

CO₂ 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 CO₂

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 世紀半ばの産業革命以前は、大気中の CO₂ 濃度は約 280ppmV (1 ppmV は体積比率で百万分の 1) でほぼ一定であった。その後上昇し始め、最近では約 15ppmV/10 年の増加速度で、1998 年現在 360ppmV に達している。CO₂ 濃度のこの急激な上昇は、化石燃料の燃焼、セメント製造、森林伐採等の人間活動が原因であり、今後の CO₂ 濃度の推移も人間活動からの CO₂ 排出量に依存する。現在考えられる CO₂ 排出シナリオのうち中位の推定では、21 世紀の半ばに約 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、本プロジェクトの目的である。

CO₂ 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、その結果が現実にも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、人間活動その他の影響を受けるからである。従って、大気 CO₂ 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、CO₂ 濃度の上昇でどう変化するかを、FACE (開放系大気 CO₂ 増加) 実験で調べ、モデルにより予測しようとする。

FACE は Free-Air CO₂ Enrichment の略で、実験フィールドにビニール等の囲いを一切せず、高濃度の CO₂ を直接放出することにより、植生の近辺の CO₂ 濃度を高める方法である。いわば未来の高 CO₂ 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、現在知る限り 11 (アメリカ 6、ヨーロッパ 3、日本 1、ニュージーランド 1) 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、イネを対象とする世界で唯一の FACE である。

1996 年のプロジェクト開始以来、実験場の整備と FACE 装置の開発を進め、ようやく 1998 年に最初の FACE 実験を岩手県雫石町で行うに至った。以下、現在までに完成した FACE 装置の概要と性能、そして実験結果の一部を紹介する。なお、ここで示す結果はどれも未だ解析途上であり、各担当者が論文として公表する際には、内容に多少の変更があり得ることにご留意願いたい。

2. 現在までの成果

2.1 成果の要約

【FACE 装置の開発】 世界の他の FACE では、CO₂を一たん空気希釈し、それを送風機でパイプから吹き出して CO₂濃度を高めている。ところが最近、この方式は FACE の目的に反して、植物の生長に影響することが分かってきた。多量に空気を吹き込むために、夜間無風時の植物体の温度が上がるのである。そこで本プロジェクトでは、100%の CO₂ガスを直接空気中に放出する、純 CO₂放出型の FACE 装置を開発した。この方式の送風量は従来型の 1/100-1/1000 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高速で噴き出された CO₂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 CO₂を放出する。放出量は、リング中心の CO₂濃度が目標値に近づくよう自動制御する。1998 年の FACE 実験では、FACE リングを 4 つ (A-D) 設置し、外気+200 ppm を目標として制御を行った。FACE リング中央部の CO₂濃度と風速の日変化

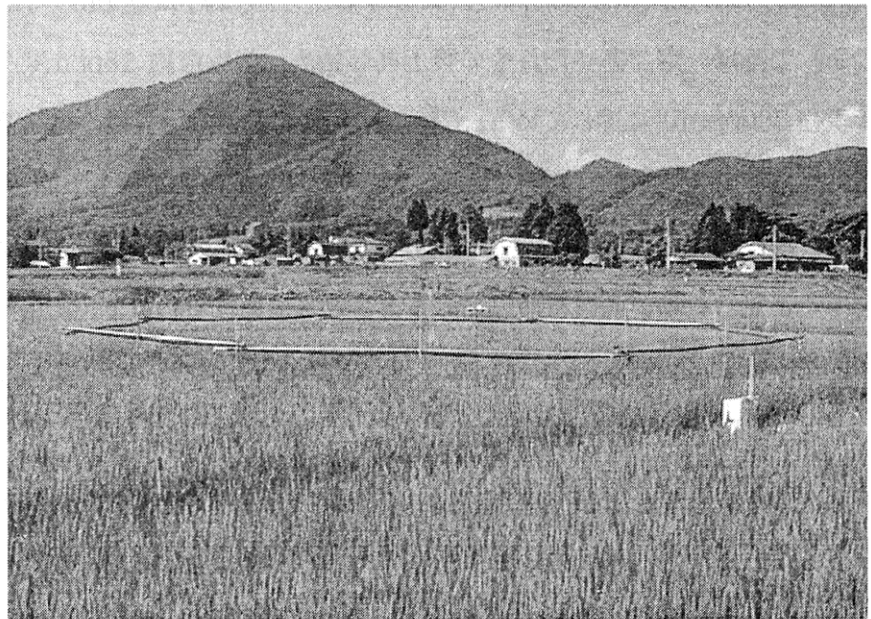


図-1 岩手県雫石町の水田に設置したFACEリング

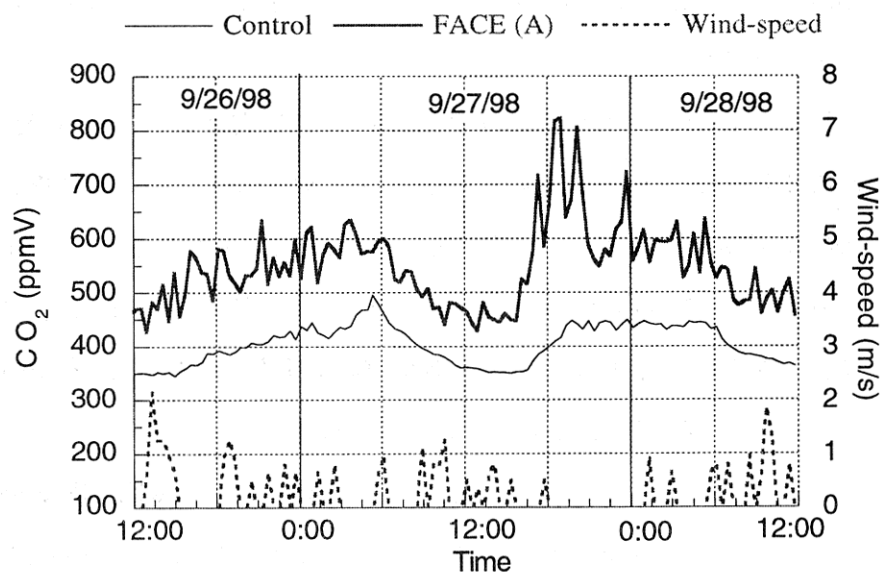


図-2 FACEリング (A) における、1998年9月26日からまる 2 日間の CO₂濃度と風速の変化

を、図-2に例示する。

各FACEリング中央での日中CO₂濃度の実験期間中平均値を、目標値の平均569ppmVと比べると、555(A)、583(B)、568(C)、603(D)ppmVと、-3~+6%の誤差であった。夜間CO₂濃度の制御精度は、日中よりもやや低かった(誤差+2~14%)。

リング中央でのCO₂濃度の時間的変動を解析したところ、日中の1分間平均CO₂濃度は80-90%の確率で目標値(外気CO₂+200ppmV)の20%以内であった。夜間のCO₂濃度も、Dリング以外は80%以上の確率で20%以内にあった。これは、1996年にデューク大学で開かれたFACEワークショップで提案された、FACEにおけるCO₂濃度制御の基準を満たしていた。

一方、リング内の場所によるCO₂濃度の違いを、群落高さにおいて各リング12地点、合計48地点で調べたところ、37地点で目標値から10%以上ずれてしまい、先のFACEワークショップで示された基準を満たすことはできなかった。ただし実験期間の最後の約1カ月間に、改良したCO₂放出量制御ロジックを用いたところ、地点間の変動が激減し48地点中45点で10%以内を実現した。制御パラメータを最適化すれば、これ以上の性能が期待できるので、1999年以降の実験では、空間的変動についても基準を満たせる見通しである。

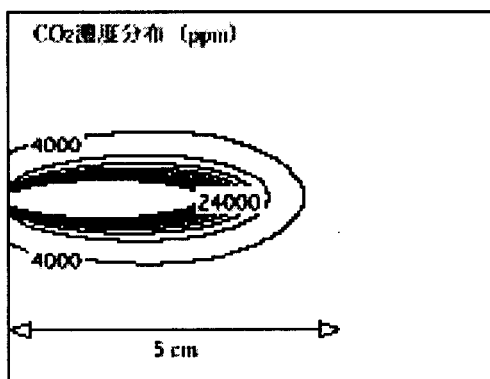


図-3 放出孔から高速で噴き出されたCO₂の濃度分布(ppmV)

こうした実測データの解析に加え、数値流体力学によるコンピュータ・シミュレーションで、純CO₂放出型FACEにおけるCO₂の拡散を解析した。その結果、放出孔からわずか5cmの距離で、CO₂濃度が4000ppmV(つまり1/250)程度に希釈されること(図-3)、放出孔が4cm間隔で分布していても、6cm程度離れると空間的に一様なCO₂分布が得られること等が分かった。このことから、送風機無しでもCO₂を空気と速やかに混合でき、十分に均一なCO₂濃度分布を実現できると考えられた。

【FACE実験の概要】 1998年のFACE実験は、次のとおりであった。東北農業試験場の温室で育てた水稻品種「あきたこまち」の苗を、5月21日に雫石町のFACE水田に植え付けた。FACE区の苗は外気よりも200ppmV高いCO₂濃度で、対照区の苗は外気と同じCO₂濃度で、それぞれ育てたものである。FACEリング内のCO₂濃度は、6月1日から10月始めの収穫まで、昼夜連続で、外気よりも200ppmV高い濃度に制御した。イネの栽培は、できる限り現地の農家の方法に沿って行った。RiceFACEプロジェクトの目的は、CO₂濃度が上昇するとイネの生長と水田生態系で、何が変化し、何が変化しないかをできるだけ多く明らかにすることである。そのた

め雫石町のFACE水田には、農学だけでなく実に様々な分野の研究者が訪れて、イネや水田の変化を捉えようとした。私たちは、地元の農家から水田を借用してFACE実験をしているが、農家の皆さんには奇妙と思われる研究も、少なくないことだろう。表—1に、1998年のFACE実験の研究課題と、研究責任者をリストアップした。屋外の実験であり、全部の研究がねらい通りいくとは限らないし、うまくいってもCO₂濃度の影響が無いこともある。が、ネガティブな結果も、それはそれで貴重な研究成果である。

表—1 1998年のFACE実験における主な研究課題と研究担当者

| 研究課題 | 研究責任者 |
|----------------|------------------------|
| FACE装置開発 | 岡田益己(東北農試) |
| イネの生長と収量 | 金 漢龍(CREST-東北農試) |
| 葉面積の生長 | 小林和彦(農環研) |
| 分けつと葉の出現パターン | 後藤雄佐(東北大) |
| 炭水化物の蓄積・転流 | 黒田栄喜(岩手大) |
| 個葉光合成 | 山岸 徹(東大) |
| 群落光合成 | 寺尾富夫(北陸農試) |
| 光合成産物の転流 | 佐々木治人(東大) |
| 他品種 | 黒田栄喜(岩手大)・寺尾富夫(北陸農試) |
| 窒素の吸収と分配 | 三浦 周(農環研) |
| 生態系の中の炭素の流れ | 小泉 博(岐阜大) |
| 土壌炭素プール | マーク・リーフリング(CREST-東北農試) |
| 施肥窒素の流れ | 戸田任重(信州大) |
| 群落微気象 | 吉本真由美(農環研) |
| イモチ病罹病性 | 中島 隆(東北農試) |
| 土壌と植物体の養分含量 | 三枝正彦(東北大) |
| 土壌微生物とメタン生成・放出 | 犬伏和之(千葉大) |
| 昆虫 | 河部 暹(東北農試) |
| イネ生長モデリング | モイン・サラム(CREST-農環研) |

【主な実験結果】 現在までに解析が進んだ実験結果を、箇条書き風に記す。こうした個々の変化をつなぎ合わせて、イネの生長と生態系に生じる変化の全貌を理解するのは、これからである。

収量： 対照区のもみ収量は5.94 t/ha、FACE区のもみ収量は6.87 t/haと、FACEで約16%の収量増となった。もみ収量の増加はもみ数の増加(+15%)とほとんど平行で、それには穂数の増加(+12%)が最大の要因だった。玄米収量の変化は、もみ収量と同様であった。

イネの生長量： 出穂期の乾物重は、対照区に比べてFACE区で、穂が33%、葉鞘+稈が24%、根は13%それぞれ増加したが、葉身の乾物重はほとんど増加しなかった(+6%)。高CO₂での葉面積の増加はごくわずかで、しかも出穂前の期間に限られていた。FACEによる穂や葉

鞘+稈の重さの増加は、出穂後縮小し収穫期には10%となった。代わりにFACEによる根の乾物重増加が、収穫期には27%に拡大した。

形態：こうした重量の変化は植物体の形態的变化を伴い、FACEにより茎数は10-12%、根数は16%増加した。葉面積や葉身重の増加が茎数の増加に及ばないことから、葉の数や大きさの減少が示唆された。稈はFACEで太くなった。

光合成・蒸散：イネの生長量の変化は、生長プロセスの変化の結果である。出穂期の個葉光合成・蒸散測定の結果、FACEにより光合成が促進され、蒸散は抑制されることが確かめられた。また、光合成のダウンレギュレーションが示唆された（高いCO₂濃度で育てた植物の光合成能力が、通常の植物のそれよりも低下する現象を光合成のダウンレギュレーションという）。

品質：FACEにより、コメのタンパク含量は少し低下し、粘りはわずかに増加した。どちらも、コメの食味が良くなる方向への変化だが、変化率は小さく、官能検査での食味に変化は無かった。

他品種：リング内の一部に、あきたこまち以外の3品種（ふくひびき、奥羽342号、岩南7号）を植えて、CO₂増加の影響の品種間差を予備的に調べた。あきたこまちも含めた4品種の比較では、FACEによるモミ収量の増加は4品種間とも9-12%で、大差無かった。なお、FACE実験を補完する目的で、より高精度の計測・制御が可能なチャンバーを用いた実験も行った。FACEと同等の高CO₂濃度で育てた品種「日本晴」は、茎数が増え、モミ収量が22%増加するが、葉面積は減少した。高CO₂では上位の葉が小さく、全葉数も少なかった。

窒素の動き：¹⁵Nをトレーサーとして解析した。FACEにより、窒素の土壌と植物への分配比率は大きく変化しないが、植物体内では窒素が葉鞘や稈により多く分配された。また植物体の炭素/窒素比率はFACEで上昇した。つまり炭素が相対的に多くなった。

微気象学的測定：イネ群落の熱収支に及ぼすFACEの影響を調べた。昼間は葉温がFACEで約1°C高いが、夜間の差は0.5°C以下だった。蒸発散量はFACEで約10%少なかった。

土壌微生物：FACE内の土壌微生物中の炭素は増加、窒素は減少傾向にあった。土壌の酸化還元電位はFACE区でより低い傾向があり、メタン生成量増加の可能性が窺えたが、チャンバー法で測ったメタン放出量に明らかな差は無かった。

イモチ病：FACE水田で、イモチ孢子を人工接種した結果、FACE区のイネがイモチ病にかかりやすい傾向があった。また出穂後にはほ場で自然発生した穂イモチは、FACE区で明らかに発病程度が高かった。

珪酸含量：葉身の珪酸含量は、FACE区が対照区の約85%に低下していた。珪酸含量の低下はイモチ病罹病性の増加の一因であり得る。なお、珪酸含量の減少は、蒸散量の減少と関連づ

けられる。

昆虫：FACE ほ場で昆虫の数と種類を観察したところ、高いCO₂濃度に誘引されるアブ・ブユ類は明らかにFACE区で多いが、それ以外の種類については、違いは明らかでなかった。

2.2 発表論文等

① 提出先 Proceedings of the International Symposium: World Food Security and Crop Production Technologies for Tomorrow, pp. 195-197.

② 論文名 ‘The Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) with Rice in Japan’

著者名 Kazuhiko Kobayashi, Masumi Okada and Han-Yong Kim

③ アブストラクト

イネについて世界初の開放系大気CO₂増加(FACE)実験を、1998年に岩手県雫石町で開始した。同実験の特徴の一つは、純CO₂放出型のFACE装置を新たに開発したことである。これにより、既存のFACEでみられるアーテファクトの影響を無視できる。1998年のFACE実験で、CO₂濃度の制御状況を解析したところ、所定の基準をほぼ満たしていた。イネの生長はFACEによって概ね増加したが、影響の程度は器官により、生育時期により異なった。

3. 今後の研究方向

ほ場実験は気象の影響を直接受けるので、信頼できる結論を得るためには、少なくとも3年間の繰り返しが必要である。それゆえ、品種や栽培法など基本的には同一のFACE実験をさらに2年間繰り返す予定である。なお1998年には、窒素施肥量を変えた小区画をリング内に設けたが、同様に他の要因を小規模に組み込んで、CO₂増加の影響がそれにより変化するかどうか調べる。

この3年間に特別な異常気象に見舞われなければ、イネの生長と収量に及ぼすCO₂増加の影響について、ある程度一般化できる結果が得られるだろう。冷夏などの異常気象が高CO₂の影響をどう変化させるかは、大変興味ある問題だが、そのためには3年間は短すぎる。

プロジェクトで知りたいのは、21世紀半ばの雫石町のコメ生産ではなくて、世界中のコメ生産と生態系の変化である。このために当プロジェクトでは、FACE実験データを利用して、イネの生長プロセス・モデルを開発・改良する。現在、世界の主なイネ生長モデルを収集しつつあり、まず1998年のFACE実験データを用いてそれらのモデルをチューニングし、1999・2000年のデータで検証する。

Rice FACEの実験結果は、プロジェクト終了後は公表されたデータとして世界中で広く利用されるようにしたい。そのために、互換性あるフォーマットでのデータの管理を進めている。現在インターネット上にウェブ・サーバーを置いて、プロジェクト共通データの共有に利用している。今後、ホームページの開設も含めて世界から良く見えるプロジェクトにしていくつもりである。