

## 高CO<sub>2</sub>濃度によるコメの増収効果は高温条件で低下

大気環境研究領域 長谷川 利拡

2013年5月9日、アメリカ合衆国海洋大気局 (NOA) は、ハワイのマウナロア観測所で測定されている大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の日平均濃度が、1958年の観測開始以来、初めて400ppmを超えたと発表しました。産業革命以前の280ppmと比較すると1.4倍に相当します。今後、CO<sub>2</sub>排出削減に向けた取り組みがなされたとしても、大気CO<sub>2</sub>濃度は上昇を続け、今世紀半ばには470~570ppm、今世紀末には540~970ppmに到達すると予測されています。CO<sub>2</sub>濃度の上昇は、温暖化や水資源循環の変化といった地球規模での環境変動の原因となり、農作物生産にも負の影響を与えることが懸念されています。一方、CO<sub>2</sub>濃度の上昇自体は、光合成を促進して収量を増加させることが知られています。しかしながら、その増収がどの程度か、どのような条件で変動するかについては、十分な検討がなく、将来の作物生産予測における不確実な要因として指摘されていました。

植物の高CO<sub>2</sub>濃度(以下高CO<sub>2</sub>)に対する応答については、主に温室や人工気象室などの閉鎖系で研究されてきましたが、地球規模の気候変化に対する食料生

産や炭素循環の応答を明らかにするためには、できる限り実際の圃場に近い条件で明らかにする必要性が高まりました。このような背景から、屋外で囲いのない条件で大気CO<sub>2</sub>濃度を高める開放系大気CO<sub>2</sub>増加 (Free-air CO<sub>2</sub>enrichment, FACE) 実験が、1989年にアメリカ合衆国のアリゾナ州で畑作を対象として始まり、その後、様々な植物種に適用されるようになりました(世界各地のFACEサイトについては、<http://www.niaes.affrc.go.jp/outline/face/globalface.html>を参照)。

水田を対象としたFACE実験は、1998年に岩手県ほじょう 雫石町で開始し、以来寒冷地のイネに及ぼす高CO<sub>2</sub>の影響解明に貢献してきました。しかし高CO<sub>2</sub>の影響は、温度などの要因によって変化することも指摘されていることから、より温暖な環境においても影響を調査する必要性がありました。そこで、寒冷地のイネ単作地帯で実施してきた雫石FACEは2008年の実験を最後に終了し、2009年12月には、より温暖な地域で学際的な研究を実施するために、茨城県に「つくばみらいFACE実験施設」を新設しました(<http://www.niaes.affrc.go.jp/outline/face/>) (図1)。

つくばみらいFACE実験拠点は、小貝川の流域に位置し、周辺には30ha以上の比較的均質な沖積土壌の水田が広がります。ここで0.5ha前後の水田(長辺100m)4筆を借り上げ、それぞれに外気CO<sub>2</sub>区(約390ppm)と高CO<sub>2</sub>処理区(約590ppm)を設けました。



岩手県雫石FACE実験サイト (1998-2008)



図1 岩手県雫石町および茨城県つくばみらい市における水田FACE実験施設

両地点とも農家水田に設けた八角形状の試験区内のCO<sub>2</sub>濃度を、外部の対照区と比べて200ppm高めます。具体的には、屋外条件で高CO<sub>2</sub>濃度を実現するため、水田の一部に正八角形状にチューブを設置し、風向きに応じてCO<sub>2</sub>を放出します。正八角形の区画内のCO<sub>2</sub>は、約70m以上離れた位置に設けられた対照区より約200ppm高い濃度(生育期間平均で約590ppm)に制御されます。



茨城県つくばみらいFACE実験サイト (2010-)

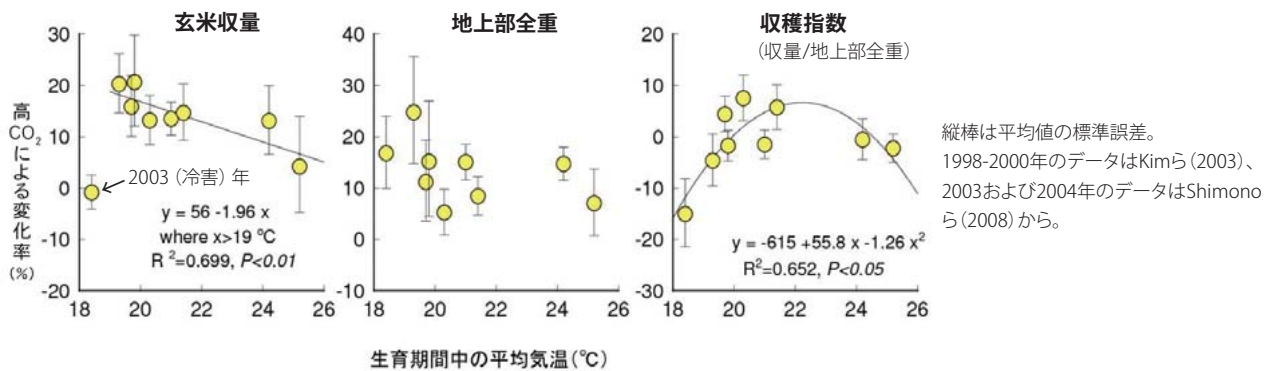


図2 FACE実験を実施した9年の生育期間中の平均気温と、「あきたこまち」の玄米収量(左)・地上部全重(中)・収穫指数(右)との関係

各処理区(リング)の大きさは、多くの品種や栽培条件を検定できるよう、雫石町の直径12m、面積120m<sup>2</sup>に対して、直径17m、約240m<sup>2</sup>に倍増しました。実験は2010年の栽培シーズンから開始し、現在も継続中です。試験区内には、来歴や形態特性の異なる品種、水地温を約2℃高める水地温上昇区、窒素施肥水準の区などを設けて、CO<sub>2</sub>と各種要因の組み合わせがイネの成長、収量、品質などに及ぼす影響を研究しています。また、雫石FACEで用いたものと同じ品種を用いることで、異なる地点におけるCO<sub>2</sub>応答を調査することができるようになりました。

### 雫石とつくばみらいにおける高CO<sub>2</sub>による増収効果

雫石における7年とつくばみらいにおける2年に共通して用いた品種「あきたこまち」について、高CO<sub>2</sub>による増収効果を比較しました(図2)。生育期間中の平均気温は、雫石で18.4~21.4℃であったのに対し、つくばみらい市は24.2~25.2℃で、幅広い温度条件下で増収効果を比較することができました。同一品種の高CO<sub>2</sub>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世界で初めてです。対照区と高CO<sub>2</sub>区での平均収量はそれぞれ578g/m<sup>2</sup>と654g/m<sup>2</sup>で、13%の増収が認められました。

しかし、高CO<sub>2</sub>による増収効果は、毎年の温度条件下で異なり、最低気温を記録した冷害年次(雫石2003年、生育期間の平均気温18.4℃)には認められず、そ

他の年次では、増収はするものの、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ました(図2左)。高CO<sub>2</sub>による増収率を、地上部全重と収穫指数(全重に占める収量の重量割合)から解析すると、地上部全重の増加率と温度には明瞭な関係が見られず(図2中)、収穫指数は低温、高温条件下でマイナスとなる傾向が認められました(図2右)。高CO<sub>2</sub>による光合成の促進は、高温条件下で高まるものと考えられていますが、生育期間を通じた乾物生産においては、高CO<sub>2</sub>による影響が高温条件下で高まる傾向は認められませんでした。一方、これまでの人工気象室の実験から、高温による不稔が高CO<sub>2</sub>条件下で悪化し、収穫指数も低下することが報告されています。最も高温であったつくばみらい2010年において、あきたこまちの出穂・開花期頃の最高気温は、不稔発生<sup>いきち</sup>の閾値とされる34~35℃になりました。さらに、高CO<sub>2</sub>処理によって葉の気孔が閉じ気味になって蒸散が低下したため、群落温度はFACE区の方が高くなりました。実際、2010年のあきたこまちの稔実率<sup>ねんじつりつ</sup>は、FACE区において対照区よりも低い傾向にあり、そのことが収穫指数の応答にも影響したのと考えられます。異なる温度条件下での高CO<sub>2</sub>による増収効果については、さらなる検証が必要ですが、9年間のあきたこまちの応答からすると、温暖化した場合には、高CO<sub>2</sub>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されました。

### FACEによる増収効果の品種間差異

あきたこまちに加え、形態特性の異なる3品種を2地点のFACE実験で比較したところ、高CO<sub>2</sub>による増収率は品種によって異なり、いずれの地点でも、<sup>もみ</sup> 籾数の多い「タカナリ」と、粒の大きい「秋田63号」で増収率が高い傾向にありました。これらの特性は、品種の潜在的な収量を示すシンク容量（すべての籾が完全に充実した場合に想定される収量で、全籾数と一粒重の積から求めます）を高める性質です。実際、シンク容量が大きい品種の場合に、高CO<sub>2</sub>による増収率も高いことが示されました（図3）。

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CO<sub>2</sub>の影響を調査しました。その結果、高CO<sub>2</sub>による増収率は、品種によって3～36%の広い範囲で変動することがわかりました。この大きな高CO<sub>2</sub>応答の品種間差異の要因について調べたところ、穂の数、一穂につく籾の数といったシンク容量に関する要素とともに、登熟の良否がかかわる登熟歩合の向上も、増収効果を高めた重要な要素であることがわかりました。一方、乾物生産の高CO<sub>2</sub>応答における品種間差異は、収量ほどは大きくなかったことから、ここで認められた品種間差異は、主に大きなシンクを確保し、そこに十分な光合成産物を供給することで得られたものと考えられます。この結果は、高CO<sub>2</sub>条件に適した新品種開発に重要な基礎情報となります。

### 今後の展望

FAO(国際連合食糧農業機関)の報告では、増加し続ける世界の人口を養うため、2050年までに主要作物の生産量を、現在よりも70%程度増加させることが必要とされます。農地面積の拡大には制約もあることから、これを気候変動条件下で達成するためには、気候変動が作物生産に及ぼす影響のしくみを理解し、新しい品種や栽培技術の開発が不可欠です。FACE実験は、そのための実証的研究手法として重要な役割を担っていますが、現在、農作物を対象としたFACE実験

は、世界で6か所のみです。日本で実施した2地点のFACE実験の結果は、世界的にも貴重なデータと考えられます。今後、世界のFACE研究者の連携を深めて、地点や作物種を超えた横断的解析を進め、収量予測モデルの予測精度の向上、高CO<sub>2</sub>環境に適応した品種の開発に役立てたいと考えています。

また、FACEでは、作物のCO<sub>2</sub>応答とともに、土壌-作物系の物質循環に及ぼす気候変動の影響も重要な研究対象です。気候変動下での炭素動態は、農業の気候変動緩和効果を知る上で最も重要な要素ですが、炭素の循環速度は窒素動態が密接に関連します。このため、つくばみらいにおいては、炭素に加えて窒素の動態にも着目した研究を実施しています。高CO<sub>2</sub>は、直接的には光合成・蒸散という気孔を介したガス交換に影響しますが、その影響は食料生産や物質循環にかかわる様々なプロセスに及びます。つくばみらいFACEでは、作物学、農業気象学、大気環境科学、土壌学、微生物学などの学際的な研究チームで、気候変動に対する農耕地の応答のしくみを解明し、気候変動への適応・緩和技術を検証する試みを継続しています。

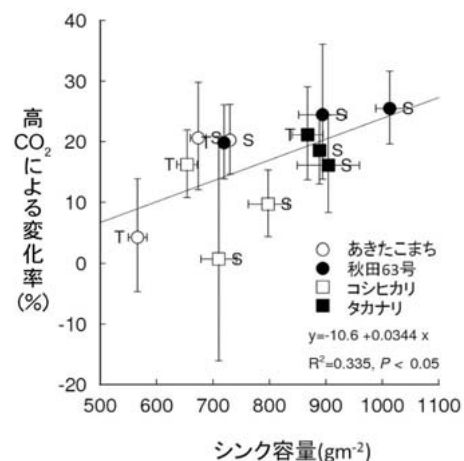


図3 高CO<sub>2</sub>による玄米収量の変化率と品種のシンク容量の関係

栗石 (2007, 2008年)、つくばみらい (2010年) の結果

シンク容量は、全籾が登熟した場合の潜在収量を示します。いずれの地点においても、シンク容量の大きい秋田63号とタカナリが収量の増加率も高い傾向が認められました。

(縦棒は平均値の標準誤差。シンボル脇のアルファベットは試験地、S-栗石、T-つくばみらい)