

戦略的創造研究推進事業

—チーム型研究(CREST)—

研究領域「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」

研究領域事後評価用資料

研究総括：小池 勲夫

2019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	3
(3)研究総括	3
(4)採択研究課題・研究費.....	4
2. 研究領域および研究総括の設定について.....	7
3. 研究総括のねらい.....	8
4. 研究課題の選考について.....	8
5. 領域アドバイザーについて.....	11
6. 研究領域のマネジメントについて.....	13
7. 研究領域としての戦略目標の達成状況について.....	18
8. 総合所見	31

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「海洋資源等の持続可能な利用に必要な海洋生物多様性の保全・再生のための高効率な海洋生態系の把握やモデルを用いた海洋生物の変動予測等に向けた基盤技術の創出」

①達成目標

- ▶ 生物多様性維持の取り組みに必要な海洋生物種の定量把握や種の同定を高効率化、高精度化するためのセンシング技術や遺伝子解析技術の開発
- ▶ 資源・エネルギー開発や自然災害の影響等による海洋生物資源量や海洋生物多様性の変動を把握するための生態系モデルやモニタリング技術の開発

②目標設定の背景及び社会経済上の要請

2007年7月に施行された「海洋基本法」を踏まえて2008年3月に閣議決定された「海洋基本計画」では、海洋における生物多様性の確保のための取組の必要性が指摘され、さらに「生態系、海洋汚染物質等の海洋環境に関する科学的知見の充実を図ることが必要である」と述べられている。

2008年6月に施行された「生物多様性基本法」を踏まえて、「生物多様性国家戦略2010」が2010年3月に閣議決定された。この中では、「海洋の生物多様性の保全の施策の基盤となるデータが不足しており、今後これらの情報を収集・整備し、科学的な保全施策を推進する必要があります」と生物多様性保全についての議論をするための基礎となるデータや知見がそもそも不足していることを指摘している。また、環境省では本国家戦略を踏まえて、海洋に特化した「海洋生物多様性保全戦略」を2011年3月にとりまとめ、「海洋の生態系の健全な構造と機能を支える生物多様性を保全して、海洋の生態系サービス（海の恵み）を持続可能なかたちで利用すること」が目的として掲げられた。

2010年6月に閣議決定された「新成長戦略」の「成長戦略実行計画（行程表）」のうち、「I 環境・エネルギー大国戦略」中に、「海洋資源・海洋再生可能エネルギー等の開発・普及の推進」を2020年までに実現すべきであると記載されている。また、2010年7月に総合科学技術会議がとりまとめた「平成23年度科学・技術重要施策アクション・プラン」では「地球観測情報を活用した社会インフラのグリーン化」として、「気候変動に対応した生物多様性保全技術の確立と全国適用」等の必要性が示されている。

「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）では「社会インフラのグリーン化」において、「地球観測、予測、統合解析により得られる情報は、グリーンイノベーションを推進する上で重要な社会的・公共的インフラであり、（中略）自然環境や生物多様性の保全、（中略）持続可能な循環型食料生産の実現等に向けた取組を進める。」と指摘されており、また「我が国が直面する重要課題への対応」のうち「地

球規模問題への対応促進」として「生物多様性の保全に向けて、生態系に関する調査や観測、外的要因による影響評価、その保全、再生に関する研究開発を推進する」としている。

2010年10月には、COP10が名古屋市で開催され、「愛知目標」として「2020年までに、生物多様性、その価値や機能、その現状や傾向、その損失の結果に関連する知識、科学的基礎及び技術が改善され、広く共有され適用される。」など20の目標が採択された。2020年までという愛知目標の期限に向けて生物多様性を維持する手法の確立が喫緊の課題である。

国際プロジェクトである「海洋生物のセンサス」によって、我が国の四方を取り囲む排他的経済水域(EEZ)が世界で最も豊かな生物多様性を有していることが2010年8月に明らかにされた。地球全体の生物多様性の保護にとっても、世界の生物種の約15%が生息する我が国周辺の生物多様性の保護は重要である。

③目標設定の科学的な裏付け

我が国は四方を海に囲まれた海洋国家であり、広大なEEZを有しているが、全海洋生物種の14.6%が我が国EEZに分布しており、生物多様性の「ホットスポット」として注目されている。また、COP10が2010年10月に名古屋市で開催されるとともに、環境省は「海洋生物多様性保全戦略」を2011年3月にとりまとめ、情報基盤の整備や海洋保護区の充実等を提言した。

国連環境計画(UNEP)が2010年10月に報告した「生態系と生物多様性の経済学」によれば、陸も含めた地球全体の生態系破壊により、最大で年4兆5000億ドルの経済損失が生じているとされている。また、日本における漁業、水産加工業、海洋レジャーなど海洋産業の経済規模は年16兆円と推定されており、生物多様性が失われ、これらの海洋産業が縮小した場合の影響は大きい。

一方で、社会活動や経済活動の拡大や地球温暖化の影響、過剰な水産資源の採取などにより、藻場や干潟の消失、貧・富栄養化など海洋生態系の劣化が顕著となっている。こうした生物多様性の崩壊は、水産資源の枯渇や、地球環境の悪化などを助長し、社会・経済に様々な影響を及ぼすことが懸念されている。

また、今後、我が国の経済が発展していくためには、海洋生物多様性の保全を図りつつ、海洋資源を有効活用していく必要がある。例えば、レアメタルや原油が逼迫するなど、エネルギー・鉱物資源の開発は、今後ますます重要になると考えられる。「海洋エネルギー・鉱物資源開発計画」(2009年3月 総合海洋政策本部了承)には、2018年をめどに商業利用の可能性を検討するとされているが、今後実際にこれらの開発を行う際に、海洋生物多様性など海洋環境にどのような影響を与えるかを評価する手法は開発途上である。今後、生物多様性の保全は温暖化ガスの排出規制同様に国際的なルールが厳しくなっていくと考えられ、これに対応するために必要な技術開発を予め行っておくことも重要である。

このような現状を踏まえると、サンゴ礁や干潟などで、なぜ多様な生物による複雑な生態系が維持されているのか、海洋における生物種の分布や密度がどうなっているのかなどの基

盤的なデータや知見の不足は大きな課題である。また、海洋生態系の変化を把握・予測するための技術も不足している。これは、海洋の調査は陸上からのアクセスが困難であり、研究船などの設備を必要とすることに加え、海洋の生物圏は陸上と異なり、海面から深海底まで深さ方向に大きな広がりを持っていることや、存在していると推定される生物種が陸上より豊富であること、海洋生物は海流に乗り広い範囲を移動可能であることなどが原因である。

そこで、本戦略目標では、海洋物理学、海洋化学、海洋生物学、統計学、生態学、分類学、分子系統学など広範な専門家の協同の下、生物多様性を維持した海洋利用の実現に資する基礎的知見の向上、基盤技術の高度化を目指し、(1)海洋生物種の定量把握や種の同定を高効率化、高精度化するための技術の開発、(2)様々な観測データから海洋生物資源量や海洋生物多様性の変動を把握するための技術開発を行う。

(2) 研究領域

「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」(2011年度発足)

本研究領域は、海洋の生物多様性および生態系を把握するための先進的な計測技術と将来予測に資するモデルの研究開発を行い、これらを保全・再生するために必要な基盤技術を創出することを目的とする。

具体的には、海洋の生物多様性および生態系の研究で現在ボトルネックとなっている、環境を含む生物データの取得技術とその将来予測に注目し、(1)海洋生物やその周辺環境の広域・連続的なセンシング・モニタリング技術、生物種の定量把握や同定の効率化、および生態系ネットワークの解明等による基盤的な生物・環境データの集積に資する先進的な技術等の開発、(2)生態系や生物多様性の変動を把握し、生態系の将来予測に貢献する新規モデルの開発、研究を対象とする。(1)、(2)いずれの研究においても対象とする生物群集や現象等を明確にする必要がある。また開発ターゲットに即した海洋現場での調査・モニタリングによる実証が要求されるため、その分野の研究者との共同研究を行うことも必要である。ただし、調査観測やモニタリングのみの研究は対象としない。

従来の海洋研究の壁を乗り越えるため、工学やライフサイエンス等を専門とする幅広い分野の研究者と海洋生物・生態研究者との共同研究を重視する。

このような研究を通して、生物への影響を考慮した海洋資源の持続的な利用や海洋保護区の設定などの海洋環境保全策の提示に貢献することが期待される。

(3) 研究総括

小池 勲夫 (東京大学 名誉教授)

(4) 採択研究課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	所属・役職 上段：研究終了時 下段：採択時	研究課題	研究費*
2011	赤松 友成	水産研究・教育機構 中央水産研究所・主任研究員 水産総合研究センター水産工学研究所・主幹研究員	海洋生物の遠隔的種判別技術の開発	198
	浦 環	九州工業大学社会 ロボット具現化センター・特別教授 東京大学 生産技術研究所・教授	センチメートル海底地形図と海底モザイク画像を基礎として生物サンプリングをおこなう自律型海中ロボット部隊の創出	485
	木暮 一啓	東京大学大気海洋 研究所・教授 東京大学大気海洋 研究所・教授	超高速遺伝子解析時代の海洋生態系評価手法の創出	408
	五條堀 孝	情報システム研究 機構・国立遺伝学研究所・特任教授 情報システム研究 機構国立遺伝学研究所・教授	Digital DNA chip による生物多様性評価と環境予測法の開発	415
	山中 康裕	北海道大学大学院 地球環境科学研究所・教授 北海道大学大学院 地球環境科学研究所・教授	植物プランクトン群集の多様性に注目したナウキャスト技術開発	252

2012	岡村 寛	水産研究・教育機構 中央水産研究所資源 管理研究センター・ グループ長 水産総合研究セン ター 中央水産研究 所・グループ長	海洋生態学と機械学習法の融合による データ不足下の生態系評価手法の開発	70
	小松 輝久	横浜商科大学商学 部・特任教授 東京大学大気海洋 研究所・准教授	ハイパー・マルチスペクトル空海リモ ートセンシングによる藻場3次元マッピ ング法の開発	346
	スミス シャーウッド	海洋研究開発機構 地球環境観測研究 開発センター・主任 研究員 海洋研究開発機構 地球環境変動領域・ 研究員	北太平洋域における低次生態系の動的 環境適応に基づいた新しい生態系モデ ルの開発	195
	竹山 春子	早稲田大学理工学 術院・教授 早稲田大学理工学 術院・教授	シングルセルゲノム情報に基づいた海 洋難培養微生物メタオミックス解析に よる環境リスク数理モデルの構築	256 (1年追加支 援期間含む)
	仲岡 雅裕	北海道大学北方生 物圏フィールド科 学センター・教授 北海道大学北方生 物圏フィールド科 学センター・教授	海洋生物群集の非線形応答解明のため のリアルタイム野外実験システムの開 発	221
	山崎 秀勝	東京海洋大学・学術 研究院・教授 東京海洋大学大学 院海洋科学技術研 究科・教授	黒潮と内部波が影響する沿岸域におけ る生物多様性および生物群集のマルチ スケール変動に関する評価・予測技術の 創出	439 (1年追加支 援期間含む)

2013	茅根 創	東京大学大学院理学系研究科・教授 東京大学大学院理学系研究科・教授	海洋生態系の酸性化応答評価のための 微量連続炭酸系計測システムの開発	222
	近藤 倫生	東北大学大学院生命科学系研究科・教授 龍谷大学工学部・准教授	環境 DNA 分析に基づく魚類群集の定量 モニタリングと生態系評価手法の開発	365
	陀安 一郎	人間文化研究機構 総合地球環境学研究所研究基盤国際 センター・教授 京大大学生態学研究センター・准教授	沿岸生態系の多様性機能評価のための 多元素同位体トレーサー技術の開発	226
	永田 俊	東京大学大気海洋研究所・教授 東京大学大気海洋研究所・教授	極微量長半減期同位体を用いた革新的 な海洋生態系・物質動態トレース技術の 創出	371
	宮下 和士	北海道大学北方生物圏フィールド科 学センター・教授 北海道大学北方生物圏フィールド科 学センター・教授	データ高回収率を実現するバイオロギ ング・システムの構築	376
			総研究費	4845

*各研究課題とも5年間の総額

2. 研究領域および研究総括の設定について (JST 記載)

本研究領域は、海洋生物多様性の保全・再生や海洋資源の持続的な利用に寄与する基盤技術の創出を目的として、現在の海洋研究で不足している基盤的なデータを効率的・網羅的に取得するための先進的な計測技術と、海洋生態系の現状を把握し生態系の変動予測に資する生態系モデルの開発を推進するものである。

計測技術については、既存の技術の改良ではなく新規な概念に基づいた広域・連続的な計測技術や、生物種判別や定量把握を効率的に行う技術の開発、モデルについては明らかにしたい現象を特定した上での物理モデルとの融合や、複数の種のネットワークを考慮した生態系モデルの構築が求められる。このように、計測技術開発と生態系モデル構築に焦点を絞ることで、戦略目標の達成に向けて適切な研究領域が設定されている。

こうした研究を進めるためには、計測技術やモデルの研究者だけでなく、海洋生物学に関する分野の研究者の参画が求められ、研究内容に応じてフィールド研究を行う研究者と協同し、検証・実証していくことが重要となる。すなわち、戦略目標の達成に向けては、生態学、海洋物理学、化学、工学及びライフサイエンス等の多様な研究者がチームを組んで研究を行っていくことが必要であり、CREST を選定することは適切である。

以上のとおり、本研究領域では既存の海洋生物学の研究者だけでなく、他の分野の研究者の参入を促すことで、分野横断的な優れた研究提案が多数見込まれる。

研究総括 小池勲夫

小池勲夫氏は、海洋生物地球化学、海洋微生物生態学の分野で先駆的な研究を行い、マリンスノー等の難分解性有機物の化学的特性解析や炭素・窒素安定同位体比、微生物群集の動態、海洋の窒素循環プロセスと微生物の役割を明らかにしてきた。調査解析のみを対象としがちな海洋研究において、研究に必要な計測技術開発を自ら精力的に行うなど、分野を超えた研究活動を進めてきた。その結果、1992年に日仏海洋学会賞、1999年に日本海洋学会賞を受賞するなど、研究に対する評価も高く、十分な先見性及び洞察力を有している。

また、東京大学海洋研究所の所長や、日本海洋学会の会長を歴任し、本研究領域発足当時は琉球大学で監事を務めるなど、海洋研究に対する知識や視野の広さが伺えるとともに、適切なマネジメントを行うことができる豊富な経験と能力を有している。

また、同氏は文部科学省科学技術・学術審議会の委員、同審議会 海洋開発分科会の分科会長、及び総合科学技術会議 基本政策専門調査会 環境プロジェクトチームの委員などを歴任しており、公平な視点で評価を行いうる資質を持ち合わせているとともに、海洋研究者や他分野の研究者から信頼を寄せられている。

以上を総合し、同氏はそのマネジメント力と視野の広さから、計測技術、計測、モデリング等の各分野を連携させ、海洋生物多様性の保全・再生に資する基盤技術の創出を目指す本研究領域の研究総括として適任である。

(JST 記載)

3. 研究総括のねらい

本研究領域では、海洋の生物多様性および生態系を把握するための先進的な計測技術と将来予測に資するモデルの研究開発を行い、これらを生物多様性および生態系の保全・再生するために必要な基盤技術として創出することを目的とする。

この目的を達成するための研究課題として、海洋の生物多様性および生態系の研究で現在ボトルネックとなっている、環境を含む生物データの取得技術とその将来予測に注目した。

具体的には、

(1) 海洋生物やその周辺環境の広域・連続的なセンシング・モニタリング技術、生物種の定量把握や同定の効率化、および生態系ネットワークの解明等による基盤的な生物・環境データの集積に資する先進的な技術等の開発

(2) 生態系や生物多様性の変動を把握し、生態系の将来予測に貢献する新規モデルの開発、研究

の2つを研究対象とした。(1)、(2)いずれの研究においても対象とする生物群集や現象等を明確にする必要があること、さらに開発ターゲットに即した海洋現場での調査・モニタリングによる実証を各研究課題には要求している。このため、フィールド観測分野の研究者との共同研究も奨励するが、調査観測やモニタリングのみの研究は対象としないこととした。

特に、従来の海洋研究の壁を乗り越えるため、工学やライフサイエンス等を専門とする幅広い分野の研究者と海洋生物・生態研究者との共同研究を重視しており、このような研究を通して、生物への影響を考慮した海洋資源の持続的な利用や、海洋保護区の設定などの海洋環境保全策の提示に貢献することを期待した。

4. 研究課題の選考について

本研究領域では、持続的な利用のための海洋生物資源の管理、海洋保護区の設定など海洋環境保全策の効果的な実施、生物多様性の保全を確保した海洋鉱物資源開発、地球温暖化の海洋生物多様性および生態系への影響の評価、大規模自然災害に伴う海洋生態系への影響把握と早期回復等のための改善策の提示など、出口を明確にした研究開発を行うことを目的とし、海洋の生物多様性および生態系を把握するために必要な「計測技術」と「生態系モデル」についての基盤技術の開発を行う研究課題を公募した。

初年度は、「海洋での生物多様性・生態系研究のボトルネックが具体的に提示され、それを解決するために新たな技術開発の確かなイメージが提案されているか」、「既にある技術・手法での観測・計測が研究の中心になっていないか」、「提案されているモデルに新規性はあるか」等の観点で評価を行い、メタゲノム、生態系モデルと衛星観測、自律型水中ロボット(AUV)、音響計測など、異分野の研究者の参画も含んだ5課題を選定した。

2年度目は初年度を踏まえて観測が中心の研究を対象外とする一方で、「より研究の焦点

を絞った、コンパクトな研究提案か」、「工学、ライフサイエンスなど異分野の研究者、企業が技術開発の中核を担う提案を歓迎」、「多様性・生態系モデルは国内外の研究者との共同研究を歓迎」といった観点を追加し選考を行った。結果として、プランクトン群集の適応動態モデル、魚類生態系評価モデル、プランクトン動態モデルとモニタリングシステム開発、野外操作実験システムの開発、藻場の三次元リモートセンシング、シングルセル・ゲノミクスなど、様々な分野にわたる6課題を採択した。

最終年度は、前年度までの観点に加えて、技術開発中心の提案については緩和した条件で、課題の選考を行い、魚類群集の現存量の推定技術やバイオリギングの高効率化、多元素安定同位体やアルカリ度などをターゲットにした化学的計測技術など、様々な分野にわたる5課題を選考した。特に計測技術の開発は、ブレイクスルーを生み、生物多様性の維持や海洋生態系の保全に至る新たな道筋が明確に読み取れる提案を優先的に採択した。

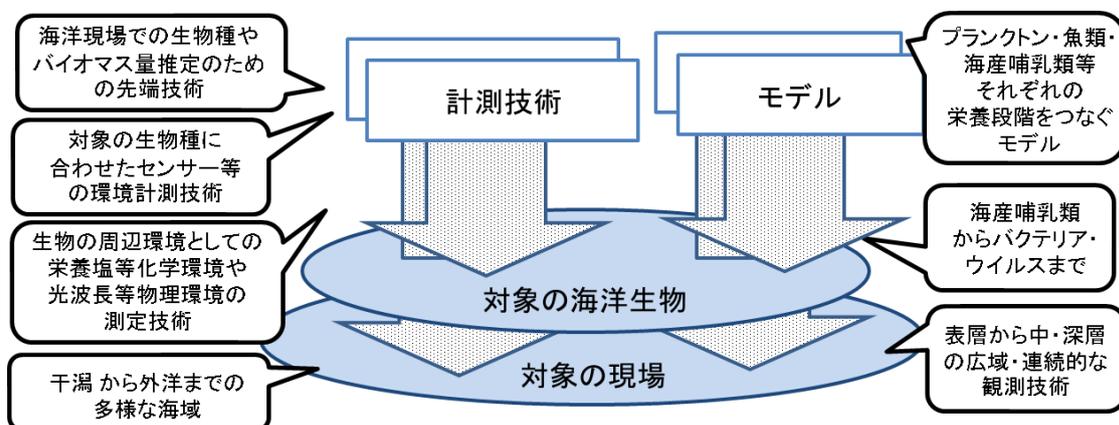
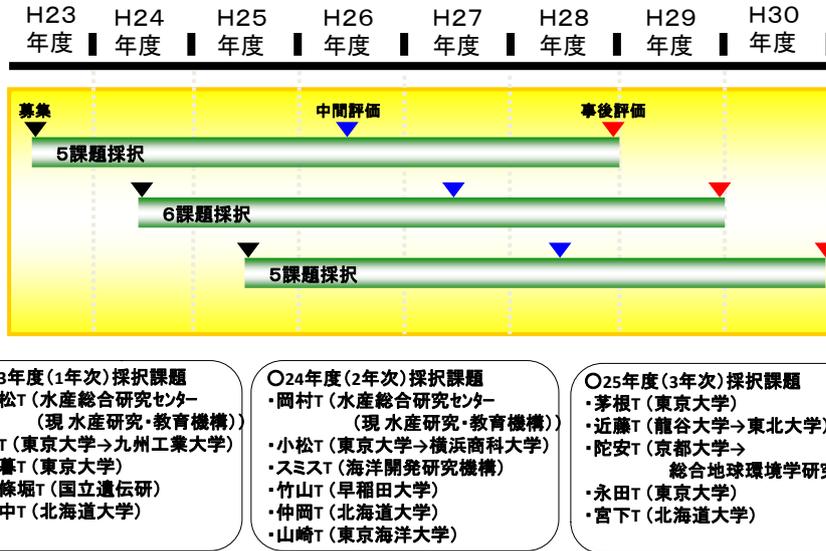


図1. 本研究領域の対象となる技術、分野の俯瞰

採択課題と研究の推移



Japan Science and Technology Agency

図2. 年度毎の採択チーム

採択課題のポートフォリオ

	微生物 プランクトン	魚類	食物連鎖 食物網	藻場・干潟 浅海域	サンゴ礁
ゲノム	【木暮】 【五條堀】	【近藤】			【竹山】
観測システム プラットフォーム リモセン			【浦】	【仲岡】 【小松】	
センサ・計測技術 (生物)		【赤松】 【宮下】			
センサ・計測技術 (環境、化学)		【陀安】	【永田】		【茅根】
モデル	【Smith】	【岡村】			
モデル+計測技 術開発	【山中】		【山崎】		

※選考時のJSTの解釈による独自の分類

Japan Science and Technology Agency

2

図3. 採択課題のポートフォリオ

5. 領域アドバイザーについて

(1) 領域アドバイザーについて

氏名 (専門分野)	終了時の所属	役職	任期
青木 一郎 (水産資源学・バイオテレメトリー)	東京大学	名誉教授	2011年8月～2019年3月
岸 道郎 (海洋生態系モデリング)	北海道大学	名誉教授	2011年8月～2019年3月
黒川 顕 (ゲノム科学、バイオインフォマティクス)	国立遺伝学研究所	教授	2014年8月～2019年3月
中田 薫 (生物海洋学、水産海洋学)	水産研究・教育機構	理事	2011年8月～2019年3月
西田 睦 (分子進化生物学)	琉球大学	理事・副学長	2011年9月～2019年3月
藤井 輝夫 (応用マイクロ流体システム)	東京大学 生産技術研究所	教授	2011年8月～2019年3月
松田 裕之 (数理生物学)	横浜国立大学 環境情報研究院	教授	2011年8月～2019年3月
三宅 亮 (マイクロ流体工学、マイクロ化学分析システム)	東京大学 大学院 工学研究科	教授	2013年5月～2019年3月
安岡 善文 (計数工学、リモートセンシング)	東京大学	名誉教授	2011年8月～2019年3月
矢原 徹一 (生態学)	九州大学 大学院 理学研究院	教授	2011年8月～2019年3月
和田 英太郎 (生物地球化学、同位体生態学)	京都大学	名誉教授	2011年8月～2019年3月

(2) 外部評価者について

氏名 (専門分野)	終了時の所属	役職	任期
瀧澤 美奈子 (海洋ジャーナリスト)	帝国出版リンデ ン		2016年9月～2019年3月
古川 恵太 (海洋政策、沿岸域管理、 環境保全)	公益財団法人笹 川平和財団 海 洋政策研究所海 洋研究調査部	主任研究員	2016年9月～2019年3月

本研究領域では、海洋に於ける生物多様性や生態系を深く理解し、その保全や再生に寄与する基盤となる技術の開発を主要な目標として、沿岸から外洋の深海までの海洋における細菌群集から海産ほ乳類までの幅広い海洋生物の種の同定や、これらの定量的把握のための広域センシング技術や遺伝子解析技術、資源・エネルギー開発や自然災害の影響等による海洋生物資源量や海洋生物多様性の変動量を把握するための生態系モデルや、モニタリング技術の開発などの極めて多様な分野にわたる提案が期待された。

このため領域アドバイザーとして、生物・化学系の研究分野から海産生物の遺伝子解析で多くの研究を進めている西田氏、窒素・炭素などの安定同位体の生態学への適用で顕著な業績を挙げている和田氏、生態学で生物の適応現象の研究を進めている矢原氏、水産学分野では、水産資源学で魚類等のバイオテレメトリーが専門の青木氏、水産海洋学で動物プランクトンの生態学が専門の中田氏、また生態系等のモデル関係では海洋の生態系モデルの我が国での先駆者である岸氏、数理生態学を海洋に応用している松田氏、さらに工学系では地球観測衛星などが専門の安岡氏、応用マイクロ流体システムの海洋分野等への応用を進めている藤井氏と、それぞれ幅広い学問分野にわたり基礎から実証研究にわたる研究フェーズを縦横に俯瞰することのできるアドバイザーの構成とした。また、自分の専門分野だけでなく本研究領域全体に亘って幅広い視点での研究へのアドバイスが出来る有識者と言う点を重視した。

また、2013年度に研究課題選考における「計測技術」、特に微量計測技術の評価を強化する観点から、マイクロ流体工学、マイクロ化学分析システム分野が専門の三宅氏を加えた。2014年度には環境ゲノム関係の研究課題の進展に伴い、生物・環境試料メタデータの情報解析の重要性が高まったことからゲノム科学・バイオインフォマティクス分野が専門の黒川氏を加えた。

領域の中間評価において、出口である社会還元に関する取り組みを評価出来る評価者が少ないのではないかと指摘があった。この点を考慮して初年度採択研究課題の事後評価が始まる2016年度から、海洋政策を民間で提言している笹川平和財団 海洋政策研究所の

古川恵太氏と海洋ジャーナリストである瀧澤美奈子氏を外部評価者として加えた。

6. 研究領域のマネジメントについて

本研究領域のベースラインは海洋の生態系・生物多様性の研究分野に於ける研究基盤としての先端技術の創出と、その実海域での従来技術・手法に対する優位性の検証であることを常に念頭に置き、このことを各研究課題の研究代表者を初めとする研究参加者に繰り返し提示した。従って、3年目の中間評価までに要素技術の開発の目途をつけ、後の2年でそのシステム化と実海域でのテストを行うような工程表での研究実施を要請した。また、開発した先端技術は社会の具体的なニーズに答えるものでなければならないことから、研究開発の社会実装への道筋を明確にすることを求めた。しかし、一方で研究代表者らが短期的な評価を意識して成果を充分解析することなく論文の作成を急ぐことや、過度に出口指向になって新たな発見の芽が摘まれることの無いよう、各研究チームの自主性は出来るだけ尊重し、研究代表者のリーダーシップと分担者の役割分担がうまくバランスして、研究チーム全体としての活性が高まるよう各研究チームとの個別での意見交換を出来るだけ行った。以下、研究状況の把握とその評価、研究指導など領域のマネジメントに関して領域全体として実施した具体的な事項について示す。

(1) 領域会議・領域分科会の開催

研究の進捗を把握し、且つ各研究チーム間でお互いの研究内容・成果を共有し共同研究や成果の相互利用が醸成されるよう、年1回を目処に非公開の領域会議を行った。しかし、本研究領域が極めて幅広い分野をカバーしていることを考慮して、2013年には「モデル」「遺伝子・物理計測」といったテーマを選定して開催する領域分科会を年4回程度開催した。このような領域会議や分科会を通じて、若手研究者を含めて研究チームを超えた交流や連携が行われており、研究総括として、海洋研究と言う、ある意味でこれまで閉じられた研究者空間が他の基礎・応用科学の分野へ開かれて来ていることを感じる。

(2) 研究費の配分の工夫

本研究領域で採択した研究課題においては、提案時にその内容を精査し、研究計画に基づいて予算配分を決定した。特に、海洋生態学の分野に工学的、分子生物学的アプローチを組み合わせた新たな観測・解析手法の開発を目指す課題には比較的大きな予算を、既存の観測データを活用し海洋環境の予測・評価モデルに特化した開発を行う課題は人件費を中心とした少額予算配分を行った。また、これまで海洋科学の分野では実績のない技術の導入を試みる一部の課題においては、研究項目を限定してスタートし、マイルストーンの達成にあわせて研究項目を拡げ、予算を追加するよう設定した。

期中の裁量経費による予算増額については、特に国際連携、チーム間連携、研究成果の社会還元に向けた実証試験の取り組みを重視して行った。なお、これらの取り組みが単年度限

りで終わることの無いよう、領域の裁量で予算を確保しながら 2013 年度より 2016 年度まで継続的に実施した。また、海洋環境の計測を行う領域の特性上、大雨・台風等の影響による装置の故障や流出、海底ケーブルの破損など想定外の事故にも緊急的に対応を行い、各研究チームの研究に遅滞が出ないよう適切にフォローした。

さらに、以下の特記事項で示す 2017 年度から開始した三陸の大槌湾、沖縄瀬底のサンゴ礁域、全国沿岸の 3 つの海域でのフィールドキャンペーンの実施のための予算を確保した。このことによってフィールドキャンペーンの世話人が、実施にかかる経費に関して安心して取り組めるような体制を図った。

(3) 研究室や調査フィールドにおけるサイトビジットの実施

海洋科学分野の特性上、研究は研究室内だけで行われるものではなく、開発した測器等で実際の生物や環境データの収集や観測は沿岸域など海洋現場で行われる。また、測器を実際に開発している研究室等での作業の実態を把握することも重要である。このため専門分野に近いアドバイザー数名とともに実際の開発現場や、それらを使つての観測・調査サイトを訪問するサイトビジットを各研究課題で複数回実施した。若手研究者を含めて開発あるいは調査の現場に集まって貰い、開発する測器等の状況や現場での観測・調査の実態・進捗状況の把握を行った。なお、サイトビジットにおいても大学院生や博士研究員など実際に研究に携わる若手研究者も議論に加わっている。

各研究課題の研究開始時からほぼ 1 年目のサイトビジットでは、主に機器あるいは手法の開発を行っている研究室を訪問し、研究チームのまとまりを把握し、研究の方向性、課題の明確化などに関して意見を聴取した。また、2 回目のサイトビジットは各研究課題の中間評価の数ヶ月前を目処に行った。領域会議や各領域分科会等で出された課題にどのように対処しているかを数時間にわたり徹底的に議論し、中間評価までの研究の目標や柔軟な計画修正などを助言した。また、最後のサイトビジットは各研究課題の最終年度の評価前に行い、実際の測器等の現場でのテストなどを見ながら、研究チームとアドバイザーとでの突っ込んだ議論により、研究課題の目的に対する達成度の評価や事後評価までに検討しておくべき事項の洗い出しを行った。

このように南は沖縄瀬底のサンゴ礁での自動炭酸系計測装置から、北は北海道厚岸湖での藻場環境制御システムまでのサイトビジットを各研究課題で 3 回にわたり実施した。アドバイザーには遠距離の出張で負担をかけたが、海洋の現場でしっかり機能する技術開発を目標とする本研究領域では、このサイトビジットは有効だったと考える。即ち、このサイトビジットによってアドバイザーの先生方の各研究課題に対する助言等がよりの確になるとともに、ポスドクや院生などの若手の研究参加者たちの本研究領域全体への理解が深まった。例えば、北海道の厚岸湖での仲岡チームへのサイトビジットでは、海草藻場で二酸化炭素の添加を行う環境制御システムの開発において、現場での複雑に変化する流れ場に追従して添加条件を制御する装置の開発が必須であることがアドバイザーから強く指摘され、

研究代表者もこれを受けて装置の大幅な改良に取り組むことになった。また、サンゴ礁での現場型の炭酸系自動計測装置についても、計測システム開発に詳しいアドバイザーから、測器の開発現場を見ながら課題の抽出方法や、その解決などについての的確な助言を得ることが出来、その後の改良が加速された。京都大学舞鶴水産実験所で行われた環境 DNA に関するサイトビジットでは多くの院生が参加し、魚類の環境ゲノムの持つ意味や今後の課題などを再認識していた。

(4) 研究課題間の連携や国際連携への働きかけ

本研究領域では、2013 年度から 2016 年度まで総括裁量経費を使い、チーム間連携、研究成果の社会還元に向けた実証試験、国際連携の 3 つの取り組みに関して、申請書ベースでの研究費を配分することでこれらの推進を図った。その結果、様々な形での研究課題間での連携が進むことで大きな成果が上がった。陀安チームが開発した硬骨魚類の脊椎骨を利用した時系列解析の手法を永田チームが応用し、炭素 14 によるサケの回遊海域の推定を行った事例や、山崎チームの開発した低次生態系モデルにおける乱流物理場の導入と、スミスチームが開発した適応生態系モデルを統合したモデルの開発などがその例である。また、海洋微生物の遺伝子情報に関しても、木暮チーム、五條堀チーム、竹山チームがそれぞれの DNA データを統一形式にまとめ、早稲田大学に置かれたサーバーで海洋生物 DNA データベースとして公開するに至った。なお、2017 年度からはこれらを統合した形で 3 つのフィールドキャンペーンを開始したが、既に終了した研究課題も含めて全部で 8 つの研究チームが参加しており、研究課題間の成果の社会還元と言う意味でもその効果が大きい活動であると考えている。

国際連携に関しては、研究総括の経費や JST/CREST 全体での国際強化支援経費を使って、その活性化を図った。例えば茅根チームにおける米国のスクリップス海洋研究所との炭酸系の標準海水に関する共同研究はその良い例である。この共同研究によって開発した炭酸系測定装置の測定精度の確保に成功するとともに、この連携関係を生かして 2018 年度から始まった文部科学省の海洋資源利用促進技術開発プログラム：海洋情報把握技術開発の公募において「Argo 搭載自動炭酸系計測システム開発」と言う大型研究費の獲得にも繋がった。また、スミスチームや山崎チームはそのモデル開発にあたって、ヨーロッパ、アメリカなどの海外の研究者との共同研究を積極的に行い、さらに頻繁な研究者交流やワークショップを行って、これらのモデルの新規性を高めるとともにその普及を図っている。陀安チーム、永田チームも合同で安定同位体の生態系での利用に関する国際ワークショップを開催して開発した新技術のアピールを行った。

(5) 研究領域中間評価への対応

領域中間評価での指摘事項をまとめると以下ようになる。

- ・本研究領域全体として特許出願数が少ないなどの課題がある。また、将来の実装を見据

えて技術・手法の世界的な標準化やマニュアル化を検討すべき。

- ・より一層研究分野間の連携を図れるように、領域会議や領域分科会の活動を活発化させる等の工夫が必要である。
- ・各研究課題をまとめて、開発された技術・手法・機器をどのように利用していくか、残りの年月で将来に向けたロードマップを提示。
- ・研究成果の社会実装に向けた努力が必要で、そのためにはその分野のアドバイザーを増やすことを考えるべき。
- ・この領域には多くの若手研究者が参画しているので、人材育成の成果をデータでしっかり示して欲しい。

特許出願数が少ないことが指摘されているのを受けて、技術開発を中心とした研究課題に対してはなるべく特許出願を呼び掛けた。その結果、全体での特許出願数は国際特許4件を含め19件となった。

なお、分析手法の開発などに関しては、特許よりも論文化での技術の普及を図る方を選択する研究者も多く、その場合は各研究者の意思を尊重した。また、開発した技術が利用できるようなマニュアルやガイドブックの作成は、これが必要なくつかの研究課題で実施されている。例えばバイオリギングの課題では、ユーチューブを使った実技も交えて、対象とする魚種に対するデータロガーの選択等のマニュアルの作成が進んでおり、ハイパースペクトロセンサーを搭載したドローンを使った海藻藻場の調査に関しても、水産試験所で独自に実施出来るようなマニュアル作成が行われた。

研究分野間のより密接な連携を図るため、領域会議などのほかに、2013年度から分野間連携での研究開発テーマを募集して、追加の研究項目を毎年数件実施した。2017年度から既に終了した研究課題も含めて行った3つのフィールドキャンペーンは、大規模な分野間連携への働きかけであり、異分野融合の役割も果たすことが出来た。なお、各研究課題の終了後の、より広範なユーザーによる利用などの社会実装に向けての検討に関しては、サイトビジットなどで代表者や主な研究分担者との面談を行い、各課題の状況に応じて助言を行った。

また、総括裁量経費で研究成果の社会還元に関する予算措置を行った。例えば、県の水産試験所などによるバイオリギングのデータロガーのユーザーの拡大を、この経費を使うことを行うことにより、その利便性を理解して貰い、長期的な利用者の拡大につなげることが出来た。また、同経費で漁業組合の要請により北海道の昆布場の生物密度の広域調査などが行われ、開発した技術の社会実装がスタートしている。このような技術開発と社会におけるニーズとの連携を強めるため、2016年度から外部評価委員として、二人の海洋関係の社会的なニーズに詳しい方に参加を要請し、サイトビジットなどにも同行して貰い、社会実装の立場からの助言を頂いた。

人材育成に関しては、まず本研究領域に参加した博士研究員および大学院博士課程院生

数を挙げると博士研究員は約 130 名、博士課程院生は約 60 名であった。なお、博士研究員の内、大学以外の所属は 10 名程度であり殆どが大学への所属になっている。このことは本研究領域での研究代表者 16 名の内、大学所属が 12 名を占めた事を反映している。また、博士研究員の内 90 名が部分的ではあっても本研究領域での研究費で雇用されていた。各研究課題終了後の調査では、博士研究員や博士課程の若手で本研究領域に参加した者で、海外も含めて大学の教員や国・地方公共団体の研究所の研究員になったものは約 50 名であり、これに対して学位取得の後、海洋関連分野の民間企業に就職した者は 10 名程度であった。なお、若手では JST のさきがけ研究者に採用されたものが 2 名おり、この分野のさらなる発展に寄与している。

(6) 研究成果の発信・実用化促進に向けた活動

① 公開シンポジウムの開催

2015 年 12 月には、我が国の各地域の沿岸の保全や総合的管理に尽力している笹川平和財団海洋政策研究所との共同で、本領域の研究成果のうち、特に沿岸の生物多様性・環境の保全や地域への貢献が期待される新技術を、各地域での海の環境保全や町おこしに関心のある一般の方に紹介する公開シンポジウムを開催した。また、2016 年 3 月には、水産総合研究センター等との共催で、生物資源の持続的な利用・管理に資する新技術開発に関するシンポジウムを開催した。さらに、2017 年度から始めた 3 つのフィールドキャンペーンの成果を受けて、本研究領域の最終年度である 2019 年 1 月から 2 月にかけて、3 つの公開シンポジウムを開催した。このうち、第 1 回の「環境 DNA 技術の現在：生態系観測の未来を展望する」と第 2 回の「先端技術で探るサケの回遊行動と生態」の 2 つのテーマのシンポジウムは笹川平和財団海洋政策研究所との共催で東京で行い、第 3 回の「サンゴ礁の多様性を測る革新技術」シンポジウムは、このテーマに関して関心の高い沖縄で開催した。

② 国際展示会への出展

本研究領域で開発している海洋生物多様性・生態系関係の新技術に関して、その製品化や市場の開拓を目的として、国際的な展示会に出展することを企画した。その 1 つは化学機器分析関係の世界最大規模の展示会である PITTCON2017 におけるブースの出展である。この毎年開催される国際展示会は 2017 年 2 月にアメリカのシカゴで行われたが、開発成果の世界への発信、及び研究開発に携わる研究者らのニーズ収集を目的として、本研究領域内で出展者を募集する形で 4 つの研究チームが参加した。また、これらの研究チームの若手研究者には同時に開かれる学会に参加し、成果発表するため経費を総括裁量経費で措置し、研究交流の場を提供した。また、2018 年 5 月に神戸で開催された海洋測器関係の国際的な展示会である OCEANS' 18 MTS/IEEE Kobe/Techno-Ocean 2018 にも研究領域として出展し、開発した AUV を展示するなど全部で 7 つの研究チームが広報活動を行った。

(7) その他マネジメントでの特記事項—フィールドキャンペーンの実施—

本研究領域で開発された新規の計測機器や計測システムあるいは技術・手法に関しては、その有効性を各チームがそれぞれ選択した海域で確認した。しかし、これらの開発した技術・手法を、同じ海域での生態系に複合的に適用することで相互のシナジー効果が期待出来、これまで明確でなかった生物多様性・生態系の構造を、より確度を持って明らかにすることができると考えた。さらに、各研究課題チーム間の現場での情報交換によって、これらの技術開発を社会実装するプロセスでの広がりも期待出来る。このような考えから、2016年度に初年度の研究課題が終了したことを受けて、2017年度～2018年度に総括裁量経費を措置して、3つのフィールドキャンペーンを実施した。このフィールドキャンペーンの実施にあたっては、調査対象や海域に関して各研究チームからの提案を募集し、アドバイザーも交えた議論によって、三陸の大槌湾でのサケの回遊の課題、沖縄瀬底のサンゴ礁域での深場サンゴ場を含むサンゴ礁の総合調査、全国沿岸における環境 DNA による魚種組成調査の3つのフィールドキャンペーンを開始した。なお、環境 DNA による魚類組成の全国調査に関しては、本研究領域内で主体となるのは近藤チームであるが、全国 528 海域での調査であり、多くの大学、水産試験所等から 100 名以上が参画することから、フィールドキャンペーンとして実施することにした。実施にあたっては関連する研究課題代表者に世話人を依頼し、各フィールドキャンペーンの具体的な研究調整を行った。

7. 研究領域としての戦略目標の達成状況について

(1) 研究総括のねらいに対する研究成果の達成度（特に中間評価からの進展など）

本研究領域の戦略目標は、海洋の生物多様性および生態系を把握するための先進的な計測技術と将来予測に資するモデルの研究開発を行い、生物多様性および生態系の保全・再生するために必要な基盤技術として創出することである。期待される具体的な技術としては、汽水・沿岸から外洋の深海まで広がる海洋における細菌群集から海産ほ乳類までの幅広い海洋生物の遺伝子解析技術を含む種同定技術と、これらの定量的把握のための広域センシング技術、資源・エネルギー開発や自然災害の影響等による海洋生物多様性や海洋生物資源量の変動量の把握に資する生態系モデルやモニタリング技術の開発などである。

これらの目標を達成するために、本研究領域では3か年にわたり全部で16課題を採択したが、そのうち14課題において目標に沿った計測機器の開発、既存の機器を組み合わせた計測システム化、あるいは新規の分析法の開発等が行われた。表1に開発した技術、手法や対象とする生物群集、社会実装への状況についての概要をまとめた。なお、魚類資源でのモデル開発を主体とした岡村チームと、低次生態系の新規モデル開発を目指したスミスターチームに関しては、モデル開発が主体であるため、別途その達成度を示すことにする。

表1 「海洋生物多様性」研究領域で開発した技術・手法について

研究チーム	開発した技術・手法	対象とする生物群集	社会実装への完成度
山中チーム	連続自動海水ろ過装置	海水中の懸濁物	国内特許、メーカー試作
	超高速液体クロマトグラフィー（植物色素の分析）	植物プランクトン	論文化済み
	水色衛星画像での植物プランクトン分類	植物プランクトン	国際ネットワークでの利用
浦チーム	AUV搭載3D広域画像マッピング	底生生物（底魚、かに）	完成し実海域で利用開始
	自動サンプリングAUV	海底堆積物、底生生物	安定した技術にはいま一歩
赤松チーム	水中集音装置、判別ソフト	海産哺乳類、魚類など	装置は市販（MMT社）
木暮チーム	自動遺伝子サンプリング装置（DNAアーカイブ）	微生物	試作段階、文部科学省の事業へ
	DNAメタデータデータベース	微生物	論文化済み
五條堀チーム	デジタルDNAチップ	微生物	早稲田大学でのサーバー実装
	自動DNAサンプリング装置（非水中型）	微生物	試作段階
小松チーム	ハイパースペクトルセンサー/ドローン/解析ソフト	藻場等	センサは浜松ホトニクスで市販化済み
	マルチナロービーム搭載小型無人艇/解析ソフト	藻場等	無人艇はヤマハで製品化
竹山チーム	シングルドロップレットデバイス	微生物、藻類	論文化済み
仲岡チーム	藻場環境制御装置	海藻藻場	試作段階
	海藻からの葉上動物忌避剤	軟体動物・甲殻類	特許化・製品化へ
山崎チーム	プランクトン画像解析ソフト	動・植物プランクトン	HPで公開予定
	低ノイズAUV		試作段階
茅根チーム	現場型微量連続炭酸系計測システム	サンゴ礁など	試作段階
近藤チーム	魚類の環境DNAメタバーコーディング法	魚類	論文化
	時系列データによる生物群集動態の予測手法		論文化
陀安チーム	硬骨魚類の脊椎骨による生育環境等の時系列解析	魚類	一部論文化、データ集積中
	重金属同位体のアイソトープマップでの行動解析	魚類等	データ集積中
永田チーム	14Cアイソトープマップによる魚類等の回遊解析	魚類・哺乳類	
	微量14C自動前処理装置		試作段階
	微量アミノ酸C,N同位体測定手法		論文化
宮下チーム	廉価版・多機能データロガー	魚類等	製品化
	個体間通信システム	魚類等	製品化
	データ受信装置の改良		

技術開発の対象とした生物群集は、細菌群集や動・植物プランクトンなどの低次生態系に位置するものから、沿岸性や回遊性の魚類、また、生態系としては、熱水鉱床などの底生生物群集、浅海域の海藻、海草藻場、サンゴ礁までを含んでいる。まず、本節では研究対象の生物群集あるいは生態系別に本研究領域で取り組んだ課題の達成状況に関してまとめる。

低次生態系における生物多様性の調査技法に関しては、従来の基本的な手法である採水・ネット採集/検鏡観察に対し新規性のある技術として、衛星観測、ゲノムでの種組成評価、画像解析などがあり、本研究領域ではこの3つの技術開発の全てが行われた。山中チームは海洋表層の植物プランクトン群集の種組成を現場で得るため、連続自動ろ過装置と超高速液体クロマトグラフによる色素分析法を開発した。得られた海洋現場での植物プランクトンの色素データと水色による衛星データから、全球における8グループの植物プランクトン群集の色素現存量データを作成した。また、8グループの植物プランクトン群集の細胞サイズを推定する衛星アルゴリズムに発展させ、全球の衛星観測から細胞サイズの多様性を評価できる可能性を世界で初めて見出した。

一方、微細な植物プランクトンを含む微生物群集では、木暮チームと五條堀チームは、それぞれ異なる遺伝子解析法によって、次世代シーケンサーとバイオインフォマティクスを活用し、ゲノム解析による種組成の解析技術を確立した。同時に両チームにより自動的にゲノム試料をサンプリングする装置の開発も行われ、五條堀チームでは沿岸の表層ブイへの設置型、木暮チームでは船上からの吊り下げ型を完成させた。いずれも試作段階であるが計測の自動化への重要なステップである。木暮チームは様々な機能遺伝子もターゲットにし、例えば、特定のビタミン合成系に関する機能遺伝子発現の検討から、生態系内における微生物群集間での機能分担の新知見も得ている。現在、様々な分野で遺伝子解析手法は急速に進展しているが、これらの研究によって海洋分野でも世界の第一線に立つことが出来た。また、山崎チームは海洋の乱流などの微細な物理場と動物プランクトンなどの生物群集との関係を解析するため、海底設置型のカメラによる連続的な画像収集を長期に亘って行った。その結果、これまであまり注目されていなかった乱流などの微細物理環境が、動物プランクトンや懸濁有機物などの動態に大きな影響を与えている事を明らかにした。また、従来殆ど取り上げられなかったマリンスノーのような有機デトリタスの分類を画像解析に組み込むことで、その低次生態系における実態を明らかにしたことも興味深い成果である。

沿岸の浅海域における海草藻場、海藻藻場では種組成や現存量の把握がこれらの機能を評価する上での基本的に必要な情報である。海草藻場はわが国では南西諸島を除くと種組成が限られているので、その分布域や生育密度の広域把握が研究開発の狙いである。本研究領域において小松チームが開発したのは、プラットフォームの無人航空機やドローンに搭載したハイパースペクトルセンサで分布域を決め、その生育密度を小型無人艇に搭載したマルチナロービームで計測する計測システムである。このシステムは北海道の昆布藻場など、均一な大型海藻が繁茂する海域でも適用が可能であり、既に北海道の日高沿岸の昆布漁

場では地元の漁協の要請で広域調査が実施された。これらの手法は着実に信頼性の高い手法として完成度は高い。しかし、地元の漁協等が独自に実施するにはコスト等が大きいので、必要に応じて簡易型・実践型の調査手法に改善する必要がある。さらに、小松チームで開発されたハイパースペクトルセンサは高感度・軽量で多方面に応用できる優れたセンサーである。これをドローンなどに搭載することで、テングサなどの卓越する海藻群落がある場合は、その分布域やおおよその現存量まで推定出来ることが実証された。

仲岡チームは、海草藻場での環境変動と藻場生態系の応答を見るため、藻場環境自動制御装置を開発した。国内外の現場でなるべく電力を使わないシステム開発を目指し、炭酸系や栄養塩、葉上動物の制御を行うシステムを作成した。中間評価での指摘により、流れ場に応答した添加物質の放流系を組み込むことで改変環境の変動は改善されたが、システムとしての安定性や、持続性に関してまだ問題が残る結果となった。なお、ここで開発された葉上動物に対する忌避物質は自然の海藻から得られたもので優れた性質を持っており、その市場化が検討されている。

サンゴ礁に関しては、竹山チームがサンゴ内の共生細菌群集を解析するために、シングルセルゲノムに関する技術開発により、共生細菌群集を通じてサンゴ礁の健全度の評価を行う研究と、茅根チームによる現場型の高精度な小型炭酸系計測装置の開発がいずれも沖縄の瀬底をテスト海域として行われた。竹山チームによるシングルセルゲノム技術では、ドロプレットを使う新手法を開発しその有効性を示すことが出来たが、共生細菌群集とサンゴの白化や環境場との関係を通じてのサンゴ礁の健全度評価に関しては、明確な手法開発を研究課題終了時までには得る事が出来なかった。一方で、最終年度に高温耐性を持つサンゴを得ることが出来、その共生細菌の検討がサンゴと共生細菌の関係の鍵となる可能性が指摘された。この結果を受けて、高温耐性サンゴに注目した移植実験を、研究期間を1年間延長して行った所、サンゴの白化と共生細菌群集の種組成との関係に関する研究が進展し、共生細菌群集の親サンゴからの伝播形式が水平伝播か垂直伝播で、その白化耐性への寄与が異なってくると言う新しい仮説を提示することが出来たことは評価できる。

茅根チームによるアルカリ度自動計測の機器開発は、中間評価の後になって低電力小型ポンプの不安定性が明らかになり、新規ポンプへの交換や不安定性の除去などに時間が取られ、海洋現場でのテストが最終年度の後半にずれ込んだが、最終的には当初目標の高精度での現場観測機器の開発に成功している。なお、サンゴ礁の種組成に関しては、浦チームが開発した3次元カメラを搭載したAUVを、ダイバーの調査が限定される深場サンゴ礁で実施し、良い成果を得ることが出来た。また、赤松チームによる音響マッピングによるサンゴ礁域での底生生物の分布域の推定なども行われ、これらの開発された技術はその適用域が広いことを示すことが出来た。

浦チームによるAUV搭載の3次元カメラによる底生生物群集の把握は、本領域では当初熱水鉱床での底生生物群集を対象にして開発されたが、この技術を数100m以深のイバラガニやキンキなどの底生生物資源の画像による種組成と現存量調査への応用にも進めること

が出来た。これは、これまで底引きトロールなどの手法に頼っていた、その現存量や分布形態の調査に新たな手法導入となった。このように AUV による海底面での生物調査は、サンゴ礁のような浅海域から熱水鉱床のような 1000m を超える深海域までに適用が可能である汎用的な技術まで進展している。

本研究領域での魚類群集の種組成に関しては、近藤チームによる採水した海水中から環境 DNA を抽出し解析する魚類環境 DNA メタバーコーディング法の開発から、赤松チームによる魚等の鳴音の検出による遠距離での水平分布の識別技術、既に示した浦チームの底生魚類の AUV で得られた画像解析による種組成解析などの複合的な技術開発が行われ、それぞれ実海域での稼働が確認されている。これらはいずれも魚類群集での従来の網や魚探などによる調査手法に比べて新規性の高いものであり、広域での生物群集組成の自動観測と言う本研究領域での開発目標と良く合致する。また、既に様々な海洋現場で実際に運用され実績を上げ始めている点も社会実装としては重要である。

さらに、永田チームと陀安チームが連携することにより、脊椎骨に残された放射性炭素 14 や重元素ネオジウム同位体等と、海域をカバーするアイソスケープマップを使った魚類個体での回遊履歴の解析法、また、個々のアミノ酸レベルでの C, N 安定同位体を使った食性履歴の解析など、個体レベルでの魚類の生活史が同時に推定出来る画期的な手法の開発が行われた。また、宮下チームによる、廉価版のデータロガーや個体間通信機能を持ったデータロガーなど、複合的なバイオリギングタグの開発により、ニシンやカツオなど多獲性魚類の回遊や産卵行動などがより効率的に追跡出来るようになったことも大きな成果である。

モデル開発に関しては、低次生態系に関するものが 3 研究課題（山中、スミス、山崎各チーム）、魚類に関するものが 1 研究課題（岡村チーム）で行われた。山中チームは、海洋における植物プランクトン群集の多様性に注目し、海洋物理モデルと結合した植物プランクトン多様性モデルの開発を行った。その結果、世界で初めて 3 次元物理場モデルの中で 240 種以上の植物プランクトン群集が競争できるようなモデルの開発に成功した。また、新たに形質空間分布の概念を導入して、衛星画像と組み合わせる群集組成の将来予測を行う手法を提示することが出来た。スミスチームは海洋の低次生態系について適応動態モデルの手法をうまく使うことにより、計算負荷が低い一方で現象の再現性がかなり良い、一連の構造化された植物プランクトンから動物プランクトンまでの低次生態系を記述するモデルの開発に成功した。例えば、これらのモデルから、北部太平洋で見られる植物プランクトン群集のサイズ分布と程度の異なる環境の攪乱頻度が、その長期的な生産性の異なりを支配していることが示唆された。

さらに、山崎チームは沿岸域における内部波や乱流など、マイクロスケールでの物理環境が動植物プランクトンの多様性に与える影響をモデル化するため、NPZ クロージャーモデル（乱流クロージャーモデルを応用した、栄養塩 (Nutrient) と植物プランクトン (Phytoplankton)、動物プランクトン (Zooplankton) に関するクロージャーモデル) を開発した。これは一般的なプランクトン生態系モデルでは平均場を扱っているため、微細なパッ

チ構造を示す植物プランクトンなどの変動成分を取り扱うことができないからである。乱流研究に使われている手法を応用してクロージャーモデルの開発を行い、変動成分は平均場に大きな影響を与えることを明らかにするなど、現場観測と良く一致するモデル開発に成功した。このように、これら3研究課題におけるモデル開発はいずれも新規性の高いものであり、当初の目的は達成出来たと評価できる。

魚類資源に関わるモデル開発が岡村チームで行われた。この研究課題は、漁獲量などの限られたデータしか得られない水産資源に関して新規モデルの開発を目指したが、水産資源量の変動に関しては、アロメトリー関係やランダム効果を使って複数種の個体群動態を解析するモデルを開発し、太平洋での魚種交代を解析し、種間関係がより影響していることを示すことが出来た。また水産資源の変動モデルと水産資源評価モデルとの統合に関しては、二重頑健法と非対称ロジスティック回帰モデルの組み合わせと言う新たな手法を提案し、より精度の高い資源の崩壊確率を予測することに成功するなどの成果を挙げた。

なお、これらの課題における研究の方向性やその進め方に関しては、アドバイザー等による助言で研究が大きく進展したケースが多かった。例えば、永田チームでのサケへの取り組みに関しては、水産関係のアドバイザーからの具体的なコメントでサンプルの集め方や既存の手法とのすり合わせがうまく進展した。また、小松チームのハイパースペクトルメーターについては搭載する無人航空機の開発が大幅に遅れたが、ドローンをプラットフォームとして現場テストを始めるように助言があり予算措置が取られたことで、測器の開発とそのテストのタイミングを合わせることが出来た。近藤チームの環境 DNA での魚類組成の解析技術に関しても、アドバイザーとの会合の中で環境中での環境 DNA に関する動態の基礎的な把握がその解釈のためには必須であるとの意見を受けて、環境中に放出された環境 DNA の組織化学的な手法による解析手法の開発も行われた。

以上、本研究領域で研究開発が行われた16研究課題の内、研究課題事後評価では、その内13課題が当初の目標を達成することが出来たA評価、環境DNA技術を開発した近藤チームの1課題が目標を上回る成果を挙げたA+評価となった。なお、研究課題事後評価でB評価であった竹山チームに関しては、サンゴの共生細菌と白化に限定した1年延長の研究での評価はA評価を得ることが出来た。

(2) 研究領域全体として見た場合の特筆すべき研究成果

本研究領域での学術的にもまた社会的なインパクトの両面において特筆すべき研究成果としては、近藤チームによる環境DNAによる海洋での魚類群集組成の解析技術と、永田・陀安両チームによる、サケなどの硬骨魚類の脊椎骨を利用した魚個体レベルでの生活史の解析技術の二つが挙げられる。

環境DNAは、陸水ではこれまで希少生物の検出などに使われ始めていたが、本研究領域で開発された次世代シーケンサーと、海産魚類DNAデータベースを用いての魚類環境DNAメタバーコーディング法は、魚類相を従来法よりもはるかに簡便で精度よくかつ網羅的に知

ることができ、様々な現場での実用性は極めて高い。さらに様々な生物が海洋中に放出する環境 DNA の動態に関する知見も蓄積された。これらの基礎的な研究も含めて、本研究領域での研究開発が中核となって、わが国におけるこの分野の環境 DNA 研究は世界のトップレベルにまで達することが出来た。なお、本研究領域の近藤チームのメンバーが主体となって環境 DNA 学会が創立され、2018 年 9 月に第 1 回東京大会を開催している。この環境 DNA 学会は既に 200 名以上の会員を得て、手法の標準化などに取り組んでいることも特記すべき成果である。この環境 DNA の様々な水域での生物群集解析への取り組みは、既に民間でも広く始められており、社会的なインパクトも大きいと考えられる。

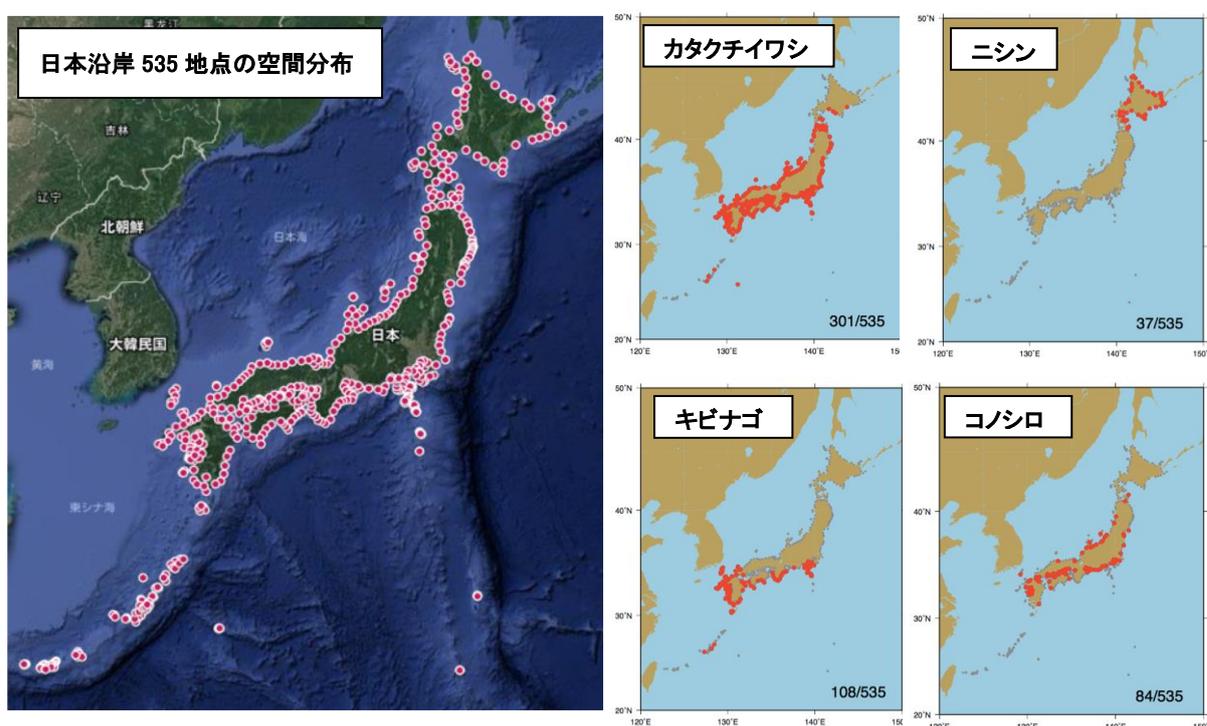


図 4. 環境 DNA 計測による魚類種組成を求めた日本沿岸域 535 地点 (右) と代表的な魚種における空間分布 (左)

一方、魚の生活史の解析にはこれまで耳石が主に使われてきたが、そのサイズや化学組成から分析できる項目は限られていた。本研究領域では、沿岸や外洋で魚の体内に取り込まれたネオジウムや炭素 14 などの重・軽元素同位体や、個々のアミノ酸などの極めて微量な成分から、その回遊履歴や食性などの解析を目指す研究課題が二つあった。陀安チームはサンプル量を増やししながら生活史を追うことが出来る部位として脊椎骨に注目し、この脊椎骨も生育環境を保存していることを、耳石との比較により確認した。脊椎骨にはコラーゲンなどの有機物も含まれるため、永田チームのターゲットであり、軽元素である放射性元素の炭素 14 の分析や、炭素・窒素の安定同位体による食性履歴の解析も可能である。

これに加えて各元素同位体の北部太平洋におけるアイソスケープマップを作成し、炭素

14 やネオジウム同位体を、薄く区分した脊椎骨サンプルでの測定と合わせることで、サケやクロマグロなどの回遊経路を個体レベルで再現出来る手法の開発に成功した。また、各アミノ酸レベルでの炭素・窒素の同位体による食性解析にも成功している。これらの技法は学術的にも新規性が高いのみならず、既に水産的に重要な魚種であるイワシ、サケ、クロマグロなどに応用され、興味深い知見を生み出しており、社会的にもインパクトのある新規手法となることが期待される。

(3) 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

本研究領域では、海洋生態系・生物多様性をターゲットにした多くの技術開発とそれらの技術に基づく科学的な知見の蓄積が行われたが、以下にその中でも科学的・技術的に顕著と考えられる事項を列記する。

- ・ AUV による深海での底生生物群集の採取装置の開発（浦チーム）
- ・ 微生物の機能遺伝子等の解析手法による生態系の動態把握（木暮チーム）
- ・ ドロップレット技法によるシングルセルゲノムの解析（竹山チーム）
- ・ 海洋魚類における環境 DNA による広域種組成の網羅的判別（近藤チーム）
- ・ 硬骨魚類の脊椎骨を使った複合的な化学分析による生活史の解明（永田、陀安チーム）
- ・ 深海魚類からの極めて古い年代を示すアミノ酸の検出（永田チーム）
- ・ 魚類間の交信による生物行動に関する情報収集効率の飛躍的な向上（宮下チーム）
- ・ 乱流過程の導入によるプランクトン動態の再評価（山崎チーム）
- ・ 植物プランクトン群集の多様性のモデル化（山中チーム）
- ・ 適応動態モデルの導入による新規の低次生態系モデルの開発（スミスチーム）

浦チームは新規の AUV 開発において AUV に海底でのサンプリング機能を付加することに挑戦した。従来海底でのサンプリングは、調査船から操作する ROV の機能とされていたが、AUV と船上との通信技術の改良や AUV ナビゲーション技術の高度化により、船上でサンプリングの対象物を指示して対象物を回収する基礎技術を完成させた。このような技術開発は世界的にも新規性があり、AUV 機能の拡充の大きな柱となるものである。

木暮チームは、従来の遺伝子情報に、その検出の場や属性などの新たな付加価値を加えたことで、広範な利用が期待されるメタメタデータベースの開発や、海洋微生物が発現する様々な機能遺伝子を検討したが、メタゲノム情報からのポリマー凝集系の遺伝子発見や、海洋微生物におけるナトリウムイオン排出性のロドプシン (NaR) の発見などは学術的にも高く評価される。なお、これらの研究成果は米国科学アカデミー紀要 (PNAS) などのトップジャーナルに掲載された。

竹山チームは、サンゴ内共生細菌の解析を行う目的で、ドロップレット・マイクロ流体デバイスの基本としたシングルセル解析法を開発し、その成果は Scientific Reports 誌等に

掲載された。また、この液滴を利用した分析技術については、その広い応用を目指して国内外の2大学、1研究機関と共同研究を開始、民間企業3社と共同研究契約を締結し、このうち数社はターゲットのスクリーニングにシステムを用いるための共同研究FSをスタートしており、今後の技術としての発展が期待できる。

近藤チームによる環境DNAと永田・陀安両チームによる同位体を使った魚等の回遊履歴の解析に関しての評価は既に(2)で示したが、近藤チームでは、さらに非線形動態理論に基づくEmpirical Dynamic Modeling (EDM)を利用して、舞鶴湾での長期観測で得られた多種個体群密度時系列データを使って種間相互作用や生物群集安定性を評価する手法を開発し、その成果はNatureに掲載された。また、永田チームでは各アミノ酸レベルでの様々な同位体分析法を開発したが、その過程で底魚において特定のアミノ酸の炭素14同位体が極めて古い年代を示すことを発見した。このことは、生態系の中で特定のアミノ酸が使いまわしされている可能性を示しており、学術的には極めて興味深い結果である。

宮下チームは、バイオリギングのために魚に装着するデータロガーの小型化と廉価化を図ると同時に、データの回収効率を上げるため個体間通信システムの開発を行った。この技術は新規性と独創性のある新しい水中音響通信システムであり、海洋測器の発展に大きく寄与し、データ回収率の向上によってバイオリギングによる海洋生物研究の深化が期待される。

山崎チームは、沿岸域における内部波や乱流などマイクロスケールでの物理環境が動植物プランクトンの多様性に与える影響を、微細構造観測プロファイラー (TurboMAP) や海底ケーブルオペザバトリー等による観測とNPZクロージャーモデルの開発で統合化する研究を行った。その結果、これまで我が国では取り組まれることが少なかった、微細物理環境と生物群集との関係について多くの成果を得ることが出来た。これらの研究成果は、Journal of Geophysical ResearchやDeep Sea Researchを初めとする、この分野の国際誌への原著論文だけでも44報が公表されており、基礎研究への貢献は大きいと評価される。

山中チームは、世界で初めて240種以上の植物プランクトンが競争する植物プランクトン多様性モデルを3次元物理モデルと結合させて開発した。現場および衛星観測から得た結果を利用しモデルと比較することで、植物プランクトン群集を形質空間上の分布として表現し、それらの多様性を示した。この結果、ある種の生存と絶滅、あるいは占有率は最大成長速度を持つ海域の体積と潜在的な生息海域への残留時間に依存していることが判った。このような解析が可能となったのは、全ての植物プランクトンが同じ条件の下で競争する多様性モデルを構築したからであり、この成果はEcological Modelling誌に発表された。また、海洋表層での新規開発による超高速液体クロマトによる色素分析法の開発などを通じて、現場データと衛星による植物プランクトンの機能的分類法の改良なども行われ、山中チームによる国際誌の論文は47編に及んでいる。

スミスチームは環境変化に対する植物プランクトンの柔軟な生理的応答を再現するために、海洋の低次生態系分野では初めて、バイオマスの動態を一つの微分方程式で表したモデ

ルを開発した。このモデルでは、瞬間的な順化という新たな仮定が、より効率的な計算を可能とする鍵となっている。また、このプランクトン群集におけるサイズの多様性に注目して、一連の構造化された植物プランクトンから動物プランクトンまでの低次生態系を記述するモデルの開発に成功した。これらの成果は Journal of Plankton Research や Scientific Reports などの国際誌に 19 編公表されている。

なお、上記には個々の研究チームにおける研究技術開発を挙げたが、国際誌等への各研究課題での論文発表は、第 1 期採択の 5 課題では 222 編、第 2 期採択の 6 課題では 112 編、第 3 期採択の 5 課題では 171 編であった。また、国際学会等での発表に関しては、各研究課題の発表は、第 1 期採択の 5 課題では 229 件、第 2 期採択の 6 課題では 184 件、第 3 期採択の 5 課題では 133 件であった。このように、全体としても活発な研究活動とその成果発表が行われてきたと考えられる。

(4) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

本研究領域における社会的・経済的な観点での貢献に関しては、ここでの技術開発の出口を大きく次の二つに区分した。一つは、現在、その進行が危惧されている地球温暖化や海洋酸性化、さらには海洋汚染等に対して、海洋生物多様性・生態系がどのように応答しているかを知るためのものであり、言わば海洋での生物多様性・生態系の保全や、その再生に寄与する技術開発である。また、もう 1 つは、人類に対するたんぱく源としての魚などの生物資源を海洋は供給しており、その持続的な利用と保全に資する技術開発である。以下に本研究領域における研究開発で、社会的・経済的な観点からの貢献として顕著な事例を列記する。

- ・現場型の小型炭酸系自動計測装置の開発（茅根チーム）
- ・海洋魚類における環境 DNA による広域種組成の判別（近藤チーム）
- ・音響計測における海洋生物群集の遠距離モニタリング(赤松チーム)
- ・AUV 搭載の 3 次元カメラによる底生生物群集の広域分布調査（浦チーム）
- ・ゲノム情報を取り込んだ海洋モニタリングデータベースの構築（五條堀チーム）
- ・藻場における広域生物密度の計測法の開発（小松チーム）
- ・海産魚類の脊椎骨による生活史の解析手法の開発（陀安、永田チーム）
- ・魚類間の交信による生物行動情報収集効率の飛躍的な向上（宮下チーム）
- ・統計的手法による水産資源量の推定法の開発（岡村チーム）

茅根チームの開発した現場型の小型炭酸系計測装置は、地球温暖化と海洋酸性化と、二つの影響を受けている世界のサンゴ礁での石灰化速度を現場で自動計測出来る機器であり、この測器を活用することで、サンゴ礁の実態をモニターし、その回復と保全を図るのに必要な情報を得ることが出来、その広範囲での利用が期待されている。なお、この機器の室内バージョンでの市販化が現在計画されている。

近藤チームによる環境 DNA による海産魚類群集の網羅的な種組成の把握技術は、温暖化により移動が容易な生物群集である魚類の温暖化への応答を、全国規模で簡易に明らかにすることが出来る技術として評価出来る。全国フィールドキャンペーンでは既に多くの大学、県水産試験場が共同でこの調査を行っており、今後のこの技法の広がりが期待出来る。

赤松チームで開発された、小型鯨類の鳴音を使った自動遠距離モニタリング技法 A-tag は、本研究課題により受動的手法で生物個体を定量できる機能が開発され、日本での特に洋上風力発電の環境アセスメントに広く用いられるようになった。さらに我が国に張り巡らされた地震観測網を用いたヒゲクジラ類の検出と可視化をアジア水域ではじめて実現し、船舶調査が困難な冬季を含め 8 年間のナガスクジラの出現動態を明らかにし、明瞭な季節変動を捉えることが出来たことも鯨類資源の保全を目指すうえでは大きな成果である。また、浦チームにより開発された AUV 搭載の 3 次元カメラによる海底生物群集の広域把握技術は、海底熱水鉱床やマンガンクラストなどの、今後開発が期待される海底鉱物資源開発における環境調査手法として重要であり、既に独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEG) などでの調査に使われ実績を上げている。

五條堀チームは、従来の海洋環境情報に、ゲノム情報をデジタルハイブリゼーション、デジタル DNA チップ、クラウドを活用した解析法など、一連のシステムとして導入することを試み、“海洋モニタリングデータベース”の構築に成功した。本データベースには、日本沿岸のメタゲノムデータが既に約 1 兆塩基蓄積されており、塩基配列データだけでなく配列解析の基になるサンプリングの時期、場所、物理化学的環境条件や解析手法等の情報も提供している。これはゲノムによる海洋生態系の評価が、一般に広く普及するのに大きく寄与する技術であると評価出来る。我が国沿岸でのまとまった形でのメタゲノムのデータベースを構築することが出来た点も優れた成果である。

海洋の生物資源の持続的な利用とその保全と言う社会的な要請に対しては、本研究領域では、特に第 3 期に採択した課題を中心として複合的な対応を行った。即ち、これらの種組成に関する情報を近藤チームの環境 DNA による広域調査などで明らかにし、また、ニシン、イワシ、サケ、カツオなどの水産的に重要な回遊魚に関しては、宮下チームによる複数のバイオロギング技術でその回遊や産卵行動を追跡する。さらに、陀安、永田両チームによる脊椎骨等を使った微量同位体計測技術による個体レベルでの回遊経路や、その食性など生活史を解析する手法開発を合わせて、これらの魚種の保全管理に必須である、基本的な生活史の情報を得る手段を提供することが出来る。これら多獲性魚類の回遊や食性などに関するデータはこれまで個別に得られていることが多く、その全体像が把握できる総合的な技術開発を行うことに成功したことで、水産関係者にも大きな反響を与えており、今後の積極的な利用が期待できる。

なお、浦チームの AUV による底生生物の広域調査手法は、水産研究所との連携でイバラガニやキンキなどの底生生物資源の画像による種組成と現存量調査への適用にも進んでいる。また、昆布藻場やテングサ場など沿岸域での食用海藻の広域調査に関しては小松チームの

開発した、ドローンや無人艇をプラットフォームとした複合的な調査手法が有効であり、この手法を使って、既に北海道日高海岸や大島での調査が水産試験所や漁業協同組合との連携で実施され、成果を挙げている。

生物資源関係のモデリングに関しては、岡村チームが漁獲量などの限られたデータしか得られない水産資源に関して、複数資源の変動予測が可能なモデルと資源量評価手法を統計学の研究者との連携により開発した。水産資源量の変動に関しては、アロメトリー関係やランダム効果を使って複数種の個体群動態を解析するモデルを開発し、太平洋での魚種交代を解析し種間関係がより影響していることを示すことが出来た。また、水産資源の変動モデルと水産資源評価モデルとの統合に関しては、二重頑健法と非対称ロジスティック回帰モデルの組み合わせと言う新たな手法を提案し、より精度の高い資源の崩壊確率を予測することに成功するなどの成果を挙げた。これらの成果は *Ecological Applications* や *Methods in Ecology and Evolution* などの国際誌に発表されている。

特許等の申請状況に関しては、国内特許が 15 件、国際特許が 4 件であった。なお、分析手法の開発などに関しては、特許よりも論文化での技術の普及を図る方を選択する研究者も多く、その場合は各研究者の意思を尊重した。

(5) 本研究領域に続く研究資金の獲得状況

本研究領域では、海洋の生物多様性・生態系の解析に関する基盤的な技術開発が行われたが、これらの成果をもとに、様々な競争的研究資金へのアプローチが行われた。得られた研究資金はその額には大きな幅があるが、3000 万円以上の大型研究費だけでも 16 件あり総額は約 11.5 億円に達する。これらの研究費は大きく分けて 2 つに区分され、1 つは、開発された技術を使って学術的な課題に取り組むものであり、山中チーム、赤松チーム、竹山チーム、茅根チームなどの科学研究費補助金などがそれに当たる。また、1 つは小松チーム、竹山チーム、茅根チーム、木暮チームなどの文部科学省の技術開発事業や JST/さきがけのように開発した技術の応用面をさらに広げるための研究開発である。なお、2018 年から始まった文部科学省の海洋資源利用促進技術開発プログラム：海洋情報把握技術開発では、公募された 3 件の課題の内 DNA データ解析技術、海洋の炭酸系自動計測技術の 2 課題において本研究領域で開発された技術が評価され採択に至っている。

(6) その他、特記事項

本研究領域では 2017 年度から 2 か年にわたって、3 つのフィールドキャンペーンを実施した。各研究課題が開発した技術・手法を同じ海域での生態系に複合的に適用することで相互のシナジー効果が期待出来、また生物多様性・生態系の構造をより確度を持って明らかにする事が、これによって出来ると考えた。さらに各課題チーム間の現場での情報交換によって、これらの技術開発を社会実装するプロセスでの広がりも期待できる。同時にサケやサンゴ礁と言った、社会的にも明確なニーズのある生物群集や生態系を調査の対象にす

ることで、研究成果の社会還元へのアピールも狙った。

岩手県大槌湾を中心として行われたサケの調査では、この湾から外洋に出て回帰してきたサケの回遊経路や、その経路における食性の変化などを個体レベルで再現するために、陀安チームと永田チームで開発された、脊椎骨に含まれる各種元素同位体を計測する手法が使われた。さらにベーリング海や他の外洋において、宮下チームで開発されたバイオロギングのデータロガーの取り付けを行っている。回帰したこれらのタグ付きのサケを解析することで、より確実な回遊経路などを再現出来ると考えられ、サケの資源管理等から見て画期的な知見となり得る。また、産卵場や自然河川で産卵した稚魚が湾内を経由して湾外へ移行する過程も、稚魚の環境 DNA や同位体分析などで明らかにしようとしている。これらのサケに関する調査は、サケの回帰や産卵がそれぞれ年に 1 回のイベントなので、その成果を蓄積するには時間がかかるが、大槌には東京大学大気海洋研究所の臨海研究施設があり、文部科学省の事業である東北マリンサイエンス拠点形成事業との密接な連携も取られており、ここでの継続的な調査が今後も行われるので、大きな成果が期待出来る。

環境 DNA のフィールドキャンペーンでは、2017 年夏に、北は北海道の稚内から南は沖縄の西表島まで全国沿岸の 528 か所の沿岸水を使い、同一手法で採水からその前処理と次世代シーケンサーでの分析を行い、「魚類環境 DNA メタバーコーディング」によってそれらの海域での魚種組成の解析を行った。この調査により我が国沿岸で報告されている海水魚 2,800 種の内 1,200 種以上の検出に成功し、これまで潜水や網などで調査されていた魚種組成に対して環境 DNA 法の大きな優位性が示された。既にこれらの膨大なデータの解析によって、ブリなどの有用魚種の北上の実態や黒潮の魚種組成への強い影響などが明らかにされており、魚類の生態や水産資源の管理などに与えるインパクトは大きい。2018 年度には、採水海域を絞る代わりに時系列データを得ることで季節変動の解析が行われた。

サンゴ礁でのフィールドキャンペーンは、本研究領域で開発された様々な要素技術を沖縄の瀬底サンゴ礁で応用する形で行われた。ここでは地球温暖化に対して、サンゴの避難所と考えられる数 10m 以深の深場に生育するサンゴの動態を、浅場サンゴと対比させることを目的としたが、深場サンゴ礁調査への AUV の投入による詳細な分布図の作成、環境 DNA や鳴音の自動観測装置によるサンゴ礁生物相の把握、サンゴ共生細菌群集の比較など、これまでサンゴ礁の研究にはあまり用いられていない新規技術が導入され、その有効性がテストされたことは、サンゴ礁の保全、再生において大きな意義を持つものとする。なお、瀬底には琉球大学の臨海施設があり、サンゴの研究者も多いので、今後の持続的な保全研究の進展が期待出来る。

研究総括として、以上のようにフィールドキャンペーンでは各研究課題での研究成果に止まらず、これらの要素技術の複合化を行い、また共同研究者を広く募って、技術の全国展開を図ることで、社会実装に向けてのより大きな推進力とすることが出来たと考える。

8. 総合所見

(1) 研究領域のマネジメント

本研究領域では、海洋で実際に使うことの出来る技術を開発することを目指したことから、進捗状況の把握と課題に対する助言、戦略目標への貢献、社会還元への道筋など領域全体としてのマネジメントに関して、アドバイザーの積極的な参画を得ながら以下の取組みを行った。

① 研究室や調査フィールドにおけるサイトビジットの実施

本研究領域が目指す生物多様性に関する技術開発では、開発した測器等による生物群集や環境データの収集や観測は沿岸域など海洋現場で行われる。また、測器を実際に開発している研究室等での作業の実態を把握することも重要である。このため専門分野に近いアドバイザー数名とともに、実際の装置の開発現場やそれらを使つての調査サイトを訪問するサイトビジットを各課題で複数回実施した。このサイトビジットにおいては、大学院生や博士研究員など実際に研究に携わっている若手研究者にも議論に加わつて貰うことで、研究チーム全体としての方向性などをより明確にすることが出来、またアドバイザーによる適切な助言を得ることが出来、研究開発の進展に大きく寄与することが出来た。

② 研究課題間の連携、研究成果の社会還元や国際連携への働きかけ

本研究領域内で、研究課題間の連携、研究成果の社会還元、国際連携の3つに対する提案を公募形式で実施した。主に総括裁量経費により4か年に亘つてこのような提案型のターゲットを絞つた研究開発を行うことで、各研究課題を戦略目標に沿つて進捗させる1つの働きかけとした。特に本研究領域での技術開発では、海洋での生物多様性や生態系と言つた、一般的なニーズに向けての産業化などとは少し距離のある課題を扱つているため、各研究課題の研究の出口をどのように設定するかは当初からの課題であった。このため社会還元への予算配分では、なんらかの社会のニーズとマッチした新規技術の提供を提案する課題を採択して実施した。伊豆大島での水産試験場の要請によるテングサ場の広域調査、県の水産試験場を対象としたバイロロギング技術の提供などがその例である。本研究領域で開発した新技術が社会でどのように使われるかを各研究課題が検討するためには、これらの予算配分は有効な手段であったと考えている。

③ 領域としてのフィールドキャンペーンの実施

フィールドキャンペーンは開発された新規技術・手法を海洋現場に適用し、その有効性を確認するために海洋科学では良く使われる手法である。海洋における生物多様性・生態系は複雑であり、これを解析する技術開発とその運用にあつては、多面的な取り組みが必須である。本研究領域で各チームが開発した新規技術を同じ海域で複合的に適用することで、相互のシナジー効果を評価し、また開発された技術のより幅広い適用の可能性を検討するためにフィールドキャンペーンを企画した。具体的には2016年度に初年度採択の研究課題が

終了したことを受けて、総括裁量経費から措置した予算で、公募形式で3つのフィールドキャンペーンを開始した。このフィールドキャンペーンでは本研究領域内での研究者だけでなく、大槌のサケの回遊に関する調査では、文部科学省の事業である東北マリンサイエンス拠点形成事業との密接な連携が行われた。また、環境DNAによる魚類組成の全国調査では、全国528海域での調査において多くの大学、水産試験所等から100名以上が参画するなど、本研究領域の枠を超えた連携を図ることで、開発された先端技術の幅広い適用の展開や新技術の周知に大きく貢献した。

(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

採択した16研究課題に対する、アドバイザーと外部評価者による事後評価の結果はA+評価が1研究課題、A評価が13研究課題、B評価が2研究課題であった。なおB評価であった竹山チームは、最終年度に高温耐性を持つサンゴを見出して1年間研究期間を追加して行い、サンゴの白化と共生細菌群集の種組成との関係に関して新しい仮説を提示することが出来た結果、A評価を得ている。従って、海草藻場での複合的な環境制御システムの開発を目指した研究課題が、流れが複雑な沿岸では制御機構の安定性に問題があるとされB評価であった以外は、最終的にはA評価以上となった。天候などの条件に左右される実海域での開発技術の有効性の確認までも評価に含めた本研究領域において、殆どの研究課題における技術開発が実海域で使用可能な新規性のある基盤技術として評価されたことになる。

また、戦略目標は「海洋生物資源等の持続可能な利用に必要な海洋生物多様性」を唱っていることから、研究の出口として特に生物資源の持続可能な利用の面に留意した。本研究領域では16課題の内、わが国で生物資源として重要な魚類や底生生物、海藻を対象生物群集に含むものは8課題あったが、中でもAUVによる底生魚類の調査手法、環境DNAによる魚類組成の網羅的な調査手法、脊椎骨による魚類個体の生活史の再現などの新規性の高い技術開発に成功した。なお、これらの新規技術は、そのより広範な適用のためには、底生魚類の広域調査のAUVのように、価格の面や取り扱いの容易さなどで今後改良の余地があり、また、脊椎骨を使った魚類の生活史解析手法に関しても熟練を要する分析手法や、高価な分析機器などの課題がある。従って新規性のあるこれらの基盤技術を広範囲での利用が可能な技術に今後進展させて行くことが必要である。

(3) 本研究領域を設定したことの意義(研究開始以前や中間評価時点と、終了時点の比較を念頭において)

陸域に比べて人間が直接観測・調査出来る場が極めて限定されている海洋での生物多様性や、生態系の保全・再生のための基盤技術の創成を狙って始められた本研究領域は、社会的な関心と技術開発の両面で時期を得ていたと考える。国連海洋法の下でわが国が世界第6位の排他的経済水域を持ち、その中の生物、鉱物資源に関する権利を確保した一方で、この広大な海域の生物資源も含めた管理義務が課される事になったからである。管理するた

めには、この海域の科学的な知見を集積する必要があり、そのための海洋の調査手法に関しては、衛星観測やアルゴフロートなどの技術開発により、物理環境の3次元的な把握に関する進展は21世紀に入っても目覚ましかつた。一方、生物群集の組成など生物多様性や生態系に関する情報は、衛星による表層植物プランクトンの分布などを除くと、その必要性にも拘らず世界的にも大きくは進展していなかった。

また本研究領域の開始当時は、生物情報をゲノムで得る技術が次世代シーケンサーの開発やバイオインフォマティクスの発展で、ゲノム解析の対象が実験室からフィールドへ移行してきた時期であった。ゲノムをターゲットにして海洋の生物多様性に関する解析技術が飛躍的に進展することが期待できたのである。本研究領域では、ゲノム解析技術によって生物群集の解析を行った課題は6課題になり、対象生物群集もウイルス、細菌群集から動・植物プランクトン、魚類群集までに及んでいる。本領域が行われたことで、ゲノムによる海洋生物多様性の解析手法においても、わが国の研究がトップレベルに並ぶことに大きく貢献した。特に、環境DNAの分析による海産魚類群集の種組成の網羅的把握に関しては世界のトップに立つことが出来、2018年における世界でもおそらく初めての、環境DNA学会の創設まで進展した。さらに、本研究領域の発足前後から急速に進展したAI技術なども、工学研究者との連携で海洋での生物多様性の分野への取り組みが本研究領域で行われた。海底生物をサンプリング出来るAUVの開発や、動物プランクトンの画像認識による種組成なども、この最新のAI技術を応用することで可能になった課題である。さらに、海洋の酸性化や温暖化によって危機的な状況にあるサンゴ礁の保全に対する社会的なニーズの高まりと、ゲノム技術やマイクロ流路を利用した「Lab on a chip」などの分析技術の進展が合致することで、社会のニーズに答えることが出来る技術開発を進めることが可能になった。

このように、海洋の各生物群集を広域で把握し、生態系における機能を評価する基盤的な技術開発が、これだけの予算規模でまとまっていたのは我が国では初めての事であり、本研究領域が設定されることで大学院学生などの若手研究者を含め、400名近くが本領域に参加し、しかも海洋生態学や分類学を専門にする研究者だけでなく、陸域の生態学、基礎生物学や海洋工学、電子工学、分析化学など多方面の研究者の参画を得て、この分野における技術開発を進めることが出来た点は今後のこの分野の進展に対して大きな貢献であろう。特に研究者の専門性が細分化しがちな我が国において、このような共同研究による新規分野へのチャレンジは相互に良い刺激を与える良い場を提供したことになる。

なお本研究領域で開発された海洋生物多様性・生態系をより広域に調査し、その動態を把握する技術の多くはまだ基盤技術の段階であり、従って訓練を積んだ研究者によって限られた生物群集と海域での有効性が確認されたに過ぎない。より広い応用のためには、技術のさらなる自動化やマニュアル化、試作機器の商品化等を進めて行く必要があるが、既に本研究領域の中で、その動きは始まっている。例えば、環境DNA学会では学会として海洋環境調査の実務者に対するマニュアル作りや講習会を始めている。また、バイオリギングのデータロガーに関しても、県の水産試験所などに対する積極的な共同研究や技術援助によってロ

ガーのユーザーを増やすことで、ロガーの販売価格の価格を下げることを行っている。各研究課題が開発した技術・手法の状況に応じてのステップを今後積み上げることで、本研究領域の成果の、より広範な社会への還元が達成出来ればと考えている。

(4) 科学技術イノベーション創出に向けた、今後への期待、展望、課題

四方を海で囲まれたわが国において、タンパク源としての海洋生物資源の果たす役割は依然として大きい。第1次産業としての漁業における技術革新は、古くは漁獲量を増やす方向に向けられたが、その後、生物資源の衰退とともにその持続的な利用が必要と言われてから久しい。しかし、この生物資源を維持・持続させるための技術開発に関する投資はこれまでもそれほど大きくなかったように思う。2020年から始まるSDGsにおいても依然として持続的な海洋の生物利用が強く提唱されているように、持続的な生物資源の利用に必要な技術は何かで、この分野の技術開発の優先順位を判断して行く必要がある。これまでの海洋の生物資源を取るための技術開発と、その持続的な利用に必要な技術開発の大きな違いは明確で、前者では対象とする生物群集が捕獲できる時期と海域が分かれば良かったのに対して、後者ではこれら生物群集の生活史を含む包括的な知見の集積がこれらの持続的な利用には必要なことである。このためには、これまで基礎科学と言われてきた海洋生物学、海洋生態学、海洋化学などでの技術開発を行って、知見を収集し統合して行くことが進むべき方向である。

その意味で本研究領域での取り組みは、まさにこの方向に沿ったものであったと言えることが出来る。本研究領域で開発されたアミノ酸レベルでの食性解析と、脊椎骨を使った時系列解析により、対象魚類の生活史のほぼすべてを網羅する食性の推移を理解出来るようになった。また、炭素14とその海洋におけるアイソスケープマップによって、イワシやサケなどの回遊経路が推定出来たことも、海洋における基礎的な科学情報の積み重ねと新規技術の組み合わせが新しい知見を生み出した良い例である。このように海洋の生物群集の種組成や、その動態と言ったいわば基礎科学的な分野での技術開発が、サケやイワシなどの有用な海洋生物の持続的な利用への施策に対し、大きく貢献出来ることを示せた意味は大きい。これまで海洋の生物分野では大きな研究費で技術開発を進めて行く事例は少なく、海洋では調査船の利用など、研究インフラの整備にも大きな経費が必要なことから、生物群集に関する知見を拡大させるための技術開発に関しては、各個人レベルでの努力に任されていたように思う。

本研究領域が様々な視点で8年間、技術開発を進めてきたおかげで、大型予算による技術開発の大きな利点である人材と資金の集中で、大きな成果を生むことが出来ることへの意識が若手研究者にも広がってきたように感じる。海洋の生物多様性・生態系の包括的な理解への道はまだまだであるが、これらの理解が海洋の有用生物の自足的な利用に必要なことを理解することによって、政策的な大型資金による技術開発が今後も継続されることを強く期待する。

(5) 所感、その他

本研究領域の研究総括として 8 年間務めてきたが、その間この研究事業の良い所をいくつか感じることが出来た。1 つは予算執行に関する柔軟性であり、もう 1 つは研究への JST のサポート体制である。参加した多くの研究者が年度等を跨った予算執行の柔軟性を高く評価している。領域として後半にある程度の予算を確保することが可能なことで、研究総括として最後の 2 か年でフィールドキャンペーンを実施することが出来た。また、本研究領域では頻繁にサイトビジットを実施したが、その手配を含めてすべて事務局のサポートでこれらが可能になった。2 回にわたって行った国際展示会への参加も、その面倒な申し込みから展示場の確保や展示物の運搬などのロジスティックスに関しても、すべて事務局が手配して行われた。

さらに多くのアドバイザーが積極的にサイトビジットなどの研究対話に参加し、若手研究者を含む各チームと時間をかけて議論して貰ったことは大変ありがたいことであった。なお、アドバイザーには課題解決のための関連研究者の紹介などの労も取って頂いたことも研究の幅を広げるのに寄与している。このように本研究領域ではアドバイザーの先生方がその専門性に関わらず、海洋での生物群集を理解するための技術開発に関して、その進展に必要なそれぞれの分野からの情報のインプットを惜しまなかったことは、多くの研究代表者のコメントからも伺えた。これは、これらの先生方がこの分野における技術開発の重要性を強く理解して参加して頂いたからと思っている。

本研究領域の研究総括を受けたのは琉球大学の監事として大学運営の一端に携わってからであり、実際の研究現場からは少し離れた時期であったので、研究の現場と密着する必要のあるこの業務がどこまで務まるか多少の不安があった。しかし、広い視点から各研究課題の話聞くことで客観性のある評価が出来、また各研究者の思いについても全体とのバランスで考えることが出来た。このように自身の出身分野である海洋生物群集と言う表題の下ではあったが、多様な生物を対象とする多くの研究者と議論を進めることが出来たことは良い経験であった。その意味で研究総括として初めに挨拶した時、理事長に最後の大きな仕事として楽しんで下さいと言われたが、そのようになったことを実感している。

以上