

## CO<sub>2</sub> 倍増時の生態系の FACE 実験とモデリング

研究代表者 農業環境技術研究所 情報解析・システム研究室長 小林和彦

Experiment and modeling of rice ecosystems under high atmospheric CO<sub>2</sub>

Kazuhiko Kobayashi, *Research Director of CREST*

Lab. of Data Analysis and Systems, National Institute of Agro-Environmental Sciences

### 1. 研究の概要

18 世紀半ば以前、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は約 280ppmV (1 ppmV は体積比率で百万分の 1) で長期間ほぼ一定だったが、産業革命の開始とともに上昇し始め、2000 年現在約 370ppmV となっている。CO<sub>2</sub> 濃度のこの急激な上昇の原因は、化石燃料の燃焼、セメント製造、森林伐採等の人間活動であり、CO<sub>2</sub> 濃度の今後の推移も人間活動に依存する。人間活動には、今後各種の CO<sub>2</sub> 排出量削減努力が加わり、CO<sub>2</sub> 濃度の予測は難しいが、今世紀の半ばないし後半には、約 560ppmV に達すると見られる。産業革命以前のちょうど 2 倍になるわけで、その時に植物の生長や生態系はどう変化するか、或いはしないか。これを明らかにするのが、本研究の目的である。

CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が植物に及ぼす影響は、実験室ではかなり調べられているが、その結果が現実にそのまま当てはまるわけではない。自然植生はもちろん、農作物もまた、実験室ではなく生態系のただ中であって、土、水、気象などの環境変動や、他の環境生物、栽培操作の影響を受けるからである。従って、大気 CO<sub>2</sub> の増加が植物の生長と生態系の動態及ぼす影響を知るためには、できる限り実際のフィールドに近い条件で実験を行う必要がある。本研究では、イネの生長と水田生態系が、CO<sub>2</sub> 濃度の上昇でどう変化するかを、FACE (開放系大気 CO<sub>2</sub> 増加) 実験で明らかにしようとする。

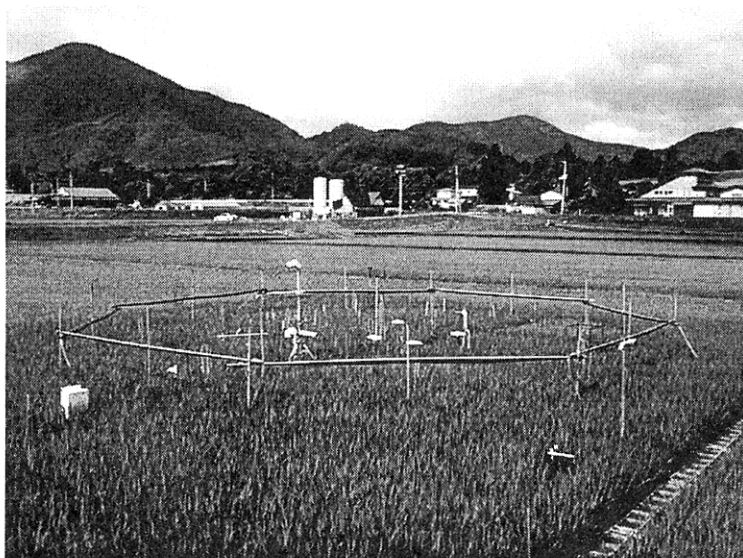
FACE は Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment の略で、実験フィールドに囲いを一切せず、高濃度の CO<sub>2</sub> を直接放出することにより、植生の近辺の CO<sub>2</sub> 濃度を高める方法である。いわば未来の高 CO<sub>2</sub> 濃度下のフィールドを、今作り出すことができる。世界には、約 17 の FACE プロジェクトがあり、樹木、自然植生、牧草地、湿地、農作物を対象に実験が進められている。本 Rice FACE プロジェクトは、世界最初のイネを対象とする FACE である。

### 2. 現在までの成果報告

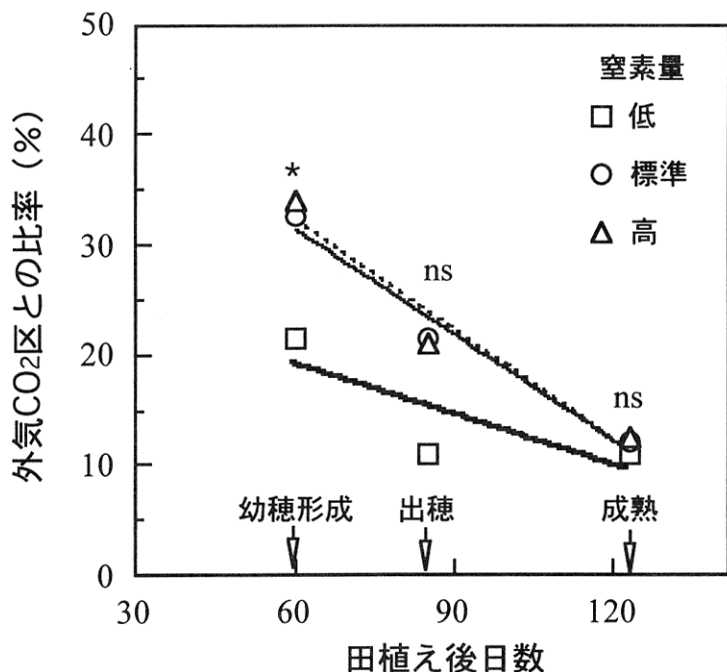
#### 2.1 成果の要約

【FACE 装置の開発】 FACE の最大の特長は、ほとんどアーテファクトの無い高 CO<sub>2</sub> 濃度環境を、フィールドに実現できることである。ところが従来アメリカ等で開発された FACE では、いわゆるブロー効果が生じるようになってきた。高濃度の CO<sub>2</sub> を含む空気を、ブローで多量に空気中に吹き込むため、植物のまわりの微気象が変わり、結果として植物の生長も変わってしまうのである。そこで本プロジェクトでは、純 CO<sub>2</sub> ガスを直接空気中に放出する FACE 装置を新たに開発した。この方式の送風量は従来型の 1/100 以下で、植物群落の微気象に及ぼす送風の影響を実際上無視できる。また送風機が無いので、野外への FACE 装置の設置に必要な労力、電力、スペースが大幅に節約される。

開発した FACE 装置は差し渡し約 12m の 8 角形で、以下 FACE リングと呼ぶ (図-1)。リ



図—1 FACE リング。遠景に見える2つの白い円筒は液化CO<sub>2</sub>タンク



図—2 イネのバイオマス量に及ぼす高CO<sub>2</sub>濃度の影響の生育時期による変化

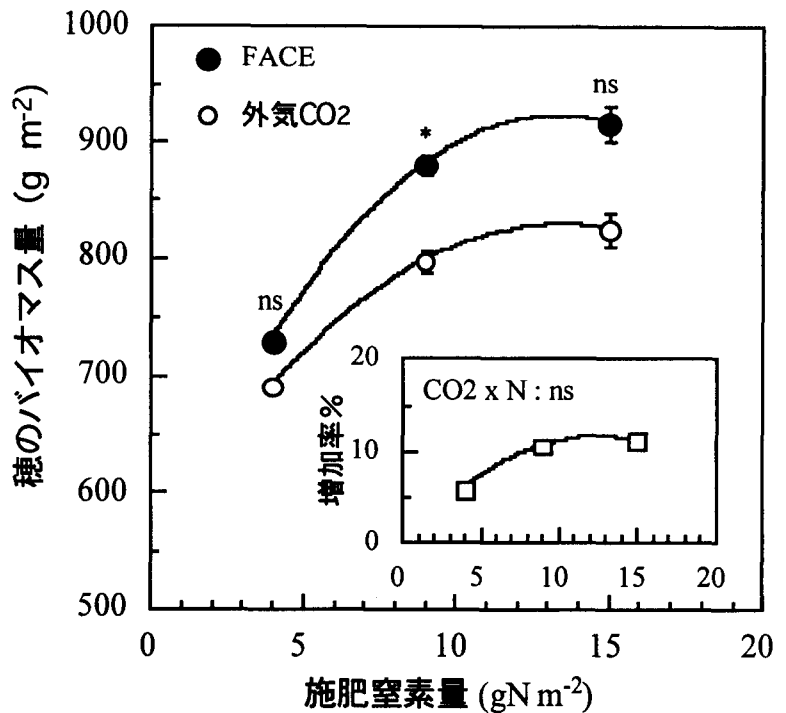
良いだろう。コメ収量は、生長のいわば総決算であって、高CO<sub>2</sub>濃度に対する生長の応答がバラバラである以上(図—2, 3)、コメ収量の応答もコンスタントではあり得ないからである。すなわち、大気CO<sub>2</sub>濃度上昇の影響を予測する際に、いわゆるβファクターのような定数を仮定することには、問題がある。また翻って考えると、CO<sub>2</sub>濃度上昇に対してより高い応答性を示す品種や栽培法があり得ることにもなる。ただし、単に肥料を沢山やれば応答性が高まるわけでないことは図—3から明らかで、高CO<sub>2</sub>濃度下での炭素同化量の増加に見合う量とタイミングで窒素供給量を増やすことが必要だろう。

リングの各辺は市販のかん水チューブでできていて、チューブ上に多数ある細孔から噴出されたCO<sub>2</sub>は、周囲の空気と急速に混合する。風向に応じて、風上側の3辺からCO<sub>2</sub>を放出する。放出量は、リング中心のCO<sub>2</sub>濃度が目標値に近づくよう自動制御する。本研究では、FACEリング中心のCO<sub>2</sub>濃度を外気よりも200ppmV高めることを目標とした。その結果、80-90%の割合で目標CO<sub>2</sub>濃度の±20%以内に制御できた。

【イネの生長と収量の変化】 イネの生長と収量はFACEによって増加したが、増加率は一定でなく変化することが分かった。例えば、バイオマス量の増加率は、生育の初期ほど高く、後になるほど低下した(図—2)。実際に本研究で、FACE内のイネの葉の光合成速度を測定したところ、光合成のアクリメーション(高CO<sub>2</sub>濃度下で生長した植物の光合成速度が、外気CO<sub>2</sub>濃度で生長した植物のそれよりも低下する現象)が、生育の早い段階(幼穂形成期以前)には見られないが、後期の止め葉では明らかに見られた。また穂のバイオマス量は窒素肥料が多いほど増えるが、高CO<sub>2</sub>濃度の効果は窒素量によって異なり、窒素量が少ないと穂のバイオマス量はほとんど増えなかった。(図—3)。

本研究の結果では、約200ppmVのCO<sub>2</sub>濃度上昇によるコメ収量の増加は、4-21%の範囲にあったが、それらを固定した値と考えないほうが

【土壌プロセスの変化】 FACE 実験の結果、高 CO<sub>2</sub> 濃度はイネだけでなく、土壌及び水中の生物プロセスにも影響することが分かった。高 CO<sub>2</sub> 濃度では、土壌微生物量や藻類・ウキクサが増え、土壌表層の窒素固定活性が高まり、田面水が CO<sub>2</sub> のソースからシンクになる場面が観察された。また、水田土壌からのメタン放出量は、FACEで40-50%多かった。高 CO<sub>2</sub> 濃度により、植物への炭素取り込みが増え、根のターンオーバーや根分泌物による炭素供給量が増加したためだろう。ただし、土壌表層の藻類の増加で、メタン酸化も促進しているだろうから、メタン生成自体はもっと増えているかも知れない。Rice FACE で観察された、こうした炭素・窒素の流れの変化は、水田だけでなく湿地生態系の物質循環やメタン生成・放出に、CO<sub>2</sub> 濃度上昇が影響することを示している。



図—3 イネの穂のバイオマス量に及ぼす高 CO<sub>2</sub> 濃度と施肥窒素量の影響

【病害の変化】 イネにとって最大の病害の一つであるイモチ病に対して、イネの側の感受性が CO<sub>2</sub> 濃度上昇で変化すると想定する理由は2つある。まず窒素濃度が低下すれば感受性は低下する。一方蒸散量の減少に伴って、葉のケイ酸濃度が低下すれば、感受性は逆に高まる。FACE 実験の結果では、窒素濃度もケイ酸濃度も、ほぼ予想通りの変化を示した。イモチ病への感受性はどちらかといえば高まる方向だったが、必ずしも一定していなかった。一方、もう一つの重要な病害である紋枯れ病の発病株率は、FACE で 2-3 倍に増加した。イネの茎数が増えると同病の菌核が植物体に付着しやすくなり、発病株が増加することが知られており、高 CO<sub>2</sub> 濃度による茎数増加が発生を促したものと考えられる。

【植物群落の熱収支と微気象の変化】 個葉スケールでは、高 CO<sub>2</sub> 濃度下で気孔が閉じるために、蒸散量は減り葉温は上がる。FACE による群落スケールでの観測では、群落表面温度は1℃程度上昇、群落蒸発散量は数%–10%減少した。また、群落内の湿度はやや低下した。こうした微気象の変化は、イネの発育や病害発生に少なからず影響した可能性がある。

【モデリング】 既存の多くのイネ生長プロセスモデルは、光合成すなわち炭素の同化に偏っており、CO<sub>2</sub> 濃度上昇に伴う炭素・窒素同化のインタラクティブな変化を適切に扱えるモデルは見あたらなかった。そこで本研究では、比較的単純ながらも土壌中の窒素動態と植物体の窒素吸収を定式化したモデル JAPONICA を用いて、FACE におけるイネの生長過程のシミュレーションを行った。現在、本研究で用いた品種「あきたこまち」の生長パラメータを決定し、外気 CO<sub>2</sub> 濃度下での生長をシミュレートする段階である。今後このモデルによって、バイオマスの生長や窒素吸収、光合成といったプロセスについての個別の観測結果を、統一されたシステムの挙動としてとらえることができるものと期待している。

## 2.2 主な発表論文（レフェリード・ジャーナルのみ）

### 2.2.1 New Phytologist（2001年5月発行予定）

Free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) with pure CO<sub>2</sub> injection: system description (Okada, M., M. Lieffering, H. Nakamura, M. Yoshimoto, H.-Y. Kim, and K. Kobayashi)

ブローワーを使わずに純 CO<sub>2</sub> を直接大気中に放出する FACE 装置を開発し、性能を評価した。その結果、FACE 実験地では平均 0.8 m s<sup>-1</sup> と相当低風速であったが、装置は所要の性能を発揮した。ただし、風速が 0.3 m s<sup>-1</sup> の場合には FACE リング中心と周辺との間に、やや大きな CO<sub>2</sub> 濃度の勾配が生じた。

### 2.2.2 New Phytologist（2001年5月発行予定）

Growth and nitrogen uptake of CO<sub>2</sub>-enriched rice under field conditions (Kim, H.-Y., M. Lieffering, S. Miura, K. Kobayashi, and M. Okada)

高 CO<sub>2</sub> 濃度に対するイネの生長・収量と窒素吸収の応答を、窒素施肥量 3 段階の下で調べた。その結果は、CO<sub>2</sub> 濃度上昇によるイネの収量増加が主にモミ数の増加によること、モミ数の増加は幼穂形成期の窒素量によることを示した。つまり、CO<sub>2</sub> 濃度上昇は初期生長を促進し、それに伴って窒素吸収を促進する結果、シンクサイズ（モミ数）が増え、増収につながるものと考えられた。

### 2.2.3 New Phytologist（2001年5月発行予定）

Effect of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on CO<sub>2</sub> exchange at the flood-water surface in a rice paddy field (Koizumi, H., T. Kibe, S. Mariko, T. Ohtsuka, T. Nakadai, W. Mo, H. Toda, S. Nishimura, and K. Kobayashi)

水田の水表面での CO<sub>2</sub> の出入りを、FACE 実験区内に設置した小型ガス交換チャンバーで測定した結果、外気 CO<sub>2</sub> 濃度下では日中・夜間通して水は CO<sub>2</sub> を放出したのに対して、FACE では夜間は放出、日中は吸収となった。この違いは、FACE 区でウキクサと藻類の生長が促進され、それらの光合成が水表面での CO<sub>2</sub> の流れを変えたためであった。

### 2.2.4 New Phytologist（2001年5月発行予定）

Rice carbon balance under elevated CO<sub>2</sub> (Sakai, H., K. Yagi, K. Kobayashi, and S. Kawashima)

CO<sub>2</sub> 濃度上昇がイネ群落の炭素収支に及ぼす影響を、植物生長・ガス交換チャンバーを用いて測定した結果、光合成・呼吸ともに高 CO<sub>2</sub> 濃度で増加し、差し引きの炭素固定量も同じく増加したが、増加率は生育初期の約 30% から出穂期の 0% まで、明らかに低下した。葉への窒素分配の減少、出穂後の葉面積の減少等が、こうした変化の原因だろう。

### 2.2.5 Biology and Fertility of Soils（2001年発行予定）

Effects of elevated CO<sub>2</sub> on biological nitrogen fixation, nitrogen mineralization and carbon decomposition in submerged rice soil (Cheng, W., K. Inubushi, K. Yagi, H. Sakai, and K. Kobayashi)

CO<sub>2</sub> 濃度上昇がイネ群落土壌の窒素固定、窒素無機化、炭素分解に及ぼす影響を、植物生長・ガス交換チャンバーを用いて測定した。その結果、高 CO<sub>2</sub> 濃度によって土壌の窒素・炭素のターンオーバーが促進され、また土壌のメタン生成能が高まった。

### 2.2.6 Agronomy Journal 92: 345-352 (2000)

Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components (Kobayashi, K. and M. U. Salam)

理論モデルによる推定値と観測値を比較する際に、平均偏差平方和と相関係数がしばしば用いられるが、この二つは想定している対立仮説が異なるため、同時に用いるのは適切でない。モデルと観測との直接比較には、平均偏差平方和を「バイアス」、「変動の大きさの差」、「変動パターン」の差」をそれぞれ表す 3 要素に分け、それぞれを比較した方が、解釈が単純明快である。なお相関係数は、「変動パターン」の一要素として含まれる。