

植物工場 - 技術と学術 -

村瀬治比古

1. 学術会議の提言

日本学術会議は、その第19期(平成15年7月22日~平成17年9月30日)において日本学術会議対外報告書「気候変動条件下および人工環境下における食料生産の向上と安全性」と題する重要な提言をまとめている。その提言は次のようなものである¹⁾。

- 1) ユビキタス社会の特徴を生かしたマクロな地球規模からミクロまでの気象・気候特性の解明と、信頼性の高い計測・モニタリングシステムの確立が必要である。
- 2) 異常気象による農業気象災害の発生メカニズムの解明及び環境へのシステム科学的アプローチによる保全・修復に関する学術の開発が不可欠である。
- 3) 要素還元された人工環境下における植物栽培プロセスの最適化、ついで局所的な精密圃場管理による最適化、さらに気象環境下における最適化へと視点を拡大し、システム科学的な機能重視の農業を多角的に実証すべき時期にある。
- 4) 人工環境下でシステム化・最適化された植物工場は、天候に左右されない無農薬で安全な作物の生産方式である。環境への負荷が少なく、経済性に富んだ知能的植物工場の研究開発が期待される。次世代の農業生産に寄与する学術価値は大きい。
- 5) システムアプローチの延長として、食の安全を脅かす要因に対するモニタリング、予防を含めソフトを有効利用する情報科学的な包括的なフードシステム、安全貯蔵技術の確立が必要である。

以上において特に第3項以降は今日の食料生産を取り巻く環境に鑑み植物工場の重要性と植物工場が担うべき役割について明確に述べている。植物工場を単に施設園芸の延長線上に位置付けることなく将来の食料生産、生物生産、更には物質生産を支える革新的なシステムとして扱う必要があることがこの提言から読み取れる。学術会議の提言は、政府各省庁および産業界等へ示され、わが国における学術および科学技術の発展に方向性を与えるものである。

2. 技術革新

約4億6千万年前に緑藻類が海中から地上に姿を現し、地球を緑の植物で覆うきっかけをなした。古植代の始まりであった(図1)。これを第1種グリーンジェネシス(Green Genesis 1st Kind)とする。その後、氷河期を繰り返す紀元前1万年のころには我々のような新人といわれる人類が出現していた。それまで、自然の植物を採取して生活していた彼らは、人為的に植物を育て食料とするいわゆる農耕を始めた。最近では、農耕の起源はメソポタミアではなくもっと古くBC9000年ころに、パレスチナのイエリコ

やアスワドで、コムギ類とマメ類の栽培が始まったといわれている。大河の水を利用して大規模な灌漑を施す農耕が、豊かな収穫を齎し、大量の余剰生産物を生み出すようになった。これが、文明の発生へとつながっていった。このようにこの厳しい自然環境に対抗して人為的に緑を作り始めたことを第2種グリーンジェネシス(Green Genesis 2nd Kind)とする。図1に示すように農耕が始まってより多くの人間を肥やすことが可能となり僅かではあるが世界の人口は産業革命まで徐々に増加した。その後、産業革命を契機に一気に世界人口の増加が始まった。工業においては技術的革命が起きたが農業については依然として厳しい自然環境の中で多少の技術的進歩はあるものの第2種グリーンジェネシス以来の自然依存型農耕の闘いを出ていない。その中で世界人口の伸びは著しく米国統計局の最新予測では、西暦2050年には世界人口が95億人を超えるとされている。農業においても20世紀半ばから「緑の革命」と言われる小麦や稲を中心とする技術革新が進行し、途上国を中心に波及したが、食料の大増産を可能とするシナリオは現実のものにはならず、それどころか生物多様性の維持を唱える立場からは厳しい批判が噴出し、事実、耐性害虫の発生で単一種の小麦生産が大打撃を受けたなどの問題が明らかになった。今世紀に入って気象変動やバイオテクノロジーの導入などを考慮した「新しい緑の革命」といわれる試みもなされているが、その基本的技術レベルは依然として第2種グリーンジェネシス以来の「自然の恵み」の範疇にあるということは明白である。

農業工学の視座からは、我々が御しうる高度な技術を生物に直接適応するのではなく、システム制御という観点を前面に押し進めることである。すなわち、最適化が可能な生産システムの構築であり、そのために高度な技術を適応していくことである。「自然の恵み」はシステム制御の観点からは処理不可能な外乱であり、まずその排除に努力すべきである。その考えを実際の技術として成熟させたとき、それが第3種グリーンジェネシス(Green Genesis 3rd Kind)である。第3種グリーンジェネシスとは、「自然の恵みとしての総取り」をより多くもたらす技術として確立した第2種グリーンジェネシスとは異なり、植物の光合成機能を活用しエネルギーの食料変換過程全てにわたって最適化することが可能なシステムを技術として完成したものである。そのアプローチに対する議論は多々あるにしても現在生物生産の分野に残された、考えうる一つの技術的到達点であることは間違いない。

21世紀は植物利用が広まると予想されている。農産物としての植物はこれまでも重要視されてきたが、その他次のような植物利用が考えられる。環境保全のための緑化植物とピオトープ用植物、将来の医療の一翼を担う有用タンパク生産機能を利用する植物分子工場さらには人の精神活動に関わる植物応用セラピー、環境浄化のためのバイオレメディエーションにおけるエンジニアリングコンポーネントとしての植物、代替エネルギーとしてのバイオマス資源

など多くの例があり、関連の研究開発が進んでいる。将来的にはこれらの多様な利用目的を満たすための様々な植物の生産はこれまでの食料生産中心の「モノづくり」の農業ではもはや社会に受け入れられないであろう。しかし、さまざまな問題が既に顕在化している現在において、何をなすべきかを考えなければならない。

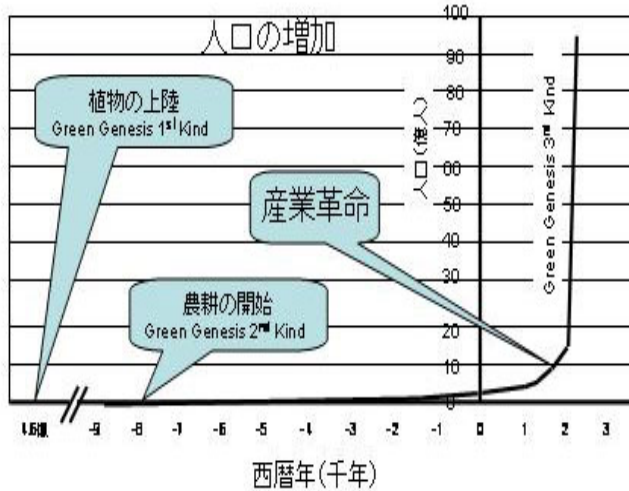


図1 植物が地表に現れたことを第1種グリーンジェネシスと称するならば、農耕の開始は第2種グリーンジェネシスであろう。それ以来未だに「自然の恵み」が作物である。将来、地球に溢れる100億の人類を肥やすためには第3種グリーンジェネシスに待つ。

3. 植物工場の科学的方法論

将来の人口爆発に備えて大量に食料を生産するモノづくり農業に拍車をかけたのでは世界の歪はますます深刻になる。農業は生物を生産することだけが目的ではなく、社会を潤すための価値を作り出すことである。人口爆発などが起きないような秩序ある世界を築くための主要な貢献を果たす産業が農業であるべきである。21世紀の農業は「コトづくり」の農業であり、その取り組むべき目的と価値は循環型生産や安全性などを考慮した生物生産システムを構築し、持続型・環境緩和型・循環型・俯瞰型といったキーワードで表現される価値を生み出すことである。

古くから人間の知的能力を生かして農耕といえども実践的な技術に成長し、社会に貢献し、近代科学の合理的な基盤が与えられ農学という実学として体系付けられた。すなわち、農学は本来設計科学である。設計科学に對する科学が認識科学であり、人文・社会科学、生命科学、物質科学である。図2は農学を新しい学術分野(生物生産システム科学)として再認識したときのたたずまいである。人工物システム科学に他ならない生物生産システム科学は、秩序原理を介して環境・健康・福祉(人文・社会科学)、ゲノム科学(生命科学)、さらにエネルギー変換(物質科学)というドメインに密接に関わって新しい学術分野を構築する。

これまで農業は基本的に食料生産を主に集約多収を図ってきた。その結果、窒素汚染、農薬汚染、表土流失、耕土劣化などなどの負の効果をもたらしたわけで、それは「モノづくり」を優先する古典的発想に依拠する縦型の技術分野が農学を含め固有領域の世界を歩んできたためいたし方のないことであった。まさに俯瞰的視点の欠如である。

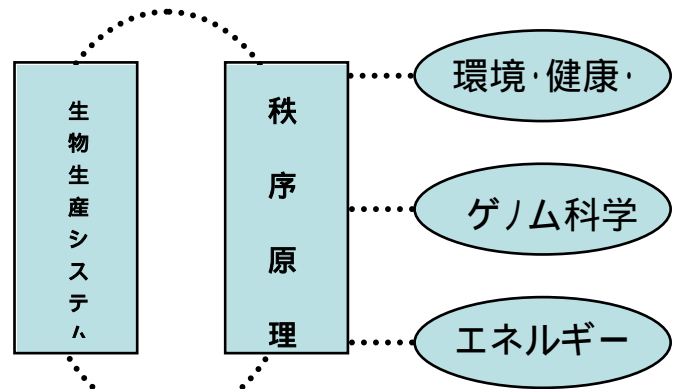


図2 「コトづくり」農業は単に食料を生産することのみを目的に営まれるものではなく、持続型・環境緩和型・循環型・俯瞰型といったキーワードで表現される価値を生み出す。

この21世紀の流れとして、価値を学術研究の内部に取り込む方法としての俯瞰的研究法があり、価値命題を検証することが可能であることから、生物生産システム科学のような確固たる設計科学には極めて有力な方法論である。先に述べたように、21世紀の農業は「コトづくり」の農業であり、その取り組むべき目的と価値は循環型生産や安全性などを考慮した生物生産システムを構築し、持続型・環境緩和型・循環型・俯瞰型といったキーワードで表現される価値を生み出すことである。その実践には、生物生産システムを俯瞰的に再評価する手立てを有することである。Fig 図3に示すようにその新しい生物生産システム科学分野は学術の基本分野と密接に関わっている。とくに、計測・制御科学、設計学、システム科学、情報学、認知科学などの分野を挙げるなら、その具体的な科学技術の領域が生物生産システム科学分野の中で基幹技術として発展し一部には生物環境工学のように体系化されてきた。システム科学、計測制御科学あるいはモデル学など生物生産システム科学において最も有用であると考えられ、その研究開発が主流になりつつあるこれらの科学技術は、横断型基幹技術にほかならない³⁾。

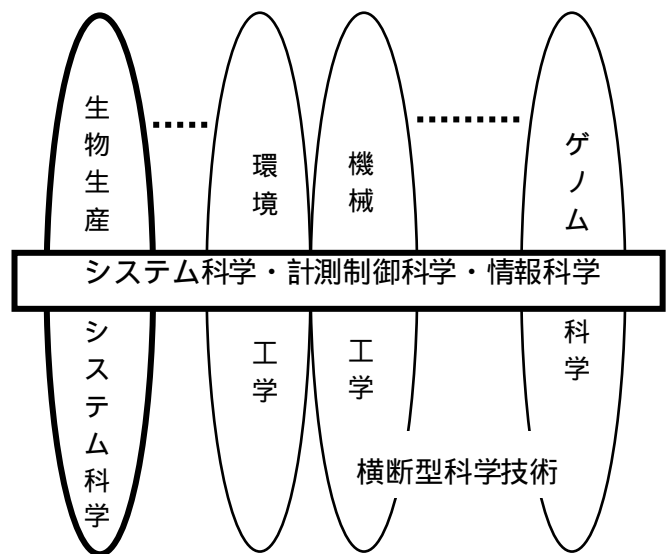


図3 生物生産システム科学(新しい農学)は環境工学や機械工学などの他領域とシステム科学や情報科学などを介して密接に関係する。

4. 最適化手法

農業について、その文化、歴史あるいは哲学との関わりに触れることなく植物生産というクリズな考え方で捉えたとしても、そこには工業生産とは比較にならないほど大規模で複雑な生産システムが横たわっている。まず、そこで扱われる植物自体が大規模複雑系の極みであり、さらにそれを自然環境が取り巻いている。そのような系に対して人類は長い年月を経て自然採取から生産という業に転ずることで何十億もの人口をこの地球上で養うに至った。作物の生産を例にすると、品種改良、播種から収穫まで肥培管理や防除なども含めた栽培技術、その機械化、ポストハーベストさらに灌漑排水まで生産性の向上を図るためのさまざまな技術の発展があった。しかし、今日においては環境親和、持続的、循環型、安全性といったキーワードで彩られた技術が求められ、もはや単に生産性向上という一面的な技術開発の方向性はまったく社会に受け入れられない事となった。今こそ生物生産システムという大規模複雑系に対してシステムの最適化(システム制御)を環境親和、持続的、循環型、安全性といった視点からアプローチを行う時である。既にその努力は始まっており、近未来に向けてさらなる加速が予想される。

制御という観点において植物に対してその成長は非可逆的であり言わば非可逆生化学反応のプロセス制御を行うと考えることもできる。また、生体に直接操作を施すことは困難で、温度、湿度、光、ガスあるいは肥料などの生育環境要素を介した制御を行うことになる。しかし、その環境が自然環境であればその操作は極めて困難である。病虫害発生、雑草繁茂、旱魃あるいは台風などは外乱というには余りに影響が大きい。このような中でこれまで培われてきた農業技術というのは、限られた条件下での最適化の技術である。即ち、限られた狭隘なそれぞれのサブシステムについて最適化が試みられたわけで、生産システム全体としての最適化には及んでいない。その結果として生産性の向上に伴って農業問題、塩害あるいは土壌劣化などの弊害・環境問題が現れた。今後は植物生産システム全体に対する最適化を行うことが重要でシステム制御や最適化などの手法が導入しやすいシステムを構築するところから始めることになる。課題はシステム制御や最適化を行うためにはその生産システムの同定・計測・モデル化などがどこまで可能であるかということである。完全制御型の植物工場システムはその目的に最も適した生産システムと考えられる⁴⁾。

近未来の巨大アグリビジネスの創造を予感させる新産業技術がアグリ・バイオである。それはバイオテクノロジーと情報技術(IT)を融合させたシステム技術を農業に応用することで生まれる新産業である。中でも植物バイオテクノロジー(植物バイオ)は従来の遺伝子組換え技術に代表されるいわゆる「バイテク」も包含した情報技術とシステム技術を主役とした領域である。植物工場などのシステムは将来の植物バイオにつながる技術である。路地栽培の場合、植物は光合成により蓄えたエネルギーを環境負荷に対抗するために大量に消費する。それに対して植物工場の場合は蓄えたエネルギーを全て次世代をつくるための遺伝子を全面的に展開するために利用できる。また、ハードウェアとしての植物工場についてはそのシステムの同定が可能であり気象変化などの極端な外乱を想定する必要がない事からそのシステム制御は自ずとより高度な最適化が可能となる。植物分子工場は植物に有用物質を生産させる技術として将来有望視される技術であるが、そのような植物を栽培するシステムに露地栽培のような制御不能なシステム

を適用することはできない。特に、閉鎖型植物工場では完全無農薬で、ゼロエミッションなど持続型・環境緩和型・循環型・俯瞰型といった価値観を考慮するに最も相応しい植物生産システムである。

ここで、植物バイオという観点で生産システムを考察する。これまでの植物工場におけるシステム制御は主に植物生育環境についての制御であり光、温度あるいは湿度といった環境要素が制御対象で信号の流れ(情報の流れ)の中に植物が入っていない。本来植物生育の最適化が目的であるにもかかわらず植物システムが組み込まれていないのである。この問題を解決することが植物バイオという範疇における技術開発である。即ち、大規模複雑系である植物システムの同定が必要である。さらにそのシステムの挙動を観測するセンシング技術が必要である。

5. おわりに

食料生産システムあるいは植物生産システムは、大規模複雑系ではあるが、そのシステムを同定する努力なしでは持続的で環境にやさしくしかも安全・安心を保障する生産物を消費者に供給することができない。自然を直接利用する農業では、その最適化レベルを十分上げるには限界があるが閉鎖型植物工場のようなシステムについてはその最適化も比較的容易で、新しい技術を積極的に投入することも可能である。なぜならば閉鎖型植物工場のようなシステムではその同定や挙動の解析が比較的容易であること、システム的人為的改変も比較的容易であることなどが挙げなる。過去にロンドンで廃墟となった古いビルディングを植物工場にするプロジェクトがあったが、わが国でも同様なアイデアが浮上しており、生産施設というより都市の一機能として高層ビルのいくつかは太陽電池を窓代わりにインストールした植物工場にして毎日新鮮な作物を直接地域住民に供給するなど是非近未来に実現したい。近視眼的には建設コストやランニングコストなどにマイナスのイメージがあるが、実際には環境コストや安全・安心コストを考慮し、大きな自然の負の影響に備えるコストも省けるなど最適化が可能なシステムのメリットは計り知れないものがある。