

前進速度を有する SSC 船型に働く波浪荷重

正員 小林 正典* 正員 島田 潔*
正員 西村 勝好**

Wave loads on a Semi-Submerged Catamaran (SSC) with forward speed

by Masanori Kobayashi, *Member* Kiyoshi Shimada, *Member*
Katsuyoshi Nishimura, *Member*

Summary

A 3-D source method is applied for computing wave loads on the cross structure of a Semi-submerged Catamaran, SSC (or Small Waterplane-Area Twin Hull, SWATH) running in regular waves. The 3-D Green function with forward speed, which has been prohibitively time consuming to apply to a SSC problem, is used with the aid of the steepest descent method¹⁾.

Among wave loads, a side force, which squeezes and splits two demihulls of a SSC, is crucially important in the strength design phase because of the SSC's distinctive configuration. It is shown by both theoretical computations and model experiments that the side force drastically decreases when the SSC is running. This is explained by that hydrodynamic interactions between the two demihulls, which are due to the action of free waves from one demihull to the other, decrease in the existence of the forward speed because some of the free waves flow downstream without reaching the other demihull.

Fluctuating pressure distributions on SSC surface, which contribute to wave loads, are computed and discussed. Some of the computed results are successfully compared with experimental ones.

1. ま え が き

半没水型双胴船(SSC: Semi-submerged Catamaran または SWATH: Small-Waterplane-Area Twin Hull, 以下 SSC と略す。)は耐航性能にすぐれ、甲板面積が広いことなどから調査船、客船等の各種用途に広く用いられている。SSC は、没水体(ローハル)と流線形のストラットからなる双胴とそれを連結するデッキから構成されており、その構造的特徴から SSC の構造設計においては縦強度よりも横強度が重要である。したがって、SSC に作用する波浪荷重の内、双胴を互いに近づけたり離したりする横方向の成分(Side Force)を精度良く推定することが、構造設計上非常に重要となる。

SSC を含む双胴船に働く波浪荷重の推定には、今まで2次元流体力をベースとした計算法が適用され、計算結果が示されている¹⁻³⁾。また、降伏強度や座屈強度と共に疲労強

度も重要であり、疲労強度評価のための Side Force の設計荷重の推定式が、停止時に対する応答関数を用いて示されている⁴⁾。しかし、SSC は双胴間の流体力学的干渉効果のために、船速、波入射角および波周期の各条件によって波浪荷重の特性が大きく変化する。特に、双胴間の流体力学的干渉効果は船速の影響を顕著に受ける。一般に、停止時横波中では双胴間の干渉効果が大きいため、Side Force は大きくなるが、航走時には双胴間の干渉効果が小さいため、Side Force は小さくなる傾向がある。降伏や座屈といった最大値を対象とした強度評価では停止時の大きい波浪荷重を用いるとしても、疲労強度のように船が一生の間に遭遇する波浪荷重の履歴を対象とする場合には、停止時の波浪荷重を用いることは過大評価になると考えられる。2次元理論では双胴間の干渉効果に及ぼす船速影響が合理的に考慮できないため、SSC の強度評価を合理的に行うためには船速影響を考慮した3次元理論が必要となる。

ここでは3次元特異点分布法による停止時の波浪中応答計算システム⁵⁾を、前進速度がある場合の3次元特異点分布法⁶⁾によって拡張し、波浪荷重を求めた。また、停止時お

* (株)三井造船昭島研究所

** 三井造船(株)特機システム事業部

よび航走時の模型実験を実施し、計算結果と実験結果の比較を行った。さらに、波浪荷重の原因となる船体周りの変動圧分布についても、計算によってその特性を明らかにすると共に、一部計算結果と実験結果の比較を行った。なお、3次元特異点分布法で用いるグリーン関数の計算は、前進速度がある場合には莫大な計算時間がかかるため、ここではグリーン関数の積分を最急降下線に沿って行う高速化手法⁷⁾を用いた。これによって、船体形状が複雑、かつ双胴であるために船体形状を表す特異点が多数必要となるSSCに対しても、3次元特異点分布法を適用することが可能となった。

2. 定式化

2.1 座標系

まず、静止水面内に \bar{X} 軸と \bar{Y} 軸を有し、鉛直上方に \bar{Z} 軸を採った。原点を \bar{O} とする空間固定座標系 $\bar{O}-\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ を考える。 \bar{X} 軸に対して α の角度(\bar{X} 軸の正方向に進行する場合が 0°)を持って進行する規則波の中を、SSCが一定速度 U で \bar{X} 軸の正方向に前進しているものとする。次に、SSCと同じ一定速度 U で \bar{X} 軸の正方向に移動する5種の等速移動座標系

- (1) $G-X_G Y_G Z_G$
- (2) $G_L-X_L Y_L Z_L$
- (3) $G_R-X_R Y_R Z_R$
- (4) $O-XYZ$

(5) $D-X_D Y_D Z_D$

を考える。これら5種の等速移動座標系の原点はすべて同じ $\bar{Y}\bar{Z}$ 面内にあり、 G 点はSSCの重心、 G_L 点および G_R 点はSSCを中心線で左右に分割した場合の、それぞれ左右舷の重心、 O 点は G 点直下の静止水面の点、 D 点は今回波浪荷重の6分力を求める点として選定した G 点直上のデッキ内の点である。座標軸 X_G, X_L, X_R, X および X_D は、SSCの進行方向へ水平に採り、 Y_G, Y_L, Y_R, Y および Y_D は、左舷方向へ水平に採る。また、 Z_G, Z_L, Z_R, Z および Z_D は、鉛直上方へ採る。これらの等速移動座標系は、平行移動によって空間固定座標系 $\bar{O}-\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ と一致する。なお、空間固定座標系および等速座標系の位置関係は、Fig.1に示す通りである。

2.2 運動方程式

規則波中を動揺しながら一定速度で航走するSSCのデッキに生じる波浪荷重は、船体に作用する波圧、船体運動に伴う流体反力、船体運動に伴う船体自身の慣性力から成っている。SSCの波浪荷重を考えるために、まずSSCの運動方程式を考えることとする。

一般に、規則波中を動揺しながら一定速度で航走する船体の重心回りの6自由度運動方程式は、微小振幅理論の下で次のように表せる。

$$[A][\ddot{X}] + [B][\dot{X}] + [C][X] + [D] = [F] \quad (1)$$

ここで、

$[A]$: 慣性マトリックス

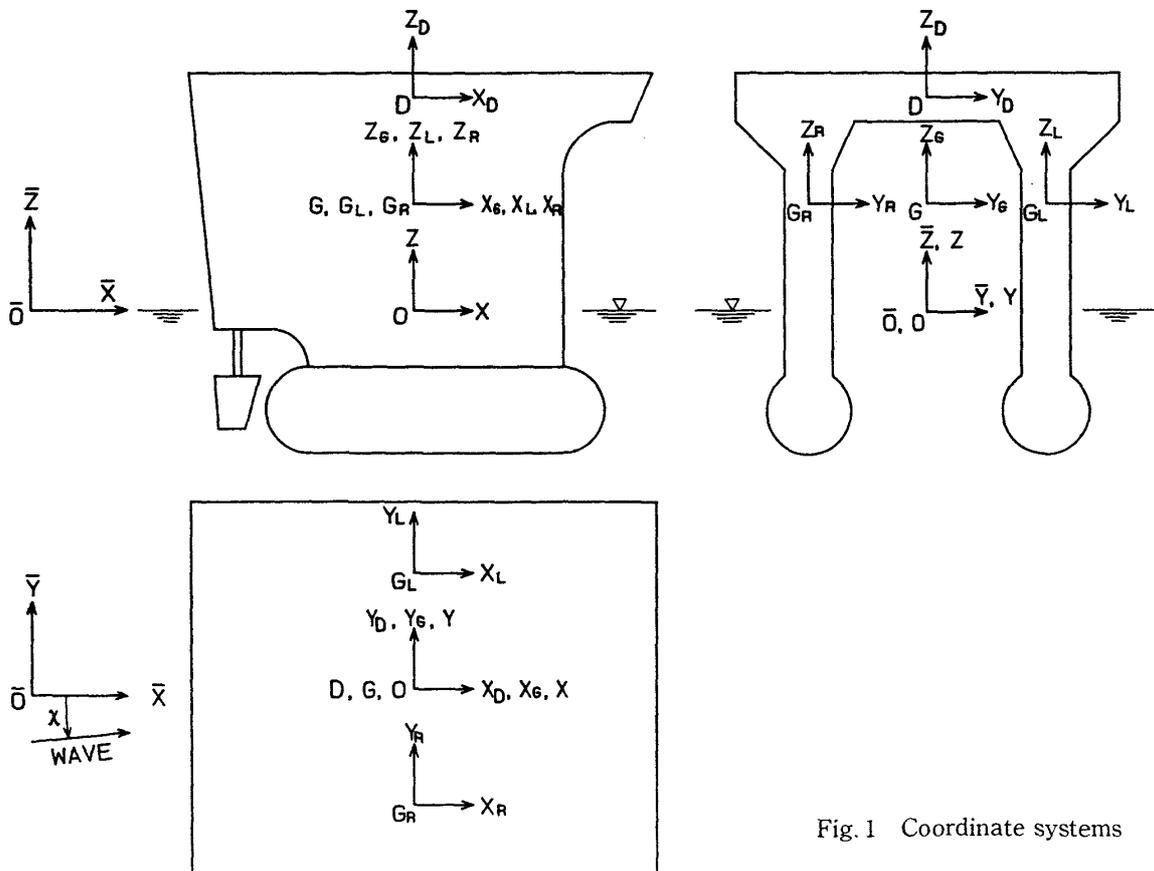


Fig. 1 Coordinate systems

- [B]: 減衰マトリックス
 [C]: 復元マトリックス
 [D]: 非線形減衰力ベクトル
 [F]: 波強制力ベクトル
 [X]: 変位ベクトル
 [Ẋ]: 速度ベクトル
 [Ẍ]: 加速度ベクトル

であり、変位ベクトル [X] は、 $X_1 =$ 前後揺れ x , $X_2 =$ 左右揺れ y , $X_3 =$ 上下揺れ z , $X_4 =$ 横揺れ ϕ , $X_5 =$ 縦揺れ θ , $X_6 =$ 船首揺れ ψ の 6 モードからなっている。[A], [B] および [F] は、船体自身の慣性力と流体力に関するものであり、流体力関連のものについては以下に示すように、3次元特異点分布法によって境界値問題を解いて求めることとする。

2.3 境界条件

船体が規則波中を一定速度で前進しながら正弦運動する調和振動問題を考えることとする。船体周りの非定常流場を表す速度ポテンシャル Φ は、入射波ポテンシャル Φ_w , ディフラクション・ポテンシャル Φ_D , ラディエーション・ポテンシャル Φ_{Rj} の線形結合として次のように表すことができる。

$$\Phi \exp(i\omega_e t) = \left(\Phi_w + \Phi_D + \sum_{j=1}^6 \Phi_{Rj} \right) \exp(i\omega_e t) \quad (2)$$

ここで、

ω_e : 出会い円周波数

t : 時間

であり、 $\exp(i\omega_e t)$ は航走する船体が規則波と ω_e の円周波数で出会うことを示している。また、ラディエーション・ポテンシャルの $j=1 \sim 6$ は、それぞれ前後揺れ、左右揺れ、上下揺れ、横揺れ、縦揺れ、船首揺れの 6 モードを表している。

規則波の振幅、円周波数、入射角を、それぞれ ζ_A , ω , χ とすると、等速移動座標系 $O\text{-}XYZ$ において、入射波速度ポテンシャルは次式で表せる。

$$\Phi_w = \frac{i\zeta_A \omega}{K} \exp\{KZ - iK(X \cos \chi + Y \sin \chi)\} \quad (3)$$

ここで、

K : 波数 ($=\omega^2/g$, g は重力加速度)

$\omega_e = \omega - KU \cos \chi$

の関係がある。

まず、ディフラクション・ポテンシャル Φ_D およびラディエーション・ポテンシャル Φ_{Rj} は、流体領域内でラプラスの方程式

$$\nabla^2 \Phi_D = \nabla^2 \Phi_{Rj} = 0 \quad (j=1 \sim 6) \quad (4)$$

を満足しなければならない。また、境界条件として、以下に示す I) 自由表面条件, II) 船体表面条件, III) 水底条件および放射条件を満足する必要がある。

I) 自由表面条件

$$\left. \begin{aligned} & \left\{ \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial X} \right)^2 + \mu \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial X} \right) \right. \\ & \quad \left. + g \frac{\partial}{\partial Z} \right\} \Phi_D = 0 \\ & \left\{ \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial X} \right)^2 + \mu \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial X} \right) \right. \\ & \quad \left. + g \frac{\partial}{\partial Z} \right\} \Phi_{Rj} = 0 \quad (j=1 \sim 6) \end{aligned} \right\} \text{on } Z=0 \quad (5)$$

ここで、 μ は Rayleigh の仮想摩擦係数であり、これを用いることによって放射条件も満足させることができる。

II) 船体表面条件

$$\frac{\partial \Phi_D}{\partial n} = -\frac{\partial \Phi_w}{\partial n}$$

$$\frac{\partial \Phi_{Rj}}{\partial n} = i\omega_e X_j \alpha_j \cdot n - UX_j \frac{\partial \alpha_j}{\partial X} \cdot n \quad (j=1 \sim 6) \quad (6)$$

X_j : 6 自由度運動

$$\alpha_j = \begin{cases} e_j & (j=1 \sim 3) \\ e_{j-3} \times r & (j=4 \sim 6) \end{cases} \quad (7)$$

e_j : X, Y, Z 軸方向の単位ベクトル

r : 船体表面の位置ベクトル

n : 船体表面に立てた法線ベクトル

III) 水底条件

$$\frac{\partial \Phi_D}{\partial Z} = \frac{\partial \Phi_{Rj}}{\partial Z} = 0 \quad (j=1 \sim 6) \text{ as } Z \rightarrow -\infty \quad (8)$$

2.4 積分方程式

流体領域内の P 点における速度ポテンシャル $\Phi_D(P)$ および $\Phi_{Rj}(P)$ を、船体表面上の特異点分布 $\sigma(Q)$ とグリーン関数 G を用いて次のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_D(P) &= \frac{1}{4\pi} \int \sigma_D(Q) G(P, Q) ds \\ \Phi_{Rj}(P) &= \frac{1}{4\pi} \int \sigma_{Rj}(Q) G(P, Q) ds \quad (j=1 \sim 6) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここで、SSC のストラットが十分薄い場合、前進速度がある場合に現れて来る線積分の項を微小であると仮定して省略している。なお、グリーン関数 $G(P, Q)$ は、前進速度がある場合とない場合について、それぞれ (10) 式および (11) 式で表せる。

(前進速度がない場合)

$$\left. \begin{aligned} & G(P(X, Y, Z), Q(X', Y', Z')) \\ &= \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \\ & \quad - \pi K \exp\{K(Z+Z')\} \{H_0(KR_0) + N_0(KR_0)\} \\ & \quad - 2K \exp\{K(Z+Z')\} \int_0^{-Z-Z'} \frac{\exp(Kv)}{\sqrt{v^2 + R_0^2}} dv \\ & \quad - 2\pi i K \exp\{K(Z+Z')\} J_0(KR_0) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここで、

(X, Y, Z) : 流体領域内の点の (X, Y, Z) 座標

(X', Y', Z') : 船体表面上の点の (X, Y, Z) 座標

$$\left. \begin{aligned} R \\ R' \end{aligned} \right\} = \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2 + (Z \mp Z')^2}$$

$$R_0 = \sqrt{(X - X')^2 + (Y - Y')^2}$$

J_0 : 第1種ベッセル関数

N_0 : 第2種ベッセル関数

H_0 : ストルブ関数

である。

(前進速度がある場合)

$$\begin{aligned} G(P(X, Y, Z), Q(X', Y', Z'))^8 \\ = \frac{1}{R} - \frac{1}{R'} - 2iK_0 T(\xi, \eta, \kappa) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} T(\xi, \eta, \kappa) &= \int_{\beta-\pi}^{-\frac{\pi}{2}+\tau-i\epsilon} \frac{1}{\sqrt{1+4\tau \cos \delta}} \\ &\quad \{k_2 \exp(k_2\nu) - \text{sgn}(\cos \delta) k_1 \exp(k_1\nu)\} d\delta \\ \left. \begin{aligned} K_1 \\ K_2 \end{aligned} \right\} &= \frac{1}{2 \cos^2 \delta} (1 + 2\tau \cos \delta \pm \sqrt{1+4\tau \cos \delta}) \\ \beta &= \begin{cases} \cos^{-1}(1/4\tau) & (4\tau > 1) \\ -i \cosh^{-1}(1/4\tau) & (4\tau < 1) \end{cases} \\ \gamma &= \cos^{-1} \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \quad (0 \leq \gamma \leq \pi) \\ \epsilon &= \sinh^{-1} \frac{|K|}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \\ \nu &= \kappa + i(\xi \cos \delta + \eta \sin \delta) \\ \tau &= \frac{U\omega_e}{g} \\ K_0 &= \frac{g}{U^2} \\ \xi &= K_0(X - X') \\ \eta &= K_0|Y - Y'| \\ \kappa &= K_0(Z + Z') \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

である。(10)式および(11)式のグリーン関数 $G(P, Q)$ は、船体表面条件以外のすべての条件を満足しているものである。

次に、ディフラクション・ポテンシャル Φ_D とラディエーション・ポテンシャル Φ_{Rj} に船体表面条件を課すと、(13)式に示す $\sigma_D(P)$ および $\sigma_{Rj}(P)$ に関する積分方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Phi_D(P)}{\partial n} &= \frac{1}{2} \sigma_D(P) \\ &+ \frac{1}{4\pi} \int \sigma_D(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} ds \\ \frac{\partial \Phi_{Rj}(P)}{\partial n} &= \frac{1}{2} \sigma_{Rj}(P) \\ &+ \frac{1}{4\pi} \int \sigma_{Rj}(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} ds \quad (j=1 \sim 6) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここで、船体表面を N 個の平面要素に分割し、各要素上で特異点強さ σ が一定とすると、(13)式は σ についての N 元の連立方程式となり、 σ を決定することができる。離散化された σ_D, σ_{Rj} に関する連立方程式は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} \sigma_D(P_m) + \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N \sigma_D(Q_n) \\ \frac{\partial G(P_m, Q_n)}{\partial n} \Delta S = \frac{\partial \Phi_D(P_m)}{\partial n} \\ \frac{1}{2} \sigma_{Rj}(P_m) + \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N \sigma_{Rj}(Q_n) \\ \frac{\partial G(P_m, Q_n)}{\partial n} \Delta S = \frac{\partial \Phi_{Rj}(P_m)}{\partial n} \quad (j=1 \sim 6) \end{aligned} \right\} \quad (m=1 \sim N) \quad (14)$$

となる。ここで、 P_m は船体表面上の境界条件を合わせる点であり、 Q_n は船体表面上に分布された特異点の位置を示している。この解法については文献6)の方法によることとする。

2.5 波浪荷重

(14)式の積分方程式を解き、 σ が決定できれば、船体に働く圧力分布、流体力等が計算できることとなる。次に、SSCの波浪荷重を計算するために、Fig.2に示すようにデッキ中央部で両舷を分割し、左右の単胴のそれぞれの運動を考えることとする。各単胴に作用する力は、流体力の他に他方の単胴から受ける内力があり、この内力がデッキに生じる波浪荷重となる。それぞれ片舷の重心回りの運動方程式は、流体力と内力を用いて次のように表せる。

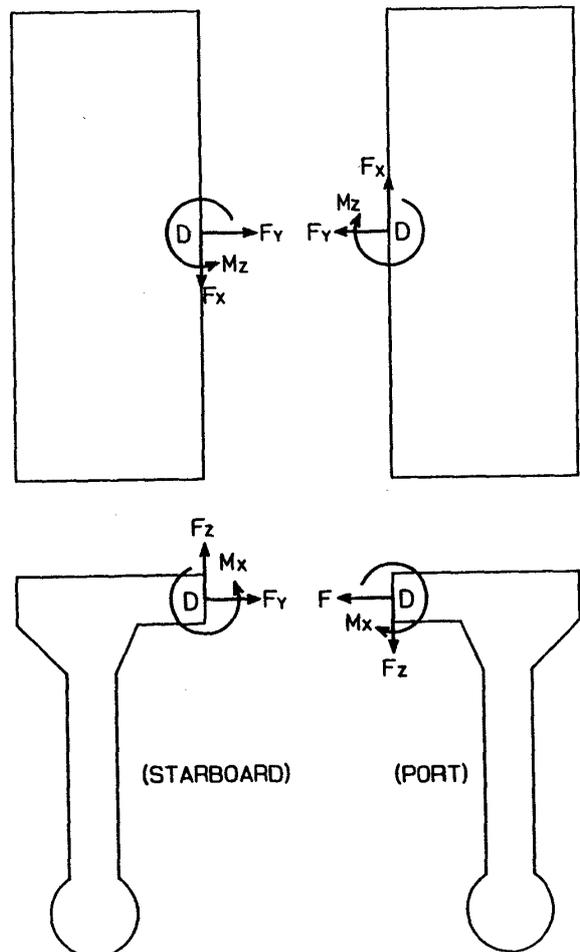


Fig. 2 Wave loads on the cross deck

(左舷)

$$\left. \begin{aligned} \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \ddot{x}_L \\ \ddot{y}_L \\ \ddot{z}_L \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} F_{L1} - F_X \\ F_{L2} - F_Y \\ F_{L3} - F_Z \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_{44} & i_{45} & i_{46} \\ i_{54} & i_{55} & i_{56} \\ i_{64} & i_{65} & i_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_L \\ \ddot{\theta}_L \\ \ddot{\psi}_L \end{bmatrix} &= \\ \begin{bmatrix} F_{L4} - M_X + l_y(-F_{L3} + F_Z) + l_z F_Y \\ F_{L5} - M_Y - l_z F_X \\ F_{L6} - M_Z - l_y(-F_{L1} + F_X) \end{bmatrix} & \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

(右舷)

$$\left. \begin{aligned} \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \ddot{x}_R \\ \ddot{y}_R \\ \ddot{z}_R \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} F_{R1} + F_X \\ F_{R2} + F_Y \\ F_{R3} + F_Z \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_{44} - i_{45} & i_{46} \\ -i_{54} & i_{55} - i_{56} \\ i_{64} - i_{65} & i_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_R \\ \ddot{\theta}_R \\ \ddot{\psi}_R \end{bmatrix} &= \\ \begin{bmatrix} F_{R4} + M_X + l_y(F_{R3} + F_Z) - l_z F_Y \\ F_{R5} + M_Y + l_z F_X \\ F_{R6} + M_Z - l_y(F_{R1} + F_X) \end{bmatrix} & \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ここで、

 M : 船体の全質量 i_{44} : 片舷の横揺れ慣性モーメント i_{55} : 片舷の縦揺れ慣性モーメント i_{66} : 片舷の船首揺れ慣性モーメント i_{45}, i_{46}, \dots : 左舷の慣性相乗積 $x_L, y_L, z_L, \phi_L, \theta_L, \psi_L$: 左舷の前後揺れ, 左右揺れ, 上下揺れ, 横揺れ, 縦揺れ, 船首揺れ $x_R, y_R, z_R, \phi_R, \theta_R, \psi_R$: 右舷の前後揺れ, 左右揺れ, 上下揺れ, 横揺れ, 縦揺れ, 船首揺れ l_y : 両舷の各重心 G_L, G_R と中心線との距離 l_z : デッキ内の D 点と重心 G との距離 $(D$ 点が上の場合が正) $F_{L1} \sim F_{L6}$: 左舷に作用する G 点回りの流体力の 6 成分 $F_{R1} \sim F_{R6}$: 右舷に作用する G 点回りの流体力の 6 成分 F_X : 左舷から右舷に作用する X_D 軸方向の内力

(Racking Force)

 F_Y : 左舷から右舷に作用する Y_D 軸方向の内力

(Side Force)

 F_Z : 左舷から右舷に作用する Z_D 軸方向の内力

(Vertical Shear Force)

 M_X : 左舷から右舷に作用する X_D 軸回りの内力モーメント (Bending Moment) M_Y : 左舷から右舷に作用する Y_D 軸回りの内力モーメント (Pitch-connecting Moment) M_Z : 左舷から右舷に作用する Z_D 軸回りの内力モーメント (Yaw-connecting Moment)

であり, 添え字 L は左舷を, R は右舷を表している。なお, 内力の 6 成分は, デッキに作用する波浪荷重全体を P 点に集中させたものである。

また, 両舷の運動と船体全体の運動には, 次の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} \phi_L = \phi_R = \phi, \quad \theta_L = \theta_R = \theta, \quad \psi_L = \psi_R = \psi \\ \ddot{x}_R - \ddot{x}_L = 2l_y \ddot{\psi} \\ \ddot{y}_R - \ddot{y}_L = 0 \\ \ddot{z}_R - \ddot{z}_L = -2l_y \ddot{\phi} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

左舷および右舷に作用する G 点回りの流体力 F_{Lj} および F_{Rj} は, それぞれの片舷の表面に働く変動圧 p を積分することによって次のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} F_{Lj} &= \int p \alpha_j \cdot n ds_L \quad (j=1 \sim 6) \\ F_{Rj} &= \int p \alpha_j \cdot n ds_R \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

船体表面に作用する変動圧は, 速度ポテンシャルから求める成分と船体運動による静水圧の和として,

$$\begin{aligned} p = & -\rho \left(i\omega_e \Phi - U \frac{\partial \Phi}{\partial X} \right) \exp(i\omega_e t) \\ & - \rho g(z + Y_c \phi - X_c \theta) \end{aligned} \quad (19)$$

 ρ : 水の密度

で表せる。なお, 変動圧, 船体運動の振幅は, 次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} p_A &= (pp^*)^{1/2} \\ z_A &= (zz^*)^{1/2} \\ \phi_A &= (\phi\phi^*)^{1/2} \\ \theta_A &= (\theta\theta^*)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

ここで, $*$ は複素共役を取ることを示している。

左右舷の運動方程式および左右舷の運動の関係式である (15)~(17) 式から, デッキの D 点回りの内力 (波浪荷重) は次のように求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} F_X &= \frac{1}{2} (F_{L1} - F_{R1} + M l_y \ddot{\psi}) \\ F_Y &= \frac{1}{2} (F_{L2} - F_{R2}) \\ F_Z &= \frac{1}{2} (F_{L3} - F_{R3} - M l_y \ddot{\phi}) \\ M_X &= \frac{1}{2} \{ F_{L4} - F_{R4} - l_y (F_{L3} + F_{R3}) \\ & \quad + 2l_z F_Y - 2i_{45} \ddot{\theta} \} \\ M_Y &= \frac{1}{2} (F_{L5} - F_{R5} - 2l_z F_X \\ & \quad - 2i_{54} \ddot{\phi} - 2i_{56} \ddot{\psi}) \\ M_Z &= \frac{1}{2} \{ F_{L6} - F_{R6} + l_y (F_{L1} + F_{R1}) \\ & \quad - 2i_{65} \ddot{\theta} \} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

なお, これら波浪荷重の振幅は, それぞれの複素共役を用いて次式で計算できる。

$$\left. \begin{aligned} F_{xA} &= (F_x F_x^*)^{1/2} \\ F_{yA} &= (F_y F_y^*)^{1/2} \\ F_{zA} &= (F_z F_z^*)^{1/2} \\ M_{xA} &= (M_x M_x^*)^{1/2} \\ M_{yA} &= (M_y M_y^*)^{1/2} \\ M_{zA} &= (M_z M_z^*)^{1/2} \end{aligned} \right\} (22)$$

3. 実験の方法

模型実験は規則波中で行われ、波浪荷重、変動圧、船体運動を計測した。

波浪荷重を計測するために中心線で2分割され、2個の2分力計を介して両舷のデッキが結合されている供試模型を用いた。この模型は、Side Force や Bending Moment の荷重に対して十分な強度を持たない分割模型であるため、2個の1分力計を介してローハルが結合されている。デッキ上の2分力計は、YZ 面内の Y および Z 方向の2分力を計測し、X 軸回りのモーメントを逃がす機構になっている。一方、ローハル内の1分力計は、YZ 面内の Y 方向分力のみを計測し、Z 方向分力と X 軸回りのモーメントを逃がす機構になっている。これらの検力計の概略の配置図を Fig. 3 に示す。この他、変動圧の計測は右舷ミッドシップ船底部に埋め込まれた歪式圧力計によって行い、船体運動の計測は、サブキャリッジ式の6自由度運動計測装置によって行った。

各計測項目の解析は、時系列をフーリエ解析して1次成分を求め、重心直上のデッキ上の点 D に集中された波浪荷重の各成分については、検力計によって計測された各分力成分を用いて、次式で求めた。

$$\left. \begin{aligned} F_y &= F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4} \\ F_z &= F_{z1} + F_{z2} \\ M_x &= (F_{y3} + F_{y4}) l_{13} \\ M_y &= -F_{z1} l_{1D} + F_{z2} l_{2D} \end{aligned} \right\} (23)$$

ここで、

- F_{y1}, F_{z1} : デッキ前部に設置された検力計で計測される Y および Z 方向の波浪荷重
- F_{y2}, F_{z2} : デッキ後部に設置された検力計で計測される Y および Z 方向の波浪荷重
- F_{y3} : ローハル前部に設置された検力計で計測される Y 方向の波浪荷重
- F_{y4} : ローハル後部に設置された検力計で計測される Y 方向の波浪荷重
- l_{13} : デッキとローハルに設置された検力計の上下方向の距離
- l_{1D}, l_{2D} : D 点とデッキ前部および後部に設置された検力計との距離

である。

なお、実験は東京大学生産技術研究所船舶航海性能水槽で行った。

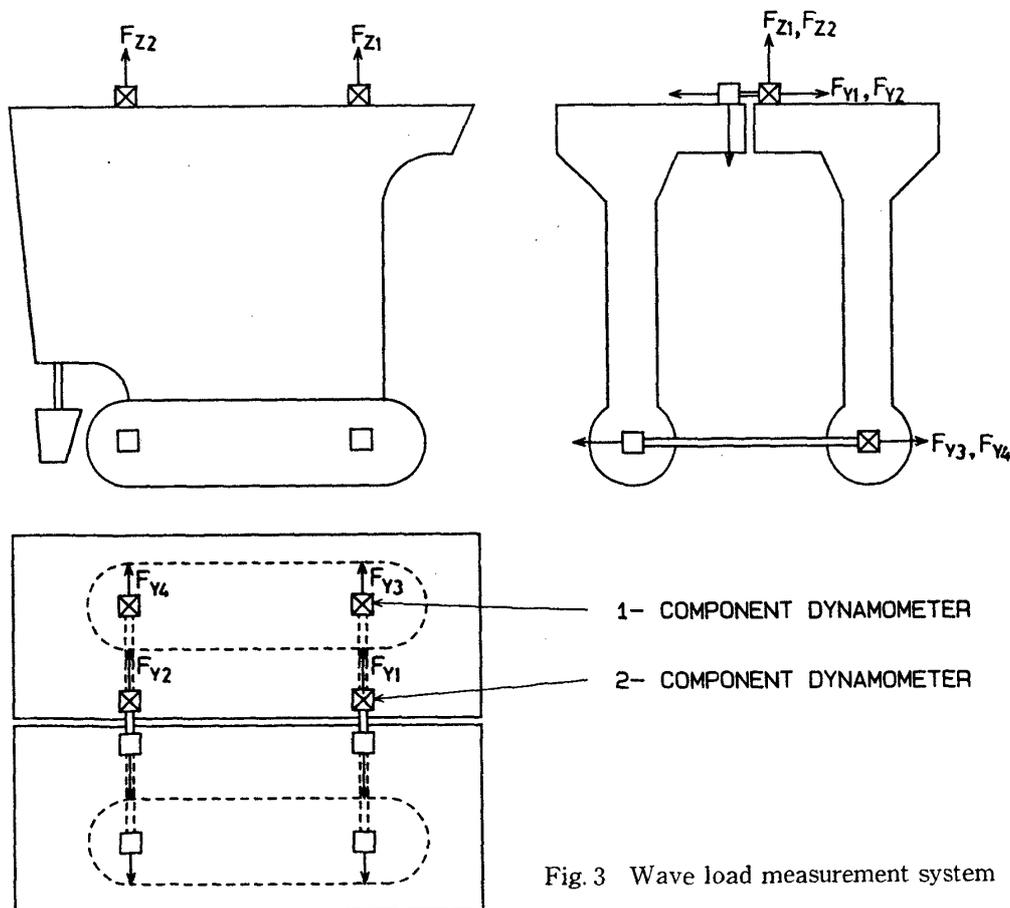


Fig. 3 Wave load measurement system

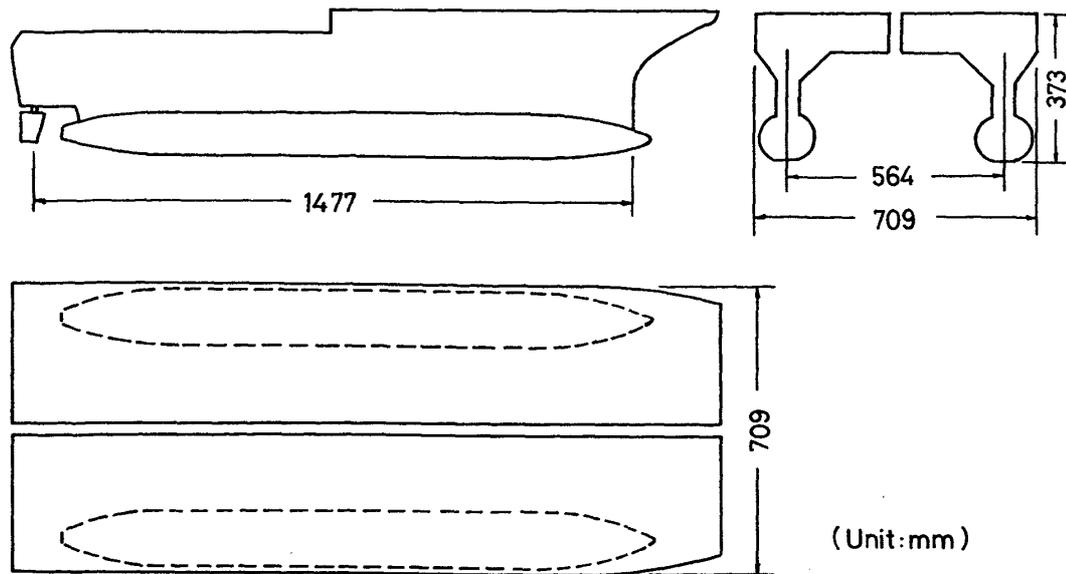


Fig. 4 Configuration of model ship

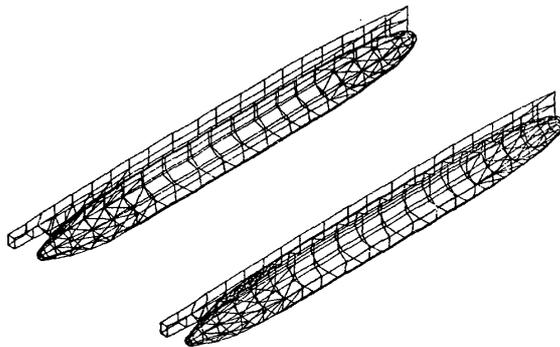


Fig. 5 Panel elements of SSC

Table 1 Principal particulars of SSC model

船長	$L = 1477 \text{ mm}$
船幅	$B = 709 \text{ mm}$
喫水	$d = 159 \text{ mm}$
浮心位置*	$L_{CB} = 37 \text{ mm}$
重心高さ	$KG = 253 \text{ mm}$
横揺れ環動半径	$r_x = 271 \text{ mm}$
縦揺れ環動半径	$r_y = 471 \text{ mm}$
横メタセンター高さ	$GM = 136 \text{ mm}$
縦メタセンター高さ	$GM_L = 378 \text{ mm}$

*) 浮心位置はミッドシップから前方への距離である。

Table 2 Computational and experimental conditions

フルード数	$F_n (= U/\sqrt{gL}) = 0, 0.42$
波入射角	$\chi = 90, 135^\circ$
波傾斜	$H_w/\lambda \approx 1/40$

4. 対象船型

計算および実験を実施した SSC の要目を Table 1 に、供試模型の概略形状を Fig.4 に示す。また、計算に使用した SSC の没水部表面の要素分割数は双胴全体で 660 であり、Fig.5 に示すように分割を行った。

5. 計算結果と実験結果の比較

Table 2 に示すように、停止時と航走時 ($F_n=0.42$) について計算および実験を行った。また、波入角の方向は横波と斜め向い波の 2 種である。以下、波浪荷重の主要な項目について、計算結果と実験結果の比較を行う。

デッキ上の D 点における波浪荷重の 3 次元特異点分布法による計算結果および実験結果を、Fig.6~9 に比較して示す。横波中の Side Force については、双胴間の干渉を無視したストリップ法による計算結果も示してある。まず、Fig.6 と Fig.7 に示す横波中、斜め向い波中の実験結果両方に顕著に見られるように、Side Force は停止時に比べ、航走時にはかなり小さくなる。これは、停止時には双胴間の干渉効果のために双胴間の水面変動が大きくなるのに対し、航走時には波動が後方に流れるために双胴間の干渉効果が小さくなるためと考えられる。3 次元特異点分布法による計算結果は実験結果に見られる船速影響を良く表しており、定量的にもほぼ満足できる推定精度を有している。ストリップ法については、横波中の Side Force に対する計算結果を参考例として示したが、船速による差がほとんど見られないため、Fig.6 では一本の一点鎖線によって停止時と航走時の両方の結果をまとめて示しておいた。このように、ストリップ法では船速影響が合理的に考慮されてい

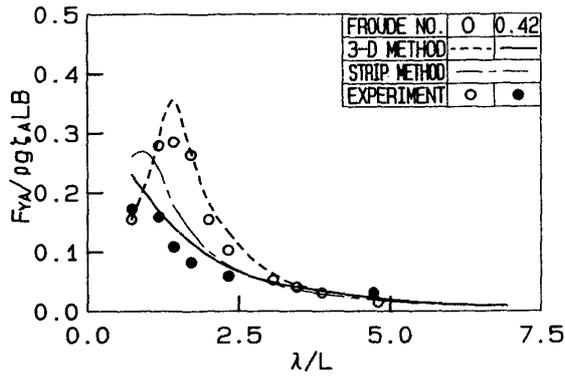


Fig. 6 Side force ($\chi=90^\circ$)

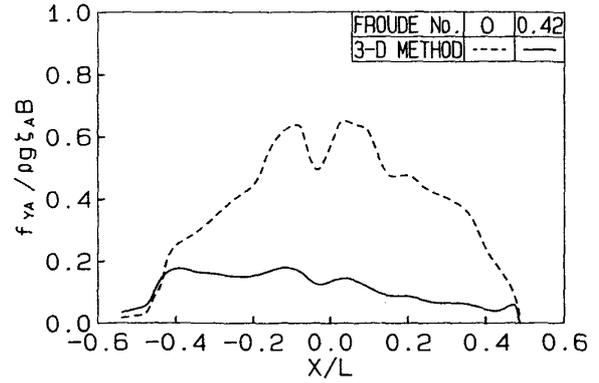


Fig. 10 Longitudinal side force distribution ($\chi=90^\circ$)

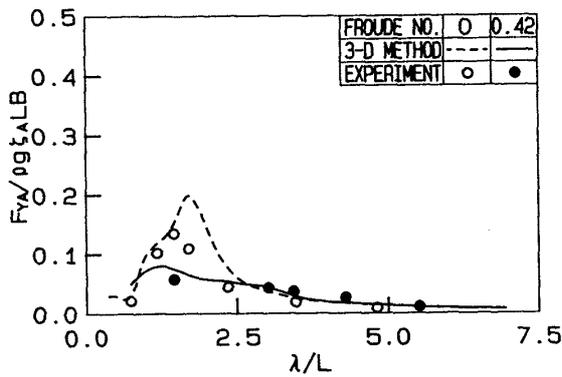


Fig. 7 Side force ($\chi=135^\circ$)

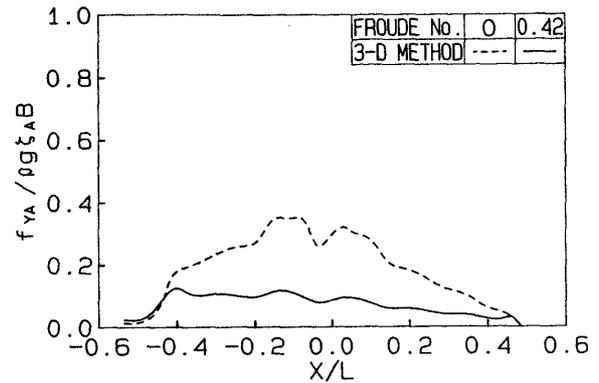


Fig. 11 Longitudinal side force distribution ($\chi=135^\circ$)

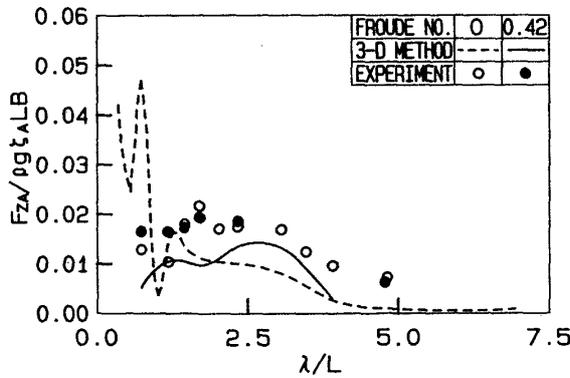


Fig. 8 Vertical shear force ($\chi=90^\circ$)

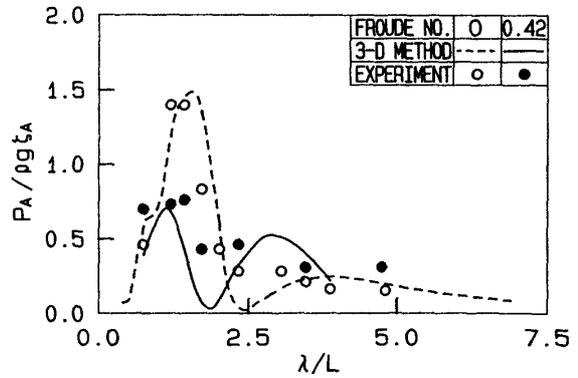


Fig. 12 Fluctuating pressure ($\chi=90^\circ$)

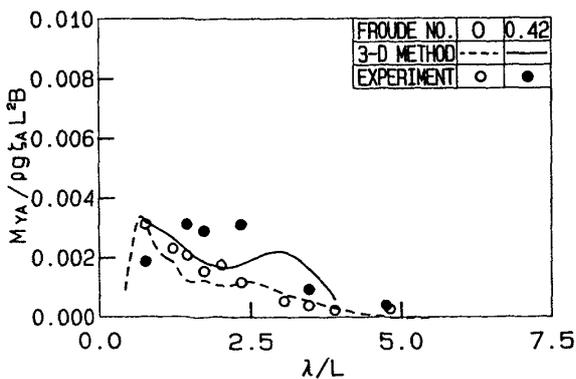


Fig. 9 Pitch-connecting moment ($\chi=90^\circ$)

ないため、実験結果に見られる顕著な船速影響を十分に説明できていない。

Fig.8とFig.9にそれぞれ示す横波中における Vertical Shear Force および Pitch-connecting Moment は、Side Force に比べて小さな値となっている。また、船速影響も Side Force に見られたほどには顕著ではなく、Pitch-connecting Moment が、船速がある場合に若干大きくなる程度である。これら2成分に対する3次元特異点分布法による計算結果は、船速影響を含めて実験結果の概略の特性を説明している。

Fig.6 および Fig.7 で見られた, SSC が停止している場合に Side Force が非常に大きくなる波 ($\lambda/L=1.73$) に対する, Side Force の船長方向分布 f_{YA} の計算結果を, 横波中および斜め向い波中に対して求めたのが, それぞれ Fig. 10 および Fig.11 である。波浪荷重の船長方向分布を積分したものが, (21)式に示す D 点回りに表した全波浪荷重であり, これらの図で示した船長方向分布 f_{YA} は (21)式を積分する前の被積分関数として求めたものの振幅である。計

算結果によると, 停止時には船首尾部に比べて中央部の Side Force が非常に大きい 3 次元性の強い分布になっており, 干渉効果によってミッドシップ付近の双胴間の水面変動が大きくなっていると推測される。一方, 航走時には, 船首部で小さく, 船尾へ行くほど大きくなる単調な分布になっており, また, 停止時に比べて全体的に非常に小さくなっている。これは, 各単胴で発生した波動が後方に流れ, 船首側へ行くほど他方の単胴の波動の影響を受けにくくな

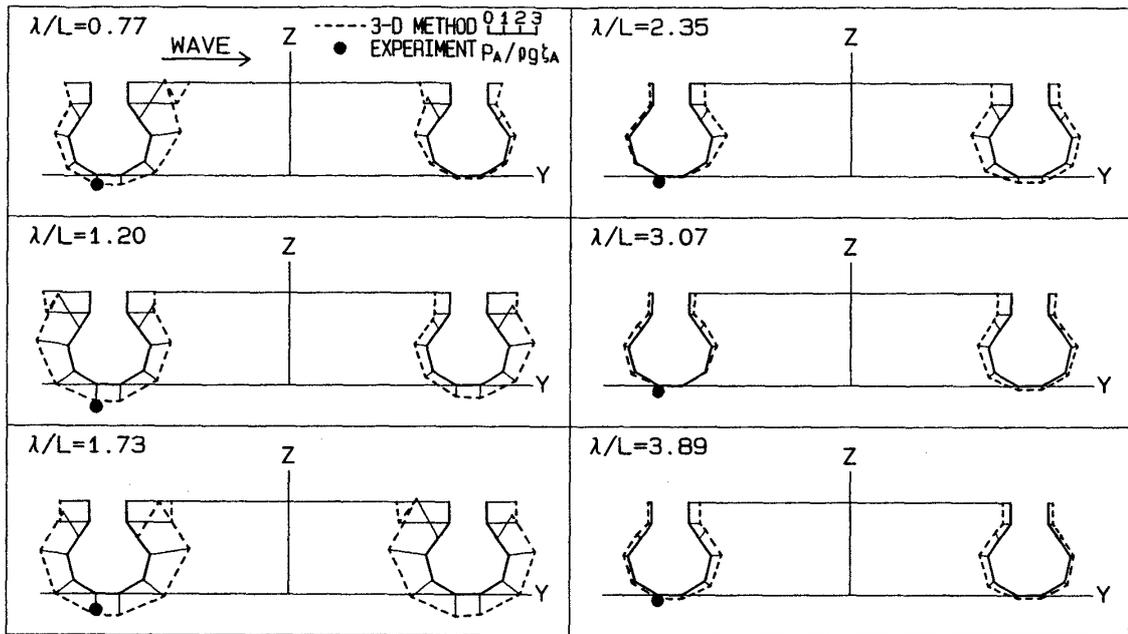


Fig. 13 Fluctuating pressure distribution at midship ($F_n=0, \chi=90^\circ$)

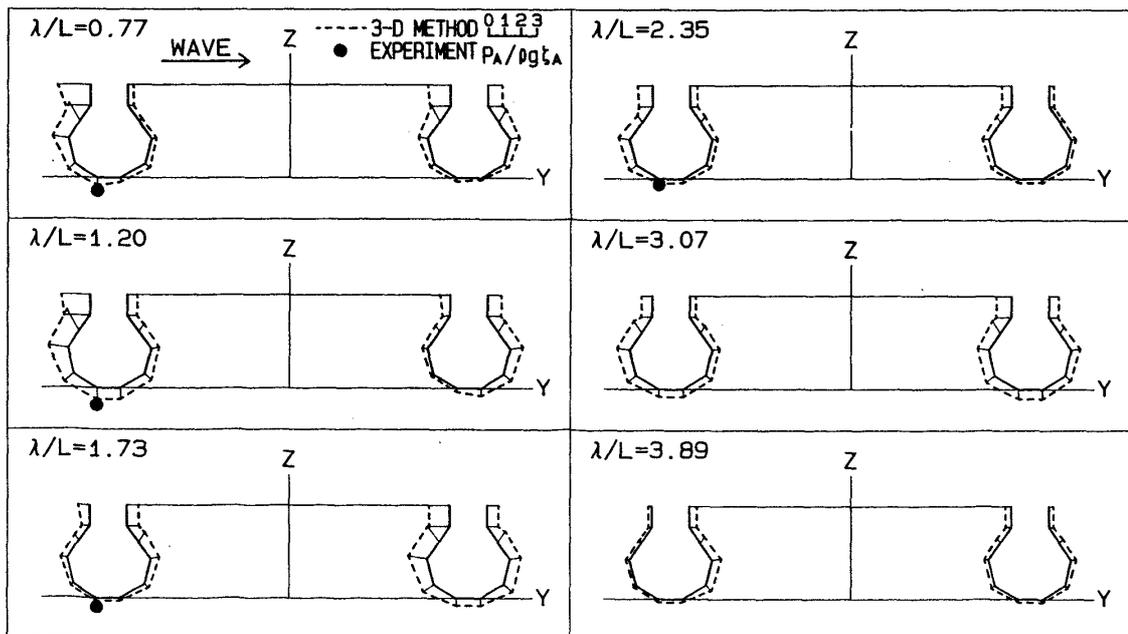


Fig. 14 Fluctuating pressure distribution at midship ($F_n=0.42, \chi=90^\circ$)

っているためと推定される。

右舷(波上側) ミッドシップ船底部における変動圧の計算および実験結果を Fig.12 に示す。変動圧は波浪荷重を発生させる原因であり、停止時に見られる変動圧のピーク位置 ($\lambda/L=1.5$ 付近) は、Fig.6 で見られた Side Force のピーク位置に良く対応している。Side Force に見られた船速影響が変動圧にも顕著に見られ、計算結果と実験結果の一

致度も良好である。

Fig.6 および Fig.7 で見られたように、SSC が停止している場合には双胴間の干渉効果のために $\lambda/L=1.5$ 付近の波に対して Side Force が非常に大きくなっている。この現象を理解するために、停止時および航走時のミッドシップにおける船体周りの変動圧振幅の計算結果を、Fig.13 および Fig.14 に示す。図中には波上側船底部において計測した

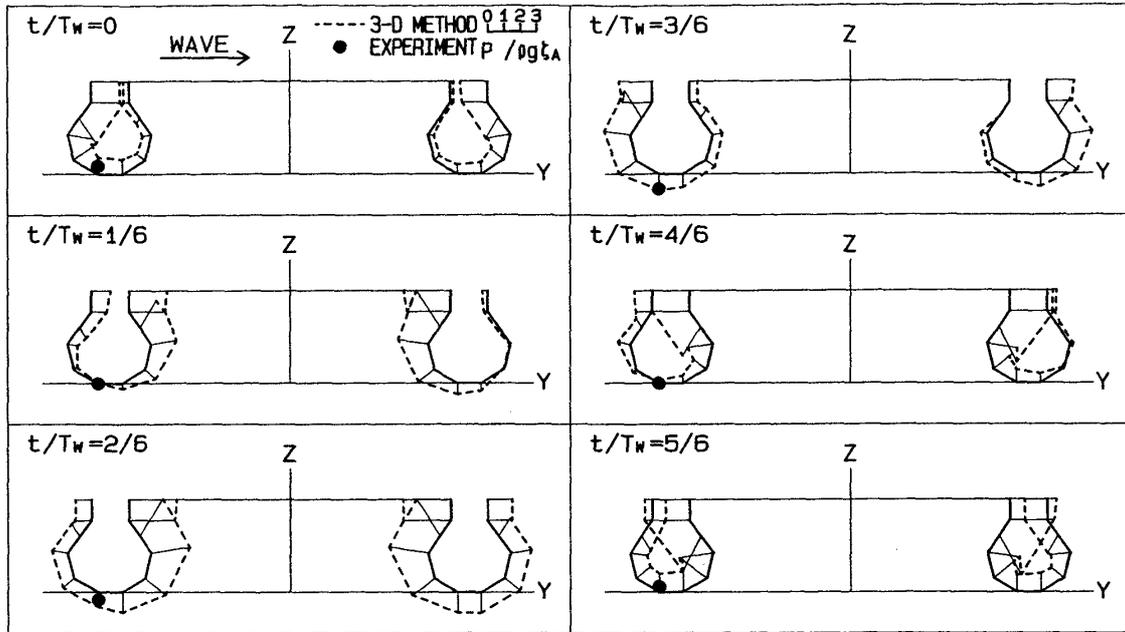


Fig. 15 Fluctuating pressure variation at midship in one cycle ($F_n=0, \chi=90^\circ, \lambda/L=1.73$)

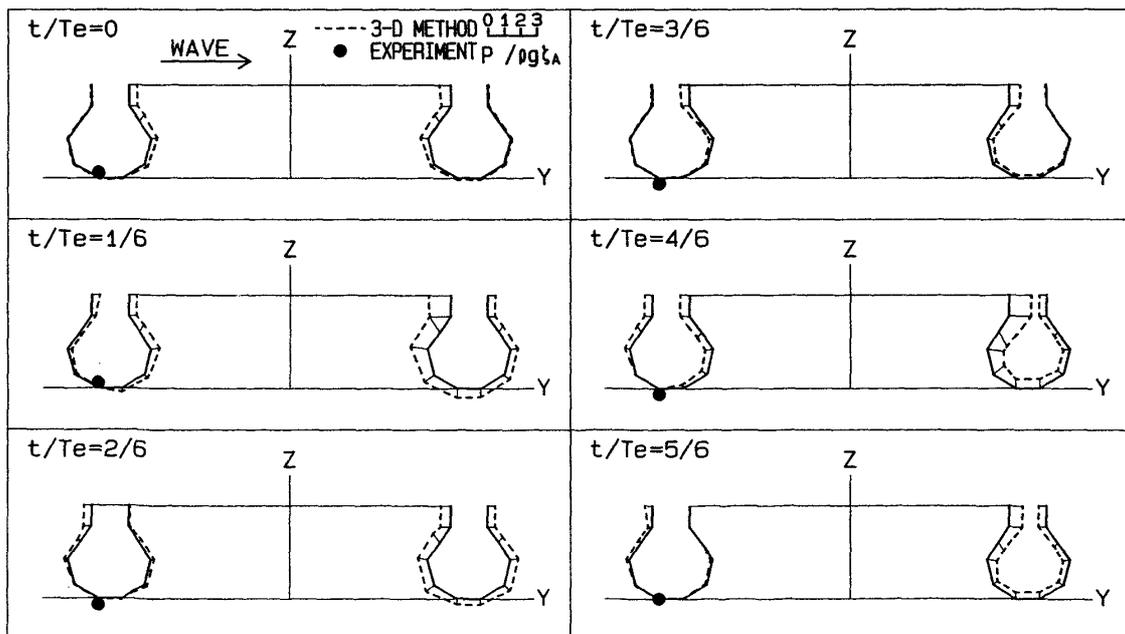


Fig. 16 Fluctuating pressure variation at midship in one cycle ($F_n=0.42, \chi=90^\circ, \lambda/L=1.73$)

実験結果も示してあり、計算結果を表す破線あるいは実験結果を表す●印と、船体断面形状を表す実線との距離が変動圧の大きさに対応している。図中の変動圧振幅 p_A は、入射波の水頭 $\rho g \zeta_A$ で無次元化されており、 $\lambda/L=0.77$ に対する図中に基準となるスケールを示してある。なお、規則波は図の左側から入射している。図からわかるように、停止時には $\lambda/L=1.73$ の波に対して双胴内部の変動圧が非常に大きくなっており、双胴間の干渉で内部の波が大きくなっていることが推測される。一方、航走時には λ/L の小さな波に対して波上側の単胴の外側で変動圧が少し大きくなるが、それ以外では大きな変動圧は見られておらず、双胴間の干渉が小さいと推測される。

次に、停止時および航走時の $\lambda/L=1.73$ の波に対するミッドシップにおける船体周りの変動圧の時間変化（波周期 T_w または出会い波周期 T_e を 6 分割したもの）の計算結果を、Fig.15 および Fig.16 に示す。図中には一部実験結果も併せて示してあり、計算結果を表す破線あるいは実験結果を表す●印が船体断面の外側にあるときに正圧で、内側にあるときに負圧を表している。停止時に Side Force が大きくなる瞬間は、Fig.15 の 6 分割の中では、 $t/T_w=1/6$ であり、このとき双胴内側には大きい正圧が、外側には負圧が生じており、双胴を広げる方向に大きな Side Force が働いている。また、 $t/T_w=4/6$ の瞬間には、双胴を近づける方向に大きな Side Force が働いている。このように、停止時に Side Force が大きくなるのは、船体周りの変動圧が大きくなる上に、双胴の内側と外側の変動圧の位相が Side Force を強めるように作用しているためということがわかる。一方、航走時には全体的に変動圧が小さいため、Side Force も小さくなっていることがわかる。また、計算結果と実験結果の対応は概ね良好である。

これらの波浪荷重を計測したときの船体運動の実験と計算の比較例として、Fig.17 に上下揺れの結果を示す。この図からわかるように、3次元特異点分布法による計算結果は、船体運動についても前進速度の影響を含めて実験結果の特性とほぼ対応しており、定量的にも大略一致している。

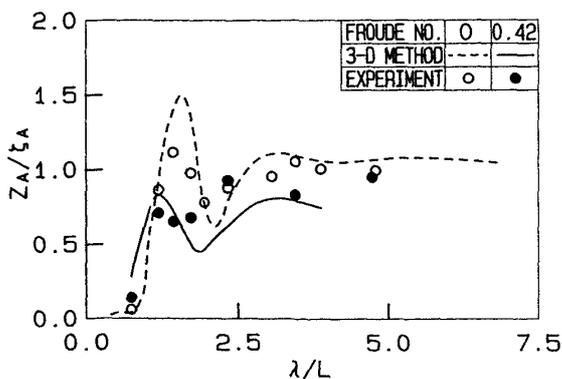


Fig. 17 Heave motion ($\chi=90^\circ$)

6. 結 論

SSC 船型の波浪中における波浪荷重、変動圧、船体運動について、3次元特異点分布法による理論計算結果と模型試験結果とを比較し、前進速度の影響を検討した。Side Force については、ストリップ法による計算結果とも比較を行った。得られた主な結論は、次の通りである。

- (1) 3次元特異点分布法による Side Force の計算結果は、実験結果の特性を良く説明している。特に、航走時に Side Force が顕著に小さくなる特性を、明確に説明している。
- (2) ストリップ法による Side Force の計算結果は、実験結果に見られる船速影響を説明できない。
- (3) Vertical Shear Force および Pitch-connecting Moment は、Side Force に比べて小さくなっており、船速影響もあまり大きくない。また3次元特異点分布法による計算結果は、実験結果の特性を概ね説明している。
- (4) 変動圧は、停止時において Side Force が大きなピークを示すときに、同様に大きなピークを示している。また3次元特異点分布法による計算結果は、実験結果の特性を概ね説明している。
- (5) 停止時に Side Force が大きくなるのは、双胴内部の変動圧が大きくなる上に、双胴の内側と外側の変動圧の位相が Side Force を強めるように作用しているためである。
- (6) 船体運動の例として示した上下揺れについても、3次元特異点分布法による計算結果は実験結果を概ね説明している。

SSC 船型の構造設計を行う上で、精度の良い波浪荷重の推定は必須である。今回、前進速度を含めた3次元特異点分布法によって SSC 船型の波浪荷重の推定を行い、模型実験との比較から本手法の有効性が確認された。波浪荷重の内、特に重要な Side Force に見られる船速影響も、本手法によって精度良く推定できることが明らかになった。

最後に、理論計算について御指導頂いた九州大学応用力学研究所大楠丹教授および広島大学岩下英嗣博士に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Lee, C. M., Jones, H. D., Curphey, R. M.: Prediction of Motion and Hydrodynamic Loads of Catamarans, Marine Technology, Vol. 10, No. 4, (1973).
- 2) Reilly, E. T., Shin, Y. S., Kotte, E. H.: A Prediction of Structural Load and Response of a SWATH Ship in Waves, Naval Engineers Journal, (1988).
- 3) 梶正和, 岡本耕一, 山下寛, 池淵哲朗: リフトフイ

- ン付双胴船に働く波浪変動圧力と構造応答, 関西造船協会誌, No.211, (1989).
- 4) Sikora, J. P., Dinsenbacher, A., Beach, J. E.: A Method for Estimating Lifetime Loads and Fatigue Lives for SWATH and Conventional Monohull Ships, *Naval Engineers Journal*, (1983).
 - 5) 小林正典, 島田潔: 海洋構造物の波浪中応答計算システム“DREAMS”, 三井造船技報, No.126, (1985).
 - 6) 小林正典: 前進速度を有する任意形状の3次元物体に働く流体力について, 日本造船学会論文集, No. 150, (1981).
 - 7) 岩下英嗣, 大楠丹: 特異点法による波浪中を航走する船に作用する流体力の研究, 日本造船学会論文集, No.166, (1989).
 - 8) Bessho, M.: On the Fundamental Singularity in a Theory of Motion in a Seaway, *Memoirs of the Defense Academy Japan*, Vol. X VII, No. 8, (1977).
-