

構造材料寿命評価 研究施設

田中 義照*

Facility for life evaluation of ship structural materials

by

Yoshiteru TANAKA

1. まえがき

近年、ナホトカ号(1997年、日本海)、エリカ号(1999年、フランス沖)、プレステージ号(2002年、スペイン沖)など、老朽タンカーの折損・油流出事故が相次いで発生し、沿岸国に甚大な環境被害をもたらされたことは記憶に新しい。これらの重大海難事故の発生要因のひとつに、適切な保守管理の欠如が指摘されているが、保守管理を合理的に行うためには、様々な環境・荷重下における構造部材や材料そのものの精度の高い寿命評価技術が要求される。

航行中の船体には、波浪による曲げモーメント等の外力やタンク内の貨物・バラスト水等の慣性力による変動圧が繰り返し作用する。これらの荷重を受ける船体構造は、薄い鋼材を縦横に組み合わせた板骨構造であり、溶接により組み立てられるため、応

力集中箇所が無数にあり疲労損傷が生じ易い。また、タンク内は積荷の影響だけでなく、昼夜の温度変化による結露等、苛酷な腐食環境である。以上の理由により、経年劣化に伴う船体構造の主な損傷は、疲労および腐食が原因となる場合が多い。

本稿で紹介する構造材料寿命評価研究施設は、船体の構造設計、検査・保守管理のための疲労損傷および腐食疲労寿命評価手法(S/N関係やき裂伝播挙動)の検証に役立てるため、1994年に運輸省船舶技術研究所(現独立行政法人海上技術安全研究所)に整備された。複合荷重試験装置および長期間腐食疲労試験装置で構成されており、構造・材料の寿命評価に関する様々な試験に用いられている。ここでは、これらの試験装置の概要を示し、利用例としてこれまでに実施された試験研究の一部について述べる。

* 構造・材料部門

原稿受付 平成21年 6月 5日

審査済 平成21年 7月 1日

2. 施設概要

構造材料寿命評価研究施設には、構造試験体の疲労試験や破壊試験に利用可能な複合荷重試験装置、並びに、船体用材料の疲労試験に利用可能な長期間腐食疲労試験装置がある。

2. 1 複合荷重試験装置

複合荷重試験装置は、可搬式試験装置（図-1 参照）および固定式試験装置（図-2 参照）からなる。可搬式試験装置は、比較的大型の船体構造模型に航行中の船舶に作用する実働荷重を模擬した繰り返し荷重を与えることができる。複数（最大 4 台）の油圧サーボ式アクチュエータを独立あるいは組み合わせて制御することができ、試験体の形状や負荷方式に合わせて、厚さ 2m のプレストレスト・コンクリート製反力床または反力壁に設置する。可搬式試験装置の要目を表-1 に示す。一方、固定式試験装置は、可搬式と同タイプの油圧サーボアクチュエータが、クロスヘッドに取り付けられている。油圧チェックがベッド中央およびアクチュエータ先端に取り付けられており、厚板試験片による疲労試験の他、構造模型の疲労試験や破壊試験にも使用される。

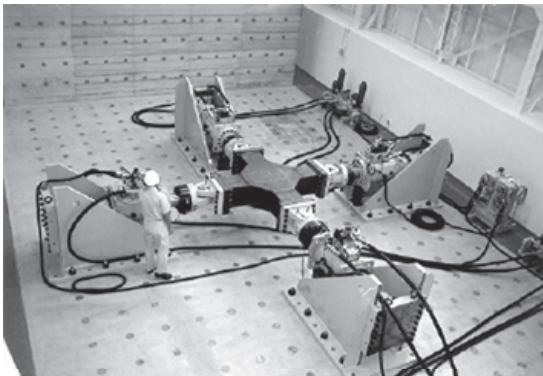


図-1 複合荷重試験装置(可搬式)の外観

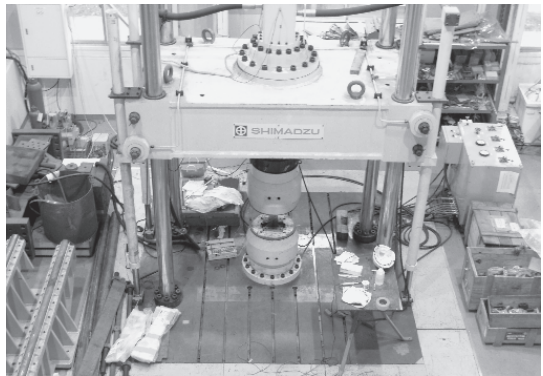


図-2 複合荷重試験装置(固定式)の外観

表-1 複合荷重試験装置(可搬式)の要目

反力床	長さ 12m×幅 8m
反力壁	高さ 4m×幅 8m
アクチュエータ 容量	静的荷重±1,200kN
	動的荷重±1,000kN
	ストローク±100mm
制御・監視装置	PC による位相制御、中点不動制御、干渉補正制御、および作動状態監視

2. 2 長期間腐食疲労試験装置

長期間腐食疲労試験装置は、船体構造部材が恒常的に晒される苛酷な腐食環境（海水、希硫酸、サワー原油環境等）における金属材料の腐食環境強度を評価し、その破壊機構を解明するための装置である。特に、腐食現象を扱うため、低負荷速度に配慮したデジタル油圧サーボアクチュエータを採用している。試験装置の荷重容量は 300kN、200kN、100kN の 3 種類、計 5 台である（図-3 参照）。

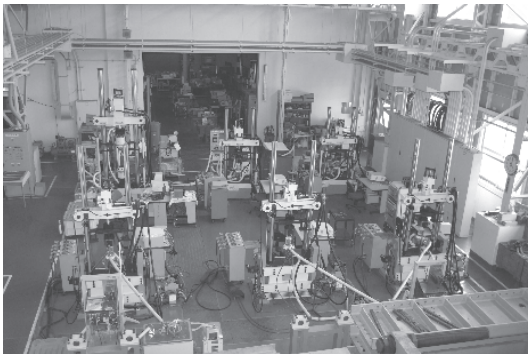


図-3 長期間腐食疲労試験装置の外観

3. 施設の利用例

これまでに構造材料寿命評価研究施設を利用して実施された試験研究のうち、代表的なものを取り上げ、以下に紹介する。

3. 1 コンテナ船の縦最終強度に関する研究

3. 1. 1 研究の背景

船体の縦曲げ最終強度（薄肉断面梁としての縦曲げモーメント負担能力）は、設計寿命（通常 25 年）の間に遭遇すると推定される最大の縦曲げモーメントに対して評価される。

一方、最近のコンテナ船の大型化は著しく、船長 400m、積載コンテナ数 14,000TEU（20 フィートコンテナ換算での総積載数）の船まで設計・

建造されている。いわゆるメガコンテナ船と称されるこのような大型船では、コンテナ自体の強度理由により、深さ方向の積載数は従来のままで、船長・船幅方向の積載数を増している。船幅の増大は、船体の両舷における波高差による振りモーメントの増大をもたらす。また、従来のポストパナマックス型コンテナ船(8,000TEU程度)と比較して、船首フレア部がかなり大きくなっているため、バウフレア・スラミングに起因する船体の弾性振動(ホイッピングやスプリング)の影響も懸念される。

そこで、縦曲げモーメントだけでなく、振りモーメント等複合荷重が作用する場合について、船体の縦曲げ最終強度にどのような影響を及ぼすかを検討するため、大阪大学とともに「船体桁の複合荷重下における縦最終強度評価法の確立に関する研究」(科学研究費補助金・基盤研究(S); 2006~2009年度)を実施している。

3. 1. 2 1/13 縮小模型による逐次崩壊試験

本研究では、長さ×幅×深さ=267×39.8×23.6mのコンテナ船(5,250TEU)の構造寸法を参考にし、1/13 縮小模型を5体製作した(図-4 参照)。模型は実船と同様、船側・船底とも二重殻構造となっており、縦横の隔壁で囲まれたホールドは大きな開口を有している。また、船体中央付近3ホールド分(各ホールドは部分隔壁により中央位置で仕切られている)がモデル化されており、寸法は長さ×幅×高さ=6.6×3.0×1.8mである。

逐次崩壊試験では、図-4に示すように、模型の一端(機関室前面に相当)を反力壁に固定し、他端の船側部に負荷治具を介して鉛直方向の荷重を2台のアクチュエータにより载荷した。始めに設定した自由端の荷重比 P2/P1 (P1 は常に下向き、P2 は上または下向き)、すなわち、振りモーメント T と固定端の曲げモーメント M の比 T/M が一定値を保つように、荷重を逐次増大させた。

この曲げと振りの比率を変えた逐次崩壊試験を行うとともに、有限要素解析プログラム LS-DYNA を用いた弾塑性崩壊解析を行い、船体桁の縦曲げ最終強度に及ぼす振りモーメントの影響を明らかにした。

一例として、振りモーメントが支配的な場合の船側外板の座屈崩壊について、試験結果と有限要素解析結果を比較して図-5に示す。また、有限要素解析結果から得られた模型の最終強度に関する曲げモーメント M および振りモーメント T の相関関係を図-6に示すが、相関関係は次式で近似できることが明らかになった(M_U および T_U は、M または T がそれぞれ単独に作用する場合の最終強度)¹⁾。

$$(T/T_U)^2 + (M/M_U)^2 = 1 \quad (1)$$

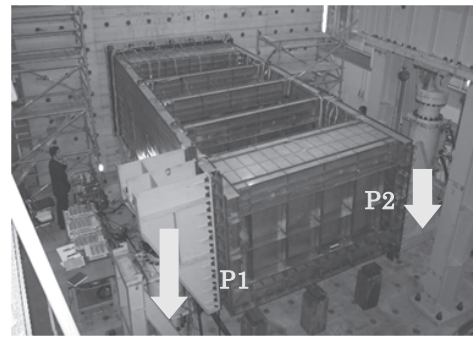
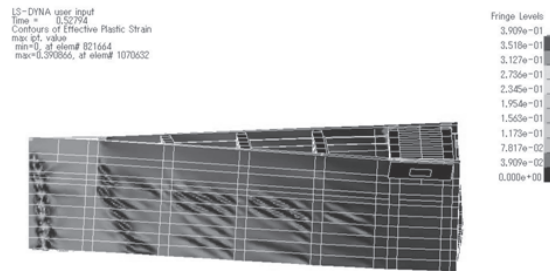


図-4 コンテナ船縮小模型の外観および設置状況



(a) 試験結果



(b) 有限要素解析結果

図-5 試験結果と計算結果の比較

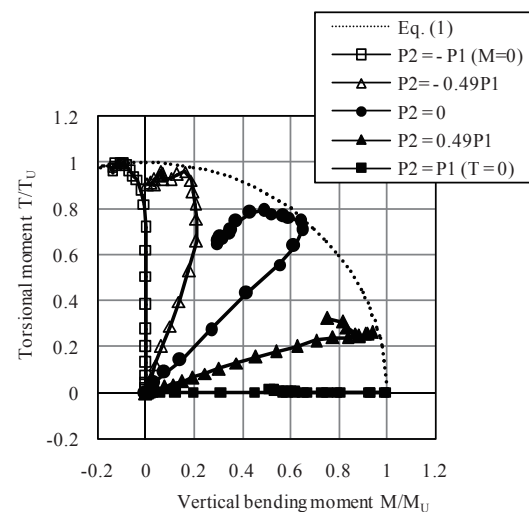


図-6 最終強度に関する曲げ・振り相関関係

3. 2 ダブルハル VLCC の構造寿命に関する研究

3. 2. 1 研究の背景

1989 年 3 月にアラスカ州プリンス・ウィリアム湾で発生したエクソン・バルデス号の座礁・油流出事故（41,300 トンの原油が流出）を契機に、IMO（国際海事機関）は、海洋汚染防止を目的として、MARPOL 条約にタンカーの船体二重殻（ダブルハル）化を盛り込んだ。これに伴い、それまで単殻（シングルハル）構造が主流であった油タンカーに、1996 年 7 月以降の引渡し船より、船体のダブルハル化が強制適用されることとなった。当時、ダブルハルタンカーは、まったく新しい構造様式であり、船体構造の健全性維持に関する経験や実績がなかったため、船体構造の寿命評価技術を構築する必要性が、ダブルハルタンカーの普及とともに高まった。

そこで、ダブルハルタンカーの設計・検査・保守の高度化を図ることを目的として、(社)日本造船研究協会（現 (社) 船舶技術研究協会）を中心に、産学官共同研究プロジェクトである「二重殻タンカーの船体構造寿命に関する研究」²⁾（1999～2002 年度）が実施されることとなった。本研究プロジェクトでは、船体構造の疲労強度に焦点が当てられ、波浪荷重や疲労き裂伝播挙動を精度良く推定するために、日本ーペルシャ湾間における実船計測や大型模型試験といった大規模な実験的アプローチが採用された。

3. 2. 2 1/3 縮小模型による疲労き裂伝播試験

ダブルハルタンカーの重要構造箇所は多数存在するが、本研究では最重要箇所の一つであるビルジナックル部を対象として 1/3 縮小模型を 2 体製作した（図-7 参照）。疲労き裂の発生・伝播挙動を精査する部位は、内底板と縦隔壁基部斜板との接合部であり、模型の 1 体は当該部分を溶接により接合し（溶接型）、もう 1 体は内底板から斜板にかけて 1 枚の板に曲率をつけて立ち上げたもの（R 型）とした。

疲労試験では図-7 に示すように、模型の船底側を上にして船側外板に相当する部分を反力壁に固定した（同図の左右方向が船長方向）。また、船体縦断面に平行な面内において、トランスフロアごとに取り付けた 3 台のアクチュエータにより载荷した。

荷重は往復一航海において、それぞれ一回ずつ嵐に遭遇すると仮定した嵐モデルを採用した。すなわち、往航ではバラスト状態（ビルジナックル部に生じる平均応力が圧縮）において、復航では満載状態（ビルジナックル部に生じる平均応力が引張）において、内外圧の差に相当する繰返し荷重が作用すると仮定した。荷重パターンを図-8 に示すが、図中の①から⑩の荷重ブロックはそれぞれ 1 万回の繰返し荷重で、①から⑩の 10 荷重ブロックを 1 セットとして繰返し負荷した。ただし、疲労試験に要

する荷重の繰返し数を溶接型と R 型でほぼ等しくするため、前者では平均荷重 P_m が $\pm 248\text{kN}$ 、最大荷重振幅 $\Delta P_{\max}$ が 406kN 、後者では平均荷重 P_m が $\pm 330\text{kN}$ 、最大荷重振幅 $\Delta P_{\max}$ が 540kN とした。

疲労き裂の検知は、目視観察およびひずみの 5% ドロップ法（溶接止端から板厚の 1/2 に相当する位置のひずみ計測値を使用）を用いた。疲労試験の結果、溶接型、R 型ともに約 33 万回で疲労き裂が発生した。試験終了後の破面観察から得られたビーチマーク（作用応力の違いによって板断面に残るき裂進展痕）を図-9 に示すが、局所き裂が合体して板厚方向に進展する様子がわかる。これらの試験結果は、有限要素解析結果の検証、Miner 則などの疲労き裂発生寿命予測結果との比較、各種き裂伝播寿命予測結果との比較に供され、有益な成果が得られた。

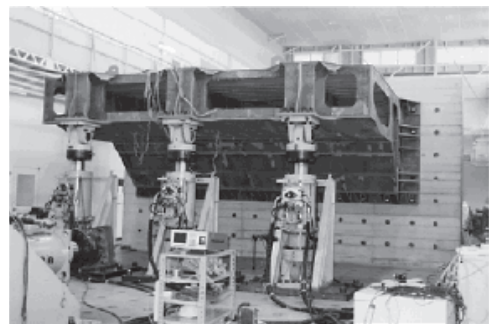


図-7 ダブルハル VLCC 構造模型の疲労試験

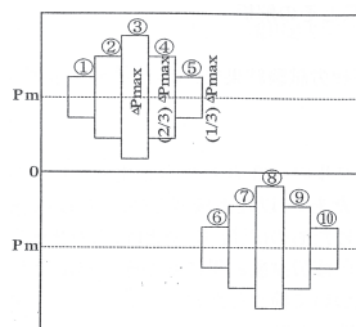
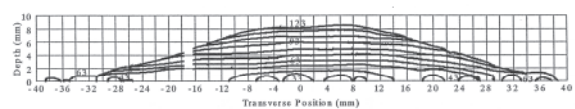
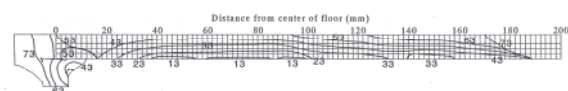


図-8 荷重パターン(嵐モデル)



(a) 溶接型模型



(b) R 型模型

図-9 ビーチマークのスケッチ

3. 3 溶接チタン管の圧縮強度

軽量かつ高強度で耐食性に優れたチタン材料は、船舶に適した材料であると考えられるが、これまで船用品の一部には使用されているものの、構造材料として使用された例は極めて少ない。そこで本研究では、中小型船の強度部材として使用されることが多い薄肉管として、溶接チタン管を用いる場合を想定し、管の長さおよび径を変えた圧縮試験（公称板厚はすべて一定）を実施し、圧縮強度特性について検討した。試験には固定式試験装置を用い、管の両端で固定条件を満足させる治具により管を支持した。

圧縮試験では、管の長さ／径の比により、図-10に示すような全体座屈、局部座屈、または両者が同時進行する場合が見られたが、圧縮強度は、管の長さ、断面積および断面2次モーメントを用いた3次式で精度良く推定できることが明らかになった³⁾。

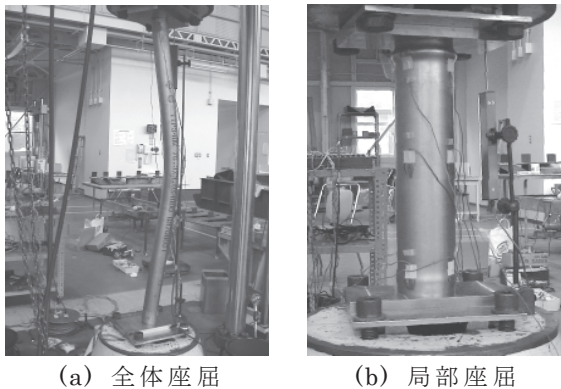


図-10 溶接チタン管の圧縮試験

3. 4 角回し溶接継手の2軸疲労試験

波浪中にある船体には、縦曲げモーメント等の波浪外力のほか、波浪変動圧や貨物・部材にはたらく慣性力等、様々な外力が作用する。したがって、船体構造部材の疲労強度をより正確に評価するためには、多軸荷重状態の影響を明らかにしておく必要がある。

本研究では、図-11に示す2軸疲労試験体を用いた疲労試験を実施した（アクチュエータ及び試験体の設置方法は図-1と同様）。その結果、2軸応力状態における角回し溶接継手の疲労強度は、ポアソン効果による応力振幅の増大を考慮した1軸応力状態の疲労強度に関連付けられることが明らかになった⁴⁾。

3. 5 造船用鋼板の長寿命腐食疲労強度の検討

船舶の寿命評価には、構造材料のS/N関係を明確にしておく必要がある。特に、貨物あるいはバラストタンク内は苛酷な腐食環境であり、船舶の設計寿命25年間に作用する荷重の繰り返し数は、 10^8 回を

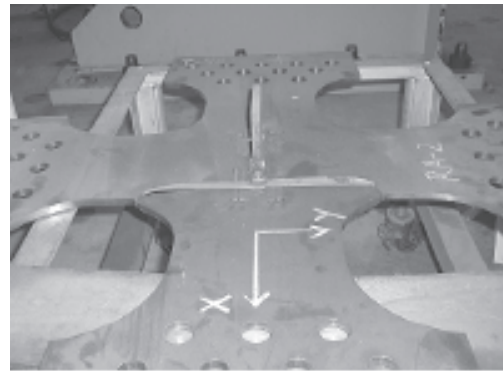


図-11 破断した2軸疲労試験体

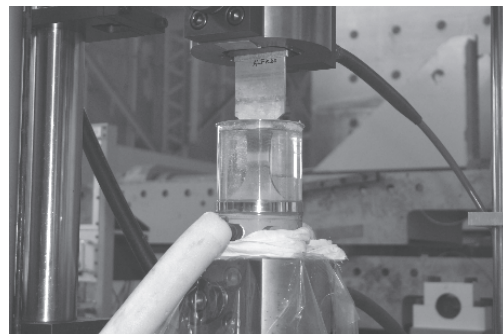


図-12 長期間腐食疲労試験(アルミニウム合金)

超える（平均波周期を6秒として）。腐食速度を維持しつつ、長寿命域（大気中では疲れ限度以下）のS/N関係を明らかにするためには、膨大な試験時間を要し、それまで実験データは殆どなかったのが実情である。

本研究では、人工海水中における造船用鋼板の長寿命腐食疲労試験（図-12参照）を行い、有用な腐食疲労試験結果が得られた⁵⁾。

4. おわりに

船舶・海洋構造物の寿命評価手法や保守管理技術については、完全な理論体系が構築されているわけではなく、様々な海難事故が発生しているのが実情である。その結果、国際船級協会連合(IACS)は共通構造規則CSRを制定し、国際海事機関(IMO)においては目標指向型基準(GBS)に関する審議が様々な海事関係者によって行われている。

本稿で紹介した構造材料寿命評価研究施設は、今年設置後15年を迎えたが、今後も本施設を利用した研究成果が海難事故の低減の一助になれば幸いである。執筆にあたり、データ等のご提供を

いただいた高橋一比古海洋部門上席研究員、並びに、小林佑規氏に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Y. Tanaka, T. Ando, Y. Anai, T. Yao, M. Fujikubo and K. Iijima: Longitudinal strength of container ships under combined torsional and bending moments, Proceedings of ISOPE2009, CD-ROM(2009)
- 2) (社) 日本造船研究協会第 245 研究部会: 「二重殻タンカーの船体構造寿命に関する研究平成 12 年度報告書」(2000)、pp.157-181
- 3) 田中義照、佐久間正明、安藤孝弘: 溶接チタン管の圧縮強度、チタン、Vol.52(2004)、No.2、pp.121-125
- 4) 高橋一比古、高田篤志、秋山繁、牛嶋通雄、前中浩: 「2 軸繰り返し荷重下における角回し溶接継手の疲労挙動 (第 2 報) - 2 軸荷重レンジ比および横方向繰り返し圧縮荷重の影響 -」、日本造船学会論文集、第 188 号(2000)、pp.599-607
- 5) 小林佑規、田中義久、後藤英信、松岡一祥、本橋嘉信: 「人工海水中における造船用鋼板の長寿命腐食疲労強度の検討」、日本造船学会論文集、第 183 号(1998)、pp.383-390