# 境界要素法による翼付き没水体まわりの流れ計算

正員 増 田 聖 始\* 正員 笠 原 良 和\* 正員 芦 立 勲\*\* 1

# Numerical Simulation for Submerged Body Fitted with Hydrofoil by Boundary Element Method

by Satoshi Masuda, Member, Yoshikazu Kasahara, Member Isao Ashidate, Member

#### Summary

Recently many kinds of high speed boats have been developed. The hydrofoil type is one of them. On considering the hydrofoil type, one important problem is interaction, for example, interaction between the main hull and the hydrofoil, the hydrofoil and the free surface etc. Here we consider the interaction between the free surface and a submerged lifting body by numerical simulation. The submerged lifting body is composed of a submerged body and a hydrofoil adapted to it. The numerical method is the Boundary Element Method (BEM) that was originally developed at Hiroshima University by Mori and Qi. We have modified the original method and have applied it to this case.

We measured the lifting force and the pressure distribution on the hydrofoil in the NKK Tsu Ship Model Basin, and confirmed that BEM is an effective method for the interaction problem between the free surface and a submerged lifting body. By using this BEM, we considered the depth effect of the lifting force of the submerged lifting body, the optimum location of the adapted hydrofoil and the optimum submerged body shape.

# 1. 緒

言

近年,船舶の新しい輸送形態を目指し,様々な高速艇の 開発が行われている。しかしそれらの大部分は旅客輸送の 為の小型のものが多い。とくに水中翼を用いて,船体を浮 上させることで大幅に抵抗を低減させる方式のものは,揚 力が長さの2乗に比例して大きくなるのに対し,排水量は 3乗に比例する。したがって水中翼を用いたこれらの船型 は大型化に不適とされてきた。そこで Fig. 12 の Type A に示すような水中翼と没水体を組み合わすことにより,大 型船の高速化を図ろうと言う考えが生まれてきた。つまり 没水体の浮力と水中翼による揚力の複合支持により船体を 浮上させる。没水体の浮力は排水量の増加と同等に増える

\* NKK エンジニアリング研究所 津研究センター

\*\* NKK 船舶・海洋本部基本計画部

原稿受理 平成8年1月10日 春季講演会において講演 平成8年5月15,16日 ので大型化への難点であった揚力の不足を補える。平成元 年度から国家プロジェクトとして開発が行われてきた超高 速船テクノスーパーライナー(TSL, Techno Super Liner) の揚力式複合支持船型(TSL-F2船型)もこのようなコン セプトに基づいている。このように没水体と水中翼を組み 合わせた船型において問題となるのが,没水体,水中翼, 自由表面の相互干渉による水中翼の揚力低下である。

ここでは、解析対象として没水体の長さが85mで40kt で航行するモデルを想定し、没水揚力体と自由表面の相互 干渉によって生じる水中翼の揚力低下について、境界要素 法を用いた数値解析を行い検討した。境界要素法は粘性影 響の少ない流場の解析に適した数値計算方法であり、船舶 流体力学の分野では造波に関する自由表面計算<sup>11213151</sup>や、 揚力体であるプロペラ周りの計算<sup>41</sup>などに広く応用されて いる。今回使用した境界要素法のコードは、広島大学工学 部において開発されたコードを本計算対象に適応させたも のである<sup>112131</sup>。この計算コードを用いて翼付き没水体にお ける没水深度影響、翼取り付け位置の影響、没水体形状の 2

日本造船学会論文集 第179号

影響について検討した。

また船型試験水槽において、水中翼翼面上の圧力計測お よび、揚力計測、波高計測を実施して計算結果と実験結果 の比較検証を行い、計算法の有効性を確かめるとともに、 実験からも没水深度の違いによる揚力および水中翼翼面上 の圧力分布への影響を確認した。

# 2. 境界要素法の定式化と数値計算法

計算対象の座標系を Fig. 1 のように定める。計算対象と なる流場をポテンシャル流場と仮定し、 $\phi$ を攪乱速度ポテ ンシャルとすると、支配方程式は Laplace の方程式で表さ れる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \tag{1}$$

式(1)をGreen 関数を用いて書き直すと

$$c\phi = \oint_{s} \frac{\partial \phi}{\partial n} \frac{1}{r} ds - \oint_{s} \phi \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r}\right) ds \qquad (2)$$

となる。ここで s は流体領域を囲む境界面を表し, r は流場 内の点と境界面上の積分点の距離を表す。また n は,境界 面上の外向き法線ベクトルを, c は空間点に対する立体角 を示す。式(2)を,TENT 関数を用いて1次の離散化を行 う。

$$\sum_{Q=1}^{N} \phi_{Q} D_{PQ} - \sum_{Q=1}^{N} \frac{\partial \phi_{Q}}{\partial n} S_{PQ} = 0 \quad P = 1, 2, \cdots, N$$
(3)

$$S_{PQ} = \iint_{S_Q} T_Q \frac{1}{4\pi r} ds \tag{4}$$

$$D_{PQ} = \iint_{s_Q} T_Q \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{4\pi r} \right) ds \tag{5}$$

また、このときの境界条件は以下のように表される。 $t, \zeta, g$ はそれぞれ時間、自由表面での波高、重力加速度を表し、 U(t)は時刻 t における没水体の前進速度を表す。 $C_p$  は圧 力係数を表し、添字  $TE_+$ 、 $TE_-$  は水中翼後縁での上面と下 面を示す。

自由表面条件;

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\zeta - U(t)\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{1}{2}\left(\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2\right)$$
  
;  $z = \zeta$  (6)  
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} - U(t)\frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial x}\frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial y}\frac{\partial \zeta}{\partial y}$$
;  $z = \zeta$  (7)



Fig.1 Coordinate system

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\frac{\partial U(t)}{\partial n} \tag{8}$$

下流境界条件;  
$$\partial \phi \quad \partial \phi$$
 (0)

$$\frac{\partial n}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial z} |_{z=0}^{z=0}$$

$$k_0 = g/U_0^2$$

その他の外側境界条件;

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \tag{10}$$

Kutta の条件;

$$\phi_{TE+} - \phi_{TE-} = \text{const.} \tag{11}$$

$$C_{\boldsymbol{p}_{TE^+}} = C_{\boldsymbol{p}_{TE^-}} \tag{12}$$

自由表面については、境界要素法とは別に差分法用の細か いメッシュを用いて計算を行う。x方向は3次の上流差分 を用い、y方向と時系列については中心差分を用いて、式 (6)、(7)を解いた。自由表面形状と攪乱ポテンシャルを、 任意の関数fを用いて表すと以下のようになる。

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{2f_{i+1,j} + 3f_{i,j} - 6f_{i-1,j} + f_{i-2,j}}{6\Delta x}$$
(13)

$$\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_{i,j} = \frac{f_{i,j+1} - f_{i,j-1}}{2\Delta y} \tag{14}$$

$$\frac{f_{i,j}^{n+1} - f_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{i,j}^{n+1} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{i,j}^{n}}{2}$$
(15)

Kutta の条件については式(11)を定式化の条件として考慮 し,式(12)については後端から流出する Wake 面の角度を 変更することで境界条件を満足させることができる。しか し実際に Wake 面を変化させて反復計算を行うのは数値 計算上困難である。そこで Wake 面の流出角度を用いて翼



Fig. 2 Flow of calculation

後端の攪乱ポテンシャルを補正することによって,その影響を考慮した。

$$\phi_{TE+} \approx \frac{\pi}{\pi + \alpha} \phi_{TE+} \tag{16}$$

$$\phi_{TE} \approx \frac{\pi}{\pi - \alpha} \phi_{TE} \qquad (17)$$

*a*は,式(12)について Newton の反復法を用いて決定する ことができる。

以上の境界条件のもと式(3),(4),(5)から得た Matrix 方程式を時系列に沿って解く。Fig.2に計算の流れ を示す。

また,計算対象は没水体と水中翼のみとし,実際は水面 貫通部として存在するストラットは省略した。物体形状は 物体表面を三角形パネルを用いて分割することにより離散 化した。

## 3. 実験方法および供試模型

船型試験水槽において計算結果の有用性を確認するため に、以下の項目について計測を行った

- (1) 水中翼翼面上の圧力
- (2) 水面上の波形計測
- (3) 3方向の力成分

供試模型として、計算対象である水中翼付き没水体と水 中翼のみの2状態を用いた。供試模型である没水体の長さ は $L_{pp}$ =3.953 m、最大直径は0.22 m である。また水中翼 翼端から翼端までの幅はB=1.674 m、想定実船に対する スケールは1/21.5 となる。このとき曳引車と没水体もしく は水中翼は、ストラットによって接続されている。水中翼 翼面上の圧力計測には直径 6 mm、定格容量 1.0 kg/cm<sup>2</sup> の 圧力センサーを翼面上に埋め込み,計測を行った。この際, 圧力センサーが翼面上において段差にならないように加工 した。コードは溝に埋め込んだ後,翼面を整形した。Fig.3 に圧力センサーの配置図を示す。波形についてはサーボ式 波高計を用いて計測を行った。また揚力および抗力の計測 については3分力計を用いた。Table 1 に計算と実験の対 応を示す。

#### 4. 考 察

水中翼付き没水体と水中翼周りの流れについて,没水深 度影響,水中翼取り付け位置,没水体形状について考察を 行う。計算条件は Fn=0.713で,特に断りのない場合は没 水体形状は Fig. 12 の Type A とする。水中翼の翼中心は 没水体先端から 55%の位置とし,迎角は 3°とする。また各 物理量の無次元化は,没水体の前進速度  $U_0$  と没水体の長 さ  $L_{\mu\nu}$  を用いて行った。

4.1 没水深度影響

水中翼付き没水体および水中翼単独の揚力へ没水深度が 及ぼす影響を境界要素法を用いた計算と,実験結果から検 討した。また実験結果には一部不確かさ解析を行った。

Fig.4に水中翼単独と水中翼付き没水体の没水深度によ

Table 1 Conditions of experiments and calculations

	Measured		8.E.M	
	Submerged body + Hydrofoil	Hydrofoil	Submerged body + Hydrofoil	Hydrofoil
d/Lpp=0.06	0	0	0	0
d/Lpp=0.08	0	0	0	0
d/Lpp=0.10	0	0	0	0
d/Lpp=0.13	0	0	0	0
d/Lpp=0.20			0	0
d/Lpp=0.25			0	0



Fig. 3 Position of pressure measuring sensors

4



Fig. 4  $C_L$  for each submergence depth

る場力の違いを示す。ここでは境界要素法による計算結果、 計測した翼面圧力を積分して求めた揚力、三分力計で計測 した揚力について比較を行った。圧力積分によって求めた 揚力は、翼端の揚力を0として Span 方向の上面と下面の 圧力差を線形に数値積分して求めた。また没水深度は船長 で無次元化した値であり,水面と没水体中心の距離で表す。 はじめに水中翼付き没水体について考える。定性的には没 水深度が大きくなるにつれてこれらの揚力は大きくなって いる。定量的には計算値と圧力積分による揚力はよく一致 しているが三分力計によって計測した値はこれらより大き い。これは計算値と積分値が翼面上の揚力のみを考え、没 水体自体に誘導される揚力を考慮していないためだと考え られる。計算結果から自由表面影響がほとんどない没水深 度1の場合と没水深度が0.08の場合では、揚力はおよそ 35%程度減少していることが分かる。つまり没水深度が小 さくなると自由表面でより大きな波を作り、その影響によ って水中翼の揚力が低下する。また,水中翼付き没水体と 水中翼単独の場合では、水中翼単独の方が揚力が大きい。 これは没水体が存在しない方が自由表面に与える攪乱が小 さく,その結果,揚力の減少も小さいためだと考えられる。 水中翼単独の場合に着目すると,定性的には水中翼付き没 水体と同様に深度が浅くなるほど揚力が小さくなっている のが分かる。ここで三分力計によって計測した揚力が、圧 力積分した値より大きいのは、圧力積分の精度の問題の他 に, 曳航試験時に左右の翼をつなぐための翼が中央に存在 しており,この部分の揚力によって,大きくなっていると 考えられる。

Fig.5 に水中翼付き没水体についての計算と実験による 翼面上の圧力分布を示す。Fig.6 には水中翼単独の場合の 翼面上の圧力分布を示す。白抜きのマークは、水中翼上面 の実験による計測値を示し、黒塗りのマークは下面の計測 値を示す。境界要素法による計算値と実験値を比較すると、 両者とも没水深度が小さくなるほど翼上面の圧力が大きく なり、結果として揚力が減少しているのが分かる。また翼 下面では没水深度の影響による圧力変動は小さい。水中翼 単独と水中翼付き没水体について圧力分布の比較を行う と、水中翼単独の方が翼上面の圧力が低いことが分かる。

Fig. 5 のように計算結果と実験結果を比較して検討を行 う場合には、実験結果の精度の評価も重要となる。その意 味から水中翼翼表面圧力計測における不確かさ解析を行っ た。不確かさ解析は、最近水槽試験結果に対しても水槽試 験の品質管理という面から採用することを勧められてい る。ここでは、通常の手法<sup>8)</sup>を使うとともに、精密度の算出 には、計測対象が圧力の平均値であるために姫野らが提唱 した算出式<sup>9)</sup>を用いた。圧力係数( $C_P$ )への不確かさを Fig. 5 の中央に示す水中翼の 50%span の上下面 10 点 (d=0.08) で行った。圧力係数のパラメータは圧力値、水の密 度、速度である。これらの誤差要因として、圧力値には圧 力計、較正曲線へのあてはめ、AD 変換、計測値の変動を挙 げた。水の密度には温度測定が、速度には計測速度が 4.4 m/s と高速なために、対水速度でなく対地速度を解析に使 用したことによる残流流れが誤差要因となる。不確かさに



境界要素法による翼付き没水体まわりの流れ計算

Fig. 6 Pressure distribution (Hydrofoil)

大きな影響を与える測定量は,計測値の変動と残流である。 95%包括度をもつ不確かさ URSS を算出した。上面の後縁 付近 (x/C=0.8) では Cp 値に対して 3.7%,下面の前縁付 近 (x/C=0.2) では 2.0%の不確かさがあり、それ以外で は0.6%~1.0%の不確かさをもつことを確認した。水中翼 下面の前縁付近(x/C=0.1)の計算結果との不一致は実験 の誤差範囲を越えていることを確認できる。

計算によって求めた各没水深度における自由表面形状を Fig.7に示す。波形は没水体中心線上の自由表面形状を示

し、原点は没水体先端とした。没水深度が浅くなるほど波 高は大きくなり,波傾斜は大きくなっている。水中翼の翼 中心は没水体の 55% Lpp であるから,波形が大きくなるほ ど波に沿った下向きの流れが大きくなり、結果として水中 翼の有効迎角が減少することになる。Fig.8は計測した波 高と計算によって得られた波高を比較した図である。没水 体中心から 0.630 Lpp 幅方向へ離れた点についての波形に ついて比較を行った。船体から後ろに離れるほど一致は良 くないが、没水体に近いところでは良く一致している。こ



日本造船学会論文集 第179号



Fig. 7 Wave profile for each submergence depth



Fig. 8 Wave profile (Submerged body with Hydrofoil)

のことから自由表面と揚力没水体の相互干渉において重要 となる没水体近傍の自由表面形状は,計算によって精度良 くシミュレートできると考えられる。

## 4.2 水中翼取り付け位置

自由表面と没水揚力体の相互干渉により、揚力減少が生 じることは前節までで明らかとなった。ここでは没水体に 取り付けた水中翼の位置を変更することによって、より揚 力減少の少ない翼取り付け位置があるかを検討した。没水 深度が 0.08 の場合について,水中翼の翼中心を没水体先端 から 35, 40, 45, 50, 55, 60% Lpp と考えて計算を行った。 Fig.9に翼の取り付け位置と揚力の関係を示す。Fig.9か らは没水体の長さ方向の半分より後方に翼を付ける方が若 干,揚力減少が大きいという傾向を示すことがわかる。し かし4.1 で示したように自由表面影響の有無による揚力の 差に比べると、これらの差は大きくない。Fig. 10 に没水体 中心上における, 翼取り付け位置が 35%, 50%, 60%の場 合の波形を示す。翼取り付け位置が没水体中心より前方に なると,生じる波形の位相も前方に移動する。また位置が 後ろになると波形の位相もそれにともなって後方に移動す る。つまり波形の位相と水中翼の位置関係は、水中翼の取 り付け位置に関係なくほぼ一定である。本計算を行う前は、



Fig. 9  $C_L$  for wing positions

Fn=0.713という高速域において,自由表面に与える影響 は没水体が支配的であり,水中翼による自由表面への影響 は小さいと考えた。よって水中翼の取り付け位置を変更す ることで有効迎角の減少が小さい最適位置を見つけること ができると予想した。しかし計算結果からは水中翼が自由 表面近傍にある場合,水中翼が波形の位相に影響を与える ことがわかった。したがって,水中翼の取り付け位置を変 更しても波形との相対的な位置関係は,ほとんど変化しな

#### 境界要素法による翼付き没水体まわりの流れ計算



Fig. 10 Wave profile for each wing positions



Fig. 11 Pressure distribution for each wing positions

いという結論を得た。つまり水中翼の取り付け位置を変化 させても水中翼と没水体,自由表面の相互干渉により,有 効迎角を減少させるような流れはほとんど変化しないと考 えられる。翼取り付け位置が 35,50,60% *Lpp* の場合の水 中翼翼面上の圧力分布を Fig.11 に示す。分布の違いが若 干見られるがその差は小さい。このことからも翼取り付け 位置によって揚力がほとんど変化しないことが分かる。

# 4.3 没水体形状

水中翼を取り付けている没水体の形状の揚力への影響を 検討するために形状を4種類に変えて計算した。まずベー スとなる没水体の形状は4.2まで計算を行ってきた形状で 断面形状が円の船型(Type A)である。断面積形状は円で あるが面積を小さくした最長体船型(Type B),断面積分 布の等しい縦長楕円の船型(Type C),断面積分布の等し い横長楕円の船型(Type D)を考え比較を行った。形状の 概略を Fig. 12 に示す。Type B は没水体の排水量を減らす ことで細長化した船型で自由表面への影響が小さいと考え られる。Type C, Type D は排水量を Type A と等しくし, 断面の面積を同じとして縦長と横長の楕円形状にしたもの である。没水深度を一定として考えた場合,縦長形状は自 由表面にたいする影響が大きく,横長形状は小さいと考え られる。以上のようなコンセプトのもと各形状について没 水深度 0.08 についての計算を行った。また Type A, Type B については船型試験水槽において水中翼の迎角が 2°の 場合の揚力を3分力計により計測した。

Fig. 13 に各没水体形状についての揚力比較を示す。計算 結果,実験結果ともに Type B の揚力が大きいことが分か る。また Type A, C, D では,Type C の揚力が他よりも 若干小さく,他はほぼ同程度である。Fig. 14 に波形の比較 を示す。排水量の小さい Type B は波形も小さく,揚力減 少を引きおこす水中翼へ流入する下向きの流れも小さいと 考えられる。残りの Type A, C, D は波形の違いがほとん ど見られない。以上の結果から没水体が回転体に近い細長 形状の場合は自由表面への影響は没水体の排水量によって 決定され、断面形状の違いによる変化はほとんどないこと が分かった。ただし、本計算では没水体を揚力体として取

7

8

日本造船学会論文集 第179号

Midship section











り扱っていないが、実際は没水体自体にも揚力が発生する ため揚力に対する最適形状は存在すると考えられるが主要 ではない。

以上の結果から没水体長さを一定にし、排水量を減少さ せれば自由表面形状の変化も小さくなり水中翼の有効迎角 が大きくなることがわかった。しかし、全体としては排水 量減少分の浮力減少が生じるため、実際は浮力と揚力の和 について評価する必要がある。すなわち排水量に見合った 最適な浮力と揚力の割合を見つけることが重要になると考 えられる。

# 5. 結 言

境界要素法による数値解析結果と船型試験水槽による実 験結果から得られた結論を以下に述べる。

1) 境界要素法により求められた水中翼翼面上の圧力分 布および揚力を船型試験水槽において計測した値と比較 することによって、本計算方法が自由表面と没水揚力体 との相互干渉に対するシミュレーションとして有効であ ることを明らかにした。

2) 本計算対象のような超高速航行する水中翼付き没水体を船型試験水槽において実験する場合には、計測時間が十分とれないという問題や実験準備や実験でかなりの時間と費用が必要であるという問題が生じる。特に翼取り付け位置や没水体形状の最適化などを実験から求めることは困難である。しかし、本計算法を用いることにより水中翼付き没水体まわりの流れを簡便に求めることができる。よって本計算法が水中翼付き没水体の最適化を行うための設計ツールの1つとして有効であると考える。

3) 水中翼付き没水体においては主に没水体と自由表面の干渉によって、水中翼の有効迎角を減少させるような流れが生じ、その結果水中翼の揚力が減少することが計算と実験から確認できた。また没水深度を深くすると自由表面に対する影響が小さくなり、その結果揚力の減少も小さくなることも確認した。



Fig. 14 Wave profile for submerged body types

4) 水中翼の最適取り付け位置について境界要素法を用いて検討した。没水体に対する水中翼の取り付け位置を変更した場合,自由表面形状も変化し,結果として水中翼と自由表面形状の相対的な位置関係はほとんど変ず,揚力に変化がないという結果が得られた。つまり水中翼の取り付け位置を変化させても揚力は変化しないことが分かった。

5) 水中翼の揚力減少と没水体形状の関係について境界 要素法を用いて検討した。排水量を一定にして断面形状 を変化させた没水体では、揚力はほとんど同じとなる。 排水量を小さくした細長型は揚力減少が小さいことがわ かった。しかし実際は、没水体の排水量と揚力によって 船体を支持するため、没水体の排水量を減らすには限度 があり、ある程度の水中翼の揚力減少はやむをえないと 考えられる。

6) 没水体と水中翼の組み合わせた船型を考えるときに は、没水体の浮力とそれによる水中翼の揚力減少のバラ ンスを考えなければならない。全体の船体支持力を構成 する没水体の排水量による浮力と水中翼の揚力の割合に ついて、最適な組み合わせを研究していく必要がある。

最後に,水中翼付き没水体に関する計算に本境界要素法 を適応するにあたり,ご指導を頂いた広島大学工学部 茂 里一紘教授,土井康明助教授,Dr.XuQiに深く感謝いた します。本論文で用いた実験結果は,平成元年度から6年 間おこなわれた国家プロジェクトである超高速船テクノス ーパーライナー(TSL, Techno Super Liner)の揚力式複 合支持船型(TSL-F2船型)の開発の中で行われた実験の 一部であり,発表に際し便宜を図っていただいたF部会部 会長である川崎重工業株式会社 荻原亮太郎氏およびF2 部会長(株)ジャパンテクノメイト 須藤正信氏とTSL-F2部会の委員の方々,TSL技術研究組合の方々に感謝申 し上げます。また本論文発表に関し,お骨折りいただいた NKK 船舶海洋本部 佐藤博一部長,協同して実験を行っ ていただいたNKK津研究センター代田國彦氏と(株)ジ ャパンテクノメイトの皆様にお礼申し上げます。

# 参考文献

- Xu Qi and Mori, K., "Numerical simulation of 3-D Nonlinear Water Wave by Boundary Element Method—In the case of submerged bodies", Jour. of the Soc. of Naval Arch. of Japan, Vol. 165, 1989, pp. 9-15
- Xu Qi and Mori, K.: "A Boundary Element Method for the Numerical 3-D Nonlinear Water Waves Created by a Submerged Lifting body", Jour. of the Soc. of Naval Arch. of Japan, Vol. 167, 1990, pp. 22-34
- Xu Qi: "Numerical Simulation of 3-D Nonlinear Water Wave by Boundary Element Method", Doctor Thesis, Hirosima University 1989
- 4) Ling, Z., Sasaki, Y. and Takahashi, M.: "Analysis of Three-Dimensional Flow around Marine Propeller by Direct Formulation of Boundary Element Method (1st Report: in Uniform Flow)", Jour. of the Soc. of Naval Arch. of Japan, Vol. 157, 1985, pp. 85-97
- Hoyte C. Raven: "Nonlinear Ship Wave Calculations using the RAPID method", 6th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Iowa, August 1993
- Morino, L. And Kuo, C.-C.: "Subsonic Potential Aerodynamics for Complex Configurations: A General Theory", AIAA Journal, Vol. 12, No. 2, Feb. 1974, pp. 191-197
- 7) 柳沢三憲: "境界要素法を用いた亜音速流中の3次 元揚力物体の空力特性の計算",航空宇宙技術研究 所報告, 1984
- 8) 笠原良和: "推進性能試験法",日本造船学会推進性 能研究委員会・第5回シンポジウム,船体まわりの 流れと船型開発に関するシンポジウム,1993, pp. 97-132
- 姫野洋司, 西尾 茂, 高松健一郎: "不確かさの抵抗・ 自航試験への応用", 関西造船協会誌, 第 214 号, 1990, pp. 39-47