

グリーンハウスオートメーション

— 栽培の自動化と品質管理, そして環境対策

大政 謙次 Kenji Omasa

東京大学 大学院農学生命科学研究科 生物環境情報工学研究室 教授

最先端農業として注目されている工場型生産方式（植物工場）について、園芸先進国であるオランダのグリーンハウスオートメーションを例に、栽培の自動化と品質管理、そして環境対策という観点から、その将来のあり方について考える。

1 はじめに

食の安全や安心、また健康のために、農作物の品質に関する関心は高い。このため、生産段階から収穫、調整、加工、流通、消費に至るフードチェーンのトレーサビリティとそれぞれの過程での適性管理 (Good X Practice, GXP) が必要とされる¹⁾。また、食用以外の花卉などの農作物でも、商品としての価値を高めるためにサプライチェーンにおける品質管理が重要とされ、切り花などでは生鮮食品と同様に収穫段階から消費までの過程の間を低温に保つコールドチェーン管理が行われている。一方、農作物の生産性や品質を向上させるために多量の農薬や肥料が使われ、農業起源の環境汚染が問題になっている。このため、最近では、農地における環境負荷低減のために適性農業管理規範—Code of Good Agricultural

Practice (GAP)—による管理が求められるようになってきた²⁾。また、オイル価格の高騰に対する対策や地球温暖化に関する京都議定書やポスト京都議定書での温室効果ガスの削減に関連して、農業生産の現場でも、エネルギー消費型から省エネルギー型の生産方式への転換が急務とされる³⁾。

そこで本稿では、最近、最先端農業として注目されている工場型生産方式（植物工場）について、園芸先進国であるオランダのグリーンハウスオートメーションを例に、栽培の自動化と品質管理、そして環境対策という観点から、その将来のあり方について考える。チーズやチューリップ、風車などが印象のオランダは、九州よりも少し小さい国土ながら、農産物の輸出額が米国に次いで世界第2位、また輸出入の差額（純輸出額）でもブラジルについて世界第2位の農業国であり、日本の農

業の将来を考えるうえで非常に参考になる。

2 日本の植物工場とオランダのグリーンハウス

日本では、歴史的な経緯もあって、「植物工場」というと、太陽光を使わず、人工光源下で環境を制御し、周年・計画生産を行う栽培施設を指す場合が多い⁴⁾。しかし、このような生産方式は、当然のことながら、太陽光を利用する一般のグリーンハウス（ガラス温室やビニールハウス）に比べて、エネルギー多消費型にならざるをえない。このため、日本でも、最近、周年・計画生産を目的とした太陽光利用の大規模なグリーンハウスが導入されるようになり、「太陽光利用型植物工場」という名称で呼ばれるようになってきた⁵⁾。

日本の太陽光利用型植物工場の見本とされるオランダのグリーンハウスは「ダッチライト型(フェンロー型)」と呼ばれ、3~4 m程度の狭い間口の簡単な構造のユニットをつなげた多連棟ガラス温室である(図1)。通常の大屋根型に比べて、経済性、換気効率、光透過率の面で優れている。また、ユニットを連結していくことにより大型化できるので、オランダのトマトやパプリカなどの野菜栽培のための施設では、一棟が10 ha以上の規模のものも建設されている。軒高も、光や気温などのハウス内環境の改善に加えて、補光ランプ、遮光カーテンや保温カーテン、細霧冷房などのハウス内上部空間に設置される設備のスペースの確保のために年々高くなっており、7 m程度のも建設されている。

オランダでは、1980年頃から光環境や気温、湿度、CO₂施肥などをコンピュータで制御することが行われるようになり、またロックウールを培地とした養液栽培が普及した⁶⁾。さらに、労働軽減や高賃金対策のために、栽培や収穫後の作業が徐々に自動化され⁶⁾⁷⁾、

現在、最も自動化が進んだ鉢花栽培では、栽培から出荷までの作業のごく一部を除いて、正に「植物工場」といべき、完全自動化に近いシステムが稼働している。これらの施設の大型化や自動化の技術開発の背景には、高収益化や労働力不足への対策に加えて、労働賃金の安い、また気候条件の良い南欧やアフリカ、中東地域との厳しい競争がある。特にトマトなどの野菜栽培では、売電や売温水により経営が成り立っているという報告もあり⁸⁾、他の産業と同様、規模拡大により生き残りを図っている。

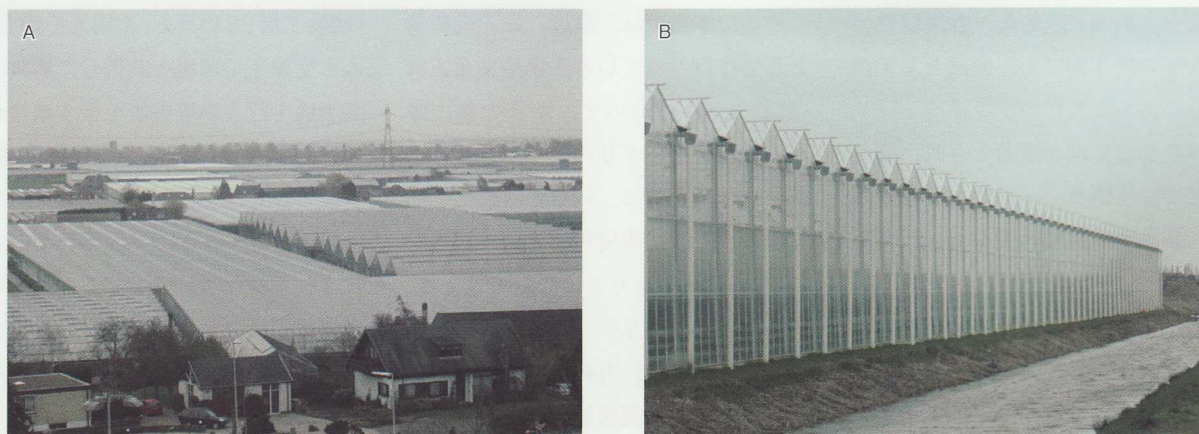
一方、環境対策の面では、欧州連合(EU)の農業起源の硝酸汚染による水系の保護に関する閣僚理事会指令(硝酸指令)(1991)以降、環境保護に関する法律に基づき、肥料成分を含んだ廃液の再利用(循環式養液栽培)化が進んだ⁹⁾。また近年、地球温暖化に対する対策とエネルギー源である北海からの天然ガスの高騰や枯渇の問題に対応するための省エネルギー、さらに一歩進めて、地域循環利用型のエネルギー創出型グリーンハウスの研究開発が進

んでいる³⁾¹⁰⁾。

3 花卉栽培の自動化と品質管理

オランダには、約1万haのグリーンハウスがある。そのうち、6,200 haが花卉栽培の施設である。バラやキクなどの切り花が約60%、鉢花が約20%で、最近では切り花が減少し、鉢花が増加している。図2は、各国の花弁(切り花+鉢花)の生産額と栽培面積である。他の国に比べて、栽培面積当たりの生産額が非常に大きい。たとえば、日本と比べた場合、栽培面積が日本の約38%にもかかわらず、生産額は約1.54倍である。卸売市場での価格は日本の方が1.6~1.8倍程度高いことから、栽培面積当たりの量としての生産性は、日本の約7倍にもなる。その理由は、大規模生産と栽培の自動化の違いによるところが大きい。

図3は、オランダのウエストランド地域の農家における鉢花(*Kalanchoe blossfeldiana* cv.)の自動栽培システム



A: オランダのウエストランドのグリーンハウス群, B: ダッチライト型グリーンハウスの外観

図1 ダッチライト型(フェンロー型)グリーンハウス

の一連の作業工程の写真である。人工土壌(ピートモス)が自動的に鉢に詰められた後、給水、植え付けが行われる。そして、約1,000鉢単位で栽培コンテナに移され、グリーンハウス内で生育させる。その位置はコンテナ単位でコンピュータにより管理される。一定期間生育させた後、個々の鉢が個別識別が可能なIDチップ付きのパレットに移され、ベルトコンベアで移動する。そして、生育状態がマルチカメラの画像計測装置で診断され、分類される。同一の生育状態に分類された鉢を、再度栽培コンテナに移し、グリーンハウス内に戻す。これを繰り返し、花が咲き、出荷できるような状態にまで生育した鉢は、規格を整えて出荷する。その際、出荷先の国の通貨での価格を、生産者ブランドのラベル表示により付けている。なお、一連の過程で、自動化されていないのは、植え付けと最終段階の包装だけである。グリーンハウス内の給水や養液管理、細霧冷房、加温、CO₂施肥、補光などは、複合環境制御システムにより制御される。機械室にはボイラーやガスエンジン(1.5 MW)があり、電気や温水を自家供給し、余剰分は売却している。なお、この農家では2.5 haの栽培を行っているが、経営者の父親と後継者の子息、それ以外に10人程度の作業員が雇用されている。

バラのような切り花では、鉢花に比べて栽培過程での自動化は難しいが、土壌栽培から作業が簡単になるロックウールを用いた可動式の栽培ベッドに移行している。最新のシステムを導入した農家では、摘み取ったバラをコンベアに吊し、自動的に包装システムまで移動させて花束を作る自動包装のシステムが導入されている。また、各農

家は鮮度保持のための冷温室をもっており、市場までのコールドチェーンを保っている。

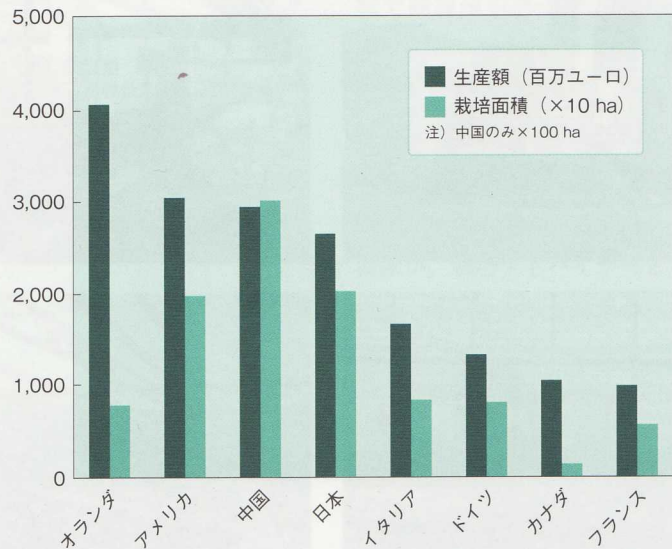
オランダで稼働している上記のような生産方式は、生産性の向上だけでなく、工業製品と同じように規格化され、また安定した価格の製品のジャストインタイムでの納入ということで、市場で受け入れられている。また、オランダの花卉の卸売市場(図4)におけるコールドチェーンは完全で、商品管理の規格化、自動化、IT化が進んでいる。なお、日本にも数は少ないが図3に示したようなシステムが輸入され、稼働している。

4 果菜類栽培の自動化と品質管理

オランダのグリーンハウスで栽培される野菜は、オランダピーマン(パプ

リカ)、トマト、キュウリの3つの果菜類で約75%を占める。1980年以降の品種や生産技術の改良により、倍以上の生産性の向上がみられ(図5)、トマトでは100 kg m⁻²の収穫が可能になったという報告もある。この値は、日本の現状の数倍の生産性である。

図6は、トマト栽培施設の例である。先にも述べたように、オランダでは、弱小農家の淘汰で生産規模の拡大が進んでおり、40 haの経営規模のものも出現している。温室内の環境は、鉢花栽培と同様、複合環境制御システムで制御される。その際、気象条件や培養液のモニタリングだけでなく、サーマルカメラによる葉温画像の計測や重量法による蒸散速度のモニタリングを行っている施設もある。トマトのロックウール栽培プラントは、地面に直付けしたものから、地上約30 cmの空中に吊り下げて廃液の回収効率を良くした「ガーター式」といわれる方式に



〔国際園芸生産者協会 (AIPH) 2009統計より作成〕

図2 各国の観賞用花卉(切り花+鉢花)の生産額と栽培面積



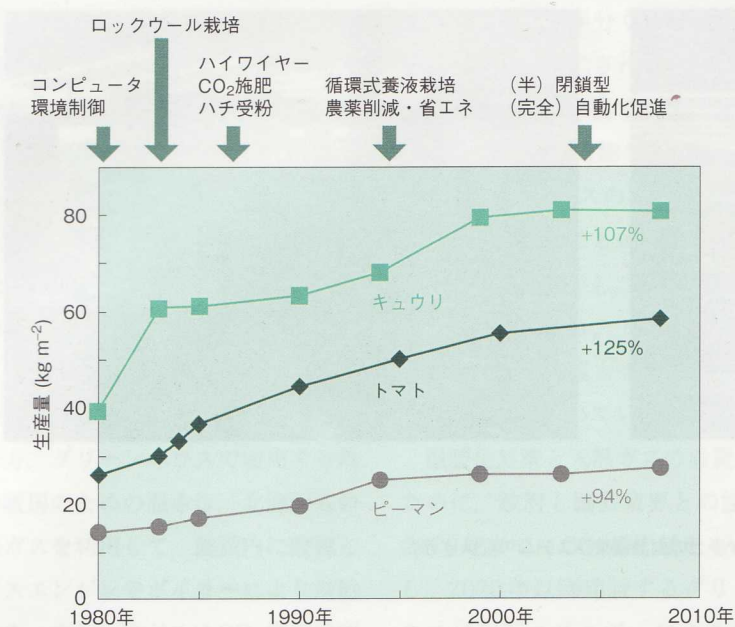
A: 人工土壌（ピートモス）の鉢詰め, B: 植え付け, C: 栽培コンテナの移動, D: 培養液の自動散布,
E: ハウス内での細霧冷房, F: 栽培コンテナからベルトコンベア上のIDチップ付きパレットへの鉢の移し換え,
G: マルチカメラの画像計測装置による選別, H: 鉢花の包装, I: 包装された鉢花

図3 鉢花 (*Kalanchoe blossfeldiana* cv.) の自動栽培システムの一連の作業工程 (オランダのウエストランドの農家)



A: 自動入札システム, B: カートの自動搬送と集積

図4 オランダの花弁の卸売市場 (Flora Holland)



Wageningen大学のEp Heuvelink准教授の果菜の収穫量データ(私信)を改変。
収穫量データは異なるが、同様な図を千葉大学の池田英雄博士も提示している

図5 オランダにおける園芸生産技術の発達と主要果菜の生産性の向上

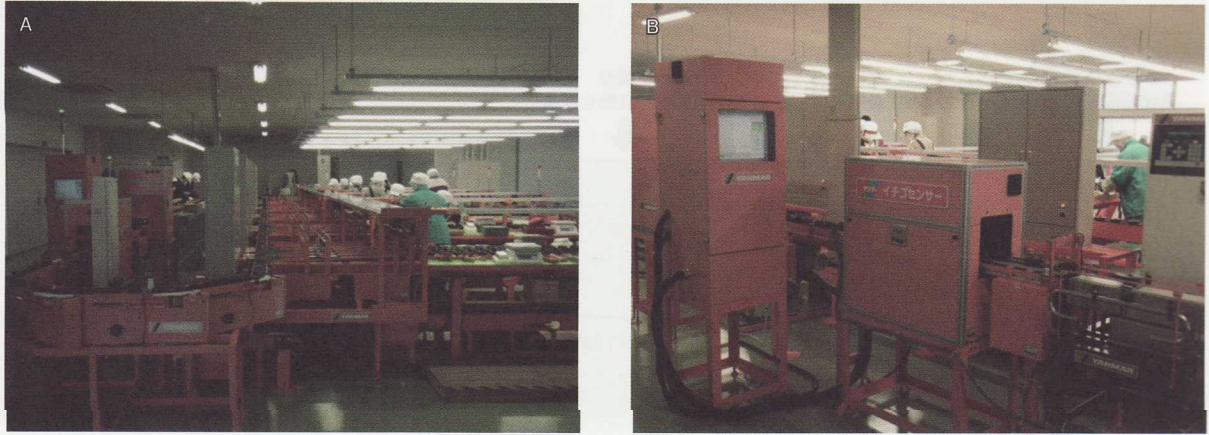
移行している。この方式の方が、作業性や暖房用のパイプ(作業用台車のレールとしても利用)からの熱対流の効果もよいようである。病虫害防除には天敵利用が進んでおり、また病害が発生しない環境を保つことにより化学農薬の使用を極力抑えている。多くの農家が、栽培アドバイザーとコンサルタント契約を結び、日常の栽培管理を行っている。収穫作業は手作業であるが、収穫後の運搬や選果は自動化されている場合が多い。

果菜類や果実などの選果システムについては、色や形状だけでなく、糖度・酸度などを指標とした緻密な等級診断と自動化は日本の方が進んでいるように思える。これは、日本の市場や消費者の品質に対する要求が高いことによるものと思われる。最近では、モモやイチゴなどの柔らかくて取り扱いが難し



A: トマト栽培の状況と収穫物の自動搬送システム, B: サーマルカメラによる葉温画像の計測,
C: 重量法による蒸散速度のモニタリング, D: 複合環境制御や経営情報管理のためのコンピュータシステム,
E: 計測データの時系列表示, F: 自動選果システム

図6 トマト栽培施設の例(オランダのウエストランドの農家)



A: パン式選果システムの概観, B: 自動選別のためのセンサー

図7 イチゴの自動選果システム¹¹⁾(JA さが)

い果実や果菜類の自動等級診断のシステムも実用化されている(図7)。そして、今後、得られた等級診断の情報を生産現場にフィードバックし、より品質の高い生産技術の開発に利用していくことが考えられている。また、農業や栄養などの機能成分診断の自動化が望まれている。なお、分光センサーを利用した診断は、簡便ではあるが、自動化のための簡易診断であるので、計測誤差が伴うことに留意する必要がある。

5 環境対策

EUの硝酸指令(1991)や農業環境規制(1999)を受けて、オランダでも農業起源の排水や農業使用の規制が強化された。この規制は非常に厳しく、グリーンハウスにおいても、肥料成分を含んだ廃液の再利用のための循環式養液栽培システムの導入や農業の軽減のための天敵利用が進んだ。現在、ロックウール栽培では培養液を施設外に廃棄しない循環式溶液栽培が実現して

り、土耕栽培でも^{あんきよ}暗渠パイプで回収し、廃液を再利用している。図8は、オランダで導入されている標準的な循環式養液栽培システムの例である。廃液は雨水などと混合され、殺菌される。廃液

を再利用し続けると肥料成分の組成が変化するので、定期的に分析し、数種の単肥原液を加え、ミキシングタンクで成分調整をする。栽培ベッドの培養液制御は、培養液のデータに加えて、

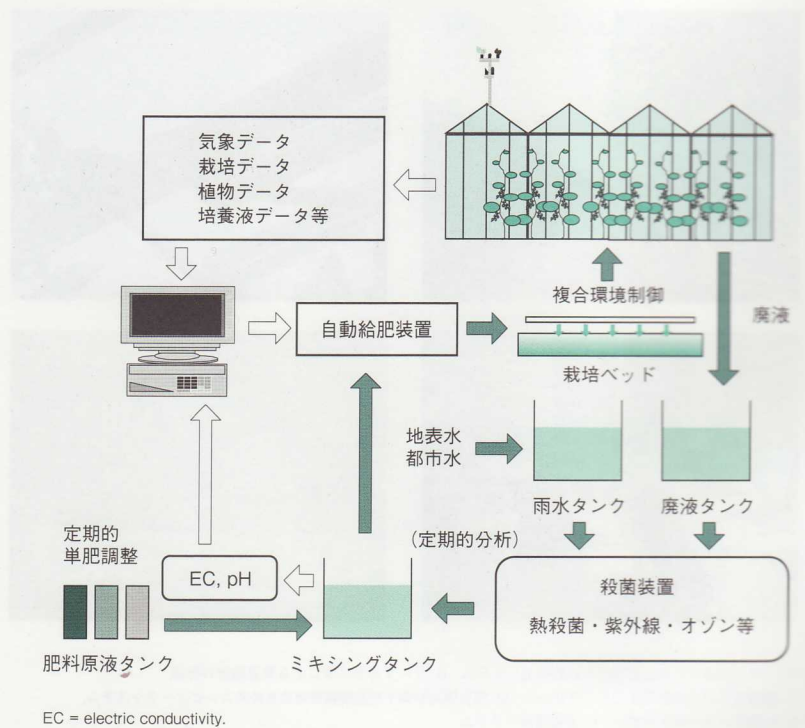


図8 オランダで導入されている標準的な循環式養液栽培システム

気象や栽培, そして植物それ自身の情報をもとに, コンピュータによる複合環境制御により行われる。廃液の定期的分析は専門の分析会社により行われ, 提携した肥料会社の原液濃度に従って処方箋が作成され, 管理される。オランダでは, 栽培についても, 専門の民間の栽培コンサルタントが定期的に訪れ, 栽培法や環境調節についてのアドバイスをしてくれる体制が確立している。

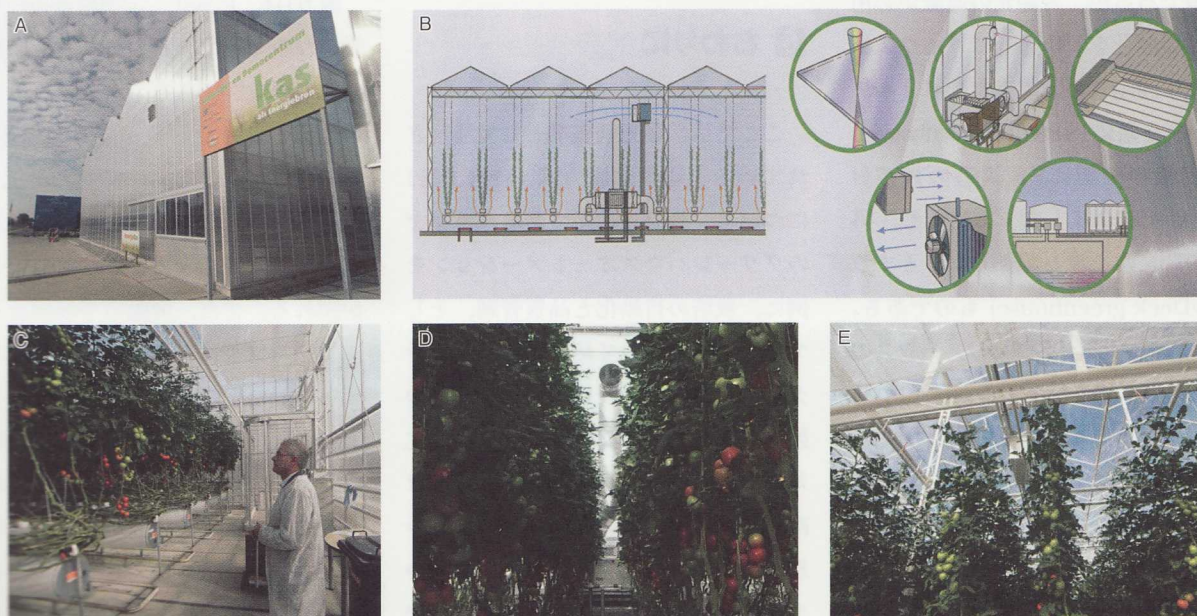
一方, グリーンハウスで使用する電気や暖房のための温水は, 北海からの天然ガスを利用して, 施設内に設置したガスエンジンやボイラーにより供給される。また, 排ガスはCO₂施肥に利用できるが, NOxが含まれ, 精製にコストがかかることから, 液化CO₂やロッテルダム化学工場からのパイプラインにより供給されるCO₂を利

用しているところも多い。天然ガス価格は末端価格の半分くらいで, 他の産業と同程度で供給されているが, 生産費の約3割が暖房費であり, 農業生産がオランダの国内総生産の2%くらいに対し, 天然ガスの消費量が約10%にも達していることから, 国内外で批判が多い³⁾。しかし, 最近の天然ガス価格の上昇により, トマトなどの野菜栽培では, 余剰電力や温水の販売により経営がなりたっている状況である。

温暖化対策と天然ガスの消費低減のために, 政府と園芸業界との協定で, 2020年までにCO₂排出量を48%削減し, 2020年以降建設するグリーンハウスは化石エネルギーによるCO₂の排出をゼロ(ゼロエミッション)にすることになっている。また, 農薬の削減のためもあり, 換気をしない, あるいは極力小さくした閉鎖型あるいは半

閉鎖型グリーンハウスとエネルギーの地域循環利用の研究開発が産学官連携で進んでいる。

図9は, Wageningen UR (University & Research Centre) の Innovation Demo Centre (Bleiswijk)¹²⁾にある“Sunergy greenhouse”と呼ばれる閉鎖型グリーンハウスである。この施設は, オランダの農業・自然・食品安全省(LNV), 園芸生産管理機構(PT)およびオランダ農業園芸組織連合会(LTO Netherland)によるエネルギー創出グリーンハウス(energy-producing greenhouse)の開発をテーマとしたコンテスト(2005-2007)で採択された3件のうちのの一つで, 2009年4月に実証ハウスとして開設した。単に省エネルギーというだけでなく, グリーンハウスを太陽光の集熱の場と考え, ヒートポンプにより, 夏場, ハウス内を地



A: Sunergy greenhouseの外観, B: 施設の概念図,
 C: トマト栽培をしているハウス内部。強制空気循環システムの大型ダクトの上に栽培ベッドが置かれている。入室に使い捨て白衣の装着が義務づけられている。
 D: 強制空気循環システムのダクトの吹き出し口が見える, E: ダブルスクリーンとハウス内上部に設置された冷却装置

図9 Wageningen URのInnovation Demo Centreにある閉鎖型グリーンハウス (Sunergy greenhouse)

下約100 mの帯水層(8~25°C)の水で冷却し、また帯水層の水にハウス内で集熱したエネルギーを蓄え、夜間や冬場のハウスや地域の暖房に利用しようという試みである¹⁰⁾。この施設では、これ以外に、ハウスの軒高を7 mと高くし、光透過性の良いガラスの使用とダブルスクリーン方式による夜間や低温時の放熱防止、およびハウス内上部への冷却装置の設置とダクトによる強制空気循環システムにより、換気のない完全閉鎖型グリーンハウスを実現している。そして、天然ガス相当で年間約30 m³/m²のエネルギーを供給でき、ハウスの運転に使用する約25 m³/m²の天然ガスを差し引いて、約5 m³/m²の正味のエネルギーを創出できるとされる。Innovation Demo Centre内には、これ以外に、コンテストで採択されたSunWind greenhouseやFlowDeck greenhouseなどの施設がある。これらの施設は、換気装置を有する半閉鎖型であるが、太陽光の遮蔽が必須な夏場の鉢花を対象として、ハウス屋根南面に開閉式の太陽光集熱パネルスクリーンを備え(SunWind greenhouse)、また屋根や壁面に2重構造の外被材(ポリカーボネイト製)を使用し、外被材の間に水を流し集熱しようとする(FlowDeck greenhouse)ものである。また、Wageningen大学では、ハウスの天井に近赤外光を反射する素材を用い、湾曲構造により種々の素材の太陽電池に近赤外光を集光させ、発電に利用しようという試みもなされている。閉鎖型グリーンハウスは、エネルギー創出に加えて、外部との空気の交換がないことから害虫の侵入を防ぐことができるが、高温多湿条件になることから、病気の発生の軽減対策が必要になるという指摘もある³⁾。実際、Sunergy

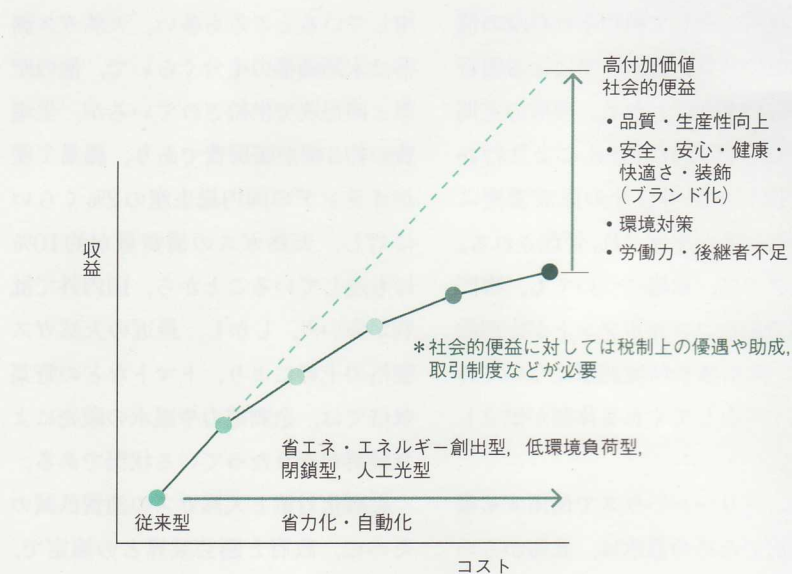


図10 自動化や環境対策のための設備投資や運転経費のコストと収益の関係

greenhouseでは簡易なクリーンルームのような管理が行われており、入室に使い捨て白衣の装着が義務づけられている。

6 おわりに

ここでは、最先端農業として注目されている工場型生産方式(植物工場)について、園芸先進国であるオランダのグリーンハウスオートメーションを例に、栽培の自動化と品質管理、そして環境対策について紹介した。オランダでも、労働力の安い新興生産国との競争、およびEUの水系保全や温暖化対策への対応で業界を取り巻く環境は厳しいが、高付加価値商品への移行や規模の拡大、自動化などによって競争力を維持している。また、オランダでは、法的強制力のある業界課税によって、業界団体〔たとえば園芸生産管理機構(PT)〕が運営され、業界内で必要な各種研究開発やプロモーションなど

が積極的に行われている。さらに、施設の建設や運営、環境対策、経営などのコンサルタントを行う体制も充実しており、日本の今後の園芸分野の発展を考えるうえで参考になる。

図10は、自動化や環境対策のための設備投資や運転経費のコストと収益の関係の概念図である。一般に、コストの増大とともに収益が落ちてくるが、品質や生産性の向上、安全・安心、健康、快適さ、装飾などといった付加価値を増大することにより、収益の改善が図れる。また、労働力や後継者不足に対する対策にもなる。しかしながら、環境対策など社会的便益が大きいコストについては、税制上の優遇や公的助成、市場における取引などの配慮が必要であろう。実際に、エネルギー創出型グリーンハウスは、太陽光によるエネルギー創出に加えて、植物の光合成によりCO₂を低減する機能があり、発電所や化学工場で排出されるCO₂を利用すれば、排出権取引の対象となるものと考えられる。今後、ライフサ

イクルアセスメント (LCA) による, より正確な評価が必要であろう。

9) Raviv, M. & Lieth, J. H., editors: *Soilless culture: Theory and practice*, Elsevier, 2008.

11) 山田久也, 田中伸明, 高田咲子. 照明学会誌, **93**, 273-276 (2009).

10) Kristinsson, J. The Energy-producing greenhouse. In: *Proceedings of PLEA 2006*, Geneva, Switzerland, 2006.

12) Wageningen UR. Greenhouse Horticulture および Innovation and Demo Centre パンフレット.

[文 献]

- 1) 熊谷進, 局博一, 大政謙次/遺伝学普及会・編. 科学は食のリスクをどこまで減らせるか. 遺伝, 別冊19 (2006).
- 2) GAP普及センター・編. GAP導入とその在り方, GAP普及センター, 2009.
- 3) 高倉直. 農業および園芸, **84**, 1063-1067 (2009); **83**, 1049-1055, 1151-1156 (2008).
- 4) 高辻正基. 完全制御型植物工場, オーム社, 2007.
- 5) 古在豊樹・編著. 太陽光型植物工場, オーム社, 2009; 学術会議公開シンポジウム「知能的太陽光植物工場」, 2009.
- 6) 岩崎正男. 農業電化, **61** (4), 10-13 (2008); **61** (6), 11-15 (2008).
- 7) 橋本康. グリーンハウスオートメーション, 養賢堂, 1994.
- 8) 斉藤章. 農業電化, **62** (11), 5-9 (2009).



大政 謙次 *Kenji Omasa*

東京大学 大学院農学生命科学研究科 生物環境情報工学研究室 教授

略 歴: 1975年, 愛媛大学大学院農学研究科修士課程修了。1985年, 工学博士(東京大学)。1976年, 環境庁国立公害研究所入所。1986年, 同研究所技術部生物施設管理室長。1990年, 国立環境研究所生物圏環境部環境植物研究室長。1998年, 筑波大学生物科学研究科教授(併任)を経て, 1999年より現職。2006年より日本学術会議連携会員。2009年より北京大学深圳研究生院客員教授。

専 門: 生物環境情報工学

受賞歴: 科学技術庁長官賞(第17回研究功績者表彰), 日本農業気象学会賞(学術賞), 日本生物環境調節学会賞, 生態工学会賞(学術賞), 農業情報学会学術賞, 日本植物工場学会論文賞, 日本リモートセンシング学会論文賞, Outstanding Contribution Award of APGC 2004 など

著書等: 下記参照

<http://joho1.en.a.u-tokyo.ac.jp/Omasa/books20090123.html>

<http://joho1.en.a.u-tokyo.ac.jp/Omasa/papers20091216.html>