

イネの高 CO₂ 濃度と温度上昇に対する応答の実験的解明とモデリング
長谷川利拓 (農研機構 東北農業研究センター)

人間活動が引き起こす気候変化が作物生産に及ぼす影響を予測し、それに適応するための技術が望まれている。そのためには作物の環境応答を実験的に解明し、それに基づく作物シミュレーションモデルの開発が必要である。これまで、大気 CO₂ 濃度上昇や温暖化への作物の応答は、主に温室や人工気象室などの閉鎖系で実験されてきたが、気候変化が食料生産や炭素循環に及ぼす影響を解明するためには、実際の圃場に近い環境での実験が必要である。長谷川氏は、高 CO₂ 濃度と温度上昇に対するイネの応答を、開放系環境操作実験などで明らかにした。さらに、従来の開放系環境操作実験が、高 CO₂ 濃度への応答を中心としたのに対し、長谷川氏は多様な温度条件下で収量応答を捉えつつ、玄米品質の変化や環境応答の品種間差、土壌プロセスの変化など、広範囲の作物学的観点からイネの環境応答を明らかにした。さらに、それらの実験結果を作物シミュレーションモデルの改良に生かした。それらの成果は以下のように要約できる。

1. 開放系環境操作実験によるイネの環境応答解明

屋外で高 CO₂ 濃度を実現する開放系大気 CO₂ 増加 (free-air CO₂ enrichment = FACE) 実験は、約 30 年前にアメリカ合衆国で始まり、イネについては 1998 年に岩手県雫石町で始まった。長谷川氏は、2003 年からイネ FACE 研究を主導し、中国科学院の FACE グループとも連携して、イネの高 CO₂ 濃度応答を包括的に取りまとめた (業績 4, 8)。さらに、2009 年には「つくばみらい FACE 実験施設」を新設し、気候変化が水田農業に及ぼす影響の研究を進めた (業績 12, 23, 28)。

温度条件が大きく異なる雫石とつくばみらいで、品種あきたこまちを用いた計 11 作期の実験結果を解析したところ、現在から 200 ppm の CO₂ 濃度上昇によって、収量が平均 11% 増加したが、増収率は 0~21% の間で変動し、特に高温条件下で小さかった。温暖化条件下では、生育後半の葉身窒素濃度の低下により、高 CO₂ 濃度による光合成促進程度が低下した (業績 1)。上記 2 地点の FACE 実験について、形態特性の異なる 4 品種の CO₂ 濃度応答を比較したところ、両地点で籾数の多いタカナリと粒の大きい秋田 63 号の応答が大きかった (業績 5)。つくばみらいでは、インド型品種を含め幅広いタイプの品種を供試した実験により、高 CO₂ 濃度による各品種の増収率が、3~36% の広い範囲で変動すること、増収率にはシンク容量と登熟歩合が大きく寄与することが分かった (業績 5)。タカナリは、コシヒカリと比較して、高 CO₂ 濃度条件下でも高い光合成能力を維持し (業績 2)、また現在の CO₂ 濃度で充実しない弱勢籾の成長が、高 CO₂ 濃度で大きく促進された。大きなシンク容量に加えて、これらの特性がタカナリの多収性と高い CO₂ 濃度応答性に貢献していた (業績 20, 21)。

コメの外観品質に関しては、高 CO₂ 濃度によって白未熟粒が多発し、整粒率が大幅に低下した。特に、その程度は高温年で大きく、高 CO₂ 濃度が高温登熟障害を悪化させた (業績 18)。さらに、近年育成された高温耐性品種では、高 CO₂ 濃度による品質の低下が小さく、高温耐性の強化が高 CO₂ 濃度下での品質向上にも有効と考えられた (業績 17)。

FACE 実験において、水田からのメタン発生量が、200 ppm の CO₂ 濃度上昇と 2°C の水温上昇により、現在より約 80% も増加することを示した (業績 16)。従って、イネ生産においては、気候変化への適応に加えて、温室効果ガスの発生抑制も併せて実現する技術が必要と考えられた。

長谷川氏によるこれらの研究は、とくに気候変化がイネ生産に及ぼす影響に関する知見を飛躍的に充実させるとともに、適応品種の育成にむけた具体的指針を提供した。

2. 農家圃場での実態調査と閉鎖系実験結果の活用

イネの開花時の温度が 35°C を超えると不稔籾が多発することが、これまでの室内実験から知られている。2007 年 8 月、関東・東海地域は、熊谷と多治見で 40.9°C を記録するなど、広範囲で異常高温に見舞われた。高温不稔の多発する温度域であり、温暖化が水稻に及ぼす影響を検証するために、長谷川氏はつくば市の作物研究所および群馬県を含む 5 県の農業研究機関と協力して高温条件下での不稔発生の実態解明に取り組んだ。その結果、同年の異常高温により、通常より高い割合で不稔が発生したことが、ただしその割合は室内実験での温度応答から推定されるよりも低いことを明らかにした (業績 3)。また、高温、乾燥、強風条件下のオーストラリアの水田地帯では、穂温が気温を大きく下回り、高温による被害が軽減されることを示した (業績 11)。

一方、閉鎖系実験によって、屋外では制御が困難な夜温の影響について、これまであまり着目されなかった生殖成長期の影響を検討し、同時期の高夜温は退化穎花数を増加させることで減収をもたらす可能性を示した (業績 9)。また、栄養成長期に関する温度応答の品種間比較を、タイプの異なる人工気象室で行い、温度応答の品種間差異は閉鎖系実験系でも高い再現性が得られることを示した (業績 13)。個葉光合成特性を 2 種類の閉鎖系実験施設および 2 地点の FACE 実験で調査し、光合成の高 CO₂ 濃度応答性が、実験施設の違いを超えて葉身窒素含量の関数として表されることを報告した (業績 6)。

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、群落微気象条件を考慮することの重要性を示したものであり、作物の環境応答の解明に大きく貢献した。同時に、閉鎖系実験と開放系実験の両者を使った研究により、閉鎖系実験であっても開放系実験と同様の情報が得られる作物特性を示すことにより、これまでに蓄積されてきた知見を活用するとともに今後作物の環境応答の解明を効率的に進める上での有益な示唆を提供したものとして、大きな貢献と考えられる。

3. 作物成長シミュレーションモデルの改良

作物成長シミュレーションモデル (作物モデル) は、気候変動の影響を定量的に予測するために不可欠な研究手法である。これまでに長谷川氏は、FACE 実験などで得られた知見を援用し、作物モデルの改良を行いながら、気候変動が及ぼす地域収量への影響評価を行ってきた (業績 7, 14, 15, 19)。従来、影響予測の不確実性については、気候シナリオの不確実性の検討が中心で、作物モデル自体の不確実性については検討されていなかった。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、長谷川氏はイネモデルチームの共同代表として、世界のイネモデル研究グループを主導しながらモデルの不確実性評価と改良のための研究を行った。世界中で開発された 13 のイネ収量予測モデルの挙動を、世界 4 地点を対象に同じ気象および栽培条件で比較したところ、モデルの予測値間で極めて大きな幅が認められることがわかった (業績 10)。

長谷川氏は、気候変化の下での農業について、最新の研究成果を総説・著書に著して、広範囲の読者へ向けて発信してきた (業績 22~28)。また、長谷川氏が実践してきた開放系環境操作実験や作物モデルを用いた気候変動研究は、国際的、学際的な研究連携に大きく貢献した。以上のとおり、長谷川氏の業績は日本作物学会賞を授与するに値するものと評価される。

研究業績

1. 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 & Cell Physiology* 55 (2), 370-380. doi: 10.1093/pcp/pcu005.
2. Chen, C.P., 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 & Cell Physiology* 55 (2), 381-391. doi: 10.1093/pcp/pcu009.
3. 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. doi: 10.2480/agrmet.67.4.3.
4. Hasegawa, T., Kobayashi, K., Lieffering, M., Kim, H.Y., Sakai, H., Shimono, H., Yamakawa, Y., Yoshimoto, M., & Okada, M. 2005: Impact of increased source capacity on rice yield: Case study with CO₂ enrichment. In *Rice is life: scientific perspectives for the 21st century: proceedings of the World Rice Research Conference held at Tsukuba, Japan on 5-7 Nov 2004.* (eds K. Toriyama, K.L. Heong & B. Hardy), pp. 124-127.
5. 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. doi: 10.1071/FP12357.
6. Hasegawa, T., Sakai, H., Tokida, T., Usui, Y., Yoshimoto, M., Fukuoka, M., Nakamura, H., Shimono, H., & Okada, M. 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 J.L. Hatfield & D. Fleisher), pp. 45-68. American Society of Agronomy, Madison, WI USA.
7. Hasegawa, T., Sawano, S., Goto, S., Konghakote, P., Polthanee, A., Ishigooka, Y., Kuwagata, T., Toritani, H., & Furuya, J. 2008: A model driven by crop water use and nitrogen supply for simulating changes in the regional yield of rain-fed lowland rice in Northeast Thailand. *Paddy and Water Environment* 6 (1), 73-82. doi: 10.1007/s10333-007-0099-1.
8. Hasegawa, T., Shimono, H., Yang, L., Kim, H.Y., Kobayashi, T., Sakai, H., Yoshimoto, M., Lieffering, M., Ishiguro, K., Wang, Y., Zhu, J., Kobayashi, K., & Okada, M. 2007: Response of Rice to Increasing CO₂ and Temperature : Recent Findings Enrichment (FACE) Experiments. In *Science, technology, and trade for peace and prosperity* (eds P.K. Aggarwal, J. Lahda, R. Singh, C. Devakumar & B. Hardy), pp. 439-448. Macmillan India, Ltd., Los Banos, Philippines and New Delhi, India.
9. Laza, M.R.C., Sakai, H., Cheng, W., Tokida, T., Peng, S., & Hasegawa, T. 2015: Differential response of rice plants to high night temperatures imposed at varying developmental phases. *Agricultural and Forest Meteorology* 209-210, 69-77. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.04.029. Elsevier B.V.
10. Li, T., Hasegawa, T., Yin, X., Zhu, Y., Boote, K., Adam, M., Bregaglio, S., Buis, S., Confalonieri, R., Fumoto, T., Gaydon, D., Marcaida, M., Nakagawa, H., Oriol, P., Ruane, A.C., Ruget, F., 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. doi: 10.1111/gcb.12758.
11. 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 (April 2006), 57-63.
12. 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. doi: 10.2480/agrmet.68.1.2.
13. Pasuquin, E.M., Hasegawa, T., Eberbach, P., Reinke, R., Wade, L.J., & Lafarge, T. 2013: Responses of eighteen rice (*Oryza sativa* L.) cultivars to temperature tested using two types of growth chambers. *Plant Production Science* 16 (3), 217-225.
14. Sawano, S., Hasegawa, T., Goto, S., Konghakote, P., Polthanee, A., Ishigooka, Y., Kuwagata, T., & Toritani, H. 2008: Modeling the dependence of the crop calendar for rain-fed rice on precipitation in Northeast Thailand. *Paddy and Water Environment* 6 (1), 83-90. doi: 10.1007/s10333-007-0102-x.
15. Sawano, S., Hasegawa, T., Ishigooka, Y., Kuwagata, T., Shindo, J., & Tao, F. 2015: Effects of nitrogen input and climate trends on provincial rice yields in China between 1961 and 2003: quantitative evaluation using a crop model. *Paddy and Water Environment* 13 (4), 529-543. doi: 10.1007/s10333-014-0470-y.
16. 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), 2639-2653. doi: 10.5194/bg-7-2639-2010. Copernicus GmbH.
17. Usui, Y., Sakai, H., Tokida, T., Nakamura, H., Nakagawa, H., & Hasegawa, T. 2014: Heat-tolerant rice cultivars retain grain appearance quality under free-air CO₂ enrichment. *Rice* 7 (1), 1-9. doi: 10.1186/s12284-014-0006-5. Springer US.
18. 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. doi: 10.1111/gcb.13128.
19. Yoshida, R., Fukui, S., Shimada, T., Hasegawa, T., Ishigooka, Y., Takayabu, I., & Iwasaki, T. 2015: Adaptation of rice to climate change through a cultivar-based simulation: a possible cultivar shift in eastern Japan. *Climate Research* 64 (3), 275-290. doi: 10.3354/cr01320.
20. 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. doi: 10.1093/jxb/ert154.

21. 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. doi: 10.1016/j.fcr.2015.04.006.
22. 長谷川利拓 2009: 気候変化がイネを中心とした作物栽培におよぼす影響と適応策 日本農学会編 シリーズ 21世紀の農学 地球温暖化問題への農学の挑戦, 養賢堂, 東京. pp.27-47.
23. 長谷川利拓 2012a: 50年後の水稲生産を予測する. *化学と生物* 50 (4), 298-301.
24. 長谷川利拓 2012b: 農業への影響. 江守正多 & 気候シナリオ「実感」プロジェクト影響未来像班編 地球温暖化はどれくらい「怖い」か? 温暖化リスクの全体像を探る, pp.161-192. 技術評論社, 東京.
25. 長谷川利拓 2014: 気候変化に対する水稲の応答と適応の方向. *遺伝* 68 (1), 76-81.
26. 長谷川利拓 2015: 地球環境変動が農業に及ぼす影響. *農業* 1600, 21-31.
27. 長谷川利拓 2016: 作物の環境応答における生理生態・遺伝・微気象モデルの融合的アプローチ. *学術の動向* 21 (No.2), 77-81. doi: http://doi.org/10.5363/tits.21.2_77.
28. 長谷川利拓, 酒井英光, 常田岳志, 中村浩史, 白井靖浩, 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.