

模型による船舶衝突実験

小黒英男*・田中邦彦*・土屋正之*・沢田博史*・翁長一彦*

Collision Tests on Ship Models

By

Hideo OGURO, Kunihiko TANAKA, Masayuki TSUCHIYA,
Hiroshi SAWADA, and Kazuhiko OHNAGA

Abstract

This report describes collision tests on free floating ship models. Two ship models, referred to as a struck ship and a striking ship were used for observing the movement of colliding ships. The shock responses for ship models were measured using boxtype ship model with two load cells. The positions of ship models obtained by the position analyzer with VIDEO camera, which was set on the tower about twenty meters in height above water surface.

The results of experiment were as follows;

(1) When the striking ship collided with midship of the stationary struck ship, the struck ship moved keeping her directional attitude the same in parallel with the position before collision. In this case, the moving angle and velocity for the center of gravity are calculated by formula (2) and (4).

(2) At the collision to the other parts, the struck ship was horizontally rotated for the center of gravity, and it was varied parallel movement after a few second. The angular velocity of those cases are calculated by formula (10) and (14).

(3) The impulse act on the struck ship can be obtained by formula (20), but when the mass of struck ship is smaller than striking ship, the impulse reach constant if the velocity of striking ship is more increase over some value, because the excessive impact energy was consumed only for washing the struck ship away.

1. ま え が き

巨大船の操縦性が他の船型に較べて問題が多いことはよく知られている。特に大型タンカーが狭水路や輻湊水域において低速航行を行う場合は、運動性能上からも未解決の問題が多く、衝突、乗上げ事故により大規模な海洋汚染を惹起したり、大規模な火災を発生するおそれが大きい。前者の代表例がトリー・キャニオン号事件であり、後者の代表例が第拾雄洋丸事件であろう。この両者の事故を契機として、海洋汚染防止対策や災害防止対策の措置が強化されたことは周知のとおりである。

船舶の衝突を未然に防止するためには、見張りの問題を含めた操船技術、船の操縦性能等に関する研究が

* 機装部

原稿受付：昭和58年5月9日

多数^{1)~3)}行われているが、一方衝突が発生した後の現象の解明や、災害の発展拡大の予測に関する技術は必ずしも充分とはいえない。その第一の理由は、従来の船体運動に関する研究が主に定常的な推進状態を取り扱っているためであって、加速または減速のような過渡的状态を取り扱うことが難しく、従って衝突のように他から衝撃的外力を受けたり、あるいは両船が互の運動エネルギーを分かち合ったりするような場合を検討することが難しいためであろう。しかし、船舶が衝突すれば両船はそれぞれ速度と針路を変化しつつ運動を行うものと予想され、流出する油の拡散状況や、それに着火した海面火災の状況等はこの両船の船体運動に深く関係する、と考えられる。すなわち衝突後の両船の運動状態が推定できれば、流出油の拡散防止や初期消火、あるいは乗員の脱出等に関する対策や方針を樹立する上で有効な参考となる筈である。

本研究は以上の考えの下に、まず模型船を用いて衝突時の船体運動の観察を行うと共に、衝突荷重の測定を試みたものである。上に述べたような理由から、最も衝突災害の大きいと予想されるタンカーを実験の対象船とし、この種の衝突実験に引続いて油の流出拡散実験や、油流出による海面火災のシミュレーション実験も可能なよう計画した。また、既存の水槽設備の特徴を最大限に活用する趣旨の下に、模型船の推進、制御の方法、及びその挙動の記録方法等を検討した。実験のねらいはあく迄も衝突による船体運動を観測記録することにあるが、その現象の解析に当っては Minorsky⁴⁾ の考えに準じて検討を加えることとした。なお、模型船による船体運動の実験には江守等の報告⁵⁾ があり、衝突荷重及びその加速度については Pakstys の報告⁶⁾ が、衝突のシミュレーション解析については Peterson の報告⁷⁾ があり、それらも参考とした。

2. 実験の方針

2隻の模型船を水槽内で動かし、任意の速度、相対角度、及び位置で衝突させようとするれば、無線操縦による自航模型船とする必要がある。しかし、この方法では実験設備の経費が高価となること、模型船積載物の重量、配置面積が大きくなるため油流出実験用の油搭載が難しくなること、水面火災実験で機器も焼損してしまうこと、水槽上の衝突地点を特定し難いこと、等の難点がある。特に衝突地点が一定しないことは、後述する挙動観測の技術の上から不利となる。この模型船の推進制御方法につき種々検討を加えた結果、最も簡単な方法として細いロープで模型船を曳航し、衝突直前に模型船を自由にする方法を採用した。この方法は装置が簡便であり、また必要に応じて任意の地点に模型船を停止させておくことが出来る利点がある。

模型船の運動を観測し、且つその位置を検出記録するためには水槽施設の特長が活用された。実験に使用した水槽は本来が救命器具等の落下試験用であり、高さ約 20m の落下塔が附属している。従ってこの塔を観測塔として用いることにより、模型船の運動を直上から観測できる。そこで、テレビカメラを塔頂に真下に向けて設置し、このカメラの撮像電気信号により対象物の変位を検出できるような変位計を用いると共に、全体の俯瞰画像をモニタテレビ上で観測する方式を採用した。この方式で対象点の変位を検出するためには、周囲の物体輝度とある程度のコントラストを有する点光源があればよいから、模型船の設備は極めて

簡単となる。模型船の装備を出来る限りなくすことは以後の実験計画の上から有利である。さらに通常のカメラの撮影画像を用いる場合に較べて、本方式は何らの画像解析を行う必要がなく、直ちに対象とする点光源の XY 座標が検出でき、オンラインでデータ処理を行うことも可能である。また実験中に観測塔上に要員を配置しておく必要もなく、実験の省力化も図られる。

測定用テレビカメラの視野の大きさと、対象点の座標の位置精度とは当然関係があり、長焦点レンズを用いて視野を狭くすれば測定精度は向上する。しかし、両船の衝突地点が不明であったり、またはその後の運動により対象点が視野の外に出てしまえば意味がない。このため、曳航ロープによる模型船移動方式においては、両船のロープの交叉点がほぼ衝突位置となるため、可能な限り視野を狭めて測定精度を上げることが出来た。

実験は衝突による船体挙動の観測と、衝突時の衝撃荷重の測定とに分けて実施した。これは、どんな相対姿勢で衝突しても荷重を検出できるようなセンサーを模型船に取付けることが難しく、またその計測コード類が船体運動を拘束する心配があったためである。このため、両実験を別個に行わざるを得なかった。後者の実験では模型船の替りに箱形の代用船を使用した。この船型、形状による差は今後さらに検討するべき問題として残されている。

3. 船体挙動の観測実験

3.1 供試模型船

衝突前後の両船の挙動を観測する実験では、大型タンカーの約 1/200 の縮尺の大小 2 隻の模型船を用い、これを互に衝突船または被衝突船として実験を行えば、質量比の異なる 2 条件を設定することができる。これらの模型船の要目を Table 1 に、また、その写真を Photo 1, 2 に示す。なお模型船にはプロペラ、舵を設けていない。

模型船の船首尾 (F.P. および A.P. の各点) には位置検出のための点光源 (豆電球と反射筒) が取り付けられ、船首と船側には衝突時に両船が接合できるようなマジックテープが貼り付けられている。これは、通常衝突角度が 90° に近い場合には衝突船が被衝突船の船側から船体に食い込み、衝突後両船が一体となって運動すると考えられること、また、衝突後の運動の解析を Minorsky の方法に準じて行う場合衝突後の移動速度が両船共等しい共通速度である方が解析が容易な

Table 1 Principal particulars

		大船型 (符号L)	小型船 (符号S)	箱 船
要 目	L_{pp} (m)	1.5000	1.2000	0.9160
	B (m)	0.2477	0.2182	0.2500
	D (m)	0.154	0.111	0.210
	d (m)	0.1227	0.0704	—
	C_B	0.851	0.803	1.000
	∇ (m ³)	0.0388	0.0148	—
実験条件	d (m)	0.1090	0.0700	0.1060
	∇ (m ³)	0.0337	0.0145	0.0243
	l_{CB} (%)	+3.53	+2.17	—

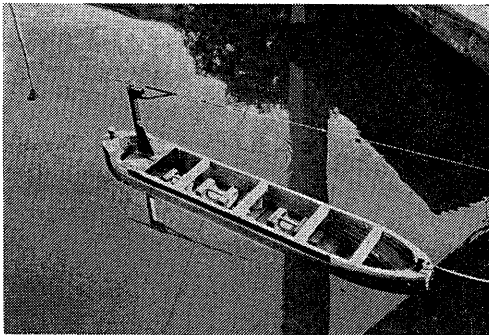


Photo 1 Large model ship

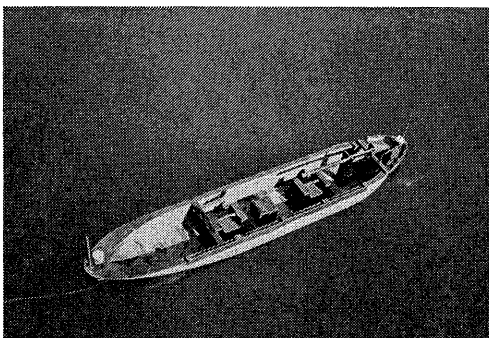


Photo 2 Small model ship

ためである。

衝突船には空中に展張した曳航用索と連結するための金具を、また被衝突船には水中の曳航索と連結するための金具を、それぞれ、Photo 1, 2 に示すように設

けた。写真に示すように模型船の装備は極めて簡単であり、例えば水面火災実験を行っても焼損して困るようなものは何一つない。

3.2 模型船の曳航装置

索を用いて模型船を曳航する場合には、衝突点で索が交叉しているため両索を空中に設けると互に他の模型船がこれに触れてしまう。この障害を避けるため、大型船用の曳航索は空中線とし、小型船用は水中線として、両索を模型船々体から上下方向に完全に隔離して設けた。また衝突後に各船を自由運動させるためには、曳航索を停止させると大型船は金具が空中曳航索から自動的に離脱する方式を採り、小型船は水中曳航索そのものをゆるめる方式とした。

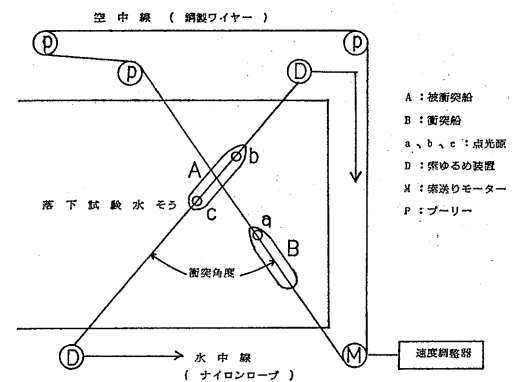


Fig. 1 Towing devices of model ships

各曳航索は水槽周辺に Fig. 1 のように各プーリーおよび索ゆるめ装置を用いて展張し、2台のモーターと速度調整器で任意の速度で索を移動させられるようにした。また、衝突角度は索ゆるめ装置およびプーリーの位置を変えることにより任意に設定することが出来る。小型船用の索ゆるめ装置は Photo 3 に示すように電磁石付プーリーにより索を約1m高さに持ち上げ、衝突直前に電源を断つことにより瞬間的に索を掛けたプーリーを落下させ、両端2台の装置により約4mの余分になった索を模型船に供給し、模型船が衝突直前から完全に自由状態となるようにするためのものである。また、自由となった索の自重が模型船の運動を阻害しないようにするため、水中曳航索は比重がほぼ1のナイロンロープ(径4mm)を採用した。大型船用の空中索には曳航用の金具が取り付けられるため、金具の重量に耐える張力と耐腐食性を考慮して鋼製ワイヤ(SUS 304, 径1mm)を採用した。

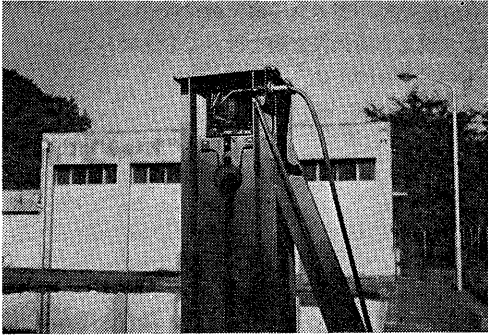


Photo 3(a) Rope opening device Upper part

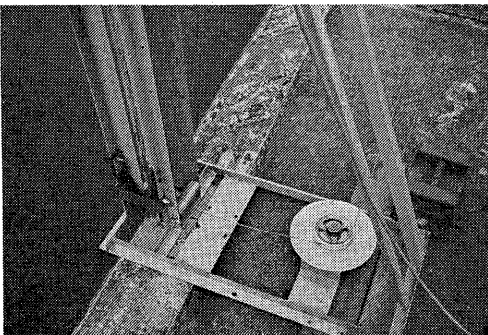


Photo 3(b) Rope opening device Lower part

3.3 観測および位置検出方法

時々刻々移動する2隻の模型船の観察は、前述のように塔頂に設置したテレビカメラ（カルニコン撮像管の計測用ビジコンカメラ）で模型船を捉え、この出力をカメラコントロールユニットに約30mの接続コードを介して入力し、ユニットに接続したモニターテレビを用いて目視観測を行った。模型船の位置の検出はカメラコントロールユニットの出力をXY座標位置測定装置に入力し、船首尾に取り付けられた点光源を自動的に追跡させ、0.1秒間隔で出力させたデジタルXY情報をデータ集録装置で集録した。測定装置の原理はテレビカメラ視野を512×512の絵素に分割し、絵素のコントラスト差から点光源の位置を検出するものである。

衝突前後の船の挙動を適確に捉えるためには、衝突船と被衝突船の各船首尾の4点の位置情報が必要であるが、計測装置の構成が3点の位置情報しか得られないものであったため、被衝突船の挙動に重点を置き、被衝突船は船首尾2点とし、衝突船は船首の1点のみを対象として測定を行った。このため、被衝突船の移動および回転は解析出来るが、残念ながら衝突船の方は

船首の移動のみしか解析出来ず、衝突船の衝突後の重心位置の変化等を解析するためには不十分であり今後の検討課題である。

集録した位置情報は、マイクロコンピュータに入力して処理すると共に、XYプロットにより両船の位置を1秒毎に作図し、両者の解析結果から衝突速度および衝突角度、並びに衝突後の両船の移動速度および被衝突船の回転速度を求めた。

テレビカメラには焦点距離25mmのレンズを使用したため、視野が約7.5m×7.5mとなり、これを一面面の走査線の数512本で除した値、即ち15mmが位置情報の精度である。

3.4 挙動実験とその結果

2隻のタンカー模型船を交互に衝突船と被衝突船とし、衝突角度をほぼ90°、60°、30°の3段階に設定して衝突実験を実施した。実験は先ず被衝突船を衝突点が両曳航索の交点附近になるように移動させ、索を張りつめた状態で停止させた。その後、水面が静止するまで待ち、衝突船を一定の速度で曳航し、衝突点までの距離が約1mに達したとき曳航索の移動を停止して衝突船を索から切り離し惰力航行させて被衝突船に衝突させた。被衝突船は、衝突船が索から離れたとき、索ゆるめ装置を開放して自由状態とした。衝突速度は索の速度調整器により12.7~52.8cm/sの間で5段階に設定した。また、衝突点は被衝突船の中央附近および船の長さの約1/4船首尾側に離れた各点の計3点とした。塔上から撮影した衝突時の様子をPhoto 4に示す。



Photo 4 Situation of collision

各実験で得られた両船の1秒毎の位置を表わした代表例をFig. 2(a)~(c)およびFig. 3に示す。尚、図中の V_B は衝突速度、 θ は衝突角度、L-SはTable 1の大型船が小型船に衝突する場合を示すもので、◎

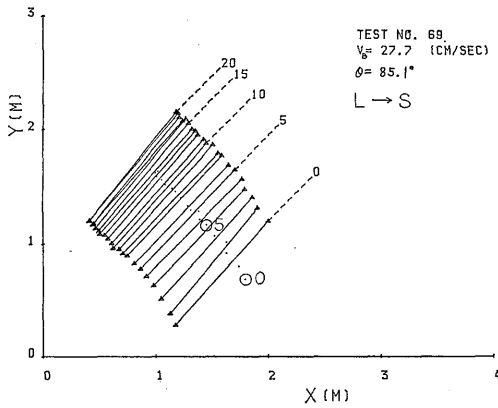


Fig. 2 (a) Model ship positions after collision
 (Colliding position: Midship)

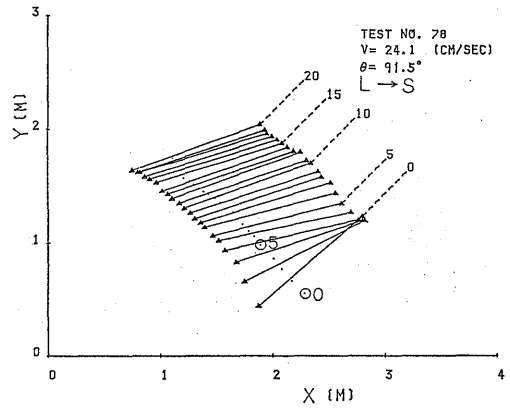


Fig. 3 Model ship positions after collision
 (Colliding position: Aft)

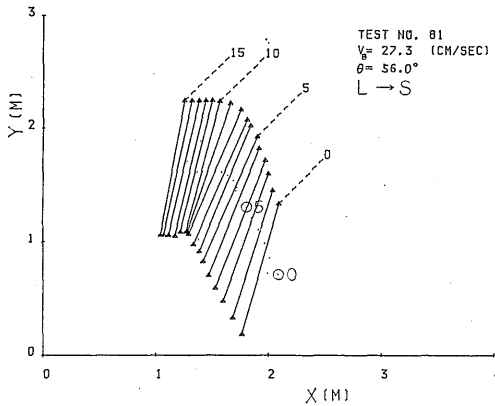


Fig. 2 (b) Model ship positions after collision
 (Colliding position: Midship)

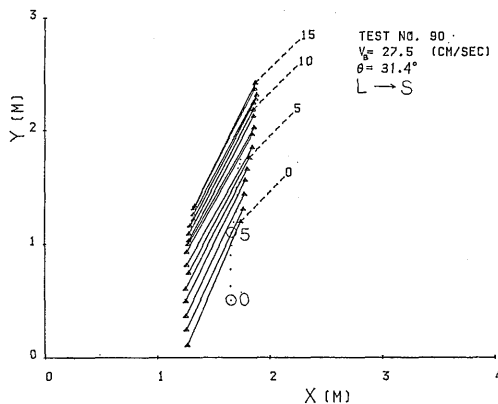


Fig. 2 (c) Model ship positions after collision
 (Colliding position: Midship)

0および $\odot 5$ は0秒並びに5秒後の衝突船船首に設けた点光源の位置を示している。

衝突点が中央附近の場合には、Fig. 2で知られるように被衝突船は衝突後衝突船の衝突直前の進行方向にほぼ平行に移動し、回転運動は殆んど生じない。この移動形態は、衝突角度が 60° 、 30° と小さくなくても同様であった。図には見られないが、目視観察によれば被衝突船に接着した衝突船は衝突直後数秒間は衝突直前の進行方向に回転せずに進行するが、次第に被衝突船との鋭角側に回転し、一見被衝突船に吸い寄せられる形となった。この現象は、衝突角度が小さい程早く生じた。

衝突点が船首尾側に偏したときには、被衝突船はその重心位置を殆んど変化せず回転運動を行うが、Fig. 3に見られるように約3秒経過後からは中央附近へ衝突した場合と同様、衝突船の衝突直前の進行方向に沿ってほぼ平行移動する形をとった。この形の衝突の場合にも、衝突船は衝突後鋭角側に回転して被衝突船に吸い寄せられる形をとった。

衝突点が何れの場合でも、衝突時には被衝突船に若干のローリングを生じた。ローリングの振巾は被衝突船が衝突船より小さいとき大きかった。この現象は目視によってのみ観察され、位置検出装置およびそのモニターテレビでは感知されない程度のものであった。

4. 衝突荷重の測定実験

衝突荷重の測定のために箱型の代用被衝突船を用い、この舷側に2個のロードセルで支持された衝突板を設けた。両荷重の合計から船首尾方向に直角の荷重

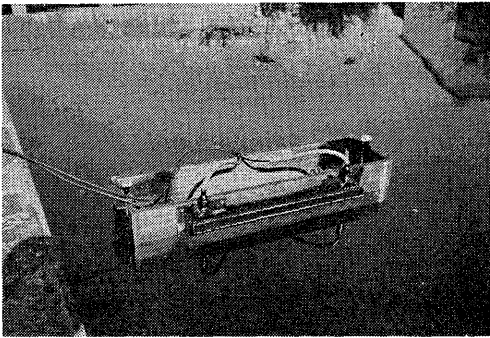


Photo 5. Boxtype model ship

成分が求められる。箱船の要目を Table 1 に、外観を Photo 5 に示す。衝突船には挙動試験に用いた 2 隻のタンカー模型船を用いた。衝突船の速度、被衝突船の変位等は挙動実験と同様の方法により測定したが、衝突荷重のためには測定用電線を地上の計測器まで導き、実験は水槽壁のすぐ近傍で行った。これは荷重の計測が主であり、変位は単なる参考値のため、電線や側壁による船体運動への影響を無視できると考えたからである。衝突時の速度範囲、衝突角度等の実験条件も挙動実験とほぼ同様である。

計測された衝突荷重の一例を Fig. 4 に示す。データは一度データレコーダーに記録したものをオシログラフで曲線化し、この面積から力積を求めた。測定記録系の周波数特性は 1kHz 以上として衝撃力の再生には注意を払った。

衝突時に箱船は衝突速度が大きくなるとかなりの振巾でローリングした。何れの場合も箱船はほぼ平行に移動したが、衝突船は挙動試験のときと同様に、衝突後鋭角側に吸い寄せられるように回転した。

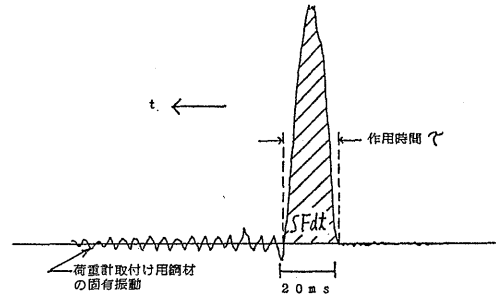


Fig. 4 Load curve by colliding shock

衝突時の箱船に生じた最大荷重を衝突船の長さを基としたフルード数 F_n ベースで整理したものが Fig. 5 である。最大荷重 F_{max} は、衝突船が被衝突船より小さい場合には F_n の 1.5 乗に比例すると考えられるが、逆に衝突船の方が大きいときは F_{max} の値は両船の質量比の約 1/3 乗ほど増加した。しかし、この場合の F_n に対する F_{max} の値は、 F_n が約 0.13 以上になるとほぼ一定となる。尚、図中の L は大型船が箱船に衝突した場合、S は小型船が箱船に衝突したときのものを示している。

実測した力積を F_n ベースで示したものが Fig. 6 である。箱船より質量の小さい小型船 (S) が衝突したときには力積はほぼ F_n に比例して大きくなるが、質量の大きい大型船 (L) が衝突したときには F_n が 0.08 以上になると比例しなくなる。最大荷重および力積で生じたこの現象は、質量の小さい被衝突船が質量の大きい衝突船により押し流されてしまい、或る一定値以上の衝突力が発生しなくなるためと考えられる。最大荷重と力積の F_n に対する比例関係が変化する F_n の値が異なるのは、衝突力の作用時間が F_n が大きくなる

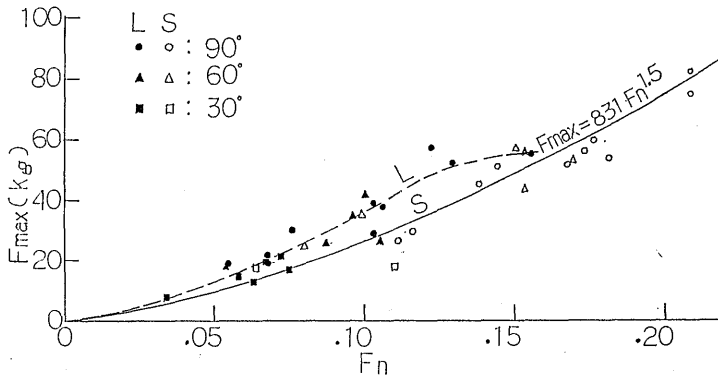


Fig. 5 Curve of maximum load

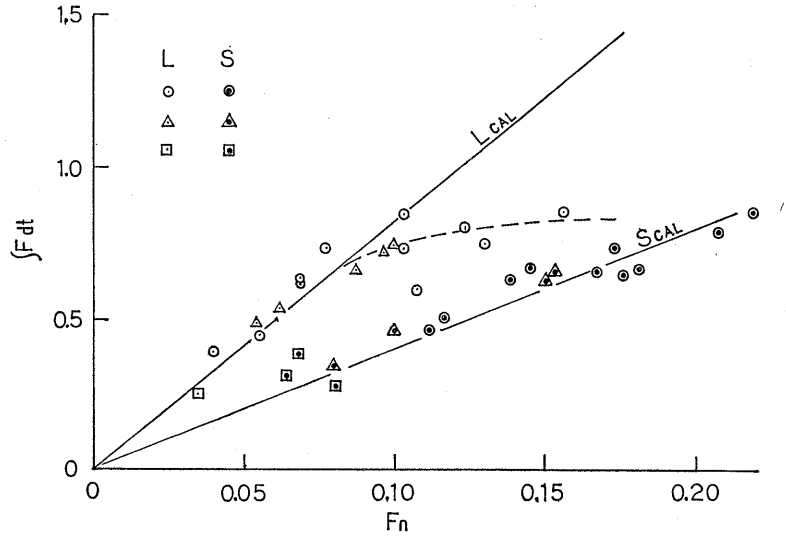


Fig. 6 Measurement value of impulse

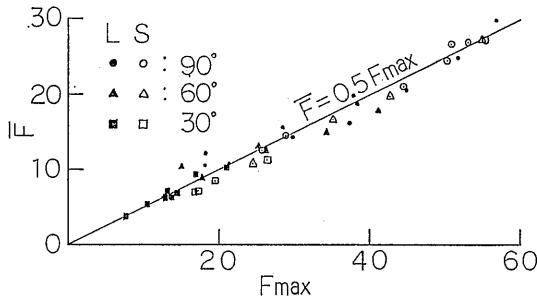


Fig. 7 Comparison of mean and maximum load

程短かくなったためであろう。

平均荷重 $\bar{F} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} F dt$ の値を F_{max} ベースで示したものが Fig. 7 である。 \bar{F} は F_{max} のほぼ 1/2 となった。今回の実験で得られた τ の値は 16~65 msec であり、衝突船の衝突速度が大きくなる程 τ の値は小さくなる傾向が認められた。

5. 実験結果の解析

5.1 船体挙動

停止している被衝突船 (添字 A) に船 (添字 B) が衝突し、衝突後結合して同一速度で移動するような非弾性衝突の場合には、衝突荷重を F 、衝突角を θ 、被衝突船と衝突船の質量を M_A 、 M_B 、また、被衝突船と衝突船の船首尾方向移動時の附加質量を $d_{mx A}$ および $d_{mx B}$ 、被衝突船の左右舷方向移動時の附加質量を

$d_{my A}$ とおくと次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} F \cos \theta &= (M_A + M_B + d_{mx A} + d_{mx B}) \ddot{x}_A \\ F \sin \theta &= (M_A + M_B + d_{my A} + d_{my B}) \ddot{y}_A \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 \ddot{x}_A と \ddot{y}_A は被衝突船の重心の移動加速度の船首尾方向成分と左右舷方向成分である。

(1) 式から、被衝突船の重心位置の船首尾線に対する移動角度 γ_0 は、 $\tan \gamma_0 = \ddot{y}_A / \ddot{x}_A$ から

$$\gamma_0 = \tan^{-1} \left\{ \frac{(M_A + M_B + d_{mx A} + d_{mx B})}{(M_A + M_B + d_{my A} + d_{my B})} \cdot \tan \theta \right\} \quad (2)$$

また、衝突後の両船の重心の共通移動速度を U とすれば、Minorsky の解析方法にならない、運動量保存則から次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} M_B V_B \cos \theta &= (M_A + M_B + d_{mx A} + d_{mx B}) U \cos \gamma_0 \\ M_B V_B \sin \theta &= (M_A + M_B + d_{my A} + d_{my B}) U \sin \gamma_0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

従って、衝突角度と両船の質量および附加質量が定まれば、 U は V_B の関数となる。

即ち、

$$U = K \cdot V_B \quad (4)$$

ここで、

$$K = M_B \sin \theta / (M_A + M_B + d_{my A} + d_{my B}) \sin \gamma_0$$

但し、 $\theta = 0$ のときは

$$K = M_B \cos \theta / (M_A + M_B + d_{mx A} + d_{mx B}) \cos \gamma_0$$

を採用する。

(1)~(3) 式の $d_{my A}$ に対し、Minorsky は $0.4 M_A$

を与えており、有田等⁸⁾は船首衝突時の船殻の破壊に関する模型実験から、衝突初期には Minorsky と同様 $d_{myA}=0.4M_A$ が採用されると報告している。

この値を用いて、 d_{mxA} および d_{mxB} が d_{myA} に比し小さくて省略できると考えると、(2) および (4) 式の γ および K の値は

$$\gamma_0 = \tan^{-1} \left\{ \frac{M_A + M_B}{1.4M_A + M_B} \cdot \tan \theta \right\} \quad (5)$$

$$K = \sin \theta / (1.4M_B + 1) \sin \gamma_0 \quad (6)$$

但し、 $M_B = M_A/M_B$

となる。Table 1 の排水量の値を用い、 θ が 90° 、 60° および 30° のときの U/V_B の値を (5)、(6) 式により計算すると、 $M_A > M_B$ のとき γ_0 は 90° 、 53.54° および 24.28° となり、 U/V_B の値は 0.235、0.253 および 0.286 となる。また、 $M_A < M_B$ のときには γ_0 が 90° 、 57.10° および 27.26° となるから、 U/V_B は 0.624、0.643 および 0.681 となる。

これらの値と実験で得られた衝突後の経過時間に対する U/V_B の曲線 (Fig. 8) とを比較すると、殆んどの場合実験値が小さい。この結果は、附加質量 d_{myA} がの値が計算値で採用した $0.4M_A$ より大きいことを示している。そこで、元良教授^{9),10)}が理論と実験から求めた L/B と d/B の関数で表わした d_{mx} (Fig. 9) と d_{my} (Fig. 10) を採用して計算してみた。

$M_A > M_B$ の場合、使用した模型船では、 $d_{myA} = 0.85M_A$ 、 $d_{mxA} = 0.086M_A$ 、 $d_{mxB} = 0.067M_B$ となるから、 θ が 90° 、 60° および 30° の場合 γ_0 は 90° 、 49.21° および 21.12° となり、 U/V_B は、0.186、0.213 および 0.259 となる。また、 $M_A < M_B$ の場合 d_{myA}

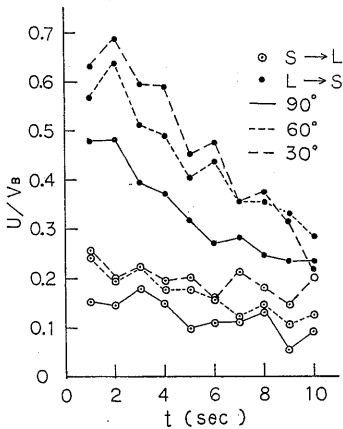


Fig. 8 Transitions of U/V_B after collision (Colliding position: Midship)

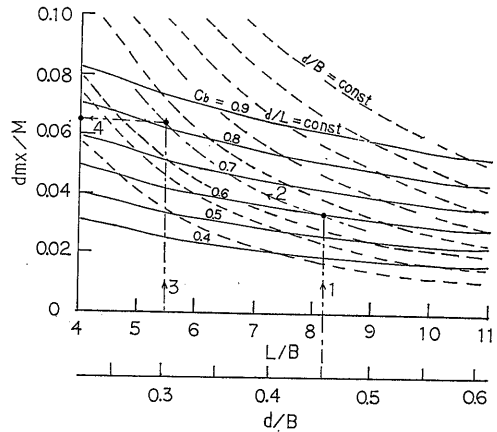


Fig. 9 Added mass abstract for the longitudinal motions (By reference No. 9)

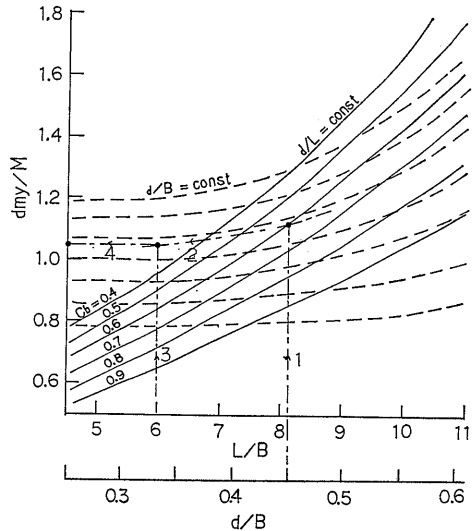


Fig. 10 Added mass abstract for the transverse motions (By reference No. 10)

$= 0.67M_A$ 、 $d_{mxA} = 0.067M_A$ 、 $d_{mxB} = 0.086M_B$ となるから、同様に γ_0 は 90° 、 56.01° および 26.31° となり、 U/V_B は 0.554、0.579 および 0.625 となる。これらの計算値は、 θ が 90° の場合を除き、 M_A 、 M_B が何れの場合もほぼ Fig. 8 の実験値と合致した。 θ が 90° の場合の U/V_B の実験値と計算値の比をとってみると、 $M_A > M_B$ のとき $0.18/0.186 = 0.968$ 、 $M_A < M_B$ のとき $0.481/0.554 = 0.868$ となる。両者の比が異なるのは、衝突時に被衝突船が小さいと大きく

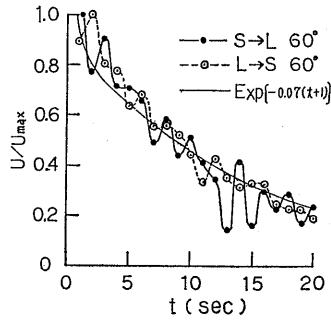


Fig. 11 Transitions of U/U_{\max} after collision (Colliding position: Midship)

ローリングを起し、衝突船の保有する運動量を消失させさせたためと考えられる。従って、Fig. 9 および Fig. 10 から附加質量を求め、(2) および (4) 式から U/V_B を計算すれば、衝突時の最大共通速度 U_{\max} を決定し得るものと考えられる。

衝突後の経過時間に対する共通速度の推移は、Fig. 8 のように衝突後 1~2 秒で最大となり、その値は衝突角度が小さい程大きい。これを U/U_{\max} で示したものが Fig. 11 である。減衰曲線はほぼ

$$U/U_{\max} = \text{Exp} \{-0.07(t+1)\} \quad (7)$$

の曲線となった。Fig. 11 は θ が 60° の場合を示しているが、 θ が 90° のときも同様であった。また、Fig. 11 には両船の質量比 M_B が 2.324 および 0.430 の両方の場合を示してあるが、 U/U_{\max} の値は両者共ほぼ等しい。この結果は、 U/U_{\max} の推移が両船の質量比に無関係に定まることを示すものである。Fig. 11 の実験曲線が波動状を示すのは、船位計測上の誤差、衝突時に被衝突船の衝撃的移動によって生じた水面の波動並びにローリング等によるものと考えられる。

衝突点が被衝突船の中央附近から離れた場所のときには偏心衝突の理論が適用出来る。この場合、被衝突船の重心の回転角加速度 $d\omega/dt$ は、被衝突船に作用するモーメントを M 、被衝突船の慣性モーメントと附加慣性モーメントをそれぞれ I_A 、 dI_A 、被衝突船の重心と衝突力の作用点との距離を s としたとき、

$$d\omega/dt = M/I = F \cdot \sin\theta \cdot s / (I_A + dI_A) \quad (8)$$

となる。衝突力 F は、被衝突船の重心の移動速度を u とおくと、衝突船の運動量が保存されると考えると $F = M_A du/dt$ とおけるから、被衝突船の慣性半径と附加慣性半径を k_A 、 dk とすれば

$$d\omega/dt = \{s \cdot \sin\theta / (k_A^2 + dk^2)\} du/dt \quad (9)$$

が得られる。(9) 式を $t=0$ のとき $u=0$ 、 $\omega=0$ の条

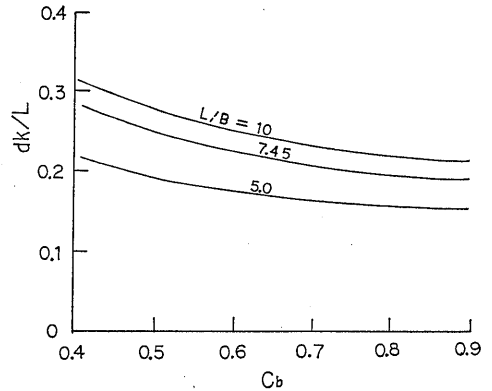


Fig. 12 Added moment of inertia for the rotary motions (By reference No. 11)

件で解くと、

$$\omega = \{s \cdot \sin\theta / (k_A^2 + dk^2)\} U \quad (10)$$

となる。今、被衝突船の回転中心と重心との距離を \bar{s} とおくと、 $U = \bar{s} \cdot \omega$ となるから、(10) 式から

$$\bar{s} = (k_A^2 + dk^2) / s \sin\theta \quad (11)$$

を得る。問題を簡単にするため、船体を便宜的に直方体で近似すると、 $k_A^2 = (L^2 + B^2) / 12$ となるから、 dk を元良教授¹¹⁾の Fig. 12 の図表から求めれば、 θ および s が既知のとき \bar{s} が求まり、 ω を実験により測定出来れば U の値を得ることが出来る。

以上の計算で求めた U の値は、被衝突船に衝突船が 90° に近い角度で衝突したときのもので、衝突角度が小さい場合は、被衝突船の左右舷方向へ作用する衝突力で回転し、更に船首尾方向成分の衝突力で首尾何れかの方向へ移動するから、 U の値は異なったものとなる。

被衝突船の重心の船首尾方向移動速度を U_x とすると、次式が成り立つ、

$$F \cos\theta = (M_A + M_B + d_{mx A} + d_{mx B}) dU_x/dt \quad (12)$$

衝突力を $F = M_B dV_B/dt$ とおいて、 $t=0$ のとき $U_x = 0$ の条件で (12) 式を解くと、 $U \cos\theta = U_x$ であるから、

$$U_x = M_B V_B \cos\theta / \{M_A + 2M_B + d_{mx A} + d_{mx B}\} \quad (13)$$

となる。従って、重心の真の移動速度 U_{G_2} (Fig. 13 の \bar{G}_2) は、移動の形を Fig. 13 のように考えると、(10) 式の U を U_G とおきかえたとき、

$$U_{G_2} = U_G \cos\gamma + U_x \cos\sigma \quad (14)$$

で表わされる。ここで、回転角度を α とすると、

$$\gamma = \tan^{-1} [\cos(\alpha/2) / \{U_G/U_x \pm \sin(\alpha/2)\}] \quad (15)$$

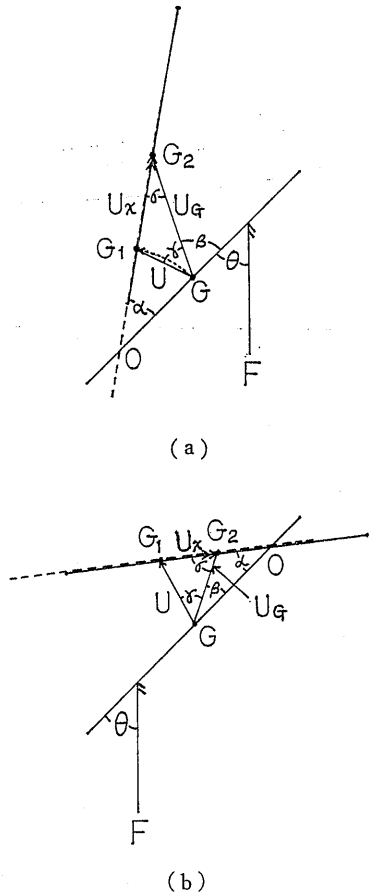


Fig. 13 Rotation and shift pattern of struck ship

$$\sigma = \{(\pi \mp \alpha)/2\} - \gamma \quad (16)$$

となる。(15), (16) 式の符号は, Fig. 13 (a) のように対向してくる被衝突船の船尾側に衝突したときには上段をとり, Fig. 13 (b) のように船首側に衝突したときには下段をとる。

重心 G の真の移動方向は, 衝突前の被衝突船の船首尾線に対し β の角度の方向となるが, この値は, 対向船の右舷側へ衝突したとき

$$\beta = \{(\pi \pm \alpha)/2\} - \gamma \quad (17)$$

左舷側のとき

$$\beta = \{(\pi \mp \alpha)/2\} - \gamma \quad (18)$$

となる。(17), (18) 式の符号のとり方は (15), (16) 式の場合と同様である。

衝突実験で得られた U_{GG_2} の値を $U_{(M)}$ とし, (14) 式で計算した U_{GG_2} の値を $U_{G(\sigma AL)}$ としたときの比を衝突角度と衝突点に対してプロットしたものが Fig. 14 である。但し, (15)~(18) 式の α 値は測定値を用いた。比の値は衝突点が中央に近くなる程何れの衝突の場合でも小さくなったが, これらの値の平均値は大型船が小型船に衝突したとき 0.62, 逆の衝突の場合 0.45 となった。比の値が, 衝突する両船の質量比でこのように異なったのは, 衝突時の反力の差によるものと考えられる。

船が衝突する場合には, 衝突船が被衝突船の船体に食い込み, 塑性変形と破壊が終了するまで衝突エネルギーが消費されるものと考えられるから, 被衝突船の移動に費されるエネルギーは減少し, U_{GG_2} の値は計算値に比し更に小さくなる。

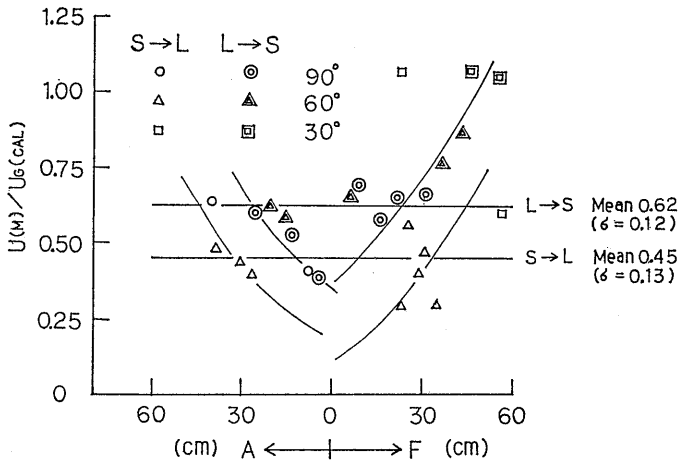


Fig. 14 $U_{(M)}/U_{G(\sigma AL)}$ for colliding positions

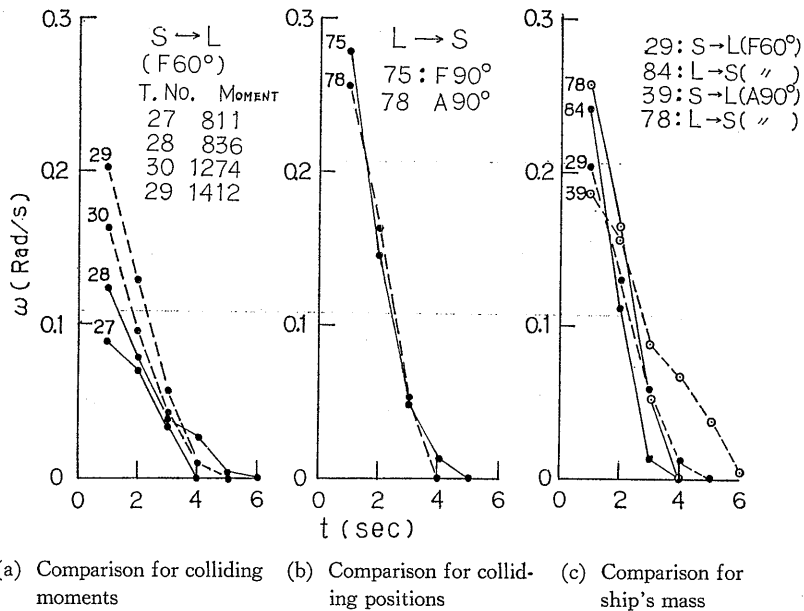


Fig. 15 Transitions of angular velocity (Number is Test No.)

被衝突船の衝突時の重心の回転角速度の測定値をプロットしたものが Fig. 15 である。尚、図中の番号は Test No. である。衝突直後の角速度は (a) のように被衝突船に加えらるるモーメントの最も大きい No. 29 の場合が最大で、モーメントが小さくなると共に減少したが、経過時間に対する角速度の減少は、初期の角速度が大きい程大きく、そのため、何れの場合も 4~5 秒経過後には角速度はゼロとなった。衝突点の差異による角速度の絶対値の差も船首側 (F) と船尾側 (A) への衝突の場合の (b) のように殆んど認められない。

衝突時のモーメントが殆んど等しい場合の両船の質量比 M_A/M_B (L→S のとき 0.430, S→L のとき 2.324) の差異による角速度の比較を試みたものが (c) である。初期の角速度は被衝突船が衝突船より小さい即ち、 $M_A/M_B < 1$ のときの方が大きい、持続時間は逆の場合の方が長い。この結果は被衝突船が大きいと初めの角速度は小さいが、回転は容易に終了しないことを示している。

5.2 衝突荷重

衝突時の力積 $\int Fdt$ は、衝突後両船が結合するような非弾性衝突では、衝突力の作用時間を τ としたと

き、

$$\int_0^\tau Fdt = M_B(V_B \sin \theta - U \sin \gamma_0) \quad (19)$$

(3) 式から $U \sin \gamma_0$ を求めて (19) 式に代入すると、

$$\int_0^\tau Fdt = M_B V_B \sin \theta \{1 - M_B / (M_A + M_B + d_{myA} + d_{mzB})\} \quad (20)$$

が得られる。

実験で求めた $\int Fdt$, V_B および θ を (20) 式に入れて被衝突船の附加質量 d_{myA} の平均を計算した結果、約 $1.22M_A$ となった。この値を採用して (20) 式から計算で求めた力積と実測した力積との比を示したものが Fig. 16 である。比の値は 1 ± 0.2 の範囲に入った。

$d_{myA} = 1.22M_A$ として (20) 式で計算した力積の曲線は、Fig. 6 に示したように、衝突船の質量が被衝突船の質量より小さい場合はよく合致する。しかし、衝突船の質量の方が大きいと L 船の曲線のように衝突速度が或る値以上になると合致しなくなる。これは、 $M_A/M_B \ll 1$ のときには、瞬間的に大きな荷重が加わるが、直ぐに被衝突船が押し流されてしまうためと考えられる。

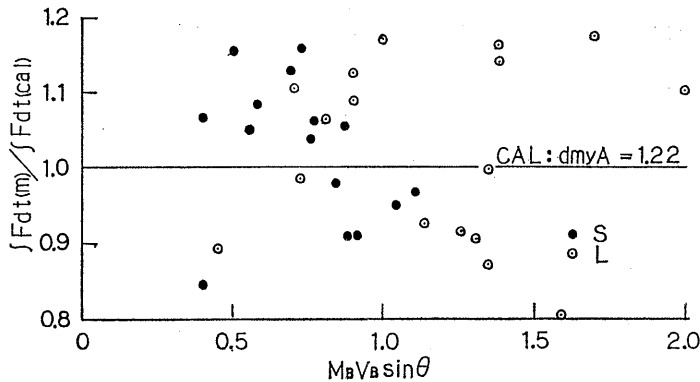


Fig. 16 Ratio of measured and calculated impulse

6. 結 び

衝突による災害防止に関する研究の一過程として、衝突時の船体の挙動並びに衝突荷重について実験を行い若干の考察を加えた。実験の方法にはなお多くの問題点が残されているが、出来ればこれらを改良発展させて衝突により発生する油の流出拡散、流出油による海面火災等の状態も模擬できるようなものとして考えている。

その第一段階である船体の挙動に関する実験の結果、得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) 被衝突船の重心附近に衝突が生じた場合には、被衝突船は衝突船の直前の進行方向にほぼ平行な移動を行い、その移動速度は元良教授の示した附加質量の値を用いれば (2), (4) 式で表わされる。また、その時間的変化は (7) 式で表わされて両船の質量の比には関係がない。
- (2) 被衝突船の重心から船の長さの 1/6 以上離れた点に衝突が生じた場合には、被衝突船は暫くの間は主に回転運動を行い、やがて (1) と同様な平行運動に移行する。回転運動の持続時間は本実験のような模型船では約 3 秒間であり、この回転角速度と重心の移動速度は (10) 式で表わされる。
- (3) 上記 (2) の場合でさらに衝突角が鋭角の場合には、被衝突船の重心の移動速度は (14) 式で表わされる計算値よりもかなり低い。回転角速度は加えられる回転モーメントに比例するが、回転運動の持続時間は被衝突船の質量に比例する。
- (4) 被衝突船の質量が衝突船の質量より大きい場合には、衝突荷重の最大値は衝突船のフルード数の 1.5 乗にほぼ比例し、平均荷重は最大値の約 1/2

となる。

- (5) 衝突による力積の値は非弾性衝突と考えたときの (20) 式で表わされるが、被衝突船が衝突船に較べて著しく小さいと適合性が悪くなる。
- (6) 上記 (1)~(3) の関係は定性的に充分推測できる事項であるが、附加質量として Minorsky が示した $0.4M_A$ では合致せず、元良教授の示した附加質量の値を用いることにより、衝突の場合の船体運動の値が定量的に求められた。

本研究を開始するに当たり、花岡達郎元運動性能部長、同部森信篤元研究室長から、また船尾洋二元機装部長から有益な助言を頂き、さらに平本文男東海大学教授、小山健夫東京大学教授からも御懇切な御指導を頂いたことに対して深く感謝の意を表します。また船体構造部有田喜久雄室長をはじめ実験に協力、指導を与えられた関係各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 翁長一彦, 桐谷伸夫: 避航操船に関する視認システムの信頼性について, 船舶技術研究所報告, 第 17 巻第 5 号 (1980), pp. 1~10
- 2) 原 潔: 避航システムモデルによる衝突確率の考察, 日本航海学会論文集, 第 50 号, 昭和 48 年 12 月
- 3) 原 潔: 避航操船の信頼性工学的考察, 関西造船協会, 昭和 52 年度秋季連合大会
- 4) V. U. Minorsky: An Analysis of Ship Collisions with Reference to Protection of Nuclear Power Plants, Journal of Ship Research, Vol. 3, No. 2 (1959), pp. 1~4.
- 5) Ichiro Emori, Keiichi Ishizaka: Reconstruction of Ship Collision by Scale Models, 日本機械学会 HOPE 国際シンポジウム, (Oct. 1977)
- 6) M. P. Pakstys, D. M. Konigsberg and H. E.

- Sheets: Ship Collision Tests with Floating Ship Models, National Maritime Research-Kings Point, (July 1977)
- 7) M. J. Petersen: Dynamics of Ship Collisions, The Technical University of Denmark, Report No. 185, (July 1980)
 - 8) 有田喜久雄, 北村勝英: 原子力船耐衝突構造の研究について, 日本造船学会誌, 第 521 号 (1972), pp. 8~20
 - 9) 元良誠三: 船体運動に対する附加質量および附加慣性モーメントについて, その 2 前後動に対する附加質量, 造船協会論文集, 第 106 号 (1959), pp. 59~62
 - 10) 元良誠三: 船体運動に対する附加質量および附加慣性モーメントについて, その 3 左右動に対する附加質量, 造船協会論文集, 第 106 号 (1959), pp. 63~68
 - 11) 元良誠三: 船体運動に対する附加質量及び附加慣性モーメントについて, 其の 1. 旋回に対する附加慣性モーメント, 造船協会論文集, 第 105 号 (1959), pp. 83~92