

漂流ブイによる対馬暖流第一分枝のトラッキング†

石井春雄*, 道田 豊**

TRACKING OF THE FIRST BRANCH OF THE TSUSHIMA WARM CURRENT WITH SURFACE DRIFTER †

Haruo ISHII*, Yutaka MICHIDA**

Abstract

A surface drifter which was launched in the East China Sea on 9 March 1991, entered the Sea of Japan through the east channel of the Tsushima Strait on 21 June. The drifter consistently tracked the First Branch of the Tsushima Warm Current, drifting along the coast of Honshu Island for about 40 days until it entered the Tsugaru Strait on 2 August. Drifting speed of the drifter is 30cm/s (0.6knots) greater on the average than the statistical current speed in summer (June, July and August), while direction is almost agreeable. A statistical comparison of ocean current and wind at the weather observatories shows lower correlation between them, suggesting that wind does not strongly effect on the speed of the First Branch of the Tsushima Warm Current. Drifting speed increased along the coast of Akita prefecture and Aomori prefecture to the west of the Tsugaru Strait, as also shown in the mean current field. The acceleration of current speed might be explained by a confluence of eastward flow of the off-shore branch of the Tsushima Warm Current, to the coastal branch in the area bounded on the east by Honshu Island.

1. はじめに

日本海における最も顕著な海流として対馬暖流がある。対馬暖流を形成する海水は、対馬海峡(東水道と西水道)から流入し、概ね日本海を東ないし北の方向へ流れた後、津軽海峡から太平洋へ、あるいは宗谷海峡からオホーツク海へと流出する。対馬海峡通過後の、日本海の西部における対馬暖流の最も一般的な流路パターンとして、三本の流れとなる、いわゆる三分枝説が提唱されて来ている(例えば、川合, 1974; 川辺, 1987)。三分枝のうち、第一分枝は対馬東水道から本州陸岸に沿うように浅海域を流れ、沿岸分枝ともよばれる。川辺によれば、一方の対馬西水道から日本海に流入した海水は、隠岐諸島方面に東へ向かう流れ(第

二分枝)と、朝鮮半島の東側を北へ向かった後に東へ向かう流れ(第三分枝)に分かれる。この第二分枝は夏季にのみ顕著で、夏以外は沿岸域の第一分枝と沖合いの第三分枝の2つの分枝流が、日本海に対馬暖流として存在するとされる。しかし、日本海の中央部での対馬暖流の流路は、本州南岸の黒潮のように、東海・関東の南方での蛇行を除けば、ほぼ一定と言えるほど明確なものではなく、時間・空間的な変動性は大きい。また、浅海域を流れる第一分枝を、同時期に、かつ、全体を包えた船舶観測の事例を筆者らは知らない。

広範囲の流況を、長期間にわたって把握するうえで、船舶観測の短所を補うのが人工衛星追跡型の表層漂流ブイによる観測である。水路部は、科学技術庁のプロジェクトである黒潮開発利用調査

† Received 1996 February 23rd Accepted 1996 March 5th

* 水路部海洋調査課 Ocean Surveys Division, Hydrographic Department
** 水路部海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Hydrographic Department

研究に参加し、調査研究の一環として、1980年から漂流ブイを黒潮域に放流して流路の実態把握を行って来ている。そのうちの1個 (ID. No.12985) を、1991年3月9日に東シナ海の陸棚域に放流した。漂流ブイは、Fig. 1に模式図を示したように、風に直接押し流される効果を減少させ、ブイの漂流速度が表層15m程度の深さにおける流れの速度を表現するように構成されている (Michida and Yoritaka, 1995)。

ブイは、放流後約2カ月間、東シナ海の放流地点の周辺海域を漂流した。その後、北上して6月21日に対馬下島の南端近くの東水道を通過して日本海に入り、本州沿岸に沿って流れ続け、8月1・2日に津軽海峡を通過して、太平洋側に出た。約40日間、漂流ブイは対馬暖流第一分枝に乗って流れたと考えられるが、このような事例は我が国の漂流ブイ調査では初めてであった。本稿では、この漂流ブイの挙動について、ブイの流れた海域における統計的な流速場及び風の場合と比較しつつ記述する。

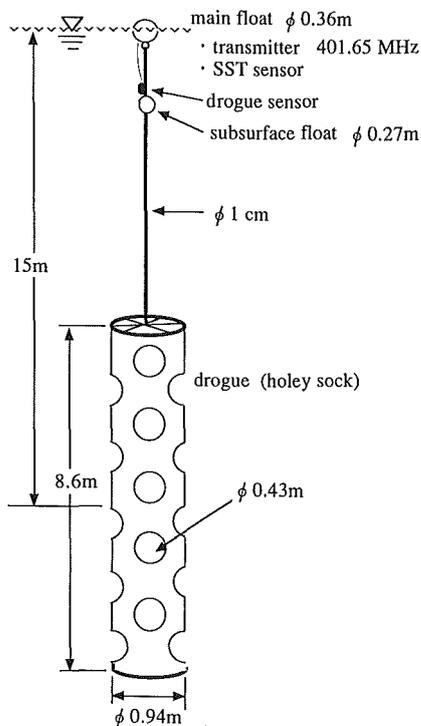


Fig. 1. Schematic view of the surface drifter which drifted in the Sea of Japan. (reproduced from Michida and Yoritaka, 1995.)

2. 方法

漂流ブイの位置決定とデータ伝送、収集はアルゴス (ARGOS) システムを利用してなされる。ブイの時刻と位置 (緯度, 経度) データから、漂流速度を算出する。漂流の速度を海洋表層の流速とみなすわけだが、この場合、位置データには数百メートルの誤差が含まれるため、漂流ブイの位置が決定される時刻の差が短いときは、不自然に大きな速度が算出されることがある。本稿で述べる漂流ブイの場合、1日に6~8回位置が決定され、時間差は10分~5時間程度とまちまちであるため、測定された位置データ (緯度, 経度) から、4時間ごとの正時 (0, 4, 8, 12, 16, 20時) の位置を内挿補間して用いた。内挿方法 (AKIMA法) は、JODC (日本海洋データセンター) が海洋観測データの管理にあたり、鉛直方向に離散的な海洋観測層の値から、所定層 (標準層) の深度の値を求める際に使用している方法である。ここでは、求めたい時刻の前後3個ずつ、計6個の位置データを用いて内挿した。

また、統計的な表面流速は、JODCの保管する海流データファイルを使用した。緯度, 経度30分メッシュ内の平均値が月別に与えられている。測定方法は、GEK (電磁海流計) または ADCP (音響式ドップラー流速プロファイラー) による。

流れと風との関連を見るため、日本海沿岸の気象官署における風のデータも調べた。資料は、気象庁発行の『日本気候表 その2 地点別月別平年値 (1951-1980)』を使用した。この表には、各気象官署で測定された月別の平均風速 (m/s) と最多風向が記載されている。最多風向は、頻度の多い第3位まで風向 (16方位) と出現頻度 (百分率) が示される。そこで、第4位以下の風向頻度は残り13方位についてすべて同じと仮定し、平均風速値を16方位の頻度に乗して、風速の南北・東西成分および平均風向を月別に求めた。本稿では、12地点の気象官署のデータを用いた。風速計は2種類 (風杯型風程式風速計と風車型自記風向風速計) が使用され、江差 (風杯型) と敦賀, 酒田 (風車

型) 以外は途中で変更されている。平均風速値は使用期間の長い風速計で測定したものを用了。統計期間は、風速については敦賀、酒田 (共に6年) 以外は14年であり、最多風向については敦賀 (16年)、酒田 (10年)、江差 (18年) 以外は20年である。

3. 結果

(1) 日本海での漂流ブイの動き

日本海を流れた漂流ブイの放流後の軌跡を Fig. 2 に示す。ブイは1991年3月9日、東シナ海の

陸棚域上の29°N, 126°Eの地点(★印)で投入された。図には、4月から9月までの各月初日の位置(●印)と200m等深線を併せて載せた。放流の目的のひとつには、潮汐流が顕著と思われる当該域の流れの実態を明らかにすることがあった。事実、5月中旬まで、ブイの漂流速度の時間変化には潮汐周期が明瞭に見られ、5月下旬からは緩やかな速度で北北東に流れた (Michida *et al.*, 1994)。彼らは、この季節にブイが北北東に流れた後、対馬暖流に乗ったことが、GEK 観測データの統計解析の結果から見て妥当であることを示した。

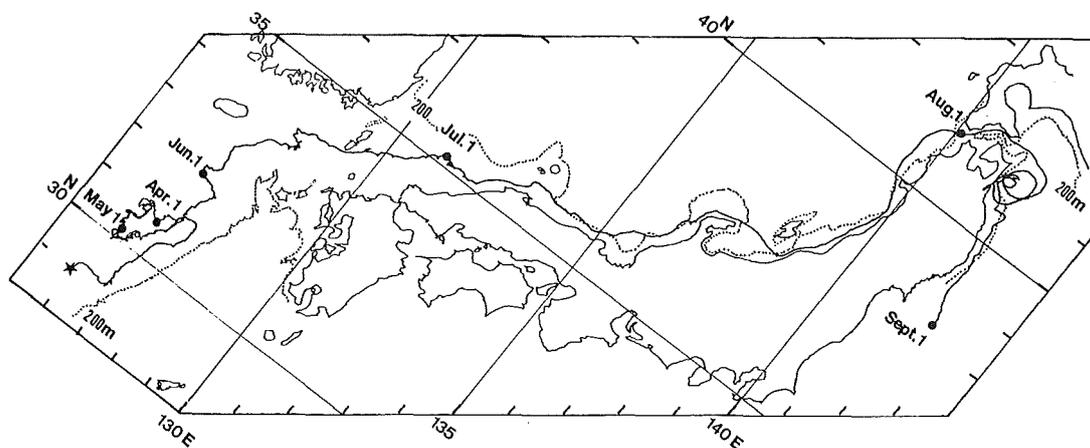


Fig. 2. Trajectory of the surface drifter for the period from 9 March to 1 September, 1991. The star symbol marks the deployment location, and solid circles mark the location on the first day of every month. Dotted line represents contour of 200m depth.

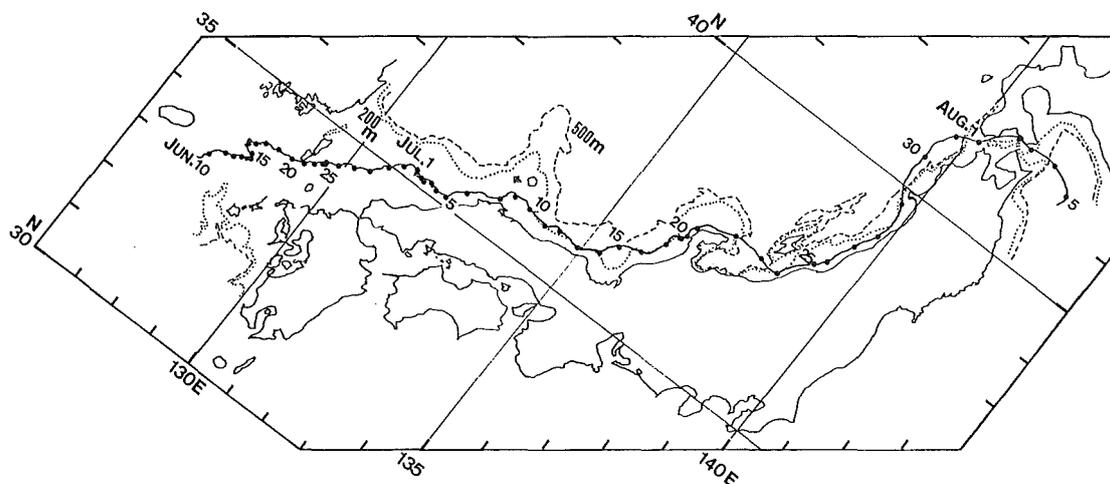


Fig. 3. Trajectory of the surface drifter for the period from 6 June to 5 August, 1991. Solid circles mark the location of the first fix of every day. Dotted and dashed line represent depth contour of 200m and 500m, respectively.

濟州島のほぼ東方（6月10日）から津軽海峡を通過して下北半島の東方（8月5日）に至るまでの漂流ブイの軌跡を描いたのが Fig. 3 である。各日の最初の位置（●印）と、200mと500mの等深線をそれぞれ点線と破線で示す。日本海の中で、漂流ブイが500m以深の海域を流れたのは、能登半島東方から佐渡島南南西にかけてと、秋田沖から津軽海峡西口にかけての2回だけであり、ほとんどの期間は、200mよりも浅い所を漂流した。対馬東水道から津軽海峡まで、対馬暖流の第一分枝（沿岸分枝）に乗ったと考えてよい。

この間のブイの漂流速度を表したのが Fig. 4

であり、速度の東西成分（U）、南北成分（V）および速さ（SPEED）の時間変化を示す。左図は、測定値（位置、時刻）から直接計算した速度であり、右図は前節で説明したように、4時間ごとに内挿した緯度、経度から計算した速度である。左図にはエラーと考えられるスパイク状の値が、右図よりも多く見られる。以後の解析では、右図に示したブイの速度を使用する。なお、次の項では、ブイの速度と日本海の流れの統計的流速とを比較するが、Fig. 4 の右図中に記した英語小文字 a ~ p は Fig. 6 に示す比較した海域メッシュである。

6月中旬（対馬海峡西方）から7月上旬（島根

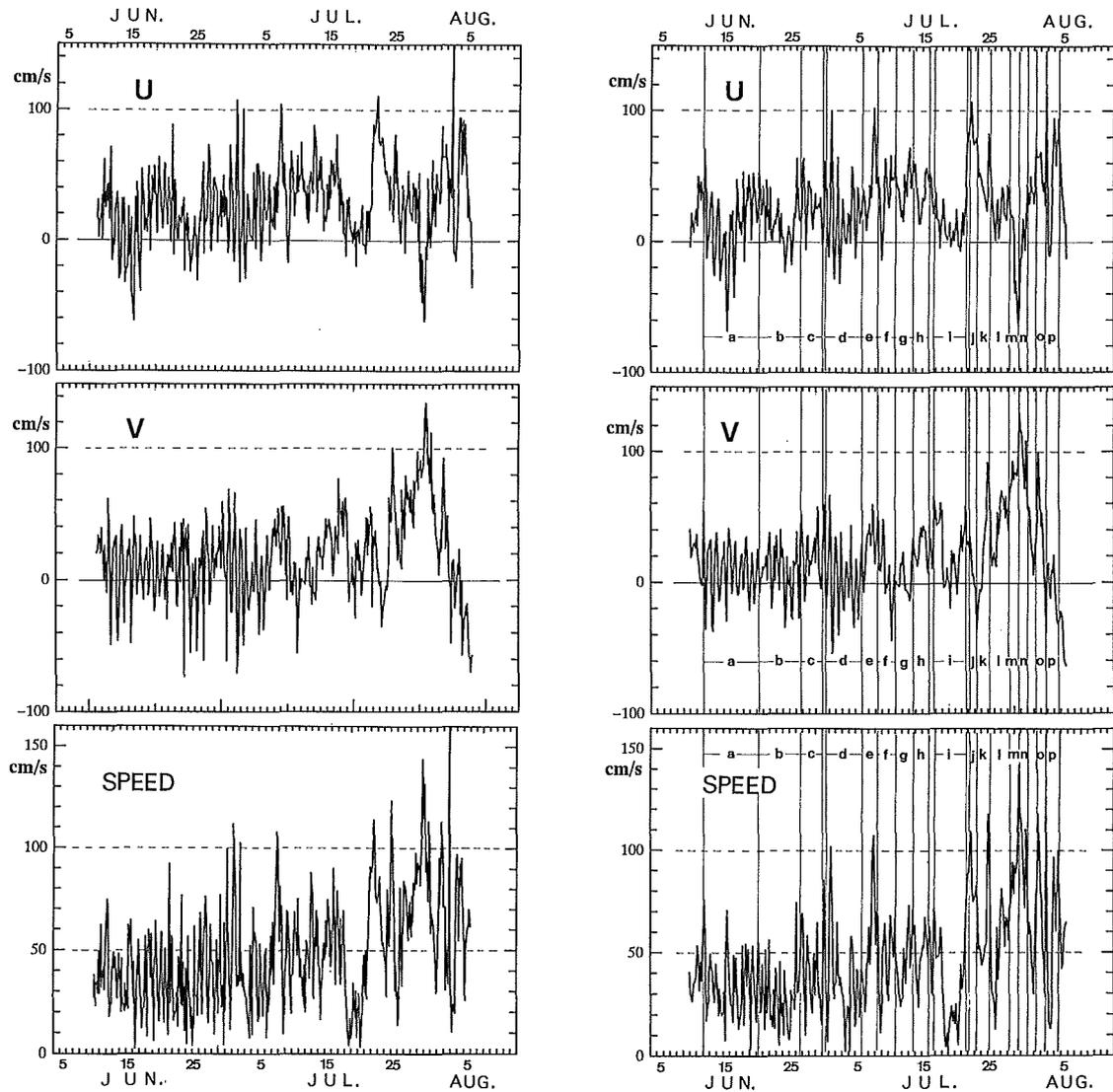


Fig. 4. Velocity components (east-west U, north-south V and speed) of the surface drifter shown in Fig. 3. The left panel is for the components calculated from observed locations, the right one is from the interpolated locations on every four hours.

県沖)にかけて、ブイの漂流速度には1日程度の短周期の変化が顕著である。潮汐周期と慣性周期(約20時間)の成分が含まれていると考えられる。Fig. 3では粗すぎて明瞭には見られないが、ブイの詳細な軌跡を見ると、この期間に小さなループ等が多く観測されている。対馬海峡付近から島根県沖にかけての平均的速さは0.6~0.8ノット(30~40cm/s)であり、1986年から1993年の期間の夏季(6~8月)に日本海沿岸域で流速計を定置した観測結果(吉ら, 1995)と同傾向にある。

7月中旬は、鳥取県沖から能登半島西方へと、平均1ノット程度(50cm/s)で流れた。能登半島西側で4日間停滞したが、その後は更に速さを増しつつ、陸岸に沿って流れて津軽海峡に至る。秋田県~青森県沖では、漂流速度は1~2ノットと加速される。

(2) 統計的流速場との比較

この項では、漂流ブイの漂流速度と、船舶観測で得られた過去データを統計処理した表面流速とを比較する。まず、緯度・経度1度のメッシュ内の平均流速を、期間1年と夏季(6, 7, 8月)について求め、Fig. 5にベクトル表示した。夏季の方が、1年平均よりも速さが大きい傾向が見られるものの、流れのパターンは同様と言える。本州陸岸に沿った流れも、速さは0.5ノット(25cm/s)程度であるが、明瞭に描かれている。

漂流ブイが日本海を流れたのが6月下旬から7月であるので、ブイの軌跡を包含する緯度・経度1度メッシュの海域を適当に取り(Fig. 6)、それぞれのメッシュ内のブイの速度と、夏季の平均流速とを比較した。ただし、メッシュa~pのうち、pだけは緯度幅が30分である。漂流ブイの平均速度は、ブイが或るメッシュに入った直後と、出る直前の位置と時刻から計算した。結果を、東西成

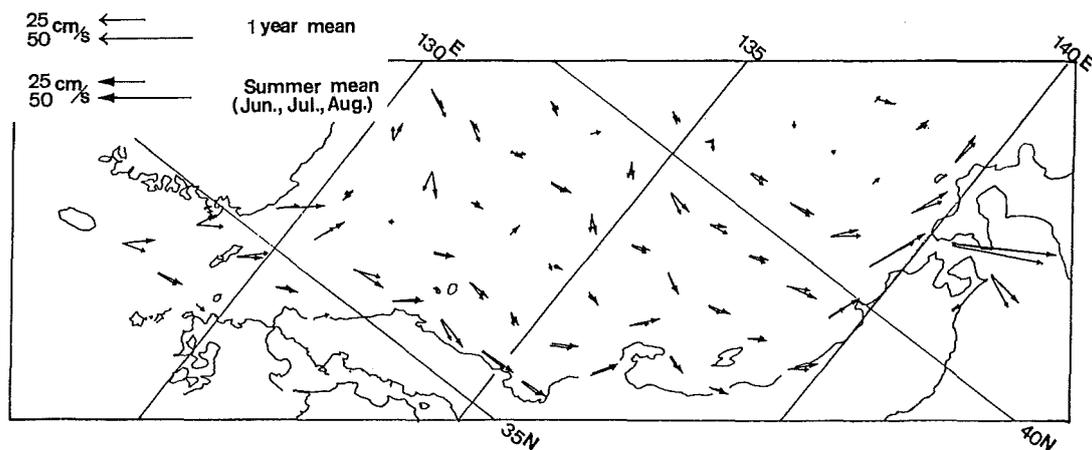


Fig. 5. Statistical current velocity averaged in 1° (latitude) \times 1° (longitude) bins, showing annual and summer (June, July and August) mean.

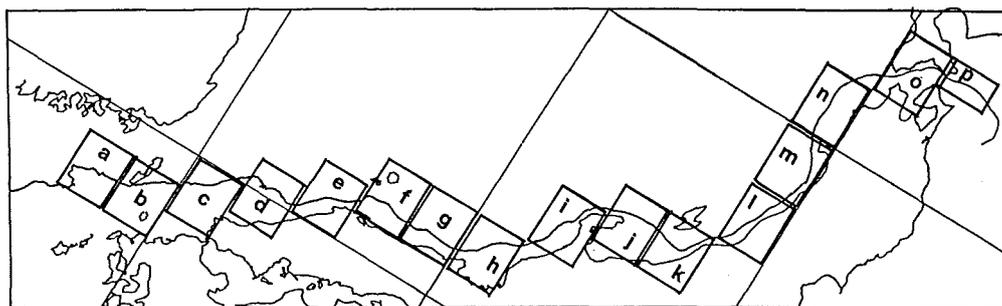


Fig. 6. Grids a~p in which drifting velocity of the drifter is compared with statistical current velocity for summer season.

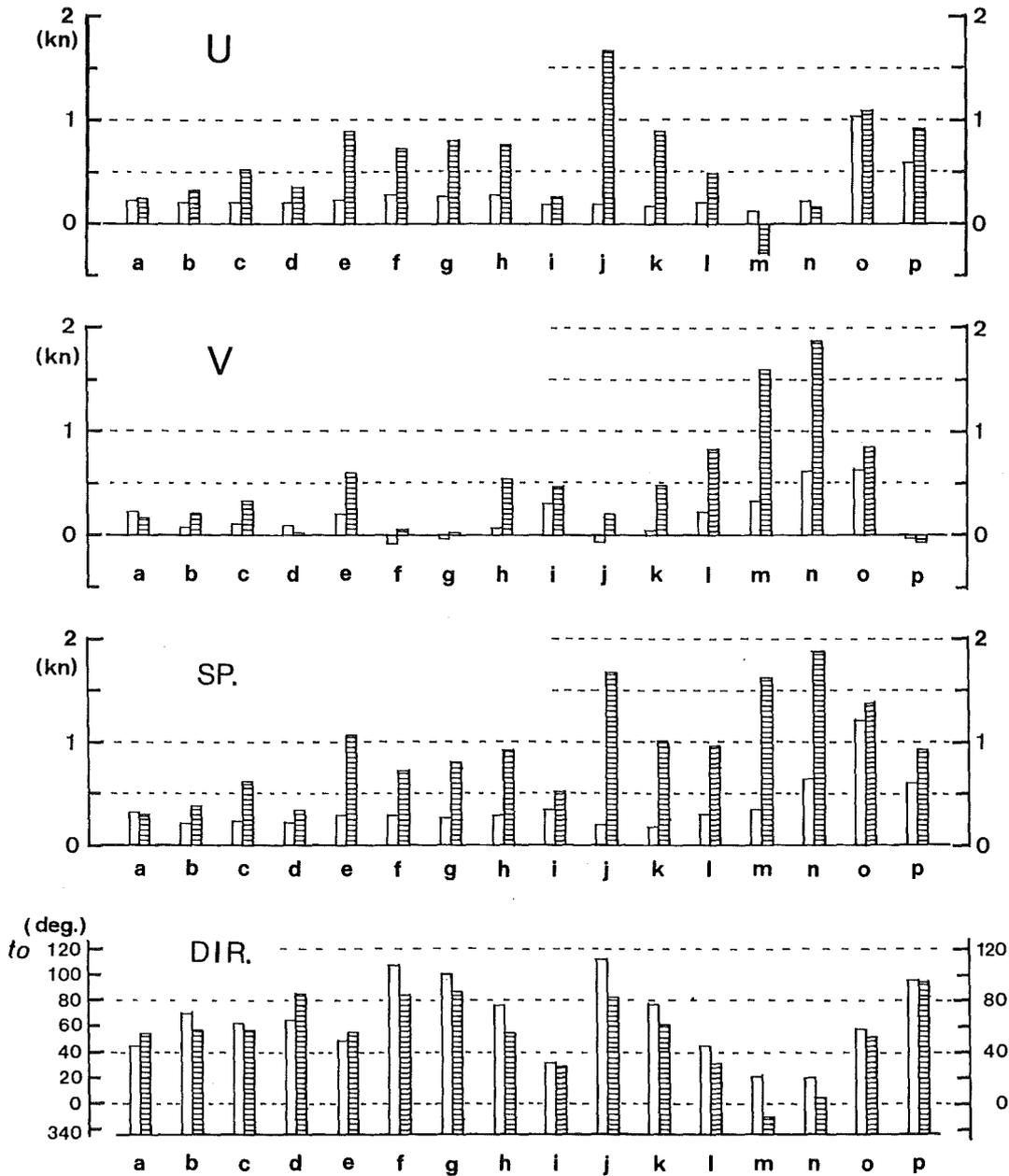


Fig. 7. Drifting velocity (shaded bars) and statistical current velocity (open bars) in the grids a~p in Fig. 6, for east-west component (U), north-south component (V), speed (SP.) and direction (DIR.).

分 (U), 南北成分 (V), 速さ (SP.) および流向 (DIR.) について, Fig. 7 に示す.

東西, 南北成分および速さともに, プイの速度の方が統計流速値よりも大きく, 特に能登半島通過後は (メッシュ j~n) かなり大きい. 速さの差については, 全12メッシュの平均が0.6ノット (30cm/s) であり, メッシュ j, k, l, m, n の平均は1.1ノット (58cm/s) に達する. 一方, 流向については, 両者は良く一致していると言える. 流速値は長期間にわたる観測値の平均であることか

ら, 流速の方が漂流速度よりも小さいこと自体は不自然ではないが, 速さの差が著しく大きい. 漂流プイが何故, 速く流れたかの解明は課題として残る.

漂流プイの動きで注目されるのは, 秋田県沖から津軽海峡西側の青森県沖にかけての漂流速度の増加である. 流速の増加は平均場 (Fig. 5) にも明らかに描かれている. 流れの加速の理由を考えると, Fig. 5 の38~42°N に見られる, 本州陸岸に向けた東向流が注目される. これらの対馬暖流の

沖合分枝と呼ばれる流れが、第一分枝に合流しているかに思える。

そこで、Fig. 8 の左上図に示したような簡単なモデルを考えてみる。緯度・経度30'メッシュ内の平均流速の東西、南北成分をそれぞれ U 、 V とし、東側が本州陸岸となっているメッシュの隣合う V の差を $(V_2 - V_1)$ とする。これと、西側のメッシュの東西成分 U_1 と U_2 の平均値との比較を、Fig. 8 の右上図のメッシュについて行った。結果は、Fig. 8 の下図である。両者の間には弱い正の

相関がある。秋田県沖から青森県沖にかけての流速増加の可能な原因として、東向きに合流する当該海域での合流が考えられるが、水温（密度）構造の空間的変化も併せて検討しなければならない。

(3) 統計的な流れと風の関連

漂流ブイの構造は、前述したとおり、風圧で直接流される効果があるべく小さくなるようにしてあるため、今回のブイの漂流速度が大きい原因を風速に求める根拠は小さい。しかし、風によって

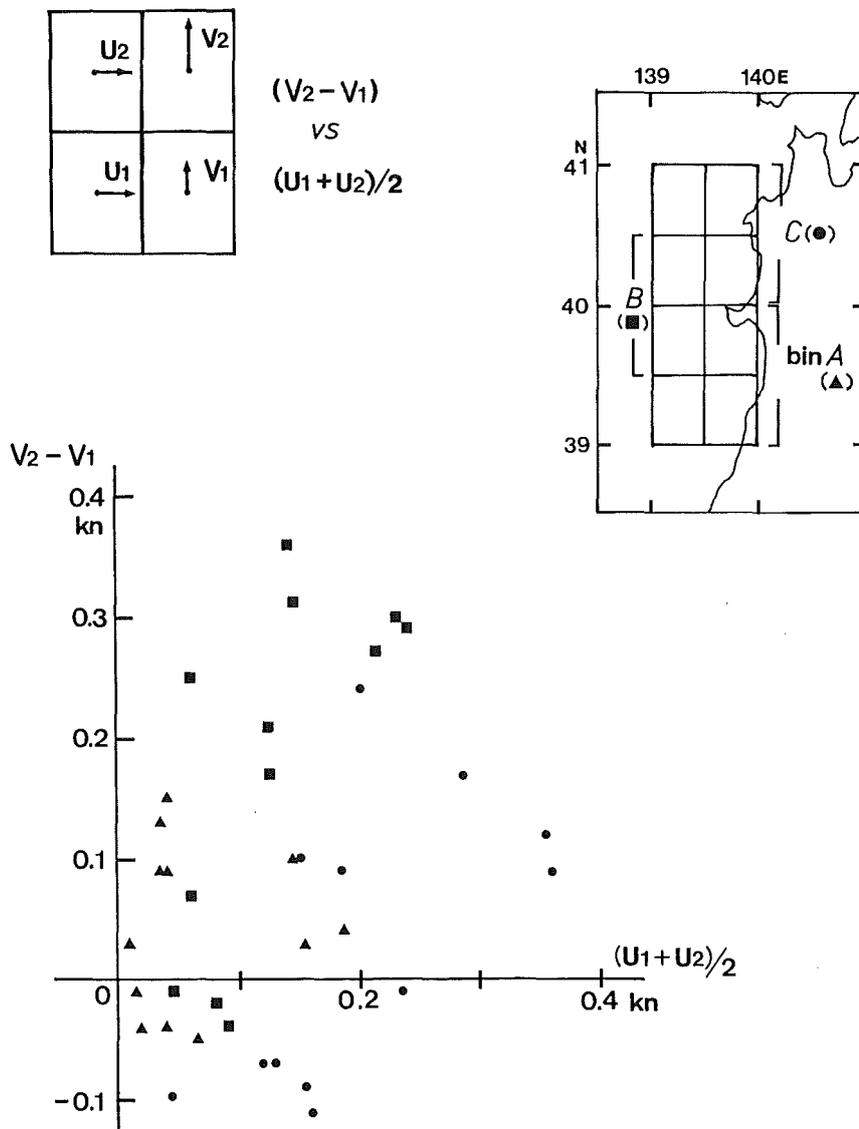


Fig. 8. (Upper left) Comparison of acceleration of north-south current component $(V_2 - V_1)$ with east-west components $(U_1 + U_2) / 2$ in the right west bins. (Lower) Correlation diagram of $(V_2 - V_1)$ and $(U_1 + U_2) / 2$ for the bins shown in the upper right panel.

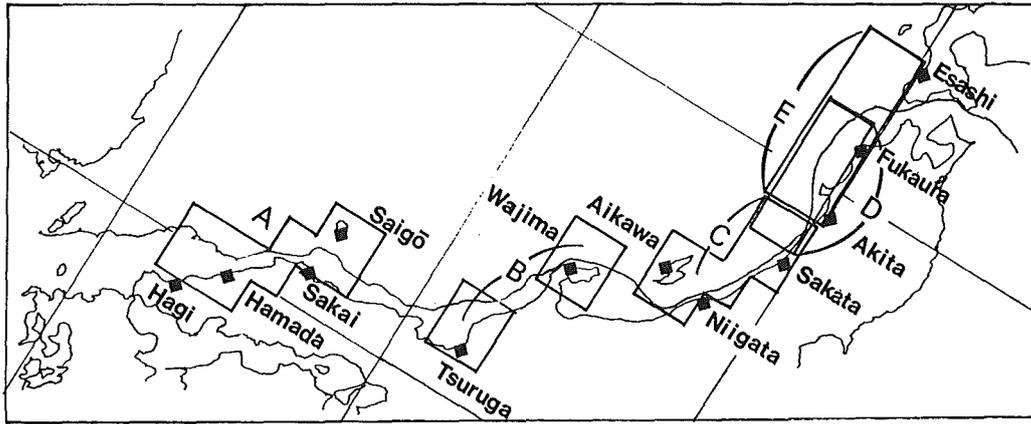


Fig. 9. Area blocks A~E in which statistical current velocity and mean wind velocity at the weather observatories (◆) are compared.

引き起こされる流れは存在するであろうし、日本海沿岸付近の風と海流の関連を調べることは必要であろう。この節では、両者の関連の有無を見るために、前節で述べた統計的平均流速と、気象官署で測定された風速・風向との比較を試みる。

まず、Fig. 9に示すように、日本海沿岸域にA~Eの5つのブロックを切った。これらのブロック内の平均流速と、気象官署(◆印で表示)での風速・風向とを比較した。風速と風向については第2節で説明した。流れと風の速度は、ともに月ごとに得られるが、流れのデータ数の特に少ない季節があり、極めて不自然な月変化が描かれることがあるため、両者に3カ月移動平均をほどこした。以下に使用するものは、すべて3カ月移動平均値である。

ブロックA~Eのそれぞれについて、流速と風速の各月変化をFig.10に表した。東西成分(U)、南北成分(V)、速さ(SPEED)および方向(DIR.)を示した。方向は流れ(吹き)去る向きである。流れ(●印)の場合、7~9月に流速が増加する傾向があり、特にブロックD、Eでの南北成分と速さについて顕著である。ブロックA、Bでは東西成分と速さが7~9月にピークとなる。夏季に流速が大きくなることは、Fig.5からも窺えるが、Fig.10では、流速の季節変化がより明らかである。

一方、風(□印)の場合も、E、Dに明らかような季節変化が見られる。しかし、東西、南北成分とも全体としては流れと風との相関は低い。

このことは、対馬暖流の第一分枝の流れに対して、風の及ぼす直接的効果は小さいことを示唆している。花輪(1984)は、対馬暖流第一分枝を沿岸境界流のひとつに挙げている。沿岸境界流は、陸岸境界を右に見て流れる海流であり、圧力傾度力とコリオリ力が釣り合っている状態にある。圧力傾度力は海水の密度分布から生じ、花輪は、陸岸境界域への低密度水の連続的な供給があれば到る所で存在可能としている。対馬暖流第一分枝が、このような密度差によって維持されているならば、上述の流れと風との相関の低さは不思議ではない。

しかし、Fig.10で、津軽海峡西側付近のブロックEにおいては、流向と風向の変化が同位相であるようにも思える。そこで、Fig.11の左上図に斜線部で示した津軽海峡西側海域の流速と、風速(江差と深浦の平均)の月変化を詳しく見てみた(Fig.11)。図で、特に11月から3月までは西寄りの風の強まりに応じて、流向も東へ向く傾向を示す。

津軽海峡西側の流速、風速と、津軽海峡東側の流速との相関を調べた(Fig.12)。海峡の西側海域Wにおける流速の南北成分V、東西成分U、江差と深浦の平均風速の北向成分 W_v 、東西成分 W_u の4量を用いた重回帰により、津軽海峡東側Eの速さSPRを推定した。すなわち、

$$SPR = aU + bV + cW_u + dW_v$$

として、12個の月平均値(単位は全てノット)を与え、SPRと東側海域Eにおける統計的な流れの

TRACKING OF THE FIRST BRANCH OF TSUSHIMA WARM CURRENT WITH SURFACE DRIFTER

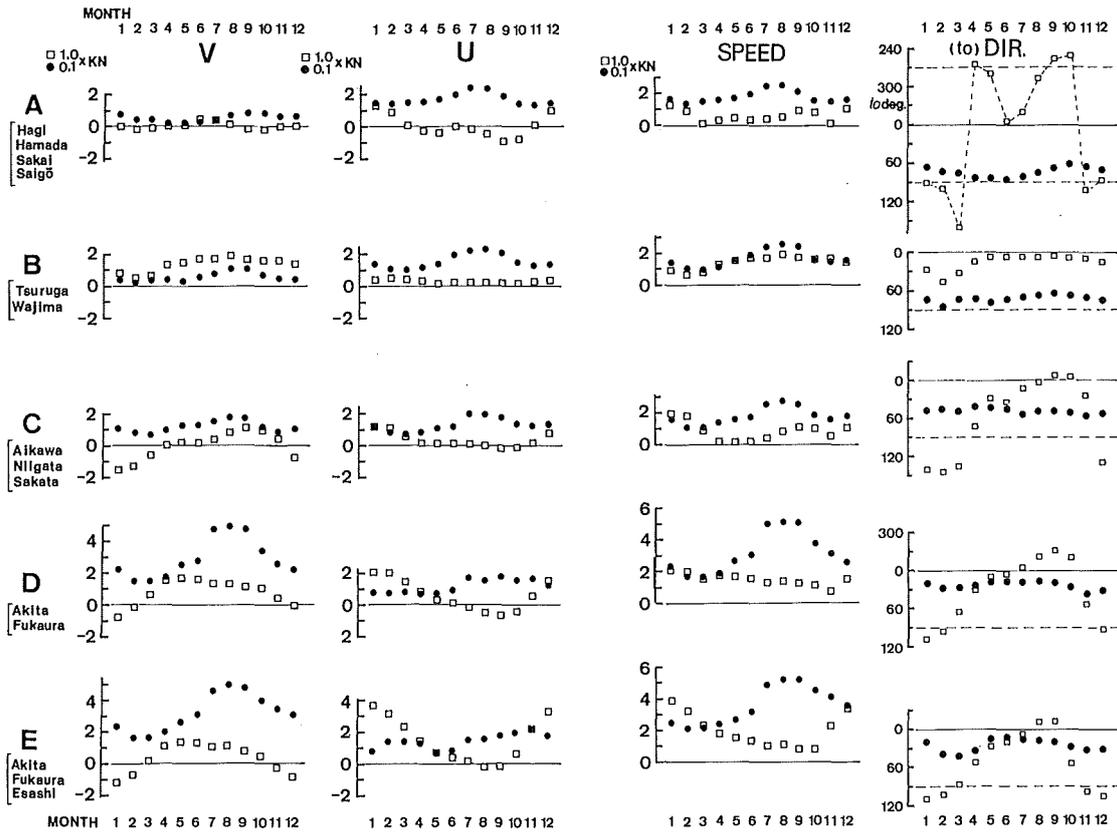


Fig.10. Monthly change of statistical current velocity (●) and mean wind velocity (□) in the blocks A~E in Fig. 9. East-west component (U), north-south component (V), speed and direction (DIR.) are shown, regarding the down-stream components as positive both for currents and winds.

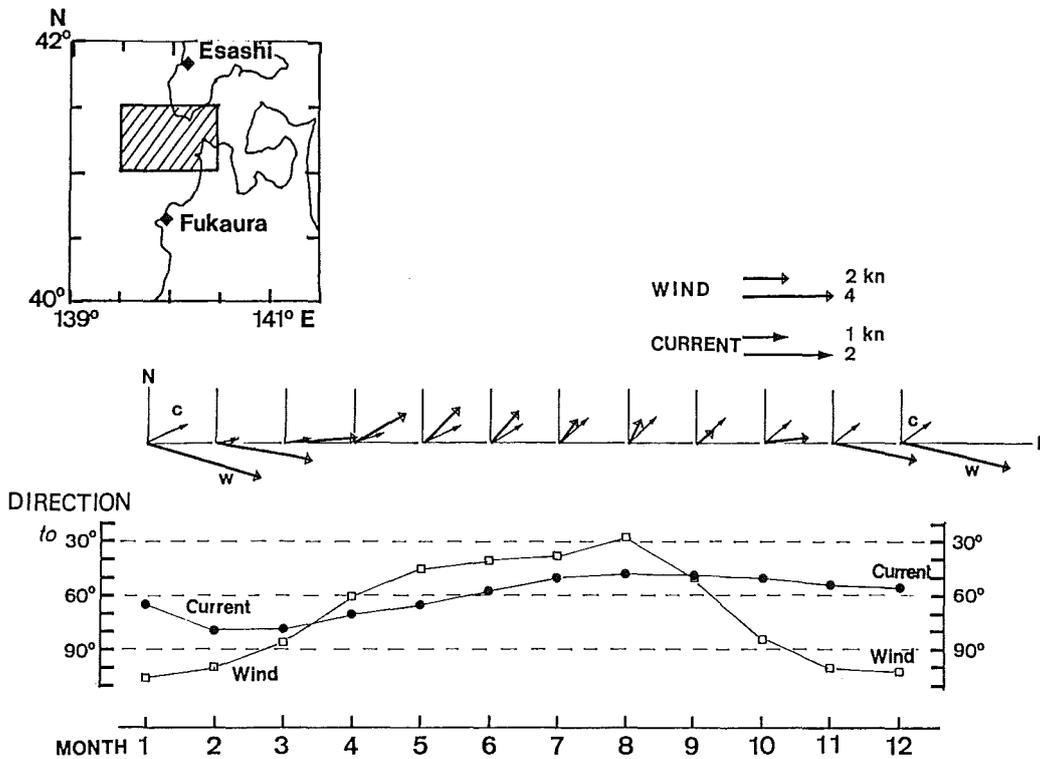


Fig.11. Monthly change of current velocity (●) in the hatched area of the upper panel, and mean wind velocity (□) at Esashi and Fukaura.

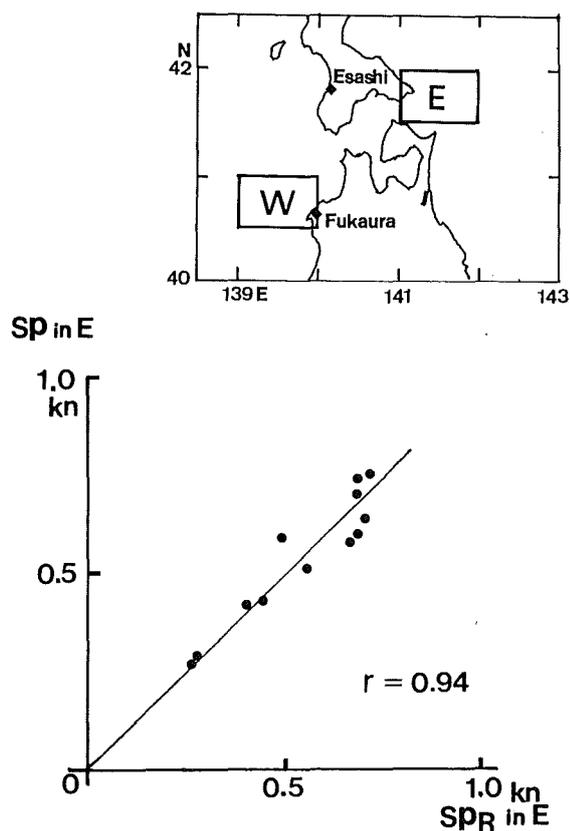


Fig.12. Correlation diagram of monthly current speed SP in the area E and SPR which is multi-regression from velocity components of current and wind in the area W. The area W and E are shown in the upper panel, and wind velocity is the mean at Esashi and Fukaura. Correlation coefficient is shown as 'r'.

速さ SP との差の 2 乗和が最小となる条件で各係数を求めた。結果は、

$$a = 0.02, b = 1.05, c = 0.03, d = 0.03$$

となった。SP と SPR の相関を Fig.12 の下図に示す。極めて良い相関を示す。各係数の大きさから、風の影響は小さく、津軽海峡東側の流れの速さは、ほとんど西側海域の流速の北向成分の大きさから推定可能と考えられる。

4. まとめ

1991年3月9日に九州西方の東シナ海に放流された漂流ブイは、6月21日に対馬東水道を経た後、8月2日に津軽海峡を抜ける間、本州陸岸に沿う対馬暖流を追跡し、連続的な流れとしての第一分枝を見事に描いた。この間のブイの漂流速度と夏

季(6, 7, 8月)の統計的な海流の速度を比較すると、漂流速度の方が大きい。その差は、平均で約0.6ノット(30cm/s)であり、特に秋田県から青森県の沖合いでは1ノット以上にもなる。しかし、流向は良く一致する。漂流速度が大きな理由については、今後、1991年の沿岸域の風や海洋の密度分布構造における特異性の有無を調べる必要がある。統計的な流速場と、沿岸の気象官署で測定された、やはり統計的な風の場とを比較すると、両者の相関は低いことがわかる。このことは、対馬暖流第一分枝の強さの変動に対して、風の直接的な影響は小さいことを示唆する。漂流ブイの速さは、秋田県沖から津軽海峡西側の青森県沖にかけて増大するが、この加速現象は統計的流速場にも明らかである。加速の原因のひとつの可能性として、東側が陸岸となる当該海域に向かって来る西側からの流入、すなわち、対馬暖流の沖合分枝の合流が考えられる。しかし、水温構造等も併せて、詳しく検討する必要がある。

参考文献

- JODC (1983): Appendix to Oceanographic Data Management. 133pp.
- 川合英夫 (1974): 日本海における海流像の変遷。対馬暖流—海洋構造と漁業。第I章第1節 7-26, 日本水産学会編, 恒星社厚生閣。
- 川辺正樹 (1987): 対馬暖流。海洋大事典(和達清夫監修), 359-361, 東京堂出版。
- 気象庁(1982): 日本気候表 その2 地点別月別平年値 (1951-1980)。
- Michida Y., H. Ishii and K. Tanaka (1994): Current Field of Kuroshio Region Observed with ARGOS Surface Drifters. *Proceedings of China-Japan Joint Symposium of the Cooperative Research on the Kuroshio* (Qingdao, China, 27-29 Oct. 1992), 62-70.
- Michida Y. and H. Yoritaka (1995): Survivability of the Surface Drifters Deployed by Hydrographic Department of

Japan for the Period from 1988 to 1993. *J. Japan Soc. for Marine Surveys and Technology*, **7** (2), 21-28.

花輪公雄(1984)：沿岸境界流. 沿岸海洋研究ノート, **22**, 1, 67-82.

吉 宣好・佐藤 敏・万代康史・後藤礼介 (1995)：「日本沿岸の流れシリーズ3」山陰沿岸の流れ. 水路部技報, **13**, 74-82.