

相模湾における漂流実験と吹送流について

寄高博行, 橋間武彦, 工藤宏之: 海洋研究室

Drifter Experiment and Wind-Induced Current in Sagami Bay

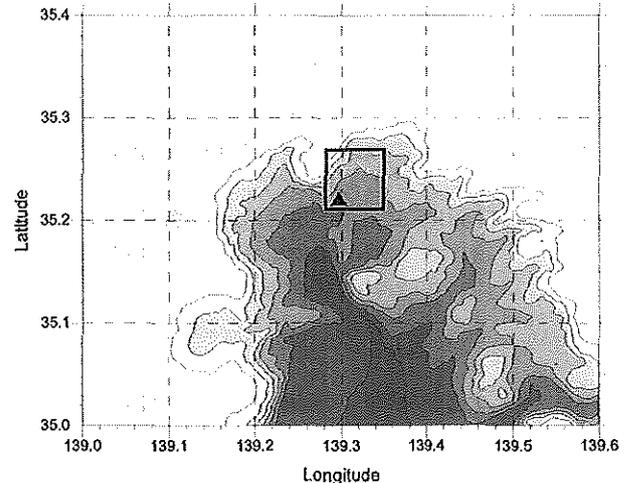
Hiroyuki Yoritaka, Takehiko Hashima, Hiroyuki Kudo : Ocean Research Laboratory

1. はじめに

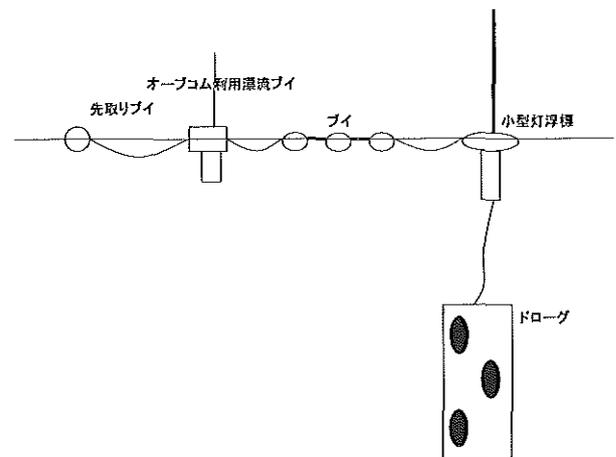
海上風によって直接駆動される吹送流の分布は海面付近に限定され、その水平収束・発散のみが中深層に至る海洋循環に寄与しているとされるが、海面を浮遊する物体にとっては移動速度の重要な構成要素となる。吹送流は海面付近で最も大きく、数十mの鉛直スケールで急激に減衰するため、鉛直粘性係数等のパラメータを推定するためには海面付近での流れの鉛直構造を測定する必要がある。既存の機器では測定が困難な面が多い。ドローク（抵抗体）を付けた漂流ブイと付けない漂流ブイを同時に放流する実験からは鉛直シアアの時間変化が得られ、吹送流のパラメータを推定する上で貴重なデータをもたらす。ここでは平成11年1月に実施された漂流実験結果から、吹送流のパラメータの推定とその時刻の風に係数・偏角を施した簡易型の吹送流推定による結果との相違を報告する。

2. 漂流実験

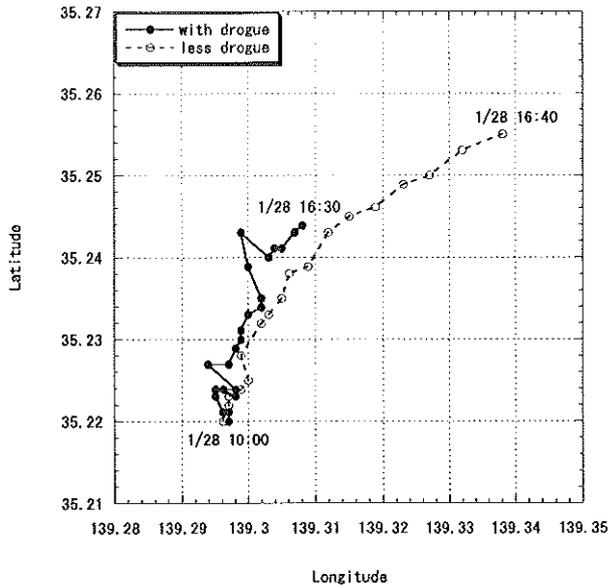
実験は測量船「明洋」によって、平成11年1月28日に相模湾の中央付近で実施された。第1図に放流点を示す。オーブコム衛星を利用して自身の位置を通報する漂流ブイに、一方に先取りブイを、他方にブイを介して小型灯浮標を連結し、その小型灯浮標にドロークを付けたものと付けないものを10時前から17時前まで約7時間漂流させた。第2図に漂流システムの概要を示す。漂流ブイの測位記録間隔はドローク付きで当初30分、11時から15分間隔、ドロークなしで20分間隔となっていた。第3図に各漂流ブイの軌跡を示す。測位間隔が不均一であるため、こ



第1図 漂流ブイの放流点 (▲) と漂流範囲 (□ : 第3図の範囲)。水深コンターは200m毎。
Figure 1 Release point of surface drifters (▲) and drifting area (□ : area shown in figure 3). Depth is contoured with interval of 200m.



第2図 漂流システムの概要。
Figure 2 Overview of drifting system.



第3図 漂流ブイの軌跡。●はドローク付きを、○はドロークなしを示す。

Figure 3 Tracks of drifting buoys. ● denotes the drifter with drogue, ○ denotes the drifter without drogue.

の原データから30分毎に前後30分の範囲にある測位記録を用い、最小自乗法で漂流速度を算出した。

3. 吹送流の推定

(1) 1次元シミュレーション

漂流ブイ放流点は岸から約9 km離れ、水深も約1000 mと深いことから、吹送流は地形の影響を受けず水平一様として鉛直1次元のシミュレーションを行った。水平流速を圧力傾度とバランスする地衡流成分 (U_g, V_g) と非地衡流成分 (U_e, V_e) に分離すると、非地衡流成分に対する線形の発展式は、

$$\partial U_e / \partial t = f * V_e + A_z * \partial^2 U_e / \partial z^2 \quad (1a)$$

$$\partial V_e / \partial t = -f * U_e + A_z * \partial^2 V_e / \partial z^2 \quad (1b)$$

ここで f はコリオリパラメータ、 A_z は鉛直粘性係数を示す。この方程式を境界条件、

$$\begin{aligned} A_z * \rho * \partial U_e / \partial z &= \tau_x, \\ A_z * \rho * \partial V_e / \partial z &= \tau_y \\ \text{at } z=0 \end{aligned} \quad (2a)$$

$$U_e = 0, V_e = 0 \text{ at } z = -z_0 \quad (2b)$$

のもとで積分する。 ρ は海水の密度、 τ_x, τ_y は風応力、 $-z_0$ は充分深い境界深度を示す。

式(1)は拡散方程式となっているため、時間には前

進差分を用いる。鉛直方向には中央差分を用いると、次ステップの流速 U_e^*, V_e^* は、

$$\begin{aligned} U_e^*(j) &= U_e(j) + dt * (f * V_e(j) \\ &\quad + A_z * (U_e(j+1) - 2 * U_e(j) + \\ &\quad U_e(j-1))) / dz^2 \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} V_e^*(j) &= V_e(j) + dt * (-f * U_e(j) \\ &\quad + A_z * (V_e(j+1) - 2 * V_e(j) + \\ &\quad V_e(j-1))) / dz^2 \end{aligned} \quad (3b)$$

ここで、 $j-1, j, j+1$ は鉛直方向の格子を、 dt は時間ステップを、 dz は鉛直格子間隔を示す。海面の境界条件 (2a) については片側差分とすると精度が $O(dz)$ となるので、海面直下とその下の格子データも用いる。海面直下とその下における関数 F を2次のオーダーまでテイラー展開すると、

$$\begin{aligned} F(-dx) &= F(0) + F'(0) * (-dz) \\ &\quad + F''(0) * (-dz)^2 / 2! \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} F(-2 * dx) &= F(0) + F'(0) * (-2 * dz) \\ &\quad + F''(0) * (-2 * dz)^2 / 2! \end{aligned} \quad (4b)$$

ここで F' は鉛直方向の1回微分、 F'' は2回微分を示す。(4)式から $F''(0)$ を消去すると、海面における1回微分は、

$$\begin{aligned} F'(0) &= (3 * F(0) - 4 * F(-dz) \\ &\quad + F(-2 * dz)) / (2 * dz) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。従って海面における境界条件 (2a) は、

$$\begin{aligned} U_e(0) &= (4 * U_e(-1) - U_e(-2) \\ &\quad + 2 * dz * \tau_x / (A_z * \rho)) / 3 \end{aligned} \quad (6a)$$

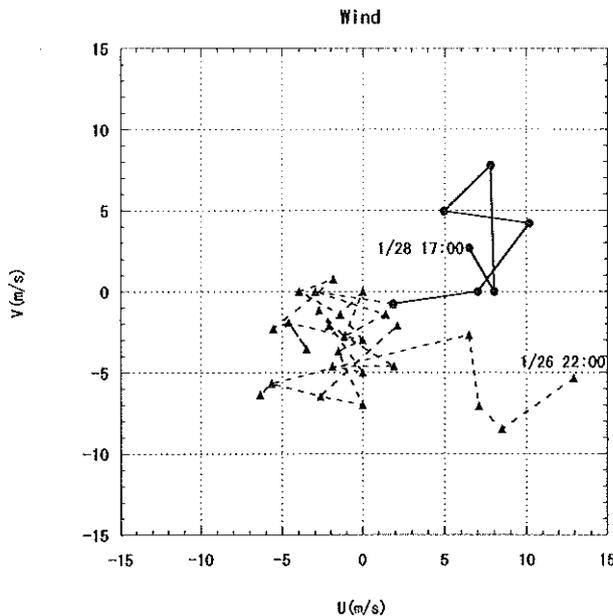
$$\begin{aligned} V_e(0) &= (4 * V_e(-1) - V_e(-2) \\ &\quad + 2 * dz * \tau_y / (A_z * \rho)) / 3 \end{aligned} \quad (6b)$$

となる。

上記の数値積分を $dz=0.5$ m の格子間隔で500 m深を下部境界とし、静止状態から行った。定常解であるエクマン吹送流が成立した場合に、流速が海面の $1/e$ になるエクマン境界層の厚さ $H_e (= \sqrt{(2 * A_z / f)})$ が10 m から100 m まで10 m 毎となるような10種類の A_z に対して計算を行った。拡散方程式の差分解法における安定条件は、

$$dt < dz^2 / (2 * A_z) \quad (7)$$

であるため、用いた最大の $A_z=0.42$ [m^2/s] に対して時間ステップは $dt < 0.3$ [sec] を求められる。こ

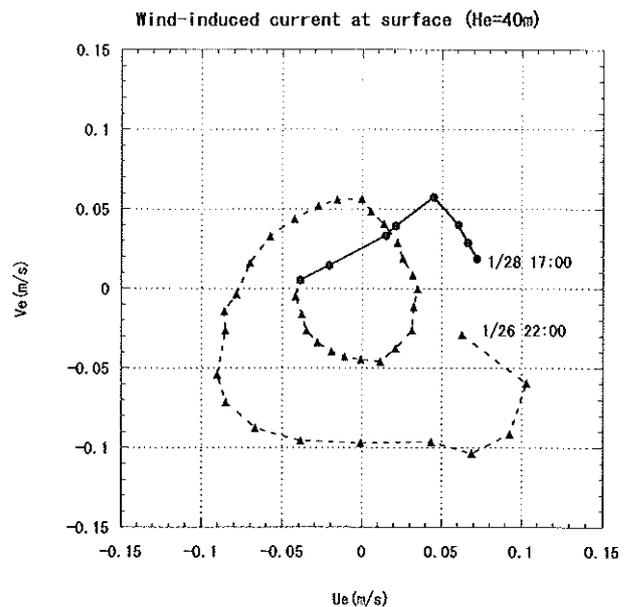


第4図 1月26日22時～1月28日17時の間に明洋で得られた1時間毎の海上風分布(流下方向)。▲と点線は漂流実験開始前の、●と実線は漂流実験開始後の期間を示す。

Figure 4 Wind (leeward direction) observed at S/V Meiyo from 22:00 Jan. 26th to 17:00 Jan. 28th. ▲ and dashed line denote wind before the drifting experiment, ● and solid line denote wind during the experiment.

ここでは $dt=0.1$ [sec] として計算を行った。

海上風データは明洋で観測された1時間毎のデータを海面上10mの風向・風速として取り扱い、大気が中立安定であると仮定して求められた Large and Pond (1982) の抵抗係数を用いて風応力に変換した。計算に使用した前々日1月26日22時から漂流実験が終了した1月28日17時までの海上風の分布を第4図に示す。1月27日7時までは相模湾外での観測中のため、相模湾における海上風とは異なる可能性を含んでいる。1次元シミュレーションの結果の例として、 $He=40m$ ($Az=0.067$ [m²/s]) の場合の海面における吹送流分布を第5図に示す。全期間を通じて北東～北北東からの弱い風が多かったが、26日22時～27日2時には西北西からの強い風が、漂流実験開始後の28日11時～17時には南西から強めの風が吹いていた。この海上風の履歴を反映して、吹送流は当初東南東向きに発達し、時計回りに減衰した後、北東方向に発達してから時計回りに向きを変えている。



第5図 鉛直1次元シミュレーションで得られた1月26日22時～1月28日17時の1時間毎の海面における吹送流分布。▲と点線は漂流実験開始前の、●と実線は漂流実験開始後の期間を示す。

Figure 5 Same as figure 4 except for wind induced current at surface.

(2) 漂流実験結果によるパラメータの推定

ドローグ付きの漂流ブイの漂流速度 \vec{U}_d とドローグなしの漂流ブイの漂流速度 \vec{U}_n をそれぞれ吹送流の寄与 \vec{U}_e 、風圧流 \vec{U}_w 、吹送流以外の流れ \vec{U}_g に分解する。

$$\vec{U}_d = \vec{U}_e + \vec{U}_w + \vec{U}_g \quad (8a)$$

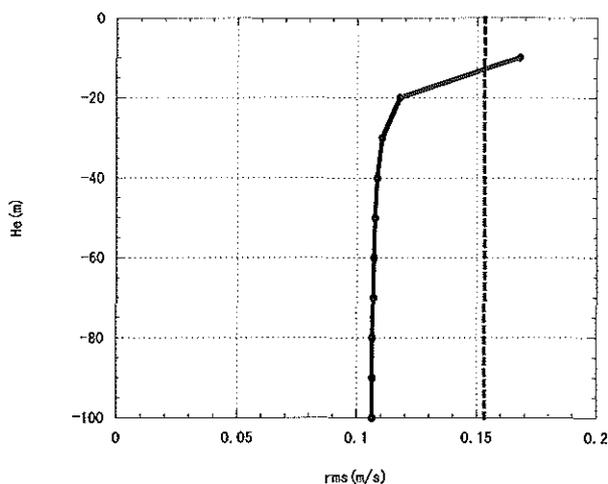
$$\vec{U}_n = \vec{U}_e + \vec{U}_w + \vec{U}_g \quad (8b)$$

吹送流以外の流れ \vec{U}_g は表層で鉛直シアを持たないと仮定すると、 $\vec{U}_g = \vec{U}_n$ となり、

$$(\vec{U}_n - \vec{U}_d) = (\vec{U}_e - \vec{U}_e) + (\vec{U}_w - \vec{U}_w) + (\vec{U}_g - \vec{U}_g) \quad (9)$$

と表せる。システムの概要から断面積等を以下の通り設定した。

海上断面積の和(A)	: 0.288[m ²]
海中断面積の和(B) (ドローグなし)	: 0.392[m ²]
海中断面積の和(B) (ドローグ付き)	: 8.476[m ²]
断面積比 (A/B) (ドローグなし)	: 0.735
断面積比 (A/B) (ドローグ付き)	: 0.034
風圧係数 (k)	: 0.025
吹送流の寄与 (\vec{U}_e) (ドローグなし)	: \vec{U}_e (0 m-0.5 m)

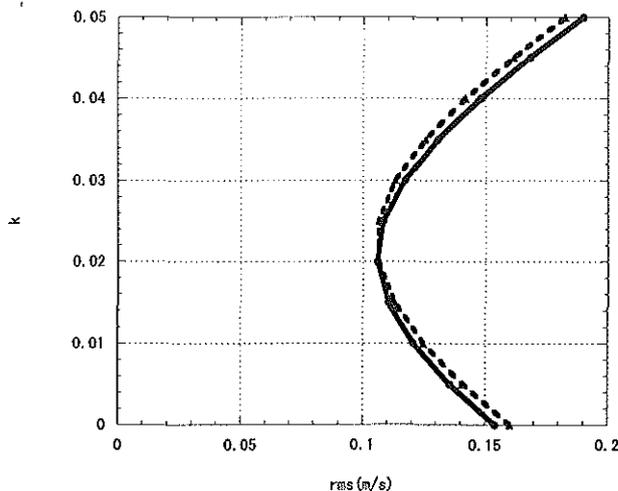


第6図 鉛直粘性係数の変化による残差（漂流速度差－吹送流の差－風圧流の差）の変化。点線は吹送流に係数・偏角を用いた場合。

Figure 6 Residual error; $(\vec{U}_n - \vec{U}_d) - (\vec{U}_e \cdot n - \vec{U}_e \cdot d) - (\vec{U}_w \cdot n - \vec{U}_w \cdot d)$ for variable vertical viscosity coefficient. Dashed line denotes residual error for wind induced current proportioned and rotated to wind.

吹送流の寄与(\vec{U}_e) (ドローク付き) : $(0.392 * \vec{U}_e (0\text{ m}-0.5\text{ m}) + 8.084 * \vec{U}_e (4\text{ m}-12.5\text{ m})) / 8.476$

ここで $\vec{U}_e (z_1 - z_2)$ は深度 z_1 から z_2 までの吹送流のベクトル平均を示す。上記の設定で吹送流の寄与と風圧流を計算し、(9) 式左辺と比較した。残差の rms を第 6 図に示す。点線は現在のオンライン漂流予測プログラムのデフォルト値である吹送流係数 = 0.0126, 偏角 = 15 度で計算した吹送流をドロークなしの漂流ブイのみに適用した場合の残差を示す。エクマン境界層の厚さ He が 40 m を越えるとほとんど残差は変化せず、係数・偏角による吹送流よりも約 0.05 m/s 改善される。 $He > 40\text{ m}$ における残差約 0.11 m/s は、海上風データの誤差、風圧係数の誤差、吹送流以外の流れの鉛直シアを含んでいると考えられる。 $He = 40\text{ m}$ と 80 m の場合について、風圧係数 k を 0~0.05 まで変化させた場合の残差を第 7 図に示す。風圧係数 0.02~0.025 で残差が約 0.11 m/s と最小値をとり、 $k = 0.025$ の設定は妥当であることを示している。



第7図 風圧係数の変化による残差の変化。実線は $He = 40\text{ m}$ の場合、点線は $He = 80\text{ m}$ の場合を示す。

Figure 7 Residual error for variable wind pressure coefficient. Solid line denotes $He = 40\text{ m}$, dashed line denotes $He = 80\text{ m}$.

4. 推定した吹送流を用いた漂流予測

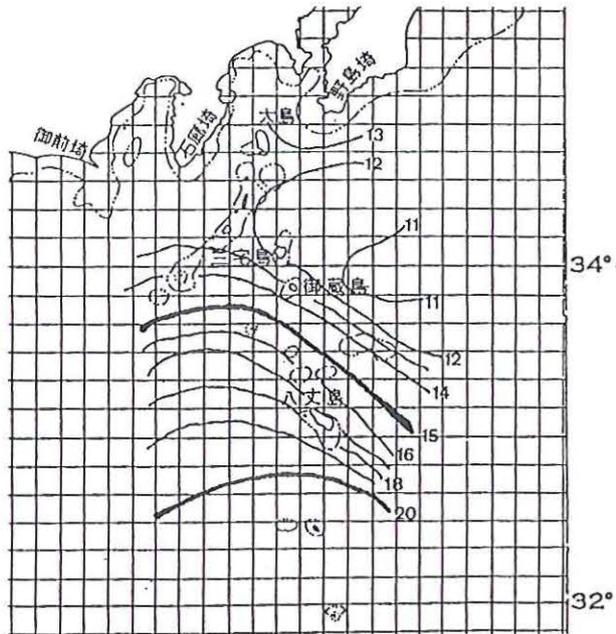
(1) 海流の推定

ドローク付き漂流ブイについて、漂流速度から前節の条件で求めた風圧流を差し引いた値 (ケース 1), さらにそこからエクマン境界層の厚さ He を 40 m (ケース 2), 80 m (ケース 3) とした吹送流シミュレーション結果を差し引いた 3 種類の推定海流を 10 時~16 時 30 分の間で平均した。結果をリアルタイム海況データベースの 1 月の統計値とともに第 1 表に示す。実験時には第 8 図に示す通り黒潮の流軸 (200 m 深水温 15°C) は八丈島のわずかに北に位置しており、D 型と見なせる流型であるが、統計値における A, C, N 型の 3 分類では N 型に属することになる。

第 1 表 ドローク付き漂流ブイの漂流速度から推定した海流値と統計海流値。

Table 1 Ocean current estimated from drifting velocity of surface drifter with drogue, and climatological mean ocean current.

	U(m/s)	σ (m/s)	V(m/s)	σ (m/s)
ケース1(漂流速度－風圧流)	0.01	0.07	0.10	0.06
ケース2(漂流速度－風圧流－吹送流($He = 40\text{ m}$))	0.00	0.05	0.07	0.06
ケース3(漂流速度－風圧流－吹送流($He = 80\text{ m}$))	0.01	0.06	0.09	0.06
統計値(5分メッシュ、1月、N型)	0.10	—	-0.02	—
統計値(5分メッシュ、1月、C型)	-0.11	—	-0.07	—



第8図 漂流実験時の伊豆諸島付近における200m深水温分布。
Figure 8 Temperature at 200m around Izu Islands during drifting experiment.

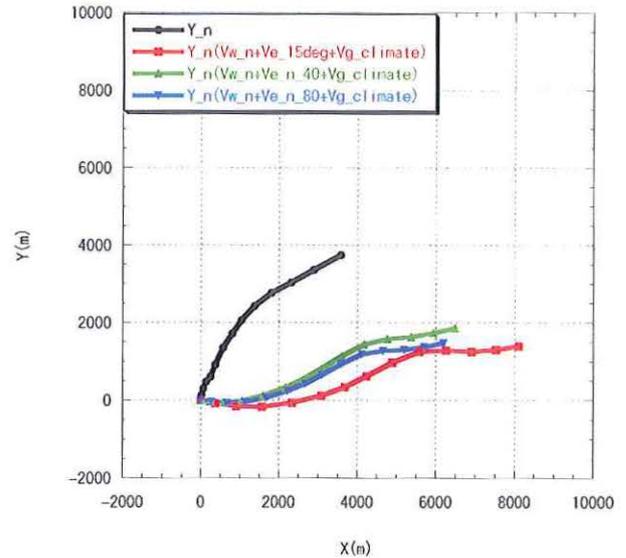
ドローク付き漂流ブイの漂流速度に対する吹送流の影響はあまり大きくなく、推定した海流はいずれも北向きで0.07~0.10m/sであるのに対して、統計値は黒潮N型で東向き0.10m/s, C型で南西向き0.13m/sと全く異なる流向を示している。

(2) 海流統計値を用いた漂流予測

ドロークなし漂流ブイについて、1月黒潮N型の海流統計値を用い、吹送流に係数(0.0126)・偏角(15度)、エクマン境界層の厚さ H_e に40m, 80mを採用した3ケースの漂流予測を行った。予測結果を漂流実験結果とともに第9図に示す。6時間30分の予測に対して、係数・偏角を用いた場合に約5100m, シミュレーション結果を用いた場合に約3500mのずれが生じており、前項で示した海流統計値の流向の相違を反映している。

(3) 海流推定値を用いた漂流予測

前項と同じくドロークなし漂流ブイについて、吹送流には前項と同じ3種を用い、海流には4(1)でドローク付き漂流ブイの漂流速度から推定した値を使用した。係数・偏角の場合ケース1の海流, エクマン境界層の厚さ H_e が40mの場合ケース2の海流, 80mの場合ケース3の海流を用いた。予測結果

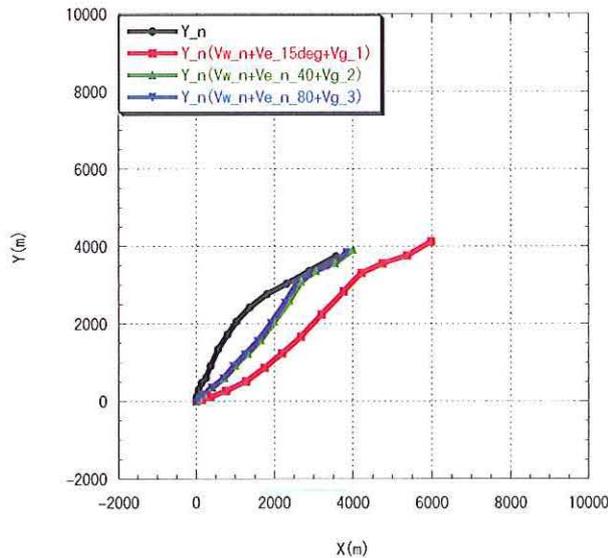


第9図 黒潮N型1月の海流統計値を用いたドロークなし漂流ブイの漂流予測。赤は係数・偏角で推定した吹送流を、緑は $H_e=40$ mのシミュレーション結果を、青は $H_e=80$ mの結果を用いている。黒は漂流実験結果。
Figure 9 Tracks of surface drifter without drogue, with climatological mean ocean current. Red line denotes track for wind induced current proportioned and rotated to wind, green line denotes track for wind induced current simulated at $H_e=40$ m, blue line denotes track for wind induced current simulated at $H_e=80$ m. Black line denotes track of real surface drifter.

を漂流実験結果とともに第10図に示す。係数・偏角を用いた場合に約2400m, H_e が40mの場合に約500m, 80mの場合に約300mのずれであった。係数・偏角を用いた場合と、シミュレーション結果を用いた場合の差は、漂流実験中はほぼ西南西からの風であったが、直前までの北北東~北東からの風に対応した吹送流の履歴が残っていたこと、西南西からの風に対応した吹送流が未発達であったことによる。風向が変化する場合には、風に即時に対応する手法では過大評価となることを示している。

5. まとめ

相模湾で行われたドローク付き漂流ブイとドロークなし漂流ブイの同時漂流実験結果に、鉛直粘性係数を変化させた1次元吹送流シミュレーション結果



第10図 第9図と同じ。ただし海流に推定海流値を用いている。

Figure 10 Same as figure 9 except for tracks with ocean current estimated from drifting velocity of surface drifter with drogue.

を適用して係数を見積もった。ドロッグ付き漂流パイとドロッグなし漂流パイの漂流速度差を説明するための鉛直シアは小さく、エクマン境界層の厚さ $He(=\sqrt{2 * Az/f})$ で40m以深と見積もられた。これは、日本海で漂流パイから吊り下げた ADCP による鉛直シア観測値から見積もられた17.5m (岩永ほか, 1997) よりも大きい。船舶搭載 ADCP データから得られた日本近海における平均値41m (道田, 1999) からは外れていない。道田 (1999) は鉛直粘性係数の季節変動も示しており、今後海域、季節毎の値を確立する必要がある。

吹送流シミュレーション結果を用いて行った漂流予測では、 $He > 40m$ ならば鉛直粘性係数の相違による予測結果の違いは小さかった。海流に統計値を、吹送流に係数・偏角を用いた場合、実験結果と予測結果に6時間半で約5100mのずれが生じた。海流統計値によるずれが約3200m、吹送流によるずれが約2000m、その他の誤差が約400mと見積もられる。漂流予測の精度を上げるためには、実測を中心とした海流推定値の精度向上とともに、吹送流の推定精度も上げる必要がある。鉛直分解能の高いシミュレーションには多くの時間が必要となるため、オペレーションには向かない面がある。このため様々な方向

からの風に対するシミュレーションを行い、応答関数を作成しておいて積分する方法(水路協会, 1990)が現実的な対応策としてあげられる。

謝辞

漂流実験に従事された測量船「明洋」船長ほか乗組員の方々、資料整理に当たられた信國正勝氏、横山陽一氏に感謝の意を表します。

引用文献

岩永義幸, 池田俊一, 茂木幹基, 野坂琢磨, 勝呂文弘, 小田卷実, 斎藤茂幸, 工藤宏之: 油流出に伴う漂流予測システムの高度化に関する研究。ナホトカ号油流出事故による環境影響に関する緊急研究成果報告書, 45-61, (1997)

Large, W. G., and S. Pond: Sensible and latent heat flux measurements over the ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **12**, 464-482, (1982)

道田豊, 1999: ADCP データから推定された日本近海の摩擦深度。1999年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 59, (1999)

日本水路協会, 1990: 重要海域の流況予測用データテーブルの整備 (対馬海峡を中心とする九州北西岸域), pp.161, (1990)