

# 船舶の構造設計における数値解析技術

船舶・艦艇事業本部 今北明彦

## 1. まえがき

三井造船では液化天然ガス (LNG) 運搬船、油タンカー、ばら積貨物船、鉱石運搬船、護衛艦、巡視船、練習船、高速船など多種多様な船舶を開発、建造している。その構造設計に当たっては、船級協会規則などの適切な規則に従って種々の解析を実施し安全性を確保する。更に、新しい形式の船舶や LNG 船のように高度な信頼性が要求される船舶に対しては、最新の数値解析技術を適用して、より合理的な船体構造の開発に努めている。船舶の構造設計に用いる数値解析としては船体に作用する荷重を算定するものと、変位、応力、振動などの構造応答を算定するものがある。荷重を算定する数値解析手法としてはストリップ法が代表的であり、波浪中の船体運動を解析し、船体に作用する波浪変動圧や曲げモーメントなどを算定する。構造応答を算定する手法としては有限要素法 (FEM) が代表的である。算定された荷重を構造解析モデルに負荷し、船体の各部材に生じる応力、変形などを解析する。解析の手法は種々あり、通常の荷重解析においては、波は非圧縮性流体の微小波高と仮定され、船体は剛体として取り扱われる。構造応答解析は微小変形の弾性問題として取り扱われる。特殊なケースとしては、大波高を高速走行する船舶のスラミング解析、水中爆破を受ける船体構造の応答解析などがあり、大波高、圧縮性流体、空気と液体の複数流体などの影響を考慮した解析がなされる。構造解析においても大変形、弾塑性解析などが適用される。更に、近年の計算環境の著しい進歩の結果、並列計算機を使用しての大規模解析も可能となり、動的、大変形、弾塑性といった非線形現象を直接解く陽解法による解析が可能となっている。当社でも最新の数値解析技術を取り入れ、船舶の安全性、信頼性、快適性を高める努力を常に行っている。本報では、船体構造設計、構造解析で用いているそれら数値解析技術を紹介する。

## 2. 一般商船構造設計における数値解析技術

当社では、大ヒット商品 5 万 6 千トン型ばら積み貨物船「三井の 56」から世界最大級の鉱石運搬船「ぶらじる丸」に至る多様な商船に対して数値解析を駆使することにより、構造安全性とコストの両立を実現している。

貨物船に対する構造設計は船級協会規則の評価基準に従って、主として貨物倉構造に対する強度解析を実施しており、一般的には

- ・ 貨物倉中央部強度解析
- ・ 全船応力解析
- ・ 詳細疲労解析

等を実施する。入力となる波浪荷重は船級協会が就航実績、

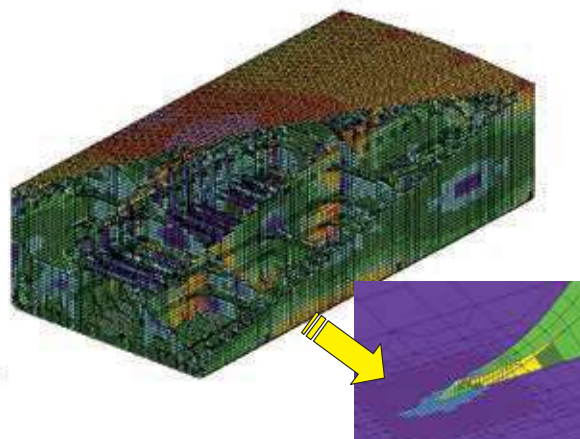
数値解析、実験等から規定した算式によって得られた値を用いるが、高度な信頼性が要求される船舶では建造会社でストリップ法、特異点分布法、ランキンソース法等の波浪荷重解析により算出することもある。

以下では、一般商船に関する最近の設計事例を中心に構造設計における数値解析技術の活用事例を紹介する。

### 2.1 油タンカー、ばら積貨物船の構造解析 (CSR)

油タンカー、ばら積貨物船に対しては近年、共通構造規則 (CSR)<sup>1)</sup>と称する規則が適用されることとなった。CSR は構造安全性を向上させることを目的とし、従来と比較して多数の荷重条件、多数の評価箇所に対して解析を実施し、評価することを要求している点が特徴である。ここでは 30 万トンの油タンカー (VLCC) における事例を紹介する。貨物倉中央部の強度解析では船体中央部の 3 タンクを取り出した要素数 20 万程度の FEM 解析モデルを用い、26 ケースの荷重条件に対して強度評価を実施している。図 1 に VLCC の強度解析モデルを示す。

応力解析は汎用構造解析プログラム MSC NASTRAN によって実施し、解析によって得られた応力値と評価基準応力の比較による降伏強度評価、座屈応力との比較による座屈強度評価を行うことによって安全で合理的な部材形状、寸法、防撓材の配置等を決定する。各船級協会は独自の解析評価システムを開発しており、ここにあげる例は財団法人日本海事協会が作成した解析評価システム PrimeShip “HULL”<sup>2)</sup>を適用した解析である。更に応力が集中する強度上の重要箇所に対しては、別途 50 mm × 50 mm 程度の要素を用いて詳細形状を正確に表現したモデルを用いて評価を行っている。



詳細構造の強度解析

図 1 VLCC の強度解析モデル (CSR)

## 2.2 詳細疲労解析〔ぶらじる丸〕

2007年に就航した世界最大級の32万トン鉱石運搬船「ぶらじる丸」では、規則要求に加えて更なる構造信頼性の向上を図るため、独自に詳細な疲労強度評価を実施している。当社で開発したストリップ法プログラム“PLOW”<sup>3)</sup>により算出した波浪荷重の周波数応答関数とFEM解析によって算出した単位荷重に対する応力応答値から規則波中の応力応答を求める。更に、波スペクトルと就航海域の波浪頻度テーブルから25年間で発生する応力応答の長期予測値を算出し、S-N線図により疲労寿命を推定している。強度上厳しい箇所については形状、寸法の変更を行い、安全性の向上を図っている。評価対象近傍は応力集中を正確に把握するため、板厚程度に分割した要素を用いたFEM解析により応力応答を算出している。図2に解析モデルを示す。ここで述べた疲労解析は一般的に設計で行われている解析であるが、研究開発中の疲労解析技術については4.に述べる。

## 2.3 LNG船の構造解析

高付加価値船の典型例であるLNG船では客先においても構造信頼性に対する関心が高く、高度な解析を実施することが多い。一例として、スノービットプロジェクト向けMOSSタイプLNG船で実施した事例を紹介する。本船は波浪荷重解析を含めた詳細な強度評価を実施した船舶に与えられるDNV (Det Norske Veritas)の船級符号CSA-2を取得しているが、その要求の一つとして最大波高時の強度評価がある。設計寿命中に北大西洋海域で最大波高に遭遇した際の強度評価を実施するため、波浪荷重は大波高時の非線形性を考慮したDNV船級協会のランキンソース法プログラムWASIM<sup>4)</sup>によって算出し、全船をモデル化したFEMモデルにこの荷重を負荷することにより強度評価を実施している。図3に波浪荷重解析モデルと構造モデルを示す。

ぶらじる丸の例、LNG船の例に示すように、波浪荷重は構造強度に直接影響するため、その推定精度の向上は非常に重要である。当社では(株)三井造船昭島研究所と協力し、波浪荷重の解析手法の開発、船級協会の解析プログラムの導入等、波浪荷重の推定精度向上という観点からも構造信頼性の向上に努めている。

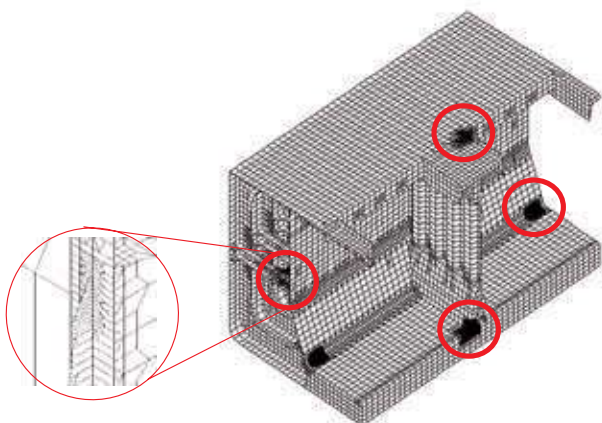


図2 鉱石運搬船の疲労解析モデル

## 2.4 数値解析業務の効率化

構造設計では、構造信頼性と軽量化などの経済性を両立させるべく多数の解析を繰り返し実施し、最適解を求めることが必要である。また、近年の計算機性能の向上により、大規模かつ高度な解析もパーソナルコンピュータ上で可能となった。このため、膨大な解析結果からいかに必要な情報を引き出し、設計に生かすかが課題となっている。解析業務は主として解析モデルの作成、解析の実行、解析結果の評価、ドキュメントの作成に分けることができるが、当社ではそれぞれの作業において効率的なシステムの採用、開発を実施し、短期間で作業を可能としている。膨大な解析が要求されるCSRでは、汎用FEM解析プリポストプログラムMSC PATRANをカスタマイズすることにより、解析結果の自動出力、補強寸法の画面表示などを可能とし、更に画面表示形式の変更などの機能を追加し、解析結果の評価、文書作成業務の効率化を図っている。

近年、造船用3次元CADの開発、普及が著しく、FEM解析モデルの作成にも活用されつつあるが、手軽にかつ短期間でCADモデルを作成できるとは言いがたい。一方、商品の開発時には詳細な構造図面が存在しない段階で、船体の主寸法、構造配置について短期間で最適化を図ることが要求される。このため、汎用3次元CADとAltair Engineering社製の汎用FEM解析プリポストプログラム“HyperMesh”をカスタマイズし、開発初期段階において短期間で解析モデルを作成するシステムを開発し、活用している。図4にシステムの画面イメージを示す。本システムの特徴は以下の通りである。

- ・汎用FEM解析プリポストプログラムのカスタマイズ
  - ・ユーザーが使い慣れた安価な汎用3次元CADによる形状データの作成
  - ・汎用CADフォーマットを介したシステムへの取り込み
  - ・シェルのみならずビーム、トラス等の線要素に対しても自動要素分割が可能
  - ・独自メニューによりユーザーフレンドリーな操作環境を実現
- 本システムでは市販されている汎用ソフトウェアをカスタマイズしているが、これは入手性、メンテナンス性、継続性を考慮しているからである。本システムは今後とも使い易さを向上させ、設計者自身が育てていく予定である。

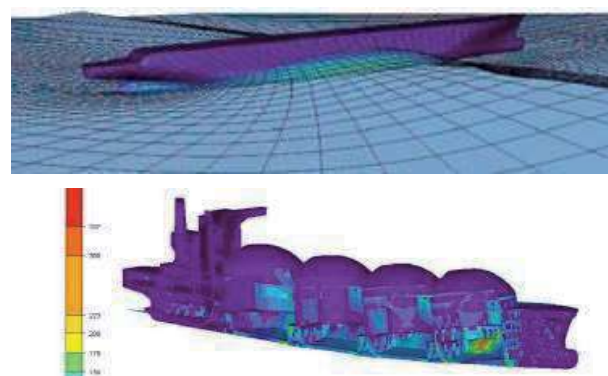
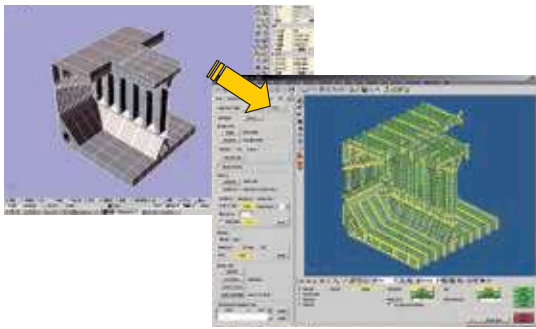


図3 大波高時の強度評価モデル (LNG船)

汎用 3D CAD による船体データ



船体構造解析メッシュ作成システム

図 4 解析モデル作成システム



図 5 VLCC の振動解析モデル (全体構造モデル)

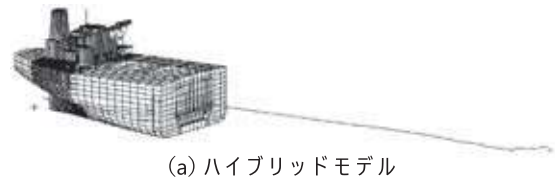
### 3. 防振設計における振動解析

船体振動の検討は乗心地、搭載機器保護の観点から、設計時の重要課題となっている。当社では、開発船については原則 FEM 解析による振動検討を実施して振動レベルを確認し、過大な振動が予想される場合には必要な対策を実施することとしている。様々な振動モードが発生する船体の防振設計を行うには、簡易式による評価では十分な精度を得ることが困難であるため、FEM 解析を用いている。

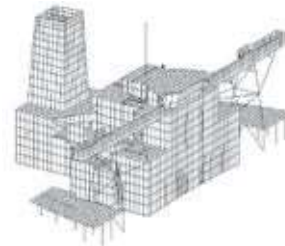
#### 3.1 振動固有値解析

図 5 に振動解析用 FEM モデルの例を示す。この例は載荷重量 30 万トンの VLCC の全体をモデル化したもので、船体の上下、水平、縦方向の振動及びねじり振動の他に、上部構造などの局部振動の評価にも使われる。水面下外板に NASTRAN の MFLUID 機能を適用することにより、付加水質量の影響を解析的に考慮することが可能となっている。このような全船のモデル以外に、梁モデルと船尾構造と上部構造を組み合わせたハイブリッドモデル、部分構造を取り出した部分構造モデルなどが解析対象に応じて使用される。図 6 にそれぞれのモデルを示す。

計算結果の例として、図 7 にブリッジ・ウィングの上下固有振動モードの例を示す。(a) は左右逆対称モード、(b) は左右対称モードである。その他、(c) に示すような居住区、煙突、レーダマストと連成したモードなど、多数の固有振動が存在する。ブリッジ・ウィングの前後方向振動モードについても左右逆対称、対称、各種連成モードが存在する。推定されたモードの固有振動数が起振力と共振すると判断される場合には必要な補強を考案し、共振を回避することになる。しかし、解析精度などを考慮し、共振回避が困難と判断される場合に

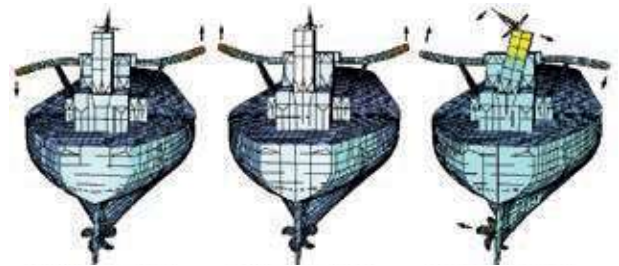


(a) ハイブリッドモデル



(b) 部分構造モデル

図 6 VLCC の振動解析モデル (ハイブリッド及び部分構造モデル)



モード (a) 5.55Hz モード (b) 5.64Hz モード (c) 6.38Hz

図 7 VLCC ブリッジ・ウィングの振動モード

は応答解析を行い、振動振幅を算定し評価することになる。

#### 3.2 振動応答解析と評価

応答振幅は構造モデルに起振力と減衰を付加し、FEM 振動応答解析を実施することにより推定する。起振力としては、プロペラに起因するものと主機に起因するものがある。プロペラに起因する起振力は、プロペラが船尾における不均一な流れを横切ることによって生じる力とキャビテーションによる力がある。それぞれ簡易的な手法、CFD を利用した手法などを用いて算定する。主機に起因する起振力は、主機シリンダ内の燃焼、クランク軸の回転による力などがあり、主機メーカーからの情報などにより算定する<sup>5)</sup>。船体構造 FEM モデルとこれら外力及び船体構造の減衰係数を入力データとして応答解析を実施し、着目する部位の応答を計算する。算出された応答は ISO6954<sup>6)</sup> などの評価方法を用いて評価する。応答解析結果の例を図 8 に示す。

### 4. 溶接継手の疲労寿命評価システム

船体構造の疲労強度は、溶接部の疲労強度により決まる。現状の疲労設計では、応力振幅  $S$  と疲労寿命  $N$  の関係を表す  $S-N$  線図を用いて、マイナーの線形疲労被害則によって寿命評価するのが一般的である。しかし、この方法では、溶接部の詳細な形状、溶接残留応力、荷重の履歴などの影響を評価することは困難である。また、実構造物に生じた疲労き裂に

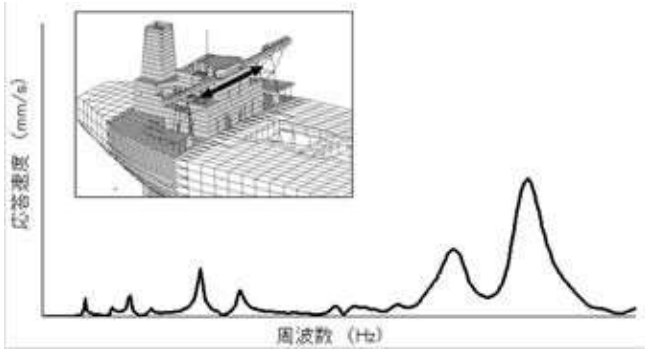


図8 VLCCの応答解析結果例(操舵室中央部左右方向)

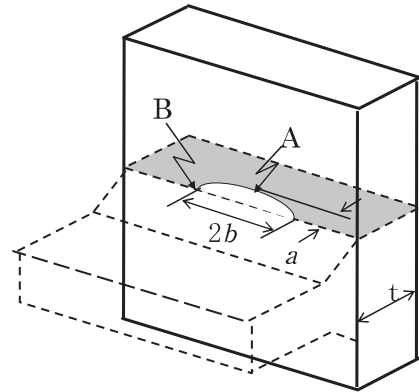


図10 疲労き裂進展解析モデル

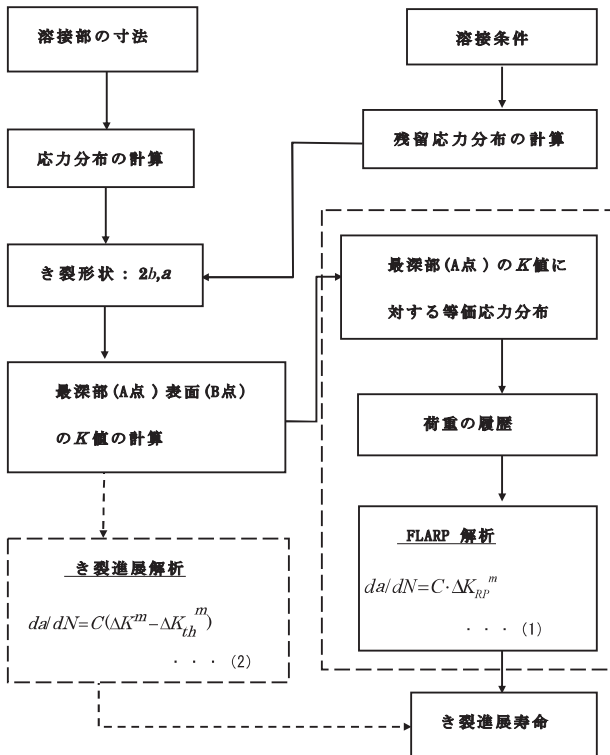


図9 疲労き裂進展寿命推定フロー

対する余寿命の評価ができないなどの限界が指摘され、疲労き裂進展解析に基づいた疲労寿命評価法が提案されている<sup>7)</sup>。

当社では、溶接止端部に発生するき裂が荷重の繰返しによって徐々に大きくなり、最終的には部材の破断あるいは隔壁の貫通による内容物の漏洩に至るまでの寿命を疲労き裂進展解析によりシミュレーションする手法を構築した<sup>8)</sup>。

#### 4.1 疲労き裂進展解析の概要

溶接部の疲労き裂進展解析に基づく疲労寿命推定の手順を図9に示す。図10に示すように、止端部における表面き裂を半楕円形で近似し、最深部(A点)と表面(B点)における応力拡大係数(K値)を計算し、その変動幅 $\Delta K$ とき裂進展速度 $da/dN$ の関係より、A、B点におけるき裂の進展量を算出する。

一方、図9中の一点鎖線で囲った範囲の手順では、豊貞らによって開発された $\Delta K_{RP}$ による疲労寿命評価法(FLARP解析)を適用している<sup>9)</sup>。FLARP解析では、負荷過程におい

て、き裂先端部で再降伏が生じ始めるRPG荷重(Retensile Plastic zone Generating load)から最大荷重に至る荷重の変動幅(Pmax-PRP)に対応した応力拡大係数の変動幅 $\Delta K_{RP}$ を導入することにより、き裂進展速度は次式のように表される。

$$da/dN = C \Delta K_{RP}^m \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $da/dN$ はm/cycle、 $\Delta K_{RP}$ は $MPa \cdot m^{1/2}$ の単位系で、 $C = 3.52 \times 10^{-11}$ 、 $m = 2.692$ である。

$\Delta K_{RP}$ は、き裂の開閉口挙動を平均応力と残留応力及び過去の荷重履歴の影響を考慮して算定されるので、これらの影響は自動的に考慮されている。また、き裂の進展の下限界値も $\Delta K_{RP}$ が0となることにより評価されている。

更に、き裂先端の塑性挙動とき裂がない状態における溶接止端における塑性挙動を評価することにより、止端に位置する結晶粒内におけるき裂の発生寿命までも統一的に取り扱うことが可能である。

#### 4.2 解析事例

解析事例として、疲労き裂の形状変化及びき裂深さと繰返し数の関係を図11に示す。FLARP解析ではき裂発生( $a = 0$ )からのシミュレーションとなっている。点線は最初のピーチマークが得られた時点からのき裂の進展を、図9中の式(2)で与えられるき裂進展速度により計算したものである。図中のプロットは、破面及びひずみ計測の結果から推定したき裂の深さを示している。残留応力を考慮したFLARP解析によるシミュレーションの結果は実験結果と良く一致しており、荷重履歴による遅延現象や残留応力の影響を考慮した本解析手法の有効性を確認することができた。今後、本手法を設計において活用していく予定である。

#### 5. 流体解析

船体構造に働く荷重の推定において、海水や貨物である液体などの流体からの影響は重要である。船体周囲の流体の激しい挙動は船体構造に対して衝撃的な荷重として作用し、ときには船体構造を変形もしくは破損させる場合もある。大変形あるいは材料塑性を伴う構造の変形挙動を流体の影響も含めて検討するためには、非線形有限要素解析と流体解析との連成解析が必要である。近年においては流体構造連成解析が

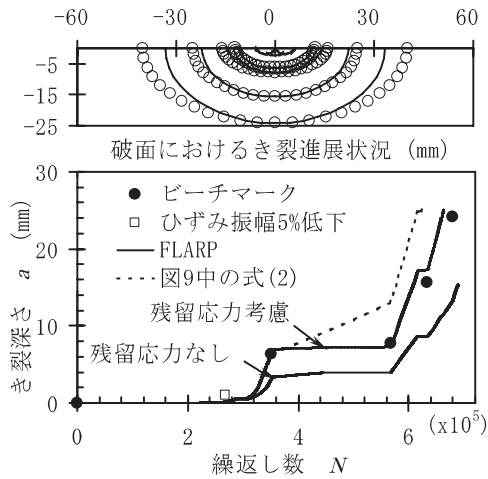


図 11 疲労試験結果と解析結果の比較

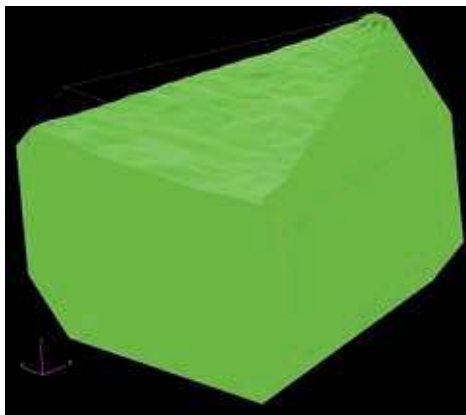


図 12 スロッシングの解析モデル

一部の現象については可能となり、当社においても基礎的解析から設計に主眼をおいた応用的解析まで幅広く実施している。そこで本章では、これまでに当社が実施した流体解析例としてスロッシング解析、流体構造連成解析例として水中爆発解析について紹介する。

### 5.1 スロッシング解析

LNG 船などの液体貨物の輸送においては、タンク内における液体貨物が船体運動により揺り動かされ、タンク内において激しい運動をする場合がある。このような液体の運動をスロッシングと呼んでいる。例えば、タンク内液体が半載状態で、その自由表面の波動の固有周期とタンクの動揺周期が近い場合には共振現象が生じ、激しい自由表面の打ち込みによる衝撃荷重がタンク壁に作用し、凹損や変形が生じる場合がある。特に、衝撃荷重がロンジやブラケットなどの補強部材に繰り返されることによる溶接接合部の疲労損傷を避けることが重要である。このようなスロッシングによる損傷を回避するためには、線形計算では把握できないタンク内の液体の挙動、構造に作用する圧力、さらに部材に生じる応力応答を正確に予測することが重要であり、実験<sup>10)</sup>ならびに高度な流体構造連成解析による検討が必要となる。

図 12 は LNG 船タンクを模擬した試験タンクの数値解析

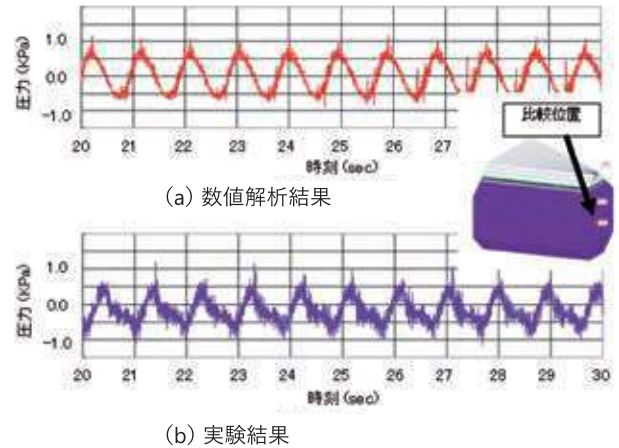


図 13 スロッシング実験結果と解析結果の比較

モデルである。本モデルはタンク内の流体領域をオイラー要素で、タンク壁を剛体要素でモデル化しており、タンクを強制的に周期運動させたときに生じるスロッシング現象を MSC DYTRAN を用いた数値解析により再現した。図 13 はタンク壁に作用する圧力の時刻歴であり、実験結果と数値解析結果の比較を示している。図から分かるように、タンク壁に作用する圧力を正確に再現できている。

このように、線形計算では把握できない現象が問題となる場合には、高度な数値解析技術を適用することにより船体構造の信頼性を確保することに努めている。

### 5.2 水中爆発解析

艦艇などに関しては、スラミングに加えて機雷や魚雷が爆発した際に発生する衝撃の影響を考慮することも大変重要である。例えば、艦艇の近傍で爆発が生じた場合には、急速なエネルギー放出による初期衝撃波の発生に加えて、炸薬の燃焼による水中爆発気泡が発生する。初期衝撃波は非常に短時間で船体に到達して衝撃を与える。一方、気泡は時間をかけて膨張収縮し、船体に曲げ運動を誘起する場合もある。更に、気泡が収縮する際には船体に向かって非常に高速な流れ(ジェット)が発生し、船体に対して大きな損傷を与える可能性がある。こうした衝撃荷重を精度良く予測するためには、流体と構造の連成解析による予測が必要となる。

写真 1 は水中爆発試験の供試体であり、船体を模擬した箱型試験体となっている。本試験体の直下で水中爆発を発生させた際の気泡及び試験体の挙動について比較を行った。なお、実験では細線爆発装置により爆発を生じさせた。図 14 は実験結果と解析結果の比較である。図から分かるように、気泡は膨張から最大径を経て収縮に至り、試験体に向かってジェットを発生させる。数値解析と実験は良好に一致している。一方、構造の応答に関しては、試験体の曲げ変位および試験体底面の局部ひずみに関する比較を行った。図 15 から分かるように、試験体全体の挙動から局部的な変形まで実験と数値解析は良く一致している。なお、本手法を船体構造初期設計に適用した手法については文献<sup>11)</sup>を参照されたい。

こうした一連の流体構造連成問題に対して、当社では高度



写真1 水中爆発試験供試体

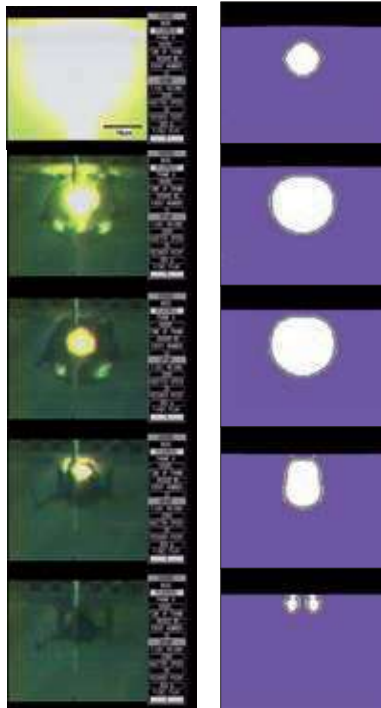


図14 実験結果と解析結果の比較 (爆発バブル形状)

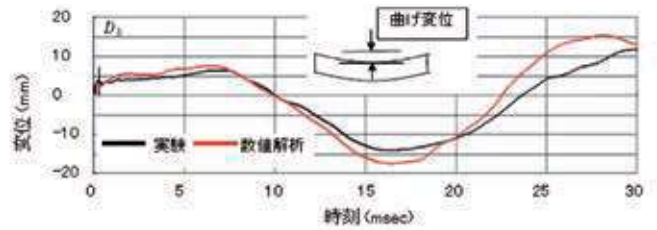
な解析技術を適用した予測を行い、安全で信頼性の高い船体構造を設計できるよう努力している。

## 6. あとがき

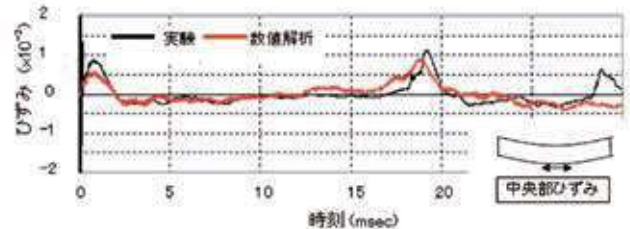
以上、紹介した例は、設計で日常的に使用されている数値解析から特殊な現象についての数値解析までである。しかし、現在特殊と呼んでいる数値解析も、近い将来日常的に設計で行う作業になる可能性は非常に高い。20年前は静的応力解析ですら設計の日常作業ではなかった。当社ではこのような数値解析技術を今後とも更に向上させ、製品の安全性、信頼性、快適性向上とともに、軽量化などの経済性との両立に活用していく所存である。

## 参 考 文 献

- 1) IACS : Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, Common Structural Rules for Bulk



(a) 曲げ変位



(b) 試験体中央部ひずみ

図15 実験結果と解析結果の比較

Carriers, (2006-1)

- 2) ClassNK : PrimeShip-HULL (CSR) User's Guide to Direct Strength Assessment System
- 3) 西村. ほか : 波浪荷重解析の精度向上に関する研究, 三井造船技報, 174 (2001-10), p. 1
- 4) Det Norske Veritas : Sesam User Manual, Wasim, Wave Loads on Vessels with Forward Speed, September 15th, (2006)
- 5) 梶原 : 大型2サイクルディーゼル機関の振動, 平成17年日本マリンエンジニアリング学会 技術セミナー講演予稿集, (2006-2), p. 29
- 6) 遠山 : ISO6594 : 2000による船体居住区振動評価のためのFFT振動解析, 日本造船学会誌, 866, (2002-3), P. 173
- 7) M. Fujino, et al. : A study on the advanced lifecycle fatigue management, WMT C, (2003-10)
- 8) 福岡. ほか : 溶接継手の疲労寿命評価システムの開発, 三井造船技報, 191 (2007-6), p. 31
- 9) 豊貞. ほか : 鋼構造物の疲労寿命予測, (2001), p.171, 共立出版
- 10) M. Arai, et al. : Numerical and Experimental Study of 3-D Sloshing in Tanks of LNG Carriers, Proceedings of OMAE 2006, OMAE 2006-92235, (2006)
- 11) A. Yasuda, et al. : Estimation Method for Longitudinal Bending Strength of a Damaged Ship due to a Close-in UNDEX Bubble, Proceedings of the 76th Shock and Vibration Symposium, (2005)

共同執筆者 : 福岡哲二 田中 茂