

船体の波浪中崩壊挙動シミュレーション



技術解説

藤久保 昌彦*

Simulation of collapse behavior of ships in waves

Key Words : ship, collapse behavior, ultimate strength, numerical simulation, model test

1. はじめに

海上を航行する船舶は、全体として一本の細長い梁と見なすことができる。この船体梁には、構造重量・貨物重量、静的浮力、波による変動圧力など様々な荷重の作用によって、長さ方向（船の分野では縦方向とよぶ）に曲げ変形や振れ変形が生じる。過大な荷重によって、曲げモーメントが断面の最大強度を超えた場合には、図1に示すような縦曲げ崩壊（longitudinal bending collapse）が生じる。縦曲げ崩壊は、横断面の破断、浸水、ひいては沈没にもつながる船舶にとって最も重大かつ終局的な破損モードである。

一般に、船体梁の縦曲げ崩壊強度は、座屈、降伏



図1 縦曲げ崩壊後の船体（Prestige号，2002）

などの構造部材の破損を考慮して、横断面の曲げモーメント-曲率関係を計算することにより求められる。図2に、この関係を模式的に示す。曲げモーメントのピーク値 M_u は、断面の最大強度を表し、縦曲げ最終強度（ultimate longitudinal bending strength）とよばれる。曲げモーメントが最終強度に達した後は、座屈変形の増加とともに耐荷力は低下する。

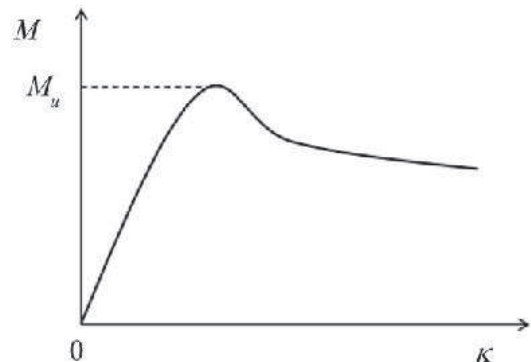


図2 船体横断面の曲げモーメント-曲率関係

ところで、船舶が過大な波浪に遭遇して最終強度あるいはそれを超える曲げモーメントが作用した場合、実際にどのような崩壊挙動が起きるであろうか？図2のように断面の耐荷力は低下するが、外力は同じようには低下してくれない。不平衡分の荷重は、構造変形だけでなく、船体運動を新たに生じさせるであろう。他方、構造変形によって静的および動的な流体圧の分布も変化する。つまり、崩壊挙動は、構造変形、船体運動、さらにこれらと流体荷重との相互作用を考慮して初めて明らかとなる。このような流体・構造連成を考慮した崩壊挙動の予測は、縦曲げ崩壊が万一生じたときの人命および貨物の喪失や流出油による海洋環境汚染などのリスクを予測する上できわめて重要である。



* Masahiko FUJIKUBO

1957年1月生
大阪大学大学院工学研究科造船学専攻修了（1981年）
現在、大阪大学大学院 地球総合工学専攻 船舶海洋工学部門 教授 工学博士
最終強度、構造安全性
TEL：06-6879-7583
FAX：06-6879-7594
E-mail：fujikubo@naoe.eng.osaka-u.ac.jp

また近年、単位輸送量あたりのコストおよびCO₂排出量の削減をねらいとして、船体の大型化が進んでいる。特にコンテナ船でその傾向が著しく、既に長さ400 mクラス、10,000個以上積みの巨大船が出現している。巨大船になるほど構造全体として相対的に柔構造となる。このため、大波高波浪中では、波浪荷重だけでなく、船体と波面の衝突（スラミング、slamming）による過渡的な弾性振動（ホイッピング、whipping）も、縦曲げ崩壊に影響するとされる。しかしその影響度は、まだ正確に把握されていない。

以上の背景の下、筆者の研究室では、流体・構造連成を考慮した船体の波浪中崩壊挙動シミュレーションプログラムを開発中である。また実船と強度的に相似な縮尺模型の水槽試験と数値シミュレーションを行い、崩壊挙動の性質を調べている。それらの概要を説明する。

2. 船体の流体・構造連成崩壊シミュレーション法

2.1 理想化構造要素法 (ISUM)

船体構造は、甲板、船底などの板部材とこれを補強する防撓材で構成される。図3に、ばら積み貨物船の横断面の例を示すが、たとえば長さ200 mの船体が、板厚20 mm程度の鋼板で建造される。長さ1 mにして板厚0.1 mmであり、船体は全体として超薄肉の構造であることがわかる。このような船体の板部材に縦曲げによる面内圧縮力が作用すると、図4のような座屈が発生し、ついで防撓材が座屈し、さらにこれらが断面内に拡がると、最終的に縦曲げ崩壊に至ることになる。

有限要素法 (FEM) を用いれば、今日では、船全体の座屈・塑性崩壊解析も可能である。しかし、設計用ツールとしては、計算の負荷が依然として過

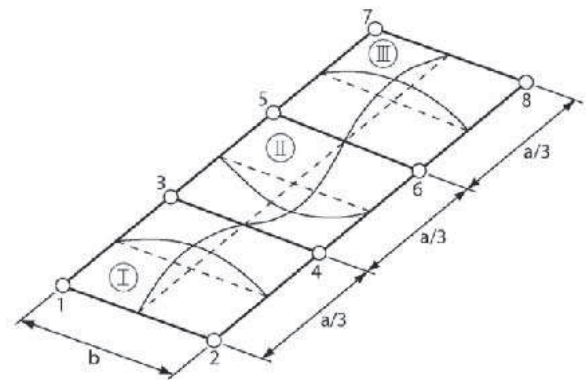


図4 ISUM 板要素

大であり、合理的かつ高速の解析法が望まれる。そこで研究室では、理想化構造要素法 (Idealized Structural Unit Method; ISUM) を開発している [1]。ISUMは、座屈および降伏の影響を工学的に理想化して大型の有限要素を実現するものである。例えば図4のISUM板要素 (I~III) では、図中に示す座屈によるたわみ変形とそれによる非線形な面内ひずみ分布をあらかじめ有限要素に取り込むことにより自由度を大幅に減らしている。また防撓材は、曲げ振り梁要素でモデル化し、板と防撓材間の相互作用は、両者の間に回転バネ要素を挿入して考慮する。

図5は、ばら積み貨物船のホールド (船倉) モデルに、甲板側が圧縮、船底側が引っ張りとなる曲げモーメントを与えたときの応力分布と板の座屈変形を表している [2]。ISUMの計算時間は、横断面解析のレベルでFEM (必要程度の要素分割を行ったモデル) と比較すると1/50オーダーであり、3次

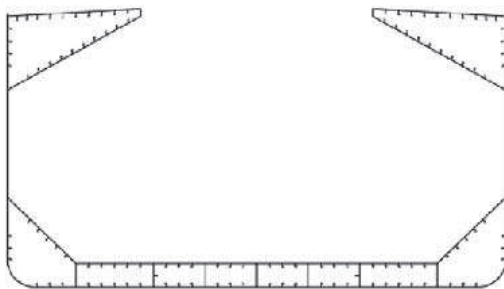


図3 ばら積み貨物船の横断面

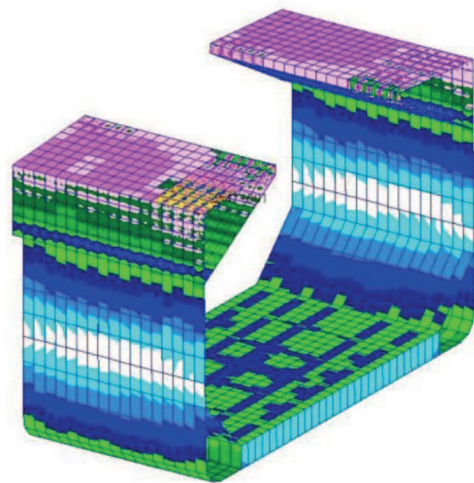


図5 ばら積み貨物船の縦曲げ崩壊 (ISUM)

元モデルではさらに効率上がる。また船体構造設計では、FEM 弾性応力解析を実施するが、要素分割は ISUM のモデル化とほぼ同等であるため、弾性解析 FEM モデルをほとんどそのまま崩壊解析に適用できることも、ISUM の利点である。

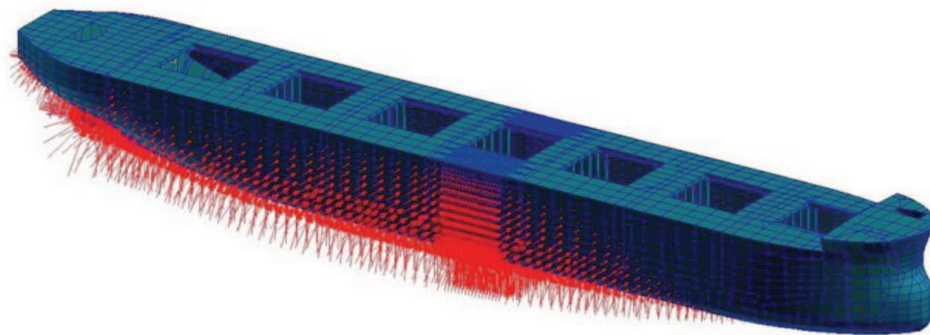
2. 2 ISUM・SSODAC 連成解析システム

船舶は、波浪中を動揺しながら前進する動的な構造物である。したがって、流体圧力とともに、運動による慣性力も作用荷重の大きな割合を占める。通常の船体構造の設計ルーチンでは、動的影響を加味して予め設定された設計荷重の下で構造解析を行い、強度評価を行なう。しかしながら、より正確に荷重分布を把握し、構造応答を解析するためには、荷重分布を解析し、得られた荷重（圧力と慣性力）をそのまま構造に負荷する荷重構造一貫解析の利用が望ましい。

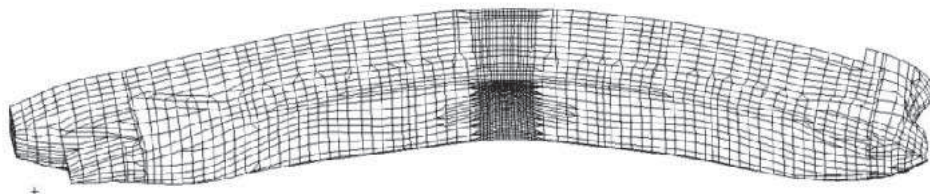
筆者の研究室の飯島は、荷重構造一貫解析プログラム SSODAC (Shell Stress Oriented Dynamic Analysis Code) を開発している [3]。船体を三次元シェルでモデル化し、構造・貨物質量も分布させる。外部流体モデルにはポテンシャル理論に立脚した三次

元特異点分布法を用いる。また弾性振動の影響、スラミング衝撃荷重の考慮などが取りこまれており、タンク内の流体からの内圧も考慮できる。このようにして、時間と共に変動する荷重分布系を計算し、これを構造に自動的に負荷して構造応答を解析する。

現在、この SSODAC と ISUM を組み合わせた、船体の波浪中崩壊挙動シミュレーションプログラムを開発中である [4]。その一例として、隔倉積みのみばら積み貨物船の運動、荷重および崩壊挙動解析結果を紹介する。隔倉積みとは、鉄鉱石のように比重の大きな貨物を運ぶ場合に一倉ずつ間隔をあけて積載する方法である。隔倉積み状態では、空倉の二重底に船底水圧による曲げ変形が生じるため、これに船底が圧縮側となる縦曲げモーメントがさらに加わると、強度上、非常に厳しい荷重条件となる。図 6(a) は SSODAC で求めたある瞬間の荷重分布を、また図 6(b) は、ISUM で求めた最終強度時の変形を表す。本解析により、対象船の場合、隔倉積みによって約 10% 程度最終強度が低下することを明らかにしている。慣性力を含む三次元的に正確な波浪中荷重分布の下での船体梁の最終強度評価を行った例は、世界的にも初めてである。今後は、構造変形



(a) 荷重分布 (SSODAC)



(b) 最終強度時の船体変形 (ISUM)

図 6 隔倉積みばら積み貨物船の崩壊挙動解析

が流体圧力に及ぼす影響を導入することにより、縦曲げ崩壊後の挙動まで追跡可能なシステムに拡張予定である。

3. 縮尺模型に関する波浪中崩壊挙動シミュレーションと水槽試験

横断面が最終強度に達した後の船体の挙動について基礎的知見を得るため、ISUM・SSODAC 連成解析システムの開発と平行して、図7に示すように、船体を二つの剛体と非線形ばねでモデル化した簡易模型について数値シミュレーションと水槽試験を実施した [5, 6]。

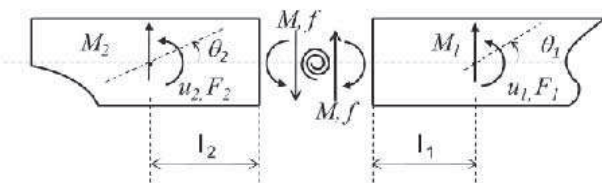


図7 二剛体・非線形回転ばねモデル

数値シミュレーションにおける非線形ばね特性は、図2に示した座屈や降伏による最終強度後の耐力低下を考慮して予め設定する。また除荷の発生による曲げ剛性の回復を考慮する。二つの剛体は、慣性力、重力、静圧と動圧による流体荷重と非線形ばねからの反力を考慮して鉛直方向、回転方向のそれぞれについて運動方程式をたて、中央部分の変位の適合条件を付して時間領域で解析する。流体力の評価に当たっては、非線形ストリップ法を用いる。すなわち、非粘性・非圧縮の完全流体を仮定し、二次元的なストリップについて流体力評価を行って、これを長さ方向に積分して、各剛体の作用荷重を評価する。この際、構造変形を含む各断面の瞬時・瞬時の位置に

対して荷重を計算する。これにより、塑性変形を含む大変形を考慮した流体・構造相関問題が定式化できる。筆者らはこれを流弾塑性問題 (hydro-elastoplasticity problem) と名付けている。

次に、地球総合工学専攻船舶試験水槽において、縮尺模型による水槽試験を行った。模型の要件として、a) 形状的な相似、b) 弾性固有振動特性の相似、c) 強度の相似が挙げられる。ただし、今回は c) の強度を評価対象とするために、b) の固有値は十分に大きいモデルとしている。図8のように、船体中央部分においてヒンジ結合された二つの剛体に、ヒンジとほぼ同断面位置の船体下端に片持ち梁状に試験片を取り付けることで、図2と類似のモーメント-回転角特性を再現した。試験片は、図に示すように曲げ圧縮側の座屈崩壊と耐荷力低下を考慮できる断面形状に設計した。模型の形状は箱型とし、前進速度ゼロを想定している。模型中央断面で三つのロードセルにより曲げモーメントを、またポテンシオメータによりヒンジ部の相対回転角を計測できる。上記縮尺模型を水槽中央位置に設置し、実船相当で平均周期 13.9s の波エネルギースペクトルをもとに、いわゆる過渡波を縮尺模型中央位置に集中させ、船体梁の一発大波中の崩壊現象を再現した。

実験で計測された二剛体間の変位角の時系列の例を図9に破線で示す。A点において最終強度に達し、急速に崩壊が進行する。B点において除荷が発生し、剛性が復活し崩壊が停止する。従って、一発大波が通り過ぎた後に、塑性変形 (崩壊量) が残る。図中には、実線により数値計算結果が示されている。計算結果は実験結果をよく説明しており、数値計算方法の妥当性が確認できる。この数値計算法を用いて、曲げモーメント-曲率関係を変えて系統的に崩壊量を調べた結果、崩壊量には最終強度後の耐荷力の低

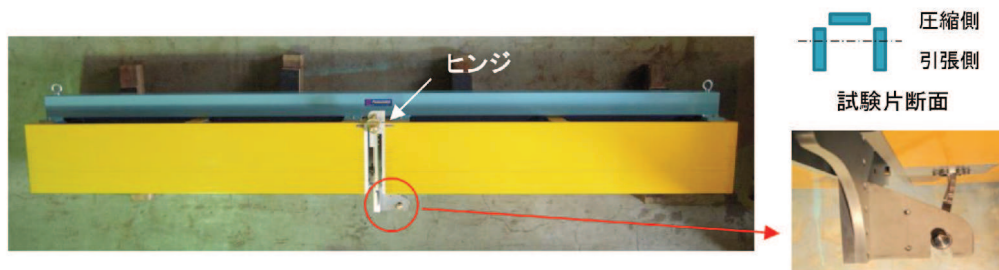


図8 水槽試験模型

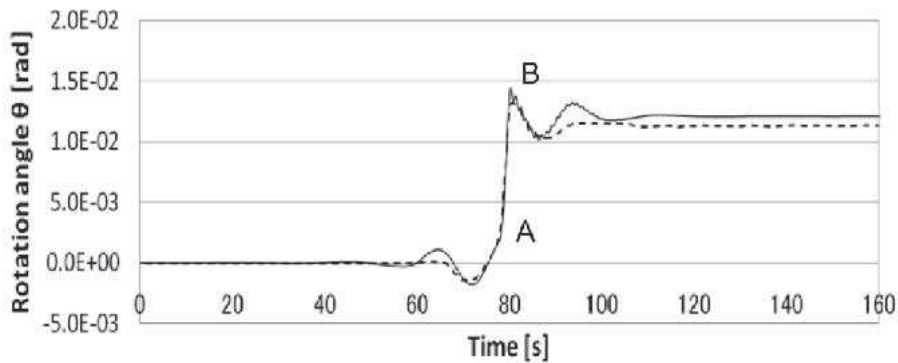


図9 ヒンジ回転角の時系列

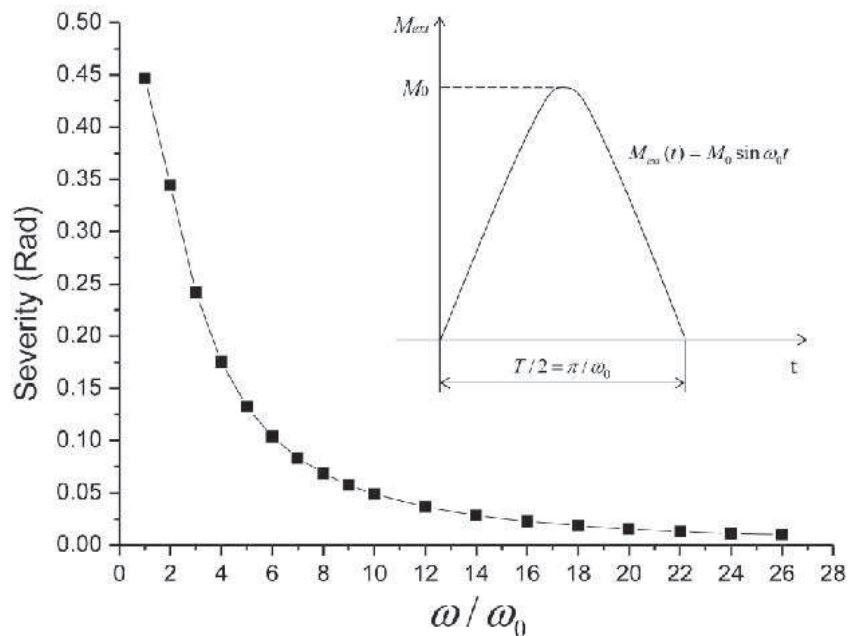


図10 衝撃荷重下での塑性変形量と荷重作用時間の関係

下率が支配的に影響することが明らかになった。これは、最終強度到達後も座屈による耐力低下が緩やかな、いわゆる ductile な構造方式ほど、崩壊によるダメージが小さいことを示唆する。さらに冒頭に述べたホイッピングが崩壊量に及ぼす影響を調べるため、図10に示すように、衝撃的な荷重を、作用時間を変化させて作用させた。その結果、同じ大きさの荷重であっても荷重作用時間が短い場合に崩壊量が小さいことを明らかにした。したがって、長周期大波高の波による崩壊量およびそれによるリスクと、作用時間の短い荷重下での崩壊量を同列で扱うことは不合理であり、このことは船体のリスクベース安全性評価において考慮されるべき性質である。

今後は、ISUM・SODDACシステムと連携して、より実船に近いモデルの検討を進める予定である。

4. おわりに

船体の縦曲げ崩壊を対象として、流体・構造連成を考慮した波浪中崩壊挙動解析システムの概要と、縮尺模型の解析および水槽試験より得られた知見を説明した。構造変形と流体との相互作用を考慮した浮体の崩壊挙動シミュレーションは、船体だけでなく、浮体式風車など、新形式の浮体構造物のリスクとその低減策を検討する上でも重要であり、今後それらの分野にも適用をはかっていきたい。

References

- [1] M. Fujikubo and P. Kaeding, New simplified approach to collapse analysis of stiffened plates, *Marine Structures*, Vol. 15, No. 3, pp. 251-283 (2002).
- [2] 藤久保昌彦, 裴志勇, 理想化構造要素法による船体の縦曲げ逐次崩壊解析, *日本船舶海洋工学会論文集*, 第1号, pp. 187-196 (2005).
- [3] K. Iijima, T. Yao and T. Moan, Structural response of a ship in severe seas considering global hydroelastic vibrations, *Marine Structures*, Vol. 21, pp. 327-448 (2008).
- [4] T. Yao, M. Fujikubo, K. Iijima and Z. Pei, Total system including capacity calculation applying ISUM/FEM and loads calculation for progressive collapse analysis of ship's hull girder in longitudinal bending, *Proc. ISOPE2012*.
- [5] K. Iijima and M. Fujikubo, Hydroelasto-plasticity approach to predicting the post-ultimate strength behavior of ship's hull girder in waves, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 16, pp. 379-389 (2011).
- [6] W. Xu, K. Iijima and M. Fujikubo, Parametric dependences of the post-ultimate strength behavior of a ship's hull girder in waves, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 17, pp. 203-215 (2012).

