

# 放送暦に基づく GNSS/INS 複合測位による海上風況計測

## Measuring Wind and Wave Heights Using GNSS/INS Integration Based on Broadcast Ephemeris

元岡 範純 佐藤 杏輔  
Norizumi Motooka Kyosuke Sato

三菱電機株式会社 先端技術総合研究所  
Mitsubishi Electric Corporation Advanced Technology R&D Center

### 1. まえがき

海上を飛行する無人飛行機（ドローン）や船舶の運航計画立案や自動走行の実現には、海上風況データ（波高、風速、風向）の取得と正確な風況予測が不可欠である。従来の GNSS を利用した波高や風向の計測では、GNSS 信号に含まれる誤差を補正するために、補強情報を用いた精密測位（RTK、PPP、PPP-RTK など）が使用されることが多い。しかし、これには高機能なアンテナや受信機、さらには通信コストが必要であった。そこで本稿では、補強情報を必要としない放送暦に基づく GNSS/INS 複合測位方式によって、波高、風速、風向を精密に計測する手法を検討した。高知県室戸岬で取得した実フィールドデータを用いて、計測精度を評価した結果、波高については 5 cm (RMS)、方位角精度については 1° (RMS) 以下の精度が得られた。

### 2. 海上風況データの計測方式

IMU 内蔵の GNSS 受信機 (u-blox F9R)、GNSS アンテナ (GGB0710)、および超音波風向風速計が搭載された海洋ブイを図 1 に示す。GNSS と IMU を統合したルースカップリング (疎結合) 型複合測位によって、姿勢角、位置、速度、IMU のセンサバイアス (ジャイロおよび速度センサバイアス) を推定した。GNSS の観測量は 5Hz の擬似距離、搬送波位相、ドップラーである。IMU データは u-blox F9R 内蔵の IMU から出力される 50Hz のデータを使用した。衛星の軌道および時刻情報は放送暦のみであり、精密暦や基地局の観測データは利用していない。

波高については、複合測位から出力される高度方向の位置推定値に対してハイパスフィルタを通し、ゼロアップクロス法によって算出した。ハイパスフィルタを用いる理由は、放送暦の衛星軌道誤差やクロック誤差、および大気遅延誤差に起因する高度変化を、高度方向の位置推定値から除去し、波高変動に起因する成分を抽出するためである。

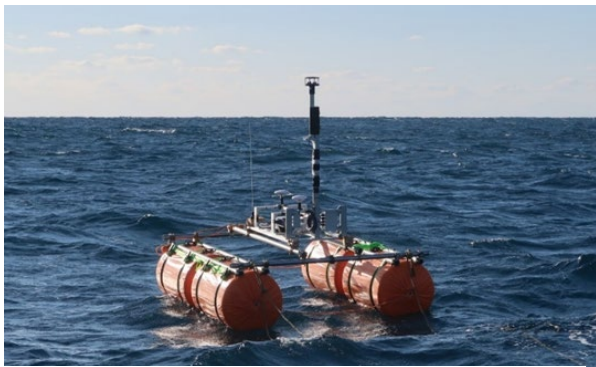


図 1 GNSS アンテナ/受信機および風向風速計が搭載された海洋ブイ (高知県室戸岬沖での実証実験中の様子)

風速および風向に関しては、海洋ブイに搭載された風向風速計によって計測するが、複合測位によって算出される速度推定値を用いて、海洋ブイの運動による見かけ上の風速を補正した (動揺補正)。加えて、風向風速計によって計測される風向は海洋ブイに固定された座標系での値であるため、海洋ブイの姿勢角推定値を用いて、ENU (East-North-Up) 系における値に変換を行った。

### 3. 実証実験

2024 年 1 月 26 日に高知県室戸岬沖で約 2.5 時間にわたり海上風況を計測するためのデータを取得し、後処理にて波高、風向および風速を算出した。

波高に関しては、基線長数 km の相対測位によって求めた値をリファレンス (真値) として、提案手法における波高計測値の推定誤差を評価した。図 2 に評価例を示す。推定値がリファレンスとよく一致しており、2.5 時間の RMS 誤差は 5cm であった。

風向の推定精度は、海洋ブイの方位角の推定精度に依存するため、複合測位による方位角の推定誤差を評価した。評価結果を図 3 に示す。海洋ブイに搭載した 2 つの GNSS アンテナ間の相対測位を行うことで方位角のリファレンスを計算した。2.5 時間の RMS 誤差は 1° (RMS) 以下と、風向風速計の計測精度 2° を下回る十分な精度が得られた。

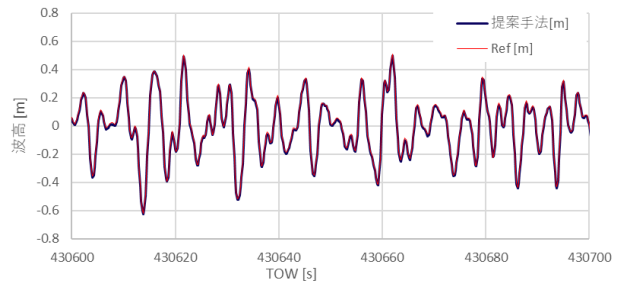


図 2 波高推定精度の評価例

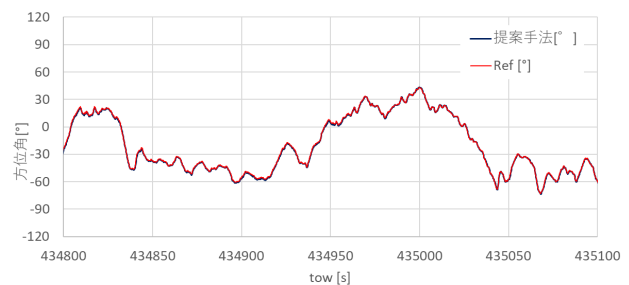


図 3 方位角推定精度の評価例