

# 微気象観測に基づく作物群落の熱・ガス交換プロセスの解明ならびに群落の環境緩和機能に関する基礎研究

大上博基

愛媛大学農学部

Energy and gas exchange processes within and above the vegetation canopy and a function of mitigating environment by the canopy based on micrometeorological measurements

Hiroki Oue

Faculty of Agriculture, Ehime University, Japan

## 1. はじめに

このたびは、2012年度の日本農業気象学会学術賞を賜り、たいへん光栄に存じます。大学院の学生時代から約28年間、フィールドでの微気象を中心とした観測による実証的な研究に関わってきた研究者として、たいへん嬉しく存じます。

学部学生だった時、漠然と農業気象学に関わることを研究したいという以外何ら具体的な展望のないまま、恩師丸山利輔先生（前石川県立大学長、現石川県参与、京都大学名誉教授）のかんがい排水学研究室（当時）の門を叩きました。丸山先生は、灌漑排水学という技術的な学問体系はもちろん重要だが、それを構成する一つ一つの科学的な基礎学問の追究こそ大学で求められるということを教育研究指導の方針の一つとされ、研究室には灌漑排水学の他、農地・森林水文学、農業気象学、土壌物理学、地下水学など、灌漑排水に関する科学分野に傑出した先生方と先輩方がおられました。大学院では、三野徹先生（現鳥取環境大学特任教授、京都大学名誉教授）の「地球上における水の役割と蒸発散」という講義（三野・丸山，1989）で、蒸発散現象が地球環境の形成に大きな役割を果たしている、すなわち宇宙にあって地球上の自然現象と生命活動を維持するために蒸発散が根幹的な仕組みであることを知り、それまでいわば霧中にいた微気象・蒸発散研究に対する視点が定まった気がしました。このあたりが、標記の研究課題への入り口だったと思います。以下の文

章で紹介させていただきますが、学生時代からこれまで数多くのご指導を下さった先生方、国内外様々なフィールドで共に研究を行ってきた研究仲間の皆様、一人で研究を行っていた頃に体力勝負の観測に協力してくれた当時の学生諸君に、深く感謝を申し上げます。また、学術賞へご推薦下さいました原菌芳信博士、学会賞審査委員会ははじめ役員の皆様および学会員の皆様に、標記の研究課題を評価下さったことに対して心から感謝を申し上げます。

さて、標記の研究課題は3つのテーマに分けられます。第一に、農業気象学の基本中の基本である各種農耕地における微気象観測を行い、各種地表面や作物群落における熱収支特性を明らかにしました。ここでは特に、熱環境緩和機能を発揮する水田微気象の特徴に注目しました。第二に、水田微気象の特徴をより実際の現象に近い視点で検討することを目指し、イネ群落内外の微気象環境を測定することにより、それを再現する群落多層微気象モデルで水田微気象の特徴の所在を明らかにしました。第三に、高CO<sub>2</sub>または高O<sub>3</sub>濃度大気環境下での穀物生産量の変化の予測を目指し、FACE施設でイネやコムギ個葉の気孔コンダクタンスと光合成速度の鉛直分布を測定することにより、作物の環境応答モデルを組み込んだ群落多層微気象モデルなどを用いて、ガス濃度変化に対する純一次生産量の変化や群落微気象環境の変化を予測しました。以下に、標記の研究課題に沿ってこれらの研究とその周辺を概観させていただきます。

## 2. 農地微気象の基礎的研究と水田のもつ熱環境緩和機能<sup>1)~8), 13), 14), 17), 19), 22), 23)</sup>

卒業論文で水田水温に関する研究を行っていたときは、学内の実験水田で基本的な気象観測を行う以

<http://www.agrmet.jp/sk/2014/F-1.pdf>

2014年10月9日 掲載

Copyright 2014, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

外は大半がデータ解析のデスクワークでしたが、当時博士課程 2 年で現九州大学教授の大槻恭一博士に懇切なご指導をいただき、研究の面白さと文献レビューの重要性を学びました。このとき、水田水温に関して日本の農業気象学分野の諸先輩方が蓄積した膨大な研究は、世界に誇る成果であることを知りました。大学院修士課程では、研究室と共同研究を行っていた(財)北海道農業近代化コンサルタント(現(財)北海道農業近代化技術研究センター)にお世話になり、理事長だった大原芳夫博士が共同研究のために会社の敷地に整備された実験水田で、イネの生育全期間にわたって微気象観測を行いました。その結果から、水田の実蒸発散量はとくに LAI が大きくなってからは可能蒸発量を越えることや、夕方以降はほとんどの場合ボーエン比がマイナス値になることが分かりました。修士論文では、現岡山大学教授の三浦健志博士が発案された多点通風乾湿計(塩ビパイプの頂部に換気扇を取りつけたもの)を用い、イネ群落内部と上部の気温・湿度を測定し、群落における熱と水蒸気交換の仕組みを記述しようとしました。しかし、その物理的な仕組みを解明するには至りませんでした。

一方で、三浦博士や大槻博士が展開されていた可能蒸発量と実蒸発散量の補完関係に関する議論にも、大きな刺激を受けました。補完関係を最初に提案したフランス人 Bouchet (1963) の論文を読みたかったのでいろいろと探し回ったところ、意外にかんがい排水学研究室と同じフロアの砂防学研究室に蔵書さ

れていました。従来、補完関係は広域の蒸発散量推定に用いられていましたが、博士論文で蒸発計を活用して傾斜地の局所的な温度環境を解明された三浦博士からヒントをいただき、水田、畑地、裸地といった性質の異なる地表面に蒸発計を置いてみました。その結果、いわゆる補完関係式に係数を組み込めば、吹走距離が 20-30m 程度の狭い地面においてもそれが成立することが分かりました。さらに三野先生から、その係数に対する物理的な意味づけに関するアドバイスをいただき、補完関係の論文が完成しました。ところで、この論文を書きながら、狭い地表面における補完関係の仕組みを検討した研究は稀なのではないかと期待し、当時大学図書館に新たに導入された文献情報データベース Biosis Previews 1969-1989 を利用し、“potential evaporation”や“pan evaporation”で検索して文献レビューを行っていました。すると、Seguin というフランス人研究者が、局所的な可能蒸発量という内容で *Agricultural Meteorology* (1975) に論文を発表していたことがわかりました。引用数が 1 件あったか無かったかと記憶しています。Bouchet の論文同様フランス語なので熟読するには少し時間がかかりましたが、それとわかる単語や論文に掲載された図から、私たちの考えとほぼ一致していることがすぐに分かりました。これには衝撃を受け、文献レビューの重要性を改めて知る機会となりました。

微気象観測を毎年続け、いくつかの種類の日表面における熱収支特性が分かってくる一方で、どこに

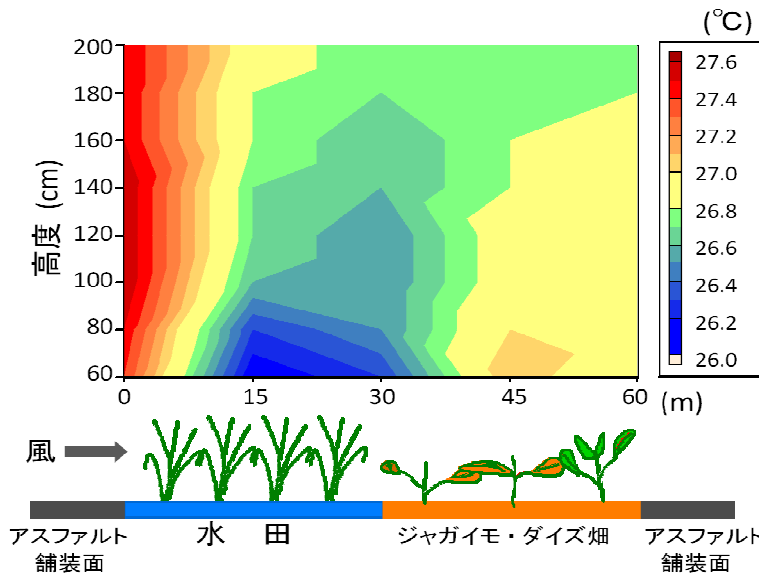


図 1 水田とその周囲の 2 次元気温分布測定結果の例<sup>5)</sup> (1992 年 8 月 27 日 13:00, 北海道深川市)

新規性を見出すかについて考えました。解答の見えない長い時間が過ぎた後、三野先生のゼミ（たとえば、三野・丸山, 1989）で蒸発散現象が環境の形成に根幹的な役割を果たしていることを教わり、地目の混在した土地利用状況にある日本の近郊地域では、これから水田の存在が重要視されるだろうということを丸山先生から助言をいただきました。そこで、その趣旨とこれまでの研究成果を関連付けながら博士論文をまとめました。丸山先生のご助言は、農業の多面的機能という発想の先駆けとして、極めて貴重でした。

博士論文と並行し、水田内外における 2 次元気温分布の測定を行っていました。補完関係と関連して地目混在化地域における水田の役割という視点に立つと、高温条件下で測定すれば必ず水田が熱のシンクになるような気温分布が現れると思い、前述の北海道農業近代化コンサルタントの皆さんにお世話になりながら三浦式多点通風乾湿計を水田の leading edge から風下へ水平方向に 5 か所設置しました。この測定結果（図 1）を水文・水資源学会で発表したところ、当時東北大学教授の近藤純正先生から、論文投稿するようご指導をいただきました。水田微気象の特殊性は興味深い一方でその具体的な原因が未解明と思われたので、畑地、水面、湿潤裸地、乾燥裸地での微気象観測結果と比較し、イネ群落の熱環境緩和機能は、畑地や裸地と比較して高い蒸発効率と水面や裸地と比較して高いバルク輸送係数の相乗

効果によることを明らかにしました（図 2）。解析手段は単層モデルと 2 層モデルでした。さらにこれらの成果を、群落内外の熱・ガス交換プロセスの解明、気象条件や作物生育条件をパラメータとする蒸発効率または群落抵抗のモデル化へと展開しました。

### 3. 作物群落内外の熱・ガス交換プロセスの解明<sup>9)~12), 18)</sup>

水田の熱環境緩和機能は高い蒸発効率と高いバルク輸送係数の相乗効果によるという結論を一つの区切りとして、わかった気になっていたのですが、それは単層モデルと 2 層モデルのうえでの結論なので現実性に欠けると感じていました。そこで、群落の微気象現象をより現実的に再現し現象理解を深めるために、幼齢のスギ群落やイネ群落で多層モデルに対応する群落微気象の測定を始めました。またこのころは、一人で愛媛大学の実験水田などで観測を行っていました。HORIBA の携帯型放射温度計でイネ群落の表面温度の鉛直分布を最初に測定した時、その測定結果は衝撃的でした。群落表面温度や葉温の鉛直分布の測定例はあまり聞かなかったのですが、測定したところ、日射量などの外部条件および天候（直達日射と散乱日射の割合）や時刻（日射量自体や太陽高度）によって鉛直分布が様々に変化し、各要因によって説明がつくということが分かってきました。

一方、1997 年 3 月から 1998 年 1 月まで、文部省

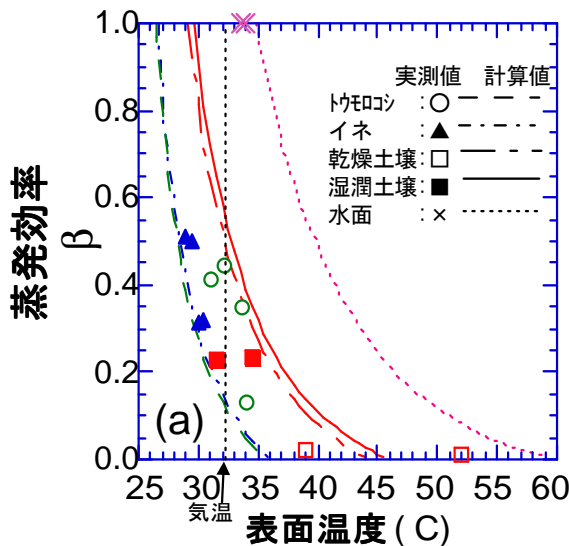


図 2 各種地表面における表面温度の実測値(各記号)と計算値(各線)の例<sup>6)</sup>

在外研究員として Cornell 大学と UC Davis に滞在する機会を得ました。Cornell 大学では Wilfried Brutsaert 教授に受け入れていただきました。Brutsaert 教授の隣の部屋をお借りし、ゼロから試行錯誤で、Kondo & Watanabe (1992) や近藤先生の教科書などをあらためて熟読しながら、乱流モデルには K 理論を用い、自分たちの観測値を用いて自分の多層モデルを作る日々を送りました。それまでモデル作成の経験がほとんどなく、フィールド観測が中心だったのですが、在外研究員の期間中はデスクワークに時間を費やすことができました。Cornell 大学滞在から 2-3 カ月たったころから、各種微気象要素やフラックスの鉛直分布がノートパソコンのモニタ上に描かれる段階になってきました。8 月から UC Davis に移動し、Roger Shaw 教授 (現 Emeriti) と共同研究を始めました。ここでも、Shaw 教授の 2 部屋隣りでちょうどサバティカルで不在となった Kyaw Tha Paw U 教授の部屋をお借りし、ゼミに参加させていただく以外は基本的に一人でデスクワークを行いました。Shaw 教授に受入をお願いした理由の一つは、2<sup>nd</sup>

order closure model をモデルに組み込みたかったことなので、さっそく Wilson & Shaw (1977) などであらためて熟読し直し、パラメータの扱いなどについて不明な点を Shaw 教授に質問して理解し、Cornell 滞在中に完成した K 理論ベースのモデルにクロージャモデルを載せ換える作業を始めました。すると間もなく、それらしい鉛直分布が出力されるようになりました。

帰国してから、愛媛大学農学部の水田で、多層モデルの再現性を検証するために群落微気象の測定を継続しました。再び測定したイネ群落の表面温度の鉛直分布には、以前に増して興奮をおぼえました。在外中は、一部架空のパラメータを与えた計算結果だけを見ていましたが、測定された鉛直分布はほぼモデルの考え方で説明がつくように思いました。イネ群落内の日射量鉛直分布は、LI-COR のライントイプ PAR 計や PREDE のライントイプ日射計を手持ちで測定しました。これらの鉛直分布は非常に興味深かったので、自動計測の困難な測定項目を連日朝から夕方まで手で測定しました。植物体面積密度の鉛直分布は、イネを数個体層別刈り取りし、部位別に面積計で測定しました。また、独自のモデル開発には個葉の気孔コンダクタンスと光合成速度の鉛直分布が必須でした。当時はそのための高価な測器を持っていませんでしたが、実験水田を提供して下さった愛媛大学農学部作物学研究室の杉本秀樹博士 (現同教授) が、KOITO の携帯型蒸散・光合成測定システムをお貸し下さった上、懇切に使用方法を教えてくださいました。この鉛直分布もまた興味深く、専攻生たちと連日のように測定しました。また同時に、モデルの構造自体も改良を重ねました。たとえば、考えれば当然なのですが、層ごとに熱収支を解く際に、葉を一面と仮定するのではなく、表側と裏側 (正確には陽側と陰側) に分けて解くことで、植物体表面温度鉛直分布の測定値は格段に精度良く再現できるようになりました (図 3)。

こうしてモデルを適用し、水田が有する熱環境緩和機能の成立要因を検討しました。その結果、イネ群落の陰になった水面が大きな吸熱効果を有することと、植物体同士の重なりによって陰になった葉面が同じく吸熱効果を有することが明らかになりました (図 4)。この結論は、多層モデルによって明らかにできたことですが、同時に群落内部の微気象環境を実測することによってしか得られなかったことだと思います。また、このモデルを適用した数値シミュレーションにより、群落全体としての生産量 (光合成速度) を最大にしつつ、水消費量 (蒸散または蒸発散量) を最小にする、すなわち水利用効率

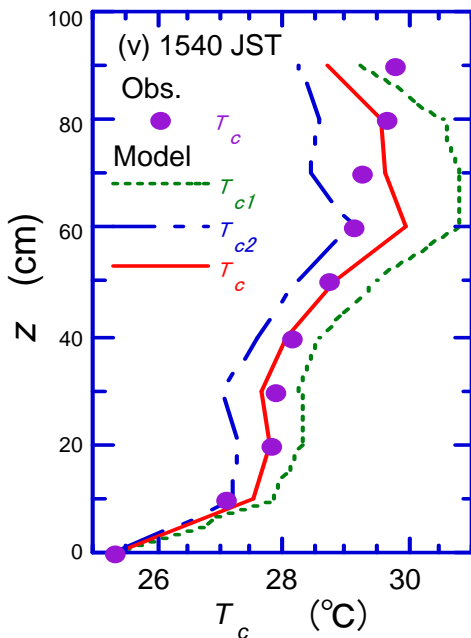


図 3 モデルによるイネ群落各層における植物体表面温度の再現例<sup>11)</sup>  
(Model の下付き数字 1 と 2 はそれぞれ陽側と陰側における表面温度の計算結果. 実線がそれらの平均値. ●が赤外放射温度計による測定値. 愛媛大学農学部実験水田, 1998 年 9 月 4 日 15:40. )

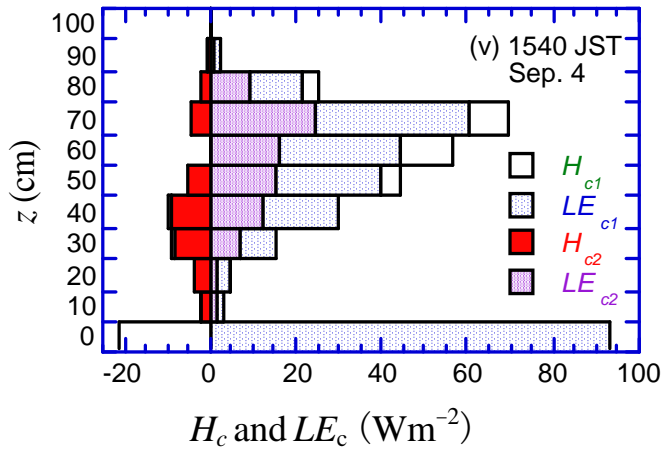


図4 イネ群落各層における植物体陽側と陰側の熱収支計算例<sup>11)</sup>  
 ( $H_c$ : 顕熱フラックス,  $LE_c$ : 潜熱フラックス, 下付き数字の1と2はそれぞれ陽側と陰側を表す.  $z=0$  cmは水面. 愛媛大学農学部実験水田, 1998年9月4日 15:40. )

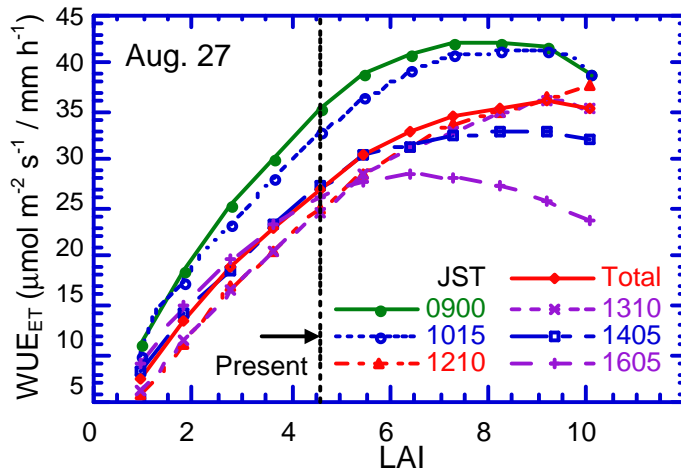


図5 LAIの変化に伴う蒸発散量に対する水利用効率( $WUE_{ET}$ )の変化の計算例<sup>12)</sup>  
 (愛媛大学農学部実験水田, 1998年8月27日の気象条件, 生育ステージで)

(両者の比)を最大にする群落構造を明らかにしました(図5)。よく知られているように、光合成速度や乾物生産量を最大にする最適 LAI の存在は、Monsi & Saeki (1953) によって理論的に示されています。栽植密度が光合成速度や収量に及ぼす影響については、日本作物学会に実に多数の論文が発表されていて、世界的に日本の関連学会のレベルが非常に高いことが分かります。一方で、ある生育ステージにおける LAI や群落構造の違いが、個葉レベルそ

して群落レベルの蒸散量や蒸発散量および水利用効率に及ぼす影響については、とくに自らの測定結果をもとに開発したモデルを適用した研究となると、例が無いと思われました。これら一連の研究で明らかにできた群落特有の熱収支の構造や仕組みは、屋上や壁面の緑化による空冷効果の創出や作物生産の効率的な環境制御などの現場に、今後応用可能であると期待できます。

#### 4. 作物の FACE 環境に対する 応答解析研究 <sup>15), 16), 20), 21)</sup>

3 で述べた研究成果の一部を気象学会でポスター発表していたところ、桑形恒男博士（当時東北農業試験場、現農業環境技術研究所 首席研究員）が、共同研究に誘って下さいました。ちょうど、小林和彦博士（現東京大学教授）と岡田益巳博士（現岩手大学教授）が推進されていた FACE プロジェクト第一ステージの最終年度を迎える頃で、二つ返事で雫石に行きました。中村浩史さん（現太陽計器）たちが FACE 施設を整然と配備・管理された実験圃場で、多層モデルを開発していた頃と同様の微気象観測と個葉蒸散・光合成速度などを、吉本真由美博士（現農業環境技術研究所 主任研究員）たちと測定しました。その結果、CO<sub>2</sub> 濃度の上昇によってイネの気孔コンダクタンスが低下するとともに、光合成速度が低下するという応答に関するデータを蓄積し、それらをモデル化しました。引き続き、小林博士と中国科学院南京土壤研究所の朱建国教授が推進し始めた中国江蘇省の FACE プロジェクトに吉本博士たちとともに参加しました。そして、植物体表面温度の鉛直分布を対象とした詳細な測定により、葉温が上

昇するばかりではなく、周囲の気温と気孔を持たない穂の温度も、CO<sub>2</sub> 濃度の上昇によって上昇することを明らかにしました（図 6）。この測定結果をもとに、CO<sub>2</sub> 濃度上昇の影響を組み込んだ微気象モデルを開発し、モデルを用いた数値実験から、CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が間接的な原因となって穂温が上昇し、夏季の高温時に不稔被害を発生させる可能性を示しました。

CO<sub>2</sub>-FACE 実験にひと区切りついた後、同じく小林博士と朱博士が推進する中国江蘇省の O<sub>3</sub>-FACE プロジェクトに宮田明博士（農業環境技術研究所 領域長）や間野正美博士（現千葉大学 助教）と参加しました。高 O<sub>3</sub> 濃度大気環境下でイネ・コムギ個葉の蒸散・光合成を測定し、O<sub>3</sub> 暴露量を組み込んだ気孔コンダクタンスと光合成のモデルを開発しました。この結果から、O<sub>3</sub> 濃度の上昇がイネとコムギ個葉の蒸散・光合成に及ぼす影響を解明し、O<sub>3</sub> 暴露がイネ・コムギ純一次生産量の減少に及ぼす影響（オゾンドウス・レスポンス；ODR）をモデル化しました。また、その応答は、品種によってもずいぶん異なることが分かりました。ODR モデルはすでに欧州を中心に開発され、オゾンドウスの増加に対して減収率が比例的に増加するというモデルは実用レベルに達し

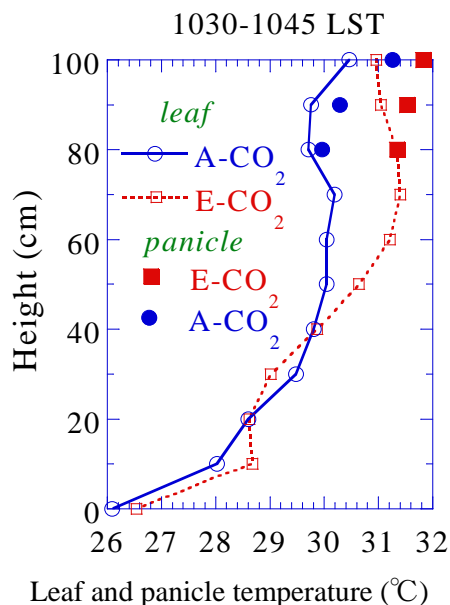


図 6 高 CO<sub>2</sub> 濃度区 (E-CO<sub>2</sub>) と通常 CO<sub>2</sub> 濃度区 (A-CO<sub>2</sub>) における葉温と穂温の鉛直分布の測定例 <sup>16)</sup>

(江蘇省無錫 China-FACE, 2002 年)

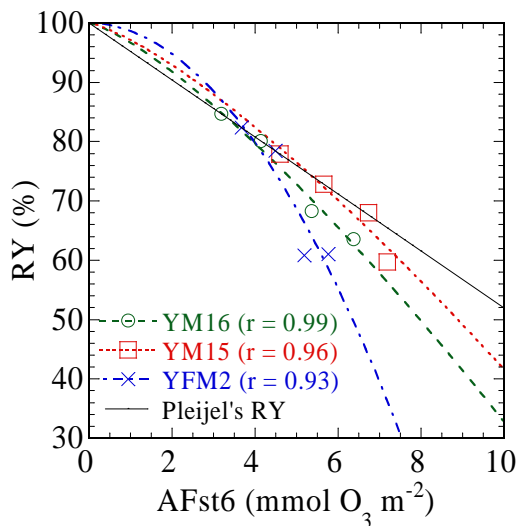


図 7 3 種類のコムギに関する  $6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上の気孔オゾンフラックス積算値 (AFst6) の計算値と穀物収量低下率 (RY) の関係 <sup>21)</sup>

(江蘇省江都 China-FACE, 2008, 2009 年). 直線の実線; 'RY (%) = 100 - 4.8 AFst6' (Pleijel et al., 2000; 2007). 点線と破線; 'RY (%) = 100 - k (AFst6)<sup>b</sup>' (Oue et al., 2011)

ていましたが、既存のモデルはコムギ収量の減少を予測するためには欠陥があることが分かりました。すなわち、オゾンドウスの増加に対する減収率の増加は直線的 (図 7 の実線) ではなく、 $O_3$  濃度上昇に伴う気孔閉鎖によってオゾンドウスの増加に歯止めがかかること、その結果としてオゾンドウスの増加によって減収率が加速的に増大する (図 7 の点線と破線) ことが分かりました。実際の収量調査からも、品種によって程度の差こそあれ、 $O_3$  濃度の上昇によってイネ・コムギの収量が低下することが確かめられています。この問題に対応する環境政策および農業食料政策の指針作りは、これからの早急な課題と思われます。そのために、これらの研究が科学的な資料として活用されるよう、さらに研究を進展させたい考えです。

## 5. おわりに

受賞対象となりました標記の研究課題について、フィールドでの観測・調査を基礎とする研究姿勢で、農業気象学・微気象学の研究をしてきました。まずフィールドでの観測・調査結果をもとに、作物群落の熱・ガス交換プロセスや群落の環境緩和機能を実証的に説明したことが、評価いただいた理由の一つではないかと思えます。また、モデルを構成する基礎方程式系自体は共通ですが、観測結果という現実を再現するよう新たな改良を重ね、自動測定 of 困難な要素も含めて微気象観測を行うことで各種パラメータを決定したことが、評価いただいたもう一つの理由ではないかと思っています。

今後はこのたびの受賞に慢心することなく、前記の初心を忘れず、現実社会における問題解決への貢献を意識しながら研究活動を続けたいと思えます。

最後に、これまでの研究活動を理解し支えてくれた家族に、最大の謝意を表したいと思えます。

## 引用文献

三野徹, 丸山利輔, 蒸発散 (その 1) - 地球上における水の役割と蒸発散 -, 農業土木学会誌, 57 (4), 305-318, 1989.

Bouchet R. J., Évapotranspiration réelle et potentielle: Signification climatique., Assemblée generale de Berkeley, AIHS, Pub., 62, 134-142, 1963.

Seguin B., Influence de l'évapotranspiration regionale sur la mesure locale d'évapotranspiration potentielle., Agric. Meteorol., 15, 355-370, 1975.

Kondo J. and Watanabe T., Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model, J. Atmos. Sci., 49, 2183-2199,

1992.

Monsi, M. and Saeki, T., Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die Stoffproduktion., Japan J. Bot., 14, pp. 22-52, 1953.

Wilson, N. R. and Shaw, R. H., A higher order closure model for canopy flow., J. Appl. Meteor., 16, 1197-1205, 1977.

## 関連の主要な論文

- 1) 大上博基, 大槻恭一, 大原芳夫, 丸山利輔, 補完関係による蒸発散量算定法の狭域への適用, 農業土木学会論文集, 161, 45-50, 1992.
- 2) 大上博基, 丸山利輔, 蒸発散算定のための蒸発計蒸発量-蒸発散研究における蒸発計蒸発量の役割 (I) -, 農業土木学会論文集, 162, 143-150, 1992.
- 3) 大上博基, 丸山利輔, 局地蒸発位としての蒸発計蒸発量-蒸発散研究における蒸発計蒸発量の役割 (II) -, 農業土木学会論文集, 162, 151-159, 1992.
- 4) 大上博基, 田頭秀和, 大槻恭一, 丸山利輔, 水田, 畑地, 裸地, アスファルト舗装面における熱収支特性と温度環境, 農業土木学会論文集, 164, 97-104, 1993.
- 5) 大上博基, 丸山利輔, 福島忠雄, 地目混在化地域の農地における 2 次元気温分布と熱収支特性, 水文・水資源学会誌, 7 (2), 130-136, 1994.
- 6) 大上博基, 福島忠雄, 丸山利輔, 水田の温度環境緩和機能, 農業土木学会誌, 62 (10), 955-960, 1994.
- 7) 大上博基, 水田における蒸発効率の実験的算定, 水文・水資源学会誌, 9 (3), 252-258, 1996.
- 8) 大上博基, 小野啓子, 水田の熱収支特性に及ぼす気象条件と群落抵抗の影響, 農業土木学会論文集, 208, 29-36, 2000.
- 9) Oue, H., Effects of Vertical Profiles of Plant Area Density and Stomatal Resistance on the Energy Exchange Processes within a Rice Canopy., Journal of the Meteorological Society of Japan, 79 (4), 925-938, 2001.
- 10) 大上博基, 水田の蒸発散・光合成特性と水利用効率に関する研究 (I) - イネの気孔コンダクタンスと個葉光合成のモデル化 -, 水文・水資源学会誌, 16 (4), pp. 375-388, 2003.
- 11) 大上博基, 水田の蒸発散・光合成特性と水利用効率に関する研究 (II) - 多層モデルを用いた数値シミュレーションによる水田の熱収支特性と水利用効率の検討 -, 水文・水資源学会誌, 16 (4), pp. 389-407, 2003.
- 12) 大上博基, 水田の蒸発散・光合成特性と水利用効率に関する研究 (III) - 多層モデルを用いた,

- LAI の違いが蒸発散量, 光合成速度, 水利用効率に及ぼす影響の検討一, 水文・水資源学会誌, 17(3), pp. 274-294, 2004.
- 13) Oue, H., Influences of meteorological and vegetational factors on the partitioning of the energy of a rice paddy field., *Hydrological Processes*, 19 (8), 1567-1583, 2005.
- 14) Oue, H., Tamoto, T. and Takase, K., Micrometeorological Model for Estimating Evapotranspiration from an Irrigated Maize Field in the Hetao Irrigation District in the Yellow River Basin, *J. Agric. Meteorol.*, 60 (5), 537-540, 2005.
- 15) Ikawa, H., Oue, H., Yoshimoto, M., Kobayashi, K. and Okada, M., Effects of FACE on Rice Leaf Photosynthesis and Transpiration in a Paddy Field - Changes of Parameters in Farquhar and Ball-Berry Models under Elevated CO<sub>2</sub> -, *J. Agric. Meteorol.*, 60 (5), 593-596, 2005.
- 16) Oue, H., Yoshimoto, M. and Kobayashi, K., Effects of Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment on Leaf and Panicle Temperatures of Rice at Heading and Flowering Stage, *Phyton*, 45 (4), 117-124, 2005.
- 17) He, B., Oue, H., Wang, Y., and Takase, K., Measurement and Modeling of Evapotranspiration from an Irrigated Wheat Field in the Hetao Irrigation District of the Yellow River Basin., *J. Japan Soc. Hydrological and Water Resources*, 20 (1), 8-16, 2007.
- 18) Oue, H., Motohiro, S., Inada, K., Miyata, A., Mano, M., Kobayashi K. and Zhu, J., Evaluation of ozone uptake by the rice canopy with the multi-layer model., *J. Agric. Meteorol.*, 64 (4), 223-232, 2008.
- 19) He, B., Oue, H. and Oki, T., Estimation of hourly evapotranspiration in arid regions by a simple parameterization of canopy resistance, *J. Agric. Meteorol.*, 65 (1), 39-46, 2009.
- 20) Oue, H., Feng, Z., Pang, J., Miyata, A., Mano, M., Kobayashi, K. and Zhu, J., Modeling the Stomatal Conductance and Photosynthesis of a Flag Leaf of Wheat under Elevated O<sub>3</sub> Concentration, *J. Agric. Meteorol.*, 65 (3), 239-248, 2009.
- 21) Oue, H., Kobayashi, K., Zhu, J., Guo, W. and Zhu, X., Improvements of the Ozone Dose Response Functions for Predicting the Yield Loss of Wheat Due to the Elevated Ozone, *J. Agric. Meteorol.*, 67 (1), 21-32, 2011.
- 22) Yan, H. and Oue, H., Application of the Two-layer Model for Predicting Transpiration from the Rice Canopy and Water Surface Evaporation beneath the Canopy, *J. Agric. Meteorol.*, 67 (3), 89-97, 2011.
- 23) Yan, H., Oue, H. and Zhang, C., Predicting water surface evaporation in the paddy field by solving energy balance equation beneath the rice canopy, *Paddy and Water Environment*, Paddy and Water Environment, 10 (2), 121-127, 2012.