

光合成と着果負担を指標とした促成ピーマンの CO₂濃度および 日中温度管理技術

篠田翔真・永尾航洋*・野村浩一**・但田育直**・山崎浩実

CO₂ concentration and daytime temperature management techniques for forced bell
pepper cultivation based on photosynthesis and fruit load as indicators

Shoma SHINODA, Kouyou NAGAO, Koichi NOMURA, Ikunao TADA and Hiromi YAMASAKI

要 約

促成ピーマン栽培において、個葉光合成モデル(FvCB モデル)のパラメータの取得と、着果負担に基づく CO₂濃度および日中温度管理技術について検討した。光合成蒸散測定装置を用いてモデルパラメータ(最大カルボキシル化速度 V_{cmax} および最大電子伝達速度 J_{max})を推定し、推定光合成速度と実測光合成速度間で高い相関関係($R^2=0.77$, $\text{RMSE}=3.13$)を得た。1果実当たりの光合成量が0.5gを下回る期間を着果負担が大きいと判断し、この期間に日中温度28.5℃、CO₂濃度650ppmで管理する光合成促進管理を実施した結果、全栽培期間で対照区より15%の増収効果が得られた。推定日積算光合成量は、日射量の少ない11~2月期間で対照区比115%、3月以降で120%となった。CO₂施用の灯油代は89%増加したものの、売上げは15%増加したため、差し引きで13%の収益向上となった。

キーワード：ピーマン、FvCB モデル、着果負担、光合成促進管理、データ駆動型農業

はじめに

高知県は、2023年産の全国ピーマン生産量において第3位を占める重要な産地であり¹⁸⁾、ピーマンは県内で系統販売金額第5位の主要品目として位置づけられている¹¹⁾。しかしながら、生産者の高齢化による将来的な生産者数の減少が予想されるなか、販売額の維持・拡大を図るためには、単位面積当たりの収益性向上と安定生産技術の確立が急務となっている。近年、増収技術として炭酸ガス(以下、CO₂)施用を始めとする環境制御技術が注目され、促成ピーマン栽培においても広く導入が進んでいる。国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構(以下、農研機構)の報告によると、イチゴ促成栽培における局所CO₂施用技術により、全体施用と比較して22%の増収効果と27%の燃油使用量削減が同時に実現されており、環境制御技術の導入による生産効率性向上の可能性が実証されている¹⁷⁾。

安定した収量と品質を得るためには、光合成、蒸散、葉面積、葉温、着果負担などの植物の生理生態情報に基づく科学的な栽培管理が必要である。Farquhar et al. (1980)⁴⁾により提唱されたFvCBモデルは、植物の光合成メカニズムを生化学的に記述するモデルとして広く用いられており、CO₂濃度や温度などの環境要因が光合成に与える影響を定量的に評価することが可能である²⁰⁾。ピーマンにおいても、Kim et al. (2016)⁹⁾により3次元光線追跡シミュレーションと組み合わせたFvCBモデルの適用例が報告されており、群落内の光合成パラメータの垂直分布を高精度で予測することに成功している。

しかしながら、現状では生理生態情報の可視化やそれらを活用した栽培管理についての研究事例は限定的であり、生産現場における栽培管理の判断は依然として生産者の経験と勘に大きく依存している。農林水産省の新規就農者調査による

*現安芸農業振興センター

**高知大学 IOP 共創センター

と、新規就農者が就農時に困難を感じる要因として「農地の確保」、「資金の確保」に次いで「営農技術の習得」が挙げられており²³⁾、篤農家の知識や技術の体系化・継承が重要な課題となっている。このような背景から、生産者の経験則に依存した従来の栽培管理から、定量化された生理生態情報に基づく科学的な栽培管理手法への転換が必要である。

高知県では、内閣府地方大学・地域産業創生交付金事業による産学官連携プロジェクト「『IoP(Internet of Plants)』」が導く「Next 次世代型施設園芸農業」への進化」に平成30年から取り組んでおり、IoTやAI技術を統合した次世代施設園芸システムの開発が進められている¹⁰⁾。同プロジェクトでは、促成ナス栽培において光合成速度や花数・果実数といった生理生態情報の可視化が実現され、データ駆動型農業による収量・品質向上の可能性が確認されている。

以上の背景を踏まえ、本研究では試験1として、促成ピーマンの個葉光合成の可視化に向け、モデルパラメータの取得と推定精度の検証を行った。具体的には、FvCBモデルに基づく光合成パラメータの同定と、実際の栽培環境下での光合成速度の推定精度を評価した。また、試験2として、可視化された光合成速度と着果数といった生理生態情報を活用したCO₂施用濃度および日中温度管理が生育、収量および経済性に及ぼす影響について評価した。本研究は内閣府地方大学・地域産業創生交付金「『IoP(Internet of Plants)』」が導く「Next 次世代型施設園芸農業」への進化」の助成を受けて実施した。

材料および方法

試験1. 個葉光合成モデルパラメータの取得と推定精度の検証

1) 個葉光合成モデルの概要

個葉光合成速度(以下、光合成速度)は、FvCBモデルを基本とし、気孔コンダクタンスモデル¹³⁾、物質移動モデル⁵⁾、および葉面エネルギー収支モデル⁷⁾を結合した統合モデルを用いて推定した。本モデルでは、光合成光量子束密度(以下、PPFD)、CO₂濃度、気温、湿度を入力変数として、RuBP再生に律速される場合の光合成速度とRubiscoによる酵素反応に律速される場合の光合成速度の小さい方を、実現される純光合成速度とする。詳細な計算手順は、Nomura et al. (2023)¹⁶⁾お

また、気孔コンダクタンスモデルのパラメータg₀とg₁は、光合成速度とPPFDの関係から推定した。測定条件は、CO₂濃度400ppm、チャンバー内湿度を60%、葉温を25℃に設定した後、PPFDを500μmol/m²/sに設定し光合成速度が安定してから、PPFDを1,500, 1,000, 750, 500, 250, 100, 50, 0μmol/m²/sの順に変化させ、8分間隔で測定した。得ら

よびNagao et al. (2025)¹⁵⁾に従った(表1)。

2) 試験ほ場および耕種概要

高知県農業技術センター(以下、高農技セ)内の土耕ピーマン栽培ほ場で実施し、供試品種には、「みおぎ」を穂木とし、台木を「台助」として8月末から翌年6月末までの促成栽培とした。

栽植密度は1.85株/m²の2条2本仕立てとし、10月中旬～11月下旬に地上100～130cmの高さで摘心した。側枝は主枝から20cm(5節程度)まで着果させ、収穫後に2～3節に切り戻した。かん水は、うね面から深さ20cmに設置したpFメータ(DIK-8333, 大起理化工業(株))の値が1.8を超えた場合に1日当たり3～5t/10aを複数回に分けてかん水した。追肥は窒素成分で1.5kg/10aを1週間に1回行った。ハウス内の温度管理は、日中は25～28℃を目標に換気し、夜間は18℃を下回らないように加温した。飽差管理は、ハウス内の飽差値が6.0g/m³を越えた場合に細霧装置(Cool BIM, (株)いけうち)により加湿した。CO₂施用は灯油燃焼式炭酸ガス施用機(真呼吸, (株)誠和)を用いて、時期によって設定を違え、450～650ppmの設定値を下回った場合に、株元に設置したダクトから施用した。

3) 調査内容および方法

FvCBモデルと気孔コンダクタンスモデルには同定する必要がある複数のパラメータが含まれており、本研究では、4つのパラメータ(V_{max}, J_{max}, g₀およびg₁)は、葉のガス交換測定に基づいて推定し、他のパラメータ(K_c, K, Γ*, α, β, θおよびΦ_{max})については文献値²⁶⁾を使用した。

V_{max}(最大カルボキシル化速度)とJ_{max}(最大電子伝達速度)は、光合成蒸散測定装置(LI6800, LI-COR社)を使用して光合成速度、葉内CO₂濃度等を測定し、その関係から推定した。測定は、PPFDを1500μmol/m²/s、チャンバー内相対湿度を60%に設定した上で、CO₂濃度を400, 200, 100, 50, 400, 550, 700, 900, 1,200, 1,500ppmの順に変化させ、20～40℃の異なる葉温で実施した。得られた光合成速度と葉内CO₂濃度の関係から、表1の式(2)と式(3)を用いて、未知のパラメータV_{max}とJ_{max}を推定した。推定では、葉内CO₂濃度400ppmまでをRubisco律速域とみなし、400ppm以上をRuBP再生律速域としてパラメータを決定した。

れたデータから、式(9)を用いて水蒸気に対する気孔コンダクタンス(g_{sw})と生理学的指標(1.6AL/Cs√DL)の関係を線形回帰してg₀とg₁を推定した。

測定部位は群落上部の開花期から果実長1cm程度までの发育段階にある果実もしくは花の基部に着生する完全に展開した健全葉3～4枚を選定した。また、複数月にわたって

表1 個葉光合成速度の推定に適用される生理生態学的モデル

	モデル式	式	参考文献
個葉光合成モデル	$A_L = \min(A_c, A_j)$	(1)	Farquar et al.(1980)
	$A_c = V_{cmax}(C_i - \Gamma^*) / \{C_i + K_c(1 + O / K_o)\} - R_d$	(2)	Farquar et al.(1980)
	$A_j = J(C_i - \Gamma^*) / (4C_i + 8\Gamma^*) - R_d$	(3)	Farquar et al.(1980)
	$J = \{I_2 + J_{max} - \sqrt{(I_2 + J_{max})^2 - 4I_2 J_{max} \theta}\} / 2\theta$	(4)	vonCaemmerer(1980)
	$I_2 = \alpha\beta\phi_{max}I$	(5)	vonCaemmerer(1980)
葉面の物質輸送方程式	$A_L = g_{ac}(C_a - C_s)$	(6)	Gaastra(1959)
	$A_L = g_{sc}(C_s - C_i)$	(7)	Gaastra(1959)
	$E_L = (g_{aw}^{-1} + g_{aw}^{-1})^{-1}(W_s(T_L) - W_a)$	(8)	Gaastra(1959)
気孔コンダクタンス	$g_{sw} = g_0 + 1.6(1 + g_1/\sqrt{D_L})A_L / C_s$	(9)	Medlyn et al.(2011)
葉の熱収支式	$R_{abs} - \epsilon_L \sigma_{SB} T_L^4 - H - \lambda E_L = 0$	(10)	Jones(2013)
V_{cmax} 、 J_{max} の温度依存性	$p_{T_L} = p_{25} \exp\left\{c - \frac{\Delta H_a}{RT_L}\right\} / \left\{1 + \frac{\exp(\Delta ST_L - \Delta H_d)}{RT_L}\right\}$	(11)	Bernacchi et al.(2003)
R_d の温度依存性	$p_{T_L} = p_{25} \exp\left\{c - \frac{\Delta H_a}{RT_L}\right\}$	(12)	Bernacchi et al.(2003)
Γ^* 、 K_c 、 K_o の温度依存性	$p_{T_L} = \exp\left\{c - \frac{\Delta H_a}{RT_L}\right\}$	(13)	Bernacchi et al.(2003)

注) A_c :ルビスコ律速時の個葉光合成速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 A_j :RuBP律速時の個葉光合成速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 A_L :個葉光合成速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 c :葉の温度依存性パラメータのスケール係数、 C_a :外気CO₂濃度($\mu\text{mol mol}^{-1}$)、 C_i :葉内CO₂濃度($\mu\text{mol mol}^{-1}$)、 C_s :葉面CO₂濃度($\mu\text{mol mol}^{-1}$)、 D_L :葉面飽差(kPa)、 E_L :個葉蒸散速度($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 g_{ac} :CO₂に対する葉面境界層コンダクタンス($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 g_{aw} :H₂Oに対する葉面境界層コンダクタンス($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 g_{sc} :CO₂に対する気孔コンダクタンス($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 g_{sw} :H₂Oに対する気孔コンダクタンス($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 g_0 :気孔コンダクタンスモデルのy切片($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 g_1 :気孔コンダクタンスモデルの傾き(kPa^{0.5})、 H :葉の顕熱(W m⁻²)、 ΔH_a :葉の温度依存性葉パラメータの活性化エネルギー(Jmol⁻¹)、 ΔH_d :葉の温度依存性葉パラメータの非活性化エネルギー(Jmol⁻¹)、 I :光合成有効量子束密度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 I_2 :光化学系IIで吸収される光子束密度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 J :電子伝達速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 J_{max} :最大電子伝達速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 K_c :ルビスコのカルボキシル化におけるミカエリスメンテン定数($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 K_o :ルビスコの酸素化におけるミカエリスメンテン定数、($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 O :葉内酸素濃度(mmol mol^{-1})、 p_{T_L} : T_L の時の葉パラメータ、 p_{25} :25℃の時の葉パラメータ、 R :気体定数(8.31JK⁻¹mol⁻¹)、 R_{abs} :吸収された放射量(Wm⁻²)、 R_d :日中の呼吸速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 ΔS :温度依存性葉パラメータのエントロピー項(Jmol⁻¹K⁻¹)、 T_L :葉温(K)、 V_{cmax} :最大カルボキシル化速度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 W_a :空気中の水蒸気濃度(mmol mol^{-1})、 $W_s(T_L)$: T_L での飽和水蒸気濃度(mmol mol^{-1})、 α :葉の吸光率(0.84)、 β :光化学系IIに到達する光の割合(0.5)、 Γ^* :ミトコンドリア呼吸を無視した場合のCO₂補償点($\mu\text{mol mol}^{-1}$)、 ϵ_L :葉の放射率、 θ :経験的な曲率係数(0.7)、 λ :水の蒸発時の潜熱(0.0442Jmmol⁻¹at20℃)、 σ_{SB} :ステファンボルツマン係数($5.67 \times 10^{-8}\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)、 ϕ_{max} :光化学系IIの最大量子収率(0.85)

測定したため、常時同じ群落の上部で直達光が当たる同じ葉齢の葉を対象とした。

さらに、モデル推定値の検証のため、実際の栽培環境下での光合成速度を測定した。測定には光合成蒸散測定装置の外光透過型リーフチャンバー(6800-12A, LI-COR社)を使用し、ハウス内の自然光条件下で実施した。

V_{cmax} と J_{max} を推定するための測定は2020年4月4日,9月29日,10月28日,2021年1月26日,3月9日,2024年2月7日に行い、 g_0 と g_1 は、2022年12月8日、実測値は2023年2月1日,3月5日,2025年4月9日,5月22日に行った。

試験2. 生理生態情報を活用したCO₂濃度および日中温度管理が生育、収量および経済性に及ぼす影響

1) 試験ほ場および耕種概要

高農技セ内に設置した隣接する2棟のSRHハウス(軒高2.8m, 間口7.5m, 奥行き20m, エフクリーンナジジフィルム展張)において土耕栽培で行った。

2023年8月31日に9cmポット苗をうね幅180cm, 株間60cm, 条間20cmの2条植え(栽植密度1.85株/m²)で定植した。主枝は2本仕立てとし、11月中旬から下旬に地上130cmの高さで摘心した。側枝は、主枝から20cm(5節程度)まで着果させ、収穫後に2〜3節に切り戻した。収穫開始は9月下旬で、1果重28〜40gを目安に週3回、翌年6月下旬まで収穫した。かん水管理および追肥、飽差管理は試験1と同様とした。

2) 試験区の設定

着果負担の程度に応じて日中温度およびCO₂濃度を調整する光合成促進管理区と、慣行管理を行う対照区を設定した。

光合成促進管理区では、以下の基準により管理条件を変更した。1週間ごとに果実長1 cm以上の果実数を各ハウス6株（計12主枝）で計測し、単位面積当たりの着果数を算出した。ついで、試験1より得られたパラメータを使用し、ハウス内の環境より推定された日積算光合成量の1週間平均値を算出し、 m^2 当たりの着果数で除して1果実当たりの光合成量を算出した。摘心前後の11月8日から翌年4月30日までの期間に1果実当たりの光合成量が0.5gを下回った場合を着果負担が大きいとみなして、ハウス内の温度が29℃を越えないよう換気設定温度28.5℃にし、日中は23℃から換気開始温度まで5%開度でスカシ換気した。さらに、 CO_2 濃度は650ppmを目標に管理した（表2、図1）。なお、光合成促進管理を実施しない期間および対照区は日中の換気設定温度は26.5℃、 CO_2 濃度は450ppmを目標に管理した（表2）。

表2 換気温度および CO_2 濃度の設定

試験区	換気温度		CO_2 濃度
	スカシ換気	換気開始	
光合成促進管理区	23℃	28.5℃	650ppm
対照区	23℃	26.0℃	450ppm

注) 日中は23℃から換気開始温度まで5%開度でスカシ換気した。

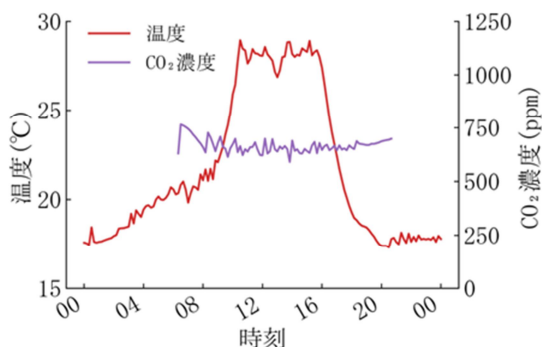


図1 光合成促進管理区における温度と CO_2 濃度の推移（10分平均）

注1) 測定日：2024年2月14日 晴天日

2) 日中は23℃から換気設定温度(28.5℃)まで天窓を5%開度でスカシ換気した。

3) CO_2 の施用時間は6時30分から17時30分までとした。

また、光合成促進管理の判断基準となる1果実当たりの光合成量は前年度のA品率と1果実当たりの光合成量との関係分析より、A品率90%以下となるケースがあった0.5gを基準値とした（図2）。

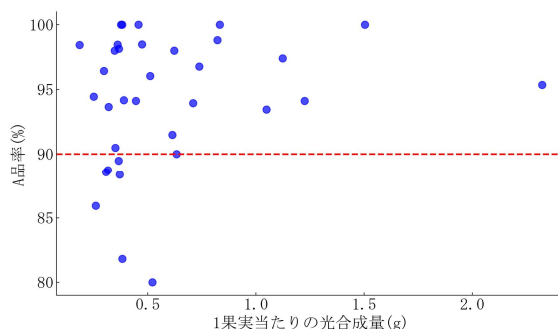


図2 1果実当たりの光合成量とA品率の分布

注1) 1果実当たりの光合成量は収穫時から2週間前の値とした。

2) A品率はJA高知県出荷規格のA品の割合とした。

3) 2022年9月29日から2023年6月2日の期間のデータを使用。

3) 調査内容および方法

環境測定は、温度、湿度、 CO_2 濃度、屋外日射量について環境制御装置(EyeFarm Cloud、(株)Nippo)より1分間隔のデータを収集した。ハウス内の環境測定は各ハウスの中央部、地上高130 cm(摘心位置付近)で実施した。なお、光合成速度の推定には屋外日射量とハウス内日射量の測定結果をもとに算出したフィルムの透過率0.8を屋外日射量に乗じてハウス内日射量を算出した。

生育調査は、1週間毎に開花数と着果数を6株調査した。また、2～3日ごとにその日もしくは前日に開花した花に開花日を記した提げ札を付けるとともに、1果重28～40gを目安に収穫し、収穫時に提げ札を回収する方法で開花から収穫までの所要日数(以下、収穫所要日数)および落花数を調査した。収穫所要日数および落花数は、3株調査とした。

収量・品質調査は、2～3日ごとに1果重28～40gを目安に収穫し、収穫した果実は、JA高知県出荷規格に従って可販品(A品・マルA品をそれぞれ上品・下品とする)および規格外品に分け、可販果収量、上品収量および上品率を求めた。下品および規格外品は着色不良果(白果、赤果)、変形果(曲がり果、奇形果)、細果、短径果、その他(石果、傷果等)に分類した。なお、収量・品質調査は、開花数・着果数調査と同一の6株について実施した。

結 果

試験1. 個葉光合成モデルパラメータの取得と推定精度の検証

V_{max} は、測定範囲である20～40℃において温度上昇とともに継続的に増加し、40℃で $257.9 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ に達した。一方、 J_{max} は35℃でピーク値 $307.3 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ に達し、40℃ではわずかに低下する傾向が認められた（図3）。時期ごとには、4月および9月に V_{max} が最も高くなり、4月に J_{max} が最も高くなった。

(図4)．気孔コンダクタンスモデルのパラメータは、水蒸気に対する気孔コンダクタンス(g_{sw})と環境・生理指標($1.6A_L/C_s\sqrt{D_L}$)の線形関係から決定した(図5)．回帰分析の結果、 y 切片 $g_0 = 0.08$ 、傾き $g_1 = 3.74$ が得られ、決定係数は $R^2 = 0.75$ であった．同定されたパラメータを用いたFvCBモデルによる光合成速度の推定値と、実際の栽培環境下での実測値を比較した結果、高い相関関係が認められた($R^2=0.77$, $RMSE=3.13$) (図6, 表3)．

試験2. 生理生態情報を活用したCO₂濃度および日中温度管理

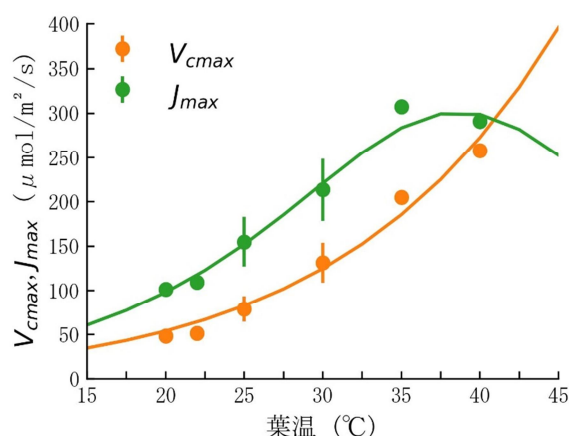


図3 V_{cmax} および J_{max} の葉温依存性

- 注1) V_{cmax} および J_{max} は、20～40℃で測定した複数の葉温における光合成速度とCO₂濃度との関係から推定した．
2) エラーバーは標準誤差

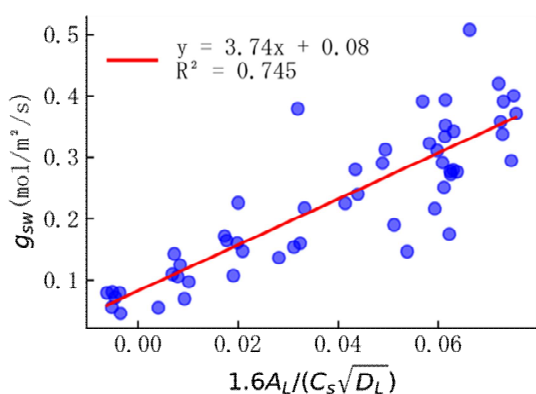


図5 気孔コンダクタンスパラメータ(g_0 と g_1)の推定

- 注) g_0 および g_1 は、水蒸気に対する気孔コンダクタンス(g_{sw})と環境・生理指標($1.6A_L/C_s\sqrt{D_L}$)との関係から推定した(A_L : 葉の光合成速度, C_s : 葉面でのCO₂濃度, D_L : 葉面飽差)．

が生育、収量および経済性に及ぼす影響

光合成促進管理は、1果実当たりの光合成量が0.5gを下回った期間に実施した．具体的には、2023年11月8日から12月6日、12月20日から12月27日、2024年1月3日から2月14日、2月21日から3月13日および3月20日から5月1日において、日中温度28.5℃、CO₂濃度650ppmを目標に管理した．光合成促進管理での温度およびCO₂濃度の推定値を使用した光合成シミュレーションの結果、光合成速度が対照区比122%の増加となった(表4)．

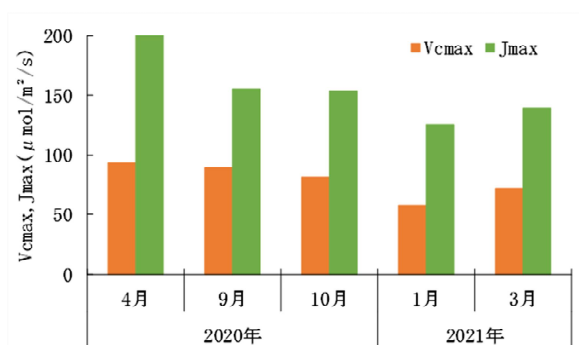


図4 葉温25℃における V_{cmax} および J_{max} の時期ごとの推移

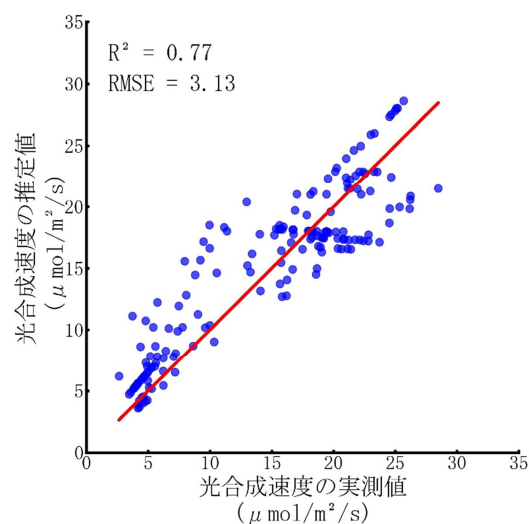


図6 光合成速度の実測値と推定値の関係

- 注1) 光合成速度の推定には表3のパラメータを使用して推定した．
2) 光合成速度の実測は自然光チャンバーを用いて、ハウス内の環境に合わせて以下の条件で測定した．
(1) 温度 : 25～29℃ (2) 相対湿度 : 55～80%
(3) CO₂濃度 : 610～800ppm

表3 光合成速度の推定に利用するパラメータ

パラメータ	説明	25℃での値	C	Dha(J/mol)	DHd(J/mol)	DS(J/mol/K)
$V_{cmax}(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	最大カルボキシル化速度	78.628	25.143	62237	-	-
$J_{max}(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	光飽和時の最大電子伝達速度	152.630	23.000	57091	314833	999.99
$R_d(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	ミトコンドリア呼吸速度	1.179	18.720	46390	-	-
$K_c(\mu\text{mol mol}^{-1})$	CO_2 に対するミカエリス定数	404.900	38.050	79430	-	-
$K_o(\text{mmol mol}^{-1})$	O_2 に対するミカエリス定数	278.400	20.300	36380	-	-
$\Gamma^*(\mu\text{mol mol}^{-1})$	ミトコンドリア呼吸を無視したときの CO_2 補償点	42.750	19.020	37830	-	-
Φ_{max}	光化学系IIの最大量子吸収率	0.85	-	-	-	-
β	光化学系IIへ吸収される光の割合	0.5	-	-	-	-
α	葉の光吸収率	0.85	-	-	-	-
θ	電子伝達速度曲線(表1の式(4))の凸度	0.7	-	-	-	-
g_0	気孔コンダクタンスモデル(Medlynモデル)のy切片	0.082	-	-	-	-
$g_1(\text{kPa}^{0.5})$	気孔コンダクタンスモデル(Medlynモデル)の傾き	3.744	-	-	-	-

注) V_{cmax} , J_{max} , R_d , K_c , K_o , および Γ^* は温度依存性を持つため、25℃でのパラメータ値と、それらの温度依存性を記述する従属パラメータを表記した(C: スケーリング定数, Dha: 活性化エネルギー, DHd: 不活性化エネルギー, DS: エントロピー。)

表4 ハウス内環境が光合成速度に及ぼす影響(光合成シミュレーション)

	温度 (℃)	CO_2 濃度 (ppm)	光合成速度 ($\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$)	対比
対照管理	26	450	21.4	100
高め温度管理	28	450	21.6	101
高 CO_2 施用管理	26	650	25.1	117
高 CO_2 施用と 高め温度管理	28	650	26.2	122

注1) 光合成速度は以下の条件でシミュレーションした。

(1)PPFD: $800\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ (2)相対湿度: 65%

2) 対比は対照管理を100とした場合の指数。

ハウス内環境は光合成促進管理区では、処理期間中の日中平均温度が対照区より1.0-1.5℃高く、 CO_2 濃度が約200ppm高く維持された。日積算光合成量の推定値は、日射量の少ない11～2月期間で対照区比115%、日射量が増加する3月以降で対照区比120%となった。日中飽差は11月にやや高く、それ以外の月では同様な推移を示した。屋外日射量は両区で同様な推移を示した(図7)。

開花数は11月上旬から2月下旬まで両区で同様に推移し、3月上旬から4月上旬にかけて光合成促進管理区で対照区より10-15%多く推移した。落花率は、処理開始直後の11月下旬から12月中旬にかけて光合成促進管理区で対照区より20%程度低くなった。2月中旬以降は両区で同等または光合成促進管理区でやや高く推移した。着果数は11月上旬まで両区で同等であったが、処理期間中は光合成促進管理区で対照区より5-

10%多く推移した(図8)。

収穫所要日数は月により異なる傾向を示した。12月は光合成促進管理区で対照区より7日長く、4月は4日長く、6月は5日長くなった。その他の月は両区で同様であった(図9)。

A品率は11月に光合成促進管理区で対照区より3%低く、2月に2%、3月に4%高くなった。その他の月は両区で同様に推移し、全期間の平均は両区とも85%であった(図10)。可販果収量は、12～3月期で光合成促進管理区が対照区より17%多く、4～6月期で18%多くなった。全栽培期間では光合成促進管理区が対照区より15%多かった(図11)。

売上げは光合成促進管理区で対照区より15%多かった。 CO_2 施用に要する灯油代は光合成促進管理区で対照区より89%多くなった。売上げから灯油代を差し引いた値は光合成促進管理区で対照区より13%多かった(表5)。

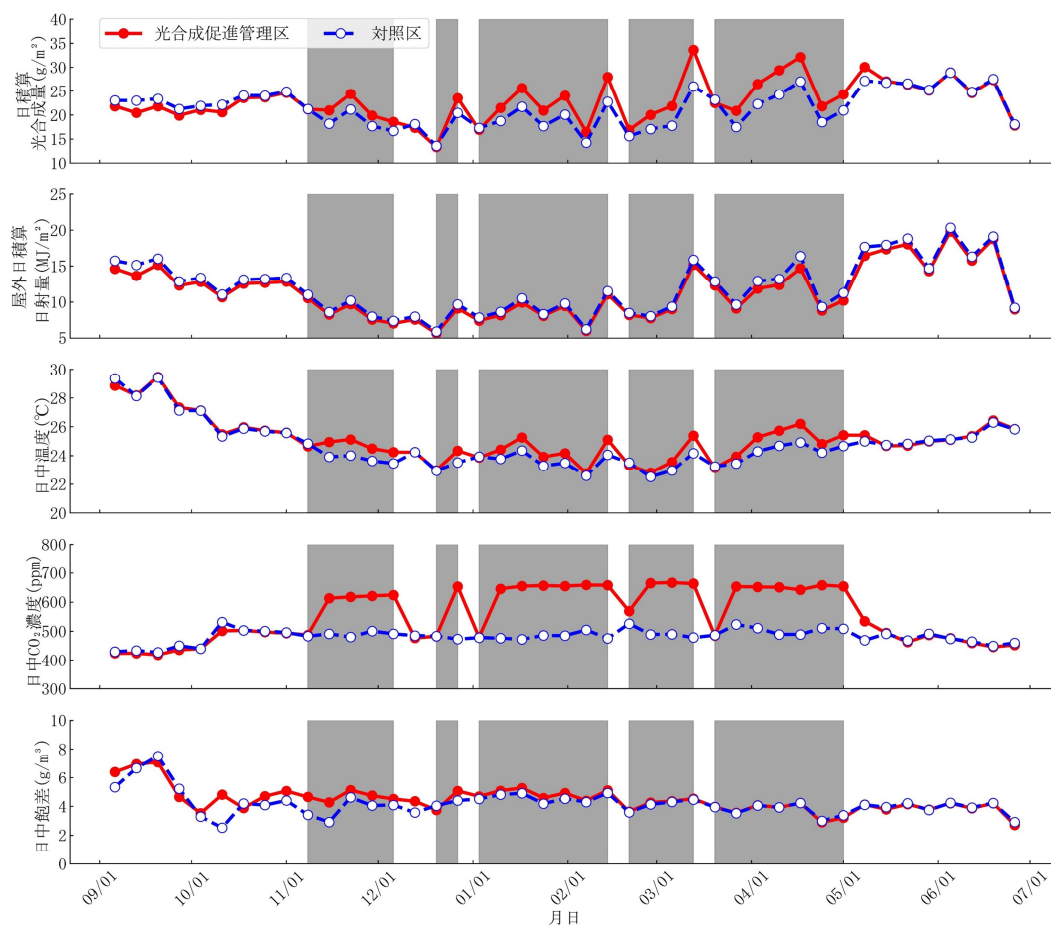


図7 日積算光合成量，屋外日積算日射量およびハウス内環境の推移(週平均)

注1) 灰色の枠線部分が処理期間を示す。

2) 光合成量は推定した光合成速度に、CO₂の分子量44(g/mol)を乗算して日積算値とした。

3) 日中は日の入から日の出までの平均値とした。

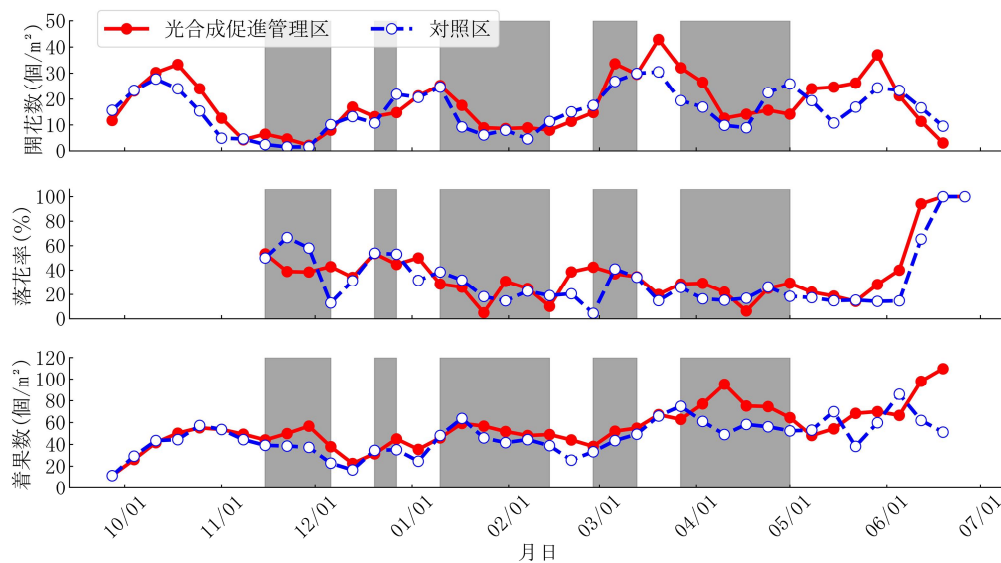


図8 開花数、落花率および着果数の推移

注1) 灰色の枠線部分は処理期間を示す。

2) 落花率は2～3日ごとに前日もしくはその日に開花した花をラベリングし、そのなかで収穫に至らなかったものの割合。

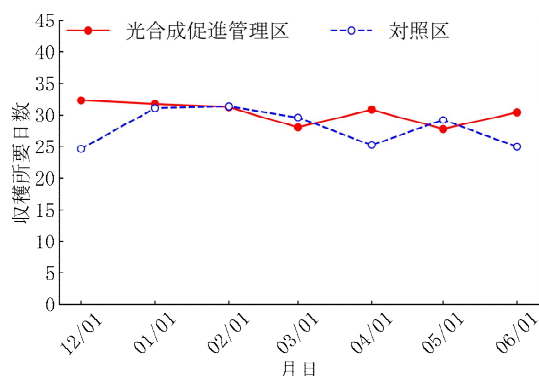


図9 収穫所要日数の推移

注) 各月に上品とした収穫した全果実の平均値。

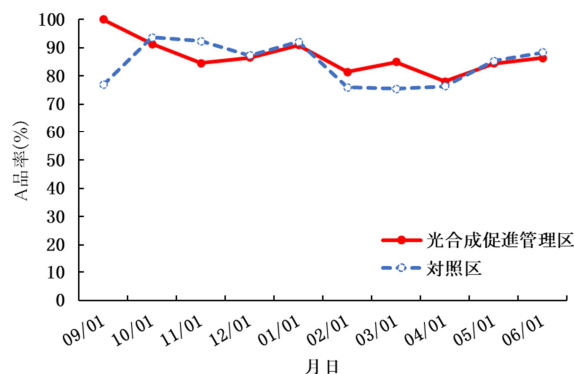


図10 A品率の推移

注) JA高知県出荷規格のA品とした。

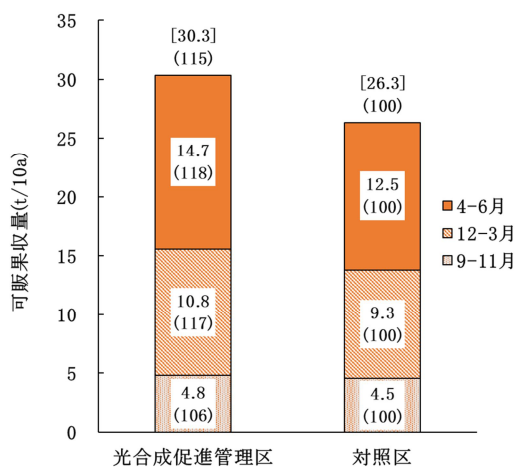


図11 可販果収量

注1) JA高知県出荷規格のA品およびマルA品の合計収量。

2) 対比は対照区を100とした場合の指数。

表5 売上げおよびCO₂施用にかかる灯油代

試験区	売上げ		CO ₂ 施用にかかる灯油代		売上げ-灯油代	
	(円/10a)	(対比)	(円/10a)	(対比)	(円/10a)	(対比)
光合成促進管理区	10,422,790	(115)	482,759	(189)	9,940,031	(113)
対照区	9,070,949	(100)	255,428	(100)	8,815,521	(100)

注1) 売上げは令和6年高知県の園芸より直近5年間の月別平均単価を可販果収量に乗じて求めた販売金額のうち手取金額を7割りとして計算した。

2) 灯油代は灯油使用量に115円/ℓを乗じて計算した。

3) 対比は対照区を100とした場合の指数。

考 察

試験1で同定されたFvCBモデルパラメータの精度検証において、推定値と実測値の間で高い相関関係($R^2=0.77$, $RMSE=3.13$)が得られたことは、Farquhar et al. (1980)⁴⁾により提唱された生化学的光合成モデルがピーマンにおいても十分な実用性を有することを示している。しかしながら、25℃における V_{cmax} および J_{max} はそれぞれ78.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ および152.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であり、Kim et al. (2016)⁹⁾がピーマンで報告した値($V_{\text{cmax}} = 88.62 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, $J_{\text{max}} = 175.42 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)よりも低い値を示した。この差異は、栽培環境や品種の違いによるものと考えられる。実際に、Bernacchi et al. (2003)²⁾は、 J_{max} の温度応答は生育条件によって変化することを示しており、本試

験においても季節による差異が確認され、屋外日射量や外気温が高い4月および9月において高い値を示した。そのため、日射量や外気温の高い春季や初秋に測定した値を用いれば、 V_{cmax} および J_{max} は高くなると考えられる。

これらの結果から、栽培環境や品種の違いによる変化をモデルに反映することが、さらなる推定精度の向上には重要であると考えられる。

気孔コンダクタンスモデルのパラメータ($g_0 = 0.08$, $g_1 = 3.74$)は、Medlyn et al. (2011)¹³⁾のモデルによる予測値と良好な適合性($R^2 = 0.74$)を示した。これらの値は、Nomura et al. (2020)¹⁶⁾がナスで報告した値($g_0 = 0.1$, $g_1 = 3.3$)と近似している。ただし、気孔コンダクタンスモデルにも精度改善の余地があり、環境要因の季節変動や栄養状態による影響を考

慮したパラメータの動的調整が必要と考えられる。さらに、光合成速度を正しく評価するには、個葉レベルから群落レベルにスケールアップする必要がある。この点について、FvCBモデルと画像から推定した葉面積指数をニューラルネットワークに組み込む手法¹⁶⁾²¹⁾やFvCBモデルと3次元光線追跡シミュレーションを組み合わせた手法⁹⁾など、いくつかの方法が報告されており、今後の検討課題である。

試験2では、1果実当たりの光合成量0.5gを判断基準とした光合成促進管理により、全栽培期間で15%の増収効果が得られたことは、植物の生理生態情報に基づく環境制御の有効性を示している。CO₂施用の効果は、Mortensen(1987)¹⁴⁾や川島ら⁸⁾が報告したCO₂施用による促成栽培での増収効果と一致する結果であり、さらに着果負担という生理的指標を組み合わせることで、より効率的な環境制御が実現されたと評価できる。高濃度のCO₂条件下に長期間さらされると、光合成が抑制される現象(光合成の順化)が報告されているが¹¹⁾⁹⁾、Qian et al.(2012)³⁰⁾の研究によると、高CO₂濃度での光合成順化はシンク・ソースバランスが影響しており、着果負担が少ないときに光合成順化が発生することが明らかにされている。この知見は、本研究で採用した着果負担が大きい時期における高濃度CO₂施用の生理学的妥当性を支持している。実際、本研究では着果負担の大きい時期(1果実当たりの光合成量が0.5gを下回る時期)に限定して高CO₂条件を適用することで、光合成順化を回避しながら増収効果を得ることができたと考えられる。一方で、判断基準とした1果実当たりの光合成量0.5gは、前年度のA品率との相関分析に基づく経験的な数値であり、より体系的な判断基準の構築が求められる。なお、対照区における1果実当たりの光合成量と落花率の関係を検討したところ、栄養生長期か生殖生長期かによって影響の程度は異なるものの、光合成量が0.5gを下回った時期に落花率が増加する傾向が認められ(図12)、この判断基準の妥当性が示唆された。

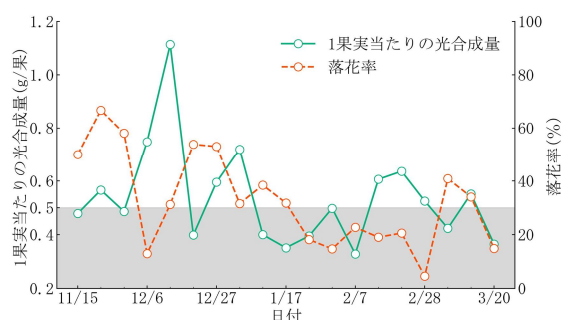


図12 対照区における1果実当たりの光合成量および落花率の推移

今後は、収量・品質目標、労働力・燃料コスト、市場価格動向および環境負荷などの複合的要因を組み込んだ意思決定モデルの開発が必要である。収穫所要日数が12月、4月、6月において対照区より長くなったことは、高CO₂・高温条件下での果実発育速度に対する影響を示している。これは、温度上昇により細胞分裂は促進されるものの、果実の肥大に必要な同化産物の転流が着果数増加により相対的に減少した可能性を示唆している。Marcelis(1993)¹²⁾はキュウリにおいて果実数の増加または温度の低下に伴い個々の果実の成長率が低下したと報告しており、本研究においては温度の上昇よりも着果負担の増加の影響が大きかったものと考えられる。今後は、果実発育ステージ別の同化産物要求量をモデル化し、個体レベルでのソース・シンク関係の動的変化を定量的に予測する必要がある。特に、果実の細胞分裂期と肥大期における環境応答の差異を明確化することで、発育ステージに応じたより精密な環境制御戦略の構築が可能となろう。A品率が全期間平均で両区とも85%と同等であったことは、光合成促進管理が収量向上を図りながらも品質を維持できることを示している。

経済性の観点では、売上げが15%増加した一方で、CO₂施用に要する灯油代が89%増加したものの、差し引きで13%の収益向上が達成された。この結果は、農研機構(2020)¹⁷⁾が報告したイチゴでの局所CO₂施用による22%増収と27%燃油削減効果と比較すると、燃料効率の面で改善の余地があることを示している。今後は、植物の生理状態により精密に対応したCO₂施用制御により、さらなる効率化が期待できる。

本研究により、FvCBモデルを用いたピーマンの光合成速度推定法を確立し、着果負担に基づく環境制御技術の有効性を実証した。個葉光合成パラメータの同定により高精度な推定が可能となり(R²=0.77)、1果実当たりの光合成量0.5gを判断基準とした光合成促進管理により15%の増収効果を達成した。今後の課題として、前述したが、栽培環境や品種差を考慮したパラメータの動的調整、個葉から群落レベルへのスケールアップ手法の改良、果実発育ステージ別の精密な環境制御戦略の構築、および経済性と環境負荷を統合した意思決定モデルの開発が挙げられる。これらの技術革新により、データ駆動型農業の実現に向けた科学的基盤が確立されることが期待される。

謝 辞

本研究の実施に当たって、北野雅治特任教授ならびに岩尾忠重特任教授をはじめとするIoP共創センターの皆様、先端生産システム担当、研究支援担当の諸氏に栽培管理や調査等にご尽力いただいた。ここに深く感謝の意を表する。

利益相反の有無

すべての著者は開示すべき利益相反はない。

引用文献

- 1) Amane Makino, Tadahiko Mae(1999). Photosynthesis and Plant Growth at Elevated Levels of CO₂. Plant and Cell Physiology, Volume 40, Issue 10 : 999-1006.
- 2) Bernacchi CJ, Singsaas EL, Pimentel C et al (2001). Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis. Plant Cell Environ 24:253-259.
- 3) C. J. BERNACCHI, C. PIMENTEL, S. P. LONG. In vivo temperature response functions of parameters required to model RuBP-limited photosynthesis. Plant, Cell & Environment, Volume 26, Issue 9 : 1419-1430
- 4) Farquhar, G.D., von Caemmerer, S., Berry, J.A. (1980). A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. Planta 149: 78-90
- 5) Gaastra P (1959). Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature, and stomatal diffusion resistance. internal PhD, WU
- 6) Hikosaka K, Noguchi K, Terashima I (2016). Modeling leaf gas exchange. Springer, Dordrecht : 61-100
- 7) Jones HG (2013). Plants and microclimate. Cambridge University Press, Cambridge
- 8) 川島信彦・山本英雄・黒住徹・谷川賢剛・田中良宏 (1993). 施設内における CO₂ 施用に関する研究(4). 奈良農試研報 24 : 25-30
- 9) Kim Jee Hoon , Lee Joon Woo , Ahn Tae In , Shin Jong Hwa , Park Kyung Sub , Son Jung Eek (2016). Sweet Pepper (Capsicum annuum L.) Canopy Photosynthesis Modeling Using 3D Plant Architecture and Light Ray-Tracing. Frontiers in Plant Science, Volume 7
- 10) Kitano, M., Nomura, K., Yamazaki, T., Iwao, T., Saitou, M., Mori, M., Yasutake, D., Kaneko, T., Ukeda, H., Ishizuka, S., Fujiwara, T., Okabayashi, T (2022). Internet of Plants (IoP) empowers bottom-up innovations in greenhouse horticulture. Environ Control Biol. 60: 3- 12.
- 11) 高知県農業振興部(2024). 高知県の園芸. P53
- 12) L.F.M. Marcelis(1993). Fruit growth and biomass allocation to the fruits in cucumber. 1. Effect of fruit load and temperature. Scientia Horticulturae. Volume 54, Issue 2 : 107-121
- 13) Medlyn BE, Duursma RA, Eamus D et al (2011). Reconciling the optimal and empirical approaches to modelling stomatal conductance. Glob Change Biol 17:2134-2144
- 14) Mortensen, L.M. (1987). Review: CO₂ enrichment in greenhouses. Crop responses. Scientia Horticulturae. Volume 33, Issues 1-2 : 1-25
- 15) 永尾航洋(2025). 果菜類の生理生態情報の可視化手法に関する研究. 愛媛大学博士論文
- 16) Nomura, K., Kaneko, T., Iwao, T., Kitayama, M., Goto, Y., Kitano, M (2023). Hybrid AI model for estimating the canopy photosynthesis of eggplants. Photosynth. Res. 155: 77-92.
- 17) 農研機構(2022). (研究成果). 局所 CO₂ 施用技術によりイチゴの増収と CO₂ 施用にかかる燃油使用量の削減を両立できる.
- 18) 農林水産省(2024). 令和5年産野菜生産出荷統計 都道府県別の作付面積, 収穫量, 出荷量
- 19) R. T. Besford(1993). Photosynthetic Acclimation in Tomato Plants Grown in High CO₂. CO₂ and Biosphere, Vol. 104/105 : 441-448
- 20) T. Qian, J.A. Dieleman, A. Elings, L.F.M. Marcelis(2012). Leaf photosynthetic and morphological responses to elevated CO₂ concentration and altered fruit number in the semi-closed greenhouse. Scientia Horticulturae, Volume 145 : 1-9
- 21) Takahiro Kaneko, Koichi Nomura, Daisuke Yasutake, Tadashige Iwao, Takashi Okayasu, Yukio Ozaki, Makito Mori, Tomoyoshi Hirota, Masaharu Kitano(2022). Agricultural and Forest Meteorology, Volume 323
- 22) Yin, X., Struik, P.C. (2009). C3 and C4 photosynthesis models: An overview from the perspective of crop modelling. NJAS Wageningen J. Life Sci. 57: 27-38
- 23) 全国新規就農相談センター(2024). 新規就農者調査結果 : 172-179

Summary

In forced (early) cultivation of sweet pepper, we investigated the acquisition of parameters for a single-leaf photosynthesis model (the FvCB model) and examined CO₂ concentration and daytime temperature management techniques based on fruit load. Using a photosynthesis and transpiration measurement system, we estimated model parameters (maximum carboxylation rate, V_{cmax} , and maximum electron transport rate, J_{max}) and obtained a high correlation between estimated and measured photosynthesis rates ($R^2 = 0.77$, RMSE = 3.13). Periods during which the photosynthetic assimilation per fruit fell below 0.5 g were identified as periods of high fruit load. By implementing photosynthesis-promoting management at a daytime temperature of 28.5° C and a CO₂ concentration of 650 ppm during these periods, a 15% yield increase over the control was achieved across the entire cultivation period. The estimated daily cumulative photosynthesis was 115% of the control during the low-solar-radiation period from November to February and 120% from March onward. Although kerosene costs for CO₂ supplementation increased by 89%, sales revenue increased by 15%, resulting in a net profit improvement of 13%.

Keywords: sweet pepper, FvCB model, fruit load, photosynthesis-promoting management, data-driven agriculture