

## 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。一方，少なくとも日本では **Global Navigation Satellite System (GNSS)** の基準局網が整備されており，高精度な衛星測位が可能となっている。そこで，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。

GNSS で海面高を計測するには，GNSS アンテナの精密測位とともに，アンテナと海面間の距離の測定が必要である。これまで後者の測定には，GNSS 信号の海面反射波の遅延を用いた **GNSS-R** 手法を用いてきたが，現場海域では瞬時観測（エポック）に数メートル～十数メートルの推定誤差が含まれることが分かっている。幸い，これらの誤差は波浪周期程度で変動しているため，それよりも長い時間平均を施せば軽減することができるが，誤差や平均時間の波浪状態への依存性などが予想される。そこで今回は，アンテナと海面間の距離を，GNSS-R と異なる手法を用いて計測することを試みた。

## 2. 研究内容

GNSS-R 以外の海面とアンテナ間の距離測定手法として，今回はドローン底部に取り付けた赤外線測距儀(GARMIN 社製 Lidar Lite v3)を用いる。海面に対して直上から直角に近い入射角で計測するため，真上のドローンに反射波が到達するまでの時間を計測して海面からセンサーまでの距離が計測できる。もし波浪などによって照射点付近に海面勾配が存在する場合，反射波は直上に向かわないためセンサーに到達せず，欠

測となる。つまり、波浪による誤差が自動的に欠測値として処理されるため、解析処理が容易となる。

さらに、「空中からの計測」ではなくなるが、ドローン等が水平方向に移動後に水上に着水すれば浮体として水上で GNSS 測位を行うことになり、アンテナと海面までの距離を固定させて計測することが可能となる。この GNSS 浮体についても観測実験を行った。

今年度も新型コロナウイルスによる行動制限のため観測日程の調整は困難であったが、2021年10月11日と12日に「いさな」を用いて実施した。これまでと同様に、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 社 F9P チップおよび Enabler 社製 GEM-3 を用いて受信した。ともに二周波の受信ができるため測位精度は高く、2km 程度離れた国土地理院の電子基準局「伊予」(950434)を参照して静止測位を行ったところ、水平位置のばらつきは GEM-3 で 2mm、F9P で 1cm 程度、鉛直位置は GEM-3 で 2mm、F9P で 5mm 程度であった。GEM-3 に比べると F9P の測位精度がやや悪かったが、この差異については、記録する衛星種やサンプリングレートの設定などの依存性について今後検討していく予定である。なお、森漁港では、水位変化の参照用の海底圧力計も設置した。漁港における干潮と満潮の潮位差は 2.6m 程度であった。

今年度は、森漁港の北西約 4km の地点付近 (33.76° N, 132.64° E) で、両日にわたって観測実験を行った。今回の観測で使用したプラットフォームは、三種類の防水ドローンと、GNSS 浮体を曳航するためのラジコンボート (図 1) である。このうち、ドローンの搭載荷重 (ペイロード) の大きな SprashDrone3+ (SP3+) と SprashDrone4 (SP4) では、GNSS-R と Lidar 計測を行い、ペイロードの小さい小型のドローン

(Spray+) では浮体計測のみを行った。GNSS 浮体用のセンサーは、球形と円筒形の二種類を用意した (図 2 左)。円筒形の防水容器は、小型の Spray+ ドローンの上部に設置して海面から一定距離を保ちつつ GNSS 測位を行う。一方、球形容器は直接海上に浮かべ、アンテナ底部が海中に没する程度の短い距離を保ちながら GNSS 測位を行う。



図 1 今回使用した観測プラットフォーム。Swellpro 社製防水ドローン：SprashDrone4 (左上)，SprashDrone 3+ (右下)，Spray+ (右上)。ラジコンボート (左下)。



図 2 球形と円筒形の GNSS 浮体用センサー (左)。球形浮体はボートに曳航させ (右)，円筒形は Spray+ドローン上端に設置する。

計測は、10月11日にSD3+を2回、Spray+を1回、ラジコンボート曳航による球形GNSS浮体を1回行った。さらに、船体から離れた場所に球形GNSS浮体を投擲して計測する実験も行った。一方、10月12日には、SD3+を1回、SD4を1回、球形GNSS浮体を3回計測した。SD3+とSD4では、約15m上空でドローンをおよそ2～3分間ホバリン

グさせて計測を行った。なお、SD4では機器の故障により Lidar 観測データは得られなかった。

### 3. 研究成果

Lidar 観測の例として、ほぼ満潮時の 10 月 11 日正午過ぎに SD3+ を用いて観測した例を図 3 に示す。図中の青点が Lidar で計測された海面までの距離、灰色の丸が kinematic GNSS でアンテナの楕円体高から 35.1m を除いた結果で、そのうち高精度の Fix 解が得られたものを赤丸で示している。12:06 から 12:10 ごろに高度 14m 付近でホバリングした様子が、Lidar と GNSS に共通して観測されている。特に、上昇途中に高度 12m 付近で数秒間行ったホバリングにも追従できており、波浪周期程度の短時間の変化も表現できることがわかる。ドローン設置時に GNSS アンテナと Lidar センサー間の距離がおよそ 0.5m あるので、これは海面の楕円体高が 34.6m であることに相当する。

ただし、ホバリング途中の 12:07:45 付近以降に GNSS の高度が 1m 近く上昇しており、系統的なバイアスとなっている。後半に GNSS 解の Fix 率が低いため、これは GNSS の測位誤差が影響しているものと考えられる。

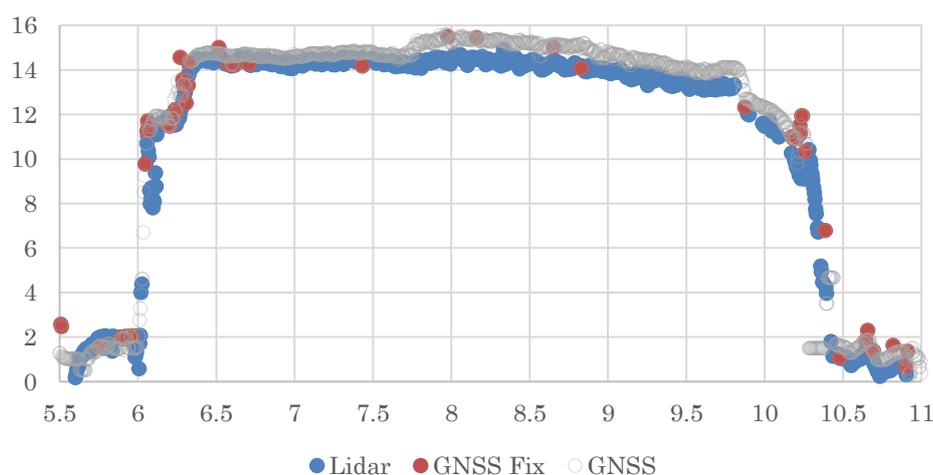


図 3 10 月 11 日正午からの経過分数と、Lidar および GNSS による距離の推定結果。

次に、GNSS 浮体による測位結果を検討する。全般的に、円筒形浮体よりも球形浮体の方が安定して Fix 解が得られた。両者は同じホイップ型アンテナを用いているが、円筒形の方が相対的に海面より高い位置に設置されている（図 2 左）。このため、海面で反射されたマルチパスを拾いやすく、解が安定しにくかったと考えられる。

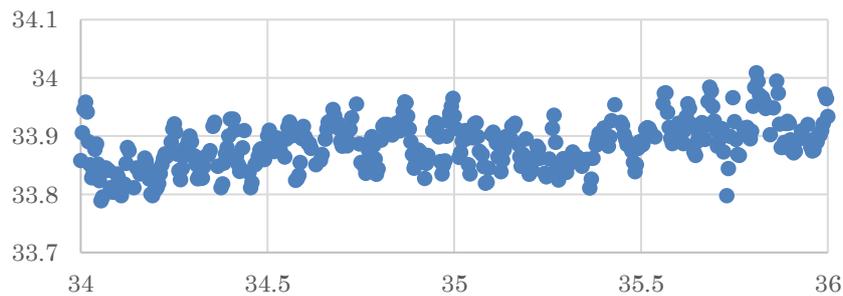


図 4 10 月 11 日 11 時からの経過分数と、球形 GNSS 浮体による楕円体高の測定結果。

図 4 は、球形 GNSS 浮体で測位したアンテナ楕円体高の時間変化である。およそ 33.9m 付近の周辺に 3~10 秒程度の周期で 0.1m 程度の振幅の変動をしており、波浪を直接計測しているものと考えられる。アンテナ底部は水面下 0.05m 付近なので、海面高はおよそ 34m 程度と考えられる。なお、図 4 で右上がりの傾向として認識できる潮時変化を考えると、図 3 の 34.6m という結果と定性的には一致している。

#### 4. 今後の問題点

Lidar を用いた計測は、波浪による誤差を受けにくく、短時間の変化にも追従できるため有用である。ただし、GNSS 測位の推定精度が現行の計測では不十分なため、アンテナの S/N 比改良など改良が必要である。一方、球形 GNSS 浮体による水位計測は安定していた。浮体の運搬にのみドローンを用いて GNSS 測位は浮体が行う方式も有用かもしれない。

#### 5. 成果発表

次年度の海洋学会等で発表予定。