

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 6 月 8 日現在

研究種目：若手研究 (B)
研究期間：2008～2009
課題番号：20760564
研究課題名 (和文) 実海域適応型船首形状に関する研究

研究課題名 (英文) Ship Bow Adapted for Actual Seas

研究代表者

柴田 和也 (SHIBATA KAZUYA)
東京大学・大学院工学研究科・特任助教
研究者番号：30462873

研究成果の概要 (和文) : 高い実海域性能を有する船首形状設計の指針を得ると共に、実海域において最適な船体形状を得るための新たな計算手法を開発することを目的に、水槽実験および計算手法の開発を行った。パナマックスバルクキャリアの水槽試験を実施し、波浪中抵抗増加の実験値を取得した。また船首部での流体挙動の様子をビデオ撮影し入射波の散乱やスプレイ現象に関する知見を得た。さらに船首部形状の違いによるローカルな波の攪乱とスプレイ現象を調べるために粒子法による水波の計算手法を開発した。

研究成果の概要 (英文) : Several experiments were carried out, and a numerical method was developed for designing bow shapes adapted for actual seas. The model ship used in the experiment was a Panamax bulk carrier. The added resistance due to waves was measured, and the scattering waves and spray was taken by a high speed camera. Furthermore, a numerical analysis method was developed by a particle method to investigate the scattering waves and spray around the ship bow.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：推進・運動性能

1. 研究開始当初の背景

(1) 波浪中抵抗増加は、実海域での船速低下や燃料消費量に影響をおよぼす重要な問題である。これまでの研究では、船体から遠方

の波浪場の解析から抵抗増加量を理論的に求める方法が主流であったが、この方法では船首の局所的な形状が抵抗増加に及ぼす影響を直接的に評価することが困難であり、実

海域における船首形状の設計に対する指針が得られ難いという問題があった。

2. 研究の目的

波浪中抵抗増加に及ぼす船首部形状の影響を明らかにすることで、高い実海域性能を有する船首形状設計の指針を得ると共に、最適な船体形状を得るための新たな計算手法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 水槽試験により、波浪中抵抗増加に及ぼす船首部形状の影響を調査するための実験データを取得する。また船首部での流体挙動の様子をビデオ撮影し入射波の散乱やスプレイ現象を捉える。

(2) 遠方の波浪場ではなく船首近傍の非線形流場に着目し、数値シミュレーションにより船首部形状の違いによるローカルな波の攪乱と放射を調べることを可能にする数値シミュレーション技術を開発する。数値計算手法として、計算格子を用いない新しい数値計算手法である粒子法の一つである MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を用いる。この方法は自由表面を伴う流体の大変形と分裂が容易に計算できるという特徴を持つ。

4. 研究成果

(1) パナマックスバルクキャリアを対象に水槽試験を実施し波浪中抵抗の実験データを得た。流体挙動の様子をビデオ撮影し、船首部での入射波の散乱やスプレイ現象に関する知見を得た。また実験データの解析プログラムを開発しプログラム登録した。

具体的には、まず反射波抵抗増加(R_{AW})の速度影響(α_U)と反射波抵抗増加の喫水周波数影響(α_d)を検討した。波浪中抵抗増加の推定は海の10モードの研究で開発された計算方法を使用した。本計算法は、満載状態で計算と実験がよく一致することが確かめられている。 R_{AW} と α_U は式(1)で表わされる。

$$R_{AW} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 BB_f \alpha_d (1 + \alpha_U) \quad (1)$$

今回対象とした船舶は、肥大船のパナマックスバルクキャリアである。試験状態を Table 1 に示す。載貨状態は37.6%バラスト、トリム角は約1.4degである。計画満載喫水は12.2mである。水槽は(独)海上技術安全研究所の400m長水槽を使用した。

波浪中試験時の船首部の造波現象を Fig.1 に示す。Fig.1 は反射波抵抗増加の速度影響係数(C_U)を算出するために必要となる短波長(波長船長比 $\lambda/L_{pp}=0.3$)のものであるが船体運動が卓越する $\lambda/L_{pp}=1.0$ においても船底は露出してない。

Table 1 Principal dimensions (Ballasted condition)

Type	Panamax Bulk Carrier		
	Actual	model	
Length between perpendiculars (m)	L_{pp}	217.00	6.27
Displacement (m ³)	∇	26992.5	2.01232
Breadth (m)	B	32.26	0.9321
Draft [aft] (m)	d_{aft}	7.80	0.2254
Draft [mid] (m)	d_{mid}	5.15	0.1488
Draft [fore] (m)	d_{fore}	2.50	0.0722
Trim (m)	τ	5.3	0.1531
Radius of gyration	k_{yy}/L_{pp}	0.292	0.292
Longitudinal center of buoyancy	$l_{cb} (\%L_{pp})$	1.920	1.920
Bluntness Coefficient	B_f	0.192	0.192

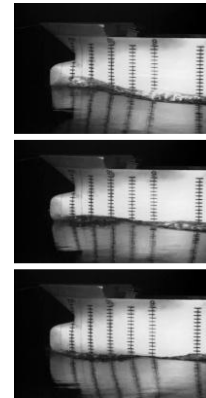


Fig. 1 Wave profile around the bow

($F_n=0.188$, $\lambda/L_{pp}=0.3$, Heading waves)

反射波抵抗増加の速度影響 α_U を検討するために、水槽試験を行った。 α_U は水槽試験より(2)式で求められる。

$$\alpha_U = \frac{R_{AW} - R_{AWm}}{\frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 BB_f \alpha_d} - 1 \quad (2)$$

ここで ζ_a は波振幅、 R_{AW} は実験で求めた波浪中抵抗増加、 R_{AWm} は計算で求めた波浪中抵抗増加の運動成分である。

設定波高が実船スケール3m相当、 $\lambda/L_{pp}=0.3$ の条件で船速を変えて波浪中抵抗増加試験を行った。(2)式より求めた α_U を Fig.2 に示す。

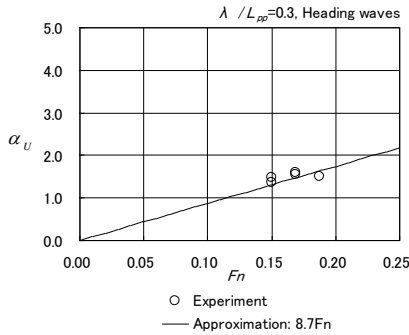


Fig. 2 Effect of advance speed of added resistance due to wave reflection

図中の直線は速度影響を F_n の関数として表した場合の線形近似式である。バラスト状態においても F_n の 1 乗に関する近似式でよく表わされている。 $\alpha_U = C_U F_n$ と表したときの係数である速度影響係数 C_U の値は 8.7 である。

波浪中抵抗増加の喫水周波数影響 (α_d) は先行研究により実験的に調べられている。バラスト状態では通常トリムがついており船首と船尾で喫水の値が異なるため喫水の取り扱いの検討を行う。ここでは α_d の計算に用いる喫水の値として船首部、船体中央部、船尾部の 3 種類の喫水値を用いる。Fig.3 に喫水周波数影響の計算結果を示す。3 種類とも λ/L_{pp} が大きくなるにつれて $\alpha_d = 0$ に近づくが、船首喫水を用いた場合その傾向が強い。 $\lambda/L_{pp}=0.5$ で α_d を比較すると船首喫水を用いた場合は約 0.082 と小さな値であるのに対して船尾喫水を用いた場合は約 0.973 と 1 に近い値である。船体中央の喫水を用いた場合は約 0.752 と中間的な値となった。また船首喫水の場合は $\lambda/L_{pp}=0.7$ で $\alpha_d = 0.012$ とほぼゼロに近い値となった。

次に波浪中抵抗増加の周波数応答関数を上記の 3 種類の喫水で計算した結果と実験結果を Fig.4 に示す。実験の設定波高は実船スケールで 2.15m 相当である。速度影響係数 C_U の値はこの応答関数の $\lambda/L_{pp}=0.3$ の値を用いて算出した値を用いた。船首部での喫水を用いた場合 $\lambda/L_{pp}=0.5 \sim 0.7$ 付近で実験値の約半分程度に過小評価となった。また船体中央部の喫水を用いた場合も $\lambda/L_{pp}=0.7$ 付近で過小評価する結果となった。一方船尾での喫水を用いた場合は実験値をよく表わしていることが分かる。これらのことは Fig.3 に示すとおり α_d の周波数影響による。

このことを考察すると、短波長域では船体運動は小さくディフラクション状態に近い。反射波抵抗増加とはディフラクション力を修正するために導入されたものである。ディフラクションは船体全体で生じているので反射波抵抗増加の計算には船体の最深部の喫水である船尾喫水を用いると、周波数影響が長波

長側まで及び、今回の場合適切に評価されていることが分かる。

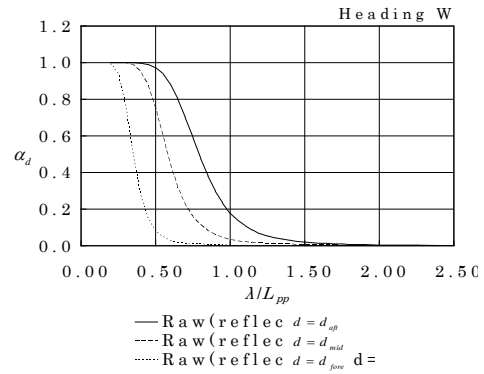


Fig.3 Draft effect of added resistance due to wave reflection

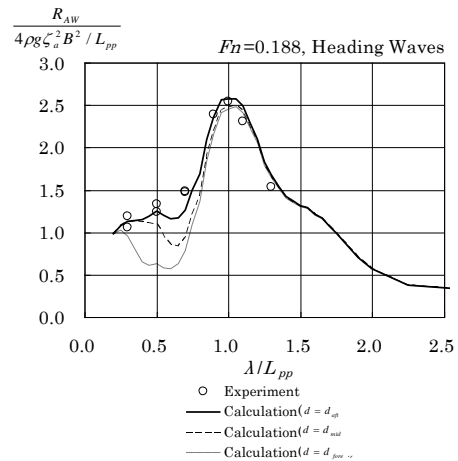


Fig. 4 Added resistance in regular waves

海の 10 モード指標の計算法をパナマックスバルクキャリアのバラスト状態に適用し検証した。その結果、バラスト状態の反射波抵抗増加の前進速度の影響は、満載状態と同様にフルード数の 1 乗の近似式で表わすことができることを示した。

またバラスト状態の波浪中抵抗増加の推定には、本手法の反射波抵抗増加の計算に船尾の喫水の値を用いると今回の場合、実験結果を説明することを示した。

(2) 船首部形状の違いによるローカルな波の攪乱と放射を調べるために粒子法による流体の数値解析プログラムを開発した。

また試験水槽で用いられる吸収式造波装置を参考に粒子法用の水波の透過境界条件を開発した。粒子法で波の計算を行う際に境界部の取り扱いが問題になる場合がある。特

に遠方への波の放射現象を伴う場合などである。粒子法や有限差分法などの数値解析手法では計算量の理由から無限遠方までの計算領域を扱うことは困難であり計算領域を有限で打ち切らねばならず、計算領域の周囲に人工的な境界が生じる。遠方への波の放射現象を計算する際に波がこの境界に入射すると非物理的な反射波が生じる場合があるため、何らかの波の透過境界条件もしくは波の減衰境界を用いる必要がある。計算格子を用いる手法ではすでに様々な無反射境界条件の手法が提案されているが、粒子法では研究例が少ない。反射波を低減するためによく用いられる方法として高粘性領域による入射波の減衰がある。この方法は反射波の低減に有効ではあるが、高粘性領域を設けることにより大きな計算領域を解く必要がある。MPS (Moving Particle Semi-implicit)法のような自由表面を伴う非圧縮性流れを解く粒子法では一般に空間解像度を可変にすることは容易ではなく、差分法などのように高粘性場を粗い解像度で解くことが難しく、高粘性場を設けることによる計算量の増大が負担になる。特に3次元計算においてはこの負担が顕著になる。そこで本研究では粒子法のための高粘性場を用いない波の透過境界条件を開発した。

方法として波の透過境界前面付近の水面高さを検出し波形解析することで境界部に入射する波の情報を取得し、その情報を基に境界部の粒子を波の解析解の速度で運動させることによって波のエネルギーを透過吸収させた。水波の透過境界面は流出・流入境界面となっており境界面の外側の領域は計算する必要がない。波の減衰領域は不要であり、高粘性領域の方法と比べて小さな計算領域で水波を計算することができ計算量を削減することができる。

本境界条件の特徴は、数値計算に波形解析の技術を導入した点と、波の透過境界を流入・流出境界として波の透過境界より外側の領域を計算不要にすることで計算量を削減した点にある。ただし本方法では透過境界付近での流場を線形の進行波で近似して計算を行う。そのため境界部において碎波が生じる場合や、流体中の渦の影響が大きい場合などは対象としていない。

波の流出境界部に位置する粒子には、次式で表わされる線形の進行波の解析解を、速度と圧力に関するディクレ境界条件として与えた。

$$\eta = A \cos(kx - \omega t + \theta) \quad (3)$$

$$\Phi = -\frac{Ac}{\sinh(kh)} \cosh[k(z+h)] \sin(kx - \omega t + \theta) \quad (4)$$

$$\frac{dx}{dt} = u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{Ack}{\sinh(kh)} \cosh[k(z+h)] \cos(kx - \omega t + \theta) \quad (5)$$

$$\frac{dz}{dt} = v = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{Ack}{\sinh(kh)} \sinh[k(z+h)] \sin(kx - \omega t + \theta) \quad (6)$$

$$c = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} \quad (7)$$

ここで波振幅 A と位相 c はフーリエ解析により求めた値を与える。ただし水平方向の流速に関しては式(3)をそのまま用いずに補正項 $-u_{c1}$ と $+u_{c2}$ を加えた次式の値を与えた。

$$u = \frac{Ack}{\sinh(kh)} \cosh[k(z+h)] \sin(kx - \omega t) - u_{c1} + u_{c2} \quad (8)$$

$$u_{c1} = \frac{a^2 \omega k \cosh 2k(z+h)}{2(\sinh kh)^2} \quad (9)$$

$$u_{c2} = C_{level} (h^* - h_0) \quad (10)$$

$$C_{level} = \frac{L_{wave} h_0}{T_{wave}} \quad (11)$$

ここで式(8)における右辺第2項の $-u_{c1}$ は質量輸送の成分を除去するための項である。進行波ではストークス・ドリフト (Stokes drift) とよばれる質量輸送が行われ、その質量輸送の平均速度は式(9)で表わされる。その速度ベクトルの方向は波の進行方向である。このストークス・ドリフトによる質量輸送成分を除去しなければ水槽内の流体量が減少してしまう。また式(8)における右辺第3項 $+u_{c2}$ は流体量の増減の抑制のための補正項である。右辺第2項により質量の減少が抑えられているが、境界部で粒子の流入と流出を行うため、長時間計算すると流体量が初期のものより増減する場合があります、その補正をこの によって行う。この項は式(10)のように現在の平均水位 h^* が計算初期の水位 h_0 に近づくように定めた。係数 C_{level} は式(11)のように入射波の1周期の時間 T_w で水槽内の流体量が初期量に戻るように定めた。

圧力に関しては、一般化されたベルヌーイの定理より求めた次式の値を波の透過境界部の粒子にディクレ境界条件として与えた。

$$P = -\rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} |\vec{u}|^2 + gz \right) \quad (12)$$

計算された水波の伝播の様子を Fig.5 に示す。Figure5(a)は固定壁による境界条件の場合である。造波板によって生成された右向きに伝わる波と、右側の固定壁で反射した左向きの波が重なり、定在波の状態になった。Figure5(b)は本研究で開発した波の透過境界条件を用いた場合の波の様子である。造波板によって生成された波が右向きに伝わり、計算領域の右端の透過境界を通り抜けている。

また定在波ではなく進行波になっている。ただし、今回のように平水時から造波すると1波目に水面高さの検出区間 L_{measure} よりも長い波長の波が発生する。この図からは分からないがこの1波目に関してはフーリエ解析によって十分な水面近似ができず反射が生じた。2波目以降に関してはこれらの反射はみられなかった。Figure 5(c)は高粘性領域による波の減衰を用いた場合の計算結果である。造波された波が右側に伝わり、高粘性領域で波の振幅が徐々に減衰していることが分かる。この方法では安定に波を消すことができ、また質量保存も完全に満たさせる長所がある。ただし波の減衰領域を長くする必要があり計算量が増大する短所があり、特に粒子法の3次元計算などでは計算負荷が高くなる。

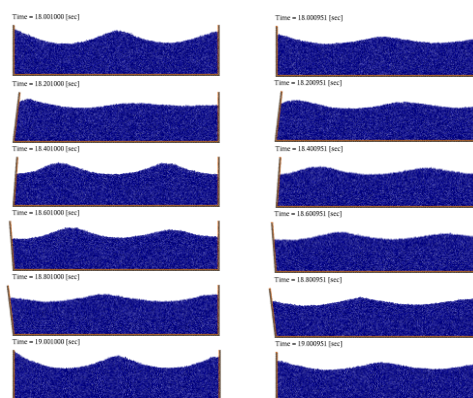
Figure 6は波の透過境界条件の計算の際に、式(1)によって近似された波の水面形状の例である。ここで横軸は水平座標を表し、 $x=0.0[\text{m}]$ は水槽右端の位置である。Figure 6より波の表面形状がフーリエ解析による cosine カーブによって似てきていることが分かる。

Figure 7は計算された波の表面形状の検出結果である。ここで横軸の原点である $x=0.00[\text{m}]$ の位置は、水槽の左端より $3.00[\text{m}]$ の位置を意味する。Figure 7(a)は固定壁境界の計算結果である。この図より、 $x=-0.37[\text{m}]$ と $x=-1.10[\text{m}]$ 付近で振幅が小さく節のようになっており、一方 $x=-0.74\text{m}$ 付近では逆に振幅が大きくなっていることが分かる。これは入射波が水槽右端の固定壁で反射し、反射波が入射波と重なることで定在波になったためである。一方、本研究で開発した波の透過条件を用いた場合 (Fig.7(b)) と、従来手法である高粘性による波の減衰領域を用いた場合 (Fig.7(c)) ではそのような振幅の節の部分はみられず、水波が定在せず時間とともに進行していることが分かる。

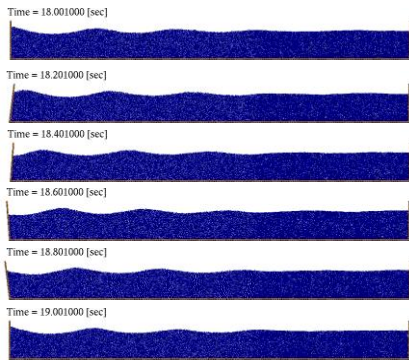
Figure 8(a)は水面高さの時間履歴である。水面高さの計測位置は、Fig.7における $x=-0.74[\text{m}]$ の位置である。3つの境界条件の結果を比較すると、固定壁の計算結果の振幅は他のものの2倍程度であることが分かる。これは固定壁によって入射波が反射され定在波となっていることに起因している。水面高さの検出位置が定在波中の振幅の大きい腹の部分に位置するため大きな振幅となった。一方 Fig.8(b)では、固定壁の振幅は他のものに比べて小さいことが分かる。これは波高の検出位置が $x=-0.37[\text{m}]$ の位置であり定在波中の振幅の小さい節の部分に位置するためである。また Fig.8(a)と Fig.8(b)において、本研究で開発した波の透過境界条件の波形と高粘性領域の境界条件の波形を比較すると、高粘性領域の境界条件の波形の平均水位が 1cm 程度高い傾向があるもののおおよそ一致しており、本研究で開発した波の透過境界条件は高粘性領域

の境界条件と同様に反射波を低減できていることが分かる。高粘性領域の平均水位が 1cm 程度 (粒子1つ分程度) 高い傾向がある原因として MPS 法での粒子振動が考えられる。粒子振動が生じると流体が幾分膨張するため、水面が高くなることが考えられる。一方、波の透過境界条件を用いた場合は平均水位が常に初期の高さに保たれるよう、式(8)の第3項に補正項 u_{e2} を加えており、この粒子振動に起因する平均水位の変化が生じず、波形に違いが生じたと考えられる。

計算量を比較すると、高粘性領域を用いた場合では波の減衰領域を設ける必要があり粒子数が $40,188$ 個必要なのに対して、本研究で提案している波の透過境界条件を用いた場合は小さな計算領域で解析可能であり粒子数が約 $16,200$ 個であった。計算時間を比較すると、高粘性領域を用いた場合では27時間56分必要なのに対して、波の透過境界条件を用いた場合では8時間28分と約30%の計算時間となった。今回の比較検証計算では、十分に波を減衰させるために高粘性領域を広くとっているために違いが大きく表れていることもあるが、本研究で提案した波の透過境界条件を用いることにより計算領域をコンパクトにすることができ計算量および計算時間を削減できることが示された。また Fig.8より波の透過境界条件では粒子の流出と流入を伴うため水槽内の流体量が波の位相により時間変化するが波周期の20倍程度の長時間の計算を行っても平均水位はほぼ初期のものに保たれていることが分かる。本研究で提案する波の透過境界条件は、波の透過境界において運動量やエネルギーを厳密に保存する方法ではないが、粒子法で水波を計算する際に計算量と計算時間を削減することができ、水波の高解像度計算を実用的に行うのに有用である。



(a) Fixed wall boundary (b) Transparent boundary



(c) High viscosity boundary
Fig. 5 Wave propagation

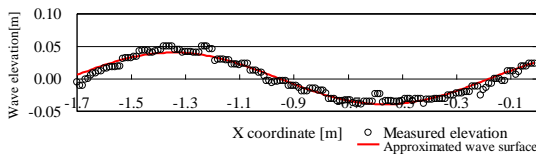
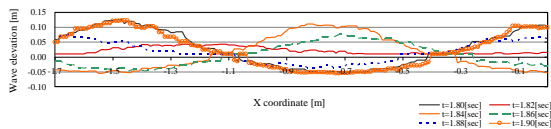
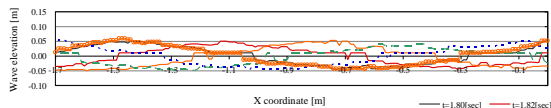


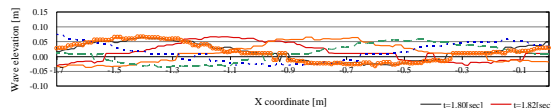
Fig. 6 Example of approximated wave surface



(a) Fixed wall boundary

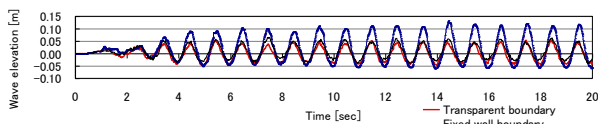


(b) Transparent boundary

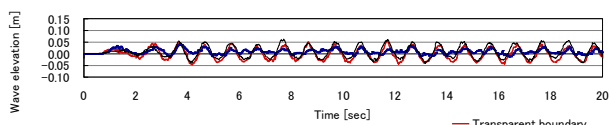


(c) High viscosity boundary

Fig. 7 Wave profile



(a) $x = -0.74$ [m]



(b) $x = -0.37$ [m]

Fig. 8 Wave elevation

粒子法で水波を計算するための透過境界条件を開発した。吸収式造波機の原理を数値計算に応用し、波の透過境界前面部の水位を取得し、線形の進行波として入射波の周波数成分を求め、その情報を基に境界部の粒子を運動させた。開発した境界条件を検証するために、進行波の伝播の計算を波周期が1.00[sec]の場合で行った。提案した波の透過境界条件を用いた計算結果を、固定壁の境界条件を用いた場合と、従来手法である高粘性領域によって反射波を抑制する場合と比較した。その結果、固定壁の境界条件を用いた場合には反射波が生じ定在波の状態になったのに対し、本手法の計算結果は高粘性領域を用いた方法と同様に進行波を透過し、反射波を抑制できることが示された。また高粘性領域による手法に比べて計算領域を小さくすることができ計算量と計算時間を削減できることを確認した。本方法により粒子法による水波の計算が従来と比べて高解像度でかつ短時間で実施可能になることが期待できる。本成果は波浪中抵抗増加を低減する船首形状の設計指針を得るための数値シミュレーション技術の開発に貢献するものである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① 柴田和也、越塚誠一、酒井幹夫、谷澤克治、辻本勝、粒子法による水波計算のための透過境界条件の開発、日本船舶海洋工学学会論文集(採択決定,印刷中)

〔学会発表〕(計3件)

- ① 柴田和也、辻本勝、船舶の波浪中抵抗増加計算のための粒子法による無反射境界条件の開発、計算工学講演会論文集 Vo1.14 (2009年5月)
- ② 柴田和也、辻本勝、高木健、バラスト状態での波浪中抵抗増加の推定、平成21年度日本船舶海洋工学学会春期講演会、日本船舶海洋工学学会春期講演会論文集、第8号(2009年5月)
- ③ 柴田和也、越塚誠一、酒井幹夫、谷澤克治、辻本勝、MPS法による水波の透過境界条件の検討、日本船舶海洋工学学会講演会論文集 第10号、論文番号 2010S-G11-5 (2010年6月7日(月)、8日(火))

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計3件）

①

名称：水槽試験データ解析用
フーリエ解析プログラム FAT

発明者：柴田和也

権利者：(独)海上技術安全研究所

種類：プログラム登録

番号：P第9555号-1

出願年月日：2008.2.27

国内外の別：国内

②

名称：大容量実船計測データ対応型
グラフ描画ソフトウェア GEL

発明者：柴田和也

権利者：(独)海上技術安全研究所

種類：プログラム登録

番号：P第9554号-1

出願年月日：2008.2.27

国内外の別：国内

③

名称：水槽試験用

データ解析区間設定プログラム MARK

発明者：柴田和也

権利者：(独)海上技術安全研究所

種類：プログラム登録

番号：P第9556号-1

出願年月日：2008.2.27

国内外の別：国内

〔その他〕

無

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 和也 (SHIBATA KAZUYA)

東京大学・大学院工学研究科・特任助教

研究者番号：30462873

(2) 研究分担者： 無

(3) 連携研究者： 無