

# 船体後流の非線形自由表面流れとトランサム船尾形状による影響

木 原 一

令和 7 年 9 月

# 船体後流の非線形自由表面流れとトランサム船尾形状による影響

(横井 嘉文 教授に捧ぐ)

木原 一\*

(令和 6 年 7 月 26 日受付：令和 7 年 6 月 5 日受理)

## Nonlinear free surface flow behind a ship and the effect of transom stern shape (Dedicated to Professor Yoshifumi YOKOI)

By Hajime KIHARA\*

This paper examines the effectiveness of the Nonlinear High-speed Strip method (2D+T method) based on the potential theory for the free surface flow behind a hull with a transom stern, which is considered to be strongly influenced by the boundary layer and wake. In addition, by introducing the mathematical description of the transom stern shape, the transom stern's submerged depth, horizontal width, and keel inclination were expressed, and parametric studies were performed on the effect of the transom stern shape on the wake shape, and the results are reported.

**Keywords:** Transom stern waves, Hollow cavity, Nonlinear free surface, 2D+T, High-speed strip theory

### 1. 緒言

平水中を航走する船のまわりの流場解析は、自由表面があることによる現象と水の粘性によって引き起こされる現象が混じった複雑な問題である。二つの現象はそれぞれ別の力学的相似則に従うが、両者に相互干渉がないか、あったとしても小さいならば、それぞれの抵抗成分を分離することができる。W. Froude (1810-1879) によるこの仮定以来、実船の抵抗を模型船の水槽試験から推定する方法が確立されてきた。このように船体抵抗は流体の非粘性成分としての造波抵抗と流体の粘性成分としての粘性抵抗に大別され、造波抵抗はポテンシャル理論で取り扱

えるため早くから理論的な研究が進められてきた。一方、船尾にできる波に着目すると、主に船体前半部で造られた自由表面の波が船尾において境界層と伴流の影響を受ける複雑な流れになっている。近年は Navier-Stokes 方程式の直接解法である CFD 研究が盛んであるが、粘性影響と造波の相互干渉を理論的に解明する研究も行われ、ポテンシャル理論を用いた線形造波理論と積分型境界層理論を組合せた研究<sup>1)2)3)</sup>も成果を挙げてきた。

高速船の船尾にはトランサム型船尾船型が採用されるのが一般的である。トランサム型船尾の造波に関する研究<sup>4)5)</sup>によれば、船尾の流場構造はマリーナ型船尾の場合と比べ大きく異なっている。トランサム船尾端では船首方向の波崩れを生じ、大きな運動量損失になるため船体抵抗の増加につながる。また船尾端から自由表面上に大きなキャビティ領域が

\* 防衛大学校 システム工学群 機械システム工学科 教授

形成される。船尾の伴流は乱流構造にあるが、流速の増加とともにトランサムがつくるキャビティ領域は大きくなり、さらにその外縁が交差する先端では“rooster tail”と呼ばれる波しぶきをともなう船尾波が見られる。このような自由表面流れの波面形状は線形造波理論の解からは得ることができない。また小型高速船では船速に応じてトリムとシンケージ（沈下量）が変化するが、同時にトランサム船尾での水切り位置（吃水）が変化する。すなわち船底境界層から生じた渦が船尾端から渦層として放出され、トランサム壁面近傍で循環する死水域を形成し、自由表面と干渉しながら後方に放出され水面を盛り上げて上下変動を起こす。一方、早い流れになると船尾船底から水面は滑らかに流出し、トランサム壁面はドライ状態（吃水0）になることが知られている。

本報告はトランサム型船尾を有する船がつくる後流の自由表面流れに関し、著者が開発した時刻歴非線形計算法<sup>6)</sup>（2D+T法）が、トランサム船尾近傍における局所的波動場の表現にどの程度有効であるかを検討したものである。また、船体の姿勢は変化しないと仮定し、トランサム船尾の造波現象を支配すると考えられるパラメータを変化させて船尾形状が後流波形に及ぼす影響を調査した。ポテンシャル理論によるアプローチであるため境界層、伴流による粘性影響は不明であるが、トランサム船尾が示すキャビティ領域や両舷端部から造られる波の干渉など、トランサム船尾船型に特徴的な後流波形を数値表現できることがわかったのでこれらについて報告する。

## 2. 問題の設定と計算法の概要

船が一定速度  $U$  で平水中を航走する問題を考える。座標系を Fig.1 のようにとり、後流を含む船体まわりの流れの計算を 2D+T 法により行う。この方法は High-speed strip theory に属するもので、細長船を前提とする 2.5 次元理論とも呼ばれている。

Fig.1 に示す計算平面上で定式化される船体横断面を含む 2 次元造波問題を境界要素法により解析する。通常のストリップ法に比べ、上流から下流への波動の伝播が考慮され、自由表面条件にも前進速度が考慮されるため高速域でも合理性をもつ解が得られるという特徴がある。ただし、本報告では空間固定座標系で定式化を行うため前進速度項は陰的表現になっている。

流体を非粘性・非圧縮の渦なし流れとすると定常造波問題は速度ポテンシャルにより記述できる。細長船近似を用いると船体近傍の流れ場の支配方程式は  $yz$  平面におけるラプラス方程式で表され、境界条件についても高次項を省略すると船体近傍の造波問題は 2 次元問題になる。定常造波問題を静止座標系で考えると

$$\frac{\partial}{\partial t} = -U \frac{\partial}{\partial x} \quad (1)$$

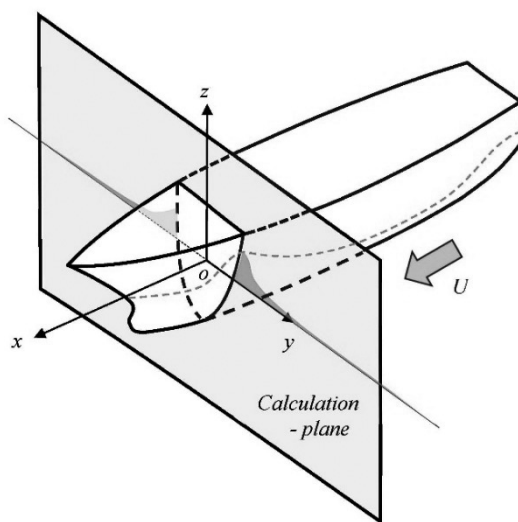


図 1 2D+T 法の計算平面と座標系

Fig. 1 Calculation plane and coordinate system for 2D+T method

なる関係が成り立つので流場の速度ポテンシャル  $\phi$  に関する境界値問題は次式で定義される。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad \text{in fluid} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\zeta = 0 \quad \text{on f.s.} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on f.s.} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = Un_x \quad \text{on hull} \quad (5)$$

ここで  $\zeta$  は波面変位,  $g$  は重力加速度,  $\partial/\partial n$  は流体向きを正とする法線微分,  $n_x$  は船体表面上の単位法線ベクトル  $\mathbf{n}$  の  $x$  軸成分を表す。(2) 式は流体領域における支配方程式を表し, (3) (4) 式は f.s. と記述した自由表面 (free surface) 上で, また (5) 式は船体表面 (hull surface) 上でそれぞれ成り立つべき境界条件である。船の移動にともない計算平面に現れる非定常造波問題を時々刻々と解くことで船体まわりの流れを求める。

自由表面の力学的条件 (3) 式より速度ポテンシャルは時間的に更新できるので自由表面は基本境界 (ディリクレ型) として, また (5) 式より法線速度が与えられるので物体表面は自然境界 (ノイマン型) として扱う。遠方および水底では剛壁の条件を与えて自然境界とするが, 壁による波の反射が領域内の波動伝播に影響を与えない程度に長く距離をとって境界を設ける。混合型境界値問題は境界積分方程式に変換し, 流体を取り囲む境界上に節点を設けて離散化する。湧き出しをグリーン関数として節点どうしの形状影響が計算できるので選点解法により境界上の節点の  $\phi$  および  $\partial\phi/\partial n$  を求めることができる。

初めに船首先端での問題を解き, その解を利用して後方の船体横断面に関する問題の境界条件を設定し, 順次解いていく。運動学的条件 (4) 式は波面上の流体粒子の位置を更新するのに用いられるが, 碎波など複雑な波面形状を表現するために自由表面を記述する流体粒子をラグランジュ的に取り扱う。ある時刻  $t$  で自由表面上  $j$  番目の節点の速度ポテンシャルと位置ベクトル  $\mathbf{r}$  が既知のとき,  $\Delta t$  後の値は次式で計算できる。

$$\phi_j(t + \Delta t) = \phi_j(t) + \int_t^{t+\Delta t} \left\{ \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 + gz(\tau) \right\} d\tau \quad (6)$$

$$\mathbf{r}_j(t + \Delta t) = \mathbf{r}_j(t) + \int_t^{t+\Delta t} \left\{ \mathbf{t} \frac{\partial \phi}{\partial s} + \mathbf{n} \frac{\partial \phi}{\partial n} \right\} d\tau \quad (7)$$

ここで  $\mathbf{t}$  および  $\partial/\partial s$  は単位接線ベクトルおよび接線方向微分を表す。(6) (7) 式の計算には 4 次精度のルンゲ・クッタ法を用いている。積分方程式を解いて得られる解は安定しており, 時間発展の計算では,  $\Delta t$  が適切な範囲にあるならば,  $\Delta t$  の設定によって結果が大きく変わるような繊細なものではない。船体横断面の間隔を  $\Delta x$  とすると時間ステップは  $\Delta t = \Delta x/U$  と設定している。時間積分の誤差を抑えるために以下の条件を課した自動時間刻みの計算スキームを用いている。

$$\frac{\max \{ |\nabla \phi_1|, |\nabla \phi_2|, \dots, |\nabla \phi_{N_F}| \}}{\min \{ \Delta s_1, \Delta s_2, \dots, \Delta s_{N_F} \}} \leq c \quad (8)$$

ここで  $N_F$  は自由表面境界上の総説点数を表し,  $\nabla \phi_j$ ,  $\Delta s_j$  は  $j$  番目の節点の速度および要素長である。時間刻みを調節する係数  $c$  は 1/3 としている。計算技法の詳細は参考文献<sup>7)</sup>を参照されたい。

### 3. トランサム船尾近傍の自由表面流れ

トランサム船尾をもつ船体まわりの流れでは, トランサムの後ろに船体は存在しないため, 物体表面条件の与え方や計算格子 (節点) の生成など数値計算上, 注意を要する。本方法と同様に境界要素法を用いた 3 次元解法の一つにランキンパネル法 (RPM) があるが, Couser ら<sup>8)</sup>は船尾端直後に形成される自由表面の窪みに擬似船体を仮定して問題を解く方法を示している。後流の状態は船尾形状や船速によって変化すると考えられるため Du ら<sup>9)</sup>や Robards ら<sup>10)</sup>は船尾端直後の空洞域の大きさについて調査を行っている。また船尾端後方の計算では低フルード数で計算不能になったり, 高フルード数

で過大な波高になったり、また波崩れ現象の取扱い等、数値解析上解決すべき問題点も多い<sup>9)10)</sup>。一方、2D+T 法では境界条件の属性を物体が存在しないトランサムより後方では自由表面として扱えばよい。すなわち境界条件の取扱いをノイマン型からディリクレ型に変更するだけで行える。境界要素法により問題を解くと全ての境界上で速度ポテンシャルとそのフラックスの値が共に既知となるので、トランサム直後の自由表面上で与える条件は (6) (7) 式より計算できる。さらに、船尾端直後の自由表面に関する圧力条件は細長船近似の枠組みで満たされる。すなわち、翼理論における Kutta 条件を付与することなく、水面上の圧力が大気圧に等しい条件により船尾船底から流出する波面は連続的な境界形状として計算できる。

船長  $L$  ベースのフルード数  $Fn=U/\sqrt{gL}$  を用いて流速を表すとき、3 種類の流速についてトランサム船尾後流の波面に関する計算結果を Fig.2 に示す。比較として回流水槽で観察した波面の画像を Fig.3 に示す。両者では船型と船速（流速）が異なるものの、トランサム後方に形成されるキャビティ領域の形状および流速に応じて変化する範囲が本計算法では再現されている。また、トランサムの両舷から後方に伸びるキャビティ領域の外縁部が交わる位置で

両側から作られた波が干渉し、波面変位を大きくする現象も計算結果は捉えている。また比較した 3 種類の中では中速の場合が最も大きくなる様子も示され、トランサム船尾後流の自由表面の表現に本計算法が有効であることがわかる。

流体領域は流れ場の  $y$  軸対象性を考慮し、 $y \geq 0$  の半平面を計算対象として、 $y$  方向の自由表面境界を 10 船長分、水深方向は 5 船長の長さを取り、グリーン関数には水底境界に関する鏡像を用いて境界を計算から取り除いている。自由表面は船体近傍に節点を密に配置し、約 250 個の要素で、また船体表面は片舷を 20 個の要素で、遠方の垂直壁は 30 個の要素で、船体下方の  $y$  軸上は 30 個の要素で離散化している。また計算する船体横断面の間隔は船長 /1000 とした。

## 4. トランサム船尾形状の影響

### 4.1 船体形状の数式表現

後流波形に関するトランサム船尾の形状影響を調査するために、船尾形状を系統的に変化させることができるように船体形状の数式表現を試みた。船尾造波を研究の主対象としていることから船首波崩れが生じにくいように船首のステムラインを垂直とし

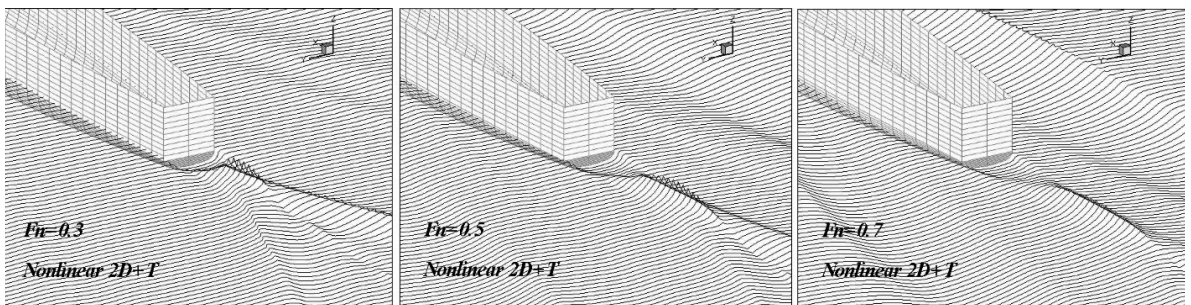


図2 2D+T 法による船尾後流波面の計算結果

Fig. 2 Calculation results of the free surface flow behind a ship using 2D+T method



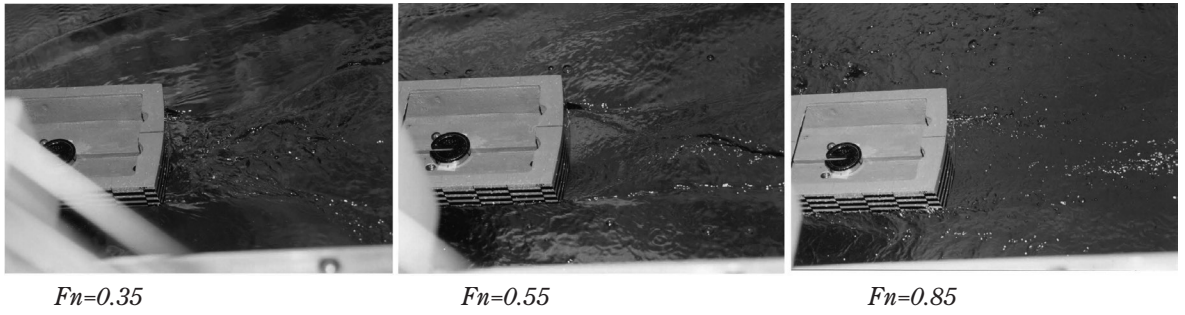


図3 滑走艇の後流波面のスナップショット

Fig. 3 Snap shots of the free surface flow behind a planing boat

た。船体表面式は船長  $L$ ，船半幅  $b$ ，標準状態の吃水  $d$  を用いて  $x=2x^*/L$ ， $y=y^*/b$ ， $z=z^*/d$  なる無次元変数を用いて以下のように表す。

$$y(x, z) = \begin{cases} y_F(x, z) & \text{for } (0 \leq x \leq 1, -1 \leq z \leq 1) \\ y_A(x, z) & \text{for } (-1 \leq x \leq 0, -\varepsilon(x) \leq z \leq 0) \end{cases} \quad (9)$$

$$y_F(x, z) = (1 - x^{2+c})(1 - z^2)(1 + \alpha x^2) + \beta z^2(1 - z^8)(1 - x^2)^4 \quad (10)$$

$$y_A(x, z) = \left[ 1 - \left\{ \frac{z}{\varepsilon(x)} \right\}^2 \right] \sigma(x) + \left\{ \frac{z}{\varepsilon(x)} \right\}^2 \left[ 1 - \left\{ \frac{z}{\varepsilon(x)} \right\}^8 \right] \sigma(x) \quad (11)$$

ここでトランサム形状を定義するために、以下の関数  $\sigma(x)$ ， $\varepsilon(x)$  を導入した。

$$\sigma(x) = 1 - (1 - \sigma_a)x^2 \quad (12)$$

$$\varepsilon(x) = 1 - (1 - \varepsilon_a)x^2 \quad (13)$$

船首部形状を規定するパラメータは  $c$ ， $\alpha$  で，船体中部は主として  $\beta$  で，また船尾部の形状はパラメータ  $\sigma_a$ ， $\varepsilon_a$  によって変化させることができる。Fig.4 に示すように  $\sigma_a$ ， $\varepsilon_a$  は船尾端 AP (After Perpendicular) における無次元半幅及び無次元吃水を表している。 $\Delta d$  は船体の沈下量を表し，船速や搭載重量の変化によって生じる吃水変化を表現する。

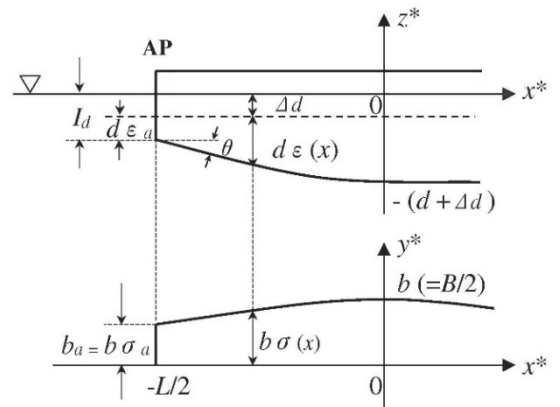


図4 トランサム船尾形状の定義

Fig. 4 Definition of transom-stern form

表1 タイプシップ (2C 船型) の主要目

Table 1 Principal particulars of Type-ship 2C

$B/L$	0.114
$d/L$	0.038
$lcb/L$ (aft)	0.010
$KB/L$	0.023
$GM_i/L$	2.285
$GM/L$	0.027
$C_b$	0.498
$C_m$	0.830
$C_p$	0.600
$C_w$	0.731

表2 トランサム船尾形状のパラメータ

Table 2 Parameters of transom-stern forms

Model name	$\theta$ [deg]	$I_a/d$	$b_a/b$	$1 + \Delta d/d$
2A-a	5.2	0.400	0.51	1.000
2A-b	5.2	0.250	0.51	0.850
2A-c	5.2	0.072	0.51	0.672
2B-a	6.5	0.400	0.51	1.150
2B-b	6.5	0.250	0.51	1.00
2B-c	6.5	0.072	0.51	0.822
2C-a	8.0	0.400	0.51	1.328
2C-b	8.0	0.250	0.51	1.178
2C-c	8.0	0.072	0.51	1.000
2C-a-M	8.0	0.400	0.75	1.328
2C-b-M	8.0	0.250	0.75	1.178
2C-c-M	8.0	0.072	0.75	1.000
2C-a-W	8.0	0.400	1.00	1.328
2C-b-W	8.0	0.250	1.00	1.178
2C-c-W	8.0	0.072	1.00	1.000

船体形状パラメータを  $c=0.518$ ,  $a=-0.598$ ,  $\beta=0.674$ ,  $\sigma_a=0.51$ ,  $\varepsilon_a=0.072$  と設定した場合を 2C 型と呼び、タイプシップとする。その主要目を Table1 に示す。Fig.5 に示すように船体前部は同一で後部のみが異なる 5 種類の船型を用い、トリムを固定し、沈下量  $\Delta d$  を a, b, c の 3 通りに変化させて船体を拘束した状態での航走を考える。Table 2 に示すように船尾の没水深度  $I_a$  の変化と船尾形状を考慮して合計 15 通りの状態を調査する。表中の  $\theta$  は Fig.4 に示すように AP におけるキール線の傾きを表す角度で、本報告ではキール勾配と呼ぶ事にする。船体後部のキール線は (13) 式によって表され、 $\varepsilon_a$  を指定すれば  $\theta$  は一意に決まる。 $\theta = 5.2^\circ, 6.5^\circ, 8.0^\circ$  はそれぞれ  $\varepsilon_a=0.4, 0.25, 0.072$  に対応し、タイプシップは  $\theta = 8.0^\circ$  の場合である。航走中のトリム変化はトランサム船尾の造波と深い関係があるが、本報告ではトリム変化を船尾形状の変化と考える立場で後流波形への影響を調査する。

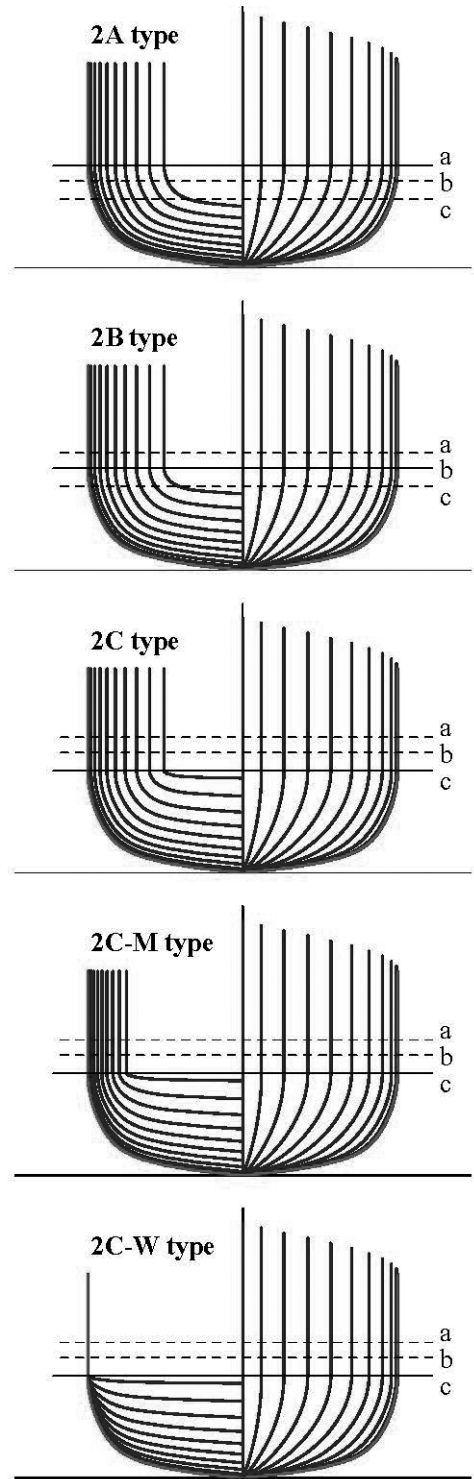


図5 異種トランサム船尾船型の正面図  
Fig. 5 Body plans of transom-stern variants

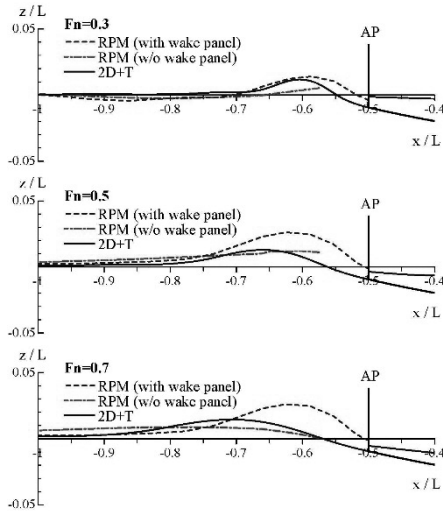


図6 波形の比較 (2B-b モデル)

**Fig.6** Comparison of calculated wave profiles on the center plane for 2B-b model.

#### 4.2 トランサム形状の影響

船体中心面 ( $y=0$ ) 上の後流波形とトランサム形状との関係について調べる。Fig.6 は 2D+T 法の計算結果を RPM (DNV の商用コード WASIM) による計算結果と比較したものである。2D+T 法の結果は低速の場合でもトランサム船尾端直後が平滑水面となるが、Fig.3 にみる流速変化にともなう波高の変化を明瞭に示しており、高速になるにつれて波長が長くなることがわかる。一方、RPM でトランサム船尾後流の自由表面にパネルを配置した計算 (図中 with wake panel と表記) ではフルード数が 0.3 から 0.5 への遷移では波高の変化がみられるが、0.5 以降では顕著な変化はみられない。パネル配置の代わりに擬似船体を置いた場合 (図中 w/o wake panel と表記)、波高は小さくなり、流速との対応関係も不明瞭である。また、パネルを配置した場合、流速が大きくなると計算が破綻して解が得られない事象が起きた。これは通常船型に対してはパネル法が船体周りの流れの計算に有効であってもトランサム船尾船型に安易に適用することができない事を意味する。一方、擬似船体を用いると波高が大きくな

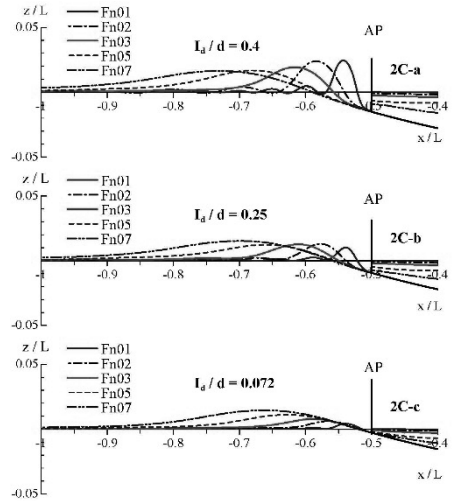


図7 2D+T 法による波形の比較 ( $\theta = 8.0^\circ$ )

**Fig.7** Wave profiles by using 2D+T method for the transom stern with  $\theta = 8.0^\circ$ .

りすぎて計算不能になるような状況には至らない。RPM による波面の計算例<sup>12)</sup>は割愛するが Fig.3 が示すような複雑なキャビティ領域を形成する非線形な後流波面を数値表現するには RPM は適していないと言える。トランサム船尾に計算パネルを配置する方法と擬似船体を仮定する方法、いずれも線形造波理論による計算法であり、RPM は摂動論的には波面変位が小さいと考えて定式化した 1 次オーダーの問題である。すなわち自由表面の境界形状を静水面 ( $z=0$ ) で代表する線形近似解では後流波面の表現に限界があると言える。また、計算コストや解像度の面においても今回の RPM では自由表面だけで約 2000 個のパネルを使用したにもかかわらず、後流での自由表面の解像度が十分ではない。一方、自由表面条件に非線形項を残して定式化している 2D+T 法は船首波の碎波もシミュレートできる (例えば Fig.2 の  $Fn=0.7$ ) ほど自由表面の解像度は高く、2 次元問題であるがゆえに計算コストも低い。Fig.3 の観測結果との比較という定性的な評価ではあるが、Fig.6 における 2D+T 法の計算結果はトランサム船尾後流のキャビティ領域の形成、流速による領



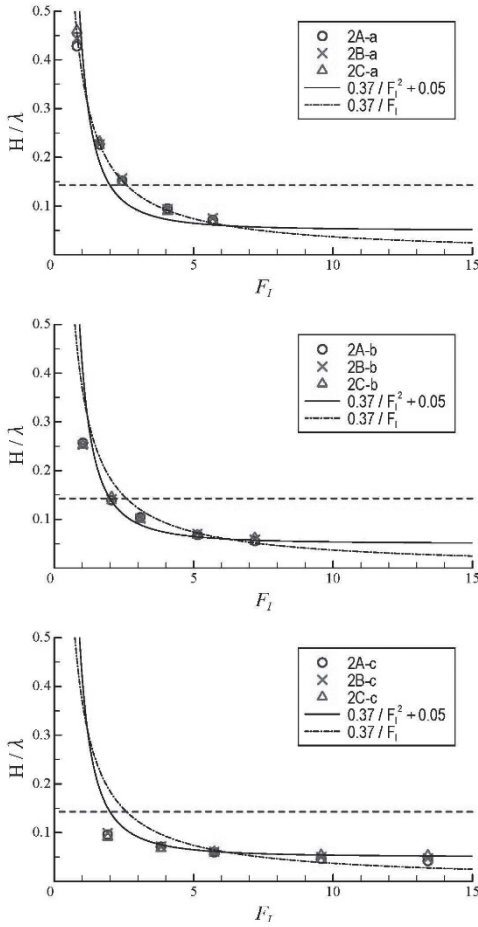


図8 波形勾配とフルード数との関係

**Fig.8** Relations between wave steepness and Froude number.

域長さの変化, さらに rooster tail の数値表現が出来ており, トランサム船尾後流の自由表面の数値表現に有効であると考えられる。

Fig.7 はいずれも  $Fn$  が 0.1 から 0.7 の範囲を 2D+T 法により計算した結果である。上から順に 2C-a, 2C-b, 2C-c 船型であり, 没水深度  $I_d$  が大きいほど波高は大きいことがわかる。また,  $Fn$  が高くなると船底から滑らかに波面が流出しており実際の造波の状況をよく表現しているのに対し,  $Fn$  が低い場合には小さい没水深度  $I_d$  では波高はあまり大きくないが,  $I_d$  が大きくなるにが相対的に強く波傾斜も大きくなる。Fig.3 ( $Fn=0.35$ ) が示すよう

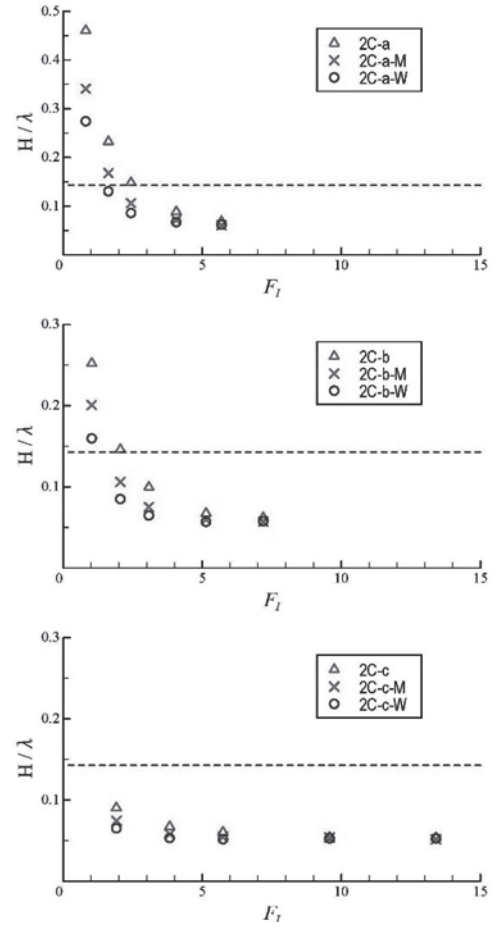


図9 波形勾配とフルード数との関係

**Fig.9** Relations between wave steepness and Froude number.

に船長方向に波崩れを生じる影響も重なり, トランサム直後の波面近傍には死水領域が生じるものと推察できる。これは船底から波面が滑らかに流出していない状態に対応する。そこで, 船尾波の波傾斜  $H/\lambda$  について没水深度ベースのフルード数  $F_I = U/\sqrt{g I_d}$  で整理し, これらの相関関係を調べてみた。その結果を Fig.8 に示す。ここでいう船尾波の波長とはトランサム船尾から波高の最も高い位置までの水平距離を  $\lambda/2$  と考えるものとする。これらの結果からわかるように没水深度ベースのフルード数で整理すると船尾波の波傾斜にはトランサムにおけるキール勾配  $\theta$  の影響はほとんど無い

と言える。 $I_d=0.4$  の場合 (状態 -a) で  $F_T=0.8$  においてのみ 2A 型, 2B 型, 2C 型による差が見られるが, 波傾斜は約  $1/2$  にも達するほど大きなものであり,  $yz$  平面上における波形の頂角は約  $30^\circ$  になっている。よって, これらの差は波しぶき先端を表現する際の計算誤差による結果と考えられる。このときの波面の様子は Fig.3 の結果からも予想される。また Fig.8 から言える 2 番目の点はポテンシャル理論で計算される後流波形の波傾斜は没水深度ベースのフルード数のほぼ  $-2$  乗から  $-1$  乗程度の量に比例するということである。図中の点線は一般的な波の碎波限界である  $1/7$  を示すものであり, この線より上に位置する場合は碎波して現実には波面は存在しないと考えられる。これらは Fig.7 が示す低フルード数域で異常に急峻な波形を示す計算結果に対応しており, 波崩れあるいは死水領域を形成する状態と考えられるが, これ以上の議論には実験による検証が必要である。最後に, トランサム幅の影響について検討した結果を Fig.9 に示す。Fig.8 と同様に波傾斜を没水深度ベースのフルード数で整理したものである。 $I_d$  が大きいほど波傾斜が大きくなる傾向は同じであるが, トランサム幅の影響がはっきり現われており,  $I_d$  が大きいほどトランサム幅の波傾斜への影響は大きいと言える。

## 5. 結言

トランサム船尾を有する船の後流について, 造波現象に着目する視点から自由表面流れの数値解析を行った。2つのランキンパネル法と 2D+T 法の合計 3 種類の方法で推定した波面の結果を回流水槽で観測した模型船の船尾波形と比較し, 2D+T 法の有効性について検討を行った。また, トランサム船尾形状を系統的に変化させて後流波形に及ぼす影響について調査した結果, 以下の結論を得た。

1. 2D+T 法はトランサム船尾から形成されるキャ

ビティ領域と造波干渉をともなう船尾後流の波面を効率的にかつ合理的に表現することができることがわかった。しかし, トランサム船尾端で完全な平滑水面にならない低速域では伴流影響のモデル化が必要と考えられる。

2. トランサムの没水深度が大きく, またトランサムの幅が小さくなるほど後流の波高が大きくなる傾向にあり, 没水深度が大きいほど幅の影響も大きくなる。今回の調査範囲では船尾のキール勾配の影響はほとんど見られなかった。
3. 後流波形の波傾斜は没水深度ベースのフルード数で整理できて, フルード数の  $-2$  乗から  $-1$  乗程度の量に比例するものと考えられる。
4. トランサム船尾端直後の流れが死水領域となる状態から平滑水面へと移行する流速はポテンシャル理論から推定される後流波形の波傾斜の大きさから予測できる可能性がある。

## 謝辞

本報告は日本機械学会 2005 年度年次大会での講演が契機となっている。横井先生から講演参加の呼びかけを頂き, 機械学会での初めての講演となりました。この点に対して感謝の意を表します。当時の横井先生との議論を通して頂きましたご意見を振り返り, この度, 新たに課題を追加して成果をまとめました。最後に, 横井教授のこれまでの流体力学分野へのご尽力に敬意を表します。

## 参考文献

- 1) 木下 健, 丸尾 孟, 他 2 名, “薄い船の造波に及ぼす粘性の影響について”, 日本造船学会論文集, 第 146 号 (1979), pp. 9-17 (in Japanese).
- 2) 土井康明, 梶谷 尚, 北村 徹, “船尾造波特性に及ぼす境界層・伴流の影響”, 日本造船学会論文集, 第 159 号 (1986), pp.23-31 (in Japanese).
- 3) 池畑光尚, 田原祐介, “船体のまわりの自由表面に及ぼす境界層と伴流の影響”, 日本造船学会論文集, 第 161 号 (1987), pp.49-57 (in Japanese).

- 4) 船野 功, 山野惟夫, “2次元トランサム船尾造波流場について”, 関西造船協会論文集, 第235号 (2001), pp.23-30 (in Japanese).
- 5) T. Yamano et al., “A consideration on Transom Stern Design” 関西造船協会論文集, 第242号 (2004), pp.1-8.
- 6) H. Kihara, S. Naito and M. Sueyoshi, “Numerical Analysis of the Influence of Above-Water Bow Form on Added Resistance Using Nonlinear Slender Body Theory”, Journal of Ship Research, Vol.49, No.3 (2005), pp.191-206.
- 7) 木原 一, “飛沫をとまなう非線形自由表面流れの計算法について”, 日本船舶海洋工学会論文集, 第8号 (2008.12), pp.89-98 (in Japanese).
- 8) P. R. Couser, J. F. Wellicome and A. F. Molland, “An Improved Method for the Theoretical Prediction of the Wave Resistance of Transom-Stern Hulls Using a Slender Body Approach”, Int. Shipbuilding. Progr., 45, No.444 (1998), pp.331-349.
- 9) S. X. Du, D. A. Hudson, W. G. Price, P. Temarel and Y. S. Yu, “Numerical Prediction of Steady Flow around High Speed Vessels with Transom Sterns”, Proc. of FAST2003, (2003), pp.17-24.
- 10) S. W. Robards and L. J. Doctors, “Transom Hollow Prediction for High-Speed Displacement Vessels”, Proc. of FAST2003, (2003), pp.19-26.
- 11) 江口辰哉, “Rankine source法による定常造波問題の数値解法”, 日本造船学会論文集, 第177号 (1995), pp.101-112 (in Japanese).
- 12) 木原 一, “トランサム船尾の自由表面流れ”, 日本機械学会2005年度年次大会講演論文集, 第2巻 (2005), pp.169-170 (in Japanese).