

常磐沖および黒潮続流域の流動・拡散特性

—アルゴスバイによる現地観測—

水鳥雅文*・坂井伸一**

1. はじめに

地球温暖化や海洋汚染などの地球規模の環境問題を考える場合、海洋における循環や拡散に関する定量的情報を収集することは重要な課題である。こうした情報を得るための観測手法の一つに人工衛星で追跡する漂流バイ（アルゴスバイ）を用いる方法がある。これは、図-1に示すように、衛星に搭載されたデータ中継器を介して、バイの位置（測定精度±350 m程度）やバイので観測されたデータを1日に10回前後の頻度で収集するものである。

本研究は、このアルゴスバイを複数同時投入して得られた現地観測結果をもとに、常磐沖および黒潮続流域における流動・拡散特性を解析・検討するものである。

2. 現地観測の内容とバイの漂流過程

本研究で使用したバイは、図-1中に示すように、長さ約1 m、重量約22 kgの浮体から長さ4 m、幅1 mのドローク（抵抗布）を垂下させる方式の漂流バイである。ブ

イ下部には水温センサーが付いており、位置情報とともに水温情報も得られる。

1992年10月28日、福島県富岡町沖約30 kmの海域において、図-2中に示す十字状に配置した5地点からバイを同時投入し、約1ヶ月間にわたりバイの位置と水温データを連続観測した。

観測されたバイの軌跡を図-2に示す。投入後のバイ群は比較的一様に南下し、その後鹿島灘付近で黒潮続流域へと移り東進し、1ヶ月後にはおよそ東経155°付近まで達した。その過程では、茨城県北部海域における一部バイの沖合への分枝や、黒潮続流域における幾つかの反時計回りの円弧を描く軌道といった現象等が認められた。

図-3は、バイAおよびEの移動速度の時系列変化を示す。常磐沖では間欠的に高い流速を示すことがあるものの、概ね10~50 cm/s程度で推移している。黒潮続流域に入ると、100~200 cm/s近い高流速となるが、その後は徐々に減速している。

また、図-4には、同じくバイA、Eで観測された水温

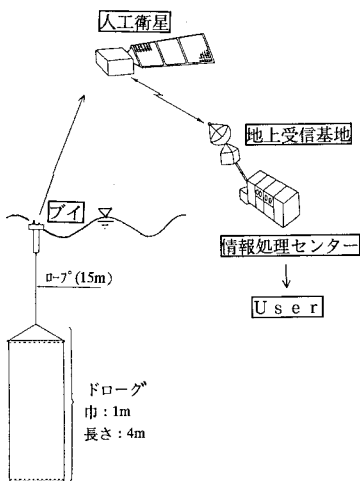


図-1 アルゴスバイの概要

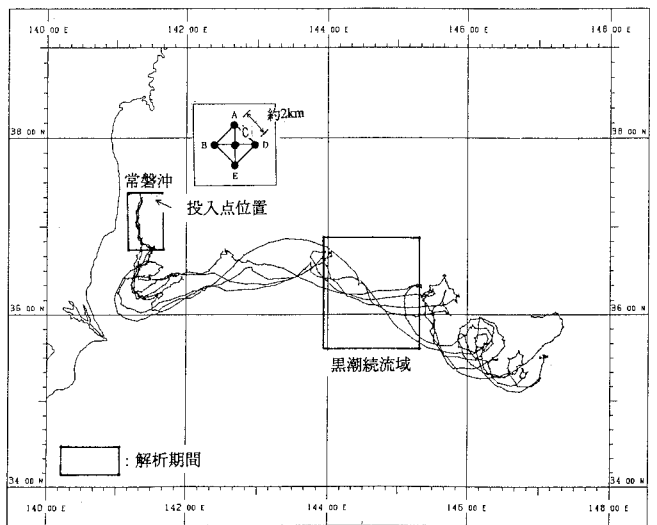


図-2 バイの投入点と軌跡

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所
 ** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所

時系列変化を示す。常磐沖での水温は16°C程度で、南下とともにわずかながら低下傾向を示す。黒潮統流域に入ると水温は急激に上昇し、明らかにプイが水温フロントを通過したことを物語っている。ただし、その水温上昇幅は、プイによって1~6°Cの幅でかなりばらつきが見られた。これは、同じ黒潮統流域内でも北寄りのコース

や南寄りのコースなど様々な軌道を通ったことを意味している。

3. 海水運動の水平変形率と鉛直流速

全観測期間の内、常磐沖および黒潮統流域の各水域において、プイの相対位置から見て4つ以上のプイがほぼ

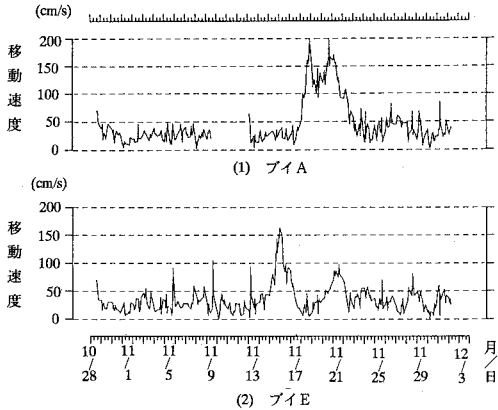


図-3 プイの移動速度の時系列変化

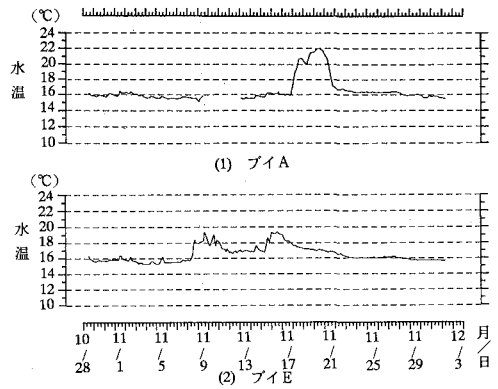
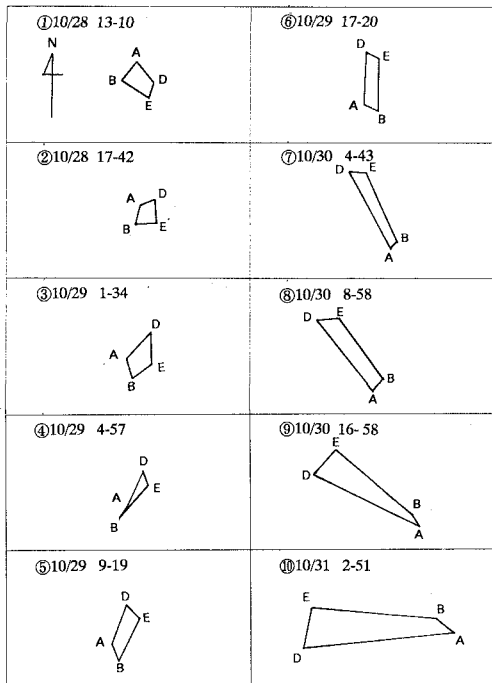
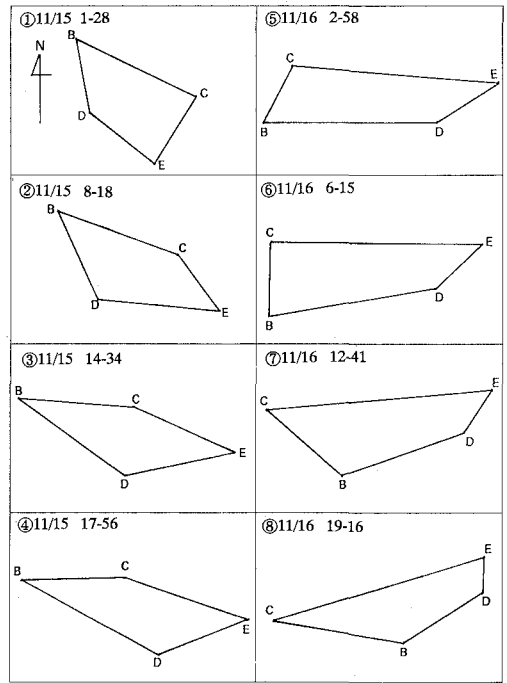


図-4 プイで観測された水温の時系列変化



図中の時刻(時-分)は、プイAの受信時刻

(1) 常磐沖



図中の時刻(時-分)は、プイEの受信時刻

(2) 黒潮統流域

図-5 プイの位置関係の推移

等間隔に位置する時点から同一水塊中に見なせる期間を選定し、各水域における表層付近での流動特性について解析した。

解析期間は、図-2中に示した範囲を漂流した期間で、常磐沖では10/28~10/31、黒潮統流域では11/15~11/17である。各期間で対象としたブイは、常磐沖はブイA, B, D, E、黒潮統流域ではB, C, D, Eのいずれも4台である。

図-5に各解析期間中における4台のブイの位置関係(図中には4台のブイをつなぐ4角形として表示)の変化を示す。常磐沖においては、最初南下とともに反時計回りの回転をしながら徐々に沿岸方向(南北方向)に長くなる傾向を示すが、10/30に入り、徐々にブイA, Bが沖合方向へと流れ出し、これによって4台の位置関係は沖合方向へ長くなる傾向に転じている。黒潮統流域においては、常磐沖の場合ほど大きな形状変化は見られないが、やはり反時計回りの回転をしながら、収束や発散、ゆがみなどの変形を繰り返している。

本研究では、まずOkubo and Ebbesmeyer (1976)の解析法を用いて、各解析期間におけるブイの移動速度をブイ群の平均速度成分、シア成分、および乱れ成分に

分解した。そして得られたシア成分より、次式のような水平2次変形率(水平発散 γ および渦度鉛直成分 η)を算出した。

$$\gamma = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y \dots\dots\dots (2)$$

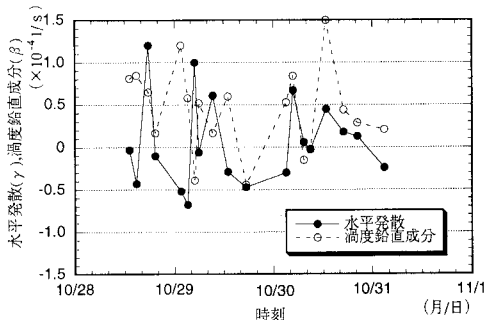
図-6は、各水域における前述の水平変形率の経時変化を示す。いずれの変形率についても常磐沖では黒潮統流域に比べ変動が大きく、収束と発散の繰り返しや渦度の増減が顕著であることがわかる。

次に、この渦度鉛直成分の時系列データから表層付近での鉛直流速成分 w を見積もる。海洋での物質循環を考える上で、鉛直流速は重要な要素であるが、その速度は水平流速に比べ極めて小さく、直接的に計測することは難しい。

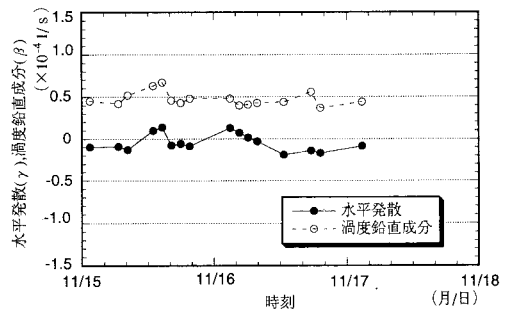
本研究では、Swensonら(1992)がCalifornia沖のCold Filamentを対象として用いた、渦度方程式から近似した次式により、ブイの持つドロッグの中心深さ z_0 (海面下約17m層)での鉛直流速成分を評価した。

$$w(z=z_0) \approx z_0 \left((\eta + f)^{-1} \frac{d_H(\eta + f)}{dt} \right)_{(z=z_0)} \dots\dots (3)$$

ここで、 $d_H/dt = \partial_t + u\partial_x + v\partial_y$ 、 f はコリオリのパラメータ

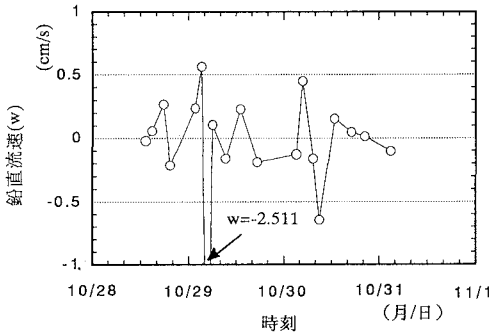


(1) 常磐沖

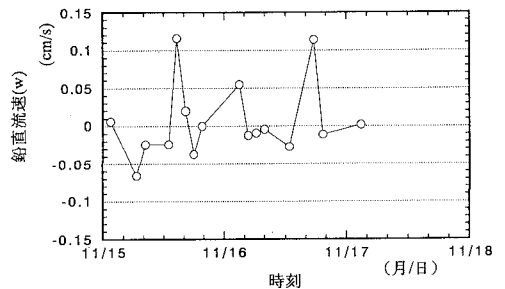


(2) 黒潮統流域

図-6 水平発散および渦度鉛直成分の時系列変化



(1) 常磐沖



(2) 黒潮統流域

図-7 鉛直流速成分の時系列変化

である。

図-7は、図-6に示した渦度鉛直成分の時系列データに基づき、上式より求めた常磐沖および黒潮統流域における鉛直流速（海面下約17m層）の時系列変化を示す。黒潮統流域での鉛直流速は、概ね±0.05 cm/sの範囲にある。この範囲は前述のM. S. Swensonら(1992)のCalifornia沖のCold Filamentを対象とした観測結果とほぼ同程度である。一方、常磐沖での鉛直流速は、概ね±0.5 cm/sの範囲にあり、黒潮統流域に比べ水平流速が小さい割に、鉛直流速は1オーダー程度大きく、鉛直的に混合が盛んであることを伺わせる。

4. 水平乱流拡散係数

各水域における拡散特性を検討するため、以下に示す2つの方法により水平乱流拡散係数 K^* を算出した。

第一は、前章でOkubo and Ebbsmeyer (1976) の解析法を用いて求めたプイ移動速度の乱れ成分より、次式により算出する方法である(以下、大久保の方法と呼ぶ)。

$$K_x^* = c\sigma_x\sigma_u, \quad K_y^* = c\sigma_y\sigma_v, \quad K^* = (K_x^* + K_y^*)/2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 K_x^*, K_y^* は K^* の東西 (x), 南北 (y) 方向の各成分、 σ_x, σ_y は各プイの位置のプイ群重心からの偏差の標準偏差、 σ_u, σ_v は流れの乱れ成分の標準偏差、 c は0.1~1.0の定数、である。

第二は、川合 (1976) の示唆するところに従い、プイ群の分散が現実には異方性を示すことに着目し、次式のような幾何平均主軸分散 σ^2 、

$$\sigma^2 = (\sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2 - \sigma_{xy}^2)^{1/2} \quad (\sigma_{xy}^2 \text{ は共分散}) \dots\dots\dots (5)$$

を求め、これに基づいたみかけの拡散係数 $K (= (1/2)(\partial\sigma/\partial t))$ と K^* との間の次のような関係式をもとに K^* を算定する方法である (以下、川合の方法と呼ぶ)。

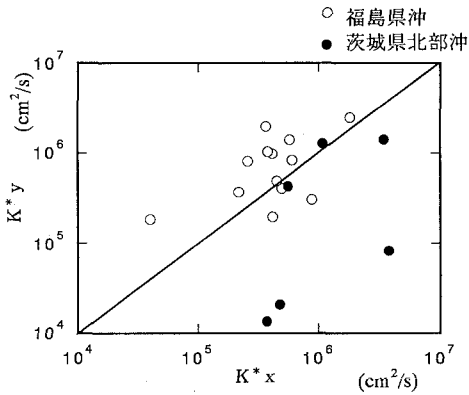
$$K = \sigma^2 \cdot \gamma/2 + K^* \quad \dots\dots\dots (6)$$

図-8は、大久保の方法により求めた各水域における水平乱流拡散係数の各方向成分の分布を示す。ただし、(4)式中の定数 c は1.0として算定している。常磐沖についてみると、福島県の沖では両方向成分ともほぼ $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ で等方性の値を示すが、茨城県北部の沖に入ると K_x^* は $5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 K_y^* は $10^4 \sim 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ と沖合方向に大きい異方性を示す。これは、この付近の海岸地形に起因する流れの特性に影響されているものと推測される。一方、黒潮統流域では、 K_x^* は $10^6 \sim 10^8 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 K_y^* は $10^5 \sim 5 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ と流れの主流方向である東西 (x) 方向に大きい異方性を示す。

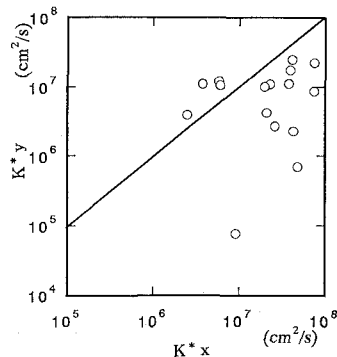
図-9は、2つの異なる方法で算出した水平乱流拡散係数の比較を示す。両者を比べると、大久保の方法 ($c=1.0$) を用いた方がやや大きい傾向がうかがえる。両者が同程度の値をとるべきという立場に立てば、前述の定数 c は0.3程度が適当と考えられる。また、こうして得られた K^* の範囲は、概ね常磐沖で $10^4 \sim 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、黒潮統流域で $10^5 \sim 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ となる。

図-10は、各水域で得られた水平乱流拡散係数と、Okubo (1971) のまとめた既往の染料拡散実験による実測値との比較を示す。長さスケールは、各水域での幾何平均主軸分散の標準偏差 σ の期間平均値の3倍をとっており、常磐沖では約 $6.3 \times 10^5 \text{ cm}$ 、黒潮統流域では約 $5.1 \times 10^6 \text{ cm}$ となる。ただし、染料拡散実験の結果は、みかけの拡散係数と言うべきものであり、両者は厳密には比較できない。しかし、得られた値の妥当性や特徴を検討する上では、一つの参考となろう。

本研究で得られた係数値は、ばらつきが大きいのが、平均的にみると常磐沖では大久保のまとめた結果とほぼ同程度であり、黒潮統流域では1オーダー程度大きいものと判断される。ここで対象とした黒潮統流域は海洋全体の中でも非常に高流速の水域であり、流速変動もかなり



(1) 常磐沖



(2) 黒潮統流域

図-8 水平乱流拡散係数の各方向成分 (大久保の方法による)

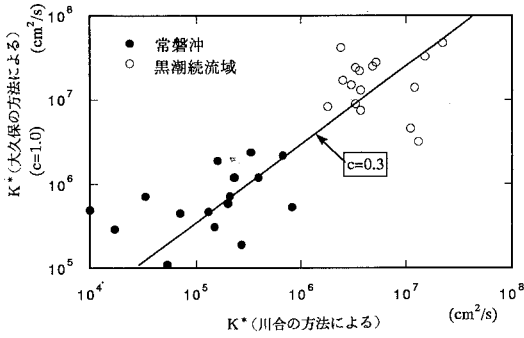


図-9 算出方法の相違による水平乱流拡散係数の比較

大きいことから、他の海域に比べ水平的な拡散現象が著しいことは十分考えられる。

また、加藤ら (1978) は、福島県沖での定点流動連続観測結果から、オイラー的に水平乱流拡散係数を算出している。それによると1日程度の時間スケールで概ね $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ で、今回の常磐沖での解析結果は、この結果と平均的にほぼ一致している。

5. おわりに

以上、複数のアルゴスプイを同時に利用した海洋観測により、単なる流況情報だけでなく、表層付近での鉛直流速や水平乱流拡散係数など、常磐沖や黒潮統流域における様々な海洋情報を得ることができた。

また、今回の検討結果から、本報で用いた海洋観測手法は、広域的な海洋情報を収集する上で有用な観測手段の一つと判断された。こうした観測例は、日本近海では極めて少ないが、今後活用事例の増加することを期待する。

なお、本研究の現地調査の実施にあたり三洋テクノマリン(株)の渡辺秀俊氏ならびに山口初代氏に多大な協力を得た。ここに記して謝意を表する。

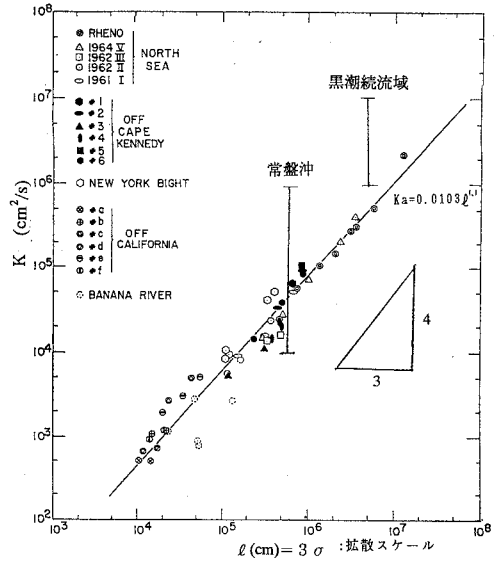


図-10 既往の現地染料実験による拡散係数値との比較 (Okubo (1971) の図に本研究の実測結果を加筆)

参考文献

加藤正進, 和田 明, 角湯正剛 (1978): 福島沖合海域における流動と拡散特性, 第22回水講演文集, pp. 55-60.
 川合英夫 (1976): 海洋物理学II (寺本俊彦編), pp. 132-133.
 水鳥雅文, 坂井伸一 (1994): アルゴスプイを用いた常磐沖から黒潮統流域における流動・拡散特性の観測, 電中研研究報告 U93046, pp. 1-39.
 Okubo, A. (1971): Oceanic diffusion diagrams, Deep-Sea Res., 18, pp. 789-802.
 Okubo, A., and C. C. Ebbesmeyer (1976): Determination of vorticity, divergence and deformation rates from analysis of drogue observations, Deep Sea Res., Vol. 23, pp. 349-352.
 Swenson, M. S., P. P. Niiler, K. H. Brink, and M. R. Abott (1992): Drifter observations of a cold filament off Point Arena, California, in July 1988, J. Geophys. Res., Vol. 97, pp. 3593-3610.