学術賞受賞研究要旨

生物環境調節における適応的解析手法の開発と応用

村 瀬 治 比 古

大阪府立大学大学院農学生命科学研究科

Development and Application of Adaptive Method in Analysis of
Environmental Control in Biology

Haruhiko MURASE

*Graduate School of Agriculture and Biological Science, Osaka Prefecture University, 1-1,
Gakuen, Sakai 599-8531, Japan*

はじめに

このたび、標記の研究に対して栄誉ある日本生物環境調節学会学術賞を授与されることとなり、身に余る光栄に存ずる。会長、蔵田憲次選考委員長ならびに選考委員の皆様方には衷心より御礼申し上げる。

受賞対象となった研究業績は、わたくしがミシガン州立大学留学の折にアカデミックアドバイザーであり学位論文の主査でありましたジョージ・メルバ教授のフィジオエンジニアリングの研究に端を発し、その後、植物システムの複雑さに魅せられる中で計算力学やシステムアプローチを経て最終的にたどり着いた適応的解析法に至る研究展開に関するものである。この間にメルバ教授をはじめ諸先生方のご助言やご助力をいただき、また、わたくしの下で一連の研究の遂行に協力をいただいた当時の学部や大学院の学生諸氏にも深く感謝申し上げる次第である。

研究経過と内容

フィジオエンジニアリング (Physioengineering) がアメリカで創始された直後から、植物生理工学の研究を進める中で熱力学、機械力学そして計算力学とシステム工学の視点を取り入れた研究手法に重点を置いた。その研究にはトマト柔細胞の水ポテンシャル変化と膨張変形に関する熱力学解析と表皮細胞の水ポテンシャル変化と亀裂の機械力学的研究などがあり、水耕トマ

トの根圏環境の制御やガラス室の湿度制御などのトマト裂果防止の具体的栽培管理法などの普及面にも反映された。その研究の道筋は、熱力学と機械力学による基礎的解析にシステム工学を応用して環境制御へ帰結するというものであった。当時、ミシガン州ではガラス温室でトマトが水耕栽培されていたが、その栽培の中に根圏に蓄積した塩類を時々洗い流して根の活性を図る管理方法が採用されていた。その方法による効果は認められていたが、その弊害として時折、激しい裂果現象が発生していた。そこで、その原因と対策についての研究が進められ、トマト果皮の応力集中と水ポテンシャル変化の関係が力学的に解析された。また、根圏の急激な水ポテンシャル変化、トマト果実の水ポテンシャル変化および果実まわりの大気の水ポテンシャル（湿度）の関係が裂果現象に複雑に寄与していることがシステムのなアプローチから解明され、トマト果皮に粘弾性モデルを適用することで根圏の洗浄が果皮の応力集中を発生させないタイミングを明らかにした。後に、この研究結果は NFT によるミニトマト栽培にも応用された。

それらの研究が基盤となり、その植物生理工学をさらに発展させた生物生産を意識した分野としてファイトテクノロジー研究を進めた。その中で、生物システムが複雑系であり、そのモデリングも単に微分方程式を重ね合わせる努力だけでは工学的な視点に立った実用性という点で限界があることから複雑系のモデリン

グには適応的あるいは知能的な方法論の導入が必要であるとの観点で、この知能的モデリングにおけるニューラルネットワークの適用を展開した。その過程で、ノイズの多い生物系のデータの扱いに、より適したカルマンニューロを開発し、一般工学分野でも用いられることとなった。農学の分野ではこれまで多くの場合、工学系由来の手法を利用してきたが、カルマンニューロについては農学系由来の方法が工学分野で用いられた例である。カルマンニューロの適用例を示すと、まず、現代制御理論を用いてはじめて解析可能とされる温度および湿度の連成問題についてカルマンニューロを用いた適応制御モデルで示した。また、温室の局所温度制御という新しい概念を実際のシステムとして実現した研究も適応制御に関するものである。この課題は、閉空間内で任意に温度分布を作り出す環境制御方法で、複数設けられたダクトから多様に温度や湿度等が調整された気流を多様な方向に吹き出すことにより温度分布を作り出すシステムである。その、気流の温度、吹き出し方向および風量は各ダクトについてそれぞれ適切に調節しなければならない。そのような複雑な系の制御には適応的方法が唯一有効で、この場合にはニューラルネットワークの逆モデルを構築することで問題を解決した。さらに、適応的方法、計算力学、システムアプローチを組み合わせることによって有限要素ニューロや有限要素網膜といった生物情報を得るための研究を展開した。有限要素ニューロの特徴は、従来のニューラルネットワークのように単純な情報の伝達構造ではなく、ポアソン方程式などの支配方程式を伴うニューラルネットワークであり、計算力学と最適化アルゴリズムの融合という観点から極めてユニークな研究成果である。これらの手法を用いて、特に複雑系のパラメータ同定に多くの研究成果が得られた。有限要素逆解析とニューロを組み合わせた植物培養器の熱力学解析は、容器内の微気象について有限要素モデルを構築した。この解析の特徴は、系の記述に対流、輻射、拡散などの熱力学の解析的モデルを適用した。このアプローチの課題は、モデルに含まれる様々なパラメータを決定するために通常極めて複雑な実験をしなければならないことである。しかし、この課題に対しては、その力学系に含まれる熱力学乗数を有限要素逆解析から推定する方法を導入することにより、単純な実験からこのパラメータを決定することを可能とした。この方法により最終的に容器内の微気象モデルを有限要素で表すことに成功した。とくに、有限要素網

膜と称する画像データを扱う有限要素ニューロは、動画に対しても画像解析に適用できるデータを取ることが可能である。微小重力場における植物成長に関しては宇宙開発分野のみならず多くの関連分野で関心が高い。しかし、作物栽培などの実用レベルでの研究報告は限られている。その中で、幸いにしてスペースストロンおよびスペースストロンジュニアと称される作物栽培が可能なクリノスタット実験装置を利用できる研究環境を得て、いくつかの関連する研究を遂行することができた。クリノスタットによる植物栽培における一つの課題は、クリノスタットの動作中の植物データをリアルタイムで収集することである。いくつかの方法は考えられるが、ここでは動画処理から植物成長をモニタする方法が採用された。その方法の採用を可能にした要因は、高速な画像取り込み技術に加え、有限要素網膜を用いた画像データの処理が可能であったことである。これらスペースストロンおよびスペースストロンジュニアなどの植物育成型クリノスタットを利用して、微小重力下の植物育成システムの開発および重力制御下における植物の成長に関する研究など多くの成果が得られた。

1. 植物システムの適応制御

栽培プロセスの環境を制御する新しい施設型農業として植物工場などの研究開発が、安全性、安定性、高効率性を備えた生産方法であるとの認識のもとに行われている。

栽培プロセスの環境制御には温度、湿度、光強度、ガス濃度などの制御因子が種々考えられる。その中でも温度および湿度の制御は極めて大きい意味をもつと考えられる。温度と湿度と植物反応とは非常に密接な関係をもっており、周囲の温度・湿度に応じて植物体は絶えず変化しているともいわれている。そのために環境の温度や湿度を植物に適した状態にするような調整を求められる場合がある。また、植物によってはより高い精度の調整が必要とされる場合もある。しかし、温度と湿度は空気線図上でも明らかなように、どちらか一方の状態を変えると、他方も変化する。したがって、温度と湿度を制御するためには見かけ上非干渉的に同時制御する必要がある。要求精度にもよるが市販のPIDコントローラなどを多段にして用いればある程度実現可能である。しかし、温度と湿度のみの連成ならばともかく植物育成環境ではその他の要素間の連成も存在し、いわゆる多入力多出力システムを想定しなければならない。したがって、複雑な植物育成環境

の制御問題についてPID制御などを利用することは根本的な解決策ではない。現代制御理論に基づく温湿度非干渉制御の研究例はあるが、実際の空調システムは系を構成する要素が多く、かつ、非線形要素や予測不可能な要素を多く含むことから、数学的な解析による制御理論でそのような系の非干渉制御は現実的とはいえない。植物システムなどの大規模複雑系の制御にはやはり適応的なアプローチが有効である。

2. カルマン・ニューロ

適応的アプローチでよく用いられるツールとして人工神経回路網（ニューラルネットワーク）がある。ニューラルネットワークは非線形の多入力多出力システムの同定に非常に有効であり、遺伝的アルゴリズムと同様に最近では日常的に用いられる手法である。ニューラルネットワークの主要な特徴は学習機能である。その学習を司る学習則とよばれるアルゴリズムがあり、最もよく用いられるものが誤差逆伝播法である。誤差逆伝播法はアルゴリズムが簡単で計算付加も少ないことから学習則の標準的存在となっている。しかし、ニューラルネットワークの学習で用いられる教師データの特質によっては収束性に劣るなど問題点も多い。たとえば植物システムを対象とした各種の実験データは機械システムなどで得られるデータと比較すると、植物システムの性質上、得られたデータに多くのノイズが含まれていたり、ばらつきが顕著であるなど教師データとしては扱いにくい。

そこで、本研究遂行の家庭で、植物システムの解析を適応的な手法で進めるためにはノイズに対して強靱な学習即を伴うニューラルネットワークの開発が急務となった。現代制御理論でよく用いられるカルマンフィルターはノイズに強いパラメータ推定法であることから、ニューラルネットワークの学習、すなわち、シナプス荷重の調整をパラメータ推定問題と捉えることで、カルマンフィルターの適応の可能性が推測できる。

実際には、シナプス荷重を状態変数と定義すれば容易に状態方程式が決定される。カルマンゲインと推定誤差共分散行列もシナプス荷重の変化率から計算できることから、カルマンフィルターがニューラルネットワークの学習即として適用可能であることを示した。この研究結果は、1994年2月に森北出版より「パソコンによるカルマン・ニューロコンピューティング」として出版され1995年9月には第2刷となり情報や工学の分野で用いられることとなった。それまでは、工

学分野から移入した手法に甘んじていた中で、生物システムを扱う困難さが故に開発に成功した新たな学習アルゴリズムが工学分野で用いられることになった。農業工学で用いる工学的手法についてオリジナリティを主張できる機会はそれほど多くはなく、私の研究においてもこのカルマン・ニューロが最初である。

本学習則の特性については、植物システムの適応制御で必ず問題となる非線形の多入力多出力システムの同定について詳細に研究を行った、また、植物の形態などを画像データとして利用することが多々あるが、その画像の認識にカルマン・ニューロが極めて有効であることも示した。トマトの裂果現象などの解析では果実の構造同定を行うがその複雑な多媒質系の処理に適応的方法が用いられる。その構造同定についてもカルマン・ニューロの有効性が確認できた。その他、制御問題やエキスパートシステム構築への適用など植物システムの研究に必要な主要部分について適応的手法の有効性をカルマン・ニューロの利用を基礎に検討した。

制御問題では、前節で述べた温度および湿度の非干渉制御について閉空間内の温湿度同時制御を時系列のニューラルネットワークで実証した。また、同じく閉空間内で温度分布を人為的に生成するシステムの研究も行った。ガラス温室内には常に場所による温度差が生じているが、その温度差は外部の日射や気温などの環境要素の状態によって決まる。通常はその温度差の存在を容認し栽培方法を工夫して、その不均一性に起因する問題の発生を回避している。しかし、高度に環境制御を行う場合には、その空間内における温度の均一性を実現するシステムであるべきである。また、逆に人為的に不均一な温度分布を実現するシステム（局所環境制御）も考えられる。この局所環境制御システムこそが真に均一な温度分布を実現することが可能である。局所環境制御を実現するためには、複雑な空気の流れを作る機能や、状態の異なる空気を吸排気する機能などが必要である。温度などの状態の異なる空気の気流を制御（風速・風量・風向制御）することが要求されるがその複雑な組み合わせは適応的制御によって実現可能であることを実証した。

3. 有限要素法とニューラルネットワーク

植物システムの解析では、単に現象をニューラルネットワークを用いてモデル化（同定）することで問題が解決できるとは限らない。時には植物システムも熱力学系の問題に帰結できる場合もあり数値的ではあ

るが理論的な解析も重要な手段となる。力学系や熱力学系の比較的複雑な問題も有限要素法などの数値計算法を用いることでかなり解析できる環境にある。しかし、やはり植物システムでは単純な熱力学系の有限要素解析のみでは最終的な結論に至る場合は稀である。その場合には有限要素法と適応的方法を組み合わせるなどの工夫が必要である。

いくつかの研究の中で、この点が最も顕著に扱われた問題の一つとして、植物培養器内部の温度分布についての解析がある。植物培養器内の温度分布は容器が置かれた外部環境によって決まる。この解析で必要な容器表面の対流熱伝達係数は通常の実験では測定が極めて困難である。そこで熱力学系をまず有限要素モデルで記述し、そこに含まれる系の特性を表す係数を未知数とする。その未知数はシステムの境界条件を一定にしたときには、系の挙動を決定する要素となる。したがって、その未知数として扱われている係数の変化と系の挙動は一つの対応関係を示す。それは通常、非線形で多入力多出力システムと位置づけられる。その考えが受け入れられればその系にニューラルネットワークを適用する。基本的に有限要素モデルが存在するため、その非線形システムの挙動は容易に計算可能である。すなわち、有限要素モデルを用いて境界条件を固定して、様々な係数の変化に対するシステム全体の挙動が数値的に求められる。このことはニューラルネットワークの教師データを有限要素モデルによって発生させることが可能になる。そのモデルが生成した教師データの内、システムの挙動を入力データ、そして求めたい係数を出力としてニューロの学習を行う。実験システムを構築し境界条件を整えてシステムの挙動を観測することで、学習済みニューロへ入力すべき実験データが得られる。後に、そのデータを学習済みニューロに入力するだけで、その挙動を引き起こす原因となる係数を推定値として出力する。この手法をニューラルネットワークを用いた逆解析手法と呼ばれ、植物システム解析に多用した。

この逆解析の考え方は応用範囲が広く、本研究成果である有限要素ニューロは、この逆解析の考え方、有限要素法の利便性およびニューラルネットの学習の概念などを組み合わせて完成させた、支配方程式のあるニューラルネットワークとして誕生した。一般に用いられているニューラルネットワークが概念的な数値上のユニット間の結合であるのに対して有限要素ニューロは物理的な構造を有していることが特徴である。支

配方程式がポアソン方程式であり、各有限要素の物質材料定数がシナプス荷重に相当する。したがって、有限要素ニューロは立体構造をとりうることから、知能を持った構造という意味においては知能構造物としても位置づけられる。すなわち、構造自体が荷重などの刺激を受けた場合に、この刺激を入力情報として構造全体に伝達し、その過程で情報処理を施して、構造内の特定の部位に出力としての物理的情報を何らかの形で出力するものである。この有限要素ニューロの特徴を生かして、葉面の画像データ（G要素の輝度、濃度共起行列から計算したコントラスト）を入力として葉内の水ポテンシャル分布の推定をする有限要素ニューラルネットワークを検討した。通常の3層ニューロの結果と比較したところ同程度の良好な推定値が得られた。ここで、有限要素ニューロの特質すべき点として問題によっては支配方程式を利用しているために学習範囲外の入力に対しても応答する場合もあり、この水ポテンシャル分布の例では通常のニューロでは予測できない範囲の入力に対しても実験値の誤差が受け入れ可能な範囲の出力を得た。

おわりに

生物環境調節学会の理念では研究領域として、植物の環境応答・環境ストレスの解析、それらの解析法・実験法・予測法・計測法の開発、植物の環境の計測および環境成立機構の解析、植物の環境調節・制御法の開発、植物利用による環境改変法の開発などが掲げられている。本研究をとおして示したことは、植物を対象にその環境調節という領域が全ての階層で複雑であり、そこでは熱力学、機械力学および計算力学などの基盤的な工学の方法論を導入する必要がある、画像処理を含め、その計測・制御の技法・技術の全てにわたり適応的な情報の扱い、あるいは、システム解析が有効であり、主に計算力学、逆解析およびニューラルネットワークを融合させる形で環境調節学研究に資する適応的解析手法を開発してきたことである。平成15年度が初年度である科学研究費補助金基盤研究(A)としてスピーキング・プラント・アプローチを主題と研究が進められている。そこでは、直接的な計測が困難な植物系の様々なパラメータをソフト的にセンシングする方法論を明確にする研究が実施されている。生物環境調節学の分野にはまだまだ未解明な部分も多く、今後この方面の研究に対し、多くの方々が更に新しい方法論を導入し、それらの研究が発展することを希望する

ものである。

関連文献

- Hashimoto, Y., Murase H., Morimoto T. and Torii T. 2001. Intelligent systems for agriculture in Japan, IEEE Control Systems Magazine **21**: 71-85.
- Murase, H., Merva G. E. 1977. Static elastic modulus of tomato epidermis as affected by water potential. Trans. of ASAE **20**: 594-597.
- Murase, H., Merva G. E. 1979. Hydraulic conductivity of vegetative tissue. Trans. of ASAE **22**: 877-880.
- Murase, H., Horinkova V. 1979. Steam-cleaning thermocouple psychrometry equipment. Agric. Eng. **60**: 23.
- Murase, H., Merva G. E., Segerlin L. J. d. 1980. Variation of Young's modulus as a function of water potential. Trans. ASAE **23**: 794-796, 800.
- Murase, H. 1988. A thermodynamic approach to plant growth controls in protected cultivation. Acta Hortic. **230**: 397-404.
- Murase, H. 1992. Neuro GMDH for biological system identification. Acta Hortic. **319**: 619-624.
- Murase, H., Yamauchi R., Honami N. 1992. Simultaneous control of temperature and humidity in a confined space using kalman filter neural networks, System Identification. Environ. Control in Biol. **30**: 37-44.
- Murase, H., Koyama S., Tani A. 1994. Finite element neural network for non-invasive plant water potential status monitoring. Control Engineering Practice **2**: 211-218.
- Murase, H., Nishiura Y., Mitani K. 1997. Environmental control strategies based on plant response using intelligent machine vision technique. Computers and Electronics in Agriculture **18**: 137-148.
- Suroso, Murase H., Tani A., Honami, N. Takigawa H., Nishiura Y. 1996. Inverse technique for analysis of convective heat transfer over the surface of plant culture vessel. Trans. of ASAE **29**: 2277-2282.
- Suroso, Murase H., Honami N. 1997. Optimization of temperature distribution inside the plant culture vessel using a genetic algorithms. SHITA Journal **10**: 10-14.
- Takahashi, N., Murase H., Murakami K. 2002. Local temperature control within a confined space by using a neural network model. SHITA Journal **14**: 131-135.
- Tani, A., Murase H., Kiyota M., Honami N. 1992. Growth simulation of alfalfa cuttings *in vitro* by kalman filter neural network. Acta Hortic. **319**: 671-676.
- Tani, A., Nishiura Y., Kiyota M., Murase H., Honami N. 1994. Design and fabrication of a centrifugal phytotron to investigate effects of gravity on the plant growth. CELSS Journal **6**: 11-16.
- Tani, A., Nishiura Y., Kiyota M., Murase H., Honami N., Aiga I. 1996. Performance of a centrifugal phytotron. Adv. Space Res. **18**: 251-254.
- Yamada, H., Murase H. 1994. Reduction in fruit cracking in the NFT cultivated cherry tomato by pumping control for hydroponic solution circulation. Environ. Control in Biol. **32**: 1-7.
- Zaidi, M. A., Murase H., Tani A., Murakami K., Honami N. 1998. Plant development response to clinostat rotation of spacetron junior under microgravity condition. CELSS Journal **10**: 1-6.
- Zaidi, M. A., Murase H., Honami N. 1999. Sensitivity of plant structure to clinorotation rates under simulated gravity condition. SHITA Journal **11**: 106-110.
- Zaidi, M. A., Murase H., Honami N. 1999. Neural network model for the evaluation of lettuce plant growth. J. Agric. Engng. Res. **74**: 237-242.