

50年後の生育環境でイネを栽培「高CO₂濃度の影響評価」

大気環境研究領域 長谷川利拓

1. はじめに

大気中のCO₂濃度は、産業革命頃の280ppmから今日までに100ppm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は増加を続け、今世紀半ばには470～570ppm、今世紀の終わりには540～970ppmにも到達するものと予測されている(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC 2001)。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同時に、それ自体が作物の光合成、水利用に影響する。また、今後予想される温度上昇や降水量・パターンの変化が作物に及ぼす影響も高CO₂濃度環境下で現れる。さらに、作物を含む植物の高CO₂応答は、生態系の炭素循環においても中心的な役割を果たす。そのため、数多くの植物種を対象に、CO₂濃度に対する生理・生態的応答に関する研究が実施されてきた。近年は、気候変動影響を明らかにするために群落・生態系レベルでの実証や遺伝的変異に関する研究が実施されている。本報告では、これまでに進めてきたイネのCO₂濃度上昇に関わる気候変動影響の研究の一部を紹介するとともに、今後の展望について述べる。

2. 各地の開放系CO₂増加実験

これまで、大気CO₂濃度の上昇により作物の光合成や収量が増加する効果(CO₂施肥効果)は、主に人工気象室などの閉鎖系実験で研究され、作物収量予測モデルにも導入されてきた。しかし、室内でみられた影響が屋外でどの程度現れるかを実証したり、耕地生態系としての炭素循環への影響を解明したりするためには、屋外圃場条件におけるCO₂応答を調査する必要がある。このような背景から、屋外の囲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)実験が実施されるようになった。

1989年にアメリカ合衆国で最初のFACE実験が開始され以来、おおよそ20年が経過した。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)内のCO₂濃度を外気より高めるもので、ほとんどの実験地において550ppmあるいは外気+200ppmを目標とした制御が行われている。この濃度は、IPCCのSpecial Report on Emission Scenarios(SRES)における高成長社会シナリオで想定される約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に加えて草地や自然植生、森林などがFACE実験の対象となった。

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(http://public.ornl.gov/face/global_face.shtml)によると、現在稼働中のFACE実験(リング直径が8m以上のもの)は世界で13ヶ所である(表1)。近年は各地で実施されたFACE試験地の実験結果を横断的に解析して、より一般的(平均的な)なCO₂応答を得ようとするメタ解析も盛んになってきた(Long et al 2004など)。しかし作物を対象としたFACE

は現在 5 地点のみである。これらのうち、コムギを取り扱ったのが 3 地点、トウモロコシおよびイネが 2 地点、オオムギ、ダイズは 1 地点のみで、熱帯における FACE 実験は実現していない。これらの主要作物の生産量の多さ、栽培環境の広さなどを考慮すると、限られた地点でのデータしか得られていないのが実状である。この点に関して IPCC (ワーキンググループ II) は、FACE のような開放系影響評価実験の重要性を強調している (IPCC 2007)。

3. これまでのイネ FACE 研究

(1) 日中 FACE 実験における増収効果

イネの FACE 実験は、農業環境技術研究所と東北農業研究所 (現農業・食品産業技術総合研究機構東北農業研究センター) が、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。以来、雫石の FACE 実験は、寒冷地の水稲の CO₂ 応答の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。

日中ともに、初期の研究主題は CO₂ 施肥効果の開放系実験系における実証であった。この点に関しては、寒冷地で実施された雫石 FACE 実験 (北緯 39 度) と亜熱帯性気候を持つ江蘇省における中国無錫 FACE 実験 (北緯 31 度) において、ともに増収程度が 14~15% と類似していたことは、光合成の促進は高温条件の方がより大きいとする光合成理論からすると、意外な結果であった (Hasegawa et al 2007)。さらに、アメリカで実施されたコムギやダイズの C₃ 光合成回路¹を持つ主要作物における増収率も類似していた (Kimball et al 2002)。

(2) CO₂ 施肥効果の変動要因

CO₂ 施肥効果が様々な条件で変動することもわかってきた。アメリカ FACE で実施された C₄ 光合成回路を持つトウモロコシやソルガムの増収程度は、水分不足がない条件ではほとんど認められなかった (Kimball et al 2002; Leakey et al 2006)。一方、C₃ 作物においても、バ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 3~23% にもよぶ有意な品種間差異が認められた (Shimono et al 2009)。さらに、2007・2008 年には、東北で多収品種である大粒の秋田 63 号が、標準品種として用いたあきたこまちよりも大きな増収が得られた (金田ら 未発表データ)。また、中国 FACE においては、インディカのハイブリッド品種、「汕優 63」「両優培九」において、30% 以上の FACE 増収効果が報告されている (Liu et al 2008; Yang et al 2009)。こうした品種間差異が、どのような形質の違いから生じるかについては、現在生理、生態、形態的な側面から研究を進めている。

CO₂ 施肥効果が、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

¹ C₃ 植物は、光合成過程で CO₂ の固定をカルビン・ベンソン回路でのみ行う植物である。これに対し、C₄ 植物は、カルビン・ベンソン回路の他に CO₂ を濃縮する経路を持ち、低い CO₂ 濃度環境でも比較的高い光合成速度を示す。C₃、C₄ の呼び方は、CO₂ 固定において、初期産物が C₃ 化合物 (炭素原子を 3 つ持つフォスフォグリセリン酸) か、C₄ 化合物 (オキサロ酢酸) であるかの違いに由来する。

表1 2010年現在稼働中の世界のFACEサイトとその概要(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)

名称・略称	国	都市	州/県	緯度	経度	開始年	対象作物あるいは生態系	設定CO ₂ 濃度(ppm)	リング直径(m)	備考/副区処理
AGFACE	オーストラリア	Horsham	Victoria	36°45'S	142°06'E	2007	コムギ(Triticum aestivum)	550	12	水分、品種
China FACE	中国	Jiangsu	Jiangsu	32°5'N	119°2'E	2004	イネ(Oryza sativa)/コムギ(Triticum aestivum)	外気+200	14	窒素、品種
FAL FACE	ドイツ	Braunschweig	Niedersachsen	52°18'N	10°26'E	1999	畑輪作作物体系(オオムギ Hordeum vulgare-草本カバークロップ-テンサイBeta vulgaris-コムギTriticum aestivum) トウモロコシZea mays	550	20	窒素、品種
SoyFACE	アメリカ	Urbana-Champaign	Illinois	40°2'N	88°13'W	2001	ダイズ(Glycine max)、トウモロコシ(Zea mays)	550	20	O ₃ 、水分、赤外線ヒーター
つくばみらいFACE	日本	つくばみらい市	茨城	35°58'N	139°60'E	2010	イネ(Oryza sativa)	外気+200	17	水地上昇/品種/窒素
BioCON	アメリカ	Bethel	Minnesota	45°24'N	93°12'W	1997	C3、C4草本	550	20	種間競合・窒素
GiFACE	ドイツ	Giessen	Hesse	50°32'N	8°41'E	1998	草地	外気×1.2	8	
New Zealand FACE	ニュージーランド	Bulls	Manawatu	40°14'S	175°16'E	1997	放牧草地	475	12	放牧・受動的加温システム(2008~)
OzFACE	オーストラリア	Yabulu	Queensland	19°12'S	146°36'E	2001	熱帯サバンナ	460, 550	15	放牧・肥料
ASPEN FACE (FACTS-II)	アメリカ	Rhineland	Wisconsin	45°36'N	89°42'W	1998	アメリカヤマナラシ(Populus tremuloides)	外気+200	30	O ₃
Bangor FACE	イギリス	Abergwyngreg yn	Wales	53°14'N	4°1'W	2005	落葉樹(Betula pendula, Alnus glutinosa, Fagus sylvatica)	外気+200	8	
Duke FACE (FACTS-I)	アメリカ	Chapel Hill	North Carolina	35°58'N	79°5'W	1994	ラーダマツ(Pinus taeda)	外気+200	30	肥料
ORNL FACE	アメリカ	Oak Ridge	Tennessee	35°54'N	84°20'W	1997	モジハフウ(Liquidambar styraciflua)	外気+200	25	
移設したFACEサイト										
Rice FACE	日本	栗石町	岩手	39°38'N	140°57'E	1998-2008	イネ(Oryza sativa)	外気+200	12	→つくばみらい
China FACE	中国	Wuxi	Jiangsu	31°35'N	120°30'E	2001-2003	イネ(Oryza sativa)/コムギ(Triticum aestivum)	外気+200	12	→Jiangdu
略称	AGFACE	Australian Grains Free Air Carbon Dioxide Enrichment Facility								
	FAL	Federal Agricultural Research Centre								
	FACTS	Forest-Atmosphere Carbon Transfer and Storage								
	BioCON	Biodiversity, CO ₂ and N								
	ORNL	Oak Ridge National Laboratory								

る (Kimball et al 2002)。自然植生を対象とした BioCON (表 1 参照) の結果では、植生の CO₂ 応答が高 CO₂ 条件に伴う窒素不足によって低下することを示した (Reich et al 2006)。施肥による窒素供給が可能な農耕地においても、高 CO₂ に対する応答、その生育に伴う低下には、窒素栄養条件が関与することが示唆されている (Sakai et al 2006)。高 CO₂ 条件においては、一般的に稲体の窒素濃度が低下する。窒素は光合成反応に必要な酵素の主成分であり、窒素濃度の低下によって光合成能力だけでなく、高 CO₂ 濃度に対する応答も低下する。こうした窒素栄養を介した応答低下については、現在の光合成モデルによってほぼ再現できることを確認している。

以上のように、大気 CO₂ 増加による施肥効果は、品種を含む栽培オプションによって変動する。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る。ことから、その変動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がるような研究を推進する必要がある。

(3) CO₂ 濃度上昇が光合成以外の形質に及ぼす影響

1) 高 CO₂ 環境下での水利用

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。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すむことになる。実際、雫石の FACE 実験では、約 200ppm 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 (Yoshimoto et al 2005)。一方、CO₂ 施肥効果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。

CO₂ 増加に伴う気孔コンダクタンスおよび作物の水消費の減少は、C₃ 植物に限らず、光合成の CO₂ 応答が小さい C₄ 植物でも広く認められる (Kimball et al 2002; Ainsworth and Rogers 2007)。その結果、水分が不足する環境においては、CO₂ による水ストレスの度合いが軽減でき、その結果トウモロコシでも FACE による増収効果が認められる事例も報告されている (Leakey et al 2006)。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 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。

2) 高 CO₂ 環境下での温度ストレス

CO₂ 増加に伴う気孔コンダクタンスの減少は水利用を減少させる一方で、蒸散による群落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°C 高く推移した (Yoshimoto et al 2005)。開花期頃の異常高温は、稔実障害を引き起こすことが、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ことから、CO₂ 濃度上昇による群落や穂の温度の上昇は、高温不稔や登熟障害の発生を助長する恐れがある。実際、中国 FACE 実験では、高 CO₂ 環境において白未熟粒の割合が増加することが報告されている (Yang et al 2007)。これには、FACE 処理による籾数増加の影響もあるが、穂温が対照区に比べて高く推移したことも少なからず影響しているものと考えられる。

品質の関連では、CO₂濃度の上昇は、食味と密接に関わる子実タンパク質含率を低下させることがわかっている (Lieffering et al 2004 ; Terao et al 2005)。また、中国江蘇省の FACE では、FACE によってアミロース含量率は低下する傾向にあった (Yang et al 2007)。このように、品質面に関しては作物理化学性に加えて、水・熱収支特性も考慮した総合的な解析と対策が必要である。そのため、現在包括的な影響評価を実施するためのモデル開発を関連研究機関と共同で進めている。

3) 水田からメタン放出の影響

大気 CO₂濃度の上昇は、重要な温室効果ガスであるメタンの発生も促進することが、日中 FACE 実験で確認されている (Inubushi et al 2003 ; Zheng et al 2006)。ただし、その程度は、-19~186% (平均 54%) と、年次や窒素・有機物施用水準などによって大きく変動した。メタンの放出は水地温上昇によっても著しく増加する。2007、2008 年の雫石 FACE では、リング内に水地温を周辺部に比べて 2°C 高める温暖化処理を行なったところ、FACE・加温区のメタン放出量は外気 CO₂、通常水温区に比べて約 80% も増加した (Tokida et al 2010)。すなわち、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」を持つことが明らかになった。これらを予測するとともに、制御するための緩和技術が求められる。

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により、メタン生成のための基質供給も増加する。また、茎や根の量の増加はメタンの主な放出経路の増大につながる。一方、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メタン基質の供給を加速させる。高 CO₂濃度、温暖化条件によるメタン放出の増加には、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 (Tokida et al 2010) が、これらを量的に予測し、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。

4. つくばみらい FACE—今後の展望

最初の FACE 実験が始まり 20 年以上が経過した。雫石のイネ FACE でも 1998 年からの栽培実験を重ね、寒冷地における水稲単作地帯における高 CO₂応答に関して多くの知見を得ることができた。また、世界的な FACE 実験のレビューを通じて、CO₂増加による平均的な増収効果については、一定の見解が得られつつある。今後は、これまでの研究成果を、気候変動に対する適応・緩和技術の開発に向けた国際・学際的な研究に発展させる必要がある。

農業環境技術研究所はそのための実験プラットフォームとして、2010 年につくばみらい市において FACE 実験施設を開設した。高 CO₂条件で多くの品種を取り扱ったり、温度、窒素などの複合的な処理を行うために、雫石では差し渡し 12m であった FACE リングサイズを 17m に拡大した。これによって、リング内面積は 240m²で雫石 FACE の 2 倍の広さを提供できる。2010 年度の CO₂濃度の制御精度は現在取りまとめ中であるが、制御期間中の状況から判断して、最低でも雫石と同程度の制御精度は確保できたと考えられる。

CO₂濃度は世界各地でほぼ同様に上昇するが、温暖化程度は地域によって大きく異なる。したがって異なる気候帯における CO₂濃度上昇の影響を評価したり、CO₂と温度上昇の影響を推定するためには、1 地点の FACE 実験だけではなく、多くのチャンバー実験や他地点

のFACE実験を有効に活用必要することが望まれる。つくばみらいFACEは、世界で3ヶ所目のイネ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、ピボットとしての役割を担う²。そのために、3地点の結果の共同解析を可能にする品種・施肥設計を行い、異なる環境におけるFACE効果を定量化する。また、水・地温上昇処理や赤外線ヒーターによる群落温度上昇処理などを取り入れ、同一地点での温暖化影響を調査する。高CO₂環境下の温度ストレスの影響、適応のための品種特性の解明を継続する。

つくばみらいFACEにおいては、雫石では低温が問題で使用できなかったような品種・遺伝子型のCO₂応答を調査する(図1左に出穂頃の試験区の様子を示した)。また、従来の品種比較試験から、遺伝解析材料などを用いた比較試験や遺伝子レベルの環境応答の解明も研究の対象である。光合成、物質生産などの収量形成過程に加えて、品質関連形質や水・窒素の利用効率の向上も今後の重要な検討課題である。

雫石で観察されたCO₂濃度・水地温の上昇がメタン放出に及ぼす影響については、土壌タイプ・気候条件の異なるつくばみらいFACEでも検証中である(図1右)。また、これまでの研究から、メタンのCO₂・温度応答を解明するためには作物-土壌の炭素動態の把握が重要であることがわかってきた。植物が固定した炭素を追跡調査することにより、炭素フローの解明を目指す。気候変動条件下の炭素動態の研究は、土壌への炭素蓄積といった長期的な緩和策のための研究にも展開できる。さらに、炭素動態に大きく影響する窒素との相互作用もつくばみらいFACEにおける重要な研究テーマである。これらの研究を効率的に実施するために、つくばみらいFACEを大気化学、土壌化学に加えて微生物相も含めた環境応答の研究フィールドとして機能させることが重要である。

FACEは、将来想定される気候条件を再現する実験手法として重要であるが、単一のFACE実験から将来の気候変動の影響や適応・緩和策を評価することはできない。複数地点のデータやその他の実験手法で得られるデータと組み合わせて、現象を総合的に理解し、影響評価を行うためのモデルが必要である。こうした研究グループの活動を通じて、気候変動研究の学際的研究の拠点を形成し、国際的な研究ネットワークの強化と気候変動への適応・緩和技術の開発に貢献したい。

引用文献

Ainsworth E, Rogers A (2007) The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]:

mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell Environ.* 30: 258-270.

Hasegawa T, Shimono H, Yang LX, Kim HY, Kobayashi T, Sakai H, Yoshimoto M, Lieffering M, Ishiguro K, Wang YL, Zhu JG, Kobayashi K, Okada M. (2007) Response of rice to increasing CO₂ and temperature: Recent findings from large-scale free-air CO₂ enrichment (FACE) experiments. *In* Aggarwal PK et al ed. *Science, technology, and trade for peace and prosperity*. Los Baños (Philippines) and New Delhi (India): International Rice Research Institute, Indian Council of Agricultural Research, and National Academy of Agricultural Sciences. Macmillan India Ltd. 439-447

(http://www.irri.org/publications/catalog/pdfs/science_technology.pdf).

Inubushi K, Cheng W, Aonuma S, Hoque M, Kobayashi K, Miura S, Kim H, Okada M (2003) Effect of free-air

² 雫石FACEは終了したため、同一年次の比較はできないが、栽培環境を統一化することにより地点間比較を実現する。

- CO₂ enrichment (FACE) on CH₄ emission from a rice paddy field. *Global Change Biology*, **9**, 1458–1464.
- IPCC (2001) *Climate Change 2001: Synthesis Report*. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 398 pp.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Parry ML et al eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 976 pp.
- Kimball BA, Kobayashi K, Bindi M. 2002. Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Adv. Agron.* **77**:293-368.
- Leakey ADB, Urubelarrea M, Ainsworth EA, Naidu SL, Rogers A, Ort DR, Long SP. (2006) Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO₂ concentration in the absence of drought. *Plant Physiology* **140**: 779-790
- Lieffering M, Kim HY, Kobayashi K, Okada M. (2004) The impact of elevated CO₂ on the elemental concentrations of field-grown rice grains, *Field Crops Research*, **88**(2-3): 279-286
- Liu H, Yang L, Wang Y, Huang J, Zhu J, Wang Y, Dong G, Liu G. (2008) Yield formation of CO₂-enriched hybrid rice cultivar Shanyou 63 under fully open-air field conditions. *Field Crops Research*, **108** (1): 93-100.
- Long SP, Ainsworth EA, Rogers A, Ort D (2004) Rising atmospheric carbon dioxide: Plants FACE the future. *Annual Review of Plant Biology*, **55**: 591-628.
- Reich PB, Hobbie SE, Lee T, Ellsworth DS, West JB, Tilman D, Knops JMH, Naem S, Trost J. (2006) Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂. *Nature*, **440**: 922-925.
- Sakai H, Hasegawa T, Kobayashi K. 2006. Enhancement of rice canopy carbon gain by elevated CO₂ is sensitive to growth stage and leaf nitrogen concentration. *New Phytol.* **170**: 321–332.
- Shimono H, Okada M, Yamakawa Y, Nakamura H, Kobayashi K, Hasegawa T. (2009) Genotypic variation in rice yield enhancement by elevated CO₂ relates to growth before heading, and not to maturity group. *Journal of Experimental Botany*, **60** (2): 523-532.
- Terao T, Miura S, Yanagihara T, Hirose T, Nagata K, Tabuchi H, Kim HY, Lieffering M, Okada M, Kobayashi K (2005) Influence of free-air CO₂ enrichment (FACE) on the eating quality of rice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **85** (11): 1861-1868.
- 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**, 2639-2653, 2010. www.biogeosciences.net/7/2639/2010/ doi:10.5194/bg-7-2639-2010
- Yang L, Wang Y, Dong G, Gu H, Huang J, Zhu J, Yang H, Liu G, Han Y. (2007) The impact of free-air CO₂ enrichment (FACE) and nitrogen supply on grain quality of rice. *Field Crops Res.* **102**: 128-140.
- Yoshimoto M, Oue H, Kobayashi K. (2005) Responses of energy balance, evapotranspiration and water use efficiency in rice canopies to free-air CO₂ enrichment. *Agric. Forest Meteorol.* **133**: 226–246.
- Yang L, Liu H, Wang Y, Zhu J, Huang J, Liu G, Dong G, Wang Y. (2009) Yield formation of CO₂-enriched inter-subspecific hybrid rice cultivar Liangyoupeijiu under fully open-air field condition in a warm sub-tropical climate. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **129**: 193-200.
- Yang L, Wang Y, Dong G, Gu H, Huang J, Zhu J, Yang H, Liu G, Han Y. (2007) The impact of free-air CO₂ enrichment (FACE) and nitrogen supply on grain quality of rice. *Field Crops Research.* **102**: 128-140.

Zheng X, Zhou Z, Wang YS, Zhu J, Wang YL, Yue J, Shi Y Kobayashi K, Inubushi K, Huang Y, Han S, Xu Z, Xie B, Butterbach-Bahl K, Yang L. (2006) Nitrogen-regulated effects of free-air CO₂ enrichment on methane emissions from paddy rice fields, *Global Change Biology* 12 (9): 1717-1732.

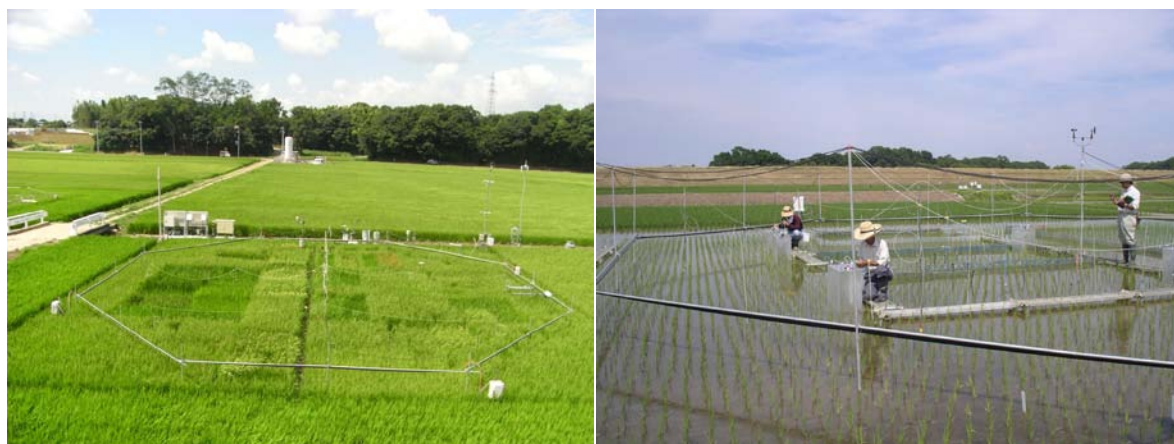


図1 つくばみらい FACE 実験

FACE 区（差し渡し 17m、面積約 240m²）では、各辺に設置した CO₂ 放出チューブから、風向・風速および試験区内の CO₂ 濃度に応じて、風上側 3 辺から CO₂ を放出。内部の CO₂ 濃度を対照区よりも 200ppm 高く制御する。2010 年度は約 30 種類の品種と異なる水温（+ 2℃）、施肥条件を設定。右は水田からの温室効果ガスの収集の様子。