単錨泊船の振れ回り運動中に生じる錨鎖張力の 緩和に関する研究—I.

—錨鎖張力の大きさに影響を及ぼす要因の分析—

井 上 欣 三*

An Investigation on Reducing Cable Tension Caused by Swing Motion of a Ship Moored at Single Anchor in Wind—I.

—On the Factors Affecting the Magnitude of Cable Tension—

Kinzo INOUE

Abstract

The author carried out the model experiments in a wind tunnel. Analyses of the results found the importance of the normal acceleration which acts on the bow of the ship. And the following results were found through further investigation on it.

- (1) The principal factor which affects the magnitude of cable tension acting steadily on the anchor cable is the lateral velocity of the center of gravity of the ship.
- (2) Regarding the impulsive cable tension, there are three significant factors in the magnitude of cable tension; a) the slackness of the anchor cable at the furthest extent of the swing motion, b) the angular velocity about ship's center of gravity, c) the lateral velocity.

The above factors should be taken into account to moor a ship safely with a single anchor.

1. は じ め に

荒天中の錨泊に関してこれまでに多くの研究が積み重ねられ^{(1)~(6)}, 走錨や錨鎖切断などの事故防止のための対策として, 強風に対しては喫水を深く, トリムを even keel または by the head として振れ回り運動を抑制し, 錨鎖を長く伸ばしてカテナリーによる緩衝効果を増すといった指針が提示されている。

しかしながら, 自動車専用船やカーフェリーのように受風面積が極端に大きい上に, 喫水やトリムの調整が意のままにならない船に関しては, さらに抜本的な振れ回り運動の抑制や錨鎖張力の緩和に対する方策を検討する必要があると思われる。

そこで, 新しい対策を検討するための第一段階として, ここでは, 風洞水槽における単錨泊船の振れ回り運動に関する模型実験を行ない, 船体運動のどのような要素が錨鎖張力の大きさに影響を及ぼすかを中心に解析を行った。

2. 模型実験の要領

供試船には 6,000 台の乗用車を積載することのできる自動車専用船の 1/105 縮尺, 木製模型船を使用した。ただし, 模型船はビルジキール, 舵は付けているがプロペラはない。船体の主要目および実験時の船体コンディションを表 1 に示す。また, 供試船の備えるべき錨, 錨鎖については同種の船の備え付け実績を考慮して表 2 に示

* 正会員 神戸商船大学 (神戸市東灘区深江南町 5 丁目 1-1)

表 1 供試船の主要目および実験時の船体コンディション

項 目	実 船	模 型 船
総トン数 (GT)	16,109.32 ton	----
全長 (Loa)	224.98 m	2.143 m
垂線間長 (Lpp)	210.00 m	2.000 m
幅 (B)	32.20 m	0.307 m
深さ (D)	27.60 m	0.263 m
実験時の船体コンディション		
喫水 (満載, 等喫水)	9.33 m	0.089 m
満載排水量	32,889.00 ton	28.410 Kg
正面受風面積	855.89 m ²	0.078 m ²
側面受風面積	5,051.99 m ²	0.458 m ²
旋回半径	0.3 Lpp	0.3 Lpp
GM	0.03 B	0.03 B

表 2 供試錨鎖および錨の要目

項 目	規 格	備 考
錨の重量	10 ton	
錨鎖の径	76 mm	
錨鎖の単位重量	126.5 Kg/m	
錨鎖の破断試験荷重	306.65 ton	第2種錨鎖, JIS規格
錨鎖の耐力試験荷重	219.05 ton	

す大きさのものを想定した。

実験には富山商船高専・水槽実験室の風洞水槽を使用した。図1に実験設定の概略を示す。水槽部は全長 12m, 幅 6m, 高さ 1.34m で実験水深は喫水の3倍に設定したので Full Scale 28m に相当する。

錨鎖は底板中央に固定したプーリーに導き、その一端を伸びの少ない糸を介してストレージ式張力測定用センサーに取り付けた。したがって、錨は海底に固定されて動かない状態に対応する。なお、錨鎖の船体側取付点は船首端とし、海底から錨鎖取付点までの高さは実船のホースパイプ下端の高さに一致させたので Full Scale 38m に相当する。

船体の振れ回り運動は水槽上部にセットしたTVカメラで撮影し、この映像と別のTVカメラの撮影する座標軸を、2mの寸法が20メモリとなるように縮尺を合わせて合成しVTRにタイムとともに連続録画した。この時、解析に便利のように1辺2mの正方形の四隅と水槽中央および模型船の船首、船尾、船体重心(ミジップに一致)に豆電球を取り付けた。

図 1 実験設定

実験はすべて定常風下で行ない、風速を Full Scale 10 m/s から 40 m/s の範囲で変化させ、錨鎖の伸出量は 8 節, 10 節, 12 節の 3 種とした。ただし、錨鎖 1 節の長さは 25m として計算した。

3. 振れ回り運動の解析

船体運動の解析にあたっては図2に示すように錨の固定点を原点とし、風軸と直角の方向を X 軸、風軸に沿う方向を Y 軸とする座標系を用いた。ここに、船首尾線と Y 軸のなす角 ϕ を船首角、錨鎖と Y 軸のなす角 θ を錨鎖角と呼ぶことにする。そして、これらは Y 軸を基準に 90° まで右回りを正として測る。

船体が振れ回り運動を行なう様子はVTRに連続録画されているので、ここでは、録画された映像を1秒ごとに再生して、船首、船尾、船体重心の各点の座標を読み取った。これらのデータはすべて電算機により処理し、Full Scale に換算して整理した。一例として錨鎖伸出長 12 節、風速 26.9 m/s の場合のカーブプロッターによる出力例を図3、図4に示す。

図 2 座 標 系

図3は船首、船尾、船体重心の各点の軌跡を振れ回り運動の1周期分についてプロットしたもので、図の中央上部の丸印は錨の固定点を示し、 X 軸 Y 軸とも1メモリは $0.5L_{PP}$ (L_{PP} は垂線間長) に対応する。風の中で単錨泊する船は図3にみられるように8の字を描きながら振れ回る。この運動は船体に働く風圧力、船体が水の中を運動することによる流体反力、錨鎖による拘束力が互いに作用し合い、その結果として特徴的な8の字を描くものであり極めて定常的な運動である。また、図4は船体重心の横移動量 (X_G)、縦移動量 (Y_G) および船首角 (ψ)、錨鎖角 (θ) の時間変化の様子を錨鎖張力 (T) の記録とともに時間軸を合わせて示したものである。

4. 実験結果

4.1 錨鎖張力の大きさ

風向に対し船体が偏角を持つとき船体には揚力が発生する。これが船体を横方向に移動させる原因となるが、振れ回り運動中は錨鎖角が 0° となる頃から船体重心が Y 軸を横切る付近において錨鎖には比較的大きな張力が持続的に作用する。この様子は図4の錨鎖張力の記録においては100～150秒および620～670秒付近にあらわれている。このような錨鎖張力をここでは定常張力と呼ぶことにする。

その後、船体の横移動に伴って錨鎖角が大きくなると、錨鎖による船首の拘束力が増大し、やがて船首の横移動は限界に達する。この時点で船体は風上に切り上り錨鎖の緊張は一時緩和される。しかしながら、船尾の横移動はなお継続しており、船体は一旦風に立つ姿勢をとった後風を受ける舷を変える。この時期は船体運動が最も緩慢な時期であるが、この直後においては急激な船首回頭に加えて船首が風下におとされ、錨鎖と船首尾線がほぼ一線になる付近で錨鎖に大きな衝撃力が発生する。このような衝撃力は図4の錨鎖張力の記録においては20秒、540秒、1060秒の3カ所にあらわれている。

振れ回り運動中における錨鎖張力の変動は主として性質の異なるこれら2種類の張力によって特徴づけられるが、図5に風速増大にともなう定常張力および衝撃力の変化の様子を錨鎖伸出長をパラメータに示す。

今回の実験の範囲内においては定常張力の大きさはほぼ風速の2乗に比例して増大しており、風

図3 振れ回り運動の軌跡

図4 振れ回り運動における変位要素および錨鎖張力の時間変化

図 5 錨鎖張力と風速の関係

図 6 振れ回り振幅と風速の関係

速が同じ場合は錨鎖を長く伸ばす方が張力は小さくなるのがわかる。一方、衝撃力についても錨鎖を長く伸ばす方が張力は小さくなる。衝撃力と風速の関係については全体としては風速が強くなるに伴い衝撃力も増大するが、いずれの錨鎖長の場合も一定の風速以上では衝撃力が著しく大きくなる傾向がみられる。

4.2 振れ回りの大きさ

振れ回り運動中に船体重心は8の字型の軌跡を描くが、ここでは、振れ回りの大きさを船体重心の横方向および縦方向の振幅を用いてあらわすことにする。図6は船体重心の横移動振幅および縦移動振幅の大きさと風速の関係を錨鎖伸出長をパラメータに示している。また、船首はその両端でわずかにふくらみを持つ円弧状の軌跡を描き、その円弧の大きさは錨鎖角の大きさであらわすことができる。図7は船首の振れ回りの大きさと風速の関係を錨鎖角の最大値を用いて示している。

縦移動振幅は横移動振幅のほぼ 1/10 程度の大きさであり、どちらも風速 20 m/s 付近までは風速が強くなるにつれて振幅も大きくなるが、風速が 20 m/s 以上の強風域においては振幅の大きさは風速とは無関係に一定となる。この傾向は最大錨鎖角についても同様である。

図 7 最大錨鎖角と風速の関係

図 8 最大船首角と風速の関係

図 9 振れ回り周期と風速の関係

図 10 船体重心の運動速度の最大値と風速の関係

縦移動振幅は錨鎖の長さによる差はほとんどみられない。しかしながら、横移動振幅および最大錨鎖角は錨鎖の長さによってその大きさは変化する。つまり、錨鎖を長く伸ばした時は短かい時に比べて船体の横移動は大きくなるが、錨鎖の左右への振れ角は小さく、逆に、錨鎖が短かい時は船体の横移動は小さくなるが、錨鎖の振れ角は大きくなる。

図8は船首角の最大値と風速の関係を示している。この場合も最大船首角は風速が20 m/s以上では風速にかかわらず一定となる。また、錨鎖伸出長による影響はほとんど認められない。

4.3 振れ回りの速さ

振れ回り周期と風速の関係は図9に示すように、風速が強いほど振れ回り周期は短くなる。しかしながら、錨鎖の長さは振れ回り周期にはほとんど影響を与えないようである。

図10は船体重心の横移動速度、縦移動速度および船首回頭速度のそれぞれの最大値と風速の関係を示している。ただし、縦移動速度については船体が風下におとされる方向の最大速度をプロットした。これによれば、振れ回り中における運動速度の最大値はいずれも風速と直線的な比例関係にあり、風速が強くなるにしたがって速く振れ回るようになることがわかる。そして、この場合も錨鎖の長さによる影響はほとんど認められない。

5. 船首に働く法線加速度の錨鎖張力への影響

5.1 船首に働く法線加速度

実験結果によれば、強風下においては振れ回りの大きさは一定限度以上には大きくならないが、振れ回りの速度は風速に比例して増大し、結果的に振れ回り周期が短くなることがわかった。このことは風速が強くなるにつれて船体はより短かい周期で一定の大きさの変位を繰り返すようになり、それだけ船体は激しく振れ回ることを意味している。

一方、船首の振れ回りに着目すれば、船首は錨を中心にな一定の円弧上を移動するが、当然のことながら、この時、錨と船首の水平距離が離れるほど錨鎖は緊張する。ここで、錨と船首の水平距離を離すのは船首に働く法線加速度の効果によるとの観点にたてば、短かい周期で船体が激しく振れ回れば、それだけ法線加速度も大きくなり、結果的に錨鎖張力も大きくなることが考えられる。

このような考え方のもとに、ここでは、船首に働く法線加速度がどのように錨鎖張力と関連するか検討を行なうことにする。

船首に働く法線加速度 (A_N) は接線速度 (V_t) を用いて次のように表わすことができる。

$$A_N = \frac{V_t^2}{r} \quad (1)$$

図11は振れ回り運動中のある瞬間における船体運動の速度成分と接線速度の関係を示している。つまり、接線速度は

$$V_t = U_F \sin(\phi - \theta) + V_F \cos(\phi - \theta) \quad (2)$$

ここに、 U_F は船首における船首尾線方向の速度成分、 V_F は船首における船体正横方向の速度成分であり、これらは船体重心の横移動速度 (V_X)、縦移動速度 (V_Y)、船首回頭角速度 (R) と次のような関係にある。

$$U_F = V_X \sin \phi - V_Y \cos \phi \quad (3)$$

$$V_F = V_X \cos \phi + V_Y \sin \phi + \frac{L_{PP}}{2} R \quad (4)$$

したがって、(1) 式は次のように表わすことができる。

$$A_N = \frac{1}{r} \left\{ (V_X \sin \phi - V_Y \cos \phi) \sin(\phi - \theta) + \left(V_X \cos \phi + V_Y \sin \phi + \frac{L_{PP}}{2} R \right) \cos(\phi - \theta) \right\}^2 \quad (5)$$

図12は錨鎖伸出長12節、風速26.9 m/sの例を用いて、船首に働く法線加速度の振れ回り1周期中の変化の様子を(5)式により求め、その結果を錨鎖張力の記録とともに時間軸を合わせて示したものである。ただし、

図11 振れ回り運動における速度成分と法線加速度

図 12 振れ回り運動における法線加速度と錨鎖張力の時間変化

錨を中心とした船首の円周運動の曲率半径は錨鎖伸出長で代表させた。

図 12 によれば、定常張力、衝撃力発生時において錨鎖張力と法線加速度のそれぞれのピークはあきらかに一致している。これより、船首に働く法線加速度は定常張力や衝撃力の発生に対し重要な役割を果していることがうかがえる。

5.2 定常張力・衝撃力発生時の運動速度および船体姿勢

図 13 は振れ回り運動 1 周期中における船体重心の横移動速度、縦移動速度および船首回頭角速度の変化を錨鎖伸出長 12 節、風速 26.9 m/s の解析例を用いて示している。

ここに、定常張力を錨鎖角が 0° になる時の張力で代表させることにすれば、この時点においては図 13 に ■ 印で示すように、船体重心の横移動速度はほぼ最大となるが、縦移動速度と船首回頭角速度はちょうど 0 となる。また、衝撃力が発生する瞬間は図 13 に ● 印で示すように船首回頭角速度が最大となる。このような特徴はいずれの錨鎖伸出長、風速についても共通してみられる傾向である。しかしながら、衝撃力発生時における船体重心の横移動速度および縦移動速度は 0 とか最大値といった特徴的な値ではなく、これらの値と風速の関係は図 14 に示すとおりである。

図 13 振れ回り運動における速度要素の時間変化

図 14 衝撃力発生時における船体重心の運動速度

図 15 衝撃力発生時における船体姿勢

錨鎖に定常張力が加わる時の船体姿勢は図 4 にみられるように錨鎖角が 0° になる時と船首角が最大となる時期が一致することから一律に決まるが、衝撃力が発生する瞬間の船体姿勢は風速によって異なる。衝撃力発生時の船首角と錨鎖角の大きさと風速の関係を図 15 に示す。これによれば、いずれの錨鎖伸出長の場合もほぼ一定の変化傾向を示しており、風速が強くなると船首角と錨鎖角の差がほとんどなくなる様子がみられる。

5.3 定常張力・衝撃力発生時の法線加速度の大きさ

錨鎖に衝撃力が発生する瞬間における法線加速度の大きさは 5.2 項にとりまとめた値を (5) 式の各項に代入して求めることができる。ただし、錨鎖に定常張力が加わる時の法線加速度については 5.2 項に述べたように、 $V_Y=0$, $R=0$, $\theta=0$ なる条件があるので次式を用いて求めることになる。

$$A_N = \frac{V_{\dot{x} \max}^2}{r} \quad (6)$$

(5) 式, (6) 式により求めた定常張力および衝撃力発生時の法線加速度の大きさと風速の関係を図 16 に示す。これによれば、法線加速度の大きさは多少のばらつきはみられるが、ほぼ風速のべき乗に比例して増大し、錨鎖伸出長に反比例することがわかる。ただし、定常張力の場合に比べて衝撃力の場合の方が全体的に法線加速度の値は小さい。

図 16 定常張力および衝撃力発生時の法線加速度の大きさ

5.4 錨鎖張力と法線加速度の関係

図 17 は錨鎖に定常張力、衝撃力が発生する時の法線加速度と錨鎖張力の関係を示したものである。これによれば、定常張力の大きさは法線加速度の大きさとほぼ一次的な比例関係にあり、あきらかに正の相関があることがわかる。一方、衝撃力の大きさは一定の荷重を境にして急激に増加する傾向がみられるが、一応両者の間には正の相関があると判断される。したがって、船首に働く法線加速度の大きさは錨鎖張力の大きさに影響を及ぼす重要な要素であるとみることができよう。

図 17 法線加速度と錨鎖張力の関係

ここに、定常張力と法線加速度は互いに一次的な比例関係にあることから、定常張力の大きさは法線加速度の大きさにのみ依存する量であるとみられるが、衝撃力の場合、その張力の大きさは基本的には法線加速度の大きさに依存する量ではあるが、張力の変化傾向は直線的ではなく、一定の荷重を境にして急激な増加傾向を示すなど、法線加速度の大きさのみでは説明しきれない部分を含んでいる。このことは、おそらく定常張力の場合は張力の絶対値が比較的小さいために錨鎖のカテナリーによる非線型性があまり顕著にあらわれないのに対し、衝撃力の場合は張力の発生機構の相異もさることながら張力の絶対値が大きいために、錨鎖のカテナリーによる非線型効果が顕著にあらわれるためであろうと思われる。

また、法線加速度の値は図 16 にみられるように、定常張力の場合に比べて衝撃力の方が全体的に小さい。いま、仮に船首に同じ大きさの法線加速度が働いたとしても、その瞬間における錨鎖のカテナリー形状が Taut 状態にあるか、Slack 状態にあるかによって得られる張力の大きさは著しく異なる。したがって、定常張力の場合、比較的大きな法線加速度が作用するにもかかわらず錨鎖張力がそれほど大きくならないのは、この時のカテナリー形状が Slack 状態に近いためであり、また、衝撃力が発生する時の法線加速度の大きさが定常張力の場合と比較して小さいにもかかわらず錨鎖張力が極めて大きくなるのは、その時のカテナリー形状が Taut

状態に近いと推定される。

ところで、衝撃力は振れ回り運動の両端において船体が風上に切り上がり錨鎖が一旦たるんだ後、急激な船首回頭とともに船首が風下におとされる過程の中で発生する。この場合、錨鎖のたるみが大きいと船首が風下におとされ、その後錨鎖が緊張するまでの空間的、時間的余裕が大きくなり、それだけカタナリー形状を Taut 状態に移行させるための力積が大きくなる。したがって、振れ回り運動の両端における錨鎖の一時的な弛緩現象はカタナリー形状を Taut 状態に導く因をなすといえよう。

6. 錨鎖張力の大きさに影響を及ぼす要因の分析

振れ回り運動中に船首に働く法線加速度は錨鎖張力の大きさに影響を及ぼす重要な要素であるといえるが、ここでは、定常張力、衝撃力発生時の法線加速度についてさらに考察を加えることにする。

錨鎖に定常張力が加わる時の法線加速度は (6) 式に示されるように船体重心の横移動速度の 2 乗に比例し錨鎖伸出長に反比例する。つまり、一定の錨鎖伸出長のもとでは、この時の法線加速度の大きさはもっぱら船体重心の横移動速度の大きさによって決まる。したがって、定常張力と法線加速度が互いに正の相関をもち、定常張力の大きさは法線加速度の大きさのみに依存する量であることからすれば、定常張力の大きさに影響を及ぼす船体運動の要素は船体重心の横移動速度であるといえよう。

錨鎖に衝撃力が発生する時の法線加速度は (1) 式に示されるように錨鎖伸出長に反比例し接線速度の 2 乗に比例する。この時、接線速度の大きさは振れ回り運動における船体の運動速度や船体姿勢に関連して決まるが、(2) 式の関係に着目すれば、船首における船首尾線方向の運動速度 (U_F) の $\sin$ 成分と船体正横方向の運動速度 (V_F) の $\cos$ 成分の和として示される。ここに、船首角と錨鎖角の差 ($\phi - \theta$) は今回の実験ケースについては微風のもとでもせいぜい 20° 程度であり、強風下ではほとんど 0° に近い値であった。したがって、(2) 式の右辺第 1 項は第 2 項に比べてその値は十分小さいものとなり、接線速度の大きさはほとんど右辺第 2 項によって支配されることになる。いま、すべての実験ケースについて第 1 項と第 2 項の量的関係を比較すれば、個々の接線速度の値を 100 としたとき、右辺第 2 項の占める割合は微風の場合で 94%，強風の場合にはほとんど 100% であった。

さらに、船首における船体正横方向の運動速度 V_F は (4) 式に示されるように、船体重心の横移動速度に関する項 ($V_x \cos \psi$)、船体重心の縦移動速度に関する項 ($V_y \sin \psi$)、船首回頭角速度に関する項 ($(L_{PP}/2)R$) の 3 つの項によって構成される。図 18 はこれら 3 つの項のそれぞれが V_F の値に対して占める割合をすべての実験ケースについて求め、その結果をプロットしたものである。

図 18 によれば、船体重心の縦移動速度に関する項が V_F の値に対して占める割合は極めて低く、船体重心の横移動速度に関する項と船首回頭角速度に関する項のそれぞれの寄与率は、船首回頭角速度に関する項の方がやや高いものの、横移動速度に関する項も同様に高いことがわかる。したがって、船首における船体正横方向の運動速度 (V_F) は主として船体重心の横移動速度 (V_x) および船首回頭角速度 (R) に関する項の両方に支配されるといえる。

以上のことから、錨鎖に衝撃力が発生する時の法線加速度については、究極的には船体重心の横移動速度と船首回頭角速度の 2 つの運動要素が支配的要因とみられるが、衝撃力と法線加速度の間に正の相関があると判断され、また、基本的には衝撃力の大きさは法線加速度の大き

図 18 (4) 式の右辺各項の値が V_F の値に対して占める割合

さに依存する量であることから、衝撃力の大きさに影響を及ぼす船体運動の要素は主として船体重心の横移動速度と船首回頭角速度の2つであるといえよう。

7. む す び

単錨泊船の振れ回り運動に関する模型実験を行ない、主として定性的な面から錨鎖張力の大きさに影響を及ぼす要因について分析を行なった。その結果次のような指針を得た。

- (1) 振れ回り運動中に船首に働く法線加速度は振れ回り運動の特性を評価するのに都合の良いパラメータであるとともに、錨鎖張力の大きさに影響を及ぼす重要な要素である。
- (2) 定常張力の大きさに影響を及ぼす要因はもっぱら船体重心の横移動速度の大きさである。
- (3) 衝撃力の大きさに影響を及ぼす要因は船体重心の横移動速度と船首回頭角速度の大きさである。なかでも船首回頭角速度の方が影響の度合は大きい。
- (4) 振れ回り運動の両端における錨鎖の一時的な弛緩現象は衝撃力を増大させる原因となる。
- (5) 衝撃力の場合、特に、錨鎖のカテナリー特性による非線型効果が顕著にあらわれる。
- (6) 錨鎖と船首尾線が一線となるような姿勢で衝撃力が発生するとき衝撃力は増大する。
- (7) 振れ回りの大きさは強風下では一定限度以上には大きくならず、振れ回りの大きさと錨鎖張力の大きさとの間には直接的な関連は見出し難い。

錨泊船の振れ回り運動の抑制や錨鎖張力の緩和に際しては、これらの個々の要因に対して適切な control を行なうことが必要であり、また、将来、安全な錨泊を確保する上での point になるといえよう。

なお、本研究をすすめるにあたり、御討議、御教示を頂いた神戸商船大学本田啓之輔教授、原潔助教授、および、実験の実施ならびに解析に終始御助力を頂いた富山商船高専館清志技官に深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 鮫島 他：荒天錨泊法に関する実験研究（第1報）—単錨泊について、日本航海学会論文集，第22号，昭和35年3月
- (2) 米田 他：荒天錨泊法に関する実験研究（第2報）—双錨泊振れ止め錨泊について、日本航海学会論文集，第23号，昭和35年12月
- (3) 米田 他：荒天錨泊法に関する実験研究（第3報）—船尾機関船橋船および油槽船について、日本航海学会論文集，第24号，昭和36年2月
- (4) 米田 他：荒天錨泊法に関する実験研究—風浪中の浮標係留について、日本航海学会論文集，第33号，昭和40年7月
- (5) 米田 他：荒天錨泊法に関する実験研究—風浪中の錨泊について、日本航海学会論文集，第36号，昭和42年1月
- (6) 志波久光：船の振れ回りと錨鎖の張力，日本海事協会研究報告，Vol. 1，昭和45年12月