船体構造の耐衝突・座礁性能に関する研究

Study on Structural Toughness of Ships against Collision and Grounding

技 術 本 部 **黒 岩 隆 夫*1 北 村 欧*2** 神戸造船所 川 本 要 次*3

海洋環境の保全及び経済的損失の低減のために、タンカーから海洋への油流出の可能性を極力少なくする必要がある.近年の 国内外の原油流出事故に対応して、オイルタンカーに関する国際法規が強化され、新造の大型タンカーにおいてはダブルハル構 造あるいはそれと同等の構造様式が義務づけられた.本報では、タンカーの衝突及び座礁に関する大規模実験並びに数値シミュ レーションについて示す.これらの検討を通じて、衝突・座礁による船体構造の破壊のメカニズムを明らかにし、船体構造の抵 抗力や吸収エネルギーを推定する数値シミュレーションの方法を提案した.このシミュレーション技術によって、実際の衝突・ 座礁事故の再現などが可能となった.

Accidental oil spills from crude oil tankers is one of the great concerns of the world from the viewpoints of the preservation of marine environment and the reduction of economic damage. In the wake of the grounding accident in Alaska in 1989, a new international design standard, that newly constructed large tankers should have a double hull construction or its equivalent, came into effect. This paper discusses large-scale experiments and numerical simulations of collisions and groundings, which were carried out to study the failure mechanisms, resistance forces and energy absorption of ship structures. Employing the proposed numerical method, simulations of actual collision and grounding accidents were performed. The studies were conducted under contract with the Association for Structural Improvement of the Shipbuilding Industry (ASIS) of Japan.

1.まえがき

1989年に発生したアラスカ沖でのタンカー座礁事故による大量 の油流出を契機に、造船業基盤整備事業協会は1991年から"タン カー構造の破壊予測技術の研究プロジェクト"を運輸省からの補 助金を受け発足させ、7年計画で実施中である⁽¹⁾. この研究の目的 は、まず船体構造の破壊メカニズムを明らかにし、衝突や座礁に 対する船体構造の抵抗力や吸収エネルギー能力を推定する方法を 提案することである. さらにこの成果を用いて、種々の構造様式 の耐衝突・座礁性能の比較をし、事故の際の油流出量を低減する ためのタンカー構造の提案を可能とすることである.

当社はこの造船業基盤整備事業協会の研究プロジェクトを受託 し、実船などを用いた衝突・座礁実験や、数値シミュレーション 技術の検討を実施してきた.本報では、大規模実験及び数値シミ



図1 実船衝突実験 長さ約80mの船を用いオランダの運河で実施した. Collision experiment of actual ship

ュレーションの結果を紹介する.

2. 大規模衝突·座礁実験

大規模な衝突実験及び座礁実験を、オランダとの国際共同実験 として実施した. 衝突実験の様子を図1に、座礁実験による供試 模型の破壊状況を図2に示す.

(1) 大規模実験の意義船体構造は、船の大きさと比較すると薄い鋼板を溶接によっ



図2 座礁実験により破壊された二重底模型 円すい形 の岩礁模型により船底外板が破断した様子を示す. Model of double bottom after grounding experiment

*1 長崎研究所強度研究室 工博 *2 長崎研究所強度研究室 て組立てたものであり、衝突・座礁による船体構造の破壊を検 討するためには、鋼板や溶接の破壊の条件を適切に捕える必要 がある.また、事故による貨物油の流出はタンクの壁が破れて 生じるので、鋼板の破断は貨物油が流出する条件でもある.

一方, 縮尺模型による実験を試みる際には, 鋼板が破断する 特性が板厚によって変化することや, 溶接形状の縮小に限界が あることに, 注意が必要である.

従来の実験は 1/10 程度の縮尺模型が用いられてきたが、本研 究では 1/4~1/2 の縮尺の模型を用いて、より現実に近い実験を 実施した.図1,図2の実験のほかにも、構造要素模型に対する 衝突実験や静的な座礁実験を実施し、船体構造を構成する鋼板 の破断条件や溶接部の破損の状況を計測・観察し、衝突や座礁 による船体構造の破壊メカニズムを明らかにすることができた. (2) 衝突実験⁽²⁾

長さ約80mの船2隻を用いた衝突実験を実施した.実験に際 し,被衝突船は船体の4箇所をシングルハル(単殻)あるいは ダブルハル(二重殻)として改造し,衝突船は船首部を剛に補 強した.停止している被衝突船の船側部に,約8knの速度で衝 突船を突入させた.

(3) 座礁実験(3)

長さ約70mの船を改造して、VLCC(超大型タンカー)の船 底構造の1/4縮尺模型を取付け、水面下に固定したコンクリー ト製の岩礁模型に対して座礁させる実験を行った。図2は座礁 実験によって破壊された二重底模型で、船底外板が岩礁模型の 両側で破断し、帯板状に変形している様子が分かる。

これらの実験により、衝突・座礁により船体構造に作用する 力、衝突船の船首部や岩礁が船体構造に突入する量、及び船体 の運動などを計測し、貴重なデータが得られた.また、単殻構 造や二重殻構造が吸収するエネルギーの大きさや、船体運動と して吸収されるエネルギーの割合などが把握できた.

3. 数値シミュレーション

3.1 シミュレーション手法の検討^{(1)~(3)}

衝突・座礁に対する船体構造の抵抗力や吸収エネルギーを推定 するために、従来から解析的な方法が提案されている.この方法 では、破壊のモードを仮定する必要があるので、実験結果や事故 調査結果がない新しい構造様式に適用する際には十分な注意が必 要である.

本研究では、船体構造の破壊の進行をシミュレートするために、 有限要素法による数値解析手法を用いた.この解析法は構造を有 限要素でモデル化し、動的な応答を陽解法により計算するもので、 構造物の弾塑性変形及び大変形や破断を時間を追ってシミュレー トできる.この方法は自動車の衝突シミュレーションにも適用さ れているが、当社では船舶の衝突・座礁を解析するために、基幹 プログラムとして採用した DYNA-3 D⁽⁴⁾に、新たに下記の計算機 能を検討して追加した.

(1) 鋼板の破断

船舶の衝突・座礁事故では構造の破壊が広範囲に生じるため, 要素の数が多くなり計算の規模が大きくなる.そこで,本研究 プロジェクトでは計算精度を保ちつつ適切に鋼板の破断をシミ ュレートできる方法を提案した.

(2) 溶接の破壊

溶接部が破壊されると船体構造の破壊モードや吸収エネルギ ーが変化する.本研究プロジェクトでは溶接部の破壊を適切に シミュレートする方法を提案した.

(3) 構造破壊と船体運動の連成シミュレーション

船舶の衝突・座礁では,船体構造が破壊されつつ船全体が運動する.これらを連成してシミュレートする方法を提案した. 3.2 数値シミュレーションの検証

図1に示した実船衝突実験に対するシミュレーション結果を, 図3に示す⁽⁵⁾. 同図で横軸は衝突船の船首が被衝突船の船側構造に 貫入する量で,縦軸が衝突により船側構造に作用する力である. 貫入量が0.8 m 以下の範囲で,前述の機能追加前には実験結果と 計算結果は異なっていたが,シミュレーション手法を検討し機能 を追加した結果,両者はほぼ一致するようになった.また,参考 文献(3)に示したように,図2の座礁実験についても,計算と実験 結果はほぼ一致した.

これらの比較から、本計算手法が実船規模の衝突・座礁をシミ ュレートできることが確認できた.



図3 実船衝突実験での衝突力 図1の衝突実験とその数値シミュレー ションによる衝突力を示す. Collision force by numerical simulation and by experiment shown in Fig.1

3.3 実際の事故のシミュレーション解析(6)

3.3.1 衝突事故

1992年にマラッカ海峡で発生した衝突事故を前述の数値解析手 法を用いてシミュレートした.

事故の状況は以下のとおりである.

100 kDWT (Dead Weight Ton:載貨重量)の大型タンカー (シングルハル構造)の船側部に、20 kDWT のコンテナ船が約 22 knの速度で、ほぼ真横から衝突した。衝突の結果、タンカーの船 体構造は図4に示すように、船側、上甲板、船底及び縦通隔壁の 広い範囲が破壊され、約 10 000 tの重油が流出した。図4 で居住区 が黒ずみ、船体構造にしわが生じているのは、衝突により発生し た火災の影響である。

図5にこの衝突事故をシミュレートした結果を示す.数値計算のために,被衝突船の船側構造及び衝突船の船首構造を,それぞれ約70000要素,約13000要素の有限要素でモデル化した.

図5は衝突開始後1.3sでの両船の変形状況を示し、衝突された タンカーの船側及び上甲板に大きな変形が生じていること、衝突



図4 衝突事故による船体構造の破壊の様子 1992 年マラッカ海峡で 発生した 100 kDWT VLCC の事故を示す. Structural failure of struck ship by actual collision



図5 **衝突事故の数値シミュレーション** 図4の衝突事故のシミュレー ション,衝突開始後1.3 s. Numerical simulation of collision accident shown in Fig.4

したコンテナ船の船首バルブが横に曲っていることが分かる.数 値計算で得られた構造破壊の範囲は、実際の事故とほぼ一致した. シミュレーション計算によると、衝突によって船側構造に作用 した最大荷重は 12 000 tf である.また、タンカーの船側構造とコ ンテナ船の船首構造が吸収したエネルギーは合計で 140 000 tf・m であり、そのうちの約7割が衝突されたタンカーの船側構造によ るものである.

なお,約4sの衝突をシミュレートするのに,浮動小数点演算能 力 SPECfp 92=500 程度の EWS (Engineering Work Station) によって,約160hの計算時間を要した.

3.3.2 座礁事故のシミュレーション

1975年にシンガポール沖で発生した,240 kDWT の大型タンカ ー (シングルハル構造)の座礁事故をシミュレートした.

この船は満載状態で約12knの速度で岩礁に座礁し,船首から約180m(船長の約60%)の範囲の船底構造が帯状に破壊された. その結果約10000tの原油が流出した.

シミュレーションによる船首部船底構造の破壊の様子を図6に, No.1貨物油タンクの破壊の様子を図7に示す.これらの破壊の状況は、事故後に観察された損傷状況とほぼ一致する.

シミュレーション結果によると、この座礁によって貨物油タン



図6 座礁事故の数値シミュレーション 般首部船底構造の破壊,座礁 後3.3 s.

Numerical simulation of grounding accident



這の破壞,座礁開始後5s. Numerical simulation of grounding accident

クの船底構造に作用する力は平均で2500 tf である。また,船底構 造のうち縦通部材(船底外板やその縦通ろっ骨など)のみが岩礁 に接触している間(図7参照)に,船底構造に作用する力は1600 tf である.これらから,表1に示すように縦通部材が全体の約60 %のエネルギーを吸収し,残りの約40%は横部材(横けたなど) が吸収したことが分かった。ただし、ダブルハル構造ではこの関 係は変化し,図2の座礁実験でのダブルハル構造については表1 に示すように,縦通部材が約40%,横部材が約60%であった。

また、岩礁に接触する縦通部材の断面積は、この座礁事故のシ

表1 座礁時に船底に作用する力と吸収エネルギー(数値シミュレーショ ン結果)

Contact force during grounding and energy absorption of bottom structure

	船底構造に作用する力		エネルギー吸収の割合	
	平均	岩礁が縦通部材 のみに接触中	縦通部材	横部材
	(A)	(B)	(C) = (B) / (A)	(D) = 1 - (C)
座礁事故(図 6)(図 7) シングルハル構造	2 500 tf	1 600 tf	約60%	約40%
座礁実験(図2) ダブルハル構造	53 tf	20 tf	約 40 %	約 60 %

三菱重工技報 Vol. 34 No. 5 (1997-9)

ミュレーションの場合 4 500 cm² である。前述の 1 600 tf をこの断 面積で除すると4 kgf/mm² であり、鋼板の降伏応力 24 kgf/mm² の約15%である。これは、座礁の際に船底構造の縦通部材は、船 長方向に十分圧縮されて抵抗する前に、上方へ曲げられるためと 考えられる.

なお、この座礁事故を約70000の有限要素を用いて約15sシミ ュレートするために、SPECfp 92=500 程度の EWS によって、約 450hの計算時間を要した.

これらの数値シミュレーションにより、衝突事故における衝突 船の喫水の影響や被衝突船の船速の影響、座礁事故における岩礁 の大きさや摩擦の影響なども検討することができた.

び 4. む す

本研究では、まず衝突・座礁に対する船体構造の破壊メカニズ ムを大規模な実験により把握した.

さらに、船体構造破壊をシミュレートする数値計算の方法を検 討し、実験との比較によってその精度を検証した.実際に発生し た衝突事故及び座礁事故のシミュレーション解析を実施し、本シ ミュレーション手法が大型タンカーの事故解析にも運用できるこ とを示した.また、数値シミュレーションを通じ、事故時のエネ ルギー吸収において、船体構造の各部分がどの程度寄与するのか を検討した.

今後,造船業基盤整備事業協会の研究プロジェクトを通じて、 本シミューション技術が船体構造の耐衝突・座礁性能の検証に使 用されていく予定である.

参考文献

- (1) 造船業基盤整備事業協会、タンカー構造破壊/油流出予測技 術研究成果報告会(1992年7月,1993年7月,1995年2 月,1995年7月,1996年7月)
- (2) Kuroiwa, T. et al., Study on Structural Damage of Ships due to Collision and Grounding, The Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE'94) Vol.IV (1994) p.416
- (3) Kitamura, O. et al., Large-Scale Grounding Experiments and Numerical Simulations, Ship Technology Research Vol.43 No.2 (1996) p.62
- (4) Livermore Software Technology Corp., LS-DYNA User's Manual (Nonlinear Dynamic Analysis of Structures in Three Dimensions (1997)
- (5) Kuroiwa, T. et al., Numerical Simulation of Collision and Grounding of Ships, International Conference on Technologies for Marine Environment Preservation (MAR-IENV'95) Vol.1 (1995) p.66
- (6) Kuroiwa, T., Numerical Simulation of Actual Collision & Grounding Accidents, International Conference on Designs and Methodologies for Collision and Grounding Protection on Ships by SNAME & SNAJ (1996) p.7-1

低騷音式防食舵

第 1977474 号 実用新案登録 登明者 長崎造船所 川添 強

複数のリブを組み合わせた骨組構造と、同骨組構造に張設 された外板とからなる舵において、キャビティ崩壊音の共鳴 を防止するとともに舵内部の腐食を防止すべく、上記リブに 連通孔が形成されて、同連通孔を通じ舵内部に充填された発 泡樹脂材が設けられ、同発泡樹脂材が、上記舵内部への原液 注入時に同原液中に耐食性ペイントを含有し注入後に発泡固



化したものであることを特徴とする,低騒音式防食舵. 図面の簡単な説明

図1,2は本考案の一実施例としての低騒音式防食舵を示す もので、図1はその斜視図、図2は図1のA-A 矢視図であ る.



三菱重工技報 Vol. 34 No. 5 (1997-9)