

# 大波高中での船体応答に及ぼす船体形状の非線形影響の検討

海上安全研究領域 \*小川 剛孝

## 1. はじめに

波浪中における船舶の耐航性能を評価する場合、船体運動、波浪荷重、波浪中抵抗増加などが指標となる。これらを推定するための実用的手法としては、線形ストリップ法が一般的に用いられている。これは、比較的波高が低く、船が細長であるとの仮定のもとに静止時の水面下形状について流体力係数を求めて船体運動を推定する手法である。これによる計算値は実験結果をよく説明しており、合理的な推定手法であることがよく知られている。

しかしながら、実際の船舶は少なからず荒天中を航行するため、荒天中での大振幅動揺とスラミングや海水打ち込みによる衝撃荷重の検討が重要となる。これらを適切に評価するためには、水面下だけでなく水面上形状も考慮する必要がある。

近年、波浪中性能と水面上形状との関連に関する研究<sup>たとえば1)</sup>もよく行われるようになってきた。さらに、安全基準を合理的に設定する観点からも、乾舷、舷弧等の水面上形状と船体運動の関係についての検討が求められている<sup>2)</sup>。

これらのことを背景として、水面上形状を考慮した設計援用シミュレーションツールの開発が求められている。将来的には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が、現状では実用に供されるまでに至っていない。そのため、高精度推定法の開発と平行して実用的推定法の開発を行い、設計や安全基準検討のための支援ツールとすることが求められている。

本研究では、実用的推定法を用いて大波高中で船体形状が船体応答に及ぼす非線形影響について検討した。船首形状の異なる2隻のコンテナ船について、船体運動とスラミングによるフレア衝撃圧を検討したので以下に報告する。

## 2. 推定手法

ここでは、浸水面形状の時間変化と各断面に働く動的な揚力の変動を考慮した非線形ストリップ法<sup>3)</sup>を用いて船体運動、上下加速度、相対水位を計算する。また、邱ら<sup>4)</sup>の方法を用いて、船体表面での圧力を計算した。計算法は以下に概説する。これにより大波高中での船体形状の非線形影響を考慮した船体運動や圧力の計算が可能となる。

任意の位置での水圧  $P$  を次式で考える<sup>4)</sup>。

$$P = P_d + P_r + P_{ma} + P_{mj} + P_{mj}^* + P_{imp} + P_{imp}^* + P_s \quad (1)$$

ここで、 $P_d$  は静水中での定常航走による流体力成分、 $P_r$  は造波減衰力による流体力成分、 $P_{ma}$  は付加質量による流体力成分、 $P_{mj}$  及び  $P_{mj}^*$  は付加質量の長手方向の変化による流体力のうち周期運動による成分と前進速度による成分、 $P_{imp}$  及び  $P_{imp}^*$  は付加質量の時間変化による流体力のうち周期運動による成分と前進速度による成分、 $P_s$  は静水圧を表わす。

船体表面でのポテンシャルが既知であれば、船体運動による速度ポテンシャル  $\phi (= \phi_A + i\phi_S; i$  は複素変数) と定常航走による速度ポテンシャル  $\phi_0 (= \phi_{A0} + i\phi_{S0})$  を用いて(1)式を次式で表わすことができる。

$$\begin{aligned} P = & VV_0 \cos \tau \frac{\partial \rho \phi_{S0}^*}{\partial x} + \omega \rho \phi_A (V_r - V_0) - \rho \phi_S \frac{\partial \phi_S}{\partial x} \\ & + V(V_r - V_0) \cos \tau \frac{\partial \rho \phi_S}{\partial x} + VV_0 \cos \tau \left( \frac{\partial \rho \phi_S^*}{\partial x} - \frac{\partial \rho \phi_{S0}^*}{\partial x} \right) \\ & - (V_r - V_0) \cos \tau \frac{\partial \rho \phi_S}{\partial x} + V_0 \cos \tau \frac{\partial \rho \phi_S^*}{\partial x} - \rho g \tilde{z}_d \cos \tau \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $V$  は船の前進速度、 $V_0$  は静水中での相対速度の鉛直方向成分、 $\tau$  はキールラインと静止水面のなす角 ( $\tau = \theta + \tau_i + \tau_s$ )、 $\theta$  は縦揺角、 $\tau_i$  は初期トリム、 $\tau_s$  は静水中航走時のトリム、

$\omega$  は出会い周波数、 $\rho$  は流体の密度、 $V_r$  は波浪中の相対速度の鉛直方向成分、 $x$  は船体重心を原点とする船長方向の位置、 $\phi^*_o (= \phi^*_{A0} + i \phi^*_{S0})$  は静止時の喫水で定常航走した際の速度ポテンシャル、 $g$  は重力加速度、 $\tilde{z}_d$  は計算する位置での水深を表わす。各位置でのポテンシャルは、積分方程式法により計算した。このとき、イレギュラー周波数は、大松の方法<sup>5)</sup>を用いて浮体の原点に吹出しと二重吹出しを分布して除去した。

本研究では、大波高中での船体応答と水線上形状の関係を検討するために、最近のコンテナ船であるポストパナマックスコンテナ船と S175 コンテナ船型の 2 隻について船体運動等を計算した。

図-1 に新旧コンテナ船の船首部フレア形状を示す。比較のために、縦軸は喫水線からの高さ、横軸はセンターラインからの距離をそれぞれ喫水で無次元化した値で表す。従来のコンテナ船に比べて、ポストパナマックスコンテナ船のフレアは大きく広がっており、フレア角も大きくなっていることがわかる。

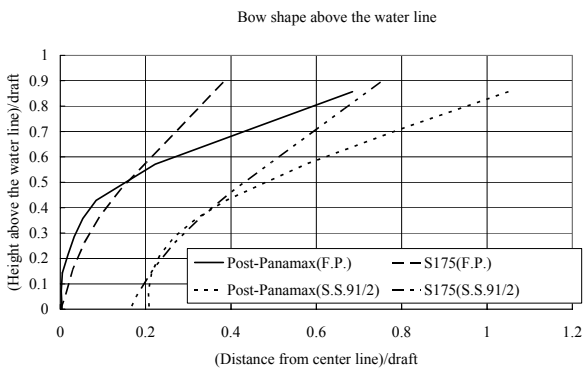


図-1 コンテナ船の船首部フレア形状

### 3. 計算結果

#### 3.1. 船体運動

はじめに船体運動と上下加速度の結果について示す。これまでに著者らは、ポストパナマックスコンテナ船について大波高中での模型実験を実施した<sup>6)</sup>。模型実験と本手法による計算結果の比較により、大波高中での船体形状の非線形影響を考慮することで船体運動、上下加速度及び相対水位変動の振幅及び位相の応答関数を精度よく計算できることを示している<sup>6)</sup>。結果の一例として、上下加速度振幅 (S. S. 9) の周波数応答関数を波高毎

に整理して図-2 に示す。縦軸は、加速度振幅  $a_a$  を波振幅  $\zeta$  と船の長さ  $L$  で無次元化した値を表す。横軸は波長船長比  $\lambda/L$  を表す。船体形状の非線形影響を考慮することで、大波高中での船体運動を精度よく推定できていることがわかる。

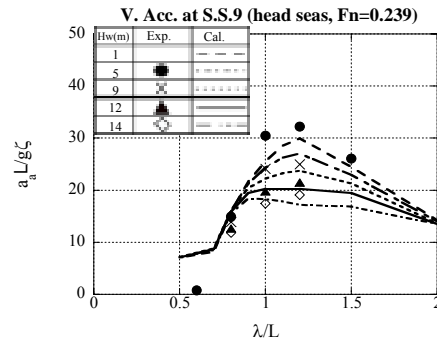


図-2 上下加速度振幅の周波数応答関数<sup>6)</sup>  
(S. S. 9、正面向波、Fn=0.239)

本研究では、S175 コンテナ船型について同様の検討を行った。波高毎の縦揺、上下揺及び上下加速度 (S. S. 8 1/2) 振幅について実験値と比較した。図-3 から図-5 にこれらの結果を示す。横軸は波傾斜  $k\zeta$  を表す。ここで  $k$  は波数を表す。計算結果との比較は、0' Dea らの実験結果<sup>7)</sup>を用いた。また、Lin らにより開発された手法<sup>8)</sup>による計算結果も示す (図中 LAMP)。この計算法は、空間固定座標系で表した時々刻々の位置でのインパルス応答関数を時間的に積分することにより船体形状の非線形影響を考慮した 3 次元計算法である。

船体形状の非線形影響によって、実験及び計算結果ともに応答振幅の無次元値は一定値とならずに、波高によって変化することがわかる。また、本手法による計算値は、 $\lambda/L=1.2$  で大波高中の上下揺を除いて波高の違いによる非線形影響をよく説明していることがわかる。また、縦揺の結果に見られるように必ずしも 3 次元計算法が実験結果をうまく説明しているわけではなかった。

コンテナ船の様に、やせ型で喫水により形状が大きく変化する船舶の縦運動に対する船体形状の非線形影響は大きい事がよく知られている。本手法を用いることで、このような非線形影響を考慮した精度よい推定が可能であることがわかる。

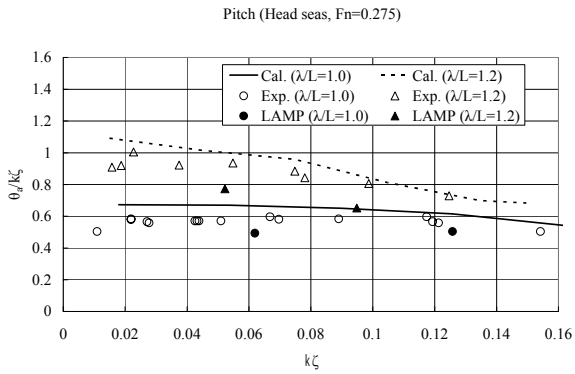


図-3 縦揺振幅に対する波高の非線形影響  
(正面向波、 $F_n=0.275$ )

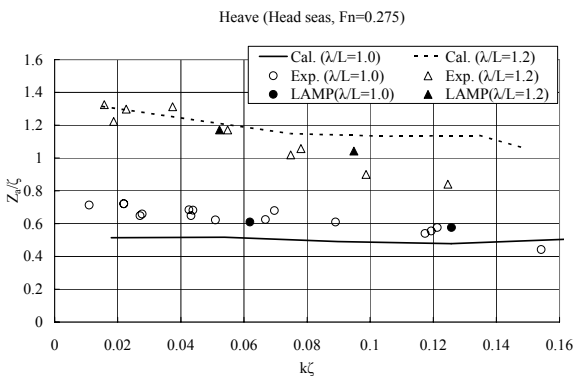


図-4 上下揺振幅に対する波高の非線形影響  
(正面向波、 $F_n=0.275$ )

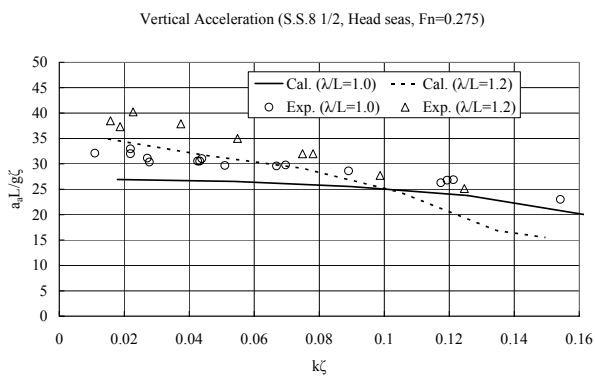


図-5 上下加速度振幅に対する波高の非線形影響  
(S.S.8 1/2、正面向波、 $F_n=0.275$ )

### 3. 2. スラミングによるフレア衝撃圧

著者らは、スラミングによるフレア衝撃圧についても同様に検討している<sup>6)</sup>。この結果、大波高中での船体形状の非線形影響を考慮することでフレア衝撃圧を精度よく計算できることを示してい

る<sup>6)</sup>。結果の一例として、フレア衝撃圧(S.S.9 1/2)の時系列を図-6に示す。計算に比べると計測波形は腰掛部が大きくなっているものの、極大値はよく一致している。また、図-7に波高毎のフレア衝撃圧の極大値を示す。計算結果は、波高の影響をうまく説明できていることがわかる。このように、本手法は排水量型中高速船のフレア衝撃圧の推定に有用であることがわかる。

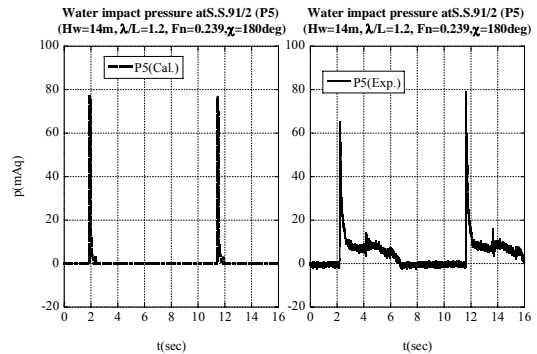


図-6 ポストパナマックスコンテナ船のフレア衝撃圧<sup>6)</sup> (左: 計算値、右: 実験値) (S.S. 9 1/2、正面向波、 $F_n=0.239$ 、 $\lambda/L=1.2$ 、波高 14m)

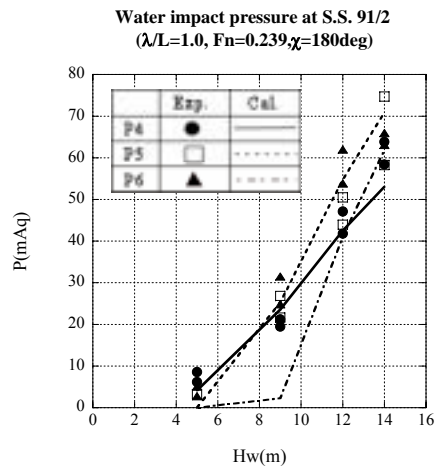


図-7 波高とフレア衝撃圧の関係<sup>6)</sup> (S.S. 9 1/2、正面向波、 $F_n=0.239$ 、 $\lambda/L=1.0$ )

図-8 及び図-9 にフレア上での衝撃圧の極大値の分布を示す。比較のために、縦軸は喫水線からの高さを喫水で無次元化した値で表す。ここでの船速、波高及び波周期では、S175 コンテナ船型の船体運動がポストパナマックスコンテナ船に比べて大きくなったため、衝撃圧も大きくなっている。フレア衝撃圧の極大値は、フレア形状の違いだ

けでなく、上下位置の違いによる着水時の相対速度や相対角の影響も受けた分布になっていることがわかる。また、船長方向位置の違いによっても分布が異なることがわかる。西部造船会技術研究会の検討結果<sup>9)</sup>でも同様の知見が得られており、本手法に用いる事でこれを確認することができた。

できる。

今後は、更に精度の検証を行うと共に、水面上形状の違いが波浪荷重や波浪中抵抗増加に及ぼす影響について検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) K. Matsumoto et. al. : Development Energy Saving Bow Shape at Sea, Proceedings of 4th Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of ship, 2000.
- 2) 小川剛孝:海水打ち込み、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」第3-1章、2003.
- 3) M. Fujino and F. Chiu: Vertical motions of high-speed boats in head sea and wave loads, Journal of society of Naval Architects of Japan Vol.154, 1983.
- 4) 邱 逢琛 他: 向波中を航走する高速艇の船底水圧について、日本造船学会論文集第171号、1992.
- 5) S. Ohmatsu : On the irregular frequencies in the theory of oscillating bodies in a free surface , Papers of Ship Research Institute Vol.48, 1975.
- 6) Y. Ogawa et. al. : Estimation method for probability density function of the water impact pressure of Post-Panamax container ship due to bow flare slamming, Proceedings of FAST2003, 2003.
- 7) J. O' Dea et.al. : Experimental Determination of Non-linearities in Vertical Plane Ship motions, Proceedings of 19th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1992.
- 8) W.-M. Lin et.al. : Large-amplitude ship motions and wave loads for ship design, Proceedings of 20th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1994.
- 9) 西部造船会技術研究会: 船体の損傷に関する調査研究(2)一波浪による船首外板の損傷とその対策一、西部造船会技術研究会研究報告第18号、1987.

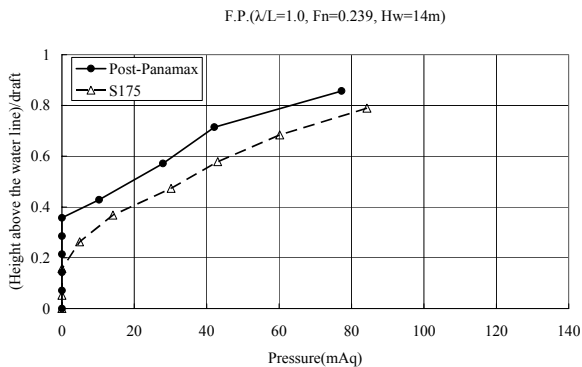


図-8 フレア衝撃圧の極大値の分布 (F.P.、正面向波、Fn=0.239、λ/L=1.0、波高14m)

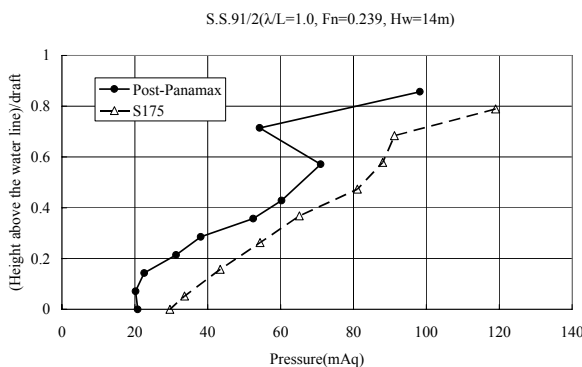


図-9 フレア衝撃圧の極大値の分布 (S.S. 9 1/2、正面向波、Fn=0.239、λ/L=1.0、波高14m)

#### 4. まとめ

新旧のコンテナ船型を用いて、大波高中での船体応答に及ぼす船体形状の非線形影響の検討を行った。その結果、

(1) 船体形状の非線形影響を考慮することで大波高中での船体運動や上下加速度を精度よく計算できることがわかった。

(2) 排水量型の中高速船については、本手法のように流体の運動量変化を考慮することでフレア衝撃圧の極大値を精度よく推定できることがわかった。また、フレア上での分布についても知ることが