

風と波の中におけるブイと係留船舶の応答

鈴木 康正*・諸石 一幸**

1. 緒 言

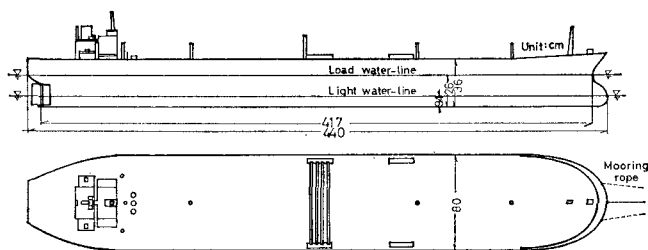
浮遊式の係留施設の一つにブイがある。ブイは港湾施設として古くから使われており、波が比較的静穏なときに使用される港内の係船ブイや、係船だけではなくタンカーの荷役を行うための施設も備えた一点係留ブイなどがある。また最近では、暴風雨時に船舶を港内に安全かつ確実に係留しておくためにブイを利用するという構想や、大型タンカー用の一点係留ブイパスを気象・海象条件の厳しい外海に設置するという計画が立てられている。さらに、海洋開発という面からも浮遊式構造物としてのブイの有用性が認識されつつある。

現地においてブイや係留船舶は波浪、風および潮流などの外力の作用を受ける。しかし、ブイと係留船舶によって形成される力学系が外的条件に対してどのように応答するかは、いろいろな要因が複雑に影響し合うために理論的な取扱いが容易ではない。そのため、風や波などの中における係留船舶の運動および係船ロープやブイの係留チェーンに発生する張力等については不明な点が多く、充分な設計基準がないのが現状である。そこで本研究では外力条件として風と波を考え、ブイとそれに単点係留された船舶の応答特性を実験的に検討した。

2. 実験方法

2.1 ブイと船舶の模型

ブイ模型はアクリル製の直円筒型で、直径 14 cm、高さ 7.2 cm、質量 491 g、自由浮体としての吃水 3.2 cm であり、重心は底面から 3.0 cm の高さにある。ブイは 1 本のチェーンによって底面の中央から水底のアンカーに係留されている。係留チェーンの水中単位重量は 134.3 gf/m である。また、チェーンに作用する張力を測定するために小型の張力計がチェーンとブイとの接続部に挿入されている。チェーン係留時のブイの吃水は約 3.7 cm である。



図—1 船体模型の外見図

模型船は木製であるが、中に鉄製の重錘を載せて船体全体としての質量および慣性モーメントを調節した。船体の外見図は 図—1 に示したとおりであり、上部工は一般的なタンカーのものである。また、船体の諸元を表—1 に示した。

表—1 模型船の諸元

項 目	空 載 船	満 載 船	項 目	空 載 船	満 載 船
船 長	417 cm	417 cm	正面投影積	3 150 cm ²	1 850 cm ²
型 巾	80.8 cm	80.8 cm	側面投影積	12 420 cm ²	5 380 cm ²
型 深	36 cm	36 cm	縦 慣 性 率	3.92×10^4 kg·cm ²	9.10×10^4 kg·cm ²
質 量	241 kg	711 kg	方形係数	0.832	0.832
吃 水	9.4 cm	26.0 cm			
重 心 高	10.9 cm	17.6 cm			
船首・重心間距離	201 cm	201 cm			

係船ロープは木綿製の糸とゴムパネを接続した長さ 1 m のもので、図—2 に示したような伸び特性を持っている。同図には直径 90 mm のナイロンエイトロープの伸び特性も示してあるが、模型に使用した係船ロープはそれに比べて荷重が小さいうちは伸びにくいことがわかる。また、小型張力計を接続して係船ロープに作用する張力を測定した。

2.2 実験水槽

実験水槽は、運輸省港湾技術研究所内にある長さ 25 m、幅 15 m、深さ 1 m の平面水槽である。水槽の一端には幅 5 m の造波板を持つピストン型造波機 3 台を設置しており、また水槽内には可動式の送風機（羽根径 1 m）9 台が波の進行方向と同一方向の風を起こすように

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部

** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部

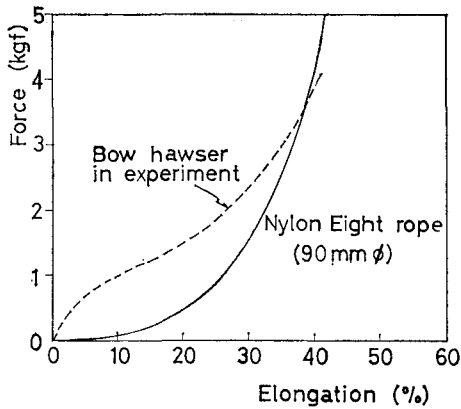


図-2 係船ロープの伸び特性

置かれている。ファンの前面には格子型の整流板があり、またダクトは設置していないオープンタイプである。送風機と模型ブイとの水平距離は約 3.2 m ある。水槽の他端には消波用の碎石斜面が、また側壁にはステンレス網製の消波工がある。なお、水槽床は水平で実験水深は 62.8 cm とし、静水面と送風機下端とは約 10 cm の間隔をとった。

2.3 実験に用いた風と波

現地でブイや係留船体に作用する外力としては風、波および潮流が支配的であると考えられる。このうち構造物に与える力学的作用が風と似ている潮流は今回の実験では省いた。

実験に用いた風は時間的にほとんど変動しない定常風である。図-3 は水面に何も置かない状態における風速

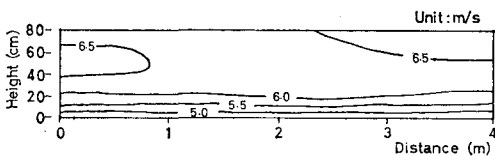


図-3 風速分布の測定例

分布の測定例である。これは送風機から 6.2 m の位置で測定したもので、実験時には模型船のほぼ中央となる。風向き方向で、これより前後 2 m の位置においても風速分布を測定したが、その結果によれば 4 m の間の風速の減少率は最大で 7% 程度であった。

一方、実験波としては、波向は一方向であるが波高と周期が一波ごとに变化する一方向不規則波を用いた。その周波数スペクトルは図-4 に示したようにブレッドシュナイダー型に近い。入射波の周期の影響をみるために有義波周期 $T_{1/3}$ を 1.66 s (今後は L の波と呼ぶ) と 1.24 s (S の波と呼ぶ) の 2 種類としたが、有義波高 $H_{1/3}$ はいずれもほぼ 4 cm である。図-4 には L の波のスペクトルを示した。図中の実線は造波機だけを駆動したと

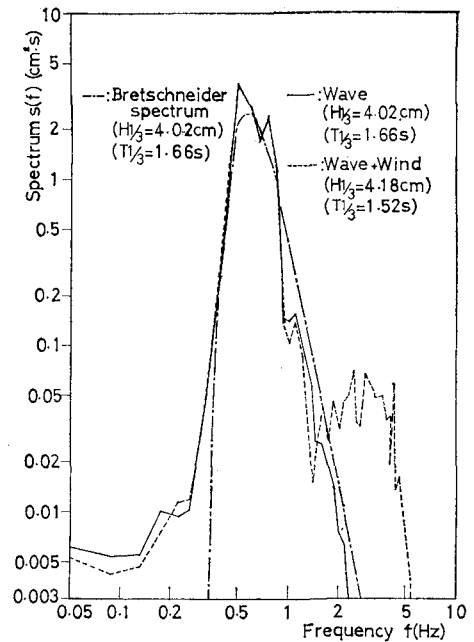


図-4 実験波のスペクトル図 (L の波)

きのスペクトル、破線はさらに風も起こしたとき (風速は図-3 に対応) のものである。高周波側に風によって起こされた波の影響がみられるが、そのエネルギーレベルは低いことがわかる。

2.4 測定および解析方法

実験は静水および無風時から開始した。風によって船体はやがて定常的な振れ回り運動を行うようになるので (図-5 参照)、定常運動の 3 周期の間の船体運動および係船ロープ張力、ブイの係留チェーン張力を測定した。船体運動は水槽の上方から 16 mm 撮影機で撮影したフィルムによって解析し、張力はペン書きオシログラフに記録した。同一の実験条件で 2 回測定し、平均値を求めた。なお、不規則波だけの実験では船体は定常的な振れ回り運動を行わなかったため、入射波の約 100 波の間にわたって測定を行った。

3. 風速と船体運動および係留張力

船体は定常風の中においても周期的な振れ回り運動を行った。図-5 は振れ回り運動を行っているときの船首および船の重心の軌跡を求めた一例である。このときの実験条件は、船体は軽荷状態であり 1 本の係船ロープによってブイにつながれている。また、ブイは長さ 62.8 cm すなわち水深との比 (スコープ) が 1.0 のチェーンによってアンカーに係留されている。風速は図-3 に対応しており、船体の平均的位置における平均風速は約 6.2 m/s である。また、造波機は駆動していない。

このような船体の振れ回り運動が風速によってどのように変化するかをみるために、他の条件は一定にして風

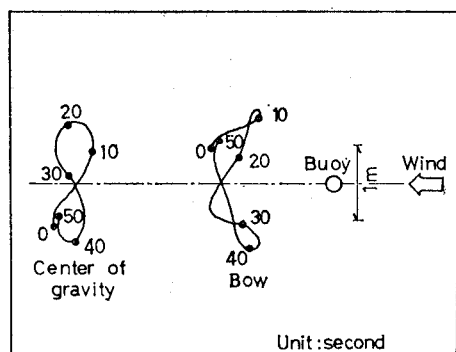


図-5 定常風中における船体の運動軌跡

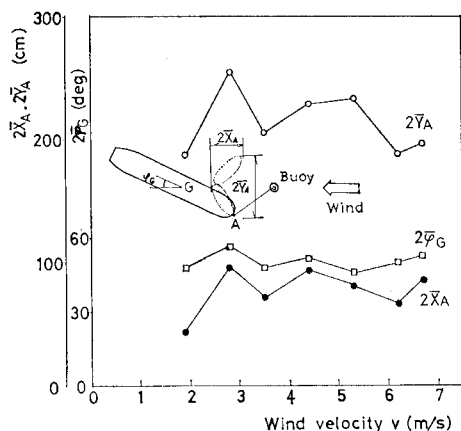


図-6 風速と船体運動振幅

速だけをさまざまに変えた実験を行った。その結果を示したのが 図-6～8 である。

まず、図-6 は船首の風向き方向の両振幅 $2\bar{X}_A$ 、風向きと直角方向の両振幅 $2\bar{Y}_A$ および船体の回転角の両振幅 $2\bar{\varphi}_A$ と風速との関係を調べたものである。この図から、船体運動と風速との間には明確な関係がないことがわかる。今回の実験ケースの中では、風速が約 2.6 m/s のときに風向と直角方向の振幅 $\bar{Y}_A$ が最大であった。このとき、アンカーを中心とした船首の振れ回り角度は約 150 度にも達した。また船体の運動軌跡について言えば、重心の軌跡は風速が変わっても 図-5 に示したパターンと同様の 8 の字型を描くが、船首の軌跡は風速が小さいときにはアンカーを中心とした円弧状に近かった。

次に、図-7 は風速と船体の振れ回り運動周期との関係を示したものである。運動周期は風速が減少するにしたがって急速に長くなることがわかる。今回の実験の範囲内では、周期 T と風速 v との間には図中に実線で示した回帰曲線のような指数関数的な関係がみられた。

また、風速と係船ロープに発生する最大張力との関係を示すと 図-8 のようになる。これから、最大張力は風

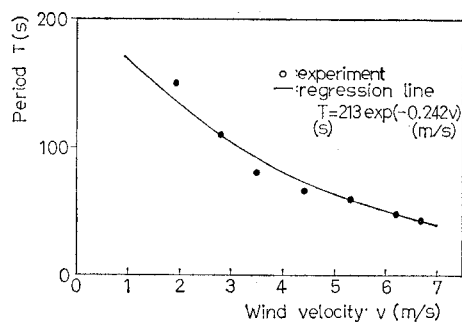


図-7 風速と船体振れ回り運動周期

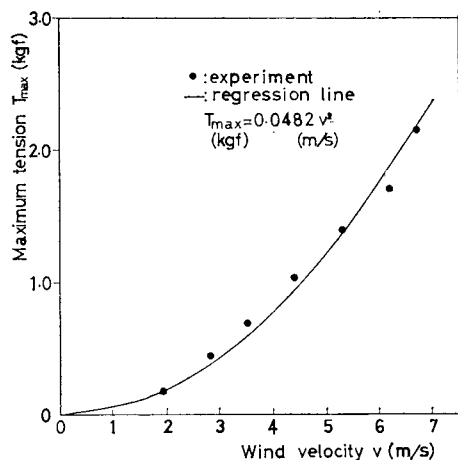


図-8 風速と係船ロープ最大張力

速の 2 乗にほぼ比例することがわかる。

一般に風荷重 F は次のようにして計算される¹⁾。

$$F = \frac{1}{2} \rho_a C_w v^2 (A \cos^2 \varphi_G + B \sin^2 \varphi_G) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ρ_a は空気密度 ($=1.21 \text{ kg/m}^3$)、 v は風速、 A 、 B はそれぞれ船体の水上部分の正面および側面投影面積、 φ_G は船体と風向とのなす角である。また、抗力係数 C_w 、および風荷重の作用する方向と船体軸とのなす角 ϕ はいずれも φ_G の関数で次式で表される (φ_G と ϕ の単位は度)。

$$C_w = 1.20 - 0.083 \cos 2\varphi_G - 0.25 \cos 4\varphi_G - 0.177 \cos 6\varphi_G \dots \dots \dots (2)$$

$$\phi = \left\{ 1 - 0.2 \times \left(1 - \frac{\varphi_G}{90} \right) - 0.8 \times \left(1 - \frac{\varphi_G}{90} \right)^3 \right\} \times 90 \dots \dots \dots (3)$$

さて、実験において係船ロープ張力が最大になるのは $\varphi_G \approx 25^\circ$ および係船ロープと風向きとのなす角がほぼ 14° のときであった。これらの値から式 (1)～(3) を用いて係船ロープの最大張力 $T_{\max}$ (kgf) と風速 v (m/s) との関係を求めてみると次のようになった。

$$T_{\max} = 0.0412 v^2 \dots \dots \dots (4)$$

図-8 中の回帰曲線の係数は 0.0482 であるので、式 (4)

の $T_{\max}$ は実験値に比べてやや小さ目ではあるが、オーダー的には良く合っていることがわかる。また実験値が計算値よりも大きい原因は、船体運動の動的効果によるものが主たる原因であろうと推定される。

4. ブイおよび船体運動に影響を与える要因について

風と波の中におけるブイと係留船舶の応答は、外力条件、船体状態および係留法などの要因によって影響を受けるものと考えられる。そこでこれらの各要因がどのように影響するかを検討するための実験を行った。

まず次のような状態を基準とし、実験ケース番号を 0 とする。すなわち、1) 船体は軽荷状態、2) ブイの係留チェーン長と水深との比 (スコープ) は 1.0、3) 係船ロープの本数は 1、4) 風速は 6.2 m/s で造波機は駆動しない、5) 無風時に船体が風向と同一方向を向いて ($\varphi_0 = 0^\circ$) 静止している状態を初期状態とする。このときの船体運動の軌跡は 図-5 に示したとおりである。

このような基準状態に対し、実験条件の一部を変えた実験を行った。実験ケースは 表-2 に示したような 8 ケースである。表中の○印が基準状態と同一の実験条件であることを示し、●印あるいは×印が変えた条件であることを示している。

これらの各実験条件における係船ロープおよび係留チェーンの最大張力の平均値 ($\bar{T}_{\max}$)、船首の運動振幅 ($\bar{X}_A, \bar{Y}_A$)、船体の回転角 ($\bar{\varphi}_0$) および船体の振れ回り運動周期 (T) について、測定値とそれらの基準状態にお

ける値との比を求めた結果を 表-3 に示した。添字 0 を付けたものは基準値であることを示す。また表中、実験ケース番号 6 (係船ロープ 2 本) の係船ロープ張力は 1 本のロープに発生する張力であり、実験ケース番号 7、8 (無風で L と S の波) では船体は周期的な振れ回り運動をしないため、船体運動振幅および周期の欄には値がない。

まず、実験ケース 1 および 2 では基準状態にさらに L の波 ($T_{1/3} = 1.66$ s) と S の波 ($T_{1/3} = 1.24$ s) を作用させている。表-3 をみると最大張力の平均値および船体運動は基準状態の 5~15% 増しとなっている。これは風による船体の長周期の振れ回り運動に、波の周期に対応したブイや船体の短周期運動が重ね合わさるためである。また、全般的に S の波の方が L の波のときよりも係留力その他が大き目になってはいるが、実験の精度から考えて有意な差であるのかは不明である。船体の運動軌跡にはほとんど変化がみられなかった。

一方、実験ケース 7 と 8 は風がない状態で L と S の波を作用させたものである。一般に波力は周期的変動をするものが大部分で、定常的な波漂流力は小さい。したがって船体は主として往復運動をしながら少しずつ波の進行方向に移動する。やがてブイと船体との距離が離れると係船ロープに張力が発生し、船体はブイ側に引き戻されてロープ張力は再び 0 となる。このときに発生する係船ロープおよびブイの係留チェーン張力は波による船体やブイの短周期運動に対応したものが支配的で、鋭いピークを持つ衝撃的な時間変化を示す。実験ケース 7 と 8

表-2 実験条件

実験ケース	風 ($v=6.2$ m/s)	波 ($H_{1/3} \approx 4$ cm)		船体状態		初期状態		チェーンスコープ		ロープ本数	
		Lの波	Sの波	軽荷	満載	$\varphi_0 = 0^\circ$	$\varphi_0 = 20^\circ$	1.0	1.5	1	2
0	○			○		○		○		○	
1	○	●		○		○		○		○	
2	○		●	○		○		○		○	
3	○				●	○		○		○	
4	○			○			●	○		○	
5	○			○		○			●	○	
6	○			○		○		○			●
7	×	●		○		○		○		○	
8	×		●	○		○		○		○	

表-3 係留張力と船体運動の測定結果

実験ケース	ロープ張力 $T_{\max}/(T_{\max})_0$	チェーン張力 $T_{\max}/(T_{\max})_0$	船首の運動 $\bar{X}_A/(\bar{X}_A)_0$ $\bar{Y}_A/(\bar{Y}_A)_0$		回転角 $\bar{\varphi}_0/(\bar{\varphi}_0)_0$	周期 T/T_0
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1	1.05	1.10	1.06	1.10	1.08	1.0
2	1.06	1.15	1.07	1.10	1.10	1.0
3	0.28	0.33	0.13	0.09	0.30	1.54
4	1.03	1.04	0.93	0.97	1.06	0.95
5	1.51	1.28	1.84	1.65	1.40	1.12
6	0.90	1.37	1.27	1.29	0.86	0.98
7	0.11	0.23	—	—	—	—
8	0.16	0.35	—	—	—	—

の張力がケース1と2の増加分よりも大きいのは、この衝撃性によるものと考えられる。また船体の運動には風の中におけるような顕著な長周期の周期性はみられなかった。

実験ケース3では船体を満載状態にして実験を行った。表-3からわかるとおり、船体の振れ回り運動振幅は非常に小さくなり、係船ロープやブイチェーンに発生する張力も基準状態の30%前後に減少する。これは船体の吃水が深くなって水面上の投影面積が小さくなったために船体に作用する風荷重が小さくなったと同時に、船体の質量が増したために動きにくくなったことが原因であろうと考えられる。このことから、風の中でブイに係船する場合にはなるべく満載状態にした方が船体の振れ回り運動や係留力を小さくできると言えよう。さて、船体の振れ回り運動振幅が非常に小さいことから、船体が正面から風を受けているものと仮定し、係船ロープ張力の平均値366 gfを用いて式(1)の抗力係数 C_w を逆算してみると $C_w=0.83$ となる。式(2)では $\varphi\alpha=0^\circ$ のとき $C_w=0.69$ となるので実験値よりもやや小さ目である。

実験ケース4では、船体の初期回転角が及ぼす影響をみるために、無風状態で風向きに対し $\varphi\alpha=20^\circ$ だけ傾けて静止させた状態から送風を開始した。表-3から、 $\varphi\alpha=0^\circ$ から開始した基準状態のときの結果とほとんど差がないことがわかる。このことから、船体の振れ回り運動は初期状態によらない定常運動であることがわかる。

次に、ブイの係留チェーンの長さの影響をみるため、チェーンの長さを水深の1.5倍にしたのが実験ケース5である。その結果、船体の振れ回り運動振幅は40~80%程度増大し、係留系に発生する張力もチェーンで30%程度、係船ロープでは50%程度大きくなった。このことから、振れ回り半径の大きい係船ブイは船体運動および係留力を増大させるという意味で不適当であると言えよう。

最後に、実験ケース6は係船ロープを2本にした場合である。船体の振れ回り運動を抑え、係留張力を減少す

るという目的のために2本係留にすることが効果的であるかを検討するためのケースである。しかし表-3からわかるとおり、船体の回転角はやや減少するものの、船首の運動振幅および発生張力は逆に増加しており(表中の係船ロープ張力はロープ1本分の値)、今回の実験では係船ロープを2本にする効果はみられなかった。ただし、係船ロープの船体取付位置、ロープの伸び特性あるいはブイの型式などの組合せ方によっては2本係留が効果的となることも考えられるが、それを検討するにはより詳細な実験が必要であろう。

5. 結 言

以上、本研究ではブイに単点係留された船体の風と波の中における応答について検討するために模型実験を行い、風速、係留法および船体の載荷状態などの各要因と船体の振れ回り運動や係留力との関連について明らかになったことを述べた。今後は、風向と波向とが異なる場合、船型の影響、潮流等の流れが及ぼす影響について検討していく予定である。

なお、船体の振れ回り運動の理論解析が米田ほか²⁾、Wichers³⁾、宝田ほか⁴⁾などによって行われている。しかし外力としてはいずれも定常力しか考慮していないために、運動方程式を線型化すると同次方程式となって振れ回り運動の安定条件しか求まらなかったり、非線型方程式を数値解法によって時系列で解いていくときに初期状態をどのようにするか等の問題があるようである。理論解析法についても今後検討していきたいと思っている。

参 考 文 献

- 1) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, pp. 2~10, 1979.
- 2) 米田謹次郎・野原威男・岡田正明・鞠谷宏士・川本文彦・及川 清: 荒天錨泊法に関する実験研究(第1報)三島型貨物船について, 東京商船大学研究報告(自然科学), 第11号, pp. 1~67, 1960.
- 3) Wichers, J. E. W.: On the Slow Motions of Tankers Moored to Single-Point Mooring Systems, J. of Petroleum Technology, June, 1978.
- 4) 宝田直之助・小保方 準: 船舶の一点係留について, 日本造船学会誌, 第595号, 1979.