



IMU・GNSS コンパスを活用した船体傾斜・動揺測定

IMU & GNSS Compass Utilization for Monitoring Motion of the Ship

2021年度卒論審査会
東京海洋大学情報通信工学研究室

小森健史(B4)
指導教員 久保信明 教授



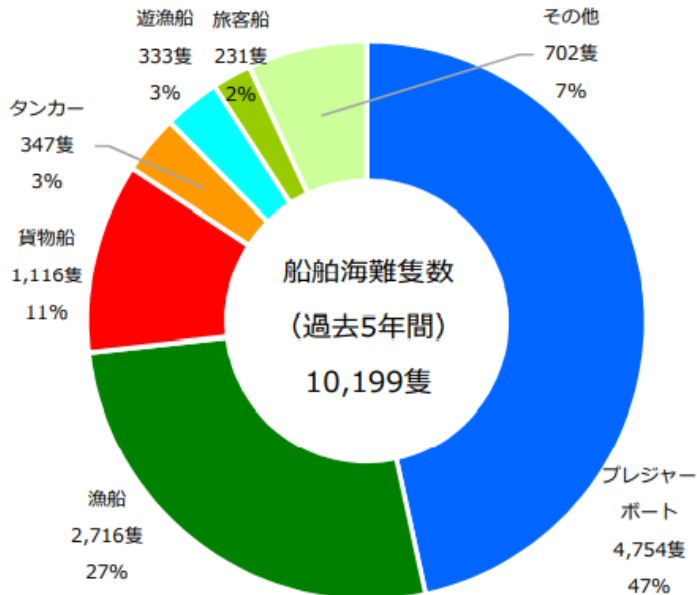
目次

- 研究背景・目的
- 導入
- 実験概要 実験航海について
- 実験方法 IMU・GNSSコンパスでの計測
- 実験結果 「船の動きを捉える」
 - 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

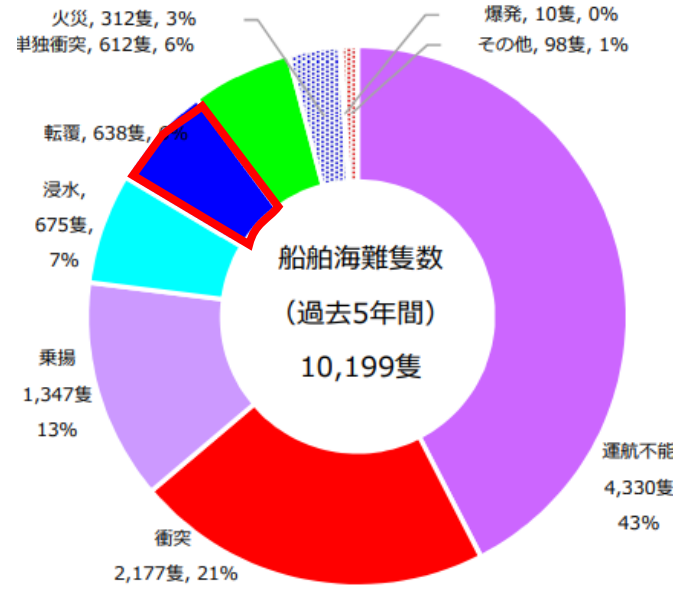
背景

- 大きな船体動揺や復原力低下は海難の原因となる。
- 転覆が船舶海難事故に占める割合は約**6%**。
- 積み荷に対しての損害も生じている。(気象・海象による損害 **16%**)

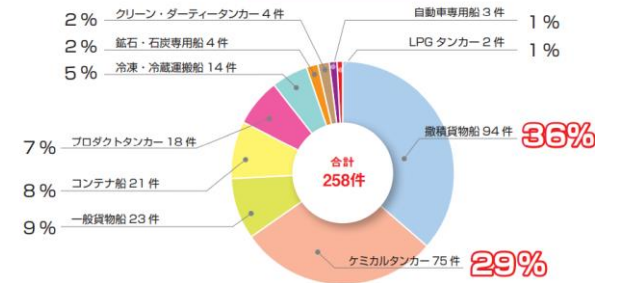
【船舶種類別の割合（過去5年間）】



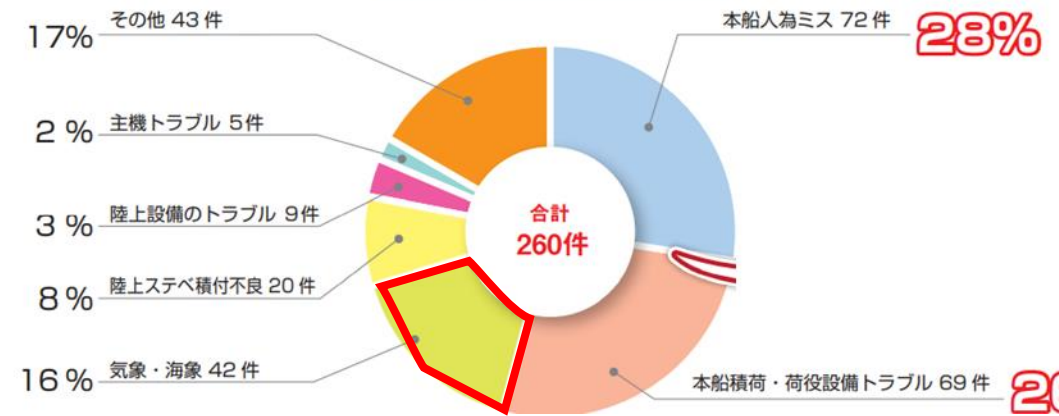
【海難種類別の割合（過去5年間）】



貨物損害船種別件数



貨物損害 事故原因



背景

- 事故事例



復原力(GM)が十分確保されてなかったことによる転覆事故



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

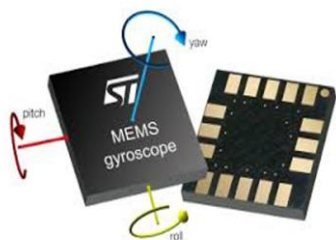
https://gcaptain.com/wp-content/uploads/2020/12/One_Apus_1-1536x1028.jpeg

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体の動態をモニタリング可能か検証する。

1. IMU・GNSSコンパスを使って船体の横傾斜角を測定。
2. IMU角速度センサーを使って横揺れ周期を計測。
→横揺れ周期から復原性の指標であるGMを推定。



MEMS式IMU ST製



NNN-31

GNSSコンパス

左:JRC製 右:FURUNO製



図:荒天航海中の様子

図の引用:[船のくらし | 旭海運 |](#)

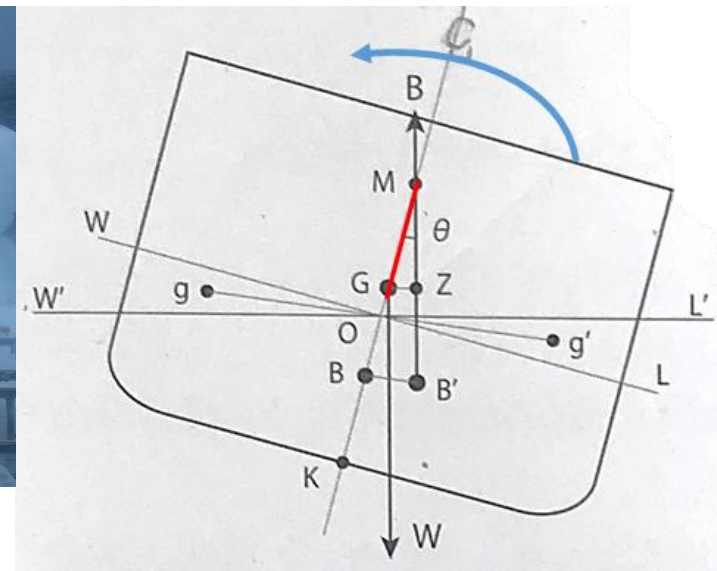


図:GMと復原性

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。

* 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。

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

* IMU角速度センサーを用いる方法

• IMUのX/Y/Z軸回りの角速度はRoll/Pitch/Yaw角速度に相当。

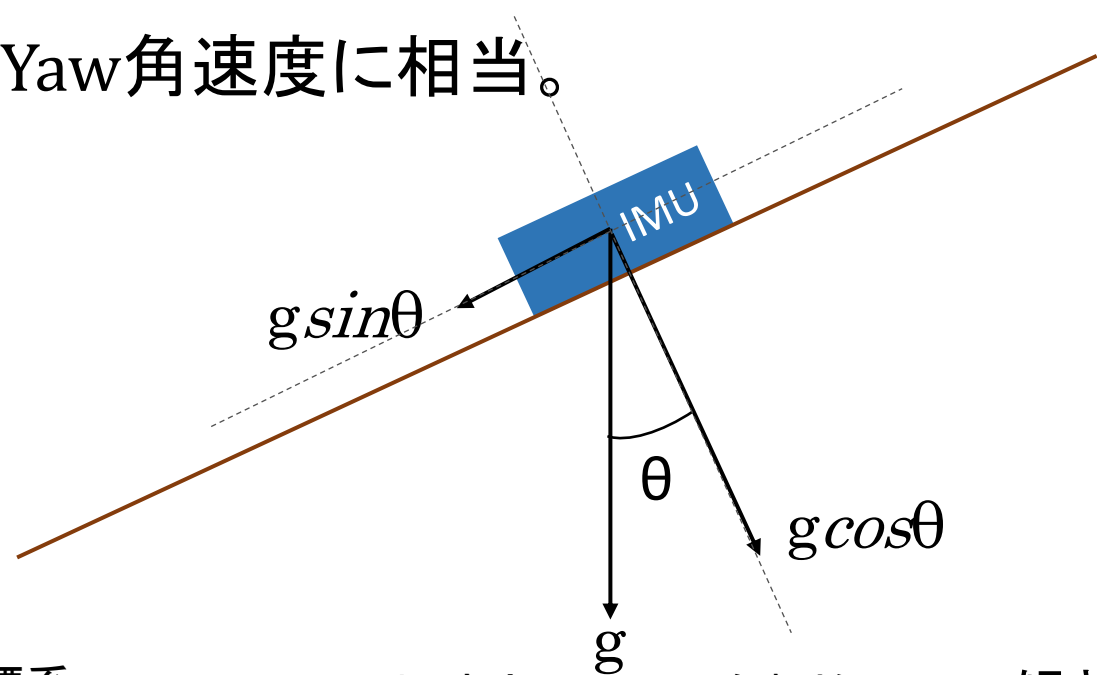
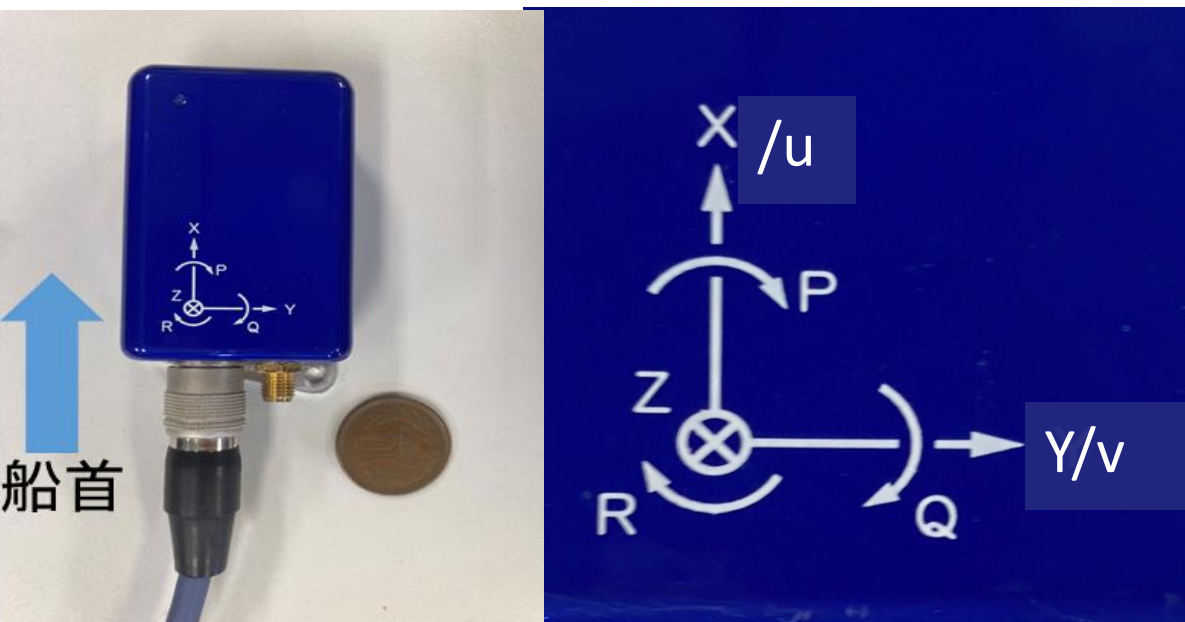


図:IMU座標系

図:加速度センサー姿勢検出 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。

正確な相対ベクトルが求めれば、正確な姿勢も求まる！

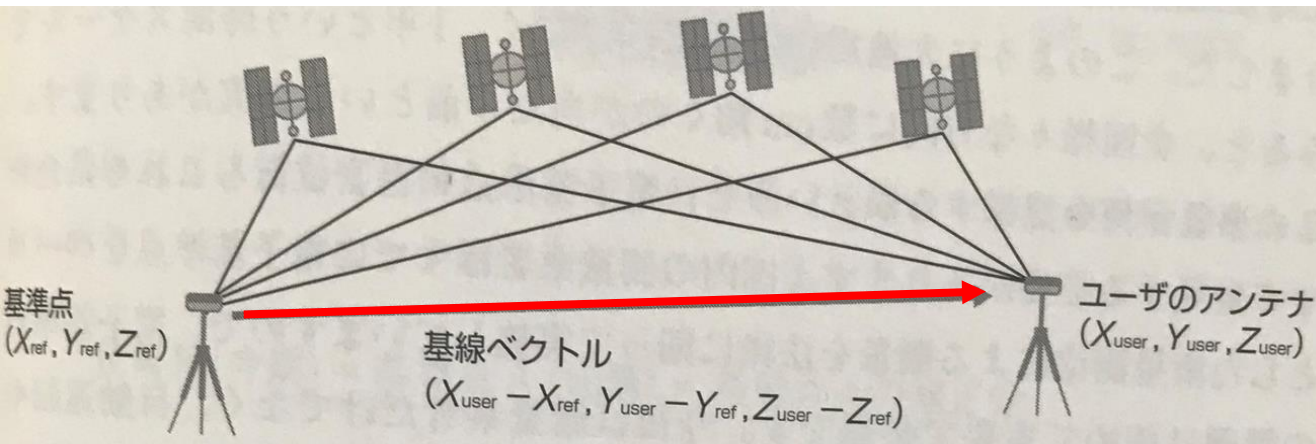


図:RTK測位と基線ベクトル



IMUの角速度とGNSSコンパスの統合(カップリング)

IMU角速度センサーの利点

- ・データ落ちなし
- ・短時間でのばらつき少ない(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、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精度が低下する

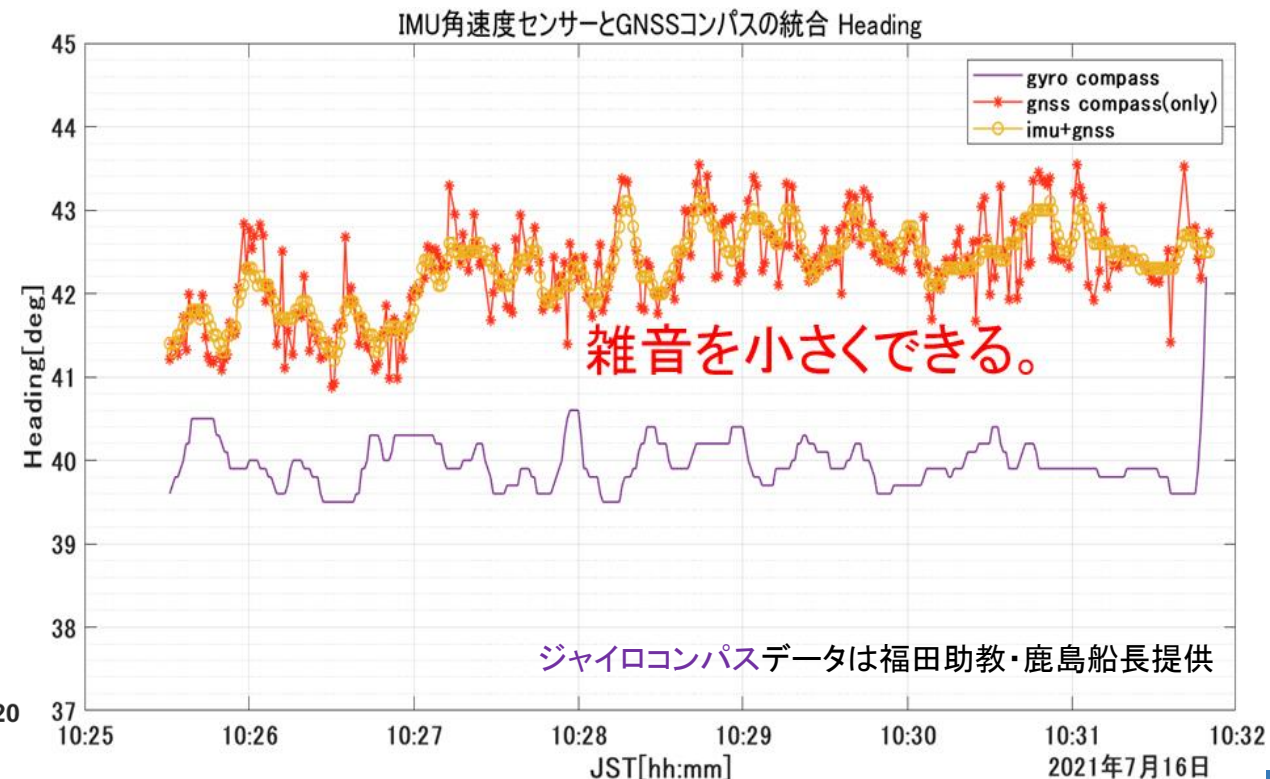
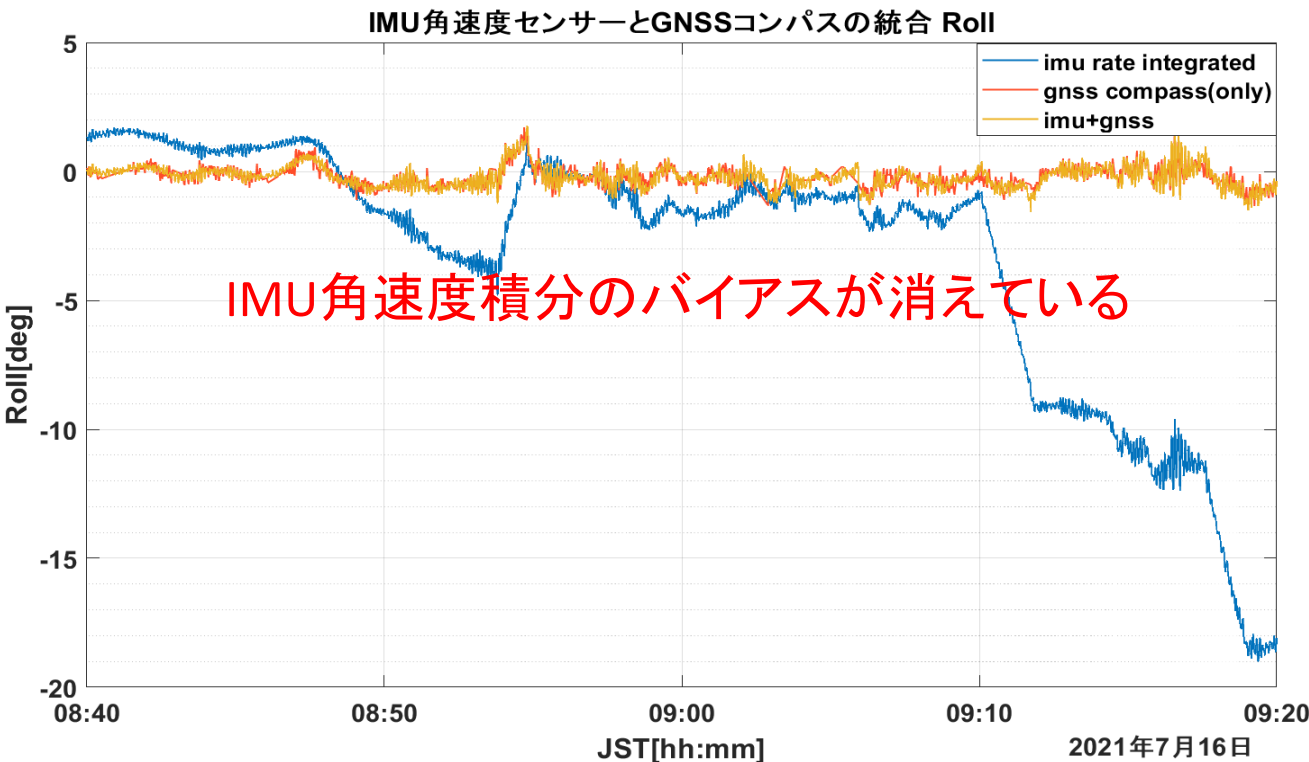
カップリング

1. データ落ちなし
2. 正確
3. 高精度



IMUの角速度とGNSSコンパスの統合(カップリング)結果

- IMU角速度の積分値、GNSSコンパスの値をそれぞれ50秒間で移動平均を取り、移動平均の差分をバイアスとして1秒毎に角速度積分値から引いた。
- Heel(Roll)/Headingの統合結果を以下に示す





実験概要

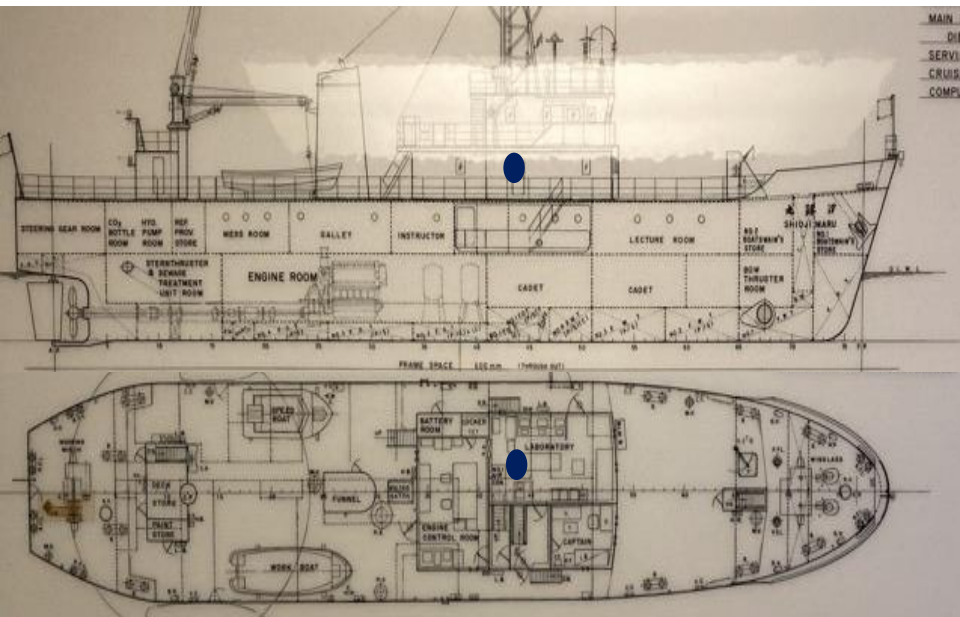
- 7月15,16日に汐路丸による実験航海に参加。
- IMU及びGNSSコンパスのデータを16日(復路)に取得。



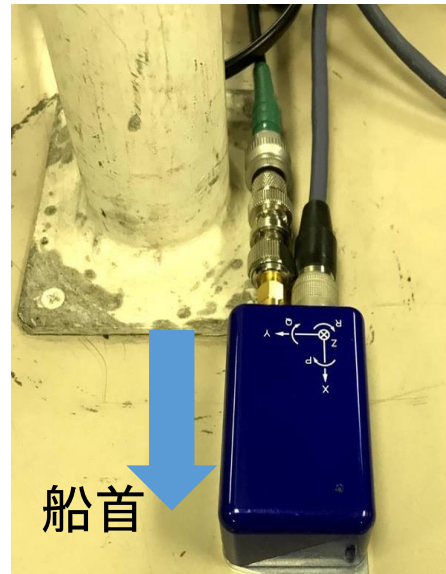
図:7月16日航跡(16日はMarine Trafficより)

実験方法 IMUでの計測

- 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

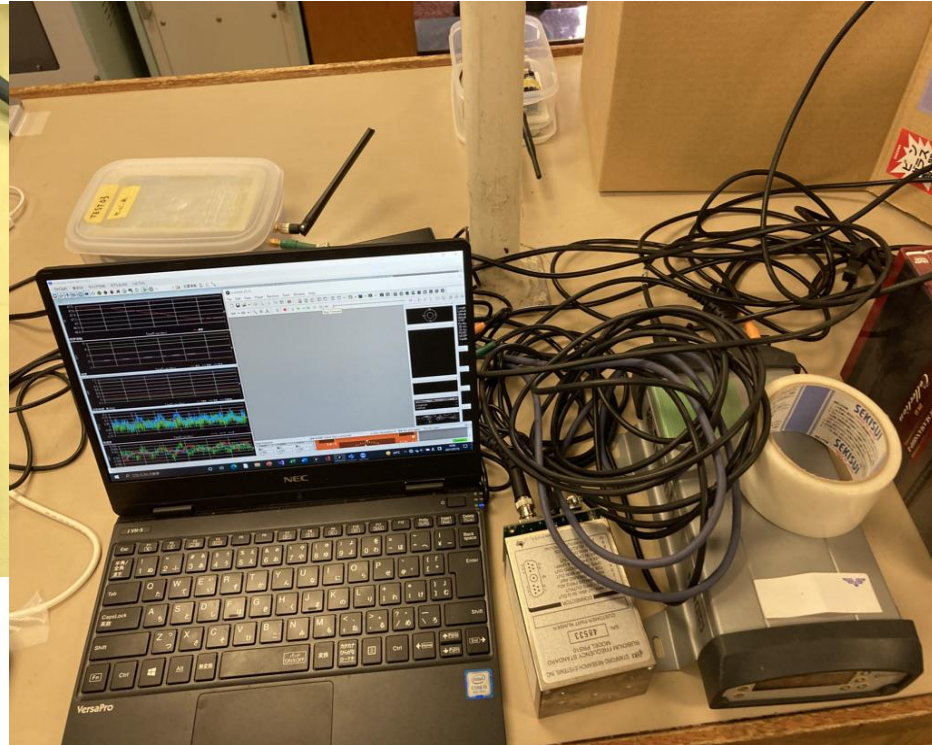
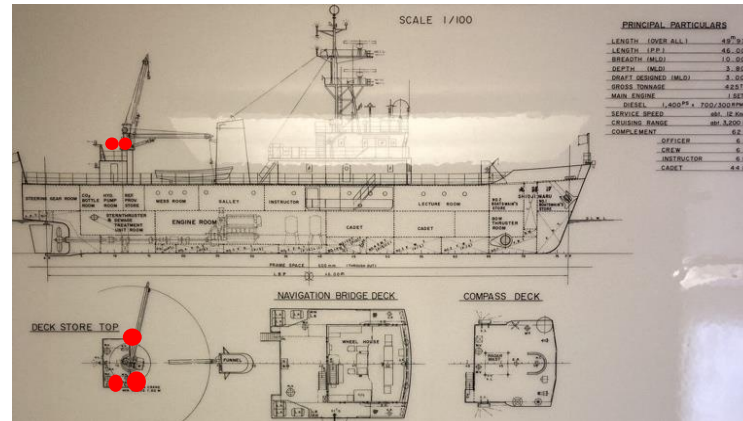
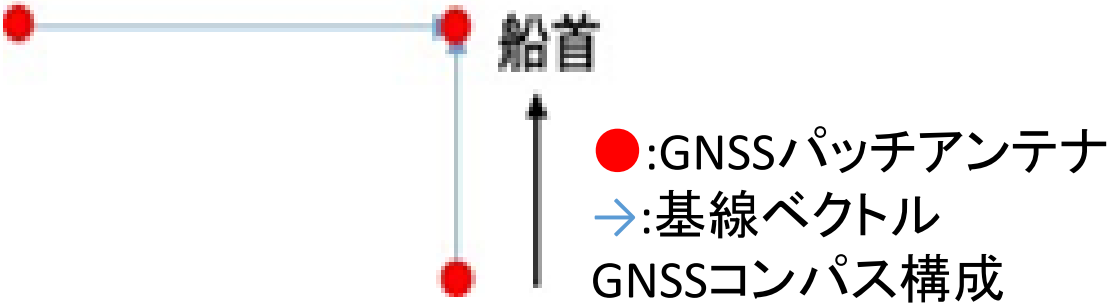


図:IMUのデータ記録

方法 GNSSコンパスでの計測

- ・ 汐路丸の後部デッキ上にアンテナを3台設置しGNSSコンパスを構成。



GNSSアンテナ設置位置

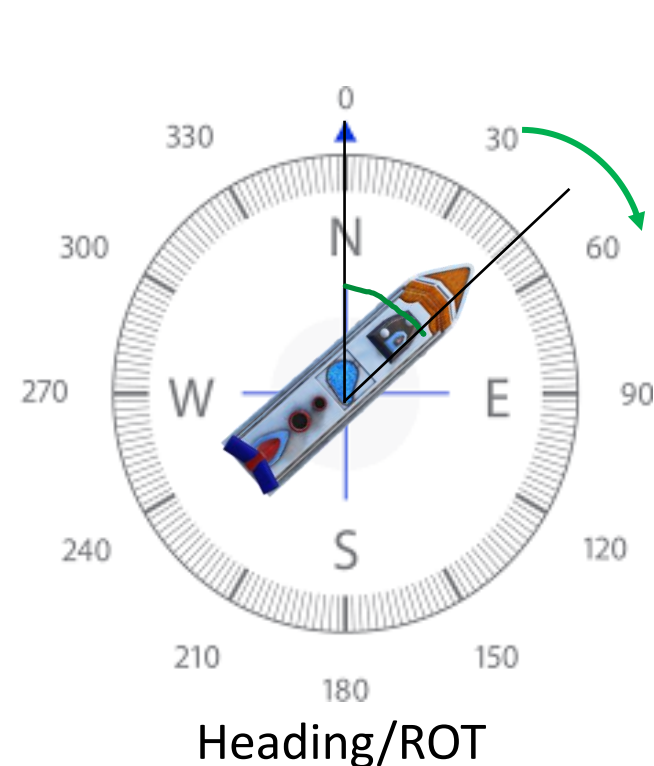
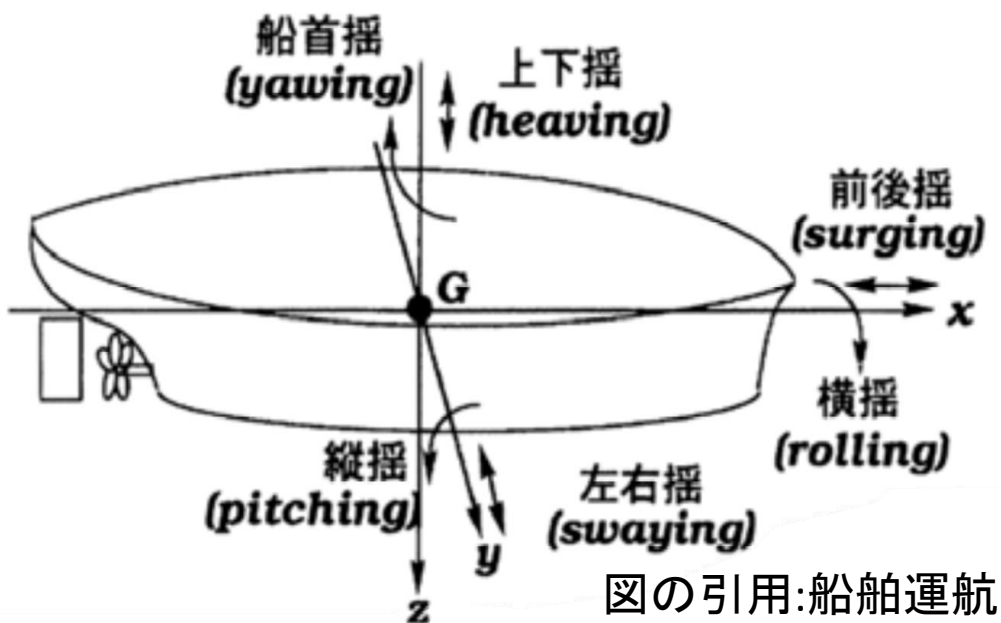


図:GNSSコンパス(横から)

(正面から)

実験結果 1. 変針時の横傾斜について

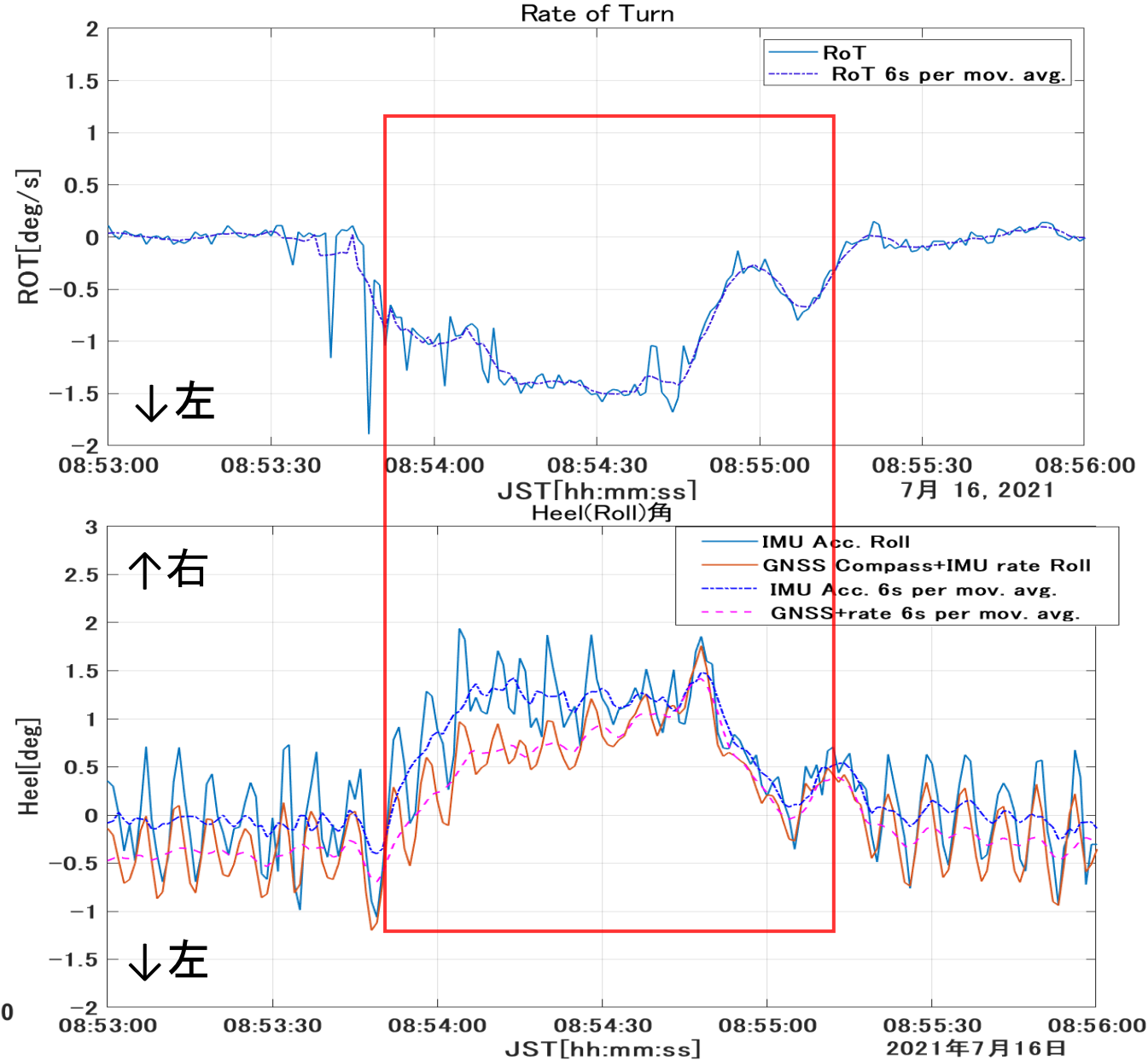
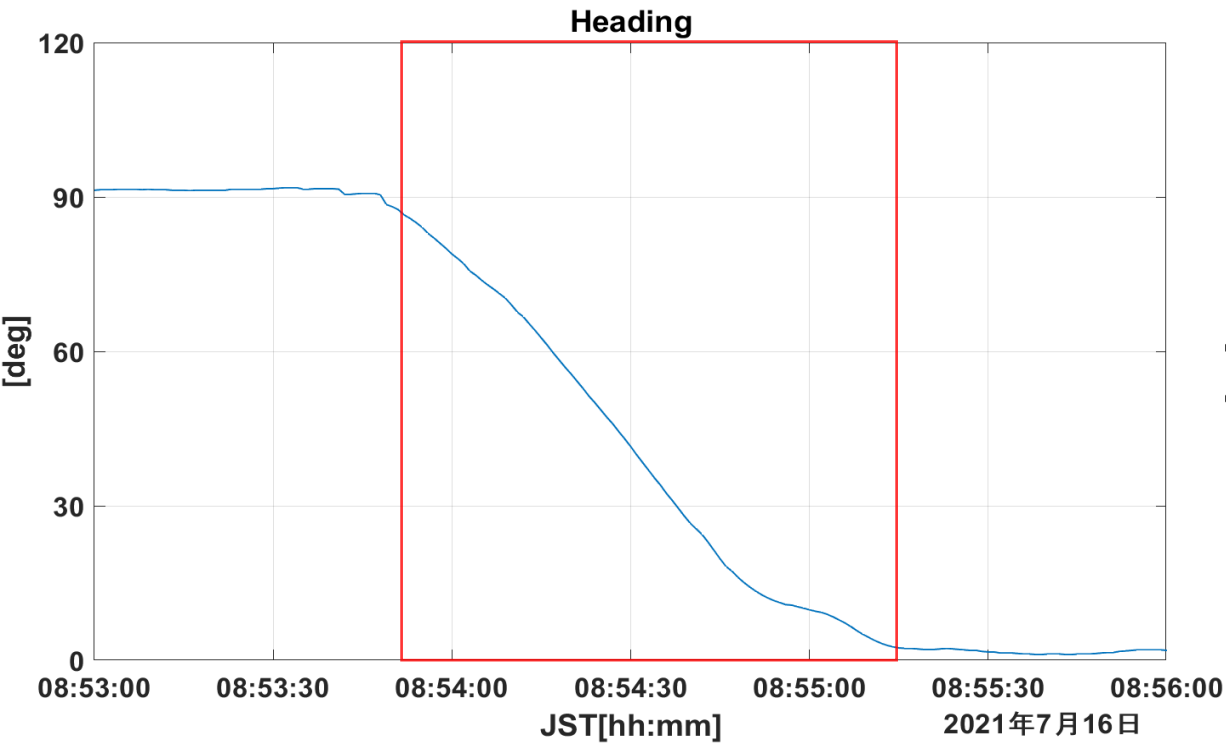
- ROT(Rate of Turn)[deg/s]:回頭(旋回)角速度のことで、1秒間に何度船首方位が変化するかを表す。右に回頭するのを正とする。
- Heel(Roll)角[deg]:横傾斜角のこと。右に傾くを正とする。



実験結果 1. 変針時の横傾斜について

左変針の例

- 回頭が発達してくる(ROTが大きくなる)と旋回外側(右)に最大で 1.8° 程傾いている(外方傾斜)。





実験結果 2.Rolling周期からGMの推定

- IMUの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(DFT)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]= $\frac{1}{\text{周波数[Hz]}}$)

- 次式からGMを計算できる

$$\text{横揺れ固有周期: } T_r = \frac{0.8B}{\sqrt{GM}}$$

$$GM = \left(\frac{0.8B}{T_r}\right)^2$$

B:型幅(=10m 汐路丸)

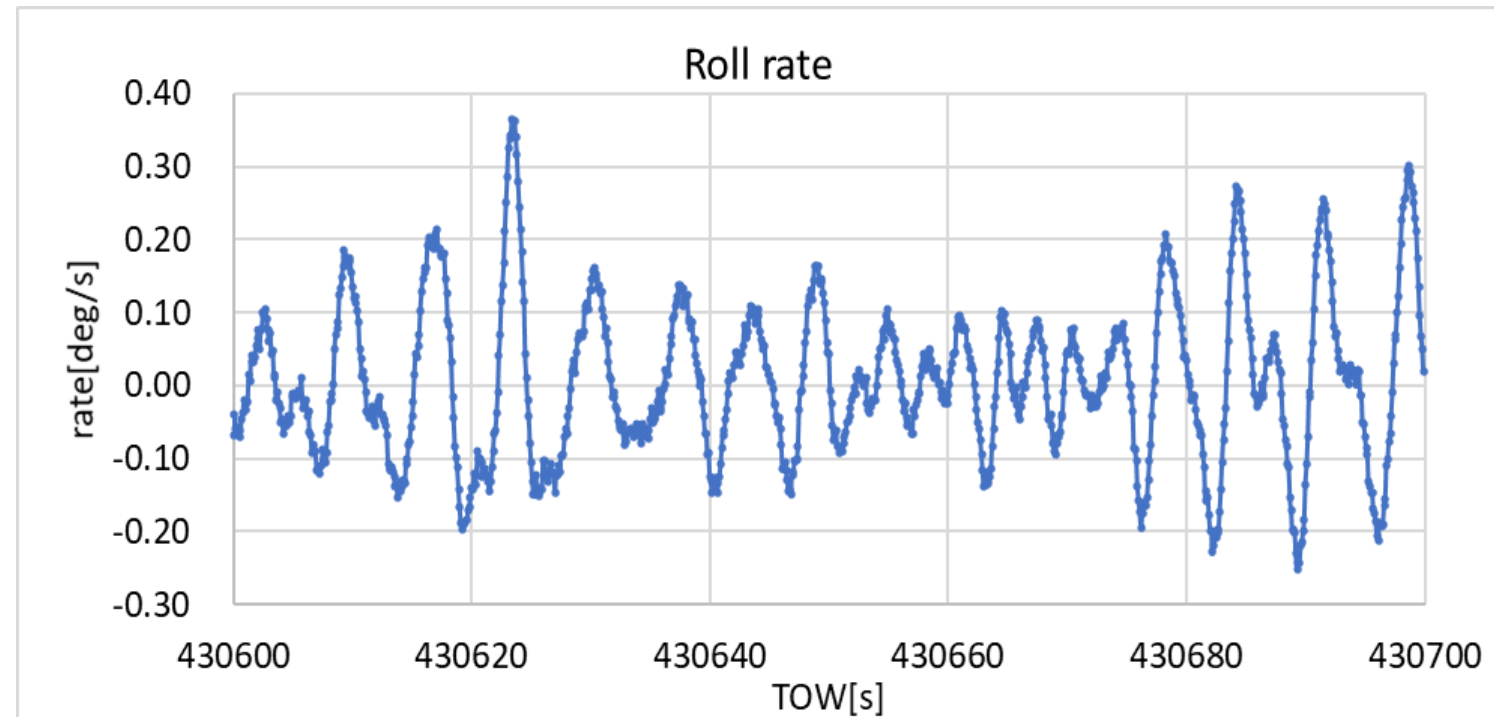


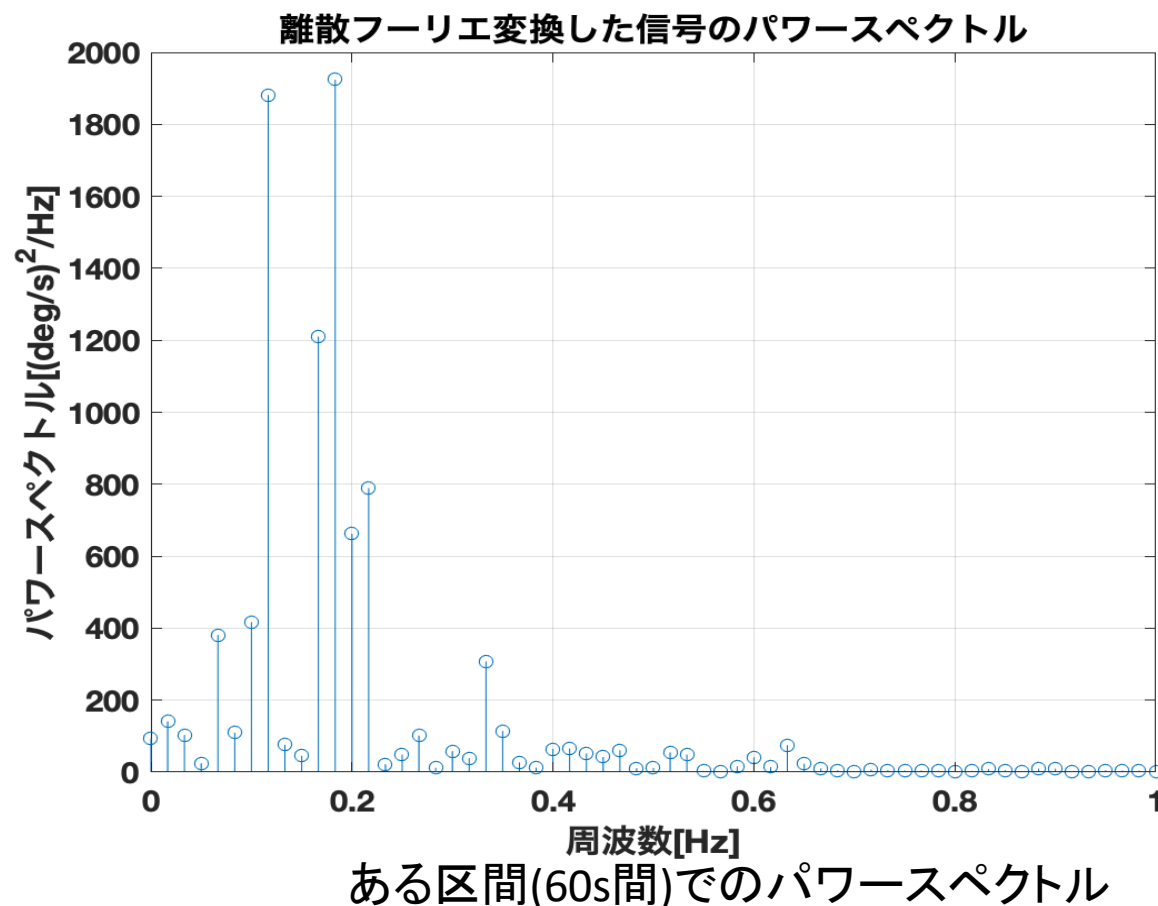
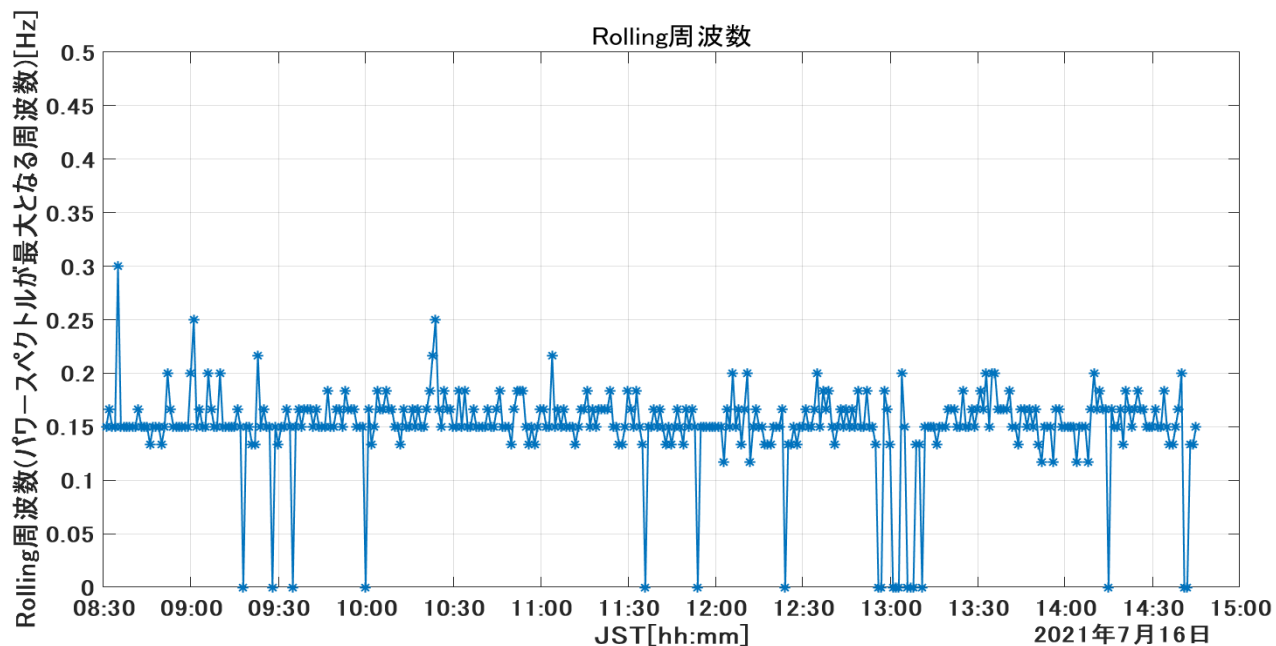
図:Roll角速度

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)連続的に解析した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
平均値	0.150	6.67



実験結果2 GMの推定値

- 横揺れ周期を6.67sとしたとき、GMの推定値は $(\frac{0.8*10}{6.67})^2 = 1.43\text{m}$ 。
- 当日の平均喫水値は2.83mであり、この値から(T)KMを算出すると、約4.1mだった。



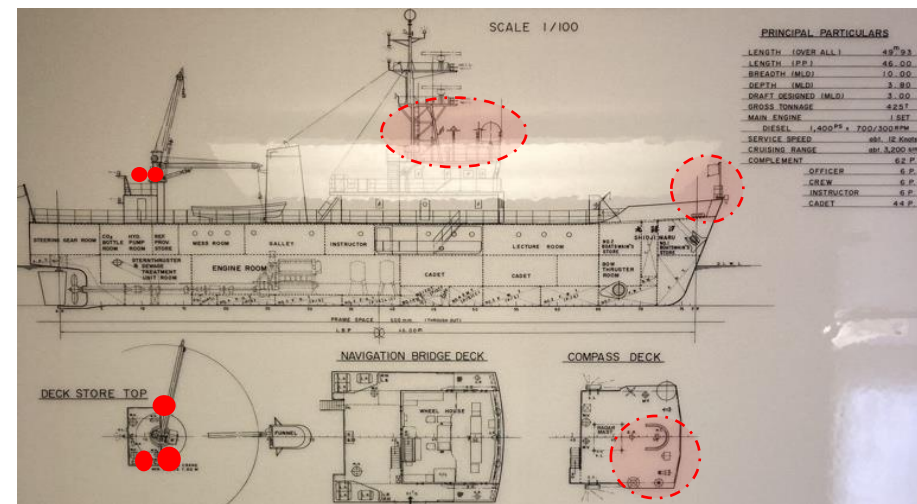
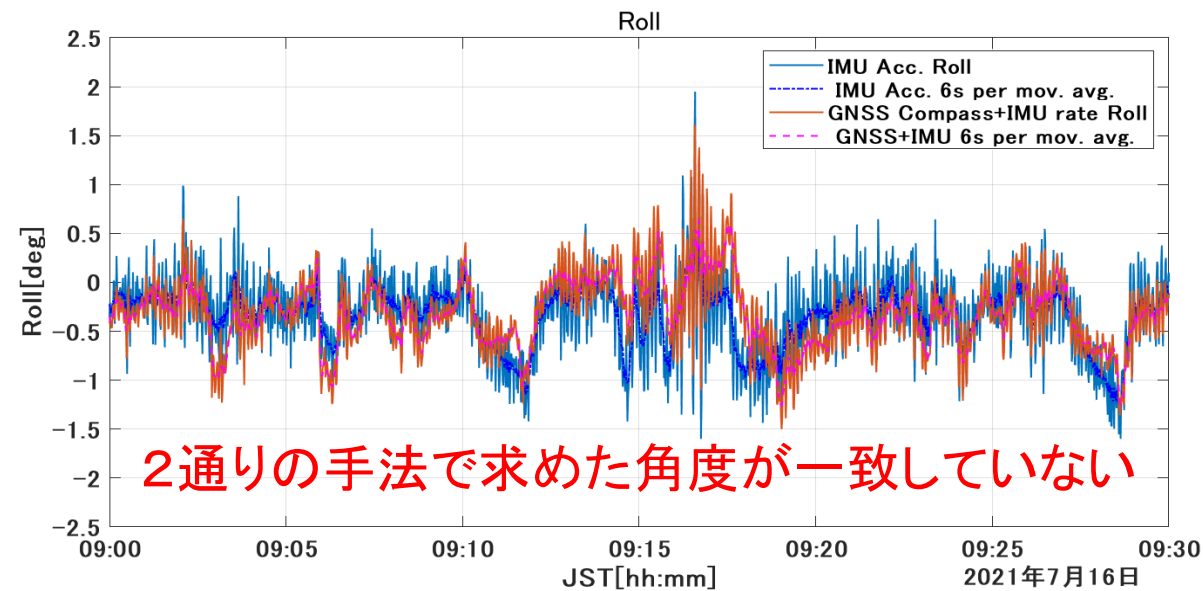
結論と今後の課題

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。
- 横揺れ周期についても求めることができ、これからGMを推定した。

課題

- 今回求めた角度及びGM推定値の正確性を調査する必要がある。
- GNSSコンパスの設置位置・手法の改善



展望

- ・リアルタイムで船の傾斜・動揺を表示する操船支援システムの開発
- ・精密測量のための正確な姿勢測定

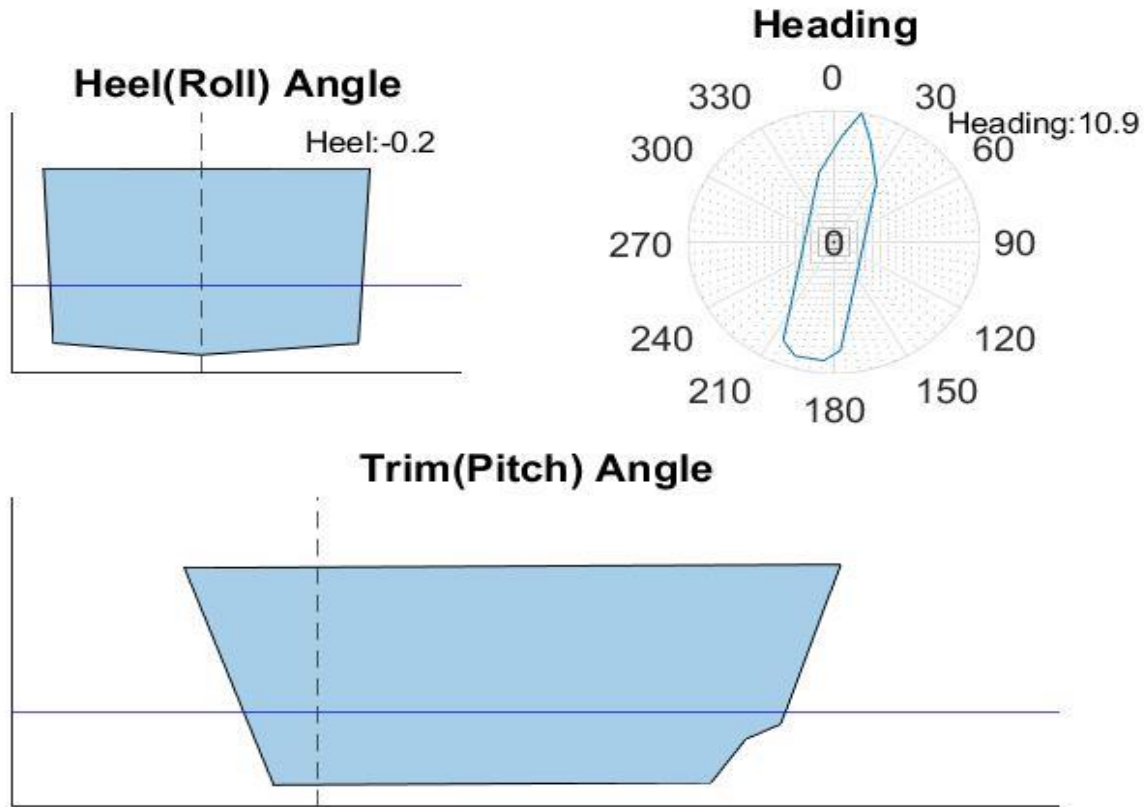


図: 操船支援システム(作成中)画面

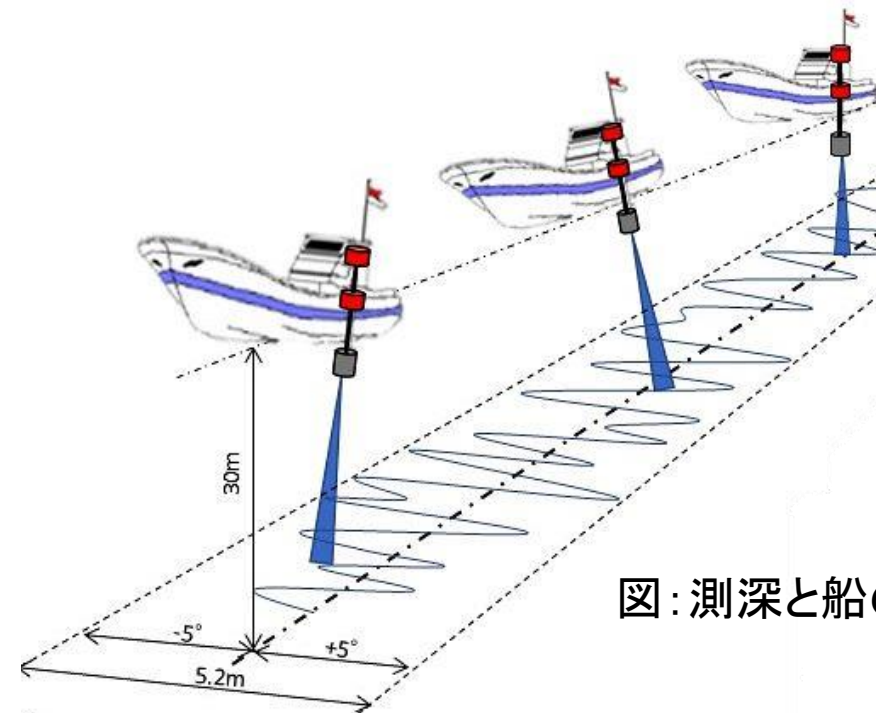


図: 測深と船の傾斜

船のローリング角度を $\pm 5^\circ$
:すれば水深30mの海底では
:2.6m幅の海底を探索できる。

図引用:[CLASとMADCOCAの活用で海底地形図を自動作成するDeSETプロジェクト](#) | [QZSS公式サイト](#) - [内閣府位置情報の活用事例](#) | [みちびき\(準天頂衛星システム\)](#)

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
- 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(MSC)
- フェリーありあけ 事故報告書 .運輸安全委員会

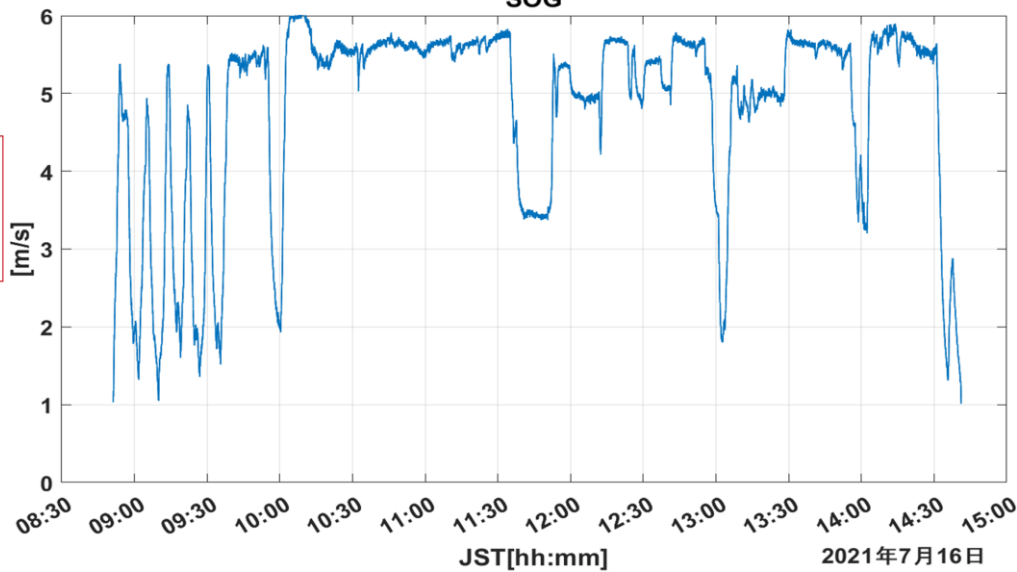
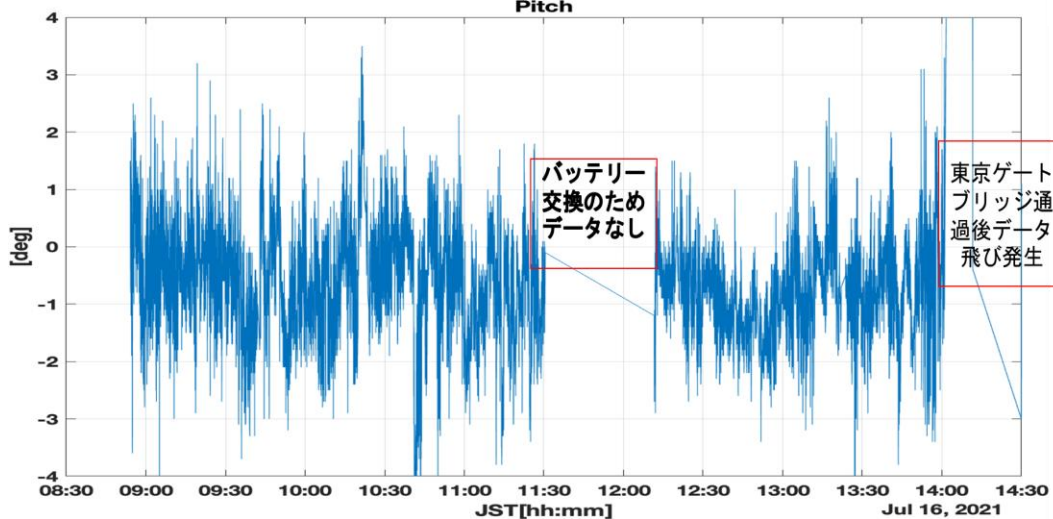
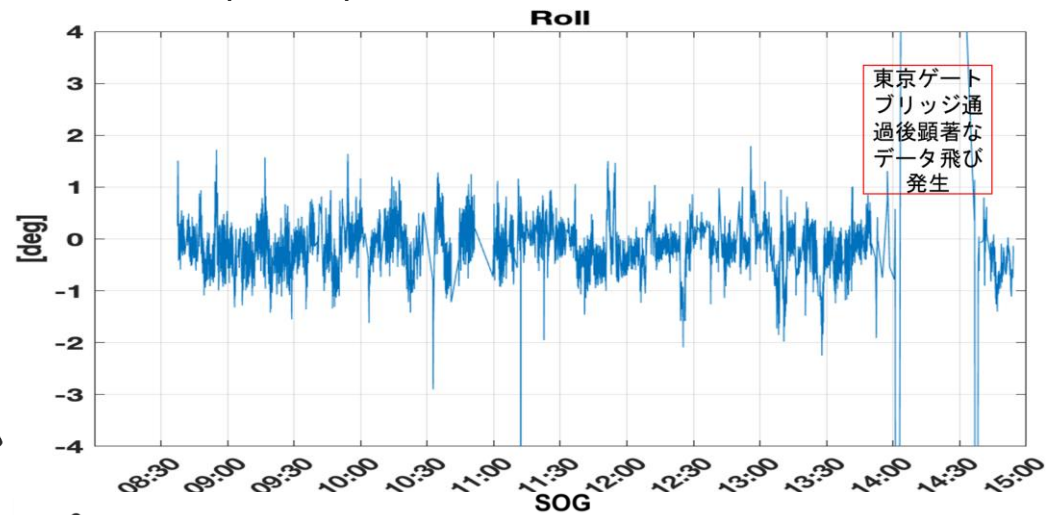
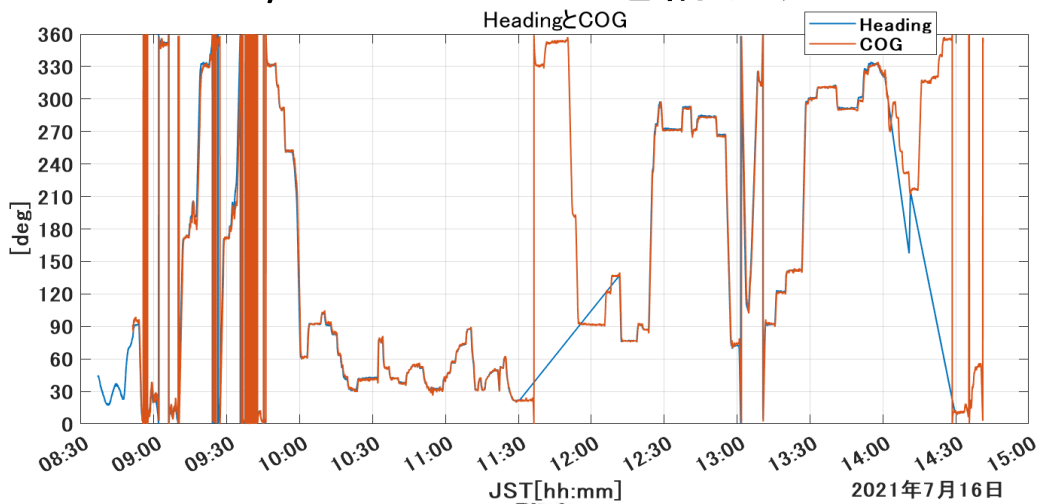
研究

- 「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
- 「船体運動測定装置の開発」. 高岡俊輔・村田航・久保雅義.2002年
- 「GPSを利用した錨泊の実時間監視」.鈴木 治 ・中村 武史 ・浪江 宏宗 ・安田 明生.1997年

ご清聴ありがとうございました。

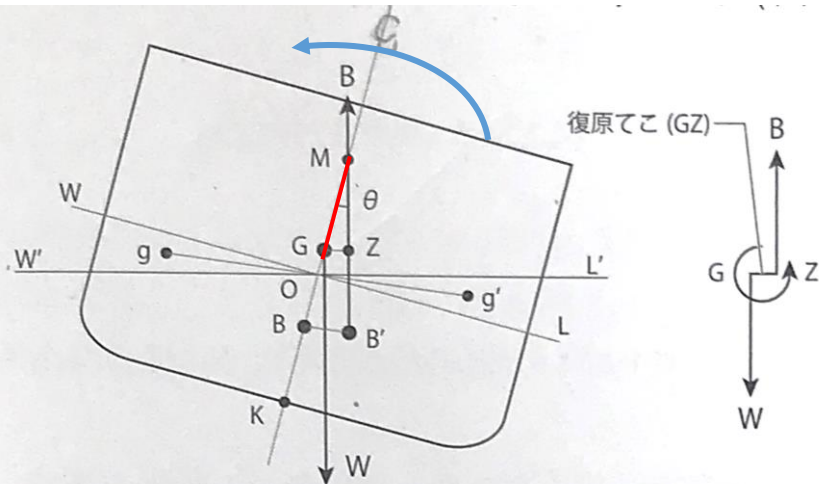
GNSSコンパス(・アンテナ)で取得したデータ

- Heading(・ROT)/Pitch...船首尾線方向のアンテナからコンパス計算
- Roll...両舷側方向のアンテナからコンパス計算
- SOG/COG...コンパスを構成するGNSSアンテナ1台(右前)をGNSS速度計として利用

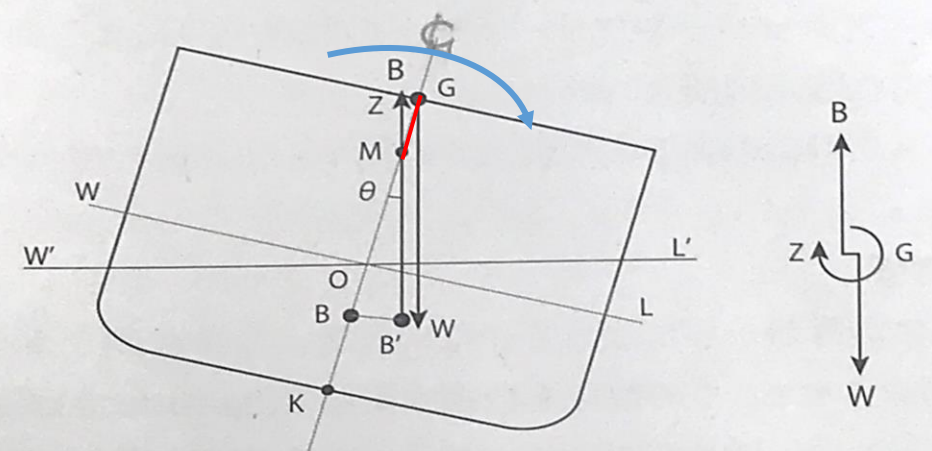


GMと復原性

- 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

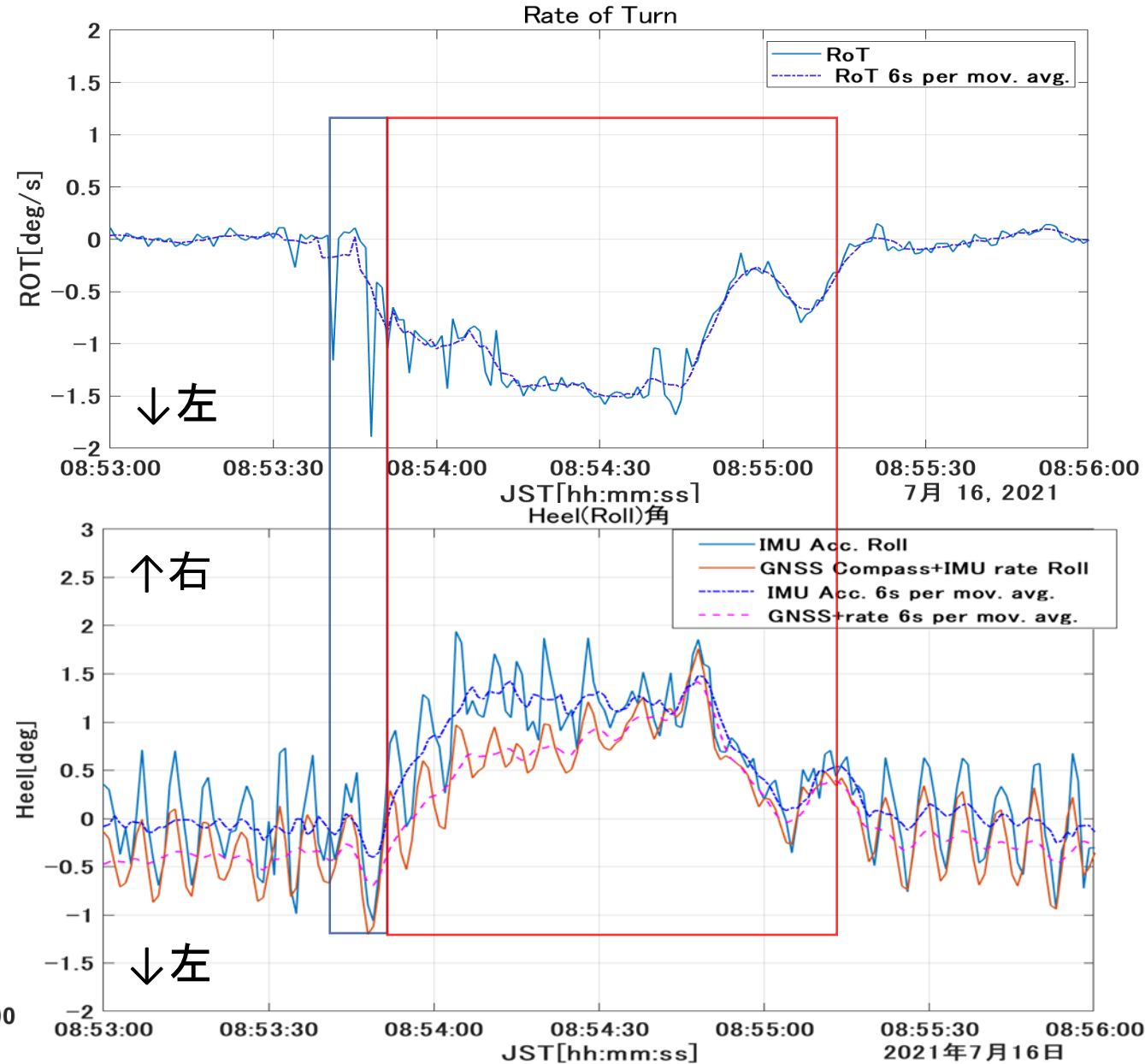
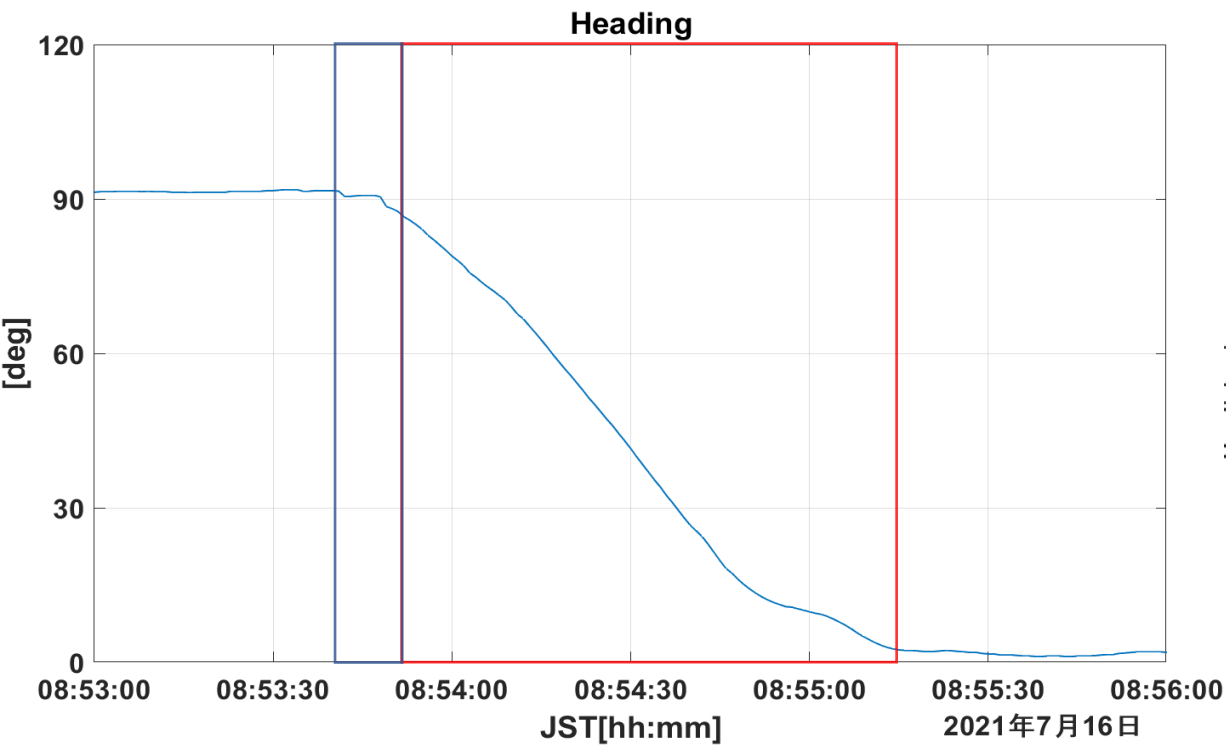
図 2.2.1.5 復原性 (不安定)



実験1結果 旋回時の横傾斜について

左変針の例

- 操舵直後は旋回内側(左)に(初期内方傾斜)、旋回運動が発達してくる(ROTが大きくなる)と旋回外側(右)に傾いている(外方傾斜)。





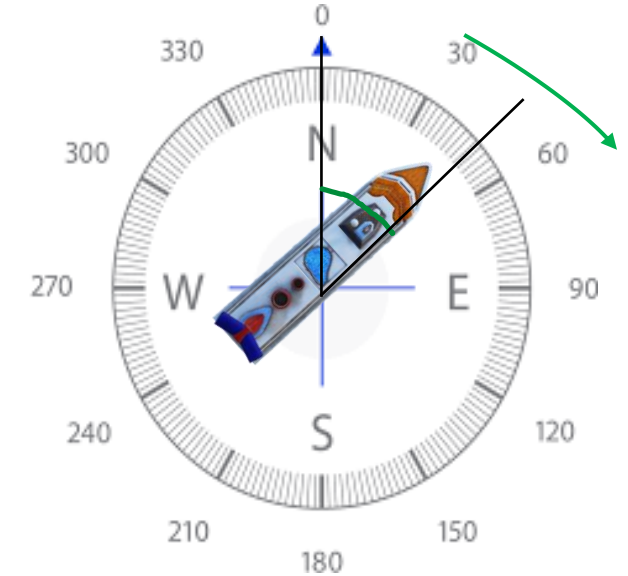
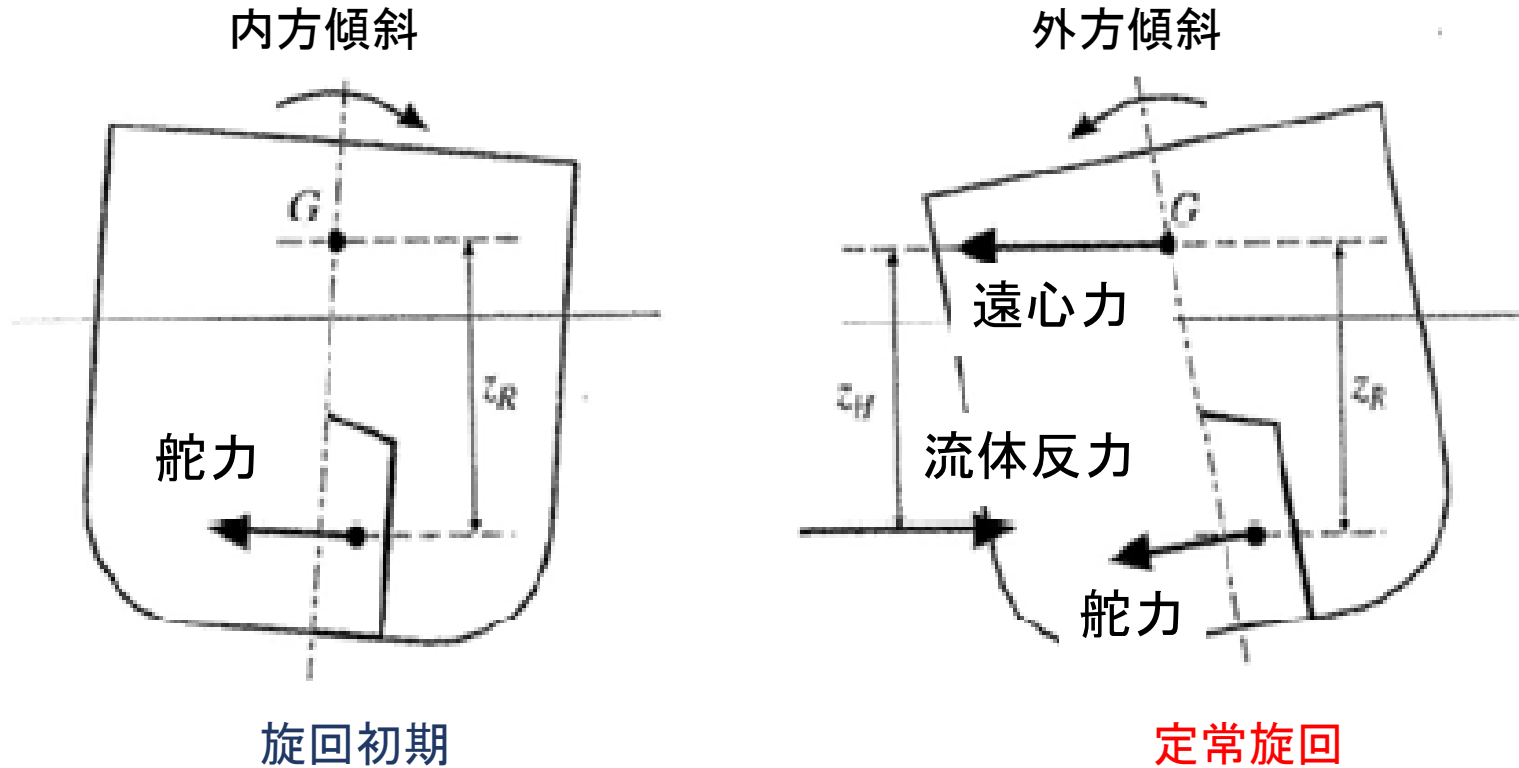
横傾斜角の値を表に示す。

表XX:08:53～08:56 変針時のHeel(Roll角)

指標種類 \ 区間	回頭前 53分0～40秒	初期内方傾斜(旋回初期) 53分45～50秒	外方傾斜(定常旋回時) 54分05秒～49秒
定常旋回時の RoT平均/最大値[deg/s]			平均-1.35/最大-1.68
IMU加速度 Heel平均値[deg]	-0.07	-0.38	1.23
IMU角速度+GNSS Compass Heel平均値[deg]	-0.40	-0.67	0.83
IMU加速度 Heel最大値[deg]	---	-1.06	1.88
IMU角速度+GNSS Compass Heel最大値 [deg]	---	-1.20	1.41 (本当の最大値はこの 後)

旋回時の船の横傾斜について

右旋回(回頭)時の例



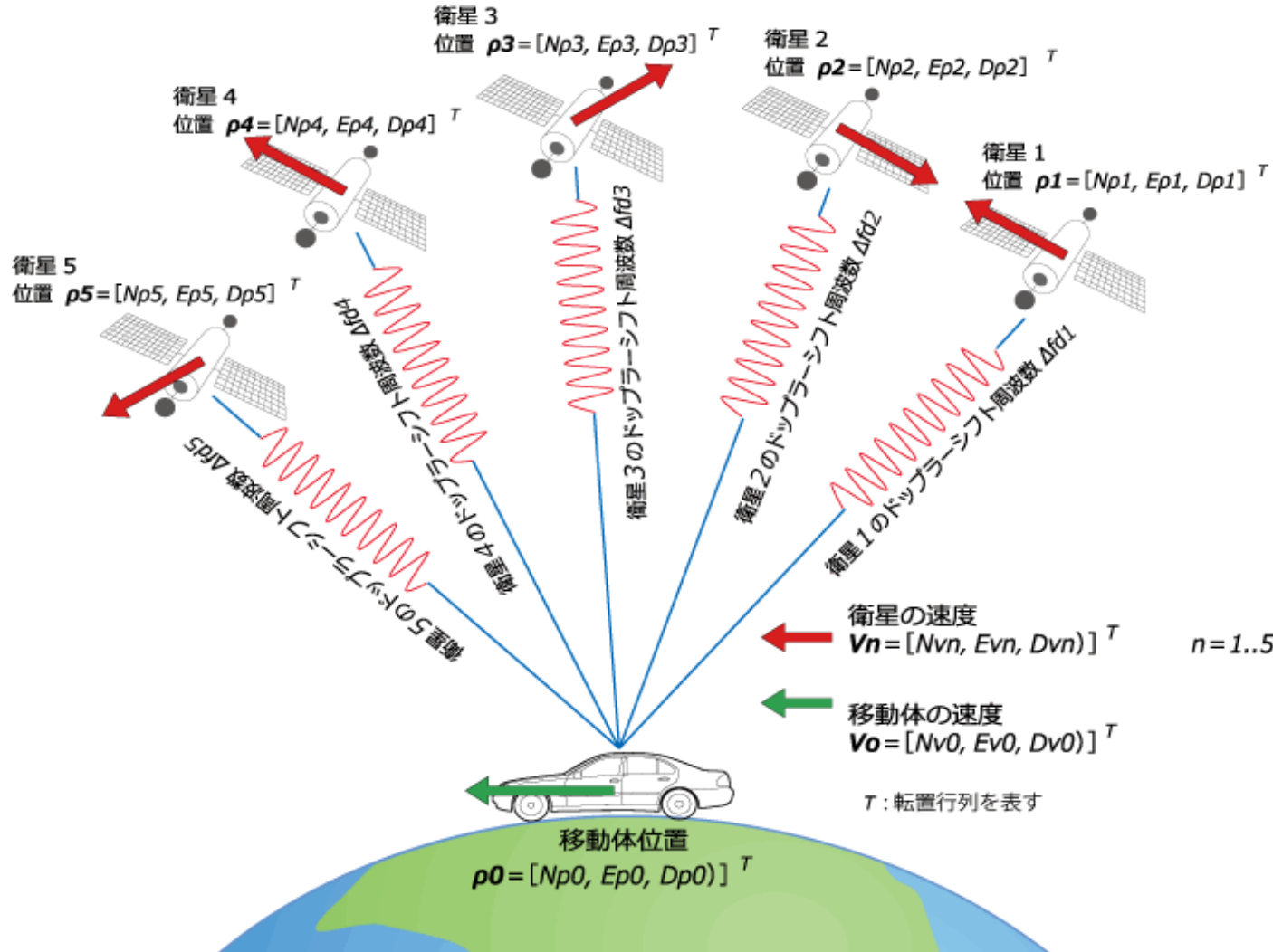
図の引用:船舶運航論講義資料

旋回初期は舵力によるモーメントで右側に傾く。(初期内方傾斜)
旋回が発達するにつれは流体反力によるモーメント(左回り)>舵力によるモーメント(右)となり左側に傾く。(外方傾斜)



GNSS速度計について

- 受信電波のドップラー測定値もしくは搬送波位相観測値の差分から対地速度を算出している。



$n=1..5$

図:GNSS速度計
 引用: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