

(昭和 27 年 11 月 造船協会秋季講演会に於て講演)

## 造波抵抗に対する側壁影響について

正員 工学士 乾 崇夫  
正員 工学士 別所 正利

Side-Wall Effects on ship Wave Resistance  
Takao Inui *Kogaushi, Member*  
and Masatoshi Bessho, *Kokagushi, Member*  
Abstsact

## Summary :

With special interests to small experimental tank works, we have investigated the tankside wall effects on wave resistance of models.

Applying the wave-making theory, we have carried out some numerical works for the series of mathematical models in the following cases.

$$T/L=0.05, 0.10, 0.15, 0.20, \infty;$$

$$b/L=1/4, 3/8, 1/2, 3/4, 1, 1.5, 2, \infty;$$

$$F=V/\sqrt{Lg}=0.218\sim 0.707,$$

where  $L$ =ship length,  $T$ =ship draft,  $b$ =water width,  $V$ =ship speed. Finally, making use of the image method, we have made towing experiments with single, double and triple models of  $T/L=0.10$ . The model length  $L$  and tank water width  $b$  being 2.333m and 3.500m, the corresponding ratio  $b/L$  is  $3/2$ ,  $3/4$ , and  $1/2$  respectively.

Comparing the experimental results with theory, we find, unexpectedly large discrepancies that the side-wall effects are more remarkable with the experiments, even in consideration of skin friction augmentations, which may be roughly estimated as 4 and 10 percentages in case of  $b/L=3/4$  and  $1/2$ .

## 記号 :—

$L$ =船の長さ (ときに  $L=2$ )

$B$ =船の幅

$T$ =船の吃水 ( $t=2T/L$ )

$b$ =水路の幅

$V$ =船の速力

$k_0=g/V^2$  (ときに  $2k_0=Lg/V^2$ );  $k=k_0 \sec \theta$  ( $\theta$  は積分変数)

$F=V/\sqrt{Lg}$  (ときに  $F=\frac{1}{\sqrt{2k_0}}$ )

$g$ =重力の加速度

$m$ =吹出しの単位面積当り強さ (単位時間流量)

$R_\infty$ =水幅無限大のときの造波抵抗

$C_{w\infty}=R_\infty/\frac{\rho}{2}V^2B^2$ =同上のときの造波抵抗係数

$R_b$ =水幅有限のときの造波抵抗

$C_{wb}=R_b/\frac{\rho}{2}V^2B^2$ =同上のときの造波抵抗係数

座標軸は船の進行方向に  $x$  軸, 鉛直上方に  $z$  軸, 原点を水面上, 船の中心におく右手系を用いる。

## 1. 序 言

一般に船の抵抗は水路の幅が有限であるときには, それが無限に広い場合に比して若干の変化をうける。このことはとくに試験水槽において模型船の抵抗測定を実施する場合に重要な問題となり, また実船においては運河

\* 東京大学工学部助教授

\*\* 東京大学生産技術研究所特別研究生

通行の船舶などにみられる現象である。\*

このような側壁影響は船の抵抗の主要成分たる摩擦抵抗と造波抵抗とについてわけて考えるのが至当であり、とくに前者については低速の船において重要であつて、かつて山根昌夫教授<sup>1)</sup>によつて詳細に研究せられた。後者は高速の場合は重要であり、とくにその著しい性質は前者が水路幅の狭小に伴い、抵抗が一方的に増加するのに反し、後者は自由波系の複雑な干渉効果の結果として、変化の様相が多種多様であること、および、前者が近距離作用に属する現象であるのに比し、後者は後方へ拡大伝播してゆく自由波系が主動性をもつ、いわば遠隔作用的現象であることが重要である。従つて造波抵抗がなにがしかの重要性を占めるような場合においては、後者に対する影響の方が前者に対する影響よりは早く現れることが予想される。\*\*) たとえば試験水槽の幅の決定などに際しては、摩擦抵抗の見地から充分であつても、なおかつ、造波抵抗に対しては側壁影響が存在するという場合もありうるわけで、このような意味において、水深が充分深い場合の造波抵抗に対する側壁影響の問題を造波抵抗理論の応用として採上げ、若干の水槽試験を実施して上記理論との比較を行つた。

## 2. 理論および計算

船型が、 $y=0$  なる鉛直中心線面内の吹出し分布で代表される場合の造波抵抗は、水深水幅ともに無限大の場合、次式で与えられる。<sup>(2)</sup>

$$R_{\infty} = -\frac{\rho k_0^2}{\pi} \int_0^{\pi/2} (P^2 + Q^2) \sec^3 \theta d\theta, \quad (2.1)$$

$$\text{ただし} \quad \left. \begin{array}{l} P \\ Q \end{array} \right\} = \iint_S m(x, z) \exp(k_0 z \sec^2 \theta) \frac{\cos}{\sin} (k_0 x \sec \theta) dx dz \quad (2.2)$$

とくに前後対称船型の場合には  $P=0$  となる。

また水幅が有限の場合には次のような級数で与えられる。

$$R_b = -\frac{\rho k_0}{b} \left[ P_0^2 + Q_0^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (P_n^2 + Q_n^2) \frac{\sec^2 \theta_n}{2 \sec^2 \theta_n - 1} \right], \quad (2.3)$$

ここに  $P_n, Q_n$  は (2.2) と同じであるが、ただ  $\theta$  としては、次式、

$$2n\pi = b k_0 \sec^2 \theta_n \sin \theta_n, \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (2.4)$$

の根  $\theta_n$  となる。<sup>(3)</sup>

計算例としては、次式のような吹出し分布によつて代表される船型を選ぶことにする。

$$m(x, z) = \frac{a_1 V}{2} \cdot \frac{2x}{L} \quad \left( -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}, \quad -T \leq z \leq 0 \right) \quad (2.5)$$

これは従来の Michell-Havelock 流の造波抵抗理論では、吃水が  $T$  で、水線形状が一様に次式の如き抛物線なる如き船型に対応している。

$$y = \frac{B}{2} \left( 1 - \frac{4x^2}{L^2} \right), \quad (2.6)$$

(2.5) の如き吹出しが実際に対応する船型は、これとはかなり異なるものであつて、この点については実験の項で再び触れることにする。

(2.5) を (2.1), (2.2) に代入すれば水路の幅が制限されない場合に対して、

$$\left. \begin{array}{l} P=0, \\ Q = \frac{a_1 V L^2}{16 \pi k_0} M \cdot Z \cdot \cos^2 \theta, \end{array} \right\} \quad (2.7)$$

$$\text{ただし} \quad \left. \begin{array}{l} M = \int_{-1}^1 \xi \sin(k_0 \sec \theta \xi) d\xi, \\ Z = 1 - \exp(-k_0 t \sec^2 \theta), \end{array} \right\} \quad (2.8)$$

$$R_{\infty} = \frac{a_1^2 \rho V^2 L^2}{4 \pi} \int_0^{\pi/2} M^2 \cdot Z^2 \cdot \cos \theta d\theta \quad (2.9)$$

\* かつて G. S. BAKER はスエズ運河の通行船舶についてこの問題を調査したことがある。

\*\* (1) によればこの限度は大体フルード数 0.23 以上であることが示されている。

$$C_{w,\infty} = \frac{16 R_\infty}{\frac{\rho}{2} a_1^2 V^2 L^2} = \frac{8}{\pi} \int_0^{\pi/2} M^2 \cdot Z^2 \cdot \cos \theta \, d\theta, \quad (2.10)$$

水幅有限の場合には、(2.3) から (2.10) に対応して

$$C_{w,b} = \frac{16 R_b}{\frac{\rho}{2} a_1^2 V^2 L^2} = \frac{8}{b k_0} \left[ M_0^2 \cdot Z_0^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} M_n^2 Z_n^2 \frac{\cos^2 \theta_n}{2 \sec^2 \theta_n - 1} \right], \quad (2.11)$$

をうる。

造波抵抗に対する側壁影響には吃水の大小が重大な関係があり、吃水が大きい程、transverse wave が大きく、側壁の存在による素成波分布の選択的性質が顕著となることが予想されるので数値計算としては、吃水を\*次の5種選んだ。

$$T/L = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, \infty,$$

また水路の幅はおよび速度は次の如くそれぞれ8種および16種とつた。

$$b/L = \infty, 2, 3/2, 1, 3/4, 1/2, 3/8, 1/4$$

$\frac{k_0 L}{2}$	10.5	9	8	7	6	5.5	5	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.6	1.2	1
$V/\sqrt{Lg}$	.2182	.2357	.2500	.2673	.2887	.3015	.3162	.3333	.3536	.3780	.4083	.4472	.5000	.5590	.6455	.7071

なお  $V/\sqrt{Lg} = 0.218 \sim 0.267$  の間では  $b/L = \infty$  の計算を行う代りに  $b/L = 6$  に対する (2.11) の値を用いた。(両者の差はこの場合実用上無視できる程度である)

なお (2.11) の級数の剰余項 ( $n = N+1$  以下) は  $N$  を大きくとればもとの積分形に直すことができ、これはプラメータで積分できる。

$$\frac{8}{b k_0} \left[ M_N^2 Z_N^2 + 2 \sum_{n=N+1}^{\infty} M_n^2 Z_n^2 \frac{\cos^2 \theta_n}{2 \sec^2 \theta_n - 1} \right] \sim \frac{8}{\pi} \int_{\theta_N}^{\pi/2} M^2 Z^2 \cos \theta \, d\theta, \quad (2.12)$$

この  $N$  の大きさは上記 (2.12) の値が (2.11) の値の数パーセントを出ないように、次のようにとつた。

$b/L$	4	3	2	1.5	1	0.5
$N$	16	12	8	6	4	2

また、 $V/\sqrt{Lg} = 0.267$  以下の低速に対しては、常に  $N = 24$  とし、このときの剰余項の計算は次式によつた。

$$\frac{4 k_0^2}{\pi k^6} \left( k^2 + \frac{2}{3} - 2k \sin 2k + \cos 2k \right), \quad \text{ただし } k = k_0 \sec \theta_N$$

### 3. 計算結果

数値計算の結果は第1表および第1~3図に示す。予想された如く側壁による反射波群の干渉は後続自由波系の波長と水路幅との関係により、複雑に変化し、フルード数に応じ、抵抗増加をみる場合もあり、また抵抗減少をきたす場合もある。このような現象および (2.3) 式の物理的な意味を理解するには素成波 elementary waves<sup>(4)(5)</sup> の概念を用いるのが便利である。たとえば、ここで取扱つたような前後対称船型にあつては(粘性の影響を無視すれば)、抵抗に直接関係のある後続波は一般に次式で与えられる。

$$\zeta(x, y) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S(\theta) \sin[(x \cos \theta + y \sin \theta) k_0 \sec^2 \theta] \, d\theta, \quad (3.1)$$

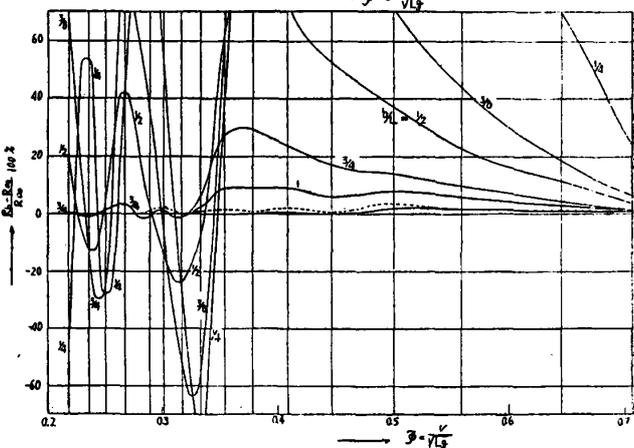
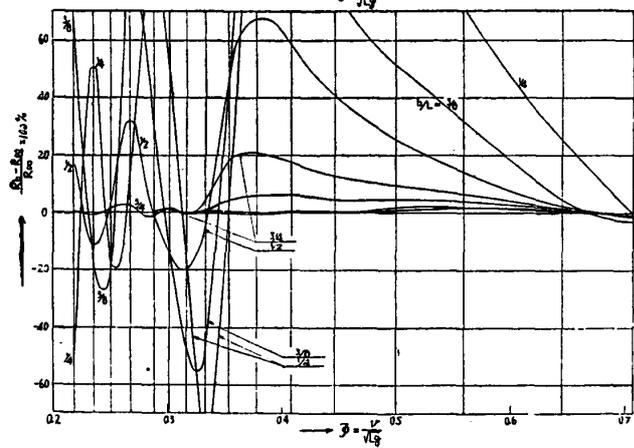
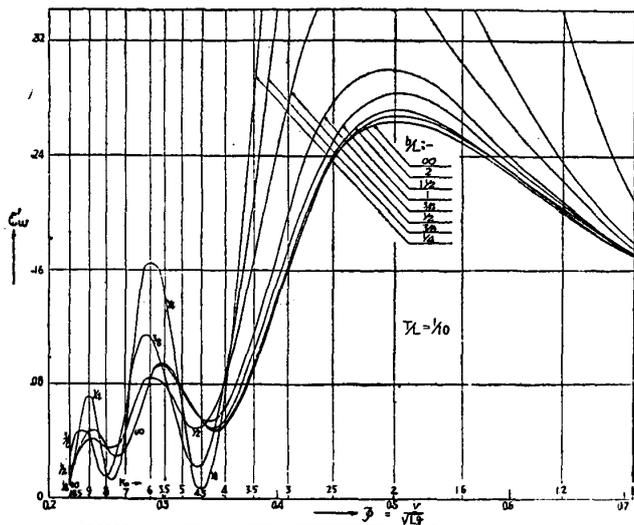
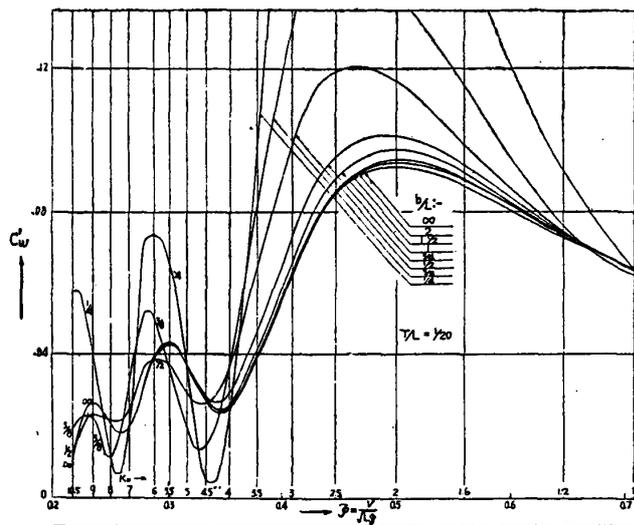
ここに  $S(\theta)$  は船型およびフルード数によつてきまる素成波の特性函数であつて、 $y = 0$  なる鉛直面内吹出し分布に対しては、

$$S(\theta) = \frac{k_0}{\pi V} \sec^3 \theta \iint_S m(\xi, \zeta) \exp(i k_0 \zeta \sec^2 \theta) \sin(k_0 \xi \sec \theta) \, d\xi \, d\zeta \quad (3.2)$$

となる。

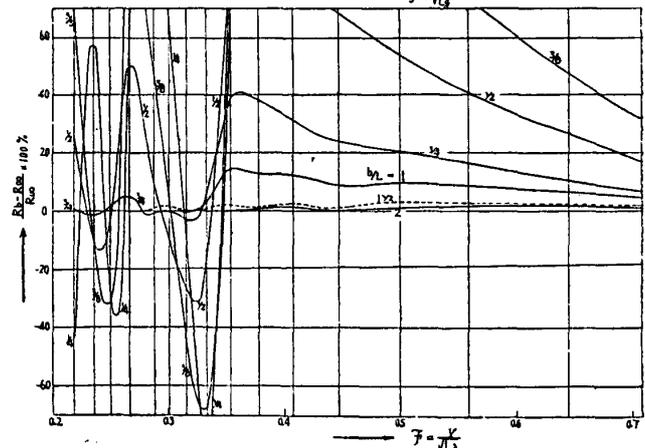
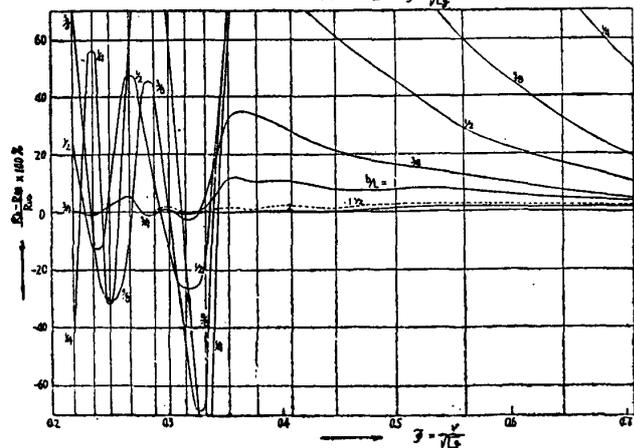
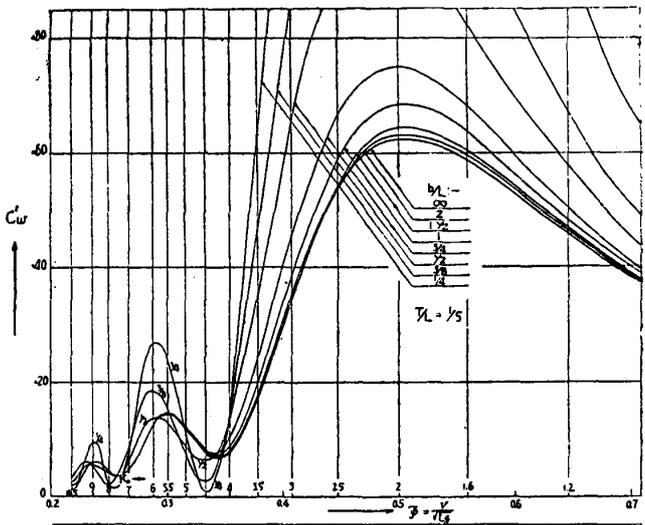
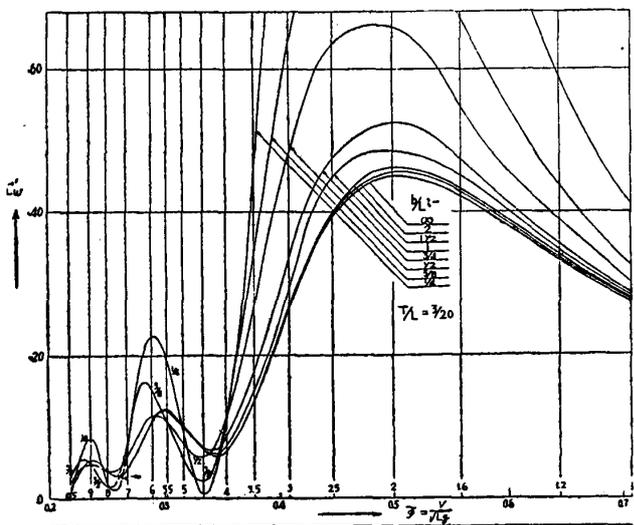
いま水路の幅が有限になると、鏡像法の考えに従つてこのような自由波系が水路の幅だけの間隔をおいて、左

\* ここに吃水と称するのは吃水1分布の領域の下限のことである。



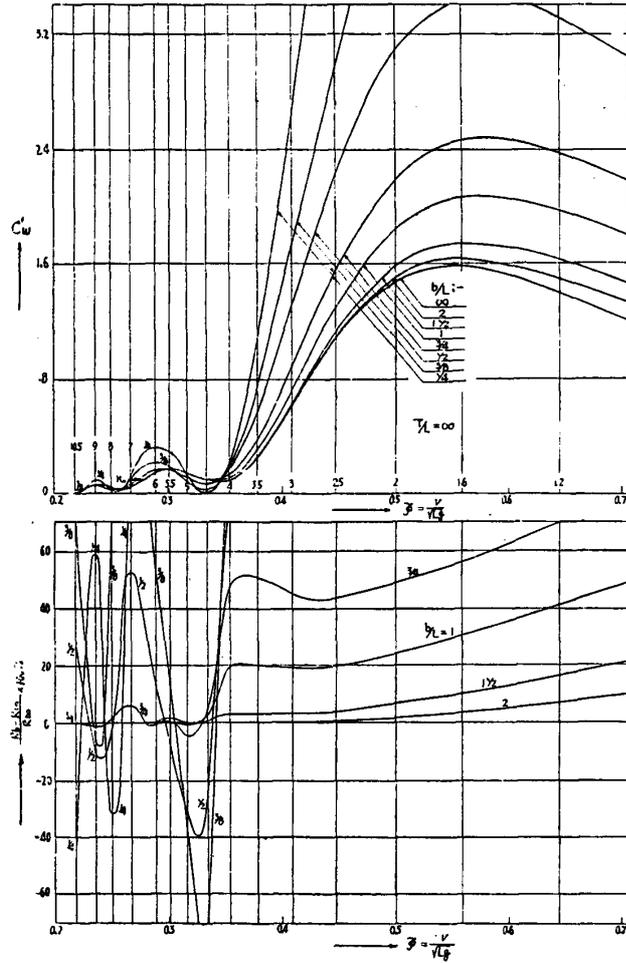
第1図 a

第1図 b

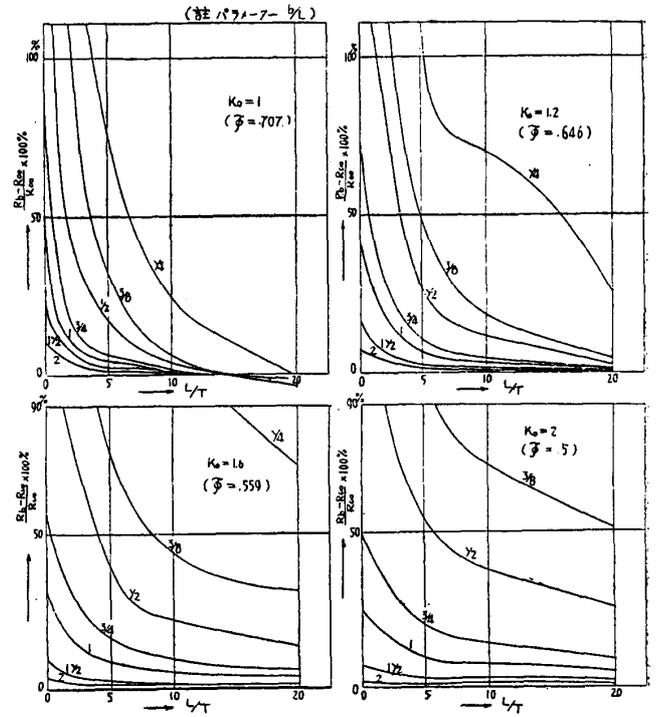


第1図 c

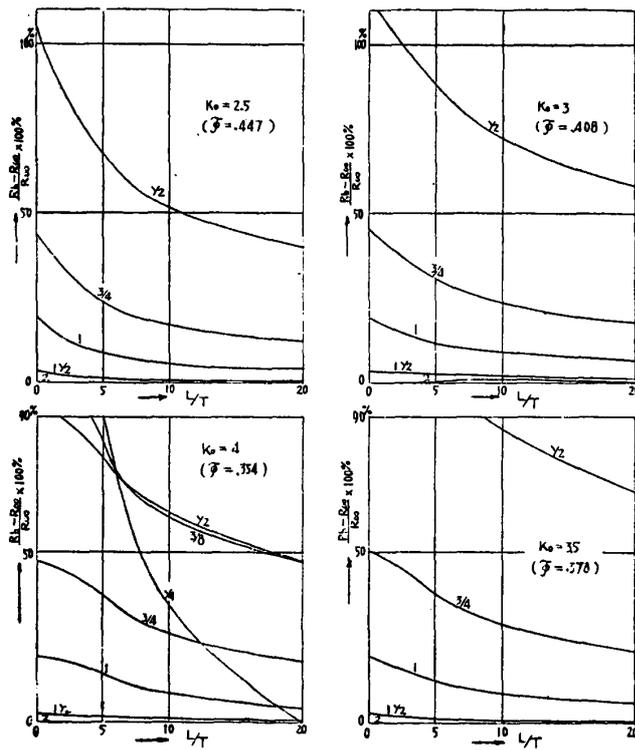
第1図 d



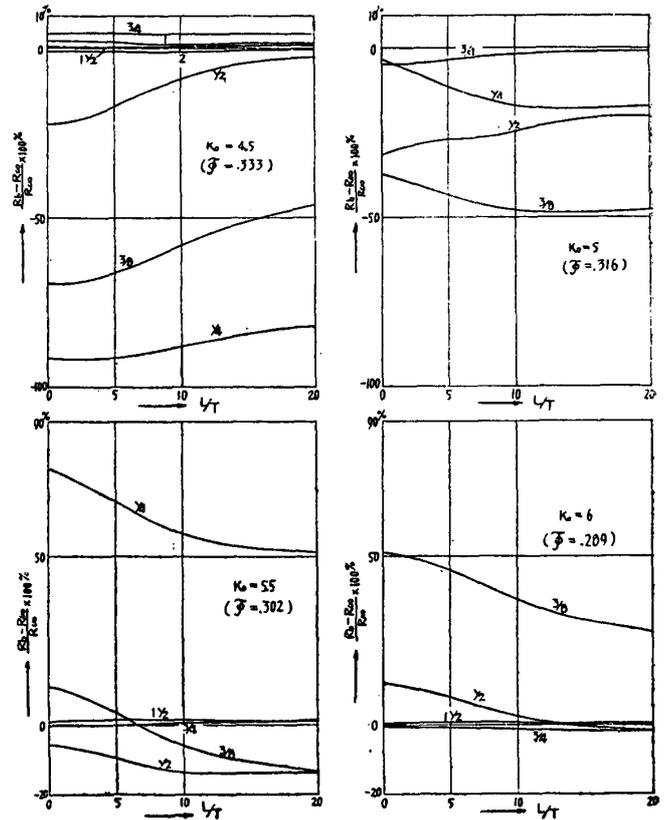
第1図 e



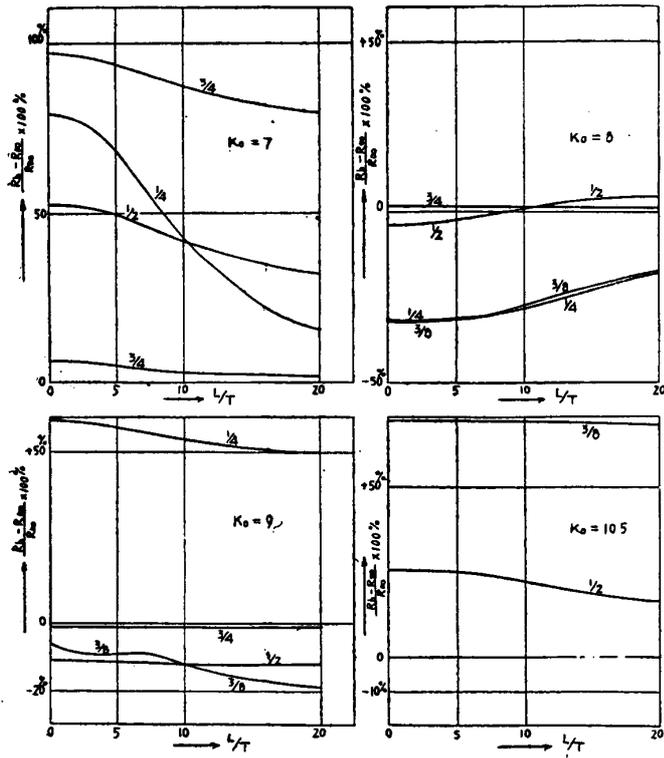
第2図 a



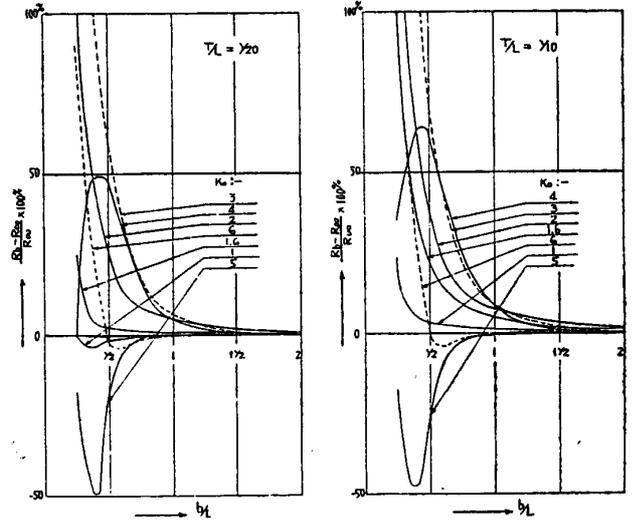
第2図 b



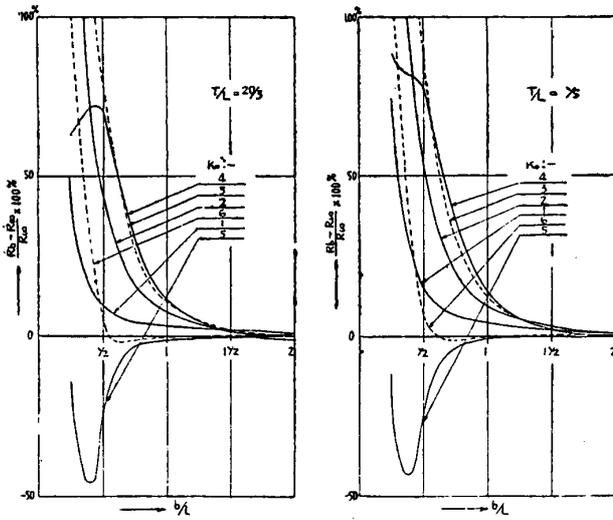
第2図 c



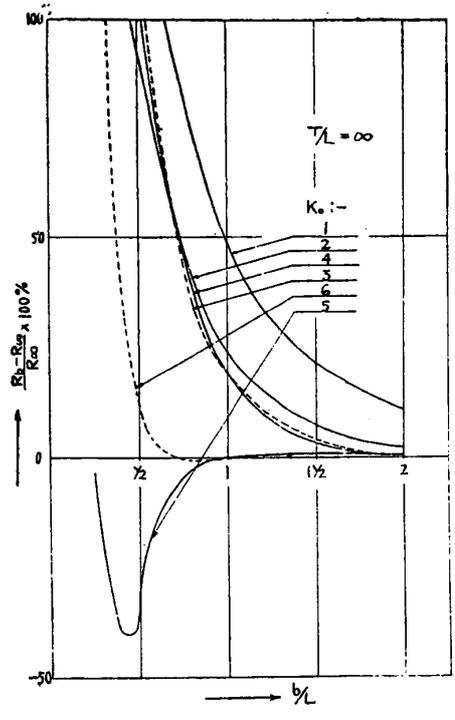
第2図 d



第3図 a



第3図 b



第3図 c

第 1 表 1

$K_0$	$K_0=1 \quad (F=.7071)$					$K_0=1.2 \quad (F=.6455)$				
	$\infty$	.4	.3	.2	.1	$\infty$	.4	.3	.2	.1
$\frac{2T/L}{(L/T)}$ $\frac{(b/L)}{2b/L}$	(0)	(5)	(20/3)	(10)	(20)	(0)	(5)	(20/3)	(10)	(20)
$\infty$ ( $\infty$ )	1.1980 (1.0000)	.37192 (1.0000)	.27220 (1.0000)	.168340 (1.0000)	.06428 (1.0000)	1.39580 (1.0000)	.45560 (1.0000)	.33120 (1.0000)	.19872 (1.0000)	.072944 (1.0000)
4 (2)	1.3252 (1.1062)	.3759 (1.011)	.2763 (1.015)	.1694 (1.006)	.0641 (.998)	1.496 (1.072)	.4631 (1.0277)	.3354 (1.012)	.2009 (1.011)	0.7317 (1.0031)
3 (1.5)	1.459 (1.218)	.37956 (1.0204)	.27816 (1.0217)	.16996 (1.0094)	.06428 (1.0000)	1.6236 (1.1631)	.46316 (1.0277)	.33820 (1.010)	.20196 (1.0162)	.073612 (1.0092)
2 (1)	1.794 (1.497)	.38760 (1.0421)	.28192 (1.0354)	.17108 (1.0163)	.06440 (1.0024)	1.9676 (1.4094)	.48364 (1.0617)	.34572 (1.0438)	.20488 (1.0309)	.073940 (1.0137)
1.5 (3/4)	2.1804 (1.821)	.39732 (1.0682)	.28508 (1.0472)	.17124 (1.0172)	.06400 (.9957)	2.3780 (1.7035)	.50388 (1.1059)	.35468 (1.0704)	.20720 (1.0427)	.073860 (1.0124)
1 (1/2)	3.037 (2.51)	.43440 (1.3148)	.30020 (1.1026)	.17408 (1.0342)	.06344 (.9872)	3.3068 (2.369)	.57224 (1.2692)	.33860 (1.1730)	.22196 (1.1167)	.074868 (1.0263)
0.75 (3/8)	3.942 (3.290)	.48904 (1.3148)	.32420 (1.1907)	.17884 (1.0625)	.06216 (.9676)	4.2992 (3.080)	.67208 (1.4753)	.43388 (1.3250)	.23484 (1.1816)	.076188 (1.0442)
0.5 (1/4)	5.822 (4.860)	.64948 (1.7461)	.40988 (1.5057)	.20852 (1.2387)	.06412 (.9978)	6.3696 (4.563)	.97736 (2.1455)	.58976 (1.780 <sup>c</sup> )	.33724 (1.700)	.09136 (1.2521)

註：—上段  $C_w = \frac{16 R_w}{\rho a^2 V^2 L^2}$  造波抵抗係数

下段  $R_0/R_\infty$  水幅無限大のものに対する比 (但し  $K_0=7\sim 10.5$  では  $b/L=3$  に対する比)

第 1 表 2

$K_0$	$K_0=1.6 \quad (F=.5590)$					$K_0=2 \quad (F=.5000)$				
	$\infty$	.4	.3	.2	.1	$\infty$	.4	.3	.2	.1
$\frac{2T/L}{(L/T)}$ $\frac{(b/L)}{2b/L}$	(0)	(5)	(20/3)	(10)	(20)	(0)	(5)	(20/3)	(10)	(20)
$\infty$ ( $\infty$ )	1.5800 (1.0000)	.58672 (1.0000)	.42112 (1.0000)	.24816 (1.0000)	.08732 (1.0000)	1.4744 (1.0000)	.62308 (1.0000)	.45016 (1.0000)	.26324 (1.0000)	.09288 (1.0000)
4 (2)	1.6376 (1.0363)	.59712 (1.0177)	.42900 (1.0188)	.25216 (1.0162)	.08884 (1.0176)	1.5028 (1.0192)	.62956 (1.0102)	.45448 (1.0096)	.26696 (1.0176)	.09384 (1.0081)
3 (1 <sup>1/2</sup> )	1.7356 (1.0982)	.60180 (1.0256)	.43120 (1.0240)	.25240 (1.0172)	.08896 (1.0186)	1.5808 (1.0720)	.64224 (1.0307)	.46216 (1.0266)	.27076 (1.032)	.09472 (1.0197)
2 (1)	2.0604 (1.3039)	.63712 (1.0859)	.45144 (1.0720)	.2620 (1.0557)	.09080 (1.0395)	1.8364 (1.2456)	.68252 (1.0952)	.48564 (1.0787)	.28192 (1.0746)	.09756 (1.0504)
1.5 (3/4)	2.4672 (1.5613)	.68140 (1.1612)	.47500 (1.1280)	.27136 (1.0935)	.09312 (1.0660)	2.1936 (1.4880)	.74864 (1.2014)	.5240 (1.1640)	.29860 (1.1380)	.10136 (1.0914)
1 (1/2)	3.4272 (2.1628)	.82260 (1.4020)	.54144 (1.2859)	.30300 (1.2210)	.09908 (1.1349)	3.0788 (2.088)	.96184 (1.5438)	.65672 (1.4586)	.36020 (1.3730)	.11664 (1.2560)
.75 (3/8)	4.4828 (2.837)	1.02072 (1.7398)	.672 (1.5960)	.35596 (1.4342)	.11484 (1.3153)	4.0552 (2.751)	1.23740 (1.9858)	.8332 (1.8508)	.44928 (1.7128)	.14028 (1.5110)
.5 (1/4)	6.6852 (4.229)	1.49396 (2.547)	.97324 (2.312)	.50492 (2.0345)	.14968 (1.7150)	6.08 (4.122)	1.85324 (2.975)	1.2468 (2.770)	.67076 (2.548)	.20716 (2.231)

第 1 表 3

$\frac{2T/L}{(L/T)}$ $\frac{(b/L)}{2b/L}$	$K_0=2.5$ ( $F=.4472$ )					$K_0=3$ ( $F=.4083$ )				
	$\infty$	.4	.3	.2	.1	$\infty$	.4	.3	.2	.1
	(0)	(5)	(20/3)	(10)	(20)	(0)	(5)	(20/3)	(10)	(20)
$\infty$ ( $\infty$ )	1.0912 1.	.53732 1.	.39372 1.	.23688 1.	.085260 1.	.6100 1.	.34216 1.	.25908 1.	1.6176 1.	.061952 1.
4 (2)	1.1000 1.0080	.53856 1.0021	.39608 1.0060	.23692 1.0008	.0856 1.0039	.61176 1.0029	.34620 1.0119	.26096 1.0071	.16286 1.0065	.062172 1.0036
3 (1 $\frac{1}{2}$ )	1.1308 1.0363	.54370 1.0118	.39852 1.0121	.2384 1.0063	.08572 1.0052	.63192 1.0359	.35092 1.0255	.2652 1.0221	.16508 1.0203	.062624 1.0109
2 (1)	1.3008 1.1920	.58452 1.0878	.42392 1.0764	.24940 1.0528	.08908 1.0447	.72656 1.1911	.38376 1.1213	.28692 1.1073	.17632 1.0900	.066140 1.0676
1.5 (3/4)	1.5656 1.4350	.6648 1.2370	.47448 1.2051	.27620 1.1657	.09592 1.1247	.8864 1.4531	.44924 1.3130	.33128 1.2787	.19976 1.2348	.073008 1.1784
1 (1/2)	2.2348 2.0484	.9032 1.6809	.6336 1.6092	.35284 1.5150	.11932 1.4008	1.3000 2.132	.64632 1.8888	.47164 1.8205	.27916 1.7253	.09816 1.5848
.75 (3/8)	2.9732 2.725	1.1976 2.229	.8380 2.1308	.45852 1.9356	.15424 1.8096	1.7376 2.849	.8664 2.532	.6332 2.444	.37512 2.3188	.13132 2.120
.5 (1/4)	4.4628 4.239	1.7996 3.349	1.2604 3.202	.71148 3.0035	.23372 2.742	2.5756 4.222	1.2700 3.712	.9232 3.562	.54212 3.352	.18752 3.028

第 1 表 4

$\frac{2T/L}{(L/T)}$ $\frac{(b/L)}{2b/L}$	$K_0=3.5$ ( $F=.3780$ )					$K_0=4$ ( $F=.3536$ )				
	$\infty$	.4	.3	.2	.1	$\infty$	.4	.3	.2	.1
	(0)	(5)	(20/3)	(10)	(20)	(0)	(5)	(20/3)	(10)	(20)
$\infty$ ( $\infty$ )	.2548 1.	.16832 1.	.13432 1.	.0900 1.	.038572 1.	.09144 1.	.075828 1.	.065676 1.	.049792 1.	.025208 1.
4 (2)	.25524 1.0018	.16744 .9950	.13344 .9933	.0896 .9958	.038384 .9952	.09168 1.0028	.076016 1.0024	.065772 1.0015	.049928 1.0028	.025256 1.0018
3 (1.5)	.26252 1.0302	.17048 1.0128	.1356 1.0096	.09056 1.0060	.038792 1.0054	.09408 1.0289	.77416 1.0210	.06664 1.0147	.050436 1.0130	.025432 1.0089
2 (1)	.30504 1.1971	.18952 1.1260	.14876 1.1073	.09796 1.0883	.040896 1.0602	.1092 1.1940	.08660 1.1420	.073096 1.1130	.054192 1.0883	.026412 1.0478
1.5 (3/4)	.38452 1.5091	.23232 1.3800	.77980 1.3387	.11584 1.2873	.04666 1.2097	.13488 1.4754	.1046 1.3793	.086856 1.3225	.062872 1.2627	.029752 1.1800
1 (1/2)	.57216 2.246	.34340 2.0402	.26408 1.9661	.16752 1.8620	.06478 1.6794	.17648 1.9308	.1356 1.7840	.11208 1.7061	.08062 1.6190	.037316 1.4800
.75 (3/8)	.74672 2.930	.44424 2.639	.34084 2.538	.21592 2.400	.08328 2.160	.18888 2.066	.13856 1.8263	1.11212 1.7070	.079776 1.6022	.037248 1.4775
.5 (1/4)	1.0548 4.138	.60316 3.582	.45192 3.363	.2746 3.052	.09832 2.549	.2176 2.380	1.14380 1.8968	.10716 1.6320	.067140 1.3484	.025272 1.0024

第 1 表 5

		$K_0=4.5$ ( $F=.3333$ )					$K_0=5$ ( $F=.3162$ )				
$\frac{2T/L}{(L/T)}$	$\frac{(b/L)}{2b/L}$	$\infty$	.4	.3	.2	.1	$\infty$	.4	.3	.2	.1
		(0)	(5)	(20/3)	(10)	(20)	(0)	(5)	(20/3)	(10)	(20)
$\infty$ ( $\infty$ )		.08584 1.	.076592 1.	.06852 1.	.05300 1.	.027168 1.	.13864 1.	.11816 1.	.1024 1.	.076268 1.	.03648 1.
4 (2)		.08528 .9934	.076016 .9925	.067780 .9892	.052556 .9915	.02704 .9952	.13836 .9980	.11804 .9990	.10168 .9930	.076212 .9995	.0365 1.0003
3 (1 1/2)		.08668 1.0096	.077136 1.007	.068752 1.0032	.05332 1.006	.027380 1.0079	.13868 1.0001	.11832 1.001	.10264 1.002	.076348 1.001	.036548 1.002
2 (1)		.08828 1.0281	.078412 1.0239	.06972 1.0174	.05384 1.0160	.027512 1.0126	.1380 .9955	.11744 .9936	.10196 .9959	.07596 .9960	.036444 .9990
1.5 (3/4)		.08928 1.0450	.08044 1.0502	.071852 1.0488	.055648 1.0500	.028344 1.0432	.13224 .9536	.1140 .9646	.09964 .9731	.074796 .9806	.036244 .9935
1 (1/2)		.066928 .7797	.063568 .8300	.058940 .8601	.048316 .9116	.026544 .9770	.10288 .6812	.08660 .7327	.07532 .7353	.057588 .7551	.029236 .8014
.75 (3/8)		.026188 .3052	.02576 .3363	.024876 .3630	.022244 .4198	.014688 .5407	.08684 .6262	.06732 .5695	.05608 .5475	.039888 .5230	.01912 .5241
.5 (1/4)		.006916 .0855	.00688 .08983	.0067928 .0991	.006452 .1217	.004956 .1825	.1342 .9680	.10496 .8880	.088 .8595	.063304 .8300	.030296 .8305
6 (3)		.08584 1.000	.07652 .9992	.06824 .9960	.053 1.000	.02716 1.000					

第 1 表 6

		$K_0=5.5$ ( $F=.3015$ )					$K_0=6$ ( $F=.2887$ )				
$\frac{2T/L}{(L/T)}$	$\frac{(b/L)}{2b/L}$	$\infty$	.4	.3	.2	.1	$\infty$	.4	.3	.2	.1
		(0)	(5)	(20/3)	(10)	(20)	(0)	(5)	(20/3)	(10)	(20)
$\infty$ ( $\infty$ )		.16700 1.	.14252 1.	.12284 1.	.090940 1.	.042744 1.	.14348 1.	.124652 1.	.10872 1.	.081792 1.	.039244 1.
4 (2)		.16704 1.0003	.14264 1.0007	.12336 1.0041	.091032 1.001	.042788 1.0009	.14384 1.0024	.12528 1.0050	.10952 1.0073	.08212 1.0040	.039476 1.0059
3 (1 1/2)		.16976 1.0162	.14504 1.0175	.12556 1.0220	.092712 1.0193	.04356 1.0191	.14412 1.0042	.12552 1.0070	.10976 1.0095	.08224 1.0056	.039540 1.0073
2 (1)		.16668 .9981	.1424 .9991	.12328 1.0033	.091056 1.0014	.042876 1.0030	.14284 .9955	.12428 .9970	.10868 .9996	.08144 .9956	.039180 .9983
1.5 (3/4)		.12752 1.0030	.14288 1.0022	.12388 1.0083	.09176 1.0090	.043432 1.0160	.14308 .9972	.12356 .9912	.10776 .9910	.08052 .9845	.038704 .9863
1 (1/2)		.15732 .9420	.12868 .9029	.10932 .8899	.07908 .8696	.036876 .8627	.16132 1.1242	.13528 1.0853	.11568 1.0638	.08380 1.0244	.03852 .9815
.75 (3/8)		.18620 1.1149	.14848 1.0419	.1236 1.0061	.0860 .9454	.037088 .8677	.21716 1.5130	.18228 1.4624	.15564 1.4318	.11208 1.3702	.05004 1.2750
.5 (1/4)		.29380 1.7590	.23724 1.6649	.19976 1.6263	.14236 1.5660	.064624 1.5119	.31904 2.224	.26700 2.142	.2276 2.0937	.16392 2.0041	.073804 1.8820

第 1 表 7

$K_0$	$K_0=7$ ( $F=.2673$ )					$K_0=8$ ( $F=.2500$ )				
	$\infty$ ( $\infty$ )	.4 (5)	.3 (20/3)	.2 (10)	.1 (20)	$\infty$ ( $\infty$ )	.4 (5)	.3 (20/3)	.2 (10)	.1 (20)
6 (3)	.04530 1.	.042587 1.	.039493 1.	.32791 1.	.018942 1.	.044440 1.	.042935 1.	.040576 1.	.034596 1.	.020539 1.
4 (2)	.045310 1.0001	.042593 1.0000	.039499 1.0000	.032798 1.0000	.018945 1.0000	.044449 1.0011	.042941 1.000	.040585 1.000	.034605 1.0002	.020541 1.000
3 (1.5)	.045372 1.0013	.042650 1.0013	.039547 1.0013	.032838 1.0012	.018968 1.0012	.044382 0.9988	.042879 0.9987	.040525 0.9988	.034548 0.9989	.020517 0.9989
2 (1)	.045576 1.0060	.042744 1.0034	.039592 1.0024	.032836 1.0011	.018954 1.0005	.044646 1.0044	.043124 1.0043	.040746 1.0040	.034728 1.0039	.020605 1.0032
1.5 (3/4)	.048349 1.0670	.044932 1.055	.041332 1.0466	.033926 1.0345	.019326 1.0201	.04230 1.0179	.043715 1.0182	.041303 1.0179	.035156 1.0160	.020813 1.0133
1 (1/2)	.069345 1.5308	.063970 1.5020	.058242 1.4743	.046615 1.4214	.024976 1.3183	.042953 0.9667	.041938 0.9767	.040134 0.9890	.035007 1.0119	.021461 1.0450
0.75 (3/8)	.089336 1.9720	.082697 1.9419	.075770 1.9184	.061614 1.8789	.033991 1.7946	.020665 0.6825	.020100 0.6871	.019304 0.6980	.017253 0.7319	.011736 0.8388
0.50 (1/4)	.081367 1.7962	.071994 1.6900	.063095 1.5978	.046985 1.4326	.021947 1.1588	.020814 0.6873	.020068 0.6860	.019178 0.6935	.016953 0.7192	.011472 0.8200

第 1 表 8

$K_0$	$K_0=9$ ( $F=.2375$ )					$K_0=10.5$ ( $F=.2182$ )				
	$\infty$ ( $\infty$ )	.4 (5)	.3 (20/3)	.2 (10)	.1 (20)	$\infty$ (0)	.4 (5)	.3 (20/3)	.2 (10)	.1 (20)
6 (3)	.06817 1.	.058717 1.	.055262 1.	.046600 1.	.026832 1.	.018227 1.	.018079 1.	.017711 1.	.016356 1.	.011507 1.
4 (2)	.060848 1.0002	.058649 0.9987	.055200 0.9987	.046546 0.9988	.026801 0.9989	.018278 1.0028	.018129 1.0027	.017759 1.0026	.016397 1.0025	.011531 1.0021
3 (1.5)	.060919 1.0016	.058693 0.9994	.055237 0.9994	.046574 0.9994	.026812 0.9993	.018227 1.0000	.018081 1.0001	.017714 1.0001	.016363 1.0005	.011520 1.0012
2 (1)	.060813 1.0000	.058625 0.9984	.055168 0.9983	.046524 0.9984	.026773 0.9979	.018383 1.0087	.018232 1.0087	.017860 1.0083	.016489 1.0081	.011602 1.0083
1.5 (3/4)	.060221 0.9902	.058074 0.9890	.054679 0.9894	.046163 0.9907	.026610 0.9918	.018379 1.0083	.018216 1.0077	.017829 1.0066	.016445 1.0053	.011569 1.0053
1 (1/2)	.054343 0.8943	.052111 0.8875	.048836 0.8836	.041013 0.8801	.023693 0.8830	.022957 1.2592	.022691 1.2550	.022078 1.2463	.019999 1.2226	.013415 1.1659
0.75 (3/8)	.057498 0.9454	.053434 0.9100	.050477 0.9133	.040994 0.8796	.021812 0.8129	.030849 1.6925	.030588 1.6920	.029963 1.6920	.027672 1.6919	.019319 1.6790
0.50 (1/4)	.096794 1.5913	.092463 1.5746	.086227 1.5600	.071633 1.5370	.040256 1.5009	.010694 0.5868	.010438 0.5774	.009977 0.5634	.008729 0.5336	.005706 0.4957

右に無限に存在し並進してゆく場合と同じことになる。このとき (3.1) で表わされる  $\theta = -\pi/2$  から  $\pi/2$  にいたる素成波群 ( $\theta$  は逆進行軸と素成波伝播方向とのなす角) の中で、位相差  $b \sin \theta_n$  がその波長  $\lambda(\theta_n) = 2\pi V^2 \sec^2 \theta_n / g$  の整数倍に等しいような素成波のみが選択的に残存し、他は位相の異なる無数の反射波による干渉の結果消えてしまう (第 4 図)。

即ちその選択条件は

$$b \sin \theta_n = n\lambda(\theta_n) \quad (3.3)$$

となり、これは (2.4) と同じものである。従つて波高は、

$$\begin{aligned} \zeta(x, y) = & \frac{2\pi}{b k_0} \left[ S(\theta_0) \sin(k_0 x) \right. \\ & \left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{S(\theta_n) \cos \theta_n}{1 + 2 \tan^2 \theta_n} \sin(k_0 x \sec \theta_n) \cos(2n\pi y/b) \right] \end{aligned} \quad (3.4)$$

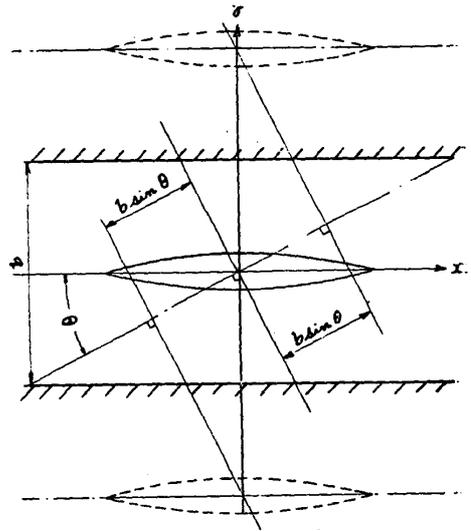
(2.4) ないし (3.3) によれば  $\theta_n$  の分布の様子は  $b/\lambda(\theta_n)$  すなわち  $b k_0$  が小さくなると無限幅の連続分布に対してその不連続性が強調されてくる。そして、(3.4) 式の第 2 項以下が第 1 項に比し小さくなり、極限においては第 1 項のみで表わされる二次元的ないわゆる canal wave に近づいてくる。そしてこのとき波高は  $1/b$  に、抵抗は  $1/b^2$  に比例して双曲線的に増加する (第 3 図)。とくに船首波系の transverse wave と diverging wave との相交るいわゆる cusp line  $\Theta = 19^\circ 28'$  が側壁によつて反射され、恰度船尾にくる場合には著しい干渉効果が予想され、実際にこのことは、第 3 図に、 $b/L \approx \tan 19^\circ 28' \approx 0.35$  の前後で著しい山或いは谷が見られることによつて示されている。

また吃水が深くなると transverse wave が著しくなることが知られているが側壁の影響は、 $\theta_n$  の分布を考えればわかるように、主として  $\theta$  の小さいところすなわち transverse wave に対して顕著であるから、吃水の深い船ほど側壁影響が著しいことが予想される。このことは第 2 図によつて具体的に示されている。

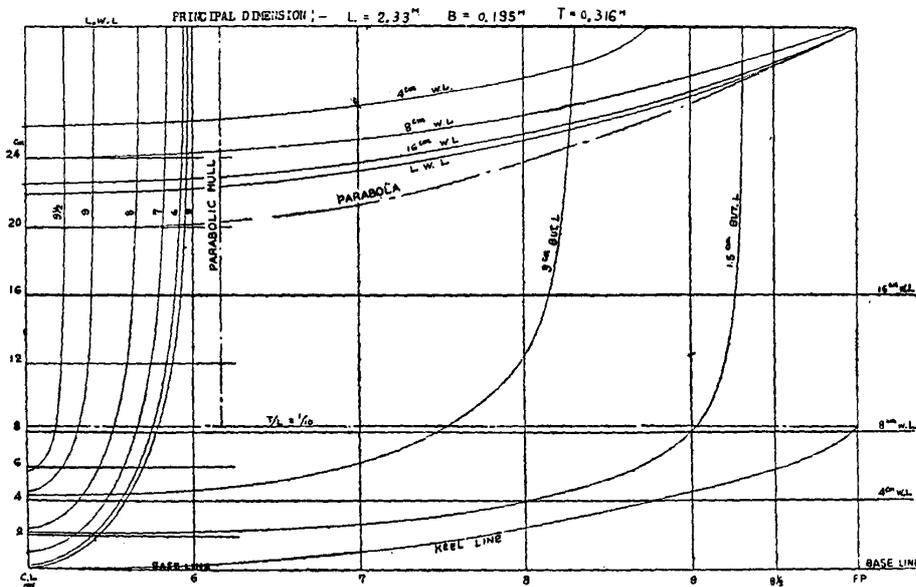
#### 4. 実 験

上記理論計算の結果が実際にどの程度正しいものであるかを検証するために東大水槽 (水幅  $b = 3.495 \text{ m}$ ) において次のような模型実験を実施した。

まず模型船の形状は、自由表面を固体壁とみなしたときの (2.5) によつて与えられる実際の形状を、( $a_1 =$



第 4 図



第 5 図

第 2 表 3

三船並列試験 (b/L=1/2) 昭 26-6-19 水温 19.6°C

速度 V(m/s)	フルード数 V√L/g	全抵抗 (kg)	平均沈下 量(mm)	縦傾斜 ×10 <sup>-1</sup>	抵抗係数 cm
1.332	.2787	0.758	13.5	-8.92	.04543
1.342	.2808	0.766	14.6	-8.67	.04522
1.417	.2965	0.896	16.6	-9.44	.04745
1.483	.3104	0.892	17.6	-9.13	.04313
1.537	.3216	0.856	19.7	-10.26	.03852
1.617	.3383	0.918	17.1	-5.56	.03733
1.662	.3477	1.094	23.5	-7.42	.04211
1.727	.3613	1.388	26.8	-4.72	.04948
1.790	.3745	1.804	28.6	-3.59	.05986
1.861	.3893	2.424	31.4	+1.85	.07440
1.921	.4019	3.022	33.6	+5.80	.08704
1.968	.4117	3.894	34.5	+7.23	.10689
2.033	.4253	4.604	36.9	+13.28	.11840
2.097	.4386	4.970	37.8	+13.08	.12013
2.141	.4479	5.696	38.0	+18.21	.13210
1.243	.2601	0.534	17.6	-10.10	.03675

第 2 表 2

二船並列試験 (b/L=3/4) 昭 26-10-15 水温 19.3°C

速度 V(m/s)	フルード数 V√L/g	全抵抗 (kg)	平均沈下 量(mm)	縦傾斜 ×10 <sup>-1</sup>	抵抗係数 cm
1.265	.2647	0.546	10.6	-3.91	.03628
1.354	.2833	0.757	12.2	-4.24	.04390
1.420	.2972	0.898	13.1	-5.11	.04735
1.485	.3108	0.968	14.3	-5.92	.04667
1.551	.3244	0.980	16.0	-6.47	.04332
1.617	.3383	1.018	17.9	-5.87	.04139
1.691	.3538	1.194	19.8	-4.18	.04440
1.729	.3617	1.299	21.0	-3.26	.04620
1.818	.3803	1.762	23.7	-0.22	.05669
1.837	.3843	1.979	24.9	+1.20	.06234
1.921	.4019	2.800	28.5	+6.74	.08065
1.831	.3831	1.897	20.0	+1.25	.06014
1.873	.3918	2.221	22.4	+4.95	.06728
1.881	.3935	2.300	23.2	+5.11	.06909
1.933	.4044	2.787	23.7	+8.48	.07928
1.921	.4019	2.648	25.0	+8.26	.07627
1.968	.4117	3.090	26.5	+10.49	.08480
1.996	.4175	3.339	28.5	+12.12	.08910
2.046	.4280	3.812	27.0	+14.95	.09682
1.686	.3527	1.124	18.3	-2.88	.04204
1.614	.3376	1.019	17.0	-4.89	.04164
1.239	.2593	0.500	9.9	-1.85	.03462
1.274	.2666	0.551	10.6	-2.39	.03609
1.728	.3615	1.314	19.8	-2.34	.04678

第 2 表 1

単船試験 (b/L=3/2) 昭 25-4-27. 水温 14.2°C

速度 (m/s)	フルード数 V√L/g	全抵抗 (kg)	平均沈下 量(mm)	縦傾斜 ×10 <sup>-1</sup>	摩擦抵抗係数 (kg)	抵抗係数 cm
1.303	.2727	0.632	6.7	-1.07	0.468	.03958
1.443	.3020	0.960	8.4	-2.23	0.564	.04897
1.586	.3318	1.108	10.3	-3.69	0.675	.04683
1.728	.3615	1.242	12.6	-2.58	0.783	.04422
1.861	.3893	1.718	16.0	-1.72	0.897	.05273
2.000	.4184	2.602	19.3	+1.72	1.023	.06915
2.131	.4458	3.682	22.0	+4.60	1.149	.08620
2.263	.4734	4.526	23.0	+9.15	1.282	.09395
2.405	.5031	5.140	22.5	+10.90	1.432	.09448
2.520	.5272	5.700	22.6	+11.53	1.560	.09543
2.668	.5582	6.142	22.7	+12.40	1.732	.09174
2.940	.6150	6.772	20.9	+11.46	2.067	.08329
3.211	.6720	7.252	19.0	+9.88	2.428	.07478
3.494	.7311	7.774	18.4	+8.07	2.832	.06771
1.763	.3688	1.342	13.9	-2.75	0.813	.04590

註：一縦傾斜=(船尾沈下量-船首沈下量/船長)×100

$$\text{抵抗係数} = R / \left( \frac{1}{2} \rho V^3 \Delta \right)^{2/3} \Delta \cdot \text{排水体積}$$

$$\text{摩擦抵抗} = \sigma \lambda \{ 1 + 0.0043(15 - f) \} S V^{1.825} (\lambda = 0.1921)$$

$$L = 2.33M \quad B = 0.1952M \quad \tau = 0.3158M$$

$$V = 0.081343M^0 \quad S = 1.483M^{1.2}$$

第 2 表 4

理論抵抗値 ( $b/L = \infty$ )

フルード数 $V/\sqrt{Lg}$	$C_w$	$C_w + C_f$
0.7071	0.0477	0.0731
.6455	.0561	.0816
.5590	.0702	.0967
.5000	.0745	.1009
.4472	.0669	.0938
.4083	.0457	.0730
.3780	.0254	.0531
.3536	.0141	.0421
.3333	.0150	.0432
.3162	.02156	.0502
.3015	.0257	.0545
.2887	.0232	.0522
.2673	.00977	.0389
.2500	.00925	.0388

$$C_w' = R_w / \frac{1}{2} \rho V^2 \nabla^{\frac{2}{3}} \quad (\text{造波抵抗係数})$$

$$C_w' = C_w \times B^2 / \nabla^{\frac{2}{3}}, \quad C_w = R_w / \frac{1}{2} \rho V^2 B^2$$

$$C_f = R_f / \frac{1}{2} \rho V^2 \nabla^{\frac{2}{3}} \quad (\text{摩擦抵抗係数})$$

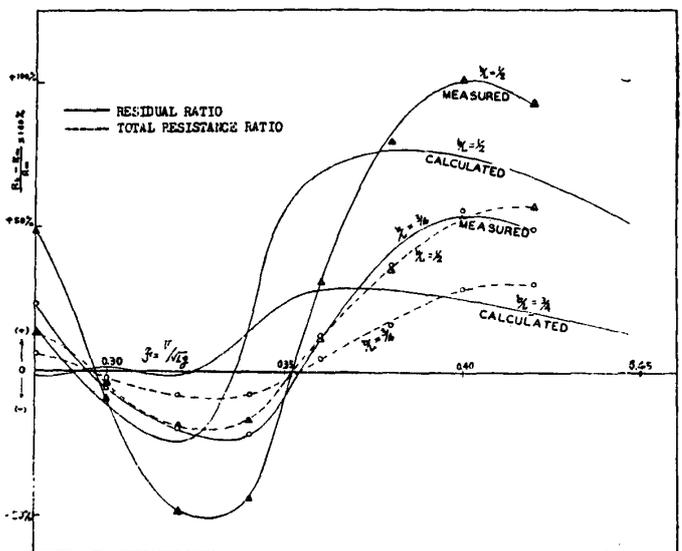
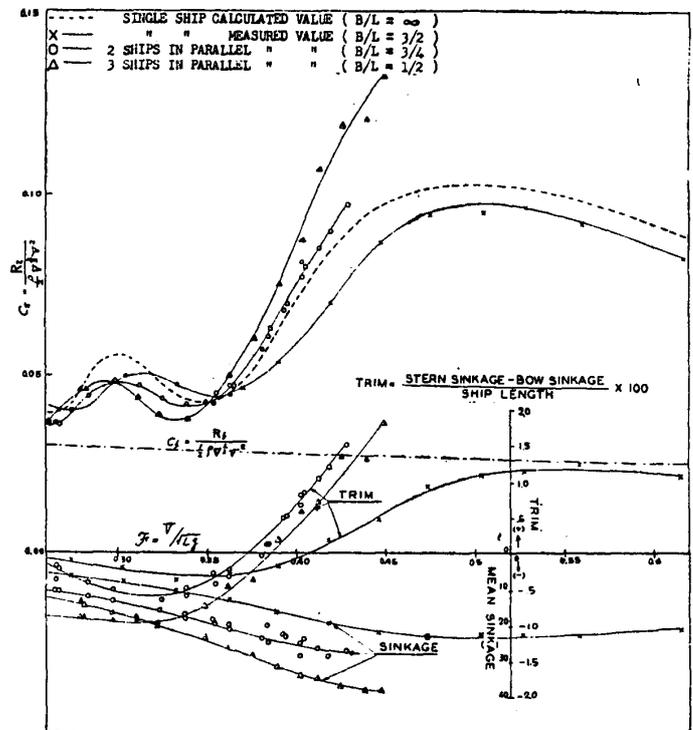
$$B^2 / \Delta^{\frac{2}{3}} = 150^{\frac{2}{3}} 100 = 0.2823$$

第 2 表 5

実験抵抗比 ( $b/L = 1.5$  に対する)

$F'$	$b/L$		全抵抗比	
	3/4	1/2	3/4	1/2
0.28	1.230	1.480	1.061	1.130
0.30	0.935	0.900	0.974	0.960
0.32	0.800	0.520	0.918	0.802
0.34	0.780	0.562	0.917	0.835
0.36	1.124	1.311	1.045	1.113
0.38	1.368	1.800	1.160	1.351
0.40	1.555	2.015	1.293	1.534
0.42	1.490	1.931	1.300	1.517

0.4,  $t=0.2$ ) 流線方程式の積分から求めたものを用いた。(6)その  $B/L$  は 0.0838,  $T/L$  は前後端で 0.100, 中央部で 0.136 である。(第 5 図) 模型長  $L$  は水幅  $b$  の 2/3, すなわち  $L=2.330$  m とし, 全く同型同大のパラフィン模型 3 コを製作し, これを, 1 隻単独の場合, 2 隻並列の場合, 3 隻並列の場合, について鏡像法に従い抵抗試験を行った。ただし, 抵抗動力計は曳航車の中央すなわち, 水槽中心線にあり, これを左右に移動せしめることが困難であったので, 2 隻並列の場合に限り, 2 隻の合計抵抗を全体として測定し, その 1/2 を以て所要の抵抗値とみなした。これらの場合の  $b/L$  の値は単独, 2 隻 3 隻の各の場合に対してそれぞれ 3/2, 3/4, 1/2 となり, 側壁上の条件は完全に満足されている。その結果は第 2 表および第 6 図に示した。ここで問題となるのは摩擦抵抗に対する正確な算定の方法であつて, とくに 3 隻並列の場合の如く, 水路幅が狭くなつてくると, 本模型船の如く極端に幅の狭い船型に対しても摩擦抵抗に対する影響が無視できなくなる。このことを予想して, 模型船と模型船の中央, 即ち仮想的側壁位置において, 前後, およ

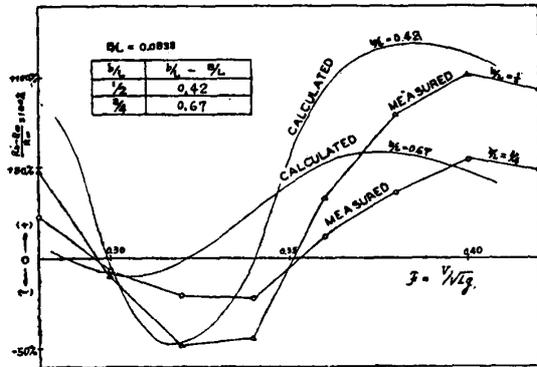


第 6 図

び深さ方向に合計9点選をんでピトー管による流速分布の測定を行つた。しかるに、実験は速度が少し高きに失し、波の影響が比較的大きく、この結果から流線にその速度分布および圧力分布の変化の様を知ることは殆ど不可能であつた。そのため、前出文献<sup>(1)</sup>によつて、摩擦抵抗の増加の程度を概算するに止めた。その値は  $b/L = 3/20, 3/4, 1/2$  に対し、それぞれ 0.4, 10% の程度の如くである。

しかしこれは概算であるから、実験成績の表現法としては、全抵抗から通常の摩擦抵抗を差引いた値をそのまま示すに止めた。この結果を上述した理論計算と比較するのであるが、さらにこの際注意を要することは、計算は理想流体に対して行われたものであつて、粘性の存在に基づくそれからの偏差が当然予想されること、および船首波が側壁によつて反射され船尾に当つて破壊される影響——これは船型条件に外ならない——が  $b/L \leq 0.35$  で著しく現れてくる可能性のあることである。

また他方実験値の精度についても速度による抵抗の増減が激しいため、もつと多くの測定点をとるべきであつたこと、2船並列の場合の測定が、前述のような方法によつたため他に比し劣つていいると考えられることなど遺憾な点が少くない。以上の諸点を考慮しつつ、第6図をみれば、このような理論計算の適用限界が概ね判断できるやうである。とくに予想外であつたことは、理論よりも実験の方が、抵抗利得のケースが誇張されて出てきた



第7図

ことであつて、これは粘性影響を以て説明することは出来ないから、先に述べた船尾よる波の破壊が主な原因ではないかと考えられる。また  $b/L=1/2$  では、浅水時においてとくに著しいいわゆる制限水路影響に相当する水路断面積の影響が若干は加わつているということも考えられる。因に実験時の中央横断面積対水路断面積の比は、 $b/L=3/2, 3/4, 1/2$  に対してそれぞれ約、0.5, 1.0, 1.5 パーセントである。

最後に理論的な根拠は全くないが、水路の実際の幅から船の幅を差引いたものを、水幅  $b$  にとり、修正した結果を実験と比較すれば第7図の如くなる。両者は粘性による位相のズレを除けば抵抗増減率としては比較的良好一致してくる。

## 5. む す び

われわれのえた結論をまとめれば次のようになる。

1° 水路の幅が狭くなると造波抵抗は顕著な増減を示すようになる(第3図)。その変化の型式には3種あつて第1は双曲線型 ( $k_0=3.6$ ) でこれは抵抗曲線が hump になる直前の速度において起る。第2の型は  $b/L \approx 0.4 \sim 0.5$  で最大となり以後  $b/L$  の減少と共に急激に減少する型 ( $k_0=4, 7, 10.5$ ) で、これは抵抗曲線が hollow を過ぎた直後に相当する。第3の型は  $b/L=0.3 \sim 0.4$  に最小の現れる場合 ( $k_0=5.9$ ) であつて抵抗曲線では hump を過ぎ hollow にかかる中間のところに相当する。(第3図には混乱をさけるため  $k_0=7, 8, 9, 10.5$  に対する場合を省略した)。

2° 速度による抵抗変化は一般的にいつて、hump にかかるところで増加しはじめ、hump の直前で最大となり、以後減少して hollow の直前で最小となつている(第1図)。ただ吃水が無限に深い場合だけは特別で last hump を過ぎてしばらくは少々減少を示し、以後速度と共に増大してゆく。また一般に抵抗変化の振幅は低速ほど小さく last hollow および last hump の前後で最大となつている。

$b/L$	2	1.5	1	0.75
$V\sqrt{Lg}$	—	0.50	0.34	0.25

いま  $T/L=0.1, 0.2$  に対して側壁の存在による造波抵抗変化の率が  $\pm 2\%$  以内に止まるフルード数の上限を求めてみると、次表の如くなる。従つて、造波抵抗のみを問題にする場合、

実験結果を考慮しても、従来の試験水槽において慣用されてきた水槽幅に対する基準<sup>(7)</sup> ( $V/\sqrt{Lg} \leq 0.35$  に対し  $b/L \geq 1.5$ ) は水深が充分深い場合には少しく安全側にあり過ぎるやうに思われる。

3° 吃水が浅い程側壁影響は少い。このことは高速において特に明瞭である。

4° 実験によつてえられた側壁影響は理論による結果よりも大きく出た。それは主として船尾によつて反射波が破壊されることに基づくものと考えられる。また理論と実験との位相のズレは粘性の影響を考慮すれば説明できる程度である。(以上)

## 文 献

- (1) 山県昌夫：試験水槽の側壁が模型船の抵抗に及ぼす影響に関する一考察 造船協会会報 47 (1931).
  - (2) HAVELOCK, T.H. ; The theory of wave resistance, Proc. Roy. Soc. 138 (1932).
  - (3) SRETENSKY, L.N. : On the wave-making resistance of a ship moving along in a canal, Phil. Mag. Vol, 22 (1936).
  - (4) HAVELOCK, T.H. : The calculation of wave resistance, Proc. Roy. Soc. 144 (1934).
  - (5) HAVELOCK, T.H. : Wave patterns and wave resistance, TINA, 76 (1934).
  - (6) 乾 崇夫：正しい船型条件による造波抵抗理論 (第2報), 未発表
  - (7) 山県昌夫：船型試験法 (1937).
-