



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	開放系の二酸化炭素とオゾン付加施設の終了 : 2002~2024年の軌跡
Author(s)	小池, 孝良; KOIKE, Takayoshi; 渡邊, 陽子 他
Citation	北方森林保全技術, 42, 29-38
Issue Date	2024
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99066
Type	departmental bulletin paper
File Information	43_1-7.pdf



I - 7 開放系の二酸化炭素とオゾン付加施設の終了

—2002～2024 年の軌跡—

小池 孝良^{1,2}, 渡邊 陽子^{1,2}, 渡辺 誠^{2,3}, 星加 康智^{2,4}, 船田 良^{2,3}, 高木 健太郎¹,
北岡 哲^{1,2}, 渡部 敏裕², 佐藤 冬樹¹, 笹 賀一郎¹

1 : 北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター, 2 : 北海道大学・農学研究院, 3 : 東京農工大学・農学研究院, 4 : Institute of Research on Terrestrial Ecosystems (IRET), National Research Council of Italy (CNR)

はじめに

本稿では皆様のご支援で継続してきた札幌実験林における開放系ガス付加施設 (FACE) (図-1) を利用した 3 種の実験の要点を述べる。特に、北方生物圏フィールド科学センター森林圏の実験施設に位置づけられた FACE の建設・維持の話題と、変則的であるが、第一著者の経験を踏まえ、本実験の意味を 1970 年頃からの地球環境変化研究の流れを踏まえ論じたい。



図-1. 2003 年秋の開放系 CO₂ 付加施設のリング全景 (実験苗畑 ; 上田龍四郎氏提供)

1970 年代の光合成データは、大気 CO₂ 濃度を 300 ppm に換算し、先行研究のデータとの比較が求められた (戸塚, 1966)。光合成の生態学的研究に接したのは、学部 2 年生で拝聴できた「玉城嘉十郎記念講演会」での門司正己教授の“物質生産の生態学”に魅了されたことにあった。当時、地球の扶養力を世界中で調べる IBP (国際生物学事業計画 1965~1974) が走っており (光合成辞典)、林学 (今の森林科学の一部) の方向を見た気がした (佐藤, 1954)。一方で、高度経済成長のひずみとしての公害が健在化し、大気汚染は深刻化した。その中で都市緑地の重要性をリモセン技術で追いかけている先輩の姿は、頼もしく思えた。

1990 年、アメリカ科学財団 (NSF) の資金による“地球環境変化における針葉樹林の役割”をテキスト化するプロジェクトに参加する機会を得て、4 つのキーワード (獲得・成長・分配・[地球環境への] 貢献) を選ぶのに丸半日 (6 時間) かけて確定するプロセスに、研究の進め方の本質を学んだ (Smith & Hinkley, 1995; 渡辺・小池, 2013)。そして、日米会議での開放系大気 CO₂ 増加 (FACE) 実験への要請 (高木・小池, 2002) が、開放系実験実行の決め手になった。なお、2006 年までの一連の流れは、“地球温暖化と植物”としてまとめた (小池, 2006)。

1) 開放系ガス付加実験へ

第一著者は、学生時代から苗木を利用して、当時、木材価格の高かったヒノキの環境応答を制御環境によって栽培試験を行ない (Koike, 1982)、光合成の場であるチラコイド膜を構成する糖脂質の脂肪酸組成 (特に不飽和度 = 二重結合の数) の季節変化を追っていた (小池, 1982)。また前々職当時、林業試験場北海道支場では、温度、緩やかな湿度、大気 CO₂ 濃度以上の環境

制御、日長（長日）の制御可能な人工気象室（生物環境調節実験棟）を利用して、高 CO₂ 環境への応答を調べた（小池・田淵，1992）。当時、CO₂ も光と同じく線型要因（例えば、萩原，1996）として考えていた。しかし、人工気象室での高 CO₂（700 ppm）で、一定期間育成した個体では、期待していた線型の光合成応答は観測されなかった（小池ら，1992）。

1970 年代、施設園芸で温度、湿度、土壌養分を理想的に整えた環境であっても収量が増加しない現象は、高 CO₂ 環境下での光合成応答に関して潜在的な光合成の考えから解釈された（Aoki & Yabuki, 1977）。その後、Lemon (1983) が「CO₂ と植物」のテキストをまとめ、その後、米国エネルギー省（USDA）の監修によって、核戦争後の“冬”の影響も踏まえた CO₂ の植物生産に与える影響がまとめられた。そこでの新しい視点は、Aoki & Yabuki (1977) が対象としたのはメロンなど大きなシンク（=果実）を持つ材料であり、野生植物への影響が判然としなかった点を踏まえ、様々な植物種を対象にしていた点にあった。ここに、開放系実験に向かう理由があった（Arp, 1991）。

将来の CO₂ への応答の重要性を考えるとときに“種（species）”の 1 つずつを考えると実験では反応を確認しきれない。このために、環境応答の共通性に注目し、成長だけではなく分解系にも注目し、機能タイプでの解析を進める事になった（小池・大崎，1997）。同時に、開放系研究の重要性が浮かび上がってきた（Arp, 1991）。その総説の内容では、図-2 に示す通り、5 リットル以下の鉢植えによる実験では、高 CO₂ への反応が通常大気 CO₂ での栽培個体と比較して、1 以下になることを指摘した。つまり、「負の制御」に注目し、世界中で進めていた制御環境（含・OTC：オープントップ

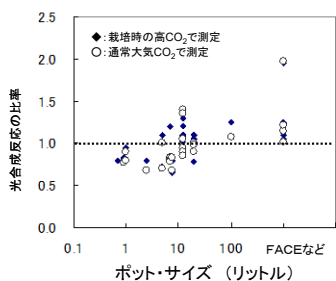


図-2. シンク・ソースから見た CO₂ 応答実験 (Arp 1991 から)

チェンバー;天井の空いた囲いで覆い、下部から目的とする CO₂、その他のガスや気温を上げる事ができる)の見直しが始まった。これを受けてスイス（高地草原）と米国（テーダマツ人工林）では、開放系の CO₂ 付加施設 (FACE) が登場した (Hendry, 1992)。

日本では岩手県雫石の水田を利用した Rice-FACE (1998~2008) が設けられ（小林，2001）、当時、東京勤務であった小池は 1995 年にその計画を知った。それだけに、日米会議の結果、北大 FACE を開始することに強いたためらいがあった。理由は、後述するが、膨大な維持費のかかることにあった。その後、上記 FACE は、筑波に移設され（臼井ら，2013；リーダーは元北大の長谷川利拓氏）、2017 年まで実施された（日本農業気象学会，2018）。

日本では岩手県雫石の水田を利用した Rice-FACE (1998~2008)

2) CO₂ 付加実験手法の変遷

高 CO₂ に対する植物の影響評価は、施設園芸から始まったが、その後、人工気象室での研究

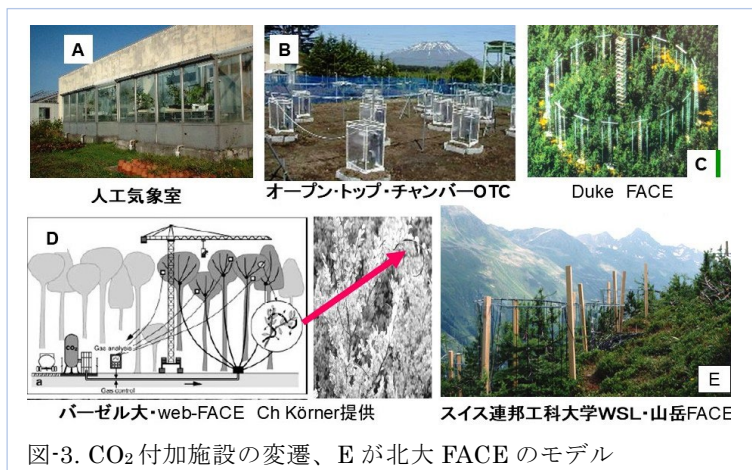


図-3. CO₂ 付加施設の変遷、E が北大 FACE のモデル

が実施された（図-3A）。続いて OTC（図-3B）、FACE（図-3C）、そして web-FACE が導入された（図-3D）。人工気象室は施設を作成するために膨大な予算が必要であり、OTC の建設費は人工気象より安価であるが、自然条件に比べると、風、日射などに不自然な点が出てくる。そこで、CO₂ の付加が可能で、根の成長抑制がないとされる FACE が考案された（Hendry, 1992；小池

ら、1996)。実際には、根を無限に伸ばすことはなく、リング内の落葉落枝は高い C/N 比を持つことから、リターの初期分解が遅れ、結果として植物体は養分欠乏になった。その結果、FACE であっても「負の制御」が確認された (Eguchi et al., 2008a)。

実は、計画当初、約 2 億円の予算が示されたので、後発 FACE として、世界では事例のないミズナラを対象に、苫小牧研究林での開設を予定し、試験地場所の整地などを行っていた。しかし、実際に予算の内示があつて、当初提示額の 1/10 であつたことから、辞退しようとした。しかし、文科省直轄の研究 (RR2002) として決定されており実施せざるを得なかつた。旧知・米国のジョージア大学 R.O. Teskey 教授の支援のもと、最も予算のかかる維持費 (CO₂ 代金) を節約するシステムの紹介を、日米会議で FACE 実行を強く要請したデューク大学の Ram Oren 教授から受けた。これを受け、スイス・Basel 大学の Ch. Körner 教授の web-FACE (Pepin & Körner, 2002) を見学に行った。しかし、予算、人的構成など規模が違い過ぎて導入は困難と判断した。そこで、かつて PD で滞在したスイス連邦工科大学・森林・雪・景観研究所 (WSL) の元の上司、R. Häslér の案内によって Basel 大学との共同研究 (かつて小池) の試験地であつたダボスの山岳 FACE にヒントを得て“北大 FACE”のアイデアを得ることができた。

予算決定後、急遽、入札の手続きに入ったが、予想通り応札がない中で (見たことのない施設の作成に応じる会社はなかつた)、予算は執行されており、年度末が近づき、小池は焦つていた。その際、調達課の“指導”によって、科研 (展開研究) で野外での CO₂ 制御機器を作成し (柴田, 2003)、ある程度実績のあつたダルトン KK が候補になつた。実施場所は予算規模と実施計画から、札幌研究林長であつた笹賀一郎氏との打ち合わせの結果、2002 年度末には実験苗畑において実施されることになつた (結果論ではあるが、フィールド調査に基礎をおく大学院講座では、陸橋があつて交通事故などの心配の少ない札幌実験林での研究は理想的であつた。ただし学部では、“森林研究ではない”という批判はあつた。)

振り返ると予算内示から約 6 ヶ月かかつてようやく契約ができた。スイス山岳 FACE の写真を基礎に、ダルトンの技師・上田龍四郎氏が、北大 FACE も設計・施工した。なお、同氏は、その卓越した技術で、森林総研・北海道支所人工気象室の CO₂ 制御、同・東北支所での 16 基 OTC を設計・施工していた実績があつた。

設計の指針と施工

FACE の足場は地中に 20 cm x 20 cm 角、長さ 50 cm 程のコンクリートの支柱を埋め、その中に足場パイプを挿入し、垂直を調整し、砂をパイプとコンクリート柱板に入れた (図-4)。



図-4. FACE の支柱設置と基礎部分の施工の概要 (上田龍四郎氏提供)

さらに、コンクリート柱板の底には 40 cm x 40 cm 厚み 7 cm のコンクリートの基石を設置していた。そして単管を設置する部分には砂を入れ、柔軟性と安定化を確保するための施工が実施された。基石は各 FACE リングについて 6 個であつた。このコンクリート柱は、ユンボで掘って取り出すことが望まれる。

なお、庁舎近くから各 FACE リングまでの電源ケーブルや CO₂ 搬送パイプは地下約 60 cm 深さに、側溝に沿って埋設された。同時に、ダルトンによる液化 CO₂ からの CO₂ ガス製造用の気化器が設置された (図-5)。なお、この気化器は、ダルトンが設置した。これの設置は北海道

の条例に従う措置であったのだが、これを理解するには、小池は2年かかった**。



図-5. FACEの制御部分（上段）と気化器の設置（下段）

写真提供：上田龍四郎氏

その結果、随意契約が認められた。北海道の条例では、ガスの製造行為を行うには、足場の安定性に対する大規模な土木工事が求められているが、苗畑なので原状復帰が実験終了後には求められた（図-5 下段左）。担当の方の言葉「形は違うがコピー機のレンタルと同じだ！液化CO₂はトナー。FACEはコピー部分」。これ以降、調達課からの“指導”はなくなった。法律の解釈と応用力の重要性を強く実感した。

**：毎年、調達課からは予算執行に関して、強い指導があった。それは、CO₂の供給に関してであった。“随意契約”の必然性が解らない！ということであった。ダルトンの納入価格は、他社に比べ約30%低価格であったが、毎年、競争入札にすることが求められ、不正の温床のような扱いを受けた。調達課職員に前年見学もしていただいたが、“特殊なCO₂であるなら認める”とか、“ガスメーターの設置”を求めた。

しかし、ある年度初めに視察された方は、庁舎手前の気化器の役割についての説明を求め、その後、FACEリングを見学された。

FACE 研究の開始と成果

北大FACEのCO₂濃度の制御能を、直ちに、高木氏ら（2004）と調査した結果、施設の性能が担保された。さらに、CO₂制御器には高分解能は必要とせず、野外での耐久性が重視されることから、フィンランドのVaisala社の機器を採用した（Eguchi et al., 2005）（図-5上）。幸い2002年まで継続した科研・別枠研究（京大-北大-名大）を“助走”研究と位置づけたため、



図-6. FACEリング内での苗木の育成（左）とライゾトロンチェンバー（アクリルチューブ）の観測端（右）

RR2002研究への移行も研究林では比較的的理解が得られた。FACEを開始する際に、スイスでは「10年以上継続できないなら、このような研究に着手すべきではない」という指摘を受けた。それは最短でも10年継続しないと生態系としての応答を確認できないからである。幸いに科研と民間からの研究費の支援があった、2006～2009年の期間のCO₂

付加を継続できた。さらに、幸いに、学部2年時から高CO₂に関連した研究に強い関心を持っていた木材生物学分野から江口則和氏が進学され、5年後には「大気中CO₂濃度増加に伴う冷温帯落葉樹木の炭素固定能力の変化に関する研究」（2007年度）として博士論文を書き上げた。蒸散抑制の道管径への効果（Eguchi et al., 2008b）とFACEでも負の制御があることを見出した（Eguchi et al., 2008a）。また多くの修士学生（2007年からは学部生も参加）との研究テーマはFACE施設に依存した内容を進めた。RR2002の最終年には、幸いなことに基盤研究A、続いて住友財団の研究費が採択され、PDの里村多香美博士（菌根菌の研究者）にもお出でいただき、共生菌類の研究が進んだ。根の成長も調査し、ライゾトロンによる観察によって（図-6右）、細根の回転率が高CO₂で加速されることを見出した（Wang et al., 2016）。

続いて、通称、”寺島科研”とよんでいた新学術領域「植物の高CO₂応答を徹底解明する分野縦断コンソーシアム」のマクロ系を扱う計画班メンバーとして参画できた（2009～2013年）⁺。

狙いは、高 CO₂ 環境では気孔が閉鎖気味になって蒸散速度が抑制されるので道管径が小さくなり、容積密度が上昇する可能性を検討した。PD として組織化学・植物解剖学の渡邊陽子博士も参加され、水分生理学的視点を加味した研究を推進された (Watanabe et al., 2010)。同時に高 CO₂ で生育した樹木葉からの“好氣的メタン発生”の可能性に迫った (Kitaoka et al., 2007; 渡辺, 2009)。前者は個葉レベルでは蒸散は抑制されたが、分枝が進むことから上層木の葉量が増え、気孔閉鎖の効果は相殺された。また、FACE 区では、林床が嫌気条件になって、メタン発生が確認された (小池ら, 2025)。一方、好氣的メタン発生は、ウダイカンバとミズナラはカラマツの約 1/5 であった (1.0 ngCH₄g⁻¹hr⁻¹)。また、水田からの放出に比べ、約 1/200 以下で、生態系への影響は極めて小さかった。森林域のメタン動態は坂部 (2022) に詳しい。

+ : 生態学会の重鎮 (なんと 2 名の会長) からは、“高 CO₂ に対する研究を進めるにしても、頭を使ってやってほしい!” と指摘を受けた。当時 TH 大のグループは CO₂ だけを出す噴出孔を利用した研究をやり始めていた。生態学の研究は、ああいう頭脳で勝負する研究がほしい、と (獲得予算の金額への) “お褒め” 頂いた。←反論はしなかったが、CO₂ 噴出孔のことは、1995 年、東京勤務時に気づいていた。当時、大気環境学研究室の伊豆田猛先生と議論をする中で、「鬼の顔になっていたね」(理由は、CO₂ 噴出孔を知ったきっかけが自衛隊員の方 2 名の高 CO₂ 中毒による事故死であった。) とお互いの顔を見合わせ、CO₂ 噴出孔の利用を断念した経緯があった。アメリカからは、日本全体の CO₂ 噴出孔の調査に来ていた (Cook et al., 2000)。伊豆田氏とも話したが、研究者で有る前に人の心を保ちたかった。

開放系オゾン付加施設の開設と FACE からの転換

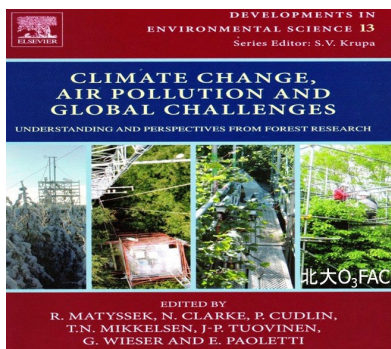


図-7. COST 報告書の表紙 (右端 : 北大 ; Matyssek et al., 2013)

2011 年から 5 年間、地球環境研究推進費 (代表 : 伊豆田猛) の野外実験「葉のオゾン吸収量に基づいた成木に対するオゾンの影響評価」の分担を行った。分担内容は幼木 (サイズ : 5~10 m) への O₃ の影響評価であった。学術研究員として参加された渡辺 誠博士と推進費 PD の星加康智博士を得て、数々の成果を上げることができた。オゾン付加の方法は、疑似反復であったが、先行していた協定校ミュンヘン工科大学の Kranzberg 試験地のシステムを採用した (図-7)。光栄なことに、COST*** の報告書の表紙の一角を飾ることができた (図-7 右端)。

***: (European Cooperation in Science and Technology: 欧州科学技術研究協力機構) は、1971 年から始まった政府間合意に基づく枠

組み。欧州における研究開発投資の効率化・一体化を促進し、大学・研究機関・産業界の共同研究を促進する研究協力プログラム。未発表データでも貢献が認められると学術的未発表の扱いであった。

なお、森林総研の交付金プロジェクトに続き、科研 (代表 : 北尾光俊) 「高 CO₂ 環境下におけるスギの CO₂ 吸収機能および材形成へのオゾン影響の解明」に関連して、筑波で、開放系 CO₂-オゾン (O₃) の設計も上田氏が担った。さらに、寺島科研・最終年に向けての推進会議で、“対流圏オゾンの影響を評価できないか?” という指摘があった。しかし、森林総研での実施していた規模の CO₂ と O₃ 付加施設を作成する予算はなく、FACE の延長として、統計処理可能な 16 基からなる OTC を設置した****。幸いにも機作の影響を評価できる反復数が確保できて、CO₂ と O₃ の複合影響の評価を行うことができた (Wang et al., 2015; 汪ら, 2018)。

****: 埋蔵文化財の調査が優先するため、CO₂ パイプ埋設の深さ 50 cm であることが問題視された。しかし、苗畑なので、最低 35 cm までは毎年のように耕耘してきたが、理解を得るまでに時間を要した。

一方、2014 年度から CO₂ 代金の 35% 値上げの予告 (北海道エア・ウォーターからダルトンへ) があって、予算的に維持できなくなった。そこで CO₂ 付加研究を終えた。一方、OTC だけ

ではなく、FACE リングの改良によって開放系オゾン (O_3 -FACE と呼ぶ) の研究を完全 3 反復で実施することができた。この開放系オゾン付加施設が稼働し始めてからは、在ギリシャ日本大使館推薦 1 名、国費留学生 2 名、中国国費留学生 (高水平) 2 名、フィンランド・ヘルシンキ大学博士研究 1 名、ドイツからは Diploma 研究にも院生 1 名、オーストラリア・シドニー大学部生 1 名 (短期留学生) が施設利用で研究に参加してきた。エジプト政府派遣の研究者など、研究プラット・フォームの役割が増えた。



イタリア・陸域生態系研究所の O_3 -FACE全景と付加の様子 中国科学院・北京のポプラへのオゾン付加実験施設

図-8. イタリア (上) (写真提供 Dr. Y. Hoshika) と中国の開放系オゾン付加施設 (Dr. LY Qu)

さらに、中国科学院 (北京、南京)、学振 2 国間協定に基づき、イタリアの陸域生態系研究所からの視察があつて、彼らの施設のモデルとなった (図-8)。ダルトンの上田氏から基本的設計資料がイタリアには提供された。

環境攪乱物質としてのオゾンの作用

対流圏オゾンの前駆物質 (主に NO_2 や VOC など) は、2022 年時点で欧米の約 4 倍量ある

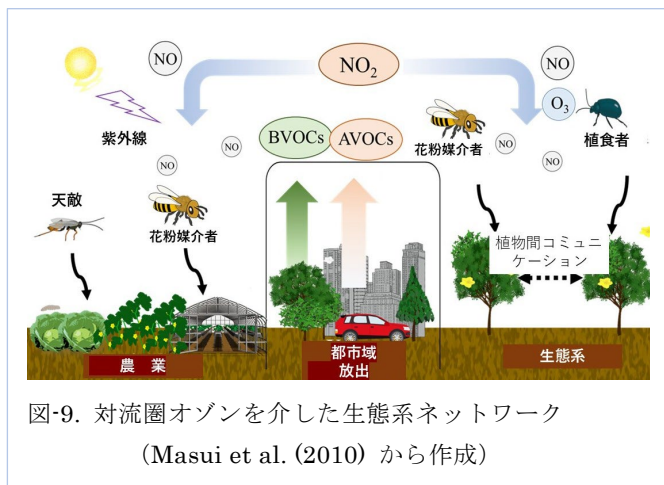


図-9. 対流圏オゾンを経た生態系ネットワーク (Masui et al. (2010) から作成)

ため、その影響は依然大きい。強力な酸化物質であるオゾンは光合成を抑制する (伊豆田, 2020 ; 増井ら, 2025)。従来、成長に関する研究が中心に行われ、環境基準が設定されてきた。言うまでもなく緑色植物の葉を中心とした光合成器官が不可欠である。一方、シラカンバで、まず確認されたが、被食防衛能力が高いはずの通常大気環境下でのハンノキハムシの葉への激害の理由を探る中で、シグナル物質である生物由来の揮発性有機化合物 (BVOC) の構造を変え、

寿命を短くする役割があることを、有機化学の手法を駆使して、生態系ネットワークの一端を増井氏は解明した (増井・博士論文 ; Masui et al., 2023)。農耕地の広がる郊外の田園地帯での訪花性昆虫の活動を介した作物生産への影響にも注目すべきことを NO タイトレーション効果 (吉門, 2019) の視点から明らかにできた。

O_3 -FACE 実験の終了と解体

最大の問題はテフロン・チューブの劣化 (O_3 酸化作用) とニュージーランド製の O_3 モニターの寿命がきっちり 2 年 (途中止めていても 2 年で稼働しなくなった)、 O_3 付加用ポンプの劣化であり、その維持費が確保出来ない状況になったこと、さらに、単管の継ぎ手 (クランプ) にサビが目立ち始めたことがあった。また、2019 年から行ってきたハコヤナギ属 2 種の応答研究にも一定の見通しができた (増井ら, 2022 ; 増井ら, 2025)。そこで RR2002 の管理移譲

を受け、解体を決定した。2025年5月には対照区、6月には苫小牧研究林からの支援を受けて、リングは解体できた（図-10）。再利用できる部分は有効活用が期待される（図-10右）。



図-10. FACE-3の解体風景（左）と利用可能な単管の移動（右）

参加した学生諸氏

実験は主に大学院生（修士・博士課程）と一部、学部生のそれぞれの論文研究として実施された。そのメンバーは、日本人と海外からの派遣国の奨学生（フィンランド、エジプト、アメリカ・フルブライト、中国・高水平制度）であり、短期留学生（2ヶ月～1年）らと国内研修

生を含む日本人学生は、ほぼ同数であった。その数は、10ヶ国（中国、韓国、キプロス～ギリシャ、インドネシアを含む）であった（以下に氏名と所属を示す）。本学学部生にはセンター森林圏の2年時の講義「森林空間機能学・同演習」で紹介（見学会を含む：付録に一部紹介した）し、2014～2019年には文科省の高大協の一環として、岩見沢農業高校のSSH実習として、毎年約40名が見学した（佐野，2014）。

- 1) CO₂研究：江口則和^{5,6}, Kim YongSuk⁵, 原 悠子⁵, 伊藤寛剛⁵, 及川聞多⁵, 森井紀子^{5,6}, 唐津一樹^{5,6}, 松井克彦⁶, 若林啓太⁸, 加村泰裕⁸, (引率教員：半 智史⁸), Jamie Mosel^{5,9},
- 2) O₃研究：稲田直輝⁵, Kam Donggyu⁵, Cong Shi⁵, 岡本昇太⁷, 鈴木優輔⁵, 野中佳祐⁷, Amali Vanderstock^{5,10}, Kyosuke Hikino^{5,11}, Tommy Chen^{5,12}, 渡部祥代⁷, 増井昇⁵, Shahenda Ab-ElEla^{5,13}, WaiLi Yu^{6,14}, Papitchaya Teawkul (Fin)^{6,15}
- 3) CO₂+O₃研究：Evgenios Agathokleous⁵, XiaoNa Wang⁵, Eka Novriyanti⁵, QiaoZhi Mao⁵, 坪 奈津美⁷, Yannan Wang⁵

5：北海道大学・農学院，6：北海道大学・環境科学院，7：北海道大学・農学部，8：東京農工大学・農学部，9：St. Oral College, (Fullbright 奨学生)，10：Biological Institute, The University of Sydney, オーストラリア，11：Department of Environmental Science, Technical University of Munich, ドイツ，12：Department of Forest Science, University of Helsinki, フィンランド，13：Department of Entomology, Cairo University, エジプト，14：Department of Zoology, Patin University, ミャンマー，15：中興大学・昆虫科学（昆虫-植物相互作用グループ）台湾

謝辞

北大 FACE として実施できたシステムの企画、設計、施工、保守点検を20年にわたって対応して下さった上田龍四郎氏（大和空調～ダルトン KK）には、心から感謝したい。上田氏の卓越した設計・施工技術は、記したように海外でも高く評価されている。また、維持管理には、仔細にわたる対応をしてくださった林達郎氏（ダルテック）、北方生物圏フィールド科学センター森林圏の皆様、特に、解体にご支援下さった中路林長、高橋廣行統括技術長ら、また、市川一氏、藤戸永志氏、佐々木圭子氏らの実験苗畑の皆様に感謝する。

引用文献

- Aoki, M., Yabuki, K. (1977) Studies on the carbon dioxide enrichment for plant growth. VII. Changes in dry matter, production and photosynthetic rates of cucumber during carbon dioxide enrichment. *Agricul, Meterol*, 18: 475-485.
- Arp, W. J. (1991) Effects of source-sink relations on photosynthetic acclimation to elevated CO₂. *Plant Cell & Environment*, 14: 869-875. doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb01450.x
- Cook, A., Vourious, G. L., Harazoro, Y. (2000) Evaluating the potential for long-term elevated CO₂ exposure studies using CO₂ springs in Japan. *Jour. Agric. Meteorol*, 56: 31-40.

- Eguchi, N., Koike, T., Ueda, T. (2005) Free air CO₂ enrichment experiment in Northern Japan. *Vaisala News*, 169: 15-16.
- Eguchi, N., Karatsu, K., Ueda, T., Funada, R., Takagi, K., Hiura, T., Sasa, K., Koike, T. (2008a) Photosynthetic responses of birch and alder saplings grown in a free air CO₂ enrichment system in northern Japan. *Trees - Structure and Function*, 22: 437-447.
- Eguchi, N., Morii, N., Ueda, T., Funada, R., Takagi, K., Hiura, T., Sasa, K., Koike, T. (2008b) Changes in petiole hydraulic structure and leaf water flow in birch and oak saplings in an enhanced CO₂ environment. *Tree Physiology*, 28: 287-295.
- 萩原秋男 (1996) 自己間引き個体群における密度効果のロジスティック理論. 名古屋大学演習林報告, 15: 31-50.
- Hendry, G. R. (1992) *FACE: Free-Air CO₂ Enrichment for Plant Research in the Field*. C.K. Smoley/CRC Press, Boca Raton, FL. USA.
- 伊豆田 猛 (2020) 大気環境と植物. 朝倉書店.
- Kitaoka, S., Sakata, T., Koike, T., Tobita, H., Uemura, A., Kitao, M., Maruyama, Y., Sasa, K., Utsugi, H. (2007) Methane Emission from Leaves of Larch, Birch and Oak Saplings Grown at Elevated CO₂ Concentration in Northern Japan —Preliminary Study—. *Journal of Agricultural Meteorology*, 63: 201-206. <https://doi.org/10.2480/agrmet.63.201>
- 小林和彦 (2001) FACE (開放系大気 CO₂ 増加) 実験. 日本作物会記事, 70: 1-16.
- Koike, T. (1982) The formation of new leaves on seedlings of *Chamaecyparis obtusa* S. et Z. treated photoperiodically from summer to winter. *Journal of Japanese Forestry Society*, 64 : 275-279.
- 小池孝良 (1982) ヒノキ葉中の脂肪酸組成の季節変化, 日本林学会北海道支部講演集, 30: 130-132.
- 小池孝良・森 茂太・高橋邦秀・及川 武久 (1995) 温暖化研究の手法とその動向. 森林立地, 37: 28-34.
- 小池孝良 (2006) 地球温暖化と植物. 伊豆田猛ほか, 植物と環境ストレス. コロナ社, 88-144.
- 小池孝良・田淵隆一 (1992) 夏期における主要針葉樹の CO₂-光合成関係. 日本林学会北海道支部論文集, 40: 104-106.
- 小池孝良・田淵隆一・藤村好子・高橋邦秀 (1992) 異なる CO₂ 濃度で成育したトドマツとウダイカンバの光合成. 日本林学会北海道支部論文集, 40: 107-109.
- 小池孝良・大崎 満 (1997) 機能タイプを基礎にした樹木の温暖化環境への反応. 日生態誌, 47: 307-313. https://doi.org/10.18960/seitai.47.3_307
- 小池孝良・Kim YongSuk・北岡 哲・渡部敏裕・市川 一・高木健太郎 (2025) 開放系 CO₂ 付加施設を利用した林床からのメタン発生検出一間伐手遅れ林への対策の提案-. 北方森林保全技術, 43: 19-24.
- 光合成辞典 : <https://photosyn.jp/pwiki/index.php> (参照 2025-09-12)
- Lemon, E. R. (1983) CO₂ and Plants: The response of plants to rising levels of atmospheric Carbon Dioxide. *CRC press*, p.302. <https://doi.org/10.1201/9780429046308>
- Masui, N., Shiojiri, K., Agathokleous, E., Tani, A., Koike, T. (2023) Elevated O₃ threatens biological communications mediated by plant volatiles: A review focusing on the urban environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(22):1982-2001. <https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2202105>
- 増井 昇・小池孝良・北岡哲・渡邊陽子・佐藤冬樹・渡部敏裕 (2022) オゾン存在下でのヤマナラシ属二種の病虫害への応答. 樹木医学研究, 26: 26-27.
- 増井 昇・中島大賢・藤戸永志・佐々木圭子・渡部敏裕・小池孝良 (2025) 開放系オゾン付加施設

- 設で育成したドロノキと欧州ヤマナラシ雑種の光合成と揮発性有機炭素化合物の計測. 北方森林保全技術, 43: 25-28.
- Matyssek, R., Clarke, N., Cudlin, P., Mikkelsen, T. N., Tuovinen, J-P., Wieser, G., Paoletti, E. (2013) Climate Change, Air Pollution and Global Challenges: Understanding and Perspectives from Forest Research. *Elsevier Developments in Environmental Science*, Vol. 13.
- 日本農業気象学会 (2018) 第 31 回気象環境研究会「イネの高 CO₂ 応答: FACE 実験でどこまでわかったか」. 日本農業気象学会 HP
- 佐野博志 (2014) 岩見沢農業高校における SSH への取り組み—森林科学科が目指す人材像—. 北方林業, 66: 110-112.
- 佐藤大七郎 (1954) 育林. 朝倉書店.
- 坂部綾香 (2022) 森林における水文循環がメタンガス交換に与える影響. 土壌の物理性, 151:49-55, https://doi.org/10.34467/jsoilphysics.151.0_49
- Smith, W. K., Hinkely, T. M. (1995) *Ecophysiology of coniferous forest*. Academic Press, NY.
ditto (1995) *Resources physiology of conifer forest: Acquisition, allocation, and utilization*. Academic Press, NY.
- Pepin, S., Körner, C. (2002) Web-FACE: a new canopy free-air CO₂ enrichment system for tall trees in mature forests. *Oecologia*, 133: 1-9. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-1008-3>
- RR2002 (Research Revolution) 人・自然・地球共生プロジェクト (陸域生態系モデル作成のためのパラメタリゼーションに関する研究) <https://www.jamstec.go.jp/kakushin21/kyousei/> (参照 2025-08-31)
- 柴田英昭 (2003) 無電源用自動開閉装置付き 6 点式土壌呼吸速度測定装置の開発と実用化. 科研展開 (YY2001-2002) <https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-13556020/>
- 高木健太郎・小池孝良 (2002) 第 9 回日米セミナー: 地球変動ワークショップ「陸域生態系における炭素循環マネージメント」報告. 北方林業, 54: 18-21.
- 高木健太郎・江口則和・上田龍四郎・笹賀一郎・小池孝良 (2004) 樹木を用いた開放系大気 CO₂ 増加実験(FACE)システムにおける二酸化炭素濃度の制御. 北海道の農業気象, 56: 9-16.
- 戸塚 績 (1966) 高等植物の物質生産と炭酸ガス条件. 植物学雑誌, 79: 51-60.
- 白井靖浩・常田岳志・酒井英光・林健太郎・長谷川利拡 (2013) FACE 実験による水田生態系の気候変動応答研究. 化学と生物, 51: 628-633.
- Wang, X., Qu, L., Mao, Q., Watanabe, M., Hoshika, Y., Koyama, A., Kawaguchi, K., Tamai, Y., Koike, T. (2015) Ectomycorrhizal colonization and growth of the hybrid larch F₁ under elevated CO₂ and O₃. *Environmental Pollution*, 197: 116-126.
- Wang, X., Fujita, S., Nakaji, T., Watanabe, M., Satoh, F., Koike, T. (2016) Fine root turnover of Japanese white birch (*Betula platyphylla* var. *japonica*) grown under elevated CO₂ in northern Japan. *Trees*, 30 : 363-374.
- 汪 雁楠・菅井徹人・坪 奈津美・渡部敏裕・小池孝良 (2018) 塩類化土壌で生育させたグイマツ苗木初期成長に対するオゾン付加の影響. 北方森林研究, 66: 51-54.
https://doi.org/10.24494/jfsh.66.0_51
- 渡辺 誠 (2009) 森林は地球温暖化を促進するのか? 好氣的条件下における陸上植物からのメタン放出に関する研究動向. 北方林業, 61: 8-11.
- 渡辺 誠・小池孝良 (2013) 欧州科学技術協力機構 COST 会議: 大気環境と森林管理会議. 北方林業, 65: 144-147.
- Watanabe, Y., Satomura, T., Sasa, K., Funada, R., Koike, T. (2010) Differential anatomical

responses to elevated CO₂ in saplings of four hardwood species. *Plant, Cell & Environment*, 33: 1101-1111.

Wullschleger, S. D., Strahl, M. (2010) *Climate Change: A Controlled Experiment*, Scientific America, March 2010: 78-83. (小池孝良訳：森で実験-気候変動の影響. 日経サイエンス, 2010(6): 2-9)

吉門洋 (2019) 都市圏周辺のオゾン濃度変化と NO タイトレーション (首都圏を中心に). 大気環境学会, 54: 185-193. <https://doi.org/10.11298/taiki.54.185>

付録-1 : 実施した研究課題 (kaken ホームページ参照)

主に科研費の支援を得た (新から旧へ : 分担金があったもののみ記載)。

- 2016~2018 (萌芽) オゾン増加環境での落葉樹の植物起源揮発性有機化合物と食葉性昆虫の動態解明
- 2014~2017 (基盤 B) 開放系オゾン付加施設で生育する冷温帯樹種の成長に及ぼす窒素沈着の影響解明と応用
- 2014~2017 (基盤 C) 気候変動と樹木種内の遺伝的多様性が森林の生態的プロセスに与える複合効果 (中村誠宏)
- 2014~2015 (萌芽) オゾンと CO₂ 複合ストレスがカラマツ属の成長と共生菌類の種多様性に及ぼす影響解明
- 2012~2014 (若手) 大気環境の変化が優良造林種グイマツ雑種 F₁ の温暖化低減能力に与える影響 (渡辺誠)
- 2011~2013 (基盤 B) 開放系施設を用いた O₃ と CO₂ 付加が主要樹種の成長と気孔通道性に及ぼす影響解明
- 2009~2013 (新学術・寺島科研) 開放系大気 CO₂ 増加環境での樹木等の光合成と木部生産機能のパラメータ化
- 2008~2010 (基盤 B) 開放型 CO₂ 付加装置による変動環境下での落葉樹・共生菌系の炭素転流と土壌呼吸評価
- 2008~2010 (学振 PD) 高濃度二酸化炭素環境下における冷温帯樹木のメタン放出量評価と放出機構に関する研究 (渡辺誠)
- 2006~2008 (学振 PD) 窒素配分から見た高 CO₂ 下での有用樹の強光阻害回避機構と木漏れ日の利用の研究 (北岡哲)
- 2006~2007 (展開 B) 開放系二酸化炭素増加処理をした落葉広葉樹の被食防衛物質の局在性の解明
- 2005~2007 (基盤 A) 大気 CO₂ 増加実験に基づく変動環境下での移行帯森林の持続的利用と動態予測
- 2004~2005 (萌芽) FACE (開放系 CO₂ 増加実験) で生育した落葉樹の蒸散速度の解明
- 2002 (特定領域研究) 陸域生態系の地球環境変化に対する応答の成果とりまとめ (和田英太郎)
- 民間財団資金 : 2006 (住友財団) 高 CO₂ 環境下での更新稚樹の光利用特性の変化と種多様性維持機構の解明

付録-2 : 2018 年度の森林空間機能学の講義の苗畑見学会からの抜粋

苗畑において何の研究をしているか/今更にあまりよくわかっていませんでした。今回 6 つの研究について説明している中でどのような実験が行われているのか矢張りここで言いました。まず O₃ については実験では FACE という装置を用いている。今更に FACE で行っている実験のあることは授業で耳にしていた。どのようなものであるか実験中に目で見ることでまた改めて実験場にはいりました。苗畑の存在も説明も多分して興味を持てました。造形学で行われている実験には文でもあまり研究内容もイメージでしかわかっていなかった。今回お話を聞くことでまたどのような研究が行われているのかを知ることでまたとても勉強になりました。 苗畑の存在も多分して興味を持てました。

付録 2.1. FACE を見学した森林科学専攻の 2 年生 (実際に FACE [例え、国際舞台では盆栽 FACE と言われていても]を見た学生さんの、その後の研究に実験苗畑が貢献したことを示す内容であった。同様のコメントは農業経済学専攻の方からもあった。)

(150~200 文字)

存在第一印象として、森林科学科があれほど立派な土地と施設を半独立した状態で何もしてはいないか勝る言えるかもしれない。この方は立派なところを自由に使え(とまで自由に使えるからいいか)森林科学科は恵まれていると感じる。私も横山氏のやっている苗畑の経験は興味深かった。今後機械導入が普及していくであろうから、着眼点の克服は、一年以内の結果がでるかは疑問だが、結果を知りたい。

付録 2.2. 実験苗畑の存在を評価した内容
当時、6 種類の実験が行われていた : FACE、OTC (CO₂, オゾン、塩類化土壌)、窒素沈着の実験的解明、生物間相互作用 (特に食葉性昆虫の行動)、踏圧の研究 (重機導入による機械化林業、公園での踏圧影響)、共生菌類の影響評価。