

避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動

平石 哲也*・本 城 智**・古川 正美***

1. ま え が き

沖縄県地方においては、生活物資の多くが直接日本本土より海上輸送されており、定期航路の果たす役割は重要である。一方、沖縄県地方は、台風の来襲する頻度が高く、台風来襲時には、定期航路を走る大型フェリーは九州方面へ避難し、長期にわたって欠航する場合がある。そこで、運行の定期性を確保するためには、沖縄県内の港湾において、フェリーを避泊する必要がある。台風来襲時のような荒天時において大型船を港内に避泊する手法としては、岸壁による係留、タワーなどの海洋構造物による係留、避泊ブイによる係留（ブイ泊）および船舶が所有する錨による錨泊が考えられる。このうち、タワー等の構造物による係留は、施設の建設費用が非常に大きくなる。また、大型船を岸壁係留するためには、係留張力が一般にブイ泊より大きくなるため、現有のウインチ、ボラード等の設備では耐えられず、大幅に改良する必要がある。そこで、本研究では、大型フェリーの港内避泊方式としてブイ泊および錨泊を対象として、避泊フェリーの振れ回り運動および係留張力の特性を模型実験によって明らかにすることを目的とした。さらに、実験によって求めた風圧力係数を用いて振れ回り運動の数値計算を行い、フェリーの避泊可能性を検討した。

2. 模型実験の方法と条件

本実験では、実際に、現在沖縄定期航路に就航している'飛龍3（略号 R3）'と'ぶりんせすおきなわ（PO）'を対象とした。'R3'は自動車航送船のようなずんぐりした船型を持っており、これに対して、'PO'は、客船に似たスマートな船型を持っている。両船とも右舷側に車両昇降用デッキを有しており、タンカーや貨物船のように左右対称な船型にはなっていない。避泊時の'PO'の垂線間距離 L_{pp} 、船幅 B 、吃水 d 、排水量 Δ はそれぞれ、120 m、20 m、5.34 m、6264 ton である。'R3'の場合、 L_{pp} 、 B 、 d 、 Δ はそれぞれ 110 m、22 m、5.48

m、7207 ton である。本実験では、水槽内の実験施設の能力および実験精度を考慮して、1/50 の縮尺で模型船を製作した。

図-1 に係留方式の模式図を示す。図-1 において、錨泊は、フェリー所有のチェーンで直接海底から係留する方式で、1本のチェーンで係留する単錨泊と、右舷および左舷側の2本のチェーンで係留する双錨泊を検討した。錨泊用のチェーンは、5000トンクラスのフェリーが通常所有する呼径 56 mm の鉄鋼製アンカーチェーンで、チェーン長は、単錨泊および双錨泊ともに 275 m とした。ブイ泊は、避泊ブイを用いてナイロン製ホーサーによって船首を単点係留する方式で、避泊ブイはアンカーチェーンで海底に係留する。避泊ブイは直径 3.6 m、高さ 1.8 m、吃水 1.4 m の円筒型とした。ブイ係留チェーンは呼径 76 mm または 124 mm で、長さ 25 m の鉄鋼製とした。ホーサーは直径 135 m、長さ 80 m のナイロンロープを2本使用するものとした。ナイロン製ホーサーは張力が作用すると伸びる特性を持つ。避泊地の水深は、15 m で一定とした。

本実験では、港内の避泊地において有義波高 1.0 m、有義波周期が 10 s および 12 s の一方向不規則波、さら

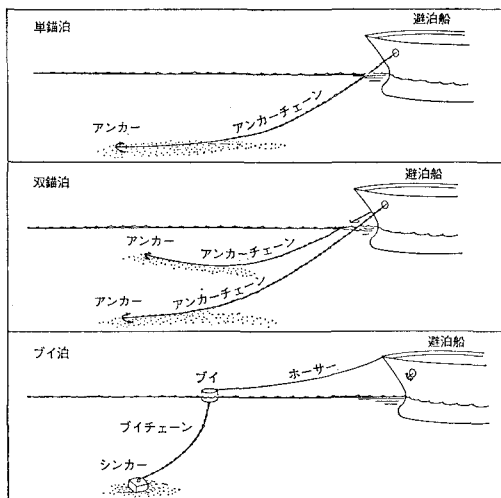


図-1 係留方式の模式図

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官
 ** 運輸省港湾技術研究所波浪研究室
 *** 沖縄開発庁沖縄総合事務局港湾計画課

に有義波高・周期が 0.9 m および 12 m の多方向不規則波が作用するものとした。なお波のエネルギースペクトルおよび方向関数はそれぞれ Bretschneider—光易型および光易型を用いた。水槽内の多方向不規則波は $S_{\max}=10$ で表されるような方向集中度を持つことが検定された。

本実験では、ブイ泊および単錨泊の場合には、実験室内で主波向を固定して送風機を動かすことによって波向と風向の相対角 β を変化させた。双錨泊の場合は、2本の錨泊チェーンが伸びきったときにつくる角度を開き角 θ' として定義し、風向 α および波向 β は、開き角の2等分線からの傾き角として定義した。定常風速は、30, 40 および 50 m/s の3種類とした。波向と風向の相対角は、ブイ泊および錨泊では、係留張力が最も大きくなるケースとして、 90° で一定とした。双錨泊の場合には、開き角を変化させるとともに、波向、風向を変化させた実験を行った。

チェーンに作用する係留張力は、ブイ係留チェーンの海底側および錨泊チェーンの船側に取り付けられた小型張力計で測定した。なお、係留船舶に作用する張力は、風、潮流および波漂流力に起因する長周期の変動成分と、波により生じる短周期の変動成分を含んでいる(高山ら, 1985)。本実験においては移動平均を行って短周期成分と長周期成分を分離することにした。

一般に、船首単点係留された船舶は風および波の漂流力によって周期数分以上の振れ回り運動をすることが知られている。振れ回り運動は、実験室の天井から船の平面的な動きをビデオで観測して求めた。

3. 荒天時における係留張力と振れ回り運動の特性

図-2 に張力の時間変動波形を示す。上段は波を作用させない場合の単錨泊時の張力変動を示す。風は、50 m/s の定常風である。錨泊チェーンは、車両昇降デッキの無い左舷側に取り付けた。図中の太い実線が張力の長周期変動成分を示す。図-2 に示されるように、張力変動の時間波形は複雑で、文献(鈴木, 諸石, 1982)に見られたように $\sin$ 関数で近似できるような単純形を示さない。これは、フェリーが昇降デッキのために左右対称船型となっておらず、風荷重の大きさが右舷および左舷側で異なるためである。単錨泊時の係留チェーン張力の場合には最大張力発生時の波形は鋭いピークを示し、長周期成分の最大値の1.2倍程度である。

双錨泊の場合には、右舷側に張力が作用しているときは、左舷側の張力はほぼ0で、反対に左舷側に張力が作用しているときは、右舷側には張力は作用していなかった。すなわち、双錨泊にしても同時に2本のチェーンに

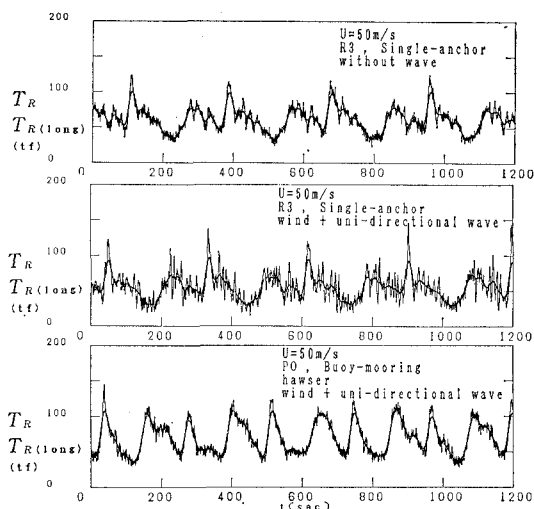


図-2 張力変動の時系列波形

張力が作用して、係留力が二分されるわけではなく、船の側面が風上になった方の係留チェーン1本で船を係留していることになる。すなわち、本質的には、双錨泊と単錨泊は同じような係留で、1本のチェーンの最大強度によって、係留条件が定まる。右舷側チェーンの最大作用張力は、109 tf (1068 kN) この値は、図-2 上段の単錨泊よりも若干小さかった。中段は、一方向波作用時の単錨泊係留張力の変化を示したものである。最大作用張力は、149 tf (1460 kN) で、波の無い上段の場合と比較すると、23 tf (225 kN) 程度大きくなる。長周期の変動成分の最大値は、波をかけた場合もかけない場合もほぼ等しく 100 tf (980 kN) である。短周期成分の振幅の最大値は、52 tf (510 kN) で、波の無いケースの2倍以上になる。ゆえに錨泊の場合には、波を作用させると波によって生じる短周期の変動成分の幅が大きくなり、その位相が長周期成分の位相と近くなると、合成張力の最大値は波をかけない場合より大きくなるのがわかる。下段は波を作用させた場合のホーサー張力の変化を示す。ホーサーのような弾性の大きい係留索を用いると、波による短周期の変動が小さくなり、最大張力も波をかけない場合とほとんど同じであった。

表-1 は、周期 12 s の wave-2 (一方向波) と wave-3 (多方向波) を作用させたときの張力変動の統計値を比較したものである。 $T_{R\max}$, $[T_R]_{1/3}$, $[T_R]_{1/3}$ は、それぞれ、最大作用張力、短周期変動張力の有義振幅および有義周期を示す。単錨泊 (M1) の場合には、短周期変動成分の振幅は多方向波を作用させた方が大きくなる。双錨泊 (M2) およびブイ泊 (B) 時のブイ係留チェーンの場合、最大作用張力は、いずれの場合も、多方向波を作用させたときの方が小さいが、その差は 7% 以内で

ある。wave-3 の波高が wave-2 より 10% 小さいことを考慮すると、短周期変動成分の変動振幅は、多方向不規則波を作用させた方が大きくなる傾向がある。といえる。最大作用張力は、多方向波を作用させても大きくなるとは限らず、変動成分の位相によっては、小さくなることもある。本実験結果からは、単錨泊を除いて、一方向波に比べて小さくなる傾向があり、一方向波で実験することは安全側の実験を行うことになる。

最大作用張力のみを調べると、波を作用させた場合のホーサー張力は、有義波高を 1m 程度の波であれば波を作用させない場合に比べてほとんど変化しなかった。錨泊の場合にはデータのばらつきはあるものの、最大張力は波の無い場合に比べて 1.1~1.4 倍に増加した。

図-3 は、双錨泊における開き角 θ' および風向 α が張力に与える影響を調べたものである。 θ' が、30, 90 および 45° の時、最大張力は、それぞれ、109, 51 および 156 tf (1068, 500, 1529 kN) となり、45° のときに

大きくなる。45° のときは振れ回り幅が非常に小さく、運動によって、張力の増加を低減することができない。そのため、最大作用張力が大きくなったものと思われる。次に、開き角を一定にして、風向を変化させてみる。 $\alpha=15^\circ$ のケースを除いて、最大作用張力は、大きく変化せず、ほぼ $\alpha=0^\circ$ のケースと等しい。 $\alpha=15^\circ$ の場合には、非常に大きな最大張力が発生し、その値は、232tf (2274 kN) である。 $\alpha=15^\circ$ の時は、風がちょうど右舷側のチェーンと

平行に作用している。風向が係留ラインの方向と一致するときは、風向と一致しないチェーンによって、船の運動がある程度拘束されるので、単錨泊時よりも大きな張力が作用し危険である。

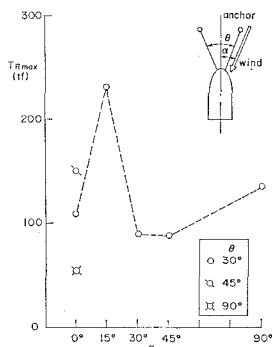


図-3 双錨泊における最大張力

表-1 一方向および多方向波の比較

	wave-2			wave-3		
$T_{1/3}$	11.9s			11.6s		
$H_{1/3}$	1.00m			0.90m		
SS_{max}	—			10		
condition	T_{Rmax}	$T_{RS} 1/3$	$T_{RS} t1/3$	T_{Rmax}	$T_{RS} 1/3$	$T_{RS} t1/3$
case No. : 5, 6 ship : R 3 mooring : M 1 chain : $\phi 56, 275m$ U : 50m/s B : 90°	136.0	46.3	13.4	170.6	55.1	14.0
case No. : 13, 14 ship : R 3 mooring : M 2 chain : $\phi 56, 275m$ U : 50m/s B : 90°	right 171.2	28.3	7.6	160.9	26.9	7.2
	left 188.7	23.4	6.7	160.5	21.7	6.6
case No. : 19, 20 ship : R 3 mooring : B chain : $\phi 76, 25m$ U : 50m/s B : 90°	188.5	44.7	10.4	172.4	43.6	10.2
case No. : 35, 36 ship : PO mooring : B chain : $\phi 76, 25m$ U : 50m/s B : 90°	166.2	56.9	11.7	152.7	56.3	11.7

振れ回り幅は、風速が変化しても大きく変化することではなく、ほぼ一定であった。たとえば、'ぶりんせすおきなわ' ブイ泊では、風速 30, 40 および 50m/s について、それぞれ、105, 109, 105 m である。振れ回り周期は、風速が大きくなると短くなり、'ぶりんせすおきなわ' のブイ泊時には、それぞれ 320, 300, 260 s であった。振れ回り幅に対する波の影響を調べたところ、波を作用させても変化しなかった。したがって、避泊面積の算定に当たっては波を考慮しなくてもよい。

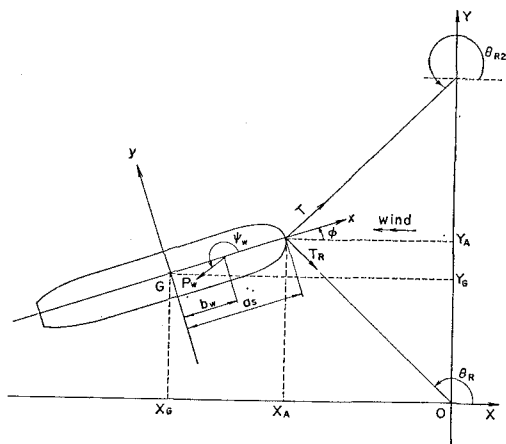
4. フェリーの風圧力係数

本研究では、模型船を伸びの無い係船索で船首と船尾を固定して風向と船軸の相対角 ϕ を変化させて張力を測定し、相対角と風圧力係数の関係を実験的に求めた。

図-4 に示すように風荷重 P_W は船体重心から b_W 離れた点に作用角 ψ_W の方向に作用するものとして定義する。風荷重の合力は次式で表される。

$$P_W = \frac{1}{2} \rho_a C_W U_W^2 (A_T \cos^2 \phi + A_L \sin^2 \phi) \cdots (1)$$

ここに、 P_W : 船体に作用する風荷重の合力、 ρ_a : 空



図—4 風荷重と座標系の定義

気の密度, C_W : 風圧力係数, U_W : 船体と空気との相対速度, A_T : 水面上船体正面投影面積, A_L : 水面上船体側面投影面積, ϕ : 船体軸と風との相対角である. 図—5 は実験値から求めた風圧力係数 C_W と作用点の位置 b_W を示したものである. C_W は, ほぼ $\phi=0^\circ$ の時に極小となり, 船型による差は小さい. そこで, 両者の平均値を実験の代表値とし, ϕ が負と正のケースに分けてそれぞれの実験式を求めた. 最小二乗法によって求めたフェリーに関する C_W の実験式は次のようになる.

$$C_W = 0.881 - 0.070 \cos 2\phi - 0.215 \cos 4\phi - 0.005 \cos 6\phi \quad (\phi > 0^\circ) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$C_W = 0.920 - 0.099 \cos 2\phi - 0.306 \cos 4\phi - 0.021 \cos 6\phi \quad (\phi < 0^\circ) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし, 上式のままでは, $\phi=0^\circ$ で不連続点を生じるので, $-10^\circ < \phi < 10^\circ$ では, 計算値が連続するように, 次式で近似した.

$$C_W = 0.5425 + 0.0105\phi \quad (0^\circ < \phi < 10^\circ) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$C_W = 0.5425 - 0.00404\phi \quad (-10^\circ < \phi < 0^\circ) \quad \dots\dots\dots (5)$$

図—5 の実線は上記の実験式を示したものである. 四角記号で示した b_W についても, ϕ の正負によってそれぞれ実験式を導くと次のようになる.

$$b_W/a_S = 0.522 - 0.00388\phi \quad (\phi > 0^\circ) \quad \dots\dots\dots (6)$$

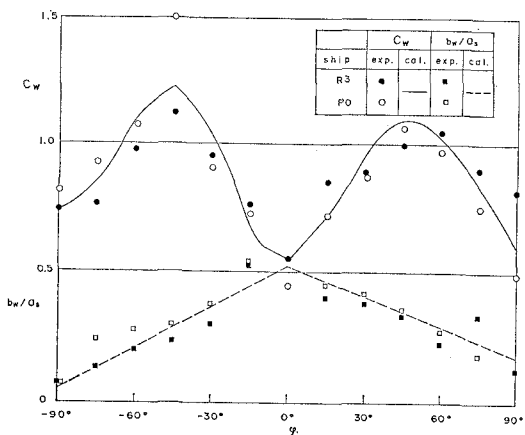
$$b_W/a_S = 0.522 - 0.00527|\phi| \quad (\phi < 0^\circ) \quad \dots\dots\dots (7)$$

図—5 の破線は, 上記実験式の値を示したものである. 実験値と計算値はよく一致している. 風荷重の作用方向は, 次式が提案されている (鈴木ら, 1982).

$$\psi_W = \{3 - (1 - |\phi_{Wr}|/90)q\} \times 90^\circ : \phi > 0^\circ \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\psi_W = \{1 + (1 - |\phi_{Wr}|/90)q\} \times 90^\circ : \phi < 0^\circ \quad \dots\dots\dots (9)$$

'R3' と 'PO' の実験結果はほぼ等しく, 実験値は ϕ が正の範囲では, $q=3$ として求めた計算式と一致する. ϕ が負の時には, 実験値は $q=5$ として計算した値に一致した.



図—5 フェリーの風圧力係数と風荷重作用点

5. フェリーの振れ回り運動に関する数値計算

振れ回り運動時に作用する張力は, 風による長周期の変動成分が支配的なので, 本数値計算では, 風および波の漂流力だけを外力とする長周期の振れ回り運動と作用張力を求めた. 本計算は, 図—4 に示した船体固定座標系 ($x-y-z$) に関する係留力, 風荷重, 流圧力抵抗の力の釣合方程式を逐次数値的に解いて, 船体の水平変位および係留張力を求めるものである. 計算手法の詳細については文献 (平石ら, 1991) を参照されたい. 船体に関する流圧力係数は実験結果と計算結果が合うように決定した.

ブイ泊の場合にはホーサーは船首に取り付けられるが, 錨泊の場合には, 図—6 に示すようにチェーン取り付け点 (錨鎖孔) は船首より船尾方向へずれた位置にある. 係留力の作用方向を示す直線と船体長軸との交点 Q の位置は一定しておらず, 係留ラインと船体長軸の成す角によって, Q' , Q'' のように変化する. そこで, 振れ回り 1 周期間の Q の位置変動を平均し, 係留力は, 常に Q_0 に作用するものとして計算した. このとき, C_{sa} を係留点作用点係数として, Q_0 の位置を船首重心間距離 a_s に対する比 $C_{sa} \times a_s$ として表した. 本実験結果から, C_{sa} は, 'PO' の単錨泊で 0.5, 双錨泊で 0.8 となった. 'R3' の単錨泊および双錨泊の場合には 0.8 となった. 図—7 は, 単錨泊時の 'PO' の最大作用張力の比較を示す. 実験値と計算値の差は実験値の 10% 以下で小さく, 本計算モデルによって, 最大作用張力等を精度よく求めることができる.

6. フェリーの避泊可能性

(1) ホーサー長と変動風の影響

数値計算で, チェーン長 l_c を 140 m から 330 m まで変化させても, 最大張力は大きく変化しなかった.

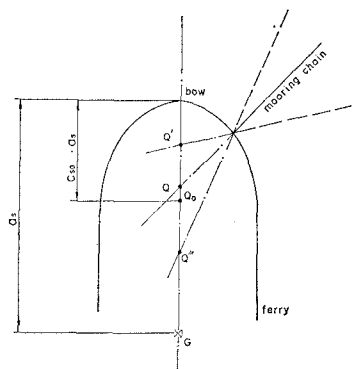
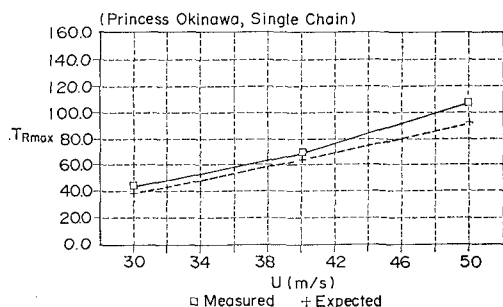


図-6 係留力作用点係数の定義



図一7 実験と計算結果の比較(単錨泊)

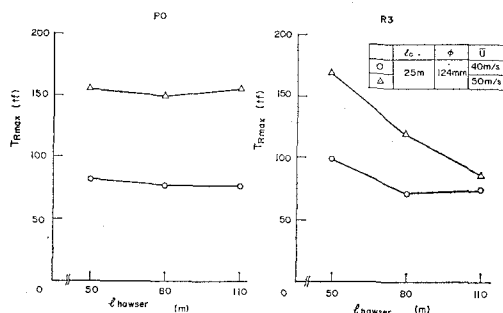
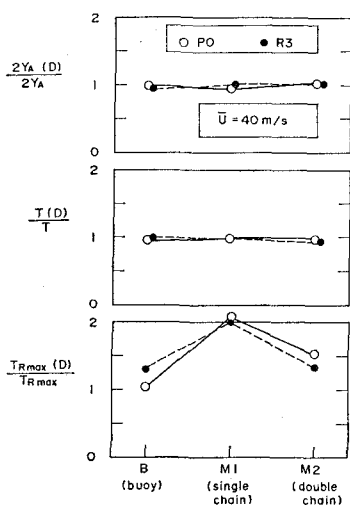


図-8 ホーサー長による最大張力の変化

図-8 はブイ泊時におけるホーサー長が変化した場合の張力の変化を示す。'PO' の場合は、ホーサー長が変化しても最大張力はそれほど変化しない。'R3' の場合、ホーサー長が 110 m になると、張力は 80 m の場合に比べて 30% 減少し、85 tf (833 kN) になる。したがって、'R3' は標準より長いホーサーを装備することによって係留張力を低減することができる。

図-9 はダーベンポートのスペクトル型を持つ変動風の影響を計算で調べたもので、上段および中段はそれぞれ、ブイ泊、単錨泊および双錨泊の場合における振れ回り幅および振れ回り周期を定常風の場合に対する比で表



図—9 変動風の影響

したものである。それぞれの比は1.0で、風の変動性を考慮してもほとんど変化しない。下段は、変動風作用時の最大張力を、定常風作用時の最大張力に対する比で表したものである。ブイ泊の時、最大張力は大きく変化しない。単錨泊および双錨泊の場合には、変動風を作用させると、最大張力は増大する。

(2) 避泊方法の検討

チェーン長を 275 m として 50 m/s の定常風を用いて計算すると最大作用張力は、単錨泊、双錨泊とも 'R3' の方が大きく、それぞれ 105.1 (1030) および 126.8 tf (1243 kN) であった。径 56 m の第 3 種スタッド付き鉄鋼製アンカーチェーンの許容荷重は 99.2 tf (972 kN) であり作用張力より小さい。また、アンカー把駐力および地鎖の水平力に対する抗力は、現有アンカーの水中重量を、約 3.5 ton とすると、全体として 20 tf (196 kN) 程度である (平石ら, 1991)。したがって、許容張力が最大作用張力より大きい径の太いチェーンを用いても走錨してしまう。

ブイ泊時の最大ホーサー張力は 129.7 tf (127 kN) であり, 137 mm ナイロンタフレホーサー 2 本の合計許容荷重 199 tf (1950 kN) より小さく, 安全な避泊が可能である. したがって, 荒天時における避泊方式としては, ブイ泊を中心に検討した方がよい.

参考文献

- 鈴木康正・諸石一幸 (1982): ブイ係留船舶の荒天時の振れ回り運動, 港研報告 Vol. 21, No. 2, pp. 107-150.
- 高山知司他 4 名 (1985): 一点係留ブイの運動と係留索張力に関する現地観測, 港研資料 No. 542, 38 p.
- 平石哲也・本城 智 (1991): 避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動に関する検討, 港研報告 Vol. 30, No. 2, pp. 3-55.