「環境調節をどう考えるか」 ーその流れと太陽光植物工場の今後を考えるー

橋本 康

(日本生物環境工学会名誉会長)

How to Approach to the Environment Control in Agriculture -Its History, SPA and Glorious Future of the Greenhouse Horticulture-

Yasushi HASHIMOTO

Honorary President of Japanese Soc, ABEES*

Abstract

This perspective paper is described about the environment control in agriculture from the historical origin of “The Japanese Society of Environment Control in Biology (ECB)” including “Phytotronics” in the second generation by Duke University in USA, to “The Greenhouse Horticulture (Solar plant factory)” based on the intelligent controlled system through the activities of IFAC (International Federation of Automatic Control). The SPA (speaking plant approach to the environment control) is also explained both in the relations of European academic activities in IFAC and in our former society of ECB, resulting the glorious future of the Greenhouse Horticulture.

Keywords: greenhouse horticulture (solar plant factory), speaking plant approach

プロローグ(階層を還元し輝かしい生物学が登場)

前世紀前半は物理学、後半(特に80年代以降)は生物学における科学革命が為された。ゲノム科学の発展は躍進著しい分子生物学に立脚し、高次の階層に見られる多くの複雑な現象を還元し、物理学と論議が出来る成果を生み出しつつある。幹細胞からの発生生理学に於いては、進化のプロセスに伴う歴史的条件が細胞中で営まれる物理化学法則に基づく反応の境界条件として機能し、ニュートン以来の物理法則一元論的世界観は修正を強いられている。

矢原は「生物の論理」¹⁾で以下のように述べている。

* 自然は階層からなっており、それに対応して自然科学の階層が成り立っているのです。還元主義的科学が有効なのである。

* 階層の間には、それぞれ境界条件があり、特に生物学は、

ゲノム科学の進展によって、ようやくこの境界条件を取り扱うことが出来るようになった。

* 生物を考えるには、自然の階層性として、個体、細胞、分子という三段の階層がどのような関係にあるかを理解すれば十分である。ここで問題になるのは、生物学に於いて還元主義はどこまで有効かということである。それぞれの現象を医学生物学諸分野の共通言語である分子生物学と細胞生理学によって解析記述した結果、異分野の間にはじめて会話が成立したことのおかげである。

自然環境を還元する「環境調節」の流れを遡る²⁾

環境調節とは、科学的に上記の生物学とどのように関わるのであろうか?

ファイトロンの出現による最適温度条件の発見

*yh840@gakushikai.jp

1949年、米国・カリフォルニア工科大学にファイトロンが

出現した。第2次世界大戦が終了し、環境を調節する工学的手段である自動制御技術が各分野に応用され、花が咲いた。哲学や基礎科学とは異次元の当時の実用技術が思わぬ分野に波及し、種々の萌芽的成果に貢献した頃である。ファイトロンの出現は、今日の新しい生物科学が台頭する4半世紀前のことであった。

温度・湿度等々の気象要因を制御したいいわゆる人工気象室の大型のものがファイトロン、小型のものがグロースチェンバーとして植物の研究用に開発された。サンプルされた植物体の細胞や組織の生理実験では為しえなかった植物固体（ホールプラント）の環境条件に起因する生理学的な応答を調べる装置としての価値が評価され、世界各地に普及し始めた。

米国のウィスコンシン大学、デューク大学等、欧州では、パリやワーゲニンゲンの研究所、豪州では、キャンベラのCSIRO等にファイトロンが建設された。この環境制御装置を用いた人工環境条件下における植物生理の特性が陸続と世に示された。特にカリテクのウェント教授による「トマトの最適温度環境」の発見は、当時の植物学分野にパラダイムシフトをもたらすものと強烈なインパクトを与えた。そして環境要因の設定値を変え、一定に調節された環境条件下で生理・生態の効果を明らかにするこの新たな方法論は「環境調節」と呼ばれることとなった。

「バイオトロニクス」

この世界的な新たな潮流に鑑み、わが国では、当時の国立遺伝研究所、専売公社秦野たばこ試験場や東大、京大、東北大、九大等に中型のファイトロンの建設が続出した。これらの諸機関の研究連絡のために創設されたのが本学会の前身「日本生物環境調節学会」であり、東大農学部・農業工学科・杉研究室に事務局が置かれた。1963年のことで、日本農学会刊行の「農学50年史」³⁾に詳しい。

学会は、ユーザとしての植物生理学、園芸学、作物学、養蚕学、畜産学、水産学等々の生物系研究者と環境調節を運用することに関する工学系（農業工学）研究者とに大別された。やがて、日本学術会議の勧告に基づき九大の「ファイトロン」が動物利用にも拡大され「バイオロン」として全国共同利用の生物環境調節研究センターに拡大され、工学面にも関ることになった。ユーザ側の環境調節に対する生物学的要請と環境調節に関する工学的限界との乖離を埋める説明にその頃（1964年、オクスフォード大学の国際シンポジウム）提案された「ファイトロニクス」の概念を、我が国独特の動物を包含する概念「バイオトロニクス」へ拡大し導入した。この用語は、しかし、我が国の思惑に関わらず、世界の

大勢には到らなかった。

当時、大学院生であった筆者は制御工学を専門とする工学部の機械や電気の研究室に出入りしており、上記コンセプトを極めたいと、本学会に残留した。後に、筆者は環境調節のメッカと云われた米国デューク大学に客員教授として滞在したが、ファイトロニクスと人工気象室の（負の）限界が結論付けられていたことを、日本では入手できない多くのシンポジウム関連の文献で知ることになった。

「人工気象室」は、科学論に逆行し、有効な方法論ではない

科学論で自然階層性の最上位に位置付ける気象条件を人工的に造成することは無意味である。多くの不確定要因が介入する環境に応答する植物反応は現象論に止まらざるを得ない。

日本学術会議では2000–2005年、「学術の新体系」に関する多くの委員会が活動した。認識科学、設計科学、情報科学、生物学等に関する総合的な再検討である⁴⁾。プロローグで示したように現在の生物学は、要素還元し、分子や細胞レベルにおける物理化学的機作を解明し、多くの本質を明らかにしている。生物の環境は、何もしなければ気象条件で規定され、上述のような環境調節では温度、湿度等々の環境要因が規定値に制御される。

この人工環境条件下におけるホールプラント（個体も小群落も）の特性を観察し、ウェント教授は「トマトの最適温度環境」を発見し、世界を驚かせたことは前述した。その線上で、人工気象室を用いて植物の生理機能を一気に解決しようと多くが試みたが、失敗に帰した。

ご存知のように、気象は自然界の最上位の階層であり、霧の発生メカニズム一つをとっても高度な科学であり、再現性のある霧の条件も簡単に環境制御機器で造成できるものではない。難解な人工気象の造成を目途とする限り、ファイトロンは生物学における要素還元方向性と正反対の路を歩み、膨大な現象論的なデータを得ても本質論には程遠く、やがて迷路に迷い込むこととなった。

要素還元された環境条件下における

植物応答の解明^{5, 6)}

1970年頃から、人工気象装置の大型ファイトロンではなく、温度、湿度、光、CO₂ガス等のシンプルな制御環境条件下における植物応答の解明を目途とする科学が植物生理学の巨匠クレマー教授を代表とする米国デューク大学を中心に広まった。生物学の進歩に沿った要素還元に基づく環境調節応用の植物生理学に関する研究である。第2世代のファイトロニクスと称し、1980年初頭には、それらの研究は最盛期

を迎えていた。

自然環境を還元する環境条件は研究に必須な要因に限定(要素還元)し、水ポテンシャル、転流、光合成速度等の生理学的特性の計測に重点が置かれ、転流のリアルタイム計測一つを取ってみても、半減期の短い C^{11} をベースにした CO_2 ガスを被実験植物を入れた特殊なグロースチェンバーにオンラインで供給するため小型サイクロトロンを研究室に接続する等、最先端の科学的手段が採用されていた。後述の SPA「**Speaking Plant Approach to Environment Control**」は、上記計測重視の学術の流れを環境制御の前段に活用する栽培システムを象徴的に記述するものとして提案されたコンセプトである。

筆者が滞在した当時(1983年)のデューク大学ファイトロン研究所の掲示板には、理学分野の植物関係の各種学会で発表された業績、例えば要素還元された単純な環境要因下における光合成の特性、転流速の経時特性等の論文と学会賞の写しが数え切れないほど貼り付けてあった。理学部的視点であり、それらの応用、特に農業生産を評価基準とする園芸学的視点とは当時は大きな距離があった。

なお、その当時、クレーマー教授の高弟であるボイヤー教授のイリノイ大学の研究室には九大生物環境調節センター出身の野並氏(現愛媛大学教授)が PhD 取得のために留学中で、水ポテンシャル計測の新たなプロジェクトに参加していた。それに先立ち、デューク大学のフェルマー教授が九大生物環境調節センターに客員教授として来日し、新たな(第2世代の)ファイトロニクスの動向を紹介していた。本学会英文誌の前身である同センター発行の「**Biotronics**」が、上記の方向に修正して行ったことは我が国のこの面の学術にとって極めて良いことであった。この面の一層の発展を願い、本会に「植物生体計測部会」を設け、上記の野並先生が部長として活動中である。

最近の話題として、新学会に移行しての第1回(2007、6)、及び第2回(2008、9)の生体計測部会のシンポジウムは斬新で、「SPA」から「SCA」(**Speaking Cell Approach**)へと、第2世代の「SPA」への萌芽が見られ、楽しみな展開である。

「SPA」と「太陽光利用植物工場」

農学の論理に沿って、変動する地球環境下で食料問題に貢献する環境調節型農業の主役の一つは、北欧起源で最近南欧にも展開する「グリーンハウス・ホーティカルチャー」であろう。1棟で数haにもなる大規模なシステムである。人工光補光型もあるが、主として太陽光をフルに利用し環境調節されるもので、高品質・高付加価値の果菜類や花卉類の大

量生産で永い年月にわたり優れた実績を誇っていた。しかし、1970年代後半、コンピュータがシステム制御に導入されると、園芸工学の枠を超えた機能的な制御工学を必要とする段階へ進歩し、システムは「太陽光植物工場」への道を歩み始める。

すなわち機能的なシステム工学に基づき、植物の生体情報を計測し、高品質・多収穫な栽培を実現する環境調節をコンピュータ制御で実現出来る途が開かれた。前述の SPA を活用する工場的栽培、すなわち「太陽光植物工場」への革新である。

変動する太陽光下で応答する生体情報を上手に活用する栽培では、一定条件(見せ掛けの最適条件)に比較し、その数倍もの収穫が得られる。植物を含む生物体は、非線形要素に起因する自励振動に基づき生理活動を行うので、当然と言える。

以下、太陽光植物工場への発展の流れをやや詳しく、年代を追って記そう。

☆1978: 我国で ISHS(国際園芸学会園芸工学会)主催のグリーンハウスシンポジウムが開催。史上初めて、多くの日本の研究者が先進的な西欧の研究者と情報交換を行い、啓蒙された。オーガナイザーの高倉氏らの功績は極めて大きい。

☆1979: ワーゲニンゲンで環境調節へのコンピュータ応用シンポジウムが開催され、その前後2ヶ月間 JSPS からオランダへ派遣の橋本が出席、オーガナイザーは G. P. A. Bot 教授。橋本が提供した画像計測を活用した SPA が話題になり、計測・制御の高度化に伴い、園芸学専門の ISHS に限定せず、工学者は工学系学会で関連学術を磨くべきであると指摘された。ワーゲニンゲン農大の若手 Udink ten Cate は、オランダの DIT(西欧屈指の名門工科大学)電気工学科出身で、最高の工学レベルを誇る IFAC(国際自動制御連盟)に拠点を設け、より工学的な研究を進めようと提案。オランダ、ドイツ等の先進的な有志が賛同し、2年後に日本で開催される IFAC 世界大会で「太陽光植物工場」の特別セッションを立ち上げる計画が同意された。IFAC の我国の受皿学会 SICE(計測自動制御学会)の当時の四国支部長が橋本であり、当時の IFAC 会長(樺木京都大学名誉教授)の了承を得て実現への道が開かれることになった。

☆1981: IFAC 京都世界大会で特別セッション「北欧のグリーンハウスの環境制御」が実現。オランダ A. J. Udink ten Cate, G. P. A. Bot(ワーゲニンゲン農大)、ドイツ H. J. Tantau(ハノーヴァー大)等、日本から古在、森本、橋本が参加。会議後、九大生環センター、筑波・環境研のグリーンハウスを見学、SICE 研究会の仲間等とハイテク・グリーンハウスに関する国際討論会を開催した(古在、高倉、高辻、大政、橋本等)。国際的には IFAC に TC(技術委員会)を、

国内的にもハイテク・グリーンハウスを専門とする組織（学会）を創ろうと総論的な合意がなされた。

☆ 1983：橋本がデューク大学客員教授・ワーゲニンゲン大上級研究員で欧米に長期間滞在した機会に、関係研究者間を奔走し、上記の準備をさらに推進した。

☆ 1985：SPA（スピーキング・プラント）の日米セミナーを開催（東京）。⁶⁾

☆ 1985：IFAC-SYSID（システム同定シンポ）が英国ヨークで開催。グリーンハウスのシステム同定に関する特別セッションを実現（A. J. Udink ten Cate, H.-J. Tantau, 橋本が発表）、同会議のパーティーで IFAC 首脳に TC 創設の必要性を陳情。

☆ 1987：IFAC ミュンヘン世界大会で、われわれの申請が承認、先ず WG が許可。

☆ 1990：IFAC 世界大会がバルト沿岸のタリーンで開催。TC が許可になり旗揚げ。

以後、TC は、農業工学関連のあらゆる制御システムに拡大。橋本は、1996 年まで TC 委員長を、1996 年から 2002 年まで、村瀬現本学会会長が同委員長を継承。

☆ 1991：IFAC 主催（史上初）、ISHS 共催のワークショップを松山市で開催。その際、ISHS 関係の北欧ハイテク・グリーンハウスの大家、総勢 30 余名を IFAC に招待。「ハイテク・グリーンハウス＝太陽光植物工場」を承認。しかし誇り高き西欧人は、以後も「Greenhouse、又は Greenhouse Horticulture」と呼び続けている。それを日本語で表現するのが「太陽光植物工場」と理解するのが妥当であろう。

☆ 1993：IFAC シドニー世界大会で鳥居、谷が発表。関係者が拡大し始める。

☆ 1994：IFAC ワークショップ（松山大会の第 2 回目）が Day（後の Silsoe 研究所長）により英国で開催、日本人多数が参加。

☆ 1995：IFAC ワークショップがオランダ、ベルギー連続開催で日本人多数が参加。

☆ 1996：IFAC サンフランシスコ世界大会で村瀬、森本、羽藤等が発表。村瀬会長は、この年、委員長に就任し、橋本路線を継承。バイオロボティクス等、農業工学の制御工学分野をさらに拡大・振興。

☆ 1997：IFAC ワークショップが Munack（後の CIGR 会長）の IPC-Chair によりドイツで開催、日本人多数が参加。

☆ 1998：IFAC ワークショップが幕張、アテネ、ブダペストで開催、日本人多数。

☆ 1999：IFAC 北京世界大会、日本人多数。☆ 2000：IFAC カンファレンスをワーゲニンゲンで開催。北欧のハイテク・グリーンハウス（太陽光植物工場）の本家に戻り、総括。以後省略。

この間、橋本は 1996–2002 に TB 委員、2002–2005 に理事、替わって 2008 年から、野口現本学会副会長が TC 委員長就任。

本来、北欧の「グリーンハウス」は「太陽光植物工場」そのものであり、創立理念から、日本植物工場学会が強力に加わるべきであった。しかし、主な活動は海外で、マイナーの国内では、ISHS に関わる園芸工学面は農業気象学会が、制御工学面の IFAC 活動は日本生物環境調節学会が受け皿学会として対応せざるを得なかったので、やがて疎外されて行った。

国内 3 学会の縄張りがグリーンハウスの先端工学面を空洞化したのが、あらゆる植物工場の学術振興を使命に発足した新（本）学会の総力で挽回を期したい。

最近、仁科副会長の尽力で愛媛大学に太陽光植物工場の研究拠点が構築され、若手の高山講師がオランダに留学し、グリーンハウスの若手工学研究グループとの交流が復活した。成果の一部が松山大会のシンポジウムで報告されたが、第 2 世代の SPA の萌芽として期待したい。

さらに、野並生体計測部会長のリーダーシップで、同大会の国際シンポジウムでは、最近の細胞生理学の発展に鑑み、SPA の生体情報を細胞内の情報まで拡大する SCA（Speaking Cell Approach）への期待も高まった。太陽光植物工場の新たな展開が可視化されてきた。

この分野の研究は、オランダではワーゲニンゲン農科大学、IMAG 研究所、ナールドワイク・グリーンハウス試験場、ベルギーではカトリック・ルーバン大学、マッヘルン園芸試験場、英国では曾ってのシルソー研究所、リトルハンプトン園芸試験場、ドイツではハノーヴァー大学、FAL の各試験機関、フランスでは INRA の各試験機関、その他ギリシャのアテネ農科大学等々欧州の広範な大学・研究機関に跨り、同時にそれらの中心的研究者は IFAC の技術委員会のメンバーも兼ねていた。FAL 所長の A. Munack は IFAC 委員長につづき CIGR の会長を歴任した。

人工光植物工場

北欧の大規模な果菜・花卉生産の「太陽光植物工場」には、農業生産の質・量面では王座を譲らざるを得ないが、工業国日本における人工光植物工場の開発の意義は大きい（高辻氏）⁷⁾。その理学的根拠は、第二世代のファイトロニクスに求めることが出来よう。関連し日本植物工場学会が 1988 年に創設された。スタート時の中心は、山口、高辻、橋本の本学会名誉会員と星事務長（当時）であった。

30 年以前に於いては、電力の需要喚起の社会的ニーズや、旧来の停滞ぎみの農業に対するアンチテーゼの意味もあ

り、また農工融合による新生産システムの嚆矢としてマスコミをはじめ、社会の強い後押しで盛り上がった。しかし、四半世紀後の今日では「地球環境の温暖化防止」の省エネ大合唱が湧き上がり、逆風となり、やや逆境に差し掛かったとも云える。「遺伝子組み換え苗生産工場」等へと漸次シフトし、社会の共感を勝ち得ていくことも必要な対応策であろう。

しかし、我が国起源の優れたこの学術は、植物工場の概念を萌芽・展開と力強く発展させ、今や、世界の「グリーンハウス・ホーティカルチャ」を太陽光植物工場の概念に誘導する国際世論の基盤を築いた功績は計り知れない程大きい。そのサバイバルは当然、輝かしい未来を共に歩んで行くことを切に願うものである。

太陽光植物工場に関わる新たな学術研究や

日本学術会議分科会の活動

太陽光植物工場は、変動する外気変動下における知能的制御^{8,9)}が効果を発揮するので、農業とは言え、人工光に比べかなり高度なシステム制御¹⁰⁾が要求される。すでに述べたように、太陽光植物工場に関わる世界の機能工学面は、IFACを中心に高度な成果を蓄積している¹¹⁾。

我が学会では、旧生物環境調節学会の流れを受け、グリーンハウス、すなわち「太陽光植物工場」に関する広範な学術を積極的に扱うのが適切と思う。グリーンハウスにおける作業の機械化や、関連する自動化等は「グリーンハウス・オートメーション」¹²⁾として既に一部その重要性が指摘されている。バイオロボティクスが高度に進展しつつある現在¹³⁾、関連する自動化、機械化を体系的に「全自動植物工場」として取り込んで行くべきで、新学会の新たな使命の一つである。

日本学術会議第21期(2008–2011)の農業情報システム学分科会(野口委員長)に「太陽光植物工場」に関するWGが組織された。古在、池田氏はじめオランダ型のグリーンハウスに詳しい我が国最高のメンバーで構成されている。総合的にこの実用システムに科学的・俯瞰的学術のメスを入れ、ハイテク技術と融合させ、真に社会貢献が出来るイノベーションを目的に一層深化した論議が始まった。世界に誇れる最大の成果を期待したい。

エピソード

本稿は2008年9月6日開催の日本生物環境工学会年次大会プレシンポジウムの講演原稿を一部加筆修正したものである。

学会には、理念と展望が必須である。我が国起源の人工光植物工場(旧日本植物工場学会)と北欧起源のハイテ

ク・グリーンハウス(太陽光植物工場)の制御工学面(旧日本生物環境調節工学会)に実績を残してきた両学会の合併が、何を意味し、今後どのような展開を見せるか、かつて両学会会長を歴任した筆者が環境調節の歴史的観点に沿った想像的視点から課題を可視化することを試みた。

今後の食料生産に関する大きな柱として、太陽光並びに人工光植物工場を総合的に扱える活力ある学会が必要な時期に差し掛かっていることは衆知であろう。

著者、会長、副会長が指導者(役員)として運営してきた国際ハイテク工学会 IFAC の学術活動が国内に反映される事が少なかった。また、園芸学の出番が少なかったこと等を深く反省し、関係各位のご理解を喚起することとした。新学会が、両学会、園芸学、IFAC 国際学会の流れに基づき、飛躍的に発展されんことを期待する。

最後に、プレシンポジウムを企画し、成功裡に実施された本学会「生物環境調節部会」の田中道男部会長、同部会関係委員に最大の敬意を表し、閉め括りたい。

引用文献

- 1) 矢原一郎. 生物の論理. 岩波書店, 1–207. 2002.
- 2) 日本生物環境調節学会編. 新版生物環境調節ハンドブック. 養賢堂, 1–585. 1995
- 3) 日本農学会編. 日本農学 50 年史. 養賢堂, 1980, (日本農学 80 年史: 現在印刷中にはさらに詳しい—第 27 章—)
- 4) 吉田民人. 新しい学術の体系. 日本学術会議. 86–172. 2003.
- 5) 橋本 康. 計測・情報科学. 養賢堂, 1–265. 1990.
- 6) Y. Hashimoto, P. J. Kramer, H. Nonami *et al.* eds. Measurement Techniques in Plant Science. Academic Press, USA. 1–431. 1990.
- 7) 高辻正基. 完全制御型植物工場. オーム社, 1–125. 2007.
- 8) 山崎弘郎・橋本 康・鳥居 徹編. インテリジェント農業—自動化・知能化のすすめ—. 工業調査会, 1–293. 1996.
- 9) Y. Hashimoto *et al.*, Intelligent Systems for Agriculture in Japan. IEEE Control Systems Magazine, 21(5) 71–85, 2001.
- 10) 橋本 康・村瀬治比古・大下誠一・森本哲夫・鳥居 徹. 農業におけるシステム制御. コロナ社. 1–185. 2002.
- 11) Y. Hashimoto *et al.* eds. The Computerized Greenhouse. Academic Press, USA. 1–340. 1993.
- 12) 橋本 康編著. グリーンハウス・オートメーション. 養賢堂. 1–212. 1992.
- 13) N. Noguchi and H. Murase eds. Special Issue on biorobotics Computers and electronics in agriculture 63(1). Elsevier. 2008.