水工研技報　30 1～8，平20
Tech. Rept. Nat. Res. Inst. Fish. Eng. 30 1-8, 2008



# 有限及び無限喫水極小造波抵抗理論の与える高速域の船型について

升也利一*

# On the optimum hull forms for high speed vessels given by the minimum wave resistance theories of the finite and infinite draft version

Toshikazu MASUYA*

**Abstract:** In this report, the author discusses the applicability of the minimum wave resistance theories for high speed fishing vessels. Numerical codes of the theory of the finite draft version and that of infinite draft version are developed and applied to saury fishing vessels whose speed reached to 0.47 by the Froude number. Numerical results show that the limit of applicability of the minimum wave resistance theory of the infinite draft version is rational up to the Froude number 0.35. The results of the theory of the finite draft version seem to have proper characteristics beyond the Froude number 0.5.

**Key words:** fishing vessel, high speed, minimum wave resistance theory

## 1　まえがき

我が国漁船の大勢を占める沿岸漁船は，デッキを持たないオープンボート形式から，大型船舶と同様の構造を持つ内燃機船に至るまで，船体及び機関の形式は様々である。これらを流体力学的に分類すると（図１参照），航行中に船の重量を支える力として，静的浮力に頼る排水量型船型と，船底に働く動的揚力に頼る滑走型船型の中間となる半滑走型（または半排水量型）船型に分類されるものが大部分である。

しかしながら，沿岸漁船であっても大型のものの中には，排水量型船型に分類するのが適当であると考えられる船型も存在する。このような船型は排水量型であっても，大型の一般商船に比べればフルード数が非常に高く，経済性の追求や$CO_2$排出量削減のための省燃料消費化の観点からは造波抵抗の低減が重要なポイントとなる。

このような排水量型沿岸漁船の例として，本報告では，平成17年度から実施されている「漁船漁業構造改革促進調査検討事業」[1] の中で取り上げられたサンマ棒受け網・鮭鱒流し網兼業漁船を想定し，従来フルード数の高い船型に対して適用例の少ない極小造波抵抗理論[2,3]の排水量型沿岸漁船への適用について，数値計算による検討を行った結果を報告する。

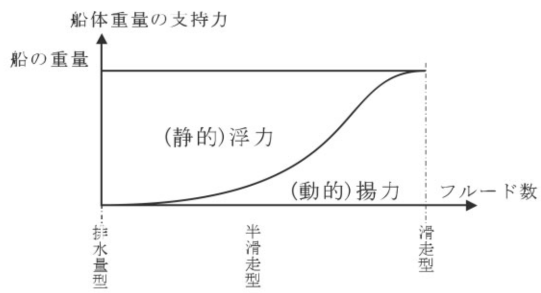


**図１　船型の流体力学的分類の概念**

## 2　極小造波抵抗理論の概要

漁船の航走フルード数は，一般商船よりも遙かに高く，従って船体抵抗に占める造波抵抗の割合は非常に大きい。丸尾[4,5] によれば，造波抵抗を支配する要素は１）フルード数，２）排水量長比，３）柱形係数

2008年１月31日受理　水産総合研究センター業績水工研C第56号
* 水産工学研究所漁業生産工学部船体研究室

Cpであり，次に重要となるのはCpカーブ(横裁面積曲線)である。Cp及びCpカーブを設計フルード数において造波抵抗極小という観点の下に最適化する方法に極小造波抵抗理論[2, 3]がある。

極小造波抵抗理論では，船型から造波抵抗を直接計算できる薄い船の理論[6]を用いる。無限小喫水の場合は細長船理論[7]となるが，Kotikら[8]が述べているように，極小造波抵抗理論に使われる細長船理論は薄い船の理論の喫水ゼロの極限に過ぎない。

極小造波抵抗理論[2, 3]では，船型を表す関数を変関数，造波抵抗をその汎関数と見なし，ラグランジェの未定乗数法により排水量などに対する付帯条件を考慮して，変分法により造波抵抗が極小となる船型を求める。このとき，造波抵抗の表現に通常の吹出し分布による表現を用いると，極小解は限られた条件下において無意味な解しか与えないため，部分積分によって２重吹出し分布による表現に改める[2]。導かれるオイラーの方程式は第１種フレッドホルム型積分方程式となるが，この積分方程式の核関数は対数特異性を持つため，得られる解は船体の前後端において $1/\sqrt{x}$ の特異性が現れる[9]。このため極小造波抵抗理論では，解は船型を直接表しているのではなく，造波抵抗が極小値をとる２重吹出しの線状あるいは面状の分布であると考える。

船型の代わりとして２重吹出し分布の問題を考える場合，排水容積など船体の幾何学的条件を表す付帯条件を２重吹出しの分布密度では直接には表現し得ないことが問題となるが，Taylor[10]によれば，その誤差は前後揺れの附加質量程度なので，極小造波抵抗理論の基となっている造波抵抗理論の近似精度からは高次の微小量として無視することができる。造波抵抗理論の性質として，水面下に深く潜るほど水面の造波は低減されるため，喫水方向の形状に対しては有益な情報を与えない。このため，２重吹出し分布は，喫水方向に一定の分布密度と仮定される。結局，これらのことから，得られた２重吹出しの分布密度はCpカーブを表わすものと解釈される。

極小造波抵抗理論には，１）無限喫水の場合[3, 4]，２）有限喫水の場合[11, 12]，３）無限小喫水の場合（細長体理論）[7]の３種類があり，実用上は１）の無限喫水の理論が一般によく用いられているようである。この中で，３）については，基となる細長体理論が低速及び高速では物理的に不合理な造波抵抗の推定値を与えることが指摘されている[8, 13, 14]。このような物理的に不合理な推定値を与える造波抵抗理論に基づいた極小造波抵抗理論によってCpカーブの検討を行うことには疑問がある。そこで本報告では以下の章において，１）の無限喫水と２）の有限喫水の極小造波抵抗理論を取り上げて検討し，それらに基づく排水量型漁船の柱形係数Cp及びCpカーブの最適化を行うプログラムを開発し，両理論が与える高速域の極小造波抵抗船型を求め，その性質について考察した結果について述べる。

## 3　計算式のまとめ

### 3.1　オイラーの方程式

薄い船の理論によれば，喫水方向に一様な断面形状を持つ喫水 $T$ の船の造波抵抗 $R_{wT}$ は，船体の片幅を $b(x)$，船の前進速度を $U$，定常造波の波数 $K_0$ を $K_0$=$g/U^2$ と書くとき，次式で与えられる。

$$R_{wT}=\frac{4}{\pi}\rho U^2\int_{-L/2}^{L/2}\frac{\partial\ b(x)}{\partial\ x}dx\int_{-L/2}^{L/2}\frac{\partial\ b(x')}{\partial\ x}\int_1^{\infty}\frac{(1-\mathrm{e}^{-K_0Tu^2})^2}{u^2\sqrt{u^2-1}}\times\cos\{K_0(x-x')u\}dudx' \tag{1}$$

同様に，１）の無限喫水の場合の造波抵抗 $R_{w\infty}$ は，(1)式で $T\to\infty$ と置くことにより，

$$R_{w\infty}=\frac{4}{\pi}\rho U^2\int_{-L/2}^{L/2}\frac{\partial\ b(x)}{\partial\ x}dx\int_{-L/2}^{L/2}\frac{\partial\ b(x')}{\partial\ x}dx'\int_1^{\infty}\frac{\cos\{K_0(x-x')u\}}{u^2\sqrt{u^2-1}}du \tag{2}$$

で表される。(1)，(2)式は船体中心面に吹出しが分布した場合の表示式であるが，前章で述べた通り，極小造波抵抗を与える船型を求める際には２重吹出し分布による表現を用いる。即ち， $b(\pm L/2)=0$ を仮定して部分積分すると，(1)，(2)式はそれぞれ次のようになる。

$$R_{wT}=\frac{4}{\pi}\rho gK_0\int_{-L/2}^{L/2}b(x)dx\int_{-L/2}^{L/2}b(x')\int_1^{\infty}\frac{(1-\mathrm{e}^{-K_0Tu^2})^2}{\sqrt{u^2-1}}\times\cos\{K_0(x-x')u\}dudx' \tag{3}$$

$$R_{w\infty}=-2\rho gK_0\int_{-L/2}^{L/2}b(x)dx\int_{-L/2}^{L/2}b(x')\,\mathrm{Y}_0(K_0|x-x'|)dx' \tag{4}$$

ここで， $\mathrm{Y}_n(x)$ は $n$ 次の第２種ベッセル関数であり，(4)式の導出には第２種ベッセル関数の積分表示式

$$\mathrm{Y}_0(x)=-\frac{2}{\pi}\int_1^{\infty}\frac{\cos(tx)}{\sqrt{t^2-1}}dt \tag{5}$$

を用いている。(3)，(4)式は $K_0\to 0$，即ちフルード数無限大のとき，それぞれ $R_{wT}=O(K_0)$，$R_{w\infty}=O(K_0\ln(K_0))$ となり，何れも造波抵抗はゼロになる。しかし，これらの性質を見るために， $y_1=K_0$， $y_2=K_0\ln K_0$ と置いて $K_0$ を横軸にこれらをプロットしてみると図２のようになり，造波抵抗ゼロへの近づき方には両者で大き

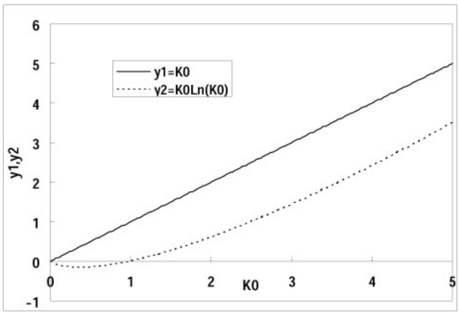


**図２　造波抵抗係数の高速域における漸近的な挙動**

な差が生じている。即ち，$K_0$が大きい場合には，両者同じような傾向でゼロに近づくが，$y_2$は$K_0=1$で一端ゼロになり，さらに負の値に転じた後，再び$K_0=0$でゼロとなっている。このことは，無限喫水の計算では，フルード数の増加と共に造波抵抗係数は減少するが，$K_0=1$となるフルード数を境に，逆に推力が発生するということになる。このことから，１）の無限喫水の場合についても，３）の無限小喫水の場合と同様に，高速域における計算結果には，十分注意を払う必要のあることがわかる。なお，逆に$K_0 \to \infty$のときには，⑶，⑷式からも明らかなように，両者は一致する。

さて，１章で述べた通り，船幅$b(x)$を２重吹出しの密度$\varphi(x)$で置き換え，次のような無次元化

$$\xi=\frac{2x}{L},\ \tau=\frac{2T}{L},\ \gamma_0=\frac{K_0L}{2}=\frac{F_n^2}{2},\ \bar{B}=\frac{2}{L}\int_{-L/2}^{L/2}f(x)dx,$$
$$\varphi(\xi)=\frac{2f(x)}{\bar{B}} \tag{6}$$

を用いると，造波抵抗係数はそれぞれ次式で表される。

$$C_{wT}=\frac{R_{wT}}{1/2\rho\bar{B}^2U^2}=\frac{2}{\pi}\gamma_0^2\int_{-1}^{1}\varphi(\xi)d\xi\int_{-1}^{1}\varphi(\xi')\int_{1}^{\infty}\frac{(1-\mathrm{e}^{-\gamma_0\tau u^2})^2}{\sqrt{u^2-1}}$$
$$\times\cos\{\gamma_0(\xi-\xi')u\}dud\xi' \tag{7}$$

$$C_{w\infty}=\frac{R_{w\infty}}{1/2\rho\bar{B}^2U^2}=-\gamma_0^2\int_{-1}^{1}\varphi(\xi)d\xi\int_{-1}^{1}\varphi(\xi')\,\mathrm{Y}_0(\gamma_0|\xi-\xi'|)d\xi' \tag{8}$$

ここで，次の関数$K(\tau;\xi)$を定義する。

$$K(\tau;\xi)=\int_{1}^{\infty}\frac{(1-\mathrm{e}^{-\gamma_0\tau u^2})^2}{\sqrt{u^2-1}}\cos(\gamma_0\xi u)du \tag{9}$$

⑼式を用いると，⑺，⑻式は次のように表される。

$$\left.\begin{matrix}C_{wT}\\C_{w\infty}\end{matrix}\right\}=\frac{2}{\pi}\gamma_0^2\int_{-1}^{1}\varphi(\xi)d\xi\int_{-1}^{1}\varphi(\xi')\left\{\begin{matrix}K(\tau;\xi-\xi')\\K(\infty;\xi-\xi')\end{matrix}\right\}d\xi' \tag{10}$$

このように，造波抵抗係数は統一的に表されるので，以下では特に有限喫水と無限喫水を区別する必要の無い場合には，以下の式について考える。

$$C_w=\frac{2}{\pi}\gamma_0^2\int_{-1}^{1}\varphi(\xi)d\xi\int_{-1}^{1}\varphi(\xi')K(\tau;\xi-\xi')d\xi' \tag{11}$$

⑾式左辺の値を極小化するに当たり，付帯条件として次の２種類を考慮する。

### a）排水量一定の条件

$$\nabla=2\int_{0}^{T}dz\int_{-L/2}^{L/2}f(x)dx=(L/2)\bar{B}T\int_{-1}^{1}\varphi(\xi)d\xi=L\bar{B}T \tag{12}$$

### b）重心位置一定の条件

$$\nabla x_G=2\int_{0}^{T}dz\int_{-L/2}^{L/2}xf(x)dx=(L/2)^2\bar{B}T\int_{-1}^{1}\xi\varphi(\xi)d\xi=L\bar{B}Tx_G \tag{13}$$

ラグランジェ乗数をそれぞれ$k_n(n=0,1)$とし，⑾式の第１変分をとってこれに加えると次式が得られる。

$$\int_{-1}^{1}\varphi(\xi)d\xi\int_{-1}^{1}\varphi(\xi')K(\tau;\xi-\xi')d\xi'+k_0\int_{-1}^{1}\varphi(\xi)d\xi+k_1\int_{-1}^{1}\xi\varphi(\xi)d\xi$$
$$=\int_{-1}^{1}\varphi(\xi)\left[\int_{-1}^{1}\varphi(\xi')K(\tau;\xi-\xi')d\xi'+k_0+k_1\xi\right]d\xi \tag{14}$$

⒂式が任意の$\varphi(\xi)$に対して成り立つためには，大括弧内がゼロになればよい。即ち，

$$\int_{-1}^{1}\varphi(\xi')K(\tau;\xi-\xi')d\xi'+k_0+k_1\xi=0 \tag{15}$$

が解くべきオイラーの方程式となる。実際の解法に当たっては，$\varphi(\xi)$を付帯条件毎に分離して，

$$\varphi(\xi)=-\frac{k_0}{2}\varphi_0(\xi)-\frac{k_1}{2}\varphi_1(\xi) \tag{16}$$

と置き，個々の$\varphi_n$に関する問題を解き，その線形結合によって所要の条件を満足する$\varphi(\xi)$を求める。即ち，⒃式は次の２つの積分方程式を解くことになる。

$$\int_{-1}^{1}\varphi_0(\xi')K(\tau;\xi-\xi')d\xi'=1 \tag{17}$$

$$\int_{-1}^{1}\varphi_1(\xi')K(\tau;\xi-\xi')d\xi'=\xi \tag{18}$$

$\varphi_n\ (n=0,1,2)$に関する問題を解いた後，ラグランジェ乗数は，⑿～⒁式から$\xi_G=2x_G/L$と置くとき，

$$k_0 = -4\frac{1}{\int_{-1}^{1}\varphi_0(\xi)d\xi} \tag{19}$$

$$k_1 = -4\frac{\xi_G}{\int_{-1}^{1}\xi\varphi_1(\xi)d\xi} \tag{20}$$

によって求められる。(19)，(20)式を(16)式に代入すると，求める２重吹出し密度の分布が得られる。

### 3.2 積分方程式の数値解法

積分方程式の数値解法には，丸尾ら[12)]の付録に示された方法を用いる。具体的な数値計算法を以下に整理して示す。(15)式，あるいは(17)，(18)式の積分方程式は次のような形に書ける。

$$\int_{-1}^{1}\varphi(\xi')K(\tau;\xi-\xi')d\xi' = g(\xi) \tag{21}$$

$K(\tau;\xi)$は，(5)式を用いると次のように表される。

$$K(\tau;\xi) = -\frac{\pi}{2}\mathrm{Y}_0(\gamma_0|\xi|) + \int_1^{\infty}\frac{(\mathrm{e}^{-\gamma_0\tau u^2}-2)\mathrm{e}^{-\gamma_0\tau u^2}}{\sqrt{u^2-1}}\cos(\gamma_0\xi u)du \tag{22}$$

(22)式右辺第２項は有限喫水の影響を表している。$G(\xi)$を対数特異点と正則関数$E(\xi)$に分離する。

$$K(\tau;\xi) = -\ln|\xi| + E(\xi) \tag{23}$$

$$E(\xi) = \ln\{\gamma_0|\xi|\} - \frac{\pi}{2}\mathrm{Y}_0(\gamma_0|\xi|) - \ln\gamma_0 + \int_1^{\infty}\frac{(\mathrm{e}^{-\gamma_0\tau u^2}-2)\mathrm{e}^{-\gamma_0\tau u^2}}{\sqrt{u^2-1}} \times\cos(\gamma_0\xi u)du \tag{24}$$

(24)式右辺の積分項は，積分端点に特異性を持つので，花岡が非定常問題で示した方法[15, 16)]にならって積分変数を $\lambda=\sqrt{u^2-1}$ と変換すると，

$$\int_1^{\infty}\frac{(\mathrm{e}^{-\gamma_0\tau u^2}-2)\mathrm{e}^{-\gamma_0\tau u^2}}{\sqrt{u^2-1}}\cos(\gamma_0\xi u)du = \int_0^{\infty}\frac{(\mathrm{e}^{-\gamma_0\tau(\lambda^2+1)^2}-2)\mathrm{e}^{-\gamma_0\tau(\lambda^2+1)^2}}{\sqrt{\lambda^2+1}}\cos(\gamma_0\xi\sqrt{\lambda^2+1})d\lambda \tag{25}$$

となり，端点での特異性が除去できる。上式を2重指数関数型積分公式により数値積分[17)]する。

ここで，対数核を持つ積分方程式の解は，一般に次のように書ける。

$$\varphi(\xi) = \frac{\Phi(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} \tag{26}$$

$\Phi(\xi)$は $-1\le\xi\le1$ の領域で有界な関数である。ここで，次のような変数変換を行う。

$$\left.\begin{aligned}\xi &= -\cos\beta\\ \xi' &= -\cos\beta'\end{aligned}\right\} \tag{27}$$

このとき，(21)の積分方程式は次のように書ける。

$$\int_0^{\pi}\Phi(\beta')[-\ln|\cos\beta-\cos\beta'| + F(\beta,\beta')]d\beta' = h(\beta) \tag{28}$$

ここで，

$$F(\beta,\beta') = E\{\gamma_0(\cos\beta-\cos\beta')\},\quad h(\beta) = g(-\cos\beta) \tag{29}$$

である。$\Phi(\beta)$は有界な関数なので，$a_n$を未定係数として次のように表す。

$$\Phi(\beta) = \sum_{n=0}^{N}a_n\cos n\beta \tag{30}$$

このとき，次の公式[18)]

$$\left.\begin{aligned}&\int_0^{\pi}\ln(a\pm b\cos x)dx = \pi\ln\frac{a+\sqrt{a^2-b^2}}{2}\\ &\int_0^{\pi n}\cos mx\cdot\ln(1-2a\cos x+a^2)dx = -\frac{\pi n}{m}a^{\pm m}\end{aligned}\right\} \tag{31}$$

から，次式が導かれる。

$$\left.\begin{aligned}&\int_0^{\pi}\ln|\cos\beta-\cos\beta'|d\beta' = -\pi\ln 2\\ &\int_0^{\pi}\cos n\beta'\cdot\ln|\cos\beta-\cos\beta'|d\beta' = -\frac{\pi}{n}\cos n\beta\quad \text{for}\ n\neq0\end{aligned}\right\} \tag{32}$$

これらの公式を用い，$F_{m,n}$，$h_m$を次のように定義し，

$$\left.\begin{aligned}F_{m,n} &= \int_0^{\pi}d\beta'\int_0^{\pi}F(\beta,\beta')\cos m\beta\cos n\beta' d\beta\\ h_m &= \int_0^{\pi}h(\beta)\cos m\beta d\beta\end{aligned}\right\} \tag{33}$$

$\hat{F}_{m,n}$を次のように置くと，

$$\left.\begin{aligned}\hat{F}_{m,n} &= \pi^2\ln 2 + F_{m,n}, &&(m=n=0)\\ \hat{F}_{m,n} &= \frac{\pi^2}{2m} + F_{m,n}, &&(m=n\ge1)\\ \hat{F}_{m,n} &= F_{m,n}, &&(m\neq n)\end{aligned}\right\} \tag{34}$$

(28)式の積分方程式は，$a_n\ (n=0,1,2,\ldots N)$ に対する次の連立方程式に書き換えられる。

$$\sum_{n=0}^{N}\hat{F}_{m,n}a_n = h_m\quad (m=0,2,\ldots,N) \tag{35}$$

(21)式右辺の関数 $g(\xi)$ は，各付帯条件に対して次のように定義される。

### a）排水量一定の条件

$$g(\xi)=1 \tag{36}$$

よって，(33)式の $h_m$ は，

$$h_0=\pi \tag{35}$$

### b）重心一定の条件

$$g(\xi)=\xi \tag{36}$$

同様に，

$$h_1=-\frac{\pi}{2} \tag{37}$$

となるが，直交性により(35)，(37)式以外の $h_m$ はゼロになる。

(15)式のように，全体の２重吹出しの密度は，以上の各付帯条件を満足する２重吹出しの密度の線形結合となる。各付帯条件に対応する(35)式の係数を $a_n^{(l)}$，$(l=0,1)$ と書くことにすると，ラグランジェ乗数 $k_0$ は，

$$\int_{-1}^{1}\varphi(\xi)d\xi=-\frac{k_0}{2}\int_{-1}^{1}\varphi_0(\xi)d\xi=-\frac{k_0}{2}\sum_{n=0}^{N}a_n^{(0)}\int_0^{\pi}\cos n\beta\,d\beta$$
$$=-\frac{k_0\pi}{2}a_0^{(0)}=2 \tag{38}$$

より，

$$k_0=-\frac{4}{\pi a_0^{(0)}} \tag{39}$$

と得られる。同様に $k_1$ は，

$$\int_{-1}^{1}\xi\varphi(\xi)d\xi=-\frac{k_1}{2}\int_{-1}^{1}\xi\varphi_1(\xi)d\xi=\frac{k_1}{2}\sum_{n=0}^{N}a_n^{(1)}\int_0^{\pi}\cos\beta\cos n\beta\,d\beta$$
$$=\frac{k_1\pi}{4}a_1^{(1)}=2\xi_G \tag{40}$$

より，

$$k_1=\frac{8}{\pi}\frac{1}{a_1^{(1)}}\xi_G \tag{41}$$

ここで，次のような係数 $A_n^{(l)}$，$(l=0,1)$ を定義する。

$$A_n^{(l)}=-\frac{k_l}{2}a_n^{(l)},\quad (l=0,1) \tag{42}$$

これらを用いると，各２重吹出しの分布密度 $\varphi_l(\beta)$，$(l=0,1)$ は次のように表される。

$$\varphi_l(\beta)=\csc\beta\sum_{n=0}^{N}A_n^{(l)}\cos n\beta,\quad (l=0,1) \tag{43}$$

所要の付帯条件を満足する最適Cpカーブは，$A_n$ を必要な付帯条件の係数 $A_n^{(l)}$ を合算して，

$$A_n=\sum_l A_n^{(l)} \tag{44}$$

と書くとき，次式で与えられる。

$$\varphi(\beta)=\sum_l\varphi_l(\beta)=\csc\beta\sum_{n=0}^{N}A_n\cos n\beta \tag{45}$$

船体の横断面は矩形なので，中央横裁面積係数を１と考えると，最適柱形係数は，

$$C_p=\frac{1}{\varphi(\pi/2)} \tag{46}$$

で得られ，造波抵抗係数は，(34)式の $\hat{F}_{m,n}$ を用いると，次式で計算される。

$$C_w=\frac{R_w}{1/2\rho B^2U^2}=\frac{\pi}{2}\gamma_0^2\sum_{m=0}^{N}A_m\sum_{n=0}^{N}A_n\hat{F}_{m,n} \tag{47}$$

## 4　開発したプログラムの概要と高速域における計算例

### 4.1　入力データ

プログラムを起動すると次のメッセージが表示され，順番にキーボードより数値を入力する。

１）設計フルード数の入力
２）$\tau$（喫水／半船長比）の値の入力
３）$\xi_G$（重心位置／半船長比）の値の入力（船首側＋）

### 4.2　出力ファイル

出力は有限喫水と無限喫水の両方がExcelで読める形式で６種類出力される。計算は，予めプログラム内で与えたフルード数に対する極小造波抵抗船型とその造波抵抗係数を計算し，次に設計フルード数に対するそれらの値を計算する。最後に設計フルード数の船型に対して，予めプログラム内で与えたフルード数に対する造波抵抗係数を計算する。このとき，(43)式の $\hat{F}_{m,n}$ を配列に格納して利用する。

出力ファイルは以下のような内容になる。

**１）an-Cof.xls**

各フルード数に対する(11)式の極小造波抵抗船型の係数 $a_n$ とラグランジェ乗数 $k_n$ を出力するファイル。

**２）Cp-Crv.xls**

各フルード数に対する極小造波抵抗船型のCpカーブと(11)式の $\Phi$ を出力するファイル。０は排水量一定の

条件，１は重心位置の条件を満足するCpカーブと$\Phi$（FIと表示）の値で，例えばCp01は０と１の両方の条件を満足するCpカーブになっている。なお，前後端点ではCpカーブの値は無限大となるので，計算と出力を省略している。

**３）MinCw-Crv.xls**

同様に，各フルード数における極小造波抵抗係数と対応する柱形係数Cpの値。

**４）Dan-Cof.xls**

設計フルード数に対する⑾式の極小造波抵抗船型の係数$a_n$とラグランジェ乗数$k_n$を出力するファイル。

**５）DCp-Crv.xls**

設計フルード数に対する極小造波抵抗船型のCpカーブと㊴式の$\Phi$を出力するファイル。内容は“ Cp-Crv.xls ”と同じ構成になっている。

**６）DMinCw-Crv.xls**

設計フルード数の船型の各フルード数に対する造波抵抗係数と，設計フルード数における柱形係数Cpの値。

### 4.3　高速域における計算例

図３に，横軸にフルード数，縦軸に各フルード数毎に極小造波抵抗船型のCp値をプロットした結果を示す。図４には，図３に対応した㊼式で与えられる造波抵抗係数を示すが，この図は１つの船型による造波抵抗係数ではなく，丸尾ら[11]の討論に従えば極小造波抵抗係数ということになる。$\xi_G \neq 0$の計算例は浮心位置を若干船尾側に移し前後非対称の条件を与えた計算結果であるが，よく知られているように前後非対称船型の造波抵抗係数は前後対象船型のそれよりも，船型の反対称量だけ造波抵抗係数が増加する。しかし，実際の船型では，理論では考慮されていない水の粘性や船体表面での波の回折効果によって，高速船では浮心位置を若干船尾側にシフトした前後非対称船型の方が抵抗は小さくなる。このような浮心位置のシフト量は，本報告で扱った理論計算を行う前に，予め実験データやそれを基に作られた回帰式などによって決定しておく必要がある。

図３に示すように，両理論の計算結果とも高速域ではCp値は漸増しているが，後者についてはフルード数0.48程度から１を越えており，そのような船型は現実には考えられない。図４では，造波抵抗のラストハンプに相当する造波抵抗係数のピーク値が，有限喫水の場合にはフルード数で0.5程度であって実験事実に合致するのに対して，無限喫水の場合には0.6を越えており物理的にも不合理な値を与えている。これらのことから，無限喫水の極小造波抵抗理論の適用速力は，フルード数で0.35程度が上限と判断される。

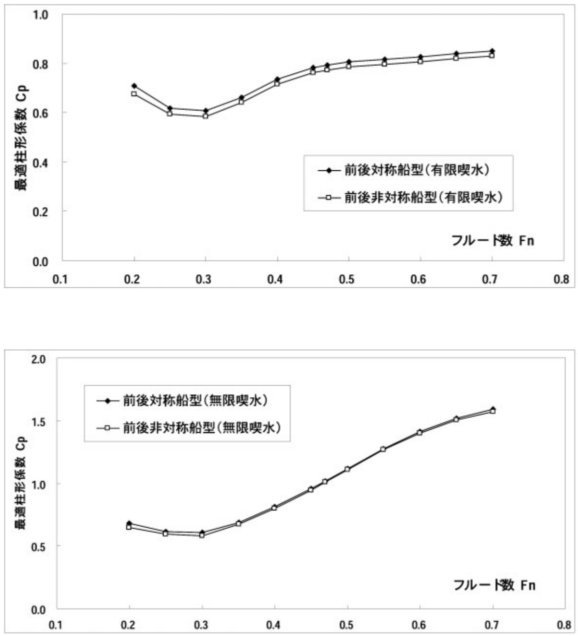


**図３　極小造波抵抗係数を与える柱形係数Cp（$\xi_G$=0 ＆$\xi_G$ =-0.1）**
**（上図：有限喫水の場合（$\tau$=0.1），下図：無限喫水の場合）**

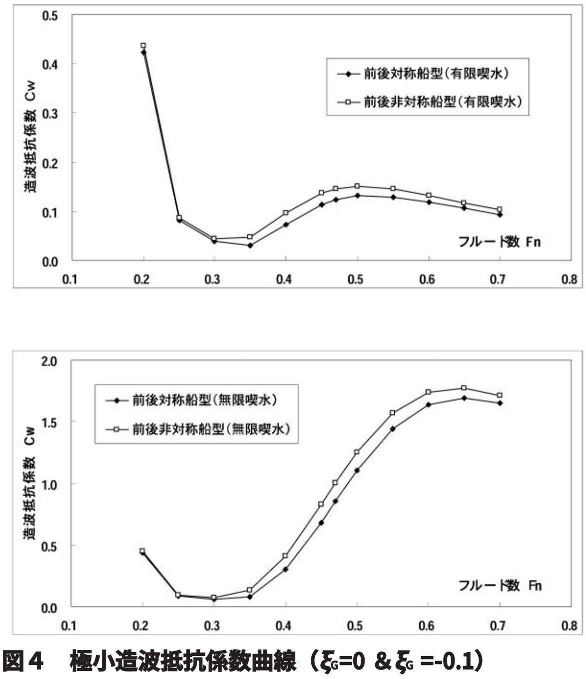


**図４　極小造波抵抗係数曲線（$\xi_G$=0 ＆$\xi_G$ =-0.1）**
**（上図：有限喫水の場合（$\tau$=0.1），下図：無限喫水の場合）**

対象としたサンマ棒受け網･鮭鱒流し網兼業漁船のフルード数は0.45～0.47程度に達しているが，これまで極小造波抵抗理論が適用された例として，最も高速なものでも0.38程度である[20]。このような高速域で航行する現状のサンマ棒受け網･鮭鱒流し網兼業漁船のCp値は0.8を越えていたが，造船所側の改良設計によ

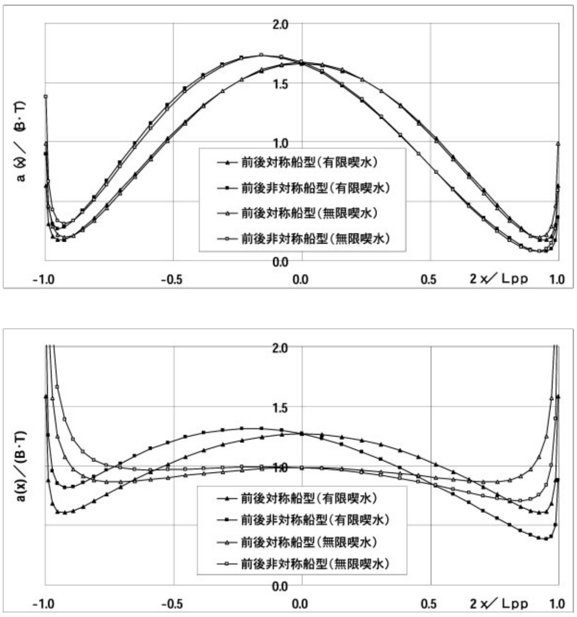


**図５　設計フルード数0.300（上図）と0.470（下図）における最適Cpカーブ（$\xi_G$=0 & $\xi_G$=-0.1）**

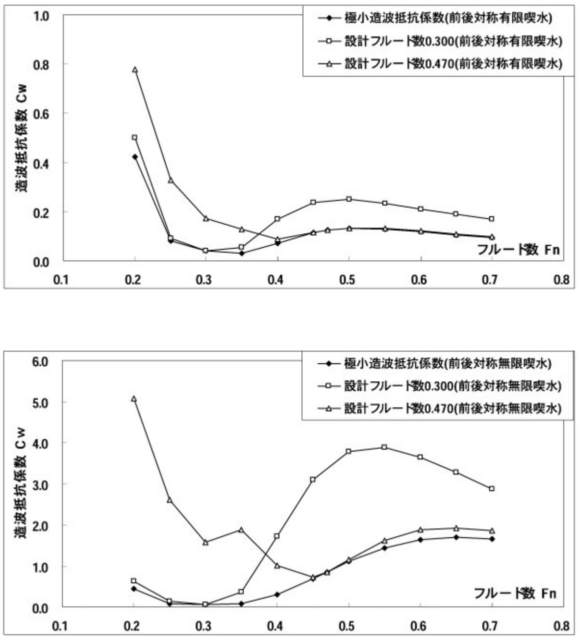


**図６　極小造波抵抗係数と設計フルード数Fn=0.3とFn=0.47の前後対称船型の造波抵抗係数の比較（$\xi_G$=0）（上図：有限喫水の場合（$\tau$=0.1），下図：無限喫水の場合）**

って図３に示される値に近い値となった。従って，次に検討すべきはCpカーブということになる。

図５には，設計フルード数0.300と0.470における最適Cpカーブの計算結果を示す。設計フルード数0.300の場合には，有限喫水のCpカーブの計算結果と無限喫水のそれとに大きな差は無いが，0.470の場合には，両者に大きな差異が現れている。このことは，図４の造波抵抗係数の傾向とも合致している。以上の図からは，今回対象としたサンマ棒受け網･鮭鱒流し網兼業漁船のような高Froude数船に対しては，無限喫水の理論の適用は困難であると判断される。なお，図５のどの結果にも船体の前後端にCpカーブの発散が現れているが，この原因は２章で述べた通りであり，これまで極小造波抵抗理論を実務設計に適用する場合には，別所[20]に述べられているような，発散部分の面積を船首垂線前方に突き出すことで，これを船首バルブの体積とする操作が行われる。

図６，７は，設計フルード数0.300と0.470の船型の造波抵抗係数と図４の極小造波抵抗係数を比較した結果である。この図から設計フルード数0.300と0.470の船型の造波抵抗係数は，設計点のフルード数において極小造波抵抗係数曲線に接しており，設計フルード数において確かに造波抵抗係数の極小値を取っていることがわかる。

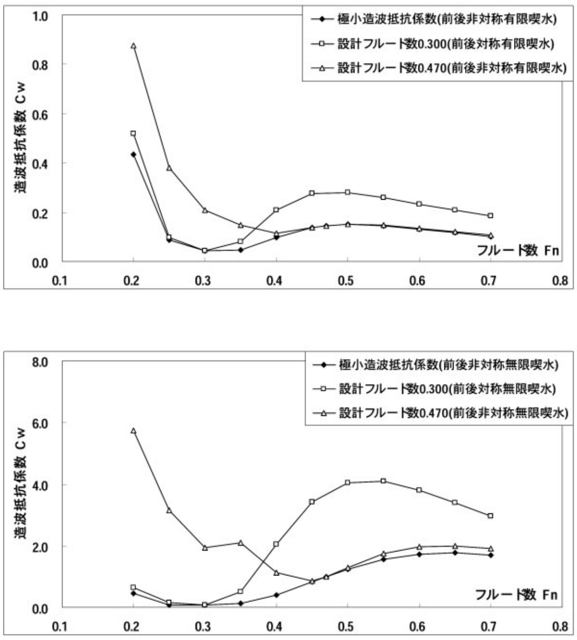


**図７　極小造波抵抗係数と設計フルード数Fn=0.3とFn=0.47前後非対称船型の造波抵抗係数の比較（$\xi_G$=-0.1）（上図：有限喫水の場合（$\tau$=0.1），下図：無限喫水の場合）**

## 5　あとがき

排水量型沿岸漁船の船型開発に用いるべく，従来から知られている極小造波抵抗理論について検討し，計算プログラムを開発してサンマ棒受け網･鮭鱒流し網兼業漁船を想定した数値計算を行った。その結果，有

限喫水とした場合の極小造波抵抗理論の適用が妥当であると判断された。

本報告で述べた計算プログラムは，「漁船漁業構造改革促進調査検討事業」[19] の中で，サンマ棒受け網・鮭鱒流し網兼業漁船の船型開発に実際に活用され，模型試験によって，所望の性能を満足することが確認された。

**謝辞**

本報告で述べた極小造波抵抗理論について，㈲流体テクノ玉島正裕博士からは，種々有益なご助言，ご討論，文献のご教示を戴きました。末尾となりましたが，ここに記して感謝の意を表する次第であります。

## 参考文献


１）平成18年度漁船漁業構造改革促進調査検討事業報告書，水産工学研究所，2007

２）Karp,S., Kotik,J. & Lurye,J.: On the Problem of Minimum Wave Resistance for Struts and Strut-like Dipole Distributions, Proc. 3rd Sympo. Naval Hydrodynamics, pp.75-119, 1960

３）丸尾孟，別所正利：極小造波抵抗の船型，日本造船学会論文集，114，pp.9-23，1963

４）丸尾孟：造波抵抗理論を船型の設計にいかに応用すべきか（上），造船協会誌，438，pp.13-19，1966

５）丸尾孟：造波抵抗理論を船型の設計にいかに応用すべきか（下），造船協会誌，439，pp.55-59，1966

６）Michell,J.H.: The Wave-Resistance of a Ship, Philosophical Magazine and Journal of Science, 45(273), pp.106-124, Feb. 1898

７）Maruo,H.: Calculation of the Wave Resistance of Ships , the Draft of Which is as Small as the Beam, 112, pp.21-37, 1962など

８）Kotik,J. & Thomsen,P.: Various Wave Resistance Theories for Slender Ships, Schiffstechnik, 10(54), pp.178-186, 1963

９）MacCamy,R.C.: On Singular Integral Equations with Logarithmic or Cauchy Kernels, Journal of Mathematics and Mechanics, 7(3), pp.355-375, 1958

10）Taylor,G.I.: The Force Acting on a Body Placed in a Curved and Converging Stream of Fluid, The Scientific Papers of G.I.Taylor, III, pp.86-106, (ed. G.K.Batchelor), (Reprinted from Proceedings of the Royal Society, A, vol. cxx, pp.260-283, 1928 )

11）丸尾孟，山越康行：有限喫水を持つ極小造波抵抗船型の計算，日本造船学会論文集，130，pp.31-40，1971

12）Maruo, H., Kasahara, K. & Miyazawa, M.: Ship forms of minimum wave resistance with bulbs, 日本造船学会論文集，135，pp.13-24，1974

13）鄭正桓：細長船理論の検討，横浜国立大学工学系研究科修士論文，1971

14）Ogilvie, T. F.: End effects in slender-ship theory, International Seminar on Wave Resistance, pp.119-139, 1976

15）花岡達郎，安藤定雄：縦波中の船の運動の計算（その１），（その２），船研研究発表会，1967，1968

16）渡辺巌：薄い船の理論に基づく非定常流体力計算法，関西造船協会誌，217，pp.85-94，1992

17）渡部力，名取亮，小国力：Fortran77による数値計算ソフトウエア，丸善，1989

18）Prudnikov,A.P., Brychkov,Yu,A., Marichev,（大槻義彦・室谷義昭監修）：新数学公式集I初等関数，丸善，1991

19）平成19年度漁船漁業構造改革促進調査検討事業報告書，水産工学研究所，2008

20）別所正利：パラダイム船型論，「船型設計と流力最適化問題」シンポジウム，日本造船学会，pp.173-199，1999

21）丸尾孟：造波抵抗理論概説，造波抵抗シンポジウム，日本造船協会，pp.1-16，1965

22）別所正利：極小値問題について，造波抵抗シンポジウム，日本造船協会，pp.17-27，1965

23）Abramowitz,M., Stegun,I.A.: Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, Dover Pub, 1952