

黒潮表層水の収束発散に関する研究—II*

— 表層混合層の上部と下部における収束発散の実測 —

川合 英夫**・坂本 久雄

A STUDY ON CONVERGENCE AND DIVERGENCE
IN SURFACE LAYER OF THE KUROSHIO—II

DIRECT MEASUREMENT OF CONVERGENCE AND DIVERGENCE
AT THE TOP AND BOTTOM OF SURFACE MIXED LAYER

Hideo KAWAI** and Hisao SAKAMOTO

In a previous paper (KAWAI *et al.*, 1969), an interpretation that horizontal convergence or divergence at the top of surface mixed layer be mostly compensated by horizontal convergence or divergence at the bottom of the layer and that there be two systems of helical motion facing each other, forming a convergence zone centered at a distance of a few nautical miles inshore of the current maximum was given upon results of direct measurement of the convergence or divergence at the surface with four current drogues. On use of three kinds of current drogues, direct measurements of horizontal convergence and divergence at the top and bottom of surface mixed layer were made aboard two research vessels, the *Soyo Maru* and the *Shyn'yo Maru*, and an airplane in the seas off the Nichinan Coast, Kyushu and off Shikoku in August, 1968.

In Fig. 1 described are the three kinds of current drogue systems: the surface drogue system with a radar target at the top of an iron pipe and a big corner drogue, working also as a ballast, at the bottom at depths between two and three m, the subsurface drogue system only different from the former in suspending the same corner drogue from the bottom of the pipe by a rope at a depth of 30 m, near to the depth of the bottom of surface mixed layer and the colored air-photo rafts with a wooden cross beneath the sea surface. At the beginning of the measurement, the four surface drogues were launched at four apexes of a square with sides 1/4 or 1/8 nautical miles long. Successively, the four subsurface drogues were launched in the vicinity of each of the surface drogues. Before the arrival of the airplane on the survey spot, the four air-photo rafts were launched in the vicinity of each of the surface or subsurface drogues. The surface and subsurface drogues were recovered except for cases of dropping, but all of the air-photo rafts were expended.

Analyzing photographs of blips of the surface and subsurface drogues on the radar scope and

*昭和44年8月31日 受理 南西海区水産研究所業績 第11号。本研究の一部は日本海洋学会春季大会 (1969年4月) で発表された。

**日本海区水産研究所 Japan Sea Regional Fisheries Research Laboratory, Niigata-shi

color photographs of the air-photo rafts taken aboard the airplane at a height of 4500 feet, the area S of quadrilateral made by each kind of drogues was calculated on the basis of eq. (2) in the previous paper. The horizontal divergence Q was calculated from time change in S on the basis of eq. (1) on page 24.

Before, during and after the drogue measurement, BT lowering and GEK fix were made at the locations shown in Fig. 2 to obtain current and temperature fields forming the background to the convergence and divergence. Hydrographic conditions off the Nichinan Coast, Kyushu during August 19–20, 1968 and off Shikoku during August 23–24 are shown in Figs. 3 and 4. According to Table 1 showing location and velocity at the axis of the Kuroshio main and branch streams, the position of the axis of the branch stream off the Nichinan Coast fluctuated very much, but that of the main stream off Shikoku did not. Figs. 5 and 6 show temperature profiles and GEK currents off the Nichinan Coast and off Shikoku and the location of current drogues at about the time of launch and recovery.

The drogue measurements were made four times; measurements I and II off the Nichinan Coast and measurements III and IV off Shikoku. Results of analysis of these measurements are shown in Figs. 7–10. In measurement III in the vicinity of the axis of the Kuroshio main stream well-defined and stable, the air-photo rafts showed a marked convergence, the surface drogues a convergence weaker than the former, and the subsurface drogues a divergence or a faint convergence. Measurement IV showed a tendency similar to measurement III, but did not exhibit such a pronounced contrast in convergence and divergence between different kinds of drogues as observed in measurement III. This may be attributed to the difference in the launch position between measurements III and IV. The launch position in measurement III corresponded to the zone of strong convergence, observed in 1967, at the surface at a distance of a few nautical miles inshore of the current maximum, while the launch position in measurement IV was located in the vicinity of the current maximum. Trajectories of drogues in measurements III and IV (Y and Z in Fig. 2, *Lower*) showed a confluence in the same manner as observed in the measurements in 1967. The confluence is, however, not necessarily accompanied by the horizontal convergence. In measurements I and II, it was difficult to determine what kind of characteristic band the trajectories of drogues corresponded to because of indefiniteness and fluctuation of the axis of the Kuroshio branch stream.

Correlations between distributions of surface phytoplankton (Figs. 11 and 12) and horizontal convergence and divergence are indefinite in general, but distribution of *Cyanophyceae* off Shikoku (Fig. 12) may be explained as follows. The habitat optimum for *Cyanophyceae* may be surface water of the warm core in the Kuroshio. The surface water has a weak component of velocity toward the convergence zone centered at a few nautical miles inshore of the current maximum, and it sinks in the vicinity of the zone. *Cyanophyceae* does not sink and drifts downstream with the maximum concentration on the side of warm water of the zone.

The results of the drogue measurement in 1968 does not contradict with the interpretations given upon the measurement in 1967, but some indefiniteness remained here needs further careful measurements on the basis of a more elaborated plan.

With the difference in convergence and divergence between depths of surface mixed layer, the fact that fish larvae, hatched out from eggs floating at the surface, sink into a subsurface depth seems to result in an effective fertilization in the convergence zone at the sea surface and an avoidance of starvation by keeping its density of population sparse at a subsurface depth.

1. はじめに

第I報においては、1967年における海面水の収束発散の実測結果に基づいて、黒潮主流を斜めに横切る2個のらせん状海水運動系の存在を推定したが、1968年には、その推定を実証するために、海面直下、海面下2~3m、海面下30mの各深度に、それぞれ抵抗板をもつ3種類の海流板おのおの4個を一斉に放流し、各種類の海流板群が形作る四辺形の面積の時間的変化より、表層混合層の上部と下部における収束発散の相異を実測した。本報においては、その実測方法を紹介するとともに、第I報で得た実測結果とも併せて、黒潮付近の表層混合層内の海水循環に関する考察結果について報告する。

本調査に当たっては、下記のように東海区および西海区水産研究所の海洋部の方々から絶大な御援助を受けた。調査船蒼鷹丸と俊鷹丸の船長はじめ乗組員および水産航空株式会社所属スカイライン型セスナ機の乗組員の方々の御労苦と併せて、調査に関係された各位のお力添えに対して、ここに厚くお礼申上げる。なお、採集したプランクトン量の計測には、南西海区水産研究所海洋部杉本仁弥部長および永田樹三室長の御指導の下に、高知大学農学部栽培漁業学科学学生土津井憲彰君が当たった。また製図には川島宣子嬢が当たった。ここに記してお礼を申しげる。

蒼鷹丸 (260トン)	船長	黒脇善雄
	調査員	川合英夫 南西海区水研海洋部
		藤本 実 東海区水研海洋部
		百田方子 南西海区水研海洋部
俊鷹丸 (184トン)	船長	角田精一
	調査員	杉浦健三 東海区水研海洋部
		見元孝一 西海区水研海洋部
		岩佐秀一 東海大学学生
セスナ機	機長	小川義司 水産航空株式会社
		日野澄太 ”

2. 用いた器材

A. 海面用海流板 (Fig. 1 の上左)

長さ約6mの鉄パイプの上端にコーナー型レーダーターゲット(対角線長90cmで構造は第I報で説明したものと全く同型)を、下端近くに新たに考案したコーナー型抵抗板(Fig. 1の左下に示されているように対角線長126cmの正八面体の中心と各頂点を結んで出来る斜辺長90cmの12個の直角二等辺三角形を、すべてブリキ板で張ったもの)を、中央部よりやや上方に浮きとしてピン玉3個を、それぞれ付し、レーダーターゲットが海面上約3mの高さに、抵抗板が海面下2~3mの深さに位置するように設計した。抵抗板にはまた錘りの役を兼ねさせた。

B. 次層用海流板 (Fig. 1 の上右)

海面用の抵抗板を、鉄パイプの下端より、長さ30mのロープで海中に吊り下げた点が異なる他は、海面用海流板と全く同型である。ロープや抵抗板の軸の方向が何れに傾いても、海水抵抗を充分に受けるように工夫されており、言わば全方向抵抗板と呼ばれるべきものである。なお、海面用および次層用海流板の空中露出部分は全く同型であり、同時に放流された8個の海流板を識別するために、長短2種類の大きさの標識旗を付した。夜間にまで測定や回収探索が続いた場合の用意として、レーダーターゲットの最上端に、色別の電球を付したが、実際には用いなかった。また航空機よりの発見を容易にするために、シーマーカーを付した。

C. 対空用海流板 (Fig. 1 の右下)

辺長180cmの正方形の頑丈な木枠にブリキ板を張り、4種類(赤、白、黄、白赤の縞)にペンキ着色して航空機上より識別できるようにした。更に発見を容易にするために、ウラニン(草色)とローダミン(紅

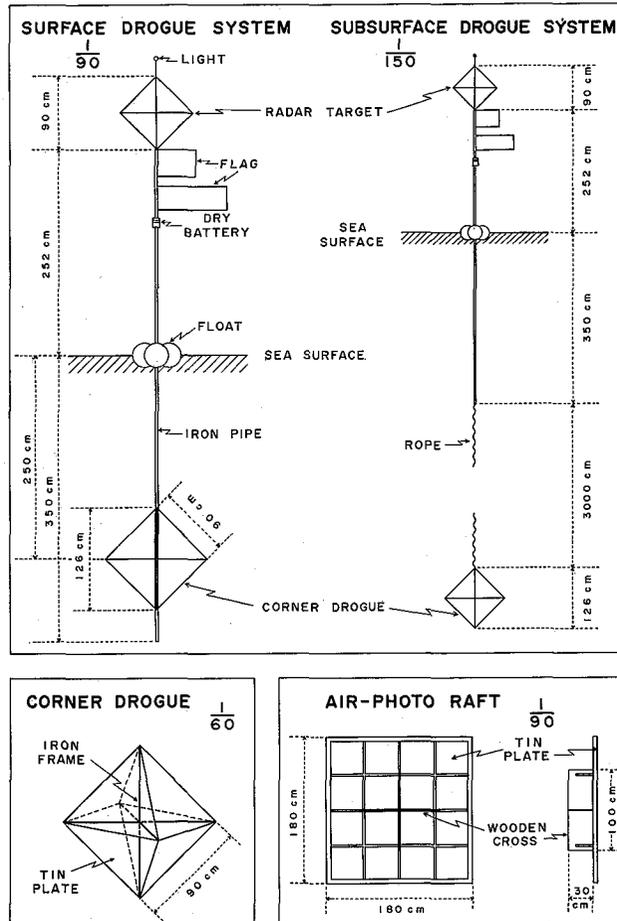


Fig. 1. Description of three kinds of current drogue systems.

色)の2種類のシーマーカーを付したが、ローダミンのマーカーでは色が映えなく効果的でなかった。100 cm×30 cmの2枚の板を十字型に組み合わせ、抵抗板として下面に付した。

D. レーダー

元神戸工業株式会社制作MD-822型(蒼鷹丸)およびMD-811型(俊鷹丸)のレーダーを用いた。レーダースコープの直径は、それぞれ12インチ(約30 cm)および10インチ(約25 cm)である。スキャナーの海面上の高さは、それぞれ9.5 mおよび9 mである。調整方法は第I報の場合と同様であった。

E. レーダー接写装置

俊鷹丸では、第I報の場合と同様に、富士通株式会社の御好意により、元神戸工業株式会社制作のものを使用した。蒼鷹丸ではレーダーフードを改造したものを使用して、撮影時刻はアサヒペンタックス データカメラにより記録した。

3. 収束発散量の測定算出方法

A. バックグラウンドの調査方法

海流板を放流する前に、海水の収束発散を起こしているバックグラウンドである、一般流速場と水温場の調査を行なった。2隻の調査船により短時間内に細部構造を把握するために、BT-ローラー-GEK方式を採用し、ナンセン型海洋観測は全く実施しなかった。測点間隔は、Fig. 2 のC, D線以外ではすべて約5海里としたが、放流点を決めるに当たっては、更に細かい間隔で調査した場合もあった。海流板回収後では、一隻は回収点を含む断面観測を、別の一隻は次回の放流点断面または周囲の概況の観測を行なった。また、植物プランクトン量および塩分の測定用として、海面下1~2m深の海水を、それぞれ1ℓおよび、100cc採取した。

B. 海流板の放流と回収方法

海面用・次層用・対空用の3種類の海流板は、第2節で説明したように、抵抗板の深さがそれぞれ異なっている。これは深さによる収束発散の差異を実測することを目的としたためであるが、3種類の海流板の放流場所が異なると、深さによるばかりでなく、場所による収束発散の差異が加わってくる。それを避けようとして、3種類の海流板をなるべく接近させて放流した。すなわち放流点の周辺の水溫海流構造の観測によって放流点が決まると、日出後先ず俊鷹丸が4個の海面用海流板を $\frac{1}{4}$ または $\frac{1}{8}$ 海里を辺長とする正方形の各頂点に配置するように放流し、次いで蒼鷹丸が4個の次層用海流板を、海面用海流板の近傍2~3m以内に放流した。また航空機の現場到着前に、4個の対空用海流板を海面用または次層用海流板の近傍に放流した。しかし予期したように、3種類の海流板は時間が経過すると、流速が深さによって異なるためにそれぞれ4個づつグループをなして分離してしまった。

海面用および次層用海流板は、日没前に回収できるように、夕刻の適時に追跡を打切った。対空用海流板については、容易に発見できる場合にのみ回収するように当初計画を立てたが、回収皆無の結果となった。

C. 海流板相対位置の測定方法

(1) 海面用および次層用海流板

測定時の間隔は、第I~III次までは2時間、第IV次では1時間であった。測定継続時間は約10時間であった。

(i) レーダースコープ映像写真による方法

風力3以下で風浪による海面反射が小の場合は、レーダー映像写真により、各海流板の相対位置を第I報の場合と同様に測定した。2種類の標識旗の組み合わせおよび前回の配置状態より、合計8個の各海流板の目視スケッチを撮影時毎に書き、それを参考にして映像写真上の各海流板の同定を行なった。

(ii) レーダースコープ映像目視による方法

風力3ぐらいでも風浪による海面反射が大である場合には、写真撮影ではなくて、レーダー映像を直接に肉眼で見ても、調査船よりの方位と距離を記録する方法を採った。

(iii) 測距儀による方法

海面反射が大で、レーダー映像による(i)または(ii)の方法が適用できない場合には、止むを得ずこの方法を採用した(8月24日の場合)。蒼鷹丸に備え付けの大型測距儀を用いて、熟練者である中山誠次甲板長が距離測定に当たり、他の一名が方位測定に当たった。前述したように海面用および次層用海流板は、時間が経過すると2つのグループに分離するが、調査船に遠い方のグループの海流板のレーダー映像が、海面反射域の外にあって、鮮明である場合には、近い方のグループの海流板の位置のみを測距儀により測定した。

(iv) 2隻の船を結ぶ線を基線とする三角測量

各海流板の相対位置のみを問題とするのであるから、この方法が適用できる訳である。基線の方位と距離は、相手の船のレーダー映像により定めた。本年の調査では、8月23日夕刻に1回のみ、この方法で測定したが、次層用海流板の内の1個が基線の延長線に近い位置を占めたために、誤差が大となり失敗した。しか

しそれ以外の海流板の位置については、それまでの海流板の配置状態と比べて、妥当な測定結果が得られたものと考えられる。

(2) 対空用海流板

測定時の間隔は20~30分、測定継続時間は1飛行について2~3時間であった。ただし8月20日の第1次追跡では、午前と午後同一の海流板群の測定を行ない、この場合には燃料補給のための中断時間も入れると、測定継続時間は2飛行で7時間となった。更に翌21日正午にも、この海流板群が発見され、測定開始より終了までの時間は約27時間となった。

海流板の相対位置は、4個の海流板の中心付近の真上 4500 feet (1371.55 m) の高度より、焦点距離 150mmのカメラを鉛直下方に向けて撮影した12.0cm×9.5cmの大きさのカラー写真により定めた。海面上の実際の距離は、縮率は

$$\frac{15}{137140} = \frac{1}{9143}$$

でフィルム画面上に記録されることになる。したがって辺長180 cmの対空用海流板は、辺長約0.2mmの正方形として録画され、ペンキ着色による各海流板の識別も完全に可能であった。しかし4個の海流板が分散して、海面上で0.4海里四方の範囲にまで拡がると、1枚のフィルム画面内には納まらなくなる。このように、画面外にはみ出した海流板の相対位置は、2枚の海流板を結ぶ線上を、一定速度で直線飛行して、飛行速度と飛行時間の積より距離を、飛行方向より方位を算出することにより、決定された。しかし誤差がかなり大と推定されるため、Fig. 7 では、この方法によって定められた対空用海流板を示す符号、A, B, C, Dを丸括弧で括った。

D. 収束発散量の算出方法

同一種類の海流板4個が形作る四辺形の面積Sの単位面積当たり、単位時間当たりの拡大(縮小)率が水平発散(収束)量となるが、これは面積Sの自然対数の変化量と等しくなる。これを式で表わせば

$$Q = \frac{1}{S} \frac{Ds}{Dt} = \frac{D}{Dt} (\log_e S) \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここに D/Dt は時間に対する実質的微分を示す。また \log_e は自然対数を示す。実際の計算は式(1)の最右辺の表現によった。この場合の面積Sは、第I報でも述べたように、各海流板に付した符号A, B, C, Dまたはa, b, c, dの順に線で結んで行くと、放流時と同じく、内側の面積を右手に見て、つまり時計廻りに囲めばプラスであるが、海流板の配置状態が入れ代って、差引きとしてマイナスの面積になる場合もあった。面積Sの符号が変る中間では、面積Sが零になるため、Qは算出できない訳である。

4. 調査の実施経過

1968年8月19日より調査を開始した。調査経過は別表に、またその観測点配置はFig. 2に示してある。8月20日に第1次の海流板による収束発散の測定(以後簡約のため第何次追跡と呼ぶ。)を行なったが、次層用海流板の抵抗板を吊り下げるロープと抵抗板との連結状態が不良のために、再三にわたり抵抗板が海中に沈没した。抵抗板付け変えや連結部の補強の最中には、海流板が舷側に引き寄せられ、調査船と共に漂流するために、海流板の相対位置は、収束発散による自然のままの漂流結果を表わしていない。

8月21日には、先ず俊鷹丸の乗組員に病人が出て、同船は早朝に現場を離れ油津港に向かったために、蒼鷹丸が単独で海面用および次層用海流板を放流して、第1回の測定を行なったが、同船にも病人が出たために、対空用海流板を放流し、海面用および次層用海流板を回収して、油津港に向かった。したがって同日のその後の測定には、航空機のみが当たった。

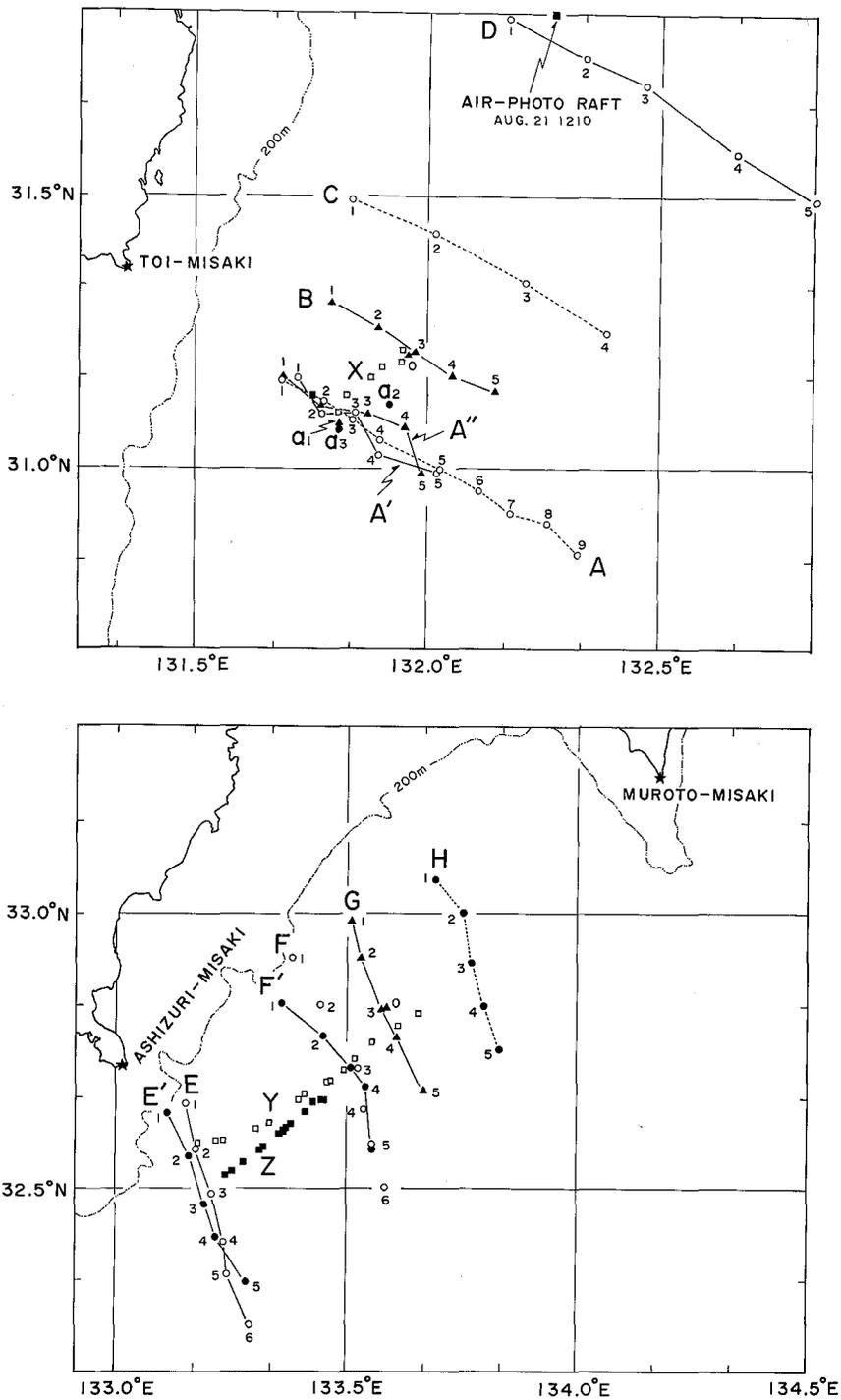


Fig. 2. Locations of BT lowering and GEK fix. *Solid lines* indicate locations of temperature profiles shown in Figs. 5 and 6.
Upper : Off the Nichinan Coast, Kyushu.
Lower : Off Shikoku.

海域	月 日	蒼 鷹 丸	(観測点)	俊 鷹 丸	(観測点)	航 空 機
日 南 海 岸 沖	8-19	0600 油津出港 事前概況 第I次放流断面	(A ₁ -A ₉) (A' ₅ -A' ₁)	0600 油津出港 事前概況 "	(D ₁ D ₅) (C ₄ -C ₁)	
	8-20	第I次放流点選定 第I次 スケッチ 第II次放流断面	(a ₁) (A'' ₅ -A'' ₁)	第I次追跡 第I次回収断面	(X ₁ -X ₆) (B ₀ , B ₅ -B ₁)	0745 宮崎離陸 第I次前半追跡 1208 宮崎着陸 1249 宮崎離陸 第I次後半追跡 1720 宮崎着陸
	8-21	第II次放流点選定 第II次追跡 発病者のため測定1回で中止 油津入港	(a ₂ - a ₄)	発病者のため油津入港		0750 宮崎離陸 第II次追跡 1251 宮崎着陸
四 国 沖	8-22	0600 油津出港 事前概況 第III次放流断面	(E ₆ -E ₁)	0600 油津出港 事前概況	(F ₆ -F ₁)	
	8-23	第III次追跡		(Y ₁ -Y ₁₄)	第III次スケッチ 第III次回収断面	(Y ₂ -Y ₁₃) (G ₀ -G ₅)
	8-24	第IV次放流断面 第IV次追跡 第IV次回収断面	(E' ₅ -E' ₁) (Z ₁ -Z ₁₃) (F' ₅ -F' ₁)	第IV次スケッチ 事後概況	(H ₅ -H ₁)	
	8-25	高知入港		高知入港		

8月22日以降では、調査海域を1967年と同様に四国沖に移したが、天気にも恵まれ、海面用および次層用海流板による第III次および第IV次追跡と、第III次対空用海流板追跡を、概ね滞りなく実施できた。

5. 黒潮の状態と放流・回収点の関係位置

A. 調査実施前の黒潮の状態

海上保安庁水路部の明洋および神戸海洋気象台の春風丸の観測結果によれば、1968年7月の黒潮主流軸は都井岬南東方および足摺岬南方では距岸20海里付近にあって接岸、室戸岬および潮岬南方では距岸30海里付近にあってやや離岸の状態にあった。

B. 調査期間中の黒潮の状態

Fig. 3 と Fig. 4 は8月19～20日における日南海岸沖および8月23～24日における四国沖の表面水温と塩分 (a)、0～200m層の鉛直平均水温 (b)、100m層水温 (c) および200m層水温 (d) の等温線または等塩分線を示す。GEKによる海面海流測定結果は、4階級別の矢印で何れの分布図にも記入してある。Fig. 3 では8月19～20日の観測値の内、A, A', B (B₀を除く。), C, Dの値を、また、Fig. 4 では8月23～24日の観測値の内、E', F', G (G₀を除く。), H, Y, Zの値を主体にして

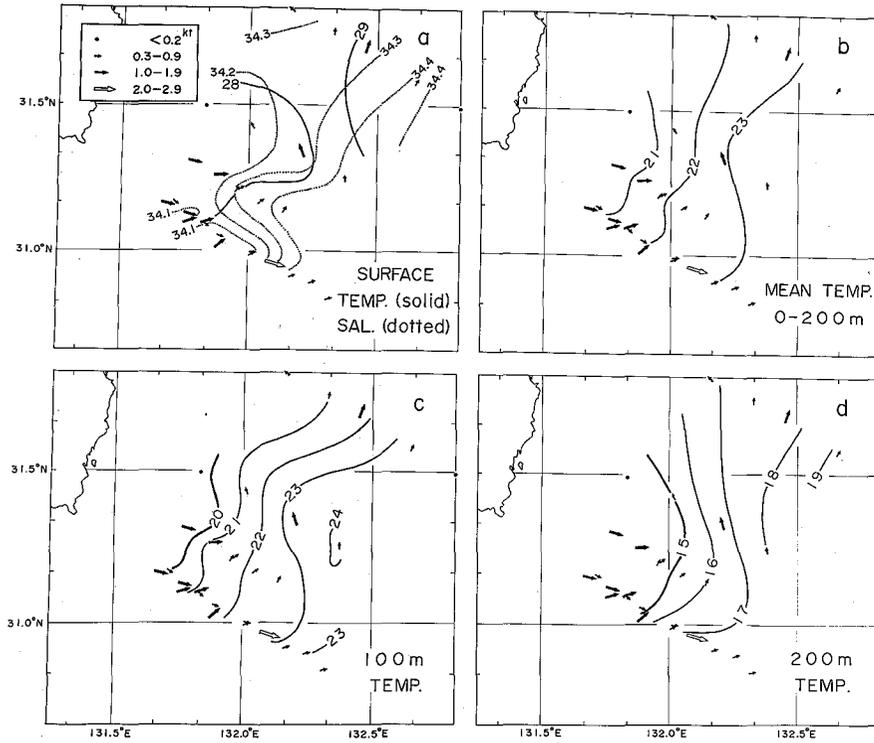


Fig. 3. Hydrographic conditions off the Nichinan Coast, Kyushu during August 19-20, 1968.

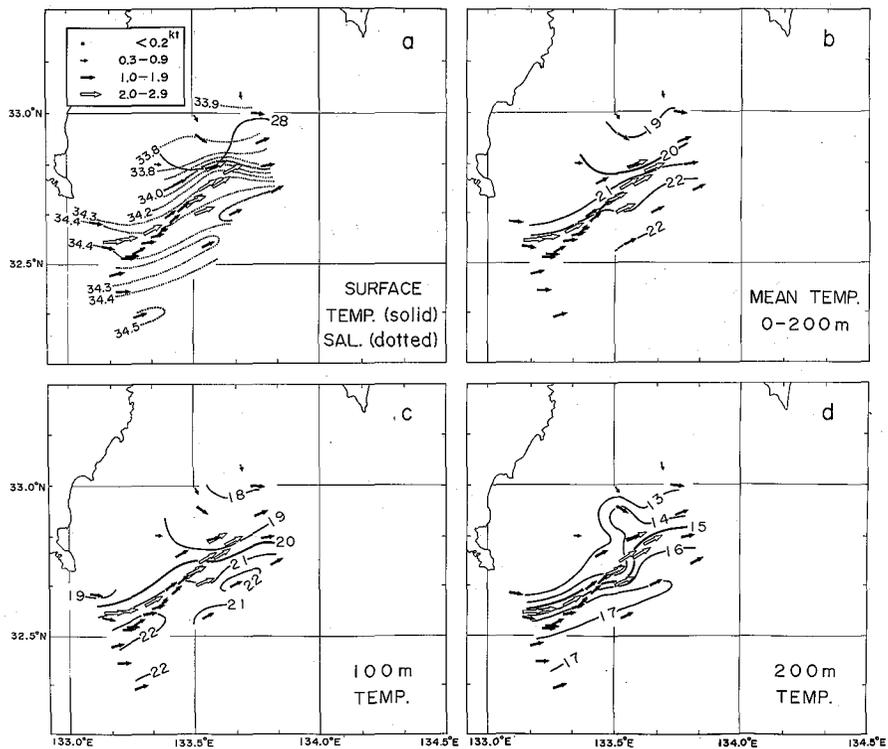


Fig. 4. Hydrographic conditions off Shikoku during August 23-24, 1968.

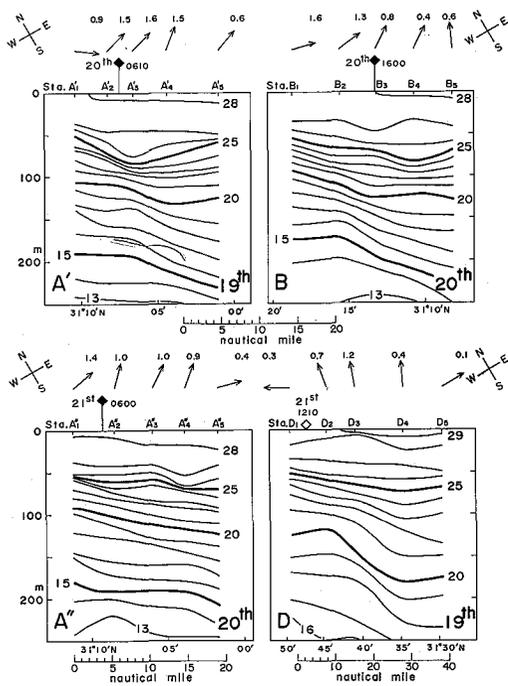


Fig. 5 Temperature profiles with vertical exaggerations of 206 to 1 in sections A, B and A" and of 412 to 1 in section D and GEK currents Off the Nichinan Coast, Kyushu. Locations of the sections are show in Fig. 2. A solid square with a leg indicates the intersection of trajectory of surface and subsurface drogues; with the section a solid square without the leg that of air-photo rafts.

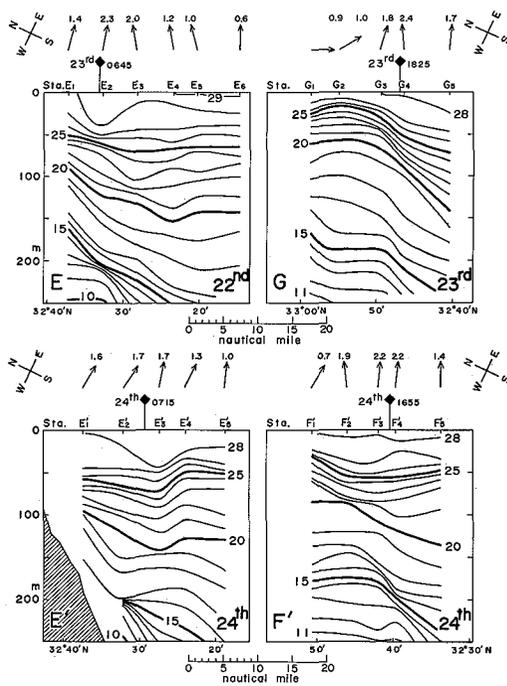


Fig. 6. Temperature profiles with a vertical exaggeration of 227 to 1 and GEK currents off Shikoku. Location of the sections are show in Fig. 2. A solid square with a leg indicates the intersection of trajectory of surface and subsurface drogues with the section.

等値線を描いた。また Fig. 5 と Fig. 6 の水温鉛直断面図では、第 I ~ IV 次の放流断面と回収断面を、左右に並べて示した。ただし第 II 次追跡では、1 回で測定を打切ったために、回収断面の代りに、20 日に放流され 21 日の正午頃発見された対空用海流板の近傍を横断する D 線の断面を示した。なお、これらの断面図では、鉛直尺度（深さ）は水平尺度の数百倍に拡大されており、その倍率は日南海岸沖の A', B, A'' 断面では 206 倍、D 断面では 412 倍 (Fig. 5)、四国沖の E, G, E', F' 断面では 227 倍 (Fig. 6) となっている。また各水温断面図の上側に示されている G E K の方位は、海岸を左手に見て断面に垂直な方向が図の上方に向くように、取られてある。

Table 1. Location and velocity at the axis of the Kuroshio main (M) and branch (B) streams during the measurement.

GEK Fix No.	Date	Time	N. Lat.	E. Long.	Dir.	Speed	Remark
Off Cape Toi Misaki, Kyushu							
A 6	Aug. 19	1424	30° 57.5'	132° 06.6'	105°	2.3'	M
A 2		1033	31° 07.3'	131° 46.4'	105°	1.4'	B
A'3		2128	31° 06.2'	131° 50.5'	075°	1.6'	B
A'1	Aug. 20	2147	31° 10.2'	131° 40.8'	080°	1.4'	B
Off Cape Ashizuri Misaki, Shikoku							
E 2	Aug. 22	2129	32° 34.0'	133° 10.4'	070°	2.3'	M
E'3	Aug. 24	0217	32° 28.2'	133° 11.5'	075°	1.7'	} M
E'2		0318	32° 33.4'	133° 09.5'	100°	1.7'	

Table 1 には、都井岬沖および足摺岬沖における、調査期間中の黒潮主流および分枝流の位置と流速・流向が示されてある。8月19日の A 線観測結果によれば、黒潮主流の最強流部は、都井岬 120° 約 45 海里の A 6 点 (Fig. 2) で、103° の方向に 2.3 ノットで流れていた。この岸側には最強流速約 1.5 ノットの分枝流があったが、Table 1 に見られるように、その位置は都井岬 120° の方向 20~30 海里の海域で、断面観測をする度に、A 2、A'3、A'1 点と変動した。8月22~24日の足摺岬南南東の観測結果によれば、黒潮主流の位置はあまり大きな変動を示さずに、足摺岬 140°~150° の方向 10~15 海里の海域を、70°~100° の方向に約 2 ノットで流れていた。

C. 放流・回収点の黒潮に対する関係位置

Fig. 5 と Fig. 6 の水温鉛直断面図の上部には、海面用および次層用海流板の放流点と回収点の位置が、1 本足のついた黒塗りの四辺形で示されてある。この図に基づいて、放流点および回収点の黒潮主流または分枝流軸に相対的な位置について、以下に述べる。

第 I 次追跡 (8月20日、日南海岸沖) の放流点は黒潮分枝流軸付近にあったが、回収点は分枝流軸より沖側へ約 11 海里の点にある。しかし、当時の風向は南寄りであったことや、回収断面の観測時刻と回収時刻の時差や、分枝流の不安定性などを考慮すると、回収断面の分枝流軸が放流断面の分枝流軸の延長であるとは考え難い。これは Fig. 3 の G E K 流速平面分布図から見ても明らかである。

第II次追跡（8月21日、日南海岸沖）の放流点は黒潮分枝流軸より沖側へ約4海里の点にあったが、この日は病人のため、追跡を中止した。

第III次追跡（8月23日、四国沖）および第IV次追跡（8月24日、四国沖）の放流点と回収点は、Fig. 6に見られるように、何れも黒潮主流軸付近にあった。しかしFig. 2を見ると、第III次追跡に相当するY点（白四角）は、第IV次追跡に相当するZ点（黒四角）に比べて、放流点では主流軸より数海里岸寄りであったが、回収点では両者が互いに接近した。これは1967年の四国沖の追跡でも見られたことである。

6. 海流板の相対位置の時間的变化

A. 海面用および次層用海流板

Fig. 7は海面用（丸印A, B, C, D）および次層用（掛印a, b, c, d）海流板の各測定時における相対位置を示す。図を見易くするために、海流板の符号の順番に実線および破線で結んである。相対位置の変化を明瞭に示すために、合計8個の海流板の重心位置を測定時毎に算出し、それがおのおのの仕切枠の中心付近の或る特定点に落ちるように、図示してある。砂目の細かい帯は、航空機上よりスケッチされた潮目の位置を示す。第I次追跡（8月20日）では、放流点の北西方向にあった潮目に、海流板が次第に接近し、夕刻にはその潮目に沿って、ほぼ一線に並んだようである。ただし第4節に述べたように、次層用海流板の作る四辺形の形状変化は、自然の収束発散のままに放置された状態と異なっている。付け変えや補強後の最初の測定時刻における海流板の配置図では、海流板符号を丸括弧で括って、このことを示した。このような不手際があったにも拘らず、海面用海流板は南側へ、次層用海流板は北側へと、それぞれまとまって相対運動を示したことは明確である。第II次追跡（8月21日）は、1回のみでの測定で中止となったが、放流点が初め同一であったにも拘らず、海面用海流板は南側へ、次層用海流板は北側へと、それぞれまとまって、第1次よりも著しい相対運動を示している。第III次追跡（8月23日）では、海面用海流板がいち早く一線に近寄り、相対的に北側に移動し、夕刻には北側の潮目に沿って一線上に並んだ。これに対し次層用海流板は、一線上に集まらずに、相対的に南側へ移動した。第IV次追跡（8月24日）では、放流時における海流板の作る正方形の辺長および測定時間間隔を、第I～III次追跡の場合の半分である $\frac{1}{2}$ 海里および1時間とした。海面用海流板はまとまって相対的に北側に移動し、正午過ぎにはほぼ南北方向に一線上に集まってから、海流板BとDとの配置が入れ替り、以後はマイナスの面積を増大させた。次層用海流板はまとまって相対的に南側に移動し、一時的な面積の縮小が見られるが、全体としては増大傾向を示した。

次に海面用海流板と次層用海流板のそれぞれの重心の相対運動より、海流の鉛直shearを求めて見よう。日南海岸沖での第I～II次追跡では、何れも海面用海流板は南側へ、次層用海流板は北側へと、相対運動を示したが、先にも述べた事情で量的なことは引き出せない。四国沖での第III～IV次追跡では何れも海面用海流板は北側へ、次層用海流板は南側へと、相対運動を示した。各海流板群の重心位置は、放流時には一致していたものが、第III次追跡では約9時間後の回収時に、北西-南東方向に約0.8海里へだたり、また第IV次追跡では約11.5時間後の回収時に、南北方向に約1.3海里へだたった。したがって相対速度は0.1ノット前後となる。海面用および次層用抵抗板の深度差が約30mであるから、海流の鉛直shearは約 $2 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ となる。

B. 対空用海流板

Fig. 8は、日南海岸沖における8月20日午前と午後および四国沖における8月23日午前の対空用海流板の測定時における相対位置を示す。4個の対空用海流板A, B, C, Dの重心位置を基準にして、Fig. 7と同様に示したものである。海流板AとBにはローダミンのシーマーカーを付けたが、カラー写真では見難く、CとDに付けたウラニンのマーカーの染料尾の曳行状態をカラー写真よりスケッチして、Fig. 8に点列として示した。また2隻の調査船で測定した風力と風向を、各仕切枠の左下隅にビューフォート階級で図示した。潮目の位置の図示はFig. 7と同様である。染料尾の曳行方向が風向とほぼ一致していることは、対空用海流板の空中露出部分が極めてわずかであるにもかかわらず、風圧による漂流を受けたものと考え

られる。また染料尾が直線状でなく彎曲したり、風向と或る角度をなしていることは、染料は時間が経つと次第に海面より沈降し、しかも海流の鉛直 shear があるために、染料尾の源泉部が位置する海面と末端部が位置する次層とでの、海流の相対速度の差を反映したためであると解釈される。第I次追跡の8月20日午前では、放流点の北西にある北東-南西方向に走る潮目に海流板は次第に接近し、航空機の燃料補給のための約2時間半の中断後、午後に最初に行なわれた測定では、午前にあった潮目は痕跡程度となって海流板AとD付近に残存しており、海流板はこの潮目に沿ってほぼ一線上に並んだ。夕刻16時30分に追跡を打切ったが、翌日正午頃再発見され、各海流板の相互配置はかなり入れ替ったにも拘らず、Fig. 8 の第2行右端に図示されているように、殆んど分散せずに全体として、よくまとまっていた。21日の再発見位置は $31^{\circ} 50' N, 132^{\circ} 16' E$ (Fig. 2 上図の上端の黒塗り四角の位置)で、これは20日09時の放流点 $31^{\circ} 09' N, 131^{\circ} 51' E$ (Fig. 2 上図の黒塗り三角 a_1 のやや北方の位置)よりNN Eに約50海里の点に当たり、漂流速度は2ノット弱となる。

第II次追跡は、航空機のみで8月21日午前に実施されたが、海流板が一線に集まる傾向は全く見られず、逆に分散傾向にあった。しかも4個の対空用海流板全部が、1枚のフィルム画面内に納らず、はみ出たものについては、第3節C(2)の方法で相対位置を測定した。

8月23日午前の第III次追跡では、正午までは東西に走る潮目に沿って、ほぼ一線上に並んだが、12時16分の最終測定では、やや四辺形の面積を増大した。

7. 収束発散の状態

第6節では、各種類別に4個の海流板が形作る四辺形の形状変化や重心位置の相対運動について考察した。4個の海流板が形作る四辺形の形状が細長くなっても、その面積が縮小しなければ、水平収束があるとは言えない。水平収束が0であっても、水平 shear があれば、四辺形は面積を一定に保ったまま細長く延びる筈である。収束発散の状態を調べるために Fig. 9 と Fig. 10 を作成した。Fig. 9 は海面用(白丸)・次層用(十字)・対空用(黒四角)の海流板各4個が形作る四辺形の面積の時間的変化を示す。縦軸には $1/100$ 平方海里を単位とした面積が目盛られているが、最下図の8月24日の分の目盛は、最上図および中央図の2倍に拡大されてある。また Fig. 10 は、第3節Dの式(1)の最右辺の表現によって算出した水平収束量(マイナス)または水平発散量(プラス)の時間的変化を示す。縦軸には 10^{-5} sec^{-1} を単位とした収束発散量が目盛られてある。Fig. 9 の最上図には、第I次追跡の8月20日の次層用海流板群の面積の時間的変化が示されていないが、これは第6節Aに述べた理由による。また Fig. 10 には、相続く2回の測定間で面積 S の符号が変わる場合には、収束発散量が示されていないが、これは第3節Dに述べた理由による。

8月20日の日南海岸沖における第I次追跡では、海面用海流板も対空用海流板も、全体の傾向としては面積が0に近づき、水平収束を示している (Fig. 9)。ただし対空用海流板は、放流直後と20日夕刻の最終測定時には、 10^{-4} sec^{-1} 程度の水平発散を示している (Fig. 10)。その途中では収束発散量は、符号が変わる程の不規則な変動を示しているが、これは面積 S と時間間隔 Δt が小さいため、面積 S の誤差が拡大されて現われたものと考えられる。対空用および海面用海流板の水平収束量は、何れも 10^{-4} sec^{-1} 程度であるが、前者の方がやや大である。

8月21日の日南海岸沖における第II次追跡では、測定誤差が大で量的なことは言えないが、発散傾向を示している。

8月23日の四国沖における第III次追跡では、対空用海流板が $2 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ 程度の著しい水平収束を示した。ただし最終測定では著しい発散を示した。海面用海流板がこれに次いで収束し、午後にはマイナスの面積となった。次層用海流板は初めに $3 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ 程度の弱い収束を示したが、その後は 10^{-5} sec^{-1} 程度の弱い発散を示した。

8月24日の四国沖における第IV次追跡では、海面用海流板は正午過ぎまで 10^{-4} sec^{-1} 程度で収束して一線上に並んでから、午後にはマイナスの面積となって発散した。次層用海流板も午前には収束傾向にあっ

たが、海面用海流板のように面積0にまで収束することなく、午後にはプラスの面積のまま、発散を示した。その量的大きさは、面積 S と測定時刻間隔 Δt が小のために拡大された誤差が影響して、不規則な変動を示しているが、 10^{-4} sec^{-1} 程度である。

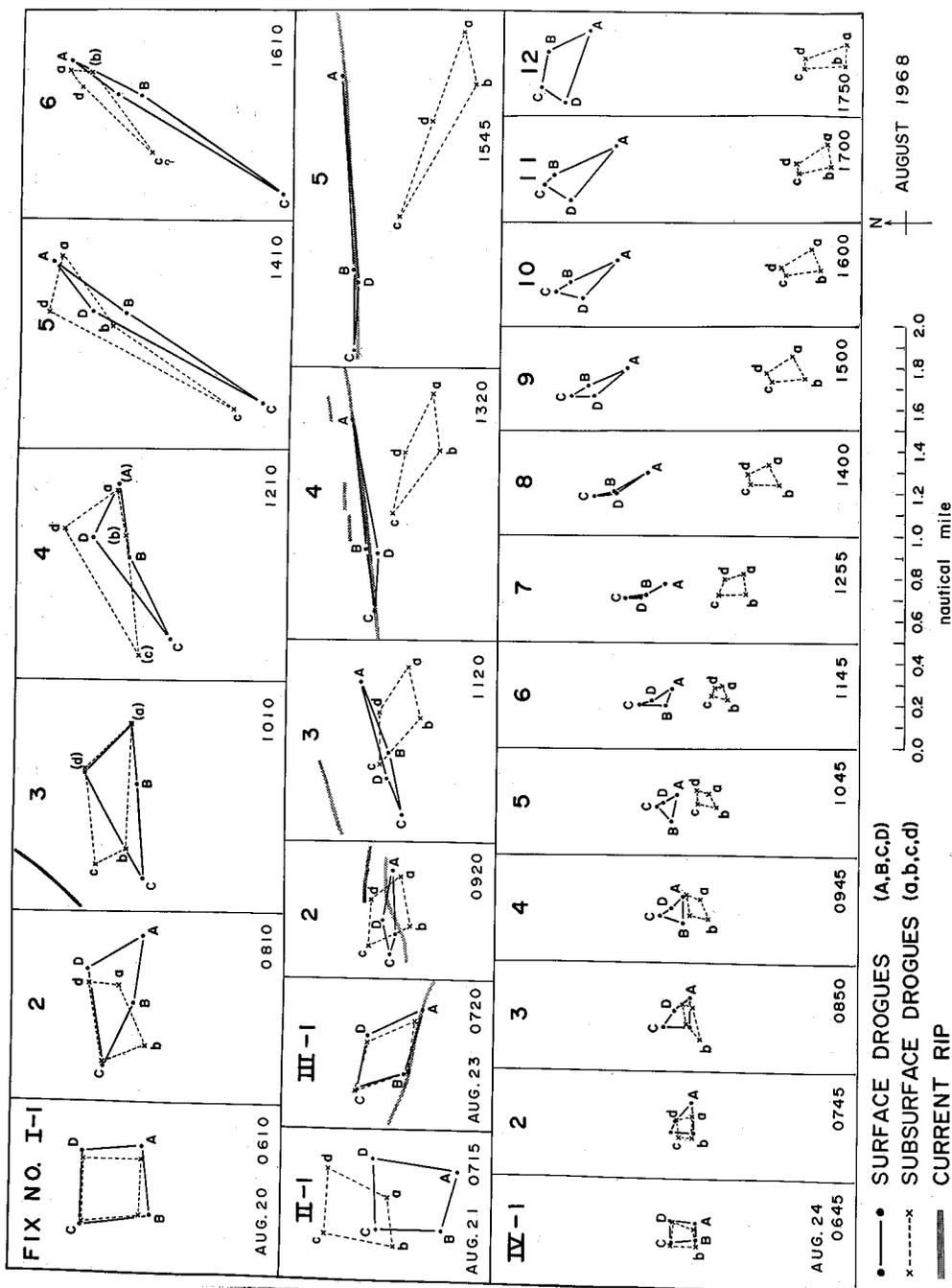
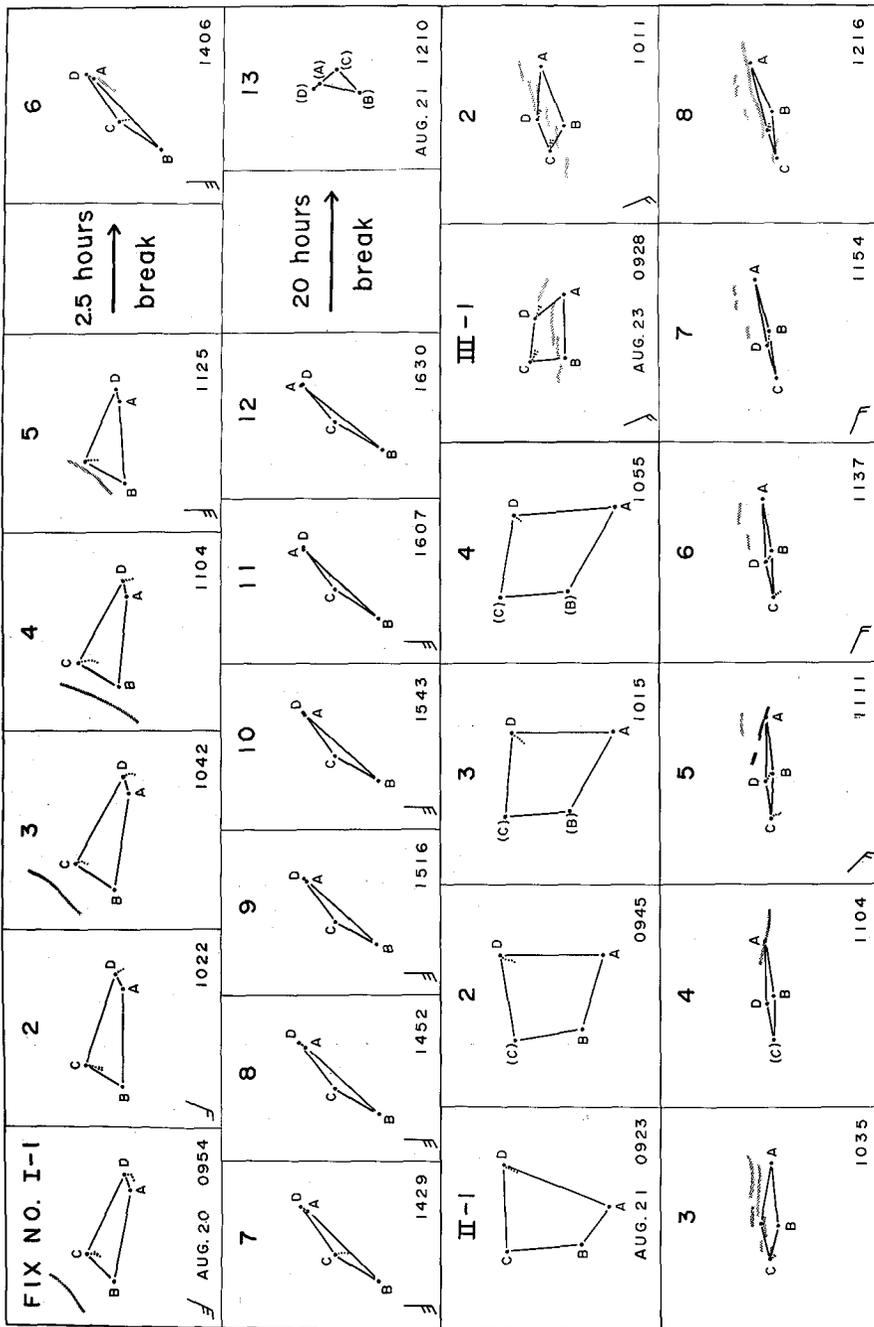


Fig. 7. Time change in relative positions of surface (A, B, C and D) and subsurface (a, b, c and d) drogues.



●—● AIR-PHOTO RAFTS (A,B,C,D)
 - - - - - CURRENT RIP
 TRAIN OF URANIN

WIND
 (BEAUFORT SCALE)

0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0
 nautical mile

N
 AUGUST 1968

Fig. 8. Time change in relative positions of air-photo rafts (A, B, C and D).

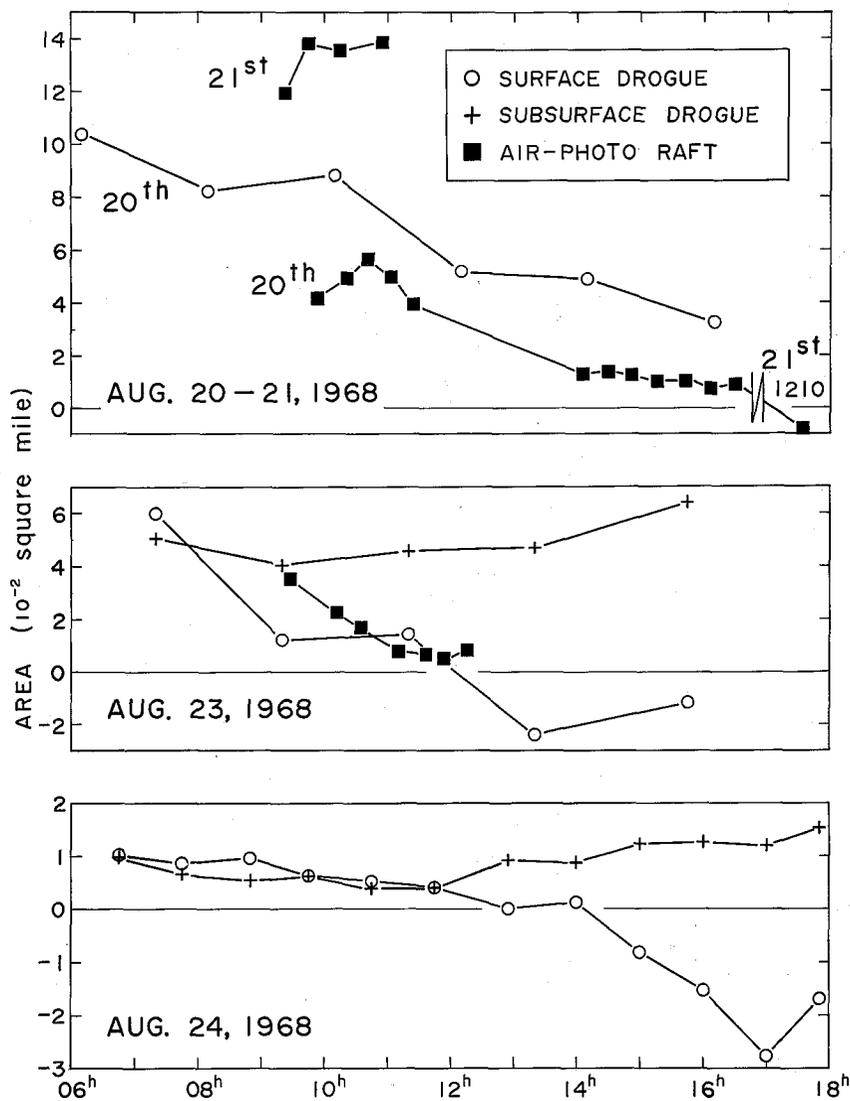


Fig. 9. Time change in quadrilateral area made by four drogues or by four rafts.

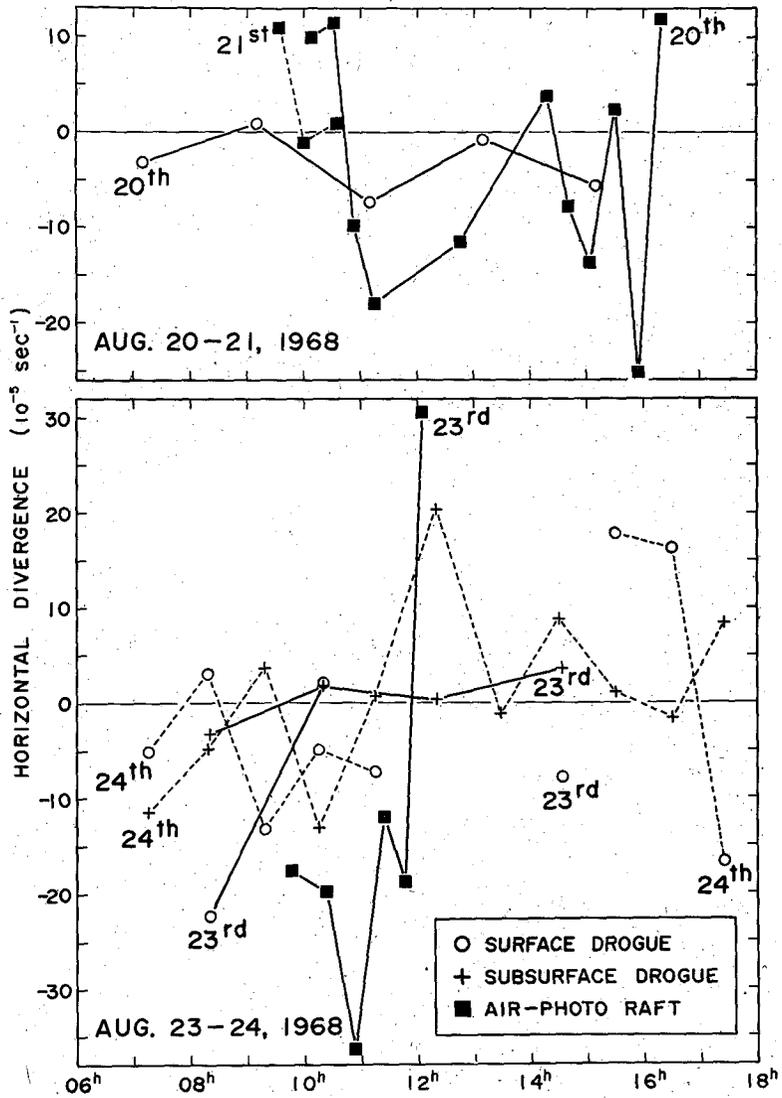


Fig. 10. Time change in horizontal divergence calculated by eq. (1).

8. 植物プランクトンの分布

Fig. 11とFig. 12は、日南海岸沖および四国沖における植物プランクトン量の海面における分布を示す。これらはBTを海中に沈める前に、海面下1~2mの所に暫らくBTを留めておく頃に、ズック製のバケツで採取された海面下1~2m深の海水1ℓ中に含まれていたものである。採集点数は全部で92点である。珪藻綱については属毎に、藍藻綱については属の区分けをせず一括して、鎖や塊まりの全数を勘定した。Fig. 11とFig. 12の図aには海水1ℓ中に含まれる藍藻綱の塊数をb, c, dには珪藻綱の内て数の多かった3属 (*Rhizosolenia*, *Chaetoceros*, *Nitzschia*) の海水1ℓ中に含まれる鎖数を、それぞれ5階級別に示してある。

Fig. 4に示されてある四国沖の海面海流の分布をFig. 12aと比較すると、藍藻綱は四国沖の2ノット以上の黒潮主流軸付近に沿って濃密に分布し、それより岸側では急激に減少するが、沖側では徐々に減少している。日南海岸沖においては、先にも述べたように黒潮分枝流の位置が、はっきりしないこと、しかも変動し易いこともあるためか、海流分布との明確な対応関係は見出せない。珪藻綱の分布については四国沖、日南海岸沖の何れの場合にも、はっきりした分布の特徴が掴めなかった。

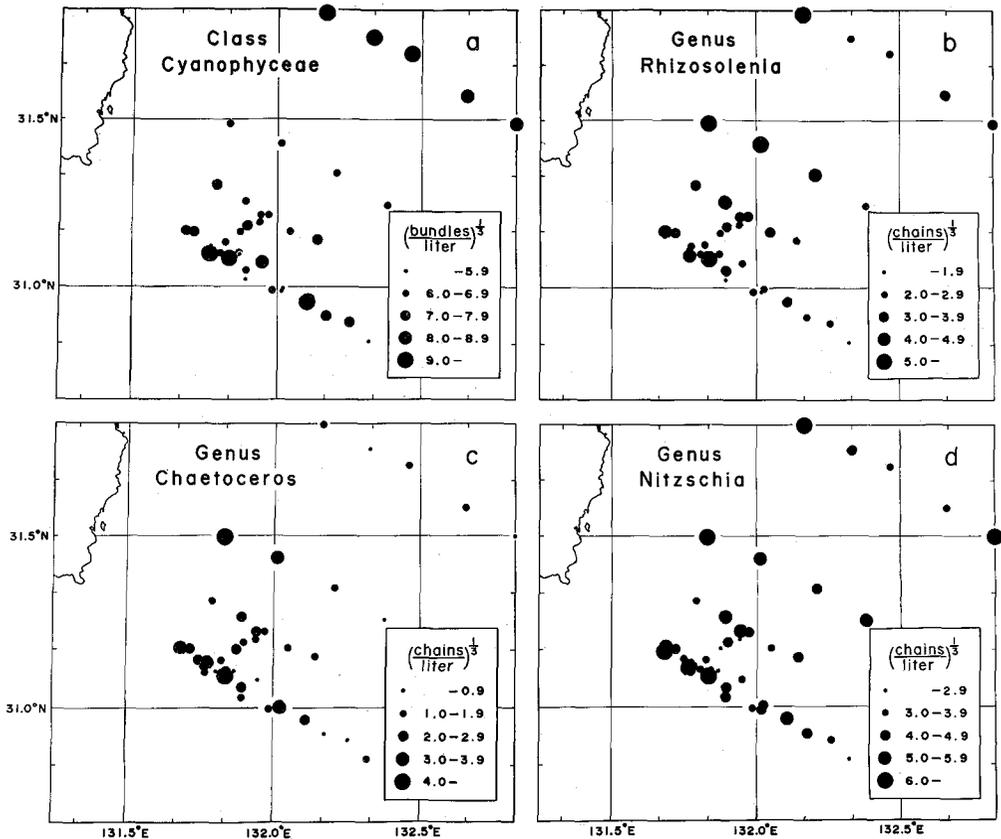


Fig. 11. Surface phytoplankton off the Nichinan Coast, Kyushu.

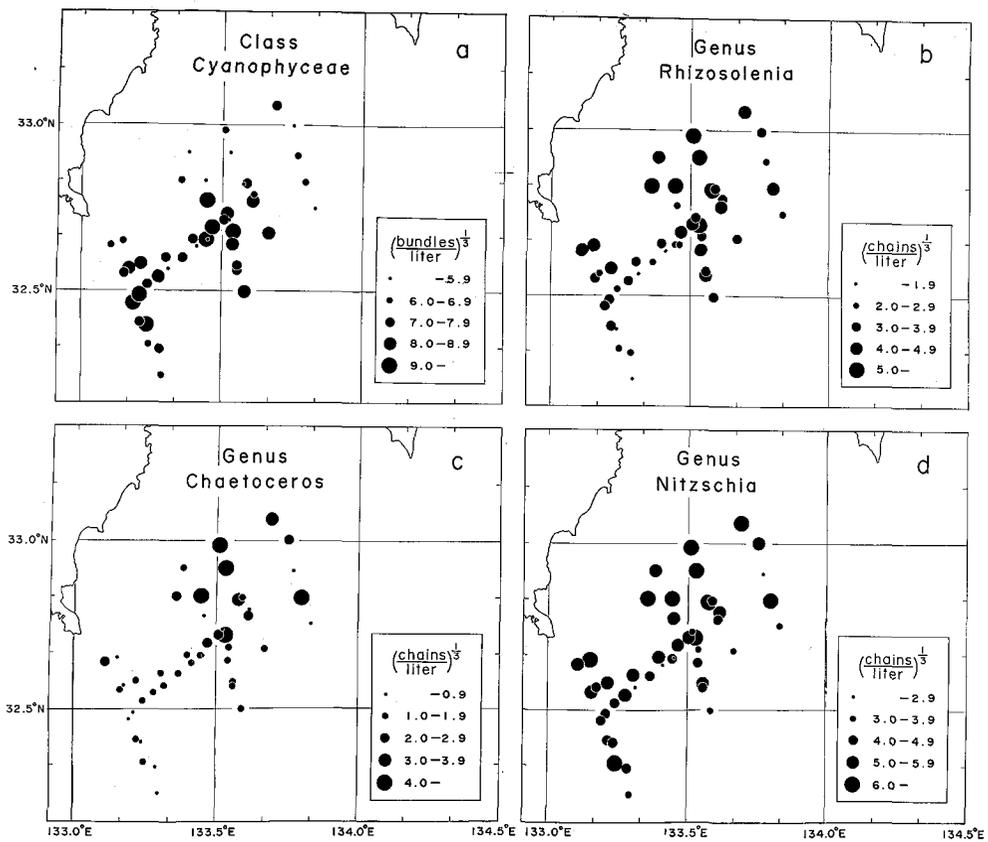


Fig. 12. Surface phytoplankton off Shikoku.

9. ま と め

四国沖では黒潮主流の強流軸が明確であり、時間的変動も少ない。このような黒潮主流付近では、抵抗板の深さが最も浅い対空用海流板が著しい収束を示し、2~3 m 深に抵抗板をもつ海面用海流板がこれに次ぐ収束を示し、表層混合層の下部付近に当たる30 m 深に抵抗板をもつ次層用海流板は発散するか、または収束するにしても、その程度は微弱であった。第III次と第IV次追跡を比較すると、前者では対空用および海面用海流板は収束、次層用海流板は発散と、際立った対照を示したが、後者ではそれほど著しい対照を示さなかった。これは第III次と第IV次追跡における放流点の差異によるものであろう。第III次追跡の放流点は、第I報で著しい収束の観測された、強流軸より2~3海里岸寄りの潮目帯に、第IV次追跡の放流点は、丁度強流軸付近にあったものと考えられる。そして放流後の時間が経つにつれて、第III次と第IV次追跡のコースは相寄り (Fig. 2下) 合流した。同様な現象は1967年の四国沖の調査でも見られた。しかし水平収束と合流とは別のことであって、合流しても Fig. 6 に見られるように、下流で流速が増大すれば、水平収束は生じなくてもよい。

都井岬沖では、黒潮分枝流の強流軸が明確でないことと、時間的変動が著しいこともあって、追跡コースが海流構造の如何なる特性帯に対応するかを決めることが困難である。しかも放流点と回収点とが、異なった特性帯に対応することもあり得る。放流点の海流構造について考えると、第I次追跡は分枝流軸付近に当たり、ここでは対空用海流板が最も著しい収束を、海面用海流板がそれに次ぐ収束を示した。次層用海流板の面積は算出されてないが、Fig. 7 の第1行に見られるように、面積は縮小せずに増大つまり発散傾向にあったと言えよう。第II次追跡では分枝流軸より約4海里沖側にあった対空用海流板が発散傾向にあった。

黒潮主流軸の明確であった四国沖での藍藻綱の分布は、次のように説明できるのではないか。すなわち藍藻綱の好適棲息域は、黒潮主流軸付近よりそのやや沖側にかけて存在する最高水温帯付近にあるが、主流軸付近より、そのやや岸側にかけて海面海水の収束帯があるために、海水は徐々に沈降するが、浮遊性の藍藻綱は海面に滞積しながら、下流に運搬され、Fig. 12 のような結果になったと推定される。

以上に述べた1968年の調査結果は、第I報で海面における海水の収束発散状態から推定した、黒潮主流を斜めに横切る2個のらせん状海水運動系の模型と矛盾するものではない。しかし一度収束した海水がまた発散を示すのは、どういう訳かよくわからない。したがって上述の模型も、更に手際よく工夫された調査によって再検討する必要がある。しかし黒潮主流軸付近からそのやや岸側にかけては、海面には著しい収束帯があり、その下方の表層混合層底部付近には著しい発散帯があり、両面の境界を離れた中間深度は、水平収束も発散も弱いという結論は、かなり確実なものと考えられる。

また浮性卵が孵化して前期仔魚の段階になると、海面より次層へと棲息水深を変えることは、上述の水利条件を考え併せると、卵の受精率向上と仔魚の飢餓による初期減耗回避という効果をもたらしていると推定される。すなわち卵の段階では潮目帯の海面付近に浮遊しており、ここでは海水の収束のために卵が密集し結果として受精が効率的となっているものと考えられる。また孵化後の段階では次層に棲息しており、ここでは海水の収束が著しくないか、または発散しているために、仔魚は分散して分布密度が小に保たれ、仔魚間の摂餌競争が緩和され、初期減耗の最大因の一つとして挙げられている飢餓の回避という結果に至っていると解釈される。

従来、難事とされていた海水の水平収束発散量の直接測定法が、本研究によって開発され、2ケ年にわたって黒潮で実施に調査を行なって若干の資料が得られたというのが、本研究進展の現状である。しかしこれだけの資料によっても、黒潮付近の海洋浮遊物の分布は、単なる拡散現象としてではなく、収束発散を考慮に入れて論じられなければならないことが判明した。

文 献

川合英夫・坂本久雄・百田方子、1969：黒潮表層水の収束発散に関する研究— I、南西水研報告、(1)、1—14。