

船舶の沈没機構の実験的研究

吉野泰平* 菅 信* 山本徳太郎*

Experimentary Study on the Mechanism of Sinking of the Ship

By

Taihei Yoshino, Makoto Kan and Tokutaro Yamamoto

This is report of study pursued through model-ship experiments. Through these experiments the authors have come to know : in what posture and at what speed a ship falls down through the water, when it sinks by damage.

At the beginning of the sinking, the posture and the sinking speed of a ship depends very much upon the position and the size of the flooding compartment of the ship. However, by the time a ship sinks four times as deep as the overall length of the ship, it comes to make nearly the same posture as it makes while floating, and its sinking speed becomes stable.

The authors have also got the following result: the posture of a sinking ship and its underwater weight are important factors for a sinking speed to be decided.

1. まえがき

本研究は原子力船の損傷時における沈降姿勢ならびに沈降速度を解明し、沈没時の原子炉コンテナの圧壊を防止するための圧力平衡弁設計の基礎資料をうるために行ったものである。

船の沈没に関する資料は非常に少なく、それも浸水時の復元性或いは最終沈降速度の試算等で、水没直後の状態をみつかったものが見当たらない。本研究の目的からは此の部分が最も重要と思われるのであるが、こ

の部分は極めて複雑で、計算により求めることは不可能に近いと考えられるので、実船の相似模型による実験により沈降姿勢と沈降速度とを求めてみた。この結果は一般船舶の他の目的にも役立たせうと思われるのでここに報告する。

2. 実験の概要

実験は当部の動揺水槽において行った。図-1に示すように、水深3.7mの水槽に原子力船の相似模型を損傷位置ならびに浸水範囲を種々変えて沈没させ、その

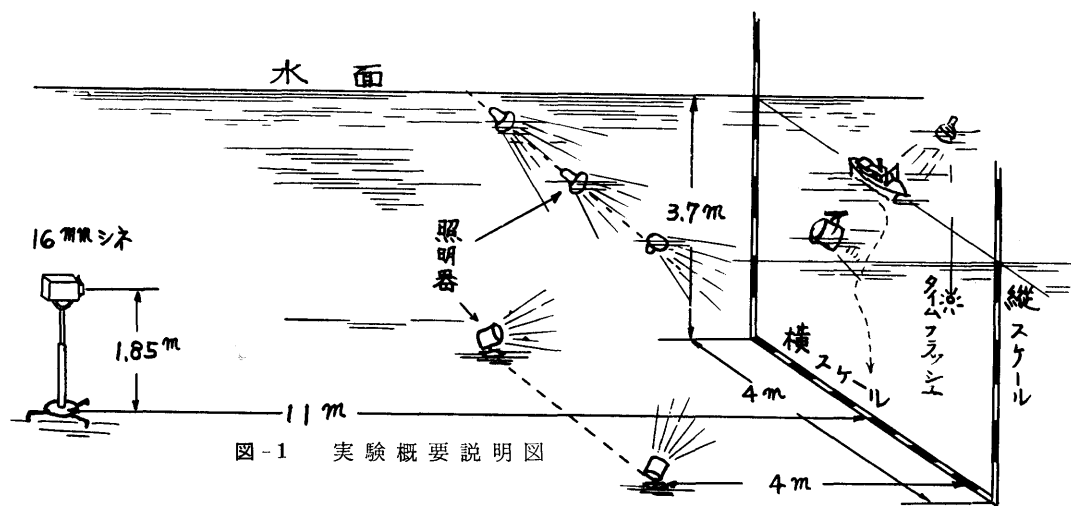


図-1 実験概要説明図

* 運動性能部

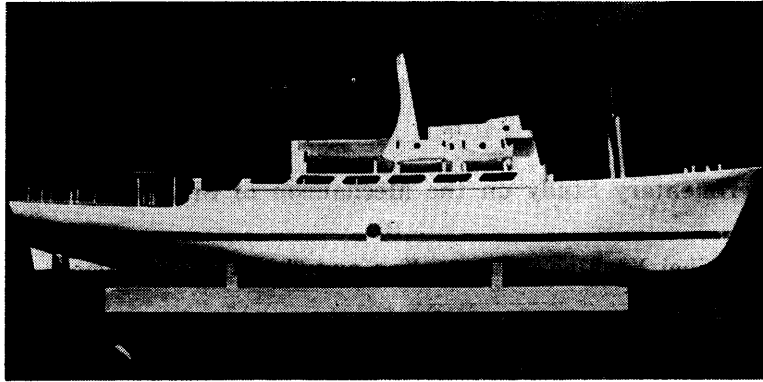


写真-1 模型船側面 (吃水線中央部の●印は重心位置)

状態を水中に設けた16mmシネにて撮影し、後でスクリーンに投影解析した。撮影に際しては模型船とともに較正用スケール、および1秒毎に閃光を発するランプを写し込んでおき、1秒毎の船の位置や姿勢がわかるようにした。

3. 模型船

実験に使用した模型船は原子力第一船(観測船)の基本設計第4次案にもとづき、0.3mm厚の真鍮板をろう付して作ったもので、その主要目は次のようである。

	模型船	実船
縮尺	1/126.7	
全長	985mm	124.31m
垂線間長	900mm	114 m

全 巾	150mm	19 m
深 さ	80mm	10 m
吃 水	52mm	6.9 m
排 水 量	4.45kg	9,270 ton

3.1 構造

模型船は写真-1に見られるように、一般配置図に基づき出来るだけ実船に相似になるよう、マスト、デリック、救命ボート、推進器、舵等も取付けた。吃水線中央部の●印は船の重心位置を示し、フィルムを映写解析の際、重心は船の位置を、吃水線は船の姿勢を計測する目標とした。

模型船のフォクスルデッキからは自由に浸水しうよう窓穴を開け、それ以下は水密構造になっている。図-2は構造の概略を示したもので、フォクスルデッキ以下は9枚の横隔壁で10区画に別け、各隔壁には

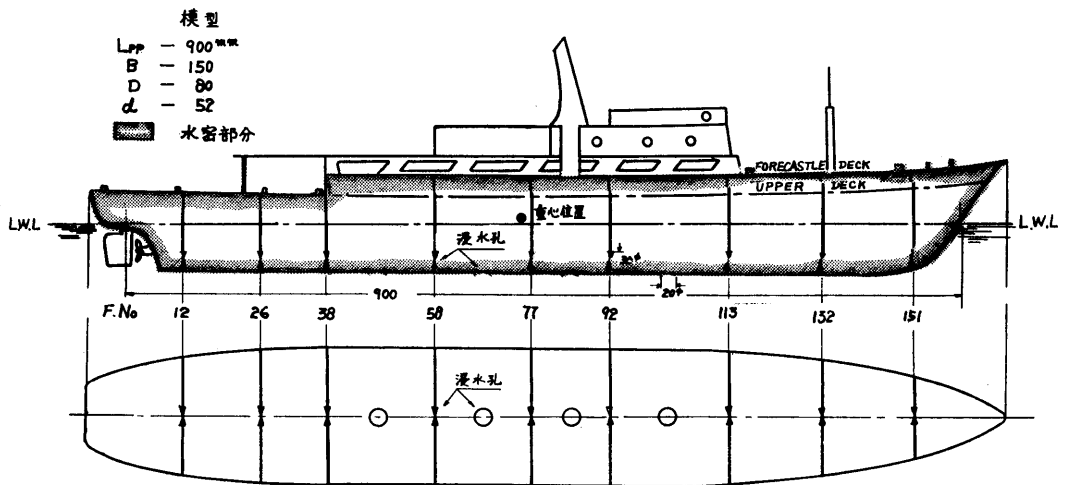


図-2 模型船構造略図

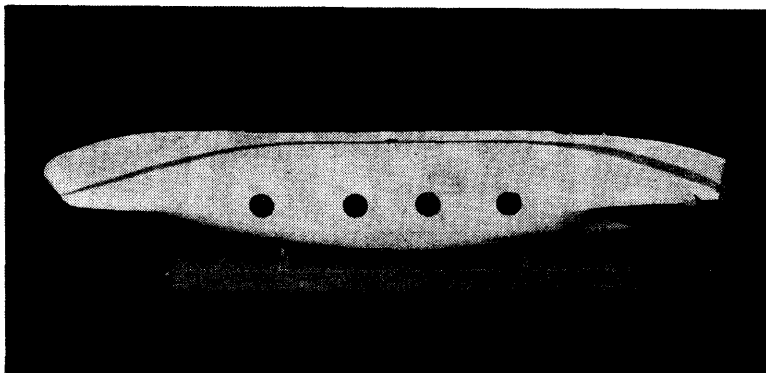


写真-2 模型船船底の浸水孔

船底に接して 30mmφ の開閉出来る孔が設けてある。天井には実船の換気孔に相当する通気管を甲板まで通した。No. 4~No. 7 の区画には 船底の中心線上に 20mmφ の開閉出来る浸水孔が設けてあり、その外側に 30mmφ の外蓋が嵌め込まれている。写真-2は船底の写真で、浸水孔の外蓋は外してある。

3. 2 浸水率, 重心

模型船は外観, 水密隔壁の位置, 重心の位置ばかりでなく, 浸水率, 重量分布等も基本設計案に基づいて出来るだけ実船と相似になるようにした。荷重は鉛の散弾を油粘土で粘り固めたものを用い、浸水率は荷重の外にフドーレオン (発泡体比重約 0.017) を図-3および表-1に示すように配置して調整した。写真-3は荷重および浸水率調整後の船体内部を示したもので、浸水孔は開いている。

3. 3 沈没方法

模型船は実験計画に基づいて船底および隔壁の浸水孔を適当に開閉しておき、船底の浸水孔には更に外蓋を油粘土で軽くはり付けておいて水面に浮べ、外蓋に付けた糸を下に引落して浸水沈没させた。No.1~3および No.8~10区画への浸水は隔壁の浸水孔を経て浸水させた。

4. 実験の種類

実船のアップパー・デッキまでの復元力計算では 2区画浸水では沈没しないことになっているので、実験は相隣れる 3区画乃至10区画浸水による沈没につき沈没姿勢と沈没速度を求めることにしたが、模型船の水密構造がフォクスル・デッキまでとした (実船も同様とは思われる) 故か、隔壁の水密が完全な場合は 6区画浸水でも沈没しない場合が生じ、4区画浸水では沈没

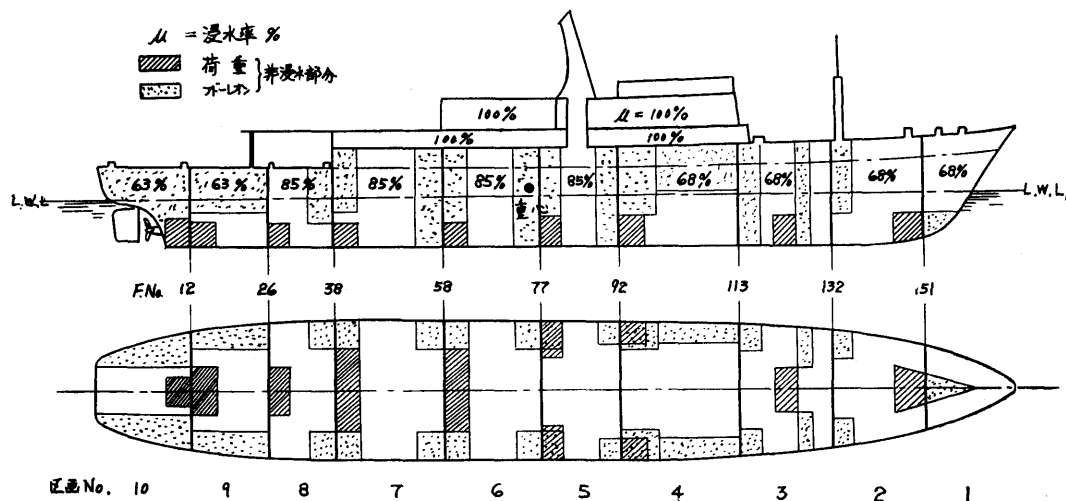


図-3 浸水率及び荷重, 非浸水部配置

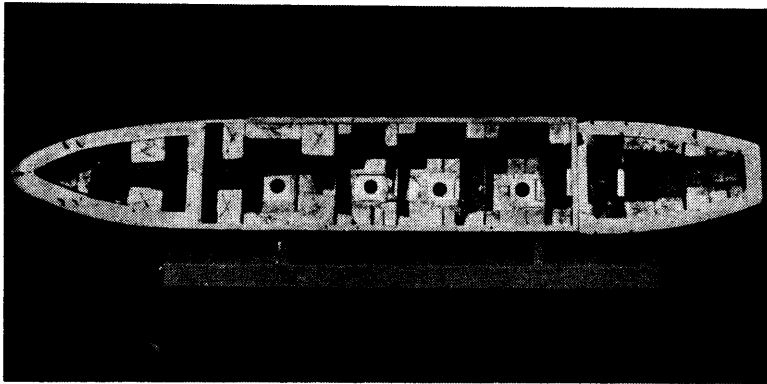


写真-3 模型船船体内部（荷重，浸水率調整後の状態）

表-1 荷重および浸水率配置

区画 No.	区画容積 実測値 cc	荷重 g	非浸水容積 cc	浸水容積 cc	浸水率 %
1	203	—	65	138	68
2	708	200	226	482	68
3	1227	100	393	834	68
4	1700	200×2	544	1156	68
5	1220	100×2	183	1035	85
6	1663	200	250	1413	85
7	1615	300	242	1373	85
8	600	100	90	510	85
9	510	100	189	321	63
10	320	100	118	202	63
計	9766	1700	2302	7464	平均 76

しなくなったので，実験ケースは表-2に示すものにとどめた。

その他，舷側を上にした状態および船底を上にした状態からの沈没，或いは浮力が片舷に片寄った場合の沈没状況の観察も行った。

5. 実験結果

5.1 沈没姿勢

船が浸水沈没する様子を観察すると，始めから浮泛姿勢に近い姿勢のまま水没沈没する場合もあるが，舷又は艀から水没するのが一般的のようであり，その場合前後方向に大きな木の葉運動をしながら沈没するが，それも水の抵抗が大きいため2〜3回で減衰し，

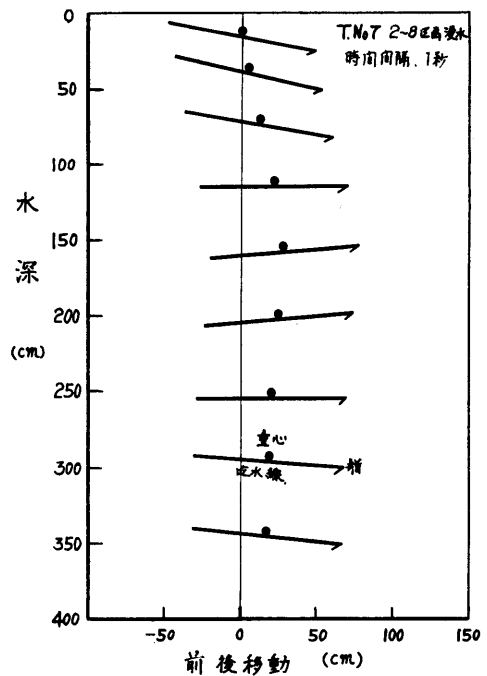


図-4 船の沈没状態

最後は浮泛姿勢に近い姿勢となって沈没する。図-4は水没初期からほとんど浮泛姿勢のまま沈没した例を，図-5・図-6は舷或いは艀から水没し，沈没して行く過程を1秒間隔で示したものである。

10区画浸水〜4区画浸水の時の或る深さにおける沈没姿勢を図-7〜図-13に示した。横軸は水深，縦軸は船の前後方向の傾斜角度で0°は吃水線が水平の場合，+は船が下っている場合，-は船が上っている場合の姿勢である。この結果からみると大角度の沈没姿勢となるのは前後の浮力が大きく片寄った場合で，少区画

表-2 実験種別一覧

実験種別	実験番号	区画番号										船底開口位置
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
4区画浸水	(52)	○	○	○	○							4
	(60)				○	○	○	○				4 ~ 7
	(53)							○	○	○	○	7
5区画浸水	(49)	○	○	○	○	○						4. 5
	(50)		○	○	○	○	○					4 ~ 6
	1 2 [*] (58)			○	○	○	○	○				4 ~ 7
	35 36 [*]				○	○	○	○	○			4 ~ 7
	(37)					○	○	○	○	○		5 ~ 7
(47)						○	○	○	○	○	6. 7	
6区画浸水	(48)	○	○	○	○	○	○					4 ~ 6
	3 4 [*] (57)		○	○	○	○	○	○				4 ~ 7
	5 6 [*]			○	○	○	○	○	○			4 ~ 7
	28 29 [*]				○	○	○	○	○	○		4 ~ 7
(38)					○	○	○	○	○	○	5 ~ 7	
7区画浸水	26 27 [*] (54)	○	○	○	○	○	○	○				4 ~ 7
	7 8 [*]		○	○	○	○	○	○	○			4 ~ 7
	19 20 [*]			○	○	○	○	○	○	○		4 ~ 7
	24 25 [*]				○	○	○	○	○	○	○	4 ~ 7
8区画浸水	9 10 [*]	○	○	○	○	○	○	○	○			4 ~ 7
	17 18 [*]		○	○	○	○	○	○	○	○		4 ~ 7
	22 23 [*]			○	○	○	○	○	○	○	○	4 ~ 7
9区画浸水	11 12 [*]	○	○	○	○	○	○	○	○	○		4 ~ 7
	15 16 [*]		○	○	○	○	○	○	○	○	○	4 ~ 7
10区画浸水	13 14 [*] 42 [*] 45 [*] 46 [*]	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4 ~ 7

注 (1) 実験番号の右肩に * 印のあるものは浸水率一ぱいまで浸水後沈降させたもの。

(2) 実験番号を () で囲んだものは、予定浸水区画の浸水では沈没しないため、他の区画にも多少の浸水をおよぼしたもの。

(3) 実験番号を [] で囲んだものは、予定浸水区画だけでも沈没するが、更に他の区画にも多少の浸水を許したもの。

浸水の場合にその可能性が強い。沈降中の最大傾斜角度は次のようであった。

浸水区画数	最大傾斜角度	
10	+37°	-50°
9	+30	-54
8	+33	-76
7	+61	-89
6	+80	-93
5	+89	-94
4	+96	-91

沈降姿勢が最大傾斜となり、再び浮沈姿勢に戻る大

体の位置は、最大傾斜角 50° では 1.5m, 80° では 3m, 90° では 4.5m 程度と推定され、沈降姿勢がほぼ安定する深さは 3 ~ 4m 辺りで、その時の傾斜角は ± 15° 以内に落ち着くものと思われる。

5. 2 沈降速度

圧力平衡弁の作動位置及び容量は水深および水圧変化速度で決められるものと想像される。従って本報告においては、沈降速度は重力方向の速度成分で表わした。

10区画乃至4区画浸水による或る深さにおける沈降速度を図-12~図-18に示した。又それぞれの最大沈降

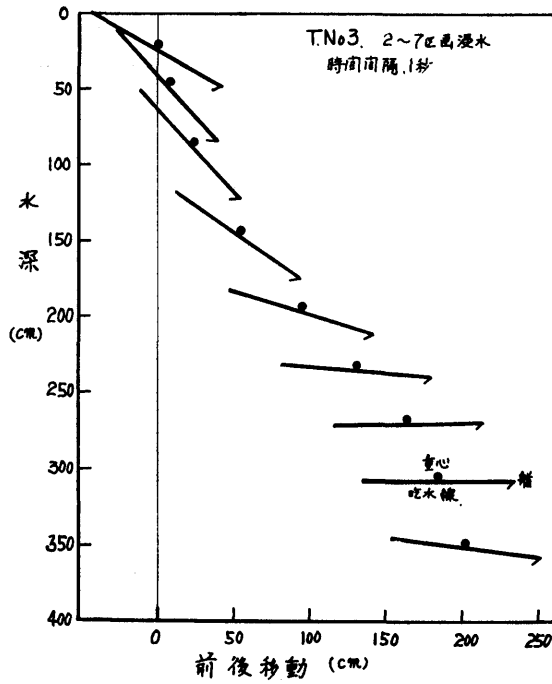


図-5 船の沈降状態

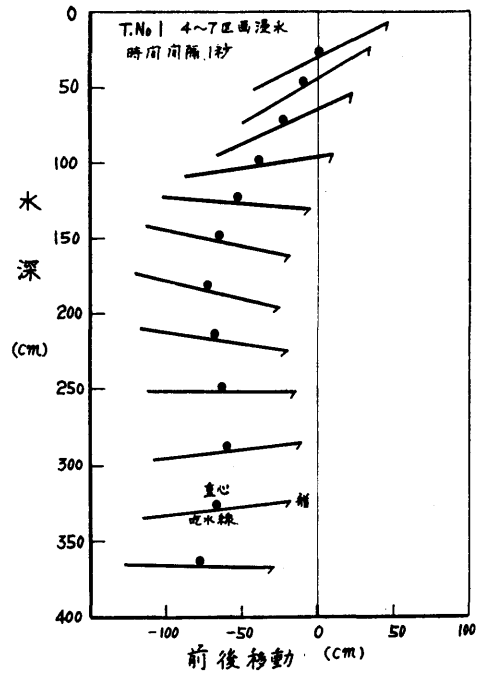


図-6 船の沈降状態

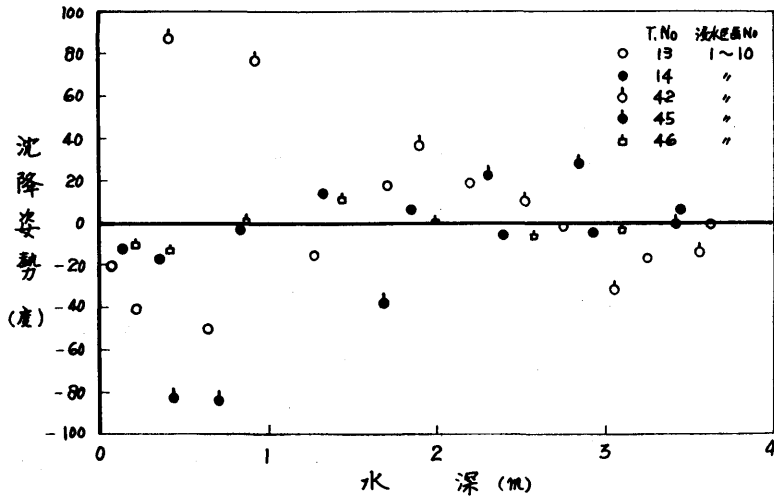


図-7 沈降姿勢の変化 (10区画浸水)

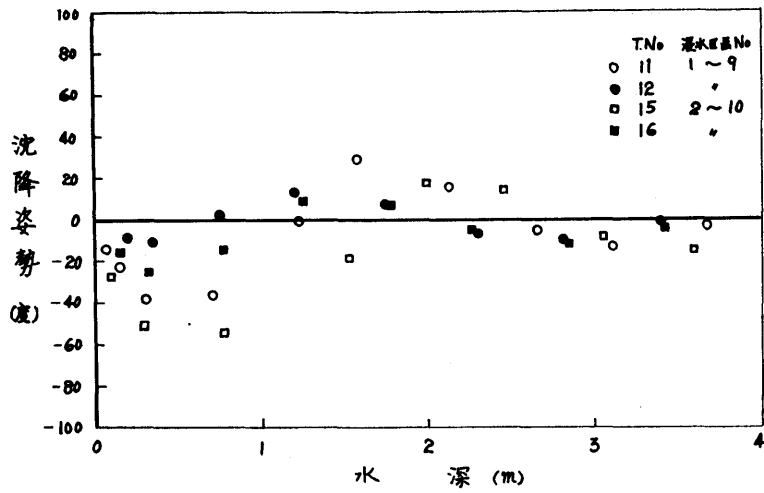


図-8 沈降姿勢の変化(9区画浸水)

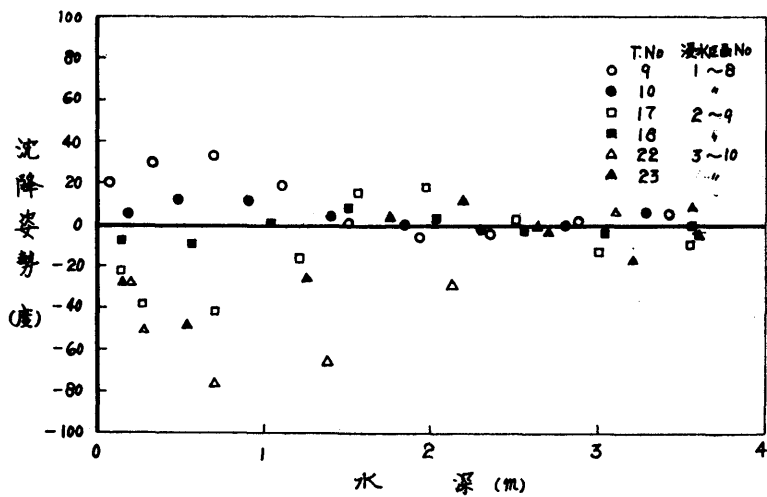


図-9 沈降姿勢の変化(8区画浸水)

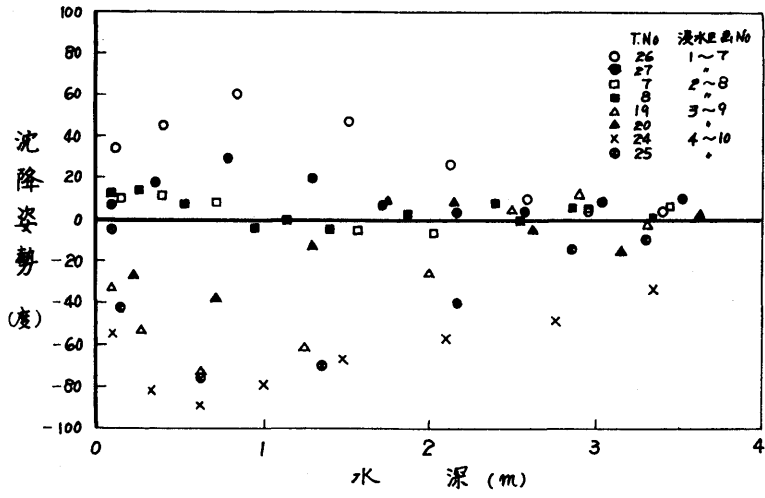


図-10 沈降姿勢の変化 (7区画浸水)

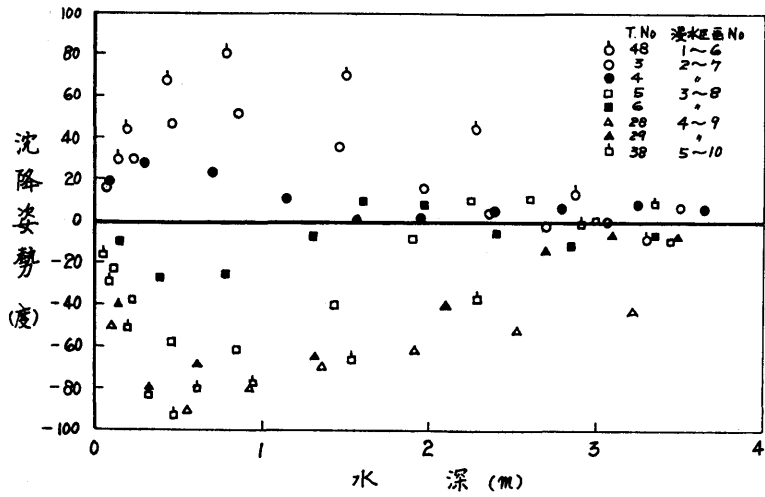


図-11 沈降姿勢の変化 (6区画浸水)

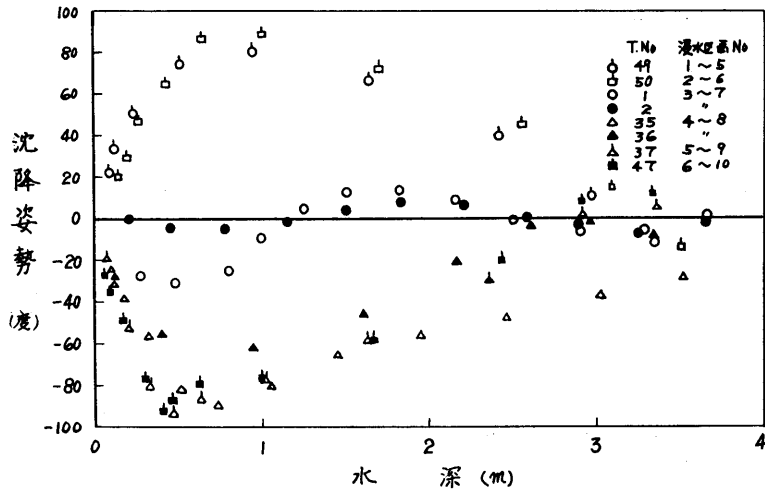


図-12 沈降姿勢の変化 (5区画浸水)

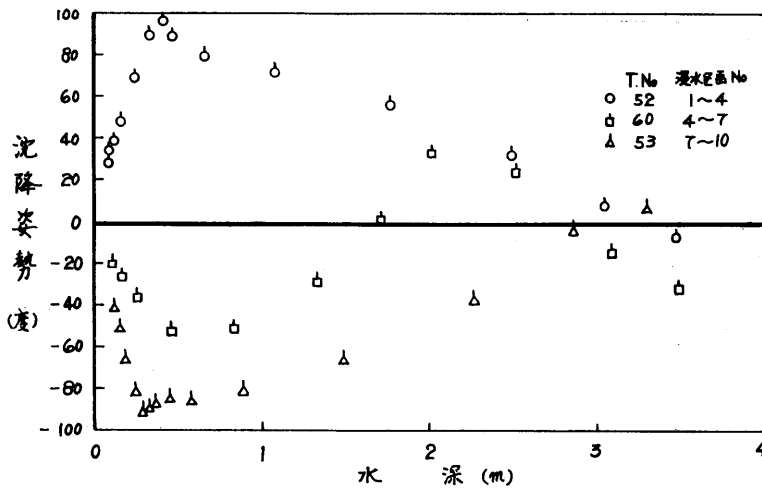


図-13 沈降姿勢の変化 (4区画浸水)

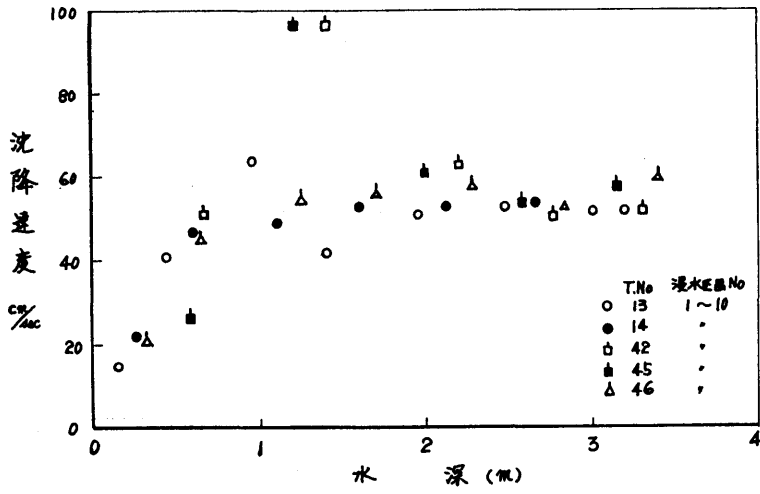


図-14 沈降速度の変化 (10区画浸水)

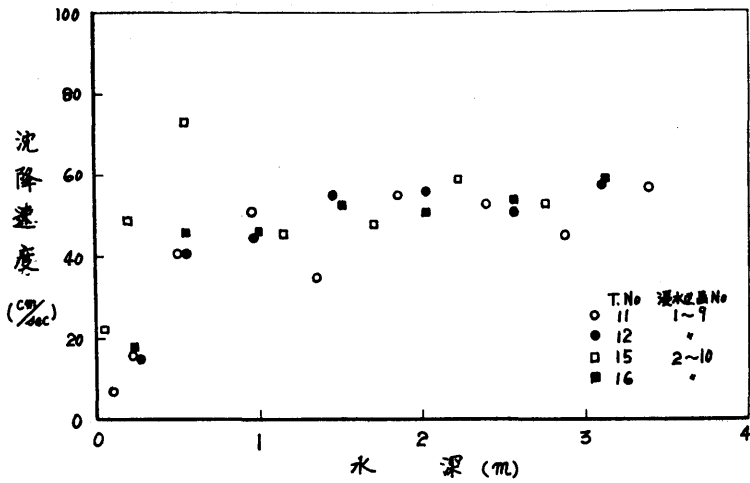


図-15 沈降速度の変化 (9区画浸水)

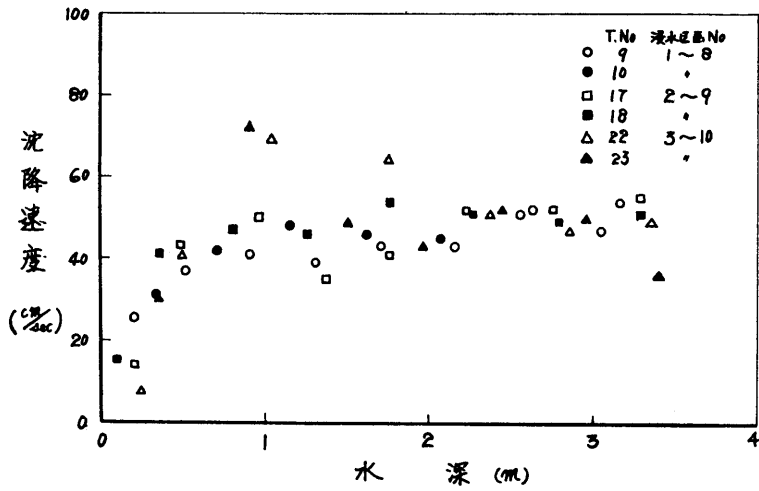


図-16 沈降速度の変化（8区画浸水）

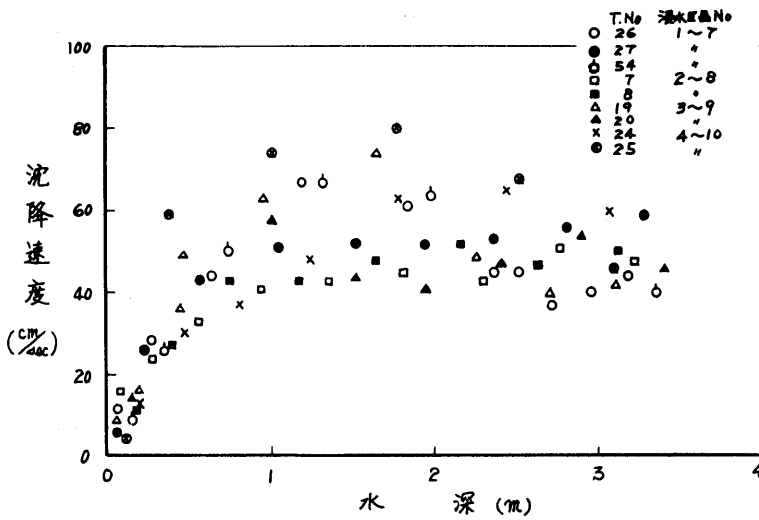


図-17 沈降速度の変化（7区画浸水）

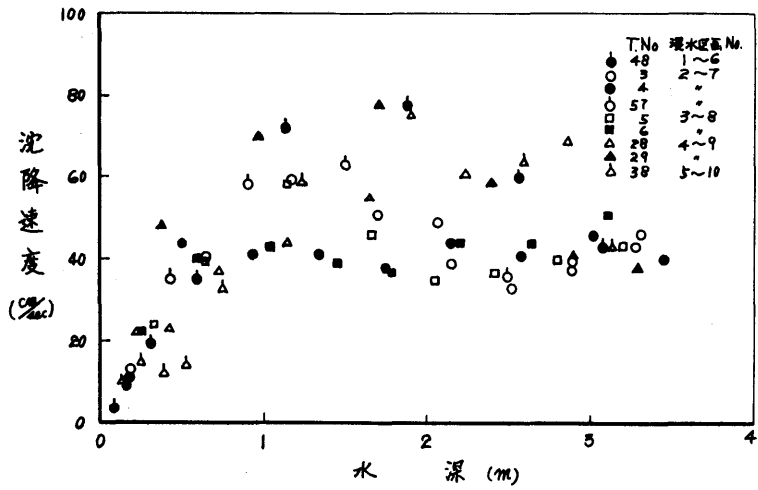


図-18 沈降速度の変化(6区画浸水)

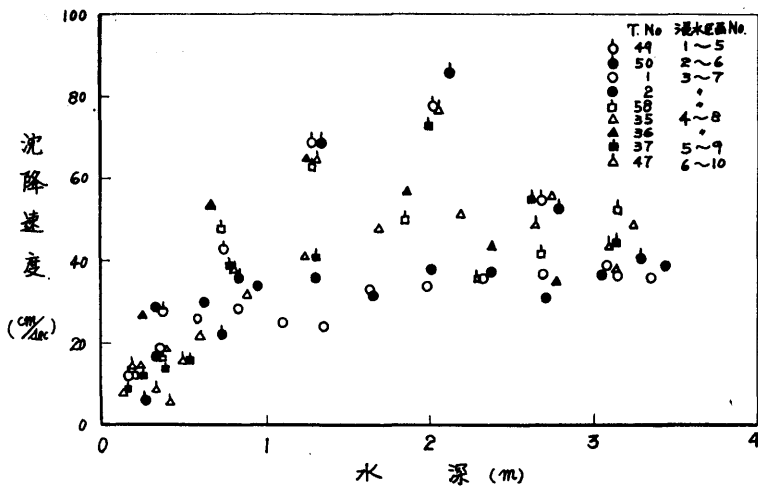


図-19 沈降速度の変化(5区画浸水)

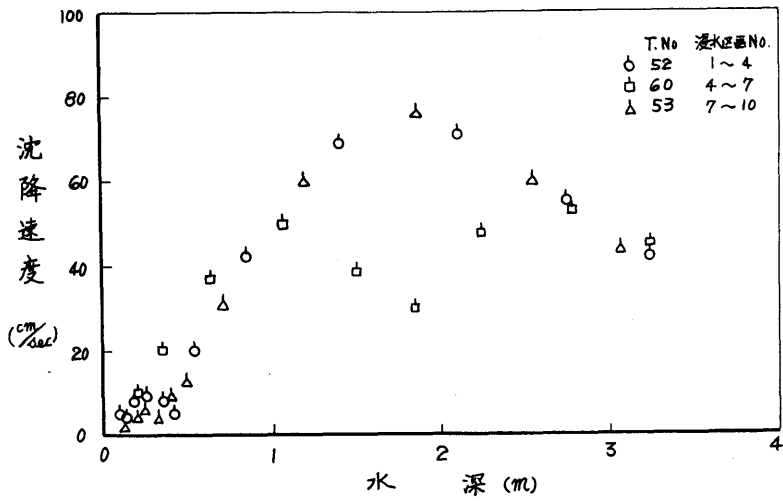


図-20 沈降速度の変化(4区画浸水)

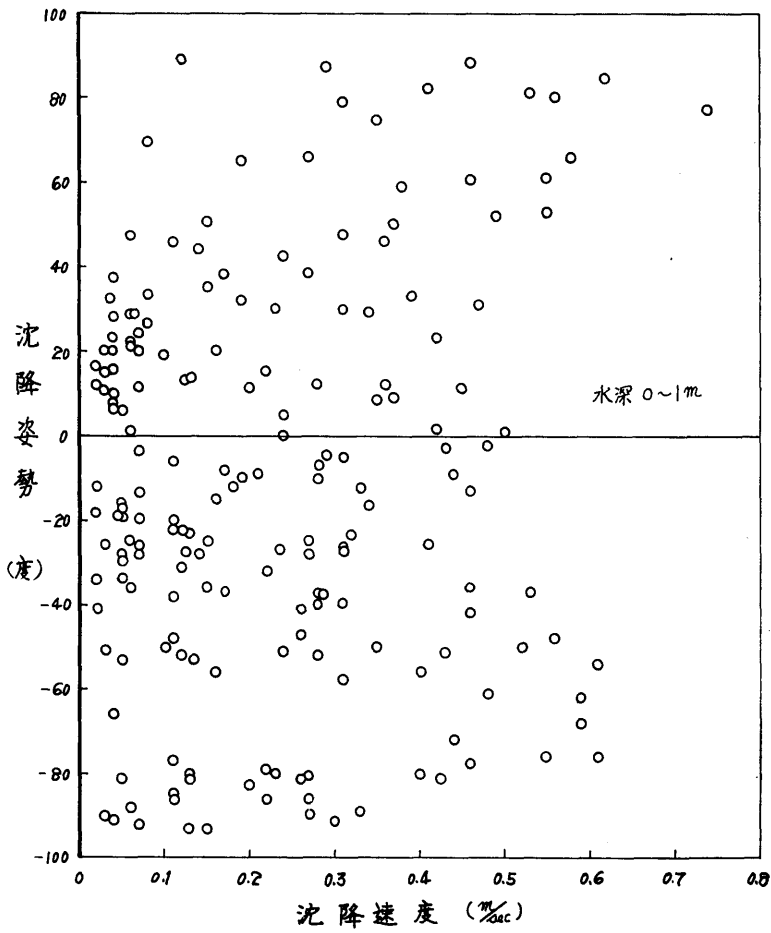


図-21 沈降姿勢と沈降速度の関係

速度および最終沈降速度は次のようである。

浸水区画数	最大沈降速度	最終沈降速度
10	64cm/sec	55cm/sec
9	73	55
8	72	50
7	80	45
6	78	45
5	86	40
4	76	40

図-14 における T.No. 42, 45 は沈降速度の極大値を推定するため、抵抗面積の最も少ないと思われる船を真下にし、水中重量が最も重くなるよう全区画に充分浸水させてから沈降させたものであり、最大沈降速度は 97cm/sec である。

船の沈降速度は、初期において浸水速度の影響が最

大と考えられるが、水没以後はほとんど沈降姿勢と水中重量に左右されるものようである。図-12~図-19 と図-5~図-11 を照合してみると、沈降姿勢が安定すると沈降速度も安定して来ることがわかり、沈降姿勢と沈降速度は非常に密接な関係があることが明らかである。

次に最終沈降速度は10区画浸水と4区画浸水とでは 15 cm/sec の差がある。これは沈降姿勢がほとんど同じであるから主として水中重量の相違によるものと解される。

図-21~図-23は沈降姿勢と沈降速度との関係をみるため、全実験を通じての1秒毎の沈降姿勢と、そのときの沈降速度を深度別にプロットしたものである。これら3図でわかることは、沈降が進むに従って沈降姿勢は浮泛姿勢に近くなり、沈降速度が .45m/sec 近傍

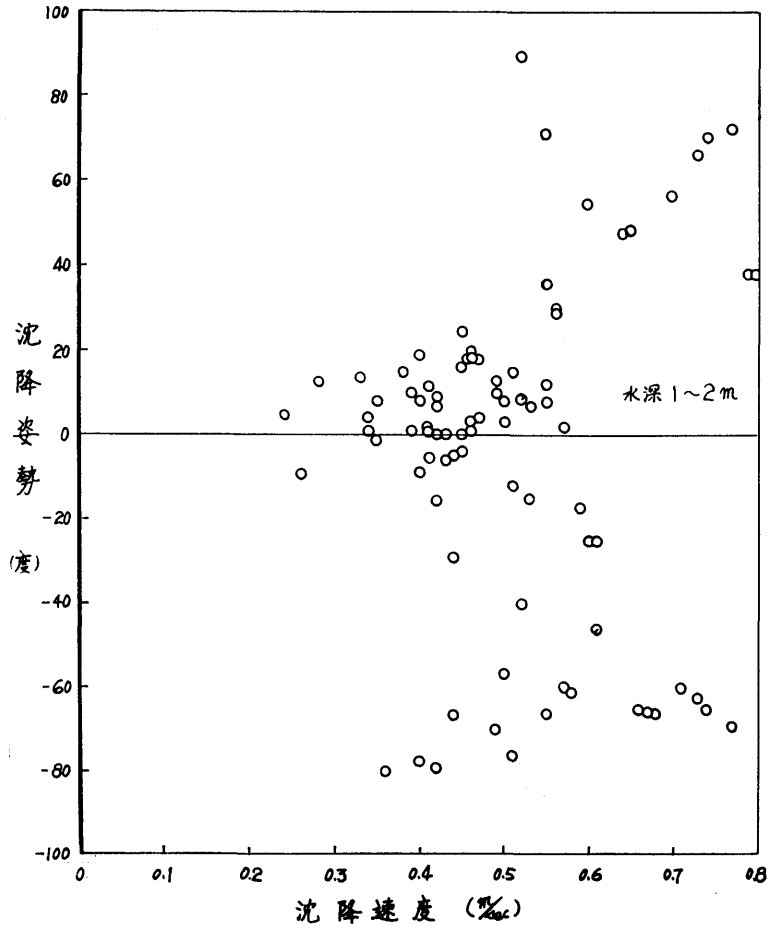


図-22 沈降姿勢と沈降速度の関係

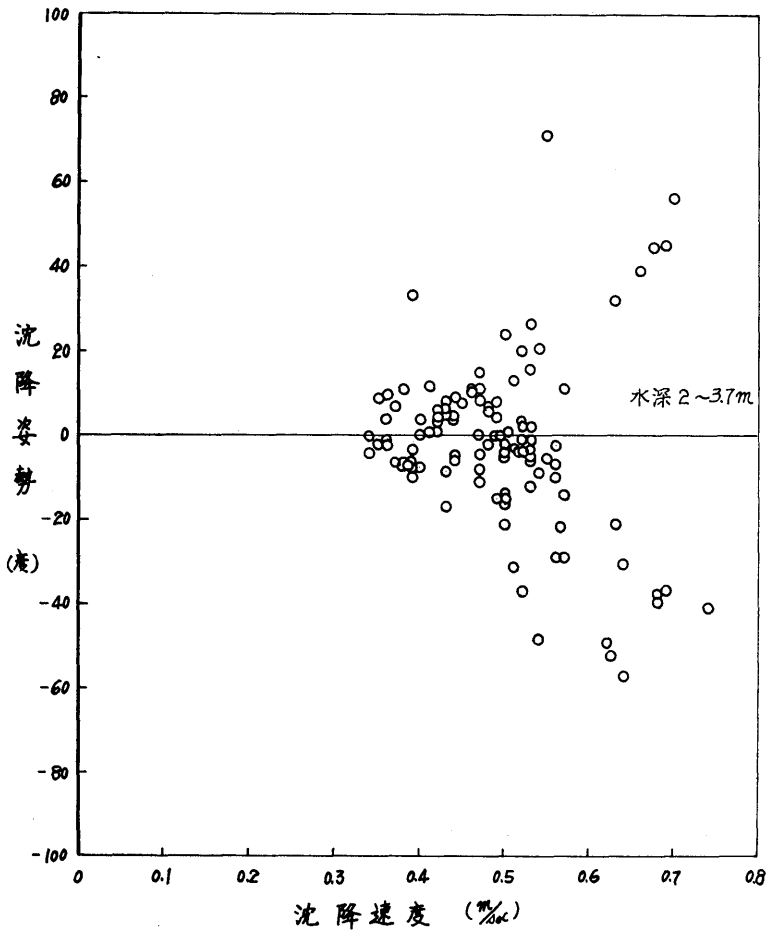


図-23 沈降姿勢と沈降速度の関係

になって来る様子がわかり、又沈降姿勢が 0° のときは沈降速度は最大 .55m/sec 程度であり、沈降速度が大きいのは深さ 1 ~ 2 m の所であって、その時船は 60° 前後の傾斜をしていること。船が 90° 以上の傾斜姿勢となるのは深さ 0 ~ 1 m の浅い所で、その時の沈降速度は 0.3m/sec 以下であること等が推定出来る。

5. 3 或る深さに達するまでの所要時間

船が浸水し始めてからの船の姿勢と下速度は、(1)浸水し始めてから船体が水没するまで、(2)船体が水没してから沈降姿勢が安定するまで、(3)沈降姿勢安定後、の3段階に大別出来る。

(1)は浸水速度、浸水容積等により所要時間は種々で、本実験においては 15秒 ~ 150秒に及び、船が直立又はそれに近い姿勢となるのはほとんどこの期間であ

る。船体が水没すると船の沈降速度は急加速度で増加し 3 ~ 5 秒で最大となり、以後は姿勢が浮泛状態に近くなるに従って沈降速度も低下し、(3)の状態になる。図-24は船体が水没した辺りから安定姿勢になる辺りまでの速度変化の様子を示したものである。

図-25 ~ 図-31は船の水沈後の深度変化を時間ベースで示したものであるが、各実験ケースとも時間の原点のとり方は一定していない。

5. 4 特殊状態での沈降姿勢

これまで述べてきた事は船が静穏な水面で浸水沈没する場合であり、しかも浮力が左右平衡している状態のものであり、別の見方をすればむしろ此の方が特殊な場合といえる。船が波や風を受けて横倒しになったり転覆したりした場合、或いは浮力が片舷に片寄った場合を仮定して沈没させたときの様子は次のようであ

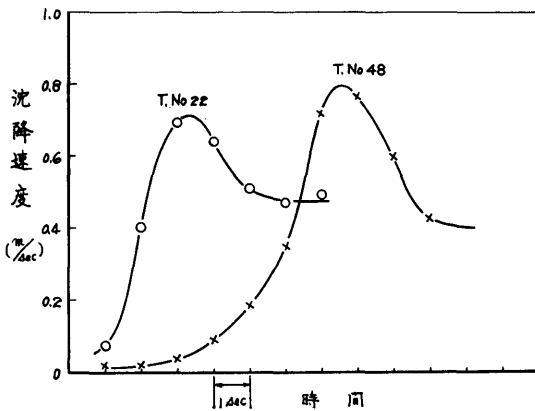


図 - 24 沈降速度の時間的变化

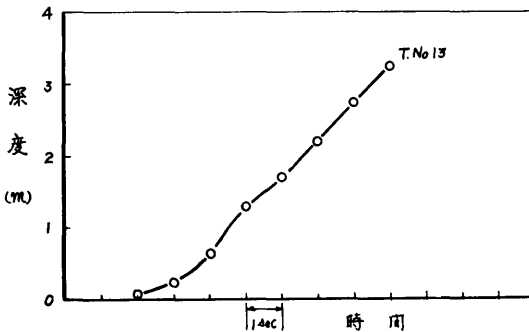


図 - 25 深度の時間的变化 (10区画浸水)

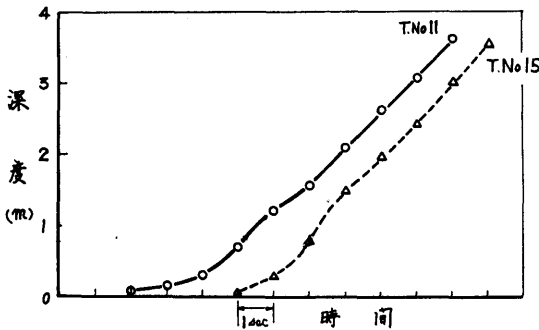


図 - 26 深度の時間的变化 (9区画浸水)

った。

(1) 左右の浮力が平衡する船を水面において強制的に横倒しにして沈没させると、船は水没後素早く前後軸を中心として回転し、浮泛姿勢に近い姿勢に復起して沈降する。

(2) 上記条件を備えた船を、船底を上にして沈没させると、水面近くで前後軸を中心として回転し、浮泛

(260)

姿勢に戻って沈降する場合と、船又は艀方向に円弧を画いて反転し、浮泛姿勢に戻って沈降する場合とある。

(3) 浮力が左右平衡している場合の沈降では、横方向への移動は余り無いが、浮力が片舷に片寄り左(又は右)に傾いて沈没する場合は、右(又は左)に横移動しながら沈降する。

(4) 浮力が前後・左右とも片寄り、船(又は艀)が下り左舷(又は右舷)に傾いて沈没する場合は、左舷(又は右舷)を内側にし船(又は艀)方向に螺旋を画きながら沈降する。

6. 実船との対応

模型船による実験結果は以上のものであったが、これを実船に当嵌める場合について検討してみる。

安定姿勢で沈降して行く船の運動方式を

$$M \frac{dV}{dt} = W - B - R \dots \dots \dots (1)$$

と書く。ただし、

M : 船内に浸入した水および附加質量を含む船の質量

W : 船の排水量

B : 残っている浮力

R : 沈降抵抗

V : 沈降速度

M および B は時間 t に関係しないと仮定し沈降抵抗を

$$R = \frac{1}{2} \rho S C V^2$$

ρ : 水の密度

S : 船の水面に対する投影面積

と書き、沈降抵抗係数 C は速度および寸法等によらず一定であると仮定すると、(1)は

$$\frac{dV}{dt} + aV^2 = b \dots \dots \dots (2)$$

となる。但し $a = \frac{1}{2} \rho S C / M$ $b = (W - B) / M$

(2)を初期条件 $t=0$ で $V=0$ を用いて解くと

$$V = \sqrt{\frac{b}{a}} \tanh(\sqrt{ab} t) \dots \dots \dots (3)$$

となる。ところで

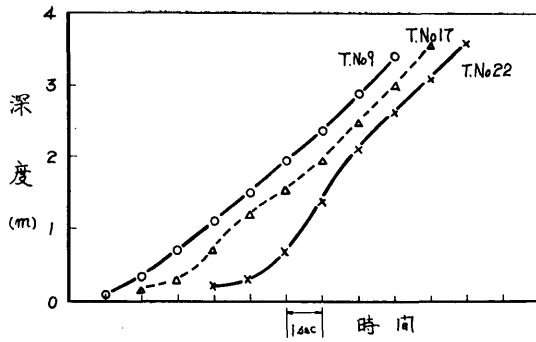


図 - 27 深度の時間的变化 (8区画浸水)

$$a \sim \frac{1}{L} \quad (L \text{ は船の長さ})$$

$b \sim g$ (重力の加速度)
の次元を持っているから

$$V \sim \sqrt{Lg} \tanh \sqrt{\frac{g}{L}} t$$

となる。これから無次元値 $\sqrt{\frac{g}{L}} t$ が模型船

と実船とで等しいところ、即ち

$$t_s = \sqrt{\alpha} t_m \text{ では } V_s = \sqrt{\alpha} V_m \text{ である。}$$

ただし、添字 s, m はそれぞれ実船および模

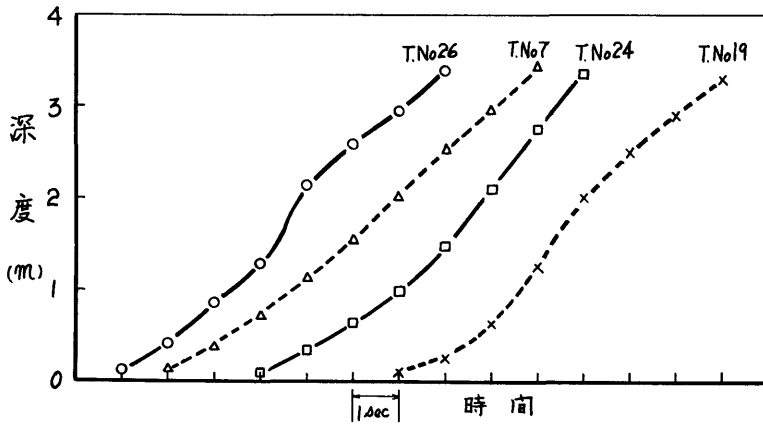


図 - 28 深度の時間的变化 (7区画浸水)

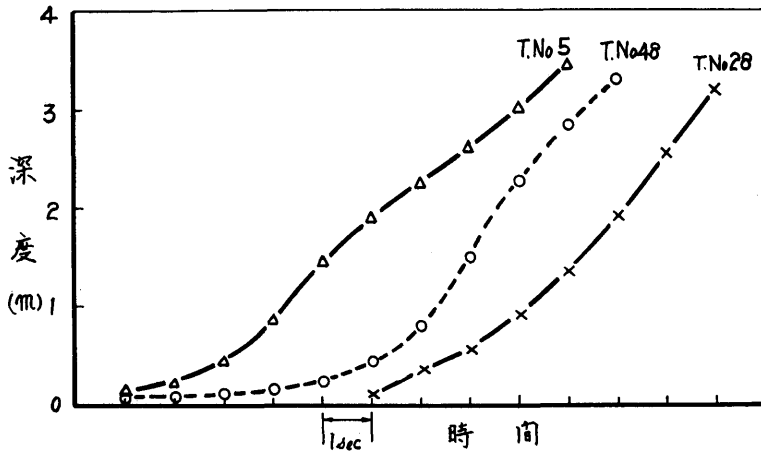


図 - 29 深度の時間的变化 (6区画浸水)

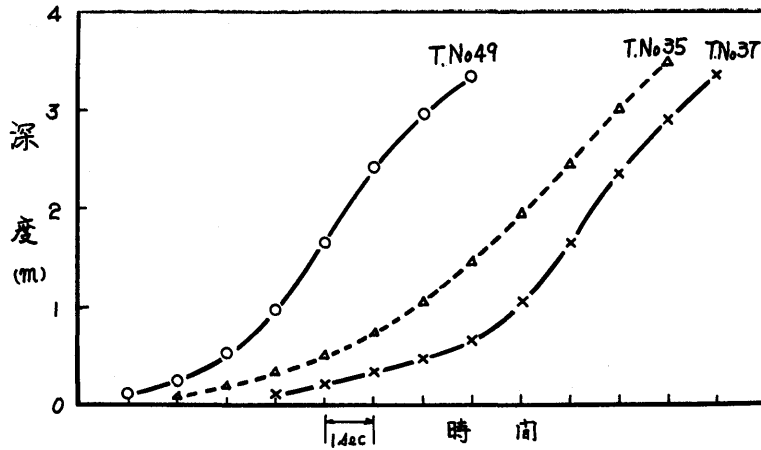


図 - 30 深度の時間的变化 (5区画浸水)

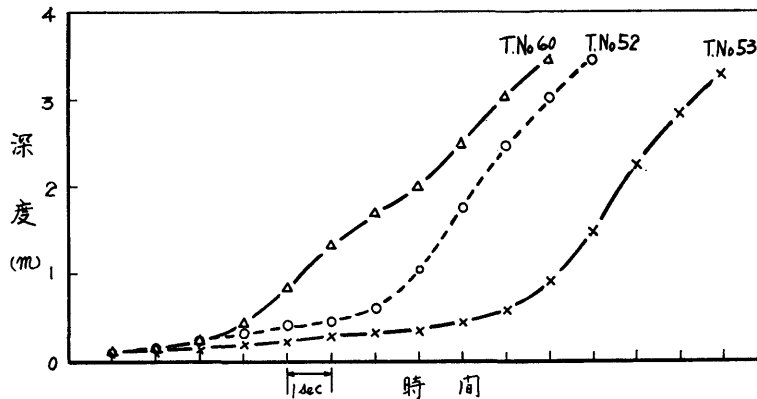


図 - 31 深度の時間的变化 (4区画浸水)

型船の値であることを示し、 $\alpha = L_s/L_m$ 。

即ち、模型試験の結果から実船の場合を推定するには時間および速度をそれぞれ $\sqrt{\alpha}$ (寸法比の平方根) 倍すればよい。又長さについては α 倍すればよい。

この結果を実験値に当嵌めてみると、

$\alpha = 126.7$ であるから

長さは 126.7 倍

時間および速度は $\sqrt{126.7}$ 倍 (11.3 倍)

となり、実験に使用した水槽の深さは約 530m に相当し、最終沈降速度は 4.5~6.2 m/sec、最大沈降速度は 7.2~9.7 m/sec で、最悪の場合でも 11 m/sec 程度、沈降姿勢は水面から 500m 以内でほぼ安定するものと思われる。

ここで C が一定であると仮定したことについて考察

(262)

を加えておく。

まづ、沈降抵抗のうち大部分が形状抵抗 (渦抵抗) であり、摩擦抵抗はほとんど無視しうる程度のもので考えてさしつかえないであろう。

流れに直角に置かれた円柱又は球のような物体の形状抵抗係数は、いわゆる臨界レイノルズ数の付近で急激に変化する。これは境界層の層流剥離か乱流剥離かの違いによるものであるが、一方、流れに直角に置かれた円板などの場合は、レイノルズ数に関係なくほとんど一定である。これは剥離点が層流・乱流によらず板の周辺にあるためである。沈降する船の場合は後者の場合に近いものと考えられ、船体の形状は甲板の縁や甲板室の前後の壁等の所で不連続になっており、乱流剥離の場合でも剥離点がそれらの不連続箇所を廻り

込んで来ることは考えられず、従って層流剝離の場合と大して違いのない後流域を作ると思われるので、円板の場合と同じ様に考えて沈降抵抗係数 C が一定と仮定して実船の場合を推定しても大した誤りはないであろう。

7. あとがき

本実験により、沈船の沈降姿勢、沈降速度には船の姿勢と水中重量の影響が大きいこと等の概略を知ることが出来たが、水槽の制約から小さな模型船で実験を

行ったので模型と実船との相似も充分とはいいがたく、模型の大きさの割に水槽の深さがやや不足であった。今後更に精密な計測をするには模型の大きさ、構造、水槽の深さ、計測方法等、全般にわたって検討すべき点が多くあるが、一応今回の実験の目的は達せられたものと思う。

最後に、本研究は石川島播磨重工業株式会社の委託によって行ったものであり、実験に当り種々御協力下さった原子力船開発事業団の方々に厚く謝意を表す。
(原稿受付 1965.9.10)