

気候変動適応の基礎となる群落微気象と作物の気象応答に関する実験的・理論的研究

丸山篤志

(農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門)

Experimental and theoretical studies on canopy micrometeorology and crop environmental response as a basis for climate change adaptation

Atsushi MARUYAMA

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

1. はじめに

この度は、伝統ある日本農業気象学会学術賞を授与されることとなり、大変光栄に存じます。ご推薦いただいた宮田明博士、推薦にあたり格別のご支援を賜りました桑形恒男博士、並びに長谷川利拓博士に深く感謝いたします。また、この研究を高く評価して下さった学会賞選考委員の先生方ほか皆様にも厚くお礼申し上げます。

受賞の対象となった群落微気象の研究は、これまでに多くの優れた先輩方が取り組まれ発展させてきた分野で、私にとって憧れの研究テーマでした。そのようなテーマを対象に、これまで研究を続けることができ、その上に荣誉ある賞を賜ることとなり、大変喜ばしいと同時に、身の引き締まる思いがいたします。

思い返せば、農水水産省の試験研究機関に配属されてからこれまで、研究室の上司や同僚をはじめ、多くの方々のご指導、ご支援により研究を行うことができました。心より感謝いたします。中でも、本配属先の上司であった故大場和彦博士には、格別のご指導を賜りました。右も左もわからなかった新人に対して、その指導がいかにか心暖かいものであったのか、今の私にはよくわかります。ここでは、お世話になった方々との関わりや、研究のきっかけのエピソードを中心に、これまでの歩みを紹介させていただきます。研究の始まりは 28 年前にさかのぼります。

2. 研究を始めるにあたり

大学で農業気象学を学んだ後、1995 年に私は農林水産省に研究職として入省しました。新人研修で配属されたのは東北農業試験場(岩手県盛岡市)の気象特性研究室でした。研究室には室長の井上君夫さんをはじめ、菅野洋光さん、桑形恒男さんらが在籍しており、やませの特性などの研究が行われていました。井上さんは水田微気象の観測やシミュレーションの先駆者で、いつかそのような研究をしてみたいと思ったものでした。

研修中に与えられた研究テーマは、やませ気象と水稻生育との関係でした。やませの常襲地帯である三陸沿岸の八戸から、

内陸の盛岡にかけての複数地点において、水稻を同一方法でポット栽培し、その生育と気象との関係を調べました。栽培地点は全てアメガスの近隣に配置されており、気象データを使って生育過程の解析やモデリングにもつながる可能性のある、大変よく練られた研究でした。ところが、学部卒で研究経験の浅かった私は、そのような解析や研究の展開には全く発想が及ばず、気象概況や水稻の作柄をただ記述するのが精一杯で、まるで夏休みの観察日記のような研究に終始しました。それでも井上さんは、途中で研究のまとめ方を強制するようなことはせず、新人ならではの興味や疑問に沿った助言や指導をくださいました。今思うと、作物の生育過程をゆっくりと観察したり、研究の意義や意味することをぼんやり考えることのできる、研究を始めるにあたっての貴重な時間だったと思います。

気象特性研究室の隣の気象環境制御研究室には、室長の岡田益己さんをはじめ、小沢聖さん、濱寄孝弘さんが在籍していました。東北での研修中は毎週のように、同研究室や水田脇の小屋あるいは滞在中の寮で、様々な方と研究の話をしながら夜遅くまで飲む機会があり、大変賑やかな環境でした。東北の夏が過ぎて研修も終わりに近づいた頃、本配属先が九州農業試験場であることを知らされました。同年 10 月に私は東京からフェリーに乗って、初めての土地だった九州に赴任しました。

3. 微気象研究のスタート

九州農業試験場(熊本県西合志町)の気象特性研究室には、室長の大場和彦さんがおられました。研究員は私ひとりで、同分野の研究者は他に、隣の資源評価研究室に脇山恭行さんが在籍していました。脇山さんは当時、海面の反射日射と果樹生産の関係を研究しており、どうしたらそのような面白い研究テーマを見つけられるのかなど、よく研究の相談をさせて頂いたことを覚えています。九州農業試験場は時間の流れが何ともゆっくりとしていて、のどかな環境で研究生活がスタートしました。その頃は大きな研究プロジェクトもなく、大場さんに圃場で水稻や小麦、トウモロコシ、サトイモなど様々な作物の栽培を教わりながら、被害調査などで現地を見て回る機会がよくありました。

雪国の小さな山村で生まれ育った私にとって、南国の九州の農業は驚きの連続でした。冬の麦畑の風景も新鮮でしたし、夏の豪雨や後述する台風による農業被害にも衝撃を受けました。

初めに最も驚いたのは、水稻の早期栽培で3月に田植えが行われていることでした。九州でも3月はまだ肌寒い日が時々ありますが、そのような日でも水田の水温は気温よりも高く、水中は十分に温かいため、苗を植えることができます。そのため、水温は水稻の移植日の早限を決める重要な要因となっています。

九州に着任した翌年1996年、宮崎公立大学の学長であった内嶋善兵衛先生のご厚意により、早期水稻を対象に水田水温を含めた微気象観測を行うことになりました。同年3月、宮崎の水田に観測装置を設置してデータ取得を開始しました。その後、大場さんの助言により、条件の異なる九州の他の2地域(阿蘇、筑後)でも同様の観測を実施しました。今考えると、気象観測の指導も兼ねた研究でした。すなわち、最初の地点(宮崎)では、私はセンサーのみを設置して大場さんがデータロガーの配線を補助して下さり、次の地点(阿蘇)では配線も含めて自分で設置を行い、最後の地点(筑後)は先方との連絡調整も含めて単独で設置を行う、といった具合でした。

データの解析を始めてから、先述のような水温と気温の関係に興味を持った私は、その傾向がモデルでも再現できるか試すことにしました。浅い水体を対象とした平衡水温モデルを基本に、水田の熱収支や微気象に関する文献を調べ、理論的背景が理解できない部分は極力原典を辿りながら、見よう見真似で水田水温の推定モデルを構築しました。しかし、問題がひとつありました。どのようにモデルを構築しても、境界条件として通常は葉面積指数(LAI)が必要です。ところが、観測はそのような目的に沿って計画したものではなかったため、LAIを測定していませんでした。

どうしようか考えているとき、たまたま読んでいた京都大学の機関誌に掲載されていた堀江武先生の論文(Horie, 1987)で、気温を説明変数としたLAIの生長モデルの存在を知りました。そこで、気温のデータを用いてLAIの計算を行ったところ、予想以上に水温の季節変化の傾向をうまく再現できることが分かりました。また、生育初期のLAIの増加傾向が九州では地域によって大きく異なるのですが(丸山ら, 2005)、その傾向を再現できる利点がありました。このようにモデルで作物を動的に扱うことで、気候変動や日々の気象の変化が水温など農地の微気象環境に及ぼす影響を、より現実的に評価できる可能性を感じ、そのことが次節で紹介する群落微気象・作物結合モデルの開発につながりました。

この年、研究室に四国農業試験場から黒瀬義孝さんが着任されました。黒瀬さんは当時、局地気象の研究で多くの論文を執筆されており、論文の書き方や図の作成方法などの基本をご教授いただきました。上記の水田水温の推定モデルの成果は、翌年に追加データを取得し、さらに異常気象年の水田水温をモデルを用いて解析することで、初めての原著論文にまとめることができました(丸山ら, 1998)。

4. 群落微気象・作物結合モデルの開発

気候変動への適応は、21世紀の農業が直面している重要な課題です。降水量や蒸発散量が変動する中、地域の水資源の有効利用が求められます。農地の水需要を左右する蒸発散量について、気候変動の影響を作物の動的変化を考慮した上で

評価できるようにしたいと思い、水田を対象とした群落微気象・作物結合モデルの開発に挑戦することになりました。

はじめに、基礎データとなる蒸発散量の観測を、九州で作期の異なる複数地域の水田(西都、阿蘇、佐賀)で実施しました。当時、蒸発散の測定にも渦相関法が使われ始めていましたが、予算が潤沢ではなかったため、測定には熱収支ボーエン比法を用いました。生育期間を通じた長期観測ができるのか心配でしたが、1999~2001年にCampbell社のデータロガーを用いて、八代平野のイグサ田でボーエン比法による蒸発散量の観測の経験がありました(Maruyama *et al.*, 2004)。そこで無事に長期の熱収支データを取得できることを確認できたため、2002年から安心して上記3地点で観測を行うことができました。

この頃、研究室には多くの研究員や学生が在籍していました。JSPS 特別研究員の中本恭子さん、JSPS 外国人特別研究員のDr. Weerakoon W.M.W、熊本大学の大角京子さんには、観測や調査で度々ご支援を頂きました。また、九州大学から当時院生だった吉越恆さん、平田竜一さん、杉浦裕義さんが滞在され、牧草畑のCO₂フラックスの観測に取り組みされていました。

蒸発散量を含む観測データを取得したのち、次に、微気象モデルと作物モデルを結合するための解析に取りかかりました。最初は、群落を一枚の葉で表現した単葉型(Big-leaf)モデルで解析を進め、群落抵抗とLAIの関係を定式化するつもりでした。ところが、両者の関係は得られたものの、その理論的な解釈が容易ではなく、研究は難航しておりました。そこで助けてくれたのは、東北農業試験場から農業環境技術研究所(農環研)に異動されていた桑形さんでした。桑形さんには、観測の開始前からこの研究の相談をさせて頂き、観測方法にも多くの助言を頂いていました。

2003年の秋に、最後の観測地点のデータを回収したのち、流動研究員の制度を利用して、農環研に数ヶ月滞在しました。桑形さんに群落微気象の理論についてのご教授を頂きながら、モデルのプログラミングを開始しました。また、森林総合研究所の渡辺力さん(現所属:北海道大学)にも、同時期に取り組んでいた葉面結露の研究(Maruyama *et al.*, 2023)のため、植物群落の多層モデルについてご教授を頂きました。これらにより、長い間独学で進めていた際の群落微気象の理論やモデルに関する数多くの疑問が氷解し、その後一気に研究が進みました。

まず、熱収支データの解析に、Big-leaf型でなく、地面と群落を分けたDouble-source型のモデル(Kondo and Watanabe, 1992; Watanabe, 1994)を利用しました。その結果、水稻群落の吸光係数や気孔コンダクタンスなどの物理・生理的パラメータが発育ステージに強く依存することを明らかにしました(Maruyama *et al.*, 2007; Maruyama and Kuwagata, 2008)。次に、それらの関係を定式化することで、作物の生育過程と微気象過程を統合した群落微気象・作物結合モデルを構築しました。同時に、観測データによる検証を行い、同モデルが蒸発散量や群落温度、水田水温などの推移を、栽培期間を通して高精度で再現できることを示しました(Maruyama and Kuwagata, 2010)。

群落微気象・作物結合モデルは、気候変動の影響を、作物の動的変化も考慮した上で評価できます。そこで、同モデルを用いて気候変動適応として作期を移動した場合の蒸発散量の変化を評価し、水稻の作期によって蒸散の割合が大きく異なる

ことを明らかにしました (Maruyama and Kuwagata, 2010)。また、将来の気候変動による水田水温と蒸発散量の変化を計算し、九州における水稲の移植早限日および水資源賦存量の変化を評価しました (Maruyama *et al.*, 2005)。

これら一連の研究は、観測の終了後から数年かけて実施し、九州大学の真木太一教授、平松和昭教授、北野雅治教授のご指導のもと、学位論文にまとめることができました。

5. 温暖化に対する作物の気象応答の解明と定量化

地球温暖化にともない、九州では水稲の登熟期の高温による玄米品質の低下が問題となるなど、2000年代はその影響が顕在化した時期でした。海外では開花期の高温による不稔の発生も報告されており、さらなる気温上昇で水稲の収量低下も懸念されました。そこで、農林水産省のプロジェクトにおいて、気温・湿度等の気象要因が作物体温を通じて高温不稔に与える影響を、品種間差を含めて解明する研究を行いました。

まず、実験を行う温度勾配チャンバーを製作しました。次に、熱電対を用いた穎花への負荷が小さい穂温の計測法を確立し、温度勾配チャンバーを用いて水稲のポット実験を行い、穂温が水稲8品種の稔実率に与える影響を定量化しました。その結果、インディカはジャポニカよりも耐高温性が高く、その違いは前者の穂温の低さに起因することや、穂温が同程度でも品種の受精能力の違いによって耐高温性が異なることを明らかにしました (Maruyama *et al.*, 2013)。また、開花期の高温によって稔実率が低下した稲は、遅れ穂の出現により減収を補償している可能性を新たに提示しました (Maruyama *et al.*, 2015)。

温暖化の影響について冬作物では、発育の早期化によって凍霜害危険期や病害防除適期の移動が問題となっていました。そこで、冬小麦3品種の作期移動試験を行い、冬作物の日長反応を考慮した発育モデルを作成し、秋播性の違いを反映した上で出穂期と登熟期を予測できることを示しました (Maruyama *et al.*, 2010)。この成果は他の冬作物にも適用可能で、温暖化が進行する中で、生物季節の予測を通して冬作物の安定生産に寄与することが期待されます。

また、温暖化による台風の大型化も指摘されており、沿岸部では作物の潮風害の増加が懸念されます。九州の台風では、1991年17・19号、1999年18号、2004年18号、2006年13号で甚大な被害が発生し、沿岸部では潮風害も発生しました。

水稲の潮風害のリスク評価のため、ポット栽培した稲に塩水を噴霧する風洞実験を行いました。その結果、塩付着後に葉の光合成速度が低下し、乾物生産・転流の阻害が発生することを明らかにしました。また、減収率を塩付着量の関数として定式化し、台風に遭遇する生育ステージによって、減収率が大きく異なることを示しました (丸山ら, 2000)。これは、沿岸部の水稲の作期移動でも考慮すべき新たな知見であり、作付計画にも活用が期待されます。

実際の台風や潮風による被害を経験して、農業の気候変動適応では、このような極端現象への対応と、そのための研究が今後は重要ではないかと感じています。

6. 水田の熱環境のシミュレーション

2008～2009年にかけて、経済協力開発機構(OECD)の国際共同研究プログラム等の制度を利用し、カリフォルニア大学デービス校に在外研究のため滞在する機会を得ました。大気科学部の Kyaw Tha Paw U 教授の指導のもと、稲体の熱環境に興味のあった私は、植物の熱環境のシミュレーション手法の開発に取り組みました。陸面-大気間の熱・水・CO₂輸送の数値モデルを改良し、植物体の温度分布の評価に応用しました。

夏季には同モデルの検証のため、野外観測を実施しました。サクラメントバレーの穀物地帯で、カリフォルニア大学バークレー校との共同観測に誘われ、同校の Dennis Baldocchi 教授、Joseph Verfaillie 氏にご助言やご支援を頂き、稲群落の熱環境を調査しました。観測サイトまでは院生らとミニバンで田舎道を数時間かけて通っていましたが、道中は延々と放牧地が広がっているのが印象的でした。圃場の大きさも桁違いで、対象水田の面積は 12.5ha もあり、圃場全体に水が届くように深水管理が行われており、水深が深いところでは 30cm を超えていました。

野外観測を開始したのは 8 月でしたが、日中は最高気温が 40℃ を超えることも珍しくなく、作業中は日射対策や水分補給が欠かせませんでした。そのような日でも、水田水温は 25℃ に満たず、群落内に屈むと涼しく感じる事が意外でした。これは、大気が乾燥しているため蒸発散による冷却効果が大きいことに加え、深水中水層の熱容量が大きいことが理由のひとつです。水管理方法によって水田の熱環境が変わることに興味を持ち、そのことが後述の水田水温シミュレーションの水管理への応用につながりました。

帰国して数年度の 2013 年、私は中央農業総合研究センター(茨城県つくば市)に異動しました(現在は農業環境研究部門に所属)。研究チームでは、チーム長の中川博視さんをはじめ、気象データや作物モデルを栽培管理に活用するための研究が精力的に行われていました。大野宏之さん、佐々木華織さんがメッシュ農業気象データの開発、吉田ひろえさんは水稲生育モデルの開発や応用に取り組まれていました。

翌年からは内閣府の大型プロジェクトも始まり、私はその中で微気象モデルを水田の水管理に活用する研究課題に取り組みました。しかし、そのためには長年の問題がひとつありました。九州で開発した水田の微気象モデルを北海道や東北に適用すると、日平均水温を過小評価してしまうのです。冷涼な地域では深水管理が行われる場合もあるため、最初は水深の違いが原因と考えました。ところが、モデルで水深の値を大きくしても水温の日変化の振幅は減少するものの日平均値は変化せず、さらに深水中で稲体が水没することによる LAI の減少を考慮しても、モデルの過小評価の傾向は改善されませんでした。

試行錯誤した結果、湛水深が低下すると地面の凸凹が露出して大気と熱交換しやすくなるはずと思い、その過程をモデル化することにしました。桑形さんに相談したところ、即座に理解して頂き、地表面の凸凹(幾何学的な粗度長)と空気力学的な粗度長の理論的な関係やモデルについて、多くの助言を頂きました。また、この発想は後日、2016年4月に発生した熊本地震の緊急被害調査(丸山・伊川, 2019)において、地震により不陸が

生じた水田圃場で、低い部分のみが湛水されて地面の多くが露出している様子を目にした際も、その考えを強くしました。

その後、北海道農業研究センターの根本学さん、濱寄孝弘さん(現所属:農研機構本部)の協力を得て、水温を観測した同センターの水田圃場で地面の凸凹の計測を行いました。それら結果をもとに、水管理による水深の変化が水温に及ぼす影響を高精度で評価できるよう、群落微気象モデルを改良しました(Maruyama *et al.*, 2017)。さらに、この改良モデルを用いたシミュレーションに基づいて、水田水温を制御する灌漑方法を提案しました。この成果は、天候に応じて水管理を最適化するプログラムの開発につながり、同プログラムは市販の圃場水管理システムにも搭載され、全国に広く普及しています。

群落微気象モデルは、この他にも様々な応用や発展が期待されます。農環研では小野圭介さんが、渦関法による水田のCO₂フラックスの長期観測に基づいて、同モデルを用いて群落スケールで光合成と気孔コンダクタンスの関係を定量的に評価し、群落の熱収支と光合成過程のモデル結合につながる成果を得ています(Ono *et al.*, 2013)。また、伊川浩樹さん(現所属:北海道農業研究センター)は、水田での開放系高CO₂(FACE)実験の結果に基づいて、同モデルを用いて多収性水稻品種の将来のCO₂増加に対する蒸発散の変化を評価し、さらに水田が周辺地域に及ぼす熱緩和効果やCO₂増加によるその変化を評価しています(Ikawa *et al.*, 2018; 2021)。

7. 三球温度計の開発

野外で気温を正確に計測するには、強制通風型の放射よけを備えた温度計を利用する必要がありますが、それには電源が必要なのが難点でした。もし、放射よけを使わずに気温を正確に計測できる温度計があれば大変便利です。

つくばに転勤して間もない頃、研究室で中川さんから「大きさや形の異なる複数の温度センサで日射の影響を見積もって正しい気温を測定できないの?」といった趣旨の質問がありました。以前に岡田益己さんから、同様の発想で開発された放射補正式の温度計(Daniels, 1968)について教わっていた私は、その研究を紹介しました。中川さんは非常に多くの研究のアイデアを持っており、半分冗談のような発想も含めて毎日のように研究の雑談をしていたため、このことも数多くの研究の種のひとつとして、それほど気に留めていませんでした。

それからしばらく経った頃、熱電対のメーカーの担当者として九州で長くお世話になっていた、名古屋科学機器株式会社の松本佳久さんがつくばに来られる機会がありました。久しぶりでしたので、カタログも眺めながら話していたとき、温度計の先端を球形に加工した製品が目にとまりました。その製品の球は大きなものですが、後日私は、以前に熱電対のハンダ付けを度々失敗して接点を団子状にしたことを思い出し、うまく“失敗”すれば小さい球の熱電対を作れないかと思いました。すなわち、センサが球形なら、表面と大気間の熱交換が、風向に依存しなくなる可能性があるため、複数センサによる正確な気温測定が実現できるのではと思いました。しかし当時は、この研究を実際に行うことまでは想定していませんでした。なぜなら、先述の大型プロジェクトなど他に優先すべき研究課題があったためで、

研究を思いつくことと、それを具体的に構想を練って実行することの間には、かなりの開きがあるからです。

変化が起きたのは2015年2月19日、茨城県下妻市の水田に現地調査に出かけたときでした。その日は天気も良く、車の運転をしながら気温測定のことを考えていました。もし放射よけを使わない温度計を作るなら、どのようなセンサの配置や個数がよいか、道中のコンビニエンスストアで休憩する間も考えているうちに、温度計の形や具体的な実験計画、関連する理論、さらに発展させた測器のアイデアも含めて想像が止まらなくなり、無性に研究をしたくなりました。実際には、ここまでの事を最初から結び付けて考えていた訳ではなく、それぞれが頭の片隅にぼんやりと存在していたのですが、それらがひとつに繋がって作りたい物の形が浮かんだと表現するのが正確かもしれません。そのような“閃き”は過去に経験がなかったため、自分でも興奮したことを覚えています。

調査から戻ってすぐ、興奮が冷めないうちに、球体の熱収支と伝熱学の理論に基づいて、球の大きさや温度との関係を導出したところ、いくつかの仮定をおけば、簡単な関係式に帰着することが分かりました。すなわち、球の表面温度と気温との差が球の直径の累乗に比例する関係を導きました。また、その関係を利用して、直径が異なる複数の小球の温度から気温を正確に求める原理を考案しました。翌日から実験の準備をはじめ、松本さんに直径の異なる小さな球形の熱電対を特注しました。その後の夏季と冬季に谷和原の圃場で実験を行い、考案した原理によって野外での気温を高精度で計測できることを確認しました(Maruyama *et al.*, 2020)。

開発した温度計は3つの球で十分な精度が得られたため、三球温度計と名付けました。三球温度計はすでに市販されており、農業分野での利用に加えて、電源確保が困難な場所や、環境を乱さない計測が求められる場合など、幅広い分野での活用が期待されます。農環研では木村建介さんが、三球温度計を茶園の気温測定に利用し、凍霜害のリスク評価とあわせて、複雑地形での日最低気温の空間分布の評価に活用しています(Kimura *et al.*, 2021; 2023)。現在は、三球温度計を温室で利用するための研究に取り組んでいるところです。

8. おわりに

これまでの研究を振り返ってみて、それらは、自分の興味に加えて、その時々や環境や交流によって偶然に産まれたものが多く、恵まれた環境やご縁のもとで研究を進めることができたと感じています。一連の研究は、研究室の上司や同僚をはじめ、多くの方々のご指導、ご支援により実施できたもので、一人ではとても成し得なかったことを改めて実感します。ここに記させて頂いた方々のほかにも、共同研究者をはじめ、同僚、技術専門職員、契約職員の多くの方々からご協力を頂きました。この場を借りて、厚くお礼申し上げます。

これからの農業気象学、および日本の農業の発展と豊かな自然や環境の持続を願って、結びといたします。

引用文献

- Daniels GE, 1968: Measurement of gas temperature and the radiation compensating thermocouple. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **7(6)**, 1026–1035.
- Horie T, 1987: A model for evaluating climatic productivity and water balance of irrigated rice and its application to Southeast Asia. *Southeast Asian Studies* **25(1)**, 62–74.
- Ikawa H, Chen CP, Sikma M, Yoshimoto M, Sakai H, Tokida T, Usui Y, Nakamura H, Ono K, Maruyama A, Watanabe T, Kuwagata T, Hasegawa T, 2018: Increasing canopy photosynthesis in rice can be achieved without a large increase in water use—A model based on free-air CO₂ enrichment. *Global Change Biology* **24(3)**, 1321–1341.
- Ikawa H, Kuwagata T, Haginoya S, Ishigooka Y, Ono K, Maruyama A, Watanabe T, 2021: Heat-mitigation effects of irrigated rice-paddy fields under changing atmospheric carbon dioxide based on a coupled atmosphere and crop energy-balance model. *Boundary-Layer Meteorology* **179**, 447–476.
- Kimura K, Kudo K, Maruyama A, 2021: Spatiotemporal distribution of the potential risk of frost damage in tea fields from 1981-2020: A modeling approach considering phenology and meteorology. *Journal of Agricultural Meteorology* **77(4)**, 224–234.
- Kimura K, Maruyama A, Sasaki K, Kudo K, Tanaka E, Fushimi E, Nakagawa H, 2023: Fine-scale mapping of daily minimum temperature in a cropland with complex terrains through the combination of a cold flow accumulation model with inversion strength. *Agricultural and Forest Meteorology* **329**, 109247.
- Kondo J, Watanabe T, 1992: Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model. *Journal of Atmospheric Sciences* **49**, 2183–2199.
- Maruyama A, Hamasaki T, Sameshima R, Nemoto M, Ohno H, Ozawa K, Wakiyama Y, 2015: Panicle emergence pattern and grain yield of rice plants in response to high temperature stress. *Journal of Agricultural Meteorology* **71(4)**, 282–291.
- 丸山篤志・伊川浩樹, 2019: 平成 28 年熊本地震により亀裂や不陸が生じた水田圃場の減水深の特徴. *九州沖縄農業研究センター研究資料* **95**, 10–17.
- Maruyama A, Kurose Y, Ohba K, 2010: Modeling of phenological development in winter wheat to estimate the timing of heading and maturity based on daily mean air temperature and photoperiod. *Journal of Agricultural Meteorology* **66(1)**, 41–50.
- Maruyama A, Kuwagata T, 2008: Diurnal and seasonal variation in bulk stomatal conductance of the rice canopy and its dependence on developmental stage. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**, 1161–1173.
- Maruyama A, Kuwagata T, 2010: Coupling land surface and crop growth models to estimate the effects of changes in the growing season on energy balance and water use of rice paddies. *Agricultural and Forest Meteorology* **150**, 919–930.
- 丸山篤志・桑形恒男・大場和彦, 2005: プラントキャノピーアーナライザによる植物面積指数の測定誤差とその葉群傾斜角への依存性. *農業気象* **61(4)**, 229–233.
- Maruyama A, Kuwagata T, Ohba K, Maki T, 2007: Dependence of solar radiation transport in rice canopies on developmental stage. *JARQ* **41(1)**, 39–46.
- 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(4)**, 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* **292–293**, 108028.
- Maruyama A, Nemoto M, Hamasaki T, Ishida S, Kuwagata T, 2017: A water temperature simulation model for rice paddies with variable water depths. *Water Resources Research* **53**, 10065–10084.
- 丸山篤志・大場和彦・黒瀬義孝, 1998: 平衡水温モデルによる異常気象年の水田水温の推定. *農業気象* **54(3)**, 247–254.
- 丸山篤志・大場和彦・黒瀬義孝, 2000: 生育時期別の潮風処理が水稻の収量に及ぼす影響. *農業気象* **56(4)**, 275–282.
- Maruyama A, Ohba K, Kurose Y, Maki T, 2005: Spatial variation in evapotranspiration from a lowland field as estimated on a 1km grid size in Kyushu. *Journal of Agricultural Meteorology* **60(5)**, 857–860.
- Maruyama A, Ohba K, Kurose Y, Miyamoto T, 2004: Seasonal variation in evapotranspiration from mat rush grown in paddy field. *Journal of Agricultural Meteorology* **60(1)**, 1–15.
- Maruyama A, Weerakoon WMW, Wakiyama Y, Ohba K, 2013: Effects of increasing temperatures on spikelet fertility in different rice cultivars based on temperature gradient chamber experiments. *Journal of Agronomy and Crop Science* **199**, 416–423.
- Ono K, Maruyama A, Kuwagata T, Mano M, Takimoto T, Hayashi K, Hasegawa T, Miyata A, 2013: Canopy-scale relationships between stomatal conductance and photosynthesis in irrigated rice. *Global Change Biology* **19(7)**, 2209–2220.
- Watanabe T, 1994: Bulk parameterization for a vegetated surface and its application to a simulation of nocturnal drainage flow. *Boundary-Layer Meteorology* **70**, 13–35.