

グリーンレーザーを用いた 藻場モニタリング手法の開発

国立研究開発法人 土木研究所寒地土木研究所 水産土木チーム ○田村 友行
菅原 吉浩
北海道開発局 網走開発建設部 紋別港湾事務所 工務課 秋田谷 肇

ブルーカーボン算定の精度向上には広域の藻場現存量の計測が不可欠である。本研究では、UAVグリーンレーザー測量を用いて北海道のコンブ藻場の三次元構造を計測する手法を検討した。その結果、本手法で算出した海藻高は潜水調査結果と概ね一致した。さらに、従来の潜水調査では点在した情報しか得られなかつたのに対し、本手法では測線外を含む広範囲の海藻高を面的に把握することが可能となり、広域バイオマス推定への有効性が示された。

キーワード：ブルーカーボン、藻場、グリーンレーザー、UAV、点群解析

1. はじめに

近年、沿岸・海洋生態系に取り込まれる炭素、いわゆる「ブルーカーボン」は、新たなCO₂吸収源として世界的に注目を集めている。我が国においても、2024年に初めて藻場が温室効果ガスのインベントリに計上されるなど、その重要性はますます高まっている。藻場のCO₂吸収量を算定する上で、海藻の現存量（バイオマス）と分布面積を正確に把握することが不可欠であり、広範囲を効率的かつ高精度に計測する手法の開発が急務となっている¹⁾。

従来、藻場の調査は、潜水士が直接潜水して観測する方法（潜水調査）や、航空機・UAV（Unmanned Aerial Vehicle）から撮影した空中写真、あるいは衛星画像を解析する方法が主流であった。潜水調査は、海藻の種や密度、湿重量といった詳細な情報を高精度に得られる一方で、調査範囲が限定的であり、多大な労力と時間を要する上に低水温下での作業など安全管理上の課題もある。対照的に、空中写真や衛星画像を用いたリモートセンシングは広範囲を一度に把握できる利点があるが、得られる情報は海藻の二次元的な分布に限られ、海藻の高さや体積といった三次元的な構造を直接計測することは困難であった。また、これらの手法は海水の濁りや水面の反射、天候条件に大きく影響されるという課題も抱えている。このように、既存の調査手法は精度と効率のどちらかを優先する二者択一の状態にあり、両者を高いレベルで両立する新たな技術が求められていた。

こうした背景から、近年、水中を透過する緑色光のレーザーをUAVに搭載し、空中から水中の地形や藻場を三次元点群データとして直接計測する「UAVグリーン

レーザー測量」が新たな調査手法として注目されている。UAVの持つ高い機動性は、調査船の航行が困難な浅瀬や岩礁域へのアクセスをも可能にし、広範囲の藻場の三次元構造を面的かつ高密度に捉えることができる。陸域の森林解析などではUAVレーザー測量による樹高やバイオマスの推定に関する研究が進んでいるが、海域の藻場、特に北海道の沿岸に多く分布するコンブを対象とした研究事例はまだ少ない。

既往の研究では、アマモ場やガラモ場を対象としたUAVグリーンレーザーによる計測事例が報告されている²⁾が、これらの研究対象は、比較的透明度の高い海域で垂直に近い形で生育する海藻種が主である。一方、本研究の対象である北海道オホーツク海沿岸の元稻府漁港は、コンブが主体の藻場であり、コンブは海底で横に倒れたり、折り重なったりする複雑な状態で生育しており、上空からのレーザーが海底まで到達しにくい事が懸念される。

そこで本研究では、UAVグリーンレーザー測量を用いたコンブ藻場を計測する手法の有効性を検討するため、コンブが非常に密に繁茂している時期を対象に調査を行い、同海域で同時期に実施した潜水調査結果と比較することで、本手法の有効性について考察する。

2. 調査方法

(1) 現地調査

本研究の現地調査は、オホーツク海に面した紋別郡雄武町の元稻府漁港である。（図-1）本漁港では、港内の静穏域を確保するとともに漁場環境を改善する目的で、二重堤の間に割石によって造成した浅場が存在する。本研

究でUAVグリーンレーザー測量を実施した範囲は、この造成浅場を含む約0.074km² (7.4ha)とした。



図-1 調査箇所

(2) UAVグリーンレーザーによる藻場計測

a) 使用機器

使用機器はJI社製 Matrice 300 RTK、UAVグリーンレーザーによる現地計測は、NETIS登録のドローンLiderシステム「TDOT3Green」（KK-200034-VE）を使用した。

（図-2）本計測器は水底部に対し高い捕捉性能を有し、「公共測量作業規程の準則」にも準拠した測量が可能である。



図-2 調査機材（グリーンレーザー）

b) 計測条件

現地でのUAVグリーンレーザー測量は、コンブの繁茂量が多くコンブ漁業開始前の2025年6月3日に実施した。計測は、UAVの飛行高度40m、飛行速度3m/sの条件で行い、計画点群密度400点/m²以上を確保した。標高の基準は、現地の漁港水準点 (DL+2.468, TP:+0.667) からの直接水準測量により設定し、水平位置はGNSSネットワーク型RTK法により取得した。

また、調査時の水中の透明度および濁度・色度調査を行った。透明度調査では、直径30cmの白色盤（セッキ板）を沈め目視できる水深を測定した。計測結果は、水深4.0mで着底した。濁度・色度調査は、海水を採水しデジタル濁度計 (DTC-4DG) により測定し、濁度0.0度、色度0.5度であり、透明度、濁度共に計測環境に良好な水質であった。

c) 潜水調査

UAVグリーンレーザー測量計測結果の精度を検証するため、測量と同時期（2025年6月3日、7日）に北海道開発局網走開発建設部紋別港湾事務所において実施した潜水調査のデータを用いて検証した。提供のデータは図-3に示すように、調査範囲内に6本の測線（延長75m～

100m）を設定し、各測線上を10m間隔で方形枠（1m×1m）を設置した。全56地点の方形枠において、ダイバーが水深計による水深（潮位補正前）の計測、および方形枠内の5地点（中心と四隅）におけるコンブの高さをスタッフで計測した。コンブの高さは、海底で横臥した状態のコンブの天端高と現地盤の間の距離として計測した。また、測線3と測線6において、方形枠内（0.25m×0.25m）の海藻を採取し、海藻の湿重量の計測を行った。



図-3 調査位置（元稻府漁港）

(3) 点群データの特性

本調査で取得したUAVグリーンレーザー点群（R7年）は、総点数約6,400万点、平均密度626点/m²と非常に高密度であった。取得した点群全体の反射強度を色分けして平面表示したものを図-4に示す。図から、岸壁や消波ブロック等の構造物では反射強度が強く（赤色系）、海域では比較的弱い（緑～青色系）傾向が読み取れる。

次に、代表的な測線における点群の断面図を図-5に示す。また、断面図を拡大し、過去の地盤データラインを重ね合わせたものを図-6に示す。この断面図からは、点群が上から順に「水面」「海藻」「海底面」という大きく3つの層に分かれて分布している様子が確認できる。しかし、本調査時期はコンブが密に繁茂していた影響で、レーザーが海底まで十分に到達せず、海底面を明確に捉えることが困難であった。

(4) 点群データの処理と分類

前述のとおり、地盤まで到達した点群が少なかったため、本研究では、過去（R5年）に同海域で実施された3Dスキャナ測量によって得られた高密度の地盤点群データを、解析の基準となる「現地盤データ」として採用した。具体的な点群の分類手順は以下の通りである。

- ①ノイズ除去: UAVレーザー測量で取得した全点群データから、明らかに水面上にあり、潮位よりも高い標高を持つノイズ点群を目視で除去した。

②目視による分類: 点群解析ソフトウェア (Trendpoint) 上で、3Dスキャナによる地盤データを重ね合わせ、測線に沿って0.5m間隔で横断図を作成した。各横断図上で、以下の基準に基づき点群を手動（目視）で「水面」「海藻」「地盤」「ノイズ」の4つに分類した(図-7)。

地盤: R5年の3Dスキャナ点群、およびそれと連続するR7年の点群。

海藻: 「地盤」として分類された点群より上に位置し、「水面」より下に分布する塊状の点群で、潜水調査による各方形枠上の海藻高さを元に分類。

水面: 標高0m付近に層状に分布する点群。

ノイズ: 上記以外の海中に浮遊しているように見える微細な点群。

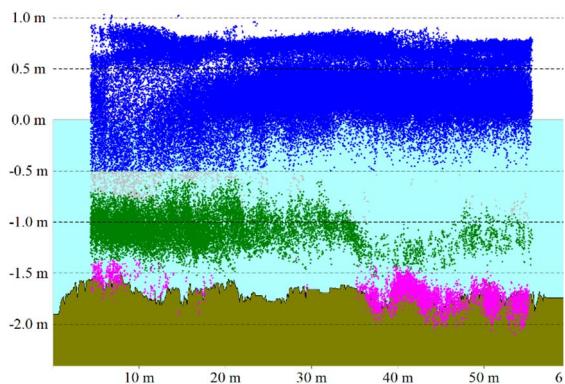


図-7 点群の目視分類の例 (測線5)

(水面: 青、海藻: 緑、地盤: ピンク、ノイズ: グレー)

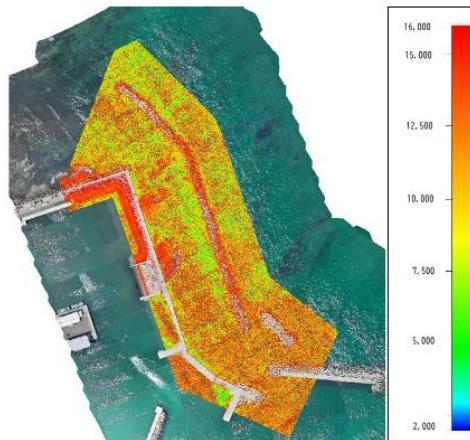


図4 全体点群の反射強度平面図

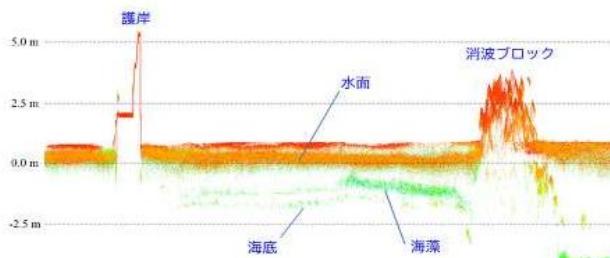


図5 代表的な横断図 (分類前)

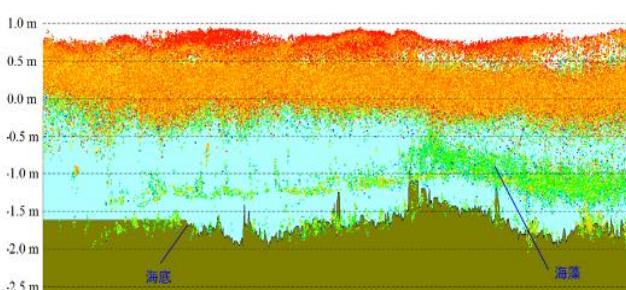


図6 代表的な横断図の拡大 (R5地盤ラインの重ね合わせ)

3. 結果と考察

(1) 点群の分類結果と各クラスの特徴

2. (4) の手法に基づき、UAVグリーンレーザーで取得した点群 (R7年) の目視による分類を行った結果、分類対象範囲内の点群は合計約464万点となり、その内訳は「水面」が約371万点、「地盤」が約25万点、「海藻」が約61万点、「ノイズ」が約7万点であった(表-1)。

表-1 点群の分類結果と各クラスの統計値

分類 クラス	点群数 (千点)	最小 標高 (m)	最大 標高 (m)	平均 標高 (m)	標高σ (m)	平均 反射強度
水面	3,710	-0.50	1.22	0.31	0.30	12,538
地盤	245	-3.46	-0.75	-2.26	0.55	7,358
海藻	613	-2.86	-0.39	-1.03	0.27	5,769
ノイズ	67	-2.75	-0.5	-0.77	-0.24	8,096

点群の標高は「水面」「ノイズ」「海藻」「地盤」の順に低くなっている。これは、物理的な位置関係（水面が最も高く、海藻がその下にあり、地盤が最も低い）を正しく反映している。地盤点群の標高の標準偏差が比較的大きいのは、造成浅場が凹凸のある捨石で構成されているためと考えられる。図-8に点群を反射強度で色分けした断面図の一例を示す。反射強度の平均値は、「水面」が最も高く、次いで「ノイズ」「地盤」「海藻」の順となった。

分類後の各クラスの点群を反射強度で色分けし平面表示したものを図-9に示す。一般に、レーザー光は固く白い物体ほど強く反射し、柔らかく黒い物体ほど吸収されて反射が弱くなるが、水面は岸壁などの構造物と同様に高い反射強度を示す傾向が見られた。水面が強い反射を示すのは鏡面反射の影響と考えられ、今回の結果もその傾向と一致する。地盤（捨石）と海藻では、地盤の方がわずかに反射強度が高い結果となったが、両者の分布には大きな重複があり、反射強度のみを閾値として両者を明確に分離することは困難であることが示唆された。

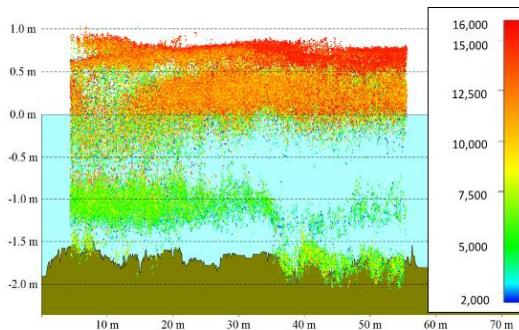


図-8 反射強度の断面図の例（測線5）

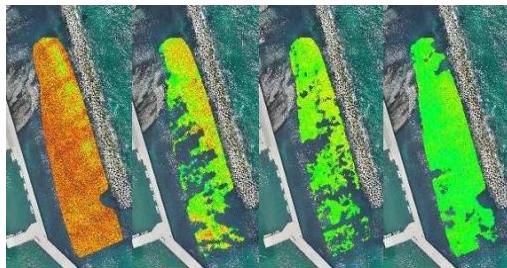


図-9 クラス別反射強度平面図
(左から水面、ノイズ、地盤、海藻)

この傾向は、R5年に実施された3Dスキャナによる点群とは異なっており（ノイズの方が地盤や海藻より反射強度が低い傾向であった）、計測機器や計測条件の違いが反射強度の特性に影響を与える可能性が考えられる。

（2）点群の標高・水深と反射強度の関係

分類した点群全体の標高（水深）と反射強度の関係を2次元散布図として図-10に示す。水面の点群は標高0m付近に集中し、反射強度は高い値から低い値まで広範囲に分布している。一方、水中の点群（海藻・地盤・ノイズ）は、水深が深くなるにつれて反射強度の最大値が低下する傾向が見られた。特に水深3m以深では、反射強度が12,500を超えるような反射強度の強い点群は観測されなかつた。

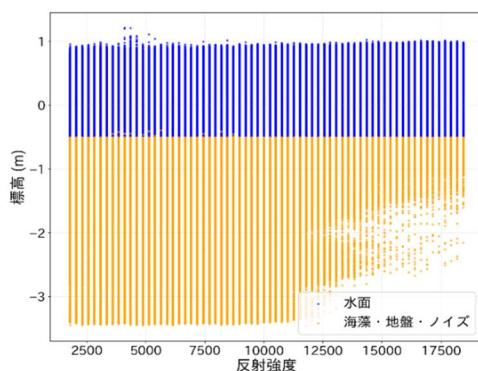


図-10 反射強度と水深の散布図

次に、目視分類した地盤と海藻の点群について、それぞれ標高と反射強度の関係をプロットした（図-11、図-12）。地盤点群は標高-1.5mおよび-2.5m付近、反射強度4,000～10,000の範囲にデータが集中している。一方、海

藻点群は標高-1.0m付近、反射強度3,000～6,000の範囲にデータが集中しており、地盤点群に比べて全体的に反射強度が低い傾向が明確に示された。この結果は、両者の分離のための閾値を示唆するものであり、将来的な自動分類モデルを構築する上で重要な特徴量となり得る。

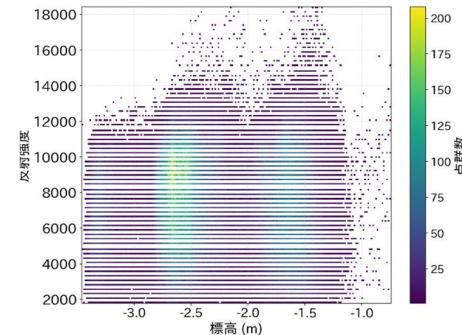


図-11 地盤点群の標高と反射強度の関係

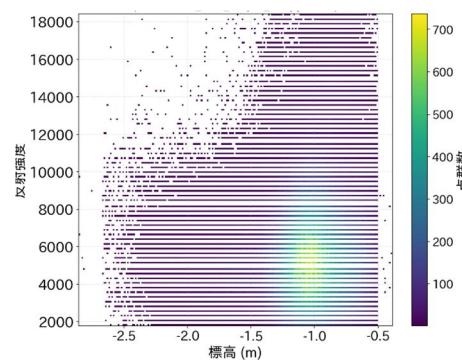


図-12 海藻点群の標高と反射強度の関係

（3）海藻高の算出結果と潜水調査との比較

本研究では、分類した点群データを用いて、測線上の海藻高を算出した。具体的には、2.5節で作成した横断図上で、「地盤」点群の上端から「海藻」点群の上端までの距離を計測した。この点群データから算出した海藻高と、潜水調査で実測された海藻高（方形枠内の最大値）を比較した結果を図-13に示す。

3測線（測線4、測線5、測線6）において、両者の計測結果は概ね一致する傾向にあることが確認できる。全測線・全地点における両者の差は、平均誤差-0.06m±0.14m

（1標準偏差）の範囲に収まった。特に海藻が密に繁茂している箇所でも大きな乖離は見られず、海藻高の計測が可能であることが確認された。誤差の要因としては、①潜水調査とUAV測量の計測日時が完全には一致していないことによる海藻自体の物理的な変動（波や潮流による揺らぎ）、②潜水士による測定位置（DGPSの誤差含む）と点群データ上の位置の微小なずれ、③点群の目視でのクラス分類の際に海藻の天端ラインを判断する際の誤差、などが複合的に影響していると考えられる。しかし、これらの誤差要因を考慮すれば、UAVグリーンレーザー測量と過去の地盤データを組み合わせることで、潜水調査と遜色のない精度で海藻高を面的に把握できる可能性が示された。

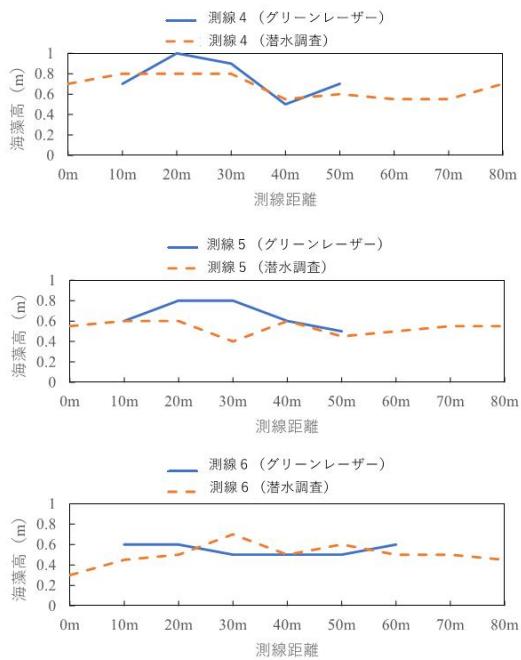


図-13 潜水調査とレーザー点群での海藻高

(4) 海藻現存量の推定

a) 従来法による推定と課題

従来、広域の海藻現存量を推定する手法としては、潜水調査で得られた「被度」と「単位面積当たりの湿重量」の相関関係を用いるのが一般的であった。例えば、図-14に2018年および2023年のリシリコンブの被度と湿重量の関係を示すが、リシリコンブの被度と湿重量の間には一般的に正の相関 ($R^2=0.85$) が確認されている。この関係式を、航空写真などから得られる広域の被度分布に適用することで、全体の現存量を推定可能とする。

しかし、この手法には課題もある。図-15に示す本調査の潜水調査結果では、被度が85~100%と非常に高い範囲においても、湿重量は1000g~4000gと大きなばらつきが見られた。これは、同じ被度であっても、海藻の高さや密生度、1年生と2年生コンブの違いといった三次元的な構造の違いによって、実際のバイオマス量が大きく異なることを示している。このように、二次元的な情報である「被度」のみに依存する従来法では、海藻の三次元的な繁茂状況を反映できず、推定精度に限界があることが示唆される。

b) 三次元情報を用いた推定

本研究で行ったUAVグリーンレーザー測量は、海藻の三次元的な構造を直接計測できる点で、従来法に対する優位性を持つ。3. (3)で示したように、本手法によって広範囲の海藻高を面的に精度良くマッピングすることが可能である。図-16に、本手法で作成した海藻高平面分布図を示す。従来の潜水調査では測線上だけの離散的な情報のみであったものが、グリーンレーザーにより測線間の海藻分布も含めた面的な情報の把握が可能となった。

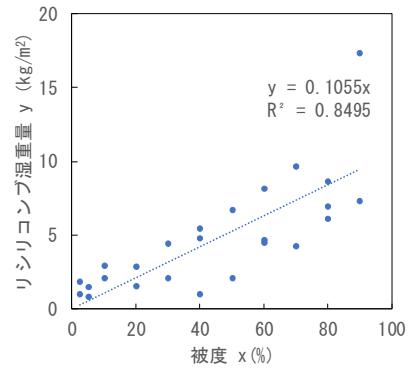


図-14 既往の調査による被度と湿重量の関係

湿重量・海藻高の比較 (L7測線)



図-15 潜水調査の湿重量・海藻高の比較 (L7測線)

さらに、今回の潜水調査の結果から、本調査海域では海藻の「高さ」と「湿重量」の間に正の相関 ($R^2=0.78$) が確認された(図-17)。この関係を用いることで、図-16の海藻高平面図からバイオマスに変換できる。具体的には、潜水調査によるスポット的な情報から外挿した体積(平均海藻高 $0.46\text{m} \times$ 面積)が $10,424\text{m}^3$ であるのに対し、グリーンレーザーによる面的な計測から算出した体積は $14,956\text{m}^3$ となった。この違いの要因は、潜水調査では捉えきれなかった測線外の海藻の体積も実測できたためと考えられる。このように、三次元情報を直接計測する本手法は、ブルーカーボン算定の精度向上に大きく貢献できると期待される。

(5) 今後の点群分類の方向性

本研究では、点群の分類を目視(手動)で行ったが、この手法を実用化し、より広範囲な海域へ展開するためには、分類プロセスの自動化が不可欠である。本研究結果から得られた知見に基づき、今後の自動分類技術の開発に向けた方向性として、以下の3点が挙げられる。

第一に、反射強度と標高(Z座標)の活用である。3.(2)で示したように、地盤と海藻は、標高と反射強度の二元平面上で、それぞれ特徴的な分布領域を持つことが確認された。これらの統計的な特徴は、機械学習モデルによって両者を分離するための識別値となり得る。

第二に、三次元特徴量を用いた機械学習の適用である。これは、人が物理的な意味を定義した特徴量を事

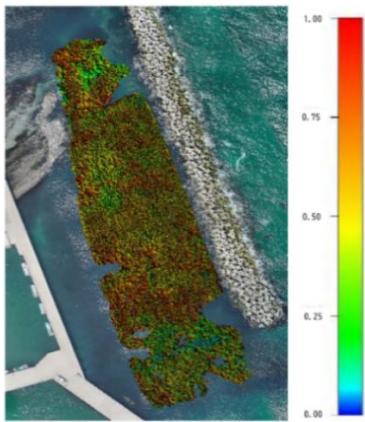


図-16 海藻高平面分布図

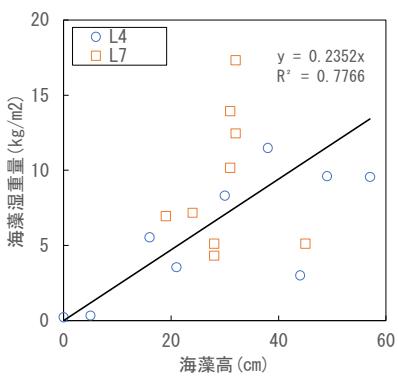


図-17 R7潜水調査による海藻高と湿重量の関係

前に計算し、それらをランダムフォレストなどの機械学習モデルに入力するアプローチである。個々の点の情報だけでなく、ある点とその周辺の点群が形成する局所的な形状（例：平坦度、曲率、法線ベクトルなど）を「三次元特微量」として数値化する。例えば、「地盤は平坦度が高く、海藻は曲率が高い」といった、人間が直感的に理解できる特徴をモデルに学習させることが可能となる。

第三に、深層学習（AI）モデルの適用である。これは、特微量の設計自体をモデルに任せる最先端のアプローチである。近年、PointNet、KPconvやPoint Transfomeなどの、点群の深層学習モデルが開発されている。これらのモデルは、人間が明示的に特微量を定義することなく、与えたデータから自動的に複雑な特徴を抽出し、高度な分類を行うことができる。本研究で作成したような精度の高い教師データセットを学習させることで、将来的には高速かつ高精度な海藻藻場の自動分類が実現できると期待される。

4. まとめ

本研究では、UAVグリーンレーザー測量と過去の地盤データを組み合わせることで、北海道オホツク海沿岸に広がるコンブ藻場の三次元的な構造を計測する手法の有効性を検証した。コンブが密に繁茂し、レーザーが

海底に到達しにくいという困難な条件下において、潜水調査結果と比較することで、以下の結論を得た。

①本手法により、コンブ藻場の空間分布を計測できることが明らかになった。点群の標高と反射強度の特性を分析した結果、水面、地盤、海藻はそれぞれ異なる特徴を示し、特に海藻は地盤に比べて反射強度が低いという、将来の自動分類に繋がりうる重要な知見が得られた。

②点群データから算出した海藻高は、潜水調査による実測値と平均誤差-0.06m±0.14m（1標準偏差）の範囲で概ね一致した。これは、計測日時の違いや測定位置の微小なずれといった誤差要因を考慮すれば、本手法が潜水調査と遜色のない精度で海藻高を計測できるポテンシャルを持つことを示している。

③海藻現存量の推定手法として、従来法が「被度」という二次元情報に依存していたのに対し、本手法は「海藻高」という三次元情報を直接計測できる。潜水調査で確認された海藻高と湿重量の強い相関関係 ($R^2 = 0.78$) を応用することで、本手法で得られた広域の海藻高マップから、より実態に即した詳細なバイオマスマップを作成できる可能性が示された。これは、場所による繁茂状況のばらつきを考慮できる点で従来法より優位性があり、ブルーカーボン算定の精度向上に大きく貢献しうると考えられる。

本研究で確立した目視分類と解析のワークフローは、同様の環境下でのUAVグリーンレーザー測量における有効な手法の基礎となるものである。今後の課題としては、今回手動で行った点群の分類プロセスを、本研究で得られた各クラスの特微量に基づき、機械学習や深層学習を用いて自動化することが挙げられる。これにより、さらに広大な海域の藻場解析を効率化し、藻場のモニタリングや保全、そしてブルーカーボン生態系の評価・算定に貢献することが期待される。

謝辞：本研究を進めるにあたり、潜水調査データをご提供いただきました、北海道開発局網走開発建設部紋別港湾事務所の皆様へ心より感謝申し上げます。また、実験・データ収集に際してご協力いただいた北日本港湾コンサルタント株式会社の土井様へ深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 海草・海藻藻場のCO₂貯留量算定ガイドブック：国立研究開発法人水産研究・教育機構, pp.13, 2023.
- 2) 吉田光寿, 渡辺謙太, 源平慶, 伴野雅之, 棚谷灯子, 茂木博匡, 桑江朝比呂：グリーンレーザースキヤナ搭載 UAV による海藻藻場の計測手法の検討, 土木学会論文集, Vol.80, No.17, 24-17288, 2024.
- 3) 棚谷灯子, 吉田光寿, 渡辺謙太, 源平慶, 伴野雅之, 茂木博匡, 桑江朝比呂：グリーンレーザースキヤナ搭載 UAV で得られた点群の解析による海草藻場の空間分布推定, 土木学会論文集, Vol.80, No.17, 24-17235, 2024