

鋼船規則C編の変遷と全面改正の概要

石橋 公也*

1. はじめに

本会の技術規則である鋼船規則C編は、コンテナ船、鉱石運搬船、液化ガス運搬船等、CSR（IACS共通構造規則）適用船を除く船舶に対する船体構造及び艤装に関する要件が定められており、本会の約100年間に渡る船級業務で培った船体構造に関する技術や経験が集約された規則である。

本会は、2017年から5年間の中期経営計画の中で5つの基本戦略を策定し、その戦略の一つである「研究開発活動の推進」に対応した形で、鋼船規則C編の全面改正作業を進めることになった。

本改正作業を進めるにあたり、新たな構造強度規則を開発するために必要となる要素技術である荷重、腐食、降伏、座屈及び疲労等の研究開発を行うため、大学、研究所と連携した多くの共同研究プロジェクトを立ち上げた。また、造船所及び船社に所属する若手技術者にも本プロジェクトに参画いただくことにより、膨大な作業が必要となる研究開発、規則開発、影響評価の作業を同時に進める体制を構築した。2019年には、本会が開催する関連業界の技術者や学識経験者で構成される船体専門委員会において全面改正案に関する本格的な議論が行われ、最終的に、2022年1月に開催された第1回技術委員会にて鋼船規則C編の全面改正が承認された。

本稿では、1921年に初刊行されてからの本会の構造規則の変遷について解説し、これまでの変遷から見た今回の全面改正の位置付けについて言及する。

2. 構造強度規則の変遷

2.1 鋼船規則の刊行

船級検査の判断基準の拠り所となる鋼船規則は1921年に初めて刊行された。第二次世界大戦後に帝国海事協会から日本海事協会に名称を改め、事業を再スタートした後に初めて刊行された鋼船規則は、その内容が大幅に変更されている。しかしながら、手元にある中で最も古い大正14年（1925年）の鋼船規則（図1参照）の目次を眺めると、現在の鋼船規則C編にその名残が十分にあることが分かる。新

旧規則は共通して、各種部材に関する要件を纏めた章（当時は編）が、ブロック建造法が採用される以前の建造順序に従って並んでおり、これらの章が構造規則の大半を占めている。旧規則では、それらの各部材に関する章の後に、油槽船（タンカー）のための要件を定めた章のみが規定されていた。油槽船は乾舷が小さく相対的に構造に働く荷重が大きくなり、また、縦通隔壁を有するため一般貨物船と構造様式が大きく異なる。当時の規則は、L、B、D等の主要目をパラメタとした実績寸法等に基づく経験式が多く採用されていたため、油槽船には一般貨物船とは異なる算式が必要であった。また、当時、リベット接合も広く使われており、貨物油が漏れないようなリベットの間隔等の要件などが確認できる。

目次	
第一章	総論……………1-7
第二章	定義……………8-11
第三章	船体……………12-19
第四章	鋼材……………20-21
第五章	艤装、船倉材、船底材……………22-24
第六章	船底……………25-31
第七章	中心線内艤装……………32-33
第八章	二重底……………34-36
第九章	肋骨……………37-39
第十章	特設肋骨……………40-41
第十一章	甲板……………42-45
第十二章	船底……………46-47
第十三章	側内肋骨及船底肋骨……………48-50
第十四章	舷柱、船底柱、甲板下設船底柱……………51-52
第十五章	船底……………53-55
第十六章	船底……………56-58
第十七章	船首尾……………59-60
第十八章	外板……………61-62
第十九章	甲板……………63-64
第二十章	内板……………65-66

図1 帝国海事協会鋼船規則（大正14年刊行）

2.2 経験式から理論式への移行

過去70年間に渡る構造強度関連の鋼船規則の主な改正を表1に纏めた。ただし、舵、船体艤装品、材料及び溶接関連の改正は割愛した。

1950年代のルールは、防撓材などの単純梁問題として扱える部材については、現在と変わらない寸法要求算式の形となっているが、外板や桁板等の多くの要求算式については、L、B、D等の船の主要目を用いた実績寸法や他船級ルールとの比較（図2参照）から導いた式となっていた。これらの要求算式は、現代に近づくにつれて、適切な荷重モデルと強度モデルに基づいたより合理的な寸法算式に変更されていくことになる（表2参照）。

* 開発本部 船体開発部

表1 NK構造強度規則の主な改正事項

時期	改正内容
1921年	鋼船規則初版の発行
1949年	日本海事協会として鋼船規則の初発行
1959年	スラミング荷重を考慮した要件の導入
1961年	理論式ベースの外板要求算式の導入
1963年	桁ウェブに関する座屈強度要件の導入
1972年	長期予測に基づく波浪縦曲げモーメントの導入
1973年	31章「ばら積貨物船」の新設 (等価パネルによる相持ち構造評価の導入)
1974年	構造関連の要件を鋼船規則C編として再編成 直接強度計算に基づく強度評価法の導入
1980年	長期予測に基づく波浪圧力を用いた大幅改正
1983年	32章「コンテナ船」の新設
1987年	UR S11 (縦強度) の一部取り入れ
1989年	組み合わせ荷重下の座屈要件の導入
1993年	29A章「ダブルハルトンカー」の新設 (ロンジ波疲労強度要件の導入)
1999年	Bulk Carrier Safety関連要件の導入 (浸水時強度要件等の導入)
2001年	タンカーの構造強度に関するガイドライン発行 (ネット寸法評価, 等価設計波法, 大骨疲労強度評価, 縦曲げ最終強度評価の導入)
2006年	CSR-B編及びCSR-T編の新設
2016年	CSR-B&T編の新設 コンテナ船要件の大幅改正 (ホイッピング荷重を考慮した要件の導入)

1960年代は、タンカーを筆頭に貨物船が急激に大型化した時代であった。これらの貨物船に対して就航船の定期的検査が実施されるような時期となる1972年に発行されたNKの会誌には次のような記述があった。「実際の船舶の損傷例をみると船体縦曲げ応力が高くなったために生じた損傷は極めてまれで、むしろ局所的な船体構造に波浪外力等の力が作用して、応力集中等で座屈または亀裂等の損傷が発生した例が多い」。単純梁の強度モデルで表される縦強度や防撓材の算式であれば、このような大型化に対応できるが、板部材や桁ウェブ部材の板の多くは、実績寸法等に基づく経験式で板厚が定められていたため対応が困難であった。船舶の大型化に伴い容積が広がった貨物倉では相対的に桁部材の強度の重要度が増しており、複雑な不静定構造の応答により発生する変形や応力に、これら経験式に基づく算式は対応できなくなっていた。これに対して、二重底構造等の相持ち構造を等価なパネルに置き換えることで、縦桁と横桁に働くせん断力の分担率を求める手法等、様々な不静定な構造様式に対応した複雑な規則算式がこの時期に多く開発されている。

2.3 長期予測と直接強度計算の登場

1970年代には、現在でも最も重要な強度評価技術が鋼船規則に登場している。その一つは、長期予測に基づく設計荷重の推定技術⁴⁾である。船体運動や船体に働く圧力を計算することができるストリップ法と、短期予測、長期予測を組み合わせた手法により波浪圧力、波浪中縦曲げモーメント等の就航期間中の最大値を求めることができるようになり、これまでの経験式に代り、より適用性が広く、より合理的な要件とすることが可能となった。

もう一つの重要な技術は、**図3**に示すような有限要素法による直接強度計算である。相持ち構造や強制変位的に荷重が働くような不静定問題を算式で扱おうとすると、あまりに式が複雑化すること、モデル化の時点でかなりの誤差を生むことが考えられるが、直接強度計算であれば、実構造を適切なビーム要素やシェル要素に置き換えることにより、これまでより遥かに精度の高い評価が可能となる。また、シェル要素であれば、トランスリングのような複雑な形状の桁に発生する局所的な応力も精度よく求めることができる。

船型	L	B	D	d	d/L	船底外板				船側外板							
						助造荷方構式	t			S	t			案 _S √S			
							NK	LR	Ship		NK	LR	Ship				
凹	1D _s	44	7.8	3.8	3.4	.0772	T 560	9.46	9.81	10	9.47	560	8.39	8.54	9	8.5	7.86
〃		48	8.8	4.2	3.76	.0783	T 540	9.98	9.72	10	9.56	540	8.60	8.47	9	8.57	8.12
〃		60	9.7	5.5	4.8	.0800	T 600	11.51	11.40	10	11.34	600	10.02	9.93	10	10.13	9.40
〃		62	10.4	5.5	4.85	.0792	T 600	11.69	11.61	11	11.40	600	10.18	10.11	10	10.16	9.55
〃		64.5	10.2	5.4	4.75	.0796	T 600	11.82	11.60	10	11.36	600	10.28	10.26	10	10.10	9.74
〃		65	10.2	5.4	4.75	.0791	T 600	11.88	11.85	11	11.36	600	10.31	10.30	11	10.13	9.78
〃		65	10.4	5.2	4.55	.0703	T 660	12.20	12.45	11.50	12.08	660	10.58	10.85	10.5	10.69	10.14
平漁船		66.33	10.5	5.5	4.8	.0724	L 650	10.26	9.68	11	10.32	600	10.54	10.39	11	10.10	9.89
凹	1D _s	67	10.8	5.7	4.8	.0716	L 650	10.32	9.70	11	10.33	610	10.33	10.51	11	10.26	9.97

図2 NK会誌に掲載された他船級及び実寸法比較表

表2 船底外板の板厚要求式

年代	規則算式
1960年	Lが110m以上のとき $\left\{0.54 + 10.7 \left(\frac{L}{100}\right)\right\} \left\{1 + 0.025 \left(\frac{L}{11} - D_s\right)\right\}$ (mm) D _s : 船の(強力上の)深さ
1961年	1.44C _d S√L + 2.5 (mm) C _d = 1 + 7 $\left(\frac{d}{L} - 0.06\right)$ S: 縦通肋骨心距
1974年	3.64CS $\sqrt{\frac{d + 0.035L'}{1.66 - f_b}} + 2.5$ (mm) C: Lに応じた補正係数1.0~1.07 f _b : 船底に関する縦強度の使用係数

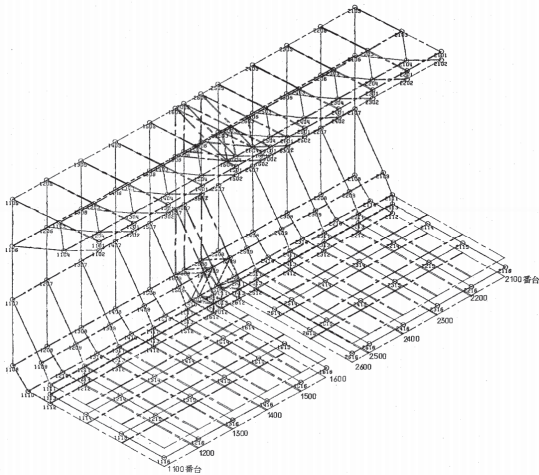


図3 1970年代に作成されたFEモデル

2.4 より理論的で合理的なルールへ

上記2つの技術を活用すれば、今回の全面改正の方向性である、より理論的で合理的な規則とすべく規則の開発を一挙に進めることができるように考えられるが、1980年に実施された長期予測に基づく波浪圧力を用いた各要件の改正以降は、大幅な改正が行われていない。90年代以降は、代わってIACS共通ルールであるCSRの制定等、IMO及びIACSの構造安全性に関する対策に関連した改正が多くなっている。

このように規則の開発が進まなかった理由は、様々挙げられるが、以下に示した2つの問題が大きな要因であると考えられる。

問題点の1つは、長期予測法により導かれた荷重値が、比較的大きかったことにあると考える。図4は、1972年に規則改正が行われた縦強度要件に用いる波浪垂直曲げモーメントの技術背景となった長期予測結果である。この当時から船の就航期間中の最大値は、超過確率 10^{-8} レベルに相当することが分かっていたが、避航、減速、変針の影響を考慮して超過確率 10^{-5} レベルに相当するモーメントを導く算式を採用している。当時の縦曲げ応力に対する許容応力は、約 150N/mm^2 （現在は、 190N/mm^2 ）となっていたこともあり、実績寸法に基づいた調整が必要であった。

この頃から、操船や遭遇海象の実態を把握するため、実船計測プロジェクトが実施されたが、得られるデータは、わずか数隻の船舶から得られたものであり、実態の全容を把握することは不可能であった。

もう1つの要因は、長期予測により、それぞれの位置において波浪縦曲げモーメントや圧力、加速度等の最大値が求められるが、それらの荷重の相関が一切分からないことである。船舶の設計には、同時

に発生する複合的な荷重を考慮する必要がある。この問題については、過去に様々な研究^{5)~7)}が行われており、本会が発行した「タンカーの構造強度に関するガイドライン」⁸⁾において初めて採用された等価設計波法にそれらの成果が活かされた。また、この等価設計波法は、その後にCSRにも採用されている。

等価設計波法とは、船体構造応答の長期予測において極めて発生確率レベルの低い値は、非常に限られた特定の短期海象（或いは、特定の波向き、波長の規則波）により生じる特性に着目して、それらの短期海象を再現する波ケースを用いて強度評価を行うというものである。

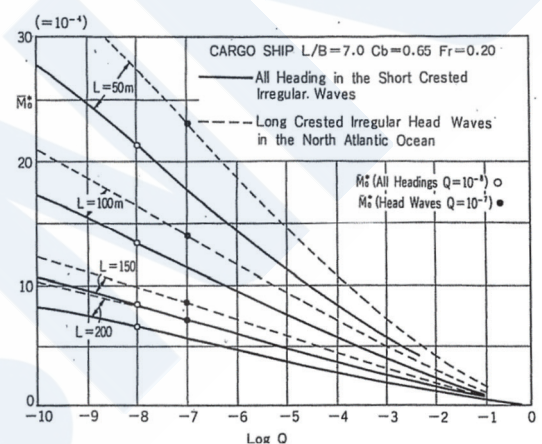


図4 波浪垂直曲げモーメントの長期予測結果

3. 新しい鋼船規則C編について

3.1 新しい鋼船規則C編の章構成

前2.1.に述べたとおり、現行の鋼船規則C編の章構成は、大正時代から大きく変化していない。主として一般貨物船を対象とした各構造部位に対する要件を規定した章が、規則の大半を占めており、船種別の強度要件がその後に続く。船種ごとの章の下レベルには、船底構造、船側構造等の各構造部位に関する節があるという所謂入れ子構成となっており、規則の読み易さを低下させる一因となっている。

鋼船規則が初めて刊行された時代と異なり、現代では荷重応答の長期予測や等価設計法の技術を用いれば、あらゆる箇所の荷重値や加速度の長期予測値や、それぞれの荷重の同時性を考慮した組み合わせを示すことができるようになっており、また、板及び防撓材の局部強度だけでなく、大骨、桁等の主要支持構造部材についても一般化した強度モデルとして扱えるようになってきているため、構造部位ごとに章を分ける必要性は低下している。

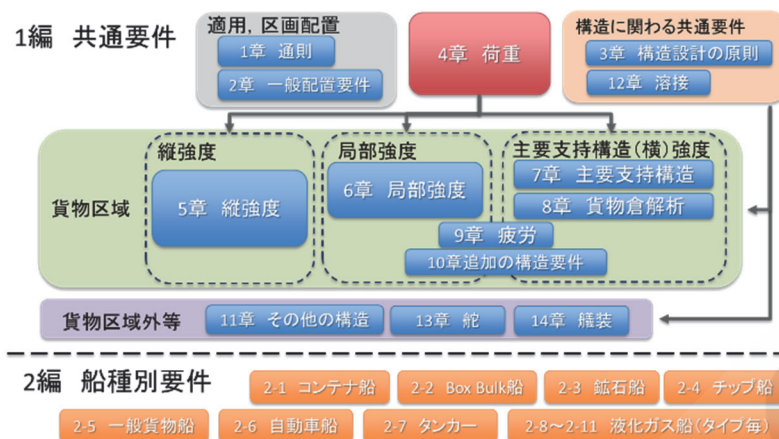


図5 新しい構造強度規則の章構成

このような状況から、規則の読み易さ、CSRに習熟した設計者からの読み易さ等を考慮して、新しい構造強度規則では図5に示す章構成とする。

局部強度、主要支持構造強度、縦強度のような強度上の構造の階層レベルや、荷重、疲労強度のような強度評価のカテゴリに関する章が規則の骨子となっている。また、船種特有の貨物の種類や積付に関する要件、特有の構造に関する追加要件を2編に規定している。

3.2 設計荷重

新しい鋼船規則C編の設計荷重に関しては、前2.4で述べた長期予測法と等価設計波コンセプトが引き続きベースとなっており、これらに非線形影響と操船影響を考慮することにより、より現実的な荷重値を導くようになっている。

荷重算式の開発に際しては、2次元ポテンシャル理論より導出される物理的に意味のある式を簡易化することで、より適用性が広く精度の高い推定式⁹⁾ ¹⁰⁾とした。さらに、現時点で推定精度、信頼性、計算工数のバランスが最もよく、また広く使われている3Dパネル法による船体応答解析、この結果に基づいた短期予測、長期予測のシリーズ計算を実施し、開発した荷重算式の検証・調整を行った。

大波高時の船体没水部の変化等に起因する非線形影響については、水槽実験及び非線形3Dパネル法を用いたシリーズ解析の結果から等価設計波ごとの係数¹¹⁾として求めている。

操船影響については、数万隻のAISより得られた遭遇海象ベースの波浪頻度分布を用いて主要な船体応答の長期予測値を求め、従来から用いられていたIACS Rec.34¹²⁾に定義される波浪頻度分布表より導かれる長期予測値との比率から係数¹³⁾を定めている。

これらの係数により、実際の船体構造に働く荷重値を、より精度よく推定し、且つ、実績寸法との乖離の少ない要求寸法を導くことができる。

3.3 腐食予備厚及び強度クライテリアの精度向上

前3.2に述べた設計荷重だけではなく、腐食予備厚、降伏、座屈、疲労に関する強度クライテリアについても、より実際の現象に沿った強度評価が行えるよう高精度化することを目指した。

新しい構造強度規則で用いられる腐食予備厚については、就航船検査時に実施される板厚計測から得られる膨大なデータを統計解析することにより、腐食環境に応じた値としている。

CSRでも本手法による腐食予備厚が採用されているが、新しい鋼船規則C編では、統計解析の対象となる板厚計測データを、主に1990年代以降に建造された船舶から集めることにより、検査強化プログラム（ESP）を前提とした近年のメンテナンス品質を腐食予備厚に反映させた。この結果、メンテナンス品質の向上によりバラスタタンクのように腐食量が減少した箇所と、乾貨物船の内底板等の腐食が抑えられない箇所が数値として明確にでている。

降伏、座屈、疲労に関する強度クライテリアについては、より損傷に直結するようなクライテリアとなるよう努めた。例えば、板及び防撓材の面外圧力に関する寸法算式については、長らく初期降伏強度及び剛塑性理論に基づく算式とこれに付随する経験的に定められていた安全率が使われてきた。

今回の開発作業においては、板及び防撓材に対して、様々なレベルの圧力を載荷・除荷する非線形FE解析を実施して、残留変形が残らない強度クライテリアがどこにあるか調査し、そのクライテリアを導くことができる簡易算式を開発¹⁴⁾ ¹⁵⁾した。本簡易算式に適切な安全率を加えることで、損傷との対応が明確な寸法要求算式を導いた。

座屈強度評価においては、荷重算式と同様にできる限り物理的に意味のある式を用いつつ、弾性座屈後の崩壊強度を精度よく推定¹⁵⁾できるようにした。

また、船体構造のような不静定構造体において、局部的に板パネルが座屈した際の周辺構造への荷重再配分の影響を考慮した要件も一部に取り入れ、より実際の損傷との相関が高い基準とした。

疲労強度評価に関しては、数万隻のAISから得られた航路の情報に基づき、より実際に近い繰り返し荷重の設定¹⁶⁾を行っている。また、船全体の疲労損傷発生確率に基づいた安全率を設定する等、実際の損傷事例との相関が明確な要件とした。

4. おわりに

今回の新しい鋼船規則C編のコンセプトは、1970年代の長期予測技術が発展した当時から構想されていた構造強度規則の理想像にかなり近づいたものとなり、その立役者は、AISデータや板厚計測データから得られたビッグデータと言える。

今後、デジタルツイン関連の技術が発達し、普及することにより、船舶の就航中に起きる様々な事象が定量的に計測され、利用できるようになる。また、これまで以上に実遭遇海象や複雑な非線形の構造応答に関する知見が獲得でき、損傷の事故原因究明等が正確に行われることになる。

新しい鋼船規則C編は、実遭遇海象や就航後の船体構造の状態の再現、実際の損傷に基づくクライテリアによる強度評価を目指し、開発を進めてきた。従って、デジタルツイン技術で明らかになった知見を、比較的容易に規則に反映することができ、今後さらに規則の安全性と合理性を向上させることが期待できる。

参考文献

- 1) 日本海事協会：鋼船規則CSR-B&T編，2021
- 2) 日本海事協会：鋼船規則C編，2021
- 3) 日本海事協会：鋼船規則CS編，2021
- 4) 福田淳一：船体応答の統計的予測，日本造船学会耐航性に関するシンポジウム，1969年
- 5) 土岐直二：設計海象の設定法に関する研究（その1）（その2），西部造船会報第89号，（平成6年），pp.191-208，第93号（平成8年），pp.121-133
- 6) 河辺寛他：波浪荷重の長期分布と遭遇海象との関係（第1報波浪荷重の最大値と想定海象），日本造船学会論文集，第186号，pp.319-339，1999
- 7) 重見利幸，朱庭耀：タンカーの主要構造部材に対する設計荷重の実用的設定法に関する研究—第一報 設計海象—，日本造船学会論文集，第191号，pp.195-207，2002
- 8) 日本海事協会：タンカーの構造強度に関するガイドライン，2001
- 9) Kyohei Shinomoto, Sadaoki Matsui et al.: Development of Closed Formula of Wave Load Based upon Long-Term Prediction - Heave Acceleration and Pitch Angle-, ASME 2020 39th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2020), 2020
- 10) 松井貞興，篠本恭平，杉本圭：船体構造設計のための波浪荷重の簡易算式の開発—第1報：縦運動の応答関数とその支配的な船型パラメータ—，日本船舶海洋工学会論文集第34号，2021（査読中）
- 11) Kei Sugimoto, Hiroshi Kawabe et al.: Non Linear Effect on Wave-induced Loads for Hull Structural Design, ASME 2020 39th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2020), 2020
- 12) International Association of Classification Societies:IACS Rec No.34, 1992
- 13) 見良津黎，福井努，朱庭耀：実海域での船舶遭遇海象における操船影響の定量的評価に関する研究（第3報），日本船舶海洋工学会講演会論文集，2021
- 14) Yoshiaki Naruse, Tetsuo Okada et al.: Scantlings Evaluations of Plates and Stiffeners Based on Elasto-plastic Analysis under Axial Loads and Lateral Pressures, PRADS 2019, Sep 22-26, 2019, Yokohama, Japan
- 15) 石橋公也，藤久保昌彦：組み合わせ荷重を受ける矩形板の最終強度簡易評価法について，日本船舶海洋工学会論文集，33巻，pp.159-172，2021
- 16) 山本規雄，杉本友宏，石橋公也：AISデータを用いた疲労強度評価用荷重（第3報：波浪追算データを用いた操船影響の検討），日本船舶海洋工学会講演会論文集，第30号，pp.495-498，2020