総 説

FACE (開放系大気 CO₂ 増加) 実験

小林和彦*

(農業環境技術研究所)

要旨: FACE (Free-Air CO₂ Enrichment = 開放系大気 CO₂ 増加) は、何の囲いもしない圃場の空気中に直接 CO₂ を吹き込んで、植生の周りの CO₂ 濃度を高める実験手法である。FACE により、大気 CO₂ 濃度が上昇した時の植物や生態系の変化を、現実の圃場で観察できる。1987 年にアメリカで始まった FACE は、今ではアメリカとヨーロッパを中心に世界中で、農作物、牧草、樹木、自然植生を対象にした研究に用いられており、日本でもイネの FACE 実験が 1998 年から行われている。大気 CO₂ 濃度の上昇が植物に及ぼす影響については数多くの研究があり、初期の温室や環境制御チャンバーでのポット実験から、近年のオープントップチャンバー等のフィールドチャンバー実験に至っているが、いずれもチャンバー自体が植物の生長を変化させ (チャンバー効果)、それが CO₂ 濃度上昇に対する植物の応答を変化させている可能性がある。これに対して FACE は、チャンバー効果が無い上に、大面積の圃場を高 CO₂ 濃度に行える特長があり、今や実用的な実験手法として確立しつつある。FACE 実験の結果は、農作物の収量増加率については従来の実験結果をほぼ支持しているが、さらに収量増加に至る生長プロセスの変化やメカニズム、生態系の変化について、多くの新しい研究成果を生み出しつつある。今後は、FACE 実験結果のモデリングへの利用、複数地点での FACE 実験実施と実験結果の比較解析、そして特に発展途上国での FACE 実験の展開が期待される。

キーワード: CO₂, チャンバー効果, 二酸化炭素, フィールドチャンバー, FACE, フェイス。

1. FACE との出会い

はじめに個人的な話であるが、私は 20 年ほど前、大気汚染物質のオゾンが野菜の生長に及ぼす影響の実験をしていた。オゾン濃度を制御した自然光型グロースチャンバーで、ポット植えのキュウリを育てて、オゾン濃度と収量の関係を調べるのであるが、チャンバー内のキュウリの生長と、外の畑のそれが全く違うことで思い悩んでいた。先輩に相談したら、「チャンバー同士で比べて、対照区とオゾン区の収量の相対的な変化が分かればいいんだから、気にすることは無いんじゃないの」と言われた。一応納得したが、心の中に引っかかるものが残った。

その後、グロースチャンバーから少し実際の圃場に近づいて、水田に設置したチャンバーでオゾンの実験をしていたが、1988 年にアメリカのフロリダ州ゲインズビルにある農務省農学・生理学研究室を訪ねる機会を得た。そこで Dr. L. Hartwell Allen, Jr. から、ミシシッピでワタの圃場に二酸化炭素 (CO₂) を直接放出する実験をしているという話を聞いた。これが FACE (フェイス) との出会いだったが、最初は何の事か見当もつかなかったし、分かった後でも、アメリカには途方もない事をする人がいるものだった。それでも強く印象に残ったし、FACE についてその後も関心を持ち続け、結局自分でも FACE 実験をやるようになったのは、以前にグロースチャンバー実験に抱いた違和感があったせいではないかと思う。

FACE は Free - Air CO₂ Enrichment の略で、私は

「開放系大気 CO₂ 増加」と訳している。圃場に何も囲いをせず、空気中に直接 CO₂ を吹き込んで、植生の周りの CO₂ 濃度を高める実験方法である。第 1 図に、私たちが岩手県雫石町の農家水田に設置した FACE 装置を示す (Kobayashi ら 1999)。イネの群落上に、8 本のプラスチック・チューブ (長さ 5 m) を、差し渡し約 12 m の正 8 角形状に設置し、風上側のチューブから CO₂ を吹き出す。CO₂ は風で運ばれつつ空気と混ざるので、8 角形の中の CO₂ 濃度は外よりも高くなる。リング中央の風向・風速と CO₂ 濃度を常にモニターし、吹き出す CO₂ の量をコンピュータで制御して、リング中央部の CO₂ 濃度を約 200 μ mol mol⁻¹ 高く保つ。プラスチックチューブ以外は普通の水田なので、そこで生じるイネの生長や生態系の変化は、実際に大気 CO₂ 濃度が上昇した時の変化をほぼ表しているはずである。つまり FACE によって、将来の大気 CO₂ 増加が農作物や陸上の植生・生態系にどう影響するかを、圃場で実際に観察できるのである。

FACE は最初「Free air stream CO₂ enrichment」として、イスラエルの Herbert Z. Enoch が、アメリカでの国際会議で 1982 年に提唱したものだという (Allen 1992)。その後、アメリカエネルギー省によるフィージビリティ・スタディを経て、1986 年に FACE 装置のプロトタイプが完成した。1987 年には、Brookhaven 国立研究所が開発した世界最初の FACE 装置が、ミシシッピ州のアンモニア工場近くのワタ畑に設置され、1988 年までの 2 年間実験が行われた (Allen 1992)。

第1図 岩手県雫石町の農家水田に設置されたFACEリング。差し渡し約12mの8角形状で、イネ群落上約0.5mに設置され、黒いチューブからCO₂が放出される。遠景に見える2つの白い円筒は、液化CO₂貯蔵タンク（合計容量23トン）。

液化CO₂の価格は大部分が輸送コストであり、その低減を図ってアンモニア工場の近くにFACEを設置したのだが、やってみると「CO₂を実験場に運ぶよりも、研究者を実験場に運ぶほうが大変」なことが分かった（Allen 1992）。実験場へのアクセスが不便で、近くに関連研究施設も無く、要するに研究にならなかったのだろう。それで、ミシシッピでの実験は2年間で中止され、FACE実験は1989年から、アリゾナ州フェニックス近郊にあるアリゾナ大学の圃場に移動した。同地では1991年までワタのFACE実験が実施され（Dugas and Pinter 1994）、その後1993年から1997年にかけてコムギの（Kimballら1999）、そして1998—1999年はソルガムの、それぞれFACE実験が行われた。それらの実験の間では、対象作物以外にFACE処理方法も多少異なり、例えばワタの実験では1日の処理時間は日中14時間のみだったが、その他の実験では24時間連続であった。しかし日中のCO₂濃度は、いずれも概ね550 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ （つまり現在のCO₂濃度から180 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 増加）であった。このような違いは、以下に紹介する世界の他のFACEでもあるが、多くのFACEで日中のCO₂濃度は550–600 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ である。

アリゾナのFACE装置の概要は、Lewinら（1992）及びHendreyら（1993）が報告している。彼らのFACE装置は直径25mのリング形で、第1図に示した日本のFACEの約2倍である。CO₂の吹き出し口も、第1図のFACEよりずっと大仕掛けで、リングは直径0.3mくらいのダクトでできており、大型のプロワーが1基接続している。プロワーの空気取り入れ口にCO₂を放出すると、外気とともに吸い込まれて空気と混合され、リング・ダクトに送られる。ダクトの全周に沿って32本の鉛直パイプ（高さ約2.5m）が連結されており、各鉛直パイプにはリングの内側に向かって空気放出口が開いている。高CO₂濃度の空気は、風上側の鉛直パイプの放出口から植物群落上に放出される。このFACE装置のCO₂濃度制御性能は高く、CO₂濃度の設定値が550 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ の時に、1分間平均CO₂濃度は90%以上が目標値の±10%以内に入り、同じく±20%以内には99%以上が入った（Nagyら1994）。

また1992年には、スイスチューリッヒ近郊のEschikonに、スイス連邦工科大学（ETH）のJoseph Noesbergerらによって直径18mのFACEリングが設置された（Hebeisenら1997）。FACE装置は、アリゾナと同様

Brookhaven 国立研究所が設計・製作したものである。それ以来、シロクロバやペレニアル・ライグラス等、牧草類の生長や土壌プロセスの変化について継続的な実験が行われ、興味深い研究成果が後記のように多数報告されている (例えば Daepf ら 2000)。

1993 年に、アリゾナとスイスの FACE 装置を開発した Brookhaven 国立研究所の George Hendrey らは、今度アメリカノースカロライナ州のデューク大学にある、10 年生のテーダマツ (*Pinus taeda* L.) 植林地で、森林用の FACE 装置の開発に着手した。装置の開発は 1995 年に完了し (Hendrey ら 1999)、1996 年から本格的に実験を開始、最近論文が出始めている (例えば Naidu and Delucia 1999, Ellsworth 1999)。樹木の FACE は、他にも 1997 年からウィスコンシン州 Rhinelander の近くで、ヨーロッパヤマナラシ (*Populus tremuloides* Michx.) を用いて、CO₂ とオゾンの両方を組み合わせた大規模な FACE 実験が行われている (Karnosky ら 1999)。また、テネシー州の Oakridge 国立研究所では、落葉広葉樹のモミジバフウ (*Liquidambar styraciflua*) の植林地で FACE 実験が進められている。

一方 1997 年から、アメリカネバダ州 Mercury 近郊の砂漠地帯で、やはり Brookhaven 国立研究所の FACE 装置による実験が開始された (Jordan ら 1999)。それまでの FACE と異なり、これは人為的攪乱の無い自然生態系での FACE である。また、ミネソタ州 Cedar creek 自然史研究地域では、植物の種多様性の実験と組み合わせた、興味深い FACE 実験が行われている。

FACE 実験の展開では、このようにアメリカが先行しているが、ヨーロッパでもスイス以外に幾つかの FACE プロジェクトが実施されている。特にイタリアは独自の FACE 装置を開発して、コムギ (Miglietta ら 1996)、バレイショ (Miglietta ら 1997, Miglietta ら 1998)、ブドウなどについて、中部イタリア Siena 近くの Rapolano Terme で FACE 実験を展開している。特に超短稈のコムギ品種を用いた FACE 実験では、一辺 1 m という極めて小さい FACE 装置を開発した (Miglietta ら 1996)。その他、ドイツの Braunschweig 及び Giessen でも FACE 実験が始まっている。またニュージーランド北島 Palmerston North 近くの Bulls では、Paul Newton らが牧草地で FACE 実験を進めている。FACE リングの中に羊を放牧していることが特徴で、彼らの FACE 実験地の写真を見ると、リングの中に点々と白い羊たちが見える (小泉ら 2000)。

日本では私たちが、科学技術振興事業団の戦略的基礎研究で 1996 年から 2000 年まで、Rice FACE プロジェクト (正式名称: CO₂ 倍增時の生態系の FACE 実験とモデリング) を進めてきた。同プロジェクトでは、岩手県雫石町の農家水田に FACE 装置 (第 1 図) を設置して、1998 年から 3 年間実験を行った (Kobayashi ら 1999)。イネにつ

いて世界唯一の FACE であり、研究結果が出版され始めたところである (Kobayashi ら 2001, Kim ら 2001, Okada ら 2001)。

世界の FACE 実験や FACE 装置の詳しい情報は、アメリカテネシー州の Oakridge 国立研究所に所在する、CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) の FACE ホームページ (<http://cdiac.esd.ornl.gov/programs/FACE/face.html>) で見ることができる。FACE は現在も世界中に広まりつつあり、例えばイリノイ大学の Steve Long らは、ダイズのための FACE 施設を現在建設中である。またインドでは 2000 年 2 月に、イタリアの Franco Miglietta のデザインによる直径 8 m の FACE リングを一基設置して、テストを始めた。南アジア各国 (インド、パキスタン、バングラデシュ他) の共同研究プロジェクトとして、イネ・コムギ作付体系において高 CO₂ 濃度環境に適応した品種の開発を主目標としている。アジアでは日本に次いで 2 番目の FACE だが、自然と農業の多様性を考えると、アジアの他地域でも同様な実験が必要である。私自身、世界最大のコムギ生産国である中国での FACE をめざして、現在準備を進めている。

さて、FACE は圃場の CO₂ 濃度を人為的に高めるが、炭酸泉などの近傍で高濃度の CO₂ が地上に噴出し、周辺の空気中の CO₂ 濃度が自然に高くなっている場所がある。これらを CO₂ 泉と呼ぶが、いわば天然の FACE である。放出源からの距離と風速に依存して、CO₂ 濃度が空間的・時間的に大きく変動したり、CO₂ 以外に植物に有害なガス: H₂S や SO₂ が共存する場合があるといった問題点はあるものの、FACE には無い大きな特長がある。それは、CO₂ 泉の周囲は極めて長い期間、高い CO₂ 濃度下にあったことである。その結果、生態系のゆっくりした変化、例えば植生や土壌微生物の種組成の変化や、土壌中の炭素・窒素量の変化が生じているものと期待される。世界では、イタリアで CO₂ 泉を利用した研究が進んでいるが (Raschi ら 1997)、他にニュージーランド (Newton ら 1996) やアイスランド (Cook ら 1998) でも、研究への利用が図られている。研究成果を記す余裕は無いが、例えば CO₂ 泉の近傍と対照区とでは、土壌中の線虫の種組成が違う (Yeates ら 1999) といった興味深い結果が得られている。日本でも単純炭酸泉や含炭酸泉・土類泉は数多く、CO₂ 泉を利用した研究の展開が期待される (Cook ら 2000)。

2. 大気 CO₂ の増加と植物

2-1. 大気 CO₂ の増加

このように FACE 研究が盛んになったのは、大気 CO₂ 濃度が急速に上昇しつつあり、それが植物や生態系に大きな影響を及ぼすと懸念されるからである。大気中の CO₂ 濃度は 3 億年以上昔の古生代には、2000-3000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ という高い値だったが、中生代の終わりとともにゆ

つくりと低下したという (Budyko ら 1989). そして約 2-5 万年前の氷河期には, $180-200 \mu\text{mol mol}^{-1}$ に低下したが, 約 1 万年前に氷河期が終わる頃には $280 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 前後まで上昇した (Schlesinger 1997). その後, 大気 CO_2 濃度は $270-280 \mu\text{mol mol}^{-1}$ で推移していたが, 18 世紀半ばの産業革命開始とともに上昇を始めた. 特に 20 世紀後半の上昇は急激で, この 50 年間に約 $60 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 上昇し, 現在は約 $370 \mu\text{mol mol}^{-1}$ である. このような大気 CO_2 の増加は, 化石燃料の燃焼や森林伐採といった人間活動からの CO_2 放出が原因であり (Houghton ら 1996), それを劇的に減らさない限り, CO_2 濃度は今後も上昇を続けるとされている (OECD 1999). 例えば何の削減努力もしなければ, 予想される大気 CO_2 濃度は 2050 年以前に $550 \mu\text{mol mol}^{-1}$ を超える. 産業革命以前の約 2 倍の濃度に達するわけである.

これに対して, 気候変動枠組み条約で 1997 年に定めた京都議定書は, 先進国の CO_2 放出量を 5-8% 削減することを目標としているが, それだけでは CO_2 濃度が $550 \mu\text{mol mol}^{-1}$ を超えるのを約 10 年遅らせるに過ぎない (OECD 1999). 現在 CO_2 放出量削減対象外である, 発展途上国からの放出量が今後増えるため, それらの国も含めた削減努力が不可欠である. そのために幾つかのアプローチが考えられているが, いずれにしても 21 世紀後半には $550 \mu\text{mol mol}^{-1}$ に達する, ないし近づく と推定される (OECD 1999). もちろん, 長期的には CO_2 放出量の削減は大きな意味があり, 何もしなければ 22 世紀末の CO_2 濃度が $2000 \mu\text{mol mol}^{-1}$ になるところを, 削減努力により $550 \mu\text{mol mol}^{-1}$ で安定させることもできるという. ただしその場合, CO_2 放出量を長期的に半減させるような厳しい措置が必要である (OECD 1999).

以上の議論は, 地球全体の炭素循環モデルの不確かさに加えて, 将来の経済発展や人口増加等について多数の仮定を含んでおり, 実際の大気 CO_2 濃度の推移は予想が難しいという. それでも, 長期的な対策として CO_2 放出量の削減を一層進める一方で, 今後 50 年くらいの間には CO_2 濃度が $550 \mu\text{mol mol}^{-1}$ に近づく と考えたほうが良いだろう. その時どんな変化が起きるか, それが人間や自然に大きなダメージを及ぼすことをどうしたら避けられるか, 今から対策を考える必要がある (Parry ら 1998, Pittock and Jones 2000).

2-2. 植物への影響

CO_2 は, 水蒸気とともに主要な大気温室効果ガスであり, その増加は地球大気の放射収支を変化させて, 平均気温の上昇や降水量の変化など全球的な気候変化を引き起こす (Houghton ら 1996). そうした気候変化が農業や林業, 自然生態系に影響を及ぼす一方 (Watson ら 1996), 大気 CO_2 の増加は植物に対して直接的に大きな影響を及ぼすと予想される.

高濃度の CO_2 が植物の生長に対して及ぼす影響につい

ては, すでに 100 年間以上研究されており, 膨大な数の論文が出版され, 総説も多数に上る. 例えば Kimball (1983) は, 農作物 (野菜と花を含む) の生長や収量への影響について, 70 以上の論文から, 430 以上の観測結果を抽出しており, そのうち量的な解析にたえる 81 の観測結果から, CO_2 濃度倍増時 (その当時で $330 \mu\text{mol mol}^{-1}$ から $660 \mu\text{mol mol}^{-1}$ へ) の平均的な収量増加率を, 28-39% (95%信頼区間) と見積もった. Cure and Acock (1986) も主要農作物について, 約 90 の研究論文から, CO_2 濃度倍増 ($340 \mu\text{mol mol}^{-1}$ から $680 \mu\text{mol mol}^{-1}$ へ) による光合成, 生長量, コンダクタンス, 収量などの変化をまとめた. それによると, バイオマス量は平均 30% 増, 収量は平均 41% 増であった. 邦文では, 農作物についての今井 (1988) の総説がある. 一方 Poorter (1993) は, 農作物に野生植物や樹木も含めて 89 の論文から, 生長促進率の高い栄養生長期について約 250 の観測例を抽出して, CO_2 濃度倍増により平均 37 % の生長促進が見られるとした. その他, 牧草については Newton (1991) の, また樹木については Saxe ら (1998) 及び Norby ら (1999) の総説がある. 小泉ら (2000) は, 草原生態系への CO_2 濃度上昇の影響をまとめている. また, 大気 CO_2 の増加は平均気温を上昇させると予想されるが, CO_2 と温度とのインタラクションについては, Morison and Lawlor (1999) が広範囲をカバーしている.

以上どの総説でも, CO_2 濃度が上昇すると生長量や収量が増加するとされている. この生長促進の原因は, 基本的には光合成促進と気孔閉鎖にある. このうち光合成促進は, 光呼吸の抑止と CO_2 固定効率の上昇による (例えば Lawlor and Mitchell 1991, Drake ら 1997). 光合成が促進される結果, 植物による炭水化物合成が増え, 生長も盛んになる. 高濃度 CO_2 は暗呼吸を直接的に抑制するが (Drake ら 1997), 個体の炭素収支に及ぼす影響はわずかだという (Amthor 2000). 一方, CO_2 濃度上昇による気孔閉鎖のメカニズムはなお未解明だというが (Jarvis ら 1999), 蒸散速度は低下し, 水利用効率が上昇するので, 水制約下では生長が促進される (Drake ら 1997). また CO_2 濃度上昇により, 気孔閉鎖とともに, 葉面積あたり気孔密度が低下することがある (van de Geijn and Goudriaan 1996). なお樹木では, CO_2 濃度上昇にともなう気孔閉鎖が見られないことも多いという (Saxe ら 1998, Ellsworth 1999).

CO_2 濃度の上昇で植物の生長が盛んになり, 農作物の収量が増加するのは, こうした生長プロセスの変化によるが, 原因と結果の関係は単純でない. たとえば炭水化物合成が盛んになるだけでは, 植物体に糖やデンプンが貯まってしまう. 増加した光合成産物が器官の生長に利用されてこそ, 個体の生長が促進される. そのため器官の生長に及ぼす養分供給量や気温の制約は, 高濃度 CO_2 による植物の生長促進を大きく左右する (Morison and Lawlor

1999, Stitt and Krapp 1999). また大気 CO₂ 増加による光合成促進は、温度が高くなるほど大きい (Long 1991). これは、温度が高くなると光呼吸速度が高まるが、高濃度 CO₂ はその光呼吸を抑止するためである. ところが CO₂ 濃度上昇による農作物の生長促進と気温の間には、光合成の促進から推定されるよりもずっと弱い関係しか観測されていない (Morison and Lawlor 1999, Nakagawa and Horie 2000).

一方、気孔閉鎖による蒸散量減少の結果、植物体の受けた日射エネルギーを潜熱で逃がす分が減るために、植物体温が上昇する. この結果、蒸散の駆動力である植物体内の水蒸気圧が上昇し、蒸散を促進する方向に働く (Kimball ら 1993, van de Geijn and Goudriaan 1996). また、光合成が盛んになって葉面積の拡大が促進されれば、植物個体あたりの蒸散量が増える一方で、土壌表面からの蒸発は抑えられる. 植物群落の蒸発散量は、気孔コンダクタンス以外に空気力学的拡散コンダクタンス (群落内での空気の拡散しやすさ) にも支配される. このように、気孔閉鎖は数多くの変化を引き起こし、他の要因の影響もあるので、大気 CO₂ 増加が植物群落の水利用、ひいては植物への土壌水分制約に及ぼす影響は、それら多くのプロセスに依存する (Field ら 1995, van de Geijn and Goudriaan 1996).

なお、トウモロコシやソルガム等の C₄ 植物は葉内に CO₂ 濃縮機構を持ち、光合成が現在の大気 CO₂ 濃度ではほぼ飽和しているので、CO₂ 濃度上昇による生長促進はあまり無いと想定されるが、実際には C₃ 植物と変わらない生長促進が見られる (Wand ら 1999, Ghannoum ら 2000). CO₂ 濃度上昇による気孔閉鎖は C₄ 植物でも生じるので、主にその結果だと考えられている (Ghannoum ら 2000). 特に、土壌水分制約により葉内の CO₂ 濃度が低下している場合には、CO₂ 濃度に対する光合成速度の応答が、C₄ 植物のほうが C₃ 植物よりも低濃度域でシャープであるため、CO₂ 濃度上昇による光合成の促進率が高い場合があることが、理論的に示されている (Jarvis ら 1999).

ところで前記のとおり、2000 年現在の大気 CO₂ 濃度は 370 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ と、産業革命以前よりも約 100 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 増加し、氷河期に比べればほぼ倍増したわけで、植物の生長と生態系にすでに大きな影響を及ぼしているはずである. 例えば過去の大気 CO₂ の増加に対応して、葉面の気孔密度の減少、水利用効率の上昇、葉の窒素濃度の減少が見られるという (Woodward 1993). 他方、CO₂ 濃度の上昇につれて逆に気孔が増加したとする報告もある (Atchison ら 2000). いずれにせよ、過去の CO₂ 濃度上昇の影響を解明することは、今後の CO₂ 濃度上昇の影響を予測する上で重要であり、今から 30 年後にはさらに重要な研究課題になっているかも知れない.

3. 実験方法の発達

3-1. 温室からフィールドチャンバーへ

前記のとおり、CO₂ 濃度上昇が植物に及ぼす影響については、100 年間以上にわたって膨大な数の研究がなされてきたが、以前の研究の多くは、CO₂ 濃度上昇の影響よりも、光合成の促進と農作物の生産性向上に主な関心があったように思われる (例えば村田 1962, 今井・村田 1976). 圃場での高濃度 CO₂ 実験もあるが (Yoshida 1973, Krenzer and Moss 1975, Fischer and Aguilar 1976), 多くの実験はポット植えの植物を用いて、温室や環境制御チャンバーの中で行われた. Kimball (1983) や Cure and Acock (1986) が取りまとめた過去の研究報告も、大多数は温室やチャンバーの実験結果である. 地球環境変化の一つとしての大気 CO₂ 増加に関心が高まるにつれ、実際の圃場における農作物の生長や収量への影響を定量的に予測することが重要な課題になった. そのため、できるだけ圃場に近い環境下での実験が必要になってきた.

温室や環境制御チャンバーの中と屋外の圃場を比べると、光の強度と質、気温の日変化、日射と気温の連動といった地上部の環境が違ふし、水、養分、根圏の大きさといった地下部の環境も違う (例えば Lawlor and Mitchell 1991). CO₂ 濃度の上昇による光合成促進や気孔閉鎖から、植物の生長促進に至る間には、前記のように数多くのプロセスが介在するので、環境制御チャンバーと圃場の間のこうした違いが、それらのプロセスに影響して、生長の促進程度も異なるかも知れない. 実際に、ポットによる根圏の制約は、CO₂ による生長促進効果に影響することがある (Rogers ら 1986, Arp 1991, Thomas and Strain 1991). また孤立個体と群落とでは、CO₂ 濃度上昇による生長促進に及ぼす気温の影響が異なるという (金ら 1996 a). 他にも、何が結果に影響してくるか分からないので (だから研究しているのだ)、実験条件をできるだけ圃場に近づけるほうが良い. 冒頭で記した、20 年前の先輩の意見には、やはり無理がある.

こうしたことから、1980 年代に入ると各種の「フィールドチャンバー」が、CO₂ 濃度上昇の影響の実験に使われ始めた. フィールドチャンバーには、以下に示すように幾つかのタイプがあり (詳しくは Allen ら 1992), それぞれ「フィールド」との近さは異なるが、共通するのは屋外に設置して自然光を利用すること、植物の地上部は群落状に生育し、地下部は実際の圃場ないし大きなコンテナで、根圏制約が無いことである. 例えば、SPAR (soil-plant-atmosphere-research) チャンバーと呼ばれる自然光形のグロースチャンバーが、フロリダ州 Gainesville のフロリダ大学の Pierce Jones らによって開発され、ダイズ (Jones ら 1985, Reddy ら 1989) やイネ (Baker ら 1996) の CO₂ 濃度影響実験に用いられた. SPAR チャンバーは気密性が高く、群落のガス交換を連続的に測定でき

るので、CO₂ 増加が群落光合成や呼吸に及ぼす影響が調べられた (Baker ら 1990). 日本でも同様のチャンバーにより、高 CO₂ 濃度下でのイネの生長や (諸隈ら 1996)、イネ群落の CO₂ 収支が (Sakai ら 2001) 研究された。

SPAR チャンバーが、言わば自然光形グロースチャンバーの発展形であるのに対して、もっと圃場に近いのが、オープントップ・チャンバー (OTC) である。差し渡し 3 m 前後、高さ 2-2.5 m の円筒形か角型の小型温室で、側面は透明プラスチックでできているが屋根は無く、圃場に直接設置する。ブロワーで大量の外気を吹き込むので、自然換気の温室よりは内部の昇温は小さい。円筒形 OTC は、最初大気汚染実験用に開発され (Heagle ら 1973)、それを CO₂ 実験に利用したものである (Rogers ら 1983, Rogers ら 1986)。また円筒形でなく、角型の OTC もある (Kimball ら 1993)。OTC はフィールドチャンバーの中でも最も多く利用されており、例えば Lawlor and Mitchell (1991) はダイズについて OTC を用いた 13 の研究を引用している。最近では OTC は、オゾンと CO₂ の共存がダイズに及ぼす影響の実験にも用いられており (Fiscus ら 1997)、さらにヨーロッパの 9 地点に OTC を設置して、春コムギに及ぼす CO₂ とオゾンの影響を調べる、大規模なプロジェクトも実施された (Jaeger ら 1999)。

なお、イネの CO₂ 実験のために国際イネ研究所 (IRRI) に設置された OTC (Jones ら 1995) は、チャンバー内部の気温を上げることができる。実はチャンバーだけでも気温は上がるが、IRRI の OTC はヒーターによって外気温よりも常に 4°C 高く制御できた (Moya ら 1997)。この OTC を用いた実験の結果は、Ziska ら (1997) や、Moya ら (1998) ほかが報告している。また、オランダではクーラーを取り付けた OTC が開発され、これにより OTC 内の気温を外気温とほぼ同じに下げることができたという (van Oijen ら 1998)。

以上の SPAR チャンバーや OTC とは異なり、一つのチャンバー内に複数の気温条件を実現できるのが、温度勾配チャンバー (Temperature Gradient Chamber = TGC) である。両端のみ開口した細長い温室の一端から空気を換気扇で引くと、他端から吸い込まれた空気が温室を通過する間に日射エネルギーで暖められるため、空気の入入口から出口に向けて気温が高くなる勾配ができる (Okada ら 1995)。TGC 内の CO₂ 濃度を高くすれば、気温と CO₂ 濃度上昇の影響を調べられる。今までに、イネ (金ら 1995 a, b) やコムギ (Rawson 1995, Batts ら 1997) の実験に用いられている。また TGC は通常、外気温から高温側への温度勾配を実現するが、空気入入口に冷却装置を置くことにより、外気温よりも低い温度から高い温度までをカバーできる大型 TGC も実現している (Okada ら 2000)。

以上のようなフィールドチャンバーで得られた成果は、例えば Lawlor and Mitchell (1991) に一部まとめられて

いるが、農作物の生長・収量の促進に及ぼす CO₂ 濃度上昇の影響について、それまでの温室等の研究結果を概ね支持する結果が得られたという。これは、フィールドチャンバーの実験が無駄であったわけではもちろんなく、より信頼性の高いデータが得られたということである。最近 Reddy and Hodges (2000) は、CO₂ 濃度と気温の上昇が農作物に及ぼす影響をまとめているが、コムギ (Lawlor and Mitchell 2000)、イネ (Horie ら 2000)、ダイズ (Allen and Boote 2000) といった主要農作物ごとの論文で主体となっているのは、いずれもフィールドチャンバーの実験結果である。

3-2. チャンバー効果

フィールドチャンバーは、ポット実験や温室よりは実際の圃場に近いと思われるが、ではどのくらい近いのだろうか。Kimball ら (1997) は、オープントップチャンバー (OTC) 内は、外よりも光が弱く、気温は高く、風は弱く、飽差は小さい (より湿っている) としている。こうしたフィールドチャンバーと圃場の環境の違いが、植物の生長に及ぼす影響を「チャンバー効果」と呼ぶ。具体的には例えば IRRI の OTC では、外と比べて日射量が 9% 減少、気温は 1-2°C 上昇、水温・地温は逆に外よりも低く (Moya ら 1997)、OTC 内のコメ収量は外よりも 12.5% 低かった。このチャンバー効果 12.5% を、その実験での CO₂ 濃度上昇による収量増加率 15-27% (Ziska ら 1997) と比べると、5-8 割に相当する大きさである。一方 van Oijen ら (1998) は、クーラー付きの OTC と、クーラー無しの OTC とを比べたところ、クーラー付きでは外気とほぼ同じ気温だったのに対して、クーラー無しの気温は外よりも約 2°C 高く、日射はどちらも外より 25% 少なかった (van Oijen ら 1998)。こうした OTC 内で、CO₂ 濃度の上昇がコムギの収量に及ぼす影響を調べたところ、次のような結果となった (van Oijen ら 1999)。

- A. クーラー無しの OTC は、クーラー有りに比べて収量が 10-30% 低い。
- B. CO₂ 濃度上昇による収量増加率は、クーラー無し、つまり気温が高いほうが大きい。

上記 A は、気温が高いことで老化・成熟が早まったためで、B は、A の高温による減収つまりチャンバー効果による減収が、CO₂ 濃度上昇で軽減されたと理解できる (van Oijen ら 1999)。言い換えれば、クーラー無しの OTC で見られた CO₂ 濃度上昇の影響には、チャンバー効果が入っている。このように CO₂ 増加の効果とチャンバー効果の間にインタラクションがある場合には、相対的な比率をとっても、チャンバー効果を消去できない。気温が外と変わらないクーラー有りの OTC でも、外より収量が低かった (van Oijen ら 1999)、チャンバー効果には気温だけでなく、日射の減少も寄与している。しかし、日射の少ないチャンバー内の収量が、外の収量よりも常に低いとは限らない。Kimball ら (1997) は、多数の OTC 実

験の結果を解析して、OTC 内の収量は屋外の収量の 70% から 173% (95%信頼区間) に及ぶことを示した。平均的には OTC 内の収量のほうが高いが、それにしても、チャンバー効果の変異は極めて大きい。

チャンバー効果により、収量だけでなく植物の生長全般が変化するが、唯一草丈の伸長が多くの場合に共通して見られる変化で、それ以外は実験ごとに全く一貫性が無いという (Heagle ら 1988)。要するにチャンバー効果は、量的にも質的にも、統一的説明が大変困難である。

なお、チャンバー効果は、一つのチャンバー内でも一様ではない。円筒形 OTC での実験では、しばしばチャンバー内の北側半分のほうが、南側半分よりも作物収量が高いという (Heagle ら 1988)。北半球では、OTC の南側に入射する日射は、側壁で反射されて光強度が低下するのに対して、北半分は頂部の開口を通して日射が直接届く他、北壁面の内側で反射された光も加わるので、南北間で入射日射量に差ができるためと考えられる (Kimball ら 1997)。また、チャンバー内の風当たりの違いによっても、生育ムラができることは、チャンバー実験では良く経験することである。ポット実験ならば、定期的にポットの位置替えをしてムラを少なくできるが、フィールドチャンバーではそれができない。

こうしたチャンバー効果の原因は、チャンバーによる内部環境の改変にある。放射環境については、チャンバー壁が可視光に対して透明でも、入射角が小さければ反射率は高まるし、材質によっては紫外線や長波放射に対して不透明である。また、チャンバーの構造材による遮光も無視できない。一方、空気の流れはチャンバーによって全面的に改変される。風は遮られ、水蒸気圧は一般に上昇するが、気温も上昇するので、相対湿度は大きく変化しないという (Kimball ら 1997)。チャンバー内の環境は植物の影響を受けて変化する。そうした内部環境の変化が今度は植物の生長を変化させる (Kimball ら 1997)。内部環境と植物のこうした相互作用は、植物の種類とチャンバーの構造や換気率、それに外部環境の組み合わせで異なると思われ、チャンバー効果を一層複雑にしているものと推察される。

以上は、OTC におけるチャンバー効果であるが、他のタイプのフィールドチャンバーにも、程度の差はあれ当てはまるだろう。特に TGC では、空気の入り口から出口に向かう気温の勾配とともに、飽差の勾配ができる (Okada ら 1995)。気温上昇だけならば飽差は拡大するはずだが、植物群落からの蒸発散によって飽差の勾配が打ち消されたり、気温とは逆の勾配ができたりする。TGC 内の気温と飽差の勾配は、このように蒸発散を介して複雑にリンクしている。また、TGC 内と屋外とでは、気温と地温の関係が異なることが示されており (Okada ら 1995)、植物の生長にとって地温が支配的な場合には、気温を基準に TGC の結果を外にあてはめると、大きな誤差を生じる。

一方、地下部環境に関して、IRRI の OTC のように実際の圃場に設置した場合は問題無いが、Baker ら (1996) の大型コンテナや、金ら (1996 a, b) の模擬水田では、根圏や土壤中の養分の動き、土壤微生物の分布が、実際の水田とはかなり異なるだろう。

一般に圃場実験では、調査区の周囲にボーダー列を 1 m なり 2 m とするものだが、フィールドチャンバーは、内部の広さがこのボーダー列程度である。つまり、圃場実験の基準からすれば、フィールドチャンバーではボーダー列で実験をしていることになる (McLeod and Long 1999)。OTC の周りにも同じ作物を植えたり (van Oijen ら 1999)、群落の高さに合わせて、チャンバーの回りに遮光布を巻いたり (Sakai ら 2001) といった努力が払われるが、光以外の要因、例えば風についてのボーダー効果は防げない。

以上のように、チャンバー効果は多岐にわたる上に、量的な解明が容易でないため、フィールドチャンバー実験の生長・収量データを、モデルの検証に利用することは難しい (Kimball ら 1997)。Whisler ら (1986) は、逆にチャンバー内の実験で得られた生長モデルのパラメータを外の生長に適用する時には、値を変更しなくてはならなかったという。私自身も以前に、OTC 内でのダイズの生長をモデリングする際に、同様の困難を経験した。最近 Ewert ら (2001) は、FACE と OTC でのコムギの実験結果について、既存の生長モデルを用いた解析を行ったところ、観測値とモデルの推定値との間の偏差が、FACE では小さかったが、OTC でははるかに大きかったとしている。

こうしたことから、フィールドチャンバーでの実験は、ポット実験よりも実際の圃場に近いだろうが、結果をそのまま圃場に当てはめたり、モデリングに用いることは困難とみられる。このことを概念的に示したのが、第 2 図である。実際に知りたいのは、外の圃場で CO₂ 濃度が上昇した場合の収量 (B 区) であるが、フィールドチャンバー実験で観測できるのは、外の圃場における現在の CO₂ 濃度での収量 (A 区)、チャンバー内における現在の CO₂ 濃度での収量 (C 区) と、同じくチャンバー内の高 CO₂ 濃度での収量 (D 区) のみである。CO₂ の効果は C 区と D 区の比較で、またチャンバー効果は A 区と C 区の比較で、それぞれ推定できるが、CO₂ の効果とチャンバー効果の間に交互作用があると、B 区の値は原理的に推定できない。ここで交互作用があるとは、チャンバーの中と外の圃場とで CO₂ の効果が異なるということで、その可能性は高い。OTC 内は外よりも気温が高いが、CO₂ 濃度上昇による光合成促進効果は気温に依存する (Long 1991)。一方、CO₂ 濃度上昇によって植物の蒸散が減ると、それがチャンバー内の湿度と気温を変え、その結果植物の生長や水利用が変化するというシナリオも考えられる。チャンバー効果の中身が複雑なだけに、CO₂ 濃度上昇との交互作用を見積もるのは容易でない。

第2図 CO₂ 濃度上昇が植物と生態系に及ぼす影響についての、フィールドチャンバー実験の概念図。A区は現在のCO₂ 濃度下での圃場，B区は高CO₂ 濃度下の圃場，C区は現在のCO₂ 濃度下のフィールドチャンバー内，D区は高CO₂ 濃度下のフィールドチャンバー内。

3-3. フィールドチャンバーから FACE へ

FACE 実験では，チャンバー効果を考えなくて良い。対照区は現実の圃場，つまり第2図のA区であり，FACE区は同じくB区にあたる。圃場であるから，土壌や微気象の違いで植物の生長は変動するが，それは圃場実験で通常利用する実験計画法で，管理し評価できる。FACEは要するに，CO₂の影響についての圃場実験なのである。FACEのもう一つの利点は，チャンバーに比べてはるかに大面積の実験が可能なことである。FACEリングの大きさにもよるが，通常の農学的測定をほぼ問題無く行える。すなわち，定期的に植物体を抜き取って重さや面積を測り，収穫期には刈り取って収量を決定する。収穫物の穀粒を成分分析にかけ，食味の官能検査をする。地下部を掘り取って，根の重さや長さを測る...といったことが，残りの植物の生長に大きな影響を与えずに可能である。これに対してチャンバーでは，植物の個体数が限られており，途中で抜き取ると栽植密度が変わってしまう。

サイズが大きいことはまた，大規模な共同研究を可能にする。いろいろな専門の研究者が，それぞれの測定を同一の圃場で行える。例えばアリゾナのコムギのFACEには，世界8カ国から総計52名の研究者が参加したという(Kimballら1997)。私たちのRice FACEプロジェクトにも，作物学だけでなく，植物生理，生態学，微気象，土壌微生物，植物病理等，いろいろの研究分野から，20名

以上が参加している。

研究対象のサイズが，FACEを必要とする場合もある。例えば15年生の樹木や羊の放牧などは，FACEが最も現実的な選択だろう。実際，土地面積あたりでは，FACEはチャンバーよりもはるかに低コストである(Kimball1992)。また砂漠の自然生態系では，人が踏み込んだりする人為的な攪乱が研究対象を決定的に破壊する恐れがあり，チャンバー実験は不可能だという。

冒頭に紹介したとおり，FACEが多くの研究者に支持され，世界中に広がりつつあるのは，こうした特長：チャンバー効果が無いことと大面積の実験が可能なことによる。ところが，FACEでもアーティファクトのあることが分かってきた。第2図で，対照区は実際の圃場(A区)であるが，FACE区(B区)がCO₂濃度上昇以外に，FACE装置自体の影響を受けることがアリゾナのFACEで確かめられたのである(Pinterら2000)。CO₂濃度上昇は気孔開度を減少させ，潜熱損失を減らすので，日射のある昼間の植物体温がFACE区で対象区よりも高いのは当然だが，夜間もFACE区の植物体温が対照区よりも約1℃高かった。FACEリングの中に高CO₂濃度の空気を吹き込むことが，夜間の無風で安定した気層を乱す結果，ちょうど茶園の防霜ファンのような働きをして，植物体温を上げることが分かった(Pinterら2000)。これを「ブローワー効果」と呼ぶが，日中は風があり日射もあるので空

気の混合が著しく、ブロー効果はほとんど見られない (Pinter ら 2000)。

アリゾナでは、1991 年までのワタの実験は日中のみ高 CO₂ 濃度としたが、1992 年からのコムギの FACE 実験では、24 時間連続で高 CO₂ 濃度とした。すると、FACE 区のコムギの発育が対照区よりも 2–5 日早く、葉の老化も進むことが観察された (Pinter ら 2000)。これが CO₂ 増加の影響でなく、ブロー効果によることは、その後の実験で確かめられた。1995 年以降のコムギの FACE 実験で、外気を FACE 区同様に吹きこむ、「ブロー対照区」を新たに設けて FACE 区と比較したところ、両区の間には夜間の植物体温や発育・老化の早さに差が見られなかった (Pinter ら 2000)。ブロー効果を対照区にも加えて、それとの比較で CO₂ 濃度上昇の影響を測るようにしたもので、第 2 図でチャンバー効果をブロー効果と読み替えれば、C 区がブロー対照区、D 区が FACE 区、A 区がブロー無しの外気区ということになる。ブロー効果による発育・老化促進は収量にも影響を及ぼし、1993・1994 年のブロー無しの対照区との比較では、FACE 区のコムギ収量は 10% 多いだけだったが、1996・1997 年のブロー対照区との比較では、FACE 区の収量増加は 15% であった (Pinter ら 2000)。ブロー効果のために、1993・1994 年の実験では、CO₂ 濃度上昇の影響が過小評価されたものと見られる。

それにしても、せっかく FACE で現実の圃場を対照区にした実験が可能になったのに、ブロー効果のせいで、後戻りしたような感じがする。植物への影響は、チャンバー効果よりは多分小さいだろうが、それにしてもモデリングにとって厄介な問題である (Pinter ら 2000)。ブロー効果が実質的にはほぼ夜間に限られることから、夜間の CO₂ 放出を止めれば問題を回避できるし、CO₂ 放出量も節約できる。実際に夜間は CO₂ を出さない FACE 実験も多い (例えばスイス ETH の FACE)。CO₂ の主な効果は光合成の促進であるから、夜間の CO₂ の効果はわずかだし、たとえあったとしても植物の生長に及ぼす影響は、ブロー効果よりも小さいと考えて良いだろう。しかし一方で、ブロー効果があっても、夜間も CO₂ を放出している FACE は多い。主な理由は、将来は夜間の CO₂ 濃度も上昇すること、それが植物に何も影響しないとは断言できないことである。実際に、CO₂ 濃度上昇が暗呼吸を抑制するという研究報告は多い (例えば Drake ら 1999)。夜間の影響も含めて、CO₂ 濃度上昇の影響が分かっているから実験をするのであり、従って実験条件をできるだけ将来の環境に近づけるべきだというわけである。

このような、ブロー効果と夜間の高 CO₂ 濃度の効果との、どちらに目をつぶるかというジレンマを解決するために、私たちの Rice FACE プロジェクトでは、ブロー効果の無い FACE 装置を開発した (Okada ら 2001)。今までの FACE でブローを使うのは、CO₂ を空気と予め

混合しておき、放出後の希釈を助けるためである。私たちの装置では、希釈しない 100% CO₂ を、プラスチックチューブに空けた直径 0.5 mm 前後の多数の細孔から高速で吹き出すことにより、周囲の空気と大変効率良く混合できる。ブローを使わないので、無風時も気層をほとんど乱さず、従ってブロー効果も無い。なお無風時には、放出された CO₂ の拡散が遅く、局所的に CO₂ 濃度が高くなりやすいが、これはブロー効果が無いことの裏返しであり、やむを得ない。この装置の CO₂ 濃度制御性能は、ブロー FACE には及ばないものの、FACE 実験に充分使用可能である (Okada ら 2001)。純 CO₂ 放出型 FACE は最近、イタリアの Franco Miglietta によって技術的改良が加えられて、現在イタリアで実施中のポプラの FACE で使用され、またアメリカイリノイ大学で建設中のダイズの FACE でも採用されるという。

3-4. FACE と現実の違い

このように FACE は、今やブロー効果を克服しつつあり、現実の圃場に一層近づいてはいるが、現実と完全には一致しない。例えば、雫石町の農家水田に設置した FACE リングの中が 21 世紀後半の CO₂ 濃度になっていても、そこで生じる変化は現実の変化と全く同じではない。第一に FACE は、いわゆる「ステップ変化」である。FACE リングの中は、急に 21 世紀後半の CO₂ 濃度になったが、現実はこの濃度上昇には 50 年以上かかる。土壤炭素プールの変化や微生物相の変化等、変化の遅いプロセスが植物の生長を支配する場合には、ステップ変化への生態系の応答は、20 年間以上も過渡的な状態にあり、その間、最終的な状態とは変化の方向さえも異なる場合がある (Cannell and Thornley 1998)。従って、FACE で見られる変化が、そのまま 21 世紀後半に生じると考えることはできない。とはいえ、FACE 実験の意義はステップ変化にこそあり、現実と同じ速度で CO₂ 濃度を上昇させるのでは、意味が無い。むしろ、FACE で観測される変化をステップ応答として解析することで、生態系の挙動について有用な情報が得られるという (Luo and Reynolds 1999)。なお FACE とは対照的に、CO₂ 泉は長期間にわたって高 CO₂ 濃度環境にあるので、そのことを利用した研究が今後期待される。

空間的にも、FACE は圃場に突出した高 CO₂ 濃度環境であり、370 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ CO₂ の海に浮かぶ、高濃度 CO₂ の島のようなものである (McLeod and Long 1999)。FACE 区の植物は、リング内だけでなく付近の植物群落全体が形成する微気象の影響下にあるが、周囲の植物は当然現在の CO₂ 濃度下であり、微気象も CO₂ 濃度上昇時とは異なる。FACE 内の群落の蒸発散や水利用は、こうした「島効果」の影響を受ける (McLeod and Long 1999)。また、FACE リングの中はアブが多いが、これも高 CO₂ 濃度の「島」に惹きつけられるからで、CO₂ 濃度上昇が吸血性の昆虫を増やすとは言えない。

FACE のもう少し技術的な課題として、CO₂ 濃度の変動がある。FACE リング内の CO₂ 濃度は、長期間平均すると目標値に極めて近いが、5 秒とか 1 分間といった短時間には、かなり大きく変動する (Nagy ら 1994, Okada ら 2001)。例えば日本の純 CO₂ 放出型 FACE 装置では、FACE 内の 5 秒間平均 CO₂ 濃度は、1 日平均すると目標値から約 10 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ずれたに過ぎなかったが、個々の 5 秒間平均値は目標値の 65% から 200% の間を変動した (Okada ら 2001)。CO₂ 濃度のこうした短時間の変動に、植物がどのように応答するか、よく分かっていないが、1 分間よりも長周期の CO₂ 濃度の振動は、光合成速度に影響するという (McLeod and Long 1999)。なお、CO₂ 濃度の短時間の変動は FACE に限ったことでなく、OTC などのフィールドチャンバーでも、FACE と同等かそれ以上の変動がみられることがある (McLeod and Long 1999)。

ところで、FACE は CO₂ 濃度上昇の影響に関する圃場実験であり、他の圃場実験と同様、結果がローカルな環境や栽培法に左右される。それゆえ、例えばアリゾナで行われたコムギの FACE 実験結果から、カナダ中央平原のコムギに生じる変化を予測するのは、少なくとも直感的には無理がある。これは、FACE に限らずフィールドチャンバーも同じで、実験条件が現実には近づくほど、結果の適用性は限られる。一つの解決法は、多数の地点で実験することで、ヨーロッパではすでに ESPACE-Wheat というプロジェクトで、OTC を 9 地点に設置してコムギに及ぼす CO₂ とオゾンの影響を実験した (Jaeger ら 1999)。FACE でも同様のネットワークが必要とされており (McLeod and Long 1999)、現在私たちが企画している中国での FACE 実験が実現し、さらに前記のインドの FACE と連携すれば、イネの FACE ネットワークができ上がる。

とはいえ、FACE 実験のコストを考えると、日本の複数地点での実験でさえ困難であり、農学的なセンスで十分な数の地点で実験することはまず不可能である。従って、圃場実験の結果を実験条件の範囲外に適用することになり、生長プロセスモデリングとの連携が不可欠である。実際にコムギでは、アリゾナの FACE 実験結果を用いたモデルのテストが、盛んになされており (Grant ら 1999, Tubiello ら 1999, Jamieson ら 2000, Ewert ら 2001)、そうしたモデルを今度は、最近始まったドイツ Braunschweig のコムギ FACE 実験の結果と比べるといったことが試みられるだろう。このようにして、モデルが複数地点の実験結果を的確にシミュレートできれば、限られた地点での実験データから、広範囲の予測が可能になるだろう。ただし、地点間の実験結果の違いを、モデルがうまく説明できない可能性もある (例えば Ewert ら 1999)。

なお、FACE 実験は圃場実験であり、実験計画に注意を払うことが大変重要である (Filion ら 2000)。これはフ

ィールドチャンバーでも同じだが、CO₂ の影響の統計的検定には、圃場 (あるいはチャンバー) 間の誤差分散を推定できるデザインが不可欠である。そして CO₂ 処理区間で統計的有意差を検出するためには、最低でも 3 反復は必要で、2 反復では実際上何も有意にならない。

3-5. FACE でできないこと

FACE は、CO₂ 増加が陸上生態系に及ぼす影響について、ある意味で究極の実験法だが、FACE でできないことも少なくない。たとえば FACE は CO₂ 濃度を下げることができない (Kimball ら 1997)。従って、産業革命以来の人間活動による約 90 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ の CO₂ 濃度上昇の影響を、実際の生態系で観測することは既に不可能である。今後数十年間の大気 CO₂ 増加を見とおすと、FACE 実験を今しなければ、CO₂ 濃度上昇による生態系の変化を直接観測する機会を失ってしまう。変化した後の生態系は見えるが、変化自体を見損なうのである。「その時その時が分かれば良い」という考え方もあるだろうが、生態系の変化を予測できるようにすることは、地球環境変化による損害を減らすためにも、また生態系をより良く理解する上でも、大変重要だと私は考えている。

FACE では、気温の制御もむずかしい。CO₂ の増加は地球大気の放射収支を変化させ、平均気温の上昇や降雨パターンの変化といった気候変化を招く (Houghton ら 1996)。気候変化と CO₂ 濃度上昇が農作物生産に及ぼす影響について、大気大循環モデルと農作物生長プロセスモデルを使って多くの予測がなされているが、結果は大きくばらついている (Watson ら 1996)。これは気候変化予測の不確かさに加えて、生長モデルの不確かさにも原因がある (小林 1998)。モデルの予測をより確かなものにするために、CO₂ 濃度上昇と気候変化 (特に温暖化) の両方が農作物と生態系に及ぼす影響について、圃場での観測データによるモデルの検証が必要である。チャンバー無しで圃場の空気を暖めるのは技術的にむずかしいが、群落の上から赤外線を照射して植物体を直接暖めることはできる (Harte and Shaw 1995, Nijs 1996)。これを FACE と組み合わせる可能性があるが、実現していないようである。照射装置自体が日射を遮ることや、葉温と気温の対応が現実と異なることなど、手法的な問題のためかも知れない。むしろ、気候の異なる地点で数年間 FACE 実験を行い、地点間・年次間の気候の違いをモデリングに取り入れていくほうが、FACE の特長が生きてと思われる。

さきに FACE は大規模な実験が可能であると言ったが、小規模な実験は逆にむずかしい。直径 1 m の小さな FACE 装置も試みられているが (Migletta ら 1996)、ボーダー効果が無いという FACE の大きな利点を失うし、リング内の CO₂ 濃度の時間的・空間的変動も大きい (McLeod and Long 1999)。ある程度大きな FACE リングが必要とすると、多量の CO₂ が必要になる。例えば、私たちの FACE リングは直径 12 m で、アリゾナの

FACE リングの半分だが、1 リングあたり 1 日約 0.6 トンの CO₂ を放出する。1 シーズンの金額に換算すると、CO₂ に必要な費用は 4 リングで約 1,200 万円に達する。CO₂ 代の他に、液化 CO₂ 貯蔵タンク（第 1 図参照）等の付帯施設も、大きな初期投資を要する。研究参加者が 20 名以上といったプロジェクトならば、人件費等を含むプロジェクト全体の費用の中で CO₂ のコストはそう大きくない。しかし、数名の研究者が大規模な外部資金無しで行うには、負担が大きすぎる。複数地点に配置したり、CO₂ と他の大気汚染物質と組み合わせたりすると、さらに大規模となる。コストの問題は、特に発展途上国では大きな障害である。FACE は、金額的だけでなく、空間的にも大規模になる。FACE 区で放出する CO₂ が対照区に流入することを避けるためには、両区間に最低でも 90 m 程度の距離が必要で、各区 4 反復とすると、全体で 300-400 m 四方の敷地が最低必要となる。

以上のような「FACE でできないこと」は、むしろフィールドチャンバーが得意である。例えば気温を制御するには、TGC (Rawson ら 1995, Hadley ら 1995, Horie ら 1995) や、OTC (Jones ら 1995) を利用すれば良い。CO₂ 濃度を下げるのは、SPAR チャンバーなら可能である (Baker ら 1990)。OTC や TGC ならば、多数地点に配置することも現実に可能である。実際に、前記の南アジア CO₂ 影響ネットワークでは、インドに 1 ヶ所 FACE を置き、他の国には OTC を置くという構想になっているが、これですら発展途上国には大きな負担である。また、個々の生理学的・生化学的プロセスの変化を調べるには、FACE やフィールドチャンバーよりも、環境制御チャンバーのほうが適していることもある。要するに、CO₂ 濃度上昇が植物や生態系に及ぼす影響の実験方法のうち、どれを選ぶかは実験の目的や規模によって決めるものであり、FACE は大規模圃場実験を選択肢に加えた点に意義がある。ファイトトロンやフィールドチャンバーは、有用な実験方法として今後も利用されるだろうが、FACE によって、そうしたチャンバー実験の結果を圃場で定量的に確かめたり、継続的な抜き取り調査によって、植物や生態系の変化の過程をとらえたりすることが可能になったのである。

4. FACE の成果と今後の展望

4-1. FACE で何が得られるか

12 年前に Dr. Allen を訪れた私にとってそうだったように、FACE の話は実に印象的であり、まして圃場で FACE リングを目の当たりにすると、かなりインパクトがある。また、実験方法として優れた点が多いのは、前記のとおりである。こうしたことから、FACE は多くの研究者に支持され、世界中に広がりつつある。その一方で、「FACE で何が新たに得られるのか？」と問われることも多い。FACE に要する予算や労力からすれば当然の疑問

と言えるが、これに対して FACE の特長から 2 つの答えが可能である。

まず、チャンバー効果が無いので、実験結果についてアーティファクトをほとんど心配しなくて良いことである。かつて、アリゾナ FACE の研究代表者である Dr. Bruce Kimball が、先ほどの問いに対して、一言「Confidence (確信)！」と答えたことを、今でも鮮明に思い出す。FACE でこそ、最も信頼できる実験結果が得られるというのである。OTC 等の実験と比べると、チャンバー効果が無いために、CO₂ 濃度上昇への応答を相対的のみならず絶対的にも直接観測できる (Kimball ら 1997)。この点は、先にも記したように、モデルのシミュレーション結果との比較にとって、大変重要である。また、これは今後期待されることだが、複数地点での FACE 実験結果を比較した結果、CO₂ に対する応答に明らかな違いが見られたら、それは実際に地点間で CO₂ 濃度上昇の影響が異なることを示しており、その原因究明が科学的理解につながる。これに対して、例えば OTC をヨーロッパ各地に配置した ESPACE-Wheat プロジェクトでは、実験結果が地点間で異なる原因の一つとして、地点間でのチャンバー・デザインや気候の違いによる、チャンバー効果の変動が挙げられている (Ewert ら 1999)。結果の解析にあたって、CO₂ の影響をチャンバー効果から分離する必要があるが、チャンバー効果の解明自体容易ではない。

もう一つ FACE でこそ可能なことは、大面積の高 CO₂ 濃度環境を利用した、詳細・多様な実験と観測である (Kimball ら 1997)。植物や土壌を定期的に採取して、CO₂ 濃度上昇への植物と生態系の応答を、変化の過程として捉えることができる。また、窒素施肥量や水管理、品種、牧草では刈り取り回数など、農作物栽培上重要な要因を、分割区法で CO₂ 濃度と組み合わせることにより (Filion ら 2000)、そうした要因によって CO₂ 濃度上昇の影響がどう変化するかが分かる。さらに、例えば生態学や土壌微生物学との共同研究により、CO₂ 濃度上昇によって生態系に生じる変化について、農学の枠を超えたより広い視野で捉えることができる (McLeod and Long 1999)。

以上はいわば「効能書き」であるが、実際に今までの FACE 実験でどんな成果が得られているだろうか。McLeod and Long (1999) は、1998 年までに出版されたアリゾナのワタとコムギの FACE 実験、そしてスイス ETH での牧草の FACE 実験の結果を、植物の生長、蒸発散、光合成、地下部の成長といった側面ごとに整理し、それぞれについて FACE が多くの成果を生んだことを示した。また Kimball ら (1997) は、アリゾナで行われたワタとコムギの実験結果を、FACE と OTC で比較した。まずワタでは、絶対的な生長量は OTC のほうが FACE よりも 30% 多かったが、CO₂ 濃度上昇による相対的な生長促進率は 50-60% とほぼ同等だった (Kimball ら 1997)。コムギでは、ESPACE-Wheat (Jaeger ら 1999)

の OTC の結果が 20% 程度の収量増加率に対して、FACE ではその約半分である (McLeod and Long 1999). しかしこの比較にはブロー効果は考慮されておらず、それを考慮すれば FACE の収量増加率は約 15% と見積もられるので (Pinter ら 2000), コムギについても OTC と FACE で大差は無い。

イネについては、Kim ら (2001) が雫石 FACE の結果を報告している。CO₂ 濃度の上昇 (約 270 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) によって、1999 年の収穫時のバイオマス重量は標準量窒素区で約 15% 増加した。これに対して、Nakagawa and Horie (2000) は京都での TGC の結果をまとめており、気温が 1°C 上昇すると生長増加率が 1.8% 高くなるという。TGC の結果を、雫石の 1999 年の実験期間中平均気温 20.8°C に換算すると、CO₂ 倍増によるバイオマス重量増加率は約 14% となる (Nakagawa and Horie 2000: Fig. 3). この二つの研究は、実験実施場所や栽培法、対象品種が違う上に CO₂ 濃度もやや異なるので、直接の比較はむずかしいが、ほぼ同程度の生長増加率とみられる。以上のように、相対的な生長増加率でみると、従来のフィールドチャンバーの結果は、FACE 実験結果によって概ね支持されたと言える。

一方スイスの FACE では、CO₂ 濃度上昇による生長促進がペレニアル・ライグラスよりもシロクロバで大きく、そのため両者が混在している場合には、高 CO₂ 濃度下でシロクロバの比率が高まった (Hebeisen ら 1997). また Daepf ら (2000) は、CO₂ 濃度上昇によるペレニアル・ライグラスの生長増加率が、6 年間の実験期間中、最初の年の 6% から 6 年目の 25% まで徐々に高まったという興味深い結果を報告している。これらはいずれも、FACE によって実際の圃場で観測されたからこそ、実験結果として貴重なのである。

チャンバーは群落の蒸発散や熱収支を大きく変えてしまうために、圃場に近い条件での観測は FACE によって初めて可能になる (McLeod and Long 1999). コムギについて、4 シーズンにわたる FACE 実験の結果を熱収支法で解析したところ、施肥窒素量が充分な場合 (350 kgN ha⁻¹) には、蒸発散量は平均で FACE で 6.7% 減少したが、窒素量が少ないと (70 kgN ha⁻¹), 蒸発散量の減少は 19.5% に達した (Kimball ら 1999). これに対してワタは、CO₂ 濃度上昇による生長量の増加がコムギよりも大きい一方で、蒸発散量は CO₂ 濃度によってほとんど変わらなかった (Kimball ら 1994).

光合成については、高 CO₂ 濃度への馴化 (アクリメーション: 高 CO₂ 濃度下で長期間生長させると、CO₂ に対する応答が低下する現象) が、チャンバー実験では報告されていたが、アリゾナのコムギ FACE では、水や栄養が充分な場合にはアクリメーションは見られなかった (Garcia ら 1998). しかし同じコムギ FACE でも、群落最上位葉はアクリメーションが見られないが、中下位葉では見ら

れるという (Osborne ら 1998). なお、両報告ともブロー効果による葉の老化促進を見ている可能性があり、結果の解釈には注意が必要である。一方スイスの FACE では、低窒素条件下のペレニアル・ライグラスで光合成のアクリメーションがみられたが、刈り取り後には消失した (McLeod and Long 1999). イネの FACE でも同様に、光合成のアクリメーションについて、窒素量や生育段階によって異なる結果が得られている (Seneweera 未発表データ). このように、光合成のアクリメーションが有るか無いかという単純な問題設定ではなく、それが何によって支配されているかという点について、有用な情報が FACE によって得られつつある。

4-2. 今後の展開

McLeod and Long (1999) が取りまとめた時点では、出版されている FACE の成果は、ほとんどアリゾナとスイス ETH の FACE のものであったが、それ以降急速に FACE の研究成果が蓄積されてきている。私たちが、2000 年 6 月末につくばで FACE2000 国際会議を開いた際には、世界中で 17 の FACE プロジェクトのうち 14 が参加した。同会議の概要は会議のホームページ (<http://ws234.niaes.affrc.go.jp/riceface/News/conp.html>) で知ることができ、また会議の様態や発表内容の紹介は別途執筆予定である。プロシーディングスは作らず、FACE2000 での発表論文を主体とした最新の FACE 研究成果を、New Phytologist 誌に投稿し、掲載許可となった論文をまとめて特別号として、2001 年に出版予定である。現在掲載見込みの論文には、日本のイネの他に、イタリアのパレイショ、アリゾナのソルガム、ドイツ Braunschweig のコムギ等、農作物の FACE 実験結果があり、アメリカ ウィスコンシン州のヨーロッパヤマナラシ、ミネソタ州の種多様性実験、ネバダ砂漠といった、樹木や自然植生の FACE 実験結果もある。また、FACE 実験に関連するチャンバー実験の結果も掲載予定である。こうした個別の研究以外に、複数の FACE 研究成果を横断的に取りまとめた論文 (シンセシスペーパーと称する) も、執筆が進んでいる。とりわけ、Kimball らが CO₂ 濃度上昇への農作物の応答を取りまとめているが、これは農作物の FACE 実験結果を主体にまとめた、初めてのシンセシスペーパーになるはずである。また、FACE 実験結果を用いたモデリングも、シンセシスペーパーとして出版される。Herbert Enoch の提唱以来 18 年を経て、FACE はようやく新奇な実験方法を卒業して、「役に立つ」実験手法として確立しつつある。

今後 FACE は、さらに多くの地点で実施され、有用な実験データを生み出すと期待される。CDIAC の FACE ホームページ (<http://cdiac.esd.ornl.gov/programs/FACE/face.html>) で FACE の世界分布図を見ると分かるが、FACE 実験地はアメリカとヨーロッパに偏っており、発展途上国にはほとんど無い。大気 CO₂ の増加を始

めとする地球環境問題の原因が、今のところほとんど先進国にありながら、結果は途上国にも及ぶこと、途上国の食料と経済が自国の農業生産に依存する度合いが高いこと、そして途上国の農業生産が一般に環境変動の影響を受けやすいことから、地球環境変動の影響を予測するための研究は、発展途上国でこそ必要だと私は考える。

謝辞: Rice FACE プロジェクトの同僚たち、とりわけ東北農業試験場の岡田益己、科学技術振興事業団の金漢龍、マーク・リーフリング、中村浩史、農業環境技術研究所の三浦周、吉本真由美の各氏に、心から感謝申し上げます。同プロジェクトは科学技術振興事業団の戦略的基礎研究推進事業の一環として、同事業団、農業環境技術研究所、東北農業試験場ほかの共同研究で実施されている。

引用文献

- Allen, Jr., L.H. 1992. Free-air CO₂ enrichment field experiment: An historical overview. *Crit. Rev. Plant Sci.* 11: 121–134.
- Allen, Jr., L.H. and K.J. Boote 2000. Crop ecosystem responses to climatic change: Soybean. In Reddy, K.R. and H.F. Hodges ed., *Climate Change and Global Crop Productivity*. CAB International, Wallingford. 133–160.
- Allen, Jr., L.H., B.G. Drake, H.H. Rogers and J.H. Shinn 1992. Field techniques for exposure of plants and ecosystems to elevated CO₂ and other trace gases. *Crit. Rev. Plant Sci.* 11: 85–119.
- Amthor, J.S. 2000. Direct effect of elevated CO₂ on nocturnal in situ leaf respiration in nine temperate deciduous tree species is small. *Tree Physiol.* 20: 139–144.
- Arp, W.J. 1991. Effects of source-sink relations on photosynthetic acclimation to elevated CO₂. *Plant Cell Environ.* 14: 869–875.
- Atchison, J.M., L.M. Head and L.P. McCarthy 2000. Stomatal parameters and atmospheric change since 7500 years before present: evidence from *Eremophila deserti* (Myoporaceae) leaves from the Flinders ranges region, South Australia. *Aust. J. Bot.* 48: 223–232.
- Baker, J.T., L.H. Allen, Jr., K.J. Boote, P.J. Jones and J.W. Jones 1990. Rice photosynthesis and evapotranspiration in subambient, ambient, and superambient carbon dioxide concentrations. *Agron. J.* 82: 834–840.
- Baker, J.T., L.H. Allen, Jr., K.J. Boote and N.B. Pickering 1996. Assessment of rice responses to global climate change: CO₂ and temperature. In Koch, G.W. and H.A. Mooney ed., *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems*. Academic Press, San Diego. 265–282.
- Batts, G.R., J.I.L. Morison, R.H. Ellis, P. Hadley and T.R. Wheeler 1997. Effects of CO₂ and temperature on growth and yield of crops of winter wheat over four seasons. *Eur. J. Agron.* 7: 43–52.
- Budyko, M.I., A.B. Ronov and A.L. Yanshin 1989. 内嶋善兵衛訳, 地球大気の歴史—その進化と未来を探る—. 朝倉書店, 東京. 198.
- Cannell, M.G.R. and J.H.M. Thornley 1998. N-poor ecosystems may respond more to elevated [CO₂] than N-rich ones in the long term. A model analysis of grassland. *Glob. Chang. Biol.* 4: 431–442.
- Cook, A.C., D.T. Tissue, S.W. Roberts and W.C. Oechel 1998. Effects of long-term elevated [CO₂] from natural CO₂ springs on *Nardus stricta*: photosynthesis, biochemistry, growth and phenology. *Plant Cell Environ.* 21: 417–425.
- Cook, A.C., G.L. Vourlitis and Y. Harazono 2000. Evaluating the potential for long-term elevated CO₂ exposure studies using CO₂ springs in Japan. *J. Agric. Meteorol.* 56: 31–40.
- Cure, J.D. and B. Acock 1986. Crop responses to carbon dioxide doubling: A literature survey. *Agric. For. Meteorol.* 38: 127–145.
- Daepf, M., D. Suter, J.P.F. Almeida, H. Isopp, U.A. Hartwig, M. Frehner, H. Blum, J. Noesberger and A. Lüscher 2000. Yield response of *Lolium perenne* swards to free air CO₂ enrichment increased over six years in a high N input system on fertile soil. *Glob. Chang. Biol.* 6: 805–816.
- Drake, B.G., J. Azcon-Bieto, J. Berry, J. Bunce, P. Dijkstra, J. Farrar, R.M. Gifford, M.A. Gonzalez-Meler, G. Koch, H. Lambers, J. Siedow and S. Wulfschlegel 1999. Does elevated atmospheric CO₂ concentration inhibit mitochondrial respiration in green plants? *Plant Cell Environ.* 22: 649–657.
- Drake, B.G., M.A. Gonzalez-Meler and S.P. Long 1997. More efficient plants: A consequence of rising atmospheric CO₂? *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 48: 609–639.
- Dugas, W.A. and P.J. Pinter, Jr. 1994. Agricultural and forest meteorology: A new field approach to assess the biological consequences of global change. *Agric. For. Meteorol.* 70: 1–342.
- Ellsworth, D.S. 1999. CO₂ enrichment in a maturing pine forest: are CO₂ exchange and water status in the canopy affected? *Plant Cell Environ.* 22: 461–472.
- Ewert, F., D. Rodriguez, P.D. Jamieson, M.A. Semenov, R.A.C. Mitchell, J. Goudriaan, J.R. Porter, B.A. Kimball, P.J. Pinter, Jr., R. Manderscheid, H.J. Weigel, A. Fangmeier, E. Fereres and F. Villalobos 2001. Modelling the effects of CO₂ and drought on wheat for different climatic conditions and cultivars. *New Phytol.* (in press).
- Ewert, F., M. van Oijen and J.R. Porter 1999. Simulation of growth and development processes of spring wheat in response to CO₂ and ozone for different sites and years in Europe using mechanistic crop simulation models. *Eur. J. Agron.* 10: 231–247.
- Field, C.B., R.B. Jackson and H.A. Mooney 1995. Stomatal responses to increased CO₂: implications from the plant to the global scale. *Plant Cell Environ.* 18: 1214–1225.
- Filion, M., P. Dutilleul and C. Potvin 2000. Optimum experimental design for Free-Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) studies. *Glob. Chang. Biol.* 6: 843–854.
- Fischer, R.A. and I. Aguilar M. 1976. Yield potential in a dwarf spring wheat and the effect of carbon dioxide fertilization. *Agron. J.* 68: 749–752.
- Fiscus, E.L., C.D. Reid, J.E. Miller and A.S. Heagle 1997. Elevated CO₂ reduced O₃ flux and O₃-induced yield losses in soybeans: possible implications for elevated CO₂ studies. *J. Exp. Bot.* 48:

- 307—313.
- Garcia, R.L., S.P. Long, G.W. Wall, C.P. Osborne, B.A. Kimball, G. Y. Nie, P.J. Pinter, Jr., R.L. LaMorte and F. Wechsung 1998. Photosynthesis and conductance of spring-wheat leaves: field response to continuous free-air atmospheric CO₂ enrichment. *Plant Cell Environ.* 21: 659—669.
- Ghannoum, O., S. von Caemmerer, L.H. Ziska and J.P. Conroy 2000. The growth response of C₄ plants to rising atmospheric CO₂ partial pressure: a reassessment. *Plant Cell Environ.* 23: 931—942.
- Grant, R.F., G.W. Wall, B.A. Kimball, K.F.A. Frumau, P.J. Pinter, Jr., D.J. Hunsaker and R.L. LaMorte 1999. Crop water relations under different CO₂ and irrigation: testing of *ecosys* with the free-air CO₂ enrichment (FACE) experiment. *Agric. For. Meteorol.* 95: 27—51.
- Hadley, P., G.R. Batts, R.H. Ellis, J.I.L. Morison, S. Pearson and T.R. Wheeler 1995. Temperature gradient chambers for research on global environment change. II. A twin-wall tunnel system for low-stature, field grown crops using a split heat pump. *Plant Cell Environ.* 18: 1055—1063.
- Harte, J. and R. Shaw 1995. Shifting dominance within a montane vegetation community: Results of a climate-warming experiment. *Science* 267: 876—880.
- Heagle, A.S., D.E. Body and W.W. Heck 1973. An open-top field chamber to assess the impact of air pollution on plants. *J. Environ. Qual.* 2: 365—368.
- Heagle, A.S., L.W. Kress, P.J. Temple, R.J. Kohut, J.E. Miller and H.E. Heggstad 1988. Factors influencing ozone dose-yield response relationships in open-top field chamber studies. In Heck, W.W., O.C. Taylor and D.T. Tingey ed., *Assessment of Crop Loss from Air Pollutants*. Elsevier, London. 141—179.
- Hebeisen, T., A. Luscher, S. Zanetti, B.U. Fischer, U.A. Hartwig, M. Frehner, G.R. Hendrey, H. Blum and J. Noesberger 1997. Growth response of *Trifolium repens* L. and *Lolium perenne* L. as monocultures and bi-species mixture to free air CO₂ enrichment and management. *Glob. Chang. Biol.* 3: 149—160.
- Hendrey, G.R., D.S. Ellsworth, K.F. Lewin and J. Nagy 1999. A free-air enrichment system for exposing tall forest vegetation to elevated atmospheric CO₂. *Glob. Chang. Biol.* 5: 293—309.
- Hendrey, G.R., K.F. Lewin and J. Nagy 1993. Free air carbon dioxide enrichment: development, progress, results. *Vegetatio* 104/105: 17—31.
- Horie, T., H. Nakagawa, J. Nakano, K. Hamotani and H.-Y. Kim 1995. Temperature gradient chambers for research on global environment change. III. A system designed for rice in Kyoto, Japan. *Plant Cell Environ.* 18: 1064—1069.
- Horie, T., J.T. Baker, H. Nakagawa, T. Matsui and H.-Y. Kim 2000. Crop ecosystem responses to climatic change: rice. In Reddy, K.R. and H.F. Hodges ed., *Climate Change and Global Crop Productivity*. CAB International, Wallingford. 81—106.
- Houghton, J.T., L.G. Meira-Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell ed. 1996. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 572.
- 今井勝 1988. 二酸化炭素と作物生産. *日作紀* 57: 380—391.
- 今井勝・村田吉男 1976. 作物の生長と物質生産におよぼす炭酸ガス濃度の影響. 第1報 葉面生長, 乾物生長, 分げつ, 分配率及び蒸散におよぼす影響. *日作紀* 45: 598—606.
- Jaeger, H.J., U. Hertstein and A. Fangmeier 1999. The European stress physiology and climate experiment (ESPACE-wheat): introduction, aims and methodology. *Eur. J. Agron.* 10: 155—162.
- Jamieson, P.D., J. Bernsten, F. Ewert, B.A. Kimball, J.E. Olesen, P. J. Pinter, Jr., J.R. Porter and M.A. Semenov 2000. Modelling CO₂ effects on wheat with varying nitrogen supplies. *Agric. Ecosys. Environ.* 82: 27—37.
- Jarvis, A.J., T.A. Mansfield and W.J. Davies 1999. Stomatal behaviour, photosynthesis and transpiration under rising CO₂. *Plant Cell Environ.* 22: 639—648.
- Jones, P., L.H. Allen, Jr., J.W. Jones and R. Valle 1985. Photosynthesis and transpiration responses of soybean canopies to short- and long-term CO₂ treatment. *Agron. J.* 77: 119—126.
- Jones, P., L. Collins and K.T. Ingram 1995. Open top chambers for field studies of crop response to elevated CO₂ and temperature. *Trans. ASAE* 38: 1195—1201.
- Jordan, D.N., S.F. Zitzer, G.R. Hendrey, K.F. Lewin, J. Nagy, R.S. Nowak, S.D. Smith, J.S. Coleman and J.R. Seeman 1999. Biotic, abiotic and performance aspects of the Nevada Desert free-air CO₂ enrichment (FACE) facility. *Glob. Chang. Biol.* 5: 659—668.
- Karnosky, D.F., B. Mankovska, K. Percy, R.E. Dickson, G.K. Podila, J. Sober, A. Noormets, G.R. Hendrey, M.D. Coleman, M. Kubiske, K.S. Pregitzer and J.G. Isebrands 1999. Effects of tropospheric O₃ on trembling aspen and interaction with CO₂: results from an O₃-gradient and a FACE experiment. *Water Air Soil Pollut.* 116: 311—312.
- 金漢龍・堀江武・中川博視・和田晋征 1996a. 高温・高 CO₂ 濃度環境が水稻の生育・収量に及ぼす影響. 第1報 生育, 乾物生産および生長諸形質について. *日作紀* 65: 634—643.
- 金漢龍・堀江武・中川博視・和田晋征 1996b. 高温・高 CO₂ 濃度環境が水稻の生育・収量に及ぼす影響. 第2報 収量および収量構成要素について. *日作紀* 65: 644—651.
- Kim, H.-Y., M. Lieffering, S. Miura, K. Kobayashi and M. Okada 2001. The effects of free air CO₂ enrichment on nitrogen uptake and yield of paddy rice. *New Phytol.* 150 (in press).
- Kimball, B.A. 1983. Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agron. J.* 75: 779—788.
- Kimball, B.A. 1992. Cost comparisons among free-air CO₂ enrichment, open-top chamber, and sunlit controlled-environment chamber methods of CO₂ exposure. *Crit. Rev. Plant Sci.* 11: 265—270.
- Kimball, B.A., R.L. LaMorte, P.J. Pinter, Jr., G.W. Wall, D.J. Hunsaker, F.J. Adamsen, S.W. Leavitt, T.L. Thompson, A.D. Matthias and T.J. Brooks 1999. Free-air CO₂ enrichment and soil nitrogen effects on energy balance and evapotranspiration of wheat. *Water Resour. Res.* 35: 1179—1190.
- Kimball, B.A., R.L. LaMorte, R.S. Seay, P.J. Pinter, Jr., R.R.

- Rokey, D.J. Hunsaker, W.A. Dugas, M.L. Heuer, J.R. Mauney, G.R. Hendery, K.F. Lewin and J. Nagy 1994. Effects of free-air CO₂ enrichment on energy balance and evapotranspiration of cotton. *Agric. For. Meteorol.* 70 : 259—278.
- Kimball, B.A., J.R. Mauney, F.S. Nakayama and S.B. Idso 1993. Effects of increasing atmospheric CO₂ on vegetation. *Vegetatio* 104/105 : 65—75.
- Kimball, B.A., P.J. Pinter, Jr., G.W. Wall, R.L. Garcia, R.L. LaMorte, P.M.C. Jak, K.F.A. Frumau and H.F. Vugts 1997. Comparison of responses of vegetation to elevated carbon dioxide in free-air and open-top chamber facilities. In Allen, Jr., L.H., M.B. Kirkham, D.M. Olszyk and C.E. Whitman ed., *Advances in Carbon Dioxide Effects Research*. ASA Special Publication No. 61. ASA, CSSA, and SSSA, Madison. 113—130.
- 小林和彦 1998. 地球環境変動と作物生育予測. 農業環境技術研究所編, 21世紀の食料確保と農業環境. 農林水産省農業環境技術研究所, つくば. 102—125.
- Kobayashi, K., M. Lieffering and H.-Y. Kim 2001. Growth and yield of paddy rice under free-air CO₂ enrichment. In Shiyomi, M. and H. Koizumi ed., *Structure and Function in Agroecosystem Design and Management*. CRC Press, Boca Raton. 371—395.
- Kobayashi, K., M. Okada and H.-Y. Kim 1999. The free-air CO₂ enrichment (FACE) with rice in Japan. *Proc. Int. Symp. "World Food Security"*, Kyoto. 213—215.
- 小泉博・大黒俊哉・鞠子茂 2000. 草原・砂漠の生態. 共立出版, 東京. 250.
- Krenzer, Jr., E.G. and D.N. Moss 1975. Carbon dioxide enrichment effects upon yield and yield components in wheat. *Crop Sci.* 15 : 71—77.
- Lawlor, D.W. and R.A.C. Mitchell 1991. The effects of increasing CO₂ on crop photosynthesis and productivity : a review of field studies. *Plant Cell Environ.* 14 : 807—818.
- Lawlor, D.W. and R.A.C. Mitchell 2000. Crop ecosystem responses to climatic change : Wheat. In Reddy, K.R. and H.F. Hodges ed., *Climate Change and Global Crop Productivity*. CAB International, Wallingford. 57—80.
- Lewin, K.F., G.R. Hendrey and Z. Kolber 1992. Brookhaven National Laboratory free-air carbon dioxide enrichment facility. *Crit. Rev. Plant Sci.* 11 : 135—141.
- Long, S.P. 1991. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentrations : Has its importance been underestimated? *Plant Cell Environ.* 14 : 729—739.
- Luo, Y. and J.F. Reynolds 1999. Validity of extrapolating field CO₂ experiments to predict carbon sequestration in natural ecosystems. *Ecology* 80 : 1568—1583.
- Luscher, A., U. Hartwig, D. Suiter and J. Noesberger 2000. Direct evidence that symbiotic N₂ fixation in fertile grassland is an important trait for a strong response of plants to elevated atmospheric CO₂. *Glob. Chang. Biol.* 6 : 655—662.
- McLeod, A.R. and S.P. Long 1999. Free-air carbon dioxide enrichment (FACE) in global change research : A review. *Adv. Ecol. Res.* 28 : 1—56.
- Miglietta, F., A. Giuntoli and M. Bindi 1996. The effect of free air carbon dioxide enrichment (FACE) and soil nitrogen availability on the photosynthetic capacity of wheat. *Photosynth. Res.* 47 : 281—290.
- Miglietta, F., M. Lanini, M. Bindi and V. Magliulo 1997. Free air CO₂ enrichment of potato (*Solanum tuberosum*, L.) : design and performance of the CO₂-fumigation system. *Glob. Chang. Biol.* 3 : 417—427.
- Miglietta, F., V. Magliulo, M. Bindi, L. Cerio, F.P. Vaccari, V. LoDuca and A. Peressotti 1998. Free air CO₂ enrichment of potato (*Solanum tuberosum*, L.) : development, growth and yield. *Glob. Chang. Biol.* 4 : 163—172.
- Morison, J.I.L. and D.W. Lawlor 1999. Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth. *Plant Cell Environ.* 22 : 659—682.
- 諸隈正裕・矢島正晴・米村正一郎 1996. CO₂ 濃度上昇と温暖化が水稻の生育及び収量に及ぼす影響. *日作紀* 65 : 222—228.
- Moya, T.B., L.H. Ziska, O.S. Namuco and D. Olszyk 1998. Growth dynamics and genotypic variation in tropical, field-grown paddy rice (*Oryza sativa* L.) in response to increasing carbon dioxide and temperature. *Glob. Chang. Biol.* 4 : 645—656.
- Moya, T.B., L.H. Ziska, C. Weldon, J.E.P. Quilang and P. Jones 1997. Microclimate in open-top chambers : implications for predicting climate change effects on rice production. *Trans. ASAE* 40 : 739—747.
- 村田吉男 1962. 空気中の炭酸ガス濃度と作物の生育. *農及園* 37 : 1—10.
- Nagy, J., K.F. Lewin, G.R. Hendrey, E.H. Hassinger and R.L. LaMorte 1994. FACE facility CO₂ concentration control and CO₂ use in 1990 and 1991. *Agric. For. Meteorol.* 70 : 31—48.
- Naidu, S.L. and E.H. Delucia 1999. First-year growth response of trees in an intact forest exposed to elevated CO₂. *Glob. Chang. Biol.* 5 : 609—613.
- Nakagawa, H. and T. Horie 2000. Rice response to elevated CO₂ and temperature. *Glob. Environ. Res.* 3 : 101—113.
- Newton, P.C.D. 1991. Direct effects of increasing carbon dioxide on pasture plants and communities. *N. Z. J. Agric. Res.* 34 : 1—24.
- Newton, P.C.D., C.C. Bell and H. Clark 1996. Carbon dioxide emissions from mineral springs in Northland and the potential of these sites for studying the effects of elevated carbon dioxide on pastures. *N. Z. J. Agric. Res.* 39 : 33—40.
- Nijs, I. 1996. Free Air Temperature Increase (FATI) : a new tool to study global warming effect on plants in the field. *Plant Cell Environ.* 19 : 495—502.
- Norby, R.J., S.D. Wullschleger, C.A. Gunderson, D.W. Johnson and R. Ceulemans 1999. Tree responses to rising CO₂ in field experiments : implications for the future forest. *Plant Cell Environ.* 22 : 683—714.
- OECD 1999. Action against Climate Change : The Kyoto Protocol and Beyond. OECD Publications, Paris. 138.
- Okada, M., T. Hamasaki and T. Hayashi 1995. Temperature gradient chambers for research on global environment change. 1. Thermal environment in a large chamber. *Biotronics* 24 : 85—97.

- Okada, M., T. Hamasaki and R. Sameshima 2000. Pre-air-conditioned temperature gradient chambers for research on temperature stress in plants. *Biotronics* 29 (in press).
- Okada, M., M. Lieffering, H. Nakamura, M. Yoshimoto, H.-Y. Kim and K. Kobayashi 2001. Free-air CO₂ enrichment (FACE) using pure CO₂ injection: system description. *New Phytol.* 150 (in press).
- Osborne, C.P., J. LaRoche, R.L. Garcia, B.A. Kimball, G.W. Wall, P.J. Pinter, Jr., R.L. LaMorte, G.R. Hendrey and S.P. Long 1998. Does leaf position within a canopy affect acclimation of photosynthesis to elevated CO₂? *Plant Physiol.* 117: 1037–1045.
- Parry, M., N. Arnell, M. Hulme, R. Nicholls and M. Livermore 1998. Adapting to the inevitable. *Nature* 395: 741.
- Pinter, Jr., P.J., B.A. Kimball, G.W. Wall, R.L. LaMorte, D.J. Hunsaker, F.J. Adamsen, K.F.A. Frumau, H.F. Vugts, G.R. Hendrey, K.F. Lewin, J. Nagy, H.B. Johnson, F. Wechsung, S.W. Leavitt, T.L. Thompson, A.D. Matthias and T.J. Brooks 2000. Free-air CO₂ enrichment (FACE): blower effects on wheat canopy microclimate and plant development. *Agric. For. Meteorol.* 103: 319–333.
- Pittock, A.B. and R.N. Jones 2000. Adaptation to what and why? *Environ. Monit. Assess.* 61: 9–35.
- Poorter, H. 1993. Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration. *Vegetatio* 104/105: 77–97.
- Raschi, A., F. Miglietta, R. Tognetti and P.R. van Gardingen 1997. *Plant Responses to Elevated CO₂: Evidence from Natural Springs*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 272.
- Rawson, H.M. 1995. Yield responses of two wheat genotypes to carbon dioxide and temperature in field studies using temperature gradient tunnels. *Aust. J. Plant Physiol.* 22: 23–32.
- Rawson, H.M., R.M. Gifford and B.N. Condon 1995. Temperature gradient chambers for research on global environmental change. I. Portable chambers for research on short-stature vegetation. *Plant Cell Environ.* 18: 1048–1054.
- Reddy, K.R. and H.F. Hodges ed. 2000. *Climate Change and Global Crop Productivity*. CAB International, Wallingford. 472.
- Reddy, V.R., B. Acock and M.C. Acock 1989. Seasonal carbon and nitrogen accumulation in relation to net carbon dioxide exchange in a carbon dioxide enriched soybean canopy. *Agron. J.* 81: 78–83.
- Rogers, H.H., J.D. Cure and J.M. Smith 1986. Soybean growth and yield response to elevated carbon dioxide. *Agric. Ecosys. Environ.* 16: 113–128.
- Rogers, H.H., W.W. Heck and A.S. Heagle 1983. A field technique for the study of plant responses to elevated carbon dioxide concentrations. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 33, 42–44.
- Sakai, H., K. Yagi, K. Kobayashi and S. Kawashima 2001. Carbon balance of rice canopy under elevated CO₂ condition. *New Phytol.* 150 (in press).
- Saxe, H., D.S. Ellsworth and J. Heath 1998. Tansley Review No. 98. Tree and forest functioning in an enriched CO₂ atmosphere. *New Phytol.* 139: 395–436.
- Schlesinger, W.H. 1997. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. Second edition. Academic Press, New York. 588.
- Stitt, M. and A. Krapp 1999. The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: the physiological and molecular background. *Plant Cell Environ.* 22: 583–621.
- Thomas, R.B. and B.R. Strain 1991. Root restriction as a factor in photosynthetic acclimation of cotton seedlings grown in elevated carbon dioxide. *Plant Physiol.* 96: 627–634.
- Tubiello, F.N., C. Rosenzweig, B.A. Kimball, P.J. Pinter, Jr., G.W. Wall, D.J. Hunsaker, R.L. LaMorte and R.L. Garcia 1999. Testing CERES - Wheat with free-air carbon dioxide enrichment (FACE) experiment data: CO₂ and water interactions. *Agron. J.* 91: 247–255.
- van de Geijn, S.C. and J. Goudriaan 1996. The effects of elevated CO₂ and temperature change on transpiration and crop water use. In Bazzaz, F. and W. Sombroek ed. *Global Climate Change and Agricultural Production*. Wiley, Chichester. 101–121.
- van Oijen, M., A.H.C.M. Schapendonk, M.J.H. Jansen, C.S. Pot, J. van Kleef and J. Goudriaan 1998. Effects of elevated CO₂ on development and morphology of spring wheat grown in cooled and non-cooled open-top chambers. *Aust. J. Plant Physiol.* 25: 617–626.
- van Oijen, M., A.H.C.M. Schapendonk, M.J.H. Jansen, C.S. Pot, and R. Maciorowski 1999. Do open-top chambers overestimate the effects of rising CO₂ on plants? An analysis using spring wheat. *Glob. Chang. Biol.* 5: 411–421.
- Wand, S.J.E., G.F. Midgley and M.H. Jones 1999. Responses of wild C₄ and C₃ grass (Poaceae) species to elevated atmospheric CO₂ concentration: a meta-analytic test of current theories and perceptions. *Glob. Chang. Biol.* 5: 723–741.
- Watson, R.T., M.C. Zinyowera and R.H. Moss ed. 1996. *Climate change 1995- Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 879.
- Whisler, F.D., B. Acock, D.N. Baker, R.E. Fye, H.F. Hodges, J.R. Lambert, H.E. Lemmon, J.M. McKinion and V.R. Reddy 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Adv. Agron.* 40: 141–208.
- Woodward, F.I. 1993. Plant responses to past concentrations of CO₂. *Vegetatio* 104/105: 145–155.
- Yeates, G.W., P.C.D. Newton and D.J. Ross 1999. Response of soil nematode fauna to naturally elevated CO₂ levels influenced by soil pattern. *Nematology* 1: 285–293.
- Yoshida, S. 1973. Effects of CO₂ enrichment at different stages of panicle development on yield components and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Soil Sci. Plant Nutr.* 19: 311–316.
- Ziska, L.H., O.S. Namuco, T.B. Moya and J. Quilang 1997. Growth and yield response of field-grown tropical rice to increasing carbon dioxide and air temperature. *Agron. J.* 89: 45–53.

FACE (free-air CO₂ enrichment) experiment: Kazuhiko KOBAYASHI* (*Natl. Inst. Agro-Environ. Sci., Tsukuba, 305-8604, Japan*)