

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19848

研究課題名（和文）GNSS海面反射信号を用いた航行中船舶からの波浪計測技術の確立

研究課題名（英文）Wave measurement methods from moving vessels using GNSS Reflectometry

研究代表者

市川 香（Ichikawa, Kaoru）

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：40263959

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：海運や海洋資源開発に波浪場の推定は不可欠である。数値モデルの発達により推定精度は向上したが、特に沿岸域では波浪観測自体が不足している。そこで本研究は、航行中の船舶から安価に波浪の常時観測できる方法を確立させた。GNSS信号の海面での反射波は直達波よりも長い経路長を通るため、両者は位相干渉して混合受信波の強度が変動する。波浪により海面高が変化して経路長差が約20cm変化するたびに受信波強度に周期的な干渉縞が生じ、その粗密の周期性と本数を計測することで波浪周期と有義波高の推定が可能となった。実際のフェリーでの観測データによって検証したところ、波浪周期・有義波高ともに良い精度で推定が可能であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海運や海洋資源開発には波浪予測が不可欠だが、複雑な地形や海流の影響を受けて変化しやすい沿岸域の波浪予測の精度を上げるには、細かな波浪観測が不可欠である。国土交通省港湾局のナウファスなど、沿岸域の波浪観測網の維持管理は予算と手間のかかる事業であり、安価なシステムの開発が望まれている。一方、今回の測定装置は、安価で小型・省電力のGNSS受信装置で構成されており、小型のアンテナを船体舷側に設置するだけで完了できる。つまり、低予算で多数の船に取付けて波浪観測網を充実させることができる。観測網が実現すれば、海運・海洋資源開発の観点から社会的な意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：Estimation of wave fields is essential for marine transports and developments. Although the accuracy of estimation has improved by the progress of numerical models, wave observations are still insufficient especially in coastal areas. This study, therefore, established a low-cost method to observe wave fields from moving ships. The GNSS signals reflected at the sea surface travel a longer path than the direct signals, so the mixed signal intensity fluctuates depending on the phase difference of two signals. Every time when the excess path length changes by the wavelength of GNSS signals, approximately 0.2 m, due to the sea surface height changes by waves, periodic interference fringes appear in the received signal intensity. By measuring the periodicity and number of these fringes, the wave period and significant wave height (SWH) can be estimated. By applying to actual observation data on a ferry, both estimations of the wave period and SWH were confirmed practically accurate.

研究分野：海洋物理学

キーワード：GNSS 海面反射 干渉計 波浪計 有義波高 波浪周期 フェリー観測

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 海上輸送や海洋資源開発などにとって、波浪の推定は死活問題である。人工衛星による風速場の観測と数値モデルの発達によって、全球の波浪場の推定精度は飛躍的に向上した。しかし、波長と水深が同程度となる浅海の沿岸域では、地形や海流の影響を受けて波浪場が複雑に変化する。風速に加えて波浪場自身の観測が必要となる。沿岸域の波浪場の空間スケールに比べると、現在の観測網は圧倒的に不足している。

(2) 沿岸域の波浪の計測には、固定もしくは漂流の浮体が通常用いられるが、測定できる地点が限定されるうえに、高額な維持費や放流の手間が必要となる。また、人工衛星海面高度計でも波高の計測が可能だが、衛星の直下しか計測できないために時間・空間スケールがかなり限定されてしまう。

2. 研究の目的

(1) そこで本研究では、走行中の船舶から波浪を安価に常時計測する手法の確立を試みた。海運や海洋資源開発上のニーズが高い沿岸域ほど航行する船舶は増えるので、数多くの船舶に常時運用できる安価なシステムを取り付けることで、波浪観測網を充実させることができる。

(2) これまで船舶では、熟練の船員による海面状態の目視によって定性的に波高を推定してきた。映像の機械学習でこれを定量的に行う方法も検討されているが、日中しか観測ができない。停泊中の船舶なら超音波やレーザー測距儀で船から海面までの距離を計測する方法も用いられるが、航走中だと船舶の周辺に造波が生じるため使用できない。また、船舶レーダの反射強度から波浪を推定する手法も開発されているが、高価なため換装している船舶数に限界がある。

3. 研究の方法

(1) そこで本研究では、世界中のどこからでも常時利用できる Global Navigation Satellite System (GNSS) を用いる。船上のアンテナは、GNSS 衛星から直達する電波 (S_D) だけでなく、海面で反射した反射波 (S_R) も受信する (図 1)。

反射波は直達波よりも長い距離を伝搬するため、アンテナに到達する時の電波の位相は直達波と異なり、両者が干渉すると受信電波の強度は変化する。つまり、反射波の経路長超過が電波の波長 (20cm 程度) だけ変化する度に、混信した電波の強度は周期的に変化して位相干渉縞が生じる。経路長超過の変化は主に海面の上下動によって生じるため、受信電波強度の干渉縞の時間変動を計測することで波浪が推定できる。

(2) 直達波と反射波の干渉による GNSS 信号強度の変化を仮想的に実験し、海面波の波高や周期、アンテナ取り付け高度、GNSS 衛星の仰角、使用する GNSS 電波の波長、海面での GNSS 信号の反射率、などのパラメータ依存性について考察した。

その結果、波浪周期内の干渉縞の本数と有義波高にはほぼ線形の対応関係があり (図 2)、有義波高が高くなるほど干渉縞の本数が増えることが確認できた。海面の波が半周期変動する間に海面高は有義波高だけ変動するので、その高さ変化を約 20cm 毎に数えた個数である干渉縞本数が波高に比例するのは合理的である。なお、海面高の時間変化は一定ではなく、波頂や波底ではゆっくりと変動するため、干渉縞本数も時間的な粗密が生じる。この粗密周期を用いると、波浪の周期も推定できる。

ただし、定量的な対応関係は波浪

のスペクトル形に依存しており、想定する波浪スペクトルを変えると図 2 の傾斜などが若干変動した。なお、その他のパラメータについては、適切に規格化を行うことで、上述の対応関係を

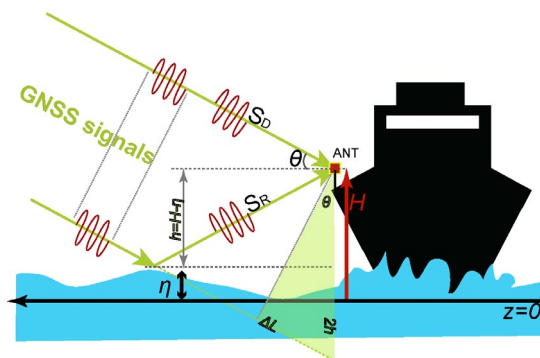


図 1 計測手法の概念図

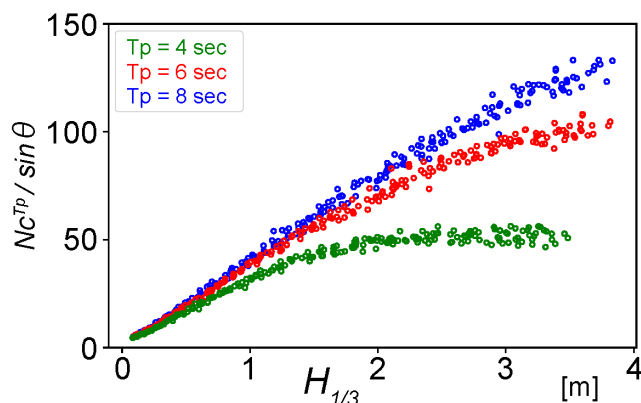


図 2 有義波高と波浪周期中の干渉縞数の対応関係

は影響しないことが確認できた。

4. 研究成果

(1) 博多と釜山を結び対馬海峡を毎日横断する国際フェリー「ニューかめりあ」に GNSS アンテナを取り付けて (図 3), 20Hz で各 GNSS 衛星の受信信号強度変動を計測した。

海面からの反射波の受信状況はアンテナの設置位置に著しく依存しており, 特に, 金属である船体からの反射波が混信してしまうと海面波の計測が不可能となることが判明した。アンテナの種類や設置方法を様々に検討してみたところ, ①上方のみでなく下方にもゲインのあるアンテナを用い, ②アンテナを船体上方に浮かせない位置に固定し, ③アンテナの下方に船体の凸部のない, 最も海側に張り出した位置を選定することが大切であることが判明した。

(2) 海況が静穏・平常・荒天のそれぞれの場合に対して, 反射波と直達波の干渉が特に顕著になる低仰角の衛星を 2 個選出して, 受信強度の時間変化を用いて波浪場の推定を行った。

実際の計測データには, 十数秒程度の長周期変動が顕著に含まれていることが明らかになった。これは, 船体の固有振動に伴ってアンテナが傾くために, アンテナ天頂に対する俯角が変化してアンテナのゲインが変化するために生じた変動だと考えられる。そこで, まずこの変動を除去した。次に, 干渉縞の時間的な疎密周期から波浪の有義周期を推定した。次に, 推定した波浪周期内の干渉縞の本数を積算し, 図 2 で作成した有義波高との対応関係から有義波高を推定した。

(3) 推定した有義波高・周期の組み合わせは, 図 4 に示すように, 同時に観測した 2 つの衛星間に隔たりがあった。特に, 海況が荒天になるほど衛星間の差は大きかった。これは, 対馬海峡内のうねり等非等方性の波浪の影響のために, 衛星の方位角に依存した変化が生じている可能性がある。一方, 2 衛星の平均値は, 気象協会の hindcast データと周期・波高ともよく一致しており, 今回の手法を用いた推定した結果が実用的な精度であることを示している。

(4) 対馬海峡において推定結果は hindcast 値とよく一致していたが, 図 2 の関係式は波浪スペクトルの形状に依存するため, 別海域でも定量的に同様な精度が保てるかは明らかではない。現実的な手法としては, 海域毎に GNSS と波浪の同時観測を行って, 図 2 のような Look-up Table を作成しておくことで, 任意の時刻での干渉縞の個数から波高の推定が可能となる。

現在, 太平洋の外洋域を含む東京～八丈島航路のフェリー橘丸でも同等な観測を開始しており, うねりが支配的な別海域での計測結果などにも拡張していく予定である。

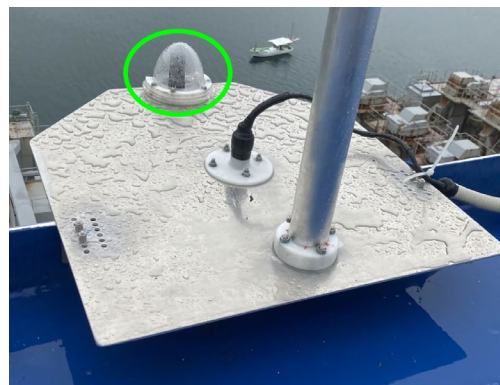


図 3 フェリーに取り付けた観測装置

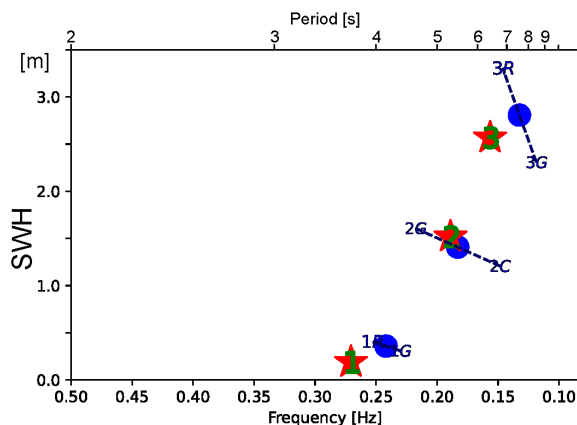


図 4 波浪周期・波高の hindcast 値 (赤星) と本研究の推定結果 (青丸)。

<引用文献>

Ichikawa, K., J.Q. Zhu, J. Noda, R. Sakemi, K. Yufu and K. Matsuura, Ship-borne wave gauge using GNSS interferometric reflectometry, *Coastal Engin. J.*, doi:10.1080/21664250.2024.2342596

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ichikawa Kaoru	4. 巻 15
2. 論文標題 Mean Seasonal Sea Surface Height Variations in and around the Makassar Strait	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 4324 ~ 4324
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/rs15174324	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 K Ichikawa	4. 巻 61
2. 論文標題 How frequently can we observe winds and waves for safer maritime transport?	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 La Mer	6. 最初と最後の頁 358-360
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.32211/lamer.61.3-4_345	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 K Ichikawa, JQ Zhu, J Noda, R Sakemi, K Yufu and K Matsuura	4. 巻 66
2. 論文標題 Ship-borne wave gauge using GNSS interferometric reflectometry	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 395-404
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/21664250.2024.2342596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 4件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Kaoru Ichikawa, JQ Zhu, J Noda, R Sakemi, K Yufu and K Matsuura
2. 発表標題 Ship-Borne Wave Gauge using GNSS Interferometric Reflectometry
3. 学会等名 The 19th French-Japanese Symposium of Oceanography（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 JingQiao Zhu and Kaoru Ichikawa
2. 発表標題 Ship-board wave height measurements using GNSS-R
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kaoru Ichikawa, Jyoushiro Noda, Ryosuke Sakemi and Kei Yufu
2. 発表標題 Ship-borne SSH measurements using GNSS-R
3. 学会等名 13th Coastal Altimetry Workshop (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kaoru Ichikawa
2. 発表標題 How frequently can we observe winds and waves for safer maritime transports?
3. 学会等名 The 18th Japanese-French Oceanographic Symposium Japan-French oceanographic Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kaoru Ichikawa and XF Wang
2. 発表標題 Wave frequency estimation by satellite altimeters
3. 学会等名 Special seminar at Seoul National University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kaoru Ichikawa
2. 発表標題 Marine Observations with Multi-copters
3. 学会等名 Kyudai Now (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kaoru Ichikawa, XF Wang and H Tamura
2. 発表標題 Capability of Jason-2 subwaveform retracers for Significant Wave Height in the calm semi-enclosed Celebes Sea
3. 学会等名 Special seminar at Seoul National University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Kaoru Ichikawa, XF Wang, H Tamura and D Wei	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 26
3. 書名 Coastal Altimetry: Chapter 7	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	松浦 邦明 (Matsuura Kuniaki)	一般財団法人日本気象協会・防災ソリューション事業部・部長 (82692)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	酒見 亮祐 (Sakemi Ryosuke)	九州大学・応用力学研究所・技術職員 (17102)	
研究協力者	野田 穰士郎 (Noda Jyoushiro)	九州大学・応用力学研究所・技術職員 (17102)	
研究協力者	油布 圭 (Yufu Kei)	九州大学・応用力学研究所・技術職員 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関