

船体構造の寿命に大きな影響を及ぼす 疲労・腐食問題及び管理

On Management of Fatigue and Corrosion ; the Significant Factors which Affect Life of Ship Structures

山本規雄 (財)日本海事協会 技術研究所
Norio Yamamoto 主任研究員

1 はじめに

船舶は設計条件に対して十分な安全性を有するように設計・建造されるが、就航後の使われ方は設計条件とは必ずしも合致しない。経年船体の状態は、建造時の船の品質のみならず、遭遇海象、積荷による荷重条件及び環境条件、船体の保守内容等の要因に依存する。従って、船舶は個々の船により経年変化の状態が異なったものとなる。船体構造の寿命を決定する劣化要因は、疲労と腐食である。船体の健全性の維持管理のためには、設計、建造及び就航に亘る管理が重要である。このためには、個船の潜在的に危険な重要箇所の状態を監視して、状態に応じた保守管理を行うことが重要である。

2 船舶の寿命

一般の構造物と同様に、船舶の寿命はその要因別に、経済寿命、機能寿命、物理寿命に分けられる。経年劣化は、物理寿命と密接に関係する。船舶の場合の物理寿命とは、疲労亀裂が脆性的な大破壊に移行する、或いは、腐食による過度な板厚衰耗で構造として成立しなくなるような、滅多に生じないような致命的な損傷形態により決定されるのではなく、むしろ、疲労亀裂の多発、或いは、腐食衰耗の広範囲な進行により必要な安全性を維持できなくなるような状態に至った時点寿命と考える。ばら積み貨物船を例にとり、船体構造に報告された損傷を損傷の形態により変形、亀裂及び腐食に大別し、報告された損傷数を最大値で標準化して船齢ごとに示した図を図1に示す¹⁾。図1は最も損傷数が多く報告された、船齢19年の腐食による損傷数に対する相対比で示している。

船舶の寿命を凡そ25年と考えると、寿命の前半部では亀裂損傷が大半を占めるが、その後次第にその割合は減少して

いく傾向にある。この傾向は、船体構造に生じる亀裂の大半が、構造設計、或いは、建造中工作管理に起因しているためと考えられる。疲労に関して適切な設計及び建造中管理が行われた場合には、通常の寿命中に疲労が問題になることは少ないが、設計寿命を超えて運航を計画する場合には、疲労に対する配慮が必要となってくる。

一方、寿命の後半部では腐食形態の損傷が占める割合が増加し、その後次第に腐食形態の損傷の範囲が拡大する傾向にある。腐食形態の損傷は、腐食衰耗の進行による強度低下を招くばかりでなく、想定外の他の形態の損傷発生の原因となる可能性もある。従って、防食管理が先ず重要であるが、腐食衰耗状態の監視に基づき、必要な強度を維持するための対策が必要といえる。

3 船舶の疲労

3.1 船舶の疲労強度評価法の開発

船体構造の疲労問題は海洋汚染防止の観点から近年重要であり、設計時における疲労強度評価は必須の要件となって

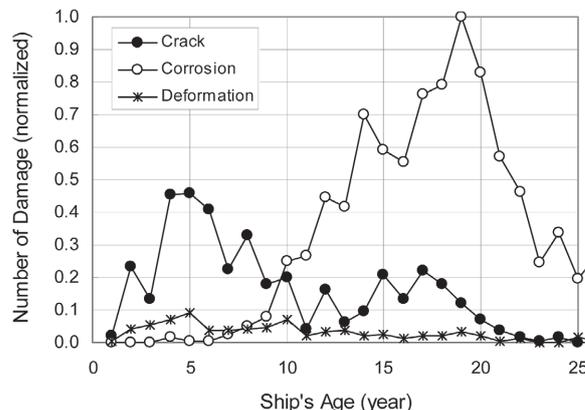


図1 損傷統計から見た船齢ごとの損傷傾向

いる。設計時の疲労強度評価結果は、船舶の潜在的な疲労危険箇所を同定し、工作管理、就航中管理を行うべき対象構造を明確にするためにも用いられる。このためには、疲労評価結果は、これまでの船舶に経験された疲労損傷の発生傾向と対応の取れたものである必要がある。

従来、一般に用いられていた溶接部の疲労強度評価手法^{2,3)}は、溶接部に存在する大きな引張り溶接残留応力の影響のために、構造的な平均応力が疲労強度に及ぼす影響は無視できるほど小さいとするものであった。しかし、損傷統計から、船体構造の場合には構造的な平均応力の影響が無視できないことが明らか⁴⁾となり、この影響を適切に考慮できる評価手法⁵⁾が開発され、規則化⁶⁾されている。これは、就航中の積付状態の変化により構造的な平均応力状態が変化するため、船舶特有の問題である。

図2に、ある船の船側縦通肋骨に生じた疲労亀裂の発生傾向と、従来の方法、及び、新しい方法で北大西洋海域25年就航に対するマイナーの線形被害則による疲労被害度を評価した結果を示す。船舶特有の問題を考慮に入れた疲労評価法による結果は、実際の損傷傾向と概ね対応しており、船舶特有の平均応力問題を考慮した評価で、船舶の疲労寿命をかなり良好に予測評価できることが分かる。

3.2 船体構造の疲労管理

船舶は非常に大きな溶接構造物で、疲労亀裂が発生する可能性のある溶接継手箇所は膨大な数になる。実際は、そのような溶接継手箇所の位置及び配置される区画の違いによる荷重条件の違い、周辺構造形式の違い等の理由により、疲労亀裂が発生する可能性や発生亀裂が機能或いは強度へ及ぼす影響、更に、検査点検における発生亀裂の発見可能性も異なってくる。従って、効率的且つ実際に船体構造の疲労管理を行うためには、(1) 疲労亀裂発生危険性、(2) 亀裂の発生・進展による影響度、(3) 亀裂発見の可能性(接近性、検査環境、亀裂進展の速さを総合的に評価)を総合的に考慮して、個々の箇所の疲労上のリスクを評価した上で、潜在的な

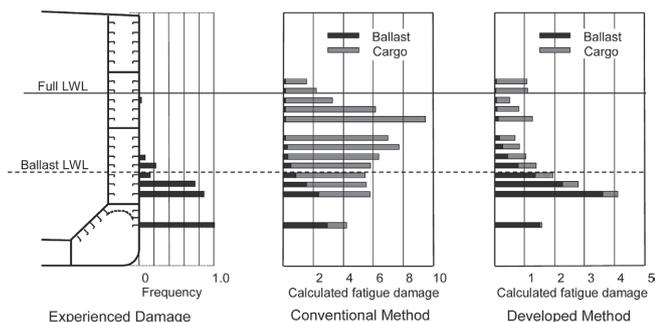


図2 疲労強度評価法の違いによる評価結果と損傷との対応

高リスク箇所を特定し管理する方法⁷⁾が考えられる。

建造中管理においては、疲労を考慮した設計上の要件を、対象箇所が満たしているかを建造現場において確認し、確認データを取得することが必要である。就航中の管理として、点検検査により疲労亀裂が発生していないことを確認することも重要であるが、就航後の疲労履歴に関する状態を監視し、余寿命評価へとフィードバックすることが必要である。船体構造の実際の疲労状態は、設計条件と就航履歴、積付履歴との相違、遭遇荒天海象の大きさと遭遇頻度等の影響を受けるので、疲労状態の監視は余寿命の評価精度を向上させるために必要である。疲労監視ツールとしては、(1) 就航履歴、(2) 歪計測、(3) 疲労センサ等があるが、各ツールの特徴を考えた適用、及び、夫々の特徴を生かして組み合わせが、実用的な余寿命評価技術を確立する上で必要である。

4 船舶の腐食

4.1 船舶の腐食状態評価法の開発

船舶にとって腐食衰耗は避けたい問題であり、船体構造は、腐食衰耗状態の把握のために、腐食による板厚衰耗が定期的に計測される。通常の設計では、強度上必要な構造部材寸法に、設計寿命中に腐食衰耗すると予想される板厚分(腐食予備厚)を加えて部材寸法が決定⁶⁾される。適正な腐食予備厚を設定するためには、腐食の発生・進行を良好に予測し、設計寿命中に生じると予想される腐食衰耗量に合理的な安全余裕を見込んで設定することが必要である。腐食の発生・進行を予測するモデルは、発生過程、進行過程共に確率現象であることから、確率モデルの導入が必要であり、モデルの同定には実際の板厚計測データが有効⁸⁾である。

板厚計測結果と確率モデルに基づく腐食量の推定結果例を図3に示す。腐食予備厚の設定に際しては、腐食現象に影響を及ぼす要因とその影響度を考慮するために、腐食環境ご

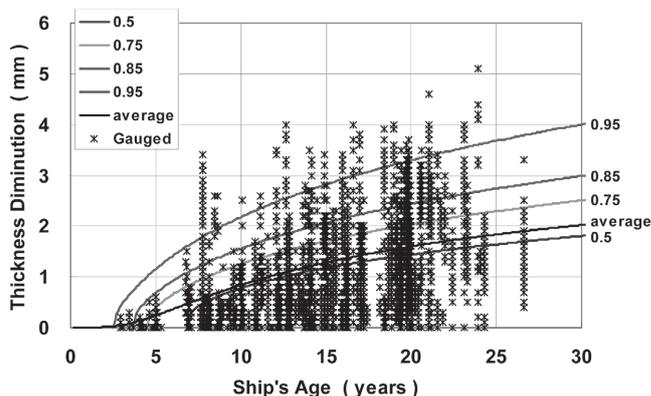


図3 船体構造部材の板厚計測結果と腐食量の予測結果の例

とに板厚計測データを分類し、分類した腐食環境ごとに腐食モデルを構築することが実際的な手法である。

4.2 腐食による強度劣化に対する考慮

腐食衰耗による板厚減は強度低下を引き起こし、過度の腐食衰耗は破孔等による機能喪失のほか、局部の降伏、座屈、破断といった損傷の原因となる。また、広範囲に亘る腐食衰耗は全体強度の低下を招き、荒天時における大事故につながる可能性が考えられる。

腐食衰耗に伴う損傷の発生を防止するためには、就航後の腐食衰耗状態を計測により把握すると共に、把握した状態から将来の腐食衰耗状態を予測することが必要である。しかしながら、船体構造部材の腐食状態は多くの要因に影響を受ける非常に複雑な現象であり、個々のケースに対して将来の状態を予測することは、一般に、困難である。この場合、腐食の発生・進行に関する確率モデル⁸⁾に含まれるパラメータの値に対して、板厚計測データに基づくベイズ推論を行うことにより、確率モデルを固有のケースに対応できるよう修正し、修正した確率モデルにより将来の腐食衰耗状態を予測することが有効な手法⁹⁾である。

推定或いは計測により確認した腐食状態に基づき強度評価を行う場合、局部強度と全体強度評価における腐食状態の取り扱いが異なることに注意が必要である。表1に或るSHVLCCの船齢20年時における腐食衰耗状態の統計値をまとめた例¹⁰⁾を示す。構造部材要素の腐食量のばらつきはかなり大きなものとなっており、局部強度の安全性を評価する場合このようなばらつきを考慮した評価が必要となる。一方、船体梁の強度に及ぼす腐食影響によるばらつきは非常に小さく、構造体の強度評価を行う場合、腐食影響によるばらつきを無視した取り扱いができることを示している。即ち、腐食衰耗による全体強度劣化或いは構造強度劣化を評価する場合には、構成する各構造部材要素に対して、平均腐食量による一様腐食状態を想定した強度評価が妥当であるといえる。

局部強度を評価する場合、対象とする構造部材要素が強

表1 SHVLCCの船齢20年時における腐食衰耗状態の統計値

		average	std.dev.	c.o.v.(%)
thickness diminution	upper deck plate	1.57	0.955	60.85
	side shell plate	0.78	0.498	63.65
	bottom plate	2.39	1.773	74.06
	longitudinal bulkhead plate	1.24	0.910	73.50
hull girder cross sectional area	upper	1403241	5233	0.37
	bottom	1714416	8722	0.51
hull girder section modulus	upper	62.37	0.161	0.26
	bottom	71.76	0.230	0.32
initial collapse load		1.64E+06	2.11E+04	1.29
hull girder ultimate strength		1.78E+06	5.91E+03	0.33

度上必要とする寸法以下まで腐食衰耗することのないように、部材の切り替え基準を参照して適切に維持補修を行う⁶⁾必要がある。このとき、局所の腐食状態が確率的に大きくばらつくので、将来の腐食状態の確率的な予測に基づき、適切な安全余裕を見込む必要がある。

部材の切り替え基準は一様腐食状態を想定して設定されているが、実際の腐食状態は凸凹表面状態として観察される。特に、専ら鉄鉱石と石炭を積載するバラ積み貨物船の倉内部材のように、ピット状の腐食が密集して腐食が進行するような場合には、ピット底の歪集中を起点として破壊が生じることがある。そこで、凸凹腐食表面状態の部材と一様腐食状態の部材との強度関係について検討しておく必要がある。図4は、凸凹腐食表面状態の板部材の圧縮最終強度と同じ強度を有する一様腐食状態の板の腐食衰耗量を求めた例¹¹⁾である。横軸のDOPは、板表面中におけるピット状腐食が発生している部分の割合を示している。圧縮荷重を受ける凸凹腐食表面状態の板部材では、平均腐食衰耗量の凡そ1.25倍の腐食量を見込んで判断する必要があるといえる。

5 おわりに

船体構造の寿命に関わる要因として疲労と腐食が大きな問題である。

船体構造に生じる疲労損傷防止の観点では、設計及び建造中の工作管理での考慮が重要であるが、長寿命運航を計画する場合には、就航後の疲労状態監視が必要である。疲労設計においては、構造物の受ける荷重状態の特徴を考慮した局所応力状態を考慮した評価を行う必要がある。船体構造には膨大な疲労上の潜在危険箇所があるので、個々の危険箇所ごとに疲労リスクを評価し、高リスク箇所を管理対象とすることが実用的であると考えられる。就航後の疲労状態の監視技

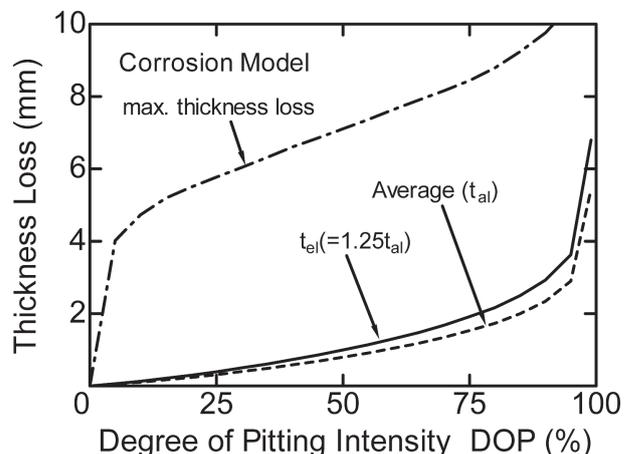


図4 圧縮荷重を受ける凸凹腐食表面状態の板部材と等価な一様腐食板

術については、今後更に実用的且つ高精度評価可能な技術の開発が望まれる。

腐食については、板厚計測による就航後の腐食衰耗状態の把握と計測データに基づく将来の腐食状態の予測が重要である。腐食衰耗の進行と共に強度劣化が生じるので、強度低下について検討する必要があるが、局部強度と全体強度を検討する場合とで考慮する腐食状態が異なることに注意が必要である。また、局部強度を検討する際に、局部腐食状態が凸凹表面状態である場合には、考慮する破壊形式に応じて凸凹表面状態の影響度が異なることにも注意が必要である。

また、腐食環境下での腐食疲労も問題で、腐食環境下での疲労寿命の低下について設計時に考慮する必要があり、通常、大気中の疲労寿命の1/2を見込んでいる。腐食疲労による疲労強度低下防止の観点から、防食塗膜の品質向上と劣化に対する管理は重要な課題である。

参考文献

- 1) 山本規雄：西部造船会，'01 構造シンポジウムテキスト，(2001)，3-15.
- 2) International Institute of Welding, Fatigue design of welded joints and components, Recommendation of IIW, XIII-1539-96/XV-845-96, IIW, (1996)
- 3) BS5400 Part 10, Code of Practice for Fatigue Design, British Standard, (1980)
- 4) 日本海事協会情報技術部，日本海事協会会誌，(1998)，245.
- 5) 山本規雄，松岡一祥：日本造船学会論文集，190 (2001)，499-505.
- 6) IACS, Common Structural Rules for Bulk Carriers, IACS CSR-B, (2006)
- 7) N. Yamamoto, H. Takano, T. Koiwa and A. Usami : Proceedings of the 23rd International Conference & Exhibition for the LNG, LPG and Natural Gas Industries, (2008)
- 8) N. Yamamoto and K. Ikegami : Transactions of the ASME, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 120 (1998), 121-128.
- 9) N. Yamamoto and H. Kobayashi : Proceedings of the 9th International Conference on Structural Safety and Reliability, (2005)
- 10) N. Yamamoto and T. Yao : Proceedings of the 8th International Conference on Structural Safety and Reliability, (2001)
- 11) 山本規雄，中井達郎：第6回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム (JCOSSR 2007), (2007), 509-516.

(2008年9月29日受付)