

大気二酸化炭素濃度の上昇が コメの収量に与える影響

農研機構農業環境変動研究センター
気候変動対応研究領域

酒井 英光

はじめに

大気中の二酸化炭素 (CO₂) 濃度は長期間 280 ppm で安定していたが、産業革命以後上昇を続け、2015 年には 400 ppm に達した。さらに、今世紀末には 421 ~ 936 ppm にも上昇すると予測されている (IPCC 2013)。CO₂ をはじめとする温室効果ガスの増加は、地球規模の温暖化やそれに伴う降水量変動などを引き起こすと考えられ、作物生産にも大きな影響を及ぼす可能性が高い。予想される気候変動の中でも温暖化は、作物の生育期間短縮による収量の減少や登熟期間の高温による玄米品質の低下など、作物生産への負の影響が懸念されている。一方、大気 CO₂ 濃度の上昇は、CO₂ 自体が光合成の基質であることから、光合成速度を促進させ、作物の成長、収量を増加させる正の影響がある。この効果は施肥効果と呼ばれており、この効果を最大限に活用することは気候変動に対する作物生産の適応策として有効であると考えられる。

開放系大気 CO₂ 増加 (FACE) 実験

大気 CO₂ 濃度の上昇に対する作物の応答については、主に温室や人工気象室などの閉鎖系で研究されてきたが、地球規模の気候変化に対する食糧生産や耕地生態系の応答を明らかにするためには、出来る限り実際の圃場

に近い条件で研究を行う必要性が高まった。このような背景から、屋外で囲いの無い条件で大気 CO₂ 濃度を高める開放系大気 CO₂ 増加 (Free air CO₂ enrichment : FACE) 実験が実施されるようになった。

FACE 実験システムは、八角形から円形に近い試験区 (リングと呼ばれる) の周囲にプラスチックチューブ等を設置し、風上側のチューブから CO₂ を放出し、試験区内の CO₂ 濃度を外気より高めるものである。リング中央の風向、風速、CO₂ 濃度を常にモニターし、CO₂ の放出量をコンピューターで制御している (Nakamura *et al.* 2012)。

イネを対象とした FACE 実験は、1998 年に岩手県雫石町 (北緯 39°) で開始したものが世界で最初である。その後、雫石と同じシステムを用いた FACE 実験が中国江蘇省 (北緯 31°) でも行われるようになった。雫石 FACE は 2008 年で終了したが、実験サイ

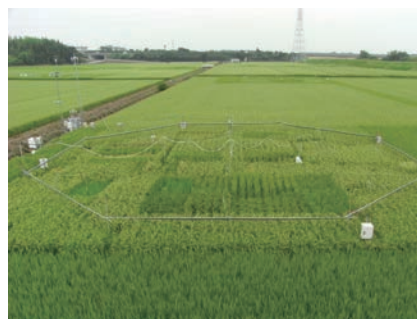


図-1 つくばみらい市で実施された FACE (開放系大気 CO₂ 増加) 実験の様子
差し渡し 17m の八角形状区画の中央部に CO₂ 濃度センサーと風向・風速計を設置し、区画内の CO₂ 濃度が対照区に対して 200ppm 高くなるように、周辺部に設置した放出チューブから風向きに応じて CO₂ ガスを放出する。

トをより温暖な茨城県つくばみらい市 (北緯 36°) に移し、2010 年から FACE 実験を実施している (図-1)。

収量および収量構成要素への影響

FACE 実験により、圃場条件においても、大気 CO₂ 濃度の上昇によりイネの収量が増加することが確認された (Kim *et al.* 2003; Yang *et al.* 2006; Hasegawa *et al.* 2013)。雫石とつくばみらいで実施された 11 作期の FACE 実験の結果、大気 CO₂ 濃度が 50 年後に予測されるレベル (現在値 +200ppm) に上昇すると、水稻品種「あきたこまち」の玄米収量は平均で約 11% 増加した (Hasegawa *et al.* 2016; 図-2)。また、収穫期のバイオマスは約 12% 増加したが、収穫指数 (玄米重 / バイオマス) は約 2% 低下した。収量構成要素では、単位面積あたりの穂数および 1 穂モミ数がそれぞれ約 9%、約 3% 増加した結果、単位面積当たりのモミ数は約 12% 増加した (図-2)。一方、登熟歩合および玄米 1 粒重への影響は比較的小さなものであった。これらのことから、大気 CO₂ 濃度の上昇による収量の増加は、穂数およびモミ数の増加が主要因であることが分かった。

高 CO₂ と気温との相互作用

FACE 実験における生育期間中の平均気温は、雫石が 18.4 ~ 21.4°C であったのに対し、つくばみらいで

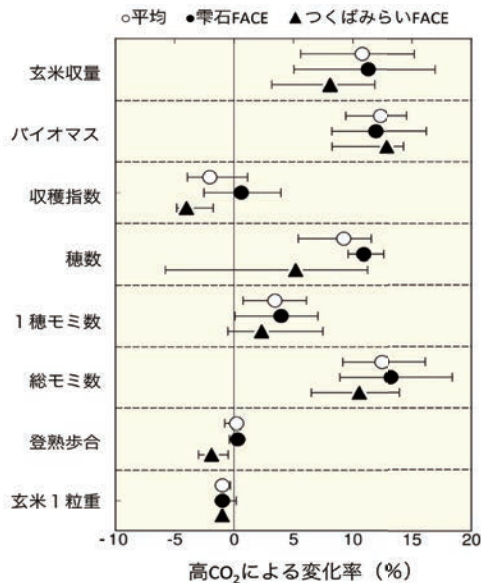


図-2 高 CO₂ による玄米収量および収量構成要素の変化率
雫石, つくばみらい FACE 実験の結果。品種はあきたこまち。図中のバーは95%信頼区間。Hasegawa *et al.* 2016 より。

は 24.2 ~ 25.2°Cであったことから、幅広い温度条件で高 CO₂ による増収効果を比較することが可能となった。同一品種の高 CO₂ 応答を、複数の FACE 地点で比較したのは、他の植物種を含めても例がない。高 CO₂ による収量への影響は気温条件で異なり、最低気温を記録した冷害年(雫石 2003 年, 生育期間の平均気温 18.4°C)では増収効果は認められず(Shimono *et al.* 2008), その他の年次では増収するものの、その程度は高温になるとともに低下する傾向が認められた(Hasegawa *et al.* 2013; 図-3)。異なる気温条件下での高 CO₂ による増収効果については、さらなる検証が必要であるが、あきたこま치의応答からすると、温暖化した場合に、高 CO₂ 濃度による増収効果が期待どおりに発揮されず、予測よりも低くなる可能性が示唆された。

窒素施肥の影響

雫石, 中国江蘇省およびつくばみらい FACE で、窒素施肥量と高 CO₂ に

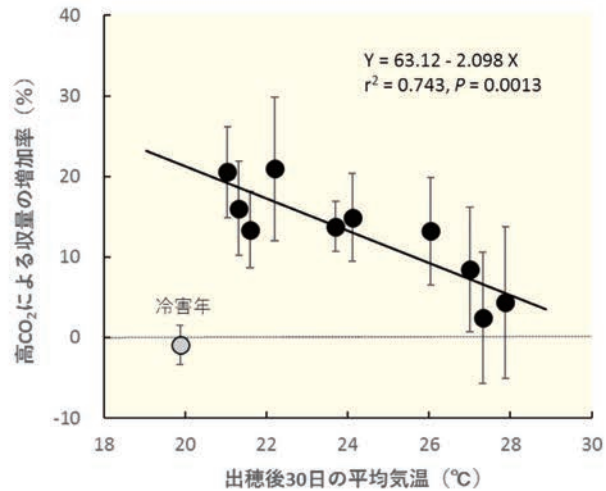


図-3 高 CO₂ による玄米収量の増加率と生育期間中の平均気温との関係
雫石, つくばみらい FACE 実験の結果。品種はあきたこまち。回帰直線は冷害年(2003年)のデータを除いたもの。Hasegawa *et al.* 2016 より。

よる増収率の関係を調査したところ、窒素施肥量が 80kg ha⁻¹ よりも少ない場合には、高 CO₂ による増収率は施肥量の減少とともに低下し、無窒素施肥ではほとんど増収しないことが分かった。また、高 CO₂ による増収効果は、80kg ha⁻¹ よりも多い場合には、窒素施肥量の増加に対して頭打ち状態を示した(長谷川ら 2018; 図-4)。高 CO₂ による収量増加の主要因は穂数やモミ数の増加であることは上述のとおりである。モミ数は作物の窒素吸収量に大きく依存することが古くから知られており、FACE 実験においても、

CO₂ 濃度に関わらず、幼穂形成期頃までの窒素吸収量とモミ数の関係に強い正の相関が認められた(Kobayashi *et al.* 2006)。窒素施肥量が少ない試験区では、幼穂形成期においても高 CO₂ による窒素吸収量の増加率が小さく、モミ数や収量の高 CO₂ 応答が低くなったものと考えられる。一方、窒素施肥量が 150 ~ 350kg ha⁻¹ と大きかった中国江蘇省では、高 CO₂ による窒素吸収量の増加率は成熟期まで継続したが、モミ数の増加率が変化せずに収量の増加率にも影響しなかったものと考えられる。

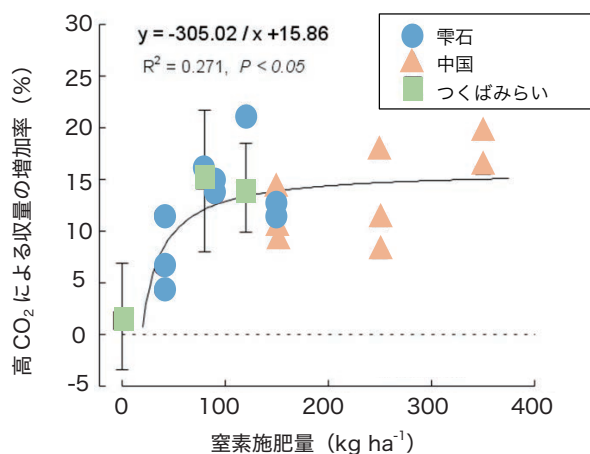


図-4 高 CO₂ による収量増加率と窒素施肥量との関係
日本(雫石, つくばみらい) FACE と中国(江蘇省) FACE の結果。長谷川ら 2018 より。

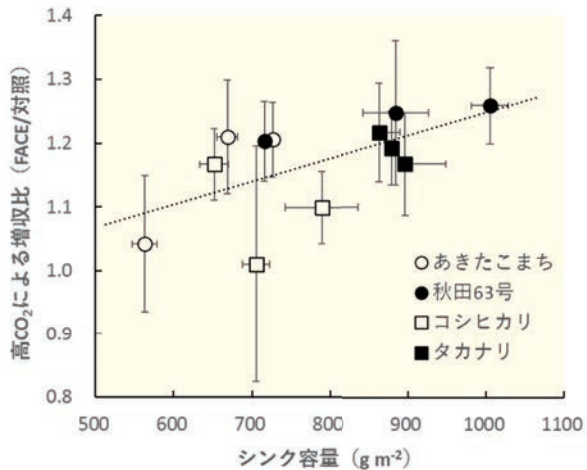


図-5 高CO₂による玄米収量の増加率とシンク容量との関係

雫石 (2007, 2008年), つくばみらい (2010年) FACE実験の結果。縦棒は平均値の標準誤差。シンク容量は単位面積あたりのモミ数と成熟時の玄米1粒重の積で、全モミが登熟した場合の潜在収量を示す。ここで示したシンク容量は、各品種、各年次の高CO₂区と対照区の平均値。Hasegawa *et al.* 2013より。

品種による高CO₂ 応答の差異

高CO₂による増収率はイネの品種間で異なった。雫石およびつくばみらいのFACE実験では、モミ数の多い「タカナリ」と、粒の大きい「秋田63号」において増収率が高い傾向にあった。これらの特性は、品種の潜在的な収量を示すシンク容量（すべてのモミが完全に充実した場合に想定される収量で、全モミ数×1粒重で表される）を高める性質である。実際、シンク容量が大きい品種の場合に、高CO₂による増収率も高いことが示された (Hasegawa *et al.* 2013; 図-5)。

つくばみらいでのFACE実験では、さらに多くの品種を用いて高CO₂の影響を調査した。その結果、高CO₂濃度による各品種の増収率には、3～36%の広い範囲で変動することがわかった (Hasegawa *et al.* 2013)。高CO₂ 応答の品種間差異について、収量構成要素による重回帰分析を行ったところ、穂数や一穂モミ数など、シンク容量に関する構成要素が重要であったが、それらに加えて、登熟の良否が関わる登熟歩合の向上も、増収効果を

高める重要な要素であることがわかった。これらの結果は、高CO₂による増収効果を遺伝的に高めるために重要な知見である。

今後の展望

FACE実験の結果より、高CO₂の施肥効果の程度は、CO₂濃度のみで一義的に決まるものではなく、気象条件、窒素施肥、水稲品種によっても変動することがわかった。これらの要因を作物モデルに導入することにより、気候変動による作物生産への影響予測において、精緻化および不確実性の低減が期待される。

さらに、高CO₂の施肥効果において水稲品種間で大きな差異が認められたことから、高CO₂ 応答を遺伝的に高める余地があることが示唆された。高CO₂に対する収量応答において、穂数、1穂モミ数などシンク容量に関する構成要素の重要性が示唆されており、高CO₂環境に適応した品種の開発が望まれる。

引用文献

Hasegawa, T. *et al.* 2013. Rice cultivar responses to elevated CO₂ at two free-

air CO₂ enrichment (FACE) sites in Japan. *Functional Plant Biology* 40, 148-159.

Hasegawa, T. *et al.* 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*. Madison, WI USA, 45-68.

長谷川利拡ら 2018. 水稲のCO₂増加に対する生育反応からみた窒素施肥の必要性. *日本土壤肥科学雑誌*, 89, 491-496.

IPCC 2013. The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. in *Climate change 2013*. Cambridge, U.K. and New York, U.S.A. Kim, H.Y. *et al.* 2003. Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops. *Field Crops Research* 83, 261-270.

Kobayashi, K. *et al.* 2006. Paddy rice responses to free-air [CO₂] enrichment. in *Managed ecosystems and CO₂: case studies, processes, and perspectives*. Berlin, Germany, 87-104.

Nakamura, H. *et al.* 2012. Performance of the enlarged rice - FACE system using pure CO₂ installed in Tsukuba, Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* 68, 15-23.

Shimono, H. *et al.* 2008. Rice yield enhancement by elevated CO₂ is reduced in cool weather. *Global Change Biology* 14, 276-284.

Yang, L. *et al.* 2006. The impact of free-air CO₂ enrichment (FACE) and N supply on yield formation of rice crops with large panicle. *Field Crops Research* 98, 141-150.