

領域略称名：植物高 CO₂ 応答
領域番号：3103

平成26年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「植物生態学・分子生理学コンソーシアムによる陸上植物の
高 CO₂ 応答の包括的解明」

(領域設定期間)

平成21年度～平成25年度

平成26年6月

領域代表者 東京大学・大学院理学系研究科・教授 寺島一郎

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	2
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	4
3. 研究領域の設定目的の達成度	6
4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	9
5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	10
6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	11
7. 総括班評価者による評価	12
8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	14
9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	17
10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	22

1. 研究領域の目的及び概要（2ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

① どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる新たな研究領域」なのか

植物個体レベルの研究の発展は、地球環境科学、農林産業、生態学の発展のためには必須であり、現在の我が国の植物科学において特に力を入れなければならない課題である。本領域研究は、通常の学会活動では交流のない分子生理学者と生態学者／農学者とが**緊密なコンソーシアム研究**を展開することにより、**個体レベルの植物科学研究の革新的推進**をめざす。地球環境が劇変している現在、自然科学としてのみならず社会問題としても極めて重要な「**植物の高CO₂応答の解明**」をコンソーシアム研究のテーマとする。

② 研究の学術的背景

南極氷床コアの解析によって過去 80 万年以上におよぶ大気 CO₂ 濃度の推移が明らかになっている。この間、数回の氷河期と間氷期が繰り返し、大気 CO₂ 濃度は、氷河期には約 200 ppm、間氷期には約 280 ppm と規則正しく推移してきた。現在は間氷期にあたる。産業革命前 1 万年間の CO₂ 濃度は、これまでの間氷期と同様、約 280 ppm であった。しかし産業革命以降は、化石燃料消費と森林破壊により CO₂ 濃度が激増し、現在は 400 ppm に達しようとしている。CO₂ 排出削減対策の効果を考慮しても、今世紀中に CO₂ 濃度は**産業革命以前の 2 倍以上の 600 ppm をはるかに越える勢い**である。CO₂ は光合成の基質であり、単純に考えれば CO₂ 濃度の上昇は植物の光合成や成長の上昇につながるように思われる。しかし、実際に植物を高 CO₂ 条件で栽培すると、光合成速度や成長はそれほど大きくならない。そればかりか、種々のダウンギュレーション反応のためにかえって低下する場合さえある。現生の大部分の植物は、長期間にわたってほぼ 200~280 ppm だった CO₂ 濃度に適応した状態にあるだろう。産業革命以降の CO₂ 濃度上昇はあまりにも急速であり、「優れた形質をもたらす変異遺伝子を持つ個体が幾世代もかけて集団内で増える」という**適応現象によって環境に追従するのは不可能**である。したがって、われわれは、将来の高 CO₂ 環境でよく CO₂ を固定し、成長する植物（好 CO₂ 植物）を創出しなければならない。

研究の現状：植物の CO₂ 応答や、それに大きな影響を及ぼす窒素（N）栄養に関する研究が、分子から地球生態系レベルにいたる各分野で行われている。分子生理学分野では、モデル植物の CO₂ 応答や炭素（C）/N バランスの鍵因子が次々と同定されている。生理生態学分野において数多く行われてきた高 CO₂ 栽培実験によって、高 CO₂ による光合成、成長、繁殖の促進率は、種や生育条件によって大きく異なること、抑制される場合もあることが明らかになっている。地球環境変化予測に関する研究は世界的に盛んで、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が定期的にとりまとめている。

CO₂ 応答研究の問題点：分子生理学的研究により CO₂ 応答性因子が次々に同定されているものの、個体全体の高 CO₂ 応答の全貌はモデル植物においてさえも明確でない。種や環境による高 CO₂ 応答の違いの原因は、ほとんど明らかになっていない。このため、地球環境予測に使われる植物個体の CO₂ 応答モデルには、経験則に基づく環境応答関数や未検証のパラメータを使用せざるを得ず、その定量性には限界がある。好 CO₂ 植物の創出のための研究はまだ緒についたばかりである。

現状の打開：この現状を打開するためには、まず、モデル植物の高 CO₂ 応答の分子から個体レベルに至る全体像を明らかにし、次に、それを基礎として野外の植物の応答に見られる環境条件や種による多様性を理解しなければならない。これによって初めて作物や樹木の高 CO₂ 応答が定量的に理解できる。従来の研究体制のままでは

は、この課題の達成は不可能だが、専門の異なる研究者が一致協力して研究すれば、分子から個体・生態系レベルまでの現象を、分子レベルの共通言語によって統一的に理解することは不可能ではない。本領域研究では、植物の高CO₂応答およびそれに深く関係する分野において顕著な成果をあげている研究者がコンソーシアムを形成して緊密な共同研究を行い、この課題を達成しようとするものである。

③ 研究期間内に何をどこまで明らかにするか

高精度の植物個体の高CO₂応答モデルを構築するために、環境依存性や種間差を含めた高CO₂応答の全貌を、定量的/包括的に明らかにする。

モデル植物を用いた研究：メンバーが同定してきたCO₂応答性因子の機能欠損および獲得変異体も活用し、精密ガス交換測定、安定同位体トレーサー実験などにより、気孔コンダクタンス、光合成速度、呼吸速度、C/N バランス、物質分配（地上部/地下部、葉/茎および分枝）、成長などの表現型の高CO₂応答を解析する。同時に、転写産物、代謝産物、植物ホルモンを対象としたオミックス解析を行う。表現型の応答とオミックスの解析結果の関連を精査することを通して高CO₂応答の全貌を解明する。このために、転写産物、代謝産物、植物ホルモン測定のためのプラットフォームを整備する。

各生態系を代表する植物を用いた研究：室内の制御環境下、および野外のFACE（free air CO₂ enrichment, 開放系大気CO₂付加）システムやOTC（open top chamber）内で、代表的な草本、木本植物を栽培し、表現型と転写産物、代謝産物、植物ホルモンの高CO₂ 応答を同時に解析する。モデル植物で明らかになった表現型とオミックスデータとの関係が、環境や種によってどのように変化するのかを定量的に検討する。これらの知見に基づいて、植物個体の高CO₂ 応答を表現するモデルを作成する。

④ 公募要領の「対象」、領域研究の発展のための方針

本領域研究は「異なる学問分野の研究者が連携して行う共同研究などの推進により、当該研究領域の発展を目指すもの」、「多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究などの推進により、当該研究領域の新たな展開を目指すもの」に該当する。また、地球環境科学などの「他の研究領域の研究の発展に大きな波及効果」をもたらす。緊密な分野縦断型コンソーシアムを作ることにより課題を達成するとともに、分野間の垣根をものもしない人材を育てる。

⑤ 本領域の推進がもたらすもの

○ 分野縦断的コンソーシアム研究は分子生理学と生態学のギャップを埋め、植物個体レベルの研究に革新をもたらす。このような取り組みは、地球環境科学や生態学ばかりでなく、個体レベルの現象の深い理解が必須である農学、森林科学、病理学、園芸学、環境修復学などのさまざまな分野で有効に機能する。本領域はそのさきがけとなるものである。

○ 本領域研究で開発する、表現型解析とオミックス解析とを同時に行う総合評価システムは、野外における植物の挙動の予測に有用であり、種々の環境に適した作物創出をはじめとする種々の研究に広く応用できる。

○ 本領域研究によって、モデル植物の高CO₂応答が包括的に明らかになるとともに、多様な植物の高CO₂応答の分子機作の定量的理解が格段に進む。これらは地球環境変化にともなう陸上生態系の挙動を正確に予測するための基盤となり、社会的にも非常に重要である。また、本研究の成果は、100 億人の食と環境とを確保するために必須となる好CO₂植物創出のための基盤となる。

2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

1. 本研究領域の研究班の構成

領域の陣容を以下の表に示す。総括班は全計画班によって構成した。関連分野の研究者を総括班連携研究者（班友）として共同研究を行うとともに、集会等にも招待した。参加したすべての班でコンソーシアムを形成したため項目は設けていない。

計画研究班

計画班代表	課題	総括班における役割
寺島一郎 東大・理・教授	成長呼吸と維持呼吸の高CO ₂ 応答（光合成におけるCO ₂ コンダクタンス）	総括・事務 安定同位体測定／実験
射場 厚 九大・理・教授	植物におけるCO ₂ シグナル伝達の分子遺伝学的解析	広報・対外交渉 変異体等管理
小俣達男 名大・農・教授	窒素制限条件下の光合成機能と生産性に与える高CO ₂ 環境の影響の解明	オミックスプラットフォーム 勉強会担当
柳澤修一 東大・農・准教授	窒素同化能力強化植物を用いたC/N相互作用に基づく高CO ₂ 応答ネットワークの解析	オミックスプラットフォーム ワークショップ担当
榊原 均 理研・環境資源科学研究センター・リーダー	植物ホルモンを介した炭素・窒素栄養バランス情報の伝達システムの解明	オミックスプラットフォーム 理研対応
牧野 周 東北大・農・教授	高CO ₂ 環境がイネの光合成とバイオマス生産に与える影響の解明	光合成タンパク解析 イネFACE 実験
小池孝良 北大・農・教授	開放系大気CO ₂ 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	樹木FACE 実験 林野庁および森林科学対応
広瀬忠樹 農大・国際食料・教授	植物機能の高CO ₂ 応答のモデル構築と検証	データ管理・勉強会担当
伊藤昭彦 国立環境研・研究員	植物のCO ₂ 応答に関するメタ分析と生態系モデルの高度化	勉強会担当 環境省、外国研究機関対応

公募研究班

期間	公募班代表	所属	課題
H22 ~25	花田耕介	理研・環境資源科学研究センター・研究員⇒九工大	高二酸化炭素条件下で変動する遺伝子群とその進化起源解析
	前島正義	名大・農・教授	気孔開閉調節分子と特定アクアポリンの高濃度CO ₂ への応答とCO ₂ 供給系の理解
	三ツ井敏明	新潟大・自然科学・教授	イネデンプン集積抑制酵素発現制御体の高CO ₂ 応答に関する研究
	山口淳二	北大・理・教授	ユビキチンカスケードが関わるC/Nバランスとソース・シンク制御機構の全容解明の高度化
	早川俊彦	東北大・農・准教授	高CO ₂ 環境下のイネの炭素・窒素栄養バランス高次統御に関わる窒素情報伝達系の解明
	三宅親弘	神戸大・農・准教授	高CO ₂ 順化に必須の遺伝子探索とその機能解析:植物はなぜ糖尿病を患わないのか?⇒高CO ₂ 順化に必須の糖アルデヒド・毒性化合物による細胞傷害防御機構の全容解明
	西田生郎	埼玉大・理工・教授	植物の糖転流経路における二次原形質連絡形成のメカニズムの解明⇒シロイヌナズナの糖転流経路と二次原形質連絡形成に対する高CO ₂ 環境の影響
	宮尾(徳富)光恵	農業生物資源研・ユニット長	高CO ₂ 応答に関与する炭水化物シグナルの同定
	唐 艶鴻	国立環境研・地球環境セ・主任	高CO ₂ 環境下で光合成誘導反応の解明と物質生産への影響評価
	長谷川利拡 ⇒酒井英光	農業環境技術研・上席研究員 農業環境技術研・主任研究員	過去100年のイネの遺伝的改良は高CO ₂ 濃度への応答性を高めたか?⇒イネのシンク生産能の遺伝的変異がCO ₂ 応答性に及ぼす影響の解明とそのモデル化
H22 ~23	馳澤盛一郎 ⇒捨垣 匠	東大・新領域創成科学・教授 東大・新領域創成科学・特任助教	イメージングと画像データベースによる陸上植物孔辺細胞の高CO ₂ 応答の細胞学的解析
	深山 浩	神戸大・農・助教	イネ葉において高CO ₂ 条件下で発現促進されるOsCCT1とOsTPK1の機能解析
24~25 班友	森長真一	東大・総合文化・助教	CO ₂ 濃度上昇に対する進化的応答の分子古生物学的解析
	北尾光俊	森林総研・室長	大気CO ₂ 濃度の上昇が樹木の温度ストレス感受性に及ぼす影響評価
H22 ~23	鹿内利治	京大・理・教授	明反応産物を介した高CO ₂ 応答ネットワークの解明
	館野正樹	東大・理・准教授	高CO ₂ 環境下における植物個体の可塑性と物質循環
H24 ~25	高木慎吾	阪大・理・准教授	葉緑体分布パターン決定における二酸化炭素の役割
	森 泉	岡山大・生物資源研・助教	高CO ₂ 環境下におけるCO ₂ 透過型アクアポリンの活性制御
班友	嶋田知生	京大・理・講師	気孔を人為的に増やした場合の光合成におよぼす影響

II. 助言・評価委員

分子生理学や植物生態学の分野の重鎮4氏に、助言や評価をお願いした。

及川武久	筑波大学名誉教授 環境省21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究 (H14-18) プロジェクトリーダー
杉山達夫	名古屋大学名誉教授、元理化学研究所植物科学センター センター長 特定領域研究「植物個体における光合成機能統御の分子基盤 (H9-12)」領域代表
山谷知行	東北大学・農学研究科・教授 元理研植物科学センターグループディレクター、元日本学術振興会学術研究センター主任研究員
和田英太郎	京都大学名誉教授、元海洋研究開発機構プログラムディレクター 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研究 (H9-13)」領域代表

III. プラットフォーム、栽培施設

コンソーシアムとして計画班の5研究室が2台ずつCO₂濃度の制御が可能な人工気象器を設置し、近隣の研究室と共用した。また、以下のプラットフォームや栽培施設を共用で利用した。多くの研究班が用いるシロイヌナズナやイネの栽培方法や栽培環境を極力統一した。栽培方法はHPで公開した。

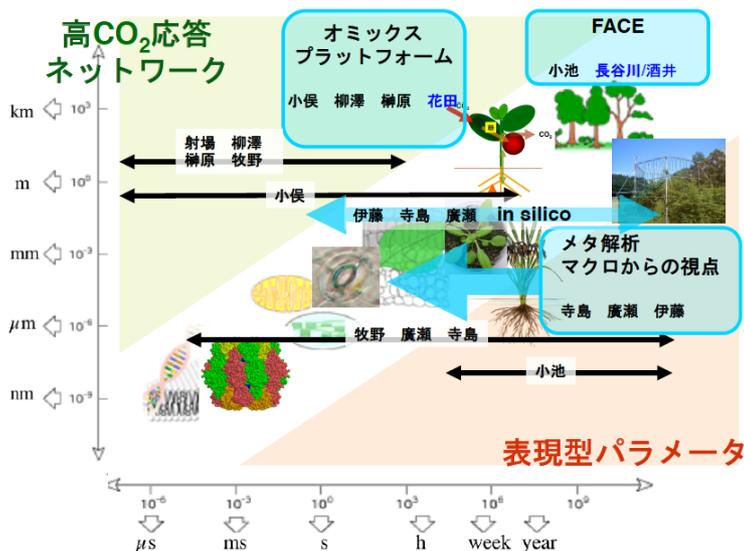
- ・ **トランスクリプトームデータベース**：花田班が、2時間～2週間 800 ppm CO₂の空気に曝露したシロイヌナズナのトランスクリプトーム解析を行い、データを公開した (<http://evolver.psc.riken.jp/seiken/>)。全ての研究班にとってヒントとなる情報が提供された。
- ・ **植物ホルモン**：榊原班が、主要植物ホルモン合計46分子種を同時測定するプラットフォームを運営した。重要な機能をはたす植物ホルモンは、一般の研究室では定量が困難であり、多くの班がこのプラットフォームの恩恵を受けた。
- ・ **代謝産物**：柳澤班と小俣班が、50分子種を越える主要代謝物質の分離定量を目的とするプラットフォームを運営した。
- ・ **FACE (free air CO₂ enrichment, 開放系大気CO₂付加) システム**：小池班が樹木FACEを運営した。長谷川・酒井班が、つくばみらい市イネFACEの管理運営を行った。
- ・ **安定同位体解析**：寺島班が安定同位体測定プラットフォームを運営した。

IV. コンソーシアム内の連携について

コンソーシアムのプラットフォームや、FACEなどの栽培施設を利用するだけでなく、緊密な共同研究を推奨した。毎年定期的に行う**班会議**および**若手の会**以外にも、日本植物生理学会、日本生化学会、日本植物学会、日本生態学会などで**シンポジウム**や**勉強会**を開き、メンバーの交流の機会を増やした。

図には計画班と、プラットフォームの運営に協力した公募班が示してある。この他にも、マイクロからマクロまで、幅の広い領域に多くの公募班が参画し、緊密なコンソーシアムを運営することができた。すでに多くの共同研究が実をむすび、論文が公表された。執筆中、計画中の論文はさらに多い。

植物生態学・分子生理学コンソーシアムによる陸上植物高CO₂応答の包括的解明

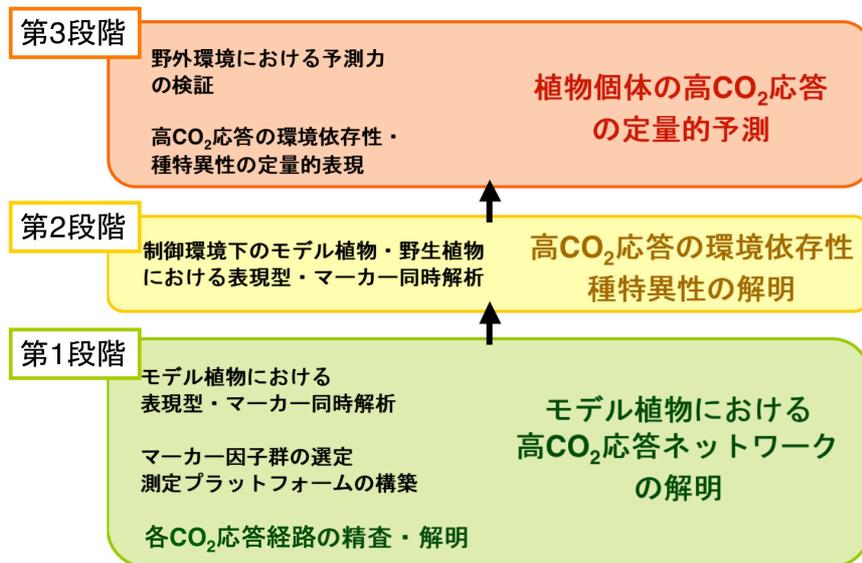


3. 研究領域の設定目的の達成度（3ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記載してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目毎の状況も記述してください。

本研究の当初の目標

図1は当初の研究戦略をまとめたもので、発足のためのヒアリング時に用いたものである。まず、第1段階では、モデル植物において高CO₂応答経路の精査・解明を行うこととしている。これらの高CO₂応答に関する新しい知見および既知の知見において重要な遺伝子、代謝産物、植物ホルモンを洗い出し、これらをマーカー因子群とする。モデル植物の高CO₂応答実験におけるマーカー因子群と表現型との同時解析も第1段階に含めた。第2段階ではこれをエコタイプ間や種間で行う。第3段階では、これらの応答を定量的に比較し、個体レベルの高CO₂応答を定量的に表現するモデリングを行うこととした。なお、当初の申請書では、第3段階の目標として、個体から生態系レベルにいたる植物高CO₂応答のモデル化が強調した。ヒアリングに残ることができた段階で、計画班の陣容や研究の実現可能性について冷静に判断し、ヒアリングでは、第3段階の内容を以下の図のように整理した。しかし実際には 8. 主な研究成果 でも述べるように、個体生理学やメタ解析データに基づく陸域生態系の優れたモデルを構築することができた。



インフラの整備、栽培条件などの統一

5つの計画班にCO₂濃度を制御することができる人工気象器を設置した。計画班の人工気象器は、近隣の公募班の利用にも供した（たとえば、名大の小俣班の人工気象器を前島班が利用。理研の榊原班の人工気象器を花田班が利用）。本学術領域で新設した以外にも、牧野班、廣瀬班、小池班、北尾班などは、これまでも高CO₂の問題を研究してきたので、CO₂濃度を制御できる人工気象器を所有していた。また、本領域研究期間内に、大型の人工光型人工気象室を主要設備とする新潟大学刈羽村先端農業バイオ研究センター、刈羽村バイオドーム、バイオ実験施設が竣工し、三ツ井が施設長としてこれを管理することになった。このように、コンソーシアム全体として、CO₂濃度の制御できる栽培施設を一定数確保することができた。

榊原班が管理する理化学研究所の植物ホルモンプラットフォーム、柳澤班の代謝産物プラットフォームなどに、総括班から消耗品費を支援し、班員の利用に供した。また、花田班が公募班としてコンソーシアムに参加後いち早く、シロイヌナズナの高CO₂応答に関する詳細なトランスクリプトームデータベースを公開した (<http://evolver.psc.riken.jp/seiken/>)。班員のみならず、全世界の研究者が参照している。また、長谷川・酒井班が管理運営する農業環境研究所の水田FACE（開放系大気CO₂付加）も利用した（牧野班、廣瀬班、寺島班、宮尾班、深山班が参画）。小池班の管理運営する樹木FACEも利用された。

表現型の解析については、研究室間で比較可能なデータが取得できるように努力した。たとえば、シロイヌナズナなどのモデル植物のC/N 応答を調べる場合には、C/Nを高めるために寒天培地に数%オーダーのグルコースやスクロースを加える。また、培地の栄養塩は数十mMの硝酸塩を含むのが一般的である。本領域では、このような人工的なC/Nバランスの操作は行わず、自然環境を意識することを徹底した。Cのバランスには、糖類ではなくCO₂を利用することとし、栄養塩の濃度についても自然条件と極端に離れないように設定した。植物の栽培条件についてはコンソーシアムによる領域研究の開始時に議論した。また、各班で用いている栽培方法を、領域のHP (<http://plant.biology.kyushu-u.ac.jp/shinryoiki/index.html>) に示して、栽培方法の共通化をすすめた。



イネFACE (長谷川・酒井班運営)



樹木FACE (小池班運営)



OTC (廣瀬・彦坂班運営)

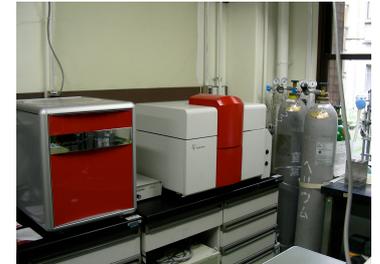
HAMILTON Star



UPLC/Xevo-TQS



AB SCIEX



植物ホルモンプラットフォーム (榊原班運営)

安定同位体測定プラットフォーム (寺島班運営)

第1段階

各CO₂応答経路の精査・解明に関しては、各班の努力により**多くのインパクトある新知見が得られた。**

高CO₂応答性の短い遺伝子が多数同定された。気孔関係では、気孔孔辺細胞および副細胞の細胞膜H⁺-ATPaseの膜輸送因子(神経伝達物質分泌因子と相同)、Dof型の気孔成熟因子、気孔孔辺細胞の気孔と反対側の細胞膜に局在するカルモジュリン/イノシトールリン酸シグナル伝達仲介因子が同定され、その機能が明らかになった。また、葉肉組織から孔辺細胞への気孔開口および気孔閉鎖シグナル伝達の重要性が生理的に示された。また、葉緑体へのCO₂供給に重要な役割を果たすCO₂透過性アクアポリン(cooporin)の分子種が特定された。アミノ酸の置換により水透過性とCO₂透過性を操作できることも示された。

C/Nバランス関係では、新たな硝酸トランスポーター、硝酸に反応する転写因子、硝酸に反応する必要十分なcis配列、C/Nバランスに応じて老化や植物免疫を調節するユビキチン/プロテアソーム系、イネにおける過剰アンモニア吸収抑制機構、などが新たに見出された。転流に大きな役割を果たす細胞間の連絡(原形質連絡)形成の必須因子(ペクチン酸リアーゼ、RSX1)の同定および機能解析も進んだ。イネのRubisco小サブユニットがRubisco量に果たす役割が明らかになり、イネにC4植物の小サブユニットを発現させると、Rubiscoの性質が大きくC4化することも明らかになった。また、高CO₂でますます大きな問題になる、植物の糖尿病(反応性糖アルデヒド生成)に関する基礎的な理解も進んだ。

表現型解析においても、従来行われてきたガス交換測定や乾燥重量の測定だけではなく、より高度な測定も行った。また、高CO₂下の形態の変化にも注目した。イネを高CO₂下で栽培すると、葉は短くなり、幅も狭くなる。これらの徴候は、植物体を2日間高CO₂にさらすことだけで起こる。また、地上部/地下部の重量比の変化についても、単に重量を測定して変化を記載するだけではなく、側根発生への植物ホルモンの作用を精査した。このように**環境発生生物学(Eco-Devo)の研究としても優れた研究が展開された。**

第2段階

第2段階では、高CO₂応答に種間差がもたらされる原因が追求された。草本植物としては、モデル植物であるシロイヌナズナの**世界各地からのエコタイプ**の表現型の比較がおこなわれた。また、イネFACEでは、**明治以来育種されて来た多数の品種**が研究対象となった。イタドリ、オオオナモミ、オオバコなどの野生植物や、根粒菌のつかない変異ダイズと根粒菌のつくダイズの比較、同じ分類群(同属)の**落葉樹と常緑広葉樹**の比較を行った。**多数の落葉樹や針葉樹**の高CO₂応答が、詳細な生物季節学観察や葉や材の解剖学的解析とともに調べられた。

表現型研究の系としては、炭酸泉近辺に生育する植物、シロイヌナズナの硝酸トランスポーター変異体を用いたN欠乏モデル植物、過剰窒素高感受性のモウセンゴケ類などを用いた挑戦的な研究も含まれている。北海道大学構内の樹木FACEを用いた研究は、本領域以前から10年間継続した意義のあるものとなった。

第3段階

多数の文献データを用いたメタ解析も行われた。一年生草本の種子生産に高CO₂がおよぼす影響の種間差に関するメタ解析、グローバルなレベルで植物高CO₂応答モデルを作る場合に必須である、世界各地の森林の葉面積指数（植物の葉の面積の総和を土地面積で割ったもの）の詳細なメタ解析、がその例である。また、個体や葉群（群落）レベルの光合成および成長の高CO₂応答モデルが構築された。生理機能を基礎に、種間相互作用を考慮したゲーム理論が組み込まれたモデルなどが構築された。個葉レベルの蒸散のモデル化なども行われた。一方、グローバルなレベルでは、高CO₂応答をシミュレートする生態系モデルの高度化を進め、地球環境変動によるガス交換や水利用効率の変化のシミュレーションが行われた。Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 気候変動に関する政府間パネル) の最新版 (2013、2014) にも大きく貢献するものとなった。

まとめ

コンソーシアムに参加した全研究班の努力により、計画した研究の全てをほぼ予定通りに行うことができた。ただし、いくつかの予定を変更した。当初の計画では、血液検査データが健康状態を調べるのにきわめて有効であるように、いくつかのマーカー因子（遺伝子発現、代謝産物、植物ホルモンの状態）を調べることで植物の高CO₂応答状態を知るために、マーカー因子群を洗い出すことにしていた。基本的にはこの考えは正しく、バイオインフォーマティクス分野でも、**バイオマーカーを選出し表現型と比較する**という研究がなされ始めた。しかし、本新領域研究によって、各CO₂応答経路の精査・解明に関する新発見が加速されたこともあり、高CO₂応答に重要なマーカー因子の洗出しは時期尚早と判断し、マーカー因子群をコンソーシアムとしてまとめることはしなかった。一方で、本領域研究では、オミックス関係のプラットフォームが充実していたため、多くの研究班がこれを利用し、より広汎なデータからCO₂応答状態を論じることができた。次世代シーケンサーが普及したこともあり、因子の洗出し／絞込みを拙速に行う必要はないと判断したのは正しかったと信じている。**高CO₂応答のバイオマーカーの選定は今後の課題**である。

表現型の解析に関しては、従来生理生態学の分野で用いられたレベルの研究を行うこととしていたが、葉の形態の変化、地上部／地下部比の変化、原形質連絡や篩管の変化、木部の解剖学的な性質の変化、などに関する研究は、**環境発生生物学 (Eco-Devo) の研究としても高く評価できるレベルのものが多かった。**

また、ヒアリングでは、個体レベルの高CO₂応答のモデリングを主として行うこととしたが、葉群（群落）レベル、陸域生態系レベルの優れたモデルも構築することができた。これらは最新のIPCCレポートにも引用されている。地球環境変化の予測に関して、植物の挙動の予測がもっとも困難な問題 (IPCC, 2013) であるが、**分子生理学レベルの知見も取り入れた正確な陸域生態系モデルを提出できたことを特記したい。**

一般に、モデル植物を用いて環境応答を研究する上で、極端な環境を与える場合と、自然環境に近い環境を与える場合とがある。これまで分子生理学分野の研究では、前者のアプローチをとることも多かった。生物が分子機械である以上、環境の変化には何らかの応答をする。その応答経路が新規なものであれば、その発見は大きな成果となる。しかし、その発見が自然界の植物を論じるのに有効であるかどうかは、自然環境に近い環境下で当該経路が表現型にどの程度寄与するのを示さなければならない。本領域研究では、**栽培条件をなるべく統一し、極端な環境を与えることをしなかった。**分子生理学の分野で、時には極端な環境を与えることで研究を進めてきたメンバーも、本領域の趣旨をよく理解して研究に取り組んだ。したがって、本研究で得られた成果は、実際の自然界でも重要なものとなっている。

なお、中間発表では、アウトリーチ活動の不足が指摘された。**9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況** で詳述するが、中間発表以降はアウトリーチ活動にも力を入れた。また、同業の専門家向けには、国際誌 *Plant and Cell Physiology* に班員からの **12 篇の論文を載せた特別号** (2014 年 2 月号) を出版した。その後出版された関連論文とともに冊子体とし世界の同業者に配布する予定である。一般植物科学研究者向けに、日本農芸化学会の「**化学と生物**」の**セミナー室**に 12 篇の総説を連載した (2014 年 3 月で連載終了)。これも取りまとめて 2014 年 7 月には出版の予定である。一般の植物科学研究者およびスーパーサイエンスハイスクールに配布予定である。さらに一般市民に向けた書籍を、**講談社ブルーバックス**として出版すべく執筆中である。

4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ程度）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

植物高 CO₂ 応答発足以前の状態

「植物の高 CO₂ 応答」は自然科学としてばかりでなく、社会的にも非常に重要な課題である。それを反映して生態学や環境科学分野で多くの研究がなされていたが、その多くは表現型の記載とそのモデル化という手法によるものであった。また、種や環境によって植物の応答が異なるが、その違いをメカニスティックに説明することも行われていなかった。理解を深めるためには、分子生理学分野の研究手法を導入する必要があるが、研究者間の交流が少なく、導入は難しかった。

世界的に見ても優れた業績をあげている日本の分子生理学分野の研究者が、高 CO₂ 応答などの生態学的な課題にあまり興味を示さなかったことも事実である。本領域のコンソーシアム研究はそこに風穴を開けようという大きな試みであった。

領域発足直後の問題点

7. 総括班評価者による評価 の杉山委員、及川委員のコメントにもあるように、当初は分子生理学者と生態学／農学の研究者の相互理解が深まるかどうか懸念された。たとえば、分子生理学者である榎原は、「生理生態学の研究班と分子生理学の研究班間で知見の共有ができ、かつ植物ホルモンの内生量に再現性よく違いが出る栽培条件を検討、設定するのに多くの時間を費やした。」と振り返っている。これまでに高 CO₂ 応答の研究を行ってきていた植物栄養学者の牧野でさえも、「研究費採択前の成果の延長上で研究がスタートできるものでなかったため、プロジェクト開始後は、多くの予備実験に多大の時間を費やすこととなった。」と述べている。結果が出やすい系を作って研究してきた分子生理学系の研究者には、多大な時間を犠牲にしてまで、栽培条件を自然環境に近づけることはなかなか理解されなかったかもしれない。しかし、毎年集会や若手の会、学会のシンポジウムや勉強会を通して、分子生理学者や生態学者／農学者のそれぞれの譲れない点を理解する段階から、徐々に協力関係へと発展した。中間評価の成績は A⁻だった。初期の状態から抜け出したばかりの段階で評価が行われたためであったことも評価が低かった原因であると思われる。

計画通りに進行しなかった点、問題点など

後半の公募研究の申請数が少なかったために採択数に制限がかかり、継続して研究することができなかったグループが複数存在した。希望するグループには連携研究者（班友）として領域に参画してもらった。班友には、総括班から領域の会議や集会に出席する際の旅費を支給した。

2011年3月の地震で、東北大学の3研究室が被災した。また、つくば地域の研究所、埼玉大学でも計画停電などの影響でフリーザー内のサンプルが融解した。2012年3月には、爆弾低気圧によって東北大学の植物栽培施設に大きな被害が出た。これらの被害に対しては、総括班からできるだけ援助を行った。東北大学のメンバーの努力により、驚くべき速さで研究が復旧したことに敬意を表したい。

3. 研究領域の設定目的の達成度で既にのべたように、マーカー因子群の選定は行わなかった。一つには、高 CO₂ 応答のさまざまな素過程についての発見が続いたため、因子群選定の機が熟していないと判断したためである。また、領域内のプラットフォームにおける代謝産物、植物ホルモンなどの測定がコンソーシアム内で広く用いられ、より精度の高い研究ができるようになっていたためでもある。

領域終了後の所感と希望

生態学分野の研究者である唐は「誘導反応の解析に伴う生化学的解析とデータ解析に困難があったが、新領域の他の研究者らの協力によって解消できた。」と述べている。生理生態学分野で研究を行ってきた寺島も、分子生理学者との共同研究を展開することを通して多くを学ぶとともに、生理学的な測定については全力で協力した。バイオインフォーマティクス分野の花田は、「植物高 CO₂ 応答という現象のコンソーシアムを構築するという発想がチャレンジングである。実際に、植物高 CO₂ 応答という課題を掲げて、分子レベルから地球全体までを一体化して見ていた。それらの一つ一つをつなげる班が存在しており、非常に幅広い未来型の新学術であったと感じた。」と述べている。相互理解が深まってきた段階で、このような試みを中止しては意味がない。植物科学の健全な発展のためには、分野縦断型のコンソーシアム研究を続けることが必須である。

領域研究の後半に向けて、分子生理学分野で新発見が続出した。これらには、自然環境に近い環境設定や野外の現象にこだわった領域の姿勢が、正に寄与したと信じている。シアノバクテリアの C/N 応答の研究を行ってきた小俣は、この領域で初めて植物を対象とした研究を行った。「植物を扱った経験のなかったメンバーが、植物の扱いを通じて研究の幅を大きく広げることができた。その具体的成果が、ラン藻と植物で保存されている葉緑体の亜硝酸イオン輸送体の発見だと言える。」という小俣のコメントは本領域の一つの意義を象徴していると思える。

5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ程度）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者の研究終了後の動向等を記述してください。

領域内での若手研究者育成の取組み

当初、大学院生をふくむ若手研究者が合宿して、講演、ポスター発表、ワークショップ、勉強会などを行う「若手の会」は2年に1回の頻度で開催する予定であった。しかし、1回目の若手の会で多くの若手が啓発されたようであり、異分野の研究者によるコンソーシアム研究である本領域としては分野を越えた交流がもっとも大切であると考えて、毎年秋に開くことにした。2011年度は静岡県伊東温泉、2012年度は北海道支笏湖、2013年度は神奈川県三浦海岸、2014年度は宮城県蔵王、いずれも2泊3日で開催した。同時に、メタボローム(2012)、気孔の生物学(2013)、植物ホルモン(2014)に関する勉強会も開いた。それぞれの会に約80名の若手研究者が参加した。

若手研究者の研究終了後の動向

計画班

寺島班	博士研究員	⇒	理化学研究所 基礎特別研究員
	博士研究員	⇒	CREST 博士研究員
射場班	博士研究員	⇒	九州大 助教
小俣班	博士研究員	⇒	CREST 博士研究員
柳澤班	博士研究員	⇒	東大 特任助教
榊原班	研究員(分担者)	⇒	理化学研究所 定年制枠研究員に採用
	研究員(連携研究者)	⇒	JST 研究員
牧野班	学振特別研究員	⇒	千葉大 助教
	博士研究員1名	⇒	CREST 博士研究員
小池班	博士研究員	⇒	農工大 テニユアトラック准教授
廣瀬班	博士研究員	⇒	茨城大 助教
	博士研究員	⇒	東北大 助教
伊藤班	博士研究員	⇒	静岡大 助教
	研究協力者	⇒	農業環境研究所 テニユアトラック研究員

公募班

山口班	学振特別研究員	⇒	北大 助教
宮尾班	任期付き研究員	⇒	森林総合研究所 研究員
	博士研究員	⇒	農業試験場 研究員
長谷川・酒井班	博士研究員	⇒	Azusa Pacific University Associate professor
三宅班	大学院生(博)	⇒	酒類総合研究所 研究員

若手研究者の受賞

廣瀬班	小口理一	2012年度	日本植物学会奨励賞	文部科学大臣表彰若手科学者賞	受賞
牧野班	矢守航	2013年度	日本植物学会奨励賞	日本農学進歩賞	受賞
射場班	祢宜淳太郎	2013年度	文部科学大臣表彰若手科学者賞		受賞
馳澤班	桧垣匠	2013年度	日本バイオイメージング学会奨励賞		受賞
榊原班	木羽隆敏	2014年度	理研 環境資源科学研究センター “CSRS Incentive Award”		受賞

他ポスター賞、プレゼンテーション賞多数

6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

研究領域内で共有する設備の購入、栽培法の統一、変異体の供与

なるべく多くの班で、統一した高 CO₂ 実験ができるように、領域発足時までに高 CO₂ 実験を行ってこなかった 5 研究班に、同型の、CO₂ 濃度調節が可能な walk-in タイプの人工気象器 2 台を設置した。全てを同じデザインにしたため、初期不良の発見、修繕などが迅速に行われた。

シロイヌナズナなどの小型実験植物を用いて分子生理学的な研究を行う場合、C/N バランスの操作には%オーダーの糖を培地に付加することが行われる。また、硝酸塩を数十 mM の高濃度で与える。本領域研究では、自然条件に近い環境で統一的な研究を行うために、栽培方法を極力統一した。また、用いる品種、エコタイプ（アクセッション）も極力統一した。栽培方法などの詳細は領域 HP に掲載して、誰でもアクセスできるようにした。

領域内では、興味深い変異体や植物材料をほぼ自由に供与して、共同研究をすすめた。

総括班からの支援

代謝産物やホルモン解析のプラットフォームの運営を支援するために、担当した計画班には消耗品費として毎年約 100 万円を支援した。各班とも迅速に測定し結果を返したため、非常に有用なプラットフォームとして機能した。また、領域の HP は九州大学の射場研究室のサーバーに載せ、メンバーが献身的に管理した。HP の管理費も総括班から支給した。

4. 研究推進時の問題点にも述べたが、後半の公募班の選定に応募したグループの数が少なかったため、採択件数の上限を決められてしまった。公募要領を絞込むと、応募の件数は少なくなるはずであり、きわめて残念な措置であった。前半公募班として研究を行い、後半にも高 CO₂ 応答関連の研究を行うことを希望した研究者には、総括班の連携研究員（班友）として参画してもらい、集会、若手の会に参加の際には旅費を支給した。

2011 年 3 月の地震および 2012 年 4 月の爆弾低気圧では東北大学の研究室や栽培施設が直接被害を被った。少額ではあったが、各研究室に物品費を配布した。また CO₂ ガスボンベの高騰のため、小池班の樹木 FACE の連続実験が不可能となりそうな事態となった。これに対しても総括班からできる限りの援助を行った。このため、2011 年度および 2012 年度は総括班の予算は他の部分を切り詰めたが赤字となったため、他の資金も充てた。

今後の計画（成果取りまとめ費用を利用したアウトリーチ活動）

終了研究領域の成果取りまとめ費が採択され 299 万円を使うことができる。中間評価では、アウトリーチ活動が不足していると指摘されたので、成果取りまとめの費用を利用して次の 3 つの活動を行う。

1. 専門誌 *Plant and Cell Physiology* の Special issue 「Plant responses to CO₂」が 2014 年 2 月に出版された。領域のメンバーが執筆した 12 篇の論文が掲載されており、全ての論文がオープンアクセスとなっている。2 月以降の領域の成果で *Plant and Cell Physiology* に掲載される論文 3~4 篇も合わせて、別冊冊子を 500 部製作し、世界の関連研究者に送付する。
2. 日本農芸化学会が編集する一般生物科学雑誌に 2013 年 4 月から 2014 年 3 月に、「セミナー室」として植物高 CO₂ 応答に関する総説を 12 篇掲載した。これを冊子にまとめ安価で販売する。成果取りまとめ費用で 500 部を購入し、国内の関連研究者とスーパーサイエンスハイスクールに配布する。
3. 本領域研究に関連する研究やこの周辺事情をわかりやすく解説した、高校生や一般市民に向けた啓蒙書を執筆中であり、講談社ブルーバックスとして刊行する。500 部を取りまとめ費用で購入し、政策担当者やスーパーサイエンスハイスクールに配布する。

総説集やブルーバックスは、関連学会の高校生ポスターの賞品としても利用する。

7. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

本プロジェクト研究の成果および今後への期待 杉山 達夫（名古屋大学名誉教授）

1. 「分子生理学・細胞生物学・生化学的研究から生態学・農学研究までを包括し、植物の高CO₂応答を解明する」との代表者をはじめとするリーダーの研究視野・志向を共有する研究者が年次を追って増え、その姿勢は若手研究者にも浸透し、その育成をもたらした。

2. 分子を基軸にした高次系研究への展開基盤が整い始めた。それはかつて植物科学研究に出現した「高次系への展開を志向した生化学・生理学・農学領域研究の融合の動き」に類似している。相違点は、領域を植物群落・生態学領域まで拡大したことであり、本研究プロジェクトの大きな意義だと思う。分子を軸にした生態学へのアプローチには、刻々と変動する野外での環境の変動、それらに対応する個体・群落の生理機能の変動と植物の多様性を考えると、分子遺伝学を軸にした視点が今後の展開のさきがけとなるだろう。

3. いかなる研究も当初の想定と得られた成果とにはある種のギャップがある。成果の一端から派生し、予想外の展開をもたらしたものが本プロジェクト研究に散見される。それらの多くは次の展開への萌芽となり得るものであり、この視点を大切に、各自で今後の展開を熟考してほしい。

4. 「高CO₂」という社会的に重要かつ関心の高い課題ゆえに、本研究プロジェクトの成果を分かりやすく内外にアピールすることは領域の責務である。

評価・助言コメント 及川 武久（筑波大学名誉教授）

CO₂は周知の通り、地球温暖化の最大の原因物質であり、植物から見れば光合成の基質である。すなわち、CO₂は科学的にも経済・社会的にも、現在大きな注目を浴びている存在である。このCO₂を対象とした今回の新学術領域の研究課題は、ミクロの分子生物学的なレベルからグローバルな生態学的レベルの研究までを統合するというもので、全く新たなコンセプトで進められた一大プロジェクトだった。

大気中のCO₂濃度の歴史的変遷を辿ってみると、2万年ほど前の最終氷期には180 ppm であったものが、約1万年前に後氷期に至ったとたん280 ppm に跳ね上がり、それ以降産業革命が始まる200年前まではほぼ安定した状態にあった。ところが産業革命を契機として濃度は上昇を続け、最近では400 ppm を超えそうな勢いである。地球温暖化が強く懸念される理由がここにある。このような環境変化は地球上の植物にも多大な影響を及ぼす。光合成の基質の増加と温度上昇は植物の基本的な生理機能に大きな変更を迫る。このような変化を分子レベルにまで立ち入って極め、得られた情報を究極的にはグローバルの生態系レベルにまで組み上げることを、本プロジェクトは目指してきた。

今回のプロジェクトには植物を対象としたミクロからマクロまでの50名を超える研究者が参画している。これらの研究者は今まで学会などで一堂に会したことがなかったに違いない。従って毎年開かれた成果報告会で聞く話は耳新しく、初めは理解しにくい話題も多々あったであろうと思う。しかし、プロジェクトの進行に伴い、このような困難を乗り越えて、異なった研究グループ間での共同研究が幾つか進みつつある。毎年の成果報告会に加えて、若手研究者を中心とした勉強会も毎年開かれ、これからの研究を担う若手研究者にとっては特に大きな刺激になったに違いない。今回のプロジェクトの成果をしっかりとまとめて、次の新たな発展を期待したいし、その可能性は大いにあると感じている。

評価・助言コメント 和田英太郎（京都大学名誉教授）

さて評価のはじめに最近私が気になっている動向をあげる。

1) ヨルゲン・ランダース著「2052年」今後40年のグローバル予測

ローマクラブ「成長の限界」（1972年）の40年後を検証し、今後の40年を予測する本である。40年前に提出されて物議を醸した「成長の限界」の結論は、「世界は破滅へのレールを進んでいる」というもので、近年の研究でやはり正しかったことが検証された。「成長の限界」はMITの複数の研究者が、世界的なシンクタンクであるローマクラブのために書いたものである。もし人類が、自然が与えることができる量以上のものを消費し続けるならば、2030年までに世界的な経済崩壊と人口の急激な減少が起ころうと予測している。

2) 事実、人為起源の二酸化炭素の放出は6から8 Gt/年となった。海は2. n Gt 強しか吸収できないので、大気CO₂濃度の上昇は加速されている。そしてそのレベルはほぼ400 ppm を越えようとしている。

3) 人口増加は以下のように激しくなっている。

1999年10月12日 60億人、2011年10月31日は70億人。この勢いでは2024年には80億に達し、中国・インドの生活レベルの向上で、実質100億人になる。

このような背景から予想すると、当該「植物高CO₂応答」は近未来に不可欠な学問新分野となり、今後は食料やバイオエネルギー問題のイノベーションを期待される社会的ニーズの高い研究分野になるだろう。是非これらの期待にこたえられる応用基礎研究を目指して進まれるよう希望する。一方、昨今のバイオエンジニアリングの進歩、地球温暖化を防ぐジオエンジニアリングの方策等が今後現実味を帯びて社会に突入する危険性が高い。この状況下で分子、遺伝子からマクロな生態系を包括する本学術領域のような分野が今後大きな成果を挙げ、ヒトの社会と自然界関係の近未来100年のあり方や方向に大きな提言をして欲しいと心から望んでいる。この意味でもこの分野の発展を祈っている。

さて、2011年3月11日14時46分18秒以降、我が国を含む東アジアでは、従来の国連気候変動枠組み条約（UN Framework Convention on Climate Change）から、気候変動ばかりではなく、地震、津波、台風、竜巻などや生物多様性の保全、持続的食料生産を求める、国連地球物理・生態系変動枠組み条約（UN Framework Convention on Geophysical & Ecological Change）が重要となるだろう。

このような背景にあり、この新学術領域でこれまで得た成果の中から、分子生理学と生理生態学を統合した応用基礎研究の事例をいくつか示していただくと、この学術分野の今後の重要性が明確になると思う。

寺島新学術の成功とインパクト 山谷 知行（東北大学大学院農学研究科）

文科省における名称が特定領域研究から新学術領域研究に変更されてから、植物対象ではじめて採択されたのがこの領域で、その後多くの領域が続いた。大きな突破口を開けてくれたことに対して、同じ植物科学の研究者としてまずは感謝したい。本領域の特徴としては、地理的には異なっても同じ栽培装置を使い、同じ条件で様々な植物の高CO₂応答を研究してきたことが、まずあげられる。領域代表の強いリーダーシップが発揮されて実現したことと思う。また、モデル植物から樹木までを数理モデル化した意欲的な研究が展開され、植物分子生理学や生態学から地球環境変化予測までを相互に結ぶ、融合研究の成功例を示すことができた。植物科学界のみならず、社会的にも大きなインパクトを与えることができたのではないだろうか。中学生や高校生が読めるような本を出版できれば、もっと貢献度は大きくなると思う。私が生きてはいない近未来の植物がどのようなになっているのか、SFのようでもあるが、私も多くのことを学びそれが現実味をもって感じられるようになった。最後に、Plant and Cell Physiologyの編集長として、本領域による特集号が2014年2月に刊行されたことに、厚く感謝申しあげたい。世界中の多くの研究者の目にとまることを期待している。

8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）【研究項目毎または計画研究毎に整理する】

（3 ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、現在から順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

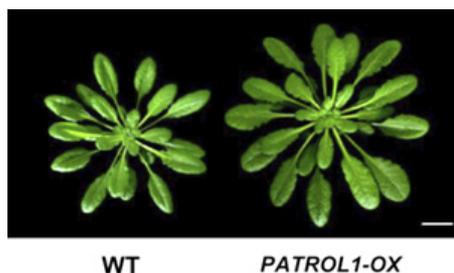
本研究領域では研究項目を設けず、全ての計画班と公募班が1つのコンソーシアムを形成して研究に取り組んだ。以下に、主な研究成果を8つの分野にまとめ、なるべく現在から遡りながら述べる。名前は各班の代表者、+は共同研究を示す。

高 CO₂ 応答性の短い遺伝子

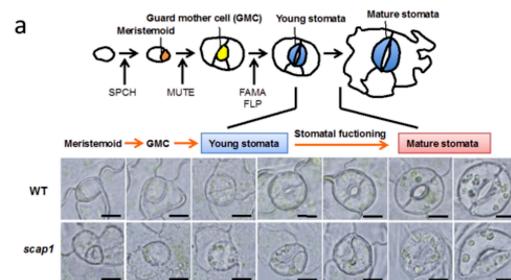
短い遺伝子領域の推定に特化した方法を開発し、シロイヌナズナおよびイネで、約 8,000 個および 10,000 個の短い遺伝子領域を予測した。シロイヌナズナで新規の短い遺伝子および既知の遺伝子すべてに関する高 CO₂ 環境にした直後のトランスクリプトームデータベースを構築した（特願 2012-59415、2013、2014、<http://evolver.psc.riken.jp/seiken/> 花田）。シロイヌナズナについて、高 CO₂ 暴露によって変動する短い遺伝子の過剰発現体には、高 CO₂ 特異的に光合成が抑制されるものがあった。これらの短い遺伝子は CO₂ のシグナリングに関係する可能性が高い（投稿済、未発表、花田）。

気孔

気孔孔辺細胞の膜交通制御因子 PATROL1（2013、射場+馳澤・桧垣）と、Dof 型転写因子 SCAP1（2013、射場+柳澤）を同定した。PATROL1 は神経伝達物質分泌因子のホモログで、細胞膜上の H⁺-ATPase 量を制御している。また、SCAP1 は気孔の形成と開閉機能を統括する。2006 年に射場らが同定した HT1 の性質を精査した。キナーゼ活性が低下した変異体は劣性で気孔は低 CO₂ でも開きにくく、活性が上昇する変異体は優性で高 CO₂ でも気孔がよく開いた。HT1 キナーゼの操作により気孔の CO₂ 応答の操作が可能である（未発表、射場）。



PATROL1の過剰変異株（右）は、生育も亢進する（Hashimoto-Sugimoto et al. 2013, *Nat Commun*）



scap1変異株（写真下）では機能的な孔辺細胞の形成ができない（Negi et al. 2013 *Curr Biol*）

PATROL1が制御するH⁺-ATPaseの膜胞による移動は孔辺細胞と副細胞とは逆で、孔辺細胞でH⁺-ATPaseが膜胞から細胞膜に移されるときに、副細胞では膜胞に移る。この逆の動きは気孔の光環境応答を増強する（2014、馳澤・桧垣+射場）。シロイヌナズナのPCaP1は、孔辺細胞では気孔と反対側の細胞膜にのみ局在しており、構造の精査からCa²⁺シグナルとイノシトールリン酸シグナルの情報変換分子として機能していることが示唆される。機能欠損株は、高CO₂でも気孔が閉じにくく、よく成長した。（2010、前島）。

剥離表皮の気孔の光やCO₂への応答は無傷葉の気孔に比べると小さいが、ツクサの剥離表皮を葉肉に載せるとこれらの応答が促進された。この応答は、葉肉との間に水溶性物質透過性のフィルムをはさんでも同様に促進されるので、葉肉から孔辺細胞への水溶性シグナルの存在が示される（2013、寺島）。

高 CO₂ 条件で栽培したポプラの光による気孔開口は、通常 CO₂ 条件で栽培したものよりも速く、馴化応答を示唆する（2012 など、唐）。気孔形成因子 stomagen を過剰発現したシロイヌナズナでは気孔密度が対照の約 3 倍となり、光合成速度も約 30%増加した（2013、嶋田）。

CO₂拡散コンダクタンス、アクアポリン

高CO₂条件下でおこる葉内細胞間隙から葉緑体へのCO₂拡散コンダクタンスおよび気孔コンダクタンスの低下には、植物ホルモンABAは関与しない（投稿済、寺島）。

CO₂拡散コンダクタンスには、CO₂透過性アクアポリン（cooporin）が関与している可能性がある。細胞膜アクアポリンのうちCO₂輸送能をもつのはPIP1型であるとされてきたが、アフリカツメガエルの卵を用いた異種発現

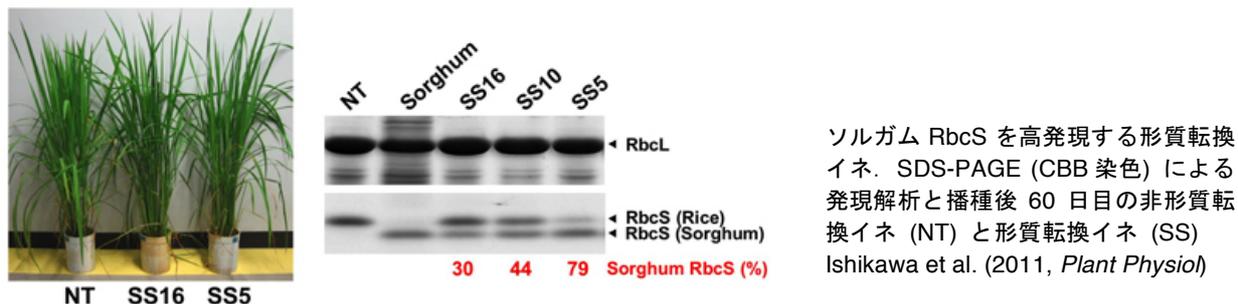
系によって、オオムギのPIP2型アクアポリン数種にCO₂透過活性があることが示された。また、特定のアミノ酸の置換によってCO₂とH₂Oの透過選択性の操作に成功した (2014、森)。シロイヌナズナにおいて高CO₂や高温で特異的に発現するアクアポリンの分子種を特定した (未発表、前島)。ダイコンのアクアポリンを導入したユーカリの生理活性や成長を比較した。PIP2を導入したユーカリの成長は亢進したが、PIP1を導入した植物の成長は抑えられた (2010、前島)。

シロイヌナズナ葉肉細胞における葉緑体の位置の決定に、細胞間隙のCO₂濃度が関与することを示した。CO₂濃度勾配のあるゲルに埋めた葉肉細胞プロトプラスト中の葉緑体が、高CO₂濃度側に集合することを発見した。今後の研究のための有力な系である (未発表、高木)。

Rubisco、代謝、呼吸、転流

イネにおいて、低CO₂では光合成炭酸固定酵素 Rubisco 量の増加が成長を促進し、高CO₂では抑制が成長を促進することを示した (投稿済、牧野)。Rubisco タンパク質量は *rbcL* の翻訳レベルによって決定すると考えられてきたが、Rubisco 小サブユニット (RBCS) mRNA の発現量を操作したところ、Rubisco タンパク質量もそれに伴って変化した。RBCSmRNA のタンパク質量への影響が初めて明らかになった (2013、牧野)。

C4 植物ソルガムの小サブユニットをイネで発現させると、Rubisco の最大活性が 50%高められた。小サブユニット遺伝子導入による育種の可能性が示された (2011、2014、深山)。



光合成過程で反応性糖アルデヒドが不可避免的に生成すること、高CO₂は生成を促進することを証明した (2011、2014、三宅)。糖アルデヒドは光合成電子伝達系で還元され活性酸素生成を引き起こす (2011、三宅+牧野)。糖アルデヒド解毒酵素 aldoketo reductase (AKR) ファミリーをシロイヌナズナにおいて見出し、その機能解析を行った (2013、三宅)。

光合成産物として主にショ糖を蓄積するイネにおいても、高CO₂環境では、光合成器官におけるデンプン代謝が光合成のダウンレギュレーションを抑える鍵となっている (未発表、牧野)。高CO₂条件下のイネで高発現する CCT タンパク質 (CRCT) は、イネの葉鞘などの栄養器官のデンプン合成を正に制御し、葉身のデンプン量を抑制する役割が示唆された (投稿済、深山)。イネのヌクレオチドピロホスファターゼ/ホスホジエステラーゼ (NPP1) 欠損変異体では、高CO₂・高温環境下においてデンプン蓄積量が増加し、成長も促進された。NPP1 は気孔開口、光合成ならびにデンプン集積を負に制御している (2014、三ツ井)。

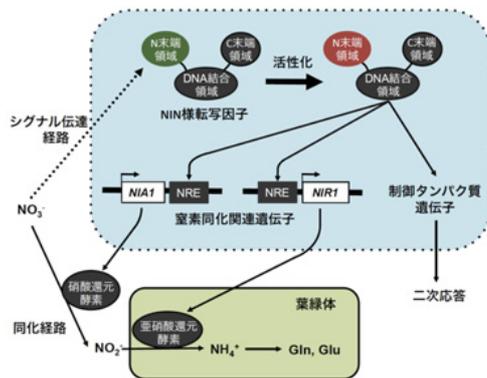
シロイヌナズナを390 ppmと780 ppmで栽培し、その地上部の呼吸系を比較した。390 ppmでは夜間の呼吸活性がATP利用反応によって律速されたが、高CO₂では律速が緩和された。この傾向は呼吸酵素レベルやメタボロームの差では説明できなかった (2014、寺島)。

シロイヌナズナでは、ペクチン酸リアーゼ *RSX1* がソース葉の葉脈の原形質連絡に局在し、原形質連絡形成により糖転流を促進する (特願 2010-110837; 未発表、西田)。高CO₂では、SUT4 トランスポーターの発現上昇と、原形質連絡形成の促進により糖転流容量が向上した (2014、西田)。

窒素栄養と C/N バランス

硝酸イオンのみを窒素源として栽培したシロイヌナズナの硝酸イオン輸送体変異株は、「恒常的窒素不足状態」の新モデルである。この変異株は、高CO₂条件下で窒素欠乏時の野生型と同様の症状を示したが、主要代謝産物の恒常性は保たれていた (2014、小俣)。過剰窒素に感受性のモウセンゴケの窒素による傷害の一因は亜硝酸イオンの蓄積であった。高CO₂条件は、窒素による障害を緩和した (2013、小俣)。葉緑体包膜上の亜硝酸イオン輸送体の同定した (2014、小俣)。好アンモニア植物イネにおいて、アンモニアの過剰吸収を抑える仕組みを見出した (未発表、早川)。

硝酸シグナル応答転写因子 (NLP) を同定した。抑制株は高CO₂環境下で成長が抑制されたが、代謝産物組成には大きな影響はなかった (2013、柳澤)。亜硝酸還元酵素および硝酸還元酵素の硝酸応答 *cis* 配列を同定した (2010、柳澤)。



植物の硝酸応答機構のモデル図

硝酸シグナルをうけて活性化した NIN 様転写因子 (NLP) は窒素同化関連遺伝子の発現と制御タンパク質遺伝子の両方の発現を制御することにより、窒素応答の鍵因子として働いている。硝酸による NIN 様転写因子 (NLP) の活性化は N 末端側領域を介して行なわれる。

Konishi & Yanagisawa (2013, *Nat Commun*)

高CO₂下で栽培したシロイヌナズナでは、トランスゼアチン型サイトカイニンの生合成が亢進し、成長促進に寄与した。他のホルモンには顕著な変化はなかった (未発表、榊原)。サイトカイニンの活性調節には、側鎖修飾による質的な調節も寄与することを見いだした (2013、榊原)。

C/N バランス変化にともなう老化や植物免疫機能の変化に、ユビキチン-プロテアソーム系が寄与していることを発見し、その構成メンバーを明らかにした (2014、2011、山口)。

表現型応答、環境発生物学 (Eco-Devo)

高 CO₂ 条件でイネの葉身は短く葉身幅は狭くなる。これらの原因となる高 CO₂ 感受性発生段階を特定した。2 日間の高 CO₂ 処理で有意な形態変化が観察された。(2014、宮尾 (徳富))。シロイヌナズナの子葉表皮において孔辺細胞特異的に GFP を発現させ、共焦点画像 (<http://hasezawa.ib.k.u-tokyo.ac.jp/lips/co2>) の解析によって気孔発生に対する高 CO₂ の影響を調べた。高 CO₂ 条件では気孔は均一に分布せず、気孔間の距離が小さいものが増えた (2013、馳澤・桧垣)。

低窒素/高 CO₂ 条件でシロイヌナズナを栽培すると、根に糖が蓄積するため植物ホルモンのバランスが変化し側根数が増加した。これにより根の重量が相対的に大きくなった (2014、寺島+榊原+柳澤)。

世界各地のシロイヌナズナエコタイプを異なる CO₂ 濃度で育成し、エコタイプ間で成長速度の CO₂ 応答に大きな差があることを見出した。さらに、その違いの原因が窒素あたりの光合成の違いに最も強く依存していることを明らかにした (投稿済、広瀬)。

FACE (free air CO₂ enrichment, 開放系大気 CO₂ 付加)

落葉樹を FACE において 4 年間高 CO₂ 下で育成すると、春に太い道管を作る環孔材樹種では、葉が大きくなり、道管径はさらに太くなった。成長は促進され、細根の生産および枯死が進んだ (2010、小池)。自然光グロースチャンパーを利用した低窒素/高 CO₂ 栽培実験において、光合成のダウンレギュレーションの生物季節学的な表現型との関連の詳細を解析した (2012、北尾+小池、2011、小池)。

過去約 100 年間に育種された代表的なイネの品種を用いて FACE 実験を行った。その結果、旧品種は新品種より高い CO₂ 応答性を示した。200 ppm の CO₂ 濃度上昇によるイネの増収率は品種により 3-36% の変動があった。増収率の変動は、シンク容量 (籾数×籾 1 粒重) の高 CO₂ 応答性に起因することを明らかにした (2013、長谷川・酒井+牧野、2011、深山+長谷川・酒井)。

イネにおける葉群動態や窒素動態は、栄養条件には強く依存するが、CO₂ 上昇には応答しないことを見出した (未発表、広瀬+長谷川・酒井)。FACE で栽培したイネ品種間で、昼間と夜間の呼吸活性を比較した (未発表、寺島+長谷川・酒井)。

メタ解析、モデル化：

森林生態系の葉面積指数 (葉面積の総和を土地面積で割ったもの) に関するメタ解析 (文献データの集積・分析) を実施し、気候要因や生物要因とのグローバルな関係を見出した (2014、伊藤+彦坂)。

最適葉群動態のモデルにゲーム理論を導入し、新しい葉群動態を構築した。このモデルにより、葉面積指数などの群落構造の環境応答 (CO₂ 上昇を含む) を定量的に説明できるようになった (2014、2012、広瀬)。個体レベルの CO₂ 応答の基礎となる個体の窒素利用の最適化モデルを構築した (2014、2011、館野)。

領域の成果を参考に、高 CO₂ 応答をシミュレートする生態系モデルの高度化を進め、地球環境変動によるガス交換や水利用効率の変化をシミュレートし (2012、2011、伊藤)、IPCC レポート (2013、2014) に大きな貢献をした。

9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、現在から順に発表年次をさかのぼり、計画研究・公募研究毎に順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

■ 主な論文と総説・書籍

□ 計画班

□ 寺島班（原著論文 21 編 総説・著書 7 編）

*Hachiya T, Sugiura D, Kojima M, Sato S, Yanagisawa S, Sakakibara H, Terashima I, Noguchi K (2014) High CO₂ triggers preferential root growth of *Arabidopsis thaliana* via two distinct systems at low pH and low N stresses. *Plant Cell Physiol*, 55, 269-280.

*Watanabe CK, Sato S, Yanagisawa S, Uesono Y, Terashima I, Noguchi K (2014) Effects of elevated CO₂ on levels of primary metabolites and transcripts of genes encoding respiratory enzymes and their diurnal patterns in *Arabidopsis thaliana*: Possible relationships with respiratory rates. *Plant Cell Physiol*, 55, 341-357.

*Fujita T, Noguchi K, Terashima I (2013) Apoplastic mesophyll signals induce rapid stomatal responses to CO₂ in *Commelina communis*. *New Phytol*, 199, 395-406.

*寺島一郎 (2013) 植物の生態 ー生理機能を中心にー 裳華房

*Terashima I, Hanba YT, Tholen D, Niinemets U (2011) Leaf functional anatomy in relation to photosynthesis. *Plant Physiol*, 155, 108-116.

□ 射場班（原著論文 7 編 総説・著書 2 編）

Hashimoto-Sugimoto M, Higaki T, Yaeno T, Nagami A, Irie M, Fujimi M, Miyamoto M, Akita K, Negi J, Shirasu K, Hasezawa S, *Iba K (2013) A Munc13-like protein in *Arabidopsis* mediates H⁺-ATPase translocation that is essential for stomatal responses. *Nat Commun*, 4, 2215.

Negi J, Moriwaki K, Konishi M, Yokoyama R, Nakano T, Kusumi K, Hashimoto-Sugimoto M, Schroeder JI, Nishitani K, Yanagisawa S, *Iba K (2013) A Dof transcription factor, SCAP1, is essential for the development of functional stomata in *Arabidopsis*. *Curr. Biol*, 23: 479-484.

*Kusumi K, Hirotsuka S, Kumamaru T, Iba K (2012) Increased leaf photosynthesis caused by elevated stomatal conductance in a rice mutant deficient in SLAC1, a guard cell anion channel protein. *J Exp Bot*, 63, 5635-5644.

Brandt B, Brodsky DE, Xue S, Negi J, Iba K, Kangasjärvi J, Ghassemian M, Stephan AB, Hu H, *Schroeder JI (2012) Reconstitution of abscisic acid activation of SLAC1 anion channel by CPK6 and OST1 kinases and branched ABI1 PP2C phosphatase action. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109, 10593-10598.

Negi J, Hashimoto-Sugimoto M, Kusumi K, *Iba K (2014) New approaches to the biology of stomatal guard cells. *Plant Cell Physiol*, 55, 241-250.

□ 小俣班（原著論文 8 編 総説 1 編）

*Maeda S, Konishi M, Yanagisawa S, Omata T (2014) Nitrite transport activity of a novel HPP family protein conserved in cyanobacteria and chloroplasts. *Plant Cell Physiol*, in press.

Takatani N, Ito T, Kiba T, Mori M, Miyamoto T, Maeda S, *Omata T (2014) Effects of high CO₂ on growth and metabolism of *Arabidopsis* seedlings during growth with a constantly limited supply of nitrogen. *Plant Cell Physiol*, 55, 281-292.

*愛知真木子, 味岡ゆい, 上野薫, 寺井久慈, 南基泰 (2013) 東海丘陵要素植物群の無機窒素栄養に対する種特異性. *湿地研究* 3, 3-14.

□ 柳澤班（原著論文 18 編）

Sato S, *Yanagisawa S (2014) Characterization of metabolic states of *Arabidopsis thaliana* under diverse carbon and nitrogen nutrient conditions via targeted metabolomic analysis. *Plant Cell Physiol*, 55, 306-319.

Konishi M, *Yanagisawa S (2013) *Arabidopsis* NIN-like transcription factors play a central role in nitrate signalling. *Nat Commun*, 4:1617. (Faculty of 1000)

Konishi M, *Yanagisawa S (2011) Roles of the transcriptional regulation mediated by the nitrate-responsive *cis*-element in higher plants. *Biochem Biophys Res Commun*, 411, 708-713.

Konishi M, *Yanagisawa S (2010) Identification of the nitrate-responsive *cis*-element in the *Arabidopsis NIRT1* promoter defines the presence of multiple *cis*-elements for nitrogen response. *Plant J*, 63, 269-282. (Faculty of 1000)

□ 榊原班（原著論文 22 編 総説 1 編）

Ko D, Kang J, Kiba T, Park J, Kojima M, Do J, Kim KY, Kwon M, Endler A, Song WY, Martinoia E, Sakakibara H, *Lee Y (2014) *Arabidopsis* ABCG14 is essential for the root-to-shoot translocation of cytokinin. *Proc Natl Acad Sci USA*, 111, 7150-7155.

Kiba T, Takei K, Kojima M, *Sakakibara H (2013) Side-chain modification of cytokinins controls shoot growth in *Arabidopsis*. *Dev Cell*, 27, 452-461.

Kiba T, Feria-Bourrellier A-B, Lafouge F, Lezhneva L, Boutet-Mercey S, Orsel M, Bréhaut V, Miller A, Daniel-Vedele F, Sakakibara H, *Krapp A (2012) The *Arabidopsis* nitrate transporter NRT2.4 plays a double role in roots and shoots of nitrogen-starved plants. *Plant Cell* 24, 245-258.

*Nakamichi N, Kiba T, Kamioka M, Suzuki T, Yamashino T, Higashiyama T, Sakakibara H, Mizuno T (2012) Transcriptional repressor PRR5 directly regulates clock-output pathways. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109, 17123-17128.

□ 牧野班（原著論文 22 編 総説 1 編）

*Suzuki Y, Makino A (2013) Translational down-regulation of *RBCL* is operative in the coordinated expression of Rubisco genes in senescent leaves in rice. *J Exp Bot*, 64, 1145-1152.

*Suzuki Y, Fujimori T, Kanno K, Sasaki A, Ohashi Y, Makino A (2012) Metabolome analysis of photosynthesis and the related primary metabolites in the leaves of transgenic rice plants with increased or decreased Rubisco content. *Plant Cell Environ*, 35, 1369-1379.

- *Suzuki Y, Makino A (2012) Availability of Rubisco small subunit up-regulates the transcript levels of large subunit for stoichiometric assembly of its holoenzyme in rice. *Plant Physiol*, 160, 533-540.
- *Suzuki Y, Kihara-Doi T, Kawazu T, Miyake C, Makino A (2010) Differences in Rubisco content and its synthesis and degradation in leaves at different positions in *Eucalyptus globulus* seedlings. *Plant Cell Environ*, 33, 1314-1323.
- 小池班 (原著論文 10 編, 総説 3 編)
- Watanabe M, Kitaoka S, Eguchi N, Watanabe Y, Satomura T, Takagi K, Satoh F, Koike T (2014) Photosynthetic traits and growth of *Quercus mongolica* var. *crispula* sprouts attacked by powdery mildew under free air CO₂ enrichment. *Eur J For Res*, in press.
- Watanabe M, Watanabe Y, Kitaoka S, Utsugi H, Kita K, Koike T (2011) Growth and photosynthetic traits of hybrid larch F₁ (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) under elevated CO₂ concentration with low nutrient availability. *Tree Physiol*, 31, 965-975.
- 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 Environ*, 33, 1101-1111.
- 廣瀬/彦坂班 (原著論文 33 編)
- *Hikosaka K (2014) Optimal nitrogen distribution within a leaf canopy under direct and diffuse light. *Plant Cell Environ*, in press.
- *Oikawa S, Okada M, Hikosaka K (2013) Effects of elevated CO₂ on leaf area dynamics in nodulating and non-nodulating soybean stands. *Plant Soil*, 373, 627-639.
- *Hirose T (2012) Leaf-level nitrogen use efficiency: definition and importance. *Oecologia*, 169, 591-597.
- *Hikosaka K, Anten NPR (2012) An evolutionary game of leaf dynamics and its consequences for canopy structure. *Funct Ecol*, 26, 1024-1032.
- *Hikosaka K, Kinugasa T, Oikawa S, Onoda Y, Hirose T (2011) Effects of elevated CO₂ concentration on seed production in C₃ annual plants. *J Exp Bot*, 62, 1523-1530.
- 伊藤班 (原著論文 5 編)
- *Iio A, Hikosaka K, Anten NPR, Nakagawa Y, Ito A (2014) Global dependence of field-observed leaf area index on climate in woody species: Systematic review. *Global Ecol Biogeogr*, 3, 274-285.
- *Ito A, Inatomi M (2012) Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis on interactions between the global carbon and water cycles. *J Hydrometeorol*, 13, 681-694.
- *Ito A (2011) A historical meta-analysis of global terrestrial net primary productivity: Are estimates converging? *Global Change Biol*, 17, 3161-3175.
- 公募班
- 花田班 (原著論文 4 編 特許出願 1 件)
- Okamoto M, Higuchi-Takeuchi M, Shimizu M, Shinozaki K, Hanada K (2014) Substantial expression of novel small open reading frames in *Oryza sativa*. *Plant Signal Behav*, 9, e27848.
- *Hanada K, Higuchi-Takeuchi M, Okamoto M, Yoshizumi T, Shimizu M, Nakaminami K, Nishi R, Ohashi C, Iida K, Tanaka M, Horii Y, Kawashima M, Matsui K, Toyoda T, Shinozaki K, Seki M, Matsui M (2013) Small open reading frames associated with morphogenesis are hidden in plant genomes. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110, 2395-2400.
- 前島班 (原著論文 25 編)
- Kim S, Yamaoka Y, Ono H, Kim H, Shim D, Maeshima M, Martinoia E, Cahoon EB, Nishida I, Lee Y (2013) The ABCA9 transporter facilitates seeds storage lipid synthesis at the endoplasmic reticulum. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110, 773-778. (Faculty of 1000)
- Tsuhihira A, Hanba YT, Kato N, Doi T, Kawazu T, Maeshima M (2010) Effect of overexpression of radish plasma membrane aquaporins on water-use efficiency, photosynthesis, and growth of *Eucalyptus* tree. *Tree Physiol*, 30, 417-430.
- Kato M, Nagasaki-Takeuchi N, Ide Y, Tomioka R, Maeshima M (2010) An *Arabidopsis* hydrophilic Ca²⁺-binding protein with a PEVK-rich domain, PCaP2, is associated with the plasma membrane and interacts with calmodulin and phosphatidylinositol phosphates. *Plant Cell Physiol*, 51, 366-379.
- 三ツ井班 (原著論文 17 編 総説 3 編)
- *Wada KC, Mizuuchi K, Koshio A, Kaneko K, Mitsui T, Takeno K (2014) Stress enhances the gene expression and enzyme activity of phenylalanine ammonia-lyase and the endogenous content of salicylic acid to induce flowering in pharbitis. *J Plant Physiol*, 171, 895-902.
- Kaneko K, Inomata T, Masui T, Koshu T, Umezawa Y, Itoh K, Pozueta-Romero J, Mitsui T (2014) Nucleotide pyrophosphatase/phosphodiesterase 1 exerts a negative effect on starch accumulation and growth in rice seedlings under high temperature and CO₂ concentration conditions. *Plant Cell Physiol*, 55, 320-332.
- 山口班 (原著論文 13 編 総説 7 編)
- *Sako K, Yanagawa Y, Kanai T, Sato T, Seki M, Fujiwara M, Fukao Y, Yamaguchi J (2014) Proteomic analysis of 26S proteasome reveals direct interaction with transit peptides of plastid protein precursors for degradation. *J Proteome Res*, in press.
- Yasuda S, Sato T, Maekawa S, Aoyama S, Fukao Y, Yamaguchi J (2014) Phosphorylation of *Arabidopsis* ubiquitin ligase ATL31 is critical for plant C/N-nutrient response under control of 14-3-3 stability. *J Biol Chem*, 289, 15179-15193.
- Sato T, Maekawa S, Yasuda S, Domeki Y, Sueyoshi K, Fujiwara M, Fukao Y, Goto DB, Yamaguchi J (2011) Identification of 14-3-3 proteins as a target of ATL31 ubiquitin ligase, a regulator of the C/N response in *Arabidopsis thaliana*. *Plant J*, 68, 137-146.
- 早川班 (原著論文 4 編 総説 1 編)
- Konishi N, Ishiyama K, Matsuoka K, Maru I, Hayakawa T, Yamaya T, Kojima S (2014) NADH-dependent glutamate synthase plays a crucial role in assimilating ammonium in *Arabidopsis* root. *Physiol Plant*, in press.
- Funayama K, Kojima S, Tabuchi-Kobayashi M, Sawa Y, Nakayama Y, Hayakawa T, Yamaya T (2013) Cytosolic glutamine synthetase1;2 is responsible for the primary assimilation of ammonium in rice roots. *Plant Cell Physiol*, 54, 934-943.

□ 三宅班 (原著論文 11 編)

- Takagi D, Inoue H, Odawara M, Shimakawa G, *Miyake C (2014) The Calvin cycle inevitably produces sugar-derived reactive carbonyl methylglyoxal during photosynthesis: A potential cause of plant diabetes. *Plant Cell Physiol*, 55, 333-340.
- Saito R, Shimakawa G, Nishi A, Iwamoto T, Sakamoto K, Yamamoto H, Amako K, Makino A, *Miyake C (2013) Functional analysis of the AKR4C subfamily of *Arabidopsis thaliana*: model structures, substrate specificity, acrolein toxicity, and responses to light and [CO₂]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 77, 2038-2045.
- Saito R, Yamamoto H, Makino A, Sugimoto T, *Miyake C (2011) Methylglyoxal functions as Hill oxidant and stimulates the photoreduction of O₂ at photosystem I: a symptom of plant diabetes. *Plant Cell Environ*, 34, 1454-1464.

□ 西田班 (原著 7 編 特許出願 1 件)

- Duan Z, Homma A, Kobayashi M, Nagata N, Kaneko Y, Fujiki Y, *Nishida I (2014) Photoassimilation, translocation, and plasmodesmal biogenesis in the source leaves of *Arabidopsis thaliana* grown under an increased atmospheric CO₂ concentration. *Plant Cell Physiol*, 55, 358-369. (Faculty of 1000)
- Yamaoka Y, Yu Y, Mizoi J, Fujiki Y, Saito K, Nishijima M, Lee Y, *Nishida I (2011) *PHOSPHATIDYLSERINE SYNTHASE1* is required for microspore development in *Arabidopsis thaliana*. *Plant J*, 67, 648-661.

□ 宮尾 (徳富) 班 (原著 5 編)

- Miyazawa S-I, Hayashi K, Nakamura H, Hasegawa T, *Miyao M (2014) Elevated CO₂ decreases the photorespiratory NH₃ production but does not decrease the NH₃ compensation point in rice leaves. *Plant Cell Physiol*, in press.
- Tsutsumi K, Konno M, Miyazawa S-I, *Miyao M (2014) Sites of action of elevated CO₂ on leaf development in rice: Discrimination between the effects of elevated CO₂ and nitrogen deficiency. *Plant Cell Physiol*, 55, 258-268. (Editor-in Chief's Choice)
- Masumoto C, Miyazawa S-I, Ohkawa H, Fukuda T, Taniguchi Y, Murayama S, Kusano M, Saito K, Fukayama H, *Miyao M (2010) Phosphoenolpyruvate carboxylase intrinsically located in the chloroplast of rice plays a crucial role in ammonium assimilation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 107: 5226-5231. (Faculty of 1000 Biology)

□ 唐班 (原著論文 5 編 総説 1 編)

- *Tomimatsu H, Tang Y (2012) Elevated CO₂ differentially affects photosynthetic induction response in two *Populus* species with different stomatal behavior. *Oecologia*, 169, 869-878.

□ 長谷川/酒井班 (原著論文 7 編 総説 6 編)

- Chen C, Sakai H, Tokida T, Usui Y, Nakamura H, *Hasegawa T (2014) Do the rich always become richer? Characterizing the leaf physiological response of the high-yielding rice cultivar Takanari to free-air CO₂ enrichment. *Plant Cell Physiol*, 55, 381-391.
- Adachi M, Hasegawa T, Fukayama H, Tokida T, *Sakai H, Matsunami T, Nakamura H, Sameshima R, Okada M (2014) Soil and water warming accelerates phenology and down-regulation of leaf photosynthesis of rice plants grown under free-air CO₂ enrichment (FACE). *Plant Cell Physiol*, 55, 370-380.
- *Hasegawa T, Sakai H, Tokida T, Nakamura H, Zhu C, Usui Y, Yoshimoto M, Fukuoka M, Wakatsuki H, Katayanagi N, Matsunami T, Kaneta Y, Sato T, Takakai F, Sameshima R, Okada M, Mae T, Makino A (2013) Rice cultivar responses to elevated CO₂ at two free-air CO₂ enrichment (FACE) sites in Japan. *Funct Plant Biol*, 40, 148-159.

□ 馳澤班 (原著論文 4 編)

- *Higaki T, Hashimoto-Sugimoto M, Akita K, Iba K, Hasezawa S (2014) Dynamics and environmental responses of PATROL1 in *Arabidopsis* subsidiary cells. *Plant Cell Physiol*, 55, 773-780.
- Akita K, Hasezawa S, *Higaki T (2013) Breaking of the plant stomatal one-cell-spacing rule by sugar solution immersion. *PLoS One* 8:e72456.

□ 深山班 (原著論文 3 編 総説 1 編)

- Morita K, Hatanaka T, Misoo S, *Fukayama H (2014) Unusual small subunit that is not expressed in photosynthetic cells alters the catalytic properties of Rubisco in rice. *Plant Physiol*, 164, 69-79.
- Ishikawa C, Hatanaka T, Misoo S, Miyake C, *Fukayama H (2011) Functional incorporation of sorghum small subunit increases the catalytic turnover rate of Rubisco in transgenic rice. *Plant Physiol*, 156, 1603-1611.

□ 森長班 (総説 1 編)

- *Morinaga S-I, Iwasaki T, Suyama Y (2014) Eco-evolutionary genomic observation for local and global environmental changes. "The biodiversity observation network in the Asia-Pacific Region: Integrative Observations and Assessments of Asian Biodiversity." Edited by S. Nakano, T. Yahara, T. Nakashizuka". Springer.

□ 北尾班 (原著論文 3 編)

- *Kitao M, Tobita H, Utsugi H, Komatsu M, Kitaoka S, Maruyama Y, Koike T (2012) Photosynthetic traits around budbreak in pre-existing needles of Sakhalin spruce (*Picea glehnii*) seedlings grown under elevated CO₂ concentration assessed by chlorophyll fluorescence measurements. *Tree Physiol*, 32, 998-1007.

□ 舘野班 (原著論文 3 編)

- *Sugiura D, Tateno M (2014) Effects of the experimental alteration of fine roots on stomatal conductance and photosynthesis: case study of devil maple (*Acer diabolicum*) in a cool temperate region. *Environ Exp Bot*, 100, 105-113.
- *Sugiura D, Tateno M (2011) Optimal leaf-to-root ratio and leaf nitrogen content determined by light and nitrogen availabilities. *PLoS One*, 6: 222236.

□ 鹿内班 (原著論文 13 編)

Nishikawa Y, Yamamoto H, Okegawa Y, Wada S, Sato N, Taira Y, Sugimoto K, Makino A, *Shikanai T (2012) PGR5-dependent cyclic electron transport around PSI contributes to the redox homeostasis in chloroplasts rather than CO₂ fixation and biomass production in rice. *Plant Cell Physiol*, 53, 2117-2126.

Yamamoto H, Peng L, Fukao Y, *Shikanai T (2011) An Src homology 3 domain-like fold protein forms a ferredoxin-binding site for the chloroplast NADH dehydrogenase-like complex in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 23, 1480-1493. (Faculty of 1000)

□ 高木班 (原著論文 1 編)

*Sakamoto Y, Takagi S (2013) LITTLE NUCLEI 1 and 4 regulate nuclear morphology in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Physiol*, 54, 622-633.

□ 森班 (原著論文 4 編)

Mori IC, Rhee J, Shibasaka M, Sasano S, Kaneko T, Horie T, *Katsuhara M (2014) CO₂ transport by PIP2 aquaporins of barley. *Plant Cell Physiol*, 55, 251-257.

□ 班友

□ 嶋田班 (原著論文 2 編)

Tanaka Y, Sugano SS, Shimada T, *Hara-Nishimura I (2013) Enhancement of leaf photosynthetic capacity through increased stomatal density in *Arabidopsis*. *New Phytol*, 198, 757-764.

■ 領域ホームページ (<http://plant.biology.kyushu-u.ac.jp/shinryoiki/index.html>)

領域発足後、直ちにホームページを開設した。2009年7月からのアクセス数は2014年6月5日に22222回を越え、Google検索で、「植物」、「CO₂」という2つのキーワードを入れると最初に出てくる。ホームページには、領域の研究班からの最新の論文の紹介(49篇分)、ニュースレター、そのほか種々の連絡が掲載してある。

■ ニュースレター

ニュースレターは冊子体としては刊行せず、ホームページから誰にでもダウンロードできる電子版とした。これまでに作成した9つのニュースレターは、いずれもA4版2段組で、22、26、23、21、22、34、22、18、30頁である。領域各研究班の研究の紹介、若手研究者の自己紹介、最新論文の解説、班会議、若手の会、シンポジウムなどの予告、総括班会議の議事録、若手の会参加者の感想文で成り立っている。

■ 新聞による公表

基礎的な分野の研究でありながら、領域における研究成果は新聞でも取り上げられた。射場班2件(朝日新聞)、榊原班3件(科学新聞、日経産業新聞など)、柳澤班1件(朝日新聞)、森長班1件(日本経済新聞)、三ツ井班8件(毎日新聞、日本経済新聞など)。

■ IPCC (気候変動に関する政府間パネル)

地球環境問題に関して最も権威のあるIPCCの第5次報告書に伊藤班の11本の論文が引用された。

■ 出版活動

2015年3月 本領域研究に関連する研究や、周辺事情をわかりやすく解説した、高校生や一般市民に向けた啓蒙書を講談社ブルーバックスとして刊行予定である。

2014年2月、専門誌 *Plant and Cell Physiology* の Special issue 「Plant responses to CO₂」を出版した。領域のメンバーが執筆した12篇の論文が掲載された。

2013年4月～2014年3月 日本農芸化学会が編集する一般生物科学雑誌「化学と生物」に植物高CO₂応答に関する総説を12篇掲載した。

■ 主催シンポジウム (計9件)

JPR 国際シンポジウム「時空間的に不均一な光環境への光合成系の応答:葉緑体から森林へのスケーリングとエコデボ」

企画者: 寺島一郎 (東大)・村岡裕由 (岐阜大)

日時: 2014年9月12日 (金) 午後 (予定)

会場: 第56回日本植物学会 日本大学生田キャンパス

「CO₂ 応答の生態学」

企画者: 伊藤昭彦 (国立環境研究所)・彦坂幸毅 (東北大)

日時: 2014年3月18日 (火) 9時30分～11時30分

会場: 第61回日本生態学会 広島国際会議場

「植物の三大栄養素 (N-P-K) の感知と利用の新理解」

企画者: 榊原 均 (理研)・小俣達男 (名大)・柳澤修一 (東大)

日時: 2014年3月18日 (火) 9時30分～12時35分

会場: 第55回日本植物生理学会 富山大学五福キャンパス

「環境変動への植物の呼吸の応答」

企画者：伊藤昭彦（国立環境研究所）・野口 航（東大）

日時：2013年9月13日（金）14時30分～17時30分

会場：第77回日本植物学会大会 北海道大学

「植物と流れ」

企画者：寺島一郎（東大）

日時：2013年9月14日（土）8時45分～11時45分

会場：第77回日本植物学会大会 北海道大学

「高CO₂な近未来環境で植物はどうなるか？ その解明のための生化学的アプローチ」

企画者：柳澤修一（東大）・榊原 均（理研）

日時：2011年9月21日（水）15時15分～17時45分

会場：日本生化学会第84回大会 京都国際会館

「C/Nバランスの研究を通して植物高CO₂応答を読み解く」

企画者：小俣達男（名大）・寺島一郎（東大）

日時：2011年9月17日（土）9時30分～12時

会場：日本植物学会第75回大会 東京大学駒場キャンパス

「植物物群落の生産構造2010」

企画者：彦坂幸毅（東北大）・寺島一郎（東大）

日時：2010年9月9日（木）9時～12時

会場：日本植物学会第74回大会シンポジウム 中部大学9号館

新学術領域勉強会「植物の高CO₂応答モデル：個葉から生態系まで」

企画者：伊藤昭彦（国立環境研究所）

日時：2010年9月8日（水）13時～18時

会場：日本植物学会第74回大会関連集会 中部大学55号館

■一般向けアウトリーチ活動（計13件）

- 2014.5.10 文京区教育センター「科学教室」（東京大 寺島一郎）小学生3～6年生24名、保護者約10名に対して、小石川植物園内で、文京区教育センター「科学教室」を行った。器官学の基礎、光合成の基礎などを講義し、植物観察を行った。2013.8.20にも、小学生15名および文京区の小学校の先生約20名に対して、同様の講義を小石川植物園で行った。
- 2013.9.25 東北大学農学部における「みやぎ県民大学講座」（東北大・牧野周）「地球の大気と植物の運命」というタイトルで本新学術研究の成果を紹介した。
- 2013.9.21 佐藤栄学園・花咲徳栄高等学校（埼玉大 西田生郎・段中瑞 [院生]）佐藤栄学園・花咲徳栄高等学校2年生の生徒25名が埼玉大学を訪問し、体験実習を行った。分子生物学の基本的な実験技術を学んだ後、「高CO₂環境下での作物の生産力強化」について議論した。2012.10.23にも同高校の生徒40名が訪問した。
- 2013.8.7-8 東京大学 高校生のためのオープンキャンパス（東京大 寺島一郎）8月7日（水）8日（木）に東京大学オープンキャンパスの理学部会場で、「地球環境変化と植物」の講義を2回行った。
- 2013.7.20 横浜雙葉高校生徒の研究室見学（東京大 寺島一郎）生徒20名を研究室に受け入れた。寺島が「光合成工場としての葉：葉はなぜ緑色なのだろうか？」というタイトルで講義、続いて研究室見学では光合成測定装置や簡易分光器での実習、CO₂チェンバーなどの見学をした。
- 2013.7.12 宮城県立仙台第一高校（東北大 牧野周）出前授業で「植物CO₂応答」を講義した。2010.9.14に福島県立原町高校、2012.6.6に秋田県立秋田高校にも同様な講義を行った。
- 2012.12.15 茨城県高等学校文化連盟 自然科学部 冬季合宿（東京大 寺島一郎）茨城県の高校の自然科学関係の部活動部員や先生160人に対し、寺島が「光合成のキモ」と題して、光合成の仕組みを講義した。
- 2012.8.10 新潟大学オープンキャンパス（新潟大 三ツ井敏明）新潟大学の五十嵐キャンパスで行われたオープンキャンパスで講義を行った。「暑さに強い稲の開発」と題して、猛暑による米の品質低下のメカニズム、CO₂濃度上昇による高温障害の助長効果、加えて高温・高CO₂耐性稲の開発の現状について講演した。
- 2012.8.6 日本植物生理学会と東北大学次世代型「科学者の卵養成講座」共催 高校生シンポジウム（東京大 寺島一郎）日本植物生理学会の東北支援事業と東北大学の次世代型「科学者の卵養成講座」の共催により東北大学の川内キャンパスで行われた高校生向けのシンポジウムで、「光合成工場としての葉 -葉はなぜ緑色なのだろうか?-」というタイトルで講演した。
- 2012.7.24 沖縄県立球陽高校（九州大 楠見健介）沖縄県立球陽高校にて、九州大学と理学部生物学科の紹介に加えて、具体的な研究の説明として「植物の環境応答」について講義した。1年生から3年生までの約40名と、担当の先生が熱心に聴講した。
- 2012.6.14 愛知工業大学名電高等学校（中部大 愛知真木子）イチロー選手の母校、愛知工業大学名電高等学校でキャリア教育の一環として模擬講義を行った。「東海丘陵湧水湿地に自生する食虫植物トウカイコモウセンゴケの保全に向けた生態学と分子生物学融合による取り組み」と題して、CO₂濃度およびNO₂濃度の上昇に対する植物の応答を解説した。
- 2012.5.25 宮城県立仙台第三高等学校（東北大 彦坂幸毅）高校に出前し、東北大学理学部と理学部生物学科を紹介した。また、「地球環境変化と植物」と題し、地球環境変化の様子、植物のCO₂応答研究の現状、高CO₂環境での植物の進化について講演した。
- 2012.3.24 秋田県立横手高等学校（東京大 野口 航、溝上祐介 [院生]）高校1年生11名が研究室見学をした。当大学の理学部や生物学科の紹介をした後、新学術領域研究で行っている植物の高CO₂応答の研究について説明した。また、研究室で行っているCO₂ガス交換測定を見学した。

10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ程度）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

我が国の植物科学の活性は高いが、モデル植物を対象とした分子生理学的研究と、農林産業、生態学、あるいは地球環境科学の基礎となる個体レベルの植物科学との間には大きな溝があり、相互に関連を保ちつつ発展しているとは言えない状況にあった。本領域研究では、通常の学会活動では交流の機会が少ない分子生理学者と生態学者・農学者とが**緊密なコンソーシアム研究**を展開することにより、**個体レベルの植物科学研究の革新的推進**をめざした。テーマとしては、地球環境が劇変している現在、自然科学としてのみならず社会問題としても極めて重要な「**植物の高CO₂応答の解明**」に定めた。

植物の高CO₂応答の概要が明らかになった

分子生理学の分野でCO₂応答やCO₂/Nバランス応答における基本的な因子がいくつも同定された。また表現型の研究においても、トランスクリプトーム、代謝産物やホルモン解析プラットフォーム、などの利用により、分子レベルの言葉で語ることでできる表現型研究が一举に増え、植物の高CO₂応答の全貌がほぼ浮彫りにされた。また、環境発生生物学としても一級の成果も得られた。さらに、植物葉群（群落）レベル、生態系レベルの高CO₂応答を記述するすぐれたモデルも作られ、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）に大きく貢献した。

コンソーシアム研究の成功

分野縦断型コンソーシアム研究によって、分子生理学と生態学者・農学者が有機的に協力した高水準の成果が多数得られた。共同研究の形をとっていない場合でも、班会議、若手の会、シンポジウムなどの機会の議論が生かされた研究が多い。これは、分子生理学者と、表現型レベルの研究を主としてきた生態学者・農学者が、相互を刺激しつつコンソーシアム研究を行ったことの成果といえよう。

若手研究者育成の成功

分野間の障壁をものともしない、たくましい若手研究者が育った。領域における研究業績によりポストを得た、あるいはポストが昇進した若手研究者も多い。多数の若手研究者が常勤のポストについた。

植物の高CO₂応答の解明というテーマの重要性が認識されてきた

植物の高CO₂応答の解明は、地球環境が劇変している現在、自然科学としてのみならず社会問題としても極めて重要なテーマである。高CO₂応答の解明は、地球環境変化の行方を予測し、適応策を立てるためには必須の前提となる。

植物の高CO₂応答の解明が大切なのはこのためだけではない。現生の大部分の植物は、長期間にわたってほぼ200~280 ppm だったCO₂濃度に適応した状態にある。したがって、産業革命以降の急速なCO₂濃度上昇に適応現象によって追従するのは不可能である。大気CO₂濃度の上昇がとどまることを知らないことを考えると、高いCO₂濃度下でダウンレギュレーションを受けずに光合成を行い、成長する植物を創出しなければ、100億人の食と環境とを確保することは不可能であることは明らかである。この慄然とさせられる状況が、領域内外の研究者に強く認識されるようになってきた。今後、研究取りまとめのための予算を使って、研究者だけではなく一般市民にもこのような状況を周知理解を求めたい。本研究の発展型として、世界の様々な環境にあわせたテラメイドの好CO₂植物を創出するための研究を行うことは、人類の存続のために必須なのである。