

3. 鋼船規則 A 編及び C 編における改正点の解説 (鋼船規則 C 編関連 (2024 年改正 1))

1. はじめに

2024 年 12 月 26 日付一部改正により改正された鋼船規則 A 編及び C 編中、鋼船規則 C 編関連 (2024 年改正 1) に関する事項について、その内容を解説する。なお、本改正の適用は次のとおりである。

鋼船規則 C 編 1 編 9.5.5, 2-1 編 9 章並びに 2-5 編 4 章及び 10 章以外

(1) 2024 年 12 月 26 日から施行

鋼船規則 C 編 1 編 9.5.5, 2-1 編 9 章並びに 2-5 編 4 章及び 10 章

(2) 2025 年 6 月 26 日以降に建造契約が行われる船舶に適用。ただし、申出により先取りで適用可。

2. 改正の背景

本会の船体構造に関する規則である鋼船規則 C 編は、全面改正が行われ、2022 年 7 月 1 日付で制定された。その後、規則適用の検討段階において、関連業界より規則の明確化や改善要望等に関するフィードバックが寄せられた。このため、関連業界からのコメントに基づいて、関連規定を改めた。

3. 改正の内容

主な改正点は以下のとおりである。

(1) Notation “HELIDK”を付記する甲板の明確化及びヘリコプタ荷重を受ける部材の評価対象の明確化 (A 編 1.2.4-29., 4.8.3.1, 10.4.6.1, 10.4.6.2, 10.4.6.3, 14.6.2.1 関連) :

改正前は、C 編 1 編 10.4.6 にヘリコプタ甲板及びヘリコプタ甲板を兼ねるハッチカバーに対する強度要件を規定しており、また、A 編 1 章 1.2.4 においては、ヘリコプタ甲板に対する C 編の強度要件を適用した場合に Notation “HELIDK”を付記すると規定していた。これら要件の適用について、強度要件が適用される甲板及び Notation が付記される甲板がそれぞれ不明確であったことから、R 編 3.2.26 に規定するヘリコプタ甲板と R 編 3.2.55 に規定するヘリコプタ着船場所の定義に基づき、強度要件は、ヘリコプタ荷重を受ける甲板に適用されること、また、Notation が付記されるのは、R 編 3.2.26 に定義するヘリコプタ甲板であって、かつ、C 編 1 編 10.4.6 に規定する強度要件を満足する甲板であることを明確にした。

(2) 旧 C 編の適用延長 (2028 年 1 月 1 日前に建造契約が行われる船の長さ L_c が 200 m 未満の船舶) (C 編 1 編 1.1.2.1 関連) :

C 編は、業界関係者の協力の下、脱炭素に代表される変革の時期に活用できる規則を目指して全面改正され、結果として、実際に即した荷重分布、適切な構造配置、データに基づいた腐食マージンの配分等を考慮できる規則になっている。この C 編は、2023 年 7 月 1 日以降の建造契約船から適用されているが、同型船に対しては、経過措置が取られており、2025 年 1 月 1 日以降の建造契約船に適用される。

C 編は、最新の技術を取り入れた規則であり、旧 C 編と比べ、合理的な設計が行える一方で、計算を精緻に行う必要があり、従来と比べて設計工数が増加する傾向がある。また、現在、造船所が繁忙な状況であり、同型船に対する経過措置が終了するまでに造船設計者が C 編による設計への対応が難しい状況にある。

従って、新設計船、同型船共に、2028 年 1 月 1 日より前に建造契約が行われる船舶であって、船の長さ L_c が 200 m 未満の船舶に対しては、全面改正前の C 編 (以下、「旧 C 編」という。)を延長して適用することができるよう規則改正を実施した。

なお、旧 C 編を適用する船舶には、Notation “ASR(Advanced Structural Rules)”は船級符号に付記されない。

(3) 居住若しくは航海業務に充当する区域の閉囲された甲板に作用する荷重の明記及び最小板厚要件の規定 (C 編 1 編 4.9.2.4, 11.3.1.1 関連) :

もっぱら居住若しくは航海業務に充当する区域の船楼甲板及び甲板室の頂板のうち、乾舷甲板上 2 層目までの閉囲された箇所に対する荷重として、旧 C 編 10.2.1-3.には $12.8(kN/m^2)$ を用いると定めていたが、C 編においては明確な要件が定められていなかった。従って、C 編 1 編 4.9.2.4 に旧 C 編と同じ要件を規定した。また、C 編において当該部材に対して考慮する腐食予備厚は、旧 C 編（船側外板等の構造部材と同じ値を考慮していた）と比べて小さく、結果として要求寸法も小さくなることから、CSR-B&T 編 1 編 11 章 3.2.2 に規定している甲板室の非暴露甲板の最小板厚（グロス板厚で 5.5mm）を C 編 1 編 11.3.1.1 に取り入れた。

- (4) ロンジ端部結合部の疲労強度評価のクライテリア修正（C 編 1 編 9.5.5.1, 2-1 編 4.6.3.1, 表 4.6.3-1., 4.6.4.1, 9.3.1, 9.3.2 関連）：

C 編 1 編 9.3 及び 9.5 では、ロンジ端部結合部の疲労強度評価法を規定している。ここでは、等価設計波に基づく 4 種類の荷重を負荷し、梁理論に基づき、ロンジに生じる軸応力及び局部曲げ応力を導出する。さらに、それらに応力集中係数を乗じてホットスポット応力範囲を求め、S-N 線図に照らし合わせることでマイナー則により疲労被害度を導出する。

最近の建造船のロンジ端部結合部は、疲労の観点から十分に対策されているが、C 編のロンジ端部結合部の疲労評価の要求値は、旧 C 編の要求値より小さいとの指摘があり、調査したところ、1980 年代頃建造の第二世代シングルハルトankerのサイドロンジの損傷と傾向が合わないことが分かった。

C 編と旧 C 編で要求する疲労強度が異なっているのは、2 つの荷重成分の精度を向上させたことが原因であると考えられる。その 1 つ目は、喫水線位置での波浪変動圧が最大になる横波の荷重ケース (BP) において考慮する波浪変動圧を合理化したことである。この荷重ケースにおける波浪変動圧を長期予測により導出する際に、従来は横揺れが最大となる条件の応答も含んでいたことから、過度に安全側だったものに対して、C 編では精度を向上させている。2 つ目は、縦曲げモーメントによる軸応力を合理化したことで、評価に用いる軸応力を導出する際、旧 C 編では、全ての荷重ケースにおいて、垂直曲げモーメント及び水平曲げモーメントの二乗和平方根を考慮していたのに対し、C 編では、荷重ケースごとに異なる縦曲げモーメント成分の組み合わせを考慮することで精度を向上させている。

本改正においては、時限的な対応として、過去の損傷と対応を取るべく、サイドロンジの疲労クライテリアを修正した。改正点は次の 3 つである。

- (a) サイドロンジのクライテリアを次のとおり改める。なお、クライテリアを厳しく設定する範囲は横波が支配的なロンジ ($0.3T_{sc}$ から T_{sc} 間のサイドロンジ) に限定している。

$$\eta \cdot \eta_l^3 \cdot D \leq 1.0$$

ここで、 η_l は次による。

$0.3T_{sc}$ から T_{sc} の範囲のサイドロンジ：1.44

その他のロンジ：1.0

- (b) コンテナ船のロンジ端部結合部の疲労評価で考慮する積付状態と設計寿命間にその積付状態が占める時間比率に関して、従来、コンテナ貨物が各貨物倉に均等に積載された状態（バラスタタンクは満載）を時間比率 100 %で考慮していたものを、コンテナ貨物が各貨物倉に均等に積載された状態（バラスタタンクは満載）とコンテナ貨物が各貨物倉に均等に積載された状態（バラスタタンクは空）を 50 %ずつの時間比率で考慮するよう改める。従来の要件は、満載状態にもかかわらずバラスタタンクを満載で考慮することで、タンク内のロンジ端部結合部において、平均応力が引張状態になる疲労強度上非常に厳しい状態のみを考慮していたが、前(a)のクライテリア調整に伴い、従来の積付状態の考慮だと、過度に安全側の評価になり、それに対応することが目的である。

- (c) $0.82T_{sc}$ 直下のロンジの端部形状を $0.82T_{sc}$ から T_{sc} の間維持するよう改める。コンテナ船の疲労強度評価において考慮する積付状態に対応する喫水は、長期間で使用される航行状態の喫水として、 $0.82T_{sc}$ を用いている。この値は、積付状態に対する喫水を、その積付状態で航行した日数で重み付けし、平均的な喫水を算出したものであるが、この喫水以上で長期間航行する場合もあることから、そのような状態にすべく、 $0.82T_{sc}$ から T_{sc} の間はロンジ端部結合部の形状、つまり、応力集中の程度を一定にすることを要求するものである。

なお、今後、荷重と疲労評価の精度向上を目指す予定であり、スペクトル疲労評価により応答や荷重についての検討及び疲労の不確実性についての検討を実施する。

- (5) コンテナ船のロンジ端部結合部（隔壁貫通部）の疲労強度評価における相対変位影響の簡易的評価法の規定（2-1 編 9.3.3 関連）：

コンテナ船は、隔壁貫通部におけるロンジの相対変位影響を考慮する必要があるが、コンテナ船の疲労解析については、断面モデルを用いた簡易解析を実施しているため、ロンジ端部結合部の疲労強度評価において、相対変位による影響を考慮する場合、疲労荷重を負荷した 3 ホールドの有限要素解析を行う必要がある。しかしながら、コンテナ船においては、疲労荷重を負荷した 3 ホールドの有限要素解析は実施しておらず、相対変位影響を考慮するためだけに本モデルを作成するのは合理的でないため、簡易的に評価できる手法の開発が望まれていた。そのため、現存のコンテナ船を用いて検討を実施し、コンテナ船に対する隔壁貫通部のロンジ端部結合部の疲労強度評価における、相対変位による影響の簡易的な評価法として、相対変位影響を考慮しない場合の疲労被害度を 3 倍することで良いこととし、これによらない場合には、貨物倉解析により相対変位を導出する旨規定した。なお、バラスタタンク内のサイドロンジについては、ソフトな形状の裏当てブラケットがついていることを前提としている。

- (6) スチールコイル荷重及び強度評価する多段積みを考慮した要件の改正（C 編 2-5 編 4.4.2.1-1., 4.4.2.1-4., 表 4.4.2-1.表 4.4.2-2., 表 4.4.2-3., 10.1.3.1, 10.1.3.2, 10.1.4.1, 10.1.4.2, 10.1.5.1 関連）：

C 編 2-5 編 4 章及び 10 章には、それぞれスチールコイルによる荷重と当該荷重に対する寸法算式を規定している。ここで考慮する加速度や腐食は、その他の C 編の強度要件（例えば局部強度要件等と同じ）であるが、当該要件固有の特徴として、ダンネージを介した荷重の特徴、コイル間の摩擦影響を考慮した荷重の考え方等が挙げられ、それらについては 1970 年代に行われた業界研究、通称 SR166 の知見に基づいている。この SR166 の検討は、主に 1 段積をターゲットにしており、2 段積及び 3 段積といったケースにおいて、横傾斜時に側壁等に作用する荷重については不透明なところがあったため、それらの状態を含めた様々な荷姿を再現して、非線形有限要素解析によるシリーズ計算に基づく検討を行い、当該検討結果を踏まえ、関連要件を改正した。主な改正点は次に示す 2 点である。

まず 1 点目は、荷重関連で、2-5 編 4 章に規定する荷重要件のうち、縦通隔壁、サイドフレーム、ホッパ斜板について、多段積に対応するべく改めた。加えてホッパ斜板については、ヒープやピッチが支配的な状態の荷重ケースも考慮するよう改めた。これは、ホッパ斜板に対する荷重が、内底板で考慮するような荷重と縦通隔壁やサイドフレームで考慮するような荷重のいずれかが支配的になるかは、条件によるためである。また、この改正に伴い、規則の前提条件についても、設計条件として選定した積付段数についての前提を明記するよう改めた。

2 点目は、寸法算式の適用範囲等に関するもので、本要件による要求板厚等は、コイルが接しない部分には適用する必要がない旨を明記した。また、3 段積を設計条件とした場合に、サイドフレームに複数の接触点が生じることを考慮した強度評価手法を規定した。

以降では、改正内容の 1 点目に関しての技術背景を説明する。まず、各部材に作用する荷重に関するデータを得るために、まず解析手法（メッシュサイズ影響、コイルや部材の剛性影響、接触及び摩擦の考慮の仕方による影響）を確立した。ここでは、解析結果と SR166 の実験結果を比較することで、解析手法を検証している。接触判定の違いによる影響の例を図 1 に示す。縦軸は、ダンネージを介して内底板に作用する圧力であり、非線形コンタクトを考慮することで、SR166 における実験値を良く再現できていることが分かる。また、あるコイル配置においてキーコイルの位置を変えた場合、横傾斜時に側壁に作用する荷重について検証も実施している（図 2 参照）。今回確立した手法により、側壁に作用する荷重が実験値と良い一致を示していることが分かる。

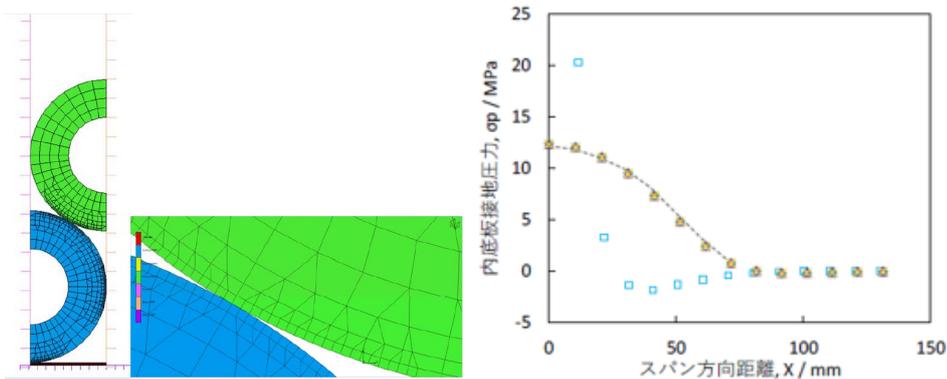


図1 非線形有限要素解析手法の検証（SR166 との比較）の例（接触の取扱い）
 （オレンジ点：非線形コンタクト，青点：線形コンタクト，黒点線：SR166 の実験値）

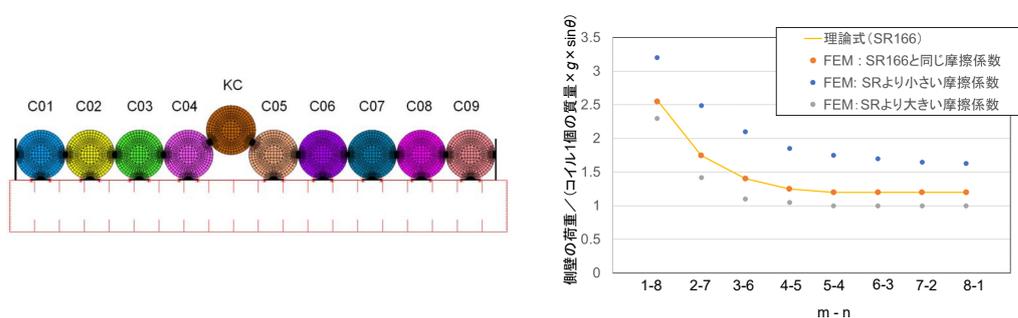


図2 非線形有限要素解析手法の検証（SR166 との比較）の例（側壁に生じる荷重）

本改正に先立ち、非線形有限要素解析によるシリーズ計算を行い、多段積及び横傾斜時において、側壁やホップ斜板に作用する荷重について検討を行った。具体的には、図3に示す荷姿を標準とし、摩擦係数による影響、キーコイルの食い込み具合の影響等、幾つかの要素についてバリエーションを持たせて荷重を算出した。なお、荷姿については、日本鉄鋼協会が過去に発行したスチールコイルの積付・保定基準の文書を参考にしている。なお、1段積で、且つ、側壁が垂直であるケースは、SR166 で十分な検討が行われていることから、シリーズ計算の対象外とした。

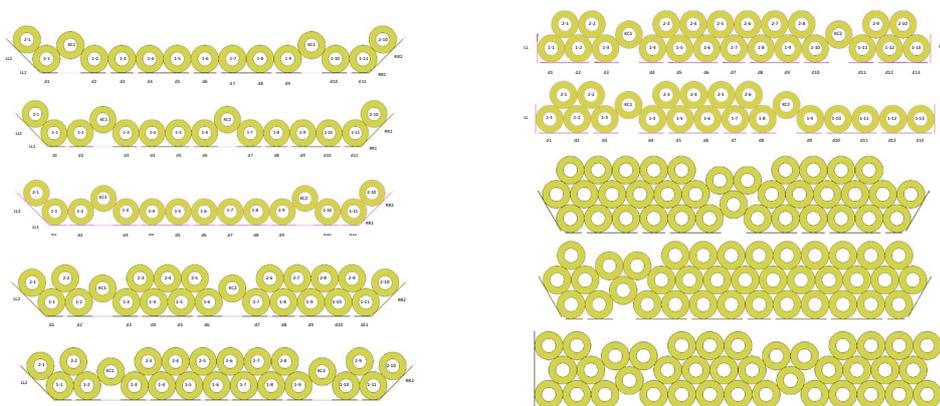


図3 非線形有限要素解析で考慮したスチールコイルの荷姿例

シリーズ計算で得られた結果の一例（2段積みで20度傾斜時）を図4に示す。上図が横傾斜時におけるミーゼス応力の分布で、下図が、側壁に作用する荷重（赤矢印）とタンクトップとコイル間に作用する摩擦力（青矢印）の値を示している。この場合、横傾斜が20度であることから、摩擦の影響が無い場合を仮定すると、力の釣合いの観点から、コイル1個当たりの重量、コイル総数、sin 20度を掛け合わせた

値、つまりコイル 8.6 個分に相当する荷重が側壁に作用することになる。しかしながら、解析結果からコイル 2.34 個分の力しか発生していないことが分かる。これはコイルとダンナー間の摩擦力（多くの場所で、コイル 0.6 個分程度の力が発生）が生じることで、コイルの回転が止められることが原因であると考えられる。摩擦力は、荷姿や固縛等の様々な要因で変化するが、その他のケースにおいても同様の状態になることがシリーズ計算より確認できた。

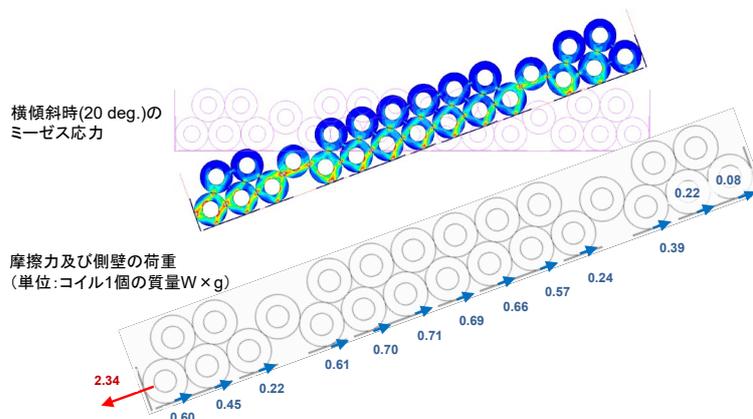


図 4 非線形有限要素解析結果の一例（2 段積みで 20 度横傾斜時）

シリーズ計算の結果に基づき、スチールコイルに関する荷重算式を改めた。縦通隔壁及びサイドフレームの場合は、SR166 の式 ($C_2 \cdot Wg \cdot \sin\theta$) に積付段数 n_1 を乗じることで発生する荷重を再現した。また、ホップ斜板の動的成分は、縦通隔壁の式に対して、斜板の直交方向に対する成分 (cos 成分) を抽出することで、荷重を再現した。なお、斜板が水平に近い場合に SR166 で確認された現象と乖離することが観察されたことから、cos 成分に最小値を設定した。ホップ斜板の静的成分については、積付段数に応じた補正係数を与えた。これはホップ斜板に隣接するコイルの上に配置されるコイルの影響を考慮したもので、下段のコイル 2 個の真ん中に上段のコイルが配置されることから、下段のコイル 1 個当たりにつき、上段のコイルの半分の荷重を受け持つが、自然な配置であれば下段のコイルは内底板とホップ斜板の双方に接することから、その分担を考慮している。

今回の改正で規定した荷重と有限要素解析による荷重の比較を図 5 に示す。数点を除き、45 度線の上にプロットがある、つまり、FEM の荷重より算式の値のほうが大きく、原則として、安全側の定式化ができています。45 度の線より右下側の数点は摩擦係数が SR166 で考慮している係数より小さかったり、固縛の影響が含まれていなかったり等の理由により、実際の現象より荷重が大きくなる可能性が高い条件であり、これらをカバーする荷重算式は過剰評価になると判断した。

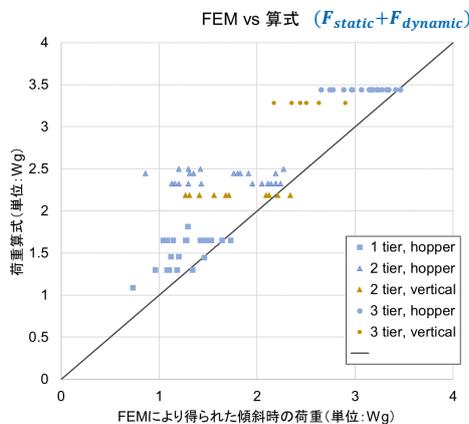


図 5 算式と有限要素解析による荷重の比較

参考として、近年コイルの大型化が進んでいることを受け、その影響について解析を用いて検討を行った。結果として、大型化による影響はなく、大型化による規則改正は必要ないと判断した。理由として、円形断面のコイルと板部材が接する面積は弧の極一部に限られ、この面積はコイルの直径によりそこに生じる集中荷重により変形が生じる。その接するエリアは、コイル直径でほとんど変化せず、結果的に板部材に生じる変形も大きく変わらないためである。

- (7) 自動車運搬船及びロールオン・ロールオフ船の最小要件の適用明確化(C編 2-6編 3.1.1.1, 3.1.1.3, 3.1.2.1, 3.1.2.2, 図 3.1.2-1.関連) :

C編に規定される船側外板に対する最小板厚要件として、1編 3.5.1.1には2つの算式が規定されており、3.5.1.1-1に規定されるベースラインから乾舷甲板から標準船楼高さの2倍までの高さに対する要件、及び3.5.1.1-2に規定されるそれより上方に対する要件がある。

PCCのような大きな船楼側部の外板を持つ船に対しては、当該箇所においては後者の要件が適用されるが、特に船楼側部外板上部においては荷重もかからず大きな応力は発生しないため、この広い範囲にわたって一律の最小板厚を要求するのは過度に安全側になるといった現状があった。

そこで、今回PCCにおける船側外板の最小板厚要件について見直すこととするとともに、船側外板に対する強度評価要件の見直しを行い、PCCの重要な強度基準であるラッキングに時に発生する上下方向応力に基づく細長比要件を規定した。