

黒潮表層水の収束発散に関する研究—I*

—海面における収束発散の実測とその解釈—

川合 英夫・坂本 久雄・百田 方子

A STUDY ON CONVERGENCE AND DIVERGENCE
IN SURFACE LAYER OF THE KUROSHIO - I

DIRECT MEASUREMENT AND INTERPRETATION OF
CONVERGENCE AND DIVERGENCE AT THE SURFACE

Hideo KAWAI, Hisao SAKAMOTO and Masako MOMOTA

The horizontal convergence or divergence of sea water is one of the important factors governing the distribution of floating matters such as fish eggs, juveniles, drifting seaweeds, minute living foods for fish and various contaminations. The measurements are, however, very difficult with such current meters as GEK, owing to indefiniteness of position of the fix, limit of accuracy in the current velocity and difference in time between adjacent fixes. On use of the current drogue with a radar target and a big wooden cross as shown in Fig. 1, we succeeded in direct measurement of the horizontal convergence or divergence in the Kuroshio south of Shikoku in August 1967 on board the *Shun'yo Maru*. At the beginning of the measurement, four drogues were released at four apexes of a square with sides a quarter of a mile long (Fig. 2). Analyzing photographs of blips of the drogues taken every two hours from early morning to sunset, the area S of the quadrilateral ABCD were calculated based on eq. (2). The horizontal divergence Q were calculated from the time change in S based on eq. (1).

When wind force is below 2 in the Beaufort scale, noise of reflection from wind waves around the ship is limited within a small area on the radarscope (Fig. 3a). When wind force exceeds 3 in the scale, the wind wave noise on the scope expands to some extent (Fig. 3b). The shape of the noise is not circular but oval as shown in Fig. 4. The best position of the ship to separate the blip of drogues from the noise is at a location 1/2 to 1 mile leeward from the drogues. When wind force exceeds 4 in the scale, the range of the noise becomes quite large, and this kind of measurement encounters an insuperable obstacle partly because of the increase in drifting speed of the drogues by the wind.

The actual measurements were made three times, each of them starting on a traverse of the Kuroshio SSE of Cape Ashizuri, Shikoku. The hydrographic conditions before and during the measurements are shown in Figs. 5-9. The drogues were released at three points 5 miles offshore from the current maximum on August 24th, 2 or 3 miles inshore from the maximum on 25th and 5 miles inshore from the maximum on 26th (Fig. 10). The results are shown in Figs. 11-13. There is

* 南西海区水産研究所業績 第2号。本研究の一部は日本海洋学会春季大会(1968年4月)で発表した。

strong horizontal convergence along the streamline 2 or 3 miles inshore from the current maximum. On either side of the current maximum, 5 miles offshore or inshore, there is strong divergence. The order of the magnitude amounts to 10^{-4} sec^{-1} (Fig. 13). If the horizontal divergence or convergence of this magnitude would be vertically uniform within the surface mixed layer, the layer would change in thickness by an unreal rate as shown in Table 1 calculated based on eq. (3). Accordingly, the assumption of uniform divergence or convergence should be given away. The actual feature might be in such ways that the divergence or convergence in the upper layer of the surface mixed layer be mostly compensated by the convergence or divergence in the lower layer, and that there be two systems of helical motion facing each other, forming a convergent zone located a few miles inshore from the current maximum (Fig. 14).

魚類の卵稚仔は黒潮によって運搬され、その漂流結果は水産資源の再生産に、大きな影響を及ぼすと言われている。しかしながら、その運搬機構は仲々複雑なものである。黒潮自体の流れ方の中で、合流分流や収束発散などの様子は、海面付近とそれより数十m下方の次層とでは、かなり変化しているらしい。また卵稚仔自体は浮遊適応などにより、上述したような黒潮の上下の流動差に応じて、適当な環境の所へ移行することも考えられる。

海洋浮遊物としては、このような卵稚仔のほかに、流れ藻、餌料生物、廃棄汚染物などがあり、これらの漂流拡散に対しては、黒潮表層水の収束発散が大きな役割を演じている。したがって、この研究は、沿岸重要資源の再生産と利用度、および海洋汚染など、すこぶる広範囲の分野に関連する訳である。また海水の収束発散は、湧昇沈降流と関連していることから、この研究は黒潮を斜めに横切るような、海水のらせん状運動の力学的解明にも、有力な手がかりを与えるものと考えられる。

黒潮の収束発散にあずかる流動は、黒潮の一般流に比べれば微弱なものであるから、G E Kなどの流速計では、一般に測定困難な現象であり、これについては今まで推測の域を出なかった。1966年夏に東海区水研海洋部が主体となって実施した、漂流物体の拡散実験に参加した折の経験により、数個の海流板を同時に追跡し、それらの相対位置の時間的変化を解析する方法が、この種の流動を測定するのに有効であるという見通しがたてられた。

しかしながら、海流板群の相対位置を、かなりの精度をもって測定するためには、特別の工夫を要する。本研究においては、レーダーターゲット付き海流板を設計し、そのレーダー映像の記録写真を取る方法を採用したが、きわめて効果的であったので、ここにその取りまとめの結果を報告する。

なお予備試験や本観測に当っては、いろいろと御尽力を頂いた俊鷹丸前船長黒肘善雄氏、および現船長角田精一氏を初めとする新旧乗組員の方々に対し、心からお礼を申し上げます。また、本観測の際に調査員として乗り組まれた、東海大学海洋学部学生土屋豊君と金古和夫君に対し、厚くお礼を申し上げます。

本研究は、科学技術庁特別調整費による、黒潮共同調査に関する総合研究の一環として実施されたものであり、お世話になった関係各位に対して、厚くお礼を申し上げます。なお、本稿を御校閲の上、有益な御助言を賜った海洋部長杉本仁弥氏に厚くお礼を申し上げます。

用 い た 器 材

A. レーダーターゲット付海流板

Fig. 1に示したような海流板を設計し使用した。風による漂流効果をできる限り減少させるために、海面上に現われる容量をなるべく小さくすると共に、海面下の十字型抵抗板を著しく大きくした。

また海流板に付したレーダーターゲットの風圧を減少させるために、海面上の高さを約3mと低くし、その大きさもなるべく小に留めた。その構造は、対角線の長さ90cmの正八面体の中心と相隣る2頂点を結んで

できる直角二等辺三角形を、すべて金網（細目針金の4分目亀の甲網）で張ったものである。

B. レーダー

神戸工業株式会社製作 MD-311型のレーダーを用いた。レーダースコープの直径は10インチ（約25cm）、スキャナーの海面上の高さは9mである。輝度(intensity)を最大に、感度(gain)を8にし方位目盛照明を点灯の状態で行なった。

C. レーダー接写装置

神戸工業株式会社製作のものを使用した。撮影番号、日付、時刻などの記入カードとレーダースコープとを同時に接写することが可能なものである。カメラは、アサヒペンタックスに広角レンズ（スーパータクマー1:3'5/28）を付したものをを用いた。ASA400(超微粒子現像)のフィルムを使用した。なお、しぼりを5.6（レーダースコープのレンジが4海里以内の場合は変える必要はない）、露出時間を4.5秒とした。これは、レーダーの1スウィープには、4秒間を要するからである。

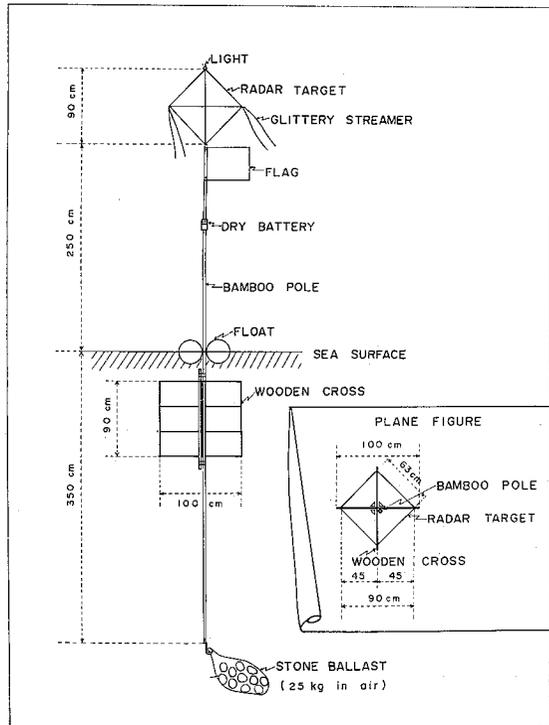


Fig. 1. Current drogue system.

海面反射とその対策

Fig. 2に示したように、4個の海流板A, B, C, Dを、1/4海里を1辺とする正方形の各頂点に初めに配置し、調査船上でそのレーダー映像を2時間ごとに接写し、写真記録上の海流板群の相対位置の変化を測定した。

レーダースコープ上には海流板の映像のほか、船の周りの風浪のために、海面から反射された電波による輝閃域を生ずる。これは海面反射と呼ばれる。予備試験および本観測の経験を総合した結果、海面反射の状態とその対策について、以下に述べるような知識が得られた。

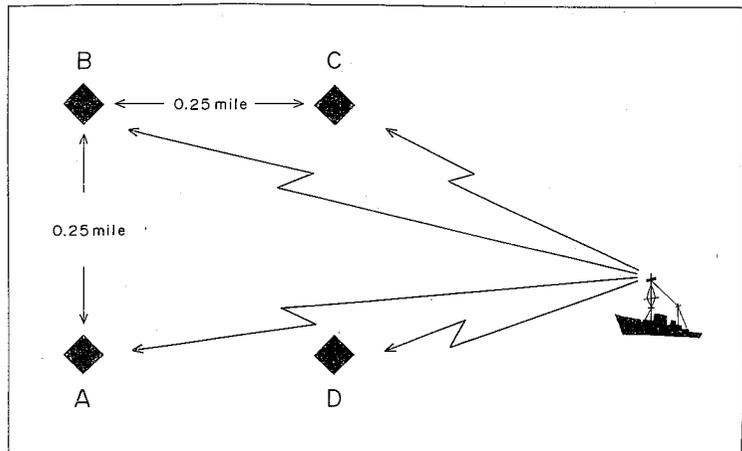


Fig. 2. Disposition of four current drogues at the beginning of the measurement.

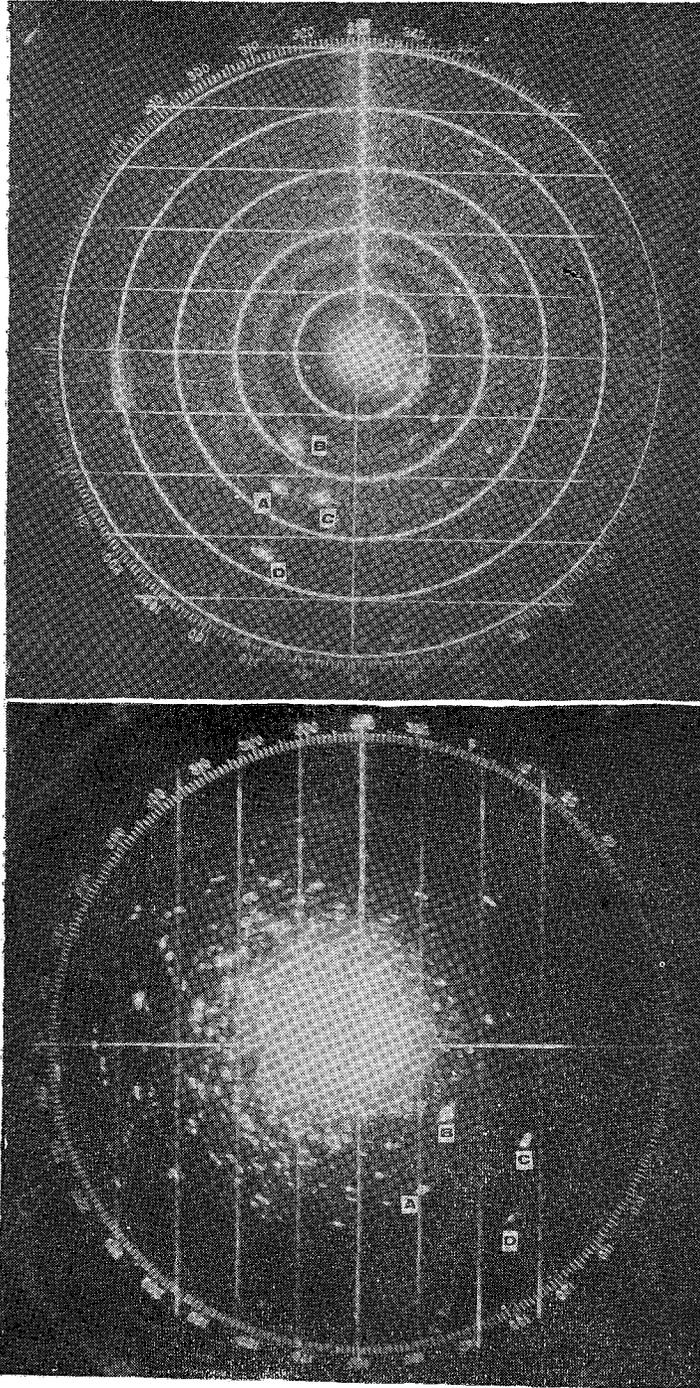


Fig. 3. Blip of current drogues A, B, C and D and noise of reflection from wind wave around the ship.
 (a) 12^h 15^m, August 25, wind force 2 (*Upper*).
 (b) 06^h 15^m, August 24, wind force 3 (*Lower*).

A. 風力2以下の場合

海面反射は調査船のごく近くに局限され、調査船より $\frac{1}{4}$ ~3海里の範囲にあるレーダーターゲットのレーダー映像はよく映る (Fig. 3 a)。しかし4海里の距離にあるレーダーターゲットはスウィープ2回に1回ぐらゐの割合でしか映らない。

B. 風力3ぐらいの場合

調査船の周囲よりの海面反射が著しくなる (Fig. 3 b)。この海面反射の範囲は、調査船を中心に円形ではなく、卵形に似たものであり、船の風上側では遠距離にまで及ぶが、風下側では近距離内に留まる。したがって、海流板より風上側 $\frac{1}{2}$ ~1海里の所に船を留めてレーダー接写を行なうと、海流板の映像が海面反射の映像より分離できる (Fig. 4)。

C. 風力4以上の場合

海面反射のおおむね範囲が大となり、一般の調査船のレーダー装備では、この種の調査が困難となる。この場合にはまた、海流板の風による漂流が大きくなって、この調査の限界となる。

本観測の実施経過

東海区水研海洋部および神戸海洋気象台が実施した、俊鷹丸（8月2～7日）と春風丸（8月6～7日）の観測結果によれば、本観測実施前の黒潮流路は、日向灘近海より遠州灘沖にかけて、大勢として著しい蛇行屈曲がなく、ゆるやかな弧を描いて流れていた。土佐沖の黒潮主流は、足摺岬 S E 10～30海里より室戸岬 S S E 10～30 海里に向かっていった (Fig. 5)。

8月17日より本観測を開始した。初めに水温場と海流場の大勢を掴むために、Sta. 1よりSta. 19までの4本の横断観測を実施した (Fig. 6)。その結果はFig. 7に示されているように、黒潮主流は8月上旬に比べて、足摺岬 S S E では接岸し、距岸15海里以内にあったが、室戸岬沖ではあまり変化がなかった。

8月19日早朝より、海流板追跡を試みたが、風力4以上となり、風浪による海

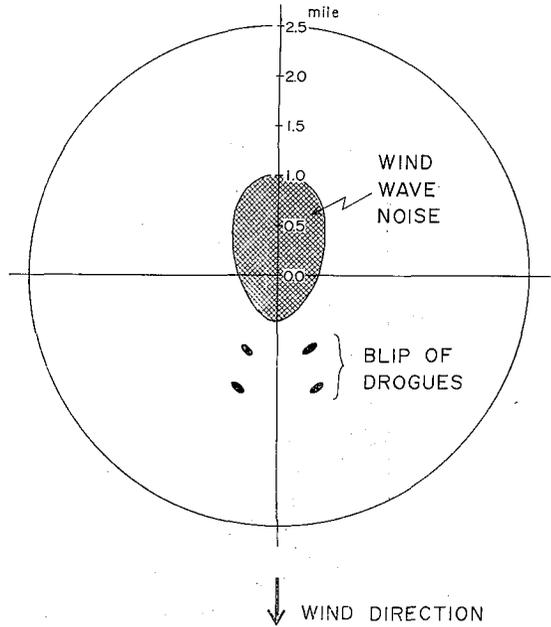


Fig. 4 The best position of the ship to separate blip of the current drogues from the wind wave noise.

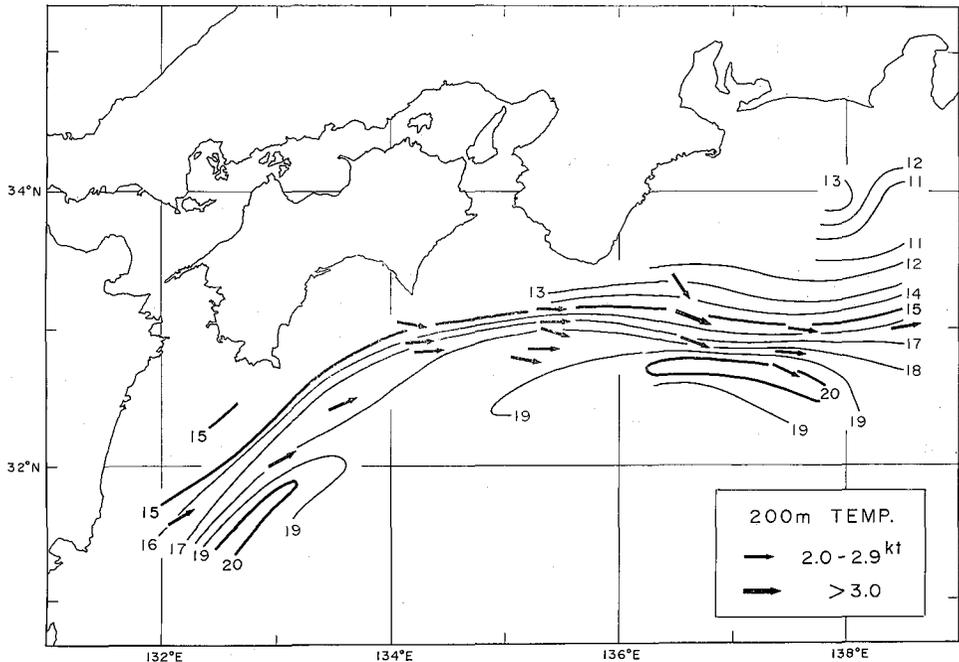


Fig. 5 Hydrographic conditions of the Kuroshio before the measurement. Surface currents less than 2 knots are omitted. Based on data from the *Shun'yo Maru*, August 2-7, 1967 and the *Shumpu Maru*, August 6-7.

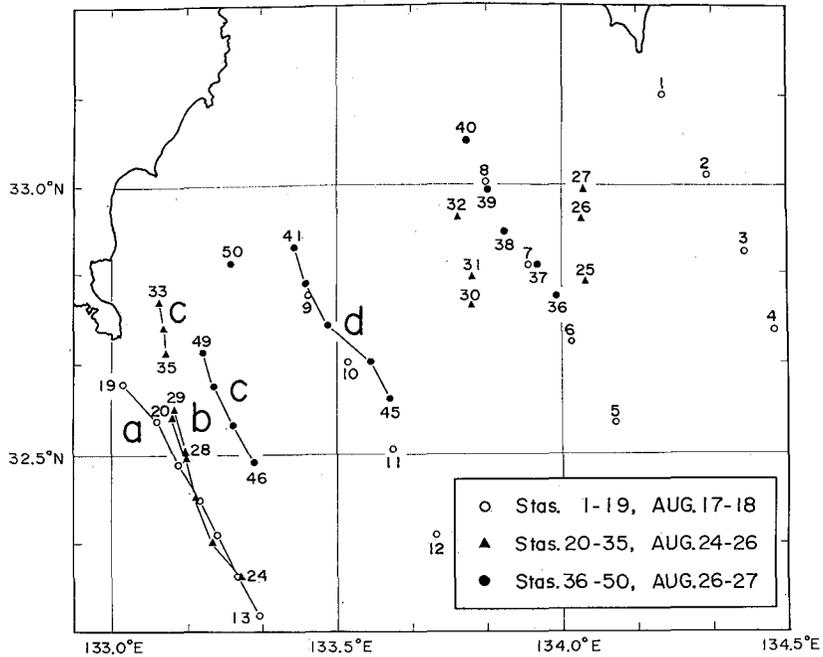


Fig. 6 Locations of BT lowering and GEK fix.
 Lines a, b, c and d indicate locations of temperature profiles
 shown in Fig. 9.

面反射が著しく、調査不能のために一たん調査を中止した。台風の通過を待って、8月24日早朝より海流板追跡試験を再開した。海流板を放流する直前に、GEKで黒潮横断線上の5海里間隔の細密測流を行ない、黒潮最強流軸の位置を毎回定めた。それらの水温断面図をFig. 9.に示す。また、8月24日以降27日までのBT、GEK観測資料を全部、一まとめにして、水平分布図として Fig. 8に示す。追跡第1日目(8月24日)には黒潮最強流部より5海里ほど沖側の点に、第2日目(25日)には最強流部より2~3海里岸側の点に、第3日目(26日)には最強流部より5海里ほど岸側の点に、海流板を放流した(Figs. 9, 10)。追跡は日の出直後より日没直前まで行なった。なお、調査員は以下の通りであった。

事前 シノプティック調査	川 合 英 夫	南西水研海洋部
	土 屋 豊	東海大学 学生
	金 古 和 夫	〃
海流板群追跡調査	川 合 英 夫	南西水研海洋部
	坂 本 久 雄	〃
	土 屋 豊	東海大学 学生

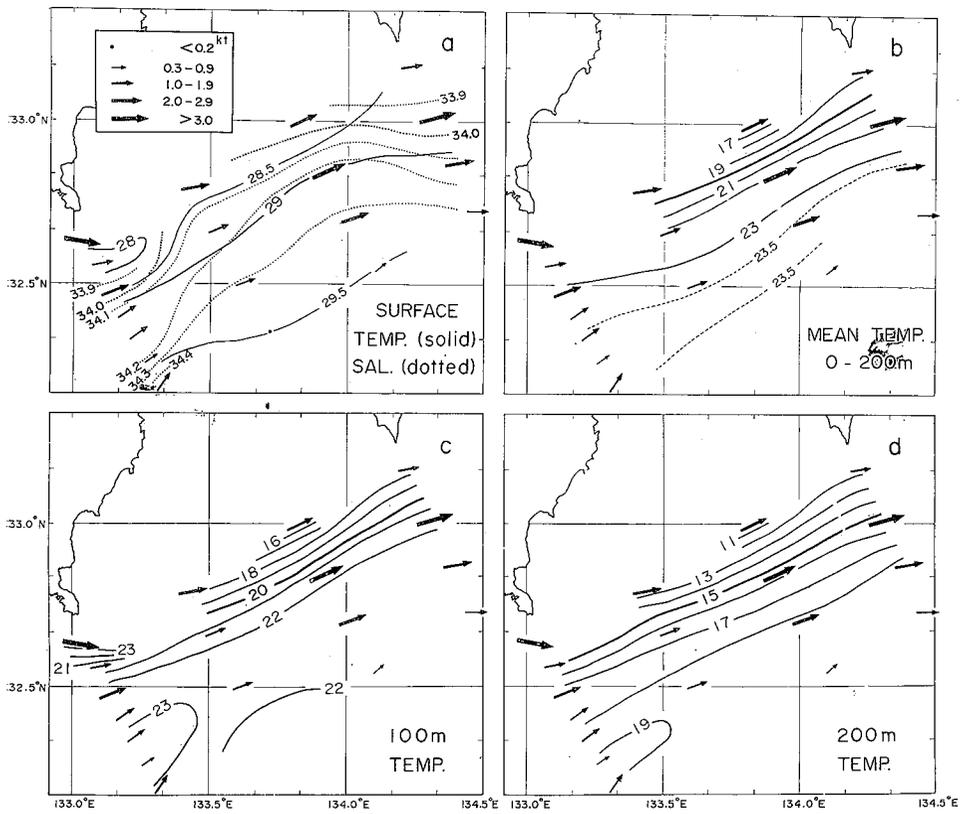


Fig. 7. Hydrographic conditions during August 17-18, 1967.

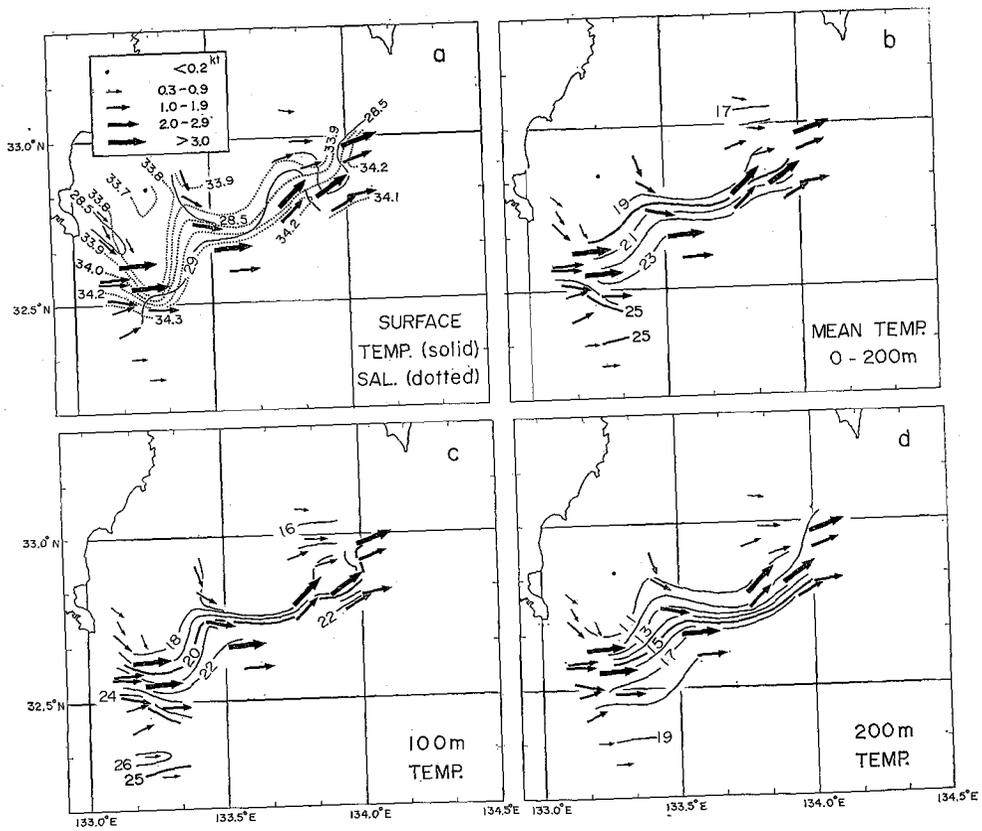


Fig. 8. Hydrographic conditions during August 24-27, 1967.

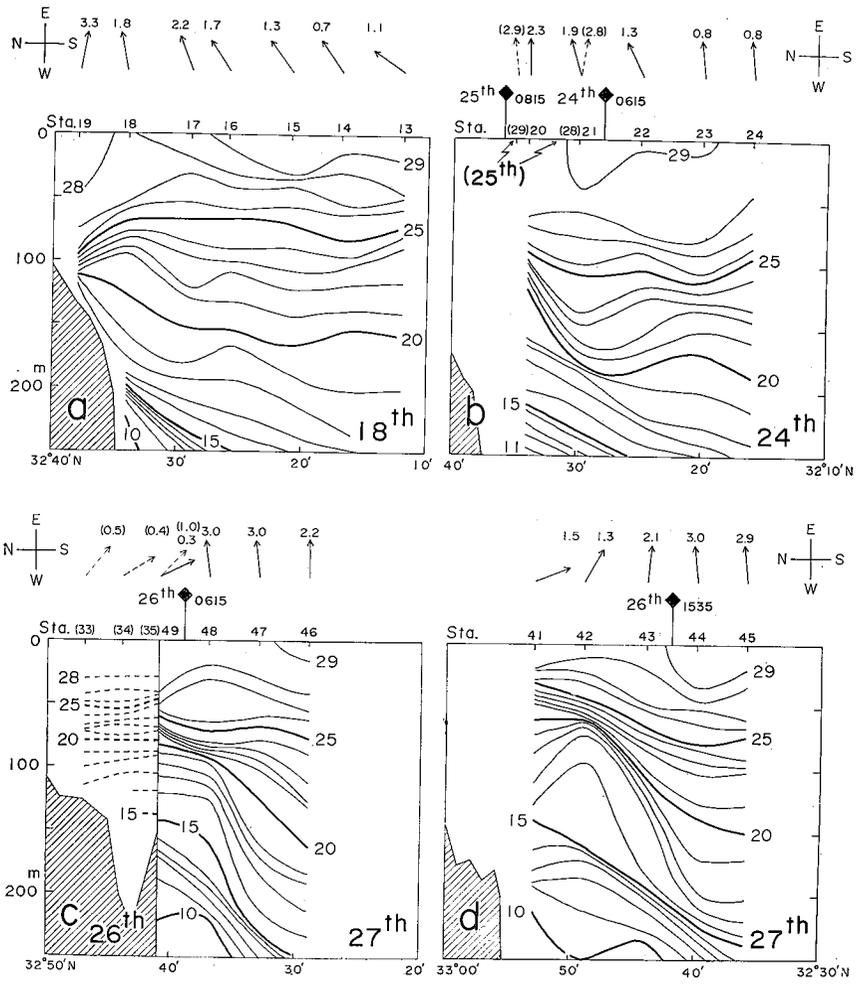


Fig. 9. Temperature profiles and GEK currents.
 Locations of the profiles are shown in Fig. 6.

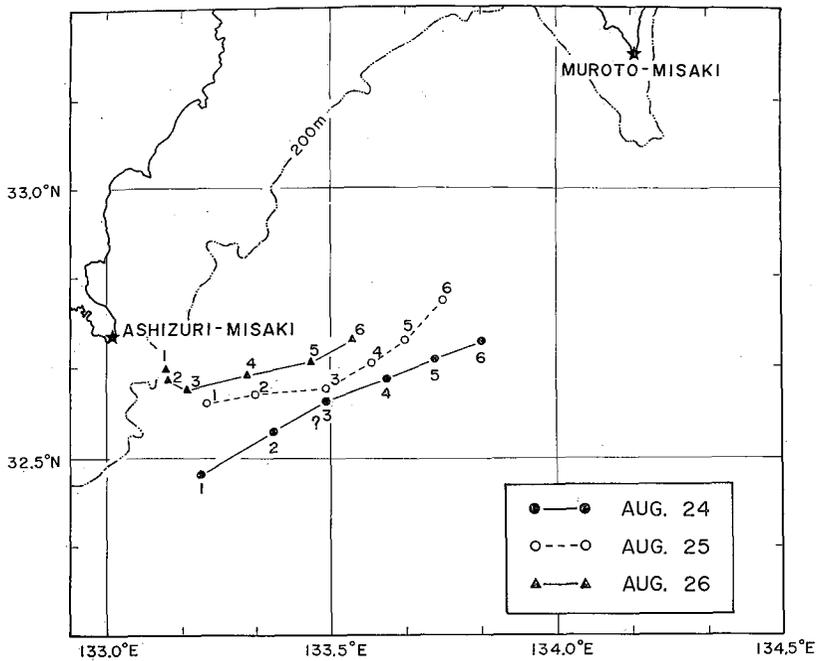


Fig. 10. Trajectories of the center of gravity of current drogues.

結 果 と 考 察

3回の海流板群の追跡写真記録を解析し、4個の海流板群の作る四辺形の面積 S を計算し、それらの時間的変化 DS/Dt より、水平発散量 Q を算出した。これを式で表わすと次のようになる。

$$Q \equiv \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{S} \frac{DS}{Dt} \quad (1)$$

ここに u , v は x および y 方向の流速成分を示す。また D/Dt は実質微分を表わす。 Q がプラスならば水平発散、マイナスならば水平収束となる。

Fig. 10. は、4個の海流板群重心の漂流経路を、Fig. 11. は同じく重心の経度・緯度・漂流速度の時間的変化を示す。これは海流板群と調査船との相対位置を、レーダー映像写真より定め、調査船の絶対位置をローランにより定めることにより、求められたものである。前者の測定精度は0.1海里のオーダーである。したがって、2時間ごとの測定より割り出した漂流速度 (Fig. 11) は、0.5ノットのオーダーの精度しかもない。

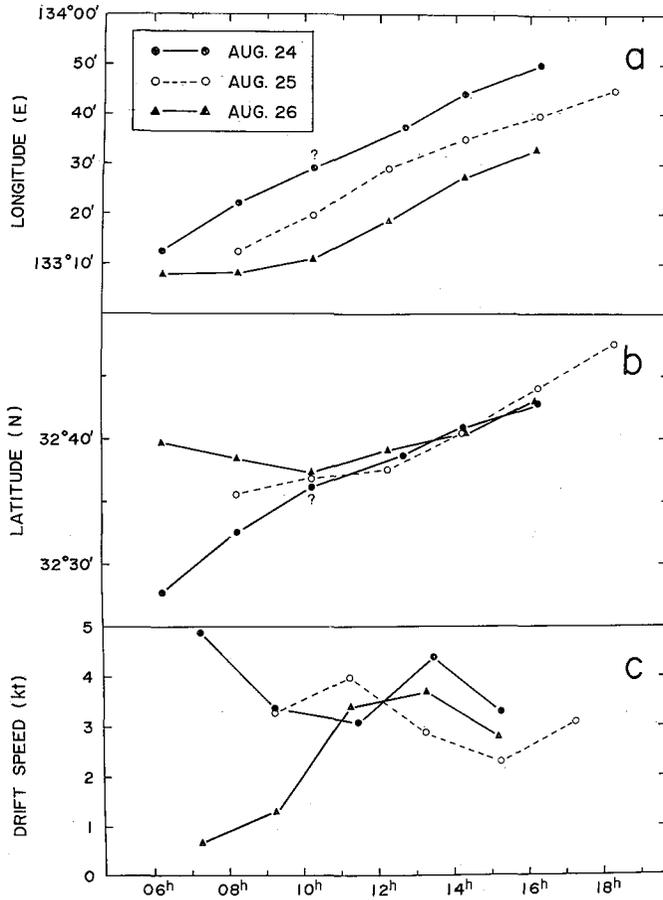


Fig. 11 Time changes in longitude (a), in latitude (b) and in drifting speed (c), of the center of gravity of current drogues.

Fig. 11. の漂流速度は 3.5 ノットを越える場合がしばしばあるにもかかわらず、G E K 測流値では、最高 3.3 ノット留りであった。この差は上述の精度を考慮すると有意なものかどうかかわからない。

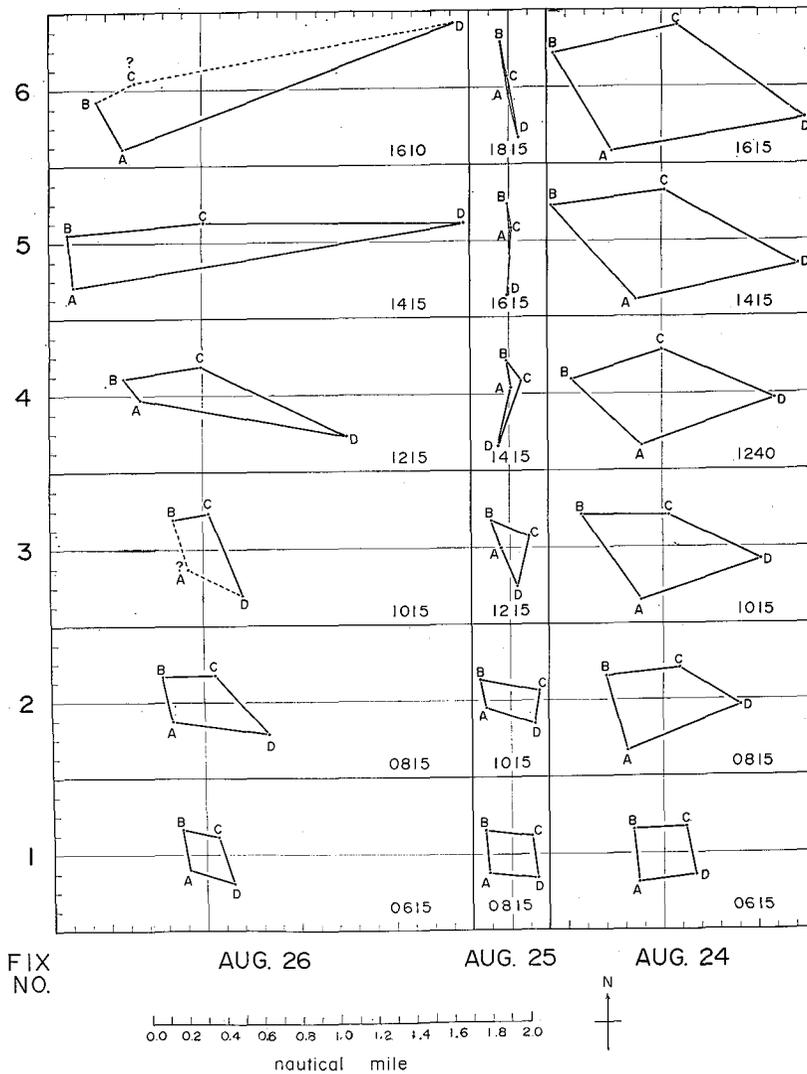


Fig. 12. Time change in relative positions of four drogues A, B, C and D.

Fig. 12. は、写真記録より読み取った4個の海流板の相対位置の時間的変化を、4点A, B, C, Dの重心を原点として表わした図である。A, B, C, Dの座標を (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) で表わすと、それを4頂点とする四辺形の面積 S は、

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} + y_i) \quad (2)$$

で与えられる。ここでA, B, C, Dを結ぶ線を順にたどると、それは本調査ではすべて、放流開始時と同様に時計廻りとなったが、反時計廻りとなる可能性もあり、その時の面積はマイナスとなる訳である。その場合には、面積 S が0となる時刻があり、式(1)より水平発散量は算出できない。

Fig. 13 a は、式 (2) より算出した面積 S の時間的変化を示す。また Fig. 13 b は、さらに式 (1) により求めた水平発散量 Q の時間的変化を示す。Fig. 13 c は測定時の表面水温と風向、風力（ビューフォート階級）の時間的変化を示す。風力は3日間を通じて3以下であったが、特に風力2以下の8月25日には、午後になって表面水温が著しく上昇し、表面水温の日周変化を示している。その他の日においても、わずかではあるが、日周変化の傾向が見られる。

これらの図を併せ考察すると、最強流部より岸側へ2~3海里の点で放流した第2日目の測定においては、著しい水平収束が起きており、そこで視察された潮目の存在という事実と、よく対応している。これに反し最強流軸より岸側および沖側へ約5海里の点では、著しい水平発散が起きていることが判明した。これら水平収束と発散量の大きさは、 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ のオーダーであり、かなりの量に達する。表層混合層内では、海水密度がほぼ一様であるから、収束発散にあずかる流動には、地衡流的に考えれば、鉛直シアがないはずである。表層混合層の厚さを H で表わすと、水平発散量は

$$Q = \frac{1}{S} \frac{DS}{Dt} = -\frac{1}{H} \frac{DH}{Dt} \dots\dots\dots(3)$$

となる。式 (3) の右の等式は、

$$\frac{D}{Dt}(SH) = 0$$

より、つまり海水の非圧縮性より求められたものである。Fig. 13 b の水平発散および収束量は、小さい時では 10^{-5} sec^{-1} 、大きい時では 10^{-4} のオーダーに達する。したがって Q にこの両者の数値を入れ、 H の厚さを種々と仮定して、それに対する DH/Dt の値を、式 (3) より算出してみると、Table 1 のような結果となる。

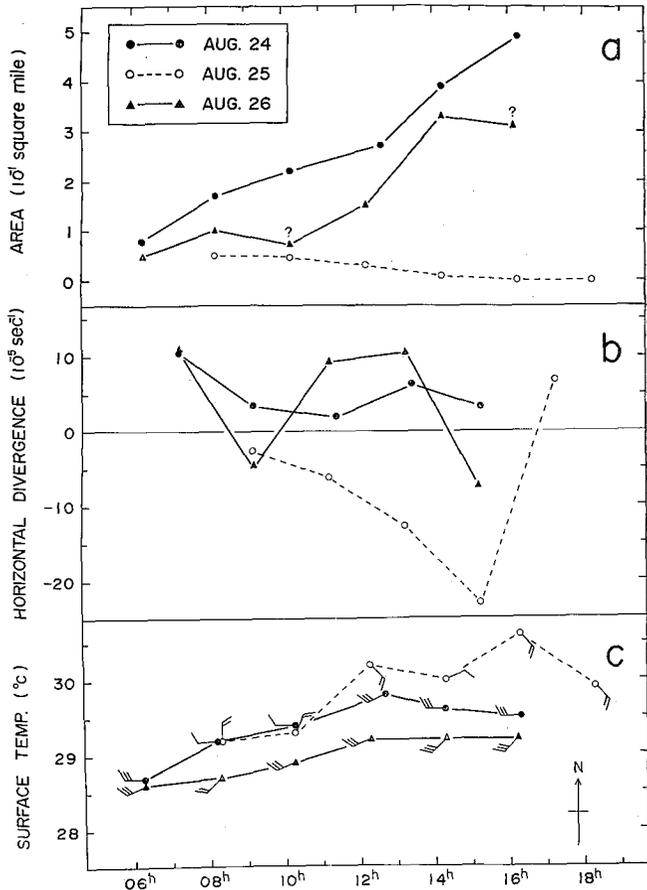


Fig. 13. Time changes in quadrilateral area made by four drogues A, B, C and D (a), in horizontal divergence (b) and in surface temperature and wind direction and force in the Beaufort scale in the vicinity of drogues (c).

Table 1. Time change in thickness of the surface mixed layer with vertically uniform horizontal divergence.

Thickness of the layer H (m)	Horizontal divergence Q (sec^{-1})	Individual time change in the thickness of the surface mixed layer		
		(m/sec)	$-DH/Dt$ (m/hour)	(m/day)
1	10^{-5}	10^{-5}	0.036	0.86
	10^{-4}	10^{-4}	0.36	8.6
10	10^{-5}	10^{-4}	0.36	8.6
	10^{-4}	10^{-3}	3.6	86
25	10^{-5}	2.5×10^{-4}	0.9	21.5
	10^{-4}	2.5×10^{-3}	9	215
50	10^{-5}	5×10^{-4}	1.8	43
	10^{-4}	5×10^{-3}	18	430

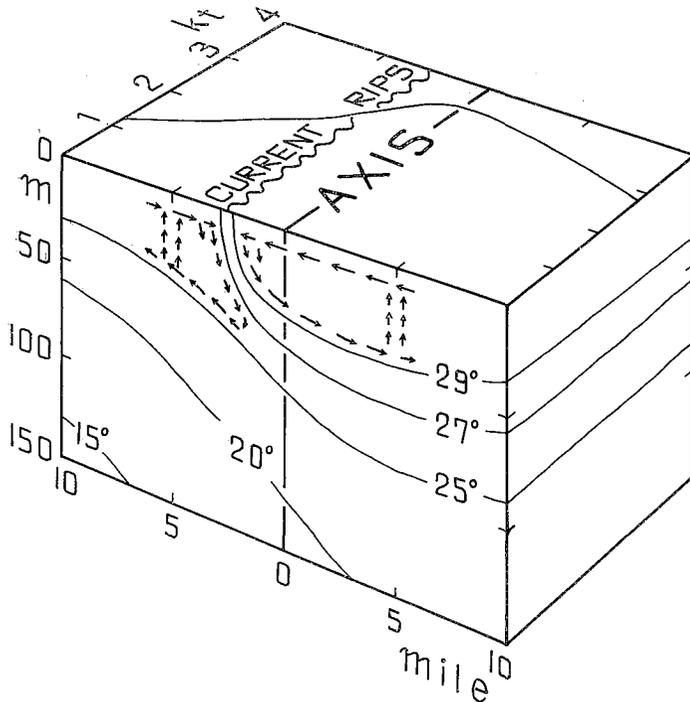


Fig. 14. A schematic estimation of helical motion in the surface mixed layer of the Kuroshio.

収束帯があり、ここで収束沈降した海水は、次層で発散するような、2つのらせん状運動系が、黒潮を斜めに横切って存在すると推定される。その結果、浮遊物体は、この収束帯に集積したまま、比重の関係で、沈降せずに収束帯に沿って下流へ運搬されるものと考えられる (Fig. 14)。観測および理論の両面より、この収束帯は黒潮横断線上の表面流速分布曲線の変曲点に位置すると言える。このことについては、今後の調査結果をまわって、第Ⅱ報でより詳しく論じたい。

現実の海洋では、Table 1に示されている DH/Dt の値に対応するような、著しい表層混合層の厚さの変化は生じていない。これは収束発散にあずかる流動が、表層混合層内では上下に一様であると仮定したことが、誤っていたからである。したがって、表層混合層の上部と下部には、収束と発散が相対して分布し、鉛直方向に積算すると、それらは互いにほとんど打消し合っていると考えられる。すなわち、海面で収束した海水は沈降した後、数十m下方の次層では、逆に発散せねばならない。またはこの逆でなければならない。したがって、黒潮最強流軸より2~3海里岸側の所に、表層海水の著しい