モデリングとデータ同化手法による 自然および農耕地生態系の気候変動応答の解明

横沢 正幸

(早稲田大学 人間科学学術院)

Elucidating climate change responses of natural and agricultural ecosystems
through modeling and data assimilation approach

Masayuki YOKOZAWA

(Faculty of Human Sciences, Waseda University)

1. はじめに

このたび、日本農業気象学会学術賞を賜り、大変光栄に存じます。ご推薦くださいました北野雅治先生、広田知良先生、ならびに学会賞選考委員会の皆様にご心より御礼申し上げます。私は農業・農学や気象学の分野において、十分な基礎知識もないまま研究をスタートさせましたが、このような栄誉ある賞を頂戴することとなり、大変うれしく思っております。本学会の会員の皆様にも、これまで暖かいご支援とご指導をいただき、心より感謝申し上げます。

私は学部・修士課程で物理学を学んだ後、1987年に当時の農林水産省・農業環境技術研究所(現・農研機構 農業環境研究部門)に入所しました。本省での面接では分子生物学を扱う部署への配属が示唆されていましたが、実際には気象管理科・気候資源研究室に配属されることとなりました。学生時代に学んだ現象とは空間スケールが10桁以上も異なる分野への取り組みに、当初は大いに戸惑いました。

当時の室長は清野裕さんでしたが、本省兼任のため、つくばの研究室にはほとんど不在でした。そのような中、韓国の農村振興庁から来日していた安在勲さんに農業気象学の基礎を教えてくださいながら、自らの研究の方向性を模索しました。

以来、多くの方々との交流を通じて、私の研究キャリアが築かれてきました。本稿では、今回の受賞対象となった研究の概要とその経緯について、交流のエピソードも交えながらご紹介いたします。なお、文中に登場する方々の所属はすべて当時のものです。

2. 植物群集システムの環境応答のモデル化

自然界における植物群集は、一般にさまざまな樹高や直径などのサイズを持つ個体から構成されています。このように異なるサイズの個体が共存する群集では、それぞれの個体が受ける光環境や資源の利用効率が異なり、環境変動に対する応答も一様ではありません。そのため、群集全体のダイナミクスを適切に記述するためには、個々の個体サイズの違いを考慮することが重要となります。

1977年にノーベル物理学賞を受賞した Anderson P.W.の言葉に「More is different」というキャッチコピーがあります

(Anderson, 1972)。本来の意味は、ミクロな構成要素が多数集まることで、集合体としてのマクロな性質に新しい構造が生まれるというものです。いわゆる創発現象について述べるとともに、物理学における要素還元主義の行き過ぎを戒めたものとして広く知られています。

私はこの考え方が、生物の個体群や生態現象、さらには物理環境と生物との相互作用を扱う農業気象学においても極めて重要であると考えました。そのような文脈で研究を模索する中、サイズ構造のモデルを利用した研究を行っていた原登志彦さんのことを知り、ちょうどその頃、農環研にポスドクとして在籍していた鞠子茂さんに紹介していただき、原さんが所属されていた東京都立大学へ頻繁に足を運ぶようになりました。原さんとの(おおくは居酒屋での)議論を通じて、私は群落光合成モデルとサイズ構造モデルを結合した新しいモデルを作成するに至りました。

当時の農環研はかなり自由な雰囲気があり、森林総研のようなテーマに取り組んでも、それほど咎められることはありませんでした。清野さんも、これを植物生産力の推定に関する新たな視点として捉え、応援してくださいました。実際には、周囲の雰囲気はそれほど寛容ではなかったのかもしれませんが、鈍感な私はあまり気にせず進めていました。

具体的には、私は、個体サイズの頻度分布の動態モデルと、群集内の個体サイズごとの光合成量や呼吸量を計算する群落光合成モデルを統合したモデルを構築しました(Yokozawa and Hara, 1992, 1995; Yokozawa et al., 1996)。それまでの研究では、群集のサイズ構造を明示的に考慮したモデルはほとんど存在せず、特に本モデルは、物理的環境と個体間の生物的相互作用を統合的に扱った初めての試みでした。

本モデルを用いることで、植物群集の構造がどのように変化し、最終的に群集全体の動態がどのように決定されるのかを明らかにすることが可能になりました。その結果、外的環境と群集を構成する個体間の内的相互作用が絡みあうことが、植物群集のサイズ構造というマクロなパターンを支配する重要なメカニズムであることが示されました(Yokozawa, 1999; Nakagawa et al., 2015)。本モデルから導き出された関係性について、京都大学の菊沢喜八郎さんから「植物群集における統一理論である」と評価していただき、大変うれしく感じたことを覚えています。まさに、「More is different」という概念が植物個体群においても発現していたのです。

3. データ同化手法を援用した広域作物モデルの開発

中国における作物生産に及ぼす気候変化や気候変動の影響を広域的に評価するために、私は環境省のプロジェクトで来日した中国科学院の陶福祿 (Tao Fulu) さんとともに、その前に飯泉仁之直 (農環研) さんと日本の水稲を対象として作成したトップダウン型の機構的作物生長・収量環境応答モデルの手法を基盤として、新たにコムギやトウモロコシにも適用可能なモデルを提案しました (Tao et al., 2009)。従来の作物モデルは、特定の作物や地域に特化したものが多く、広域的な気候影響評価においては適用範囲の限界がありました。そのため、より汎用性が高く、異なる作物にも対応できるモデルの開発が求められていました。

本モデルでは、作物が環境条件に応じてどのように生育・生長し、結実するのかという過程を詳細に記述するとともに、土壌水分収支などの物理プロセスも考慮し、作物学や物理学の知見に基づいて定式化しました。これにより、気温や降水量、日射量などの気象条件が作物の成長や収量に与える影響を精緻に評価できるようになりました。また、モデルのパラメータは、(中国における) 県スケールの統計データを用いて MCMC (マルコフ連鎖モンテカルロ) 法により推定しました。この手法により、パラメータ値のユニークな最適値だけではなく、確率分布として推定結果を得ることができるため、不確実性を考慮した解析が可能となりました。このパラメータ推定の特性を活かし、気候変化による作物生産性の広域評価においても、シナリオごとの変動幅や不確実性を定量的に示すことができるようになりました。その後、陶さんによって改良された本モデルは国際的な作物モデリングプロジェクトである AgMIP (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) に登録され、さらに、その評価結果は IPCC 第 5 次評価報告書 (AR5) にも引用されるなど、気候変動影響評価の分野で重要な役割を果たしています。

データ科学における「理解と予測の相克」は、統計学習の権威である Vapnik V. の言葉に端的に表されています。彼は、「複雑な現実世界では、より精度の高い予測を目指すほど、理解を犠牲にしなければならない」と主張しました。この考えが正しければ、その対偶もまた成り立ち、「理解を深めようとするれば、より精度の高い予測を諦めざるを得ない」ということとなります。一方でこの研究では、プロセスベースモデルと生産量の統計データはプロセスモデルから創発されたものであると見做し、すなわち、先に述べた「More is different」の考え方で広域における生産性予測を行うモデルを作成したことになると思います。この研究から私は、データ科学を利用して複雑な系の予測をするとき、Anderson P.W. が主張するような「階層構造」を考慮して進めると云うことは理解と予測の相克を克服するヒントにはならないか、と考えるようになりました。

4. 農耕地における土壌炭素貯留ポテンシャルの推計

農耕地における気候変動緩和策の一つとして、土壌炭素の貯留量を評価することは非常に重要です。特に、水稲栽培が盛んな日本においては、稲作特有の土壌環境を考慮した評価手

法が求められます。そこで、私は英国で開発された土壌炭素分解環境応答モデル RothC を、日本の水稲栽培に適用できるようにモデル構造を改変しました。この改変では、水田特有の湛水状態が土壌有機物の分解に及ぼす影響を考慮し、炭素動態をより適切に再現できるようにしました。

さらに、日本各地の農耕地における土壌炭素量の長期連用試験データを活用し、データ同化手法を用いてモデルパラメータを推定しました。これにより、観測データとモデルの整合性が高まり、土壌炭素量の動態をより精度良く表現することが可能になりました。次に、3 次メッシュ気象データを組み合わせることで、全国規模での土壌炭素量の時空間変化を推計しました (Yokozawa et al., 2010)。このアプローチにより、地域ごとの気候条件や土壌特性に基づいた精密な評価が実現しました (Sakurai et al., 2012)。

このモデルを利用して、収穫後の残渣 (茎や根など) のすき込み処理や有機肥料の使用の有無など、異なる農業管理シナリオを設定し、それぞれの条件下での土壌炭素量の変化をシミュレーションしました。このシミュレーションにより、農業管理の違いが土壌炭素の貯留や放出にどのような影響を与えるのかを時空間分布として明らかにしました。これらの研究成果の一部は、「土壌の CO₂ 吸収見える化サイト」 (<https://x.gd/Sc3Pf>) に組み込まれ、農業関係者や研究者が活用できる形で提供されています。

本研究の共同研究者の白戸康人さんは、この分野における顕著な功績により、土壌肥料学会賞を受賞されました。白戸さんとは英国の Rothamsted 試験場を訪問し、RothC モデルを開発した Jenkinson D.S. 博士らとの面会の機会を得ました。また、100 年以上にわたり一貫した管理・観測が継続されている同試験場の歴史的圃場の視察と貴重な土壌試料群の見学も行いました。この訪問を通じて土壌肥料学分野の研究者との交流を深められたことは、極めて有意義な経験となりました。

5. 大気 CO₂ 濃度の上昇が作物収量・蒸発散量に及ぼす影響の逆推定

大気中の二酸化炭素 (CO₂) 濃度の上昇は、地球温暖化の主要な要因の一つとされています。しかし一方で、植物にとっては光合成機能を増進させる効果があり、特に C3 植物であるダイズやコムギなどでは、CO₂ 濃度の上昇による成長促進 (CO₂ 施肥効果) が期待されています。ただし、この効果は単純にプラスに働くわけではなく、温暖化による気温の上昇、降水量の変化、日射量の増減など、環境要因の変化による機能抑制とのトレードオフによって、作物の成長や収量への影響が決まります。そのため、CO₂ 濃度上昇による生育促進効果が、実際の農業生産にどの程度寄与するのかを定量的に評価することが重要です。

本研究では、過去の気象データ、ダイズの収量データ、および機構的作物生長・収量環境応答モデルを用いて、文部科学省の研究プロジェクトで農環研のポスドクとして我々の研究グループに合流された櫻井玄さんと粒子フィルターを利用して、光合成サブモデルのパラメータ推定を行いました。特に、大気中 CO₂ 濃度の上昇が作物の生産性に与える影響 (CO₂ 施肥効

果)を定量的に評価し、その空間的な分布を明らかにしました(Sakurai et al., 2014)。

その結果、ダイズの主要生産地域であるアメリカ、ブラジル、中国において、2002-2006年の平均収量は、1980年と比較して、それぞれ4.34%、7.57%、5.10%増加したと推計されました。これらの収量の増加は、地域ごとの気象条件や土壌特性に依存し、特に蒸発散量との関係が深いことが示されました。これは、CO₂濃度の上昇によって気孔の開度が低下し、蒸発散が抑制されることで、水利用効率が向上するという既存の実験的研究結果とも整合するものでした。

本研究の結果は、CO₂濃度上昇が作物生産にもたらすポジティブな影響を示すと同時に、その効果が環境要因と複雑に相互作用することを示唆しています。今後の気候変動下における農業の適応策を検討する上で、本研究の知見が有用な基盤となることが期待されます。

6. 今後の研究方向

(1) 生態系の構造を考慮した環境変動に対する応答のモデリング

植物個体群集のサイズ構造などに起因した系の幾何学的構造が系内の環境の時間空間的変動を決め、その生物学的応答が系の動態にフィードバックするダイナミクスを解析する手法を模索しています。特に、系構造の変動が閾値を超えた際の急激な変化(ティッピングポイント)の予測手法とそのメカニズムに着目しています。

(2) 気候変動と生態系の相互作用(影響、適応、対策)

将来の環境変動が生物多様性、生態系サービス、食料生産に及ぼす影響を定量的に評価しています。この評価をもとに、人間活動との相互作用を統合的に分析し、政策立案者や環境管理者に具体的な情報を提供することを目指しています。また、生態系の気候変動緩和機能(例:森林や農耕地による炭素蓄積)や適応策の実施による環境影響を総合的に評価するフレームワークの構築を進めています。

(3) 生態系リザーバーコンピューティングモデルによるレジリエンス評価

生態系の複雑な動態をリザーバーコンピューティングの概念を用いて、システムの短期的動態予測ならびに環境変動に対する回復力(レジリエンス)を評価する新たなアプローチを模索しています。

(4) 生態系サービスと人間活動の相互作用研究

近年、ゲーム理論を援用して、生態系サービスの利用をめぐる人間の意思決定過程をモデル化する研究を進めています。これは、持続可能な資源管理や環境政策の立案に重要な示唆を与えるものです。特に最近の成果として、環境研究総合推進費S18プロジェクトで早稲田大学のポストドクとして合流された中河嘉明さんと行った「空間公共財ゲームに基づく水稻栽培における水利用集中時期の分散化制度設計」に関する研究(Nakagawa and Yokozawa, 2023)を紹介します。

水稻栽培では、灌漑シーズンの初期に代かきで使用される水量が最も多くなります。しかし、気候変動により積雪量が減少すると、この時期の水不足が深刻化する可能性があります。適

応策として、灌漑開始日を分散させることでピーク時の水需要を抑制する制度が求められています。本研究では、エージェントベースモデルと空間公共財ゲーム理論を用い、さまざまな制度設計を検討しました。

このモデルでは、農家の経済的要因(収穫利益や栽培コスト)、灌漑開始日の分散化に伴う協力コストや補助金、農家間の情報共有ネットワークを考慮しました。シミュレーションの結果、一つの農家が一つのグループに所属し、グループが重複しない制度では、協力する農家の数が増加せず、灌漑開始日の分散もほとんど見られませんでした。一方で、一つの農家が複数のグループに所属し、グループが重複する制度を導入した場合、協力する農家が増加し、灌漑開始日の分散が最大化されることが示されました。さらに、補助金の額を決定するために、各グループ内の協力者数を灌漑開始日の分散を通じて推定する手法を提案しました。これにより、スキームの運営コストが削減され、農家の虚偽申告に影響されにくい補助金の提供や政策評価が可能となります。

環境変動、特に気候変動が農業や生態系に及ぼす影響については、これまでも多くの研究が行われてきました。しかし、本研究で扱ったような、ステークホルダーの適応意欲の醸成や受容促進まで踏み込んだ適応策の検討は、今後の大きな課題であると思います。このような研究を推進するためには、自然科学と社会科学の知見を統合する分野横断的なアプローチが不可欠だと考えています。

7. おわりに

本稿では、農業気象学会賞の対象となった生態系の環境変動応答と気候変動適応に関する一連の研究について、その展開をご報告させていただきました。これまでの研究は、本稿で言及させていただいた方々以外にも、多くの共同研究者の皆様との協働により進められてきました(<https://x.gd/JNXRb>)。研究を通じた交流の中で、学術的な知見の深化はもとより、研究者としての姿勢や科学的探究の本質についても数多くの貴重な示唆をいただきました。この場をお借りして心より感謝申し上げます。今後も、「More is different」という視座を基盤としながら、分野横断的なアプローチによって理論・モデル研究と実証研究の融合を図り、環境変動下における持続可能な社会の実現に寄与してまいりたいと考えております。最後になりましたが、引き続き(もう少しの期間ですが)大学での研究・教育活動を継続してまいりますので、学会員の皆様には今後ともご指導ご鞭撻を賜りますよう、お願い申し上げます。この度は誠にありがとうございました。

引用文献

- Anderson PM, 1972: More Is Different -Broken symmetry of science-. *Science* **177**, 393-396.
- Nakagawa Y, Yokozawa M, 2023: A social system to disperse the irrigation start date based on the spatial public goods game. *PLOS ONE* **18**, e0286127.
- Nakagawa Y, Yokozawa M, Hara T, 2015: Competition among

- plants can lead to an increase in aggregation of smaller plants around larger ones. *Ecological Modelling* **301**, 41-53.
- Sakurai G, Iizumi T, Nishimori M, Yokozawa M, 2014: How much has the increase in atmospheric CO₂ directly affected past crop production? *Scientific Reports* **4**, 4978. doi:10.1038/srep04978.
- Sakurai G, Jomura M, Yonemura S, Iizumi T, Shirato Y, Yokozawa M, 2012: Inversely estimating temperature sensitivity of soil carbon decomposition by assimilating a turnover model and long-term field data. *Soil Biology and Biochemistry* **46**, 191-199.
- Tao F, Yokozawa M, Zhang Z, 2009: Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: A new process-based model development, optimization and uncertainty analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* **149**, 831-850.
- Yokozawa M, 1999: Size hierarchy and stability in competitive plant populations. *Bulletin of Mathematical Biology* **61**, 949-961.
- Yokozawa M, Hara T, 1992: A canopy photosynthesis model for the dynamics of size structure and self-thinning in plant populations. *Annals of Botany* **70**, 305-316.
- Yokozawa M, Hara T, 1995: Foliage profile, size structure and stem diameter-plant height relationship in crowded plant populations. *Annals of Botany* **76**, 271-285.
- Yokozawa M, Kubota Y, Hara T, 1996: Crown architecture and species coexistence in plant communities. *Annals of Botany* **78**, 437-447.
- Yokozawa M, Shirato Y, Sakamoto T, Yonemura S, Nakai M, Ohkura T, 2010: Use of the RothC model to estimate carbon sequestration potential of organic matter application in Japanese arable soils. *Soil Science and Plant Nutrition* **56**, 168-176.