

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1101

March 2020

防舷材の使用環境を考慮した設計法の導入に向けた検討

中村健・中村俊之・宮田正史・米山治男・加島寛章

Study for revising of a design method considering the usage environment of fenders

NAKAMURA Takeshi, NAKAMURA Toshiyuki, MIYATA Masafumi, YONEYAMA Haruo
, KASHIMA Hiroaki

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1101

March 2020

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕
E-mail:ysk.nil-pr@gxb.mlit.go.jp

国土技術政策総合研究所資料

No.1101

防舷材の使用環境を考慮した設計法の導入に向けた検討

March 2020

防舷材の使用環境を考慮した設計法の導入に向けた検討

中村 健*・中村俊之**・宮田正史***・米山治男****・加島寛章*****

要 旨

防舷材は、船舶の係留施設への接岸・係留時に、船舶と係留施設の双方の損傷を防止するために設置されるものであり、国内ではゴム防舷材が採用されることが多い。ゴム防舷材の性能は、船舶接岸時に防舷材が吸収できるエネルギー量と防舷材からの最大反力により評価される。ゴムの材料特性から見ると、温度や船舶の接岸速度といった使用環境によりゴム防舷材の性能は変化し、海外では性能変化を反映できる設計も行われている。

近年、国内でもゴム防舷材のより合理的な設計法と試験法が検討され、2018年に「ゴム防舷材の設計法と試験法に関するガイドライン」((一財)沿岸技術研究センター)の発刊により、使用環境を考慮したゴム防舷材の設計(新設計法)が可能となった。しかしながら、新設計法の導入に向けては、各港湾での設計温度の設定手法を定めるとともに、設計法の切替えによる防舷材の規格選定に及ぼす影響程度を予め確認する等の検証が必要である。

以上のことから、本検討では新設計法の適用を円滑に進めるために以下の検討を行った。まず、ゴム防舷材の特性と現行設計法について整理し、次いで国産防舷材を対象として使用環境による性能変化を表す3種類の係数値を防舷材メーカーより取得し、各係数の傾向等を示した。次いで全国の港湾の気温の統計データを基に設計温度の設定条件を検討し、参考値を算出した。最後に、温度および接岸速度等の影響を考慮した場合の吸収エネルギーと最大反力に及ぼす影響評価を行った。

検討の結果、新設計法の適用により現行設計法に比べてやや経済的な防舷材の選定が可能になる一方、製品により性能値の振れ幅が大きいため製品選定をより慎重に行う必要があること、寒冷地では反力値が大きくなる傾向にあることなどを示した。

キーワード：ゴム防舷材，温度条件，接岸速度，試設計

*港湾研究部 港湾技術担当課長
**港湾研究部 港湾技術担当係員
***港湾研究部 港湾施設研究室長
****港湾空港技術研究所 海洋研究領域長
*****港湾空港技術研究所 海洋研究領域 主任研究官

Study for revision of a design method that considers the usage environment of fenders

NAKAMURA Takeshi *
NAKAMURA Toshiyuki **
MIYATA Masafumi ***
YONEYAMA Haruo ****
KASHIMA Hiroaki *****

Synopsis

Fenders are installed to prevent damage to ships and mooring facilities during berthing and mooring, and rubber fenders are often used in Japan. The performance of rubber fenders is evaluated based on the amount of berthing energy they can absorb and the reaction force they produce. The performance of rubber fenders naturally changes with the usage environment, including its temperature and berthing speed.

In recent years, methods for evaluating performance changes have been studied in Japan, and the design of rubber fenders in consideration of their usage environment was made possible by the 2019 publication of the "Guidelines for Design and Testing of Rubber Fender Systems."

In this paper, we present the results of a basic study we conducted to effectively apply this new design method. First, we outlined the characteristics of rubber fenders and the current design method, then, we obtained three coefficient values that indicate the performance changes associated with the usage environment of domestic fenders. The tendency of each coefficient values is also presented. Next, based on statistical data, we determined the setting conditions and specific design temperatures of the air temperature at ports nationwide. Then, we evaluated the effects on the energy absorption and reaction force with respect to temperature and berthing speed, and trial designs were developed in accordance with the specific design conditions.

The application of this new design method enables the selection of fenders that are slightly more economical than those produced by the current design method. We also found that it will be necessary to select the product more carefully because the fluctuation range of product performance values is larger when all products are considered and the reaction force tends to be greater in cold regions.

Key Words: rubber fender, temperature, berthing speed, trial design

* Chief, Port Engineering Team, Port and Harbor Department, NILIM
** Technical Staff, Port Engineering Team, Port and Harbor Department, NILIM
*** Head of Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
**** Director, Coastal and Ocean Engineering Department, PARI
***** Senior researcher, Coastal and Ocean Engineering Department, PARI

目 次

1. はじめに	1
1.1 検討の背景	1
1.2 検討の概要	1
2. ゴム防舷材の特性と設計法	2
2.1 ゴム防舷材の特性と種類	2
2.2 現行設計法(港湾基準)	3
2.3 PIANC指針	4
2.4 国内におけるガイドラインの策定	6
3. 傾斜係数・速度係数・温度係数とその影響評価	8
3.1 概要	8
3.2 防舷材の試験方法と係数の算定	8
3.3 傾斜係数・速度係数・温度係数の傾向と特徴	9
4. 温度変化とその評価	13
4.1 概要	13
4.2 ゴム防舷材の温度変化への追随性	13
4.3 港湾周辺の気象台・気象観測所における気温変化	14
4.4 設計温度の設定	16
5. 設計法による性能値の相違	20
5.1 使用環境による影響の総合的評価	20
5.2 平行接岸での複合係数	20
5.3 5° 傾斜の場合の複合係数	20
6. 結論	22
謝辞	22
参考文献	22
付録A 国産防舷材の係数值一覧	23
付録B 熱伝導方程式による温度変化の試算	26
付録C 日平均気温に関する情報	28
付録D 新設計法による防舷材の試設計と手順	33

1. はじめに

1.1 検討の背景

防舷材は、船舶の係留施設への接岸・係留時に、船舶と係留施設の双方の損傷を防止するために設置されるものであり、国内ではゴム防舷材が採用されることが多い。ゴム防舷材の性能は、船舶接岸時に防舷材が吸収できるエネルギー量と防舷材からの最大反力により評価される。

ゴムの材料特性から見ると、温度や船舶の接岸速度といった使用環境によりゴム防舷材の性能は本来変化するものの、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾に基づく設計法（以下、「現行設計法」と表記する）では、これらの影響は考慮されていない。一般に、ゴムの温度が低くなるとゴムが硬くなるため、吸収エネルギーは大きくなり、反力も大きくなる。接岸速度（ゴムの圧縮速度）が大きくなると、同じ効果が発現する。一方、温度が高くなった場合や接岸速度が小さくなると、吸収エネルギー、反力とも小さくなる。

防舷材の設計に温度や接岸速度の影響を加味する動きは1990年代からあり、国際航路協会(PIANC)の会議等の場で議論がなされた結果、PIANCから2002年に“Guidelines for the Design of Fenders Systems: 2002”²⁾（邦訳：防舷材システム設計の指針：2002版³⁾）が発刊された。この指針では防舷材の温度や、接岸により防舷材を圧縮する速度の相違による影響を係数として与えて、使用環境による性能変化を反映することとしており、以後、海外ではこの指針に基づいた防舷材の設計がなされるようになってきた。

国内においても、PIANCの指針やそれに伴う海外での防舷材の設計法の変更状況は認識されてはいたが、統一された試験方法が確立されていなかったことなどから、PIANCの指針を国内の設計法に反映させるに至らなかった。しかし、2018年に「港湾の施設の技術上の基準・同解説」が改訂されることとなり、国内の防舷材製品についても性能変化を定量的に示すためのデータが蓄積され、影響を評価する試験法を統一できる環境となってきたことから、(一財)沿岸技術研究センターと国内防舷材メーカー5社(当時)により、PIANCの指針の内容を含むゴム防舷材のより合理的な設計法と試験法の検討立案が2015年にスタートした。

この検討結果については2017年に学識経験者や官民の港湾関係者による委員会にて更なる検討が加えられ、2018年に「ゴム防舷材の設計法と試験法に関するガイドライン」⁴⁾の名で(一財)沿岸技術研究センターから発刊された（以後、「ガイドライン」と表記する）。このため、

国内でもこのガイドラインに準拠し、使用環境を考慮したゴム防舷材の設計（以後、「新設計法」と表記する）を行うことができるようになった。

ガイドラインには、防舷材の吸収エネルギー（船舶接岸時のエネルギーを吸収できる限界値）の計算式が示されている。設計で考慮できる吸収エネルギーは、吸収エネルギーの規格値（メーカーの標準条件で計測した値）に対して5種類の影響要因（製造誤差、温度、接岸速度、船体が防舷材に接したときの傾斜角度、経年変化）を係数として乗じることで算出できる。同様に、防舷材の最大反力についても、これら5種類の影響要因を考慮して算出することができる。

現行設計法では、5種類の影響要因のうち製造誤差の影響は既に考慮されており、傾斜角度についても大型石油タンカー等の係留施設の設計では考慮されている。また、接岸速度は既存の設計でも必要となる設計条件であり、新設計法の導入にあたって大きな課題はない。経年変化については、現行設計法はもとより新設計法でも将来的な影響要因に留まっており、現時点では考慮されない。

しかしながら、温度については、新設計法の実務への適用にあたって大きく2つの課題がある。1点目は、各港湾で設計条件の一部として設計温度（上限、下限）を設定する必要があるが設定方法が明確ではないことである。温度条件の設定方法によっては、設計で用いる吸収エネルギーや最大反力の値が大きく変化するため、注意が必要となる。2点目は、新設計法の導入において防舷材の規格選定に及ぼす影響程度が確認されていないことである。各防舷材メーカーの技術開発の成果として、同じ基本形状と寸法の防舷材でも、製品によって吸収エネルギーや反力の規格値、温度や速度による性能変化に大きな差異がある。そのため新設計法では、製品選択の如何によって防舷材のサイズ、そして整備コストに大きな差が生じる可能性があり、設計の実務にあたっては十分に留意する必要がある。

1.2 検討の概要

以上のことから、本検討では新設計法の適用を円滑に進めるために以下の検討を行い、設計実務上の参考資料として活用すべき技術情報を取りまとめた。各章の構成・内容は以下に示すとおりである。

第2章では、ゴム防舷材の特性と国内外の設計法について概説する。ガイドラインについても、その記載内容と現行設計法からの変更点について述べ、設計法の見直しの必要性を示す。

第3章では、新設計法での吸収エネルギーと反力の算定



図-2.1 V型防舷材の例（各社公表資料より）



図-2.2 円錐型防舷材(受衝板付)の例（同左）

に影響を及ぼす傾斜係数・速度係数・温度係数の3種類の係数に着目し、各係数の概要、各係数の試験による算出方法、国内の防舷材メーカー4社から得た情報に基づく各係数値の傾向や製品によるばらつきについて述べる。

第4章では、国内各港で新設計法による防舷材の設計を適切に行うための温度設定について述べる。まず外気温の変化に対するゴム防舷材内部の温度変化について、既存の情報や熱伝導方程式に基づき確認し、次に国内の主要港湾での気温変化を、過去の気象観測データから求めて防舷材の温度環境の地域差を示す。そして新設計法での防舷材の設計温度の設定方法を整理するとともに、全国の港湾における設計温度を参考値として示す。

第5章では、現行設計法と新設計法での防舷材の設計結果の相違について明らかにする。5.1で新設計法による反力と吸収エネルギーを現行設計法による値と比較する方法を示し、5.2と5.3で2通りの接岸条件での新設計法の適用による反力と吸収エネルギーの増減程度を明示する。

第6章は全体の結論として、第3章から第5章までの結果を要約し、新設計法を適用する際の留意点を明示する。

2. ゴム防舷材の特性と設計法

2.1 ゴム防舷材の特性と種類

(1) ゴム防舷材の特性

防舷材の役割は船舶の係留施設への接岸時、及び係留中に船体が係留施設本体に接触する際のエネルギーを吸収し、船体と係留施設双方への衝撃を緩和することにある。船体が防舷材に接触し、さらに圧縮させる際に防舷材が変形することでエネルギーが吸収されることから、変形する間にできるだけ多くのエネルギーが吸収され、かつその間に防舷材の反力（船体と係留施設との間で伝

達される力）はできるだけ小さいことが望ましい。

現在、国内の係留施設に設置されている防舷材の多くは上記の変形特性を持たせるために、図-2.1、図-2.2に示すように、ゴム材料を利用し、かつ船舶の接岸等によるエネルギーを防舷材が変形しながら吸収できる形状をとっている。このようなゴム防舷材の反力を図化すると図-2.3のような形態を示す。図の横軸は変位、縦軸は反力、変位-反力曲線と横軸との間の面積が防舷材で吸収できるエネルギー量を表す。

ゴム防舷材の変位-反力曲線は、一般に小さな変位で反力が急増した後、漸増もしくは概ね一定の値を保ちつつ変位量が増し、その後再び反力が急増する形状をとる例が多い（定反力型ゴム防舷材と呼ばれる）。定反力型ゴム防舷材の許容変位量は、反力が2度目の急増に転じるまでとし、そこまでの吸収エネルギー、反力のピーク値（最大反力）が防舷材の性能と規定される場合が多い。本検討では、上述した定反力型ゴム防舷材を対象とする。

(2) ゴム防舷材の形状

防舷材は、使用形態による区分として、防舷材本体に受衝板を取り付け、受衝板を介して船体と接触するタイ

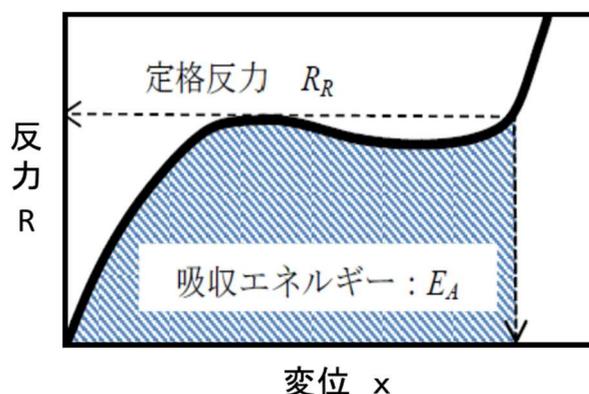


図-2.3 防舷材の反力と吸収エネルギー

ブと、防舷材自体が船体と接触するタイプに大別される。ゴム防舷材本体の種類としては、断面がV字状となっているV型(図-2.1参照)と、円筒型や円錐型(図-2.2参照)などに大きく分類される。V型では、防舷材のゴム部分が直接船体に接触して接岸エネルギーを吸収する。円筒型や円錐型では(一部のV型も)、鋼製の受衝板を介して接岸エネルギーを吸収する。コンテナバースや大型クルーズ船を対象とした係留施設では、大きなエネルギーを吸収できる円筒型や円錐型の防舷材が受衝板付きで用いられることが多い。円錐型は円筒型に比べ同寸での吸収エネルギーが大きく経済的なため、高さ2mを超える超大型のもの以外は円錐型が主流となっている。

2.2 現行設計法(港湾基準)

(1) 設計手順

国内での防舷材の設計手順は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説(2018)」¹⁾(以後「H30年基準」と表記する)に規定されている。

防舷材の設計では、図-2.4に示すように接岸時と係留時の双方の条件を満足する仕様を決定する。接岸時は、船体の一つの防舷材にのみ接触している状況を仮定し、当該防舷材だけで接岸エネルギーを吸収できるような防舷材の仕様を決定する。この際、係留施設側からの反力制限や船体側面の面圧制限、接岸時の船体の陸側への変位量に制限がある場合には、それらの条件も満足するように防舷材の仕様を決定する。

一方、係留時については、係留時の海象・気象条件下

で船体の動揺などにより、係留施設側からの反力制限、船体の変位制限、係留索の破断強度を超えないかを確認することになる。しかしながら、防波堤に囲まれ、うねりや長周期波の影響の少ない静穏な海象条件下では、接岸時の条件で防舷材の仕様が決まることから、係留時の照査は省略される場合が多い。このため、本検討においても主として接岸時を対象に議論を進める。

(2) 接岸エネルギー

現行設計法では、船舶の接岸時の接岸エネルギーは、次式にて算定される。

$$E_f = \frac{1}{2} M_s V_b^2 C_m C_e C_s C_c \quad (1)$$

ここに、

- E_f : 船舶の接岸エネルギー (kJ)
- M_s : 船舶の質量 (満載排水トン数DT, t)
- V_b : 船舶の接岸速度 (m/s)
- C_m : 仮想質量係数
- C_e : 偏心係数
- C_s : 柔軟性係数 (一般に1.0)
- C_c : バースの形状係数 (一般に1.0)

である。

(3) 吸収エネルギーと反力の照査

現行設計法では、防舷材の吸収エネルギーは前述の接岸エネルギー(式(1))を上回ることであり、その値

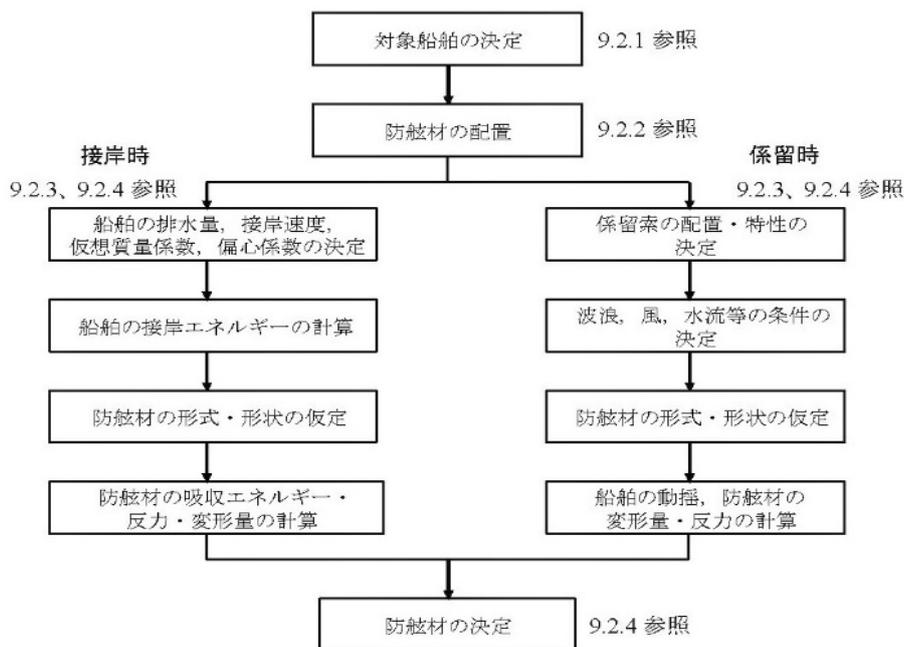


図-2.4 H30年基準に基づく防舷材の設計フロー (H30年基準より転載)

は次式で算出される。

$$E_s = \phi E_{cat} \geq E_f \quad (2)$$

ここに、

E_s : 防舷材の吸収エネルギー (kJ)

ϕ : 防舷材の製造上の誤差 (公差)

E_{cat} : 防舷材の吸収エネルギーの規格値 (kJ)

である。

上記の製造上の誤差については、一般に10%とされており、設計上安全側に評価するため吸収エネルギー算出の際は10%低減、すなわち係数 ϕ は0.9としている。なお、式(2)からわかるように、現行設計法では吸収エネルギー算出のために係数等乗じて補正しているのは防舷材の製造上の誤差のみであり、防舷材の使用環境を考慮する項はない。

次に、設計上の反力の値は、安全側に評価するために規格値を10%割り増した値としている。H30年基準においては、防舷材の選定に関して勘案すべき事項の一つとして、船舶の接岸時に発生する防舷材反力が係留施設の構造に与える影響を挙げており、栈橋構造の設計における「船舶による作用」の1つに、この防舷材反力が用いられる。

2.3 PIANC指針

(1) PIANC指針の概要

海外における防舷材の設計法として、国際航路協会 (PIANC) が2002年に公表した指針 (Guidelines for the Design of Fenders Systems: 2002) について概説する。本指針の原本は英文であるが、2005年に作成された邦訳 (防舷材システム設計の指針: 2002版) を引用元とする。

本指針の内容は、次の5つの章立てとなっている。

- ・防舷材システムの原理
- ・適用する防舷材システム
- ・防舷材システム設計細目
- ・設計供用期間に関する提案
- ・特別なケース (船種ごとの特記事項など)

また、付属書として、防舷材の試験方法、船舶の大きさ (各船種の載貨重量トン別の標準的な寸法等の一覧)、設計事例、仕様書作成指針 (メーカーへ提示する項目) が記載されている。

(2) PIANC指針による設計手順

PIANC指針による設計フローは図-2.5に示すように、現行設計法に比べ細かな記載があるが、「接岸船舶」と「係留船舶」の2通りについて設計検討を行う点は現行設

計法と同じである。防舷材の選定のプロセスについては「防舷材システム設計細目」の章に記載されている。

(3) 接岸エネルギー

PIANC指針による設計接岸エネルギーの算定式は、現行設計法の式(1)と同じである。ただし、船舶の質量 (本指針では排水量と表記) は通常95%信頼度レベル、接岸速度については50%信頼度レベル (すなわち平均的な値) を特性値として採用し、その一方で算定した設計接岸エネルギーにさらに「異常接岸係数」を乗じて計算接岸エネルギーを算出することとされている。対象船舶や接岸の頻度、接岸速度にもよるが異常接岸係数は1.1~2.0程度が標準であるとされており、これも乗じた計算接岸エネルギーの算定式は付属書Dの設計事例に記載されている次式となる。

$$E_v = \frac{1}{2} M_s V_b^2 C_m C_e C_s C_c C_{ab} \quad (3)$$

ここに、

E_v : 計算接岸エネルギー (kJ)

C_{ab} : 異常接岸係数

である。

(4) 吸収エネルギーと反力の照査

防舷材による吸収エネルギーと反力の算定手順と算定式については指針の本編には記載がなく、付属書Dの設計事例に記載されている。

算定手順は、(3)で算定された計算接岸エネルギー E_v と、設計条件として与えられた最大反力 R_v について、下記の式(4)~式(7)により、最小必要吸収エネルギー E と最大反力 R を求める。防舷材の温度については、設計条件として与えられた環境温度の最高値 T_{max} と最低値 T_{min} のそれぞれを用いて E と R を求める。

最小必要吸収エネルギー

$$E = E_v / (VF_E * TF(T_{max}) * 0.9) \quad (4)$$

$$E = E_v / (VF_E * TF(T_{min}) * 0.9) \quad (5)$$

最大反力

$$R = R_v / (VF_R * TF(T_{max}) * 1.1) \quad (6)$$

$$R = R_v / (VF_R * TF(T_{min}) * 1.1) \quad (7)$$

ここに、

E : 防舷材に要求される吸収エネルギー (kJ)

VF_E : 速度係数 (吸収エネルギー用)

VF_R : 速度係数 (反力用)

防舷材設計の基本
フローチャート

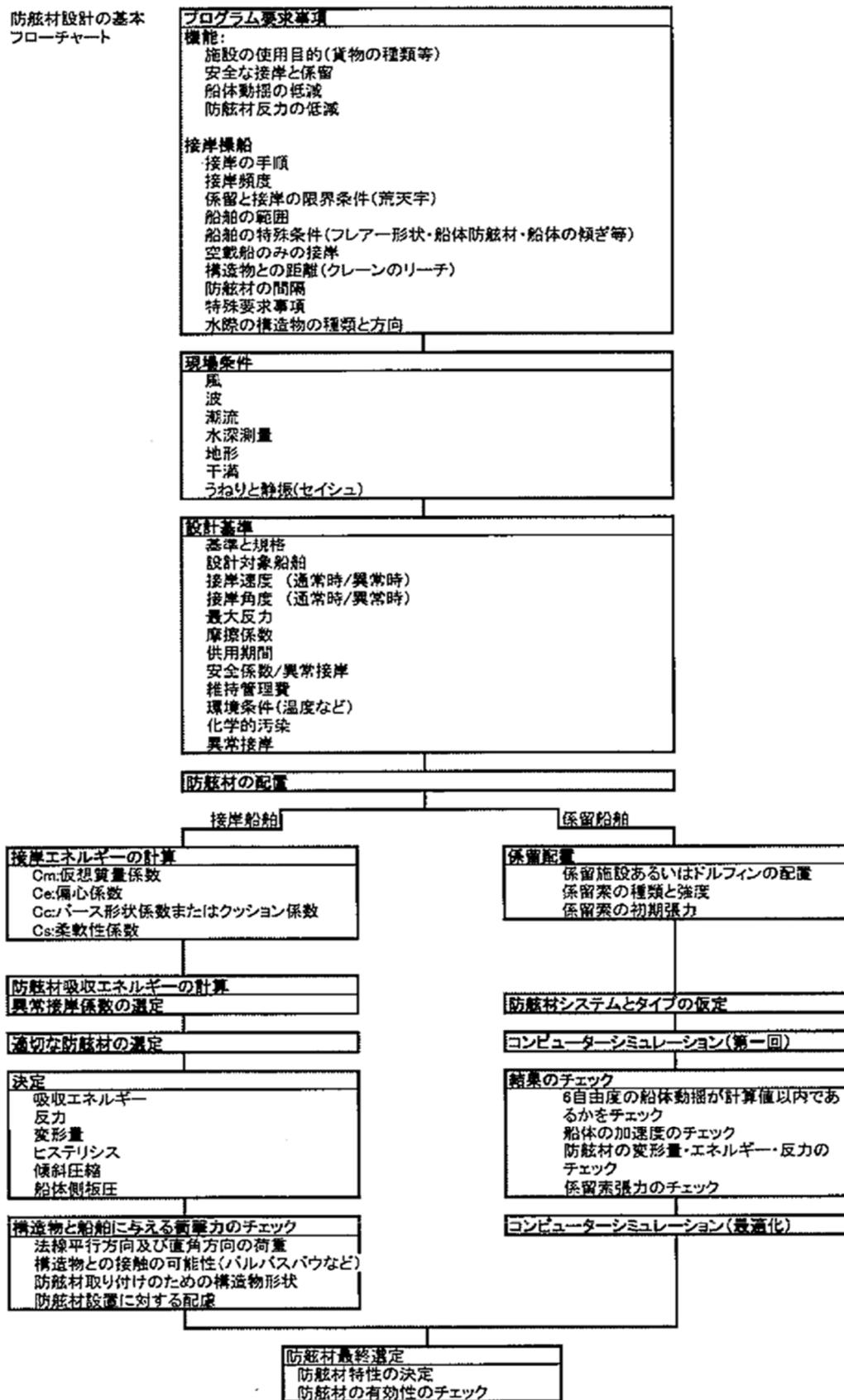


図-2.5 PIANC 指針に基づく防舷材の設計フロー (PIANC 指針より転載)

$TF(T_{max})$: 温度係数 (環境温度最高値時)

$TF(T_{min})$: 温度係数 (環境温度最低値時)

である。

式(4)と式(5)の右辺の0.9, 及び式(6)と式(7)の右辺の1.1は, 国内基準の式(2)の ϕ と同じく製造誤差10%を考慮するための係数である。

また, 速度係数と温度係数については, 設計条件から算定される吸収エネルギーや反力を防舷材製品の表示性能と適切に比較するための補正係数として用いている。

PIANCの指針における速度係数の初期値は接岸速度0.15m/sの条件, 温度係数の初期値は23℃の条件である。

最小吸収エネルギーは式(4)と式(5)の計算結果を比較して大きい側の値, 最大反力は式(6)と式(7)の結果を比較して小さい側の値を, それぞれ安全側の値として採用し, 最小吸収エネルギー以上かつ最大反力以下の規格値を持つ防舷材を選定する。

2.4 国内におけるガイドラインの策定

(1) ガイドラインの概要

本節では, 2018年に発刊された「ゴム防舷材の設計法と試験法に関するガイドライン」³⁾について概説する。

ガイドラインの構成は次のようになっている。

- ・ゴム防舷材の役割と種類
- ・ゴム防舷材の性能
- ・ゴム防舷材の設計法
- ・ゴム防舷材の試験法
- ・(付録) ゴム防舷材の設計事例

本節では, ガイドラインの記載の中から, 第3章以降の検討に直結する項目である防舷材の設計手順, 吸収エネルギーと反力の算定について概説する。

(2) 防舷材の設計手順

ガイドラインに記載の防舷材の設計手順を図-2.6に示す。本設計手順では, 接岸エネルギーを計算し, その後「性能影響要因の決定」として, 係留施設の構造形式や船舶係留時の動揺による防舷材の性能照査の必要性の有無から, 防舷材の設計で考慮すべき性能影響要因を選択することが示されている。図中の「係数パターンA」では製造誤差のみ考慮し, 「係数パターンB」および「係数パターンC」では製造誤差以外の影響要因も考慮することとしている。

3種類のパターン分けの内容は次のとおりである。

a) 係数パターンA

重力式や矢板式の岸壁のように, 岸壁背後に裏込土砂等を有する係留施設の場合, 陸側方向への水平力(接岸時の防舷材反力)の作用に対して耐力に余裕がある。また, 対象船舶に面圧の制約が無い, あるいはあっても700kN/m²以上の場合は, 自然環境や使用条件による防舷材の性能変化が係留施設の構造安全性に及ぼす影響は小さい。このため, 以上の条件下では, ゴム防舷材の性能照査にあたって製造誤差のみを考慮することで十分であるとされている。

係数パターンAに関しては, 影響要因はゴム防舷材の製造誤差のみであり, 現行設計法と変わらない。これには面圧や接岸力など, ゴム防舷材の反力に起因する制約がない場合は従来通りの設計法として設計者の負担を軽減するとともに, 吸収エネルギーの小さい小型船舶用の防舷材などの開発・製造にかかる負荷の増大を抑制するための配慮と考えられる。

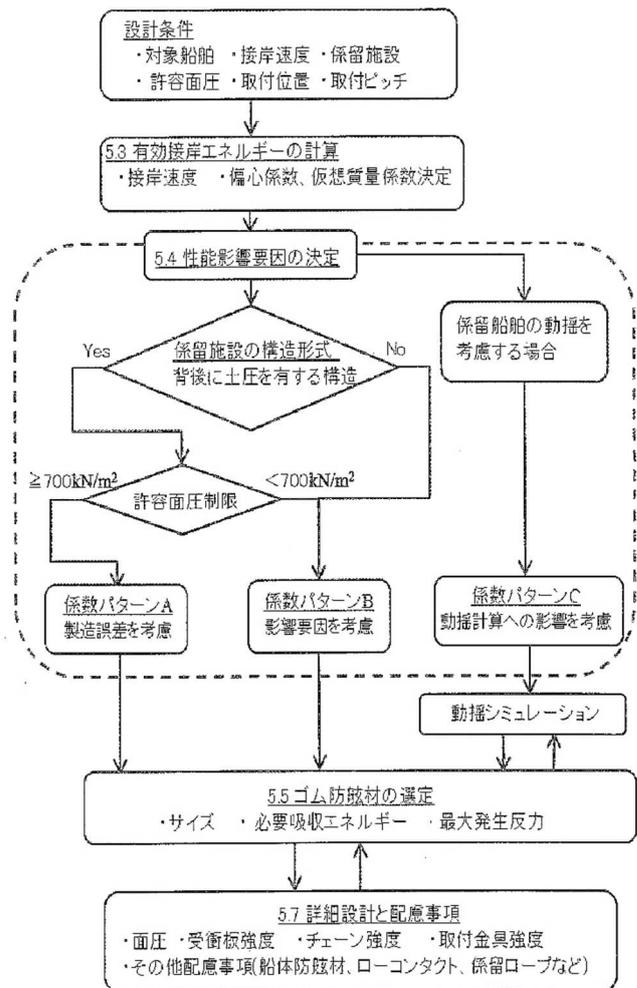


図-2.6 ガイドラインに基づく防舷材の設計フロー (ガイドラインより転載)

b) 係数パターンB

杭式栈橋やドルフィンのように、岸壁背後に裏込土砂等を有さない係留施設の場合、陸側方向への水平力（接岸時の防舷材反力）が設計の支配要因となる場合もある。また、岸壁背後に裏込土砂等を有する係留施設の場合であっても、大型コンテナ船など対象船舶に面圧の制約（700kN/m²未満）がある場合には、防舷材からの最大反力は面圧制限を超過しないように設計する必要がある。このため、以上に示した条件下では、ゴム防舷材の性能照査にあたっては、製造誤差以外にも影響要因を考慮した慎重な設計が必要とされる。具体的には、ゴム防舷材の性能照査は製造誤差に加えて次の各要因を考慮する。

- ・ 防舷材の温度
- ・ 船体が防舷材に接触する際の傾斜角度
- ・ 船舶の接岸速度
- ・ 防舷材の経年変化

なお、以後の検討は、上記b)の係数パターンBを対象として議論を進める。

c) 係数パターンC

荒天時に船舶が岸壁に係留されたまま避泊する場合、係留船舶がうねりや長周期波の影響を受ける場合、浮体構造物の係留にゴム防舷材を使用する場合など、係留時の船舶動揺シミュレーションによって船舶の動揺量、防舷材反力や係留索張力などの照査を行う場合には、防舷材の変位-反力特性が照査結果に大きく影響を及ぼす場合もある。このため、係留船舶の動揺を考慮する場合は、係数パターンBと同様、防舷材性能に影響を及ぼす各種要因を考慮した慎重な設計が必要とされる。

(3) 接岸エネルギー

新設計法で用いる接岸エネルギーの算定方法は現行設計法と変わらず、前述の式(1)で求める E_f である。

なお前節で述べたPIANCの設計法では、接岸エネルギーを算定するための船舶の質量は通常95%信頼度レベル、接岸速度については50%信頼度レベルの値としていたが、国内基準では設計条件として与える対象船舶の質量や接岸速度は基本的に最大値（設計上許容される最大値）である。この点も、現行設計法と新設計法では同じである。

(4) 吸収エネルギーと反力の算定と照査

防舷材が使用される環境における設計吸収エネルギーと設計反力の値は、次式で算出される。

$$E_A^- = E_A C_{pE}^- C_{aE}^- VF_E^- TF_E^- C_{agE}^- \quad (8)$$

$$R^+ = R_R C_{pR}^+ C_{aR}^+ VF_R^+ TF_R^+ C_{agR}^+ \quad (9)$$

ここに、

E_A^- ：設計吸収エネルギーの最小値 (kJ)

E_A ：吸収エネルギーの規格値 (kJ)

R^+ ：設計反力の最大値 (kN)

R_R ：反力の規格値 (kN)

C_{pE}^- ：製造誤差係数の下限値(0.9)

C_{pR}^+ ：製造誤差係数の上限値(1.1)

C_{aE}^- ：吸収エネルギーの傾斜係数

C_{aR}^+ ：反力の傾斜係数または1.0の大きい方の値

VF_E, VF_R ：速度係数(吸収エネルギー，反力)

TF_E, TF_R^+ ：温度係数(吸収エネルギー，反力)

C_{agE}^-, C_{agR}^+ ：経年変化係数(どちらも1.0)

である。

上記の各係数のうち、製造誤差係数に関しては前述のとおり定数として取り扱っている。防舷材の経年変化を表す経年変化係数については、今後必要とされる可能性があるため、要因の1つとして挙げている。ただし、現時点では十分な調査実績が得られていないため、係数値としては定数（1.0）として良いとされている。傾斜係数、速度係数、温度係数に関しては次章で詳述する。

吸収エネルギーの照査については、現行設計法と同様に接岸エネルギー E_f を上回ることにしている。また反力については、式(8)で接岸エネルギーを満足する防舷材製品の反力の規格値を式(9)に代入して求めた値 R^+ が、係留施設側から要求される最大反力以下となることを照査する。もし R^+ が要求される最大反力を超過する場合には、反力が適切な範囲になるように防舷材を再選定することとなる。

3. 傾斜係数・速度係数・温度係数とその影響評価

3.1 概要

新設計法に基づく防舷材の設計では、2.4で述べたように反力や吸収エネルギーを求めるために、製造誤差係数、傾斜係数、速度係数、温度係数、経年変化係数の計5種類の係数値を与える必要がある。このうち製造誤差係数は現行設計法と同様の値、経年変化係数は現状1.0を与えるため、港湾施設の設計条件や防舷材の設置箇所の気温により異なる値を取るの傾斜、速度、温度の3つの係数値となる。

本章では、3つの係数（傾斜係数、速度係数および温度係数）を対象として、3.2にて防舷材の性能を測定するための試験方法と試験結果から各係数を算定する方法について概説する。3.3では国内の防舷材メーカー4社からの情報提供に基づき、各係数の傾向を紹介する。

3.2 防舷材の試験方法と係数の算定

本節の内容についてはガイドラインの第6章「ゴム防舷材の試験法」に詳述されているが、3.3以降の記述の理解を助けるため、概要を記載する。

(1) 標準条件での試験（静的圧縮試験）の概要

実物もしくは縮尺モデルのゴム防舷材を試験体とし、基本的な性能を測定する試験が静的圧縮試験である。試験体は周囲の温度ともども $23^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ の恒温の環境下で、防舷材の受圧面に対して直角に（図-3.1の試験機面板の角度 θ が0度、即ち水平である）、かつ中心軸の方向に載荷して防舷材を圧縮変形させる。まず設計ひずみ量（吸収エネルギーの規格値が得られるまで防舷材を圧縮した時のひずみ量）以上まで3回以上圧縮を行い（これを予備圧縮という）、1時間以上静置の後、設計ひずみを超えるまで1回圧縮を行う。これを本圧縮と称し、この時の性能を静的圧縮性能とする。

本圧縮での圧縮速度は標準ひずみ速度（ $0.01\sim 0.3\%/s$ または $0.3\sim 1.3\text{mm/s}$ ）の範囲内とし、荷重が立ち上がる点をひずみ量のゼロ点としてデータを整理する。なお、試験体がV型防舷材で、かつ開いた側（脚部）が繋がっていない場合（図-2.1の左側の防舷材が該当）は、圧縮により脚部がさらに開かないように固定して圧縮を行う。

静的圧縮性能は縦軸に荷重（もしくは反力）、横軸に変位（もしくはひずみ）をとった性能図表で表示される。先に図-2.3で模式的に示した変位と反力の関係がこれにあたり、この図表から反力と吸収エネルギーの規格値を求める。なお、静的圧縮試験を縮尺モデルで実施する場

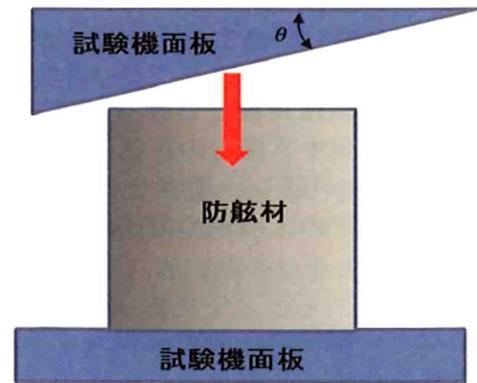


図-3.1 傾斜試験のイメージ

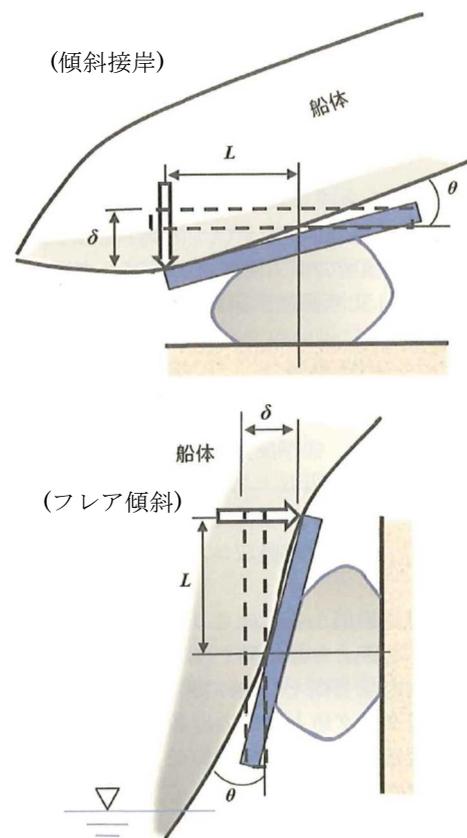


図-3.2 防舷材に傾斜角度が生じる例

合は、応力とひずみの値が現物の試験と同一となり、相似則が成り立つよう、载荷速度を調整する。

(2) 傾斜係数と試験方法（角度依存性試験）

前述の静的圧縮試験は、荷重を防舷材の受圧面に対して直角に、かつ中心軸方向に与えたが、実際に船体が防舷材に接するときは船体の側面と防舷材の受圧面とは必ずしも平行にはならない。例えば図-3.2のように、船舶が係留施設に対して平行に接岸しない場合（傾斜接岸）や、防舷材に接する船体の側面が垂直でない（フレア傾斜）

表-3.1 各種載荷試験の実施条件と結果の整理

試験名称	①静的圧縮試験	②角度依存性試験	③速度依存性試験	④温度依存性試験
試験体 形状寸法	実物 or 縮尺モデル	実物 or 縮尺モデル (高さ 100mm 以上)	②に同じ	②に同じ
温度設定	23℃±5℃	①に同じ	①に同じ	-30℃,-20℃,-10℃,0℃,10℃, 23℃,30℃,40℃,50℃
予備圧縮回数	3回以上	3回以上	3回以上	3回以上
試験機面板の角度	0度	指定の角度±1度	0度	0度
圧縮速度	0.01~0.3%/s or 0.3~1.3mm/s	①に同じ	0.01~50%/sのう ち最低3種類	①に同じ
計測項目	荷重,変位(ひずみ量)	①に同じ	①に同じ	①に同じ
求める指標	反力,吸収エネルギー	傾斜係数	速度係数	温度係数

場合、もしくはその両方の場合がある。これにより船体の側面（および防舷材の受圧面）と係留施設の面に角度 θ が生じ、変位-反力曲線は変化する。

この角度 θ がついた環境で防舷材を載荷する試験を角度依存性試験という。試験方法は図-3.2に模式的に示すような、試験体の上面に当てる面板を角度 θ で傾斜させた試験機を用いて試験体を軸方向に圧縮し、荷重と変位を計測する。試験条件については表-3.1に、前述の静的圧縮試験や後述の各試験とあわせて記載した。

この角度依存性試験により得られた反力と吸収エネルギーの規格値を、(1)の静的圧縮試験での規格値で除したものが傾斜係数であり、傾斜による性能への影響を示す係数となる。

(3) 速度係数と試験方法（速度依存性試験）

静的圧縮試験における圧縮速度は0.01~0.3%/s または 0.3~1.3mm/sと規定されているが、これらの値は設計条件として与えられている接岸速度（10cm/s程度のことが多い）に比べて格段に遅い。一般に防舷材を圧縮する速度が速いと反力と吸収エネルギーは増大する傾向があり、図-3.3で黄色や赤の曲線で示すような変位-反力関係となる。

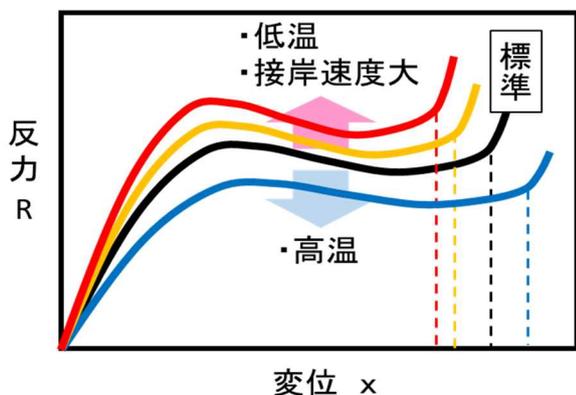


図-3.3 防舷材の使用環境による性能変化

圧縮速度の影響を確認する試験を速度依存性試験と称し、試験方法は表-3.1に記載のとおりである。この試験により、圧縮速度が速くなることの影響を把握することができる。傾斜係数と同様に、速度依存試験により得られた反力と吸収エネルギーの規格値を、(1)の静的圧縮試験での規格値で除したものが速度係数であり、圧縮速度の大小による性能への影響を示す係数となる。

(4) 温度係数と試験方法（温度依存性試験）

ゴム防舷材は他のゴム製品と同様、高温下では軟化、低温化では硬化し、防舷材の変位-反力関係にあつては高温では図-3.3に青の曲線で示すように反力、吸収エネルギーとも標準（静的圧縮試験の値）より小さく、低温では黄色や赤の曲線で示す大きめの値を取る。

防舷材の温度の影響を確認する試験を温度依存性試験と称し、試験方法は表-3.1に記載のとおりである。

この温度依存性試験により得られた反力と吸収エネルギーの規格値を、(1)の静的圧縮試験での規格値で除したものが温度係数であり、防舷材の温度の高低による性能への影響を示す係数となる。

3.3 傾斜係数・速度係数・温度係数の傾向と特徴

(1) 各係数の公表状況と防舷材メーカーからの情報提供

a) 防舷材メーカーによる係数値の公表状況

前節で述べた3種類（傾斜、速度、温度）の係数については、すでに海外の防舷材設計には用いられていることから、各防舷材メーカーが製品ごとに係数値を公表している。国内の防舷材メーカーについても海外向けの製品カタログでは、従来より係数を示している。一例として、表-3.2に国内防舷材メーカーの係数の表記例を示す。

一方、国内向けにはこれらの係数は設計上不要であったため、国内の防舷材メーカーの製品カタログにも記載されていない。

表-3.2 海外向け防舷材の係数表示例（シバタ工業(株) ホームページより）

TEMPERATURE FACTOR

Temperature [°C]	-30	-20	-10	0	10	23	30	40	50	60
Correction Factor	1.559	1.375	1.182	1.083	1.034	1.000	0.976	0.945	0.918	0.917

VELOCITY FACTOR

Compression Time [s]	1	2	3	4	5	6	7	8	≥ 10
Correction Factor	1.014	1.005	1.004	1.003	1.003	1.002	1.000	1.000	1.000

ANGLE FACTOR

Compression Angle [°]	0	3	5	8	10	15	20
Energy Absorption of original value [%]	100	96	95	94	92	82	54
Reaction Force of original value [%]	100	100	100	100	100	100	100

b) 国内防舷材メーカーからの係数値の情報提供

本検討においては、国内に流通している一般的な防舷材について、新設計法を適用した場合に現行設計法に対してどの程度の差異が生じるかを調査するため、ガイドラインを編集出版した(一財)沿岸技術研究センターを通じて、国内防舷材メーカー4社（シバタ工業(株)、住友ゴム工業(株)、西武ポリマ化成(株)、明治ゴム化成(株)）から、汎用V型（全16製品）、高性能V型（全19製品）、円錐型（円錐型を含む。全22製品）の防舷材の各係数の情報を得た。付録Aに、各社から提供を受けた傾斜係数、速度係数および温度係数を一覧表として示す。ちなみに高性能V型防舷材は、汎用V型防舷材の細部形状を改良し、汎用V型よりエネルギー吸収効率を高めた（反力に対するエネルギー吸収量が大きい）製品である。

なお、これ以降の検討は、今回提供を受けた係数を用いて行っているが、この情報は国内で販売されているすべての防舷材を網羅したものではない。また、今後の各社の製品の改廃により、係数値も変更となる場合もあるため、検討結果の解釈においては、その点を留意する必要がある。

(2) 傾斜係数

図-3.4に反力の傾斜係数、図-3.5に吸収エネルギーの傾斜係数の値を、傾斜角度との関係性として示す。傾斜係数については、防舷材メーカー各社とも、形状（汎用V型、高性能V型、円錐型）が同じであればゴム材料の硬度に関係なく、傾斜角度に対する傾斜係数の値は一律となっている。

傾斜係数は、高性能V型の一部製品を除き、反力、吸収エネルギーとも角度が大きくなるにつれて係数の値が小さくなる傾向にある。角度が大きくなると、反力が下がり、防舷材で吸収できるエネルギーも大きく低下することがわかる。本図では、防舷材メーカーの資料に基づいて傾斜角度20度までの傾斜係数を図化しているが、設計上の船舶の傾斜接岸の角度は3度もしくは5度とすることが多く、その範囲での傾斜係数は、反力および吸収エネルギーの両者とも、0.9~1.05程度の範囲に収まっている。

なお傾斜係数は、防舷材の受圧面が一律に傾斜した場合の値であり、防舷材の一部だけが船体に接触し変形するような場合には適用されない。

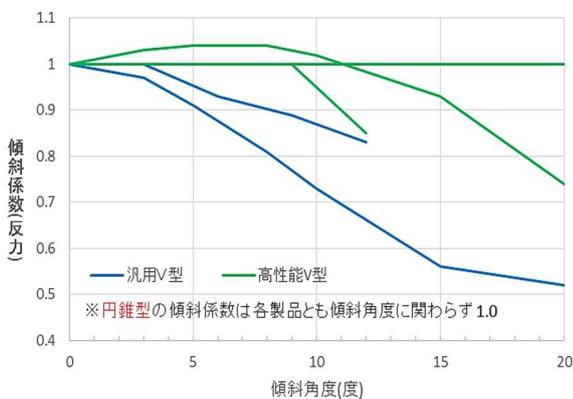


図-3.4 傾斜係数(反力)

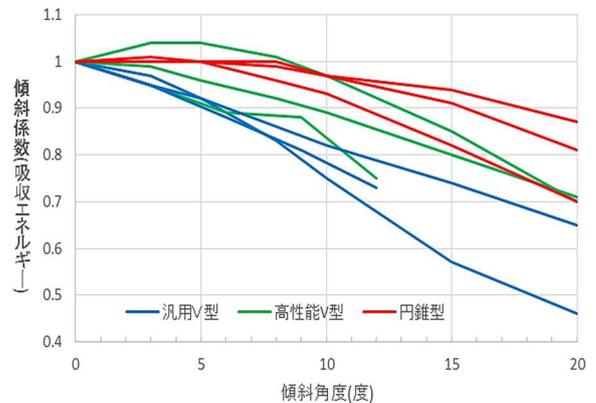


図-3.5 傾斜係数(吸収エネルギー)

(3) 速度係数

速度係数は、防舷材を圧縮する速度指標として「ひずみ速度」に対する係数として定義される。ひずみ速度とは、単位時間当たりの防舷材の変位（設計上は接岸速度）を防舷材の高さで除した値である。接岸速度とひずみ速度の関係を4通りの高さの防舷材について図化すると図-3.6のようになる。例えば、接岸速度0.1m/sで高さ1mの防舷材を圧縮する場合のひずみ速度は10%/s、同じ接岸速度でも防舷材の高さが0.5mの場合は20%/sとなる。

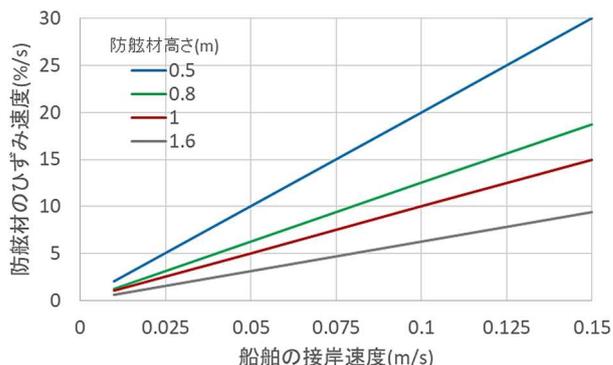


図-3.6 接岸速度～ひずみ速度

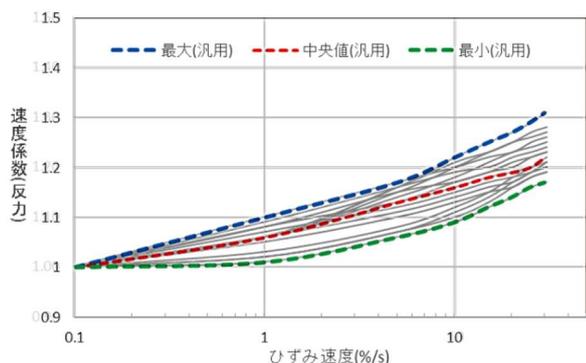


図-3.7 速度係数(反力；汎用V型)

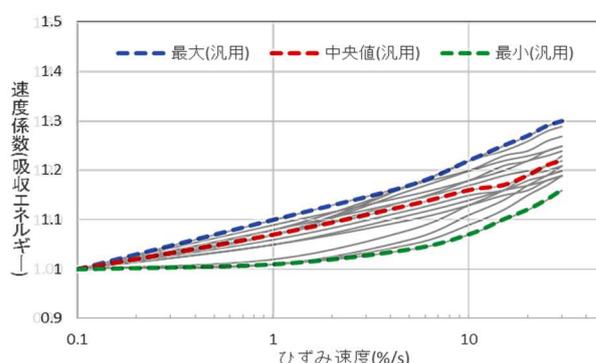


図-3.10 速度係数(吸収エネルギー；汎用V型)

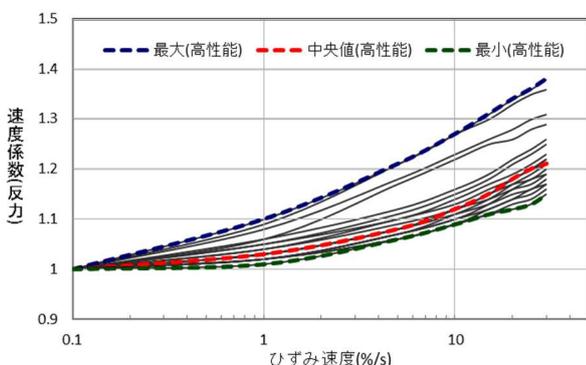


図-3.8 速度係数(反力；高性能V型)

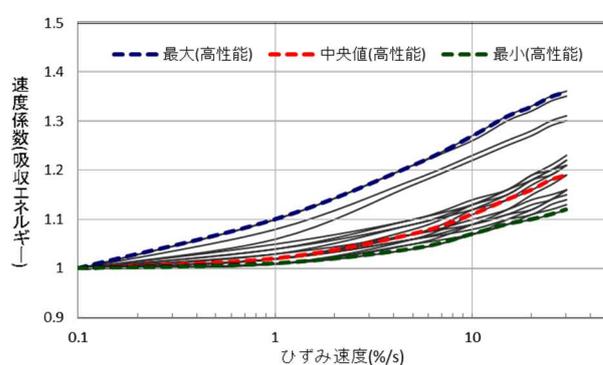


図-3.11 速度係数(吸収エネルギー；高性能V型)

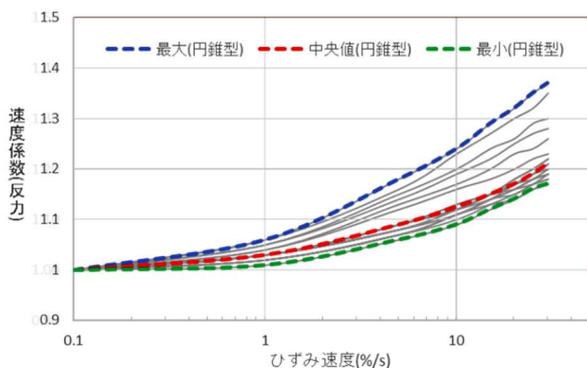


図-3.9 速度係数(反力；円錐型)

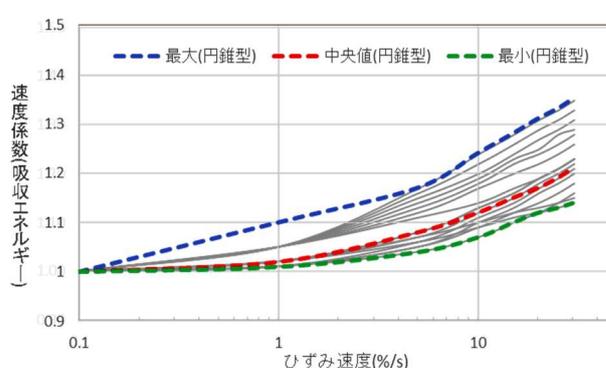


図-3.12 速度係数(吸収エネルギー；円錐型)

先述したとおり、防舷材の規格値を決定するための静的圧縮試験では、防舷材の圧縮速度はごく微速である。このため、ゴム防舷材の材料特性上、ひずみ速度が速い方が一定の変位（防舷材高さに対する比率）までの吸収エネルギーも反力も大きくなる。そのため、速度係数は基本的に1.0より大きな値をとる。

図-3.7から図-3.9に反力の速度係数、図-3.10から図-3.12に吸収エネルギーの速度係数の値を、防舷材のひずみ速度との関係で示す。各図中に灰色の実線で示した曲線は個々の製品の速度係数を示し、それらのうち各ひずみ速度での最も大きな値を青線、最も小さな値を緑線、中央値を赤線で結んだ。なお、係数の評価に際して平均値でなく中央値を用いたのは、例えば図-3.8などが顕著な例であるが、一部の製品の係数が他の製品より顕著に大きい（もしくは小さい）状況が見られたため、係数の全般的な傾向を見るためには中央値の方が適切と判断したためである。

反力の速度係数については、防舷材の形式を問わず、ひずみ速度1%/sでは速度係数1.0～1.1程度（中央値1.04）、ひずみ速度10%/sでは速度係数1.05～1.25程度（中央値1.14）と、ひずみ速度が速いほど速度係数は増大し、かつ製品による係数値のばらつきも増大する。吸収エネルギーの速度係数についても同様の傾向であり、ひずみ速度1%/sでは速度係数1.0～1.1程度（中央値1.04）、ひずみ速度10%/sでは速度係数1.06～1.27程度（中央値1.13）である。

防舷材の形状による係数の相違について見ると、反力、吸収エネルギーとも、高性能V型が他の形状に比べて係数値の幅が広く、かつ一部係数値の大きな製品も存在することがわかる。

(4) 温度係数

ゴム防舷材はその材料特性から、高温では柔らかく、低温では硬くなるが、その特性により高温では一定の変位に達するまでの反力も吸収エネルギーも小さくなる。逆に、低温では反力も吸収エネルギーも大きくなる。

図-3.13から図-3.15に反力の温度係数、図-3.16から図-3.18に吸収エネルギーの温度係数の値を、温度との関係性として示す。各図中に灰色の実線で示した曲線は個々の製品の温度係数を示し、それらのうち最も大きな値を青線、最も小さな値を緑線、中央値を赤線で結んで示した。なお、防舷材の吸収エネルギーと反力の規格値は23℃の環境で試験を行って求めているため、どの製品でも23℃での温度係数は1.0となる。

反力の温度係数を示した図（図-3.13から図-3.15）から、氷点下の環境では温度の低下により温度係数が急激に増

加する傾向にあることがわかる。反力の速度係数は、防舷材の形式を問わず、0℃で1.0～1.4程度（中央値1.15）、氷点下10℃で1.0～1.8程度（中央値1.27）である。例えば、温度係数が1.5であれば、標準温度（23℃）の条件下で発生する反力の1.5倍の反力が発生することになる。

このため、新設計法の導入に際しては、特に低温時における防舷材反力の増大に注意が必要であるといえる。また、氷点下では製品による係数値のばらつきも大きいいため、製品の選定にも注意を要することがわかる。

吸収エネルギーの温度係数を示した図（図-3.16から図-3.18）から、標準温度（23℃）より高い温度の範囲では、

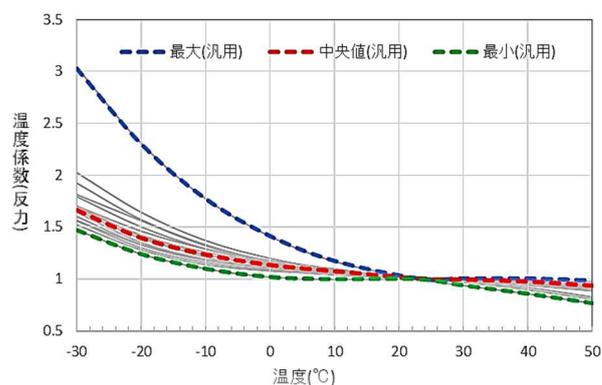


図-3.13 温度係数(反力；汎用 V型)

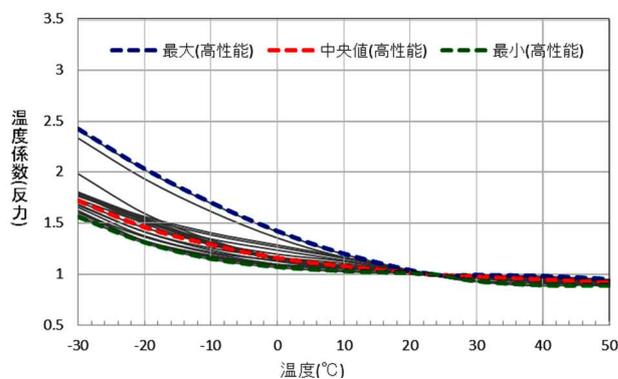


図-3.14 温度係数(反力；高性能 V型)

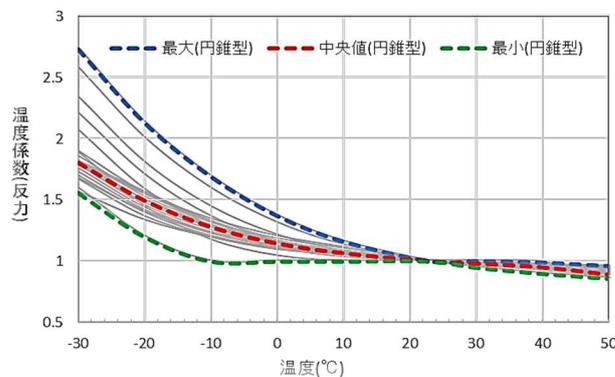


図-3.15 温度係数(反力；円錐型)

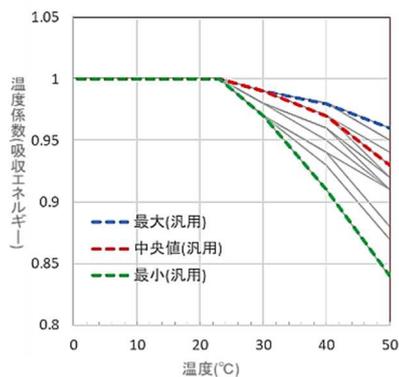


図-3.16 温度係数
(吸収エネルギー；汎用 V 型)

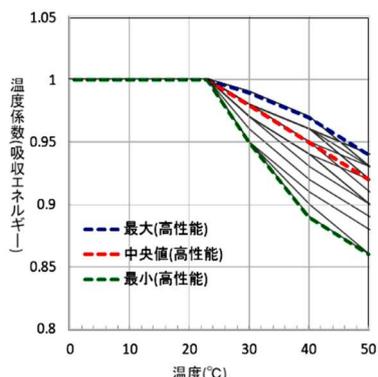


図-3.17 温度係数
(吸収エネルギー；高性能 V 型)

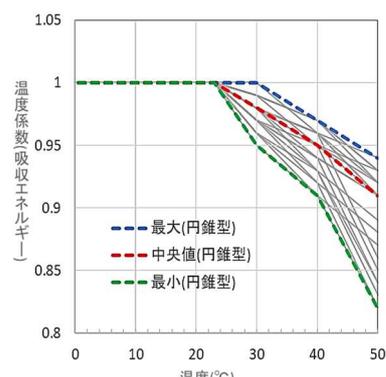


図-3.18 温度係数
(吸収エネルギー；円錐型)

温度が高くなるにつれて係数の値が小さくなる傾向にある（23℃以下の温度係数は実際の性能に関係なく1.0で固定）。温度が高くなると、ゴムの軟化にともない反力が下がり、防舷材で吸収できるエネルギーも大きく低下するためである。例えば30℃では、温度係数は最も小さい値で0.95程度となり、この係数だけ見れば従来の吸収エネルギーの規格値を5%程度小さめに評価する必要があることがわかる。なお、防舷材のタイプによる係数の相違はあまりない。また、製品による係数のばらつきはあるものの係数自体の変化が小さいので、反力の温度係数より製品の選定への影響は少ないといえる。

4. 温度変化とその評価

4.1 概要

本章では、国内各港で新設計法による防舷材の設計を適切に行うための温度設定について述べる。4.2では、外気温の変化に対するゴム防舷材内部の温度変化について試算し、1日の平均気温（外気温）を利用し、防舷材の設計温度を設定することの妥当性を示す。4.3では、国内の主要港湾での気温変化について、港湾周辺の気象台・気象観測所における過去の気象観測データを集計、統計処理して防舷材の温度環境の地域差を示す。4.4では4.3の結果を基に新設計法での防舷材の設計温度の設定方法を整理するとともに、全国の港湾における設計温度を参考値として示す。

4.2 ゴム防舷材の温度変化への追従性

(1) 外気温に対するゴム内部の温度変化

温度係数の設定に用いる温度は、防舷材表面の温度ではなく、1基の防舷材全体（ゴム内部も含めた）の平均的な温度の方が、より適切であると考えられる。係留施設

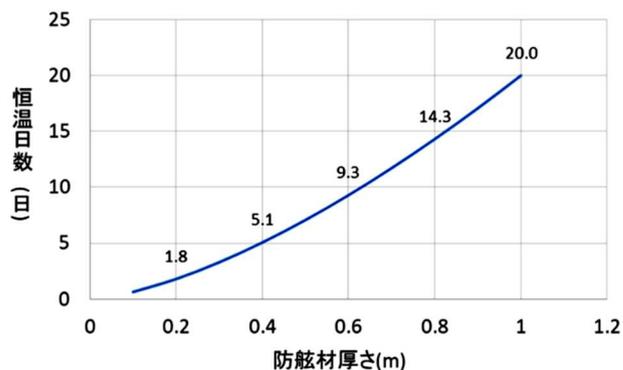


図-4.1 防舷材厚さと恒温日数

に設置されている防舷材は常時外気に曝されており、時に海水の飛沫を浴び、高潮位時に一部海水中に入ることにはあるものの、基本的には防舷材周囲の外気温の影響を受けゴム内部の温度が変化する。一方、ゴム材料は一般に熱伝導性が低いため、防舷材の性能評価のための温度に外気温の値をそのまま用いることは適切とは言い難い。以上のことから、以下(2)および(3)では、外気温の変化に対するゴム内部の温度変化に追従性について確認する。

(2) PIANC指針による評価

PIANC指針の付属書Aには、試験のために防舷材を恒温の環境下に置いた場合に防舷材全体が一定の温度になるまでの日数を算出する経験式の記載がある(式(10))。

$$\text{恒温日数(日)} = 20 * \text{ゴム厚の最大値(m)}^{1.5} \quad (10)$$

式(10)に基づき、ゴム厚と恒温日数との関係をプロットした結果を図-4.1に示す。例えば防舷材の厚さが0.2mの場合、恒温日数は1.8日となる。これは防舷材の中心部の温度が外側の温度と同じになるまで1.8日を要することを意味している。そこから考えると、1日（24時間）の中の気温変化（昼夜の気温変化）に対する防舷材全体の

表-4.1 気温データ収集対象地点一覧

地点名	選択根拠	観測所名	港湾からの距離(km)
稚内	日本最北端。冬期に著しく寒冷。	稚内地方気象台	0.1
釧路	冬期に加え夏期も寒冷。	釧路地方気象台	0.4
函館	北海道の中では最も温暖。	函館地方気象台	4
八戸	東北北部を代表。	八戸特別地域気象観測所	0.4
新潟	北陸を代表。	新潟地方気象台	6
小名浜	東南北部、茨城を代表。	小名浜特別地域気象観測所	0.4
横浜	東京湾内を代表。	横浜地方気象台	0.6
四日市	伊勢湾内を代表。	四日市特別地域気象観測所	5
神戸	大阪湾内を代表。	神戸地方気象台	0.2
境	山陰を代表。	境特別地域気象観測所	1
高松	瀬戸内を代表。	高松地方気象台	0.3
下関	北部九州、関門を代表。	下関地方気象台	0.2
鹿児島	南部九州を代表。	鹿児島地方気象台	0.6
那覇	南西諸島を代表。	沖縄気象台	2

温度変化の応答は極めて緩慢であるため、対象とする防舷材の厚さにも依存するが、一般的な製品では1日から数日間の平均気温をゴム防舷材の性能変動を評価するための代表値として利用することが妥当であると考えられる。

(3) 非定常熱伝導方程式の解析解による確認

式(10)については、式の根拠が明確ではなかったことから、1次元非定常熱伝導方程式の解析解により、(2)と類似した条件下における外気温に対するゴム内部の温度変化の応答を確認した。詳細な計算過程は付録Bに示すが、標準的な天然ゴムの熱伝導率、密度および定圧比熱を与条件とし、防舷材表面から10cm内側(厚さ20cmの防舷材を想定)の温度の経時変化を試算したところ、ゴムの内部温度が表面の温度とほぼ同一になるまで2日程度を要しており、式(10)と同様の結果が得られた。

(4) 温度条件の設定に利用する外気温

代表的な防舷材製品のゴム厚は、概ね15～30cm程度である。このゴム厚に対応する恒温日数は、概ね1.2日～3日程度である。温度条件の設定に際し、外気温の平均化日数(時間)を長く取れば、日単位の細かな気温変化が平滑化されるため、平均化日数が短いほど温度条件の設定に際しては、より安全側の評価となる。このため本検討では、防舷材の温度を考える際の外的条件である設置箇所気温は、1日の平均気温の値をベースに検討を進める。

4.3 港湾周辺の気象台・気象観測所における気温変化

(1) 概要

ガイドラインでは吸収エネルギーと反力の計算に用いる温度係数について、吸収エネルギー算出時には「設計

温度(上限)」での温度係数、反力算出時には「設計温度(下限)」での温度係数を用いることとしているが、設計温度の設定条件については記載がない。

本節では設計温度の設定(4.4)に先立ち、国内の寒冷地から温暖地を網羅する代表14港湾を取り上げ、各港湾周辺に位置する気象台・気象観測所での20年間分の日平均気温の観測データを用いて気温を評価する。この評価結果に基づき、4.4にてさらに気象台・気象観測所を増やし、全国港湾における温度条件の設定に繋げる。

(2) 気象台・気象観測所における外気温の日平均データ

過去の全国各地の気温データは気象庁が公表し、同庁のwebページにて検索と取得が可能である⁵⁾。本節では全国の大まかな外気温の状況を見るため、全国14ヶ所について、1998年9月1日から2018年8月31日までの20年間の日平均気温データを収集した。表-4.1には、対象とする港湾とその選定根拠、港湾周辺の気象台・気象観測所に関する基本情報(名称、対象港湾からの距離等)を示す。なお、気象庁公表の日平均気温データは、毎正時の気温観測値(24回/日)を平均した値であり、0.1℃単位の観測値を集計し、小数2位を四捨五入して求められている。

(3) 外気温の頻度分布および累積相対頻度分布

図-4.2から図-4.4に、釧路、横浜および那覇における日平均気温の頻度分布(図中、灰色の棒グラフ)および累積相対頻度分布(図中、青線)を示す。釧路は寒冷地、横浜は国内の平均的な地域、那覇は特に温暖な地域の代表事例として示すものである。付録Cには、その他の地点における同様の図面を示す。なお、頻度分布の階級は1℃の範囲であり、図中の横軸に表記されている気温以上、

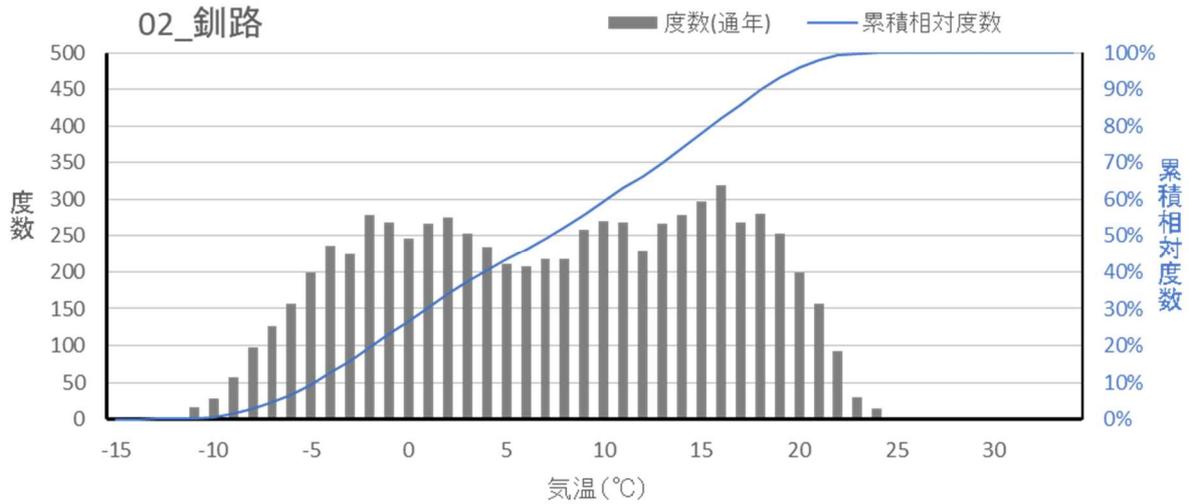


図-4.2 日平均気温の度数分布(1度ごと度数と累積；釧路)

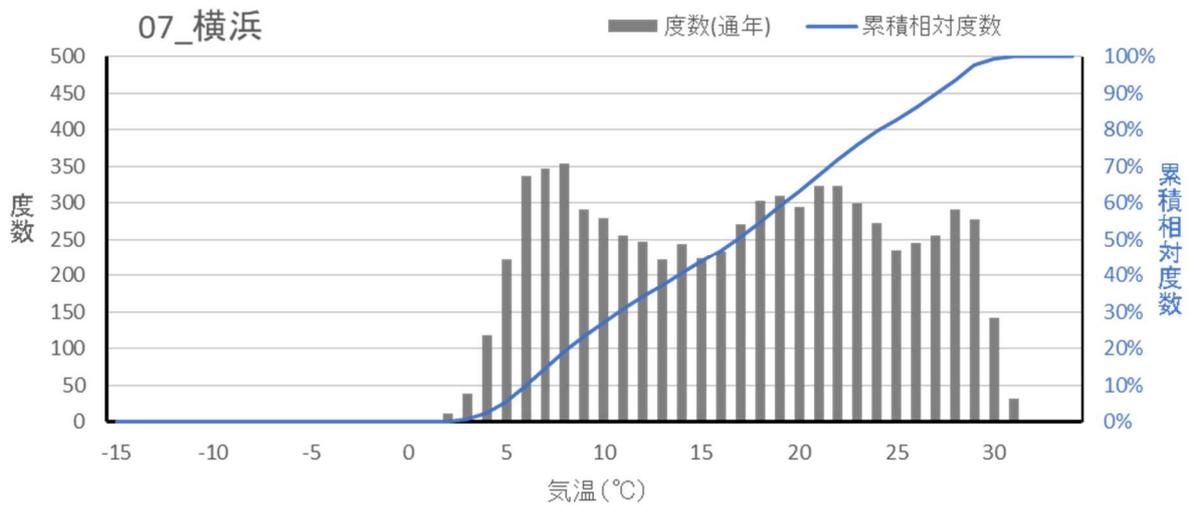


図-4.3 日平均気温の度数分布(1度ごと度数と累積；横浜)

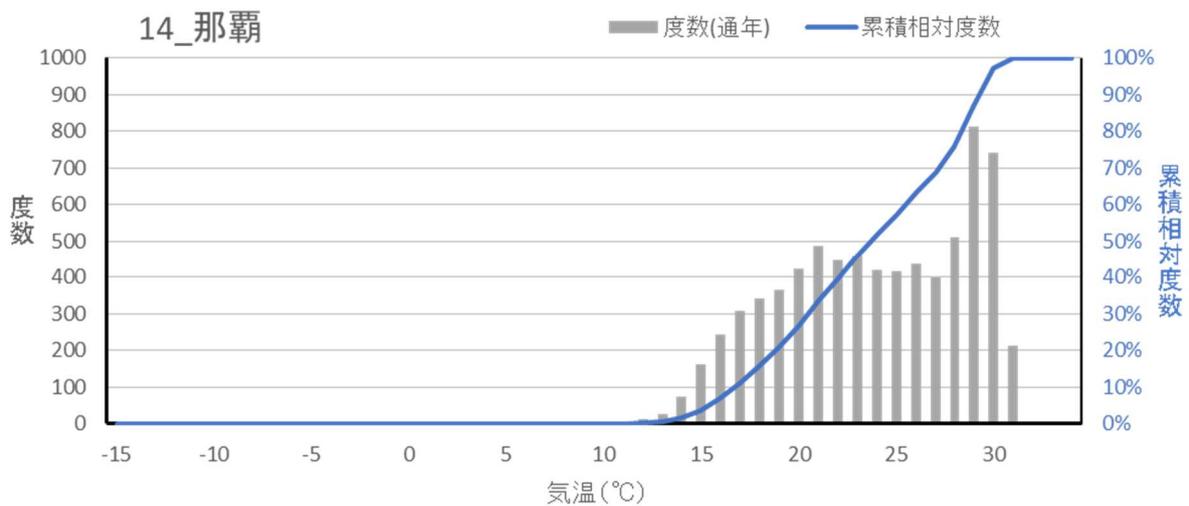


図-4.4 日平均気温の度数分布(1度ごと度数と累積；那覇)

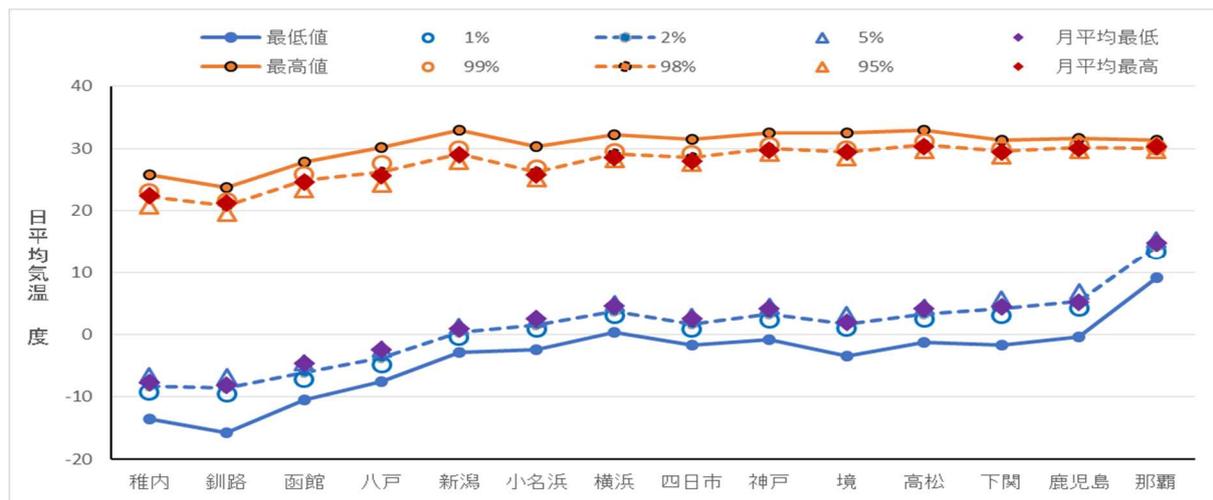


図-4.5 港別の気温最低値・最高値と設計温度

1°C高温側の気温未満（例えば、20°Cに対応する度数は、20°C以上、21°C未満の度数）の度数（データ数）を棒グラフとして表示した。また、累積相対頻度は気温データを低い順から並べ替え、1°Cごとの相対度数（各階級の度数を全データ数で除して算出）を計算し、得られた各階級の相対度数を低温側から加算した値（累積和）である。

これらの頻度分布図より、各地の分布形は複雑な分布形状であり、正規分布や対数正規分布などで表現できるものではないことがわかる。強いて言えば、低温側と高温側にピークを持つ台形のような形状となることがわかる。この傾向は、付録Cに示す他の地点でも同じである。

以上のことから本検討では、累積相対頻度分布の結果を用いて設計温度（上限、下限）を設定することとした。

(4) 全国各地の港湾の気温

図-4.5は、全国14ヶ所について、20年間における日平均気温の最低値および最高値を示したものである。なお、同図には、低い順に並べ替えた気温データの全データ数にして1%、2%、5%に位置する値、および95%、98%、99%に位置する値（すなわち高温側から1%、2%、5%）もプロットされているが、これらについては次章で言及する。

最高値（橙色実線）の値を見比べると、北海道と東北で30°Cを下回るほかは全国的に30°C前後が記録されていることがわかる。一方、最低値（青色実線）を見比べると、北海道では-10°C以下、八戸で-8°C程度と低く、逆に那覇は10°C程度と高いが、それ以外の南東北～九州までの範囲は0°C～-5°Cを示しており、地域による差が大きい。

前章で反力の温度係数が低温域では増大することを述べたが、国内でも日平均気温が-10°Cを下回る地域があることもあり、設計温度は防舷材設計に大きく影響する可能性があることが確認された。

4.4 設計温度の設定

(1) 設定の考え方

防舷材の温度係数を定めるための設計温度については、設計上の安全性を極力高める観点でいえば、吸収エネルギー算出用の「設計温度（上限）」は過去最高の日平均気温を、反力算出用の「設計温度（下限）」は過去最低の日平均気温を採用することもできる。しかし、その場合は得られた気温データの中の特異値を採る恐れがあるため、特異値を排除し、かつ設計上危険側にならない温度を設定する必要がある。以上のことから、本検討では、20年間の日平均気温データから算出した気温発生確率分布において、低温側および高温側のパーセント点として1、2および5%を選択し、設計温度の参考値の候補として議論を進めることとする。

防舷材の性能照査に適用する設計温度のパーセント点を検討するにあたり、他の土木構造物の設計時の温度設定について確認する。コンクリート標準示方書⁶⁾には、温度の昇降の特性値は年平均気温と月平均気温の最高と最低の差より定めるとなっている。

図-4.5には、先述したとおり、各地点における低温側の日平均気温の最低値（20年間）と各パーセント点（1%、2%、5%）、および高温側の日平均気温の最高値（20年間）と各パーセント点（1%、2%、5%）の気温を示す。この図には、コンクリート標準示方書の規定にある月平均気温についても、20年間分の最高値と最低値もあわせて記載している。まず、低温側の結果をみると、港湾によって差はあるものの、最低値と1%点との気温差は2～6°C程度であり、最低値を採用すると極端に低温の温度条件となり、設計温度の特性値としては適切ではないと考えられる。次に、各パーセント点間での気温差を俯瞰すると、

まず1%点と2%点の気温の差は最大でも1℃程度である。同様に2%点と5%点の差は最大でも1.5℃程度である。このため、低温側の設計温度として、1から5%のパーセント点の範囲でどのような値を設定したとしても、温度係数はわずかに変化するのみである。なお、高温側でも、最高値と1%点との気温差は1~3℃程度であり、各パーセント点での気温差は1%点と2%点とで最大1℃程度、2%点と5%点とで最大2℃程度であり、高温側もどのパーセント点を選択しても、温度係数の変化は僅かであり、防舷材に及ぼす影響は小さいと言える。

ここで、設計温度の範囲外の日平均気温の出現について考えると、例えばパーセント点を2%とした場合、単純計算で年間7日程度(365日×0.02)、設計温度(上限)より高温な日数が生じる。設計温度(下限)より低温な日数も同じである。厳密に捉えるならば、設計温度(上限)より高温であれば、吸収エネルギー計算用の温度係数が設計より小さくなり、防舷材の吸収エネルギーが設計値を下回る恐れがある。また、設計温度(下限)より低温であれば、反力計算用の温度係数が設計より大きくなり、船舶接岸時の反力が設計値を上回る可能性がある。

しかしながら、設計条件として設定される船舶質量および接岸速度は、想定される最大値である。実際の供用時には、最大質量をもった船舶が最大接岸速度で接岸することは考えられない。このため、実際には接岸エネルギーは、設計上の値(吸収エネルギー)を上回ることはない。さらに、万が一、最大質量・最大接岸速度の船舶が設計温度を多少超える条件下で接岸したとしても、防舷材の変位~反力関係の特性上、直ちにゴムが破断する等の損傷は発生しない。さらに、前述の式(8)(9)からもわかるように、防舷材製品の製造誤差係数10%が吸収エネルギーと反力の計算時に考慮されているため、防舷材の温度が一時的に設計温度の範囲外になった場合でも接岸エネルギーを吸収しきれない状況や、設計以上の反力が発生する状況は極めて考えにくい。

ここで、あらためて図-4.5に戻ると、20年間における月平均気温の最高値と3つのパーセント点の値を比較すると、どの地点でも2%点の値とほぼ同じであることがわかる。また、20年間の月平均気温の最低値についても、2%点あるいは5%点の値に近いことがわかる。この月平均気温の最高値と最低値は、橋梁等の重要な土木インフラ施設のコンクリート構造物の照査を対象としたコンクリート標準示方書における温度条件に対応するものであるが、先述したとおり防舷材の設計余裕は相当程度備わっているため、防舷材の性能照査における設計温度としては2%点を採用することで十分な安全性を確保できると考えら

れる。以上のことから、本検討では、防舷材の性能照査における設計温度として、20年間の日平均気温の2%点(高温側、低温側)を標準的な参考値とし、検討を進める。

(2) 設計温度の設定事例

本項では、(1)に示した方法に基づき、全国の港湾で活用できるように、全国主要港湾の設計温度(高温側、低温側)を、高温側2%点と低温側2%点を事例として取りまとめた。取りまとめた結果を表-4.2及び図-4.6に示す。以下、この結果の作成手順と利用方法を解説する。

まず、2%点の温度は、設計対象の港毎(全61港湾)に最寄りの気象観測施設の過去20年間分(1998年9月1日~2018年8月31日)のデータを収集し、温度の低い順に値を並べ替え、最低値と最高値からデータ数で2%の位置にある気温(上側2%点、下側2%点)として算出した。さらに、小数点以下を丸めて(上限値は切り上げ、下限値は切り下げ)、整数値とした。この整数値を、おのおの設計温度(下限)および設計温度(上限)と呼称する。

次に、港湾ごとに算出された設計温度(上限、下限)を、国内の設計実務の効率化の観点から、国土交通省の港湾関係事務所単位(北海道は開発建設部単位)で区分することとした。これは、各事務所または建設部は、明瞭な所掌地域が定められており、所掌地域内では各港で統一した値を用いることで設計条件の共通化やミスの防止を目的としている。しかし、各事務所管内の港湾の設定温度を一律に該当する気象観測地点での値に合わせると、以下の理由で不自然な設定になる港が生じた。

- ・港の位置や海域等の条件が、隣接する事務所(観測地点)に近い<例：七尾港→伏木富山港，岩国港→広島港>
- ・港が直轄事務所の所在地から遠く、かつ海域も異なる<例：宿毛湾港(高知港)，川内港(鹿児島港)>
- ・隣接する事務所との設定温度の差が大きく、管轄する事務所(観測地点)の値をそのまま用いるのは不自然<例：相馬港(小名浜港~仙台塩釜港)，名瀬港(鹿児島港~那覇港)>

これらに加え、1つの海域内に複数の事務所が近接している場合は、1ヶ所の代表地点に集約した。

以上の手順に基づき、全国の港湾(離島を除く)の設計温度(低温側2%点、高温側2%点)の参考値を、事例として表-4.2及び図-4.6に取りまとめた。なお、この値の採用は必須ではなく、個別港湾での設定や2%点以外の設計温度を採用するなど、設計者の独自の判断を制限するものではない。

表-4.2 全国の港湾の設計温度（参考値）一覧

	港名・海域名	観測地点名	対象港(重要港湾以上)	設計温度(°C)	
				下限	上限
北海道	稚内	稚内	稚内	-9	23
	紋別	紋別	紋別、網走	-10	23
	根室	根室	根室	-8	21
	釧路	釧路	釧路	-9	21
	苫小牧	苫小牧	苫小牧、室蘭	-8	23
	函館	函館	函館	-6	25
	小樽	小樽	小樽、石狩湾新港	-7	25
	留萌	留萌	留萌	-8	24
太平洋側	八戸	八戸	八戸、むつ小川原	-4	27
	宮古	宮古	久慈、宮古、釜石、大船渡	-3	26
	仙台塩釜	塩釜	仙台塩釜	-3	27
	相馬◇	相馬	相馬	-1	28
	小名浜	小名浜	小名浜	1	27
	鹿島	鹿嶋	鹿島、茨城	2	28
	東京湾◆	横浜	千葉、木更津、東京、横浜、川崎、横須賀	3	30
	清水	清水	清水、田子の浦、御前崎	4	29
	三河	豊橋	三河、衣浦	3	29
	伊勢湾◆	四日市	名古屋、四日市、津松阪	1	29
	尾鷲◇	尾鷲	尾鷲	3	29
	紀伊◆	和歌山	和歌山、日高、徳島小松島、橋	3	30
	高知	高知	高知、須崎	3	30
	宿毛湾◇	宿毛	宿毛湾、宇和島※	4	29
	宮崎	宮崎	宮崎、細島、油津	4	30
	志布志	志布志	志布志	3	29
日本海・東シナ海側	青森	青森	青森	-5	27
	秋田	秋田	秋田、船川、能代	-3	28
	酒田	酒田	酒田	-1	29
	新潟	新潟	新潟、直江津	0	30
	富山湾	伏木	伏木富山、七尾※	-1	30
	金沢	金沢	金沢	0	30
	敦賀	敦賀	敦賀	1	30
	舞鶴	舞鶴	舞鶴	0	30
	境	境	境、鳥取	1	30
	浜田◇	浜田	浜田、三隅	3	29
	関門◆	下関	下関、小野田、宇部、三田尻中関、徳山下松、北九州、苅田、中津※	4	30
	博多◆	福岡	博多、唐津、伊万里	3	31
	長崎	長崎	長崎、佐世保	3	30
	有明海	熊本	熊本、三角、八代、三池※	2	31
	川内◇	川内	川内	3	29
	鹿児島	鹿児島	鹿児島	5	31
瀬戸内海	大阪湾◆	大阪	大阪、堺泉北、阪南、神戸、尼崎西宮芦屋	3	31
	備讃◆	高松	高松、坂出、姫路※、東播磨※、水島、宇野、岡山、福山※、尾道糸崎※	3	31
	芸予◆	広島	広島、呉、岩国※、松山、今治、東予、新居浜、三島川之江	2	31
	大分	大分	大分、別府、津久見、佐伯	3	30
奄美・沖縄・特定離島	名瀬◇	名瀬	名瀬	12	30
	那覇	那覇	那覇、中城湾、金武湾、運天	14	31
	石垣◆	石垣島	石垣、平良	15	31
	南島島	南島島	南島島	20	30
記号の意味	◇:直轄事務所の観測地点と異なる海域、もしくは隣接県の観測地点との気温差が大きいため選定した観測地点 ◆:同一の湾内もしくは海域に複数の直轄事務所があるため統一して選定した観測地点 ※:観測地点の直轄事務所の管轄外であるが、位置や地形から当該観測地点の気温の適用が適切と思われる港湾				

5. 設計法による性能値の相違

5.1 使用環境による影響の総合的評価

3章では新設計法で用いられる個々の係数についてデータを図示し、係数値の変化度合いやばらつきについて述べ、4章では個々の港で温度係数を求めるための設計温度の設定について検討した。本章ではこれらを受け、国内の港湾で新設計法を適用した場合に算定される吸収エネルギーや反力がどのように変わるか、それにより経済性や本体構造物、船舶にどう影響するかを考察する。

3章では傾斜、速度、温度の3種類の係数を個別に図示して傾向を述べたが、新設計法での防舷材での設計ではこれら係数が掛け合わされて設計吸収エネルギーや設計反力が算定される。したがって、この3つの係数を掛け合わせた値（以下本章では「複合係数」と称する）が現行設計法で求められる吸収エネルギーと反力との相違を比率として示す値となる。

複合係数の算定条件は、次のとおりとする。

傾斜係数については、平行接岸の場合（傾斜角度 0° ）と傾斜角度 5° の2通りで算定する。傾斜角度は設計条件として設定される船舶の接岸角度を採用するのが良いように考えられるが、防舷材にとっての傾斜角度の因子は3.1で述べたように傾斜接岸とフレア傾斜の2種類があり、一方で接岸角度は接岸状況の実態ではなく接岸エネルギーを最も大きめに（安全側に）評価するために大きめに設定した例も多く、これをそのまま傾斜角度とすることは好ましくない。よって本章の検討では、傾斜を考慮した場合、傾斜を考慮しない場合の複合係数の変化を把握するために、傾斜角度 0° と 5° の2通りで算定する。

速度係数については、ひずみ速度 $10\%/s$ の条件で算定する。ひずみ速度と接岸速度の関係は先に図-3.6に示しているが、ひずみ速度 $10\%/s$ は防舷材高さ $1m$ の場合は接岸速度 $0.1m/s$ 、防舷材高さ $0.5m$ の場合は接岸速度 $0.05m/s$ に相当し、接岸速度の実態から考えて標準的な値と考えられる。

温度係数については、4章で示した全国の港湾における設計温度（上限、下限）から、吸収エネルギーの複合係数算定には $15^\circ C$ から $31^\circ C$ まで、反力の複合係数算定には $-10^\circ C$ から $15^\circ C$ の範囲の係数を用いることとする。

5.2 平行接岸での複合係数

(1) 汎用V型の場合

図-5.1は、汎用V型の防舷材各製品について、平行接岸、ひずみ速度 $10\%/s$ の条件下で、複合係数と温度との関係を示したものである。 $15^\circ C$ を境に低温側は反力の複合係数、

高温側は吸収エネルギーの複合係数を一枚の図中に収めている。

複合係数の値を中央値ベースで評価すると、反力に関しては最も温暖な地域（南西諸島が該当）で1.2程度、最も寒冷な地域（道東、道北エリア）で1.4余りとなり、船舶接岸による反力は現行設計法に比べ相当程度大きく評価される。一方、吸収できるエネルギーについては、1.2程度と現行設計法に比べ大きく評価される。これより、新設計法では従来設計法に比べて、中央値採用の場合、設計吸収エネルギーは20%程度の増加、設計反力は20%～40%（寒冷）程度の増加となる。

このため、矢板・重力式の係留施設の防舷材を新設計法での係数パターンBで設計した場合は、現状より製品規格を下げるができる（V型防舷材の検討であれば、従来の必要長さに対して約17%短縮（ $=100/120$ ）できる）。一方、栈橋式の場合（背後に土圧を有しないため係数パターンは自動的にBとなる）は反力が大きくなるため、低反力の製品を選定することや栈橋構造の構造強化が必要となり得る。栈橋の場合、新設計法を適用すると、既存の防舷材を取り換えの際に、既設の防舷材と同規格の製品でも設計反力が栈橋本体の設計条件に見合わなくなる可能性があることに注意する必要がある。

(2) 高性能V型、円錐型の場合

(1)と同様に、平行接岸、ひずみ速度 $10\%/s$ の条件下で、複合係数と温度の関係を高性能V型について示したのが図-5.2、円錐型の防舷材について示したのが図-5.3である。

複合係数の温度による変化、製品による係数のばらつき具合は、基本的には汎用V型と同様であるが、吸収エネルギーの係数が $25^\circ C$ 以上で小さめ（中央値ベースで1.1程度）となっているのが相違点として見てとれる。反力の係数は、円錐型は汎用V型と同程度の値、高性能V型は低温側でやや大きく、1.2～1.5程度の値となった。高性能V型はもともと吸収エネルギーに対する反力が汎用V型より小さいため、反力の複合係数は双方同じような値となっているが、設計反力は全体に高性能V型の方が小さく算出される。これらの算出方法や結果は、付録Dに示す。円錐形の場合、現行設計に比べて大きく算出された反力への対処として、受衝板を大きくするか軟質でサイズの大きい防舷材が必要となる可能性があり、その場合は必ずしも経済的とはならない点に留意が必要である。

5.3 5° 傾斜の場合の複合係数

汎用V型について、傾斜角度 5° 、ひずみ速度 $10\%/s$ の条件下で、複合係数と温度との関係を示したのが図-5.4、

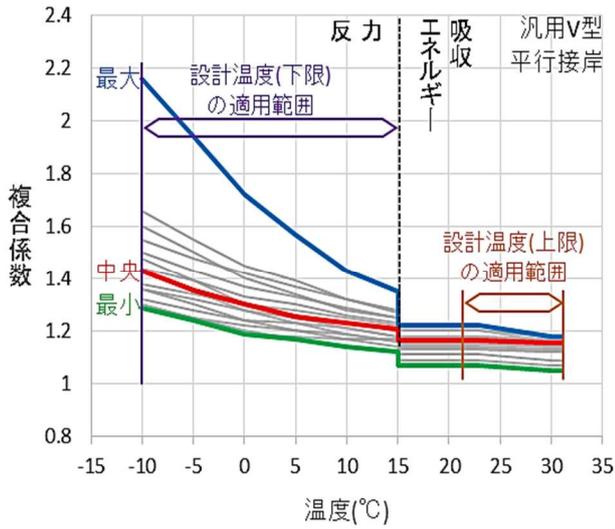


図-5.1 複合係数の温度による変化(平行, 汎用V型)

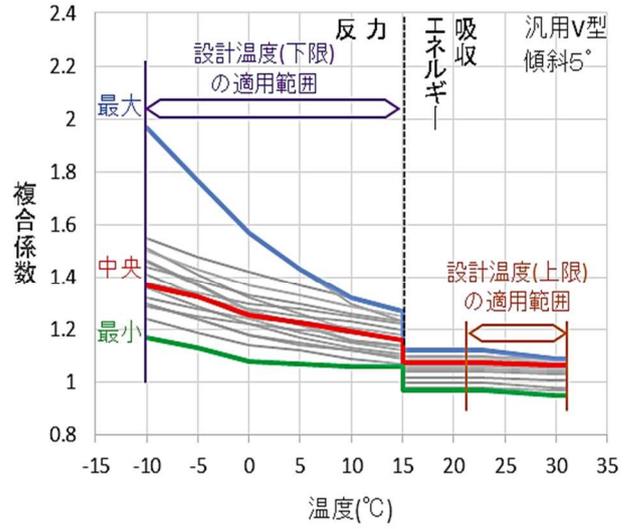


図-5.4 複合係数の温度による変化(5°, 汎用V型)

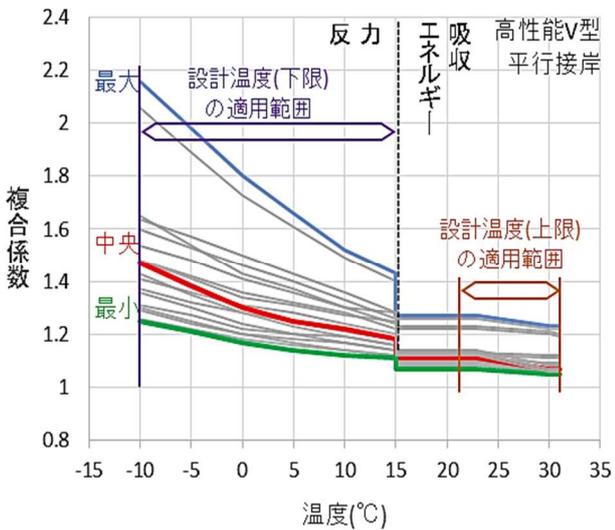


図-5.2 複合係数の温度による変化(平行, 高性能V型)

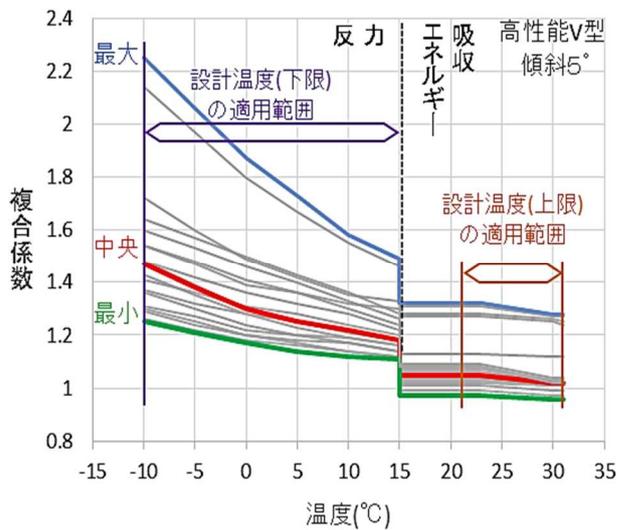


図-5.5 複合係数の温度による変化(5°, 高性能V型)

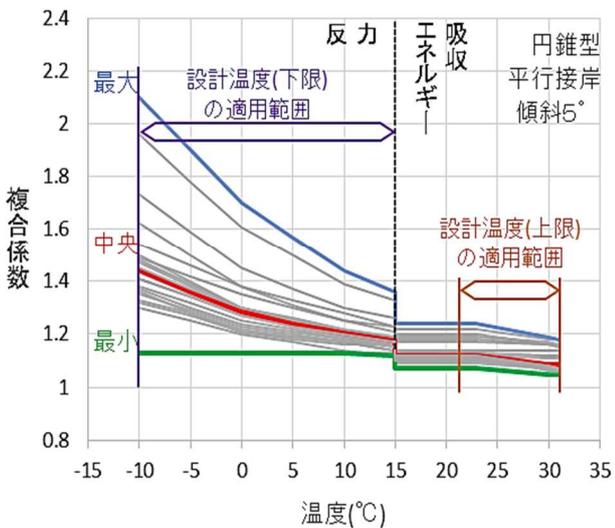


図-5.3 複合係数の温度による変化(円錐型)

高性能V型について示したのが図-5.5である。円錐型については、傾斜角度5°での傾斜係数が全製品1.0であったため、図-5.3と全く同じ関係性となる。

図-5.4は図-5.1に対して、図-5.5は図-5.2に対して、それぞれ傾斜の影響が加味された複合係数となる。吸収エネルギーについては、まず中央値ベースで見ると、汎用V型で1.07程度、高性能V型で1.02～1.05と、どちらも平行接岸の場合に比べて値が小さくなっていることがわかる。さらに最小値では1.0以下と、例外的ではあるが現行設計法より吸収エネルギーが小さく評価される場合もあり得る。また、特に高性能V型では、製品による係数の差がより拡大している。

反力については、汎用V型は全体的に平行接岸と比べてやや小さめの係数値を示している。一方、高性能V型は中央値と最小値はほぼ同じで、最大値はむしろ高性能V型の方が大きめの値を示し、製品による差が拡大している。

中央値ベースで現行設計法に対する吸収エネルギーや反力の増減を見ると、吸収エネルギーは現行設計法より大きく評価できるものの、平行接岸よりその差は小さく、総じていえば5%程度の増加にとどまる。

6. 結論

本検討では、「ゴム防舷材の設計法と試験法に関するガイドライン」に基づく防舷材の設計法を「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に導入し、防舷材の設計や製品選定を行うに際して、温度設定を中心とした検討を行い、設計実務上の参考資料として活用すべき技術情報を取りまとめた。主な結論は以下の通りである。

- ・国内の防舷材製品の傾斜、速度、温度の各係数値を収集・調査した結果、角度が増すほど傾斜係数は低下、ひずみ速度が増すほど速度係数は増加、低温ほど（特に氷点下）温度係数は増加する傾向は、各製品に共通して見られた。しかし、製品によって係数の振れ幅が大きく、防舷材の性能値に影響することが分かった。
- ・過去20年の日平均気温の度数分布より、温度係数の算出に用いる設計温度（上限、下限）の参考値を全国の港湾関係事務所等の単位で求めた。参考値の選定に際しては気温データの特異値を排除すべく、低温側および高温側から2パーセント点の値を採用した。
- ・国内の防舷材製品の速度係数・温度係数を用いた新設計法では、現行設計法より吸収エネルギーを高め評価でき、反力の制約が小さい条件ではやや経済的な防

舷材の選定が可能になる。一方で特に寒冷地で反力が大きく算出され、かつ製品による振れ幅が大きいことから、製品選定は慎重に行う必要があることが判明した。

今後、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の部分改訂により、国内港湾での防舷材の設計に使用環境を考慮する場合には、本検討が設計作業を円滑に進める一助となれば幸いである。

謝辞

本検討の実施にあたり、（一財）沿岸技術研究センターの山本修司 参与には、ガイドラインの検討委員会の事務局を主導されたご経験から、本検討の全般にわたって種々のアドバイスや情報提供を賜った。同じく（一財）沿岸技術研究センターの秋山 斉 調査役には、防舷材の設計・製造に係る豊富な経験を基に、防舷材製品とその材料特性等について種々の知見をご教示いただいた。

また、国内防舷材メーカー4社（シバタ工業(株)、住友ゴム工業(株)、西武ポリマ化成(株)、明治ゴム化成(株)＜五十音順＞）からは、現行の防舷材製品の傾斜係数、速度係数、温度係数の情報をご提供いただき、各係数の傾向をはじめ検討内容の精度を高める一助となった。

以上の各氏、各社に対し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上)(中)、(公社)日本港湾協会、2018年
- 2) PIANC：Guidelines for the Design of Fenders Systems: 2002
- 3) 国際航路協会：防舷材システム設計の指針：2002版
- 4) ゴム防舷材の設計法と試験法に関するガイドライン、（一財）沿岸技術研究センター、2018年
- 5) 気象庁：過去の気象データ・ダウンロード、<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>（2020年 1月31日閲覧）
- 6) 2017年制定 コンクリート標準示方書【設計編】、(公社)土木学会、2018年

付録 A 国産防舷材の係数値一覧

なお、製品ごとに1~88の番号を付して係数値の左側に記載しており、同じ製品の各係数を抽出できるようにした。

本文3.3にグラフで示した国産防舷材の傾斜係数、速度係数、温度係数について、防舷材メーカーから提供を受けた係数値の一覧表を掲載する。

付表-A.1 傾斜係数

角度 (度)	反力										吸収エネルギー											
	0	3	5	6	8	9	10	12	15	20	0	3	5	6	8	9	10	12	15	20		
汎用V型	1	1.00	0.97	0.91		0.81		0.73		0.56	0.52	1.00	0.97	0.92		0.83		0.75		0.57	0.46	
	2	1.00	0.97	0.91		0.81		0.73		0.56	0.52	1.00	0.97	0.92		0.83		0.75		0.57	0.46	
	3	1.00	0.97	0.91		0.81		0.73		0.56	0.52	1.00	0.97	0.92		0.83		0.75		0.57	0.46	
	4	1.00	0.97	0.91		0.81		0.73		0.56	0.52	1.00	0.97	0.92		0.83		0.75		0.57	0.46	
	5	1.00	0.97	0.91		0.81		0.73		0.56	0.52	1.00	0.97	0.92		0.83		0.75		0.57	0.46	
	11	1.00	1.00		0.93		0.89		0.83			1.00	0.95		0.88		0.81		0.73			
	12	1.00	1.00		0.93		0.89		0.83			1.00	0.95		0.88		0.81		0.73			
	13	1.00	1.00		0.93		0.89		0.83			1.00	0.95		0.88		0.81		0.73			
	14	1.00	1.00		0.93		0.89		0.83			1.00	0.95		0.88		0.81		0.73			
	21	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.95	0.92		0.86		0.82		0.74	0.65	
	22	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.95	0.92		0.86		0.82		0.74	0.65	
	23	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.95	0.92		0.86		0.82		0.74	0.65	
	24	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.95	0.92		0.86		0.82		0.74	0.65	
	25	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.95	0.92		0.86		0.82		0.74	0.65	
26	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.95	0.92		0.86		0.82		0.74	0.65		
27	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.95	0.92		0.86		0.82		0.74	0.65		
高性能V型	31	1.00	1.03	1.04		1.04		1.02		0.93	0.74	1.00	1.04	1.04		1.01		0.97		0.85	0.70	
	32	1.00	1.03	1.04		1.04		1.02		0.93	0.74	1.00	1.04	1.04		1.01		0.97		0.85	0.70	
	33	1.00	1.03	1.04		1.04		1.02		0.93	0.74	1.00	1.04	1.04		1.01		0.97		0.85	0.70	
	34	1.00	1.03	1.04		1.04		1.02		0.93	0.74	1.00	1.04	1.04		1.01		0.97		0.85	0.70	
	41	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00		0.85			1.00	0.95	0.91	0.89		0.88		0.75			
	42	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00		0.85			1.00	0.95	0.91	0.89		0.88		0.75			
	43	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00		0.85			1.00	0.95	0.91	0.89		0.88		0.75			
	44	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00		0.85			1.00	0.95	0.91	0.89		0.88		0.75			
	45	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00		0.85			1.00	0.95	0.91	0.89		0.88		0.75			
	51	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.99	0.96		0.92		0.89		0.80	0.71	
	52	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.99	0.96		0.92		0.89		0.80	0.71	
	53	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.99	0.96		0.92		0.89		0.80	0.71	
	54	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.99	0.96		0.92		0.89		0.80	0.71	
	55	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.99	0.96		0.92		0.89		0.80	0.71	
56	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.99	0.96		0.92		0.89		0.80	0.71		
57	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.99	0.96		0.92		0.89		0.80	0.71		
58	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.99	0.96		0.92		0.89		0.80	0.71		
59	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.99	0.96		0.92		0.89		0.80	0.71		
60	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	0.99	0.96		0.92		0.89		0.80	0.71		
円筒型	61	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.01	1.00		0.96		0.93		0.82	0.70	
	62	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.01	1.00		0.96		0.93		0.82	0.70	
	63	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.01	1.00		0.96		0.93		0.82	0.70	
	64	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.01	1.00		0.96		0.93		0.82	0.70	
	65	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.01	1.00		0.96		0.93		0.82	0.70	
	66	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.01	1.00		0.96		0.93		0.82	0.70	
	67	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.01	1.00		0.96		0.93		0.82	0.70	
	71	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.99		0.97		0.94	0.87	
	72	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.99		0.97		0.94	0.87	
	73	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.99		0.97		0.94	0.87	
	74	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.99		0.97		0.94	0.87	
	75	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.99		0.97		0.94	0.87	
	76	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.99		0.97		0.94	0.87	
	77	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.99		0.97		0.94	0.87	
	81	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00		0.97		0.91	0.81	
	82	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00		0.97		0.91	0.81	
	83	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00		0.97		0.91	0.81	
	84	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00		0.97		0.91	0.81	
85	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.00		0.97		0.91	0.81		
86	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	0.99		0.98		0.97		0.89	0.81		
87	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	0.99		0.98		0.97		0.89	0.81		
88	1.00	1.00	1.00		1.00		1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	0.99		0.98		0.97		0.89	0.81		

付表-A.2 速度係数

ひずみ 速度	反力								吸収エネルギー								
	0.1%/s	1%/s	5%/s	10%/s	15%/s	20%/s	25%/s	30%/s	0.1%/s	1%/s	5%/s	10%/s	15%/s	20%/s	25%/s	30%/s	
汎用V型	1	1.00	1.06	1.16	1.22	1.25	1.27	1.29	1.31	1.00	1.08	1.17	1.22	1.25	1.27	1.29	1.30
	2	1.00	1.06	1.16	1.21	1.23	1.25	1.27	1.28	1.00	1.07	1.17	1.22	1.25	1.27	1.29	1.30
	3	1.00	1.06	1.15	1.20	1.23	1.25	1.26	1.27	1.00	1.07	1.17	1.22	1.24	1.26	1.28	1.29
	4	1.00	1.06	1.14	1.18	1.21	1.23	1.24	1.25	1.00	1.07	1.16	1.20	1.23	1.24	1.26	1.27
	5	1.00	1.06	1.13	1.17	1.19	1.21	1.22	1.23	1.00	1.07	1.14	1.18	1.21	1.22	1.24	1.25
	11	1.00	1.03	1.08	1.12	1.15	1.18	1.20	1.22	1.00	1.02	1.08	1.13	1.16	1.19	1.21	1.23
	12	1.00	1.02	1.07	1.11	1.14	1.17	1.19	1.21	1.00	1.01	1.06	1.11	1.14	1.17	1.19	1.21
	13	1.00	1.02	1.07	1.10	1.13	1.16	1.18	1.19	1.00	1.01	1.05	1.09	1.12	1.15	1.17	1.19
	14	1.00	1.01	1.06	1.09	1.12	1.14	1.16	1.17	1.00	1.01	1.04	1.07	1.10	1.12	1.14	1.16
	21	1.00	1.05	1.10	1.13	1.15	1.16	1.18	1.19	1.00	1.05	1.10	1.13	1.15	1.16	1.18	1.19
	22	1.00	1.06	1.11	1.14	1.16	1.17	1.19	1.20	1.00	1.05	1.11	1.14	1.16	1.17	1.18	1.19
	23	1.00	1.07	1.12	1.15	1.17	1.18	1.19	1.20	1.00	1.06	1.12	1.15	1.16	1.18	1.19	1.20
	24	1.00	1.08	1.13	1.16	1.18	1.19	1.20	1.21	1.00	1.07	1.13	1.16	1.17	1.19	1.20	1.21
	25	1.00	1.08	1.15	1.17	1.19	1.20	1.22	1.23	1.00	1.08	1.14	1.17	1.19	1.20	1.21	1.22
26	1.00	1.09	1.16	1.19	1.20	1.22	1.23	1.24	1.00	1.09	1.15	1.18	1.20	1.22	1.23	1.24	
27	1.00	1.10	1.17	1.20	1.22	1.23	1.25	1.26	1.00	1.10	1.17	1.20	1.22	1.23	1.24	1.25	
高性能V型	31	1.00	1.10	1.21	1.27	1.31	1.34	1.36	1.38	1.00	1.10	1.21	1.27	1.31	1.33	1.35	1.36
	32	1.00	1.09	1.21	1.27	1.30	1.33	1.35	1.36	1.00	1.10	1.21	1.26	1.30	1.32	1.34	1.35
	33	1.00	1.08	1.18	1.23	1.26	1.28	1.30	1.31	1.00	1.08	1.18	1.23	1.26	1.28	1.30	1.31
	34	1.00	1.06	1.17	1.22	1.25	1.26	1.28	1.29	1.00	1.06	1.17	1.22	1.25	1.27	1.29	1.30
	41	1.00	1.03	1.08	1.12	1.15	1.18	1.20	1.22	1.00	1.02	1.08	1.13	1.16	1.19	1.21	1.23
	42	1.00	1.03	1.08	1.12	1.15	1.18	1.20	1.22	1.00	1.02	1.07	1.12	1.15	1.18	1.20	1.22
	43	1.00	1.02	1.07	1.11	1.14	1.17	1.19	1.21	1.00	1.01	1.06	1.11	1.14	1.17	1.19	1.21
	44	1.00	1.02	1.07	1.10	1.13	1.16	1.18	1.19	1.00	1.01	1.05	1.09	1.12	1.15	1.17	1.19
	45	1.00	1.01	1.06	1.09	1.12	1.14	1.16	1.17	1.00	1.01	1.04	1.07	1.10	1.12	1.14	1.16
	51	1.00	1.02	1.06	1.09	1.11	1.12	1.13	1.15	1.00	1.01	1.04	1.07	1.09	1.10	1.11	1.12
	52	1.00	1.02	1.06	1.09	1.11	1.13	1.14	1.16	1.00	1.01	1.05	1.07	1.09	1.11	1.12	1.13
	53	1.00	1.02	1.07	1.10	1.12	1.14	1.15	1.17	1.00	1.02	1.06	1.08	1.10	1.11	1.13	1.14
	54	1.00	1.03	1.08	1.11	1.13	1.15	1.16	1.18	1.00	1.02	1.06	1.09	1.11	1.12	1.14	1.15
	55	1.00	1.03	1.08	1.12	1.14	1.16	1.17	1.19	1.00	1.02	1.07	1.09	1.11	1.13	1.14	1.16
56	1.00	1.04	1.09	1.12	1.15	1.17	1.18	1.20	1.00	1.03	1.07	1.10	1.12	1.14	1.15	1.16	
57	1.00	1.04	1.10	1.13	1.16	1.18	1.20	1.21	1.00	1.03	1.08	1.11	1.13	1.15	1.17	1.18	
58	1.00	1.05	1.10	1.14	1.17	1.19	1.21	1.23	1.00	1.03	1.09	1.12	1.14	1.16	1.18	1.19	
59	1.00	1.05	1.11	1.15	1.18	1.21	1.23	1.25	1.00	1.04	1.09	1.13	1.15	1.18	1.19	1.21	
60	1.00	1.06	1.12	1.16	1.19	1.22	1.24	1.26	1.00	1.05	1.10	1.14	1.16	1.19	1.20	1.22	
円筒型	61	1.00	1.06	1.18	1.24	1.29	1.32	1.35	1.37	1.00	1.05	1.17	1.24	1.28	1.31	1.33	1.35
	62	1.00	1.06	1.16	1.23	1.27	1.30	1.32	1.35	1.00	1.05	1.16	1.22	1.26	1.29	1.31	1.33
	63	1.00	1.05	1.15	1.20	1.24	1.26	1.29	1.30	1.00	1.05	1.15	1.20	1.24	1.27	1.29	1.31
	64	1.00	1.05	1.14	1.19	1.22	1.25	1.27	1.28	1.00	1.05	1.14	1.19	1.23	1.25	1.28	1.29
	65	1.00	1.04	1.13	1.17	1.20	1.23	1.24	1.26	1.00	1.05	1.13	1.18	1.22	1.24	1.26	1.28
	66	1.00	1.04	1.12	1.16	1.18	1.20	1.22	1.23	1.00	1.05	1.12	1.17	1.20	1.22	1.24	1.26
	67	1.00	1.03	1.09	1.13	1.15	1.16	1.17	1.18	1.00	1.05	1.11	1.14	1.17	1.19	1.21	1.23
	71	1.00	1.03	1.08	1.12	1.15	1.18	1.20	1.22	1.00	1.02	1.08	1.13	1.16	1.19	1.21	1.23
	72	1.00	1.03	1.08	1.12	1.15	1.18	1.20	1.22	1.00	1.02	1.08	1.13	1.16	1.19	1.21	1.23
	73	1.00	1.03	1.08	1.12	1.15	1.17	1.19	1.21	1.00	1.02	1.07	1.12	1.15	1.18	1.20	1.22
	74	1.00	1.02	1.07	1.11	1.14	1.17	1.19	1.21	1.00	1.01	1.06	1.11	1.14	1.17	1.19	1.21
	75	1.00	1.02	1.07	1.11	1.14	1.16	1.18	1.20	1.00	1.01	1.05	1.10	1.13	1.16	1.18	1.20
	76	1.00	1.02	1.07	1.10	1.13	1.15	1.17	1.19	1.00	1.01	1.05	1.09	1.12	1.14	1.16	1.18
	77	1.00	1.01	1.06	1.09	1.12	1.14	1.16	1.17	1.00	1.01	1.04	1.07	1.10	1.12	1.14	1.16
	81	1.00	1.02	1.07	1.11	1.13	1.14	1.16	1.17	1.00	1.02	1.06	1.09	1.11	1.12	1.13	1.14
	82	1.00	1.03	1.08	1.11	1.14	1.15	1.17	1.18	1.00	1.02	1.07	1.10	1.12	1.13	1.14	1.15
	83	1.00	1.03	1.09	1.12	1.14	1.16	1.18	1.19	1.00	1.02	1.07	1.10	1.12	1.14	1.15	1.16
	84	1.00	1.03	1.09	1.12	1.15	1.17	1.18	1.19	1.00	1.02	1.07	1.10	1.13	1.14	1.16	1.17
85	1.00	1.03	1.09	1.13	1.15	1.17	1.19	1.20	1.00	1.02	1.08	1.11	1.13	1.15	1.16	1.17	
86	1.00	1.03	1.09	1.13	1.15	1.17	1.19	1.20	1.00	1.02	1.08	1.11	1.13	1.15	1.16	1.18	
87	1.00	1.04	1.10	1.14	1.16	1.18	1.20	1.21	1.00	1.03	1.08	1.12	1.14	1.16	1.17	1.18	
88	1.00	1.04	1.11	1.15	1.17	1.19	1.21	1.22	1.00	1.03	1.09	1.12	1.15	1.17	1.18	1.19	

付表-A.3 温度係数

温度	反力									吸収エネルギー				
	-30℃	-20℃	-10℃	0℃	10℃	23℃	30℃	40℃	50℃	23℃以下	30℃	40℃	50℃	
汎用V型	1	3.03	2.30	1.77	1.41	1.17	1.00	0.94	0.86	0.77	1.00	0.97	0.91	0.84
	2	2.02	1.64	1.37	1.20	1.09	1.00	0.97	0.90	0.81	1.00	0.97	0.93	0.87
	3	1.92	1.57	1.33	1.17	1.07	1.00	0.97	0.92	0.83	1.00	0.97	0.94	0.88
	4	1.70	1.41	1.21	1.10	1.04	1.00	0.99	0.96	0.90	1.00	0.98	0.96	0.91
	5	1.47	1.24	1.10	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96	1.00	0.99	0.98	0.95
	11	1.81	1.56	1.32	1.16	1.08	1.00	0.98	0.94	0.89	1.00	0.99	0.97	0.93
	12	1.79	1.50	1.29	1.15	1.07	1.00	0.98	0.95	0.89	1.00	0.98	0.96	0.92
	13	1.68	1.42	1.24	1.13	1.06	1.00	0.98	0.96	0.91	1.00	0.98	0.96	0.92
	14	1.56	1.33	1.19	1.10	1.05	1.00	0.98	0.97	0.93	1.00	0.98	0.95	0.91
	21	1.52	1.28	1.14	1.08	1.05	1.00	0.99	0.98	0.98	1.00	0.99	0.98	0.96
	22	1.56	1.30	1.16	1.09	1.06	1.00	0.99	0.98	0.97	1.00	0.99	0.98	0.96
	23	1.60	1.33	1.18	1.11	1.07	1.00	0.99	0.98	0.96	1.00	0.99	0.98	0.95
	24	1.64	1.35	1.19	1.12	1.08	1.00	0.99	0.98	0.95	1.00	0.99	0.97	0.94
	25	1.66	1.39	1.23	1.14	1.08	1.00	0.99	0.97	0.94	1.00	0.99	0.97	0.93
26	1.68	1.42	1.26	1.15	1.08	1.00	0.99	0.97	0.93	1.00	0.99	0.97	0.92	
27	1.70	1.46	1.29	1.18	1.10	1.00	0.98	0.96	0.93	1.00	0.97	0.94	0.91	
高性能V型	31	2.42	2.03	1.70	1.42	1.20	1.00	0.93	0.89	0.91	1.00	0.97	0.94	0.90
	32	2.34	1.94	1.62	1.36	1.17	1.00	0.94	0.91	0.91	1.00	0.97	0.94	0.90
	33	1.99	1.60	1.34	1.16	1.06	1.00	0.98	0.96	0.93	1.00	0.98	0.95	0.91
	34	1.61	1.37	1.21	1.10	1.04	1.00	0.99	0.98	0.95	1.00	0.98	0.96	0.94
	41	1.81	1.56	1.32	1.16	1.08	1.00	0.98	0.94	0.89	1.00	0.99	0.97	0.93
	42	1.80	1.53	1.31	1.16	1.08	1.00	0.98	0.94	0.89	1.00	0.99	0.97	0.93
	43	1.79	1.50	1.29	1.15	1.07	1.00	0.98	0.95	0.89	1.00	0.98	0.96	0.92
	44	1.68	1.42	1.24	1.13	1.06	1.00	0.98	0.96	0.91	1.00	0.98	0.96	0.92
	45	1.56	1.33	1.19	1.10	1.05	1.00	0.98	0.97	0.93	1.00	0.98	0.95	0.91
	51	1.57	1.31	1.15	1.07	1.03	1.00	0.99	0.98	0.95	1.00	0.98	0.96	0.94
	52	1.59	1.32	1.16	1.08	1.05	1.00	0.99	0.97	0.95	1.00	0.98	0.96	0.94
	53	1.61	1.33	1.17	1.09	1.06	1.00	0.98	0.97	0.95	1.00	0.98	0.96	0.93
	54	1.63	1.33	1.18	1.10	1.07	1.00	0.98	0.96	0.94	1.00	0.98	0.95	0.93
	55	1.66	1.38	1.22	1.14	1.09	1.00	0.98	0.96	0.93	1.00	0.97	0.94	0.92
56	1.69	1.42	1.26	1.17	1.11	1.00	0.97	0.95	0.92	1.00	0.97	0.93	0.90	
57	1.72	1.46	1.31	1.20	1.13	1.00	0.97	0.94	0.92	1.00	0.96	0.92	0.89	
58	1.74	1.51	1.35	1.24	1.14	1.00	0.97	0.93	0.91	1.00	0.95	0.91	0.88	
59	1.77	1.55	1.39	1.27	1.16	1.00	0.96	0.93	0.90	1.00	0.95	0.90	0.86	
60	1.78	1.57	1.41	1.29	1.17	1.00	0.96	0.92	0.89	1.00	0.95	0.89	0.86	
円筒型	61	2.73	2.13	1.69	1.37	1.16	1.00	0.95	0.90	0.86	1.00	0.96	0.91	0.82
	62	2.57	2.00	1.59	1.31	1.13	1.00	0.96	0.92	0.86	1.00	0.97	0.92	0.82
	63	2.33	1.80	1.44	1.21	1.08	1.00	0.97	0.94	0.86	1.00	0.97	0.93	0.83
	64	2.20	1.70	1.36	1.16	1.05	1.00	0.98	0.95	0.86	1.00	0.98	0.93	0.84
	65	2.06	1.58	1.28	1.11	1.03	1.00	0.99	0.96	0.86	1.00	0.98	0.94	0.84
	66	1.88	1.44	1.17	1.04	1.00	1.00	1.00	0.97	0.86	1.00	0.99	0.95	0.85
	67	1.59	1.20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.86	1.00	1.00	0.96	0.86
	71	1.81	1.56	1.32	1.16	1.08	1.00	0.98	0.94	0.89	1.00	0.99	0.97	0.93
	72	1.81	1.55	1.32	1.16	1.08	1.00	0.98	0.94	0.89	1.00	0.99	0.97	0.93
	73	1.80	1.54	1.31	1.15	1.08	1.00	0.98	0.94	0.89	1.00	0.99	0.97	0.92
	74	1.79	1.50	1.29	1.15	1.07	1.00	0.98	0.95	0.89	1.00	0.98	0.96	0.92
	75	1.78	1.47	1.27	1.14	1.07	1.00	0.98	0.95	0.89	1.00	0.98	0.96	0.91
	76	1.67	1.40	1.23	1.12	1.06	1.00	0.98	0.96	0.91	1.00	0.98	0.96	0.91
	77	1.56	1.33	1.19	1.10	1.05	1.00	0.98	0.97	0.93	1.00	0.98	0.95	0.91
	81	1.66	1.36	1.19	1.09	1.05	1.00	0.99	0.97	0.96	1.00	0.98	0.96	0.94
	82	1.69	1.39	1.20	1.10	1.05	1.00	0.98	0.97	0.95	1.00	0.98	0.95	0.93
	83	1.72	1.41	1.22	1.11	1.05	1.00	0.98	0.96	0.94	1.00	0.97	0.95	0.92
	84	1.75	1.43	1.23	1.12	1.05	1.00	0.98	0.95	0.94	1.00	0.97	0.94	0.91
85	1.78	1.45	1.25	1.12	1.06	1.00	0.97	0.95	0.93	1.00	0.97	0.94	0.91	
86	1.81	1.49	1.28	1.15	1.08	1.00	0.97	0.94	0.92	1.00	0.96	0.93	0.89	
87	1.85	1.52	1.31	1.18	1.10	1.00	0.97	0.94	0.91	1.00	0.96	0.92	0.88	
88	1.89	1.55	1.34	1.20	1.11	1.00	0.96	0.93	0.90	1.00	0.95	0.91	0.87	

付録 B 熱伝導方程式による温度変化の試算

B-1. 一次元熱伝導方程式

気温の変化により、防眩材全体の温度がどの程度敏感に変化するかを理論的に算出するため、一次元熱伝導方程式を用いた計算を試みる。

熱伝導方程式を用いることで、物体の周囲で生じた温度変化が物体の内部の温度にも変化を与え、最終的に物体全体の温度が周囲の温度と同一になるまでの所要時間を算定することができる。一次元熱伝導方程式は、物体が無限の広さを持ち、厚さが一様な平面と仮定し、熱の伝導が物体の表面から中心に向かってなされると単純化した場合の式であり、次のように表される。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{B-1})$$

上式のうち T は温度、 x は物体の表面から厚さ方向の任意の距離、 t は物体周囲の温度変化後の経過時間を表す。また α は温度拡散率という、物質により異なる値をとる指標であり、次式で算定される。

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{B-2})$$

ここに k : 熱伝導率 (W/mK)

ρ : 密度 (kg/m³)

C_p : 定圧比熱 (J/kg K)

B-2. 式の展開と防眩材への適用

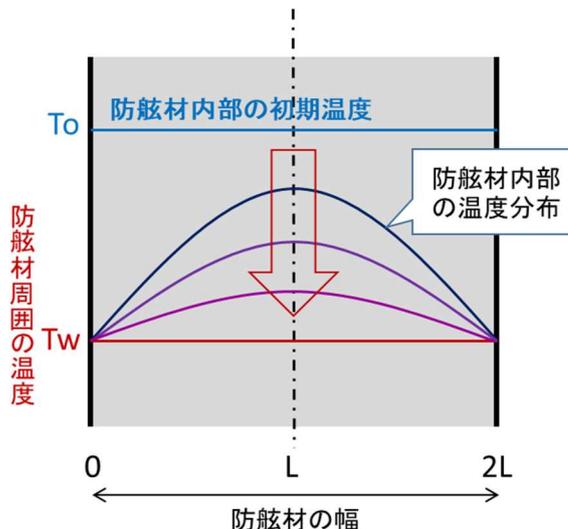
一次元熱伝導方程式を防眩材内部の温度変化に適用する場合、式(B-1)で用いた変数、式(B-2)で用いた定数等を図示すると付図-B.1 のようになる。

また、初期温度を T_0 、防眩材周囲での変化後の温度を T_w 、温度の変化分 [$T_0 - T_w$] を θ とすると、式(B-1)は次のように表せる。

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (\text{B-3})$$

また、付図-A.1 から次の初期条件と境界条件が定義できる。初期条件は防眩材周囲の温度が変化した瞬間、防眩材内部の温度は全面的に変化前の温度であることを示し、境界条件は、防眩材の表面の温度が周囲の温度と同一である ($\theta=0$) ことを示している。

初期条件



付図-B.1 防眩材内部の温度変化

$$t=0, 0 \leq x < 2L \quad \text{で} \quad \theta = \theta_i = T_0 - T_w$$

境界条件

$$X=0, t>0 \quad \text{で} \quad \theta=0$$

$$X=2L, t>0 \quad \text{で} \quad \theta=0$$

式(B-3)は変数分離法を用いて式展開し、前記の2つの境界条件を適用すると、温度変化 θ は、

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp\left\{-\left(\frac{n\pi}{2L}\right)at\right\} \sin \frac{n\pi x}{2L} \quad (\text{B-4})$$

と表現できる。ここまでの式展開については熱力学の教科書等に掲載されているので、本稿では省略する。

式(B-4)の中の定数 C_n は、前記の初期条件から

$$C_n = \frac{1}{L} \int_0^{2L} \theta_i \sin \frac{n\pi x}{2L} dx = \frac{4}{n\pi} \theta_i \quad (\text{B-5})$$

$n=1,3,5,\dots$

これらより、時間の経過による防眩材内の任意の位置の温度の変化割合は、次の式で算定できる。

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \exp\left\{-\left(\frac{n\pi}{2L}\right)at\right\} \sin \frac{n\pi x}{2L} \quad (\text{B-6})$$

$n=1,3,5,\dots$

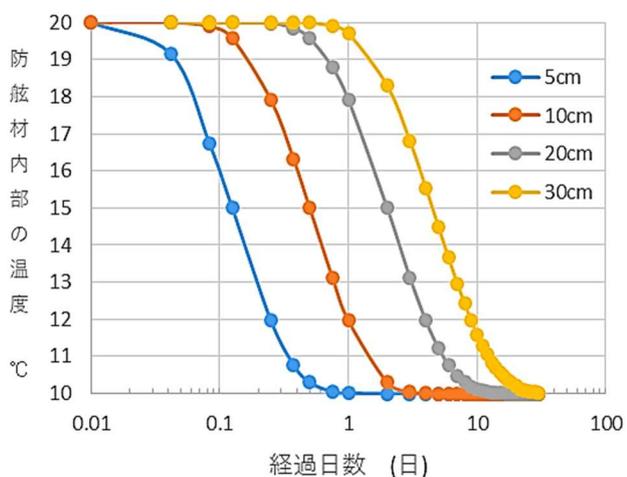
B-3. 温度変化の試算

前記の式(B-6)を用いて、防眩材の周囲の温度変化に対して防眩材内部の温度が時間の経過に伴いどのように変

化し、周囲と同じ温度に収束していくかを試算した。

付図-B.2 は、防舷材の厚さが10cm, 20cm, 40cm, 60cmの4通りの場合について、防舷材の温度が20℃、周囲の温度が10℃となった瞬間からの防舷材中心部(厚さの半分の位置)の温度変化を示したものである。本計算では熱伝導率 k を0.2W/m K、密度 ρ を1200kg/m³、定圧比熱 C_p を1900J/kg Kとして試算を行った。

横軸の経過日数は対数表記としているが、本文4.1で例示した厚さ20cmの防舷材の場合(図中の橙色の曲線を参照)、中心部の温度が防舷材周囲の温度と同一になるまで2日以上を要していることがわかり、本文の式(10)で算定される日数と概ね一致していることがわかる。

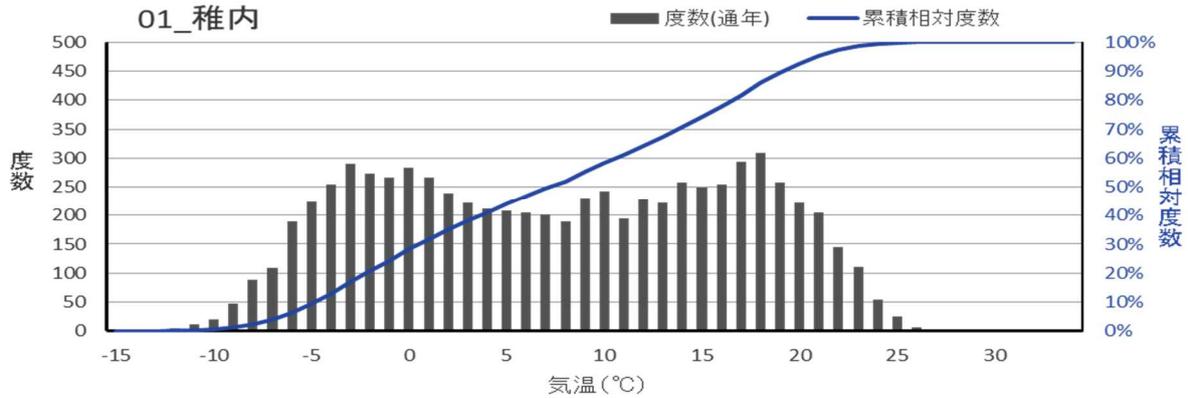


付図-B.2 温度変化の試算

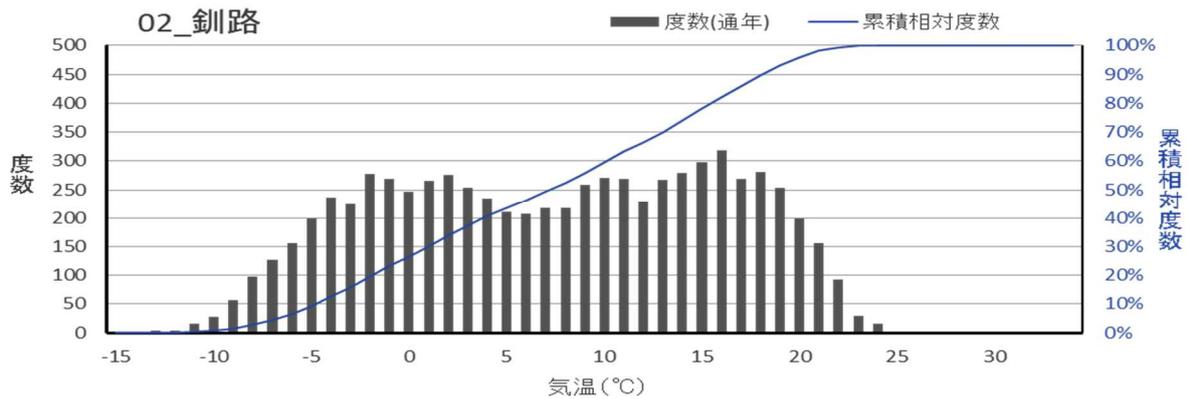
付録 C 日平均気温に関する情報

本文 4.2 にて例示した国内 14 ヶ所の港湾について、過去 20 年間の日平均気温の 1 度ごとの度数分布と累積相対度数を図化した。(付図-C.1～付図-C.14)

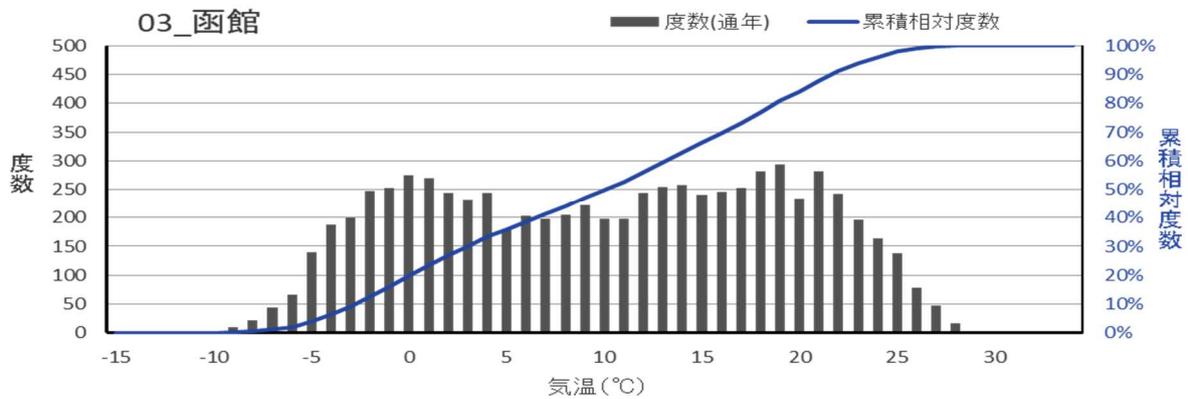
また、本文 4.3 で一覧表で示した設計温度設定地点の日平均気温について、最高値、最低値および上下限から 1%、2%、5%の値を付表-C に示した。



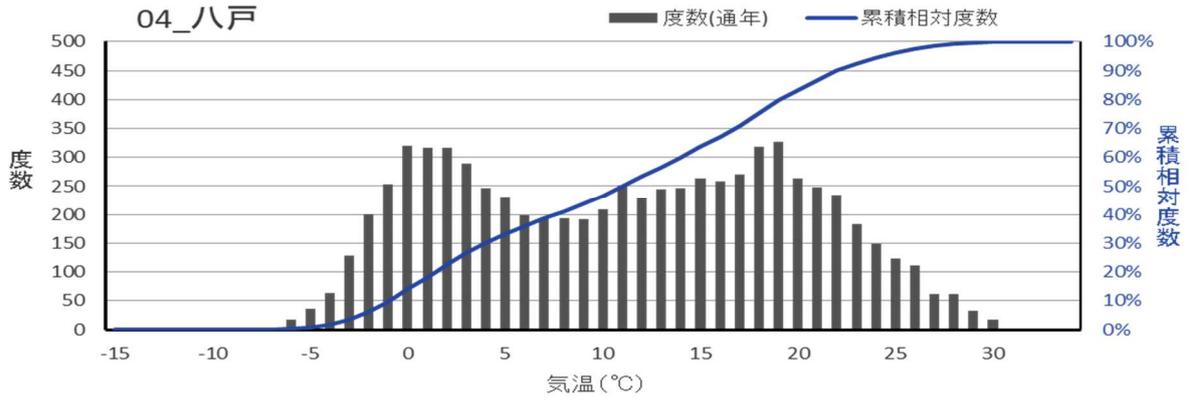
付図-C.1 度数分布(稚内)



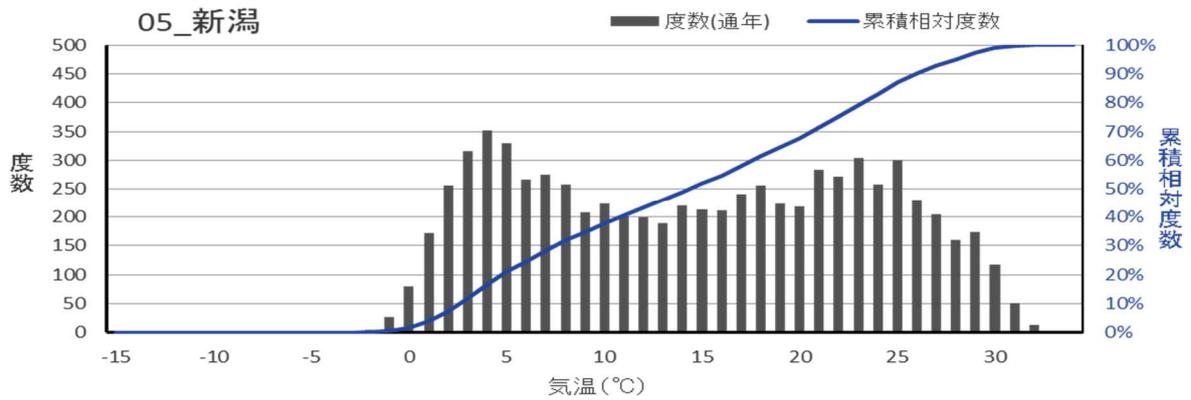
付図-C.2 度数分布(釧路)



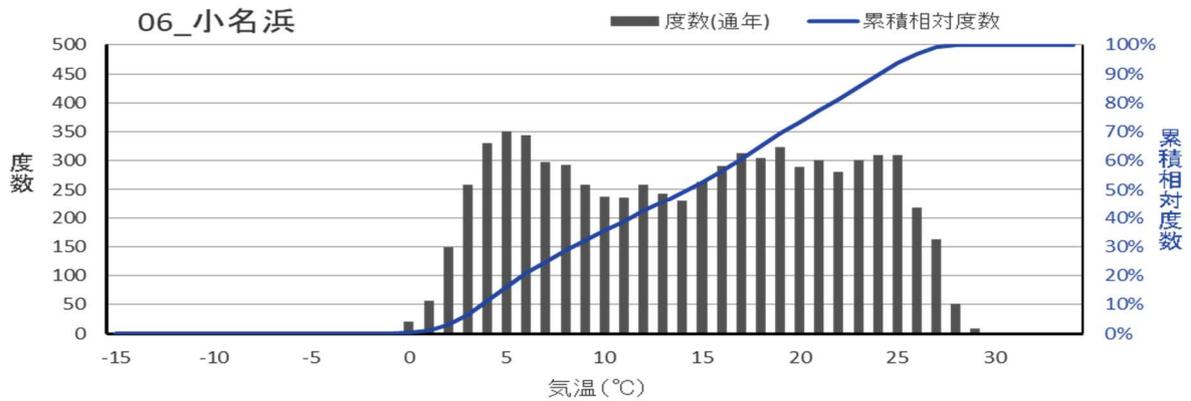
付図-C.3 度数分布(函館)



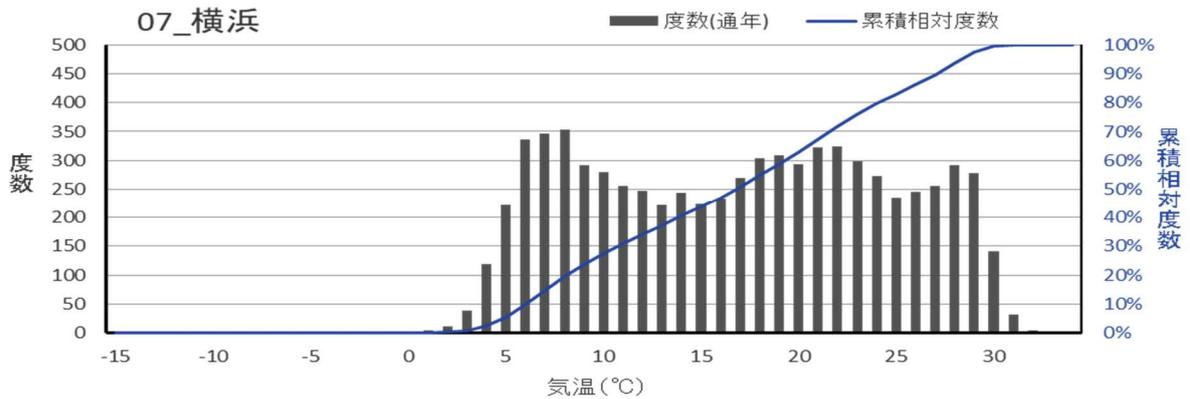
付図-C.4 度数分布(八戸)



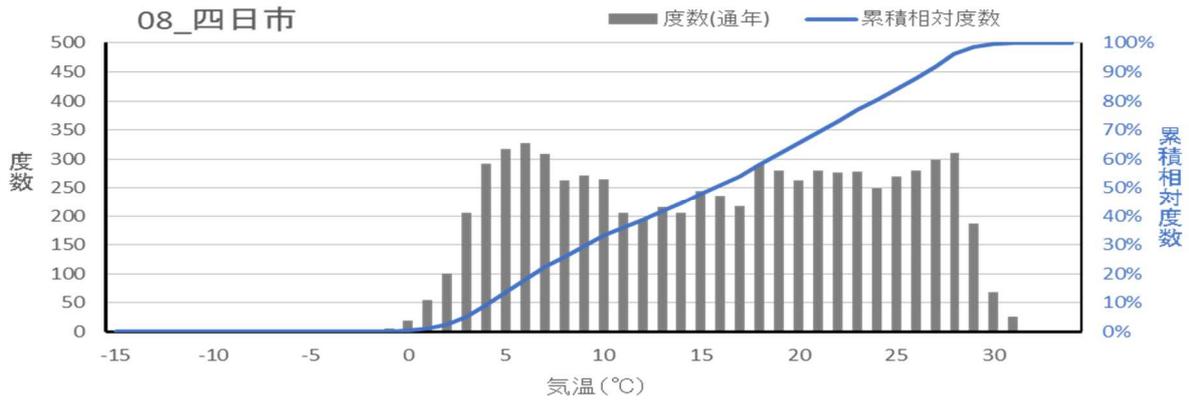
付図-C.5 度数分布(新潟)



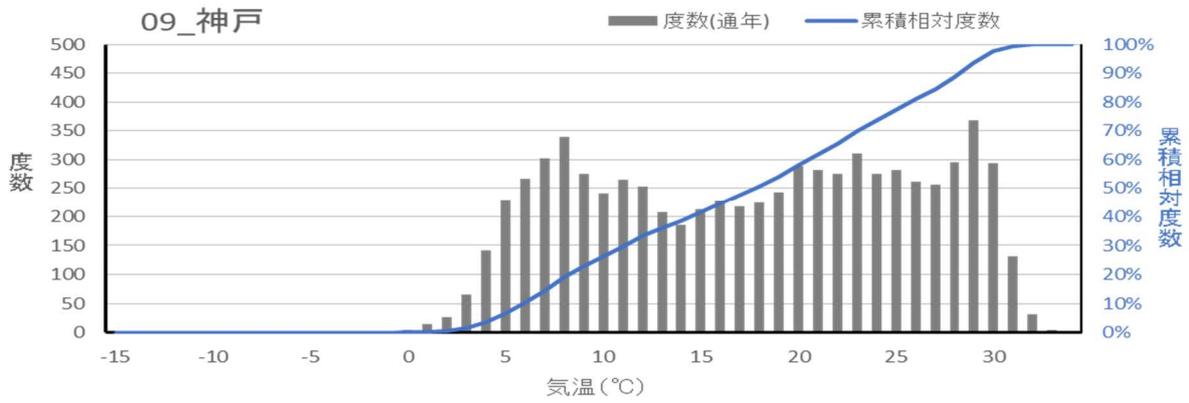
付図-C.6 度数分布(小名浜)



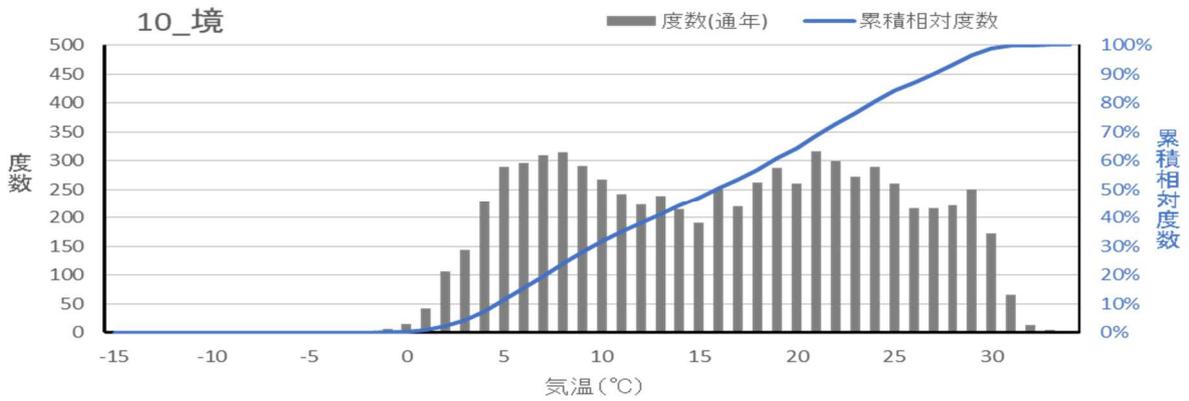
付図-C.7 度数分布(横浜)



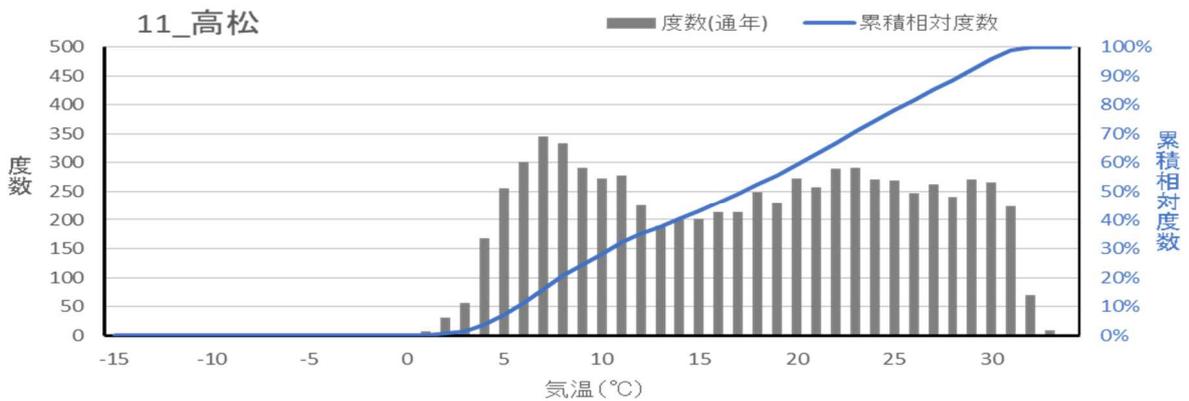
付図-C.8 度数分布(四日市)



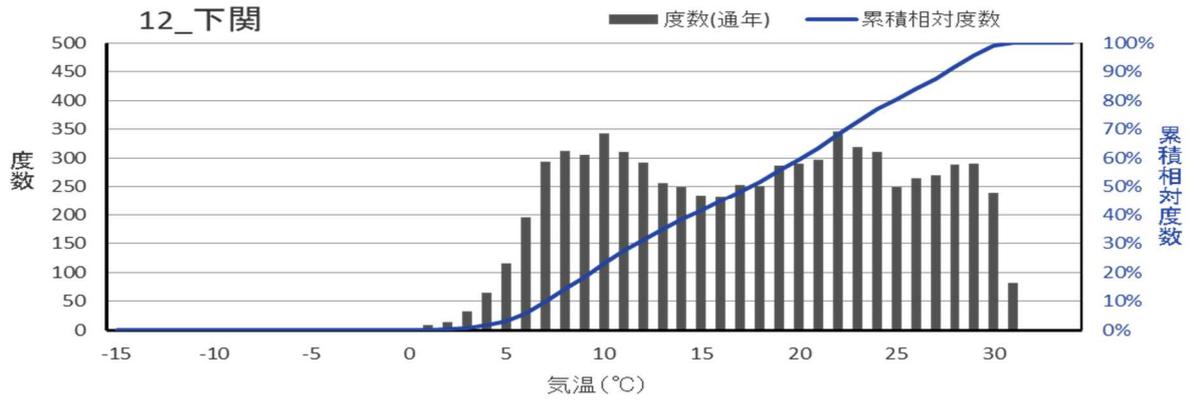
付図-C.9 度数分布(神戸)



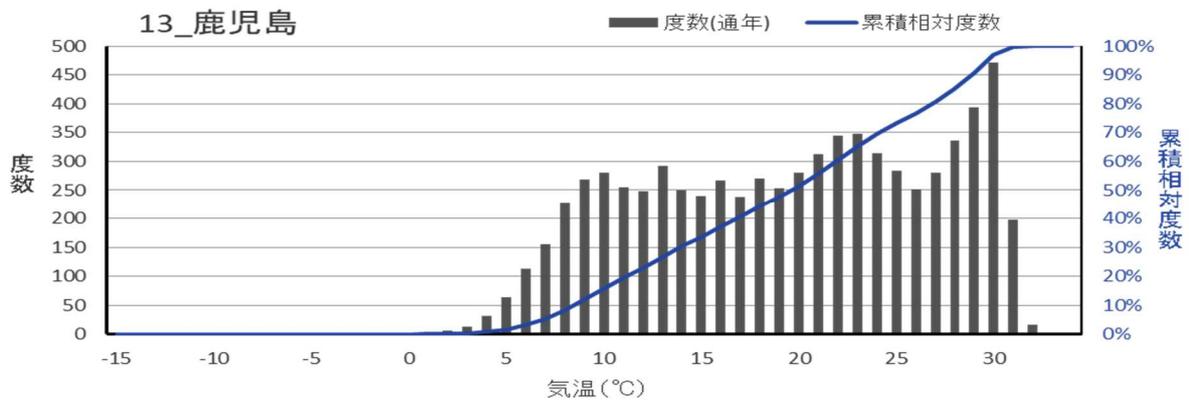
付図-C.10 度数分布(境)



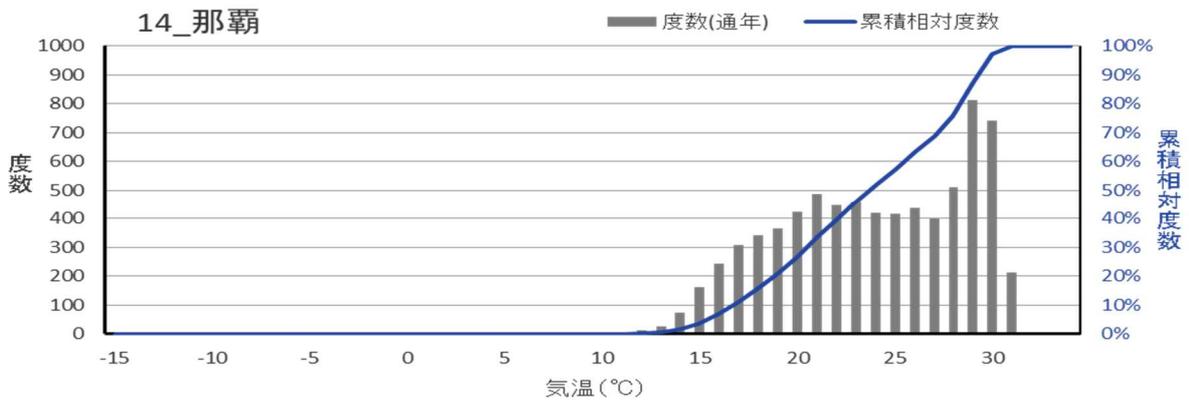
付図-C.11 度数分布(高松)



付図-C.12 度数分布(下関)



付図-C.13 度数分布(鹿児島)



付図-C.14 度数分布(那覇)

付表-C 設計温度設定地点の日平均気温

		計測値(気象庁観測 1998年9月1日~2018年8月31日の20年間の日平均気温)								
		最低値	1%	2%	5%	平均値	95%	98%	99%	最高値
北海道	稚内	-13.5	-9.2	-8.3	-6.6	7.2	20.8	22.3	23.1	25.8
	紋別	-15.4	-10.6	-9.3	-7.5	6.9	21.1	22.8	24.0	30.8
	根室	-11.9	-8.1	-7.1	-5.4	6.8	19.0	20.8	21.7	25.6
	釧路	-15.7	-9.5	-8.5	-6.8	7.2	19.6	20.9	21.6	23.7
	苫小牧	-12.3	-8.3	-7.1	-5.6	8.2	21.3	22.6	23.3	27.2
	函館	-10.4	-7.2	-6.0	-4.6	10.0	23.4	24.9	25.8	27.8
	小樽	-11.6	-7.7	-6.8	-5.2	9.3	22.6	24.2	25.1	28.5
	留萌	-13.6	-9.0	-7.8	-6.0	8.3	22.0	23.4	24.4	27.6
	稚内	-13.5	-9.2	-8.3	-6.6	7.2	20.8	22.3	23.1	25.8
太平洋側	青森	-7.5	-4.9	-4.2	-2.7	11.2	24.6	26.5	27.3	30.1
	八戸	-7.5	-4.8	-3.8	-2.4	10.9	24.2	26.3	27.6	30.2
	宮古	-6.2	-3.4	-2.4	-1.1	11.2	23.6	25.5	26.6	28.4
	仙台塩釜	-6.3	-3.1	-2.2	-0.9	12.3	24.9	26.2	26.9	28.0
	相馬	-4.3	-1.1	-0.5	0.8	13.2	25.8	27.3	28.0	30.6
	小名浜	-2.4	0.8	1.5	2.5	14.2	25.2	26.3	26.9	30.3
	鹿島	-0.5	1.5	2.2	3.2	15.6	27.1	28.0	28.6	30.3
	東京湾	0.3	3.1	3.7	4.9	16.8	28.2	29.1	29.5	32.2
	清水	0.7	3.7	4.3	5.4	17.3	27.9	28.7	29.3	31.4
	三河	-0.3	2.4	3.2	4.3	16.9	27.9	28.8	29.4	32.0
	伊勢湾	-1.7	0.9	1.7	2.9	15.6	27.6	28.6	29.2	31.5
	尾鷲	0.4	3.1	3.8	5.0	16.9	27.5	28.6	29.2	31.9
	紀伊	-0.4	3.0	3.7	4.7	17.5	29.1	29.8	30.2	32.7
	高知	-0.2	3.0	3.8	5.1	18.1	28.6	29.5	29.9	32.1
	宿毛	-0.4	3.3	4.3	5.6	17.9	28.0	28.7	29.1	31.1
	宮崎	0.3	3.9	4.7	5.9	18.4	28.6	29.6	30.1	31.6
志布志	-1.0	3.1	3.9	5.2	17.9	27.4	28.1	28.5	29.6	
鹿児島	-0.4	4.3	5.3	6.8	19.6	29.6	30.2	30.5	31.7	
日本海・東シナ海側	青森	-7.5	-4.9	-4.2	-2.7	11.2	24.6	26.5	27.3	30.1
	秋田	-5.5	-3.2	-2.5	-1.2	12.3	26.1	27.7	28.5	31.6
	酒田	-4.4	-1.6	-0.8	0.3	13.1	26.7	28.2	28.9	31.5
	新潟	-2.8	-0.4	0.3	1.3	14.3	27.9	29.1	29.9	33.0
	富山湾	-3.2	-0.8	-0.2	0.8	14.7	27.9	29.2	29.7	32.8
	金沢	-2.6	0.2	0.8	2.0	15.5	28.6	29.7	30.2	32.4
	敦賀	-1.3	1.1	1.7	2.8	16.1	28.9	30.0	30.5	32.4
	舞鶴	-2.1	0.2	0.8	1.8	15.3	28.4	29.4	30.0	31.3
	境	-3.5	1.0	1.7	3.2	15.8	28.5	29.5	30.0	32.5
	浜田	-3.0	2.1	3.0	4.3	16.0	28.0	28.8	29.3	31.8
	関門	-1.7	3.1	4.2	5.7	17.5	28.8	29.6	30.0	31.3
	博多	-2.0	3.0	3.9	5.4	17.9	29.7	30.5	30.9	32.8
	長崎	-2.4	3.0	3.9	5.4	18.0	28.8	29.6	30.1	32.4
	有明海	-3.0	1.9	2.8	4.2	18.1	29.5	30.3	30.6	31.9
	川内	-1.7	2.8	3.4	4.6	17.8	28.4	29.0	29.4	30.8
	鹿児島	-0.4	4.3	5.3	6.8	19.6	29.6	30.2	30.5	31.7
瀬戸内海	大阪湾	-0.1	2.8	3.5	4.7	17.6	29.9	30.7	31.1	32.7
	備讃	-1.2	2.5	3.3	4.4	17.2	29.7	30.6	31.1	33.0
	芸予	-2.2	1.7	2.5	3.9	17.0	29.3	30.2	30.8	32.0
	大分	-1.7	3.0	3.8	5.1	17.3	28.8	29.7	30.1	31.7
奄美・沖縄・特定離島	名瀬	7.3	11.6	12.2	13.3	21.9	29.4	29.9	30.2	31.1
	那覇	9.2	13.4	14.2	15.4	23.7	29.7	30.1	30.3	31.4
	石垣島	9.5	14.3	15.1	16.7	25.0	30.2	30.6	30.8	31.5
	南島	17.8	19.6	20.0	20.9	26.4	29.2	29.5	29.7	30.6

付録 D 新設計法による防舷材の試設計と手順

D.1 新設計法による試設計

(1) 試設計の条件

前章までに検討した気温等の条件設定を踏まえ、吸収エネルギーや反力の値が設計法の新旧、気温、接岸速度や接岸角度、防舷材の仕様によってどの程度の相違が生じるかを計算により確認した。

対象船舶の仕様は付表-D.1に示す、3万トンクラスの一般貨物船とした。この仕様はガイドラインに記載のゴム防舷材の設計事例のうち1例と同じものである。

接岸条件は付表-D.2に記載のとおり、平行接岸（接岸角度0度）と接岸角度5度の2通りとした。

温度条件は付表-D.3に記載のように、3.3で示した全国14ヶ所のうち寒冷地として釧路、国内の標準的な気温の地域として横浜、冬期も温暖な地域として那覇の3ヶ所を計算の対象とした。

防舷材の性能データとしては前章の検討でも用いた、国内防舷材メーカー各社提供の防舷材資料を利用した。

付表-D.1 対象船舶の仕様

船種	トン数 (DT)	垂線間長 L_{pp}	型幅 B	満載喫水 d
一般貨物船	35,220t	171m	28.3m	16.2m

付表-D.2 接岸条件

条件	接岸速度	接岸角度	防舷材高さ	防舷材間隔	接岸エネルギー
平行	0.1m/s	0度	1m	12m	181kJ
傾斜		5度			

付表-D.3 温度条件

港名	釧路	横浜	那覇
最高温度	21°C	30°C	31°C
最低温度	-9°C	3°C	14°C

(2) 平行接岸（接岸角度0）の場合

まず船舶が係留施設の法線に平行に接岸した場合の、新旧設計法による相違、防舷材の仕様や気温による相違を見る。

a) 吸収エネルギー

付図-D.1は、国内メーカー製造の汎用型と高性能型のV型防舷材（高さ1m）について、長さ1mあたりの吸収エネルギーの計算結果をプロットしたものである。

V型防舷材の吸収エネルギーについては、従前から概算値を算出するために次の式を用いることがあった。

$$E = 245 H^2 L \quad (D-1)$$

ここに、

E : 防舷材の吸収エネルギー(kJ)

H : 防舷材の高さ(m)

L : V型防舷材の長さ(m)

各メーカーともゴムの硬度を数段階に変化させた製品を取り揃え、そのうち1つの製品を標準的な硬度（ゴム質比率1.0）としており、概算値はその製品の吸収エネルギー相当となっている。そのため、図ではそれに当たる製品を標準と扱い、それより硬度が高く反力や吸収エネルギーの大きな製品を「硬質」、硬度が低く反力や吸収エネルギーの小さな製品を「軟質」として図化した。なお、試設計のグラフでは硬度の高い順にプロットしてある。

小さな黒丸で示した現行設計法の値からわかることは、汎用・高性能のいずれも、全体にゴム質が硬質なほど長さ1mあたりの吸収エネルギーが大きく、ゴム質により吸収エネルギー量に3倍近い差があることと、同等のゴム質で比較すると高性能の防舷材の方が吸収エネルギー量が大きいことである。

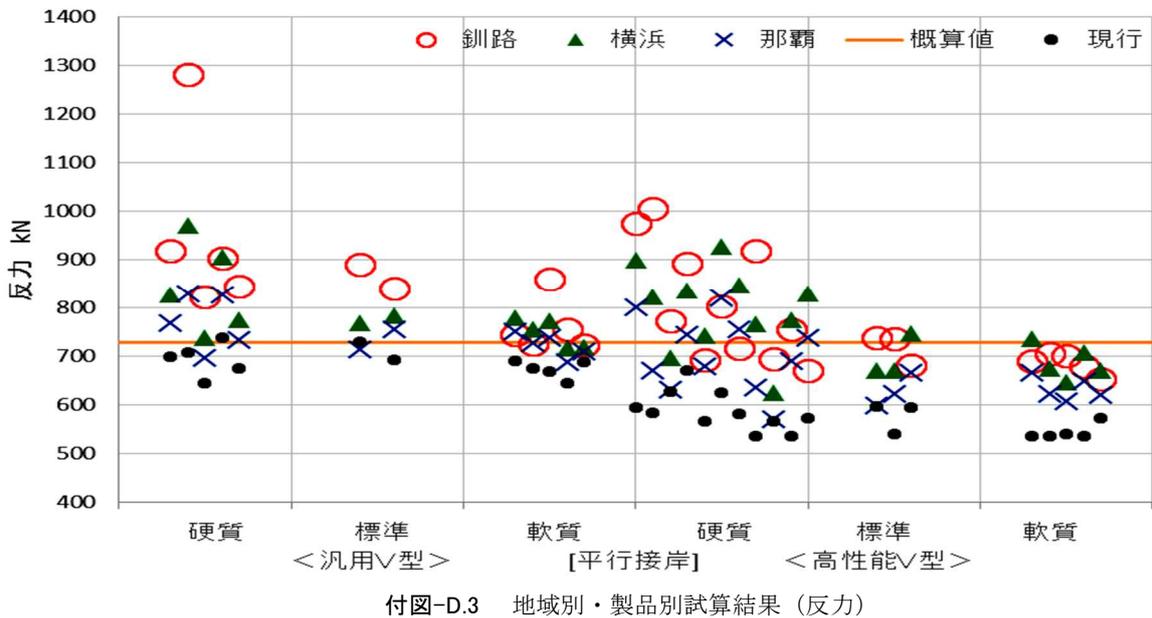
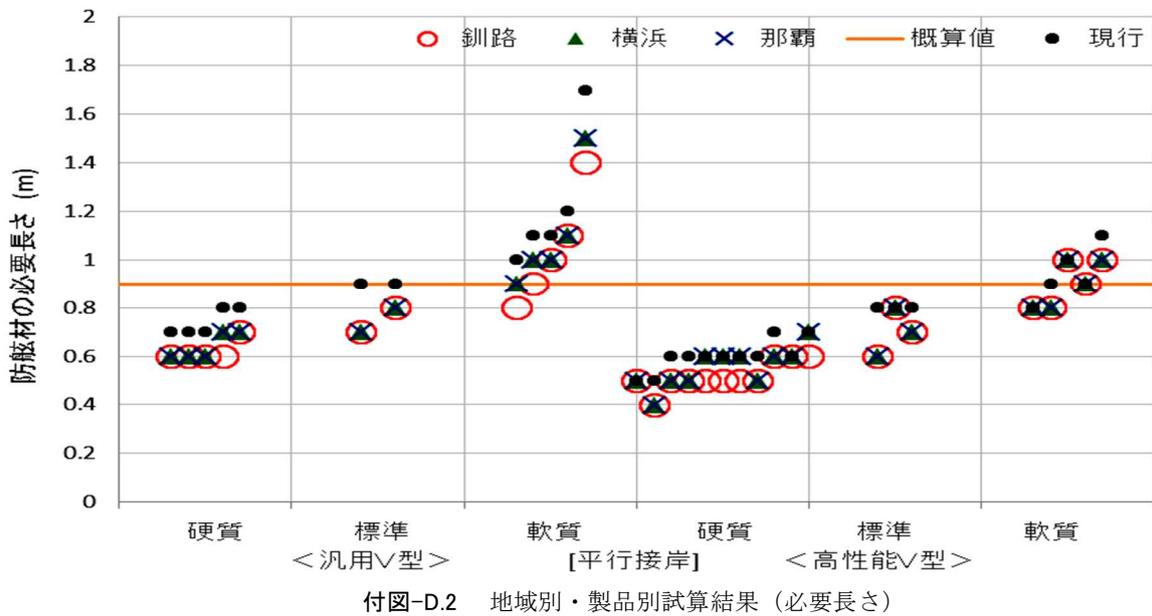
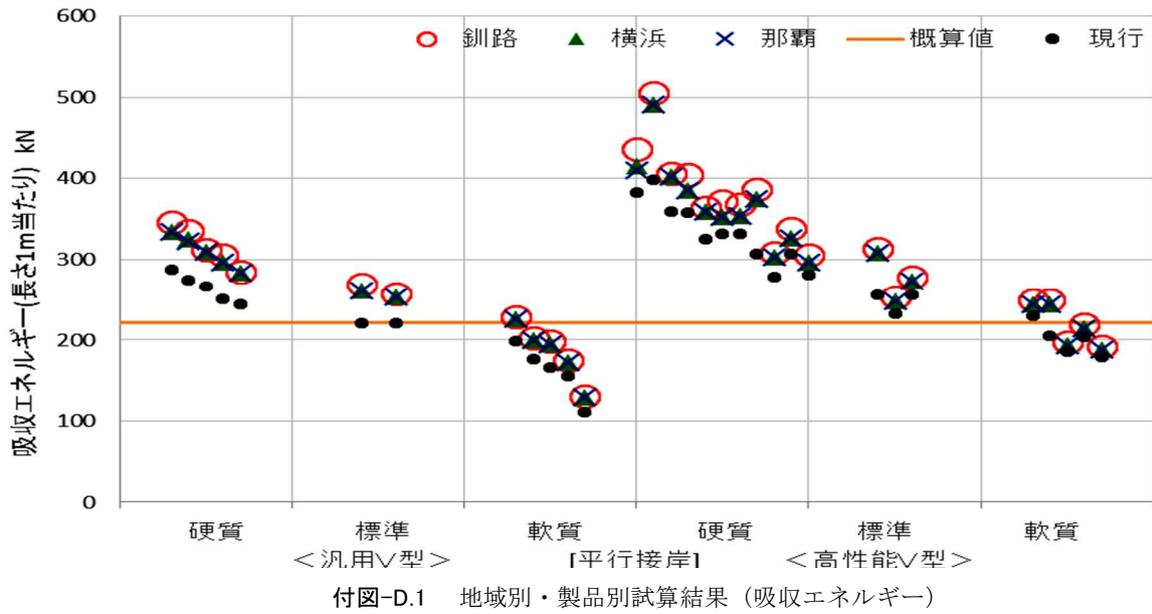
新設計法での計算結果は、図中に地域ごとに釧路は○、横浜は▲、那覇は×とマークを分けてプロットした。これより長さ1mあたりの防舷材の吸収エネルギーは、この条件下では全般に現行設計法での算出結果より大きな値が算出されることがわかる。値の増加は製品によるが5%~25%、平均では15%程度となっており、これは前節の図-5.1で示した吸収エネルギーの温・速係数の値に符合する。

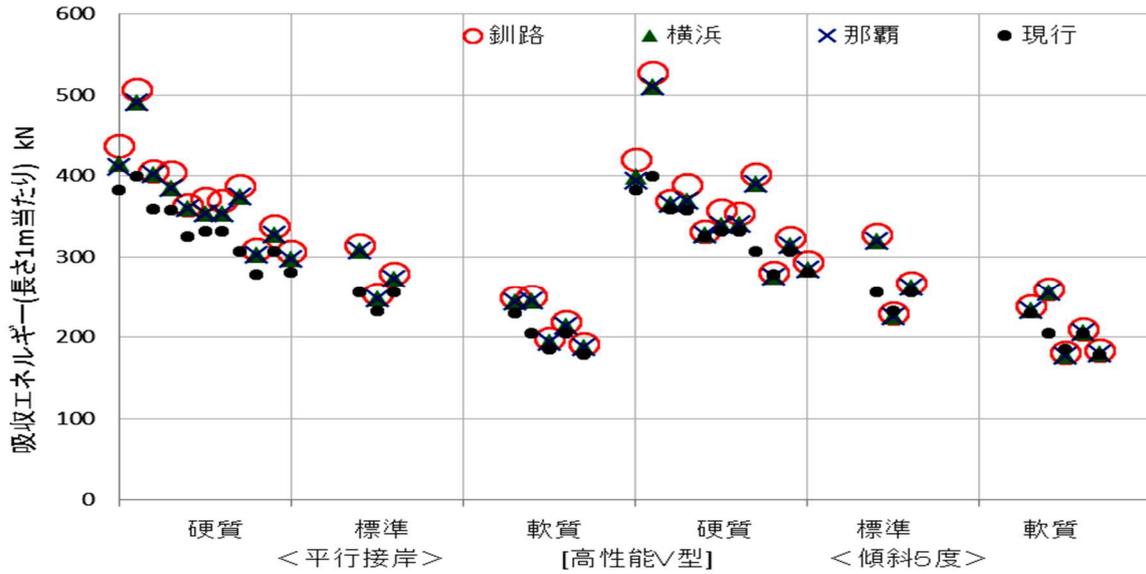
一方地域差については、○印の釧路の値が他の地域より若干大きめになっているものの、顕著な差は表れていない。これは、先に図-3.16~3.18に示したように吸収エネルギー計算用の温度係数は23°C以下では1.0で固定されており、かつ設計温度（上限）が那覇でも30°C未満で温度係数が大きく低下するほど高温でないため、地域差があまり生じなかったものと思われる。

b) 防舷材の必要長さ

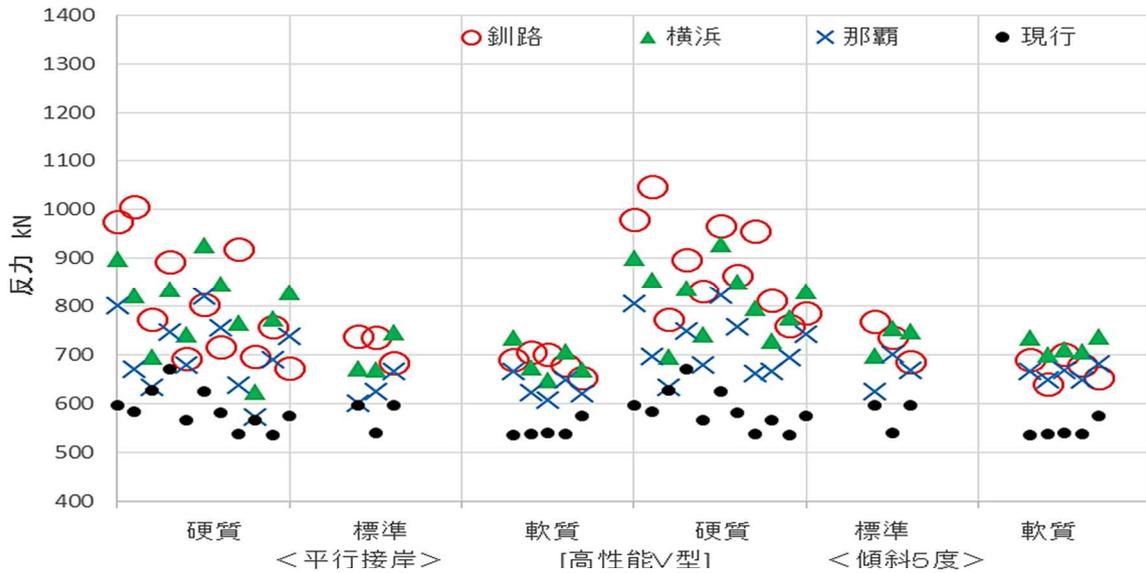
次に付図-D.2では、今回の船舶による接岸エネルギーを受け止めるための防舷材の必要長さを製品ごとに新旧設計法、地域別に求めプロットした。必要長さは接岸エネルギーを付図-D.1で示した長さ1mあたりの吸収エネルギーで除し、0.1m単位で切り上げて求めた。

接岸エネルギーは設計法や地域に依らず均一（本ケースでは181kJ）なので、防舷材の必要長さは基本的に吸収エネルギーの大きさに逆比例し、ゴムの硬度が低いほど長い防舷材が必要となること、高性能V型より汎用のV型の方が長い防舷材が必要となることわかる。





付図-D.4 傾斜角度の有無による影響 (吸収エネルギー)



付図-D.5 傾斜角度の有無による影響 (反力)

また、前述のように新設計法で計算した吸収エネルギーは全般に現行設計法での吸収エネルギーより大きめの値を算出するため、必要な防舷材長さは現行設計法で算出した場合より0.1m~0.3m短くて良いことがわかる。

地域差については、一部の製品で釧路での必要長さが他地域より0.1m短い場合があるほかは3地域とも同じ長さとなっており、気温差の影響はあまり現れないことがわかる。

なお、今回は試算としてわかりやすいよう、防舷材高さを1mとしたため、必要長さが高さより短い1m未満の結果も示しているが、一般には防舷材の長さが高さ以上となるよう選択する。

c) 反力

続いて反力について同じように図化したのが付図-D.3である。V型防舷材の反力についても、下記の通り概算値を算出する式があり、概算値として橙線で示している。

$$R = 736 H L \quad (D-2)$$

ここに、

R : 防舷材の反力(kN)

H, L : 式(11)に同じ

まず現行設計法での算定結果を見ると、ゴム質の硬度による差はほとんど見られず、汎用V型と概算値では700kN前後、高性能V型では500~600kN程度の値を示し

ている。

新設計法による結果は、全般には汎用V型の反力が高性能V型に比べ大きめの値となっていることは現行設計法と同じであるが、地域により値の差異が大きく現れている。全般に釧路での反力が最も大きく、横浜と那覇の比較では横浜が少し大きい結果となった。汎用V型、高性能V型とも、硬質の製品の一部は釧路における反力が突出して大きく算出されているが、これは本文5章で示した反力の複合係数が、氷点下の気温環境で著しく増加することを示している。

(3) 傾斜角度の有無による影響

船側が防舷材に接する際の傾斜角度を5度としたケースの計算結果について、平行接岸のケースと比較し相違とその傾向を述べる。なお、現行設計法の計算結果は吸収エネルギー、反力とも(2)と同一である。

a) 吸収エネルギー

高性能V型防舷材について、長さ1mあたりの吸収エネルギーの計算結果を付図-D.4に示す。図中にプロットされた記号の凡例は付図-D.1～D.3と同じであり、図の左側半分が平行接岸、右側半分が接岸角度5度の場合である。接岸角度の影響を見るのに高性能V型防舷材のデータを用いたのは、角度5度における傾斜係数の変動範囲が汎用V型に比べて大きく、接岸角度を考慮した場合の留意点がより明確になると思われるためである。

黒●で示す現行設計法と橙色の線で示す概算値の計算では傾斜角度を考慮する項目がないので、左右とも同じ値である。新設計法での値は左右で多少の相違があるが、平行接岸での結果に比べて全体的に増加もしくは減少する傾向は見られず、数値的には個々の製品による開差の方がはるかに大きいことが見て取れる。

b) 防舷材の反力

(2)のc)と同様の図表を、高性能V型防舷材の平行接岸の場合と傾斜角度5度の場合を比較すべく描いたのが付図-D.5である。新設計法での平行接岸と傾斜5度での反力を比べると、硬質の防舷材で若干反力が大きめに見て取れるが、個々の製品による開差の方がはるかに大きいことが確認できる。

(4) 試設計結果のまとめ

具体的な船舶条件と接岸条件を与えた場合に、現行設計法と新設計法の双方の算定結果に生じる開差と、設計上留意すべき点について、以下にまとめる。

- ・現行設計法での算定結果に比べ、新設計法では吸収エネルギーはやや大きめの値をとり、その分必要長さは短くなる。これらに関する釧路・横浜・那覇の3地点での開差は小さい。

- ・反力については新設計法の結果は現行より全般に大きく算出され、特にゴム質が硬く、寒冷地での条件では大幅に増大する製品がある。一方で軟質の製品は全般に現行より1割程度の増にとどまるなど、ゴム質により変化が異なる。

- ・傾斜接岸など船体が防舷材に角度をつけて接する場合は、接岸エネルギー、必要長さ、反力のどの項目も平行接岸に対して多少の値の変化があるが、防舷材の製品間の差よりはるかに小さい。

D.2 計算手順

(1) 計算の条件

D.1に記載の平行接岸の条件で、ゴム質標準の高性能V型防舷材の一例を用いるケースを計算する。定数は付表-D.4に示す。

付表-D.4 計算条件

船種	一般貨物船
トン数(DT)	35,220t
垂線間長 L_{pp}	171m
型幅 B	28.3m
満載喫水 d	16.2m
接岸速度 V_B	0.1m/s
防舷材間隔 S	12m
防舷材高さ	1m
接岸エネルギー	181kJ
最高～最低温度	30℃～3℃
吸収エネルギー(カタログ値)	284kJ
反力(カタログ値)	677kN

(2) 吸収エネルギー(長さ1m当たり)の計算

新設計法での吸収エネルギーの計算式は、本文2.4にも記載の

$$E_A^- = E_A C_{pE}^- C_{aE}^- V_{FE}^- T_{FE}^- C_{aGE}^- \quad (D-3)$$

であり、このうち E_A は付表-D.4にある吸収エネルギーのカタログ値284kJ、 C_p は製造誤差係数0.9、傾斜係数 C_{aE} と経年変化係数 C_{aGE} は1.0が代入される。

速度係数 V_{FE} は付図-D.6から読み取るが、図の横軸はひずみ速度のため、付表-D.4に記載の接岸速度0.1m/sを防舷材高さ1mで除してひずみ速度10%/sを算出して速度係数を読み取ると、図より1.09が得られる。

温度係数TFEは付図-D.7から、最高温度(30°C)のときの値0.99を読み取り、これらの値を式(D-3)に代入すると

$$E_A = 284 * 0.9 * 1.0 * 1.09 * 0.99 * 1.0 = 275 \text{kJ}$$

となる。

(3) 必要な防舷材長さの計算

防舷材の長さは、接岸エネルギーを吸収できる分必要なため、接岸エネルギーを(2)で算定した長さ1m当たりの吸収エネルギーで除して必要な長さを求める。

$$\frac{\text{接岸エネルギー} 181 \text{kJ}}{\text{1m当たりの吸収エネルギー} 275 \text{kJ}} = 0.66 \text{m}$$

となり、防舷材の長さは一般に0.1m単位のため切り上げて0.7mが必要な長さとなる。

(4) 反力の計算

反力は、本文2.4に記載の式

$$R^+ = R_R C_{pR}^+ C_{aR}^+ V F_R T F_R^+ C_{agR}^+ \quad (D-4)$$

により求めるが、今回は反力のカタログ値が長さ1m単位での値であるため、式(D-2)で得た値に(3)で算出した防舷材長さを乗じることで防舷材1ヶ所あたりの反力値が得られる。

C_p^+ は製造誤差係数1.1、傾斜係数 C_{aR} と経年変化係数 C_{adR}^+ は1.0であり、速度係数VFRは付図-D.6からひずみ速度10%/sで1.11、温度係数TFRは付図-D.7から最低温度(3°C)のときの値1.11が得られる。

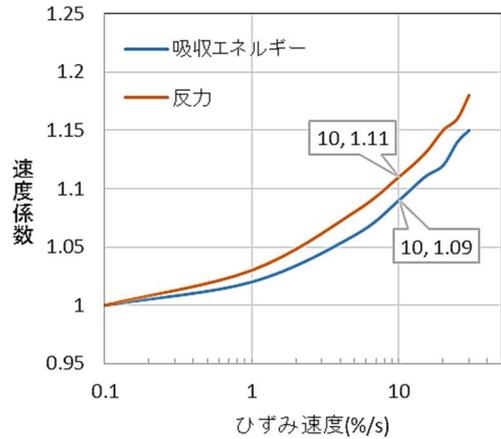
これらの値を式(D-2)に代入して

$$R = 677 * 1.1 * 1.0 * 1.11 * 1.11 * 1.0 = 918 \text{kN (1mあたり)}$$

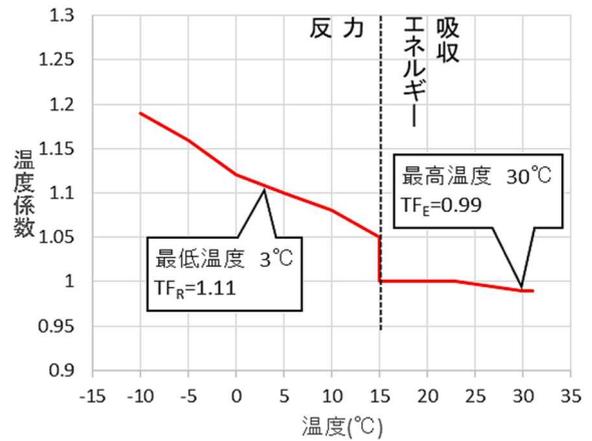
防舷材1ヶ所あたりの反力は

$$918 * 0.7 = 643 \text{kN}$$

と算出される。



付図-D.6 速度係数



付図-D.7 温度係数