

戦略的創造研究推進事業 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」
研究課題「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」

研究終了報告書

研究期間 平成24年10月～平成30年3月

研究代表者：小松 輝久
(横浜商科大学商学部 特任教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

海洋生物多様性の保全には、多くの海洋生物の産卵場、生育場となっている藻場の保全が不可欠で、藻場種ごとの分布とバイオマスの情報が必要となる。広域に分布する藻場の把握には、リモートセンシングが適しているが、藻場種判別やバイオマス測定はできていない。そこで、光・音響リモートセンシングのシステムとそれらをのせるプラットフォーム開発を行う、光学、工学、海洋学、水産学、リモセンの専門家の産官学を超える研究チームを組織した。

研究総括グループ(代表東大、現横浜商科大)は、各班との調整と総合観測を行うことを目的として設置し、年 3 回の年度初め・中間・年度末のチーム全員での検討会を行い、全体で進捗状況を確認し、調整した。年に 10 回程度、各班の代表による幹事会を開催し、調整、および、毎年、チーム全体での総合観測を行うための調整を行った。

光ハイパースペクトル開発グループ(班長東工大)は、藻場種を判別するために必要な radiometric 分解能と空間分解能の高い安価で軽量の海域に特化した国産のハイパースペクトル画像(簡単のため HSI と略す)システムの開発を目指した。高速超小型分光器(バンド数 288, 波長帯域 340-820nm, 波長分解能 14nm)を浜松ホトニクス社と共同で開発し(浜松ホトニクス社で市販中)、ステッピングモータを用いて角度を制御できるミラーによって進行横方向(レンジ方向)にスキャンした入射光を分光器に導く光ファイバー束方式のシステムを考案した。耐水容器に入れ、位置情報を 10Hz で取得できる。海面にも着水可能なドローンを開発し、このシステムを搭載して、海上からだけでなく、センサ受光部を海面直下に入れて、海底の光反射率スペクトルを取得できる。HSI データから、藻場種を判別する方法と、音響マルチスペクトルグループが計測した底深・藻場種・それらの現存量をもとに、海底の水深分布、藻場種ごとの観測海域における現存量分布を推定する方法を開発した。なお、藻場種の分布とそれらの現存量分布、CDOM の提供を現場検証班から、海底情報をプラットフォーム班から提供を受ける。

音響マルチスペクトルグループ(班長東大、現横浜商科大)は、超音波を用いて 256 本のレンジ方向 0.5° 、進行方向(アジマス方向) 1.0° の細いビームを 256 本一度のピングで発射・受信して、位置、動揺、方位を正確に把握し、海底地形を 3 次元で微細に測定できるナローマルチビームソナーシステム(NMBS)を用いた。このシステムで得られる測深点と海底反射強度をもとに、アマモ以外には今までほとんど研究が進んでいなかった、コンブ、ホンダワラを含む藻場種の判別とアマモについてはリアルタイム判別の方法を開発し、立体的構造を持つ藻場の 3 次元分布を表示できるようにした。なお、検証用の藻場種分布とそれらの現存量分布についての情報を現場検証班から、小型無人艇で取得した海底情報をプラットフォーム班から受けた。さらに、藻場種ごとの現存量を推定する方法を考案した。測定した底深分布、底深・藻場種・それらの現存量を光ハイパースペクトル班に提供する。

プラットフォームグループ(班長東海大)は、バンに搭載して運搬可能で、自立航行が可能な、光ハイパースペクトルセンサを搭載する小型無人機と音響マルチスペクトルシステムを搭載する小型無人艇を開発した。JAXA が担当し、雲の影響を受けずに低空から観測でき、滑走路がなくても海上から離発着可能な小型無人機を開発した。小型無人機は、100km/h で 2hr 以上飛ぶため広域の調査が可能である。東海大学が担当し、ヤマハ発動機と共同で、NMBS を搭載するプラットフォームとして、艀装に時間を要さず、観測時にはソナー取り付け角度のキャリブレーションが不要な専用の小型無人艇を開発した。小型無人艇は、最大船速度 2.5 knot、満充電での連続航行は約 3 時間、約 14km の航行が可能で、2km 離れた地上局で無人艇を監視して、データ取得ができる。無人艇の船底には水中カメラも設置し、船底直下の映像を正確な位置情報と合わせて記録することで、音響および光学測定結果の検証に用いる。船上には下向き照度スペクトル、船底には海底反射率を取得できるセンサを搭載し、HSI の検証用にデータを収集することができる。収集したデータは光ハイパースペクトル開発グループに提供する。

海域検証グループ(班長北里大学)は、光ハイパースペクトル班および音響マルチスペクトルグループが推定するため、また、推定した結果の検証をするために必要な現場の藻場種分

布・現存量データを高精度の測位とともに取得した。さらに、光ハイパースペクトル班に CDOM 観測データを提供した。

佐渡における総合観測を実施し、岸沖方向に沿う観測面を設定し、自立航行する小型無人艇搭載 NMBS でデータを取得した。小型無人機は、海上離発着による自律航行で、HSI により広域を観測した。現場検証班の取得情報を参照し、NMBS での底深別の藻場種ごとのバイオマスデータをもとに、HSI で取得した藻場種分布と底深分布を使って、HSI でスキャンした海域全体の藻場種分布とそのバイオマス分布を推定すること、を目指した。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. ナローマルチビームソナーによる藻場分類と現存量推定

概要:

ナローマルチビームソナーシステムで取得した測深データと海底反射強度をもとに、藻場判別を行い、藻場判別結果をもとに、藻場種ごとに、現存量を推定する方法を開発した。海底の超音波の後方散乱によってコンブ藻場、測深データと海底反射強度によるアマモ場、ガラモ場の現存量推定が可能となった。2017年に東京大学 TLO から特許を申請した。

その成果が CREST 課題の目標にどのように寄与するか:

CREST 課題目標の一つは、藻場の現存量推定を目標としている。いままでは、潜水調査による坪刈という手法で、例えば、川端ら(1990)の瀬戸内海の柳井湾におけるアマモの現存量の季節変化の研究がある。しかし、この手法は、破壊的であること、パッチ状に分布する藻場や密度により濃淡がある藻場では、坪刈する場所によってばらつきが大きくなり、坪刈で得た現存量が、藻場全体を代表しているのかについて常に疑問が生じていた。その問題を解決するためには多くの点で坪刈しなければならないが、破壊的で時間と労力がかかることから困難であった。ナローマルチビームソナーシステムによる海草や水生植物の現存量推定を行った例は Komatsu et al. (2003)や Abukawa et al. (2013)がある。ナローマルチビームソナーシステムで取得した測深データを用いて藻場の全体の草体体積を算出して現存量を求めているが、より詳細な空間スケールでの現存量を推定することはできていなかった。今回の開発により、50x50cm という詳細なスケールで、現存量をマッピングできるようになり、当初の目標を達成することができた。

2. 浅海域における任意の海底位置の船上からの高精度測位

概要:

藻場浅海域において任意の海底位置を船上から高精度測位する新手法を開発した。最近の安価・小型・高精度な GNSS 受信機を用いれば精度を下げず機器コストを大幅に削減できる。また、無人機、ドローン、無人艇に同一受信機種を用いることにより、全計測システムの測位精度を均等に高精度化できるのみならず、測位バイアスが排除されるため全計測の位置を合わせる事が可能となる。2017年に北里大学 TLO から特許を申請した。

その成果が CREST 課題の目標にどのように寄与するか:

CREST 課題目標では、ハイパースペクトルセンサシステム、ナローマルチビームソナーシステム、現場調査が三位一体となって藻場分布、現存量推定が広域にできるようになる。これら3種のデータを結びつけるのが位置データである。ナローマルチビームソナー、ハイパースペクトルセンサ、現場検証の各データの融合は、困難ではないかという指摘を受けたことから、小松チームでは位置精度の向上に取り組んできた。浅海域における任意の海底位置の船上からの高精度測位する方法を開発した結果、水中も含めて位置精度を cm スケールにできた。これにより、ハイパースペクトルセンサシステム、ナローマルチビームソナーシステム、現場調査で得た結果を精度よく合わせることができるようになり、本課題の、藻場の保全のための正確な三者の計測対象が同一で矛盾のないデータセットを作成できるようになった。

3. アマモの深い水深での分布確認

概要:

温暖化が進む中で、深い底深帯では水温上昇はより小さい。そこに浅海域の生物が分布する場合には、サンゴ礁のように、refugia になる。アマモ類の一種タチアマモが、佐渡の両津(白瀬地先)で、底深 20m まで分布することを潜水によるグランドトゥルースで、また、ナローマルチビームソナーによるリモートセンシングで明らかにした。様々な海域における既存のデータと合わせて、生育限界水深と光量との関係を整理した結果、回帰直線で表すことができた(Sakanishi and Komatsu, 2017)。

その成果が CREST 課題の目標にどのように寄与するか:

CREST 課題では、海洋生物多様性保全のための革新技术開発を行うことが使命となっており、そのためには、多くの海洋生物を涵養する藻場の分布状況の詳細かつ正確な把握が使命となる。船が近づけない光の減衰の小さい浅い藻場を捉えることができる光ハイパースペクトルセンサ、光の減衰の大きい深い藻場を捉えることができる音響ナローマルチビームソナーの両方が、それぞれ、補いあって、藻場を総合的にマッピングすることを目的の一つとしている。特に、深い藻場については、refugia になる可能性があることを本研究結果は示している。深場の藻場マッピングが重要であり、潜水せずに海底を効率よくマッピングできるナローマルチビームソナーシステムが重要であることを本研究は強く支持している。深場に分布する藻場を効率よく各地でマッピングすることにより、藻場の refugia の分布が明らかにでき、将来の温暖化に備え、保全を重点的に行う必要のある藻場を特定できるようになる。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. ナローマルチビームソナーによる簡易な藻場現存量推定方法の確立

概要:

ナローマルチビームソナーによる簡易な藻場現存量推定方法を開発した。本方法は、測深点データを用いるという簡単な方法である。本成果のアルゴリズムを用いた藻場判別と現存量推定のソフトウェアを開発し、手軽に、坪刈りしなくても藻場分布とバイオマスを推定できるようになれば、藻場分布とその現存量分布のマッピングに大きく貢献する。

その成果が CREST 課題の目標にどのように寄与するか:

潜水による坪刈りという点データしか収集できないことが、藻場の現状把握、藻場研究、藻場の生物多様性を検討する上でボトルネックとなっており、CREST 課題の目標の一つとしてこのボトルネックの解決を設定した。藻場現存量分布を得ることができるナローマルチビームソナーによる簡易な藻場現存量推定方法と広域の藻場分布が計測できる光学リモートセンシングとを組み合わせることで、3 次元の分布を含めた群落構造の情報を底深とともに得ることができるようになった。本成果は、この目標を達成し、藻場保全、藻場研究、藻場の生物多様性保全のために必要とされている藻場分布とその現存量分布のマッピング技術を社会に提供できるようになった。

2. ハイパースペクトルセンサシステムの開発

概要:

浜松ホトニクスと連携して開発した高感度高速超小型分光器と、光ファイバー束、スイングミラーを用いた、ハイパースペクトルセンサシステムは、今まで数百万円が下限金額であり農水産業、工業において利用するには敷居が高い計測器であった。CREST による開発の結果、各方面においてスペクトロメータ利用が促進される条件である低価格化と超小型化という汎用性の鍵となる問題を解決した。NEC などの企業も関心を示しており、今後、さらに開発したハイパースペクトルセンサシステムの利用が進むと期待される。

その成果が CREST 課題の目標にどのように寄与するか:

CREST 課題の目標の一つは、ハイパースペクトル計測によって、藻場種を判別することである。そのためには、海面下にある海底の光反射率スペクトルを正確に計測できるシステ

ムを開発しなければならない。このシステムは、海洋生物多様性を維持するのに不可欠な藻場の観測を広域で実施するのに役立つ。それだけでなく、藻場構成種そのものが漁業資源であるコンブ類やテングサ類について、水産研究機関や漁業関係者にも計測技術を提供できるようになるため、それらの資源の管理を適切に実施することができる。ハイパースペクトルセンサの軽量小型化、価格の低減が実現できた。その結果、ドローンに搭載できるようになり、手軽にドローンでのハイパースペクトルセンサ計測システムの実運用が可能となり、リモートセンシングの専門家ではない東京都島しょ農林水産総合センター大島事業所の水産分野担当者にシステムを移管できた。

3. 自立型無人艇にナローマルチビームソナーを搭載した海底測量システム開発

概要:

本プロジェクトでヤマハ発動機と共同で開発した自立型無人艇にナローマルチビームソナーを搭載した海底測量システムについて、測量業界から多数の引き合いがきており、ヤマハ発動機では、CREST の成果をもとに、自立型無人艇ナローマルチビームソナーシステムの商品化を行ない事業化した。特に、備船が困難な場所における海やダムなどの海底・湖底地形測量において力を発揮することが高く評価されている。

その成果が CREST 課題の目標にどのように寄与するか:

CREST 課題の目標の一つは、ナローマルチビームソナーを用いて、藻場種と現存量のマッピングを行うシステムを開発すること、また、ナローマルチビームソナーシステムを搭載するプラットフォームを開発することである。＜科学技術イノベーションに大きく寄与する成果＞の1と3 が結びつくことで、浅海域における藻場計測の基盤を、ナローマルチビームソナーを所有する民間の測量会社や環境計測会社に築くことができる。その意味において、この成果は、CREST での開発結果が、民間に波及したことを示している。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「研究統括」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
小松 輝久	横浜商科大学商学部	特任教授	H24.10～
齋藤 元也	東京工業大学イノベーション研究推進体	特任教授	H24.10～
林崎 健一	北里大学海洋生命科学部	准教授	H24.10～
千賀 康弘	東海大学海洋学部	教授	H24.10～
佐々 修司	横浜商科大学地域経済研究所	研究員	H24.10～

研究項目

- ・音響マルチスペクトルシステムと光ハイパースペクトルシステムの統合運用システムの開発
- ・作成した観測システムについての検証試験

②「音響マルチスペクトル」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
小松 輝久	横浜商科大学商学部	特任教授	H24.10～
佐々 修司	横浜商科大学地域経済研究所	研究員	H24.10～
澤山 周平	水産研究・教育機構中央水産研究所	研究員	H24.10～
大瀧 敬由	漁業情報サービスセンター	係員	H25.4～
浅田 みなみ	(株) パナソニックエコシステム	職員	H27.4～
西田 周平	東京大学大気海洋研究所	特任研究員	H24.10～
佐川 龍之	リモート・センシング技術センター	研究員	H25.4～
秋野 秀樹	北海道立総合研究機構中央水産試験場	研究主任	H25.10～
福田 裕毅	北海道立総合研究機構中央水産試験場	主査	H25.4～
Phan Minh Thu	ベトナム国立ニャチャン海洋研究所	研究員	H24.10～
Luong CAO VAN	ベトナム国立海洋環境資源研究所	研究員	H24.10～
Aidy Mohamed Shawal	マレーシア国立大学海洋研究所	准教授	H24.10～
Thidarat Noiraksar	タイ国ブラファ大学海洋科学研究所	上級研究員	H24.10～

Nurjannah Nurdin	インドネシア国ハサヌディン大学	研究員	H24.10～
Phauk Sophany	プノンペン王立大学理学部	研究員	H24.10～
田上 英明	水産大学校	助教	H29.4～
水野 紫津葉	東京大学大気海洋研究所	特別研究員	H24.10～
濱名 正泰	東京大学大気海洋研究所	特任研究員	H25.4～H29.3
阪本 真吾	神奈川県水産技術センター	研究員	H24.10～H29.3
アタチャイ カンタンチャンポ	東京大学大気海洋研究所	特任研究員	H24.10～H29.3
國分 優孝	東京大学大気海洋研究所	特任研究員	H24.10～H26.3
許 敏	東京大学大気海洋研究所	DC3	H25.4～H28.3
村田 裕樹	東京大学大気海洋研究所	MC 2	H26.4～H28.3
サラ ゴンザルボ	東京大学大気海洋研究所	DC3	H25.4～H29.3
上田 修作	東京大学大気海洋研究所	MC2	H25.6～H26.3
西田 由布子	東京大学大気海洋研究所	MC2	H25.6～H26.3
倉持 優希	東京大学大気海洋研究所	MC2	H25.6～H26.3
ムハマンド・ナジール・ムハンマド	東京大学大気海洋研究所	特任研究員	H24.10～H28.3
依田 春子	東京大学大気海洋研究所	研究補佐員	H27.4～H29.3

研究項目

- ・底質判別多周波ナローマルチビームソナーシステム開発
- ・底質判別多周波ナローマルチビームソナーシステム用の底質超音波マルチスペクトルデータベース構築と種判別バイオマス推定アルゴリズム開発
- ・種判別・バイオマス推定多周波音響測深機システム開発
- ・種判別・バイオマス推定多周波音響測深機用の底質超音波マルチスペクトルデータベース構築と種判別・バイオマス推定アルゴリズム開発

③「光ハイパースペクトル開発」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
齋藤 元也	東京工業大学イノベーション研究推進体	特任教授	H24.10～
山口 雅浩	東京工業大学工学院	教授	H25.4～

小杉 幸夫	東京工業大学イノベーション研究推進体	特任教授	H24.10～
宇都 有昭	東京工業大学情報理工学院	助教	H24.10～
関 晴之	東京工業大学イノベーション研究推進体	特別研究員	H24.10～
小尾 新三	東京工業大学イノベーション研究推進体	特別研究員	H24.10～
豊岡 知子	東京工業大学イノベーション研究推進体	研究補佐員	H24.10～
望月 貫一郎	(株) パスコ パスコ総合研究所	副所長	H26.4～
王 翠	東京工業大学イノベーション研究推進体	招聘研究員	H27.4～
羽鳥 好律	東京工業大学大学院総合理工学研究科	教授	H25.4～H26.3
成松 義人	日本電気(株) 宇宙システム事業部	主任技師長	H24.10～H27.3
島村 秀樹	(株) パスコ研究開発センター	センター長	H27.10～H27.3

研究項目

- ・リアルタイム情報を得るための空中観測スペクトル瞬時処理システム開発
- ・無人機搭載用高精度沿岸域ハイパースペクトルセンサ開発
- ・底質光学スペクトルデータベース構築
- ・藻場の主要構成種の種判別・バイオマス推定アルゴリズム開発

④「プラットフォームシステム開発」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
千賀 康弘	東海大学海洋学部	教授	H24.10～
穂積 弘毅	宇宙航空研究開発機構 航空技術部門	特任担当役	H24.10～
石渡 俊樹	東海大学海洋学部	B4	H29.4～
黒瀬 龍幸	東海大学海洋学部	B4	H29.4～
鈴木 理子	東海大学海洋学部	B4	H29.4～
山田 綾香	東海大学海洋学部	MC2	H26.4～H27.3
宮下 裕介	東海大学海洋学部	B4	H27.5～H28.3
今田 丞治	東海大学海洋学部	B4	H27.5～H28.3
中原 基	東海大学海洋学部	B4	H28.5～H29.3
星野 匠	東海大学海洋学部	B4	H28.5～H29.3

研究項目

- ・可搬式自立型小型無人艇プラットフォームシステムの開発
 - ・ナローマルチビームソナー搭載可搬式自立型無人小型艇の開発と運用
 - ・海面反射スペクトル測定器および水中広角カメラの搭載
- ・水陸離発着自立型小型無人機プラットフォームシステムの開発
 - ・システム設計製作・飛行試験及び信頼性・安全性・安定飛行能力の向上
 - ・搭載用観測システム統合飛行試験及び実運用

- ・マルチコプターを利用したプラットフォームシステムの開発
- ・光ハイパースペクトルセンサ搭載マルチコプターシステムの開発

⑤「海域検証」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
林崎 健一	北里大学海洋生命科学部	准教授	H24.10～
坂西 芳彦	水産研究・教育機構日本海区水産研究所	グループ長	H24.10～
西田 修平	東京大学大気海洋研究所	特任研究員	H24.10～
青木 優和	東北大学大学院農学研究科	准教授	H24.10～
小川 浩史	東京大学大気海洋研究所	准教授	H24.10～
寺内 元基	環日本海環境協力センター	主任研究員	H24.10～
片寄 剛	北里大学大学院海洋生命科学研究科	DC3	H28.4～
小玉 悠然	北里大学大学院海洋生命科学研究科	MC 2	H29.4～
井出 翔一郎	北里大学海洋生命科学部	B4	H29.4～
玉澤 慶一	北里大学海洋生命科学部	B4	H29.4～
梶山 健悟	北里大学海洋生命科学部	B4	H29.4～
増山 晶	北里大学海洋生命科学部	B4	H29.4～
玉田 悟	北里大学大学院海洋生命科学研究科	MC2	H28.4～H29.3
三村克哉	北里大学海洋生命科学部	B4	H28.4～H29.3
本村 拓也	北里大学海洋生命科学部	B4	H28.4～H29.3
高山 幸輝	北里大学海洋生命科学部	B4	H28.4～H29.3
有馬 史織	北里大学大学院海洋生命科学研究科	MC2	H28.4～H29.3
辻野 寛人	北里大学海洋生命科学部	研究生	H27.4～H29.9

研究項目

- ・藻場を構成する大型海産植物の種組成，分布，現存量データの取得
- ・光学的ハイパースペクトルデータに影響する因子の検討とデータの取得

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

① 北海道えりも町漁業協同組合笛舞支所

北海道えりも町漁業協同組合笛舞支所と協働して、笛舞地先のコンブ藻場のマッピング結果を地元漁業者へ説明する会を2015年6月に地元で行った。好評であったため、同年10月に再度行った。さらに、2017年7月に笛舞支所の組合員にCRESTの成果を紹介するとともに、今後のCREST成果の現場での生かし方について、意見交換を行った。なお、2015年6月および2017年7月には、地元小学生に対するアウトリーチを行った。

② 日本科学未来館におけるサイエンスアゴラ出展

2015年11月13日から15日に日本科学未来館で開催されたサイエンスアゴラに「音と光で海中の草原を測る」というタイトルで、本研究の内容とその意義を紹介する展示を行い、国民へのアウトリーチを行った。

③ 東京都島しょ農林水産総合センター大島事業所との共同研究

2015年度から2017年度まで、伊豆大島のテングサ場の分布マッピングを大島事業所と共同研究として行った。以前は、空中写真を撮影し、事業所としてテングサ場のマッピングを試みたが、できなかったという経緯があった。山崎チームの紹介で、同事業所を訪問し、社会貢献としてこの研究を行った。光ハイパースペクトルおよびナローマルチビームソナーによる測深データを用いてテングサ場をマッピングした結果は、同事業所の潜水坪刈り調査結果と一致し、同事業所から、この方法への高い信頼が得られている。2017年度は、共同研究契約に基づくテングサの現存量分布研究を2018年2月～3月に実施した。

④ PITTCONでの出展

2017年2月に開催された2017年PITTCON 2017において、「Compact Hyper Spectral Imaging Sensor and High-Performance UAV」という展示と講演を行った。展示及び講演では、多くの世界的な産業界の方々との情報交換ができた。

⑤ 国際強化支援策の実施

2017年に、光学研究に特化したフランスのFresnel InstituteのMireille Guillaume教授およびEcole Centrale Marseille の Sylvain Jay教授のグループと光ハイパースペクトルセンサで得られたデータの解析方法、特に、底深および水質推定に関する研究ネットワークを形成した。

§ 3 研究実施内容及び成果

3. 1 統合運用システムの開発(東京大学(現, 横浜商科大学)・研究統括グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

光ハイパースペクトルシステムと音響マルチスペクトルシステムの開発, それらを搭載するプラットフォーム開発, 実海域での検証データ取得という連携を通じて空海ハイパー・マルチスペクトル藻場3次元計測システムを完成することを目標とした。本研究の前半において, 初期のセンサシステムとプラットフォームの間での調整, 空海の両センサシステムのデータを相互に結びつけるフォーマットの策定等を行った。

センサシステムとプラットフォームの間での最終調整, 両システムのデータ取得と実海域の藻場現場検証データ取得, 最終的な実海域での共同調査の実施について企画・調整・実施をおこない, すべての研究を相互に結びつけることを目指した。

本研究の前半において, 初期のセンサシステムとプラットフォームの間での調整, 空海の両センサシステムのデータを相互に結びつける調整を行った。研究代表者およびおもな共同研究者が, 1-2ヶ月に1回程度定期的に, 東大柏または各研究実施場所に集まり(場合によってはテレビ会議を含む), 各グループの進捗状況を把握するとともに, 統合システムとしての機能が十分発揮できるように調整を行った。2011年度は7回, 2012年度は16回, 2013年度は18回, 2014年度は19回, 2015年度は10回開催した。また, 2016年は, 8回, 2017年は6回, 年度初めの4月および10月に本プロジェクトの参画者全員の会合を開催し, 意思疎通をはかった。2012年11月, 2015年7月および2017年度7月のサイトビジットについても各研究グループとの調整を行った。

光ハイパースペクトルセンサシステム班および音響マルチスペクトルシステム班とプラットフォーム班の間での最終調整, 両システムのデータ取得と実海域における現場検証班による藻場データ取得, 最終的な実海域での共同調査の実施について企画・調整・実施をおこない, すべての研究を相互に結びつけた。2012年から2017年まで毎年6月に行っている北海道えりも町における調査(2016年を除く), 9-10月に行っている宮城県志津川湾または, 佐渡での調査について全研究班が参加できるように調整を行った。水上離発着小型無人機によるハイパースペクトルセンサ観測と同期した小型無人艇によるナローマルチビームソナーシステムによる観測を2017年9月に実施した。その時の, 計画観測海域を図3.1.1に示す。この観測では, ナローマルチビームソナーで取得した各種データを光ハイパースペクトルで観測した広域の藻場分布データ解析に用いて, 海域全体の藻場現存量分布を求める。詳しくは各班の報告を参照のこと。



図 3.1.1 2017 年 7 月に予定したえりも町笛舞地先の総合観測予定海域と, ナローマルチビームソナーによる岸沖方向の観測範囲(同じ色のピン4本で囲まれた4面の長方形区域)(左図)と, 佐渡白瀬地先で実施した, 小松チーム総合観測における, 小型無人機によるハイパースペクトル観測線(赤色)および小型無人艇によるナローマルチビームソナーによる観測範囲(沿岸から沖合に描かれた3本の白色長方形)(右図)。

3. 2 音響マルチスペクトルシステム開発(東京大学(現, 横浜商科大学)・音響マルチスペクトルグループ)

(1) 研究実施内容及び成果

1) 底質判別多周波ナローマルチビームソナーシステム開発

開発したシステムでは小型無人艇に搭載可能な可搬型超小型の、フットプリントの非常に小さいナローマルチビーム音響測深機で藻類及び海底を検出して藻類の 3 次元情報(面積及び海底高度)を得て藻類の体積を計測し、一方でマルチビーム計測の特徴を生かしてそこに生えている藻類に固有の周波数による後方散乱強度のグレーディング角(見通し角)スペクトルを算出して種別の判別を行う。そのため、ナローマルチビームソナーの周波数をソフトで可変に設定でき、その周波数に対する、グレーディング角ごとの海底後方散乱強度、水柱における単位体積当たりの海底後方散乱強度が取得できるようなハードウェアシステムとした。現場調査で得られる上述の底質超音波マルチスペクトルデータをもとに、検索・相関値の算出を行って、藻場構成種の判別やバイオマスを得るシステムを開発した。2012-13 年度に、上述した①の機能を備える多周波・高周波ナローマルチビームソナーと高精度 GNSS ジャイロ、及びデータ収録装置からなるシステムのハードウェアを整備した(図 3.2.1)。

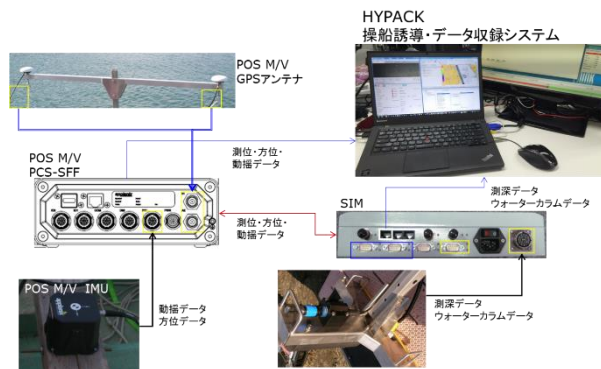


図 3.2.1 底質判別多周波ナローマルチビームソナーシステムの構成。

2) 底質判別多周波ナローマルチビームソナーシステム用の底質超音波マルチスペクトルデータベース構築と種判別バイオマス推定アルゴリズム開発

標準球(TS=-40dB)を用いて試作ナローマルチビームソナーの持つ送波レベルや指向性などのソナーパラメータを駿河湾に係留されているバージを用いて、ソナー方程式に必要なナローマルチビームソナーの諸元を正確に得た。その結果、ソナーの設定値に対してグレーディング角に依存しない正確なエコー強度の数値データを得る事ができるようになった。

3) 海底測深データおよび海底反射強度を用いた藻場構成種判別法解析

海底測深データを用いれば、疎なガラモ場を構成しているホンダワラ類の分布を把握することが確かめられた。また、ナローマルチビームソナーデータ収録用ソフトウェアには、測深値の信頼性を収録時に確かめることができるように、グリッドごと(例えば 0.5x0.5m などを与えると)の測深データをもとに 95%信頼限界値(CL)を求めて可視化される機能が備わっている。そこで、この機能を利用した、リアルタイムでのマッピングができないかについて、砂地上に分布するアマモ場を対象として、志津川湾において研究を行った。潜水者が撮影したアマモの繁茂状況からアマモの被度を3段階に分け、データ収録用ソフトで得られる信頼限界をもとに推定した 95%CL との関係調べたところ、 $R^2=0.80$ の高い相関が得られた。砂地上に生育するアマモについては3段階の密度でのリアルタイムでのマッピングができることが示された(Hamana and Komatsu, 2016)。

3.3 光ハイパースペクトルシステム開発(東京工業大学・光ハイパースペクトル開発グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

1) ハイパースペクトルセンサの開発

本開発プロジェクトでは、固定翼機や、ドローン等に搭載可能な低価格ハイパースペクトルセンサおよびデータ収録系の開発を行った。当初は、浜松ホトニクス社製の市販品の小型分光器を使用予定であったが、無人機が時速 100km/h の速度で走査した場合には、十分な刈り幅がとれないことが判明したため、浜松ホトニクス社と共同で高感度分光器 Micro-Spectrometer C12880MA を開発した。バンド数、波長帯域、波長分解能はそれぞれ 288, 340-820 nm, 15 nm である。開発した分光器は高感度 CMOS センサの採用により現行の分光器 (C12666MA) と比較して約 100 倍の感度向上を達成した。感度の向上により露光時間の削減および高速化が可能である。開発した高速超小型分光器は、ハイパースペクトルセンサ用だけでなく、それ以外の産業への利用が見込まれている。現在、低価格で市販されているのは、本プロジェクトによる成果である。

本システムは光学情報取得部の望遠レンズ、光学ファイバー束 (以降簡単のために光学 FB と略す)、凸レンズ、スイングミラー(SM)、分光器、データ処理・記録部 (CPU、記憶装置)、GPS、電源で構成され、総重量は 2500g である。撮影高度と取得したい地上解像度に合わせて、望遠レンズの対物レンズを変えることができる。通常は焦点距離 $f = 35\text{mm}$ を使用する。光学 FB(特注品、三菱電線工業株式会社製)は、望遠レンズの結像面の情報を石英ファイバー $M \times N$ 本で伝達する。望遠レンズの結像面上に設置された光学 FB の端点(Image plane:IP)は 16×16 の 256 本のファイバーを正方格子状に並べた 2 次元アレイであり、結像を $M \times N$ に量子化する。光学 FB の他方の端点 (Composite plane: CP) は、光学 FB を 2 分割した 2 つの 2 次元アレイの中心部に 1 次元アレイ (Sensor fiber array, $M \times 1$) を挟む構造となっている(図 3.3.1)。したがって、CP は 272 本のファイバーで構成される 2 次元アレイである。CP 面の 1 次元アレイの各ファイバーの他方の端点はそれぞれ分光器に接続される。 $M=N=16$ で、ファイバー間距離 0.3mm の光学 FB を製作した。CP からの光は凸レンズ (焦点距離 18mm) を通過する。CP を凸レンズの焦点面上に設置した。CP の対面側に直径 10mm のアクリルミラーを設置する。SM の回転はステップモータで制御する。

本観測系の心臓部は、図 3.3.1 に示す反射型ファイバー束スキャン機構で、上空から観測された藻場の画像内の微小領域の光を超小型反射ミラーにより、効率よく超小型分光器に導くことができる。測定された対象物の反射スペクトル情報は、同時に測定される GPS 情報、天空照度情報、および、測定時刻のデータとともに SD メモリ内に保存され、着陸後回収して解析に供される。

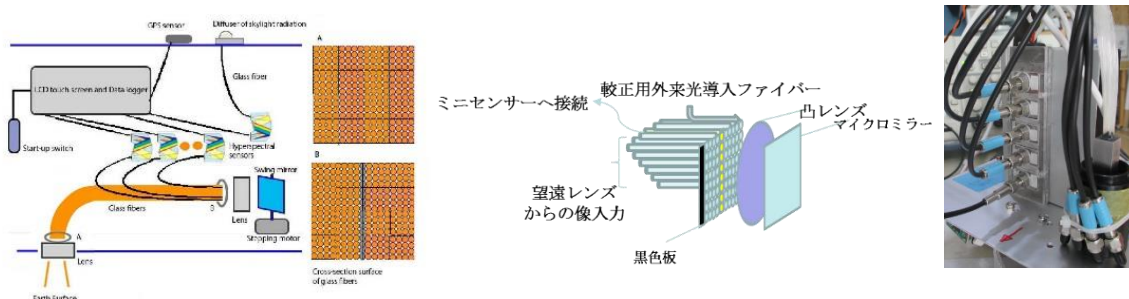


図 3.3.1 ハイパースペクトル観測用機材の反射型スキャン機構の模式図(左図)、スキャン機構(中図)、実装されたスペクトル観測機構(右図)

2) ハイパースペクトル画像 (HSI) センサの性能評価

開発したハイパースペクトルセンサが取得するハイパースペクトルデータの空間的・光学的測定精度を評価するために、格子状カラーパターンの近接計測を実施した。ハイパースペクトルセンサ直下に、4色(赤, 青, 緑, 黄)で構成される格子状カラーパターンを設置し、リニアアクチュエータで直線移動(移動速度: 22.4mm/s)した(図3.3.2)。光源には太陽(2015年2月20日正午)を利用した。計測時点の天候は晴天、照度計による計測照度は77000luxであった。光学FBのファイバー間は 0.3mm、望遠レンズ(焦点距離 35mm)とカラーパターンの距離は472mmより、解像度は4.05mmである。空間解像度の評価のため、カラーパターンの単位格子の大きさには、40mm, 20mm, 10mmの3パターンを用いた。1点あたりの露光時間は1ms、取得データの転送時間は0.3ms、1スイングあたりの計測点は64点、1スイングあたりの計測時間は83.2msである。スイングの周期は300ms、1スイングあたりのリニアアクチュエータの移動量は6.7 mmである。分光特性は、FieldSpecとほぼ同等であり、良い結果が得られた(図3.3.3)。

表 3.3.1 開発年と開発したセンサの仕様

センサ仕様	1号機 Prototype 2013	2号機 2014	3号機 2017
ファイバ径	0.5mm	0.23mm	0.1mm
センサ本数	8	8	16
ファイバ密度	2本/mm	3.3本/mm	10本/1mm
水平ピクセル	10	16	64
L (mm)	5.5	5.1	6.5
T (mm)	4	4.8	6.4
解像度	2×2m	1×1m	25×25cm
刈り巾 SW	20m	16m	16m
画素露光時間	50ms	4ms	0.25ms

センサ仕様と開発年を表3.3.1に示す。現在は、3号機で、刈り幅を広くとるために、地上分解能は、50cmx50cmになるように運用している。

3) 小型無人機およびドローンへの搭載と光反射スペクトル取得結果

2015年6月18日に北海道えりも町笛舞漁港の沿岸において、プラットフォーム班が開発した自動操縦固定翼無人機に、開発した HSI センサを搭載(図 3.3.4)し、観測を実施した。高度は 150m、速度は 30m/s、計測時点の天候は晴天であった。海中に墜落時の機器損傷防止のために、ハイパースペクトルセンサを防水ケースに密閉し、透明アクリルカバーを通して計測を実施した。防水ケースの重量を含む総重量は 3700 g である。笛前地先のコンブ漁場で、JAXA の固定翼機に搭載したハイパースペクトル観測装置で、約 100m の上空より、同海域の底質のスペクトル計測を実施した。

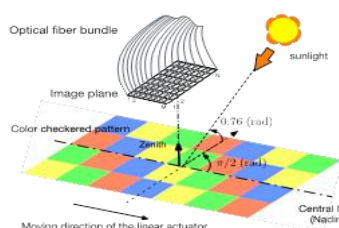


図 3.3.2 格子カラーパターン試験

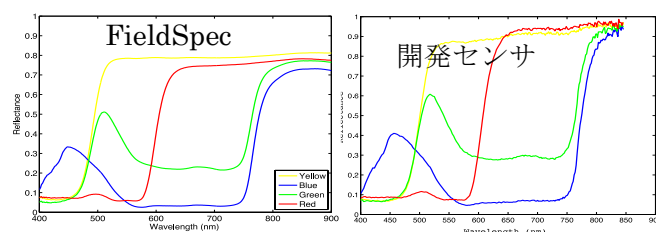


図 3.3.3 デファクトスタンダードの FieldSpec と開発センサの特性評価比較

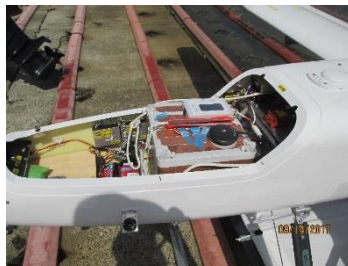


図 3.3.4 無人機に搭載した防水型開発センサ(3.2kg)

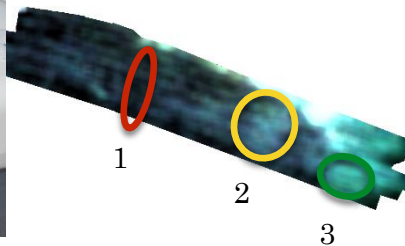


図 3.3.5 開発センサで得られたデータから作成したカラー画像

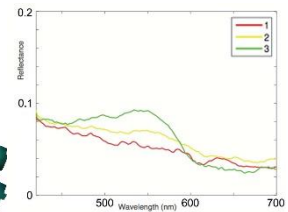


図 3.3.6 開発センサで得られた 1.2.3 の領域の光反射スペクトル

搭載動画カメラで取得した直下動画より生成したモザイク画像(図 3.3.5)と対応するハイパースペクトルセンサデータを GPS 情報に基づき幾何補正した反射率カラー画像(空間分解能 1.3 m)を得た。図 3.3.5 の番号で示す領域のスペクトル特性を図 3.3.6 のように得た。領域 1 のスペクトルは、水中コンブのスペクトルとほぼ一致し、領域 2 のスペクトルは黒っぽい底質と水の吸収、領域 3 のスペクトルは白色底質反射と水の吸収を反映していると見られる。また、2015 年 7 月 31 日には志津川湾でドローンに搭載して 20m 高度からの観測を行い、翌 8 月 1 日は船に搭載し海上 2.5m 観測を実施した。これらの観測により、本センサで良好に計測でき、データを取得できることが示された。

全方向に移動するドローン用に、風の抵抗に方向性のない円筒形防水ケースに収納した(図 3.3.7 左)。本システムは機体も全て防水で、海上での着水が可能である。ケースを含めた計測系の重量は電池を含め、約 2.7kg である。本観測システムの最大の特徴は、着水モードで水中藻場を観測することが可能で(図 3.3.7 中)、海水面の反射の影響を受けずに、藻場の観測を実施することができる(図 3.3.7 右)。



図 3.3.7 陸上(左図)および着水モード(中図)のマルチコプター搭載ハイパースペクトルセンサと佐渡白瀬地先で着水モードにより計測した可視画像(右図)

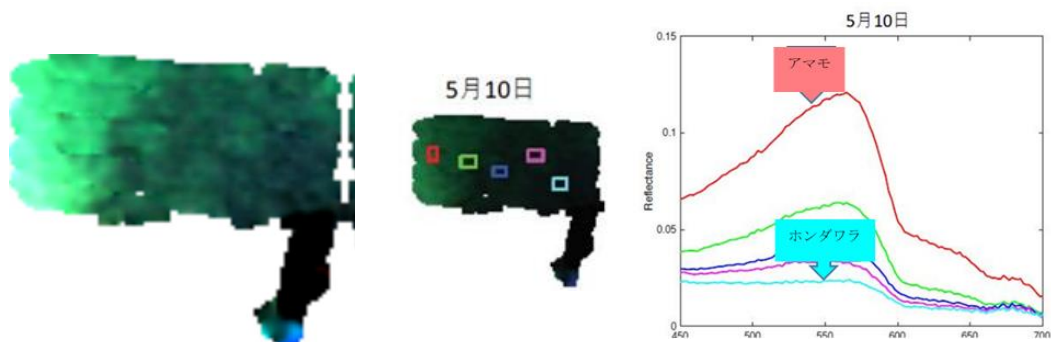


図 3.3.8 下田外浦のアマモとホンダワラ類の混成藻場の RGB による画像(左図)、色付きの四角で囲った微小領域(中図)とそれに対応する反射スペクトルの例(右図)。

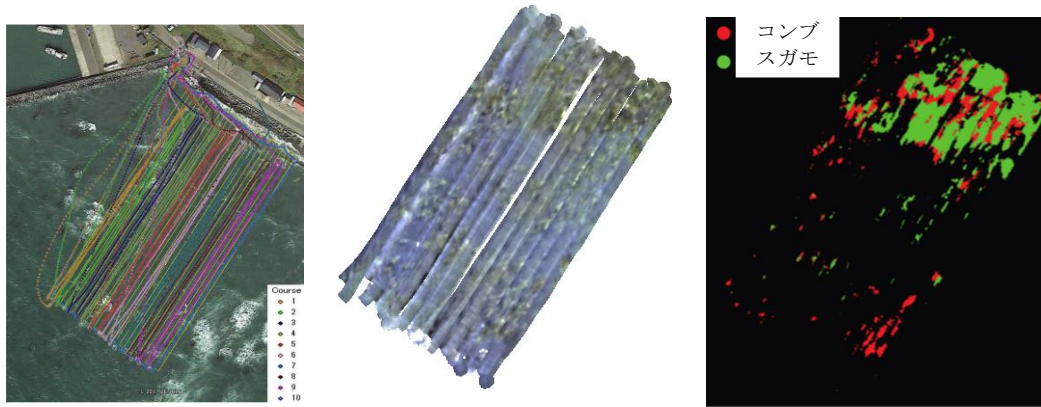


図 3.3.9 2017 年 6 月 29 日に北海道えりも笛前地先におけるドローンの運行軌跡(左図),ハイパースペクトルセンサの RGB による画像(中図), 分類結果(右図)

2016 年 5 月に下田外浦でドローンに搭載したハイパースペクトルセンサシステムで光反射スペクトル画像を取得した(図 3.3.8)。アマモとホンダワラ類の混成藻場の結果で、アマモとホンダワラ類を明確に識別可能である。

2017 年 6 月 29 日に北海道襟裳地区のコンブ漁場の藻場判別にハイパースペクトルデータが利用可能か調べるために、海上 20m の高さから運行速度 8km/h で 100m × 200m の範囲をドローンに同センサを搭載して観測し、データを取得した。4)で説明する方法で分類し、コンブとスガモの分布が得られた(図 3.3.9)。

4) 藻場の主要構成種の種判別・バイオマス推定アルゴリズム開発

伊豆大島の周辺には、テングサの原料となるマクサ、オオブサ等が分布するが、その適正な資源管理の立場から、周辺海域の資源量を上空から調査する観測方法の確立が求められている。このようなニーズに応えるべく、簡易なハイパースペクトル観測システムの開発を進めている。本 HSI 画像取得システムの試験のため、2016 年 2 月に、大島秋の浜にて飛行高度 20m でドローン搭載 HSI スペクトル画像の観測を実施した。ハイパースペクトル画像から、対象物の状態を認識する一つの手法としては、多数の波長から得られる情報を有効利用して対象領域を既知のスペクトル分布からなるテンプレートとして、これとの類似度から未知の領域を分割する方法が多用される。このような方式を適用するのに重要なのは、前処理段階で、観測条件の影響を如何にして低減するかである。特に、上空より海中や海底の物体を認識する際には、時事刻々変化する海面の波の状態や、それに伴って変化する鏡面反射成分の変化、雲の動きによる日照量の変化が結果に重大な影響をおよぼす可能性がある。日照量の変化に関しては、通常、白色板で較正する方法が適用されるが、海上での計測の場合、白色板の較正が困難な場合が多く、日照量変化等に可能な限り invariant な指標を前処理段階で得ることが好ましい。

このような観点から、反射率強度の線形変換に対して invariant な指標として、次式で定義されるスペクトル曲線間の相関係数を評価する。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i - f_{av})(g_i - g_{av})}{f_{Nr} g_{Nr}} \quad (3.3.1)$$

ここで、 f_i は観測で得られた i 番目の波長の反射スペクトル強度、 g_i はテンプレートとする既知の物体の i 番目の波長の反射スペクトル強度を、また、それぞれの波長平均での f_{av} および g_{av} は、次式で求める。

$$f_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i, \quad g_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i \quad (3.3.2)$$

また、全体の値を最大値1となるように、分母のノルムは以下のように算出する。

$$f_{Nr} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (f_i - f_{av})^2}, \quad g_{Nr} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (g_i - g_{av})^2} \quad (3.3.3)$$

以上の R をマッチングスコアとして使用することで、例えば、照度変化で全体の強度が2倍になる場合や、曇天時の散乱光分が定数として加わる場合にも、同一の特徴群に属するスペクトルとして判定できる。

ドローン搭載の観測システムで取得した大島秋の浜の海面下の HSI 画像に対して、海面からの反射を低減する処理を行った後に、上記のスペクトル相関法によって対象物を探索する作業を試みた。本実験では、テンプレート作成用に、同日測定を行った東大小松班により提供された底質データ 130 点を、(a)テングサ、(b)岩肌及びサンゴモ、(c)白砂の3種類に分け、各々の教師点の平均スペクトルから各々のグループの平均スペクトルからテンプレートを作成した。これらのテンプレートとの類似度を式(3.2.1)の R で評価し、 R の大きさを濃淡画像として表示した。底質調査の行われていない点の底質予測は、これら3つのテンプレートとの類似度を比較し、最も高い類似度を与えたテンプレートのクラスに属するものと判定することで、全観測領域を各クラスに分類できる。図 3.3.10 は、上記の方法で、ハイパースペクトル測定結果を用い、大島メメズ浜付近の海域の底質を分類した結果で、同図(右図)は同海域でほぼ同時期に東京都が坪刈りを実施した結果で、ハイパースペクトル観測でテングサ領域と推定された位置②③④で大きな収量が得られている。

表 3.3.2 大島メメズ浜地先における東京都実施坪刈り地点のマクサ、オオブサ、その他海藻の現存量(乾重 g)

	①	②	③	④	⑤
マクサ	153.6	300.5	435.8	247.0	
オオブサ			23.5		159.0
その他海藻	1.1	5.3	3.5	2.0	6.0

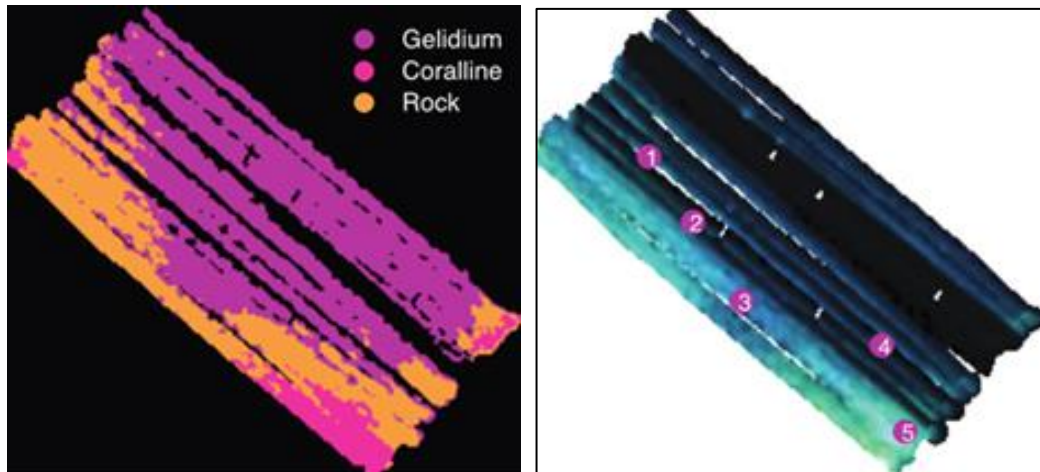


図 3.3.10 2016 年 9 月 9 日ドローン・ハイパースペクトル計測から推定した、大島メメズ浜付近の底質分布(左図)と同海域で東京都実施坪刈り地点(右図)

3.4 プラットフォームシステム開発（東海大学および JAXA 等・プラットフォームシステム開発グループ）

(1) 研究実施内容及び成果

プラットフォーム班は、海上から藻場の詳細分布を音により 2 次元走査観測するための自律航行小型無人艇（無人艇）と、上空から広域海面を短時間に光学的に観測して藻場領域を把握する自律航行小型無人飛行機（無人機）を作製した。無人船にはマルチビーム音響測深機を搭載した。無人機には光ハイパースペクトルセンサを搭載し、沿岸域のどこでも離発着可能な水上離発着可能な機体を作製した。いずれも車で持ち運びができる可搬式のプラットフォームを目標とした。

(2) 可搬式自律航行小型無人艇の開発

1) 無人船開発仕様

マルチビームソナーを搭載した全長 2.9m の自律航行無人艇を開発した。艇体は既存の小型ボートを利用して船底にマルチビームソナーを装着し、自律航行のための制御システムを組み込んだ。陸上との通信のために 2 チャンネルの無線 LAN を装備し、調査航路の設定、ソナー発振周波数の制御、船体の姿勢情報・観測データ等の受信を行う。陸上局からの制御可能距離は約 2km である。観測では、地上局より観測領域を指定することで、この領域内を自律ラスタ航行して海底藻場からの音響反射の 2 次元分布を取得する。自律航行だけでなく、遠隔手動制御も可能である。動力源には取り外し可能なモジュール型リチウム電池を用いて電動モータを駆動しており、最大船速は 2.5 knot、満充電での連続航行は約 3 時間、約 14km の航行が可能である（図 3.4.1, 図 3.4.2）。

無人船の船底には水中カメラも設置し、航路直下の映像をモニタ・記録することで、音響および光学測定結果の検証に用いる。無人船運搬には専用台車を用意し、台車ごと商用ワンボックスカーを改造した専用車両に搭載できる。

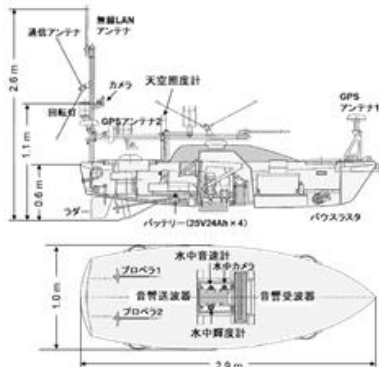


図 3.4.1 無人艇概略図

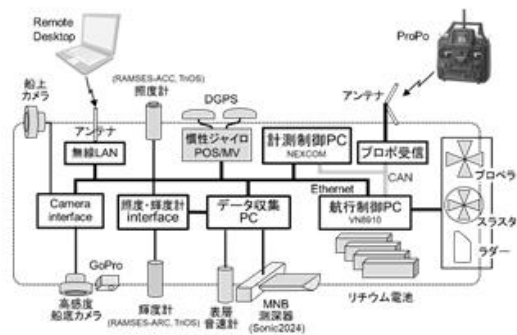


図 3.4.2 無人艇内部機器機構

2) 海底面反射率スペクトルの算出

無人機搭載光ハイパースペクトルセンサの校正・検証を目的として、海面での反射率スペクトルから海底面での反射率スペクトルの以下の方法で算出する。観測には船上に設置した分光照度計（下向き天空照度 E_d 観測）と船底に固定した輝度計（上向き水中輝度 L_u 観測）を用いた。

藻場海域では水深が浅く、水中の拡散消散係 k [m^{-1}] は海域内で一定であると仮定できる。この時、海底面（水深 d [m]）の反射率を r とすると、

$$\phi \cdot L_u = E_d \cdot r \cdot \text{Exp}\{-2kd\} \quad (3.4.1)$$

と表すことができる（ ϕ は定数）。したがって底質が同じ（海底面反射率 r が同じ）で、水深の異なる場所（ d_1, d_2 ）での海面輝度/照度反射率 $R=L_u/E_d$ と r の関係から次式が成り立つ。

$$r_1 = r_2 = \varphi \cdot R_1 \cdot \text{Exp}\{-2kd_1\} = \varphi \cdot R_2 \cdot \text{Exp}\{-2kd_2\} \quad (3.4.2)$$

無人船では R_1, R_2 の実測値と、マルチビームソナーで測定した d_1, d_2 から k を推定できる。

(3) 水陸離発着自律型小型無人機プラットフォームシステムの研究開発

1) システム設計製作・飛行試験及び信頼性・安全性の向上

光ハイパースペクトルセンサ搭載用の観測プラットフォームとして、水上より離発着が可能な小型無人機システム(自動操縦システムを含む機体および地上管制システム:以降 UAS と略す)を開発した(図 3.4.3)。JAXA が研究開発した「長時間滞空型小型無人機システム」および「放射線モニタリング小型無人機システム」(以降 UARMS と略す)の機体、通信および自動操縦システムをベースとして、陸上離発着用の車輪に換えて水上離発着を可能とするフロート・システムを装着したものである。UAS の基本的機能である自動操縦装置は、制御主計算機に搭載された誘導・制御則演算コードにより、あらかじめプログラムされたウェイポイント・データにより定められた飛行経路を自動的に飛行可能であり、自動操縦中でも地上管制システム(以降 GS と略す)からアップリンクされるコマンドにより、高度、速度、飛行経路を任意に変更することも可能である。さらに、飛行状況データ(機体位置、高度、速度、姿勢等)や搭載機器ステータス(不具合発生有無)は、機体からダウンリンクされて GS のコンソールに表示され、飛行状況や機体システムの健全性をリアルタイムで監視することができる。なお、離発着は遠隔操縦による手動操縦で行われるが、自動操縦中でも必要に応じて手動操縦に切り換えることができる。UAS の信頼性・安全性向上に関しては、搭載システムの冗長化等を基本とすると共に、先行的に開発が進められていた UARMS での飛行試験等で得られた技術的知見や不具合対策を反映する手法を採用した。

フロート・システムを装着した飛行試験では、水上滑走中にフロートから生じる水飛沫がプロペラを損傷させる現象(プロペラが胴体後方に位置するプッシュ方式のため)やポーポイズ現象(上下揺れと縦揺れとの連成運動)に悩ませられたが、前者は左右フロート間に張った波消しシートにより、後者は胴体とフロートとの位置関係の調整および水上滑走時にポーポイズ現象が起きにくい機体姿勢を保持する(遠隔操縦パイロットの練度向上)などの対策で解決することができた。また、陸上機とくらべて水上機は、水上滑走時にフロートが受ける水の抵抗が大きいため、離水までの滑走距離が長くなる。このためにどうしても波(うねり)の影響を受けやすいため、前述のポーポイズ現象と相まって離水速度に到達する前に波に乗りあげて空中に跳ね上げられ、その結果、水面上に落着いて機体を損傷してしまうことを経験した。これを避けるためには、水上滑走距離をできるだけ短くすることが有効であることから、短距離で離水速度に到達するようにプロペラ推力増加を目的としてエンジン換装(排気量を 120cc から 150cc へ)を行った。その結果、陸上機と同等の 150~200m の水上滑走で離水することが可能となり、波の影響を受けにくくすることができた。空中における操縦安定性に特に問題はなく、自動操縦システムも誘導・制御則のゲイン調整をすることなく正常に機能することを確認した。

2) 搭載用観測システム統合飛行試験及び実運用

光ハイパースペクトルセンサを搭載した実運用は、2015 年 6 月 17-20 日に実施した笛舞漁港付近(北海道幌泉郡えりも町笛舞、陸上から離発着)および 2017 年 9 月 12-16 日に実施した白瀬漁港付近(新潟県佐渡市白瀬、水上から離発着)における観測飛行が挙げられる。観測飛行は光ハイパースペクトルセンサを搭載して、笛舞漁港付近の観測飛行では、観測対象海域に対して、対気速度 30m/s、対地高度 150m で、長辺を約 1000m、短辺を約 440m とした長方形の周回飛行経路を設定し、自動操縦で観測対象海域をくまなく網羅するように長辺を周回ごとに短辺に沿って 30m(測線間隔)ずつ沖合に移動しながら飛行した。周回数は 16 周、飛行時間は 31min であった(図 3.4.4)。同じく白瀬漁港付近の観測飛行では、観測対象海域に対して、対気速度 30m/s、対地高度 140m で、長辺を約

850m, 短辺を約 180m とした長方形の周回飛行経路を設定し(図 3.4.5), 笛舞漁港付近観測飛行と同様の手法で飛行した。周回数は 6 周, 飛行時間は 13min であった。いずれの観測飛行でも飛行後のデータ解析で, 設定された周回飛行経路に対する実際の飛行経路誤差は, 観測対象海域上空において垂直方向誤差(高度方向の誤差)が±5m 以内, また水平方向誤差(設定コースに対する左右方向の誤差)が±2m 以内と良好な結果を得た。上記2回の観測飛行の他に, 2016 年 8 月の白瀬漁港付近, 2017 年 6 月の笛舞漁港付近と実運用の機会が 2 回あったが, 前者の場合は, 直前に福島県猪苗代湖で行っていた飛行試験において, 離水直後の左旋回で左主翼先端が水面に接触したために不時着水, フロートおよび主翼の一部等を損傷し, その修理に時間を要したために, また後者の場合は, 当初予定していた水上滑走面では機体からのダウンリンクが堤防等に妨げられて受信できない状態であったため, やむなくやや波の荒い水面から離水を試みたが, フロートよりも長い波長の波に煽られて離水してしまい失速し墜落した。その後, 予備機体を用いてダウンリンクを諦めて当初予定の水上滑走面で水上滑走試験を行ったが, 強風や霧で天候に恵まれなかったために, いずれの場合も観測飛行を行うことができなかった。

研究期間中にシステムの設計製作, 飛行試験, 不具合対策等に思いの外に時間を取られ, 2回の実運用にとどまった。しかし, 我が国では実用的な例が見当たらない, 水上からの離発着を可能とし, 光ハイパースペクトルセンサ(質量約 3kg)を搭載して, 広範囲な観測対象海域を短時間で観測できる小型無人機プラットフォームを完成させることができた。

全長x全幅	2.6x4.2m
主要構造	GFRP
エンジン	ガソリン,150cc
巡航速度	28-35m/s
離陸(水)質量	<55kg
滞空時間	>2hr.
自動操縦方式	プログラム自動操縦



図 3.4.3 小型無人機プラットフォーム主要諸元と佐渡における離水時の小型無人機

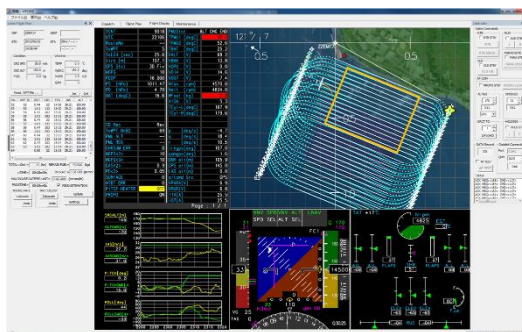


図 3.4.4 2015 年 6 月の笛舞漁港付近観測飛行時の地上管制局コンソールの画面。図中の橙線枠内が観測対象海域, 同じく白線が設定飛行経路, 青線が実際の飛行経路



図 3.4.5 2017 年 9 月の白瀬漁港付近観測飛行状況。図中の橙線枠内が観測対象海域, 同じく白線が設定飛行経路, 赤線が実際の飛行経路。白線が赤線でマスクされ, 正確に飛行したことを示す

(4) マルチコプターを利用したプラットフォームシステムの開発

2015 年 12 月より, 光ハイパースペクトル画像センサ搭載用のマルチコプターシステムの開発に取り組み, 2016 年 3 月にこの大型マルチコプターを完成させた。センサ搭載時

で 20 分間の飛行と自動運転可能な防水型である。この光ハイパースペクトル画像センサ搭載マルチコプターシステムは、センサ部分を海水につけて、水上で観測が可能であり、藻場のスペクトルが水中で観測することができる。2016 年度および 2017 年度には本マルチコプターで光ハイパースペクトル画像センサを搭載して観測を実施した。

3.5 海域検証(北里大学・「海域検証」グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

光ハイパースペクトルリモートセンシングシステム開発と音響マルチスペクトルシステム開発では、大型海産植物の種判別とバイオマス推定を行うアルゴリズムを構築する。そのために、光ハイパースペクトルリモートセンシングデータと音響マルチスペクトルデータの空間解像度に合致した現場での生物量測定手法を確立した。その方法に基づいて、異なる海域で海水の分光特性や藻場の群落構造特性ごとにデータを取得し、開発したシステムの有効性を実証した。

また、有色溶存態有機物(CDOM)、および、クロロフィル、懸濁物濃度について現場で測定し、藻場と CDOM 形成との関連の把握、およびこれらの有色物質のハイパースペクトルデータにあたる影響を検討した。それに基づいて、各海域でデータを取得・データベース化を図り、光ハイパースペクトルシステム開発班の藻場検出、藻場を構成する主要種の判別、バイオマス推定アルゴリズムの開発の精度向上を図るために用いられる。

さらに、各プラットフォームで得られたデータのデータフュージョンを行うために高精度測位法の開発を行った。

表 3.5.1 海域検証グループによる調査場所、藻場、調査日、調査方法、調査主体

場所	藻場種類	調査日	調査方法	調査主体
富山湾魚津市沿岸	ガラモ場	2012/12/14	漁船を用いた水中ビデオカメラ(みるぞう Pro)、潜水	NPEC
富山湾氷見市沿岸	アマモ場、ガラモ場	2012/12/21	漁船を用いた水中ビデオカメラ(みるぞう Pro)、潜水	NPEC
七尾湾(西湾)沿岸	アマモ場	2015/6/1,2,16	漁船を用いた水中ビデオカメラ(みるぞう Pro)、GoPro による録画	NPEC
		2015/7/23	デジタルスチルカメラによるスタンド・アップパドルサーフボード上からの静止画撮影	
北海道神恵内地先	ホソメコンブ、スガモ、ウガノモク	2013/6/12-15	漁船を用いた水中ビデオおよびソナー調査	北里大
北海道えりも町 笛前地先	ホソメコンブ、スガモ、ウガノモク	2013/6/17-18	漁船を用いた水中ビデオおよびソナー調査、坪刈	北里大
		2013/9/9-10		
		2014/6/16-17 2014/10/19-20		
大槌湾	コンブおよびガラモ場	2013/3/25, 6/3, 10/5	漁船を用いた水中ビデオおよびソナー調査	北里大
		2014/2/19, 5/26, 12/11		
		2015/5/15, 8/5 2016/5/30		
越喜来湾浪板海岸	アマモ場	2013/2/26, 8/22	漁船を用いた水中ビデオおよびソナー調査	北里大
		2014/3, 5/7, 8/23, 10/11		
		2015/5/16, 8/1		
石巻市狐崎浜	アラメ海中林・ガラモ場(ヨレモク・フシスジモク・アカモク・ジョロモクが生育)	2014/7/22	SCUBA 潜水を用いたライン調査	東北大
		2015/4/28		
		2015/9/17		
佐渡島両津湾(佐渡市白瀬地先)	アマモ場(アマモ、スゲアマモ、タチアマモのアマモ属 3 種が生育)	2013/7/5	SCUBA 潜水を用いたライン調査	日本海区水研
		2014/9/19		
		2015/6/12		

1) 藻場を構成する大型海産植物の種組成, 分布, 現存量データの取得

表 3.5.1 に示す海域において藻場を構成する大型海産植物の種組成, 分布, 現存量などのデータを取得した。調査している場所は, ガラモ場, コンプ場, アラメ場, アマモ場で, 日本における重要な藻場の構成種を一通りカバーしたといえる。

佐渡島両津湾では, 6–24m の底深帯にアマモ場が形成されており, 浅い方から順にアマモ, スゲアマモ, タチアマモの生育がみとめられた。6m 付近ではアマモ, 20m 以深ではタチアマモの純群落が形成されていたが, 他の底深帯では複数種の混成群落が見られた。0.5km をこえる海岸線にそった分布が確認され, 少なく見積もっても 10ha をこえるアマモ場の広がり確認できた。底深 10, 20m における海草群落の現存量は, それぞれ 76–205, 47–68 g m⁻² であった。この場合, 底深 10m における種組成はアマモのみ又はアマモとスゲアマモであるのに対し, 20m ではタチアマモのみであった。比較的浅い底深帯から深い底深帯まで, 複数種の植物が生育し, 透明度も高い海域であることから, 音響学的及び光学的探索技術の開発に適したテストフィールドで, 現場のシートゥルースデータを取得することができた。

岩手県大槌湾では, 湾の北側では潮間帯下部にエゾノネジモクが毎年卓越する。それより深い底深 5–7m では植生が経年的な変化を示した。2013 年から 2014 年にかけて湾奥部の七戻ではマコンブとアカモクが, 湾口に近い南影ではマコンブとワカメが高い被度を示した。一方, 湾の南側においては, 湾口に近い松島でアカモクが, 湾中央部の平磯でマコンブが卓越した。2015 年から湾の各所においてアカモクは観察されたものの, 一年生のマコンブは減少した。2016 年になると, 湾の北側潮間帯下部にエゾノネジモクが見られたものの被度は減少した。底深 5–7m においてマコンブは観察されず, ホンダワラ類が 20% 未満の低い被度を示すのみであった。湾の南側では, 松島, 平磯共に植生は極めて貧弱であった。2017 年には海藻の衰退が著しく湾全体で裸地の割合が高まった。海藻植生の衰退と共に湾全体でキタムラサキウニが高密度で観察され, キタムラサキウニによる食害が湾内の海藻衰退の一要因であると考えられる。また, 大船渡市浪板海岸においてはアマモの群落がキタムラサキウニにより食害されていた。

以上の調査地点の例を図 3.5.1 と図 3.5.2 に示した。



図 3.5.1 石巻市狐崎浜での海中調査の様子と海藻生育



図 3.5.2 氷見市沿岸のビデオ調査(左図), 大船渡市浪板海岸での調査(中図), 佐渡市両津湾の調査(右図)

2) 光学的ハイパースペクトルデータに影響する因子データの取得(北里大, 東北大, 東大, 日水研, 環日本海)

水中での光が減衰する主な要因は, 1) 水分子による吸収・散乱, 2) 懸濁粒子による吸収・反射・散乱, 3) 溶存態有機物による吸収・散乱が考えられる。そこで, 本研究においては, 主に2)に対応する470nmにおける散乱光メーター(感度 0.003 m^{-1})と, 主に3)に対応するCDOMメーター(EX/EM 370/460 nm, 感度 0.28 ppb), および Chlorophyll メーター(EX/EM 470/695 nm, 感度 $0.025 \mu\text{g l}^{-1}$)を備えた, ECO Triplet Fluorometer and Backscattering Sensor(WetLabs 製)を用いて現場法により散乱強度($\beta \text{ m}^{-1}\text{Sr}^{-1}$), クロロフィル濃度($\mu\text{g l}^{-1}$), CDOM 濃度(ppb)の鉛直プロファイルの計測を行った。一例として岩手県大槌湾で取得した CDOM の場所による違いを示す(図 3.5.3)。大槌湾北岸では, 湾口側では湾中央よりも値が少しばらついている。値はほぼ同程度の値であることがわかる。

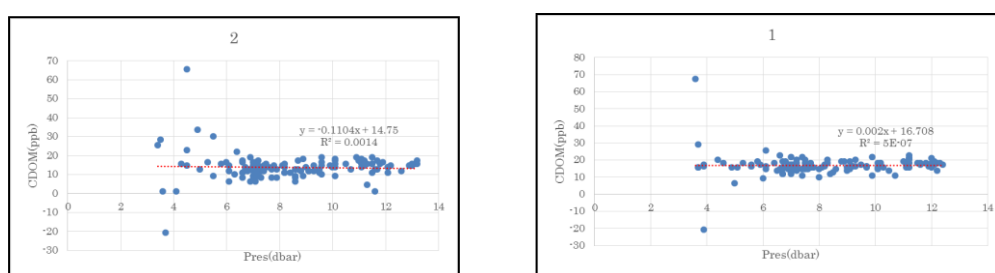


図 3.5.3 岩手県大槌湾北岸湾口(左)と同北岸湾中央(右)における水深(横軸)に対する CDOM の変化(縦軸)

表 3.5.2 代表的な藻場調査海域における光学影響因子の特性

		Chl ($\mu\text{g/l}$)	CDOM(ppb)	β (470)
えりも	沖合(3m~)	1.08 ± 0.78	15.95 ± 5.38	0.0065 ± 0.0039
	沿岸(~3m)	2.07 ± 3.27	24.62 ± 21.46	0.0095 ± 0.0088
両津湾	港外	0.22 ± 0.16	-0.23 ± 2.11	0.0012 ± 0.0009
	港内	0.50 ± 0.10	5.11 ± 4.17	0.0068 ± 0.0098
大槌湾	湾	1.09 ± 0.37	12.09 ± 3.80	0.0020 ± 0.0005

湾内の各点における鉛直方向の計測を1セットとして, 水柱を特徴付ける光学的特性としてその平均値を用いて評価を行うこととした。表 3.5.2 に代表的な調査海域における特性値を取りまとめた。佐渡・両津湾においては, 港外は他の海域よりも明らかに透明度が高く, 各特性値はそれを反映していた。港内の藻場でドローンを用いたハイパースペクトル計測を行ったのに合わせて, 港内での計測を行ったところ, クロロフィル濃度, CDOM濃度は港外よりは高いものの他海域より明瞭に低かった。しかし, 散乱強度に関してはえりも沖合と同程度に高かった。えりもにおいては, 3m 未満の浅い水深帯が岸に向かって広がっており, 干潮時には沖合との水交換が妨げられるものと思われる。この海域では各特性値は他海域に比べて高い値を示した。興味深いことに両津湾の港内とえりもの沿岸域において CDOM 濃度と散乱強度は高い正の相関が見られた。浅い海域において CDOM 濃度

や散乱強度が高かったことは、今後、水深を考慮する必要があることを示している。海底植生判別のためには、水柱補正(全層分の補正)が必要だからである。CDOM は、紫外から青にかけての波長の吸収が大きいこと、当該領域は海藻・海草判別への寄与は必ずしも大きくないことなどから、補正の重要性に関しては今後、現場法に加えてベンチトップ型蛍光分光光度計などを併用して各波長の減衰係数を求めた上でさらなる検討を行う必要がある。本研究からも、水深あるいは離岸距離と吸光・散乱要因との関連が示唆されたことは、吸光・散乱要因の地理的変動が、無人機を用いた広域調査における現存両推定に影響する可能性が考えられる。今後、広域の迅速計測手法の開発と、水柱補正法の開発が必要となるものと思われる。

3) データフュージョンのための高精度測位法の開発

3-1) GNSS 受信機の選定

高精度測位はハイパーセンサーの解像度1ピクセル 15cm 以下の精度を得ることが目標である。この測位精度を得るには、2 周波受信が可能である測量用 GNSS 受信機を用い、VRS(Virtual Reference Station)方式による RTK 測量を行うのが一般的である。しかしながら、2 周波受信は極めて高価である。一方、現在では測位衛星は米国の GPS のみならず、ロシアの GLONASS、中国の Beidou など複数の GNSS コンステレーションが運用されている。さらには GPS を補完する準天頂衛星みちびきが利用可能となっている。これら複数の GNSS を用いれば、2 周波受信機並の測位精度が得られるとされている。まず、VRS 方式の 2 周波受信機と1周波受信機のパフォーマンスを比較した(図 3.5.4)。2 周波受信機では、水平方向の 2DRMS が1cm 未満であった。一方、1周波受信機においては、2-3cm の精度であり、測位精度としては問題のない水準であることが確認された。なお、RTK 測位においては FIX 解を得られたかどうか十分な精度を得られているかの目安となる。受信を開始してから FIX するまで 10 分以上の時間を要した場合もあったので注意が必要である。U-blox 社の1周波受信機 UBLOX NEO-M8T を用いることとした。

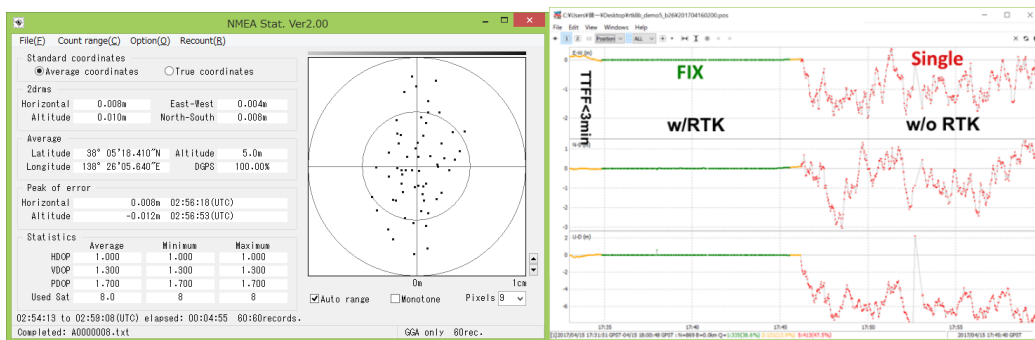


図 3.5.4 RTK 精度の比較。2 周波受信機による例、2016 年 8 月佐渡・両津湾(左図)と1周波受信機による例、2017 年 4 月鶴沼海岸(右図)。左図の外側の円周が中心から 1cm の距離を示す。右図の FIX は、FIX 解が得られた場合、Single は単独測位の場合を示す。

3-2) 高精度測位法

海底の点を GNSS 測位する場合、水は電波を通さないで GNSS アンテナは海上に設置する必要がある。GNSS アンテナを海底点の真上に置くことはほとんど不可能なので、測位したアンテナの位置座標から未知の海底点をどのように求めるか、測量法がポイントとなる。測量には一般にいわゆる3角測量(基線測量)、すなわち、距離、角度による測量が用いられる。水中でリアルタイムに距離を測るには、現状では音波を用いるしかない。しかし、音波による測離は密度(塩分・水温)に依存するため正確さに欠ける。USBL(Ultra Short Base Line)と称されるシステムが海洋土木工事に用いられているが、50cm 程度の精度しかないと言われている。一方、固定長の軸に GNSS コンパスと傾斜計を取り付け、アンテナか

らの方位，距離，角度を求めて測位する方式も提案されている。この方式は高精度な GNSS コンパスと傾斜計は極めて高価であること，軸に対して傾斜計を真に鉛直に取り付ける必要があることにより高価で面倒な方法である。

3-3) 高精度測位の統合運用に関して

以上，海域検証を中心に測位精度の向上に関して記述した。しかし，高精度測位の統合運用のためには，各プラットフォームの測位精度を RTK レベルに引き上げる必要がある。RTK 解析を行うためには基準局を設置する必要がある。海域検証に用いる基準局を共通の基準局として運用するのが簡便で良いであろう。一方，移動局に関しては各プラットフォームに既存の GNSS 受信機との互換性が問題となるが，ドローンは GNSS 受信機の変更は比較的簡単であり，無人艇はペイロードに余裕があるのでともに対応可能である。

§ 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 2件, 国際(欧文)誌 22件)

1. Shuhei Sawayama, Teruhisa Komatsu, Nurjannah Nurdin: Coral reef habitats mapping of Spermonde Archipelago using remote sensing compared with in situ survey of fish abundance, Proc. SPIE 8525, Remote Sensing of the Marine Environment II, 85250P, 2013, doi: 10.1117/12.975777
2. Tatsuyuki Sagawa, Atsuko Mikami, Masakazu N. Aoki, Teruhisa Komatsu: Mapping seaweed forests with IKONOS image based on bottom surface reflectance, Proc. SPIE 8525, Remote Sensing of the Marine Environment II, 85250Q, 2013, doi: 10.1117/12.975678
3. Shuhei Sawayama, Teruhisa Komatsu, Nurjannah Nurdin: Coral reef habitats mapping of Spermonde Archipelago using remote sensing compared with in situ survey of fish abundance, Proc. SPIE 8525, Remote Sensing of the Marine Environment II, 85250Q 2013, doi: 10.1117/12.975777
4. Sophany Phauk, Teruhisa Komatsu, Shuhei Sawayama, Thidarat Noiraksar: Marine habitat mapping: using ALOS AVNIR-2 satellite image for seagrass beds at Rabbit (Koh Tonsay) Island, Cambodia, Proc. SPIE 8525, Remote Sensing of the Marine Environment II, 85250V, 2013, doi: 10.1117/12.999310
5. Phan Minh Thu, Tong Phuoc Hoang Son, Teruhisa Komatsu: Using remote sensing technique for analyzing temporal changes of seagrass beds by human impacts in waters of Cam Ranh Bay, Vietnam, Proc. SPIE 8525, Remote Sensing of the Marine Environment II, 85250T, 2013, doi: 10.1117/12.977422
6. Aidy M. Muslim, T. Komatsu, D. Dianachia: Evaluation of classification techniques for benthic habitat mapping, Proc. SPIE 8525, Remote Sensing of the Marine Environment II, 85250W, 2013, doi: 10.1117/12.999305
7. Shuji Sasa, Shuhei Sawayama, Shingo Sakamoto, Ryo Tsujimoto, Genki Terauchi, Hiroshi Yagi, Teruhisa Komatsu: Did huge tsunami on 11 March 2011 impact seagrass bed distributions in Shizugawa Bay, Sanriku Coast, Japan?, Proc. SPIE 8525, Remote Sensing of the Marine Environment II, 85250X, 2013, doi: 10.1117/12.999307
8. Shingo X. Sakamoto, Shuji Sasa, Shuhei Sawayama, Ryo Tsujimoto, Genki Terauchi, Hiroshi Yagi, Teruhisa Komatsu: Impact of huge tsunami in March 2011 on seaweed bed distributions in Shizugawa Bay, Sanriku Coast, revealed by remote sensing, Proc. SPIE 8525, Remote Sensing of the Marine Environment II, 85251B, 2013, doi:10.1117/12.999308
9. Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Genya Saito and Yukio Kosugi, Development of UAV-mounted miniature hyperspectral sensor system for agricultural monitoring, Proc. IGARSS 2013, pp. 4415-4418, 2013, doi 10.1109/IGARSS.2013.6723814
10. Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Genya Saito and Yukio Kosugi: Characterization of rice paddies by a UAV-mounted miniature hyperspectral sensor system, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol.6, No.2, pp.851-860, 2013, doi:10.1109/JSTARS.2013.2250921
11. 小松輝久, 水野紫津葉, 三上温子, 佐川龍之, 坂本真吾, 石田健一, 田中潔, 道田豊, 固着期から浮遊期へと変化する海藻・海草のダイナミックな生態系, 沿岸海洋研究, Vol.51, No.2, pp.191-202, 2014
12. Kuniaki Uto, Yukio Kosugi and Genya Saito, "Semi-supervised hyperspectral subspace learning based on a generalized eigenvalue problem for regression and dimensionality reduction", IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol.7, No.6, pp.2583-2599, 2014, doi:10.1109/JSTARS.2014.2325051
13. Thidarat Noiraksar, Shuhei Sawayama, Sophany Phauk and Teruhisa Komatsu, "Mapping Sargassum beds off the coast of Chon Buri Province, Thailand, using

- ALOS AVNIR-2 satellite imagery”, *Botanica Marina* Vol.57, No.5, pp367–377, 2014, doi: 10.1515/bot-2014-0015
14. Kuniaki Uto, Yukio Kosugi and Genya Saito, “Hyperspectral Subspace Learning of Forest Phenology Under Order Constraints”, *Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp.4652-4655, 2014, doi:10.1109/IGARSS.2014.6947530
 15. Mazlan Hashim, Syarifuddin Misbari, Nurul Nadiah Yahya, Samsudin Ahmad, Md Nadzri Reba (Univ. Technology Malaysia) and Teruhisa Komatsu, “An Approach for Quantification of Submerged Seagrass Biomass in Shallow Turbid Coastal Waters”, *Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp.4439-4442, 2014, doi: 10.1109/IGARSS.2014.6947476
 16. Teruhisa Komatsu, Takayoshi Ohtaki, Shingo Sakamoto, Shuhei Sawayama, Masahiro Hamana, Michiharu Shibata, Koji Shibata and Shuji Sasa, “Impact of the 2011 Tsunami on Seagrass and Seaweed Beds in Otsuchi Bay, Sanriku Coast, Japan”, In *Marine Productivity: Perturbations and Resilience of Socio-ecosystems (Proceedings of the 15th French-Japanese Oceanography Symposium)*, Editors: Hubert Jean Ceccaldi, Yves Hénocque, Yasuyuki Koike Teruhisa Komatsu, Georges Stora, Marie-Hélène, Tusseau-Vuillemin, Springer International Publishing, pp. 43-53, 2015, doi:10.100/978-3-319-13878-7
 17. 坂西芳彦, 阿部信一郎, 小松輝久, 佐渡島両津湾における海草群落の分布下限水深, *藻類(日本藻類学会和文誌)* Vol.63, No.2, pp.85-89, 2015
 18. Kuniaki Uto, Yukio Kosugi and Genya Saito, “Semi-supervised hyperspectral manifold learning for regression,” *Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp.9-12, Milan Italy, 2015, doi:10.1109/IGARSS.2015.7325684
 19. Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Genya Saito, Yukio Kosugi and Teruhisa Komatsu, Development of a Low-Cost, Lightweight Hyperspectral Imaging System Based on a Polygon Mirror and Compact Spectrometers *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, pp. 861-875, 2016, doi:10.1109/JSTARS.2015.2472293
 20. Masahiro Hamana and Teruhisa Komatsu. "Real-Time Classification of Seagrass Meadows on Flat Bottom with Bathymetric Data Measured by a Narrow Multibeam Sonar System", *Remote Sensing* 8(2), 96(16p), 2016, doi:10.3390/rs8020096
 21. Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Genya Saito, Yukio Kosugi, and T. Komatsu, “Development of a Low-Cost Hyperspectral Whiskbroom Imager Using an Optical Fiber Bundle, a Swing Mirror and Compact Spectrometers,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, no. 9, pp. 3909-3925, 2016, doi: 10.1109/JSTARS.2016.2592987
 22. Kuniaki Uto, Yukio Kosugi, and Genya Saito, "Optical leaf parameter estimation based on directional characteristics of leaf-scale hyperspectral images," in 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 6914-6917, 2016, doi: 10.1109/IGARSS.2016.7730804
 23. Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Genya Saito, Yukio Kosugi, and Teruhisa Komatsu, “Coastal Observation Using New Hyperspectral Imager for UAVs” in 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 3614 - 3617 DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127781
 24. Sakanishi, Y. and Komatsu, T., Growing depth limit of *Zostera caulescens* in coastal waters along the Japan Sea coast of Honshu, Japan. *Fisheries Science*, vol.83(6), pp. 977–986, 2017, doi:0.1007/s12562-017-1128-7

(2)その他の著作物(総説, 書籍など)

1. 宇都有昭 ”プロジェクト紹介 : JST CREST 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 : ハイパースペクトルセンサ開発を中心に”, 日本リモートセンシング学会誌, 36(4), pp,421-424, 2016
2. 小杉幸夫, 宇都有昭:ファイバー像反射型走査機構を備えたハイパースペクトル観測装置, ケミカルエンジニアリング, 2016 年 6 月号, pp.7-14, 2016

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 3 件, 国際会議 1 件)

1. 小松輝久(東大), リモートセンシング・GIS 技術の沿岸域管理・環境保全への応用, 日本学術会議公開シンポジウム「農林水産業への地球観測・地理空間情報の応用」プログラムおよび要旨, 27-34, 2013 年 3 月 21 日
2. Teruhisa Komatsu (東大), Thidarat Noiraksar (Brapha Univ.), Shingo Sakamoto, Hiroomi Miyamoto, Sophany Phauk (東大), Pornthep Thongdee, Suthep Jualaong (Eastern Marine and Coastal Resources Research Center), Shuhei Sawayama, Shuhei Nishida (東大), Development of a decision tree method to classify seagrass beds: example in Kung Kraben Bay, Golf of Thailand, with use of ALOS AVNIR-2, RCT-JSPS Joint International Seminar on Coastal Ecosystems in Southeast Asia, Chiang Mai, Thailand, 15-17 November 2013
3. 石坂丞二 (名大), 小松輝久 (東大), 沿岸環境のモニタリングへの利用, 海洋と宇宙の連携推進シンポジウム「海洋状況認識に有効な宇宙技術」, 日本リモートセンシング学会・日本海洋学会, 東京, 2015 年 3 月 5 日
4. 小松輝久(東大), 空と海からの藻場の 3 次元マッピング公開シンポジウム「新技術を活用した『海を活かしたまちづくり』」, 海洋政策研究所・JST, 笹川平和財団ビル国際会議場 東京, 2015 年 12 月 15 日

② 口頭発表 (国内会議 12 件, 国際会議 22 件)

1. 齋藤元也・関 晴之・宇都有昭・小杉幸夫 (東工大)・東 健太・左高 巧船 (IMO), 簡易空中分光測定システムの試作, システム農学会 2012 年度秋季シンポジウムおよび一般研究発表会, 信州大学農学部南箕輪キャンパス, 2012 年 11 月 2-3 日
2. 宇都有昭・関 晴之・齋藤元也・小杉幸夫 (東工大), UAV 搭載 HS ミニセンサによる圃場計測, 日本写真測量学会 平成 24 年度秋季学術講演会, 秋田市, 2012 年 11 月 1-2 日
3. 丸家 誠・宇都有昭・齋藤元也・小杉幸夫 (東工大):偏光分光特性を用いた植物葉の水分変化検出の試み, 第 51 回光波センシング技術研究会「光波センシングのための偏光技術」, 東京理科大森戸記念会館, 2013 年 6 月 4-5 日
4. Kuniaki Uto, Yukio Kosugi (東工大), Leaf parameter estimation based on shading distribution in leaf scale hyperspectral images, 5th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing, Gainesville, Florida, USA, 25-28 June, 2013
5. Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Genya Saito and Yukio Kosugi (東工大), Development of UAV-mounted miniature hyperspectral sensor system for agricultural monitoring, Proc. IGARSS 2013, 4 p Melbourne, Australia, 21-26 July 2013
6. Genya Saito, Haruyuki Seki, Kuniaki Uto, and Yukio Kosugi (東工大), Development of Mounted Hyperspectral Sensor on UAV for Environmental and Agricultural Studies, Proceedings of the 34th Asian Conference on Remote Sensing, 4 p, Bali, Indonesia, 20-24 October 2013
7. Thidarat Noiraksar, Teruhisa Komatsu, Shuhei Sawayama, Shuhei Nishida (東大), and Ken-ichi Hayashizaki (北里大), Mapping Sargassum beds in the East Coast of the Gulf of Thailand, using ALOS AVNIR-2 image, NRCT-JSPS Joint

- International Seminar on Coastal Ecosystems in Southeast Asia, Chiang Mai, Thailand, 15-17 November 2013
8. Aoki, M.N., Suzuki, H., Aoki, T., Horikoshi, A., Endo, H. & Agatsuma (東北大), Y. Effects of subsidence caused by the 2011 Tohoku Pacific Earthquake on an *Eisenia bicyclis* kelp bed off Oshika Peninsula, northeastern Japan. The 10th International Temperate Reefs Symposium, Perth, Australia. January, 2014.
 9. Tatsuyuki Sagawa, Tomohiro Watanabe, Shingo X. Sakamoto, Masahiro Hamana, Shuhei Sawayama and Teruhisa Komatsu (東大), “Simulation of seagrass beds mapping by satellite image based on the radiative transfer model”, IOC Sub-Commission for the Western Pacific (WESTPAC) 9th International Scientific Symposium, Nha Trang, Vietnam, 22-25 April 2014
 10. Cao Van Luong, Nguyen Van Quan (ベトナム国立海洋環境資源研究所), Teruhisa Komatsu (東大), and Dam Duc Tien (ベトナム国立海洋環境資源研究所), “The Biomass and Habitat Mapping on the Status of Seagrass Beds in Some Coastal Lagoons, Central Vietnam”, IOC Sub-Commission for the Western Pacific (WESTPAC) 9th International Scientific Symposium, Nha Trang, Vietnam, 22-25 April 2014
 11. Phan Minh Thu1 (ベトナム国立海洋研究所) and Teruhisa Komatsu (東大), “Multiple Hyperspectral Remote Sensing for Seagrass changes in Cam Ranh Bay”, IOC Sub-Commission for the Western Pacific (WESTPAC) 9th International Scientific Symposium, Nha Trang, Vietnam, 22-25 April 2014
 12. Aidy M. Muslim (University of , Teruhisa Komatsu (東大) and Saifullah A. Jaaman , “Seagrass Mapping of Brunei Bay Using Remote Sensing”, IOC Sub-Commission for the Western Pacific (WESTPAC) 9th International Scientific Symposium, Nha Trang, Vietnam, 22-25 April 2014
 13. Mazlan Hashim, Nurul Nadiyah Yahya, Syarifuddin Misbari, Samsudin Ahmad (University of Technology Malaysia) and Teruhisa Komatsu (東大), “Satellite-based change detection of seagrass biomass in Merambong shoal”, IOC Sub-Commission for the Western Pacific (WESTPAC) 9th International Scientific Symposium, Nha Trang, Vietnam, 22-25 April 2014
 14. Shuhei Sawayama, Teruhisa Komatsu, Nurjannah Nurdin, Shingo X Sakamoto and Muhammad Akbar (東大), “Developing the research on fish-habitat relationships in Indonesian coral reefs using remote sensing”, IOC Sub-Commission for the Western Pacific (WESTPAC) 9th International Scientific Symposium, Nha Trang, Vietnam, 22-25 April 2014
 15. 濱名正泰・佐々修司・小松輝久 (東大), ナローマルチビームソナーを用いた藻場タイプ判別手法の開発に関する研究, 日仏海洋学会術研究発表会, 東京, 2014年6月14日
 16. Kuniaki Uto, Yukio Kosugi and Genya Saito (東工大), “Hyperspectral Subspace Learning of Forest Phenology Under Order Constraints” IEEE 35th International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2014, Quebec, Canada, 13-18 June 2014
 17. Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Genya Saito and Yukio Kosugi (東工大), “Development of Lightweight Hyperspectral Imaging System for UAV Observation”, Proceedings of 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing, 4p, Lausanne, Switzerland, 24 - 27 June 2014
 18. 齋藤元也・関 晴之・宇都有昭・小杉幸夫 (東工大)・小松輝久 (東大), 沿岸域調査のためのハイパースペクトルイメージセンサの試作, システム農学会 2014年度秋季一般研究発表会, 京都, 2014年10月17-18日
 19. 宇都有昭・小杉幸夫・齋藤元也 (東工大), 順序情報に基づくハイパースペクトル多様体学習, 日本リモートセンシング学会第57回(平成24年秋季)学術講演会, 京都, 2014年

11月6-7日

20. 鈴木はるか・青木智也・青木優和・遠藤 光・堀越彩香・吾妻行雄 (東北大), 牡鹿半島沿岸におけるアラム幼体の加入および生残とそれに関わる環境要因, 平成 26 年度日本水産学会東北支部大会, 秋田市, 2014 年 11 月 7-8 日
21. 宇都有昭・関 晴之・齋藤元也・小杉幸夫 (東工大), UAV 搭載型小型軽量 HS 画像取得系の開発, 平成 26 年度日本写真測量学会秋季学術講演会, 高松, 2014 年 11 月 20-22 日
22. 林崎健一・坂井翔 (北里大)・小松輝久 (東大), ソナーと水中ビデオを用いた植生解析手法の開発, 平成 26 年度日本水産学会春季大会, 東京, 2015 年 3 月 27-31 日
23. Genya Saito, Haruyuki Seki, Kuniaki Uto, Yukio Kosugi (東工大) and Teruhisa Komatsu (東大), “Development of Hyperspectral Imaging Sensor, Which Mounted on UAV for Environmental Study at Coastal Zone” Proc. ACRS2014, 4 pages, Nay Pyi Taw, Myanmar, 27-31 October 2014
24. Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Genya Saito, Yukio Kosugi (東工大) and Teruhisa Komatsu (東大), Development of Hyperspectral Imaging System Using Optical Fiber Bundle And Swing Mirror, 7th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing, 4 pages Tokyo Japan, 2- 5 June 2015
25. 宇都有昭・関 晴之・齋藤元也・小杉幸夫 (東工大), 持続可能な低価格・小型軽量ハイパースペクトル画像取得系の開発, 平成 27 年度日本写真測量学会年次学術講演会, 東京, 2015 年 5 月 19-20 日
26. Genya Saito, Haruyuki Seki, Kuniaki Uto, Yukio Kosugi (東工大) and Teruhisa KOMATSU (東大), “Development of Hyperspectral Imaging Sensor which Mounted on Unmanned Aircraft for Coastal Zone Studies” Proc. ACRS2015, 6 pages, Manila, Philippine, 19-23 October 2015
27. 宇都有昭・関 晴之・齋藤元也・小杉幸夫 (東工大)・小松輝久 (東大), バンドルを利用したハイパースペクトル画像センサによる沿岸海洋計測, 長崎大学・良順会館, 26-27 November 2015
28. 宇都有昭・関 晴之・齋藤元也・小杉幸夫 (東工大)・小松輝久 (東大), 光ファイババンドルを用いたハイパースペクトル画像センサによる沿岸域分類, 日本リモートセンシング学会第 60 回学術講演会, 日本大学生産工学部津田沼キャンパス, 習志野市, 2016 年 5 月 13 日
29. Kuniaki Uto, Yukio Kosugi and Genya Saito (東工大), Optical leaf parameter estimation based on directional characteristics of leaf-scale hyperspectral images, 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, China National Convention Center, Beijing, China, 15 July 2016
30. Genya Saito, Haruyuki Seki, Kuniaki Uto, Yukio Kosugi (東工大) and Teruhisa Komatsu (東大), Development of Hyperspectral Imaging Sensor and UAV for Coastal Zone Studies, Asian Conference of Remote Sensing (ACRS) 2016, the Galadari Hotel, Colombo, Sri Lanka, 19 October 2016
31. Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Genya Saito, Yukio Kosugi (東工大), Shuji Sasa, Shuhei Sawayama, Minami Asada and Teruhisa Komatsu (東大), New Hyperspectral Imager for Environmental Monitoring with Use of Optical Fiber Bundle and Ultra-Compact Spectrometers for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), PITTCON 2017, oral session McCormick Place – West Hall, Chicago, USA, 8 March 2017
32. Teruhisa Komatsu, Masayasu Hamana, Minami Asada and Shuji Sasa (東大), Development of a narrow multibeam sonar system for mapping, First Core-to-Core Program Research and Education Network on Coastal Ecosystems in Southeast Asia, Universiti Putra Malaysia, Serdang, Selangor Darul Ehsan,

Malaysia, 14 March 2017

33. Ken-ichi Hayashizaki (北里大) and Teruhisa Komatsu (横浜商大), Improvement of Positioning accuracy for Ground trothing using low-cost single-frequency GNSS RTK system, 10th WESTPAC International Scientific Conference, Qingdao, China, 17-20 April 2017
34. Genya Saito, Haruyuki Seki, Kuniaki Uto, Yukio Kosugi (東工大), Yasuhiro Senga (東海大), Koki Hozumi (JAXA) and Teruhisa Komatsu (横浜商大), Development of Hyperspectral Imaging System for Coastal Zone Studies, The 38th Asian Conference on Remote Sensing, New Delhi, India, 22-27 October 2017

③ ポスター発表 (国内会議 7件, 国際会議 10件)

1. Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Genya Saito, Yukio Kosugi (東工大), Development of UAV-mounted miniature hyperspectral sensor system for agricultural monitoring, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, Australia, 21-26, July, 2013
2. Genya Saito, Haruyuki Seki, Kuniaki Uto and Yukio Kosugi (東工大), Development of a Hyperspectral Sensor on UAV for Biomass Estimation at Costal Zone, 11th Field Science Center International Symposium, Matsushima Miyagi Japan, 1-2 August, 2013
3. 林崎健一 (北里大), 小松輝久 (東大), アマモ場簡易観察手法の開発と被災水域での観察例, 平成25年度日本水産学会秋季大会, 三重県津市, 2013年9月21日
4. Aoki, M.N., Suzuki, H., Aoki, T., Horikoshi, A., Endo, H. and Agatsuma Y. (東北大), Effects of subsidence caused by the 2011 Tohoku Pacific Earthquake on an *Eisenia bicyclis* kelp bed off Oshika Peninsula, northeastern Japan. The 10th International Temperate Reefs Symposium, Perth, Australia. 12-17 January, 2014.
5. 坂西芳彦, 阿部信一郎 (日本海区水産研究所), 小松輝久 (東大), 佐渡島両津湾沿岸におけるアマモ場の群落構造について 日本藻類学会第38回大会, 千葉県船橋市, 2014年3月15-16日
6. Hamana, M., Komatsu, T., Sasa, S., Sakamoto, S. X., Otaki, T. (東大), Akino, H. and Fukuda, H. (北海道中央水試), Three dimensional mapping of *Sargassum* beds using a narrow multi-beam sonar. IOC Sub-Commission for the Western Pacific (WESTPAC) 9th International Scientific Symposium, Nha Trang, Vietnam, 22-25 April 2014
7. 鈴木由香莉・青木優和・堀越彩香・遠藤 光・吾妻行雄 (東北大), 津波後の宮城県女川湾におけるホンダワラ類葉上動物群集構造の季節変化: 基質海藻フェノロジーとの関係の考察, 2014年日本プランクトン学会・ベントス学会合同大会, 東広島市, 2014年9月4-7日
8. 宇都有昭・小杉幸夫・齋藤元也 (東工大), 順序情報に基づくハイパースペクトル多様体学習, 日本リモートセンシング学会第57回(平成24年秋季)学術講演会, 京都, 2014年11月6-7日
9. Kuniaki Uto, Yukio Kosugi, Genya Saito (東工大), Semi-Supervised Manifold Learning of Time-Series Hyperspectral Forest Images, Proc. 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing, Lausanne, Switzerland 23-27 June 2014
10. Sakamoto, S., Sasa, S., Tsujimoto, R., Terauchi, G. and Komatsu, T. (東大), (2014) Disturbance and recovery of seagrass beds in Shizugawa Bay after the huge tsunami of the 2011 Tohoku earthquake, Sanya, China, The 11th International Seagrass Biology Workshop, 6-10 November 2014
11. Hamana, M., T. Komatsu (東大), Development of a simple method for

- detection of sublittoral tidal seagrass beds using a narrow multi-beam sonar system. The ICES Symposium on “Marine Ecosystem Acoustics (Some Acoustics)–observing the ocean interior in support of integrated management”, Nantes, France, 25-28 May 2015
12. 宇都有昭・関晴之・齋藤元也・小杉幸夫（東工大）・小松輝久（東大），光ファイババンドルを利用したハイパースペクトル画像センサによる沿岸海洋計測，日本リモートセンシング学会第 59 回（平成 27 年度秋季）学術講演会，長崎大学・良順会館，2015 年 11 月 26-27 日
 13. 坂西芳彦（日本海区水研）・小松輝久（東大），日本海沿岸の深所に形成される海草群落と光環境の関係について，日本藻類学会第 40 回大会，日本歯科大学生命歯学部，2016 年 3 月 19-20 日
 14. Ken-ichi Hayashizaki（北里大），Masahiro Hamana, Shuuji Sassa and Teruhisa Komatsu（東大），Mapping of kelp forest using integrated data from sonar and underwater video on geographic information system, International Seaweed Symposium 2016, Scandic Hotel Copenhagen, Denmark, 23 June 2016
 15. Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Genya Saito, Yukio Kosugi（東工大），Measurement of a coastal area by a hyperspectral imager using an optical fiber bundle, a swing mirror and compact spectrometers, 8th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing, 8th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing, 24 August 2016
 16. 坂西芳彦（日本海区水研）・小松輝久（東大），佐渡海峡沿岸における海草群落の分布下限水深と光環境について，佐渡海峡沿岸における海草群落の分布下限水深と光環境について，高知大学朝倉キャンパス，24 March 2017
 17. Kuniaki Uto, Haruyuki Seki, Genya Saito, Yukio Kosugi（東工大），and Teruhisa Komatsu（横浜商大），“Coastal Observation Using New Hyperspectral Imager for UAVs” in 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Fort Worth, Texas, USA, 26 July 2017

(4)知財出願

①国内出願（7件）

1. リモートセンシング装置及びリモートセンシング方法，小杉幸夫，関 晴之，宇都有昭，齋藤元也，小松輝久，JST，2013 年 11 月 8 日，特願 2013-231849
2. センシング装置及びセンシング方法，小杉幸夫，関 晴之，宇都有昭，齋藤元也，小松輝久，JST，2014 年 2 月 14 日，特願 2014-26773
3. センシング装置及びセンシング方法，小杉幸夫，関 晴之，宇都有昭，齋藤元也，小松輝久，東工大，2014 年 11 月 26 日，特願 2015-546300
4. 照明装置ならびにそれを用いた蛍光スペクトル画像観測装置および飛行型測定装置，小杉幸夫，関 晴之，宇都有昭，齋藤元也，小松輝久，東工大，2017 年 2 月 27 日，特願 2017-034320
5. 藻場の種別分布と生物量の取得方法及び装置，小松輝久，浅田みなみ，濱名正泰，佐々修司，東大，2017 年 7 月 28 日，特願 2017-146190
6. 水中目標地点測位システム，水中目標地点測位方法，及び，プログラム，林崎健一，小松輝久，北里大，2017 年 12 月 27 日，特願 2017-252470
7. 反射率測定装置，反射率の測定方法，日射光強度の推定方法，飛行型測定装置，宇都有昭，小杉幸夫，関 晴之，齋藤元也，東工大，2018 年 3 月 2 日 特願 2018-037912

②海外出願（2件）

1. センシング装置及びセンシング方法，小杉幸夫，関 晴之，宇都有昭，齋藤元也，小

- 松輝久, 東工大 (JST より移管), 2014 年 11 月 6 日, PCT/JP2014/005590, 未定
2. 蛍光ハイパースペクトル画像観測装置, 小杉幸夫, 関 晴之, 宇都有昭, 齋藤元也, 小松輝久, 東工大, 米国特許商標庁 (USPTO) 出願, 2016 年 3 月 31 日, US62/315934

(5) 受賞・報道等

① 受賞

Best paper award of 5th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS 2013). Kuniaki UTO, 28th June 2013

② マスコミ (新聞・TV 等) 報道

新聞掲載 1: 日高報知新聞 30 行写真入り,

表題: 無人機で藻場調査, 笛舞小学校の児童も学習に参加「えりも」, 2015 年 6 月 22 日

新聞掲載 2: 十勝毎日新聞 30 行写真入り,

表題: 無人機藻場調査 児童も学習「えりも町」, 2015 年 6 月 29 日,

(6) 成果展開事例

① 実用化に向けての展開

- ・2015 年 10 月 23 日に JST 主催の東京工業大学新技術説明会で, 本プロジェクトで特許取得した「ファイバー像反射型走査機構を備えたハイパースペクトル観測装置」を発表し, いくつかの会社からの引き合いがあった。
- ・東工大発のベンチャー企業「株式会社ディーブ・センシング・イニシアティブ (DSI)」を本プロジェクトで開発したハイパースペクトル画像センサの商品化をすることを一つの動機として, 2017 年 4 月に設立した。本研究プロジェクトの成果とした出願した特願 2013-231849 および特願 2014-26773 の実施権許諾を東工大 TLO から得るために交渉を行っているところである。

② 社会還元的な展開活動

- ・平成 25 年度は, 北海道えりも町漁業協同組合において, 6 月に超音波ナローマルチビームソナーによる海底地形マッピングおよび藻場推定域についての説明会を行い, 好評を博した。その結果, 再度説明会を依頼され, 10 月に行った。
- ・平成 27 年度は, 北海道えりも町笛舞漁港において 2015 年 6 月 14-20 日の間, 音響および光センサによる総合調査を実施中に, えりも町立笛舞小学校の総合学習として海洋生物多様性の重要性と CREST プロジェクトの内容について講義を行った。
- ・平成 29 年度は, 北海道えりも町笛舞漁港において 2017 年 6 月 24-7 月 1 日の間, 音響および光センサによる総合調査を実施中に, えりも町立笛舞小学校の総合学習として海洋生物多様性の重要性と CREST プロジェクトによる光センサとソナーによる藻場調査の内容について講義を行った。
- ・平成 27 年度から 29 年度に渡り, 東京都島しょ農林水産総合センター大島分事業所の依頼を受け, 同所と共同で大島のテングサの資源量を推定するための観測を実施している。大島東部のテングサ漁場において, マルチビームソナーおよびハイパースペクトルセンサによる観測と海底調査を毎年実施した。

§ 5 研究期間中の活動

5. 1 主なワークショップ, シンポジウム, アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2014年6月18日	ソナーシステム運用試験成果発表会	えりも漁協会会議室	15人	えりも漁協組合員に昨年度の調査報告
2014年10月7日	研究内容紹介と無人艇見学 Workshop	三保マリーナ会議室	20人	東海大学海洋学部学生に研究内容の紹介
2014年10月17日	ソナーシステム運用試験成果発表会第2回	えりも漁協会会議室	15人	えりも漁協組合員に調査内容・結果報告
2015年6月18日	えりも町立笛舞小学校総合学習「藻場の調査」	えりも町 笛舞漁港	30人	無人飛行機を利用して上空からの藻場環境の試験調査方法の学習
2015年11月13-15日	JST 戦略的創造研究推進事業サイエンスアゴラ	東京 日本科学未来館	多数	現在までの成果を, 一般市民・学生・関係者に公開展示を行う。
2017年3月5-9日	国際展示会 PITTCONに参加	米国シカゴ	多数	開発したハイパースペクトルセンサおよびマルチコプターを展示
2017年6月28日	えりも町立笛舞小学校総合学習「藻場の調査」	えりも町 笛舞漁港	30人	無人機搭載光センサによる上空からと無人艇搭載のソナーによる藻場調査の学習
2017年10月20日	ハイパースペクトル(HS)データによる水深測定ワークショップ	東海大学海洋学部	8人	フランス人研究者2名を招聘し, HSデータによる水深測定法を討議
2017年10月22日	ハイパースペクトルデータによる水深測定に関する国際シンポジウム	キャンパスプラザ京都	10人	フランスおよび日本でのHSデータによる水深測定法研究者による発表と討議

§6 最後に

えりも町でのコンブ場を対象とした研究では、地元の方々と協働で、観測をすることができた。また、地元への観測結果を共有する説明会など、まさに、Co-design, co-production, co-delivery という Future Earth 型の研究を行うことができた。今回の CREST の出口として、えりも町漁業協同組合では、大変期待していただいている。このままで終わるのではなく、実用化に向けたさらなる取り組みをぜひ行いたい。



2015年6月18日北海道えりも町での地元小学生への「藻場計測」についての出前授業



2017年9月、佐渡における海上離着水した後の光ハイパースペクトル班とプラットフォーム班小型無人機グループの集合写真



2017年9月、佐渡における総合調査の後の集合写真