

3次元物体の附加質量に及ぼす浅水影響

— $K=0$ と $K=\infty$ の場合 (その2, 一般船型への適用) —

菅 信*

Shallow Water Effects on Added Mass of a Three Dimensional Body

— In Case of $K=0$ and $K=\infty$ (Part 2, Application to Ship Form) —

By

Makoto KAN

Abstract

In the previous paper, a method of calculation of the shallow water effects on an added mass or moment of inertia of a floating three dimensional body was presented for the cases of the frequency parameter $K(=\omega^2/g)=0$ and $K=\infty$. By means of the numerical comparison with the correct solution, it was shown that when the problem concerned was solved by the usual integral equation method, the Green function represented by a finite integral, which had been derived by the several authors independently, could not be applied. In this paper it is proved that the erroneous representation of the Green function was derived as a result of the disregard for the theorem that the termwise integration is possible when the infinite series in uniformly convergent.

A simple method for easy estimation of the shallow water effects of an actual hull form was also proposed in the previous paper. Owing to the method, the coefficients of the shallow water effects of a ship are basically equal to ones of the ellipsoid with the same value of L/B and B/d as the ship, whereas the effective water depth is modified by C_b of the ship. In this paper the validity of the method is discussed by the comparison with the numerical results of a tanker obtained by the author's method using the integral equation.

The charts and tables for the ellipsoids with various axis ratio, which is used to estimate the shallow water effects of a ship for all six modes of motion except for heave for $K=0$, are extended to cover the wide range of L/B and B/d and revised by improvement of numerical technique. An interpolation formula to estimate the shallow water effects of the ellipsoid with arbitrary axis ratio is also presented.

1. はし が き

船のような3次元物体が浅水域の水面上で角周波数 ω の調和振動をしているときの流場を求める造波ポテンシャル問題において、その2つの極限である $K(=\omega^2/g)=0$ と $K=\infty$ の場合については、造波ポテンシャル問題を解く一般的な数値解法で扱うことができないことと、この2つの極限の場合が船の衝突、

振動、操縦運動の問題と深くかかわっていることから、これらを独自に解いておくことが必要である。このような認識から著者らは先にこの両極限の問題を取扱い、いわゆる積分方程式法で使用するグリーン関数として3種類の型の表示式を導き、無限級数表示のものと無限積分表示のものは正しい表示式であるが、一見もっとも使い易そうにみえる有限積分表示のものは誤った表示式であって、これを使って問題を解くと $K=\infty$ の場合には誤った表示式であるにもかかわらず誤りの部分が相殺されて正しい結果と一致する結果を与えること、及び $K=0$ の場合には、浅水で附加質

*運動性能部

原稿受付：昭和59年11月2日

量が小さくなるという誤った結果を与える¹⁾ことを、数値計算で示した²⁾。

数値計算によって誤った表示式であることが明らかになった有限積分表示のグリーン関数が、その導出の過程でどこに誤りがあるのかを数学的に説明することは前報²⁾ではできていなかったが、今回の報告では、その点を明らかにすることができた。要約すると、一様収束でない無限級数は一定の条件がない場合には項別積分ができないにもかかわらず、これを無視したために誤った表示式を導いてしまったということである。数学的には初歩的な誤りであるが、厳密さを欠いたまま数式の演算を進めてしまうとこのような誤りをおかすことがあるという典型的な例であり、また同じ誤りをおかしている例が著者以外にもあることから³⁾、今後も同じ種類の誤りが繰り返されないと限らないので、敢えて誤りの原因を明らかにしたものである。

次に、前報では一般船型の計算プログラムが完成していなかったため、楕円体の計算結果を示したに止ったが、その後これが完成し船型を表す数100点の3次元座標を入力データとして与えることによって任意の一般船型の計算ができるようになったことから、今回その計算例を示し、更に前報で提案し実験値との比較によってその有効性を示した一般船型の簡易推定法についても、その有効性について更に詳細な検討を行った。

今回の報告では更に、一般船型の簡易推定法で使用する楕円体の軸長比及び水深をパラメータにした系統計算結果の数値表についても、液体水素タンカーなど将来の需要を見込んで幅広浅吃水船についての附加質量の浅水影響係数の推定ができるように、 L/B は4~8、 B/d は2~5と範囲を拡げた表を示してある。また、数値計算法の改良により僅かではあるが前報より精度の良い表になっていることと、 h/d の間隔を細かくして内挿がよりスムーズにできるようになっていることが、前報の表より改善されている点である。更に L/B と B/d に関する内挿については、図式内挿の他に数式による内挿ができるように、内挿式を導いてあるので一層使い易くなっている。

2. グリーン関数の表示式

2.1 定式化

平面的には無限に広がった一定水深 h の水域で、円周波数 ω の調和振動をする浮体がある場合、その流場を表す単位速度あたりの速度ポテンシャルを

$Re(\phi e^{i\omega t})$ とすると、 $K=0$ と $K=\infty$ の両極限で ϕ の満たすべき基礎方程式ならびに境界条件は、Fig. 1 のような座標をとると次の通りである。

$$\text{流体領域で} \quad \nabla^2 \phi = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{水域}(z=h)\text{で} \quad \phi_z = 0 \quad (2.2)$$

$$\text{自由表面}(z=0)\text{で} \quad \phi_z = 0 \quad (K=0\text{の場合}) \quad (2.3)$$

$$\phi = 0 \quad (K=\infty\text{の場合}) \quad (2.4)$$

$$\text{浮体表面} S \text{ 上で} \quad \phi_n = V_n \quad (2.5)$$

但し V_n は浮体の運動の法線速度成分

$$\text{無限遠方}(R \rightarrow \infty)\text{で} \quad \phi_n \rightarrow -Q/2\pi R h \quad (K=0\text{の場合}) \quad (2.6)$$

$$\phi \rightarrow 0 \quad (K=\infty\text{の場合}) \quad (2.7)$$

$$\text{但し} \quad Q = \int_S \phi_n dS \quad (2.8)$$

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} \quad (2.9)$$

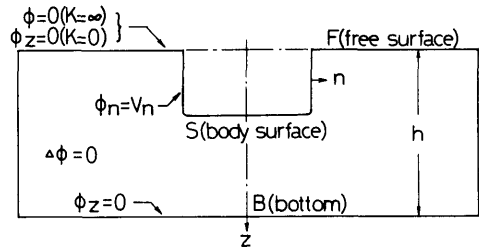


Fig. 1 Boundary conditions

2.2 積分方程式

$P(x, y, z)$, $Q(x', y', z')$ を船体表面上の点とし、上の境界条件を満たす速度ポテンシャル ϕ が次の積分方程式

$$\begin{aligned} \phi(P) + \frac{1}{2\pi} \int_S \phi(Q) \cdot G_n(P, Q) dS \\ = \frac{1}{2\pi} \int_S \phi_n(Q) G(P, Q) dS \end{aligned} \quad (2.10)$$

の解として表わされるとしたとき、必要な諸条件を満たすグリーン関数 $G(P, Q)$ の表示式として先に¹⁾求めた有限積分型のものが誤った表示式であることを前報²⁾では数値的に明らかにしたのであるが、これを数学的に明らかにしようというのが本章の次節以降の主な目的である。

2.3 無限級数表示型のグリーン関数

Fig. 2 に示すように、 $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty$ として無限個の単位強さの source 列を $(x', y', z'+4nh)$ と $(x', y', -z'+2h+4nh)$ に、sink 列を $(x',$

$y', -z' + 4nh$) と $(x', y', z' - 2h + 4nh)$ においたときの速度ポテンシャルをそれぞれ G^+ , G^- とすると

$$G^+ = - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{|R^2 + (z - z' - 4nh)^2|^{1/2}} + \frac{1}{|R^2 + (z + z' - 2h - 4nh)^2|^{1/2}} \right] \quad (2.11)$$

$$G^- = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{|R^2 + (z + z' - 4nh)^2|^{1/2}} + \frac{1}{|R^2 + (z - z' + 2h - 4nh)^2|^{1/2}} \right] \quad (2.12)$$

と書ける。水底と自由表面の条件を満たすグリーン関数を $K=0, \infty$ に対してそれぞれ G_0, G_∞ とすると

$$G_0 = G^+ - G^- \quad (2.13)$$

$$G_\infty = G^+ + G^- \quad (2.14)$$

で表わせることは、Fig. 2 の鏡像列の水底に関する対称性 ($K=0$ 及び $K=\infty$) および自由表面に対する反対称性 ($K=\infty$) または対称性 ($K=0$) から明らかである。

しかし (2.11), (2.12) で表わされる G^+, G^- はそれぞれ発散級数であり, (2.14) で表わされる G_∞ の場合には発散部分は相殺されて消えるが (2.13) の G_0 の方は消えないし, 今の場合, プログラム上は G^+ と G^- を別々に計算しておいてから (2.13), (2.14) により G_0 と G_∞ を同時に求める方式をとるため, これらの発散部分ははじめから取除いておく必要がある。従ってこの発散部分を取除いたものを改めて G^+, G^- とすると,

$$G^+ = - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{|R^2 + (z - z' - 4nh)^2|^{1/2}} + \frac{1}{|R^2 + (z + z' - 2h - 4nh)^2|^{1/2}} \right] + 2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|4nh|} \quad (2.15)$$

$$G^- = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{|R^2 + (z + z' - 4nh)^2|^{1/2}} + \frac{1}{|R^2 + (z - z' + 2h - 4nh)^2|^{1/2}} \right] - 2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|4nh|} \quad (2.16)$$

となる。但し \sum' は $n=0$ を除く総和を表わす記号である。

今

$$f(R, Z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|R^2 + (Z - 4nh)^2|^{1/2}}$$

$$- \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|4nh|} \quad (2.17)$$

とおくと

$$G^+ = -f(R, z - z') - f(R, z + z' - 2h) \quad (2.18)$$

$$G^- = f(R, z + z') + f(R, z - z' + 2h) \quad (2.19)$$

と表わされるから, 今後 (2.17) で表わされる $f(R, Z)$ を検討することにする。(2.17) の右辺第2項を考慮しないとこの無限級数が収斂しないのは明らかであるが, 電子計算機のプログラムでは, これを考慮しないで作っても, 有効桁数や収斂判定条件の与え方の関係から収斂していないにもかかわらず収斂条件を満足してしまうことがあり, その場合でも $K=0$ で $\int_S \phi_n ds \neq 0$ の場合以外は, ほとんど正しい数値解が得られるし, また $K=0$ で $\int_S \phi_n ds \neq 0$ の場合は, 前報²⁾で示したようにもともと解がないので, このような発散部分を打ち消す項の有無が計算結果に大きな影響を与えることはないようであるが, 式の正しい表示式としては, やはりきちんと入れておくべきものである。 $f_R (= \partial f / \partial R)$ と $f_Z (= \partial f / \partial Z)$ は収斂級数であり問題は無い。

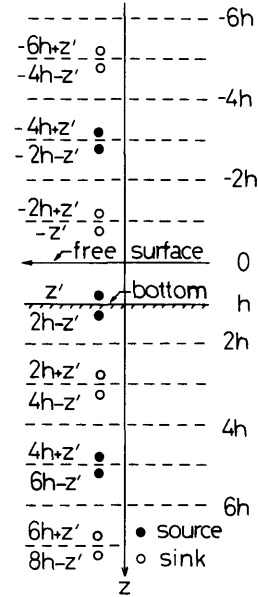


Fig. 2 Image series of source and sink

2.4 無限積分表示型のグリーン関数

Lipschitz の公式

$$\int_0^\infty e^{-iz-4nhit} J_0(Rt) dt = \frac{1}{\{R^2 + (Z-4nh)^2\}^{1/2}} \quad (2.20)$$

と定積分

$$\int_0^\infty e^{-mih} dt = \frac{1}{|n|h} \quad (n \neq 0) \quad (2.21)$$

を (2.17) に代入すると

$$f(R, Z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^\infty |e^{-iz-4nhit} J_0(Rt) - e^{-4mih}| dt \quad (2.22)$$

と書ける。但し \sum'' は (2.22) の第 2 項については $n=0$ を除く総和を表わす記号とする。

関数項級数の無限区間の項別積分に関する Hardy の定理⁴⁾ は

$$\left[\sum_{n=1}^{\infty} \int_a^\infty |f_n(x)| dx \text{ または } \int_a^\infty \sum_{n=1}^{\infty} |f_n(x)| dx \text{ のいずれか} \right]$$

一方が収斂すれば

$$\int_a^\infty \left(\sum_{n=1}^{\infty} f_n(x) \right) dx = \sum_{n=1}^{\infty} \int_a^\infty f_n(x) dx$$

というものであるから、今 (2.22) で積分記号と総和記号を入れかえたものを $f_1(R, Z)$ とおき

$$f_1(R, Z) = \int_0^\infty \sum_{n=-\infty}^{\infty} |e^{-iz-4nhit} J_0(Rt) - e^{-4mih}| dt \quad (2.23)$$

無限等比級数の公式

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-iz-4nhit} = \frac{\cosh(2h - |Z|)t}{\sinh 2ht} \quad (2.24)$$

及び

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-4mih} = \frac{e^{-2ht}}{\sinh 2ht} \quad (2.25)$$

を (2.23) に代入すると

$$f_1(R, Z) = \int_0^\infty \frac{\cosh(2h - |Z|)t \cdot J_0(Rt) - e^{-2ht}}{\sinh 2ht} dt \quad (2.26)$$

であり、この積分は有限確定の値を持つから、上述の Hardy の定理によって

$$f_1(R, Z) = f(R, Z) \quad (2.27)$$

即ち、無限積分表示 (2.26) が正しい表示式であることが示される。

(2.26) の積分が有限確定値を持つのは、被積分関数の分子第 2 項 $-e^{-2ht}$ により、第 1 項に含まれる発散部分が打ち消されるからであって、この第 2 項に相当するのが、先に無限級数表示の (2.17) 式右辺第 2 項の発散部分を打ち消す項として述べたものである。無限級数表示の場合は、発散部分を打ち消す項は入れなくても計算結果に差が出ないと述べたが、無限積分表示の場合は、これを考慮しないと (2.26) で $f_1(R, Z)$ の値が求められないことになる。

2.5 有限積分表示型のグリーン関数

積分公式

$$\frac{2R}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{R^2 + (Z-4nh)^2 \cos^2 \theta} d\theta = \frac{1}{\{R^2 + (Z-4nh)^2\}^{1/2}} \quad R > 0 \quad (2.28)$$

を (2.17) に代入すると

$$f(R, Z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{2R}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{R^2 + (Z-4nh)^2 \cos^2 \theta} - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|4nh|} \quad (2.29)$$

と書ける。

今 (2.29) の右辺第 1 項の積分記号と総和記号を入れかえたものを $f_2(R, Z)$ とおき

$$f_2(R, Z) = \frac{2R}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{R^2 + (Z-4nh)^2 \cos^2 \theta} d\theta - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|4nh|} = \frac{\pi R}{2h^2} \int_0^{\pi/2} \sec^2 \theta \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\left(\frac{\pi R}{2h} \sec \theta\right)^2 + \left(\frac{\pi Z}{2h} - 2n\pi\right)^2} d\theta - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|4nh|} \quad (2.30)$$

無限級数の公式

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\left(\frac{\pi R}{2h} \sec \theta\right)^2 + \left(\frac{\pi Z}{2h} - 2n\pi\right)^2} = \frac{\sinh\left(\frac{\pi R}{2h} \sec \theta\right)}{2 \cdot \frac{\pi R \sec \theta}{2h} \left\{ \cosh\left(\frac{\pi R}{2h} \sec \theta\right) - \cos \frac{\pi Z}{2h} \right\}} \quad (2.31)$$

を使うと

$$f_2(R, Z) = \frac{1}{2h} \int_0^{\pi/2} \sec \theta \frac{\sinh(\pi R \sec \theta / 2h)}{\cosh(\pi R \sec \theta / 2h) - \cos(\pi Z / 2h)} d\theta - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|4nh|} \quad (2.32)$$

となる。

関数項級数の閉区間の項別積分に関する公式⁵⁾ は $f_n(x)$ が閉区間 $[a, b]$ で連続で、級数 $\sum f_n(x)$ が一様収斂すれば

$$\int_a^x \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) dt = \sum_{n=1}^{\infty} \int_a^x f_n(t) dt \quad (a \leq x \leq b)$$

というものであるが、(2.30) 第一式の級数

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{R^2 + (Z - 4nh)^2 \cos^2 \theta} \quad (2.33)$$

は $\theta = \pi/2$ のとき収斂しないから、閉区間 $[0, \pi/2]$ で一様収斂ではない。従って積分記号と総和記号の入れ替えが出来るという保障はない。一様収斂でない場合にもこの入れ替えができるためには少なくとも $\sum f_n(t)$ が収斂し、かつそれが積分可能であることが必要条件になるが⁵⁾、今の場合この条件を満足しないことも明らかであるから

$$f(R, Z) \neq f_2(R, Z) \quad (2.34)$$

であることが示される。

前報では、この積分と和の順序交換ができる保障がないことを無視して機械的に順序交換を行い、更に

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|4nh|} = \frac{1}{2h} \int_0^{\pi/2} \sec \theta d\theta - \frac{\ln 2}{2h} \quad (2.35)$$

の関係を使って

$$f_2(R, Z) = -\frac{1}{2h} \int_0^{\pi/2} \sec \theta \frac{\exp(-\pi R \sec \theta / 2h) - \cos(\pi Z / 2h)}{\cos h(\pi R \sec \theta / 2h) - \cos(\pi Z / 2h)} d\theta + \frac{\ln 2}{2h} \quad (2.36)$$

とし、これをグリーン関数の有限積分表示としたのであるが、この表示がグリーン関数の表示式として正しくないものであることは上述のとおりである。

一方前報で Z 方向の微分値については

$$f_d(R, Z) = f_{2d}(R, Z) \quad (2.37)$$

であることが数値的に示されていたが、これは (2.33) の級数の Z 方向の微分

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{-Z(Z - 4nh) \cos^2 \theta}{|R^2 + (Z - 4nh)^2 \cos^2 \theta|^2} \quad (2.38)$$

が $\theta = \pi/2$ の場合も含めて $[0, \pi/2]$ で一様収斂であるため、積分と和の順序交換ができて、このことを確認せず機械的に順序交換を行ったのであるが、(2.37) が成り立ったものである。

3. 数値計算

3.1 楕円体

楕円体の方程式を

$$\left. \begin{aligned} x &= a \sin \alpha \cos \beta \\ y &= b \sin \alpha \sin \beta \\ z &= c \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

で表わすと、積分方程式 (2.10) は

$$\begin{aligned} \phi(\alpha, \beta) &+ \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} d\alpha' \int_0^{2\pi} \phi(\alpha', \beta') \cdot \\ &G_n(\alpha, \beta; \alpha', \beta') d\alpha' d\beta' \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} d\alpha' \int_0^{2\pi} \phi_n(\alpha', \beta') \cdot G(\alpha, \beta; \alpha', \beta') d\alpha' d\beta' \quad (3.2) \end{aligned}$$

となる。これを数値的に解くための代数方程式に直すときに微少面素 $da' \times d\beta'$ の中で ϕ は一定とし、 ϕ_n , G , G_n については、前報ではその微少面素を囲む 4 つの端点における値の平均値をとる方法を採用した。

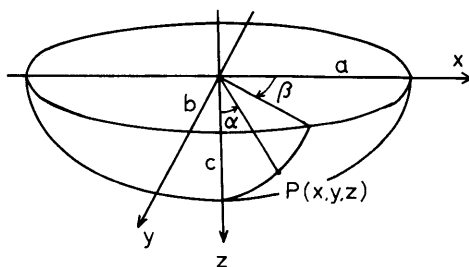


Fig. 3 Ellipsoid

しかし、 ϕ を評価しようとする点 $P(\alpha, \beta)$ 自身が属する微少面素 ΔS からの影響を考えると

$$\begin{aligned} \phi(\Delta S) \int_{\Delta S} G_n ds \\ \text{の方は、} G_n \text{ に含まれる} \\ -\frac{\partial}{\partial n} 1/r \quad (\text{但し } r = \sqrt{R^2 + (Z - Z')^2}) \end{aligned}$$

の項については Cauchy の主値をとる形となり、面素を構成する 4 つの端点の平均値をとってもそれほど大きな誤差になる心配は少ないと判断されるし ΔS が平面ならその寄与は 0 であるが、一方

$$\phi_n(\Delta S) \int_{\Delta S} G ds$$

の方は、 G に含まれる $-1/r$ の積分では、点 $P(\alpha, \beta)$ から最も遠く離れた 4 つの端点の平均をとったのでは必ず低く見積ってしまうことになる。従ってこの点を考慮することによって精度改善をはかれる可能性がある。これには Hess and Smith⁶⁾ が速度場で行ったような厳密な評価をポテンシャルの場でもできれば理想的であるが簡単にはできそうもないので、ここではもっと簡単に、点 $P(\alpha, \beta)$ と 4 つの端点との中点をと

りその4つの中点での平均値をとるという方法に変えてみた⁷⁾。G 中の $-1/r$ 以外の項（即ち鏡像を表わす項）からの影響及び他の面素からの影響の評価に関しては面素の4つの端点の平均をとるという従来の方法のままで良いと判断されるのでそのままにしてある。このような改善法による計算精度の check を行ってみた結果を Table 1 に示す。分割数は α 方向の分割数 ($0 \leq \alpha \leq \pi/2$) $M=12$, β 方向の分割数 ($0 \leq \beta \leq \pi$) $N=24$ である。前報の方法に比べかなりの精度向上が表現されていると判断できる。

従ってこの方法で楕円体の軸長比を変えた系統計算を行った結果を Fig. 4 に示す。この図は、 L/B , B/d によって附加質量の浅水影響の受け方がどう変わるか、また運動のモードによって浅水影響がどう変わるか、周波数が0と ∞ でどう違うかなどの点を定性的に把握するのに役立つほか、前報で示した一般船型の簡易推定法で使用するものであり、液体水素タンカーなど将来の需要も考えて幅広吃水船の推定にも使えるように B/d の範囲を2~5に拡張してある。上述のように数値計算法の改良により精度向上がはかられているが、この図では浅水影響係数 k_{ij} として、水

深 h のときの附加質量係数 $\mu_{ij}(h)$ と、 $h=\infty$ のときの附加質量係数 $\mu_{ij}(\infty)$ との比として表わしてあるため、精度向上の効果は Table 1 に示したほどは出ていないが今回の図表の方が精度の良いものである。またこの図では、 $k=\infty$ の解析解がある場合には、それを示し数値解との比較によって、計算精度の大よその見当がつくようになっている。更に $k/d=2.0$ の μ_{ij} を追加することによって、より使い易い図表にしたつもりである。なお附加質量係数 μ_{ij} は、附加慣性モーメントを含めて、物体の質量と単位寸法 ($=1$) を使って無次元化したものである。

運動モードについては、前報で解がないことを示した $K=0$ で $\int \phi_n ds \neq 0$ の場合、すなわち楕円体なら $K=0$ の heave の場合のみを除いてすべての場合について示してある。回転運動は各座標軸まわりである。

グリーン関数の数値計算にあたっては、 R , Z , h の値によって無限級数表示 f と無限積分表示 f_i のどちらを使ったら計算時間が節約できるかが検討課題になり得るが、ここではすべて無限級数表示のものを収斂判定をしながら使用した。

Table 1 Accuracy of the present method ($K=\infty$)

※M=12, N=24 ; h=∞		K=0			K = ∞		
		μ_{11} surge	μ_{22} sway	μ_{66} yaw	μ_{33} heave	μ_{44} roll	μ_{55} pitch
sphere	exact	0.5	0.5	0	0.5	0	0
	previous method	0.483	0.483	0	0.486	0	0
	present method	0.503	0.503	0	0.501	0	0
ellipsoid a=9, b=1.5, c=1	exact	0.0330	0.626	8.87	1.399	0.102	20.28
	previous method	0.0325	0.578	8.11	1.297	0.086	18.24
	present method	0.0334	0.609	8.71	1.386	0.098	20.05

SURGE (K=0) k11

MARKS	B/d		2			3			4			5		
	h/d	L/B	4	6	8	4	6	8	4	6	8	4	6	8
			*	1.00	2.41	2.86	3.28	3.18	3.82	4.42	3.93	4.77	5.55	4.67	5.66	6.64
▲	1.10	2.17	2.60	3.00	2.88	3.48	4.04	3.57	4.36	5.10	4.26	5.20	6.11	
◇	1.25	1.91	2.29	2.64	2.50	3.05	3.55	3.10	3.82	4.49	3.70	4.57	5.40	
□	1.50	1.63	1.94	2.23	2.09	2.54	2.97	2.56	3.17	3.74	3.04	3.79	4.49	
×	2.00	1.35	1.56	1.77	1.64	1.98	2.28	1.97	2.42	2.84	2.30	2.86	3.39	
◆	2.50	1.21	1.36	1.52	1.42	1.67	1.91	1.65	2.00	2.33	1.90	2.34	2.76	
Y	4.00	1.07	1.13	1.21	1.15	1.28	1.41	1.26	1.45	1.64	1.39	1.64	1.89	
μ_{11}	EXACT	.0816	.0452	.0293	.0602	.0330	.0212	.0477	.0260	.0166	.0395	.0214	.0137	
h=∞	NUMERICAL	.0823	.0456	.0295	.0609	.0334	.0215	.0485	.0264	.0169	.0404	.0220	.0140	

* ALL NUMERICAL CALCULATIONS WERE CARRIED OUT WITH $m=12$, $N=24$

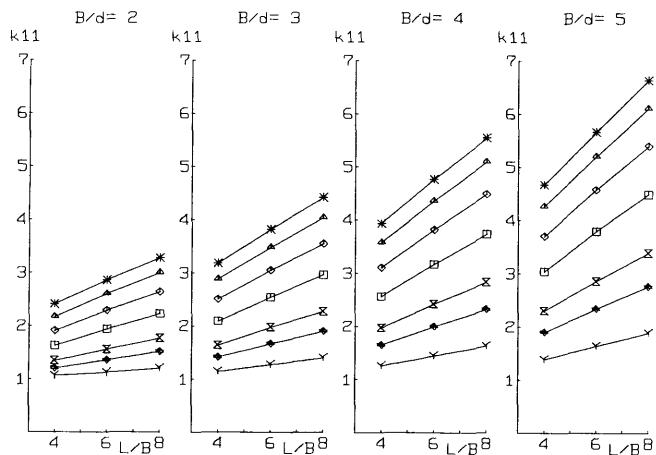


Fig. 4(a) k_{11} of ellipsoid ($K=0$)

SWAY (K=0) k22

MARKS	B/d		2			3			4			5		
	h/d	L/B	4	6	8	4	6	8	4	6	8	4	6	8
			*	1.00	2.87	3.57	4.19	3.94	4.98	5.93	4.98	6.32	7.59	5.98	7.61	9.23
▲	1.10	2.15	2.50	2.79	2.94	3.50	3.96	3.76	4.53	5.16	4.60	5.57	6.38	
◇	1.25	1.70	1.90	2.05	2.22	2.53	2.77	2.78	3.21	3.55	3.38	3.93	4.37	
□	1.50	1.39	1.50	1.58	1.71	1.87	2.00	2.06	2.29	2.47	2.44	2.74	2.98	
×	2.00	1.17	1.22	1.25	1.32	1.40	1.46	1.51	1.62	1.70	1.71	1.86	1.97	
◆	2.50	1.09	1.12	1.14	1.18	1.23	1.26	1.29	1.36	1.41	1.42	1.51	1.58	
Y	4.00	1.02	1.03	1.04	1.05	1.07	1.08	1.09	1.11	1.13	1.14	1.17	1.20	
μ_{22}	EXACT	0.868	0.917	0.945	0.956	0.626	0.640	0.455	0.474	0.483	0.368	0.382	0.388	
h=∞	NUMERICAL	0.853	0.893	0.903	0.911	0.609	0.611	0.453	0.464	0.464	0.368	0.376	0.375	

* ALL NUMERICAL CALCULATIONS WERE CARRIED OUT WITH $m=12$, $N=24$

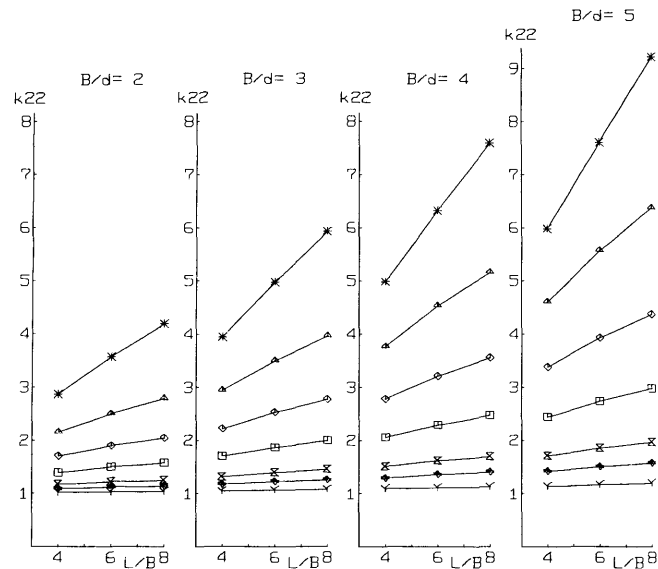


Fig. 4(b) k_{22} of ellipsoid ($K=0$)

ROLL (K=0) k44

MARKS	B/d	2			3			4			5		
	$\frac{h}{d} \backslash \frac{L}{B}$	4	6	8	4	6	8	4	6	8	4	6	8
*	1.00	.	.	.	4.56	5.64	6.65	5.64	7.00	8.28	6.61	8.23	9.85
▲	1.10	.	.	.	3.22	3.77	4.24	4.13	4.87	5.46	5.01	5.93	6.64
◇	1.25	.	.	.	2.33	2.61	2.84	2.92	3.32	3.62	3.54	4.04	4.41
□	1.50	.	.	.	1.73	1.87	1.99	2.09	2.30	2.45	2.48	2.74	2.93
⊗	2.00	.	.	.	1.32	1.38	1.43	1.50	1.59	1.66	1.70	1.82	1.91
◆	2.50	.	.	.	1.17	1.21	1.24	1.28	1.33	1.37	1.40	1.48	1.53
Y	4.00	.	.	.	1.05	1.06	1.07	1.08	1.10	1.12	1.12	1.15	1.17
μ_{44}	EXACT	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
$h=d$	NUMERICAL	.	.	.	0.152	0.159	0.161	0.667	0.692	0.782	1.650	1.787	1.732

• ALL NUMERICAL CALCULATIONS WERE CARRIED OUT WITH $n=12, N=24$

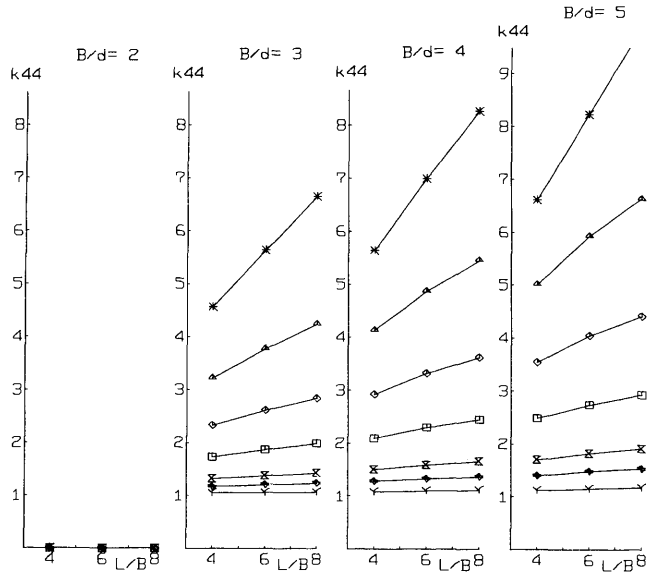


Fig. 4(c) k_{44} of ellipsoid ($K=0$)

PITCH (K=0) k55

MARKS	B/d	2			3			4			5		
	$\frac{h}{d} \backslash \frac{L}{B}$	4	6	8	4	6	8	4	6	8	4	6	8
*	1.00	2.68	3.10	3.50	3.49	4.08	4.63	4.26	4.99	5.70	5.00	5.87	6.72
▲	1.10	2.37	2.80	3.19	3.15	3.74	4.28	3.90	4.64	5.32	4.62	5.49	6.32
◇	1.25	2.02	2.41	2.76	2.67	3.23	3.74	3.32	4.03	4.68	3.97	4.82	5.60
□	1.50	1.68	2.00	2.29	2.17	2.64	3.08	2.68	3.30	3.86	3.19	3.95	4.64
⊗	2.00	1.35	1.57	1.78	1.66	2.01	2.33	2.00	2.46	2.89	2.36	2.93	3.46
◆	2.50	1.21	1.36	1.52	1.42	1.68	1.93	1.66	2.02	2.35	1.92	2.37	2.79
Y	4.00	1.06	1.13	1.20	1.15	1.27	1.40	1.26	1.44	1.63	1.38	1.63	1.88
μ_{55}	EXACT	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
$h=d$	NUMERICAL	3.040	9.057	19.00	12.10	34.42	78.44	30.94	86.34	175.3	63.11	174.5	352.9

• ALL NUMERICAL CALCULATIONS WERE CARRIED OUT WITH $n=12, N=24$

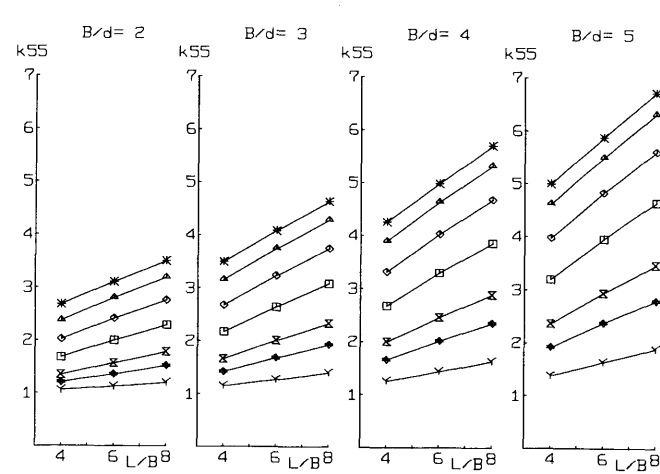


Fig. 4(d) k_{55} of ellipsoid ($K=0$)

YAW (K=0) k66

MARKS	B/d	2			3			4			5		
	$\frac{h}{d} \setminus \frac{L}{B}$	4	6	8	4	6	8	4	6	8	4	6	8
*	1.00	1.51	1.73	1.92	1.94	2.28	2.57	2.39	2.86	3.27	2.85	3.46	4.00
▲	1.10	1.34	1.50	1.62	1.67	1.91	2.10	2.02	2.36	2.62	2.40	2.83	3.17
◇	1.25	1.21	1.31	1.40	1.44	1.60	1.73	1.70	1.93	2.10	1.98	2.28	2.50
□	1.50	1.11	1.17	1.22	1.25	1.35	1.43	1.42	1.57	1.67	1.61	1.80	1.94
×	2.00	1.04	1.07	1.09	1.10	1.15	1.19	1.19	1.26	1.32	1.29	1.39	1.47
+	2.50	1.02	1.03	1.04	1.05	1.08	1.10	1.10	1.14	1.18	1.16	1.22	1.27
Y	4.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02	1.04	1.05	1.04	1.06	1.08
μ_{66}	EXACT	2.067	5.641	10.91	3.334	8.869	16.92	4.603	12.09	22.91	5.871	15.30	28.89
$h=\infty$	NUMERICAL	2.053	5.542	10.61	3.308	8.704	16.43	4.575	11.89	22.29	5.857	15.11	28.21

* ALL NUMERICAL CALCULATIONS WERE CARRIED OUT WITH $m=12$, $N=24$

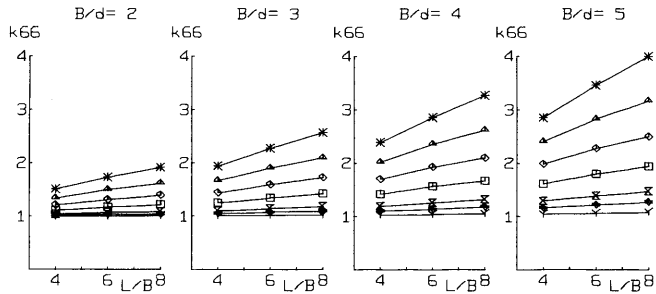


Fig. 4(e) k_{66} of ellipsoid ($K=0$)

SURGE (K=∞) k11

MARKS	B/d	2			3			4			5		
	$\frac{h}{d} \setminus \frac{L}{B}$	4	6	8	4	6	8	4	6	8	4	6	8
*	1.00	1.45	1.44	1.43	1.60	1.56	1.53	1.72	1.65	1.60	1.79	1.73	1.67
▲	1.10	1.35	1.35	1.35	1.51	1.48	1.46	1.65	1.60	1.56	1.75	1.70	1.65
◇	1.25	1.24	1.26	1.26	1.37	1.37	1.36	1.50	1.48	1.45	1.61	1.59	1.54
□	1.50	1.15	1.16	1.17	1.24	1.24	1.24	1.33	1.33	1.32	1.42	1.43	1.40
×	2.00	1.06	1.08	1.09	1.12	1.13	1.13	1.17	1.18	1.18	1.23	1.24	1.23
+	2.50	1.03	1.04	1.05	1.05	1.08	1.08	1.10	1.11	1.11	1.14	1.16	1.15
Y	4.00	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.06	1.06
μ_{11}	EXACT												
$h=\infty$	NUMERICAL	.0381	.0192	.0115	.0264	.0132	.0079	.0201	.0100	.0060	.0162	.0080	.0048

* ALL NUMERICAL CALCULATIONS WERE CARRIED OUT WITH $m=12$, $N=24$

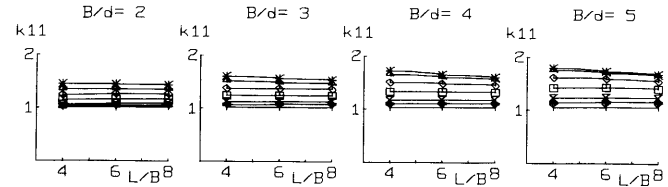


Fig. 4(f) k_{11} of ellipsoid ($K=\infty$)

SWAY (K=∞) k22

MARKS	B/d	2			3			4			5		
	$\frac{h}{d} \backslash \frac{L}{B}$	4	6	8	4	6	8	4	6	8	4	6	8
*	1.00	1.57	1.62	1.65	1.77	1.81	1.86	1.93	1.99	2.04	2.07	2.13	2.23
▲	1.10	1.32	1.35	1.37	1.50	1.53	1.55	1.67	1.71	1.72	1.84	1.87	1.89
◇	1.25	1.17	1.19	1.20	1.29	1.31	1.33	1.42	1.45	1.45	1.55	1.57	1.58
□	1.50	1.08	1.09	1.09	1.15	1.16	1.17	1.23	1.25	1.25	1.32	1.32	1.33
×	2.00	1.02	1.03	1.03	1.05	1.06	1.06	1.09	1.10	1.09	1.13	1.14	1.14
◆	2.50	1.01	1.01	1.01	1.03	1.03	1.03	1.04	1.05	1.04	1.07	1.07	1.07
Y	4.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02
μ_{22}	EXACT												
$h=\infty$	NUMERICAL	0.366	0.359	0.350	0.238	0.231	0.224	0.174	0.167	0.163	0.135	0.130	0.126

• ALL NUMERICAL CALCULATIONS WERE CARRIED OUT WITH $n=12$, $N=24$

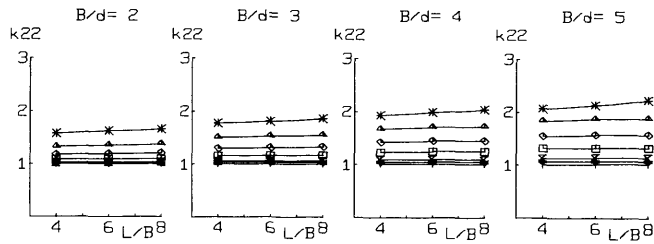


Fig. 4(g) k_{22} of ellipsoid ($K=\infty$)

HEAVE (K=∞) k33

MARKS	B/d	2			3			4			5		
	$\frac{h}{d} \backslash \frac{L}{B}$	4	6	8	4	6	8	4	6	8	4	6	8
*	1.00	1.96	1.91	1.88	2.07	2.01	1.98	2.08	2.02	2.01	2.03	1.98	2.01
▲	1.10	1.93	1.91	1.89	2.27	2.21	2.17	2.53	2.43	2.36	2.66	2.52	2.44
◇	1.25	1.62	1.62	1.62	1.89	1.88	1.87	2.17	2.14	2.11	2.44	2.37	2.31
□	1.50	1.37	1.38	1.38	1.56	1.56	1.56	1.76	1.76	1.75	1.96	1.95	1.93
×	2.00	1.18	1.19	1.20	1.29	1.30	1.30	1.40	1.41	1.41	1.52	1.52	1.52
◆	2.50	1.10	1.12	1.12	1.17	1.18	1.19	1.25	1.26	1.26	1.33	1.34	1.33
Y	4.00	1.03	1.04	1.04	1.06	1.07	1.07	1.09	1.10	1.10	1.12	1.13	1.13
μ_{33}	EXACT	0.860	0.917	0.945	1.325	1.399	1.434	1.790	1.881	1.923	2.256	2.363	2.412
$h=\infty$	NUMERICAL	0.859	0.913	0.938	1.318	1.386	1.415	1.773	1.851	1.884	2.221	2.388	2.341

• ALL NUMERICAL CALCULATIONS WERE CARRIED OUT WITH $n=12$, $N=24$

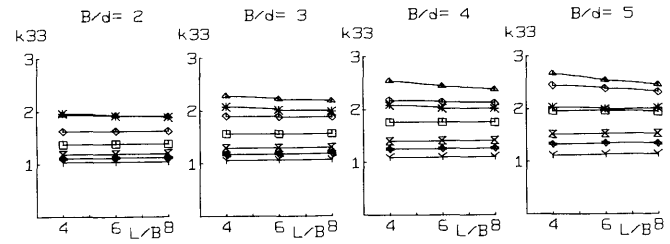


Fig. 4(h) k_{33} of ellipsoid ($K=\infty$)

ROLL (K=∞) k44

MARKS	B/d	2		3		4		5				
	$\frac{h/d}{L/B}$	4	6	4	6	4	6	4	6	8		
*	1.00	.	.	2.20	2.26	2.30	2.43	2.49	2.56	2.59	2.67	2.82
▲	1.10	.	.	1.74	1.78	1.79	2.01	2.04	2.04	2.25	2.27	2.28
◇	1.25	.	.	1.41	1.43	1.44	1.60	1.61	1.62	1.77	1.79	1.79
□	1.50	.	.	1.19	1.20	1.22	1.31	1.32	1.32	1.42	1.43	1.43
⊗	2.00	.	.	1.06	1.06	1.07	1.11	1.12	1.12	1.17	1.17	1.17
◆	2.50	.	.	1.02	1.03	1.03	1.05	1.05	1.05	1.08	1.08	1.08
Y	4.00	.	.	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02
μ_{44}	EXACT	.	.	0.100	0.102	0.103	0.436	0.444	0.446	1.073	1.089	1.094
$h=\infty$	NUMERICAL	.	.	0.098	0.099	0.097	0.418	0.416	0.412	1.013	1.003	0.992

* ALL NUMERICAL CALCULATIONS WERE CARRIED OUT WITH $n=12$, $N=24$

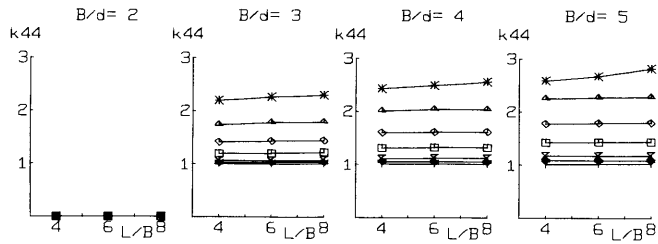


Fig. 4(i) k_{44} of ellipsoid ($K=\infty$)

PITCH (K=∞) k55

MARKS	B/d	2		3		4		5					
	$\frac{h/d}{L/B}$	4	6	4	6	4	6	4	6	8			
*	1.00	1.77	1.74	1.70	1.98	1.91	1.85	2.11	2.00	1.94	2.18	2.05	1.99
▲	1.10	1.59	1.60	1.58	1.84	1.81	1.77	2.04	1.97	1.91	2.20	2.08	2.00
◇	1.25	1.39	1.41	1.42	1.59	1.60	1.59	1.79	1.78	1.75	1.97	1.93	1.88
□	1.50	1.22	1.25	1.26	1.36	1.39	1.39	1.51	1.52	1.52	1.65	1.66	1.64
⊗	2.00	1.09	1.12	1.13	1.17	1.20	1.21	1.26	1.28	1.29	1.34	1.37	1.37
◆	2.50	1.04	1.06	1.07	1.09	1.12	1.13	1.15	1.17	1.18	1.21	1.23	1.24
Y	4.00	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.04	1.04	1.06	1.06	1.06	1.08	1.09
μ_{55}	EXACT	2.067	5.641	10.91	7.049	20.28	38.37	19.51	49.37	92.57	39.08	97.02	182.6
$h=\infty$	NUMERICAL	2.052	5.593	10.81	7.770	20.05	37.92	19.25	48.63	91.18	38.34	95.94	179.0

* ALL NUMERICAL CALCULATIONS WERE CARRIED OUT WITH $n=12$, $N=24$

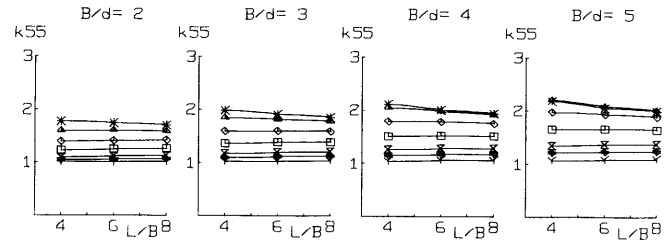


Fig. 4(j) k_{55} of ellipsoid ($K=\infty$)

YAW (K=∞) k66

MARKS	B/d	2			3			4			5		
	h/d	4	6	8	4	6	8	4	6	8	4	6	8
*	1.00	1.24	1.26	1.28	1.38	1.40	1.41	1.51	1.53	1.55	1.63	1.67	1.71
△	1.10	1.15	1.16	1.17	1.25	1.27	1.27	1.36	1.38	1.38	1.47	1.48	1.49
◇	1.25	1.08	1.09	1.10	1.15	1.16	1.17	1.23	1.24	1.25	1.31	1.32	1.33
□	1.50	1.03	1.04	1.04	1.07	1.08	1.09	1.12	1.13	1.14	1.18	1.19	1.19
×	2.00	1.01	1.01	1.01	1.02	1.03	1.03	1.05	1.05	1.05	1.07	1.08	1.08
◆	2.50	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02	1.03	1.04	1.04
Y	4.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01
μ66	EXACT												
h=∞	NUMERICAL	0.989	2.489	4.599	1.488	3.704	6.838	1.965	4.888	9.049	2.425	6.047	11.24

* ALL NUMERICAL CALCULATIONS WERE CARRIED OUT WITH M=12, N=24

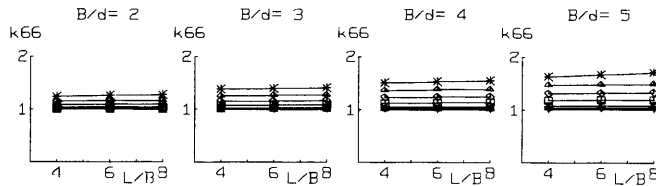


Fig. 4(k) k₆₆ of ellipsoid (K=∞)

3.2 一般船型

一般船型の場合は、楕円体の場合のような変数変換は行わず、積分方程式 (2.10) をそのまま代数方程式に直して数値解を求める。微小面素 dS (大部分は4辺形、まれに3角形) の面積及び dS に立てた法線の方向余弦は、楕円体の場合のように単純な解析的表示は出来ないが、 dS の4つの端点の座標を使って、4辺形の2つの対角線ベクトルの外積によって近似的に表わすことができるから (2.10) を代数方程式に直すのに特に困難はなく、数値計算法の大部分は楕円体

の場合と異なることはない。

数値計算例としてタンカー船型 (東京丸) をとり上げた。分割の方法は船の長さ方向に、 $SQ, ST. 9$ から $SQ, ST. 1$ までは $L_{pp}/20$ の間隔で16等分、 FP と $SQ, ST. 9$ の間及び $SQ, ST. 1$ と $SQ, ST. 1/4$ の間は $L_{pp}/40$ の間隔でそれぞれ4等分と3等分、 FP より前の部分及び $SQ, 1/4$ より後の部分についてはその部分をそれぞれ1つのブロックとして扱い、合計長さ方向に25のブロックに分割し、各ブロックはキールからガス方向に吃水線まで15分割した。結局船体表

面の片側半分を $25 \times 15 = 375$ の面素に分割したことになる。ガス方向の分割は等分割ではなく off set から直接数値の読みとれる water line または buttock line の適当な箇所を分割点として選んである。船首、船尾のブロックでは端部は、船体中心面上に分割点があることとなるから、普通の船型では、船首尾の船底部分の2つの面素だけが3角形となりあとはすべての面素が4辺形になる。

計算結果を Table 2 に示す。このうち実験及び

FEM による3次元計算値のある^{*)} $K=0$ の場合の k_{22} (sway) と k_{66} (yaw) について Fig. 5 にそれらと比較して示してある。 k_{22} については、実験値と良く合っており、FEM による計算とも浅い方でやや差があるが大体合っている。浅水影響係数 k_{22} だけでなく附加質量係数 m_{22} についても $k=\infty$ の値を比べると本法による値が0.795で実験値が0.754、FEM による計算値が0.738とかなり良い一致とみてよいであろう。 k_{66} についても実験値との一致は良いとみなせる。

Table 2 Shallow water effect coefficient k_{ii} of Tanker "Tokyo Maru"

h/d	K = 0			K = ∞					
	k ₁₁ surge	k ₂₂ sway	k ₆₆ yaw	k ₁₁ surge	k ₂₂ sway	k ₃₃ heave	k ₄₄ roll	k ₅₅ pitch	k ₆₆ yaw
1	3.53	6.26	3.05	1.34	1.40	0.87	1.17	1.05	1.44
1.05	3.41	5.38	2.76	1.33	1.37	1.19	1.45	1.41	1.39
1.1	3.27	4.64	2.50	1.32	1.34	1.62	1.73	1.81	1.33
1.25	2.87	3.15	1.94	1.26	1.24	2.45	1.82	2.30	1.21
1.5	2.39	2.15	1.52	1.17	1.13	2.03	1.37	1.86	1.11
2	1.87	1.52	1.22	1.09	1.05	1.48	1.10	1.39	1.04
2.5	1.60	1.29	1.11	1.05	1.02	1.29	1.03	1.22	1.02
4	1.25	1.09	1.03	1.02	1.01	1.10	1.00	1.26	1.00
5	1.16	1.05	1.01	1.01	1.00	1.26	1.00	1.03	1.00
$\frac{\mu_{66}}{h=\infty}$	0.0509	0.795	3798	0.0190	0.296	1.325	56.79	4860	1721

$$L_{pp}=290\text{m}, \quad B=47.5\text{m}, \quad d=16\text{m}, \quad \nabla=177,505\text{m}^3$$

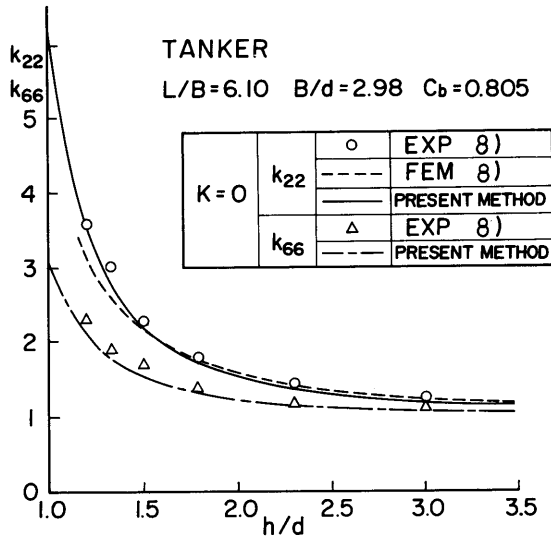


Fig. 5 Comparison with experiment

4. 簡易推定法

前報で提案した一般船型の簡易推定法は次のようなものである。

まず求めようとする運動モードと K に応じた必要な図表を Fig. 4 の中から選び、その表で、ある k/d の欄に注目し、与えられた船の L/B と B/d に対する k_{ii} を内挿によって求める。そのときの h/d は楕円体の相当吃水 he/d であるから、与えられた船に関しては

$$h/d = he/d + \frac{1}{2}(C_b - \frac{\pi}{6}) \quad (4.1)$$

で計算される h/d に対する値であるとするものである。

k_{ii} を表から内挿するには、図式内挿でもよいが、パソコン等で処理することを考えると簡単な数式で表わされていた方が便利である。Fig. 4 をみると L/B と B/d に対する k_{ii} の変化は比較的単調で緩やかであるから、次のような L/B , B/d に関する 2 次式で充分近似できると考えられる。即ち

$$k_{ii} = \{a_1(B/d)^2 + a_2(B/d) + a_3\}(L/B)^2 + \{a_4(B/d)^2 + a_5(B/d) + a_6\}(L/B) + a_7(B/d)^2 + a_8(B/d) + a_9 \quad (4.2)$$

各運動モード、 K 及び h/d に対して表の数値に (4.2) をあてはめて係数を求めた一覧表が Table 3 に示してある。

この内挿公式を使って先に 3 次元の厳密計算をしたタンカー東京丸 ($L/B=6.10$, $B/d=2.98$, $C_b=0.805$) について、各運動モードについて簡易推定をして比較したのが Fig. 6 である。

操縦運動の推定に必要な $K=0$ での sway と yaw については、この簡易推定法が極めて有効であることが Fig. 6 (b) と (c) に示されている。 $K=0$ での surge については、Fig. 6 (a) から判断すると C_b の修正をしないで楕円体の値そのものを使った方がよさそうであるが、surge の場合には、無限水深での附加質量の値が小さいので、 C_b の修正をする簡易推定法による値と C_b の修正をしない楕円体の値そのもののどちらを使用しても見掛質量 (船の質量 + 附加質量) としては 1% 以下の誤差におさまる。 $K=0$ での heave は前報で示したように解がない、従って前後非対称な一般の船型の場合 midship まわりの pitch についても解がないと考えるのが自然である。また pitch, roll については $K=0$ の場合を簡易法で推定することが必要になる例が現在のところ考えられないので、これらについては比較の図を示していない。

衝突問題の推定に必要な附加質量は $K=\infty$ の場合ばかりではないが、衝突の瞬間は $K=\infty$ の値をとるのでこれが一つの重要な物理量である。衝突問題では surge, sway, yaw の運動モードについての附加質量が必要になるが、Fig. 6 (d), (e), (i) に見るように、 $K=0$ の surge の場合と同様、 C_b の修正をしない方

がむしろよさそうである。しかし、 $K=\infty$ の場合の無限水深での附加質量は、 $K=0$ の場合の値の $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ 程度に小さくなることと、浅水影響の受け方が $K=\infty$ の場合は、 $K=0$ の場合よりかなり小さいことから、簡易推定法として統一した推定式であるためには、 C_b の修正を入れても、見掛質量としての誤差は、surge, yaw なら 1% 以下, sway でも数% 以下におさまる。

振動問題では、 $K=\infty$ での heave, roll, pitch が更に必要になるが、Fig. 6 (f), (g), (h) にあるように極く浅水で浅水影響が小さくなり、ある水深のところでピークのあるような形になっている。heave と pitch については、楕円体でも B/d の大きい形状でそ

のような傾向が表われている (Fig. 4 (h), (j)) が、これは扁平な船底の影響が、そのような効果を与えているものと推測される。従って、ここで述べたような簡易推定法でこれらの傾向を表わすことはむづかしいと考えられ、実際 roll と pitch では極く浅水では簡易推定法による推定はあまりよくない。しかし、heave の場合は、簡易推定の結果も、ある水深でピークのあるカーブになっており、ある程度これらの傾向を表わしている。

いずれにしても、何の手がかりもない場合には、振動問題でもこの簡易推定法がある程度の有効性をもっていると言ってよいであろう。

Table 3(a) Coefficients of interpolation formula of k_{11} ($K=0$)

h/d	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
1.00	0.002118	-0.01437	0.01732	-0.02669	0.2733	-0.1876	0.0657	-0.0604	1.306
1.10	0.001009	-0.00720	0.00692	-0.01273	0.1766	-0.0544	0.0298	0.1391	0.837
1.25	0.000788	-0.00588	0.00462	-0.01008	0.1561	-0.0423	0.0300	0.0503	0.833
1.50	-0.000220	0.00015	-0.00163	0.00200	0.0738	0.0201	0.0006	0.1360	0.687
2.00	0.001113	-0.00878	0.01258	-0.01335	0.1613	-0.1581	0.0454	-0.2555	1.241
2.50	0.000651	-0.00581	0.01031	-0.00781	0.1158	-0.1385	0.0309	-0.2105	1.239
4.00	0.000625	-0.00513	0.01015	-0.00750	0.0915	-0.1467	0.0324	-0.2646	1.405

Table 3(b) Coefficients of interpolation formula of k_{22} ($K=0$)

h/d	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
1.00	0.002308	-0.01330	0.00761	-0.02959	0.3331	-0.0998	0.0641	0.0382	0.900
1.10	0.000391	-0.00696	0.00471	-0.00468	0.1784	-0.0863	0.0246	0.1294	0.906
1.25	-0.000163	-0.00134	-0.00309	0.00322	0.0607	0.0300	0.0094	0.2002	0.706
1.50	-0.000266	0.00048	-0.00338	0.00506	0.0104	0.0482	-0.0009	0.1950	0.702
2.00	-0.000272	0.00103	-0.00337	0.00389	-0.0020	0.0376	0.0013	0.0846	0.835
2.50	0.000355	-0.00286	0.00304	-0.00363	0.0392	-0.0364	0.0189	-0.0716	1.067
4.00	0.000370	-0.00247	0.00333	-0.00382	0.0285	-0.0352	0.0144	-0.0705	1.078

Table 3(c) Coefficients of interpolation formula of $k_{66} (K=0)$

h/d	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
1.00	0.000379	-0.00430	0.00340	-0.00144	0.0917	-0.0308	0.0073	0.0957	0.761
1.10	0.000095	-0.00293	0.00086	0.00009	0.0675	-0.0102	0.0107	0.0412	0.788
1.25	-0.000045	-0.00268	0.00437	0.00180	0.0508	-0.0473	0.0059	0.0096	0.938
1.50	0.000349	-0.00432	0.00634	-0.00358	0.0658	-0.0788	0.0213	-0.1150	1.115
2.00	-0.000266	0.00148	-0.00316	0.00382	-0.0114	0.0353	-0.0009	0.0355	0.881
2.50	-0.000016	-0.00013	0.00006	0.00019	0.0091	-0.0107	0.0069	-0.0395	1.042
4.00	0.000993	-0.00734	0.01197	-0.01130	0.0865	-0.1409	0.0319	-0.2338	1.372

Table 3(d) Coefficients of interpolation formula of $k_{11} (K=\infty)$

h/d	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
1.00	-0.000905	0.00646	-0.00945	0.01399	-0.1082	0.1579	-0.0614	0.5832	0.540
1.10	-0.000611	0.00427	-0.00609	0.00984	-0.0773	0.1154	-0.0445	0.4800	0.566
1.25	-0.000887	0.00583	-0.01064	0.01127	-0.0821	0.1548	-0.0358	0.3938	0.492
1.50	-0.000867	0.00444	-0.00540	0.01103	-0.0609	0.0824	-0.0301	0.2619	0.727
2.00	-0.000314	0.00182	-0.00370	0.00440	-0.0285	0.0624	-0.0126	0.1411	0.758
2.50	0.000003	-0.00101	0.00164	-0.00003	0.0112	-0.0125	0.0025	-0.0090	1.004
4.00	0.000359	-0.00340	0.00673	-0.00369	0.0367	-0.0730	0.0116	-0.0976	1.194

Table 3(e) Coefficients of interpolation formula of $k_{22} (K=\infty)$

h/d	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
1.00	0.000638	-0.00247	0.00065	-0.00515	0.0186	0.0243	-0.0045	0.2358	0.981
1.10	0.000562	-0.00418	0.00516	-0.00674	0.0501	-0.0494	0.0153	0.0575	1.063
1.25	0.000353	-0.00285	0.00367	-0.00487	0.0384	-0.0420	0.0164	0.0007	1.050
1.50	0.000663	-0.00415	0.00495	-0.00922	0.0586	-0.0695	0.0313	-0.1235	1.169
2.00	0.000274	-0.00204	0.00187	-0.00266	0.0198	-0.0128	0.0087	-0.0267	0.991
2.50	0.000660	-0.00488	0.00754	-0.00793	0.0586	-0.0906	0.0237	-0.1554	1.241
4.00	-0.000278	0.00157	-0.00205	0.00396	-0.0224	0.0294	-0.0113	0.0681	0.906

Table 3(f) Coefficients of interpolation formula of k_{33} ($K=\infty$)

h/d	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
1.00	0.000637	-0.00195	0.00386	-0.00389	0.0021	-0.0387	-0.0346	0.3246	1.611
1.10	0.000270	0.00048	-0.00192	-0.00262	-0.0254	0.0502	-0.0463	0.7070	0.741
1.25	0.000222	-0.00117	0.00139	-0.00579	0.0251	-0.0265	0.0194	0.1931	1.153
1.50	-0.000290	0.00189	-0.00364	0.00286	-0.0216	0.0463	-0.0042	0.2353	0.873
2.00	0.000622	-0.00435	0.00622	-0.00748	0.0508	-0.0669	0.0224	-0.0381	1.147
2.50	-0.000841	0.00575	-0.01035	0.00946	-0.0664	0.1265	-0.0217	0.2321	0.631
4.00	0.000006	-0.00005	-0.00115	-0.00008	0.0006	0.0163	0.0002	0.0282	0.923

Table 3(g) Coefficients of interpolation formula of k_{44} ($K=\infty$)

h/d	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
1.00	0.001670	-0.00770	0.00547	-0.01127	0.0384	0.0422	-0.0169	0.4470	0.827
1.10	0.001389	-0.00987	0.01341	-0.01418	0.0960	-0.1036	0.0197	0.1469	0.953
1.25	-0.001702	0.01297	-0.02477	0.02165	-0.1667	0.3269	-0.0691	0.7172	-0.187
1.50	0.001482	-0.01311	0.02733	-0.01529	0.1349	-0.2757	0.0328	-0.1777	1.440
2.00	0.002282	-0.01889	0.03753	-0.02866	0.2356	-0.4632	0.0837	-0.6303	2.232
2.50	-0.000604	0.00545	-0.01214	0.00850	-0.0766	0.1708	-0.0243	0.2493	0.441
4.00	-0.000361	0.00225	-0.00338	0.00553	-0.0353	0.0548	-0.0208	0.1464	0.752

Table 3(h) Coefficients of interpolation formula of k_{55} ($K=\infty$)

h/d	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
1.00	-0.000063	0.00395	-0.00923	0.00326	-0.0749	0.1383	-0.0471	0.6182	0.742
1.10	0.000322	0.00060	-0.00617	-0.00450	-0.0186	0.0966	-0.0096	0.4252	0.671
1.25	0.000639	-0.00447	0.00515	-0.00891	0.0524	-0.0468	0.0204	0.0907	1.056
1.50	-0.000303	0.00199	-0.00571	0.00301	-0.0238	0.0808	-0.0071	0.2072	0.699
2.00	-0.000586	0.00385	-0.00807	0.00703	-0.0472	0.1091	-0.0187	0.2109	0.614
2.50	0.000320	-0.00212	0.00154	-0.00447	0.0296	-0.0164	0.0152	-0.0450	0.991
4.00	0.000555	-0.00487	0.00894	-0.00666	0.0599	-0.1075	0.0201	-0.1616	1.286

Table 3(i) Coefficients of interpolation formula of k_{66} ($K=\infty$)

h/d	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
1.00	0.000395	-0.00265	0.00363	-0.00162	0.0132	-0.0088	-0.0046	0.1533	0.908
1.10	0.001308	-0.00917	0.01319	-0.01570	0.1100	-0.1533	0.0444	-0.2048	1.364
1.25	0.000032	-0.00023	0.00038	-0.00039	0.0028	0.0003	0.0035	0.0515	0.943
1.50	-0.000599	0.00419	-0.00720	0.00594	-0.0415	0.0764	-0.0091	0.1138	0.789
2.00	-0.000010	-0.00017	0.00012	0.00012	0.0025	-0.0019	0.0021	-0.0037	0.997
2.50	0.000018	-0.00089	0.00286	0.00102	0.0019	-0.0193	-0.0043	0.0163	1.011
4.00	-0.000000	0.00000	-0.00000	-0.00000	-0.0000	0.0000	0.0025	-0.0145	1.019

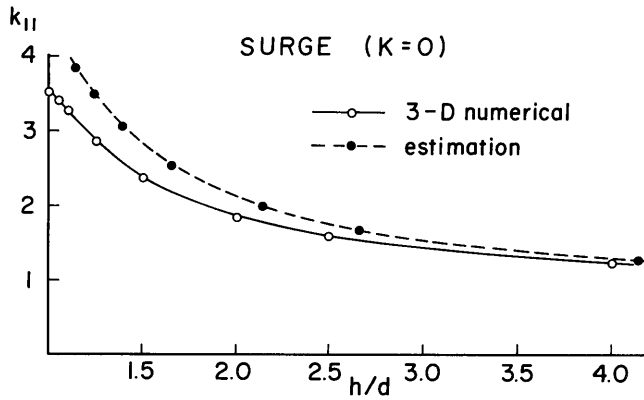


Fig. 6(a) Surge ($K=0$)

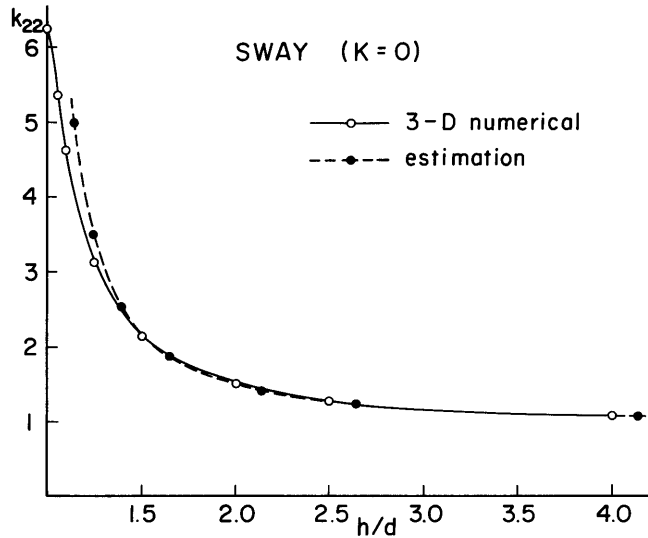


Fig. 6(b) Sway ($K=0$)

Fig. 6 Comparison between 3-D numerical solution and estimation by simple formula (Tanker "Tokyo Maru")

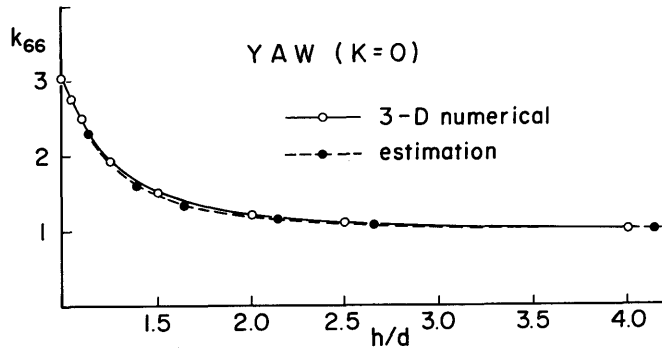


Fig. 6(c) Yaw ($K=0$)

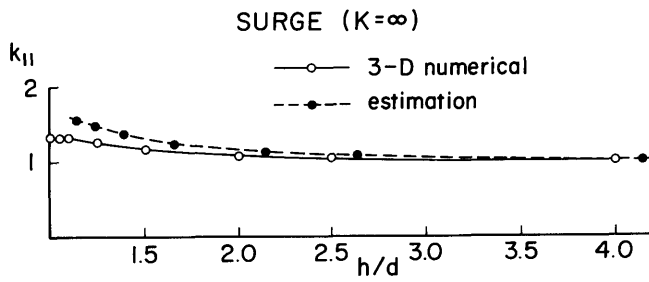


Fig. 6(d) Surge ($K=\infty$)

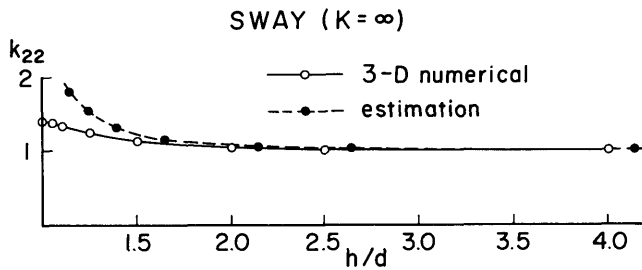


Fig. 6(e) Sway ($K=\infty$)

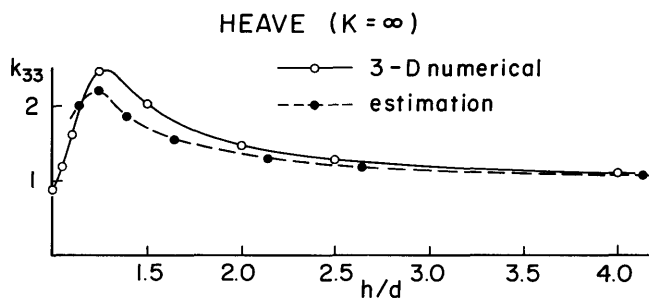
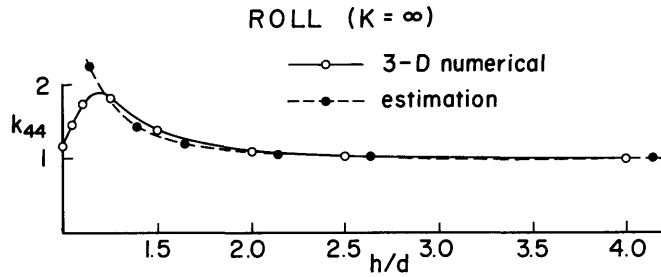
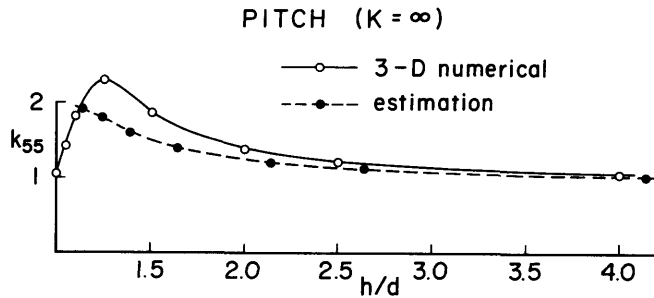
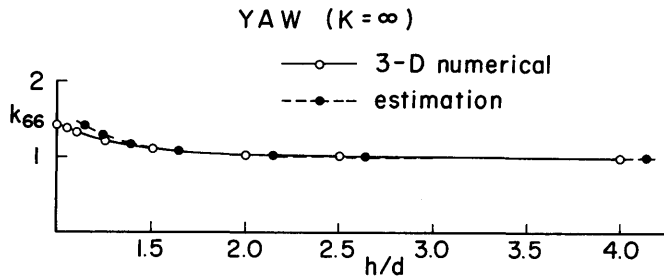


Fig. 6(f) Heave ($K=\infty$)

Fig. 6(g) Roll ($K = \infty$)Fig. 6(h) Pitch ($K = \infty$)Fig. 6(i) Yaw ($K = \infty$)

5. ま と め

$K=0$ と $K=\infty$ の場合の 3 次元物体の附加質量に及ぼす浅水影響の計算法について、前報に引き続いて取り扱い次のような結論を得た。

1. 吹出しの無限個鏡像列による速度ポテンシャルの表示式として導いた (2.36) の形の有限積分型の表示式が誤りであることは、前報で数値的に明らかにしたが、本報ではこの誤った表示式が「一様収束でない無限級数は項別積分ができない」にもかかわらず、これを無視したことによって導き出されたものであることを明らかにした。

2. 一般船型の計算を行うプログラムを開発して、タンカー船型についての数値計算を行い、既存の実験値及び FEM による計算値との比較により、本計算結果の精度を確認した (Fig. 5)。

3. 前報で提案した一般船型の簡易推定法で使用する楕円体の軸長比及び水深をパラメータにした系統計算結果の数値表のパラメータ範囲を拡げ幅広浅吃水船にも使用できるようにしたほか、数値計算法の改良により精度の良い数値表にした (Fig. 4)。またこれらの数値表から任意の L/B , B/d に対して浅水影響係数 k_u を内挿するための簡易公式を導いた ((4.2) 式及び Table 3)。

4. タンカー船型の計算結果と簡易推定法による推定値との比較により, $K=0$ の sway と yaw については両者は極めて良い一致を示すこと, $K=0$ の surge と $K=\infty$ の surge, sway, yaw については, C_b の修正をしない方が良い推定値になること, 及び $K=\infty$ の heave, roll, pitch については, 極く浅水で一致の良くない部分もあるが, 全体としては簡易推定法が役に立ちうることを明らかにした (Fig. 6)。

参 考 文 献

- 1) 菅信, 原口富博: 3次元物体の附加質量に及ぼす浅水影響, 第42回船研研究発表会講演集 (1983. 12)
- 2) 菅信, 原口富博: 3次元物体の附加質量に及ぼす浅水影響— $K=0$ と $K=\infty$ の場合—, 船研報告第21巻第3号 (1984. 5)
- 3) A. B. Basset: A Treatise on Hydrodynamics, vol. 1, p. 57, Dover Publications (1961)
- 4) 森口繁一, 宇田川銈久, 一松信: 数学公式Ⅱ一級数・フーリエ解析一, 岩波全書, (1962), p. 117, 119
- 5) 日本数学会編集: 岩波数学辞典, 岩波書店, 第2版, (1970), p. 586
- 6) J. L. Hess and A. M. O. Smith: Calculation of Potential Flow about Arbitrary Bodies, Progress in Aeronautical Sciences Vol. 8, Pergamon Press (1967)
- 7) 菅信: 3次元物体の附加質量に及ぼす浅水影響の計算プログラム, 船研報告第21巻5号 (1984. 9)
- 8) 藤野正隆, 高品純志, 山本茂: 操縦運動の附加質量および附加慣性モーメントの3次元修正について, 造船学会論文集第135号 (1974)