

## 船舶・海洋構造物の疲労照査

大阪大学大学院工学研究科  
船舶海洋工学専攻

富田康光

## Fatigue Strength Evaluation for Ship and Offshore Structures

by Yasumitsu Tomita

## 1 船舶・海洋構造物の構造設計

船舶・海洋構造物の疲労照査(疲労設計、疲労強度評価法)に入る前に構造設計全般の概要を以下に示す。

構造設計は全ての構造物に対して共通で、構造設計対象物に作用する外力(荷重)、その荷重作用下での設計対象物各部の応力応答解析及び応答値に基づいた強度(寿命)評価を経て行なわれる。外力は設計対象物で大いに異なるが、応力応答解析及び強度評価は理論的には差異はない。しかし、実際は対象構造物により応答解析、強度評価法も相当異なる。

船舶・海洋構造物の構造と材料に関する構造設計手法は各国の船級協会にて定めている。船舶・海洋構造物の設計にとって外力(荷重)及び応力応答解析は極めて難しく、その精度に応じて図1のように大別できる。<sup>1)</sup> 手法(1)及び(2)は構造設計の実際において行なわれている手法で船級協会規則はこれに属する。特に手法(1)はこれまで船舶の分野で用いられてきた比較強度検討のための伝統的手法で、標準荷重は実際の海象や航行状態と明確な関係はない。一方、実際の航行状態に合わせ、絶対評価を目指して実動荷重を評価する場合には手法(1)及び(2)は適用できず、手法(3)に依らねばならず、現在盛んに研究が行われている。

## 2 船舶・海洋構造物の疲労設計

## 2.1 船舶

一般船殻構造の強度解析は長年の間に培われた膨大な実績を基礎に、いわゆる経験工学に基づく各国船級協会規則などを基準に、行われてきた。(ここでは、船級協会規則の紹介は省略する)すなわち、近似的な強度解析を行って損傷実績をもとにした許容応力を設定し、それによる相対的評価を繰り返しながら改良を加えるという手法である(図1 手法(1)及び(2)参照)。

船体構造の疲労強度解析に関しては、特殊な液化ガス運搬船ではルールにより疲労解析が義務付けられている他、疲労損傷発生時もしくは特殊な構造または材料の採用時に船級協会や船主により疲労強度解析を要求される。しかし、一般船の船体構造部材の疲労強度解析が設計時に実施されることはこれまで少なかった。最近ではこの状態が変わりつつあり、船体の安全性の立場から、一般船でも疲労強度解析は必要であるとの認識から、最近では各船級協会が疲労設計ガイダンスを発行している。<sup>2,3,4,5)</sup> また、応力応答以降の疲労照査に関してはIIW(国際溶接会議)がまとめており、本フォーラムで紹介されている。

現在、船舶分野では確立された疲労強度解析法はないが、1)疲労設計対象構造、部材、2)疲労設計の基本的な考え方、3)実働荷重の種類とその取り込み方の基本的な考え方、4)疲労設計線図、5)疲労強度判定法と判定基準、6)線形破壊力学の適用、という6点について通常行われている船体構造の疲労損傷解析法は表1のようである。

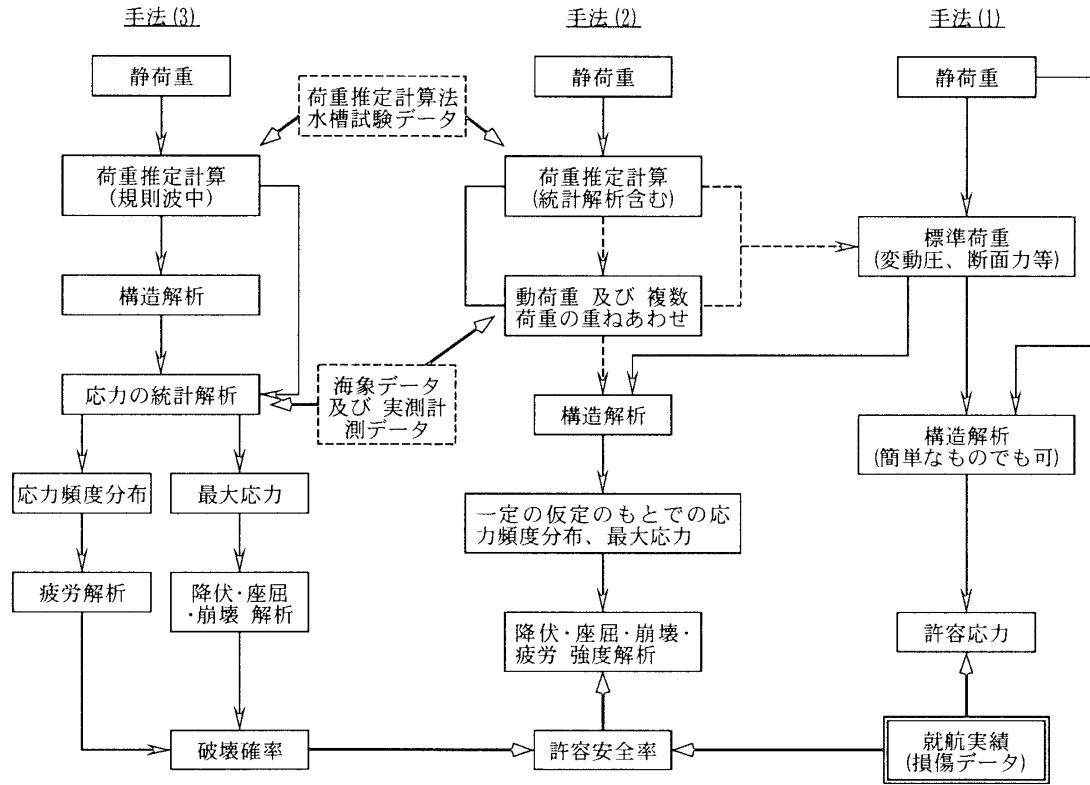


Fig.1 Outline of typical procedure for strength evaluation

Table 1 Fatigue strength evaluation for ship and offshore structures

	船舶	半潜水式海洋構造物	ジャッキアップ式海洋構造物
対象構造物	各種船舶の各種構造部材	全構造部材 特にブレースとブレース、 コラム、主甲板の継手部	パイプ継手
基本的な考え方	図1の手法(2)又は(3)で長期分布はワイブル分布又は指数分布 マイナー則、修正マイナー則	図1の手法(2)又は(3)で部材力の長期分布を求めた後マイナー則	同左
実働荷重の種類 基本的考え方	波浪外力、波浪中での運動加速度による力、及び船体運動に伴う倉内荷重、ストリップ法	波浪外力と波浪中での運動加速度による力が主なもの	同左
疲労設計線図	船体構造に関して規定された疲労設計線図がないため、様々な線図 海洋構造物の線図 その他文献のデータ	ホットスポット応力を基準にしたS-N線図又は各種溶接継手別のS-N線図(ルールで与えられている)	同左
判定手法と判定基準	累積被害度による判定 設計寿命は20年 被害地は実績を参考にして比較強度法、従って0.05~1.0	累積被害度による判定 設計寿命と判定基準はオーナー、船級協会、設計者で決定	設計寿命は通常20年、その他同左
線形破壊力学の適用	特になし	同左	同左

## 2.2 海洋構造物

海洋構造物には多種多様の構造様式があり、その機種に応じた設計法が必要で、実際の設計では通常規則に<sup>6,7,8)</sup> 従った手法をとるのが一般的で、現在では船舶とほぼ同じである。船舶の場合と同様に前述の6点について疲労強度解析法を表1に示す。

## 2.3 船舶・海洋構造物の最近の疲労設計法の概要

ここでは、現在、船舶・海洋分野で検討が進められている疲労設計法を紹介する。<sup>9)</sup>

すなわち、図1の手法(3)を発展させた図2に依るもので、'部材の選定'から始まり、'条件の設定'、'波浪中の運動応答、荷重解析'、'全体構造解析'、'疲労強度評価のための'局部応力解析'、'応力の頻度解析(短期、長期)'を経て、'疲労寿命の評価'が行なわれる。

### 2.3.1 疲労強度評価対象構造部材の選定

疲労強度の評価には、まず最初に評価の対象とする構造部材を選定しなければならない。理想的には、船体構造の全体的な応力解析の結果から、疲労強度を評価すべき部材を選定することが望ましいが、全体構造レベル(数百mスケールの溶接構造体)の解析結果から疲労強度評価に必要な局部(内部応力集中部数mm)の応力を評価することは困難である。通常は過去の損傷実績、部材の重要度、構造の特徴などを考慮して選定されている。部材選択の例として、日本海事協会の「船体疲労設計ガイダンス」にはコンテナ船、バルクキャリアー、VLCCにおける重要部材のリストが示されている。<sup>5)</sup>

将来的には、重要部材毎に局部の構造を反映した応力集中係数を別途用意しておき、それと全体構造解析の結果より、一次の疲労強度の評価を行い、さらに、より詳細な疲労強度評価の必要な部材を選定するという手順が考えられる。

### 2.3.2 疲労強度評価のための条件の設定

疲労強度評価の条件として以下のような項目が設定される。

- 1) 積付け条件と稼働率
- 2) 航路と波浪データ(長期波浪データ、波スペクトル)
- 3) 荒天時の操船判断

積付け条件は船体の波浪中における応答特性を支配するパラメータであり、満載状態とバラスト状態が基本となるが、船舶の一生を通じた応答特性を表すためには、さらに複数のケースを設定することも考えられる。また、積付け条件は平均応力とその変動として船体構造の疲労強度に直接影響を及ぼす因子となる。

船舶が遭遇する海象条件は航路によって異なり、その結果船体構造に生じる応力の頻度分布も航路によって異なる。船舶に作用する荷重あるいは応力の頻度分布を精度よく推定するためには、航路に応じて適切な波浪データを設定することが望まれる。しかし、一般には生涯の実際の使用状況を考えると航路を限定することは難しく、World Wideに対応した条件としてWaldenの北大西洋の波浪データなど広く用いられている波浪条件を設定することで対処している。今後、船舶が遭遇する波浪情報の収集とその設計へのフィードバックが、船体構造の疲

労設計をより高精度にしていくためには重要である。

荒天時における進路変更などの操船判断により波浪中の船体応答は変化し、その影響は高応力域に現れる。線形疲労被害則によれば疲労強度に対する高応力域の影響は比較的少ないという結果が得られるが、実際には亀裂損傷の多くは荒天に遭遇した直後に発見されることが多く、亀裂の伝播寿命、特に発見された亀裂の余寿命の評価には重要な因子となり、線形疲労被害則の適用には注意が望まれる。

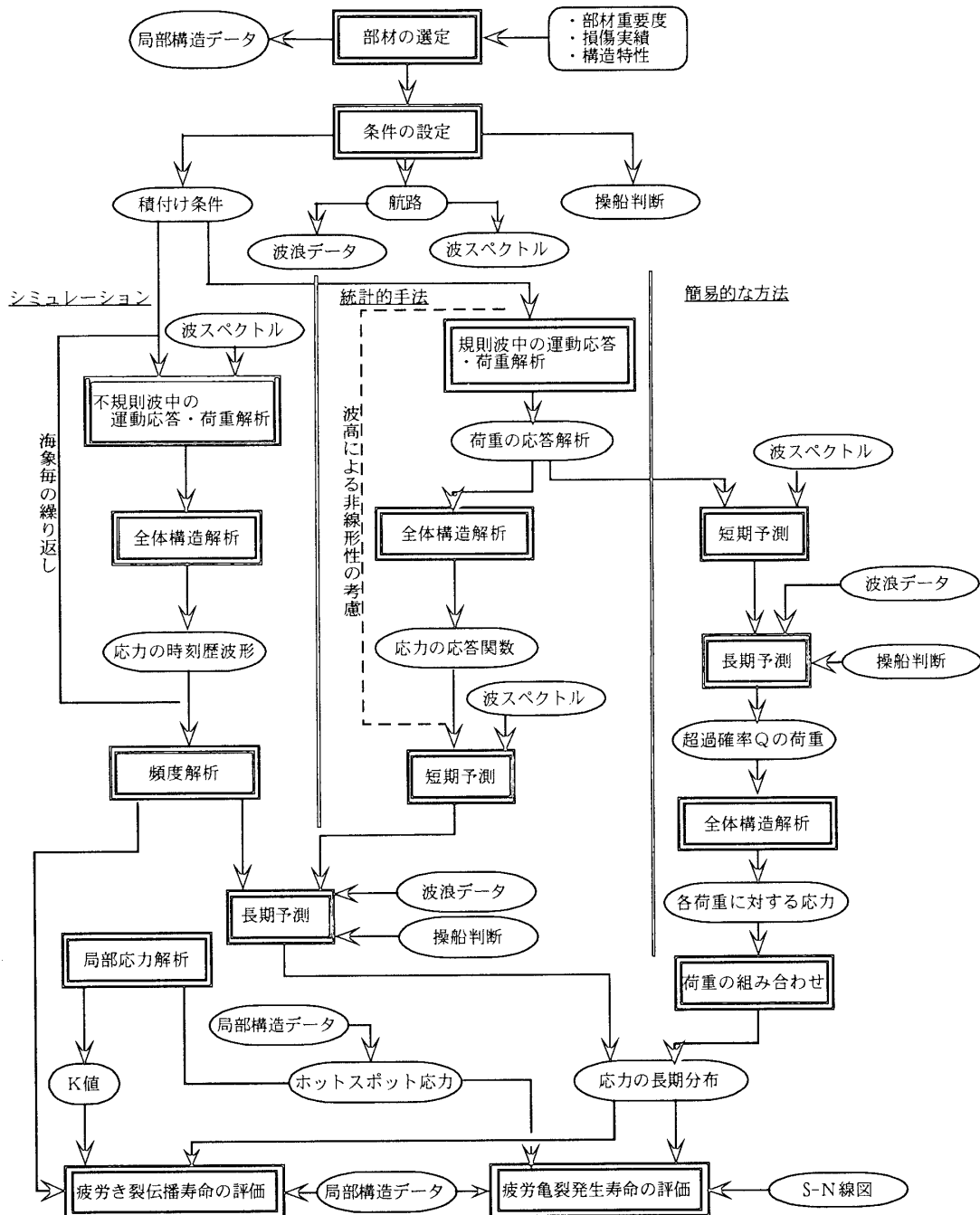


Fig.2 Outline of fatigue design procedure

### 2.3.3 疲労強度評価のための荷重の推定と構造解析

船体各部に生じる応力の長期分布(波浪荷重といわれるが、本来は応力が必要)が与えられるという条件下での設計に際しては、理論的な不確かさはあるものの、現状では線形被害則を用いた強度評価法をとらざるをえない。ただし、最近の研究成果で得られた知見を反映することにより、線形被害則からの評価結果の精度及び信頼性の向上は大いに期待できる。ところが、現実には部材に作用する荷重または応力の状態(あるレベルの応力の繰返し-長期分布-とその出現順序)の不透明さが全体の疲労強度評価において曖昧かつ厳密さを欠く結果をもたらしている。

すなわち、仮に応力情報がわかれば強度(寿命)は、現状ではある部分の不正確さは残るものの(例えば、線形被害則を用いたときの限界値、変動荷重条件下での疲労限、平均応力及び残留応力の影響など)かなりの精度で行うことができる。しかし、実際はその応力情報の不確か故に強度評価の段階で実損傷例との対比のために修正が余儀なくされ、研究成果が十分に活用できないかあるいは成果とは異なった評価をしている状況にある。それゆえ、船舶・海洋構造物の疲労設計にとって作用応力の情報の精度を高めることが最も重要かつ緊急の課題である。

波浪に対する各種応答の長期分布は次式が基礎となる。

$$Q(x) = \int_0^x q(x/R)p(R)dR \quad (1)$$

ここで、  
 $x$  : 波浪に対する各種の船体応答で、縦揺れ、横揺れなどの船体運動、縦曲げ、ねじりモーメント、変動水圧などの波浪荷重、構造部材の変動応力  
 $R$  : 船の状態(船速、積付け状態)、波浪状態(波高、波周期、波向き)  
 $Q(x)$  : 船体応答  $x$  の超過確率  
 $q(x/R)$  :  $R$  における  $x$  の超過確率  
 $p(R)$  : 船の状態と波浪状態の組み合わせの発現確率

$x$  と  $R$  の関係は波浪中の船体運動が線形応答か非線形応答か、さらに材料特性も含めた構造応答が非線形かに応じて適切な解析によりもとめられるべきである。すなわち、線形応答の場合には規則波中の船体応答計算により求められ、応答関数として表される。非線形な応答が現れる場合には短期の海象をシミュレートした非線形の時刻歴解析が必要となる。現状においては、船体運動のどの段階から非線形計算を行うべきか明らかではなく、また非線形計算も容易でないので、スラミング等の特殊な現象を除けば、線形計算が適用されている。

波浪中の応答が線形的な特性を示す場合には、統計的手法は非常に有効で、船体の運動や荷重の推定には広く用いられている。しかし、応力の頻度分布を求めるためには、膨大な量の応力解析が必要となる。応力解析の量を少なくする手法として離散化法が提案されているが設計のレベルでの適用は難しい。

設計の実務においては後述のより簡便な方法が適用されているが、その妥当性については必ずしも明らかにされておらず、構造解析用の荷重条件の設定法に関しては種々検討がなされている。すなわち、「(1)式における超過確率:  $Q$  が  $10^{-6}$  となる応力を与える海象条件をいかに

して合理的に設定するか」という検討がなされている。なお、各応力レベルでの海象状態の真の応力応答は線形解析で不十分であれば強度解析の目的に応じて適宜非線形解析をすればよい。

簡便法として、(1)ピーク時比率法、(2)相関係数法、(3)設計波法、(4)船級協会の方法など各種の構造解析用の波浪荷重設定法が提案されているが、理論的根拠は必ずしも明確でない。

更に船舶の場合には上記の波浪外圧に対して船体運動に伴う積荷の内圧も加わり、実際に構造部材に作用している荷重(応力)はこれらの個々の圧力が位相差をもって重畳された複合荷重である。最近では内圧の算定精度向上に対する要望が強く整備されつつある。<sup>9)</sup>

また、船舶に作用する波浪海象或いはそれに伴う荷重は、嵐状態と平穏状態が交互にランダムに現れる従属過程であり、大きな荷重は独立過程のように散発的に現れるのではなく嵐状態の時にまとまって出現し、疲労被害は疲労限などのある限界値以上で生じるので被害は荷重繰返し数に一義的に比例するのではなく、どんな海象に遭遇したかに支配される。すなわち、荷重の頻度分布だけでなく荷重の履歴も重要であるとの観点から嵐モデルと呼ばれる疲労寿命評価用の荷重モデルが提案されている。<sup>10)</sup>

#### 2.3.4 疲労強度評価のための局部応力の算定

船体構造における疲労亀裂の大部分は構造的な応力集中部に位置する溶接部に生じるので、溶接ビード止端部の応力が評価の対象になる。その評価応力には公称応力、ホットスポット応力、ピーク応力があり、その評価手法も種々提案されている。いずれにしても数百mの構造体の数mm範囲の応力解析を直接行うことは現状では困難であるから、通常は全体構造解析、構造詳細解析及び溶接部詳細解析に分けた階層的解析手順がとられる。船体構造詳細部に対して公称応力の定義が困難なこと、溶接継手形状が複雑なことなどにより、海洋構造物のパイプ継手で提案されたホットスポット応力を用いる方向にある。応力解析並びにホットスポット応力に関しては本フォーラムで詳細に紹介される。

#### 2.3.5 疲労寿命評価

疲労寿命の評価の方法として以下の2つの方法がある。

- 1) 疲労亀裂の発生寿命による評価
- 2) 疲労亀裂伝播寿命による評価

船体構造に関して現在行われている設計は、疲労亀裂の発生を基準とした「安全寿命設計」である。具体的には詳細な応力解析の結果得られる応力とS-N線図を用いた累積疲労被害則に基づいて疲労亀裂発生寿命が評価される。ただし、変動荷重下で累積疲労被害則を用いる場合、疲労限をどのように設定するかにより

- 1) 限界疲労被害値
- 2) 被害値が限界疲労被害値に閉める割合が大きくなる応力レベル、すなわち疲労寿命に大きく影響する応力レベル

などが大いに影響を受ける。長寿命域での腐食環境の影響を無視すれば疲労被害度に寄与する応力は超過確率が $10^{-3} \sim 10^{-8}$ のレベルの応力振幅である。

一方、疲労亀裂伝播寿命の評価は損傷時の解析に適用され、損傷原因の究明と対応策の

評価に有効な情報を与えている。また、発見された亀裂のその後の伝播寿命を評価することによって、その亀裂が船体構造全体の安全性あるいは貨物漏洩といった機能喪失に対してどの程度の影響度を持つかという判断のための重要な情報を得ることが出来る。<sup>11)</sup>

### 3 まとめ

船舶・海洋構造物の疲労は作用荷重、応力応答解析、変動荷重下の強度評価いずれも理論的に解決すべき問題はまだまだ多い。

安全と環境に対する要求が厳しい折り、経済性の制約の中で質のよい設計が望まれる。

疲労強度の精度の高い定量的評価は今後の構造設計の中で不可欠となるであろう。

### 参考文献

- 1) 伏見彬、橋本州史：“構造設計と荷重”運動性能委員会 第1回シンポジウム -耐航性研究と船舶構造設計- 日本造船学会、1992
- 2) American Bureau of Shipping: “Guide for Fatigue Assessment of Tanker” 1993, “Safe Hull System for Bulk Carriers” 1995
- 3) Det Norske Veritas: “Fatigue Assessment of Ships” 1993
- 4) Lloyd’s Register of Shipping: “ShipRight” -Fatigue Design Assessment Procedure- 1994
- 5) 日本海事協会：“船体疲労設計ガイドランス”、1995
- 6) American Welding Society: “Structural Welding Code - Steel” 1981
- 7) United Kingdom Department of Energy: “Offshore Installations : Guidance on Design and Constructions” 1983
- 8) Det Norske Veritas: “Rull for Classifications of Mobile Offshore Unit”、1983
- 9) 日本造船研究協会 第228研究部会 平成9年度報告書：“波浪中の船体構造の安全性評価の研究”、1996
- 10) 日本造船研究協会 第216研究部会 総合報告書：“大型船縦通肋骨材の強度に関する研究”、1994
- 11) 日本造船研究協会 第219研究部会 総合報告書：“き裂伝播解析手法の実用化に関する研究”、1996