

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 25 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360366

研究課題名(和文) 曳き波に対する小型船の運動計算法

研究課題名(英文) Simulation method of ship motions in wash wave

研究代表者

黒田 貴子 (Kuroda, Takako)

独立行政法人海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：00415811

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では船の曳き波を、CFD結果を用いて造波機で再現する方法を提案し、この曳き波再現法の精度を確認した。さらに3次元数値造波水槽で本再現法を用いて曳き波を再現し、曳き波中の小型船の運動をシミュレートした。そのシミュレーション結果を、本曳き波再現法を用いて計測した曳き波中の小型船の運動の結果と比較し、本計算方法が曳き波中の小型船の運動計算法として有用であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to propose the simulation method of a small ship's motions in wash wave. Authors have proposed a reproduction method of wash wave by multi-segmented wave generators which are controlled by using computed results of CFD. Moreover, wash wave and ship motions in wash wave were simulated by 3D-NWT (three dimensional numerical wave tank). 3D-NWT can simulate wash wave in the same manner as the multi-segmented wave generators in ASMB. Input data of both methods are the computed wash wave by CFD. Simulated wash wave and ship motions in wash waves by 3D-NWT is in good agreement with the measured results in ASMB. These simulated results indicate that 3D-NWT is able to simulate wash wave reproduced by wave generator and ship motions in wash wave.

研究分野：船舶工学

キーワード：曳き波 造波機 3次元数値造波水槽 船体運動

1. 研究開始当初の背景

船の高速化に伴い、曳き波が引き起こす様々な被害が報告されている。漁労中の小型漁船の場合、網を展張していると操船が自由にできないため曳き波をやり過ごすことが困難であり、また、操業中に搭乗者が立って作業をしていて落水する事故が発生している。このような海難事故を防ぐには曳き波に対する小型船の応答を明らかにする必要がある。船が造る曳き波については古くから問題とされているが曳き波で誘起される小型船の動揺計算法は構築されていない。この原因のひとつに曳き波を試験水槽で発生させることが困難であることが挙げられる。曳き波に対する小型船の応答を明らかにするには、曳き波を試験水槽で再現し、曳き波に対する小型船の応答を把握する試験法と運動計算法の構築が求められる。

2. 研究の目的

本研究では航行する船舶が造る曳き波に対する小型船の運動計算法を提案する。曳き波を試験水槽の造波機で発生させ、曳き波に対する小型船の応答を模型実験により把握し、3次元数値造波水槽を用いた曳き波に対する小型船の運動計算法を構築する。

3. 研究の方法

本研究は①CFD 結果を用いた造波機による曳き波の再現法の構築、②曳き波に対する小型船の応答に関する模型実験、③曳き波に対する小型船の運動計算法の構築を実施した。船の曳き波を CFD で計算し、曳き波の自由表面上の速度と水位変動を用いて多分割型造波機に与える曳き波の造波信号を作成し、曳き波を造波機で再現する技術を構築した。次にこの曳き波の造波法を用いて曳き波中を漂泊する小型漁船模型の船体運動を計測し、応答特性を把握した。さらに3次元数値造波水槽を用いて今回構築した曳き波再現法で曳き波を再現し、その曳き波中の小型漁船の船体運動を時間領域で解いて実験結果と比較し、曳き波中の小型船の運動計算法の精度と有用性を確認した。

4. 研究成果

(1) 曳き波の造波法

曳き波が引き起こす小型船の転覆を試験水槽内に再現するには、模型船を曳航して曳き波を起こし、その中で別の模型船を自航させて船体運動を計測することになり、高度な実験技術を要し、実験の再現性を確保するのも容易ではない。また、曳き波を造る船と曳き波を受ける船の縮尺比を合わせるので船の大きさにも限界が生じる。そこで、本研究では多分割型造波機を用いて水槽内に曳き波を再現させる。

①曳き波の再現法

本研究では数値計算で求めた曳き波の波形を基に試験水槽の多分割型造波機に水位

変動と自由表面上の造波面法線方向の流速を造波データとして与え、船型に応じた曳き波を再現する方法を開発した。

曳き波を再現する水槽は海上技術安全研究所の実海域再現水槽(ASMB)である。本水槽は長さ 80m、幅 40m で全周に 382 台のフラップ式多分割型造波機を有している。造波板の幅は 55cm、ヒンジ深さは 1.6m である。

Photo 1 に実海域再現水槽の概観を示す。



Photo 1 Actual Sea Model Basin

曳き波の数値解析結果のうち、曳き波の水位変動 η と自由表面上の造波面法線方向の流速 v を検査線に沿って切り出した波形を時系列データに変換したものを造波機に与えて曳き波を再現する。ただし、法線方向速度には造波機駆動部高さでの法線方向速度に変換し、さらに造波効率を与える必要がある。Fig. 1 にこの曳き波再現法の概念図を示す。曳き波の数値解の上に多分割型造波機の配置を重ねている。ここで検査線とは曳き波を造る船の中心線と平行な自由表面上での位置であり、造波機の水槽側前面の位置になる。

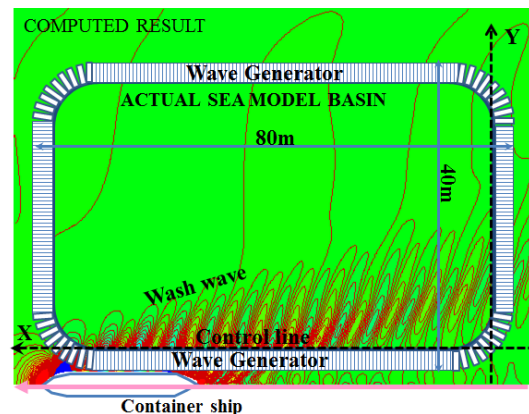


Fig. 1 Image of wash wave reproduction

次に、曳き波の法線方向速度 v にフラップ式造波機の造波効率を与える方法を検討する。フラップ式造波機の造波効率 A は以下の式で表わされる。

$A =$

$$\frac{2 \sinh kH_1 (kH_2 \sinh kH_1 - \cosh kH_1 + \cosh k(H_1 - H_2))}{H_2 k (kH_1 + \sinh kH_1 \cosh kH_1)} \quad (1)$$

よって、造波機に与えるべき法線方向速度 v_y は造波効率を含む造波板速度振幅と波振幅

の関係式に、自由表面から造波機駆動部への位置変換を乗じた以下の式で表わされる。

$$v_y = \frac{\tanh kH_1 H_0}{A} \frac{H_0}{H_2} v \quad (2)$$

(2)式中の H_0 、 H_1 、 H_2 はそれぞれ造波板の高さ、水槽の深さ及び造波板の水深を示す (Fig. 2)。曳き波の v に造波効率を与えるには、曳き波の v をフーリエ変換し、すべての周波数で造波効率をかけ、逆フーリエ変換をする。

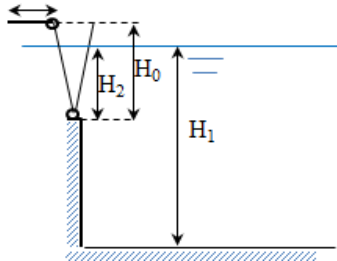


Fig. 2 Definition of H_0 , H_1 and H_2

② 曳き波の CFD 計算

船長 200m の大型肥大船、瘦形船が造る曳き波を試験水槽で再現するために海上技術安全研究所が開発した CFD コード“NEPTUNE”を用いて船の曳き波を計算した。これは 3 次元非圧縮性レイノルズ平均 Navier-Stokes 方程式を支配方程式として、疑似圧縮性を導入して収束解を求める計算コードである。自由表面の計算には Level-set 法を使用し、乱流モデルは Spalar-Allmaras モデルを用いた。計算対象として肥大船には VLCC 船型、瘦形船にはコンテナ船型を用いた。主要目を Table 1 に示す。

Table 1 Principal particular of computed ships

	VLCC (full ship)	Container Ship (fine ship)
L_{pp} [m]	200.00	200.00
B [m]	36.27	28.00
d_m [m]	13.00	9.40
C_B	0.81	0.65

肥大船と瘦形船が 12、14、16kts ($F_n=0.139, 0.163, 0.186$)で航行する際の曳き波の計算を行った。計算格子点数は主用方向、ガス方向、横方向に $617 \times 97 \times 409$ 、計算領域は $-2.14 \leq x/L_{pp} \leq 5.2$ 、 $-2.97 \leq y/L_{pp} \leq 0$ 、 $-3.51 \leq z/L_{pp} \leq 0.02$ である。肥大船と瘦形船の 16kts での曳き波の計算結果を波紋分布で Fig. 3、4 に示す。船首近傍から大きな発散波が、船尾からは横波が現れる。

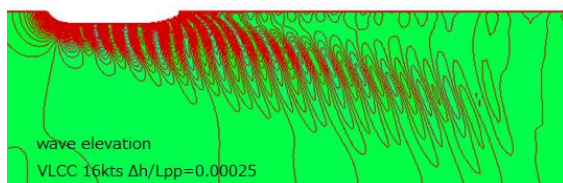


Fig. 3 Contours of wave elevation generated by full ship

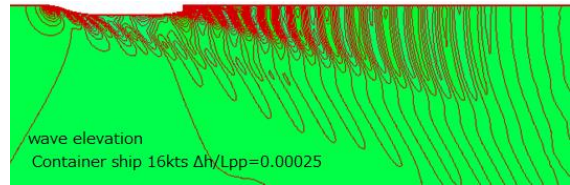


Fig. 4 Contours of wave elevation generated by fine ship

③ 造波機での曳き波再現結果

肥大船と瘦形船の曳き波を造波機で再現した結果を示す。曳き波を造る船の尺度は $1/10$ ($L_{pp}=20.0\text{m}$)とし、検査線は船の中心線から $y/L_{pp}=0.15$ の位置とした。容量式波高計を用いて曳き波を造る船の中心線から $y/L_{pp}=0.30, 0.525, 0.75$ の位置で波形を計測した。肥大船 (16kts) の曳き波の再現の様子を Photo 2 に示す。Fig. 5 肥大船と瘦形船の 16kts での曳き波を $L_{pp}=0.30$ で計測した結果を CFD 結果と併せて時系列で示す。計測結果と計算結果はよく一致しており、航走波が再現できていることが確認できる。

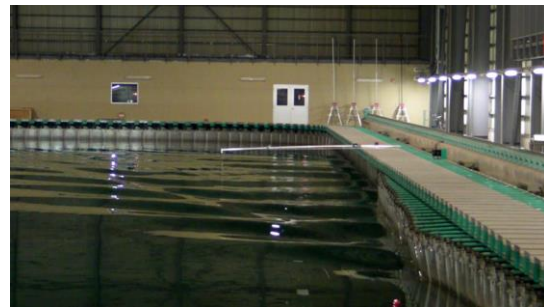


Photo 2 The state of wash wave reproduced by wave generators (fine ship at 16kts)

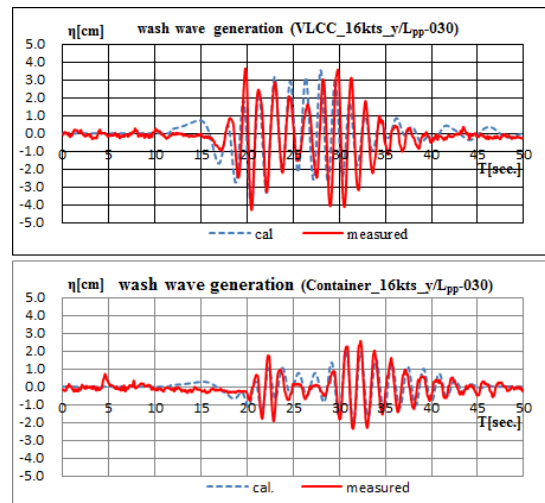


Fig. 5 Reproduced wash wave of full and fine ships at 16kts

(2) 曳き波中の小型船の運動計測

前章で再現した大型船の曳き波を受ける漂泊時の小型漁船の船体運動を計測した。

① 実験概要

本試験で用いた供試模型は縮尺 $1/10$ の小型底曳網漁船 (11GT)で $L_{pp}=14.9\text{m}$ である。模型船の写真を Photo 3 に示す。横揺れ及び縦

揺れはジャイロで、上下揺れは超音波式変位センサで計測した。計測位置は $y/L_{pp}=0.425$ である。曳き波に対する模型船の向きは、曳き波のカブスでの波の進行方向 35.26deg . に対して定義した向波から追波の 5 方向である。Fig. 6 に曳き波と船の位置関係を示す。図中に示す船は横波中である。

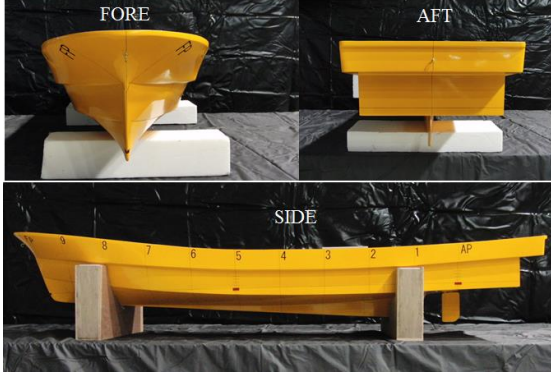


Photo 3 Model ship (Japanese small trawler)

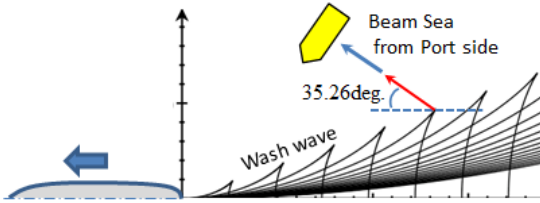


Fig. 6 Location of model ship and wash wave direction at cusp

②運動計測結果

Fig. 7 に小型底曳網漁船のコンテナ船の曳き波中の横揺れ ϕ 、縦揺れ θ と上下揺れ Z の最大運動振幅を最大波傾斜 $k\zeta_w$ と最大波振幅 ζ_w で無次元化して示す。横波中の横揺れと向波中の縦揺れが大きいことが分かる。

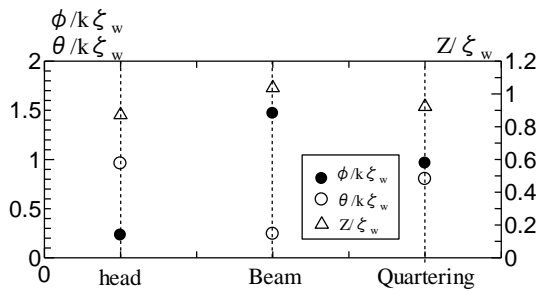


Fig. 7 Non-dimensional ship motions in wash wave at $y/L_{pp}=0.425$

(3) 曳き波に対する小型船の運動計算法

曳き波に対する小型船の運動計算は 3 次元数値造波水槽(3D-NWT)を用いた。

①3次元数値造波水槽

本計算に用いた 3D-NWT は境界要素法による時間領域計算コードで、理想流体の仮定の下、造波機による水槽内への造波及び水槽内の浮体の運動を時間領域でシミュレートできる。計算領域は Fig. 8 に示す自由表面 S_f 、造波面 S_w 、垂直壁面 S_v 、水底面 S_b と船体表面 S_h に囲まれた領域である。Fig. 9 に ASMB

の一部を切り出した計算領域を示す。領域の大きさは $L \times B \times D = 61.6\text{m} \times 24.2\text{m} \times 4.5\text{m}$ で、 z 方向に 3 分割し、表層の深さは造波板深さと同じ 1.6m とし、さらに 3 分割した。 x 方向の分割は造波板 1 枚の幅に対し 2 分割とした。速度ポテンシャルを導入し、水の密度 ρ 、重力加速度 g と船長 L_{pp} を用いて諸式を無次元化表示すると流場では速度ポテンシャル ϕ とその時間微分 ϕ_t はラプラスの式を満たす。

$$\nabla^2 \phi = \nabla^2 \phi_t = 0 \quad (3)$$

固定壁 S_v 、水底面 S_b 、造波面 S_w 及び船体表面 S_h の境界条件は(4)式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial n} &= 0 && \text{on } S_v \text{ and } S_b \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} &= v(x, y, z, t) && \text{on } S_w \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} &= n \cdot (V + \omega \times r) && \text{on } S_h \end{aligned} \right\} (4)$$

ここで、 $v(x, y, z, t)$ は造波面の法線方向速度で、本計算では CFD による曳き波計算結果から求めて与えている。 V と ω は船の速度と角速度で、 r は重心位置から船体表面を示す位置ベクトルである。

自由表面の境界条件は(5)式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} &= -\frac{\partial \phi}{\partial z} - c(x, y)\eta \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} &= -\eta - c(x, y)\phi \end{aligned} \right\} (5)$$

η は水位変動、 $c(x, y)$ は減衰領域に与える減衰係数である。反射波の除去する減衰領域は、造波する波の 1 波長分以上の幅を持たせている。Fig. 9 にコンターで示すのは減衰係数で、減衰領域の入口では 0、奥では 1 になる 2 次式で設定されている。

浮体の加速度を求めるには浮体表面の圧力分布を計算する必要がある、これには ϕ に関する境界値問題を解く必要がある。本計算法ではモード分解法を採用し、 ϕ を 7 つのモードに分解する。

$$\phi_t = \sum_{j=1}^6 \alpha_j \varphi_j + \varphi_7 \quad (6)$$

ここで、 α_j は船の 6 自由度の加速度である。船体表面の一般化加速度を $\alpha = (\dot{V}, \dot{\omega})$ 、一般化法線方向ベクトルを $N = (n, r \times n)$ とすると、 $\varphi_j (j=1 \sim 6)$ の境界条件は以下のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} &= 0, && \text{on } S_v, S_b \text{ and } S_w \\ \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} &= N_j, && \text{on } S_h \\ \varphi_j &= 0, && \text{on } S_f \end{aligned} \right\} (7)$$

これらの境界値問題を解き、各モードに対する船の単位加速度に起因する流体力の圧力

を求める。
 ϕ_7 の境界条件は以下のとおり。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi_7}{\partial n} &= 0, & \text{on } S_v, S_b \text{ and } S_h \\ \frac{\partial \phi_7}{\partial n} &= \frac{\partial v(x, y, z, t)}{\partial t}, & \text{on } S_w \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$\phi_7 = -\eta - c(x, y)\phi$ on S_f
 境界値問題の解より流体力は(9)式で求まる。

$$F_{ij} = \int_{S_h} -\phi_j N_i dS \quad j = 1 \sim 7 \quad (9)$$

船体の加速度 α_j は船の運動方程式で求まる。

$$\sum_{j=1}^6 (M_{ij} - F_{ij})\alpha_j = F_{i7} + F_{i8} + F_{i9} \quad (10)$$

ここで、 M_{ij} は船の慣性テンソル、 F_{i8} と F_{i9} は復原力と重力である。

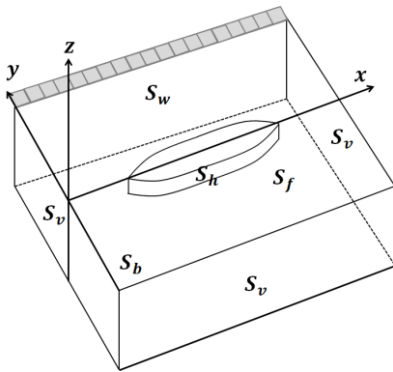


Fig. 8 Definition of computational domain and coordinate system

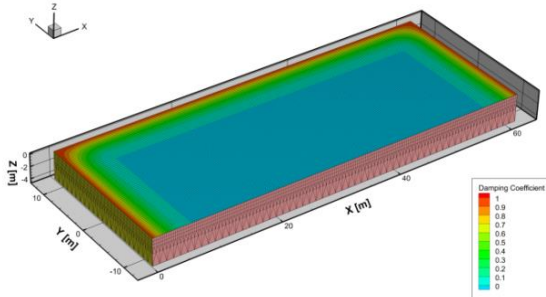


Fig. 9 Computational domain of 3D-NET for ASMB

② 曳き波シミュレーション

ASMBの造波機で再現した $Fn=0.186$ で航行する瘦形船($L_{pp}=20m$)の曳き波を 3D-NWT でシミュレートした。3D-NWT に与えた法線方向速度 v_y は ASMB の造波機に与えたものと同じで CFD で計算した曳き波の自由表面形状を $y/L_{pp}=0.15$ でロンジカットした値を使っている。Fig. 10 にシミュレートした曳き波の概観を、Fig. 11 に瘦形船の中心線から $y/L_{pp}=0.3$ 離れた位置での波高を ASMB の造波機での再現時の計測結果と合せて示す。3D-NWT の結果と ASMB の造波機で再現し

た結果が良く一致していることが分かる。

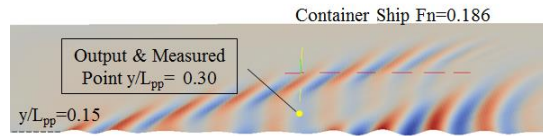


Fig. 10 Simulated wash wave of container ship at $Fn=0.186$

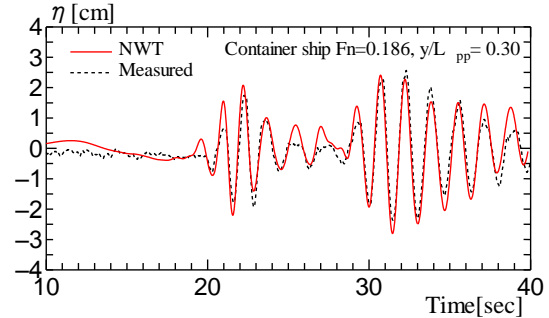


Fig. 11 Comparison between measured and simulated wash wave of container ship

③ 曳き波中の船体運動計算

3D-NWT で曳き波中の船体運動をシミュレートするために、船体表面と船体周りの自由表面をメッシュ生成ツール “Gridgen” を用いてパネルを作成した。Fig. 12 に計算領域のパネルを示す。横揺れの減衰係数は 3D-NWT で粘性が考慮されないで模型船の自由横揺れ試験より求めた値を設定した。Fig. 13 に瘦形船($Fn=0.186$)の曳き波中の小型漁船の運動シミュレーション結果の概観図を示す。小型漁船の位置は $y/L_{pp}=0.425$ 、検査線は $y/L_{pp}=0.15$ である。小型漁船の上下揺れ Z 、横揺れ ϕ 、縦揺れ θ のシミュレーション結果を Fig. 14 に実験結果と比較して示す。シミュレーション結果は実験結果と良く一致しており、本計算法は曳き波中の船の運動を計算するのに有効な手段であることを示している。

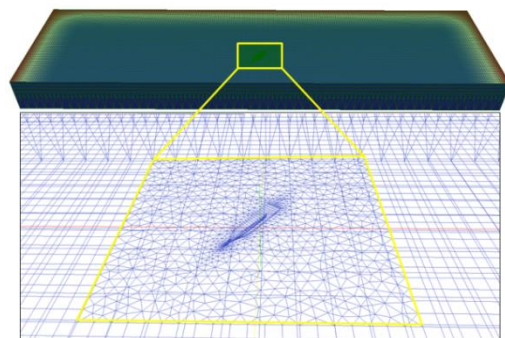


Fig. 12 Computational grid for ship

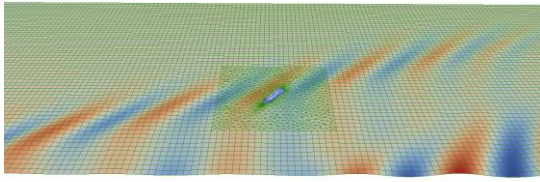


Fig. 13 Simulated wash wave of container ship at $F_n=0.186$

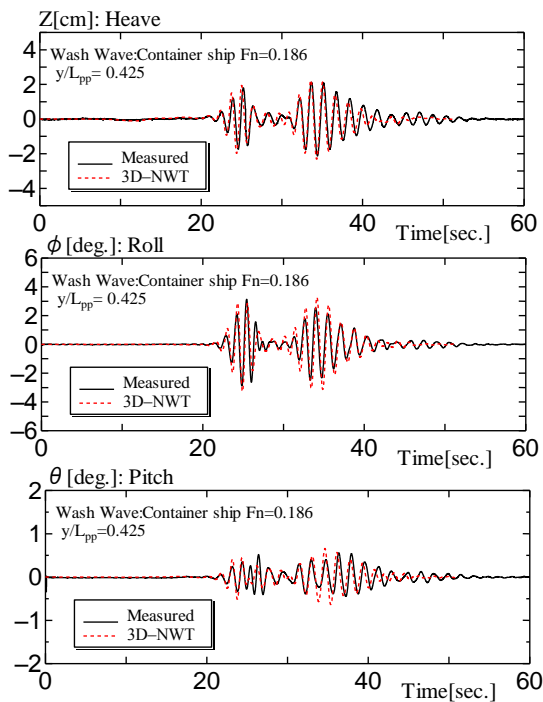


Fig. 14 Comparison between measured and simulated ship motion in wash wave of container ship ($F_n=0.186$)

(4) まとめ

本研究では船の曳き波を、CFD 結果を用いて造波機で再現する方法を提案し、この曳き波再現法の精度を確認した。さらに 3 次元数値造波水槽で本再現法を用いて曳き波を再現し、曳き波中の小型船の運動をシミュレートした。そのシミュレーション結果を、本曳き波再現法を用いて計測した曳き波中の小型船の運動の結果と比較し、本計算方法が曳き波中の小型船の運動計算法として有用であることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- ①黒田貴子、平田信行、小林寛、谷澤克治、Generation Method of Wash Wave by Wave Generator in Model basin, Proceedings of OCEANS'12、査読無、2012 年
- ②黒田貴子、小林寛、宝谷英貴、谷澤克治、CFD の結果を用いた曳き波再現法と曳き波中の小型船の運動計測、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読無、第 16 号、pp331-334、

2013 年

③黒田貴子、小林寛、宝谷英貴、谷澤克治、Motion Measurement of a Small Trawler in Wash Wave of High Speed Ferry Reproduced by Wave Generators、Proceedings of FAST2013、査読有、2013 年

④黒田貴子、小林寛、宝谷英貴、谷澤克治、Sip Motions of Small Trawler with Advanced Speed in Wash Wave Reproduced by Wave Generator、Proceedings of OCEANS'14、査読無、2014 年

⑤黒田貴子、谷澤克治、小林寛、3 次元数値造波水槽による曳き波造波、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読無、第 19 号、2014 年

⑥黒田貴子、小林寛、谷澤克治、Three Dimensional Numerical Wave Tank for Simulation of Floating Ship in Wash Wave、査読有、Proceedings of ISOPE2015、2015 年 [学会発表] (計 5 件)

①黒田貴子、Generation Method of Wash Wave by Wave Generator in Model Basin、OCEANS'12、2012 年 10 月、ハンプトンローズ (アメリカ)

②黒田貴子、CFD の結果を用いた曳き波造波法と曳き波中の小型船の運動計測、日本船舶海洋工学会講演会、2013 年 5 月、広島国際会議場 (広島市)

③黒田貴子、Motion Measurement of a Small Trawler in Wash Wave of High Speed Ferry Reproduced by Wave Generators、FAST2013、2013 年 12 月、アムステルダム (オランダ)

④黒田貴子、Ship Motions of Small Trawler with Advanced Speed in Wash Wave Reproduced by Wave Generator、OCEANS'14、2014 年 9 月、セントジョンズ (カナダ)

⑤黒田貴子、3 次元数値造波水槽による曳き波造波、日本船舶海洋工学会講演会、2014 年 11 月、長崎ブリックホール (長崎市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

黒田 貴子 (KURODA Takako)
研究者番号 : 00415811

(2)研究分担者

谷澤 克治 (TANIZAWA Katsuji)
研究者番号 : 70373420

(3)研究分担者

田口 晴邦 (TAGUCHI Harukuni)
研究者番号 : 70344455

(4)研究分担者

小林 寛 (KOBAYASHI Hiroshi)
研究者番号 : 20361503

(5)研究分担者

宝谷 英貴 (HOUTANI Hidetaka)
研究者番号 : 30636808