

戦略的創造研究推進事業  
CREST・さきがけ複合領域  
領域中間評価用資料

研究領域「二酸化炭素資源化を目指した  
植物の物質生産力強化と生産物活用の  
ための基盤技術の創出」

研究総括：磯貝 彰

2016年3月



## 目次

1. 研究領域の概要 .....	1
(1) 戦略目標 .....	1
(2) 研究領域 .....	4
(3) 研究総括 .....	4
(4) 採択課題・研究費.....	5
2. 研究総括のねらい.....	9
3. 選考について .....	11
4. 領域アドバイザーについて(CREST・さきがけ共通).....	14
5. 研究領域の運営について.....	16
6. 研究の経過と所見.....	18
(1) さきがけ .....	18
(2) CREST .....	24
7. 総合所見 .....	30



## 1. 研究領域の概要

### (1) 戦略目標

「二酸化炭素の効率的資源化の実現のための植物光合成機能やバイオマスの利活用技術等の基盤技術の創出」

#### ① 具体的な達成目標

本戦略目標は、主に光合成やバイオマス生産に着目した植物科学研究を基盤に、その研究成果を活用し、二酸化炭素を資源化する革新的技術、バイオマスを効率的に利活用する技術の開発を、異分野連携の下に進めていくものであり、これまでの技術を飛躍的に向上させるとともに、新たなブレークスルーとなる革新的技術を獲得するための取組である。

本戦略目標下の研究によって、光合成機能の解明による光合成効率の向上やバイオマスの増産、バイオリファイナリー技術の多様化・高度化等、植物を通じた二酸化炭素の資源化のための基盤技術の創出を実現する。これらの研究成果を大学等の研究ネットワークや企業等による実証・実用化研究につなげることにより、高い二酸化炭素固定機能や劣悪環境耐性等を有するバイオマス作物の開発、新たなバイオマス分解微生物・酵素等による効率的バイオマス利活用技術の確立等の実現を目指す。

具体的な研究の内容としては以下の研究を想定する。

- 1) 光合成機能の統合的理解と、それに基づく光合成効率向上のための基盤技術の創出
- 2) 多様な環境に適応した多様な植物の機能解析・育種研究を通じた、炭素貯留向上・高品質バイオマス開発のための基盤技術の創出
- 3) バイオマス分解・代謝の解明や、ゲノム合成技術等の活用を通じた、バイオマス利活用の効率向上・高度化のための基盤技術の創出

#### ② 目標設定の背景及び社会経済上の要請

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次評価報告書では、20世紀後半以降の地球温暖化は、人類が化石燃料を消費するなどして排出した温室効果ガスの増加が原因である可能性が非常に高いとされ、今後も温度上昇が続くことが予測されている。このような地球規模の温暖化を抑制し、化石燃料に依存しない持続可能な社会を構築するためには、再生可能エネルギーの確保や物質生産システムの抜本的転換が必要である。

このため、

- 1) 「科学技術に関する基本政策について」に対する答申(2010年12月 総合科学技術会議)の「エネルギー供給の低炭素化」の「バイオマス利用等の再生可能エネルギー技術の研究開発を戦略的に推進する」。
- 2) 新成長戦略(2010年6月 閣議決定)の「I. グリーン・イノベーションにおける国家戦略」の木質バイオマスの熱利用、空気熱利用、地中熱・太陽熱の温水利用等の普及。

さらに、下記等の政策が決定された。

3) 成長戦略実行計画(工程表)の「低炭素型産業の立地推進、世界拠点化に向けた取組の推進」「資源エネルギー確保戦略の推進」「革新的技術の開発の前倒し、重点化(CCS(二酸化炭素回収・貯留)、原子力、次世代自動車、バイオリファイナリー、洋上風力等)」。

更に、同時期には下記の 2 つの計画も策定され、その実現に向けて、戦略目標「二酸化炭素の効率的資源化の実現のための植物光合成機能やバイオマスの利活用技術等の基盤技術の創出」が設定された。

4) 「2011 年度科学・技術重要施策アクション・プラン」(2010 年 7 月)の「グリーン・イノベーション」における、「2. 3 課題解決に向けた取組」の「食料と競合しない木質系バイオマスの大量導入を目指して革新的製造技術の研究開発」や、施策パッケージ「木質系バイオマス利用技術の研究開発」の「木質バイオマス利用技術のための目的基礎研究(文部科学省)」。

5) バイオマス活用推進基本法に基づき、2010 年 12 月に閣議決定された「バイオマス活用推進基本計画」における「バイオマスの活用の推進に関し、政府が総合的かつ計画的に講ずべき施策」の「バイオマス又はバイオマス製品等を供給する事業の創出等」「バイオマス製品等の利用の促進」や、「バイオマスの高度利用に向けて中期的に解決すべき技術的課題」の「木質系バイオマスといったセルロース系バイオマスの効率的な糖化技術、エタノール以外の様々な化成品原料を生産する発酵技術等の開発」「バイオマスプラスチックの更なる普及に向けて、低コスト製造技術、耐熱性・耐久性を向上させる技術等の開発」。

本戦略目標を達成するためには、最先端研究基盤事業「低炭素社会実現に向けた植物研究推進のための基盤整備」で整備された基盤等を用いて、これまでモデル系生物を用いて行われてきた様々な生命機能の研究成果を活用し、効率的な二酸化炭素資源化やバイオマス増産に適した多様な生物種の解析等を展開すること。バイオマス利活用技術に関しては、バイオ燃料創出等の先行事業の研究成果を最大限に活用するとともに、課題等を抽出して、長期的な展望を持つ基礎に立ち返った技術開発を推進することが求められた。

本戦略目標に係る研究開発は、植物科学から工学までの広い研究分野を含む。このため、本戦略目標下の研究を進めるに当たっては、理学系、農学系、工学系の異分野研究の融合を図ることが必要である。また、「大学発グリーンイノベーション創出事業」により構築される大学等の研究ネットワークとの連携も図り、植物の光合成機能やバイオマスに関する研究成果を共有することで、二酸化炭素資源化技術開発を加速させる。

さらに CREST・さきがけ複合領域「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイオエネルギー創成のための基盤技術の創出」を始めとする関連研究領域や先端的低炭素化技術開発(ALCA)の関連研究などとも連携し、事業全体として効果的・効率的に研究を推進することが必要である。

### ③目標設定の科学的裏付け

IPCC 第4次評価報告書では、人為的二酸化炭素排出量のおよそ2割が森林減少等によるものと試算されており、地球温暖化の適応・緩和策の中でバイオマスエネルギー政策の相乗効果やバイオマスの将来性が高く評価され光合成による二酸化炭素資源化技術の高度化が低炭素社会実現に大きく寄与することが予想されている。また、IEAの世界エネルギー展望2010においても、バイオ燃料利用が急増していくと予想されている。

光合成の代謝ネットワークやバイオマス生産に関わる生長制御や形態形成の解析、さらに植物の環境応答やストレス耐性研究など日本の植物研究分野における基礎科学技術水準は欧米と同等以上である。また、アジア諸国もバイオマス生産、作物生産の向上を目指した基盤研究に力を入れており、アジアにおける日本のリーダーシップを確保していくことが必要である。

日本においては、モデル系生物を利用して有用物質生産に関わる代謝物の網羅解析であるメタボロームや生長制御に重要な役割を果たすホルモンを対象にしたホルモノームなどの統合解析に大きな進展が見られることから、今後のバイオマス増産技術等への寄与が期待されている。さらに、乾燥、高温、塩害、酸性土壌などの劣悪環境耐性の研究や病害虫への感染耐性の研究でも世界をリードしており、その研究成果を発展させることが期待されている。

特に二酸化炭素の資源化については、これまでモデル実験系で大きな成果を上げている葉緑体機能の解明を基にした光合成効率の向上に関わる研究や、二酸化炭素固定とバイオマス生産に関わる代謝制御ネットワークの解明と利用が有効であることが予想されるが、これらの知見がエネルギー、バイオマス作物に関する非モデル植物の遺伝子組換えなどにはまだ実現されていない。実用化のためには導入遺伝子を適切かつ厳密に制御するゲノム設計の技術が必要であり、今後バイオマス生産向上に向けて導入遺伝子のゲノム設計や形質転換効率の向上を実現するための研究開発が必要である。また、植物の多様性に基づくゲノム情報解析を基に環境変化に対応した有用な遺伝子ネットワークの解明と利用も重要な長期的課題である。

さらに、二酸化炭素の資源化のためには二酸化炭素を固定化したバイオマスの利活用に向けた研究が重要であり、バイオマスのエネルギー利用に関わる研究とともに、石油で作られている化学製品原料の代替研究が重要である。ポリ乳酸等のバイオプラスチックは実用化されているものの、コピー機やパソコン等の筐体に使用できる耐熱性のある新規バイオプラスチックの実用化は進んでいない状況である。これらの研究開発を実施することで、環境研究分野で国際的なイニシアティブを取ることが可能となる。

(国が定めた戦略目標より抜粋・引用)

## (2) 研究領域

「二酸化炭素資源化を目指した植物の物質生産力強化と生産物活用のための基盤技術の創出」(2011年度発足)

本複合領域では、植物の光合成能力の増強を図るとともに、光合成産物としての各種のバイオマスを活用することによって、二酸化炭素を資源として利活用するための基盤技術の創出を目的とします。

具体的には、植物の物質生産能力の基本である光合成の制御機構を光合成産物の代謝や転流、及び窒素同化などとの相互作用も含めて統合的に理解し、それに基づいて光合成能力を向上させる基盤技術についての研究を推進します。また、植物の多様な環境への適応機構の解明に基づいた光合成能力向上や炭素貯留能向上、及び有用バイオマス産生のための基盤技術の創出を目指します。さらには、植物の物質生産能力を最大限に活用するためのバイオマス生合成・分解機構の理解とその活用技術の研究を推進します。これらの研究を推進するにあたり、二酸化炭素を資源化する革新的技術の開発までを見据えた、植物科学研究とバイオマス利活用研究の連携や融合にも取り組みます。

(2011年度募集要領より引用)

## (3) 研究総括

磯貝 彰(奈良先端科学技術大学院大学 学長/奈良先端科学技術大学院大学 名誉教授)

(4)採択課題・研究費

表1 さきがけ

(百万円)

採択年度	研究者	研究(開始)／中間評価時の所属・役職	研究課題	研究費*
2011年度	岩井 優和	(理化学研究所基幹研究所 特別研究員)／カリフォルニア大学・ポスドク	ライブセルイメージングによる光環境適応機構の実態解明	39
	上田 貴志	東京大学大学院理学系研究科 准教授	膜交通の機能変化による高機能植物の開発【5年型】	66
	小田 祥久	(東京大学大学院理学系研究科 助教)／国立遺伝学研究所新分野創造センター 准教授	細胞内自己組織化制御と生体ナノマシンの開発による新規木質バイオマス素材の創出	40
	笠原 博幸	(理化学研究所植物科学研究センター 上級研究員)／東京農工大学グローバルイノベーション研究機構 キャリアチャレンジ教授	オーキシンによる植物の器官形成制御技術の開発	40
	小林 高範	石川県立大学生物資源工学研究所 特別研究員	植物の鉄センシング機構解明による生産力の強化	40
	内藤 健	(農業生物資源研究所遺伝資源センター 任期付研究員)／同上 主任研究員	Vigna 属野生種群が独自に獲得した耐塩性機構の解明【5年型】	76
	中尾 佳亮	(京都大学大学院工学研究科 講師)／同上 教授	木質系バイオマスを利用する高付加価値多置換芳香族化合物の精密合成手法の創出	40
	中島 敬二	(奈良先端科学技術大学院大学バイオサイエンス研究科 准教授)／同上 教授	植物生産能の高度利用に向けた「植物 iPS 遺伝子」の応用展開	40
	中道 範人	(名古屋大学高等研究院 特任助教)／名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所 特任准教授	バイオマス生産性の向上を指向した概日時計のシステム生物学	40
三輪 京子	(北海道大学創成研究機構 特任助教)／北海道大学地球環境科学研究院 准教授	肥料有効利用型植物の作出基盤	40	

2011 年度	山口 雅利	(埼玉大学総合研究機構環境科学研究センター 准教授) / 埼玉大学研究機構環境科学研究センター 准教授	転写抑制因子を活用したリグノセルロース低含有植物の作出	40
2012 年度	秋山 拓也	東京大学大学院農学生命科学研究科 助教	化学反応性に則したリグニン高分子構造の解析	28 (1.8)
	有村 慎一	東京大学大学院農学生命科学研究科 准教授	植物ミトコンドリアゲノム人為改変技術と雄性不稔植物の作出	43 (3.2)
	千葉 由佳子	(北海道大学創成研究機構 特任助教) / 北海道大学大学院理学研究院 准教授	シヨ糖過剰ストレス耐性に関わる転写と mRNA 分解の協調制御	41 (1.0)
	塚越 啓央	(名古屋大学大学院生命農学研究科 特任助教) / 名古屋大学遺伝子実験施設 特任講師	バイオマス生産性を支配している細胞機能転換転写制御ネットワークの人工構築	40
	中島 清隆	(東京工業大学応用セラミックス研究所 助教) / 北海道大学触媒科学研究所 准教授	固体ルイス酸による高効率バイオマス変換: 植物由来の炭化水素類の必須化学資源化	40
	永野 惇	(京都大学・日本学術振興会特別研究員) / 龍谷大学農学部 講師	フィールドオミクスによる野外環境応答の解明	50 (9.8)
	平野 展孝	日本大学工学部 准教授	セルロース/ヘミセルロース/リグニン分解酵素群の集積・近接化による協働作用の創出	35
	藤本 龍	(新潟大学大学院自然科学研究科 助教) / 神戸大学大学院農学研究科 准教授	雑種強勢の分子機構の解明とその高バイオマス作物への活用	41 (1.0)
松本 謙一郎	北海道大学大学院工学研究院 准教授	光合成と連動するバイオポリマー合成系の構築	32 (1.3)	

2012 年度	山口 礼子	(京都大学大学院生命科学研究科 助教)	miRNA による植物の年齢制御メカニズムの解明と応用展開	0**
2013 年度	安達 俊輔	(農業生物資源研究所 日本学術振興会特別研究員) / 東京農工大学グローバルイノベーション研究機構 特任助教	葉内 CO <sub>2</sub> 拡散を促進する葉肉組織形態の改良を通じたイネ光合成能力の飛躍的向上	40
	岩本 政雄	農業生物資源研究所植物科学研究領域 主任研究員	包括的物質輸送促進による生産強化技術の開発	36
	梅澤 泰史	東京農工大学農学研究院 准教授	アブシシン酸シグナル伝達の中枢ネットワークを標的とした次世代型環境ストレス耐性植物の創成	39 (2.8)
	笠原 竜四郎	(名古屋大学大学院理学研究科 研究員) / さきがけ専任	イネ生殖分子機構の解明と操作を基盤としたアポミクシスへの挑戦	40 (0.5)
	草野 都	(理化学研究所環境資源科学研究センター 上級研究員) / 筑波大学生命環境系 教授	低窒素で持続可能な二酸化炭素資源化のための中心代謝バランス制御機構の解明	33 (1.4)
	西條 雄介	奈良先端科学技術大学院大学バイオサイエンス研究科 准教授	パターン受容体ネットワークによる高精度・持続型の植物防御システムの開発	49 (8.9)
	橘 熊野	群馬大学理工学研究院 助教	フルフラールを出発原料とする汎用高分子モノマーライブラリの構築	43 (3.4)
	豊田 正嗣	(ウィスコンシン大学・日本学術振興会 海外特別研究員) / さきがけ専任	植物の全身性クロストークを支える長距離・高速カルシウムシグナルの解明と応用	40
	松下 智直	九州大学大学院農学研究院 准教授	光環境に応じた光呼吸の新規適応機構の解明とその改変による植物生産性の向上	50 (9.6)
	山口 有朋	(産業技術総合研究所コンパクト化学システム研究センター 主任研究員) / 産業技術総合研究所化学プロセス研究部門 研究グループ長	木質バイオマスの全炭素成分有効利用を目指した触媒化学変換技術の開拓	40

2013 年度	矢守 航	(千葉大学環境フィールド科学センタ ー 助教)／東京大学大学院理学系研 究科 准教授	変動する光環境下における 光合成制御メカニズムの解 明と応用展開	40
			総研究費	1,301

2011年度採択の網掛け課題は終了した課題

\*研究費：2015年度上期までの実績額に2015年度下期以降の計画額を加算した金額

( )内の数字は増額支援額(内数、10万円まで表示)

\*\*：採択後、自己都合により研究中止

表2 CREST

(百万円)

採択 年度	研究代表者	研究(開始)／中間評価時の 所属・役職	研究課題	研究費*
2011 年度	鹿内 利治	京都大学 大学院理学研究 科 教授	構造と進化の理解に基づく光合成の 環境適応能力の強化	408
	田中 歩	北海道大学 低温科学研究 所 教授	葉緑体機能改変によるステイグリー ン植物の創出	157
	彦坂 幸毅	東北大学 大学院生命科学 研究科 教授	将来の地球環境において最適な光合 成・物質生産システムをもった強化植 物の創出	228
	渡辺 隆司	京都大学 生存圏研究所 教授	電磁波応答性触媒反応を介した植物 からのリグニン系機能性ポリマーの 創成	276
2012 年度	浅見 忠男	東京大学 大学院農学生命 科学研究科 教授	植物ホルモン間クロストークと化 学・生物学的制御技術を利用したバイ オマス高生産性植物の開発	296
	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	DNA 倍加誘導系の確立による高バイ オマス植物の創出	219
	重岡 成	近畿大学農学部 教授	シンク／ソース同時改良による植物 生産性強化の基盤開発	312
	田口 精一	北海道大学大学院工学研究 院 教授	植物バイオマス原料を利活用した微 生物工場による新規バイオポリマー の創製および高機能部材化	230
	堤 伸浩	東京大学大学院農学生命科 学研究科 教授	高速ジェノタイピングを利用したエ ネルギー作物のテーラーメイド育種 技術の開発	453

2013 年度	芦荊 基行	名古屋大学生物機能開発利 用研究センター 教授	作物の地下茎による栄養繁殖化に向 けた基盤技術の開発	398
	磯貝 明	東京大学大学院農学生命科 学研究科 教授	新規セルロース系ナノ素材の表面構 造および集積構造制御による炭素マ テリアルストリームの創成	240
	大西 康夫	東京大学大学院農学生命科 学研究科 教授	高性能イミダゾール系バイオプラス チックの一貫生産プロセスの開発	372
	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	エピゲノム制御ネットワークの理解 に基づく環境ストレス適応力強化お よび有用バイオマス産生	364
			総研究費	3,953

\*研究費：2015年度上期までの実績額に2015年度下期以降の計画額を加算した金額

## 2. 研究総括のねらい

二酸化炭素の削減は、地球規模の課題である。この対策としては化石資源から、特にエネルギーを産生する際発生する二酸化炭素を削減するという方向と、二酸化炭素を資源として消費するという2つの方向がある。後者の方向には植物の持つ光合成機能の活用が不可欠である。光合成では、二酸化炭素を出発原料として太陽エネルギーを用いてそれを還元し、炭素-炭素結合から成る有機化合物を生成することができる。こうした炭素-炭素結合の形成は、現在研究が進められている人工光合成でもまだできていない植物の持つきわめて優れた能力である。こうした視点に立つとき、光合成により生成されたエネルギーレベルの高い有機化合物を燃焼などによって熱エネルギーに変換するのではなく、一つのバイオマス資源として活用し、それを化学的・工学的、あるいは生物学的なプロセスにより分解・変換・再結合して工業製品原料や有用ポリマーなどを作り出す科学技術の確立は、長期的に見れば二酸化炭素削減のためのきわめて重要な対策であり、それを実現する科学技術の確立は重要、且つ、戦略的に推進すべき研究課題となる。本報告書にも既にかけてきたように、我が国の植物科学分野の基礎研究力が日本の科学研究の中でも特に優れたものであり、その多くの成果が世界の第一級のものであることは、よく知られていることである。しかし、こうした基礎的な分野での科学力が、イノベーションにつながる科学技術の確立にまだ十分貢献できていないという問題があるのは事実である。それにはいくつかの原因があるが、その一つは、基礎科学が対象としている植物がモデル植物であり、作物や実用植物を対象とした研究が少ないこと、また、実験室と野外での栽培条件が大きく異なること、さらには、農学や理学分野の研究者と工学分野の研究者との連携が十分ではなく、基礎的な知見が産業技術にまで発展していないことなどがある。また、これまでに活用が期待されている技術の中で重要なものである遺伝子組換え植物の活用について、社会的な許容がまだ十分でないこともこれに加えてある。この最後の問題はこれからも重要な

問題として、社会的な解決が期待されるところではある。

こうした中、本複合領域は、二酸化炭素を出発点として、最終的に、工業製品を生み出す技術開発の基盤を確立することも目的として設定された。しかしながら、モデル植物の結果を実用植物へと展開しようとする際に問題となる、実験に要する時間が圧倒的に長いということは、植物の基礎研究が産業化への応用研究に展開されていない理由の一つであり、研究の推進に現実的には大きな障害となっているのは事実である。本複合領域においても、最長5年という研究期間で、1世代1年という実用植物を対象としてどのくらいの繰り返し実験が可能かは、その成果をさらに次のステップに展開しようとするとき、やはり、現実的には大きな制約となる。すなわち、本複合領域での研究において、二酸化炭素から出口の工業製品の生産まで、一つの研究課題で実施することはきわめて困難である。こうしたことを考慮した上で、今回、CREST とさきがけのハイブリッド型研究領域として、本複合領域が設定される機会に、研究総括としては、以下のようなことを想定した。(1)本CREST研究領域では、理農工の連携によって、できるだけ入り口から出口に至る幅広い分野の研究を展開する研究課題を採択し、新たな融合研究への展開を図る。また、光合成研究は、本複合領域の基盤にあたる分野であり、日本の優れた研究力が活かせるような体制をとる。(2)本さきがけ研究領域では、この分野の将来の技術展開に至る可能性を秘めた、それぞれの分野で先端的、且つ、挑戦的な研究を採択し、研究を推進するとともに、本CREST研究課題との連携を図り、総合的にこの分野の研究の推進を図る。そのためには、本さきがけ研究領域では、全体研究の推進に貢献しうるような、新たな方法論を対象とした研究も重視する。このような方針で、それぞれの研究課題が、二酸化炭素から工業製品に至る研究を通して展開するのではなく、領域全体として見たとき、入り口から出口までが通して研究されている状況をとることとした。当然のことながら、モデル植物だけを対象とした研究ではなく、作物、バイオマス植物などを対象とした研究を主体とし、また、バイオマスからそれらを分解して、工業製品を作成する研究においても、実バイオマスを材料とした研究を展開することを重視した。こうして、本複合領域の研究の主要な柱として、(1)光合成の効率化により、植物の二酸化炭素資源化能力を高める研究、(2)植物(作物、バイオマス植物)の環境耐性力(病虫害耐性、高低温耐性、乾燥耐性、塩耐性など)を高め、バイオマスとしての植物生産量を増強する研究、(3)バイオマスを効率よく分解し有用成分を作り出す研究、並びにそれらを効率よく変換する研究、またバイオマス、あるいはバイオマス由来の成分を材料として有用な工業製品やバイオプラスチックなどを作成する研究、の3つの分野の研究を展開することとした。それらの具体的な内容は「3. 選考について」以下に記すこととする。このようにして、本複合領域の研究によって、理学や農学分野での日本の高い植物科学研究力を、工学などの応用化学分野の研究と結びつけ、二酸化炭素を資源化し、それを活用するシステムを構築し、この分野のイノベーションにつなげることを目指した。

また、本複合領域では、優れた研究成果を生み出すこととともに、広範な植物科学研究

者のネットワーク形成、また、この分野の将来を担うべき研究者および研究者集団の育成も、領域運営にあたっての一つの大きな目的とした。その際重要なことは、本複合領域が CREST とさきがけからなるハイブリッド型の研究領域であることである。そこでは、本複合領域がバーチャルな研究所としての機能を発揮し、個々の研究課題がそれぞれの目的とする成果を上げ、また、CREST とさきがけそれぞれの領域全体として期待される成果を上げるだけでなく、この 2 つの研究領域の相乗効果を期待しなければならない。そしてそれによって本複合領域に期待される上記の多様な目的を達成することが必要である。そこで、本複合領域では各種の活動(研究会、研究発表会など)を両者一体として行い、領域内での研究の交流や協力体制を強化するとともに、本 CREST 研究領域の中で活躍する若手研究者もまた、この分野の将来を担うべき研究者として位置づけ、さきがけ研究者との交流を図るようにした。また、「最先端・次世代研究開発支援プログラム」の研究者の中でこの領域の研究分野にかかわる研究者もさきがけ研究者と交流することを支援した。さらに、本複合領域の一年前に発足した、「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイオエネルギー創成のための基盤技術の創出」(藻類バイオエネルギー)複合領域とは、光合成という視点では、共通の課題をもつこと、さらに本複合領域と同時に策定された「植物 CO<sub>2</sub> 資源化研究拠点ネットワーク (Network of Centers of Carbon Dioxide Resource Studies in Plants: NC-CARP)」プロジェクトがバイオマスの活用について具体的なイノベーション目指しており、本複合領域とも関連が深いことからこれらの複合領域、プロジェクトとの連携も図った。これらは、すべて、植物科学全体として、それを基盤としたイノベーション創成を目指すネットワークを作り上げるためである。

### 3. 選考について

#### (1)選考方針

本複合領域は、植物の光合成能力の増強を図るとともに、光合成産物としての各種のバイオマスを活用することによって、二酸化炭素を資源として利活用するための基盤技術を創出することを目的に開始されたものである。具体的な研究分野としては、(1)光合成制御機構の統合的理解と光合成能力向上についての研究、(2)環境適応機構の解明に基づく光合成能力向上や炭素貯留能向上及び有用バイオマス産生についての研究、(3)バイオマス生合成・分解機構の理解とその活用技術の 3 つの分野の研究を対象としている。そして、選考方針としては、さきがけが個人型研究であり、CREST がチーム型研究であることから、部分的に違いがあるものの、基本的には、(1)学術的に秀でていること、(2)植物の光合成能力や物質生産能力を活用する研究提案となっていること、(3)二酸化炭素の資源化という課題の解決に向けて達成しようとする目標が明確に設定されていること、を重視した。これに加えて、本さきがけ研究領域では、(4)提案内容と実施体制の独立性や独創性、挑戦性についても重視した。また本 CREST 研究領域では、(4)研究代表者のリーダーシップのもと、

チーム全体で達成しようとする目標が明確であることも重視した。また、理学・農学・工学の研究者が「植物の物質生産力を活用して二酸化炭素を資源化する」という共通の目標のもとに協働・連携したチームを編成した研究提案を期待した。次年度以降の採択では、既に選考された課題との関連、あるいは、全体として、3つの研究分野がバランス良く配置されるよう、配慮した。

審査は領域アドバイザーによる書面審査による第一段審査とヒアリングによる第二段審査によって行った。なお、本さがけ研究領域では、応募件数がきわめて多いため、第一段審査としての書面審査において、外部の専門家の協力も得た。

具体的な研究の内容としては以下の研究を想定して選考を行った。

- ①光合成機能の統合的理解と、それに基づく光合成効率向上のための基盤技術の創出
  - ・比較ゲノム解析を利用した葉緑体代謝システムの解析
  - ・炭素代謝過程の改良と二酸化炭素固定効率の向上
- ②多様な環境に適応した多様な植物の機能解析・育種研究を通じた、炭素貯留向上・高品質バイオマス開発のための基盤技術の創出
  - ・メタボロームなどの統合オミックス解析による代謝制御ネットワークの解析
  - ・C3 光合成機能の改良と、C3 型光合成生物への C4 光合成導入
  - ・光合成シンク/ソースの最適化研究
  - ・ゲノム設計・分子育種によるバイオマス生産性向上、新規バイオマス植物の創出
- ③バイオマス分解・脂質合成システムの解明を通じた、バイオマス利活用の効率向上・高度化のための基盤技術の創出
  - ・バイオマス分解微生物育種研究、新たな酵素の開発による、バイオマス利活用効率の向上
  - ・植物育種とマテリアル化学・工学と連携した新素材開発研究
  - ・ポリ乳酸等続く新しいバイオプラスチック素材の創出、高機能化

## (2) さきがけ

本さがけ研究領域においては、1年目は、121件の応募課題から、11件(うち2件は、5年の研究期間)を採択した。それらは、光環境適応や環境耐性、栄養、概日時計、バイオマス産生など二酸化炭素資源化を実現するための多方向からのアプローチに関する研究提案であった。なお、植物バイオマス分解および分解物を有用物質合成の原料として使用するための分離・精製に関わる部分を対象とする研究提案が多くはなかったため、それらは次年度以降に期待した。2年目は116件から10件(うち1件は採択後辞退)を採択した。この年度は非常に広い分野からの提案があり、様々な切り口からバイオマス増産を目指す植物研究だけでなく、基礎研究の成果を応用していく上で欠かせない視点を与える研究や、バイオマスの構造解析と分解、活用技術の研究についても優れた提案を採択することが出来た。3年目は124件の応募課題から11件を採択した。この年度も非常に広い分野からの研

研究提案があり、前回までにはない新しい切り口からの研究も採択することができた。また、2011, 2012 年度の不採択理由を参考にした上で、再提案された結果、本年度採択となった研究提案もあった。

以上のように、2011 年度の研究領域発足以来、3 回の公募で 32 件の研究課題を採択した（実施に移されたものは 31 件）。そして、各研究者が、多様な観点から植物の生産力強化と生産物活用という研究領域の目標に取り組んでくれるものと期待した。また、本複合領域の特徴の一つは、CREST とのハイブリッド型であるので、さきがけ研究者のみならず、CREST 研究者とも交流を広げて大いに活躍し、将来において本複合領域を担っていく研究者に成長するとともに、その成果がこの分野の“さきがけ”となることを期待した。

### (3) CREST

本 CREST 研究領域については、1 年目は、53 件の応募から 4 件を採択した、それらは、光合成の環境適応機構の改変、葉緑体の機能維持と強化、高二酸化炭素濃度・高温の環境においても生産性を維持できる植物の作出、および植物が生産する物質から機能性ポリマーを合成する技術の開発、というそれぞれに異なったアプローチで二酸化炭素の資源化に取り組む提案であった。また、この年度は植物バイオマスの利活用において不可避な課題である、植物バイオマス分解および分解物を有用物質合成の原料として使用するための分離・精製に関わる部分を対象とする研究提案が多くはなかったので次年度以降に期待した。2 年目の選考では、31 件の応募課題から 5 件を採用した。ここでは、植物ホルモン作用の遺伝的・化学的制御、細胞サイズ増大の人工的誘導、二酸化炭素固定機能（ソース機能）と光合成産物の貯蔵機能（シンク機能）の同時強化、植物成分からポリマーを合成する微生物工場の構築、ゲノム情報を活用したバイオマス作物育種技術の開発、というそれぞれに異なったアプローチで二酸化炭素の資源化に取り組む研究提案を採択することができた。3 年目は、46 件の応募課題から 4 件を採択した。それらは、イネ科作物への地下茎増殖能の付与、エピゲノム制御による環境ストレス適応力の強化、植物成分からの高性能プラスチック合成、新規セルロース系素材の開発、という目標を掲げる研究提案を採択した。

こうして、2011 年度の研究領域発足以来、3 回の公募で 13 件の CREST チームを採択した。戦略目標と本複合領域が掲げる、光合成能強化、バイオマス生産性向上、バイオマス利活用、の 3 つの分野に多方面からアプローチする研究体制を整えることができた。各チームが研究代表者のリーダーシップのもとに研究を進め、理学・農学・工学領域の研究者が集まる本複合領域のネットワークを生かし、植物の物質生産から植物バイオマスの活用技術までを見通すことができる共働・連携研究を進めていくことを期待した。

#### (4) 募集活動

本複合領域の課題募集にあたっては、選考方針で述べた具体的に想定される研究内容に沿った課題の応募を促すため、多くの植物科学研究者が参加する「植物科学シンポジウム」(2011年12月2日)で領域の全体像を紹介するとともに、関連する分野の学会などを通じて周知活動を行った。また最終年の募集を前に、2013年4月6日には、JSTにおいて本複合領域のミニシンポジウムを開催し、宣伝に努めた。その結果、多様な分野から、多くの応募があり、図1に示すように、選ばれた課題が領域全体をカバーしている。

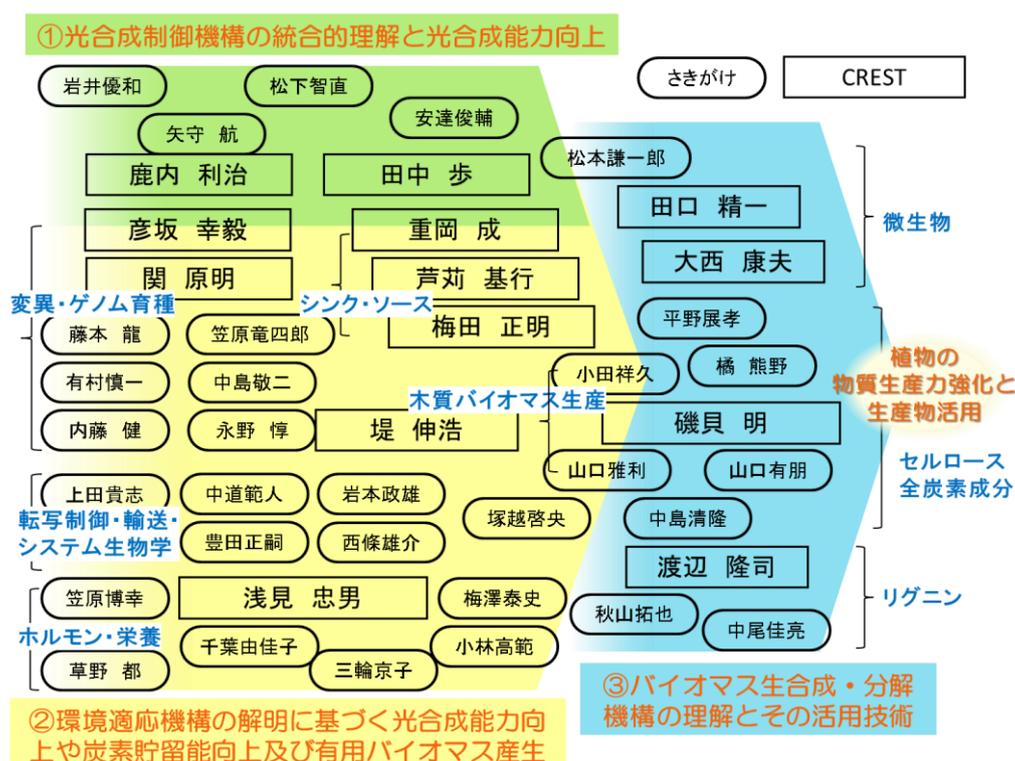


図1 二酸化炭素資源化研究領域実施課題分布

#### 4. 領域アドバイザーについて(CREST・さきがけ共通)

本複合領域がカバーする研究分野は、光合成からバイオマスの生産増強、さらに、バイオマスを活用した生産技術基盤の開発と、二酸化炭素から工業製品まで、きわめて幅広い。そのため、これらの全領域をカバーしうるように多様な専門分野の研究者11名を領域アドバイザーとして委嘱した。その際、それぞれの専門分野で研究実績、また、評価者としての実績のある研究者を選考した。また、本複合領域は、理学、農学、工学の融合を図ることも重要であり、領域アドバイザーとしての、こうした所属にも配慮した。さらに、シニアの研究者のみならず、若手研究者、および、女性研究者、民間企業の研究者からも著名な研究者を選考した。以下、領域アドバイザーの所属・職、主要な経歴、専門分野を下記の表に示す。

表3 領域アドバイザー一覧

領域アドバイザー名	中間評価時の所属 経歴	役職	任期
坂 志朗	京都大学大学院エネルギー科学研究科	教授	2011年8月～
	ダイセル化学工業(株)総合研究所 主任研究員	バイオマスのトポ化学、 バイオエネルギー学	
佐々木 卓治	東京農業大学総合研究所	教授	2011年8月～
	(独)農業生物資源研究所 理事	作物ゲノム学、植物分子生物学	
佐藤 文彦	京都大学大学院生命科学研究所	教授	2011年8月～
	京都大学農学部農芸化学科 教授	植物細胞分子生物学、 植物分子細胞育種学	
篠崎 一雄	理化学研究所環境資源科学研究センター	センター長	2011年8月～
	(独)理化学研究所植物科学研究センター センター長	植物分子生理学、植物ゲノム 機能学	
田中 良和	サントリーグローバルイノベーションセンター(株)研究部	上席研究員	2011年8月～
	サントリーホールディングス株式会社植物科学研究所 所長	植物バイオテクノロジー、 植物二次代謝	
土肥 義治	高輝度光科学研究センター	理事長	2011年8月～
	(独)理化学研究所 理事	生分解性高分子	
西澤 直子	石川県立大学生物資源工学研究所	所長、教授	2011年8月～
	東京大学大学院農学生命科学研究科教授	植物栄養学、新機能植物開発学、植物細胞工学	
長谷 俊治	大阪大学 蛋白質研究所	教授	2012年6月～
	大阪大学蛋白質研究所 所長、教授	生物化学、植物生理学	
東山 哲也	名古屋大学 WPI トランスフォーマティブ生命分子研究所	教授	2011年8月～
	名古屋大学大学院理学研究科 教授	生殖分子情報学(植物生殖における細胞間シグナリング)	
福田 裕穂	東京大学大学院理学系研究科	科長、教授	2011年8月～
	東北大学理学部教授	生物学、植物生理学	
山谷 知行	東北大学研究推進本部 URA センター	特任教授	2011年8月～
	東北大学大学院農学研究科 教授	植物分子生理学、植物栄養学	

横田 明徳	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	2011年8月～ 2012年4月
	(財)地球環境産業技術研究機構 主席研究員	植物分子生理学	

## 5. 研究領域の運営について

既に「2. 研究総括のねらい」に記述したように、本複合領域の特徴は、研究内容としては二酸化炭素から工業製品までの3つの分野からなる長いプロセス、そして研究チーム構成としては、CRESTとさきがけのハイブリッド型であることである。そのため全体としてみれば、個人型研究から大型のチーム型研究までが含まれ、また研究対象分野も、光合成という基礎的な分野から微生物工学や化学プロセスによる工業製品の作成まで幅広い。こうした領域の特性を生かしつつ、且つ、それぞれの研究が発展するよう努めることが研究総括としての責任である。また、研究成果のみならず、植物科学研究領域のネットワーク形成や今後この領域を担う中心的研究者、若手研究者の育成も、本複合領域では目的の一つとして考えている。こうした本複合領域の目的の達成のため、領域の運営にあたってはCRESTとさきがけを一体として考え運営することを基本方針とした。そして、異なる分野の研究者間での相互理解を図る中での共同研究などの推進、共通した分野の研究者間での研究情報の交換や共同研究などの推進を通じて、領域内全体として相互支援が行われ研究が推進されること、また、若手研究者が活躍し研究者ネットワークが形成されることを心がけた。さらには成果の情報発信という観点から、アウトリーチ活動や企業への情報発信や連携なども積極的に進めた。また国策として実施されている関連分野の研究領域、研究プロジェクトなどとの連携も図ることとした。領域の運営にあたっては、適宜開催された領域アドバイザー会議での議論や事務局等の意見も取り入れつつ、研究総括として判断し、いろいろな施策を行ってきた。

まず、領域の連携施策としては、具体的には、年度ごとの研究成果発表会はCRESTとさきがけの合同領域会議とし、プログラムも研究分野ごとに整理して開催した。これとは別に、年に一度さきがけ単独の領域会議を泊まりがけで開催したが、ここでは本CREST研究領域で共同研究者として研究を実行している若手研究者も同時に参加することを推奨し、相互の研究の理解と情報交換、若手研究者のネットワーク形成に努めた。また本さきがけ研究領域の研究者の間で、いっそうの研究交流を図り、それぞれの分野の研究者ネットワークを形成することを目的として、2014年度からさきがけ研究者を研究分野別に5つのグループに分け分野ごとの勉強会を開催した。この勉強会には本CREST研究領域の研究者を含めた特別講師を呼ぶなど、最先端の研究情報を交換するとともに、領域会議という全体の中での短時間の発表では行えない濃密な研究内容の紹介・討論を行うことが出来た。この分野別勉強会は「藻類バイオエネルギー」のさきがけ研究者にも参加を呼びかけ、関連の研究領域との連携を図っている。なお、2015年度には既に2011年度採択(3年型)課題は研究期間を終了しているが、これらの研究者もさきがけ研究者という位置づけで、合同領域

会議、およびさきがけ領域会議への参加を呼びかけた。その結果多くの 2011 年度採択課題のさきがけ研究者が参加し発表を行った。

さらに、これからの植物科学の応用の中での重要課題である「データ科学の発展と植物科学との融合」についてのワークショップを開催し、さきがけと CREST の研究領域のこの分野の研究者および外部の研究者を呼んで研究交流を行った。また、本 CREST 研究領域のいくつかの研究課題の中でストリゴラクトンを一つのキーワードとしている研究チームがあることから、「ストリゴラクトン研究会」を開催することとし、これまでに 2 度開催した。2014 年度には 4 チームから、また 2015 年度には 3 チームからチーム間の壁を超えて当該研究者が集まり、最先端の研究の紹介と意見交換を行った。また、2015 年度には、本 CREST 研究領域の光合成関係の 2 つのチームが合同で研究連絡会議を実施した。他の国策でのプロジェクトとの連携では 2013 年度に NC-CARP と共同で国際シンポジウムを開催した。本シンポジウムでは海外からのこの分野の著名な研究者を招待し、世界での研究動向についての情報交換を行うことが出来た。こうした連携推進施策により、さきがけと CREST のそれぞれの研究領域の枠を超えていろいろな形の共同研究が行われ本複合領域全体の活性化に貢献している。

研究の進捗状況の把握と指導については、本 CREST 研究領域では領域アドバイザーの中からその分野に詳しい委員を選び、課題担当アドバイザーとして位置づけ、領域会議やチームごとの研究連絡会議で、研究の進捗状況の把握と研究方向などについてのアドバイスを行ってきた。なお年に 1 度から数回行われているチーム連絡会議に際しては、原則的に研究総括と担当アドバイザーが出席している。また必要に応じて研究環境や新規購入機器類の状況も把握すべく研究室を視察している。本 CREST 研究課題の中間評価は領域アドバイザー全員で行い、進捗状況や今後の方向について意見交換した。その結果、優れた研究については今後の研究の方向性や展開方法などについて示唆し、また進捗状況の思わしくない研究については、研究を集中化することや特定の課題の中止を含む研究内容の縮小を勧告した。こうした評価は、後述するように次年度予算に反映させた。本さきがけ研究領域については研究開始時に研究総括と事務局でサイトビジットを行い、本さきがけ研究課題の趣旨について研究者の上司にあたる方に説明するとともに研究環境を視察した。本さきがけ研究課題の進捗状況の把握と指導については、領域会議の際に、研究の進め方、材料や方法などに関して、各領域アドバイザーが専門の立場から具体的なアドバイスをを行った。またさきがけ研究者には本 CREST 研究領域のシニアの研究者からもいろいろなアドバイスがあり、各研究者はそれらを取り入れることで研究を進めて行った。こうした意見交換の場はさきがけ研究者にとって、研究室に籠もってはいは得られなかった貴重な経験であったはずである。これもハイブリッド型の領域運営の効果である。

予算については、本 CREST 研究領域では採択課題の研究計画の策定時及び各年度に十分内容を検討して配分額を決定した。そして各年度に、総括裁量経費として確保しておいた予算から、それぞれの研究の進捗状況についての評価も含め考慮したうえで、優れた研究

をいっそう推進するために研究途中で必要となった機器類の購入経費などを配分した。また 2015 年度においては、これらの申請に対して JST からの追加配分を得ることも出来た。その主要なものは、形質評価用無人ヘリコプターシステム、高解像度画像撮影装置、液体クロマト/質量分析装置 (LC/MS)、低温下マイクロ波反応装置、低照射量電子回折記録システム、ゲル浸透クロマトグラフィー装置などである。その他、領域内での共同研究の推進や国際交流への支援としても総括裁量経費として配分した。一方、中間評価で研究の進捗状況にやや問題がある課題については、研究計画の縮小・集中化を図り、翌年度以降の予算を減額した。本さがけ研究課題の研究加速のための追加予算申請にあたっては、毎年 2 度の領域会議や報告書から研究の進行状況を把握し、優れた研究を行っている研究者を優先して、その研究環境で不足している機器類の購入などを研究総括として推薦した。また 2015 年度については、さがけ研究者の間での共同研究の推進のための予算や国際共同研究のための予算を追加配分することも出来た。こうした中で特記すべきものとしては永野惇への新たな植物栽培装置の試作開発費支援がある。これによって、同氏が本複合領域の研究の中で明らかにしてきた野外環境での遺伝子発現の微細な日変動や季節変動を、実験室レベルで再現できるような植物栽培装置を作り上げることが出来た。これは本さがけ研究領域の一つの大きな成果でもある。

人材の輩出や育成については、さがけ研究者および、本 CREST 研究領域の中での若手の共同研究者の動向が重要であるが、合計 31 名のさがけ研究者の中で、数多くの研究者が各種の学会賞などを受賞し、また、きわめて多くの研究者が上級の研究者ポストを獲得している。更に、本 CREST 研究領域の各研究チームに参画する若手研究者も、数多く上級ポストなどを獲得している。このように、本複合領域ではさがけ研究者を始め、若手の優れた人材を多数育てることが出来たと考えている。

## 6. 研究の経過と所見

### (1) さがけ

表 4 論文・発表と特許出願件数

(2015 年 10 月 1 日現在)

さがけ	論文			特許			口頭発表		
	合計	国内	国際	合計	国内	国際	合計	国内	国際
2011 年度採択	68	5	63	4(2)	3(1)	1(1)	170(50)	112(25)	58(25)
2012 年度採択	32	0	32	1(0)	1(0)	0( )	137(54)	97(44)	40(10)
2013 年度採択	29	1	28	2(0)	2(0)	0( )	94(31)	59(17)	35(14)
領域合計	129	6	123	7(2)	6(1)	1(1)	401(135)	268(86)	133(49)

(括弧内：特許は登録数、口頭発表は招待講演数を、内数で記載)

本さきがけ研究領域 31 課題のうち既に昨年度で 9 課題が終了し、本年度で 9 課題が終了予定である。また、来年度で終了予定の課題は 13 課題で、それをもってすべての課題の研究期間が終了する。これらの課題の大部分は予定通りあるいは予定以上の成果を上げている。その成果としての論文発表数などを表 4 にまとめた。ここでは先ず研究総括のねらいから見た研究成果などの総合的な状況を示しておく。

本複合領域は二酸化炭素資源化に向けての植物による二酸化炭素の固定から植物バイオマス生産、植物バイオマスの活用という一連のプロセスの中で、それぞれの場に焦点をあてた新たな技術基盤の開発につながるような先端的、且つ広範囲の課題を含んでいる。その中で研究者はそれぞれの研究環境にふさわしい研究体制を構築し、また研究費を有効に活用して、研究を発展させるために最大限の努力をしてきた。植物を対象とした研究としては、3 年間という期間では成果を見定めるには決して十分な長さとはいえない。本複合領域で得られた成果もその意味ではまだ途中段階のものが多いことは事実である。しかし、31 の研究課題の多くは研究総括としてのねらいを十分に達成してきていると判断している。それらは当初の研究目標を達成し基礎研究として新しい知見を数多く得たばかりでなく、将来の二酸化炭素資源化への基盤技術に貢献しうる新たな手法を明確に示して、技術開発の基盤作りに貢献したことによる。特にさきがけ研究が個人型研究であることから、その研究手法・研究成果などが一つの起点となって将来の総合的な大型研究につながるような成果が数多く得られたことは特筆に値する。それらのうち特に優れたものとしては、以下のようなものがあげられる。まず、永野惇の環境変動の少ない実験室レベルでの研究を環境変動の大きい野外での研究に発展させるための新たな研究手法に関する数理統計的な研究である。また、内藤健、小林高範らの環境ストレス耐性にかかわる遺伝子群や植物の生産性の増強に貢献しうる遺伝子等の解明は、今後の植物バイオマスの増産に向けた基盤技術の確立の重要なターゲットとなる。また、中道範人の時計遺伝子の発現を制御する化合物の発見は、植物生産の増強に関し新たな展開をもたらすと考える。小田祥久は新規な木質バイオマス素材を作成することを目指し、壁孔形成などを自在に制御しうる技術を開発することが出来た。さらには、秋山拓也のリグニンの微細構造の研究の成果は、これまでに植物バイオマスとして活用が十分にされてこなかったリグニンの活用について今後大きな基盤的な視点を与えるものである。また上記の者以外にも、岩井優和、上田貴志、中尾佳亮、有村慎一、中島清隆、橘熊野、矢守航の各氏の研究成果は優れたものである。こうした成果はそれぞれの研究分野でも高く評価されており、2011 年度採択課題を中心に数多くの国際誌に発表され、また国際学会での招待講演なども多く、国際的にも第一級の研究成果として認知されている。なお、2012、2013 年度採択課題については、まだ優れた成果が論文として発表されていないものもあるが、現在、その準備を進めているところである。

なお、こうした本さきがけ研究課題が直ちに新たな生産プロセスにつながることは、植物科学の分野では多くは期待できないが、次の大型研究などにつながり発展させることによって、新たなプロセス開発につながることを期待できる。そしてそれはこれまでには十

分には開発されてこなかった新たな二酸化炭素資源化の科学技術となり、化石資源に依存してきた社会システムを再生可能な二酸化炭素を基礎とした社会システムへ変換するという大きな社会的な課題に貢献しうるものと考えている。しかし、そのためにはまだ少し時間がかかると考える。

また、本複合領域ではこの領域の将来の主導的研究者の育成とそのネットワークの形成をも目指した。次代の植物科学を担う研究者の育成という点では、さきがけ研究者の中の以下のような形でのポストの獲得や昇進があった。助教(特任助教)から准教授(特任准教授)が7名、特任助教から特任講師が1名、学振特別研究員から講師(特任助教)が2名、特任准教授(任期付き研究員)から准教授(主任研究員)が1名、准教授(上級研究員、主任研究員)から教授(グループ長)が4名、講師から教授が1名。さらにこれを年度別で見ると、2011年度採択研究者11名中9名、2012年度採択研究者9名中5名、2013年度採択研究者11名中4名が昇任(年度内の予定も含む)している。また、これまでに15件の各種の学会賞などの受賞があり、そのうち文部科学大臣若手研究者賞(2件)、日本学術振興会賞(1件)、日本農学進歩賞(1件)が含まれている。こうした成果はさきがけ研究者として優れた研究者を思考し得たということもあるが、この研究期間での研究成果が評価された結果でもあるとして、本複合領域が人材を多数育てることが出来た証拠でもありと考えている。また、さきがけ研究者の間での共同研究やCREST研究者との共同研究が数多く展開された。さらには、本複合領域の数人のさきがけ研究者が中心になって本複合領域外の研究者にも呼びかけ、「バイオマスイノベーション若手の会」を自主的に結成し、2013年度から毎年シンポジウムを開催している。このように本複合領域内外で植物科学研究者のネットワーク作りが進んできたことは、先の若手研究者育成の成果と併せ本複合領域のねらいの一つが達成されつつあることを示している。

なお、さきがけ研究ではかなり挑戦的な課題も重要な課題であるとして採択した。そうしたものの中には、必ずしも期待された成果が得られていないものもある。その一つの理由に植物、特に作物や樹木、あるいは実用植物を材料とした場合には一つの実験に時間がかかることがある。そうしたあまり進展しなかった課題も本複合領域採択を一つのきっかけにして研究を継続することにより新たな成果につながって行くであろうと考えている。その意味では、本複合領域により今後の研究への端緒を得ることが出来たことはひとつの成果であると考えている。

また、本研究の中からその研究成果を基礎にそれを発展させるために、あらたなCREST研究領域へ採択されたもの、あるいは他の戦略的競争的資金を得たものなどがあり、具体的な二酸化炭素資源化に向けた科学技術システムの開発に向けて研究を継続発展させることが期待されている。今後も次々に本さきがけ研究領域での成果を基礎に次の研究費の獲得につながる研究者が数多く出てくることを期待され、それによって次代の主導的な研究者に成長するとともに、この分野のイノベーションにつながる科学技術を開発していくことが期待される。

以下、多くの優れた研究成果の中から特筆すべき事例を紹介する。

・永野 惇 研究者「フィールドオミクスによる野外環境応答の解明」

本研究課題では、まず野外トランスクリプトームデータと気象データとを統計モデリングにより統合的に解析する手法(フィールドオミクス)を開発し、野外におけるイネの葉のトランスクリプトーム変動における体内時計、環境要因、日齢の影響を定量的に明らかにした。さらにフィールドオミクスに量的遺伝学を組み合わせるための基盤技術(多検体・低コスト・安定 RNA シーケンス(RNA-seq)ライブラリ調整法、高速解析プログラム)の開発と概念実証を進めた。これらの基盤技術を用いて、イネを材料とした実証研究を行った。その結果、少数の遺伝子が品種間で異なるパラメータをもつことがわかった。今後は、染色体断片置換系統(CSSL)の各系統のジェノタイプを考慮した解析を行うことで、品種間のパラメータの違いの原因と考えられるゲノム領域の特定と、トランスクリプトームの設計が可能になると考えられる。

並行して、野外での複雑な変動を再現しつつ高度にコントロールが可能なPC制御高機能グロスチャンバ(SmartGC)を開発した。このSmartGCを用いて野外で見られたなだらかな気温・光変化を再現したところ、トランスクリプトームの変化を野外で見られたものに近づけることが出来、野外と実験室の違いをもたらす大きな要因の一つは光、気温の変化パターンであるということを示した。

・内藤 健 研究者「Vigna 属野生種群が独自に獲得した耐塩性機構の解明」

マメ科植物について、種々のストレス環境にある野生種を材料とした遺伝学的な解析から、各種のストレス耐性にかかわる遺伝子群を明らかにし、それらを非生物的ストレス耐性植物の開発に活用するため、*V. marina*、*V. riukiensis* および *V. trilobata* のそれぞれについて、F<sub>2</sub> 集団の作成と評価、およびマイクロサテライトマーカー(SSR マーカー)を用いた連鎖解析による量的形質遺伝子座(QTL)の同定およびゲノム解読を行った。

*V. marina* については、寄与率約 50%の巨大耐塩性 QTL を同定した。さらに、Illumina HiSeq2000 を用いて全ゲノムを解読し、RAD-seq 法による F<sub>2</sub> 集団のジェノタイピングを行い、マーカー数 1,295 の高密度連鎖地図を作成することに成功した。

*V. riukiensis* については、2つの耐塩性 QTL を同定した。さらに、RNA-seq 法によるトランスクリプトーム解析を行い、アズキにおいては塩ストレスによって多数の遺伝子の発現が変動するのに対して、*V. riukiensis* においては発現が変動する遺伝子の数が限定的なことを明らかにした。これは、アズキにとってのストレスとなる条件が、適応種の *V. riukiensis* にとってはストレスではないことを示唆していると考えられた。

*V. trilobata* については、海岸型と内陸型で遺伝的にも耐塩性に関して明確に分化していることを明らかにした。

・小林 高範 研究者「植物の鉄センシング機構解明による生産力の強化」

鉄イオンを吸収しにくい塩基性土壌などで十分に生育する植物を育成するための方策として、鉄センサータンパク質候補の機能を明らかにし、その活用によって、鉄吸収を可能とする植物を作成することを目的に研究を進めた。

その過程で、イネの鉄欠乏誘導性 RING-finger 型ユビキチンリガーゼを 2 種類同定し、OsHRZ1、OsHRZ2 と命名した。これらが鉄および亜鉛と結合し、ユビキチン化活性を持つことを証明した。これらの発現を低下させたイネは鉄欠乏耐性と鉄蓄積を示し、鉄の吸収・移行を担う鉄欠乏誘導性遺伝子の発現が鉄十分条件で亢進していたことから、これらは鉄欠乏応答を負に制御する因子であり、鉄センサーの候補分子と考えられた。更に、非形質転換イネおよび上記 HRZ の発現を低下させたイネを用いてマイクロアレイ解析とプロテオーム解析を行った結果、イネ根の鉄欠乏応答には転写制御とタンパク質レベルの制御の両方が重要であることが示唆された。

・中道 範人 研究者「バイオマス生産性の向上を指向した概日時計のシステム生物学」

シロイヌナズナの概日時計機構に関わる転写抑制因子である Pseudo-Response Regulator 5 (PRR5) の分子機能解析を進め、PRR5 タンパク質内に、DNA 領域との相互作用に必要なタンパク質ドメインを明らかにした。さらに PRR5 に直接制御される約 60 個の遺伝子を見いだした。この中には、光周性花成、組織の伸長、そして低温ストレス応答の鍵として働く転写因子をコードしている遺伝子 (CDF family, PIF family, DREB1 family) が見いだされた。また PRR5、PRR7、PRR9 によるこれら遺伝子の抑制は、日周的模式の形成に必須であることが分かった。以上の解析により、時計機構から時計出力への時間情報の伝達の仕組みの一部が具体的に明らかになった PRR は維管束植物に高度に保存されているため、PRR を機能欠損されることで、開花遅延、組織伸長、乾燥ストレス耐性、そしてバイオマス生産性の向上などの有用形質を他の植物においても付与できる可能性がある。そこで優性機能喪失型の PRR の作製を試み、シロイヌナズナにおいてバイオマス生産性を向上させることができた。一方、PRR5 をイネにおいて過剰発現させると、バイオマス生産性が向上した。植物種によってバイオマス生産性を向上させる PRR の利用法が明らかとなった。

・小田 祥久 研究者「細胞内自己組織化制御と生体ナノマシンの開発による新規木質バイオマス素材の創出」

壁孔形成などを自在に行いうる技術を開発し、新規木質バイオマス素材を作成することを目的に、二次細胞壁の壁孔に局在する因子をスクリーニングし、ROPGEF4 (ROP GTPase 活性化因子)、ROPGAP3 (ROP GTPase 不活化因子)、活性型 ROP11 (ROP GTPase) および Kinesin-13A を同定した。これらの遺伝子の詳細な機能解析により、ROPGEF4 と ROPGAP3 の働きによって局所的に ROP11 が活性化し、細胞膜ドメインを形成することを突き止め

た。さらに、活性化した ROP11 が MIDD1-Kinesin-13A 複合体を細胞膜ドメインにリクルートすることにより、局所的に表層微小管の脱重合を促進し、壁孔の形成をもたらすことを明らかにした。一方、表層微小管はその側面において、活性型 ROP11 の局在を制限していることが判明した。このように活性型 ROP11 と表層微小管が排他的に相互作用することにより、壁孔の形態が制御されていることが示唆された。そこで、これらの因子の一過的な過剰発現および発現抑制を試み、壁孔のサイズおよび密度、形態を一過的に改変することに成功した。壁孔の形態をより柔軟に改変するために、さらにスクリーニングを行い新規の細胞骨格付随タンパク質を同定した。この発現レベルを制御することにより、螺旋型に近い二次細胞壁パターンを実現した。このように、二次細胞壁の沈着パターンを制御する分子機構を明らかにするとともに、二次細胞壁の沈着パターンを大幅に改変することに成功し、本研究課題の目標の大部分を達成した。

・秋山 拓也 研究者「化学反応性に則したリグニン高分子構造の解析」

本研究課題では、リグニン高分子を切断する際に成分分離や低分子化の要になると想定される部分構造として、ジエノン型構造および、高分子の分岐点の候補構造の解析を行った。これに加え、リグニン構造の樹種間における多様性とその規則性について調べ、以下の研究結果を得た。スピロジエノン構造は、0.1M 塩酸、室温の温和な酸処理条件下で低分子化し、ジアリールプロパン構造へ変換されることが、モデル化合物を用いた実験で明らかとなった。これにより、スピロジエノン型構造が高分子内部にある場合、高分子を切断し低分子化に寄与する反応が、比較的温和な塩酸処理によって進行することが示唆された。高分子分岐点の候補であるビフェニル構造の含有量について、ニトロベンゼン酸化法を精査して分析手法を確立し、針葉樹スギリグニンでは、少なくとも芳香核の 6.7% (下限値) がビフェニル型構造として含まれることが示された。もう一つの分岐点候補であるジアリールエーテル構造については、NMR 法による検出が可能となり、同結合が少量ながらもリグニンに含まれることが明確となった。針葉樹と広葉樹を含む 21 樹種について上記の化学分解法を適用した結果、ビフェニル含有量は芳香核構造の構成比と密接な関係にあることが示された。さらにリグニン構造の多様性の一環として裸子植物グネツムグネモンあて材を分析した結果、概ね広葉樹あて材(被子植物)に似た特徴を持つ一方、針葉樹あて材の化学的特徴を併せ持つことが明らかとなった。

・有村 慎一 研究者「植物ミトコンドリアゲノム人為改変技術と雄性不稔植物の作出」

人工制限酵素 TALEN を用いた高等植物ミトコンドリアゲノムの任意遺伝子破壊に挑戦した。TALEN は狙った塩基配列を認識する二つ一組のタンパク質であり、これらタンパク質について①ミトコンドリア局在配列を持ち②植物内で安定して高発現するベクターを、③ターゲットの数だけそれぞれ作る必要がある為、Multisite Gateway System を流用した高効率ベクター構築システムを作製した。このベクターシステムを用いてイネ・シロ

イヌナズナを材料に 3 種類のターゲット遺伝子の破壊ベクターを作製し植物に導入したところ、現在、1 遺伝子の 2 カ所の破壊に成功し独立の遺伝子破壊植物体 20 系統を得た。現時点ではこの植物ミトコンドリアのジーンターゲットングは世界初の成功例である。今回の遺伝子破壊とその後の解析によって、その正常ゲノムの維持様式や修復過程、真の物理的構造についての手がかりを得ることができた。まだ成功例が少ないため、遺伝子毎、領域毎、形質転換手法や植物種の違い等検討すべき事項が多数考えられ、今後多数のターゲットに対して破壊と解析を行っていきたいと考えているが、任意遺伝子の破壊に向け当初設定した最大の目的である遺伝子ターゲットングに成功することができた。

## (2) CREST

表5 論文・発表と特許出願件数

(2015年10月1日現在)

CREST	論文			特許			口頭発表		
	合計	国内	国際	合計	国内	国際	合計	国内	国際
2011年度採択	185	11	174	10	9	1	632(185)	464(83)	168(102)
2012年度採択	105	21	84	7	4	3	393(169)	301(122)	92(47)
2013年度採択	76	24	52	15	9	6	346(112)	230(57)	116(55)
領域全体	366	56	310	32	22	10	1371(466)	995(262)	376(204)

(招待講演数は括弧で口頭発表数の内数として記入)

本複合領域の CREST 研究課題は、光合成そのものにかかわる課題 2 件、光合成からバイオマス増産にかかわる課題(シンクソース)3 件、バイオマス増産にかかわる新たな手法(ゲノム、エピゲノム)に関する課題 2 件、新たな育種法の開発に関する課題 1 件、植物ホルモンの活用によるバイオマス増産に関する課題 1 件、微生物によるポリマー生産に関する課題 2 件、セルロース系ナノ材料に関する課題 1 件、リグニンの活用に関する課題 1 件の合計 13 課題から成る。これらは前記した 3 つの研究分野に適切な割合で配置することが出来る。それぞれの課題は 3.選考について述べたように、二酸化炭素から出口の工業製品までの全てをカバーしているわけではないが、研究上の課題として出来るだけ幅広く対応することを期待して選んだものである。この 13 課題のうち、4 課題は 26 年度中間評価を終え、5 課題が 27 年の中間評価を行っているところである。すなわち 13 課題のうちの半分以上が中間点を過ぎ成果をまとめていく方向で研究を集約する段階に来ている。これらの課題のうち多くは期待された成果を上げつつあり現時点での発表論文数などを表 5 に掲げた。その中で優れた課題の成果については別途記載するが、はじめに総合的な状況について記載しておく。

研究総括としては、光合成機構の研究から、バイオマス増産につながる遺伝子改変や育種技術への展開、シンクソースの研究によって、バイオマスとして活用できる部位の増大法の開発など、ゲノムやエピゲノムを活用した育種法や植物栽培技術の開発、さらには、

植物ホルモンの利活用による植物増産システムの開発などにつながる成果を、光合成やバイオマス生産にかかわる研究課題(図 1 ①、②)では期待した。また、バイオマスを原料として工業製品として開発するバイオマスの活用にかかわる研究課題(図 1 ③)では、出来るだけ実バイオマス、あるいは、入手可能なバイオマスを原料として、工業製品を作るシステムの開発とそれによって有用な工業製品が作られることを期待した。バイオマスの活用にかかわる研究は光合成やバイオマス生産にかかわる研究に比べ、新たな科学技術として二酸化炭素の資源化にいち早く貢献しうるものであると考えた。

現時点での研究成果を概括すると、やはり、バイオマスの活用にかかわる研究課題が、プロセス開発も含めて、将来の技術展開が見通せる成果を出しつつあると考えている。その中では、磯貝明の研究は、ナノセルロースという新たな素材を工業的に提供するもので、今後いろいろな方面に多くの期待が持てるものである。この研究は、2013 年度採択のもので、2016 年度に中間評価をすることになっているが、現時点でも、すでに本複合領域を代表しうるような特徴的な成果を出していると考えている。また、渡辺隆司のリグニンの活用を目的とした研究も、従来木質バイオマス利用における研究が主にセルロース等をターゲットとしていたことを考えると、今後の進展や活用が期待できるものである。また、微生物機能を活用したポリマー生産を目指す田口精一の研究、及び大西康夫の研究も、それぞれのこれまでの応用微生物学の実績の上にならざるを得ない研究で、具体的に有用なポリマーが生産されつつあり、生産性の増大や、コストなどの問題も視野に入れた研究段階に及びつつある。ただ、田口と大西の研究は、実バイオマスを原料とした場合のプロセスとして、一貫性という意味ではさらに検討を要するところがある。これらの研究は、学術的な面よりも、技術開発という視点で、期待された成果を上げているといえる。このように、本複合領域から生まれることが期待される工業製品は新たな素材を提供するものであると考えている。

一方、光合成やバイオマス生産にかかわる研究課題では、堤伸浩の研究は、ゲノム情報をいかに活用して必要な形質を有した植物を育種するかという立場からの育種法の開発で、大量のデータをどう集め、どう処理し、どう活用していくかという手法を確立しつつある点で、大きな成果を上げているといえる。これまでゲノム育種という言葉がなかなか実体を伴わなかった中で、今回の堤の研究は、ソルガムというバイオマス植物を材料とした研究であり、その方法論は幅広くいろいろな植物に今後利用可能なものであり、発展性も大きなものである。この研究の過程で、ある F<sub>1</sub> が優れた形質を有することを発見したことも、副産物としては大きな成果で、F<sub>1</sub> 品種としてすぐにでも実用可能であると考えられる。

また、植物ホルモンの分野で学術的に世界をリードしているメンバーを率いる浅見忠男は、本研究課題でも、学術面で世界に誇りうる研究成果を出しつつある。また、その成果は、植物の生育の制御法の開発の基礎データとしても役に立つものであり、また、本研究課題の中で作られてきたいろいろなホルモンのアゴニスト及びアンタゴニストは、植物ホルモンの研究者が活用できるものである。本研究課題から直ちに、バイオマス増産を図る

技術が開発されるのは、まだ難しいが、そのための基礎データとして重要なことを明らかにしている。特に、ストリゴラクトンは、新たな植物ホルモンとして、いろいろな作用があることが知られており、その活用は植物による物質生産に有効なものとして、多方面で研究されているところであり、その分野を世界のレベルで牽引していると言って良い。なお、ストリゴラクトンについては、芦刈基行のチームでも研究の一つの対象となっており、このチームの分担研究者である山口信次郎の研究成果も世界的に優れたものであり、浅見ともども、国際学会での招待講演を務めている。

論文や特許等の状況については、研究の課題の領域内での位置を反映してか、チームによってばらつきがあるのが実態であり、論文数も特許数も多いチーム、論文は多いが特許は少ないチーム、論文数は少ないが特許は多いチーム、どちらも少ないチームなどがある。一般的には、本複合領域の前半部(光合成やバイオマス生産に係わる研究)を担当するチームは、学術論文は多いが特許は少ない傾向がある。こうしたチームの学術論文は、基礎科学として質の高いものが多い。しかし、それを科学技術として発展させるには、少し時間がかかりそうである。一方、後半部(バイオマスの利活用による工業製品などを生産するプロセスや技術体系などに関する研究)を担当するチームでは、論文数は決して多いとはいえないが、特許数は比較的多く、実用性に重点をおいた研究となっている。また、多くのチームでは相当数の国際学会で招待講演を果たしており、論文発表と合わせて、それぞれの分野で世界を牽引しているといえる。

本複合領域の CREST の研究者は、それぞれの学会などの各種の賞を数多く受賞しているが、そのなかでも、磯貝明が「セルロースナノファイバーの TEMPO 触媒酸化に関する画期的な研究、および木材セルロースからナノフィブリル化セルロース(NFC)を高効率で調製する前処理方法として、この酸化を利用開発した業績」に対して、林産分野のノーベル賞といわれる Marcus Wallenberg 賞(Marcus Wallenberg 財団、スウェーデン)を 2015 年にアジア人として初めて受賞したことは特筆に値する。また、彦坂チームの共同研究者である寺島一郎は 2015 年に「みどりの学術賞」を受賞している。

以下、多くの優れた研究成果の中から特筆すべき事例を紹介する。

- ・浅見 忠男 研究代表者「植物ホルモン間クロストークと化学・生物学的制御技術を利用したバイオマス高生産性植物の開発」

本研究課題ではストリゴラクトン(SL)、ジベレリン(GA)そしてブラシノステロイド(BR)について、植物ホルモンクロストークの解明とその成果のバイオマス高生産性植物の開発への応用を目的とした。まず個々の植物ホルモンについてバイオマス生産に関わる機能遺伝子の同定・解析・クロストークへの関与解明を試みた。SL 受容体の構造ならびに GA 情報伝達因子と SL 受容体の SL 依存的結合、そして SL-GA 間生理的クロストークの存在を明らかにし、化学的または遺伝子的な GA 制御による SL 機能制御の可能性を示した。選択的 SL 制御剤を創製し、サトウキビの分げつ制御によるバイオマ

ス生産性の向上に指針を見出した。また、開発した BR 生合成阻害剤 Brz を用いて新規 BR シグナル伝達遺伝子 BIL 群の単離と機能解析を行った。これら変異体群は SL 欠乏と相乗的に枝分かれが促進されることを浅見グループの創製した SL 阻害剤 TIS108 処理によって確認した。BIL7 遺伝子のイネへの形質転換により、種子収量と地上部バイオマスを 30%増加させることに成功した。サトウキビへの形質転換においても茎長、分けつの増加傾向が認められた。以上、個々の植物ホルモン制御法と植物ホルモン間クロストークの制御法の開発により、バイオマス生産性を高める方法を広く提案することに成功した。

- ・磯貝 明 研究代表者「新規セルロース系ナノ素材の表面構造および集積構造制御による炭素マテリアルストリームの創成」

本研究課題では独自開発したセルロース系ナノ素材について、その特性と機能を制御する手法を、理学－農学－工学融合型の研究体制によって構築し、これらのバイオ系ナノ素材を、先端部材にマテリアルとして蓄積－利用することで、森林産業と先端産業を結びつける新しい炭素マテリアルストリームの創成を目的としている。2, 2, 6, 6-テトラメチルピペリジン 1-オキシラジカル(TEMPO)酸化セルロースナノファイバー(TOCN)は、その表面カルボキシル基の対イオンをアルキルアンモニウム塩に変換することで、表面疎水化 TOCN を疎水性の基材にナノ複合化することが可能となった。また、TOCN の特性を支配する基本的因子である分子量および分子量測定法を確立し、TEMPO 酸化反応条件、水中解繊処理条件により顕著な低分子化挙動と共にその制御方法を明確化した。TOCN を含む新規バイオ系ナノ材料の調製と特性解析としては、超低密度、透明、高強度、超低熱伝導率の TOCN エアロゲル、ポリ乳酸との複合化、ポリアクリルアミドとの複合化、ナノクレイとの複合化、アルキルケテンダイマーとの複合化等を検討し、TOCN の特性を生かした優れた物性の発現が確認できた。TOCN－コラーゲン複合化医療材料への展開を目的として、TOCN にコラーゲンを複合化したフィルムおよびエアロゲルを作製し、構造と物性を評価し、さらに、細胞の接着性、増殖性を評価することで足場材料への応用について検討を行った。コラーゲンと TOCN を組み合わせたエアロゲルは三次元足場材料として応用可能であることが示された。

- ・堤 伸浩 研究代表者「高速ジェノタイピングを利用したエネルギー作物のテーラーメイド育種技術の開発」

本研究課題ではゲノム情報を駆使し対象とする環境に適した品種を高速に育成するための育種手法を開発することを目的として、資源作物として高い潜在能力を持つソルガムを例として、メキシコ塩害地あるいは福島での栽培に適した品種の育成を目指して以下の研究を実施した。RAD-seq と呼ばれる次世代シーケンサを活用した多検体ジェノタイピング法を改良して、ソルガムの多検体高速ジェノタイピング技術を確立し、約 500 系統の遺伝資源に適用したところ、30 万以上の一塩基多型(SNP)を検出した。福島、メキシ

この塩害地で交配後代を含めた大規模な栽培試験をおこない、バイオマス関連形質の表現型データを取得した。ジェノタイプデータと表現型データから表現型予測モデルを構築し、これを基盤として選抜を繰り返す育種手法が有効であることが示唆された。また、RAD-seq で得た SNP データと表現型データを利用したゲノムワイド関連解析 (GWA 解析) から、稈長および乾汁性の主働遺伝子を確認し、これら新規遺伝子の機能を分子遺伝学的に明らかにした。大量の表現型データを効率よく取得する Information Technology (IT) 技術を応用した計測システムやドローンを利用した形質評価手法を開発するとともに、系統情報、SNP 情報、形質情報、圃場マップを格納し、圃場調査で得た表現型情報をオンラインで即座に転送・閲覧できるデータベースを開発した。これらは、今後のフィールド農学研究の基盤技術となりうる。

- ・ 渡辺 隆司 研究代表者「電磁波応答性触媒反応を介した植物からのリグニン系機能性ポリマーの創成」

本研究課題では、マイクロ波反応により植物体から高分子合成に適したリグニンを高効率で分離して機能性高分子を合成する。リグニンモノマー経由の研究では、マイクロ波による反応促進効果を示す高効率リグニン分解反応を見出した。さらに電磁波の影響を解析した結果、電場がこの反応を促進することを示した。リニア型リグニンの分離・変換研究では、有機合成したリグニン分岐構造モデルと分離リグニンの構造解析を進めて、分岐が少なく低変性な溶媒可溶リグニンをバガスから高収率で得る反応を見出した。本反応はラジカル捕捉剤と酸触媒により、収率と分岐度を制御でき、リグニン抽出率は最大で 95% に達した。加えて分離リグニンは有害な紫外線 UV-B の高い吸収能を有していた。リグニン親和性触媒の合成を目指した研究においては、コア部分の合成とペプチドの探索を実施した。これまでに、リグニン親和性ペプチドを選抜し、ペプチドが配列特異的にリグニンに吸着することを明らかにした。触媒のコア部分は、ルテニウム (Ru) 錯体が結合したノルバリンを合成し、それらが単離リグニンや木粉中のリグニンを室温でも酸化分解する事、3 価 Ru 種とアミノ基部位が反応に大きく寄与することを示した。また、これら触媒のコア部分とリグニン親和性ペプチドの結合にも成功した。さらに、リグニンを共有結合で担持する自己組織化単分子膜 (SAM 膜) を開発した。電磁波解析グループとプロセス開発グループは、被加熱物の誘電特性の解析を行うとともに、構造の異なる 2 つの広帯域電磁波照射容器を開発した (特許出願中)。分解反応の解析のため、核磁気共鳴 (NMR) による 2 つの定量性低下要因を排除する新規測定手法の開発、リグニンユニット配列のフーリエ変換質量分析計 (FTMS) による解析にも成功している。

- ・ 田口 精一 研究代表者「植物バイオマス原料を利活用した微生物工場による新規バイオポリマーの創出と高機能部材化」

本研究課題では、植物バイオマス原料から有用ポリマー素材を微生物工場で作出し、

高機能部材化する一貫プロセスの開発を目指している。対象となるバイオポリマーは、ポリ乳酸と並び立つ「多元ポリ乳酸」と側鎖長が均一な「ホモ PHA(ポリヒドロキシアルカン酸)」である。いずれも、糖質バイオマスおよび油脂バイオマスから合成可能な超光学純度ポリエステルである。多元ポリ乳酸は、独自の乳酸重合酵素を利用して、数%～約 70%の範囲で乳酸分率を制御し、既存ポリ乳酸に硬軟多様性や新規物性を付与できることを実証した。また、キシローストランスポーター過剰株を用いることで、現行の微生物ポリマー産業生産力に迫ってきた。ホモ PHA は、構造均一性を極め、ポリマー合成量を飛躍的に向上させることに成功し、レジ袋と同等の性能を引き出している。最近解明したポリマー分子量制御決定因子は、高分子量化ひいてはナノファイバーなど高機能部材化へと応用可能である。さらに、新規のポリ乳酸結晶核剤「キシランエステル」は、石油系ポリマーと同等以上の結晶化効果を実現し、両ポリマーへの応用が期待される。現在産学連携を組み、一貫プロセスのプロトタイプ構築に成功している。

・梅田 正明 研究代表者「DNA 倍加誘導系の確立による高バイオマス植物の創出」

本研究課題ではポプラやイネで DNA 倍加を誘発する技術開発を行い、植物バイオマスの効率的な増産を実現しようとしている。DNA 倍加は器官の巨大化や代謝産物の高蓄積をもたらすので、その誘導により植物バイオマスの増産を期待できる。しかし、多くの樹木やイネなどでは DNA 倍加がほとんど起きず、その理由は未解明のままである。

そこで、梅田グループは、まず 4 倍体ポプラを作出し、木部細胞の巨大化と茎や葉のバイオマス増大が起きていることを確認した。これにより、DNA 倍加は木質バイオマスの増産にも有用であることが明らかになった。一方で、効率的にバイオマスを増強するには、個体全体ではなく、特定の部位や器官で DNA 倍加を誘発するのが有効であると考えられる。そこで、各グループにおいてポプラ及びイネの細胞周期制御因子の発現操作及び DNA 倍加変異体の探索を行った。その結果、イネにおいてサイクリン A2 遺伝子の欠損により、体細胞レベルの DNA 倍加が起こることを見出した。また、クロマチン構造の緩和が DNA 倍加能を上げることを発見し、DNA 倍加誘導に効果がある新たな遺伝子素材を数種類単離することに成功した。以上のように、今後ポプラやイネで高度な DNA 倍加を誘発するのに必要な知見や実験材料を得ることができた。

・大西 康夫 研究代表者「高性能イミダゾール系バイオプラスチックの一貫生産プロセスの開発」

本研究課題では、セルロースを原料とした芳香族化合物の微生物発酵生産システムを確立し、発酵生産される芳香族化合物を原料としたポリベンズイミダゾール(PBI)系新規ポリマーを開発することにより、実バイオマスから PBI 系ポリマーを生産する一貫プロセスを構築することを目的としている。これまで 3-アミノ-4-ヒドロキシ安息香酸(3,4-AHBA)合成酵素遺伝子を導入した組換えコリネ菌を用いて、紙パルプから 3,4-AHBA

を高収量に発酵生産するためのプロセス開発を進めた。PBI 合成における基幹ジアミンを化学合成で生産する研究に関しては、合成ルートを確認し 100 mg スケールの合成を行うことができた(収率 60%程度)。また、3,4-ジアミノ安息香酸(3,4-DABA)の重合による PBI の合成と評価を前倒しで行い、溶液中で 3,4-DABA を重合しポリアミドアミンを得る条件を確立した。共重合用アミンの原料となるカフェ酸を生産する大腸菌の構築し培養条件の検討を行った結果、カフェ酸の生産量を 80 mg/L に増大できた。さらに紙パルプを炭素源とした同時糖化発酵によって、270 mg/L の生産量でカフェ酸を生産することができた。モノアミンの生産に関しては、遺伝子を導入した 4-アミノフェニルアラニン生産大腸菌を用い、グルコースを原料として 4-アミノフェニル酢酸を発酵生産することに成功した。また、ジアミン系芳香族モノマーの呈色反応に着目したスクリーニング系の開発を目指し、ナフタレンジカルボン酸とジメチルスルホキシドによるジイミン形成が目的化合物のスクリーニングに適している可能性を見出し、1,158 種の糸状菌培養抽出物から 23 種の候補化合物を得た。

## 7. 総合所見

### (1) 課題選考、領域運営について

本複合領域の特性は、二酸化炭素の固定という光合成機能から、バイオマスの生産性強化、バイオマスの変換・活用という、きわめて長いプロセスを研究対象分野としていること、また CREST とさきがけのハイブリッド型の研究領域であることである。もちろんそのプロセスが一貫した研究課題として計画されることが望ましいが、研究期間が限られていることからそれは困難である。そのため、研究対象や研究グループの規模はきわめて幅広く分散することになる。そうしたことから採択にあたっては、領域全体としてプロセス全体をカバーできるように研究課題を選択し採択することを考えた。研究の公募について初年度はホームページだけの紹介しか出来なかったが、二年目は毎年定期的に開催され多くの植物科学研究者が集まる「植物科学シンポジウム」で研究総括が本複合領域を紹介する講演を行い、三年目は JST において本複合領域のミニシンポジウムを開催し、本複合領域の意図するところ、期待される研究課題の宣伝に努めた。こうした活動によって、幸い多くの研究計画が申請され、その中から優れた研究を採択することが出来た。その結果図 1 に示すように、さきがけ研究者と CREST のチームをバランス良く配置することができた。また本さきがけ研究領域では、この領域の研究を推進しうるような技術開発や基礎的知見を得るための研究課題も採択した。それによって、他の研究が活性化されることを想定したからである。

こうして採択された研究グループをまとめて本複合領域をバーチャルな研究所として運営するために、さきがけ研究領域と CREST 研究領域を一体として運営することとした。そしていくつかの基本的な方策を考えた。ひとつは、異なる研究分野を専門とする研究者間

での相互理解を深め、本複合領域の研究目的と意義についての意思統一を図ることである。それによって、それぞれの研究者が自らの立ち位置を全体の中で理解し、全体プロセスの一貫通貫性についての発想を常に研究の中で生かしていくことを期待した。一方、それぞれの専門分野の中での先端的な研究を行うための、最先端の研究情報や資源などの交流や交換も重要であるとして専門的な分野ごとの集まりにも考慮した。これらの具体的なものとしては、「ストリゴラクトン研究会」や、「データ科学の発展と植物科学との融合」ワークショップなどがある。ストリゴラクトンは多様な生理活性を示す植物ホルモンとして世界的にも注目され、日本がこの研究を世界的にリードしているところもあり、これをテーマにした国際会議も開かれている。今後も基礎科学の視点のみならず、このホルモンを活用した植物生産において本 CREST 研究領域の研究者が世界をリードする立場を維持していくことが期待される。また、「データ科学」は新しい測定技術や解析技術の開発によって、今後膨大に生まれてくるデータを植物科学の分野にどう活用していくかという点で本複合領域の共通的な話題であった。こうした新しい方法論などを取り入れつつ、本複合領域の研究はそれぞれ相互干渉、相互連携しながら発展し、優れた研究成果を生み出すことができた。

さらにハイブリッド型の特性を生かし、CREST 研究者とさきがけ研究者の間での交流を図った。特に若手研究者の育成にあたっては、本 CREST 研究領域にかかわっている若手研究者をさきがけ研究者と同じように扱い領域会議などに参加させ、相互の研究の理解と情報交換、若手研究者のネットワーク形成に努めた。また、この領域会議には「最先端・次世代研究開発支援プログラム」のこの分野の研究者にも参加を求め、毎年数人が参加してきた。これは、このプログラムに研究専念義務があり、採択された研究者が他の総合的研究プロジェクトに参加できないため、研究者ネットワークからはずされる傾向があることを懸念したためである。このような施策により次代の植物科学を担う若手研究者のネットワークを形成しようとした。また、さきがけ研究領域の研究期間がほとんど 3 年間であることを考慮し、研究が終了した後もさきがけ研究者として扱い、領域会議や勉強会に参加することを要請した。こうしたことから、さきがけの領域会議などでは多くの若手研究者によって専門分野を超えた活発な意見交換が行われ、その中で研究のアイデアや共同研究なども生まれてきた。これは研究成果とは別に本複合領域の一つの大きな成果であると考えている。なお、本さきがけ研究領域は本 CREST 研究領域に先んじて 2016 年度で終了してしまうが、本複合領域の続く間は、終了した課題のさきがけ研究者も一緒に活動していく予定である。

## (2) 研究領域の研究成果の見通し

バイオマス生産を増強する方法は、一つは、植物の持つ二酸化炭素固定能力を増大させることであり、もう一つは、植物を栽培する際に発生する、各種の生物的・化学的・物理的環境ストレスによる消耗を防止することである。本複合領域の前半の光合成やバイオマ

ス生産にかかわる研究課題(図 1 ①、②)はこうしたバイオマス増産にかかわる科学技術の基盤にかかわる研究である。また、そうして生まれてきたバイオマスすなわち炭素化合物をいかにして有用な工業製品に変換していくかが、後半のバイオマスの活用にかかわる研究課題(図 1 ③)になる。本複合領域が一体のものとして成立しこの前半と後半をつなげるためには、量としてのバイオマスのみならず、その質、すなわちどのような性質を持ったバイオマスであれば、後半のプロセスに有効であるかという視点からの研究、またそうした植物を作り出す研究もまた重要である。それがバイオマスとして有用性質を持った植物の育種法の新たな開発システムということになる。植物育種もゲノム情報や各種のオーム情報が容易に、且つ大量に得られる現時点で、それらをいかに活用していくかが課題となっている。一方、バイオマスの活用研究課題も、バイオマス由来の成分であっても、その化学的純正品を用いた工業製品の作出ということだけでなく、化学的にいえば混合物である実バイオマスを材料としたプロセスの完成への取り組みが重要となる。このように、両方の側がそれぞれお互いの状況を理解することが、本複合領域が一体のものとして成り立つ基本となる。本複合領域の研究内容の広さから、現時点ではそれぞれの研究課題が本複合領域の中ですべて連携しているということはないが、領域会議などの中で、こうした総合的な視点は共有されてきていると考えている。

本複合領域も中間点を過ぎ、本さきがけ研究領域では 18 課題が終了し、本 CREST 研究領域では、9 課題が中間評価を終えている。本複合領域は植物科学を中心として、二酸化炭素の資源化のための新たな科学技術あるいはシステム・プロセスなどを確立するための基盤となる新知見を得ることを目指しているが、「研究の経過」のところで記載したように、それぞれの研究は、ほぼ予定通りあるいは予定以上の成果を上げている、あるいは上げつつあり、終了時には、ほとんどの課題で、その目的とした研究成果が得られるものと期待している。中でも、本複合領域の中では後半部分を担当する、バイオマスの利活用による工業製品などを生産するプロセスや技術体系などに関する研究、特に本 CREST 研究領域の研究は、終了時には、企業などとの共同研究を通じて、イノベーションにつながる社会実装のための研究という段階に近いものが得られると確信している。そうしたものの中には、各種のバイオポリマー、ナノセルロース材料、リグニン由来の化合物などの研究がある。また、本さきがけ研究領域についても、それぞれが焦点を当ててきた研究課題が、それを発展させ、さらに大きな研究計画に発展する可能性を多く秘めた研究が認められている。そうした大型の研究を通じて、その成果がイノベーションにつながって行くと考えられる。この中には、バイオマスの活用のための化学や工学的な研究課題も多く含まれているのが本複合領域の特徴でもある。

また、本さきがけ研究領域や本 CREST 研究領域の課題の中に共通してある、ゲノム時代の大量データの活用方法についての研究は、植物による物質生産、バイオマス生産の分野における波及性の高い研究手法として実っていくことが期待される。一方、本さきがけ研究領域と本 CREST 研究領域の中で、本複合領域の前半部分すなわち光合成やバイオマス生

産にかかわる研究も、本複合領域終了後直ちに企業との連携が図れるような研究は多くはないが、将来の植物による物質生産の増強の手法として活用されるべき、学術的にも重要な基盤的な知見を数多く生み出している。それらの活用には、遺伝子組換えや新しいゲノム編集技術などの手法が多く活用されると思われるが、それが真に活用されるには、遺伝子組換え植物に対する社会的許容という問題が解決されることが必要である。また、それをもたらすための活動や、これによって作られる植物の有用性や重要性を具体的に示していくことが、植物科学のコミュニティーとしての活動として、本複合領域の延長上に必要である。なお、植物によるバイオマス生産の増強方法は、バイオマスのみならず、食料や、植物の特定成分の生産にも活用できるものであり、こうした方面にも、本複合領域の研究成果が活用されることが期待される。

本複合領域は、図 1 に示すように、①光合成や②バイオマス生産に係わる研究、③バイオマスの利活用に関する研究という幅広い研究対象分野を含み、また個人型研究から大型のチーム型研究までが含まれている。これらを一体的に運営する中で、複合領域の特性を生かした形での、さきがけ研究者と CREST チーム、また、さきがけ研究者間での共同研究を期待し、また推奨した。その結果、これまでも述べてきたように、多様な連携・共同研究が進行中である。特に個人型研究のさきがけ研究者では、例えば、永野惇が開発を進めた大容量・迅速な RNA-Seq や RAD-Seq 解析を用いた共同研究(矢守航、藤本龍、塚越啓央、堤チーム等)、笠原竜一郎と橘熊野による受精率測定法改良の共同研究、遺伝子発現解析のための藤本龍、芦荻チーム、関チームによる共同研究等、多くの共同研究が進行中である。既にこういった共同研究から例えば矢守航と鹿内チームによる成果発表や、松下智直、草野都、矢守航、彦坂チームによる成果発表がなされている。今後、個人型研究の限界を超えた成果を始め、複合領域ならではの成果が多く得られることを期待している。

### (3) 本複合領域を設定したことの意義

これまでも記載したように、日本の植物科学の基礎研究力は世界的に見ても第一級のものとして認識されている。しかしこうした研究力がイノベーションにつながる科学技術として十分には活用されてこなかったという現状がある。こうした中で二酸化炭素の削減を目指した科学技術の確立には、二酸化炭素を資源として有機化合物に変換する植物の光合成力を基盤とした技術開発を図ることが重要であるという観点から、本複合領域が戦略的創造研究推進事業として策定された。このことは植物科学研究の重要性が再認識されたということで、この分野の研究者全体が喜んでいるところである。本複合領域の策定とほぼ同時期に、NC-CARP や ALCA の中で植物バイオテクノロジーが計画され、また植物科学研究者ネットワーク形成などの施策が行われたことも同じ認識に立つものと思われる。その意味で本複合領域が期待される成果を上げうるかどうかは、植物科学研究全体の将来構想に影響を与えるものと認識している。幸い、2015 年度から新たに、戦略的創造研究推進事業として CREST 研究領域の 1 領域(「環境変動に対する植物の頑健性の解明と応用に向けた

基盤技術の創出」(研究総括：田畑哲之)および、さきがけの2領域(「フィールドにおける植物の生命現象の制御に向けた次世代基盤技術の創出(研究総括：岡田清孝)」、「情報科学との協働による革新的な農産物栽培手法を実現するための基盤技術の創出(研究総括：二宮正士)」)が、植物科学を中心とした研究領域として設定された。このことはますます、植物科学研究の重要性が認識されてきているということの意味するものとして、本複合領域の運営状況などもそれを推進するために貢献しているのではないかと考えており、研究総括としては責任を感じるとともに喜んでいる。

本複合領域設定のもう一つの意義は、二酸化炭素資源化のための科学技術の開発のために、理学部、農学部、工学部などの専門分野の異なる研究者が共同研究を開始したことである。これまで植物科学の基礎的研究力が工業的な立場からの産業化にはつながって来なかったのはこうした連携が十分でなかったこともある。本複合領域はこうした垣根を取り外し、目的の達成のための専門研究分野を超えた新たな共同研究体制を作ることを誘導した点で今後の研究計画のモデルとなっていくはずであり、後に続く類縁の研究領域、研究プロジェクトへの波及性は大きいものがあるといえる。

#### (4) 今後への期待や展望

本複合領域の目指すところは、二酸化炭素を資源として活用し、最終的には工業製品として変換するプロセスにかかわる科学技術の基盤となる研究成果を多数生み出すことである。これまでの各研究課題の研究はほぼ順調に進んでおり、既に紹介したようにその中でも大きな成果を生みつつある研究課題もある。特に本複合領域の中で、CREST 研究領域で出口部分を担当する、新しい機能を持ったポリマーや、機能性の微細セルロース繊維、リグニン分解物の活用などの研究課題にはそうしたものが多い。しかしそれ自体ではまだ、そのまま社会実装されイノベーションにつながるものではない。今後さらにその研究成果をブラッシュアップし、コスト問題なども一定レベルの競争力があるものとしなければならない。その意味ではこうした成果を社会実装につなげるために、次のステージの研究課題を支援するシステムが重要である。また本さきがけ研究領域の研究でバイオマス成分の工学的あるいは化学的分解や変換、微生物によるバイオマス成分からの新たなポリマー生産システムなど、バイオマス活用の基礎技術としていろいろなプロセスへの展開可能な成果も数多くある。こうした成果も多くに関連技術として一体となって活用されていくべきものであって、それを発展させるための研究を継続的に行っていくことが必要である。その意味では、本複合領域での研究成果の延長上に、さらに社会実装に近い研究課題が進められていくことが期待される。既に、本複合領域の CREST の共同研究者やさきがけの研究者のうち、ALCA や CREST などの戦略的大型研究へと発展しているものが相当数見られる。今後も本複合領域の研究の進行の中でこうした傾向が多数見られていくと考えており、そうした展開研究の中で本複合領域の研究成果が生かされ、将来の社会実装への展開に向けたイノベーションにつながることを期待される。

## (5)感想など

本複合領域がハイブリッド型として策定されたことの効果は、若手研究者の育成という点で大きなものがあると考えている。また、本複合領域のように全く異なる専門分野の研究者が集まった意味も大きいものがある。それぞれの研究推進という立場からだけではなく、若手研究者が普段出会うことのない分野の研究者と交流できたことは焦点を絞った研究領域では出来なかったし、若い研究者にとって現状に自分を縛り付けるのではなく、多様な未来を考える上で貴重な経験となったと考える。本複合領域では、そうした視野の広い研究者が数多く育っていくことを期待している。

また、他の研究領域との連携については、本複合領域の発足に先立って発足していた「藻類バイオエネルギー」とは、光合成機能の強化という視点で共通点がある。この領域との研究上の連携や情報交換の機会を探った。しかし、それぞれの年度計画のスケジュールの中で、一体となった企画はなかなか難しかった。そこで、本さがけ研究領域の分野別勉強会で、「藻類バイオエネルギー」の関連研究者の参画を呼びかけた。本年度、植物科学関係のさがけ研究領域2件、CREST研究領域1件が発足したことに伴い、今後はこうした関連領域との連携を図って行く必要があると考えている。それによって、植物科学領域全体として社会的な課題を解決するための基盤技術の開発研究を推進したいと考えている。そのためのネットワークの基盤は本複合領域が作ってきており、また、本複合領域の研究者がその成果を発展させるべく新たな研究領域の研究者として採択されていることも、こうした連携を可能として行くと考えている。

研究成果を社会に公開することはこうした研究領域にとっては重要なことである。本複合領域はきわめて広範な分野を対象としていることもあって、領域全体での公開発表などにあまり注力してこなかった。代わって関連分野の企業などからの多くの参加者が見込まれるこの領域の研究に関連する各種のイベントの中で、その目的にあった研究者を本複合領域のメンバーの中から派遣し、その成果の実用化の可能性や企業との連携などについて議論する機会を作った。領域全体の公開シンポジウムよりこの方が、より実効性のあるアウトリーチ活動であると考えている。