

最先端の構造強度評価法に関する 実用的手引書の開発

有馬 俊朗*, 岡 正義**

Development of the practical guide for the state-of-the-art methods for hull strength evaluation

by

Toshiro ARIMA, Masayoshi OKA

Abstract

This paper outlines the outcome of “Development of the practical manual about the state-of-the-art methods for hull strength evaluation”, a research theme in the National Maritime Research Institute.

Requirements of hull structural strength to ensure ship safety have been developed and continuously improved as classification societies’ rules, which were in general empirical and prescriptive, for historical reasons. As there are more than 10 major classification societies for long years, requirements directly related to ship safety such as hull girder strength, in particular, should be internationally standardized in order to set the most achievable and minimum goals to enhance and ensure maritime safety and to protect marine environment. In 1989, the International Association of Classification Society (IACS) adopted the Unified Requirements on “Hull Girder Longitudinal Strength” (UR S11), in which the classification rules on the longitudinal strength of the major classification societies were unified. Along with changes in social requirements and advancements in shipbuilding technologies, ship sizes got rapidly bigger, and in recent years ultra-large vessels such as 20,000 TEU type container ships and 30,000 D/W ore carriers were in service. Under these circumstances, related classification rules have been continuously improved and UR S11A (Longitudinal Strength Standard for Container Ships), which includes additional functional requirements for large container ships, was finally adopted in 2015.

On the other hand, the International Maritime Organization (IMO), which is a specialized agency of the United Nations that is responsible for measures to improve the safety and security of international shipping and to prevent marine pollution from ships, implemented the Goal-Based ship construction Standards (GBS) for bulk carriers and oil tankers contracted on or after 1 July 2016 in response to serious accidents of bulk carriers and oil tankers. GBS, which can be recognized as “Standards” for developing “rules”, consist of five Tiers including Tier I (Goals) and Tier II (Functional Requirements). In other words, classification societies’ rules should be developed to conform to Tier I and Tier II and these rules shall be verified by IMO in accordance with Tier III (Verification process).

According to these backgrounds, the recent structural rules or guidelines related to structural safety assessment of ships have been considerably upgraded not only from a technical point of view but also from a philosophical point of view. In addition, as transparency is a key concept of the current regulations such as IMO GBS, huge amount of technical background documents are now available. Therefore, the authors believe that it is important to develop the practical guide to facilitate understanding of overview of the state-of-the-art methods for hull strength evaluation. Hence this paper outlines the results of the research on structural safety and structural strength evaluation, whole ship direct load and strength analysis using whole ship structural model, hull stress measurement and onboard monitoring system, etc.

* 一般財団法人 日本海事協会 開発本部 (研究当時, 構造安全評価系)

** 構造安全評価系

原稿受付 平成30年10月30日

審査日 平成30年12月20日

目 次

1. まえがき	45
2. 船舶の構造安全評価と IMO/GBS	46
2.1 IMO GBS	46
2.1.1 GBS 全般	46
2.1.2 GBS の目標と機能要件	46
2.1.3 船体の縦曲げ最終強度と残存強度	46
2.1.4 設計寿命と環境条件	46
2.2 構造安全性と構造強度評価	48
3. 縦強度の評価	48
3.1 縦強度	48
3.1.1 船体の強度に関する教材	48
3.1.2 IACS の縦強度に関する統一規則 (UR S11)	50
3.1.3 コンテナ船の縦強度に関する IACS 統一規則 (UR S11A)	50
3.1.4 船体梁の縦曲げ最終強度評価	50
3.2 全船荷重・構造一貫解析システム	51
4. 降伏強度評価	52
4.1 降伏強度評価の基本的な考え方	52
4.2 実船応力計測	53
5. 座屈／最終強度評価	56
5.1 極限海象に対する構造要件	56
5.2 座屈強度評価の基本的な考え方と最終強度	56
5.2.1 柱の圧縮座屈と最終強度	56
5.2.2 板の圧縮座屈	57
5.3 船体梁の縦強度と最終強度	58
5.3.1 縦強度	58
5.3.2 最終強度	59
6. 疲労強度評価	60
6.1 疲労強度	60
6.1.1 船員と材料の“疲労”	60
6.1.2 疲労強度及び疲労寿命	60
6.1.3 疲労強度評価法及び設計法	61
6.1.4 疲労強度評価用の想定航路	61
6.1.5 疲労強度に影響するその他のパラメータ等	61
6.2 船上モニタリングシステム	62
6.2.1 船体構造強度モニタリングシステム	62
6.2.2 運航支援用、性能評価用モニタリングシステム	63
6.2.3 統合型船上モニタリングシステム	63
7. 材料の脆性破壊	65
7.1 脆性破壊	65
7.1.1 「脆」と「靱」	65
7.1.2 延性と脆性	65
7.1.3 靱性	65
7.1.4 脆性破壊	65

7.1.5 脆性破壊の防止	66
8. 最近の船体構造基準の動向と研究プロジェクト	67
8.1 GBS 適合の船級協会規則	67
8.2 GBS 適合検証プロセス	68
8.3 MSC98 の審議結果	68
8.4 構造安全に関する研究プロジェクト	69
8.4.1 構造設計情報の運航時での活用	69
8.4.2 船上モニタリング情報(運航時)と規則・基準	69
9. おわりに	70
参考文献	71

1. まえがき

船体の構造強度要件は、歴史的な理由から船級協会と呼ばれる第三者機関が、基本的に経験則をベースに開発した規則(船級協会規則)として規定されてきた。主要な船級協会に限った場合でも、10を超える船級協会が存在し、夫々が独自に規則開発を行った場合、縦強度のように船舶の安全に直結する強度要件にも、大きなばらつきが生じることになる。このため、国際船級協会連合(International Association of Classification Societies, 以下 IACS)では、1989年(平成元年)に縦強度に関する統一規則(Unified Requirement, 以下 UR) S11¹⁾を採択し、世界の主要な船級協会規則の縦強度に関する要件が統一された。また、IACS UR S11の制定(1989年)から後述するIMO GBS及びIACS CSRが施行される間、社会ニーズの変化及び造船技術の進歩もあいまって、船舶の大型化も進んでおり、近年では20,000TEU型コンテナ船、30,000D/W 鉦石運搬船などの超大型船が就航している。この間、主要な船級協会では、関連する船級規則を継続的に改正してきたが、近年発生した大型コンテナ船の海難事故を契機として、2015年に大型コンテナ船に特化した縦強度の統一規則UR S11A²⁾が採択された。

1990年代に頻発した大型ばら積貨物船の沈没事故、2000年前後に立て続けに起きたタンカーからの油流出事故^{3)~5)}を契機として、国際海事機関(International Maritime Organization, 以下 IMO)は、SOLAS条約に船体の強度基準を規定するための作業を開始した。IMOは、船級協会が船体構造強度に関する規則を継続的に改良し、十分な実績を有していることも勘案し、船級規則開発等のための基準と看做することができ、達成すべき目標(Goals)及び機能要件等が明確に規定された目標指向型の構造基準(Goal-based Ship Construction Standards for Bulk Carriers and Oil Tankers, 以下 GBS)の開発に着手した。一方、IACSは、IMOのGBS開発と平行して、油タンカー用及びばら積貨物船用の2つの共通構造規則(Common Structural Rules, 以下 CSR)の開発し、2006年4月1日以降の建造契約船に適用を開始した。IACSは、IMOに於けるGBS開発にも積極的に参画するとともに、草案段階のGBSで要求される機能要件を全て満足するようにCSRを開発していたが、2010年5月にIMOの第87回海上安全委員会(MSC 87)で採択されたGBSに完全適合する形で開発されたのがIACSの調和共通構造規則(Harmonized CSR for Bulk Carriers and Oil Tankers, 以下 HCSR)であり、2015年7月1日以降の建造契約船に適用されることとなった。

前述のようにIMO GBSは規則のための基準と看做せ、構造規則に係わる枠組み自体も大きく変化している。すなわち、GBSの適用対象船舶であるばら積貨物船及び油タンカーの船級協会規則は、IMO GBSの目標(Goals)と機能要件に適合することが要求されるとともに、IMOはこれらの船級規則がGBSに適合しているか否かの検証(適合監査)を実施する枠組みが確立されている。

具体的には、2016年5月に開催されたIMOのMSC 96に於いて、12のIACSメンバーの主に船体構造に関する船級規則がSOLAS条約II-1章3-10規則から強制要件として参照される「ばら積貨物船及び油タンカーに関する目標指向型構造基準(GBS)」^{6,7)}に適合していると確認され、MSCの決定がMSC.1/Circ.1518⁸⁾として各国政府へ回章(Circulate)された。

本稿では、船舶の構造安全評価に関連する近年の構造規則、また、その背景にある技術及び研究開発の進展状況などを整理した結果について報告する。

なお本論文は、海上技術安全研究所（以下、当所）の先導研究「最先端の構造強度評価法に関する実用的手引書の開発（平成 26 年度～平成 27 年度）」において作成した手引書について紹介するものである。また本論文は、主著者が一般社団法人日本船長協会月報「Captain」に連載したテキスト⁹⁾等を再構成したものである。

2. 船舶の構造安全評価と IMO/GBS

2.1 IMO GBS

2.1.1 GBS 全般

IMO GBS は船舶の安全性を高めるための新しい枠組みであり、IMO、船級協会及び業界が役割を分担する 5 階層構造（図 1）となっている。具体的には、IMO が規定する目標（Tier I）及び機能要件（Tier II）の下、Tier I と Tier II の要件に対する適合検証（Tier III）及び Tier III に適合した船級規則及び業界標準等がそれぞれ Tier IV 及び Tier V となる。対象は長さ 150m 以上のばら積貨物船及び油タンカーである。

2.1.2 GBS の目標と機能要件

目標（Goal）としては、「船舶は、その生涯を通じ、適切な運航及びメンテナンスを前提として、指定された運航条件及び環境条件の下で、非損傷時及び一定の損傷時において安全且つ環境負荷が少ないよう設計・建造されなければならない」と規定されている。

機能要件は、上記の目標を達成するための具体的な要件を整理・分類したものであり、設計寿命、環境条件、構造強度、疲労強度、残存強度及び構造の冗長性等が含まれる。

2.1.3 船体の縦曲げ最終強度と残存強度

構造強度に関する機能要件に於いては、過剰な変形及び少なくとも座屈、降伏及び疲労強度を含む損傷モードに対して船体強度を評価すべきことが規定されるとともに、縦曲げ最終強度の評価が義務付けられている。また、残存強度では、衝突、座礁及び浸水等の損傷時に於いて、想定される事故シナリオに対応する海象条件の下、十分な縦曲げ最終強度を有するように設計されることが要求される。

縦強度評価は、船体梁に作用する曲げモーメント及びせん断力による応力が許容範囲内にあることを確認すると共に個々の縦強度部材の座屈強度を検討するものであるが、縦曲げ最終強度の評価では、座屈後の剛性低下を考慮した船体横断面の縦曲げモーメント負担能力を直接的に評価するものである。

IACS のメンバーである（一財）日本海事協会（以下、ClassNK あるいは NK）は、1999 年に「船体構造強度評価のための技術指針」¹⁰⁾を出版するとともに、これを発展させて、タンカー、ばら積貨物船及びコンテナ運搬船用の「構造強度に関するガイドライン」^{11)~13)}をそれぞれ 2001 年、2002 年及び 2003 年に出版した。これらの 3 船種用のガイドラインには何れも「縦曲げ最終強度ガイドライン」が含まれている。

また、2006 年 4 月 1 日以降の建造契約船に適用開始となった IACS の油タンカー用及びばら積貨物船用の 2 つの共通構造規則（Common Structural Rules, 以下 CSR）に縦曲げ最終強度評価が導入された。

なお、これらの機能要件を全て満足するように、新規に残存強度評価等を追加する形で開発されたのが IACS の調和共通構造規則（Harmonized CSR for Bulk Carriers and Oil Tankers, 以下 HCSR）¹⁴⁾であり、2015 年 7 月 1 日以降の建造契約船に適用されることとなった。

2.1.4 設計寿命と環境条件

従来、船舶の設計寿命は約 20 年と言われてきたが、IMO GBS では 25 年と規定されている。また、構造強度評価の前提となる環境条件は北大西洋に固定されている。このため、GBS に適合することを目的として開発された IACS CSR に基づき設計・建造された船舶は強度面で強化され、結果的に鋼材重量は増加することとなった。なお、IACS は北大西洋（図 2 の 8, 9, 15 及び 16 の海域）の波浪発現頻度表（図 3）等を Recommendation No.34¹⁵⁾として出版している。

地球温暖化の影響，人工衛星を利用した波浪観測技術の進歩を受けた最新観測データ等を考慮すると，船舶にとってより厳しい海象の発生確率は上記より大きいという意見があり，IACSはRecommendation No.34の改定を念頭に置いた技術的な検討を進めている．一方，ウェザールーティング等の航海支援技術及び船上モニタリング技術等の進歩及び普及の現状も考慮すべきであり，安全性と経済合理性のバランスのとれた設計・建造が可能な形で改定されることが期待される．

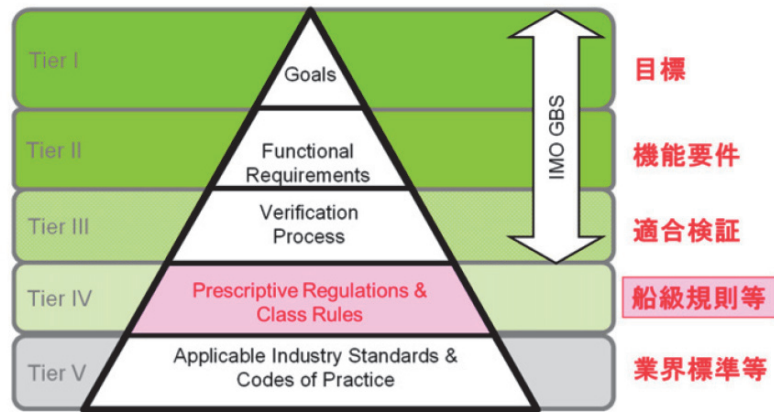


図 1. IMO GBS の枠組み

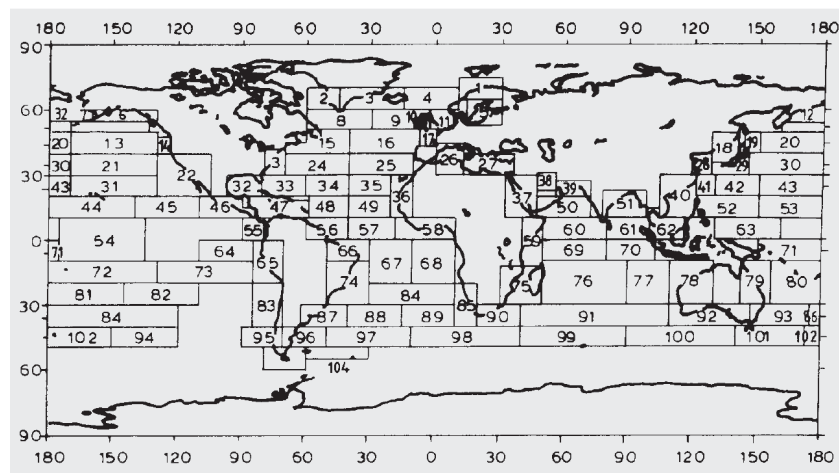


図 2 北大西洋の範囲の定義 (Area 8, 9, 15 and 16)¹⁵⁾

Hs/Tz	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	SUM
0.5	0.0	0.0	1.3	133.7	865.6	1186.0	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3050
1.5	0.0	0.0	0.0	29.3	986.0	4976.0	7738.0	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	22575
2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	22	197.5	2158.8	6230.0	7449.5	4860.4	2066.0	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0.0	23810
3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	34.9	695.5	3226.5	5675.0	5099.1	2838.0	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	19128
4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	13289
5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	51.0	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126.0	463.6	150.9	41.0	9.7	2.1	0.4	0.1	8328
6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	12.6	167.0	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1	4806
7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1	2586
8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	296.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1	1309
9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1	626
10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4.0	1.2	0.3	0.1	285
11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1	124
12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	4.4	9.9	12.8	11.0	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0.0	51
13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.4	3.5	5.0	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0.0	21
14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	8
15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	3
16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1
SUM:	0	0	1	165	2091	9280	19922	24879	20870	12898	6245	2479	837	247	66	16	3	1	10000

The Hs and Tz values are class midpoints.

図 3 北大西洋の短期海象（有義波高と平均波周期の組合せ）の発現頻度表¹⁵⁾

2.2 構造安全性と構造強度評価

IMO GBS の構造強度等に関する機能要件等を参照すると、構造安全性は非損傷時と損傷時に分けて考えることが出来る。

非損傷時において構造安全性を確保するためには、使用期間中に通常遭遇すると想定される通常海象の内、最も厳しい最悪海象に対して構造部材が座屈、永久変形、亀裂等の損傷が生じないことが必要となる。また、回避することが出来ず遭遇する過酷な海象である極限海象に対しては、重大事故に繋がる亀裂、崩壊等が生じないことが必要である。

一方、損傷時については、衝突、座礁、浸水等の事故シナリオに対応した海象の下、重大事故に繋がる損傷範囲の拡大、崩壊等の事故の拡大が生じないことが必要となる。

降伏強度及び座屈強度等の強度要件と対応する設計海象の対応を大胆に纏めると表 1 のように整理できる。

表 1 強度要件と海象の対応

降伏強度	応力を弾性範囲内の適正なレベル以下に抑える 1) 永久変形防止 2) 疲労強度及び座屈強度に対する一次バリア 3) 極限海象等における余剰強度の確保	通常海象 (最大応答→最悪海象)
座屈強度	パネル及び柱等の弾性座屈、弾塑性座屈	通常海象 (最大応答→最悪海象)
疲労強度	疲労被害度、亀裂伝播解析	通常海象 (船舶の想定される使用期間)
最終強度	縦曲げ最終強度 (非損傷時)	極限海象 (縦強度)
残存強度	損傷時 (衝突、座礁等) の縦曲げ最終強度	事故シナリオに対応する海象 (縦強度)

3. 縦強度の評価

3.1 縦強度

3.1.1 船体の強度に関する教材

1978 年に日本船長協会は「船体の強度 ---船体の泣きどころ---」¹⁶⁾と題するビデオを製作し、現在も販売している。この中で、船体の強度を、①縦強度 (船の長さ方向の強さ)、②横強度 (船の幅方向の強さ) 及び③局部強度 (船の局部的な強さ) に 3 分類している。

このビデオでは船体の強度が非常に分かり易く解説されているので、最初にこのビデオの解説の一部を引用しつつ縦強度の基本的な考え方を説明する。

縦強度は、人間に例えるとバックボーン、即ち、背骨の強さに相当する。図 4 に示すように波のない港等で静止している時 (静水中) で荷物やバラストを積むことにより船体に縦曲げモーメントが生じること、波浪中では波の山 (波頂) や谷が船のどの位置にあるかによって波による縦曲げモーメントが変化すること等が解説されている。

図 5 に示すように、波浪縦曲げモーメント (M_w) は波の長さが船の長さにほぼ等しくなるときに最大になる。(垂直) 縦曲げモーメントの長さ方向分布は、最大値は船体中央部付近に生じ、且つ、船首尾に向かって小さくなる。波浪せん断力 (F_w) は船の長さの 1/4 付近の縦曲げモーメントの傾斜が最大となる点で最大となる。なお、波浪縦曲げモーメント及び波浪せん断力の最大値は、波頂が船首尾に来た時 (Sagging 状態) または船体中央に来た時 (Hogging 状態) に生じる。

垂直縦曲げモーメントの他に、その影響度合いに応じて水平縦曲げモーメント及び捩りモーメント(図6参照)を考慮する必要がある。例えば、コンテナ船等では捩りモーメントの影響が大きく、船級規則等でも検討が要求される。

上記の日本船長協会のビデオ製作当時(1978年)のClassNKの鋼船規則では、静水中縦曲げモーメント(M_s)と波浪中縦曲げモーメント(M_w)の和に対する最大応力を軟鋼の降伏応力の約60%、即ち147N/mm²(15kgf/mm²)以下にすることが要求されていた。なお、許容応力と比較するための最大の縦曲げ応力 σ_{max} は、梁理論に従って縦曲げモーメントを断面係数で除すことにより求められる。また、せん断力も重要である。例えば、隣接する貨物倉や貨物タンク的一方が満載で他方が空の場合には、その境界に大きなせん断力が発生する。従って、縦曲げモーメントと同様の検討が必要である。当時は、静水中せん断力(F_s)と波浪せん断力(F_w)の合計に対する許容応力は約118N/mm²であった。

なお、 M_w 及び F_w によって最大応力が発生するのは100万回に1回の発現確率の波に遭遇した場合に相当すると解説されている。

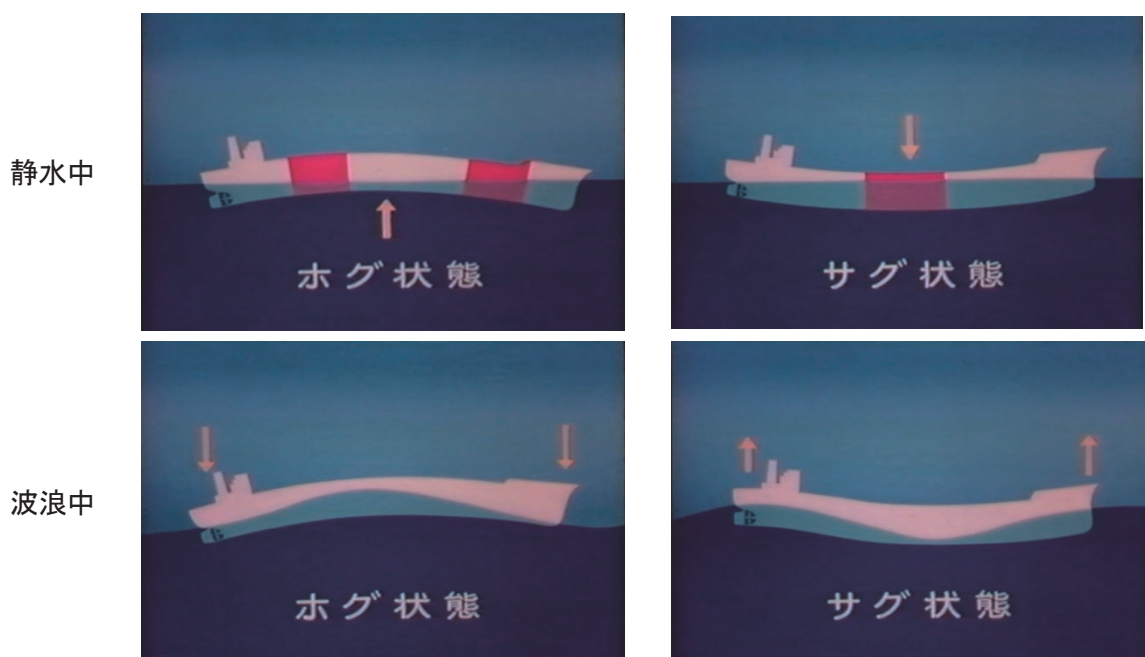


図4 縦強度：静水中及び波浪中のホグ(Hogging)状態とサグ(Sagging)状態¹⁶⁾

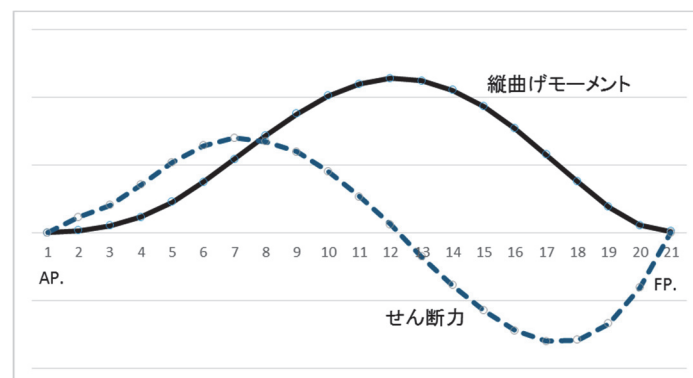


図5 波浪縦曲げモーメント及び波浪せん断力の船の長さ方向分布の例



図6 垂直縦曲げモーメント，水平縦曲げモーメント及び振りのモーメント¹⁶⁾

3.1.2 IACSの縦強度に関する統一規則（UR S11）¹⁷⁾

1989年5月にIACSの理事会に於いて、Hogging状態及びSagging状態の波浪縦曲げモーメント M_w と波浪せん断力 F_w を与える算式を規定し、 M_s と M_w の和及び F_s と F_w の和に対する許容応力をそれぞれ 175N/mm^2 及び 110N/mm^2 とする縦強度に関する統一規則（UR S11）が承認された。それまでは、主要な船級協会の規則に規定される M_w 及び F_w 並びにその許容応力はばらばらであり、Hogging状態とSagging状態の M_w 及び F_w の差がない規則も多数あった。

Hogging状態とSagging状態で M_w や F_w の大きさに差が生じる理由は、実船計測でも確認されている「①船体形状の非線形性の影響」（波浪中の船体の没水部分が時間の経過とともに変化する影響）、荒天時に減速せずに航行した際に発生し易いスラミング（Slamming）及びスラミング発生後に船全体が振動するホイッピング（Whipping）等による「②非線形荷重の影響」が考えられるが、IACS UR S11では①の船体形状の非線形影響のみが考慮されている。従って、規則上は②の非線形荷重の影響は、荒天回避や減速などの運航方法によってある程度避け得るものと考えられていることに留意する必要がある。

ばら積貨物船と油タンカーの縦強度に関しては、IACS UR S11の技術的な内容が組み込まれたIACSの共通構造規則（IACS CSR）に従う必要がある。IACS CSRはIMO GBSに適合するためにネット寸法（グロス寸法から腐食予備厚を差し引いた寸法）に基づく強度評価手法を用いているため、縦曲げ及びせん断の許容応力が、それぞれ 190N/mm^2 及び 120N/mm^2 に調整されている。

3.1.3 コンテナ船の縦強度に関するIACS統一規則（UR S11A）¹⁸⁾

2015年6月にコンテナ船の縦強度に関するIACS統一規則 S11Aが新規に制定された。従来、コンテナ船の縦強度もUR S11でカバーされていたが、近年のコンテナ船事故を受け、コンテナ船に対する縦強度要件が改訂された。

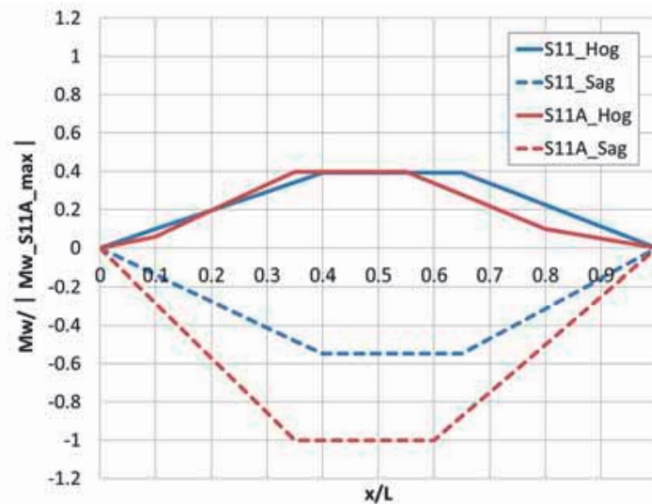
具体的には、縦強度評価に用いる荷重算式を高精度化（図7参照：Sagging縦曲げモーメントの強化等）した他、ばら積貨物船及び油タンカーのための共通構造規則（IACS CSR）における座屈強度評価及び縦曲げ最終強度評価が取り入れられている。さらに、大型コンテナ船に対しては、ホイッピングにより発生する縦曲げモーメントを考慮した船級独自の強度評価を要求する機能要件が規定されている。

3.1.4 船体梁の縦曲げ最終強度評価

船体の折損事故を防止するには、船舶の設計寿命中に発生すると想定される最大の縦曲げモーメントに対して、十分な余裕をもたせた縦強度を確保しておけば良いが、縦曲げ最終強度評価を行えば、その余裕度を知ることが出来る。

ばら積貨物船及び油タンカーを対象とするIMO GBSでは、構造強度に関する機能要件の一部として、設計環境条件下で適切な縦曲げ最終強度を持つことが要求されており、IACSは2006年4月1日以降の建造契約船に対して適用を開始したIACS CSRに縦曲げ最終強度に関する規定を組み込んでいる。具体的には、縦曲げ最終強度を部分安全係数で除した値が、静水中縦曲げモーメント及び波浪中の縦曲げモーメントにそれぞれの部分安全係数を乗じ、それらを合計した値以上であることを要求している。なお、3種類の部分安全係数は、荷重と強度のばらつきを考慮した構造信頼性解析結果に基づき定められている¹⁹⁾。

なお、縦曲げ最終強度の推定法としては、逐次崩壊解析法（Smithの方法）及び非線形有限要素法等があるが、後者は多大の労力と計算時間を必要とするため、現行のIACS CSRではより実用的な前者が採用されている²⁰⁾。しかし、より実用的とは言えるものの手計算では不可能であり、専用のコンピュータソフトウェアを使って計算する必要がある。

図7 波浪中垂直縦曲げモーメント M_w の比較 (例)¹⁸⁾

3.2 全船荷重・構造一貫解析システム

当所では、2011年4月から開始した第3期中期計画(5ヶ年計画)に従い、全船荷重・構造一貫解析システムを開発した。

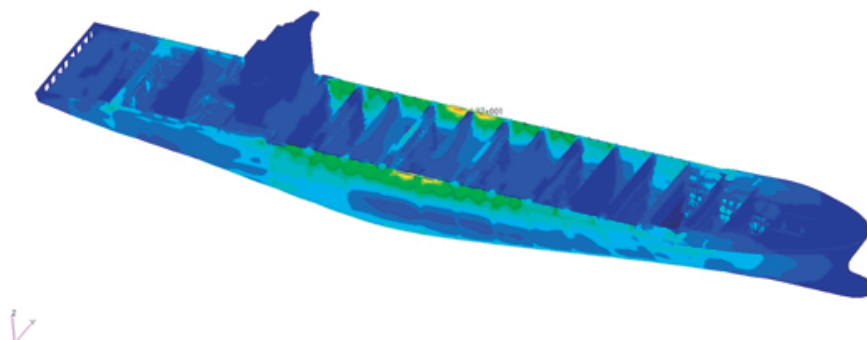
本システムは、6自由度船体運動及び波浪荷重計算プログラムである①NMRIW (Nonlinear Motion in Regular and Irregular Waves) と構造解析関連の一連のプログラム (NMRI-DESIGN) を組み合わせたものである。なお、後者は、②NMRIW による解析結果を入力とする FEM 解析用の全船モデルへの荷重負荷プログラム

(NMRI-DESIGN-PRE)、③FEM 実行プログラム及び④FEM 解析結果のポスト処理プログラム

(NMRI-DESIGN-POST)、計算作業の自動化・効率化を目的とする⑤グラフィック・ユーザ・インターフェース (GUI) を統合したものである。図8及び9に解析例を示す²¹⁾。

解析対象船舶の積付状態、波高、波向き及び波周期等をパラメータにして、実用的な工数内で、様々な波浪条件下での荷重を入力とする構造解析を行い、強度評価が必要な構造部材に発生する応力の周波数応答特性を求めることが出来る。当所では、これを活用してスラミングにより誘起される船体の振動応答現象であるホイッピングを考慮した疲労寿命推定等に関する研究も実施している²²⁾。

LNG 船、大型コンテナ船等では、船級規則等に規定される設計荷重を用いず、直接荷重を推定した上で個船ごとに設計荷重を設定し、直接強度計算により船体構造部材の配置及び寸法を定めたいとのニーズもあり、これらの要望に応えることが可能なシステムである。国内では同様のシステムをいくつかの造船所 (三菱重工業 (MHI) やジャパンマリンユナイテッド (JMU) 等) が開発済みである。なお、これらのシステムは図10に示すように波浪荷重解析から FEM への作業の流れが一方であり²³⁾、両者を連成させる手法と区別するために二段階解法と呼ばれることがある。

図8 NMRI-DESIGN を用いた全船荷重・構造一貫解析の例²¹⁾

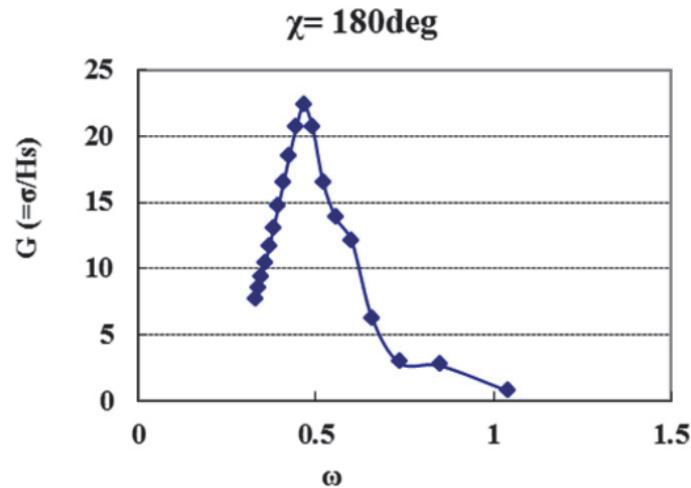


図9 NMRI-DESIGN で求めた応力の応答関数の例²¹⁾

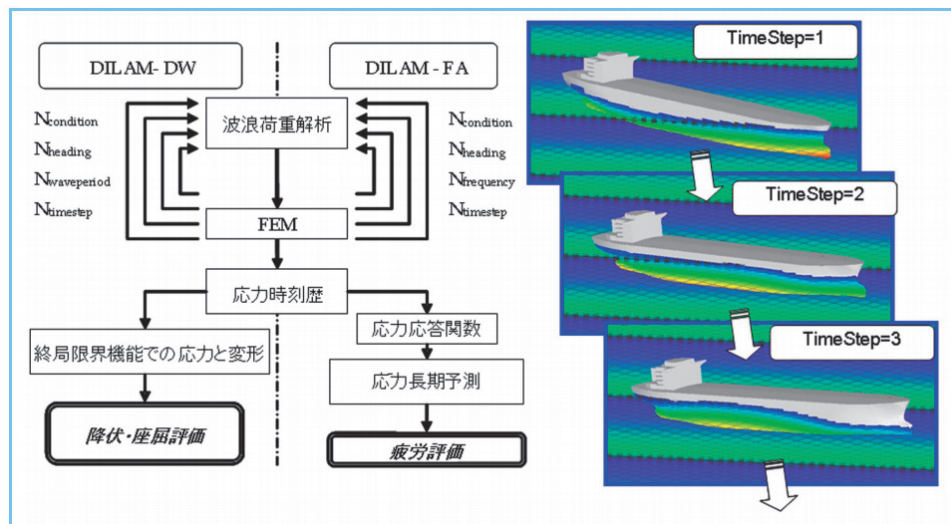


図10 大手造船所で開発された最先端構造解析プログラム DILAM
(Direct Loading Analysis Method) のイメージ図²³⁾

4. 降伏強度評価

4.1 降伏強度評価の基本的な考え方

上述の通り、応力、ひずみ及び許容応力等の用語を用いてきたが、これらについて補足説明をするとともに、降伏強度評価の基本的な考え方、特に安全余裕の考え方について述べる。

最悪海象に対しては、基本的に、構造部材に作用する荷重と変形が比例する弾性範囲を対象とする。材料力学の基礎として弾性範囲内では、「単位面積に作用する力（応力： σ ）」と「構造部材が変形する方向の伸び（または縮み）をその部材の長さで割った無次元量（ひずみ（歪）： ε ）」の間には、

$$\sigma = E \times \varepsilon \dots\dots\dots (4.1)$$

の関係がある²⁴⁾。式(4.1)の E は、ヤング率とよばれる材料定数である。

鉄の棒を長さ方向に引っ張るとき、その力を徐々に大きくすると降伏荷重までは、式(4.1)の関係が成り立つ。この降伏荷重を棒の断面積あたりに換算したものが降伏応力である。しかし、それ以上に力を大きくすると急激にひずみ（ ϵ ）が大きくなり（図11参照²⁵⁾）、最終的に破断に至る。また、破断に至る前に負荷を止める、あるいは小さくすると永久変形が残る。なお、棒の長さ方向に直交する荷重が作用する、即ち梁に横荷重が作用すると、梁に曲げモーメント M が生じ、このとき梁の長さ方向に作用する応力 σ は、梁の断面形状で決まる断面係数 Z を用いて、

$$\sigma = M/Z \cdots \cdots \cdots (4.2)$$

で求めることができる。

構造規則の基本的な考え方の一つは、通常海象に於いて検討対象の構造部材に生じる最大応力（ $\sigma_{\max}$ ）が、ある程度の余裕度（安全率： α ）をもって降伏応力（ σ_y ）を超えないよう（すなわち、 $\sigma_{\max} \times \alpha \leq \sigma_y$ を満たすよう）に構造寸法を決めることである。なお、降伏応力を安全率で除した（ σ_y / α ）は許容応力と呼ばれ、許容応力を設計強度の目安とする設計は許容応力度設計法と呼ばれる。

なお、現行の構造規則では、 $\alpha=1$ になっているケースもあるが、最大応力（ $\sigma_{\max}$ ）そのものを求める際にも、ある程度の余裕度が見込まれているので、総合的には安全余裕は含まれていると考えることができる。これは、自然現象を相手としていることから、船舶がその寿命中に遭遇する最も厳しい海象（最悪海象）を正確に且つ確定的に定めることは不可能に近いことから、荷重の不確実性も加味した上である程度の余裕度をもって設計荷重が定められているからである。従って、 $\sigma_{\max}$ の中にも余裕度が含まれていることになる。

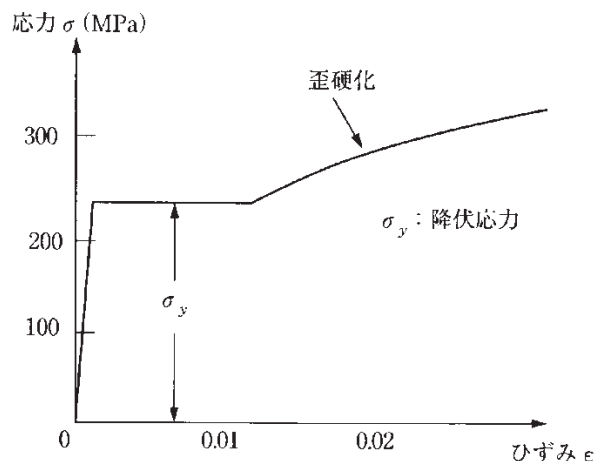


図11 軟鋼の応力・ひずみ関係²⁵⁾

4.2 実船応力計測²¹⁾

第2章では、IACSの縦強度に関する統一規則では、静水中縦曲げモーメント（ M_s ）と波浪縦曲げモーメント（ M_w ）の和に対して許容応力が設定されていることを述べた。また、大きさや形状が異なる数多くの船舶について、船の寿命中に遭遇すると想定される最悪海象中で生じる縦曲げモーメントの最大値を推定するとともに、長期間に亘る実績等を考慮して、規則荷重が、例えば図12⁵⁾のように規定されている。

一方、従前よりも特に大きい船舶、新形式船及びLNG船のような高付加価値船等に於いては、実際に波浪中に航行している際に、縦曲げ応力及び疲労強度上の重要箇所（critical area）の局所的な応力等を計測することにより、船舶の構造健全性をモニタリングするとともに、設計の妥当性の確認が行われることがある。

長期の疲労強度に焦点を当てた船体構造強度モニタリングシステムを搭載した例²⁶⁾を図13に示す。左下が局所的な応力を測定するためのひずみゲージの写真、右下が上甲板下の縦曲げ応力を計測するためのロングベースのセンサーの写真である。前者のセンサー自体の長さは数mmオーダーであるが、後者は数mオーダーである。

これらのセンサーは、変動する応力の動的な成分を測定することには適しているが、かなり頻繁に 0 点の調整が必要なことから、例えば静的な応力成分を含めた絶対値を測定することが困難である。しかし、最近では 0 点の調整が不要なセンサーも開発されている。その例を図 14²⁷⁾及び図 15²⁸⁾に示すが、これらは何れも光ファイバーを用いたひずみセンサーである。図 14 が小型のセンサーで、図 15 は光ファイバーを 3 本撚った光学ストランド（より線、長さ：1m~10m）のロングベースのセンサーである。

船舶の積付状態により決まる静的な縦曲げ応力と波浪中での動的な縦曲げ応力の和が測定出来れば、規則で定める許容応力との比較により、船舶の強度面での余裕度、もしくは危険度が評価でき、操船判断に資する船舶の強度面からの情報、警報を出すシステムとすることも可能である。しかし、経験則ベースの構造規則の許容応力は、総合的にどの程度の余裕度があるか定量的に示すことは難しく、単純に許容応力と比較するだけでは判断が難しい面がある。そのため、個々の事例毎に閾値が決められているのが現状である。標準的な閾値の設定手順、あるいは標準的な閾値が確立されるには、業界内に散逸している実船計測データの収集及び共有化が必要と考えられる。

なお、実船応力計測を行う船体構造モニタリングについては、IMO から勧告²⁹⁾が、主要な船級協会からガイド、ガイドライン等^{30)~33)}が発行されているが、何れも強制要件ではなくオプションである。また、これらに対応した船体構造モニタリングシステムを販売している会社（例えば、Light Structure 社³⁴⁾及び Strainstall 社³⁵⁾）が複数ある。統合型船上モニタリングシステムの概念図の例を図 16 に示す。

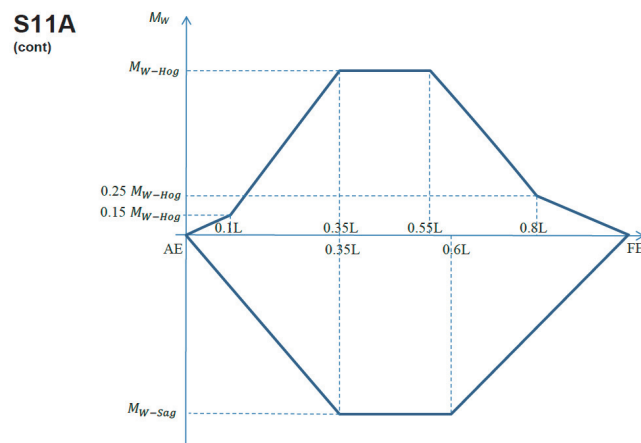


図 12 船の長さ方向の波浪中垂直縦曲げモーメント M_w の分布⁵⁾

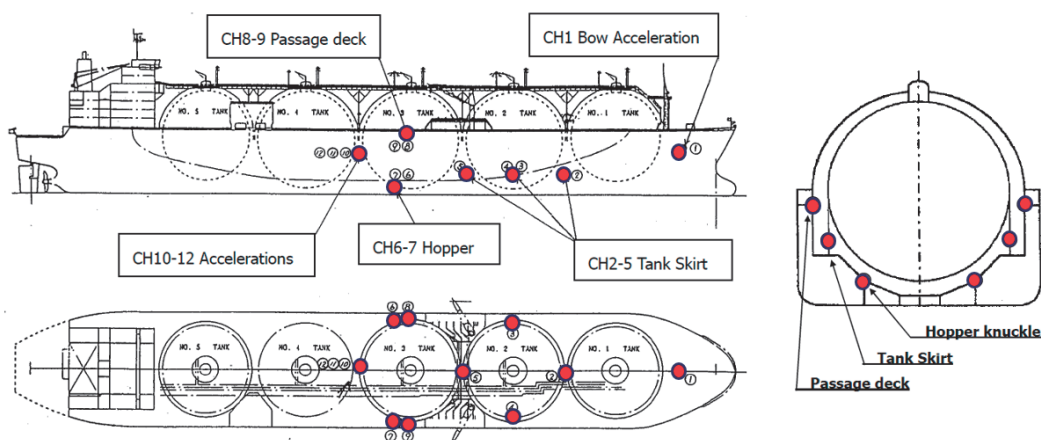




図 13 LNG 船の船体応力モニタリングシステムの例²⁶⁾

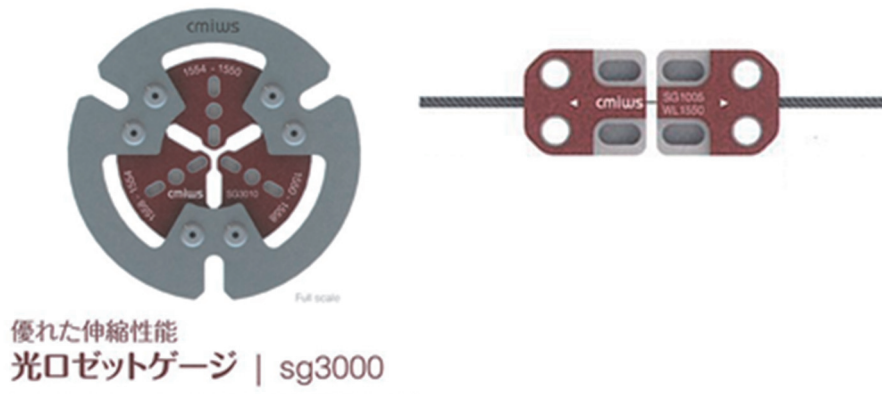


図 14 光ファイバーを利用したひずみゲージの例²⁷⁾



図 15 光学ストランド (光学ストランドモニタリングシステム)²⁸⁾

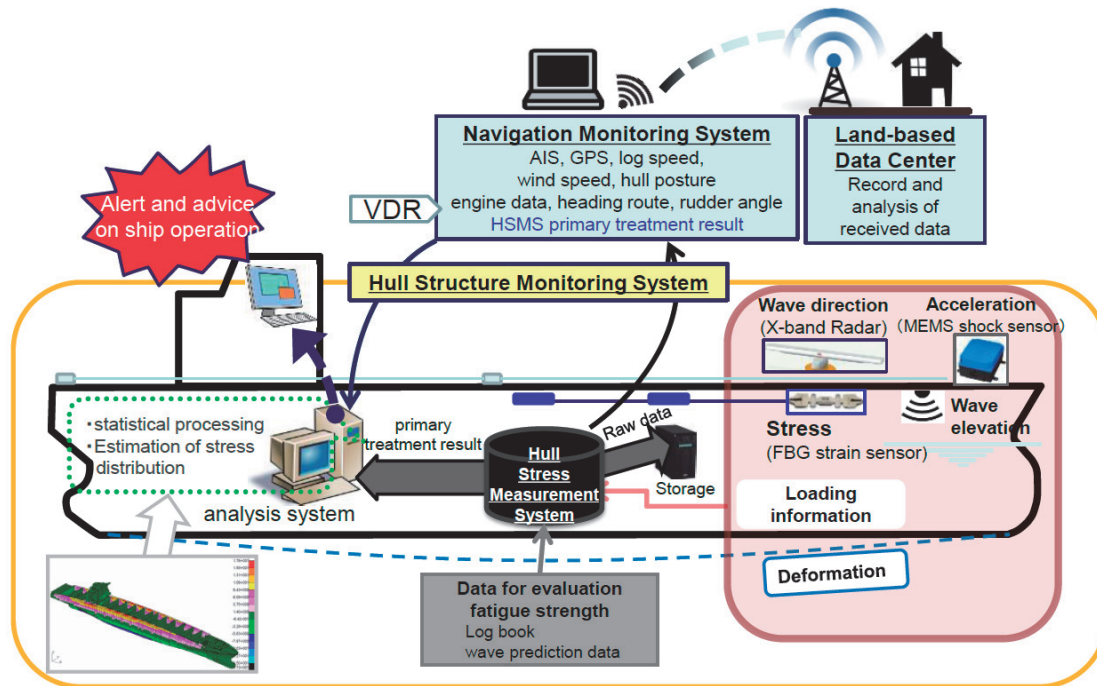


図 16 統合型船上モニタリングシステムの概念図³⁶⁾

5. 座屈／最終強度評価

5.1 極限海象に対する構造要件

極限海象は、荒天回避や減速などの運航方法によってある程度避け得るものと考えて設計荷重が設定されている通常海象とは異なり、何らかの原因で回避することが出来ず遭遇せざるを得ないと想定される過酷な海象である。規則上は、極限海象下でも船体折損等の重大事故に繋がる亀裂、崩壊等が生じないことを念頭に置いている。

第2章で説明したように、SOLAS 条約第II-1 章第3-10 規則(GBS)^{6) 7)}では縦曲げ最終強度が、表2の通り第2階層 (Tier II) の3番目の機能要件である構造強度 (Structural strength) の一部として要求されている。

最終強度の計算には、船体梁の最終強度 (それに寄与する板や防撓材の最終強度を含める) が、北大西洋の環境条件下で想定される縦曲げモーメントを上回るか否かを検証する必要がある。換言すると、極限海象下で生じる最大縦曲げモーメントに耐える縦曲げ最終強度をもつように船舶を設計することが要求されていることになる。

また、コンテナ船用の縦強度のIACS統一規則 (UR S11A)⁵⁾に於いても、縦曲げ最終強度の要件が規定されている。

5.2 座屈強度評価の基本的な考え方と最終強度

第3章にて降伏強度評価の基本的な考え方を述べたので、ここではまず、柱及び板の順に座屈強度評価の基本的な考え方を述べる。また、本節の後半で最終強度についても言及する。

5.2.1 柱の圧縮座屈と最終強度

柱に軸方向の圧縮荷重 (P) を徐々に負荷すると、ある荷重までは柱が軸方向に縮むが、荷重がある限界値を超えると、軸方向と直交する方向、即ち横方向に「たわみ (撓み)」始める (図17参照)。たわみ始めた直後に荷重を減少させて荷重を零にすると、変形は残らず元の長さの柱に戻る。永久変形が残らない場合、弾性座屈のみが起きていることになる。座屈とは、軸方向に縮むという安定な釣り合い状態から、横方向に撓むという別の安定状態に急激に移行する不安定現象である。柱を圧縮する場合の座屈応力 σ_{cr} は、降伏応力 (σ_y) を超えない範

囲では、ヤング率 (E) に比例し、柱の細長比 (λ) の 2 乗に反比例する。従って、細長い柱ほど小さな荷重で座屈することになる。

一方、横方向にたわみ始めた後も荷重を増加させ続けると、ある荷重 (最終強度) を超えると、耐えられる荷重が下がると同時に横方向のたわみが急激に大きくなり柱は崩壊する。詳細に述べると、柱が横方向にたわみ始める、即ち曲り始めると、発生した曲げ応力のために部分的に降伏が始まり、更に降伏範囲が広がり塑性関節が形成され、軸方向の荷重に耐えることが出来ず、柱の支え方 (境界条件) に応じて中央部で折れたり、横に倒れたりする。船舶の構造部材としての柱が座屈崩壊するということは、その柱がもともと耐えていた荷重を支持できなくなることを意味し、他の柱部材等が肩代わり出来なければ、より重大な構造損傷の発生に繋がる。

5.2.2 板の圧縮座屈

板を圧縮する荷重を徐々に増加させる場合も、ある荷重までは板の面内で縮むが、ある荷重を超えると面外に撓みが生じる (図 18 参照)。これが板の座屈である。長方形の板の場合、板の周辺の境界条件及び板の細長比に応じて座屈モード及び座屈応力 σ_{cr} が異なる。板を一方向に圧縮する場合の σ_{cr} はヤング率 (E) 及び板厚/圧縮荷重を受ける辺の長さの 2 乗に比例する。また、ポアソン比も影響し、ポアソン比が大きくなると σ_{cr} は大きくなる傾向にある。

座屈応力を超えて作用する応力を大きくすると、面外のたわみが急激に大きくなり、板の一部分が降伏し、荷重をゼロに戻しても大きな永久変形が残る段階、即ち塑性座屈した状態に至る。船舶の構造部材としての板は、周辺を他の構造部材で拘束されていることが多いため、たわみが大きくなると板の中央部に引張の応力が発生し、更にたわみが大きくなるとやがて降伏が始まる。それ以後、降伏域が拡大するとともに剛性が低下し、最終強度に達する (図 19 参照)。板が最終強度を超えると、その板がもともと耐えていた荷重を受け持てなくなり、他の板部材等が肩代わり出来なければ、より広範囲の構造損傷が発生する。

表 2 GBS に規定される機能要件 (Functional Requirements) の抜粋⁷⁾

II.1 設計寿命 (Design life)		設計寿命は 25 年以上とすること。(The specified design life shall not be less than 25 years.)
II.2 環境条件 (Environmental conditions)		船舶は、北大西洋の環境条件とその長期波浪発現頻度表に基づき設計すること。(Ships shall be designed in accordance with North Atlantic environmental conditions and relevant long-term sea state scatter diagrams.)
II.3 構造強度 (Structural strength)	II.3.1 全体設計 (General design)	船舶の構造部材は区画の目的に適し、構造の連続性を確保できるように設計すること。構造部材は、荷役装置によって生じる構造の安全性を危うくするかもしれない損傷を避けることを念頭に、全ての想定される貨物の荷役に適するように設計すること。(The ship's structural members shall be of a design that is compatible with the purpose of the space and ensures a degree of structural continuity.以下省略)
	II.3.2 変形及び破壊モード (Deformation and failure modes)	構造強度は、極端な変形及び座屈及び降伏及び疲労等の損傷モードに対して評価。(The structural strength shall be assessed against excessive deflection and failure modes, including but not limited to buckling, yielding and fatigue.)
	II.3.3 最終強度 (Ultimate strength)	船舶は適切な最終強度をもつように設計すること。(Ships shall be designed to have adequate ultimate strength. Ultimate strength calculations shall include ultimate hull girder capacity and related ultimate strength of plates and stiffeners, and be verified for a longitudinal bending moment based on the environmental conditions in functional requirement II.2.)
	II.3.4 安全余裕 (Safety margins)	船舶は相応しい安全余裕をもって設計すること。(Ships shall be designed with suitable safety margins:以下省略)

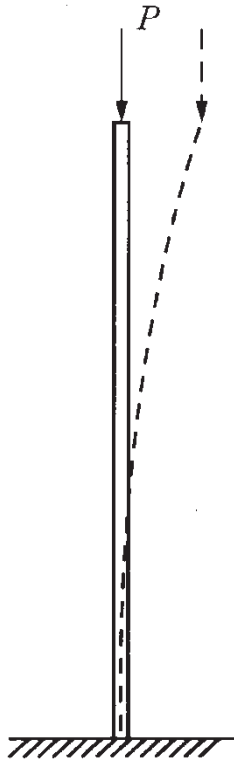
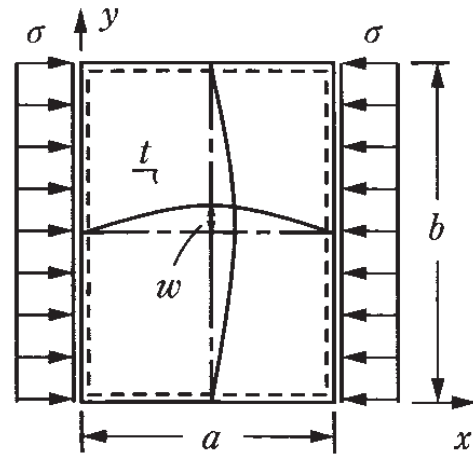
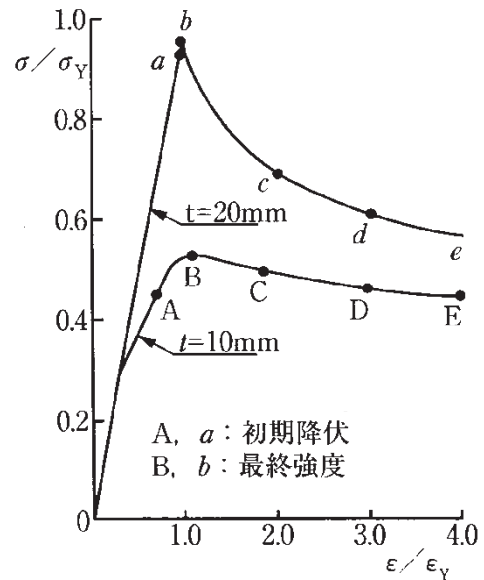
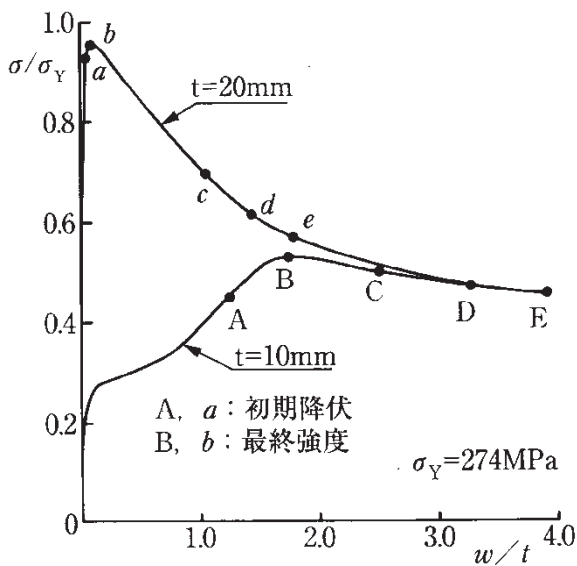
図 17 軸圧縮を受ける柱の変形²⁰⁾図 18 面内圧縮を受ける周辺単純支持矩形板²⁰⁾

図 19 周辺単純支持矩形板(図 18 の寸法 $a \times b = 1000\text{mm} \times 800\text{mm}$ の矩形板)の弾塑性大たわみ挙動²⁰⁾
 (左: 平均応力-たわみ曲線, 右: 平均応力-平均ひずみ曲線)

5.3 船体梁の縦強度と最終強度

5.3.1 縦強度

船体梁 (Hull Girder) の場合は, 長さ方向に直交する方向, 船体梁が曲がる方向の荷重, 縦曲げモーメント等を対象にする. 第 2 章では, 船体梁の縦強度に対しては, IACS UR S11 及びコンテナ船の縦強度に関する IACS UR

S11Aがあり、最悪海象に対しても永久変形を防止する等の観点から、降伏強度及び座屈強度が規定されている船を説明した。また、第1章で述べたようにCSR¹⁴⁾にも縦強度の要件が含まれていることを述べた。なお、IMOによる船級協会規則のGBS適合検証監査に於ける指摘事項の是正処置として、2017年7月1日以降の建造契約船に適用される改正CSRでは、関連要件が強化されている点、将来的にはUR S11及びURS11A並びにIACS CSRに含まれる縦強度の調和作業が行われる見込みであることに注意しておく必要がある。

5.3.2 最終強度

国内における船体の縦曲げ最終強度評価に関しては、矢尾哲也広島大学名誉教授（兼）大阪大学名誉教授³⁷⁾、及び藤久保昌彦大阪大学教授等により最終強度に関する研究^{例えは38)}が精力的に進められている。当所に於いても、最終強度に関する大規模実験を含む研究³⁹⁾等を実施している。また、最近発生した大型コンテナ船の折損事故の事故報告書⁴⁰⁾が国土交通省から公開されている。また、NKが2016年7月に開催した技術セミナーに於いても同事故報告書等に基づくコンテナ船の新しい最終強度規則の解説⁴¹⁾が報告されている。

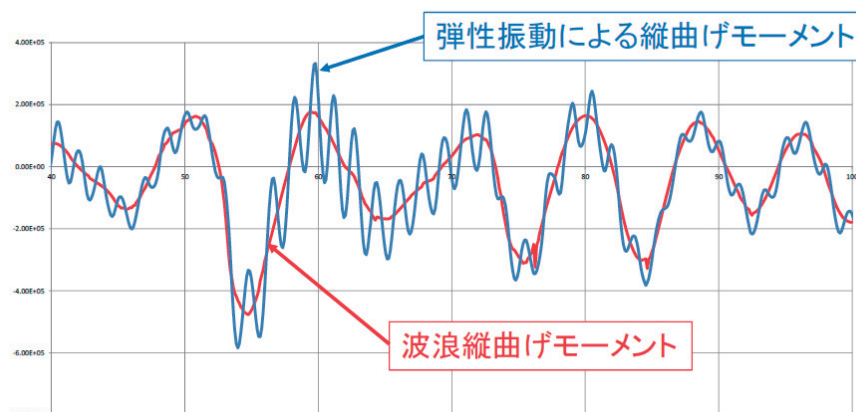
一例として、UR S11Aに規定される縦曲げ最終強度要件を以下に示す。式中の記号は、 M_U が逐次崩壊解析法（スミス法）により算出した縦曲げ最終強度、 γ_M が船体梁の縦曲げ最終強度に対する部分安全係数、 γ_{DB} が面外荷重影響等を考慮した部分安全係数、 γ_W が波浪中縦曲げモーメントに対する部分安全係数である。

スミスの方法では船体梁に縦曲げモーメントが最終強度を超えつつある時、船体の断面を構成する部材が順次座屈・降伏して、断面の曲げ剛性が順次低下していくことを考慮しながら計算を進め、最終的に最終強度を求める²⁰⁾。

$$M_U/(\gamma_M \cdot \gamma_{DB}) \geq M_S + \gamma_W M_W \cdots \cdots (5.1)$$

上記の式には図20に示すように、ゆっくり変動する波浪縦曲げモーメントに、船首部に作用する衝撃荷重により誘起されるホイッピングによる高い周波数の振動（非線形現象）が重畳する影響が陽な形で含まれていないため、各船級独自の改良がおこなわれた上で、実際の設計に適用されている。

なお、最終強度を推定する手法としては、非線形有限要素法を用いる方法もある。座屈と降伏の影響を考慮して高精度に逐次崩壊挙動を追跡可能である。多大の工数と計算時間が必要となるが、昨今のコンピュータ関連のハードウェアとソフトウェアの発展もあり、研究ベースでは活用されている。一例として当所で非線形構造解析ソフトLS-DYNAを使って実施したコンテナ船の逐次崩壊解析の最終状態を図21に示す。コンテナ船の中央部が「くの字」型に折損している状況が再現できている。



注) 青色が弾性振動（ホイッピング）が重畳した実際の時刻歴、
赤色が高周波成分を除いた波浪縦曲げモーメントの時刻歴

図20 縦曲げモーメントの時刻歴⁴¹⁾

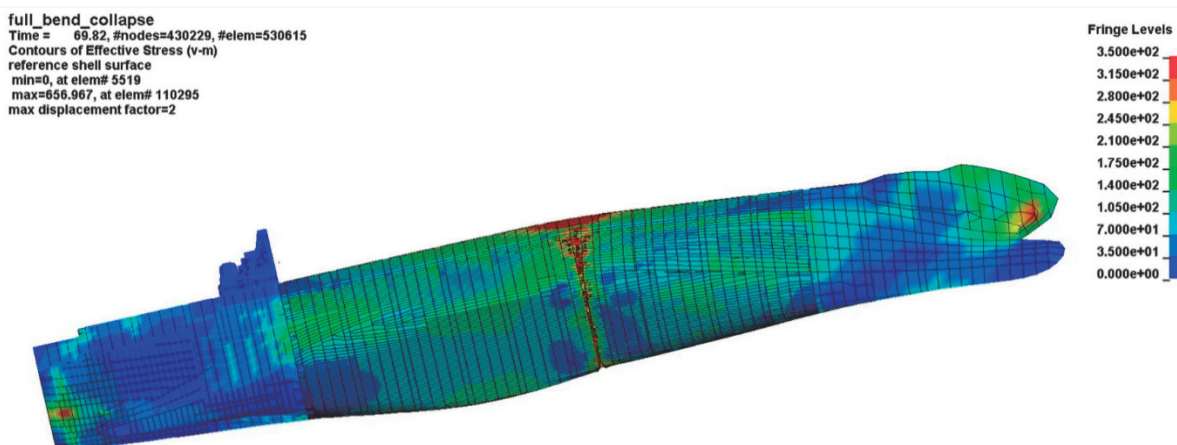


図 21 LS-Dyna を使ったコンテナ船の逐次崩壊解析結果の例

6. 疲労強度評価

6.1. 疲労強度

6.1.1 船員と材料の“疲労”

「国際海事機関（IMO）」及び「疲労」をキーワードにインターネットを検索すると、最初にヒットするのが国土交通省による「国際海事機関（IMO）第 2 回人的因子訓練当直小委員会（HTW2）の結果について」というプレスリリース⁴²⁾がある。そこには主な審議結果として「船員の疲労の軽減・防止のため「疲労（Fatigue）」の軽減及び管理に関する指針（MSC/Circ.1014）⁴³⁾」の見直しが合意された旨の記載がある。

一方、第 2 章で紹介した IMO GBS^{6),7)}では疲労強度に関する要件が、表 3 の通り第 2 階層（Tier II）の 4 番目の機能要件である疲労寿命（Fatigue life）として要求されている。

「船舶海洋シリーズ⑥船体構造（構造編）」⁴⁴⁾では、以下の記述がある。即ち、「繰返し荷重を受ける材料は、引張り試験で測定される静的な最終強度より大幅に小さい応力で破壊することがある。この現象を材料の疲労または疲れ（fatigue）と呼ぶ。構造物や機械部品の損傷原因の約 8 割は疲労が関係しているといわれ、疲労破壊の防止が構造設計の重要課題となっている。」と説明されている。

乱暴な表現かもしれないが、「船員の“疲労”」と「船体構造強度評価の“疲労”」の共通点は「蓄積」すること、「疲労」の「防止、軽減及び管理」がそれぞれの分野で重要課題である。

6.1.2 疲労強度及び疲労寿命

鉄（鋼）を材料とする試験片に、降伏応力よりも小さい繰返し荷重（応力）を 10 万回、100 万回、1000 万回作用させると、ついには試験片は破断する。図 22 に示すように繰返し荷重を一定応力振幅（stress amplitudes: σ_a ）で与えた場合に破断した際の繰返し数（N）が、その試験片の疲労に関する性能と考えることが出来る。この破断繰返し数（N）は、同一材料の試験片でもばらつきが大きい。図 23 に示すように応力振幅（ σ_a ）が小さいと大きくなる。換言すると、応力振幅（ σ_a ）が大きいと小さな繰返し回数で破断する、即ち、疲労寿命が短くなる。

なお、1 回の繰返し荷重の時間と繰返し回数の積は、破断するまでの時間に相当する（例えば、10 秒×1000 万回=約 3.2 年となる）ので、船舶の構造強度評価に於いては構造部材及び詳細構造箇所の疲労寿命は年数で表現され、船舶の設計寿命（IACS CSR¹⁴⁾では 25 年）と直接、比較することが出来る。

主に鉄鋼を材料として溶接により組立てられる船体構造の場合も、作用する応力振幅（ σ_a ）が大きく、繰返し数が大きいと、比較的短い期間で疲労亀裂が生じる傾向は同じである。船舶は 20 年、25 年間の長期に亘って波浪中を航行し不規則な繰返し荷重を受けることから、例えば、高い繰返し応力が数多く作用する構造部材・応力集中箇所には、疲労亀裂が発生する可能性が高くなり、疲労寿命は短くなると推定される。

6.1.3 疲労強度評価法及び設計法

6.1.2 で述べたように同じ材料及び同じ特性の試験片に同じ大きさの繰返し応力(S: cyclic stress)を作用させても破断繰返し数 N は大きくばらつくことが疲労寿命推定の困難さの一因である。そのため、疲労設計で用いる場合は、安全側の推定とするため S-N 線図では各繰返し数 N に対する応力振幅の平均的な値から“ばらつき”を表す標準偏差の2倍だけ下方に下げたものが用いられている。また、腐食環境下では疲労寿命が低下することも知られており、IACS CSR では非腐食環境とは異なる S-N 線図が使われている。

また、船舶の設計寿命の期間中に、特定の構造部材及び詳細構造箇所作用する繰返し応力は、船舶の積付状態、遭遇する海象や操船方法等の影響を受けて大きく変化する。従って、様々な大きさの応力振幅と繰返し数の組合せが順不同に作用することとなり、設計のためには線形累積被害則設計法に従い単純化して、一定の範囲の応力振幅に対応する繰返し数から疲労強度への影響度を推定し、全ての応力振幅範囲に亘ってその影響を総合評価して累積疲労被害度を計算する。なお、この設計法は手法の開発者と普及させた研究者の名前に由来してパルムグレン・マイナー則 (Palmgren-Miner rule)、または単にマイナー則 (Miner's rule) と呼ばれている。

6.1.4 疲労強度評価用の想定航路

船舶がその寿命期間中（長期間：例えば、25 年）にどのような短期海象（2 時間程度継続）にどの程度の頻度で遭遇するかは、主な航路、ウェザールーティングの利用の有無及び船長判断が大きい荒天避航のやり方（操船）等に依存する。短期海象は有義波高と平均波周期の組合せで分類することが出来る。これについては第1章で紹介したように海域毎に波浪発現頻度表が公表されている。

ばら積貨物船と油タンカーが対象の IACS の共通構造規則 (CSR) では IMO GBS の機能要件に適合するため、25 年間、北大西洋を航行することを想定している。

一方、コンテナ船等の他の船種の場合は、ワールドワイド (Worldwide) と呼ばれる実際の船舶の航路を単純化することにより、例えば、北大西洋が 10%、太平洋が 30%、インド洋が 36%、欧州—アジア（スエズ運河経由）8%等々（計 100%）を想定して疲労強度評価を行っている。

6.1.5 疲労強度に影響するその他のパラメータ等

降伏強度評価及び座屈強度評価は最悪海象を、最終強度評価は極限海象を対象に最大荷重が作用した場合の強度評価を行う。これに対して、疲労強度評価は通常海象（船舶の想定される使用期間中）を対象とし、様々な大きさの荷重が作用した場合の強度評価を行う必要がある。前節までにご紹介してきたように非常に多くのパラメータがあり、設計時に疲労寿命を正確に推定することは極めて困難である。例えば、本論では触れなかったが、積付条件に応じて大きく変化する平均応力の影響、溶接構造物であることから溶接残留応力の影響、評価応力の選択（公称応力又はホットスポット応力の何れにするか）等の影響、使用する S-N 線図の選択の影響等を考慮する必要がある。そのため、現在も継続的に疲労強度設計法、疲労強度評価基準の見直しが進められている。

表3 GBSに規定される機能要件 (Functional Requirements) の抜粋⁷⁾

II.1 設計寿命 (Design life)	設計寿命は 25 年以上とすること。(The specified design life shall not be less than 25 years.)
II.2 環境条件 (Environmental conditions)	船舶は、北大西洋の環境条件とその長期波浪発現頻度表に基づき設計すること。(Ships shall be designed in accordance with North Atlantic environmental conditions and relevant long-term sea state scatter diagrams.)
II.4 疲労寿命 (Fatigue life)	設計疲労寿命は船舶の設計寿命より短くしないこと。また、機能要件 II.2 の環境条件に基づくこと。(The design fatigue life shall not be less than the ship's design life and shall be based on the environmental conditions in functional requirement II.2.)

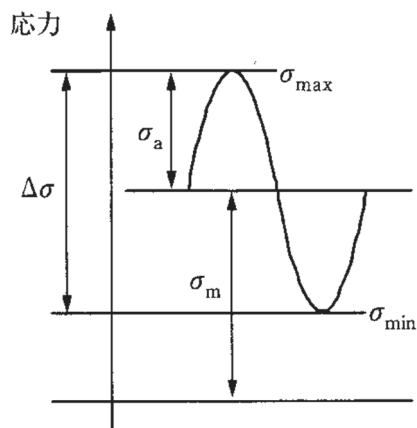
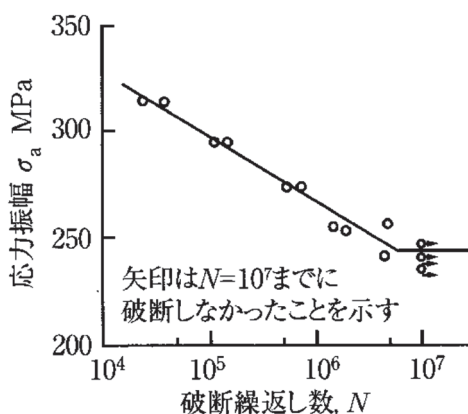


図 22 横軸に時間をとった作用応力の変動と記号の定義 (図 7.2 繰返し応力²⁰⁾)



(a) 鉄鋼材料 (S25C) の S-N 線図

図 23 応力振幅と破断繰返し数の関係 (図 7.4 代表的な S-N 線図²⁰⁾)

6.2 船上モニタリングシステム

6.2.1 船体構造強度モニタリングシステム

2015 年に開催された国際船舶海洋構造会議 (ISSC 2015)⁴⁵⁾では、船体構造に関するライフサイクル管理 (Structural Lifecycle Management, SLM) の為には、大量のデータ転送が必要であるものの、海軍等の一部の分野を除き、標準化が進んでいない現状が報告された。また、構造健全性のモニタリング (Structural health monitoring) は諸刃の剣の状態で、多くの種類のデータがモニターできる一方、より良い意思決定モデルと融合するには多くの課題が残っていること、積極的な研究開発があるもののなかなか前進しない状況であると総括されている。

なお、第 4 章に於いて、光ファイバーを利用した応力計測用センサーが開発される等、船体構造強度モニタリングシステムは技術面では大きく進化していること等を紹介した。しかし、一部の高付加価値船を除くと、コスト面の問題、多くの関係者が活用出来る段階に至っていないこと等から、広く普及しているとは言い難い状況である。

また、実際に搭載されている場合でも、A 造船所、B 船社及び C 船級協会といった特定のグループの共同研究プロジェクトとして実施されていること、専らコストを負担している中心の組織が計測データの所有権を持っていることから情報共有が限定的になる傾向があること、個船のデータだけでは一般化が難しいこと等から、計測データの包括的な活用法という観点からは多くの課題が残っている。

6.2.2 運航支援用、性能評価用モニタリングシステム

2015年の海上技術安全研究所講演会²¹⁾に於いて、当時、海外のホームページ（<http://www.esrgtech.com/>）のサイトで船用機器等のモニタリングシステム等を纏めたイラスト（図24）を紹介するとともに、船用機器及び機関のモニタリングシステム及びその活用が、主に予防保全の観点から、実用化段階にあることに触れている（図25）。また、IMOによるグリーンハウスガス（GHG）規制に対応するには、造船所に於いてはエネルギー効率の高い船舶を建造すること、船社では燃料消費量を最小化するようなオペレーションをすることが喫緊の課題となっており、実船の性能を測定することの出来るモニタリングシステムが普及しつつある。

上記の講演会において、日本郵船株式会社殿より「海運におけるビッグデータの活用とIoT（Internet of Things）」と題する講演があり、海運におけるビッグデータの例として、航海データ、機器データ、AISデータ、気象データ及びビジネスデータがあること、ウェザールーティングを計測データの連携でフリートレベルの運航の最適化に活用していることが紹介された。

6.2.3 統合型船上モニタリングシステム

実用化・普及がより進んでいる運航支援用、性能評価用モニタリングシステムに、船体構造強度モニタリングシステムを統合すれば、有義波高、波向き、船速及び船舶の位置情報等の収集システム並びにデータの一次処理及び船陸間通信システム等は一本化でき、大幅なコストダウンが図れることが期待されている。

また、2016年には、国の補助事業としてウェザールーティングの高度化、船体強度モニタリングシステムの実用化等に関する研究プロジェクトが立ち上がっている。

これらの研究開発の成果を活用するとともに、ビッグデータ活用の枠組み及び技術が成熟すれば、構造強度分野では、例えば、構造強度評価基準・規則の開発・検証、構造強度評価技術の検証、船舶の検査・保守へのフィードバック、荒天回避に資する運航支援機能の開発等に活用されることが期待される。

なお、船体構造強度モニタリングデータ（ビッグデータに対応すると、スモールデータ）を活用して、設計時に正確な予測が難しい疲労強度を、実際の応力変動履歴を使って検証するとともに、余寿命の評価に活用することが技術的には可能である。また、応力計測用センサーが設置されていない構造部材及び構造詳細箇所についても、第3章で紹介した全船荷重・構造一貫解析システム等を用いて応答特性が把握できていれば、原理的には余寿命評価が可能である。当所では、2016年に始動した国の補助事業としての研究プロジェクトの中で、最小限の数のセンサーを用いて、構造強度上重要な構造部材や構造詳細箇所の構造健全性モニタリングを可能とするシステムの開発に取り組んでいる。

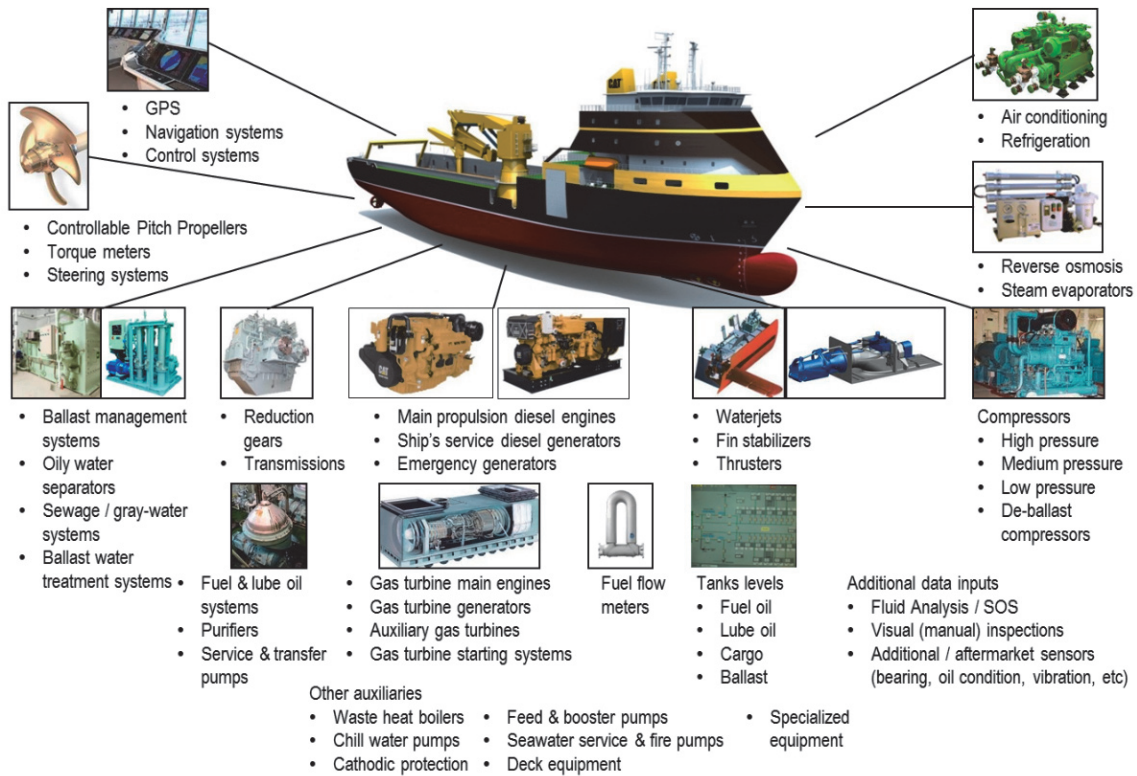


図 24 幅広い種類に機器のモニタリング及び分析が可能な資産情報（システム）⁴⁶⁾

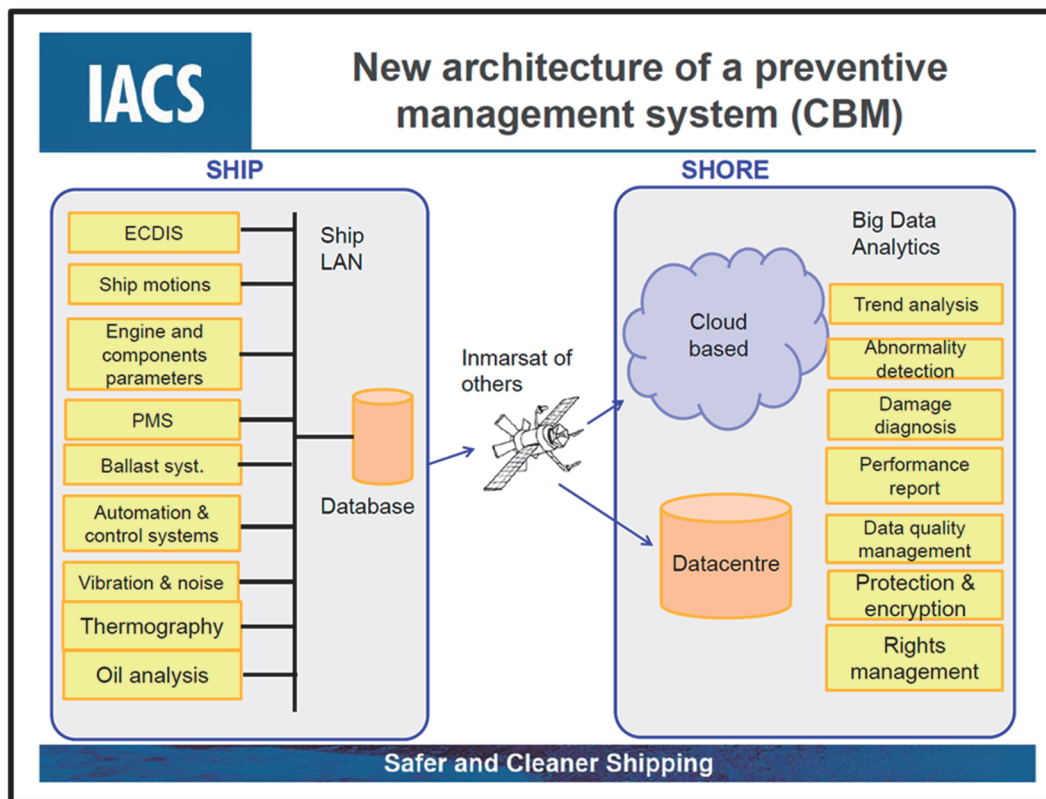


図 25 予防保全システムの新しい枠組みの例⁴⁷⁾

7. 材料の脆性破壊

7.1 脆性破壊

7.1.1 「脆」と「靱」

「脆」と「靱」は、「脆」は「ぜい」「もろ(い)」と読み、また、電子辞書(広辞苑)⁴⁸⁾では「壊れやすい. くだけやすい。」等との説明がある。ガラスや陶磁器は壊れやすく、脆いといえる。

「靱」は「じん」「うつぼ」と読み、前者の場合「しなやかで丈夫なこと。」を意味し、例えば、なめし皮は、丈夫で柔らかく、破れにくいというイメージがある。一方、「靱(うつぼ)」は、「矢を入れ、腰につけて持ち歩く筒形の容器」という意味がある。

7.1.2 延性(えんせい: ductility)と脆性(ぜいせい: brittleness)

船体構造の主要な材料である鉄(鋼)製の試験片を長さ方向に引張ると、荷重の大きさと試験片の変形(伸び)は比例し、横軸に「ひずみ」を縦軸に「応力」をとるとある応力(弾性)範囲までは直線になり、それ以上変形させると最終的には破断に至る。

デジタル大辞泉⁴⁹⁾では、「延性」とは「物体が、その弾性の限界を超えても破壊せずに引き延ばされる性質。金・銀・白金・銅などが延性に富む。」と解説されている。一方、脆性(ぜいせい)とは「物体が外力を受けたときに、あまり変形しないうちに破壊する性質。もろさ。」と解説されている。

「船舶海洋工学シリーズ⑥船体構造」(構造編)⁴⁹⁾によれば、「破断までに大きな塑性変形を生じる材料を延性材料(ductile material)と呼ぶ。鋼をはじめとする船体構造用材料の多くは、常温では延性材料である。」とある。更に、「破断までにほとんど塑性変形を示さない材料を脆性材料(brittle material)と呼ぶ。ガラス、セラミックスなどが脆性材料の代表である。常温で延性材料である船体構造材料も、・・・低温で延性が低下して脆性材料に近くなる。」と解説されている。

7.1.3 靱性(じんせい: toughness)

靱性とは、「材料の粘り強さ。材料の中で亀裂が発生しにくく、かつ亀裂が伝播しにくい性質。延性・展性が一般に平滑な材料についての特性であるのに対して、亀裂や切り欠きのある材料の特性。」(出典:大辞林(第三版)⁵⁰⁾)と解説されている。

靱性を調べる試験方法としては、切欠のある試験片(10mm×10mmの正方形断面の長さ55mmの四角柱)に衝撃荷重を作用させた(ハンマーで打撃した)際の破断面を観察し、平坦で光沢のある脆性破面の大きさを確認する方法(図26参照)があり、シャルピー衝撃試験と呼ばれている。

なお、同じ材料でも低温環境下では靱性が低下することが知られている。なお、鋼材中に吸収された水素により鋼材の靱性が低下する現象(水素脆化: hydrogen embrittlement)にも留意する必要がある。腐食、溶接及び電気メッキ等が水素吸収の原因として考えられる。

7.1.4 脆性破壊(brittle fracture)

インターネットで「脆性破壊」を検索すると、「物体が目に見える変形をほとんど伴わず、突然破断すること(大辞林 第三版)」とある。パキッと割れてしまうイメージで、亀裂は高速で伝搬し、破面(破断した面)は平滑なのが特徴である。

船舶の脆性破壊事故として有名なのが、戦時標準船(リバティ船: liberty ship)の折損事故である。第二次世界大戦中に米国において多数の全船溶接の貨物船等が建造されたが、船が真二つに折損し、沈没事故が続発した。インターネットを検索すると、かなり多くの情報⁵¹⁾や写真(図27)⁵²⁾等を見つけることが出来る。この事故を教訓として世界中で多くの研究が行われた。

鋼材を溶接で接合すると溶接部分に微小な欠陥が出来る可能性がある。また、もともとの鋼材には十分な靱性があっても、溶接による熱入力の結果、金属組織が変化し靱性が低下する可能性がある。また、板厚が大きくなると脆性破壊が発生するリスクが高まることも知られている⁵³⁾。

7.1.5 脆性破壊の防止

専ら鋼を構造材料とし、溶接によって建造される船舶にあっては、適切な材料を選択すると共に適切に溶接しないと、脆性破壊のリスクが高まる。したがって、そのようなリスクを制御するために、船級規則では適切な材料の選択及び適切な溶接方法等について厳格な要件が含まれている。

世界の主要な船級協会の業界団体である国際船級協会連合 (IACS) では、新造時の検査に関する統一規則 (UR: Unified Requirements) Z23⁵⁴⁾、船舶の建造及び修理に関する勧告 Rev.47⁵⁵⁾、材料及び溶接に関する統一規則 UR W11⁵⁶⁾、UR W28⁵⁷⁾、UR W31⁵⁸⁾ 及び UR S33⁵⁹⁾等を開発・公開しており、IACS のメンバーである ClassNK 等の船級規則に取り込まれ実用に供されている。

また、IMO の目標設定型基準 (GBS) に於いては、表 4 に示すように機能要件のIL.11 (建造品質手順) 等として関連する要件が含まれている。

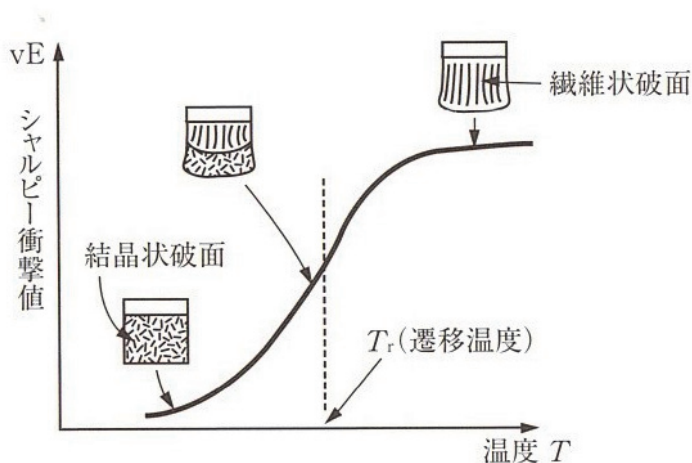


図 26 鋼のシャルピー衝撃値の遷移曲線⁴⁴⁾



図 27 戦時標準船の Schenectady T2 tanker の脆性破壊事故⁵²⁾

表4 GBSに規定される機能要件 (Functional Requirements) の抜粋⁷⁾

CONSTRUCTION	建造
II.3.4 安全余裕度 (Safety margins)	船舶は適切な安全余裕度をもって設計されなければならない。 (中略) その安全余裕度は、荷重、構造のモデル化、疲労、腐食、<u>材料の不完全性</u>、建造時の作業ミス、座屈、残存及び最終強度を含む、計算する際にある程度の不確実性を含む全ての設計変数に対して適切なものでなければならない。 Ships shall be designed with suitable safety margins: (partly omitted) .2 appropriate for all design parameters whose calculation involves a degree of uncertainty, including loads, structural modelling, fatigue, corrosion, <u>material imperfections</u>, construction workmanship errors, buckling, residual and ultimate strength
II.11 建造品質手順 (Construction quality procedures)	船舶は、知的財産権に配慮した上で、制御され透明性が確保された品質生産標準に従って建造されなければならない。船舶の建造品質手順は、少なくとも<u>材料、製造、アライメント、組み立て、接合及び溶接手順</u>、表面準備と塗装に関する仕様を含まなければならない。 Ships shall be built in accordance with controlled and transparent quality production standards with due regard to intellectual property rights. The ship construction quality procedures shall include, but not be limited to, <u>specifications for material, manufacturing, alignment, assembling, joining and welding procedures</u>, surface preparation and coating.

8. 最近の船体構造基準の動向と研究プロジェクト

8.1 GBS 適合の船級協会規則

第1章に述べたように、2016年5月開催のMSC 96にて、ばら積貨物船及び油タンカーを対象として、NKを含むIACSのメンバー船級協会の船体構造に関する船級規則がGBS⁶⁾⁷⁾に適合していることが確認された。また、この決定がMSC.1/Circ.1518⁸⁾として回章されている(表5参照)。

IMO GBSは5階層構造(図1)となっており、IMOが規定する目標(Tier I)及び機能要件(Tier II)の下、船級規則及び業界標準等がそれぞれTier IV及びTier Vと位置づけられる。目標(Goal)としては、「船舶は、その生涯を通じ、適切な運航及びメンテナンスを前提として、指定された運航条件及び環境条件の下で、非損傷時及び一定の損傷時において完全且つ環境負荷が少ないよう設計・建造されなければならない」と規定されている。

また、目標を達成するための要件を整理・分類したものが機能要件であり、設計寿命、環境条件、構造強度、疲労強度、残存強度及び構造の冗長性等が含まれる。

表 5 IMO GBS に適合している船級規則を発行している認定機関 (RO) のリスト⁸⁾

Recognized Organization	Date of confirmation	Session of MSC
American Bureau of Shipping (ABS)	11 May 2016	MSC 96
Bureau Veritas (BV)	11 May 2016	MSC 96
China Classification Society (CCS)	11 May 2016	MSC 96
Croatian Register of Shipping (CRS)	11 May 2016	MSC 96
DNV GL	11 May 2016	MSC 96
Indian Register of Shipping (IRS)	11 May 2016	MSC 96
Korean Register of Shipping (KR)	11 May 2016	MSC 96
Lloyd's Register (LR)	11 May 2016	MSC 96
Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK)	11 May 2016	MSC 96
Polish Register of Shipping (PRS)	11 May 2016	MSC 96
RINA Services (RINA)	11 May 2016	MSC 96
Russian Maritime Register of Shipping (RS)	11 May 2016	MSC 96

8.2 GBS 適合検証プロセス

個々の船舶の構造設計及び建造に当たっては、実務的には船級協会規則に従った図面承認及び検査等が不可欠であり、Tier IVの船級協会規則がIMO GBSの目標 (Tier I) 及び機能要件 (Tier II) に合致していることを予め検証、確認しておく仕組みが必要である。

そのため Tier IIIとして、船級協会規則等の GBS 適合を検証するための手続き等を規定した「GBS 適合検証ガイドライン」⁶⁰⁾がIMOに於いて作成されている。

最初のステップとして、船級協会等がIMO GBSに適合した規則等を開発するとともに、その規則等がIMOの適合検証ガイドラインに規定される評価基準等に合致しておりIMO GBSに適合しているか否かを自己評価した上で、「初回のGBS適合検証審査」の実施をIMOに要請する。次に、IMO事務局長が、自己評価報告書を含む申請書類一式に基づき、規則等のGBS適合を技術的な観点から監査する専門家チーム (監査チーム) を設置する。

最終的に、海上安全委員会 (MSC) が、監査チームが作成した監査報告書に基づき最終判断を下すことになる。その際、監査報告中に規則等に対する不適合等の指摘事項が含まれていれば、その是正処置等への対応方針が併せて判断される。

なお、現行のGBS適合検証ガイドラインには、「初回のGBS適合検証プロセス」の完了後には、規則等の継続的な改善を目的とした規則改正等が不可欠な状況を鑑み、規則改正に焦点を当てた「GBS適合維持監査」を継続的に実施すべきことが規定されている。

8.3 MSC98の審議結果

MSC96では、NK他の船級規則のGBS適合が認められるとともに、監査報告書で指摘されたIACSメンバーに共通の不適合に対する是正処置を実施し、その結果を2016年末までにIMOに報告すべきことが合意された。

この決定に従い、IACSはCSRの緊急改正を行い、その結果を期限内にIMOに報告した。IMOが2017年初頭に設置した監査チームは、当該緊急規則改正により不適合が是正されたか否かの確認作業を行い、その結果がMSC98に報告された。最終的に、MSC98に於いて不適合の是正処理が完了したことが認定されるとともに、「初回の適合検証プロセス」が完了したことが合意されたので、今後は規則改正を対象とする「GBS適合維持監査」が継続的に行われる段階に進むことになる。

第1回目のGBS適合維持監査については、船級協会等が2018年3月末までに規則改正等に関する書類をIMOに提出し、監査結果を2018年11月開催予定のMSC100で審議するとのスケジュールが合意されている。

また、MSC98に於いては、将来的には適合維持監査は原則として3年毎に実施することを規定した適合検証ガイドラインの改正案が作成されている。なお、改正案はMSC99で更なる見直しが行われた上で、MSC100に於いて採択される見込みである。

8.4 構造安全に関する研究プロジェクト

8.4.1 構造設計情報の運航時での活用

第4章で紹介した通り、日本から統合型船上モニタリングシステムの概念図等を含む INF 文書³⁶⁾が MSC 97 に提出されている。業界主導で普及が進んでいる「エンジン等の予防保全用のモニタリングシステム」及び「燃費向上等を目途とする運航系の船上モニタリングシステム」等に、就航中の船体構造に発生している縦曲げ応力等をモニタリング出来る「船体強度モニタリングシステム」を統合するというアイデアである。

このような統合型システムが普及するためには、構造応答のモニタリング点数を最小とし、コストダウンを図ることが鍵となる。波浪中での船体構造の応答特性、特に重要な構造部材の応力の周波数応答関数等を構造設計時に推定して船上モニタリングシステムに組み込んでおけば、原理的には、計測センサーを設置していない構造部材に発生している応力も推定出来ることから、計測センサー数を減らすとともに、操船判断の参考となる情報を提供出来ることが期待される。

荒天域での操船法を記述した教科書等によれば、船体構造の損傷が危惧される海象に遭遇している際には、船長が船首船底スラミングや青波打ち込みの発生頻度等を目安に変針及び減速の判断をすること等が記載されている。従って、例えば船舶が極めて大型化する等してブリッジから船首部の状況の把握が難しくなるようであれば、操船判断のベースとなる代替の情報が必要となる。図 28 に示した概念図⁶¹⁾は、重要構造部材に発生している応力並びに変針又は減速した場合の応力の変化傾向を推定出来る船上モニタリングシステムを開発し、船長に操船判断の参考となる情報を提供するというコンセプトを表現したものである。

8.4.2 船上モニタリング情報（運航時）と規則・基準

船舶の構造設計のための船級協会規則は、過去の実績に基づいて開発されている、即ち経験則をベースとしている。数多くの船舶が規則に基づいて構造設計・建造され、実海域で使用されてきた。規則は安全に運航出来た船舶の実績を集約したもの、換言すると成功例が規則の中に蓄積されているが、構造損傷の発生及び重大事故に対しては、原因を追求するとともに、それらの再発を防止するための規則改正が継続的に行われてきた。従って、運航時の情報の規則・基準へのフィードバックの枠組みは長年に渡って確立されてきていると言える。

これに加えて、統合型の船上モニタリングシステムが普及し、膨大なデータ（ビックデータ）が蓄積・活用できるようになると、より良い規則・基準の開発が目指せる。例えば、「より正確な短期海象の発現頻度表の開発」、「船舶が特定の短期海象に遭遇するおおよその確率の推定」が可能となったり、構造安全評価の観点からは規則・基準類に規定されている強度の余裕度の妥当性等々の検証が可能となったり、より安全で合理的な船舶の建造、船舶の運航方法等を実現が可能となったりする。図 28 の中ではビックデータを活用する「Data Driven Regulation」というキーワードで表現している。

また、海事分野のビックデータ活用に関しては、海事関係者間で広くデータを共有出来る枠組みが必要であり、日本主導で「船舶及び海洋技術－実海域データ共有化のための船内データサーバー要件」及び「船舶及び海洋技術－船上機械及び機器用データ標準」の開発が進められている。また、日本では、図 29 の概念図の右側に示された陸上のオープンデータセンター⁶²⁾を具現化したデータセンターを、第3者機関としての NK が子会社を設立して、運用を開始している。これに加えて、業界要望を受けて、NK が関係業界と連携して年内に法的な側面を含めたデータ共有の仕組みを確立することを狙った IoS オープンプラットフォーム推進協議会が設立されている。なお、IoS は IoT（Internet of Things）を参考とした造語で Internet of Ships を表現したものである。

従って、そう遠くない将来に、「実海域での船の安全で効率的な運航の実現」、「より安全で合理的な船舶に資する構造規則・基準の開発」及び「ビックデータを活用した最先端の構造設計及び建造」が、今まで以上に幅広く且つ強力に相互リンクしている枠組みに進化していくことが強く期待される。



図 28 Data Driven Regulation, 構造設計及び船上モニタリングのリンクの概念図⁶¹⁾

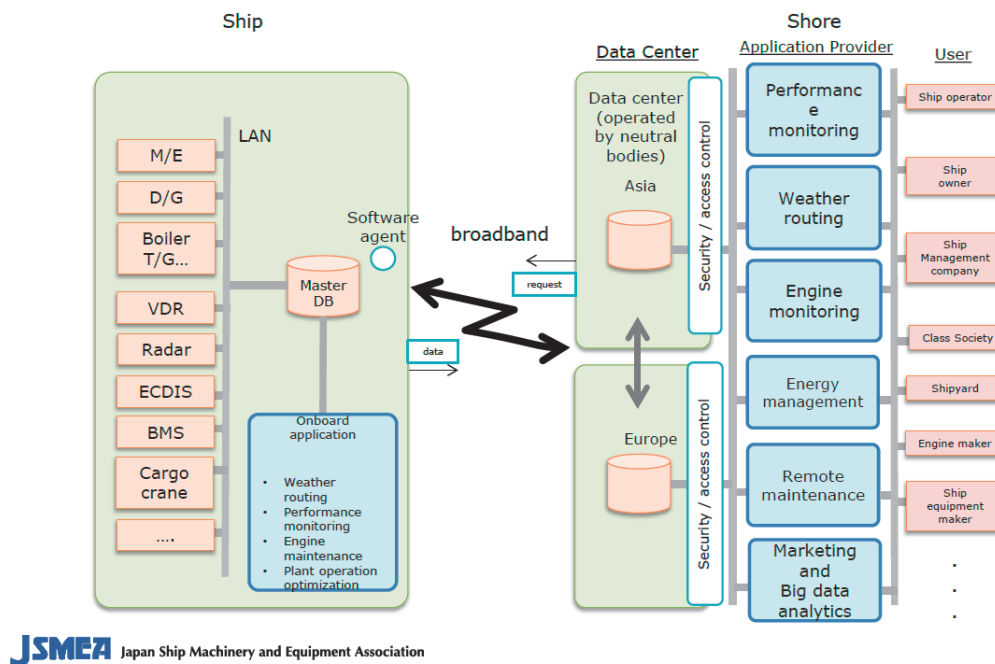


図 29 日本船用工業会のスマートナビゲーション研究会の船陸オープンプラットフォームコンセプトの概念図⁶²⁾

9. おわりに

本論文では、海上技術安全研究所の先導研究「最先端の構造強度評価法に関する実用的手引書の開発（平成 26 年度～平成 27 年度）」において作成した手引書について紹介した。IMO GBS を皮切りに、構造安全性と構造強度

評価, 全船荷重・構造一貫解析システム, 船体構造強度モニタリング及び船上モニタリングシステム等について研究成果を取りまとめ, また, 船体梁の縦強度及び最終強度に加えて, 降伏強度, 座屈強度及び疲労強度の基本的な説明を行うとともに, 脆性破壊についても言及した. ここで紹介した調査研究の成果は, 重点研究「新構造基準作成に資する先進的な荷重・構造強度評価及び船体構造モニタリングシステムの開発」に引き継がれている. 当所の重点研究を含め, 将来立ち上がる研究プロジェクトの実現と成功に, 本手引書が役立つことを期待する.

参考文献

- 1) IACS : UR S11, Longitudinal Strength Standard. (<http://www.iacs.org.uk>/参照) (1989).
- 2) IACS : UR S11A, Longitudinal Strength Standard for Container Ships. (2015).
- 3) ナホトカ号事故(1997年1月)原因調査報告書, ナホトカ号事故原因調査委員会, (1997).
- 4) エリカ号事故(Dec.1999)報告書, マルタ政府, (2000).
- 5) プレステージ号(Nov.2002)事故報告書, バハマ政府, (2004).
- 6) IMO : IMO 決議 MSC.290(87), Adoption of amendments to the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, as amended. (2010).
- 7) IMO : IMO 決議 MSC.287(87), Adoption of the International Goal-Based Ship Construction Standards for Bulk Carriers and Oil Tankers. (2010).
- 8) IMO : MSC.1/Circ.1518, Promulgation of rules for the design and construction of bulk carriers and oil tankers of an organization, which is recognized by Administrations in accordance with the provisions of SOLAS regulation XI-1/1, confirmed by the Maritime Safety Committee to be in conformity with the goals and functional requirements of the Goal-based Ship Construction Standards for Bulk Carriers and Oil Tankers. (2016).
- 9) 有馬俊朗:「海技情報」船舶の構造安全評価について(その1)～(その7), 船長協会会誌「Captain」433号～439号, (2016～2017).
- 10) ClassNK : 船体構造強度評価のための技術指針, (1999).
- 11) ClassNK : タンカーの構造強度に関するガイドライン, (2001).
- 12) ClassNK : ばら積貨物船の構造強度に関するガイドライン, (2002).
- 13) ClassNK : コンテナ運搬船の構造強度に関するガイドライン, (2003).
- 14) IACS : Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. (2013).
- 15) IACS : IACS Recommendation No.34 (Rev.1), Standard Wave Data (2000).
- 16) 日本船長協会: 船体の強度 ---船体の泣きどころ--- (ビデオ), (1978).
- 17) 新田顕, 荒井宏範, 馬飼野淳: IACS 縦強度統一規則とその背景, 日本海事協会誌第214号, (1991), pp.1-13.
- 18) ClassNK : 鋼船規則等の改正概要, 2015ClassNK 秋季技術セミナー, (2015), pp.39-44.
(http://www.classnk.or.jp/hp/pdf/research/seminar/2015/all_dvd2015.pdf)
- 19) ClassNK : ばら積貨物船及び二重船殻油タンカーの共通構造規則に関する解説 (IACS CSR), 日本海事協会誌第276号 (臨時特集号), (2006).
- 20) 藤久保昌彦ほか: 船舶海洋工学シリーズ⑦, 船体構造強度編, 成山堂書店, (2012).
- 21) 有馬俊朗: 構造安全評価と船上モニタリングシステム, 平成27年度(第15回)海上技術安全研究所講演会講演集, (2015), pp.54-71.
- 22) 岡正義ほか: ホイッピングを考慮した疲労寿命推定と船上モニタリング, 平成28年度(第16回)海上技術安全研究所研究発表会講演集, (2016), pp.112-121.
- 23) 佐藤宏一, 大塚浩友, 宮崎智: 最先端構造解析プログラム MHI-DILAM ---大型船舶・海洋構造物への適用 ---, 三菱重工技報 Vol.47 No.3 (2010)船舶・海洋特集, (2010), pp.92-98.
- 24) 石川廣三: 構造の世界 ---なぜ物体は崩れ落ちないでいられるのか---, 丸善, (1991). (「J. E. Gordon, Structures: or Why Things Don't Fall Down, 1978.」の翻訳版)
- 25) 藤久保昌彦ほか: 船舶海洋工学シリーズ ⑦船体構造 強度編, 成山堂書店, (2012).

- 26) Sato, K., Ohira, H., Tatani, M. and Yoshida, T.: Long-term Fatigue Monitoring For LNG Carrier, Gastech (2005).
- 27) (株) シミウスの製品カタログ : <http://www.cmiws.jp/>
- 28) OSMOS 技術協会 : <http://www.osmos.jp/technology/product/index.html>
- 29) IMO : Recommendations for the fittings of Hull Stress Monitoring Systems, MSC/Circ.646, (1994).
- 30) ABS : Guide for Hull Condition Monitoring System, (2015).
- 31) BV : Hull Stress and Motion Monitoring (MON-HULL), BV Rules, Pt 3. Ch 5, Sec1, (2016).
- 32) DNV GL : Class Notation – HMON, Rules for classification: Ships –DNVGL-RU-SHIP-Pt1Ch2, (2016).
- 33) ClassNK : Rules for Hull Monitoring Systems (船体監視システム規則), (2016).
- 34) LightStructure 社 : <http://www.lightstructures.no/hmon.html>
- 35) Straininstall 社 : <http://www.straininstall.com/index.php/systems/vessel-monitorin>
- 36) IMO : MSC 97/INF.12 (Japan), Integrated on-board monitoring system for the safe and efficient ship operation, (2016).
- 37) 矢尾哲也 : 船体の縦曲げ最終強度評価 - 過去 ; 現在 ; 未来 -, 公開資料, (2014)
http://www.e-technostar.com/support/material_yao/
- 38) 藤久保昌彦 : 船体の波浪中崩壊挙動シミュレーション, 生産と技術 第 65 巻 第 1 号(2013), pp.28-33.
<http://seisan.server-shared.com/651/651-28.pdf>
- 39) 田中義照ほか(2013) : 複合荷重下における船体梁の縦曲げ最終強度に関する研究, 「海上技術安全研究所報告」第 13 巻第 2 号, (2013), pp.25-39.
- 40) 国土交通省コンテナ運搬船安全対策検討委員会 : コンテナ運搬船安全対策検討委員会 最終報告書, 平成 27 年 3 月, (2015).
- 41) ClassNK : 大型コンテナ船の構造強度に関する NK の取組み, 2016ClassNK 技術セミナー, (2016), pp.118-149.
<http://www.classnk-rd.com/activities/20160711.html>
- 42) 国土交通省 : 国際海事機関(IMO)第 2 回人的因子訓練当直小委員会(HTW2)の結果について, (2015)
<https://www.mlit.go.jp/common/001081217.pdf>
- 43) IMO : MSC/Circ.1014, Guidance on Fatigue Mitigation and Management. (2001).
- 44) 藤久保昌彦ほか : 船舶海洋工学シリーズ⑥, 船体構造 構造編, 成山堂書店, (2012).
- 45) ISSC : Committee IV.2 Design Methods, Proceedings of the 19th International Ship and Offshore Structures Congress, (2015).
- 46) <http://www.esrgtech.com/marine-solutions/total-vessel-monitoring/>
- 47) IACS : Tripartite meeting (2015)
- 48) 広辞苑 第七版, 岩波書店(2008).
- 49) デジタル大辞泉 (<https://daijisen.jp/digital/>), 小学館
- 50) 大辞林 (第三版), 三省堂, (2006).
- 51) 例えば, <http://www.sozogaku.com/fkd/cf/CB0011020.html>
- 52) The Welding Institute (TWI): <http://www.twi-global.com/news-events/case-studies/schenectady-t2-tanker-165/>, (2017).
- 53) 北田博, 福井努 : 船舶で躍進する新高張力鋼—TMCP 鋼の実用展開—, 成山堂書店, (2014).
- 54) IACS : IACS UR Z23 (Rev.6) Hull Survey for New Construction, (2016).
- 55) IACS : IACS Rec.47 (Rev.7) Shipbuilding and Repair Quality Standard, (2013).
- 56) IACS : IACS UR W11 (Rev.8) Normal and higher strength hull structural steels, (2014).
- 57) IACS : IACS UR W28 (Rev.2) Welding procedure qualification tests of steels for hull construction and marine structures, (2012.)
- 58) IACS : IACS UR W31 (Rev.1) Application of YP47 Steel Plates, (2015).
- 59) IACS : IACS UR S33 (Rev.1) Requirements for Use of Extremely Thick Steel Plates in Container Ships, (2015).
- 60) IMO 決議 MSC296 : Adoption of Guidelines for Verification of Conformity with the International Goal-Based Ship Construction Standards for Bulk Carriers and Oil Tankers, (2010).
- 61) 有馬俊朗 : GBS の取り組みについて, 海上技術研究所セミナー, バリシップ (2017).

- 62) 安藤英幸：スマナビ研の取り組みとオーブンプラットフォームへの期待，Ios (船のIot)オーブンプラットフォームに関するフォーラム(日本海事協会)，(2017).