

漂流ブイの速度と地衡流速との関係†

石井春雄*

A RELATION BETWEEN GEOSTROPHIC CURRENT SPEED AND DRIFTING SPEED OF SURFACE DRIFTER †

Haruo ISHII*

Abstract

Drifting speed (U_{drift}) of surface drifters are compared with geostrophic current speed (U_G) at the sea surface referred to 1000db, 2000db and 3000db surface in the Kuroshio area south of Japan. U_{drift} and U_G are in the positive correlation and the gradient of regression line are 0.66 (1000db), 0.68 (2000db) and 0.80 (3000db), respectively. U_{drift} is about 20cm/s larger than U_G on the average, and differences between them seem not to depend on the differences of observed period nor on the drifting duration near the stations for Nansen or CTD casts. Centrifugal force's effect caused by the curvature of the drifter movement is checked to be negligibly small. Exclusion of five extreme cases where the difference between U_{drift} and U_G referred to 1000db are greater than 40cm/s makes an even better correlation; the gradient of regression being 0.96 (1000db), 0.99 (2000db) and 1.00 (3000db), respectively. This fact strongly suggests that mean current field in the Kuroshio area is under the geostrophic balance.

1. はじめに

外洋では、吹送流や潮流など短期間に変動する流れの成分を除き、海水の流れの力学は、黒潮をはじめとして地衡流バランスにあると考えられる。事実、基準面を1000m程度より深く採った力学計算から得られる海面の力学的な高度偏差の水平分布図は、GEK（電磁海流計）やADCP（音響式ドップラー流速プロファイラー）で測定した流速データを統計処理した結果の流速分布と良く対応する。一方、水路部は海流の調査手法として人工衛星追跡型の表層漂流ブイを1980年から使用している（例えば、Ishii *et al.*, 1982）。これらの漂流ブイの移動する速さと地衡流の速さとが、どの程度合致するかを調べるのは、意義のあることと考える。石井（1992）は、本州南方の主に黒潮域を

漂流したブイのうち、漂流の前後1カ月程度の期間内に周辺海域でCTD観測やナンゼン観測（以下、海洋観測と言う）が行われたものを選び、地衡流速と漂流速度とを比較した。しかし、これらの中には、ブイの漂流範囲の採り方が適切でなかったり、計算の誤りなどがあった。本報告では、これらの見直しを行い、比較した結果を述べる。

2. 方法

1980年から1989年までの期間に、船舶による海洋観測がなされた測点の付近を通過した漂流ブイを抽出し、ブイの漂流速度と力学計算から求めた海面での地衡流の速度を比較した。Fig. 1 a, bに、海洋観測点对（○印）とその周辺での漂流ブイの軌跡を示す。二図に分けたのは、錯綜を避けるためである。漂流ブイの観測位置を全てではないが、

† Received 1996 March 7th Accepted 1996 March 21st
* 水路部海洋調査課 Ocean Surveys Division, Hydrographic Department

黒丸 (●) で示した。大きな黒丸は、地衡流速と比較した対象期間の始めの位置 (始点) と終わりの位置 (終点) を表す。始点と終点は、2点間の距離 (移動距離) が海洋観測点間の距離と同程度となるよう、主観的に選んだ。地衡流速と比較する漂流ブイの速度成分 (U_{drift}) として、当然、地衡流と同一方向の速度成分を計算する。すなわち、地衡流速は2つの海洋観測点を結ぶ直線に直角方向の流速であるが、ブイの始点・終点間の距離を所要時間で除して求めた速度ベクトルの、この方向への射影を取ったのが U_{drift} である。

力学計算により地衡流速を求める際、最も浅い基準面を1000db (deci-bar; デシバール) 面とし、最深は3000db 面とした。1000db 基準の海面での地衡流速の計算に使用した海洋観測点对の数、すなわち比較したケースの数は31である。2つの海洋観測点の間を横切るような漂流ブイの経路を抽出するのが好ましいが、必ずしもそうならない。なかには、ブイの軌跡が2つの観測点を結ぶ直線に交わらず、Fig. 1のケース番号4, 8, 29のように平行に近い場合もある。

漂流ブイの経路が曲率をもつ場合、遠心力が働いて、海水の流れが傾度流 (gradient flow) 平衡にある可能性を考え、ブイの連続する3点の位置から曲率半径を求めた。計算に用いたブイの位置は、測定値そのものではなく、次のように平滑化した値である。まず、測定された時刻と位置 (緯度・経度) から、4時間ごとの正時 (0, 4, 8, 12, 16, 20時) の位置を内挿補間する。内挿方法は、JODC (日本海洋データセンター) が、離散的な観測深度のデータ値から、一定の深度における値を求める際に使用している方法 (AKIMA 法) である。ここでは、連続する6個のデータから、3番目と4番目の時間内に含まれる4時間ごとの正時の位置を内挿した。更に、内挿値に7個 (24時間) の移動平均をかけた。これは、対象海域が28~35°N であることから (Fig. 1), 潮流や慣性振動の成分を除去するためである。

海洋観測データの出所は、1980年から1984年までは JODC が編集した『Data Report of KER』

の No. 3-No. 8 である。1985年以後は、『気象庁海洋気象観測資料』ならびに『水路部観測報告 (海洋編)』によった。

3. 結果

海面の地衡流速 U_G と、漂流ブイの漂流速度 U_{drift} との関係を Fig. 2 に示す。地衡流計算の基準面は、1000db (上図), 2000db (中図) および3000db (下図) とし、地衡流速を U_{G1000} , U_{G2000} , U_{G3000} とそれぞれ表す。図中の各印は、四角 (■) が U_{G1000} のみ得られた場合 (11ケース), 三角 (▲) が U_{G2000} まで (5ケース), 丸印 (●) が U_{G3000} まで得られた場合 (15ケース) をそれぞれ表す。各印に添えた数字は、Fig. 1 に示したケース番号である。各図に U_G と U_{drift} との相関係数と回帰直線式を記したが、 U_{G3000} が得られたケースだけを選んだとき (丸印のデータのみ使用したとき) の結果も併せて示した。なお、地衡流速 U_G の方向と漂流速度 U_{drift} の方向が逆になる場合が2例あるが (ケース番号15, 16), U_{drift} を基準とし、 U_G をマイナス値として扱った。

当然とも言えるが、 U_{drift} と U_G の間には、Fig. 2 の各図に正の相関が見られる。基準面が1000, 2000, 3000db と深くなるにしたがい、回帰直線の傾きが0.66, 0.68, 0.80, 相関係数が0.72, 0.76, 0.85と大きくなる。また、 U_{G3000} が得られたケースについてのそれらは、傾きが0.64, 0.76, 0.80, 相関係数が0.79, 0.84, 0.85である。漂流速度の方が地衡流速よりも大きい傾向があるため、回帰式の傾きは1よりも小さい。また、 U_{drift} と U_{G1000} の差の絶対値の平均が21cm/s, 標準偏差が18cm/s と両者の差は大きく、40cm/s を超える場合が5例 (ケース番号9, 14, 21, 27, 30) もあるなど、非常に良い相関とは言えない。

漂流速度と地衡流速の差の原因として、比較した時期の相違 (海洋観測とブイ漂流の期間の差), ブイの漂流時間の長さ, 漂流経路の抽出方法 (始点・終点の選び方) がまず考えられる。つまり、両者を比較する際に時間・空間がマッチしていない可能性がある。そこで、速度差の絶対値と、観

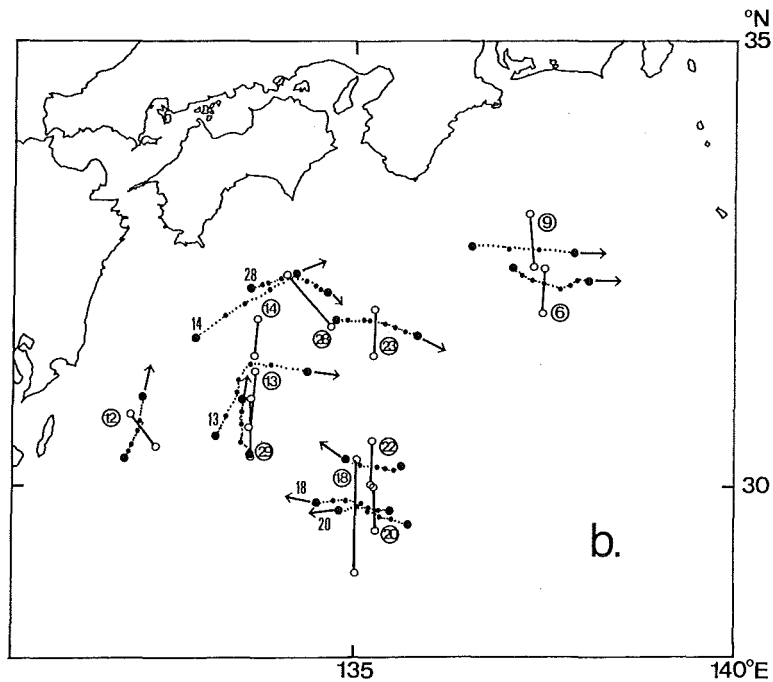
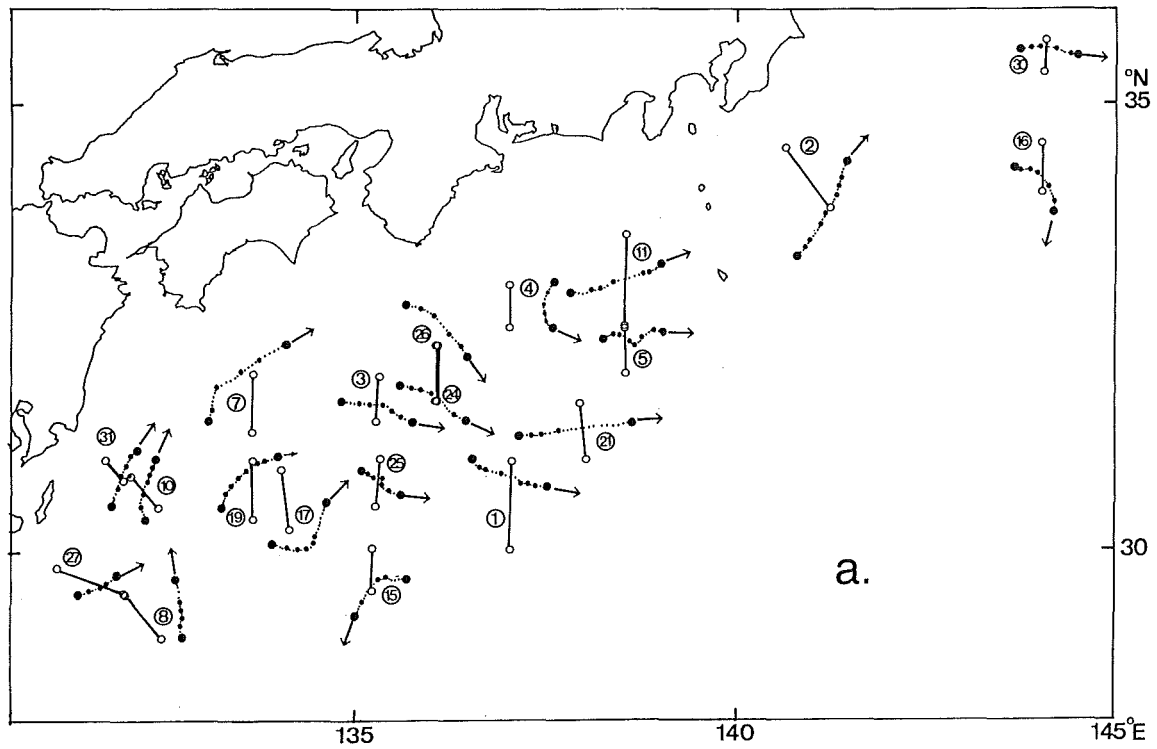


Fig. 1 a, b. Trajectories of the surface drifters and the hydrographic stations (open circles) by Nansen or CTD casts, which are used for comparison with drifting speed and geostrophic current speed. Larger solid circles mark the starting and ending positions of each drifter, and smaller ones partially mark observed locations. Numerals show the numbers of individual comparison cases.

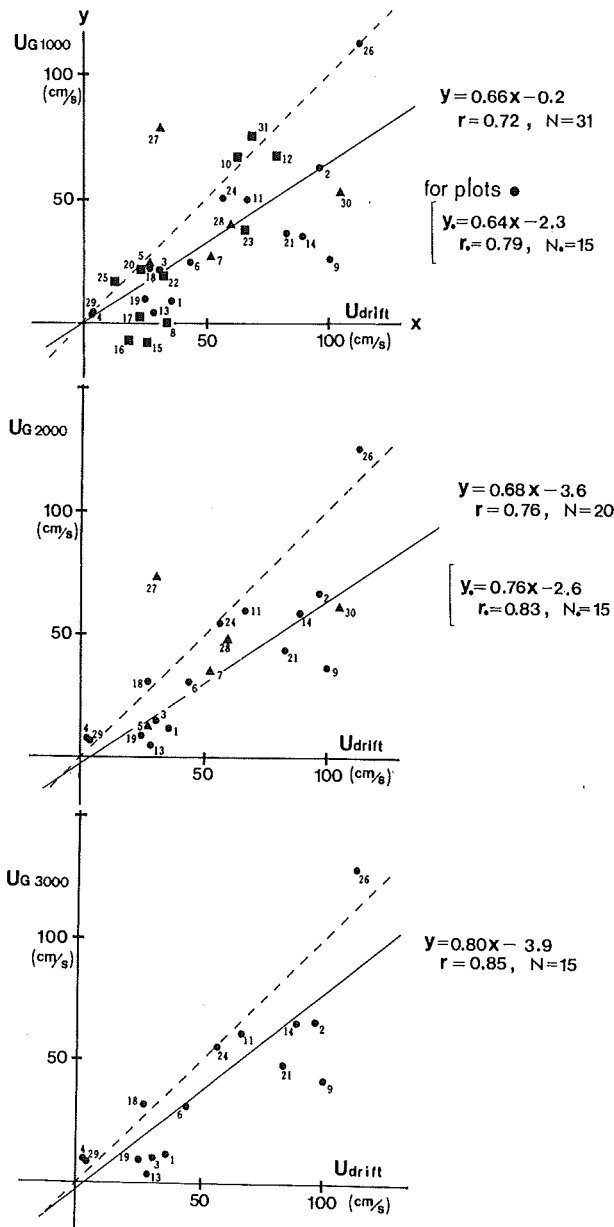


Fig. 2 Relations between drifting speed and geostrophic speed referred to 1000db (upper), 2000 db (middle) and 3000db (lower) surface, respectively. Square marks show the cases where 1000db is the deepest reference level in geostrophic calculation. Similarly, triangle marks are for 2000db cases and circle marks for 3000db. Numerals show the numbers of individual comparison cases. Solid line shows the regression line, and broken line is $y=x$. Correlation coefficient and numbers of data are shown as r and N . The equation of regression line and correlation coefficient are also shown for the cases where 3000db is deepest reference level.

測期間の差との関係 (Fig. 3 a), プイの漂流期間との関係 (Fig. 3 b) を見てみた. 海洋観測時刻は2測点の中間時刻とし, 漂流速度の観測時刻はプイの始点・終点の中間時刻とした. 図中の数字の添字は, 速度差が40cm/sを超えるケースの番号を表す. 図から, 速度差が観測時間差やプイ漂流期間に依存しているとは言えない.

Fig. 1 に示した各プイの始点と終点の間の直線距離を D_b , 2つの海洋観測点間の距離を D_s として, Fig. 4 a に D_b と D_s の関係を31個のケースについて示す. D_b と D_s の平均は, それぞれ93km, 69kmであり, 両者の差のばらつきも大きい. D_b と D_s の比 (D_b / D_s) および距離差 $|D_b - D_s|$ を, 地衡流速 U_{G1000} と漂流速度 U_{drift} の差との関係を示したのが Fig. 4 b, c である. 距離差 $|D_b - D_s|$ が大きいとき, また, 比 D_b / D_s が1より離れているときに, 速度差が40cm/s以上となるケースが発生しているようにも見える. そこで, $|D_b - D_s|$ が約30km以内となり, かつ, 比 D_b / D_s が0.8~1.6程度になるように, 漂流プイの始点と終点の採り方を31ケース中の18ケースについて修正し, 比較を試みた. 結果は, Fig. 5 のとおりであり, 速度差の大きさが, 距離差 $|D_b - D_s|$ や比 D_b / D_s に依存しているとは考え難い. また, 始点・終点の採り方を変えても, 漂流速度 U_{G1000} の変化は18ケースの平均で2.0cm/sにとどまる. したがって, 修正した漂流速度を用いて, Fig. 2 と同様にプロットしても, 基準面1000, 2000, 3000db に対して, 回帰直線の傾きが0.65, 0.67, 0.81, 相関係数が0.71, 0.75, 0.85と, ほとんど変化しない. このことから, Fig. 1 の海洋観測点の配置に対して選んだ漂流プイの軌跡の採り方は, 不適切でなかったと言える.

漂流速度と地衡流速との相違の原因の可能性として, 最後に, 海水に働く遠心力の効果考えた. 漂流プイの経路は, Fig. 1 に見られるように曲率を持つ場合がある. このとき, 遠心力の付加によって, 流れは傾度流となる. 傾度流の速度 U_{grad} と, 地衡流の速度 U_G との間には

$$U_{grad} = -fR [1 \pm (1 + 4U_G / fR)^{1/2}] / 2$$

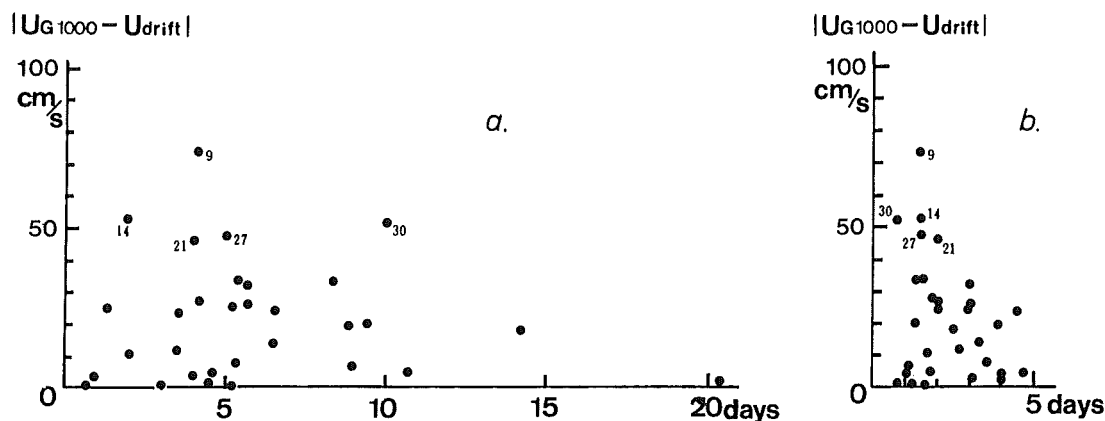


Fig. 3 Comparisons of the absolute value of the differences between drifting speed (U_{drift}) and geostrophic speed (U_{G1000}) referred to 1000db, with (a) the time differences in days between hydrographic observations and drifter measurements, and with (b) the durations in days of drifter measurements.

で表される関係がある (例えば, Apel, 1987). ここに, f はコリオリ・パラメータで地球自転角速度 ω , 地心緯度 ϕ として $f=2\omega \cdot \sin\phi$ と表される. R は曲率半径で高気圧性回転の場合はマイナス符号を取る. 地衡流の速度成分が, Fig. 1 の漂流ブイの始点・終点間では一定と仮定して, 漂流経路の曲率半径を求めれば, 傾度流の速度 U_{grad} を推定できる.

前節で述べたように, 平滑化した 4 時間ごとのブイの位置データを用いて, 曲率半径を計算した. なお, 位置が 4 時間ごとに与えられるので, 各ケースにおける計算の始めと終わりの位置は, Fig. 1 に示したものと少し異なる. 各ケースで, 連続する 3 点の位置から半径を求め, これを 1 点ずつずらしていくので複数の流速値が得られるが, これらを単純平均して傾度流の流速値とした. なお, 上記の式で, 2 つの U_{grad} 値が得られるが, 一方は現実的でない値をとるため, 選択は容易である. 傾度流と地衡流の速度差 $|U_{grad} - U_{G1000}|$ は, 全 31 ケースの平均で 1 cm/s であった. ケース番号 27 では, 流速増加の最大値 9.5 cm/s が得られる. しかし, ブイの漂流速度との差は, この増加分だけ更に広がる. 結果として, 傾度流と地衡流の速度差は無視できる程に小さいため, 漂流速度と地衡流速との差を縮めることはできない.

4. 考 察

前節で述べた傾度流について少し検討を加える. Taira *et al.* (1987) は, 大蛇行期の黒潮流域と, 伊豆大島北側の相模湾に投入した漂流ブイの経路に円軌道をあてはめ, 遠心力の大きさを評価している. 黒潮蛇行域に投入したブイには, ドローグ (抵抗布) が 300 m 層と 800 m 層に取付けられ, それぞれ 69 時間と 111 時間追跡された. 曲率半径は約 116 km と 97 km, 遠心力のコリオリ力に対する比は, 6% と 7% と見積もられた. 一方, 相模湾の黒潮に投入された 2 個のブイ (ドローグは 300 m 層) は, 26, 21.5 時間の追跡の結果, 曲率半径は約 18, 24 km, 遠心力のコリオリ力に対する比は 56%, 42% となった.

今回対象とした漂流ブイの経路の曲率半径を, 連続する 3 点の位置から求めるかわりに, 始め・終わりの点と主観で選んだ地理的中間点の 3 点から求めても大きな変化はない. この方法で求めた傾度流と, 地衡流の速度の差は全 31 ケースの平均で 1.2 cm/s である. 同様に, 平均半径は 288 km, 遠心力のコリオリ力に対する比は 5% となった. ケース番号 27 では, この比が 35% と特に大きい, これを除いた 30 個のケースの平均は, 半径 295 km, 比 4% となる. 本州南方の外洋域では, 大蛇行期の黒潮流路の曲率半径は最も小さいときのひとつと考えられる. 黒潮蛇行域における Taira *et al.*

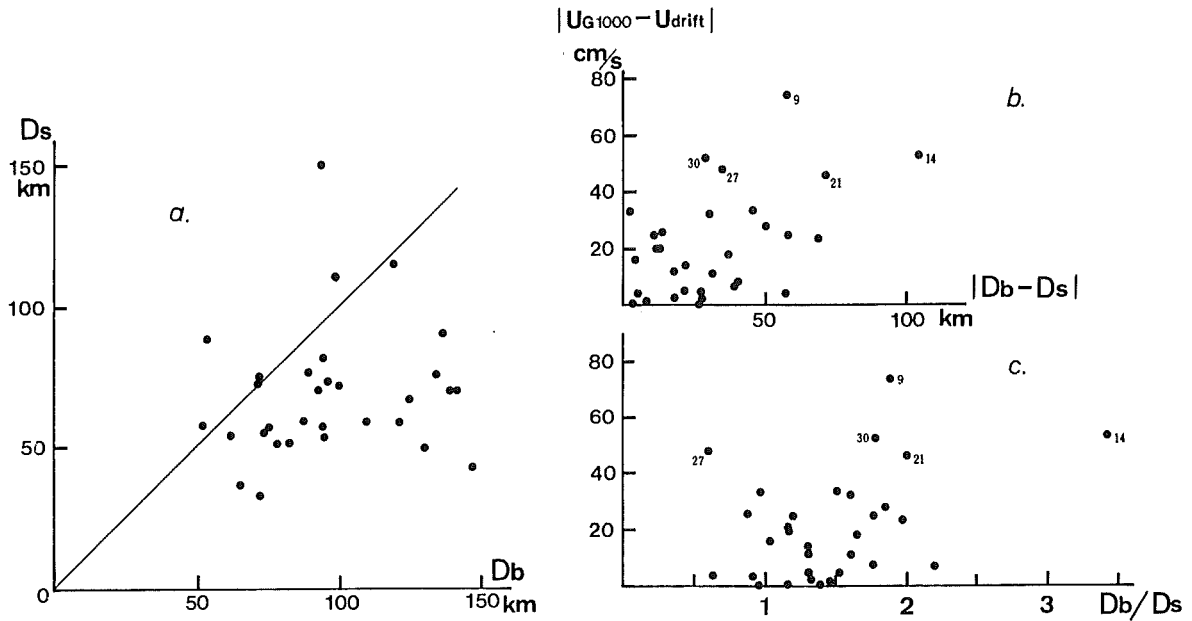


Fig. 4 a. Relation of the distances (D_s) between a pair of hydrographic stations with the distances (D_b) between the starting and ending positions of drifters shown in Fig. 1.
 b. Relation of the difference of D_s and D_b ($|D_b - D_s|$) with the difference between geostrophic speed (U_{G1000}) referred to 1000db and drifting speed (U_{drift}).
 c. The same as panel b., except for the ratio D_b / D_s instead of $|D_b - D_s|$.

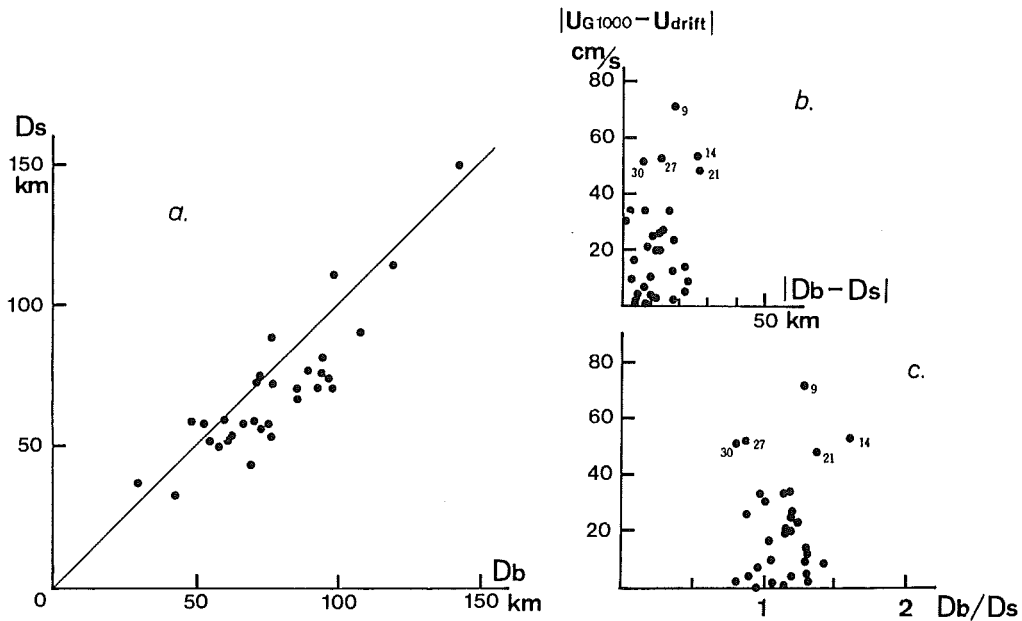


Fig. 5 The same as Fig. 4, except that starting and ending positions of drifters are modified in 18 cases among 31 cases.

の結果よりも、半径が約3倍大きく、遠心力対コリオリ力の比は2/3程度に小さいという、ここでの見積もりは妥当であろう。Fig. 1の漂流ブイの軌跡の曲率半径が全体としては大きく、したがって遠心力の効果が小さいため、地衡流速からの増減は数cm/sにとどまり、漂流速度と地衡流速との相違の原因を傾度流に求めることは困難である。

漂流速度と地衡流速との差が特に大きい原因のひとつに、風による吹送流の可能性もあるが、個々のブイの漂流期間の風速変化については未調査である。ここで、速度差が40cm/s以上となったケースを除いて、地衡流速 U_G と漂流速度 U_{drift} をプロットしたのが Fig. 6 である。この図は、Fig. 2 からケース番号 9, 14, 21, 27, 30 における値を特異値として除いた結果である。基準面の深さ 1000, 2000, 3000db に対して、回帰直線の傾きが 0.96, 0.99, 1.00, 相関係数が 0.90, 0.93, 0.91 となる。5つのケースを除くことにより、Fig. 2 に比べて回帰式の傾きは 1 に極めて近く、相関も高くなる。更に、3000db 基準の地衡流速 U_{G3000} が得られたケース (Fig. 6 の三角と四角で表した値を除いた場合) についてのそれらは、傾きが 0.91, 0.99, 1.00, 相関係数が 0.94, 0.93, 0.91 となる。

基準面が深くなるにつれ、回帰式の傾きが 1 に近づくが、1500db と 2500db 基準の場合を加えて、基準面深度に対する地衡流速の変化の様子を見た。Fig. 6 の最下図に示した U_{G3000} が得られた 12 個のケースについて、1000, 1500, 2000, 2500 および 3000db 基準の海面地衡流速値をそれぞれ平均した後、 U_{G3000} に対する比を求める。一方、これら 5つの基準面ごとに、 U_G と U_{drift} 間の回帰直線の傾きを計算し、基準面の深さを 3000db としたときの傾きに対する比を求める。これら 2種の比を、基準面の深さに対してプロットしたのが Fig. 7 である。図から、基準面が 2000db 以深では、これらの比の値は余り変わらないことがわかる。Nitani (1975) は、遠州灘沖の黒潮地衡流量の基準面深度に対する依存性について解析した。Nitani が解析に使用した地衡流量値は、最深の基

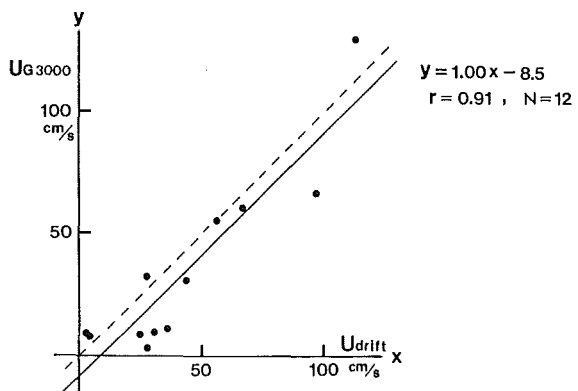
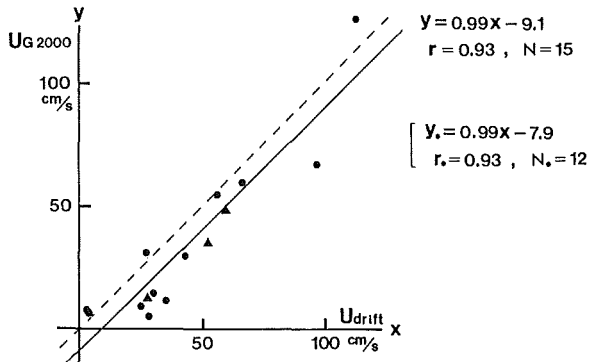
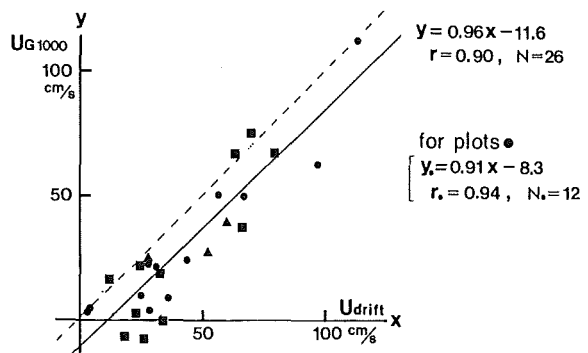


Fig. 6 The same as Fig. 2, except that five cases (9, 14, 21, 27, 30 in the case number) are excluded, recognizing as these cases' data are extreme.

準面が1600dbであったため、それ以深については外挿して、黒潮域の無流面は2000~2500dbの深さに在る可能性を示し、暫定的に無流面2300dbを採用している。Fig. 7に示した結果は、Nitaniの推定と矛盾しない。

表層漂流ブイの流れる速度は、平均的には地衡流速と良い対応を示す。このことは、少なくとも本州南方の黒潮流域において、地衡流バランスが成立していることを強く示唆する。また、無流面は1000dbよりは深く、2000db程度にあると推測される。ただし、Fig. 6中の回帰式のy切片は、いずれも-8~-12(cm/s)の範囲にあり、漂流速度が地衡流速より系統的に大きいことを示している。また、3000db基準の地衡流速が得られた12ケースについての回帰式のy切片は、-8.3, -7.9, -8.5と変化が小さい。このことは、海中の密度分布構造に依存しない流れ(順圧流)の成分の存在を憶測させるが、本報告で用いたデータからは、これ以上の議論はできない。

5. まとめ

表層漂流ブイの漂流速度 U_{drift} と、漂流ブイの流れた付近の海洋観測結果から計算した地衡流の速度 U_G とを最多で31ケースについて比較した。対象とした海域は本州南方の黒潮流域が主であ

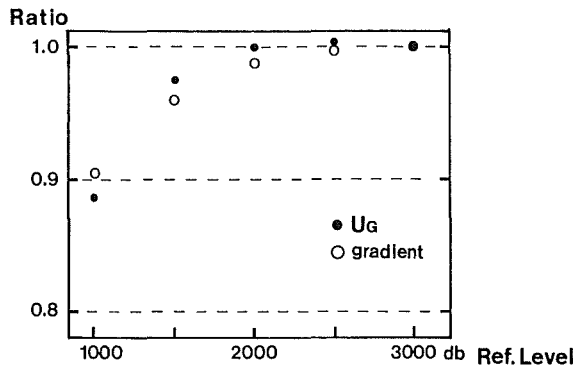


Fig. 7 Solid circles show the ratios of geostrophic current speed in several reference levels to that referred to 3000db. Similarly, open circles show the ratios for the gradient of regression line. Both values of geostrophic speed and gradient are the average of twelve cases which are marked with solid circles in Fig. 6.

り、力学計算時の基準面の最深は3000db面とした。両者は正の相関を示し、基準面が深くなるにつれ、回帰直線の傾きは大きくなり、0.66 (1000db基準), 0.68 (2000db基準, 20ケース), 0.80 (3000db基準, 15ケース)となった。

両者の速度の差は、平均して約20cm/sあり、 U_{drift} の方が大きい。この差は、ブイの漂流時間の長さや、海洋観測と漂流ブイ観測の時期の差に因るものとは考え難い。また、漂流経路が曲率をもつことから、傾度流バランスの成立を仮定すれば、地衡流速からの増減も考えられる。しかし、遠心力の効果は極めて小さく、地衡流速からの増減は数cm/sにとどまり、漂流速度と地衡流速の大きな差の原因を、傾度流に求めることは困難である。

漂流速度と1000db基準の地衡流速との差が、40cm/s以上となった5つのケースを特異なケースと見なして除いた後の、漂流速度と地衡流速の比較では、回帰直線の傾きは0.91 (1000db基準), 0.99 (2000db基準), 1.00 (3000db基準)となった。ブイの漂流速度は地衡流の速度と平均的には良く合っており、本州南方の黒潮流域において地衡流バランスが成立していることが強く示唆される。

参考文献

Apel, J. R. (1987) : Geophysical Fluid Dynamics II : Currents and Circulation, 247-342, Chapter six in *Principles of Ocean Physics*, Academic Press.

石井春雄(1992) : 漂流ブイの速度と地衡流速の比較. 平成2年度黒潮の開発利用調査研究成果報告書, 33-36

Ishii, H., R. Saruwatari, Y. Ueno, S. Kuramoto and H. Nishida (1982) : Application of drifting buoys in ocean research. *Rep. Hydrogr. Res.*, **17**, 347-365.

Nitani, H. (1975) : Variation of the Kuroshio south of Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **31**, 155-173.

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.