

拡散消散係数を利用した航空レーザー測量の 水深取得可能海域とその季節変化の把握の試行[†]

小川 遥^{*1}, 山野寛之^{*2}, 住吉昌直^{*3}

Trial to visualize the distribution and seasonal variation of ALB-measurable areas estimated
from remotely sensed diffused attenuation coefficient data[†]

Haruka OGAWA^{*1}, Hiroyuki YAMANO^{*2}, and Masanao SUMIYOSHI^{*3}

Abstract

Efficient Airborne Lidar Bathymetry (ALB) surveys involve elaborate prior adjustments and operation planning processes based on a consideration of various relevant conditions. We attempted to visualize the distribution and its seasonal variation of the ALB measurable areas around Japan using a remotely sensed dataset of diffused attenuation coefficients, which represents the optical characteristics of the seawater, to help reduce the burden of the operation planning. The results showed that the maximum measurable depth at a certain spot seasonally varies and, subsequently, the distribution of the measurable areas varies as well. The estimated maximum penetration depths have proved to make a useful index for operation planning, while its future verification is required.

1 はじめに

水路測量における航空レーザー測量は、一般的に海洋調査で実施されているマルチビーム測量に比べ、極浅海域でも安全に広範囲を短時間で効率的に測量ができる一方、水質や気象、海象、航空機の運用に関する条件等の制約が多い。そのため効率的な測量を実施するにあたっては綿密な事前調整や計画立案が必要不可欠である。特に測量区域や測深線の設定、測深時期は計画の早い段階で検討される事項であり、航空機の整備状況、周辺

の陸上地形、気象・海水状態の季節変化、航空交通など様々な要素を勘案しなければならないため労力がかかる。航空レーザー測量はレーザー光を使用した測量方法であることから、測深能力には水質や底質が大きく影響することが知られており、測深限界水深は海水の光学特性を表す透明度や拡散消散係数(Kd: Diffused Attenuation Coefficient)で表すことができる。透明度はセッキ板と呼ばれる白い円盤を目視が可能な深さまで沈め、その深度で示す。この測定手法は簡易で

[†] Received September 17, 2021; Accepted November 5, 2021

* 1 技術・国際課 海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

* 2 沿岸調査課 Coastal Surveys Division

* 3 技術・国際課 海洋情報技術調整室 Process Control and Improvement Office, Technology Planning and International Affairs Division

あり直観的で分かりやすい一方で測定誤差が生じやすく、現場に赴かなければデータを取得することが困難である。Kdは照度計で計測、あるいは人工衛星の光学センサで推定することで得られる水中における光の吸収・散乱による光の減衰率のことである。算出に若干の手間がかかるが透明度測定に比べ測定誤差が少ない（小澤・他, 2014）。また、Kdを求めるために照度計を使用した場合は現地に行く必要があるが、衛星データを使用した場合には一度に広範囲のデータを現場に行くことなく入手することが可能である。

本報告では、航空レーザー測量の運用計画策定の負担を軽減することを目的として、衛星画像から得られる拡散消散係数を利用した航空レーザー測量の水深取得可能海域とその季節変化の把握を試みた。

2 手法

2.1 使用した各種データセット

2.1.1 拡散消散係数情報

まず、衛星画像から算出されるKdの情報をインターネット上から無料で取得できるアメリカ航空宇宙局（NASA：National Aeronautics and Space Administration）のウェブサイト OceanColorWEB（NASA online：https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/kd_490/）からダウンロードした。本報告で使用したKdは、地球観測衛星Aquaに搭載されているMODerate resolution Imaging Spectroradiometer（MODIS）によって観測された490 nmの波長帯におけるKdである。波長帯490 nmのKdの現場値と青から緑のバンドのリモートセンシング反射率の比から経験式を導き、その式を使用して観測されたりリモートセンシング反射率からKdを計算することができる（NOAA：National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021）。以後、波長による拡散消散係数について言及する場合には下付きで波長を表示することとする。MODISは、36バンド観測波長帯を持つ光学センサで、NASAがエアロゾルの光学的特性や植物プランクトン量、海面水温、植生指数等の高次処理を行った

データを提供している（宇宙技術開発株式会社衛星画像データサービス, 2021）。OceanColorWEBからダウンロードした衛星画像情報の分解能は4 kmで、データ取得可能期間はブラウザ上で日単位からミッション全体まで幅広く選択することが可能である。本報告では、2002年7月4日から2021年3月31日までの統計平均値のKd₄₉₀と、春、夏、秋、冬の季節平均のKd₄₉₀をラスタ形式でダウンロードした。なお季節の定義については、OceanColorWEBの分類に従い、春は該当年の3月21日から6月20日、夏は該当年の6月21日から9月20日、秋は該当年の9月21日から12月20日、冬は該当年の12月21日から3月20日としている。以後、これらの季節平均値は春、夏、秋、冬と記載する。

2.1.2 海底地形データ

日本周辺の500 m水深データ（J-EGG500：JODC-Expert Grid data for Geography）を日本海洋データセンターのウェブサイト（Japan Oceanographic Data Center（JODC）online：https://www.jodc.go.jp/jodcweb/JDOSS/index_j.html）からダウンロードした。これは様々な海洋調査機関で取得された水深測量データをメッシュ化した水深データセットである。

2.2 ツール

Esri社のArcGISのArcMap、3D Analyst及びSpatial Analystを使用する。

2.3 処理方法

2.3.1 Kd₄₉₀の空間的可視化

OceanColorWEBでダウンロードしたKd₄₉₀値の統計平均値、春、夏、秋、冬のNetCDFファイルをArcMapで表示する。

2.3.2 Kd₄₉₀の波長変換

Kd₄₉₀を航空レーザー測量で使用する緑レーザー光の波長帯532 nmにおける拡散消散係数Kd₅₃₂に変換する。Kdの波長変換方法については

Table 1. Correspondence table of diffused attenuation coefficients between 490 nm and 532 nm created by Dr. Viktor Feygels.

表 1. Feygels 博士が作成した 490 nm と 532 nm の拡散消散係数の対応表。

Kd ₄₉₀ (m ⁻¹)	Kd ₅₃₂ (m ⁻¹)
0.060	0.079
0.070	0.086
0.080	0.093
0.090	0.099
0.100	0.106
0.110	0.113
0.120	0.120
0.130	0.126
0.140	0.133
0.150	0.140
0.160	0.147
0.170	0.154
0.180	0.160
0.190	0.167
0.200	0.174

Austin and Petzold (1986) に記載されており、その方法で Teledyne Optech の Dr. Viktor Feygels が作成した Kd₄₉₀ と Kd₅₃₂ の対応表を Table 1 に示す。なお、本報告では、Table 1 から線形回帰した回帰式 (1) を導出し、ArcMap の Spatial Analyst の「ラスタ演算」機能を使用し変換を行った。

$$y = 0.6771x + 0.0384 \quad \text{式 (1)}$$

この作業を統計平均、春、夏、秋、冬の 5 パターンで行った。

2.3.3 航空レーザー測深システムの測深限界水深の算出

航空レーザー測深システムの測深限界水深は Kd と各システムの固有値から導くことができる。例えば、当庁が所有する Teledyne Optech 社製航空レーザー測深機 CZMIL Nova のスペックシートには Shallow Channel と Deep Channel の測深

能力について、それぞれ Kd₅₃₂ が 0.08 から 0.40 の範囲内、海底反射率が 15% 以上、かつ海象・気象が理想的な条件であった場合に、理論上の測深限界水深は 2.9/Kd, 4.4/Kd で導かれると記載されている (Teledyne Optech, 2021)。

本研究では当庁において運用実績のある CZMIL の Dmax を算出した。ここで、Teledyne Optech による CZMIL の Deep Channel の測深限界水深 (以下、Dmax とする) の算出式を式 (2) に示す。

$$Dmax = \frac{4.2}{Kd_{532}} \quad \text{式 (2)}$$

数字「4.2」は CZMIL Deep Channel 固有の定数である。式 (2) に従い、CZMIL を使用した場合の Dmax を Spatial Analyst の「ラスタ演算」機能を使用して求める。

2.3.4 CZMIL を用いた航空レーザー測量で測深可能な海域の Dmax

本報告では、J-EGG500 のメッシュ水深値よりも 2.3.3 項で求めた Dmax が大きかった場合に、CZMIL による航空レーザー測量が実施可能であると判定することとし、「フィールドの演算」機能を使用して、J-EGG500 のメッシュ水深値から Dmax を引いた値を求めた。求めた 5 パターン分の差分の結果も J-EGG500 のフィールドに追加する。そして、プロパティのフィルター設定でこの差分がマイナスの場合のみに、Dmax が表示されるようにし、ポイント型のシェープファイルとしてエクスポートした。

3 結果

Fig. 1, Fig. 2 に日本周辺における Kd₄₉₀ の統計平均、春、夏、秋、冬の Kd₄₉₀ 分布図を示す。これらの図の色彩表示は最小値を 0.0174, 最大値を 6.4 に統一し、寒色は Kd₄₉₀ が小さく、暖色は大きいことを表す。なお、ヒストグラム平滑化のストレッチ処理をすることにより、変化を見やすくした。Kd の解釈については、値が小さいほど減衰率が小さいため、レーザー光が深くまで到達し

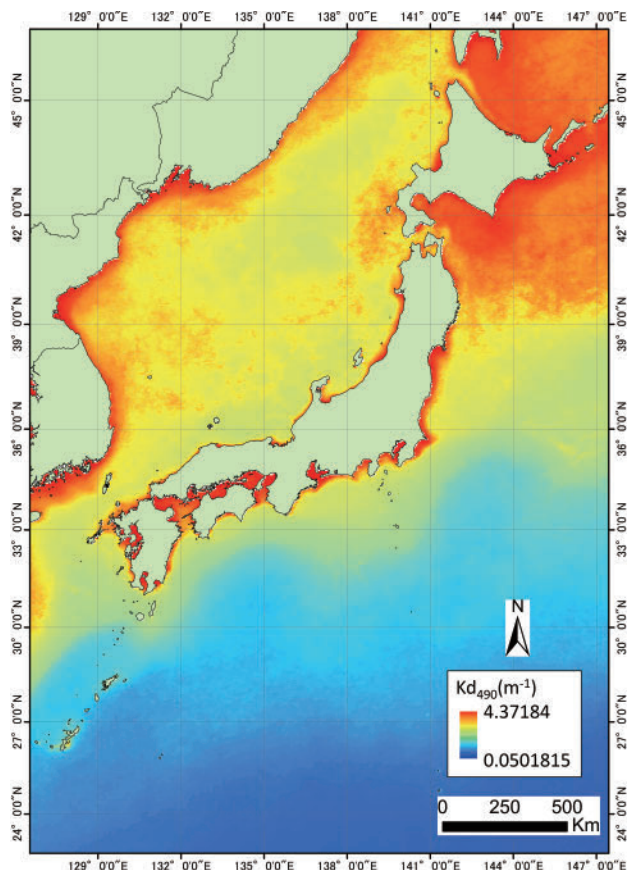


Fig. 1. Distribution map of the statistical average value of the diffused attenuation coefficient at a wavelength of 490 nm acquired by MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) onboard the Aqua.

図1. 地球観測衛星 Aqua に搭載されている MODIS により取得された波長 490 nm の拡散消散係数の統計平均値の分布図.

航空レーザー測量に適していると理解することができる。Fig. 1 からは、日本周辺の沿岸部は外洋に比べ、 K_d が大きいことがわかる。また、奄美大島以南では比較的値が小さく、房総半島沖には K_d の低い海域がみられる。また、Fig. 2 からは、季節による K_d の空間的分布の変化があることがわかる。夏は K_d の空間的なばらつきが少ない海域が多く、房総半島沖にみられる K_d の勾配が大きい。秋にもその勾配の傾向はみられるが冬、春には不明瞭になる。また、夏と秋、春と冬で似た空間的分布の傾向を示しているようにみえる。

Fig. 3 に 2.3.3 項で算出した日本周辺における D_{max} の空間分布図を示す。表示範囲における

D_{max} の最大値は 83.70 m で、最小値は 0.96 m であった。

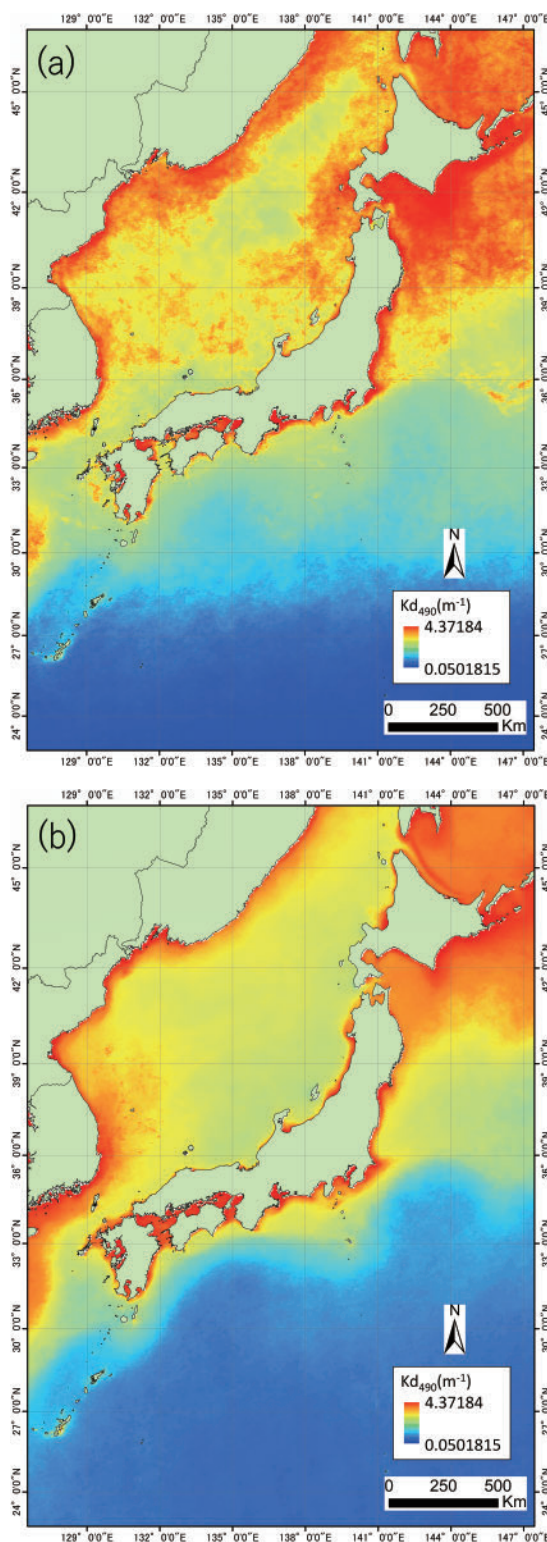


Fig. 2. Seasonal distribution maps of the diffused attenuation coefficient at a wavelength of 490 nm acquired by MODIS onboard the Aqua: (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter.

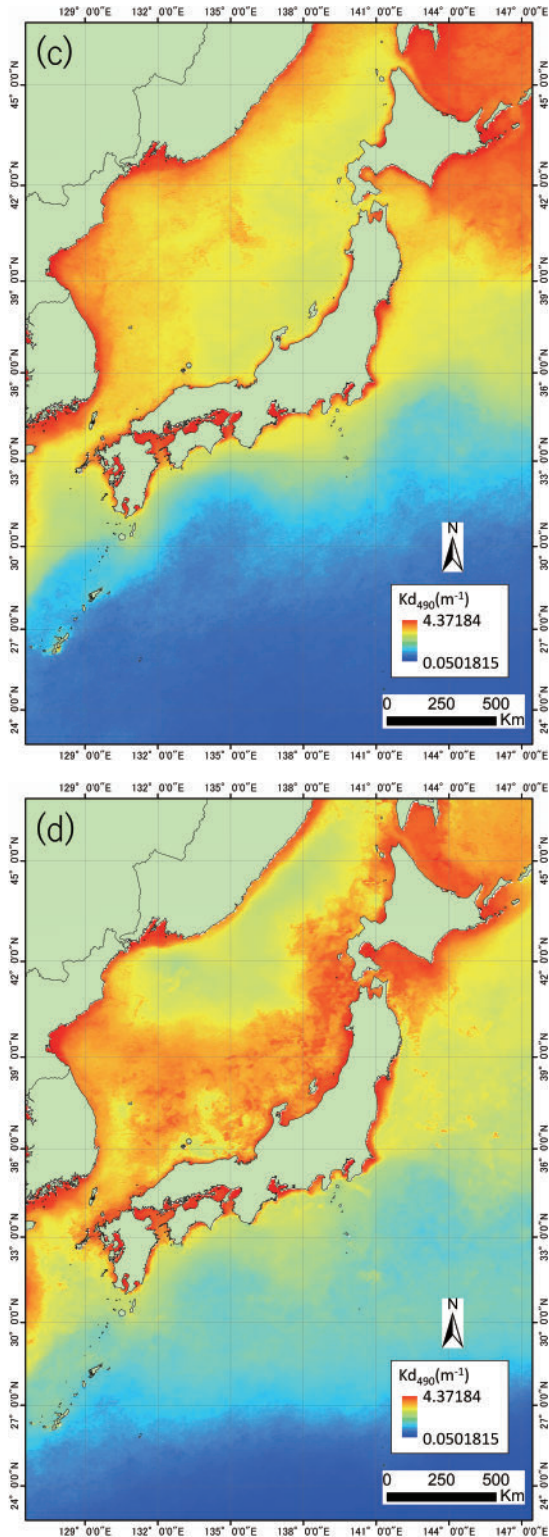


図2. 地球観測衛星 Aqua に搭載されている MODIS により取得された波長 490 nm の拡散消散係数の季節分布図：(a) 春 (3月21日から6月20日), (b) 夏 (6月21日から9月20日), (c) 秋 (9月21日から12月20日), (d) 冬 (12月21日から3月20日).

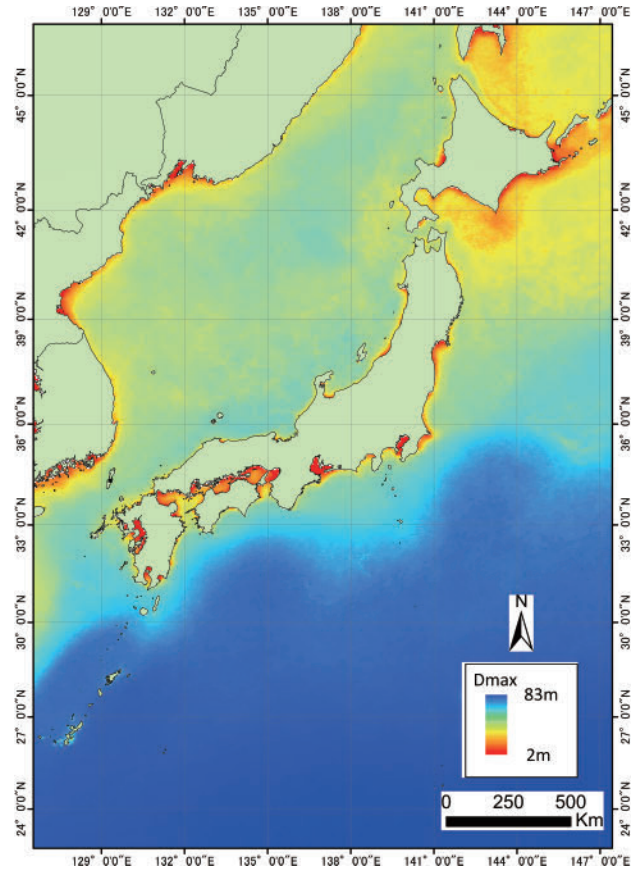


Fig. 3. Maximum penetration depth (Dmax) distribution map acquired using the Deep Channel of airborne LIDAR system CZMIL.

図3. 航空レーザー測量システム CZMIL の Deep Channel を使用した場合の測深限界水深 (Dmax) 分布図.

次に、Dmax の活用方法の1つとして、Fig. 4 に 2.3.4 項に記載した方法で求めた Kd_{532} の統計平均値から求めた CZMIL を用いた航空レーザー測量で測深可能な海域における Dmax の分布を示す。この図によって、実際に航空レーザー測量を行った場合のその地点における測深限界水深と水深取得可能海域の把握が可能である。ドットが表示されている地点は航空レーザー測量で測量が実施可能と判定された海域であり、ドットの色はその地点における Dmax に対応している。図から、内海や湾内において Dmax は小さい傾向にあることがわかる。

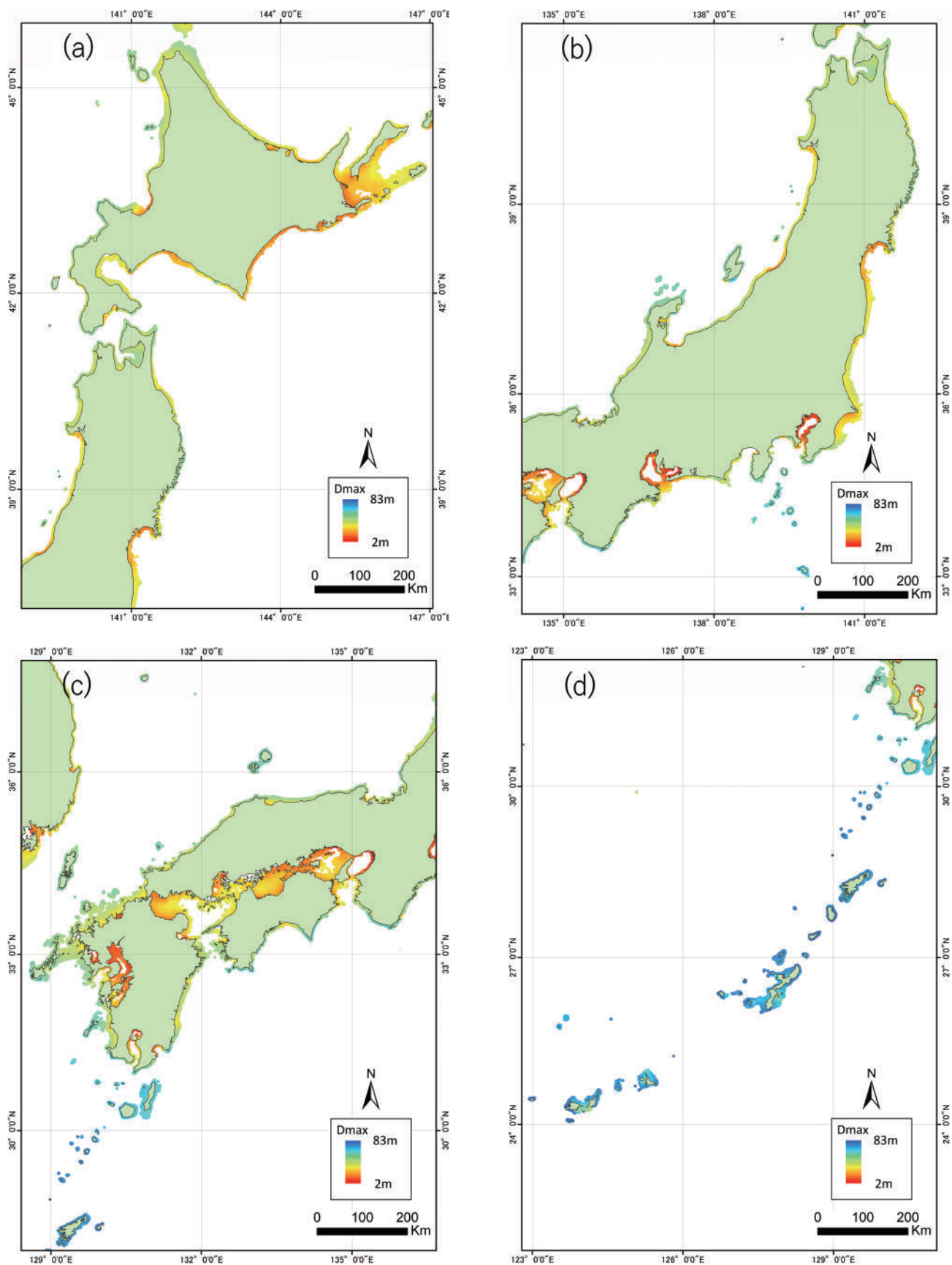


Fig. 4. Dmax distribution maps in the areas where CZMIL can penetrate: (a) Hokkaido, (b) Eastern Japan, (c) Western Japan, and (d) Nansei Islands.

図4. CZMILで測深可能な海域におけるDmax分布図：(a)北海道、(b)東日本、(c)西日本、(d)南西諸島。

また、Fig. 4 から沖縄本島周辺、房総半島周辺の Dmax 分布図を拡大した図をそれぞれ Fig. 5 に示す。なお、Fig. 5 以降の図には海図記載情報を使用した 10 m 毎の等深線を 70 m まで表示している。Fig. 5 (a) では、航空レーザー測量による水深取得可能海域が比較的広範囲に広がっており、やはり Kd が小さい海域は航空レーザー測量に適していることが確認できた。Fig. 5 (b) からは、東京湾内はあまり航空レーザー測量に向いておらず、一方外洋側は面的に航空レーザー測量で水深取得が可能であり航空レーザー測量に好適であることがわかる。最大 Dmax は 52 m、最小 Dmax は 5 m であった。

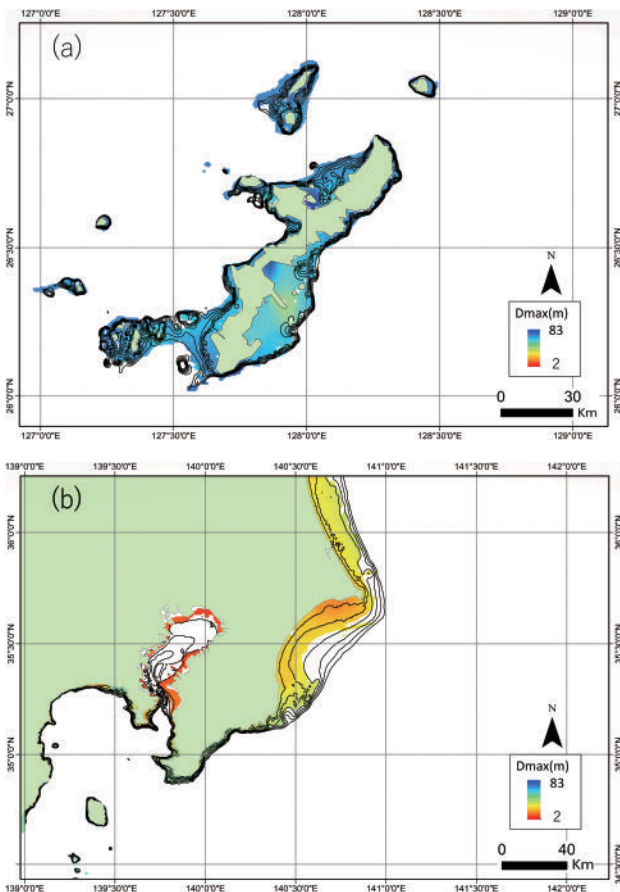


Fig. 5. Magnified views of Fig. 4: (a) around the main island of Okinawa and (b) around the Boso peninsula.

図 5. 図 4 の拡大図：(a) 沖縄本島周辺、(b) 房総半島周辺。

次に 2.3.4 項に記載した方法で各季節の Kd から求めた Dmax 分布図の季節変化についての結果を紹介する。季節変化は、各季節の Dmax 分布図をレイヤーとして様々な順序で重ねることで把握が可能であり、奄美大島以南のように Dmax の空間分布に季節変化がない海域や、逆に季節変化が顕著な海域を知ることができる。特に宗谷地方や宮城県沖、境港付近、高知沖等では季節変化が顕著であった。Fig. 6 (a), Fig. 7 (a), Fig. 8 (a) は宗谷地方、宮城県沖、九州北西部における季節毎の Dmax 分布を色で表現し、水深取得可能海域の面積が広い季節を下にした重畳図である。なお、春をピンク色、夏を緑色、秋を黄土色、冬を青色で表現した。また、Fig. 6 (b), Fig. 7 (b), Fig. 8 (b) に Fig. 6 (a), Fig. 7 (a), Fig. 8 (a) のうちそれぞれの海域で最も水深取得可能海域が広い季節における Dmax 分布図を、Fig. 6 (c), Fig. 7 (c), Fig. 8 (c) に最も水深取得可能海域が狭い季節における Dmax 分布図を示す。Dmax 分布図はドットの色で Dmax を表現している。これらは Dmax 分布の空間的変動が大きく季節変化が著しい例であるが、同じ海域であっても季節によって水深取得可能海域の面積が変化することが明らかである。

4 考察

本報告では、Kd を使用した航空レーザー測量の測深限界に関する指標 Dmax を使用することで、日本周辺における航空レーザー測量による水深取得可能海域と航空レーザー測量に好適な海域や季節の把握を試みた。

航空レーザー測量において具体的に Dmax 分布図の活用が想定されるシーンは 2 つ考えられる。1 つ目のシーンは、長期計画の策定や災害発生時の緊急対応が求められた場合の航空レーザー測量による水深取得可能海域の把握である。このような場合には、Fig. 4, Fig. 5 に示したように Kd の平均統計値を使用した Dmax 分布図を使用することが有効と考えられる。2 つ目のシーンは、年間計画の作成時である。通常、航空レーザー測

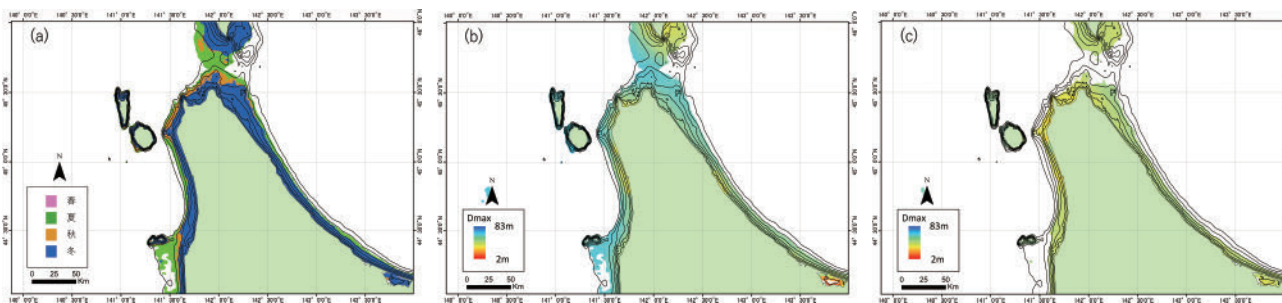


Fig. 6. Seasonal changes of CZMIL measurable areas around Soya District: (a) Superimposed map of seasonal measurable areas, (b) Dmax distribution map in summer, and (c) in winter.

図 6. 宗谷沖における CZMIL で測深可能な海域の季節変化：(a) 季節変化の重畳図，(b) 夏の Dmax 分布図，(c) 冬の Dmax 分布図。

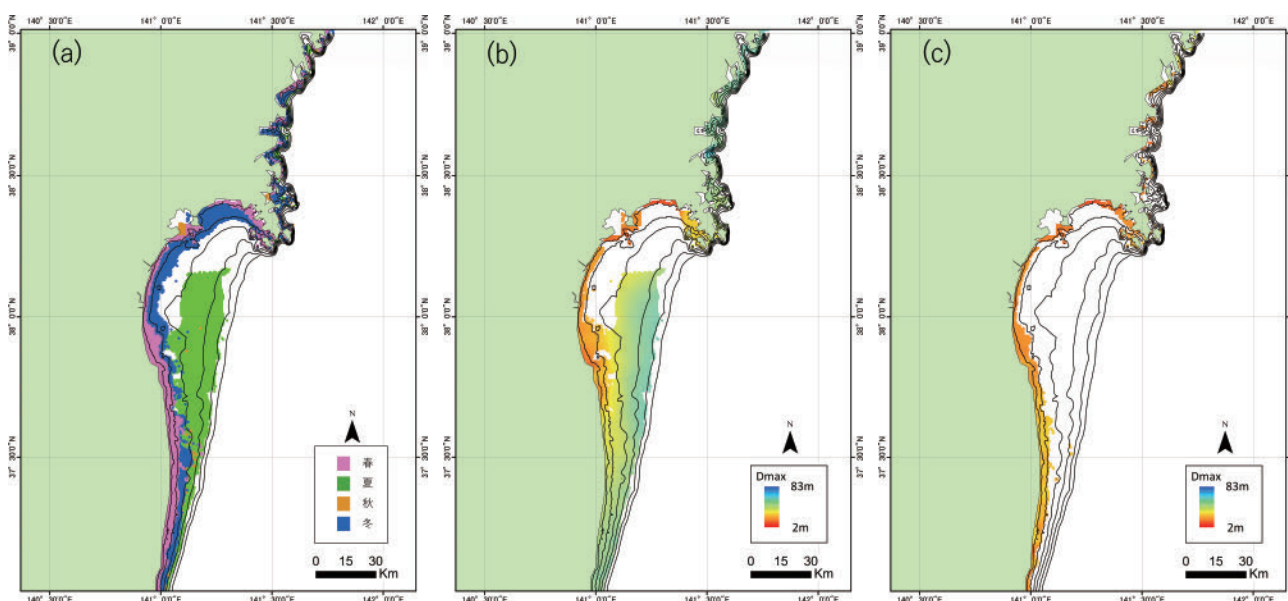


Fig. 7. Seasonal changes of CZMIL measurable areas off the coast of Miyagi Prefecture: (a) Superimposed map of seasonal measurable areas, (b) Dmax distribution map in summer, and (c) in spring.

図 7. 宮城県沖における CZMIL で測深可能な海域の季節変化：(a) 季節変化の重畳図，(b) 夏の Dmax 分布図，(c) 春の Dmax 分布図。

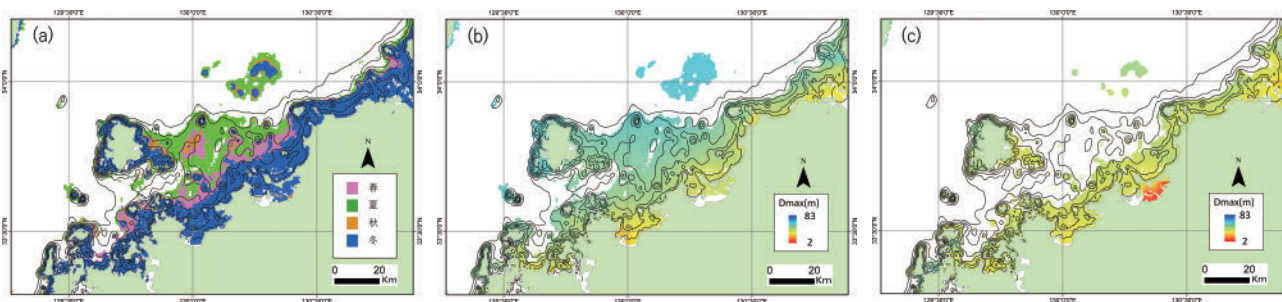


Fig. 8. Seasonal changes of CZMIL measurable areas in northwestern Kyusyu: (a) Superimposed map of seasonal measurable areas, (b) Dmax distribution map in summer, and (c) in winter.

図 8. 九州北西部における CZMIL で測深可能な海域の季節変化：(a) 季節変化の重畳図，(b) 夏の Dmax 分布図，(c) 冬の Dmax 分布図。

量の年間計画はいくつか測量候補海域を選択し、海域毎に周辺海域の海底地形から測線を作成し、測量可能時間や飛行時間、測量可能範囲を概算し積算を行う。この際に実際に測量が出来ない海域に測線を設定してしまうと、貴重な測量時間や航空機の燃料を浪費してしまうため、効率的な測量を行うためには無駄のない測線を作成することが重要であり、予め水深取得可能海域が予想できていることのメリットは大きい。Fig. 6 から Fig. 8 に示したように、 K_d の平均統計値を使用した場合でも一部の海域では水深取得海域面積と同地点における取得水深の季節変化がみられたことから、より細かい時間スケールの K_d 値を使用することで、さらに航空レーザー測量実施に好適な時期の把握が可能になるだろう。また、航空レーザー測量における D_{max} 分布図の活用という観点からは、 K_d の水平分解能を上げることも重要である。本報告で使用した衛星画像は分解能が 4 km であり、リアス式海岸や島間、岩礁地帯、入江などの空間スケールが小さい海域の K_d は読み取ることが出来ないため、 D_{max} の算出は難しい。複雑な地形の海域は一般的な測量手段であるマルチビーム測量に比べ航空レーザー測量の特性を生かしやすい海域であるため、 D_{max} を把握することの重要性は大きい。例えば陸上に飛行高度よりも高い山がある湾のような海域では、一方向からしかアプローチができないために普段の倍の飛行時間が必要になる。そのような場合に、分解能が高い衛星画像を使用し事前に D_{max} 分布図による水深取得可能海域の把握を実施することで、非効率を避けることができるだろう。

また、Fig. 4 に K_d の平均統計値から求めた航空レーザー測量で測深可能な海域における D_{max} 分布図を示したが、実際的水深値と J-EGG500 の水深値の差が大きい地点もあったことから、J-EGG500 が航空レーザー測量で測深可能な海域の D_{max} を抽出する指標として適切ではない可能性が考えられる。例えば、実際的水深が 35 m で J-EGG500 が 45 m、 D_{max} が 36 m であった場合には、J-EGG500 の水深値をフィルターとして

使用したことにより、その地点では実際は測深可能であるにも関わらず測深不可と判定されてしまうということが起こり得る。J-EGG500 は 500 m メッシュであり、かつ内挿補間された値であるので実際的水深とは異なる。そのため、より詳細で実水深に近い密なグリッドの値をフィルターとして活用することで、より適切な結果が得られるだろう。

5 まとめと今後の展望

今回、本報告では衛星画像から得られる拡散消散係数を利用して D_{max} 分布図を作成する方法を紹介し、航空レーザー測量の水深取得可能海域の可視化とその季節変化の把握を試行的に行った。結果として、海域により取得可能水深値が異なり、また海域によっては季節によっても異なるため、 D_{max} は測量計画策定の検討のための有用な指標であることがわかった。

今後 D_{max} を実際の計画策定に活用していくためには、 D_{max} の妥当性と汎用性の評価をする必要がある。沖縄県宮古島周辺において試行的に実測値と D_{max} の比較を行ったので、その結果を Fig. 9 に示す。暖色系の段彩図で CZMIL による水深取得海域を、青色のドットで 2.3.4 項の方法で求めた D_{max} による水深取得可能海域を表し、2.3.4 項でフィルターとして使用した J-EGG500 から生成した 10 m 毎の等深線を図に表示した。また、 D_{max} による水深取得の可否の予想と、実際に CZMIL で水深値が取得できたかどうかが一貫していない海域を枠で囲み (A, B, C)、各々について検討した。A 海域は実際には八重干瀬 (やびじ) が広がっている遠浅な海域であるが、J-EGG500 のメッシュ水深値は明らかにそれよりも大きな値を示している。そのため実際には航空レーザー測量に適した海域であるにもかかわらず、 D_{max} からは水深値が取得できないと予想されてしまっている。B 海域はそもそも測量を実施していない海域である。A 海域とは逆に、C 海域は実水深に近い海図記載水深と比較して J-EGG500 メッシュ水深が浅くなっているために、

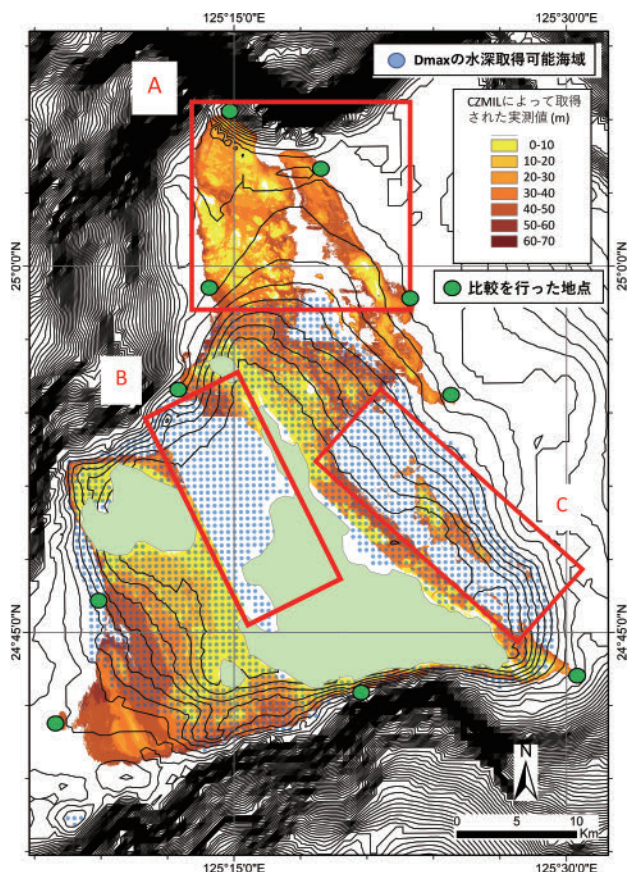


Fig. 9. Superimposed map of measured depths by CZMIL and predicted measureable areas using Dmax around Miyako Island.

図9. 宮古島周辺におけるCZMILにより実測された水深とDmaxによる測深可能海域の重畳図。

Dmaxによる水深取得可能海域が実際よりも広く予想されたと考えられる。そのうえ、測量時の気象・海象が悪かったため、実際の水深取得可能海域は通常より狭くなった可能性がある。上記に記した海域以外は、多少の差異はあるもののCZMILによる水深取得海域とDmaxによる水深取得可能予想海域はおおむね対応している。加えて、Fig. 9の緑点で示すCZMILによって行われた測深で得られた実測値の測深可能限界水深とDmaxの比較をTable 2に示す。ここでは、全体的にDmaxが実際の測深可能限界水深よりも系統的に25-30%深くなっている傾向がみられた。この傾向は少なくとも本海域では測深可能水深を小さくする補正が必要であること示唆している。今後他の海域における比較検証も行い、その妥当性と汎用性を評価することが必要であると考えら

Table 2. Comparison table between maximum penetrated depth value by CZMIL and Dmax value at green points in Fig. 9.

表2. Fig. 9の緑点におけるCZMILによる実測値とDmax値の比較表。

実測値(m)	Dmax値(m)
50.45	68.38
56.86	66.76
51.67	62.08
46.06	68.38
52.50	68.23
60.14	65.91
51.45	69.14
54.12	64.54
57.33	68.23
53.01	65.77
51.02	56.64

れる。

謝 辞

沿岸調査課航空レーザー測量担当の方々には、ソフトウェアの使用環境や航空レーザー測量の実測値の提供等でご支援・ご協力をいただきました。また、Teledyne OptechのDr. Viktor Feygelsには、Kd₄₉₀からKd₅₃₂への変換についての情報提供でご支援いただきました。更に、本稿は匿名の査読者による有益なご指摘と助言により、大幅に改善されました。ここに記して感謝いたします。

文 献

- Austin, R. W. and T. J. Petzold (1986) Spectral dependence of the diffuse attenuation coefficient of light in ocean waters, *Optical Engineering*, 25, 471-479.
- Japan Oceanographic Data Center, 500 m 水深デー

タ, https://www.jodc.go.jp/jodcweb/JDOSS/index_j.html, Accessed 15 Jun. 2021.

National Aeronautics and Space Administration (NASA), OceanColorWEB, https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/kd_490/, Accessed 15 Jun. 2021.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), MODIS Diffuse Attenuation Coefficient at 490 nm (Kd_{490}), https://eastcoast.coastwatch.noaa.gov/cw_490.php, Accessed 15 Jun. 2021.

小澤淳眞・坂下祐明・宮作尚宏・下村博之・蒲恒太郎・川村 裕・岡部貴之 (2014) ALB (航空レーザー測深) の河川測量への適用, 先端測量技術, 106, 72-82.

Teledyne Optech (2021) CZMIL SUPERNOVA Technical Specifications.

宇宙技術開発株式会社衛星画像データサービス, Terra/Aqua (MODIS) 「テラ衛星およびアキア衛星」モディスの概要・諸元, https://www.sed.co.jp/sug/contents/satellite/satellite_modis.html, 参照 2021 年 7 月 15 日.

要 旨

効率的に航空レーザー測量を実施するためには, 綿密な事前調整や運用計画策定が必要であり, これらの作業は勘案すべき事項が多く労力と時間を要する. 航空レーザー測量の運用計画策定の負担を軽減するために本報告では, 衛星画像から取得した海水の拡散消散係数を使用して, 日本周辺における航空レーザー測量による水深取得可能海域とその海域の季節変動の可視化を試みた. その結果, 航空レーザー測量に好適な季節が海域によって違うだけでなく, 同じ海域や地点であっても季節によって取得可能な最大水深が異なることが明らかになった. 今後の検証は必要であるものの, 求められた測深限界水深は運用計画策定の検討のための指標として有用であることがわかった.