

波浪中における船の操縦運動シミュレーション

(第2報: zig-zag 運動とプロペラ逆転停止運動)

正員 安川 宏 紀*

Simulations of Ship Maneuvering in Waves (2nd report: zig-zag and stopping maneuvers)

by Hironori Yasukawa, *Member*

Summary

Simulations of zig-zag maneuver and crash astern in regular waves were carried out. The simulation model used for the stopping maneuver takes only wave drift forces into account to usual maneuvering model in still water. On the other hands, the model for the zig-zag maneuver includes wave-induced motion effects in addition to the wave drift forces. In this paper the validity of the methods are confirmed through comparison with free-running model test results in head and beam waves with various wave lengths for SR108 container ship model. It was found that the simulation methods can roughly predict the zig-zag and stopping maneuvers in regular waves, although there is some room for improvement. It may be needed to make more rational hydrodynamic model or improve the calculation accuracy of wave drift forces.

1. 緒 言

著者は、前報(第1報)において、波浪中における旋回運動のシミュレーション計算結果を水槽試験結果と比較し、計算法の検証を行った¹⁾。本論文では、前報の続きとして、規則波中における zig-zag 運動とプロペラ逆転停止運動に関する検討結果について報告する。

最初に、波浪中における zig-zag 運動とプロペラ逆転停止運動に関する過去の研究例をレビューする。波浪中における zig-zag 運動の本格的なシミュレーション計算を最初に行ったのは、浜本等²⁾であったと考えられる。浜本等は、Horizontal Body Axes System のもとで運動方程式を再構築し、波浪中における操縦運動を含む6自由度の運動シミュレーション計算法を提示した。その上で、波浪による強制力としてフルード・クリロフ力を用い、規則波中における zig-zag 運動時のシミュレーション計算を実施した²⁾。しかしながら、計算に波漂流力が考慮されていないこと、また水槽試験結果との比較による検証が行われていない等の課題を残した。その後、平山等³⁾は、不規則波中における肥大船の zig-zag 性能について検討を加え、波漂流力を考慮した操縦運動シミュレーション計算法は水槽試験結果とおおよそ一致することを示した。ただ、正面向波のみにおける検討であった

ため、「種々の条件下での検討の積み重ねが必要」³⁾としている。一方、波浪中におけるプロペラ逆転停止性能に関して、安川等⁴⁾によるタンカー船型を対象としたシミュレーション計算例があるが、水槽試験による検証は行われていない。

波浪中における zig-zag 運動とプロペラ逆転停止運動の水槽試験による検討例として、Ueno 等の報告があり⁵⁾、貴重な知見を得ている。ただ、波浪中における水槽試験は、波に関するパラメータが多く、それらの影響を網羅するのは容易ではない。種々の船型について、実験データの蓄積が望まれるところである。波浪中における操縦運動、特に zig-zag 運動とプロペラ逆転停止運動に関する研究は、未だ発展の途上にあると言えよう。

本論文では、規則波中における zig-zag 運動やプロペラ逆転停止運動のシミュレーション計算に焦点を当てる。具体的には、著者が先に報告した計算法¹⁾⁶⁾を用いて、規則波中における zig-zag 運動やプロペラ逆転停止運動のシミュレーション計算を行い、種々の波長や波方向における水槽試験結果との比較により、計算法の検証を行う。計算法の検証データを得るべく、SR108 コンテナ船を対象に、規則波中における zig-zag 運動、プロペラ逆転停止運動に関する自由航走模型試験を行っている。検討の結果、著者が先に報告したシミュレーション計算法は、規則波中における船の zig-zag 運動やプロペラ逆転停止運動をおおよそ予測できるものの、更なる精度向上が必要であることが分かった。

* 広島大学大学院工学研究科

原稿受理 平成 20 年 3 月 10 日

2. 対象船と水槽試験の概要

2.1 対象とする船

SR108 コンテナ船の模型船を対象に水槽試験を行った。Fig.1 に SR108 船型の正面線図を示す。Table 1 に実船と模型船の主要目を示す。実船と模型船の縮尺比は 1/50 である。表中、 L_{pp} は垂線間長、 L_{wl} は水線長、 B は幅、 d は喫水、 x_G は浮心位置を表す。 C_b は方形係数、 Δ は排水量、 S は船の浸水面積である。

水槽試験では 5 翼の模型プロペラを用いた。表中、 D_P はプロペラ直径、 p はプロペラピッチ比である。本船の舵は、マリナー型のものが装着されている。 H_R は舵スパン長 (舵高さ)、 B_R は舵コード長であり、 A_R は舵の全面積である。それらは、ホーン部も舵として含めた値である。

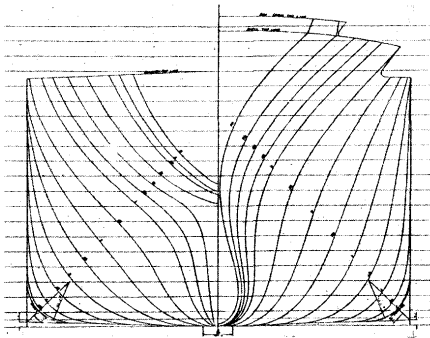


Fig. 1 Body plan of SR108 container ship

Table 1 Principal dimensions of SR108

symbol	ship	model
L_{pp}	175.00m	3.500m
L_{wl}	178.21m	3.564m
B	25.40m	0.508m
d	9.50m	0.190m
x_G	-2.545m	-0.051m
C_b	0.572	0.572
Δ	24,801ton	193.57kgf
S	5,499m ²	2.200m ²
D_P	6.507m	0.1301m
p	0.7348	0.7348
H_R	7.70m	0.154m
B_R	4.215m	0.0843m
A_R	32.46m ²	0.0130m ²

2.2 自由航走模型試験の概要

水槽試験は、三菱重工業長崎研究所耐航性能水槽で実施された。

波浪中旋回運動におけるアプローチ船速は、プロペラ回転数 10.05rps で直進航走できる船速とした。これは、平水中を船長ベースのフルード数 $F_n = 0.15$ 相当で航走できる船速 0.879m/s を達成できるプロペラ回転数である。すなわち、プロペラ回転数一定の条件下で試験を行ったことを意味する。操舵速度は 12.0deg/s とした。

波条件は波方向 0deg と 90deg の 2 ケースに対し、波長船長比 λ/L を 0.5, 0.7, 1.0, 1.2 の 4 ケースとした。波高は $H_w/L = 0.02$ を目標とした。なお、波方向 0deg はアプローチ航走時に正面向波、波方向 90deg はアプローチ航走時に右舷横

波を意味する。zig-zag 運動試験においては、操舵は波の谷が船体中央 (ミッドシップ) を通過した瞬間に操舵を開始するものとした。プロペラ逆転停止運動においては、操舵は波の谷が船体中央を通過した瞬間にプロペラを逆転させた。そのとき、プロペラ回転数は正転時の 75% ($n_P = -7.54\text{rps}$) とした。プロペラ逆転への変化は、瞬時に行うものとした。

模型船は、所定の船速で自走させるために必要なモータ及びプロペラや、計測に必要な操舵器、自航動力計、傾斜計、ディレクショナル・ジャイロ、追跡用ターゲットを装備する。試験は、光学式位置計測装置 (XY トラッカー) の位置信号 (曳引車と船体の位置偏差) を曳引車速度制御装置へフィードバックすることで船体を自動追跡し、船位、船体運動加速度、操舵状況等を計測する¹⁾。zig-zag 試験においては、ジャイロからの方位のフィードバック信号をもとに自動操舵するため、方位に関する十分な計測精度が必要となるが、ドリフト等の発生は見られず十分な計測精度を有することを確認している。

3. シミュレーション計算法の概要

3.1 zig-zag 運動の計算モデル

zig-zag 運動においては、操舵のタイミングが所定の方位角に達した時点で行われるので、シミュレーション計算における方位角に波浪動揺の影響を含ませる必要がある。そのためには、波漂流力を定常流体力として考慮するだけでは不十分であり、波浪動揺の影響を考慮する必要がある。ここでは、著者が提案している波浪動揺の影響を考慮したシミュレーション計算法⁶⁾を用いて、規則波中における zig-zag 運動のシミュレーションを行う。

シミュレーション計算に必要な操縦流体力特性は、孫、野本による試験結果⁷⁾から推定した値を用いた。また、波漂流力係数として、理論計算値を用いた。詳細は、第 1 報¹⁾に記載した。

3.2 プロペラ逆転停止運動の計算モデル

波浪中におけるプロペラ逆転停止運動のシミュレーション計算法としては、前報で述べた平水中における操縦運動計算法に波漂流力だけを考慮する簡易な方法¹⁾を用いる。さらに、プロペラ逆転停止運動のシミュレーション計算は、旋回運動や zig-zag 運動のような通常の運動とは異なり、プロペラ回転が逆転の上、船体斜航角が非常に大きい状態を取り扱う必要が生じる。以下に、プロペラ逆転停止運動シミュレーションにおける特別な取り扱いについて言及する。

プロペラ逆転時における推力特性を推定する必要があるが、これについては、文献⁴⁾を参考に、前進時のプロペラ正転時におけるプロペラ推力の単独特性から、いわゆる 4 象限におけるプロペラ推力特性を推定した。Fig.2 に推定したプロペラ推力特性を示す。図中、 J が前進定数、 K_T が推力特性である。

プロペラ逆転時には、プロペラ後流が船体側に流入して、船体に横力ならびに回頭モーメントが誘起される。この流体力成分は、プロペラ逆転発令後、停止にいたるまでに発生する船の横変位と深く関わっている。この横力と回頭モーメント成分 (Y_P, N_P) を藤野等⁸⁾にならい次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} Y_P &= \rho n_P^2 D_P^4 Y'_P(J_a) \\ N_P &= \rho n_P^2 D_P^4 N'_P(J_a) L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 ρ は水の密度、 n_P はプロペラ回転数、 D_P はプロペラ直径である。 Y'_P, N'_P はプロペラ逆転時における船体に作用する

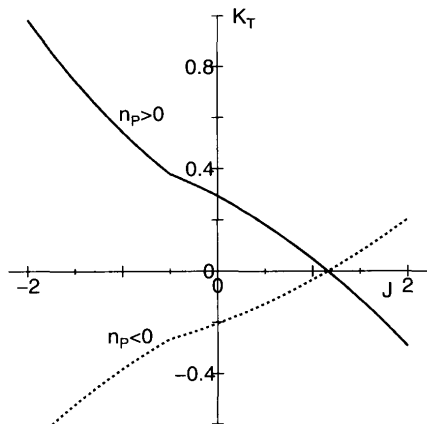


Fig. 2 Thrust open characteristics of a propeller

付加流体力係数であり、プロペラのピッチ P をベースとした見かけの前進係数 $J_a = U_0 / (n_P P)$ の関数として表す。なお、 U_0 は船速の長さ方向成分である。本シミュレーション計算における Y'_P, N'_P の特性として、藤野等が行った Tencho-Marun を対象とした水槽試験結果⁸⁾を用いた。

旋回運動や zig-zag 運動のような通常の操縦運動を取り扱うときには、船体の流体力モデルとして、流体力微係数表示が使用される。この微係数表示は、高々 $\pm 30\text{deg}$ までの斜航角を想定しているため、真横方向へ動く可能性もあるプロペラ逆転時には不十分であり、別の取り扱いが必要となる。本計算法では、船体斜航角が大きくなった場合には、別のモデルに連結する方法⁹⁾を採用する。具体的には、文献⁴⁾で述べた大斜航角時のモデルに連結する。そのとき、大斜航時の流体力特性が必要となる。大斜航時の流体力特性を把握すべく、広島大学船型試験水槽で拘束模型試験を実施した。Fig.3に水槽試験結果を示す。図中、 X'_H, Y'_H, N'_H はそれぞれ斜航による前進力増加、横力、回頭モーメント係数であり、船長、喫水、船速ベースに無次元化されている。 β が斜航角である。微係数表示モデルから大斜航角モデルに連結する斜航角の設定値は 30deg とした。

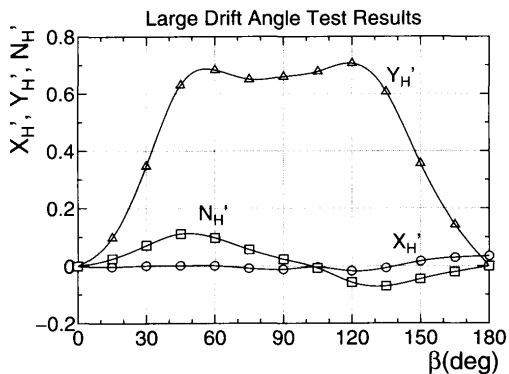


Fig. 3 Large drift angle test results

4. 規則波中における zig-zag 運動

4.1 平水中における比較

初期舵角 10deg 、初期切り返し方位角 10deg の zig-zag 運動を、 $10/10$ zig-zag 運動と書くこととし、平水中における $10/10$

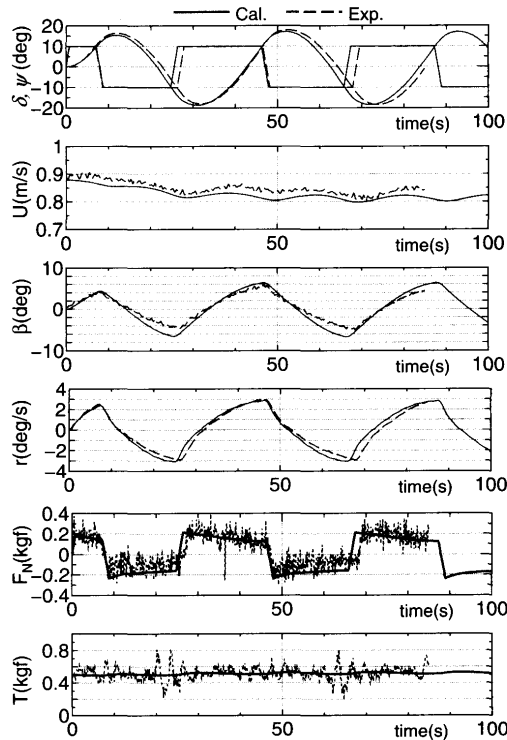


Fig. 4 Comparison of time histories for 10/10 zig-zag maneuver in still water

zig-zag 運動について比較を行った。Fig.4に、方位角 (ψ)、舵角 (δ)、船速 (U)、船体斜航角 (β)、回頭角速度 (r)、舵直圧力 (F_N)、プロペラ推力 (T) の時刻歴結果の比較を示す。計算結果は、いずれの項目についても、水槽試験結果と良好一致を示していることが分かる。ここでは図示していないが、 $-10/-10, 20/20, -20/-20$ zig-zag 運動についても、精度良く計算できていることを確認した。なお、 $10/10$ zig-zag 運動と $-10/-10$ zig-zag 運動は、おおよそ左右対称と言えるが、厳密には、プロペラの回転流の影響により、左右対称とはならない。シミュレーション計算においては、この影響は、左右運動に対する整流係数の違いによって表されている¹⁾ことを付記しておく。

4.2 規則波中における比較

次に、規則波中における $10/10, -10/-10, 20/20, -20/-20$ zig-zag 運動について比較を行った。波方向は 0deg と 90deg とし、それぞれ波長船長比を種々変化させた。Fig.5に、 $\chi = 0\text{deg}$ における $10/10$ ならびに $-10/-10$ zig-zag 運動時の方位角 (ψ) と舵角 (δ) の時刻歴結果の比較を示す。Fig.6は、同じく、 $\chi = 90\text{deg}$ における比較である。 $\chi = 90\text{deg}$ の $\lambda/L = 0.5$ の計算結果は、水槽試験結果とおおよそ一致しているが、それ以外の計算結果は、水槽試験結果と比べて応答が早く、水槽試験結果と良好一致を示していない。特に、 $\chi = 0\text{deg}$ の $\lambda/L = 1.0$ のような上下揺や縦揺の大きなところで、計算結果の応答がもっとも早いようである。

Fig.7に、 $\chi = 0\text{deg}$ における $20/20$ ならびに $-20/-20$ zig-zag 運動時の方位角と舵角の時刻歴結果の比較を示す。Fig.8は、同じく、 $\chi = 90\text{deg}$ における比較である。その特徴は、 $10/10$ ならびに $-10/-10$ zig-zag 運動時の結果とほぼ同じであるが、計算と実験との一致度はわずかに改善されているように見える。

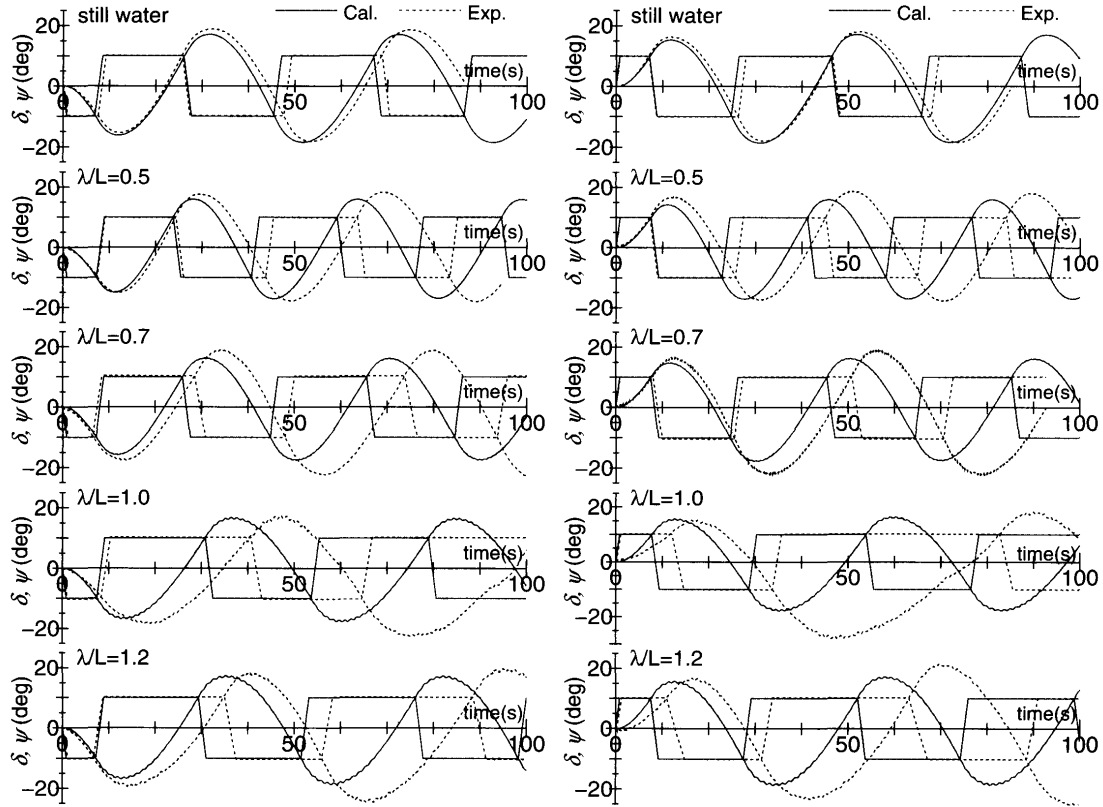


Fig. 5 Comparison of time histories of heading angle and rudder angle for -10/-10 and 10/10 zig-zag maneuvers in head waves ($\chi = 0\text{deg}$)

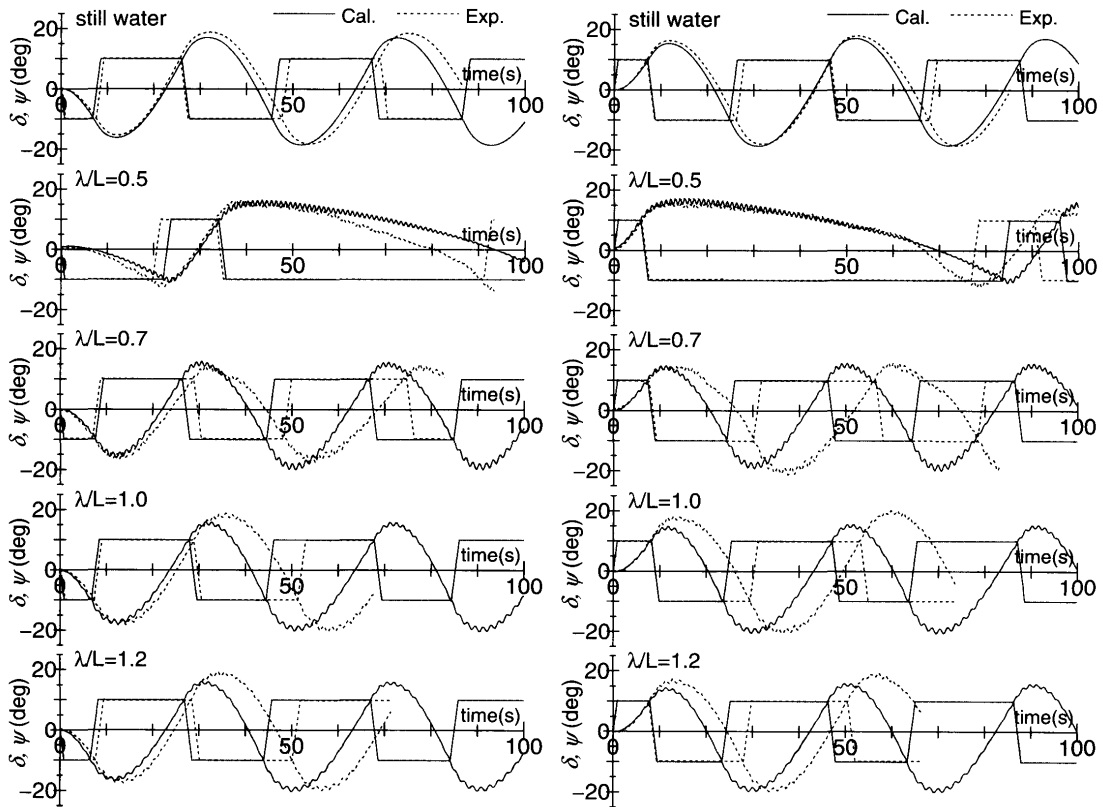


Fig. 6 Comparison of time histories of heading angle and rudder angle for -10/-10 and 10/10 zig-zag maneuvers in beam waves ($\chi = 90\text{deg}$)

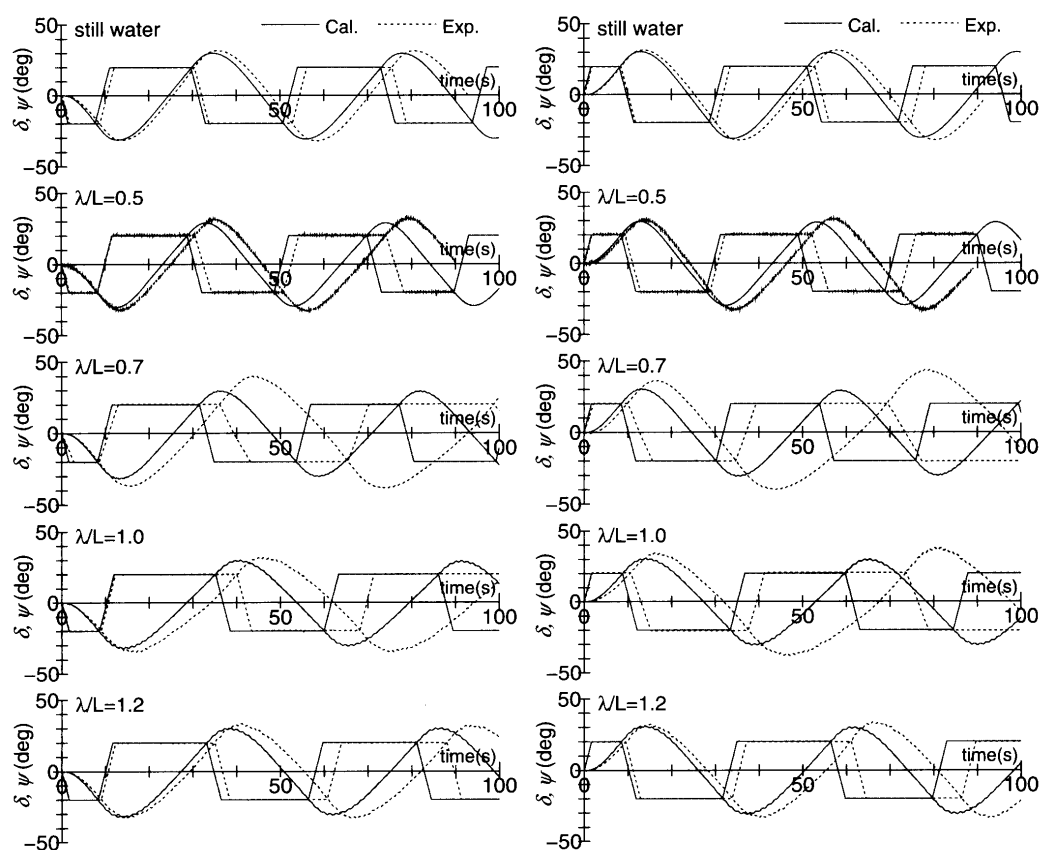


Fig. 7 Comparison of time histories of heading angle and rudder angle for -20/-20 and 20/20 zig-zag maneuvers in head waves ($\chi = 0^\circ$)

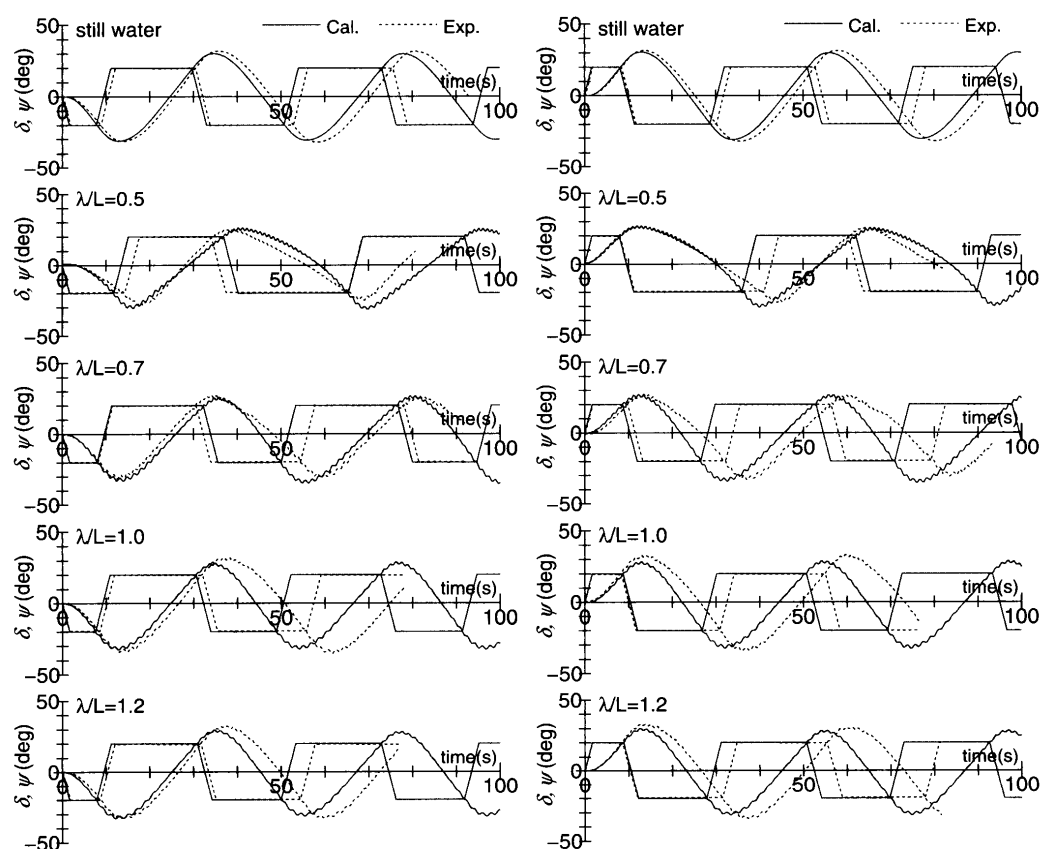


Fig. 8 Comparison of time histories of heading angle and rudder angle for -20/-20 and 20/20 zig-zag maneuvers in beam waves ($\chi = 90^\circ$)

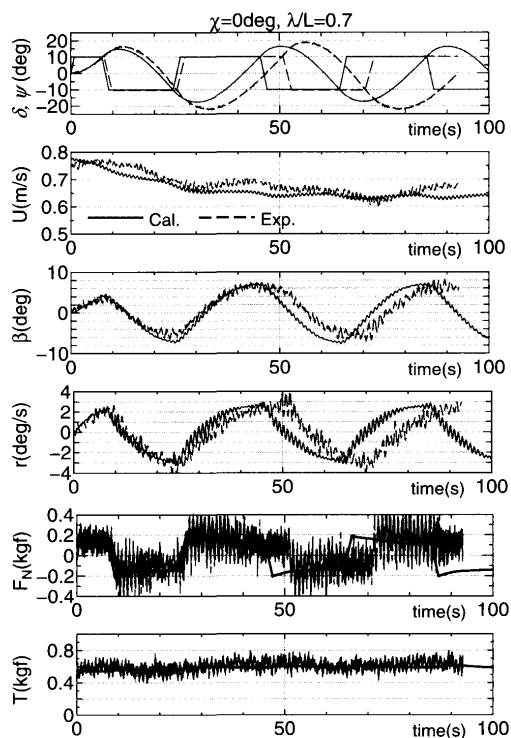


Fig. 9 Comparison of time histories for 10/10 zig-zag maneuver in head waves ($\chi = 0\text{deg}$, $\lambda/L = 0.7$)

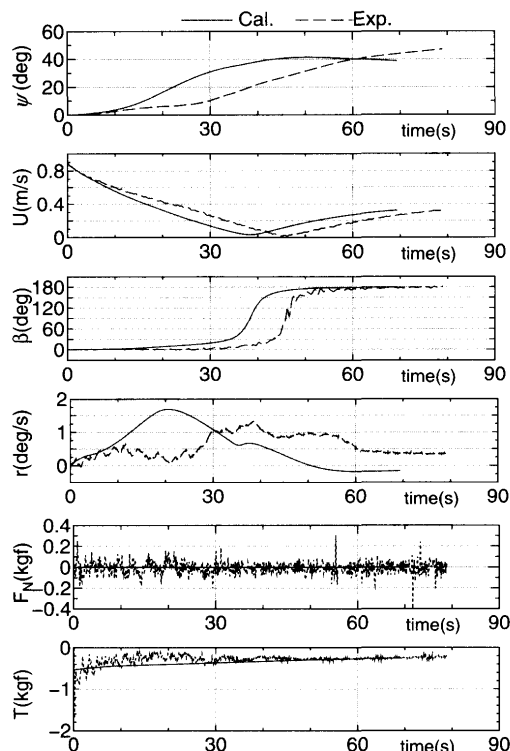


Fig. 11 Comparison of time histories for stopping maneuver in still water

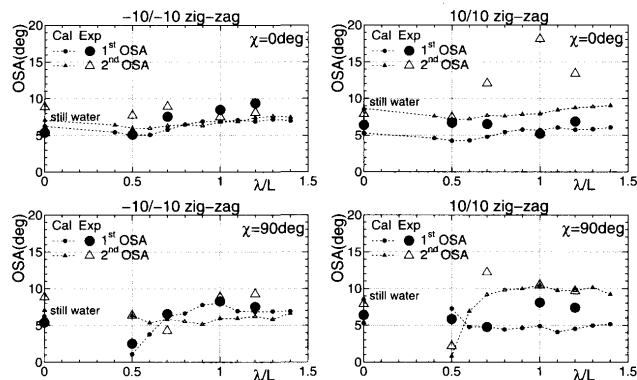


Fig. 10 Comparison of 1st and 2nd overshoot angles of -10/-10 and 10/10 zig-zag maneuvers in waves (upper: $\chi = 0\text{deg}$, lower: $\chi = 90\text{deg}$)

Fig.9に、 $\chi = 0\text{deg}$ の $\lambda/L = 1.0$ における方位角 (ψ)、舵角 (δ)、船速 (U)、船体斜航角 (β)、回頭角速度 (r)、舵直圧力 (F_N)、プロペラ推力 (T) の時刻歴結果の比較を示す。先に述べた通り、水槽試験結果と比べて、計算結果は応答が早く、行き過ぎ角 (OSA) が小さい。水槽試験では、zig-zag 運動の間で、わずかながら加速が見られるが、計算ではそのような現象は捉えられておらず、船速低下量がより大きい。理由として、計算における波浪中抵抗増加の取り扱いが精度的に十分でない可能性がある。また、回頭角速度のピーク値を見ると、計算値は水槽試験結果よりも小さい。一方、船体斜航角のピーク値については、計算結果は水槽試験結果と良い一致を示している。平水中においては、

本計算は水槽試験結果と良い一致を示すことから、波浪中では、回頭運動に関する減衰のみが小さくなったと考えることができる。舵直圧力やプロペラ推力の計算値は、高周波数で変動する実験値の平均を通っており、計算精度は十分であることが分かる。計算結果の応答が早くなる理由は、今のところ、はっきりしないものの、波浪中抵抗増加や船体に作用する波漂流力の取り扱いの不備から来るものと考えられる。

Fig.10に、規則波中における 10/10 ならびに -10/-10 zig-zag 運動の第 1 ならびに第 2 行き過ぎ角 (1st & 2nd OSAs) の比較を示す。平水中における値は、 $\lambda/L = 0$ のところにプロットしている。 $\chi = 0\text{deg}$ においては、1st OSA の計算値は、平水中の値と比べて $\lambda/L = 0.5$ 付近でやや小さくなり、 λ/L とともに増加する傾向がある。2nd OSA についても同様である。水槽試験結果を見ると、-10/-10 zig-zag 運動においては、計算結果と似た傾向となっている。一方、10/10 zig-zag 運動の実験結果は、計算結果と大きく異なっている。特に、2nd OSA の実験値が過大である。正面向波における水槽試験では、10/10 ならびに -10/-10 zig-zag 運動は、おおよそ左右対称となり、従って両者の行き過ぎ角も似たような値になることが予想されるが、そのような結果とはなっていない。水槽試験において、zig-zag 運動の左右非対称性が強く出た理由は今のところ不明であるが、波浪影響により、整流係数が平水中とは異なる値をとるようになり、さらに左右非対称性が顕著となったことが考えられる。本試験結果の信頼性の検討を含め更なる調査が必要であろう。 $\chi = 90\text{deg}$ のように横から波を受ける場合、 $\lambda/L < 0.5$ のような短波長域では、運動が発散し行き過ぎ角が得られなかった。これは、波浪定常横力や回頭モーメントが短波長域で大きくなるためであり、Ueno 等の水槽試験においても同様な現象が見られる⁵⁾。一方、 $\lambda/L > 0.5$ では、運動の発散はなくなり、行き過ぎ角が得られ

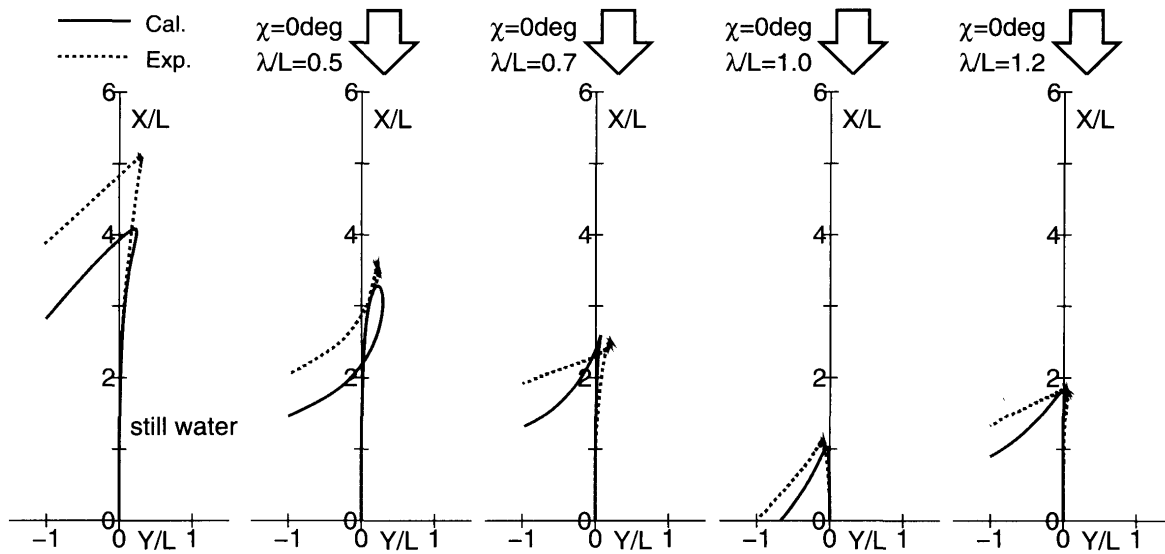


Fig. 12 Comparison of ship trajectories of stopping maneuver in head waves ($\chi = 0\text{deg}$)

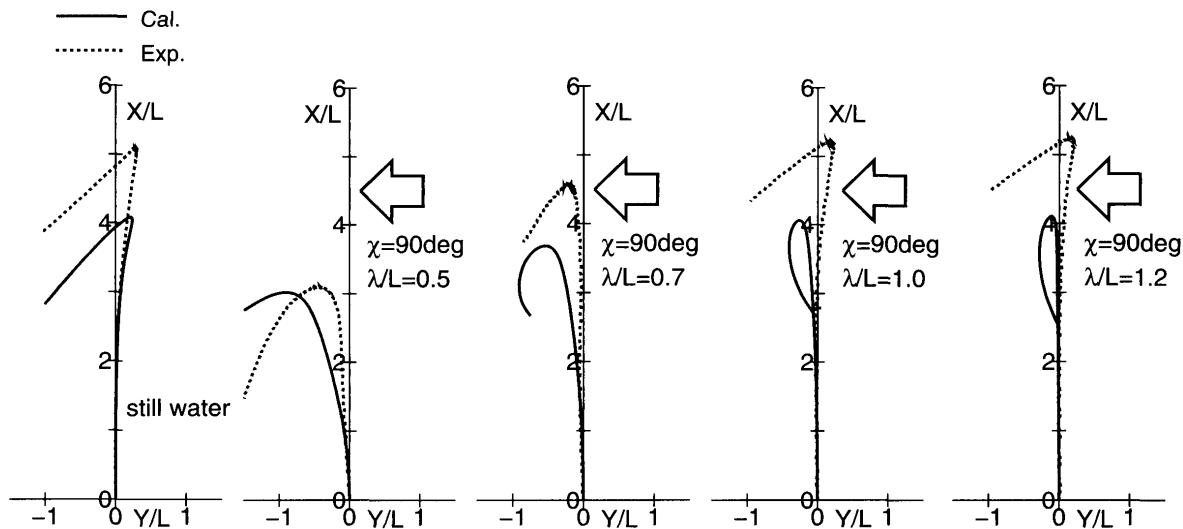


Fig. 13 Comparison of stopping trajectories in beam waves ($\chi = 90\text{deg}$)

るようになる。 $-10/-10$ zig-zag 運動の 1st OSA の計算値は、 $\lambda/L = 0.5$ において最も値が小さくなり、 λ/L とともに増加する傾向がある。他方、2nd OSA は、 λ/L にかかわらず同程度の値となっている。これらの傾向は、水槽試験結果とおおよそ一致している。 $10/10$ zig-zag 運動については、1st OSA の計算値は λ/L にかかわらず同程度の値となる。また、2nd OSA は $\lambda/L = 0.5$ で最も値が小さく、 $\lambda/L = 0.8$ 付近まで増加し、その後ほぼ一定となる。これらの傾向は、水槽試験結果とおおよそ一致している。

5. 規則波中におけるプロペラ逆転停止運動

5.1 平水中における比較

平水中におけるプロペラ逆転停止運動について比較を行った。Fig.11に、方位角 (ψ)、船速 (U)、船体斜航角 (β)、回頭角速度 (r)、舵直圧力 (F_N)、プロペラ推力 (T) の時刻歴結果の比較を示す。なお、運動軌跡については、次節で言及する。 ψ は正の値

を取り、船体はまず右舷側に変位することが分かる。しかしながら、 r の変化の様子が、計算と水槽試験結果ではやや異なる。このような横方向の変位は、プロペラ逆転時における船体に作用する付加流体力によって発生する。本シミュレーション計算では、この付加流体力特性として、先に述べた通り、本船とは異なる船の水槽結果を使用しており、これが定量的に差が生じる要因と考えられる。プロペラ逆転時の T は当然負となるが、 $t = 20\text{sec}$ 付近の値が示す通り、計算におけるその絶対値は大きめである。これは、プロペラ逆転時の推力特性の予測精度が十分ではなかったためと考えられる。計算における T の絶対値が大きめであることから、 $U = 0$ となる停止までの時間が小さくシミュレートされることになる。 F_N はほぼゼロであることが分かる。計算結果は、水槽試験結果と定性的な一致を示しているが、定量的には十分とは言えないようである。プロペラ逆転停止運動のシミュレーションについては、平水中においても、改善の余地がある。

5.2 規則波中における比較

Fig.12に、 $\chi = 0\text{deg}$ における、プロペラ逆転開始から停止そして後進までの運動軌跡の比較を示す。図中、 $X = 0$ がプロペラ逆転を開始した位置である。平水中での計算結果は、水槽試験結果と比べると停止距離が1船長ほど短い、右舷側に変位する傾向や後進の方向が水槽試験結果と一致している。波浪中における計算結果もまた水槽試験結果とおおよそ一致している。 $\lambda/L = 0.5$ から $\lambda/L = 1.0$ と変化するにつれて、波浪中抵抗増加が大きくなり、停止までの距離も短くなることが分かる。

Fig.13に、 $\chi = 90\text{deg}$ における運動軌跡の比較を示す。規則波中における計算結果は、波に対して横方向に大きく流される傾向があり、 $\chi = 0\text{deg}$ における結果よりも、水槽試験との一致度は劣る。 $\lambda/L = 0.5$ から $\lambda/L = 1.0$ と変化するにつれて、 $\chi = 0\text{deg}$ の場合とは逆に、停止までの距離が長くなる。

Fig.14に、プロペラ逆転開始から停止するまでの X 方向の距離 (停止距離と呼ぶ) の比較を示す。 $\chi = 0\text{deg}$ では、 $\lambda/L = 0.9 \sim 1.0$ 付近で停止距離が最も小さくなり、その計算結果は水槽試験結果と良い一致を示す。なお、本水槽試験の傾向は、Ueno 等⁵⁾ のものとおおよそ同じであった。一方、 $\chi = 90\text{deg}$ の場合には、波長は短いほど停止距離が短くなる。 $\lambda/L > 1.0$ になると、その停止距離は、平水中におけるそれとほぼ同じとなる。計算による停止距離は水槽試験のそれよりも短いものの、計算結果は水槽試験の傾向を捉えていることが分かる。

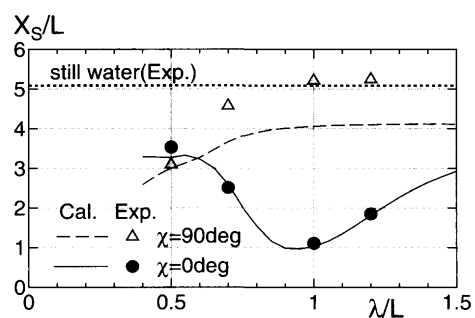


Fig. 14 Comparison of stopping distance in waves

6. 結 言

著者が先に報告した計算法¹⁾⁶⁾を用いて、規則波中における zig-zag 運動やプロペラ逆転停止運動のシミュレーション計算を行い、種々の波長や波方向における自由航走模型試験との比較を通じて、計算法の検証を行った。その結果、著者が先に報告したシミュレーション計算法は、規則波中における船の zig-zag 運動やプロペラ逆転停止運動を定性的に予測できるものの、定量的な精度での予測のためには改良が必要であることが分かった。精度向上のためには、波漂流力等の予測精度向上もしくはより合理的なシミュレーションモデルの構築が必要であろう。

謝 辞

本研究の実施に当たり、広島大学名誉教授小瀬邦治先生から貴重な御助言を賜った。心よりお礼申し上げます。また、水槽試験の実施に御協力いただいた三菱重工業長崎研究所耐航性能水槽の方々にも深くお礼申し上げます。本研究は文部科学省科学研究費 (基盤研究 (B)16360438) の補助を受けたことを記し関係各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 安川宏紀：波浪中における船の操縦運動シミュレーション (第1報：旋回運動), 日本船舶海洋工学会論文集 第4号 (2006), pp.127-136.
- 2) 浜本剛実, 金 潤洙：波浪中の操縦運動を記述する新しい座標系とその運動方程式, 日本造船学会論文集第173号 (1993), pp.209-220.
- 3) 平山次清, 金 世殷：肥大船の操縦性能に及ぼす短波長方向スペクトル波の影響の一検討, 日本造船学会論文集第176号 (1994), pp.129-136.
- 4) 安川宏紀, 小瀬邦治：風浪下におけるタンカー船型のプロペラ逆転停止運動シミュレーション, 西部造船会々報 第106号 (2003), pp.57-68.
- 5) Ueno, M., Nimura, T. and Miyazaki, H.: Experimental Study on Manoeuvring Motion of a Ship in Waves, International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability, MARSIM'03 (2003), Kanazawa.
- 6) 安川宏紀：旋回する船の波浪動揺シミュレーション, 日本船舶海洋工学会論文集 第4号 (2006), pp.117-126.
- 7) 孫 景浩, 野本謙作：高速コンテナ船の操縦運動と横揺れとの連成挙動について, 日本造船学会論文集 第150号 (1982), pp.232-244.
- 8) 藤野正隆, 切田 篤：プロペラ逆転による制動時の船の操縦性について (第一報), 関西造船協会誌 第169号 (1978), pp.57-70.
- 9) Kobayashi, E.: A Simulation Study on Ship Manoeuvrability at Low Speed, Mitsubishi technical bulletin No.180 (1988), Mitsubishi Heavy Industries, Ltd