

4 1 高速フェリーの実海域性能評価法の検討

海上安全研究領域 ＊小川 剛孝、辻本 勝、沢田 博史、石田 茂資
輸送高度化研究領域 塚田 吉昭

1. はじめに

船舶の性能を適切に評価するためには、平水中の推進性能はもとより、波や風による外乱下での性能を適切に評価する必要がある。近年、推進性能の向上や安全基準の見直しに関連して波浪や風浪中での性能をこれまで以上に検討する必要性が高まっている¹⁾。これにより、船舶の性能向上により役立つような研究成果の創出を指向している。これらの性能評価は、従来までの評価法に対して実海域性能評価といわれている¹⁾。

その一つである船舶の耐航性能は、船体運動、波浪荷重、波浪中抵抗増加などを指標として評価される。船舶はその航海において少なからず荒天中を航行するため、荒天中の大振幅動揺やスラミングと海水打ち込みによる衝撃荷重等の検討が重要となる。これらを適切に評価するためには、平水中での推進性能の検討ではほとんど斟酌されない水面上形状を考慮する必要がある。長期海象における波浪中推進性能を評価する際にも同様のことがいえる。

荒天中では波高の増加にともない船体運動が大きくなるため、大振幅動揺による非線形性が強くなる。非線形性が強い現象を厳密に解くためには、CFD 等の数値計算手法による高精度推定法の開発が望ましい。しかしながら、現状では実用に供されるまでに至っていない。そこで本研究では、静止時の水面上形状を考慮した実用的推定法の開発を行った。

本研究は、平成 12 年度から 5 ヶ年計画で実施した「SBD の概念による実海域性能を考慮した高速船の船型設計法の研究」の研究項目の一つとして実施した。ここで取り上げた高速フェリーの改良船型について、耐航性能評価のための模型実験を実施した。ここでは、模型実験結果との比較を通

じて実施した計算法の検証結果を報告する。

2. 大波高中運動性能推定法

はじめに、当所で開発した大波高中での運動性能推定法 NMRIW (Nonlinear Motion in Regular and Irregular Waves)²⁾ について概説する。

本推定法は、非線形ストリップ法の考えにもとづくもので、時々刻々の水面下形状とラディエーション及びディフラクション流体力を考慮した時系列計算法である。

波浪中での操縦運動や斜波中の耐航性能を評価するためには、波による流体力だけでなく、操縦流体力も考慮する必要がある。異なる座標系で扱われてきたこれらの流体力を同時に扱うために、Horizontal Body座標系³⁾を用いて流体力を表した。これにより、大振幅の回転運動を近似的に取り扱うことなく船体重心周りの 6 自由度の運動方程式を解くことができる。座標系を図-1 に示す。

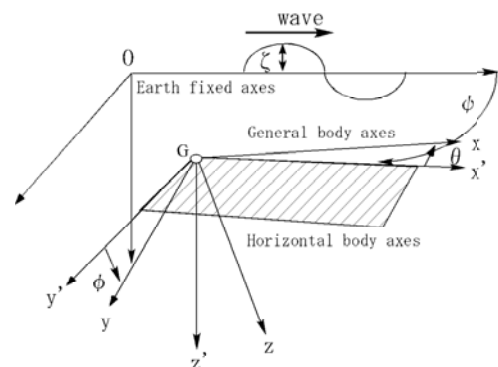


図-1 NMRIW の座標系

この運動方程式では、プロペラスラストと船体抵抗及び舵による流体力も考慮している。また、舵を PID 制御することで船の針路を制御している。

非線形ストリップ法にもとづく計算法はこれまでにもいくつか開発されている^{たとえば 4)}が、先に述

べたように流体力の取り扱いが異なる。本推定法では、流体力の取り扱いを変えることで、これまでほとんどの手法で困難であった斜波中での応答も計算可能である。

3. 模型実験

改良高速フェリー模型 ($L_{pp}=187\text{m}$, $C_B=0.483$) を用いた波浪中試験を当所 400m 水槽 (長さ×幅×深さ: $400 \times 18 \times 8\text{m}$) で行った。模型船の主要目を表-1 に示す。

模型船をガイド装置に取り付けて正面向波中 ($\chi=180^\circ$) を曳航し、波浪中抵抗増加、船体運動及び上下加速度を計測した。船速は、航海速力 31.9kt (フルード数 $Fn=0.383$) に設定した。上下揺、縦揺、前後揺の船体運動は、ポテンショメーターにより計測した。左右揺と船首揺は拘束している。また、加速度計を用いて S. S. 8 での上下加速度を計測した。

波高が抵抗増加や船体運動に及ぼす影響を調べるため、波高 H_w は 2.3m ($H_w/L_{pp}=1/80$)、3.1m ($H_w/L_{pp}=1/64$)、5.1m ($H_w/L_{pp}=1/37$) の 3 種類を設定した。

表-1 高速フェリー (改良船型) 主要目

$L_{pp}(\text{m})$	187.0
$B(\text{m})$	26.4
$d(\text{m})$	7.0
$D(\text{m})$	13.6
$\text{Disp.}(\text{m}^3)$	17712.0
Block coef. : C_B	0.483
Longitudinal gyration(x_y/L_{pp})	0.243

さらに、短期海象での運動性能について調べるために、当所 80m 角水槽 (長さ×幅×深さ: $80 \times 80 \times 4.5\text{m}$) において長波頂不規則波中実験も行った。ここでは、正面向波 ($\chi=180^\circ$) 及び斜向波 ($\chi=135^\circ$) における船体運動、上下加速度、相対水位変動を計測した。不規則波は実船スケールで平均波周期 $T_{02}=8$ 秒、有義波高 $H_{1/3}=2\text{m}$ 及び 4m に設定した。波スペクトルは ISSC スペクトルを用いた。実験で用いた出会い波の数は約 1000 波である。

ここでは、波高 1m の規則波中 (正面向波及び斜波) での船体運動、上下加速度、相対水位変動の

計測も別途行った。

4. 実験結果と計算との比較

4. 1. 船体運動

正面向波中で計測した上下揺と縦揺の応答関数を波高毎に整理して図-2 及び図-3 に示す。縦軸は、フーリエ解析により求めた 1 次成分であり、上下揺振幅 Z は波振幅 ζ で、縦揺振幅 θ は最大波傾斜 $k\zeta$ でそれぞれ無次元化している。ここで k は波数を表す。横軸は波長船長比 λ/L である。図中には本推定法による計算結果を実線及び点線で示す。また、斜向波中 ($\chi=135^\circ$) での上下揺と縦揺の応答関数を図-4 に示す。

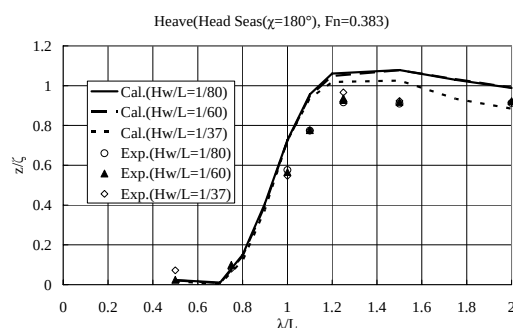


図-2 上下揺の応答関数
(正面向波 ($\chi=180^\circ$), $Fn=0.383$)

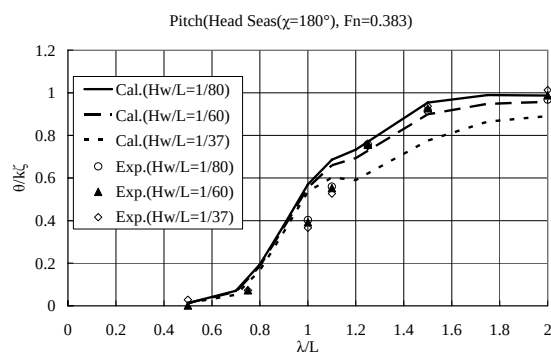


図-3 縦揺の応答関数
(正面向波 ($\chi=180^\circ$), $Fn=0.383$)

本推定法による計算結果は、斜向波の長波長域で実験値との差が大きくなるものの、概ね精度よく推定できていることがわかる。

これまでの研究結果から、ある程度波高が大きくなりスラミングや海水打ち込みが頻繁に発生するようになると、船体運動の非線形が強くなることが知られている²⁾。本実験の波高は最大で約

5mと極端に大きくはないが、波高が大きくなるにつれて振幅の無次元値が小さくなっており、波高による非線形影響が現れていることがわかる。

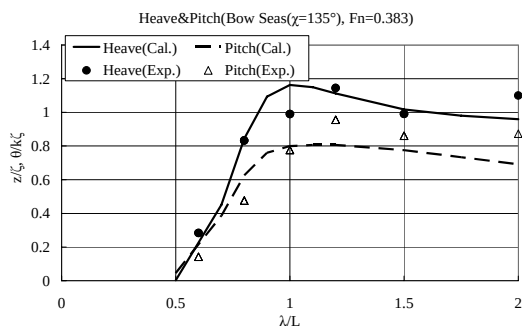


図-4 上下揺及び縦揺の応答関数
(斜向波($\chi=135^\circ$), $Fn=0.383$ 、波高 1m)

4. 2. 上下加速度及び相対水位変動

正面向波中で計測した上下加速度(S. S. 8)の応答関数を波高毎に整理して図-5 に示す。縦軸は、フーリエ解析により求めた 1 次成分であり、加速度振幅 a を船長 L と波振幅 ζ の比 L/ζ で無次元化したものである。また、正面向波及び斜向波における相対水位の応答関数を図-6 に示す。

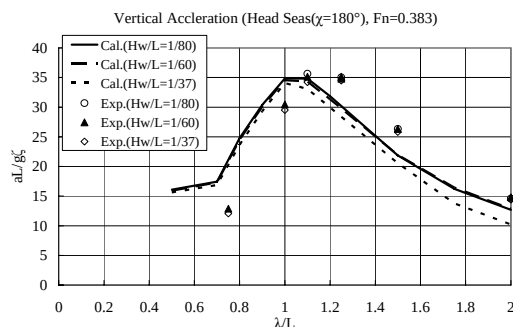


図-5 上下加速度の応答関数
(S. S. 8、正面向波($\chi=180^\circ$), $Fn=0.383$)

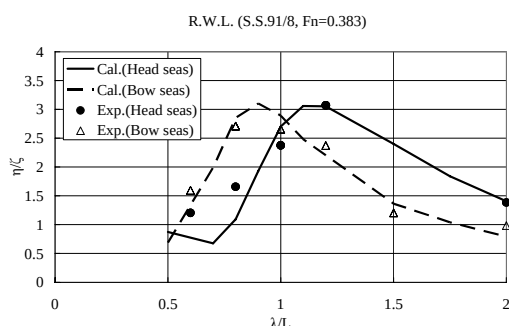


図-6 相対水位変動の応答関数 (S. S. 91/8、
正面向波及び斜向波、 $Fn=0.383$ 、波高 1m)
これらの結果から、船体運動の場合と同様に、

本推定法により上下加速度と相対水位が精度よく推定できていることがわかる。また、あまり顕著ではないが、上下加速度にも波高による非線形影響が現れていることがわかる。

4. 3. 波浪中抵抗増加

波浪中抵抗増加 R_{AW0} の推定には、丸尾の抵抗増加公式⁵⁾を用いた。公式の入力である船体運動は、NMRIWにより計算した。これにより大波高中での波浪中抵抗増加の推定が可能となる⁶⁾。

また、本推定法はストリップ法の考え方に基づいて船体運動を計算しているので、船首部の反射波による抵抗増加は考慮していない。そのため、反射波による成分 $\angle R_{AW}$ は、藤井・高橋⁷⁾の式を用いた。ここで示す波浪中抵抗増加の計算結果は、両成分の和($=R_{AW0} + \angle R_{AW}$)を表す。

正面向波中で波浪中抵抗増加の応答関数を波高毎に整理して図-7に示す。縦軸は、波浪中抵抗増加を $\rho g B^2 H_w^2 / L$ で無次元化した値である。 $H_w/L=1/60$ の計算値については、船体運動の結果と同様に $H_w/L=1/80$ の計算値と有意な差が無かったため省略する。この図から、波浪中抵抗増加に対する波高の非線形影響が船体運動に比べて大きくなっていることがわかる。また、本推定法による計算値は、短波長域で実験値との差が大きくなるものの、波高影響を考慮した精度良い推定が可能であることがわかる。

4. 4. 不規則波中での超過確率

結果の一例として、縦揺の超過確率について示す。正面向波($\chi=180^\circ$)及び斜向波($\chi=135^\circ$)中での縦揺の時系列から正負それぞれの極値のヒストグラムを求め、これから超過確率を計算した。極値の絶対値の超過確率を図-8及び図-9に示す。ここでは、船首上げを正とする。縦軸は超過確率を対数軸で表す。

有義波高 4m の縦揺は、同じ超過確率での有義波高 2m の縦揺の 2 倍よりも小さくなっており、縦揺は波高に比例しないことがわかる。このことから、規則波での実験結果と同様に波高の非線形影響があることが確認できた。

また、本推定法を用いて、不規則波の有義波高

(2m 及び 4m) と等しい波高で縦揺の周波数応答関数を計算した。これと波スペクトラム (ISSC スペクトラム) を掛け合わせる事で縦揺の分散値を計算した。このようにして求めた縦揺の分散値を用いたレーリー分布を同じく図中に示す。

波高が大きくなるにつれてスラミングや海水打ち込みが激しく発生するようになると、正負の非対称性が顕著になる。そのために実験値とは差が大きくなるものの、本推定法を用いた超過確率は実験値をよく説明している事がわかる。このように、波高の非線形性を考慮した周波数応答関数を用いる方法は、不規則波中での超過確率の推定に有用である事がわかる。

5. まとめ

大波高中での運動性能推定法を開発し、高速フェリーを用いた波浪中実験結果と比較することにより検証を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 船体運動に比べて波浪中抵抗増加に対する波高の非線形影響は相対的に大きくなる。
- (2) 本推定法のように、時々刻々の水面下形状を考慮することで、荒天下での船体運動や波浪中抵抗増加を精度よく推定することができる。
- (3) 本推定法を用いることで、船体応答の超過確率を適切に把握することができる。

参考文献

- 1) 日本造船学会試験水槽委員会: 日本造船学会試験水槽委員会シンポジウム「実海域における船舶性能に関するシンポジウム」、2003.
- 2) Ogawa, Y. et. al. : The effect of a bow flare shape on the water impact pressure, Proceedings of ISOPE2005, 2005.
- 3) Hamamoto, M. et. al. : A New coordinate system and the equations describing manoeuvring motion of ship in waves, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 173, 1993.
- 4) 藤野正隆他: 大波高波浪による船体の波浪荷重に関する研究(第1報)、日本造船学会論文集第156号、1984.
- 5) 丸尾孟他: 簡易化公式による向い波中抵抗増

加の計算、日本造船学会論文集第140号、1976.

- 6) 小川剛孝他: 荒天時の波浪中抵抗増加について、第3回海上技術安全研究所研究発表会講演集、2003.
- 7) 藤井斉他: 肥大船の波浪中抵抗増加に関する実験的研究、日本造船学会論文集第137号、1975.

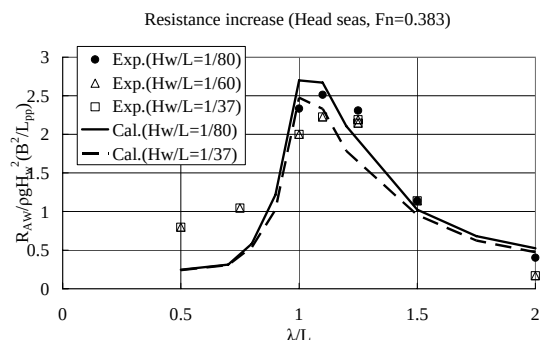


図-7 波浪中抵抗増加の応答関数
(正面向波、Fn=0.383)

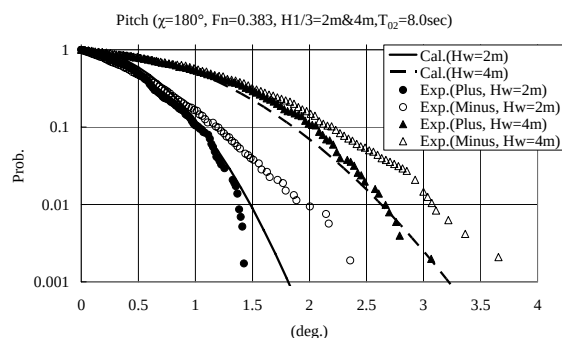


図-8 縦揺の超過確率 (正面向波、Fn=0.383、有義波高 2m 及び 4m、平均波周期 8 秒)

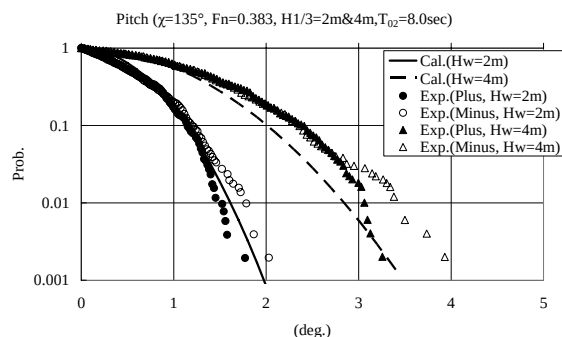


図-9 縦揺の超過確率 (斜向波、Fn=0.383、有義波高 2m 及び 4m、平均波周期 8 秒)