

## 1. 研究目的

海面の高さは潮汐や波浪など様々な要因によって変化するが、海面付近の圧力分布や海洋上層の熱容量の指標として使われるなど、海面水温などと同様に海洋物理学における重要な物理量の一つである。実際、沿岸付近では潮位計などによって歴史的に古くから計測が行われている。ところが、水温などと異なり、洋上の海面高度は人工衛星海面高度計でのみ計測されていて、船舶などでの直接測定は行われていない。人工衛星海面高度計は特定の衛星軌道直下の海面高度を、数十日に一度程度の頻度でしか計測しないため、沿岸域のように時間・空間スケールの小さな現象を観測するには不向きである。このため、任意の場所と時刻で海面高度を取得する方法が求められてきた。

このうち、Global Navigation Satellite System (GNSS)による衛星測位は最も現実的な方法の一つである。近年、ドローンに上向きと下向きの二つの GNSS 受信機を搭載し、水面で反射した GNSS 信号とドローンに直接到達した GNSS 信号の経路差から海面とドローン間の距離を計測して、ドローンの位置と水面までの距離の差として水面の高度を計測する手法 (GNSS-R 高度計) が開発された (Ichikawa *et al.*, 2019)。琵琶湖でこれを検証したところ、数 cm の精度で水面の高度が推定できることがわかった。ただし、この精度は波浪に依存するため、一般に湖面よりも有義波高が大きい海洋で同手法が適用可能かは未確認である。

## 2. 研究内容

そこで、観測船「いさな」を用いた GNSS-R 高度計の実験を 2019 年 7 月 28 日に行った。愛媛県伊予市森漁港に停泊中の車のルーフ部分に測量用の GNSS アンテナを設置し、参照用の地上局として ublox m8t により GPS と BeiDou の信号を 5Hz で受信した (図 1)。



図 1 停車中のルーフ部に設置した，参照用の GNSS 地上局

森漁港の西方の洋上で、「いさな」から GNSS-R 高度計を搭載したドローン（図 2 左）を離発着させ、高度 10～30m 程度で 6～7 分間ホバリングさせる観測を、潮時の異なる 9:30, 11:40, 12:25, 15:35, 16:30 の合計 5 回行った。計測時には、参照用に GNSS 受信機を入れた浮体と、波高計測用のブイも放流した（図 2 右）。上向きと下向きの各々の受信機の設定は、地上局と同じである。観測地点は、陸上の参照局からの基線長が長くなり過ぎないように 3～8km 程度とした。なお、船上でドローンを離発着させるためのテスト飛行は 7 月 26 日に行った。

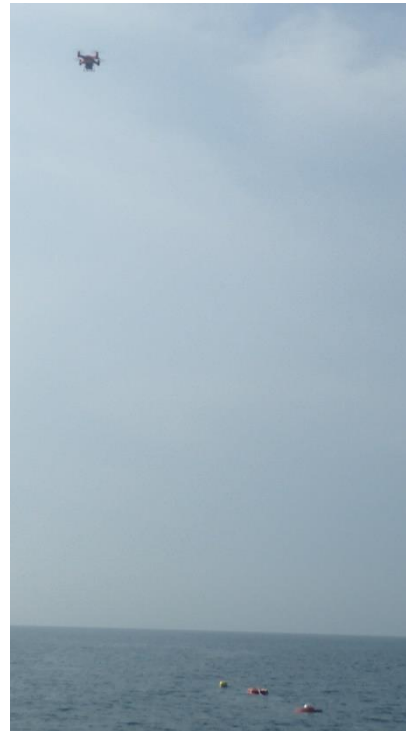


図 2 GNSS-R ドローン高度計(左)と，観測時の参照用ブイ群(右)

### 3. 研究成果

上向きと下向きのアンテナで受信した同じ衛星の信号は、直達波と反射波の経路差による遅延と、2台の受信機のクロック差に起因する時刻遅延の影響を受ける。これらの遅延要因は、どのGNSS衛星にも共通しているため、複数の衛星データを用いた最小二乗法によって求めることができる (Ichikawa et al., 2019)。最小二乗法の性質上、使用できる衛星の個数が多いほど推定精度が向上すると期待されるが、障害物などがない洋上での観測のためドローンに搭載された2台のGNSS受信機では常時8台以上のGNSS衛星信号を捕捉していたため、海面とドローン間の距離を安定して計算することができた。

一方、海面の高度を求めるには、ドローン自身の高度を別途求める必要がある。ドローンの高度は、ドローンで受信したGNSS直達信号を、地上で固定された参照局を参照することで精密測位によって求めることが可能である。ところが、参照用地上局を駆動するバッテリーの駆動時間

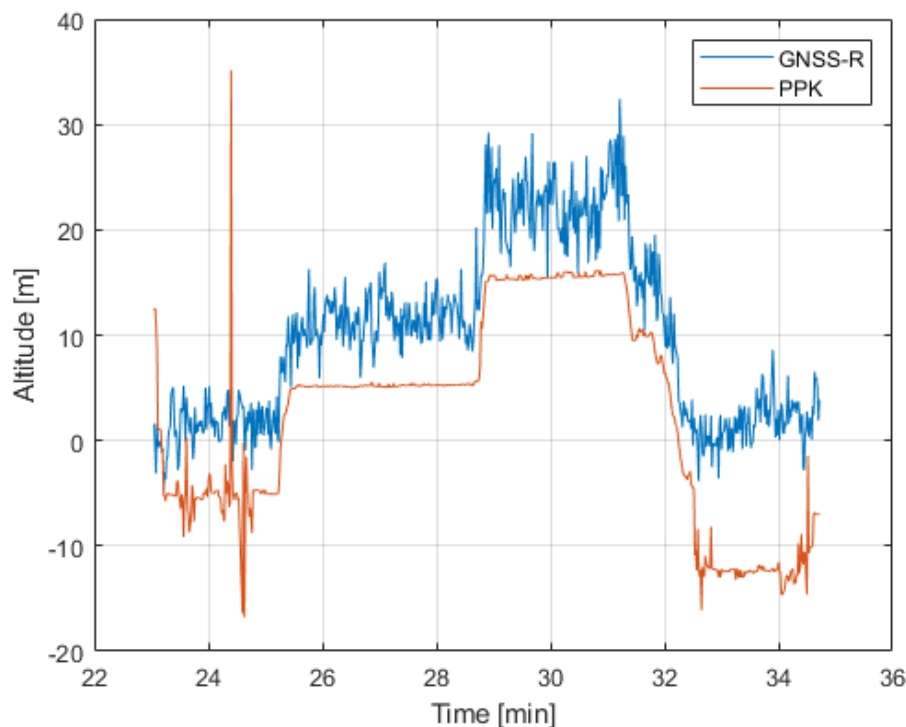


図3 GNSS-R高度計で推定した海面とドローン間の距離（青線）と、精密測位で求めた参照局アンテナからの高度（赤線）。9:30の観測の場合。

が想定よりも短かったため、5回のドローン計測のうちはじめの3回しか有意なデータを得ることができなかった。

ドローンの高度の精密測位結果と、海面からドローンまでの距離を求めることができた3回の観測では、ドローンの高度変化にともなって両者が連動して変化しており、高度にかかわらず6m程度の差が保たれていることが確認できた(図3)。ただし、前者の精密測位結果(赤線)は、ドローンの高度が10mと20mでホバリングしている際には安定しているものの、低高度では非現実的な短周期変動が含まれていて精度が低い。これは、船体など高所からのGNSS反射波が上向きアンテナに到達して、マルチパス誤差となっている可能性が高い。一方、GNSS-R高度計で観測した海面からの距離(青線)には、顕著な短周期変動が確認できる。この短周期成分は、ホバリング高度が20mの方が10mの場合よりも大きい。典型的な周期はともに10~20秒程度であり、うねりによって海面が傾斜して反射点が幾何学的に移動したために生じていることが示唆される。

青線と赤線の差は、参照用地上局のアンテナと海面までの距離を示していると考えられる。上空10m以上でホバリングしている状況に限定して時間平均を求めると、9:30の観測では6.3m、11:40では3.2m、12:25では5.1mであった。この日は正午ごろが最低潮位となるため潮位は9:30よりも減少し青線と赤線の差は0.5mほど増加する傾向になるはずだが、今回得られた結果とは一致していなかったため、海面高度の決定精度に定量的な問題がまだ残っていると考えられる。

#### 4. 今後の問題点

今回のGNSS-R高度計の精度は、精密測位によるドローン高度の決定精度と、GNSS-R手法による海面とドローン間の距離の決定精度の両方が関与する。

後者の決定精度は、顕著な短周期変動である波浪の影響を軽減できるかが鍵となる。一般にGNSS-Rでは、仰角が低いGNSS衛星ほど波浪の影響を大きく受けるので、現在8個以上の全衛星を解析に使用している

が、仰角の高い GNSS 衛星に限定して解析することで精度が向上することが期待できる。

一方、前者の精度は参照用地上局からの基線長に依存するが、今回の 3 回の計測では水平距離で 3km から 8km まで変化しているため、この影響を受けている可能性がある。今後の対応として、GNSS 直達波の受信機を 2 周波対応の高精度のものに変更することで、精密測位での基線長の影響を軽減することができると期待される。これは次年度以降、ドローンに取り付けた受信機を改造して実験する予定である。

## 5. 成果発表

次年度の海洋学会等で発表予定