



実船の船体動揺計測と横揺れ周期を用いた 復原性推定に関する研究

2024年8月8日

海洋科学技術研究科海運ロジスティクス専攻

博士前期課程2年 小森健史



目次

- 研究背景・先行研究
- 導入
- 実験「IMUによる船体動揺計測」
 - 横揺れ/縦揺れ角速度と周期の計測
- 検証1「横揺れ周期からのGM推定精度検証」
 - コンディション計算値との比較
- 検証2「縦揺れ周期の実測値と理論推定値の比較」
- まとめ



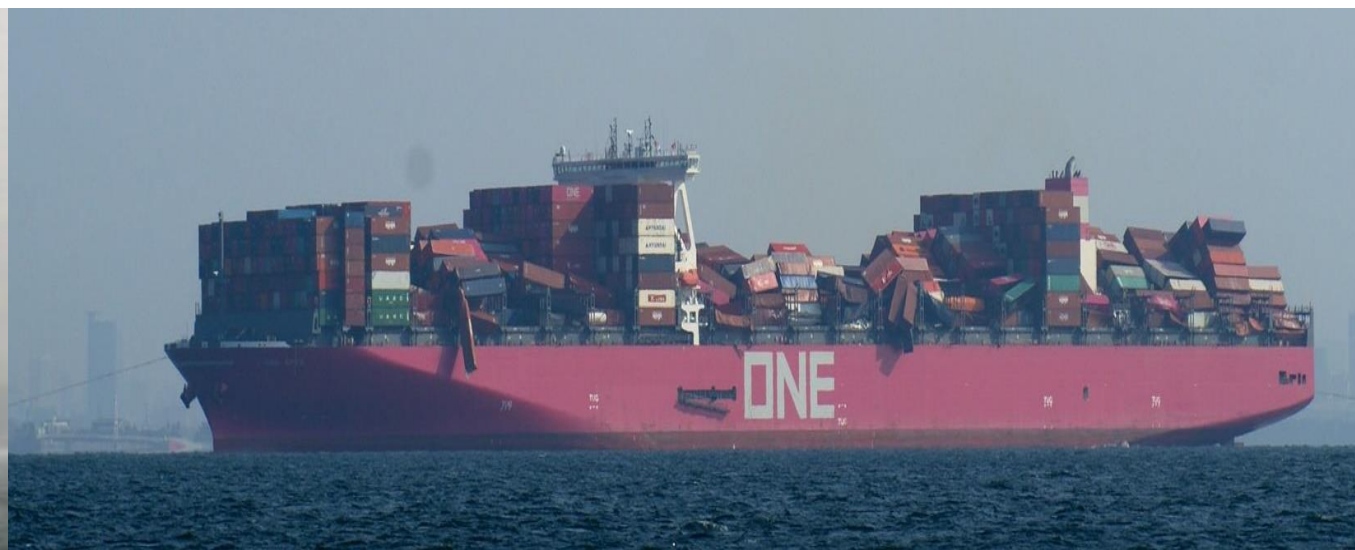
研究背景

3

- 復原力が不足していると、転覆の危険性が増す。
→航行中も復原力の大きさを把握する必要がある。
- 同調横揺れやパラメトリック横揺れを防ぐための手段として横揺れ固有周期を把握しておくことは重要である[1]。



航行中の復原力低下による大傾斜



パラメトリック横揺れが原因として疑われる
コンテナ流出事故

出典(左から):

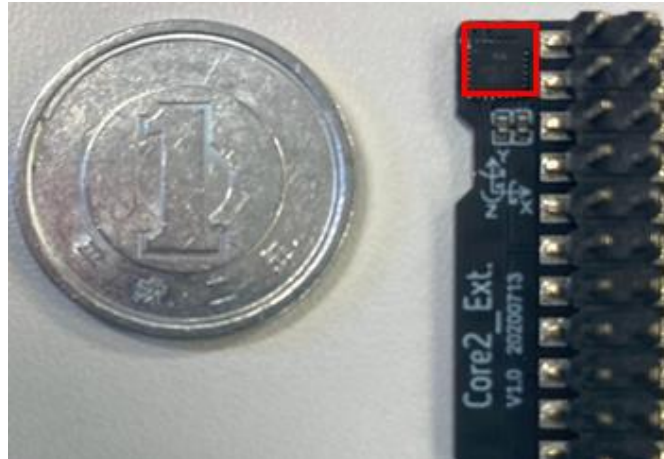
https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/books/report2010/html/tokushu/images/021_04.jpg

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



研究背景・先行研究

- 近年、MEMS-IMUの小型化が進み、モーションセンサーとして電子機器に搭載されるようになっている。
- MEMS加速度センサーを用いた船体横揺れの計測は濱地[2]や井上ら[3]によって既に行われているが、横揺れ周期から推定した横メタセンタ高さの正確性を検証できていない。



電子機器に搭載されているMEMS-IMU(赤枠内)



研究背景

- パラメトリック横揺れの危険性を評価するためのPolar chartが提案されているが、この計算過程で船の横揺れ固有周期を用いる[1]。
- 波を船首尾方向から受ける場合、出会い周期と縦揺れ周期は等しくなるため、パラメトリック横揺れを避けるためには**縦揺れ周期に注意をする必要がある**[4]。

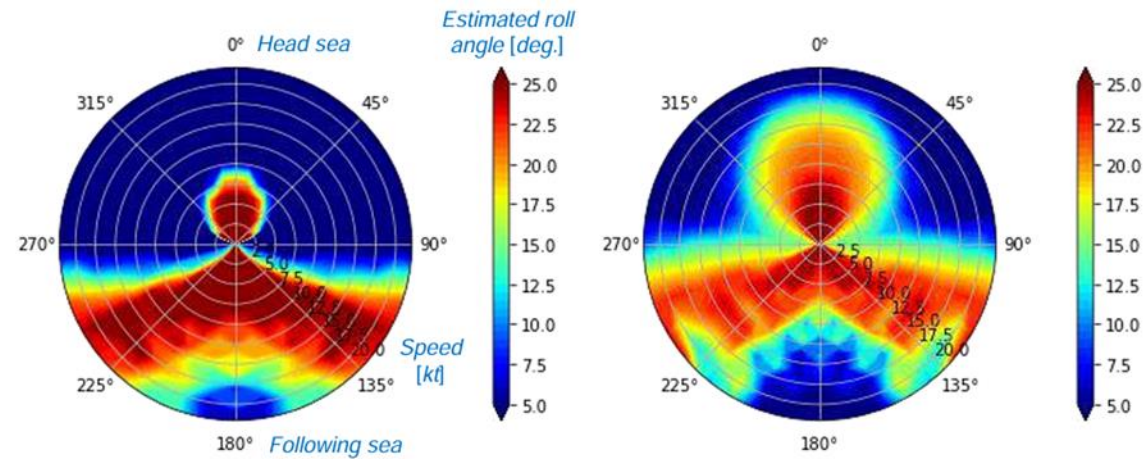


Fig. A6-9 Example of polar charts based on ship speed
(as per loading condition [draft and GM] and wave height)

Polar chartの1例

出典: 日本海事協会, パラメトリックロール対策に関するガイドライン



目的

- 角速度センサーを用いた船体動揺計測手法の提案
 - スマートフォン搭載のセンサーでも揺れの小さい条件で、船体動揺を計測できるか検証
- 横揺れ周期からどれくらい正確にGMを推定できるかの検証
 - コンディション計算値との比較
- 縦揺れ周期の実測値と理論推定値の比較



導入 IMU

- Inertial Measurement Unitは角速度・加速度センサーからなり、3次元の直進及び回転運動を捉えることができる。
- 本研究ではIndustrial-levelとConsumer-levelの MEMS IMUを用いる。
- Consumer-levelのIMUはスマートフォンにも内蔵されている。

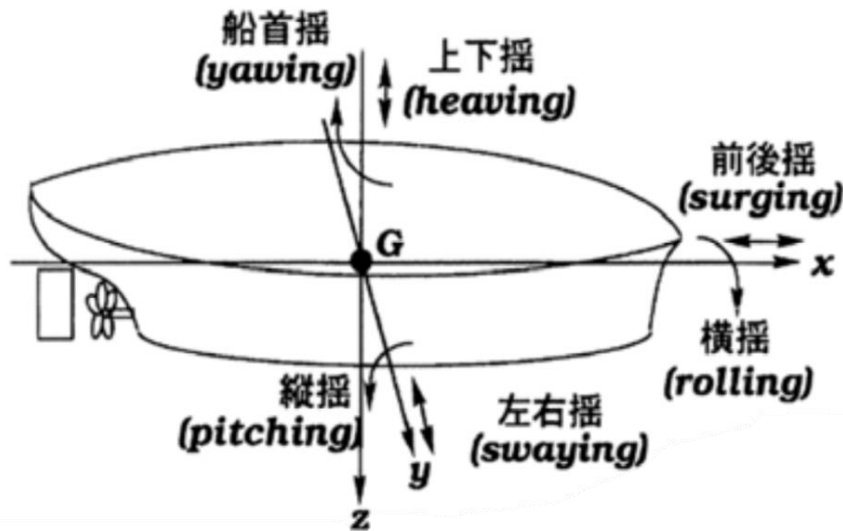


図:6自由度 船体動揺の場合

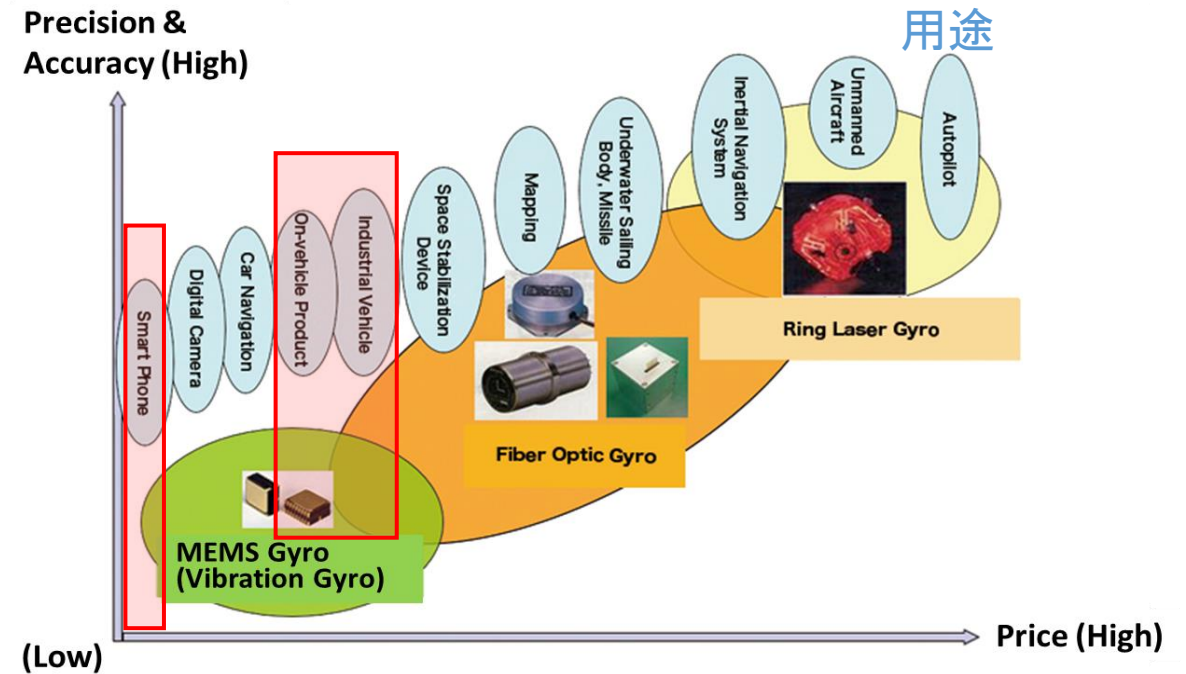
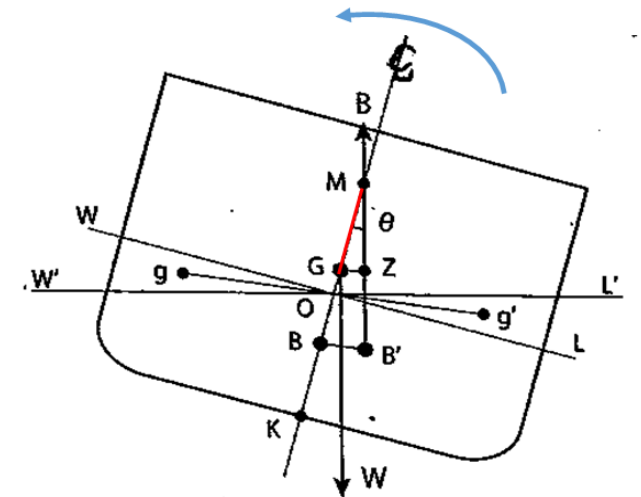
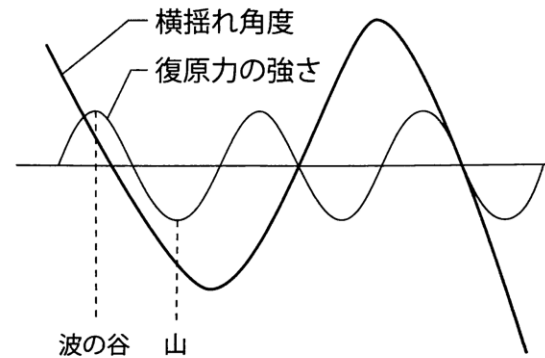
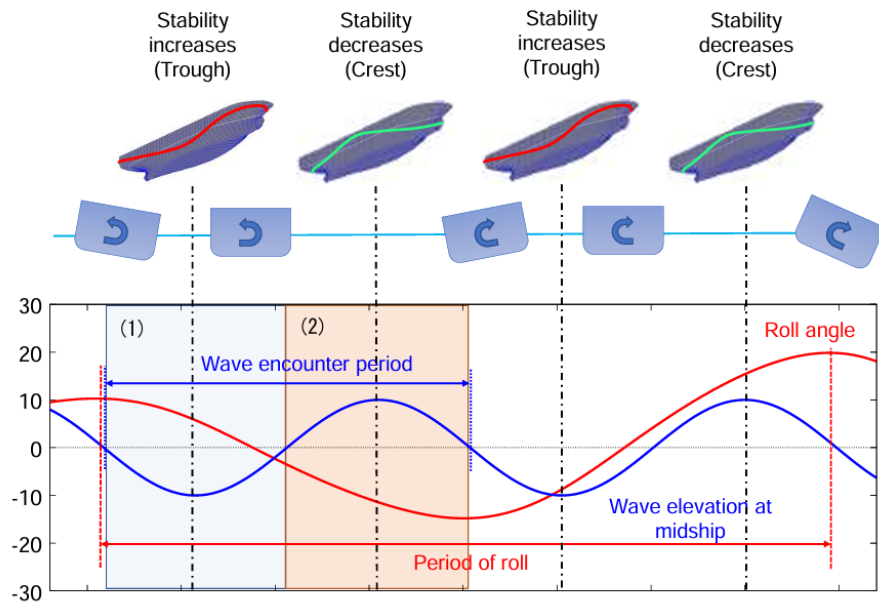


図:ジャイロセンサーの分類

引用:多摩川精機HP https://mems.tamagawa-seiki.com/tec_info/

導入 パラメトリック横揺れ

- 波浪によって水線面積が変わると、復原力・GMの大きさも変化する
- 復原力の大きさが船の横揺れ固有周期の1/2の周期で変化すると、揺れが増幅されてしまう(パラメータ励振)。



パラメトリック横揺れのメカニズム

図引用: 日本海事協会, 「パラメトリックロール対策に関するガイドライン」
海技教育機構, 「読んでわかる三級航海 運用編」

GM(横メタセンタ高さ)と復原性



実験 汐路丸の船体動揺周期の計測

実験航海概要

- 使用船舶: 汐路丸IV世
- 実験日時: 2023年2月7～9日
- 航行中にIMUを用いて、船体動揺(Roll・Pitch)を計測する。



図: 汐路丸IV世

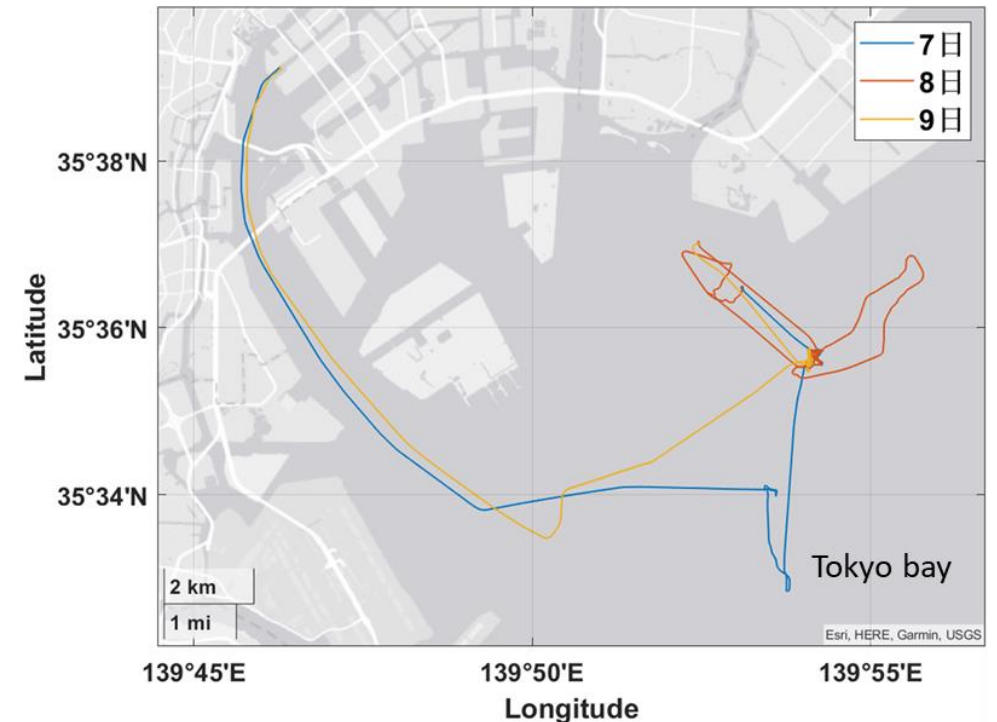


図: 2月7～9日航跡



実験 汐路丸の船体動揺周期の計測

方法 IMUでの動揺計測

①産業レベルIMU

- ・東京航空計器製GNAS® CSM-MG100 を船橋後部に設置。
- ・2/7~9の航行中に専用ソフトでデータ計測。

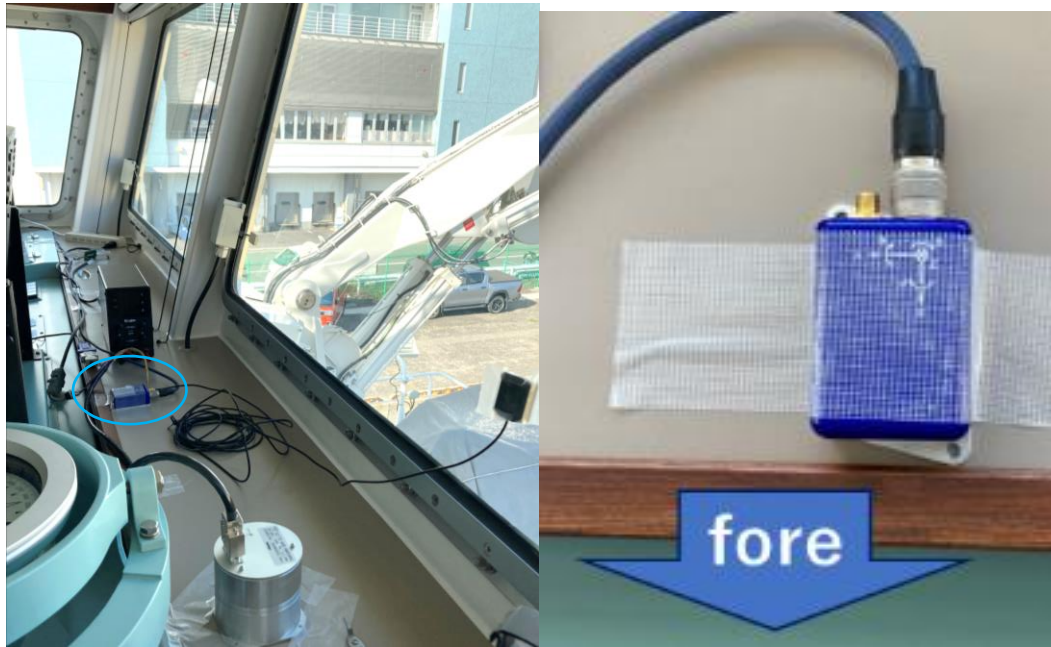


図:船橋後部に設置した産業レベルIMU

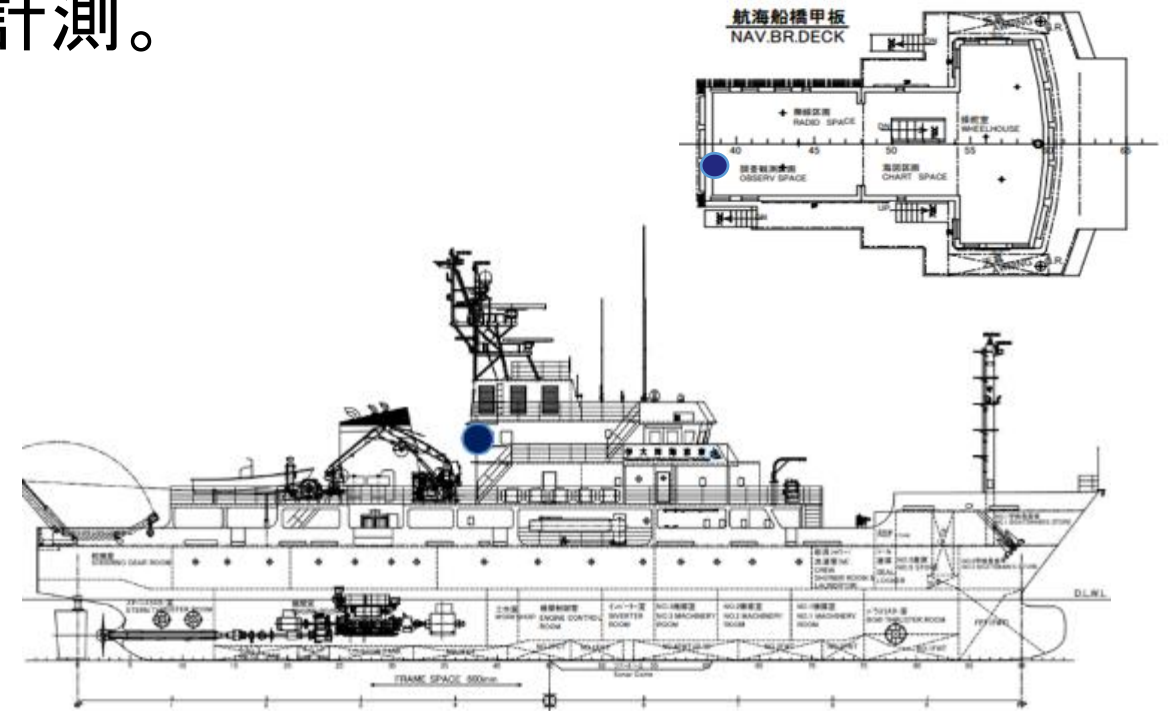


図:産業レベルIMU設置位置(●)
船の図面は一般配置図より引用



方法 IMUでの計測

②スマートフォン(民用レベルのIMU)

- iPhone SE™を教室内の右舷側に設置。
- iOS®アプリ“SensorLogger”を使ってモーションデータを記録。
- 2/8~9の航行中に計測。



図:教室内に設置したスマートフォン

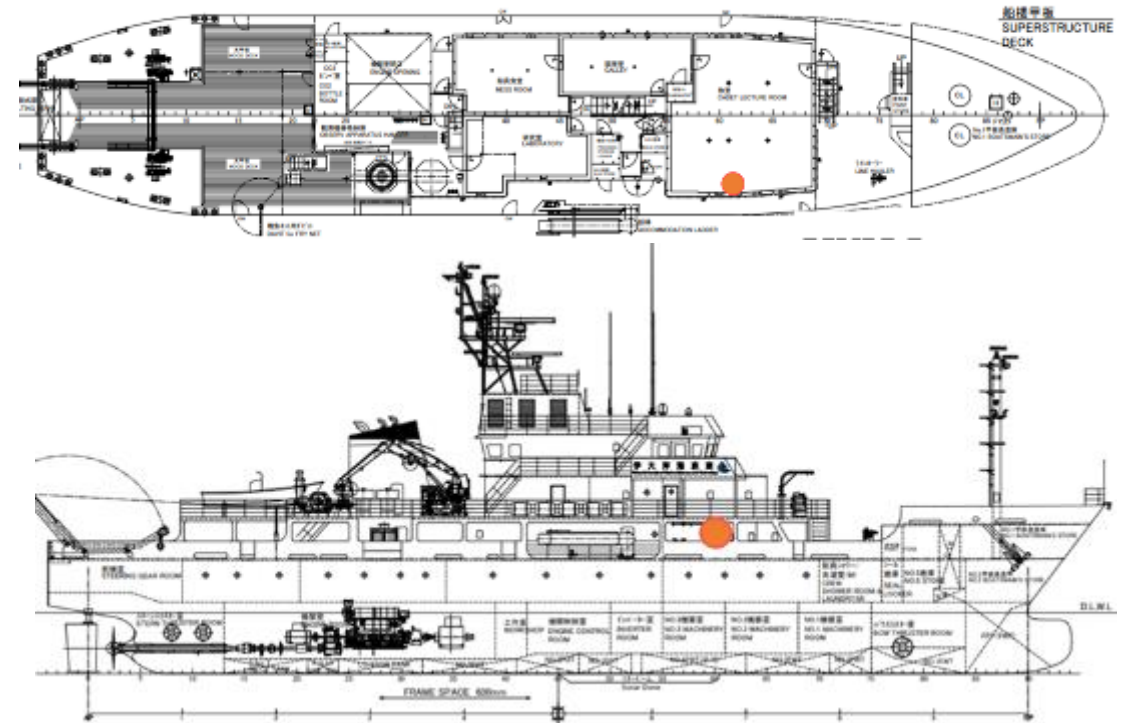


図:スマートフォン設置位置(●)



方法 角速度センサーによる船体動揺計測

- 前提として、IMU本体の座標系と船体座標系が一致しているとする。
- IMUで計測したbody座標各軸方向の角速度(p/q/r)をnavigation座標に変換すれば、Rolling/Pitching rateを求められる。

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix}$$

$\dot{\phi} / \dot{\theta} / \dot{\psi}$: roll/pitch/yaw rate(Euler angle)

$\phi / \theta / \psi$: roll/pitch/yaw (Euler angle)

p/q/r: angular rate in body axis of IMU

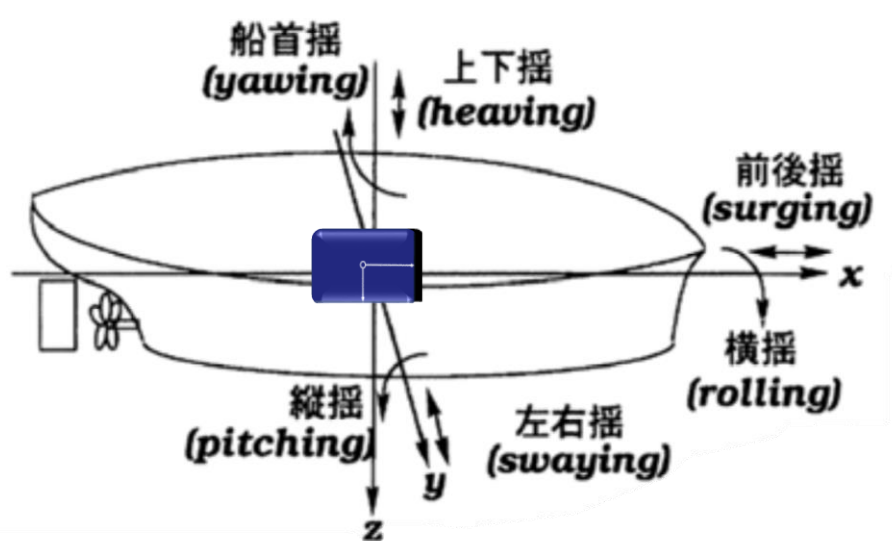


図:船の動揺・船体座標

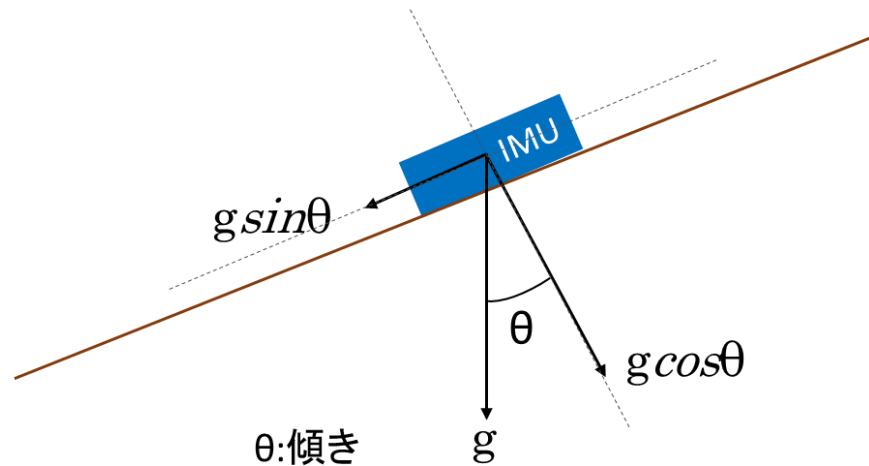


図:IMU座標系

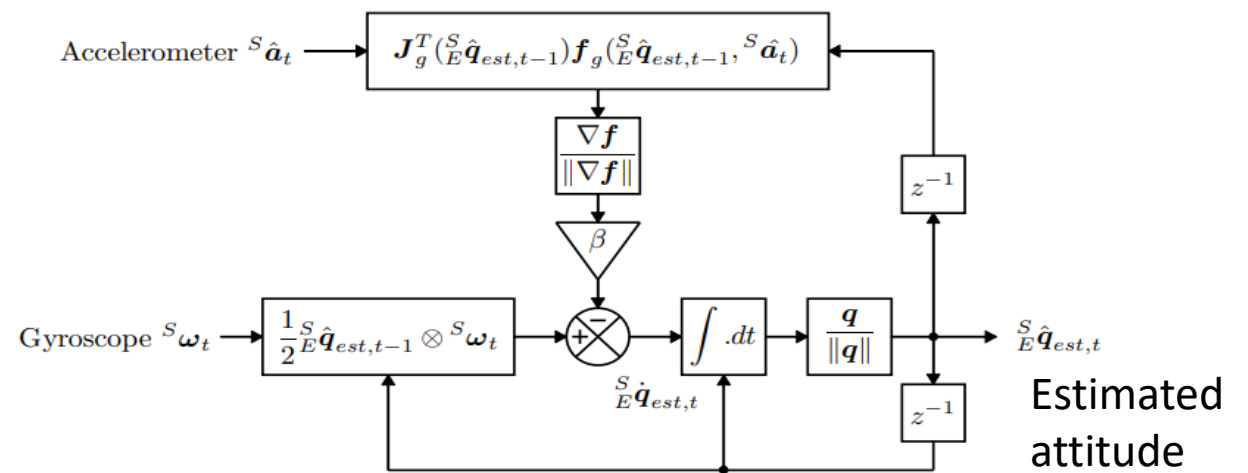


方法 角速度・加速度による姿勢の計算

- 各軸方向の重力加速度の比から傾斜角(Roll・Pitch)を求められる。
- Madgwick Filterで角速度と加速度を統合することにより、双方のセンサーで生じる誤差を低減した姿勢を求められる。



加速度センサーによる傾斜角の計算

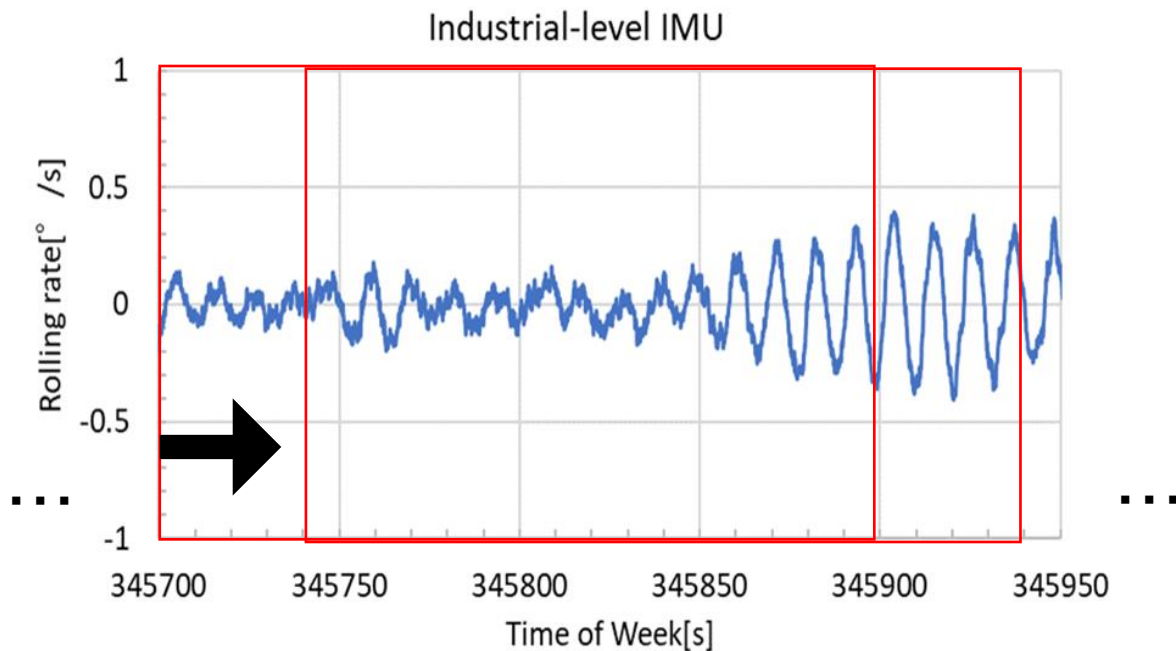


Madgwick Filterのブロック図

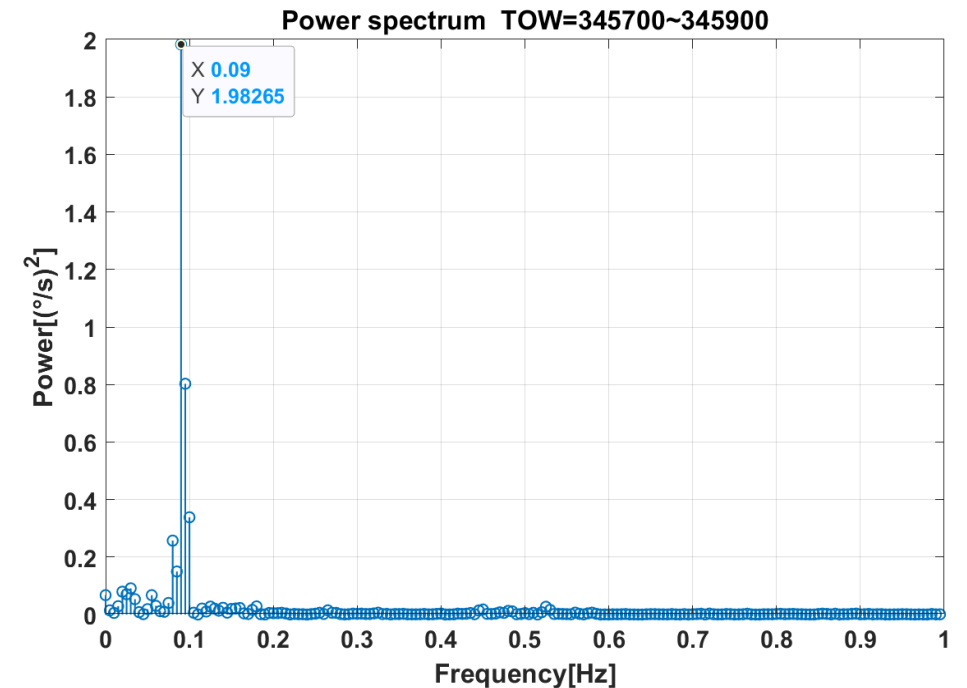


方法 時間周波数解析

- 横/縦揺れ角速度に対して短時間フーリエ変換(STFT)を行って、各時刻の動揺周期を求める。
- 200s分で区切ったデータに対して、40s毎に離散フーリエ変換(DFT)を行っていく。
- DFTの結果、パワーが最大になった周波数を横/縦揺れ周波数とみなす。



短時間フーリエ変換イメージ

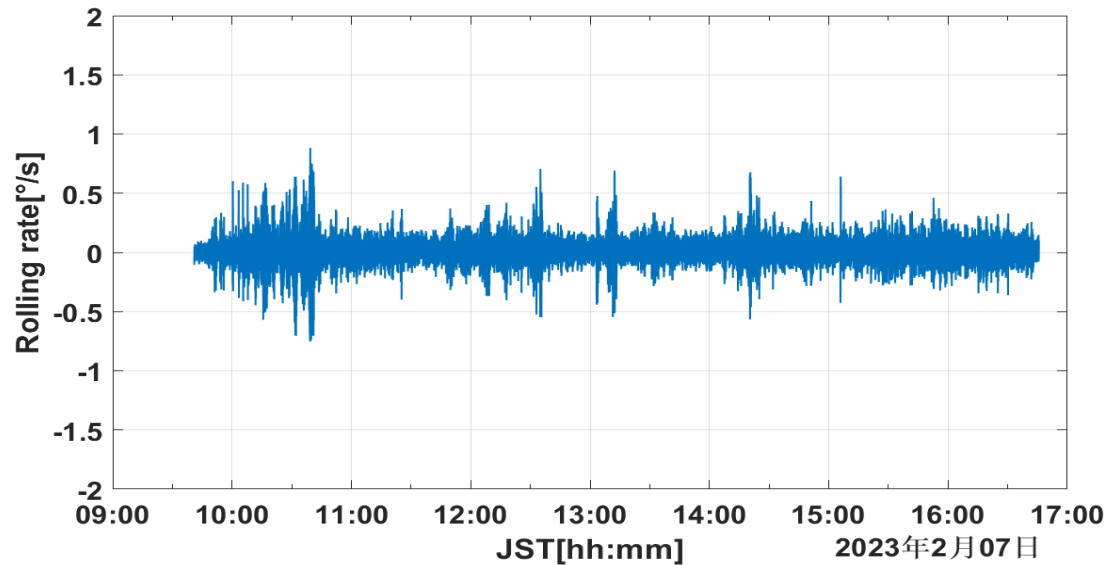


横揺れ角速度のDFT結果 パワースペクトル図

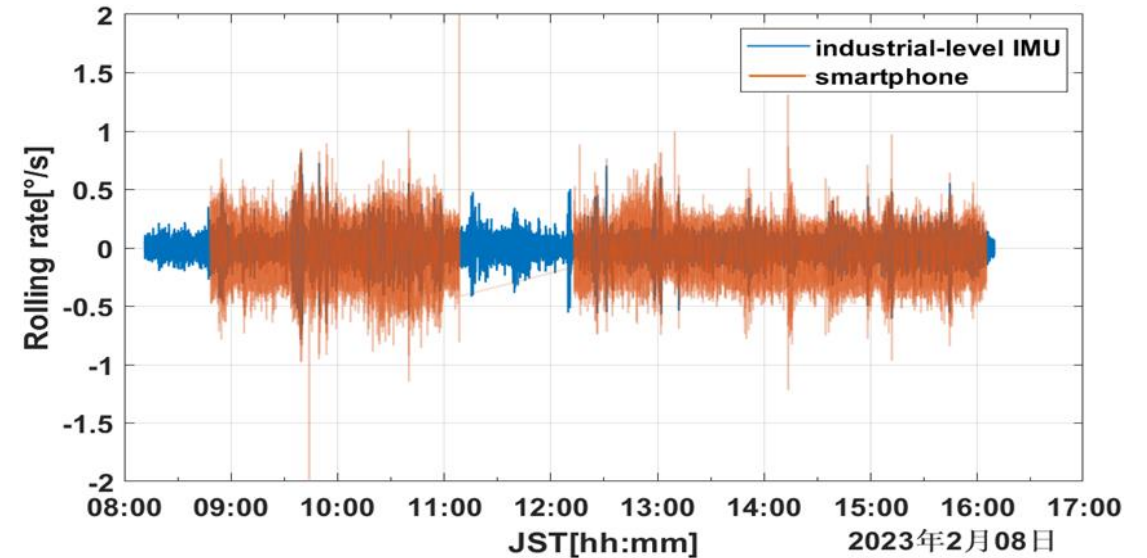


実験 結果 汐路丸の横揺れ角速度

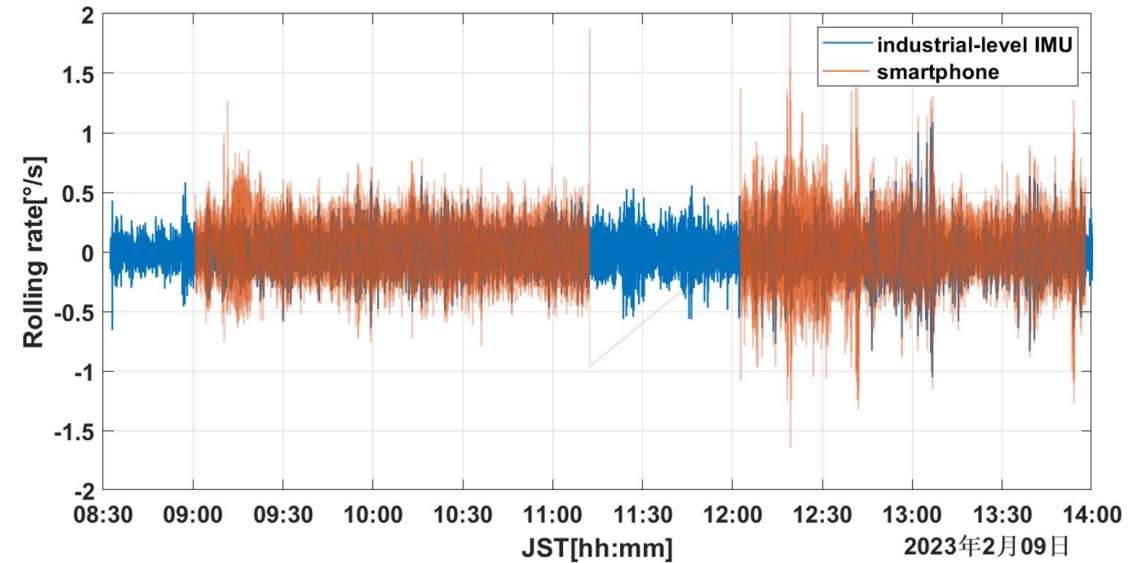
- 産業レベルのIMUとスマートフォンで計測した横揺れ角速度。
- 角速度の大きさが概ね $1.0^{\circ}/s$ 以内である。



産業レベルのIMUで計測した横揺れ角速度 2/7



横揺れ角速度 2/8

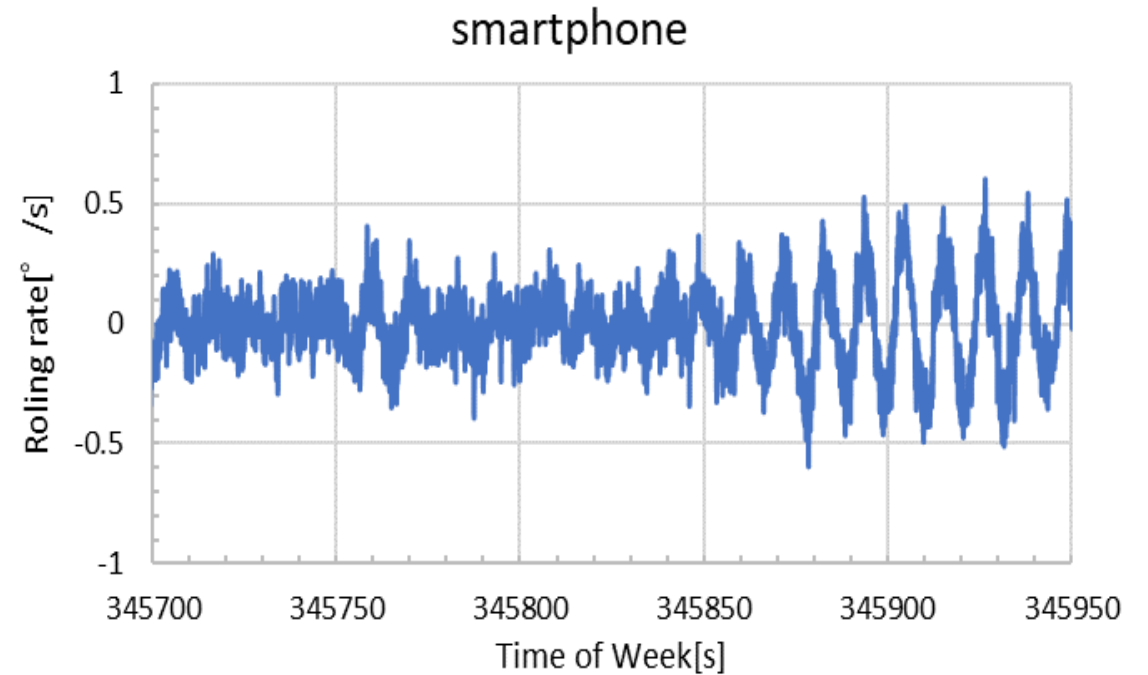
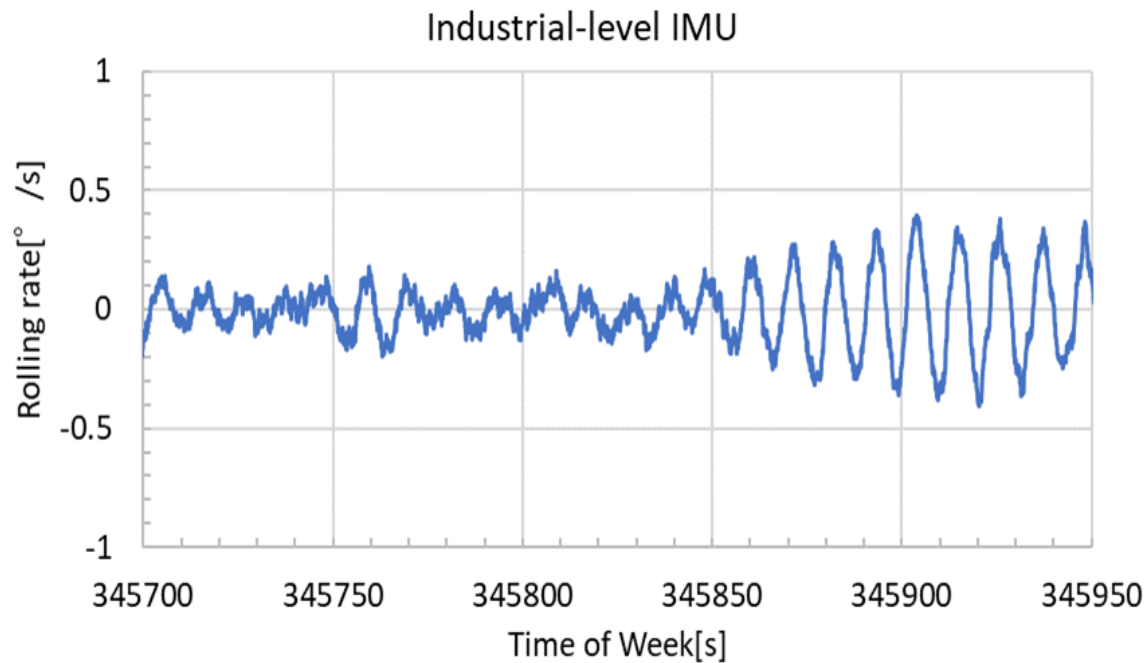


横揺れ角速度 2/9



結果 横揺れ角速度

- 250s分で(2/9 09:01～09:05)で拡大して比較。
- スマートフォンで計測した角速度が大きく見えたのは、スマートフォン搭載のセンサー雑音が大きいためだと考えられる。
- 雑音を除けば、計測値には差がないと考えられる。

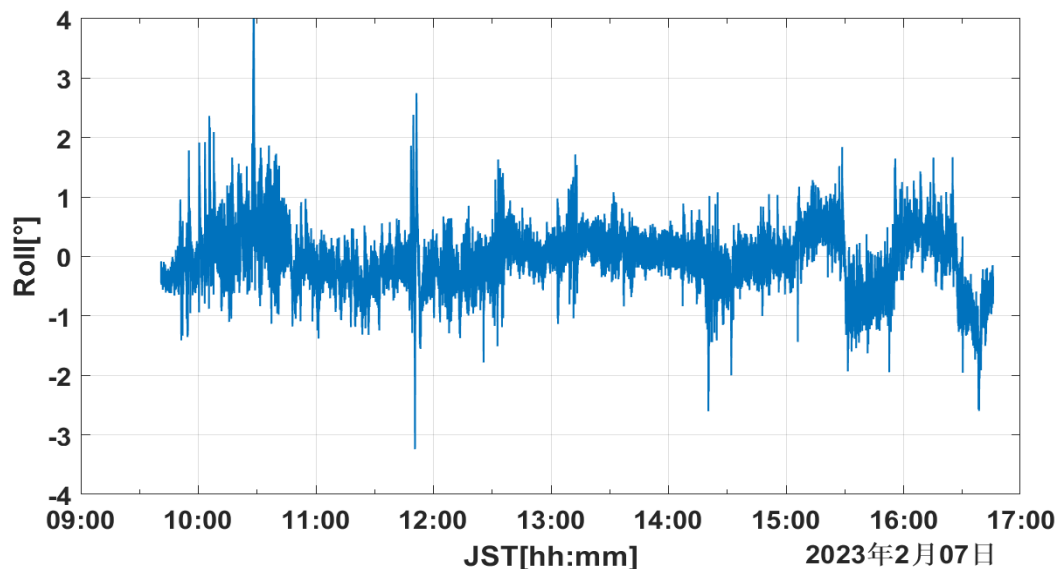


2/9 09:01～09:05で抜き出したRolling角速度

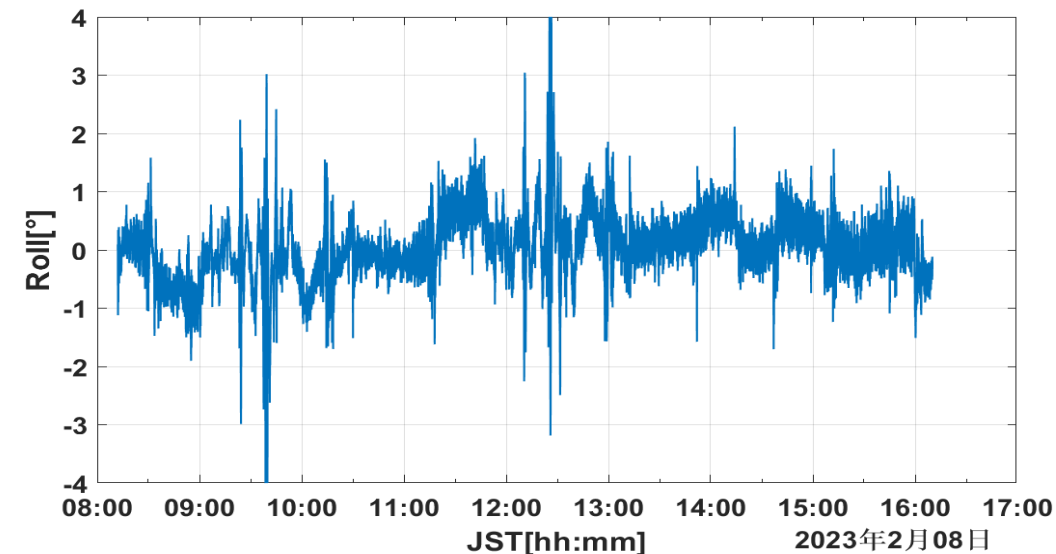


結果 Roll

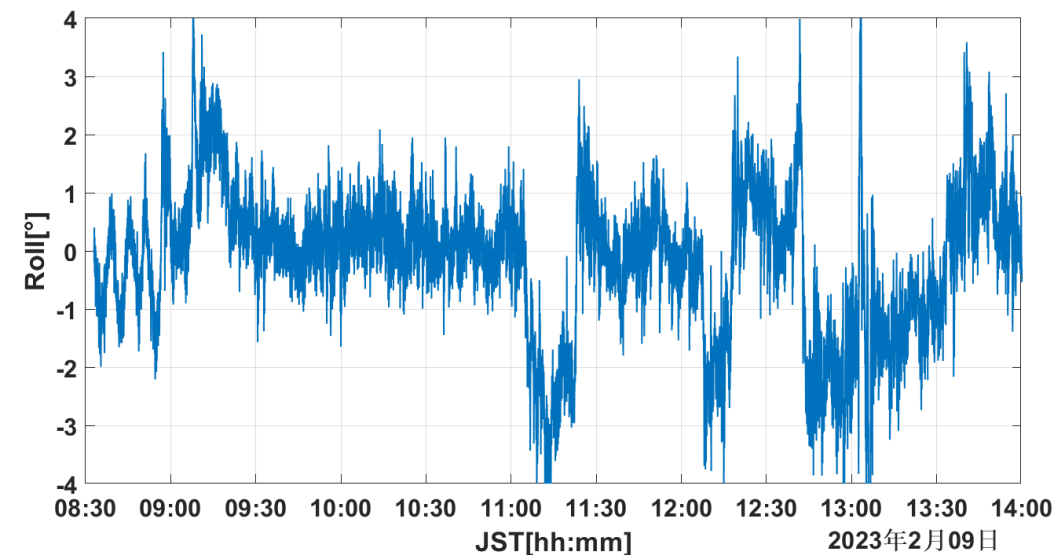
- 産業レベルのIMUで計測した角速度と加速度を統合して求めたRoll
- 振幅は概ね 1.0° 以内である。



Roll(Heel角) 2/7



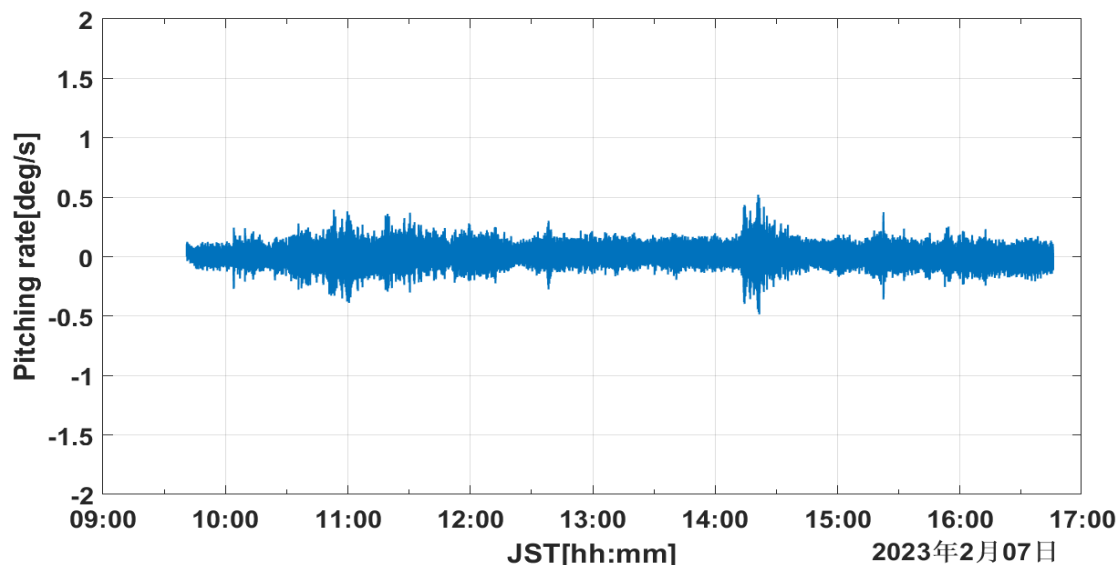
Roll 2/8



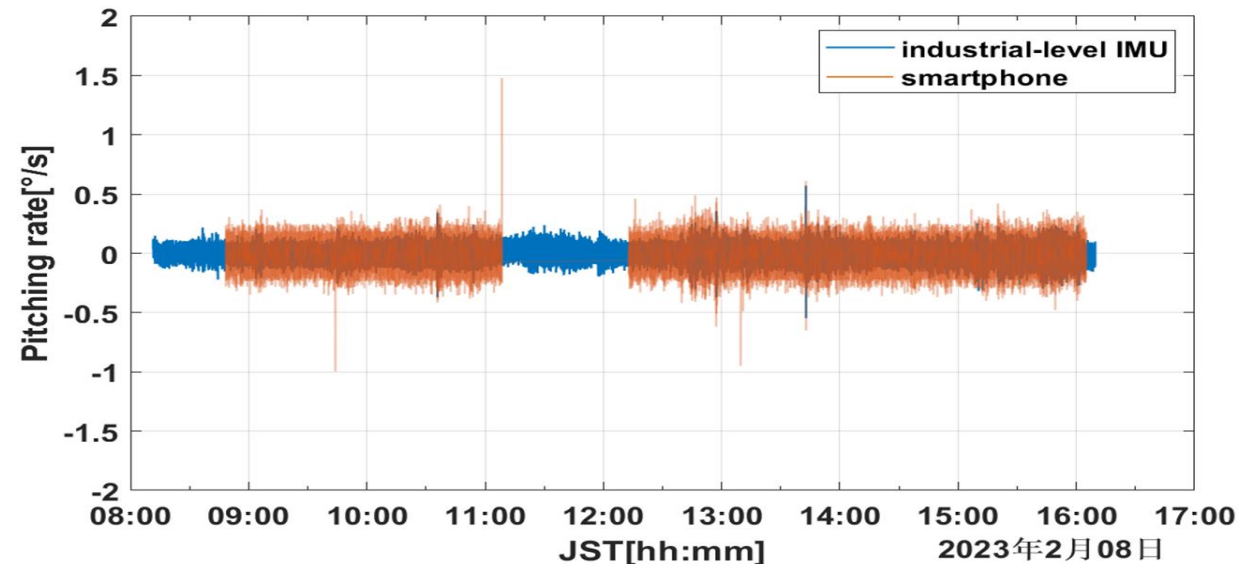
Roll 2/9

結果 汐路丸の縦揺れ角速度

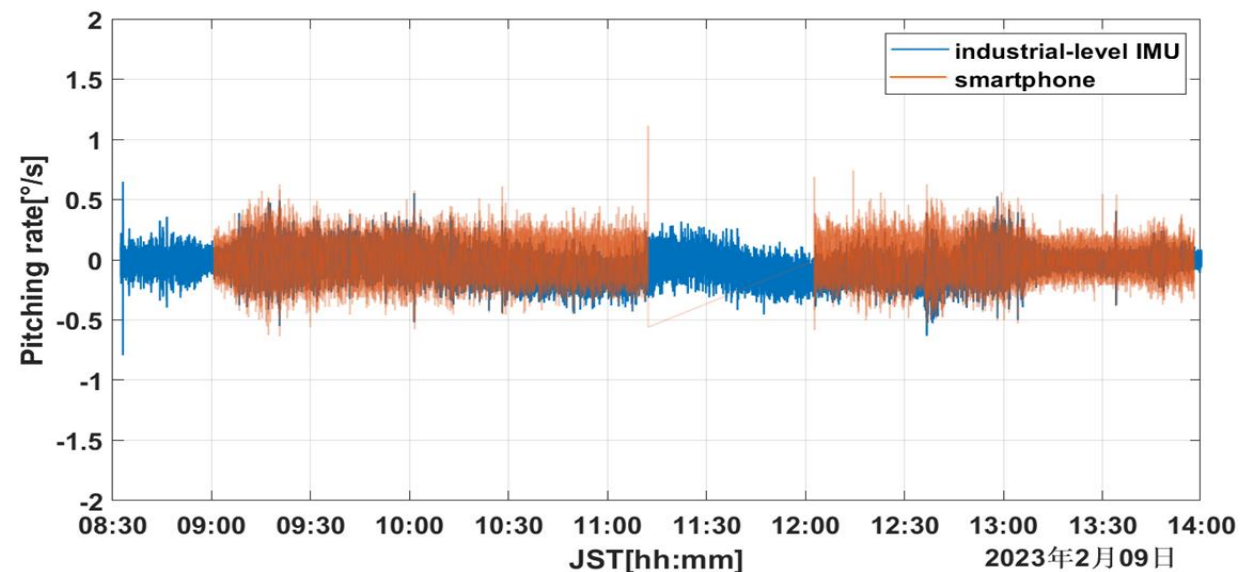
- 産業レベルのIMUとスマートフォンで計測した縦揺れ角速度。
- 角速度の大きさが概ね $0.5^{\circ}/s$ 以内である。



産業レベルのIMUで計測した縦揺れ角速度 2/7



縦揺れ角速度 2/8

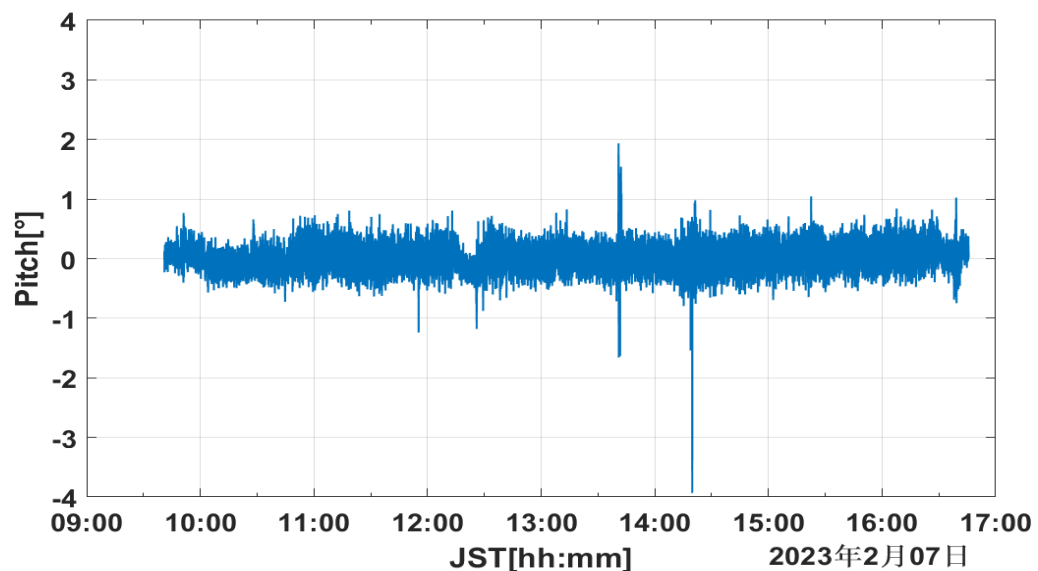


縦揺れ角速度 2/9

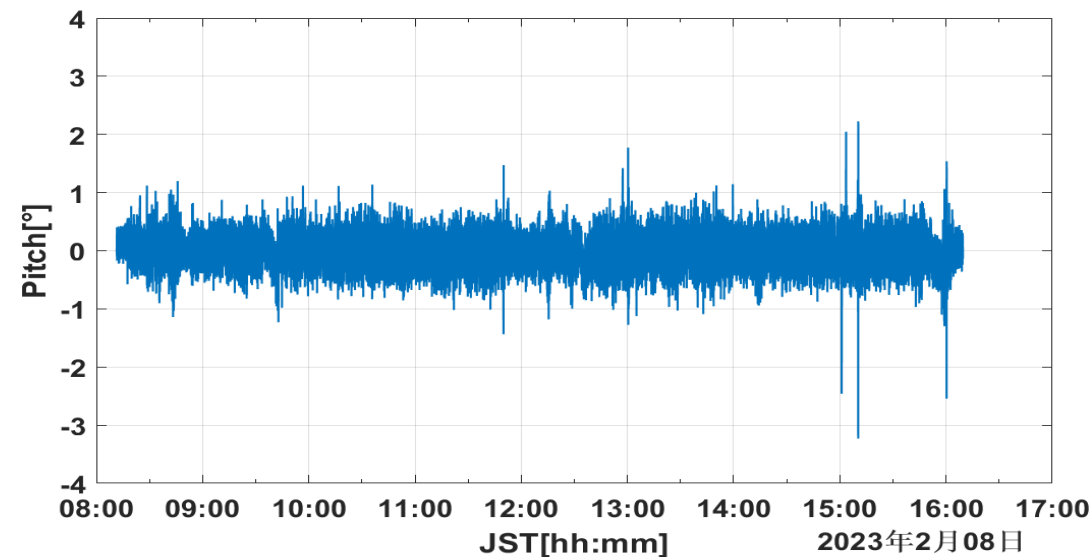


結果 Pitch

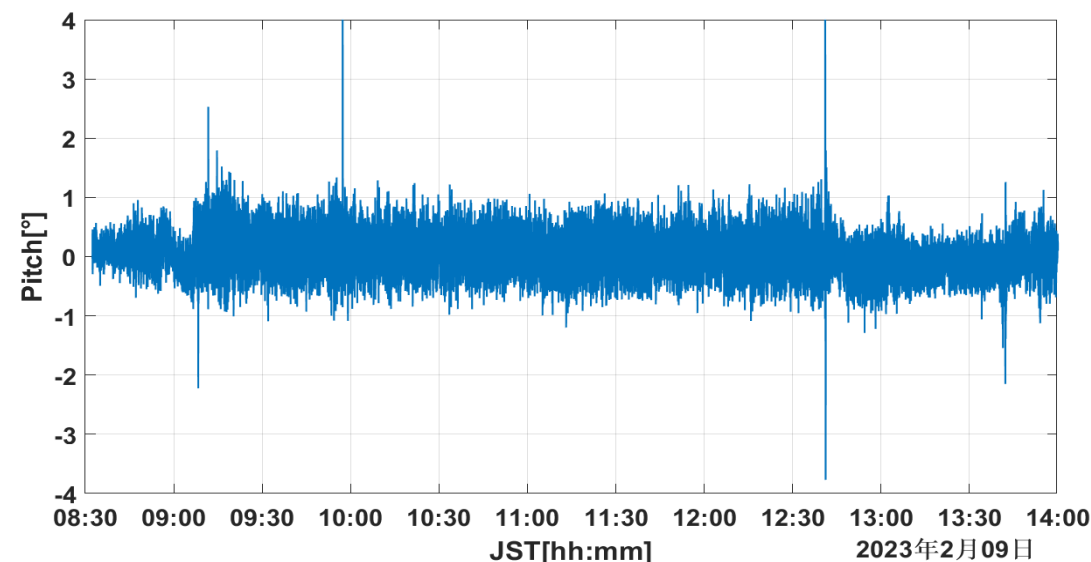
- 産業レベルのIMUで計測した角速度と加速度を統合して求めたPitch
- 振幅は概ね 1.0° 以内である。



Pitch(Trim角) 2/7



Pitch 2/8

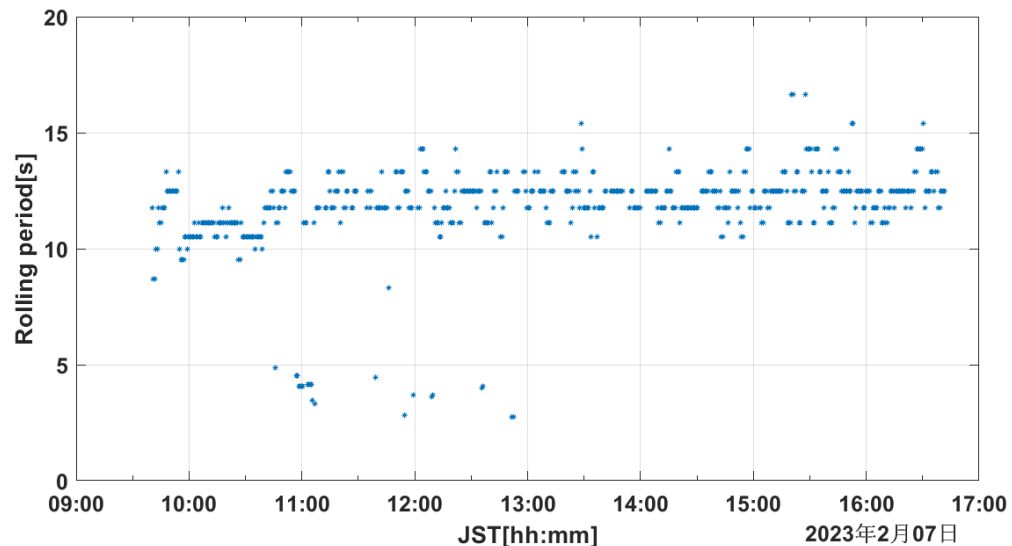


Pitch 2/9

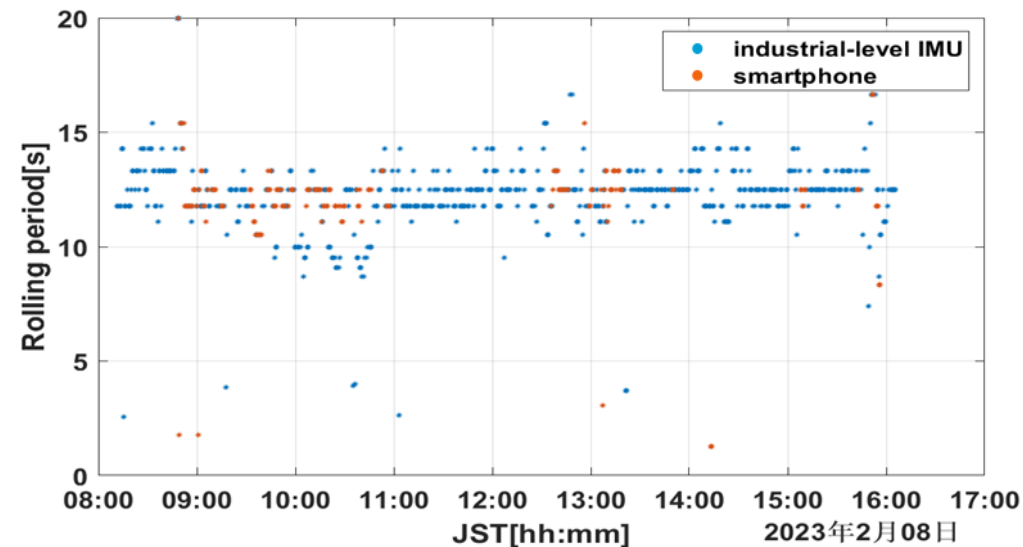


結果 横揺れ周期

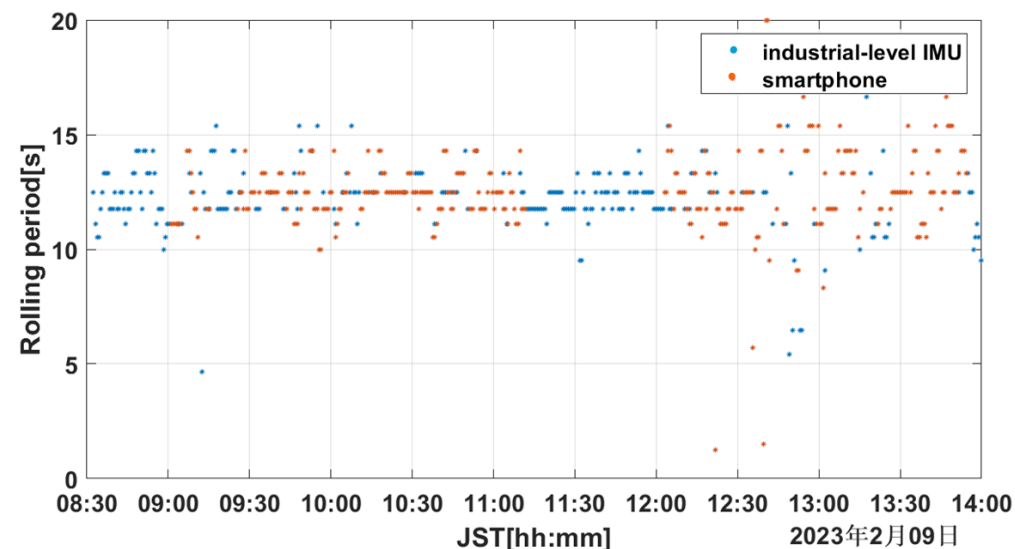
- 短時間フーリエ変換の結果として、各時刻の横揺れ周期を示す。
- 周期9~16sの範囲においては両結果とも概ね一致している。



横揺れ周期 2/7



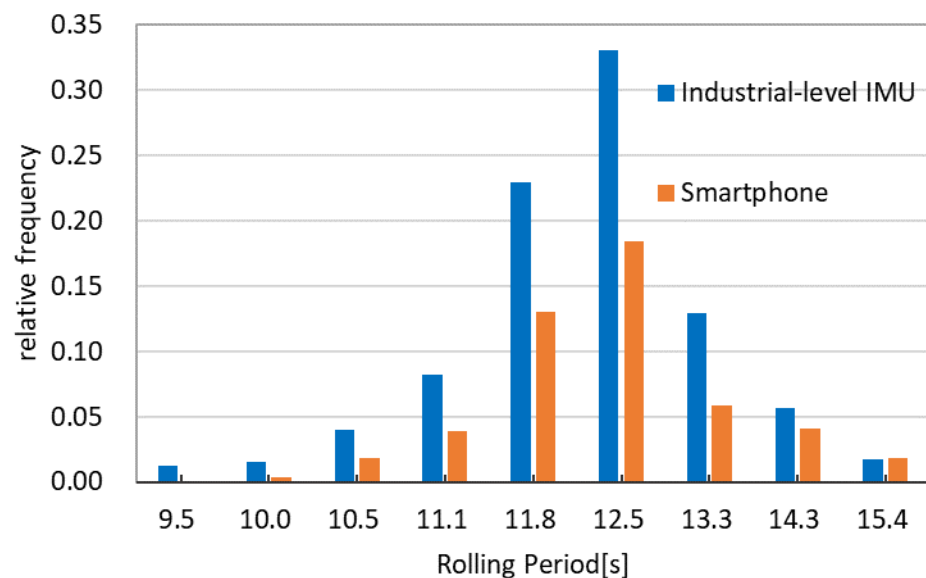
横揺れ周期 2/8



横揺れ周期 2/9

結果 横揺れ周期

- 横揺れ周期の最頻値は2つとも、12.5[s]だった。
- 産業レベルのIMUの場合、横揺れ周期11.77~12.50sで相対度数0.55以上だった。
- 船は常に固有周期で横揺れしているわけではない。



横揺れ周期の相対度数分布

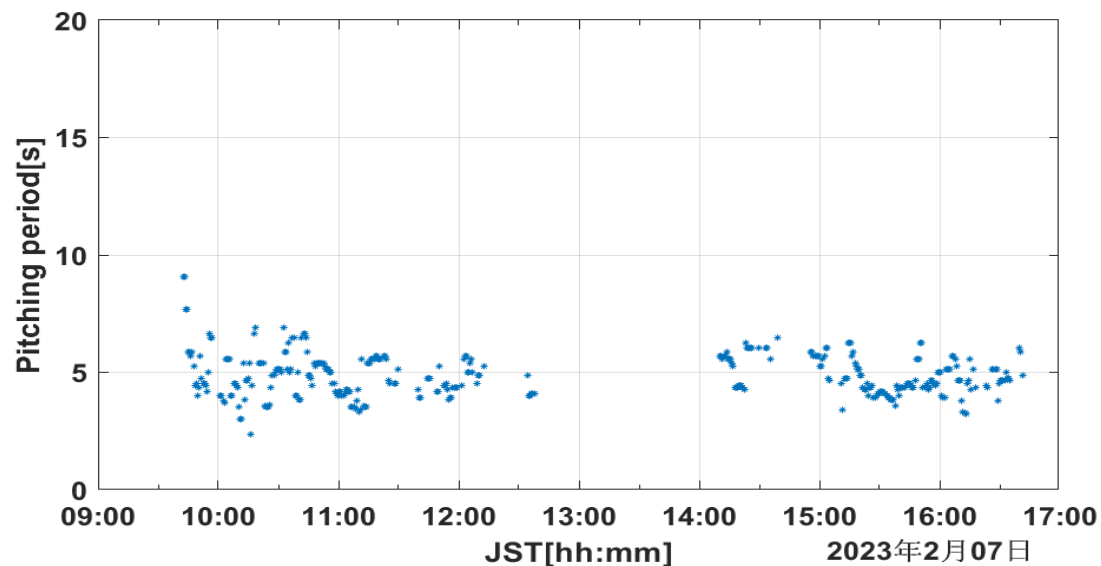
表:横揺れ周期の統計代表値

周期が 5~25s で絞って計算	産業レベル IMU 2/7~9	スマートフォン 2/8~9
最頻値[s]	12.50	12.50
中央値	12.50	12.50
平均値	12.33	12.54
標準偏差	1.31	1.49

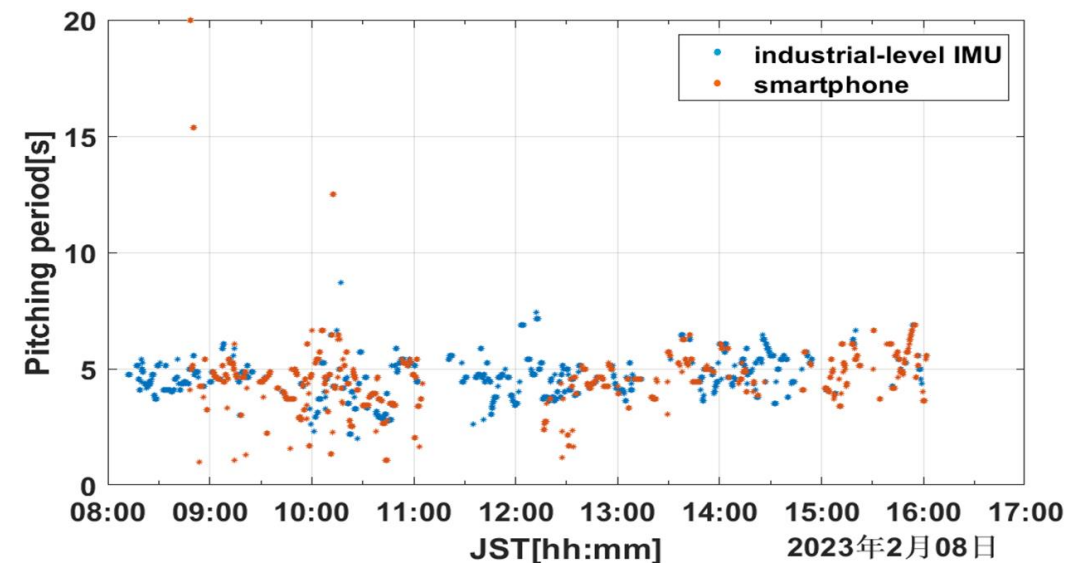


結果 縦揺れ周期

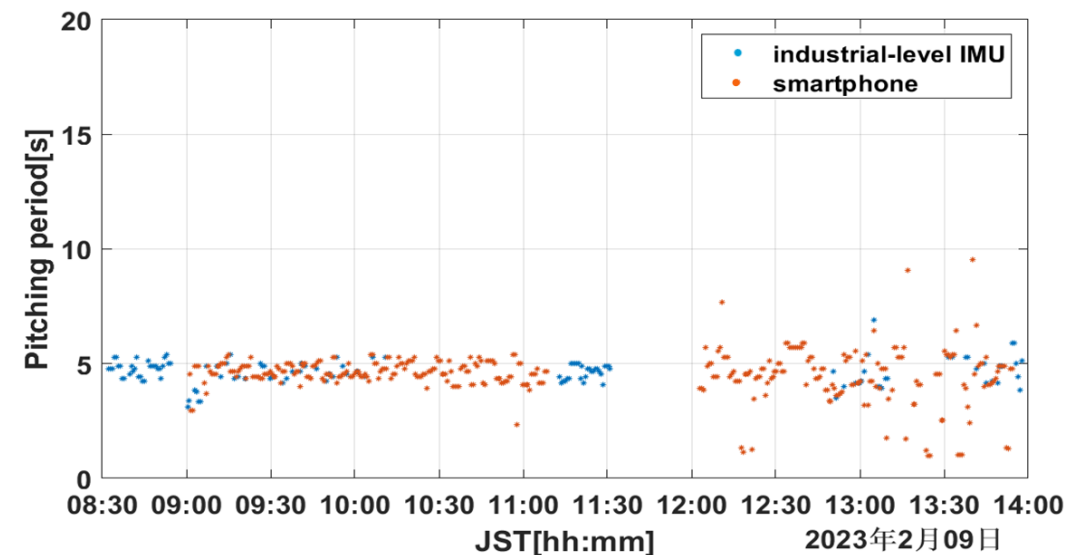
- 短時間フーリエ変換の結果として、各時刻の縦揺れ周期を示す。
- 周期3~7sの範囲においては両結果とも概ね一致している。



縦揺れ周期 2/7



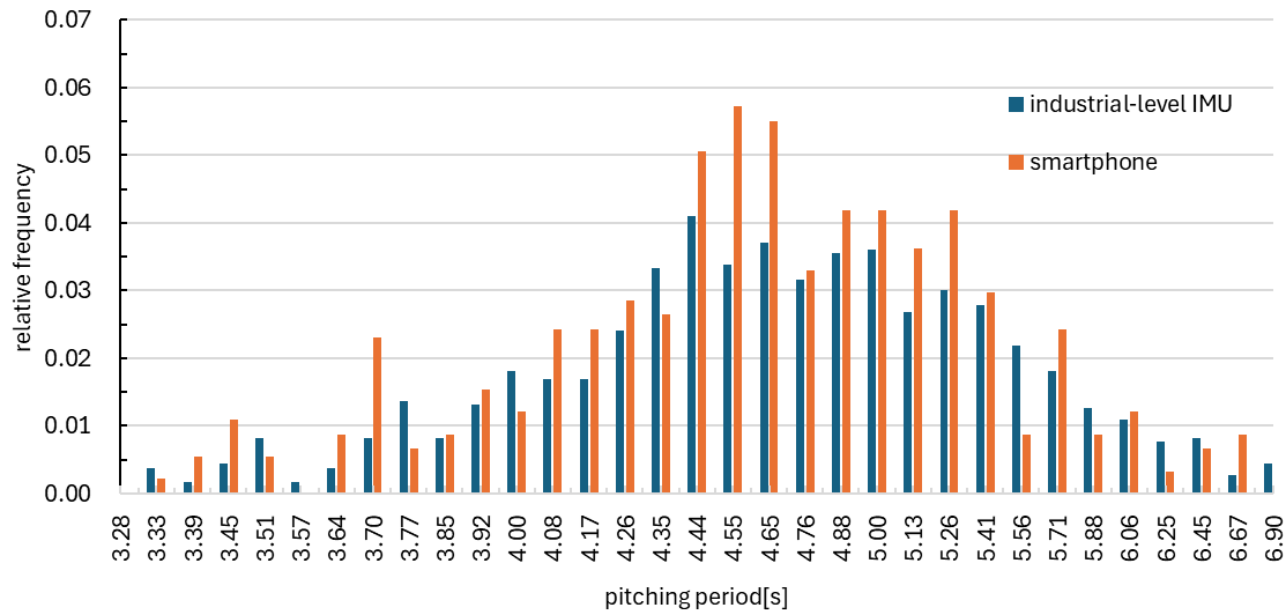
縦揺れ周期 2/8



縦揺れ周期 2/9

結果 縦揺れ周期

- 産業レベルのIMU・スマートフォンともに4.44~4.65[s]の周期が最も頻繁に発生していた。
- 船は常に固有周期で縦揺れしているわけではない。



縦揺れ周期の相対度数分布

表:縦揺れ周期の統計代表値

周期 15s 以下で絞ったデータに対して計算	産業レベル IMU	スマートフォン
最頻値[s]	4.44	4.55
中央値	4.65	4.55
平均値	4.74	4.53
標準偏差	0.80	1.07



検証 GMの推定と精度検証

横揺れ周期からのGMの推定

- $T_r = \frac{2 * k B}{\sqrt{G_0 M}}$

∴ $G_0 M = \left(\frac{2 * k * B}{T_r} \right)^2$ の式を利用。

- T_r : 横揺れ固有周期、 B : 船幅、 kB : 慣動半径、 $G_0 M$: 自由水影響を考慮したGM

- 慣動半径の係数: k はIMO復原性基準の式[5]で導出。

$$k = 0.373 + 0.023 \frac{B_{mld}}{d_{mld}} - 0.043 \frac{L_{wl}}{100} = 0.423$$

検証 GM推定値

- 1~2番目に頻度が大きかった11.77~12.50[s]を固有周期とみなして計算すると、 $G_0M=0.564\sim0.637\text{m}$ となった。

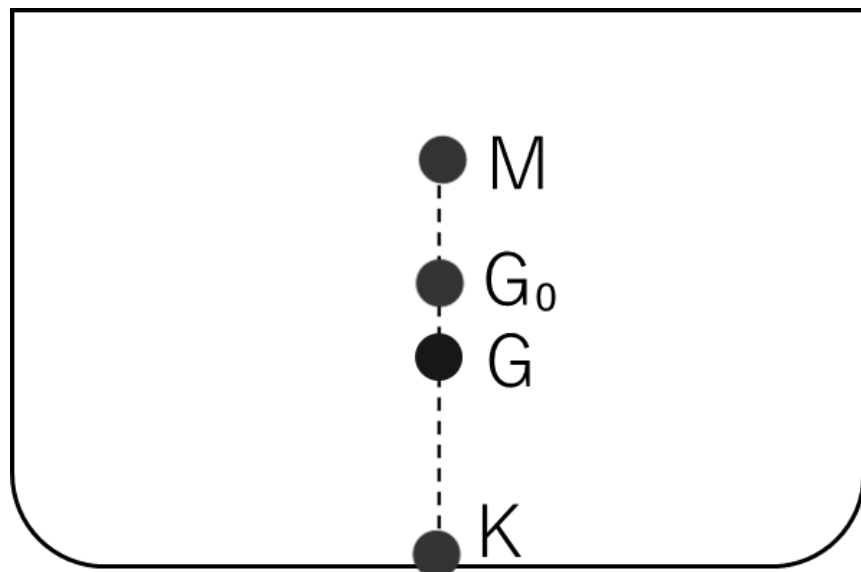
表:横揺れ周波数/周期からのGM推定結果

横揺れ周波数[Hz]	周期[s]	$G_0M[\text{m}]$
0.075	13.33	0.496
0.08	12.50	0.564
0.085	11.77	0.637
0.09	11.11	0.714
0.095	10.53	0.796



検証 コンディション計算によるGMの算出

- 次の順序で算出
 1. 清水・燃料油量(Condition)から船の排水量とKG、GG₀を計算
 2. 排水量等数値表から排水量に該当するKMを引く
 3. $G_0M = KM - KG - GG_0$
- 出港前と入港後のコンディションで計算。



※GG₀:自由水影響による
GM減少量

図:K,G,Mの位置関係

Condition Table

ITEM	WEIGHT[ton]	LCG	LCG Moment{KG[m]	KG Mt[t-m]	Free.S[t-m]
LIGHTWEIGHT	1023.5	1.19	1217.965	4.6	4708.1
CONSTANT	34.40	5.56	191.264	3.85	132.44
PROVISIONS	3.00	-5.26	-15.78	2.77	8.31
Fresh Water					
No.1 F.W.T(C)	16.6	-20.48	-338.94	0.85	14.0675
No.2 F.W.T(C)	8.8	-16.85	-147.77	0.67	5.8759
No.3 F.W.T(C)	19.4	-13.06	-253.23	0.56	10.8584
No.4 F.W.T(P)	9.2	-7.67	-70.72	0.49	4.5178
No.4 F.W.T(S)	11.8	-7.67	-90.66	0.56	6.6192
Fresh Water Total	65.8	-13.71	-901.33	0.638	41.94
Diesel OIL					
No.1 F.O.T(P)	6.5	-2.68	-17.29	0.6	3.87
No.1 F.O.T(S)	6.7	-2.68	-17.85	0.61	4.06
No.2 F.O.T(P)	0.3	0.63	0.19	0.09	0.03
No.2 F.O.T(S)	1.0	0.52	0.50	0.27	0.26
No.3 F.O.T(P)	8.7	4.83	42.21	0.43	3.76
No.3 F.O.T(S)	8.0	6.75	54.19	0.33	2.65
F.O. Serv Tk.(F)	1.7	7.13	12.38	5.22	9.07
F.O. Sett Tk.(S)	0.5	7.14	3.92	4.82	2.65
Diesel Oil Total	33.43	2.34	78.25	0.788	26.34
F.P.T.(FW)	23.22	-25.81	-716	1.57	36.46
FW Ballast Total	23.22	-25.81	-716	1.57	36.46
GRAND Total	1183.3	-0.21	-145.63	4.19	4953.58
DISPLACEMENT	1183.3				
Draft(corr.)[m]	3.35		Fore[m]	3.25	TKM[m]
LCB	-0.31		Aft	3.5	KG[m]
LCG	-0.12	Obs'd draft	Mean(Q/M)	3.39	GM[m]
LCF	1.03		Mid	3.39	GG ₀ [m]
MTQ[t-m]	12.36		Trim[m] +/-B/S	0.16	G ₀ M[m]
TPC[t/cm]	4.49	Cal'd draft	(Ext)[m]	3.35	

検証 コンディション計算によるGM

- コンディション計算による $G_0M = 0.58 \sim 0.62\text{m}$
- 横揺れ周期から推定した $G_0M = 0.564 \sim 0.637\text{m}$ とほぼ一致した。

表:コンディション計算結果

	7日出港前	9日入港後
排水量[ton]	1201.2	1183.3
TKM[m]	4.97	4.97
KG[m]	4.15	4.19
GG ₀ [m]	0.20	0.20
G ₀ M[m]	0.62	0.58

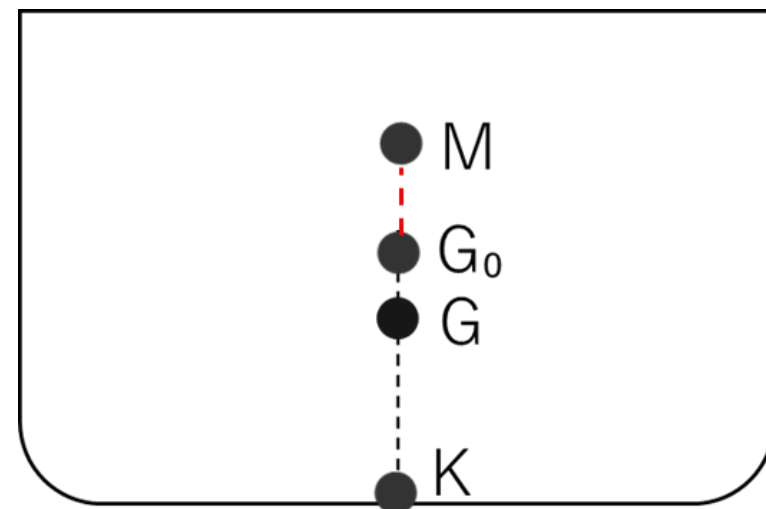
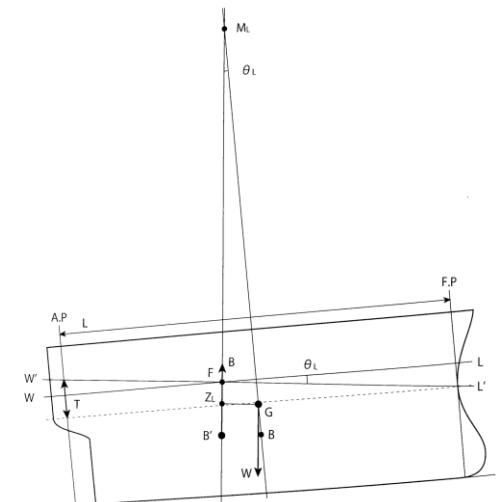


図:K,G,Mの位置関係

検証2 縦揺れ周期実測値と推定値の比較

- 理論的な簡易推定式: $T_p = \frac{2k_p L_{pp}}{\sqrt{GM_L}}$ を利用。
 - T_p : 縦揺れ固有周期、 L_{pp} : 垂線間長、 $k_p L_{pp}$: 縦慣動半径
 - GM_L : 縦メタセンタ高さ
- 慣動半径の係数: $k_p=0.25$ [6]を用いると、汐路丸の縦揺れ固有周期は

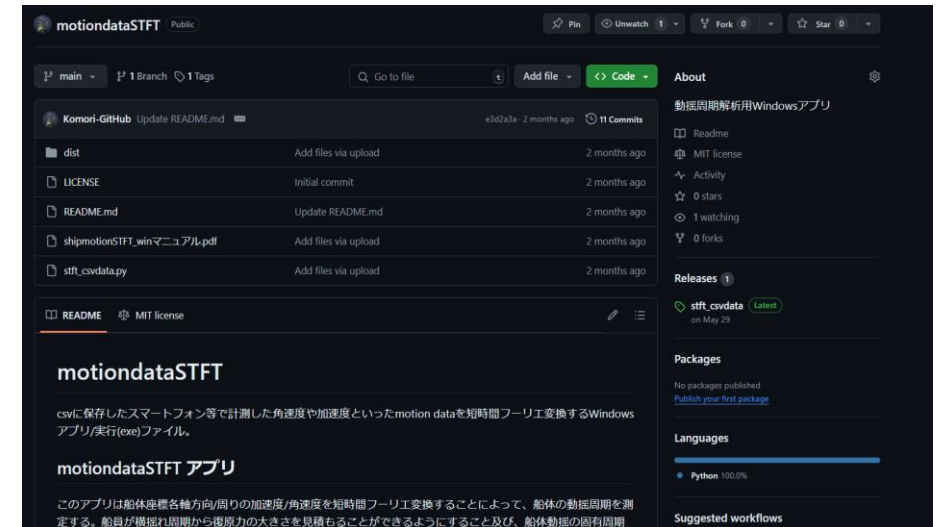
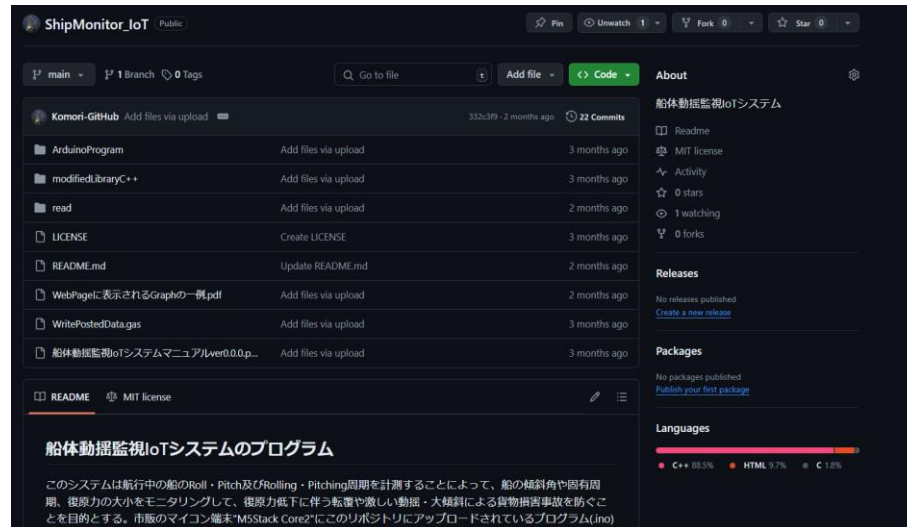
$$T_p = \frac{2 \cdot 0.25 \cdot 54.0}{\sqrt{56.40}} = \underline{3.60[s]}$$
 と推定された。
- 実測した縦揺れ周期の最頻値 4.4~4.6 [s] を固有周期とみなすと25%以内の差で一致。





まとめ

- 産業レベルのIMUのみならず、スマートフォンでも船体動揺・動揺周期を計測できた。
- 横揺れ固有周期から誤差10%未満で横メタンセンタ高さを推定できた。
- ただし、他の船で横揺れ周期からどれくらい正確に横メタセンタ高さを推定できるかは実際に確かめる必要がある。



「船体動揺監視IoTシステム」・「動揺周期計算用PCアプリ」公開ページ(GitHubリポジトリ)

https://github.com/Komori-GitHub/ShipMonitor_IoT

<https://github.com/Komori-GitHub/motiondataSTFT>



今後の課題

- ・固有周期を判断する基準についても検討していきたい。



謝辞

- 本研究の遂行にあたって、汐路丸の完成図書、航行記録データを提供して下さり、またアドバイスを下さった汐路丸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

1. 日本海事協会,「パラメトリックロール対策に関するガイドライン」,2023.2.
2. 濱地 義法・江崎 修央ほか:「船体傾斜及び横揺周期モニタリングシステムの試作」,日本航海学会論文集 第129巻,pp87-92,2013.12.27.
3. 井上 修輔:「大型船舶向け横揺れ周期・傾斜角表示システムの開発」,鳥羽商船高等専門学校,2015.4.
4. IMO: MSC.1/Circ.1228 *REVISED GUIDANCE TO THE MASTER FOR AVOIDING DANGEROUS SITUATIONS IN ADVERSE WEATHER AND SEA CONDITIONS*, pp.3,2007.1.
5. IMO: RESOLUTION A.562(14)
RECOMMENDATION ON A SEVERE WIND AND ROLLING CRITERION (WEATHER CRITERION) FOR THE INTACT STABILITY OF PASSENGER AND CARGO SHIPS OF 24 METRES IN LENGTH AND OVER,pp.7,1985.11.
6. 柏木正・岩下英嗣:「船舶海洋工学シリーズ④ 船体運動 耐航性能編」,成山堂書店,pp.8,2012.10.