

# 次世代植物工場における情報化とシステム制御

誌名	植物環境工学
ISSN	18802028
著者名	野口,伸
発行元	日本植物工場学会
巻/号	24巻3号
掲載ページ	p. 174-179
発行年月	2012年9月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 次世代植物工場における情報化とシステム制御

野口 伸

北海道大学大学院農学研究院 060-8589 札幌市北区北9条西9丁目

### Plant Factory based on ICT toward Next Generation

Noboru NOGUCHI

Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Kita-9, Nishi-9, Kita-ku, Sapporo, 060-8589, Japan

#### はじめに

植物工場は昨今日本政府が進める農商工連携のシンボリックな事業の一つとして注目されている植物生産技術である。農産物を計画的かつ安定的に生産・供給できる植物工場は地域の産業振興の観点からも注目されている。植物工場による生産と加工・流通を一貫体系で実現し、6次産業化を積極的に進めて新しい産業と雇用を創出することが、地域コミュニティの活性化を図る上でポイントとなる<sup>1)</sup>。また、環境・エネルギーの観点から持続的に安全な食料を安定的に生産できるシステムとして植物工場は期待されている。世界の人口は現在67億人に達し、2050年には92億人になると推計されており、地球規模の人口増加と経済成長による水不足、エネルギー不足が懸念されている。砂漠地帯での食料生産など水使用量を大幅に節減できる食料生産システムの開発は21世紀の重要な課題である。本稿では、次世代植物工場のあり方を考えたい。植物工場を人類の持続的発展に資する技術の域まで昇華させるために必要な要件を、現在海外において研究・開発中の植物工場から考察する。また、次世代太陽光植物工場において情報化・インテリジェント化はキーテクノロジーであるが、その必要性和今後の取り組みについて日本学術会議農業情報システム学分会において対外報告をまとめ、2011年6月に公表した。本稿ではその要旨についても論じることにする。

#### 人類の持続性と植物工場

人類の持続性を脅かしている要因に「食料」、「水資源」、「エネルギー」、「健康」、「地球温暖化」、「近代化・グローバルイゼーション」、「生物多様性」などがある。特に水資源とエネルギー問題は21世紀の重要課題と位置づけられている。太陽光植物工場は水を効率的に利用できる生産システムであることも特徴の一つである。スペインのトマト栽培では植物工場における栽培が露地栽培と比較して水使用量が1/5程度であり、植物工場の水の蒸散・拡散を抑える効果が水使用量の節減に多大に貢献している。Fig. 1に示したように一般に降雨・灌漑水のうち、60～90%が蒸散し、浸透・流亡が0～30%、バイオマス生産に寄与するものは10%に過ぎない。Table 1はトマト乾物重1kg生産する上で、必要な水の量である。植物工場で平均的な栽培技術では2,432kgの水を消費する。他方、露地栽培では13,870kgの水を必要とし、植物工場における生産の5.7倍の水が必要である。さらに植物工場において栽培技術の高いオペレータによる生産の場合、1,058kgまで水使用量を抑えられる。すなわち、栽培のエキスパートに匹敵する制御系を開発した場合、植物工場によって露地栽培のわずか7.6%の水使用量まで節減できるのである。このような背景から、水の有効利用が可能な植物工場は水資源保全の観点からも魅力的である<sup>2)</sup>。

「エネルギー」や「温暖化」についても、次世代植物工場にはその対策が要求される。石油エネルギーの使用量を減らし、二酸化炭素など温室効果ガスの削減を図ることは植物工場を大規模化そして普及させていく上で重要である。植物工場は露地栽培と比較して太陽エネルギーのほか、電気エネルギーも必要である。風力エネルギーや植物残渣などのバイオマスエネルギーなど多様なエネルギーの活用による生産エ

2012年 5月 7日受付

2012年 6月 1日受理

Corresponding author: Noboru Noguchi

(noguchi@bpe.agr.hokudai.ac.jp)

エネルギーの節減を図ることが普及拡大に向けて要求される。我が国においては夏季の高温対策用にヒートポンプの導入が望まれるが、このエネルギー源も海水、地下水などが有効である。実際にEUの次世代植物工場のヒートポンプ熱源には深海水が検討されている。水資源、エネルギー資源が乏しい地域において作物を安定的・持続的に生産できる次世代太陽光植物工場は人類にとって目指すべき方向であろう。

次世代の太陽光植物工場のあり方

太陽光を最大限に利用しながら食料を生産しつつ、エネルギー、水資源の観点から高い持続性を目指している太陽光植物工場の開発がEUにおいて進められている。Fig. 2はドイツのベルリン工科大学で研究中の「石油エネルギー」と「水資源」の節減を目指した太陽光植物工場である。Watergy プロジェクト<sup>3)</sup>と呼ばれ、EUの第5次研究開発フレームワーク・プログラムで行われた。植物群落から蒸散した水を凝集・回収して再利用し、さらに水の潜熱を熱交換器によって回収して夜間暖房に利用するアイデアである。200 m<sup>2</sup>の実験施設であるが、Fig. 3に示したように中央のタワーに熱交換器 (3: Heat exchanger) が配置されており、蓄熱槽 (6: Heat storage) と接続されている。昼夜を問わず水の回収ができる機構を有しており、水資源と石油エネルギーの節減を図った植物工場である。昼間は蒸散水を含んだ高温・高湿度の空気がタワー上部から流入し、熱交換器を介して、熱と水の回収を行う。夜間は低温の空気がタワー下部から流入して熱交換器で加温される。したがって、この植物工場の場合、制御の狙いは「作物生産に適した栽培環境」とともに「水・エネルギーの回収と再利用」にある。操作項目は温度・湿度・CO<sub>2</sub>施用である。通常の植物工場の環境制御では、一般に植物生産による利益最大化の実現という単一の目的関数をとる。植物生産期間中のランニングコストは、栽培開始時刻  $t_0$  と終了時刻  $t_f$  間のコスト関数  $L$  を積分した (1) 式で表される。

$$\int_{t_0}^{t_f} L(x_s, u, d) dt \quad (1)$$

ここで、 $x_s$  は植物工場内部の状態ベクトル、 $u$  は操作ベクトル、 $d$  は大気条件など周辺環境の状態ベクトルである。また、最終的な生産物による利益を (2) 式で定義すると、

$$\Phi(x(t_f)) \quad (2)$$

目的関数  $J$  は (3) 式で表される。

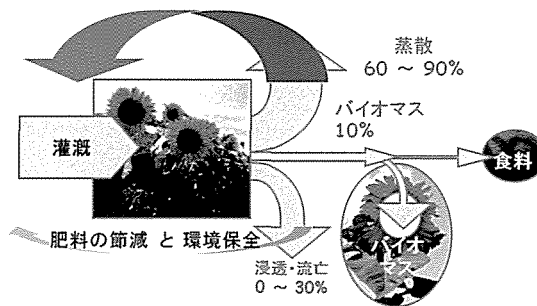


図1 植物生産における水の移動  
Fig. 1 Water transfer for plant production

表1 トマト1kg(乾物)生産するに必要な水

Table 1 Required water for tomato production (kg/kg DM)

栽培管理技術	水量 [kg]	
優秀	1058	植物工場
平均	2432	
優秀	4198	露地栽培
平均	13870	

(Fereres & Orgaz, 2001, internal report)

watergy

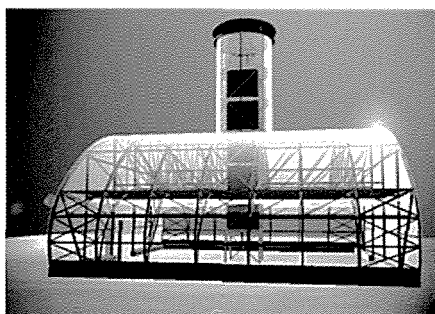


図2 ベルリン工科大学で研究開発された水とエネルギー使用の節減を目指した太陽光植物工場 (1)

Fig. 2 Plant factory saving water and energy developed by Technical Univ. of Berlin (1)

$$J = -\Phi(x(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} L(x_s, u, d) dt \quad (3)$$

したがって、 $J$  はコストを表しているため、実際の制御では  $J$  の最小化を実現する操作ベクトル時系列の生成が目標とな

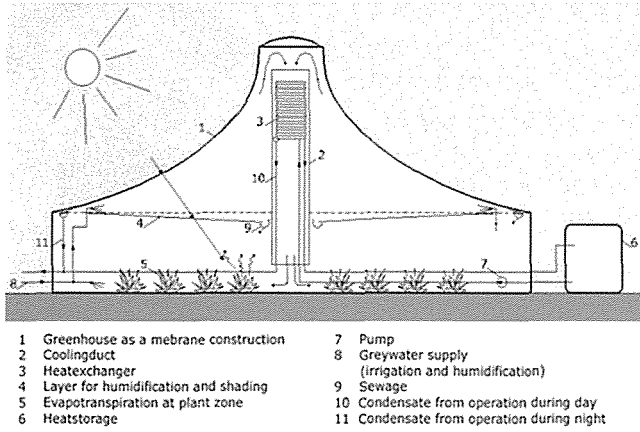


図3 ベルリン工科大学で研究開発された水とエネルギー使用の節減を目指した太陽光植物工場 (2)  
 Fig. 3 Plant factory saving water and energy developed by Technical Univ. of Berlin (2)

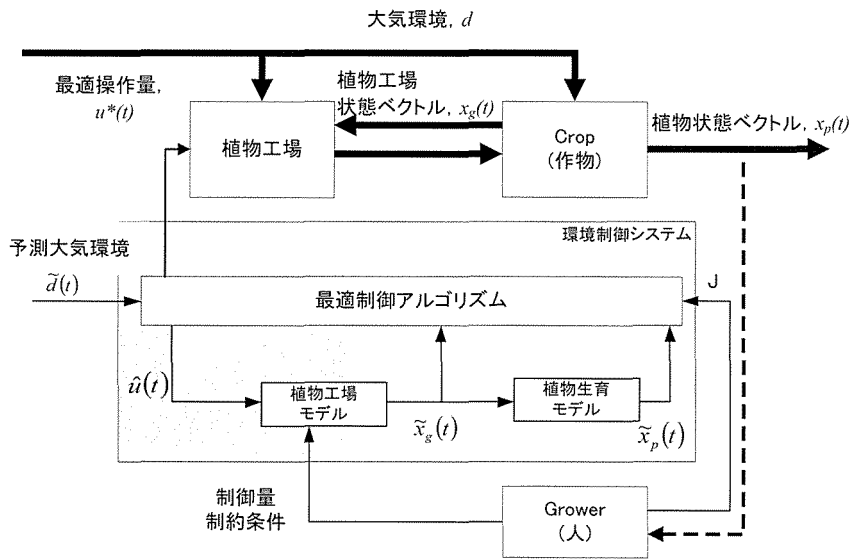


図4 太陽光植物工場の最適制御  
 Fig. 4 Optimal control for a plant factory

る。ところが, Watergy のような「生産による利益の最大化」に加え, 「水と熱エネルギーの回収」も評価関数に入れた場合, (4) 式のような多目的最適化問題<sup>4)</sup>となる。

$$J = \alpha \left[ -\Phi(x(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} L(x_s, u, d) dt \right] - \beta \int_{t_0}^{t_f} E(x_s, u, d) dt \quad (4)$$

ここで,  $a, \beta$  はスカラーで個々の評価項目の重み係数である。(4) 式には水と熱エネルギー回収による利益  $E(x, u, d)$  を栽培期間にわたり積算した項を付加している。Watergy の開発目標の場合, 評価関数は (3) 式ではなく (4) 式を採用し, 多目的最適制御としての取り扱いが要求される。すなわち, エネルギーや水回収を目的とした植物工場の場合, 本来の目的である植物生産の最大化に加え, エネルギーと水回収の効率化といった目的関数も設定され, その多目的なパレート最適解<sup>5)</sup>を求めて環境制御を行う必要がある。換言すると多目的最適制御理論を導入しないとエネルギー回収は進むが,

植物成長の低下を招く、もしくはその逆が発生し、所期の成果が上がらないことが十分予想されるのである。さらに、最適制御を実現するためには Fig. 4 のような植物工場モデル、植物生育モデルの両者が必要であり、現有するモデルの精度から判断してこの最適制御システムの実装は容易ではない。しかし、次世代の植物工場は単なる生産性だけでなく、人類の持続性に影響を与える「水資源」、「エネルギー」、「地球温暖化」などの要因も考慮する必要があり、将来的には植物工場の環境制御に多目的制御の導入は不可欠となる。これまでの Watergy の成果は、①栽培期間を延ばすことができる、②換気がないため農薬が不要である、③従来の施設と比較して水使用量を 75% 節減できるなどのメリットが報告されている。しかし、実際には (1) 自然循環による熱交換性能の限界、(2) 夏季の冷房能力不足が問題であり、(1) については強制換気、また (2) については低温源を深海水に求める方法が検討されている。さらに昼夜間温度差が小さい地域や高湿度地域では本システムの適用が難しいこと、夏季は 24 時間単位で熱バランスが取れないため季節間熱貯蔵の必要性も指摘されており、実用化にはまだまだ時間がかかるものと思われる。

Fig. 5 は施設屋上に近赤外光フィルター (NIR フィルター)

を装備した植物工場である<sup>6)</sup>。近赤外光と可視光を分離して夏季の室温上昇を抑え、Fig. 6 に示したように太陽エネルギーの 50% にも及ぶ近赤外光を集光して電気エネルギーに変換することで、遮光・換気・冷房にかかるエネルギー使用量の節減を達成しようと試みる。換気を伴わない栽培環境であるので CO<sub>2</sub> 濃度と温度の制御性能は格段に向上する副次効果がある。Fig. 7 は NIR フィルターを装備することによる効果をエネルギーと水資源の観点から調べたものである。シミュレーションではあるが、NIR フィルターを装備することで、室内の温度上昇が抑えられ、換気に要するエネルギーが 1/6、水の蒸散量は 1/2 以下になることが明らかにされている。しかし、これらの研究はまだまだ緒に就いたばかりで技術的課題も多い。たとえば、合理的な NIR フィルターの開閉制御法や集光装置の姿勢制御法などは今後検討が必要であろう。

#### 太陽光植物工場の情報化・インテリジェント化の必要性

太陽光植物工場では地域固有の気象資源を有効に活用・考量して最適な環境制御を行わなければ植物の生産性を向上させることは難しい。この理由から地域の自然環境を把握したうえで植物工場内環境を制御することが要求される太陽光

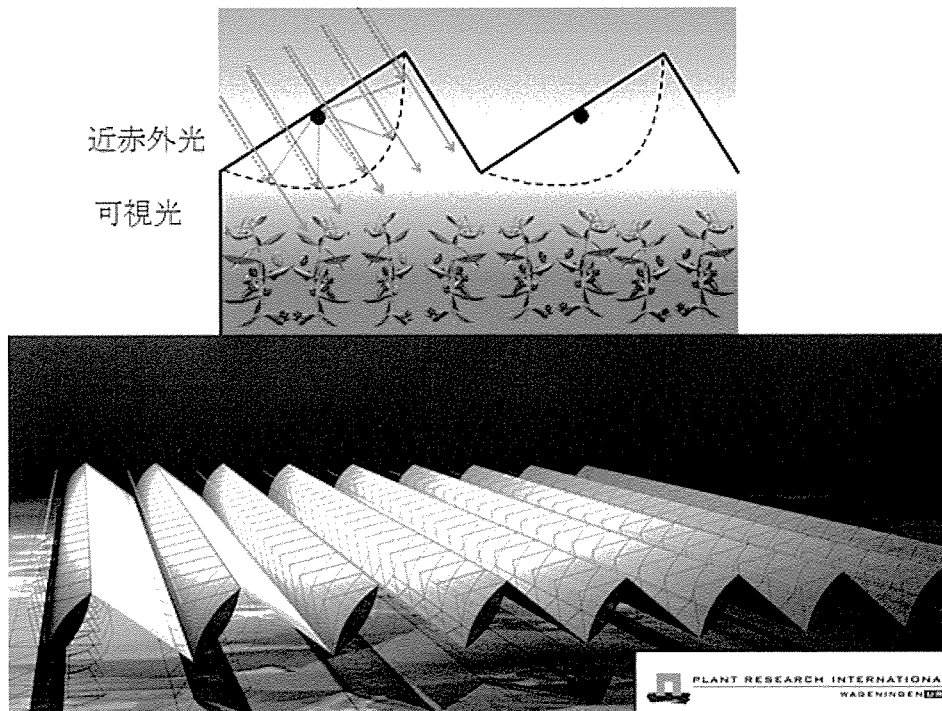


図 5 エネルギー回収を目的として近赤外光フィルターを装備した太陽光植物工場

Fig. 5 Plant factory with a spectral selective parabolic mirror and a collector at a focal point for converting energy to useful electrical energy

植物工場は、いまだ高い技術を有した人のオペレーションが必要であり、工業化・産業化に発展させるうえで大きな障害となる。すなわち、太陽光植物工場による食料生産を工業化・産業化するためには非接触なセンシング技術によって植物生体の状態を検出して、検出データに基づいて最適な環境状態

を探していくことが要求される。このコンセプトは橋本 康先生が提唱されたスピーキング・プラント・アプローチ (Speaking Plant Approach, SPA) として世界的にもよく知られている<sup>7)</sup>。

日本学術会議第 21 期農学委員会・食料科学委員会合同農業情報システム学分会では分科会 WG「知能的太陽光植物工場」(世話役:橋本 康先生)を設置した。WGは農業工学, 園芸学, 植物生理学, 精密工学など 29 人の専門家により構成した。3 回の公開シンポジウムと 9 回の分科会審議を行い, 植物工場の広範な普及を実現するために不可欠な科学技術とこれからの学術研究のあり方について検討した。その結果を「報告/知能的太陽光植物工場の新展開」として取りまとめ 2011 年 6 月に公表した。この提言をとりまとめた動機は, 生物学と工学との複合領域で展開する植物工場は両者の体系的な学術に立脚し, システム科学を包含するサステイナブルな展望が示せなければ, その有用性に対する社会の理解は得られないことにある。さらに, 社会的には植物工場の有用性の評価は分かれ, 今後の展開の方向性が絞られぬまま最近に至っていることに対する反省と, 科学者としてその発展方向を社会に示さなければならないことが理由である。この提言では植物工場の次なるステップに備えて今後検討すべき情報化・システム化の観点から問題点を指摘し, 農

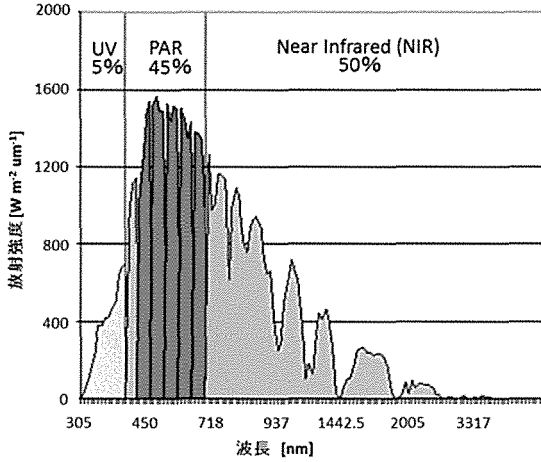
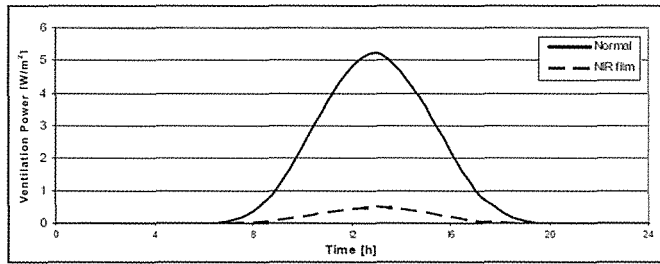
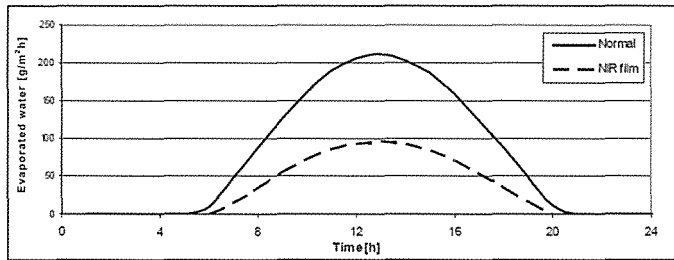


図 6 太陽光のスペクトル  
Fig. 6 Spectrum of sunlight



a) NIR フィルターの有無が換気に必要なエネルギーに及ぼす影響



b) NIR フィルターの有無が水の蒸散量に及ぼす影響

出典: Sonneveld P.J. et al. Greenhouse with an Integrated NIR Filter and a Solar Cooling System. In: Proc. International Symposium on Greenhouse Cooling, Almeria, Spain. 24-27 April, 123-130, 2006.

図 7 植物工場における NIR フィルターの効果 (シミュレーション結果)  
Fig. 7 Effect of NIR reflecting filter for a required ventilation power and an amount of evaporated water inside a plant factory (Simulation result)

林水産省・経済産業省など関係行政機関、産官学の研究機関の今後の取り組みを喚起した。報告の内容は以下の通りである<sup>8)</sup>。

#### (1) 植物工場の目指す環境制御型農業を育てる学術環境の整備

オランダのような植物工場の先進国ではコンサルタントが驚異的な高品質・多収穫を実現したケース・スタディーに注目し、得られたデータに基づいて「栽培作物と環境調節に関するある種のエキスパート・システム」を研究開発した。このエキスパート・システムがオランダの農業生産において驚異的な成果をもたらした原動力である。すなわち、栽培技術の表面的な模倣は無意味であり、太陽光植物工場における環境条件と生理生態の応答関係を同定し、オランダに見られるような農業に革命を起こすコンピュータ制御の芽を大きく育てる学術環境の整備がわが国においても不可欠である。

#### (2) 生体計測とスピーキング・プラント・アプローチ (SPA) による環境制御の必要性

太陽光植物工場では、人工光植物工場とは異なり、外界の気象条件の時系列的な変動、あるいは日変化に基づく変動によって、栽培環境と同時に生育状態も変動する。この変動に対応して収穫量を維持・増大させることが、太陽光植物工場発展のポイントである。効果的な環境制御を行うため、まず植物の生育状態の診断が必要不可欠であり、植物の生体計測結果に基づいた環境制御が本質である。この技術思想は20年以上前に提唱されたSPAと今日研究が進められている第2世代SPAであり、今後の太陽光植物工場にとって必須の概念として位置付けて学術研究を推進する必要がある。

#### (3) 植物栽培プロセスへのシステム科学的アプローチの推進

SPAを効果的に推進するには、環境条件に対する作物の生理状態のシステム同定が重要になる。すなわち、諸々の環境条件に応答する作物のシステム科学的な検討が必要である。植物工場のモデルプラントで実際に栽培し、実測し、試行錯誤で基本的なシステムに関する洗い直しが必須である。さらに太陽光植物工場のシステム制御において、その飛躍的な前進に向けて最適化、知能化の概念は重要である。これらの学術研究を推進して、全く効率的な植物工場のあるべき理想像、すなわち「次世代植物工場」像に結び付ける必要がある。

#### (4) 次世代植物工場を担う研究者・技術者の育成

農学における課題対応型教育プログラムとして「次世代植物工場」は取り組むべき課題である。「次世代植物工場」は生物学と工学の融合を高度に進めた学際・複合領域であ

り、さらにSPAや植物—環境複合系のモデリングと制御、さらに最適化・知能化といった学問分野が重要となる。また、現在農商工連携プロジェクトとして行政から強力に支援されている植物工場プロジェクトにおいても情報化・システム化・自動化を重点課題に据えており、その人材育成は急務である。今後、学協会・大学・試験研究機関・企業などが連携して、教育カリキュラムや教科書など教材の整備を行うことが必須である。

#### おわりに

植物工場は地域の産業育成など地域再生に有効な技術とみなされている。さらに、太陽光利用型は自然エネルギーや水資源を効率的に利用できる生産システムに展開できることも特徴の一つであり、21世紀最大の課題である『持続的発展』に貢献するイノベーションの1つであることに疑いようはない。特に次世代の植物工場は、育種など植物科学の視点での進化も当然必要であるが、工学的側面では、情報化とシステム制御の高度化が問題の本質にある。今後、最先端の科学技術を結集して次世代植物工場の研究開発がさらに加速することを期待したい。

#### 引用文献

- 1) 野口 伸. 農工融合によるフードイノベーションを目指して. 日本農学アカデミー会報. 12: 6-53. 2009.
- 2) 野口 伸. 太陽光植物工場の新展開 (野口・橋本・村瀬編著) 養賢堂, 東京. 157-171. 2012.
- 3) Zaragoza G. et al. Watergy project: Towards a rational use of water in greenhouse agriculture and sustainable architecture. *Desalination*. 211: 296-303. 2007.
- 4) 加藤寛一郎. 工学的最適制御. 東京大学出版, 東京. 1-241. 1988.
- 5) 坂和正敏. 非線形システムの最適化. 森北出版, 東京. 1-172. 1986.
- 6) Sonneveld P.J. et al. Greenhouse with an Integrated NIR Filter and a Solar Cooling System. In: *Proc. International Symposium on Greenhouse Cooling*. Almeria, Spain. 24-27 April, 123-130. 2006.
- 7) Hashimoto Y. Recent strategies of optimal growth regulation by the speaking plant concept. *Acta Horticulture*. 260: 115-121. 1989.
- 8) 日本学術会議農業情報システム学分会. 知能的太陽光植物工場の新展開. 第21期日本学術会議報告. 1-22. 2011.