宇宙×生物多様性の異分野連携による沿岸環境評価：ハイパースペクトルが明らかにしたクロロフィルのダブルピーク

山本　聡[1]・水山　克[2]・松岡　萌[1]・池田　あやめ[1]・水落　裕樹[1]・井口　亮[3]

1．はじめに

沿岸域は生物多様性に富む重要な環境である一方で，開発や観光利用などの人間活動の影響を受けやすく，環境劣化が進行している地域も少なくありません．こうした沿岸環境を回復へと導く「ネイチャーポジティブ」を実現するためには，環境変化を客観的・長期的・効率的に監視する仕組みが重要となります．その有力な手段として，衛星を用いたリモートセンシング技術の活用が進められています．従来の衛星リモートセンシングでは，海が反射する光の色（可視波長の反射スペクトル）の変化からクロロフィルα濃度を推定し，植物プランクトン量の広域的な把握が行われてきました．しかし，沿岸域は海底からの反射光や陸域由来の懸濁物質の影響が強い「光学的に複雑な水域」であり，外洋域を想定した従来手法では推定が困難でした．

この課題に対し，我々は従来よりも高い波長分解能を有するハイパースペクトルデータに着目し，沿岸域におけるクロロフィルα濃度推定を可能にする新たな手法の開発を進めてきました．特に，従来の海域リモートセンシングで用いられてきたマルチバンドデータでは捉えにくいスペクトル構造の詳細を利用する点に，この手法の特徴があります．この記事は，その研究成果を報告した論文（Yamamoto *et al.*, 2026）およびそのプレス発表（産業技術総合研究所, 2026）を基に加筆・再構成しています．

2．宇宙からの海域のクロロフィルα濃度の観測

衛星リモートセンシングによる海域環境の把握においては，クロロフィルα濃度が代表的な指標として広く用いられてきました．クロロフィルαは植物プランクトンを始めとする光合成生物が共通して持つ色素で，特定の色の光を吸収する性質があります．このため，植物プランクトンの量だけでなく，どれくらい活発に光合成をしているかを示す指標として広く利用されています．クロロフィルαは青色の光を強く吸収し，緑の光を多く反射するため，海水中のクロロフィルαが増えると，海の色は青から緑を帯びた色へと変化します．従来法ではこの特徴を利用し，衛星観測では海面の色（可視波長で観測された反射スペクトル）の変化を捉えることで，海域の環境変化を捉えてきました（例えば，村上，2016；平譯ほか，2017）．

このような手法は，植物プランクトンが海面の色を支配的に決定する外洋域では有効です．しかし，沿岸域は海底の反射や陸から流入する懸濁物質・溶存有機物の影響が大きいため，外洋域を前提とした従来の海面の色を利用した手法では，クロロフィルα濃度の推定精度が大きく低下することが知られています．このような問題を克服するためには，ハイパースペクトルデータを用いて，スペクトル形状に含まれる情報を精緻に利用する手法が求められます．

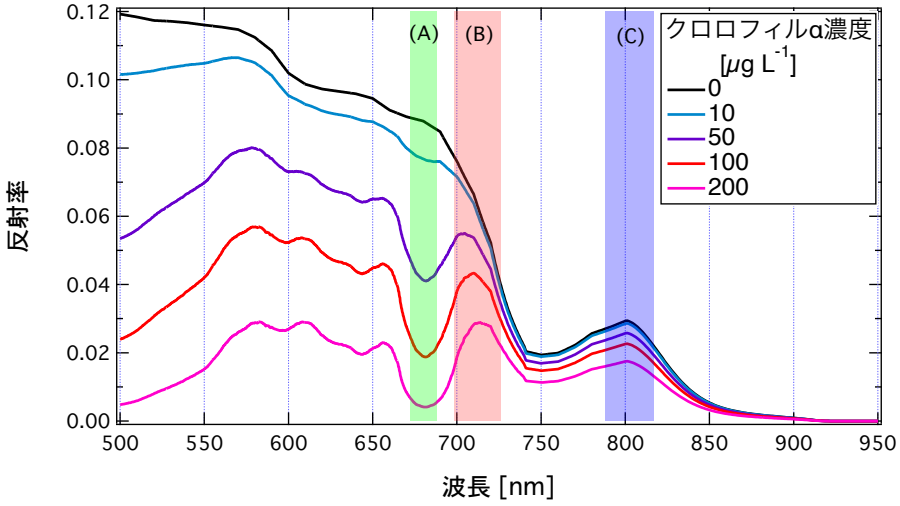
3．ハイパースペクトルデータの活用

地質調査総合センター地質情報研究部門のリモートセンシング研究グループでは，地球観測衛星や月・惑星探査で取得されるハイパースペクトルデータを対象に，反射スペクトルに基づく鉱物識別手法の開発を進めてきました（山本ほか，2025；松岡ほか，2026）．この過程で蓄積してきた分光学とデータ解析の知見を基に，植生や光合成色素の分光特性にも着目し，海域で観測される反射スペクトルの中からクロロフィルαに由来する特徴的な情報を抽出するデータマイニング手法の開発を進めました．

多重散乱モデルに基づいて計算した浅海域の反射スペクトルを第1図に示します（多重散乱モデルの詳細は Kishino *et al.*, 1986）．クロロフィルα濃度を変化させた場合，スペクトルにはいくつかの波長帯に特徴的な変化が現れます．

1 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門
2 名桜大学 〒905-8585 沖縄県名護市
3 産総研 研究戦略本部ネイチャーポジティブ技術実装研究センター

キーワード：リモートセンシング，分光学，ハイパースペクトル，クロロフィル，環境評価技術



第１図　多重散乱モデルによって計算された，様々なクロロフィル α 濃度に対する水の反射スペクトル．(A) の波長はクロロフィル α によって生じる吸収帯に対応．(B) と (C) は今回の研究で着目した反射率のピーク（710 nm を中心とするピーク 1 と 800 nm を中心とするピーク 2）を示す波長帯．クロロフィル α 濃度が増加するとピーク 1 が顕著になる傾向がわかる．

まず，(A) の 675 nm 付近では，クロロフィル α 特有の強い吸収によって反射率が大きく低下します．また，植物プランクトン細胞がもつ散乱および吸収特性の影響で，(B) の 710 nm 付近には反射ピークが形成されます（以下，ピーク 1 と呼ぶ）．さらに，浅い沿岸域では海底からの反射光が加わるため，(B) に加えて (C) の 800 nm 付近にも別の反射ピークが出現します（以下，ピーク 2 と呼ぶ）．本研究で特に注目したのは，これらの二つのピークが同時に現れるスペクトル形状です．これらは，クロロフィル α 濃度が高い場合に顕著に見られます．つまり，710 nm と 800 nm 付近にピークを持つ「ダブルピーク」は，沿岸域におけるクロロフィル α 濃度の上昇と関連する特徴量になり得ると考えられます．

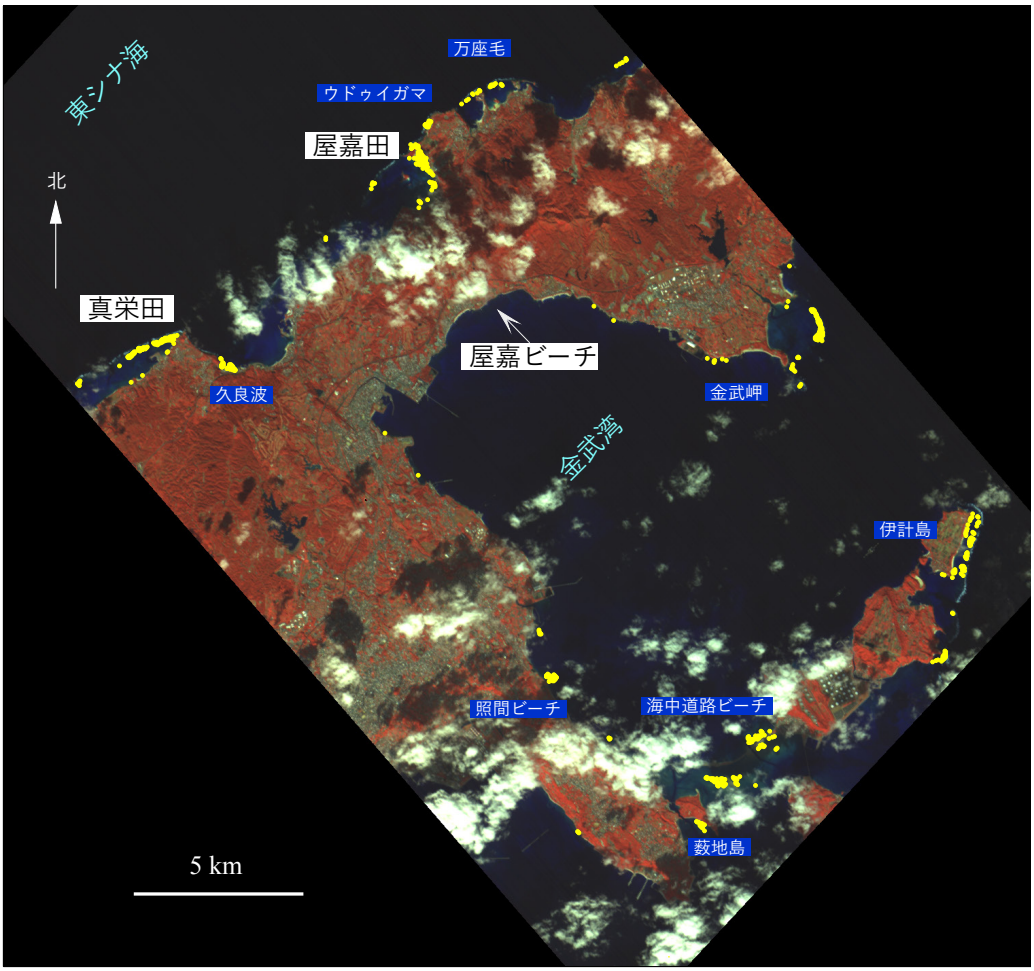
沿岸域において，700 nm 付近や 800 nm 付近で反射率が相対的に増加する現象自体は，これまでも報告されていました．しかし従来の海域観測を目的としたマルチバンド形式の衛星センサーでは観測できる波長帯が限られており，また複雑な地形をもつ沿岸域を十分な空間分解能で観測できず，スペクトル構造とクロロフィル α 濃度との関係は十分に解明・検証されていませんでした．

そこで，我々は国際宇宙ステーション搭載型ハイパースペクトルセンサー HISUI の観測データを使って，ダブルピークの出現特性について調べました．沖縄本島沿岸は，浅海域に多様な生物が生息し，クロロフィル α 濃度が比較的高い地域が含まれると期待されます．そこで，沖縄本島沿岸で観測された HISUI データに対して，ダブルピークを示す反射スペクトルのみを抽出するデータマイニング手法を適用しました．その結果，特定の沿岸浅海域において，ダブルピークが集中的に存在することが確認されました（第 2 図の黄色丸）．さらに，その分布は空間的に一様ではなく，入江やサンゴ礁周辺に偏在し，多くの検知点は真栄田，屋嘉田に集中していることがわかりました．

4．沖縄での現地調査

ダブルピークが集中する領域の環境的特徴を検証するため，生物多様性の専門家と分野横断的な連携のもと，沖縄本島沿岸域で現地調査を行いました（第 3 図）．その結果，HISUI データでダブルピークが多数検出された屋嘉田および真栄田の沿岸では，浅海域に多様な生物が生息し，生命活動が活発な環境が広がっていることが確認されました．また，携帯型ハイパースペクトル測定装置（FieldSpec）を用いた現地測定を行い，現地の海水の反射スペクトルにも，HISUI データと同様のダブルピークが明瞭に現れることが確かめられました（第 4 図）．一方，浅海域でありながら HISUI データでダブルピークが確認されなかった屋嘉ビーチでは，同様の測定でもダブルピークは観測されず，顕著な生態系も確認されませんでした．これらの結果は，HISUI データから抽出されるダブルピークの空間分布が，実際の生態環境の違いを反映していることを示しています．

さらに，ダブルピークの特徴とクロロフィル α 濃度との関係を定量的に評価するため，屋嘉田，屋嘉ビーチ，備瀬，瀬底など複数の沿岸域で海水を採取し，クロロフィル α 濃度とハイパースペクトル測定装置によるダブルピークの強度を比較しました．その結果，クロロフィル α 濃度が高い海域ほど，ピーク 2 の強度に対してピーク 1 の強度が相対的に大きくなる傾向が確認されました（第 5 図）．ここで重要なのは，ピーク 1 の強度はクロロフィル α 濃度だけでなく，水深の影響も受ける点です．一方，ピーク 2 の強度はクロロフィル α 濃度に依存せず水深のみによって変化します．この特徴を利用し，ピーク 1 の値そのものではなく，ピーク 1 とピーク 2 の関係（第 5 図中のデータの分布から



第 2 図　沖縄本島中央西側における「ダブルピーク」を示す地点の分布（黄色丸）．多くの検知点は真栄田，屋嘉田といったサンゴなど多様な生物が多く生息する沿岸域で見つかっている（金武湾に面する屋嘉ビーチでは「ダブルピーク」は見つかっていないが，現地調査を行った場所を示している）．本文中に出てくる備瀬と瀬底はこの地図の範囲外で，さらに北東側に位置する．背景図は HISUI の波長 765 nm, 555 nm, 705 nm のデータをそれぞれ赤，緑，青に割り当てて作成した擬似カラー画像.

形成される傾き）を見ることで，水深の影響を分離し，クロロフィル α 濃度のみを推定することが可能となります．

この観点で第 5 図を見ると，大きく三つの傾向を読み取ることができます．第一に，屋嘉田（主に暖色系データ点）ではピーク 1 の強度が全体的に高く（傾きが大きく），クロロフィル α 濃度も 40–60 µg/L 以上と高い値を示す集団が見られます．第二に，屋嘉ビーチや瀬底（主に水色データ点）ではピーク 1 の強度が低く（傾きが小さく），クロロフィル α 濃度も 20 µg/L 以下の低い値を示します．第三に，備瀬（主に青色データ点）はその中間に位置し，クロロフィル α 濃度は 20–30 µg/L 程度となっています．このように，HISUI データでダブルピークが多く観測された屋嘉田ではクロロフィル α 濃度が高く，屋嘉ビーチは低い値を示すことから，HISUI データと現地観測の対応関係が確認されました．これらの結果は，ダブルピークの分布から形成される傾きが，クロロフィル α 濃度の良い指標になりうることを示唆しています．

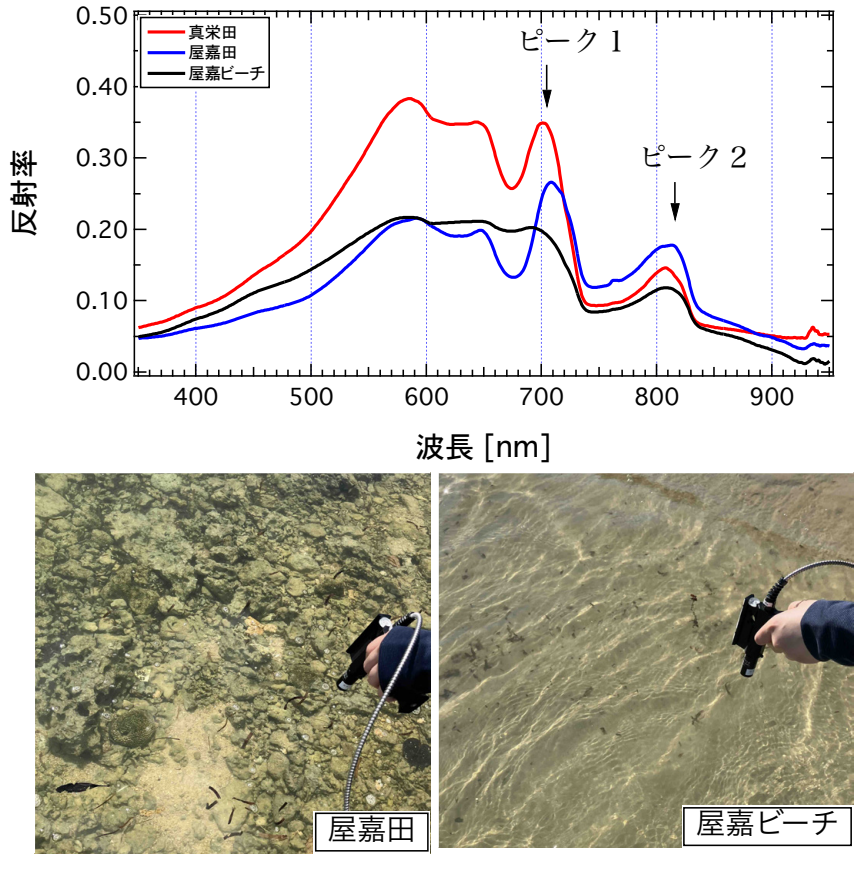
以上より，衛星ハイパースペクトルデータからダブルピークの強度特性を解析することで，現地のクロロフィル α 濃度の空間分布を推定できる可能性が示されました．

5．宇宙×生物多様性の異分野連携による環境影響評価法

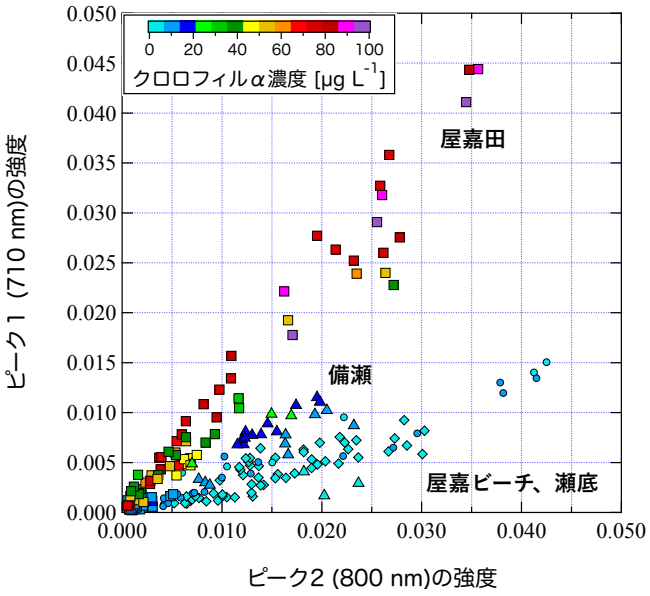
今回の研究では，ハイパースペクトルデータのダブルピークという新たなスペクトル特徴に着目することで，従来の手法では困難であった沿岸域におけるクロロフィル α 濃度の推定を，衛星観測により遠隔から評価できる可能性を示しました．特に重要なのは，衛星データの解析結果と実際の生態環境との対応関係を精査するために，沖縄県に所在する名桜大学の生物多様性の専門家との連携の下で現地調査を実施した点です．本研究は「宇宙分野」と「生物多様性分野」という従来は必ずしも密接ではな



第 3 図　持ち運び可能なハイパースペクトル測定装置（FieldSpec）を使った現地調査の様子．（上）備瀬での現地測定の様子．測定装置のピストル型の受光器を使って水面からの光を測定する．参照用白板は反射率データを取得するためのリファレンスとして使用される．（下）ダブルピークを示す地点が集中していた真栄田や屋嘉田での観測の様子．



第 4 図　（上）FieldSpec で測定された反射率データ．真栄田および屋嘉田ではダブルピークが観測されるが，屋嘉ビーチでは顕著なピーク 1 が見られない．（下）屋嘉田および屋嘉ビーチでの測定時の底質の様子．屋嘉田では多様な生物が生息しているが，屋嘉ビーチでは顕著な生物活動は見られない．



第 5 図　屋嘉田（■），備瀬（▲），屋嘉ビーチ（●），瀬底（◆）の海水におけるピーク 1 とピーク 2 の関係．現地で直接測定した水に対するクロロフィル α 濃度を色で示しており，寒色（水色，青色）から暖色（緑，黄色，赤，紫）の順に濃度が高くなる．

かった分野の連携により，スペクトル情報の物理的解釈と生態学的実態とを結びつけた点に特徴があります．近年，AI や機械学習を用いた衛星データ解析の研究が数多く報告されていますが，空間的な分類やパターン抽出にとどまり，現地観測による十分な検証が伴わない場合も少なくありません．これに対し，本研究では，現地調査に基づく検証を重視することで，分光学的・物理的特性と生態環境との対応関係に基づいた環境評価手法の構築を試みました．

本手法により，ハイパースペクトルデータを用いた宇宙からの観測による赤潮発生の兆候監視や沿岸環境の広域モニタリング，さらには沿岸開発に対する環境影響の客観的評価などへの活用が期待されます．今後は，衛星観測の空間分解能や観測頻度の制約を補うため，ドローン搭載型ハイパースペクトルセンサー（ドローンハイパー）の活用を進めていく予定です（池田, 2026）．ドローン観測と現地調査を組み合わせることで，衛星単独では把握が困難なスケールにおいても，ダブルピークを指標としたクロロフィル α 推定を高度化できると考えています．これらを通じて，衛星データとドローンデータを統合した，ダブルピークを指標とする新しい環境モニタリング技術を確立し，沿岸生態系の保全や海洋環境の持続的な利用に貢献することを目指します．

文　献

平譯　享・高尾信太郎・鈴木光次・西岡　純・渡邉　豊・伊佐田智規（2017）衛星による海洋基礎生産力の推定．海の研究（Oceanography in Japan），**26**，65–77.

池田あやめ（2026）リモートセンシング研究グループにおけるドローンを用いたハイパースペクトルデータ取得技術開発への取り組み．GSJ 地質ニュース，**15**，245–247.

Kishino, M., Sugihara, S. and Okami, N.（1986）Theoretical analysis of the in-situ fluorescence of chlorophyll- α on the underwater spectral irradiance. *La mer, Bulletin de la Societe Franco-Japanaise d'Oceanographie*, **24**, 130–138.

松岡　萌・山本　聡（2026）ひとさじのイルメナイトと輝石の混合実験．環境と測定技術，**53**（8），12–15.

村上　浩（2016）海色センサ（GCOM-C/SGLI）．沿岸海洋研究，**54**，3–9.

産業技術総合研究所（2026）宇宙から浅い海の環境を読み解く：ハイパースペクトルが明らかにした「クロロフィル α のサイン」—宇宙×生物多様性の異分野連携で実現した，沿岸域を衛星から見守る新しい環境モニタリング技術—．https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2026/pr20260323/pr20260323.html（閲覧日：2026 年 6 月 15 日）

山本　聡・松岡　萌・長岡　央・大竹真紀子・池田あやめ（2025）月の宝探し：ハイパースペクトルリモートセンシング技術を駆使した月の資源鉱物マッピング．GSJ 地質ニュース，**14**，363–366.

Yamamoto, S., Mizuyama, M., Matsuoka, M., Ikeda, A., Mizuochi, H. and Iguchi, A.（2026）Double-peaked hyperspectral features at 710 and 800 nm for monitoring coastal chlorophyll- α concentrations from space. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **131**, e2025JG009443, doi:10.1029/2025JG009443.

YAMAMOTO Satoru, MIZUYAMA Masaru, MATSUOKA Moe, IKEDA Ayame, MIZUOCHI Hiroki and IGUCHI Akira（2026）Decoding coastal environments from space: Hyperspectral insights into the signature of chlorophyll- α .

（受付：2026 年 6 月 15 日）