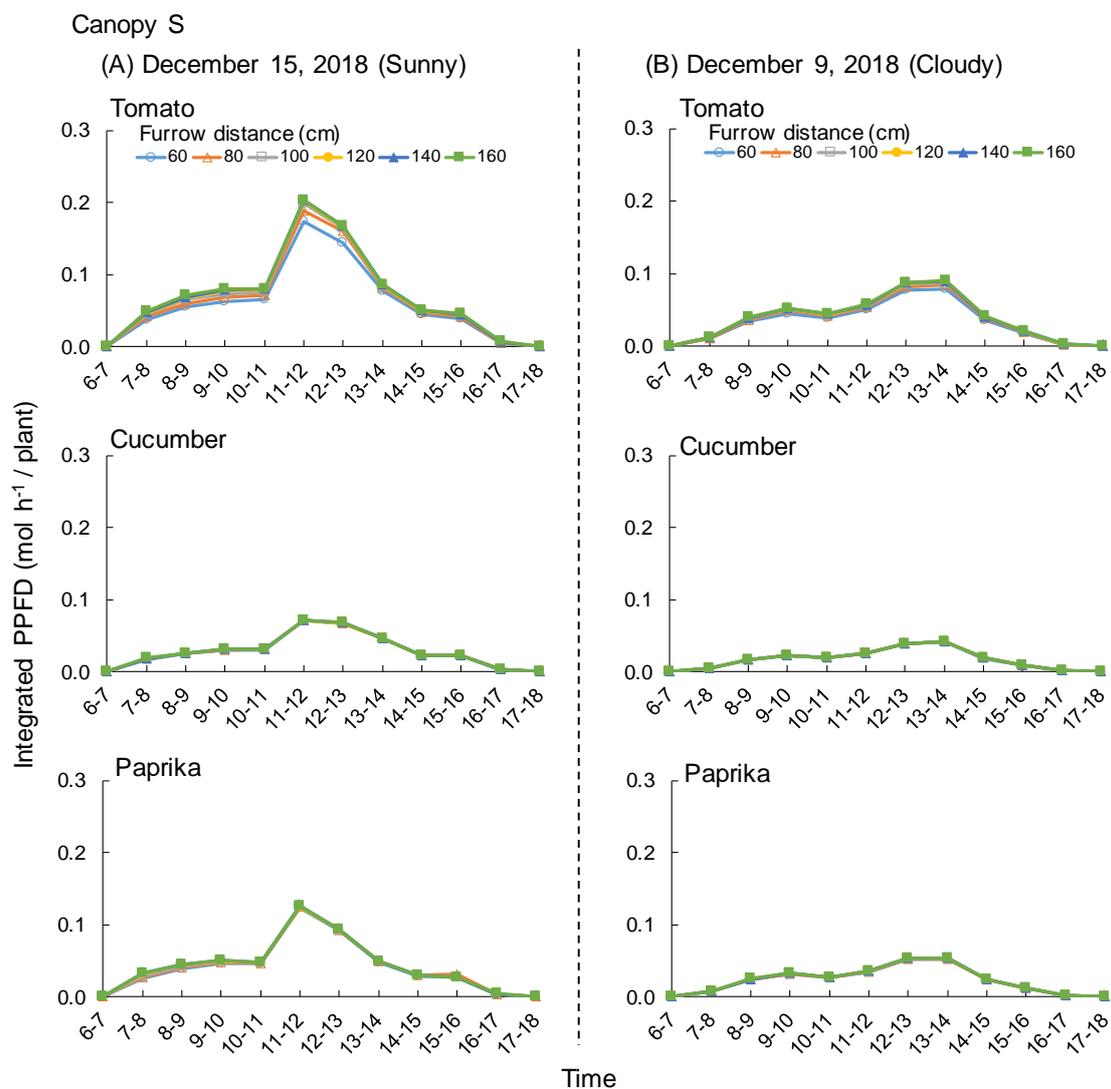


Fig. 4. 19 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of Canopy S at different furrow distances on December 15 (sunny) and 9 (cloudy), 2018. Canopy S included plants with a height of 40 to 60 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

#### 4.3.3.2. Canopy M の受光量

##### 4.3.3.2.1. 夏至を想定したシミュレーション（6月13日（快晴）と21日（曇天））

6月13日（快晴）と21日（曇天）のCanopy Mでは各植物種において、特に下層で畝間が1株あたりの受光量に影響を与えた（Fig. 4. 20）。トマトの下層は畝間100 cm程度で日積算受光量が飽和し始めた。キュウリおよびパプリカは畝間80 cm程度で日積算受光量が飽和し始めた。上層の受光量については、どの植物種についても畝間の影響を受けなかった。加えて、植物種によって各層の受光量の大小関係が異なった。トマトでは、中層>上層>下層の順で受光量が大きくなった。キュウリでは、中層>下層>上層の順で受光量が大きくなった。パプリカでは、下層>中層>上層の順で受光量が大きくなった。

Fig. 4. 20-Aに6月13日（快晴）の畝間と1株あたりの層別受光量の関係を示した。トマトでは畝間60-160 cmの間で下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ37.1、15.2および2.8%であった。キュウリでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ16.9、2.4および0.7%であった。パプリカでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ13.5、6.1および1.6%であった。

Fig. 4. 20-Bに6月21日（曇天）の畝間と1株あたりの層別受光量の関係を示した。トマトでは、畝間60-160 cmの間で下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ39.0、15.5および2.8%であった。キュウリでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ14.9、2.8および0.0%であった。パプリカでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ13.5、4.4および0.7%であった。

6月13日（快晴）および21日（曇天）における下層の1時間の積算受光量の推移をFig. 4. 21に示した。特に、トマトで畝間80 cm以下、キュウリおよびパプリカは畝間60 cm以下で1時間の積算受光量が各時間帯でその他の畝間よりも小となっていた。中層の1時間の積算受光量の推移をFig. 4. 22に示した。特にトマトで畝間80 cm以下で1時間の積算受光量が各時間帯でその他の畝間よりも小となっていた。キュウリおよびパプリカでは、各時間帯で1時間の積算受光量に畝間の影響はみられなかった。上層の1時間の積算受光量の推移をFig. 4. 23に示した。どの植物種においても、各時間帯で1時間の積算受光量に畝間の影響はみられなかった。特に6月21日（曇天）においては、これまでと同様に各層の積算PPFDの推移（Figs. 4. 21-B, 4. 22-B and 4. 23-B）が温室外PPFD（Fig. 4. 16）と同様の推移

を示していた。

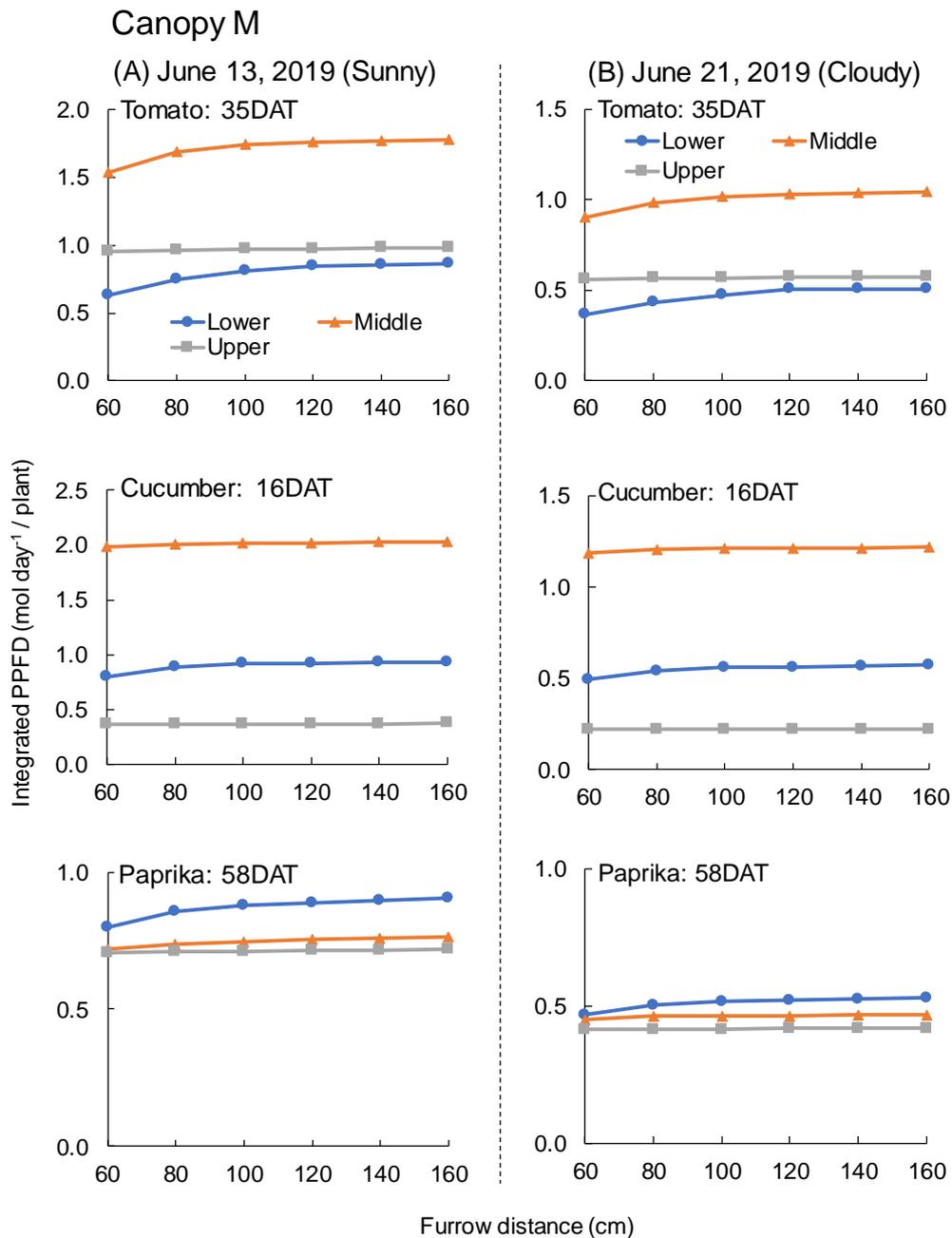


Fig. 4. 20 Effect of furrow distance on the daily integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of Canopy M on June 13 (sunny) and 21 (cloudy), 2019. Daily integrated PPF (6:00–18:00) was estimated. Canopy M included plants with a height of 80 to 100 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

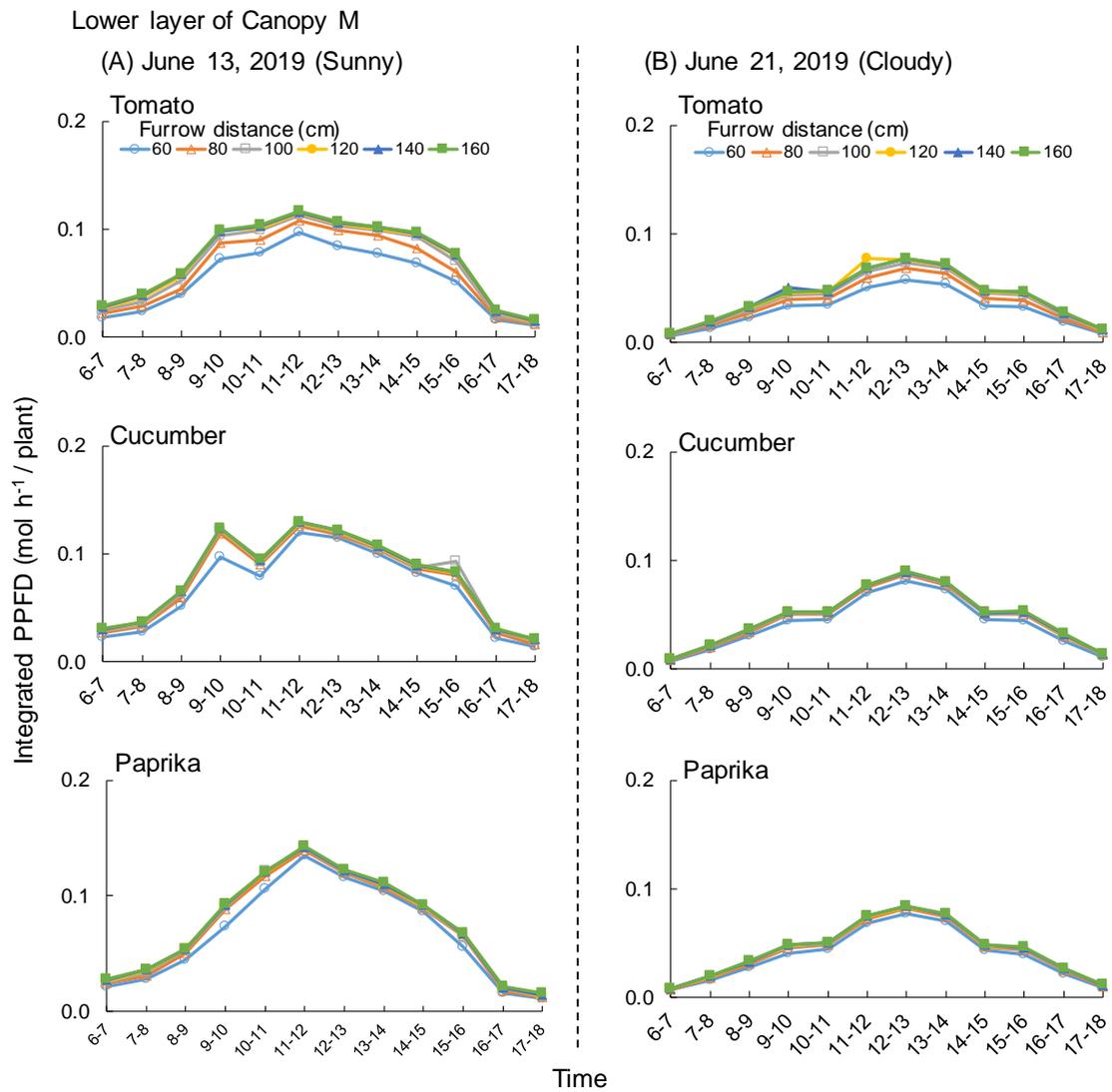


Fig. 4. 21 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of the lower layer of Canopy M at different furrow distances on June 13 (sunny) and 21 (cloudy), 2019. Canopy M included plants with a height of 80 to 100 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

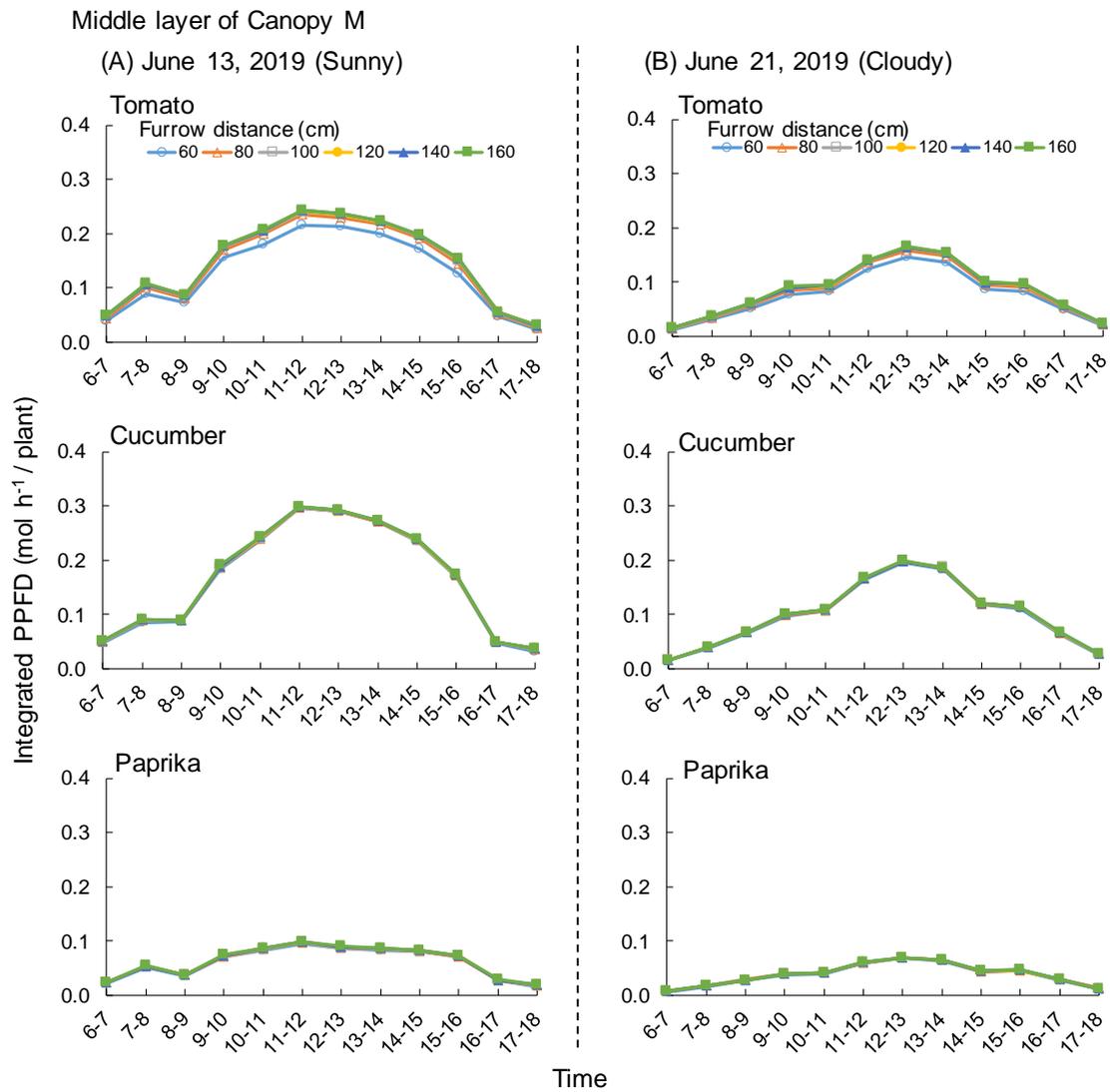


Fig. 4. 22 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of the middle layer of Canopy M at different furrow distances on June 13 (sunny) and 21 (cloudy), 2019. Canopy M included plants with a height of 80 to 100 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

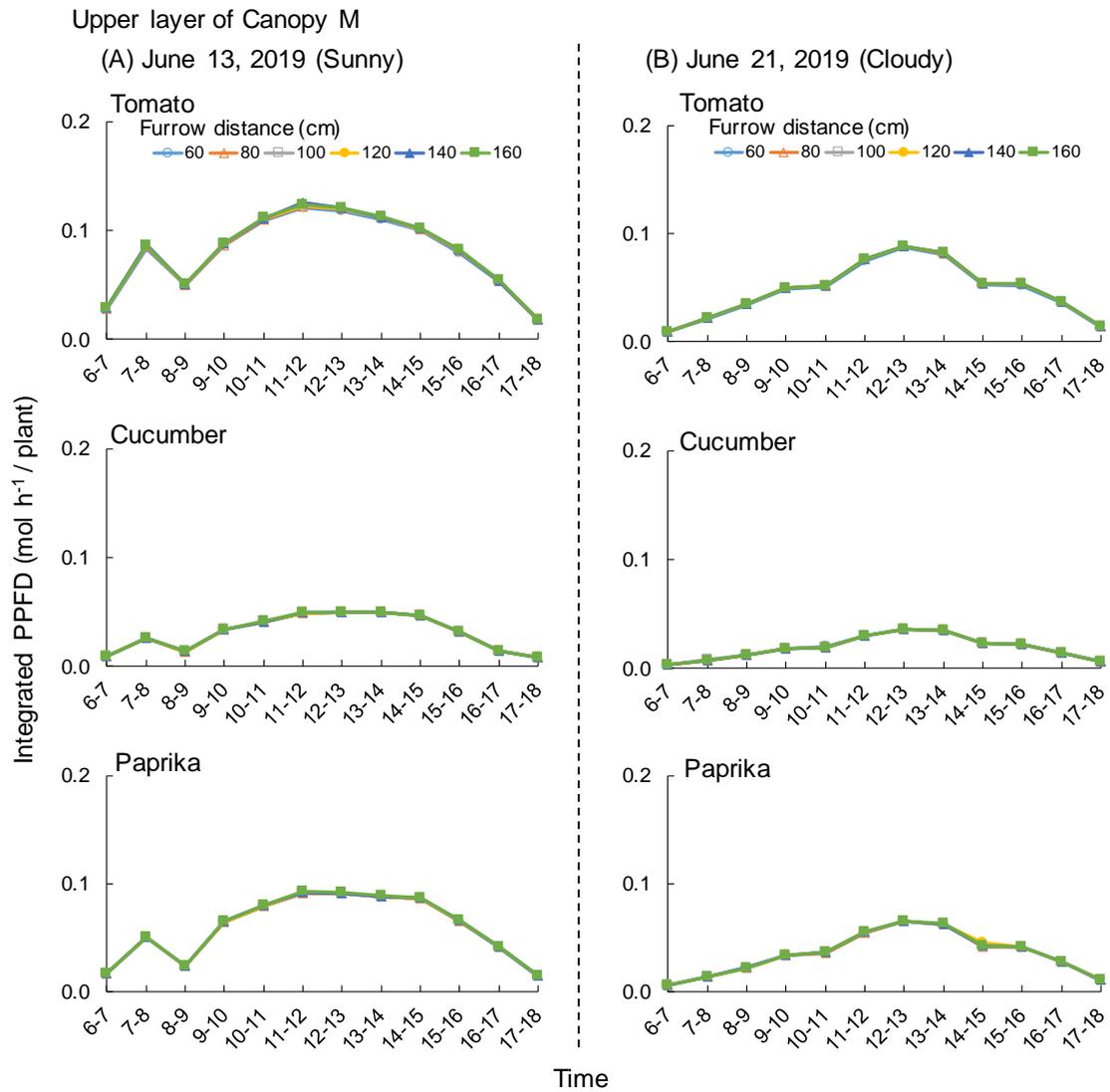


Fig. 4.23 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of the upper layer of Canopy M at different furrow distances on June 13 (sunny) and 21 (cloudy), 2019. Canopy M included plants with a height of 80 to 100 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

#### 4.3.3.2.2. 冬至を想定したシミュレーション (12月15日(快晴)と9日(曇天))

12月15日(快晴)と9日(曇天)のCanopy Mのトマトおよびキュウリでは下層および中層、パプリカでは特に下層の日積算受光量が畝間の影響を受けた(Fig. 4.24)。また、6月のシミュレーションと同様に植物種によって各層の受光量の大小関係が異なった。トマトでは、中層>上層>下層の順で受光量が大きくなった。キュウリでは、中層>下層>上層の順で受光量が大きくなった。パプリカでは、畝間80-160 cmの間で下層>中層>上層の順で受光量が大きくなった。トマトおよびパプリカでは畝間120 cm程度で日積算受光量が飽和し、キュウリでは、100 cm程度で日積算受光量が飽和し始めた。

Fig. 4.24-Aに12月15日(Canopy M)の畝間と1株あたりの層別受光量の関係を示した。トマトでは、畝間60-160 cmの間で下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ62.7、30.3および7.3%であった。キュウリでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ51.9、11.6および1.5%であった。パプリカでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ50.3、15.0および4.3%であった。

Fig. 4.24-Bに12月9日(Canopy M)の畝間と1株あたりの層別受光量の関係を示した。トマトでは、畝間60-160 cmの間で下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ57.8、24.1および6.1%であった。キュウリでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ27.7、7.9および1.0%であった。パプリカでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ27.1、11.5および2.8%であった。

12月15日(快晴)および9日(曇天)における下層の1時間の積算受光量の推移をFig. 4.25に示した。特に、トマトおよびパプリカで畝間100 cm以下、キュウリで畝間80 cm以下で1時間の積算受光量が各時間帯でその他の畝間よりも小となっていた。中層の1時間の積算受光量の推移をFig. 4.26に示した。特にトマトで畝間80 cm以下、キュウリで畝間60 cm以下で1時間の積算受光量が各時間帯でその他の畝間よりも小となっていた。パプリカでは、各時間帯で1時間の積算受光量に畝間の影響はみられなかった。上層の1時間の積算受光量の推移をFig. 4.27に示した。どの植物種においても、各時間帯で1時間の積算受光量に畝間の影響はみられなかった。特に12月9日(曇天)においては、これまでと同様に各層の積算PPFDの推移(Figs. 4.25-B, 4.26-B and 4.27-B)が温室外PPFD(Fig. 4.16)と同様の推移を示していた。

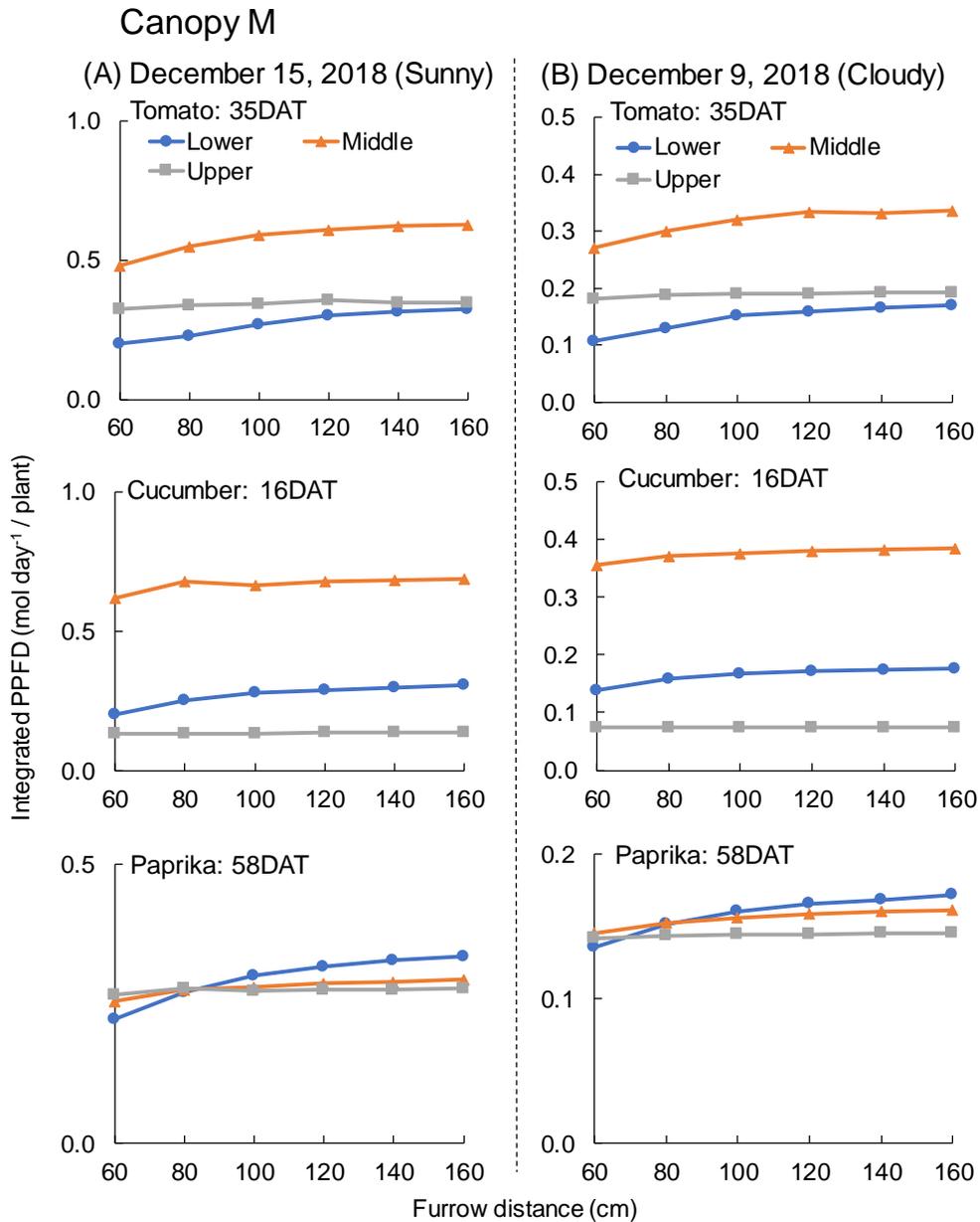


Fig. 4. 24 Effect of furrow distance on the daily integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of Canopy M on December 15 (sunny) and 9 (cloudy), 2018. Daily integrated PPFD (6:00–18:00) was estimated. Canopy M included plants with a height of 80 to 100 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

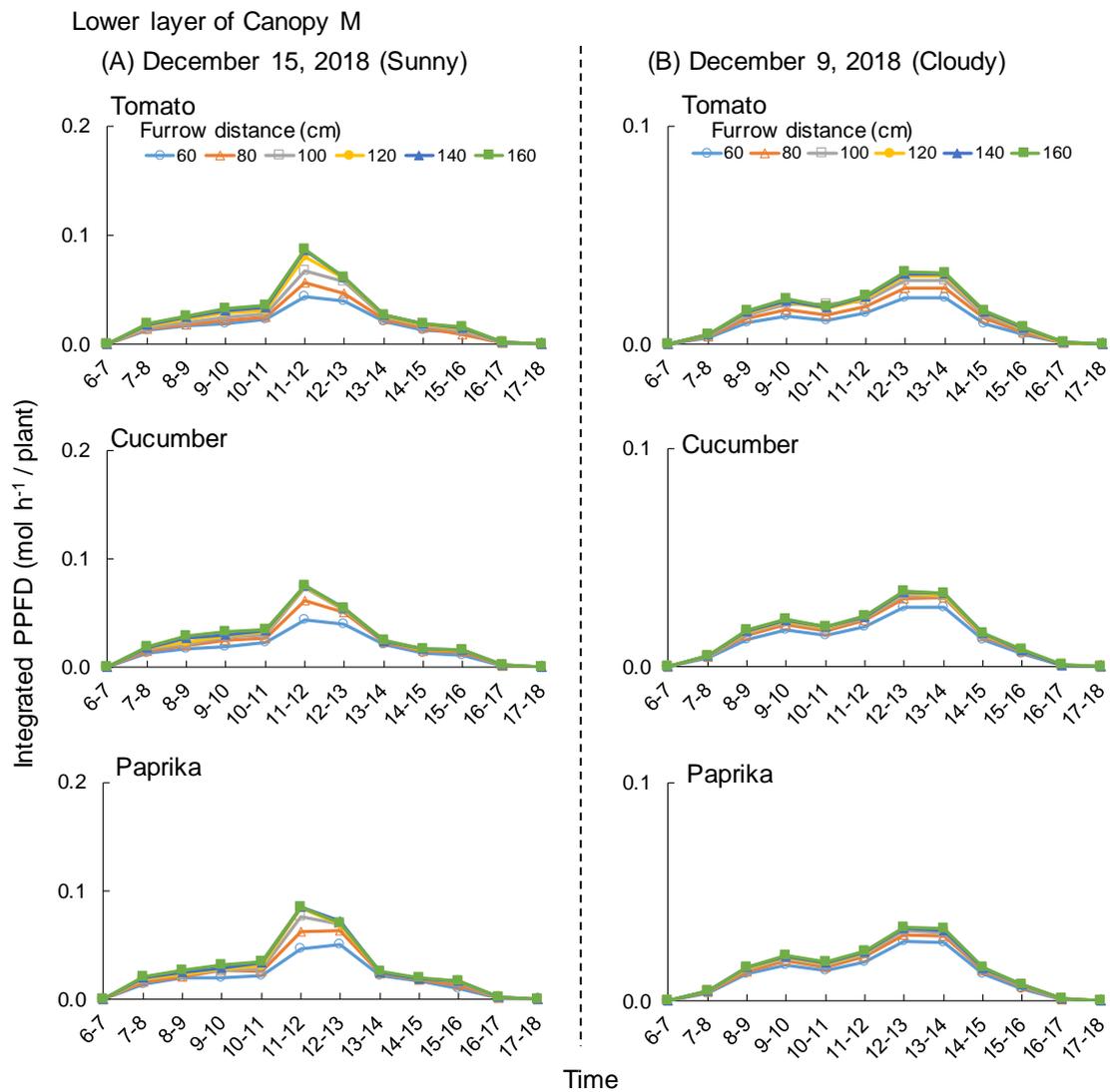


Fig. 4. 25 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of the lower layer of Canopy M at different furrow distances on December 15 (sunny) and 9 (cloudy), 2018. Canopy M included plants with a height of 80 to 100 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

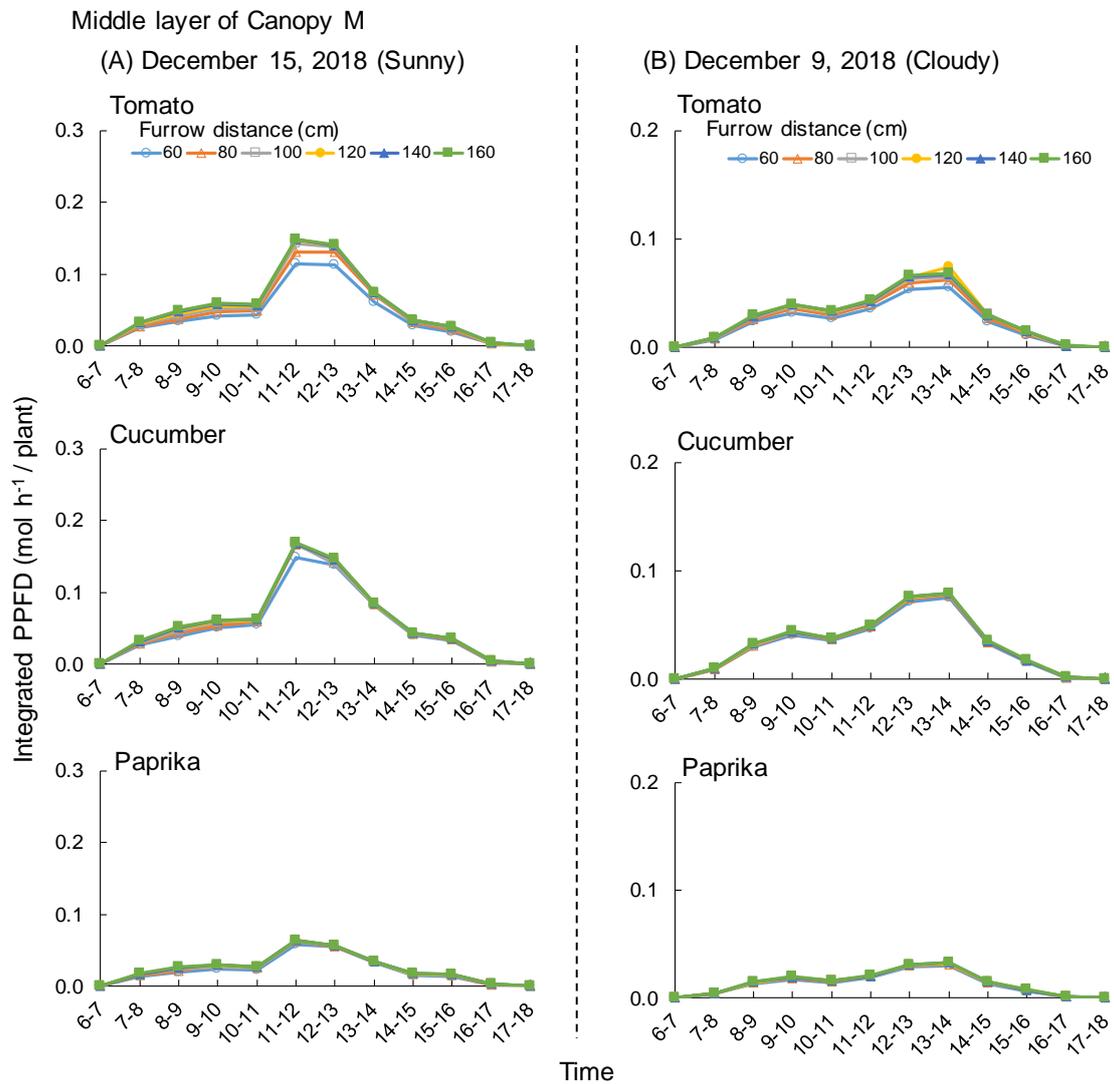


Fig. 4. 26 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of the middle layer of Canopy M at different furrow distances on December 15 (sunny) and 9 (cloudy), 2018. Canopy M included plants with a height of 80 to 100 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

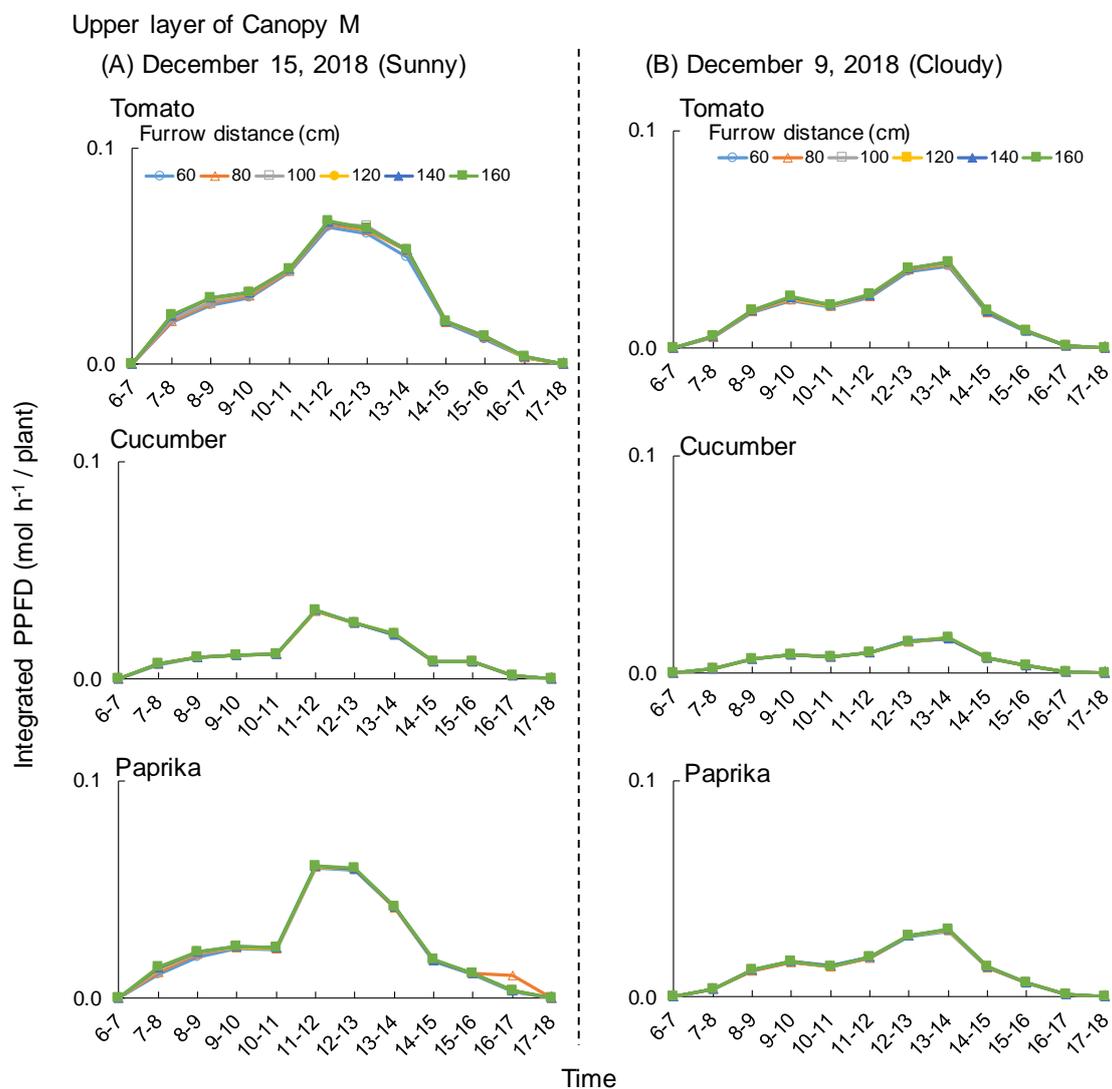


Fig. 4. 27 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of the upper layer of Canopy M at different furrow distances on December 15 (sunny) and 9 (cloudy), 2018. Canopy M included plants with a height of 80 to 100 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

#### 4.3.3.3. Canopy L の受光量

##### 4.3.3.3.1. 夏至を想定したシミュレーション (6月13日(快晴)と21日(曇天))

6月13日(快晴)と21日(曇天)のCanopy LもCanopy Mと同様に特に下層および中層の1株あたりの受光量は畝間の影響を受けた(Fig. 4.28)。トマトおよびキュウリは畝間120 cm程度で日積算受光量が飽和し始めた。パプリカでは畝間100 cm程度で日積算受光量が飽和し始めた。どの植物種についても、上層部分の受光量は畝間の影響を受けなかった。また、Canopy Mと同様に植物種によって各層の受光量の大小関係が異なった。トマトでは、中層>下層>上層の順で層別受光量が大きくなった。キュウリおよびパプリカでは、中層>上層>下層の順で層別受光量が大きくなった。

Fig. 4.28-Aに6月13日(Canopy L)の畝間と1株あたりの層別受光量の関係を示した。6月13日のトマトでは、下層、中層および上層で畝間60-160 cmの間の1株あたりの日積算受光量の増加率はそれぞれ107.4、22.6および3.0%であった。キュウリでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率はそれぞれ75.9、21.9および2.7%であった。パプリカでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率はそれぞれ40.2、23.0および3.9%であった。

Fig. 4.28-Bに6月21日(Canopy L)の畝間と1株あたりの層別受光量の関係を示した。トマトでは、下層、中層および上層で畝間60-160 cmの間の1株あたりの日積算受光量の増加率はそれぞれ113.3、24.1および2.7%であった。キュウリでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率はそれぞれ70.3、21.7および2.8%であった。パプリカでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率はそれぞれ39.2、21.4および4.1%であった。

6月13日(快晴)および21日(曇天)における下層の1時間の積算受光量の推移をFig. 4.29に示した。特に、トマトおよびキュウリで畝間100 cm以下、パプリカで畝間80 cm以下で1時間の積算受光量が各時間帯でその他の畝間よりも小となっていた。中層の1時間の積算受光量の推移をFig. 4.30に示した。特にトマトおよびキュウリで畝間80 cm以下、パプリカで畝間60 cm以下で1時間の積算受光量が各時間帯でその他の畝間よりも小となっていた。上層の1時間の積算受光量の推移をFig. 4.31に示した。どの植物種においても、各時間帯で1時間の積算受光量に畝間の影響はみられなかった。特に6月21日(曇天)においては、これまでと同様に各層の積算PPFDの推移(Figs. 4.29-B, 4.30-B and 4.31-B)が温室外PPFD(Fig. 4.16)と同様の推移を示していた。

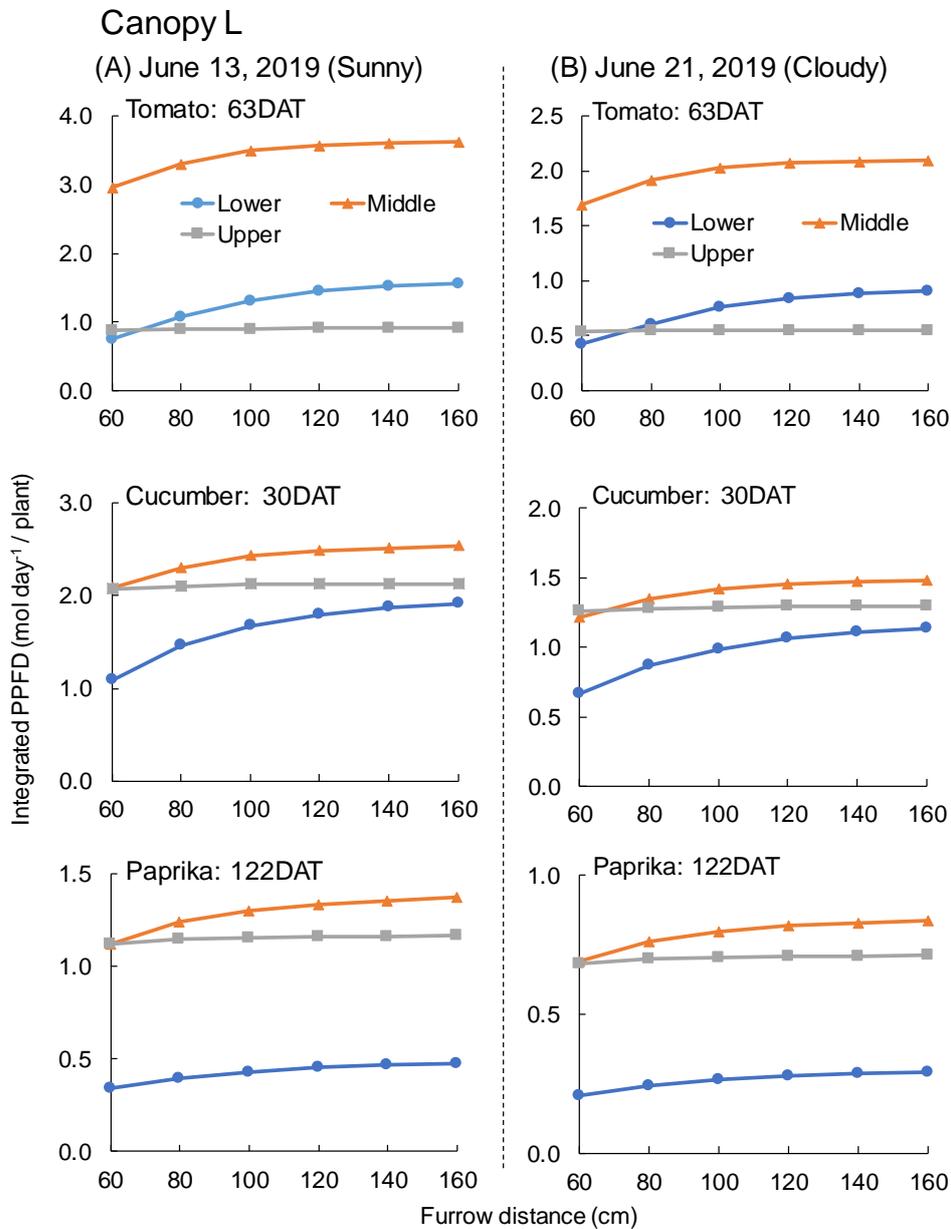


Fig. 4. 28 Effect of furrow distance on the daily integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of Canopy L on June 13 (sunny) and 21 (cloudy), 2019. Daily integrated PPF (6:00–18:00) was estimated. Canopy L included plants with a height of 150 to 160 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

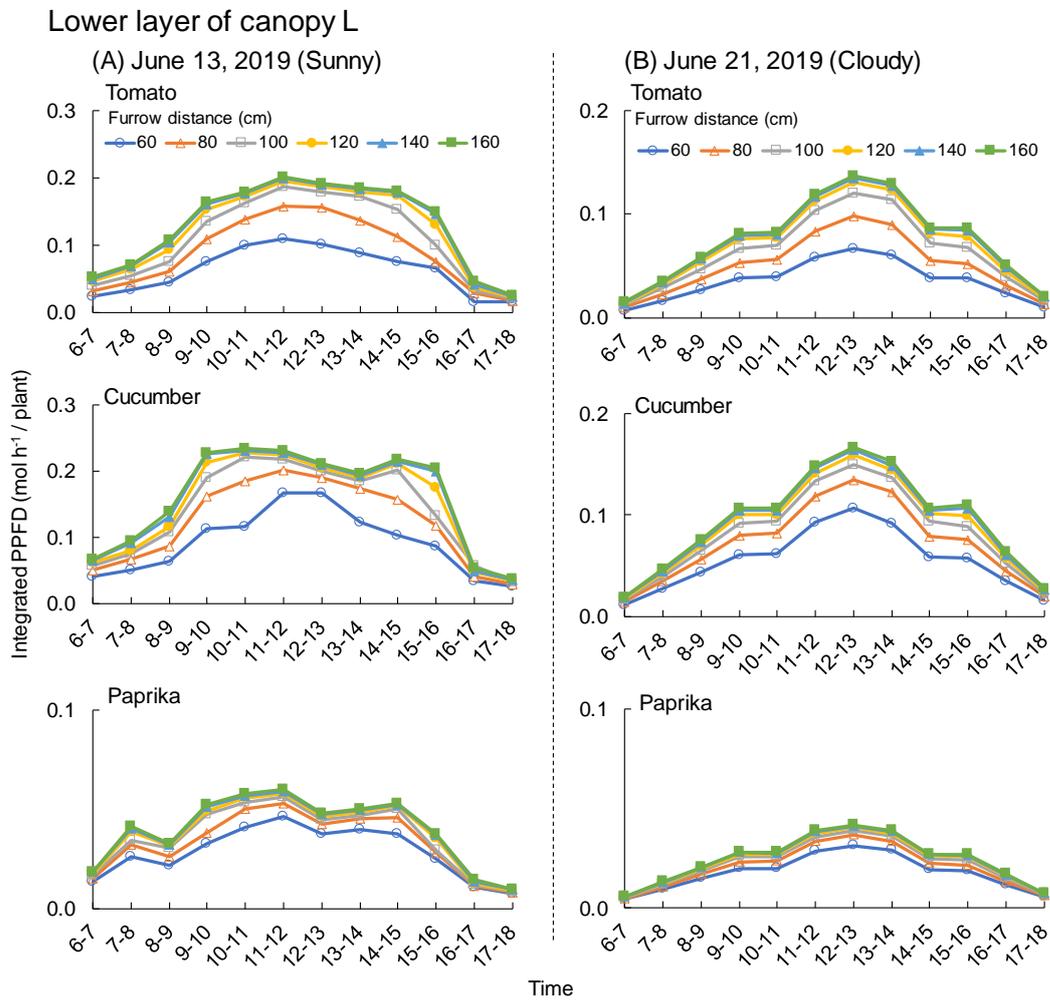


Fig. 4. 29 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of the lower layer of Canopy L at different furrow distances on June 13 (sunny) and 21 (cloudy), 2019. Canopy L included plants with a height of 150 to 160 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

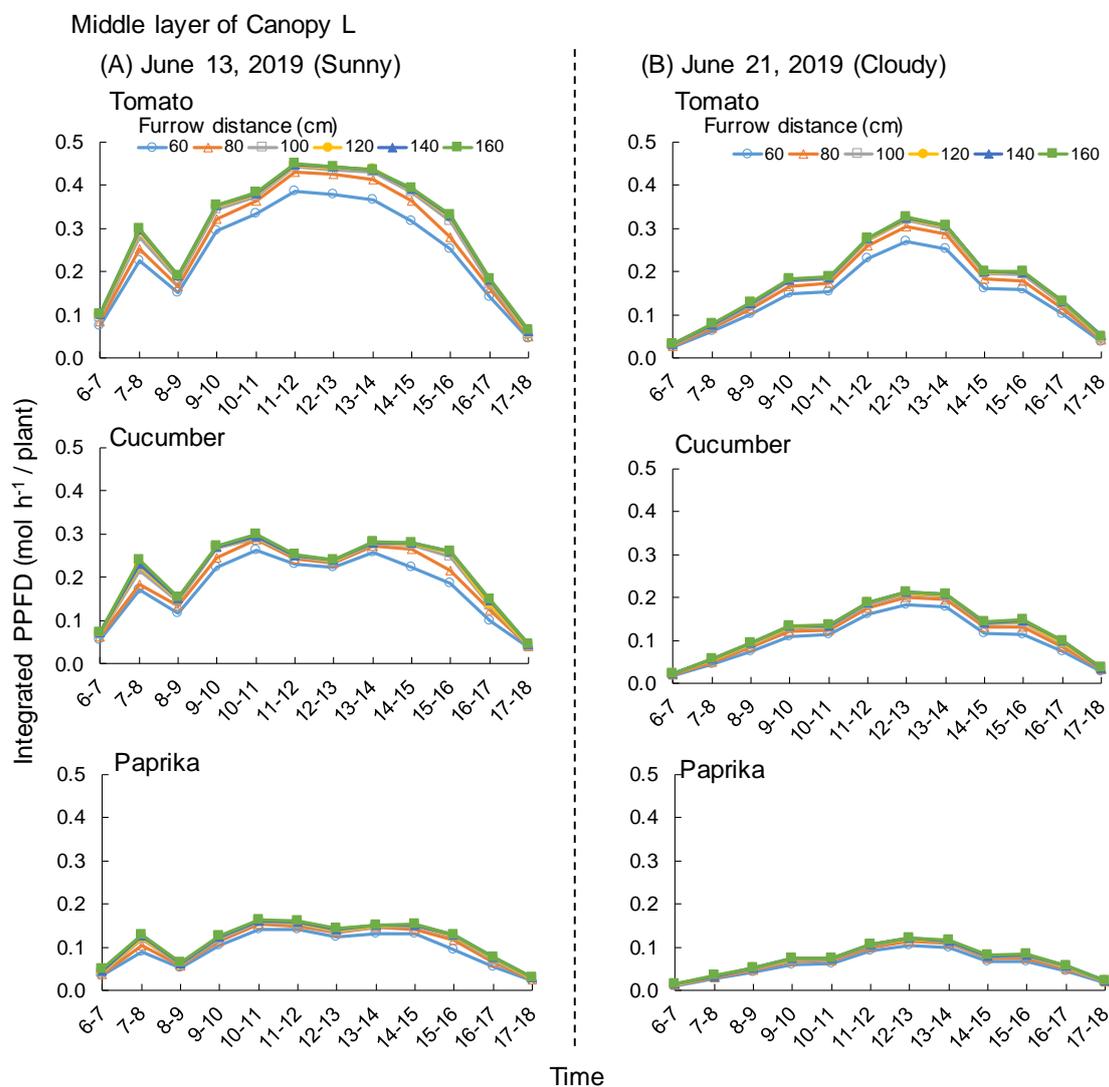


Fig. 4. 30 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of the middle layer of Canopy L at different furrow distances on June 13 (sunny) and 21 (cloudy), 2019. Canopy L included plants with a height of 150 to 160 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

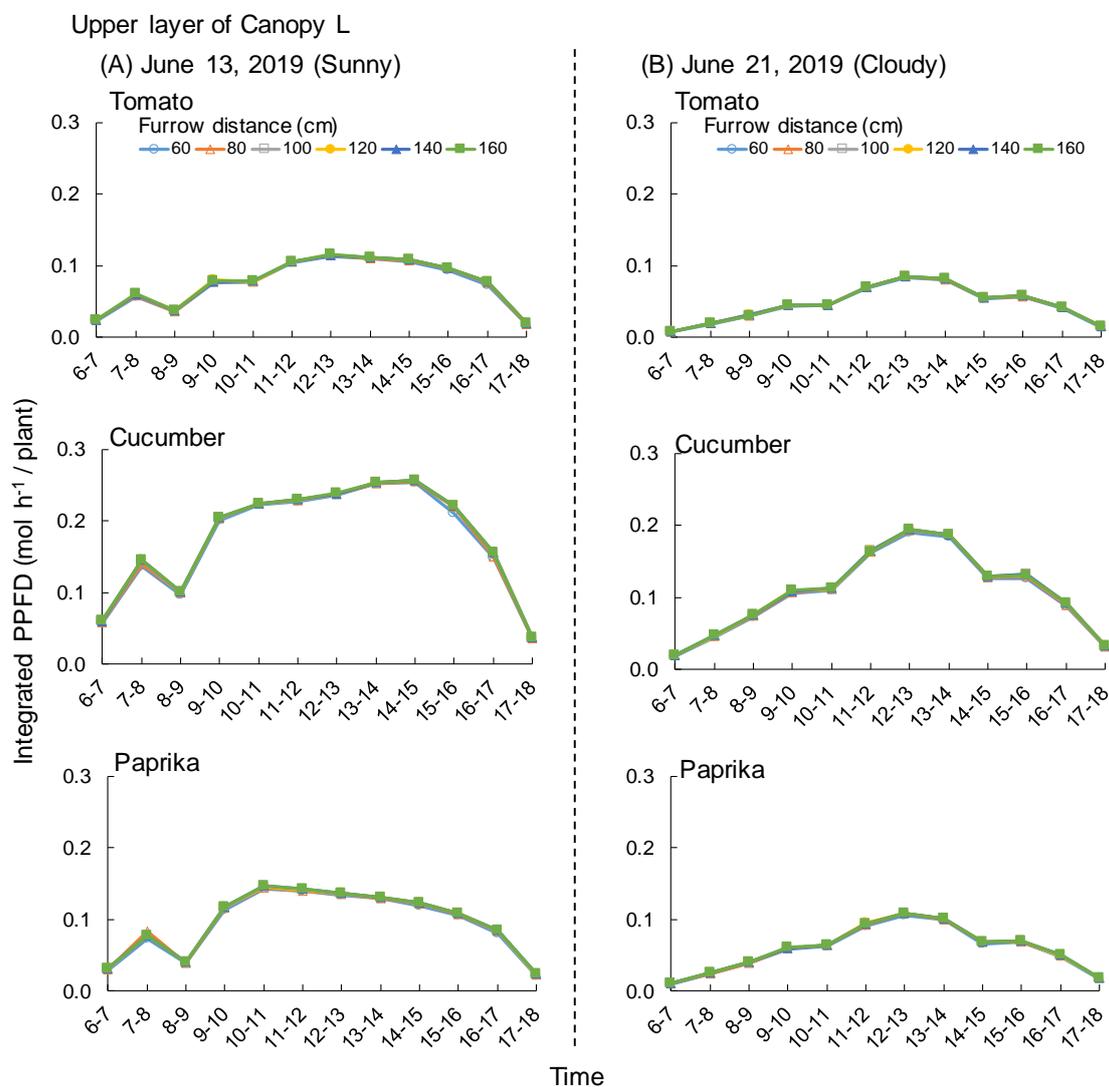


Fig. 4. 31 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of the upper layer of Canopy L at different furrow distances on June 13 (sunny) and 21 (cloudy), 2019. Canopy L included plants with a height of 150 to 160 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

#### 4.3.3.3.2. 冬至を想定したシミュレーション (12月15日(快晴)と9日(曇天))

12月15日(快晴)と9日(曇天)のCanopy Lも各植物種で、下層および中層の1株あたりの日積算受光量は畝間の影響を受けた(Fig. 4. 32)。上層の日積算受光量は畝間の影響を受けなかった。トマトおよびキュウリは畝間160 cm程度で日積算受光量が飽和し始めた。パプリカでは畝間120 cm程度で日積算受光量が飽和し始めた。また、6月13日と同様に植物種によって各層の受光量の大小関係が異なっており、各層の受光量の大小関係は6月のシミュレーションと同様であった。

Fig. 4. 32-Aに12月15日(Canopy L)の畝間と1株あたりの層別受光量の関係を示した。トマトでは、畝間60-160 cmの間で下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ180.0、47.1および5.0%であった。キュウリでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ117.5、34.3および6.4%であった。パプリカでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ81.3、40.1および11.1%であった。

Fig. 4. 32-Bに12月9日(Canopy L)の畝間と1株あたりの層別受光量の関係を示した。トマトでは、畝間60-160 cmの間で下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ143.7、35.7および3.9%であった。キュウリでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ87.6、27.2および4.5%であった。パプリカでは、下層、中層および上層の1株あたりの日積算受光量の増加率は、それぞれ56.5、34.6および8.5%であった。

12月15日(快晴)および9日(曇天)における下層の1時間の積算受光量の推移をFig. 4. 33に示した。特に、トマトおよびキュウリで畝間140 cm以下、パプリカで畝間100 cm以下で1時間の積算受光量が各時間帯でその他の畝間よりも小となっていた。中層の1時間の積算受光量の推移をFig. 4. 34に示した。特にトマトおよびキュウリで畝間100 cm以下、パプリカで畝間80 cm以下で1時間の積算受光量が各時間帯でその他の畝間よりも小となっていた。上層の1時間の積算受光量の推移をFig. 4. 35に示した。どの植物種においても、各時間帯で1時間の積算受光量に畝間の影響はみられなかった。特に12月9日(曇天)においては、これまでと同様に各層の積算PPFDの推移(Figs. 4. 33-B, 4. 34-B and 4. 35-B)が温室外PPFD(Fig. 4. 16)と同様の推移を示していた。

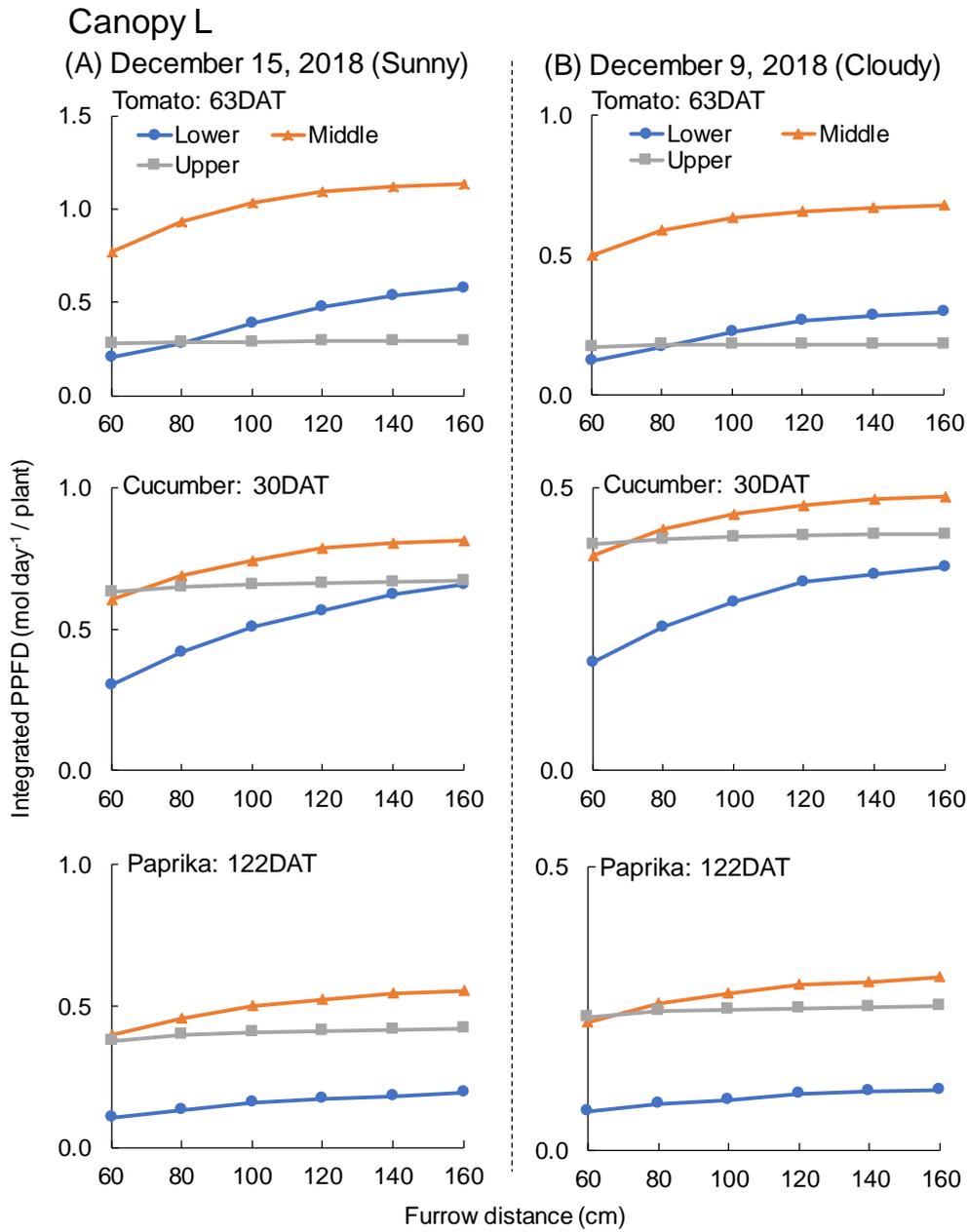


Fig. 4. 32 Effect of furrow distance on the daily integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of Canopy L on December 15 (sunny) and 9 (cloudy), 2018. Daily integrated PPFD (6:00–18:00) was estimated. Canopy L included plants with a height of 150 to 160 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

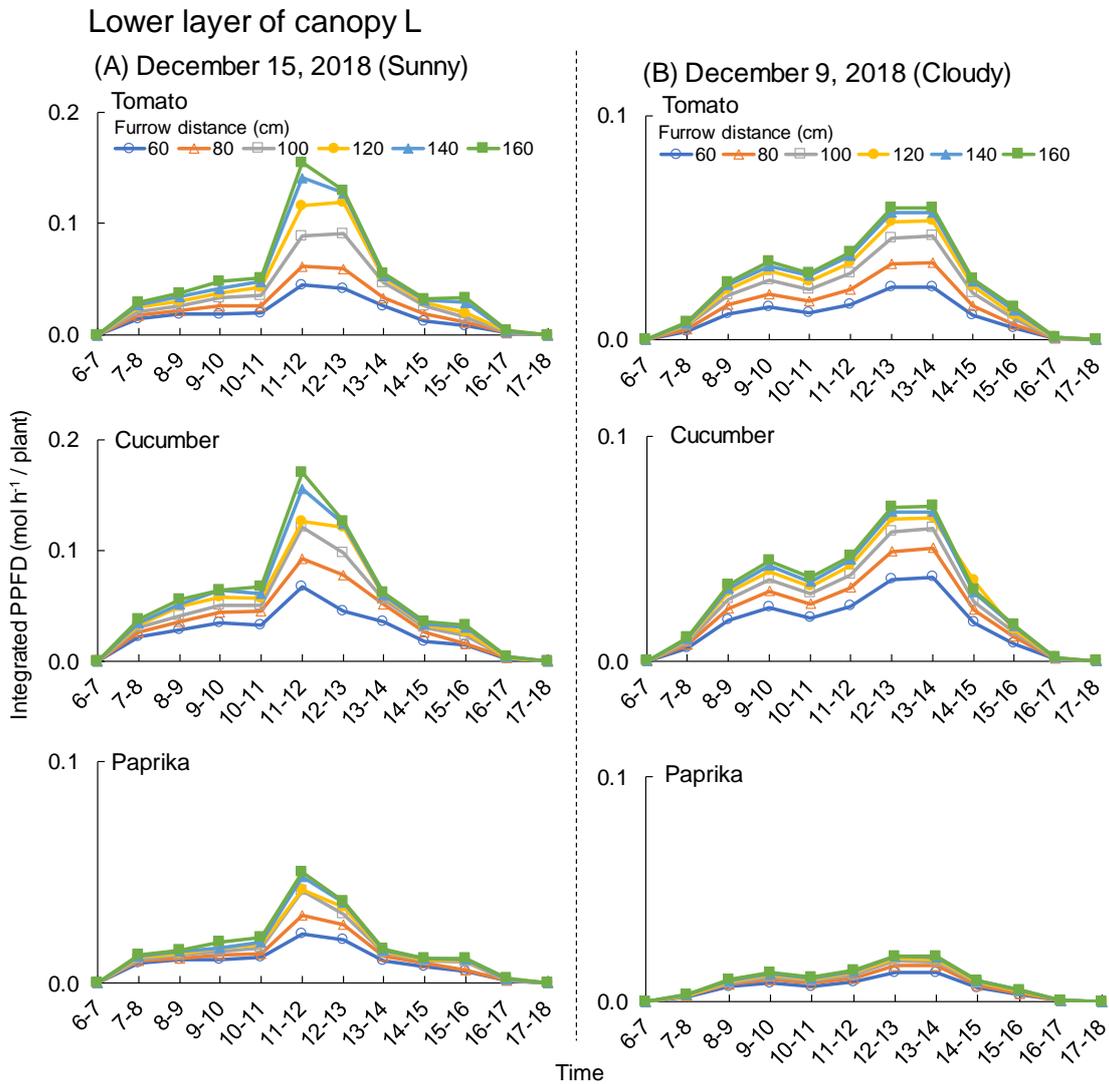


Fig. 4.33 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of the lower layer of Canopy L at different furrow distances on December 15 (sunny) and 9 (cloudy), 2018. Canopy L included plants with a height of 150 to 160 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

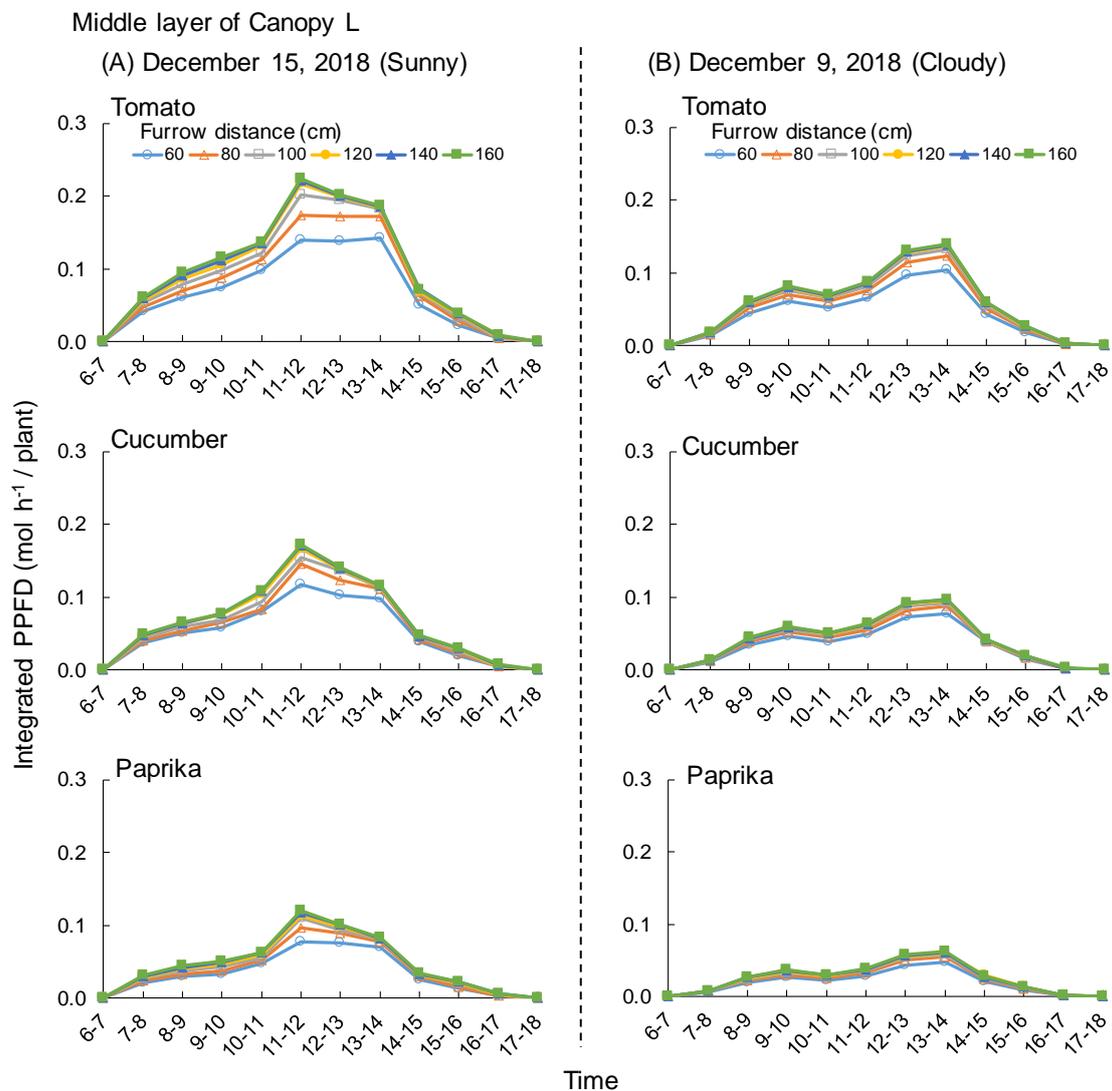


Fig. 4. 34 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of the middle layer of Canopy L at different furrow distances on December 15 (sunny) and 9 (cloudy), 2018 (Canopy L). Canopy L included plants with a height of 150 to 160 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

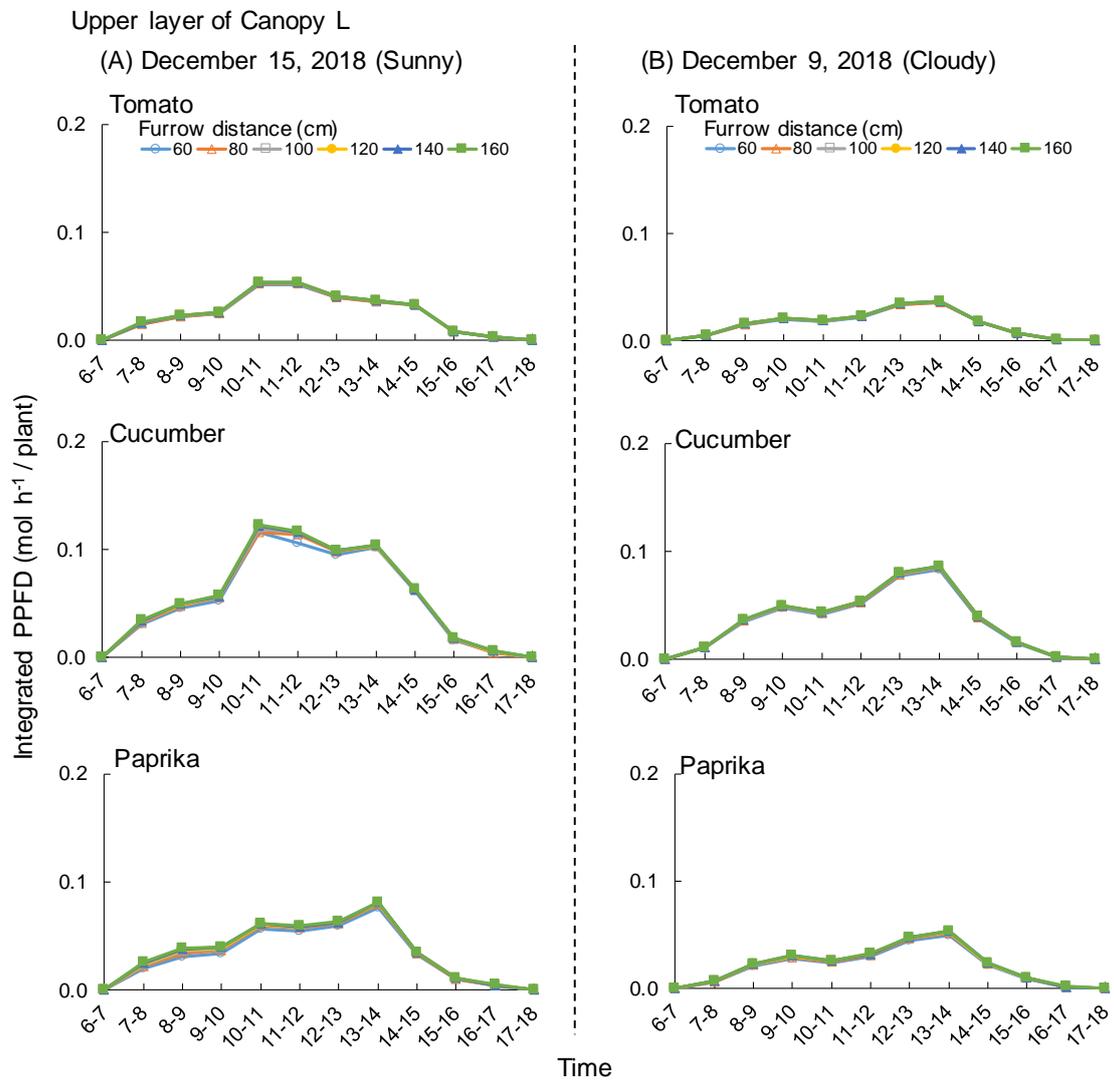


Fig. 4. 35 Changes in the hourly integrated photosynthetic photon flux density (PPFD) per plant of the upper layer of Canopy L at different furrow distances on December 15 (sunny) and 9 (cloudy), 2018 (Canopy L). Canopy L included plants with a height of 150 to 160 cm. Furrow distance changed from 60 to 160 cm virtually in the optical simulation.

#### 4.3.4. 考察

##### 4.3.4.1. 畝間の受光量への影響

畝間が狭くなると隣の群落による相互遮蔽が増加するため、シミュレーション内で草丈の低い Canopy S を除いて株あたりの受光量が減少していた (Figs. 4. 20, 4. 24, 4. 28 and 4. 32)。蔵田ら (1988) は魚眼レンズを用いてトマト群落内から垂直上方に向け撮影することで群落の直達光受光率を推定し、群落の高さが高くなると群落直達光受光率が高くなると述べている。そのような現象を本試験では光学シミュレーションの手法を用いて再現できていた。このように、光学シミュレーションを用いることで、群落の形状を考慮して畝間に応じて変化する受光量を定量的に評価することが可能である。Canopy M および L の各層 (下層、中層および上層) の受光量については、特に下層が他の植物や中層および上層に存在する葉による遮蔽を受けやすく、下層の受光量が畝間の減少による影響を受けていた (Figs. 4. 21, 4. 25, 4. 29 and 4. 33)。特に、高栽植密度下の下位葉は、相互遮蔽によって十分な受光量を確保できない (Lu et al., 2012) ため、光学シミュレーションを用いて受光量の少ない葉を可視化することで、摘葉等の栽培管理の指標としての利用が期待できる。逆に上層については、隣の群落の相互遮蔽の影響を受けにくかったため、どの時間帯も畝間の影響はみられなかった (Figs. 4. 23, 4. 27, 4. 31 and 4. 35)。

また、ある一定以上の畝間の距離があると、1株あたりの受光量は飽和しそれ以上増加しないため、シミュレーションにより推定した受光量が飽和し始める畝間距離で栽培することで、株あたりの受光量を最大化させかつより狭い畝間で栽培できると考えられた。より狭い畝間で栽培することで、栽植密度が高まることにより収量の増加が期待できる。

##### 4.3.4.2. 植物種の受光量への影響

草丈が同程度でも植物種によって各層の受光量の大小関係が異なっていた (Figs. 4. 20, 4. 24, 4. 28 and 4. 32) のは、植物種によって群落構造が異なり (Fig. 4. 13)、それが層別受光量に影響を与えていたためであった。Isoda et al. (1992) は草丈 1 m 程度のダイズ群落の上層に葉が集中しているため、上から 20–30 cm の層で大部分の日射を吸収していたと日射吸収フィルムを用いた方法で明らかにしている。上層ほど、周りの他の植物の遮蔽がないため、受光量が大きくなりやすいが、必ずしもそうではなく、葉面積の多い他の層で受光面積が大きくなり受光量が上層より多い場合もある。

例えば、Canopy L のトマト、キュウリおよびパプリカで中層の葉面積の割合が他の層と

比較して大 (Fig. 4. 13) であり受光面積が大きかったため、中層が他の層と比較して受光量が大きであった (Figs. 4. 28 and 4. 32)。そして、キュウリおよびパプリカは相互遮蔽が発生しにくい上層の受光量が下層よりも大となっていた (Figs. 4. 28 and 4. 32)。一方、トマトはキュウリおよびパプリカと比較して上層の葉面積の割合が小さく (Fig. 4. 13) 上層の受光面積が小さかったため、上層の受光量は下層と比較して小であった (Figs. 4. 28 and 4. 32)。葉面積の多い層で受光面積が大きくなり受光量が増加しやすいが、下層では中層、上層および他の群落の遮蔽を受けやすいため、受光面積が確保できていても他の層よりも受光量が小である場合が多かった。6月13日および21日の Canopy M のパプリカでは、例外的に下層の受光量が他の層と比較して大となっていた (Figs. 4. 20 and 4. 24) が、これは下層に存在する葉面積が中層と同等 (Fig. 4. 13) であり、かつ下位葉が中位葉および上位葉と比較してより葉身傾斜角が小さく横方向に展開していたためであった。葉身傾斜角が受光体制に与える影響は試験 4-3 で詳しく述べる。葉が水平に近い群落ほど、吸光係数が大きくなるという報告がある (Monsi and Saeki, 1953, 2005)。上記より、Canopy M のパプリカの下位葉が日射を受光しやすかった。したがって、本手法は植物の形態や群落形状を考慮し受光量を層別に可視化することが可能なので、受光量の少ない層の摘葉や補光する際の指標としての利用が期待できる。LAI が大きすぎると、群落下部の光強度が光補償点以下となり光合成による物質生産に貢献できないだけでなく、呼吸によって同化産物を消費する (東出ら, 2018) という報告があり、受光量の少ない層の可視化は生産性を向上させるために重要である。

#### 4.3.4.3. 太陽高度および気象条件の受光量への影響

冬季の方が夏季と比較して株あたりの受光量が減少しない最小の畝間が大であった (Figs. 4. 17, 4. 20, 4. 24, 4. 28 and 4. 32) のは、下記の理由である。12月15日の太陽高度は1日を通して6月13日および21日と比較して低く (冬至: 最大約  $30^{\circ}$ 、夏至: 最大約  $80^{\circ}$ )、太陽高度が低いと群落への日射の入射角が大きくなり温室内の側端の群落に日射が遮蔽されやすく、正午以外の時間帯に群落内部に日射が入射しにくかったためであった。したがって、本シミュレーションモデルを用いると季節を考慮して、受光量が減少しない最小の畝間を把握することが可能となる。植物を定植する前に、本シミュレーションモデルを利用すると畝間等の栽植方法を季節や植物種等を考慮して決定することが可能である。

12月15日の正午付近に、Canopy L においてそのほかの時間帯と比較して下層の1時間の積算受光量が大きい傾向がみられた (Fig. 4. 33-A) のは下記の理由である。太陽高度が1日

を通して低く、かつ散乱日射の割合が低いため、正午以外の時間帯に群落内部に日射が入射しにくかったためであった。Tewolde et al. (2016) はトマト群落内の不足した受光量を改善するため、冬の昼間および夏と冬の夜にトマト群落内で補光を行うことで収量が増加したと述べている。シミュレーションの結果からも、冬は群落内部に日射が入射しにくく、群落内の受光量が不足しやすいため、群落内補光の効果は夏と比較して大きいと考えられ、本シミュレーションモデルを用いると補光ランプの効果的な設置位置等の把握に役立つと考えられた。

6月21日と12月9日は、1日を通して散乱日射の割合が大きく群落下部に散乱光が入射しやすかったため受光量の推移 (Figs. 4. 18-B, 4. 19-B, 4. 21-B, 4. 22-B, 4. 23-B, 4. 25-B, 4. 26-B, 4. 27-B, 4. 29-B, 4. 30-B, 4. 31-B, 4. 33-B, 4. 34-B and 4. 35-B) は温室外 PPFD の推移 (Fig. 4. 16) と同様の傾向であった。大石 (2016) は温室内の散乱日射は、温室外日射と同様の経日変化を示したことから、温室内の陰による影響を受けにくいと述べており本研究の結果と一致した。したがって、本シミュレーションモデルを用いると散乱日射の割合等の気象条件を考慮した受光量の推定が可能となる。

#### 4.4. 試験 4-3 葉面積指数と受光量の関係

##### 4.4.1. 目的

植物群落の受光体制は葉の形や角度等により変化することが知られている。Monsi and Saeki (1953, 2005) は葉の角度や配置が群落の吸光係数に影響を及ぼすことを示しており、特に垂直的な葉は吸光係数を下げ、葉がモザイク状の配置の場合は吸光係数が上昇すると述べている。早田ら (2010) は出穂期のイネの葉身傾斜角度を測定すると、個体群吸光係数の大小関係を推定できると述べている。植物種により形態が異なるため、LAI と群落受光量の関係は変化すると考えられる。

Anten and Hirose (2001) は高窒素条件下で育ったオオオナモミの群落光合成速度を最大化する LAI は 3.5 程度、低窒素条件化では 2.5 程度であったと述べている。上記より、群落光合成速度を最大化する最適 LAI が存在すると報告されている (Anten and Hirose, 2001)。したがって、その LAI で果菜類を栽培することで収量の増加につながると考えられる。

植物 3D モデルを用いた受光量のシミュレーションを行うことで、植物の葉の形や角度を忠実に再現できるため、各植物種の群落の受光体制を再現することが可能である。また、一般的に作物は畝状に栽培され、葉面積や形状は生育ステージに伴って変化する (Sameshima, 1995) が、3D モデルを用いることで上記についても再現可能である。

本節では、果菜類の植物種間差 (トマト、キュウリおよびパプリカ) が LAI と受光量の関係に与える影響を明らかにすることを目的とする。レイトレーサー法を用いて複数段階の LAI における各果菜類の群落受光量を推定し、LAI と栽植面積あたりの群落受光量の関係を調査した。植物種間差については、葉の角度や葉長等の形態的な特徴を用いて考察した。

##### 4.4.2. 材料および方法

###### 4.4.2.1. 実験植物の栽培

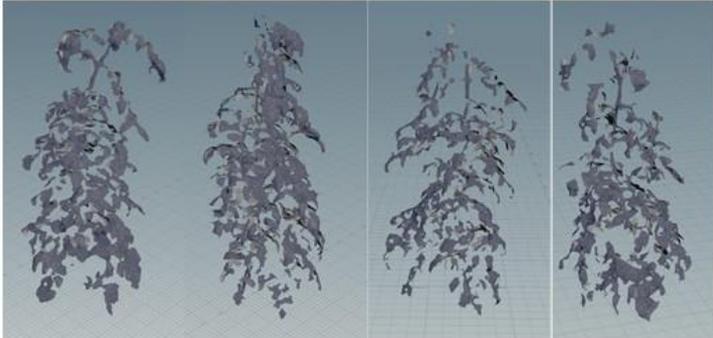
2019 年 9 月 10 日に第 2 章と同様の南北棟温室 (168 m<sup>2</sup>) に播種後約 3 週間のトマト (*Solanum Lycopersicum* L., ‘麗夏’, サカタのタネ (株)) およびパプリカ (*Capsicum annuum* L., ‘フルーピーイエローピーマン’, タキイ種苗 (株)) をロックウールキューブ (DELTA6.5G, Grodan Inc.) に移植しロックウール (Granulate, Grodan Inc.) を充填したワグネルポット (NF-5 型, アズワン (株)) に定植した。キュウリ (*Cucumis sativus* L., ‘フリーダムハウス 2 号’ (株) サカタのタネ) は 12 月 4 日に上記と同様に定植した。本試験では植物個体を 1 株ずつ 3D スキャンするために、ワグネルポットを栽培に使用した。畝間は 1.6 m、株間は 0.9 m

で栽培した。株間を 0.9 m と広くしたのは、スキャンの際に植物同士が干渉するのを防ぐためである。かん水は OAT ハウス肥料 A 処方 1 単位培養液 (OAT アグリオ (株)) を用いた。トマト、キュウリおよびパプリカの栽培はそれぞれ 2019 年 11 月 8 日 (59 DAT)、2020 年 1 月 25 日 (52 DAT) および 2020 年 3 月 3 日 (175 DAT) まで行った。

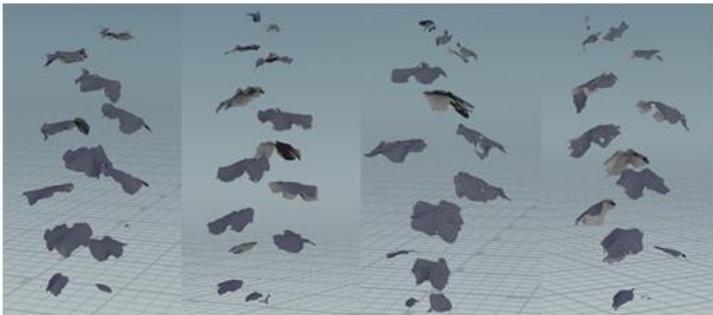
#### 4.4.2.2. 群落 3D モデルの作成

59 DAT のトマト (草丈: ~1.5 m、葉枚数: ~20 枚)、40 DAT のキュウリ (草丈: ~1.6 m、葉枚数: ~13 枚) および 147 DAT のパプリカ (草丈: ~1.5 m、葉枚数: ~30 枚) のそれぞれ 4 株を 3D スキャナー (DPI-8X, (株) オーピーティー) で周りをスキャンし点群データを取得した。植物個体の点群データを 3.2.2.2.2. と同様に点群処理ソフト (OPT Cloud Survey, (株) オーピーティー) に取り込み、点群データを 3 点の頂点を持つポリゴンデータ (STL 形式) に変換した。植物個体のポリゴンデータを 3D モデリングソフト (Houdini 17, Side Effects Software Inc.) に取り込み不要なポリゴンの削除およびポリゴン数を削減しファイルを軽量化した (Fig. 4. 36)。作成した 4 個体の 3D モデルのポリゴンの面積の垂直分布より推定した植物の構造を Fig. 4. 37 に示した。軽量化したトマト、キュウリおよびパプリカそれぞれ 4 個体の 3D モデルを SketchUp 2017 (Trimble Inc.) に取り込み長さ 4 m の栽培ベンチの 3D モデル上に株間 25、33 および 50 cm になるように配置した (Figs. 4. 38, 4. 39 and 4. 40)。株間 25、33 および 50 cm で栽培ベンチ上に植物 3D モデルをそれぞれ 16、12 および 8 株配置した。各果菜類の 3D モデルを配置した栽培ベンチの 3D モデルを温室 3D モデル内に移動し、畝間 80、100、120、140 および 160 cm になるように配置した温室モデルを作成した (Fig. 4. 41)。上記の条件を組み合わせ作成したトマト (LAI 1.2–3.5)、キュウリ (LAI 0.8–2.5) およびパプリカ (LAI 0.6–1.7) の群落 3D モデルをシミュレーションに利用した。本研究では、3D モデルを用いて畝間 5 段階 (80、100、120、140 および 160 cm) と株間 3 段階 (25、33 および 50 cm) のすべての組み合わせを用いて群落を再現しているため、LAI が同程度で畝間および株間が異なる群落が存在している。

Tomato: 59 DAT



Cucumber: 41 DAT



Paprika 147: DAT

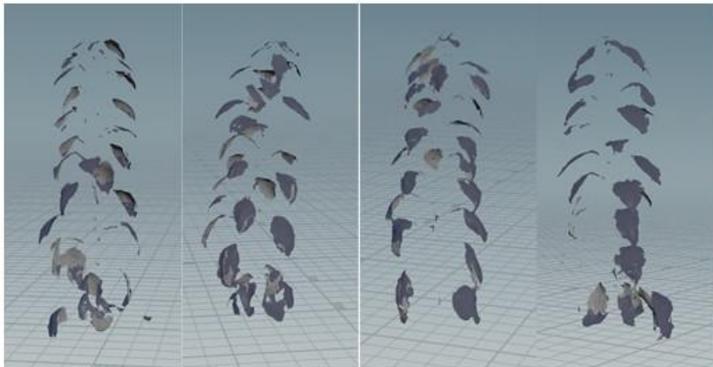


Fig. 4. 36 The surface models of plants for optical simulation. Tomato, cucumber, and paprika were scanned using a 3D scanner to construct the 3D model. Four individual plant 3D models were used to construct canopy 3D models.

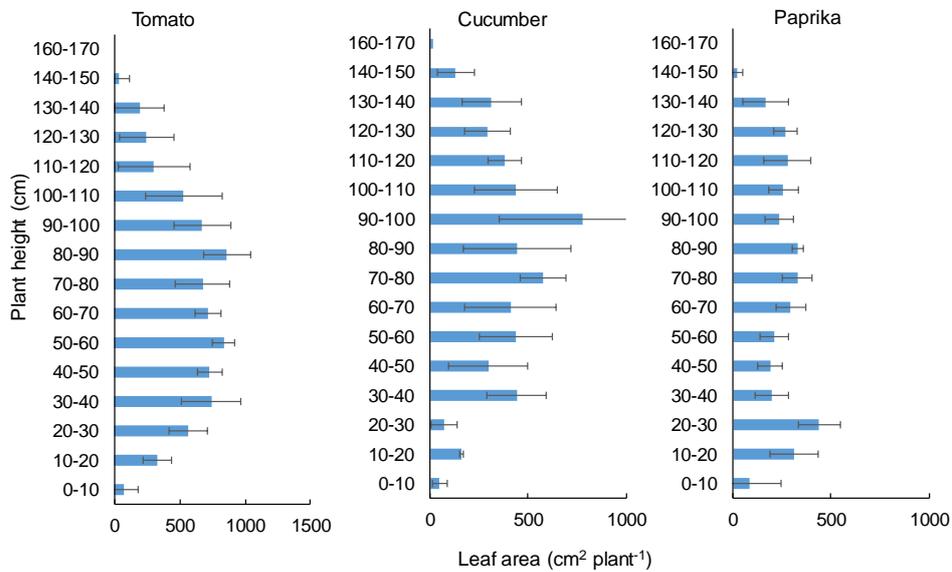


Fig. 4. 37 Plant structures estimated by the plant 3D model (n=4). The total leaf area of tomato, cucumber, and paprika was 7480.9, 5206.3, and 36045 cm<sup>2</sup>/plant, respectively. The error bars indicate a standard deviation (SD).

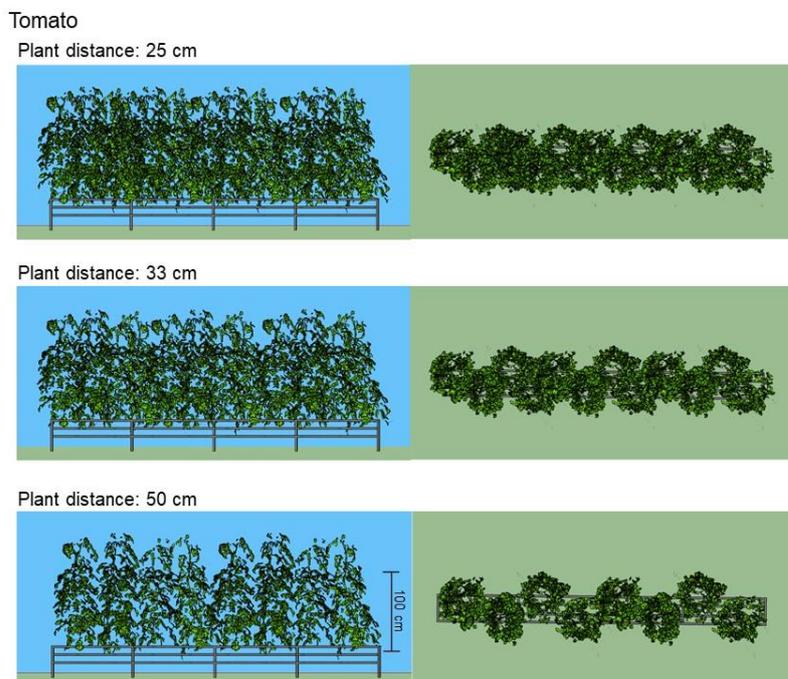
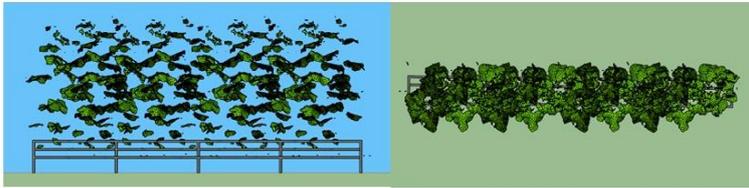


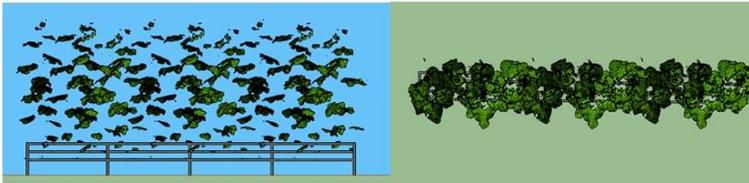
Fig. 4. 38 Canopy 3D models of tomato (59 DAT) at different plant distances. Plant height was ~ 1.5 m.

Cucumber

Plant distance: 25 cm



Plant distance: 33 cm



Plant distance: 50 cm

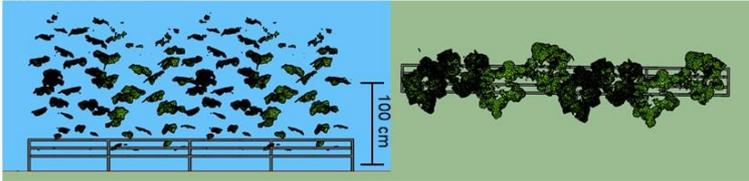
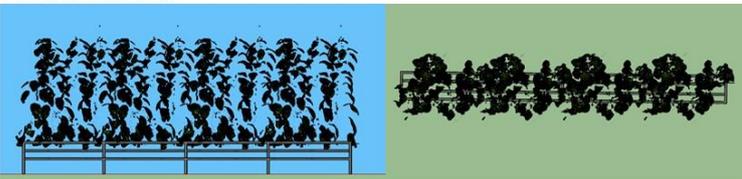


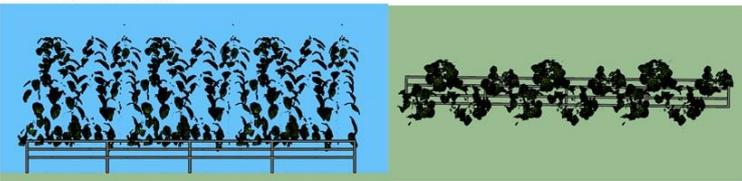
Fig. 4. 39 Canopy 3D models of cucumber (41 DAT) at different plant distances. Plant height was ~ 1.6 m.

Paprika

Plant distance: 25 cm



Plant distance: 33 cm



Plant distance: 50 cm

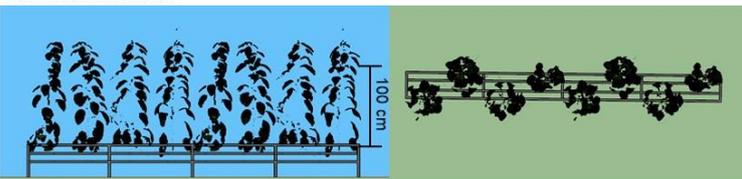


Fig. 4. 40 Canopy 3D models of paprika (147 DAT) at different plant distances. Plant height was ~ 1.5 m.

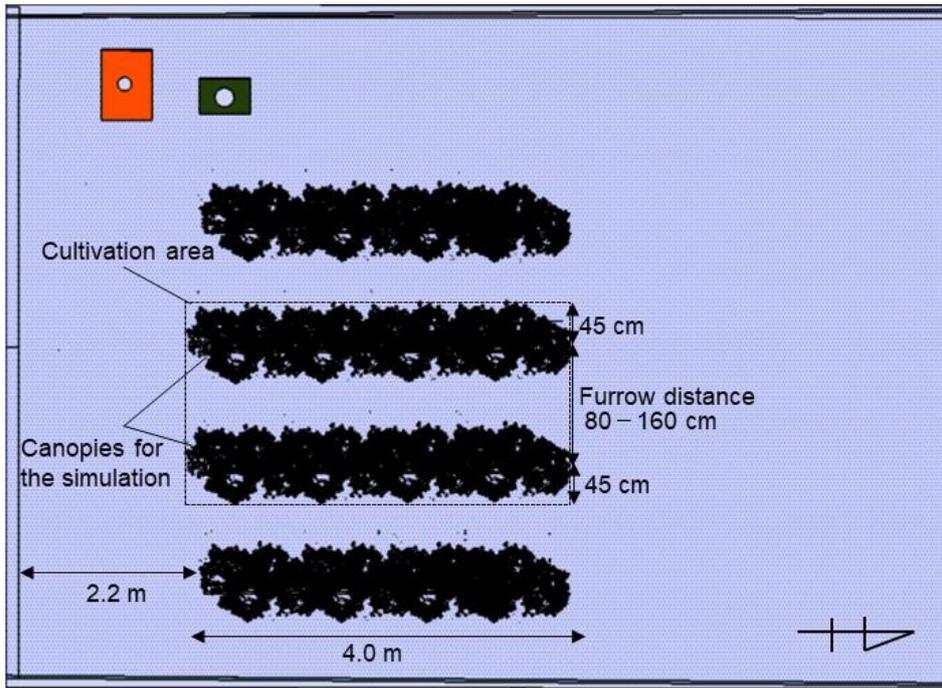


Fig. 4. 41 The layout of cultivation benches and the location of estimated points of photosynthetic photon flux density in the greenhouse. Furrow distance was changed from 80 to 160 cm virtually for the optical simulation. Plant distance was changed from 25 to 50 cm virtually.

#### 4.4.2.3. 果菜類の葉の傾斜角と葉長

植物種によって、同じ LAI でも受光体制が異なることが知られている。Monsi and Saeki (1953, 2005) は葉の角度や位置が群落内の光の減衰に影響を及ぼし、特に理想的な配置の水平葉をもつ植物群落の吸光係数は 1 と述べている。葉柄が長く水平な葉をもつ種は、葉柄が短く垂直な葉をもつ種よりも周りの植物との間に発生する光の競合には有利に働く (Hikosaka and Hirose, 1997) という報告もある。上記の報告を言い換えると、葉の傾斜角が大きいと群落の下部に日射を逃がしやすく、葉がより水平的に植物の外側に伸びているほうが日射を受光しやすいということになる。

葉の傾斜角および葉長を各植物種の推定された LAI と受光量の関係の考察に利用するため、作成した各果菜類の 3D モデル (Fig. 4. 36) を用いて 3D モデリングソフト (SketchUp 2017, Trimble Inc.) 上でそれらの測定を行った (葉長 10 cm 以上の葉を対象)。葉の傾斜角は、水平面に対する葉面の傾きとし、Fig. 4. 42 に本試験で定義した葉の傾斜角を示した。葉長は葉の基部から末端までの直線距離とした。トマトおよびキュウリは上から 10 葉目までを測定対象とした。パプリカは上から 15 葉目までを測定対象とした。下位葉ほど、3D モデル内で葉が入り組んでおり、傾斜角および葉長の測定が困難であったため、下位葉は調査対象から除外した。

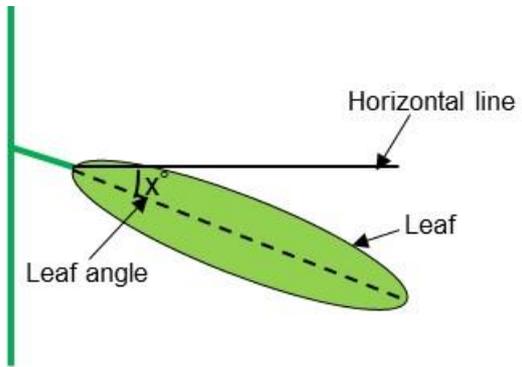


Fig. 4. 42 Measurement points of leaf angle.

#### 4.4.2.4. 群落の受光量のシミュレーション

光環境の推定には、4.2.2.3.に示した主に建築分野で用いられているレイトレーサー法を用いた光学シミュレーションソフトの Radiance (Berkeley lab) を用い、同様の方法で行った。温室に用いられている被覆資材の光学特性の設定値は 4.2.2.3.と同様とした。葉の光学特性の設定値は、4.3.2.4.と同様とした。

光環境の推定には 4.4.2.2.で作成した果菜類の群落 3D モデルを使用した (Figs. 4. 38, 4. 39 and 4. 40)。群落を構成するポリゴンの各重心の座標を推定点として PPF<sub>D</sub> の推定を行い、その値に各ポリゴンの面積を乗じ積算することで各植物群落の受光量を推定した (4.3.2.4.)。推定対象の群落は Fig. 4. 41 に示した。

推定対象日については、太陽高度の違いがおよぼす影響を結果に反映させるため、夏至 (6 月 21 日) および冬至 (12 月 22 日) に近い日で 1 日の大部分の雲量が 0 もしくは 0+の日とした (2018 年 12 月 15 日および 2019 年 6 月 13 日) (Fig. 4. 16)。夏至および冬至の松戸市の太陽高度を Fig. 4. 15 に示した。

上述した方法を用いて、Fig. 4. 41 に示した位置の群落 (畝間: 80–160 cm、株間: 25、33 および 50 cm) の受光量を 1 時間おきに推定し、対象とする群落の栽植面積あたりの受光量を推定した (6:00-18:00)。作成した群落 3D モデルを構成するポリゴンの面積より算出した群落の葉面積と栽植面積より LAI を算出し、LAI と栽植面積あたりの受光量の関係を調査した。

#### 4.4.3. 結果

##### 4.4.3.1. 各果菜類の葉の傾斜角と葉長

Fig. 4. 43 に各果菜類の葉の傾斜角を示した。どの葉位もトマト>パプリカ>キュウリの順で葉の傾斜角が大の傾向がみられた。トマト、キュウリおよびパプリカの葉の平均傾斜角はそれぞれ、57.4、27.6 および 43.0° であった。

Fig. 4. 44 に各果菜類の葉長を示した。トマト>キュウリ>パプリカの順で葉長が大となる傾向がみられた。トマトは本試験の測定した範囲では葉長は下位葉になるにつれて増加傾向がみられた。キュウリは第7葉以降、葉長が減少する傾向がみられた。パプリカの葉長はどの葉位も同程度であった。トマト、キュウリおよびパプリカの平均葉長はそれぞれ、35.8、21.6 および 14.2 cm であった。

上述した傾斜角と葉長の情報は、受光体制の種間差について考察する際に利用した。

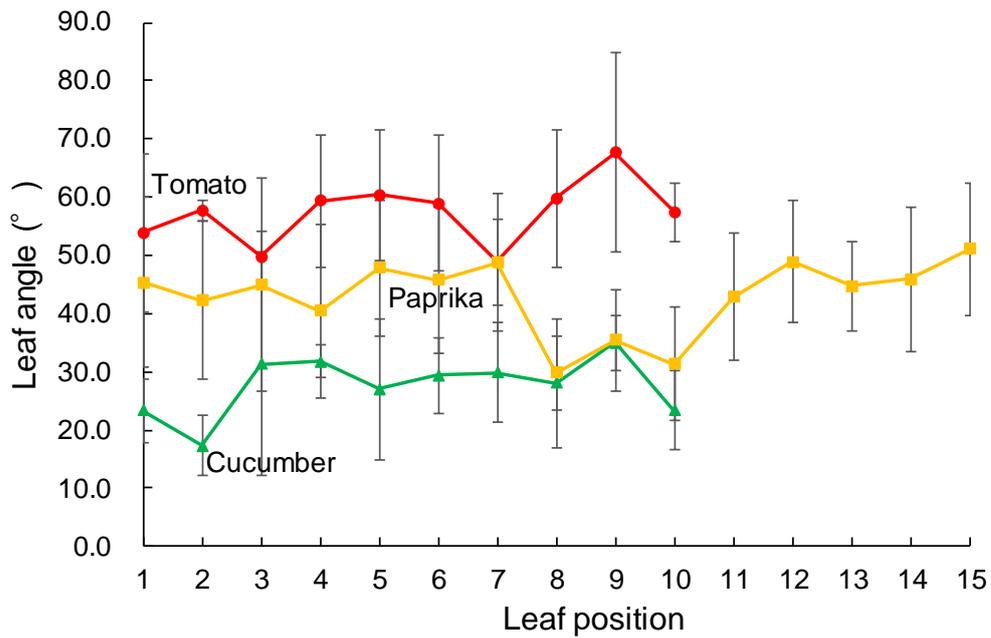


Fig. 4.43 Leaf angle of fruit vegetables at each leaf position (n=4). Leaf position was counted from the top of the plants using 3D models. Tomato, cucumber, and paprika plants had ~20, ~13, and ~30 leaves. The error bars indicate standard deviation (SD).

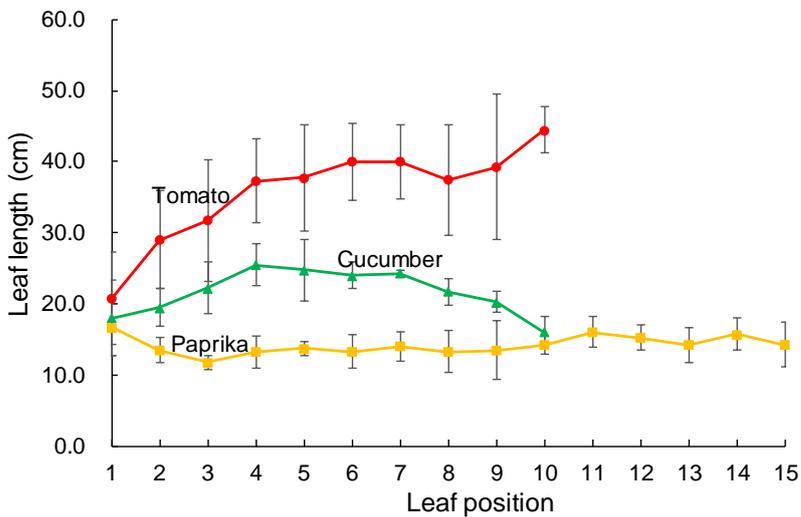


Fig. 4.44 Leaf length of fruit vegetables at each leaf position (n=4). Leaf position was counted from the top of the plants using 3D models. Tomato, cucumber, and paprika plants had ~20, ~13, and ~30 leaves, respectively. The error bars indicate standard deviation (SD).

#### 4.4.3.2. LAI と群落受光量の関係

Fig. 4. 45 に LAI と各果菜類の栽植面積あたりの受光量の関係を示した。

Fig. 4. 45-A に夏至を想定したシミュレーション結果を示した。同程度の LAI の時にキュウリの受光量がトマトおよびパプリカと比較して大となる傾向がみられた。トマトとパプリカでは、LAI 1.1-1.7 の範囲で、LAI と受光量の関係が同様の傾向を示した。

本研究では、3D モデルを用いて畝間 5 段階（80、100、120、140 および 160 cm）と株間 3 段階（25、33 および 50 cm）のすべての組み合わせを用いて群落を再現しているため、LAI が同程度で畝間および株間が異なる群落が存在している。特にトマトとキュウリで、同程度の LAI の群落において株間が広い場合に株間が狭い場合と比較すると広い方の群落で受光量が増加する傾向を示していた。

Fig. 4. 45-B に冬至を想定したシミュレーション結果を示した。冬至でも夏至と同様に同程度の LAI のときにキュウリの受光量がトマトおよびパプリカと比較して大となる傾向がみられたが、夏至と比較すると植物種間差が小さくなっていた。

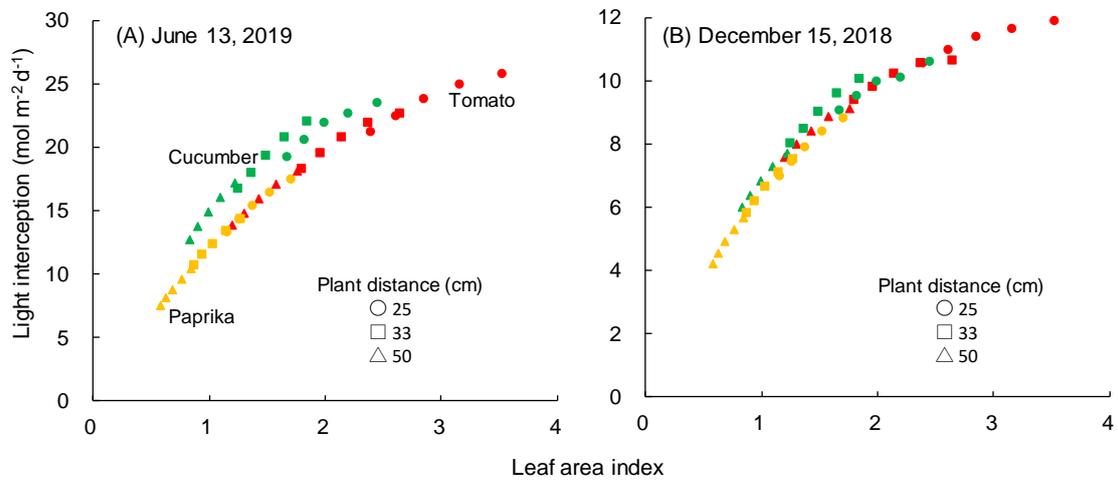


Fig. 4.45 Relationship between leaf area index and light interception of the canopy. The ranges of LAI of tomato, cucumber, and paprika canopies were 1.2–3.5, 0.8–2.5, and 0.6–1.7, respectively. Furrow distance changed from 80 to 160 cm virtually in the optical simulation. Plant distance changed from 25 to 33 cm virtually in the optical simulation.

#### 4.4.4. 考察

##### 4.4.4.1. LAI と群落受光量の関係

Fig. 4. 45-A において、夏至にキュウリの群落でトマトおよびパプリカの群落と比較すると、同程度の LAI で栽植面積あたりの群落受光量が大きくなったのは、キュウリの葉の傾斜角 (27.6°) がトマト (57.4°) やパプリカ (43.0°) と比較すると小さかった (Fig. 4. 43) ためと考えられた。Monsi and Saeki (1953, 2005) は、平行な葉から垂直的な葉になるにつれて植物群落の吸光係数が減少すると述べている。各群落の吸光係数を算出し、葉の傾斜角が受光体制におよぼす影響を考察する。吸光係数は式 1-1 を変形した式 4-2 を用いて算出した。

$$K = \frac{1}{F} \times \ln \frac{I_0}{I} \quad (\text{式 4-2})$$

I : 群落内のある高さの光強度

$I_0$  : 群落上の光強度

K : 吸光係数

F : 葉面積指数

夏至の栽植面と群落上の受光量を 1 時間おきに推定 (10:00–14:00) し、それぞれの植物の平均吸光係数を算出すると、トマト、キュウリおよびパプリカでそれぞれ 0.50、0.70 および 0.58 であった (Fig. 4. 46-A)。葉の傾斜角の小さいキュウリで吸光係数がトマトおよびパプリカと比較して大となっており、既往の研究と傾向が一致していた。Fig. 4. 44 よりトマトの葉長はキュウリやパプリカと比較すると大であり日射を受光しやすい形態と考えられた。しかし、Fig. 4. 43 に示すようにトマトの葉の傾斜角が他の果菜類と比較すると大きくかつ複雑な小葉を持っているため、群落下部に日射を逃がしやすかったと考えられた。したがって、本シミュレーションモデルは各果菜類の形態が受光体制に与える影響を再現できていたと考えられた。

一方、Fig. 4. 45-B において、夏至でみられた LAI と栽植面積あたりの受光量の関係の間差が冬至ではみられなかったのは、下記の理由が考えられた。吸光係数は太陽高度によって変動することが知られており、例えばライグラス群落では太陽高度 30°、クローバー群落で太陽高度約 25° のときに吸光係数が最大となる (黒岩・門司, 1963)。詳細には葉の傾斜角の大きい葉は、低い太陽高度で自己遮蔽が増加し、より平行に近い葉は高い太陽高度で自己遮蔽が増加するということである (Falster and Westoby, 2003)。冬至のトマト、キュウリ

およびパプリカの吸光係数はそれぞれ 0.43、0.50 および 0.62 であり (Fig. 4. 46-B)、夏至と比較するとキュウリの吸光係数が低下していた。日射量の多い南中時刻付近の松戸の太陽高度は、夏至で約 75°、冬至で約 30° である (Fig. 4. 15) ため、今回使用した傾斜角の小さい葉をもつ果菜類のキュウリについては、冬至に吸光係数が低下しやすかったと考えられた。冬至のキュウリの吸光係数が低下したことで、キュウリの受光量が減少し、LAI と受光量の関係の種間差が発生しにくくなったと考えられた。以上より、本シミュレーションモデルは、植物の形態に加え、気象条件も受光量の推定に反映できていた。

Fig. 4. 45 において、LAI が同程度の時に株間が狭く畝間が広い方が栽植面積あたりの受光量が減少する傾向を示した。例として、キュウリで同等の LAI の時 (LAI : 1.7 および 1.6) の、株間の狭い群落 (株間 : 25 cm、畝間 : 160 cm、LAI : 1.7) と広い群落 (株間 : 33 cm、畝間 : 160 cm、LAI : 1.6) の吸光係数を用いて説明する。吸光係数は式 4-2 を用いて算出した。

夏至で、栽植面と植物上の受光量から算出した吸光係数は株間の狭い群落と広い群落でそれぞれ 0.37 および 0.59 であった (Fig. 4. 47-A)。冬至ではそれぞれ 0.33 および 0.48 であった (Fig. 4. 47-B)。畝間の狭い群落の方が広い群落と比較して吸光係数が低かったため、同程度の LAI の時に株間が狭いほうが受光量が低下したと考えられた。株間が吸光係数に影響した理由として以下が考えられた。本研究では、3D モデルを用いて畝間 5 段階と株間 3 段階のすべての組み合わせで群落を再現しているため、LAI が同程度で畝間および株間が異なる群落が存在している。作成した群落で LAI が同程度の場合、株間が狭い群落 (株間 : 0.25 m) を含む方が、広い株間の群落 (株間 : 0.33 や 0.5 m) を含む場合よりも畝間が広くなる。したがって、LAI が同程度の群落では、株間が狭い群落の方が葉の重なる頻度が多いため、栽植面積あたりの投影葉面積の割合が小さくなる。栽植面積中の投影葉面積の割合が小さいと群落間の通路に直接日射が入射しやすくなるため、吸光係数および栽植面積あたりの群落受光量が減少する。

以上より、各植物種の形態的な特徴を含む 3D モデルを用いて受光量の推定を行うことで、植物の群落構造を考慮した受光量の推定が可能であった。同一の LAI でも植物種、株間および畝間によって受光体制が異なっていたため、光学シミュレーションの利用は不均一な群落を持つ温室栽培における果菜類の受光量の把握に特に有効と考えられた。また、本シミュレーションモデルを用いると、受光量が最大化する LAI を把握可能となるため、その LAI で栽培を行えば、収量の増加が期待できる。

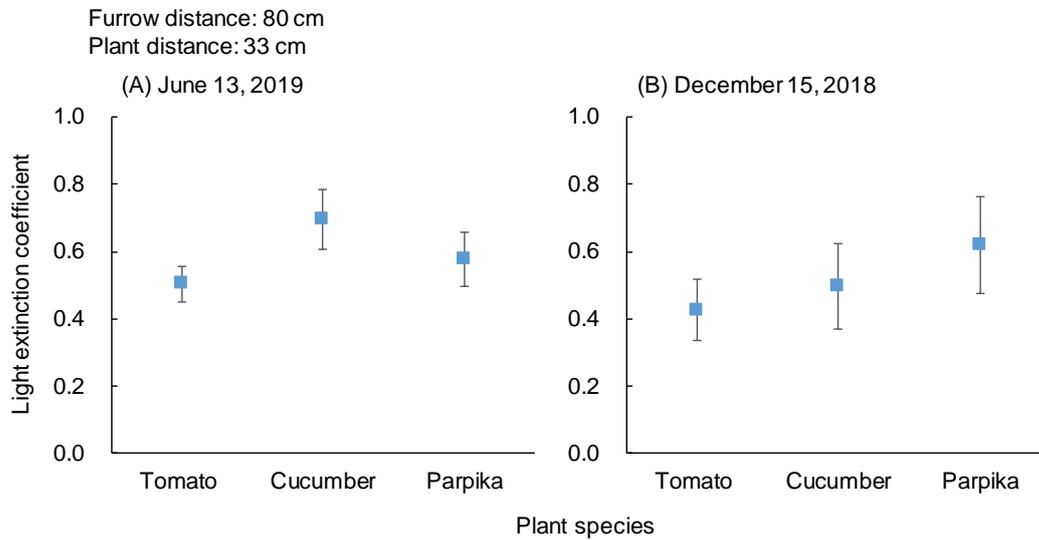


Fig. 4. 46 The light extinction coefficient of tomato, cucumber, and paprika canopies. Plots are averages of hourly values between 10:00 and 14:00. The error bars indicate standard deviation (SD).

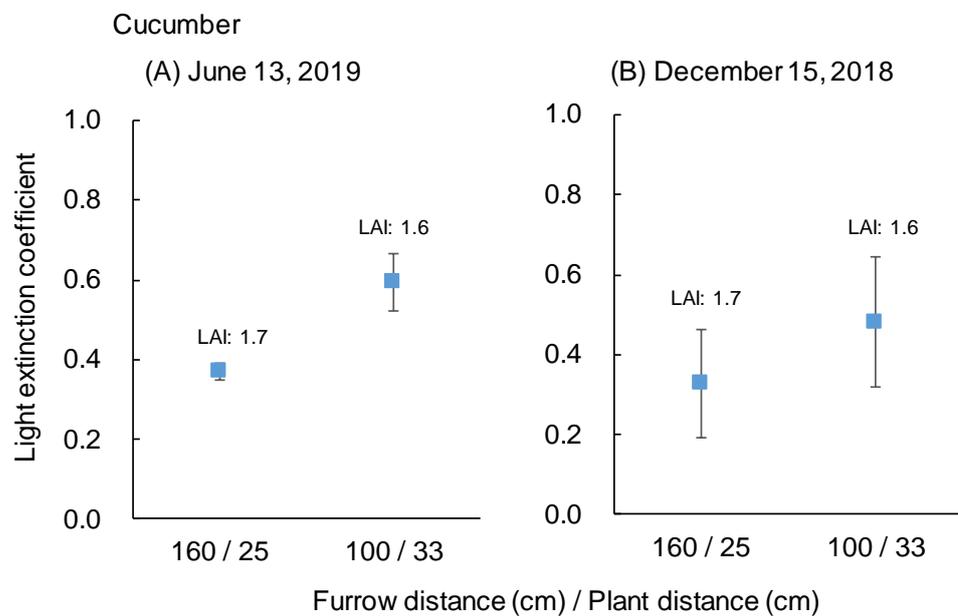


Fig. 4. 47 Effects of the furrow distance and plant distance on the light extinction coefficient for cucumber. Plots are averages of hourly values between 10:00 and 14:00. The error bars indicate standard deviation (SD).

#### 4.4.4.2. 本シミュレーションモデルの利用方法の検討

本シミュレーションモデルを用いることで、植物種、栽植方法および太陽高度を考慮し、LAIと栽植面積あたりの受光量の関係を明らかにすることができた。したがって、本シミュレーションを長期にわたり実施することで、地域や季節を考慮し、栽培期間を通して受光量を増加させる栽植方法を明らかにすることができる。そしてその栽植条件において栽培することで収量の増加につながると考えられた。今後、光-光合成曲線の近似式を本シミュレーションモデルに組み込み群落光合成速度を推定することで、群落光合成量を最大化するLAIが把握可能となると考えられる。

本試験では平均高さ 4 m 程度の単棟温室を想定しシミュレーションを行ったが、温室形状や草丈を変更した 3D モデルを用いることで仮想的な条件での作物の受光体制の把握が可能となる。

また、多くの作物で受光体制は収量性に影響を与えることが知られており、育種目標の一つとなっている（田中, 2011）。したがって、同一植物種の異なる品種で同様の受光シミュレーションを行うと、受光体制の品種間差を明らかにすることができ、形態を考慮した育種を行う際にも利用可能と考えられた。

#### 4.5. まとめ

トマト群落および温室の 3D モデルを用いてレイトレーサー法による受光シミュレーションを行うことで、群落内の PPFD の推定が可能であった。1 時間および 1 日の積算 PPFD の実測値と推定値の間に線形関係がみられたため、本手法は、受光量を増加させる栽植方法や LAI の提案に利用可能と考えられた。

シミュレーションの精度確認を行った後に、異なる畝間におけるトマト、キュウリおよびパプリカ群落の層別受光量の推定を行った。群落の各層の受光量を植物種や群落構造を考慮して定量的に推定が可能であった。畝間距離に応じた各層の受光量の変化も定量的に把握することができるため、群落内補光や摘葉を行う際の指標に利用できると考えられた。また、株あたりの受光量が飽和する最小の畝間を明らかにすることが可能であった。より狭い畝間で栽培することで、栽植密度が高まることにより収量の増加が期待できる。

加えて、LAI と栽植面積あたりの受光量の関係を明らかにするために、トマト、キュウリおよびパプリカの植物個体の 3D モデルを作成した。それらを組み合わせて、複数段階の LAI をもつ群落 3D モデルを作成し、受光量のシミュレーションを行った。同じ LAI でも植物種によって受光量の傾向が異なっていた。植物種ごとに葉の角度や葉長の傾向が異なっており、それらが群落の吸光係数に影響を与えていた。上記の方法を用いることで、栽植面積あたりの受光量が飽和する LAI を植物種、栽植方法および季節等を考慮して推定可能と考えられた。また、その LAI で栽培することで収量の増加につながると考えられた。

以上より、本シミュレーションモデルを用いることで、果菜類の栽培時に層別の受光量を考慮して畝間距離を決定することができる。加えて、栽植面積あたりの受光量が飽和する LAI も推定可能であるため、群落の LAI 管理を行う際の指標としての利用が期待できる。

## 第5章 総括

### 5.1. 本論文の摘要

本研究では、温室内の果菜類の収量増加を目的として3Dモデルを用いた受光量および生育の推定を行った。

第2章では、温室で異なる畝間距離においてトマト栽培を行い、群落の受光体制と生育および収量の関係の調査を行った。群落の受光率（温室栽培面に入射した日射を植物が受光する割合）が増加すると収量も増加する傾向がみられた。しかし同等のLAIでも畝間距離が異なると群落の受光体制は異なっていたため、畝間を持つ不均一な群落では、果菜類の受光体制を一般化することが難しいと考えられた。したがって、果菜類の群落形状を3Dモデルにより再現し受光量の推定をするためには光学シミュレーションが果菜類の受光体制の把握に適していると考えられた。

第3章では、3Dスキャナーで果菜類（トマト、キュウリおよびパプリカ）の3次元形状を示す点群データを取得し、3Dモデルを作成した。植物の3Dモデルの3次元情報から複数項目の生育情報（葉面積、草丈、群落構造および収量）を同時に取得可能であることを明らかにした。したがって本技術は、受光量を増やすための果菜類の栽培管理の最適化につながると考えられた。また、各果菜類の3Dモデルは植物の形状を反映しているため、光学シミュレーションを用いた受光量の推定に利用可能である。

第4章では、果菜類（トマト、キュウリおよびパプリカ）の群落3Dモデルと光学シミュレーションの手法の一つであるレイトレーサー法を組み合わせ、温室内の群落受光量を層別に推定した。本シミュレーションモデルを用いると、果菜類の群落形状や気象条件等を考慮しながら植物の受光量を増加させる畝間やLAIを推定可能になった。また、受光量が最大化するLAIを推定し、そのLAIで栽培すると収量の増加につながると考えられた。

以上より、本研究で開発した方法で果菜類の受光量の推定を行うと、温室において受光量を増加させる畝間やLAIを明らかにできる。また、3Dモデルを用いた生育の推定と組み合わせることで、目標とする群落になるよう栽培管理を定量的に実施できると考えられた。

### 5.2. 今後の課題および展望

#### 5.2.1. 実際の栽培への本シミュレーションモデルの利用

本研究で示した受光量および生育を推定する手法を下記のように組み合わせることで、生育ステージや季節に応じて変化する受光体制を考慮しながら果菜類の栽培が可能となる

と期待できる。

栽培中の果菜類の群落を栽培期間中リアルタイムでスキャンし群落の 3D モデルを作成し、層別の受光量をレイトレーザー法により推定する。その時の群落の下層も含めて受光量を増加させる畝間や LAI を探索する。シミュレーションにより明らかになった受光量が増加する畝間もしくは LAI になるように栽培管理を行う。栽培管理時には、群落 3D モデルから現在の LAI を推定し、目標の LAI になるような摘葉もしくは畝間距離の変更を行う。上記のような栽培を行うことで、長期間にわたり受光体制や LAI を制御しながらの栽培が可能となり、収量の増加が期待できる。今後、本手法が果菜類の収量増加に有効かどうか栽培試験により検証する必要がある。

#### 5.2.2. 収量予測への本シミュレーションモデルの利用

当研究グループでは、トマトの生育モデルを用いて収量やそれにかかわる経費や売り上げの推定も行ってきた (大森, 2018)。生育モデルは、群落光合成量から乾物生産量を算出し環境条件に応じて推定されたそれぞれの器官への分配率からトマトの収量を予測している。群落光合成量を推定する際には、栽培時の群落の受光体制を考慮する必要がある。村井 (2020) は、畝間を考慮して補正した群落の吸光係数を用いて群落光合成速度を算出することで、生育モデルの汎用性および精度が向上したと報告している。

本研究で、レイトレーザー法を用いることで温室、群落構造および気象条件を考慮した果菜類の受光量の推定が可能となった。したがって、今後本研究で構築した受光量のシミュレーションモデルと生育モデルを組み合わせることで、より実際の栽培環境を再現した収量の予測が可能になると期待できる。また、収量予測の精度の向上は適切な売上の推定にもつながる。

## 引用文献

- 安東赫・原田正志・岩崎泰永・東出忠桐. 2018. 未熟葉の摘葉処理がトマトの生育および乾物分配に及ぼす影響. 農研機構研究報告野菜花き研究部門 **3**: 9–18. doi: 10.24514/00001878.
- 安東赫・東出忠桐・岩崎泰永・河崎靖・中野明正. 2015. 施設キュウリのハイワイヤー栽培における LAI 簡易推定. 野菜茶業研究所研究報告 **14**: 23–29. doi:10.24514/00001840.
- Anten, N. P., and Hirose, T. 2001. Limitations on photosynthesis of competing individuals in stands and the consequences for canopy structure. *Oecologia* **129**: 186–196.
- Amundson, S., Deyton, D. E., Kopsell, D. A., Hitch, W., Moore, A., and Sams, C. E. 2012. Optimizing plant density and production systems to maximize yield of greenhouse-grown “Trust” tomatoes. *HortTechnology* **22**: 44–48. doi:10.21273/HORTTECH.22.1.44.
- Benalcázar, M., Padín, J., Brun, M., Pastore, J., Ballarin, V., Peirone, L., and Pereyra, G. 2011. Measuring leaf area in soy plants by HSI color model filtering and mathematical morphology. *Journal of Physics: Conference Series* **332**: 1–9. doi:10.1088/1742-6596/332/1/012034.
- Blanco, F. F., and Folegatti, M. V. 2003. A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants. *Horticultura Brasileira* **21**: 666–669. doi:10.1590/s0102-05362003000400019.
- Buck-Sorlin, G., De Visser, P. H. B., Henke, M., Sarlikioti, V., Van Der Heijden, G. W. A. M., Marcelis, L. F. M., and Vos, J. 2011. Towards a functional structural plant model of cut-rose: Simulation of light environment, light absorption, photosynthesis and interference with the plant structure. *Annals of Botany* **108**: 1121–1134. doi:10.1093/aob/mcr190.
- Buck-Sorlin, G. H., Hemmerling, R., Vos, J., and De Visser, P. H. B. 2010. Modelling of spatial light distribution in the greenhouse: Description of the model. *Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, Proceedings - PMA09*: 79–86. doi:10.1109/PMA.2009.45.
- Cagnola, J. I., Ploschuk, E., Benech-Arnold, T., Finlayson, S. A., and Casal, J. J. 2012. Stem transcriptome reveals mechanisms to reduce the energetic cost of shade-avoidance responses in tomato. *Plant Physiology* **160**: 1110–1119. doi:10.1104/pp.112.201921.
- Casadesús, J., and Villegas, D. 2014. Conventional digital cameras as a tool for assessing leaf area index and biomass for cereal breeding. *Journal of Integrative Plant Biology* **56**: 7–14. doi:10.1111/jipb.12117.
- Cebula, S. 1995. Optimization of plant and shoot spacing in greenhouse production of sweet pepper. *Acta Horticulturae* **412**: 321–329. doi:10.17660/actahortic.1995.412.37.

- Chitwood, D. H., Kumar, R., Ranjan, A., Pelletier, J. M., Townsley, B. T., Ichihashi, Y., Martinez, C. C., et al. 2015. Light-induced indeterminacy alters shade-avoiding tomato leaf morphology. *Plant Physiology* **169**: 2030–2047. doi:10.1104/pp.15.01229.
- Cho, Y. Y., Oh, S., Oh, M. M., and Son, J. E. 2007. Estimation of individual leaf area, fresh weight, and dry weight of hydroponically grown cucumbers (*Cucumis sativus* L.) using leaf length, width, and SPAD value. *Scientia Horticulturae* **111**: 330–334. doi:10.1016/j.scienta.2006.12.028.
- Concha-Meyer, A., Eifert, J., Wang, H., and Sanglay, G. 2018. Volume estimation of strawberries, mushrooms, and tomatoes with a machine vision system. *International Journal of Food Properties* **21**: 1867–1874. doi:10.1080/10942912.2018.1508156.
- Dadwal, M., and Banga, V. K. 2012. Estimate ripeness level of fruits using RGB color space and fuzzy logic technique. *International Journal of Engineering and Advanced Technology* **2**: 225–229. Available at: <http://www.ijeat.org/attachments/File/v2i1/A0803102112.pdf>.
- Dandois, J. P., Olano, M., and Ellis, E. C. 2015. Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision uav estimates of forest structure. *Remote Sensing* **7**: 13895–13920. doi:10.3390/rs71013895.
- de Visser, P.H.B., Marcelis, L.F.M., Heijden, G.W.A.M. van der, Vos, J., Struik, P.C., and Evers, J.B. 2002. 3D modeling of plants: a review. *Plant Research International* **52**: 1–23. Retrieved May 12, 2018. URL: <http://edepot.wur.nl/29859>
- de Visser, P. H. B., Gerhard H., Buck-Sorlin, G. H., and van der Heijden. G. W. A. M. 2014. Optimizing illumination in the greenhouse using a 3D model of tomato and a ray tracer. *Frontiers in Plant Science* **5**: 1–7. doi:10.3389/fpls.2014.00048.
- Dornbusch, T., Wernecke, P., and Diepenbrock, W. 2007. A method to extract morphological traits of plant organs from 3D point clouds as a database for an architectural plant model. *Ecological Modelling* **200**: 119–129. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.07.028.
- El-Bendary, N., El Hariri, E., Hassanien, A. E., and Badr, A. 2015. Using machine learning techniques for evaluating tomato ripeness. *Expert Systems with Applications* **42**: 1892–1905. doi:10.1016/j.eswa.2014.09.057.
- エペ フォーヴェリンク. 2012. トマト オランダの多収技術と理論 (中野明正・池田英男訳). p. 133. 農山魚村文化協会. 東京.
- Falster, D. S., and Westoby, M. 2003. Leaf size and angle vary widely across species: What

- consequences for light interception? *New Phytologist* **158**: 509–525. doi:10.1046/j.1469-8137.2003.00765.x.
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2018: FAOSTAT\_data\_3-5-2020.csv. Retrieved March 5, 2020. URL: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Font, D., Pallejà, T., Tresanchez, M., Teixidó, M., Martínez, D., Moreno, J., and Palacín, J. 2014. Counting red grapes in vineyards by detecting specular spherical reflection peaks in RGB images obtained at night with artificial illumination. *Computers and Electronics in Agriculture* **108**: 105–111. doi:10.1016/j.compag.2014.07.006.
- 古山真一, 石神靖弘, 彦坂晶子, 後藤英司. 2017. 植物工場における異なる赤青光比および光強度下で育成した 赤系リーフレタスの株生産に必要な照明電力量の推定. *植物環境工学* **29**: 60-67.
- Gerland, P., Raftery, A. E., Ševčíková, H., Li, N., Gu, D., Alkema, L., Fosdick, B. K., et al. 2014. World Population Stabilization Unlikely This Century. *Science* **346**: 234–237. doi:10.1126/science.1257469.World.
- Gongal, A., Amatya, S., Karkee, M., Zhang, Q., and Lewis, K. 2015. Sensors and systems for fruit detection and localization: A review. *Computers and Electronics in Agriculture* **116**: 8–19. doi:10.1016/j.compag.2015.05.021.
- Hashimoto, A., Suehara, K., and Kameoka, T. 2012. Quantitative evaluation of surface color of tomato fruits cultivated in remote farm using digital camera images. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration* **5**: 18–23. doi:10.9746/jcmsi.5.18.
- Hayashi, S., Saito, S., Iwasaki, Y., Yamamoto, S., Nagoya, T., and Kano, K. 2011. Development of circulating-type movable bench system for strawberry cultivation. *Japan Agricultural Research Quarterly* **45**: 285–293. doi:10.6090/jarq.45.285.
- 早田一也・大川泰一郎・本林隆・平沢正. 2010. 葉身傾斜角度による水稻の個体群吸光係数の簡易評価法の検討. *日本作物学会紀事*. **79**: 174-183. doi:10.1626/jcs.79.174.
- Heuvelink, E. 1995. Effect of plant density on biomass allocation to the fruits in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Scientia Horticulturae* **64**: 193–201. doi:10.1016/0304-4238(95)00839-X.
- Heuvelink, E., Bakker, M. J., Elings, A., Kaarsemaker, R., and Marcelis, L. F. M. 2005. Effect of leaf area on tomato yield. *Acta Horticulturae* **691**: 43–50. doi:10.17660/ActaHortic.2005.691.2.
- 東出忠桐. 2018. 施設トマトの収量増加を目的とした受光と物質生産の関係の利用. *園芸学*

- 研究 **17**: 133–146. doi:10.2503/hrj.17.133.
- Hikosaka, K., and Hirose, T. 1997. Leaf angle as a strategy for light competition: Optimal and evolutionarily stable light-extinction coefficient within a leaf canopy. *Ecoscience*. **4**: 501–507. doi:10.1080/11956860.1997.11682429.
- Hikosaka, K., Nagashima, H., Harada, Y., and Hirose, T. 2001. A simple formulation of interaction between individuals competing for light in a monospecific stand. *Functional Ecology*. **15**: 642–646. doi:10.1046/j.0269-8463.2001.00557.x.
- 堀江武・桜谷哲夫. 1985. イネの生産の気象的評価・予測法に関する研究 (1) 個体群の吸収日射量と乾物生産の関係. *農業気象* **40**: 331–342. doi: 10.2480/agrmet.40.331.
- 星岳彦・安場健一郎・黒崎秀仁. 2016. 日本の施設園芸とユビキタス環境制御システムの現状と展望. *植物環境工学* **28**: 163–171. doi:10.2525/shita.28.163.
- Hosoi, F., Nakabayashi, K., and Omasa, K. 2011. 3-D modeling of tomato canopies using a high-resolution portable scanning lidar for extracting structural information. *Sensors* **11**: 2166–2174. doi:10.3390/s110202166.
- Hosoi, F., Nakai, Y., and Omasa, K. 2013. 3-D voxel-based solid modeling of a broad-leaved tree for accurate volume estimation using portable scanning lidar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **82**: 41–48. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.04.011.
- Hosoi, F., and Omasa, K. 2006. Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **44**: 3610–3618. doi: 10.1109/Tgrs.2006.881743.
- 細井文樹・大政謙次. 2014. 3次元リモートセンシングによる森林構造の計測と解析. *日本生態学会誌* **64**: 223–231. doi:10.18960/seitai.64.3\_223.
- 井上克哉. 2018. 高糖度トマト生産のための画像情報を用いた葉内水分状態の推定とかん水制御. 千葉大学大学院園芸学研究科修士論文.
- Isoda, A., Nojima, H., Takasaki, Y., Yoshimura, T., and Ishikawa, T. 1992. Radiation interception in field grown soybeans measured by integrated solarimeter films. *Japanese Journal of Crop Science* **61**: 124–130. doi:10.1626/jcs.61.124.
- Itakura, K., and Hosoi, F. 2019. Voxel-based leaf area estimation from three-dimensional plant images. *Journal of Agricultural Meteorology* **75**: 211–216. doi:10.2480/agrmet.D-19-00013.
- Itakura, K., and Hosoi, F. 2018. Automatic individual tree detection and canopy segmentation from

- three-dimensional point cloud images obtained from ground-based lidar. *Journal of Agricultural Meteorology* **74**: 109–113. doi:10.2480/agrmet.d-18-00012.
- Jacovides, C. P., Tymvios, F. S., Asimakopoulos, D. N., Theofilou, K. M., and Pashiardes, S. 2003. Global photosynthetically active radiation and its relationship with global solar radiation in the Eastern Mediterranean basin. *Theoretical and Applied Climatology* **74**: 227–233. doi:10.1007/s00704-002-0685-5
- Jiang, C., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ebihara, M., Nakaminami, A., and Maruo, T. 2017. Responses of leaf photosynthesis, plant growth and fruit production to periodic alteration of plant density in winter produced single-truss tomatoes. *Horticulture Journal* **86**: 511–518. doi:10.2503/hortj.OKD-060.
- 金子壮, 東出忠桐, 安場健一郎, 大森弘美, 中野明正. 2015. 収量構成要素の解析からみたトマト低段栽培における定植時の苗ステージと栽植密度. *園芸学研究* **14**: 163–170.
- 蔵田憲次・岡田益己・佐瀬勘紀. 1988. トマト群落の畝方位と直達光受光率-魚眼レンズ撮影による解析-. *農業気象* **44**: 15–22. doi: 10.2480/agrmet.44.15.
- 黒岩澄雄・門司正三. 1963. 植物群落における光要因と光合成の理論的解析(2) 吸光係数と光合成の日変化. *農業気象* **19**: 15–21. doi:10.2480/agrmet.19.15.
- Lati, R. N., Filin, S., and Eizenberg, H. 2013. Estimating plant growth parameters using an energy minimization-based stereovision model. *Computers and Electronics in Agriculture* **98**: 260–271. doi:10.1016/j.compag.2013.07.012.
- Lu, N., Maruo, T., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ito, Y., Ichimura, T., and Shinohara, Y. 2012. Effects of supplemental lighting within the canopy at different developing stages on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high density. *Environmental Control in Biology* **50**: 1-11. doi: 10.2525/ecb.50.1.
- Maamari, F., Fontoynt, M., Tsangrassoulis, A., Marty, C., Kopylov, E., and Sytnik, G. 2005. Reliable datasets for lighting programs validation-benchmark results. *Solar Energy* **79**: 213–215. doi:10.1016/j.solener.2004.12.003.
- Malik, M. H., Zhang, T., Li, H., Zhang, M., Shabbir, S., and Saeed, A. 2018. Mature tomato fruit detection algorithm based on improved HSV and watershed algorithm. *IFAC-PapersOnLine* **51**: 431–436. doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.183.
- 松岡瑞樹・福田直也. 2003. 養液栽培における高糖度トマト生産の研究：育苗培地と栽植密

- 度が収量・品質に及ぼす影響. 筑波大学農林技術センター研究報告 **16**: 25–35.
- McCree, K.J. 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology* **10**: 443–453. doi:10.1016/0002-1571(72)90045-3
- Monsi, M., and Saeki, T. 1953. Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany* **14**: 22–52.
- Monsi, M., and Saeki, T. 2005. On the factor light in plant communities and its importance for matter production. *Annals of Botany* **95**: 549–567. doi:10.1093/aob/mci052.
- Monteith, J. L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* **281**: 277–294. doi: 10.1098/rstb.1977.0140.
- Montero, F. J., De Juan, J. A., Cuesta, A., and Brasa, A. 2000. Nondestructive methods to estimate leaf area in *Vitis vinifera* L. *HortScience* **35**: 696–698. doi:10.21273/hortsci.35.4.696.
- 村井美郷. 2020. トマト生育モデルを用いた温室内環境制御技術の開発. 千葉大学大学院園芸学研究科修士論文.
- 中西美一. 2016. 温室環境管理における ICT 活用. 電気設備学会誌 **36**: 708–711. doi:10.14936/ieiej.36.708.
- ナッパーランドホームページ. アクセス日: 2021 年 1 月 11 日.  
URL: <http://www.napperland.net/napper/jirei.html>
- 農林水産省. 2020. 施設園芸をめぐる情勢. index-18.pdf. アクセス日: 2021 年 1 月 6 日  
URL: <https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/attach/pdf/index-18.pdf>
- 大橋雄太. 2016. レイトレーサー法を用いた温室におけるキュウリ群落の光環境の推定. 千葉大学大学院園芸学研究科修士論文.
- 大石直記. 2016. 散乱光センサによるトマト葉面積指数の非破壊評価. 植物環境工学 **28**: 125–132. doi:10.2525/shita.28.125.
- 大森渉. 2018. 大規模温室におけるトマトの生育・栽培環境・管理作業・資源エネルギーの統合モデルの開発. 千葉大学大学院園芸学研究科修士論文.
- 大森弘美・黒崎秀仁・岩崎泰永・高市益行. 2015. トマト低段密植栽培における果房収穫システムの開発 (第 1 報). 農業食料工学会誌 **77**: 113–121. doi: 10.11357/jsamfe.77.2\_113.
- Papadopoulos, A. P., and Ormrod, D. P. 1990. Plant spacing effects on yield of the greenhouse tomato *athanasios*. *Canadian Journal of Plant Science* **71**: 297–304. doi:10.4141/cjps91-040.
- Papadopoulos, A. P., and Ormrod, D. P. 1991. Plant spacing effects on growth and development of the

- greenhouse tomato. *Canadian Journal of Plant Science* **71**: 297–304. doi:10.4141/cjps91-040.
- Papadopoulos, A. P., and Ormrod, D. P. 1988a. Plant spacing effects on light interception by greenhouse tomatoes. *Canadian Journal of Plant Science* **68**: 1197–1208. doi:10.4141/cjps88-149.
- Papadopoulos, A. P., and Ormrod, D. P. 1988b. Plant spacing effects on photosynthesis and transpiration of the greenhouse tomato. *Canadian Journal of Plant Science* **68**: 1209–1218. doi:10.4141/cjps88-150.
- Papadopoulos, A. P., and Pararajasingham, S. 1997. The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.): A review. *Scientia Horticulturae* **69**: 1–29. doi:10.1016/S0304-4238(96)00983-1.
- Puttemans, S., Vanbrabant, Y., Tits, L., and Goedemé, T. 2017. Automated visual fruit detection for harvest estimation and robotic harvesting. 2016 *6th International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications, IPTA 2016*: 1–6. doi:10.1109/IPTA.2016.7820996.
- Quan, Q., Lanlan, T., Xiaojun, Q., Kai, J., and Qingchun, F. 2017. Selecting candidate regions of clustered tomato fruits under complex greenhouse scenes using RGB-D data. *2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics, ICCAR 2017*: 389–393. doi:10.1109/ICCAR.2017.7942724.
- Rose, J. C., Paulus, S., and Kuhlmann, H. 2015. Accuracy analysis of a multi-view stereo approach for phenotyping of tomato plants at the organ level. *Sensors* **15**: 9651–9665. doi:10.3390/s150509651.
- Rose, J. C., Kicherer, A., Wieland, M., Klingbeil, L., Töpfer, R., and Kuhlmann, H. 2016. Towards automated large-scale 3D phenotyping of vineyards under field conditions. *Sensors* **16**: 1–25. doi:10.3390/s16122136.
- Rothan, C., Diouf, I., and Causse, M. 2019. Trait discovery and editing in tomato. *Plant Journal* **97**: 73–90. doi:10.1111/tpj.14152.
- 斎藤哲. 2018. 拡散性被覆資材を用いた温室のレイトレーザー法による光環境シミュレーション. 千葉大学園芸学部園芸学科卒業論文.
- Sameshima, R. 1995. Estimating the absorptivity of solar radiation in soybean canopies for use in crop models. *Journal of Agricultural Meteorology* **51**: 37–45.
- Sarlikioti, V., De Visser, P. H. B., Buck-Sorlin, G. H., and Marcelis, L. F. M. 2011. How plant architecture affects light absorption and photosynthesis in tomato: Towards an ideotype for plant

- architecture using a functionalstructural plant model. *Annals of Botany* **108**: 1065–1073. doi:10.1093/aob/mcr221.
- Serôdio, C., Boaventura Cunha, J., Morais, R., Couto, C., and Monteiro, J. 2001. A networked platform for agricultural management systems. *Computers and Electronics in Agriculture* **31**: 75–90. doi:10.1016/S0168-1699(00)00175-7.
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., and Taheri, S. 2018. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics* **32**: 287–302. doi:10.1515/intag-2017-0005.
- 高田幸枝・小峯裕己・増尾渉・望月悦子・木村洋. 2008. 昼光利用による照明用エネルギー削減効果の検討方法に関する研究：(第1報) 室内昼光照度分布シミュレーションプログラムの精度検証. 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集：2227–2230. doi:10.18948/shasetaikai.2008.3.0\_2227.
- 田中淳一. 2011. チャ品種・系統における葉身傾斜角度と収量性との関係. 育種学研究 **13**: 89–98. doi:10.1270/jsbbr.13.89.
- 谷野耕. 2017. レイトレーサー法を用いた温室内のトマト群落の光環境の推定. 千葉大学園芸学部園芸学科卒業論文.
- Tazuke, A., and Sakiyama, R. 1986. Effect of Fruit Temperature on the Growth of Cucumber Fruits. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* **55**: 62–68. doi:10.2503/jjshs.55.62.
- Teixidó, M., Font, D., Pallejà, T., Tresanchez, M., Nogués, M., and Palacín, J. 2012. Definition of linear color models in the RGB vector color space to detect red peaches in orchard images taken under natural illumination. *Sensors* **12**: 7701–7718. doi:10.3390/s120607701.
- Tewelde, F. T., Lu, N., Shiina, K., Maruo, T., Takagaki, M., Kozai, T., and Yamori, W. 2016. Nighttime supplemental LED inter-lighting improves growth and yield of single-truss tomatoes by enhancing photosynthesis in both winter and summer. *Frontiers in Plant Science* **7**: 1–10. doi:10.3389/fpls.2016.00448.
- Thimijan, R. W., Heins, R. D., Thimijan, R. W., and Heins, R. D. 1983. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure a review of procedures for interconversion. *HortScience* **18**: 818–820.
- 鳥居大貴. 2020. 温室におけるレイトレーサー法を用いたトマト群落光合成速度の推定と温

- 室骨材が群落受光量 に及ぼす影響の解析. 千葉大学園芸学部園芸学科卒業論文.
- 津村柊吾. 2018. 画像計測による温室内トマトの生育モニタリング技術の開発. 千葉大学大学院園芸学研究科修士論文.
- Ureña, R., Rodríguez, F., and Berenguel, M. 2001. A machine vision system for seeds quality evaluation using fuzzy logic. *Computers and Electronics in Agriculture* **32**: 1–20. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00150-8.
- van Os, E.A., van Zuijdam, R.P., Hendrix, A.T.M., and Koch, V.J.M. 1993. a Moving Fruit Vegetable Crop. *Acta Horticulturae* **342**: 69–76. doi:10.17660/actahortic.1993.342.8
- Vos, J., Evers, J. B., Buck-Sorlin, G. H., Andrieu, B., Chelle, M., and de Visser, P. H. B. 2010. Functional-structural plant modelling: A new versatile tool in crop science. *Journal of Experimental Botany* **61**: 2101–2115. doi:10.1093/jxb/erp345.
- 渡邊慎一・中野有加・岡野邦夫. 2001. 積算日射計測フィルムを用いた果菜類の個葉受光量の簡易測定. *生物環境調節* **39**: 121–125. doi: 10.2525/ecb1963.39.121.
- 矢口裕明・長谷川貴巨・長濱虎太郎・稲葉雅幸. 2018. 収穫装置と視覚認識に着目したトマト自動収穫ロボットの構成法. *日本ロボット学会誌* **36**: 693–702. doi:10.7210/jrsj.36.693.
- Yamamoto, K., Guo, W., Yoshioka, Y., and Ninomiya, S. 2014. On plant detection of intact tomato fruits using image analysis and machine learning methods. *Sensors* **14**: 12191–12206. doi:10.3390/s140712191.
- 吉岡宏・高橋和彦. 1981. 果菜類における光合成産物の動態に関する研究 (5). *野菜試験場報告* **9**: 63–81.
- Zhang, Y., Teng, P., Aono, M., Shimizu, Y., Hosoi, F., and Omasa, K. 2018. 3D monitoring for plant growth parameters in field with a single camera by multi-view approach. *Journal of Agricultural Meteorology* **74**: 129–139. doi:10.2480/agrmet.D-18-00013.
- Zhao, Y., Gong, L., Zhou, B., Huang, Y., and Liu, C. 2016. Detecting tomatoes in greenhouse scenes by combining AdaBoost classifier and colour analysis. *Biosystems Engineering* **148**: 127–137. doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.05.001.
- Zhou, S., Liu, X., Wang, C., and Yang, B. 2020. Non-iterative denoising algorithm based on a dual threshold for a 3D point cloud. *Optics and Lasers in Engineering* **126**: 105921. doi:10.1016/j.optlaseng.2019.105921.

## 謝辞

本研究の遂行ならびに論文の執筆にあたり、公使にわたりご指導およびご鞭撻を賜りました主指導教員である後藤英司教授に謹んで感謝申し上げます。また本論文の審査をしていただいた主査の椎名武夫教授、同じく副査の松岡延浩教授、彦坂晶子准教授、浄閑正史准教授には、博士論文執筆のための有益なご助言およびご意見をいただき、心より御礼申し上げます。

彦坂晶子准教授には、学位審査だけでなくゼミ等を通して特に植物の生理生態学的な側面から、数多くのご助言を頂戴しましたこと、深く御礼申し上げます。石神靖弘元助教（現高崎健康福祉大学農学部准教授）には、研究テーマの核となるシミュレーションに関する手法について、的確なご指導を頂戴しましたこと、深く御礼申し上げます。吉田英生助教には、日々の研究活動を通して、異なる視点から数多くの貴重なご助言を頂き、深く感謝申し上げます。

大学院生・学部生として本研究に携わった村井美郷氏、鳥居大貴氏、高橋想平氏には深く御礼申し上げます。最後に、数多くの有益なご意見およびご助言を頂きました環境調節工学研究室の皆様に、厚く感謝申し上げます。