

船舶の橋脚衝突と衝突力

岩井 聡*・長沢 準**・小田一紀***・庄司邦昭****

1. 緒 言

近年、海洋の開発・利用の増加に伴い、各種の海洋構造物が設置されるようになった。本州四国連絡橋や湾岸道路の建設計画にみられるように設置水域が内海や湾内の場合、輻輳する船舶による海洋構造物への衝突事故の発生率は高くしかも甚大な二次災害を招く危険性がある。従って海洋構造物と船舶との衝突を防止あるいは衝突時に両者を防護するために海洋構造物周辺での船舶の挙動と衝突危険領域、衝突力等を総合的に把握する必要がある。しかしこの種の研究はこれまで殆んどなされていないのが実状である。

著者らは橋脚周辺の船舶に影響を及ぼす諸問題について検討を進めてきた^{1),2)}。本研究では矩形の水平断面をもつ橋脚を対象に、特に船舶が主機の故障など不測の原因によって漂流する場合も含め、橋脚周辺での船舶の挙動と衝突危険領域の設定、衝突力等について調査した。

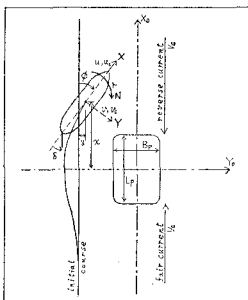
2. 船舶の挙動と衝突危険領域

2.1 衝突領域の求め方

(1) 航行船の運動方程式

橋脚周辺を航行する船の水平面内の運動方程式は図—1に示す座標系に対して次のように表わされる。

$$m(\dot{u}_0 - rv_0) = X_{\dot{u}_0} \dot{u}_0 + X_v v_0 \dots\dots\dots (1)$$



図—1 船体運動の座標系

$$m(\dot{v}_0 + ru_0) = Y_{\dot{v}_0} \dot{v}_0 + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{v_0} v_0 + Y_{r_0} r + Y_{\delta} \delta + Y_c \dots\dots\dots (2)$$

$$I_z \dot{r} = N_{\dot{v}_0} \dot{v}_0 + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{v_0} v_0 + N_{r_0} r + N_{\delta} \delta + N_c \dots\dots\dots (3)$$

ここに m : 船の質量, u_0, v_0 : 船の船首方向および横方向の対水分速度, r : 回頭角速度, I_z : 船の重心を通る鉛直軸まわりの慣性モーメント, δ : 舵角とし, X_c, Y_c, N_c は橋脚周辺の流況変化により航行船が受ける前後力, 横力, 回頭モーメントである。

(2) 船体に働く非対称流体力

運動方程式中の非対称流体力 X_c, Y_c, N_c を求めるため大阪市立大学河海工学実験場の回流水路(長さ 35 m, 幅 4 m, 水深 75 cm)において模型実験を行った。橋脚模型は表—1に示す2種, 模型船は表—2のSM-1を使

表—1 橋脚模型の寸法

Pier model	Length (L_p)	Breadth (B_p)	Corner radius (R_p)	L_p/B_p
PM-1	45 cm	27 cm	5.6 cm	1.67
PM-4	90 cm	54 cm	11.2 cm	1.67

表—2 模型船の寸法

Ship model	Length	Breadth	Draft	Brock coefficient
SM-1	100 cm	17.0 cm	6.7 cm	0.80
SM-2	150 cm	25.5 cm	10.1 cm	0.80

用した。水流の流速と橋脚長さから求めた実験状態のレイノルズ数は約 $1.7 \times 10^5 \sim 3.4 \times 10^5$ である。前回²⁾は逆流時を対象に実験を行ったが今回は新たに模型船の船首が流下側に向いた順流時の場合の実験を追加した。流向は橋脚長辺に平行とし模型船に働く横力および回頭モーメントの計測には前回と同様に磁歪方式ダイナモメータを使用した。

実験値は次のような無次元化を行って整理した。

$$\text{横 力 係 数 } C_Y = Y_c / \left(\frac{1}{2} \rho L_s d V_c^2 \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{回頭モーメント係数 } C_N = N_c / \left(\frac{1}{2} \rho L_s^2 d V_c^2 \right) \dots\dots\dots (5)$$

* 正会員 東京商船大学教授 商船学部航海学科
 ** 工博 運輸省船舶技術研究所部長 船体構造部
 *** 正会員 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科
 **** 正会員 工博 東京商船大学助教授 商船学部航海学科

ただし Y_c, N_c : 模型船に働く横力と回頭モーメント(計測値), ρ : 水の密度, L_s : 模型船の垂線間長さ, d : 模型船の喫水, V_c : 水流の対地流速である。

順流時と逆流時の計測結果をまとめて図-2に示す。

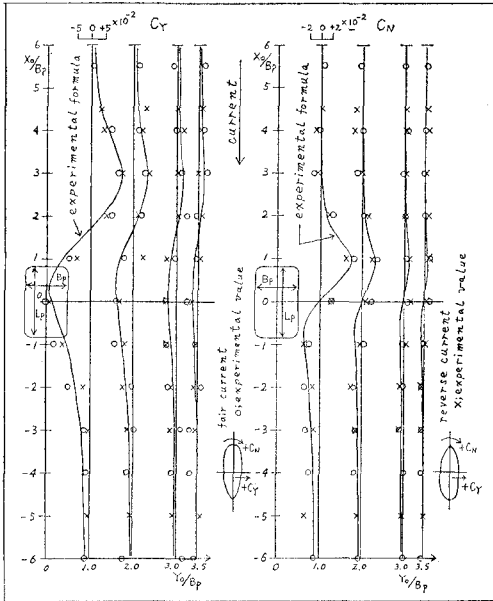
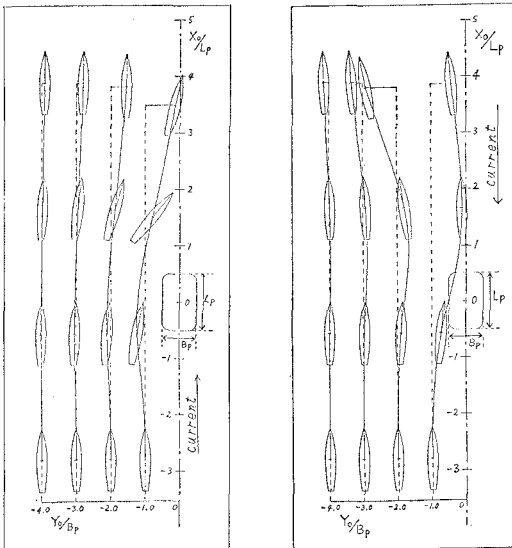


図-2 非対称流体力 ($B_p/L_s=0.27$)

図中の実線は以前求めた実験式²⁾による値である。図-2によると C_Y, C_N については順流時と逆流時で差なく実用上はどちらも同じ実験式で表わし得ることがわかる。

(3) 航行船の運動軌跡

運動方程式 (1)~(3) を数値計算すると橋脚周辺を航行する船の運動軌跡が求まる。計算結果を図-3に示す。



(a) 順流時航行船 (b) 逆流時航行船

図-3 航行船の運動軌跡 ($V_c/V_s=0.75, B_p/L_s=0.54$)

表-3 運動方程式の諸係数 (Tanker 満載状態)

Principal dimensions etc.		Y	N
B/L	0.164	Y_{rc}	N_{rc}
d/L	0.055	$\frac{1}{2}\rho L^3$	$\frac{1}{2}\rho L^4$
F/L^3	0.0073	Y_r	N_r
C_b	0.805	$\frac{1}{2}\rho L^4$	$\frac{1}{2}\rho L^5$
$\frac{m}{\frac{1}{2}\rho L^3}$	0.01461	Y_{vc}	N_{vc}
$\frac{I_x}{\frac{1}{2}\rho L^5}$	0.00117	Y_r	N_r
$\frac{X_{uc}}{\frac{1}{2}\rho L^3}$	-0.00087	Y_δ	N_δ
		$\frac{1}{2}\rho L^2 U^2$	$\frac{1}{2}\rho L^3 U^2$

(1)~(3) 式中 X_{uc} などの流体力微係数は表-3のタンカーについて実験で求めた小川の値³⁾を用いた。また X_c は無視し Y_c, N_c は実験式を使用した。

順流時航行船は橋脚のやや手前から船首が橋脚へ向き船体中心は橋脚から離れるが、橋脚と並ぶ付近から船体中心は橋脚へ近づく、一方、逆流時航行船は橋脚手前で船首が橋脚へ向き船体中心も橋脚へ近づく、このことから順流時航行船は橋脚の流下側隅角部への船側衝突、逆流時航行船は橋脚の流下側正面や側面への船首衝突などの起こる可能性が高いと思われる。

(4) 漂流船の挙動と漂流軌跡

橋脚の流上側で航行船が主機の故障などで漂流したときの挙動について非対称流体力の計測実験と同じ回流水

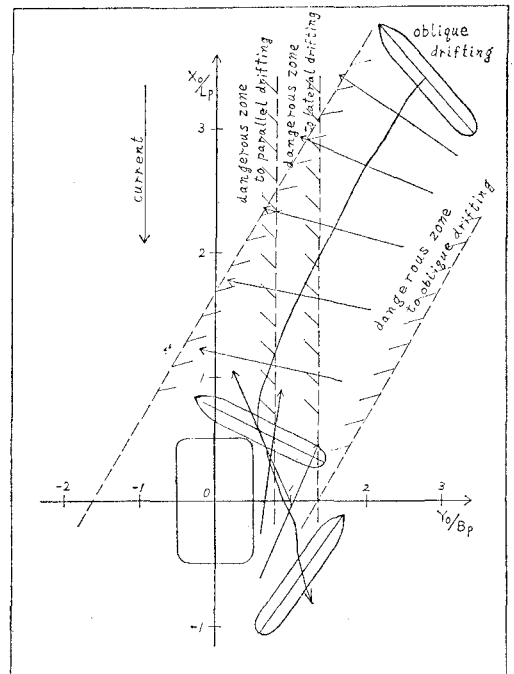
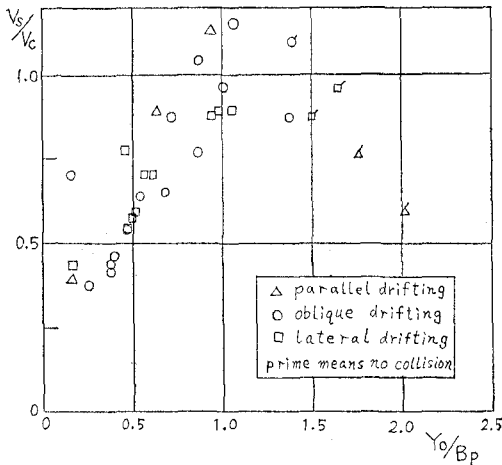


図-4 漂流船の挙動と衝突領域 ($B_p/L_s=0.45$)

路で水面上約4.4mの位置に取り付けたモータードライブカメラで連続撮影してしらべた。表—1に示す橋脚模型と表—2に示す模型船を使用し漂流の初期船首方位は流れに対し 0° （平行漂流）、 45° （斜め漂流）、 90° （横漂流）に設定した。漂流船の挙動の一例を図—4示す。実験結果から漂流船が橋脚へ衝突する場合、次のような形態をとることがわかった。

- 橋脚正面への船首尾衝突（平行漂流）
- 橋脚正面への船側衝突（横漂流）
- 橋脚隅角部への船側衝突（斜め漂流、横漂流）
- 橋脚側面への船首尾衝突（斜め漂流）

また橋脚に衝突する瞬間の船体中心の位置と速度の関



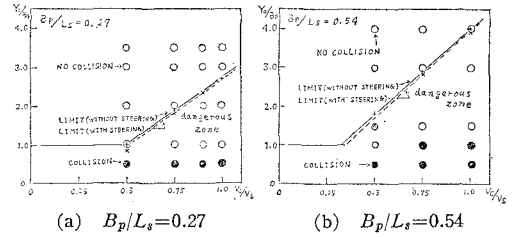
図—5 漂流船の衝突速度 ($B_p/L_s=0.54$)

係を図—5に示す。これによると橋脚正面への衝突速度はやや小さくなり隅角部付近への斜め衝突の速度は大きくなる傾向がみられる。

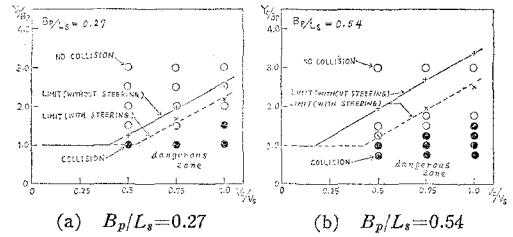
2.2 衝突危険領域

(1) 航行船の衝突危険領域

順流時と逆流時の航行船について運動軌跡を橋脚中心から原針路までの横距離 Y_0 、船速 V_s に対する流速 V_c 、船の長さ L_s に対する橋脚幅 B_p などを変えて計算し、船が橋脚を通りすぎて船尾と橋脚端が L_s だけ離れるまでに生じた原針路からの最大横偏位と最大偏角についてしらべた。そして船を安全に操船するための許容限界値を、横偏位は $0.2L_s$ 、偏角は 0.1 rad (5.73°) と設定しこれより大きな横偏位、偏角を生じる領域を衝突危険領域と定めた。このようにして求めた衝突危険領域と流速・船速比の関係を順流時と逆流時について表わしたものがそれぞれ図—6、図—7である。図中の実線は操舵しない場合、破線は操舵した場合の危険領域限界線を表わし、この線より下側が衝突危険領域である。操舵のシミュレーションは偏角が 2° を超えたとき原針路へ戻るように舵角 15° を取るようにした。図中の白丸、黒丸は計算を行った組み合わせ条件を示しているが黒丸は橋脚



図—6 順流時航行船の衝突危険領域



図—7 逆流時航行船の衝突危険領域

に衝突した場合である。

図—6、図—7によると順流時と逆流時では非対称流体力の大きさに差がないので衝突危険領域においてはあまり差がみられない。ただし操舵すると逆流時において狭くなる。黒丸が示すように計算上実際に衝突する領域は順流時に比べ逆流時の方が広いようである。また橋脚に比べ船が小さい程、船速に比べ流速が大きい程危険領域が広がる傾向を示している。

(2) 漂流船の衝突領域

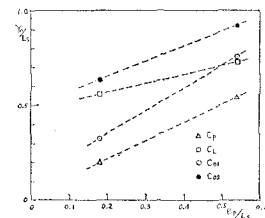
模型船の漂流実験の結果から衝突領域を求めると次のような結果が得られた。

$$\text{平行漂流} \quad |Y_0| < C_p L_s \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{横漂流} \quad |Y_0| < C_L L_s \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned} \text{斜め漂流} \quad & (Y_0 - C_{01} L_s) \tan 60^\circ < X_0 \\ & < (Y_0 + C_{02} L_s) \tan 60^\circ \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

図—4にこの領域を示したが式中の各係数 C_p , C_L , C_{01} , C_{02} については図—8に示すように橋脚が小さくなると衝突領域が狭くなる傾向にある。



図—8 漂流船の衝突領域を示す係数

3. 船体圧壊強度特性と衝突力

3.1 衝突形態について

前章において航行船、漂流船の衝突危険領域について検討し、この領域に入ったときの挙動をしらべ船が橋

脚に衝突する形態を4種類に分類したがここではその中から最も厳しい、あるいは可能性の大きい次の2形態を取り上げて衝突力を検討することにした。

- ① 橋脚正面へ船首が衝突する形態
- ② 橋脚隅角部へ船側が衝突する形態

3.2 船舶の圧壊強度特性の概要

船体強度は船体の構造方式により差がみられる。500 G.T. から 4 000 G.T. 程度の船を対象とした場合、横肋骨方式の船が多く、船の長さ、船の深さ、フレームスペース、船体外板の厚さなどを総トン数 W (T) の関数として表わし船体変形量 χ (m) と圧壊荷重 P (ton) の関係を求めると次のようになる⁴⁾。

$$\text{形態①} \quad P = 2.72\delta_F^{-1}W^{1/3}(0.71W^{1/6}+1)^3\chi \\ 0 < \chi < \delta_F \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$P = 2.72W^{1/3}(0.71W^{1/6}+1)^3 \\ \delta_F \leq \chi \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{形態②} \quad P = 83.1r^{-1/3}(0.95W^{1/6}+1)(0.57W^{1/3} \\ + 4r)\chi^{1/2} \quad 0 < \chi < \frac{2}{9}r \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$P = 39.2r^{1/6}(0.95W^{1/6}+1)(0.57W^{1/3} \\ + 4r) \quad \frac{2}{9}r \leq \chi \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし δ_F : 傾斜船首の長さ, r : 橋脚隅角部半径である。

3.3 衝突船の運動エネルギーと衝突力

衝突船の運動エネルギー E_s は水の付加質量を前後運動に対し排水量 Δ の 10%, 左右運動に対し 40% とし、衝突速度を V_s とすれば次のように表わされる。

$$\text{船首衝突} \quad E_s = 0.55\Delta V_s^2/g \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{船側衝突} \quad E_s = 0.70\Delta V_s^2/(1+(l/R))^2g \quad \dots\dots\dots (14)$$

この運動エネルギーが全部船体の破壊によって吸収されると考えれば (9)~(12) 式における P を χ について積分して求まる船体の圧壊による吸収エネルギー E に対して $E=E_s$ において衝突速度 V_s (m/sec) に対する船体変形量 χ (m) および衝突力 P (ton) の関係を求めることができる。ここでは $\Delta=2.2W$ 、衝突点と重心の船首尾方向の距離 l と I_x に対する慣動半径 R の比を 1 とし計算し次式を求めた。

$$\text{形態①} \quad \chi = 0.11W^{1/2}(0.71W^{1/6}+1)^{-3/2}V_s \\ 0 < V_s < V_1 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$P = 2.18W^{1/2}(0.71W^{1/6}+1)^{3/2}V_s \\ 0 < V_s < V_1 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\chi = 0.071W^{1/3} + 0.045W^{2/3}(0.71W^{1/6} \\ + 1)^{-3}V_s^2 \quad V_1 \leq V_s \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$P = 2.72W^{1/3}(0.71W^{1/6}+1)^3 \\ V_1 \leq V_s \quad \dots\dots\dots (18)$$

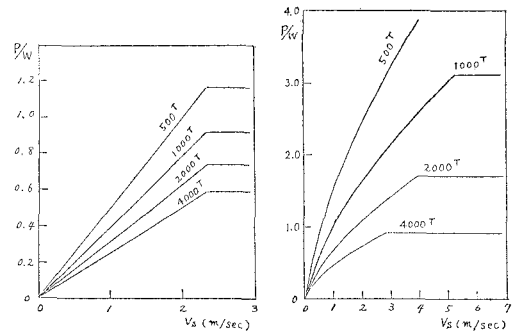
$$\text{形態②} \quad \chi = 0.013W^{2/3}r^{1/3}(0.95W^{1/6} \\ + 1)^{-2/3}(0.57W^{1/3}+4r)^{-2/3}V_s^{4/3} \\ 0 < V_s < V_2 \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$P = 9.34W^{1/3}(0.95W^{1/6}+1)^{2/3}(0.57W^{1/3} \\ + 4r)^{2/3}V_s^{2/3} \quad 0 < V_s < V_2 \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\chi = 0.074r + 0.002W^{1/2}(0.95W^{1/6} \\ + 1)(0.57W^{1/3}+4r)V_s^2 \quad V_2 \leq V_s \\ \dots\dots\dots (21)$$

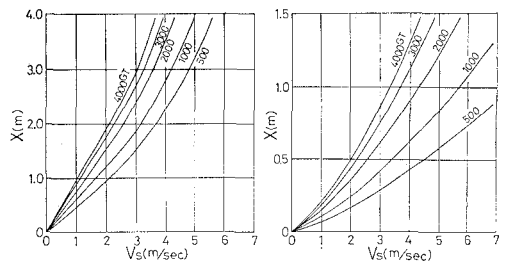
$$P = 39.2r^{1/2}(0.95W^{1/6}+1)(0.57W^{1/3} \\ + 4r) \quad V_2 \leq V_s \quad \dots\dots\dots (22)$$

ただし V_1, V_2 は船体の破壊がそれぞれ $\delta_F, 2r/9$ まで達するときの衝突速度である。これらの関係を総トン数を変えて示したのが 図—9、図—10 である。



(a) 橋脚正面への船首衝突 (b) 橋脚隅角部への船側衝突

図—9 船舶の衝突速度と衝突力



(a) 橋脚正面への船首衝突 (b) 橋脚隅角部への船側衝突

図—10 船舶の衝突速度と変形量

4. 実際問題への適用

次のような状況を設定して橋脚に対する船舶の衝突危険領域、衝突力などを推定した。

橋脚: 本州四国連絡橋南備讃瀬戸大橋 6P
($L_p=58.5$ m, $B_p=35.1$ m)

潮流: 4 ノット (2.06 m/sec)

対象船: 長さ 56 m, 総トン数 1 000 T

推定値を順流時、逆流時、漂流状態についてそれぞれ表—4 (a), (b) および (c) に示した。いずれの場合も橋脚隅角部への船側衝突の方が変形量が小さく衝突力が高いことが注目される。

表-4 衝突力と変形量の算定例

(a) 順流時航行船の橋脚隅角部への船側衝突

船の対水速度	衝突危険領域	衝突速度	衝突力	船側変形量
0 ノット	$ Y_0 < 216 \text{ m}$	4 ノット	1 920 ton	0.26 m
2 ノット	$ Y_0 < 162 \text{ m}$	6 ノット	2 510 ton	0.44 m
4 ノット	$ Y_0 < 98 \text{ m}$	8 ノット	3 040 ton	0.65 m

(b) 逆流時航行船の橋脚正面への船首衝突

船の対水速度	衝突危険領域	衝突速度	衝突力	船首変形量
8 ノット	$ Y_0 < 184 \text{ m}$	4 ノット	830 ton	1.26 m
10 ノット	$ Y_0 < 146 \text{ m}$	6 ノット	930 ton	1.96 m
12 ノット	$ Y_0 < 108 \text{ m}$	8 ノット	930 ton	2.94 m

(c) 漂流船の橋脚への衝突

漂流形態	衝突領域	衝突形態	衝突速度	衝突力	変形量
平行漂流	$ Y_0 < 54 \text{ m}$	橋脚正面へ船首衝突	4 ノット	830 ton	1.26 m
横漂流	$ Y_0 < 73 \text{ m}$	橋脚隅角部へ船側衝突	4 ノット	1 920 ton	0.26 m
斜め漂流	$\begin{cases} X_0 > 1.7(Y_0 - 74 \text{ m}) \\ X_0 < 1.7(Y_0 + 92 \text{ m}) \end{cases}$	橋脚隅角部へ船側衝突	4 ノット	1 920 ton	0.26 m

5. ま と め

船舶による橋脚への衝突問題に関して衝突危険領域、衝突力、船体変形量等について検討し次のような結論を得た。

(1) 橋脚付近の順流時航行船に働く非対称流体力を計測したがその値は逆流時とほとんど差はなく同じ実験

式で表わし得る。

(2) 順流時航行船と逆流時航行船に対し衝突危険領域を設定し発生する可能性の大きい衝突形態を示した。

(3) 漂流船に対し衝突領域を示し衝突形態を分類した。

(4) 本研究を実際問題へ適用し同一の衝突速度に対し橋脚隅角部・船側衝突は橋脚正面・船首衝突に比べ変形量が小さく衝突力が大きいことを示した。

今後さらに船舶の運動エネルギーを吸収するための緩衝構造の研究や船舶の衝突力を軽減する方法等についても検討を行ないたい。

終りに、本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究「海洋構造物の安全性に関する研究」の一部である。また、大阪市立大学永井莊七郎名誉教授より終始貴重な御教示をいただいた。ここに付記して深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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, 1979.
- 2) 永井莊七郎・岩井 聡・小田一紀・庄司邦昭：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），第 24 回海岸工学講演会論文集，pp. 433-437, 1977.
- 3) 小川陽弘：外力を受ける船の操縦運動の計算（その 1），日本造船学会論文集，第 126 号，pp. 107-120, 1969.
- 4) 長沢 準・有田喜久雄・谷 政明・岡 修二：通航船舶の橋脚衝突時の圧壊強度について，日本造船学会論文集，第 142 号，pp. 323-332, 1977.