

# 箱型浮体の拘束直進, 斜航, 旋回時の 抵抗について

影本 浩\*

## Hydrodynamic Forces on Box-shaped Vessels Towed in Calm Water

By  
Hiroshi KAGEMOTO

### Abstract

With a increasing number of huge offshore works and the construction of huge offshore structures under planning or going on, towing of large caissons (typical dimension ; 50-100m), which are basic components of the structures, has become inevitable.

The estimation of hydrodynamic forces on the caissons while they are towed is vital for the estimation of necessary horse-power of towing ships as well as course stability of towed caissons and thus determines the effectiveness of the construction works and the safety of the towing operations.

Accordingly the hydrodynamic forces on box-shaped vessels are investigated in this paper.

Experiments are conducted in a towing tank and in a rotating-arm tank while changing the water depth, the radius of circulation and the heading angle of models of wide variety of length, breadth and draft.

As a theoretical model Kirchhoff's Dead Water Theory is applied with some success.

Finally experimental formulae are proposed for the use of the estimation of forces, moments and so-called hydrodynamic derivatives.

	目 次	頁
第1章 緒言 .....		87
第2章 直進時の抵抗 .....		88
2.1 幅の変化の影響 .....		88
2.2 喫水の変化の影響 .....		89
2.3 長さの変化の影響 .....		90
2.4 水深の変化の影響 .....		92
2.5 抵抗成分の分離 .....		93
第3章 斜航時の抵抗 .....		95
第4章 旋回時の抵抗, モーメント .....		97
第5章 抵抗, モーメントを求めるための 実験公式 .....		101

第6章 結言 .....	104
謝辞 .....	105
参考文献 .....	105

### 1. 緒 言

箱型浮体は, 円柱と共に海洋構造物の基本的な構成要素である。

特に近年では, 大型海洋構造物, 大型海洋土木工事の出現に伴い, 大型の箱型ケーソンを曳航する機会がふえている。

曳航馬力の推定, 曳航時の保針性, 旋回性, ふれまわりなどを予測するためには, 直進, 斜航, 旋回時に加わる抵抗成分を推定することが必要不可欠である。これらの成果は, 係留時の安定性などの予測にも応用

\*海洋開発工学部

原稿受付: 昭和60年1月11日

できる。しかしながら、これまで箱型浮体の曳航時の流体力特性について調べられた例は少ない。

従って、船舶技術研究所の曳航水槽、旋回腕水槽、海洋構造物試験水槽を駆使して、箱型浮体の直進、斜航、旋回時の抵抗、モーメントを調査した。実際の曳航時には、トリム、ヒール、浮体の全体的な沈下・上昇などが生ずるであろうが、本研究はそれらを拘束した状態について調べたものである。

拘束模型を扱うことにより、抵抗に影響を及ぼすパラメータを限定することができ、浮体まわりの流れのメカニズムと抵抗との関係を分析的に調べることが可能となり<sup>1)</sup>、拘束しない場合の抵抗の推定法を調べる上で非常に有用な知見を得ることができる。また、拘束模型のデータから、操縦性、針路安定性、ふれまわりなどを記述する運動方程式の係数を得ることができる。

収録されたデータ量は膨大であり、一時にそのすべてを整理、分類して考察を加えることは困難であるため、今回はその中から主なものを選んで公表する次第である。

## 2. 直進時の抵抗

### 2.1 幅の変化の影響

長さ(L)1.2m、喫水(d)0.1mで一定とし、幅(B)を0.1mから0.5mまで変化させた5種類の箱型浮体模型を用いて、拘束直進時の抵抗を測定した。実験に使用した水槽は、三鷹第3船舶試験水槽(長さ×幅×水深=150m×7.5m×3.5m)で、図-1に示すように、三分力計(日章電機 LMC 型)を介して模型を走行台車に固定して測定を行なった。曳航速度は0.1m/s~0.8 m/sで、模型スケールが実機の1/30~1/50と考えられるため、実機に換算((実機速度)=(模型速度)×(スケール比)<sup>1/2</sup>)すると0.5~6.0m/s(1~12kt)程度 of 速度となる。平板や箱型浮体の抵抗はレイノルズ数にはあ

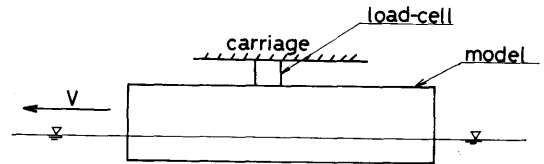


Fig. 1 The experimental set-up for the measurement of the resistance.

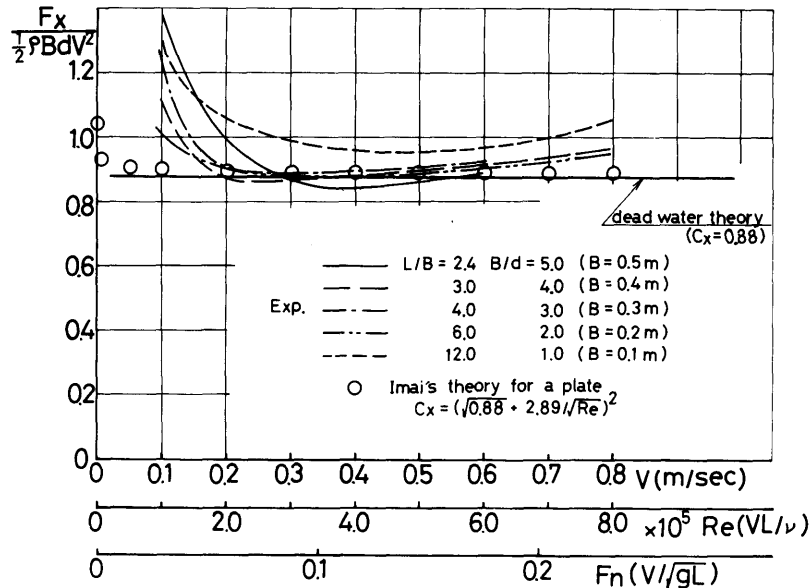


Fig. 2 The resistance vs the breadth (B). (The resistance is measured while the model is towed with a uniform velocity V in calm water by a carriage as shown in Fig. 1. The trim, heel and sinkage are restricted completely.)

まり影響されないため、造波の影響を等しくする意味で模型と実機とのフルード数を同じになるように速度の換算を行なった。ちなみに、本四連絡橋用の大型ケーソンの曳航速度は最大で4~5 kt程度であり、潮流速等海象条件からも構造物の曳航速度は4 kt程度が適当であり限界であるとされている<sup>2)</sup>。

抵抗計測の結果を図-2に示す。ただし、縦軸には $\frac{1}{2} \rho B d V^2$ で無次元化した抵抗係数を示した。 $(\rho$ :水の密度,  $V$ :曳航速度)

図より $L/B \leq 6.0$ では速度0.2~0.7m/s(フルード数0.05~0.20)の範囲で抵抗係数が $L/B$ によってあまり変化しない(抵抗値が幅に比例する)ため、幅がある程度以上( $L/B \leq 6.0$ )大きくなると、浮体まわりの流れは幅方向に変化のない2次元流であると考えられる。

その際の浮体まわりの流れを文献<sup>3),4)</sup>を参考にして推定するとほぼ図-3に示す様な幅方向に変化のない二次元流であると考えられる。浮体の背面領域は死水モデルで近似できる。従って、試みに、理論モデルとして、図-4に示すようなKirchhoffの死水モデルを使って抵抗係数を算出すると<sup>5)</sup>,

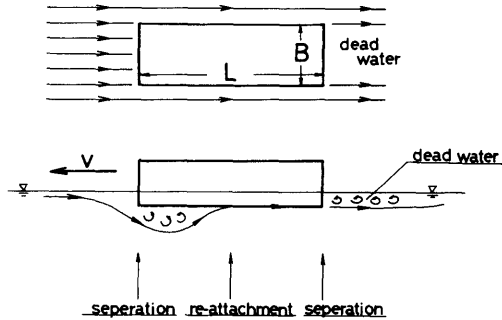


Fig. 3 The flow pattern around a box-shaped vessel.

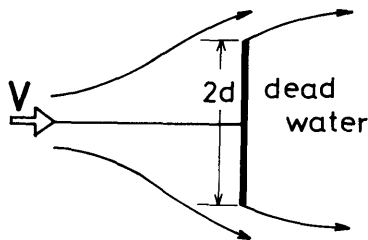


Fig. 4 Kirchhoff's dead water model.

$$\text{抵抗係数} = 2\pi / (\pi + 4) \sim 0.88 \quad (2.1)$$

となり、図-2に示す実験結果とよく一致する。文献6)によると、レイノルズ数が大きい場合は、平板に一樣流があたるときの流れはKirchhoffの死水モデル流れになると述べており、その解を第一次近似式として、レイノルズ数の低い流れまで適用できる式を導いている。

$$\text{今井の式: 抵抗係数} = (\sqrt{0.88} + 2.89 Re^{-1/2})^2 \quad (2.2)$$

( $Re$ :レイノルズ数)

今回の実験でレイノルズ数は $10^5 \sim 10^6$ 程度、従って実機では $10^6 \sim 10^7$ 程度になり、いずれにしても(2.2)式によればレイノルズ数変化による抵抗係数変化は非常に小さく、抵抗係数は0.88でほぼ一定である。

箱型浮体の抵抗係数に対するレイノルズ数影響についても同様のことが成り立つとすれば、結局フルード数0.05~0.20程度の速度で水深の深い海域を航行する幅広( $L/B \leq 0.6$ )の箱型浮体の抵抗係数は0.88程度で一定であるといえる。

しかし、図-2に示すように速度が非常に小さく( $V < 0.2$ m/s)なると、抵抗係数が大きくなり、抵抗値は速度の2乗よりもむしろ速度に比例する。また、高速の場合( $V > 0.6$ m/s)には、自由表面の攪乱が大きくなるため、造波抵抗、碎波抵抗などの影響により抵抗係数は大きくなる。

## 2.2 喫水の変化の影響

前節で述べたものと同じモデル( $L=1.2$ m)で、幅0.5mの( $L/B=2.4$ )一定とし、喫水を順次浅くして直進時の抵抗を調べた結果を図-5に示す。水深は3.5mである。

前節の結果により、 $L/B=2.4$ (喫水0.1m)では流れは幅方向に変化の少ない2次元流になっているものと思われる。喫水がさらに浅くなると、流れは浮体の下面をまわって流れやすくなるため流れはますます2次元になるものと推定される。Hoerner<sup>7)</sup>によっても、自由表面を剛体壁と考えることができれば $L/d > 10.0$ で抵抗係数はほぼ0.90であり、死水モデルによる値0.88とほぼ一致する。

従って自由表面の影響が無視できるとすれば、 $L/d > 10$ 程度に喫水( $d$ )が浅くなれば( $L=1.2$ mとすると、 $d < 0.12$ m)、抵抗係数は前節と同じく0.9程度であるといえる。

しかし、今図の実験結果をみると、 $V=0.45$ m/sを境にして、それより低速では、喫水の浅いほど抵抗係数

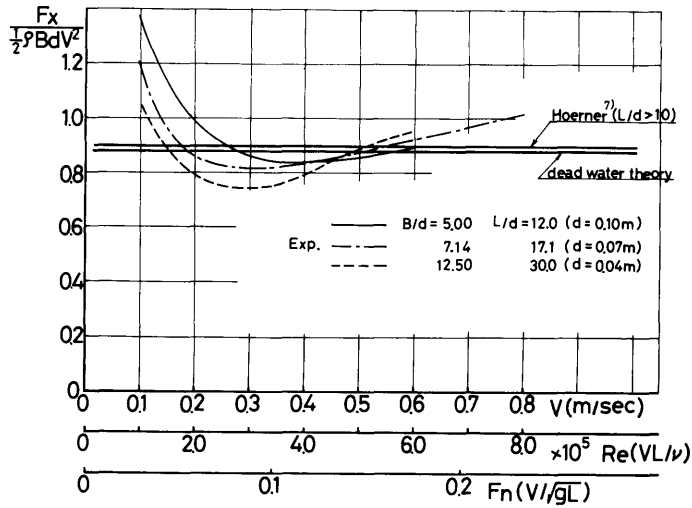


Fig. 5 The resistance vs the draft (d).

は小さくなり、逆に高速では、喫水の浅いほど抵抗係数は大きくなるようである。喫水が浅くなれば、攪乱源（角の部分）が水面に近づいて自由表面の影響が出てくるためと思われる。

逆に今回の実験よりも喫水が深くなってくると、流れは幅方向に変化が小さいと仮定することは許されなくなり、2次元死水理論にては不十分になることが予想される。

2.3 長さの変化の影響

図-6に長さの変化が拘束直進時の抵抗に及ぼす影響の例として( $L = 1.2\text{m}$ ,  $B = 0.5\text{m}$ ,  $d = 0.1\text{m}$ )の箱型浮

体と、( $L = 0.01\text{m}$ ,  $B = 0.5\text{m}$ ,  $d = 0.1\text{m}$ )の平板に近い箱型浮体の抵抗を実験的に調べた結果を示す。実験時の水深は3.5mである。図中には、Kirchhoffの死水モデルによる値及び、文献7)に示されている無限流体中の3次元平板( $B/d < 10$ )に対する値もあわせて示す。

Kirchhoffの死水モデルは、一様流中の平板（長さ0）に対する理論モデルであるが、そのモデルによる抵抗係数は、長さの長い箱型浮体( $L = 1.2\text{m}$ )についてはよく一致するが、平板に近い長さの短い箱型浮体( $L = 0.01\text{m}$ )についてはかなり差がある。長さが長くなると、底面で流れが整流されて、図-3に示したように、

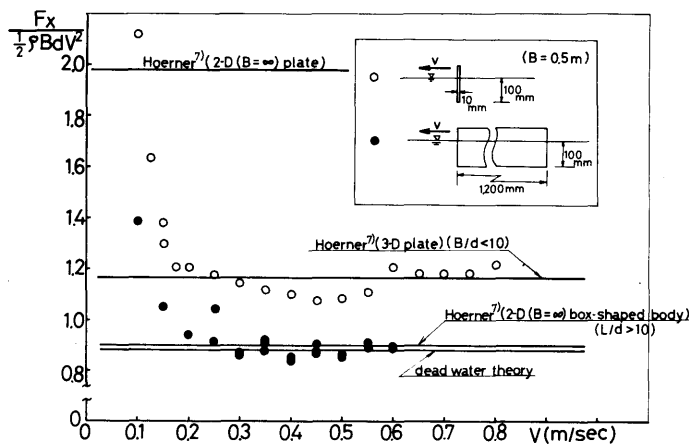


Fig. 6 Comparisons of the resistances of a plate and a box-shaped vessel.

浮体後面で底面の接線方向に流れが剥離して、背面に死水領域が形成されるため、死水モデルによる抵抗係数と実験値がよく一致するものと思われる。逆に平板の場合には、流れの速度が遅い（レイノルズ数が小さい）場合には、平板の背面に流れがまわりこんで、背面領域が死水にて近似できなくなるものと思われる。

さらに、長さ1.2mの箱型浮体の場合は、前節の結果より幅0.5mですでに流れは幅方向に変化の小さい2次元流と考えられるが、長さ0.01m、幅0.5mの

箱型浮体の抵抗の実験値は、文献7)による無限流体中の3次元平板の抵抗の実験値とほぼ一致しており、幅無限大の2次元平板の抵抗と大きく異なる。

しかし、長さ0.01m、幅0.5mの箱型浮体（喫水0.1m）の幅方向の両端に長さ2mの側板をつけて、幅方向に変化のない2次元流れにして抵抗を測定したところ、図-7に示すように側板をとりつけない場合とあまり差はなく、更に文献7)とは逆に側板をとりつけて幅方向に変化のない2次元流にした方が、抵抗

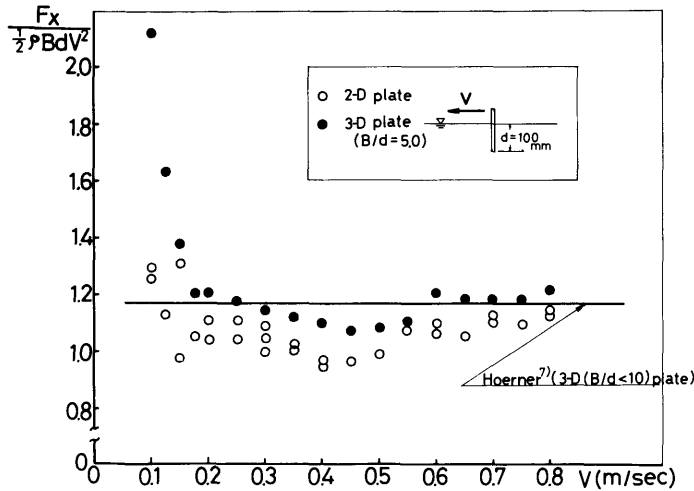


Fig. 7 The resistance of a 2-D and a 3-D plate.

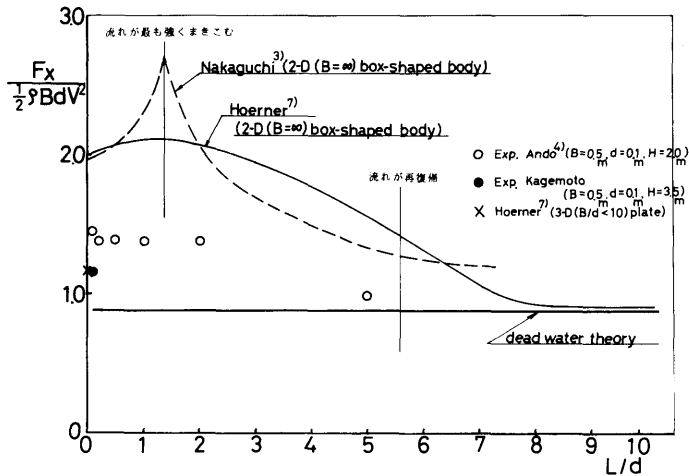


Fig. 8 The resistance vs the length (L).

係数が小さくなっている。詳細なメカニズムの解明は今後の課題である。

過去に $L/d$ を変化させて抵抗を計測した例があるので<sup>3),4),7)</sup>、(文献3)は長さ一定、喫水変化、文献4)は喫水一定、長さ変化)、横軸に模型長さ( $L$ )をとってそれらの実験値を再プロットすると図-8に示す如くなる。

文献3)によれば、 $L/d=1.4$ で流れの背面へのまきこみが最も強く、抵抗係数が最大となり、さらに長さが長くなって $L/d=5.6$ 程度で前面で剝離した流れが再付着する。文献4)によっても、抵抗係数は $L/d=2.5\sim 5.0$ で大きく変化すると述べており、更に文献7)によると $L/d>10.0$ で抵抗係数は一定になるとされている。

また、長さが更に長くなると抵抗係数は死水モデルによる値に近づいて一定となる傾向がある。

2.4 水深の変化の影響

海洋構造物の曳航や設置場所は、当面は湾内や沿岸などの比較的水深の浅い場所が多いであろうから水深の変化が抵抗に及ぼす影響を調べることは重要である。

従って、長さ( $L$ )1.5m、幅( $B$ )0.75m、( $L/B=2.0$ )の箱型浮体模型を用いて、浅水域における拘束直進時の抵抗を調べた。実験を行なった水槽は、水深を0~2mまで任意に変化させることが可能で、かつ底面の平面度が±2mmと浅水影響を調べるのに適している海洋構造物試験水槽(長さ×幅=40.0m×27.6m)である。

前述と同様に、理論モデルとして死水モデルを使うとすれば、図-9に示すような水路内の平板を考えればよい<sup>5)</sup>。 $H$ は水深、 $d$ は喫水を表わす。

死水モデルによる理論値と、実験値を比較して示すと表-1に示す如くなる。実験は喫水0.075m、0.0375mの2種類の状態について行なったため、上段に喫水0.075mの場合の抵抗係数を、下段に喫水0.0375mの場合の抵抗係数を示している。死水モデルでは喫水変化の影響を説明できない。

さらに、死水モデルによる推定値は、実験値の2倍から数十倍と大きく、定量的な推定には役立たない。

水深が浅い場合には、浮体底面と水底との間隔が小さく、流れを幅方向に変化のない2次元流れと仮定することに無理があり、むしろ流れは喫水方向に変化が少なく、大部分は浮体の側面をまわって流れる2次元

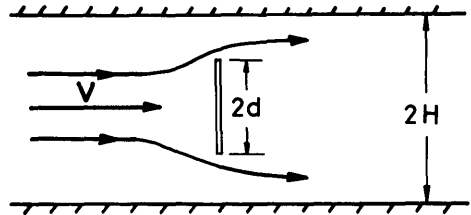


Fig. 9 The dead water model ( I ) for small water depth ( $H$ ). (This theoretical model is used for the calculation of the resistance shown in the table 1.)

Table 1 Comparisons of the theoretical and the experimental results of the resistance ( $F_x$ ) for small water depth. (The theoretical results are obtained by the Kirchhoff's dead water theory.)

H/d	Resistance coefficients (Resistance/ $\frac{1}{2}\rho B d V^2$ )		
	Theory	Exp. ( $L/B = 2.0$ )	
		B/d = 10	B/d = 20
1.2	93.07	1.320 ( $V = 0.134$ )	1.078 ( $V = 0.137$ )
		1.180 ( $V = 0.274$ )	1.368 ( $V = 0.271$ )
1.5	21.64	1.282 ( $V = 0.135$ )	1.204 ( $V = 0.134$ )
		1.072 ( $V = 0.274$ )	1.156 ( $V = 0.281$ )
3.0	4.36	0.952 ( $V = 0.134$ )	0.754 ( $V = 0.136$ )
		0.868 ( $V = 0.277$ )	0.924 ( $V = 0.272$ )
8.0	1.99	0.934 ( $V = 0.333$ )	0.994 ( $V = 0.333$ )
		0.838 ( $V = 0.337$ )	0.830 ( $V = 0.333$ )

( $V$ : in m/sec)  
 (upper column:  $d = 0.0750\text{m}$ )  
 (lower column:  $d = 0.0375\text{m}$ )

流れに近いと考えられる。その場合にも、死水モデルを適用するとすれば、図-10に示す如くなる。この場合の抵抗係数は0.88で、実験値には近くなるが、水深の影響を取り入れることができないため不十分である。

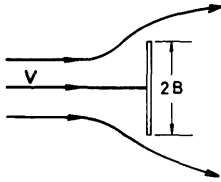


Fig.10 The dead water model ( II ) for small water depth (H).

2.5 抵抗成分の分離

以上の結果より、水深が深い場合には幅広( $L/B \leq 6.0$ )の箱型浮体の拘束直進時 (フルード数0.05~0.20程度)の浮体まわりの流れは、Kirchhoffの死水モデルにてある程度近似できて、流れは幅方向に変化の少ない2次元的な流れで、自由表面の影響は小さく、浮体背後の領域は死水に近い状態になっているであろうと予想される。

これらのことを確認するために、代表的なモデルについて抵抗成分の分離を試みた。

実験に使用したモデルは、長さ1.2m、幅0.5mの箱型浮体模型で、実験時の喫水は0.1m、水深は3.5mである。

1) 表面圧力計測による全抵抗分離

まず、全抵抗を摩擦抵抗と圧力抵抗とに分離して考えることとした。摩擦抵抗は、実験にて計測することが困難なため、平板の摩擦抵抗式によって推定した。

圧力抵抗は、箱型浮体であるため、模型の前面と後面の半幅領域のみの表面圧力を計測し、それを積分して求めることとした。そこで、表面圧力は図-11に示すように12箇所に直径1.6mmの圧力計測孔を設けて、模型を前進、後進させることにより生ずる船首圧、船尾圧をスキヤナルブと半導体圧力計によって計測した。12箇所における圧力を計測した結果、各点の圧力にあまり差がないことと、実験上の制約(温度変化の影響と思われるが、曳航中に圧力計測値がなかなか安定せず。多点計測が困難であった。)から、図-11に示す⑤の計測点を代表点として各速度で数回計測を行ない、その平均値に浮体前後の面積をかけて圧力抵抗を算定した。

図-12にこのようにして求めた摩擦抵抗係数( $C_f$ )と前後面の圧力抵抗係数( $C_{RP}(F)$ ,  $C_{RP}(A)$ )及び3分力計にて計測した全抵抗係数( $C_{RT}$ )を示す。この図から、摩擦抵抗と圧力抵抗の和は、3分力計にて計測した全抵抗よりも、速度の高い範囲において幾分高めであるが、概ね一致しており、摩擦抵抗以外の剰余抵抗(圧力抵抗)が全抵抗の90%程度を占めていることがわかる。

2) 伴流計測と波形計測による全抵抗分離

さらに、全抵抗を造波抵抗と伴流に基づく抵抗に分

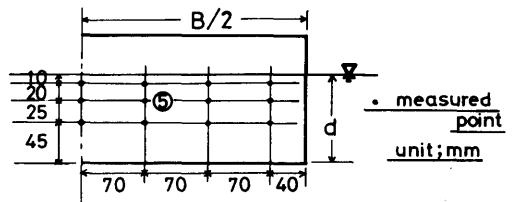


Fig.11 Measured points of the pressure on the body surface.

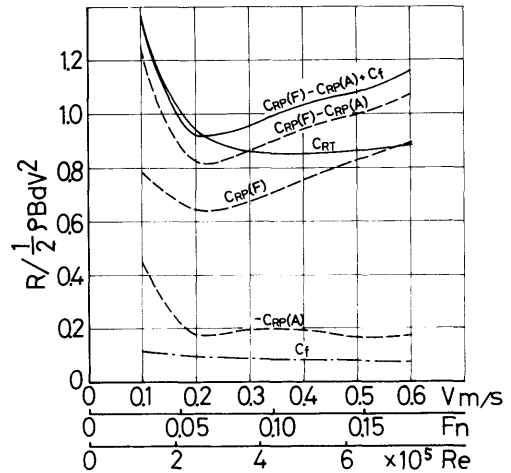


Fig.12 Comparisons of the resistance components due to the friction ( $C_f$ ) and due to the pressure ( $C_{RP}(F)-C_{RP}(A)$ ). ( $L=1.5m$ ,  $B=0.75m$ ,  $d=0.1m$ ,  $H=3.5m$ .  $C_f$  is the calculated value.  $C_{RP}(F)$ ; pressure resistance due to the measured pressure on the fore-surface of a model.  $C_{RP}(A)$ ; pressure resistance due to the measured pressure on the aft-surface of a model.)

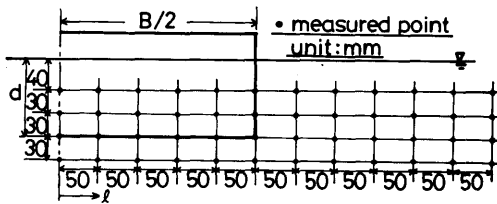


Fig.13 Measured points of the velocity in a wake. (L/2 behind the aft-surface of a model.)

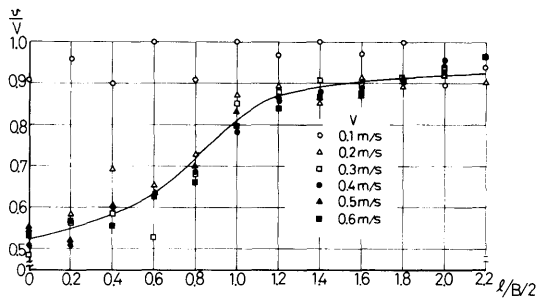


Fig.14 An example of measured velocities in a wake. (4cm below the undisturbed free surface.  $V$ ; the velocity of a carriage.  $v$ ; the measured velocity in a wake obtained by velocity meters fixed to the carriage.)

離して考えることとした。まず、伴流計測は、図-13に示すように模型の後面より  $L/2$  後方の断面に設置した翼車型流速計(直径2.5cm, 4翼)を模型と共に曳航して、図中に示す48箇所で行進方向の流速( $v$ )を計測した。 $v$ は走行台車に対する相対流速である。計測した伴流の例として水面下4cmにおける流速分布を図-14に示す。曳航速度0.1m/s以外の場合には、曳航速度によって  $v/V$  の値にあまり違いがないので、図中に実線で示すように実験点を通る平均的な線を引いて、この平均線を曳航速度0.2m/s~0.6m/sの場合の実験値として、以後抵抗の算出を行なった。伴流に基づく抵抗を求めるには、流速と共に圧力損失も必要であるが、今回は流速のみを用いて近似的に次式で算出した<sup>10)</sup>。

$$R_{wake} = V^2 \int_s \rho \frac{v}{V} (1 - \frac{v}{V}) ds \quad (2.3)$$

( $s$ : 後流計測を行なった箇所における流れと直角な二次元断面)

ただし、計測点以外で推算が必要となる箇所の流速は計測値の内挿及び外挿にて推定した。この様にして求

めた伴流に基づく抵抗係数( $C_{RW}$ )を全抵抗係数( $C_{RT}$ )と共に図-15に示す。

次に、波形計測を行ない波形解析から造波抵抗を求めた。波形は水槽側壁に取り付けた片持梁にサーボ式波高計を模型中心線より  $L/2$  隔てた位置に取りつけて計測した。波形計測例を図-16に示すが、曳航速度0.4 m/s以下ではほとんど波が起こらず、0.6m/sで最大波高が4mm程度、0.8m/sで最大波高14mm程度であった。計測した波形記録を使って Newman-Sharma による Longitudinal Cut Method で造波抵抗係数( $R/1/2$

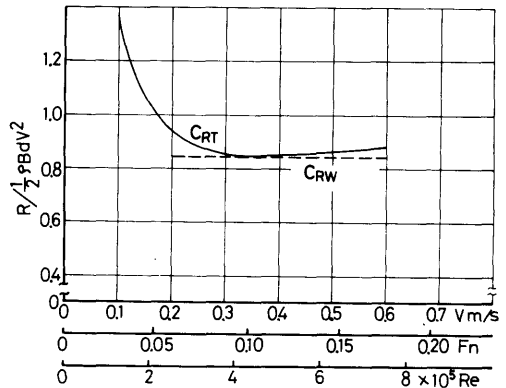


Fig.15 The resistance due to the wake ( $C_{RW}$ ). ( $C_{RT}$ ; total resistance.)

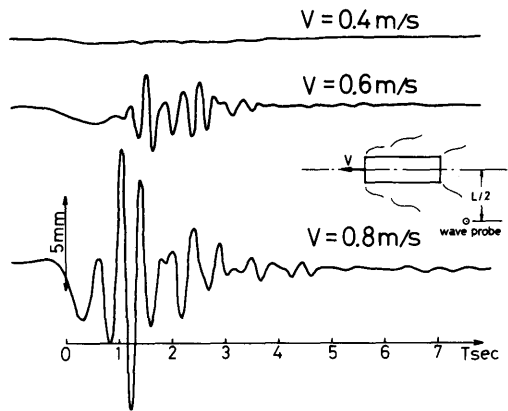


Fig.16 Examples of measured waves. (The resistance component due to the wave making is calculated from the measured waves. The calculated wave-making resistance is less than 1% of the resistance component due to the wake.)



$\rho B d V^2$ )を求めた結果<sup>9)</sup>, 0.6m/sで $0.78 \times 10^{-3}$ , 0.8m/sで $0.54 \times 10^{-2}$ 程度であった。従って, 造波抵抗は伴流に基づく抵抗の1%にも満たないことから, 図-15に示すように全抵抗と伴流に基づく抵抗とがほぼ等しい値を示してよいといえる。

箱型浮体に対して, 通常船舶に適用されている波形解析法を使用することの是非については今後の問題としても, 箱型浮体の拘束直進時の抵抗の約95%以上は伴流に基づく抵抗であり, 伴流に基づく抵抗の中の摩

擦抵抗に基づく成分は前述のごとく約10%程度であるといえる。

参考のため, 算定された各抵抗成分の値を表-2にまとめて示す。

### 3. 斜航時の抵抗

長さ1.5m, 幅0.75mの箱型浮体模型を使用して, 喫水( $d$ )0.075m, 及び0.0375mの場合につき, 水深( $H$ )を $H/d=8.0$ で斜航させた場合の水平面内の2分力を

Table 2 Resistance components due to various causes. (experimental results.)

	Total resistance	Pressure on the front surface	Pressure on the rear surface	resistance due to the pressure	resistance due to the friction	resistance due to the wake
V	全抵抗	船首圧	船尾圧	圧力抵抗	摩擦抵抗	伴流に基づく抵抗
m/s	kg	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	kg	kg	kg
0.1	0.035	0.40	-0.23	0.032	0.003	
0.2	0.096	1.32	-0.36	0.084	0.010	0.086
0.3	0.197	3.09	-0.89	0.199	0.021	0.194
0.4	0.347	6.19	-1.55	0.387	0.035	0.345
0.5	0.548	10.54	-2.11	0.633	0.052	0.540
0.6	0.811	16.43	-3.29	0.986	0.072	0.777

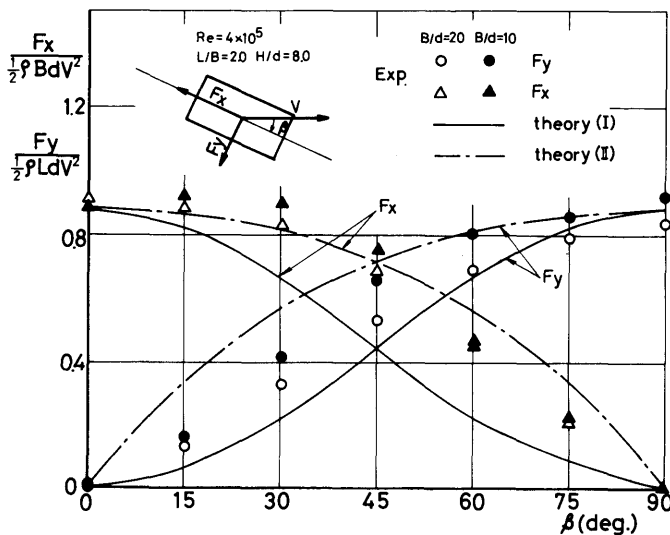


Fig.17 Two components of the resistance ( $F_x, F_y$ ). (Heading angle ( $B$ )  $\neq 0^\circ$ , theory ( I ); dead water theory ( $\beta = \infty$ ), theory ( II ); dead water theory ( $d = \infty$ ))

調べた結果を図-17に示す。ただし、曳航速度は0.333 m/sで一定である。

理論モデルとしては、前章と同様に死水モデルを考えたが、浮体の長さ、幅方向の各速度成分を求めて、浮体に働く抵抗は、各速度成分で長さ、幅方向に直進した場合の抵抗の和であるとする方法と（理論モデル I）と、無限噴水の2次元浮体として傾斜板に対する死水モデルを適用する方法（理論モデル II）との2通りを試みた。側面での流れは、偏角(β)が小さい場合には後者の考え方に、逆に偏角が大きい場合には前者の考え方に近い流れになっていると推察される。(前面における流れに対しては逆のことがいえる。)いずれにしても、箱型浮体斜航時の抵抗の推定に Kirchhoff の死水モデルの様な単純モデルを適用することは無理があると思われるが、試みに推算を行なった結果を図-17中にあわせて示す。

各推算値は次のようにして算定した値である。

理論モデル ( I )

図-18に示すように、長さ L, 幅 B, 噴水 d の箱型浮体が偏角 β で、速度 V にて斜航する場合、箱型浮体の -x 方向速度成分は V cos β, -y 方向速度成分は V sin β

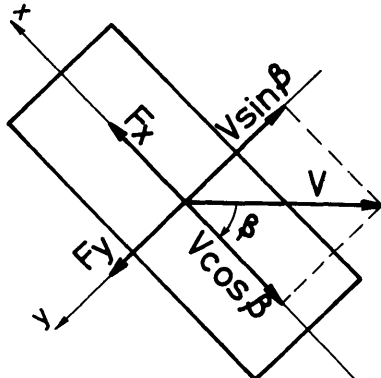


Fig.18 The dead water model for the theory ( I )

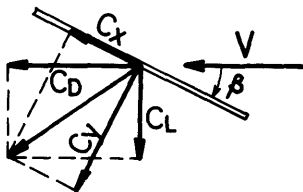


Fig.19 The dead water model for the theory ( II ). (2-D (d=∞) plate)

であるから、x 方向、y 方向に働く抵抗は、各々 -x 方向に V cos β, -y 方向に V sin β にて直進した場合の抵抗に等しいと考え図-4に示した死水モデルを適用すると x 方向、y 方向に働く抵抗 (Fx, Fy) は各々 0.88 × 1/2 ρ (V cos β)² B d, 0.88 × 1/2 ρ (V sin β)² L d となる。従って、x 方向抵抗係数 (Cx), y 方向抵抗係数 (Cy) は次式のようになる。

$$C_x = 0.88 \times \frac{1}{2} \rho (V \cos \beta)^2 B d / \frac{1}{2} \rho V^2 B d = 0.88 \cos^2 \beta \quad (2.4)$$

$$C_y = 0.88 \times \frac{1}{2} \rho (V \sin \beta)^2 L d / \frac{1}{2} \rho V^2 L d = 0.88 \sin^2 \beta \quad (2.5)$$

理論モデル ( II )

図-19に示すように厚さのない長さ ℓ の 2 次元平板に迎角 β にて速度 V の一様流があたる場合の抗力係数、揚力係数を死水モデルで計算すると<sup>5)</sup>,

$$C_D \equiv (\text{抗力}) / \frac{1}{2} \rho V^2 \ell = \frac{2\pi \sin^2 \beta}{4 + \pi \sin \beta} \quad (2.6)$$

$$C_L \equiv (\text{揚力}) / \frac{1}{2} \rho V^2 \ell = \frac{2\pi \sin \beta \cos \beta}{4 + \pi \sin \beta} \quad (2.7)$$

これを図-19に示すように、Cx, Cy 方向に分けて考えると

$$C_y = C_D \cos \beta - C_L \sin \beta \quad (2.8)$$

$$C_x = C_D \sin \beta + C_L \cos \beta \quad (2.9)$$

だから、

$$C_x = 0 \quad (2.10)$$

$$C_y = \frac{2\pi \sin \beta}{4 + \pi \sin \beta} \quad (2.11)$$

となる。この結果を図-20に示すような箱型浮体の場合に適用すると、斜航時の抵抗は、長さ B の 2 次元平板に迎角 π/2 + β で速度 V の一様流があたる場合の抵抗

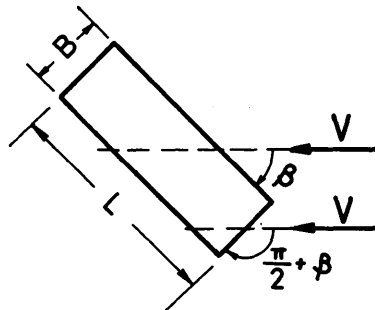


Fig.20 The dead water model for the theory ( II ). (2-D box-shaped vessel.)

と、長さ  $L$  の 2 次元平板に迎角  $\beta$  で速度  $V$  の一様流があたる場合の抵抗の和と考えると、 $x$  方向、 $y$  方向の抵抗係数は次式に算定できる。

$$C_x = \frac{x \text{ 方向の抵抗}}{\frac{1}{2} \rho V^2 B d} = \frac{2\pi \cos \beta}{4 + \pi \cos \beta} \quad (2.12)$$

$$C_y = \frac{y \text{ 方向の抵抗}}{\frac{1}{2} \rho V^2 L d} = \frac{2\pi \sin \beta}{4 + \pi \sin \beta} \quad (2.13)$$

このようにして求めた 2 種類の推算値を図-17中に示したが、理論モデル (I) による推定値は実験値より小さめの、逆に理論モデル (II) に基づく推定値は実験値より大きめの値を推定する傾向があり、定量的な推定には、両方法とも不十分であり、流れの一部は浮体の側面をまわって流れ、残りは浮体の底面をまわって流れるような現実に近い三次元流れの理論モデルを考える必要がある。

4. 旋回時の抵抗、モーメント

旋回時の抵抗、モーメントは、抵抗あるいはモーメントの値そのものとしても重要であるが、旋回角速度、旋回半径に対する抵抗、モーメントの変化率（流体力微係数）も保針性、旋回性、ふれまわりの可能性などを推定するうえで重要である。

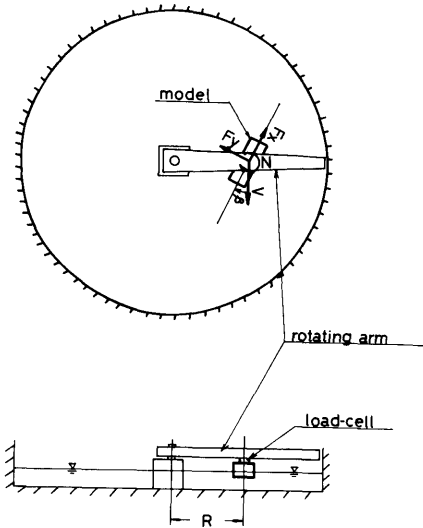


Fig.21 The experimental set-up for the measurement of the resistance and the moment in a rotating arm tank.

旋回時の抵抗、モーメントは、斜航時の抵抗計測に使用したものと同じ箱型浮体模型（長さ1.5m、幅0.75m）を用いて、当所の旋回腕水槽（半径6.0m、最大水深0.85m）にて図-21に示すように浮体を旋回腕に固定し、回転させてその際に働く長さ方向 ( $x$ )、幅方向 ( $y$ ) の水平 2 分力及び回頭モーメント ( $N$ ) を計測した。

実験状態は、喫水 ( $d$ ) を  $B/d$  で 10 及び 20 の 2 種類、水深は  $H/d$  で 1.2、1.5、3.0、8.0 の 4 種類について行なった。その他偏角 ( $\beta$ ) 及び旋回半径 ( $R$ ) も系統的に変化させて、流体力微係数を実験的に求めることとした。旋回時の速度 ( $V$ ) は 0.32m/s で一定とした。

偏角  $\beta$ 、水平分力  $F_x$ 、 $F_y$ 、及び回頭モーメント  $N$  の正方向は図-21中に示す方向とする。

旋回時の抵抗、モーメントについても前章にて述べた理論モデル (I) にて推算を試みた。理論モデル (II) の適用は困難であったので行っていない。

箱型浮体の側面、前面における各点の流体の浮体に対する速度は図-22に示すようであると考えられるから、

側面における各点の速度は

- $x$  方向  $R\omega \cos \beta + \frac{B}{2}\omega$
- $y$  方向  $R\omega \sin \beta + x_1\omega$

前面における各点の速度は

- $x$  方向  $R\omega \cos \beta - y_1\omega$

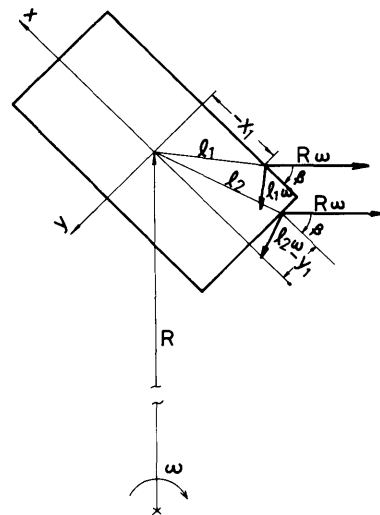


Fig.22 Velocity components of the points on the model surface. ( $\omega$ ; angular frequency of the rotation.)

-y方向  $R\omega\sin\beta - \frac{L}{2}\omega$

となる。従って、摩擦抵抗を無視すると、  
y方向分力( $F_y$ )は、

$$F_y = \int_{-x_0}^{-L/2} \frac{1}{2} \rho (R\omega\sin\beta + x\omega)^2 d \cdot 0.88 dx$$

$$- \int_{L/2}^{x_0} \frac{1}{2} \rho (R\omega\sin\beta + x\omega)^2 d \cdot 0.88 dx$$

$$= 0.44 \frac{\rho d}{3\omega} \left\{ 6R\omega\sin\beta \cdot \left(\frac{L\omega}{2}\right)^2 + 6(R\omega\sin\beta)^2 x_0\omega \right.$$

$$\left. - 6R\omega\sin\beta \cdot (x_0\omega)^2 + 2(x_0\omega)^3 \right\} \quad (2.14)$$

ただし、 $x_0 = R\sin\beta$  ( $R\sin\beta > \frac{L}{2}$  のときは  $x_0 = \frac{L}{2}$ ,

$R\sin\beta < -\frac{L}{2}$  のときは  $x_0 = -\frac{L}{2}$ )

x方向分力( $F_x$ )は、

$$F_x = \int_{-y_0}^{-B/2} -\frac{\rho}{2} (R\omega\cos\beta - y\omega)^2 \cdot d \cdot 0.88 dy$$

$$+ \int_{B/2}^{y_0} \frac{\rho}{2} (R\omega\cos\beta - y\omega)^2 d \cdot 0.88 dy$$

$$= 0.44 \frac{\rho d}{3\omega} \left\{ 6R\omega\cos\beta \cdot \left(\frac{B}{2}\right)^2 - 6(R\omega\cos\beta)^2 \right.$$

$$\left. \cdot y_0\omega - 6R\omega\cos\beta (y_0\omega)^2 - 2(y_0\omega)^3 \right\} \quad (2.15)$$

ただし、 $y_0 = -R\cos\beta$  ( $-R\cos\beta > \frac{B}{2}$  のときは  $y_0 =$

$\frac{B}{2}$ ,  $-R\cos\beta < -\frac{B}{2}$  のときは  $y_0 = -\frac{B}{2}$ )

計測される力には浮体に働く遠心力も含まれているから、遠心力をも含めて抵抗係数を考えると、

$$C_y = (F_y + \Delta F_y) / \frac{1}{2} \rho (R\omega)^2 L d$$

$$= 0.88 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{L}{R}\right) \sin\beta + 2 \cdot \left(\frac{x_0}{L}\right) \sin^2\beta \right.$$

$$\left. - 2 \left(\frac{x_0^2}{RL}\right) \sin\beta + \frac{2}{3} \left(\frac{x_0^3}{R^2 L}\right) \right\} - \frac{2L}{R} \left(\frac{B}{L}\right) \cos\beta \quad (2.16)$$

$$C_x = (F_x + \Delta F_x) / \frac{1}{2} \rho (R\omega)^2 B d$$

$$= 0.88 \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{L}{R}\right) \cdot \left(\frac{B}{L}\right) \cos\beta \right.$$

$$\left. - 2 \cdot \left(\frac{y_0}{L}\right) \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cos^2\beta \right.$$

$$\left. - 2 \left(\frac{y_0^2}{RL}\right) \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cos\beta - \frac{2}{3} \left(\frac{y_0^3}{R^2 L}\right) \left(\frac{L}{B}\right) \right\} + \frac{2L}{R} \sin\beta \quad (2.17)$$

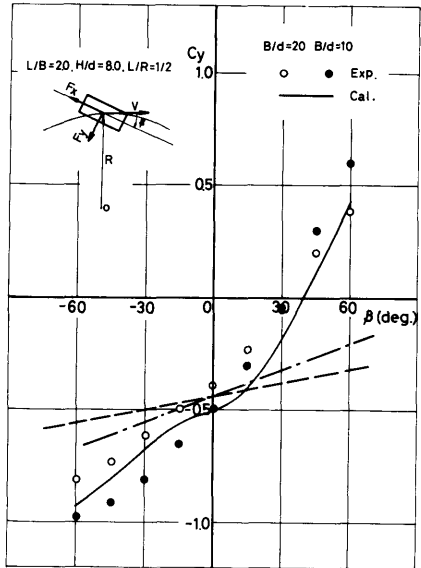


Fig.23(a) The resistance component ( $F_y$ ).  
( $L/B=2.0$ ,  $H/d=8.0$ ,  $L/R=1/2$ )

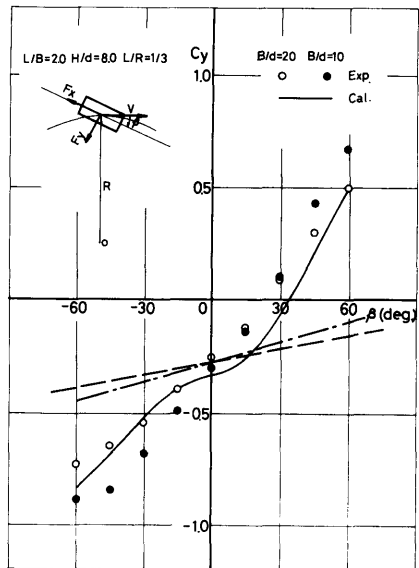


Fig.23(b) The resistance component ( $F_y$ ).  
( $L/B=2.0$ ,  $H/d=8.0$ ,  $L/R=1/3$ .)

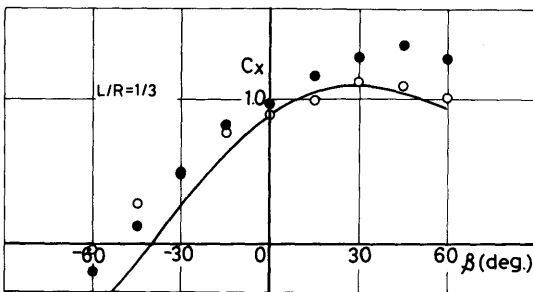
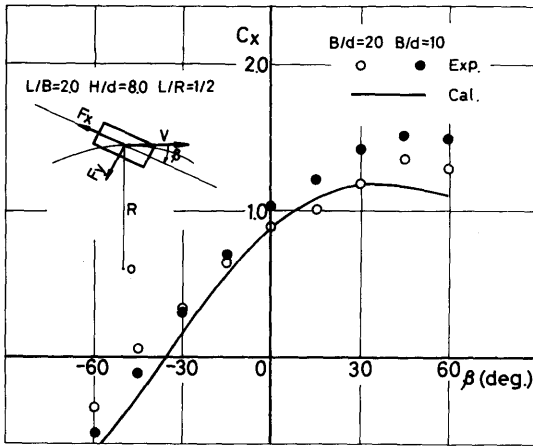


Fig. 24 The resistance component ( $F_x$ ).  
( $L/B=2.0$ ,  $H/d=8.0$ ,  $L/R=1/2, 1/3$ .)

ただし、 $\Delta F_y$ ,  $\Delta F_x$ は遠心力による寄与である。

(2.16), (2.17)式にて推算した値と実験値との比較例を図-23, 24に示す( $H/d=8.0$ )。各図は、偏角を $-60^\circ$ から $60^\circ$ まで変化させた時の抵抗係数を表わしたものであり、 $L$ ,  $B$ ,  $d$ ,  $H$ ,  $R$ は各々模型の長さ、幅、喫水、水深、旋回半径を示す。

(2.16), (2.17)式にては $B/d$ の違いによる抵抗係数の差は説明できないが、現象の複雑さを考えれば図-23, 24における実験値と理論値の一致は予想以上であり、水深の深い場合には簡単な死水モデルでも定量的な推定が可能な場合のあることがわかった。

図-25には、旋回半径( $R$ )を変化させた場合の抵抗係数( $C_y$ )の変化を示す( $\beta=0^\circ$ )。この場合も、実験値と理論値(Theory I)はよく一致しているようにみえるが、偏角( $\beta$ )が $0^\circ$ の場合、計測される幅方向の力はほとんど遠心力であり(理論値((2.16)式において $x_0=0$ ,  $\beta=0$ )は遠心力だけとなる)、その他の流体力は微小である。

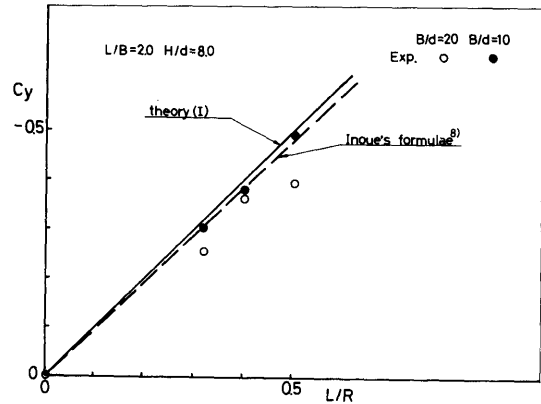


Fig. 25 The resistance component ( $F_y$ ) vs the radius of the circulation ( $R$ ).  
(Heading angle ( $\beta$ ) =  $0^\circ$ .)

箱型浮体の曳航時などでは振り回りが問題となり、その場合抵抗値そのものよりも、偏角( $\beta$ ), 旋回半径( $R$ )の変化に対する横力( $F_y$ )の変化率(流体力微係数)が問題となる。

(2.16)式を使うと、

$$\frac{\partial C_y}{\partial \beta} \Big|_{\beta=0^\circ} = 0.44 \times \frac{L}{R} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial C_y}{\partial \gamma} \Big|_{\beta=0^\circ} = -2 \cdot \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.19)$$

( $\gamma \equiv L/R$ )

一方、文献(8)には、通常船型に対して半実験的に次式が示されている。

$$\frac{\partial C_y}{\partial \beta} \Big|_{\beta=0^\circ} = 1.4\pi d/L \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial C_y}{\partial \gamma} \Big|_{\beta=0^\circ} = \pi d/2L - 2\left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.21)$$

図-23(a), (b)中には(2.18)式を一点鎖線で、(2.20)式の $d/L=1/40$ の場合を点線で示した。図-25中には(2.19)式の値を一点鎖線で、(2.21)式の値を点線で示した。ただし、図-25中では、一点鎖線は実線に一致した。各線は、 $\beta=0^\circ$ (図-23(a), (b))あるいは $\gamma=0$ (図-25)における実験点を通して(2.18), (2.19)式、(2.20), (2.21)式で与えられる傾きをもつ直線を描いたものである。

図よりわかるように、 $(\partial C_y/\partial \beta)|_{\beta=0^\circ}$ に対しては、死水理論による値((2.18)式)、井上式((2.20)式)共に実験値に比べてかなり低い値を与える。 $(\partial C_y/\partial \gamma)$ に対

しては、(2.19), (2.21)式共に実験値とよく一致するが、井上式(2.21)の方が、遠心力以外の微小な流体力をも考慮しており、実験値との一致も良い。

浮体の中心のまわりの回頭モーメント(N)については、水平方向2分力と同様の考え方をすると、

$$N = \int_{-x_0}^{-L/2} -\frac{1}{2}\rho(R\omega\sin\beta + x\omega)^2 \cdot x d \cdot 0.88 dx + \int_{L/2}^{x_0} \frac{1}{2}\rho(R\omega\sin\beta + x\omega)^2 \cdot x d \cdot 0.88 dx - \int_{-y_0}^{-B/2} \frac{1}{2}\rho(R\omega\cos\beta - y\omega)^2 y d \cdot 0.88 dy + \int_{B/2}^{y_0} \frac{1}{2}\rho(R\omega\cos\beta - y\omega)^2 y d \cdot 0.88 dy \quad (2.22)$$

となり、モーメント係数 $C_N$ は、

$$C_N = N / \left[ \frac{1}{2}\rho(R\omega)^2 L^2 d \right] = 0.88 \left\{ -\frac{1}{4}\sin^2\beta - \frac{1}{32}\left(\frac{L}{R}\right)^2 + \left(\frac{x_0}{L}\right)^2 \cdot \sin^2\beta - \frac{4}{3}\left(\frac{x_0^3}{RL^2}\right)\sin\beta + \frac{1}{2}\left(\frac{x_0^2}{RL}\right)^2 - \frac{1}{4}\cos^2\beta \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^2 - \frac{1}{32}\left(\frac{L}{R}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^4 \right\}$$

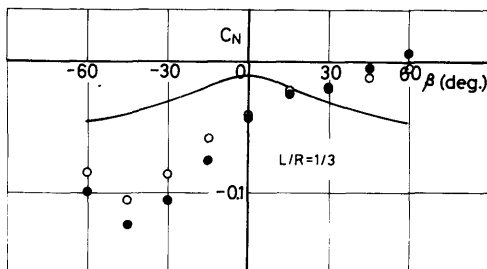
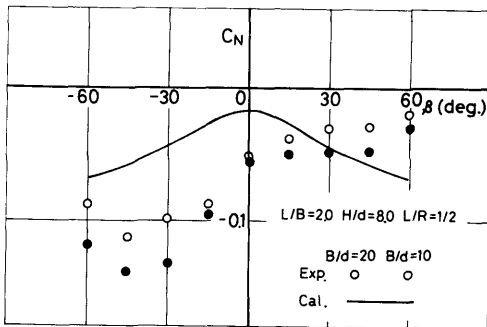


Fig.26 The yawing moment (N). (L/B=2.0, H/d=8.0, L/R=1/2, 1/3.)

$$+ \left(\frac{y_0}{L}\right)^2 \cdot \cos^2\beta + \frac{4}{3}\left(\frac{y_0^3}{RL^2}\right)\cos\beta + \frac{1}{2}\left(\frac{y_0^2}{RL}\right)^2 \quad (2.23)$$

となる。ただし、遠心力は浮体の幾何学的中心に働くものとして、回頭モーメントに対する寄与は無視した。図-26に、水深の深い場合(H/d=8.0)の旋回時の回頭モーメントの実験値と、(2.23)式による推定値の比較例を示す。実験値と理論値は定性的にも一致しない。推算値と実験値の差の大きな理由の一つとして考えられるのは、浮体の角の部分において実際の流れは、一部は幅方向に、一部は深さ方向にまわって流れ、推算にあたって仮定している2次元的な流れと大きく異なる。

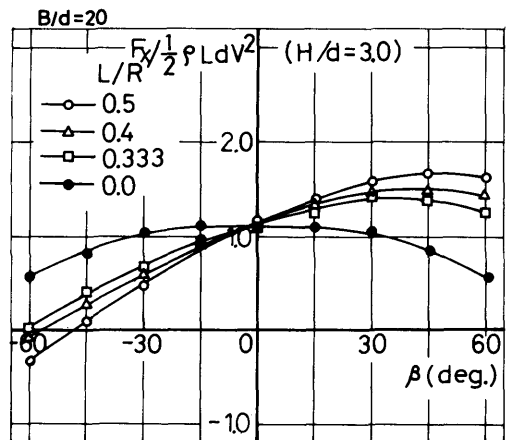
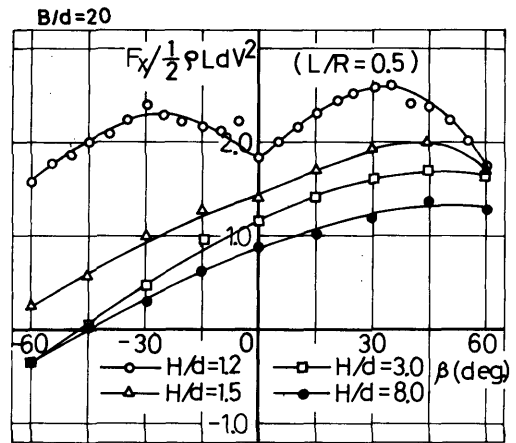


Fig.27(a) Examples of the measured resistance components ( $F_x$ ) for various H/d and L/R.

り、角の部分での局部的な力の推定誤差がモーメントとしては（モーメントを考えている点と角の部分との距離（モーメントレバー）が大きいために）、大きな誤差となることがあげられる。したがって、回頭モーメントに対しては、更に実際の流場を良く近似する理論モデルを考える必要がある。

5. 抵抗抵抗, モーメントを求めるための実験公式

旋回時の抵抗, モーメントの計測は, 前章でも述べたように,  $L/B=2$  ( $L=1.5, B=0.75m$ )の箱型浮体模型を用いて, 模型の喫水( $d$ )を $B/d$ で10及び20の2種類, 水深( $H$ )を $H/d$ で1.2, 1.5, 3.0, 8.0の4種類について, 偏角( $\beta$ )を $-60^\circ$ から $60^\circ$ まで, 旋回半径( $R$ )を $L/R$ で1/2, 1/2.5, 1/3及び $0$  ( $R=\infty$ , 斜航の場合)の3種類

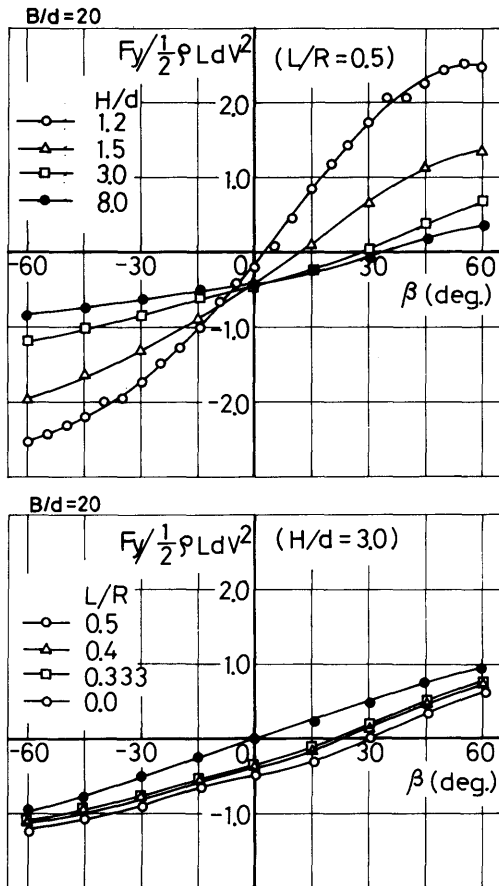


Fig.27(b) Examples of the measured resistance components ( $F_y$ ) for various  $H/d$  and  $L/R$ .

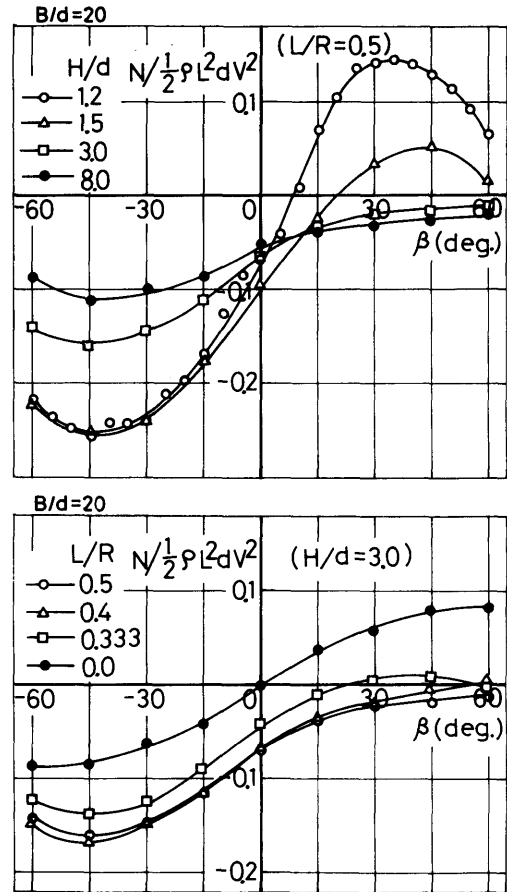


Fig.27(c) Examples of the measured moment ( $N$ ) for various  $H/d$  and  $L/R$ .

に変化させて行なった。実験にて得られた抵抗（遠心力を含む）、モーメントの例を図-27(a), (b), (c)に示す。

前章で述べたように、水深が深い場合 ( $H/d=8.0$ )の水平方向2分力については、定量的な推算がある程度可能であるが、回頭モーメント、あるいは水深が浅い場合の水平分力については推算値（死水モデル）では不十分である。従って、実験値を基として、抵抗, モーメントを簡便に推定できる実験公式をつくることを目的として、まず旋回時の抵抗, モーメントが次式で表わされるとして、各 $B/d$ , 及び $H/d$ について全ての実験値を用いて最小2乗法で各係数を求めた。

$$C_x = c_0 + c_1\beta + c_2\gamma + c_3\beta\gamma + c_4\beta^3\gamma + c_5\beta\gamma^3 + c_6\beta^4 + c_7\gamma^4$$

Table 3 (a) Coefficients ( $c_0 \sim c_7$ ) for the experimental formulae. (equation (2.24) )

	B/d	H/d	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$
$C_x = F_x / \frac{1}{2} \rho B d V^2$	20	1.2	1.4784	.9830	7.4090	-.6324	-.9944	6.6476	-1.3832	-18.4866
		1.5	1.3214	.0532	.1962	1.6038	-.8526	2.9458	-.4298	1.6304
		3.0	.9248	-.2302	2.0110	2.0030	-.2796	.7336	-.1922	-4.7760
		8.0	.8932	-.3680	.2228	1.9322	-.1448	-.7350	-.0340	-.9650
	10	1.2	1.3472	.4814	1.3340	-.2606	-.9158	5.7768	-.9694	-2.2734
		1.5	1.2860	-.1044	1.9318	1.4430	-.5756	1.3902	-.3350	-6.3302
		3.0	.9560	-.2262	2.2462	2.5704	-.4268	-.5792	-.2412	-6.0194
		8.0	1.0008	-.4342	.3878	2.4838	-.2308	-1.2316	-.0408	-1.6798

Table 3 (b) Coefficients ( $a_0 \sim a_6$ ) for the experimental formulae. (equation (2.24) )

	B/d	H/d	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
$C_y = F_y / \frac{1}{2} \rho L d V^2$	20	1.2	0.0078	3.0638	0.9279	0.0677	2.9579	-1.1935	-4.0490
		1.5	0.0039	1.8878	-0.4458	0.1073	0.5256	-0.5216	-1.1820
		3.0	-0.0003	0.8667	-0.9056	0.3989	0.01735	-0.0117	-0.0591
		8.0	0.0066	0.5278	-0.9057	0.3788	0.1881	0.0165	0.3620
	10	1.2	0.0040	2.4548	0.4406	-0.0316	1.4032	-0.9514	-1.9587
		1.5	0.0013	2.1813	-0.4124	0.1433	1.1298	-0.7754	-0.1215
		3.0	0.0004	0.9759	-0.9424	0.6010	0.6205	-0.0839	-0.1131
		8.0	0.0082	0.7218	-0.9721	0.5806	0.2083	-0.0093	-0.1545

Table 3 (c) Coefficients ( $b_0 \sim b_6$ ) for the experimental formulae. (equation (2.24) )

	B/d	H/d	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
$C_N = N / \frac{1}{2} \rho L^2 d V^2$	20	1.2	0.0001	0.4234	-0.1428	-0.1158	-0.0120	-0.2723	0.2862
		1.5	0.0009	0.2590	-0.2200	0.0008	0.2134	-0.1604	0.0173
		3.0	0.0004	0.1563	-0.2074	-0.0138	-0.0935	-0.0667	0.2090
		8.0	0.0013	0.0947	-0.1678	0.0000	-0.0422	-0.0435	0.1653
	10	1.2	-0.0003	0.2778	-0.1068	-0.0679	-0.0237	-0.1581	0.0575
		1.5	-0.0001	0.3130	-0.2266	-0.0191	-0.0144	-0.1844	0.2413
		3.0	0.0000	0.1582	-0.1958	0.0123	-0.0635	-0.0685	0.0749
		8.0	-0.0777	0.1031	0.1314	-0.0060	-0.0638	-0.0424	-0.5310



$$\begin{aligned}
 Cy &= a_0 + a_2\beta + a_1\gamma + a_3\beta^2\gamma + a_4\beta\gamma^2 + a_5\beta^3 + a_6\gamma^3 \\
 C_N &= b_0 + b_1\beta + b_2\gamma + b_3\beta^2\gamma + b_4\beta\gamma^2 + b_5\beta^3 + b_6\gamma^3 \\
 (\gamma &= L/R, \beta : \text{ラジアン}) \quad (2.24)
 \end{aligned}$$

最小2乗法にて得られた各係数の値を表-3に示す。(2.24)式は遠心力をも含んでいるから、遠心力の寄与を除いた各抵抗、モーメント係数を  $Cx', Cy', C_N'$  とすると、

$$\begin{aligned}
 Cx' &= c_0 + c_1\beta^2 + c_2\gamma^2 + c_3\beta\gamma + c_4\beta^3\gamma + c_5\beta\gamma^3 \\
 &\quad + c_6\beta^4 + c_7\gamma^4 - 2\gamma\sin\beta \\
 Cy' &= a_0 + a_1\beta + a_2\gamma + a_3\beta^2\gamma + a_4\beta\gamma^2 + a_5\beta^3 \\
 &\quad + a_6\gamma^3 + 2\gamma(B/L) \cdot \cos\beta \\
 C_N' &= C_N \quad (2.25)
 \end{aligned}$$

(2.25)式を用いると、曳航時の振れまわりなどで問題となる流体力微係数は、

$$\left. \frac{\partial Cy'}{\partial \beta} \right|_{\beta=0} = a_1, \quad \left. \frac{\partial Cy'}{\partial \gamma} \right|_{\beta=0} = a_2 + 2 \cdot (B/L) \quad (2.26)$$

$$\left. \frac{\partial C_N'}{\partial \beta} \right|_{\beta=0} = b_1, \quad \left. \frac{\partial C_N'}{\partial \gamma} \right|_{\beta=0} = b_2 \quad (2.27)$$

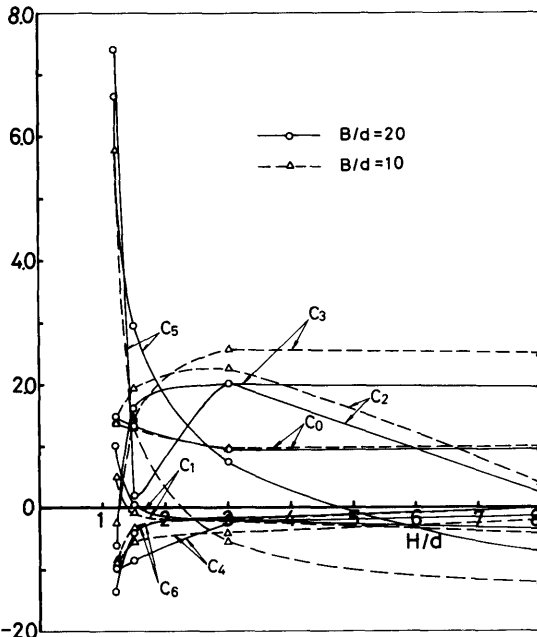


Fig.28(a) Coefficients ( $c_0 \sim c_7$ ) vs  $H/d$ . (The coefficients are determined by the least square method so that the formulae (2.24) are the well approximation of the experimental results.)

などの様に求められる。

図-28(a), (b), (c)に各々  $Cx', Cy', C_N'$  に対する係数の値を  $H/d$  に対して示す。図より  $B/d$  の影響はあまり大きくなく、また水底の影響は  $H/d=5.0$  程度から急激に現われてくるのがわかる。なお、 $B/d=10$  の  $b_2, b_6$  は  $H/d=3$  と  $8$  での値が非常に大きいためその間を点線で結んでいない。回頭モーメントに対する旋回半径の影響が、 $H/d=5 \sim 8$  程度に深くなっても、水深によって大きく変化することを示している。今回の実験範囲  $L/R=1/2 \sim 1/4$  程度の旋回半径ならば、 $H/d=3$  での  $b_2, b_6$  の値と、 $H/d=8$  での値を直線にて内挿しても十分である。

(2.25)式、および図-28(a), (b), (c)を用いれば、箱型浮体の拘束直進、斜航、旋回時の抵抗、回頭モーメントは次のようにして推定できる。

(1)図-28(a), (b), (c)を用いて、対象とする  $H/d$  に対する各係数  $a_0 \sim a_6, b_0 \sim b_6, c_0 \sim c_7$  の値を求める。(  $c_7$  については変化が激しいため図中に示していないが、表-3(a)を用いて直線で内挿すればよい。)  $H/d > 8$  の場合は、 $H/d=8$  の値で代用する。  $10 < B/d < 20$  の場合は、

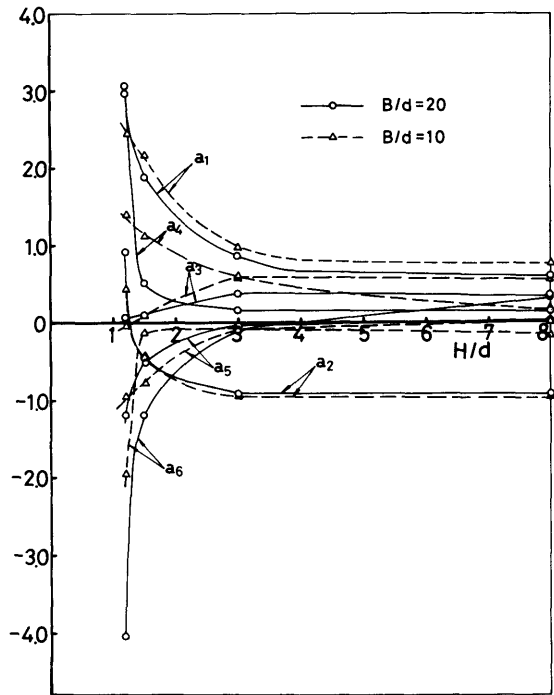


Fig.28(b) Coefficients ( $a_0 \sim a_6$ ) vs  $H/d$ .

$B/d=10, 20$ の値を用いて内挿にて求める。 $B/d < 10$ あるいは $B/d > 20$ の場合は、 $B/d=10, 20$ の値を用いて外挿にて求めるより他ないが $B/d$ が著しく小さい場合や、著しく大きい場合には適用できない。

(2)(1)にて求められた各係数の値を使って、(2.25)式にて抵抗係数、モーメント係数を求める。

各係数の定義は、

$$Cx' = Fx / \frac{1}{2} \rho V^2 B d \quad (2.28)$$

$$Cy' = Fy / \frac{1}{2} \rho V^2 L d \quad (2.29)$$

$$C_N' = N / \frac{1}{2} \rho V^2 L^2 d \quad (2.30)$$

である。 $(\rho$ :水の密度,  $V$ :浮体の速度(旋回の場合は $V=R\omega$ ,  $\omega$ :旋回円周波数,  $R$ :旋回半径,  $L$ :浮体長さ,  $B$ :浮体幅,  $d$ :喫水)

また、 $\gamma=L/R$ で、 $\beta$ は偏角(ラジアン)(2.28)~(2.30)式の $Fx, Fy, N$ は各々遠心力を含まない水平面内の2

分力、及び浮体の幾何学的中心まわりの回頭モーメントである。

遠心力をも含んだ抵抗、モーメントは(2.24)式にて求められる。

本方法の適用できる速度範囲は第2章の結果からの類推により、フルード数( $V/\sqrt{gL}$ ,  $g$ :重力加速度)で0.05~0.20程度(長さ100mで $V=3kt \sim 12kt$ )である。また、 $L/B$ については、同様に第2章の結果を用いて $L/B \leq 6.0$ 程度の幅広浮体について適用可能である。

表一3に示した各係数の値は、長さ1.5m, 幅0.75mの模型を用いて得られたものであり、実機への適用可能性を検討すべきであるが、第2章5節で述べたように、抵抗成分のうち摩擦抵抗に基づくものは10%以下であるため、同じ寸法比( $L/B, B/d$ )をもつ浮体ならばスケールによらず抵抗係数、モーメント係数は $\pm 10\%$ 程度の誤差範囲内で一定になるものと推定されるので、実機の抵抗、モーメントの推定も $\pm 10\%$ 程度の誤差を許すならば本法にて十分である。

### 6. 結 言

本研究により得られた成果を列挙すると次の如くなる。

直進時の箱型浮体の抵抗について

(1)  $L/B \leq 6.0, B/d \geq 2.0$ で水深の深い場合には、流れは幅方向に変化のない2次元的な流れとなり、フルード数0.05~0.20の速度範囲で抵抗は速度の2乗に比例し、抵抗係数はKirchhoffの死水理論による平板の抵抗係数値0.88とほぼ一致する。

(抵抗係数: 抵抗/ $\frac{1}{2} \rho B d V^2$ )

(2) 長さが長くなるにつれて、前面で剥離した流れが側面に再付着する( $L/d=5 \sim 6$ )ようになり、抵抗係数はKirchhoffの平板に対する死水モデルによる抵抗係数に近づいて一定となる。

(3) 抵抗に対する浅水影響は $H/d=5$ 程度から急激に現われ、抵抗係数は $H/d$ の減少と共に増加するが、死水理論にては定量的な推定には不十分である。

(4) 模型レベルでは、全抵抗のうち摩擦抵抗の占める割合は10%以下で、90%以上は前面と後面の圧力差に基づく抵抗である。さらに全抵抗を造波抵抗と伴流に基づく抵抗に分けた場合、造波抵抗の占める割合は1%にも満たない。

斜航時の箱型浮体の抵抗について

(5) 深水域における斜航時の箱型浮体のまわりの流れは

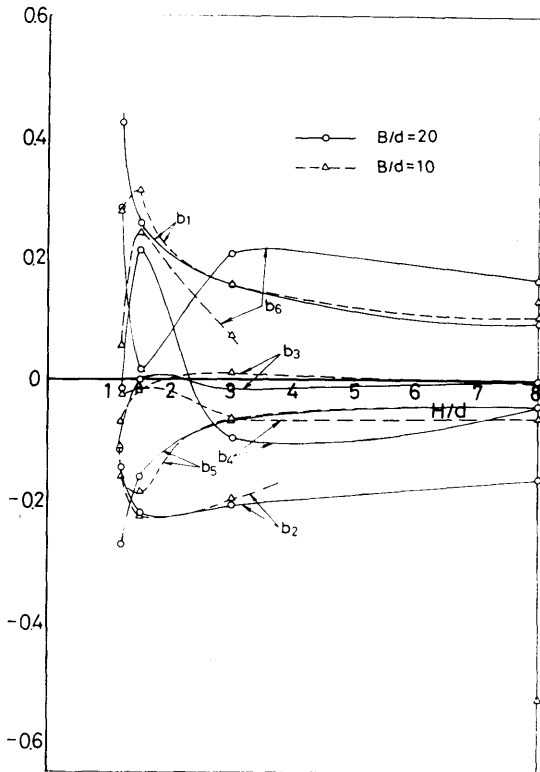


Fig.28(c) Coefficients ( $b_0 \sim b_6$ ) vs  $H/d$ .

すべて側面をまわって流れるとか、逆にすべて底面をまわって流れる2次元な流れとか仮定することのできない3次元な流れであり、死水理論による2次元平板の斜航時の抵抗係数と10~20%の差がある。

旋回時の箱型浮体の抵抗，モーメントについて

- (6)深水域における旋回時の水平2分力は，簡単な死水理論にても定量的にかなり満足すべき一致がみられたが，回頭モーメントの推定には死水理論は不十分である（しかし同じ理論にて斜航時の抵抗は精度よく推定できないため，更なる検討が必要である。）
- (7)偏角，旋回半径の関数として実験公式を示し， $L/B$ ， $B/d$ ， $H/d$ が与えられたときのトリム，ヒール，沈下などを拘束された箱型浮体の直進，斜航，旋回時の水平2分力，回頭モーメント，流体力微係数を推定する実用的な方法を示した。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり，海洋開発工学部星野技官に実験を補助していただいた。

更に波形解析については，推進性能部の既存プログラムを使用させていただき，その使用にあたっては同部の日夏技官の御助力を得た。この紙面をかりて両氏に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 藤井齊，野本謙作  
操縦性試験法  
第2回操縦性シンポジウム，1970年，p.p.1~40
- 2) 飯島靖郎  
海洋構造物の施工技術の現状  
日本造船学会誌第663号，昭59年，p.p.2~14
- 3) 中口博，橋本貴久裕，武藤真理  
矩形断面柱の抗力に関する一実験  
日本航空学会誌，第16巻，第168号，1968年，p.p.1~5
- 4) 安藤定雄  
一様矩形断面形状を有する海洋構造物の曳航時の3分力について  
船舶技研海洋開発工学部内レポート，1983年
- 5) 今井功  
等角写像とその応用 岩波書店 p.p.122, 265~266
- 6) 今井功  
流体抵抗の理論  
科学 第28巻，No.3，1958年，p.p.2~7
- 7) Hoerner,S.  
Fluid Dynamic Drag published by the author.  
1958年 p.p.3.12, 3.16
- 8) 井上正祐，平野雅祥，平川雄二，向井一浩  
等吃水船体の操縦性微係数について  
西部造船会会報 第57号，昭54年，p.p.13~19
- 9) 標準船型試験法第2分冊  
波形解析法  
船研推進性能部編，昭和56年，p.p.9-O-(1)~9-V-(53)
- 10) 谷口中  
造波抵抗の測定  
造波抵抗シンポジウム，1965年，p.p.55~63