

解説記事

スマートグリーンハウスへの展望 —工場生産方式、環境・エネルギー対策、そして知能情報化—

大政謙次



日本生物環境工学会副会長・東京大学教授

A Perspective on Smart Greenhouse - Factory Production Systems, Environment and Energy Measures, and Intelligent Informatization -

Kenji OMASA

Professor at the University of Tokyo

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、消費に至るそれぞれの過程での適性管理 (GXP; Good X Practice) とフードチェーンのトレーサビリティが必要とされる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、生鮮食品と同様に収穫段階から消費までの過程での鮮度管理が問題となる。

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、有害物質の混入だけでなく、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 (GAP; Code of Good Agricultural Practice) による管理が求められるようになってきた²⁾。また、エネルギー価格の高騰や地球温暖化に対する対策のために、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、さらには再生可能

エネルギー利用型の生産方式への転換が急務とされる^{3,4)}。

そこで、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を例に、栽培の自動化と品質管理、そして環境・エネルギー対策という観点から、その将来の在り方について考える。特に、オランダでの最近の生き残りをかけた設備投資や大規模化の流れは、競争原理に基づいた産業としての農業をみる場合に役に立ち、その問題点を知ることにもなる。また、情報通信技術 (ICT) を仲介とした、生産、流通、消費段階でのイノベーションとこれらの統合、即ち、スマートグリーンハウスの必要性についても簡単に述べる。

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さす場合が多い⁵⁾。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

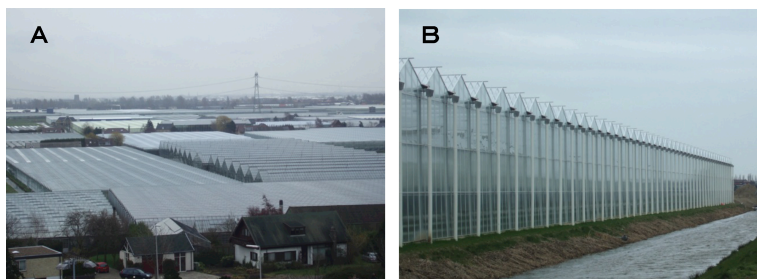


図1 ダッチライト型（フェンロー型）グリーンハウス。
A:オランダのウエストランドのグリーンハウス群。B:ダッチライト型グリーンハウスの外観。

多消費型にならざるをえない。このため、葉菜類を中心に鮮度や無農薬、含有成分調節などを売りにブランド化し、健康意識の高い層に対する市場の拡大を狙っている。一方、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^{6,7)}。

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、3～5 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 程度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、遮光や保温カーテン、細霧冷房や施肥灌水装置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⁸⁾。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⁸⁻¹⁰⁾、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、まさに、植物工場というべき、完全自動化に近いシステムが稼働している¹¹⁾。これらの施設の大型化や自動化の技術開発の背景には、生産コストの削減や労働力不足への対策に加えて、労働賃金の安い、また、気候条件のよい南欧やアフリカ、中東地域との厳しい競争があり、他の産業と同様、規模拡大により生き残りを図っている。このような自動化や規模拡大は、生産、流通、消費を一体化した情報インフラの利用を促進している。

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¹²⁾。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^{11, 13)}。

3. 最近のオランダのグリーンハウスを取り巻く環境の急激な変化

オランダには、約 1 万 ha のグリーンハウスがある¹⁴⁾。その内訳の遷移をみると、最近のオランダのグリーンハウスを取り巻く環境の急激な変化が読み取れる（図2）。2001 年には総面積が 10,416 ha で、花卉用が 6,221 ha、野菜用が 3,985 ha であった。そして、2011 年までは、花卉用が野菜用などに転換されるかたちで 1 万 ha をやや超える面積を維持してきたが（2011 年には総面積が 10,249 ha で、花卉用が 4,219 ha、野菜用が 4,988 ha）、2012 年には、総面積が 9,962 ha、花卉用が 4,107 ha、野菜用が 4,865 ha とついに 1 万 ha を切った。この間の生産者数は、2000 年の時点で 11,070 戸であったが 2012 年には 5,099 戸と半減し、5 ha 以上の生産者の総面積に占める割合が 10.6% (2000 年) から 44.0% (2011 年) に増加した（図3）。このことから、生産者は経営が悪化した花卉や野菜の弱小農家を吸収するかたちで規模拡大し、生き残りを図ってきたことがわかる。

特に、トマトやパプリカなどの野菜生産者の規模拡大が著しい。これは、規模拡大による生産コストの低減と、販売市場における価格交渉力強化、そして、売電・売温水などによる経営の多角化、安定化などを目的としてきた¹⁵⁾。しかしながら、例えばトマトの市場価格を例にとると、販売単価の採算ラインは約 0.70 € kg⁻¹ とされるが、最近の相場は 0.5～0.65 € kg⁻¹ 程度であり、採算ぎりぎりの状態にある。この価格は市場が保護された日本の卸売り価格の 1/3 程度である。また、

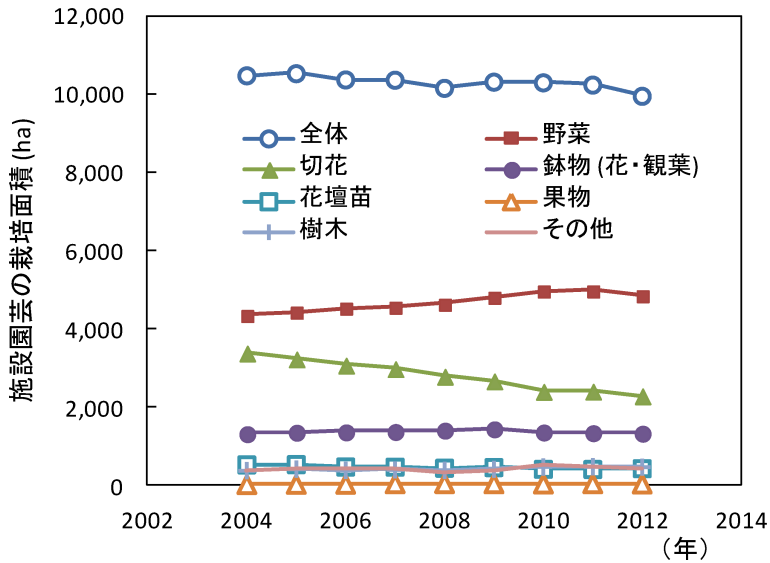


図2 オランダにおけるグリーンハウスの栽培面積の経年変化¹⁴⁾。

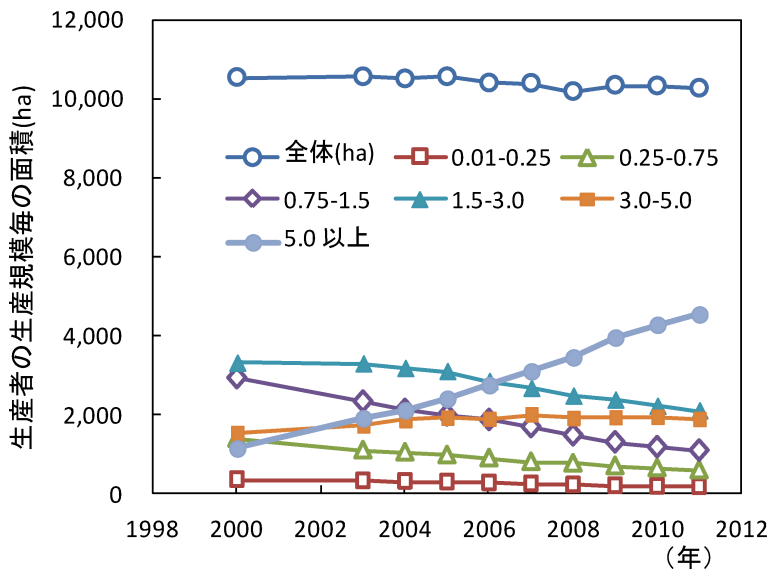


図3 オランダにおけるグリーンハウス生産者の生産規模毎の面積の経年変化¹⁴⁾。

2011年5月から7月にかけて、最大輸出先のドイツ北部を中心とした腸管出血性大腸菌 (EAgg-EHEC O104:H4) の問題で、販売価格が $0.20\sim 0.30 \text{ € kg}^{-1}$ 程度まで低下し、経営に打撃を与えた。パプリカ市場価格は生産者にとってさらに悪い。

このような状況において、従来は売電・売温水などで経営の安定化を図ってきたが、2014年を目標とする欧州の卸売電力市場の統合計画の下、2006年にオランダのAPX、ベルギ

ーのBelpex、フランスのPowernextの3市場が統合され、さらに、ベネルクス3国とドイツ、フランスの市場統合 (欧州中央部市場統合プロジェクト、CWE)、また、CWEと北欧4カ国の電力取引所ノルドプールとの連携がすすんでいる。このため、原料である北海天然ガス価格の高騰と北欧の水力発電やフランスの原子力発電などの安価な電力に対する競争力の低下により、最近では、売電が安定した収入源ではなくなり、トマトやパプリカなどの野菜生産者の経営環境のさらなる

悪化を招いている。

花卉用のグリーンハウスは、上述したように、この10年間で約3割が野菜など他の生産に転用されたがその多くはバラやキクなどの切り花生産の削減である。鉢花生産の面積は減っておらず、自動化のための設備投資が活発で、生産性の向上により競争力が維持されている状況にある。このように、オランダでは、自由競争の下、グリーンハウスを取り巻く環境の変化に対して、大規模化と自動化のための技術開発、そしてエネルギー関連設備への投資により生き残りを図っているが、オランダ国内での経営環境は厳しく、これまで培ってきた技術やシステム運営、コンサルティングなどのノウハウを生かした海外展開を積極的に行っている。インターネットに代表される情報通信技術（ICT）は、世界規模でのノウハウの収集と普及に役立っている。

4. 花卉栽培の自動化と品質管理

各国の花卉（切り花+鉢花）の生産額と栽培面積を比べ

てみると、オランダの栽培面積当たりの生産額が非常に大きい。例えば、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4は、ウエストランド地域の農家における鉢花（*Kalanchoe blossfeldiana*）の自動栽培システム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

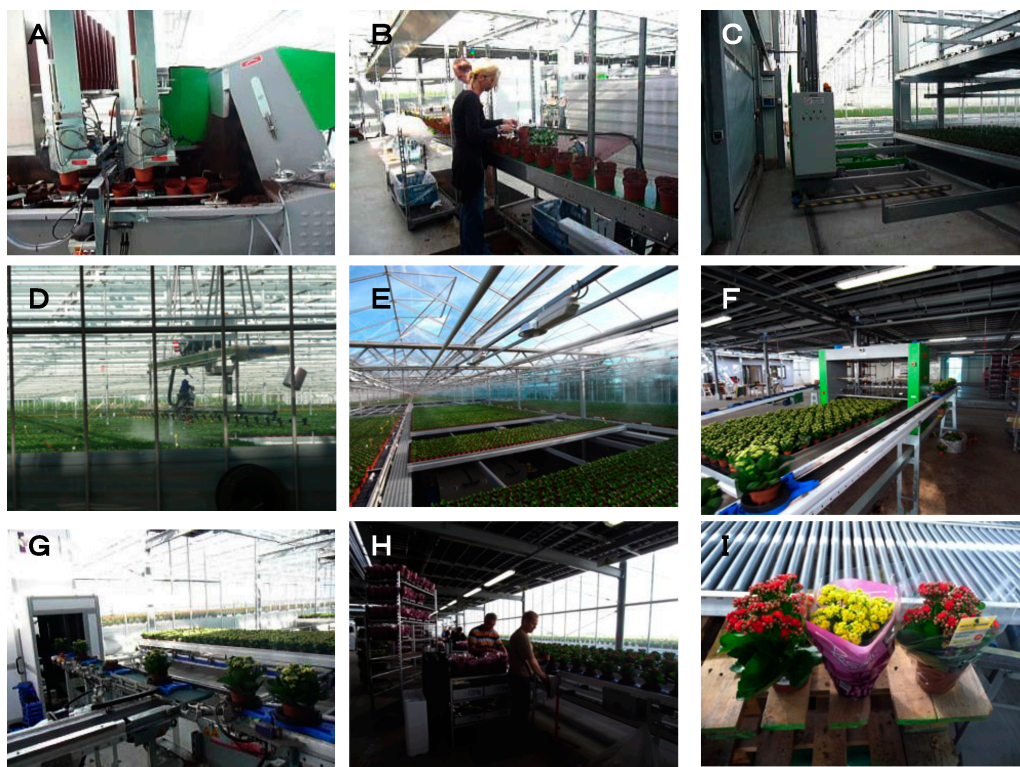


図4 鉢花（*Kalanchoe blossfeldiana*）の自動栽培システムの一連の作業工程（ウエストランドの農家）。
A:人工土壌（ピートモス）の鉢詰。B:植え付け。C:栽培コンテナの移動。D:培養液の自動散布。E:ハウス内の細霧冷房。F:栽培コンテナからベルトコンベア上のIDチップ付きパレットへの鉢の移し換え。G:マルチカメラの画像計測装置による選別。H:鉢花の包装。I:包装された鉢花。

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、切り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、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持っており、市場までの鮮度維持に努めている。

5. 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、トマト、パプリカ、キュウリの3つの果菜類で約75%（2012年）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、トマトでは生産者のレベルで60 kg m⁻²、

また、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5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、最近では数十ha以上の規模のものも建設されている。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、廃液の回収効率をよしたガーター式といわれる方式に移行している。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良いようである。病虫害防除には天敵利用が進んでおり、また、病害が発生しにく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、収穫後の運搬や梱包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

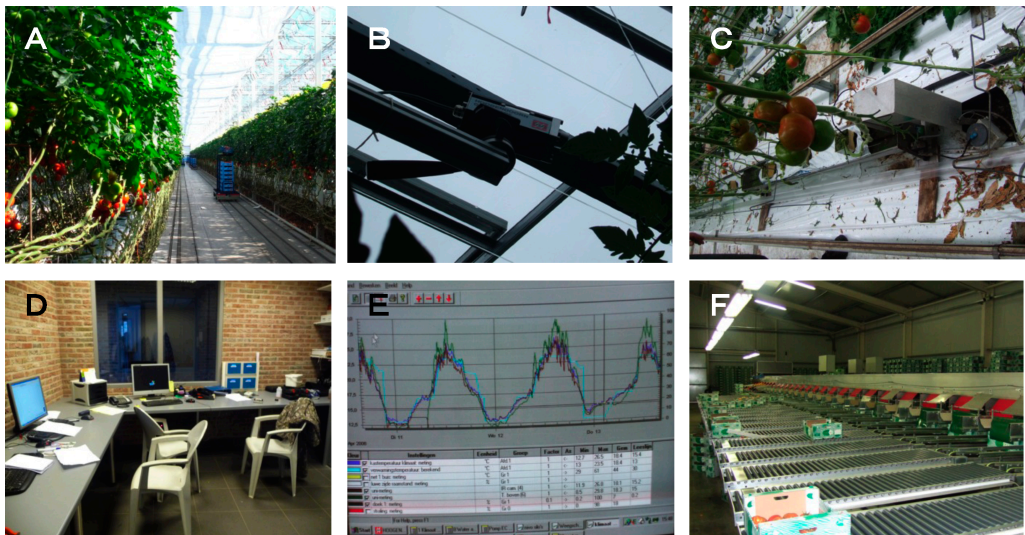


図5 トマト栽培施設の例（ウエストランドの農家）。

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。

る。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、農薬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。

6. 環境・エネルギー対策

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薬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薬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養液栽培が実現しており、土耕栽培でも暗渠パイプで回収し、廃液を再利用している。図6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、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。このような現場では、情報インフラの活用が有効である。

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、NO_x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、末端価格の半分位で、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%位に対し、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⁾。上述したように、トマトなどの野菜栽培では、これまで余剰電力や温水の販売により経営がなりたっていたが、これも必ずしも安定した収入源ではなく、更なる統廃合の原因になっている。

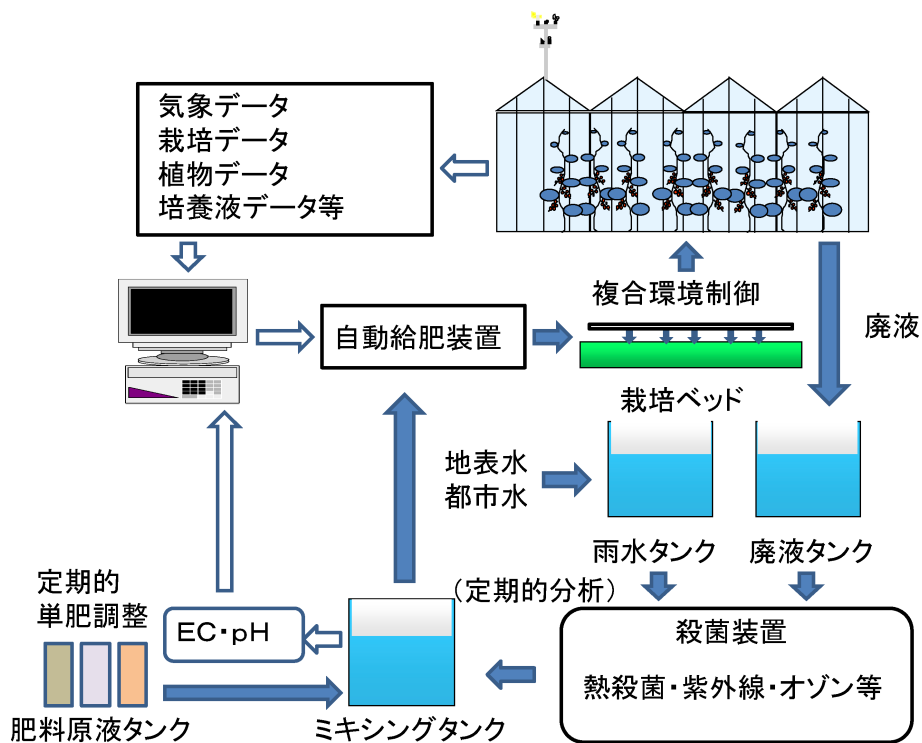


図6 オランダで導入されている標準的な循環式養液栽培システム。

また、農業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進んでいる¹⁶⁾。

7. スマートグリーンハウスの提案

上記で、園芸先進国であるオランダのグリーンハウスを例に、これを取り巻く環境の変化と、規模拡大、自動化、品質管理、そして環境・エネルギー対策などにおける技術の進歩と問題点について紹介した。現在、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）を将来の競争原理に基づく産業として考える上で、オランダの経験は非常に役に立つ。農業はその生産性の低さから先進国においては補助金の助けなくしてはなかなか成り立たない。賃金が高くなると工業においても同じ問題が起こる（図7）。6次産業化や農商工連携は、その生産性の低さを、末端の消費と一体化して考えることにより、付加価値を高め、効率化しようとするものである。オランダのグリーンハウスの経験は、環境・エネルギー対策も含め、6次産業化や農商工連携など、政府が推進している攻めの農業の将来像の参考になる。オランダでは、法的強

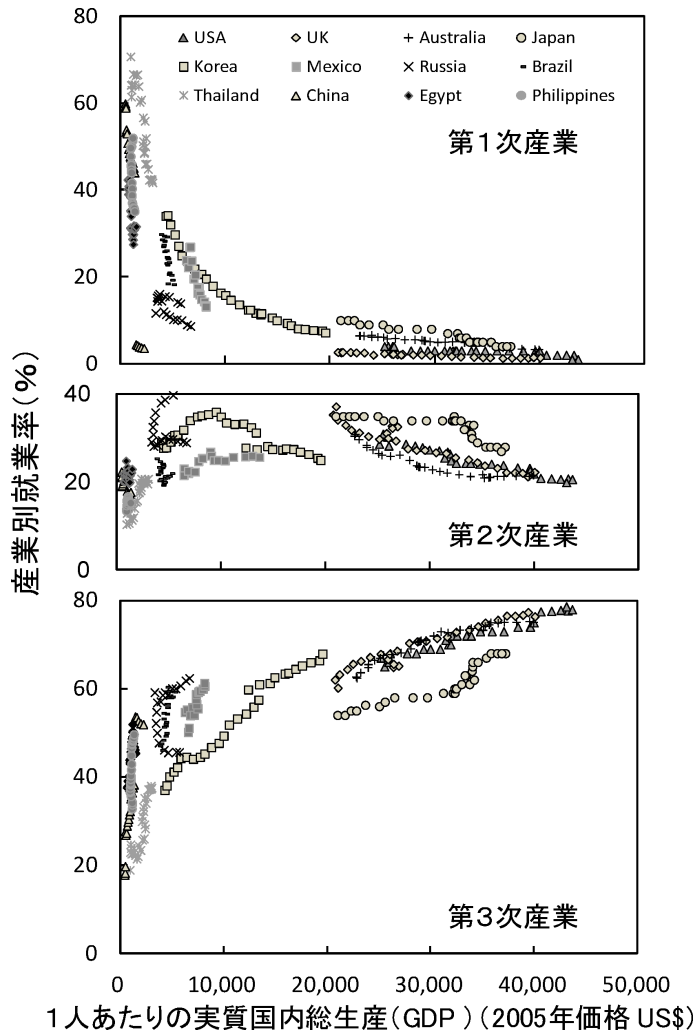


図7 産業別就業率と1人あたりの実質国内総生産との関係。
 出典：GDPはWorld Bank national accounts dataとOECD National Accounts data files、産業別就業者数はLABORSTA Internet (<http://laborsta.ilo.org/STP/guest>)。なお、産業別就業率率は、国際標準産業分類から日本標準産業分類に変更し、算出した。

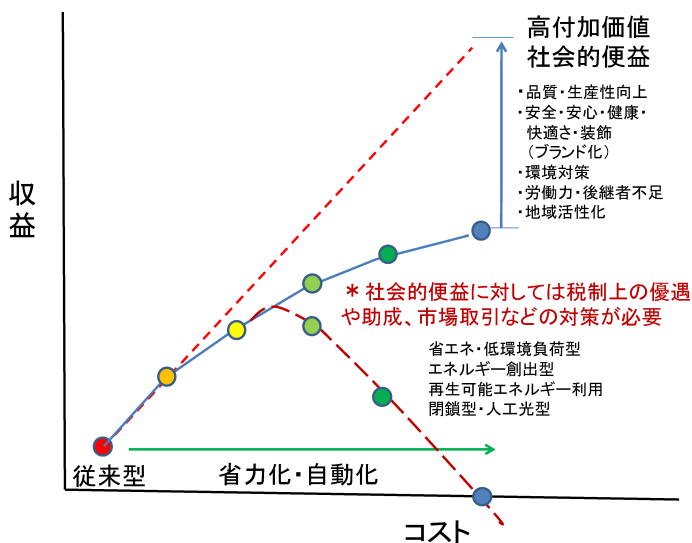


図8 グリーンハウスの設備投資や運転経費のコストと収益の関係。

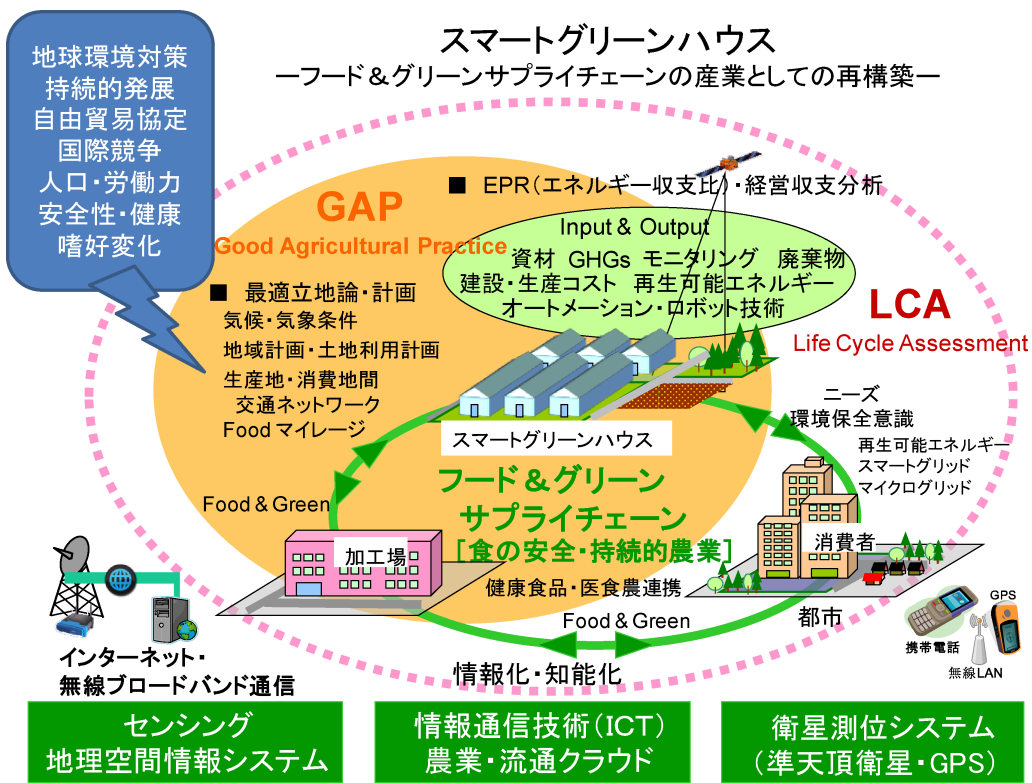


図9 スマートグリーンハウスの概念図。

制力のある業界課税によって、業界団体（例えば 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・エネルギー対策、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上で参考になろう。

図 8 は、グリーンハウスの自動化や品質管理、環境・エネルギー対策など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、コストの増大と共に、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、地域社会の活性化対策にもなる。しかしながら、収益がコストを割り込むような場合、環境対策や地域活性化、雇用創出など、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、推進のための配慮が必要となる。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、発電所や化学工場などで排出される CO₂ の施肥利用や農産物残渣の再利用は、排出権取引や再生可能エネルギーの買取り制度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る。

図 9 は、農産物の生産、流通、消費を一つのフード&グリーンサプライチェーンシステムとして捉え、システムの情報化、知能化により、グリーンハウスの規模拡大、自動化、品質管理、そして環境・エネルギー対策などを行うスマートグリーンハウスの概念図である。生産、流通、消費に加えて、地域社会の活性化や環境・エネルギー対策、医食農連携などの情報を双方向、循環型で連携させるところに特徴がある。工場生産化されたグリーンハウスは、アグリシステムの中でも、最も先進的な生産技術であるが、この図は、土地利用型農業や地域社会の情報化、知能化（スマートビレッジ）にも適応でき、6次産業化や農商工連携、医食農連携などを推進していくための概念図ともいえる。また、人間側から機械にアクションを起こすユビキタス情報社会からさらに進化し、人間の生活空間の中に、情報ネットワークが張り巡らされ、センサーなどで機械が状況を感じし、人間が意識しないで情報機器を使えるアンビエント情報未来社会への提案でもある。フード&グリーンサプライチェーンシステムに加えて、医食農連携やスマートビレッジ、ライフサイクルアセスメント（LCA）、エネルギー利用の最適化などにおいて、クラウドコンピューティングによるビッグデー

タの収集と情報利用が推進されることが望まれる¹⁷⁻¹⁹⁾。

引用文献

- 1) 熊谷 進, 局 博一, 大政謙次. (財) 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. エヌ・ティー・エス, 東京. 1-224. 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, つくば. 1-143. 2009.
- 3) 高倉 直. オランダ施設園芸の長期戦略 (1) 施設園芸展を中心に. 農業および園芸. 83:1049-1055. 2008.
- 4) 高倉 直. 今, なぜ植物工場か —食糧とエネルギー自給の Autonomous House プロジェクト—. 農業および園芸. 84:1063-1067. 2009.
- 5) 高辻正基. 完全制御型植物工場. オーム社, 東京. 1-125. 2007.
- 6) 古在豊樹 (編著) 太陽光型植物工場. オーム社, 東京. 1-186. 2009.
- 7) 野口 伸, 橋本 康, 村瀬治比古 (編著). 太陽光植物工場の新展開. 養賢堂, 東京. 1-353. 2012.
- 8) 岩崎正男. オランダの施設園芸技術の発達過程と近年の動向 (1). 農業電化. 61:10-13. 2008.
- 9) 岩崎正男. オランダの施設園芸技術の発達過程と近年の動向 (2). 農業電化. 61:11-15. 2008.
- 10) 橋本 康 (編著). グリーンハウス・オートメーション. 養賢堂, 東京. 1-212. 1994.
- 11) 大政謙次. 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—. 遺伝. 64:87-95. 2010.
- 12) Raviv M, Lieth JH (eds). Soilless Culture: Theory and practice. Elsevier Science, San Diego, USA. 1-587. 2008.
- 13) Kristinsson J. The Energy-producing greenhouse. Proc of PLEA2006, Geneva, Switzerland. 6-8. 2006.
- 14) CBS (オランダ中央統計局) Kwantitatieve Informatie voor de Glastuinbouw 2012-2013
- 15) 齊藤 章. 施設園芸先進国オランダにおける最新技術 (1). 農業電化. 62:5-9. 2009.
- 16) Wageningen UR. Greenhouse Horticulture 及び Innovation and Demo Centre パンフレット
- 17) 動け! 日本 タスクフォース編. 動け! 日本. イノベーションで変わる生活・産業・地域 日経 BP 社, 東京. 1-436. 2003.
- 18) 大政謙次. 新アグリシステム: 第 1 次産業のイノベーション. Eco-Engineering 16: 9-13. 2004.
- 19) 東京大学アンビエント社会基盤研究会 農林環境 WG (編). アンビエント農業— ICT で未来の農業を創る. 同研究会 農林環境 WG. 1-121. 2012.