

観測波を用いた沿岸航行の船体運動の再現性と欠航判断に関する研究

A Study on Reproduction of Ship Motions Using Coastal Waves and Judge of Operational Cancellation

笹 健児¹・寺田大介²

Kenji SASA and Daisuke TERADA

A safety of maritime transportation should be secured around harbours and open waters. However, the evaluation method about judge of ship cancellation has not been numerically modeled yet. It is inevitable to estimate ship motions during the coastal navigation. Here, the new concept of reproduction of ship motions is shown by using the coastal network wave database, NOWPHAS. A domestic ferry service, which navigates in the Pacific Ocean, is set as the object of this study. Firstly, field observations of ship motions were implemented when typhoons approached Japan in 2003-2004. Then, the reproduction accuracy is verified between two types of equations of motions. It shows that the impulse response method is inevitable to estimate large amplitudes pitch motions with detailed wave data as directional spectrums for the judge of cancellation.

1. 研究の目的

船舶による海上輸送の安全性は港湾内、港湾付近の海域および沿岸航行中におけるそれぞれの局面で確保されなければならない。海岸工学の分野では港内における係留船の長周期船体運動が数多く検討され（白石ら, 1995；久保ら, 1997）、港湾に入出港する局面（笹ら, 2003）や港外海域で荒天避泊する局面（笹ら, 2005）での船体運動も検討された。一方、船舶海洋工学の分野では波浪荷重に耐えうる船体構造および復原性能を確保する観点より、大洋航海中における船体運動の検討事例が数多く存在する（日本造船学会, 2003；元良ら, 1982）。しかし、沿岸航行中の船舶に関する欠航判断の定量的な評価手法は未構築であり、内航フェリーなど未だ多くの船舶では波浪予報値をもとに船長の経験と勘に依存した欠航判断が余儀なくされる。このため、急変する気象海象と発生する船体運動の関係を予測しきれず、積載貨物の損傷や船舶が海難事故に遭遇した事例も存在する。航行中の船体運動を考える場合、波向や船体速度も重要な要素であり、不規則波中を航行中の数値モデルとして時間領域で実測値との再現性を検討した例も非常に少ない。日本では全国規模で沿岸波浪に関する高精度な観測情報網（ナウファス）が構築され（永井, 1997）、当該システムを活用した船体運動の推定が有効と考える。本研究では外洋を航行するフェリーを対象に台風接近時の船体運動を現地観測し、近隣ポイントにおける沿岸波浪データを入力波形として船体運動を再現できるモデルの構築および実測値との精度検証を実施した。これより沿

岸航行中の船体運動の再現性を支配する要因を明らかにし、沿岸観測波を活用した欠航判断システムの可能性を検討した。

2. 沿岸航行時の船舶運航に関する現地調査

本研究では図-1に示す大阪～高知の太平洋上を航行する定期フェリーを対象に調査検討を行った。図より室戸岬沖で大きく船首方位を変更するルートとなっている。船舶運航者への聞き取り調査の概要（小林ら, 2006）は以下に要約される。①航海中に最も卓越する運動は縦揺れであり、特に室戸岬の近くで顕著となる。②うねり時の欠航基準を決めるのは難しいが、現状では風速10～12m/s、有義波高2.5mを目安としている。③うねりだけでなく風を伴った場合はさらに危険となり、台風以外にも低気圧や前線が南の海上に位置する場合にはかなり波が高くなる。④車両貨物として木材を積載しているケースもあり、横揺れで荷崩れを起こしやすく、ワイヤー等

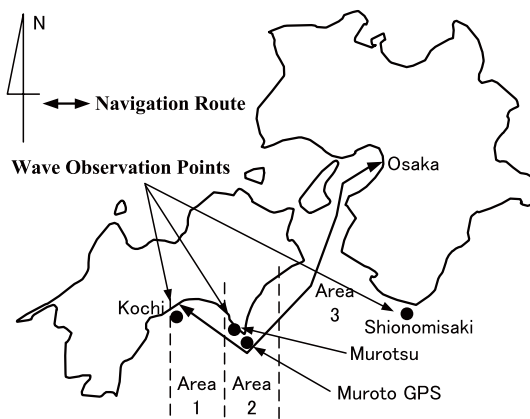


図-1 本研究で対象としたフェリーの航海ルート

1 正会員 博(商船) 大島商船高等専門学校准教授商船学科
2 博(工) 広島商船高等専門学校准教授商船学科

で車両も固縛するが十分ではない。また縦揺れ時にも車両甲板にかなりの衝撃が発生するため、貨物の損傷が懸念される。これからも現場では欠航を判断するためのデータと船体運動を推定する手段を持たないことが分かる。

3. 船体運動および沿岸波浪の現地観測

(1) 船体運動の現地観測

本研究では5,000DWT級のフェリー（垂線間長109m, 幅21m, 喫水4.5m, 排水量6,032t, メタセンター高さ1.4m, 方形係数0.57）を観測対象とし、船体運動測定装置（笹ら, 2001）を用いた船体運動の現地観測を2003～2004年の台風接近時に実施した。航海中の全局面でデータを計測したが、データ量が膨大であること、対象海域が広域にわたることから、図-1に示す3海域に分類し、時間領域および周波数領域で特性を整理分析した。図-2

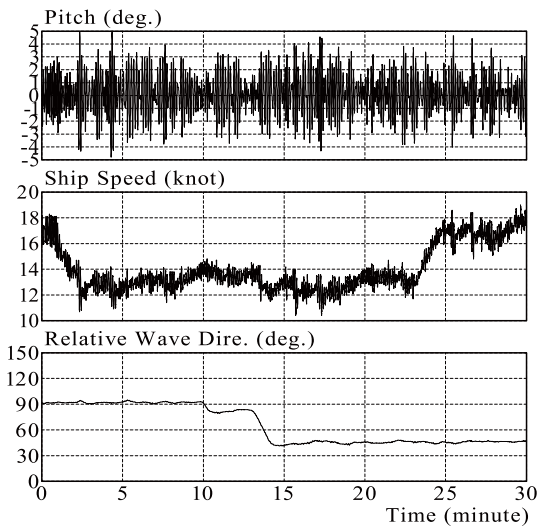


図-2 船体運動の観測結果（海域2，2003年9月22日）

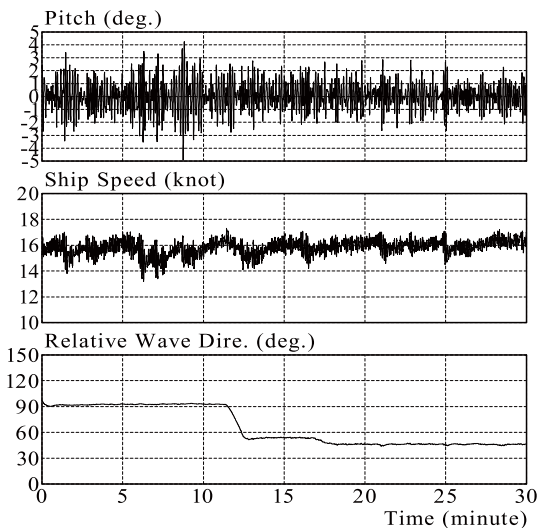


図-3 船体運動の観測結果（海域2，2004年7月30日）

および図-3に2003年9月22日および2004年7月30日に海域2（室戸岬沖）で観測された縦揺れ、船体速度、船首方位と観測波の波向から求まる相対波向の時系列を示す。

図より、両方のケースで室戸岬の沖で船首方位が大きく変化しながら片振幅4～5°の縦揺れが発生している。船体速度は前者が12～14ノット、後者が15～16ノットであり、前者は通常時よりも減速航行している。これらは事前調査の結果をほぼ裏付けていると言える。

(2) 沿岸波浪の観測データと船体運動との関係

欠航判断にあたり、波浪と船体運動の関係を把握することは極めて重要であるが、時々刻々の船体位置における波浪を計測することは非常に困難である。日本では全国の沿岸にて波浪観測ポイントが多数構築され、リアルタイムにデータ提供されているナウファスの活用を試みる。図-1よりルート上にも波浪観測点が室津、室戸GPS、高知の3箇所稼働しており、船体運動を観測した同時期のデータを整理分析した。図-4は2004年7月30日0:00に室津および室戸GPSで観測された水位変動の時系列を示す。

図より室津と室戸GPSでは水位振幅が大きく異なり、有義波と比較すると室津が0.85m、12sであるのに対し、室戸GPSは2.97m、11.8sであった。これは沖合の室戸GPSから沿岸近くの室津に波浪が伝播する過程において、地形等の影響で低減していると考えられる。室戸GPSの方が船舶の位置に近い場合、船体運動の再現計算においては基本的には室戸GPSのデータを用いた。図-5は図-2および図-3に示す縦揺れと同時刻の波浪のスペクトルを比較したものを示す。ただし室戸GPSは2004年から稼働しているため、図-2に対応する波浪データは室津のみである。

左側は縦揺れのピーク周期は8s、波浪は11sと5sに二つのピークが存在し、右側は縦揺れが8s、波浪は12sに卓越周期が存在する。両ケースとも縦揺れの周期は約8sであるが、観測された波浪の周期は必ずしもこれとは一致していない。よって沿岸観測波の有義値だけでなく、船体運動にて安全性を評価する必要があることが分かる。

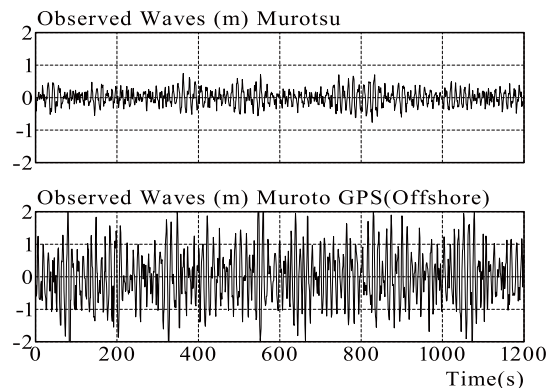


図-4 室津および室戸GPSでの水位変動

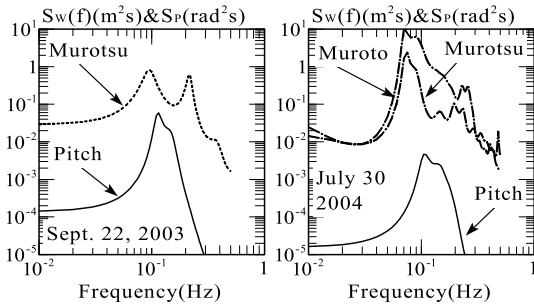


図-5 船体運動と波浪のスペクトルの比較結果

4. 船体運動の数値解析による再現性の検討

(1) 船体運動の数値解析モデル

大洋航海中の場合、対象期間が数日～数週間の長期のため、時系列解析による実海域データを用いた再現精度の検証は不十分である。ここでは船体運動の運動方程式として流体力の扱いが異なる2手法を用いた。これらは係留船の動揺解析にて再現精度に顕著な差異が見られたため比較対象とした。なお、運動方程式における流体力・波力は多重極展開法(田村ら, 1969)をもとにしたストリップ法をベースに算出した。また、縦運動と横運動は線形理論の範疇では別々に分けて考えることができるため、本研究では上下揺れと縦揺れの2モードのみを対象に船体運動を解析した。

a) 流体力を一定の周波数にて代表する方法(手法A)

流体力がある周波数にて代表させる場合の運動方程式は次式で表される。

$$\sum_{i=1}^2 (M_{ii} + \int_L A_{ij}(\sigma_{E1/3}) dy) \ddot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^2 \int_L B_{ij}(\sigma_{E1/3}) dy \dot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^2 C_{ij} X_j(t) = F_j(t) \quad (j=1,2) \quad (1)$$

ここで、 M は船体質量、 $A(\sigma)$ および $B(\sigma)$ は船体各断面における角周波数 σ での付加質量および減衰係数、 C は復原力係数、 $F(t)$ は時刻 t における波浪外力、 $X(t)$ は船体変位を示す。前進速度を有する場合、船舶に作用する出会角周波数 $\sigma_{E1/3}$ は入射波向、波数、船体速度を用いて次式で表される。

$$\sigma_{E1/3} = \sigma_{1/3} + kV \cos \alpha \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{1/3}$ は沿岸波浪の有義周期に対応する角周波数、 k は波数、 V は船体速度、 α は相対波向を示し、波向は船首方向を 0° とし、船尾方向(180°)に測るものとする。波浪外力は成分波ごとの角周波数から得られる出会角周波数における応答関数をもとに重ね合わせて求めた。式(1)を数値積分すれば、船体運動の時系列が求められる。

b) 流体力をインパルス応答で表現する方法(手法B)

手法Aは加速度と速度に比例する流体力が周波数に依存する形であるが、これは外力の卓越周期と船体運動の固有周期が同一の場合を前提としている。係留船舶の長周期動揺のように両者の差異が著しい場合、流体力が特定の周波数に依存しないインパルス応答を考慮する必要があると示されている(久保ら, 1997)。前進速度を有する場合のインパルス応答を考慮した運動方程式(斎藤ら, 1992)は以下のように提案されている。

$$\sum_{i=1}^2 (M_{ii} + \int_L m_{ij}(\infty) dy) \ddot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^2 \int_L K_{ij}(t-\tau) \dot{X}_j(\tau) dy d\tau \quad (j=1,2) \quad (3) \\ + V \sum_{i=1}^2 D_{ij} \dot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^2 C_{ij} X_j(t) + V \sum_{i=1}^2 E_{ij} = F_j(t)$$

ここで、 $m(\infty)$ および $K(t)$ は船体各断面における不変付加質量および遅延関数、 D および E は船体速度および運動速度または運動変位に比例する追加項を示す。

$$D_{ij} = \delta_{ij} \int_L \frac{\partial m_{ij}(\infty)}{\partial y} dy \quad (ij=1,2) \quad (4)$$

$$E_{ij} = \delta_{ij} \int_L \int_L \frac{\partial K_{ij}(t-\tau)}{\partial y} X_j(\tau) dy d\tau \\ + 2\beta_{ij} \int_L \int_L K_{11}(t-\tau) X_j(\tau) dy d\tau \\ + 2\gamma_{ij} \int_L \int_L K_{12}(t-\tau) X_j(\tau) dy d\tau \\ + V\beta_{ij} \int_L \frac{\partial m_{11}(\infty)}{\partial y} dy X_j(t) + V\lambda_{ij} \int_L \frac{\partial m_{12}(\infty)}{\partial y} dy X_j(t) \quad (ij=1,2) \quad (5)$$

ただし、 $(ij=1,2)$ に関して、

$$\delta_{ij} = \begin{cases} -1 \cdots (i=j) \\ 1 \cdots (i \neq j) \end{cases}, \quad \beta_{ij} = \begin{cases} 1 \cdots (i=1, j=2) \\ 0 \cdots (\text{それ以外}) \end{cases} \\ \gamma_{ij} = \begin{cases} -1 \cdots (i=2, j=2) \\ 0 \cdots (\text{それ以外}) \end{cases}, \quad \lambda_{ij} = \begin{cases} 1 \cdots (i=2, j=2) \\ 0 \cdots (\text{それ以外}) \end{cases}$$

である。斎藤らは追加項 D および E の定式化にあたり、船首尾の船体形状が非対称であることによる船体運動への影響を無視した近似形を提案したが、ここでは方形係数が0.6以下の船型であることを考慮し、式(4)および(5)に示す船首尾影響を考慮した係数設定とした。各断面での遅延関数および不変付加質量は全周波数領域における流体力係数の値より次式で求められる。

$$K_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B_{ij}(\sigma) \cos \sigma t d\sigma \quad (ij=1,2) \quad (6)$$

$$m_{ij}(\infty) = A_{ij}(\sigma) + \frac{1}{\sigma} \int_0^\infty K_{ij}(t) \sin \sigma t d\sigma \quad (ij=1,2) \quad (7)$$

(2) 船体運動の再現結果と実測値との比較

図-6に2004年7月30日の室戸沖での縦揺れを対象に、相対波向は当時の主波向と船首方位からほぼ真横の 85° にて両手法で計算した結果と実測値との比較を示す。図

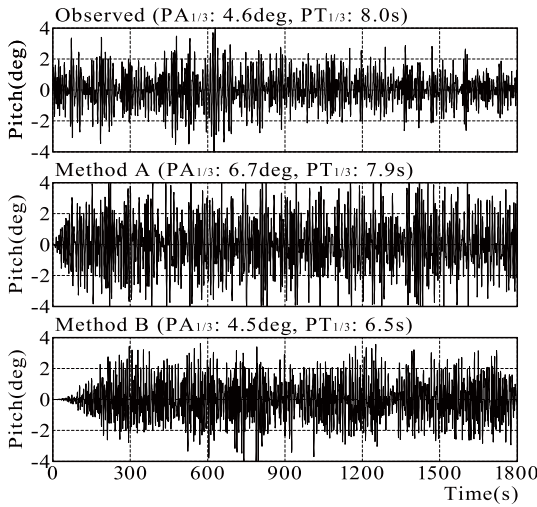


図-6 縦揺れの実測値と計算値の比較
(2004年7月30日, 室戸岬沖)

中の $PA_{1/3}$ および $PT_{1/3}$ は時系列からゼロアップクロス法にて求めた縦揺れの有義振幅および有義周期を示す。

図より両手法とも縦揺れが卓越している状況は概ね再現できており、手法間で顕著な差異は見られない。しかし、手法Aは運動振幅が実測値よりも大きめに再現され、手法Bは運動周期が実測値よりも短い。図-7は2003年9月13日に海域1(高知沖)を航行中に発生した縦揺れを両手法で再現した結果と実測値の比較を示し、入力波形は航行海域に最も近い同時刻の高知沖の値を使用した。

図より縦揺れの有義振幅は 1.9° であり、手法Aでは有義振幅は実測値の半分以下で過小評価している。一方、手法Bでは有義振幅は 2.2° と実測値にかなり近く、手法による再現精度に明確な違いが生じていることが分かる。

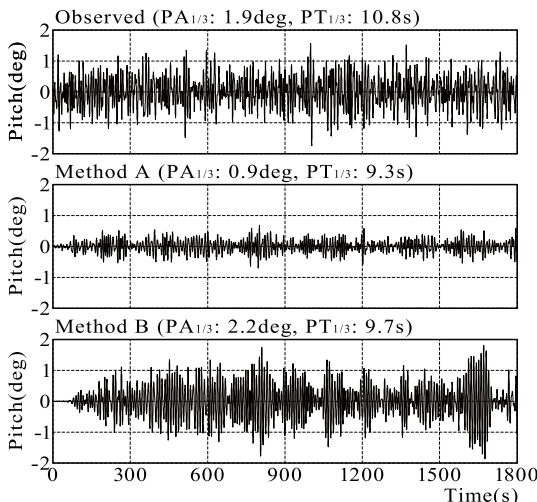


図-7 縦揺れの実測値と計算値の比較(2003年9月13日, 高知沖)

(3) 船体運動の再現性を支配する要素

係留船舶の場合、運動方程式中における流体力の評価方法が再現性を支配する(久保ら, 1997)。対象とした沿岸航行中の船体運動についても同様の考察を行った。式(1)において流体力を代表させた有義出会い周波数 $\sigma_{E1/3}$ と次式で求められる縦揺れの固有周期の関係を考察した。

$$T_p = 2.007 \frac{\kappa_l}{\kappa_w} \sqrt{\frac{C_b d}{C_w}} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 T_p は縦揺れの固有周期、 κ_l は船の縦揺れ時の慣動半径、 κ_w は水線面における縦揺れ軸の慣性モーメントに対する慣動半径を示し、両者の比 ≈ 1 とした。 C_b は方形係数 ($= 0.57$)、 d は喫水 ($= 4.5\text{m}$)、 C_w は水線面係数 ($= 0.73$) であるので、 $T_p = 3.8\text{s}$ となる。このため、次式で示される有義出会い周期 $T_{E1/3}$ との関係を調べた。

$$T_{E1/3} = \frac{1}{2\pi\sigma_{E1/3}} \dots\dots\dots (9)$$

縦揺れの固有周期と有義出会い周期の差の絶対値を周期差 DTP 、縦揺れの実測値に対する計算値の有義振幅の比を縦揺れ振幅比 RPA としてそれぞれ定義する。

$$DTP = |T_p - T_{E1/3}| \dots\dots\dots (10)$$

$$RPA = \frac{(PA_{1/3})_{CAL}}{(PA_{1/3})_{OBS}} \dots\dots\dots (11)$$

図-8は観測データの中から数値解析を行った21ケースについて、手法ごとに横軸に周期差、縦軸に縦揺れ振幅比をプロットした結果を示す。

周期差が2s以上の領域にある場合、両手法による振幅差は小さく、縦揺れ振幅比も0.6~1の範囲にあった。一方、周期差が2s以下の共振周期帯にある場合、振幅比は手法Aでは100以上と完全な時系列の発散状態となった。

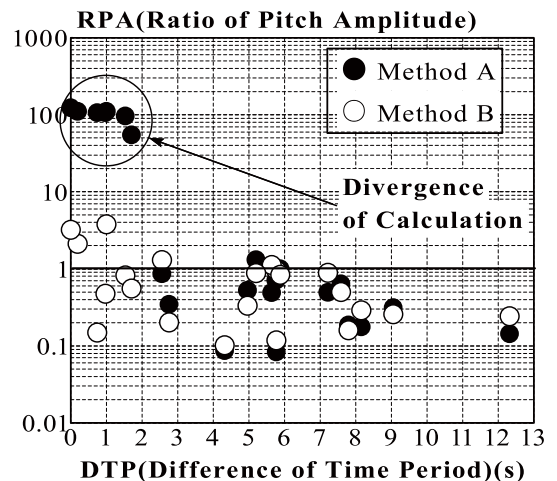


図-8 手法ごとにおける周期差と縦揺れ振幅比の関係

手法Bでは共振周波数帯においても振幅比は0.1~3にあり、全体的に手法Aより再現精度が安定している。しかし、縦揺れ振幅比が1付近にあるケースは少なく、十分な精度であるとは言いがたい。前進速度を有する船体運動を考える場合、波浪の周期だけでなく船体速度、波数、相対波向を含めた出会い周期で議論しなければならない。波浪データは船体位置に最も近い沿岸観測ポイントで代表させたが、実用上はこれらを使用しても大きな支障はないと考えられる。ただし、図-4に示す室津と室戸GPSでの水位振幅の比較結果など沿岸観測ポイントで波浪が地形等によって大きく遮蔽される影響を把握する必要がある。さらに図-5の複数のピークをもつスペクトル形状などの場合、波の複雑な方向分散性が出会い周期や波浪外力の計算精度に強く影響している。これらを正確に解析・推定できるための研究も進められており(寺田ら, 2002)、沖波の方向スペクトルを正確に推定できるシステムの応用により計算精度の向上が期待できる。

5. 結論および今後の課題

- a) 外洋フェリーでは台風時だけでなく低気圧接近時にも船体運動が卓越し、貨物損傷から見た欠航判断が要求される。
- b) 船体運動は船首方位を大きく変更する室戸岬沖で卓越し、特に縦揺れが最大 $\pm 5^\circ$ 程度発生する状況で航行している実態が明らかとなった。これからも経験と勘のみによる船体運動の予測の困難さが裏付けられる。
- c) 波浪データと船体運動との周波数特性にて、両者のピーク周波数は必ずしも一致していない。波浪も風波とうねりが共存する複数ピークを持つ形状も少なくなく、相対波向と船体速度、波周期から求められる出会い周期による船体運動への影響を考察する必要がある。
- d) 周期差が2s以上ある場合、両手法による再現精度に大きな差異は見られない。周期差が2s以内の共振周波数帯では手法Aでは計算値が発散するが、手法Bでは縦揺れ振幅比は1~3の範囲にとどまっている。
- e) 手法Aは運動方程式中における流体力を固有周期に近い一定値で代表させるため、外力に対する応答が実際よりも過大になるためであると考えられる。一方、手法Bでは流体力が周波数に依存しないため、応答が手法Aよりは小さくなっていると推察できる。
- f) 沿岸波浪データを用いた船体運動の再現を行ったが、室津観測点では沖合の振幅が大きく低減される場合もあり、沖合波との関係を事前に把握する必要がある。
- g) 風波とうねりが共存するような複数ピークを持つスペクトル形状に対応できる沖合波の方向分散性を詳細に表現した方向スペクトルとして与えられる計測システムのアルゴリズムを発展・応用させていく必要がある。
- h) 欠航判断において貨物への衝撃力および荷崩れの推定が最終的に求められ、今後の研究にて船体運動と同時に縦揺れや横揺れ発生時の衝撃力および荷崩れ危険度を精度よく推定できるシステムを構築する必要がある。
- i) 欠航判断システムとしては波浪情報からのリアルタイム予測と連動させる必要があるが、手法Bによる船体運動の計算時間は実用上問題なく、波浪予測の計算能力との関係が実用性を議論する上での技術課題となる。

謝辞

本研究の実施にあたり、高知特急フェリー(株)の方々には船体運動の現地観測および現地調査において多大なご協力を賜ったことに深く感謝の意を表する。現地観測の実施にあたり、広島商船高等専門学校・小林豪准教授ならびに韓国海洋大学・趙翼順氏の助力を得たことに謝意を表する。また全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)のデータベースを活用させて頂いたことを付記し、(独法)港湾空港技術研究所海洋水工部海象情報研究領域の関係者諸氏に感謝する。

参考文献

- 久保雅義・笹 健児・白石 悟・榊原繁樹(1997)：数値計算法が長周期波作用下における長周期船体動揺へ及ぼす影響について、海岸工学論文集，第44巻，pp.236-240。
- 小林 豪・久保雅義・趙 翼順・水井真治・笹 健児(2006)：岬沖海域における船舶運航の問題点に関する基礎的研究，日本航海学会論文集，第114号，pp.1-7。
- 斎藤公男・東 秀行(1992)：波浪中船体応答の時系列解析について－縦波中における上下揺，縦揺－，日本造船学会論文集，第172号，pp.9-16。
- 笹 健児・久保雅義(2001)：船体運動測定装置を活用した全天候型海上輸送システム構築へ向けての基礎的研究，海洋開発論文集，Vol.17，pp.235-240。
- 笹 健児・久保雅義・白石 悟・永井紀彦・趙 翼順・水井真治・小林 豪(2003)：外洋性港湾における入出港時の着離岸作業障害に関する研究，海岸工学論文集，第50巻，pp.1311-1315。
- 笹 健児・永井紀彦・白石 悟・米山治男・水井真治(2005)：荒天時の観測波を用いた船体運動による港外避泊船の安全性評価，海岸工学論文集，第52巻，pp.1246-1250。
- 白石 悟・久保雅義・上田 茂・榊原繁樹(1995)：係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策，海岸工学論文集，第42巻，pp.941-945。
- 田村福造・高木又男(1969)：規則波中の応答理論および計算法，耐航性に関するシンポジウムテキスト第I章，pp.1-52。
- 寺田大介・井関俊夫(2002)：方向波スペクトルのオンライン推定法に関する研究，日本造船学会論文集，第192号，163-169。
- 永井紀彦(1997)：ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)による我国沿岸の波浪特性の解明，港湾技研資料，No.863，113p。
- 日本造船学会海洋工学委員会性能部会(2003)：実践浮体の流体力学(前編)－動揺問題の数値計算法－，成山堂書店，291p。
- 元良誠三(1982)：船体と海洋構造物の運動学，成山堂書店，362p。