

橋脚による流況変化が航行船舶に及ぼす影響に
関する研究（その 2）

永井 荘七郎*・岩 井 聡**・小田 一 紀***・庄 司 邦 昭****

1. 緒 言

本四連絡橋のように、その架橋水域が船舶航行の場となっている場合には、水域の中に設置される巨大な橋脚は周辺の流れの場の流況を変化させ、その結果これに接近して航行する船舶に直接流体力学的非対称力を与え、航行船の進路保持に影響を及ぼす¹⁾。

このような観点から、まず橋脚周囲の流況を明らかにするため水槽実験によってその周囲の流速、流向および乱れの強さの平面分布を調べ、橋脚周囲の流況を巨視的に把握し、前回の第 1 報に発表した。

今回は航行船が橋脚至近の主流域を航過する過程においてどのような非対称流体力を受けるかを前回同様水槽実験を行って調べ、これを船の操縦運動方程式に代入して数値計算し、船の運動軌跡を求めることによって橋脚に対する船の接航限界を検討した。

2. 実験施設および実験方法

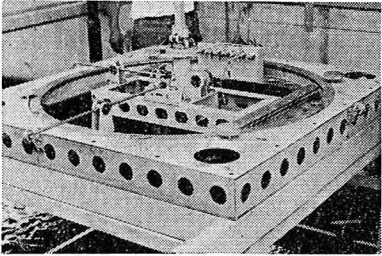
(1) 実験施設

実験は前回と同様に大阪市立大学河海工学研究室の長さ 35m、幅 4.0m、深さ 0.75m の回流水槽で行った。実験に用いた橋脚模型は本四連絡橋が予定されているもののうち船舶主航路を対象に南備讃瀬戸航路および明石海峡航路に設けられるものを選んだ。その寸法、形状等は表—1 に示すとおりである。また、実験に供した船の模型は橋脚の大きさと現地における通航船舶の大きさの

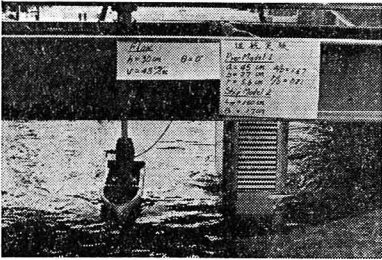
実態を考慮し、長さ（垂線間長） $L=100\text{ cm}$ 、幅 $B=17\text{ cm}$ 、吃水 $d=6.7\text{ cm}$ 、方形係数 $C_b=0.80$ のものを用いた。表—1 には船の長さ（垂線間長）と橋脚断面の縦長さの比 L/a をも記した。

(2) 実験方法

船体に働く非対称流体力すなわち船を横向きに移動させようとする力（以下横力と呼ぶ）と船の針路を変えようとするモーメント（以下回頭モーメントと呼ぶ）は写



写真—1 磁歪管式三分力ダイナモメータ



写真—2 実験状況

真—1 に示すような磁歪管式の三分力ダイナモメータを用いて計測した。このダイナモメータを写真—2 に示すように、水槽をまたぐ移動架台に載せ、橋脚模型周囲の任意点における流体力を計測できるようにした。計測にあたっては、橋脚に対する船の進路、位置および船に働く流体力等の記号を図—1 のように設定した。

航過船の進路はすべて橋軸と直角方向（航路に平行）とし、橋脚に対する流向 β は橋軸と直角を基準として $\beta=0^\circ, 10^\circ$ および 20° に変えた。流速は $42\sim 59\text{ cm/sec}$ 、水深はほぼ 30 cm にした。流体力の計測範囲は

表—1 橋脚模型の寸法

橋 脚 模 型	断 面 寸 法					縮 尺	船の長さ/橋脚 断面の縦長さ L/a
	縦 長 さ $a\text{ (cm)}$	横 幅 $b\text{ (cm)}$	隅 角 曲 率 $r\text{ (cm)}$	a/b	r/b		
PM-1	45	27	5.6	1.67	0.21	1/130	2.22
PM-2	54	27	5.6	2.00	0.21	1/150	1.85
PM-3	67	27	5.6	2.48	0.21	1/90	1.49
PM-4	90	27	5.6	1.67	0.21	1/65	1.11

* 正会員 工博 大阪市立大学名誉教授
** 正会員 東京商船大学教授
*** 正会員 工博 大阪市立大学工学部土木工学科 助教授
**** 正会員 工博 東京商船大学講師

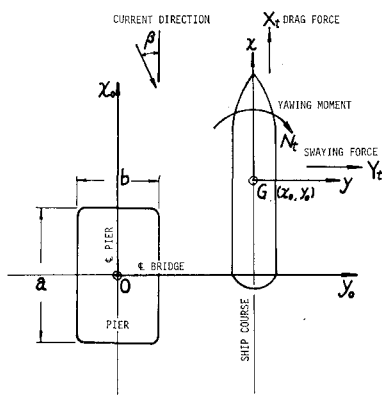


図-1 橋脚と航過船の相対位置および座標系

$x_0=(4.5\sim 9.0)b$, $y_0=\pm(1.0\sim 3.5)b$ である。

橋脚周りの流れの変化によって航過船に働く左右非対称な流体力は実験結果から次のように定義した。

$$\text{横力} : Y_p = Y_t - Y_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{回頭モーメント} : N_p = N_t - N_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに, Y_t , N_t : 橋脚に接触した船体に働く横力および, 回頭モーメント, Y_0 , N_0 : 橋脚の影響のないときの船体に働く横力および回頭モーメント. 流向が船首尾線に一致する ($\beta=0^\circ$) ときは $Y_0=0$, $N_0=0$ である。

(1) 式の横力および (2) 式の回頭モーメントから (3) 式および (4) 式で定義される横力係数および回頭モーメント係数を求めて実験結果を解析した。

横力係数:

$$C_Y = Y_p / \left(\frac{1}{2} \rho L d U_c^2 \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

回頭モーメント係数:

$$C_N = N_p / \left(\frac{1}{2} \rho L^2 d U_c^2 \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに, ρ : 水の密度, L : 船の垂線間長, d : 船の吃水, U_c : 橋脚の影響を受けない様流速。

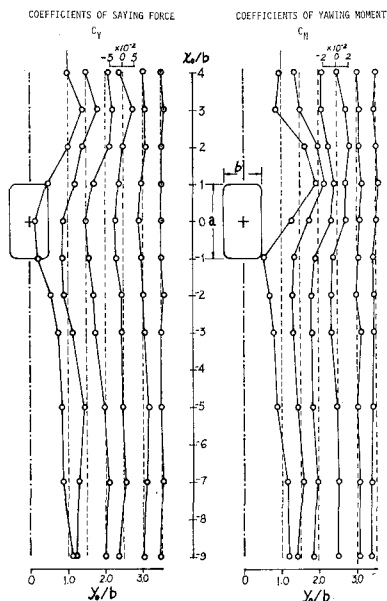
3. 非対称流体力係数の平面分布

(1) 一般的傾向

(3) 式および (4) 式から求めた横力係数および回頭モーメント係数の分布の一例を PM-2 について表わすと図-2 のごとくである。これらの分布状態は他の橋脚模型の場合もほぼ同様であって, 一般に次のような傾向を有する。

(1) 横力係数は, 船が流れに逆って橋脚に近づくにしたがって橋脚側に引き寄せられる負の値を示し, 船の重心がほぼ橋軸に並ぶとき負の極大値に達し, 橋脚を通過すると反対方向に向って反撥される正の値を示す。船の重心が橋脚前面より橋脚幅の2倍程度の位置に達したとき正の極大値をとり, やがて消滅する。

(2) 回頭モーメント係数は, 船が橋脚に近づくにし

図-2 横力係数および回頭モーメント係数の分布状態 ($a/b=2.00$ の場合)

たがって橋脚側に回頭する負の値を示し, 船の重心が橋脚の手前端に並ぶとき負の極大値をとり, その後橋脚と反対側に反撥される正の値を示す。船が橋軸を航過し, その重心がほぼ橋脚の前端を通過するとき橋脚と反対側に向く正の極大値に達し, やがて消滅する。

(3) 以上の非対称流体力は船の針路が橋脚から離れるにしたがって急激に減少し, その距離と橋脚幅との比 y_0/b がほぼ 3.5 以上になるとほとんど発生しない。

(2) 橋脚断面形状の影響

船が橋脚近傍を航過する過程における横力係数および回頭モーメント係数 (以後これらを併わせて非対称流体力係数と呼ぶ) の正の極大値と負の極大値の差 (以後最大振幅と呼ぶ) ΔC_{Ym} および ΔC_{Nm} をとって, これと橋脚断面の縦横比 a/b との関係を $y_0/b=1.0$ および 2.0 の場合について表わしたものがそれぞれ図-3(a) および (b) である。図-3(a) および (b) によると, 断面の縦横比の値が 1.68~2.48 の範囲にある橋脚では, 非対称流体力係数に及ぼす橋脚断面の縦横比の影響はほとんどないと考えてもさしつかえないと思われる。

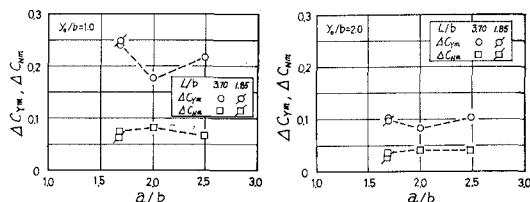


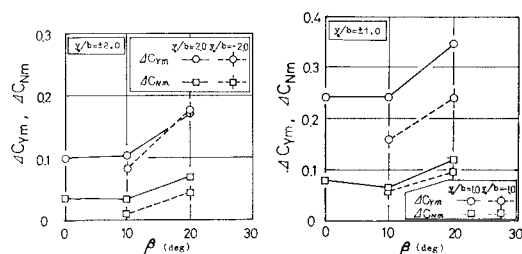
図-3 非対称流体力係数に及ぼす橋脚断面の縦横比の影響

（3）橋脚と船の相対的大きさの相違による影響

図-3(a) および (b) には、断面形状が PM-1 と幾何学的に相似 ($a/b=1.67$, $r/b=0.21$) で、大きさが PM-1 の2倍である PM-4 の場合の実験結果をも示した。船の長さおよび橋脚断面幅の比 L/b の値はそれぞれ 3.70 および 1.85 であるが、両者の実験値がほぼ一致していることから判断して、実験の範囲内では非対称流体力係数に及ぼす橋脚と船の相対的な大きさの相違の影響は小さいと考えられる。

（4）流向の影響

図-4(a) および (b) は、PM-1 の模型を用いて非対称流体力係数の最大振幅と流向の関係を調べた結果を示したものである。



(a) $y_0/b = \pm 1.0$ の場合 (b) $y_0/b = \pm 2.0$ の場合

図-4 非対称流体力係数に及ぼす流向の影響

流れが橋脚正面に対して直角でない場合には、船が橋脚の右側を航行するか、左側を航行するかによって船に働く非対称流体力係数の最大振幅の大きさは異なり、橋脚に対する流向と船の進行方向を図-1 に示すようにとれば、一般に船が橋脚の左側を通過するときの方が小さい値を示すことが図-4(a) および (b) から明らかである。また同図によれば、流向が 10° 以内であれば非対称流体力係数に及ぼす流向の影響はないが、 10° 以上になると急激に影響が現われることがわかる。

航路にあっては、通常流れは航路にほぼ平行 ($\beta=0^\circ$) であるが、そのような場合には、流向が $\pm 10^\circ$ 程度の範囲で変動しても横力および回頭モーメント係数の分布状態にはほとんど変化が生じないと考えてもさしつかえないと思われる。

4. 非対称流体力係数の模式化

（1）非対称流体力係数の絶対値の最大化

橋脚近傍の航過船に働く非対称流体力係数の絶対値の最大値は、図-2 から明らかなように、横力係数の場合には船の重心が橋軸に並ぶときに、また回頭モーメント係数の場合には船の重心がほぼ橋脚の前方端に並ぶときに生ずる。これらの最大値 C_{ym} および C_{nm} と船の針路との関係を調べるとそれぞれ図-5(a) および (b) に示すとおりである。これらの図によると、実験の範囲

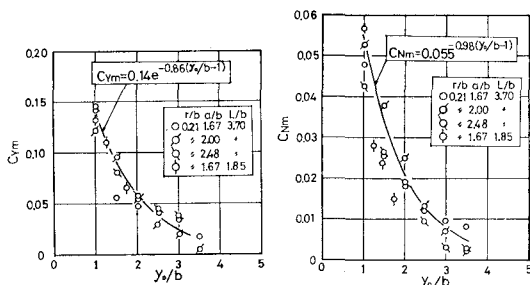


図-5(a) 最大横力係数と船の針路の関係

図-5(b) 最大回頭モーメント係数と船の針路の関係

内ではそれぞれの最大値は橋脚断面形状や船の長さおよび橋脚断面幅の比にあまり関係なく、 y_0/b が同じであればほぼ同じ値を示すことがわかる。図-5(a) および (b) から C_{ym} および C_{nm} と y_0/b の間の近似的な関係を求めると次のような実験式を得る。

$$C_{ym} = 0.14e^{-0.86(y_0/b-1)} \quad (5)$$

$$C_{nm} = 0.055e^{-0.98(y_0/b-1)} \quad (6)$$

ここに、 C_{ym} , C_{nm} : 橋脚中心線から y_0 の針路を航行する船に働く横力および回頭モーメント係数の絶対値の最大値、 b : 橋脚幅。

（2）船の航過に伴う非対称流体力係数の変化

図-6(a) および (b) は横力係数および回頭モーメント係数とそれぞれの絶対値の最大値との比 C_x/C_{ym} および C_n/C_{nm} の値の x_0/a による変化を $y_0/b=1.0$ の場合について表わしたものである。図-6(a) および (b)

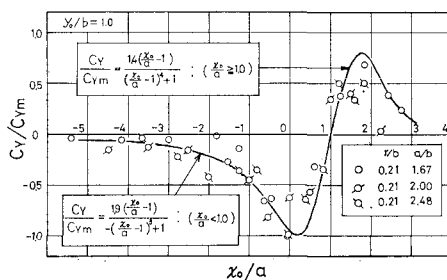


図-6(a) 航過時の横力係数の変化 ($y_0/b=1.0$ の場合)

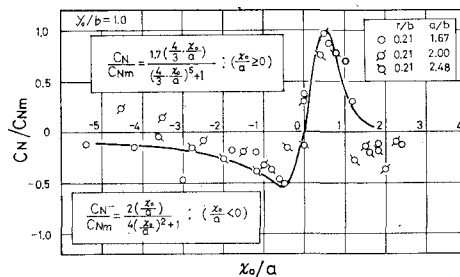


図-6(b) 航過時の回頭モーメント係数の変化 ($y_0/b=1.0$ の場合)

によれば、データのばらつきは大きい、橋脚断面形状にあまり関係なく、 C_Y/C_{Ym} および C_N/C_{Nm} と x_0/a の間にはほぼ次のような関係がなりたつ。

横力係数:

$$C_Y/C_{Ym} = \begin{cases} \frac{1.9(x_0/a-1)}{-(x_0/a-1)^3+1} & x_0/a \leq 1.0 \\ \frac{1.4(x_0/a-1)}{(x_0/a-1)^4+1} & x_0/a > 1.0 \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

回頭モーメント係数:

$$C_N/C_{Nm} = \begin{cases} \frac{2(x_0/a)}{4(x_0/a)^2+1} & x_0/a \leq 1.0 \\ \frac{1.7(4x_0/3a)}{(4x_0/3a)^3+1} & x_0/a > 1.0 \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

(7) 式および (8) 式は $y_0/b=1.0$ の場合の実験式であるが、 y_0/b が他の値の場合も近似的にこの式を適用することができる。

以上のことから、(7) 式および (8) 式をそれぞれ (5) 式および (6) 式に代入すると、 $\beta=0^\circ$ の場合の橋脚周囲の非対称流体力係数の分布式として次のような実験式が得られる。

横力係数:

$$C_Y = \begin{cases} \frac{0.266(x_0/a-1)e^{-0.98\{(y_0/b)-1\}}}{-(x_0/a-1)^3+1} & x_0/a \leq 1.0 \\ \frac{0.196(x_0/a-1)e^{-0.98\{(y_0/b)-1\}}}{(x_0/a-1)^4+1} & x_0/a > 1.0 \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

回頭モーメント係数:

$$C_N = \begin{cases} \frac{0.11(x_0/a-1)e^{-0.98\{(y_0/b)-1\}}}{4(x_0/a)^2+1} & x_0/a \leq 1.0 \\ \frac{0.0935(4x_0/3a)e^{-0.98\{(y_0/b)-1\}}}{(4x_0/3a)^3+1} & x_0/a > 1.0 \end{cases}$$

5. 航過船の運動軌跡

(1) 船の運動方程式

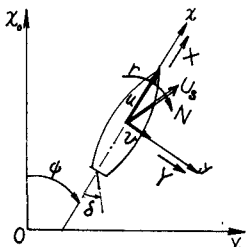


図-7 座標系

水平面内の船の操縦運動は、図-7 に示す船に固定した座標を用いて次の3つの連立方程式で表わすことができる。

$$m(\dot{u}-rv)=X \dots\dots\dots (11)$$

$$m(\dot{v}+ru)=Y \dots\dots\dots (12)$$

$$I_{zz}\dot{r}=N \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 m : 船の質量、 U_s, u, v : 船の対地速度および各軸方向の分速度、 r : 回頭角速度、 ϕ : 回頭角、 I_{zz} : 船の重心 G を通る鉛直軸周りの慣性モーメント、 δ : 舵角、 X, Y : それぞれ船に働く各軸方向の流体合力、 N : 船の鉛直軸周りの流体合モーメント。

いま、船が橋脚近傍を航過するときの合速度はほとんど変らないものと考え、一定とする。また、操縦運動においては縦方向の運動は横方向の運動および回頭運動との連成が弱いので、これを他の運動と切り離して、(12) 式と (13) 式の連成のみを考え、それらの右辺の流体力項を次のように表わす。

$$Y = Y_v\dot{v} + Y_r\dot{r} + Y_{vv}v + Y_{vr}r + Y_{v\delta}\delta + Y_p \dots\dots (15)$$

$$N = N_v\dot{v} + N_r\dot{r} + N_{vv}v + N_{vr}r + N_{v\delta}\delta + N_p \dots\dots (16)$$

ここに、右辺第1項から第5項はそれぞれ $\dot{v}, \dot{r}, \dots, \delta$ に基づいて船に働く流体横力および回頭モーメントであり、 Y_p および N_p は橋脚の影響によって加わる非対称横力および回頭モーメントである。

(15), (16) 式をそれぞれ (12), (13) 式に代入し、また回頭運動に基づく船首尾方向の分速度 u の変化を考慮すると、

$$\dot{u} = rv \dots\dots\dots (17)$$

$$\dot{v} = \frac{1}{m - Y_v} [Y_v v + (Y_r - m u) r + Y_{v\delta} \delta + Y_p] \dots\dots\dots (18)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{I_{zz} - N_r} \cdot [N_v v + N_r r + N_{v\delta} \delta + N_p] \dots\dots (19)$$

が得られる。ただし、 Y_r, N_v はこの場合影響が小さいと考え無視した。

(2) 橋脚近傍の船の航跡

実験で求めた橋脚近傍の船体に働く非対称流体力 Y_p および N_p をそのまま (17)~(19) 式に代入し、それらを数値計算することによって橋脚近傍を航過する船の運動軌跡を求めた³⁾。その一例を $a/b=2.00, U_s/U_0=3.0$ の場合について表わすと、図-8 に示すごとくで

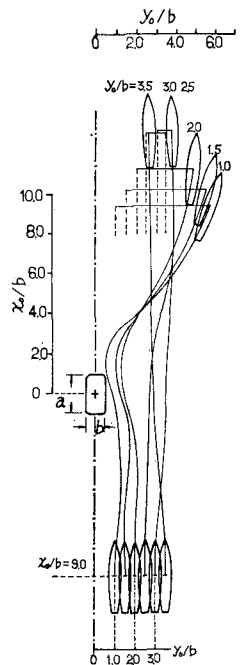


図-8 橋脚の近傍を航行する船舶の航跡 ($a/b=2.00, r/b=0.21, \beta=0^\circ, U_s/U_0=3.0$)

表—2 船体運動に基づく流体力微係数

Swaying		Yawing	
$\frac{m - Y_v}{\rho L^3/2}$	0.0180	$\frac{I_{zz} - N_r}{\rho L^5/2}$	0.00115
$\frac{Y_v}{\rho L^3 U^2/2}$	-0.01434	$\frac{N_v}{\rho L^3 U/2}$	-0.00460
$\frac{Y_r - m u}{\rho L^3 U/2}$	0.00456	$\frac{N_r}{\rho L^4 U/2}$	-0.00296
$\frac{Y_\delta}{\rho L^2 U^2/2}$	-0.00332	$\frac{N_\delta}{\rho L^3 U^2/2}$	0.00165

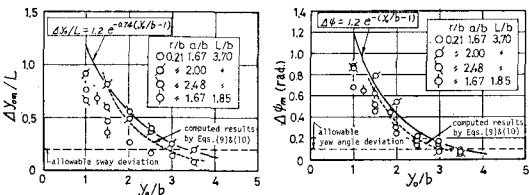
ある。

計算にあたっては、船自体の流体力微係数については表—2 に示すマリナー型の船について得られた値⁴⁾ を使用し、橋脚の影響によって船体に加わる非対称流体力に対応して行う操舵は通常の操舵操作に準拠し、その針路が原針路から 2° 偏位したとき、修正舵角 15° を操作するものとした。

図—8 からも明かなように、橋脚に近い針路をとるほど船の軌跡が大きく変動し、船が橋脚に寄り過ぎると針路の保持は困難となり、橋脚との衝突あるいは橋脚を通過後航路に向って大きく偏位し、他船の航行に大きな障害を与えるようになる。

6. 接航可能限界

図—9 は上の数値計算から得られた船の航跡から、船が橋脚側面を航過し終るまでの間に橋脚の影響によって生じた最大横偏位と船の長さの比 $\Delta y_{om}/L$ および最大偏角 $\Delta \phi_m$ を求めて y_0/b との関係を表わしたものである。図には実験から直接求めた非対称流体力係数を用いて計算した結果と (9) および (10) 式の実験式を用いて得られた計算結果の両方を示した。これらの図によれば、前者の計算結果に橋脚の形状の相違によってばらつきが見られるが、両者の結果はほぼ一致しており、(9) および (10) 式は非対称流体力係数の分布を表わす実験式とし



(a) $\Delta y_{om}/L$ と y_0/b の (b) $\Delta \phi_m$ と y_0/b の関係関係

図—9 航過時の船の最大横偏位および最大偏角 ($U_\delta/U_0=3.0$ の場合)

て十分計算に適用することができると考えられる。

接航船に生ずる偏位および偏角の最大値は、厳密にはそれぞれの橋脚について求めなければならないが、船の航行の安全面から図—9 に示すように計算結果の上限値をとり、次のように近似する。

$$\Delta y_{om}/L = 1.2 e^{-0.74(y_0/b)-1} \quad (20)$$

$$\Delta \phi_m = 1.2 e^{-(y_0/b)-1} \quad (21)$$

一般の航路を航行中の操船において、通常許容される針路のずれの許容範囲はほぼ次のようである。

最大横偏位: 船の長さの 1/5

最大偏角: 0.1 rad.

これらの条件をそれぞれ (20) 式および (21) 式に代入するとそれらの許容限界値に対応した y_0/b の値がそれぞれ 3.4 および 3.5 と求まり、船の航行の安全を確保するには船の針路を橋脚中心線より橋脚幅の約 3.5 倍以上離れた位置に保持する必要があることがわかる。

7. 結 論

前報に引き続き、橋脚近傍の接航船に働く横力および回頭モーメントを計測し、その結果から接航船の運動軌跡を計算で求め、橋脚周囲の流れの変化が接航船に及ぼす影響を検討した。その結果、本論で扱った範囲の橋脚、環境条件に対して次のような結論を得た。

- 1) 橋脚周囲の流況変化によって接航船が受ける偏位、偏向作用は船が橋脚に近い針路をとるにしたがって指数関数的に強くなる。
- 2) $\beta=0^\circ$ の場合の橋脚周囲の非対称流体力係数の分布は近似的に (9) 式および (10) 式で表わすことができる。
- 3) 橋脚設置に伴う船の航路障害の範囲は、橋脚側面から橋脚幅のほぼ 3 倍の側方水域に及ぶ。

参 考 文 献

- 1) 岩井 聡・久々宮 久・大津浩平: 橋脚周りの流れが接航船の保針に及ぼす影響についての基礎実験, 日本航海学会誌 No. 44, pp. 153-159, 1960.
- 2) 永井莊七郎・小田一紀: 橋脚による流況変化が航行船舶に及ぼす影響に関する研究 (その 1), 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 585-590, 1976.
- 3) Iwai Akira and Kuniaki Shoji: On the effect of wind around the pier upon the course keeping of ship, 日本航海学会論文集 No. 55, 1976.
- 4) H. Eda: Low-speed controllability of ships in wind, Journal of Ship Research, Vol. 12, No. 3, 1968.