

航行船舶が捉えた東日本震災時の海震の計測 Sea Shock Measured by a Sailing Ship in North East Japan

塩谷 茂明*・笹 健児**
Shigeaki SHIOTANI and Kenji SASA

要旨：平成23年3月11日に発生した東日本大震災により，東北地方の太平洋岸全域が広く被災した。地震は三陸沖の東経142.9°，北緯38.1°，深さ24kmを震源地とし，観測史上最大のマグニチュード9.0を記録した。長時間に渡り大規模な海底変動が発生している。著者らは，某カーフェリーの実海域波浪中における安全性評価の研究の実施中に，偶然にも，この大地震に震源から近距離で遭遇した。本研究はカーフェリーが遭遇した海震のデータの計測結果を示す。海震のデータは6自由度の船体運動であり，海震データは世界でもほとんど収集されていない貴重なデータであるので，ここに公表する。計測データの解析により，海震の貴重な情報が提供された。

キーワード：海震，船体運動，東日本大震災，スペクトル解析

1. 緒言

平成23年3月11日に発生した東日本大震災により，青森，宮城，福島から茨城県に至る，東北地方の太平洋岸全域が広く被災した。地震の強い揺れは長く続いた。特に沿岸部では地震に伴う未曾有の大津波に遭遇し，甚大な被害を被った。平成24年7月25日時点で死者は15,867名，行方不明者は2,904名である¹⁾。東日本大地震は14時46分に，三陸沖で男鹿半島の東南東130km付近が震源地で発生した。869年7月9日に三陸沖東方で，マグニチュード8.3以上の地震があったと記録される貞観大地震以来，1000年に1度の大地震であると言われている。震度は観測史上最

大のマグニチュード9.0を記録した。地震が三陸沖の東経142.9°，北緯38.1°，深さ24kmを震源地とし，震源域は岩手県から福島県に至る長さ450km，幅約200km，すべり量は20~30m程度に及んでいる。この範囲に余震が密集して発生していることにより，長距離に渡り大規模な海底変動が発生している。

著者らは，東北地方の沿岸を航行海域とする某カーフェリーの実海域における波浪中の安全性評価を目的に，搭載車両の動揺およびラッシング加重調査に関する研究を長期にわたり実施していた。偶然にも，宮城県沖を航行中の本船は，この大地震に震源から近距離で遭遇した。一般に，航行船

* 正会員 神戸大学 自然科学系先端融合研究環，** 非会員 神戸大学 大学院海事科学研究科

船が経験する地震動を海震(sea-shock, seaquake)と呼ぶ²⁾。海震に関する研究は、航海士が生涯で1, 2回経験するかどうかと言われるほど、ほとんど通常経験することがなく、再現性が困難であるために、研究例は非常に少ない。平成10年頃に、超大型浮体式海洋構造物(VLFS)の建造が計画された際に、海震の浮体構造物の免震性に関し、理論的研究がなされた程度である³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。しかし、実際の海震を定量的に計測した例は、これまでにほとんどなく、航海士の発言の記憶が残る程度である。

著者らは海底地震に伴う海震を、フェリーに搭載の船体動揺計測装置で、船体運動として偶然に計測することが出来た。これまでに、著者ら⁷⁾は震度6.0の海底地震の震源地近くを航海中に、この場合も偶然に海震を経験し、海震時の船体運動について報告している。このような非常に貴重な計測データは世界に類がない。しかし、今回の地震は想定外の規模であり、航行船舶への影響は遙かに大きい。ここに、大地震時の海震の計測データと解析結果について公表し、報告する。

2. 海震に遭遇

最近、自動車搭載のカーフェリーが荒天の大波

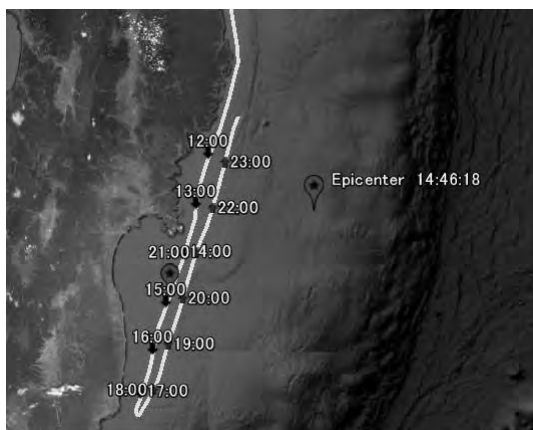


図1 フェリーの航跡と震源地

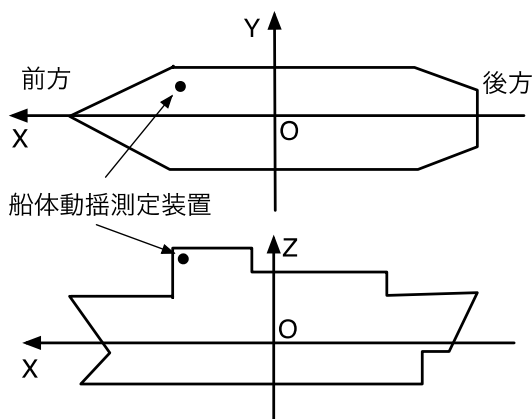


図2 フェリーの座標系

表1 フェリーの主要目

| Item | Ferry |
|--------------------|-------------|
| Loa | 190 m |
| Lpp | 175 m |
| Breath | 26.49 m |
| Depth | 20.25 m |
| Draft | 6.70 m |
| Gross Tonnage | 11,410 ton |
| Main Engine Output | 14,580 kw×2 |
| Trial Speed | 27.61 knots |
| Sea Speed | 24.90 knots |

高域を航行中に、積載自動車の荷崩れから、復原力を失い転覆に至る海難が発生した。著者らはフェリー搭載の貨物及び船舶の安全性評価を目的に、某フェリー会社のフェリーにて、実海域航行中の船体動揺、航海・機関データ、気象・海象データの計測・収集実験を実施していた。

東北沿岸を茨城、仙台及び北海道経由の航路を航行中の某フェリー会社のカーフェリーが福島県沖で東日本大地震に遭遇した。

図1に地震発生時に本船が東北地方沿岸を航行中の航路を示す。図中の沖合の赤色の記号が震源

地であり、その時刻にフェリーは福島の北部を南南西に針路 200° にて航行していた。航路上の記号は地震発生時の船位を示す。船位は震源地から南西、約 56km の北緯 $37^\circ 50'$ 、東経 $141^\circ 30'$ 近くである。すなわち海震時には震源位置は本船の左舷後方であったことになる。フェリーは 17:00 時過ぎに、大惨事により寄港地に入港できないとの連絡を受け、航海の途中で引き返している。

図 2 にカーフェリーの座標系および船体動揺計測装置の設置位置を記載した図を示す。当該実験においては、船体運動計測装置を船橋に設置しただけでなく、加速度センサーを船首および船尾に設置しており、海震時の加速度を 3 カ所で計測しているが、震度が大きいこともあり 3 カ所ともほぼ同一の値を計測していた。計測装置は船舶の動揺計測に実績のあるクロスボ社の慣性計測ユニット NAV440[®] を図 1 に示す原点から 53.2m 前方、 9.0m 右舷側、 15.2m 上側に設置している。

表 1 に船体主要目を示す。フェリーは大洗と苦小牧を往復する。船体運動の固有周期は当時の状況から Z 軸に並進運動する heave は 10s 程度、X 軸まわりに回転する roll は 11.8s 、Y 軸まわりに回転する pitch は 7s 程度であった。地震の場合、我が国では、気象庁⁹⁾が、陸上での観測データに基づき、陸上で受ける地震に対し、10 段階の震度階級を定めている。震度は計測震度計により観測されている。震度は地震計の設置位置周辺で、どのような現象や被害が発生するかを示す。

海震の場合、濱村¹⁰⁾は海震の強さを表す、二種類の海震階級表を紹介している。一つはルードルフ(E. Roudolph)により、1898 年に多数の経験談から、船上での人体の感覚に基づき 10 段階に分けて作成している。我が国では、これを修正し、昭和 20 年頃まで、海震遭遇時に、報告が義務付けられていた。しかし、海震階級は海上の気象・

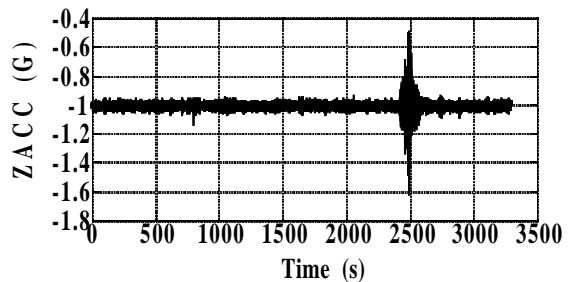
海象の様子、船舶の寸法、構造、船速等により異なることとされ、実際には、階級の判断が難しいとされ、報告されなくなった。

他はジーベルグ(A. Sieberg)により、1923 年に 6 段階に分け作成している。しかし、この階級表は我が国では、正式に採用されなかった。

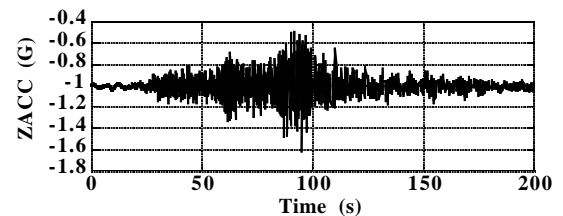
ルードルフとジーベルグの海震階級を対応付けると、ジーベルグの 1 がルードルフの 1 で軽震、2~4 が 2 で弱震、5 が 3 で中震、6 が 4 で強震、7~9 が 5 で烈震、10 が 6 で激震となる。

3. 海震のデータと解析

乗組員によると、海震遭遇時に、船底を突き上げる様な相当強い衝撃を受けたという。強い振動は数分間続いた。このような状況から判断して、今回の海震はルードルフの震度階級表で 5 程度（機帆船で、船上に立つことが困難となり大きい物体も位置がずれたり転倒したり、台から飛び出

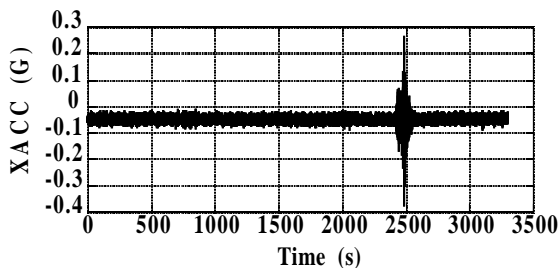


(a) 海震発生前後 1 時間の時系列

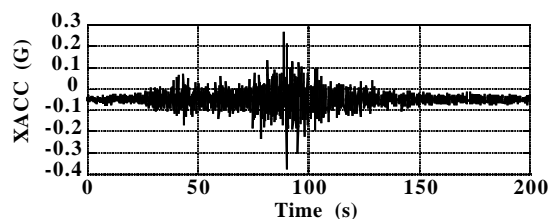


(b) 海震発生前後 200 秒間の時系列

図 3 z 方向の加速度運動

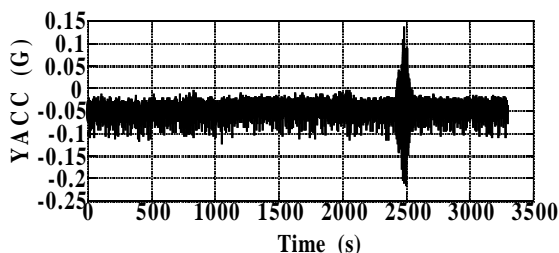


(a) 海震発生前後 1 時間の時系列

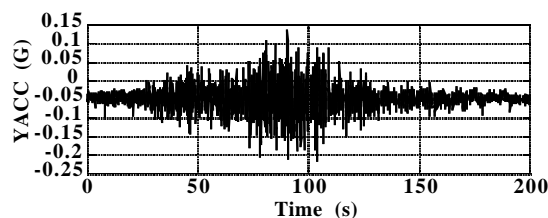


(b) 海震発生前後 200 秒間の時系列

図 4 x 方向の加速度運動



(a) 海震発生前後 1 時間の時系列



(b) 海震発生前後 200 秒間の時系列

図 5 y 方向の加速度運動

したりする), ジーベルグの海震階級で 7,8 程度と想像できる。地震がマグニチュード 9.0 (暫定値) の強さと震源から約 56km と近いことから, 海震

の強度が大きくなったものと思われる。

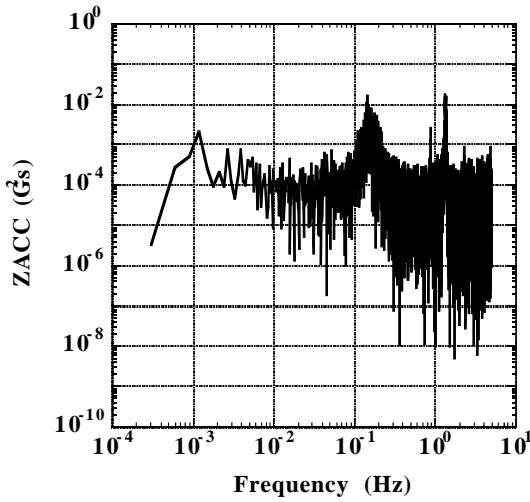
図 3 に船体鉛直の z 軸方向の加速度の時系列を示す。横軸は時刻(s), 縦軸は加速度(G)を示す。(a) 図は海震発生前後約 1 時間の時系列であり, データのサンプリング周期は 0.1s である。地震発生時刻の 14:46 は, およそ横軸の時間 2300~2700s の数値間を示す。(b)図は海震発生時の時系列である。地震発生前後の振動は波浪の影響による船体動揺であり, ほとんど微小な振動で, 静穏である。しかし, 地震発生時突然大きく変動し, 最大変動量 1.1G(-1.6G~-0.5G)にまで達する。著しく大きな加速度の変化は地震発生時の約 3 分間続き, 船体に大きな激しい高周波数の上下動の振動が発生している。これが一般に言われている海震である。

図 4 に船首尾の x 軸方向の加速度の時系列を示す。図 3 に見られた大きな振動と同時刻に, 同様の顕著な振動が見られる。最大変動量は 0.7G(-0.4G~-0.3G)程度であり, z 方向の加速度の約 1/2 で, 若干小さい。

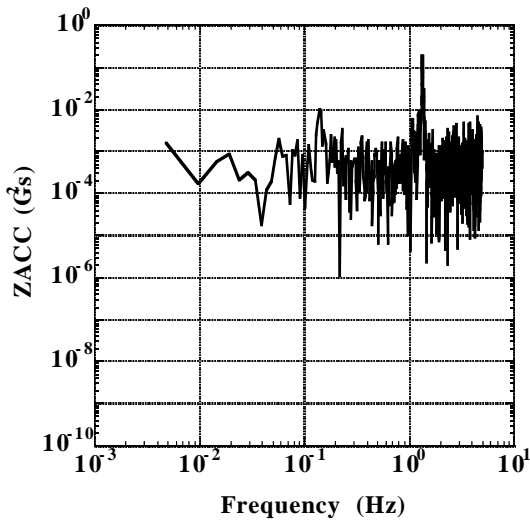
図 5 に正横の y 軸方向の加速度の時系列を示す。波浪中の y 方向の加速度の振動が, z および x 軸方向の振動より, 大きく見えるのは, 縦軸のスケールの違いによる。海震前後の波浪による変動量は z, x 軸方向の加速度とほとんど同程度の大きさである。海震遭遇時には, 最大変動量は 0.35G(-0.2G~-0.15G)程度であり, x 及び z 軸方向に比較すると, 最も小さい。

一般に, 通常海震では, 塩谷ら⁷⁾の観測で見られるように, z 軸方向のみの振動が顕著であり, x および y 軸方向の振動は微小である。しかし, 今回のように強い地震の場合, z 軸方向と比較すると僅かだけ小さいが, x 及び y 軸方向でも顕著な振動が観測されている。このように強い地震発生時には, 船体が 3 方向共に大きく震動することがわかり, 非常に貴重なデータが収集できた。

x,y,z 方向の振動の周波数応答の調査として, 各

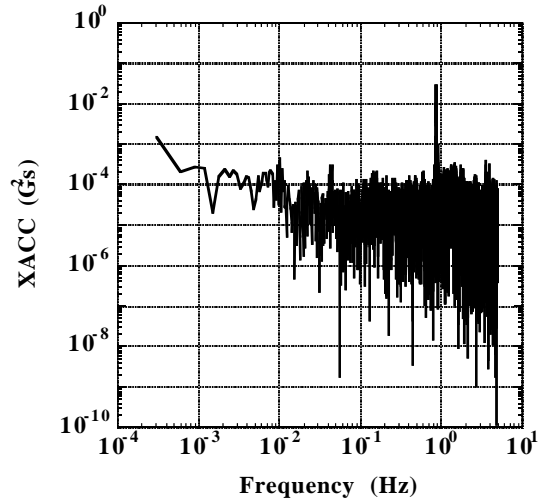


(a) 海震前

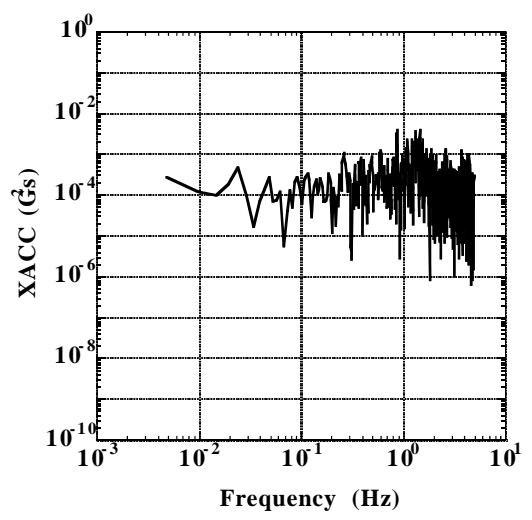


(b) 海震時

図6 z方向の加速度運動のスペクトル



(a) 海震前



(b) 海震時

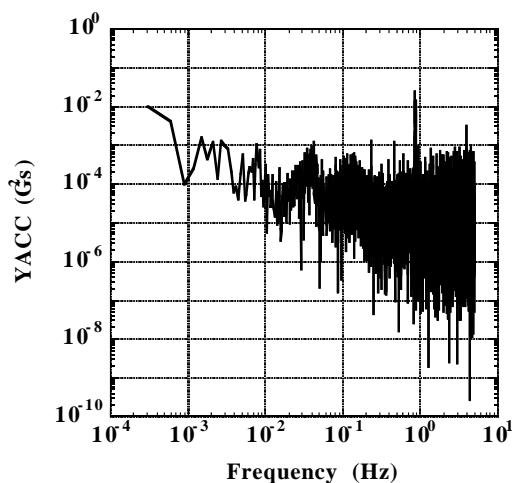
図7 x方向の加速度運動のスペクトル

方向の加速度データをスペクトル解析した。

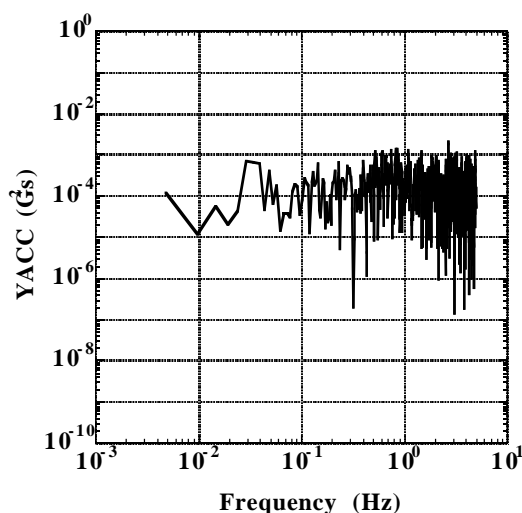
図6にz軸方向の船体振動の加速度スペクトルを示す。横軸は周波数、縦軸は振動の加速度スペクトルを示す。(a)図は地震発生前の加速度スペクトルを示す。約0.15Hz付近にスペクトルのピーク値が見られる。これは波浪中の航行船舶の、船

体波浪応答による加速度スペクトルと考えられる。

周期6, 7sの卓越した波浪に対し、船体が上下方向に反応し動揺する。また、0.9Hz付近にもピーク値が見られるが、x, y軸方向にも見られるので、波浪中の船体動揺に起因した周波数であると思われる。地震発生時に周波数が1.5Hzに鋭いピ



(a) 海震前



(b) 海震時

図8 y方向の加速度運動のスペクトル

ーク値が見られる。海震前のスペクトルにも同じ周波数のピーク値が見られるが、約10倍のスペクトル値を示す。これは海震による高周波数の振動である。

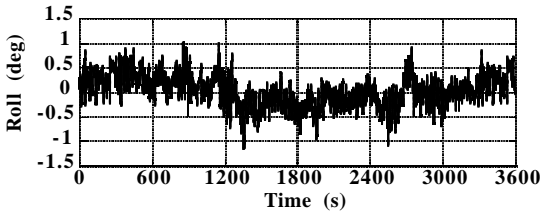
図7にx軸方向の船体振動の加速度スペクトルを示す。(a)図の海震前に、0.9Hz付近にピーク値があるが、これは海震時にも見られるので、波浪

中の船体動揺に起因した周波数と思われる。海震時に、周波数1.5Hz付近にピーク値が見られる。これは図6(b)の海震発生時のx方向の船体振動のピーク周波数ほど顕著でないが、同じ周波数である。スペクトル値は(a)図の海震前より約10倍のスペクトル値を示す。しかし、z軸方向の最大スペクトル値の約1/100程度のオーダーであり、値は小さい。

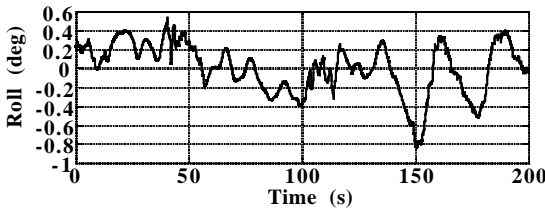
図8にy軸方向の船体振動の加速度スペクトルを示す。(a)図は海震発生前の加速度スペクトルを示す。x軸方向のスペクトルとほとんど同じ周波数の約0.9Hz付近に鋭いスペクトルのピーク値が見られる。これはz、x方向と同様に、波浪による船体応答の加速度と考えられる。(b)図の地震発生時の加速度のスペクトルでは、全般に顕著なスペクトルのピーク値が見られない。2.5Hz付近に小さなスペクトルのピーク値が見られる。これが地震発生時の船体の海震によるy方向の振動と考えられる。

以上をまとめると、実海域航行中では、z軸方向の振動の加速度スペクトルは、波浪中の船体動揺に強く起因する。xおよびy軸方向の振動は、船首方位と波向の相対方位に関連し、振動周期が変化し、必ずしも波浪と振動の周波数は同期しないとされる。海震に遭遇時の周波数は、1~2Hzとなり、x,y,zのいずれの方向にも同様な船体振動が現れる。特に、スペクトル分布で見られるように、z軸方向に、顕著な周波数の振動が現れる。また、xおよびy軸方向において、0.035~0.04Hzおよび0.009Hz付近に小さなピーク値が見られるが、これは周期が25~30秒および1分40秒程度であり、船舶が波漂流力の周期と同調しているものと思われる。

図9に船体の横揺れ(Rolling)の時系列を示す。横軸は時間、縦軸は横揺れを角度で示す。(a)図は地震発生前後の約1時間の時系列である。地震発

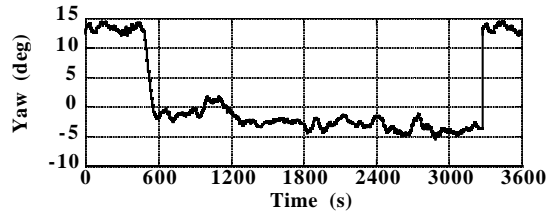


(a) 海震発生前後 1 時間の時系列

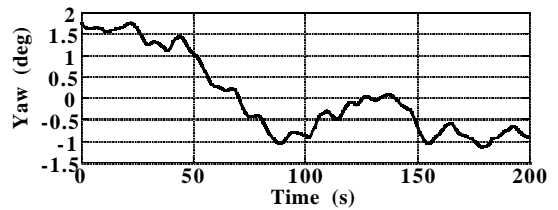


(b) 海震発生前後 200 秒間の時系列

図 9 x 軸周りの運動(Rolling)

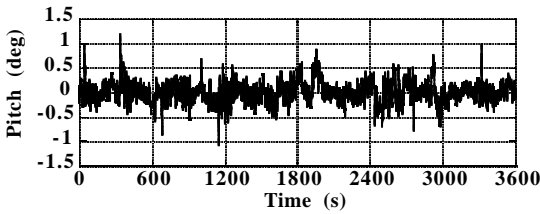


(a) 海震発生前後 1 時間の時系列

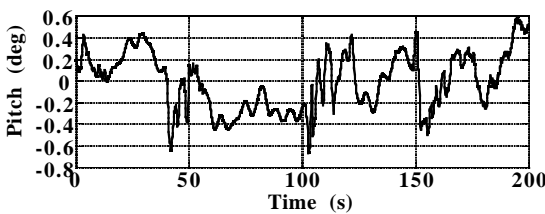


(b) 海震発生前後 200 秒間の時系列

図 10 z 軸周りの運動(Yawing)



(a) 海震発生前後 1 時間の時系列



(b) 海震発生前後 200 秒間の時系列

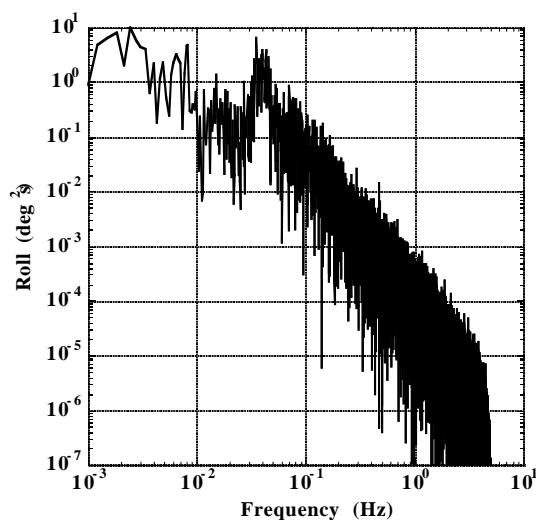
図 11 y 軸周りの運動(Pitching)

生時刻の 14:46 は横軸の時間 2300~2700s の数値間を示す。(b)図は海震発生時の時系列である。最大横揺れは $\pm 1^\circ$ 程度であり、それほど大きくない。横揺れが必ずしも縦軸の 0° を基準に動揺していないのは、北東の季節風の変化による横傾斜

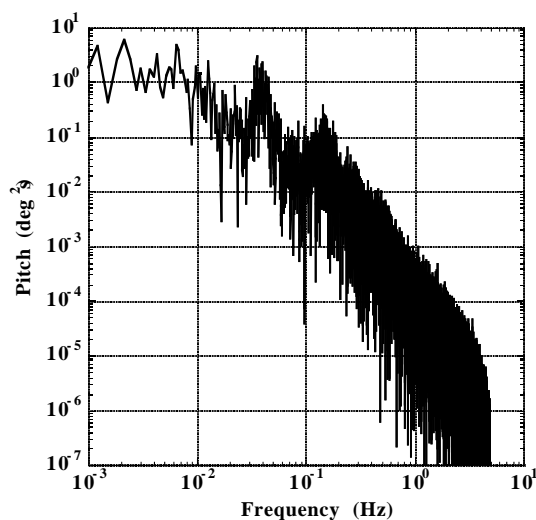
によるものと思われる。(b)図で、地震中の 30~130s 間の動揺の変動量が小さくなり、変動の振動数が僅かだけ増加しているように見える。しかし、海震による Rolling に顕著な変動は見られない。

図 10 に船体の縦揺れ(Pitching)の時系列を示す。(a)図では縦揺れは、平均 0° を中心に最大縦揺れが $\pm 0.5^\circ$ 程度であり、横揺れよりも小さい。(b)図において、地震発生の前半時に縦揺れが減衰し、振動数も僅かだけ増加しているように見える。しかし、(a)図における地震発生時刻の 2300~2700s の間で、海震による船体縦揺れに、ほとんど顕著な変化が見られない。

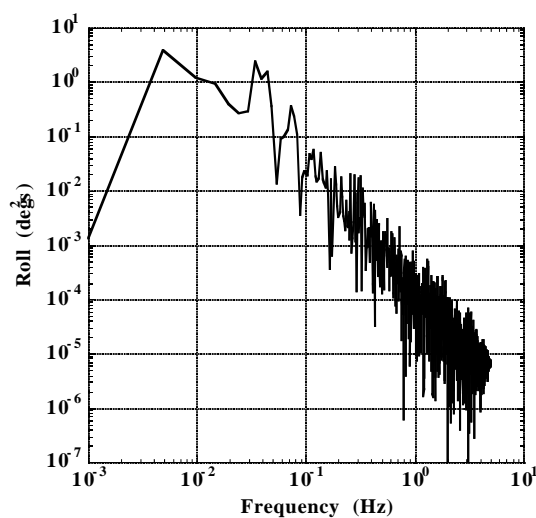
図 11 に船体の船首揺れ(Yawing)の時系列を示す。(a)図において、時刻 600s と 3300s の時刻の頃に、 $12\sim 13^\circ$ の大きな船首揺れの変化が見られるが、通常の操船時にこのような大動揺は生じないので、これは操舵による回頭と思われる。それ以外の時刻では、船首揺れの顕著な変化は見られない。Rolling 及び Pitching の(a)図に比較すると、変動量が小さく見えるのは、縦軸のスケール



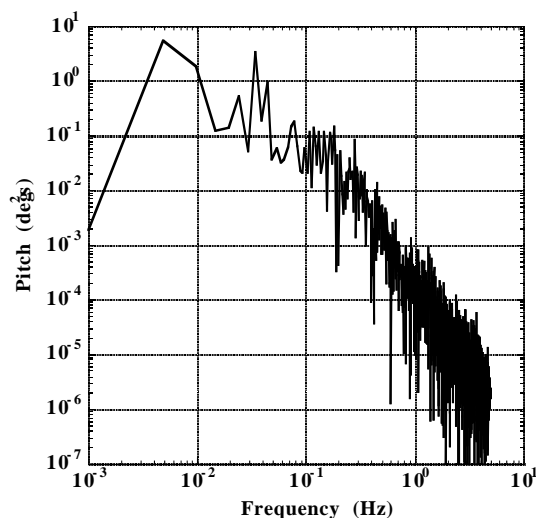
(a) 地震発生前



(a) 地震発生前



(b) 地震発生中



(b) 地震発生中

図 1 2 船体 Rolling のスペクトル

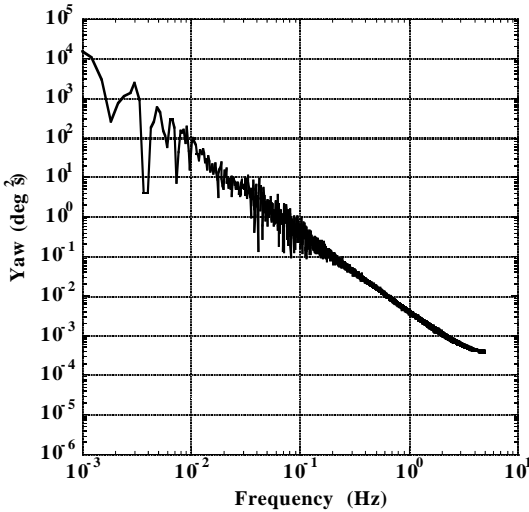
図 1 3 船体 Pitching のスペクトル

が異なることによる。実際は $\pm 1.0^\circ$ 程度の大きさである。(b)図において、地震発生時に船首揺れが 1.5° から -1.0° まで減少し、その後緩やかな変動を示す。(a)図において、地震時に顕著な船首揺れの変動を示していない。

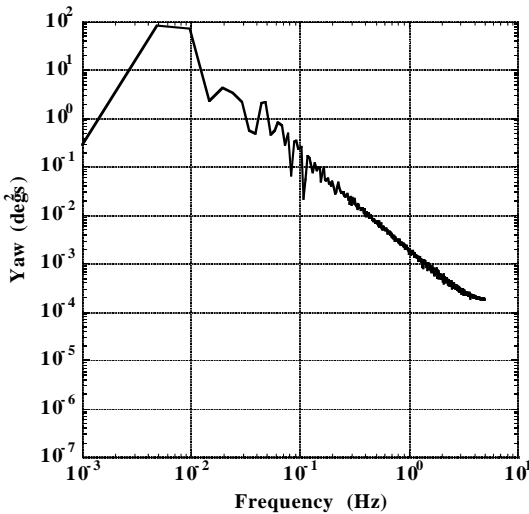
x,y,z 軸方向の船体運動の加速度のスペクトル

計算と同様に、船体の横揺れ、縦揺れ及び船首揺れの地震による周波数応答の調査を目標に、それぞれの時系列データをスペクトル解析した。

図 1 2 に船首尾方向の x 軸周りの船体横揺運動 (Rolling) のスペクトルを示す。横軸が周波数、縦軸が角度のスペクトルで、単位は deg^2s である。



(a) 地震発生前



(b) 地震発生中

図 1 4 船体 Yawing のスペクトル

(a)図は地震発生前のスペクトルである。航海中の波浪の影響による船体横揺れのスペクトルである。周波数が 0.035~0.04Hz 付近に微小なスペクトルのピークが見られる。周期 25~30 秒程度の船舶が波漂流力の周期と同調していることの影響によると思われる。(b)図は地震発生時のスペクトルで

ある。このスペクトルにも(a)図と同様の 0.035~0.04Hz 付近に小さなスペクトルのピークが見られる。それ以外に、特に海震による周波数成分は見られない。(a)図のスペクトルとよく似ている。これにより、海震が船体横揺れに影響していないと思われる。

図 1 3 に船体横方向の y 軸周りの船体縦揺運動 (Pitching) のスペクトルを示す。(a)図は地震発生前のスペクトルである。周波数が 0.035~0.04Hz 及び 0.15Hz に小さなスペクトルのピークが見られる。後者は航海中の波浪の影響による船体縦揺れのスペクトルである。前者は周期 25~30 秒程度の船舶が波漂流力の周期と同調していることの影響によると思われる。(b)図は地震発生時のスペクトルである。このスペクトルにも(a)と同じ周波数に同様の小さなスペクトルのピーク値、それ以外に、周波数が 0.3Hz にも小さなピーク値がある。これらのピーク値は(a)図にも見られるので、海震の影響によるか不明である。x,y,z 軸方向の同様の加速度の周波数から、判断すると、海震に起因のスペクトルでないと思われる。今後詳細な解析が必要である。

図 1 4 に船体鉛直方向の z 軸周りの船首揺運動 (Yawing) のスペクトルを示す。(a)図は地震発生前のスペクトルである。特に顕著なスペクトルのピークは認められない。(b)図は地震発生時のスペクトルである。このスペクトルにも(a)図と同様、特に海震による周波数成分は見られない。

以上から、航行中のフェリーは左舷側の船尾斜め後方から海震の粗密波を受けているが、船体運動の Rolling, Pitching 及び Yawing の角度の時系列をスペクトル解析した結果、各スペクトルの形状は互いに類似している。また、海震の影響と思われる顕著なスペクトルのピーク値も確認出来なかった。さらに、各軸方向の船体運動の加速度の時系列では、明らかに海震によると思われる高

周波数の振動が見られたのに対し、各軸周りの角運動の時系列には、顕著な高周波数の変動を示さない。これらにより、船体の角運動に対し、海震の影響は小さく、ほとんど影響しないことが解った。海震は、軸方向の波浪に起因の振動に、高周波数の振動が重ね合って現れる。

4. 結論

平成 23 年 3 月 11 日に 1000 年に一度の大規模な地震が東日本に発生した。青森、宮城、福島から茨城県に至る、東北地方の太平洋岸全域が広く被災した。特に沿岸部では地震及び地震に伴う未曾有の大津波に遭遇し、甚大な被害を被った。

偶然に、この強い海底地震が発生した海域を航行中のカーフェリーが異常な海震を経験した。フェリーには積載自動車及び船体の安全性評価実験を目的に、船体運動の計測器を搭載し、計測を実施していた。

海震の影響による貴重な船体運動の計測を行うことができた。これまでに海震の計測及び解析を行った事例はほとんど見られない。本計測データを解析した結果、以下の主要な結論を得た。

1) マグニチュード 9.0 の大地震の発生により、 x, y, z 軸方向の加速度に、海震による高周波数の船体振動が、顕著に観測された。

2) 高周波数の振動は z 軸方向が最も顕著であり、 x 及び y 軸方向は僅かだけ小さい。

3) x, y, z 軸周りの船体動揺運動に、海震の影響の高周波数の振動は見られなかった。

今後、海震に遭遇時の船体運動の貴重なデータと、別所らによる、海震を疎密波として捉え、速度ポテンシャルで表し、浮体表面の海震荷重を理論的に求めた計算結果との比較検証を行う所存である。

本研究は文部科学省科学研究費（挑戦的萌芽研究 24651200 代表者 塩谷茂明）の補助を受け

たことを記し関係各位に謝意を表す。

引用・参考文献

- 1) 警察庁：<http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo.pdf>
- 2) 別所正利，前田久明，増田光一，高村浩彰：浮体構造物の高周波数振動による動水圧と海底地盤の弾性変形特性に関する基礎的研究，日本造船学会論文集，第 189 号，pp. 93-100，2001
- 3) 別所正利，前田久明，増田光一，高村浩彰：超大型浮体式海洋構造物の海震に伴う応答解析手法に関する基礎的研究，日本造船学会論文集，第 186 号，pp.215-222，1999
- 4) 別所正利，前田久明，増田光一，高村浩彰：地震波の地盤・水中伝播特性を考慮した海震に伴う浮体構造物の応答特性に関する研究（第 1 報），日本造船学会論文集，第 190 号，pp.381-386，2001
- 5) 岡本強一，堀田健治：海震時における超大型浮体式海洋構造物の時刻歴応答に関する実用的解析法，2002 年度日本建築学会関東支部研究報告集，第 73 号，pp.265-266，2002
- 6) 森田知志：海底の地盤条件を考慮した地震時流体力の解析法，海岸工学論文集，第 41 巻，pp.821-825，1994
- 7) 塩谷茂明，若林伸和，笹健児，寺田 大介：航行船舶が遭遇した地震動の解析，第 23 回海洋工学シンポジウム，日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会，平成 24 年 8 月 2, 3 日，pp.1-8，CD-ROM，2012
- 8) 住友精密工業株式会社：慣性運動計測機器カタログ，<http://www.xbow.jp/imu440.pdf>，2013
- 9) 気象庁：ホーム > 気象等の知識 > 地震・津波，[http://www.jma.go.jp/jma/kishou/](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/)

jishin.html, 2012

- 10) 濱村健治：海上は免震か？—海震の調査—，
船の科学，第40巻，pp.58-61，1987

株式会社日本海洋科学入社，平成14年10月広島商船高等
専門学校商船学科，平成24年10月神戸大学大学院海事科学
学研究科勤務，現在神戸大学准教授，商船学博士，日本航
海学会，他4学会会員。

E-mail:sasa@maritime.kobe-u.ac.jp

著者紹介

塩谷 茂明（正会員）

神戸大学自然科学系先端融合研究環
（神戸市東灘区深江南町5-1-1），昭
和25年生まれ，昭和51年3月神戸
商船大学商船学研究科修士課程（航
海学専攻）修了，同年4月同年広島商
船高等専門学校助手，平成3年長崎
大学水産学部勤務，現在神戸大学教
授，工学博士，日本航海学会，日本
船舶海洋工学会，日本土木学会，他11
学会会員。

E-mail:shiotani@maritime.kobe-u.ac
.jp



笹 健児（非会員）

神戸大学大学院海事科学研究科（神戸市東灘区深江南町
5-1-1），平成6年3月神戸商船大学大学院修了，同年4月

Sea Shock Measured by a Sailing Ship in North East Japan

Shigeaki SHIOTANI and Kenji SASA

ABSTRACT : The entire Pacific coastal region of the Tohoku was widely affected by the Great East Japan Earthquake that occurred on March 11, 2011. The maximum magnitude recorded in the history of earthquakes is 9.0. The earthquake had an epicenter at 142.9° east longitude and 38.1° north latitude, a depth of 24 km. This was an opportunity for the authors to collect data on the shaking of the ship body during its actual sea voyage in order to evaluate the safety of vessels and cargo loaded. There are a few studies in which seaquakes have actually been measured; records consist of navigators remarks.

As we had experienced a seaquake because of an undersea earthquake during a voyage and had installed a measuring device for the shaking of the ferry hull, we succeeded in measuring the seaquake as the hull motion. This type of measured data does not exist elsewhere, and hence is extremely valuable. This report contains our measured earthquake data and analysis.

KEYWORDS : *Sea-shocks, ship motion, Big earthquake disaster in East Japan, spectrum analysis*