

# 波浪荷重解析の精度向上に関する研究

西村 勝好\* 前田 泰自\* 望月 幸司\*  
島田 潔\*\* 丸山 文生\*\* 五十嵐 和之\*\*

## Study on Improvement of Accuracy of Wave Load Analysis

*Katsuyoshi NISHIMURA, Taiji MAEDA, Kouji MOCHIZUKI  
Kiyoshi SHIMADA, Fumio MARUYAMA, Kazuyuki IGARASHI*

Today, highly accurate wave load analysis is required to enhance safety and reliability of ship and offshore structures. Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. has added a function to calculate wave induced shearing force, bending moment and torsional moment of hull girders to our system, called “DREAMS”, of three-dimensional singularity distribution method. In comparison with model tests for a VLCC, it has been made clear that “DREAMS” can predict the wave bending moment and wave fluctuating pressure accurately enough. Furthermore, the following points are clarified, in comparison with results of our system, called “PLOW”, of strip method.

- 1) “DREAMS” can predict the wave bending moment more accurately than “PLOW”, since “DREAMS” considers the effect of force in longitudinal direction.
- 2) In case that the neutral axis of hull section is situated higher compared with the draft, the wave bending moment by strip method tends to be overestimated.

船舶及び海洋構造物の構造信頼性の向上を図るために、運動と波浪荷重の解析精度の一層の向上が求められている。本研究では、3次元特異点分布法による解析システム“DREAMS”に、単胴船の波浪断面力を計算できる機能を追加し、VLCCを対象に波浪荷重水槽試験による検証を行った。その結果、波浪変動圧、波浪断面力ともに十分な精度を有することを確認した。また、ストリップ法による解析システム“PLOW”との比較も行なうことにより、以下のことを明らかにした。

- 1) 縦曲げモーメントについて、3次元特異点分布法では、ストリップ法では考慮されない前後力の影響を考慮することによって、より精度の高い結果が得られる。
- 2) 船体の中性軸が喫水と比べて高い場合には、ストリップ法は、過大な縦曲げモーメントを与える傾向があり注意を要する。

### 1. はじめに

近年、商船の構造設計手法は、構造信頼性の向上を目指して、従来の規則算式による設計（Design by Rule）から、現象を直接数値解析することによる設計（Design by Analysis）へと変わりつつある。波浪荷重の推定精度向上は、それがDesign by Analysisに基づく設計手順の上流に位置し構造解析結果に大きな影響を与えることから、重要性を増してきている。

三井造船では、Design by Analysisに対応する解析システムとして船体構造解析トータルシステム（当社プログラム名：MISTRAL）<sup>1)</sup>を開発し、その中の運動・波浪荷重解析サブシステムとして、従来のストリップ法に波浪変動圧や波浪断面力などの波浪荷重の精度向上のための改良を取り入れた解析

システム（当社プログラム名；PLOW）を開発した。

商船の運動・波浪荷重解析には、その簡便性からストリップ法が広く用いられてきた。商船の波浪荷重で最も重要な縦曲げモーメントについても、ストリップ法は、これまでの成果<sup>2)</sup>によりある程度の精度を有していると考えられているが、あくまでも近似計算法であるため、その推定精度を十分に認識した上で用いる必要がある。ストリップ法以外の波浪荷重の解析手法の一つとして3次元特異点分布法がある。当社で開発した3次元特異点分布法による解析システム（当社プログラム名；DREAMS）<sup>3)</sup>は、形状が複雑な海洋構造物や半没水型双胴船<sup>4)</sup>などの解析に用いられてきた。

また、商船についても3次元特異点分布法による運動・波浪変動圧の解析が行われ、ストリップ法及び水槽試験との比較によってストリップ法の問題点が明らかにされると共に、ストリップ法の改良<sup>5)</sup>に利用されてきた。一方、波浪断面力については、浅喫水幅広船型において計算した例<sup>6)</sup>はあるが、一般船型についてストリップ法及び3次元特異点分布法

\* 船舶・艦艇事業本部 基本設計部

\*\* (株)三井造船昭島研究所 事業統括部

による計算結果と実験結果を比較検討した例は見られない。  
 そこで、筆者らは VLCC を対象に 6 分割模型を用いた波浪荷重の水槽試験を行って波浪断面力の特性を明らかにし、ストリップ法及び 3 次元特異点分布法との比較によって波浪断面力に対する 3 次元影響に関する検討を行った。

本報では、その概要を以下に示す。

2. 波浪荷重の解析システム

2.1 PLOW (ストリップ法)

PLOW において、初期のストリップ法に比べて改良された主な点は、次のとおりである。

波浪変動圧推定精度向上のために、従来のストリップ法のように radiation ポテンシャルを流用して diffraction ポテンシャルを求めるのではなく、diffraction 問題を直接解いている。また、2 次元特異点分布法を使用しており、任意断面形状への適用が可能である。

2.2 DREAMS (3 次元特異点分布法)

船舶のような細長い形状に限らず、任意形状の構造物に適用可能な解析システムとして、DREAMS が開発された。今回、単胴船の波浪断面力を計算できる機能を DREAMS に追加したが、DREAMS では構造物を 3 次元物体として厳密に取り扱うため、ストリップ法など 2 次元解析では考慮できない前後方向の流体力及び慣性力によって生じる縦曲げ及び水平曲げモーメントを考慮することができる。

上下、左右の剪断力、曲げモーメント及びねじりモーメントの船長方向分布は、任意点 (一般には中性軸) 回りの値として次式によって計算される。

$$VSF(x_0) = - \int_{AE}^{x_0} Pn_z ds - \int_{AE}^{x_0} (\ddot{Z}_H - x\ddot{\theta})m(x) dx \dots\dots\dots(1)$$

$$HSF(x_0) = - \int_{AE}^{x_0} Pn_y ds - \int_{AE}^{x_0} (\ddot{Y}_S + x\ddot{\phi})m(x) dx \dots\dots\dots(2)$$

$$VBM(x_0) = \int_{AE}^{x_0} \{(x_0 - x)n_z + (z - z_0)n_x\} Pds + \int_{AE}^{x_0} \{(x_0 - x)(\ddot{Z}_H - x\ddot{\theta}) - z_0\ddot{X}_S\} \cdot m(x) dx \dots\dots\dots(3)$$

$$HBM(x_0) = - \int_{AE}^{x_0} \{(x_0 - x)n_y + yn_x\} Pds - \int_{AE}^{x_0} (x_0 - x)(\ddot{Y}_S + x\ddot{\phi})m(x) dx \dots\dots\dots(4)$$

$$TM(x_0) = - \int_{AE}^{x_0} \{yn_z - zn_y\} Pds - \int_{AE}^{x_0} R_{xx}^2 \ddot{\phi}m(x) dx \dots\dots\dots(5)$$

ここで、  
 VSF : 縦剪断力                      HSF : 水平剪断力  
 VBM : 縦曲げモーメント        HBM : 水平曲げモーメント

- TM : ねじりモーメント      P : 変動圧
- X<sub>S</sub> : SURGE 変位              Y<sub>S</sub> : SWAY 変位
- Z<sub>H</sub> : HEAVE 変位              φ : ROLL 変位
- θ : PITCH 変位                ψ : YAW 変位
- ds : 船体表面の各要素の面積
- (n<sub>x</sub>, n<sub>y</sub>, n<sub>z</sub>) : 船体表面の各要素の方向余弦
- (x, y, z) : 船体表面の各要素の座標 (原点は重心)
- R<sub>xx</sub> : ROLL 環動半径
- m : 船体の船長方向質量分布
- x<sub>0</sub> : 計算点の船長方向座標
- z<sub>0</sub> : 縦曲げモーメント計算点の重心からの高さ
- AE : 船尾端の x 座標

である。積分は船尾から荷重を求める断面まで行うこととなる。それぞれの第 1 項は変動圧に基づく断面力であり、第 2 項は船体の慣性力に基づく断面力を示している。

3. 水槽試験

表 1 に主要目を示す縮尺 1/100 の VLCC 模型を用いて水槽試験を実施した。模型は図 1 に示すように 6 分割されており、各分割模型間には 3 mm のクリアランスを設けたのち、上部においてアルミ製角パイプで連結されている。角パイプには歪ゲージが貼付されており、各モードの断面力が計測される。

停船状態の規則波中の船体動揺、波浪断面力、変動圧力分布を計測した。計測項目と計測装置は次の通りである。なお、圧力計は図 2 に示す位置に配置した。

- 船体動揺 : 6 自由度運動計測装置
- 波浪断面力 : 背骨検力計 (歪ゲージ式)
- 変動圧 : 圧力計

規則波は、実機相当で周期 T=7~30 秒 (波長 λ = gT<sup>2</sup>/2π, g : 重力加速度), 波傾斜 1/50 及び 1/25, 波向 χ = 180~90 deg (30 deg ピッチ) とした。

4. 波浪荷重の推定精度の検証

VLCC を対象に水槽試験結果と PLOW 及び DREAMS の解析結果を比較し、運動、波浪荷重の推定精度について検証を行った。DREAMS で用いた解析モデルは図 3 に示すとおりである。

4.1 船体運動

DREAMS による船体運動の主な計算結果を、実験結果及び PLOW の計算結果と比較して図 4 に示す。ここで、並進運動及び回転運動は、それぞれ入射波の振幅 (ξ) 及び最大

表 1 供試模型主要目  
 Principal Dimension of Segmented Model of VLCC  
 (縮尺 : 1/100)

	実機	模型
船長 L	318 m	3180 mm
船幅 B	60 m	600 mm
型深さ D	28.8 m	288 mm
喫水 d	18.8 m	188 mm

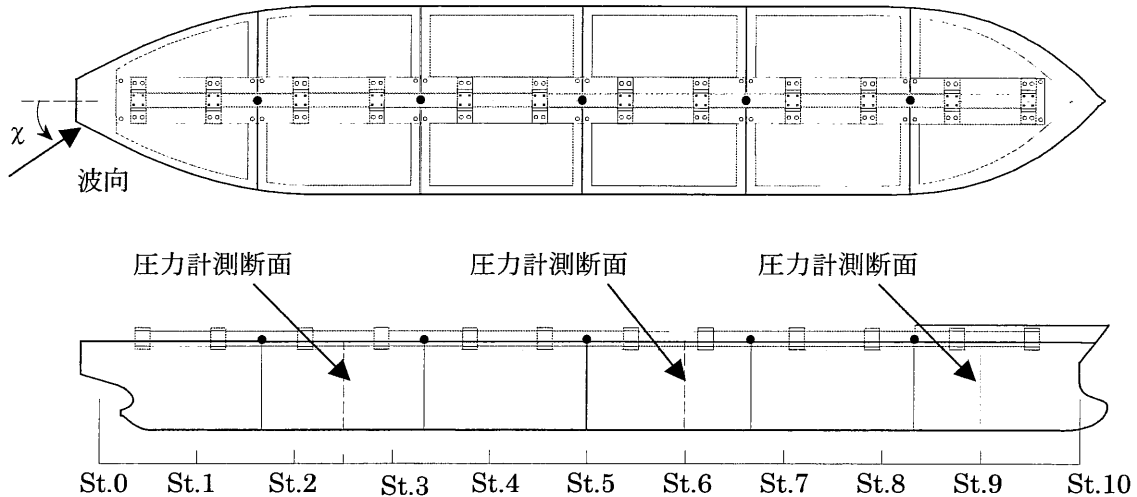


図1 供試模型  
Segmented Model of VLCC

SQ.ST	圧力計測点				
	±80deg	±65deg	±60deg	±50deg	0deg
2.5	○	—	○	—	○
6	○	○	—	○	○
9	○	○	—	○	○

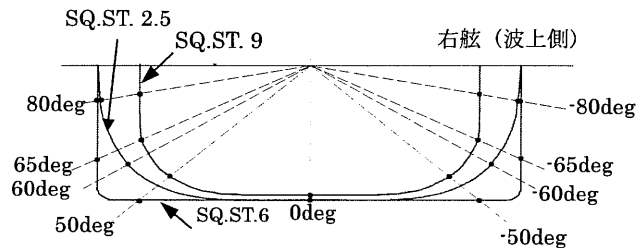


図2 圧力計測位置  
Location of Pressure Gauge

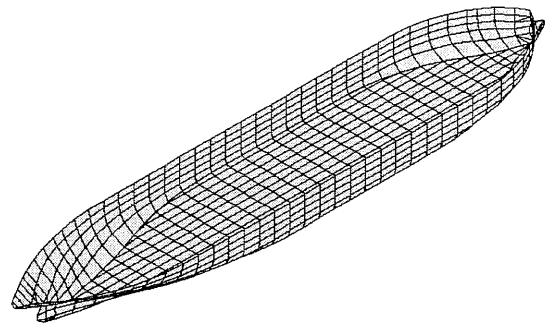


図3 DREAMS で用いた解析モデル  
Mesh Division of Model for "DREAMS"

波傾斜 ( $k\zeta$ ) で無次元化して表示している。これらの図から、DREAMS による計算結果は、全ての運動について実験結果を良好に説明していることが分かる。PLOW による計算結果も、ほぼ実験結果を良好に説明しているが、SURGE については、DREAMS に比べて推定精度が若干低くなっている。これは、DREAMS では前後方向に作用する流体力を厳密に境界値問題を解いて求めているが、2次元理論に基づく PLOW では簡易的な手法により求めているためと考えられる。

#### 4.2 波浪変動圧

波浪変動圧の比較を、入射波の水頭 ( $\rho g \zeta$ ) で無次元化して図5に示す。全般に、PLOW も DREAMS と同等の計算結果が得られており、水槽試験ともよく一致している。これは、PLOW では2次元特異点分布法を用いて断面形状を正確に考慮しているためと考えられる。しかし、向波(波向 180 deg.) 及び斜め向波(波向 150 deg.) における船尾部(SQ.ST.2.5)の波浪変動圧については、DREAMS に比べて

PLOW の結果は水槽試験との一致度が若干悪くなっている。これは、入射波が船首から船尾方向に進行する際に船体表面で反射することによって入射波が減衰するなどの船体との3次元的な干渉が生じるため、2次元理論をベースとする PLOW の推定精度が悪くなったものと考えられる。

#### 4.3 波浪断面力

MIDSHIP における縦曲げモーメント、水平曲げモーメント及びねじりモーメントの比較を、水頭×船幅×船長<sup>2</sup> ( $\rho g \zeta BL^2$ ) で無次元化して図6に示す。なお、縦曲げモーメントの計算点高さは、DREAMS では検力計位置に一致させたが、PLOW では計算点高さの影響は考慮されない。

各モーメントとも、DREAMS と PLOW による計算結果は、ピーク近傍を除いて、水槽試験結果とほぼ一致している。縦曲げモーメントについては、構造設計において特に重要な波浪断面力であり、この程度のピーク値の違いでも構造設計に及ぼす影響は大きいため、以下に考察を行う。

DREAMS が水槽試験結果を良好に説明しているのに対して、PLOW が DREAMS 及び水槽試験結果に比べて大きい値を与える傾向が見られる。その原因を調べるために、縦曲げモーメントの船長方向分布について検討した。図7はピーク

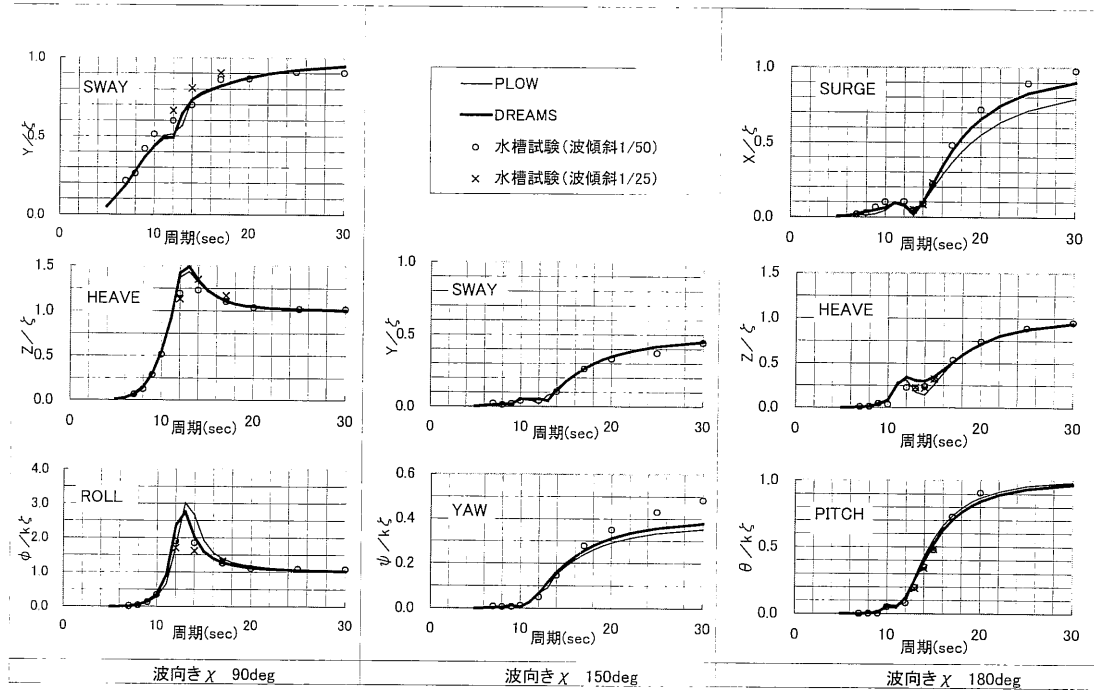


図4 船体運動の周波数応答関数(振幅)  
Ship Motion

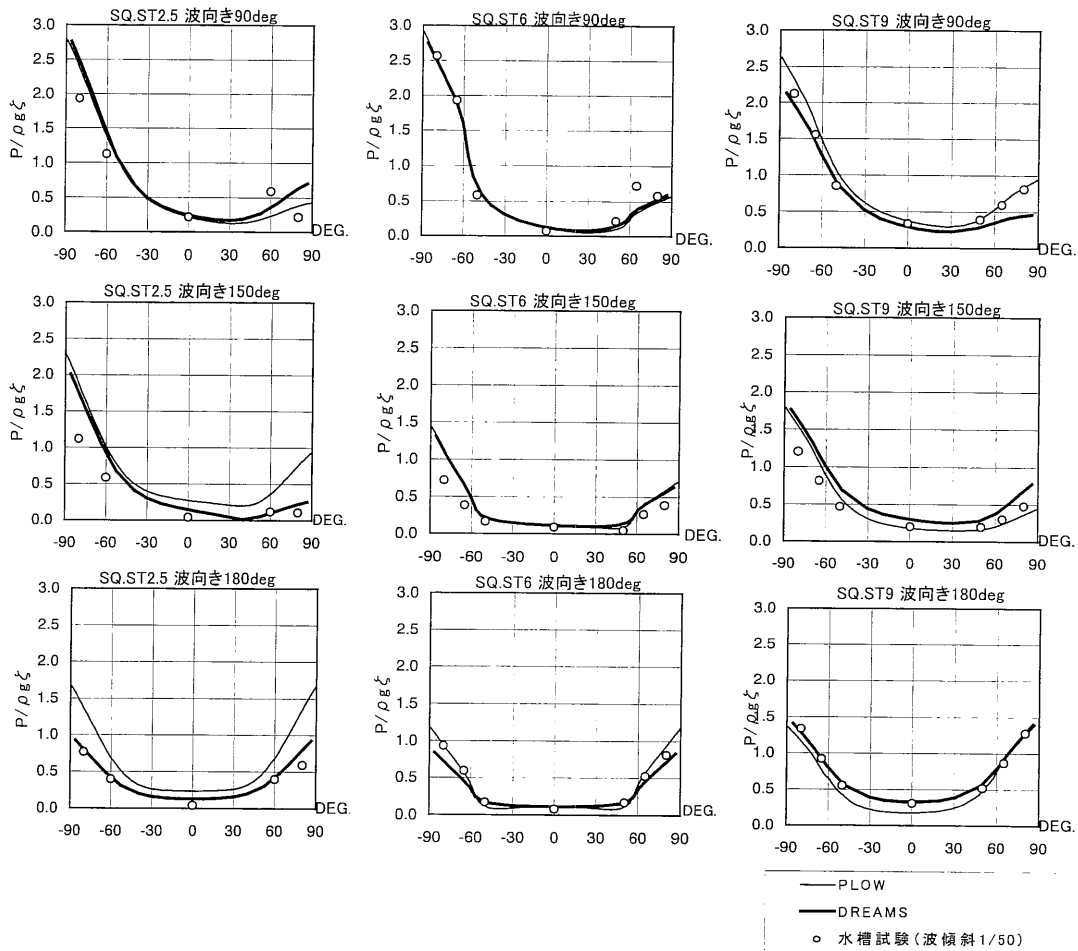


図5 波浪変動圧(周期 10 sec)の断面分布  
Wave Pressure Distribution (T=10 sec)

値近傍の波周期（15秒）における分布を示す。PLOWでは船体中央部で最大の縦曲げモーメントが発生し、船首・船尾側に行くにつれて単調に減少している。一方、DREAMSでは船体中央部の最大モーメントからの減少が船尾側に比べて船首側で大きくなり、船首付近で小さなピークが見られている。DREAMSによる計算結果は、水槽試験結果とも定量的に良く一致している。

PLOWが、DREAMSと異なる原因として、変動圧による上下方向の流体力のみを考慮し、前後方向の流体力及び慣性力を無視していることが考えられる。図8に示すように、船首近傍の変動圧が正圧と考えると、上下方向の流体力( $F_1$ )によるモーメントはサギングであるのに対し、前後方向の流体力( $F_2$ )によるモーメントは、縦曲げモーメントの計算点高さが前後方向の流体力の作用位置よりも高い場合にはホギングとなるため、互いに打ち消しあう方向に作用し、縦曲げモーメントを低減させることになる。

図9は、縦曲げモーメントの計算点高さを変化させて実施したDREAMSとPLOWの計算結果を比較したものである。DREAMSの計算結果では、縦曲げモーメントの計算点高さが低くなるに従い、船体中央のピーク値が大きくなると共に、

船首部の小さなピークが消えて行く傾向が見られる。特に前後力が縦曲げモーメントに寄与しない前後力の着点中心に近い位置の計算点ほど、DREAMSによる縦曲げモーメントの計算結果が、PLOWの計算結果に近くなっており、上記考察の妥当性が確認できたと考えられる。

構造設計では、船体中性軸高さにおける縦曲げモーメントを用いるが、上記のことは、船体中性軸位置が前後力の着点中心より離れている場合には、前後力の影響によってストリップ法による縦曲げモーメントの推定精度が落ちることを示しており、注意が必要である。

5. ま と め

VLCCの波浪荷重について、ストリップ法、3次元特異点分布法による解析と実験の比較を行い、以下のことが確認された。

- 1) 3次元特異点分布法については、波浪変動圧、波浪断面力ともに十分な推定精度を有する。
- 2) ストリップ法については、以下の点を除いて、3次元特異点分布法同様、商船の波浪荷重解析法として、十分な推定精度を有することが確認された。

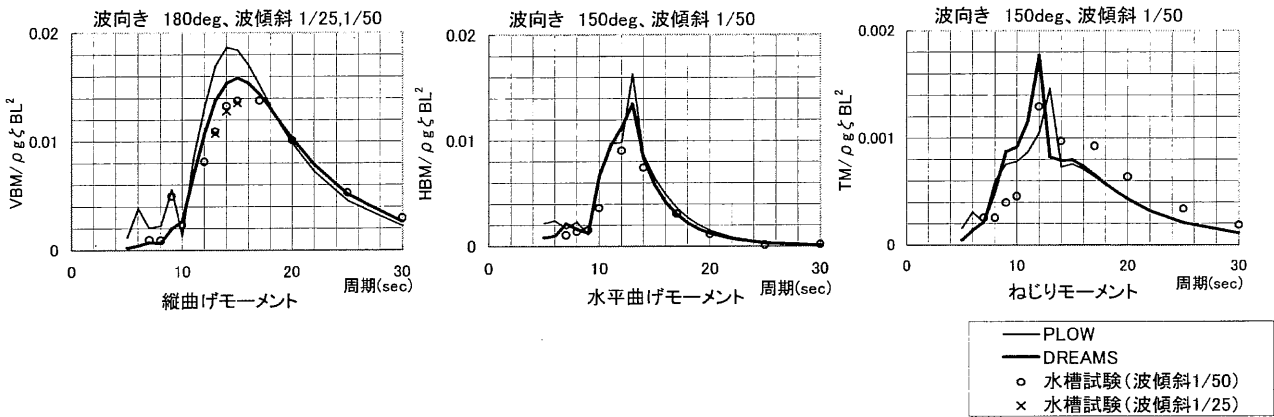


図6 波浪断面力(ST.5)の周波数応答関数(振幅)  
Wave Induced Moment of Hull Girder at Midship

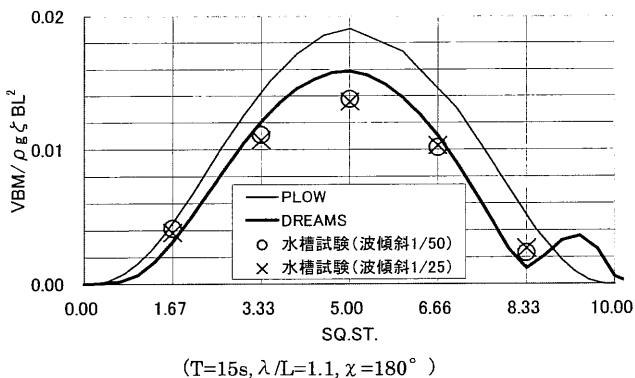


図7 縦曲げモーメントの船長方向分布  
Vertical Bending Moment Distribution

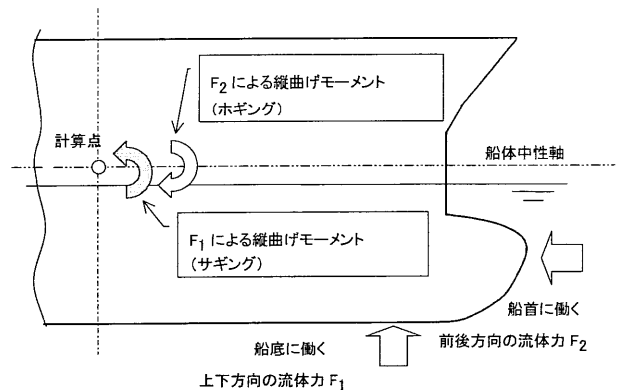


図8 前後力の縦曲げモーメントに対する作用  
Force in Longitudinal Direction Acting as Vertical Bending Moment

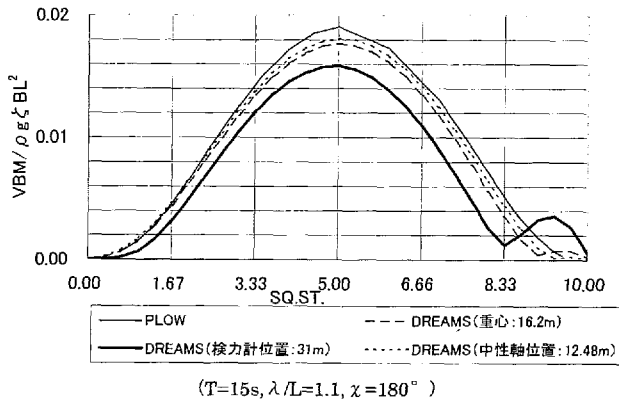


図9 縦曲げモーメントの船長方向分布計算点高さの影響  
Influence of Calculation Point Height on Vertical Bending Moment Distribution

- a) 向波中の船底の波浪変動圧については、ストリップ法では入射波と船体の3次元干渉が考慮されないため、3次元特異点分布法に比べてやや精度が落ちる。
- b) 縦曲げモーメントについては、ストリップ法では前後力の影響が考慮されないため、3次元特異点分布法に比べて精度が落ちる。特に、船体の中性軸が喫水と比べて高い船については、ストリップ法では過大評価となる傾向にあり注意が必要である。
- 上記 a), b)については、今後、ストリップ法でも、これら

の影響を簡便に考慮することによって、3次元特異点分布法に近い推定精度を得られるように改良を行う予定である。

また、航走中の運動、波浪変動圧、波浪荷重についても、実験とストリップ法及び3次元特異点分布法による解析結果との比較を行うことにより、解析精度を検証する予定である。

#### 参考文献

- 1) 仁保. ほか: 新しい船体構造解析トータルシステムの開発(第1報), 三井造船技報, 157(1996), p. 1
- 2) 渡. ほか: ストリップ法, 耐航性理論の設計への応用, 運動性能研究委員会, 第11回シンポジウム, (1994), p. 167
- 3) 小林. ほか: 海洋構造物の波浪中応答計算システム“DREAMS”, 三井造船技報, 126(1985), p. 1
- 4) 小林. ほか: 前進速度を有するSSC船型に働く波浪荷重, 日本造船学会論文集, 168(1990), p. 159
- 5) 伊藤. ほか: 肥大船の短波長域における波浪変動圧について, 日本造船学会論文集, 166(1989), p. 233
- 6) 野尻: 3次元浮体に働く変動圧力および波浪荷重の研究, 日本造船学会論文集, 148(1979), p. 54

[問い合わせ先]

船舶・艦艇事業本部 基本設計部  
TEL 0436-42-6423 西村 勝好