

ブイ係留船舶の振れ回り運動の数値計算法

鈴木康正*・諸石一幸**

1. まえがき

港の重要な機能の一つは、静穏な海水面の確保である。安全な荷役作業を可能にするためばかりではなく、本来港は船舶の停泊地という機能も持っており、荒天時には船舶にとって安全な避難場所であるべきである。しかしながら、現状では港内に避泊用の充分な施設がなく、また泊地のスペースが足りないために、荒天時には大型船舶は港外に退避させられることが多い。これは安全性の面で問題であると同時に、経済的にも時間的にも大きな損失である。このようなことから、安全な港内避泊に対する要望が高まってきており、荒天時の係留施設として避泊ブイを使用することが検討されている。

ところが、単点係留された船舶は強風下では振れ回り運動をし、係留系には大きい張力が発生することが知られている。いま例として定常風中で振れ回り運動をしている模型船の各時刻ごとの位置を5sごとに示すと図-1のようになる。これからわかるとおり、振れ回り運動の振幅は大きく、周期は長い。このような運動は流れによっても発生すると言われる。

さて、船体が図-1のような振れ回り運動をしているときの船首と船体重心の軌跡を示すと図-2の破線のようにになる。実線については後で述べる。このように、重心の軌跡が8の字を描くこと、風向きに対し左右がほぼ

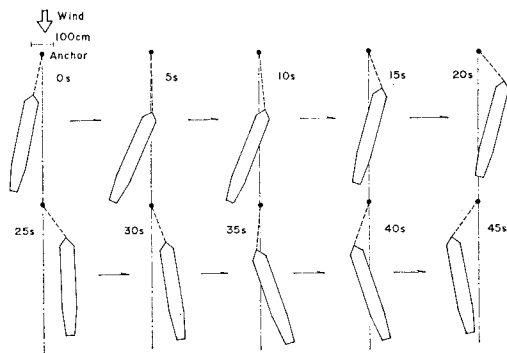


図-1 船体の振れ回り運動 (風速 $U_w=620$ cm/s)

* 正会員 工修 (前)運輸省港湾技術研究所海洋水理部 主任研究官
(現)運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所次長
** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室

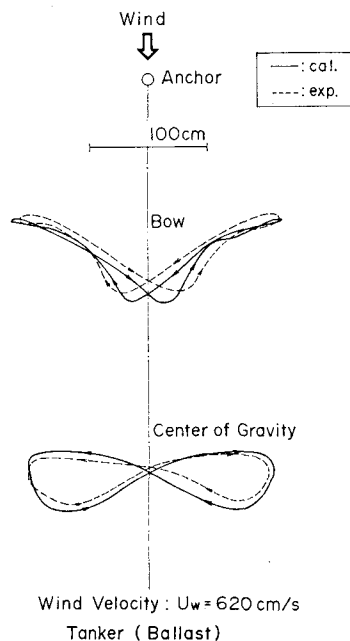


図-2 振れ回り運動の軌跡

対称であること、周期的であること、船体の初期状態に影響されないことなどが振れ回り運動の特徴である。

そこで本研究では、避泊ブイの安全にとって重要である強風下の船体の振れ回り運動の数値計算法について検討した。

なお、現地で船体に作用する外力には風のほかに波浪と流れなどがある。著者らはこのうち、振れ回り運動に対する波浪外力の作用について水理模型実験によって検討し、風の作用に比べて相対的に小さいことを確認した¹⁾。

2. 振れ回り運動方程式

2.1 座標系

船体の振れ回り運動に関する座標系としては、空間に固定された座標系 $X-Y-Z$ と船体に固定した座標系 $x-y-z$ とを用いる (図-3 参照)。空間固定座標系の原点は係留ブイのアンカーを通る鉛直軸と静水面の交点にとり、風の進行方向と逆向きに X 軸、それと直角に

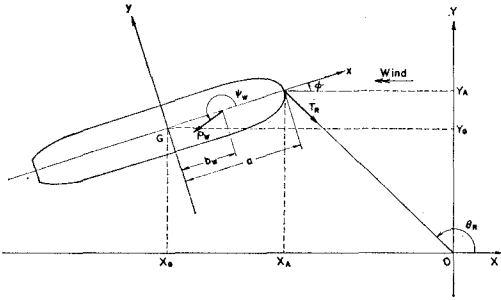


図-3 座 標 系

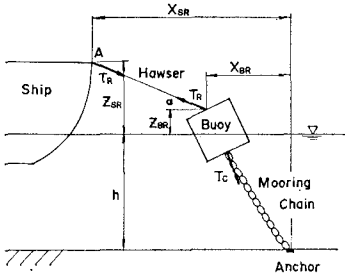


図-4 SALM 型ブイ

Y 軸、鉛直上方に Z 軸をとっている。また、船体固定座標系の原点は船体の重心とし、船首方向に x 軸、直角方向に y 軸、上方に z 軸をとった。

さて、本研究で対象とするのは、船舶のブイ係留法のうちでも最も単純な船首単点係留の場合である。ブイの型式は SALM (Single Anchor Leg Mooring) 型であり、図-4 に示したように、直円柱型のブイ本体が 1 本のチェーンによってアンカーに係留されている。このとき船体に作用する外力は、風荷重、流体抵抗及び係留力である。

2.2 船体に作用する風荷重

今回は風荷重の実測は行っていないので、標準的なものとして「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(日本港湾協会発行)にも採用されている岩井らの実験結果²⁾を参考とした。

まず、風荷重の計算は次式によった。

$$P_W = \frac{1}{2} \rho_a C_W U_{Wr}^2 (A_T \cos^2 \varphi_{Wr} + A_L \sin^2 \varphi_{Wr}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 P_W : 風荷重、 ρ_a : 空気密度 (1.21 kg/m^3)、 C_W : 風圧係数、 U_{Wr} : 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_{Wr} : 船体の軸と風向との相対角 (度) である。

風圧係数 C_W は船型と風向との関数であり、タンカ型船体に対しては次式で求めた。

$$C_W = 1.2 - 0.083 \cos 2\varphi_{Wr} - 0.25 \cos 4\varphi_{Wr} - 0.177 \cos 6\varphi_{Wr} \quad \dots\dots\dots (2)$$

また、風荷重の合力の作用点は船体の長軸上にあり、

その点の x 座標 b_W は次式によって求めた。

$$b_W = a - (0.291 + 0.0023 \times |\varphi_{Wr}|) \times L_{PP} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 a : 船首と重心との水平距離、 L_{PP} : 船体の垂線間距離である。

一方、風荷重の作用方向について文献 2) の実測データを検討した結果、文献 2) で提示されている算定式を一部修正した次式を用いることとした。

$$\Psi_W = \left\{ 3 - \left(1 - \frac{\varphi_{Wr}}{90} \right)^5 \right\} \times 90^\circ \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、相対風速 U_{Wr} とその方向 φ_{Wr} は、風速を U_W 、船体固定座標軸方向の船体の速度成分を $\dot{x}$ 、 $\dot{y}$ とすれば、次式で表わされる。

$$U_{Wr} = \sqrt{U_{xT}^2 + U_{yT}^2}, \quad \varphi_{Wr} = \tan^{-1} [U_{yT}/U_{xT}] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

$$U_{xT} = U_W \cos \varphi + \dot{x}, \quad U_{yT} = -U_W \sin \varphi + \dot{y}$$

以上が本研究で用いた風荷重の算定式である。予備計算によって風荷重と船体の振れ回り運動との関係を調べたところ、特に風荷重の作用方向 Ψ_W を適切に選定することが、数値計算の精度を高めるために重要であることがわかった。

2.2 船体に作用する流体抵抗

流体抵抗は造波抵抗と流圧力とに大別される。

(1) 船体の周期運動に対する造波抵抗

船体が静水中で周期的に運動すると、船体には造波抵抗と呼ばれる力が作用し、一般に運動の加速度及び速度に比例する力の和として次式のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} (P_{C1})_x &= -M_{xx}\ddot{x} - B_{xx}\dot{x} \\ (P_{C1})_y &= -M_{yy}\ddot{y} - B_{yy}\dot{y} \\ (P_{C1})_z &= -J_{zz}\ddot{\varphi} - B_{zz}\dot{\varphi} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

上式の左辺はそれぞれ x 、 y 方向の造波抵抗及び z 軸まわりの造波抵抗モーメントである。また M_{xx} 、 M_{yy} 及び J_{zz} は付加質量及び付加慣性モーメント、 B_{xx} 、 B_{yy} 及び B_{zz} は減衰力の係数及び減衰モーメントの係数である。

これらの各流体力係数は、船体の運動振幅が小さいときには線型ポテンシャル理論等で求めることもできる。しかし、船体の振れ回り運動のように振幅が大きい場合に線型理論を用いることは適当ではないと考えられる。そこで本研究では静水中で行なわれた実験結果³⁾を基にして流体力係数を定めた。今回対象とした船体では後出の表-1 に示した値を計算に用いている。なお、減衰項は小さいので無視した。

(2) 流圧力

流体と水との相対速度によって生ずる流圧力は方向性が極めて強く、相対速度の方向にかかわらず常に船体の真横方向の成分が支配的である⁴⁾。そこで、数値計算で

は次式で表わされる y 方向の流圧力成分及び回転モーメントだけを考慮することとした。

$$(P_{C2})_y = -\frac{1}{2} \rho_w C_{y90} (1 + \Delta k_y) \dot{y}^2 A_{SL} \sin \varphi_{Cr} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$(P_{C2})_z = (P_{C2})_y \times b_G \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 ρ_w : 流体密度、 C_{y90} : 真横からの流れに対する流圧力係数、 Δk_y : 浅水影響係数、 A_{SL} : 水面下の船体側面投影面積、 φ_{Cr} : 相対流速の方向 ($=\tan^{-1} [\dot{y}/\dot{x}]$)、 b_G : 流圧力作用点の x 座標である。 C_{y90} 、 Δk_y 及び b_G は現在までに行なわれた測定結果⁴⁾を参考にして、今回対象とした船体に対しては $C_{y90}=1.5$ 、 $\Delta k_y=0$ とし、 b_G は次式によって定めた。

$$b_G = a - (0.2 + 0.0035 \times |\varphi_{Cr}|) \times L_{FP} \quad \dots\dots\dots (9)$$

最後に、船体の旋回に対する流体抵抗は次式によって計算した。

$$(P_{C3})_y = -\int_{-L_{FP}/2}^{L_{FP}/2} \frac{1}{2} \rho_w C_{CR} \frac{A_{SL}}{L_{FP}} \times \{(\dot{\phi}x + \dot{y})|\dot{\phi}x + \dot{y} - \dot{y}|\dot{y}\} dx \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$(P_{C3})_z = -\int_{-L_{FP}/2}^{L_{FP}/2} \frac{1}{2} \rho_w C_{CR} \frac{A_{SL}}{L_{FP}} \times (\dot{\phi}x + \dot{y})|\dot{\phi}x + \dot{y}|x dx \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 C_{CR} は旋回抵抗係数である。 C_{CR} の値については現在までに十分なデータが得られていない。そこで本研究ではある設定した条件において実験結果と計算結果とを比較して適切な値を選定した。

2.3 係留力

図-4 に示した SALM 型のブイでは、係留力はブイのアンカーと船首との水平距離によって決まる。そこで、あらかじめ船体の変位と係船ロープ張力との関係を求めておき、船体の振れ回り運動の数値計算に用いた。ただし、振れ回り運動による係留系への動的効果は考慮していない。

なお、SALM 型ブイの場合、ブイは係船ロープ張力によって大きく変位するので、ブイの没水状態を考慮して静水圧的復元力を計算した。また、ブイの係留チェーン張力はカタナリー理論により計算し、さらに係船ロープの非線型伸び特性も考慮して、係留系全体としての係留特性を求めた。

2.4 運動方程式

船体に固定した座標系における船体の振れ回り運動方程式は次のように表わされる。

$$M_S(\ddot{x} - \dot{y}\dot{\phi}) = P_x, \quad M_S(\ddot{y} + \dot{x}\dot{\phi}) = P_y, \quad I_z\ddot{\phi} = P_z \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 M_S : 船体の質量、 I_z : 旋回慣性モーメント、

また各式の右辺は外力である。これらの外力は前節までに述べた風荷重、流体抵抗及び係留力の和である。

この運動方程式を解析的に解くことは困難なので、ルンゲ・クッタ法によって数値積分を行なった。ただし、式 (12) は船体固定座標系における運動方程式であるのに対し、外力は空間固定座標系における船体位置の関数である。そのために各計算ステップごとに船体座標と空間座標との間の座標変換を行ない、各時刻の船体位置を求めなければならない。

また、時刻 0 における初期状態が計算結果に及ぼす影響について予備計算で検討した。その結果、船体の初期変位にかかわらず一定の振れ回り運動を行なうことが確認できた。

なお、数値積分では時間キザミ Δt が計算精度に影響するが、検討の結果、振れ回り運動周期の 1/500 程度とすれば充分であることがわかった。

3. 実験結果と計算結果の比較

3.1 実験方法

数値計算法の精度について検討するため、計算結果と水理模型実験結果との比較を行なった。実験は運輸省港湾技術研究所内にある平面水槽 (長さ 25 m、幅 15 m、高さ 1 m) に模型船を浮かべ、送風器によって定常風を作用させて行なった。水深は 62.8 cm とした。

模型船は船尾に船楼を持つタンカーのもので、その諸元は表-1 に示したとおりである。また、ブイ模型はアクリル製の直円柱で、直径 14 cm、高さ 7.2 cm、質量 491 g である。ブイの係留チェーンは鉄製であり、水中での単位長さ当り重量は 1343.4 gf/m (1.316×10^4 dyn/m)、長さ 61 cm である。さらに、係船ロープはスプリ

表-1 模型船の諸元

船長	L_{PP} (cm)	417	付加慣性能率 J_{zz} ($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$)	1.03×10^6
船幅	B (cm)	80.8	側面面積 A_y (cm^2)	16340
型深	D (cm)	36	正面面積 A_x (cm^2)	3910
質量	M_S (kg)	241	船首重心距離 a (cm)	201
慣性能率	I_z ($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$)	2.89×10^6	水中側面面積 A_{sz} (cm^2)	3920
吃水	ds (cm)	9.4	空中側面面積 A_L (cm^2)	12420
付加質量	M_{xx} (kg)	6.43	空中正面面積 A_T (cm^2)	3150
〃	M_{yy} (kg)	64.5		

ングとタコ糸によって作製した。ただし、スプリングの重量が係船ロープに直接作用しない構造とし、船首とブイとの間の自然長は 105 cm とした。

船体の振れ回り運動は水槽の上方から 16 mm カメラで撮影し、チェーン及びロープの張力を小型張力計で測定した。

3.2 船体の静的変位と発生張力

まず、船体の係留特性の数値計算法の精度を検討するため、船体を静的に水平方向に引き、船体変位と係留力とを測定した。その結果を示したのが図-5 である。図

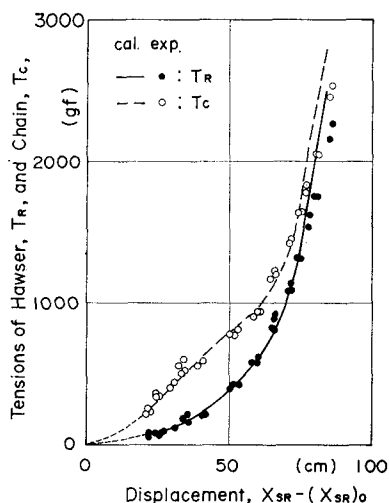


図-5 船体の変位と係留力

中の○印がチェーン張力の測定値、破線がその計算値、●印が係船ロープ張力の測定値、実線がその計算値であり、横軸は船首とアンカーの水平変位を示す。図からわかるとおり、測定値と計算値はほぼ一致しており、計算法の精度が確認された。

3.3 船体変位と係留力の時間変化

次に、旋回抵抗係数 C_{OR} の値を定めるために、模型船に 620 cm/s の定常風を作用させて振れ回り運動を測定し、数値計算結果と比較した。図-6 は $C_{OR}=3.0$ としたときの実験値と計算値を、船首の変位 X_A , Y_A , 旋

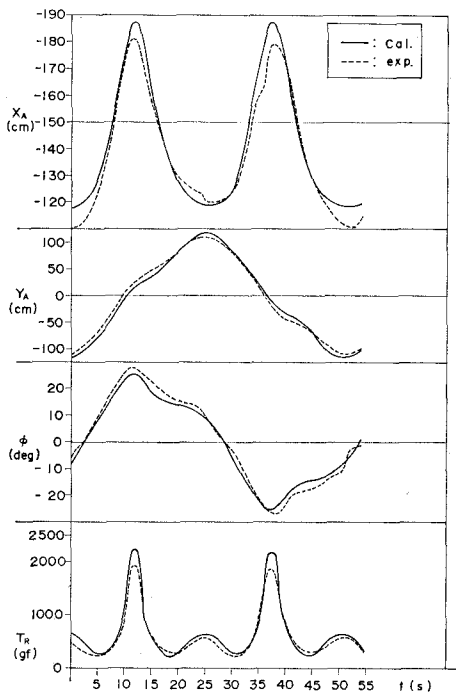


図-6 船体の運動と係留力の時間変化

回角 φ 及び係留力 T_R の時間変化について比較したものである。また、図-2 の実線は運動軌跡の計算結果である。これらの図より、船体の運動及び係留力の計算結果は、振幅及び位相とも実験結果とほぼ一致していることがわかる。そこで、数値計算に用いる旋回抵抗係数 C_{OR} は 3.0 を用いることとした。

また、係留力 T_R には振れ回り運動の一周期の間に大小の極大値が 2 回ずつ発生する。このうち大きい方の極大値は船首の X 座標 X_A がほぼ最小となるときに生ずるが、このときの Y 座標 Y_A は 0 に近く、また船体の旋回角 φ の絶対値はほぼ最大である。一方、小さい極大値は Y_A の絶対値がほぼ最大となるときに発生している。

3.4 風速と船体の振れ回り運動

数値計算法の精度をさらに検討するために、さまざまな風速を持つ定常風を作用させて実験を行なった。図-7 は風の方向及び直角方向の船首の運動両振幅 $2\bar{X}_A$, $2\bar{Y}_A$ について、実験値と計算値を比較したものである。

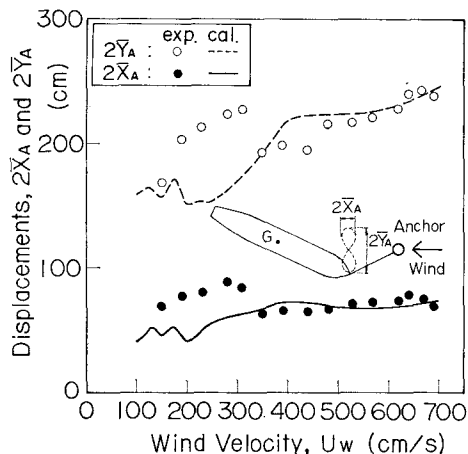


図-7 風速と船首の運動振幅

この図から、風速 U_W がおよそ 350 cm/s 以上の場合には実験値と計算値はほぼ一致しているが、風速 U_W がそれ以下になると計算値は実験値よりもかなり小さいことがわかる。この原因について検討したところ、実験では $U_W \approx 350$ cm/s の前後で船体の振れ回り運動のパターンが変化しているのに対し、計算結果にはそれが再現されていないことが判明した。これが誤差の主たる原因であると考えられるが、詳細は依然として不明である。

次に、図-8~10 はそれぞれ船体の旋回角の両振幅 $2\bar{\varphi}$, 係留力の最大値 T_R 及び振れ回り運動周期 T について、実験結果と計算結果を比較したものである。これらの図から、旋回角、係留力及び運動周期は風速の大小にかかわらず両者がほぼ一致していることがわかる。

また、図-8 からわかるとおり、旋回角は風速によっ

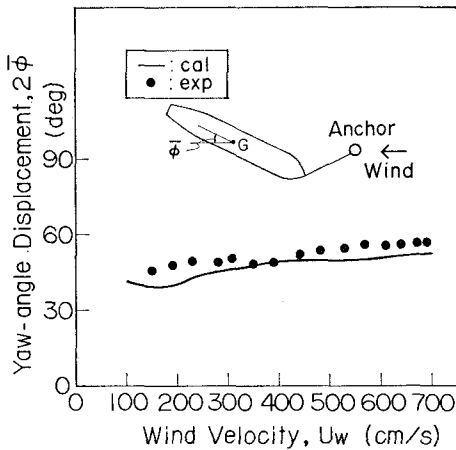


図-8 風速と旋回角

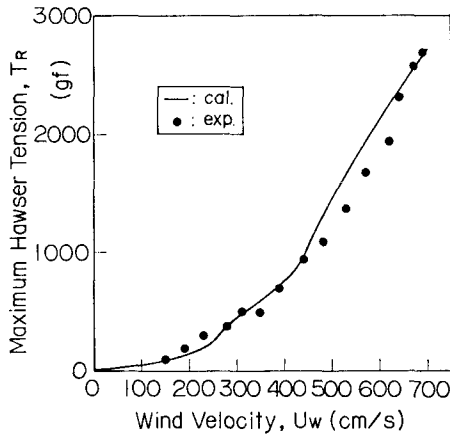


図-9 風速と係留力

てあまり変化せず、平均的には $2\bar{\phi} \approx 50^\circ$ である。

図-10からは、風速が小さくなると運動周期 T は急激に長くなることがわかる。著者らはかつて実験データを基にして、周期は風速と指数関数的な関係があると仮定して回帰曲線を求めた⁵⁾。しかし、今回さらに風速が小さいときの実験を行ない、また数値計算を行なった結果、周期と風速との関係は反比例に近いことが判明した。

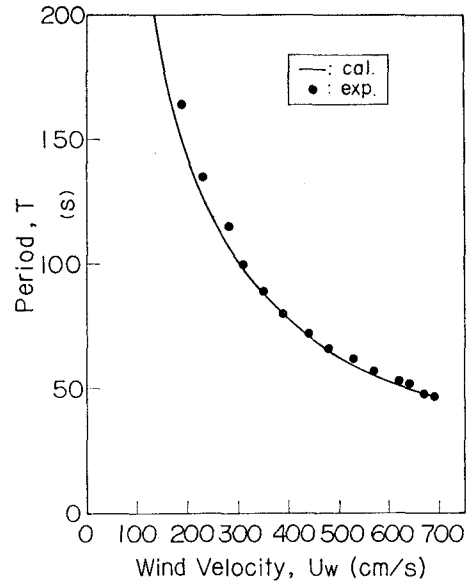


図-10 風速と運動周期

4. まとめ

本文では、定常風中における船体の振れ回り運動の数値計算法を提示し、水理模型実験結果と比較することによってその精度を確認することができた。しかし、旋回抵抗係数の適切な決定法等について、さらに検討を加えていく必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 鈴木康正・諸石一幸：ブイ係留船舶の荒天時の振れ回り運動，港湾技術研究所報告，第21巻，第2号，pp. 107~150，1982年6月。
- 2) 岩井 聰・矢島澄夫：繫泊船に働く風圧について，日本航海学会第26回講演会，pp. 86~93，昭和36年。
- 3) 元良誠三：船体運動に対する付加質量及び付加慣性モーメントについて，造船協会論文集，第105号及び第106号，昭和34年。
- 4) 日本造船研究協会第155研究部会：巨大タンカーの係留システムの研究報告書，研究資料，No. 236，261 p.，昭和50年3月。
- 5) 鈴木康正・諸石一幸：風と波の中におけるブイと係留船舶の応答，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 426~430，1981年。