HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	II-2 RR2002・モジュールFACE研究の展開―札幌実験苗畑の利用―
Author(s)	小池, 孝良; 江口, 則和; 渡辺, 誠; 渡邊, 陽子; 北岡, 哲; 里村, 多香美; 高木, 健太郎; 柴田, 英昭; 日浦, 勉; 笹, 賀一郎; 船田, 良
Citation	北方森林保全技術, 26, 47-52
Issue Date	2008
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/67650
Type	article
File Information	hopposhinrin26-P47-P52.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Ⅱ－２　RR2002・モジュール FACE 研究の展開
－札幌実験苗畑の利用－

小池孝良[1]，江口則和[2]，渡辺 誠[3]，渡邊陽子[1]，北岡 哲[3]，里村多香美[4]，高木健太郎[2]，
柴田英昭[2]，日浦 勉[2]，笹 賀一郎[2]，船田 良[5]

[1]北大農学研究院　[2]森林圏ステーション　[3]日本学術振興会特別研究員 PD　[4]香川大学農学部　[5]東京農工大学

はじめに

モジュール FACE とは、モジュール（部材）単位での CO_2 付加実験を野外で行い（Free Air CO_2 Enrichment; FACE, 開放系大気 CO_2 増加）、大気中の CO_2 濃度が上昇する環境での樹木の成長応答と CO_2 固定・貯留能力を調べる施設のことである（小池ら 1995）。当初、予算規模から、シュートや枝単位での CO_2 付加を想定していた。しかし、設計・施工に貢献された上田龍四郎氏（北海道ダルトン）の技術によって（山武ニュース 2002）、スイス・バーゼル大学と山岳 FACE を基礎にした北大独自の FACE が完成した（江口ら 2004, Eguchi *et al.* 2005, 小池ら 2005）。

図1. 札幌研究林実験苗畑に設置直後の FACE 三基
（上田龍四郎氏提供）

本来は、森林全体を対象に研究できる実験施設の設置を予定したが（DukeFACE 2007）、予算の制約から小規模の FACE を設けることになった。しかし、このことによって進行し続ける大気 CO_2 増加に伴う温暖化条件での落葉樹 11 種の成長応答を、土壌条件を加味して調査することができた（江口ら 2004, 小池ら 2005）。当初の文科省予算が終了し、いわば第二期に入ったので、これまでの予算の流れと研究の構成をまとめ、現在、運転中のシステムを紹介する。これによって、実験苗畑の施設の利活用の基礎資料としたい。

研究の背景と予算措置

本研究のきっかけは、米国テロ直後に開催された日米会議の席上、Ram Oren 教授（Duke 大学 FACE 担当）から、世界で「FACE 研究の空白地帯」であるアジアでの成果を求められたことである（高木・小池 2002）。その後、日本側議長であった安岡善文氏（国立環境研究所から東大生産技術研究所・教授）の主導のもと、2002 年から文科省の直轄事業「人・自然・地球共生プロジェクト」（通称 RR2002；平成 14～18 年度）研究費の中で、「全地球レベルの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」によって実施した。

この内容は FACE（開放系 CO_2 増加実験）システムによって CO_2 付加に伴う葉面積指数(LAI)の変化を詳細に解析し、衛星データから植生変動を予測するためのパラメータを抽出することである。RR2002 を基礎にして以下の科学研究費補助金の支援を受け、センター研究員、学術振興会特別研究員らの研究とドイツとの研究交流も含め、研究を継続している。

支援を受けてきた研究基金は、主に日本学術振興会の科学研究費補助金であるが、その他、ドイツ科学研究費、住友財団、ノーステック財団などである。

平成 16-17 年度：萌芽研究；FACE(開放系 CO_2 増加実験)で生育した落葉広葉樹の蒸散速度の解明（代表：小池孝良）

平成 17-19 年度：基盤研究 A；大気 CO_2 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（代表：小池孝良）
平成 18-19 年度：萌芽研究；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（代表：小池孝良）
平成 18-19 年度：住友財団環境研究基金：高 CO_2 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（代表：小池孝良）
平成 18-20 年度：学振 PD；窒素分配から見た高 CO_2 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（代表：北岡 哲）
平成 19 年度：SFB 607 project B5；C-allocation of juvenile and adult trees: Impact of competition, disturbance by ozone and onogenetic scaling (Prof. R. Matyssek, Technological University of Munich, Germany)
平成 19 年度：ノーステック財団・研究開発助成事業・基盤的研究開発育成事業・若手研究補助金；樹木群落の炭素固定機能評価（代表；里村多香美）
平成 20-22 年度：基盤研究 B：開放型 CO_2 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（代表；小池孝良）
平成 20-22 年度：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（代表；渡辺 誠）

ＦＡＣＥシステムと維持

北大の開放系大気 CO_2 増加(FACE)実験の精度は、先行するイネを対象にした RiceFACE (小林 2001) とほぼ同様の能力を得た（高木ら 2004, Eguchi *et al.* 2005a,b）。植え付け時には二年生の苗木を用いたので、急激な CO_2 付加によるショック効果がない成長応答を確認できた。

2007 年 7~8 月にブナを残して地上部を伐採し、2008 年からは萌芽更新と好気的メタン発生の研究に焦点を置く構成に成った（Kitaoka *et al.* 2007）。

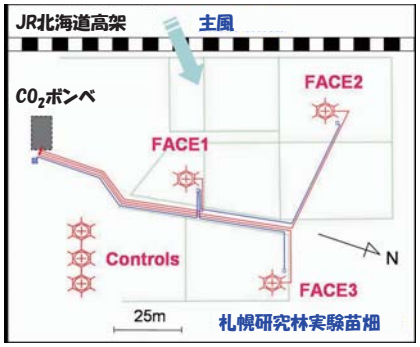

図 2. FACE の配置図

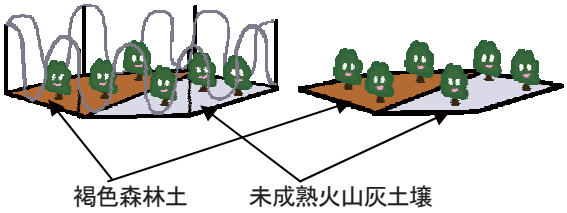

図 3. 各 FACE の構成

樹種は 11 種の落葉樹を使用。FACE 内部に成長の速い先駆種。外部には成長の遅い遷移後期種を配置した。左が 500ppm、右は対照 370ppm である。

本システムは、最終的に実験苗畑へ戻すために恒久的ガスタンクは設置せず、設計施工業者である北海道ダルトン（平成 20 年 10 月からダルトン北海道支社）によって、CO_2 ガスの供給が行われている。北大調達課によって施設全体を「レンタル機器の可動契約」と位置づけ、運用を行っている。一般道路から実験苗畑へは、2 トン車以上は入ることが出来ないため、CO_2 の供給は通常 150kg ボンベによっている。

研究の狙い

大気中の二酸化炭素濃度([CO_2])の上昇が社会問題となって久しい。本研究では高 CO_2 環境に対する冷温帯樹木 11 種（陽樹：カラマツ、ケヤマハンノキ、シラカンバ、ウダイカンバ、陰樹：イタヤカイデ、ブナ、シナノキ、中間種：ヤチダモ、ハリギリ、ハルニレ、ミズナラ）の生理生態特性の変化を解明し、CO_2 固定能力の変化を評価することを目的とした。樹木は成長することで同化した CO_2 を長期間貯留する。そこで樹幹成長の変化を調べた。

高CO_2では気孔が閉じ気味になって蒸散速度が抑制されるので、水分通道構造の変化が予想される。この際、土壌の栄養条件が問題になると考えられるので、褐色森林土と北海道では、最も特徴的な未成熟火山灰土壌を苫小牧研究林から客土し、栄養条件の影響を評価する。従来の制御環境によって得られた結果では、高 CO_2 条件における CO_2 貯留機能変化に関する知見に統一した見解は無かった（Yazaki *et al*. 2005, 小池 2006a,b）。また、先行する FACE 研究者からは、土壌変化の確認できる 10 年間の CO_2 付加が必須と指摘された。

研究の構成

全期間を通じて葉の食害の追跡を行い（小池）、植物群落の生産力と直結する葉面積指数(LAI； 単位面積当たりの葉面積)を、 札幌研究林の開放系CO_2増加実験(FACE)装置と苫小牧研究林に設置した対照試験地において追跡する（小池・日浦）。また、蒸発散をモニターしながら（笹・高木）、研究最終年度には実験材料を伐採し木部の詳細な組織解剖学的解析を行う（船田・渡邊陽子）。
この間に、甲山によって提案された森林構造仮説を考慮して、周極域に広がる森林動態との比較から、北海道の針広混交林と極東に広がる類似森林の動態も予測する。また、全期間を通じて流入する窒素沈着と落葉の窒素無機化速度を推定することで（柴田）、高CO_2での樹木の成長を制限する物質循環過程を解析する。【注意】図中の囲みの中が対応する研究員を示す。甲山：統合研究担当（地球環境科学研究院所属）。

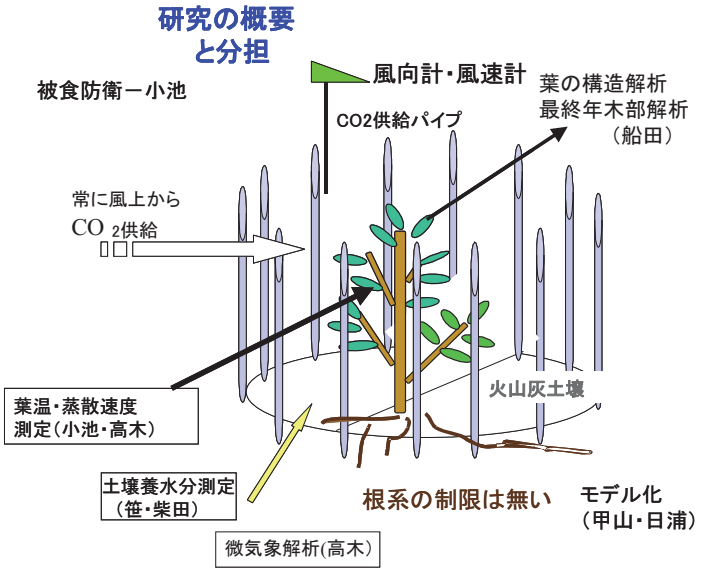

図 4.　FACE（Free Air CO_2 Enrichment）の構成

研究成果の要点

FACE 内の [CO_2]は、2040 年頃を想定して 500ppmv とした（対照区+130ppmv）。また、FACE 内の土壌を半分に区切り、片面を富栄養の褐色森林土、もう片面を貧栄養の火山灰土壌とした。まず CO_2 同化特性(光合成)の変化に着目した。火山灰土壌では高 CO_2 処理をしてもあまり増加しなかった。樹木は成長することで同化した CO_2 を長期間貯留する。そこで樹幹の変化を調べた。高 CO_2 処理による成長の促進効果は、火山灰土壌や CO_2 付加期間が長いと認められなくなった。CO_2 貯留を評価するためには、材質の変化を明らかにすることが重要である。そこで、材質に影響を与える水分通道構造の変化を調べた。長期間の高 CO_2 処理によって、道管を流れる流量の継続的な低下が起こり、道管サイズが低下することが分かった。また、CO_2 上昇に伴う冷温帯林構成樹種の CO_2 貯留量の変化を評価した。すると、褐色森林土でのみ CO_2 貯留量が増加した。この増加割合は他地域の成果と同等であった。本研究により、東アジア冷温帯林における高 CO_2 環境下での CO_2 固定機能変化に関する知見が得られた。これらの成果が得られた基になった博士論文・修士論文・卒業論文（東京農工大学）の課題を以下に示す。

FACE を利用して提出された博士論文・修士論文・卒業論文

江口則和：2007年度北海道大学博士（農学）学位請求論文「大気中CO_2 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」

上里季悠：2007年度北海道大学修士（環境科学）「異なるCO_2 濃度と土壌栄養条件がハンノキ属樹木の被食防衛能に及ぼす影響」

松井克彦: 2007年度北海道大学修士（環境科学）「Effects of elevated CO_2 on the decomposition rate of leaf litter through grazing of wood louse (*Porcellio scaber*/ (Isopoda; Oniscidae)) with special reference to its growth and consumption rate (高CO_2 環境で生産された落葉が及ぼす等脚類(*Porcellio scaber*/(Isopoda; Oniscidae))の成長と摂食量を通した分解への影響)

唐津一樹：2006年度北海道大学修士（農学）「高濃度CO_2 環境下で長期生育した落葉広葉樹の光合成特性」

飛弾 剛 : 2006年度北海道大学修士（農学）「Change in the light compensation point of deciduous broad-leaved tree saplings grown under elevated CO_2 (高CO_2 環境下での光補償点の変化)」

森井紀子: 2006年度北海道大学修士（農学）「Water relations of deciduous broad-leaved tree saplings to elevated CO_2 in a Free Air CO_2 Enrichment (FACE) (FACE(開放系大気CO_2 増加)に生育する落葉広葉樹の水分特性)」

遠藤郁子: 2005年度北海道大学修士（農学）「Growth and survival of three species of Betulaceae seedlings in the large disturbed area (大規模な撹乱跡地におけるカバノキ科3 樹種の生存と成長)」

柴田隆紀: 2005年度北海道大学修士（農学）「異なるCO_2 と窒素環境で生育した落葉広葉樹の被食防衛機構」

江口則和: 2004年度北海道大学修士（農学）「Change of photosynthetic capacity of *Alnus hirsuta* with increasing of atmospheric CO_2 concentration: comparing the proximate *Betula* spp. without symbiotic N_2 fixing micro-organism (大気中CO_2 濃度の上昇に伴うケヤマハンノキの光合成能力の変化～窒素固定菌と共生しない近縁のカバノキ属と比較して～)」

若林啓太：2007年度東京農工大学農学部卒業論文「FACEを用いた高濃度CO_2処理による樹木の組織学的変化」

謝辞

本研究は上田龍四郎技師（北海道ダルトン K.K.）の献身的な貢献なしには成立しない。氏との科研費・旧展開研究を通じた協力関係に本研究は依っている。上田氏の設計、施設維持管理に深く感謝する。また、実験苗畑を管理しているセンター森林圏ステーション南管理部の奥谷 昭、市川 一、福井富三、藤戸永志、菅田定雄各氏らと林業技能補佐員諸氏の支援が不可欠であった。記して感謝する。システムの構成には、スイス・バーゼル大学 Ch.Körner 教授、ETH の R.Häsler 博士、米国 Duke 大学 R.Oren 教授、東大生産研の安岡善文教授（現在・国立環境研究所理事）と遠藤貴宏博士の貴重な助言と森林圏ステーション長の前川光司、佐藤冬樹各氏、札幌研究林の神沼林長、北大事務部の平林晴樹、長町吉雄、猫塚和美、王生(いくるみ)晶子、久保大輔、後藤 普各氏らのご配慮も不可欠であった。

引用文献

DukeFACE (2008) http://face.env.duke.edu/main.cfm

江口則和・上田龍四郎・笹賀一郎・小池孝良(2004) FACE（開放系大気 CO_2 増加）を用いた落葉樹への高 CO_2 付加実験．北方林業 56:4-7.

Eguchi, N., Koike, T. and Ueda, T. (2005a) Free air CO_2 enrichment experiment in Northern Japan. Vaisala News 169: 15-16.

Eguchi, N., Funada, R., Ueda, T., Takagi, K., Hiura, T., Sasa, K. and Koike, T. (2005b) Soil moisture condition and growth of deciduous tree seedlings native to northern Japan grown under elevated CO_2 with a FACE system. Phyton (Horn, Austria) 45: 133-138.

Eguchi, N., Morii, N., Ueda, T., Funada, R., Takagi, K., Hiura, T. and Sasa, K. and Koike, T. (2008a) Changes in petiole hydraulic structure and leaf water flow in birch and oak saplings in an enhanced CO_2 environment. Tree Physiology 28:287-295.

Eguchi, N., Karatsu, K., Ueda, T., Funada, R., Takagi, K., Hiura, T., Sasa, K. and Koike, T. (2008b) Photosynthetic responses of birch and alder saplings grown in a free air CO_2 enrichment system in northern Japan. Trees - Structure and Function 22: 437-447.

江口則和・北岡 哲・崔 東壽・小池孝良 (2008) 世界の FACE から～世界各地の開放系大気 CO_2 増加実験（Free Air CO_2 Enrichment：FACE）を見学して～．北方林業 60（印刷中）

Kitaoka, S., Sakata, T., Koike, T., Tobita, H., Uemura, A., Kitao, M., Maruyama, Y., Sasa, K. and Utsugi, H. (2007) Methane emission from leaves of larch, birch and oak saplings grown under elevated CO_2 in northern Japan -A preliminary study-. Journal of Agriculture Meteorology 63: 201-206.

小林和彦 (2001) FACE（開放系大気 CO_2 増加）実験. 日本作物学会記事 70:1-16.

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 (1999) CO_2 濃度上昇と森林の応答能力研究の動向. 大気環境学会誌 34:A35-A42.

小池孝良・江口則和・笹賀一郎 (2005) FACE（開放系大気 CO_2 増加）を用いた冷温帯落葉樹への高 CO_2 付加実験. 日本光合成研究会会報 43:8-12.

小池孝良 (2006a)　環境変動への陸域生態系の応答、「地球環境と生態系」(武田博清・占部城太郎(編者) 共立出版　東京、68-93.

小池孝良 (2006b) 地球温暖化と植物、「植物と環境ストレス」(伊豆田 猛 編著)、コロナ社、東京、88-144

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 CO_2 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.

山武ニュース(2002) FACE 実験装置の CO_2 濃度制御システムにデジタル指示調節計を導入 (http://www.compoclub.com/products/casestudy/hokkaido_university/casestudy2.html)

Yazaki, K., Maruyama, Y., Mori, S., Koike, T. and Funada, R. (2005) Effects of elevated carbon dioxide concentration on wood structure and formation in trees, Plant responses to air pollution and global change. (Omasa, K. Nouchi, I. De Kok, L J. eds.), Springer Tokyo, pp 89-97.

日本林学（森林学）会北海道支部会での発表

(1) 江口則和・唐津一樹・上田龍四郎・船田良・高木健太郎・日浦勉・笹賀一郎・小池孝良. (2005) FACE (Free Air CO_2 Enrichment)を用いた高 CO_2 濃度処理が落葉樹稚樹へ与える影響－成長と生理反応、2 年間の結果－. 日本森林学会北海道支部論文集 53: 73-75.

(2) 唐津一樹・網野真一・江口則和・上田龍四郎・高木健太郎・小池孝良 (2005) Free Air CO_2 Enrichment (FACE) により高 CO_2 処理された落葉樹広葉樹稚樹の光合成特性と Rubisco の応答. 日本森林学会北海道支部論文集 53:76-78.

(3) 江口則和・森井紀子・上田龍四郎・船田良・高木健太郎・日浦勉・笹賀一郎・小池孝良(2006) 高 CO_2 環境下での冷温帯樹木の水利用特性の変化が葉柄の内部構造に与える影響. 日本森林学会北海道支部論文集 54: 49-51

(4) 森井紀子・江口則和・船田良・高木健太郎・日浦勉・笹賀一郎・小池孝良 (2006) FACE 開放系大気 CO_2 増加）に生育する落葉広葉樹の水分生理特性. 日本森林学会北海道支部論文集　54: 64-66.

(5) 飛騨剛・唐津一樹・江口則和・高木健太郎・日浦勉・笹賀一郎・小池孝良 (2006) 高 CO_2 環境下で生育したブナとウダイカンバの呼吸特性—開放系大気 CO_2 増加(FACE)を用いた場合—. 日本森林学会北海道支部論文集　54:58-60.

(6) 唐津一樹・飛騨剛・江口則和・上田龍四郎・高木健太郎・日浦勉・笹賀一郎・小池孝良(2006) FACE(開放系大気 CO_2 増加)に生育する落葉広葉樹の光合成特性. 日本森林学会北海道支部論文集　54:61-63.

(7) 江口則和・森井紀子・上田龍四郎・船田良・高木健太郎・日浦勉・笹賀一郎・小池孝良(2007) 大気中 CO_2 濃度の増加に伴う冷温帯樹木シュートの通水特性と通道組織の変化. 日本森林学会北海道支部論文集 55: 50-52.

(8) 森井紀子・江口則和・池田武文・渡邊陽子・高木健太郎・日浦勉・笹賀一郎・小池孝良(2007) FACE 開放系大気 CO_2 増加）に生育する落葉広葉樹の水分生理特性. 日本森林学会北海道支部論文集　55: 53-55.

(9) 飛騨剛・江口則和・飛田博順・宇都木玄・上村章・北岡哲・小池孝良 (2007) 高 CO_2 環境下で生育した冷温帯落葉広葉樹の光補償点の変化—被陰環境で生育した稚樹を用いて—. 日本森林学会北海道支部論文集　55:41-43.

(10) 崔東壽・渡邊陽子・上里季悠・北岡哲・秋林幸男・笹賀一郎・小池孝良 (2007) 異なる光環境下に生育するニセアカシア稚樹の光合成特性—北海道大学札幌研究林の事例— 日本森林学会北海道支部論文集

55:44-46.
(11) 上里季悠・松木佐和子・飛田博順・笹賀一郎・小池孝良（2007）異なる CO_2 濃度と土壌栄養条件がハンノキ属樹木の被食防衛に与える影響．日本森林学会北海道支部論文集　55:56-58.
(12) 松井克彦・江口則和・佐藤冬樹・市川一・菅田定雄・笹賀一郎・小池孝良 (2007) 高 CO_2 環境で生産された落葉を摂食するワラジムシの飼育試験．日本森林学会北海道支部論文集　55:59-61.
(13) 北岡哲・阪田匡司・飛田博順・上村章・北尾光俊・宇都木玄・丸山温・笹賀一郎・小池孝良 (2007) 北海道の主要落葉樹からのメタン発生に関する予備試験．日本森林学会北海道支部論文集　55:70-72.
(14) 江口則和・里村多香美・渡邊陽子・北岡哲・上田龍四郎・船田良・高木健太郎・日浦勉・笹賀一郎・小池孝良 (2008) 高 CO_2 環境下で生育する冷温帯落葉広葉樹の水分通道と木部構造の変化．日本森林学会北海道支部論文集　56: 25-27.
(15) 北岡哲・宇都木玄・北尾光俊・飛田博順・上村章・加藤光多・竹内裕一・上田龍四郎・江口則和・小池孝良 (2008) 開放系大気 CO_2 付加実験施設(FACE)で育成した冷温帯主要落葉広葉樹の光および窒素利用特性．日本森林学会北海道支部論文集　56: 153-156.

この他に、北海道東海大学工学部の卒業演習、国際植物学会、日本生態学会、進化植物学研究会などでの発表があるが、紙面の都合上、割愛した。

英文タイトルと要旨

[English title]

Studies on the CO_2 storage capacity of deciduous trees with use of FACE (Free Air CO_2 Enrichment) in the Experimental Forest of Hokkaido University.

[Authors]

KOIKE Takayoshi, EGUCHI Norikazu, WATANABE Makoto, WATANABE Yoko, KITAOKA Satoshi, SATOMURA Takami, TAKAGI Kentaro, SHIBATA Hideaki, HIURA Tsutom, SASA Kaichiro, FUNADA Ryo

[Abstract]

Since the effect of high [CO_2] is known to depend on soil conditions, we evaluated the response in two soils which are widely distributed in northern Japan: infertile and immature volcanic ash (VA) soil, and fertile brown forest (BF) soil. Except alder, most species showed photosynthetic down-regulation only in VA soil. The explanation is reduced nitrogen and Rubisco content in the leaf. For alder, the down-regulation occurred only in BF soil because of the accumulation of starch in foliage, which restricts CO_2 diffusion inside the chloroplast. The higher photosynthetic rate of alder in infertile VA soil could be due to the sink for photosynthates in the N_2-fixing symbiont. Water relations in woody species are intimately related to xylem hydraulic structures. Transpiration or stomatal conductance generally decreases at high CO_2 concentrations ([CO_2]). To determine the relation between water flow and hydraulic structure at high [CO_2], we investigated the single-leaf scale response of both sun and shade leaves of two species (diffuse-porous; birch and ring-porous; oak) grown on VA and BF. We used four-year-old saplings exposed to 500 $\mu mol CO_2\ mol^{-1}$ for three years. For sun leaves, the water flow (i.e. stomatal conductance and leaf-specific hydraulic conductivity) and the total vessel area of the petiole consistently decreased at elevated [CO_2] despite differences in species and soil type. However, parameters in shade leaves did not show the significant change. Our results show that changes in water flow at elevated [CO_2] may lead to acclimation in petiole hydraulic structure. These results help us to see how trees might accommodate themselves to the coming CO_2-enhanced environment. Based on our results, we can evaluate acclimation traits of broadleaf trees native to Japan to elevated CO_2 condition.