

イネに及ぼす大気 CO₂ 増加と気候変化の影響の解明

長谷川利弘

(農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター)

Impacts of elevated CO₂ and climate change on rice

Toshihiro HASEGAWA

(National Agriculture and Food Research Organization, Tohoku Agricultural Research Center)

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。ご推薦いただいた小林和彦先生、学会賞選考委員会および会員の皆様に厚く御礼申し上げます。受賞の対象となった研究の大部分は、屋外開放系水田で大気 CO₂ 濃度を高める FACE 実験の結果です。Rice FACE プロジェクトを立ち上げられた小林和彦先生、岡田益己先生をはじめ、FACE 実験に携わって下さった方々にこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。また、今回の受賞は FACE 研究チームの活動を評価していただいたものと認識しています。その代表として受賞できることは光栄の至りで、チームメンバーと喜びを分かち合いたいと思います。本稿では、受賞対象の研究概要に加えて、Rice FACE プロジェクトの経緯、研究チームの構成などについても紹介します。

2. Rice FACE プロジェクトの経緯

人間活動に由来する大気組成と気候の変化は、今後さらに加速して農作物生産に大きな影響を及ぼすと予測されており、それに対する適応のために、影響のしくみの理解にもとづく技術開発が必要です。従来、作物の環境応答の実験には、温室や人工気象室が用いられてきましたが、気候変化の影響解明には、現実の圃場に近い環境での実験が望まれていました。このような背景から、1980 年代後半にアメリカでワタを対象とした FACE 実験が始まり、その後世界各地で異なる植物種を対象とした FACE 実験が実施されるようになりました。アジアの基幹作物であるイネを対象にした FACE 実験は、1998 年に岩手県雫石町で始まりました。小林和彦先生、岡田益己先生らの手によって開発された新システムです。私が最初に Rice FACE プロジェクトに関わらせていただいたのは、北海道大学在任中の 2000 年でした。この時から FACE 実験結果をモデルで再現し、気候変動下のコメ収量予測の精度を向上させることを目的としてデータの収集、解析を開始しました。この時期に、それまで開発していた作物モデルに、Farquhar *et al.* (1980) の光合成 (FvCB) モデルを導入し、現在のモデルの骨格を構築しました。2003 年には東京大学に移られた小林先生の後任として、農業環境技術研究所に赴任

し、Rice FACE プロジェクトのリーダーを務めさせていただくことになりました。

雫石では、第一期 (1998~2000 年)、第二期 (2003~2004 年)、第三期 (2007~2008 年) と断続的ですが計 7 回、栽培実験が行われました。その後、さらに温暖な地域におけるイネの高 CO₂ 応答を確かめるために、茨城県つくばみらい市に FACE 実験施設を新設しました (長谷川, 2012; 長谷川ら, 2013)。施設の完成は、2009 年 12 月です。つくばみらいでは、CO₂ 濃度処理区により多くの品種や栽培条件を取り込むために、試験区面積を雫石 FACE の 2 倍 (約 240 m²) に拡大しました (Nakamura *et al.*, 2012)。さらに、八角形区画の外周に設置する CO₂ パイプを増設して、上下二層化しました (図 1)。風速の弱い時には上方パイプから、強い時には下方パイプから放出することにより、リング内の濃度の均一化を図りました。このように、日常のメンテナンスに加えて、システムの改良を重ねることで、高い制御精度も向上が図られました。つくばみらいでは、2010 年から 2017 年に継続して 8 作期の実験が実施できました。この間、実験が継続できたのは、雫石 FACE 開設時から 20 年間にわたり FACE 制御を担当した中村浩史氏をはじめ、多くのサポートメンバーの献身的な貢献があったからです。今回、中村氏が 20 年間の FACE 運転の実績を評価され、日本農業気象学会功績賞を受賞されたことは大きな喜びで、環境制御、計測の基盤を評価していただいた日本農業気象学会に感謝と敬意を表します。

3. FACE 拠点における学際的な研究チームの結成

FACE は、単に高 CO₂ 環境を圃場で実現する施設ではなく、気象、作物生理、土壌学の専門家が集結し、様々な角度から水田における環境応答を研究する拠点です。このような学際的な研究者が集まる研究拠点となったのは、プロジェクトを立ち上げた小林和彦先生、岡田益己先生のリーダーシップと広い人脈によるところですが、その背景には環境応答を耕地システムの挙動としてとらえる農業気象学的視点があったと考えます。このような学際的なネットワークは、FACE プロジェクトの無形財産で、それを継承することができたのは本当に幸運でした。

FACE 実験では、第一期から変わらず継続していることが 2 つあります。一つはプロジェクト参画者による田植え作業で、FACE 実験への参画者は原則全員参加してもらっています。毎年 40 名以上の研究者が参画し、植え網方式の田植えを経験します。本作業は、割り当てられた実験区

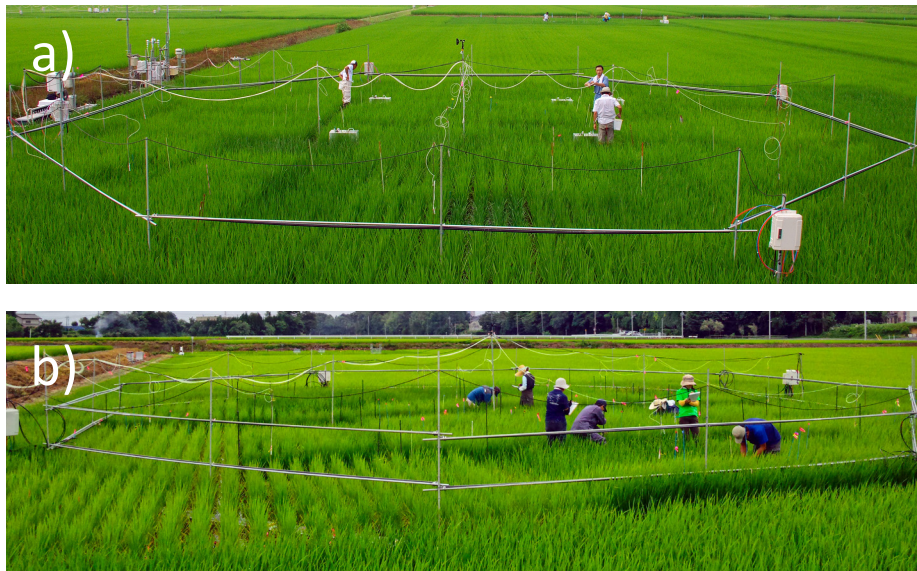


図 1. つくばみらい FACE における CO_2 処理区。a) は 2010 年版で、八角形状の周辺部に設置した放出パイプは一層構造。b) は 2011 年から放出パイプを上下二層化したもの。いずれも中央部の CO_2 濃度と風速、風向に応じて、風上側から純 CO_2 を放出するシステム。風が弱い時には、リング内の濃度勾配がでやすいため、二層システムでは、弱風時には上層から、強風時には下層から放出し、濃度ムラを減少するように改良。

画を確認するだけでなく、異分野の研究者と交流する機会にもなりました。もう 1 つは、例年 3 月頃に開催していた年次 FACE 会議です。この場では、当該年の結果と次年度の計画を議論しますが、ここでも分野間の協力が発展しました。これらを通じて、FACE 研究者ネットワークが充実し醸成されていったと思います。

つくばみらい FACE では強固な FACE コアチームを形成することができました。群落微気象学を専門とする吉本真由美氏、作物生理学を専門とする酒井英光氏、土壌一大気物質循環を専門とする林 健太郎氏、土壌物理学・生物地球化学に強い常田岳志氏、作物生理と環境制御を得意とする福岡峰彦氏が日々の FACE 実験の遂行、予算確保、研究方向の検討に大いに貢献してくれました。また、研究を支えてくれたのは、在籍してくれた優秀なポスドクです。程為国氏、常田岳志氏、安立美奈子氏、澤野真治氏、朱春梧氏、臼井靖浩氏、Charles Chen 氏、氏家和広氏、張国友氏らは、様々な専門分野で学位を取得後にプロジェクトに加わり、FACE 実験や作物モデリングに関する研究に貢献してくれました。

農業環境技術研究所（農環研）以外からは、第一期から参画いただいていた犬伏和之先生のグループのご協力、メタン発生や土壌中の炭素・窒素動態の研究も継続できました。また、2010 年に開始した JSPS 科研費新学術領域研究「植物生態学・分子生理学コンソーシアムによる陸上植物の高 CO_2 応答の包括的解明」（寺島一郎先生代表）からも大きなサポートを得ました。本コンソーシアムからは、光合成生理学や生態学などの理系系の研究者の参画があり、学際性が一層高まりました。また、早津雅仁氏のお声かけで、最先端の土壌微生物学の研究者の参画も得られました。このような学際的チームによって、作物生産、群落環境、炭素・窒素代謝に関する気候変動研究を推進することができました。

4. FACE における研究成果の概要

つくばみらい FACE を開始した 2010 年の夏は、前例のない高温に見舞われました。その結果、冷涼な雫石 FACE とは大きく異なる CO_2 反応が認められました。両地点の FACE 実験における収量反応を年次を重ねて解析した結果、共通に用いたあきたこまの収量は、現在から 200 ppm の CO_2 濃度上昇によって 10~11% 増加しましたが、増加率は気温が高いほど低下することがわかりました（Hasegawa *et al.*, 2016）。また、コメの外観品質に関して、高温が白未熟粒を増加させ、整粒率を低下させることは知られていましたが、FACE 実験の結果から高 CO_2 濃度がその影響を激化させることも明らかになりました（Usui *et al.*, 2016）。高 CO_2 濃度によるイネの収量増加率は、品種によっても大きく異なり、3~36% にも及ぶ幅広い変動を示しました（Hasegawa *et al.*, 2013）。増収率が高かったのは、籾数が多く粒重が大きいなどシンクサイズが大きく、ソース（光合成）能力が高い品種であることがわかりました（Hasegawa *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015）。以上の結果は、将来の気候条件下で有利な品種特性を示すものと考えられます。また、 CO_2 濃度と水温を上昇させる実験を行い、水田からのメタン発生量が 200 ppm の CO_2 濃度上昇と 2℃ の水温上昇で、現在より約 80% も増加することを示し（Tokida *et al.*, 2010）、気候変化への適応に加えて、温室効果ガスの発生抑制も同時に実現する技術の重要性を示しました。以上の結果は、 CO_2 濃度上昇がイネや水田に及ぼす影響に気温や品種がどのように関わるのかを、現実の圃場での実験によって明らかにしたものです。

5. 農家圃場での高温影響実態調査

猛暑年となった 2010 年以前にも、2007 年 8 月に関東や

東海地方で 40℃を超えるような異常高温が発生しました。これまでの室内実験から、イネの開花時の気温が 35℃を超えると不稔粒が多発することが知られていましたが、生産現場での影響の実態は明らかではありませんでした。そこで、作物研究所、群馬県、埼玉県、茨城県、愛知県、岐阜県との協力で、2007 年 8 月の猛暑の影響の実態調査を行いました。その結果、同年の異常高温により平年より高い割合で不稔が発生したこと、ただしその割合は室内実験の結果から推定されるよりも低いことを示しました (Hasegawa *et al.*, 2011)。

オーストラリアの水田地帯は、日中の最高気温がしばしば 40℃以上になることが知られていますが、ここでも不稔の多発は報告されていませんでした。そこで、不稔研究の第一人者である松井 勤氏、小林和広氏と微気象学を専門とする吉本真由美氏らとでチームを結成し、オーストラリアの水田地帯での不稔実態を調査しました。現地の微気象観測から、高温、乾燥、強風条件下では、穂温が気温を大きく下回り、高温がイネの受精に及ぼす影響が軽減されることがわかりました (Matsui *et al.*, 2007)。以上の結果は、閉鎖系実験の結果を屋外環境へ適用するにあたり、群落微気象の効果を考慮することの重要性を明らかにしたものです。これらの研究を契機に、水田群落の微気象を統一的方法で観測する世界的なネットワーク、MINCERnet が 2009 年に開始し、現在も吉本真由美氏のリーダーシップにより継続しています (Yoshimoto *et al.*, 2012)。日本の農業気象学が世界の気候変動研究に貢献している一例です。

6. 作物成長モデルの改良

前述のとおり、FACE プロジェクトに参画した際に最初に行ったのは、既存の作物成長モデル（以下、作物モデル）への FvCB 光合成モデルの導入でした。その後、FvCB モデルのパラメータの頑健性を、下野裕之氏、酒井英光氏、安立美奈子氏、Charles Chen 氏らの協力で調査しました (Adachi *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2014; Hasegawa *et al.*, 2016)。雫石 FACE、つくばみらい FACE、東北農業研究センターのグラディオオトロン、農環研のクライマトロンという日本を代表する環境操作実験施設で光合成パラメータを収集できたことは幸運でした。その解析の結果から、FvCB モデルにおける主要パラメータである最大 CO₂ 固定速度 (V_{cmax}) および最大電子伝達速度 (J_{max}) は、生育ステージ、実験地点や開放系・閉鎖系の実験系に関わらず、葉身の窒素条件で高精度に推定できることを示しました (Hasegawa *et al.*, 2016)。本成果は、CO₂ 濃度上昇がイネの成長に及ぼす影響をモデリングする際の核になる部分で、そのパラメータの頑健性を示した本成果は、作物モデルの改良に貢献するとともに、光合成の生理応答を理解するためにも有益です。また、閉鎖系の実験が、生理応答を把握するためには有効であることを示す例となりました。現在、本成果を含む作物モデルは、桑形恒男氏、西森基貴氏、石郷岡康史氏、吉田龍平氏らによる国内のコメ生産への影響評価に利用してもらっています。また、将来の気候条件における多収品種の水利用に関しては、伊川浩樹氏が観測・モデル研究に発展させてくれています。この他、FACE 実験の結果は、麓 多門氏による生物地球化学モデ

ルの改良にも利用されており (Fumoto *et al.*, 2013)、気候変化への適応と温室効果ガス発生抑制の両者へ貢献する知見になりました。

気候シナリオと作物成長モデルによる気候変動の影響評価においては、予測の不確実性を示すことが望まれています。これまで予測の不確実性では、主に気候シナリオの不確実性に基づく評価が行われてきましたが、作物モデル自体の不確実性については、統一的な方法で検討されていませんでした。このような背景から、2010 年に農業モデルの相互比較改良プロジェクト (AgMIP) が立ち上げられました。私は、国際イネ研究所の Tao Li 氏、ワーゲニンゲン大学の Xinyou Yin 氏らとともにイネモデルチームの共同代表を務め、作物モデルの不確実性評価と改良のための研究を開始しました。その結果、世界 4 地点を対象に実施した 13 のイネ収量予測モデルの比較から、予測値はモデル間で大きく異なること、その程度は高温や低温が著しい地点で大きいことを示しました (Li *et al.*, 2015)。現在、AgMIP-rice はモデルの CO₂ 応答、温度応答の相互比較と改良を行うフェーズに入っています (Hasegawa *et al.*, 2017)。現在参画している 16 モデルのうち、日本からは DNDC-rice、GEMRICE、H/H、MATCRO、SIMRIW の 5 モデルが参画しています。これも日本の農業気象学会が、世界に貢献する重要な分野になっています。

7. おわりに

FACE 実験、現地圃場の高温影響実態調査、作物モデルは、いずれも農業気象学会が長年培ってきた研究の礎の上に成り立つものです。我々のチームの成果が、農業気象学の基盤の継承と気候変動分野への応用に貢献できたならば、それは私の望外の喜びです。また、つくばみらい FACE の開設、実施では、上に挙げた方々以外にも、多くの方々のご協力がなければ成立しませんでした。ここにすべての方のお名前を列挙することはできませんが、つくばみらい FACE の開設に協力いただいた農環研役職員の皆様、場所の選定から地元の方々との交渉にご協力いただいた故松本公吉氏、松本和男氏、CO₂ タンク・観測小屋の土地を快くお貸しくださった故染谷 昇氏、染谷多加也氏、年々の管理作業にご協力いただいた小絹生産組合代表の菊池典夫氏に厚く御礼申し上げます。FACE 実験の栽培管理では、研究技術支援室（現農研機構・本部企画戦略本部つくば技術支援センター）の鈴木忠男、若林浩徳、飯野宏幸、岡田利之、鎌田輝志、渡邊浩二、荒 貴裕、一石司夫、星野 渉の各氏に一方ならぬ協力をいただきました。今回、同時に功績賞を受賞した中村浩史氏は、20 年間にわたり FACE 環境制御を世界水準に保ってくれました。また、FACE 実験の準備、設営、調査、分析のすべてにおいて、献身的に協力してもらった大村照代、石橋美由起、張替高志、木本典子、武藤千恵、若月ひとみの各氏に心より御礼を申し上げます。つくばみらい FACE は、農水委託気候変動プロ、JSPS 科研費で実施しました。記して謝意を表します。

引用文献

Adachi M, Hasegawa T, Fukayama H, Tokida T, Sakai H,

- Matsunami T, Nakamura H, Sameshima R, Okada M, 2014: Soil and water warming accelerates phenology and down-regulation of leaf photosynthesis of rice plants grown under free-air CO₂ enrichment (FACE). *Plant and Cell Physiology* **55**(2), 370–380.
- Chen CP, Sakai H, Tokida T, Usui Y, Nakamura H, Hasegawa T, 2014: Do the rich always become richer? Characterizing the leaf physiological response of the high-yielding rice cultivar Takanari to free-air CO₂ enrichment. *Plant and cell physiology* **55**(2), 381–391.
- Farquhar GD, von Caemmerer S, Berry JA, 1980: A biochemical model of photosynthesis CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* **149**, 78–90.
- Fumoto T, Hasegawa T, Cheng W, 2013: Application of a process-based biogeochemistry model, DNDC-Rice, to a rice field under free-air CO₂ enrichment (FACE). *Journal of Agricultural Meteorology* **69**(3), 173–190.
- Hasegawa T, Ishimaru T, Kondo M, Kuwagata T, Yoshimoto M, Fukuoka M, 2011: Spikelet sterility of rice observed in the record hot summer of 2007 and the factors associated with its variation. *Journal of Agricultural Meteorology* **67**(4), 225–232.
- Hasegawa T, Li T, Yin X, Zhu Y, Boote K, Baker J, Bregaglio S, Buis S, Confalonieri R, Fugice J, Fumoto T, Gaydon D, Kumar SN, Lafarge T, Marcaida III M, Masutomi Y, Nakagawa H, Oriol P, Ruget F, Singh U, Tang L, Tao F, Wakatsuki H, Wallach D, Wang Y, Wilson LT, Yang L, Yang Y, Yoshida H, Zhang Z, Zhu J, 2017: Causes of variation among rice models in yield response to CO₂ examined with Free-Air CO₂ Enrichment and growth chamber experiments. *Scientific Reports* **7**(1), 14858.
- Hasegawa T, Sakai H, Tokida T, Nakamura H, Zhu C, Usui Y, Yoshimoto M, Fukuoka M, Wakatsuki H, Katayanagi N, Matsunami T, Kaneta Y, Sato T, Takakai F, Sameshima R, Okada M, Mae T, Makino A, 2013: Rice cultivar responses to elevated CO₂ at two free-air CO₂ enrichment (FACE) sites in Japan. *Functional Plant Biology* **40**(2), 148–159.
- Hasegawa T, Sakai H, Tokida T, Usui Y, Yoshimoto M, Fukuoka M, Nakamura H, Shimono H, Okada M, Hatfield JL, Fleisher D, 2016: Rice free-air carbon dioxide enrichment studies to improve assessment of climate change effects on rice agriculture. In *Improving modeling tools to assess climate change effects on crop response* (eds by Hatfield J.L. and Fleisher D.), American Society of Agronomy, Madison, WI USA, pp. 45–68.
- Li T, Hasegawa T, Yin X, Zhu Y, Boote KJ, Adam M, Bregaglio S, Buis S, Confalonieri R, Fumoto T, Gaydon D, Marcaida MIM, Nakagawa H, Oriol PP, Ruane AC, Ruget FF, Singh B, Singh U, Tang L, Tao F, Wilkens P, Yoshida H, Zhang Z, Bouman B, 2015: Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions. *Global Change Biology* **21**, 1328–1341.
- Matsui T, Kobayashi K, Yoshimoto M, Hasegawa T, 2007: Stability of rice pollination in the field under hot and dry conditions in the Riverina region of New South Wales, Australia. *Plant Production Science* **10**(1), 57–63.
- Nakamura H, Tokida T, Yoshimoto M, Sakai H, Fukuoka M, Hasegawa T, 2012: Performance of the enlarged Rice-FACE system using pure CO₂ installed in Tsukuba, Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* **68**(1), 15–23.
- Tokida T, Fumoto T, Cheng W, Matsunami T, Adachi M, Katayanagi N, Matsushima M, Okawara Y, Nakamura H, Okada M, Sameshima R, Hasegawa T, 2010: Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) and soil warming on CH₄ emission from a rice paddy field: impact assessment and stoichiometric evaluation. *Biogeosciences* **7**(9), 1863–1903.
- Usui Y, Sakai H, Tokida T, Nakamura H, Nakagawa H, Hasegawa T, 2016: Rice grain yield and quality responses to free-air CO₂ enrichment combined with soil and water warming. *Global Change Biology* **22**(3), 1256–1270.
- Yoshimoto M, Fukuoka M, Hasegawa T, Matsui T, Tian X, Vijayalakshmi C, Singh MP, Myint TT, Weerakoon W, 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.
- Zhang G, Sakai H, Tokida T, Usui Y, Zhu C, Nakamura H, Yoshimoto M, Fukuoka M, Kobayashi K, Hasegawa T, 2013: The effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on carbon and nitrogen accumulation in grains of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of experimental botany* **64**(11), 3179–3188.
- Zhang G, Sakai H, Usui Y, Tokida T, Nakamura H, Zhu C, Fukuoka M, Kobayashi K, Hasegawa T, 2015: Grain growth of different rice cultivars under elevated CO₂ concentrations affects yield and quality. *Field Crops Research* **179**, 72–80.
- 長谷川利拓, 2012: 50年後の水稲生産を予測する. 化学と生物 **50**(4), 298–301.
- 長谷川利拓・酒井英光・常田岳志・中村浩史・臼井靖浩・林 健太郎・吉本真由美・福岡峰彦, 2013: つくばみらい FACE 実験によるイネの高 CO₂ 応答の検証. 光合成研究 **23**(1), 18–23.