



船体の縦曲げ最終強度に関する研究

矢尾 哲也*

Study on Ultimate Ship Hull Girder Strength

Key Words : Longitudinal Bending, Buckling/Ultimate Strength, Nonlinear Structural Response Analysis

1. はじめに

近年、日本海におけるナホトカ号(1997年1月)、ビスケー湾におけるエリカ号(1999年12月)、スペイン沖におけるプレステージ号(2001年11月)など、タンカーの折損沈没事故による油流出が重大な環境問題を引き起こしている。これらの事故はいずれも、船体が老朽化して縦曲げ最終強度が十分でなかったことが原因であった。同種の事故が発生した菱洋丸の損傷の様子を、図1に示す。この場合、船体は逆への字形に折れ曲がっているが、船体の破断そして沈没には至っていない。

波のない平水中に浮かんでいる船体には、自身の重量、載貨物重量が下向きに、浮力が上向きに作用する。波浪中ではさらに、波による力が船体に作用

する。これらの船体に作用する力を、通常は外力と総称する。これらの外力が作用すると、船体横断面には剪断力や曲げモーメントなどの内力が発生する。縦曲げ最終強度とは、船体の横断面が耐え得る最大曲げモーメントを意味する。

ところで、船体は薄板で構成されている。長さ300mを超える超大型タンカーでも、船体を構成する鋼板の厚さは、高々25mm程度である。このことは、0.25mmの厚さの材料で3mの模型を作ることに相当する。従って、薄板だけの船体構造では上記の外力に耐えられないので、薄板に骨材を縦横に配置して補強している。シングルハル構造の大型タンカーの主要な骨材の配置を、図2に示す。実船ではさらに、数多くのスチフナやブラケットが取り付けられている。



図1 折損した菱洋丸(1976年9月)

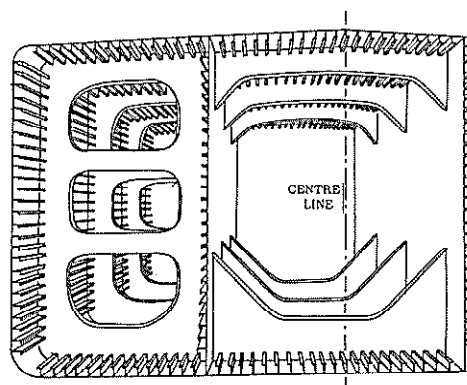


図2 シングルハルタンカーの構造図



* Tetsuya YAO

1945年3月生

昭和42年大阪大学工学部造船学科卒業
現在、大阪大学・大学院工学研究科・
船舶海洋工学専攻、教授、工学博士、
船舶工学

TEL 06-6879-7583

FAX 06-6879-7594

E-Mail yao@naoe.eng.

osaka-u.ac.jp

船体構造を設計する場合、船体に作用する外力を設定し、その力のもとでの構造応答を求め、その結果に基づいて構造破損が生じないように部材の寸法を決定する。従って、船体構造設計は、まず外力を正しく設定することから始まる。平水中で作用する外力は、船体寸法と構造配置が決まれば、容易に算

定することができる。しかしながら、波による外力は自然現象が相手であり、単純に決めることはできない。通常は、従来の観測結果に基づいて、 10^{-8} 回の発現確率の波(10^8 回に一回出会う最大の波)による外力を設定する。ちなみにこの波は、船体が約20年に一回出会う大きさの波に相当する。

船体に作用する最大外力の設定が終わると、つぎは船体横断面が耐え得る最大曲げモーメントである縦曲げ最終強度を算定する必要がある。前置きが長くなったが、本稿では、この縦曲げ最終強度解析法に関する研究およびその成果の活用について紹介する。

2. 船体の縦曲げ最終強度解析法

船体の縦曲げ強度に関する研究は、材料のヤング率で知られるThomas Youngに始まる。彼は1814年、船体を一本の梁と見なし、自重と波の形を仮定して得られる分布荷重のもとで船体横断面に生じる剪断力と曲げモーメントを計算している^[1]。

一方、極限状態における船体の縦曲げ強度について初めて検討したのは、Isambard K. Brunelであると言われる。Brunelは1850年代に当時最大の客船Great Eastern号を設計するに当たって、縦曲げ強度の理論的検討を行っている^[2]。本船は当時の標準的な船の2倍の長さを有する巨大船であったが、Brunelは座屈状態を想定して断面に発生する最大曲げモーメントを計算し、縦曲げの引張り側で材料が破断しないように上甲板と船底外板の板厚を決めている。

1874年、William G. Johnは英国造船学会で、縦曲げ強度算定のための基本的な考え方を示した^[3]。すなわち、波に関しては最も船体にとって厳しい条件(波長と船長が等しく、波の山が船体中央または船首尾にある状態)を考え、船体中央断面における曲げモーメントを計算する。つぎに、梁理論を適用してこの断面の最大応力を計算し、破断が発生しない条件より甲板の板厚を決めた。

John以降、曲げモーメントの計算方法および応力の計算方法は様々に改良され、板厚を決める条件も材料の破断応力から降伏応力、さらに座屈応力へと変化して行ったが、基本的な考え方はJohn以降変化していない。とは言っても、計算方法の改良には目覚しいものがある。

始めは、前述のように材料力学の梁理論を適用して、曲げモーメントによって断面に生じる直応力を計算した。この縦曲げ応力の計算には長らく梁理論が適用されて来たが、近年、計算機環境と有限要素法の発展に伴い、弾性応答解析の範疇では正確な応力算定が可能となっている。ただし、この計算は単に船体全体が弾性挙動すると仮定した場合に各部材に発生する応力を求める計算であり、外力がどの大きさになると構造崩壊が生じるかの情報を与えるものではない。

船体横断面がどこまでの外力に耐え得るかを明らかにするための計算を始めて実施したのは、J. B. Caldwellである^[4]。彼は1965年、船体横断面の全断面塑性曲げモーメントを、曲げの圧縮側にある部材の座屈発生による耐力低下を考慮した形で計算する方法を示し、この全断面塑性曲げモーメントを縦曲げ最終強度とした。

Caldwellの方法は、断面を構成する部材が全て同時に最大耐力に達する、あるいは、達する時期は異なっても達した後、その最大耐力を保つと仮定していることになる。実際の崩壊挙動は、断面を構成する個々の部材が順次座屈・塑性崩壊して耐力が低下しながら、断面全体の最終強度に達する、いわゆる逐次崩壊挙動となる。

このような逐次崩壊挙動を追跡するためには、材料非線形性(降伏の影響)と幾何学的非線形性(座屈の影響)を考慮した非線形構造応答解析の実施が必要となる。そのための近似的な計算方法として、Smithの方法^[5]がある。この方法は、船体横断面を防撓材と防撓材間の板よりなる要素に分割し、各要素の軸荷重のもとでの挙動を表す平均応力～平均ひずみ関係を、座屈と降伏の影響を考慮して予め求めておく。つぎに、断面に曲率を増分的に与え、各要素が予め求めた平均応力～平均ひずみ関係に従って挙動すると仮定して、断面の逐次崩壊挙動を追跡する。この方法は単純な方法ではあるが、曲げが支配的な場合には船体横断面の崩壊挙動を比較的精度よく追跡できる方法として評価されており、縦曲げ最終強度の計算に広く適用されている^[6]。

最も厳密な方法は、材料非線形性および幾何学的非線形性を考慮した有限要素法である。しかしながら、座屈・塑性崩壊解析を実施するためには、船体を要素に分割する際に、通常の線形応答解析の場合

と異なり、座屈モードを十分正確に再現することが出来る程度の細かい要素分割が必要となる。すなわち、要素数(従って解くべき未知数の数)が膨大な数となり、しかも、非線形挙動を微小な線形挙動を足し合わせる増分計算で追跡する必要がある。従って、現在の発達した計算機環境を持ってしても、船体は非線形構造応答解析の対象としては大き過ぎる。

ただし、現実には有限要素法を適用した船体の縦曲げ崩壊解析が実施されている。しかしながら、この解析には連立1次方程式を解いて構造応答を求める通常の求解過程は含まれておらず、問題を動的な問題に変換して、ベクトル演算だけで解を求める陽解法が適用されている。従って、必ずしも解の精度が保障された解析であるとは言えない。

これに代わる方法として、現在、理想化構造要素法が注目を集めている。この方法は、有限要素法に比べるとより大きな構造単位をひとつの要素と考えて、解くべき問題の自由度の数を減らし、計算を容易にする方法である。この方法は1974年に上田ら^[7]によって始めて提案された方法であるが、近年、新しい要素が開発され^[8]、その実用化への試みが精力的になされている^[9]。これが成功すれば、より簡便に、かつ高精度で船体の縦曲げ最終強度を求めることが可能になると期待される。

3. 本研究成果の社会への還元

本研究成果は、より安全な船体の設計・建造に寄与することは勿論であるが、海洋環境保護のための国際条約の締結にも寄与している。ここでは、後者について紹介する。

ナホトカ号事故は、老朽化した船体の板厚がかなり衰耗し、十分な縦曲げ強度を保持していなかったために発生した^[10]。事故は公海上で発生しており、わが国として未然にこの事故を防止する方法はなかった。そこで、同種の事故の発生を防止するためには国際的な枠組みが必要と考えたわが国政府は、国際海事機構(International Maritime Organization; IOM)の場で老朽船排除のための方策を提案した。

提案に際して、国内に技術委員会を設置して技術的諸問題について検討したが、その中で、板厚衰耗が縦曲げ最終強度に及ぼす影響を明らかにするために、前述のSmithの方法による一連の解析を11隻の、また、陽解法を用いた有限要素法解析を3隻のシン

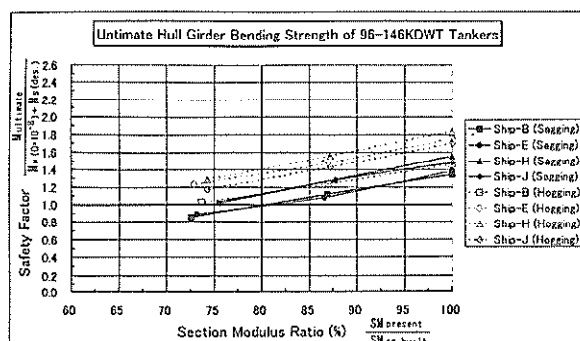


図3 船体の板厚衰耗が縦曲げ最終強度に及ぼす影響

グルハル・タンカーに対して実施した。解析により得られた結果の一例を、図3に示す。

図3は、板厚衰耗による弾性断面係数の減少率と安全率(縦曲げ最終強度/設計荷重)の関係を表している。この結果に基づいて日本はIMOの場で、

① 定期検査時に板厚の検査を行って検査結果を記録すると同時に、記録簿に板厚衰耗限度を記載しておくこと、

② ②計測結果に基づいて縦曲げ最終強度の評価を行い、評価結果を検査報告書に記載すること

を提案した。本提案は、「船齢10年以上、長さ130m以上のタンカーを対象として、縦強度が新造時の85%以上であることを要求する」ものであり、具体的には甲板および船底外板の断面積が85%以下になれば、板の切り替えまたは補修を義務付けるものである。

本提案は、IMOの場で多くの国々の支持を得て、折から発生したエリカ号事故の影響もあり、甲板と船底外板の断面積の切り替え限界を90%に引き上げた上で、2000年に国際条約として採択された

4. まとめ

本稿では、船体強度の中で最も重要な縦曲げ最終強度に焦点を絞り、これに関する研究の沿革、解析方法の現状を説明した上で、研究成果が単により合理的な船体構造の設計・建造に役立っているだけでなく、海洋環境汚染防止のための国際条約の締結にも役立っていることを示した。

最後に、バイオ、ナノ、ITなど、時代の要請に応じた新しい研究が社会的に必要であることは言うまでもない。しかしながら、一方では船舶、土木、

建築など昔からある学問分野の研究も、社会の持続的発展のためには必要不可欠であることを、本稿を読んで認識していただければ幸いである。

参 考 文 献

- [1] Timoshenko, S.P.: History of Strength of Materials, McGraw-Hill Book Company, New York (1953).
- [2] Rutherford, S.E. and Caldwell, J.B.: "Ultimate Longitudinal Strength of Ships: A Case Study," Trans. SNAME, Vol.98 (1990), pp.441-471.
- [3] John, W.G.: "On the Strength of Iron Ships," Trans. Inst. Naval Arch., Vol.15 (1874), pp.74-93.
- [4] Caldwell, J.B.: "Ultimate Longitudinal Strength," Trans. RINA, Vol.107 (1965), pp.411-430.
- [5] Smith, C.S.: "Influence of Local Compressive Failure on Ultimate Longitudinal Strength of a Ship's Hull," Proc. Int. Symp.on Practical Design in Shipbuilding, Tokyo, Japan (1977), pp.73-79.
- [6] Yao, T. *et al.*: "Ultimate Hull Girder Strength," Proc. 14th Int. Ship and Off-shore Structures Congress, Vol.2, Nagasaki, Japan (2000), pp.321-391.
- [7] Ueda, Y. and Rashed, S.M.H.: "Elastic-Plastic Analysis of Framed Structures using Matrix Method (3rd Report) —Ultimate Strength with Consideration of Web Buckling—," 日本造船学会論文集, 第131号(1972), pp.229-240.
- [8] Fujikubo, M., Kaeding, P. and Yao, T.: "ISUM Rectangular Plate Element with New Lateral Shape Function (1st Report) —Longitudinal and Transverse Thrust—," 日本造船学会論文集, 第187号(2000), pp.209-219.
- [9] Fujikubo, M. and Kaeding, P.: "New Simplified Approach to Collapse Analysis of Stiffened Plates," Marine Structures, Vol.15, No.3 (2002), pp.251-283.
- [10] 運輸省: ナホトカ号事故原因調査委員会報告書 (1997).

この記事をお読みになり、著者の研究室の訪問見学をご希望の方は、当協会事務局へご連絡ください。事務局で著者と日程を調整して、おしらせいたします。

申し込み期限: 本誌発行から2か月後の月末日

申し込み先: 生産技術振興協会 tel 06-6395-4895 E-mail seisan@maple.ocn.ne.jp

必 要 事 項: お名前, ご所属, 希望日時(選択の幅をもたせてください), 複数人の場合は
それぞれのお名前, ご所属, 代表者の連絡先

著者の都合でご希望に沿えない場合もありますので、予めご了承ください。