

(昭和 28 年 11 日造船協会秋季講演会に於て講演)

# Gravity Dynamometer による波浪中抵抗 試験及び Surging について

正員 工学士 元 良 誠 三

## Abstract

On Measuring of Ship's Resistance in Waves by Gravity Dynamometer Method, and Surging of Ship in Waves.

By Seizo Matora, *Kogakushi, Member*

In measuring ship's resistance in waves, the method of connecting the model to the dynamometer is found to be a difficult matter.

If they were connected rigidly, the dynamometer would be acted by a force over ten times the mean resistance of the model, and if springs were put there as a buffer, the natural period of the system might become so long as to synchronize with the period of the waves.

The Author thinks the gravity dynamometer method, that has been used at the Hamburg experimental tank, and which was suggested to be used at the Sixth International Conference of Ships Tank Superintendents, is a very clever method, because it allows ship to surge freely, and satisfies the condition of constant thrust.

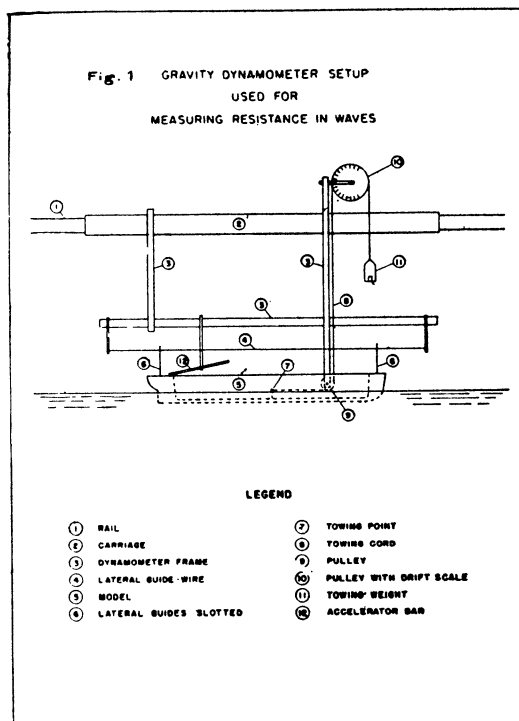
An experiment was done at the experimental tank of Tokyo University with a model of the S. S. Nisseimaru.

Two devices, one for recording the motion of the model thereby making it possible to measure the mean speed and the surging of the model, and the other for eliminating the effect of acceleration of the weight by reducing the ratio of pulleys, were made at the experiment.

波浪中の船体抵抗を測定するに際して、模型と抵抗動力計との連結をどの様にするかと云う事は極めて難かしい問題で、若しこれを固着すると船に加わる一波毎の Surging force が天秤に直接掛つて来る為、平均抵抗の 10 数倍に達する力を受ける事になり、且つ船は波に対して実際より激しく衝突するので平均抵抗其の物も実際より大きくなる事が予想される。

又 buffer として適当な spring を挿入する事が考えられるが spring の為系の固有週期が波週期に近くなつて同調を起す可能性が出て来るので、十分な buffer となる程の弱い spring は用いられない。

Hamburg 水槽で従来用いられ、最近も第 6 回国際水槽主任者会議で Experimental Towing Tank により提案された Gravity Dynamometer Method, 即ち重錘により推力を与える方法は船の surging を自由に許し、且推力一定の条件を略々満す点で勝れていると思われるので、従来の方法に多少の工夫を加え



て東大水槽で実験を行つて見た。

§1. 装置概要

Fig. 1 は Experimental Towing Tank で行われている方法のスケッチである。

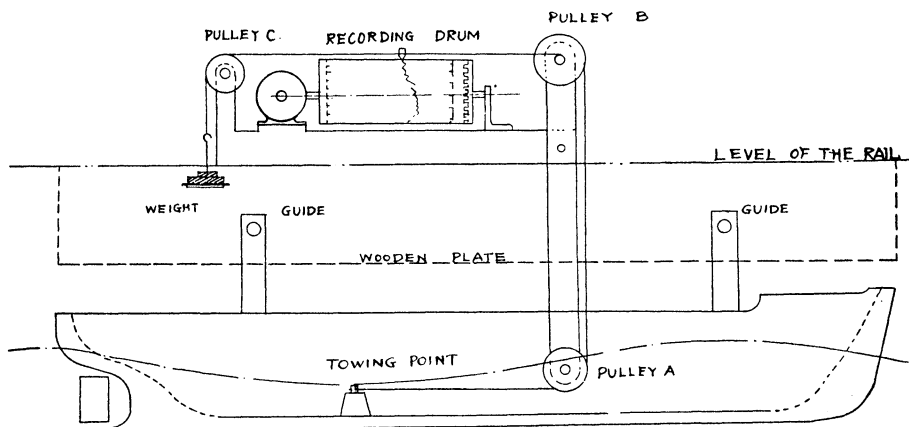
Towing point より紐を出し滑車⑨により上向きに方向を変え、更に滑車⑩を経て重錘⑪を掛ける。⑪の重さと船の平均抵抗が釣り合う速度で船が走るわけである。

電車の速度より模型速度が早いか遅いかすると滑車⑩は徐々に回転する。

滑車⑩に目盛を附し、一定時間 (10 秒) 中の滑車の回転から模型の電車に対する速度を出し、之を電車の速度に加減して模型の速度を得る。その速度に於ける平均抵抗が重錘の重さに等しいわけである。

この方法で工合の悪いと思われる点が二つある。

Fig 2 GRAVITY DYNAMOMETER SETUP  
USED FOR  
MEASURING RESISTANCE IN WAVES.



GUIDE OF MODEL DESIGNED BY Y KIKUCHI

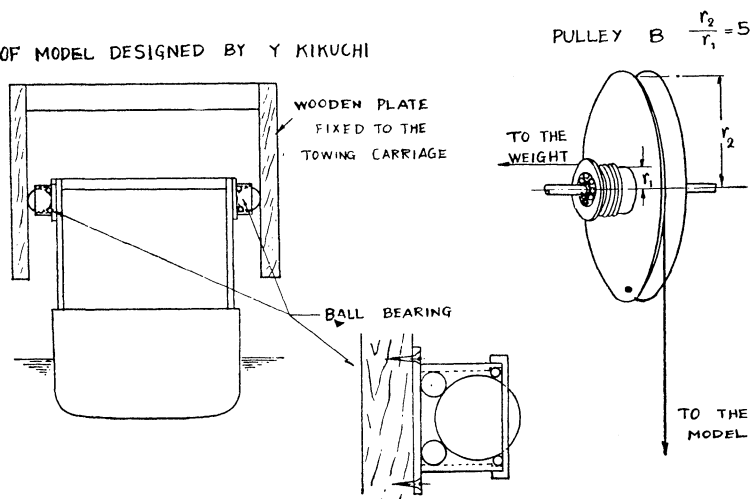
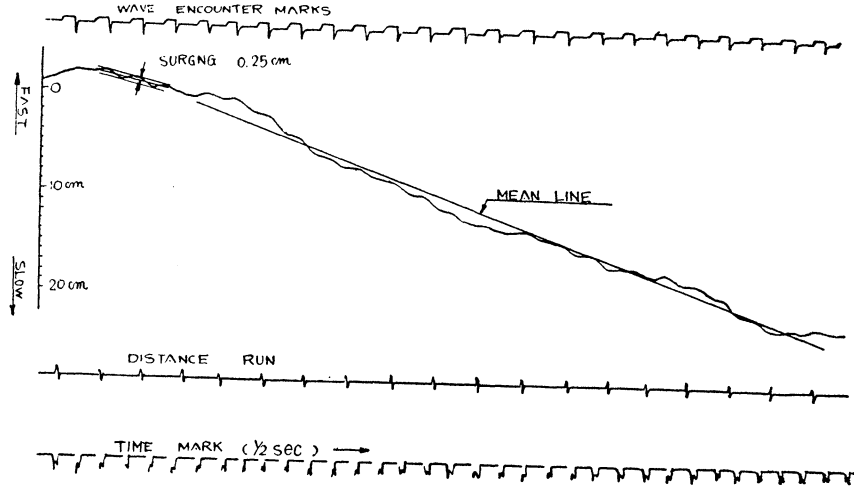


Fig 3. EXAMPLE OF SOME TYPICAL RECORDS.

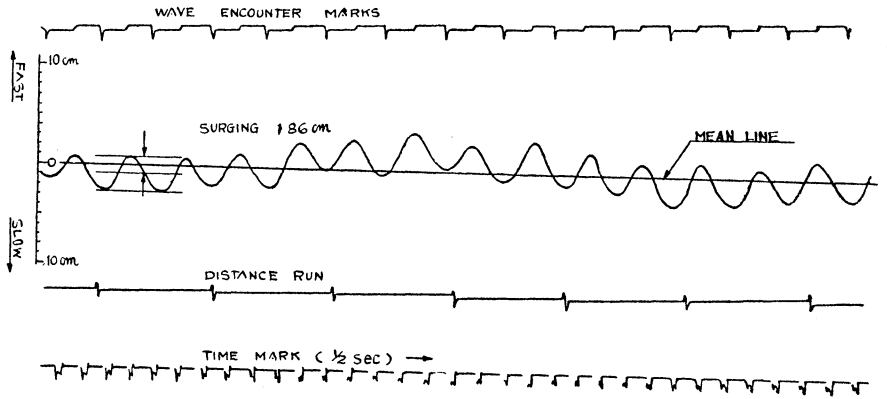
EXP NO 11

WAVE LENGTH  $\lambda = 2000$  m  
 MODEL SPEED  $V = 1.125$  m/sec  
 WEIGHT  $W = 3300$  mg  
 RESISTANCE  $R = 0.660$  kg  
 PERIOD OF ENCOUNTER  $T_e = 0.69$  sec



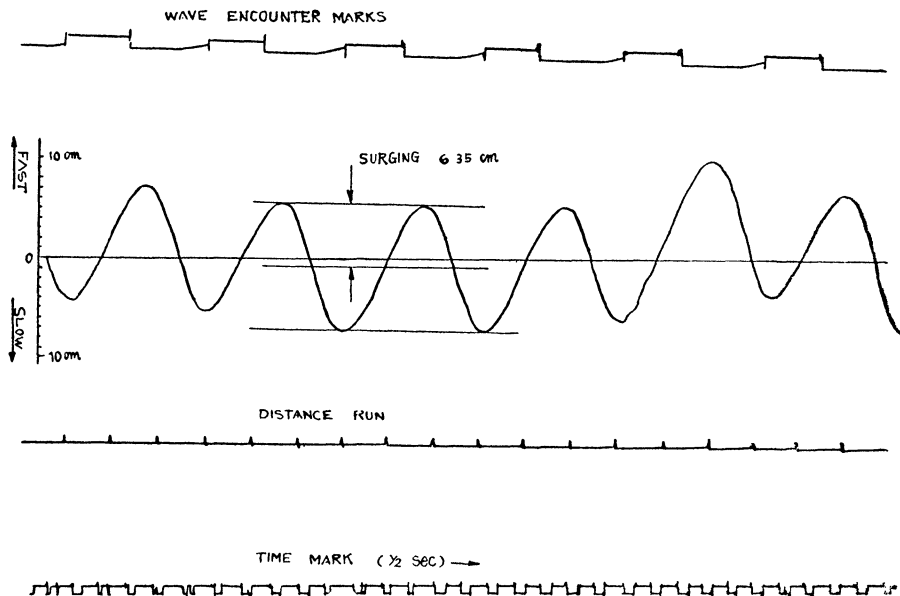
EXP NO 29

WAVE LENGTH  $\lambda = 3.000$  m  
 MODEL SPEED  $V = 0.427$  m/sec  
 WEIGHT  $W = 2500$  mg  
 RESISTANCE  $R = 0.500$  mg  
 PERIOD OF ENCOUNTER  $T_e = 1.15$  sec



EXP NO 21

WAVE LENGTH  $\lambda = 3.000$  m  
 MODEL SPEED (WITH WAVE)  $V = 1.097$  m/sec  
 WEIGHT  $W = 2500$  kg  
 RESISTANCE  $R = 0.500$  kg  
 PERIOD OF ENCOUNTER  $T_e = 2.716$  sec



一つは滑車⑩の回転で模型の電車に対する平均速度を読む事である。即ち模型は絶えず surging を行いつつ走るから滑車は行きつ戻りつして中々平均速度が求められないのと、電車の速度と釣合速度が異なる場合クランプを外しても、模型は直ちに進み又は遅れを生じないで徐々に加速されて行くからである。

そこで今回は Fig. 2 に示す如く糸を水平に張つてその先に別の滑車を経て重錘を掛け、糸の動き、即ち船の動きを回転円筒に記録し、時間、電車の走行距離、波との出合時間等を同時に記録し、その記録より模型の平均速度を求める様にした。この記録の一例は Fig. 3 に示す如くである。

尙この記録は後述の意味もあつて、船の動きを滑車で  $\frac{1}{5}$  に落して記録してある。

他の一つの点は、船の重錘が直結されている為船の surging が直接重錘に伝わつて、上下運動を起し、その加速度によつて重錘の重さ、即ち船に加わる推力に多少の変動を生じる結果、この方法の長所の一つである推力一定の条件が崩れるわけである。この点に関しては Fig. 2 の如く副滑車Bを用いて比率を変える事によりこの影響を少くした。

即ち船の surging の振幅を  $a$ 、週期を  $T$ 、錘りの重さを  $W$  とすると

直結の時 平均推力 =  $W$

$$\text{に対し変動推力は } \frac{W}{g} \times \text{加速度} = \frac{W}{g} \times a \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2$$

一方滑車Bで糸の動きを  $1/k$  をとすると、錘りの重さは前の  $k$  倍となり

平均推力 =  $W$

重錘の重さ =  $kW$

$$\text{重錘の重さの変動 } \frac{kW}{g} \times \frac{a}{k} \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 = \frac{Wa}{g} \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2$$

之が滑車Bを経て  $1/k$  となつて模型に伝わるから推力変動は  $\frac{1}{k} \frac{W}{g} a \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2$

即ち滑車比  $1/k$  を小さくする程推力の変動は少くなる。

今回は  $k$  を5に取つて実験を行つた結果、推力変動は、1% 以内に収める事が出来た。

## §2. 記録例

Fig. 3 は日聖丸の 2.5 m 木製模型についての実験例である。

Exp. No. 11 は波長 2 m、迎波の場合で surging は小さい、この場合には重錘が少々軽いため模型は電車より遅れている。波の極めて小さな不規則性や電車速度の不釣一が影響して surging 以外に模型の電車に対する相対速度は多少長週期で変動している。大体相対速度一定と見られる範囲で平均線を引き、一定時間中の移動距離から電車に対する模型速度を出し、之を電車速度に加減して模型の対水速度を求める。

Exp. No. 29 は波長 3 m、迎波の場合で surging はかなり大きくなつて居る。この場合は重錘が丁度釣合つて模型は surging をしつつ電車と略々同一速度で進んでいる。

Exp. No. 21 は波長 3 m、追波の場合で surging が極めて大きくなつて居る。

## §3. 日聖丸模型による実験例

Fig. 4 は日聖丸 2.5 m 模型につき波長 2 m, 3 m の波に対し夫々迎波、追波の時の抵抗を測つたものである。船の動揺週期と波週期の一致する附近で著るしい抵抗増加が認められ、又追波では迎波に較べて格段に抵抗が少く船速の小さな所ではむしろ推力になることがある。

## §4. 誤差の検討

a) 滑車及びガイドの摩擦

滑車Aは荷重が少いので摩擦が少ないが、滑車Bは荷重が抵抗の5倍になるので多少の摩擦は免れない。又ガイドも Fig. 2 の如くボールが平行な平板に接触して方向を保つ様になつて居るので多少の摩擦がある。

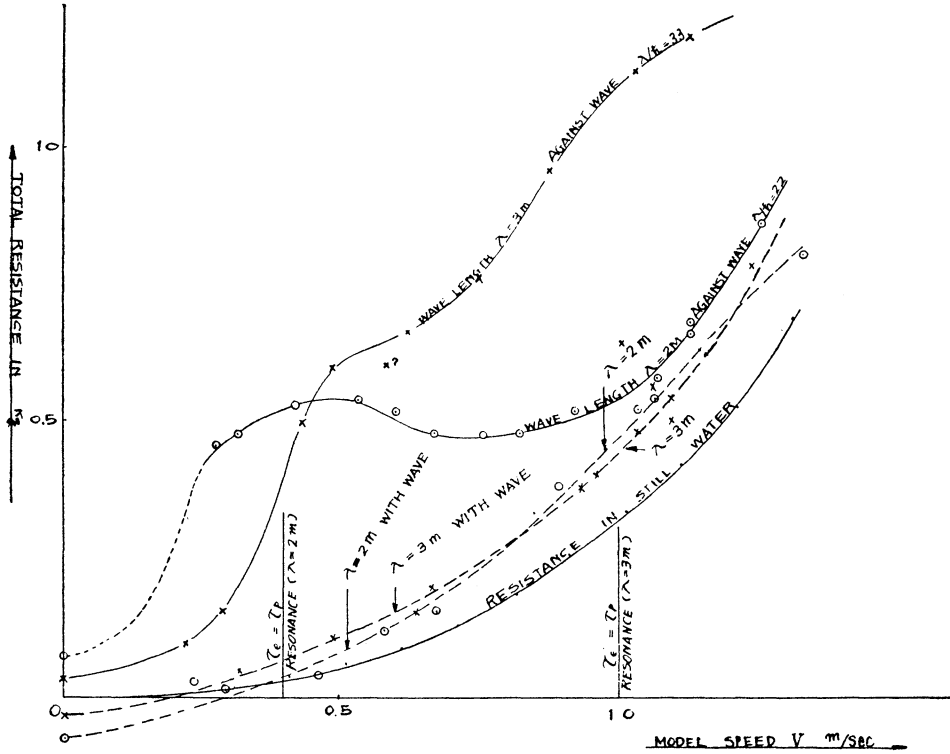
これ等の摩擦を  $\Delta R$ 、平均抵抗を  $R$ 、重錘の重さを  $W$  とすると

模型が電車より進む時  $W/k = R + \Delta S$  over estimate

“ “ 遅れる時  $W/k = R - \Delta R$  under estimate

Fig. 4 Model Experiment of S. S. Nissei-Marui in Waves by the Gravity Dynamometer Method.

Model Length(pp)	2.500 m	Scale ratio $1/51.2$	○— $\lambda = 2$ m	} AGAINST WAVE
// Displacement	97.862 kg		—x— $\lambda = 3$ m	
Full Load Condition			○- - $\lambda = 2$ m	} WITH WAVE
Natural Pitching Period	.94 sec		- -x- $\lambda = 3$ m	



となるわけであるが、実際は絶えず surging とするので、一相殺して誤差は減少する。

この関係を Fig. 5 に示す。即ち Fig. 5 (a) は模型が電車と同一速度で進む場合で、模型が surging により進む時間と遅れる時間とが等しい為に摩擦力  $\Delta R$  は +, - 相殺して平均抵抗としては誤差が這入らない。Fig. 5 (b) は模型が徐々に進む場合でこの場合は、進む時間が遅れる時間より長くなる為  $\Delta R$  が + の誤差として這入ってくる。

この進みと遅れの時間の差は Fig. 5(c) の如くして求められる。

即ち surging の週期 = 出合週期 =  $\tau$

模型と電車の相対速度 =  $\Delta V$  (進む時を正), surging の振幅 =  $a$

とすると, Surging の曲線を平均線より  $\tau \Delta V / 2\pi$  寸下の平行線で切った時の交点が夫々進み, 或は遅れの時間を表す。従つて  $a < \tau \Delta V / 2\pi$  となると摩擦力  $\Delta R$  は全面的に誤差として這入ってくる事になる。

今この様な範囲の  $\Delta V$  を数例について求めて見ると, Table. 1 の様になる。

航行中に weight を加減して  $\Delta V$  をこの範囲内に収めることは, 慣れて来ればさして困難ではない。

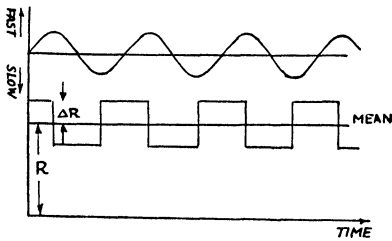
尙  $\Delta R$  がどの程度であるかを知るために静水中の模型の抵抗をこの方法で測り, 模型が進む時と遅れる時と二通りについて実験を行つたのが Fig. 6 である。進む時は  $\Delta R$  が + に効き遅れる時は  $\Delta R$  が - に効くから, 二系統の抵抗曲線の差が  $2\Delta R$  となるわけである。Fig. 6 によると  $\Delta R$  は大体 10 gr 程度である。

尙 Fig. 6 には磁歪式動力計で測つた抵抗値が記入してあるが Gravity Dynamometer で測つたのと低速で

Table. 1

$\lambda$	$\tau e$	$a$	$\Delta V(\tau \Delta V / 2\pi = a)$
2.0	1.16	0.75 cm	0.0407 m/sec.
	0.70	0.25 cm	0.0202 m/sec.
3.0	1.37	2.25 cm	0.107 m/sec.
	0.90	0.50 cm	0.0349 m/sec.

Fig. 5 (a)



差があるのは、後者の実験までに二ヶ月程経っていて模型表面にひび割れを生じて居た為と思われる。

b) 重錘の上下による推力変動

重錘が上下する為の推力の変動は、平均抵抗には何らの誤差も与えないが、推力一定と云うこの方法の最大の長所に対して誤差を生ずる事となる。

Surging の振幅を  $a$ 、週期を  $\tau$  とすると重錘の加速度にする推

Fig. 5 (b)

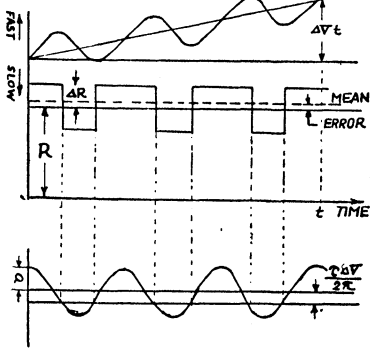


Fig. 5 (c)

力変動は、

$$\alpha = \frac{1}{5} a \left( \frac{2\pi}{\tau} \right)^2 \quad \left( \frac{1}{5} \dots \text{滑車比} \right)$$

これを実測値より計算して見ると

Table. 2

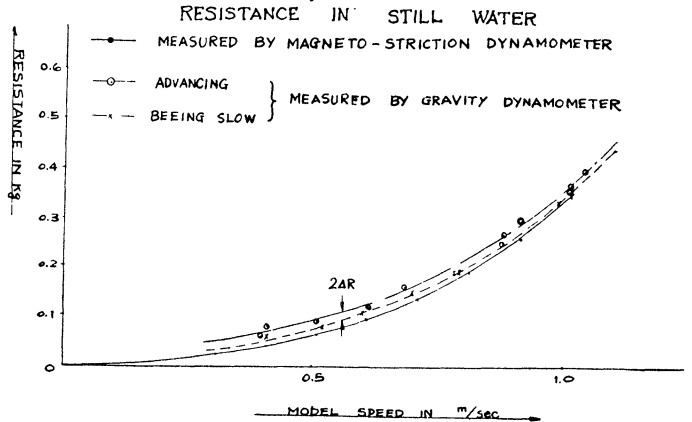
波 長	波長/船長	surging 振幅	出合周期	加 速 度
2 m	0.8	0.75 cm	1.16	4.41 cm/sec <sup>2</sup> = 0.45%g
		0.25 cm	0.70	4.02 // = 0.40
3 m	1.2	2.25 cm	1.37	9.05 // = 0.97
		1.50 cm	0.90	4.88 // = 0.50
		1.50 cm	0.90	4.88 // = 0.50

従つて重錘が上下する為の誤差は抵抗の 1% 以内である。

この推力一定の条件は surging を自由にし、従つて pitching heaving 等を成可く自然の儘にする目的であるが実船では推進器の推力が波の為に変動する事を考えると、この程度の誤差は問題にはならない。

§5. Surging の量及び性質

Fig 6



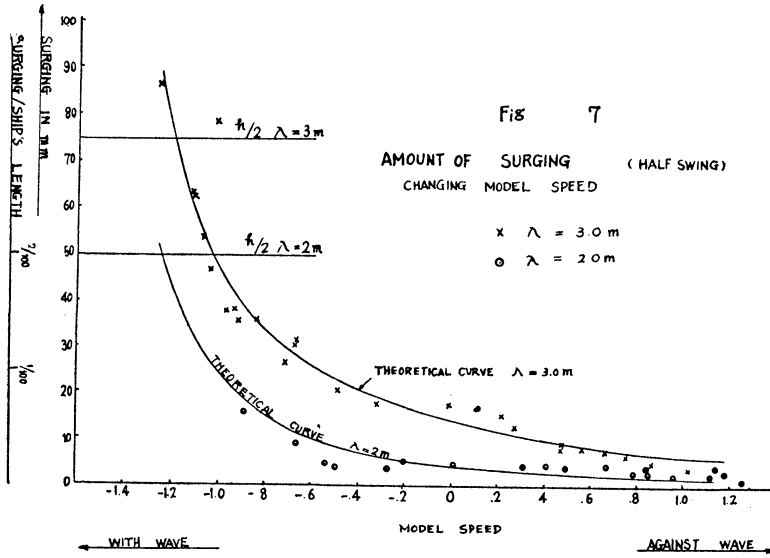


Fig 7

AMOUNT OF SURGING ( HALF SWING )  
CHANGING MODEL SPEED

x λ = 3.0 m  
o λ = 2.0 m

$V$ , 波長を  $\lambda$ , 波週期を  $\tau_w$  とすると

$$\text{surging の振幅は } a = a_0 \left( \frac{\lambda}{V_w + V} \right)^2 / \tau_w$$

$a_0$  は船速 0 の時の surging 振幅

となる。この式は surging force が船速及び surging の振幅に拘らず一定とした点で誤差がある事が予想されるが、Fig. 7 で見ると非常によく実験値と合致する事が判る。

b) 波高の影響

波長を一定とし、船速一定 = 0 とした時波高の影響を調べた結果が Fig. 8 である。surging の量は波高に比例して殆んど直線的に増加して居る。又平均抵抗は略々波高の二乗に比例し Havelock の理論を合致する。

c) 波長の影響

波長対波高を一定に保ち、波長を変化させると Fig. 9 の如くなる。図は波高対波長 1/20 の波について波長を変化したもので大体波長対船長が 1 を超えると急激に surging が大きくなる。之は surging force が船体位置に於ける浮力の前後方向の成分、即ち波傾斜を積分したものである事を考えると容易に予想される性質である。

Fig. 9 中の曲線は図示の如き  $\eta = 1 - \xi^4$  なる prismatic curve を有する船について surging の振幅を理論的に求めたものであつて実験値とかなりよく合致する。その計算は附録に示してある。

d) Surging の位置

Surging の位相は波長対船長の比によつて変化する。波頂線が艀を通過する瞬間の surging の方向を図示したものが Fig. 10 である。Fig. 10 は種々の長さの波につき丁度波頂が艀に来た時の surging speed の位相と船尾に於ける波の orbital motion の水平の speed の位相を求めたものであるが、之より見て、大体船の長さと同程度の波では surging による対水速度と波の orbital motion による speed とが船尾に於ては丁度方向が同じとなり両者が加わる方向にある事が判る。この事は推進器の slip が波浪中では大巾に変動する事を意味し、荒天中の馬力損失の一因が surging による推進効率の低下にある事も考えられる。

今 2, 3 の例につき船尾に於ける流速の変動を求めて見ると、Table. 3 の如くなる。

a) 出合週期との関係

Surgingの量は迎え波では出合週期が短い為に余り大きくなく、追波では出合週期の延長と共に大きくなって模型速度が波の速度に近づく時、極めて大きくなって波の orbital motion の振幅 (1/2 波高) を超える場合が出て来る。

この関係を Fig. 7 に示す。図中の曲線は出合週期 (船速) に拘らず surging force が一定なものと考えて計算した理論値である。即ち、波速を  $V_w$ , 船速を

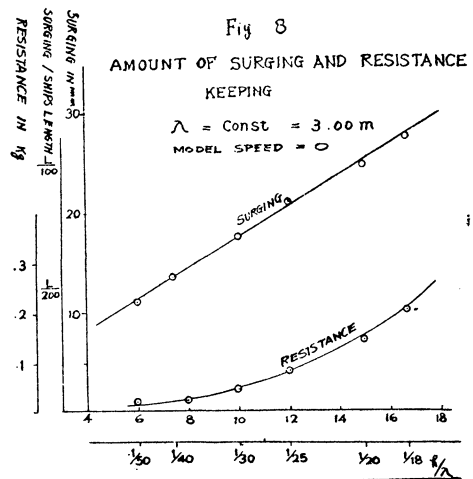


Fig 8

AMOUNT OF SURGING AND RESISTANCE  
KEEPING

λ = Const = 3.00 m  
MODEL SPEED = 0

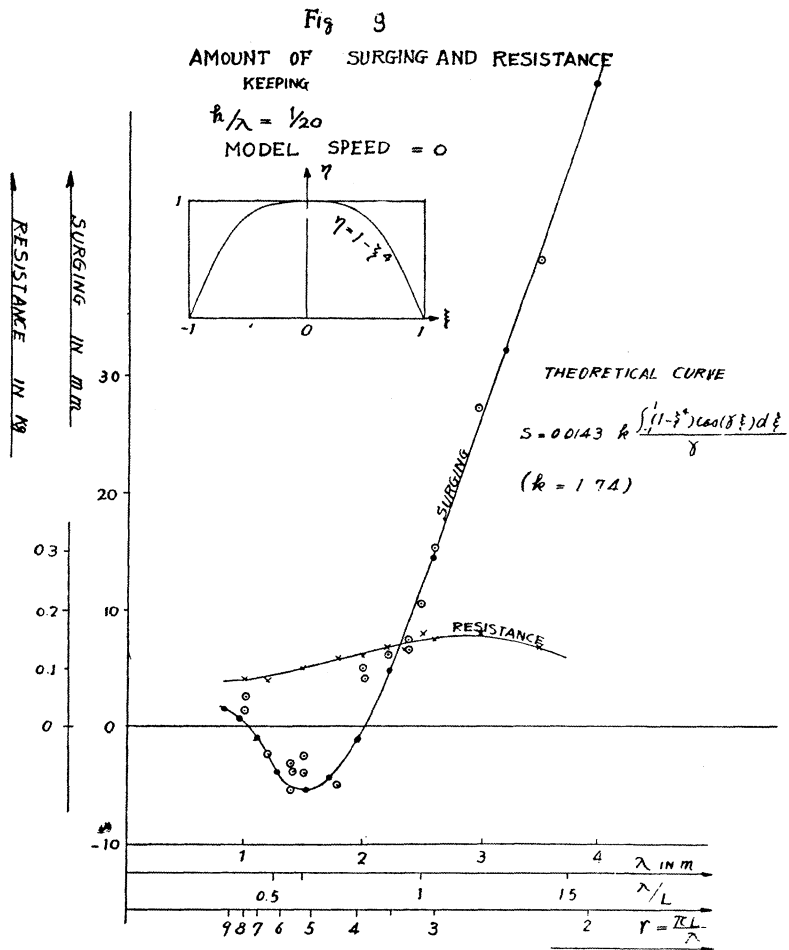


Table. 3  $\lambda=3.0\text{ m}$   $h/\lambda=1/20$

実船速度 $V_s$	模型速度 $V_m$	surging 振幅 $a$	surging speed	波の orbital motion の speed	合成速度/船速
8 kts	.575	1 cm	.0562 m/sec.	.163 m/sec.	38 %
13	.934	.6	.040	"	21.7
-13(追波)	-.934	3.8	.040	"	21.7

Table. 3 は波長 3 m 即ち波長/船長=1.2 波長/波高=1/20 と云う極めて steep な波についてであるから実際はこれ程迄の変動はないかも知れないが、低速では propeller の slip がかなり変動し、従つて効率が大巾に低下する事が考えられる。

昨年の日聖丸実船試験の記録を見ても torque が大巾に変動し、或る場合には negative torque を生じて居る事もあるがその変動の主要原因として、上記の様な事が考えられる。

### 附 録 Surging の理論的解析

#### §1. Surging force の計算

Fig. A-1 に於て

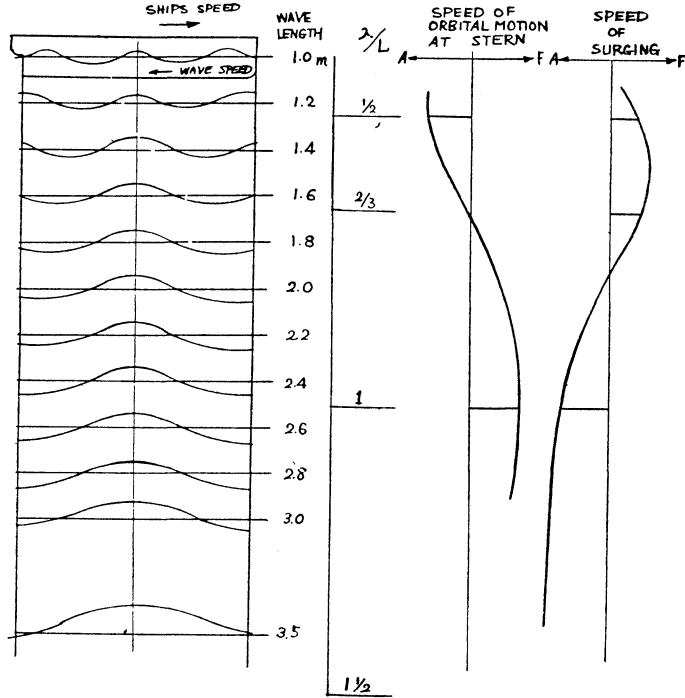
翼を原点として前後方向を  $x$  軸、垂直上方を  $y$  軸とする。今波の形を

$$y = r \cos \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \tag{1}$$



Fig. 10

RELATION BETWEEN PHASE OF SURGING AND WAVE LENGTH



但し  $r=h/2=$ 波高/2  
 $c$ …波の速度 } とする。  
 $\lambda$ …波長

波傾斜は

$$\tan \theta = \frac{dy}{dx} = k \cdot r \frac{2\pi}{\lambda} \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \quad (2)$$

Surging force は、或位置に於ける船体の一部に働く水圧の前後方向の分力を積分したものである。

今船の断面積の分布を

$$\eta = f(\xi) \quad (3)$$

で表わす。但し  $\xi$  は  $x$  軸方向で  $\xi = \pm 1$  が  $x = \pm L/2$  に相当するものとする。

即ち

$$\xi L/2 = x \quad (4)$$

又  $\eta$  は各場所に於ける水線下断面積の中央横断面に対する比で

$$\eta = 1 \text{ は } A_{\text{中}} \text{ を表わすものとする。}$$

然る時は断面積  $\eta$ 、長さ  $d\xi$  の部分に働く水平力は

$$dF_s = \rho g A_{\text{中}} \eta k \cdot \tan \theta d\xi = \rho g A_{\text{中}} k r \frac{2\pi}{\lambda} \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \eta d\xi \quad (5)$$

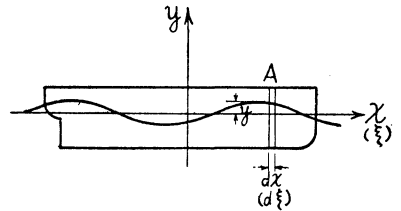
但し  $k$  は有効波傾斜係数である。

更に  $\xi L/2 = x$  なる関係を入れ、

$$\pi L/\lambda = \gamma \text{ と置くと} \quad (6)$$

$$dF_s = \rho g k r \gamma A_{\text{中}} \eta \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{\xi L}{2} - ct \right) d\xi \quad (7)$$

Fig A-1



之を  $\xi$  につき積分すれば surging force が求められる。今  $\eta$  は  $\xi$  の土に對し対称であると考え、又  $\frac{2\pi c}{\lambda} = \omega$  とすると (7) 式は

$$F_s = \rho g k r \gamma A_{\text{水}} \sin \omega t \int_{-1}^1 \eta \cos \gamma \xi d\xi \tag{8}$$

§2. Surging の振幅

Surging の振幅により surging force が変化せぬものと考え、更に surging に対して抵抗が無いものとするれば

$$\text{surging 振幅 } a = \frac{|F_s|}{m'} \left( \frac{\tau}{2\pi} \right)^2 \tag{9}$$

但し  $m'$ …船の質量 (見積質量を含む)  $\approx 1.1 m$

$\tau$ …出会週期

(8)式を(9)式に代入して  $m = \rho A_{\text{水}} L \cdot C_p$  を代入すると

$$a = \frac{k r \gamma g}{1.1 L C_p} \left( \frac{\tau}{2\pi} \right)^2 \int_{-1}^1 \eta \cos \gamma \xi d\xi \tag{10}$$

実験値と比較する為、静止時に種々の波長の波が当る場合を計算して見ると

$$\left. \begin{aligned} \text{波高} &= 2r = \lambda/20 \\ \text{出会週期} &= \text{波週期} = 0.8\sqrt{\lambda} \text{ sec.} \\ C_p &= 0.73 \end{aligned} \right\} \text{を代入すると,}$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{k g \times 0.8^2}{1.1 \times 40 \times 0.73 \times 4} \gamma \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot L \int_{-1}^{+1} \eta \cos \gamma \xi d\xi \\ &= 0.122 k \frac{\int_{-1}^1 \eta \cos \gamma \xi d\xi}{\gamma} m. \end{aligned} \tag{11}$$

船型を定める  $\eta = f(\xi)$  として一般に  $\xi$  の多項式で表わせば積分は結局  $\int_{-1}^1 \xi^n \sin \gamma \xi d\xi$  の形になる。

G. Weinblum<sup>(1)</sup> の論文にはこの積分の数表が掲げられているので其数値を用いて計算する。

今船型として

$$\eta = (1 - \xi^4) \tag{12}$$

を用いれば、次表の如くなる。之と Fig. 9 の実験値とを比較して見ると  $k = 0.948$  と探ると大体よく合致する事が判る。

$\lambda$	$\gamma$	$\frac{\int_0^1 (1 - \xi^4) \sin \gamma \xi d\xi}{\gamma}$	$a$ (11 式による)	$k = 0.948$ とせる時の振幅 $a$
3.93	2.0	.237	.0578	.0548
3.1416	2.5	.1332	.0325	.0308
2.61	3.0	.0638	.0156	.0148
2.245	3.5	.0211	.00515	.00488
1.965	4.0	-.00552	-.00135	-.00128
1.743	4.5	-.0193	-.00471	-.00447
1.570	5.0	-.0250	-.00610	-.00578
1.425		-.0223	-.00544	-.00516
1.310	6.0	-.0172	-.00420	-.00398
1.205		-.0112	-.00273	-.00259
1.120	7.0	-.00457	-.00112	-.00106

1) G. Weinblum and M. St. Denis, "On the Motions of Ships at Sea" T.S.N.A. & M.E. 1950.