

50年後の水稻生産を予測する

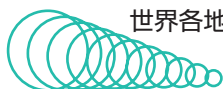
温暖化・CO₂濃度上昇が水稻生産に及ぼす影響を実際の水田で調べる

長谷川利拡

(独)農業環境技術研究所

大気中のCO₂濃度は現在約390 ppmで、過去200年に100 ppm以上上昇した。今後、CO₂排出削減に向けた取り組みがなされたとしても、大気CO₂濃度は上昇を続け、今世紀半ばには470～570 ppm、今世紀の終わりには540～970 ppmにも到達するものと予測されている⁽¹⁾。CO₂濃度の上昇は、温暖化や水資源循環といった地球規模での環境変動の原因になるとともに、それ自体が作物の光合成の促進や気孔開度の減少といった作物生理への影響を介して、作物の生育、収量、水利用に影響する。また、温度や降水の変化も高CO₂濃度条件下で作物に影響するため、高CO₂濃度に対する作物の応答は、今後の作物生産を予測したり、気候変動に対する適応技術を開発したりする上で最も基礎的な環境応答といえることができる。

作物の高CO₂濃度への応答を調べるには、主に温室や人工気象室などが利用されてきた。しかし、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、大気中のCO₂濃度に対する作物群落や自然植生の応答を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った。このような背景から、屋外で開いのない条件で大気CO₂濃度を高める開放系大気CO₂増加 (free air CO₂ enrichment, FACE) 実験が、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った⁽²⁾。イネを対象としたFACE実験は、1998年に岩手県雫石町で純CO₂ガスを放出するシステムとして開始したものが世界で最初である。2001年には、雫石で開発したFACEシステムが中国江蘇省に導入され、イネのCO₂応答に関する知見が蓄積されてきた。雫石FACEは2008年の実験を最後に終了し、2009年12月には、将来の大気CO₂濃度上昇がもたらす気候変化が水稻生産に及ぼす影響を実際の水田で調べ、適応技術を検証するための研究拠点として、茨城県に新たな「つくばみらいFACE実験施設」を設置し、2010年から栽培実験を開始した。本稿では、これまでのFACE実験を振り返るとともに、今後の研究方向を展望する。



世界各地の開放系CO₂増加実験

世界のFACE実験に関する情報を集積しているアメリカ合衆国のオークリッジ国立研究所によると、2010年現在稼

動中のFACE実験 (試験区の直径8 m以上のもの) は世界で13箇所ある (図1)。CO₂制御の方法は、各地で多少の違いはあるが、基本的には円形から八角形に近い形状の試験区 (リングと呼ばれる) の周辺から風向きに応じてCO₂を放出し、リング内のCO₂濃度を目標濃度に高めるものである。また、ほとんどの実験地において550 ppmあるいは外気+200 ppmを目標とした制御が行なわれている。この濃度は、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 気候変動に関する政府間パネル)⁽¹⁾が高成長社会シナリオで想定する約50年後のCO₂濃度に相当する。これまでにワタ、コムギ、ソルガム、イネ、ダイズ、トウモロコシといった作物、草地や自然植生、森林などが実験の対象になった。作物を対象としたFACEは現在5地点で、1地点で複数の作物を取り扱うところもあるが、コムギを取り扱うのが3地点、トウモロコシおよびイネが2地点、ダイズは1地点のみで、地点数、対象作物種数ともに限られている。また、熱帯におけるFACE実験は実現していない。このような状況に関して、IPCCはFACEなどによる圃場レベルの実証研究が将来予測の不確実性の軽減や適応技術の開発に重要であることを強調している⁽³⁾。



日中イネFACE実験における増収効果

イネのFACE実験は、1998年に岩手県雫石町 (北緯39度) で開始され、寒冷地の水稻のCO₂応答解明のために大きな役割を果たした。2001年には雫石で開発したFACEシステムが中国江蘇省のFACE実験 (北緯31度) に導入され、イネのCO₂応答に関する知見が蓄積されてきた。日中FACEともに、実験開始当初の研究主題は、CO₂濃度上昇に伴う増収程度を屋外条件で明らかにすることであった。寒冷地で実施された雫石FACEと亜熱帯性気候の中国江蘇省FACEにおいて、CO₂濃度を外気よりも200 ppm高めた場合の増収程度がともに14～15%と類似していたことは、光合成の促進は高温条件のほうがより大きいとする光合成理論からして意外な結果であった⁽⁴⁾。また、アメリカで実施されたコムギやダイズのC₃光合成回路をもつ主要作物における増収率も同様であった^(5, 6)。

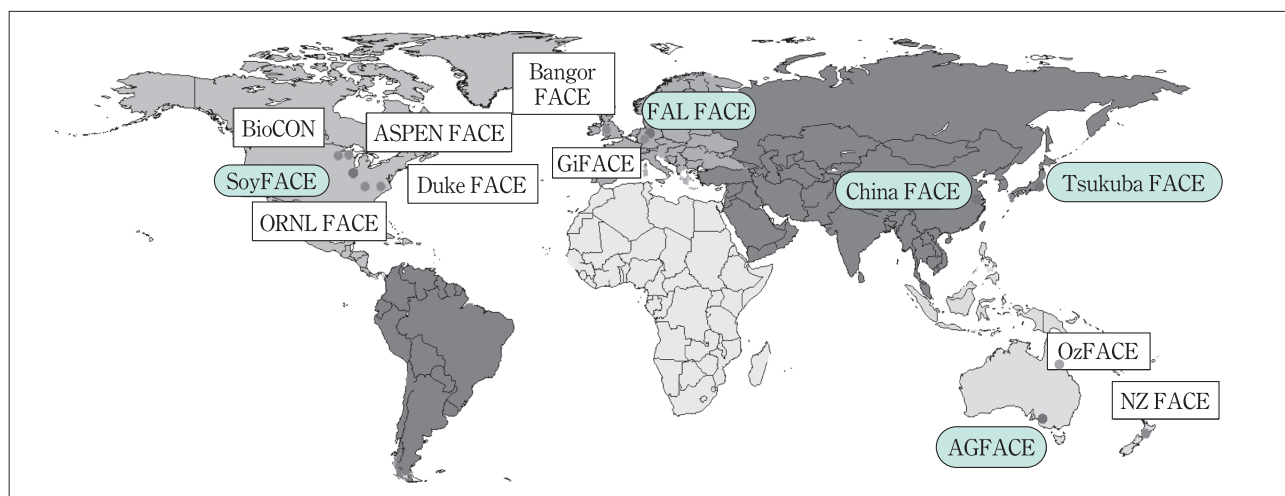
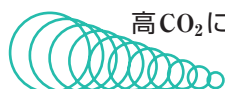


図1 ■ 2010年現在稼働中の世界のFACEサイト（リング直径が8m以上のもの。アメリカ Oak Ridge 国立研究所のまとめ http://public.ornl.gov/face/global_face.shtml と著者の私信による。コバルト色が作物を対象としたFACE）。

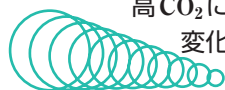
略称は下記のとおり。AGFACE: Australian Grains FACE Facility, BioCON: Biodiversity, CO₂ and N, FAL: Federal Agricultural Research Centre, GiFACE: The University of Giessen FACE facility, ORNL: Oak Ridge National Laboratory, OzFACE: Australian Tropical Savannas FACE Facility, SoyFACE: University of Illinois, Soybean FACE Experimental Facility など



高CO₂による増収効果の変動要因

高CO₂による増収効果が作物種によって異なることもわかってきた。先に述べたコムギ、ダイズ、イネの増収率は同程度であったが、C₄光合成回路をもつトウモロコシやソルガムでは、干ばつが生じなければ増収はほとんど認められなかった^(5,7)。また、C₃作物においても、パレイショやワタのようにCO₂応答が大きな作物種もある。さらに、イネの中でも品種によってCO₂応答が異なる。たとえば、雫石FACEで2003、2004年に実施した品種の早晩性の比較では、増収程度と早晩性との間には一定の関係は認められなかったものの、FACEによる増収率には有意な品種間差異が認められた⁽⁸⁾。また、中国FACEにおいては、インド型ハイブリッド品種において、30%以上のFACE増収効果のある事例が報告されている^(9,10)。また、増収の程度が、窒素栄養条件によっても変化することは、多くの研究で報告されている⁽⁵⁾。

以上のように、大気CO₂増加による増収効果は、品種や栽培条件によって変動する。これは、食料生産予測における不確定要因である一方、気候変動に適応するための機会と考えられ、そのメカニズムを解明して、予測精度を高めるとともに、適応技術の開発につなげるような研究を推進する必要がある。

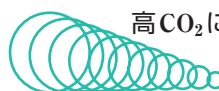


高CO₂による群落の水利用・温度環境の変化

CO₂濃度の上昇は、光合成速度を増加させるとともに、葉の気孔の開き方を小さくすることが古くから知られている。その結果、葉から大気への水蒸気の通りやすさ（気孔コンダ

クタンス）が小さくなる⁽¹¹⁾。したがって、同じ葉面積ならばCO₂濃度が高い条件では群落の水の消費が少なくて済むことになる。実際、雫石のFACE実験では、約200 ppmのCO₂濃度上昇によって、水稻群落の水消費は約8%程度減少した⁽¹²⁾。一方、高CO₂による成長促進によって乾物重は増加したことから、植物が消費した水の量に対する乾物生産の割合（水利用効率）は、高CO₂濃度区が対照区に比べて20%近く増加した。ただし、CO₂増加と同時に進行する温暖化に伴い、蒸発要求量は大きくなるものと予測されており、CO₂増加による蒸散の減少が打ち消される可能性もある。このように将来の農耕地における水収支は、降水量の変化に加えて、温度、CO₂濃度の変化が蒸発散に及ぼす影響にも依存するため、農耕地の水収支も作物を含むシステムとして評価することが必要である。

一方、CO₂増加に伴う気孔コンダクタンスの減少は、群落の水利用だけでなく蒸散による冷却効果を低下させる。雫石におけるFACE実験では、高CO₂濃度区の群落表面温度は、対照区に比べて昼間の平均で約0.3℃高く推移した⁽¹²⁾。収量形成に重要な受精、登熟過程は、高温に対する感受性が高く、わずかな温度上昇でも高温障害が激化することがこれまでのチャンバー実験の結果から明らかにされている。将来の温暖化環境においては、気温上昇の影響に加えて、CO₂増加による群落温度の上昇が高温障害の発生を助長することも懸念される。



高CO₂による水田からメタン放出への影響

大気CO₂濃度の上昇は、作物の生産だけでなく、水田における炭素循環にも影響する。還元状態にある水田土壌は、

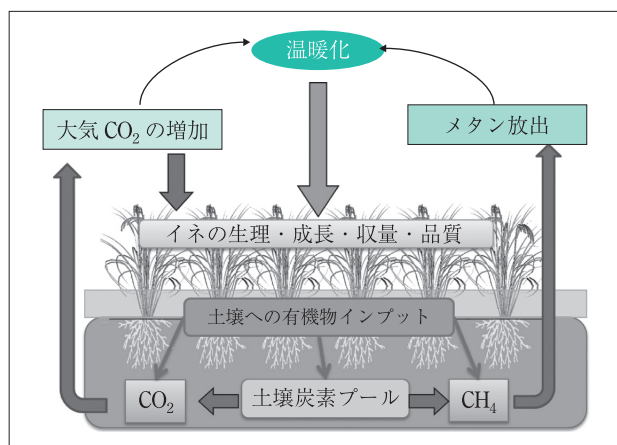
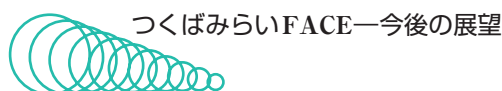


図2 ■ 高CO₂による水田からのメタン放出の促進

大気CO₂濃度の上昇は、その温室効果によって地球温暖化の原因となる一方、イネの生育・収量・品質に及ぼすだけでなく、土壌-作物-大気における物質循環にも影響して、CO₂やメタンの放出が高まることが懸念される。つくばみらいFACEでは、気候変化が作物に及ぼす影響とともに、農耕地からの温室効果ガスの発生に及ぼす影響、さらに品種や栽培管理技術によってそれらの影響がどのように変化するかを調べることで、将来の環境に適応するための方法を検討する。

CO₂の約21倍の温室効果があるメタン (CH₄) の発生源であるが、高CO₂濃度はCH₄の発生を促進することが、日中FACE実験で確認されている^(13, 14)。さらに、CH₄の放出は水地温上昇によっても著しく増加する。FACEリング内に水地温を2℃高める温暖化処理区を設けたところ、FACE・加温区のCH₄発生量は外気CO₂、通常水温区に比べて約80%も増加した⁽¹⁵⁾。これには、図2のような要因が関連しているものと考えられる。すなわち、大気CO₂濃度の上昇に伴う光合成の促進およびそれに伴う炭素獲得量の増加は、CH₄生成のための基質供給も増加させる。さらに、茎や根の量の増加はCH₄の主な放出経路の増大につながる。温暖化は、土壌中の炭素代謝や根の枯死を早めることによってCH₄基質の供給を加速させる。高CO₂濃度、温暖化条件によるCH₄放出の増加には、このような過程が複合的に関連しているものと考えられる⁽¹⁵⁾。実際、水田から発生するCH₄の基質の約50%もが、栽培中の光合成産物に由来することも明らかになってきた⁽¹⁶⁾。

このように、大気CO₂増加や温暖化は、イネおよび水田土壌の炭素代謝に影響し、温室効果ガスの発生を加速する「気候システムへのフィードバック効果」をもつことがわかってきた。これらを定量的に予測し、有効な緩和技術を開発するためには、気候変動時の農耕地における炭素の流れを明らかにする必要がある。



これまでの研究を発展させ、異なる気候帯におけるCO₂

濃度上昇の影響メカニズムを解明し、気候変動に対する適応・緩和技術の開発を国際・学際的に展開するための実験プラットフォームとして、2009年12月に茨城県つくばみらい市にFACE実験施設を新設し、2010年から栽培実験を開始した。つくばみらいFACEは、世界で3個所目の水田FACE実験施設で、雫石、中国江蘇省との中間に位置することから、地点間比較のピボットの役割を担う。ここでは、雫石では温度が低すぎて使用できなかったインド型品種を含めて、幅広いタイプの品種のCO₂応答を比較する。また、遺伝解析用の系統を用いてCO₂応答に関わる遺伝的要因の解明を目指す。さらに、光合成、物質生産、収量の他、コメの品質、水・窒素の利用効率なども対象として、気候変化の影響を多面的に研究する。

CO₂濃度と温度、窒素、品種などの処理条件を組み合わせた実験には、処理区面積の確保が必要である。そのため、雫石では差し渡し12mであったFACEリングを、つくばみらいでは17mに拡大した。これによって、リング内面積は240m²と、雫石FACEの2倍になった。2010年の実験では、FACE区における生育期間平均のCO₂濃度が584ppm (対照区386ppm, 目標値の平均586ppm) で、雫石FACEやその他の世界のFACE実験と同等かそれ以上の制御精度が得られた⁽¹⁷⁾。多くの遺伝材料から品種の選抜を行なうようなスクリーニングには十分なサイズではないが、リング内には約20の品種と水温処理区 (通常よりも2℃高く維持) や異なる窒素水準区を配置することができた (図3)。これらと高CO₂区に対する応答との相互作用を調査中である。

先に述べたとおり、つくばみらいFACEは、雫石FACEと中国江蘇省FACEのほぼ中間的な緯度に位置する。3地点の生育期間中の平均気温を比較すると、雫石が20℃ (7作期平均)、中国江蘇省では約25℃に対して、つくばみらいの1991年から2010年の20年間の平均 (6月～9月) 気温は23.2℃で、両者の中間的な温度帯におけるCO₂応答が得られるものと期待される。ただし、実験を開始した2010年は、日本の夏 (6月～8月) の史上最高温を記録した。つくばみらいにおいても、栽培期間中の平均気温が25.2℃、日最高の平均が29.9℃で、平年を約2℃も上回る猛暑となった。このような条件で得られた高CO₂による増収率は16%と雫石と類似していたが、整粒率 (未熟米、割米などを除いた、整った米粒の割合) は17ポイント低下し、多数の白未熟粒が発生することが明らかになった^(18, 19)。これは冷涼な雫石では認められなかった現象である。こうした温度条件とCO₂濃度との相互作用の圃場条件での解明は重要な検討課題である。

雫石で観察されたCO₂濃度・水地温の上昇がCH₄放出に及ぼす影響については、気候や土壌条件の異なるつくばみらいFACEでも検証中である。先に述べたとおり、水田から発生したCH₄は、生育中の植物の固定炭素に由来する部分が多い。したがって、CO₂・温度に対するCH₄発生の応答を解明し、CH₄を抑制する技術を開発するためには、作物の環境応答と作物-土壌の炭素動態を明らかにした上で、炭素

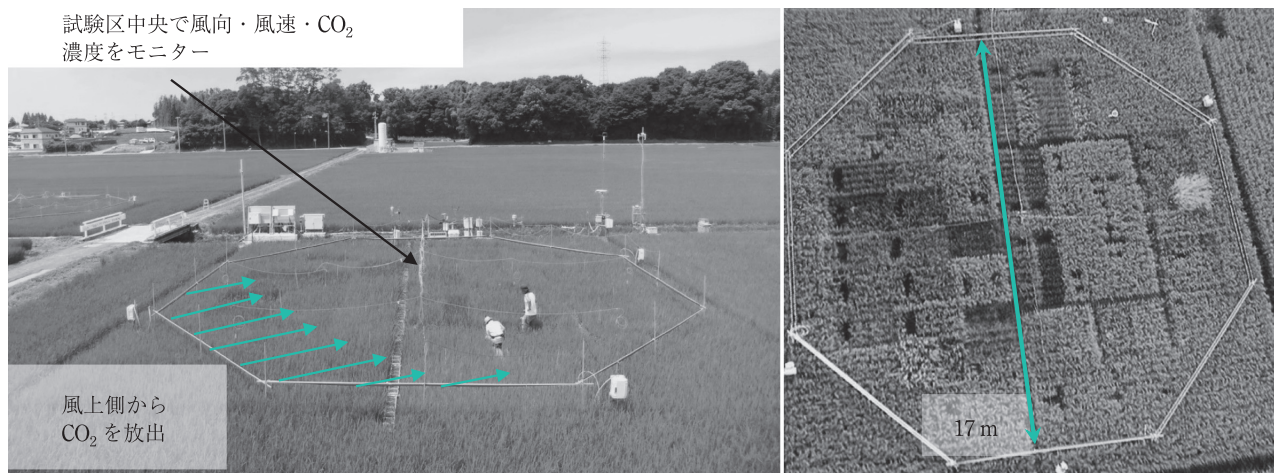


図3 ■ 茨城県つくばみらい市におけるFACE (Free Air CO₂ Enrichment; 開放系大気CO₂増加) 実験施設

屋外条件で高CO₂濃度を実現するもので、この施設では、水田の一部に差し渡し17mの正八角形状にチューブを設置し、風向きに応じてCO₂を放出(左)。正八角形区画内のCO₂濃度は外気よりも約200 ppm高い濃度(2010年度は生育期間平均で584 ppm)に制御。試験区内には約20品種、3水準の肥料、2水準の水温処理区が含まれる(右)。

の流れを制御するための技術に結び付ける必要がある。さらに、土壌-作物系における窒素は、炭素の循環速度に大きく影響する。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展開している。さらに、これらの変化をつかさどる土壌中の微生物の変化を対象とした研究にも着手している。

以上のような問題意識から、FACEリングという限られた空間ではあるが、作物学、農業気象学、大気環境科学、土壌学、微生物学などを専門とする研究者が、環境変化に対する農耕地の応答を様々な側面から検討するためのFACE研究グループが形成されつつある。このグループには独法だけでなく大学からの参画もある。それぞれの得意分野を生かしながら、総合的な研究を展開し、気候変化が作物に及ぼす影響と農耕地からの温室効果ガスの発生に及ぼす影響を明らかにし、さらに品種や栽培管理技術によってそれらの影響がどのように変化するかを調べることで、気候変化への適応と緩和のための技術オプションを提示する。また、国際的な作物FACEのネットワークや農業モデルの研究グループとの連携も図りながら、気候変動の研究拠点としての発展も目指しているところである。

1) IPCC/R.T. Watson *et al.* (ed.): "Climate Change 2001,

Synthesis Report", Cambridge University Press, 2001, p.398.

2) G.R. Hendrey *et al.*: *Ecol. Studies*, **187**, 15 (2006).

3) IPCC/M.L. Parry *et al.* (ed.): "Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability", Cambridge University Press, 2007, p.976.

4) T. Hasegawa *et al.*: "Science, Technology, and Trade for Peace and Prosperity", ed. by P.K. Aggarwal *et al.*, Macmillan India Ltd., p.439.

5) B.A. Kimball *et al.*: *Adv. Agron.*, **77**, 293 (2002).

6) P.B. Morgan *et al.*: *Global Change Biol.*, **11**, 1856 (2005).

7) A.D.B. Leakey *et al.*: *Plant Physiol.*, **140**, 779 (2006).

8) H. Shimono *et al.*: *J. Exp. Bot.*, **60**, 523 (2009).

9) H. Liu *et al.*: *Field Crops Res.*, **108**, 93 (2008).

10) L. Yang *et al.*: *Agric. Ecosyst. Environ.*, **129**, 193 (2009).

11) E. Ainsworth & A. Rogers: *Plant Cell Environ.*, **30**, 258 (2007).

12) M. Yoshimoto *et al.*: *Agric. Forest Meteorol.*, **133**, 226 (2005).

13) K. Inubushi *et al.*: *Global Change Biol.*, **9**, 1458 (2003).

14) X. Zheng *et al.*: *Global Change Biol.*, **12**, 1717 (2006).

15) T. Tokida *et al.*: *Biogeosciences*, **7**, 2639 (2010).

16) T. Tokida *et al.*: *Global Change Biol.*, **17**, 3327 (2011).

17) H. Nakamura *et al.*: *J. Agric. Meteorol.*, **68**, 15 (2012).

18) 長谷川利雄ら: 日作紀, **80** (別1), 134 (2011).

19) 常田岳志ら: 日作紀, **80** (別1), 136 (2011).