

人工衛星Sentinel-6により観測された波高データの精度検証と日本周辺の波エネルギー算出

馬渡竜輝¹・柴山知也²

¹早稲田大学創造理工学研究科建設工学専攻修士課程

²早稲田大学理工学術院

研究背景と目的

【背景】

世界各地における海面上昇や津波・高潮被害

近年、気候変動の影響による海面上昇や地震・台風による津波・高潮などが問題となっている。観測施設がない地域が少なくないことを考えると、どの程度の被害や影響があるのかあらゆる地点で観測することは難しい。人工衛星の観測データを用いることでこれまで以上に海洋開発技術の適用範囲を広げることができる。

人工衛星の観測データを活用することで期待される効果

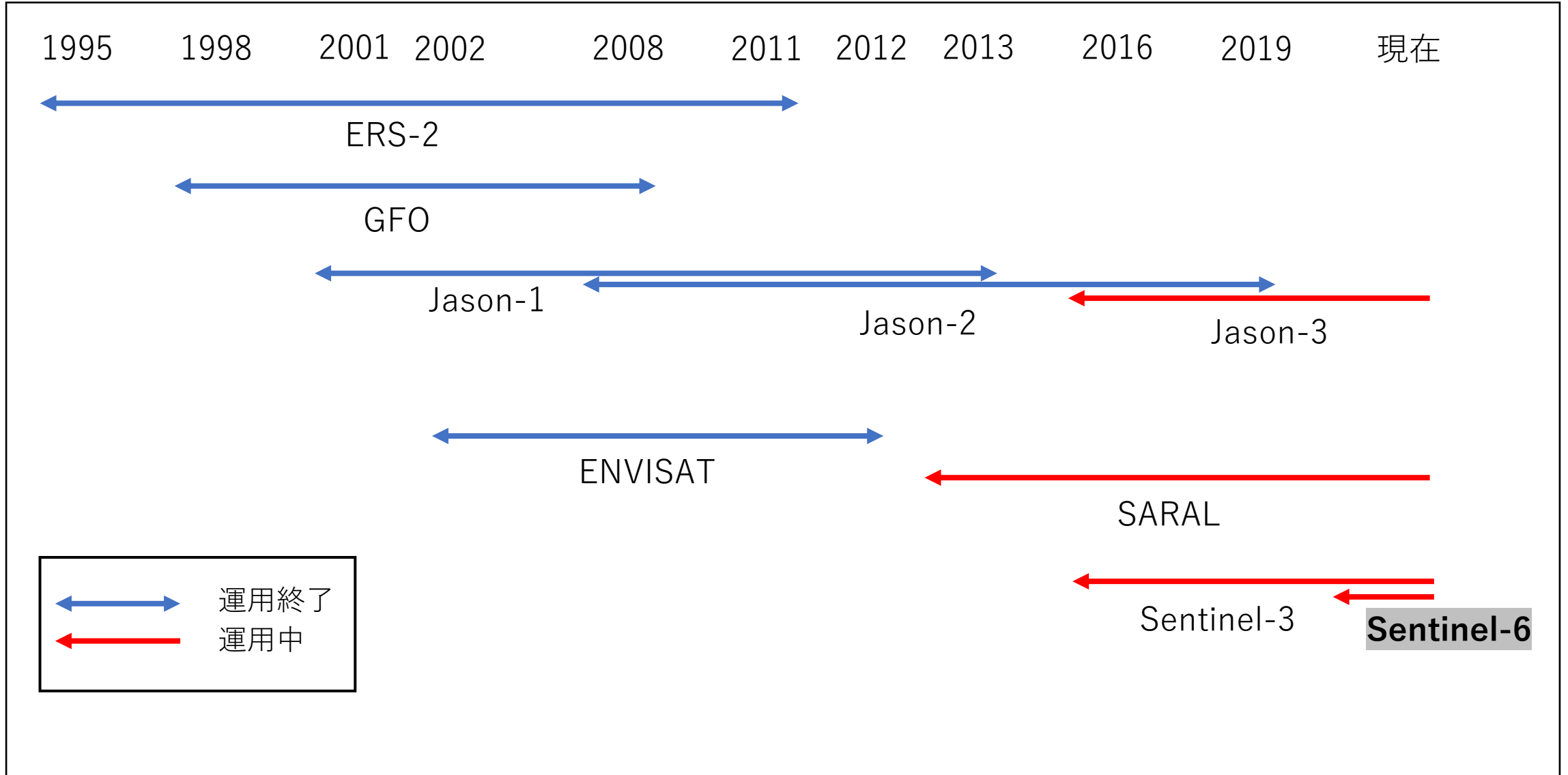
現在、数多くの人工衛星が稼働しており、その中には海面観測をミッションとして稼働している衛星がある。世界中の波浪情報を数値データとして誰でも場所を問わずに取得することが可能であるため、災害時のデータ調査や発電施設の適地選定を行うことができる。

【目的】

人工衛星Sentinel-6の有義波高観測精度を検証し、実際に活用できる水準にあるのかを検討する

人工衛星による波高観測の歴史

表1 波高を観測する人工衛星の運用年表



波高を観測する運用中の主要人工衛星

Sentinel-6が最も波高観測に適している

最新の観測機器，観測頻度は最多

表2 波高を観測する主要人工衛星の概要

| 人工衛星の種類 | Sentinel-6 | Jason-3 | SARAL |
|---------|---|---|--|
| 運用期間 | NASA/ESA | NOAA/EUMETSAT | CNES/ISRO |
| 打ち上げ日 | 2020年11月21日 | 2016年1月17日 | 2013年2月25日 |
| 周期 | 約112分 | 112.4分 | 100.6分 |
| 回帰 | 約10日 | 約10日 | 35日 |
| 観測範囲 | 緯度 ± 66.0度 | 緯度 ± 66.0度 | 緯度 ± 82度 |
| 解像度 | 7km | N/A | 40~50km |
| 主な搭載機器 | Poseidon-4 (レーダー高度計) AMR-C (高性能直下観測マイクロ波放射計) | Poseidon-3B Altimeter (レーダー高度計) AMR-2 (直下観測マイクロ波放射計) | Altimeter in Ka-band (AltiKa) (Kaバンド高度計) |
| 特徴 | 現在稼働している人工衛星の中で，最新の機器を搭載している。 | 有義波高を誤差0.5m程度で観測できる。 | 回帰日数が35日であるため，1つの地点の観測頻度が少ない。 |

Sentinel-6データの概要

日本周辺の衛星軌道

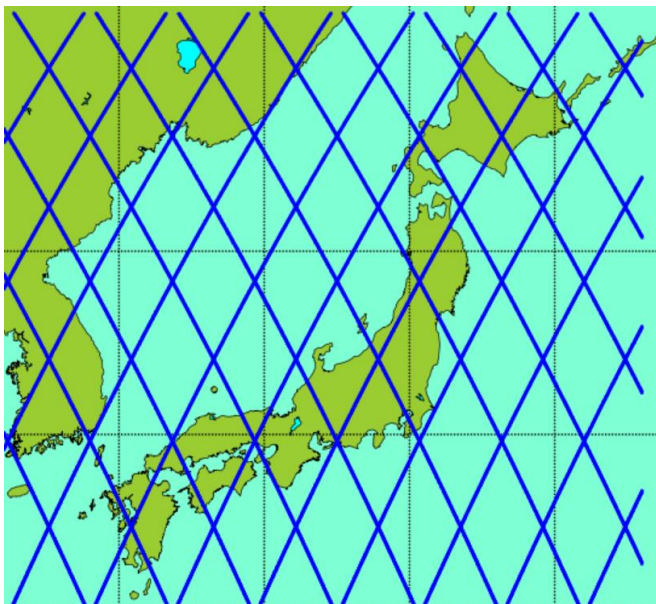


図1 Sentinel-6の日本周辺軌道

波高観測のメカニズム

発射したレーダー波と反射波の時間差から水面の高低差を算出し、波高（有義波高に相当すると言われている）を推定している。

提供されているプロダクト

NRT(Near Real Time)
STC(Short Time Critical)
NTC(Non Time Critical)

データ取得先

EUMETSAT Data Centre

取得できるデータ

有義波高, 水温, 水面高, 風速など

データ形式

netCDF4

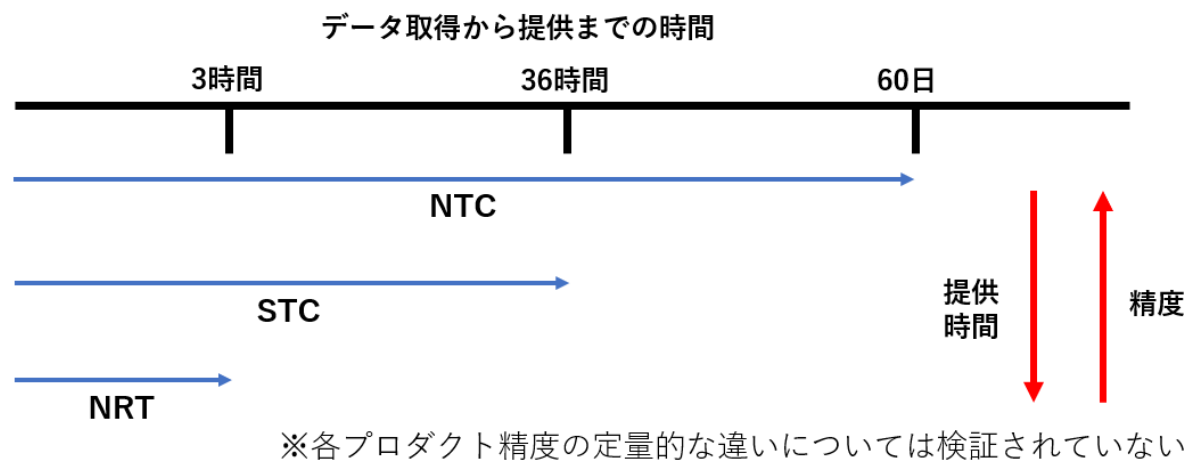


図2 各プロダクトの提供時間と精度

Sentinel-6の精度検証

精度検証方法

NOWPHASから取得できる有義波高データを真の値とし、この値とSentinel-6から取得できる有義波高の値を比較する。

検証地点

Sentinel-6の軌道とNOWPHAS観測地点との距離が近い地点を対象とした（以下16地点）。

むつ小川原，久慈，秋田，能代，金沢，鹿島，第二海堡，鳥取，浜田，高知，室津，苅田，青森東岸沖，福島県沖，伊勢湾口沖，高知西部沖

評価方法

波高平均誤差・標準偏差を算出

対象期間

2021年～2022年の2年間

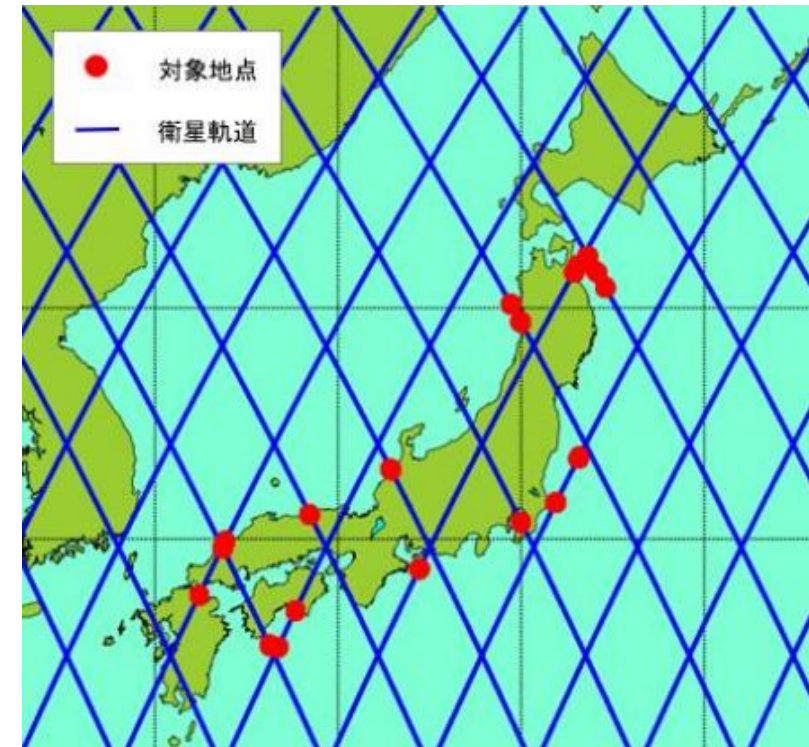


図3 精度検証の対象地点

Sentinel-6の精度検証

何らかの観測ミスによる外れ値を除去して精度検証を行った。

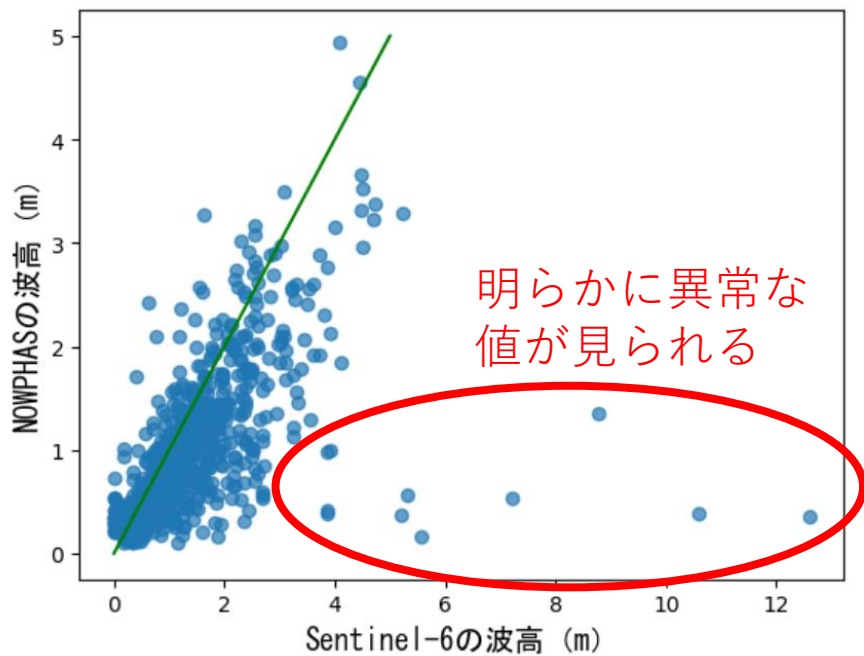


図4 外れ値除去前のSentinel-6とNOWPHASデータの散布図

サンプル数：648個
相関係数：0.546

外れ値として除去する

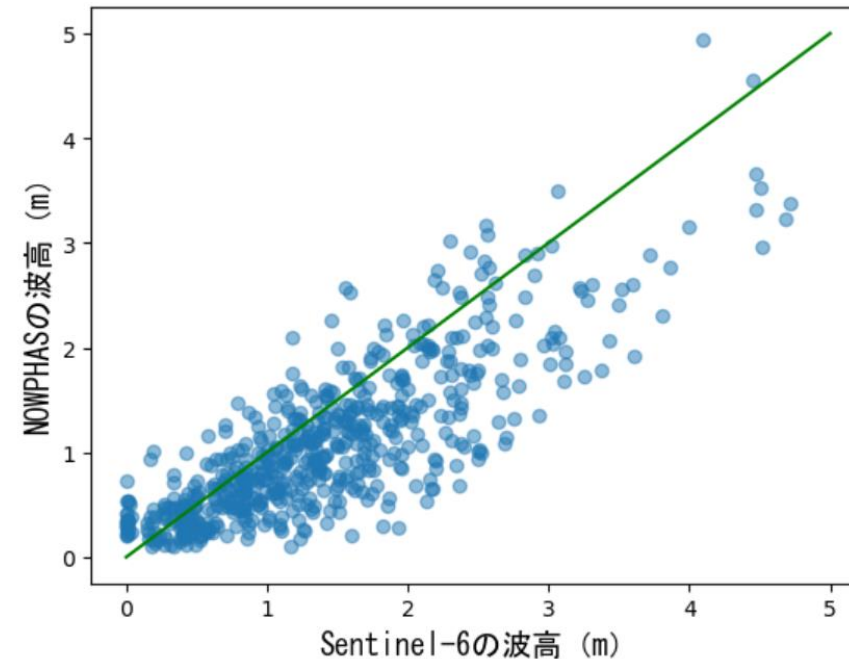
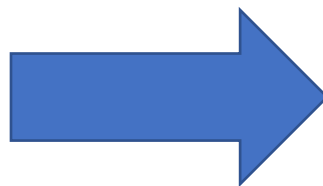


図5 外れ値除去後のSentinel-6とNOWPHASデータの散布図

サンプル数：612個
相関係数：0.824

外れ値について

本研究における外れ値の定義

誤差の四分位範囲を用い，以下の式で算出

外れ値 < 第一四分位数 - (1.5 × 四分位範囲)

外れ値 > 第三四分位数 + (1.5 × 四分位範囲)

Sentinel-6データと外れ値の関係

Sentinel-6の有義波高が5m以上のとき，外れ値になっている

外れ値を除去して検証する理由

外れ値は何らかの理由で観測ミスが起きている可能性が高い。特に，Sentinel-6において波高5m以上と観測した場合は全て外れ値となっており，日本海側の沿岸域で起きていることが多い。そのため，正常時の精度を検証するためには外れ値を除去して考えるべき。

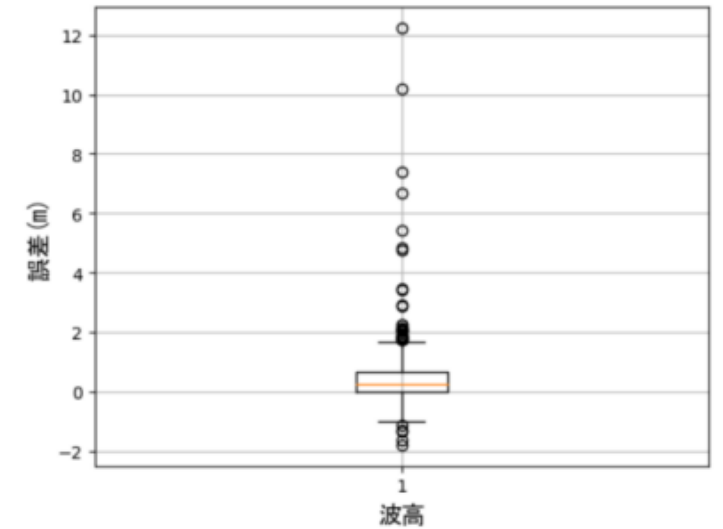


図6 波高誤差の箱ひげ図

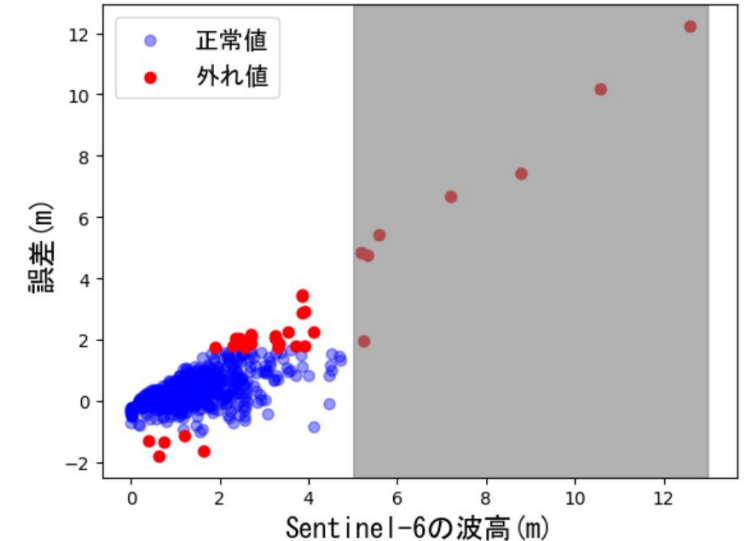


図7 外れ値で層別したSentinel-6の波高と誤差の関係

外れ値の分析

日本海側の沿岸域で観測ミスが起きる可能性があると考えられる

鳥取、金沢、秋田の3地点では、波高が小さいにもかかわらず、波高5m以上であると誤って観測する場合があった。Sentinel-6の解像度が7kmであるため、観測地点が陸に近いと陸上の高低差のデータも含んでしまうことが原因として考えられる。



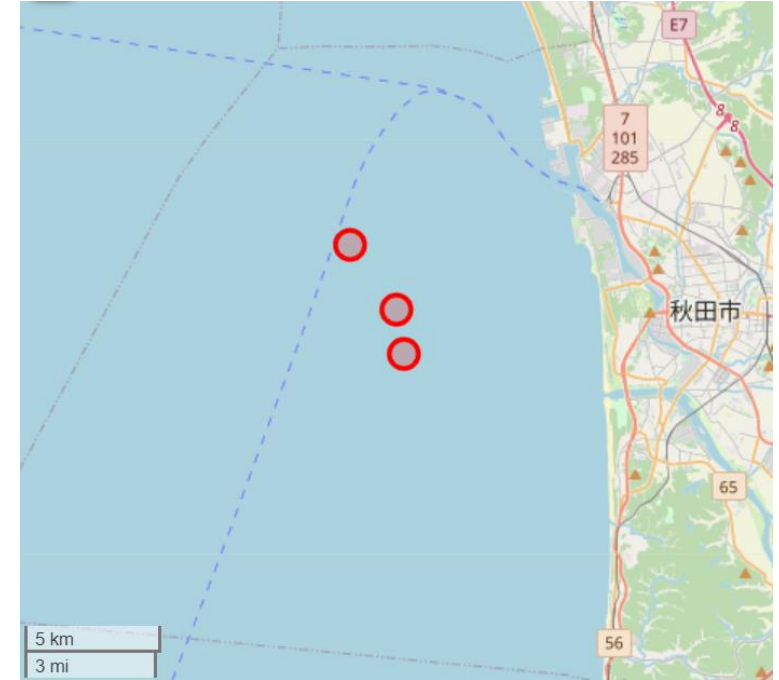
鳥取 [2/33]

海岸線から約5km以内



金沢 [1/44]

海岸線から約5km以内



秋田 [3/29]

海岸線から約7km以内

図8 外れ値観測地点 (地点名 [外れ値/総サンプル数])

Sentinel-6の精度検証

外れ値除去後の比較結果

平均誤差：0.30m, 中央値：0.22m, 標準偏差：0.50m (図10)

→ Jason-3 の誤差0.5mより精度は良い.

Sentinel-6の方が値が大きくなる傾向がある (図9)

日本海と太平洋で誤差のばらつきが少し異なる (図11)

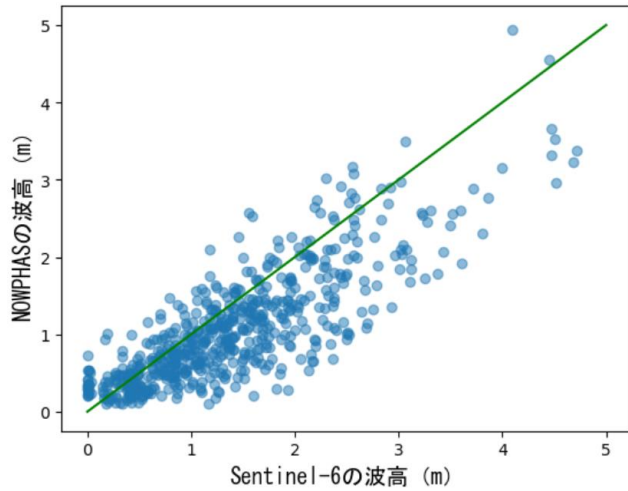


図9 Sentinel-6とNOWPHASの散布図

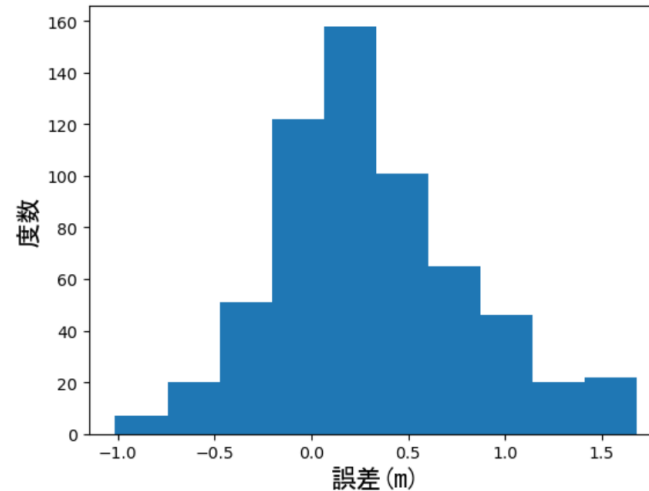


図10 波高誤差の分布

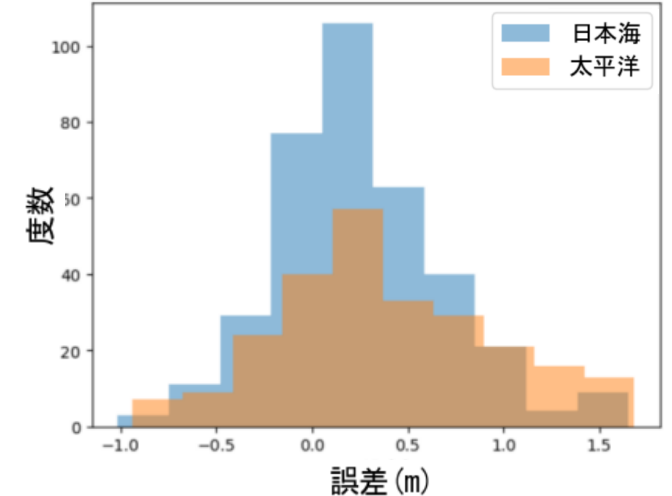


図11 日本海・太平洋で層別した波高誤差の分布

➡ Sentinel-6のデータをそのまま使用せず, 補正をしてから使用すべき

Sentinel-6波高データの補正

Sentinel-6とNOWPHASデータの比較から、Sentinel-6の方が値が大きくなるという特徴が分かった。そこで、Sentinel-6の有義波高データを補正することで精度が向上することが考えられる。

回帰分析

表3 Sentinel-6有義波高の回帰分析結果

| | 候補① | 候補② |
|------|----------------------|--|
| 説明変数 | Sentinel-6の有義波高 (x) | Sentinel-6の有義波高 (x) 海洋のラベル (z：日本海0, 太平洋1) |
| 補正式 | $y = 0.684x + 0.128$ | $y = 0.829x - 0.049z$ |
| 決定係数 | 0.679 | 0.681 |
| RMSE | 0.42 | 0.44 |

ほとんど同じ精度

※決定係数…説明変数が目的変数をどのくらい表しているかを示す指標で1に近いほど良い。

※RMSE…二乗平均平方根誤差。0に近いほど誤差が小さい。

簡便な点から候補① $y = 0.684x + 0.128$ を使用する

補正後の精度検証

補正前

平均誤差：0.30

標準偏差：0.50



補正後

平均誤差：0.005

標準偏差：0.428

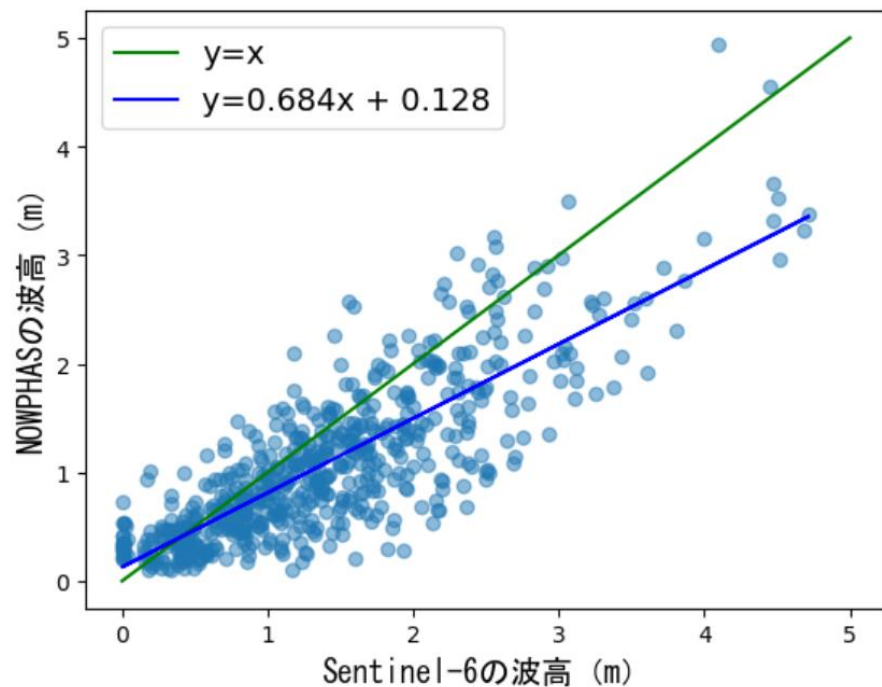


図12 回帰分析から得られる回帰直線

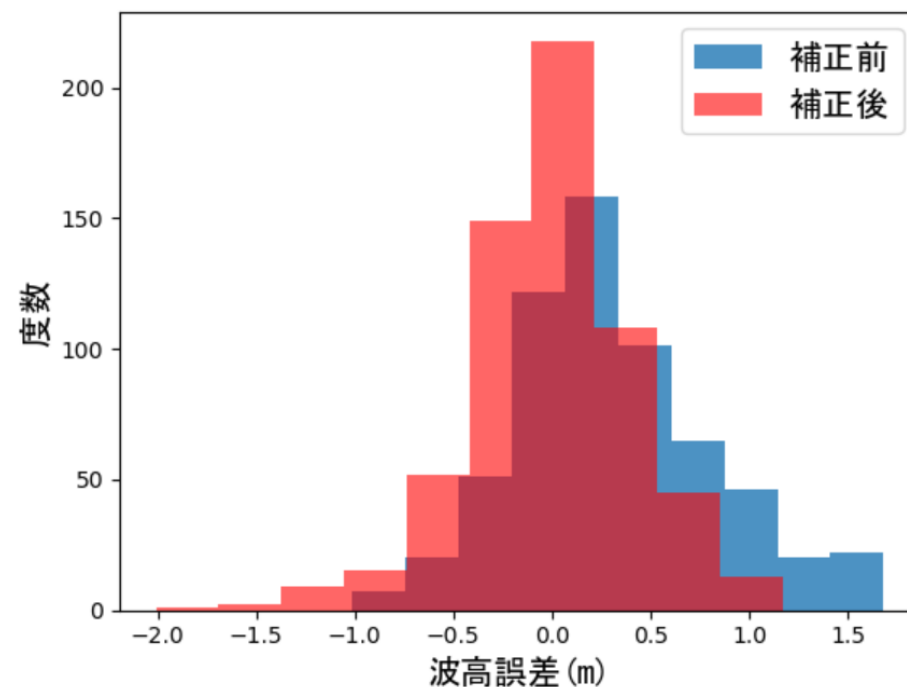


図13 衛星データ補正後の誤差分布

補正することで、平均誤差0.005m、標準偏差0.428mとなり精度が向上した

衛星データの活用について

活用方法の一つとして，日本周辺における波エネルギーの算出を行った．算出式は以下の式を用い，衛星軌道が交差する地点を対象とした．

$$W = \frac{\rho g}{8} H_{1/3}^2$$

W : 波エネルギー
 ρ : 密度
 g : 重力加速度
 $H_{1/3}$: 有義波高

対象地点ごとに衛星が通過した回数だけ計算を行い，その平均を代表値とした．

日本海

太平洋側に比べて波エネルギーは小さい

太平洋

波エネルギーの大きさは場所によって大きく異なる

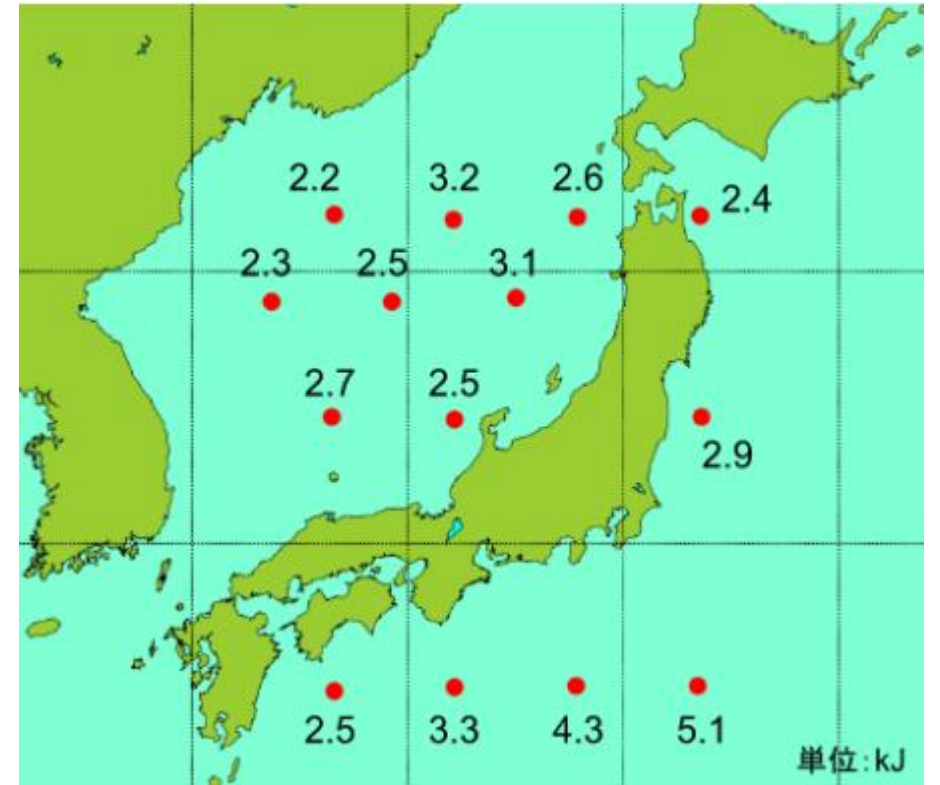


図14 衛星データから算定した日本周辺の波エネルギーの分布 (kJ) (各地点での平均値)

- NOWPHAS有義波高データと比較したSentinel-6の有義波高データの精度は、**平均誤差0.30m**，標準偏差0.50mであり，**観測値はNOWPHASの値より大きくなる**傾向があった。
- Sentinel-6の精度を向上させるためにSentinel-6有義波高を**補正する式** ($y = 0.684x + 0.128$) を推定し，**平均誤差0.005m**，標準偏差0.428mと精度が向上した。
- **日本海の沿岸域での観測ミス**が起こる可能性があり，その原因や対応策について考える必要がある。
- 人工衛星データの活用方法の一つとして，日本周辺における波エネルギーの算出を行い，様々な地点の波エネルギーを算出できることが分かった。

■ 参考文献

- 1)リアルタイムナウファスWeb site : <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- 2)一般社団法人リモート・センシング技術センター, Jason-3 衛星情報データベース : <https://www.restec.or.jp/satellite/jason-3.html>
- 3)一般社団法人リモート・センシング技術センター, Sentinel-6 衛星情報データベース : <https://www.restec.or.jp/satellite/sentinel-6.html>
- 4)Woo Hye-Jin, Park Kyung-Ae: Validation of significant wave height from Jason-3 and Sentinel-3A/B and relation to tidal currents in coastal regions of the Korean Peninsula, International Journal of Remote Sensing, Vol. 43, Issue.3, pp 961-996, 2022
- 5)Liu Zhizhong, Yang Jungang, Zhang Jie, Cui Wei: Jason-3 global statistical assessment based on Jason-2, Haiyang Xuebao, Vol.42, Issue.3, pp 129-139, 2020.
- 6)NASA : 5 Things to Know About Sentinel-6 Michael Freilich, 2020. <https://www.nasa.gov/feature/jpl/5-things-to-know-about-sentinel-6-michael-freilich>
- 7)海洋エネルギーポータルサイト : http://www.todaiww3.k.u-tokyo.ac.jp/nedo_p/jp/webgis/