(32) 光学衛星を用いた港湾工事における海域の濁り分布推定手法の検討

丸山　夏樹[1]・羽柴　秀樹[2]・園部　雅史[3]

[1]学生会員　日本大学大学院　(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)

E-mail: csna23029@g.nihon-u.ac.jp

[2]正会員　日本大学教授　理工学部土木工学科　(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)

E-mail: hashiba.hideki@nihon-u.ac.jp

[3]正会員　日本大学助教　理工学部土木工学科　(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)

E-mail: sonobe.masashi@nihon-u.ac.jp

近年，地球温暖化防止に向けた再生可能エネルギーの積極的な導入が期待され，洋上風力発電事業の計画が進められている．それに伴い，洋上風力発電の設置及び維持管理のための港湾工事が行われている．このような港湾工事は水質汚染などの海洋環境の変化が懸念され，着手前後の調査を広域かつ継続的に実施する必要がある．また，今後も洋上風力発電事業は計画されているため，洋上風力発電の設置及び周辺の港湾工事前後における海洋環境のモニタリング手法の検討は重要である．本研究では周期的かつ広域に観測できる Landsat 衛星の分光反射特性を用いて，海域の濁り分布推定手法の検討をすることで港湾工事前後の海域における広域的・定期的なモニタリングを試みた．結果として，港湾周辺の工事の影響が一時的に発生することについて確認できた．

Key Words: *Satellite data,Water turbidity estimation,Marine environment survey,harbor construction*

1．はじめに

近年，地球温暖化防止に向けた再生可能エネルギーの積極的な導入が期待され，洋上風力発電事業が注目されている．秋田県に位置する能代港周辺は，風況や海底の地盤状況等から日本国内初の商業洋上風力発電事業として期待されており，港湾区域内を含め複数の洋上風力発電事業の計画が進められている．[1)] それに伴い，洋上風力発電の設置及び維持管理を安定して行うための埠頭の再編及び機能強化が行われている．これらを踏まえ，能代港周辺の大規模な港湾工事が行われている．

このような大規模な港湾工事は水質汚染などの海洋環境や周辺の土地利用の変化が懸念され，着手前後の環境影響評価の監視調査を広域で面的かつ継続的に実施する必要がある．また，今後も洋上風力発電事業は計画されているため，周辺の港湾工事前後における海洋環境の定期的なモニタリング手法の検討は重要である．特に，洋上風力発電事業は日本初であることから，周辺の海洋環境にどのような影響を及ぼすか，そのモニタリング手法について未知な点がある．一方，水質（水の濁り）について，洋上風力発電機器の基礎設置や海底ケーブルの敷設に伴い海底土砂の巻き上げなどが懸念されている．また，一時的な水の濁りによる海生生物や海生植物への影響も懸念されている．[2)]

このような港湾工事における海洋環境調査は主に現地での水質調査が行われている．[3)] しかし，現地での水質調査は海洋環境の広域かつ面的な評価が困難である．実際，能代港周辺の水質調査測点は数点しか存在しない．広域かつ面的な評価を定期的に行うにはリモートセンシングを用いた手法が適している．リモートセンシングを用いた環境モニタリングの検討事例として，高分解能光学衛星や航空機，ドローンが挙げられるが，これらの手法は周期的な観測データの取得が困難である点や観測に費用を要する点から，定期的なモニタリングが困難である．また，複数の異なるセンサのデータを用いる場合，太陽高度やオフナディア角などが異なり，DN 値から輝

度値や反射率への変換やその補正などが複雑になることから，同観測条件で定期的な情報の取得が困難である．定期的な環境モニタリングを行う上では，観測条件が同一である衛星観測データを用いることが重要である．

そこで本研究では同観測条件で同一シーンを周期的かつ広域に観測でき，容易に入手可能な Landsat 衛星の分光反射特性を用いて，海域の濁り分布推定手法を検討することで，能代港港湾工事及び，洋上風力発電工事前後の海域における広域的・定期的なモニタリングを試みた．

２．研究方法

(1) 対象エリア

図-1 に対象エリアである秋田県能代港及び周辺海域と，環境省により公開されている水質データの測点（黄点）を示す．

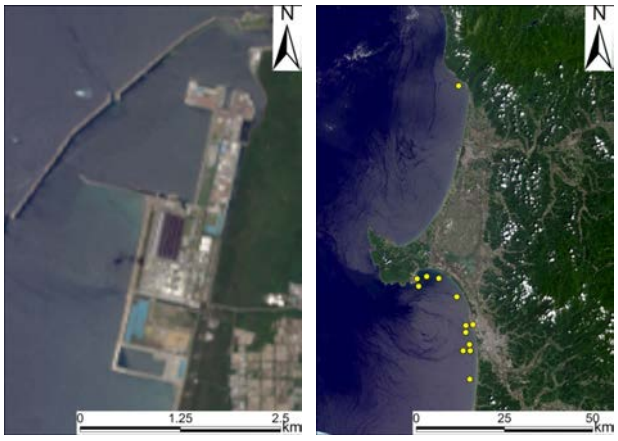


図-1 秋田県能代港及び周辺域と水質データの測点

(2) 使用衛星データ

2020 年の能代港港湾工事着行前後に観測された Landsat8 の Level1 データを使用した．Landsat8/OLI センサは可視光域から中間赤外域の 7 つの band 帯のマルチスペクトル画像を 30m×30m の空間分解能で観測している．これらの衛星データは Earthexploler から入手した．

(3) 衛星データの前処理及び反射率の変換

一般に光学衛星画像はそれぞれのピクセルごとに DN 値が格納されている．取得した光学衛星画像については，大気による散乱・吸収の影響及び太陽高度，反射率を補正する必要がある．そのため，使用衛星データについて，以下の式を用いて，大気，反射率の補正処理を行なった上で，DN 値から反射率に変換した．

$$\rho\lambda=(M\rho\times DN+A\rho)/\cos(\theta_{SZ}) \quad (1)$$

M_ρ：REFLECTANCE_MULT_BAND_x
A_ρ：REFLECTANCE_ADD_BAND_x
DN：デジタルナンバー
$\rho\lambda$：太陽高度補正済み TOA 反射率
θ_{SZ}：局所太陽の仰角

(4) 分光反射特性を用いた海域の水の濁りの推定手法の検討

SS（浮遊物質量）は，水中に懸濁している不溶解性の微粒子のことを指し，主に，水の濁りや透明度等を測る際の指標として用いられる．また，水の濁りに伴い，外観や生態系にも影響を及ぼす．一般的に，SS 量は降雨後や造成工事に伴い，一時的に増加する．[4] 本研究では，水の濁りと SS に相関があると仮定し，現地調査データとして環境省により公開されている [5] SS データを用いた．本研究の対象領域である能代海域の環境省により公開されている水質データは水質調査測点が少ないため，衛星データの同一シーンにある秋田港の測点を含めた 13 地点を用いた．水の濁りの推定手法検討の際，現地調査による SS データを評価データ，Landsat 衛星により観測されたそれぞれのバンドの分光反射率を学習データとして使用した．用いた衛星データ及び SS の現地調査データの観測日は 2021 年 6 月 10 日である．また，環境省により公開されている SS の現地調査データの観測時刻はおよそ午前 9 時から 11 時頃である．加えて，Landsat 衛星は日本上空をおよそ午前 9 時から午前 10 時頃に観測する．海域においては，衛星観測頻度及び現地調査が容易に行えない関係から，衛星観測と現地調査の日付及び時刻を同期させることは困難であるため，既往研究は少ない．本研究では観測日及び時刻をほぼ同期させることで，水の濁りの推定手法の信頼性が向上すると考えられる．

(5) 港湾工事前後の水の濁り分布の推定モデル

分光反射特性を用いた SS 値の推定手法の検討結果から、港湾工事着工前後である 2019 年から 2022 年までの 1 年間ごとの水の濁り分布の推定モデルを作成し，能代港港湾工事及び，洋上風力発電工事前後の周辺海域への影響を考察した．衛星データと現地の条件をなるべく揃えるため，水の濁り分布の推定の際に使用した Landsat 衛星の観測日をおよそ 6 月ごろに設定した．

３．研究結果

(1) 各バンドの分光反射率及び補正処理の検討結果

Landsat 衛星により 2021 年 6 月 10 日に観測された 各バンドの分光反射率と SS の現地調査データの関係を**図-2**

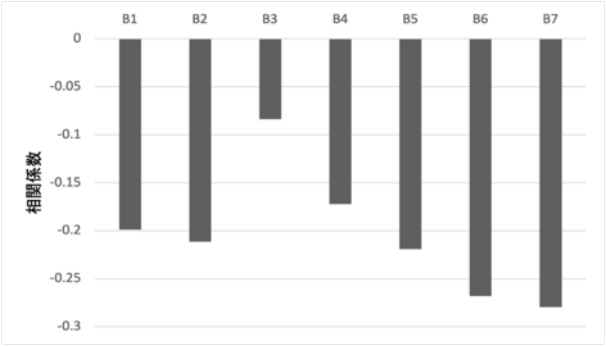


図-2　各バンドの分光反射率と SS の相関

に示す.

結果として，全てのバンドにおいて 0 に近い負の相関が得られた． Landsat 衛星により観測された各バンドの分光反射率は陸域観測を主な目的としているため，大気補正や反射率の補正において，反射の弱い海域では補正しきれていない点が考えられる．そこで，可視光域及び近赤外域を有するバンドについて，一般的に海域における反射は 0 と仮定される中間赤外域（1560~2300nm）を有する band6 及び band7 を用いて海域反射補正処理 [6] を行った．中間赤外域を用いた海域反射補正処理後の各バンドの分光反射率と SS の現地調査データの関係を**図-3** に示す.

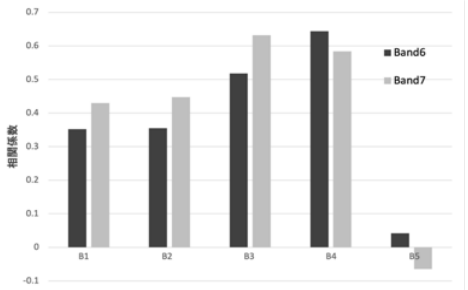


図-3　補正処理後の各バンドの分光反射率と SS の相関

結果として，補正を行う前と比較すると，可視光域においては全体として高い相関が得られた．特に，band3（可視広域緑）と band4（可視広域赤）においてはある程度の相関が得られた．近赤外域においてはあまり変化が見られなかった．band6 と band7 の補正結果を比較すると，band7 による補正結果の方が相関の高い傾向が見られた.

(2)　水の濁りの推定手法の検討結果

水の濁りの推定手法の検討をするため，衛星観測を含む分光反射率を用いた水の濁りの推定の際に一般に用いられる比演算処理を行った．海域反射率補正済みの可視光域及び近赤外域の各バンド全通りの組み合わせと SS の現地調査データの関係を**表-1** に示す.

結果として，band3 と band1 及び band3 と band2 の組み合わせが最も相関が高かった．この結果は，一般的に水の濁りが高いほど可視光域緑の反射が強く，水が透明であるほど可視光域青の反射が強くなるという分光反射特性 [7] からも説明できる.

表-1　比演算処理結果と SS の相関

B1/B2	B1/B3	B1/B4	B1/B5
−0.0093	−0.6090	−0.2711	0.2109
B2/B1	B2/B3	B2/B4	B2/B5
0.0126	−0.6407	−0.2882	0.2154
B3/B1	B3/B2	B3/B4	B3/B5
0.6163	0.6456	0.1869	0.2969
B4/B1	B4/B2	B4/B3	B4/B5
0.2965	0.3135	−0.1398	0.3030
B5/B1	B5/B2	B5/B3	B5/B4
−0.1040	−0.1063	−0.2238	−0.2767

次に海域反射率補正済みの複数のバンドの組み合わせと現地調査のデータセットを作成し，現地調査による SS データを評価データ，Landsat 衛星により観測された各バンドの分光反射率を学習データとして，水の濁りの推定手法について統計的手法を用いて検討した．各バンドごとの物理的な解釈を踏まえながら説明変数を決定し，重回帰分析より導かれた式のうち，F 値<0.05 であり，t 値，P 値が本研究で最も有意であった式を式（2）に示す．なお，Bi は使用したバンドを示す.

$$SS=(3.90B1-4.53B2+1.86B3+1.21B5)\times10^{4}-21.6 \quad (2)$$

この式の，相関係数は 0.81，決定係数は 0.66 であった．比演算処理の結果と比較して，より高い相関が得られたため，本研究ではこの推定式を用いて，港湾工事前後の水の濁り分布の推定を行った.

(3)　港湾工事前後の水の濁り分布の推定モデルの結果

港湾工事期間及びその前後である 2019 年から 2022 年までの 1 年間ごとの水の濁り分布の推定モデルの結果を**図-4** に示す.

図-4 より，港湾工事及び，洋上風力発電工事着工前である 2019 年と比較して，護岸整備などの陸上工事期間である 2020 年から 2021 年にかけて港湾周辺海域における水の濁りの増加が確認された．その後 2022 年には港湾周辺海域における水の濁りの減少が確認された．この結果から，護岸工事などの海域に面する，あるいはその付近での陸上工事において，その周辺の海域に水の濁りが一時的に発生するということが示唆された.

洋上風力発電機器の基礎設置や海底ケーブルの敷設などが行われた海上工事期間である 2021 年から 2022 年にかけては，水の濁りの増加を確認することができなかった．この結果が Landsat 衛星の分解能によるものであるか，洋上風力発電工事において水の濁りへの影響が微量であることかなどの要因も考えられるが，本研究では，

洋上風力発電の設置工事が行われた地点の現地調査データのを入手することができなかったため，検証することができなかった．今後計画されている洋上風力発電の設置工事地点の現地調査データを用いた検討が必要であると考える．

また，**図-4** の右上に位置する，閉鎖的な海域においても水の濁りが確認された．この結果は閉鎖的な海域においては海水の流れが悪いため，SS などの水の濁りに関係する物質が流れにくいことから説明できる．

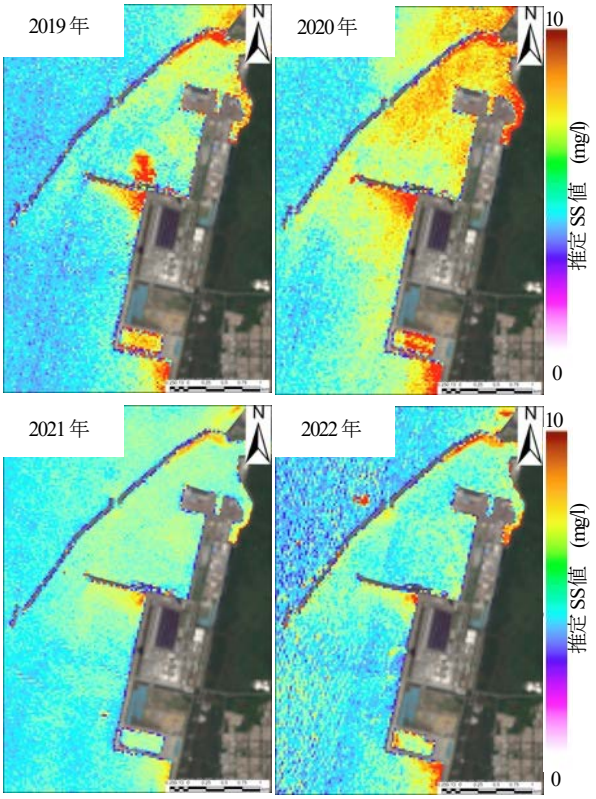


図-4　水の濁り分布の推定モデル結果

4. まとめ

本研究では, 近年，洋上風力発電事業が注目されていることを背景に，洋上風力発電の設置及び周辺の港湾工事前後における海洋環境のモニタリング手法の検討を行った．同観測条件で同一シーンを周期的かつ広域に観測でき，容易に入手可能な Landsat 衛星の分光反射特性を用いて，海域の水質（水の濁り）の推定手法を検討した．特に，海域において困難である衛星観測と現地調査の日付及び時刻を同期させることで，信頼性の高い結果が導かれたと考察できる．また，推定した手法から水の濁り分布の推定モデルを作成し，港湾工事前後の海域における広域的・定期的な水質（水の濁り）のモニタリングを行った．

結果として，各バンドの分光反射率と SS との関係は高い相関が得られなかったが，分光反射率の低い海域における補正を行うために，中間赤外域のバンドによる補正処理を加えることで，比較的高い相関が得られた．比演算処理による水の濁りの推定では，可視光域青及び緑のバンドを用いることが最も高い相関が得られた．現地調査による SS データを評価データ，衛星観測による各バンドの分光反射率を学習データとして，水の濁りの手法の推定について統計的手法を用いた検討では比較的高い精度で推定を行うことが出来た．この推定手法を用いて得られた，水の濁り分布の推定モデルの結果から，港湾工事及び，洋上風力発電工事前後の周辺海域において，陸上工事期間では，港湾周辺海域における水の濁りを確認することができ，港湾周辺の陸上工事の影響が一時的に発生することについて確認できた．海上工事期間では，水の濁りの増加を確認することができなかった．今後計画されている洋上風力発電の設置工事地点の現地調査データを用いた検討が必要であると考える．また，閉鎖的になっている海域においても水の濁りが確認された．

今後の展望として，海域の水の濁りについてより詳細に調査するため，現地調査データのサンプル数を増やすことによる推定手法の精度向上や，分光反射率の低い海域における補正手法の検討，本研究での水の濁り分布の推定手法について，他のエリアおよび時期についての適用性や精度の検証を行う予定である．

参考文献

1) 国土交通省：洋上風力発電の導入促進に向けた港湾のあり方に関する検討会,<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001613016.pdf>,(入手 2023.6.9).
2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 国内の洋上風力発電環境影響評価事例における参考項目とその選定理由,<https://www.nedo.go.jp/content/100890018.pdf>,(入手 2023.6.9).
3) 環境省：能代港洋上風力発電事業環境影響評価方法書, <https://www.nedo.go.jp/content/100890018.pdf >,(入手 2023.6.9).
4) 国土交通省：河川水質要領,<https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/suishitsu/pdf/s04.pdf>,(入手 2023.6.9).
5) 環境省：水環境総合情報<https://water-pub.env.go.jp/water-pub/mizu-site/mizu/kousui/dataMap.asp >,(入手 2023.6.9).
6) 作野 裕司：現地調査と衛星データによる西日本豪雨前後の広島県沖における透明度分布特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 75 巻 , 2 号, 2019 .
7) 田中 邦一, 横田 道生, 鈴木 徹, 佐伯 悟：水面からの分光反射特性と水質について , 写真測量とリモートセンシング, 16 巻, 1 号, 1977.