

日本農業気象学会 80 周年記念セッション報告 「農業気象学における観測・計測およびモデル研究： 現在位置と将来展望」

熊谷悦史*・野村浩一**・植山雅仁***・丸山篤志*・岩田拓記****・松田 怜*****

*農業・食品産業技術総合研究機構農業環境研究部門
**高知大学 IoP 共創センター
***大阪公立大学農学研究科
****信州大学理学部理学科
*****東京大学大学院農学生命科学研究科

Report on the 80th Anniversary Session of the Society of Agricultural Meteorology of Japan, entitled
“Observations and Modeling in Agricultural Meteorology: Current Status and Future Perspective”

*Etsushi KUMAGAI, **Koichi NOMURA, ***Masahito UEYAMA, *Atsushi MARUYAMA, ****Hiroki IWATA and *****Ryo MATSUDA

*Institute for Agro-Environmental Sciences,
National Agriculture and Food Research Organization
**IoP Collaborative Creation Center, Kochi University
***Graduate School of Agriculture, Osaka Metropolitan University
****Faculty of Science, Shinshu University
*****Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

1. 概要

日時：2023年3月16日(木) 17:00-18:30

場所：山口県山口市 KDDI 維新ホール(メインホール)

オーガナイザー：熊谷悦史, 岩田拓記, 松田怜

司会：熊谷悦史

講演：

1. 作物の環境応答のモデリング: 施設園芸分野における現状と課題 (野村浩一)
2. 長期観測データからの深い情報抽出と多点解析による情報の一般化 (植山雅仁)
3. 農業気象学における観察の重要性: 葉面結露のモデル化を例にして (丸山篤志)

2. 趣旨とアンケート結果

2.1 セッションの趣旨

2023年に日本農業気象学会は創立80周年を迎えた。熊谷, 岩田, 松田(次世代活性化担当理事)は, 平野高司会長(当時)から節目にふさわしい企画の依頼を受け, 2023年全国大会において「80周年記念セッション」を企画した。このセッションでは

創立100周年に向けての学会活動の活性化を目標として, 農業気象学の学術的未来可能性を議論することとした。まず, セッションの内容を決めるうえで, 各活動分野の若手・中堅研究者が農業気象学の現在と未来の研究および学術活動に関してどのような意識を持っているかを把握する目的で, 2022年の7月中旬から8月中旬にかけて学会員を対象に以下のWebアンケートを実施した。

2.2 Web アンケートの内容

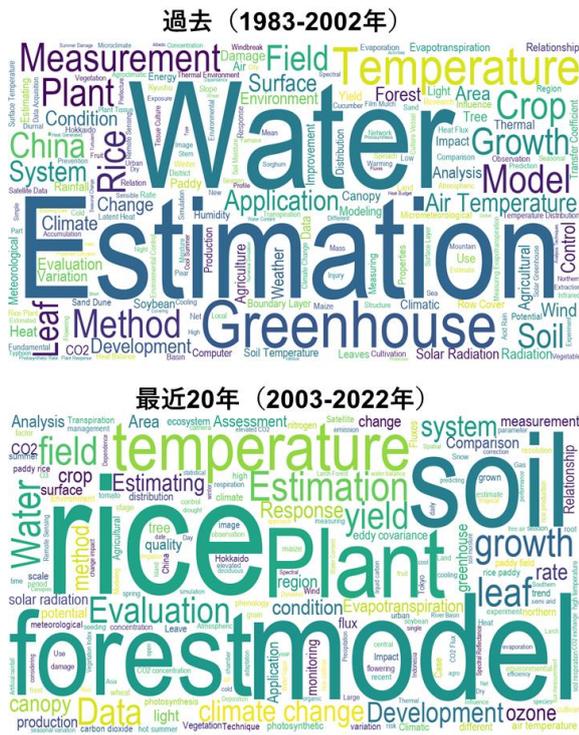
アンケートの内容は以下の通りである。なお, アンケートでは氏名やメールアドレスの入力は求めず, 個人を特定できないようにした。

タイトル: 農業気象学の現在と未来の研究および学術活動に関する意識調査

次世代活性化理事は, 2023年の全国大会にて, 創立100周年に向けた農業気象学の未来可能性を議論する「80周年記念セッション」を企画する。セッションでは, 農業気象学の各活動分野で, 現在において重要な研究は何か? 100周年までの今後20年間で重要な研究は何か? その研究を遂行する上で必要な視点や研究手法は何か? 今後どのような研究展開が期待できるか?などを議論したい。本セッションでは分野横断的に議論できる共通テーマを抽出して, 分野間の連携についても議論したい。セッションの内容を検討する上で, 各活動分野の研究者が, 農業気象学の現在と未来の研究および学術活動に関

してどのような意識を持っているかを知りたいと考えている。そこで、以下のアンケート調査へのご協力をお願いする。

- あなたの年齢を選択してください。
紙面が限られるので選択肢は省略。
- あなたの研究活動分野を選択してください(複数選択可)。
紙面が限られるので選択肢は省略。
- 下に示した図は、過去(1983-2002年, 上図)と最近20年(2003-2022年, 下図)において、日本農業気象学会の学術誌(「農業気象」および「Journal of Agricultural Meteorology」)に掲載された学術論文の英文タイトルを使い作成したワードクラウドである。ワードクラウドとは、あるテキストデータに登場する各単語の使用回数を抽出し、その回数の多少をフォントサイズの大小で表現した図である。特に重要な単語や相対的な重要度は低いものの構成要素としては十分に貢献している単語を一目で把握できるので、あるデータの全体像を簡単に俯瞰できる。過去と最近20年のワードクラウドの結果を比較して、気づいた点をご回答ください(難しい質問かもしれませんが、任意回答とします)。



- あなたの活動分野で現在(2022年)において解決すべき課題や課題解決のために必要な視点や手法について自由にご回答ください(文章でなくキーワードでも良いです)。
- あなたの活動分野で今後20年において解決すべき課題や課題解決のために必要な視点や手法について自由にご回答ください(文章でなくキーワードでも良いです)。

2.3 アンケートの集計結果

Web アンケートでは 63 名からの回答が集まった。回答者の皆様にこの場を借りて御礼申し上げる。

質問 1 の回答者の年齢の集計結果によると、全回答者数の約 70%が 20~40 代であり、アンケートの結果には 20 年後も現役である世代の意見が反映されていると思われた。

質問 2 の回答者の研究活動分野の集計結果によると、「作物気象反応, 収量予測, 適地判定」が 34 名, 「接地気象, 物理気象, 局地気象」が 25 名, 「測器, 測定法」が 20 名, 「施設内の環境調節」が 18 名で, 「農業情報システム, 「生物生産システム(植物工場, 植物組織培養)」, 「気候, 生物季節」および「気象災害, 気象改善」がそれぞれ 10 名程度となった。

質問 3 は任意回答としたために、回答数は 52 件となった。過去から現在の英文誌のタイトルの変遷として, 「観測研究(Measurement)からモデル研究(Model)へ移行した」, 「研究対象が物理系(Water など)から生物系(Forest, Rice, Plant)へ移行した」, 「大きな変化はなく課題や手法は普遍的である」という回答が寄せられた。

質問 4 と質問 5 の回答は記述式であり、集計と解釈が困難であったので、ここでも回答の全体像を俯瞰できるワードクラウドを使用した。図 1 は質問 4 の回答をもとに作成したワードクラウドである。研究手法に関連する単語としては、「モデル」が最も大きく、次いで、「データ」、「観測」、「予測」の順に大きかった。また、最近、多くの分野で利用されている「機械学習」も目に留まった。研究課題に関連する単語としては、「気候変動」が最も大きく、次いで、「施設」、「作物」、「栽培」や「現場」などの単語が大きかった。次に、個別の回答におけるキーワードをいくつか抽出してみると、手法に関しては「プロセスベースモデル」、「人工知能・機械学習モデル」、「プロセスベースモデルと人工知能・機械学習モデルの使い分けや融合」、「モデルの汎化能力の評価法」、「データやモデルコードのオープン化」があり、モデルへの関心が高いことが伺えた。課題に関しては、「気候変動対応型栽培」、「作物収量予測や気候変動適応効果の定量化」、「温暖化緩和のための温室効果ガス排出量評価」、「地球規模の気候変動の解明」、「陸域物質循環の長期変動・気候変動応答の解明」、「圃場スケールの気象予測」、「生産現場と研究者との橋渡し」などがあり、気候変動への関心が高いことが伺えた。

図 2 は質問 5 の回答をもとに作成したワードクラウドである。研究手法に関連する単語は、現在を対象とした質問 4 の回答とは様子変化して、「データ」が最も大きく、その後、「観測」や「予測」と続き、「モデル」は相対的に小さくなった。研究課題に関する単語は、「植物」、「栽培」、「生態」、「作物」が目に残った。個別の回答におけるキーワードをいくつか抽出してみると、手法に関しては「観測・計測手法の改良」、「データの効率的取得」、「データ・解析法・モデルコードのオープン化」などがあり、観測・計測への関心が高いことが伺えた。課題に関しては、「農業気象学の農業への貢献」、「作物生育予測の精緻化・汎用化」、「植物生産の完全な工場化」、「タワーフラックスサイトの長期運営」、「極端気象への対応」、「農業におけるゼロエミッションの実現」などと特定の分野に偏っていない印象を受け、農業気象学が抱える課題の多様性が反映される結果となった。

以上のアンケート集計結果から、研究手法に関しては現在と今後 20 年における学会員の関心が異なることが伺えた。すなわち、現在においてはモデルへの関心が強い一方で、今後 20 年においては観測・計測等によるデータ収集や共有方法への関心が強いと解釈できた。農業気象学の特色の1つは、課題解決に向け精密な観測・計測手法とそれらに基づくモデル化手法を駆使するところにある。そこで、80 周年記念セッションでは、各活動分野において、観測・計測をメインにモデル化にも取り組んでいる気鋭の中堅・若手の学会員による先端的研究を取り

量を予測するのは困難であることを、園芸作物を事例にして示した。光合成能力よりも光合成産物を利用する能力(シンク能力)に作物の成長は支配されるが、シンク能力は光合成と比較して計測が困難であり、メカニズムの解明や理論化が進んでいないことが示された。そのようなメカニズムがよくわからない事象に対しては、「データに含まれる重要なパターンを自動的に抽出してくれる」人工知能(AI)が威力を発揮すると考えられるが、環境要素や葉面積指数(LAI)を説明変数とした単純なニューラルネットワークによる群落光合成推定では、学習データに対しては優れた予測性能を発揮するものの、学習データの範囲外のデータや、学習データと異なる環境下で取得されたデータに対する予測性能(外挿性)に課題があることを示した(Kaneko et al., 2022)。



図1. 質問 4 の回答に含まれる名詞で作成したワードクラウド



図2. 質問 5 の回答に含まれる名詞で作成したワードクラウド

上げ、それぞれの現状、今後 10~20 年の見通しや発展の可能性について紹介し、農業気象学の学術的発展の議論のきっかけを作ることを目指した。

3. 講演内容

3.1 作物の環境応答のモデリング: 施設園芸分野における現状と課題

野村(高知大学)は、施設園芸作物の生理・生態反応の計測とモデリングにおける現状と課題を紹介した。はじめに、施設園芸の栽培現場において環境制御や栽培管理によって収量や品質を最大化するためには、「環境調節と栽培管理が、作物の成長・収量・品質にどう影響を及ぼすのか?」を数式で表すことの重要性が示された。光合成が作物の生長と収量の土台となることを強調した上で、既知のメカニズムに基づいたプロセスベースモデルを使うことで、環境要素、個葉光合成能力、群落構造の情報から群落スケールでの光合成速度を推定できる一方、光合成で得られた炭素の用途がわからないと作物の成長や収

量を予測するのは困難であることを、園芸作物を事例にして示した。光合成能力よりも光合成産物を利用する能力(シンク能力)に作物の成長は支配されるが、シンク能力は光合成と比較して計測が困難であり、メカニズムの解明や理論化が進んでいないことが示された。そのようなメカニズムがよくわからない事象に対しては、「データに含まれる重要なパターンを自動的に抽出してくれる」人工知能(AI)が威力を発揮すると考えられるが、環境要素や葉面積指数(LAI)を説明変数とした単純なニューラルネットワークによる群落光合成推定では、学習データに対しては優れた予測性能を発揮するものの、学習データの範囲外のデータや、学習データと異なる環境下で取得されたデータに対する予測性能(外挿性)に課題があることを示した(Kaneko et al., 2022)。

高知大学では、生産者が取得した施設内の環境や作物画像のビッグデータをクラウドに収集し、そのデータと AI によって創出される営農支援情報を生産者にフィードバックすることで、産地全体の生産技術の底上げを目指す Internet of Plants (IoP) プロジェクトが進行中であり、AI の予測性能の改善が進められていることが紹介された。予測性能の改善のためのアプローチの1つとして、プロセスモデルと AI を組み合わせる手法が紹介された。具体的には、環境要素からプロセスモデルで個葉光合成速度を推定し、個葉光合成速度と LAI をニューラルネットワークに学習させることで、外挿性の問題を克服できることが示された(Kaneko et al., 2022)。また、プロセスモデルを土台としつつ、計測が困難な転流や維持・生長に関連するパラメータを遺伝的アルゴリズムによって推定し、着花・着果数や収量を予測する手法開発に取り組んでいることが紹介された。

最後に、農業気象学の強みは作物の生理生態の知見をベースにしたプロセスモデルの構築にあり、AI 技術者との協働により、プロセスモデルと AI を組み合わせた新手法開発を進めていくべきことであることが強調された。質疑応答では、IoP プロジェクトの枠組で計測が困難な転流に関わるデータを取得しクラウドに収集できるのか、生産現場のデータはプロセスモデル構築に利用できるのかなどが討議された。

3.2 長期観測データからの深い情報抽出と多点解析による情報の一般化

植山(大阪公立大学)は、陸域生態系の炭素循環を対象とした研究における観測とモデリングの現状と課題について紹介した。はじめに、過去 20~30 年間の研究分野の発展や国際的なネットワーク形成により、渦相関法によって観測されるフラックスデータは膨大になり、そこから情報を取り出す技術に関して改良が必要であることが示された。観測データを解析・解釈するための道具としてモデルの利用が有効で、Data-Model fusion というアプローチが農業気象学の観測者に有益なツールとなりえらした。Data-Model fusion の定義は「観測データを使ってプロセスモデルを制約し、制約されたモデルの感度や内在変数を解析することから、高度な情報を抽出する解析」とした。

講演では、フラックス観測データの解釈に Data-Model fusion を用いた 2 つの研究事例が紹介された。1 つ目の研究の問いは、アラスカのクロトウヒ林で 20 年間観測された群落光合成速度のデータセットにおいて、「CO₂ 濃度上昇が炭素フラックスに

与えた影響はどの程度だったか?」というものであった (Ueyama *et al.*, 2016)。古典的な線形回帰によると、年間 CO₂ 吸収量は CO₂ 濃度の上昇に伴って直線的に増加しているように見えるが、線形回帰は単純に説明力が低くだけでなく、交絡因子の影響を受ける可能性が説明された。そこで、CO₂ 応答を表現するのに不可欠な既存のプロセスモデルを組み合わせた群落光合成モデルが利用された。観測データを使って、モデルパラメータを日毎に算出し、基準年からの CO₂ 濃度上昇に対する群落光合成速度の増加量を計算できるように設計された。検証のため、個葉レベルのモデルパラメータを計測し、モデルの推定値も個葉レベルにダウンスケールして比較すると、良い精度となることが示された。モデルを使って、CO₂ 濃度上昇の効果を評価すると、観測された群落光合成速度の数%のオーダーで CO₂ 濃度上昇が効いている可能性が示された。世界の多数の観測サイトのデータに同様の手法を適用して CO₂ 濃度上昇の効果量も算出され、数%のオーダーで効いていることを明らかにされた。さらに、多点のデータについて機械学習を使ってアップスケールすることで、全球スケールでの計算にも使えることを示した。

2つ目の研究では、2015年から2022年にかけて北海道の美唄湿原で実施された渦相関法による CH₄ フラックスのデータセットを対象に、「CH₄ フラックスがどのような要因で変動したのか」が解析された (Ueyama *et al.*, 2022)。演者が考える仮説、既往文献や湿原のプロセスモデルの構造を基に数式化し、泥炭を上部の酸化層と下部の嫌気層に分け、二層内で CH₄ が生成・酸化され、植物を介して、もしくはバブルや拡散により大気へ輸送されるというシンプルなモデルが構築された。このモデルのパラメータを観測データで制約し、その当てはまりから仮説がどのくらい説明可能なのか、また制約されたモデルの内部変数や感度実験からの様々な情報抽出が試みられた。6年間の CH₄ フラックスの変動の大部分が8個のパラメータで説明可能で情報圧縮でき、輸送プロセスは植物輸送とバブル輸送が卓越するという推論結果となることが紹介された。次に、世界の湿原のデータセット (FLUXNET-CH₄) を利用してモデル解析が実施された。それぞれの湿原を管理する専門家からの意見に従いモデルを修正して解析すると、一部のサイトでは精度が低いながら、多くのサイトにモデル解析が適用できることが示された。

最後に、Data-Model fusion のアプローチは交絡因子から知りたい情報を抽出するために有効な技術であること、数式化過程でデータとの適合が悪ければ考慮できていないプロセスがあること、不確実性が多ければその部分を野外実験するというモチベーションにつながることで、自分たちのサイトのデータで構築した解析手法を多点解析に適用することで知見の一般化が促進されるとともに、自分たちのサイトの位置づけも分かること、データ共有により様々な研究者と交流することで多様な視点をモデルに組み込んで解析することが可能になることなどが強調された。質疑応答では、十分に理解が進んでいないプロセスが含まれる事象には、Data-Model fusion アプローチの適用は難しく、解釈を間違える可能性があることや FLUXNET-CH₄ のデータセットで、バブルと植物由来の割合は、地点・気候・植生の違いでは説明できないことなどが討議された。

3.3 農業気象学における観察の重要性: 葉面結露のモデル化を例にして

丸山 (農研機構) は、水稻群落の葉面結露のモデル化 (Maruyama *et al.*, 2023) を例にして、農業気象学における観察の重要性を紹介した。はじめに、観察とは「物事の状態や変化を客観的に注意深く見ること」と定義された。植物の葉面における結露は、地表面の熱収支や水収支に占める割合は少ないものの、光合成や夜間の呼吸、病害の発生にも影響を与え、さらに乾燥地では一部の昆虫の水分補給源となるなど、生態系の中で重要な役割を果たしていることが紹介された。次に、葉面の結露については、センサーの開発から将来の気候変動シナリオに対するシミュレーションも含めて数多くの研究が行われているが、夜間におけるその形成過程を直接観測した報告例は意外なほど少なく、植物群落における空間分布や時間変化など、その基本的な特性が十分には知られていないことが紹介された。そこで、水稻群落を対象とした結露の夜間観測によって、葉面結露量は群落の下層よりも上層で大きいこと、葉面結露量の鉛直勾配が急な日と緩やかな日があることが示された。次に、群落微気象モデルを用いた結露のシミュレーション結果が紹介され、群落全体での結露量は観測値とモデル計算値が一致していること、上層ほど結露量が多い傾向はモデルでも再現できていることが示された。一方、上層と下層との結露量の違いがモデルでは大きすぎることで、すなわち下層の結露がうまく再現できていないことが示され、その理由がいくつか挙げられた。そのようなモデル計算値と観測値の違いを正しく考察する上では、元の現象の観察が不可欠であることが強調された。

観察を基に帰納的にモデルを組み立て、モデルを用いて演繹的に計算し、その計算値と観測値の違いを考察することで、どのようなプロセスが考慮されていないかなど、帰納と演繹が繰り返されることで現象の理解が進むことが示された。演繹的アプローチは比較的实施しやすいが、帰納的アプローチは無限の方向性があり難しいことが示された。帰納によるモデルの成功例として、水深による田面の粗度長の変化をモデル化することで、水田水温の推定の精度が向上したことが紹介された。その際には、予めどのような発想に至るかは分からないので、多くの事象を観察しておくことが重要であることが示された。さらに、三球温度計 (Maruyama *et al.*, 2020) の開発にも熱電対の作成過程での失敗の観察がきっかけになったエピソードが紹介された。最後に、観察は研究結果のよい考察につながることで、よい考察は新たな研究の発想につながることで、どのような発想につながるかは予想できないことが強調された。

質疑応答では、植物群落で大気の水蒸気が凝結した結露と植物の体液は区別できるのか、多くの要素を観察しておくことで偶然の産物を拾うことの重要性、目で見ただけでなく五感を使うことの大切さ、臨場感を大事にすること、研究は無いものを見ること、深い知識や洞察がないと観察からよい発想につながらないことなどの意見交換がなされた。

4. おわりに

本セッションでは、学会創立 100 周年に向け、各研究分野の観測・計測とモデル化研究における現在位置と今後 20 年間で取り組むべき課題を共有することを目的とした。総合討論では、オーガナイザーの熊谷から各演者へ観測・計測やモデル化手法の限界や今後取り組むべき課題が問われた。野村は、自身の研究において、観測にくいプロセスがあることが作物環境応答のモデル化の足かせになっており、それを観測するための工夫を考える必要があるとして、自身が知らない計測手法を有する研究者とのコラボレーションや研究者ネットワークの構築が重要であるとした。植山は、野外観測の研究者として、観測データにおける気候変動影響を評価したい場合は、長期観測を粘り強く継続することが重要であるとした。さらに、公開された論文における解析結果は陳腐化する可能性があるが、観測データ自体は陳腐化されないで、データを次世代に継承・共有していくことの重要性を強調した。丸山は、モデル化手法は AI 技術等の発達でこれから益々発展していく可能性があるが、現場での観察やそこから得られるインスピレーションは AI 技術では代替できず、研究者の重要な役割となると思われるので、それらを大切にしたいとした。

最後に、司会を担当した熊谷の感想を述べたい。3 名の演者の研究姿勢の共通する部分としては、興味がある事象に対して、観測とプロセスモデルをうまく統合して、モデルを使って観測できていないプロセスを理解しようとしているところにあると感じた。精密な観測技術とこれまでの知見に基づくプロセスモデルは、農業気象学者の強みであり、その強みは日本農業気象学創立 100 周年まで今後 20 年間に於いても変わらないと予想する。今後 20 年間で起こる気候や気象の変化、自然や農業生態系の変化、国内農業の構造的変化、社会構造の変化、それらに伴う研究課題の変化は誰にも予想できない。予想できない課題に対応するためには、広範囲な研究分野をカバーする農業気象学はその分野の多様性を保持しつつも、各分野の深化を進めなければならないと思う。また、課題解決に向けた異分野共同研究においては、農業気象学者は多くの分野の専門用語を理解できるので、異分野間の潤滑油や橋渡しを担えるはずである。総合討論の時間が限られており、今後 20 年間の課題を全体の共有認識として十分にまとめるには至らなかったが、アンケートの収集結果や各講演者の話題が、今後の農業気象学研究の発展に何が必要かを議論するためのきっかけとなることを期待したい。本セッションでは、アンケート調査結果からの一部を抽出して、観測・計測とモデル化研究に焦点を当てた。その他のトピックスについて取り上げられなかったことについてはお詫び申し上げます。

5. 謝辞

この場を借りて、本企画についてご助言をいただきました平野高司顧問(前会長)を始めとする学会理事の皆様、アンケート協力者、参加者ならびに大会関係者に深く感謝いたします。

引用文献

- Kaneko T, Nomura K, Yasutake D, Iwao T, Okayasu T, Ozaki Y, Mori M, Hirota T, Kitano M, 2022: A canopy photosynthesis model based on a highly generalizable artificial neural network incorporated with a mechanistic understanding of single-leaf photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology* **323**, 109036.
- Maruyama A, Kuwagata T, Watanabe T, 2023: Observations on dew formation in the rice canopy and its simulation using a multilayer microclimate model. *Journal of Agricultural Meteorology* **79**, 28-37.
- Maruyama A, Matsumoto Y, Nakagawa H, 2020: Multiple-globe thermometer for measuring the air temperature without an aspirated radiation shield. *Agricultural and Forest Meteorology* **292**, 108028.
- Ueyama M, Tahara N, Iwata H, Euskirchen ES, Ikawa H, Kobayashi H, Nagano H, Nakai T, Harazono Y, 2016: Optimization of a biochemical model with eddy covariance measurements in black spruce forests of Alaska for estimating CO₂ fertilization effects. *Agricultural and Forest Meteorology* **222**, 98-111.
- Ueyama M, Yazaki T, Hirano T, Endo R, 2022: Partitioning methane flux by the eddy covariance method in a cool temperate bog based on a Bayesian framework. *Agricultural and Forest Meteorology* **316**, 108852.