

波による係留船舶の運動および係留力に関する実験

合 田 良 実*・ 鈴 木 康 正**・ 蜂 須 賀 和 吉***

1. 緒 言

船舶の係留に関する問題は、暴風時の避泊の安全性、海上作業の限界条件、荷役効率およびシーバース等の港湾諸施設の安全性などと大きな関わりを持ち、港内の静穏度の評価という面からも重要な問題である。これに関する研究は過去にいくつか行なわれており、特に最近では海洋開発に関連して大型海洋構造物の係留問題が重要視され、さまざま方面で実験的、理論的な研究が行なわれている¹⁾。しかし、係留船舶の波浪中の動揺および係留力は流体力学的に見ても最も複雑な現象の一つであり、与えられた風、潮流、波浪などの外的条件から直ちに解析できるまでには至っていない。本文は、波浪中の係留船舶に対する理論解析を行なう前の第一段階として、実験的に船体動揺と係留力を求めたものである。

2. 実験装置

実験に用いた水路は、運輸省港湾技術研究所大型水工実験場内に設置された 40 m 不規則波造波水路である。この水路は幅および高さ 1.5 m、長さ 40 m で側壁の一部が強化ガラスでできており、水路内を観察できるようになっている。また水路床は水平である。なお水深は 25 cm とした。

測定器としては、波高については容量式波高計、船体運動の測定には X-Y アナライザーと呼ばれる装置を用いた。この装置はテレビと同様のものであるが画面上に X-Y 座標をとってあり、カメラの視野内の最も明るい点の位置をその座標で表わし、電氣量に変換することができる。したがって周囲を暗くして船体に明るい光源を設け、それをカメラでとらえれば船体の運動を測定できるので、船体にはまったく影響を与えずにその運動を測定することができる。

一方、索張力は最大でも 40 gr 程度で非常に小さかったため、張力をそのまま測定するのは困難であった。そこで係留索の途中に鋼製の溝形 (C) の検出器を挿入し、

張力が曲げモーメントとして溝形の腹部に作用するのをストレインゲージで検出するようにした。

3. 模型船体およびブイ

模型船長は水路の諸元との対応を考慮して 1 m とし、5 000 D.W.T. の貨物船のグラスファイバー製 1/100 模型を用いた。外観は 図-1 に示すとおりである。また、模型船の諸元および諸係数を 表-1 に示した。なお実験

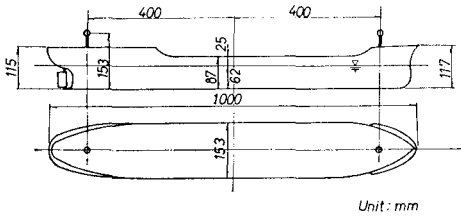


図-1 模型船

表-1 模型船の諸元および諸係数

全 長	100 cm	横 揺 周 期	1.81 sec
吃 水 船 長	95.5 cm	KG	4.88 cm
型 幅	15.3 cm	KM	6.35 cm
型 深	8.7 cm	方 形 係 数	0.657
吃 水	6.2 cm	柱 形 係 数	0.715
排 水 量	5 942 cm ³	中央断面積係数	0.920
水 線 面 積	1 201 cm ²	水線面積係数	0.822

はすべて迎波状態で行なっているので、船体運動は前後揺 (surging)、上下揺 (heaving) および縦揺 (pitching) の 3 種類となる。そこで、図-1 に示したように船中央から前後 40 cm、船底から高さ 15.3 cm の 2 点に豆電球を取付け、解析を行なった。

また、後出の 図-3-(2) のようにブイ係留についても実験を行なっているが、ブイ模型は外径 30 mm のアクリルパイプで作製した。その浮力は現地で 7 ton であり、現在 5 000 D.W.T. の船舶を対象として現地で設置されている一般的な係船浮標であるといえる。

今回実験に用いた係留索には、船体をアンカーに係留するもの (今後は S.M.L. と略称する)、ブイをアンカーに係留するもの (B.M.L.) および船体をブイに係留す

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部
** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部
*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部

るもの (S.B.L.) の3種類がある。実船においては船体の艀装数によって係留索の単位重量が定められており、実験に用いた模型船の実船では 38.63 kg/m となる。したがって模型 (縮尺 1/100) では 0.039 gr/m となり非常に軽いので木綿糸を使用することにした。また各係留索には適当な弾性を与えるためにバネを接続し、それぞれの索長およびバネ定数は表-2 に示すとおりとした。

表-2 係留索の諸元

種 類	索 長 (cm)	バネ定数 (gr/cm)
S.M.L.	35	7.14
S.B.L.	17	16.5
B.M.L.	35	49.2

4. 実験方法

4.1 実験波

実験に用いた波は規則波と一方向スペクトルを持つ不規則波である。規則波については、周期による船体運動および係留力の変化をみるために $T=0.77 \text{ sec} \sim 1.92 \text{ sec}$ の範囲で 16 種類の周期を持つ波を用いた。予備実験の結果、波高が 5 cm 以下では船体運動と索張力が波高に比例することが確かめられたので、それぞれの周期に対しては一つの波高についてのみ実験を行なうこととし、 $T \geq 0.91 \text{ sec}$ の波では約 4 cm, $T < 0.91 \text{ sec}$ の波では約 2 cm の波高を用いた。 $T < 0.91 \text{ sec}$ の波で波高を下げたのは、波高が大きいと船体運動が不安定になったためである。

一方、不規則波としては図-2 に示したような一次元スペクトルを持ち、有義波高 3.57 cm, 有義波周期 0.94

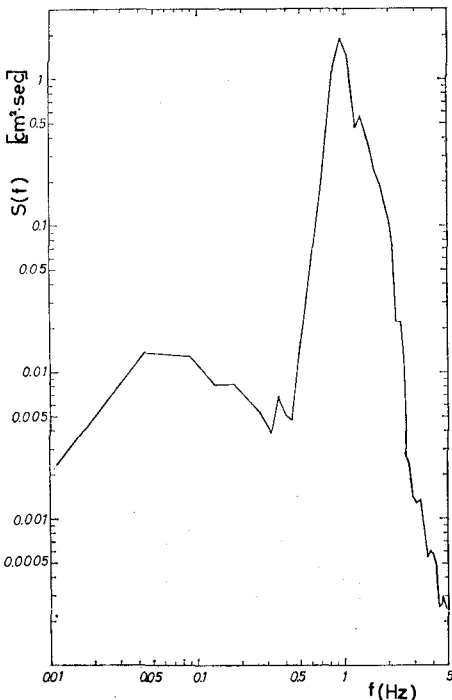


図-2 不規則波の周波数スペクトル

sec の波を用いた。

4.2 係留法

係留船舶の運動および係留力に影響を及ぼす要因としては、係留索の本数および係留法 (アンカー係留かブイ係留か) など

が考えられる。今回の実験では図-3 の3種類の係留法を対象とし、係留索の本数および係留法による影響について検討した。なお4点係留においては、静水状態で係留索が伸びもたすみもしないように係留した。

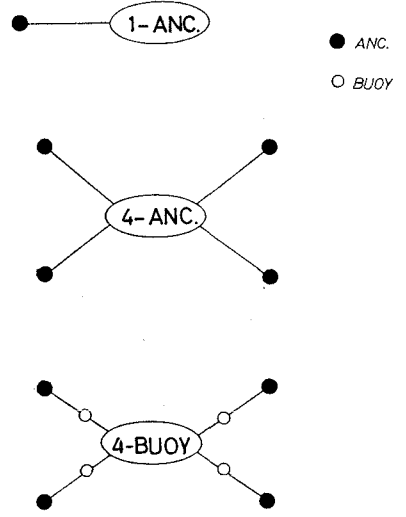


図-3 船体の係留法

4.3 データ解析法

迎波状態における船体の前後揺、上下揺および縦揺の振幅は、以下のようにして船体の前後に設けた豆電球の上下および水平変位の記録から求めることができる。

いま静水状態における船体の重心位置を原点とし、波の進行方向と逆向きに x 軸、鉛直上向きに y 軸をとる。また船体の前後2点 P, Q に豆電球を取付け、静水状態における座標をそれぞれ (a, b) , $(-a, b)$ とする。さらに、波によって船体が動揺したとき、時刻 t における船体重心の前後揺変位、上下揺変位および縦揺変位角をそれぞれ ξ_t, η_t および δ_t とすれば、そのときの豆電球の位置 (x_P, y_P) , (x_Q, y_Q) は次式で表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} x_P &= \xi_t + a \cos \delta_t + b \sin \delta_t \\ y_P &= \eta_t - a \sin \delta_t + b \cos \delta_t \\ x_Q &= \xi_t - a \cos \delta_t + b \sin \delta_t \\ y_Q &= \eta_t + a \sin \delta_t + b \cos \delta_t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

したがって、 x_P, y_P, x_Q, y_Q を $X-Y$ アナライザーで測定すれば、上式を解いて次式によって ξ_t, η_t, δ_t を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \xi_t &= \{x^+ - b\sqrt{4 - (x^-/a)^2}\}/2 \\ \eta_t &= \{y^+ - b\sqrt{4 - (y^-/a)^2}\}/2 \\ \delta_t &= \tan^{-1}(y^-/x^-) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} x^+ &= x_P + x_Q, & x^- &= x_P - x_Q \\ y^+ &= y_P + y_Q, & y^- &= y_P - y_Q \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

このようにして時刻 t の変位が求まれば、それらの極値

から各船体動揺の振幅を計算することができる。この際極値は放物線によってデータを内挿して求めた。また各時刻における座標 x_P, y_P, x_Q, y_Q はペン書きオシログラフのアナログ記録から、データ読取装置によって 0.2 sec おきに読取った値を用いた。

なお、解析は船体運動が定常状態に達した後のみを対象とし、過渡状態については解析を行っていない。

5. 実験結果と考察

5.1 規則波中の係留船舶の運動および係留力

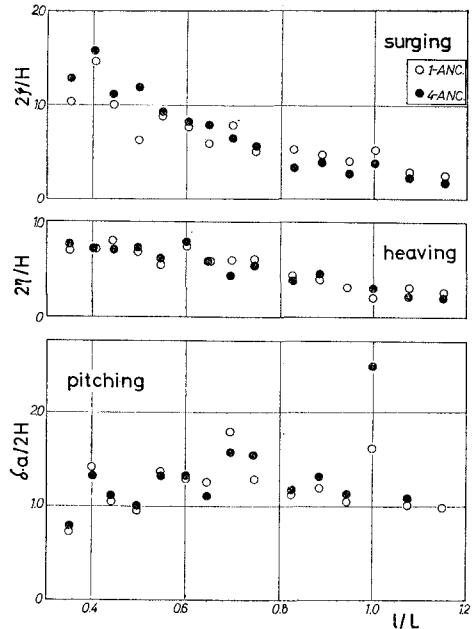
(1) 船体のふれまわり運動

船体、係留状態および入射波が完全に対称であれば、迎波状態では船体は左右に振れず、水路軸方向でのみ動揺するものと考えられる。しかし実験においては波長が長いときには船軸と水路軸がほぼ一致していたが、波長が短くなって $L < 110$ cm ($T < 0.9$ sec, L : 波長) となると船尾が水路軸からはずれるという現象が見られた。この原因としては、上記の各条件が対称でなかったこと、船体による散乱波の水路側壁からの反射波の影響および波長の短い波に対しては、波の進行方向に船腹を向けようとする傾向があることなどが考えられる。なお末広²⁾は、波の周期が横揺と縦揺の共振周期の間にあるときは波浪中に自由に浮遊している船は波に対し横向きになり、その他のときは波に対して立つ現象について述べているが、その影響を受けている可能性もある。しかし詳細については不明であり、平面水槽で縮尺の大きい模型船を用いてさらに実験を行ない検討を加える予定である。

ここで述べた船尾のふれまわり運動は、風の中における船体のふれまわり運動とは異なる現象であろうと思われる。しかし実験においては水路軸に対し 30 度前後も傾く場合も見られ、港内の泊地等に停泊する船舶の安全性の面から見ればやはり重要な問題であろうと考えられる。

(2) 船体運動の周波数応答

図一4—(1)～(3)は、今回実験の対象とした係留法のうち拘束性が弱いと考えられる一点アンカー係留と拘束性の強い4点アンカー係留における船体動揺の測定結果である。図の横軸は船長 l の波長に対する比、縦軸は各動揺の両振幅の波高に対する無次元値である。これらの図を見ると、前後揺は $l/L = 0.4$ ($T = 1.70$ sec) 付近に共振周期を持つことがわかる。また上下揺の共振周期は約 0.63 sec ($l/L = 1.63$) であるので今回実験に用いた規則波の周期の範囲内には共振周期が存在せず、相対船長が増大するとともに無次元振幅は単調に減少している。一方縦揺については、測定値のばらつきが大きいためにはっきりしたことは判らないが $l/L = 0.6 \sim 0.7$ および $0.9 \sim 1.0$ ($T = 1.41$ sec および 1.02 sec) 付近で振幅が大きくな



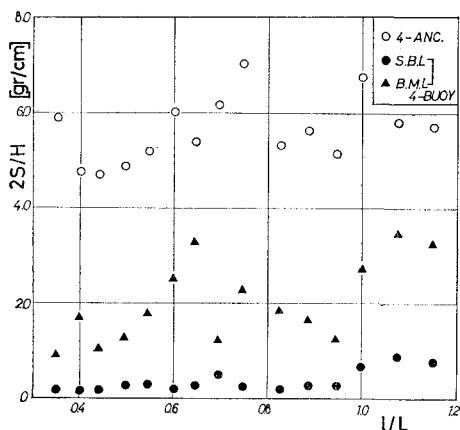
図一4 船体運動の周波数応答

っていることが判る。紙面の都合でこのほかの係留法に対する船体動揺の測定結果は載せていないが、やはりこれらの傾向が見られた。なお観測によると波に対して船腹を向けようとする傾向は $l/L = 0.9 \sim 1.0$ 付近で最も大きかった。したがって縦揺振幅のこの付近のピークは、実際に縦揺振幅が大きかったというよりもその影響を受けたものと考えた方が妥当であると思われる。

また図一4で最も特徴的なことは、船体動揺が係留法の違いによる拘束性の強弱にはほとんど影響されていないということである。係留船舶の波浪中の動揺は、波による強制力、造波抵抗、静水圧的復元力および係留力に支配されるが、今回実験を行なった係留法のうちで最も拘束性の高いと考えられる4点アンカー係留においても係留力は船体動揺にほとんど影響を及ぼさず、波浪強制力が支配的であったことがわかる。したがって係留船舶の波浪中の運動は、よほどの緊張係留でない限り自由に浮遊している船体の運動と同じようにして計算できるものと考えられる。また逆に言えば、係留索は船体の移動を抑えることはできても、波による動揺を減少させることはなかなか困難であると予想される。ただし船体動揺に対する拘束性を増し、係留力が波浪強制力と同程度のオーダーを持つようにすれば、当然のことながら船体動揺振幅は低減されることになる。

(3) 係留力の周波数応答

4点係留の場合のアンカー係留とブイ係留における係留力を、船首側の一本の係留索に係用する索張力で比較したのが図一5である。この図を見ると、ブイ係留にした場合にはアンカー係留に比べて係留力は非常に小さく

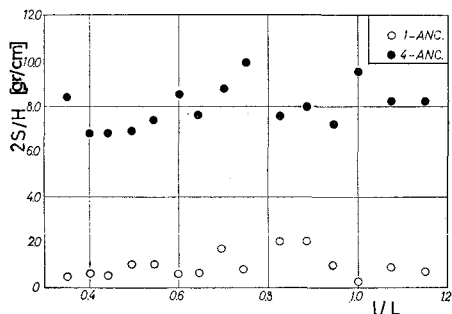


図—5 アンカー係留とブイ係留における係留力

なり、しかも S.B.L. と B.M.L. の張力の和が S.M.L. の張力よりも小さくなっていることがわかる。これはブイ係留の方がアンカー係留に比べて船体運動に対する拘束性が弱いこと、および中間にブイを設けたことによる係留力の減少効果によるものと考えられる。ブイは係留索に張力が作用すると水中に没し、張力の一部を浮力に置き換えることにより一種のダンパーのような役割を果たしている。係留力の低減法には今回用いたような水面に浮かんだブイの他に、水中ブイおよびシンカー等が考えられるが、今回の実験結果から類推すればこれらもやはり係留力の低減に有効であると思われる。

図—6 は、1 点アンカー係留および 4 点アンカー係留の係留力を比較したものである。4 点係留に対する値は船首側の 2 本の索張力から船軸方向の分力を求めたものである。4 点係留は 1 点係留に比べて緊張度が高いため、係留索に非常に大きな張力が作用することになる。多点係留は船体のふれまわりを抑えるために用いられる係留法であるが、波力に対しては遊びを持たせたり、あるいはブイ係留にするなどして係留力の低減を図らない限り危険であると思われる。

なお、図—4 の船体運動と 図—5, 6 の係留力の周波数応答を比較してみると、今回の実験では係留力は縦揺と大きな関わりを持っていることが判る。

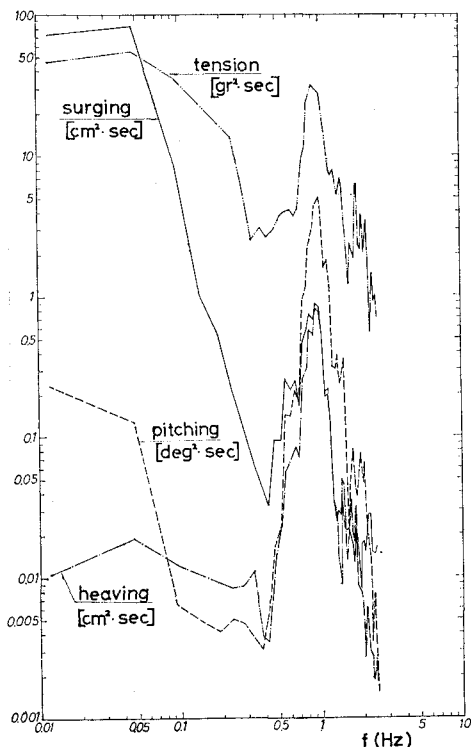


図—6 1 点係留と 4 点係留における係留力

5.2 不規則波中の係留船舶の運動および係留力

以上述べてきたのは規則波中の係留船舶についてであるが、実際の海の波はあくまでも波高、周期および波向がさまざまな変化する不規則波である。したがって規則波だけを対象とするのでは不十分であり、最終的にはより実際の波に近い不規則波について解析を行なう必要がある。今回は 図—2 に示した一次元スペクトルを持つ波の中に模型船を係留し、船体運動および係留力を測定してそれらのエネルギースペクトルを求めた。一例として 1 点アンカー係留のときの応答スペクトルを示すと 図—7 のようになる。この図を見ると船体の水平運動のエネルギースペクトルが低周波側で非常に大きくなっていることがわかる。これは船体が変動漂流力を受けて長い周期で水平方向に運動するためであり、不規則波中の係留浮体に特有の現象で一般に slow drift oscillation と呼ばれている³⁾。このような船体の長周期の水平動揺は当然のことながら索張力にも影響を及ぼし、船体が沖側にあるときには索張力はほとんど 0、岸側に押しやられるときには漂流力による定常的な力の他に船体動揺にともなう変動張力が加わり非常に大きな張力が現われる。さらに係留索がちょうど伸び切るときに大きな波を受けると衝撃的な張力が発生する場合がある。

一般に線形性の仮定が成立つ現象では、不規則波のスペクトルを $S(f)$ 、周波数応答関数を $F(f)$ とすれば応答スペクトル $S_R(f)$ は次式で計算される。



図—7 不規則波中の応答スペクトル

$$S_R(f) = S(f)[F(f)]^2 \dots\dots\dots (4)$$

1点アンカー係留の周波数応答関数を 図-4, 6 から求め, 図-2 の周波数スペクトルを用いて計算した応答スペクトルと 図-7 の測定結果を前後揺と係留力について比較すると 図-8-(1), (2) のようになる. 前後揺の測定値には, 低周波側に slow drift oscillation の影響が見られ計算値よりもやや大きいスペクトルを持っているが, ほぼ計算値と測定値は一致しているといえる. また上下揺と縦揺についても同様の比較を行なったところ, 前後揺の場合よりも良く一致した. したがって船体運動に対しては, 計算の対象とした周波数域では線形性が成立していることが判る. 一方, 係留力については測定値

の方が一般に大きくなっている. これは上に述べたような長周期の水平運動による非線形効果が, 全周波数領域にわたって係留力に影響を及ぼしているためと考えられる. このことから, 不規則波中の係留力は, 規則波に対する応答関数をそのまま用いても計算することはできず, slow drift oscillation 等による非線形効果も考慮する必要があることが判る. なお, 船体運動についても低周波領域では同様のことが言える.

6. 結 語

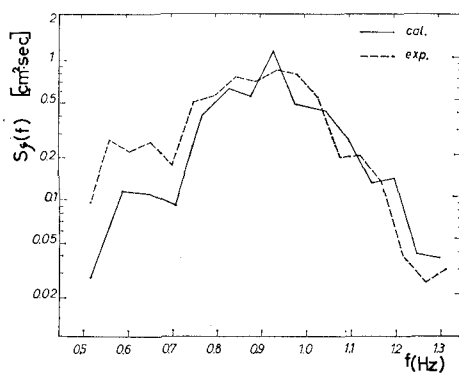
係留船舶の波浪中の船体動揺および係留力を実験によって求めたところ, 次のような結論を得た.

- 1) 今回対象とした係留法の範囲では, 係留法の違いによる船体動揺の差はほとんど見られなかった. このことから, よほどの緊張係留でない限り波浪中の船体動揺を支配しているのは波の強制力であり, 係留力はほとんど影響を及ぼしていないことが判る.
- 2) 係留索にブイ等を設けることによる索張力の低減効果は大きい.
- 3) 多点係留など船体運動に対する拘束性の強い係留法では, 緊張係留にすると非常に大きな係留力が発生する.
- 4) 不規則波中の船体運動の応答スペクトルは, 線形性の成立つ領域では規則波中の応答関数を用いて計算できるが, 低周波領域では slow drift oscillation の影響による非線形効果が大きい. 一方係留力には非線形性が高く, 規則波中の応答関数から応答スペクトルを求めることができない.

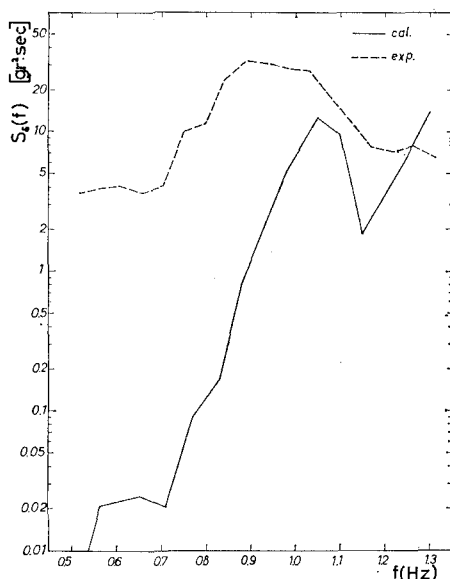
なお今回は迎波状態のみを対象としたが, 今後は横波および斜波を受けるときの実験を実施すると同時に, 理論解析を行ない, 港内静穏度解析への応用, 船舶の最適係留法および係船浮標等の設計法などについて検討を加えていきたいと考えている.

参 考 文 献

- 1) たとえば, 日本造船学会: 第2回海洋工学シンポジウム (浮遊式海洋構造物の係留問題を中心にして), 昭和51年6月, 162 p.
- 2) Suehiro, K.: Yawing of ships caused by oscillation amongst waves, T.I.N.A., Vol. 62, 1920.
- 3) たとえば, Hsu, F. H. and K. A. Blenkarn: Analysis of peak mooring force caused by slow vessel drift oscillation in random seas, O.T.C., 1970, Paper No. 1159.



(1) 前後揺



(2) 係留力

図-8 応答スペクトルの計算値と測定値