

領域略称名：植物環境突破力  
領域番号：3210

平成27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

「大地環境変動に対する植物の生存・成長突破力の  
分子的統合解析」

(領域設定期間)

平成22年度～平成26年度

平成27年6月

領域代表者 (岡山大学・資源植物科学研究所・教授・馬 建鋒)

# 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	7
2. 研究領域の設定目的の達成度	9
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	12
4. 審査結果の所見及び中間評価で指摘を受けた事項への対応状況	13
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	15
6. 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）	20
7. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	27
8. 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）	29
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	33
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	34
11. 総括班評価者による評価	36

## 研究組織

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00	22119001 大地環境変動に対する 植物の生存・成長突破力 の分子的統合解析	平成 22 年度 ～ 平成 26 年度	馬 建鋒	岡山大学・資源植物科学研究所・教授	11
A01 計	22119002 劣悪化する土壌環境に 適応するための植物の 知恵	平成 22 年度 ～ 平成 26 年度	馬 建鋒	岡山大学・資源植物科学研究所・教授	3
A01 計	22119003 窒素飢餓環境に対する イネの生存戦略	平成 22 年度 ～ 平成 26 年度	山谷知行	東北大学・研究推進本部・特任教授	4
A01 計	22119004 乾燥ストレスに対する 植物の生存戦略の分子 機構	平成 22 年度 ～ 平成 26 年度	篠崎和子	東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授	3
A01 計	22119005 環境変動に対する気孔 開閉制御の分子機構	平成 22 年度 ～ 平成 26 年度	木下俊則	名古屋大学・トランスフォーメティブ生命分子研究所・教授	5
A01 計	22119006 栄養応答における新規 転写後制御機構の解明	平成 22 年度 ～ 平成 26 年度	内藤 哲	北海道大学・大学院農学研究院・教授	1
A02 計	22119007 深水条件下における節 間伸長の分子機構	平成 22 年度 ～ 平成 26 年度	芦荻基行	名古屋大学・生物機能開発利用研究センター・教授	2
A02 計	22119008 植物の分枝を制御する メカニズムの解析	平成 22 年度 ～ 平成 26 年度	経塚淳子	東北大学・生命科学研究所・教授	1
A02 計	22119009 根の成長を支える細胞 増殖の相転換機構の解 明	平成 22 年度 ～ 平成 26 年度	梅田正明	奈良先端科学技術大学院大学・バイオサイエンス研究科・教授	1
A02 計	22119010 環境変動に応答した植 物の細胞・器官サイズ制 御	平成 22 年度 ～ 平成 26 年度	杉本慶子	理化学研究所環境資源科学研究センター・チームリーダー	1
A03 計	22119011 植物システム制御の数	平成 22 年度 ～	佐竹暁子	九州大学・理学研究院・准教授	1

	理モデリング	平成 26 年度			
計画研究 計 11 件					
A01 公	23119509 植物の環境応答における細胞壁ペクチンの機能解明	平成 23 年度 ～ 平成 24 年度	小林 優	京都大学・農学研究科・准教授	1
A01 公	23119512 ミネラル欠乏ストレス時に根で機能する輸送体の包括的解析	平成 23 年度 ～ 平成 24 年度	深尾陽一郎	立命館大学・生命科学部・生命情報学科・准教授	4
A01 公	23119515 イネの高マンガン集積に関与する分子機構の解明	平成 23 年度 ～ 平成 24 年度	上野大勢	高知大学・教育研究部総合科学系・准教授	4
A01 公	23119516 硫酸イオントランスポーター遺伝子下流域によるゲノム機能および成長制御の分子機構	平成 23 年度 ～ 平成 24 年度	丸山明子	九州大学・農学研究院・准教授	1
A01 公	23119521 タンパク質脱リン酸化を制御するアブシジン酸シグナルネットワークの解析	平成 23 年度 ～ 平成 24 年度	西村宜之	農業生物資源研究所・放射線育種場・主任研究員	1
A02 公	23119511 根の形態変化を介した植物の成長戦略	平成 23 年度 ～ 平成 24 年度	青山卓史	京都大学・化学研究所・教授	1
A02 公	23119517 CLV シグナル系に注目した、光ストレスによる植物生長制御機構の解明	平成 23 年度 ～ 平成 24 年度	澤 進一郎	熊本大学・大学院自然科学研究科・教授	1
A02 公	23119523 リン酸欠乏に応答した葉の老化制御機構の解明	平成 23 年度 ～ 平成 24 年度	梅原三貴久	東洋大学・生命科学部・教授	2
A02 公	23119519 土壌微生物由来の新規シグナル因子による植	平成 23 年度 ～ 平成 24 年度	村田 純	公益財団法人サントリー生命科学財団生物有機科学研究所・統合生体分子機能研究部・研究員	1

	物生長制御機構の解明				
A03 公	23119520 データ同化手法を用いた作物の環境ストレス応答の解明	平成 23 年度 ～ 平成 24 年度	横沢正幸	静岡大学・総合科学技術研究科・教授	2
A03 公	23119524 植物ストレス応答に対応した細胞「域」：細胞応答から器官形態をつなぐ数理モデル	平成 23 年度 ～ 平成 24 年度	持田恵一	国立研究開発法人理化学研究所・環境資源科学研究センター・チームリーダー	3
A01 公	23119501, 25119701 環境ストレス活性型転移因子による植物のゲノム変化と環境適応	平成 23 年度 ～ 平成 26 年度	伊藤秀臣	北海道大学・大学院理学研究院・助教	1
A01 公	23119502, 25119702 低温ストレス応答における mRNA 合成と分解の協調的制御システム	平成 23 年度 ～ 平成 26 年度	千葉由佳子	北海道大学・大学院理学研究院・准教授	2
A01 公	23119503, 25119703 植物の栄養飢餓とオートファジー	平成 23 年度 ～ 平成 26 年度	石田宏幸	東北大学・大学院農学研究科・准教授	2
A01 公	25119704 タンパク質合成系の改変による光合成の強光ストレス耐性の向上	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	西山佳孝	埼玉大学・大学院理工学研究科・教授	1
A01 公	23119506, 25119708 環境ストレスにおける脂質転換と環境順応力	平成 23 年度 ～ 平成 26 年度	下嶋美恵	東京工業大学・大学院生命理工学研究科・准教授	2
A01 公	23119507, 25119709 イネの OsHKT1 依存の葉身内 Na <sup>+</sup> 濃度制御による塩抵抗性の分子機構の解明	平成 23 年度 ～ 平成 26 年度	堀江智明	信州大学・学術研究院繊維学系・准教授	1
A01 公	25119713 プロテオームによる環境変動に応答する SUMO 化タンパク質の解析	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	石田喬志	熊本大学・自然科学研究科・特任助教	1
A01 公	25119714 環境ストレス耐性を付	平成 25 年度 ～	宮地孝明	岡山大学自然生命科学研究支援センターゲノム・プロテオーム解析部門	2

	与するトランスポーターファミリーの網羅的解析	平成 26 年度		准教授	
A01 公	23119514, 25119717 核酸塩基代謝の多機能性とストレス適応戦略における代謝中間体の役割解明	平成 23 年度 ～ 平成 26 年度	坂本 敦	広島大学・大学院理学研究科・教授	1
A01 公	25119720 環境シグナルを統合制御する新規転写因子 VOZ に関する研究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	佐藤雅彦	京都府立大学大学院・生命環境科学研究科・准教授	1
A01 公	23119518, 25119722 耐塩性シロイヌナズナが有する塩馴化機構の解明	平成 23 年度 ～ 平成 26 年度	太治輝昭	東京農業大学・バイオサイエンス学科・准教授	1
A01 公	23119522, 25119724 ヒストン修飾を介した植物の乾燥ストレス適応機構の解析	平成 23 年度 ～ 平成 26 年度	関 原明	理化学研究所環境資源科学研究センター・植物ゲノム発現研究チーム・チームリーダー	2
A01 公	23119504, 25119705 コケ植物の変水性制御に関わる分子機構の解析	平成 23 年度 ～ 平成 26 年度	竹澤大輔	埼玉大学大学院理工学研究科・准教授	3
A02 公	25119706 低リンストレスに対する呼吸系応答戦略機構の解明	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	野口 航	東京大学・大学院理学系研究科・准教授	1
A02 公	23119508, 25119710 植物における細胞周期制御とストレス応答のクロストーク	平成 23 年度 ～ 平成 26 年度	伊藤正樹	名古屋大学・大学院生命農学研究科・准教授	1
A02 公	23119510, 25119711 環境変動下における生存戦略としての栄養繁殖機構の解析	平成 23 年度 ～ 平成 26 年度	石崎公庸	神戸大学・大学院理学研究科・准教授	3
A02 公	23119513, 25119715 N I M A 関連キナーゼによる形態形成と環境応答の協調機構の解析	平成 23 年度 ～ 平成 26 年度	本瀬宏康	岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授	2

A02 公	25119725 ジベレリン輸送を介した植物の生長制御機構の解析	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	瀬尾光範	国立研究開発法人理化学研究所・環境資源科学研究センター・ユニットリーダー	1
A03 公	23119505, 25119707 ストレス環境が根端成長に及ぼす影響の数理モデル解析	平成 23 年度 ～ 平成 26 年度	岩元明敏	東京学芸大学・教育学部・准教授	2
A03 公	25119716 栽培オオムギの地域適応を紐解く数理モデルの構築	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	最相大輔	岡山大学・資源植物科学研究所・助教	1
A03 公	25119718 植物の代謝・シグナル伝達における植物ホルモン間クロストークの数理モデル化	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	粟津暁紀	広島大学 大学院理学研究科 准教授	2
A03 公	25119719 環境変動に伴う大規模代謝反応システムの応答を効率よく解析するための手法開発と応用	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	白石文秀	九州大学・農学研究院・教授	1
A03 公	25119721 体内時計の同調臨界点における代謝不安定化機構のオミクス解析と数理モデル	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	福田弘和	大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授	2
A03 公	25119723 植物体内におけるケイ素吸収・輸送・集積過程のモデル解析	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	櫻井 玄	国立研究開発法人 農業環境技術研究所・生態系計測研究領域・任期付研究員	3
公募研究 計 48 件					

## 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、応募時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」であるか

環境変動ストレスに対して植物は長い進化の過程で巧みな環境突破力を獲得し、その能力はゲノム上に刻まれている。植物のストレス応答に関わる個々の研究において、これまで日本は世界をリードする優れた業績を上げてきた。しかし、今後予想される急激な大地の環境変化に対する植物の応答を統合的に解析する領域は存在していない。本領域は **Nature** や **Science** をはじめ世界のトップジャーナルに論文を発表してきた異分野の研究者による有機的な連携により、植物のゲノムに刻まれている“環境突破力”を分子レベルで統合的に解析し、それを個体から地球環境レベルで理解することによって、日本の植物科学の学術水準を一層高めようとするものである。

### ② 研究の学術的背景

移動できる動物とは異なり、動くことができない植物は環境変化に適応するために、長い年月をかけて巧みな戦略を獲得してきた。その戦略の分子機構は近年少しずつではあるが、明らかになってきた。例えば、**馬**は植物が病虫害や他のストレスから身を守るために土壌から多量のケイ素を吸収するのに必要な輸送体を同定した（*Nature*, 2006, 2007）。**篠崎**は植物の乾燥ストレス耐性に関与する転写因子を同定した（*PNAS*, 2006）。**木下**は環境に応答する気孔の開閉のシグナル伝達機構を明らかにした（*Nature*, 2001; *PNAS*, 2008）。また**山谷**は窒素飢餓に対するイネの同化代謝応答反応を解明した（*J Exp Bot* 2007）。**内藤**は体内の栄養状態に応答するリボソームの機能制御機構を明らかにした（*Science*, 1999; *Genes Dev.* 2005）。

一方、植物は環境ストレスを回避して生存する力だけではなく、様々な環境変動に応答して成長形態を自在に変化させ、さらに一生を通じて成長を続ける能力も備えている。近年その成長力の仕組みも段々明らかになってきた。**芦苜**は洪水環境における浮きイネの伸長機構を解明した（*Nature*, 2009）。**梅田**は気孔形成に関与するサイクリンなどを同定した（*Plant Cell*, 2007）。**杉本**は細胞成長の制御に必要な転写因子を特定した（*Plant Cell*, 2009）。また**経塚**は枝分れを制御する分子機構を明らかにした（*Nature*, 2007, 2008）。

以上のように、これまでは個々のストレス耐性や成長機構に関する研究が精力的に行われてきた。しかし、その一方で、ストレス耐性と成長制御は複雑に絡み合っており、個別の研究では植物の持つ環境突破力を総合的に理解することはできないことも明らかとなった。また、世界的に見ても個々の実験科学者が積み重ねてきた知見を総合し、数理モデルに取り入れ、システムとして理論的に記述、理解する試みはなされてこなかった。したがって、急激に進む環境変化、特に土壌環境変化を予測し、複合ストレス因子と成長制御の仕組みを総合的に明らかにし、それらをモデル化して個体および地球環境レベルで包括的に理解することが今、求められている。

研究期間内に様々な環境ストレスに対して植物が発達させてきた突破力の分子機構やストレス間のネットワークなどを解明し、植物個体の生存成長戦略の分子メカニズムを明らかにする。そして、これらの知見を基盤として数理モデルとコンピューターシミュレーションを駆使することにより、環境条件に応じて植物が個体として示す挙動を理論的に明らかにする。研究領域の概要は以下の通りである。

**生存戦略研究**：土壌酸性化、重金属、窒素飢餓、乾燥、高温などのストレスに対する植物の応答を分子レベルで解明する。まず、酸性土壌耐性にかかわる新規遺伝子を同定し、それらの発現制御機構やシグナル伝達経路を明らかにして、植物の酸性土壌耐性機構を包括的に解明する。また、乾燥と高温ストレス応



答の両方で働く転写因子の活性化機構を分子レベルで解明し、乾燥と高温のそれぞれのストレスに特異的な遺伝子発現の制御機構や環境ストレス応答の制御ネットワークの全貌を明らかにする。さらに、植物の窒素飢餓の検知と応答に関わる代謝ネットワークを解明するとともに、イネの主要な窒素源である  $\text{NH}_4^+$  の情報伝達に関わるグルタミン受容体を同定し、その受容機構を明らかにする。以上のような各種ストレス間のクロストークを明らかにし、複合ストレスに対する応答機構を解明する。一方で、細胞内環境を維持する分子機構を明らかにするために、細胞内低分子化合物に応答した翻訳停止から mRNA の分解に至る経路を分子的に解剖し、その制御系の全貌を解明する。また同時に、気孔の開閉を制御するシグナル伝達経路を明らかにし、さらにその制御因子を気孔で発現させ評価することにより、大気環境における気孔の役割を明らかにする

**成長戦略研究:** ストレスに応答する成長制御の典型的な例として、冠水時に急激な節間伸長を行う浮きイネがある。この浮きイネ性に関与する新たな QTL 遺伝子を同定し、その機能を明らかにすることにより、深水依存的な節間伸長メカニズムを分子レベルで解明する。また、イネの分枝形成をモデルとして、腋芽の形成・休眠・伸長をコントロールする分子メカニズムを明らかにする。一方、環境変動に応答した植物の成長制御を理解するために、細胞分裂と細胞成長の制御機構についても明らかにする。まず細胞周期制御系の転換によるエンドサイクルの誘導機構について明らかにし、細胞周期モニターシステムを利用して栄養環境に応答した根細胞の分裂・伸長制御について明らかにしていく。また、細胞成長を抑制的に制御する転写因子に注目し、その下流および上流で働く因子の機能を解析することにより、環境条件に応答した細胞成長の制御ネットワークの解明を目指す。

**モデリング研究:** 数理モデルとコンピュータシミュレーションを駆使することで、植物個体の成長生存戦略の分子メカニズムを理論的に明らかにする。まず、植物の器官成長・養分の吸収と輸送・光合成による同化産物蓄積過程を定式化した数理モデルを開発し、遺伝・環境要因が成長に及ぼす影響の定量化に取り組む。土壌養分条件と光・温度条件に応じて、植物が個体として示す挙動を理論的に予測し、特定の環境で高い生産性を実現するためにはどのような遺伝子間相互作用が必要かを明らかにする。

これらの知見に基づいて、植物の環境突破力を包括的に理解する。また本領域で得られる成果は今後予想される大地環境の悪化に伴う食糧・環境問題の解決にもつながるものである。

本領域研究は「既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「異なる学問分野の研究者が連携して行う共同研究等の推進により、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等の推進により、当該研究領域の新たな展開を目指すもの」に該当する。モデリング研究も含めた異分野の研究者の有機的な連携により、新たに「植物の環境突破力」という領域を開拓できる。共同研究や若い研究者の育成に努め、世界をリードする成果を上げる。これらの成果は植物科学の他の研究領域の発展にも大きな波及効果をもたらす。

これまでこの分野では遺伝子間の相互作用や現象間の相互作用に関して定性的な記述がなされてきたが、定量的な考察はあまりなされてこなかった。本領域の研究が展開することにより、植物を個体として環境を突破し生存するための高次システムとして理解することが可能となる。また、新規環境耐性遺伝子の同定と情報伝達機構の解明を通して、これまで個別に研究してきたストレス耐性をピラミディングすることにより、複合ストレスに強い作物の創出につながり、今後予想される大地環境の劇的な劣悪化に対応する食糧生産にも寄与できる。

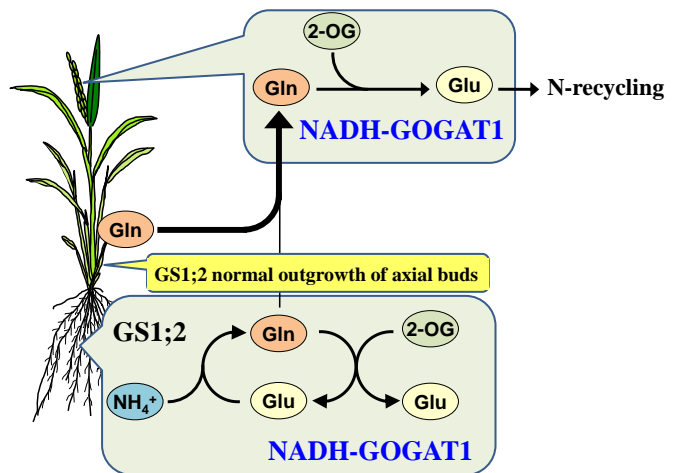
## 2. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ程度）

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ごとの状況も記述してください。

本領域の設定目的は様々な環境ストレスに対して植物が発達させてきた突破力の分子機構やストレス間のネットワークなどを解明し、植物個体の生存成長戦略の分子メカニズムを統合的に明らかにすることである。そして、これらの知見を基盤として数理モデルとコンピューターシミュレーションを駆使することにより、環境条件に応じて植物が個体として示す挙動を理論的に明らかにする。研究項目は、「生存戦略研究」、「成長戦略研究」、「モデリング研究」に分け、計画班員同士、計画班員と公募班員同士による様々な共同研究が活発に行なわれ、植物の巧みな生存・成長戦略に関する分子機構の理解を大きく前進させた。これまでに発表した論文は 561 報で、特許は 11 件である。これらの成果の多くはインパクトの高い科学誌に発表し、また多くの新聞などのメディアで取り上げられた。全体として目標が十分達成され、一部の成果は目標を超えたとと言える。

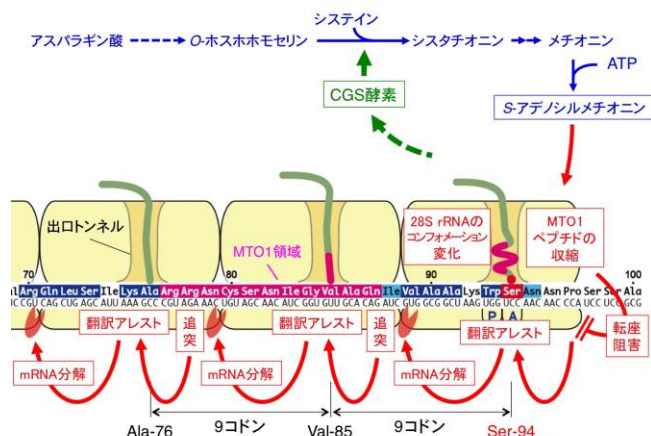
様々な環境ストレス（土壌酸性化、栄養飢餓、塩害、乾燥、高温、低温など）を克服するために、植物が発達させてきた分子機構を様々な手法で明らかにした。馬は酸性土壌耐性に関与する遺伝子を複数同定し、その発現制御機構や耐性獲得過程を解明した。特にイネアルミニウム輸送体（PNAS 2010）やマンガン輸送体（Nat Commun 2013）の同定、オオムギのアルミニウム耐性遺伝子 *HvAACT1* の獲得機構（Nat Commun 2012）の解明など、目標を超える成果をあげた。また佐竹および櫻井との共同研究でイネケイ酸吸収のモデリングを行い、ケイ酸輸送体 *Lsi1*, *Lsi2* の極性局在とカスパー線配置は他の作物に比べ輸送能力が高く、コストパフォーマンスが最も良いことを明らかにした（PCP, 2015）。山谷は窒素欠乏に対して、老化器官から窒素を効率よく転流する仕組みを明らかにした。イネは、窒素飢餓環境では茎数や種子数を減らして完熟種子を稔らせる応答を示すが、その分子機構は明らかではなかった。山谷は窒素飢餓環境を長期間模倣できるとされる窒素代謝遺伝子欠損変異体を用いて、①外界の  $\text{NH}_4^+$  の検知機構、②  $\text{NH}_4^+$  の同化・再利用機構、

図 1 根での GS1;2 と NADH-GOGAT1 による初期同化



③代謝バランス、④穂への物質転流モデリングから、根における  $\text{NH}_4^+$  の初期同化や分けつの伸長に関わる要因（Plant J 2015）や、種子数の決定に関わる窒素代謝要因を、逆遺伝学的に明らかにした（図 1）。変異体では代謝バランスの崩壊が大きく影響していることを見だし（Plant J 2011）、イネの窒素飢餓環境に対する生存戦略について、分子機構のかなりの部分を明らかにした。リボソームを舞台とした遺伝子発現制御機構は、細胞内の恒常性維持、とりわけ細胞質の代謝環境に迅速に応答するメカニズムとして注目されつつある。メチオニン合成酵素をコードする *CGS1* mRNA を翻訳中のリボソームは、メチオニンの代謝産物である S-アデノシルメチオニンに反応して特定の位置で翻訳を停止し、これと共役して *CGS1* mRNA が分解される。内藤は翻訳停止に伴って新生ペプチドとリボソーム RNA にコンフォメーション変化が起こることを明らかにした（JBC, 2014）。これは、翻訳停止に特異的なコンフォメーション変化を明らかにした初めての報告である（図 2）。また、停止したリボソームに後続のリボソームが 9 コドン間隔で追突し、それぞれのリボソームの位置で mRNA 分解が誘導されることを明らかにするとともに、停止したリボソームにおけるペプチド転移反応の活性中心の状態を明らかにした（JBC, 2014）。一方、この mRNA 分解は、一般的な mRNA 分解とは異なり、ポリ A 鎖の短縮化が先行していないことを明らかにした。本研究により翻訳停止から mRNA 分解に至る過程の理解が深まった。一方、篠崎は植物の乾燥と高温ストレスに応答する制御ネットワークで重要な働きを示す転写因子である *DREB2A* の活性化機構を

図 2 リボソームを舞台とした突破力の新規ストラテ



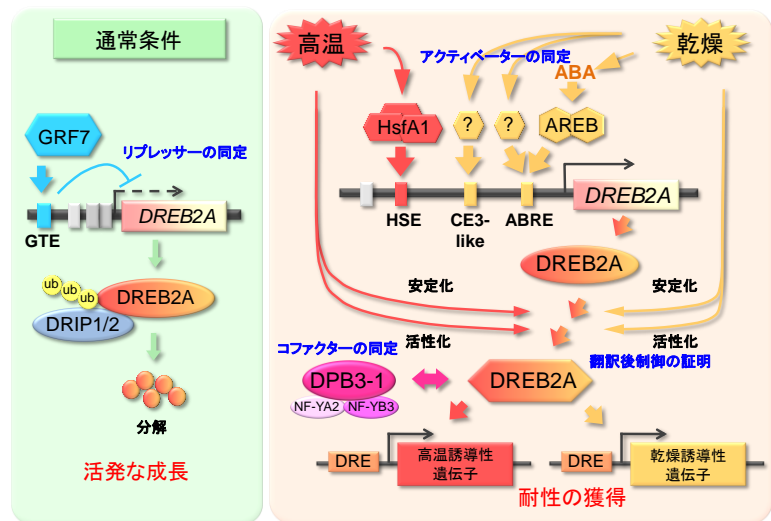
と高温ストレスに応答する制御ネットワークで重要な働きを示す転写因子である *DREB2A* の活性化機構を

分子レベルで解明するとともに、DREB2Aが機能を果たしている乾燥と高温ストレスによる遺伝子発現の制御ネットワークの全貌を解明することを目指した。シロイヌナズナの転写因子 DREB2A は転写レベルで制御されており、高温条件下では HsfA1 転写因子が、乾燥条件下では AREB 転写因子が重要な制御因子であることを示した (PCP 2011; MGG2011)。また、DREB2A の転写は、通常条件下では GRF7 によって抑制されていることも明らかにした (Plant Cell 2012; PNAS 2012)。一方、DREB2A は転写後調節も受けており、ストレス条件下での DREB2A タンパク質の安定化が活性化に重要であることを見出した (Plos One 2013)。さらに、活性化した DREB2A は転写因子 DPB3-1 と相互作用することにより、協調的に下流遺伝子群の発現誘導を強めることを示す (Plant Cell 2014) など、DREB2A を中心とした植物の環境ストレス応答の転写ネットワークの制御機構を解明した (図 3)。植物の表皮に存在する気孔は、一对の孔辺細胞により構成され、様々な環境シグナルに応答してその開度を調節し、光合成に必要な二酸化炭素取り込み、蒸散や酸素の放出など植物と大気間のガス交換を制御している。木下は気孔開閉のシグナル伝達の分子機構の解明を目的として、新奇の気孔開度変異体の解析や気孔孔辺細胞を用いた生理・生化学的解析を進め、花成ホルモン FT などの光周性経路による気孔開度制御という新たな気孔開度制御機構を見出した (Curr Biol 2011; Plant Physiol 2013; PCP 2015)。Mg キラターゼなどのテトラピロール合成系が気孔孔辺細胞のアブシジン酸シグナル伝達に影響を与えること明らかにした (JPR 2011, 2013; Front Plant Sci 2013)。さらに、気孔開度を人為的に制御した植物体を作成し、植物の成長・生存における気孔の役割の解析を進め、気孔開口促進により植物の光合成・生産量が高まること (PNAS 2014)、気孔のアブシジン酸に対する感受性を高めことで乾燥耐性が高まることを明らかにした (Front Plant Sci 2013)。これらの成果はいずれも国際的に高い評価を受け、国内外の学会で招待講演を行った。

植物の成長は細胞増殖とその後の伸長成長により規定され、光、温度、乾燥、栄養といった環境要因によって大きく影響を受ける。梅田はシロイヌナズナの根において、細胞分裂から DNA 倍加 (細胞分化・伸長) への転換を制御する因子について解析した結果、サイトカニン情報伝達の下流でオーキシシンシグナルの抑制と細胞周期停止が引き起こされることが明らかになった (Curr Biol. 2013)。また、DNA 損傷ストレスはサイトカニン合成量を上げることにより DNA 倍加を誘導すること、オーキシシンシグナルを抑制して幹細胞の細胞死を促進すること、ブラシノステロイドシグナルを増強して静止中心の細胞分裂を誘導することも明らかになった。一方、分裂組織においては、DNA 損傷に応答して転写抑制型の MYB3R 転写因子が安定化し (EMBO J 2015)、これにより G2/M 期遺伝子の発現を抑制して細胞周期進行を阻害していることが示された。本研究では、植物組織内での細胞周期進行をモニタリングするために、2つの細胞周期ステージを可視化できる蛍光マーカーの開発も行った。その結果、根での細胞周期進行のリアルタイムイメージングに成功し、DNA 倍加への移行プロセスの解析に応用することができた (Plant J 2014)。また杉本は環境変化による植物の成長変化が受動的な成長阻害ではなく、積極的な成長戦略として起こっていること明らかにした (Curr Opin Plant Biol 2014)。植物に特有な転写因子 GTL1 の機能解析を進め、GTL1 が CCS52A1 遺伝子の発現を低下させることによって核内倍加周期を終了し、その結果細胞成長を抑制することを見いだした (EMBO J 2012)。さらに GTL1 のホモログである DF1 との二重変異株の解析を通して、GTL1 および DF1 が根毛の成長制御に大きく関係していることを見出した。また最近根毛の細胞成長を負に制御する転写因子として Zn フィンガータンパク質である OBP4 を新たに発見した。さらに GTL1、DF1 および OBP4 それぞれの下流因子の探索を行い、共通して根毛成長を正に制御する因子を見出した。興味深いことに、根毛細胞の分化を制御する GL2 ととも下流因子のオーバーラップが見られ、環境要因から根毛成長に至る過程で、細胞分化と成長が協調的に制御されている可能性を見出した。

芦荻は浮きイネの深水依存的な節間伸長の分子メカニズムの解明を行った。遺伝学的解析から、浮きイネの節間伸長を司る新規の QTL を見いだした (AOB Plant 2014)。また植物生理学および遺伝学的解析から、浮きイネは植物ホルモンの GA 依存的に節間伸長することを明らかにした (Plant Cell Environ 2014)。また、浮きイネの深水依存的な節間伸長を司る 2つの遺伝子 (SK3 及び SK4) を同定することに成功した。SK3 は機能未知の遺伝子であり、深水依存的に節間の細胞分裂を行う組織で発現することが明

図 3 環境の変化に対応した植物の成長と耐性獲得の制御





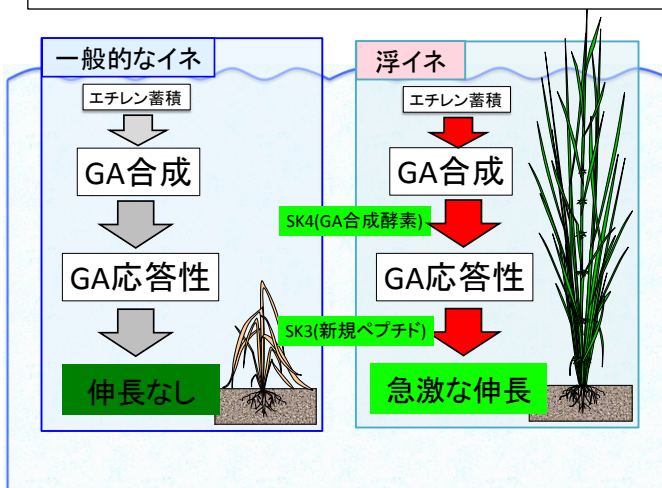
かになった。SK4 はジベレリン (GA) の合成酵素遺伝子である GA20ox2 をコードしていた。浮きイネの SK4 は一般的なイネに比べ高い GA 合成活性を保持すること、また深水依存的に節間で SK4 の発現が著しく誘導されることが判明した。また、様々分子遺伝学的な解析から、エチレンの情報伝達因子 OsEIL1 が GA20ox2 のプロモーターに結合することが明らかになった(図4)。これまでの研究で、浮きイネでは、深水に伴って節間伸長部位で SK3 を発現し細胞分裂を活性化する。また、深水依存的にエチレンが節に蓄積し、EIL1 を介して GA 合成酵素 (SK4) を活性化させ GA を生産し細胞伸長を行うことで節間伸長を起こすと推測された。一方、経塚は植物の枝分かれについて、ストリゴラクトンによる腋芽の成長制御を解析した。まず、イネを材料として腋芽休眠を再現性良く観察できる実験系を確立し、休眠の開始/解除の過程を詳細に観察した。その結果、休眠開始の引き金になるのはメリステム活性の停止ではなく、分化した葉原基での細胞分裂活性の低下であることを見出した。さらに、休眠開始/解除において葉原基とメリステムで局所的に起こる遺伝子発現変化を解析し、ABA とジャスモン酸による遺伝子発現制御と休眠による発現制御に明瞭な関連があることを明らかにした。また、植物特異的な CDK 阻害因子遺伝子や既知の休眠遺伝子の変動など興味深い知見が得られた。さらに、ストリゴラクトン受容体である D14 が節管を通して植物体内を移動することを証明した。穂の枝分かれ程度を決定する TAWAWA1 遺伝子の機能解析を進め、TAW1 が転写調節因子であること、境界領域決定因子である BOP と相互作用して機能することを明らかにした (PNAS 2013)。

佐竹は実験科学者と共同していくつかのモデルの構築に成功した。まずは節管栄養輸送モデルの開発と収量増加が期待されるイネ穂デザインを行った。イネの玄米数や玄米配置を制御する遺伝子情報をもとに、収量の高い品種を作出するための育種研究が近年盛んに行われているが、光合成能や成長期間は固定したまま玄米数のみを増加させていくと、各玄米の登熟度は低下し総収量は減少する。この玄米数と玄米の登熟度の間にあるトレードオフをとらえた節管栄養輸送モデルを開発し、イネ穂上でのショ糖転流と玄米登熟を予測することで収量の高い玄米配置を探索した (PCP, 2015)。次にデンプンと概日時計の相互調節がもたらす最適成長に関するモデリングを行った。植物は日中生産した光合成産物の一部をデンプンとして蓄積し、それを夜間にショ糖に分解し様々な成長器官へ輸送することで昼夜問わず継続して成長する。しかし、多様な明暗サイクルへの応答メカニズムはまだわかっていない。巧みなデンプン制御には体内時計とデンプン代謝の相互調節が必要であると考え、数理モデルをもとにした分析を進めた。さらに温暖化環境下での開花時期予測を行った。自然環境でみられる複雑な温度環境でも適切な時期に開花できるメカニズムを明らかにするとともに、遺伝子情報に立脚した開花時期予測モデルを開発した (Nat Commun 2013)。

特筆すべきは新領域の形成に向け、計画班員同士、計画班員と公募班員同士、異なる班員同士による共同研究が活発に行なわれたことである。詳細は別項目を参照されたいが、例えば、佐竹、千葉と櫻井 (公募班員) は共同で遺伝子情報に立脚した開花予測モデルを開発した (Nat Commun 2013)。佐竹、千葉、持田 (公募班員) は共同で豊凶現象を引き起こす窒素の役割を開花遺伝子発現解析から解明した (Ecol Lett 2013)。木下と馬との共同研究により、気孔孔辺細胞おける遺伝子発現解析法の開発を行った (Plant Physiol 2013)。木下と石崎 (公募班員) との共同研究により、植物の細胞膜プロトンポンプの進化的解析を行った (Plant Physiol 2012)。山谷と石田 (公募班員) は老化葉身でのタンパク質分解機構を明らかにした (Plant Physiol 2015)。内藤と藤原、千葉は共同研究でホウ素応答における転写後制御機構を解明した (Plant Cell 2011)。

以上のように、本誌学術領域により、これまで明らかにされていなかった植物の巧みな生存・成長戦略に関する分子機構の統合的理解を大きく前進させた。

図4 浮きイネの節間伸長機構



### 3. 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。

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災と 4 月 7 日の大きな余震により、被災地である東北大学大学院農学研究科の山谷グループ、石田グループは大きな被害を受けた。キャンパス内の研究棟などの建造物の破壊は免れたものの、研究室の機器類や設備のほとんどが破損し、また長期にわたった停電・断水で、超低温フリーザーや冷蔵庫・恒温器に保管あるいは実験中の貴重な試料・種子等や、高額な試薬類は壊滅的な打撃を受けた。生物試料は再度調製するため、長期にわたる時間が必要であった。そこで、すべての班員から支援の申し出があり、また総括班経費から傾斜配分を行った。その後、山谷、石田班員の努力により、支障なく研究を進めた。

また、班員間の共同研究を促した結果、モデリング班との共同研究が予想以上に多かったため、2回目の公募時にモデリング班の課題を多く採択した。また総括班経費からモデリングを行う研究員を雇用し、計画班員の佐竹と協力して、多くの共同研究を展開した。

#### 4. 審査結果の所見及び中間評価で指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ程度）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

##### <審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

###### 審査結果の所見

本研究領域は、植物の様々な環境変化に適応して成長する、いわゆるストレス応答と適応機構を、分子・細胞レベルで明らかにし、植物の生存戦略機構・成長戦略機構を解明することを目指した意欲的な提案である。現在の地球レベルでの食糧問題や環境問題に対する、基礎植物科学の対応としても、本研究分野の必要性が高い。本研究領域は細胞の環境ストレスに対する転写因子の活性化機構と遺伝子発現制御ネットワークの解明を目指した生存戦略機構研究と、環境ストレス回避のための細胞分裂と細胞成長の制御を解明する成長戦略機構研究、それらの解析結果を活用し、数理モデルとコンピューターシミュレーションにより、植物細胞のストレス応答の分子機構を理論的に明らかにするモデリング研究から構成されており、総括班内に「ストレス評価センター」を設置し、連携して研究を推進することは評価できる。

若手から幅広い年齢層までの研究者で構成され、個々の研究者の業績が優れていることから研究成果が期待できるが、その一方でそれぞれが上手く連携できるか懸念もある。特に生存戦略と成長戦略を有機的に連携させるために、数理モデリングによるシミュレーションを行う点が特徴的であるが、具体的に数理モデルがどの様に連携するかが明確ではない。転写因子などが明らかとなっても、数式により一般化するにはデータが不足している。このような条件でモデル化が可能であるか不明である。領域代表者が期待するような研究成果を得るためには、wet 担当研究者からモデリング担当研究者に提供するデータの質と量についての吟味と、研究期間の途中で、進展状況に応じた研究目標と研究手法の練り直しが必要である。

###### 指摘を受けた事項への対応状況

領域会議や若手の会などの集まる機会を利用して、またメールなどを通じて、計画班員同士、計画班員と公募班員同士、異なる班員同士による共同研究を促して、総括班から共同研究に対して支援を行った。またホームページに班員専用のページを設けて、実験材料、手法、機器などの交流を図った。さらにモデリング研究者と実験研究者との共同研究を促すために、「モデリング講習会」、「モデリング研究とのマッチング」などを企画した。さらにモデリング研究を強化するために、総括経費の傾斜配分を行った。そういう努力の甲斐があって、最終的に各種共同研究が 136 件に上り、共同研究で発表した論文が 28 報もあった。

##### <中間評価で指摘を受けた事項への対応状況>

2013 年 9 月に受けた中間評価では、A の評価を受けた。

###### 中間評価の主なコメント

個々の研究代表者は質の高い研究を順調に展開していると判断でき、また全体としてみても、総括班が立ち上げたストレス評価センターの利用を班員に促し、多くの共同研究を生み出そうとする姿勢が伺える。しかしながら、現在のところ新興・融合領域を形成される段階にまでは進捗していない。

関連学会でのシンポジウムや、国際シンポジウムの企画、招待講演、ホームページを通じて、研究内容を紹介し、他の関連の領域に大きな影響を与えつつあり、また新聞報道も多く社会的な関心を集めていると評価できる。しかしながら、(中略)複合ストレスに強い植物・作物の生産など、農学・地球環境科学への応用・貢献などの波及効果も期待されるものの、現時点では、他の領域への明確な波及効果は見られない。

研究項目 A03 モデリング班は規模が小さいという制約はあるが、この領域内における寄与は現時点で大きいとは言えず、公募研究代表者をも含め、一層の充実を計るべきである。モデリング研究の位置づけが明確でなく十分に活用されていないため、実験によるウェット研究を強くサポートするかたちで機能させる必要がある。数理モデリングを積極的に適用しようとする姿勢は伺えるものの、まだ人材不足の感があるため、公募研究での補充や若手研究者のドライ研究への参画などが望まれる。

###### 指摘を受けた事項への対応状況

メールや班会議、若手の会などを通じて、積極的に異分野による共同研究を促してきた。また総括班経費から共同研究を支援した。モデリング研究を強めるために、総括班経費からモデリング研究を行う博士研究員 1 名を雇用する経費を計上して、モデリング班で唯一の計画研究である佐竹グループの研究推進力の強化を図る

とともに、他の共同研究を推進した。また、数理モデリングの公募研究への応募呼びかけを関連研究者に行い（平成24年10月まで実施）、それら優れた公募研究の積極的な採択を進めることによって、モデリング班全体の強化を図った。さらに、実験科学者とシミュレーションの両者のギャップを埋める新たな試みとして、平成25年度の公募班が決定した時点で、実験科学者とモデリング研究者によるマッチングを行った。加えて、本新学術領域発足一年目にも行ったモデリング講習会を再度開き、モデリング研究と実験系研究とのさらなる融合、実験系若手研究者のモデリング研究への参画を促進してきた。最終的に異分野間の共同研究が多く行われ、最終的に136件の共同研究に上った。また、共同研究の論文が28報発表された。

その他、「農学・地球環境への応用・貢献などの波及効果」については、A01 生存戦略班・芦莉が、研究成果を応用した作物の分子育種を進め、実際の農業への応用・貢献への具体的な取り組みも着実に進んでいる。同時に、各班員の成果についても、「植物の環境突破力」の理解に留まらず、常に「農学・地球環境科学への応用・貢献、食糧問題や自然環境問題の解決など社会への様々な波及」を意識して研究に取り組むように働きかけを行ってきた。

## 5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ程度）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいもの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ごとに計画研究・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。

移動することのできない植物は、絶えず様々な環境ストレスを受けその生存を脅かされている。しかし、植物は、これらの環境の変化を速やかに感じ取り適応して生存・成長する突破力を進化の過程で獲得してきた。本新学術領域は、植物の環境突破力の分子機構を統合的に解明することを目的とし、これまでに以下のような多くの成果を得ている。これらの成果の多くはインパクトの高い科学誌に発表し、また新聞など多くのメディアで取り上げられた。

### A01「生存戦略研究」

#### 1-1 計画研究(総論文数 194 報、特許数 3 件)

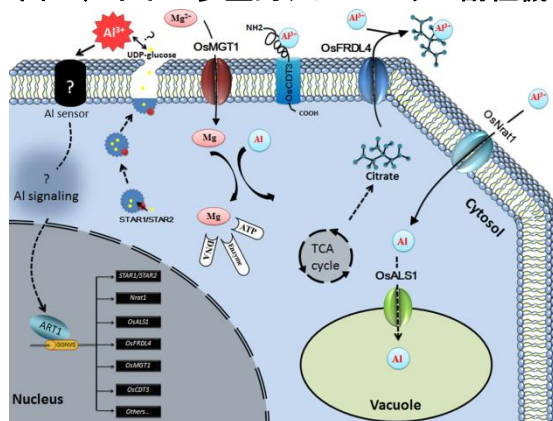
様々な環境ストレス(土壌酸性化、栄養飢餓、塩害、乾燥、高温、低温など)を克服するために、植物が発達させてきた分子機構を様々な手法で明らかにした。世界の耕地面積の 3-4 割を占める酸性土壌での主なストレス因子であるアルミニウム毒性に関してイネから複数の耐性遺伝子を同定し、その役割を解明した。またこれら耐性遺伝子の発現を制御する転写因子 ART1 のシス配列 (GGNVS) を同定した(図1)。一方、オオムギのアルミニウム耐性遺伝子 HvAACT1 の発現はその遺伝子上流に約 1kb のトランスポゾン様の挿入によって、シラゲガヤのアルミニウム耐性遺伝子 HIALMT1 の発現はプロモーター領域に ART1 と結合するシス因子の数を増やすことによって獲得・向上してきたことを明らかにした。さらに環境中のマンガン濃度の変動に対処するために、イネの節で発現している OsNramp3 がマンガンの分配をコントロールしていることを解明し、また地上部のマンガンの無毒化に関与する遺伝子を二つ同定した。更に共同研究によりケイ素吸収数理モデルを構築した。

イネは、窒素飢餓環境では茎数や種子数を減らして完熟種子を稔らせる応答を示すが、その分子機構は明らかではなかった。本研究では、窒素飢餓環境を長期間模倣できるとされる窒素代謝遺伝子欠損変異体を用いて、①外界の  $\text{NH}_4^+$  の検知機構、②  $\text{NH}_4^+$  の同化・再利用機構、③代謝バランス、④穂への物質転流モデリングから、分子機構の解明を試みた。その結果、根における  $\text{NH}_4^+$  の初期同化や分けつ伸長に関わる要因や、種子数の決定に関わる窒素代謝要因(3)を、逆遺伝学的に明らかにした。変異体では代謝バランスの崩壊が大きく影響していることを見だし、またショ糖転流の数理モデルを構築した。以上、イネの窒素飢餓環境に対する生存戦略について、分子機構のかなりの部分を明らかにできた。

リボソームを舞台とした遺伝子発現制御機構は、細胞内の恒常性維持、とりわけ細胞質の代謝環境に迅速に応答するメカニズムとして注目されつつある。メチオニン合成酵素をコードする CGS1 mRNA を翻訳中のリボソームは、メチオニンの代謝産物である S-アデノシルメチオニンに反応して特定の位置で翻訳を停止し、これと共役して CGS1 mRNA が分解される。翻訳停止に伴って新生ペプチドとリボソーム RNA にコンフォメーション変化が起こることを明らかにした。これは、翻訳停止に特異的なコンフォメーション変化を明らかにした初めての報告である。また、停止したリボソームに後続のリボソームが 9 コドン間隔で追突し、それぞれのリボソームの位置で mRNA 分解が誘導されることを明らかにするとともに、停止したリボソームにおけるペプチド転移反応の活性中心の状態を明らかにした。一方、この mRNA 分解は、一般的な mRNA 分解とは異なり、ポリ A 鎖の短縮化が先行していないことを明らかにした。本研究により翻訳停止から mRNA 分解に至る過程の理解が深まった。

植物の乾燥と高温ストレスに応答する制御ネットワークで重要な働きを示す転写因子である DREB2A の活性化機構に関して、シロイヌナズナの転写因子 DREB2A は転写レベルで制御されており、高温条件下では HsfA1 転写因子が、乾燥条件下では AREB 転写因子が重要な制御因子であることを示した。また、DREB2A の転写は、通常条件下では GRF7 によって抑制されていることも明らかにした。一方、DREB2A は転写後調節も受けており、ストレス条件下での DREB2A タンパク質の安定化が活性化に重要であることを見出した。さらに、活性化した DREB2A は転写因子 DPB3-1 と相互作用

図1、イネの多重的アルミニウム耐性機構

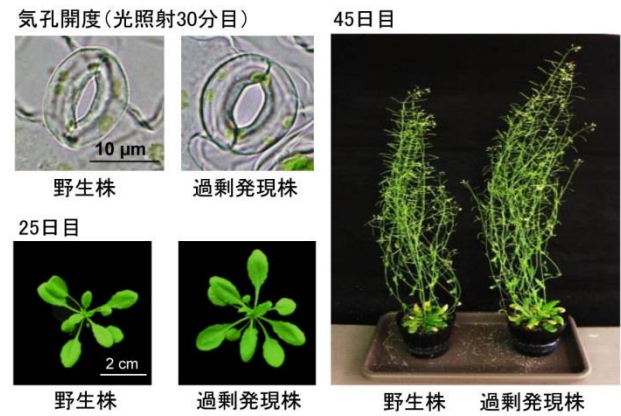




することにより、協調的に下流遺伝子群の発現誘導を強めることを示すなど、DREB2A を中心とした植物の環境ストレス応答の転写ネットワークの制御機構を解明した。一方、ダイズの DREB2A 相同遺伝子についてもその機能を解析し、DREB2A は植物において共通に機能していることを明らかにした。

植物の表皮に存在する気孔は、一対の孔辺細胞により構成され、様々な環境シグナルに応答してその開度を調節し、光合成に必要な二酸化炭素取り込み、蒸散や酸素の放出など植物と大気間のガス交換を制御している。新奇の気孔開度変異体の解析や気孔孔辺細胞を用いた生理・生化学的解析を進め、花成ホルモン FT などの光周性経路による気孔開度制御という新たな気孔開度制御機構を見出した。Mg キラターゼなどのテトラピロール合成系が孔辺細胞のアブシジン酸シグナル伝達に影響を与えること明らかにした。さらに、気孔開度を人的に制御した植物体の作出し、植物の成長・生存における気孔の役割の解析を進め、気孔開口促進により植物の光合成・生産量が高まること、気孔のアブシジン酸に対する感受性を高めことで乾燥耐性が高まることを明らかにした(図2)。加えて、気孔開口の駆動力を形成する細胞膜プロトンポンプに着目した研究も進め、光合成や植物ホルモン・オーキシンにより活性化される新たな生理現象を見出し、気孔開閉のシグナル伝達の分子機構の解明に大きく貢献した。

図2 プロトンポンプ過剰発現株における気孔開口と成長の促進



### 1-2 公募研究(総論文数 141 報、特許数 5 件)

硫酸イオン輸送体 SULTR2;1 の硫黄欠乏による発現上昇が、3' 非翻訳領域による転写調節によること、この発現上昇により硫酸イオンの吸収と根から地上部への移行が促進されることを明らかにした。輸送体 OsMTP8.1 はマンガンを液胞へ隔離することにより無毒化することを突き止めた。リン酸欠乏条件下ではストリゴラクトンに対する応答性を上げることがわかった。また小胞体—葉緑体間の脂質輸送や脂質転換は、植物の環境ストレス耐性において重要な役割を担っていることを明らかにした。イネの効率的な窒素利用と成長におけるオートファジーの役割を実証した。植物の環境ストレス耐性に関与する酢酸合成経路は、エピジェネティックな因子(ヒストン脱アセチル化酵素 HDA6)によって直接的に制御されていた。またストレス条件下で蓄積する代謝中間体アラントインが、アブシジン酸などの植物ホルモンの産生を亢進し、遺伝子レベルでストレス応答を惹起することを明らかにした。アブシジン酸 (ABA) による種子発芽の抑制で働く主要な因子の一つで、2C 型タンパク質脱リン酸化酵素 (PP2C) をコードする AHG1 の相互作用因子を複数同定することに成功した。コケ植物の高い脱水耐性発現に特異的な細胞内の微細構造変化やストレスシグナルの伝達に関わる新規因子を同定した。シロイヌナズナにおいては光ストレス耐性能に必要なビタミン C 輸送体を世界で初めて同定した。タンパク質合成系の改変により光合成の強光耐性が向上していた。

通常条件下では細胞質に散在していた VOZ-GFP が、乾燥や高温ストレス条件下では細胞質内ストレス顆粒および P-body に局在することを明らかにした。高温ストレスで転移したトランスポゾン、宿主植物の子孫集団の中でストレス耐性を獲得した個体を誕生させることがわかった。低温ストレスに応答した多くの遺伝子が、発現レベルを上昇させる一方で mRNA 分解を促進させていることを明らかにした。一方で、ポリ A 分解酵素が高濃度シヨ糖ストレス応答に関わることも明らかにした。

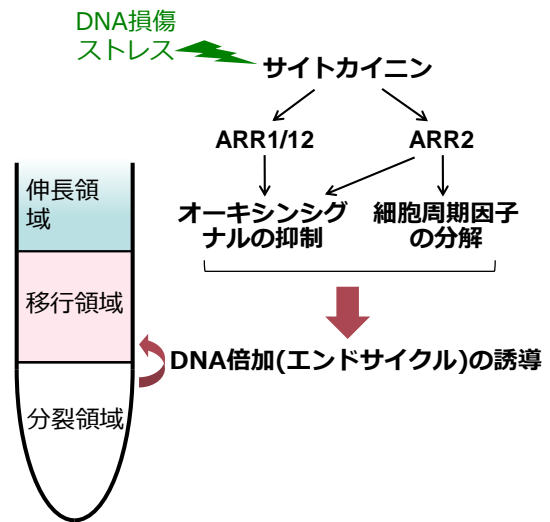
浸透圧ストレスに耐性を示すシロイヌナズナは、塩馴化後浸透圧耐性に優れていることを見出し、その制御遺伝子を同定した。OsHKT1;4 は、生殖成長期のイネの茎や葉、特に止葉の葉身に Na<sup>+</sup>が過剰蓄積する事を防いで塩ストレスを獲得していることが明らかとなった。

## A02 「成長戦略研究」

### 2-1 計画研究(総論文数 85 報、特許数 1 件)

植物の成長は光、温度、乾燥、栄養といった環境要因によって大きく影響を受ける。シロイヌナズナの根において、細胞分裂から DNA 倍加(細胞分化・伸長)への転換を制御する因子について解析した結果、サイトカニン情報伝達の下流でオーキシシグナルの抑制と細胞周期停止が引き起こされることが明らかになった(図3)。また、DNA 損傷ストレスはサイトカニン合成量を上げることにより DNA 倍加を誘導すること、オーキシシグナルを抑制して幹細胞の細胞死を促進すること、ブラシノステロイドシグナルを増強して静止中心の細胞分裂を誘導することも明らかになった。一方、分裂組織においては、DNA 損傷にตอบสนองして転写抑制型の MYB3R 転写因子が安定化し、これにより G2/M 期遺伝子の発現を抑制して細胞周期進行を阻害していることが示された。さらに植物組織内の細胞周期進行をモニタリングするために、2つの細胞周期ステージを可視化できる蛍光マーカーの開発も行った。その結果、根での細胞周期進行のリアルタイムイメージングに成功し、DNA 倍加への移行プロセスの解析に応用することができた。

図3 根における細胞分裂から DNA 倍加への移行



環境に応じて植物が成長を止めることは、受動的な成長阻害ではなく、積極的な成長戦略として起こっていることが明らかとなってきた。植物に特有な転写因子 GTL1 の機能解析を進め、GTL1 が CCS52A1 遺伝子の発現を低下させることによって核内倍加周期を終了し、その結果細胞成長を抑制することを見いだした。さらに GTL1 のホモログである DF1 との二重変異株の解析を通して、GTL1 および DF1 が根毛の成長制御に大きく関係していることを見出した。また最近根毛の細胞成長を負に制御する転写因子として Zn フィンガータンパク質である OBP4 を新たに発見した。さらに GTL1、DF1 および OBP4 それぞれの下流因子の探索を行い、共通して根毛成長を正に制御する因子を見出した。興味深いことに、根毛細胞の分化を制御する GL2 とも下流因子のオーバーラップが見られ、環境要因から根毛成長に至る過程で、細胞分化と成長が協調的に制御されている可能性を見出した。またこれらの転写因子の環境ストレス下での機能を解析し、GTL1、DF1 がリン酸濃度に応じた根毛の成長制御に関与することを見いだした(図4)。

図4 リン酸濃度に応じて転写因子 GTL1, DF1 による根毛成長の調節

東南アジアのデルタ地帯に生育する浮イネは、水位の上昇に反応して茎を最大 7m 程度まで伸長させることができる。遺伝学的解析から、浮きイネの節間伸長を司る新規の QTL を見いだした。また植物生理学および遺伝学的解析から、浮きイネは植物ホルモンの GA 依存的に節間伸長することを明らかにした。また、浮きイネの深水依存的な節間伸長を司る2つの遺伝子(SK3 及び SK4)を同定することに成功した。SK3 は機能未知の遺伝子であり、深水依存的に節間の細胞分裂を行う組織で発現することが明らかになった。SK4 はジベレリン(GA)の合成酵素遺伝子である GA20ox2 をコードしていた。浮きイネの SK4 は一般的なイネに比べ高い GA 合成活性を保持すること、また深水依存的に節間で SK4 の発現が著しく誘導されることが判明した。また、様々分子遺伝学的な解析から、エチレンの情報伝達因子 OsEIL1 が GA20ox2 のプロモーターに結合することが明らかになった。これまでの研究で、浮きイネでは、深水に伴って節間伸長部位で SK3 発現し細胞分裂を活性化する。また、深水依存的にエチレンが節に蓄積し、EIL1 を介して GA 合成酵素(SK4)を活性化させ GA を生産し細胞伸長を行うことで節間伸長を行うことが推測された。



植物の枝分かれについて、ストリゴラクトンによる腋芽の成長制御を解析した。休眠開始の引き金になるのはメリステム活性の停止ではなく、分化した葉原基での細胞分裂活性の低下であることを見出した。さらに、休眠開始/解除において葉原基とメリステムで局所的に起こる遺伝子発現変化を解析し、ABA とジャスモン酸による遺伝子発現制御と休眠による発現制御に明瞭な関連があることを明らかにした。また、植物特異的な CDK 阻害因子遺伝子や既知の休眠遺伝子

の変動など興味深い知見が得られた。さらに、ストリゴラクトン受容体である D14 が篩管を通して植物体内を移動することを証明した。穂の枝分かれ程度を決定する TAWAWA1 遺伝子の機能解析を進め、TAW1 が転写調節因子であること、境界領域決定因子である BOP と相互作用して機能することを明らかにした。

## 2-2 公募研究(総論文数 100 報、特許数 1 件)

発生が進んだ器官にける細胞分裂の停止には、転写抑制因子として働く R1R2R3-Myb による G2/M 期遺伝子群の転写抑制が重要であること、また R1R2R3-Myb 転写活性化因子と抑制因子は異なるタンパク質複合体を形成し、それらは発生に伴ってダイナミックに構成因子を変化させていることが明らかになった。新たな GA 輸送体を複数同定し、そのうちの 2 種が葯の解裂、種子形成、発芽後の初期生長を冗長的に制御することを明らかにした。低リン下でホソバルピナスはコストの低い根を多くつくことでリンを獲得する戦略をとり、シロバナルピナスでは、リン獲得能力の高いクラスター根をつくることでリンを獲得する戦略をとっていた。シロイヌナズナのホスファチジルイノシトール-4-リン酸 5-キナーゼ遺伝子 *PIP5K3* および *PIP5K4* がリン酸欠乏時の根毛細胞において転写因子 PHR1 により転写活性化され、それにより根毛伸長が促進されることを明らかにした

分裂組織の活性制御機構において、ペプチドホルモンの CLV3 (GLE) の下流で機能する因子 AGB1, PUB4, BAM1 等、多くの因子の同定に成功した。またペクチンの特異的構成糖 KDO の生合成酵素 CKS (GTP:KDO シチジリル転移酵素) の解析から、成長に伴う新規細胞壁の構築に際し正常なペクチンゲルの形成が不可欠であった。NIMA 関連キナーゼがチューブリンのリン酸化を介して微小管を脱重合させ、余分な微小管を取り除くことが明らかになった。また、NIMA 関連キナーゼが塩ストレスなどに関与すること、NEK6 がトランスポゾンや non-coding RNA の発現抑制に必要であることが明らかになった。

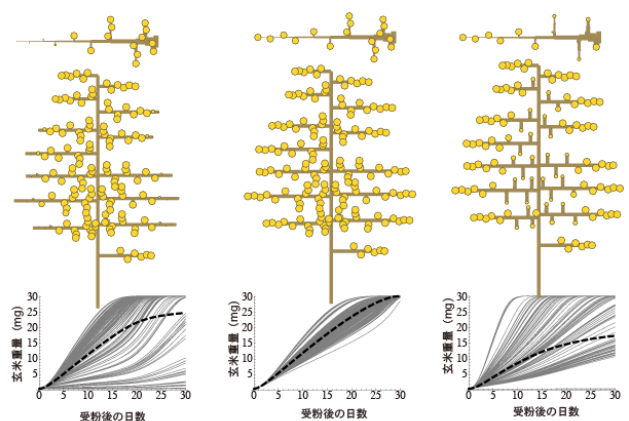
ゼニゴケの栄養繁殖におけるオーキシンの重要性を明らかにし、栄養繁殖制御の鍵となる転写因子やシグナル伝達因子を複数同定することに成功した。また光環境(日長)に応じた栄養成長から生殖成長への繁殖モードの転換を制御するメカニズムは、コケ植物の時点で獲得されており、被子植物の花成制御へと転用されたことを示した。

## A03 「モデリング研究」

### 3-1 計画研究(総論文数 15 報、特許数 0 件)

イネの玄米数や玄米配置を制御する遺伝子情報をもとに、収量の高い品種を作出するための育種研究が近年盛んに行われているが、光合成能や成長期間は固定したまま玄米数のみを増加させていくと、各玄米の登熟度は低下し総収量は減少する。この玄米数と玄米の登熟度の間にあるトレードオフをとらえた篩管栄養輸送モデルを開発し、イネ穂上でのショ糖転流と玄米登熟を予測することで収量の高い玄米配置を探索した(図5)。また植物は日中生産した光合成産物の一部をデンプンとして蓄積し、それを夜間にショ糖に分解し様々な成長器官へ輸送することで昼夜問わず継続して成長する。しかし、多様な明暗サイクルへの応答メカニズムはまだわかっていない。巧みなデンプン制御には体内時計とデンプン代謝の相互調節が必要であると考え、数理モデルをもとにした分析を進めた。温暖化環境下での開花時期予測を予測するため自然環境でみられる複雑な温度環境でも適切な時期に開花できるメカニズムを明らかにするとともに、遺伝子情報に立脚した開花時期予測モデルを開発した。

図5 3種類の篩部構造における玄米の登熟プロセスモデリング



### 3-2 公募研究(総論文数 38 報、特許数 0 件)

ダイズの主要生産地域を対象に、過去の収量・気象データと生理過程を考慮した作物モデルにデータ同化手法を適用して、1980年~2006年の25年間における大気CO<sub>2</sub>による施肥効果を推計した結果、収量は平均して約5.8%増加したこと、乾燥環境の地域ほどCO<sub>2</sub>施肥効果が大きいことが示された。ケイ素輸送体に関する分子生物学的な知見をもとに、数理モデル化を行い、そのモデルを用いたシミュレーション実験から、イネがいかんして、ケイ素を効率よ



く吸収・輸送しているかについて明らかにした。数理モデルを用いた根端成長解析法を開発し、様々な環境ストレスおよびそれに関連する遺伝子の変異が及ぼす影響の解析を進め、特に myb3r1/3/5 の解析に取り組み、この変異体では細胞増殖域が拡大することを定量的に示した。

様々なストレス負荷時における遺伝子発現変動のマイクロアレイデータを用い、発現の noise-plasticity 関係を考察した結果、シロイヌナズナの遺伝子発現における noise-plasticity 関係は、酵母や大腸菌のものと大きく異なる事が見出された。栽培進化によって広域適応的に分化した栽培オオムギの開花時期制御の多様性を、春化を説明する数理モデルを構築して低温の閾値温度と低温期間の 2 つのパラメータを用いて春化要求性の違い(播性程度)を記述することに成功した。大規模な酵素反応ネットワークにより構成される植物の代謝の数式モデルを構築し、シロイヌナズナ代謝反応の解析を行った。

概日時計の同期現象に関する理論的考察に基づいて、非同期条件下における時計遺伝子 CCA1 の発現リズムを精密に計測し、かつ実験終了時のサンプルに対して RNA-seq 解析を試みた。その結果、非同期条件下において時刻表示遺伝子群の概日リズムパターンに大きな乱れが確認され、概日時計によるトランスクリプトームの調節機能が正常に働いていないことが推察された。

広域 TEM 画像やストレス関連の転写因子等をデータベース化するために必要なアプリケーション開発・実装等を行った。広域 TEM 像上の細胞小器官にアノテーションを加え細胞や組織ごとに分布定量化するための解析基盤を整えた。

## 6. 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）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（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、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、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。また、別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。

### (1) 主な論文等一覧について（発表論文数：合計 561 報）

[計画班は3報、公募班は1報のみ記した。( )内は総論文数]

主な掲載論文 (IF : Impact factor 2014) IF5 以上 161 報

*Nature* (IF 42.351) 2 報、*Nat Commun* (IF 10.742) 9 報、*Nature Plants* 1 報、*Trends in Plant Sci* (IF 13.479) 3 報、*PLoS Biol* (IF 11.771) 2 報、*Nature Geosci* (IF 11.668) 1 報、*EMBO J* (IF 10.748) 3 報、*Curr Biol* (IF 9.916) 6 報、*Proc Natl Acad Sci USA* (IF 9.809) 20 報、*PLoS Genet* (IF 8.167) 2 報、*Plant Cell* (IF 9.575) 27 報、*Curr Opin Plant Biol* (IF 9.385) 8 報、*Plant Physiol* (IF 7.394) 37 報、*Plant J* (IF 6.815) 31 報、*New Phytol* (IF 6.373) 10 報

#### 計画研究

計画研究代表者 馬 建鋒(岡山大学資源植物科学研究所・教授)(49)

Yamaji N, Sasaki A, Xia JX, Yokosho K, Ma JF\* (2013) A node-based switch for preferential distribution of manganese in rice. *Nat Commun* 4, 2442. [山陽新聞、日刊工業新聞などに掲載](#)

Fujii M, Yokosho K, Yamaji N, Saisho D, Yamane M, Takahashi H, Sato K, Nakazono M, Ma JF\* (2012) Acquisition of aluminium tolerance by modification of a single gene in barley. *Nat Commun* 3, 713. [朝日新聞、山陽新聞、産経新聞、中国新聞などに記事掲載](#)

Xia JX, Yamaji N, Kasai T, Ma JF\* (2010) Plasma membrane-localized transporter for aluminum in rice. *Proc Natl Acad Sci USA* 107, 18381-18385. [朝日新聞、山陽新聞などに記事掲載](#)

計画研究代表者 木下 俊則(名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所・教授)(14)

◎Wang Y, Noguchi K, Ono N, Inoue S, Terashima I, Kinoshita T\* (2014) Overexpression of plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase in guard cells promotes light-induced stomatal opening and enhances plant growth. *Proc Natl Acad Sci USA* 111, 533-538. [朝日新聞、読売新聞、毎日新聞、日本経済新聞、信濃毎日新聞などに記事掲載、Faculty of 1000 に選出、野口班員との共同研究](#)

◎Ando E, Ohnishi M, Wang Y, Matsushita T, Watanabe A, Hayashi Y, Fujii M, Ma JF, Inoue S, Kinoshita T\* (2013) *TWIN SISTER OF FT*, *GIGANTEA*, and *CONSTANS* have a positive but indirect effect on blue light-induced stomatal opening in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiol* 162, 1529-1538. [馬班員との共同研究](#)

Kinoshita T\*, Ono N, Hayashi Y, Morimoto S, Nakamura S, Soda M, Kato Y, Ohnishi M, Nakano T, Inoue S, Shimazaki K (2011) *FLOWERING LOCUS T* regulates stomatal opening. *Curr Biol* 21, 1232-1238. [読売新聞、中日新聞、日刊工業新聞、Nature web Japan などに記事掲載、NHK ニュースで内容紹介、Faculty of 1000 に選出](#)

計画研究代表者 篠崎 和子(東京大学大学院農学生命科学研究科・教授)(23)

Sato H, Mizoi J, Tanaka H, Maruyama K, Qin F, Osakabe Y, Morimoto K, Ohori T, Kusakabe K, Nagata M, Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K\* (2014) Arabidopsis Dpb3-1, a DREB2A interactor, specifically enhances heat stress-induced gene expression by forming a heat stress-specific transcriptional complex with NF-Y subunits. *Plant Cell* 26, 4954-4973. [化学工業日報、読売新聞に掲載](#)

Osakabe Y, Arinaga N, Umezawa T, Katsura S, Nagamachi K, Tanaka H, Ohiraki H, Yamada K, Seo S, Abo M, Yoshimura E, Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K\* (2013) Osmotic stress responses and plant growth controlled by potassium transporters in Arabidopsis. *Plant Cell* 25, 609-624.

Kim JS, Mizoi J, Kidokoro S, Maruyama K, Nakajima J, Nakashima K, Mitsuda N, Takiguchi Y, Ohme-Takagi M, Kondou Y, Yoshizumi T, Matsui M, Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K\* (2012) Arabidopsis GROWTH-REGULATING FACTOR 7 functions as a transcriptional repressor of ABA- and osmotic stress-responsive genes including *DREB2A*. *Plant Cell* 24, 3393-3405. [化学工業日報に掲載](#)

計画研究代表者 内藤 哲(北海道大学大学院農学研究院・教授)(12)

Hagiwara-Komoda Y, Sugiyama T, Yamashita Y, Onouchi H, Naito S\* (2014) The N-terminal cleavable pre-sequence encoded in the first exon of cystathionine  $\gamma$ -synthase contains two different functional domains for chloroplast targeting and regulation of gene expression. *Plant Cell Physiol* 55, 1779-1792.

◎Yamashita Y, Kadokura Y, Sotta N, Fujiwara T, Takigawa I, Satake A, Onouchi H, Naito S\* (2014) Ribosomes in a stacked array: elucidation of the step in translation elongation at which they are stalled during *S*-adenosyl-L-methionine-induced translation arrest of *CGS1* mRNA. *J Biol Chem* 289, 12693-12704. [佐竹班員、藤原班員との共同研究](#)

Onoue N, Yamashita Y, Nagao N, Goto DB, Onouchi H, Naito S\* (2011) *S*-Adenosyl-L-methionine induces compaction of nascent peptide chain inside the ribosomal exit tunnel upon translation arrest in the *Arabidopsis CGS1* gene. *J Biol Chem* 286, 14903-14912. [同誌の Papers of the Week に採択](#)

計画研究代表者 山谷 知行(東北大学大学院農学研究科・教授)(11)

◎Ohashi M, Ishiyama K, Kusano M, Fukushima A, Kojima S, Hanada A, Kanno K, Hayakawa T, Seto Y, Kyojuka J, Yamaguchi S, Yamaya T\* (2015) Lack of cytosolic glutamine synthetase1;2 in vascular tissues of axillary buds caused severe reduction in their outgrowth and disorder of metabolic balance in rice seedlings. *Plant J* 81, 347-356. [経塚班員との共同研究](#)

Funayama K, Kojima S, Tabuchi-Kobayashi M, Sawa Y, Nakayama Y, Hayakawa T and Yamaya T\* (2013) Cytosolic glutamine synthetase1;2 is responsible for the primary assimilation of ammonium in rice roots. *Plant Cell Physiol* 54, 934-943. [Selected a highlight paper](#)

Kusano M, Tabuchi M, Fukushima A, Funayama K, Diaz C, Kobayashi M, Hayashi N, Tsuchiya NY, Takahashi H, Kamata A, Yamaya T\*, Saito K\* (2011) Metabolomics data reveal a crucial role of cytosolic glutamine synthetase 1;1 in coordinating metabolic balance in rice. *Plant J* 66, 456-466.

計画研究代表者 芦刈 基行(名古屋大学生物機能開発利用研究センター・教授)(6)

Song X-J, Kuroha T, Ayano M, Furuta T, Nagai K, Komeda N, Segami S, Miura K, Ogawa D, Kamura T, Suzuki T, Higashiyama T, Yamasaki M, Mori H, Inukai Y, Wu J, Kitano H, Sakakibara H, Jacobsen SE, Ashikari M\* (2015) Rare allele of A novel histone H4 acetyltransferase enhances grain weight, yield and plant biomass in rice. *Proc Natl Acad Sci USA* 112, 76-81.

Ayano M, Kani T, Kojima M, Sakakibara H, Kitaoka T, Kuroha T, Shim RA, Kitano H, Nagai K, Ashikari M\* (2014) Gibberellin biosynthesis and signal transduction is essential for internode elongation in deepwater rice. *Plant Cell Environ* 37, 2313-2324.

Nagai K, Kondo Y, Kitaoka T, Noda T, Kuroha T, Shim RA, Yasui H, Yoshimura A, Ashikari M (2014) QTL analysis of internode elongation in response to gibberellin in deepwater rice. *AOB Plant* 6, 1-12.

計画研究代表者 梅田 正明(奈良先端科学技術大学院大学バイオサイエンス研究科・教授)(21)

Takahashi N, Kajihara T, Okamura C, Kim Y, Katagiri Y, Okushima Y, Matsunaga S, Hwang I, Umeda M\* (2013) Cytokinin control endocycle onset by promoting the expression of an APC/C activator in *Arabidopsis* roots. *Curr Biol* 23, 1812-1817.

Nobusawa T, Okushima Y, Nagata N, Kojima M, Sakakibara H, Umeda M\* (2013) Synthesis of very-long-chain fatty acids

in the epidermis controls plant organ growth by restricting cell proliferation. *PLoS Biol* 11, e1001531. [毎日新聞、朝日新聞、奈良新聞読売新聞、日本経済新聞、日経産業新聞に掲載](#)

Adachi S, Minamisawa K, Okushima Y, Inagaki S, Yoshiyama K, Kondou Y, Kaminuma E, Kawashima M, Toyoda T, Matsui M, Kurihara D, Matsunaga S, Umeda M\* (2011) Programmed induction of endoreduplication by DNA double-strand breaks in *Arabidopsis*. *Proc Natl Acad Sci USA* 108, 10004-10009. [朝日新聞、産経新聞、日刊工業新聞、日経産業新聞などに掲載、Faculty of 1000 に選出](#)

**計画研究代表者 経塚 淳子(東北大学大学院生命農学研究科・教授)(8)**

Li W, Yoshida A, Takahashi M, Maekawa M, Kojima M, Sakakibara, H, Kyozuka J\* (2015) SAD1, an RNA polymerase I subunit A34.5 of rice, interacts with Mediator and controls various aspects of plant development. *Plant J* 81, 282-291.

Yoshida A, Sasao M, Yasuno N, Takagi K, Daimon Y, Chen R, Yamazaki R, Tokunaga H, Kitaguchi Y, Sato Y, Nagamura Y, Usijima T, Kumamaru T, Iida S, Maekawa M, Kyozuka J\* (2012) *TAWAWA1*, a novel regulator of rice inflorescence architecture, functions through the suppression of meristem phase transition. *Proc Natl Acad Sci USA* 110, 767-772.

Kobayashi K, Yasuno N, Sato Y, Yoda M, Yamazaki R, Kimizu M, Yoshida H, Nagamura Y, Kyozuka J\* (2012) Inflorescence meristem identity in rice is specified by overlapping functions of three AP1/FUL-like MADS box genes and *PAP2*, a *SEP* MADS box gene. *Plant Cell* 24, 1848-1859.

**計画研究代表者 杉本 慶子(理化学研究所植物科学研究センター・チームリーダー)(15)**

Ikeuchi M\*, Iwase A\*, Rymen B, H Harashima H, Shibata M, Ohnuma M, Breuer C, Morao AK, de Lucas M, De Veylder L, Goodrich J, Brady SM, Roudier F, and Sugimoto K (2015) PRC2 represses dedifferentiation of mature somatic cells in *Arabidopsis*. *Nature Plants* (in press) \*Co-first author

Ikeuchi M, Sugimoto K, Iwase A (2013) Plant callus: mechanisms of induction and repression. *Plant Cell* 25, 3159-3173.

© Breuer C, Morohashi K, Kawamura A, Takahashi N, Ishida T, Umeda M, Grotewold E, Sugimoto K\* (2012) Transcriptional repression of the APC/C activator *CCS52A1* promotes the active termination of cell growth. *EMBO J* 31, 4488-4501. [梅田班員との共同研究、日刊工業新聞、日経 BP オンラインなどに掲載](#)

**計画研究代表者 佐竹 暁子(九州大学大学院理学研究院・准教授)(9)**

© Seki M\*, Feugier FG, Song X, Ashikari M, Nakamura H, Ishiyama K, Yamaya T, Ikeda M, Kitano H, Satake A (2015) A mathematical model of phloem sucrose transport as a new tool for designing rice panicle structure for high grain yield. *Plant Cell Physiol* 56, 605-619. [芦荻班員、山谷班員との共同研究](#)

Miyazaki Y, Maruyama Y, Chiba Y, Kobayashi MJ, Joseph B, Shimizu KK, Mochida K, Hiura T, Kon H, Satake A\* (2014) Nitrogen as a key regulator of flowering in *Fagus crenata*: understanding the physiological mechanism of masting by gene expression analysis. *Ecol Lett* 17, 1299-1309.

© Satake A\*, Kawagoe T, Saburi Y, Chiba Y, Sakurai G, Kudoh H (2013) Forecasting flowering phenology under climate warming by regulatory dynamics of flowering-time genes. *Nat Commun* 4, 2303. [千葉班員、櫻井班員との共同研究、北海道新聞 毎日新聞 日本経済新聞などに掲載](#)

**公募研究代表者 石田 喬志(熊本大学自然科学研究科・特任助教)(3)**

Ishida T, Tabata R, Yamada M, Aida M, Mitsumasu K, Fujiwara M, Yamaguchi K, Shigenobu S, Higuchi M, Tsuji H, Shimoamoto K, Hasebe M, Fukuda H, Sawa S\* (2014) Heterotrimeric G proteins control stem cell proliferation through CLAVATA signaling in *Arabidopsis*. *EMBO Rep* 15, 1202-1209. [熊本日日新聞に掲載](#)

**公募研究代表者 石田 宏幸(東北大学大学院農学研究科・准教授)(7)**

© Wada S, Hayashida Y, Izumi M, Kurusu T, Hanamata S, Kanno K, Kojima S, Yamaya T, Kuchitsu K, Makino A, Ishida H\* (2015) Autophagy supports biomass production and nitrogen use efficiency at the vegetative stage in rice. *Plant Physiol* (in press) [山谷班員との共同研究](#)

**公募研究代表者 伊藤 秀臣(北海道大学大学院理学研究院・助教)(5)**

©Matsunaga W, Ohama N, Tanabe N, Masuta Y, Masuda S, Mitani-Umeno N, Yamaguchi-Shinozaki K, Ma JF, Kato A, Ito H\*. (2015) A small RNA mediated regulation of a stress-activated retrotransposon and the tissue specific transposition during the reproductive period in Arabidopsis. *Front Plant Sci* 6, 48. [馬班員、篠崎班員との共同研究](#)

公募研究代表者 坂本 敦(広島大学大学院理学研究科・教授)(3)

Watanabe S, Matsumoto M, Hakomori Y, Takagi H, Shimada H, Sakamoto A\* (2014) The purine metabolite allantoin enhances abiotic stress tolerance through synergistic activation of abscisic acid metabolism. *Plant Cell Environ* 37, 1022-1036.

公募研究代表者 佐藤 雅彦(京都府立大学大学院生命環境科学研究科・准教授)(3)

Ichikawa M, Hirano T, Enami K, Fuselier T, Kato N, Kwon C, Voigt B, Schulze-Lefert P, Baluška F, Sato MH\* (2014) Syntaxin of plant proteins SYP123 and SYP132 mediate root hair tip growth in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Physiol* 55, 790-800.

公募研究代表者 下嶋 美恵(東京工業大学バイオ研究基盤支援総合センター・助教)(4)

Iwai M, Ikeda K, Shimajima M and Ohta H\* (2014) Enhancement of extraplastidic oil synthesis in *Chlamydomonas reinhardtii* using a type-2 diacylglycerol acyltransferase with a phosphorus starvation-inducible promoter. *Plant Biotechnol J* 12, 808-819. [日経産業新聞、科学新聞に掲載](#)

公募研究代表者 関 原明(理化学研究所環境資源科学研究センター・チームリーダー)(4)

Kim JM, To TK, Seki M\* (2012) An epigenetic integrator: New insights into genome regulation, environmental stress responses and developmental controls by HISTONE DEACETYLASE 6. *Plant Cell Physiol* 53, 794-800. [表紙に採用](#)

公募研究代表者 竹澤 大輔(埼玉大学大学院理工学研究科・准教授)(4)

Takezawa D, Watanabe N, Ghosh TK, Saruhashi M, Suzuki A, Ishiyama K, Somemiya S, Kobayashi M, Sakata Y\* (2015) Epoxycarotenoid-mediated synthesis of abscisic acid in *Physcomitrella patens* implicating conserved mechanisms for acclimation to hyperosmosis in embryophytes. *New Phytol* 206, 209-219.

公募研究代表者 太治 輝昭(東京農業大学バイオサイエンス学科・准教授)(2)

Higashi Y, Ohhama N, Ishikawa T, Shimura A, Katori T, Kusakabe K, Yamaguchi-Shinozaki K, Ishida J, Tanaka M, Seki M, Shinozaki K, Sakata Y, Hayashi T, Taji T\* (2013) *Thellungiella salsa* HsfA1d, a protein identified via FOX hunting, functions as a major positive regulator in heat stress response. *Mol Plant* 6, 411-422.

公募研究代表者 千葉 由佳子(北海道大学大学院理学研究院・准教授)(3)

©Chiba Y\*, Mineta K, Hirai YM, Suzuki Y, Kanaya S, Takahashi H, Onouchi H, Yamaguchi J, Naito S (2013) Changes in mRNA stability associated with cold stress in Arabidopsis cells. *Plant Cell Physiol* 54, 180-194. [内藤班員との共同研究](#)

公募研究代表者 西山 佳孝(埼玉大学大学院理工学研究科・教授)(3)

Nagano T, Yutthanasirikul R, Hihara Y, Hisabori T, Kanamori T, Takeuchi N, Ueda T, Nishiyama Y\* (2015) Oxidation of translation factor EF-G transiently retards the translational elongation cycle in *Escherichia coli*. *J Biochem* (in press)

公募研究代表者 堀江 智明(信州大学繊維学部・准教授)(3)

Schroeder JI\*, Delhaize E, Frommer WB, Gueriot ML, Harrison MJ, Herrera-Estrella L, Horie T, Kochian LV, Munns R, Nishizawa NK, Tsay YF, Sanders D\* (2013) Using membrane transporters to improve crops for sustainable food production. *Nature* 497, 60-66.

公募研究代表者 宮地 孝明(岡山大学自然生命科学研究支援センター・准教授)(2)

©Miyaji T\*, Kuromori T, Takeuchi Y, Yamaji N, Yokosho K, Shimazawa A, Sugimoto E, Omote H, Ma JF, Shinozaki K, Moriyama Y\* (2015) AtPHT4;4 is a chloroplast-localized ascorbate transporter in Arabidopsis. *Nat Commun* 6, 5928. [馬班員との共同研究. NHK 等報道、山陽新聞など掲載、Nature Plants, Molecular Plant の News &View に取り上げられた](#)

公募研究代表者 上野 大勢(高知大学教育研究部・准教授)(1)



©Chen Z, Fujii Y, Yamaji N, Masuda S, Takemoto Y, Kamiya T, Yusuyin Y, Iwasaki K, Kato S, Maeshima M, Ma JF, Ueno D\* (2013) Mn tolerance in rice is mediated by OsMTP8.1, a member of the cation diffusion facilitator family. *J Exp Bot* 64, 4375-4387. [馬班員との共同研究](#)

公募研究代表者 小林 優(京都大学大学院農学研究科・准教授)(1)

Oiwa T, Kitayama K, Kobayashi M\*, Matoh T (2013) Boron deprivation immediately causes cell death in growing roots of *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. *Soil Sci Plant Nutr* 59, 621-627.

公募研究代表者 深尾 陽一郎 (立命館大学生命科学部・准教授)(2)

Fukao Y\*, Yoshida M, Kurata R, Kobayashi M, Nakanishi M, Fujiwara M, Nakajima K, Ferjani A (2013) Peptide separation methodologies for in-depth proteomics in Arabidopsis. *Plant Cell Physiol* 54, 808-815.

公募研究代表者 丸山 明子(九州大学大学院農学研究院・准教授)(1)

©Maruyama-Nakashita A\*, Watanabe-Takahashi A, Inoue E, Yamaya T, Saito K, Takahashi H (2015) Sulfur-Responsive Elements in the 3'-Non-Transcribed Intergenic Region Are Essential for the Induction of SULFATE TRANSPORTER 2;1 Gene Expression in Arabidopsis Roots under Sulfur Deficiency. *Plant Cell* 27, 1-18. [山谷班員との共同研究](#)

公募研究代表者 石崎 公庸(神戸大学大学院理学研究科・准教授)(10)

Ishizaki K, Mizutani M, Shimamura M, Masuda A, Nishihama R, Kohchi T\* (2013) Essential role of the E3 ubiquitin ligase NOPPERABO1 in schizogenous intercellular space formation in the liverwort *Marchantia polymorpha*. *Plant Cell* 25, 4075-4084.

公募研究代表者 伊藤 正樹(名古屋大学大学院生命農学研究科・准教授)(6)

©Kobayashi K, Suzuki T, Iwata E, Nakamichi N, Suzuki T, Chen P, Ohtani M, Ishida T, Hosoya H, Müller S, Leviczky T, Pettkó-Szandtner A, Darula Z, Iwamoto A, Nomoto M, Tada Y, Higashiyama T, Demura T, Doonan JH, Hauser MT, Sugimoto K, Umeda M, Magyar Z, Bögre L, Ito M\* (2015) Transcriptional repression by MYB3R proteins regulates plant organ growth. *EMBO J* (in press) [梅田班員、杉本班員、岩元班員、石田班員との共同研究](#)

公募研究代表者 瀬尾 光範(理化学研究所環境資源科学研究センター・ユニットリーダー)(2)

Saito H, Oikawa T, Hamamoto S, Ishimaru Y, Kanamori-Sato M, Sasaki-Sekimoto Y, Utsumi T, Chen J, Kanno Y, Masuda S, Kamiya Y, Seo M, Uozumi N, Ueda M, Ohta H\* (2015) The jasmonate-responsive GTR1 transporter is required for gibberellin-mediated stamen development in Arabidopsis. *Nat Commun* 6, 6095.

公募研究代表者 野口 航(東京大学大学院理学系研究科・准教授)(2)

Funayama-Noguchi S\*, Noguchi K, Terashima I (2015) Comparison of the response to phosphorus deficiency in two lupin species, *Lupinus albus* and *L. angustifolius*, with contrasting root morphology. *Plant Cell Environ* 38, 399-410.

公募研究代表者 本瀬 宏康(岡山大学大学院自然科学研究科・准教授)(5)

Motose H\*, Hamada T, Yoshimoto K, Murata T, Hasebe M, Watanabe Y, Hashimoto T, Sakai T, Takahashi T (2011) NIMA-related kinases 6, 4, and 5 interact with each other to regulate microtubule organization during epidermal cell expansion in *Arabidopsis thaliana*. *Plant J* 67, 993-1005.

公募研究代表者 青山 卓史(京都大学化学研究所・教授)(1)

Wada Y, Kusano H, Tsuge T, Aoyama T\* (2015) Phosphatidylinositol phosphate 5-kinase genes respond to phosphate deficiency for root hair elongation in *Arabidopsis thaliana*. *Plant J* 81, 426-437.

公募研究代表者 梅原 三貴久(東洋大学生命科学部・教授)(2)

Yamada Y, Furusawa S, Nagasaka S, Shimomura K, Yamaguchi S, Umehara M\* (2014) Strigolactone signaling regulates rice leaf senescence in response to a phosphate deficiency. *Planta* 240, 399-408.

公募研究代表者 澤 進一郎(熊本大学大学院自然科学研究科・教授)(12)

Ishida T, Tabata R, Yamada M, Aida M, Mitsumasu K, Fujiwara M, Yamaguchi K, Shigenobu S, Higuchi M, Tsuji H, Shimamoto K, Hasebe M, Fukuda H, Sawa S\* (2014) Heterotrimeric G proteins control stem cell proliferation through

CLAVATA signaling in Arabidopsis. *EMBO Rep* 15,1202-1209. [熊本日々新聞に掲載](#)

**総括班研究分担者 沖 大幹(東京大学生産技術研究所・教授)(2)**

Pokhrel YN\*, Hanasaki N, Yeh P J-F, Yamada TJ, Kanae S, Oki T (2012) Model estimates of sea-level change due to anthropogenic impacts on terrestrial water storage. *Nature Geosci* 5, 389–392.

**公募研究代表者 岩元 明敏(東京学芸大学教育学部・准教授)(4)**

Iwamoto A\*, Kondo E, Fujihashi H, Sugiyama M (2013) Kinematic study of root elongation in *Arabidopsis thaliana* with a novel image-analysis program. *J Plant Res* 126, 187-192.

**公募研究代表者 櫻井 玄(農業環境技術研究所生態系計測研究領域・任期付研究員)(3)**

©Sakurai G\*, Satake A, Yamaji N, Mitani-Ueno N, Yokozawa M, Feugier FG, Ma JF (2015) In silico simulation modeling reveals the importance of the Caspian strip for efficient silicon uptake in rice roots. *Plant Cell Physiol* 56, 631-639. [佐竹班員、馬班員との共同研究](#)

**公募研究代表者 白石 文秀(九州大学大学院農学研究院・教授)(6)**

Iwata M, Sriyudthsak K, Hirai MY, Shiraishi F\* (2014) Estimation of kinetic parameters in an S-system equation model for a metabolic reaction system using the Newton–Raphson method. *Math Biosci* 248, 11-21.

**公募研究代表者 福田 弘和(大阪府立大学大学院工学研究科・准教授)(4)**

Higashi T, Nishikawa S, Okamura N, Fukuda H\* (2015) Evaluation of Growth under Non-24 h Period Lighting Conditions in *Lactuca sativa* L. *Environ Control Biol* 53, 7 -12.

**公募研究代表者 持田 恵一(理化学研究所環境資源科学研究センター・チームリーダー)(3)**

Mochida K\*, Yoshida T, Sakurai T, Yamaguchi-Shinozaki K, Shinozaki K, Tran LS (2013) TreeTFDB: An integrative database of the transcription factors from six economically important tree crops for functional predictions and comparative and functional genomics *DNA Res* 20, 151-162.

**公募研究代表者 横沢 正幸(静岡大学工学系研究科・教授)(1)**

Sakurai G, Iizumi T, Nishimori M, Yokozawa M\* (2014) How much has the increase in atmospheric CO<sub>2</sub> directly affected past crop production? *Sci Rep* 4, 4978. [静岡新聞、中日新聞、日本経済新聞に掲載](#)

## (2) ホームページについて

領域ホームページの URL: <http://bsw3.naist.jp/JFM/>(和文)、[http://bsw3.naist.jp/JFM/English\\_top.html](http://bsw3.naist.jp/JFM/English_top.html) (英文)

当領域では、発足当初の 2010 年 8 月始めに日本語のホームページ(HP)を作成し、2011 年 2 月に英語の HP を開設した。これらを通じて、領域の研究概要、組織、計画班員の研究内容、論文等の研究成果について広報してきた。また、班会議、若手の会、国際ワークショップ、アウトリーチ活動等についても、随時、活動状況について報告してきた。また HP 内に、班員間でシェアできる実験技術・材料の一覧を掲載し、班員間の交流を促進する場を作ってきた。このような情報の共有が具体的な共同研究の発展に結びつき、145 件にのぼる領域内共同研究の増進に貢献していると考えられる。これまで HP へのアクセス数は 35906 件にのぼる。

## (3) 主催シンポジウム

本領域が主催また共催した国際・国際シンポジウムは以下のとおりである。

2015 年 3 月、公開シンポジウム(東京)、「植物環境突破力ー新たなる研究の発展に向けてー」(国内、主催)

2015 年 3 月、日本植物生理学会(東京)、「Epigenetic and transcriptional control of environmental response」(国際、共催)

2014 年 9 月、日本土壌肥料学会(東京)、「植物栄養と数理モデルの接点ー数理モデルで植物栄養の仕組みを理解する」(国内、共催)

2014 年 3 月、日本植物生理学会(富山)、「環境変動に対する植物の生存成長戦略：統合研究の新展開」(国内、共催)

2013年3月、16th International Workshop on Plant Membrane Biology (倉敷)、「Plant power to overcome environments」(国際、共催)

2013年3月、日本植物生理学会(岡山)、「環境と植物—温度・RNA・成長」(国内、共催)

2012年12月、公開シンポジウム(札幌)、「環境突破力!—植物の生存戦略と成長戦略」(国内、共催)

2012年9月、日本植物学会(姫路)、「ゲノム倍加に伴う植物細胞の成長—鍵因子と応用展開」(国内、共催)

2012年8月、日本植物分子生物学会(奈良)、「植物のストレス耐性の基礎研究から応用への展開」(国内、共催)

2012年3月、日本植物生理学会(京都)、「環境変動に対する植物の生存・成長突破力」(国内、共催)

2011年12月、公開シンポジウム(倉敷)、「Strategies of Plants against Global Environmental Change」(国際、主催)

2011年3月、第3回日中植物栄養ワークショップ(倉敷)。(国際、主催)

2010年9月、日本植物学会(愛知県春日井市)、「細胞周期研究から見えてきたDNA複製・修復の統御機構」(国内、共催)

#### (4) アウトリーチ活動

これまでに行ったアウトリーチ活動は以下のとおりである。

小学生田植え・稲刈り教室(芦荻) 2011年6月11日~10月22日 名古屋大学フィールド科学教育研究センター  
東郷フィールド

ひらめき☆ときめきサイエンス KAKENHI ~ようこそ大学の研究室へ~ (経塚)「身近な不思議発見隊 —おコメができるまで大研究—」 2011年8月20日、2012年8月19日、2014年8月24日 東京大学農学部

福島市立三河台小学校での出前授業「おコメ徹底研究」(経塚) 2012年5月18日

福島県立福島高校での講演・座談会「植物科学の魅力、研究者という職業」(経塚) 2012年5月18日

高校生シンポジウム“植物の多様な生存戦略 —東北に植物のチカラを—”(芦荻) 2012年8月6日、東北大学・川内北キャンパス

名古屋大学・生物機能開発利用研究センター公開実験講座~バイオサイエンス・バイオテクノロジーを体験する~(芦荻)  
2013年8月4日、2014年8月3-4日、名古屋大学・生物機能開発利用研究センター

名古屋市鶴舞中央図書館市民講座「植物科学で食糧増産に挑む」(芦荻) 2014年11月24日、名古屋市鶴舞中央図書館

福島県原町第3中学校での出前講義、実験「おコメを知る」(経塚、芦荻) 2014年9月7日

#### ・サイエンスカフェ

2010年9月 第2回東京国際科学フェスティバル「いのちの星 地球」における講演「花の見かけは遺伝子で決まる」(経塚)

2012年7月4日、アルテゴ ドウ ショウズ・名古屋(芦荻)

2012年10月、植物の美を読み解く ~アートとサイエンスの出会い~日比谷図書文化館(杉本)

2013年5月15日、パーク栄・名古屋(木下)

## 7. 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。

本領域では、班会議やホームページを通じた情報交換により、班員間で共同研究の機会を見つける場を数多く提供してきた。特に、研究項目間や、計画班員と公募班員との有機的連携を意識して共同研究を推進していた。これまでのところ、領域内の共同研究は計画班・公募班合わせて136件に上っている。これらの中には、共同研究の成果を論文として発表したもの、学会で発表したもの、実験を遂行中のものなど、様々な段階の共同研究が含まれるが、以下にそれらの連携状況をご紹介します。すでに論文発表は28件ある。

### 共同研究の内訳

①生存戦略研究 & ②成長戦略研究	47 件
①生存戦略研究 & ③モデリング研究	27 件
②成長戦略研究 & ③モデリング研究	12 件
① 生存戦略研究 & ②成長戦略研究 & ③モデリング研究	2 件
②生存戦略研究 & ①生存戦略研究	30 件
②成長戦略研究 & ②成長戦略研究	18 件
計画班員 & 計画班員	30 件
計画班員 & 公募班員	65 件
公募班員 & 公募班員	56 件

### 共同研究の課題

（赤は計画班員、緑は公募班員を示す。）

- ① 馬 & ②梅田：アルミニウムが細胞周期進行に与える影響のイメージング解析
- ① 馬 & ②経塚：ストリゴラクトンの篩管移動
- ①馬 & ①木下：気孔孔辺細胞における遺伝子発現法の開発 (*Plant Physiol* 発表)
- ①馬 & ①上野：マンガン輸送体の機能解析 (*J Exp Bot* 発表)
- ①馬 & ①堀江：イネのナトリウム輸送体 OsHKT1 の免疫染色法を用いた局在解析
- ①馬 & ②石崎：ゼニゴケを用いた植物トランスポーター発現系の開発
- ①馬 & ②本瀬：イネにおける Nim-related kinase (NEK) の機能解析
- ①馬 & ③岩元：アルミニウムが根端成長に及ぼす影響の数理モデル解析
- ①馬 & ①関：酢酸処理によるイネの乾燥ストレス耐性付与の解析
- ①馬 & ①宮地：葉緑体に存在するアスコルビン酸輸送体の解析 (*Nature Commun* 発表)
- ①馬 & ③櫻井：カスパリー線を介したシリコン取り込みの数理学的解析 (*Plant Cell Physiol* 発表)
- ①藤原 & ①内藤 & ③岩元：bor3 変異体の根端成長に関する細胞動力学解析と数理モデル解析
- ①藤原 & ②芦苺：栄養欠乏耐性を付与するイネ野生系統の解析
- ①藤原 & ②梅田：ハウ素が細胞周期進行に与える影響のイメージング解析 (*Plant Cell* 発表)
- ①藤原 & ②経塚：イネの栄養輸送体の発現解析
- ①藤原 & ①深尾：ハウ素輸送体の相互作用タンパク解析
- ①藤原 & ②澤：シロイヌナズナ変異株のゲノム解析
- ①藤原 & ③岩元：根の成長のモデリング
- ①木下 & ①下嶋：シロイヌナズナのホスファチジン酸ホスファターゼ変異体の気孔応答
- ①木下 & ①西村：シロイヌナズナ PP2C 過剰発現体の気孔開閉応答の解析
- ①木下 & ②石崎：ゼニゴケを用いた細胞膜プロトンポンプの進化的解析 (*Plant Physiol* 発表)
- ①木下 & ①下嶋：シロイヌナズナ pah1pah2 変異体における乾燥ストレス耐性機構の解析
- ①木下 & ②本瀬：NimA-related kinases の気孔開閉応答における機能解析
- ①木下 & ③持田：桑の葉における孔辺細胞の SEM 観察
- ①篠崎 & ①太治 & ①関：植物の高温耐性を強化する遺伝子の発見 (*Mol Plant* 発表)
- ①篠崎 & ①深尾：DREB2 の相互作用タンパク解析
- ①篠崎 & ③持田：シロイヌナズナ低温感受性変異体の葉緑体の電顕解析
- ①篠崎 & ①藤原 & ①石田 (喬)：植物の乾燥と高温ストレスに応答する制御ネットワーク
- ①内藤 & ①千葉：シロイヌナズナ CGS 1 遺伝子 mRNA のポリ A 長さの制御機構
- ①内藤 & ①千葉：低温応答における転写後制御機構および翻訳停止と共役した mRNA 分解におけるポリ A 鎖長の解析 (*Plant Cell Physiol, Genes Genet Syst* 発表)
- ①内藤 & ①藤原 & ①千葉：ハウ素応答における転写後制御機構 (*Plant Cell* 発表)
- ①内藤 & ①藤原 & ①千葉 & ③白石：メチオニン生合成制御の数理解析 (*Plant Cell Physiol, BMC Syst. Biol* 発表)
- ①山谷 & ②芦苺：浮き稲の代謝物プロファイリング

- ①山谷 & ①石田：葉の老化時における窒素、炭素の転流とオートファジー—安定同位体とオートファジー不能変異体を用いた解析— (*Plant J* 発表)
- ①山谷 & ①丸山：硫黄欠乏による硫酸イオントランスポーターSULTR2;1 の発現誘導機構の解析 (*Plant Cell* 発表)
- ①山谷 & ③佐竹：イネ穎果へのショ糖転流のモデリング (*Plant Cell Physiol* 発表)
- ①山谷 & ②経塚：イネの腋芽伸長と GS1;2 機能 (*Plant J* 発表)
- ②芦苺 & ①藤原：栄養欠乏耐性を付与するイネ野生系統の解析
- ②芦苺 & ③佐竹：イネの穂への転流モデルについて (*Plant Cell Physiol* 発表)
- ②芦苺 & ①下嶋：イネ耐水性遺伝子の同定
- ②梅田 & ②杉本：核内倍加を制御する因子の発現制御機構の解析
- ②梅田 & ①深尾：タンパク質リン酸化部位の同定
- ②梅田 & ②伊藤 (正)：DNA 損傷応答における MYB 転写因子の機能解析
- ②梅田 & ②澤：線虫の植物感染時における細胞分裂の影響に関する解析
- ②梅田 & ②村田：微生物揮発物質に暴露した植物根の細胞周期
- ②梅田 & ②本瀬：NimA-related kinases の DNA 損傷における機能解析
- ②梅田 & ③岩元：DNA 倍加に関わるシロイヌナズナ変異体の根端成長に関する数理モデル解析
- ②経塚 & ①深尾：腋芽伸長に関わるタンパク質の相互作用タンパク質解析
- ②経塚 & ②澤：イネのストリゴラクトンシグナルに関する突然変異体の単離
- ②経塚 & ①藤原：カドミウム輸送体の調節機構
- ②経塚 & ②芦苺：イネの分けつ機構の解析
- ②杉本 & ②石崎：基部陸上植物における脱分化制御因子 WIND1 の解析
- ②杉本 & ②伊藤 (正) 後期促進複合体 (APC/C) による核内倍加制御
- ②杉本 & ②澤：線虫の植物感染時における多核化に関する解析
- ②杉本 & ②本瀬：NimA-related kinases の核内倍加における機能解析
- ②杉本 & ②本瀬：微小管と細胞周期
- ②杉本 & ③持田：根における葉緑体発達制御機構に関する TEM 構造観察
- ②杉本 & ③持田：シロイヌナズナ遺伝子変異体のトランスクリプトーム解析 (*Plant Cell* 発表)
- ②杉本 & ①馬：植物細胞リプログラミングを引き起こす栄養ストレス
- ②杉本 & ③岩元：GTL1、DF1 の根のメリステム成長制御
- ③佐竹 & ①山谷 & ②芦苺：イネの登熟過程における穎果への窒素流入に関するモデリング研究
- ③佐竹 & ①馬 & ③櫻井：ケイ素輸送モデルの開発とトランスポーターの最適配置に関する数理的解析 (*Plant Cell Physiol* 発表)
- ③佐竹 & ①藤原：シロイヌナズナにおけるケイ素輸送の数理モデル
- ③佐竹 & ①木下：師部転流への FT の関与とモデリング
- ③佐竹 & ①篠崎：ストレス応答に関する転写因子ネットワークダイナミクス
- ③佐竹 & ①内藤：リボソーム翻訳停止プロセスの解明 (*J Biol Chem* 発表)
- ③佐竹 & ①千葉 & ③櫻井：遺伝子情報に立脚した開花予測モデルを開発 (*Nat Commun* 発表)
- ③佐竹 & ①千葉 & ③持田：豊凶現象を引き起こす窒素の役割を開花遺伝子発現解析から解明 (*Ecol Lett* 発表)
- ③佐竹 & ②澤：維管束パターン形成のオーキシンの関与に関するモデリング
- ③佐竹 & ②村田：微生物揮発成分のプレート内拡散に関するモデリング

その他、65 件。



## 8. 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。

総括班経費は以下のように効果的に活用した。

### （1）領域会議の開催

これまでに領域会議を6回開催した。計画班員の持ち回りで、倉敷（2011年6月）、名古屋（2012年3月）、札幌（2012年12月）、仙台（2013年6月）、京都（2014年3月）、東京（2015年3月）の各地で開催し、計画班員と公募班員の全員が研究成果や計画を発表し、交流を深めた。そこから様々な共同研究が生まれた。またその都度、総括班会議も開催し、領域の運営方針などを議論した。その開催経費と旅費を支援した。

### （2）若手の会の開催

「10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況」で詳しく記述されたように、毎年各地で「若手の会」を計5回開催した。その開催経費と旅費を支援した。

### （3）若手研究者の海外渡航経費

14名の若手研究者の海外渡航経費をサポートした。

### （4）国際・国内シンポジウムの開催

「6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況」で詳しく述べたように、本領域が総括班経費で主催または共催の国際・国際シンポジウムは13件あった。

### （5）ニュースレターの発行

これまでにニュースレターを計5回発行した。班員の研究成果だけではなく、解説記事や領域の活動、注目論文のハイライトなどをわかりやすく作成して、全国の関連研究者に送付した。その刊行経費を支出した。

### （6）ストレス評価センター

岡山大学資源植物科学研究所内でストレス評価センターを設けて、総括班経費で班員の研究活動をサポートしてきた。遺伝子組み換え植物の隔離温室を利用した研究所外の班員は5名で、計1215日であった。またレーザーマイクロダイセクションを利用した所外の班員は3名で、計277時間であった。

### （7）共同研究の促進

新領域を形成するために、異なる分野の共同研究を促し、そのための経費を総括班経費から一部支援した。特にモデリング研究を強化するために、総括経費の傾斜配分を行った。

### （8）アウトリーチ活動

本領域の研究成果を社会に広く知ってもらうために、アウトリーチ活動を担当する計画班員を指定し、様々なアウトリーチ活動をしてきた。これまでに市民を対象にした講演会は6回、小学生の体験教室は4回、福島の高校での活動は2回を行った。そのための経費を支援した。

その他にラボジョイントミーティングを開催するための経費を支援した。

その他、共焦点レーザー顕微鏡用のレーザー光源やIR-LEGOシステムは、根における細胞周期進行を経時的にモニタリングするために使用した。アルミニウムやホウ素などのストレスが根の成長に与える影響を細胞周期レベルで解析するために役立った。これらの設備の活用により、馬、梅田、岩本の共同研究を促進することができた。

またマルチモードプレートリーダーは、トランジェントアッセイによる転写因子の活性の測定に使用した。特に、根における細胞分裂と細胞伸長を制御する転写因子の機能解析に使用し、植物ホルモンシグナルとのクロストークの解明に役立った、この設備の活用により、梅田、杉本、伊藤（正）の共同研究を促進することができた。

・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細(計画研究において購入した主要な物品(設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。)について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価(円)	金額(円)	設置(使用)研究機関
22	ICP質量分析装置システム	アジレント・テクノロジー(株)・7700X	1式	23,508,000	23,508,000	岡山大学
	蒸散測定システム	メイワホーヌ(株)・LI-6400XTQ/A	1式	7,905,052	7,905,052	名古屋大学
	ImageQuantシステム	GEヘルスケア・LAS4000	1台	6,291,600	6,291,600	東京大学
	DNA自動分離装置	クラボウ・PI-80X	1台	4,683,000	4,683,000	東京大学
	1480nmレーザ光源	シグマ光機社製・FLS1480-1000	1台	4,588,419	4,588,419	奈良先端科学技術大学院大学
	蛋白質分離用高速液体クロマトグララム	AKTA Purifier UPC10ベースシステム	1式	3,042,367	3,042,367	北海道大学
	ライトキャプチャーII	アトー製・AE-6981FC	1台	2,400,300	2,400,300	名古屋大学
	紫外可視分光光度計	UV-1800・島津	1台	2,260,776	2,260,776	東北大学
	大型恒温振とう培養機	タイテック、BR3000LF	1台	2,142,000	2,142,000	理化学研究所
	23	リアルタイムPCR解析システムアップグレード	BIO-RAD CFX384	1台	5,932,500	5,932,500
純水製造システム		Milli-Q Integral 5L・日本ミリポア	1式	2,914,905	2,914,905	東北大学
全自動核酸抽出機		クラボウ	1台	2,646,000	2,646,000	理化学研究所
共焦点レーザ顕微鏡用レーザー光源		オリンパス社製	1式	2,325,750	2,325,750	奈良先端科学技術大学院大学
リアスライサー		堂阪イーム・PR07	1台	1,496,250	1,496,250	名古屋大学
24	マルチモードプレートリーダー	独国ベルトルトテクノロジ社製・TriStar2	1台	3,633,708	3,633,708	奈良先端科学技術大学院大学
	等電点電気泳動装置	LB942-LFA	1台	1,929,375	1,929,375	東北大学
	人工気象器	プロティアン・i12 IEF・バイオラッド	1台	1,249,500	1,249,500	奈良先端科学技術大学院大学
25	純水製造装置	日本医化器械製作所社製・LH-410S	1台	897,750	897,750	奈良先端科学技術大学院大学
26	人工気象器暗室型	メルクリポア社製・Milli-Q Reference	1台	1,492,560	1,492,560	東京大学

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

**【平成22年度】**

・旅費

国内旅費： 2,777,830 円 (学会、領域班会議、若手の会への参加、研究打合せなど)

外国旅費： 1,200,834 円 (国際学会参加)

・人件費・謝金

研究員給与： 14,960,704 円

研究補助・謝金： 4,693,262 円

・その他

8,020,349 円 (本領域の研究遂行に必須であるため)

(シーケンス解析、ソフトウェア購入、機器の修理・保守契約、英文校閲など)

**【平成23年度】**

・旅費

国内旅費： 5,645,704 円 (学会、領域班会議、若手の会への参加、研究打合せなど)

外国旅費： 4,404,664 円 (国際学会参加)

・人件費・謝金

研究員給与： 47,620,065 円

研究補助・謝金： 9,856,309 円

・その他

7,575,247 円 (本領域の研究遂行に必須であるため)

(クローニング委託、ソフトウェア購入、機器の修理、英文校閲など)

**【平成24年度】**

・旅費

国内旅費： 7,166,230 円 (学会、領域班会議、若手の会への参加、研究打合せなど)

外国旅費： 3,414,790 円 (国際学会参加)

・人件費・謝金

研究員給与： 53,638,356 円

研究補助・謝金： 11,814,587 円

・その他

9,547,543 円 (本領域の研究遂行に必須であるため)

(シーケンス解析、アミノ酸分析、形質転換外注、ソフトウェア購入、機器の修理、論文投稿料など)

**【平成25年度】**

・旅費

国内旅費： 6,193,544 円 (学会、領域班会議、若手の会への参加、研究打合せなど)

外国旅費： 6,207,635 円 (国際学会参加)

・人件費・謝金

研究員給与： 56,437,230 円

研究補助・謝金： 9,375,002 円



・その他

15,919,196 円（本領域の研究遂行に必須であるため）

（イネゲノム変異解析、DNA マイクロアレイ受託解析、シーケンス解析、ソフトウェア購入、機器の修理、論文掲載料、別刷り代、英文校閲など）

【平成26年度】

・旅費

国内旅費： 4,746,721 円（学会、領域班会議、若手の会への参加、研究打合せなど）

外国旅費： 3,265,464 円（国際学会参加）

・人件費・謝金

研究員給与： 52,276,815 円

研究補助・謝金： 10,062,348 円

・その他

16,305,500 円（本領域の研究遂行に必須であるため）

（ハイスペックショットガン解析、次世代シーケンス解析、DNA マイクロアレイ受託解析、ソフトウェア購入、機器の修理、論文掲載料、英文校閲など）

(3) 最終年度（平成26年度）の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

該当なし。

## 9. 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。

本領域が発足して以来、Nature, Nature Communications, PNAS, Plant Cell, Current Biology, Plant Journal, Plant Physiologyをはじめ、植物関連の国際学術誌に発表した論文が559報にのぼり、その多くは関連分野の研究者に引用されている。多くの論文がFeatured paperとして取り上げられ、雑誌の表紙を飾ったものは10報あった。2012年に経塚班員、2014年に篠崎班員と関班員がトムソン・ロイター社の植物・動物科学部門 Highly Cited Researchers に選出された。また2014年に篠崎班員が日本植物学会誌「Journal of Plant Research」に掲載された論文は最も引用度が高い論文として論文賞を受賞した。さらに日本植物生理学会の欧文誌「Plant & Cell Physiology」が2014年に、これまでに発表された8,500編の論文の中から選んだ12篇「Leading paper」の中で、馬、篠崎、経塚班員の論文が選定された。これは関連分野に高いインパクトを与えていることの証拠である。

本領域の研究期間中に、各班員の活躍で日本農学賞をはじめ、数多くの賞を受賞している。10. で述べる若手研究者の各学会での奨励賞受賞以外に、主に以下のような班員による受賞があった。これらの受賞は関連分野への貢献が認められたと言える。

沖 大幹：第16回生態学琵琶湖賞(日本生態学会)、2011年7月

芦荻基行：American Association for the Advancement of Science Fellow (AAAS fellow), 2012年2月

馬 建鋒：第20回木原記念財団学術賞 2012年4月

佐竹暁子：数理生物学会奨励賞 2012年9月

内藤 哲：日本植物細胞分子生物学会学術賞 2012年8月

馬 建鋒：山陽新聞賞(学術功労) 2014年1月

山谷知行：日本農学賞・読売農学賞 2015年4月

芦荻基行：第23回木原記念財団学術賞、2015年4月

また本領域で得た最新の研究成果をシンポジウムの開催、ホームページでの紹介、ニュースレターの発行などを通じて、関連分野の研究者に積極的に紹介することに務めてきた。毎年日本植物生理学会や植物学会、日本土壌肥料学会、日本植物分子生物学会など植物関連学会の年会開催時に班員が異なるテーマのシンポジウムをオーガナイズした。これまでに「6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況」で詳しく記述されているように計13回の国内・国際シンポジウムを主催、または共催した。特に2011年12月に主催した国際シンポジウム「Strategies of Plants against Global Environmental Change」は震災の年にも関わらず、多くの国内外の参加を得た。また本領域のメンバーが中心となってアジアで初めて開催された「16th International Workshop on Plant Membrane Biology」は22カ国から310人の参加者を得た。開催期間中に「環境突破力」のセッションを設け、主に計画班員による発表が行われ、好評を得た。

これまでにニュースレターを計5回発行した。班員の研究成果だけではなく、解説記事や領域の活動、注目論文のハイライトなどをわかりやすく作成して、学内外関係者ならびに各種研究教育機関へ配布し、当領域で展開されている研究活動を広く認知・理解してもらえよう努めた。特に数理モデリングに関する特集記事を組み、当領域の特徴であるモデリング研究が生存・成長班の研究においてどのように活用できるのかを、わかりやすく解説した。研究成果に関するホームページも随時更新し、これまでのアクセス数は3万5千件以上にのぼり、本領域への高い関心度が伺える。

これまでに下記のように「RICE」誌と「Plant & Cell Physiology」誌に本領域の特集号を刊行した。また農芸化学会の「化学と生物」誌に本領域の研究成果をシリーズで2015年8月から紹介する予定である。

RICE

Special Issue 「Abiotic stress in rice」 2012 Guest Editor: Motoyuki Ashikari and Jian Feng Ma

Plant & Cell Physiology

Special Issue 「Modeling Strategies for Plant Survival and Growth」 2015 Guest Editor: Akiko Satake, Gen Sakurai and Toshinori Kinoshita

## 10. 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。

若手育成は本領域の大きな柱の一つと位置づけ、若者の交流を深めるために、毎年各地で「若手の会」を開催してきた。若手による研究発表以外に、毎回若手を中心に様々な企画を行った。第1回目の倉敷（2010年10月）では、モデリング講習会や世界的に著名な研究者による講演（英語）を企画した。第2回目の浜松（2011年10月）では、英文ジャーナルのエディターによる「Writing scientific papers for international journals」や「女性PIへの道」を企画した。また第3回の札幌（2012年7月）では、「論文パブリッシュへの道のり」、第4回の宮城蔵王（2013年11月）では「3世代で語り合う私の研究」、第5回の京都（2014年11月）では、「若者の質問に答えてください」をそれぞれ企画した。いずれも好評を博した。

また若手の海外発表を促すために、14名の若手研究者の海外渡航経費をサポートした。その学会参加報告を領域のホームページ上に掲載している。

若手研究者の授賞と昇任は以下のとおりである。

### 授賞

丸山 明子：日本土壌肥料学会奨励賞、2011年3月

本瀬宏康：平成23年度文部科学省若手科学者賞、2011年4月

西村 宜之：日本植物生理学会奨励賞、2013年3月

山地直樹：日本土壌肥料学会奨励賞、2013年9月

宮地孝明：第85回日本生化学会大会鈴木紘一メモリアル賞、2012年12月

石崎公庸：日本農芸化学会農芸化学奨励賞、2013年3月

佐竹暁子：数理生物学会奨励賞、2013年9月

石崎公庸：日本植物学会 JPR 論文賞、2013年9月

福田弘和：日本生物環境工学会 学術奨励賞、2013年9月

石崎公庸：日本農芸化学会 BBB 論文賞、2014年3月

佐竹暁子：守田科学研究奨励賞、2014年6月

山下由衣：日本植物細胞分子生物学会学生奨励賞、2014年8月

永井啓祐：第126回講演会日本育種学会優秀発表賞、2014年9月

瀬尾光範：植物化学調節学会奨励賞、2014年10月

石崎公庸：日本植物生理学会奨励賞、2015年3月

池内桃子：日本植物学会若手奨励賞、2015年4月

### 昇任・採用

城所 聡：2011年7月、東京大学農学生命科学研究科特任助教から同研究室 助教に昇任

杉本慶子：2012年4月、理研ユニットリーダーからチームリーダーに昇任

本瀬 宏康：2013年1月、岡山大学大学院自然科学研究科助教から准教授に昇任

溝井 順哉：2013年2月、東京大学農学生命科学研究科特任助教から同研究室 講師に昇任

石崎公庸：2013年4月、京都大学大学院生命科学研究科助教から神戸大学大学院理学研究科准教授へ昇任

岩元明敏：2013年4月、東京学芸大学教育学部助教から准教授に昇任

山地直樹：2014年4月、岡山大学資源植物科学研究所助教から准教授に昇任

諸橋賢吾：2014年4月、理研研究員から東京理科大学准教授に昇任

下嶋美恵：2015年4月、東京農工大学助教から准教授に昇任

高橋直紀：2013年7月、奈良先端大学院大学博士研究員から同大学助教に採用

Christian Breuer：2014年4月、理研研究員からケルン大学独立PIに採用

黒羽剛：2015年2月、名古屋大学生物機能開発利用研究センター博士研究員から東北大学理学研究科助教に採用

## 11. 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。

### 巖佐 庸（九州大学理学研究院・教授）

新学術領域研究「植物の環境突破力」（領域代表馬建鋒教授）は、植物の環境ストレス耐性の分子生物学的基盤を解明するとともに、数理モデリングを行うことによって新しい研究分野を確立しようとする目的を持って進められた。

研究対象はさまざまであったが、非常に優れた実験生物学の研究者が計画班員にそろっていた。その年齢も中堅から若手といってもよい研究者が中心であった。多数の女性研究者が班員に含まれ、中心的な役割を果たしたことも、本領域研究の特色である。社会へのアウトリーチ活動や大学院生などへの教育セッションも熱心に行われた。

他方、分子生物学的な理解をもとに数理モデルを構築し、生命科学に新しい側面を切り開く、という側面に関しては、当初は1名が計画班員として含まれていただけであった。しかしその後、研究テーマとする公募班員が採用され、それぞれに努力をされ、いくつかの優れた成果が上がった。

本新学術研究でなされた数理モデリングでは、フラックスの記述と制御、法則性の解明が中心である。最適化を取り込んだものもあり、それらは植物の環境応答の適応性を理解する上で役立つ。他方で、実験的研究が遺伝子ネットワークの解明を行っていることを考えると、数理モデリングも遺伝子の発現や制御の組み込まれたものであることが望ましいが、分子メカニズムを取り込んだ数理モデルは本新学術領域ではなされなかった。次のステップ、発展版としてそのような研究展開を期待したい。

生命科学の新学術研究において数理モデリングを行うとうたった領域をいくつか知っているが、多くの領域でモデリングの役割や特色について領域運営の責任者が理解しておられるとは思えないことが多かった。モデルは単なる飾りに扱われていて本質的役割を果たすとは評価されていないと感じた。本新学術研究はそれらとは全く対照的で、数理モデリングの強み、有効性を正確に理解している分子生物学者の方が多数含まれていた。馬領域代表をはじめ、新学術研究を運営された中心メンバーが、数理モデリングの役割についてよく理解し、リーダーシップを発揮されたためである。その背景には植物生理学という分野が定量的な理解にもとづいて発展していたという学問の歴史があるのかもしれない。その結果、分子生物学的手法で実験をすすめている大学院生や博士研究員などの若手研究者にも、数理モデリングを研究で使いたいとする希望者が多く育っている。

今後、分子生物学を中心とする生命科学において、数理科学との融合や協同が盛んになると予想されるが、馬プロジェクトは、新しい研究領域を確立させることができた新学術領域研究の最大の成功例の一つと数えられるであろう。

### 寺島一郎（東京大学大学院理学系研究科・教授）

新学術領域研究「植物環境突破力」では、植物のストレス応答の分子基盤を明らかにし、それをもとに厳しい環境に耐性を持つ植物を創ることを目指して研究が進められてきた。このテーマは、地球環境の激変下にあって、間もなく100億人に達しようとしている人類に十分な食糧を提供し、森林や草原などの生態系の機能を維持するために、最も重要なものである。本新学術領域研究では、馬建鋒代表をはじめとする農学系の研究者と、基礎植物科学系や数理生物学の研究者が緊密に協力し、この課題に正面から取り組んだ。基礎系の分野で行われるストレス応答研究の中には、非現実的な条件下で植物の挙動を解析するものもある。このような研究は、実際の環境ストレス耐性植物の創出のためには意味のないものである。本領域では、そのような懸念のある研究や、植物材料の栽培に問題がある研究が、厳しく批判されていたのが印象的であった。このような教育的な議論が意識改革を生み、結果として地に足の着いた一流の研究成

果に繋がったと思う。議論の中心を担った総括班メンバーの努力を多としたい。

本領域研究では、目標の一つであった数理的手法の導入にも大きな成果があった。数理生物学者と実験科学者が緊密に協力することで、単に現実を説明するだけのレベルを超えた、予測力・説明力があり信頼性の高いモデルがいくつも完成した。

若手の育成にも大きな成果があった。「若手の会」は毎年開かれ、回を重ねる毎に若手の研究者がたくましく育っていることが実感された。若手同士ではなく、シニアの研究者も親しくかつ厳しく若手と議論していたことが印象に残った。総括班の予算によって各班の若手を国際学会で発表させたことも優れた企画だったと言えよう。

本新学術領域によって、多くの質の高い成果が生まれた。同時に、農学系、基礎系、数理系の研究者が太いパイプが結ばれ、学際的研究のさらなる発展の基盤も築かれた。本領域研究のテーマは5年で終わるようなものではない。この基盤を生かしたプロジェクトの継続が強く望まれる。

### 中村研三（中部大学応用生物学部・教授）

本新学術領域研究は、植物科学の中でも進展著しい植物の環境応答の研究分野に、数理モデリングの手法を導入して新しい展開を図ろうとするところに斬新さがあり、そうした方向への強い期待を受けてスタートした。当初こそモデリングを取り入れた研究は多くなかったが、領域内での講習会などを重ね、班員による優れたモデリングの研究成果の発表もあって、モデリングへの理解は広まり、それを積極的に取り入れた研究は着実に増加した。環境変化への個体レベルの応答といった問題から地球規模の環境変動の農業生産への影響といったレベルまで、モデリングやシミュレーションの重要性は今後益々高まると思われ、本領域研究の当初の目的は達成されたと評価できる。

本領域研究では、数理分野の研究者と実験科学者との間はもとより、班員の間での共同研究が非常に活発に行われた。植物の環境応答の研究分野は、従来から我が国が世界をリードする分野の一つであったが、こうした活発な共同研究を通して本領域研究の中では環境応答の分子機構から個体や生態のレベルでの環境応答、それらの数理モデルと実に幅広い研究のスペクトラムが追求され、多くの優れた研究成果が生み出された。また、発足当初から学会等でのシンポジウムや国際シンポジウムを開催してモデリング研究の普及や研究成果の公開を活発に進めてきたが、様々なアウトリーチ活動や若手の会なども数多く企画・開催し、班員と共同研究者や学生らだけでなく、子供達を含めた多くの一般の方々に巻き込んだ領域活動が活発に行われ、若手後継者の育成や一般の方々に植物科学の面白さ、身の回りの生活における重要性などの理解を深める上でも大いに貢献したと評価できる。

このように、本領域研究では領域代表のリーダーシップのもとで若手を中心とした幹事グループの領域活動への強い熱意が発揮され、「環境突破力」というインパクトあるネーミングに相応しい精力的な領域研究活動が行われて多くの更なる発展を期待させる成果が生み出された。