



RTK 測位による船体沈下量測定

Measurement of Dynamic Sinkage of Full-Scale Ship by RTK Positioning

2023/11/27

東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科

小森健史 久保信明



目次

- 研究背景と目的
- 導入
- 実験概要
- 実験方法
 - RTK測位による船体沈下量測定
 - IMUによるトリム変化の計測
- 実験条件
- 実験結果
 - 船体沈下量とトリム変化測定結果
- 考察
 - 沈下量推定値と測定値の比較
- まとめ



研究背景

- 航行中の船体沈下量は主に模型試験によって測定されている。
- 沈下量を見積もる推定式は複数存在するが、実船で計測した例は少ない。
- 衛星測位(GNSS)技術は誤差3cm以内で地球上の3次元位置を求められ、測量での利用が広がっている。

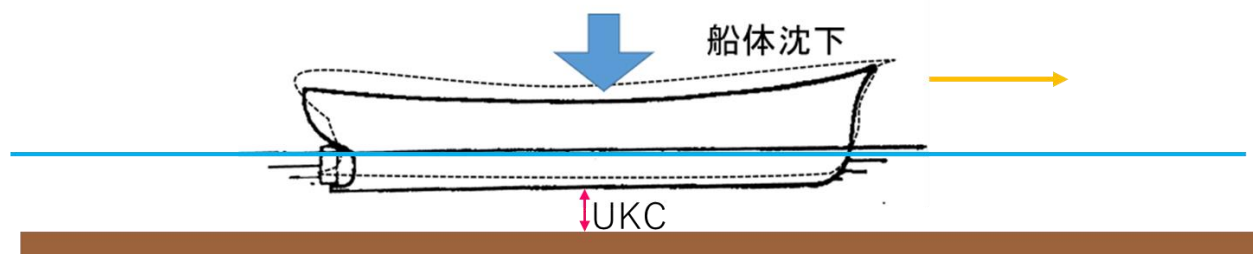


図:船体沈下



図:GNSSを用いた測量

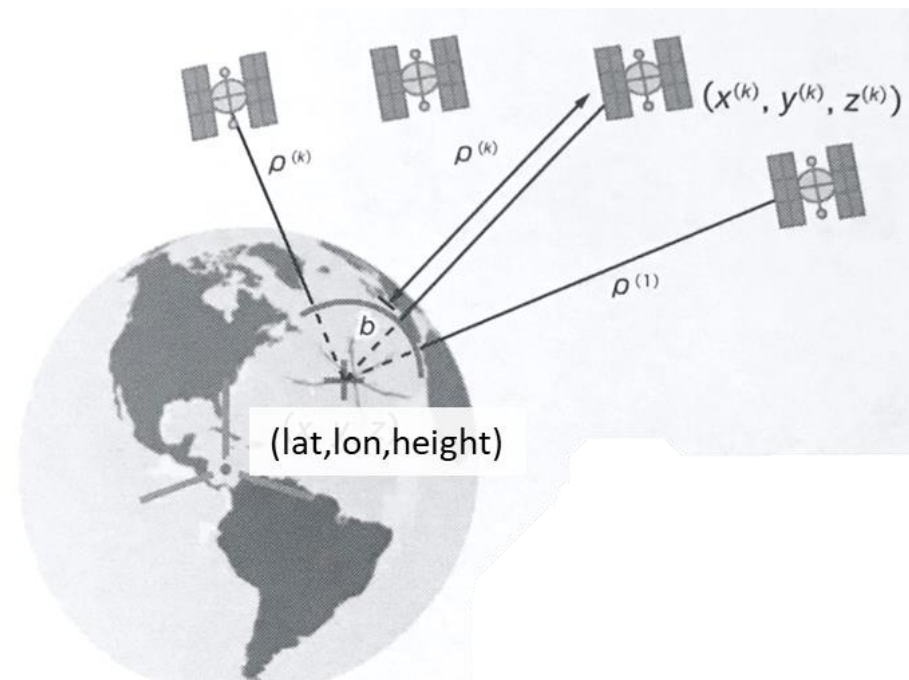
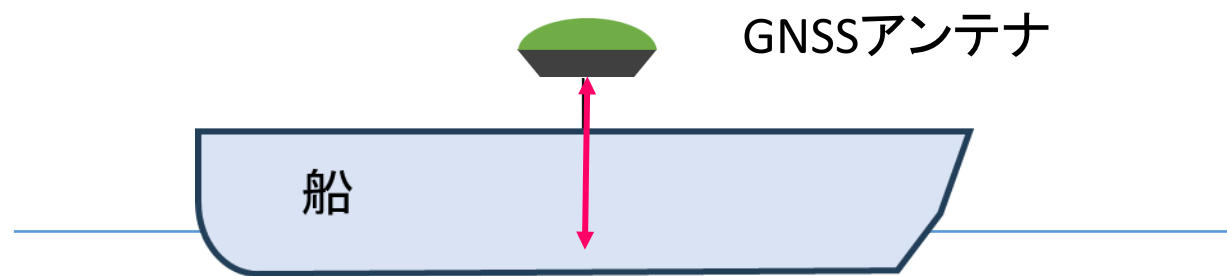
引用:[GNSS測量機器 | 三和航測株式会社 \(sanwakousoku.co.jp\)](http://sanwakousoku.co.jp)



目的

3

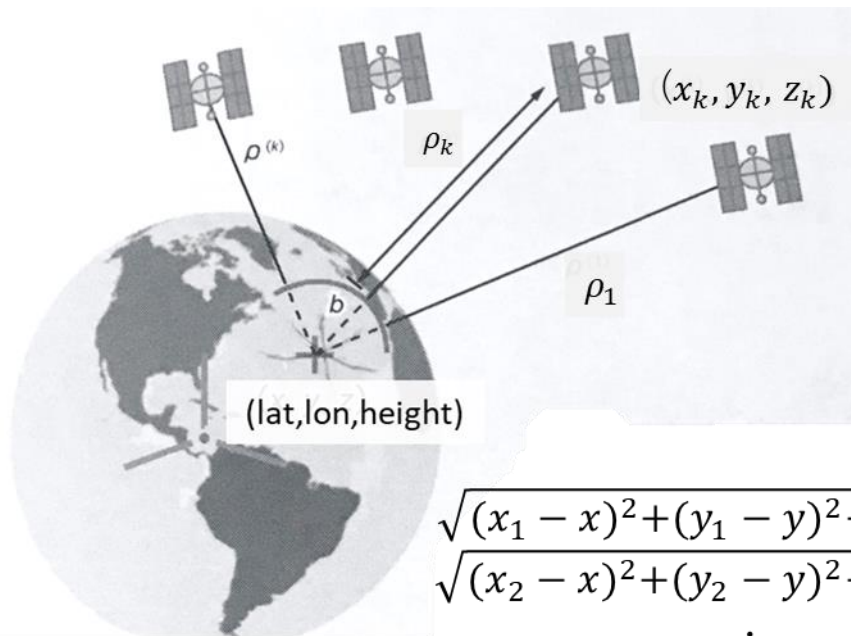
- 船上でGNSS測位を行って高度を測定することにより、実船の船体沈下量を連続的に計測する手法を提案。
 - 既存の式による推定値と比較することで、提案手法で計測した船体沈下量が信頼できるか判定。



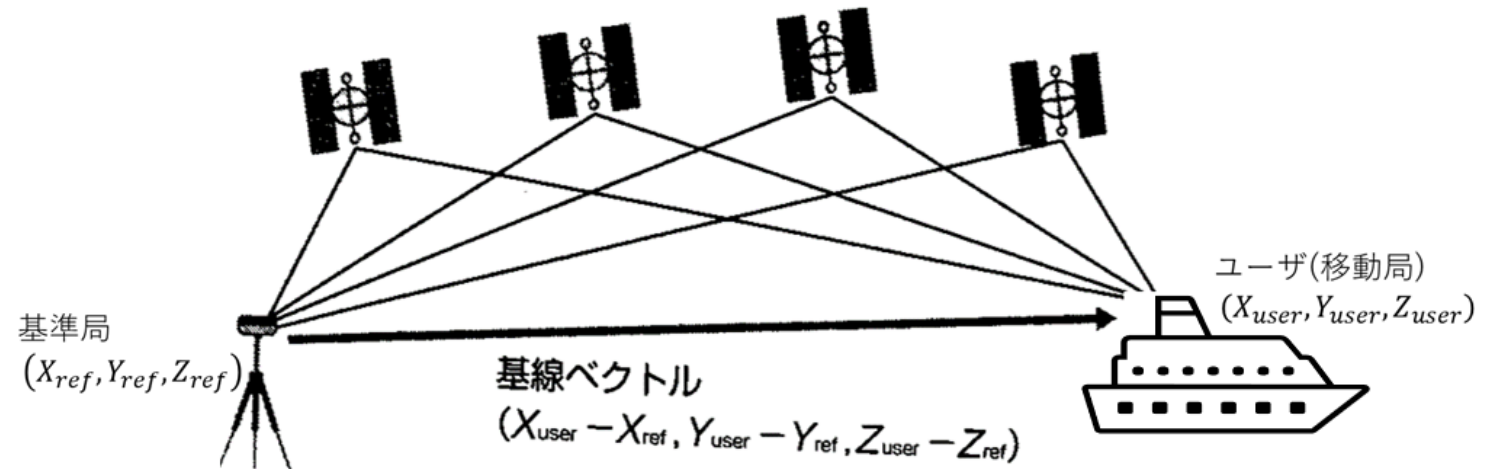


導入 GNSSとRTK測位

- Global Navigation Satellite Systemは測位衛星から電波を受信して、位置が分かっている衛星からの距離を使って位置を計算している。
- 本研究では誤差3 cm以内で3次元位置を求めることができる、RTK測位で位置を求める。



$$\begin{aligned}\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} &= \rho_1 \\ \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} &= \rho_2 \\ &\vdots\end{aligned}$$



導入 ジオイドと測地系

- ジオイドとは地球重力の等ポテンシャル面のことで、地球全体の平均海面に最もよく整合する。
- 地球全体が海に覆われていると仮定しても、その表面は凹凸(最大200 m弱の差)している。
- 測地系とは地球上の位置を表す基準で、地球の形を表面が滑らかな回転楕円体で近似し、これを基準に(緯度,経度,高度)を決める。

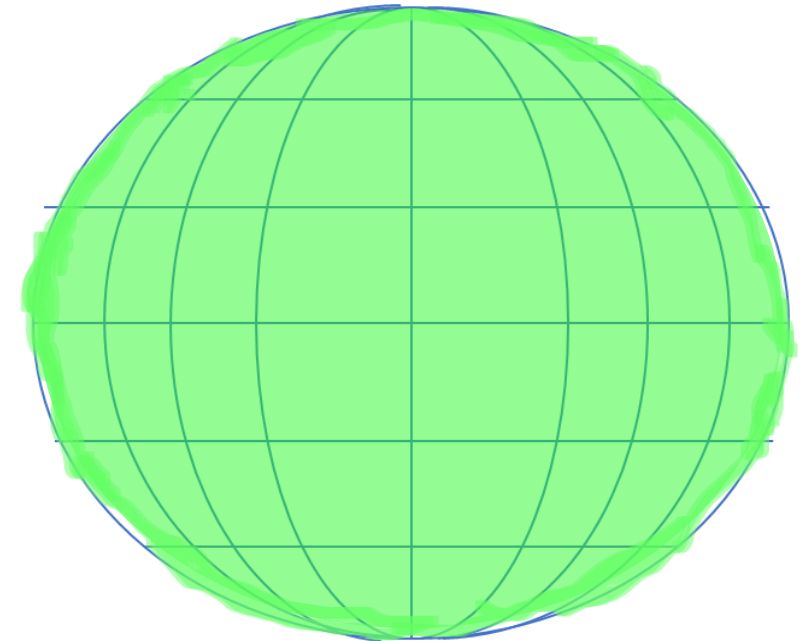
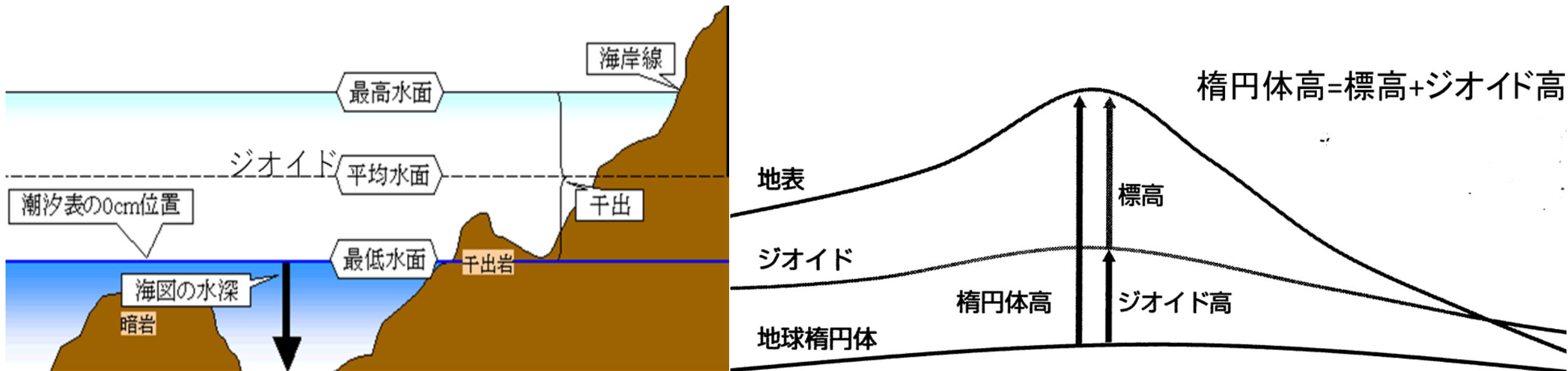


図:ジオイド(黄緑塗りつぶし)と
測地系準拠楕円体(青枠)



導入 高さの定義

- 楕円体高はGNSSが採用している測地系WGS84の準拠楕円体面からの高さ。
 - GNSS測位結果は(緯度、経度、楕円体高)で求まる。
- ジオイド高は楕円体面からジオイドまでの高さ。
- 日本の標高の基準(0m)は東京湾の平均海水面





実験概要

- 使用船舶は汐路丸。

表:汐路丸主要目

Gross Tonnage[ton]	L_{all} [m]	L_{pp} [m]	B_{mld}	d_{mld} [m]
775	60.7	54.0	11.1	3.50

表:汐路丸コンディション 2/7出港前

$draft_{mean}$ [m]	Displacement[ton]
3.44	1201



図:汐路丸IV世 引用:東京海洋大学パンフレット

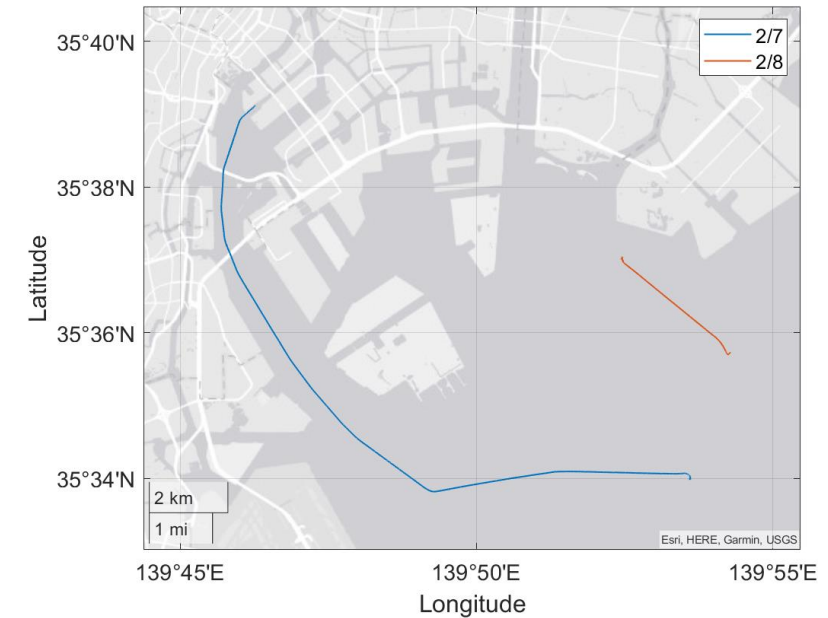


実験概要

- 水深が喫水の2倍以上の海域で実験を計2回行った。

表:船体沈下量測定実験

	Test1	Test2
場所	東京西航路 東京湾羽田・若洲沖	東京湾浦安沖
日時	2/7 09:35~11:00	2/8 15:35~16:10



実験時路丸航跡

実験方法 GNSSによる測定

- GNSSアンテナを汐路丸の甲板上に設置
- RTK測位を行い船体沈下量を測定
 - 基準局は海洋大越中島キャンパス実験棟屋上
- 受信機にはu-blox製 ZED-F9P受信機を用いた。

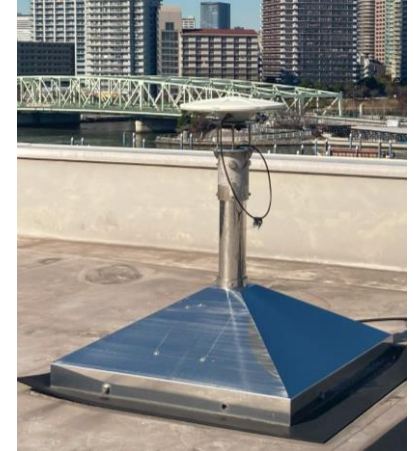


図:海洋大屋上基準局



図:GNSSアンテナ設置位置

船の図面は一般配置図より引用

図:船上のGNSSアンテナ
と記録用PC

実験方法 IMUによる測定

- IMUを船橋後方に設置し、船の姿勢(Trim変化)を計測。

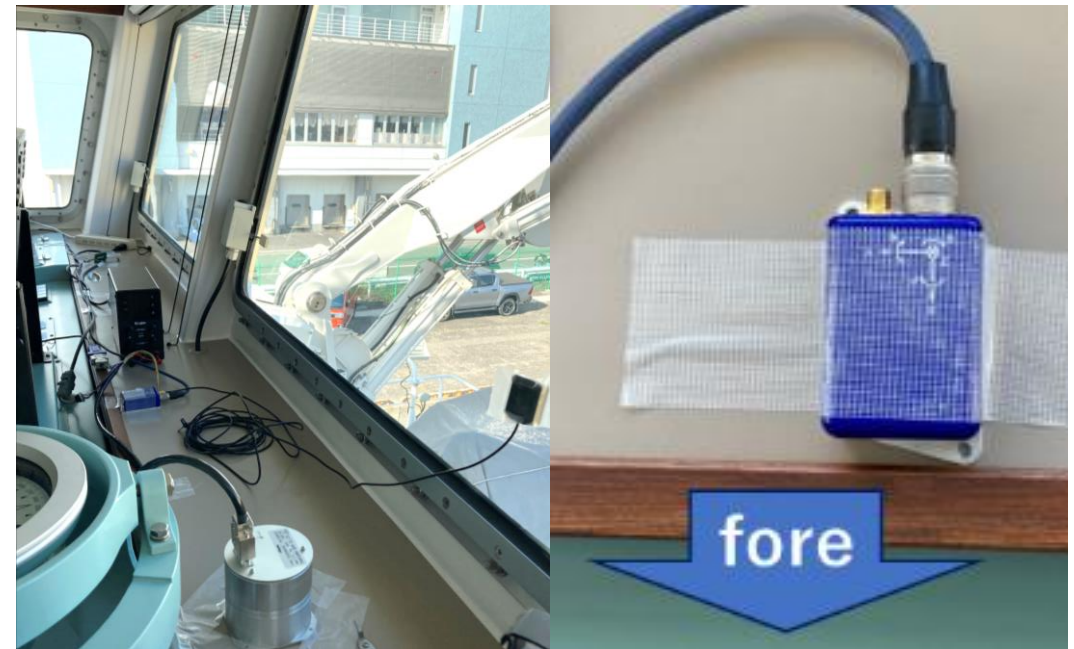


図:産業レベルIMU設置位置(●)
船の図面は一般配置図より引用

図:船橋後部に設置した産業レベルIMU

実験方法 船体沈下量の測定

- GNSSの測位結果である楕円体高度からジオイド高と潮位を引いてアンテナの水面上高さを求める。
- アンテナの水面上高さの変化から沈下量を測定。
- ジオイド高は国土地理院のジオイド高計算ソフトでの計算値を用いる。

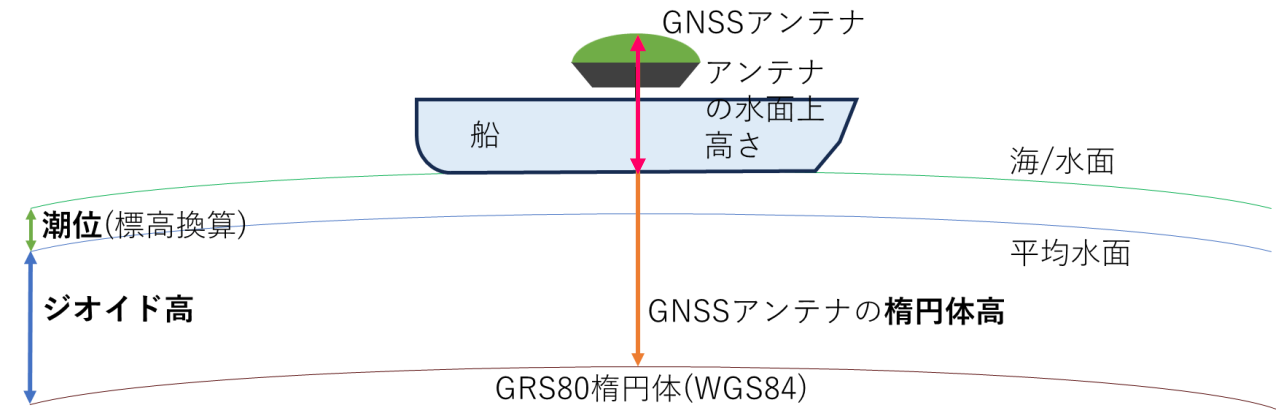


図:アンテナの水面上高さの計算

ジオイド高計算

トップページ ジオイド高について 操作方法 お問い合わせ

入力値

1点毎の計算 一括計算

座標値の入力方法 ☒ 数値入力 ☐ 地図上で選択

座標値の入力 地図上で確認

緯度 353437.32

経度 1395131.93

入力単位選択 ☒ 度分秒 ☐ 十進法単位

【緯度・経度の値の入力例(度分秒)】

緯度 36° 6' 13.5893" → 360613.5893
経度 140° 5' 16.2782" → 1400516.2782
ddd mm ss.s → dddmss.s

計算実行

計算結果

入力値

使用したパラメータ 「日本のジオイド2011」 Ver.2.2

緯度・経度 緯度 35°34'37.32" 経度 139°51'31.93"

出力値

ジオイド高 35.6384 m

印刷

実験方法 船体沈下量の測定

- ・ 潮汐のデータは気象庁の東京における潮汐(確定値)を利用。
- ・ 潮位を平均水面からの高さ(標高)に換算して使用。

毎時潮位 2023年2月 東京

[先月](#)

[翌月](#)

日	時刻																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	-4	10	21	29	32	30	26	23	23	26	31	38	46	50	48	39	24	5	-16	-38	-56	-62	-55	-37
2	-16	2	17	30	38	40	32	20	8	1	2	11	21	29	31	29	22	8	-17	-50	-81	-97	-95	-77
3	-51	-24	0	21	35	42	39	30	17	3	-4	-1	13	30	43	47	42	30	8	-23	-58	-87	-99	-92

満潮・干潮 2023年2月 東京

[先月](#)

[翌月](#)

日	満潮								干潮							
	時刻	潮位	時刻	潮位	時刻	潮位	時刻	潮位	時刻	潮位	時刻	潮位	時刻	潮位	時刻	潮位
1	4:07	32	13:15	50	*	*	*	*	7:30	22	20:56	-62	*	*	*	*
2	4:40	40	14:00	31	*	*	*	*	9:22	1	21:22	-99	*	*	*	*
3	5:14	42	14:57	47	*	*	*	*	10:12	-5	22:08	-99	*	*	*	*
4	5:27	57	15:00	65	*	*	*	*	10:28	2	22:50	00	*	*	*	*

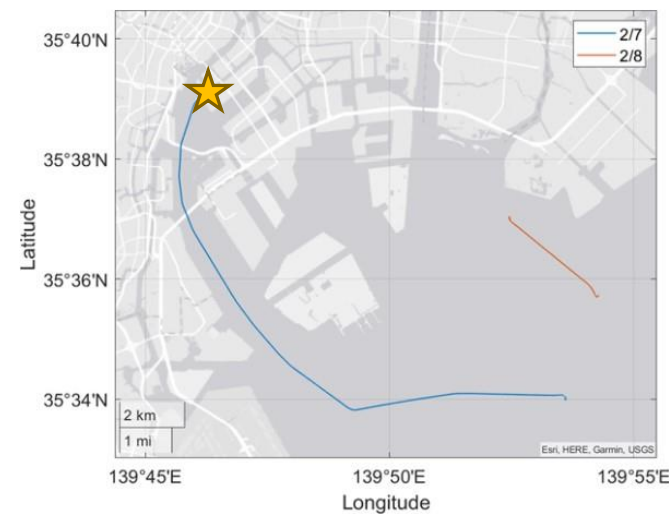


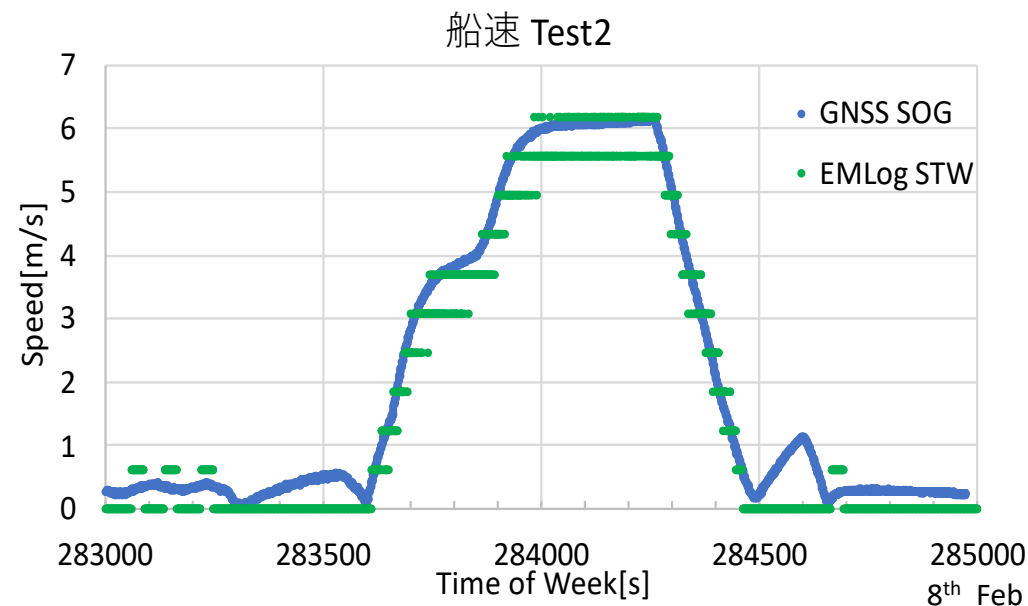
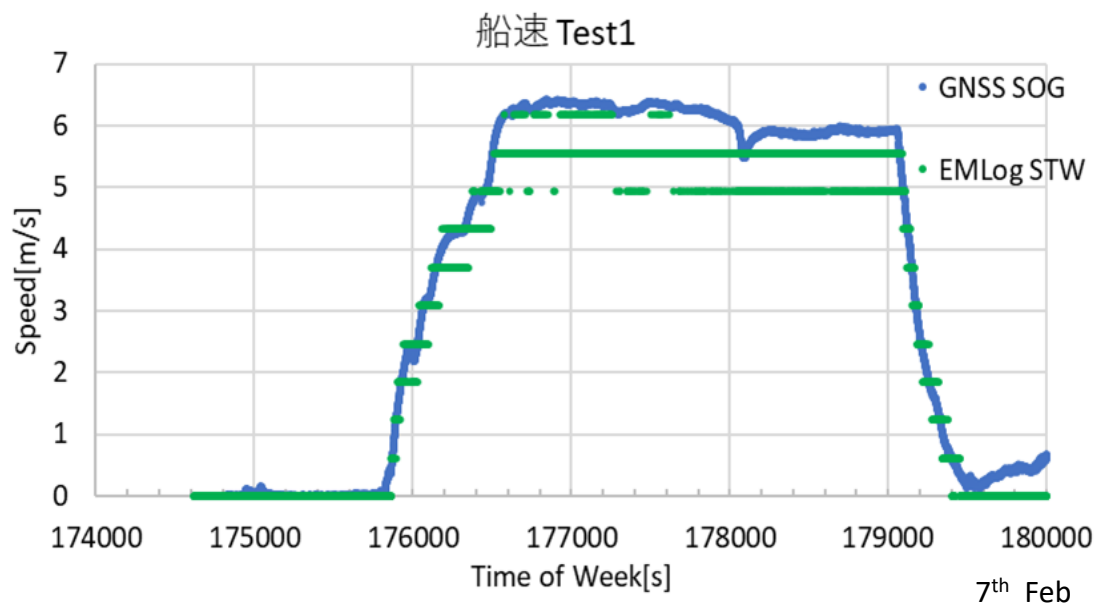
図:東京検潮所(地図中★の位置)

条件 船速

- 船速としてGNSSの対地速度(SOG)を用いる。
-水の流れるはないと仮定
- EMLogの航程から計算した対水速力(STW)は解像度が低い。
-STW瞬時値が記録できなかった。



図: 汐路丸搭載のEM Log



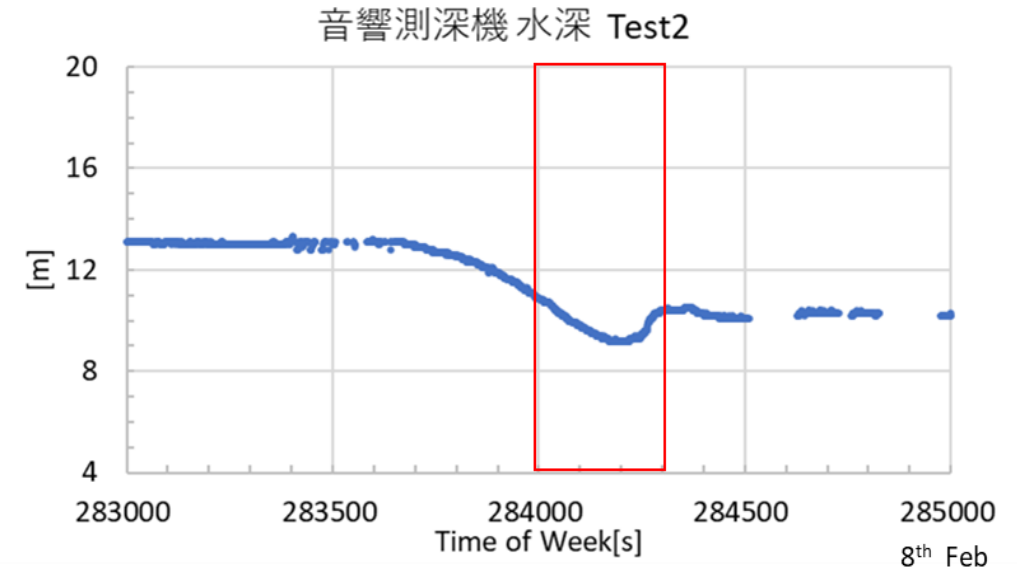
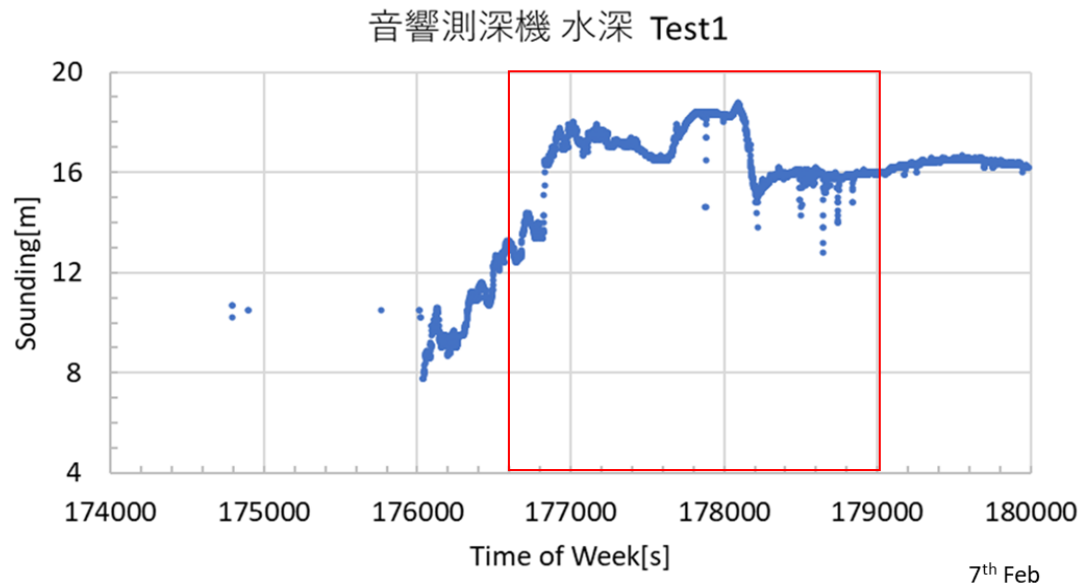


条件 水深

- 水深は汐路丸備え付けの音響測深機で計測。
- Test1の水深は8~18m。
 - 最大速力6.0~6.3m/sで航行しているときは12~18 m
- Test2の水深は 9~13 m。
 - 最大速力6 m/sで航行しているときは 9~10 m



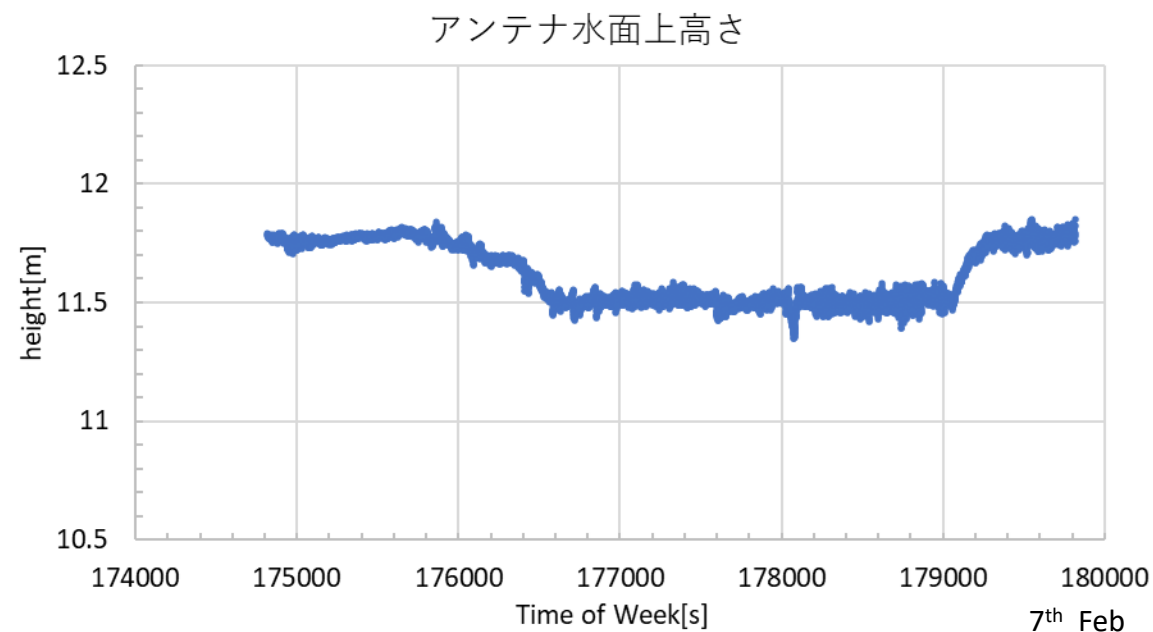
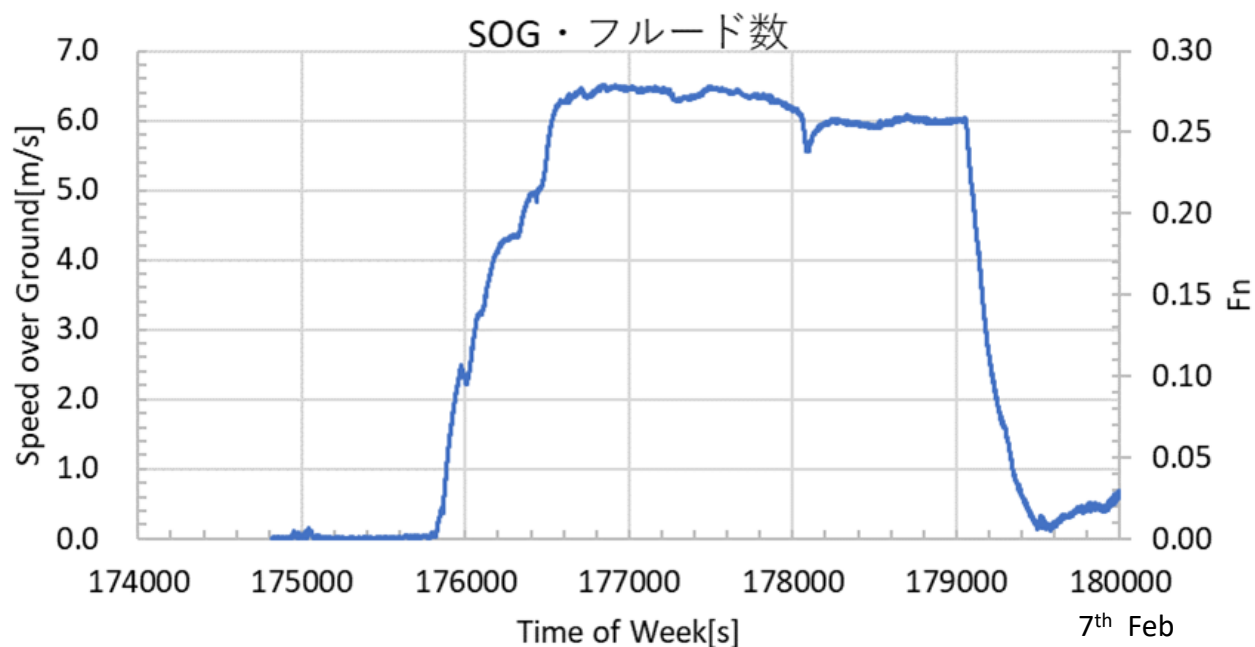
図: 汐路丸搭載の音響測深機



※Time of WeekとはGPS時刻で日曜日00:00:00(UTC)からの経過秒を表す。

結果 Test1 船体沈下量

- 船速が大きくなると、アンテナ水面上高さが減少している。
- アンテナの水面上高さが減少は船体沈下及びトリム変化によるものと考えられる。

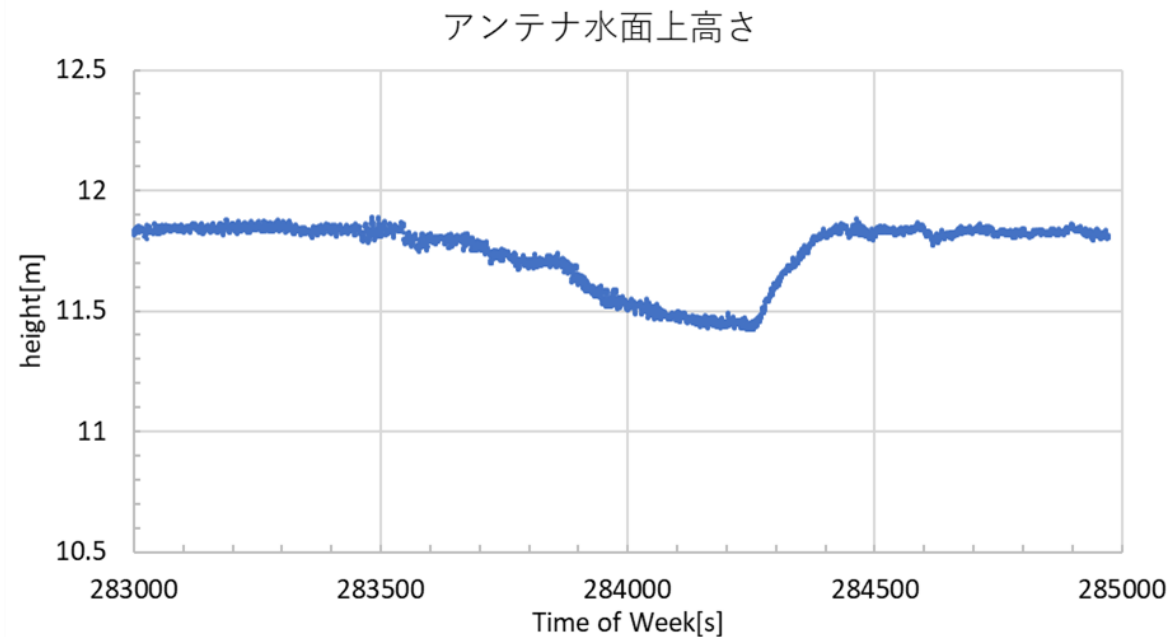
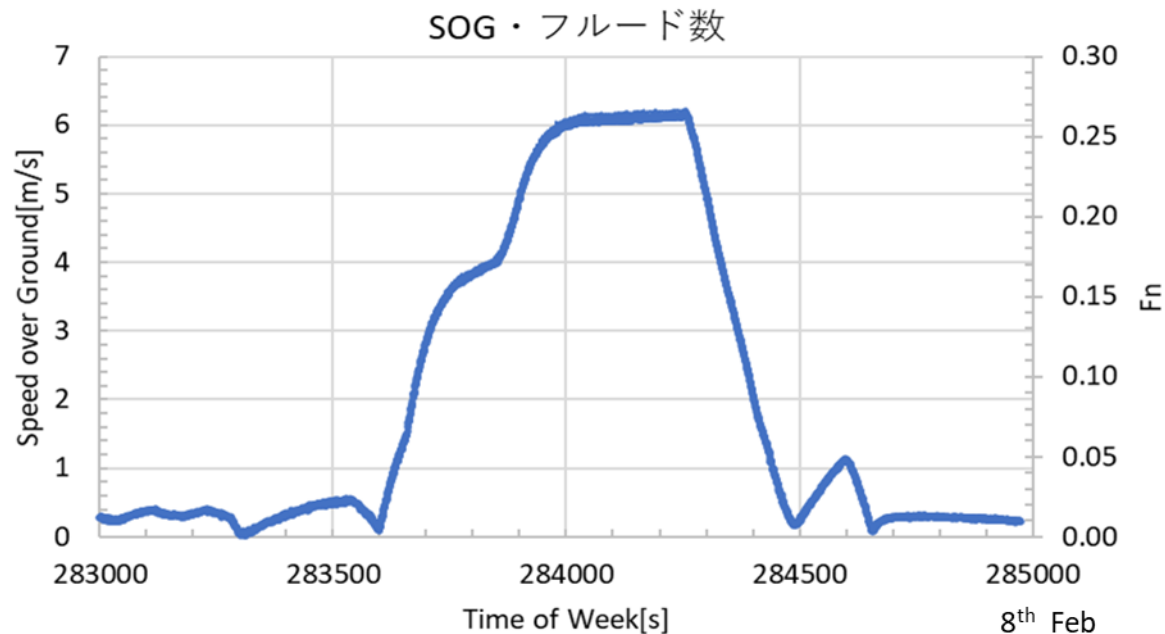


※ $F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$ は対水速力で計算すべきだが、今回はGNSS Velocity(対地速力)で計算。



結果 Test2 船体沈下量

- 船速が大きくなると、アンテナ水面上高さが減少している。
- 全速航行時の船体沈下量が約35~37 cmとTest1(約27cm)と比べて大きい。

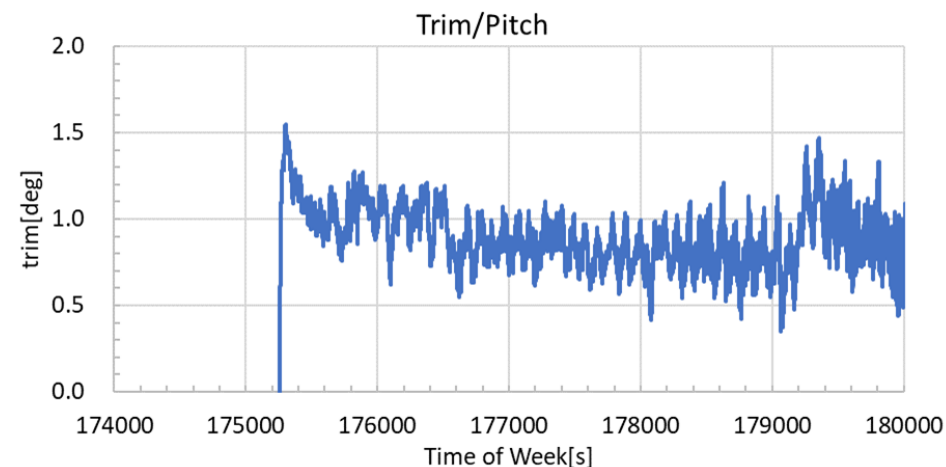
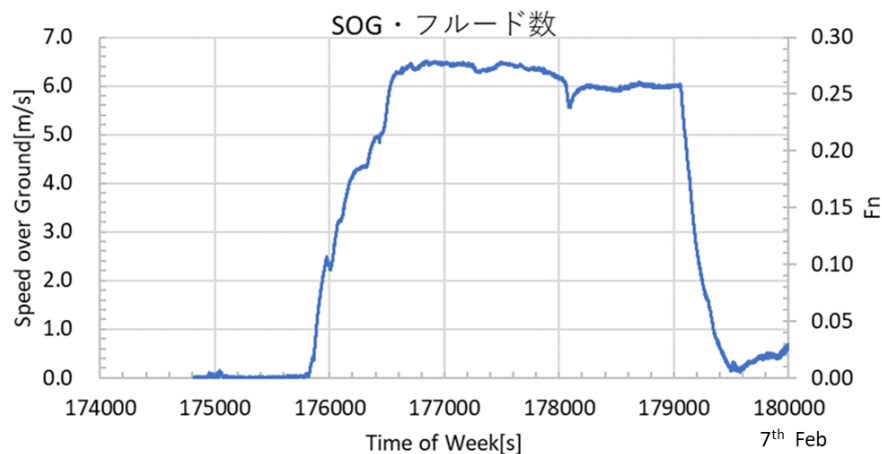




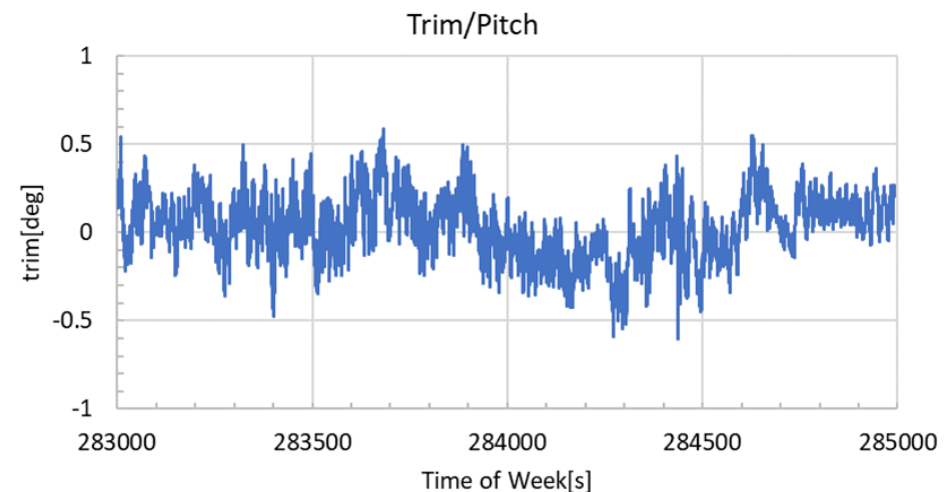
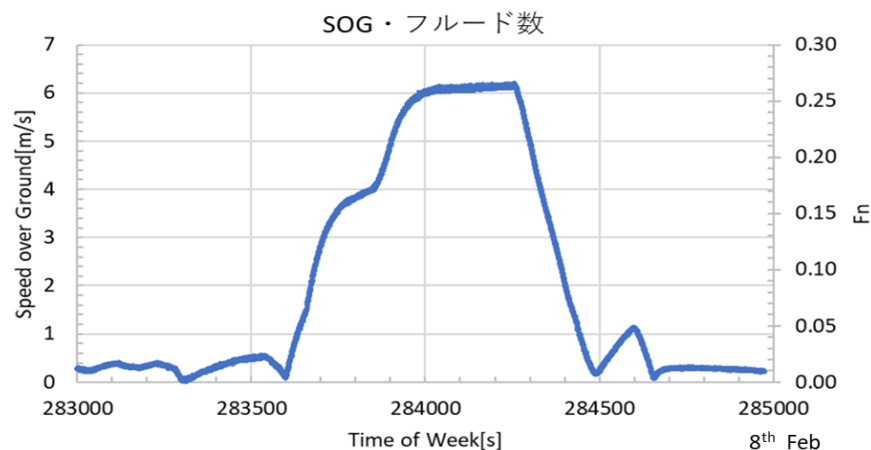
結果 Trim変化

- IMUで計測したトリム(船尾トリムが+)。
- $0.1 \sim 0.3^\circ$ 船首トリム側へ変化している。

Test1



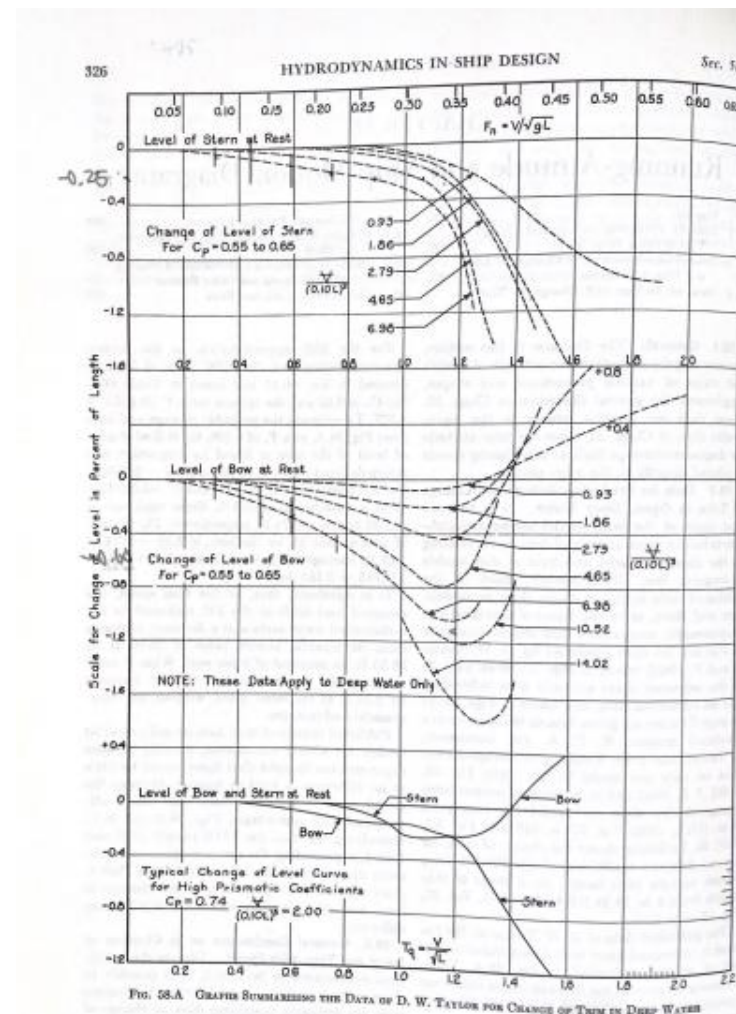
Test2



考察 推定値との比較

船体沈下量推定1 深水域での推定値

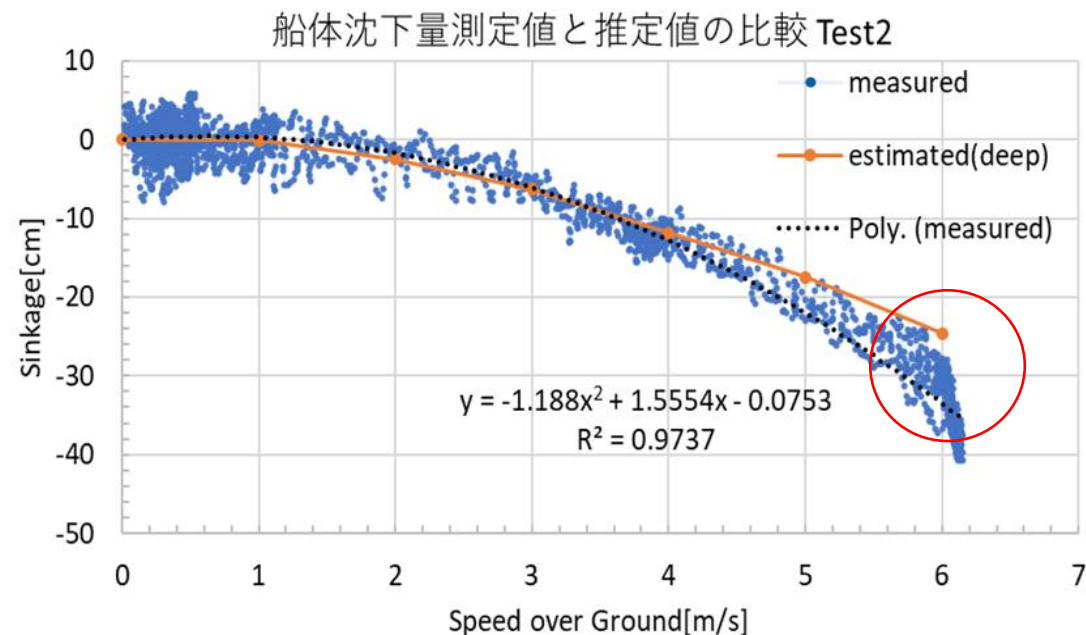
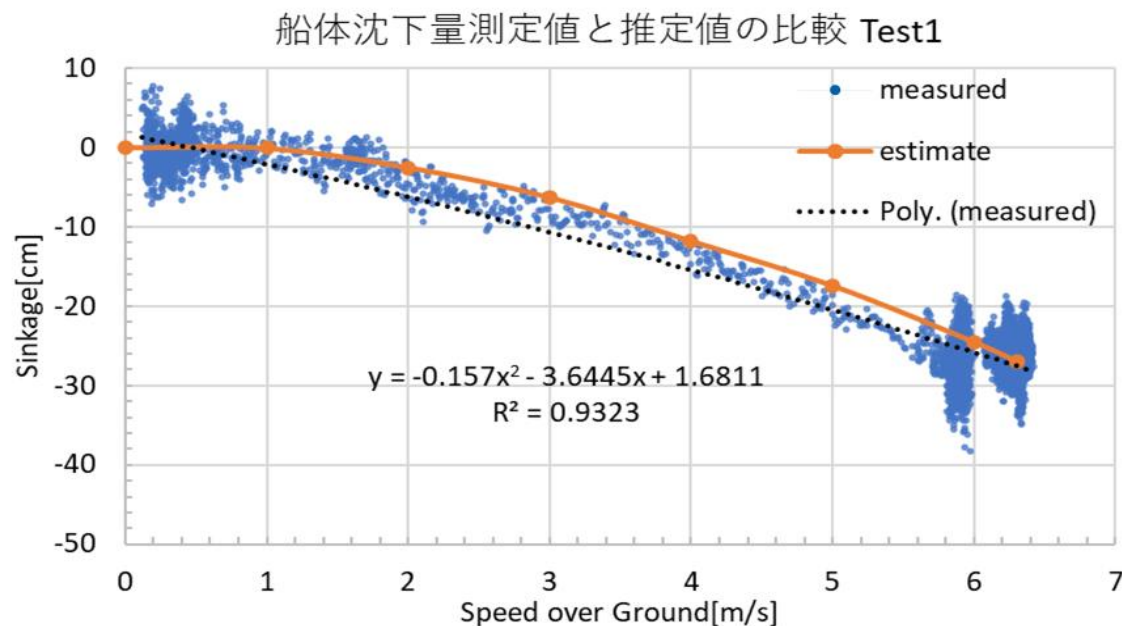
- 深水域での船体沈下推定量は
"HYDRODYNAMICS IN SHIP
DESIGN"に記載されている "Graphs
for Data of D.W.Taylor for Change
of Trim" から読み取った。
- この表は柱形係数が0.55～0.65の船を
対象としている。
- 汐路丸の柱形係数は0.64



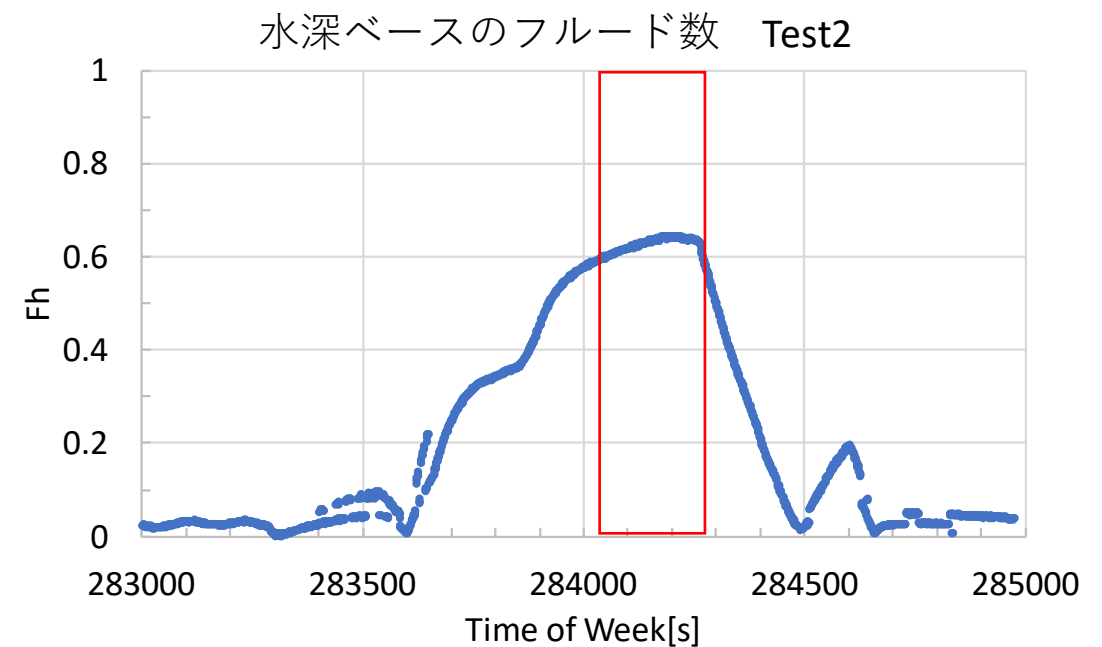
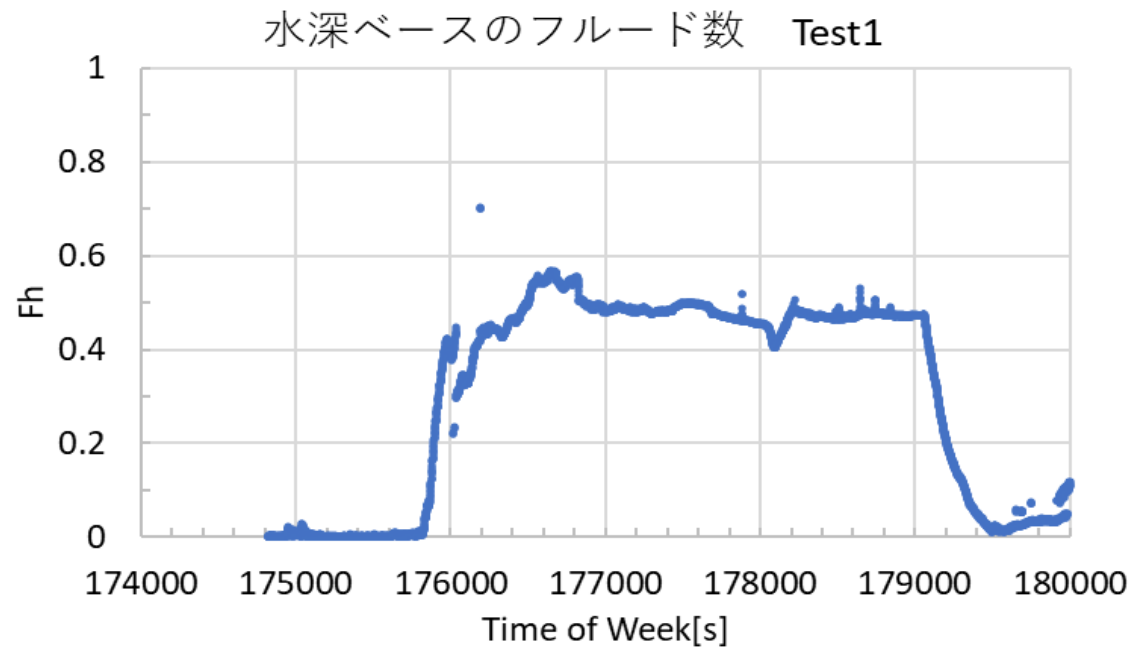


深水域での沈下量推定値と船体沈下量測定値の比較

- 沈下量が船速の二乗に比例して増加している。
- 測定結果と推定値が3~4cm以内で一致している。
 - Test2.の船速6m/s付近を除く



- 水深ベースのフルード数がTest2の全速で航行している時刻において、浅水影響が表れ始める0.6~0.7(subcritical zone)に達している。
- $F_h = \frac{V}{\sqrt{gH}}$ H:水深 V:本来は対水速力を使うべきだが、ここではGNSSのSOG[m/s]





②推定値との比較

船体沈下量推定2 浅水域での推定式

- Millwardの推定式(1992)
- 船首での沈下量

$$s_{bow} = (61.7 \cdot C_b \cdot \frac{d}{L} - 0.6) \frac{L}{100} \cdot \frac{F_h^2}{\sqrt{1 - F_h^2}}$$

- 船体中央での沈下量

$$s_{mid} = \left(38.0 \cdot C_b \cdot \frac{d}{L} \right) \frac{L}{100} \cdot \frac{F_h^2}{\sqrt{1 - F_h^2}}$$

- d [m]:型喫水 L [m]:船長 C_b :方形係数(汐路丸は0.585)
- アンテナ位置での沈下量を線形補間で求める

推定式2による船体沈下量とGNSSにより測定した船体沈下量の比較

- $F_h > 0.60$ の範囲で船速の平均値は6.1m/s、 F_h の平均値は0.63。
- $F_h = 0.63$ をMillwardの式に代入して、アンテナ設置位置における沈下量を求めたところ、測定値と3cm以内で一致。

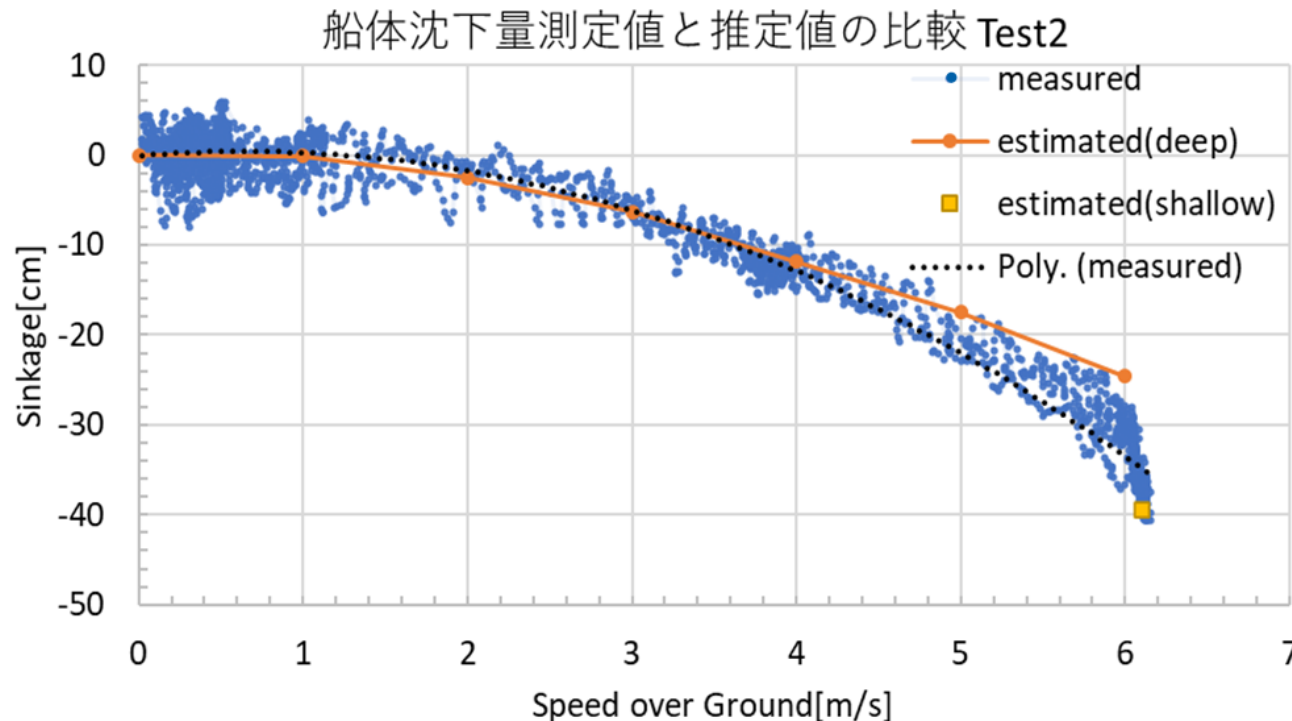


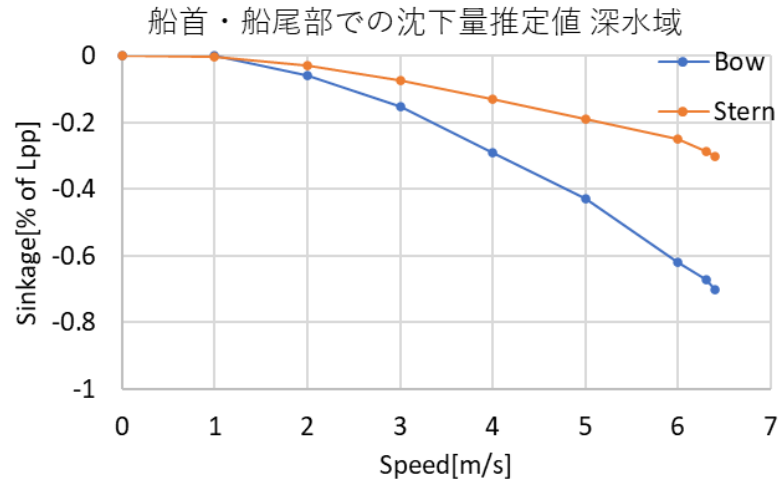
表:6.1m/sでの沈下量

測定値[cm]	36.5
深水域の推定値	25.5
浅水域の推定値	39.4



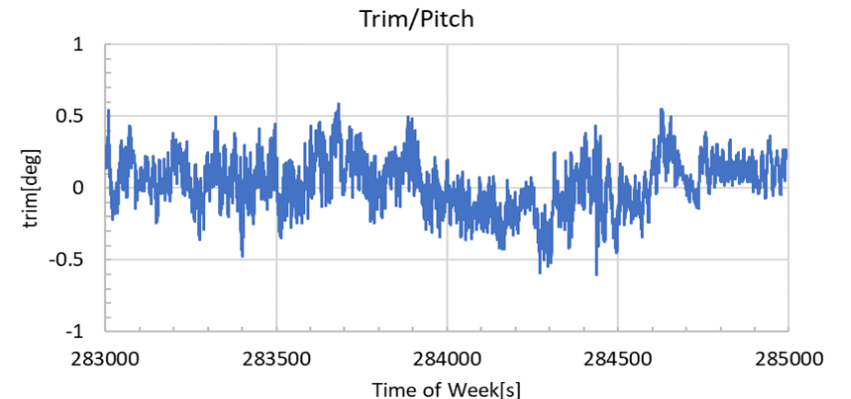
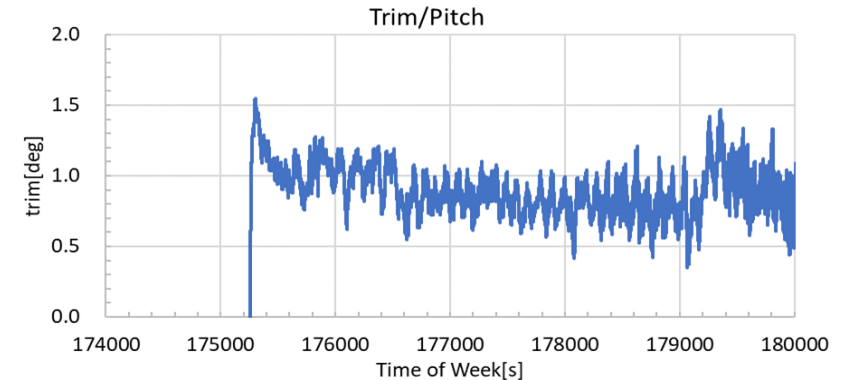
考察 Trim変化の向き

- 深水域・浅水域での沈下量推定値では船首の方が大きく沈み込んでいる。
→船首トリムになる
- IMUでの測定結果も航行中、船首トリム側へ変化していた。



Millwardの推定式 SOG=6.1m/sの時

船首部での沈み込み[%Lpp]	0.86
中央での沈み込み	0.72



まとめ

- 船にGNSSアンテナを設置して、アンテナの水面上高さを求めることにより船体沈下量を測定した。
- 測定した沈下量が理論通り船速の二乗に比例しており、推定値とおおむね一致していた。
→本手法で船体沈下量を正しく計測できる。
- 本手法は日本のジオイドモデルと気象庁の潮汐観測資料を使用しており日本沿岸で適用可能。



図:Softbankの高精度測位サービス
ichimill





謝辞

- 本研究の遂行にあたって、実験の援助を下され、また汐路丸に関する資料を参照させて頂いた鹿島船長と航海士の方々に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。



参考文献

- Jeong Hun Ha ,Tim Gourlay: Validation of Container Ship Squat Modeling Using Full-Scale Trials at the Port of Fremantle: Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering,144(1),2018.
- 国土地理院：測量計算ソフト ジオイド高計算 ,
<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/geoid/calcgh/calcframe.html>, (参照2023-6-12).
- 気象庁: 潮汐観測資料 東京, <https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/genbo/index.php>, (参照2023-6-12).
- 練習船「汐路丸」完成図書 ,ジャパンマリンユナイテッド株式会社,2021.
- The Society of Naval Architects and Marine Engineers: HYDRODYNAMICS IN SHIP DESIGN, Vol.2,Chap58,pp325-328,1957.
- 鈴木和夫,佐々木紀幸,川村隆文: 船舶海洋工学シリーズ② 船体抵抗と推進,成山堂書店,pp.110,2012.
- 野中晃二:スコット推定法について-Ⅱ , NAVIGATION,日本航海学会,149,2001.

ご清聴ありがとうございました。



Memo



導入 IMU(加速度・角速度)による姿勢測定

- IMUの加速度センサーにより計測した重力加速度を用いてRoll/Pitchを算出することができる。
- 加速度によって求めたRoll,Pitchと角速度(Roll/Pitch rate)を線形KFで統合することにより、より精度の良く、船の加減速による誤差を軽減した姿勢を求める。



図:IMU

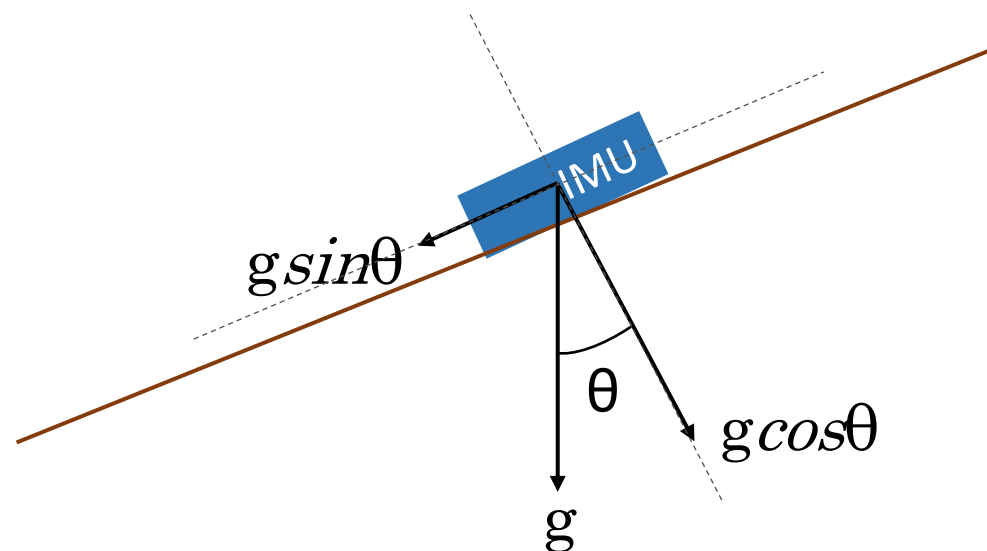
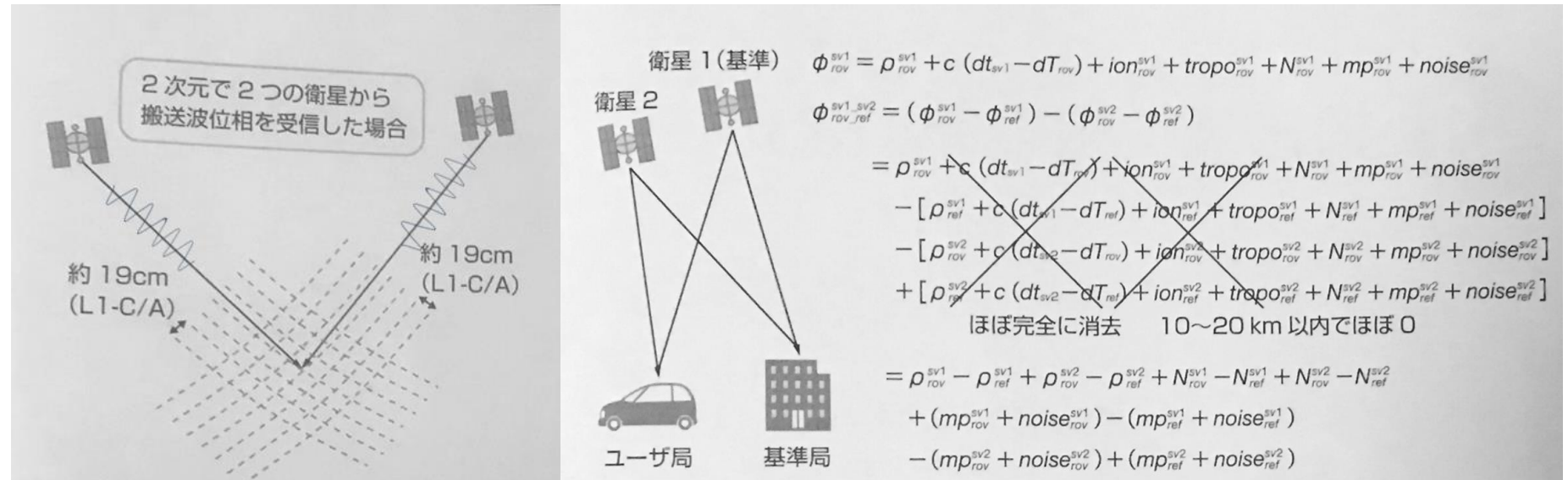


図:加速度センサー姿勢検出

- コードによる疑似距離ではなく、搬送波位相の波数を用いて衛星-受信機間の距離をmmレベルで求める。
- 基準局とユーザ側で二重位相差をとることによって電離層 & 対流圏遅延、時計誤差を消去している。



導入 GNSS速度

- 測位衛星から受信した信号のドップラー周波数を測定することにより、cm/s級の対地速度を求めることができる。
- GNSS受信機は位置だけでなく、速度も出力できる。

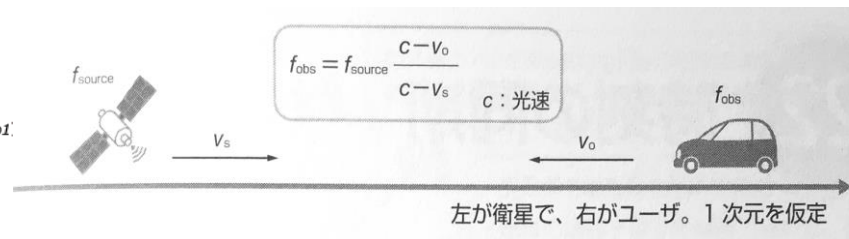
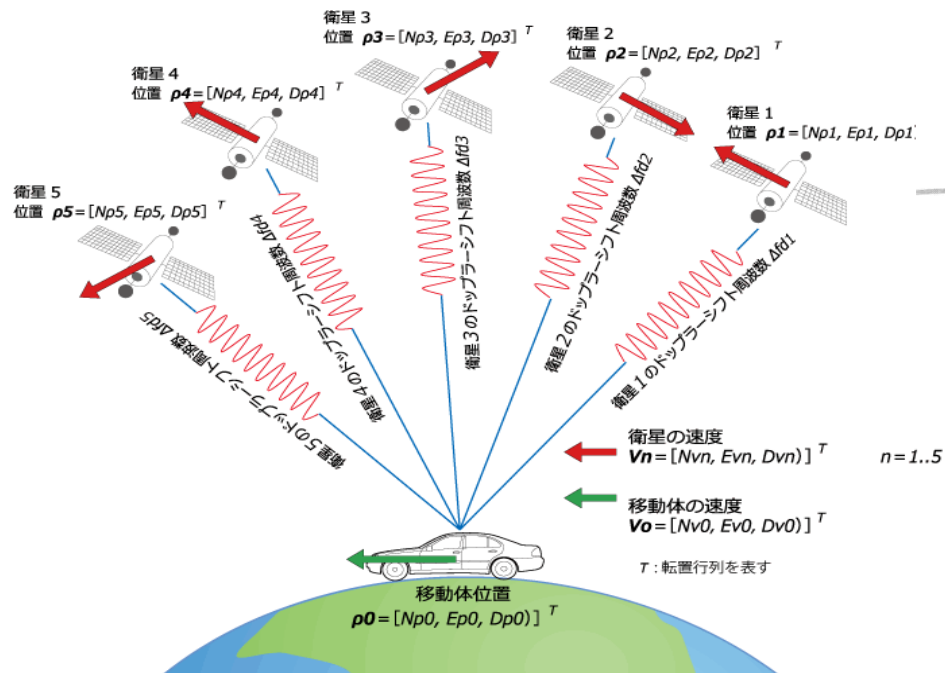


図:ドップラー効果と速度

引用:図解よくわかる 衛星測位と位置情報

図:GNSS速度計の原理

引用:図解よくわかる

小野測器, GPSによる速度測定の原理

URL:https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/products/keisoku/vehicle/lc8_principle.htm

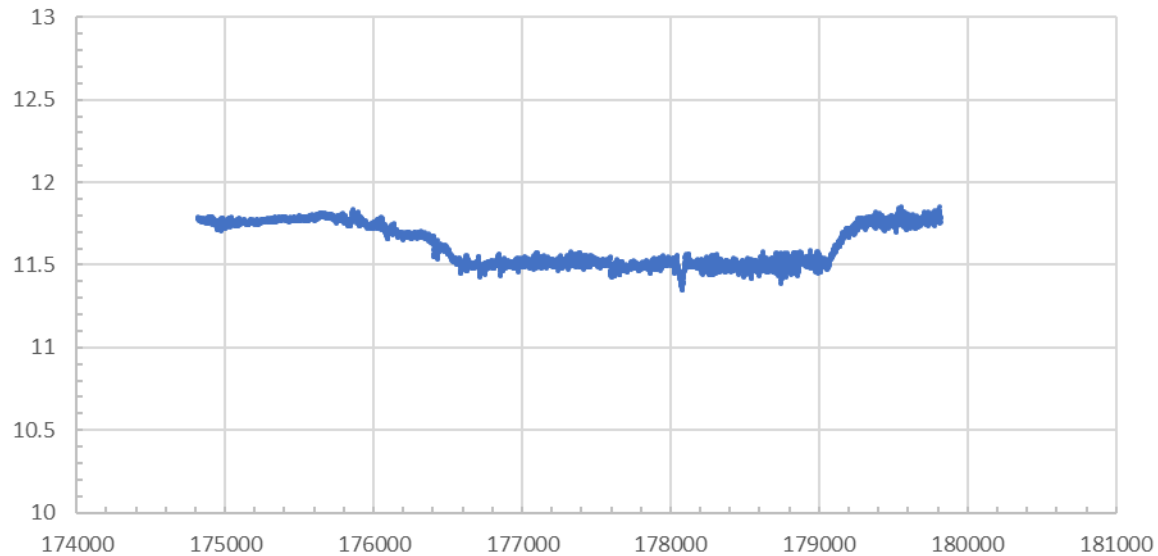


図:スマートフォンのSpeedmeter

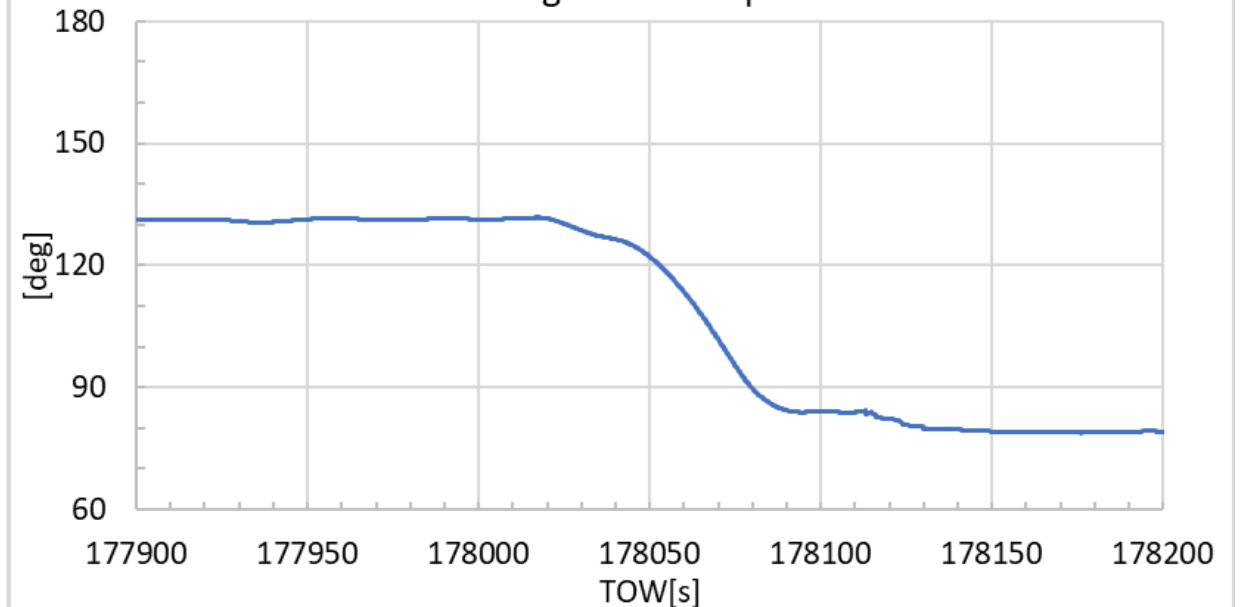
引用:UniCom TechnologyのApp Store

- TOW=18050付近の速力の減少は左旋回によるもので、アンテナ水面上高さの一時的な減少は外方傾斜によるもの。
-アンテナは右舷側につけた。

アンテナ水面上高さ



Heading GNSS Compass





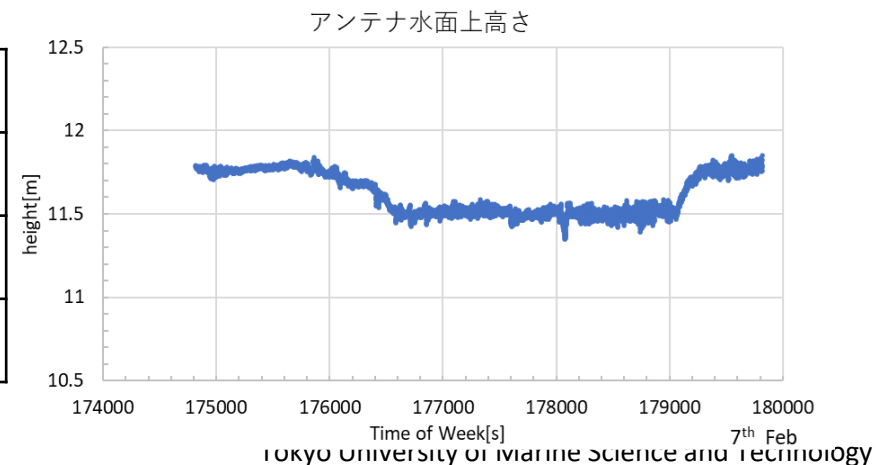
結果 2/7 船体沈下量

- 各時刻におけるアンテナの水面上高さの平均値は表のとおり

TOW[s] test1	船の航行状態	アンテナ高さ[m]
174900~175700	停止中(係留中)	11.771
176900~178000 178100~179000	全速航行中	11.506
179500~179817	停止中(停留)	11.775

- アンテナ設置位置における全速航行時の船体沈下量は約27 cm。

TOW[s] test2	船の航行状態	アンテナ高さ[m]
283000~283600	停止中(係留中)	11.837
284000~284300	全速航行中	11.481
284500~284900	停止中(停留)	11.828



船首・船尾での沈下量の違い

- 使用船舶は汐路丸Ⅲ世で、実験日は2020年10月23日
- GNSSアンテナ・受信機を船首と船尾に設置し、各地点でRTK測位。

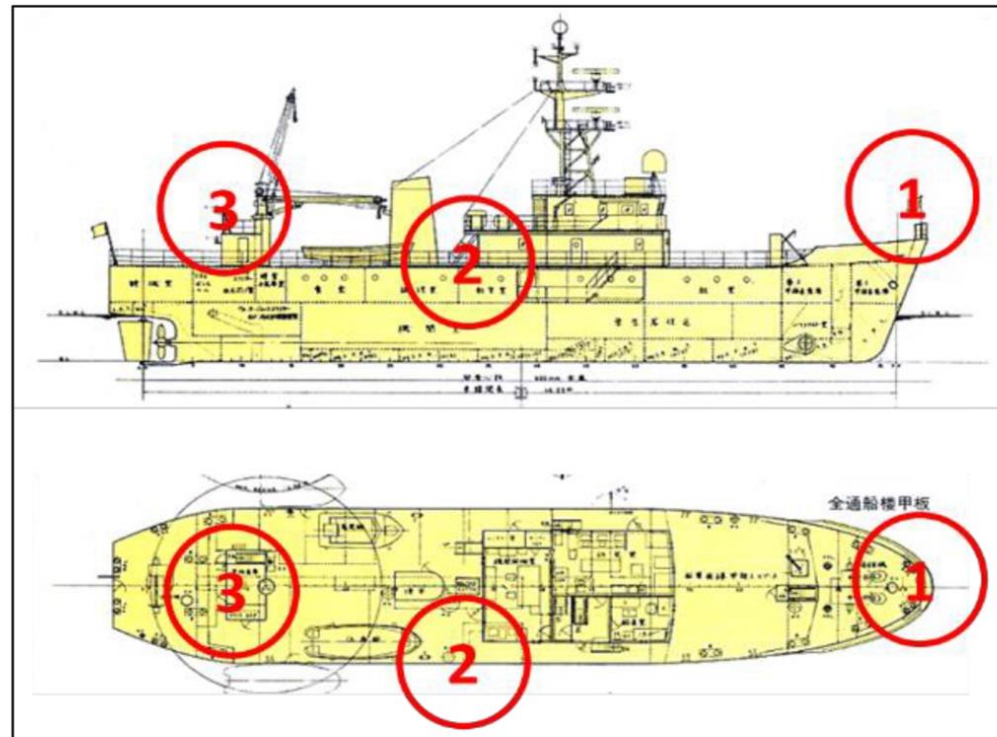


図 3.14 汐路丸平面図におけるアンテナ配置



左上:船首①
右上:中央②
右下:船尾③

図の引用:「船舶の自動離着桟における GNSS の活用手法の研究」,青木京平
Tokyo University of Marine Science and Technology

- 船首部の方が沈下量が大きい

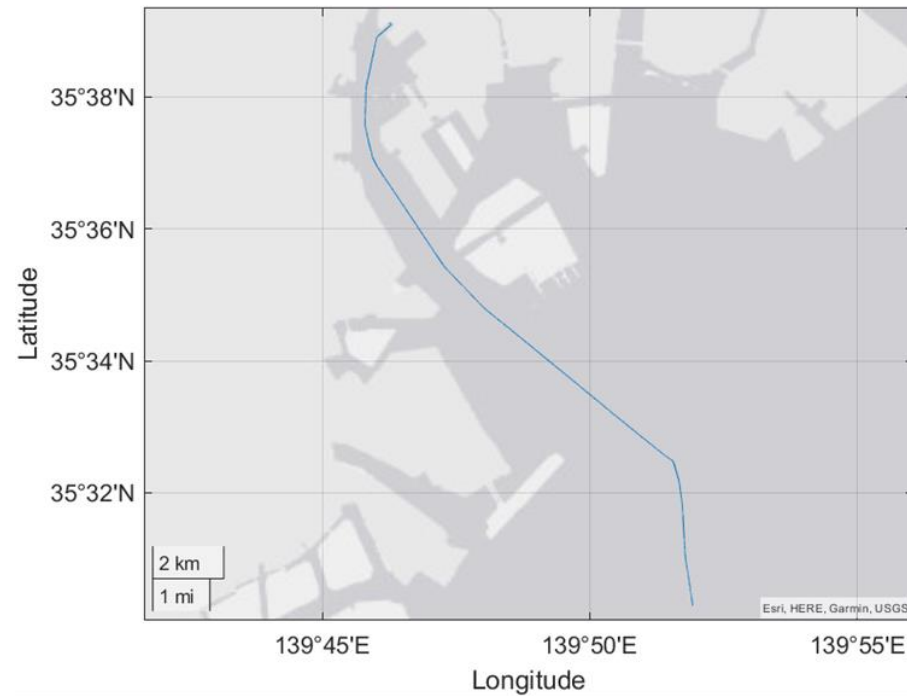


図: 汐路丸Ⅲ世の航跡

