

海上貯油施設における係留用防舷材の取替基準の検討

大村 厚夫*・山本 修司**・大川 大一***・森 雅彦****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

** (一財) 沿岸技術研究センター 業務執行理事

*** (一財) 沿岸技術研究センター 主任研究員

**** 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油備蓄部基地管理課 担当調査役

国家石油備蓄基地では、大型ドルフィンに据え付けたセル型ゴム防舷材で、大型貯蔵船を継続係留している。この係留用防舷材は、風・波浪等の動的な力が常に作用する外部環境で使用される「係留システムの“要”」であり、強度・耐久性に対して十分な配慮のもとで維持管理されている。船舶接岸用のゴム防舷材が、目視可能な損傷・劣化を理由に通常 20～30 年の供用期間で更新されているのに対して、これら係留用防舷材についてはこれまで取替えの実績がない。本業務は係留用ゴム防舷材について、供用後 40～50 年程度を想定した劣化寿命等を調査・評価し、「貯蔵船係留用ゴム防舷材の取替基準」を作成することを目的に、3 カ年計画で実施するものである。

本稿では、取替基準策定にあたっての技術的要素と検討手順の概要を紹介する。

キーワード：洋上備蓄基地、海上貯油施設、係留用ゴム防舷材、取替基準、劣化予測

1. はじめに

上五島及び白島の両洋上備蓄基地は、国家石油備蓄基地計画の一環として 1984 年に建設工事が着手され、それぞれ 1988 年・1996 年に完成し現在に至っている。

防波堤によって囲まれた泊地に、原油タンクとなる貯蔵船を係留する世界初の洋上石油備蓄基地の係留システムは、風・波等の外力によって常に動揺する貯蔵船を、継続係留する極めて特殊な施設である。貯蔵船係留用のゴム防舷材は、船体動揺によって生じる外力エネルギーを吸収し、船体と係留施設の損傷防止を図るための重要な設備である。供用後 20 年以上経過していることから、機能低下の有無を確認し、今後の更新に備えた「取替基準」を策定すべき時期に来ている。

2. 貯蔵船係留システムの概要

両備蓄基地における貯蔵船係留システムは、浮遊するバージ型貯蔵船をセル型ゴム防舷材を介してドルフィンで係留する方式である。

2.1 洋上石油備蓄基地の規模

両備蓄基地の概要を示す。

表-1 洋上備蓄基地の概要

	上五島石油備蓄基地	白島石油備蓄基地
面積	陸域：約 26ha 海域：約 40ha	陸域：約 14ha 海域：約 60ha
備蓄方式	洋上タンク方式	洋上タンク方式
備蓄施設容量	約 88 万 kl × 5 隻	約 70 万 kl × 8 隻
貯蔵船	L390m × B97m × H27.6m	L397m × B82m × H25.4m
完成年	1989 年オイルイン	1997 年オイルイン

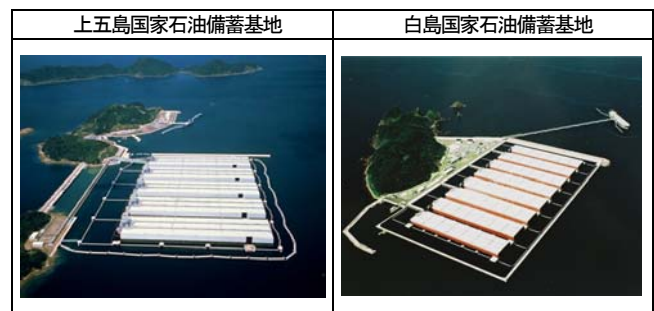


図-1 洋上石油備蓄基地の全景

2.2 上五島国家石油備蓄基地の係留システム

(1) セル型防舷材システム

定反力型防舷材

- ① C3000H (横係留用) 8 基/隻, 全 40 基
- ② C2250H (縦係留用) 4 基/隻, 全 20 基

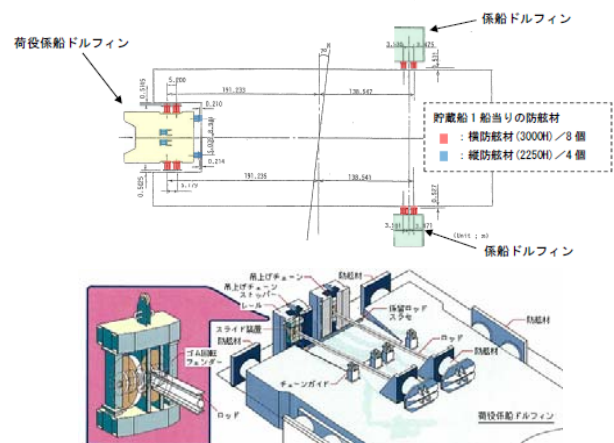


図-2 上五島備蓄基地係留システムのイメージ

(2) 係船ドルフィン

コンクリートケーソン重力式

- ① 横係留用 6基 (B1～B6)
 ② 縦・横係留用 5基 (L1～L5)

2.3 白島国家石油備蓄基地の係留システム

(1) セル型防舷材システム

定反力型防舷材

- ① C2500H (横係留用) 12基/隻, 全96基
 ② C2500H (縦係留用) 4基/隻, 全32基



図-3 白島備蓄基地係留システムのイメージ

(2) 係船ドルフィン

コンクリートケーソン重力式

- ① 縦・横係留用 18基 (No. 1～No. 18)

3. セル型ゴム防舷材の採用条件

3.1 セル型防舷材の性能

セル型防舷材は中空円筒形で、「高い吸収エネルギーと低い反力」を両立した定反力型のゴム防舷材である。

以下に受衝板付きゴム防舷材の部材構成とセル型防舷材 (SUC2500H) の性能曲線を示す。

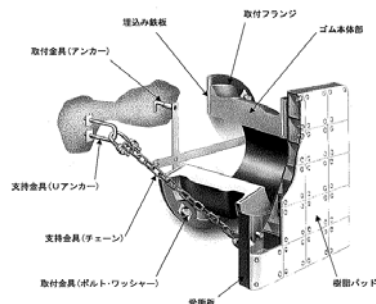


図-4 受衝板付きゴム防舷材の部材構成

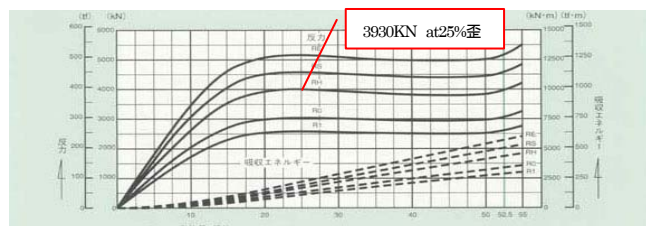


図-5 SUC2500H の性能曲線

なお、防舷材の反力・吸収エネルギーは、ゴム質を変えることにより選択可能であるが、基地建設時はゴ

ム質RHが採用されている。

3.2 防舷材特性

港湾の施設の技術上の基準・同解説 (昭和 55 年 9 月) の「海上貯油基地施設」に準拠し、防舷材の特性は以下となっている。

表-2 定反力型防舷材の特性変化

項目	変動幅 (ただし、公称特性曲線について同一歪に対する荷重の変動幅)
製造上の誤差	0.95～1.05 (防舷材の組合せを工夫することにより係留点毎のバラツキは±5%以内を建設時に確保する)
経年変化	1.0～1.05 (厚肉大型防舷材の場合)
動的特性	1.0
クリープ特性	防舷材に作用する定常外力又は平均荷重が当該防舷材の10%歪みを上回る場合、特性が著しく不安定になるので、定常外力又は平均荷重はこの範囲内にあるものとする。
繰返し性状	0.9～1.0 (40%変形・波数10波に相当する特性)
傾斜圧縮特性	1.0 (軸直角方向力を軸方向力の10%以上とする特性)
温度特性	0.95～1.04 (40℃～15℃に対応)
総合評価	硬化時: 標準特性×1.15 (1.05×1.05×1.04) 軟化時: 標準特性×0.80 (0.95×0.9×0.95)

3.3 係留シミュレーション

(1) 数値シミュレーション

貯蔵船に係る係留施設は、模型実験と数値シミュレーションとを適切に組み合わせることで推定する方法を採用している。具体的には、線形ポテンシャル理論に基づく三次元特異点分布法により流体力 (付加質量・造波減衰力・波強制力) を算定し、係留装置を非線形なばねの復原力としてモデル化 (ヒステリシス考慮) する。貯蔵船の構造質量や復原力等から構成される運動方程式を時間領域で解くことにより、貯蔵船の運動や係留歪・係留反力等を計算する方法を採っている。なお、計算プログラムは、船体運動計算プログラムと統計処理プログラムから構成されている。

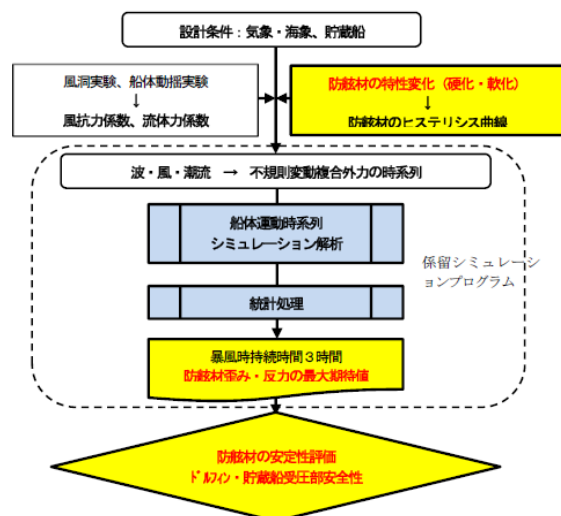


図-5 数値シミュレーションの計算プロセス

(2) 環境外力条件

係留施設の設計にあたっては、安全確保を特に重視して、自然条件の再現期間を100年としている。

表-3 両石油備蓄基地の計画自然条件

	再現期間	風	波浪	潮流
空載 ～ 半載	20年	44m/s	上五島： $H_{1/3}=0.32\sim0.77\text{m}$ 白島： $H_{1/3}=0.20\sim0.25\text{m}$	上五島のみ 0.5kn を考慮
半載 ～ 満載	100年	51m/s	上五島： $H_{1/3}=0.38\sim0.95\text{m}$ 白島： $H_{1/3}=0.25\sim0.30\text{m}$	

(3) 貯蔵船の動揺によって生ずる外力

係留施設は貯蔵船の動揺によって生ずる外力等に対して十分に安全な構造とするものとし、以下の標準値が採用されている。

表-4 動揺による外力の標準値

対象	標準値・判定条件
係船ドルフィン 貯蔵船受圧部	数値シミュレーションにより算定された防舷材最大反力とする。(ドルフィン1.5倍)
係留用防舷材	① 数値シミュレーションにより算定された定常外力(周期10分以上の長周期変動も含む)による防舷材変形(歪量)が、10%以下であること ② 数値シミュレーションにより算定された変動外力も含めた全荷重による最大防舷材変形(歪量)が35%以下であること

4. ゴム防舷材の劣化要因

4.1 ゴム防舷材の劣化要因

ゴム防舷材の主な構成材料である「ゴム」は、金属や無機材料または皮革など天然素材と比べて劣化し易い。ゴム・プラスチックは自然環境下に曝されているうちに物理的・化学的作用を受け、徐々に本来の特性を失い実用に耐えられなくなり、崩壊・分解する。ゴム・プラスチックは、熱水・紫外線・オゾン・窒素酸化物・イオウ酸化物によっても影響を受ける。

以下に係留用ゴム防舷材の劣化要因の模式図を示す。

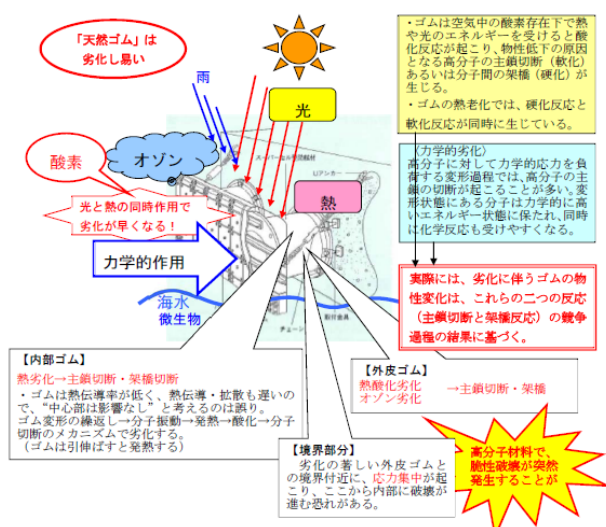


図-6 劣化要因の作用イメージ

4.2 ゴムの劣化要因と現象

ゴムの劣化要因には、自然環境要因、化学的要因、疲労要因、外力要因がある。劣化要因と現象を体系的にまとめたものを以下に示す。

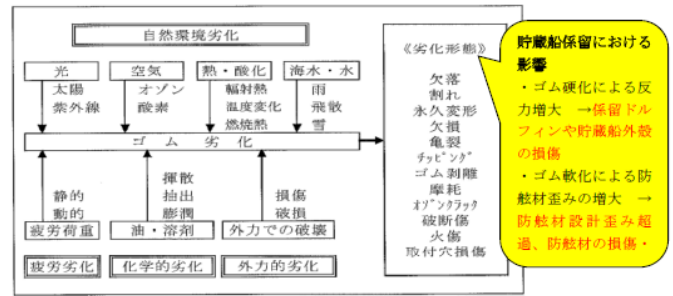


図-7 ゴムの劣化要因と現象

5. 防舷材性能特性を把握する方法

防舷材のような肉厚部材の40・50年後の性能特性を推定する方法が確立されていないため、本業務では、以下の3つの方法を通して推定する方針である。

- ① 実機防舷材の圧縮試験による方法
- ② 室内促進劣化試験による方法
- ③ FEMにより性能特性を再現する方法

5.1 実機防舷材の圧縮試験による方法

係留用実機防舷材は供用後28年経過時点、接岸用については39年経過時点迄の実機圧縮試験結果が整理可能である。防舷材の性能特性は、これら実測結果に「外的使用環境」の影響を考慮して、外挿法にて40・50年経過後の性能を推定する方法がある。これまでの実測値によると、供用後の性能特性は少し硬化側に推移している模様である。

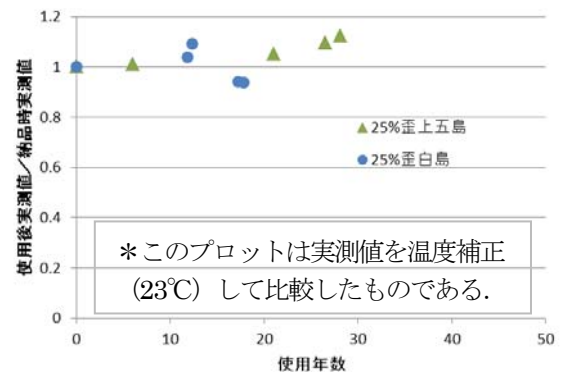


図-8 係留用防舷材の経過年数と反力比

5.2 室内促進劣化試験による方法

ゴム防舷材は屋外使用のため、「紫外線」と「熱」の影響が大きい。ゴム材料サンプルシートおよび縮尺模型(100H)について人工促進曝露試験を実施し、引張試験・硬さ試験・繰返し耐久試験を行ってゴム防舷材の性能低下を推定するものである。

ただし、模型スケールのちがいは表面劣化の影響が浸透しにくい実機防舷材の内部ゴムの劣化範囲・程度との差異となって性能特性に影響するため、「縮尺模型の劣化モデル」については修正・検証が不可欠である。

5.3 FEMにより性能特性を再現する方法

室内促進劣化試験による方法から得られたゴム材料の劣化状態をFEM解析の入力パラメータに反映することで、40・50年を経過した防舷材の性能特性を推定する試みである。

この方法では、事前にFEM解析モデル・入力パラメータ及び解析結果としての性能曲線のキャリブレーションが不可欠である。このため、供用ゼロ年及び供用28年経過時点の実機防舷材の圧縮試験結果を用いて再現性をチェックし、その後室内促進劣化試験の結果を適用する計画である。

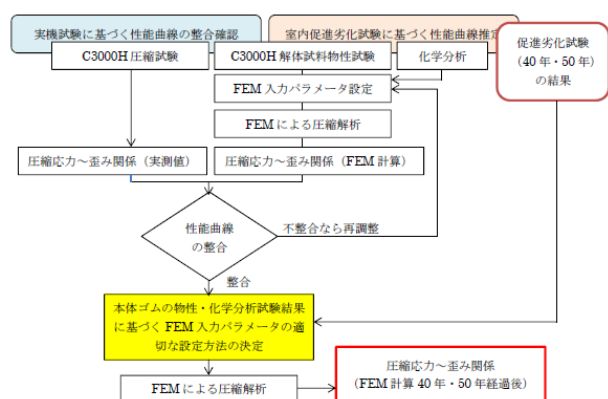


図-9 FEMによる性能特性の推定方法

6. 今後に向けて

係留用ゴム防舷材の取替基準策定において、防舷材が使用される外部環境や実機防舷材のゴム厚を考慮した時、供用後20年以上経過した実機防舷材の圧縮試験結果から得られる「性能特性」の信頼性は高いと想定される。しかしながら、試験体数が限られること、外挿補間法ではゴム劣化の傾向が将来的に「硬化から軟化に変化」する場合、「ゴム性能が急変」する場合を早い段階で予測することは困難である。したがって、室内促進劣化試験や採取ゴムの化学分析等の結果を反映した総合的な判定が必要である。

平成26年度以降の調査検討では、以下を実施する予定である。

なお、室内促進劣化試験における50年相当の曝露期間は2年程度を想定している。

6.1 係留用実機防舷材（供用28年）の解体試験

上五島備蓄基地で供用されてきた係留用実機防舷材1基について圧縮試験を実施した後、内部くり抜きゴムの物性試験（引張・伸び・硬度）によって劣化影響深さを把握する。

6.2 促進劣化させたゴム材料の試験

ゴムの劣化状態を定量的に把握するため、室内試験サンプルについて物理試験を行い、必要な場合には化学分析（ガラス転移点、組成分析、分子構造、加硫密度等）を行う。

6.3 FEM解析による防舷材性能特性の再現

係留用実機防舷材の試験から、28年供用後の防舷材性能曲線と内部ゴムの劣化影響深さが設定できる。内部ゴムの劣化程度・分布をFEMモデルの入力パラメータに反映し、実機防舷材の性能曲線を再現する方法を検討する。更には40・50年経過後の性能曲線を推定する。

6.4 取替基準のイメージ

防舷材の取替基準は、経年劣化した防舷材の性能特性を考慮して実施される係留シミュレーション結果における「防舷材の最大反力と最大歪み」が目安となる。40・50年経過した時点の最大反力や最大歪の推定値が、図中の「緑色」の範囲にプロットされるか否かを、性能のバラツキを考慮した判定図として作成する。

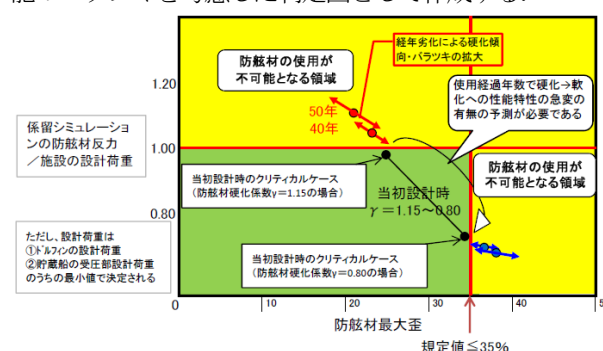


図-10 貯蔵船係留用ゴム防舷材の取替基準イメージ

7. 謝辞

本稿は、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構資源備蓄本部発注の「平成25年度国家石油備蓄基地の貯蔵船係留用防舷材の取替基準等に関する調査業務」の一部を取まとめたものである。

業務にあたっては、「同検討委員会（委員長：上田茂鳥取大学名誉教授）」の委員及び関係者から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局監修、(社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、昭和55年9月
- 2) (一財)沿岸技術研究センター：ゴム防舷材の維持管理ガイドライン(改訂版)、平成25年3月
- 3) 上田茂：浮体橋に使用する係留用ゴムフェンダーの特性、海洋工学シンポジウム、平成10年7月
- 4) 大武義人：劣化と寿命予測、第189回ゴム技術シンポジウム2013年2月5日
- 5) 上五島石油備蓄・海上タンク貯蔵所申請図書(第5/14巻)、昭和63年
- 6) 白島石油備蓄(株)：港湾施設詳細設計見直し業務報告書II.係船ドルフィン設計計算書・数量計算
- 7) 上五島石油備蓄株式会社：上五島国家石油備蓄基地のご案内
- 8) 白島石油備蓄株式会社：白島国家石油備蓄基地の概要