

西部瀬戸内海の海水交換

II. 別府湾の海水流動と海水交換*

俵 悟**・中田英昭***・藤原建紀****・平野敏行*****

Water Exchange of western Seto Inland Sea

II. Current pattern and Water Exchange in Beppu Bay

Satoru TAWARA**, Hideaki NAKATA***, Tateki FUJIWARA****
and Toshiyuki HIRANO*****

Abstract

In this paper, current pattern and water exchange between inner and outer waters of Beppu Bay in the western Seto Inland Sea were studied by Lagrangian measurement using drifting buoys and drift cards. The wind effects on the current pattern were also analysed based on the current data obtained by Eulerian measurement using current meters to clarify the roles of wind driven current in the transport of materials in the Bay.

The results are summarized as follows;

(1) A thermal front generally occurs in the mouth of Beppu Bay and it seems to play an important role in the water exchange of inner and outer waters.

The inner water moves mostly southward along the front and outward flows from the southern edge of the front, when the shape of the front is deformed due to ebb current.

(2) Tidal residual circulation in anticlockwise direction is found in the Bay. This anticlockwise circulation develops due to prevailing NW'ly wind in winter, while almost no change is observed under weak SSE'ly wind in summer.

1. はじめに

瀬戸内海と外海との海水交換は主として豊後水道、紀伊水道を通じて行われている。内海水と外海水の相接するこれらの海域には、しばしば海洋前線が形成されており、海水交換に重要な影響をおよぼしていると考えられている。例えば、吉岡(1971)は冬季紀伊水道に形成される顕著な海洋前線について、また YANAGI(1980)は

豊後水道に隣接する伊予灘の国東半島南東沖に冬季に出現する海洋前線について、それぞれの特性を記述し、形成機構を論じている。

一方、最近の人工衛星、航空機からの熱映像(Photo. 1)によると、別府湾佐賀関から国東半島南岸にかけて、別府湾湾内水と湾外の豊後水道系水との間に、しばしば顕著な水温前線の存在が認められる。しかしながら、この水温前線が湾内水と湾外水との海水交換にどのような役割を果たしているかについては、ほとんど分かっていない。前報(俵ほか, 1987)では別府湾外の速吸瀬戸(豊予海峡)周辺海域における海水流動特性を、主として漂流ブイ追跡、表層漂流ハガキ等の放流などラグランジュ的測流によって明らかにし、それにもとづいて速吸瀬戸を通じての海水交換機構について考察した。ここではさらに、別府湾内および湾外においてこれまで実施した同様のラグランジュ的測流調査の結果をもとに、湾口部に

* 1978年6月23日受理

** 水産大学校 Shimonoseki University of Fisheries, Yoshimi, Shimonoseki, 759-65 Japan

*** 東京大学海洋研究所 Ocean Research Institute, University of Tokyo, Nakano-ku, Tokyo, 164 Japan

**** 中国工業技術試験所 Government Industrial Research Institute, Chugoku, 15000 Hiro, Kure, Hiroshima, 737-01 Japan

***** 東海大学 Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu, Shizuoka, 424 Japan

形成される水温前線と湾内水の交換との関わりについて検討を加えた。

最近、風による沿岸海洋の応答については、多くの研究があり(例えば蓬沼, 1979; 大谷, 1986), 内湾の海水交換に風が大きく寄与していることが明らかになってきている。FUJIWARA (1985), 藤原 (1985, 1986a, 1986b) は瀬戸内海を対象にして、吹送流の統計的システム解析を行い、風による通過流量と物質輸送におよぼす影響を明らかにした。前報 (1987) では、速吸瀬戸の海水流動・交換には風の変動が重要な影響をおよぼしていることが分かった。そこで本研究では、別府湾における夏, 冬季それぞれ15日間の連続測流資料 (産業公害防止協会, 1974) をもとに、別府湾内の恒流の風による変動について解析を行い、ブイ追跡結果とあわせて風の効果に関する総合的な考察を行った。

2. 資料と方法

漂流ブイは海表面の浮子に横 1.5 m, 縦 2.0 m の抵抗布を吊り下げ、これにレーダー・トランスポンダを取り付けたものである。このブイの追跡、漂流ハガキ放流による流動調査の方法は前報と同様である。1982年と1983年の各年の1月と6月にブイ追跡を実施したが、1982年6月には計器の故障のためデータを得ることができなかった。1982年の調査ではブイ追跡とあわせて漂流ハガキの放流を行った。Table 1, Table 2 にそれぞれブイ追跡の実施状況および漂流ハガキの放流、回収状況を示した。

また、海水流動に対する風の効果の解析には、Fig. 1 に示す定点において、水深 2.5 m 層 (Stns. 1, 5, 8 は 15 m 層を含む) で、1973年9月5日~21日, 1974年2

月27日~3月14日の2回実施された連続15日間の測流結果 (産業公害防止協会, 1974) を用いた。この測流資料のうち、湾奥部 Stn. 1 で1973年9月に観測された流速 (北向分速, 2.5 m 層および 15 m 層) の時系列を大分における風の東向分速の変化とあわせて Fig. 2 に示した。この図から風に対する流れの応答は 2.5 m 層と 15 m 層では逆相関である。また、Stn. 1 における風の東向分速と流れの東向, 北向分速とのステップ応答関数を求めると、5~6 時間で応答関数はピークになる。このことから、湾内恒流 (25時間平均流) は風の東向, 北向分速によって変動することがうかがわれる。内海における風による流れは FUJIWARA (1985) が示しているように、地形, 水深によって異なる。そこで、各定点における恒流と風の日平均値 (24時間平均) との関連を、次式による回帰分析によって見出した。

$$U = a_0 + a_1 U_w + a_2 V_w \quad (1)$$

$$V = b_0 + b_1 U_w + a_2 V_w$$

a_0, b_0 は風の影響を受けない測流期間中の25時間平均流の東向, 北向分速の平均値, U, V は恒流の東向, 北向分速 (cm/s), U_w, V_w は大分の風の東向, 北向分速の日平均値 (m/s) とする。回帰分析には、生データから12時間間隔で求めた各定点の恒流 (25時間平均) と風 (日平均) の値を用い、風と流れとの時間遅れは0とみなして回帰分析を行った。

3. 結 果

- (1) 湾口部の水温前線と湾内水の海水交換
- (a) 冬季の観測例

1982年1月28日から29日までのブイの流跡を Fig. 3-a

Table 1. List of Radar buoys tracking in Beppu Bay.

No	Released time	Moon's age		Duration hr	Released position				Picked up position				Mean Daily mean wind current				
		hr	d		lat(N)	long(E)	lat(N)	long(E)	lat(N)	long(E)	(°)	(cm/s)	(°)	(m/s)			
1	'82, Janu. 28,	9.0	3	23.5	33°	21.95'	131°	42.83'	33°	16.21'	131°	52.85'	125	22.18	318	15.9	
2	"	"	9.7	"	14.3	33	19.00	131	44.76	33	15.69	131	52.37	118	25.74	"	"
3	"	"	10.4	"	24.0	33	19.49	131	52.00	33	18.14	132	01.02	100	16.36	"	"
4	'83, Janu. 26,	16.0	12	25.0	33	19.08	131	41.05	33	16.58	131	52.20	105	19.81	335	7.4	
5	"	"	16.0	"	25.0	33	19.07	131	43.35	33	17.71	131	53.08	100	16.93	"	"
6	"	"	16.0	"	23.5	33	19.08	131	45.59	33	17.78	131	49.75	111	8.11	"	"
7	"	"	16.0	"	24.5	33	19.04	131	50.14	33	20.59	131	49.67	346	3.36	"	"
1	'83, June	21,16.5	10	47.0	33	20.35	131	44.33	33	21.07	131	53.25	84	8.18	48	5.5	
2	"	"	16.5	"	47.0	33	21.00	131	47.80	33	21.26	131	52.21	86	4.03	"	"
3	"	"	16.5	"	47.0	33	21.71	131	51.14	33	22.91	131	51.73	22	1.42	"	"
4	"	"	16.5	"	24.5	33	22.38	131	54.76	33	15.49	132	02.65	136	19.99	353	4.8

Mean current is calculated tracking buoy duration times.

別府湾の海水流動と海水交換

Table 2. List of releases and recoveries of drift cards in Beppu Bay.

Released station	Date	Number	Recoverd number	Rate of recovery %
J1	25, Jan. '82	200	94	47
J2	29, Jan. '82	50	4	8
J3	" "	50	12	24
J4	" "	50	15	30
A	1, June '82	50	9	18
B	" "	50	9	18
C	" "	50	16	32
D	" "	50	10	20

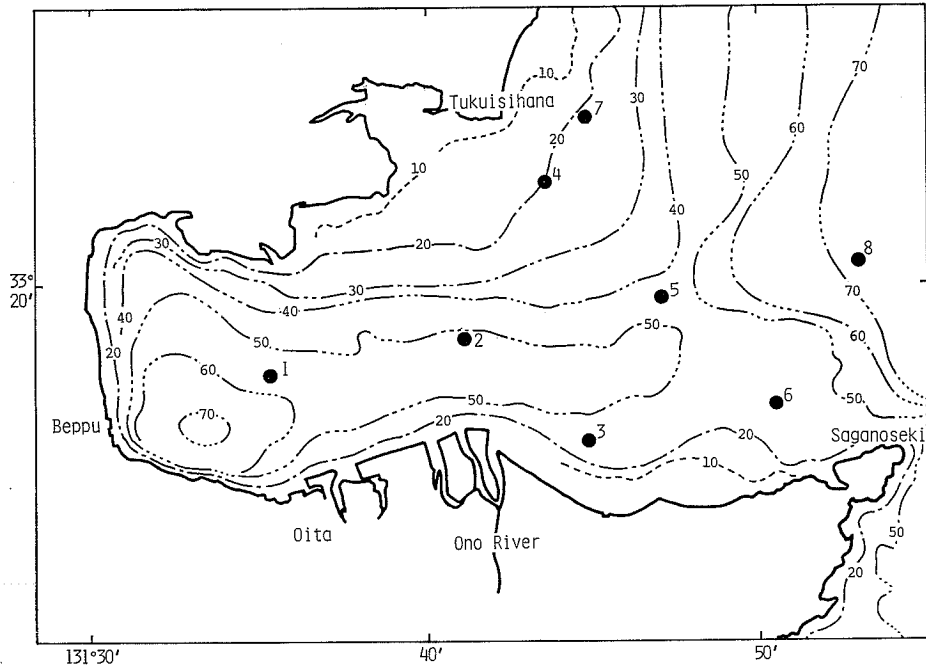


Fig. 1. Locations of current observation stations and bathymetric chart of Beppu Bay. Lines represent depth contours in meters.

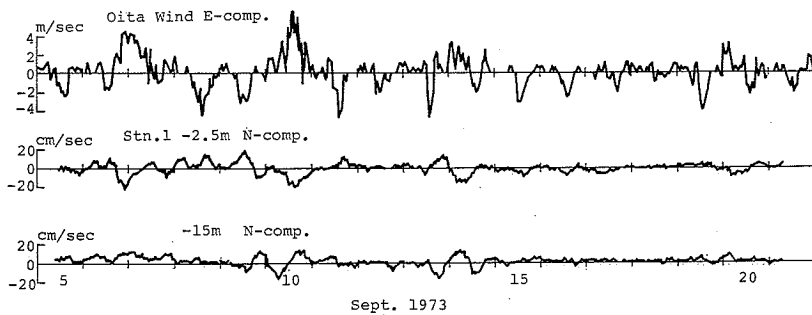


Fig. 2. Variations of the eastward wind velocity at Oita and northward current velocities at Stn. 1 in the 2.5 m and 15 m depth layer.

に示した。ブイ 1, 2 は投入点から、ほぼ南東方向へ向かって流れている。速吸瀬戸の北流中期の間は、ブイは複雑な動きを示しながら停滞しているが、南流時には、南東方向へ速く流れている。ブイ 1 は転流時に佐賀関へ最も接近し、北西風によって岸へ打ち上げられた。ブイ 2 は湾口付近で北へ向かって流れたが、複雑な動きを示しながら、岸へ向かって接近したので、投入後 23.5 時間でブイを揚収した。一方、ブイ 3 は図に示したように、潮時によって北西-南東方向への往復流を示しながら、24 時間後には豊後水道へ流出した。ブイ追跡中は、北西の季節風が強く、日平均風速は約 16 m/s であった。ブイ 1, 2 の投入点付近の潮流は大潮の最大流速値で東西方向で 20 cm/s 以下と小さい(産業公害防止協会, 1974)。したがって、速吸瀬戸の北流時(上げ潮)には、湾内の潮流と吹送流とが逆方向になり、複雑な動きを示しながら停滞するが、南流時(下げ潮)には、潮流と吹送

流がほぼ同じ方向であり、流速は増加している。ブイ 1 と 2 の平均流速はいずれも約 22 cm/s となるが、この流れの大部分は吹送流によるものと考えられる。ブイ 3 の豊後水道への流出もまた吹送流によるものと考えられる(俵ら, 1987)。

また、1983 年 1 月 26 日から 27 日までの大潮期に湾内において 4 個のブイを追跡した (Fig. 3-b, c)。投入開始時には Fig. 3-c に示すブイ 3 と 4 との投入地点の間に、水温差約 2°C の水温前線がほぼ南北方向に形成されていた。そこで、湾内水の水温の指標としてブイ 3、湾外水の水温の指標としてブイ 4 に DTR (Digital thermal recorder) をとりつけ、漂流中の水温を連続的に測定 (5 分間隔) した。ブイ 1, 2, 3 の流跡はいずれも相互に類似のパターンを示し、投入直後からブイはほぼ南西へ流れ、その後は南岸に沿って東方へ流れている。東方への流速は速吸瀬戸の北流時には小さくなり、北流最強時には

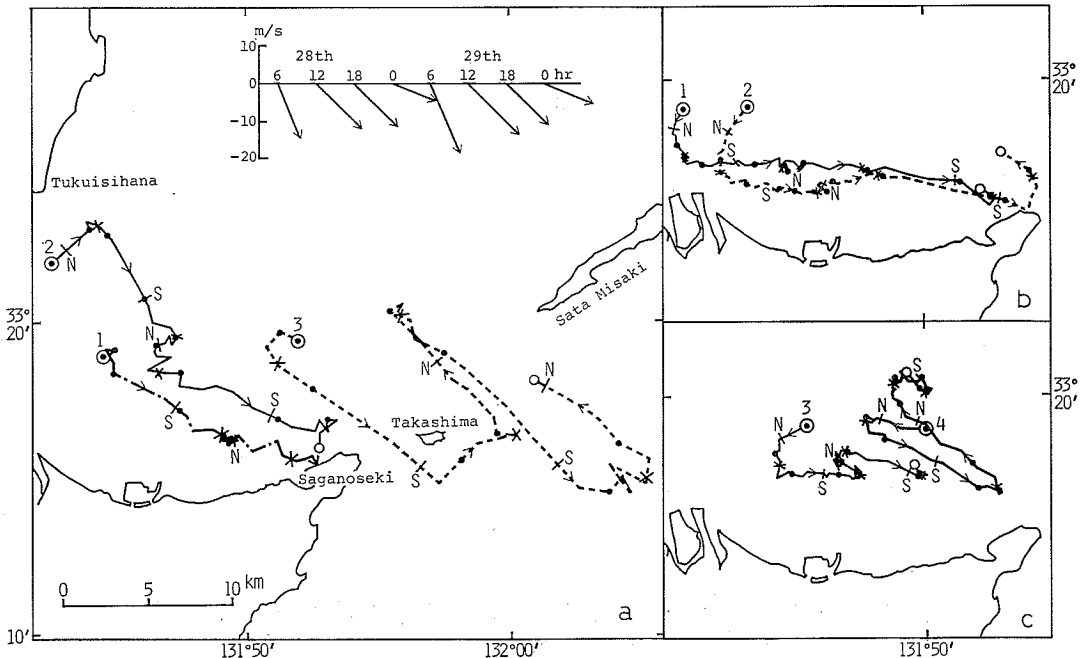


Fig. 3. Trajectories of radar buoy in Beppu Bay.

(a): From 28th to 29th January 1982. Insert figure is wind vectors at Satamisaki from 28th to 29th January 1982.

(b): Trajectories of buoys 1 and 2 from 26th to 27th January 1983.

(c): Trajectories of buoys 3 and 4 same duration as (b). Time marks (●) on trajectories are placed every three hours.

N, S: Radar buoy location at the time of maximum northward and southward current in the Hayasui Seto.

×: Radar buoy location at the time of slack.

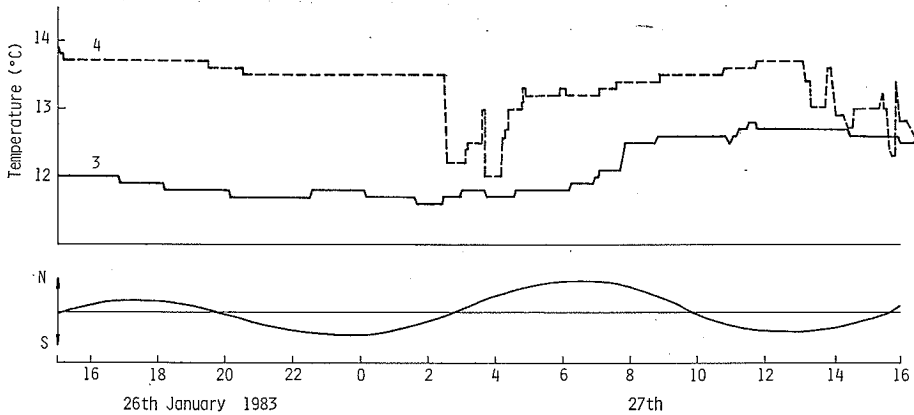


Fig. 4. Temperature observed at buoys 3 and 4 (upper) and tidal current at Hayasui Seto (lower) from 26th to 27th January 1983.

流速は0か、わずかに負となり、速吸瀬戸の南流時には東方への流速が大きくなっている。一方、水温前線の外側に投入したブイ4は内側のブイとは全く異なった流跡を示し、潮時によって、北西—南東方への往復流を示している。ブイ3と4にとりつけたDTRによって測定された水温の時系列を Fig. 4 に示す。湾内・外の水温差は約2°Cで漂流中の水温変化はブイ4の方で著しかった。すなわち、投入して約12時間後の27日03時の転流時に、ブイ4は湾口部佐賀関北方に達し、そこで水温は急激に低下し、転流後北流に乗って湾口部を離れる際に水温は再び上昇して投入時と同じく13.6°C前後を示した。そして、次の南流末期から転流時にかけて、水温の変動は大きくなった。ブイ3の水温は投入から一潮汐の間はほぼ12°Cを示し、次の一潮汐の間は12.6°Cで水温の変動はブイ4のそれに比べて小さい。

さらに、Fig. 5 には1982年1月25日および29日に水温前線の内側3点(J1-J3)、沖側1点(J4)で放流した表層漂流ハガキの漂着状況を示した。沖側のハガキは、豊後水道の四国沿岸に漂着したが、前線の内側3点で放流したものについては Stn. J1, J2 のハガキが佐賀関周辺に集中的に漂着している。Fig. 3-a においてブイ1が Stn. J1 のハガキと同じように、佐賀関の沿岸に打ち上げられたことなどから推察して、前線の内側の漂流ハガキはブイ1と同じように湾口付近で流れが弱くなった時に、北西風によって沿岸へ漂着したものと考えられる。

(b) 夏季の観測例

1983年6月21日から23日までの大潮期に観測したブイの流跡を Fig. 6-a に示した。ブイ1, 2, 3 は湾内水、ブイ4 は湾外水の流動をみるために投入したものであ

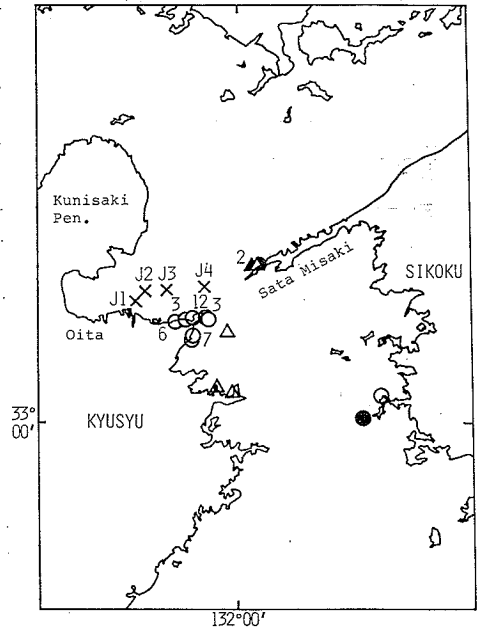


Fig. 5. Recoveries of surface drift cards released on 25-29th January 1982.

○△▲●: Recoveries of the cards released at Stns. J1, J2, J3, J4, respectively.

Numerals are number of recoveries cards.

る。ブイ1, 2, 3 の漂流状況は冬季の場合とは異なり、いずれも投入後時計まわりのループを描き、投入して25時間後、ブイ1は投入点から南東方向3.5海里、ブイ2, 3 はほとんど投入点付近に位置していた。ブイ1, 2, 3 はその後 Fig. 6-b に示したような流跡をそれぞれ描き、投入して47時間後にはいずれも湾口部に収束し、湾外へは

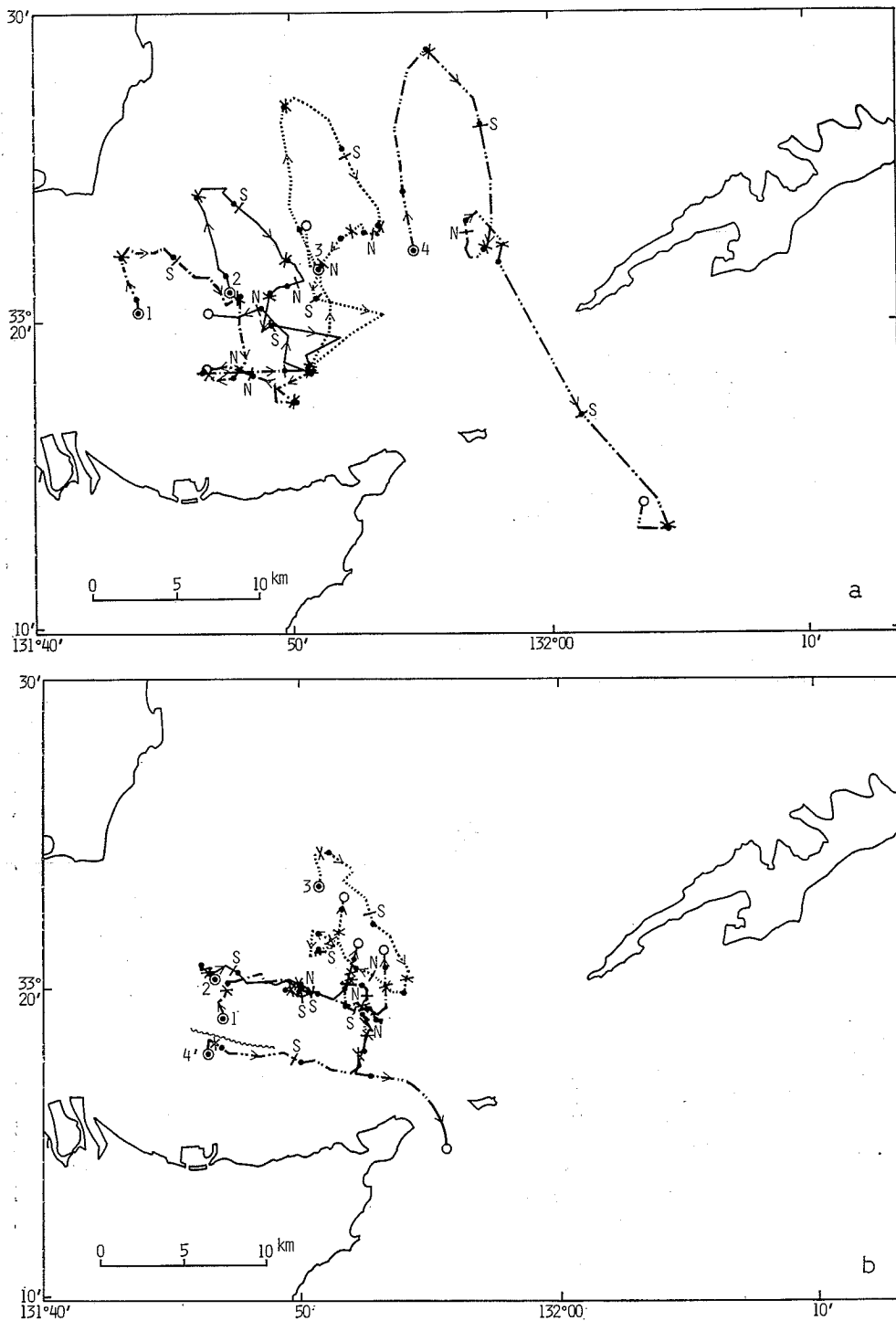


Fig. 6. Trajectories of radar buoy from 21st to 23rd June 1983. Legends are same as in Fig. 5.
 (a): From 21st to 22nd June (b): From 22nd to 23rd June
 ~~~~~: Thermal front on 19hr 23rd June

流出しなかった。一方、ブイ 4 はブイ 1, 2, 3 と同様なループを画きながらも、25 時間後には投入地点の南南東 9.3 海里まで漂流し、豊後水道へ流出した。6 月 22 日 19 時頃、Fig. 6-b の 1 と 4' との間に水温差 2°C の水温前線が図示した形状で存在しているのが目視されたのでブイ 4 を 4' の地点に再投入して、湾の南岸付近の流動を調べた。その結果、この再投入したブイ 4' は南岸沿いに東へ向かって漂流し、佐賀関と高島との間を通過して豊後水道へ流出した。

上記のブイ追跡期間にブイ 1 とブイ 4 にとりつけた DTR の水温変化を Fig. 7 に示す。ブイ 1 の水温は 19.5°C から 20°C であったが、6 月 22 日の 15 時から 17 時までの間、20°C 以上となった。

ブイ 4 の水温は速吸瀬戸を漂流していた時には、ほぼ 19°C を示した。再投入したブイ 4' の水温は投入直後の 19 時には 22°C を示したが、20 時から 23 日の 1 時までには 20°C から 18.5°C まで低下し、その後急上昇して 21°C となり、9 時から 10 時にかけては 22°C と 20°C との間で変動した。

なお、Fig. 8 には 1982 年 6 月 1 日湾内 4 地点 (A~D) で放流した表層漂流ハガキの漂着状況を示した。湾奥の Stn. A で放流したハガキの一部は湾奥南岸に漂着しているが、湾内で拾得された大部分のハガキは南岸沿いに

漂着し、とりわけ湾口部の水温前線が湾の南岸に接する佐賀関付近には多く漂着している。このことは湾内の表層水は別府湾の南岸に沿って湾外に流出することを示唆している。

## (2) 風による 25 時間平均流の変動

(1) 式により、各定点について回帰分析を行い、その結果を App. Table 1 に示した。この表に示すようにほとんどの定点で回帰式は 5% の有意水準で有意とみなされる。したがって、各定点の 25 時間平均流は風によって起こる流れであると説明できないことはない。夏季、冬季のそれぞれについて風の影響を受けない測流期間中の 25 時間平均流の東向、北向分速の平均値  $a_0$ ,  $b_0$  を合成してそれぞれ Fig. 9-a, b に示した。ここに示した流れは、測流期間中の風以外の潮汐残差流、湾外水の流入、河川水の流出の影響を受けたものを含んでいると考えられる。これらの図にはいずれも湾口部から湾中央部にかけて反時計まわりの流れが認められる。この反時計まわりの流れは、夏、冬ともほぼ同じパターンを示すことから、地形性の潮汐残差流によるものと考えられる。

次に、風に起因する流れをみてみよう。大分においては冬季は北西風が卓越し、夏季は南南東の風が卓越する。そこで冬季のモデル風として 1982, '83 年の 1 月の最多風 の平均値 (NW, 6 m/s), 夏季のモデル風として 1983

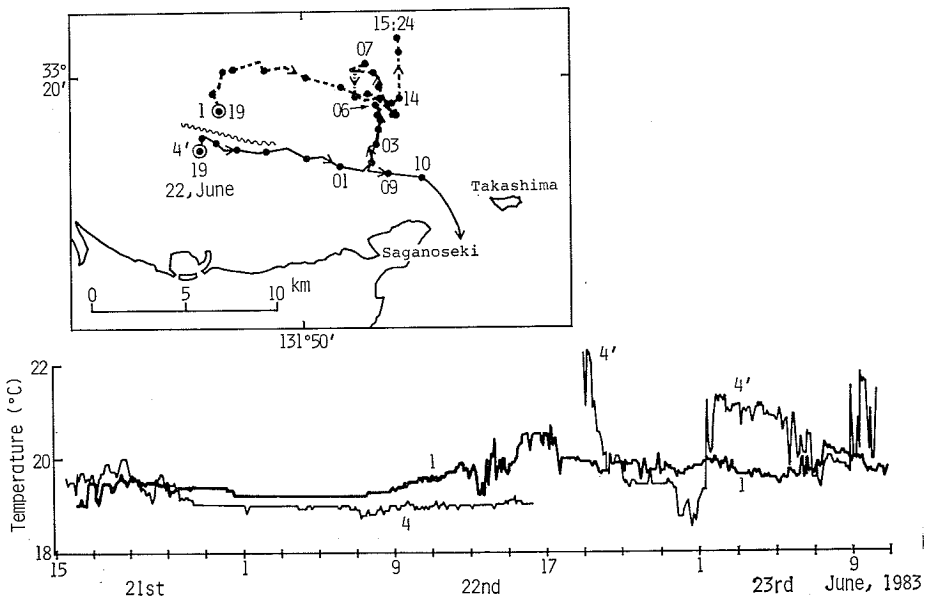


Fig. 7. Temperature record by DTR suspended from radar buoy from 21st to 23rd June 1983. The trajectories of radar buoy with DTR are shown in upper figure (a part of Fig. 6-b). Time marks on trajectories are placed every one hour.

年8月の最多風の平均値 (SSE, 2 m/s) と現地データから求められている偏回帰係数 (App. Table 1) を回帰式に与え、各定点の流れを推定した。夏季, 冬季推定結果をそれぞれ Fig. 10-a, b に示した。

夏季には南南東の風が卓越しており, それに対応して湾奥部 Stn. 1 の上層には北に向かう流れ, 15 m 層には北東へ向かう流れが生ずる。また, Stns. 2, 4, 7 では西へ向かう流れ, 湾口南部 Stn. 5 には南西, Stn. 6 には北西へ向かう流れがそれぞれ生じる。一方, 冬季には北西風が卓越するが, それに伴って湾奥 Stn. 1 では 2.5 m, 15 m 層とも南〜南西に向かう流れが生ずる。また湾口部 (Stns. 2, 4, 5, 7) では南西に向かう流れ, 湾口南部 (Stns. 3, 6) では東南東, 南東へ向かう流れ, Stn. 8 では北東へ向かう流れが生じ, 湾口部の反時計まわりの流れは強まる。

以上に示したように, 別府湾内には, 季節にかかわらず, 基本的には地形性の潮汐残差流による反時計まわりの流れがあり, これに風によって生ずる流れが加わる。夏季には卓越風が概して弱いので, 流れのパターンは風の影響を受けない25時間平均流 (Fig. 9-a) と比べて大

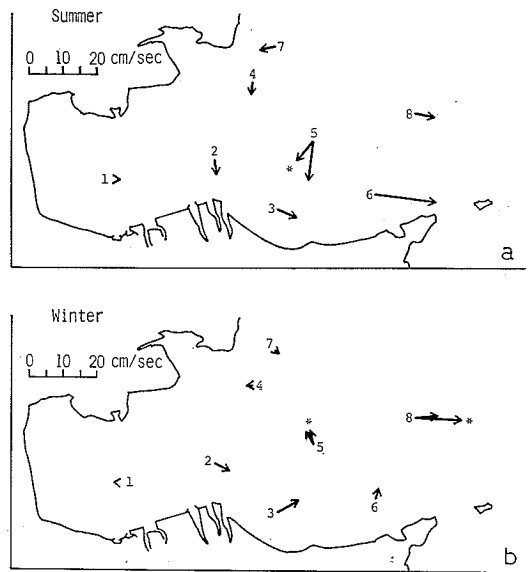


Fig. 9. 25h-mean current obtained by a, b of the multiple regression equations (1) at 2.5 m depth layer. a): In summer b): In winter  
\*: Current at 15 m depth layer.

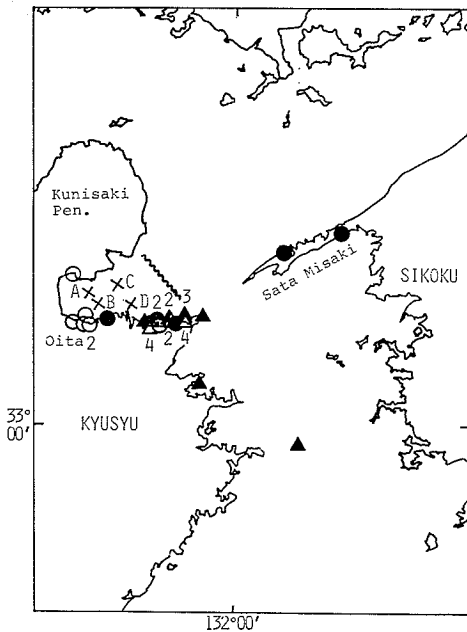


Fig. 8. Recoveries of surface drift cards released on 1st June 1982.

○●△▲: Recoveries of the cards released at Stns. A, B, C, D, respectively.  
Numerals are number of recoveries cards.

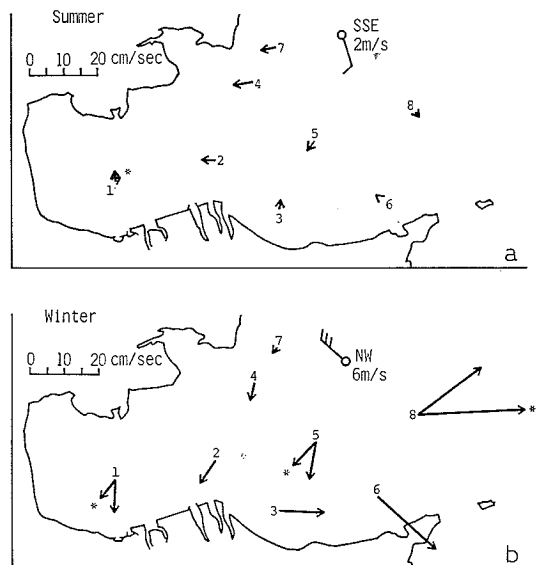


Fig. 10. Wind driven current at 2.5 m depth layer due to SSE wind (2 m/s) in summer and NW wind (6 m/s) in winter estimated by multiple regression equations.

a): In summer b) In winter  
\*: Current at 15 m depth layer.



大きく変化しないが、冬季には卓越風が強く、湾内の流れはその風向、風速に応じて大きく変化する。湾奥部 Stn. 1 では、夏季、冬季を通じて潮流、吹送流以外の流れとも弱く、流れはほとんど風だけに支配される。

#### 4. 考 察

海上保安庁 (1977) によると、別府湾および付近の上げ潮流の流路には速吸瀬戸から北上し国東半島南部の春石鼻沖合から左旋し南～南西流の湾内に進入する流れと、佐賀関沖合から分かれそのまま西進して湾内に流入する流れがあって、これらが湾中央部付近で合流し湾奥部に向かう。また、下げ潮流は湾内では東流し湾外の東側海域では南東～南流して速吸瀬戸に向かう流れになると報告されている。しかしながら、ブイの追跡、表層漂流ハガキの漂着結果では、夏、冬とも報告された潮流とは異なった流動パターンを示した。

冬季は水温・塩分の値が表面から底層までほぼ等しいので、表面の水温・塩分の分布から、水温前線の水平分布を把握することができる。Fig. 11 に1983年1月28日の上げ潮時、下げ潮時における表面の水温・塩分分布を示した。水温前線は上げ潮時には Stn. 5, 8, 17, 22 付近に形成されているが、下げ潮時には、上げ潮時の位置より 1~2 km 沖側へ移動しており、また、佐賀関付近 (Stn. 22) で東西方向に変形し、約 5 km 沖側へ移動している。

Photo. 1 は 1975年3月11日10時42分から12時01分の間に、高度 12,500 feet より撮影された別府湾の熱映像である。画面の黒い部分が低温部、白い部分が高温部を示す。大分水試の3月27日の定線観測によれば湾外水の水温は 12.7°C、湾内水のそれは 10.6°C であり、Photo. 1 に見られる湾口部の水温前線は約 2°C の水温の不連続線と推定される。このときの潮時は速吸瀬戸の南流への転流後 2.3 時間から南流最強前 0.7 時間の下げ潮末期にあたり、Fig. 11-b の潮時と対応する。Fig. 11-b の水温 13°~13.5°C、塩分 33.8‰ の等量線は湾口部の水温前線の形状を示すと考えられる。この水温前線の形状と Photo. 1 のそれとはほぼ同じように見える。一方、湾内に放流した漂流ハガキの漂着状況から、湾外へ向かうハガキの多くは夏、冬の観測例を通じて佐賀関付近に集中的に漂着している。また、ブイの流跡 (Fig. 6-b) においてもブイが湾外へ流出したケースでは、ブイは佐賀関と高島との間を通過して流出している。Photo. 2 は Photo. 1 の一部、別府湾佐賀関付近の熱映像を拡大して示したものである。撮影時刻 (11時37分) は速吸瀬戸の南流最強時の約 1 時間前にあたり、湾口部に形成

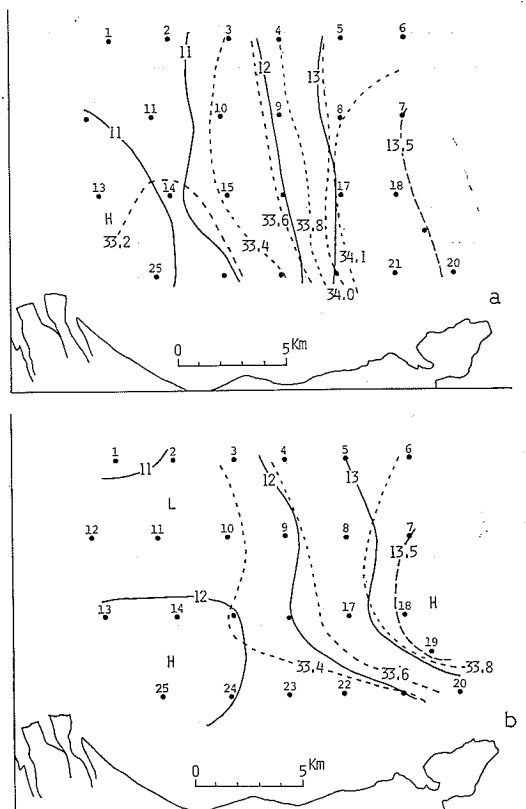


Fig. 11. Horizontal distributions of surface temperature °C (solid line) and salinity ‰ (dotted line) in Beppu Bay on 28th January 1983.  
a): Flood tide period (07:30-11:15)  
b): Ebb tide period (12:30-16:00)  
Numerals are station numbers.

されていた水温前線が、下げ潮流によって変形し、低温な湾内水が佐賀関と高島との間を通過して流出していることが分かる。Fig. 6-b に示したブイ 4' の佐賀関付近での流跡は、Photo. 2 の低温水の流出の様相と類似している。

湾口部に形成される水温前線は Fig. 11-a にみられるように、湾口部ではほぼ南北に形成され、その前線の南縁は南岸 (佐賀関付近) に接近しているが、その北縁は北岸 (春石鼻付近) とはかなり離れた位置にある。上げ潮時に湾外水は水温前線の北側から流入し、湾口の中央部から南部にかけては、この水温前線を湾内へ移動させるだけであろう。

下げ潮時には湾内水は湾口部に形成される水温前線が潮時によって変形したとき、佐賀関と高島との間を通過

して湾外へ流出する場合が多いと考えられる。

ブイ追跡中の DTR の水温変化をみると、投入時の水塊の水温を示し、ブイが転流時水温前線付近にあるとき水温が一次的に変化する。しかし、25時間程度の時間では、ブイが他の水塊へ流入することはなく、同一水塊中を漂流していることが考えられる。

水温前線より内側の水域には、夏冬を通じて地形性の潮汐残差流による反時計まわりの流れが存在し、この流れと風によって生ずる流れが合成されて実際の恒流を生ずる。夏季には卓越風が弱いので、湾内の反時計まわりの流れは大きく変化しないが、冬季には卓越する北西風によって、反時計まわりの環流が強くなる。湾内に投入したブイの流跡をみると、夏季にはブイはループを画きながら湾口部に収束したが (Fig. 6-a, b)、冬季には北西風の影響を受け、ブイは反時計まわりで南岸付近へ流れ、その後南岸を東へ向かう流れ (Fig. 3-b) を示した。このことは、冬季には北西風によって、湾内の反時計まわりの環流が強くなっていることを示唆している。また、それに伴って湾内の物質輸送の様相が変化すると考えられる。

## 5. おわりに

湾スケールでの物質輸送には、吹送流、潮汐残差流、密度流が合成された恒流が重要な役割を果たしているといわれているが、別府湾の場合、すでに述べたように地形性の潮汐残差流は全般的には弱い。しかしながら、本研究の結果湾内の25時間平均流の変動要因として風の効果が大きい。別府湾の湾内における物質の輸送は、主に非定常的な風の変動に大きく支配されると考えられる。

一方、別府湾湾口部には水温前線が形成されている。この水温前線を境に、湾外水は主として南北方向への往復流を示しながら、豊後水道へ流出し、湾内水は時計まわ

りのループを画きながら湾口部に向かう流れ (Fig. 6-a) か、南岸沿いに湾外へ向かう流れを示し、両水塊の流れの様相は異なることが分かった。

今後さらに、このような水温前線の存在と卵稚仔等の生物分布や漁場の形成との関連について検討を進めていく必要がある。

最後にブイ追跡、ハガキ等の投入にあたり協力していただいた大分県水産試験場所属黒潮丸乗組員、試験場職員の方々に心より感謝の意を表する。

## 文 献

- 第七管区海上保安本部 (1977) 瀬戸内海別府湾及び付近の流況, ガリ版
- FUJIWARA, T. (1985) An application of statistical system identification method to the analysis of wind-induced current and wind set-up. *Coastal Eng. Japan*, **28**, 119-123.
- 藤原建紀 (1985) 瀬戸内海における物質の輸送と収支. 学位論文 (東京大学), 125 p.
- 藤原建紀・肥後竹彦 (1986a) 瀬戸内海の通過流と物質輸送に対する風の効果. *沿岸海洋研究ノート*, **23**, 109-119.
- 藤原建紀・高杉由夫, 肥後竹彦 (1986b) 吹送流の統計的システム解析. *産業公害*, **22**, 7, 33-37.
- 蓮沼啓一 (1979) 東京湾における流動の特徴. *沿岸海洋研究ノート*, **16**, 67-75.
- 大谷清隆 (1986) 短時日吹く風によって生ずる沿岸湧昇. *沿岸海洋研究ノート*, **23**, 155-165.
- 俵 悟・中田英昭・平野敏行 (1987) 西部瀬戸内海の海水交換, I. ブイ追跡結果からみた速吸瀬戸周辺海域の海水流動. *水産海洋研究会報*, **51**, 147-156.
- YANAGI, T. (1980) A Coastal Front in the Sea of Iyo. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **35**, 253-260.
- 吉岡 洋 (1971) 冬期紀伊水道に発生する Oceanic front について (1). *海と空*, **46**(2), 31-44.

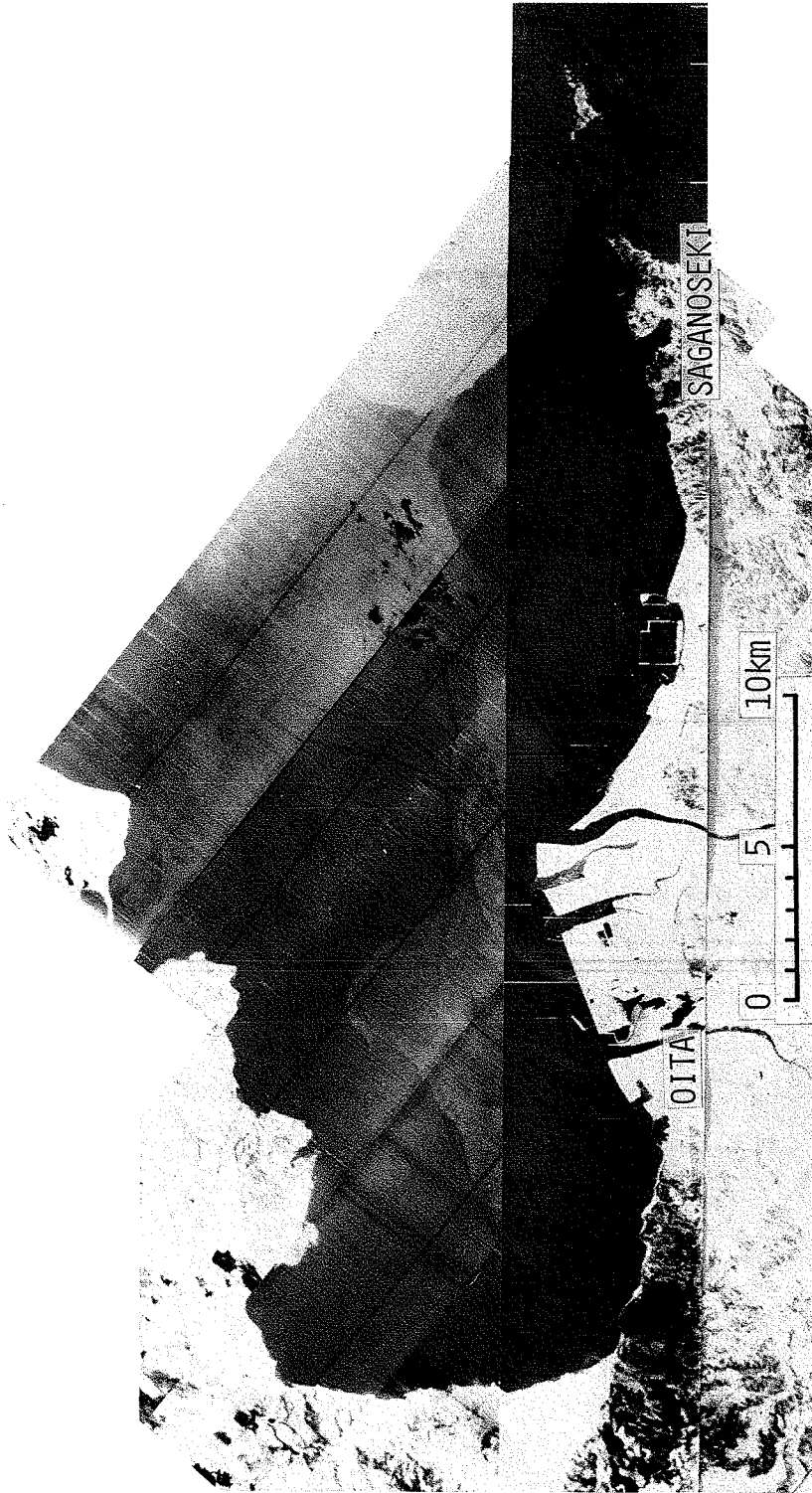


Photo. 1. The thermal infrared image of Beppu Bay measured by airplane in 12,500 feet height from 10.7 to 12.0 JST March 11, 1979. Darker areas indicate colder waters.

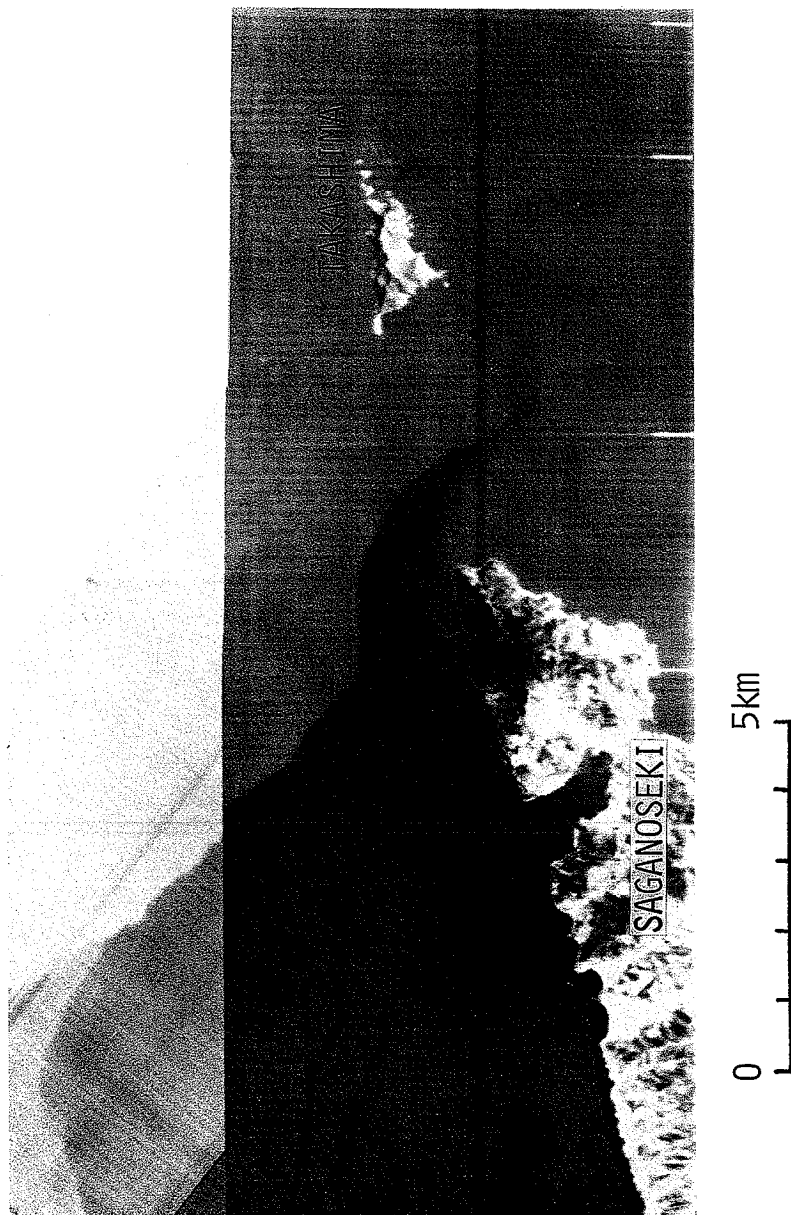


Photo. 2. The thermal infrared image of mouth of Beppu Bay measured by airplane in 12,500 feet height 11.6 JST March 11, 1979 (A part of Photo. 1). Darker areas indicate colder waters.

別府湾の海水流動と海水交換

App. Table 1. Results of multiple regression analysis.

Summer

|                     |   | a <sub>0</sub> | a <sub>1</sub> | a <sub>2</sub> | MR    | F        | D | F  |
|---------------------|---|----------------|----------------|----------------|-------|----------|---|----|
| Stn. 1              | U | 1.50           | 0.946          | -0.235         | 0.449 | 3.416*   | 2 | 27 |
|                     | V | -0.05          | -2.650         | -0.283         | 0.721 | 14.582** | 2 | 27 |
| Stn. 1 <sup>+</sup> | U | 0.06           | -0.728         | -0.286         | 0.204 | 0.583    | 2 | 27 |
|                     | V | 1.42           | 1.137          | -0.843         | 0.690 | 12.255** | 2 | 27 |
| Stn. 2              | U | 0.45           | 1.749          | 1.462          | 0.613 | 7.833**  | 2 | 26 |
|                     | V | -4.44          | -1.232         | 0.328          | 0.294 | 1.228    | 2 | 26 |
| Stn. 3              | U | 5.80           | 3.376          | -1.529         | 0.725 | 9.967**  | 2 | 18 |
|                     | V | -2.53          | -3.750         | -0.136         | 0.671 | 7.381**  | 2 | 18 |
| Stn. 4              | U | -0.41          | 2.336          | 2.228          | 0.594 | 6.823*   | 2 | 25 |
|                     | V | -3.58          | -1.322         | 1.027          | 0.427 | 2.785    | 2 | 25 |
| Stn. 5              | U | -1.45          | 0.197          | 1.052          | 0.751 | 17.427** | 2 | 27 |
|                     | V | -11.43         | 0.422          | 1.324          | 0.493 | 4.335*   | 2 | 27 |
| Stn. 5 <sup>+</sup> | U | -4.69          | 0.550          | -0.415         | 0.222 | 0.700    | 2 | 27 |
|                     | V | -5.77          | 1.368          | 0.588          | 0.357 | 1.971    | 2 | 27 |
| Stn. 6              | U | 18.13          | -0.084         | 0.242          | 0.098 | 0.122    | 2 | 25 |
|                     | V | -2.49          | -2.175         | 0.618          | 0.402 | 2.406    | 2 | 25 |
| Stn. 7              | U | -4.30          | 1.342          | 1.898          | 0.660 | 9.669**  | 2 | 25 |
|                     | V | -1.08          | -1.445         | 1.047          | 0.603 | 7.126**  | 2 | 25 |
| Stn. 8              | U | 5.96           | -2.507         | 0.387          | 0.525 | 5.136*   | 2 | 27 |
|                     | V | -1.20          | -0.614         | 0.848          | 0.315 | 1.491    | 2 | 27 |

Winter

|                     |   |       |        |        |       |          |   |    |
|---------------------|---|-------|--------|--------|-------|----------|---|----|
| Stn. 1              | U | -0.46 | 0.468  | 0.972  | 0.403 | 2.419    | 2 | 25 |
|                     | V | 0.02  | -2.488 | -0.236 | 0.765 | 17.667** | 2 | 25 |
| Stn. 1 <sup>+</sup> | U | -0.01 | -1.297 | -0.285 | 0.513 | 4.454*   | 2 | 25 |
|                     | V | 0.65  | -2.073 | -1.153 | 0.595 | 6.866*   | 2 | 25 |
| Stn. 2              | U | 4.24  | -0.278 | 1.501  | 0.850 | 29.997** | 2 | 23 |
|                     | V | -2.26 | -2.027 | -0.609 | 0.565 | 5.404*   | 2 | 23 |
| Stn. 3              | U | 6.20  | 2.217  | -1.757 | 0.569 | 3.596    | 2 | 15 |
|                     | V | 3.54  | 1.065  | 2.154  | 0.838 | 17.713** | 2 | 15 |
| Stn. 4              | U | -2.05 | 0.137  | 0.732  | 0.425 | 2.650    | 2 | 24 |
|                     | V | -0.12 | -0.657 | 1.046  | 0.822 | 24.914** | 2 | 24 |
| Stn. 5              | U | -2.21 | -0.187 | 0.455  | 0.429 | 2.709    | 2 | 24 |
|                     | V | 4.05  | -1.839 | 1.501  | 0.835 | 27.658** | 2 | 24 |
| Stn. 5 <sup>+</sup> | U | -1.11 | -1.916 | -0.399 | 0.787 | 15.487** | 2 | 19 |
|                     | V | 4.44  | -1.443 | 0.565  | 0.635 | 6.432**  | 2 | 19 |
| Stn. 6              | U | 0.93  | 3.387  | -1.371 | 0.857 | 34.468** | 2 | 25 |
|                     | V | 3.36  | -2.779 | 1.954  | 0.767 | 17.917** | 2 | 25 |
| Stn. 7              | U | 1.34  | 0.226  | 0.993  | 0.633 | 7.013**  | 2 | 21 |
|                     | V | -1.19 | 0.358  | 1.423  | 0.769 | 15.164** | 2 | 21 |
| Stn. 8              | U | 6.58  | 4.310  | -0.715 | 0.666 | 4.379*   | 2 | 11 |
|                     | V | 0.43  | 3.352  | -0.390 | 0.534 | 2.198    | 2 | 11 |
| Stn. 8 <sup>+</sup> | U | 13.92 | 5.708  | -3.755 | 0.794 | 8.525*   | 2 | 10 |
|                     | V | -0.74 | 0.247  | 0.011  | 0.059 | 0.017    | 2 | 10 |

MR: Multiple regression coefficient

F: F value, DF: Degree of freedom

\*, \*\*: Significant at 5% and 1% level, respectively

<sup>+</sup>: Current at 15 m depth layer