



IMUとGNSSコンパスを用いた船体運動測定

IMU & GNSS Compass Utilization for Monitoring Motion of the Ship

GPS/GNSSシンポジウム2022 研究発表会

10月21日

東京海洋大学情報通信工学研究室

小森健史(M1) 小松大生(M2) 久保信明



目次

- 研究背景・目的
- 導入
 - 船体姿勢・方位について
 - GMと復原性
 - IMUとGNSSコンパス
- 実験方法
 - 実験航海について
 - IMUとGNSSコンパスによる計測
- 実験結果
 - 1. 旋回時の船の横傾斜について
 - 2. Rolling周期算出・GM推定
- 結論と展望

- 復原力が不足していると、船は転覆の危険性が増す。
- 大きな船体傾斜・動揺による荷崩れの危険がある。



復原力不足による転覆



航行中の復原力低下による大傾斜



大きな横揺れによるコンテナの流出

引用(上から時計回りに):

https://gcaptain.com/wp-content/uploads/2018/08/Korean_Ferry_Sewol_Capsized.jpg

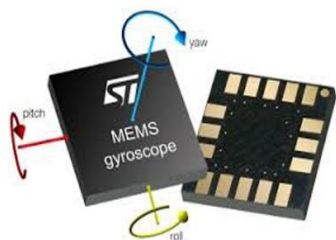
https://gcaptain.com/wp-content/uploads/2020/12/One_Apus_1-1536x1028.jpeg

https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/books/report2010/html/tokushu/images/021_04.jpg

目的

IMU及びGNSSコンパスを用いて船の動きをモニタリング可能か検証。

1. MEMS式IMU・GNSSコンパスを使って船体の横傾斜角を測定。
2. IMU角速度センサーもしくはGNSSアンテナの速度を用いた2通りの方法で横揺れ周期を計測。
→横揺れ周期から復原力の指標であるGMを推定できる。



MEMS式IMU ST製



NNN-31

GNSSコンパス

左:JRC製 右:FURUNO製



図:船の横傾斜

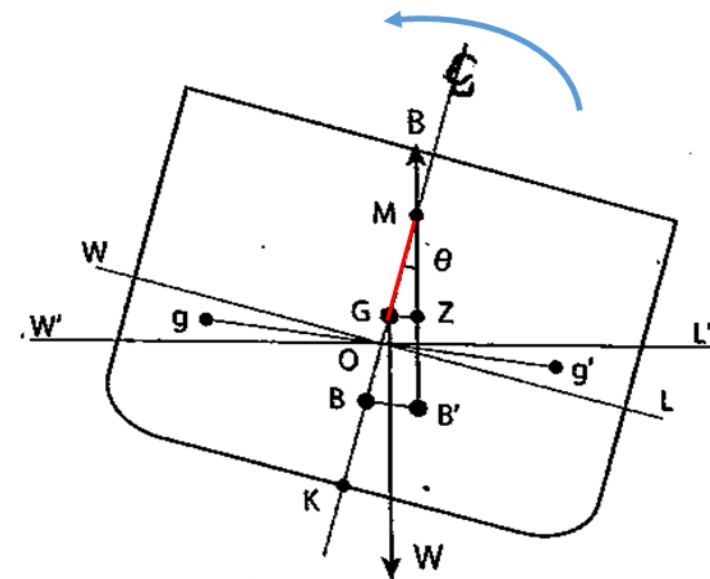


図:GMと復原性

導入 船体姿勢・方位について

| 本実験で用いる指標 | 説明 |
|----------------------|---|
| 船首方位 Heading[deg] | 船首が向いている方位で、北から時計回りに測る。 0~360° の値をとる。 |
| Heel(Roll)角[deg] | 船首もしくは船尾から船体を見た際に船が横方向に何度傾いているかをしめす。右に傾くのを正とする。 |

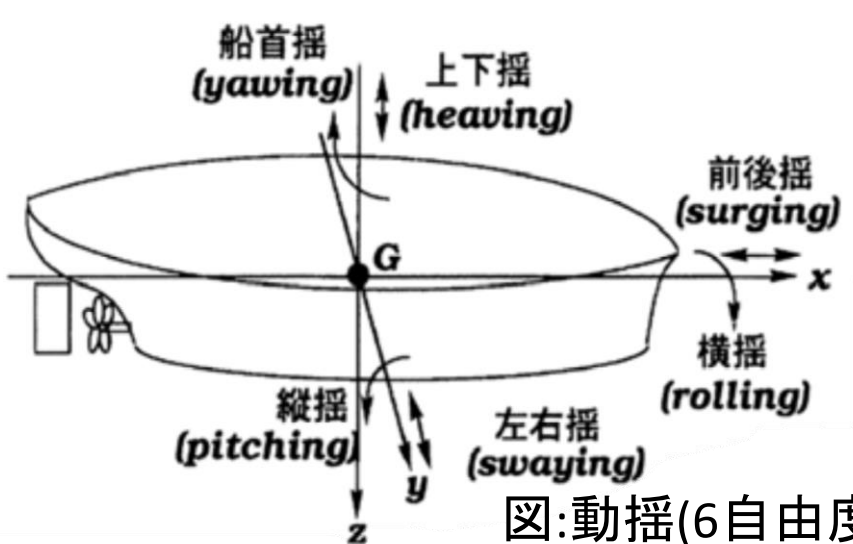


図:動揺(6自由度)

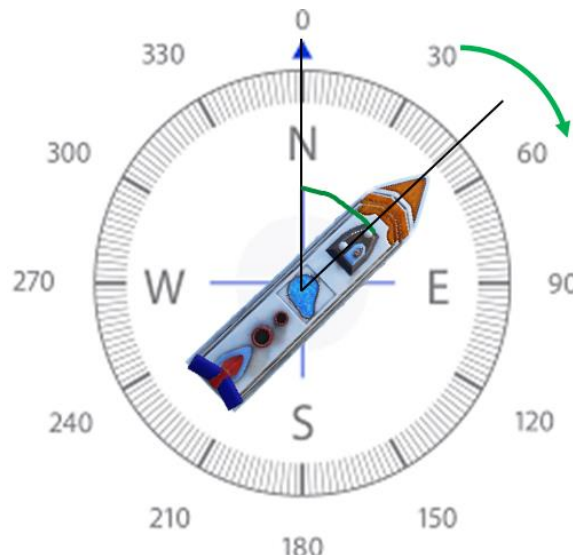


図:方位 Heading

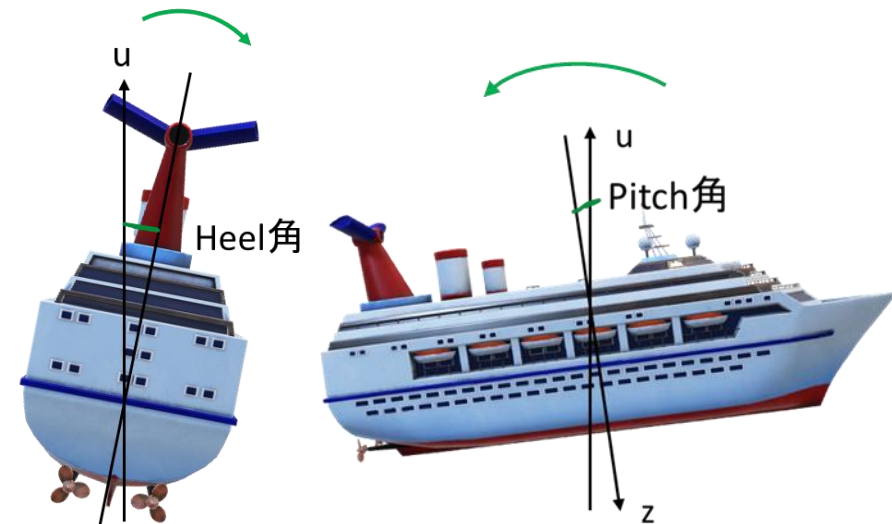
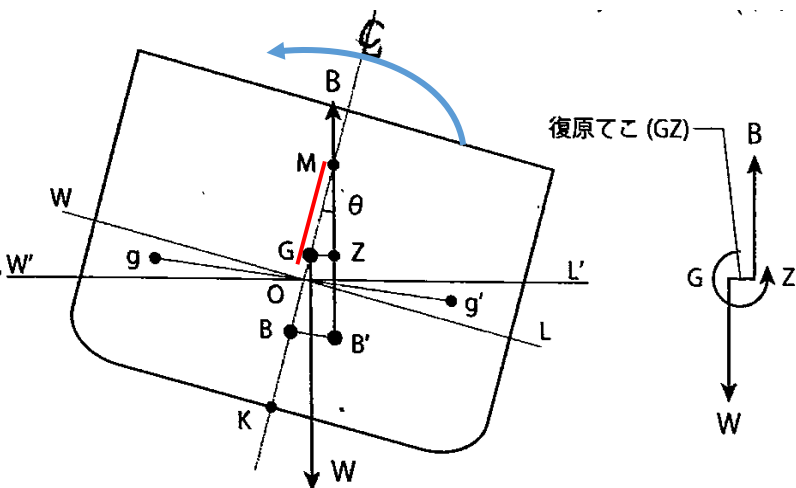


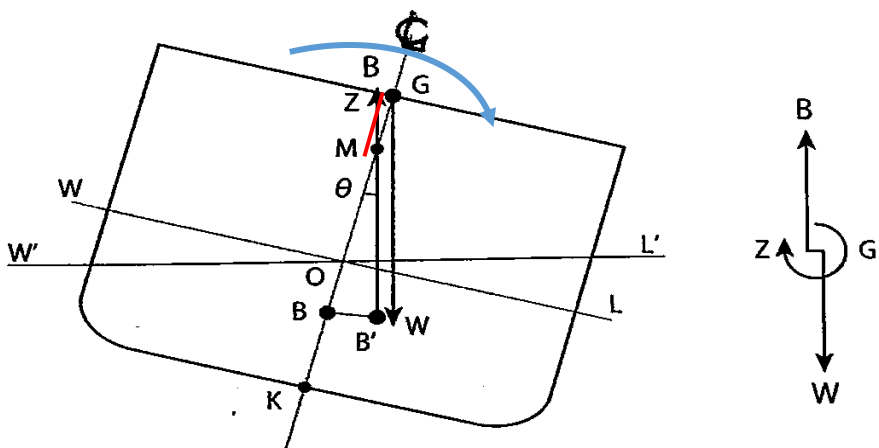
図:傾き Heel(Roll)角とPitch(Trim)角

GMと復原性

- 船が傾いた時の浮力の作用線と船体中心線との交点を横メタセンタMという。
- 重心Gと横メタセンタ:M間の距離を(横)メタセンタ高さ:GMという。



- 復原性 安定
MがGよりも上方にあり(GMが正)、船を少し傾けた際に船体を直立に戻そうとする復原モーメントが働く。



- 復原性 不安定
MがGよりも下方にあり(GMが負)、船を少し傾けた際に傾きを増大させる方向に傾斜モーメントが働く

図 2.2.1.5 復原性 (不安定)

導入 IMUによる姿勢推定

IMUbody座標のX軸が船首尾線に平行になるように設置。

① IMUの加速度センサーを用いる方法。

- 重力加速度を使ってRoll/Pitchを求めることができる。

$$\text{Pitch} = \sin^{-1} \frac{g_x}{g} \quad \text{Roll} = \sin^{-1} \frac{g_y}{g \cdot \cos(\text{Pitch})} \quad g_*: \text{重力加速度のIMU * 軸方向成分}$$

② IMU角速度センサーを用いる方法

- IMU座標のX/Y/Z軸回りの角速度をNavigation座標に変換してRoll/Pitch/Yaw rateを求める。角速度[deg/s]を積分して姿勢・方位[deg]を求める。

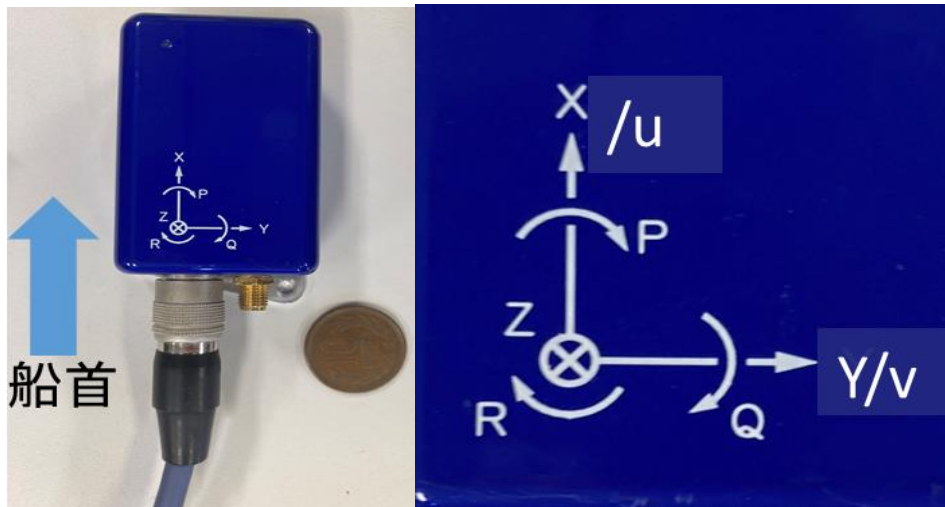


図:IMU座標系

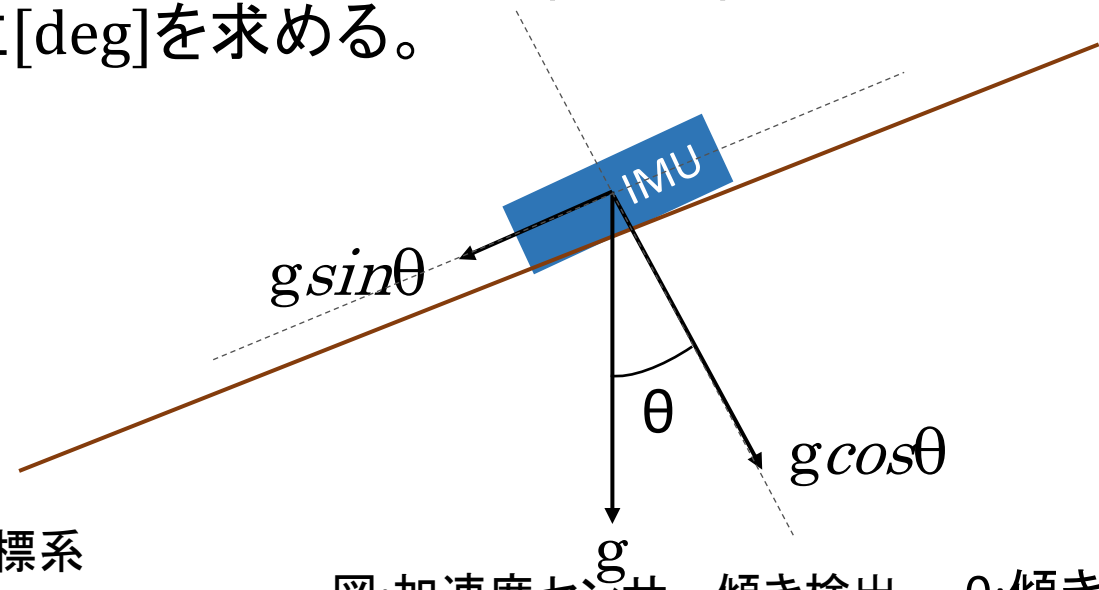


図:加速度センサー傾き検出 θ :傾き

GNSSコンパスについて

- RTK測位では、基準点からユーザのアンテナへの精密な相対ベクトル (基線ベクトル)を求めることにより、ユーザの精密な位置を求める。

精密な相対ベクトルから方位・姿勢を求める！

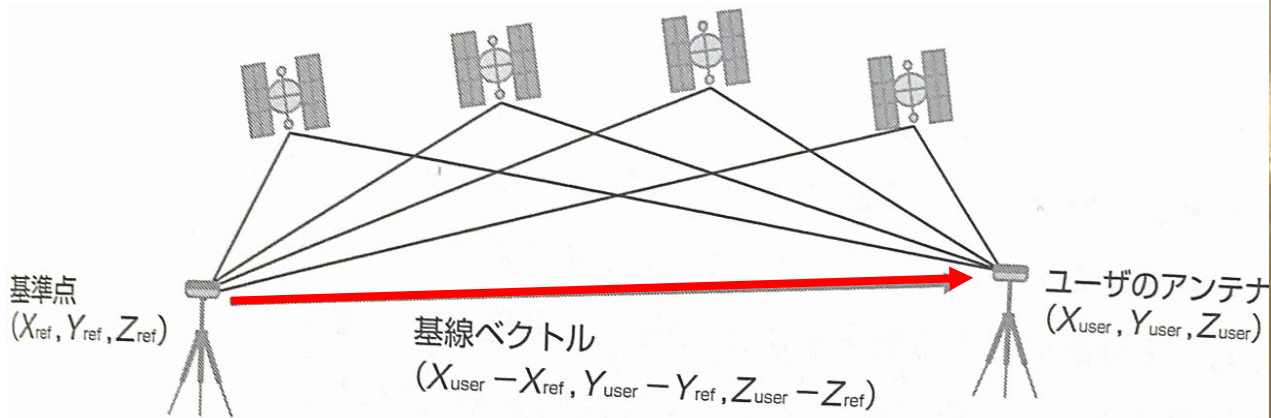


図:RTK測位と基線ベクトル



IMU角速度センサーとGNSSコンパスの統合

IMU角速度センサーの利点

- ・データ落ちなし
- ・雑音がほぼない(精度◎)

欠点

- ・積分していくごとにバイアスが蓄積(確度×)

GNSSコンパスの利点

- ・方位・姿勢の値がそのまま求まり、時間が経ってもバイアスは蓄積しない(確度◎)

欠点

- ・雑音が含まれている(精度×)
- ・測位環境が悪ければ方位・姿勢の精度・正確性が低下し、利用不可となる。

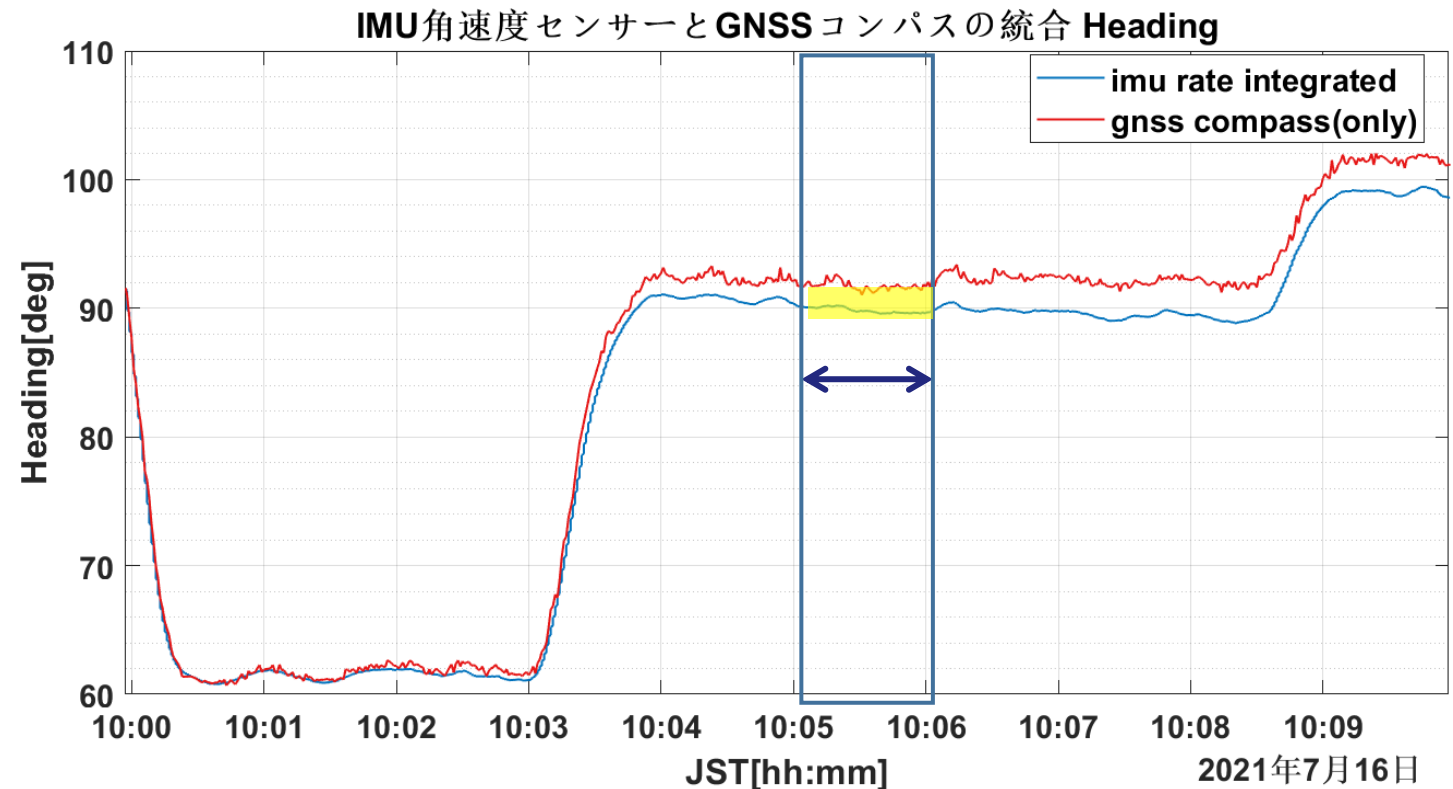
統合(カップリング)

1. データ落ちなし
2. 正確
3. 高精度

統合 角速度積分値+GNSSコンパス

(1)移動平均フィルター

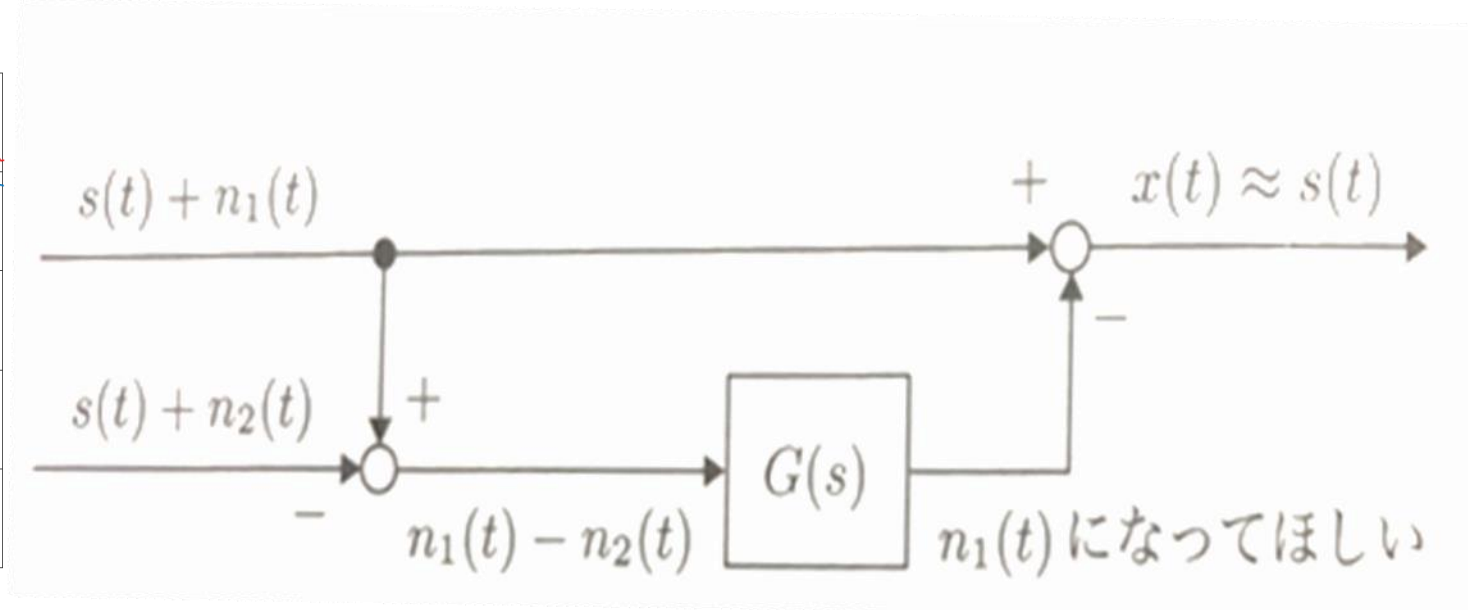
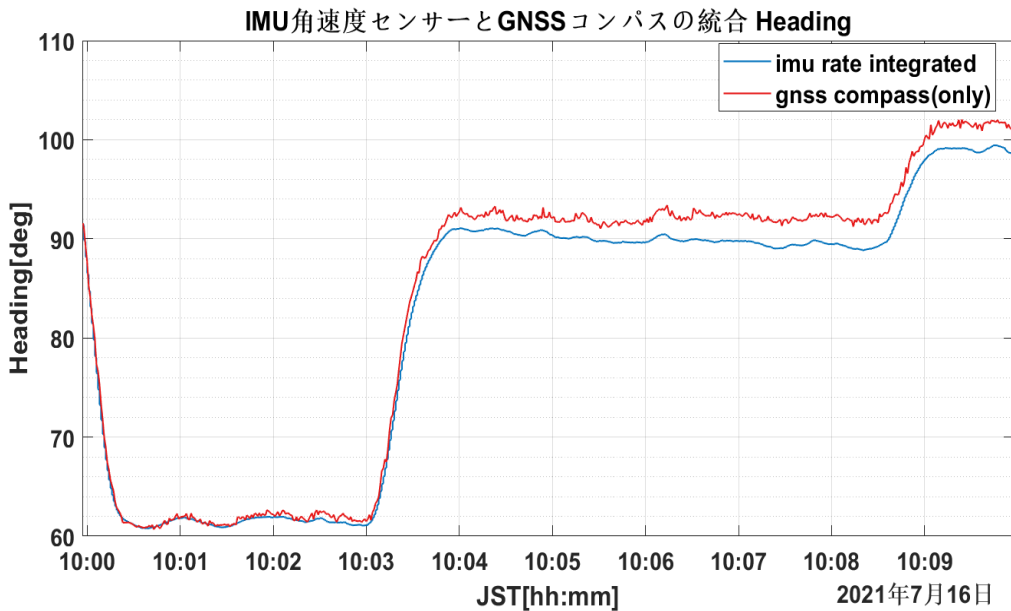
- IMU角速度を積分するにつれて蓄積する誤差を除去。
- 一定時間分のIMU角速度の積分値、GNSSコンパスの角度の移動平均の差分を**バイアス**として1epoch毎に角速度積分値から引いていく。



2021年7月16日

統合 角速度積分値+GNSSコンパス (2)相補フィルター

- IMU角速度積分値とGNSSコンパスの角度には真値 $s(t)$ にそれぞれ異なる誤差 $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$ が含まれる。
- カルマンフィルターに2つの計測値の差分 $n_1(t) - n_2(t)$ を入力して、角速度積分値の誤差 $n_1(t)$ を推測。
- IMU角速度積分値から誤差 $n_1(t)$ を引く



図引用:「カルマンフィルターの基礎」



IMU角速度積分値とGNSSコンパスの統合結果

- 姿勢と方位での統合結果を示す。

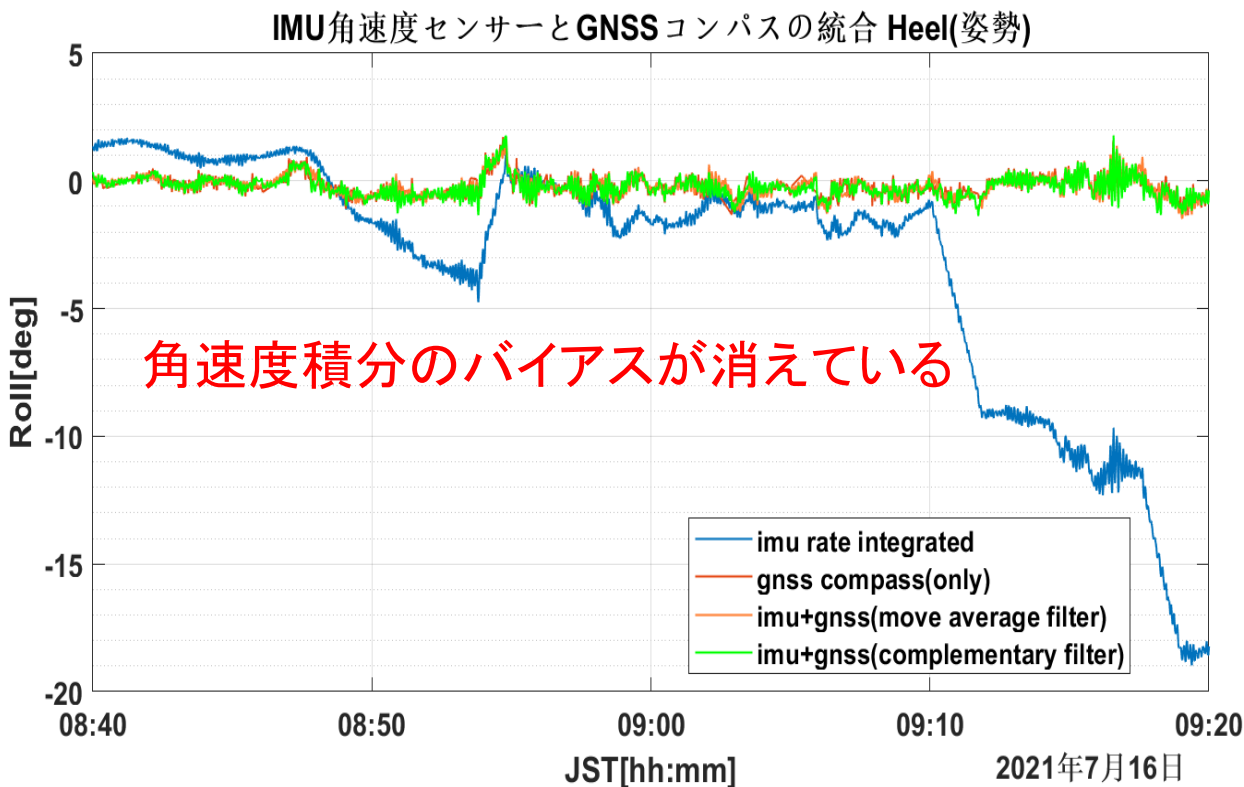
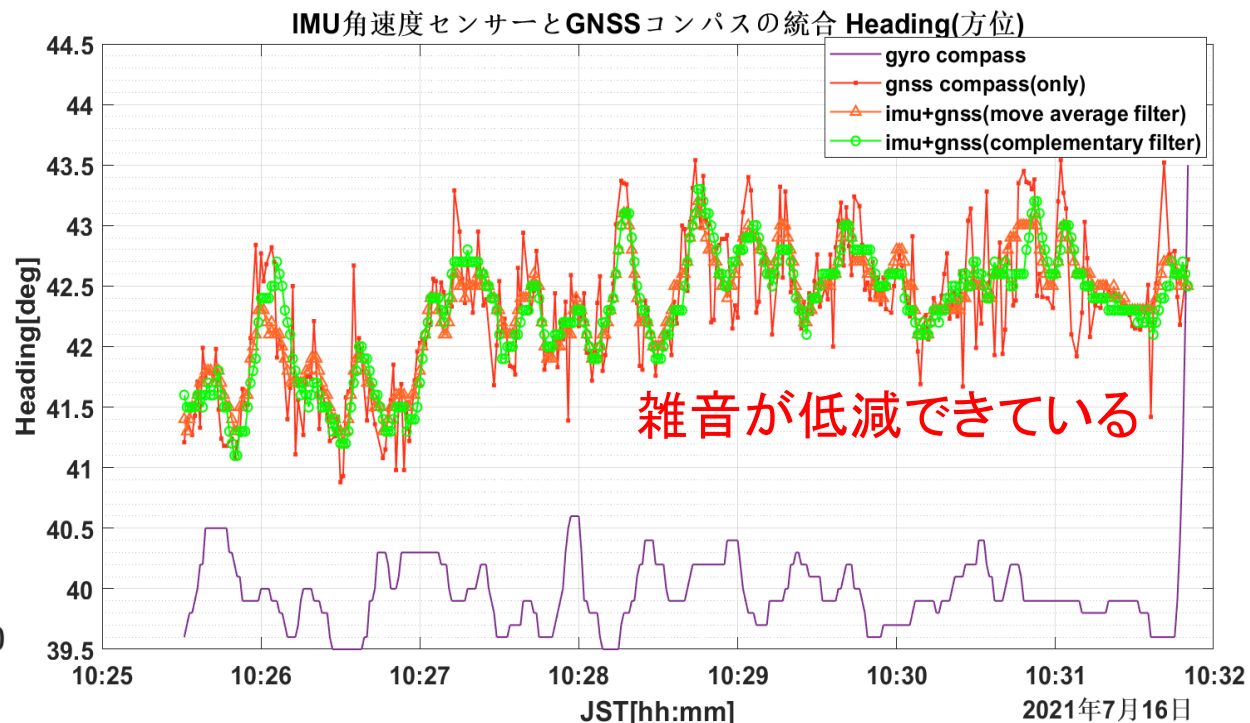


図:IMU角速度とGNSSコンパスの統合

表4-2 Headingの標準偏差 10:25~10:32のデータ

| | |
|-----------------------------------|--------|
| Gyro compass | 0.3395 |
| GNSS compass 単独 | 0.5742 |
| IMU rate+GNSS compass (移動平均フィルター) | 0.4468 |
| IMU rate+GNSS compass (相補フィルター) | 0.4768 |





実験概要

- 2021年7月15,16日に汐路丸による実験航海に参加。
- IMU及びGNSSコンパスのデータを16日(復路)に取得。



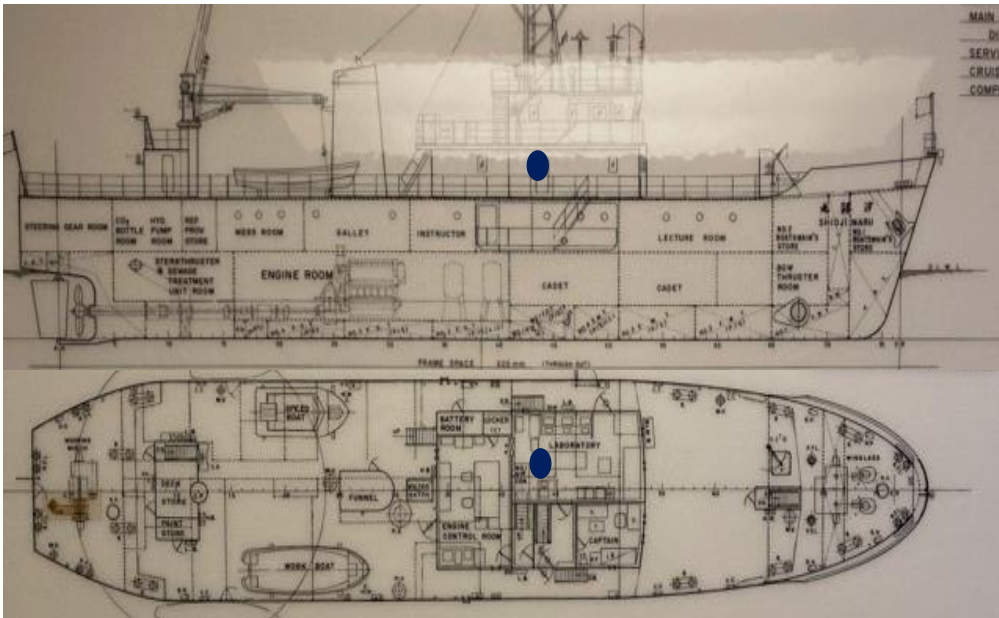
図:7月16日航跡 引用:東京海洋大学パンフレット



図:7月16日航跡 引用:Marine Trafficより

実験方法 IMUでの計測

- IMUには東京航空計器の CSM-MG100 を用いる。
- IMUは汐路丸船内のLab.に設置。IMUで計測した角速度と加速度を主に用いる。
- 航行中にデータ記録



IMU設置位置(青丸)



IMU本体

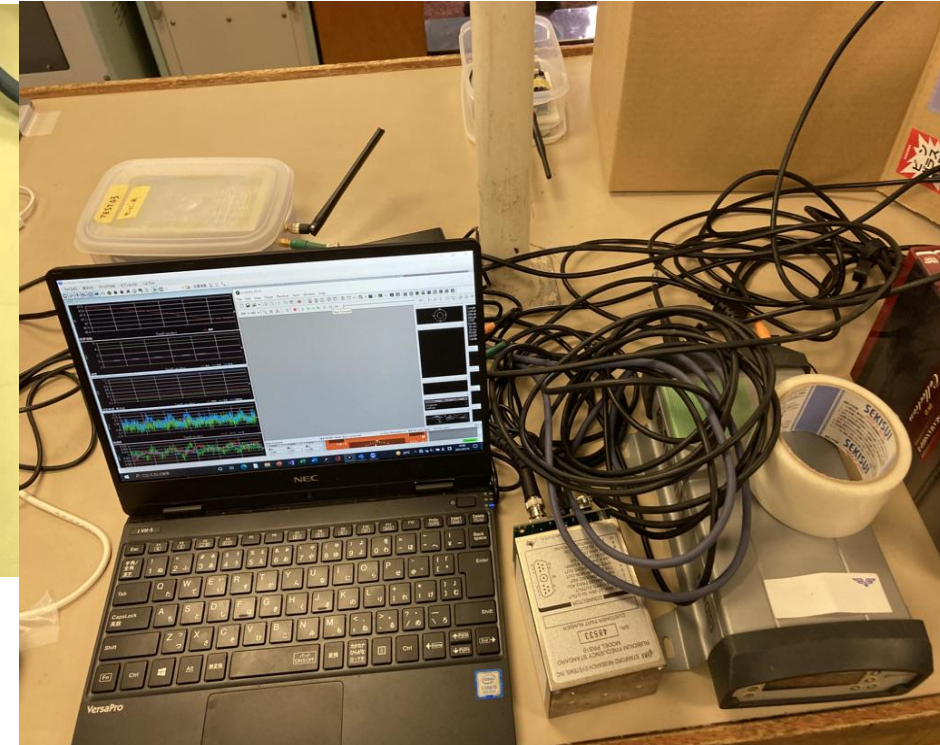
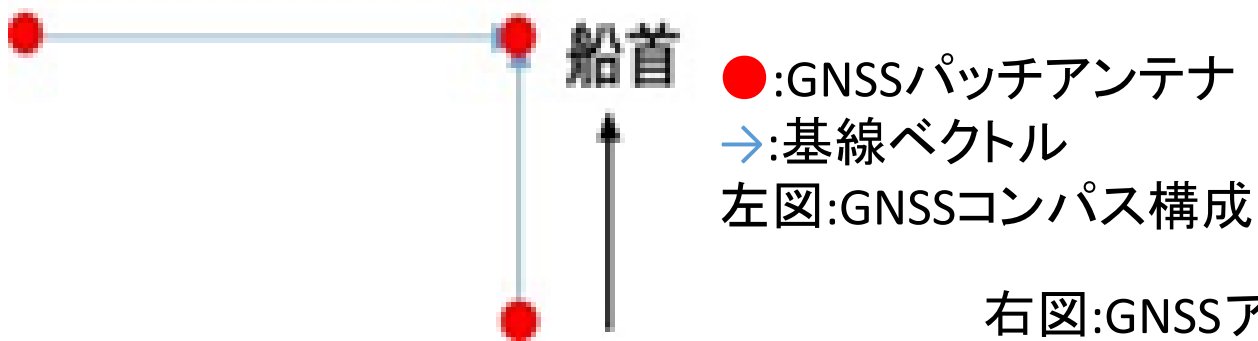


図:IMUのデータ記録

方法 GNSSコンパスでの計測

- 汐路丸の屋外後部に設置したGNSSアンテナ(ANN-MB-00) 3台でコンパスを構成。



右図:GNSSアンテナ設置位置

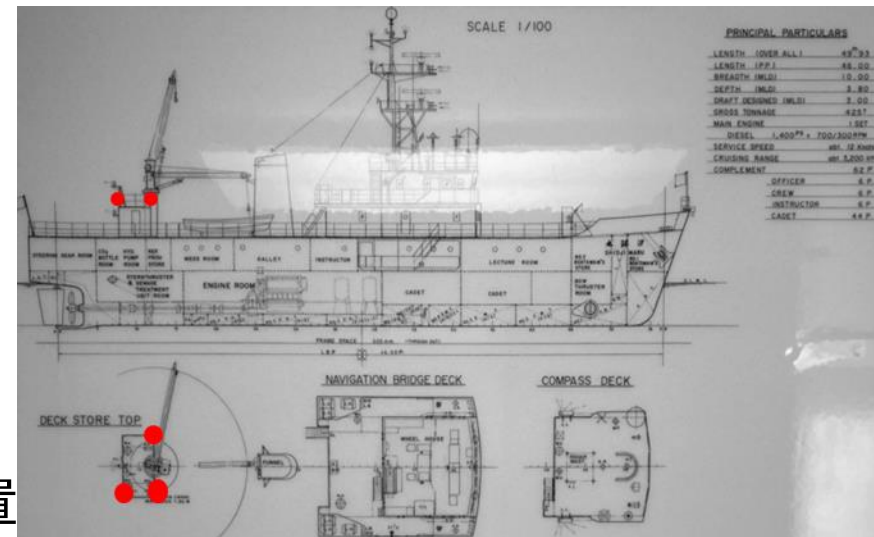


図:GNSSコンパス(横から)

(正面から)

GNSSコンパスでの計測

- ZED-F9P受信機内蔵のロガーで生成・保存した観測ファイル・航法ファイルを基線解析ソフト”RTKCORE”で解析して基線ベクトルを求める。
- 基線ベクトルから方位と傾きを求める。

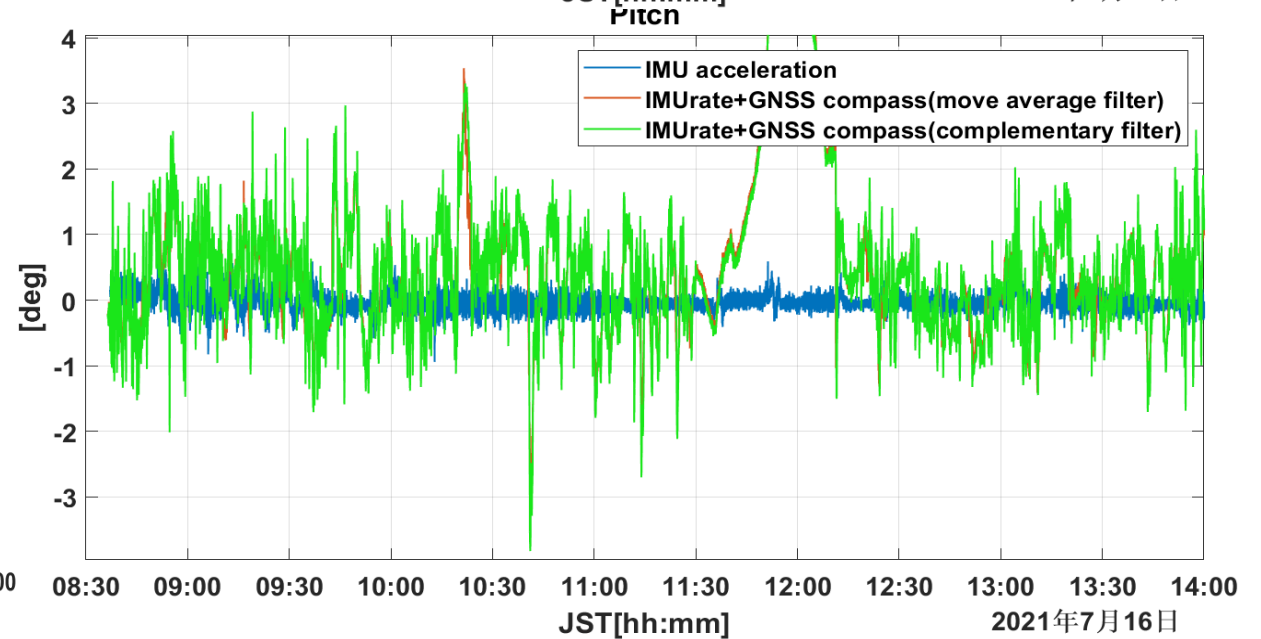
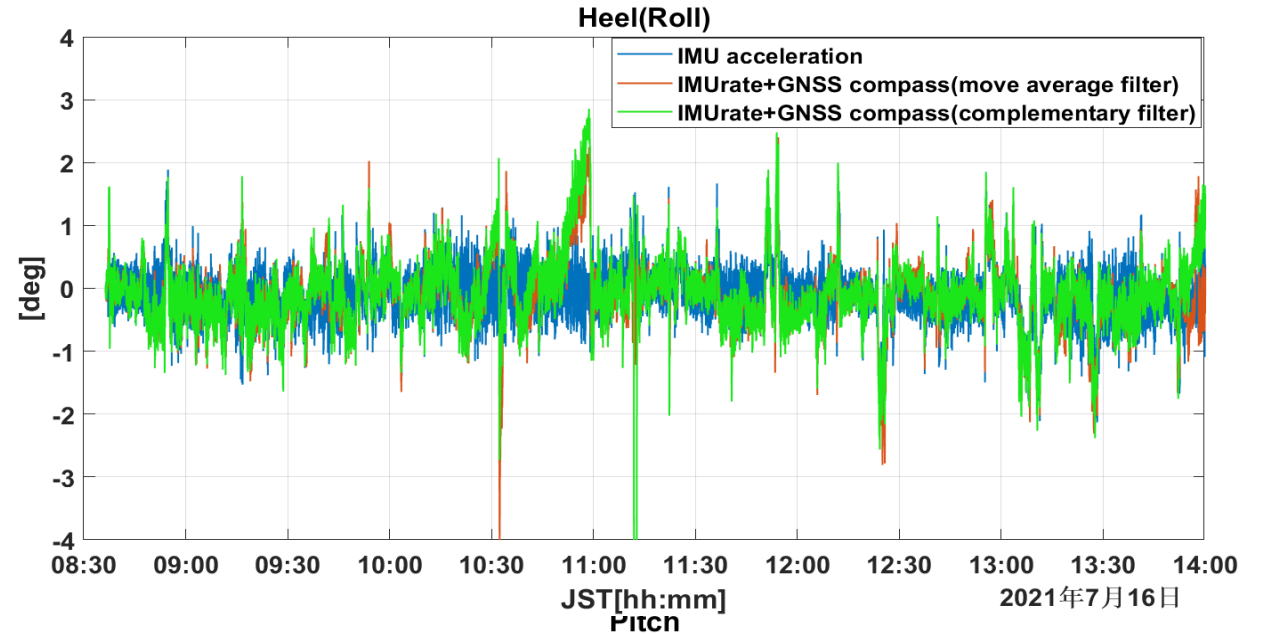
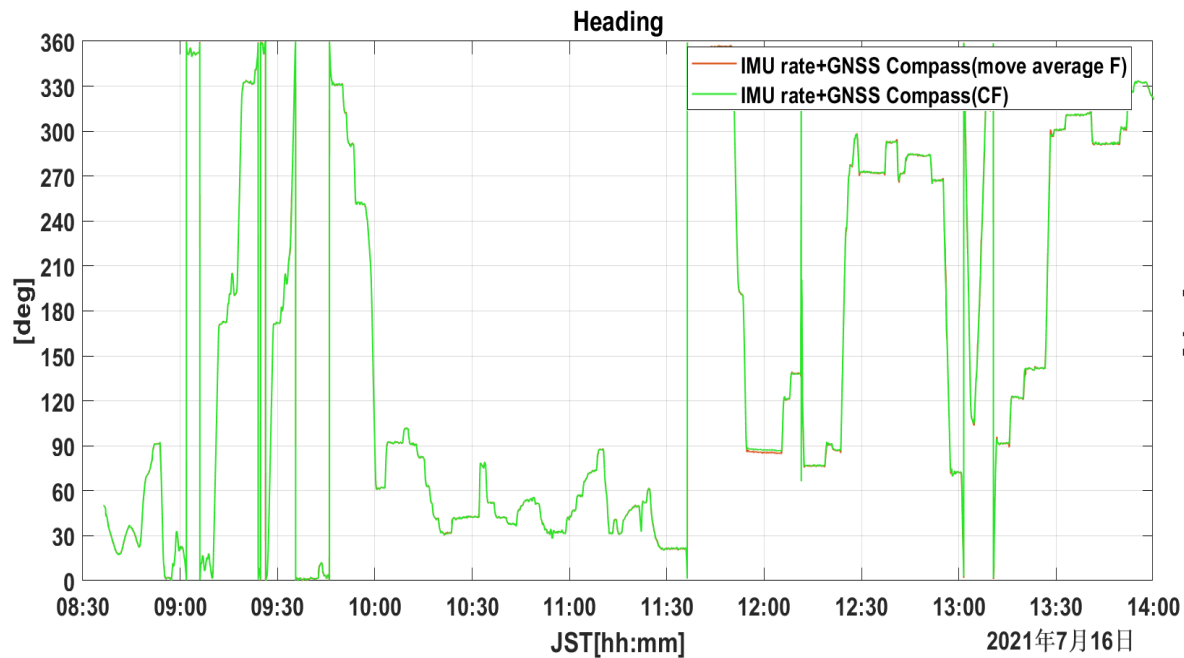
表:基線ベクトル(解析結果)

| A | B | C | D | E | F | G | H |
|--------------|----|-----------|-----------|-------------|-----------|------------|----------|
| Time of Week | | Lon Diff | Lat Diff | Height Diff | Lat | Lon | Height |
| 431643.0 | 18 | -0.132697 | -4.433624 | 0.024253 | 35.334862 | 139.664959 | 42.39399 |
| 431648.0 | 20 | -0.03366 | -4.434844 | 0.087328 | 35.334839 | 139.66524 | 41.42848 |
| 431649.0 | 18 | 0.00953 | -4.420904 | 0.042363 | 35.334834 | 139.6653 | 41.77195 |
| 431650.0 | 18 | 0.06654 | -4.429395 | 0.024331 | 35.334825 | 139.665358 | 41.62945 |
| 431651.0 | 19 | 0.122844 | -4.425572 | 0.031366 | 35.33482 | 139.665414 | 41.75442 |
| 431652.0 | 19 | 0.188201 | -4.409664 | 0.083907 | 35.334814 | 139.66547 | 42.72017 |
| 431656.0 | 14 | 0.508734 | -4.406805 | -0.000276 | 35.334795 | 139.665709 | 41.50564 |
| 431657.0 | 17 | 0.603119 | -4.388209 | -0.008513 | 35.334796 | 139.665771 | 42.13273 |

☒:F9CLogger

実験結果 船の方位・姿勢

- 7月16日は風・海面状況ともに穏やかで動揺はあまり観察できない。



実験1 変針(旋回)時の船の横傾斜について

- 左変針時の例。
- 船の回頭が発達した際、流体反力による右回りのモーメントは舵力による左回りモーメントより大きくなり船は右側に傾く(外方傾斜)。

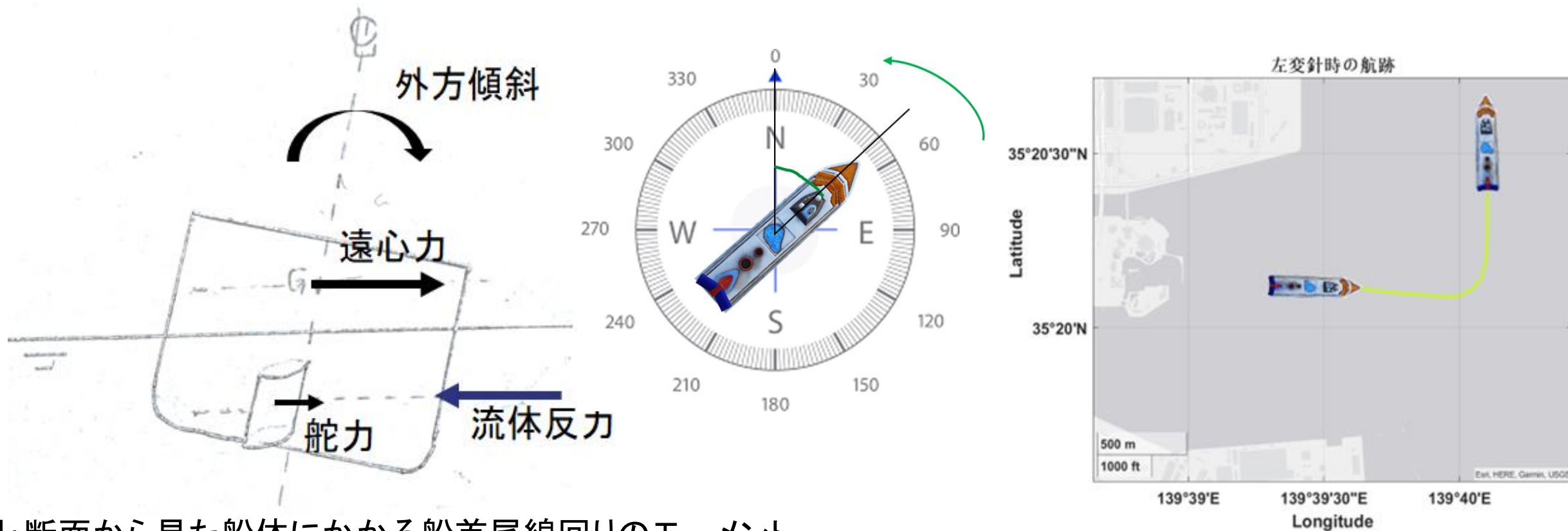
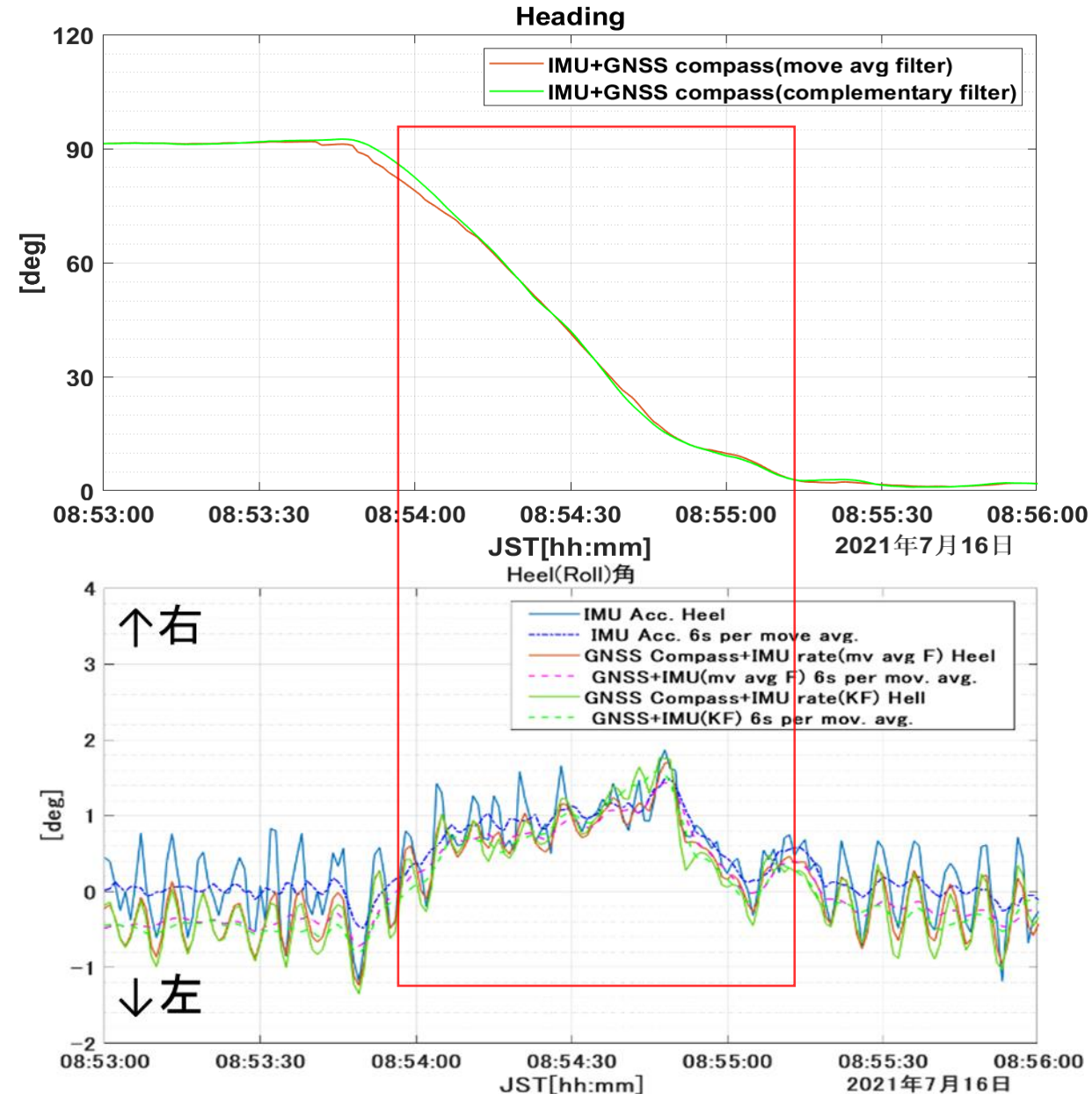
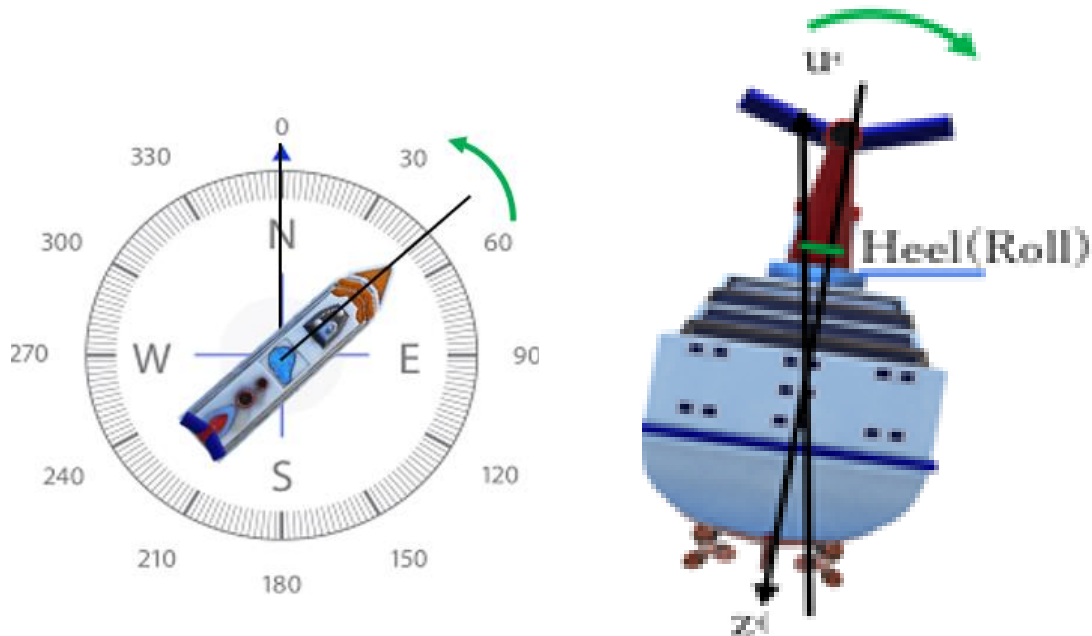


図: 断面から見た船体にかかる船首尾線回りのモーメント

実験結果 1. 変針時の横傾斜について

左変針の例

- 回頭時、旋回外側(右)に最大で 1.8° 程傾いている(外方傾斜)。





実験 2.船の横揺れ周期の測定とGM値推定

(1)角速度センサーを用いた横揺れ周期計測

- IMU角速度センサーで計測したRoll角速度を60秒間隔に区切りながら連続的にスペクトル解析(離散フーリエ変換)を行う。
- 横揺れ周期はパワースペクトルが最大になる周波数(の逆数)を代表値として用いる。(周期[s]= $\frac{1}{\text{周波数[Hz]}}$)

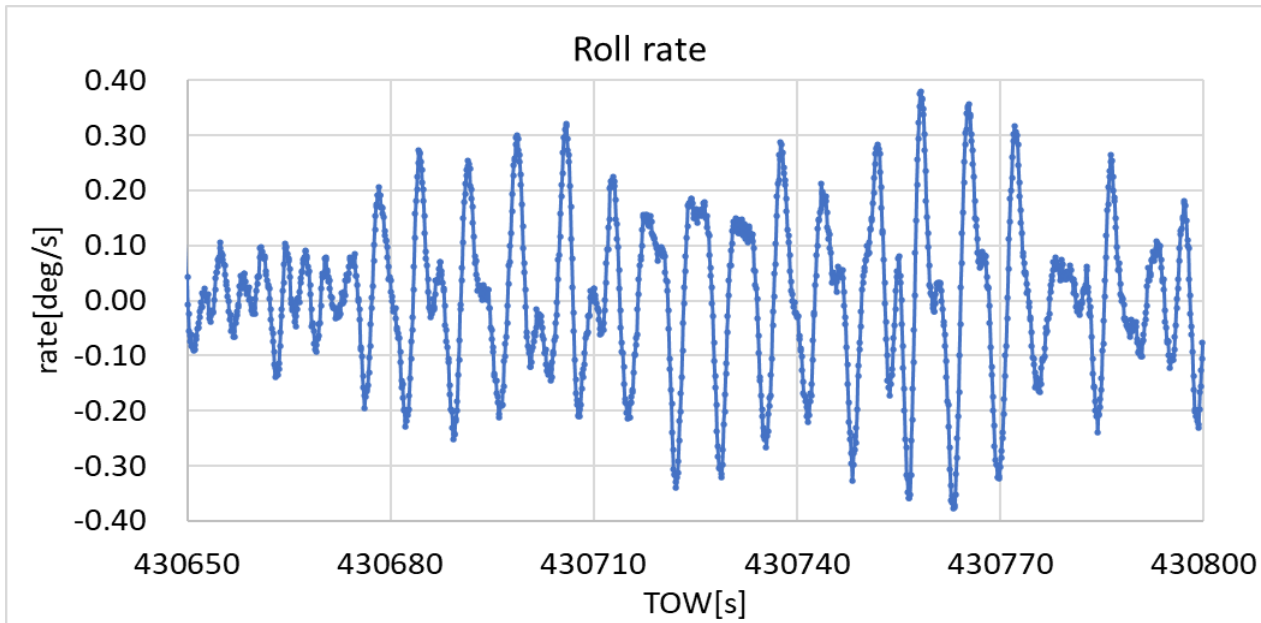


図:ある時刻間におけるRoll角速度

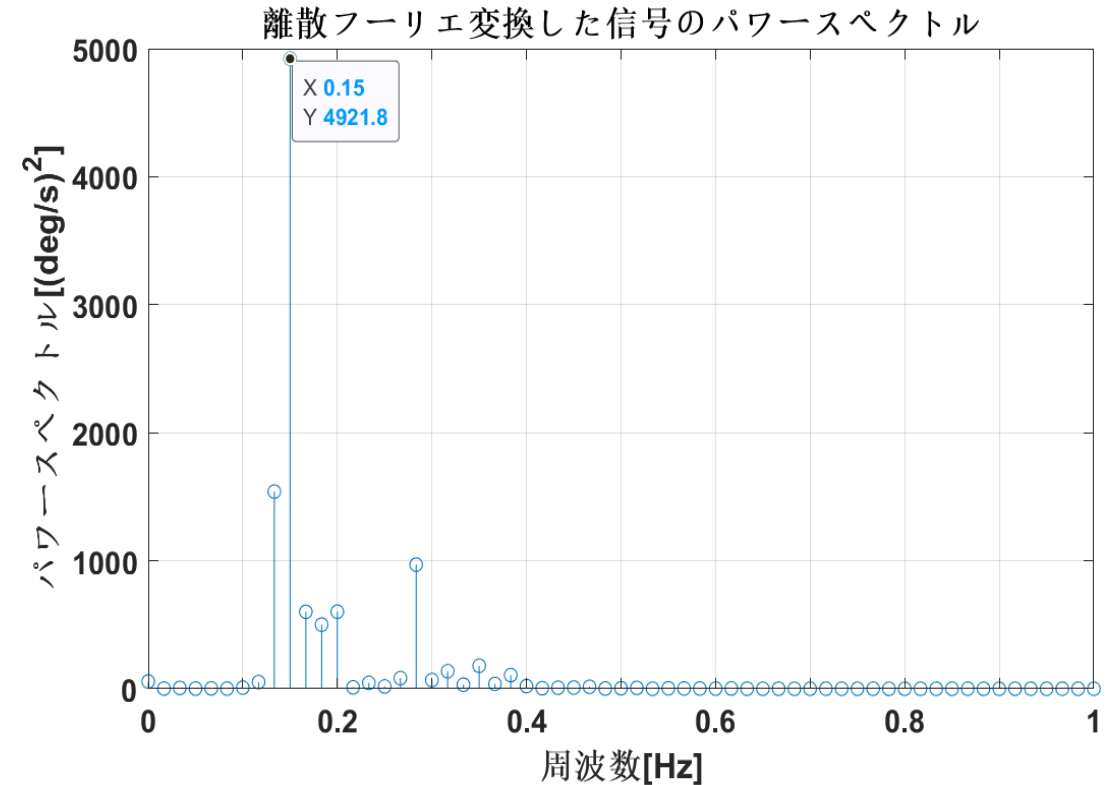


図:ある区間(60s間)でのパワースペクトル



(2)2つのGNSSアンテナの相対速度(高度成分)を用いた船の横揺れ周期計測

- 船が横揺れすればGNSSアンテナ間で相対速度が生じる。
- 船の幅(正横)方向につけた2つのアンテナの速度(高度成分)の差(↓-↑ or ↑-↓)をスペクトル解析(Lomb-Scargle Periodogram)して、横揺れ周波数・周期を求める。

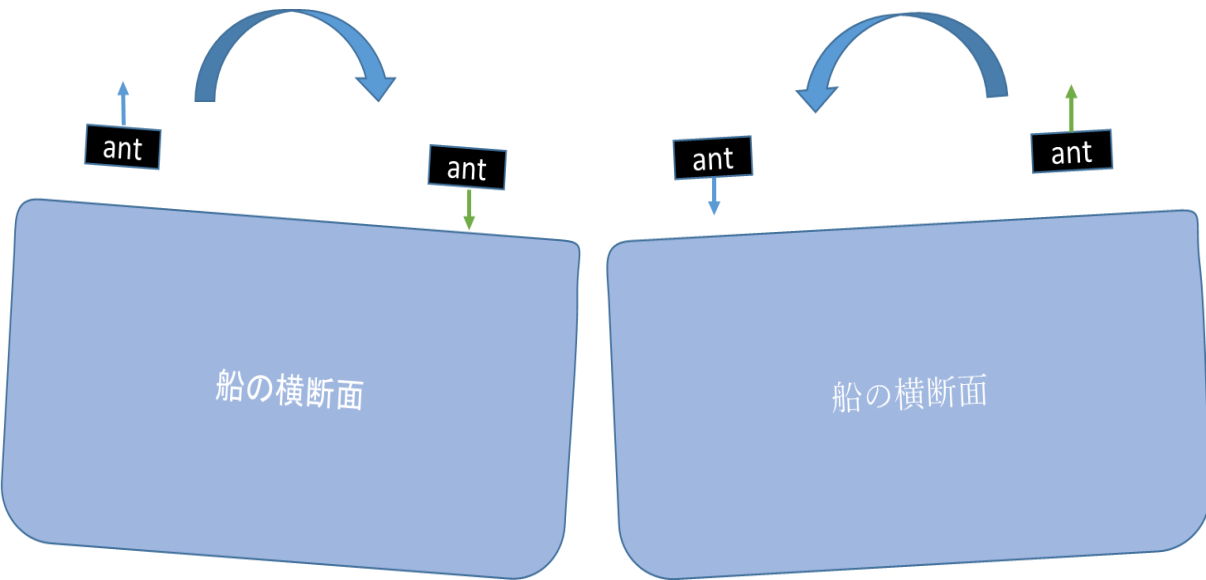


図:船の水平・幅方向に設置した2つのアンテナ相対速度(高度方向成分)

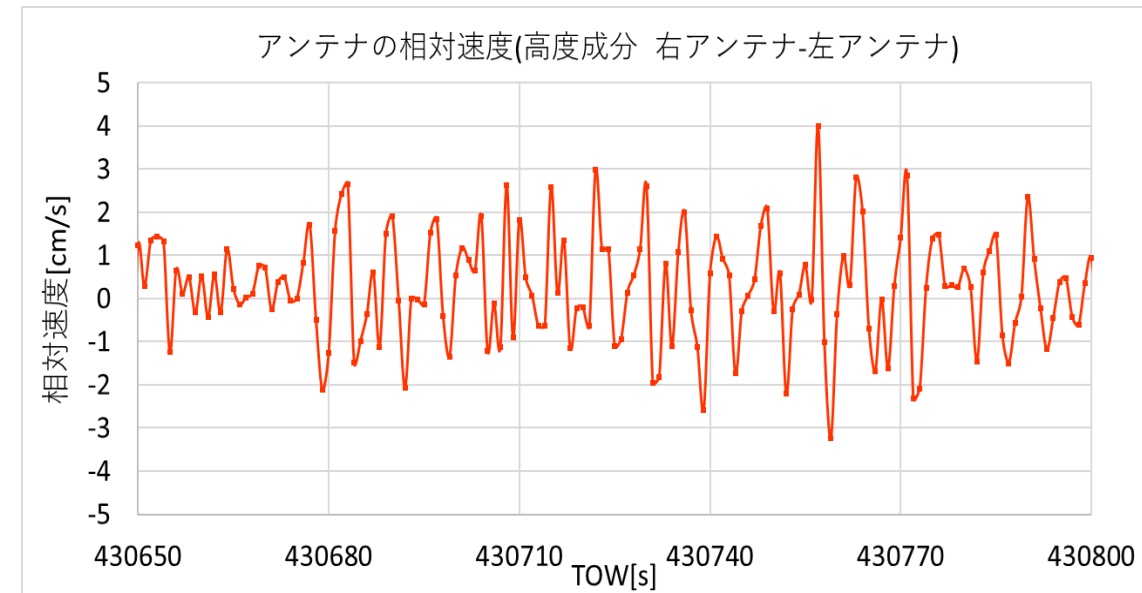


図:ある時刻間における2つのアンテナの速度(高度成分)の差

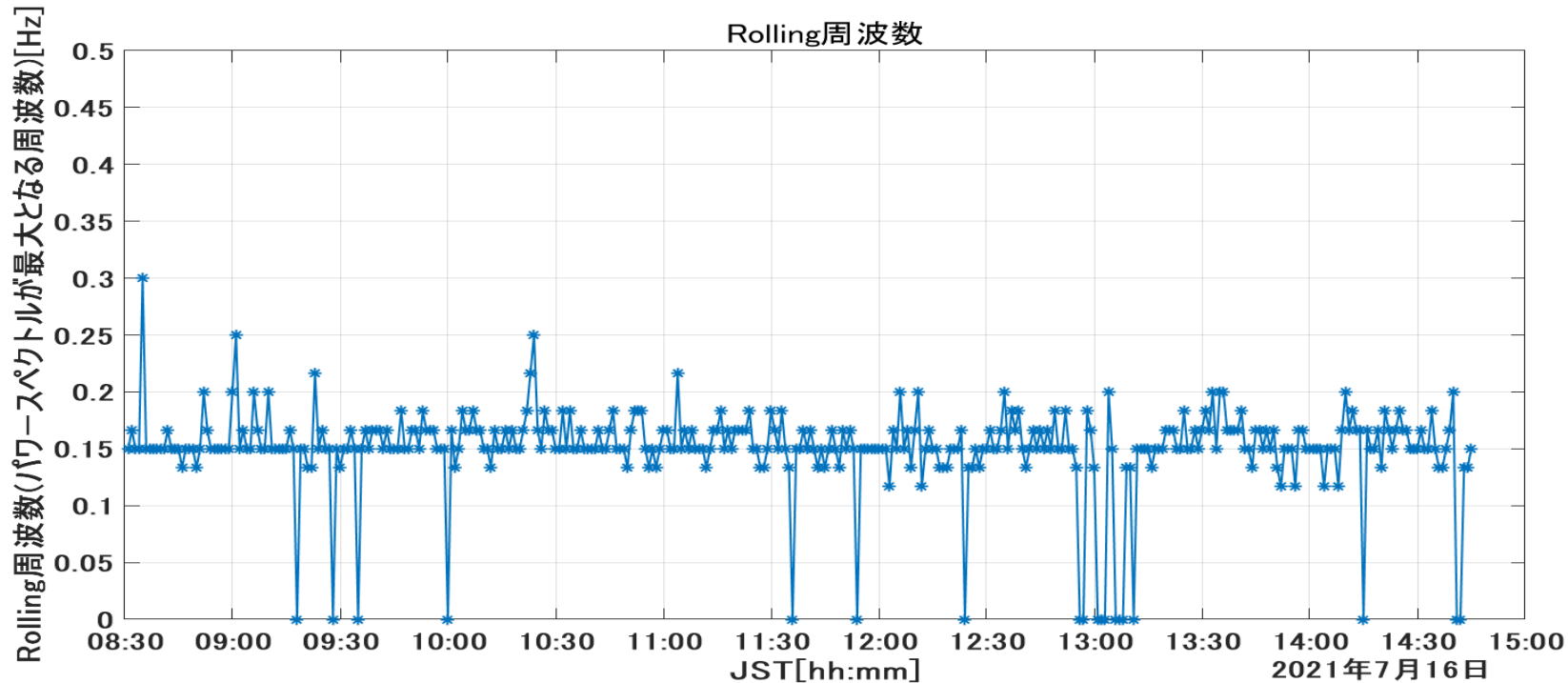
実験結果 2.

(1)IMU角速度のスペクトル解析結果 Roll rate[deg/s]

- 航行中(8:30~14:45頃) の横揺れ(Rolling)周波数/周期を示す。

表:Rolling周波数/周期結果

| | 周波数[Hz] | 周期[s] |
|-----|---------|-------|
| 最頻値 | 0.15 | 6.67 |
| 平均値 | 0.15 | 6.67 |





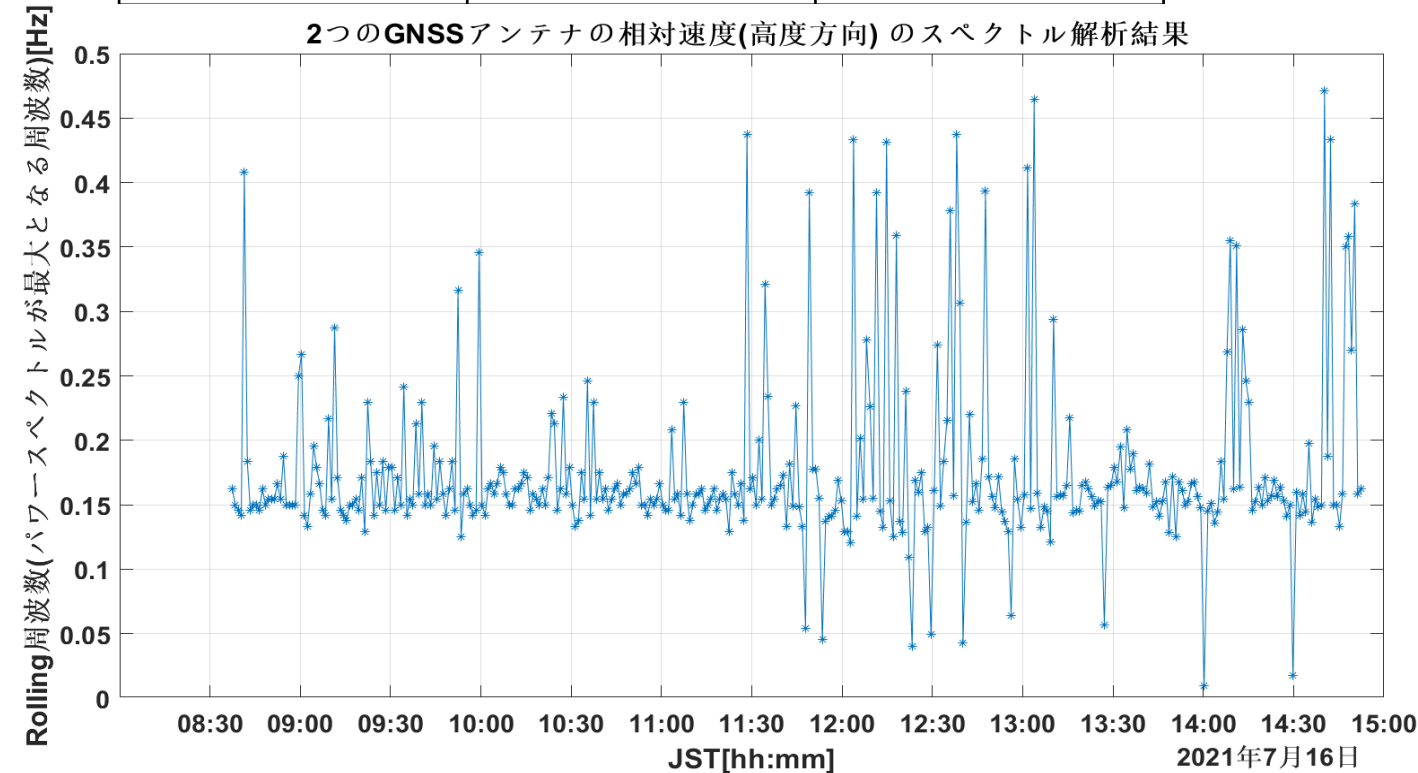
(2)2つのGNSSアンテナの相対速度(高度方向)のスペクトル解析結果

- 航行中の横揺れ(Rolling)周波数/周期を示す。

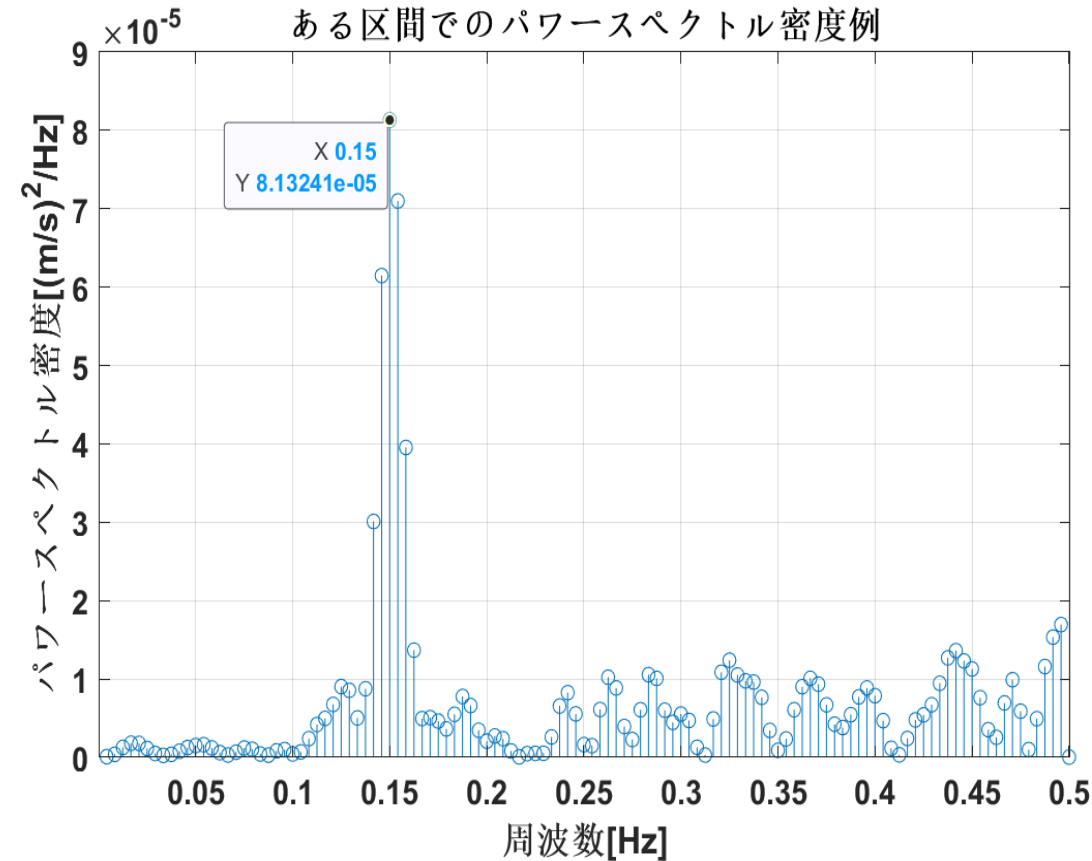
表:Rolling周波数/周期結果

| | 周波数[Hz] | 周期[s] |
|-----|---------|-------|
| 最頻値 | 0.150 | 6.67 |

2つのGNSSアンテナの相対速度(高度方向)のスペクトル解析結果

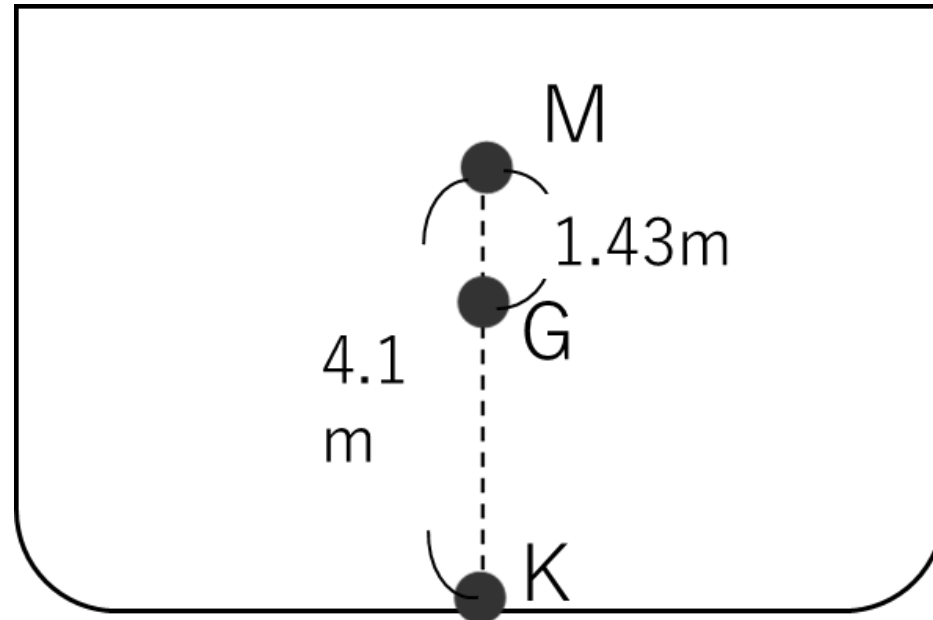
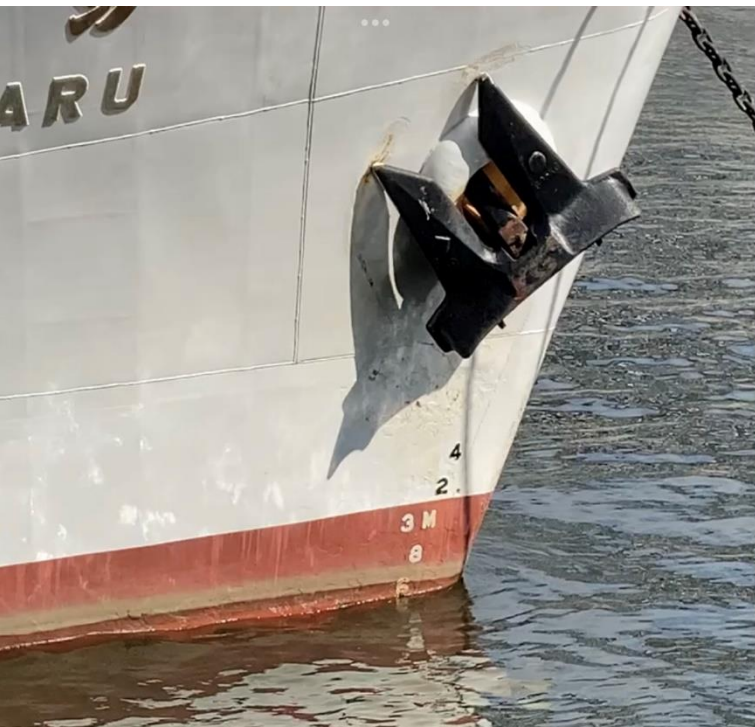


ある区間でのパワースペクトル密度例



実験結果 2.GMの推定値

- 横揺れ周期を T_r 、船幅を B とすると $T_r = \frac{0.8B}{\sqrt{GM}}$ の関係が成り立つ。
- 横揺れ周期を6.67sとしたとき、GMの推定値は $\left(\frac{0.8 \cdot 10}{6.67}\right)^2 = 1.43\text{m}$ 。
- 平均喫水値は2.83mであり、この値からKMを算出すると、約4.1mだった。





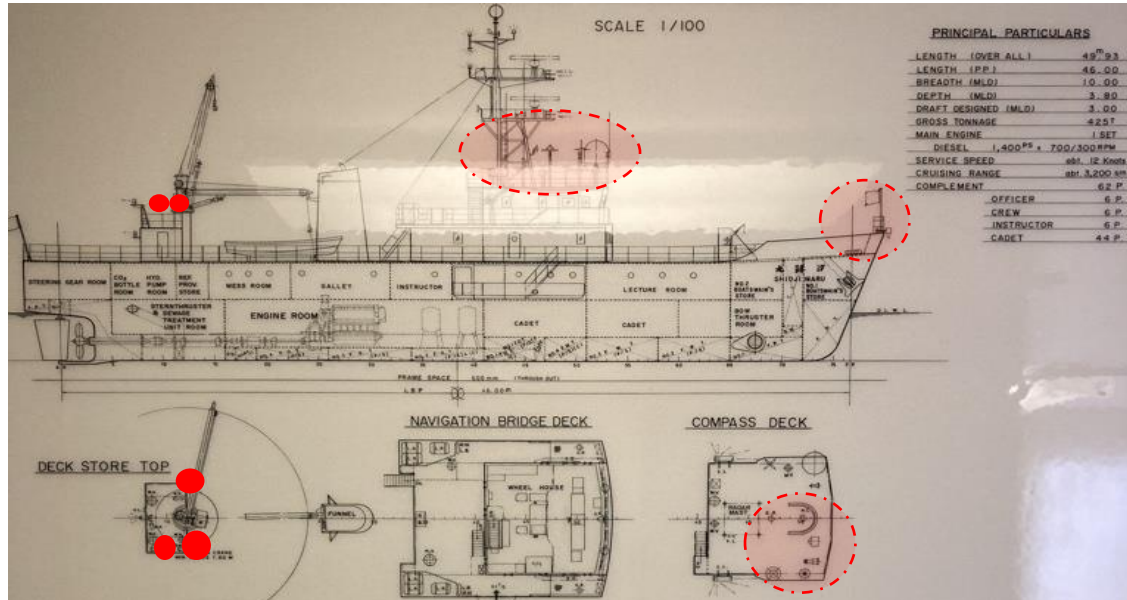
結論と今後の課題

結論

- 実験当日は風・波等の外乱による動揺は見られなかったため、変針時の横傾斜に着目し、これを捉えることができた。
- MEMS式IMUとGNSS速度を用いて小さな横揺れに対しても周期を測定することが可能なことを示せた。

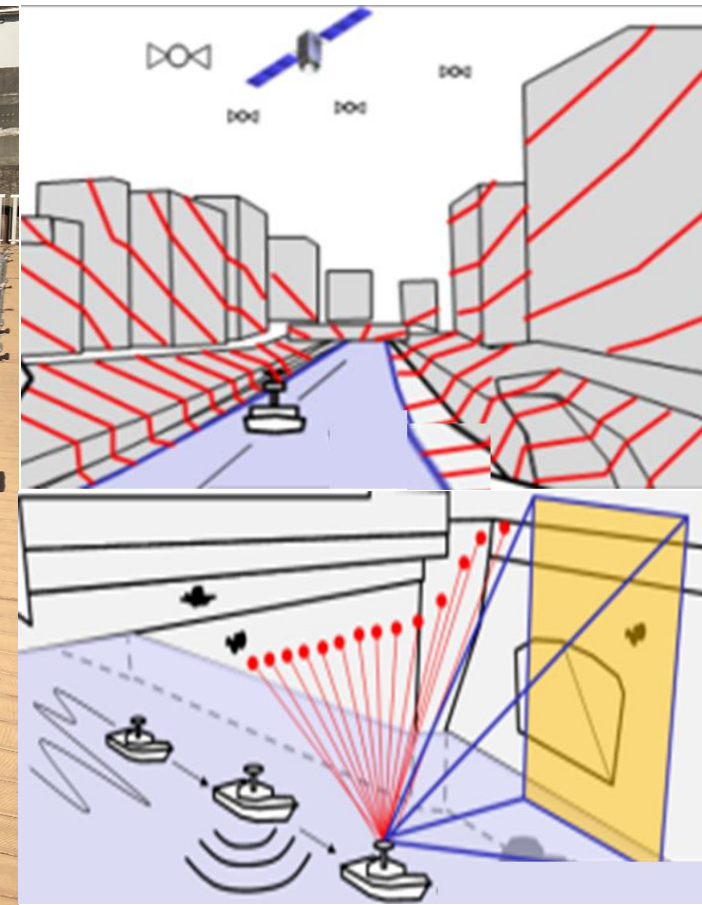
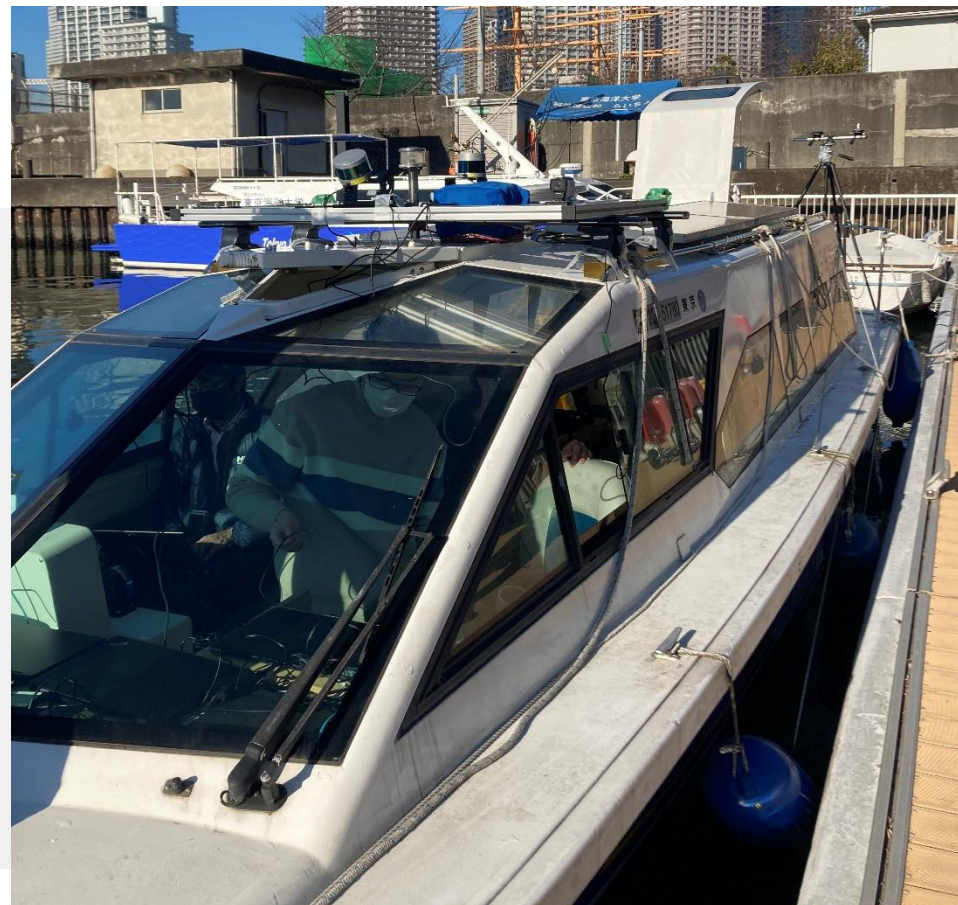
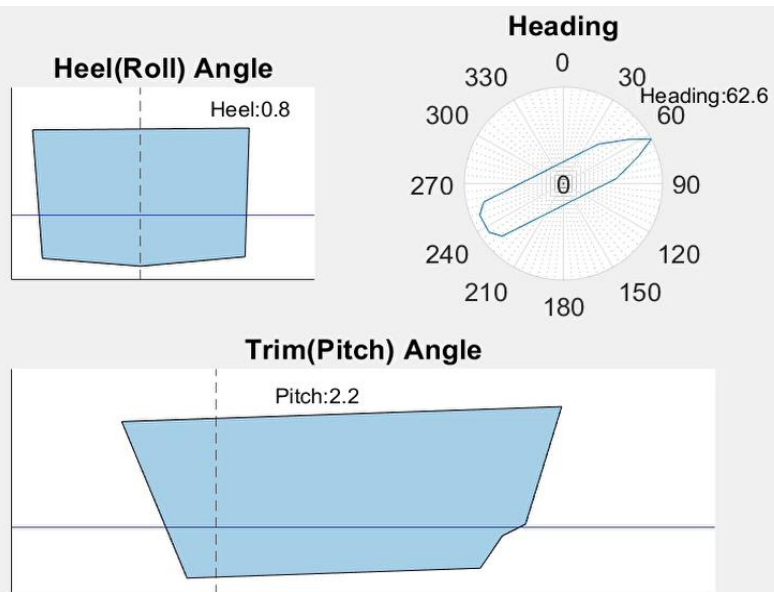
課題

- RTK測位精度が最も良くなるGNSSコンパスの設置位置・手法の調査



今後の展望

- 船の傾斜角・動揺周期をタブレット等で表示する操船支援システムの開発
- 小型船を用いた河川構造物計測時の精密姿勢測定法の開発。



図：操船支援システム(作成中)画面

図：電気推進船らいちょうによる河川構造物点検、3DMap作成のための精密測量

図引用: R3年度「都市河川構造物点検における自律型船舶利用のための水上屋内外シームレス測位」委託業務成果報告書.

文献

- 「図解 よくわかる衛星測位と位置情報」.久保信明 .2019年
- 「精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機」 .日本航海学会.2004年
- 「カルマンフィルターの基礎」.足立修一・丸田一郎.東京電機大学出版局.2013年6月
- BLUE BACKS「図解 船の科学」 .池田良穂 .2014年
- 「読んでわかる三級航海 運用編」.海技教育機構 .2017年
- MSC.363(92) PERFORMANCE STANDARDS FOR ELECTRONIC INCLINOMETERS .IMO . 2013年
MSC.116(73) PERFORMANCE STANDARDS FOR MARINE TRANSMITTING HEADING DEVICES .IMO .2000年

研究

- 「GNSSコンパスに関する基礎研究」. 青木京平 .2019年
- 「大型船舶向け横揺れ周期・傾斜角表示システムの開発」.井上 修輔一
- 「都市河川でのGNSS/SLAMによる屋内外シームレス測位」.中川 雅史、木邨 直人、尾関 友啓、久保 信明、清水 悦郎,2022年

ご清聴ありがとうございました。