IMU を用いた船体横揺れ周期の計測と GM の推定

学生会員○小森　健史（東京海洋大学）　　正会員　久保　信明（東京海洋大学）

要旨

本研究では東京海洋大学所有の汐路丸 IV 世に IMU を設置して、航行中にモーションデータを取得し、これをスペクトル解析することで船の横揺れ周期を計測した。横揺れ周期と GM の関係式から当該船舶の横メタセンタ高さ(GM)を推定し、Condition 計算によって求めた値と比較した。

加えて、より簡単に船の動きを捉える方法として、モーションセンサーとして MEMS-IMU が内蔵されているスマートフォン及びマイクロコンピューター端末で船の横揺れ角速度・周期を計測できないか検証した。

キーワード：測位技術　IMU　船体動揺　復原性　横メタセンタ高さ(GM)

1.　はじめに

十分な復原力を確保することは、船舶の安全運航上重要であり、通常は十分な復原力が確保されているかをコンディション計算にて確認している。しかしながら、復原力が航行中の清水・燃料の消費や、波浪による水線面積の変化によって減少することがある。復原力の不足による海難として、2009 年に「フェリーありあけ」が継続的に追い波を受けており、GM が減少した状態で三角波を受け、大傾斜に至った[(1)]例がある。

他方で、波浪との出会い周期などが船体動揺の固有周期と等しくなると共振が生じる。共振によって船体に激しい動揺が発生したことによるコンテナ流出事故も毎年報告されている。著者は、航行中においても操船者が自船の横揺れ固有周期や復原力の変化を把握することができればこうした事故を未然に防げるのではないかと考えた。

そこで、航行中の船の横揺れに焦点を当てて、IMU で計測した横揺れ角速度・加速度を解析して船の横揺れ周期を求め、復原力の大小の指標である GM を推定する手法を提案する。また、この方法により推定した GM とコンディション計算によって求めた GM の値を比較することで、推定精度を検証する。

IMU による計測では数十万円の価格帯の産業レベルの IMU に加えて、安価かつ身近なもので IMU が搭載されている機器として、スマートフォンとマイコン端末も用いて、産業レベル IMU と比較してどれくらいの性能を発揮できるか評価する。

2.　実験方法と条件

2.1　実験航海概要

本研究では 2023 年 2 月 7～9 日の汐路丸実験航海においてデータを取得した。船舶の航行海域は東京湾内である。船は常に航走していたわけではなく、ほぼ停留状態であった時間が半分以上占める。

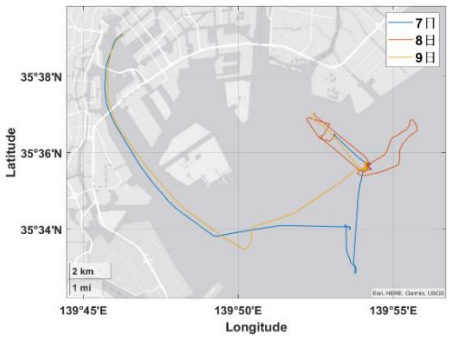

図 1　実験航海時の航跡

2.2　実験機器概要と計測方法

IMU では 3 軸の角速度と加速度を計測することができる。

① 産業レベルの MEMS-IMU

産業レベルの MEMS-IMU として、東京航空計器製”GNAS モーションセンサーユニット CSM-MG 100”を用いた。この IMU は船橋後部(Chart room)・船体中心に設置し、専用の PC ソフトで計測データを記録した。

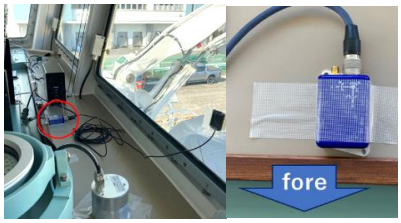

図 2　汐路丸に設置した産業レベルの IMU

② スマートフォン・内蔵 MEMS-IMU

Apple 製 のスマートフォン”iPhone SE”に内蔵されている IMU の計測データを iOS アプリケーション”SensorLogger”で記録した。スマートフォンは教室内の右舷側に設置した。

図 3　汐路丸に設置したスマートフォン

③　マイコン端末・内蔵 MEMS-IMU

本研究では M5Stack 社によって開発されたマイコン端末/IoT 開発キットである”M5Stack Core2”を用いた。端末に搭載されている IMU(TDK-InvenSense 製”MPU-6886“)で計測したデータを、MicroSD へ出力するようにプログラムを書き込んだ。マイコン内で角速度と加速度のセンサーフュージョンをリアルタイムで行い、その結果(姿勢角)も出力した。マイコン端末は船橋後部(Chart room)の右舷側に設置した。

図 4　汐路丸に設置したマイコン端末と MEMS-IMU ”MPU6886”(黄枠内)

2.3　計測について

IMU での計測日時は表 1 に示す通りである。

表 1　IMU の計測日時

計測機器	計測日時
産業レベル IMU	2/7～9 日の航行中
スマートフォン	2/8～9 日の航行中 但し 11:00～13:00 頃まで計測を中断している。
マイコン端末	2/7 午後 2/8～9 日の航行中 但し複数回計測が中断している。

2.4　船の横揺れ角速度のスペクトル解析手法

航行中に記録した全データに対して、スペクトル解析を時系列に行っていく。スペクトル解析には離散フーリエ変換(DFT)を用いる。スペクトル解析の条件を表 2 に示す。

表 2 スペクトル解析(DFT)条件

解析対象データ	産業レベル IMU とスマートフォン:横揺れ角速度 マイコン計測キット:角速度と加速度を統合して求めた Roll
データのサンプリング周期	0.5[s]
スペクトル解析を行うデータ個数/時間窓長	400sample/200[s]
周波数分解能	0.005Hz
適用した窓関数	ハミング関数
何秒毎にスペクトル解析の計算を行うか	10[s](20sample)毎

図 5 に時系列にスペクトル解析を行っていく方法を示す。横軸は GNSS 時刻の Time of Week、縦軸が角速度である。赤枠で囲ったのが 200 秒分のデータである。スペクトル解析の対象区間を 10 秒分ずつ後ろにスライドさせながら、全時間分のデータを解析していく。

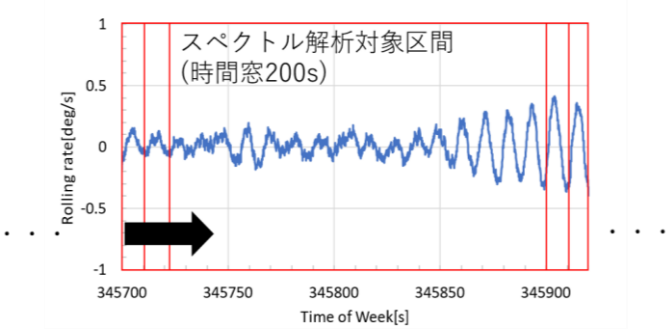

図 5　産業レベル IMU で計測した一部時刻間(TOW=345700~345920)の横揺れ角速度

図 6 に産業レベル IMU で計測した角速度のスペクトル解析結果の 1 例として、TOW=345720～345920s/09:01～09:05(JST) におけるパワースペクトルのグラフを示す。本研究ではパワーが最大となる周波数/Peak をスペクトル解析結果の代表値(その区間での横揺れ周波数)とみなす。

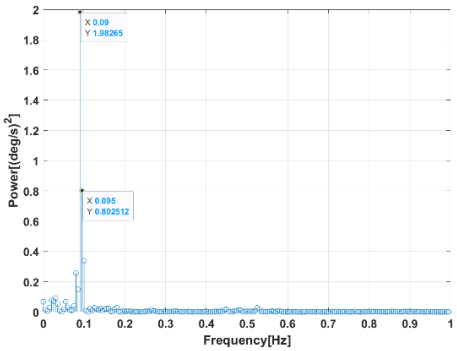

図 6　産業レベル IMU で計測した角速度のスペクトル解析結果 1 例

図 7 に同日同時刻(2/9 09:01～09:05)にスマートフォンで計測した角速度とこのスペクトル解析結果を示す。スマートフォンのジャイロセンサーの計測値に含まれる雑音は比較的大きいことがわかる。雑音の影響により、スペクトル解析の結果、0.00Hz 付近のパワーが本来の横揺れ周波数付近でのそれよりも

大きくなってしまう。マイコン端末でも計測値の雑音が大きく、同様な結果となる。このためスマートフォンとマイコン端末では、0.01Hz 以上でパワーが最大となる周波数をスペクトル解析結果の代表値(その区間での横揺れ周波数)とみなした。

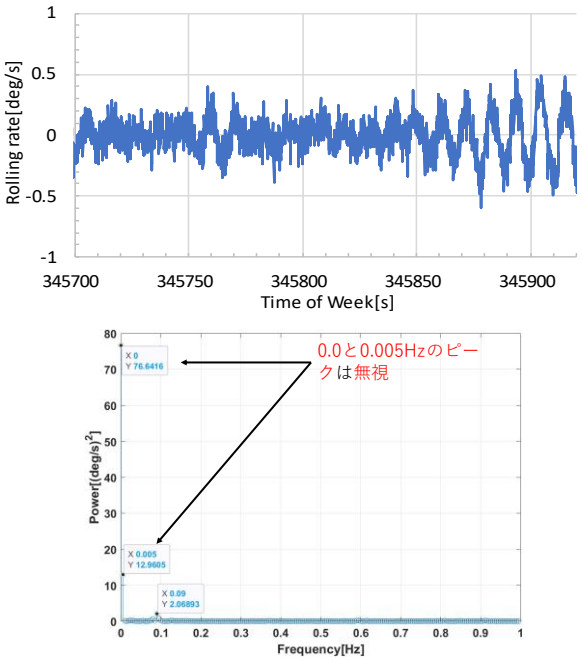

図 7　スマートフォンの IMU で計測した角速度とこのスペクトル解析結果 1 例

3.　実験 1「船の横揺れ周期の計測」　結果

3.1　船の横揺れ角速度

2 月 8 日に産業レベル IMU とスマートフォンで計測した汐路丸の横揺れ角速度を図 8 に示す。

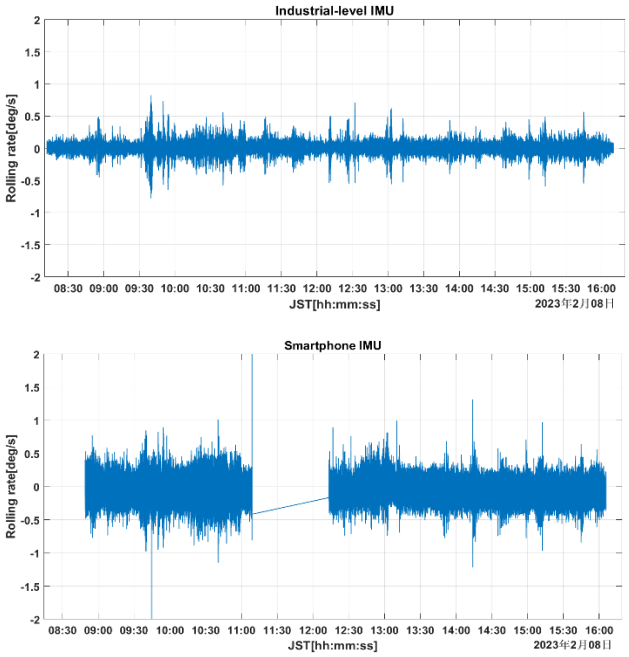

図 8　2 月 8 日に計測した横揺れの角速度

グラフから全時間にわたって横揺れ角速度の大きさは 1°/s 以下と微小なものであったことが分かる。スマートフォンで観測した角速度の方が大きく見えるのは、スマートフォン内蔵の IMU の雑音が産業レベル IMU と比べて大きいためだと考えられる。

3.2　スペクトル解析結果

2/7～9 に産業レベル IMU で計測した角速度、スマートフォン内蔵の IMU で計測した角速度、マイコン端末で計測した角速度・加速度を統合して求めた Roll(Heel)のスペクトル解析結果を図 9 に示す。スペクトル解析結果である横揺れ周波数が、真値に近い0.08～0.1Hz 付近では3つとも概ね一致している。しかし、マイコン端末では雑音の影響による 0.01Hz 付近のピークが表れてしまっているときがある。

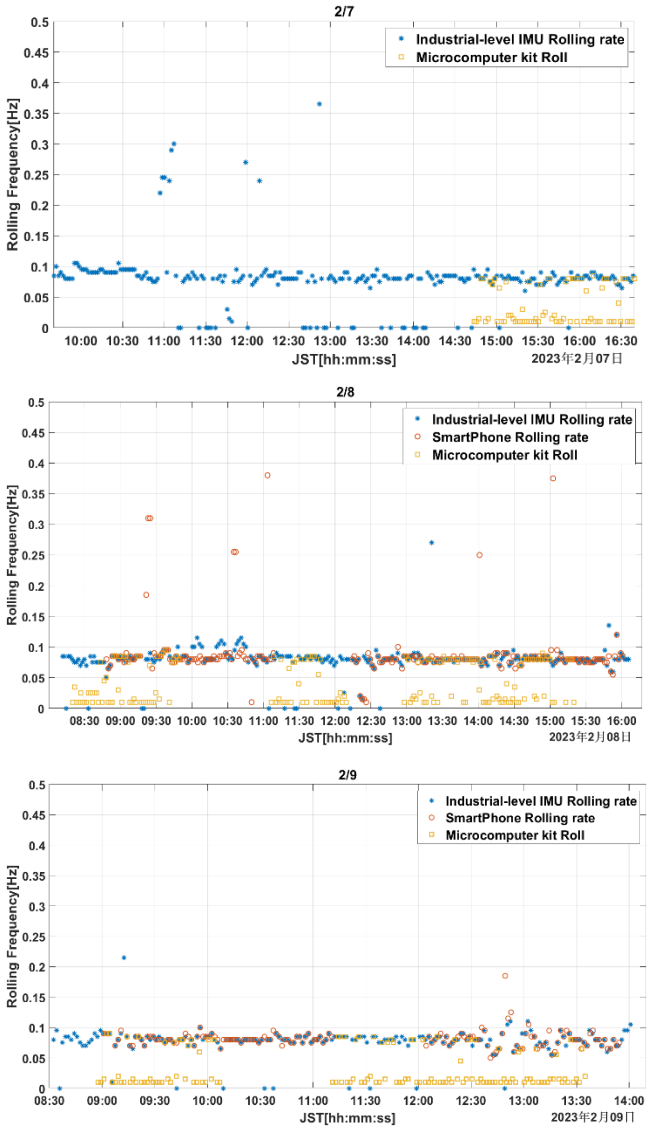

図 9　2/7～9 日のスペクトル解析結果

3 つのスペクトル解析結果に対して、0.07～0.11Hz の間で各周波数の相対度数を計算したところ、図 10

のようになった。

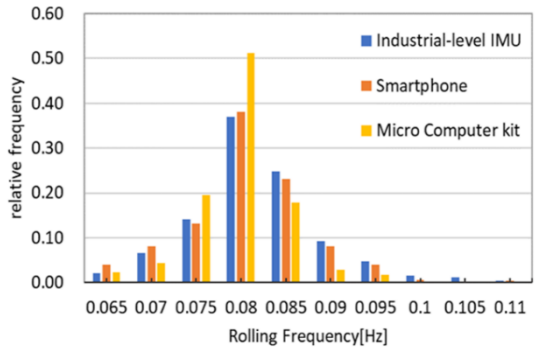

図 10　横揺れ周波数の相対度数分布図

4.　実験 2「船体横揺れ周期による GM の推定」 結果

船の横揺れ固有周期: T_rから GMを推定する際、関係式(i)を用いた。

$$T_r = \frac{2*k*B}{\sqrt{GM}} \quad \cdots(\mathrm{i})$$

慣動半径: kについては IMO 復原性基準の式[(2)]で算出した。

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

表 3 に船の横揺れ周期から推定した GM の値を示す。

表 3　横揺れ周波数/周期から推定した GM

横揺れ周波数[Hz]	横揺れ周期[s]	GM[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

2 月 7 日出港前・9 日入港後の条件で汐路丸 IV 世の完成図書[(3)]に基づき、コンディション計算を行って求めた GM の値を表 4 に示す。

表 4　汐路丸の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_0M[m]	0.62	0.58

5.　まとめ

今回、スマートフォン及びマイコン端末に搭載されている、低コストだが比較的精度の劣る IMU でもフーリエ変換の結果の処理の仕方を工夫することで、産業レベルの IMU と同様に船の揺れが小さくても、動揺周期を正しく計測できることがわかった。

汐路丸の横揺れ周期を測定した結果、この値は 9～14 秒と幅があることがわかった。一部時刻で抜き出した角速度とスペクトル解析結果のグラフを見ても、1 つ 1 つの横揺れの周期が多少異なっていることが分かる。船の横揺れ周期と GM の関係式(i)は横揺れを抵抗のない自由振動と仮定しているが、実際の横揺れはこの条件を常に満たすわけではないと考えられる。

その頻度(相対度数)が大きかった横揺れ周期:T_r=12.50～11.77 秒で G_0M を計算したところ、0.56～0.64m となり、コンディション計算で算出した G_0M=0.58～0.62m とほぼ一致した。横揺れが必ずしも一様ではないことに注意する必要はあるが、本実験を通じて横揺れ周期から G_0M を精度よく推定できることが分かった。

今後は M5StackCore2 の演算及び IoT 機能を活用して、船の横揺れ周期や GM 推定値をリアルタイムに測定・計算し、船内ネットワーク経由で船員に共有できるようにしていく予定である。

6.　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。

7.　参考文献

(1) 運輸安全委員会:船舶事故調査報告書 「フェリーありあけ船体傾斜」, 2011.2.25.

(2) 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,1985.11.

(3) Japan Marine United Co. ,練習船「汐路丸」 完成図書,2021.10.13.