

係留小型船舶のサージ減衰係数と係留索特性 に関する現地調査

A STUDY OF DAMPING COEFFICIENT AND CHARACTERISTICS OF MOORING ROPES FOR MOORED FISHING BOATS

大塚淳一¹・小玉茂義²・吉野真史³・白石悟⁴

Junichi OTSUKA, Shigeyoshi KODAMA, Masafumi YOSHINO and Satoru SHIRAISHI

¹正会員 博(工) (独) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²非会員 (独) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³正会員 (株) アルファ水工コンサルタンツ (〒063-0829 北海道札幌市西区発寒9条14丁目)

⁴正会員 博(工) 北海道工業大学空間創造学部 (〒006-8585 北海道札幌市手稲区前田7条15丁目)

Free oscillation tests using three types of moored fishing boats were performed to acquire the damping coefficient of their surging motion. The damping coefficient of a heavier boat was found to be much small due to its strong inertial force. It was also found that the viscous drag coefficient estimated from the damping coefficient was about 0.5 in the case of 5 to 20 gross tonnage. The characteristics of the mooring ropes used on the boats were also investigated from a tension strength test. The tension strength of the mooring ropes used over long periods had much decreased due to deterioration. The damping coefficients, the viscous drag coefficients and the characteristics of the mooring ropes acquired in this study are applicable to estimating proper parameters for the numerical simulations of dynamics of moored fishing boats.

Key Words : Moored fishing boat, damping coefficient, mooring rope

1. はじめに

岸壁に係留されている船舶が大きく動揺する場合、安全で効率的な荷役作業を行うことが困難となる。荷役障害が多く発生する港では、港内静穏度を高めることが求められ、通常、防波堤の延伸や消波構造物の設置による港内波高の低減対策が検討される。しかしながら、係留船舶の動揺現象は波高のみならず流速や風速、さらに、係留索の張力や防舷材の反力などの影響を受けるため、港内波高の低減のみに着目した対策では船体動揺を抑制することができず、荷役障害の対策として十分な効果が得られない場合がある。そのため、荷役障害に対する適切な対策を検討する際には、実際の波浪・風況と係留状況を再現可能な水理模型実験を実施し、船体動揺の低減量から対策効果を評価する必要があるといえるが、実験の複雑さや費用等の面からこのような水理模型実験が行われた例は極めて少ない。一方、近年開発が進められている数値計算による係留船舶の動揺シミュレーションは、実際の動揺現象を比較的高い精度で再現可能であることが確認されており、荷役障害の対策を検討する際の有効なツールとして期待さ

れている^{1), 2)}。

係留船舶の動揺シミュレーションを行う場合、計算条件として波浪や風況のみならず減衰係数や係留索の特性に関する情報を与える必要がある。貨物船やフェリーなど中・大型船舶の減衰係数や係留索の特性については、模型実験や現地観測から比較的多くの知見が得られている^{3), 4), 5)}が、漁船のような小型船舶についてはこれらに関する情報が極めて少ないため、適切な計算条件を設定することができないのが現状である。

そこで本研究では、岸壁に係留されている小型船舶を対象に動揺減衰量の現地調査および係留索の引張強度試験を行い、これまで不明な点が多かった小型船舶の減衰係数と係留索の伸度特性に関する知見を得ることを目的とする。

2. 調査方法

調査は北海道後志管内古平漁港の岸壁に係留されている3隻の漁船を対象に行われた。各漁船の総トン数は4.90 t (A船), 9.99 t (B船), 19.00 t (C

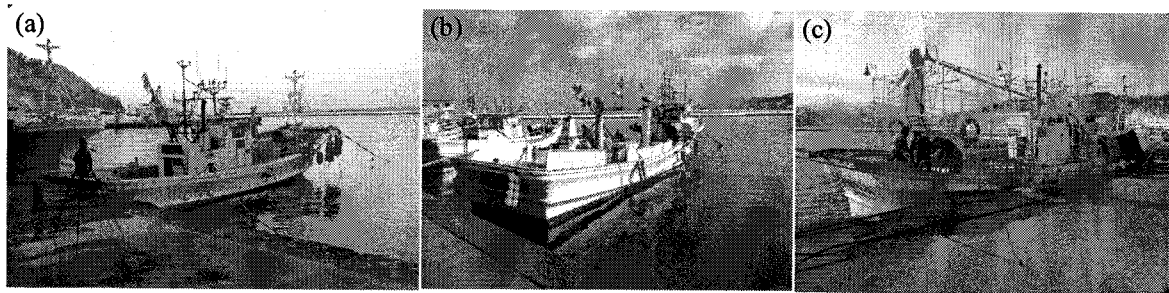


写真-1 調査対象漁船 ((a) : A船, 4.90 t, 縦付け, (b) : B船, 9.99 t, 縦付け, (c) : C船, 19.00 t, 横付け)

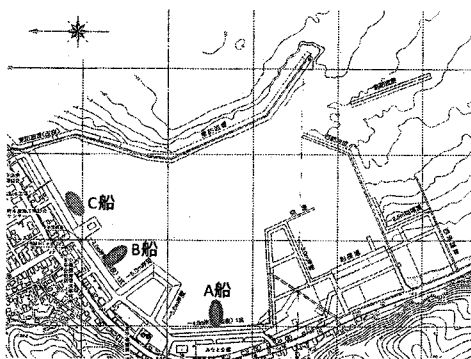


図-1 古平漁港の港形と各漁船の係留位置

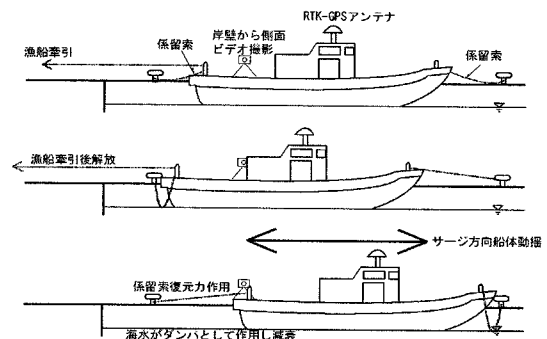


図-2 サージ減衰係数の調査方法

表-1 各漁船の船体諸元と係留索諸元

船名	A 船	B 船	C 船
総トン数	4.90 t	9.99 t	19.00 t
船長	12.70 m	13.80 m	18.30 m
船幅	3.45 m	3.09 m	4.47 m
喫水	1.00 m	1.20 m	1.35 m
没水幅	2.83 m	2.39 m	3.82 m
没水長	11.02 m	12.30 m	17.15 m
係留方法	縦付け	縦付け	横付け
係留索本数	船首2本 船尾2本	船首1本 船尾2本	船首1本 船尾1本
係留索延長	船尾右9.9 m 船尾左9.3 m	船尾右12.3 m 船尾左12.1 m	船首12.3 m 船尾11.7 m

注：A船、B船の船首係留索の延長は先端がアンカリングされており計測できなかった。

船)であり、A船とB船は岸壁法線に対して縦方向（縦付け）、C船は横方向（横付け）に係留されていた。写真-1に調査で使用した漁船、図-1に古平漁港の港形と各漁船の係留位置、表-1に各漁船の船体諸元と係留索諸元を示す。

船体動揺はサージ、スウェイ、ヒープ、ロール、ピッチ、ヨウの6自由度で説明されるが、本研究ではこれらの動揺成分のうち、サージ（船体の前進方向・後進方向）に対する減衰係数を調査した。以下に、サージ減衰係数の調査方法を示す。船首または船尾に設置したロープで船体をサージ方向に牽引し、張力が十分作用した状態でロープを切断すると船体は係留索の張力を復元力として自由振動を開始する。自由振動開始後、船上に設置したGPSで船体の位置情報をサンプリング間隔1秒で記録し、得られた位置情報からサージ方向の振動データを抽出した。

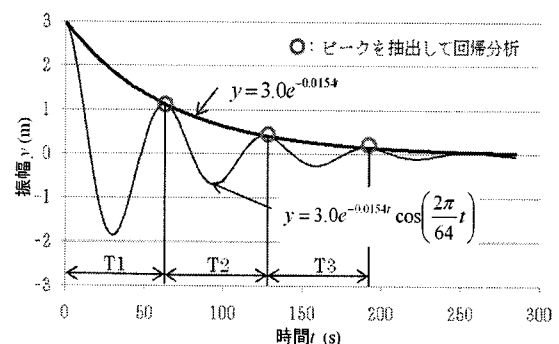


図-3 単一周期を仮定した減衰振動曲線から減衰係数を決定する方法（牽引距離3.0 (m)、減衰定数0.0154 (s⁻¹)、振動周期64.0 (s)、振動周期は実測データのピーク時間間隔 T_n (s)の平均値)

図-2にサージ減衰係数の調査方法を示す。本調査では、振動データの正側の包絡線を以下に示す減衰曲線で近似することにより減衰係数を求めた。

$$y = \lambda e^{-\beta t} \quad (1)$$

ここで、 y は振幅(m)、 λ は初期振幅(m)、 β は減衰係数(s⁻¹)、 t は時間(s)を示している。なお、本調査の場合、初期振幅 λ は船体の牽引距離となる。また、調査で得られたサージ方向の振動データを再現する際には、以下に示す単一周期を仮定した減衰振動の一般式を適用した。

$$y = \lambda e^{-\beta t} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (2)$$

ここで、 T は振動周期(s)を示している。本調査では振動周期として振動データのピーク時間間隔の平均値を与えた。図-3に単一周期を仮定した減衰振動

曲線から減衰係数を決定する方法を示す。なお、減衰係数 β は時間の逆数の次元を持つため、この値に振動周期 T を乗じて無次元量としたうえで調査結果の考察を行うものとする。

本調査では、係留索の使用期間が減衰係数に与える影響を把握するため、各漁船で実際に使用されていた係留索を用いて調査を行った後、新品の係留索に交換し再度調査を行った。調査は各漁船の新・旧両係留索に対してそれぞれ5回ずつ行われ、減衰振動の周期性が最も高いと判断されたデータを用いて減衰係数を計算した。各漁船の牽引距離は係留索の新・旧に関わらずA船で2.0 m、B船で3.2 m、C船で2.8 mとした。調査を行う際に、船体に風や波が作用すると船体の挙動が複雑になり減衰係数を正確に求めることが困難となるため、調査は風が弱く港内が静穏な日を選んで行われた。また、調査中に他の船舶の通過に伴う航跡波が発生した場合は調査を一時中断し、航跡波が完全におさまるのを確認してから調査を再開した。調査終了後、使用した係留索を回収し、後日、各係留索の引張強度試験を行った。

3. 結果および考察

(1) サージ減衰係数の調査結果

図-4、図-5、図-6はそれぞれA船、B船、C船に関するサージ減衰振動の実測値と単一周りを仮定して計算された減衰振動の近似曲線を示している。また、表-2に各漁船の振動周期と無次元減衰係数の調査結果を示す。なお、A船とB船では船体が防舷材に接触せずに振動していたため防舷材の影響を考慮しない。C船では船体側面が防舷材に接触することが確認されたが、接触時間が短時間であったため、C船についても防舷材の影響は無いものとして説明を行う。各漁船のサージ減衰振動は位相や振幅に差異が見られる部分があるものの、単一周りを仮定した減衰振動曲線で概ね近似可能といえる。なお、位相や振幅に差異が生じる理由について明確に示すことはできないが、船体に作用する僅かな風や波、さらに、係留索の延長や伸度特性の違いが影響していると推測される。船体がサージ方向に振動する際には、造波抵抗と粘性抵抗を受ける。振動周期が短い場合、振動の減衰に対して造波抵抗の影響が増加する一方、振動周期が長い場合は造波抵抗が減少し、粘性抵抗の影響が卓越する。したがって、振動周期が長いB船とC船では粘性抵抗の影響を比較強く受けられていると考えられる。一般に、係留索は経年劣化によって新しい係留索よりも堅くなる（同一伸度で発生する張力が大きくなる）ため、旧係留索を使用したほうが振動周期は減少する。この傾向はB船とC船で明確に現れている。一方、A船では新係留索を使用したケースにおいて極端に振動周期が減少している。この原因を本調査で明らかにすることはできなかった。

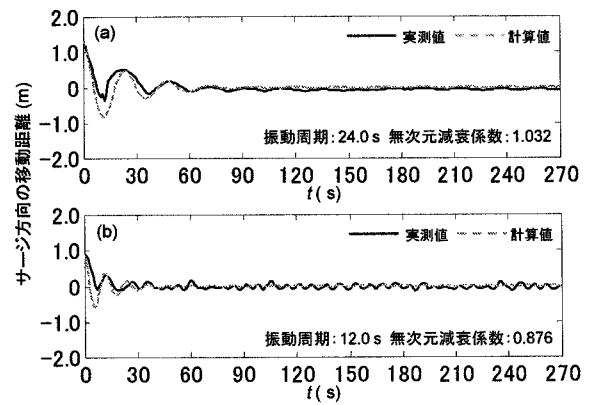


図-4 A船に関するサージ減衰振動の実測値と単一周りを仮定して計算された減衰振動の近似曲線 ((a): 旧係留索使用, (b): 新係留索使用)

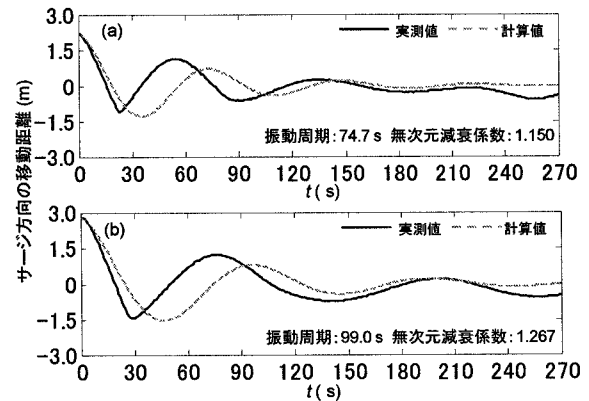


図-5 B船に関するサージ減衰振動の実測値と単一周りを仮定して計算された減衰振動の近似曲線 ((a): 旧係留索使用, (b): 新係留索使用)

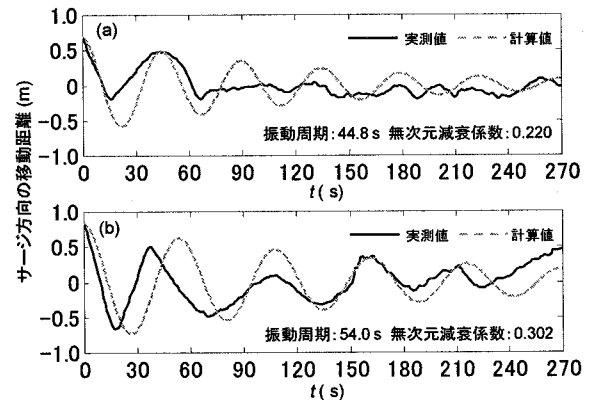


図-6 C船に関するサージ減衰振動の実測値と単一周りを仮定して計算された減衰振動の近似曲線 ((a): 旧係留索使用, (b): 新係留索使用)

表-2 各漁船の振動周期と無次元減衰係数

船名	係留索の新旧	振動周期	無次元減衰係数
A 船	旧	24.0 s	1.032
	新	12.0 s	0.876
B 船	旧	74.7 s	1.150
	新	99.0 s	1.267
C 船	旧	44.8 s	0.220
	新	54.0 s	0.302

たが、A船では新係留索を使用して調査を行う際に、何らかの不備があったものと推測される。B船とC船ではともに新係留索よりも旧係留索を使用したケースで無次元減衰係数が大きな値を示している。そのメカニズムについては不明であるが、係留索の劣化が減衰係数の増大に何らかの影響を及ぼしていると思われる。C船の無次元減衰係数はA船、B船よりもかなり小さな値を示している。喫水、没水幅、没水長の値が大きいC船では、造波抵抗と粘性抵抗が大きく作用するため、減衰係数はA船、B船よりも大きな値を示すと予想されたが、C船では総トン数が大きく造波抵抗力と粘性抵抗力よりも慣性力が卓越するため、動揺減衰量の時間変化がA船、B船よりも小さくなり、図-3に示す方法で得られた減衰係数の値が最も小さくなったと考えられる。

(2) 粘性抵抗係数の調査結果

係留船舶の動揺量は造波抵抗と粘性抵抗により減衰し、特に、振動周期が長い場合では粘性抵抗の影響が卓越する。A船の振動周期は比較的短いため（表-2参照）造波抵抗が動揺量の減衰に影響を与えていると推測されるが、ここでは、造波抵抗の影響は小さいと仮定し粘性抵抗の影響のみを考慮する。以下に減衰係数から粘性抵抗係数を算出する方法を示す。ばねの弾性力と粘性抵抗力を考慮した振動体の運動方程式は以下の式で表すことができる。

$$A\ddot{x} = -B\dot{x} - Cx \quad (3)$$

ここで、右辺第1項は粘性抵抗力、第2項はばね弾性力、 x は原点からの移動距離、 A は振動体の質量、 B は粘性抵抗係数、 C はばね係数を示している。 $x = Xe^{st}$ とおいて(3)式に代入すると以下の特性方程式が得られる。

$$As^2 + Bs + C = 0 \quad (4)$$

この特性方程式の根は、

$$s_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (5)$$

となる。ここで、 $B' = 2\sqrt{AC}$ とおき $\zeta = B/B'$ 、 $\omega_n = \sqrt{C/A}$ とすると、

$$C = \omega_n^2 A, \quad B = 2\zeta\omega_n A \quad (6)$$

が得られる。これらを(4)式に代入し特性方程式を書き直すと以下のようになる。

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (7)$$

この式の根は、

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_n \quad (8)$$

となり、 $0 < \zeta < 1$ のとき(8)式は振動系の固有角振動数 ω_d を用いて、

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_d \quad (9)$$

と表すことができる。これより、もとの微分方程式の基本解は、

$$e^{s_1 t}, e^{s_2 t} = e^{-\zeta\omega_n t} (\cos\omega_d t \pm j\sin\omega_d t) \quad (10)$$

となり、一般解は以下に示す、初期振幅 λ 、初期位

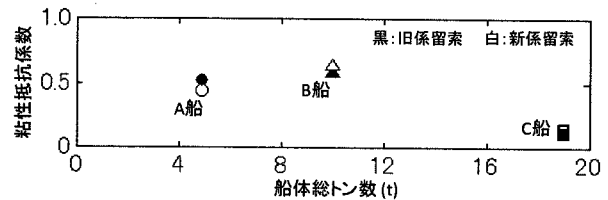


図-7 船体総トン数と線形の粘性抵抗係数の関係

相 ϕ とする減衰振動曲線となる。

$$x(t) = \lambda e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) \quad (11)$$

ここで、 $\zeta\omega_n$ は(1)式で示した減衰係数 β に対応するためこの関係を(6)式に代入することにより、

$$B = 2\beta A \quad (12)$$

を得ることができる。一方、港内長周期波影響評価マニュアル⁶⁾では浮体の運動方程式における粘性抵抗力は以下の式で示されている。

$$D(\dot{x}) = a\dot{x} + b|\dot{x}|\dot{x} \quad (13)$$

$$a = 4p(M+m)/T \quad (14)$$

$$b = 3q(M+m)/4 \quad (15)$$

ここで、 D は粘性抵抗力、 p は線形の粘性抵抗係数、 q は非線形の粘性抵抗係数、 T は振動周期、 M は船体の質量、 m は船体の付加質量を示している。本調査では船体の移動速度が遅いため速度の2乗項を無視すると、(13)式は右辺第1項 $a\dot{x}$ のみで表すことができる。この項は(3)式の右辺第1項に対応するため、(12)式と(14)式の係数を比較すると線形の粘性抵抗係数 p を

$$p = \beta T / 2 \quad (16)$$

として得ることができる。 βT は表-2に示す無次元減衰係数と同一であり、無次元減衰係数の半分の値が線形の粘性抵抗係数となる。

図-7は船体の総トン数と線形の粘性抵抗係数の関係を示している。C船で比較的小さな値を示しているものの、各漁船の粘性抵抗係数は0.5程度であることがわかる。また、久保ら⁴⁾が500 GT級船舶を使用して求めた線形の粘性抵抗係数も0.5と報告されている。したがって、5 tクラスから500 tクラスの船舶に関しては、船体の総トン数に関わらず線形の粘性抵抗係数は0.5程度であると考えられる。なお、港内が大きく擾乱し船体の移動速度が速い場合は非線形の粘性抵抗の影響（(13)式右辺第2項）を考慮することが必要といえる。

(3) 係留索の伸度特性の調査結果

表-3は減衰係数の調査で使用した係留索の一覧を示している。ここで、表中のPPロープはポリプロピレンロープ、タストンライトはPPロープの商品名、ハイゼックスとはポリエチレンロープの商品名を示している。また、旧係留索の破断張力は引張強度試験から得られた値であり、新係留索の破断強度はカタログ値を示している。A船、B船の旧係留索の使用期間はそれぞれ2年～3年であり、C船では交換してからそれほど日数が経過していなかった。

表-3 調査で使用した係留索の一覧

船名	係留索の新旧	係留索の種類	設置位置	径(mm)	破断張力(kN)
A 船	旧	PPロープ	船首左	28	98.50
	旧	PPロープ	船首右	23	58.90
	旧	PPロープ	船尾左	25	47.60
	旧	ポリエチレンクロス	船尾右	28	38.38
	新	タストンライト (PPロープ)	船首左右, 船尾左右	24	80.00
B 船	旧	未回収	船首	—	—
	旧	ポリエチレンロープ	船尾左	29	45.92
	旧	ポリエチレンロープ	船尾右	24	63.45
	新	タストンライト (PPロープ)	船尾左右	24	86.85
C 船	旧	PPロープ	船首	32	117.80
	旧	PPロープ	船尾	32	119.55
	新	タストンライト (PPロープ)	船首, 船尾	36	153.00
参考	新	ハイゼックス (ポリエチレンロープ)	—	12.2	17.64

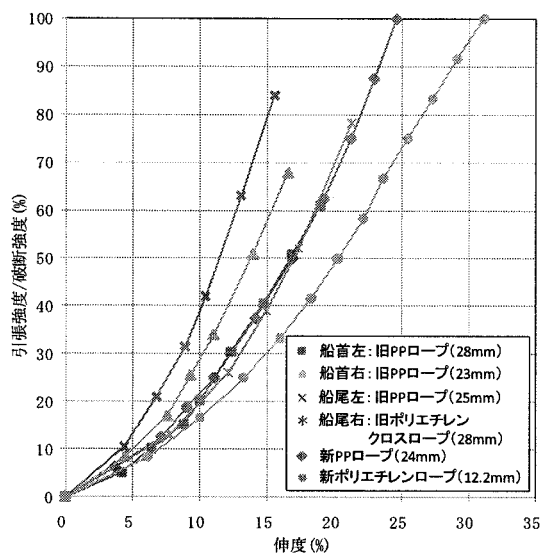


図-8 A船で使用した係留索の伸度特性

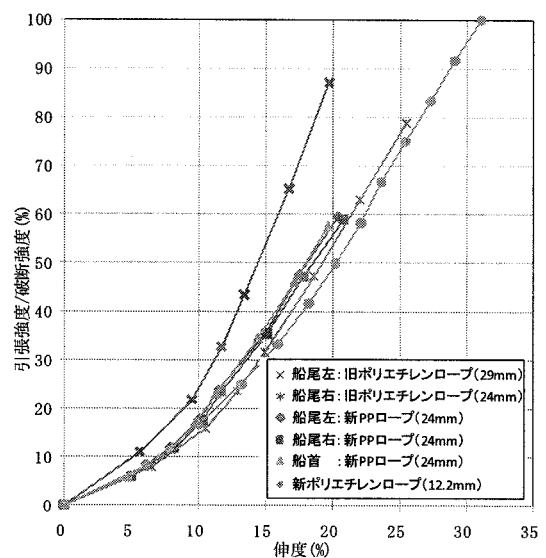


図-9 B船で使用した係留索の伸度特性

図-8, 図-9, 図-10は表-3に示す各漁船の調査で
使用した係留索の伸度特性を示している。通常、伸
度特性は引張強度と伸度の関係から評価されるが、
本調査では、材質と径が異なる複数の係留索の伸度
特性を比較するため、引張強度/破断強度と伸度の
関係から評価した。旧係留索では係留索の劣化の影
響により同一伸度における旧係留索の引張強度/破
断強度の値が新係留索よりも高い値を示す傾向が確
認できる。特に係留索の使用期間が長いA船とB船で
はその傾向が顕著となる。係留船舶の動揺シミュ
レーションを行う際に、計算条件として係留索の伸
度特性をカタログ値で与えた場合、係留索の劣化の
影響が考慮されていないためシミュレーションの精
度が低下すると考えられる。本調査によって、材質、
径および使用期間がそれぞれ異なる係留索の伸度特
性に関する情報が得られた。係留船舶の動揺シミュ
レーションを行う際に係留索の伸度特性に関する情
報が十分得られていない場合、本調査結果を参考に
することで、従来よりも適切な伸度特性の設定が可
能であると考えられる。

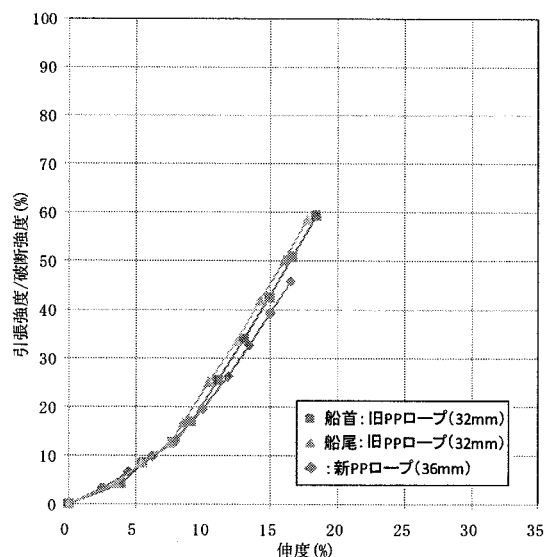


図-10 C船で使用した係留索の伸度特性

(4) 係留索の安全性の評価

係留索の使用期間が長いA船とB船では、係留索の劣化が進んでおり荒天時に強い張力が作用すると破断する恐れがある。ここでは、A船とB船に使用されている係留索の安全性を評価するため、荒天時における動揺シミュレーションを実施し、各係留索に作用する張力を求め安全性を評価する。動揺シミュレーションは浮体動揺解析システムプログラム⁷⁾（独）港湾空港技術研究所）を使用して行われた。計算条件として与える波浪データはH22.1.2の荒天時における港内波浪の再現計算結果を適用し、風況データについては岸壁近傍における観測値を適用した。表-4にA船とB船近傍の波浪・風況を示す。計算条件として与える係留索の伸度特性は現地調査結果を適用した。なお、調査ではB船の船首係留索を回収することができなかったため、B船の船首係留索の伸度特性として船尾左右の伸度特性の平均値を与えてシミュレーションを行った。船体諸元については表-1に示す値を計算条件として与えた。

表-5は各係留索の安全性の評価結果を示している。なお、許容張力は破断張力に安全率3.8⁸⁾を考慮した値を設定した。A船とB船の各係留索に作用する最大張力は全て許容張力以下となっており、今回想定した波浪・風況では係留索が破断する可能性は低いといえる。このように、動揺シミュレーションにより係留索に作用する張力を把握することで、係留時の安全性を評価することが可能といえる。

4. 結論

本研究の主要な結論を以下に示す。

- 1) 岸壁に係留されている総トン数が異なる3隻の漁船を対象に振動減衰量の調査および各漁船で使用していた係留索の引張強度試験を行うことにより、各漁船のサージ減衰係数と係留索の伸度特性に関する情報を取得した。
- 2) サージ減衰振動は単一周期を仮定した減衰振動曲線で概ね再現することが可能であり、この曲線から減衰係数を求めることができる。
- 3) 係留索は経年劣化によって堅くなるため、新係留索よりも旧係留索を使用したほうが船体の振動周期は減少する。
- 4) 小型船舶の場合、船型が大型化すると減衰係数が顕著に低下する傾向が確認された。
- 5) 線形の粘性抵抗係数はややバラツキがあるものの、総トン数が5 t～500 tクラスの船舶では0.5程度となることが確認された。
- 6) 旧係留索では係留索の劣化の影響により同一伸度における旧係留索の引張強度/破断強度の値が新係留索よりも高い値を示す。特に使用期間が長い係留索ではその傾向が顕著となる。
- 7) 実際に使用されている係留索の伸度特性を計

表-4 A船とB船近傍の波浪・風況

位置	A 船近傍	B 船近傍
有義波高	0.25 m	0.27 m
有義周期	4.5 s	4.5 s
波向き	E	E
平均風速	0.59 m/s	0.71 m/s
風向き	WSW	WSW

注：沖波の有義波高は4.15 m、有義周期は11.3 s

表-5 係留索の安全性の評価結果

船名	設置位置	最大張力	破断張力	許容張力
A 船	船首左	3.3 kN	98.5 kN	25.9 kN
	船首右	3.6 kN	58.9 kN	15.5 kN
	船尾左	4.3 kN	47.6 kN	12.5 kN
	船尾右	4.2 kN	38.4 kN	10.1 kN
B 船	船首	3.9 kN	54.7 kN	14.4 kN
	船尾左	3.4 kN	45.9 kN	12.1 kN
	船尾右	3.6 kN	63.5 kN	16.7 kN

算条件として与えて動揺シミュレーションを行うことにより、係留索の張力から係留時の安全性を評価することが可能となる。

謝辞：本調査を実施するにあたり、国土交通省北海道開発局小樽開発建設部ならびに東しやこたん漁業協同組合の関係者の方々に多大なるご協力を頂いた。また、船体動揺シミュレーションでは（株）アルファ水工コンサルタンツの林氏と八木澤氏に多大な協力を頂いた。ここに改めて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 大山巧・土田充：緩勾配方程式による港内船舶の動揺解析，土木学会論文集，第 539 号，pp. 141-154，1996。
- 2) 白石悟・久保雅義・榊原繁樹・笹健児：長周期船体動揺の数値計算による再現性に関する研究，海岸工学論文集，第 46 巻，pp. 861-865，1999。
- 3) 白石悟・米山治男・佐藤平和・笹健児：数値シミュレーションによる係留船舶の長周期動揺の評価に関する考察，海洋開発論文集，第 18 巻，pp. 137-142，2002。
- 4) 久保雅義・今枝彬朗・奥村宗行：長周期船体運動計測装置の試作と計測結果について，神戸商船大学紀要，第 2 類，第 28 号，pp. 289-298，1999。
- 5) Wilson, B.W.: Elastic Characteristics of Mooring Ropes, NATO Advanced Study Institute on Analytical Treatment of Problems in the Berthing and Mooring Ships, pp. 41-64, 1973。
- 6) (財) 沿岸技術研究センター：港内長周期波影響評価マニュアル，2004。
- 7) 上田茂：係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究，港湾技研資料，No. 504，Dec. 1984。
- 8) 本田啓之輔著：操船通論，成山堂出版，pp. 145，1998。