

農耕地等生態系における微気象観測とモデリングによる 気候変動の影響解明

吉本真由美

(農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター)

Measurement and modeling of micrometeorology in agricultural ecosystems
for climate change impact research

Mayumi YOSHIMOTO

(National Agriculture and Food Research Organization, Institute for Agro-Environmental Sciences)

1. はじめに

このたびは、伝統ある日本農業気象学会学術賞を賜り、大変光栄に存じます。ご推薦いただいた長谷川利拓博士、学会賞選考委員会ならびに会員の皆様方に、厚くお礼申し上げます。大学では地球物理学専攻で、気象学の中でも流体力学など理論的なことを学んだ程度で、農業や作物のことも知らず、また植物の計測や気象観測の経験もなかった私が、農業気象の分野でここまで研究を進めて来られましたのは、ひとえに、挑戦的で教育的でリーダーシップ溢れた上司の皆様方、そして優秀で個性的な研究者仲間にも恵まれたおかげです。これまでご指導いただき、また様々な研究の場面で関わっていただいた皆様方に深く感謝の意を申し上げます。本稿では、農業気象との出会いからこれまでの研究の展開についてご紹介させていただきます。

2. 農業気象との出会い

私にとって農業気象の入口は、農林水産省入省時の東北農業試験場での新人研修でした。配属された気象特性研究室の井上君夫室長は水田微気象の観測やシミュレーションモデル開発の先駆者で、同じく物理出身の農業気象学研究者でした。当時は岩手県種市町におけるやませ時の微気象観測や霧の特性の研究に着手されており、粒径分布の計測から霧の変質過程を把握する研究のお手伝いをさせていただきました²⁾。午後5時以降には、岩崎尚東北農業試験場長や気象環境制御研究室の岡田益己室長らとも酒を片手に交流する機会があり、若手研究者も交えて研究成果の話や農業研究の行く末等について遅くまで議論されていたことを覚えています。半年間の新人研修が終わりに近づいた頃、台風が非常に強い勢力のまま日本海から北東北に接近し、リンゴ産地に大きな被害をもたらしました(平成3年台風第19号)。実は私は大学で台風の勢力が強まる力学的メカニズムの研究をしており、新人同期生らに「嵐(台風)を呼ぶ女」と冗談を言われたものです。これからは気象現象そのもの(台風)でなく、その産業への影響や被害予測、防災といった応用研究が必要なのだと漠然と考えるものの、自分に何ができるのかはわからない状態でした。新人

研修終了時の送別会では、井上室長より「自分の分野にこもるのではなく、違う分野の人達と積極的に関わって研究を進めてほしい、貴方にはできる」との饒のお言葉をいただき、農業環境技術研究所(現農研機構・農業環境変動研究センター、以下農環研)に着任することとなりました。

3. アラスカのツンドラ生態系や農業生態系における CO₂ 収支に関する観測研究

農環研では気象特性研究室に配属され、原菌芳信室長と宮田明氏のもとで農業気象の基礎を学ぶこととなりました。原菌室長は栽培や計測の経験がなかった私に、まずは冬野菜の簡易被覆栽培実験の課題を与えました。畑地で冬野菜を栽培し、マルチやトンネル施用下の温度環境を精密測定して生育や収量との関係式を出し、それをメッシュ展開して適地判定するというもので¹⁾、今思えば当時の農業気象の基本的な要素が一通り詰まっていました。原菌室長には、栽培の他、気象測器の工作から屋外での観測の仕方なども一からご教授いただきました。メッシュデータの使用にあたっては気候資源研究室の清野豁室長や横沢正幸氏にもお世話になりました。

気象特性研究室では、渦相関法の黎明期であった1990年代に、様々な農業生態系で微気象学的なフラックス観測を行い、その手法を確立しようとしていました。1993年には原菌室長がサンディエゴ州立大学のW. C. Oechel教授のグループとともにアラスカの北極域ツンドラ生態系でのフラックス観測を開始することになり、私もそれに同行する機会を得ました。当時日本で発売され始めたばかりのCampbell社のデータロガーの使い方を太陽計器(株)の梅谷昭氏に教わり、温湿度・風速プロファイルの計測やガスサンプリング制御のプログラムを作成し、主に微気象観測を担当しました。北極域ツンドラは雄大で、これまでの常識が通用しない熱収支構造や植生の生態を目の当たりにしました。また、アラスカでのプロジェクトには我々微気象研究者の他、土壌、植物生理、生態学などを専門とする多くの海外の研究者が参加しており、彼らとの交流は大変刺激的でした。私は1997年までの5年間、毎年夏季のアラスカでの微気象とCO₂フラックスの観測に従事しました。アラスカ州バロウの海岸性ツンドラでの微気象と熱収支解析から、ツンドラ表面の水分状態により拡散抵抗が異なり、活動層土壌からの温室効果ガスフラックスに影響す

<http://agrmet.jp/wordpress/wp-content/uploads/2020-F-1.pdf>

2019年12月4日 受付

Copyright 2020, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

る可能性等を示し¹³⁾、日本農業気象学会若手研究者奨励賞をいただきました。また、ツンドラの凍土の融解に伴う活動層の昇温と乾燥過程を簡易なモデルで明らかにし¹⁴⁾、アラスカ州プルドーベイでの海岸性湿地状ツンドラでの CO₂ フラックスと微気象要素との関係から、植物の光合成能と生態系呼吸量から正味の CO₂ フラックスを推定するツンドラ CO₂ 収支モデルを開発しました¹⁵⁾。これらにより、地球温暖化に伴い凍土の融解・土壤炭素の分解が進行し、CO₂ 放出量を増大させ、さらに温暖化を加速させる可能性を、観測とモデルから裏付けることができました。一連の北極域ツンドラの微気象と CO₂ フラックスの観測研究結果を博士論文としてまとめ、大阪府立大学の文字信貴教授より学位をいただきました。学位取得にあたり、大阪府立大学の皆様には有益なご助言、温かい激励をいただきましたことをこの場を借りてお礼申し上げます。

農業生態系では、ダイズ群落の CO₂ 収支の観測結果を対象に、群落内外の熱・物質輸送を流体力学的に計算する多層モデルに Farquhar らの個葉の光合成速度の生化学サブモデルを組み込んだ大気-植生-土壌系モデルを構築し、将来の温度上昇と CO₂ 濃度上昇の割合によっては水利用率が大きく変化する可能性を示しました¹²⁾。

4. Rice FACE システム開発への貢献

小林和彦先生がアジアで初となる水田での開放系高 CO₂ (FACE) 実験を主導して立ち上げることになり、私は小林先生にお誘いいただき、Rice FACE プロジェクトに参画できることになりました。それに先立ち、原菌室長に同行してアリゾナ州マリコバのコムギ FACE を訪れ、渦相関法で FACE 下の熱収支や CO₂ 変動の観測を行いました。屋外で CO₂ を放出して群落全体の CO₂ 濃度を上げるという大胆な実験と、そこに様々な分野の研究者が参画する大規模なプロジェクトを実感する貴重な機会となりました。リーダーの USDA の B. A. Kimball 博士との議論の場はとても有意義で、現在でも FACE での CO₂ 変動や T-FACE (後述) についての情報交換など交流を続けています。

さて、アリゾナの FACE ではあらかじめ空気で希釈された CO₂ ガスをブローで施用するブロー方式でしたが、1998 年から岩手県雫石町で開始された水田 FACE では、ブローを用いず放出チューブから純 CO₂ を圧力差で拡散させる方式が、岡田益己先生らにより独自に開発されました⁷⁾。私は中村浩史氏らとともにシステム開発に携わり、主に制御ロガー間の通信とモニタリングのソフトウェア構築を担当しました。また中国科学院南京土壤研究所の朱建国博士が主導する中国江蘇省無錫での FACE 実験立ち上げの際には、気象観測システムを現地に導入するとともに、中村氏、金漢龍氏とともに現場に長期滞在して雫石 FACE システムの移設・構築を行いました。あまり言葉が通じず習慣も異なる環境で、現地の人々に協力を依頼しシステムを作り上げるという初めての状況で、予想外の出来事も多々ありましたが、朱博士らの手厚いサポートをいただき無事任務を達成することができました。

5. 熱収支モデルによる気候変動下の水田の微気象環境の解明

FACE 実験の利点は、現実の圃場環境で将来の高 CO₂ 濃度による作物群落の応答を観測できることですが、作物群落における本来の大気成層がブローで乱されるブロー式 FACE に比べ、純 CO₂ 式 FACE は、より現実の圃場の微気象環境に近い条件を実現しています。この最大の利点を活かし、私は FACE 下の水田群落の水・熱収支に関する微気象観測とモデリング研究を進めました。当時東北農研におられた桑形恒男氏の紹介で愛媛大の大上博基先生を迎え、一緒に群落内微気象や蒸散速度の測定を行いました。大上先生は多層モデルによる水田群落の熱・ガス交換プロセスの解明を進めておられ、そのフィールド測定にかける熱意には大変刺激を受けました。私は群落を植生と地表面に分けて扱うバルク 2 層モデルを FACE 水田に適用し、高 CO₂ 濃度による気孔コンダクタンス低下により生育期間中のバルク葉温が 0.6 ~ 1°C 上昇すること、水利用率が 19% 増大することなどを明らかにしました¹⁶⁾。また、中国江蘇省無錫の FACE 水田では、出穂・開花期から登熟期にかけて微気象と穂蒸散の詳細な測定を行って、穂周辺の群落内大気の熱収支から穂温を推定するモデルを開発し、高 CO₂ 濃度に伴う群落内の微気象変化により、穂温が 0.5 ~ 1°C 上昇し、温暖化による高温不稔発生をさらに激化させる可能性を示しました¹⁷⁾。

2003 年には東大に移られた小林和彦先生の後任として、長谷川利拓氏がユニットリーダーとして着任され、後期の雫石 FACE やつくばみらい FACE などを主導されることになりました。以降、作物学や植物生理を専門とする酒井英光氏、作物生理学の知見だけでなく電子回路や環境制御など工学的な技術を有する福岡峰彦氏を合わせた 4 名体制で、Rice FACE 実験や開放系水田温暖化実験、農環研のクライマトロンという環境制御施設などでのイネの環境応答の解明を進めてきました。特に、高 CO₂ 濃度に伴い間接的に穂温が上昇し、高温不稔を激化させる可能性が示唆された先の中国 FACE での成果¹⁷⁾ をより深化させ、穂蒸散の特性や穂温の環境応答に関する様々な圃場実験を行い、データを積み重ねてきました。

前述のバルク 2 層モデルによる群落熱収支モデル¹⁶⁾ と群落内熱収支による穂温推定モデル¹⁷⁾ とを統合し、穂温推定モデル (IM²PACT) を開発しました¹⁰⁾。IM²PACT は簡易なバルク構造ながら、蒸散抑制剤散布実験などの屋外の圃場実験で検証しており、群落上の一般気象要素から日本の気候での開花期の穂温を高精度で推定できます。2007 年 8 月、関東・東海内陸で気温が 40°C を超えるような異常高温が発生しました。開花時に 35°C を超えると高温不稔が誘発されるという従来の閉鎖系実験からの知見から、高温不稔による減収が懸念されましたが、高温影響の緊急調査の結果、閉鎖系実験からの推定よりも高温不稔が大幅に少ないことがわかりました。IM²PACT で異常高温時の穂温分布を解析したところ、関東・東海内陸では高温時に湿度が低く、蒸散冷却のため穂温が気温よりも低かったことが、従来の閉鎖系実験からの推定よりも高温不稔発生が少なかった一因であることがわかりました。なお、穂温推

定モデル IM²PACT は農環研の作物温暖化応答ユニット長の桑形恒男氏が構築したモデル結合型作物気象データベース⁴⁾にも組み込まれており、イネの高温障害等に関わる農業気象や作物の研究者に活用されています。

6. イネの気候変動影響評価のための国際観測ネットワークの構築

2007年の異常高温時の不稔調査と穂温分布の解析の成果は、閉鎖系実験の知見をそのまま一般圃場に適用することの危険性と、そのギャップを克服するツールパーツとしての群落微気象の重要性を示しています。国内では未だ高温不稔による減収は顕在化していませんが、世界の高温稲作地域ではイネの高温不稔の頻発が報告され、各国の高温不稔の実態把握や温暖化による激化等の影響予測が急がれています。しかし、高温不稔に直接関与する穂温は、群落上の一般的な気温と異なり、そのギャップが高温障害の発生要因の解明や正確なリスク評価を妨げています。例えば、オーストラリアのニューサウスウェールズ州の水田では、日中の気温がしばしば40℃を超えるにも関わらず、高温不稔の多発は報告されていません。現地水田の群落微気象と不稔調査を実施したところ、非常に乾燥した強風が群落上を吹走しており、活発な蒸発散により群落が冷やされ、穂温が群落上の気温より7℃近く低いことがわかりました⁶⁾。一方、中国長江流域の水田では、日最高気温が35℃程度であるにも関わらず、高湿度で風速が低い気象条件のため穂温が群落上気温よりも最大4℃程度高く、高温不稔が頻発している要因の一つであることがわかりました⁸⁾。これらの研究は、長谷川氏や作物学分野で高温不稔の専門家である岐阜大の松井勤先生や島根大の小林和広先生らと協力して実施したものです。

これらの研究を契機とし、2009年に世界の多様な気候の水田で、高温不稔の実態と穂近傍の熱環境を統一的手法かつ高精度でモニタリングする国際観測ネットワーク MINCERnet を構築しました⁹⁾。高温不稔に直接関わる穂温の連続モニタリングは難しいため、穂の近傍の気温・湿度をモニタリングの主要項目とし、電源の確保が困難な途上国の水田でも、強制通風で精度良く群落内の気温・湿度を測定できる自立型群落微気象測定システム (MINCER) を開発しました¹⁾。MINCER は、農業気象で培われた屋外での気温測定に必要な知見と、福岡氏の電気工学的な知見と技術の粋を集めた装置で、水田での配線作業も不要で、農業気象の専門家でなくても簡単に測定できます。MINCER を中国・台湾・フィリピン・ミャンマー・インド・スリランカ・アメリカ合衆国に配布し、日本を含む8か国でモニタリングを開始し、乾燥気候か湿潤気候かで群落内外の気温差が異なること、気温の日較差や夜温、湿度レベルなど、穂温や登熟過程に影響を及ぼす要素が気候の違いにより大きく異なること等を明らかにしました。現在では、アフリカの4か国(セネガル、コートジボワール、ガーナ、マダガスカル)にもネットワークを展開し、多様な気候を横断する12か国でモニタリングを行うとともに、研究目的も、将来の水資源変動を見据えた高温と乾燥ストレスの相互作用の評価や、高温不稔耐性品種の導入や早朝開花性による高温回避などの各種温暖化適応策の有効性の評価に軸足を

移しつつあります。なお、MINCERnet は、文科省科研費基盤 A (15H02650)、環境省地球環境保全等試験研究費の補助をいただいて実施しています。記して謝意を表します。

7. おわりに

東北農業試験場での新人研修を終え農環研に赴任する際に井上君夫室長にいただいた「違う分野の人達と積極的に関わって研究を進めてほしい」との饒のお言葉に、私が十分応えられているかは自信がありませんが、少なくとも最近実感しているのは、農業気象学で長年培われてきた自然や耕地生態系の微気象環境を精緻に観測する技術と、そうして得られたデータに基づく物理的なモデルは、気候変動研究において作物学や育種学など様々な分野で必要とされているということです。国際観測ネットワーク MINCERnet はその主たる例ですが、他にも、元国際イネ研究所の Krishna S.V. Jagadish 博士とは、イネの開花期と登熟初期における高温と乾燥の複合ストレスの実験を行い、MINCER や蒸散測定により複合ストレス下のイネ群落内微気象の変化を定量的に明らかにしました⁵⁾。また、早朝開花性系統の開発など育種の専門家である石丸努氏が、熱帯の現地水田での高温不稔の回避性を評価するにあたり、IM²PACT を用いた穂温の推定が、状況証拠の一つとして、結果に論拠を与えることができました³⁾。

農業気象学の気候変動研究への貢献としてもう一つ重要なのが、開放系環境操作実験です。Rice FACE 実験が様々な分野から水田生態系の高 CO₂ 応答を研究するプラットフォームであったことは言うまでもないですが、一方、開放系温暖化実験は、屋外の圃場の群落微気象を物理的に改変させるので、農業気象学の最も得意とする概念・手法の一つだと思えます。私たちは、福岡氏が主となり開発した PROMETHEUS (水田の畝間に架けた電熱線による群落上部温暖化装置) や酒井氏の科研費による T-FACE (赤外線ヒーターによる群落表面の昇温) などによる様々な開放系温暖化実験を行っています。異なる2つの開放系温暖化実験での群落内熱収支構造を把握するとともに、IM²PACT で穂温を推定して不稔率の定式化を試みています¹⁸⁾。

これらの農業気象学的アプローチを駆使して、さらに気候変動研究に貢献できれば望外の喜びです。冒頭に申し上げました通り、私がここまで農業気象の分野で研究を進めて来られましたのは、関わっていただいた多くの皆様のおかげです。ここにお名前を載せられなかった方々も多くいらっしゃると思います。

今後とも皆様のご指導・ご鞭撻をいただけますよう、どうぞよろしく願いいたします。

引用文献

- 1) Fukuoka M, Yoshimoto M, Hasegawa T, 2012: MINCER: A novel instrument for monitoring the micrometeorology of the rice canopy. *Journal of Agricultural Meteorology* **68**(2), 135-147.
- 2) 井上君夫・吉本真由美・阿部博史, 1997: 三陸沿岸に侵入する海霧の雲物理特性, *農業気象* **53**(1), 21-28.
- 3) Ishimaru T, Xaiyalath S, Nallathambi J, Sathishraj R, Yoshimoto M, Phoudalay L, Samson B, Hasegawa T, Hayashi

- K, Arumugam G, Muthurajan R, Jagadish KSV, 2016: Quantifying rice spikelet sterility in potential heat-vulnerable regions: Field surveys in Laos and southern India. *Field Crops Research* **190**, 3-9.
- 4) Kuwagata T, Yoshimoto M, Ishigooka Y, Hasegawa T, Utsumi M, Nishimori M, 2011: MeteoCrop DB: an agro-meteorological database coupled with crop models for studying climate change impacts on rice in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* **67**(4), 297-306.
- 5) Lawas LMF, Shi W, Yoshimoto M, Hasegawa T, Hincha DK, Zuther E, Jagadish KSV, 2018: Combined drought and heat stress impact during flowering and grain filling in contrasting rice cultivars grown under field conditions. *Field Crops Research* **229**, 66-77.
- 6) Matsui T, Kobayasi K, Nakagawa H, Yoshimoto M, Hasegawa T, Reinke R, Angus J, 2014: Lower-than-expected floret sterility of rice under extremely hot conditions in a flood-irrigated field in New South Wales, Australia. *Plant Production Science* **17**(3), 245-252.
- 7) Okada M, Lieffering M, Nakamura H, Yoshimoto M, Kim H, Kobayashi K, 2001: Free-air CO₂ enrichment (FACE) with pure CO₂ injection: system description. *New Phytologist* **150**, 251-260.
- 8) Tian XH, Matsui T, Li SH, Yoshimoto M, Kobayasi K, Hasegawa T, 2010: Heat-induced floret sterility of hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars under humid and low wind conditions in the field of Jiangnan basin, China. *Plant Production Science* **13**(3), 243-251.
- 9) Yoshimoto M, Fukuoka M, Hasegawa T, Matsui T, Tian XH, Vijayalakshmi C, Singh MP, Myint TT, Weerakoon WMW, Lafarge T, Lur HS, Tarpley L, 2012: MINCERnet: A global research alliance to support the fight against heat stress in rice. *Journal of Agricultural Meteorology* **68**(2), 149-157.
- 10) Yoshimoto M, Fukuoka M, Hasegawa T, Utsumi M, Ishigooka Y, Kuwagata T, 2011: Integrated micrometeorology model for panicle and canopy temperature (IM³PACT) for rice heat stress studies under climate change. *Journal of Agricultural Meteorology* **67**(4), 233-247.
- 11) 吉本真由美・原蘭芳信, 1993: メッシュデータによるダイコンの簡易被覆栽培適地の判定. *農業気象* **49**(2), 99-104.
- 12) 吉本真由美・原蘭芳信・河村哲也, 2000: 大気-植生-土壌系モデルによる高温・高CO₂濃度条件下のダイズ群落におけるCO₂収支の解析. *農業気象* **56**(3), 163-179.
- 13) 吉本真由美・原蘭芳信・宮田 明・Walter C. Oechel, 1996: アラスカ州バロウの北極域ツンドラにおける1993年夏季の微気象及び熱収支特性. *農業気象* **52**(1), 11-20.
- 14) 吉本真由美・原蘭芳信・宮田 明・Walter C. Oechel, 1996: アラスカ州バロウのツンドラの活動層における熱・水収支特性. *農業気象* **52**(4), 293-300.
- 15) 吉本真由美・原蘭芳信・Walter C. Oechel, 1997: アラスカ州プルドーベいの北極域ツンドラにおける盛夏期のCO₂収支に及ぼす微気象の影響. *農業気象* **53**(1), 1-10.
- 16) Yoshimoto M, Oue H, Kobayashi K, 2005: Energy balance and water use efficiency of rice canopies under free-air CO₂ enrichment. *Agricultural and Forest Meteorology* **133**, 226-246.
- 17) Yoshimoto M, Oue H, Takahashi N, Kobayashi K, 2005: The effects of FACE (free-air CO₂ enrichment) on temperatures and transpiration of rice panicles at flowering stage. *Journal of Agricultural Meteorology* **60**(5), 597-600.
- 18) Yoshimoto M, Sakai H, Fukuoka M, Hasegawa T, Zhang G, Ujiie K, Nakamura H, 2019: Heat induced sterility of rice observed with two different free-air canopy warming methods. *Proceedings of the International Symposium of Agricultural meteorology* 2019, p. 185.