

相模湾の循環流に関する実験的研究(I)*
 一回転系順圧流体模型における循環流パターンの
 レイノルズ数, ロスビー数依存性—
 秋 孝尚**・杉本 隆成**

Hydraulic model experiment on the circulation
 in Sagami Bay (I)
 —Dependency of the circulation pattern on Reynolds
 and Rossby numbers in barotropic rotating model—
 Hyo Sang Choo and Takashige Sugimoto

相模湾の循環流の変動機構を解明するための第1ステップとして, 水深一定の回転系順圧流体の流入出模型を用いてパラメータ依存性を調べた。その結果, 相模湾南部の時計回りの曲率を持つ黒潮分枝流の流路パターンはレイノルズ数(R_e 数)が60以下, 60-540および540以上の3つの領域に分けられ, R_e 数540以上の流路パターンは R_e 数に依存しないことが分かった。模型の回転角速度 Ω を大きくすると, R_e 数が60以下の領域では分枝流が湾内により深く侵入する。順圧模型では, 湾内奥部寄りの左旋環流は流入口の伊豆半島側の後流渦の流入によって維持され, R_e 数の増加に伴ってその強さは増加し, R_e 数540以上では流入流量の約20%になる。流入水路の角度 θ を北東向きから北向きに変えた場合は, 伊豆半島側の流入口付近の後流渦が生じないため, 湾内の左旋環流は生じない。また, 東岸の存在(湾の幅)と大島北東側の後流渦も分枝流および湾内の左旋環流のパターンに影響する。

To analyze the path of the Kuroshio branch and the circulation in Sagami Bay, a series of hydraulic model experiment were carried out by use of a barotropic source-sink flow in a tank on a rotating table. In the model, the bottom and coastal topography were reproduced with nearly flat bottom and rectangular configurations. The volume transports and rotation rate of the turn table and the directions of the inflow and outflow were changed.

The results indicate that the flow patterns are mostly dependent on Reynolds number (Re , hereafter). For the regime of Re above 540, there is almost no alteration in the anticyclonically curved path. The effect of Coriolis parameter on the current path appears only in the regime of low Reynolds number. In the inner parts of the bay a cyclonic circulation of about 20% in the volume transports develops. Its vorticity originates from the viscous boundary layer in the left-side coast of the entrance channel looking downstream of the inflow, which turns into the eddy associated with the coastal geometry and efficiently transfers into the inner part of the bay. Another wake is formed in the lee side of the Oshima Island. This wake and the direction of inflow are also influential to the inward penetration of the loop current and the inner circulation.

* 1991年5月21日受領, 1991年11月20日受理

** 東京大学海洋研究所

1. 緒 言

相模湾は本州関東平野の南西部に位置し、太平洋に面した開放型の湾である。湾内の海洋構造および循環流は遠州灘、伊豆海嶺上での黒潮流路の離接岸の振幅が大きいいため、湾内に流入する黒潮分枝流の変動の影響を強く受ける。相模湾内の漁海況変動の研究に関連して、古くは木村 (1942)¹⁾ が「急潮」に関する研究を展開し、宇田 (1937)²⁾ は Fig. 1 に示すような相模湾奥部の左旋環流の模式図を提出した。また、石野ほか (1967)³⁾ や、最近では松山ほか (1980)⁴⁾、蓮沼ほか (1983)⁵⁾、岩田 (1986)⁶⁾、Iwata and Matsuyama (1989)⁷⁾ などにより、黒潮の離接岸に伴う沖合からの暖水流入の変動の影響の様子が明らかにされてきた。黒潮分枝流については、Teramoto (1965)⁸⁾ が伊豆大島西水道で水道間の電位差を測ることによって、水道を通過する分枝流の流量は黒潮流量の約6%の $2 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ であることを示した。また、Taira and Teramoto (1981⁹⁾, 1986¹⁰⁾ は係留系による長期測流やCTDによる水温・塩分の横断面観測等によって、大島西水道での分枝流は33日と100日周期の変動が卓越し、その通過流量は平均約 $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ で $0.5 \sim 4.0 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ の変動幅を持っていることを明らかにした。さらに、Taira *et al.* (1987)¹¹⁾ は、漂流ブイを追跡し、湾南

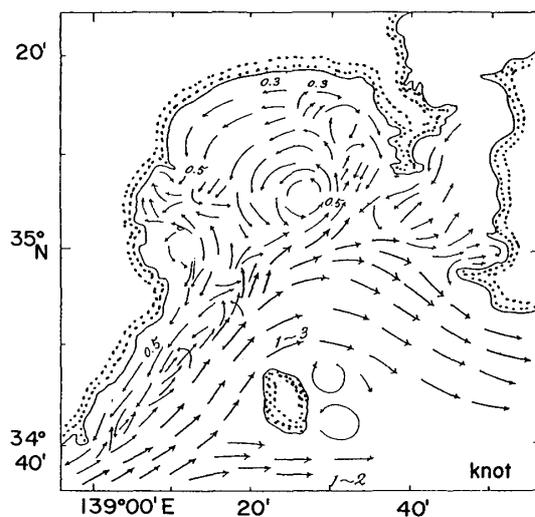


Fig. 1 Schematic view of the surface circulation during the winter season in Sagami Bay (after Uda, 1937¹¹⁾).

部での黒潮分枝流の流路と流れの力のバランスを調べた。

しかしながら相模湾の循環流の変動の力学的機構、相模湾内の海水交換過程の実態の問題等はまだ未解明のまま残されている。たとえば、1) 大島西水道から相模湾に流入する黒潮分枝流の流量と遠州灘～房総沖の黒潮流路との定量的関係、2) 黒潮分枝流の流路と湾中央部から奥部にかけて存在する左旋環流の変動を支配する力学的機構、3) 大島の北東側に生じる後流渦の構造と変動の実態およびそれらの力学的機構、4) 常磐・鹿島灘から外房沿岸沿いに波及すると考えられる陸棚波・陸棚斜面波の影響、5) 相模湾の陸棚・陸棚斜面沿いの急潮の力学的機構と予測手法などの解明である。

ところで、相模湾における循環流は大島西水道から流入する黒潮分枝流の慣性力や摩擦応力のほか、海岸や海底地形、密度成層状態、コリオリ力、その他の外力的条件の影響を受けると考えられる。そこで、本研究では相模湾の循環流の構造に影響を与えていると考えられる主な要因について、まずは回転系均質流体模型を用いて、2)と3)にあげた相模湾の流動の力学的パラメータ解析に焦点を絞って実験を行った。その中でも特に大島西水道から流入する黒潮分枝流流路の湾内への侵入の度合と、左旋環流の強さの黒潮分枝流流量への依存性を水深一定の順圧回転流体模型の範囲で定量的に明らかにした。さらに、地球自転の効果、大島西水道からの黒潮分枝流の流入角、大島東水道からの流出条件、大島北東側の後流渦の変動の影響等についても調べた。

2. 模型と実験装置

相模湾の黒潮分枝流は遠心力とコリオリ力が圧力傾度力と釣り合ったいわゆる傾度流になっており、遠心力項はコリオリ項の約50%である (Taira *et al.*, 1987¹¹⁾). 主流部の単位幅あたりの質量輸送 M ($100 \sim 300 \text{ m}^2/\text{s}$) を代表的な表面流速 V ($0.5 \sim 1 \text{ m/s}$) で割った流動層の厚さ H は $200 \sim 300 \text{ m}$ 程度であり、大島西水道での海底付近の流速は小さいので (Taira *et al.*, 1987¹¹⁾), 準定常的な流れ

相模湾の循環流に関する実験的研究(I)

は大島西水道(シル最浅部の平均水深は約400 m)とこれを越えた後, 海底地形の影響(即ち, 渦度保存式での渦の伸び縮みに伴う地球自転の影響)を強く受けることなく東水道から流出するものと考えられる. また, 分枝流の流体の緯度変化(Δy)は高々25 km程度であり, これに伴うベータ効果($\Delta y \times \beta = \Delta f$)は 3.8×10^{-7} (c. g. s)程度であって, この分枝流の相対曲率渦度 $V/R_c(2.0 \times 10^{-5}$ (c. g. s), V :平均流速(50 cm/s), R_c :曲率半径(~ 25 km))に比べて無視することが出来る. また, 海底エクマン層の厚さ($(K_z/f)^{1/2}$: 1~10 m, ただし K_z : $1 \sim 10^2$ cm²/sと仮定)に対して上記の流動層の厚さは十分厚く, また, 渦動粘性係数 K_h として 1.8×10^5 cm²/s を与えた時の水平乱流レイノルズ(R_e)数 $R_{eh}(VL/K_h \sim 1300$, 湾の幅 L : ~ 45 km)も 10^{2-3} に比べて十分大きいことから粘性の効果が分枝流の流路パターンに直接及ぼす影響は小さいと考えられる.

一方, 相模湾の中央部から奥部にかけて存在する左旋環流に注目すると, 定常的な左旋環流の成因として, 原型では, 分枝流北縁の正のシアーと河川系水や沖合からの暖水流入による沿岸境界密度流が考えられる. しかし, 水深が一定の順圧模型では, 渦度の供給源は水平粘性の効果しか考えられない. さらに, この水平粘性の効果を力学的に相似に再現する為には, 原型の水平乱流 R_e 数の値が模型における分子 R_e 数の値と近いことが必要十分条件になる. 従って, 今回の実験では, 分枝流北縁の横断方向のシアーとそれに関わる渦動粘性係数の評価をまだ行っていないため, R_e 数

等へのパラメータ依存性から検討した.

2.1 基本方程式と縮尺

現象を支配する基礎方程式としては, 流入出する流れの厚さの変化が問題にする現象に大きな影響を与えないと仮定して, 水深一定の渦度方程式を用いた.

$$\partial \zeta / \partial t + V \cdot \nabla \zeta = K_h \nabla^2 \zeta - (f \cdot K_z)^{1/2} \zeta / H \quad (1)$$

ただし, t は時間, ζ は相対渦度の鉛直成分($\zeta = \mathbf{k} \cdot (\nabla \times \mathbf{V})$), V は水平流速, K_h と K_z は各々水平, 鉛直渦動粘性係数, $\nabla = \partial/\partial x \mathbf{i} + \partial/\partial y \mathbf{j}$, $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$, そして f はコリオリパラメータであり, 模型では f の代わりに 2Ω (Ω は回転台の角速度)を用いる. H は流動層の代表的厚さ, 模型では水深である. 実際, 原型に対する方程式(1)を代表的な水平距離 L (相模湾の幅: 45 km), 時間 f^{-1} , 大島西水道の平均流速 V_0 , 水深 H_0 (200 m) で無次元化し, 渦度 ζ を $V_0/L \cdot \zeta^*$ にすると式(1)は,

$$\begin{aligned} \partial \zeta^* / \partial t^* + (V_0/fL)_p V^* \cdot \nabla^* \zeta^* \\ = (K_h/fL^2)_p \nabla^{*2} \zeta^* - (K_z/fH_0^2)_p^{1/2} \zeta^* / H^* \quad (2) \end{aligned}$$

となる. ここで $*$ は無次元化された変数, 添字 p は原型の値を示す. 従って, 模型で無次元化された渦度方程式は

$$\begin{aligned} \partial \zeta^* / \partial t^* + (V_0/2\Omega L)_m V^* \cdot \nabla^* \zeta^* \\ = (\nu/2\Omega L^2)_m \nabla^{*2} \zeta^* - (\nu/2\Omega H_0^2)_m^{1/2} \zeta^* / H^* \quad (3) \end{aligned}$$

となる. ここで ν は分子動粘性係数, 添字 m は模型の値を表す. 式(2)と式(3)において括弧内の各無次元パラメータが原型と模型とで同じであれば解としての流れのパターンは相似になる. 従って, この相似律は次のように与えられる.

Table 1 Scale ratios of the model and the values of parameters for the prototype and the model.

Property		Scale ratio	Prototype	Model
Horizontal length	L	$L_r = 3.0 \times 10^5$	45 km	15 cm
Vertical length	H	$H_r = 3.6 \times 10^3$	200 m	5.5 cm
Time	T	$T_r = 5.0 \times 10^3$	1.5×10^5 sec	30 sec
Volume transport	Q	$Q_r = 6.5 \times 10^{10}$	2.0×10^{12} cm ³ /s	30 cm ³ /s
Velocity	V	$V_r = 6.0 \times 10^1$	60 cm/s	1.0 cm/s
Kinematic Viscosity	K_h	$K_{hr} = 1.8 \times 10^7$	1.8×10^5 cm ² /s	0.01 cm ² /s
	K_z	$K_{zr} = 2.6 \times 10^3$	2.6×10 cm ² /s	0.01 cm ² /s

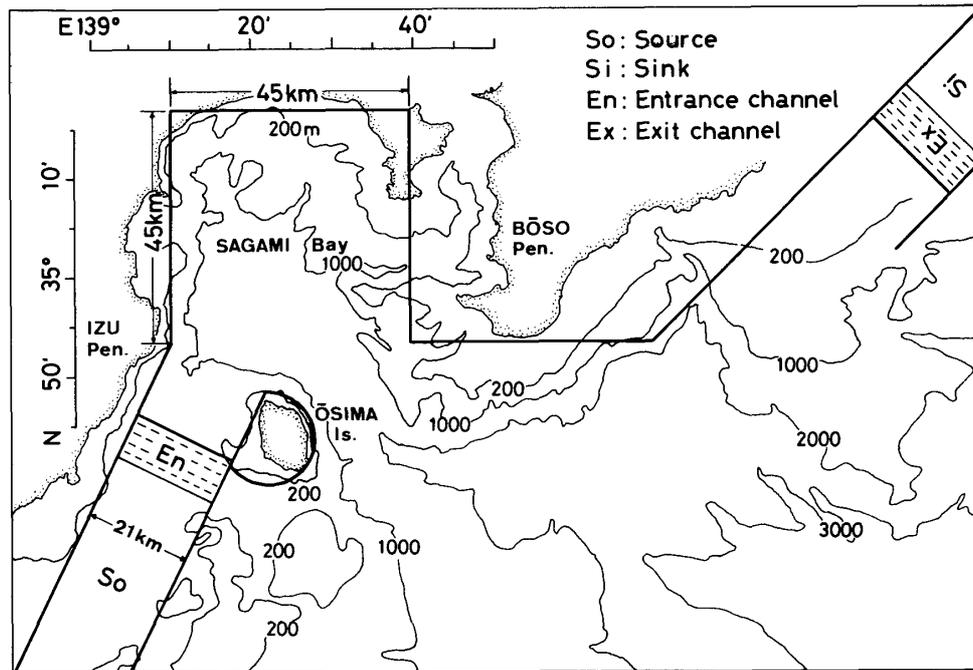


Fig. 2 Domain of the hydraulic model and the general configuration. Thin lines show bathymetry of the prototype Sagami Bay.

$$(V_0/fL)_p = (V_0/2\Omega L)_m \quad (4)$$

$$(K_h/fL^2)_p = (\nu/2\Omega L^2)_m \quad (5)$$

$$(K_z/fH_0^2)_p = (\nu/2\Omega H_0^2)_m \quad (6)$$

模型における諸元の縮尺を V_r , L_r , H_r , T_r で表すと $V_r = (V_0)_p/(V_0)_m$, $L_r = (L)_p/(L)_m$, $H_r = (H_0)_p/(H_0)_m$, $T_r = 2\Omega/f$ になる。ここで式(4)から $V_r = T_r^{-1}L_r$, 式(5)式(6)から $L_r = (T_r K_h)^{1/2}$, $H_r = (T_r K_z)^{1/2}$ が模型の縮尺の条件になる。 L_r と H_r は回転数 Ω に依るので Ω の範囲が決まると、 L_r と H_r が決まる。しかし、 L_r と H_r を求めるには K_h , K_z 及び ν の値を知る必要がある。水の分子動粘性係数 ν は、ほぼ $10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$ である。しかし、原型の K_h の確かな値は分かっていないので、流れに底面摩擦の影響が無視できる鉛直縮尺で、かつ現実の K_z , K_h のオーダーを満足するように決めた。流量の縮尺 Q_r は $Q_r = V_r H_r L_r = L_r^2 H_r T_r^{-1}$ で求められる。原型と模型の諸元、諸量の縮尺及びその代表的な値を Table 1 に示す。

2.2 実験装置と測定方法

実験に使われた回転台は厚さ1.0 cm, 直径120 cm のジュラルミン円盤を有し、回転数が 0~10 rpm (回転/分) の範囲で無段変速可能な回転精度

0.5%以内の電動モータにより駆動された。模型の水槽の大きさは幅120 cm, 奥行き80 cm, 高さ35 cm で厚さ0.5 cm のアクリル板製である。実験対象海域の地形と模型の範囲を Fig. 2 に示す。風の影響を避ける為、水槽の上部には透明なガラス板のふたを付けた。実験室内の温度変化は 1°C 以内で調節した。模型の流れはラボポンプとフロータ式流量計 (最大200 l/hr) からなる回流装置を使った。流入出による乱れの発生を押える為、流入・流出水路に mesh size 約1.5 mm の鉄網7枚を水路の前・後半部に設置し、その間に厚さ5 mm のスポンジ2枚を2枚の鉄網の間に挟んだ。その結果、流入口からのほぼ一様な流れを得た。実験は spin up time 5分 に比べて十分長時間 (30分以上) をかけた後、開始した。流れの可視化は、水槽内の水表面にアルミ粉をまいて長時間露出によるカメラ撮影とビデオカメラ写真撮影を行った。この方法で得られた資料は主な循環パターンと共に、変動する渦等の流れの細かな構造を表した。また、流入水路と湾内での流速分布や流線パターンを調べる為、染料チモルブルを用いた。実験のスタンダード・ケースとしては $H = 5.5 \text{ cm}$, 流入角 θ

相模湾の循環流に関する実験的研究 (I)

Table 2 Cases and parameter ranges of the model experiment.

Factors	Values given in the model								
Direction of inflow	θ	0°	25°	90°					
Direction of outflow	α	free	90°	135°	180°				
Revolution rate	Ω (rpm)	1/2	2	3	4	8			
Volume transport	Q (cc/s)	1.7*	2.8*	4.2*	5.5	8.3*	11.1*	14.0	20.8*
		27.0	34.7*	42.0	48.6*	56.0			

* 2 rpm only
standard case

= 25° (北から時計回り), $\Omega = 2$ rpm で, 流量は 1.7~56 cc/s の範囲で行った. 各実験ケースとパラメータの範囲を Table 2 に示す.

3. 実験結果

3.1 循環流パターンの分枝流流量への依存性

大島西水道から相模湾へ流入する黒潮系暖水の流量は, Taira and Teramoto (1986)⁹⁾ の黒潮大蛇行時の調査によると, 平均は約 1.8 Sv であり, 0.5~4.0 Sv の範囲で変動する. そこで本実験では, 流量 (Q) をこれに合わせた 5.5 cc/s (原型で 0.4 Sv) ~ 56 cc/s (3.6 Sv) の 10 ケースと, 非大蛇行時を想定した流量の 1.7, 2.8, 4.2 cc/s (0.1~0.27 Sv) の 3 ケースについて行い, 各流量毎に分枝流のパターンと平均流況を調べた.

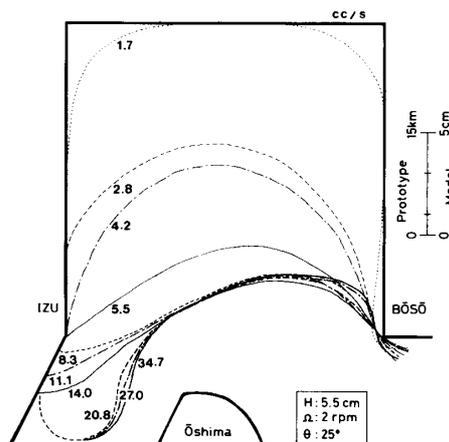


Fig. 3 Dependence of the current path on the flow rates for standard case. Lines indicate the northern boundaries of mainstream in which the current speed is fastest.

スタンダード・ケースの各流量毎に分枝流のパターンを Fig. 3 に示す. 図中の線は湾内の黒潮分枝流の北縁である. 図によると分枝流は Q が小さい 1.7~4.2 cc/s の時は湾奥まで侵入するが Q が増えるに従って侵入度が小さくなる. 特に, $Q = 14$ cc/s (0.9 Sv) から 56 cc/s (3.6 Sv) までの分枝流のパターンはほとんど変わらず侵入は湾口にとどまる.

分枝流の曲率半径は $Q = 1.7 \sim 11.1$ cc/s の範囲で Q が増加すると大きくなるが, 侵入度の場合と同じく $Q = 14$ cc/s から 56 cc/s まででは変化がない. $Q = 8.3$ cc/s 以上では, 西水道 (流入口付近) の下流に向かって左側の部分に湾内水との混合域が広がる. 実験のスタンダード・ケースの $Q = 5.5, 14, 42$ cc/s の場合における相模湾の平均流況を Fig. 4a, b, c に示す. 図によると相模湾の流れ場の全体的な構造は各流量別に大体次の 3 つの領域で構成される. 1) 湾の西口からの流入水が湾の西側境界 (伊豆半島) となす角があるために作られる後流渦の流入による奥部の左旋環流域. 2) 大島を右にみて回る分枝流域. 3) 大島の北東付近に形成される後流域.

奥部の左旋環流のパターンは流量が小さい $Q = 5.5$ cc/s では, 湾のほぼ中央に中心を持つ円形に近いが, 流量が大きい $Q = 14, 42$ cc/s では中心が南西側に移動した楕円形となる. その主流域の平均流速は各々模型で 0.036 (原型換算で 2.2), 0.068 (4.1), 0.2 cm/s (12 cm/s) 程度である. 分枝流域は流速が一番速い主流域から分枝流の奥部側の左旋環流と大島北東の後流渦の遭う混合域

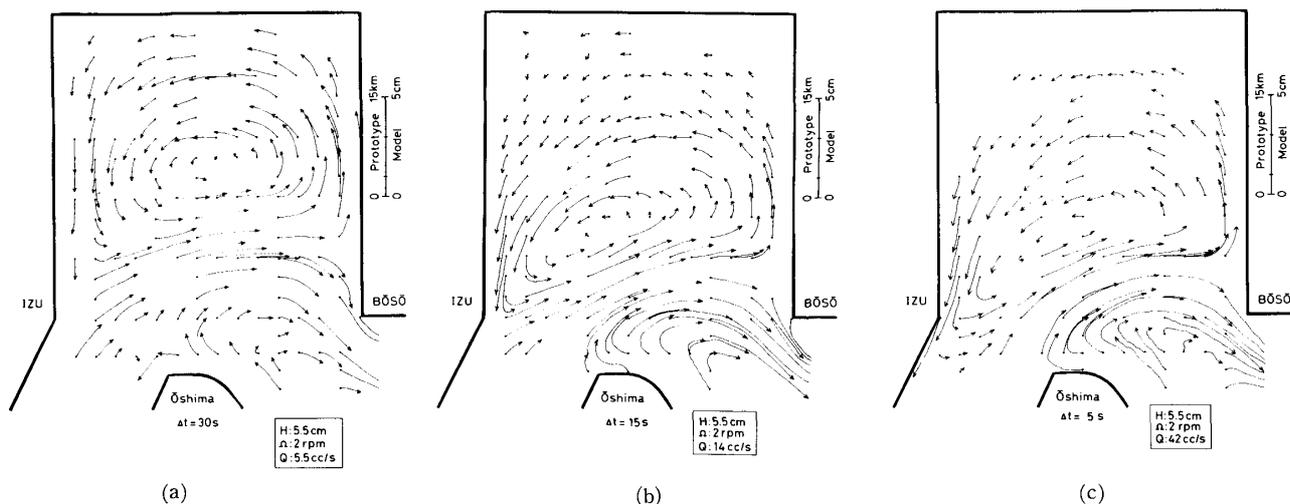


Fig. 4 Distributions of current vectors for the flow rates of standard case, (a) $Q = 5.5 \text{ cc/s}$ (b) $Q = 14 \text{ cc/s}$ (c) $Q = 42 \text{ cc/s}$. Current Vectors are estimated during Δt time period on each flow rate.

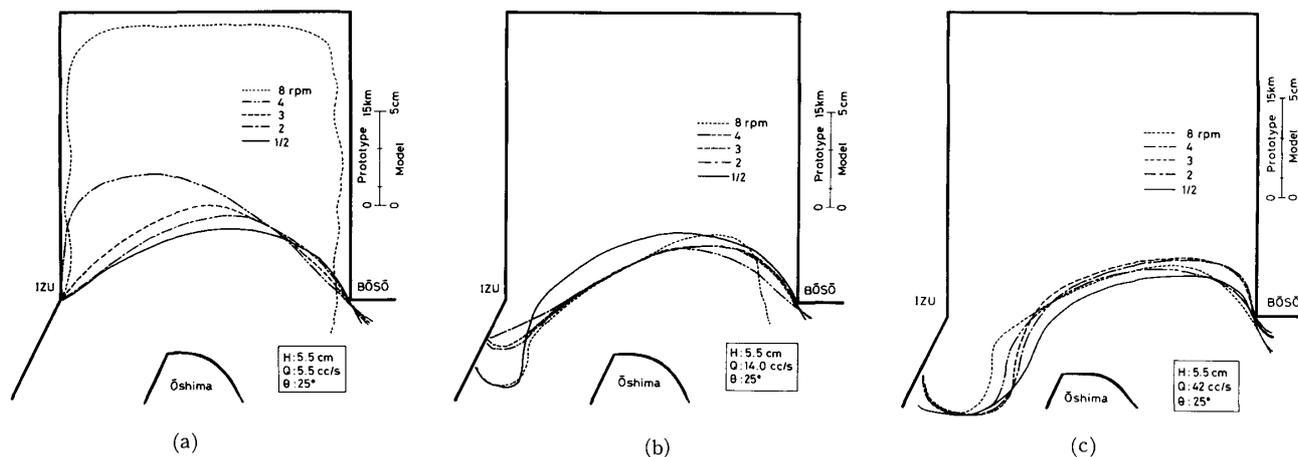


Fig. 5 Dependence of the current path on the revolution rates of the model (rpm) for standard case, (a) $Q = 5.5 \text{ cc/s}$ (b) $Q = 14 \text{ cc/s}$ (c) $Q = 42 \text{ cc/s}$.

(乱流境界層域) となっている。大島北東の後流渦域は流量の増加に伴って拡大し、房総半島の南西端近くまで発達する。染料注入により流れの3次元的な構造をみると、ここでは水平混合の他にかなりの鉛直混合が見られる。

3.2 循環流パターンのコリオリパラメータへの依存性

分枝流のパターンを支配する要因としてコリオリ力の影響を調べるため、模型の基本回転数である $\Omega = 2 \text{ rpm}$ と $1/2, 3, 4, 8 \text{ rpm}$ の5ケースについて流量別に流況の違いを調べた。 $Q = 14 \text{ cc/s}$ 以上では Ω を変えても分枝流のパターンは

ほとんど変化しない。Fig. 5a, b, c は $Q = 5.5, 14, 42 \text{ cc/s}$ の例を示す。 5.5 cc/s では回転数の増加に伴って分枝流は湾の奥まで侵入する。その南北変化の幅は 11 cm (原型で 33 km) 程度である。分枝流の曲率半径 (R_c) は $8.5 \sim 5.0 \text{ cm}$ 以下 ($25.5 \sim 15 \text{ km}$) で小さい。 14 cc/s の R_c は $5.5 \sim 9.5 \text{ cm}$ ($16.5 \sim 28.5 \text{ km}$) の範囲で、南北変化の幅は 1 cm 位で比較的小さい。 42 cc/s の場合は R_c が $7.5 \sim 11.0 \text{ cm}$ ($22.5 \sim 33 \text{ km}$)、南北変化の幅は $0.5 \sim 0.8 \text{ cm}$ ($1.5 \sim 2.4 \text{ km}$) であり、模型の回転数による分枝流パターンの変化はほとんど見られない。

相模湾の循環流に関する実験的研究 (I)

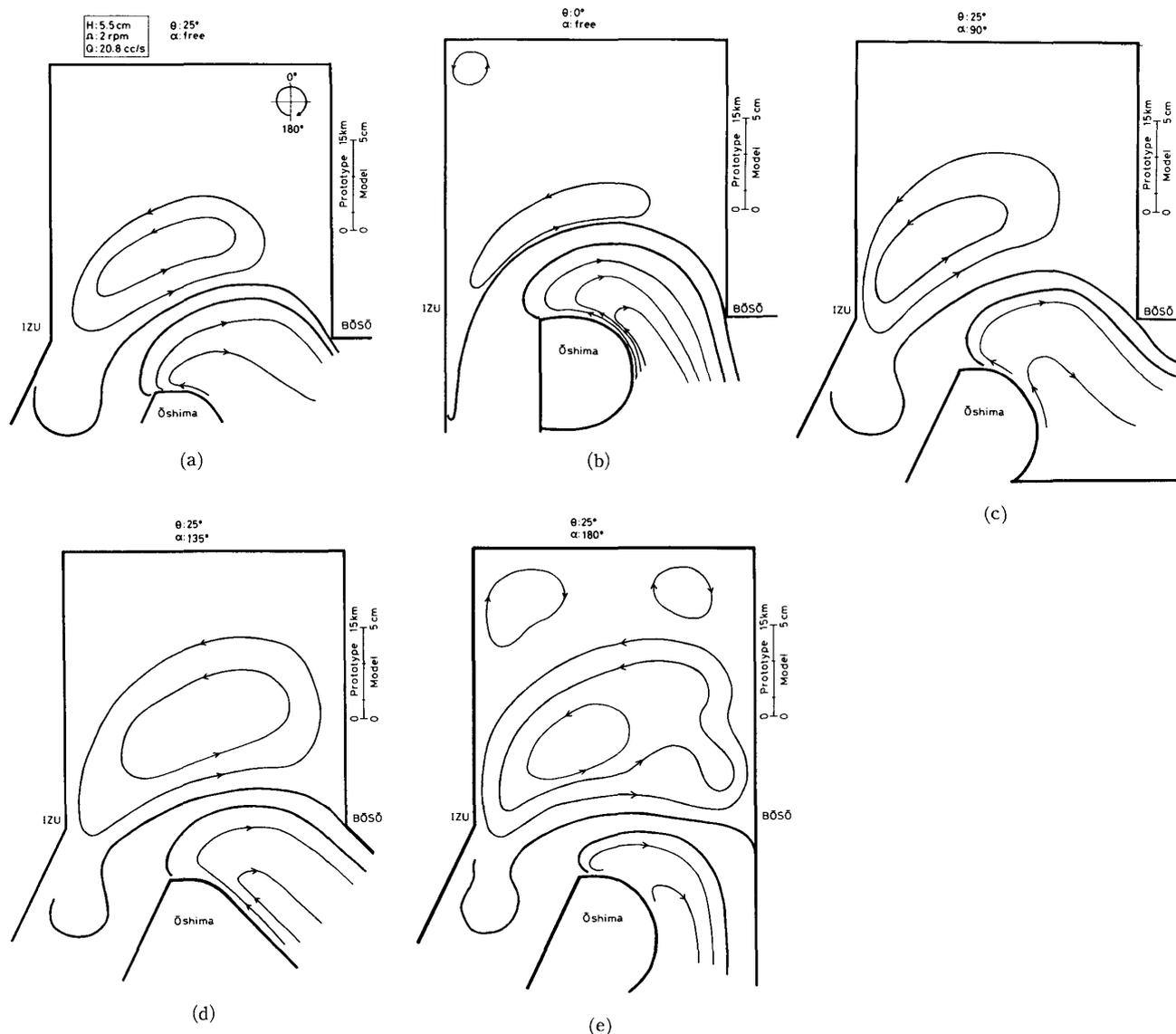


Fig. 6 Schematic views of circulation pattern for each direction of the inflow and outflow, (a) $\alpha = \text{free}$ and $\theta = 25^\circ$ (standard case) (b) $\alpha = \text{free}$ and $\theta = 0^\circ$ (c) $\alpha = 90^\circ$ and $\theta = 25^\circ$ (d) $\alpha = 135^\circ$ and $\theta = 25^\circ$ (e) $\alpha = 180^\circ$ and $\theta = 25^\circ$.

3.3 循環流パターンの流入・流出角への依存性

大島西水道から相模湾内へ流入する黒潮分枝流の流入角 θ と大島東水道から流出する流出角 α は相模湾の200 m等深線の走向から θ を約 25° (北向きを 0° にして時計回り) に固定したが, α は陸岸境界条件が大島東水道を出てから open boundary となっていて流出角は free にした. しかし, 現場の流れでは黒潮が相模湾に接岸した場合, 流出角条件 α は free ではないと考えられるので, 実験ではスタンダード・ケースの $\theta = 25^\circ$, $\alpha = \text{free}$ の他に θ を 0° と 90° , α を 90° , 135° , 180° に変え

て調べた. Fig. 6a~e はその中で $\theta = 25^\circ$, 0° , $\alpha = 90^\circ$, 135° , 180° の例を示す. $\theta = 0^\circ$ (Fig. 6b) では分枝流の曲率半径 R_c が 8.5 cm (25.5 km) で $\theta = 25^\circ$ (Fig. 6a) の場合の 10.0 cm (30 km) より小さい. そして, $\theta = 0^\circ$ の時は流入口で作られる流れの正のシアーが小さいため, 奥部の左旋環流は発達していない. 一方, 大島北東の後流渦域は北側に広がっている. α の増加 ($\alpha = 90^\circ$ (Fig. 6c), 135° (Fig. 6d), 180° (Fig. 6e)) による R_c の変化は 8 , 12 , 18 cm で α が増えるに従って R_c も増える. $\alpha = \text{free}$ の時の R_c は 10 cm で α が 90° と

135°の間にある。分枝流の北縁の大島の北端からの距離 (l_b) は α が free の時が 6 cm で、 α が 90°, 135°, 180° の時は 5.6, 5.2, 3.7 cm の順に小さくなる。 α の変化に伴う奥部の左旋環流の強さは α が増えると強くなる。 $\alpha = 180^\circ$ の時はその強さが急に増えて、循環の形は不安定となる。また、この時湾の奥部には時計回りの循環流が生じる。大島北東の後流渦域は縮小し、弱くなる。

4. 考 察

回転均質流体の流入出模型を用いて相模湾内の分枝流のパターンを調べた結果、分枝流のパターンは流量に依存し、流量が少ない時はコリオリパラメータに依存することが認められた。また、湾の幅や流入出角等の陸岸地形にも依存する。湾の奥部に形成される左旋環流と大島北東の後流渦 (Wake) の強さもこれらのパラメータによって変動する。これらの結果は順圧的な分枝流の湾内侵入度や分枝流の曲率半径、そして奥部の左旋環流と大島北東の後流渦域の生成機構を理解する上で重要である。

4.1 相模湾の黒潮分枝流(ループ流)の曲率半径、侵入度の無次元パラメータ依存性

回転均質流体の無次元化された渦度方程式(3)の各項の大きさを比較するため、無次元パラメータを導入すると、式(3)は

$$\begin{aligned} \partial \zeta^* / \partial t^* + V^* \cdot \nabla^* \zeta^* \\ = R_e^{-1} \nabla^{*2} \zeta^* - E_k^{1/2} R_0^{-1} \zeta^* / H^* \end{aligned} \quad (7)$$

となる。ここで R_e は Reynolds 数、 R_0 は Rossby 数、 E_k は Ekman 数を表す。この式(7)の左辺は渦度の時間変化及び移流項、右辺は水平粘性と底面摩擦による渦度の水平、鉛直拡散項を表す。流量すなわち、流入速度が増えると移流項が増大し、高 Reynolds 数領域の流れである次のような Euler 方程式の形で近似される。

$$\partial \zeta^* / \partial t^* + V^* \cdot \nabla^* \zeta^* = 0 \quad (8)$$

相模湾の場合、上記の式(8)が適用されるのは流量増加による分枝流のパターンの変化がほとんどない $Q = 14 \text{ cc/s}$ (原型では 0.9 Sv)、 R_e 数 540 以上からであると考えられる。高 R_e 数の式(8)の流

れは主に流れの境界条件によって支配されるポテンシャル流の形となるが、実際、相模湾のような流れ場の水平スケールが小さく、地形も複雑な、流れが強い海域では流れの不安定が起こりやすく、境界層の剝離現象が起こる。従って、式(8)の R_e 数 540 以上の流れにおいては、湾の境界条件(相模湾の幅、奥行)を満たす式(8)の解だけでは実際の相模湾の流れ場を推定できないと考えられる。本実験の結果としても、 R_e 数 540 以上からは流入口付近に分枝流と伊豆半島側の間に著しい速度の欠損(速度の水平シア)による後流渦が生成された。この後流渦は分枝流で運ばれ、乱流拡散されながら湾の東側境界の淀み点辺りまで来て再び湾内へ補給され、結局湾内全体が反時計回りの後流域 (Wake) になる。また、大島北東部にも上と同じ機構を持つ後流域が生成、発達する (Fig. 4a, b, c)。従って高 R_e 数時の相模湾の流れのパターンにはこのような 2 つの後流による境界条件の変化を考慮すべきであると考えられる。

流入口からの流量が少ない場合の定常状態では式(7)の左辺は右辺に比べて無視可能で、

$$R_e^{-1} \nabla^{*2} \zeta^* - E_k^{1/2} R_0^{-1} \zeta^* / H^* = 0 \quad (9)$$

となり、この時の湾内の流れは低 R_e 数の層流のポテンシャル流となる。実験の結果からみたこの時の R_e 数はスタンダード・ケースの $R_e = 60$ 以下で分枝流のパターンは曲率半径が湾の曲率半径より小さく、湾奥まで突っ込む (Fig. 3)。従ってこの時の相模湾の流れ場では流体の粘性効果が大きく働いていると考えられる。式(9)の水平粘性項と底面摩擦項との比は $(K_z^{1/2} / K_b) \cdot \{(2\Omega)^{1/2} \cdot L^2 / H_0\}$ で、角速度 Ω を除いた各無次元パラメータが一定だと仮定すれば角速度 Ω の増加によって底面摩擦は水平粘性に対し相対的に大きくなる。底面摩擦が大きくなると流入する流体の主流部の流速は減少するが流入する流量が一定であるため、流れの幅が広がって分枝流は湾の奥まで広がる (Fig. 5a)。

R_e 数が約 100 から 500 までの間は R_e 数が増えるに従って分枝流 (ループ流) の湾内侵入距離は減少し、曲率半径は増加する (Fig. 3)。この時、流

相模湾の循環流に関する実験的研究 (I)

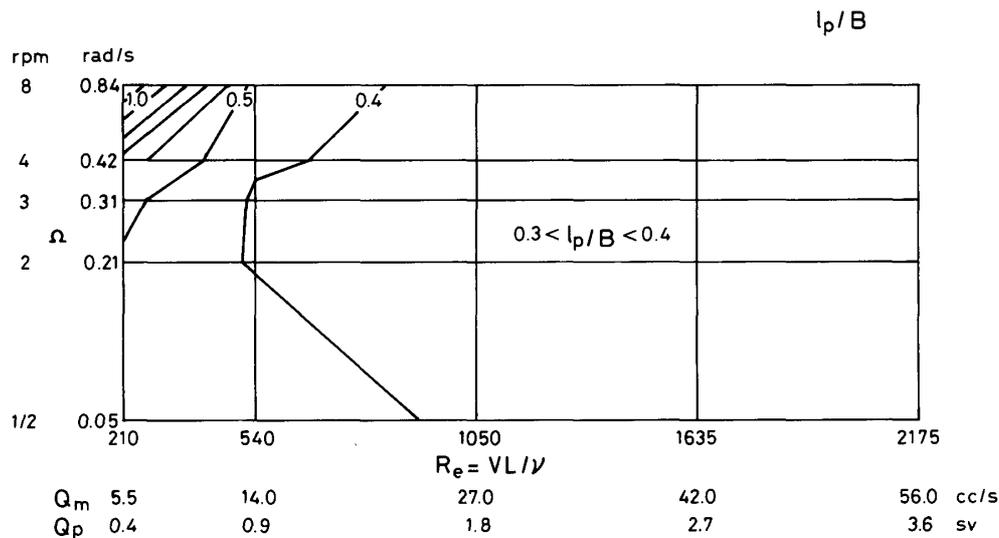


Fig. 7 Dependence of the penetration rate (l_p/B) on Reynolds number R_e and angular velocity Ω in loop current. Q_m , Q_p indicate the volume transports of model and prototype on corresponding Reynolds number. B is the breadth of Sagami Bay. The experimental data are located in each of the grid points.

れの境界条件が固定されていると、主に流量（流速）の大きさに流れるパターンが決められると考えられる。分枝流の湾内侵入度 (l_p/B , B : 湾の幅) の流量と模型の回転角速度への依存性を調べるため、1/2~8rpm, 5.5~56.0 cc/s の実験ケースにおける結果を Fig. 7 に示す。分枝流の北縁の湾内侵入度は流量5.5~14 cc/s (R_e 数210~540) の間では Q と Ω の両方に依存するが、14 cc/s 以上では Q と Ω にほとんど依存しないことが分かる。ただし、流量14~27 cc/s (R_e 数540~1050) 以下の範囲で Ω が 3 rpm 以上と 2 rpm 以下の領域では多少複雑な依存関係が見られる。これは奥部の左旋環流の発達と流入口での流入水(分枝流)のより上流での剥離、大島北東の後流渦域の成長・発達に原因するものではないかと考えられる。一方、相模湾の現場観測から測定された大島西水道からの平均流入流量の R_e 数は1050程度で Q と Ω の変化による分枝流の侵入度が変化しない領域に属している。

4.2 相模湾の左旋環流の無次元パラメータへの依存性

相模湾奥部の左旋環流の強さや大島北東の後流渦域等の大きさには粘性の働きが重要である。今回の実験の流入口水路の中は鉛直 R_e 数 ($R_e =$

VH/ν) が全実験ケースで55~770程度で、流れは層流状態の領域にある。従って、粘性係数の実験値を分子動粘性係数の 10^{-2} cm²/s と仮定した。この値を原型に換算すると水平渦動粘性係数 K_h は 1.8×10^5 cm²/s、鉛直粘性係数 K_z は 26 cm²/s の程度となる。しかし、水平 R_e 数の値が約500を越えると流れは流入水路出口の両側の境界から剥離し、分枝流と伊豆半島、大島の間では著しい速度の欠損(速度の水平シア)と後流渦が生成され、後流渦が次々と流れ去る状態になる。従って、流れは層流から乱流へ遷移し、実験結果として出てきた湾奥部の左旋環流や大島北東の後流渦域は充分発達した自由乱流で、この状態での運動量等の交換は大きいと考えられる。

次に湾奥部に生成される左旋環流の R_e 数への依存性を見る為、スタンダード・ケースにおける奥部の左旋環流の強さと分枝流の湾内侵入距離 l_p の R_e 数による変化を調べた。奥部の左旋環流の平均流量(流速)と大島北端から分枝流の北縁までの距離を調べた結果 (Table 3) によると、奥部の左旋環流の流量は R_e 数が増えるに従って増える。しかし、左旋環流の流量と流入流量との比(百分率)は R_e 数が210の時の26%が一番大きい、 R_e 数が540と1635とではそれぞれ19%および18%

Table 3 The intensity of anticlockwise circulation in the inner part of Sagami Bay and the penetration distance of loop current depending on Reynolds number.

R_e	Vol. transport of inflow <velocity>		Averaged vol. transport of anticlockwise circulation <velocity>		Penetration distance of loop current l_p (cm)	
	(cc/s)	(cm/s)	(cc/s)	(cm/s)		
210	5.5	<0.14>	1.44	<0.036>	26%*	7.4
330	8.3	<0.22>				6.3
435	11.1	<0.29>				6.2
540	14.0	<0.36>	2.68	<0.068>	19%*	6.0
810	20.8	<0.54>				6.0
1050	27.0	<0.70>				6.0
1350	34.7	<0.90>				6.0
1635	42.0	<1.09>	7.70	<0.196>	18%*	5.9
1890	48.6	<1.26>				6.0
2175	56.0	<1.45>				5.9

R_e indicates Reynolds number ($= VL/\nu$). Penetration distance l_p was measured from the northern end of Oshima to the northern limit of loop current. The asterisked values are the percentages of averaged volume transport of anticlockwise circulation to volume transport of inflow.

で、あまり差がない。この結果は、流入する流量の平均約20%程度が奥部の左旋環流を形成し、 R_e 数540以後はその流入流量との比率はほとんど変わらないことを示す。分枝流の湾内侵入距離も R_e 数540~2175では5.9~6.0 cm程度で、あまり変化がない。従って、相模湾の奥部の左旋環流の強さは分枝流のパターンと同じく R_e 数540前後を境にして分類される。

4.3 循環流パターンの流入・流出角への依存性

分枝流のパターンが Q と Ω の両パラメータに依存しない (R_e 数540以上の領域) の流量20.8cc/s (R_e 数810)において、流入角 θ 、流出角 α を変化させた場合の流れのパターンの変化を Fig. 6a~e に示した。大島西水道から相模湾へ流入する黒潮分枝流の流入角 θ による影響をみるための $\theta = 0^\circ$ (北向きの流入) の時は、奥部の左旋環流が生成されないことが分かった。これは相模湾奥部の左旋環流の生成要因として考えられる流入口付近の伊豆半島側の後流渦が発生・流出しないためであると考えられる。また、流出角 α の減少に

伴い、分枝流の湾内への侵入度は増加し、奥部の左旋環流の強さが減少、大島北東の後流渦域の拡大が見られた。

西口のみならず、このように東口の境界条件の影響も湾内の循環流のパターンに少なからぬ影響をもっているため、現場において今後詳しい調査が望まれる。

5. 結 論

水深一定の順圧回転均質流体の流出入模型を用いて相模湾の黒潮分枝流と奥部の循環流のパラメータ依存性を調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 分枝流のパターンは、スタンダード・ケース 2 rpm の下で、 R_e 数60以下と60~540, 540以上の3つの領域に分けられる。
 - ・60以下；分枝流の幅は湾奥まで広がる。
 - ・60~540； R_e 数の増加によって分枝流の曲率半径は増加し、湾内侵入度は減少する。
 - ・540以上； R_e 数に依存しない。

相模湾の循環流に関する実験的研究 (I)

- ② R_e 数が540以下の領域では、 Ω の増加に伴い分枝流の曲率半径が減少し、湾内侵入度が増加する。540以上では R_e 数の場合と同じく依存性がない。
- ③ 奥部の左旋環流は流入口付近の後流渦の流入によって生成される。 R_e 数の増加に伴いその強さが増加し、 R_e 数540以上では流量が流入流量の約20%となる。
- ④ 大島北東域では奥部の左旋環流の形成と同じ機構で後流域 (Wake) が形成される。
- ⑤ 流入出条件による変化では流出角 α の増加によって分枝流の湾内侵入度は減少するが、曲率半径は増加する。この時、奥部の左旋環流域は拡大するが大島北東の後流渦域は縮小する。流入角 θ が 0° の時は奥部の左旋環流は発達しない。

今回の実験は、均質流体、水深一定で陸棚斜面無し、かつ、準定常の条件で、パラメータ依存性を調べた。しかし、相模湾へ流入する沖合の黒潮系暖水は湾内沿岸水と密度差を持っている為、密度成層による流れの傾圧的要素の影響とそれと関連した沿岸水と沖合水との間の前線波動、密度成層と結びついた地球自転の効果等も相模湾の循環に影響を与える欠かせない要因であると考えられる。今後、これらの要素の効果を解析する実験を継続する予定である。

参 考 文 献

- 1) 木村喜之助(1942)：沿岸の大急潮について。中央気象台彙報, 19, 1-85.
- 2) 宇田道隆(1937)：ブリ漁期における相模湾の海況及び気象と漁況との関係。水産試験場報告, 8, 1-59.
- 3) 石野 誠・大塚一志・瀬戸口明宏・本橋敬之助 (1967)：日本近海海流系に関する水産海洋学的研究 I。黒潮沿岸分枝流の接岸流入とそれに伴う漁業災害の一例。La mer, 5, 244-250.
- 4) 松山優治・岩田静夫・細田昌広 (1980)：相模湾における流れの観測。沿岸海洋研究ノート, 18, 9-17.
- 5) 蓮沼啓一・中田英昭・永江英雄・平野敏行 (1983)：相模湾の表層循環系とその変動。1983年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 117-118.
- 6) 岩田静夫(1986)：相模湾の海況の短期変動に関する研究。神奈川県水産試験場論文集, 3, 1-64.
- 7) Iwata, S. and M. Matsuyama (1989)：Surface circulation in Sagami Bay: the response to variations of the Kuroshio axis. J. Oceanogr. Soc. Japan, 45, 310-320.
- 8) Teramoto, T. (1965)：Day-to-day to monthly variations in oceanic flows estimated from cross-stream differences in electric potential. Doctoral Dissertation, University of Tokyo, 74pp.
- 9) Taira, K. and T. Teramoto (1981)：Velocity fluctuations of the Kuroshio near the Izu Ridge and their relationship to current path. Deep-Sea Res. 28, 1187-1197.
- 10) Taira, K. and T. Teramoto (1986)：Path and volume transport of the Kuroshio current in Sagami bay and their relationship to cold water masses near Izu Peninsula. J. Oceanogr. Soc. Japan, 42, 212-223.
- 11) Taira, K., T. Teramoto and K. Takeuchi (1987)：Centrifugal forces estimated from trajectories of drifting buoys in winding paths of the Kuroshio. J. Oceanogr. Soc. Japan, 42, 104-110.