

1. 研究目的

波浪，潮汐，地衡流平衡，熱膨張など様々な要因で変化する海面高は海洋物理学における重要な物理量の一つであり，沿岸の潮位計などによって古くから計測が行われている。しかし，絶対的な高さの基準のない洋上では人工衛星海面高度計しか計測手段が無かったため，観測海域や時刻が限定されてしまう。そこで，Global Navigation Satellite System (GNSS) 受信機をドローンに搭載して，任意の場所と時刻で海面高度を計測する試みを行っている。

琵琶湖では精度数 cm で水面高の観測に成功しているが (Ichikawa *et al.*, 2019)，波浪が存在する海洋では海面での電波の反射条件が悪くなるため，一般に精度が低下すると考えられる。そこで昨年度から，観測船「いさな」を用いて，洋上でのドローン高度計の観測実験を行っている。昨年度の計測結果では，洋上でもドローン高度計による海面高度の計測が可能であることを確認したが，精度の面でまだ問題があることが判明していた。そこで本年度は，より高精度の計測が可能ないように，GNSS のアンテナと受信機を二周波受信できるものに変更して実験した。

2. 研究内容

新型コロナウイルスによる行動制限のため今年度の観測日程の調整は非常に困難であったが，2020年11月4日と5日に「いさな」を用いて実施した。昨年度と同様に，愛媛県伊予市森漁港の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，参照用地上局として ublox f9p チップを採用した用いたロガーを用いて 4 Hz で GPS と Beidou 衛星の信号を受信した。昨年は L1 周波数のみが受信できる ublox m8t チップを用いていたが，今年度用いた f9p では L1 と L2 の二周波が受信でき



図 1 停車中のルーフ部分に設置した、参照用の GNSS 地上局
(左)。昨年度は夏季のため、ルーフの上に冷却材を設置した
(右)。

るため、より高精度の測位が可能となった。なお昨年度は地上局のモバイルバッテリーの駆動時間が十分でなかったため、大型のものに変更した。また、昨年度は夏季に実施したためルーフの上に冷却材を入れたクーラーボックスを設置してアンテナを設置したが、今年度はルーフに直接アンテナを設置した。森漁港では、水位変化の参照用の海底圧力計も設置した。

森漁港の西北西約 10km の地点 (33.7728° N, 132.561° E) で、両日にわたって観測実験を行った。ドローンには、直達波を受信する上向きの GNSS アンテナと、海面からの反射波を受信する下向きの GNSS アンテナが取り付けられていて、今年度は各々が ublox f9p チップ搭載のロガーに接続させている。11 月 4 日は 13 時過ぎに出港して 14:04~14:15 と 15:48~15:56 の 2 回のフライト、11 月 5 日は 8 時に出港して 8:41~8:49 と 9:25~9:34 の 2 回の合計 4 回のフライトを行った。各フライトでは、海上 5m, 10m, 15m, 20m のそれぞれでおよそ 1 分程度ドローンをホバリングさせた後、船上に着地させて回収した。

このうち、11 月 4 日の 2 回目のフライトでは GNSS のロガーが不調のため記録が取れていなかった。また、11 月 5 日の 2 回目のフライトではコントローラからの信号が途中で消失したため海面着水した。観測データは無事に回収できたものの、ロガー等が水没したために、ここで観測

中止とした。

なお、両日とも参照用に波浪計測ブイと海面高度計測ブイを放流させたが、海面高度ブイはロガーの故障のため観測データが記録されていなかった。波浪計測ブイの計測からは、両日とも有義波高が 0.3m 程度と穏やかな海況であったことが分かった。

3. 研究成果

まず、今年度の主な変更点である GNSS 受信機の変更について考察する。今年度のドローン高度計では、ほぼ常時 8 個以上の GNSS 衛星が受信されており、ほとんどの時刻で 12 個の衛星が捕捉できていた (図 2)。これらの個数は、昨年度よりも 2 割程度多く、受信機の変更の効果であると考えられる。

なお、ここで示された GNSS 衛星の個数は、海面からの反射波として受信された GNSS 衛星の個数で決まっており、GNSS 衛星から直接受信する直達波の場合は常時 20 個以上の GNSS 衛星が受信できていた。受信した衛星個数が 0.25 秒ごとに変動しているのは、波浪によって局所的

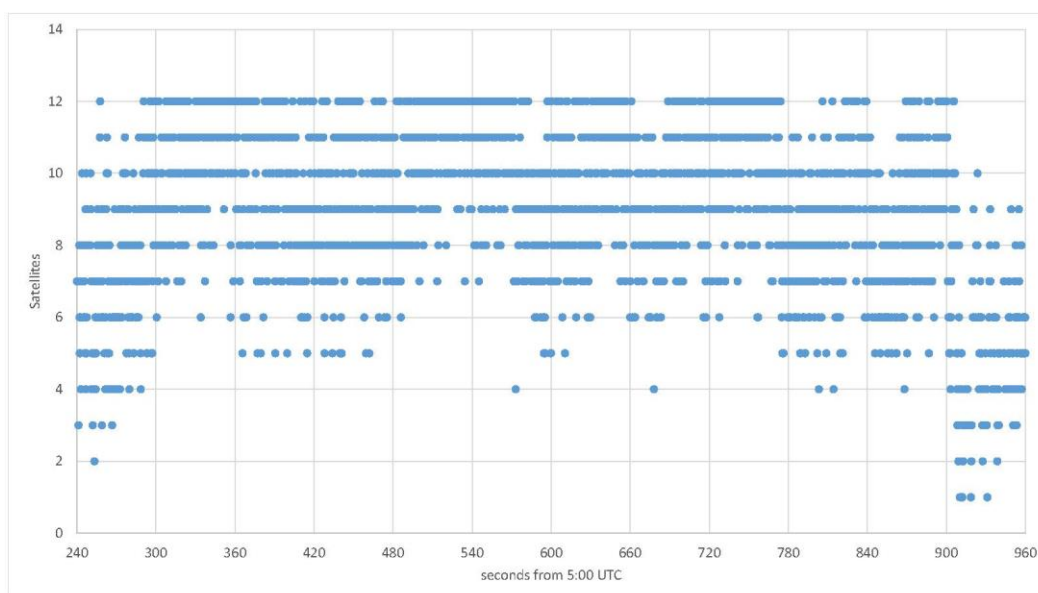


図 2 ドローン高度計で取得した GNSS 衛星個数の時系列の例。11 月 4 日の 1 回目のフライトの結果。

な海面傾斜が乱数的に変動するために、仰角の低い衛星からの反射信号がアンテナに到達しなくなる海面傾斜状態が瞬間的に生じたためだと考えられる。

なお、車のルーフ部分に設置した地上局でも、今年度は衛星個数の改善が見られたうえに、測位の安定性が大幅に向上していた。これは、アンテナとルーフの距離が近くなったため（図1）、大面積の金属板である天板で反射した電波をアンテナが受信してしまうマルチパスエラーの割合が低下したためではないかと考えられる。参照局の測位精度はドローン高度計の精度に大きな影響を与えるため、冷却よりもマルチパスを回避する設計を優先させる必要があることが判明した。

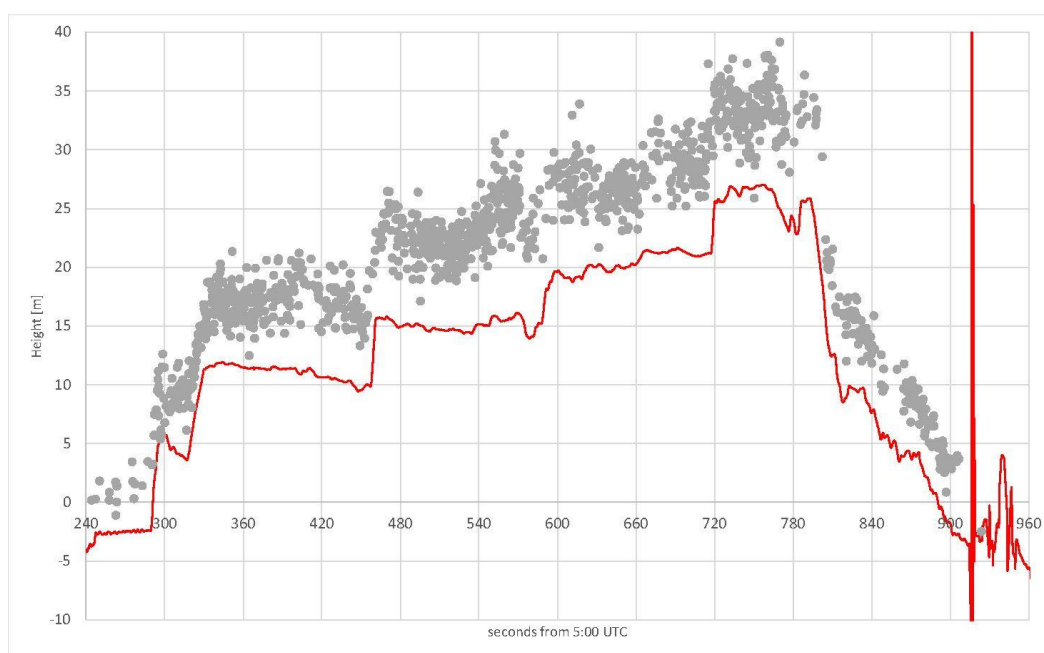


図3 11月4日の1回目のフライトの高度の推定結果。ドローン自身の高度変化（赤線）と、ドローンと海面間の距離の推定値（灰点）を時系列で表示した。

計測した高度の例として、11月4日の1回目のフライトの結果を図3に示す。赤線はドローンの高度変化を示しており、船上（-3m）から上昇させて10m、15m、20m、25mで1分程度ずつホバリングして着船させて

いる。今年度は二周波の PPP 測位を用いているため、この位置決定精度は高く、ホバリング中のドローンの高度が 10 秒程度毎に 0.2m ほどの揺らぎを示しているのが確認できる。

一方、海面からの反射波を用いて推定したドローンと海面間の距離（灰色の点）は、ドローン自身の高度変化に追従して変化しているが、5m 程度の幅があることがわかる。この変動幅は昨年度までの結果では 10m 程度であったため、GNSS の受信精度の向上によって縮小しているが、依然として大きな偏差である。これらの偏差は、波浪によって海面が局所的に傾斜するために、海面で反射してアンテナに到達する点が幾何学的な反射点と一致せず、海面までの距離を想定より長く推定したために生じたと考えられる。図 2 でも説明したように 4 Hz のエポック毎に波浪の影響が異なるため、推定値にばらつきが出る。今年度は GNSS の受信個数が増えたことにより極端な偏差の発生が抑制されるために、変動幅が縮小したものと考えられる。

4. 今後の問題点

今年度の結果では、二周波 GNSS 受信機を用いることでドローンの位置決定精度は向上するが、反射波を用いたドローンと海面間の距離測定精度の向上は限定的であった。受信する GNSS 衛星の個数がエポック毎に変動していることから、短時間で乱数的に変化する局所的な海面傾斜の影響が反映されていると考えられ、これらを分離する特別な解析手法が別途必要であることが確認された。

なお、海面までの距離は、光学測距儀を用いても計測することが可能である。航走する船舶のように自身の周りに造波してしまうプラットフォームでは光学測距儀は不適だが、ドローンのように造波しないプラットフォームであれば利用が可能であると考えられるため、次年度以降は併用して検証する予定である。

5. 成果発表

次年度の海洋学会等で発表予定。