

東京大学大学院新領域創成科学研究科
自然環境学専攻海洋環境コース海洋環境動態学分野

平成 18 年度 修士論文

駿河湾東部海域における収束発散場
に関する研究
Divergence and Convergence in Suruga Bay

2007 年 3 月修了

指導教員 道田 豊 助教授

学生証番号 46868

石神 健二

2007 年 2 月 28 日提出

目次

第 1 章: 序論.....	3
1 - 1 .背景.....	3
1 - 2 . 既往の研究.....	4
1 - 3 . 本研究の目的.....	6
第 2 章: 実験方法と結果.....	7
2 - 1 .実験方法.....	7
2 - 2 .データ.....	8
2 - 3 .実験結果.....	9
第 3 章: 解析方法.....	14
3 - 1 .二次元変形率.....	14
3 - 2 .Okubo and Ebbesmeyer の方法.....	14
3 - 3 .川合の方法.....	15
3 - 4 .各方法の比較と収束発散の推定精度.....	18
第 4 章: 解析結果.....	21
第 5 章: 考察.....	27
5 - 1 .収束発散.....	27
5 - 2 .流れ藻分布との比較.....	29
5 - 2 .伸び変形率最大値.....	31
第 6 章: 結論.....	34
謝辞.....	35
参考文献.....	36
付録 .各実験の二次元変形率の 1 時間移動平均の時系列変化.....	37
要旨(和文).....	41
Summary(English).....	43

第1章 序論

本研究は駿河湾における収束発散場に関する研究である．この章では研究の背景及び既往の研究について説明するとともに本研究の目的について述べる．

1-1．背景

2004年，駿河湾に流れ藻が大量に堆積している海域があることが確認された(三上ほか(2005))．

流れ藻とは海面に浮かんでいる海藻や海草の総称(図1-1)で，日本近海の浅海域に生息するホンダワラ科植物が基質から離れることにより発生する．ホンダワラ科植物は春季に体長が数メートルに達し，波や流れにより基盤から引き剥がされるが，気胞と呼ばれるガスが入った器官により浮



図1-1．海面に浮遊する流れ藻

力を持っているため，海面を漂流する．その中で沖合へ流失したものは気胞を失い沈降するまで約2ヶ月間，海洋表層を漂流するといわれており，その間流れ藻はサンマ，サヨリ，トビウオ類といったダツ目類が産卵基質として利用するとともに，ブリ稚魚であるモジャコやマアジ仔魚が発育段階の一時期を過ごすために，水産資源上非常に重要なものとなっている．また，海藻は二酸化炭素を固定し，窒素，リン等の栄養塩を吸収するため，基盤から引き剥がされた流れ藻は栄養塩や炭素を外洋と深海へ移送していることとなり，炭素循環においても重要な役割を担っていると考えられる．

しかし，これらの重要性を認識されながらも，流れ藻の海洋における集積場所や沈降場所に関する情報は乏しく，それらに関する研究は困難であった．ところが，三上ら(2005)が2004年5月，伊豆半島戸田村(現沼津市戸田)から土肥町(現伊豆市土肥)の沖合約3～4km，水深200～400mの駿河湾東部海域において底曳網により大型褐藻類を採集した結果，採集したサンプルの中で湿重量に占める割合はホンダワラ類が最も高く，その中に気胞の脱落した比較的新しいホンダワラ類があることも発見した．このことから，駿河湾東部海域は，流れ藻が集積し，沈降する海域であると考えられる．

そこで日下ほか(未発表)が駿河湾東部海域において流れ藻の目視調査を行った結果が図1-2である．図1-2は2005年5月，6月に行った流れ藻の目視調査の結果を示したものである．この結果をしてみると，両月とも駿河湾東部海域に数多くの流れ藻が目視されており，このことから駿河湾東部海域には流れ藻が集積・沈降していると考えられる．

以上のことから，駿河湾東部海域には流れ藻を始めとする浮遊物質が集積する何らかのメカニズムがあると考えられる．そこで本研究では，沈降流・湧昇流と密接に関連しており，流れ藻など海洋浮遊物質の移流・拡散・集積に関して大きな役割を演じている収束発散に着目した．

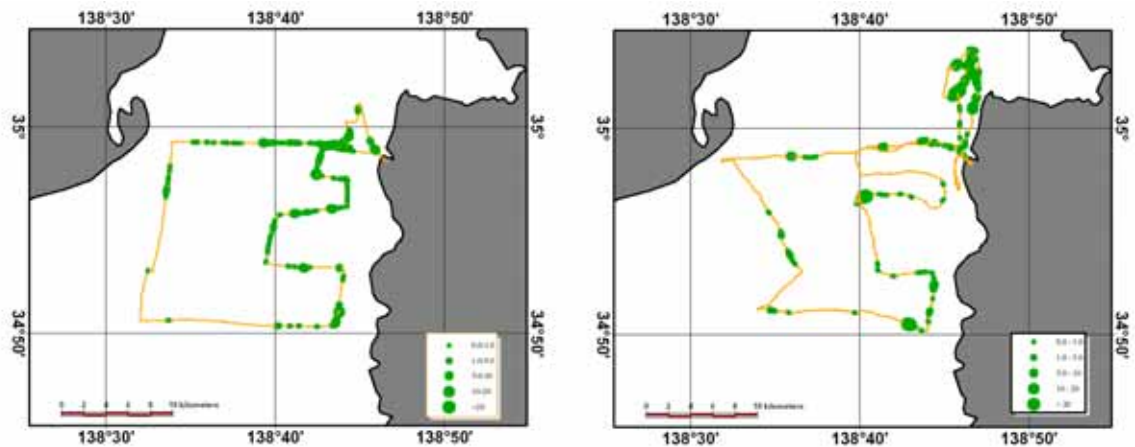


図 1 - 2 . 駿河湾における流れ藻目視調査の結果例 (日下, 小松 (未発表))

緑の は流れ藻の存在を表し, その大きさは量を示す .

左図 : 2005 年 5 月 20 日 , 右図 : 2005 年 6 月 24 日

1 - 2 . 既往の研究

浮子拡散実験

浮子拡散実験とは浮子を海洋上に放流し, その形状の変化から拡散係数等を見積もる実験のことである . 浮子とはその名前の示すとおり「浮かぶ物質」のことである . 浮子拡散実験は実海域の拡散係数を推定するために古くから行われてきたが, その中で Okubo and Ebbesmeyer (1976) や川合 (1976) は拡散係数と同時に収束発散, 渦度, 伸び変形率, ずれ変形率の 4 つの二次元変形率を求める方法を提案した . これら二次元変形率の中で収束発散は, 沈降流・湧昇流と密接に関連しており, 流れ藻など海洋浮遊物質の移流・拡散・集積に関して大きな役割を演じている (川合 (1969)). 古くから浮子としては海流はがき, 新聞紙, 抵抗板付ベニヤ板 (柳ら (1981)), レーダー応答機付ブイ (Molinari and Kirwan (1975)), アルゴスブイ (水島・坂井 (1994)) などが用いられてきたが, これらの浮子は, 浮子の数, 位置測定精度, 測位の同時性, 複数の浮子の識別, 継続時間, 風によるすべりの防止そして測定頻度などの点で十分とは言えず収束発散を精度よく求めることが出来なかった . しかし近年では Global Positioning System (以下 GPS) と風によるすべりを無視できる漂流ブイを用いることにより高精度・高頻度・長時間の実験が可能となり, 精度よく収束発散を求めることが出来るようになってきている (青柳 (2006)).

駿河湾の特徴

流れ藻が集積しているとされる駿河湾は湾口幅約56km奥行き約65km、表面積約2,300km²、容積1,969km³を有する開放性の湾(図1-3)となっている。フォッサマグナの南部に位置し、南海トラフから続く駿河トラフが湾口東部海域から湾奥まで達している。そのため水深は非常に深く湾口部の最大水深は2,400mあり、湾奥部

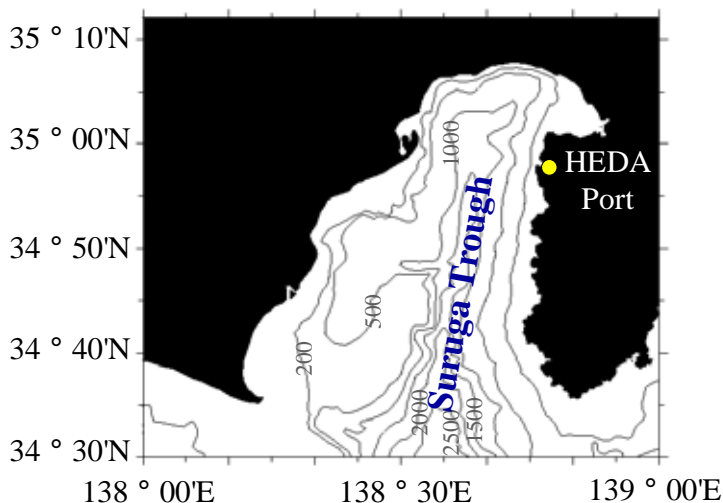


図1-3. 駿河湾の海底地形図

でも1,000mを越えている。さらに沖合海域には黒潮が流れ同湾は黒潮系外洋水の影響を強く受けている。海底地形は、湾中央の駿河トラフにより東部と西部に分けられる。西部には石花海堆と石花海盆が広がり、大陸棚が比較的発達している。逆に東部海域は大陸棚の発達がわるく、単純な大陸斜面からなっている。駿河湾に注ぐ主な河川は狩野川、富士川、安部川、大井川等で、これらの河川水および湾奥中央部に位置する田子の浦港よりの流出水の影響も沿岸水の形成に関して無視することはできない。降水量は年平均約2,500mmに達し、年間の約40%が梅雨期を中心とした夏季の6,7,8月に集中している。また、同湾では沿岸海域で突然発生する強い流れを意味する「急潮」がしばしば発生する(児島(1996), 勝間田(2003)など)。

駿河湾の海洋物理環境

稲葉(1982, 1988)は、湾口海域東部(20m層, 他の4地点は全て10m層)・西部, 湾奥海域東部・北部・西部で流速計による観測を行い、25時間移動平均流(図1-4)は湾奥海域では反時計回りの環流が卓越し、湾口部では黒潮流軸が石廊崎を南へ約75km沖合にある銭洲より南にあるときに時計回りの環流、銭洲より北にあるときには反時計回りの環流となることを示した(図1-5)。また、駿河湾では、潮位変動では半日潮が卓越するにも関わらず、潮流振幅では日周期潮流が卓越しており、成層が強いときに大きく、成層が弱いときに小さくなるため、この日周期潮流は内部潮汐によるものと考えられる(稲葉(1982, 1988), 松山(1988), 宇野木(1993))。以上のことを考慮すると、流れ藻などの浮遊物質が駿河湾内、特に湾奥部では、一箇所に集積せずに循環している可能性がある。しかし湾内の流れは外洋と比較し弱いため、浮遊物質が集積する可能性もある。また、これらの実験では、駿河湾全体の流れの概要は分かったが、小さいスケールでの流れは依然不明であり、物質の集積過程に対して本質的に重要な役割を果たすと考えられる収束発散場についても、実際に浮子拡散実験を行い測定した例はない。

1 - 3 . 本研究の目的

以上のことから本研究では，流れ藻が集中して堆積している駿河湾奥東部海域においては，表層を漂流する流れ藻が集積するメカニズムがあるという仮説に基づき，流れ藻など浮遊物質の集積に本質的に重要な役割を果たすと考えられる収束発散場を，駿河湾東部海域において浮子拡散実験により明らかにすることを目的とした．

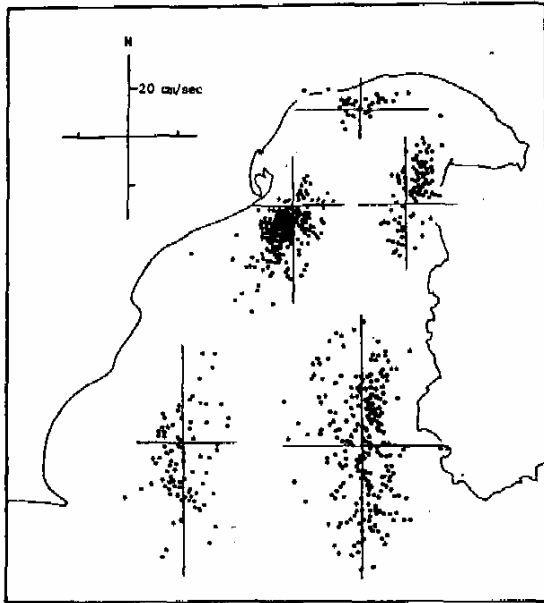


図 1 - 4 . 25 時間移動平均流の散布図
(稲葉 (1982))

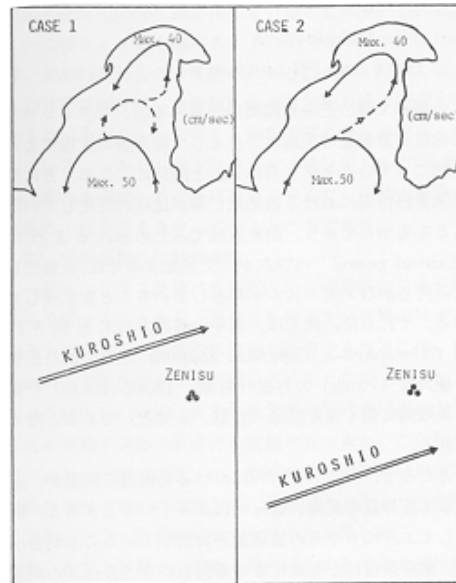


図 1 - 5 . 駿河湾の環流と黒潮位置との関係
(稲葉 (1988))



写真 1 . 駿河湾から望む富士山

第 2 章：実験方法および結果

駿河湾において収束発散を求めるために GPS 搭載漂流ブイを用いた浮子拡散実験を行った。実際の実験の様子は写真 1, 2, 3, 4 としてそれぞれ 6 ページ, 13 ページ, 26 ページ, 35 ページに掲載した。この章では, 本研究で用いた手法の詳細, 得られたデータ及び実験結果について述べる。尚, 本研究では, 東西方向の東向きを正として x 軸とし, 南北方向の北向きを正として y 軸とし, x y 平面の二次元で解析を行った。

2 - 1 . 実験方法

実験で用いた装置は, 測位したデータを送信する GPS 携帯端末と, 海水の流れを測定するための漂流ブイの 2 つの部分から構成されている。以下にそれぞれの部分の詳細を示す。

GPS 携帯端末

本実験で使用した GPS 携帯端末(図 2 - 1)はゼニライトブイ社製のポケット通信式端末で, 本来は徘徊老人や迷子対策として, 所持者の現在位置を地図上に表示することが目的で開発されたもので, 本研究で使用するものはそれを海上へと応用したものである。外形寸法は幅 45mm, 高さ 95mm, 奥行 22mm (アンテナ突起部含まず) で重量は約 79 g と小型, 軽量であり, 海上で使用する際にはプラスチックの密閉容器に入れ, 漂流ブイの頂に設置している。GPS の測位分



図 2 - 1 . GPS 携帯端末

解能は 100 分の 1 秒で約 30cm である。本 GPS 携帯端末はポケット通信式の GPS 端末であり, 事前に WEB 上で設定されたスケジュールに従い取得したデータを时时刻刻 E-mail で指定した E-mail アドレスへ送信してくる。そのため, 万が一ブイを消失してもデータだけは得ることが出来る。データ取得間隔は, 5 分, 10 分, 15 分, 20 分, 30 分, 60 分の中から選択出来, 電池の持続時間は, 我々の測定したところ 5 分間隔では約 36 時間, 60 分間隔では約 6.8 日であるが電波の良し悪しや電池自体の消耗度などにより更に短くなると思われるので注意が必要である。また, E-mail でデータを送ってくるとともに, パソコンや携帯電話などから WEB にアクセスすることで, 任意の時間に測位すると同時に最新位置を知ることも可能であり, 遠隔地から監視することが出来る。しかしながら, 携帯電話 (株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ) の圏外では使用不可能であるため, 海上で使用する際には対象海域の電波状態を確認するための予備実験が必要不可欠である。

漂流ブイ

本実験で用いた漂流ブイの模式図を図 2-2，写真を図 2-3 に示す。漂流ブイは浮子（フロート）と抵抗体（ドローク）からなり，高さ約 30cm の回転楕円体型の浮子に通した支柱から長さ 110cm、直径 57cm の円柱型の抵抗体を垂下させてある。GPS 携帯端末は浮子頂の密閉型プラスチックケース内に設置されている。浮子の支柱下部におもりをつけることで，また，抵抗体を浮子の下部からのばすことで，抵抗体が海流により流されている時にも浮子が直立姿勢を出来る限り保つように設計されている。これは GPS 携帯端末の位置測定時のデータ欠損を減らすためである。また，漂流ブイは海上風によって直接押し流される効果（風圧流）を受けるので，漂流ブイの漂流流速と海水の運動にずれが生じる。この風圧流を減殺するために，浮子の下部に海上部対水中部の断面積比が 1/30 以下となるように抵抗体を吊り下げることで，その効果をほぼ無視できるようになっている（Niiler *et al.*, 1987）。このことから漂流ブイの運動はドロークの中心水深の流れに従うものと考えられる。浮子と抵抗体とを結ぶロープの長さを変えることにより様々な深さの流れを測ることが出来るが，本実験では表層の流れを測定するために，浮子と抵抗体を結ぶロープ長は 50cm とし，漂流ブイは水深 2 m の流れに従っているとした。流れ藻は海面上にほとんど出ておらず，個体により異なるが水面下 0 ~ 2 m 程度までしか存在しないため（図 1-1 参照），漂流ブイと同様風圧流を受けない。従って，漂流ブイは流れ藻と同様に流れていくと考えられる。また今後は GPS 搭載漂流ブイのことを簡単にブイと呼ぶことにする。

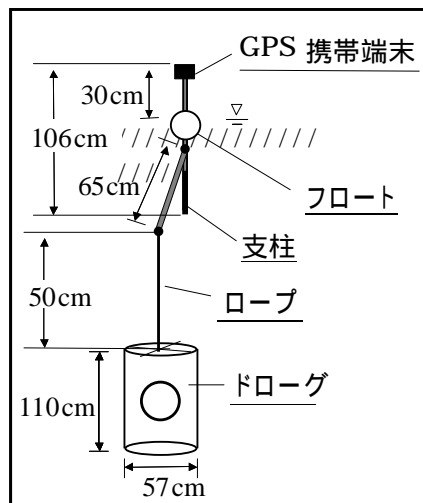


図 2-2 . 漂流ブイ模式図



図 2-3 . 漂流ブイと富士山

2 - 2 . データ

駿河湾における GPS 携帯端末の受信状況調べるため 2004 年 11 月 5 日に，GPS 携帯端末を船に設置し，駿河湾での受信状況を調べた。その結果が図 2-4 である。駿河湾においては北緯 34 度 45 分以上，東経 138 度 30 分以上では測位可能であることが分かった。また携帯端末 GPS は衛星が捕らえられなかった場合，推定値（dopa）を算出するが図を見ても分かるように，本来なら海上にあるべき点が陸上にあることから，推定値は全く使用できないことが分かった。

以上の予備実験を踏まえ、駿河湾東部、静岡県沼津市戸田沖において3個から12個のブイを使用した浮子拡散実験を、2005年の2月25日、3月11日、3月19日、4月18日、5月20日、6月23・24・25日、7月22日、8月20日、9月22日、そして2006年の3月23日、4月26日、5月31日-6月1日、6月28・29・30日、7月25・26日、8月30・31日、9月21・22日、10月29・30日にかけて合計17回行った。各実験の漂流開始時刻、回収時刻、放流時間、仕様浮標数及び、放流開始時と回収時の水平スケール $L = \sqrt{2\sigma_x\sigma_y}$ を表2-

1に示す。実際に実験を行った結果GPS携帯端末のデータ欠損率は約10%とやや高くなっ

ている。このようなデータの欠損は3次スプライン法により補間を行った。ただし、2006年6月28日のBuoy 2に関しては21時00分から23時00分までの長時間の欠損があるため補間を行わず、その前とその後に分けて解析を行った。

2005年4、5、7、8月に静岡県沼津市戸田の港付近で固定点観測を行った結果、標準偏差は東西方向13.2、13.7、5.7、5.2m、南北方向7.0、10.0、5.3、4.3mであった。固定点測定位置は近くに高い建物があるなど良い条件ではなかったため、実際の海上ではこれらの結果より標準偏差は小さくなると期待されるが、本研究ではGPSの測位精度(標準偏差)を東西方向13.7m、南北方向10.0mとした。

2 - 3 . 実験結果

2005年2月から2006年10月の計17回の実験において延166個のブイを放流した。全てのブイの軌跡を図2-5に各実験のブイの軌跡を図2-6に示す。図2-6において各実験の放流開始位置は黒丸で表している。

放流地点は主に戸田港沖であるため東側に軌跡が偏っている。全体としてみると、東側では、ブイは北へ流れることが多かった。一方、2006年5、6、8、10月に西端で放流したブイを見ると、2006年10月を除いて全てのブイが南へ流れた。これらの結果は稲葉(1982、1988)の結果とよく一致し、特に2006年6月28・29日、同年8月30・31日、同年10月29・30日の実験の軌跡は10月の軌跡は若干小さいものの、反時計回りの環流を捉えている。その他の特徴的な流れとしては、2005年6月23・24日、2006年5月31日-6月1日、2006年9月21・22日には、放流直後伊豆半島西岸へ接近し南へ進んだ。また、観測時間が長くても25時間以下であることから断言は出来ないが、下げ潮時に北へ向かう流れ

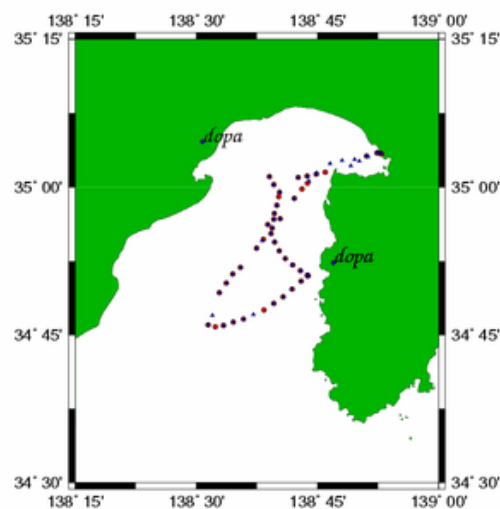


図2-4 . 駿河湾におけるGPS携帯端末受信状況

dopaは受信失敗時の推定値

(2006年7月26日等)や、上げ潮時に南に向かう流れ(2005年3月11日等)が観測されたこと、さらに、2006年8月30・31日、同年9月21・22日に約12時間で流れの方向が変化したことは、駿河湾において内部潮汐が卓越していることと矛盾しない。しかし、本研究における実験は2005年3月を除けば、月に1度の実験であり実験時間も25時間以下であること、また秋季及び冬季のデータが乏しいことから季節変化について結論付けることは困難である。

表2-1. 各実験の概要 (水平スケール: $L = \sqrt{2\sigma_x\sigma_y}$)

実験日	群	放流開始時刻	回収時刻	放流時間	プイ数	水平スケール	
						放流開始時	回収時
2005/2/25	午前	9:20	10:25	1:05	4	363	326
	午後	11:40	12:00	0:20	4	219	223
2005/3/11		8:25	11:55	3:30	6	451	518
2005/3/19		10:35	15:00	4:25	5	309	380
2005/4/18	北東	10:10	14:20	4:10	4	2023	2762
	北西	10:10	14:20	4:10	4	2110	3190
	南東	10:10	14:20	4:10	4	1984	2620
	南西	10:10	14:20	4:10	4	2185	2274
	all	10:10	14:20	4:10	9	3188	4369
2005/5/20		9:00	13:35	4:35	4	254	217
2005/6/23-24	戸田沖	16:40	4:40	12:00	3	146	765
2005/6/23-24	土肥沖	17:20	11:20	18:00	3	191	374
2005/6/24-25		10:40	9:20	22:40	3	216	141
2005/7/22		10:05	14:40	4:35	12	553	917
2005/8/20		9:55	13:40	3:45	11	479	814
2005/9/22	大	9:15	13:05	3:50	4	830	847
	中	9:15	13:05	3:50	4	451	493
	小	9:15	13:05	3:50	4	181	271
	all	9:15	13:05	3:50	12	504	534
2006/3/23	東	8:05	10:25	2:20	6	325	429
	西	8:20	10:20	2:00	6	316	374
	all	8:20	10:20	2:00	12	430	583
2006/4/26	東	8:10	13:40	5:30	6	289	885
	西	8:25	13:35	5:10	6	326	368
	all	8:25	13:35	5:10	12	512	910
2006/5/31-6/1		12:50	10:40	21:50	5	631	539
2006/6/28-6/29		13:40	14:00	24:20	4	592	3706
2006/6/29-30		18:00	7:20	13:20	5	633	748
2006/7/26		5:10	11:25	6:15	9	501	1184
2006/8/30-31		12:31	13:21	24:50	5	629	1398
2006/9/21-22		13:20	7:10	17:50	5	603	2233
2006/10/29-30		12:40	8:30	19:50	5	526	1171

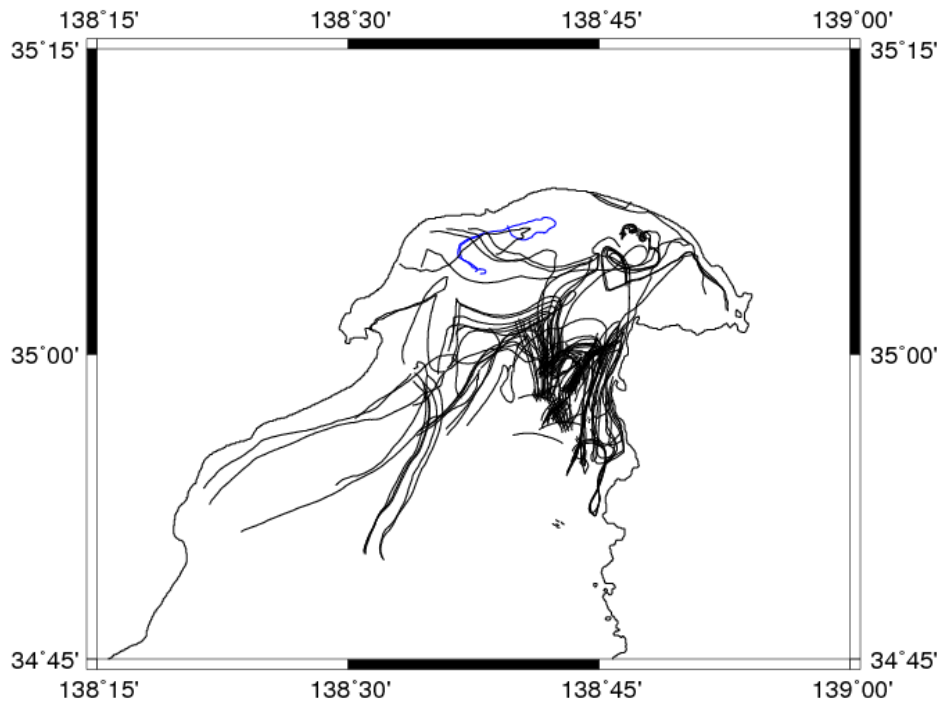


図 2 - 5 . 全ブイの軌跡 (青線は水深 20m仕様のブイの軌跡)

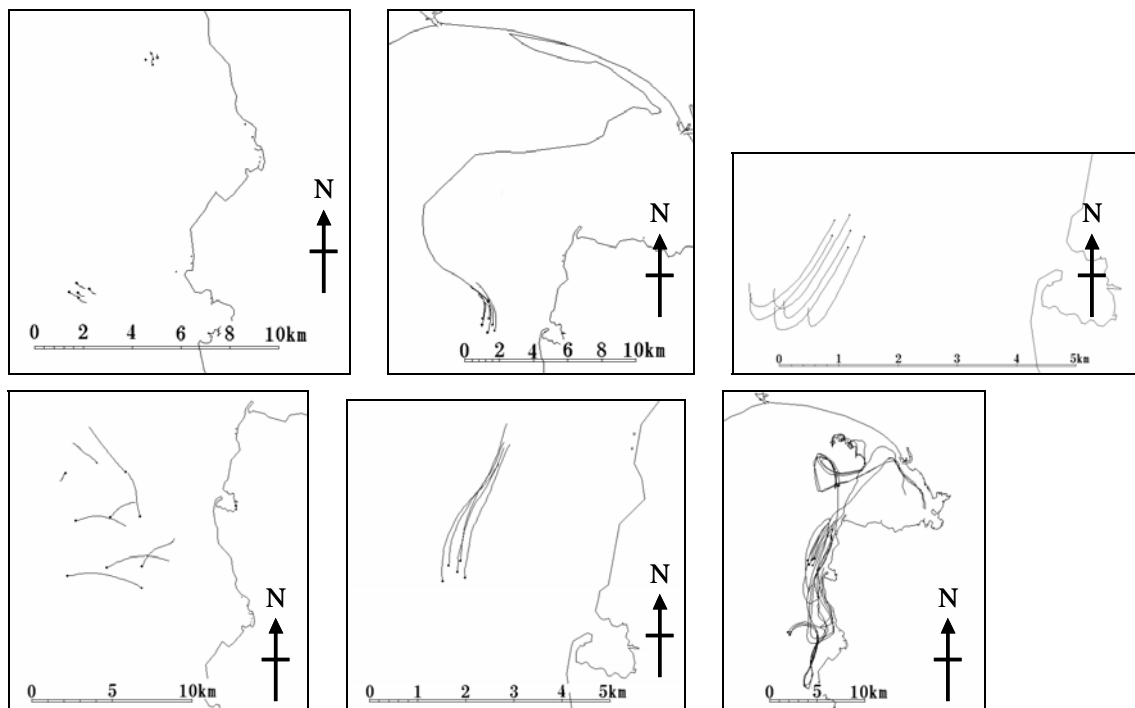


図 2 - 6 (a). ブイの軌跡

上段左 : 2005 年 2 月 25 日 上段中央 : 2005 年 3 月 11 日 上段右 : 2005 年 3 月 19 日
 下段左 : 2005 年 4 月 18 日 下段中央 : 2005 年 5 月 20 日 上段右 : 2005 年 6 月 23-25 日

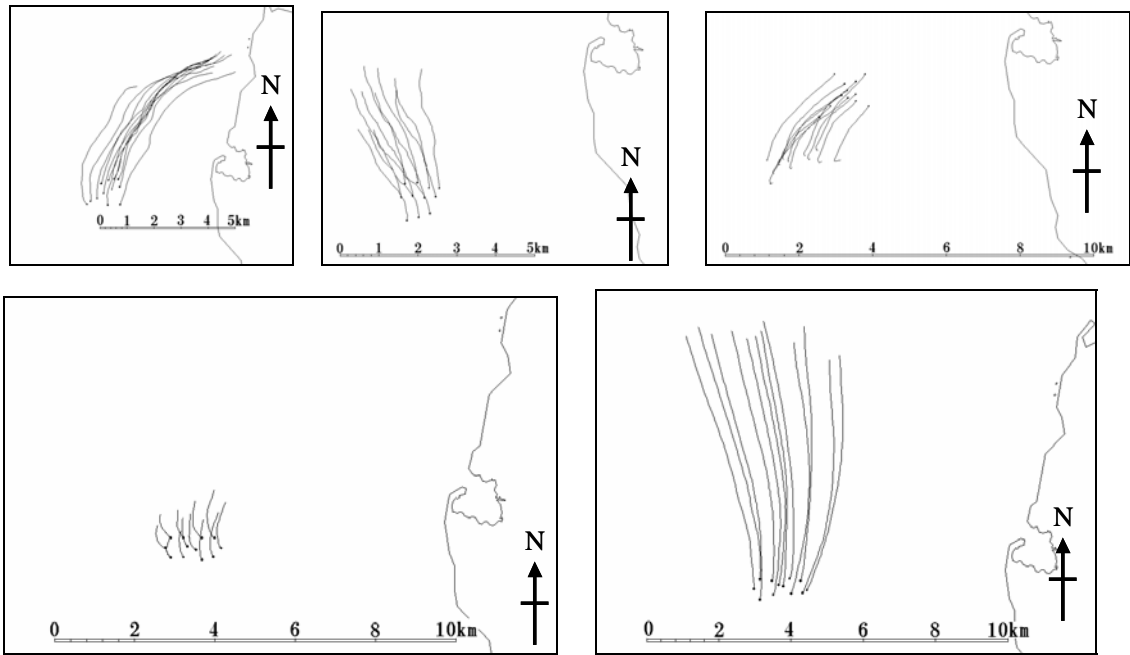


図 2-6 (b). ブイの軌跡

上段左：2005 年 7 月 22 日 上段中央：2005 年 8 月 20 日 上段右：2005 年 9 月 22 日

下段左：2006 年 3 月 23 日 下段右：2006 年 4 月 26 日

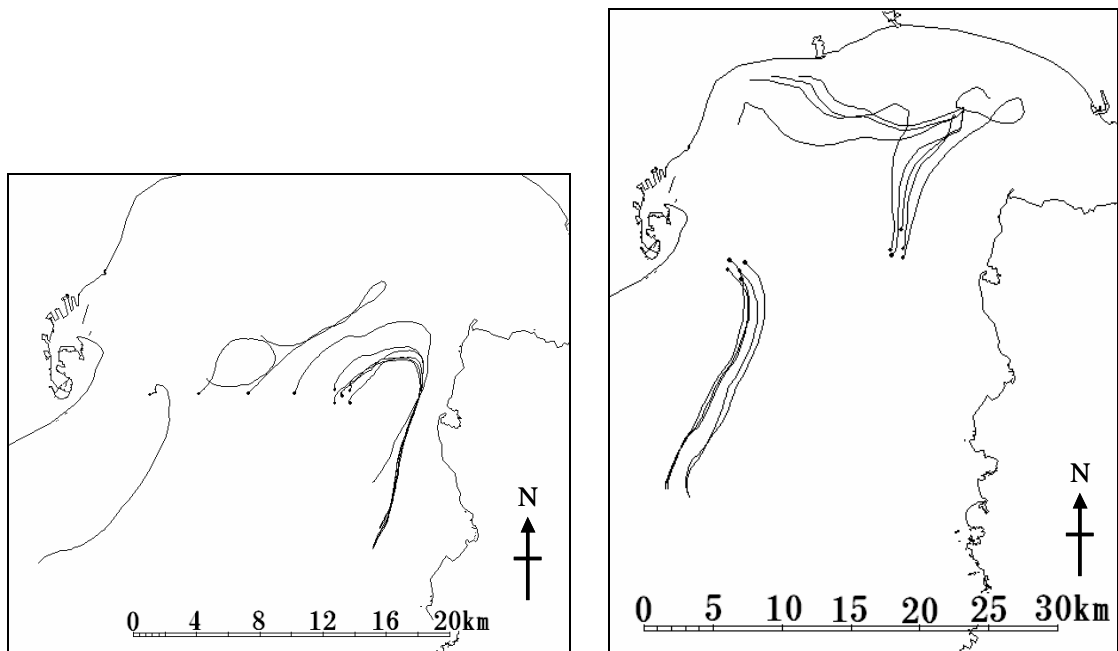


図 2-6 (c). ブイの軌跡

左：2006 年 5 月 31 日・6 月 1 日 右：2006 年 6 月 28・29 日(右) 6 月 29・30 日(左)

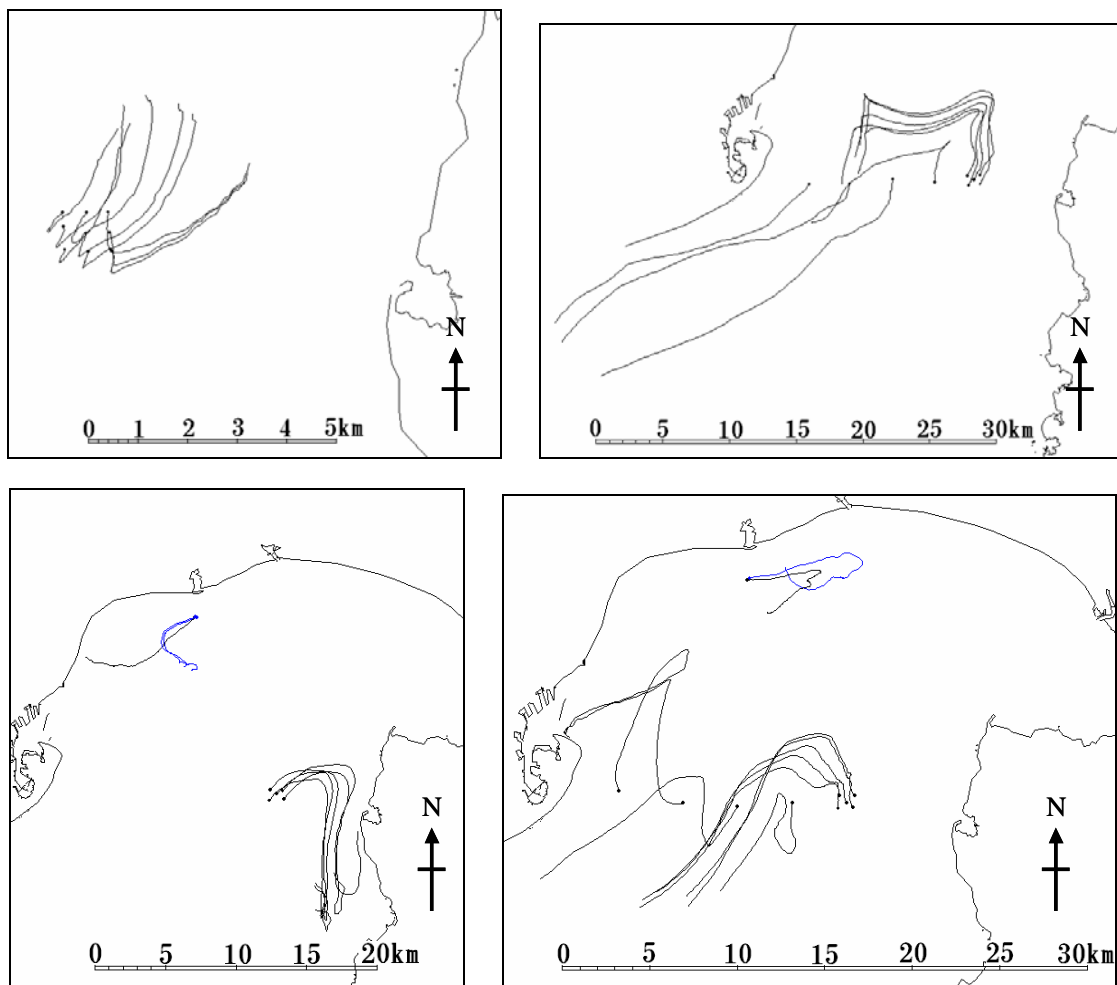


図 2-6 (d). ブイの軌跡 (青線は水深 20m 仕様のブイの軌跡)
 上段左 : 2006 年 7 月 26 日 上段右 : 2006 年 8 月 30・31 日
 下段左 : 2006 年 9 月 21・22 日 下段右 : 2006 年 10 月 29・30 日



写真 2 . 観測の様子 左 : ブイ準備中 右 : ブイ放流

第3章：解析方法

浮子拡散実験により収束発散をはじめとする二次元変形率を求める方法として、Okubo and Ebbesmeyer (1976) と川合 (1976) の2つの方法がある。本章ではそれら2つの方法について述べ比較するとともに、位置決定精度が収束発散に与える影響を考える。

3 - 1 . 二次元変形率

二次元変形率 (differential kinematic properties) として水平収束発散 (Horizontal divergence) $Q(t)$, 渦度 (Vorticity) $\zeta(t)$, 伸び変形率 (Stretching deformation rate) $\alpha(t)$, ずれ変形率 (Shearing deformation rate) $h(t)$ の4つが以下のように定義されている。

$$\left. \begin{aligned} Q(t) &= \frac{\partial \bar{u}(t)}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}(t)}{\partial y} \\ \zeta(t) &= \frac{\partial \bar{v}(t)}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}(t)}{\partial y} \\ \alpha(t) &= \frac{\partial \bar{u}(t)}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}(t)}{\partial y} \\ h(t) &= \frac{\partial \bar{v}(t)}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}(t)}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (3 \cdot 1)$$

ここで $\bar{u}(t), \bar{v}(t)$ は各浮子の座標 $x(t), y(t)$ における時刻 t の流速 $u(t), v(t)$ の平均値である。

水平収束発散は、正のときに発散しているといい、その海域における流体の湧き出しを示し、負のときには収束しているといい、その海域において流体の沈降があることを示している。渦度は、正のとき z 軸まわりで反時計回り、負のときに時計回りの回転を示す。伸び変形率は、正のときに y 方向に比べて x 方向への粒子群の伸びが大きいことを表し、負のときは逆に x 方向に比べて y 方向への粒子群の伸びが大きいことを示している。ずれ変形率は、正のときに x 軸に対して $+45$ 度の方向への伸びが大きいことを示し、負の時には x 軸に対して -45 度の方向へ伸びが大きいことを示している。

これらの二次元変形率を浮子拡散実験から求める方法として、Okubo and Ebbesmeyer (1976) と川合 (1976) の方法がある。

3 - 2 . Okubo and Ebbesmeyer の方法

Okubo and Ebbesmeyer (1976) は、多数個の漂流ブイを用いた浮子拡散実験から以下の方法で二次元変形率を求めることを提案した。

まず n 個 ($n > 3$) の漂流ブイを放流し一定時間毎に位置を測定すると、時刻 t における n 個の漂流ブイの座標 $x_i(t), y_i(t)$ が得られ、同時に流速 $u_i(t), v_i(t)$ が計算できる。

$$x_i(t), y_i(t) \quad i=1,2,3,\dots,n \text{ (drogues)}$$

$$u_i(t), v_i(t) \quad t=1,2,3,\dots,m \text{ (times)}$$

次に得られた各漂流ブイ各時刻の流速を Taylor 展開して、平均流速と一次の流速勾配、乱れ速度に分解すると、

$$\left. \begin{aligned} u_i(t) &= \bar{u}(t) + \frac{\partial \bar{u}(t)}{\partial x} [x_i(t) - \bar{x}(t)] + \frac{\partial \bar{u}(t)}{\partial y} [y_i(t) - \bar{y}(t)] + u_i''(t) \\ v_i(t) &= \bar{v}(t) + \frac{\partial \bar{v}(t)}{\partial x} [x_i(t) - \bar{x}(t)] + \frac{\partial \bar{v}(t)}{\partial y} [y_i(t) - \bar{y}(t)] + v_i''(t) \end{aligned} \right\}$$

$$\left(\bar{x}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t), \bar{y}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i(t), \bar{u}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i(t), \bar{v}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i(t) \right)$$

と表せる。ここで $\frac{\partial \bar{u}(t)}{\partial x}, \frac{\partial \bar{u}(t)}{\partial y}, \frac{\partial \bar{v}(t)}{\partial x}, \frac{\partial \bar{v}(t)}{\partial y}$ は一次の流速勾配、 $u_i''(t), v_i''(t)$ は

二次以上の項で、乱れ速度を表す。このとき、これらの粒子群内部での流速勾配は一定であると仮定し、この一次の流速勾配を行列演算による直線回帰法（最小二乗法）で求め、二次元変形率を算出することが出来る。

3 - 3 . 川合の方法

川合(1976)は3つ以上の浮子を用いて二次元変形率を測定する以下の方法を提案した。

水平流速の水平勾配としては、4個のものがある。面積 A をもつ領域内で積分すると、平面上のガウスの定理やストークスの定理などにより、

$$\left. \begin{aligned} \iint_A \frac{\partial u}{\partial x} dx dy &= \oint_C u dy \\ \iint_A \frac{\partial u}{\partial y} dx dy &= -\oint_C u dx \\ \iint_A \frac{\partial v}{\partial x} dx dy &= \oint_C v dy \\ \iint_A \frac{\partial v}{\partial y} dx dy &= -\oint_C v dx \end{aligned} \right\} \quad (3 \cdot 2)$$

と表せる．ここで u , v は海水流速の x , y 成分である． C は面積 A を取り囲む閉曲線を示す．

浮子 n 個を領域 A の多角形の頂点に見立てて，多角形の内部を左手に見ながら，浮子を順にたどってつけた番号を $i=1,2,3,\dots,n$ とし， i 番目の浮子の位置座標を (x_i, y_i) ，その漂流速度を (u_i, v_i) とする．

各浮子が存在する点での海水流速は，浮子の漂流速度に等しく，また i 番目と $i+1$ 番目の2個の浮子を結ぶ線分上の流速は，その2個の浮子の漂流速度の距離に対する一次補間により与えられると考えられると以下の関係が成り立つ．

$$\frac{y - y_i}{y_{i+1} - y_i} = \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} = \frac{u - u_i}{u_{i+1} - u_i} = \frac{v - v_i}{v_{i+1} - v_i} \quad (3 \cdot 3)$$

ここに， (x, y) は上述の線分上の座標を， (u, v) はその点での流速を表す．

式 (3・3) を用いて式 (3・2) の線積分を浮子番号順に，浮子多角形の辺に沿って一周して行くと次の式が得られる．

$$\left. \begin{aligned} \iint_A \frac{\partial u}{\partial x} dx dy &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (u_i y_{i+1} - u_{i+1} y_i) \\ \iint_A \frac{\partial u}{\partial y} dx dy &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (u_i x_{i+1} - u_{i+1} x_i) \\ \iint_A \frac{\partial v}{\partial x} dx dy &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (v_i y_{i+1} - v_{i+1} y_i) \\ \iint_A \frac{\partial v}{\partial y} dx dy &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (v_i x_{i+1} - v_{i+1} x_i) \end{aligned} \right\} (3 \cdot 4)$$

ここで， $n+1$ 番目の浮子は，1 番目の浮子に一致する．

次に，時間差 Δt の2時点

$$t' = t - \frac{\Delta t}{2}, t'' = t + \frac{\Delta t}{2}$$

で，各浮子の位置がいっせいに測定されたとする．2時点の中間時点 t では測定がないが，各浮子の位置座標は， t' と t'' の2時点での座標 (x_i', y_i') と (x_i'', y_i'') の中間値と一致し，また漂流速度は， t'' と t' での位置座標の差を Δt で割ったもので与えられると考えてよく，

$$\left. \begin{aligned} x_i &= \frac{x_i'' - x_i'}{2}, y_i = \frac{y_i'' - y_i'}{2} \\ u_i &= \frac{x_i'' - x_i'}{\Delta t}, v_i = \frac{y_i'' - y_i'}{\Delta t} \end{aligned} \right\} (3 \cdot 5)$$

と表される． $i+1$ 番目の浮子についても，同じような式が成り立ち，これらを式(3・4)に代入すれば，流速勾配の面積分が求められる．

同様に浮子多角形の面積は

$$A = -\oint_C y dx = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - y_i x_{i+1}) \quad (3 \cdot 6)$$

と表せる．多角形の内部を左手に見て一周されるような面積はプラス，逆回りのものはマイナスとする．プラスとマイナスの面積が結びつく場合もある．浮子が海面に束縛されている限り，面積符号が逆転するはずはないが，現実にはしばしば見受けられる．図3-1はその一例である．これは，帯のように細長く伸びて曲がりくねった浮遊物の輪郭が，浮子の数が十分でないために，うまく捉えられなかったためと解釈される．

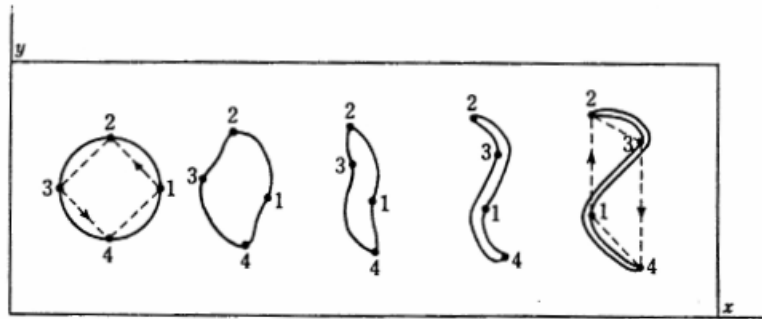


図3-1．浮子四角形の見かけの面積符号の逆転 (川合(1976))

ここで式(3・1)の二次元変形率の面積分は式(3・1)(3・4),(3・5)により

$$\left. \begin{aligned} \iint_A Q dx dy &= \frac{1}{2\Delta t} \sum_{i=1}^n (-x_{i+1}'' y_i' + y_{i+1}'' x_i' + x_{i+1}' y_i'' - y_{i+1}' x_i'') \\ \iint_A \zeta dx dy &= -\frac{1}{2\Delta t} \sum_{i=1}^n (-x_{i+1}'' x_i' - y_{i+1}'' y_i' + x_{i+1}' x_i'' + y_{i+1}' y_i'') \\ \iint_A \alpha dx dy &= \frac{1}{2\Delta t} \sum_{i=1}^n (-x_{i+1}'' y_i' - y_{i+1}'' x_i' + x_{i+1}' y_i'' + y_{i+1}' x_i'') \\ \iint_A h dx dy &= -\frac{1}{2\Delta t} \sum_{i=1}^n (-x_{i+1}'' x_i'' - y_{i+1}'' y_i'' - x_{i+1}' x_i' - y_{i+1}' y_i'') \end{aligned} \right\} (3 \cdot 7)$$

と表せる．

面積 A が時刻 t' から時刻 t'' までの間に变化する速度は，式(3・6)を時間微分して，式(3・5),(3・7)を考慮すると

$$\frac{DA}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (u_i y_{i+1} + x_i v_{i+1} - v_i x_{i+1} - y_i y_{i+1}) = \iint_A Q dx dy = \bar{Q} A$$

となる．したがって，

$$\bar{Q} = \frac{1}{A} \frac{DA}{Dt} = \frac{D}{Dt} \ln A \quad (3 \cdot 8)$$

を得る．ここにバーは面積平均を示す．式(3・8)は，水平収束発散の面積平均値が，その面積の変化率に等しいことを表している．

残りの3個の二次元変形率も，同じように幾何学的に算出できる．式(3・1)において，第1式の u を v に， v を $-u$ で置換すれば，第2式を得る．一方，式(3・5)の第2式により

$$\begin{aligned} x_i'' &= x_i' + u_i \Delta t = x_i' + \Delta x_i \\ y_i'' &= y_i' + v_i \Delta t = y_i' + \Delta y_i \end{aligned}$$

と表せるから，上述の速度成分の置換に相当する座標増し分の置換を行うと，

$$\begin{aligned} x_i^\zeta &= x_i' + \Delta y_i \\ y_i^\zeta &= y_i' - \Delta x_i \end{aligned}$$

となる．このような置換を n 個の浮子の全てについて行ったときに得られる，時刻 t'' における架空の浮子多角形の面積を A^ζ で表せば，式(3・8)と同じようにして

$$\bar{\zeta} = \frac{1}{\Delta t} \ln \left(\frac{A^\zeta}{A} \right)$$

によって，渦度鉛直成分の面積平均が求められる．

伸び変形率に対しては，式(3・1)の第1式の u はそのままにして，第2式の v を $-v$ で置換すればよいから，置換浮子多角形の座標は

$$\begin{aligned} x_i^\alpha &= x_i' + \Delta x_i \\ y_i^\alpha &= y_i' - \Delta y_i \end{aligned}$$

となる．また，ずれ変形率に対するものは

$$\begin{aligned} x_i^h &= x_i' + \Delta y_i \\ y_i^h &= y_i' + \Delta x_i \end{aligned}$$

となる．これらの置換は，渦度鉛直成分では時計回りの 90° 回転，伸び変形率では x 軸に対する鏡像反転，ずれ変形率では x 軸と y 軸の間の 45° 傾斜線に対する鏡像反転となる．

なお本研究では川合の方法では上記のような浮子の個数が足りずに輪郭が捉えられないことを防ぐために，各時点での多角形を幾つかの三角形に分解し，ヘロンの公式を用いて面積を求めた．

3 - 4 . 各方法の比較と収束発散の推定精度

Okubo and Ebbesmeyer と川合の両方法で求めた収束発散を比較したところ殆ど差は見られなかった．どちらの方法を用いても，浮標群が一行に並んだときや，浮標群の形成する多角形の面積が小さいときには収束発散および他の二次元変形率が大きくなった．これは，浮標群が一行になるときは式(3・1)の分母部分の ∂x や ∂y が， ∂u や ∂v に対して小さくなるためであり，同様に面積が小さいときには式(3・8)の分母部分の A が小さくなるためである．しかし，川合の方法は面積を用いて収束発散を求めているために，多角形の内部に浮子が存在する場合，その浮子の運動を無視することになる．本研究で行った実験の中には多角形の内部にも幾つかのブイが存在することが多く，それらの値を用いた方がよりよく海域の流れを再現できると考えた．従って，本研究では Okubo and Ebbesmeyer の方法を用いて，解析を行った．

次に GPS の位置精度が収束発散の推定にどの程度の影響を与えるのか考察する．ここでは Okubo and Ebbesmeyer と川合の方法では殆ど差が無かったこと，そして，面積変化の方が誤差の伝播が分かり易いことから川合の方法での収束発散の推定精度を求めた．

まず初めに，GPS 携帯端末の位置精度は東西方向 $\sigma_x = 13.7\text{m}$ ，南北方向 $\sigma_y = 10.0\text{m}$ で

あった．このとき二つの浮子 (x_i', y_i') ， (x_{i+1}', y_{i+1}') 間の距離 L' に関する誤差 $\sigma_{L'}$ は，誤差伝播の法則より，

$$\sigma_{L'} = \sqrt{\frac{2\{(x_{i+1}' - x_i')^2 \sigma_x^2 + (y_{i+1}' - y_i')^2 \sigma_y^2\}}{(x_{i+1}' - x_i')^2 + (y_{i+1}' - y_i')^2}} \quad (3 \cdot 9)$$

と表せる．このとき，実際には多角形の各辺の長さは独立ではないが，独立であるとして計算した．このことにより実際の誤差より若干大きく誤差を見積もっていることになる．

(x_i'', y_i'') ， (x_{i+1}'', y_{i+1}'') 間の距離 L'' の誤差は式(3・9)の (x_i', y_i') ， (x_{i+1}', y_{i+1}') を

(x_i'', y_i'') ， (x_{i+1}'', y_{i+1}'') に置き換え， (x_i, y_i) ， (x_{i+1}, y_{i+1}) 間の距離 L の誤差は式(3・

5)より (x_i', y_i') ， (x_{i+1}', y_{i+1}') を $\left(x_i = \frac{x_i'' - x_i'}{2}, y_i = \frac{y_i'' - y_i'}{2}\right)$ ， $\left(x_{i+1} = \frac{x_{i+1}'' - x_{i+1}'}{2}, y_{i+1} = \frac{y_{i+1}'' - y_{i+1}'}{2}\right)$

に置き換えればよい．このことから，距離 L ， L' ， L'' から求めた面積により得られた収束発散を \bar{Q} とし，距離 $L + \sigma_L$ ， $L' + \sigma_{L'}$ ， $L'' + \sigma_{L''}$ から求めた面積により得られた収束発散を $\bar{Q} + \sigma_{\bar{Q}}$ として，収束発散の推定精度 $\sigma_{\bar{Q}}$ を求めた．また今回，収束発散を一時間移動平均で表したが，一時間移動平均したときの推定精度 $\sigma_{\bar{Q}}$ は，一時間の間に n 個のデータがあ

るとすると，誤差伝播の法則より

$$\overline{\sigma}_Q = \frac{1}{n} \sqrt{\sigma_{Q1}^2 + \sigma_{Q2}^2 + \sigma_{Q3}^2 + \dots + \sigma_{Qn}^2}$$

と表せる．

ここでは，一例として 2006 年 5 月 31 日-6 月 1 日の実験の両方法による収束発散及び推定精度を図 3-3 に示す．

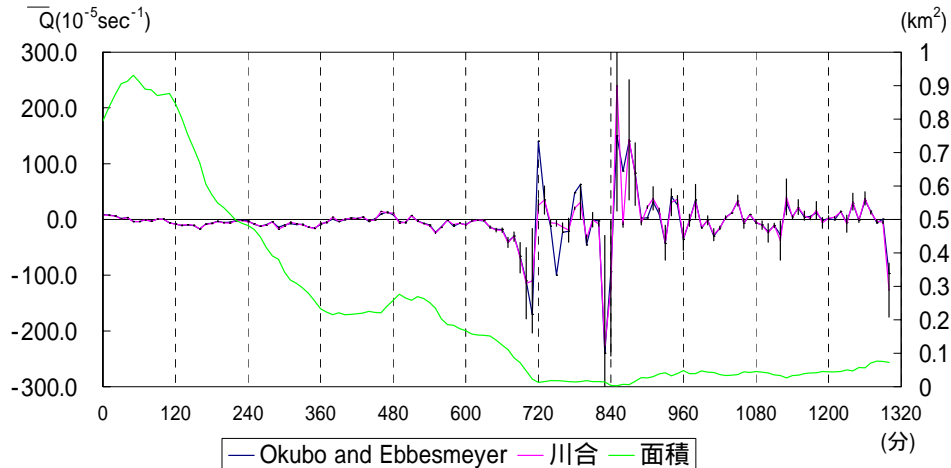


図 3-3 (a). 収束発散及び面積の時系列変化
 - Okubo and Ebbesmeyer 及び川合の方法の比較 -
 左縦軸の単位は 10^{-5}sec^{-1} ，右縦軸の単位は km^2 .
 エラーバーは収束発散の推定精度

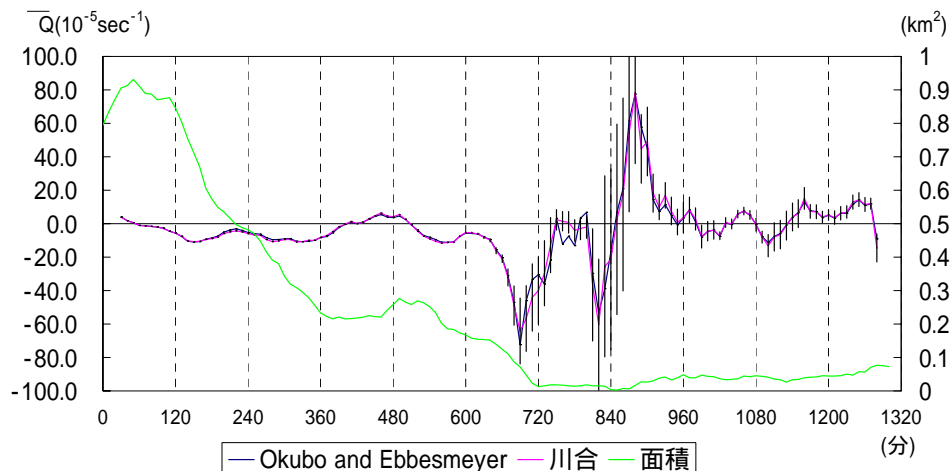


図 3-3 (b). 収束発散の 1 時間移動平均値及び面積の時系列変化
 - Okubo and Ebbesmeyer 及び川合の方法の比較 -
 左縦軸の単位は 10^{-5}sec^{-1} ，右縦軸の単位は km^2 .
 エラーバーは収束発散の 1 時間移動平均値の推定精度

推定精度は、ブイ群がばらばらに分布しているときは 10^{-6}sec^{-1} 以下のオーダーで収束発散のオーダーに比べ 1 桁以上小さかったが、ブイ群が一列にならび、面積の値が小さくなった時点では収束発散が大きくなるとともに、推定精度も悪くなった。従って、強い収束を示す際には、ブイ群が一列にならび易く面積も小さくなるために推定精度が悪くなった。

第4章：解析結果

第3章で述べた Okubo and Ebbesmeyer の方法を用いて収束発散を求めた。この方法では浮子群内で流速勾配が同じであると仮定しているため、ブイを放流した後に他のブイから大きく離れてしまった2005年6月23日の Buoy11 ,Buoy12 ,6月24日の Buoy 4 ,Buoy 5 ,2006年6月28-29日の Buoy 4 は計算には使用しなかった。また2005年2月の実験は計算を行ったものの実験時間が短かったため、今後の解析からは除いた。また図が煩雑になるのを防ぐため、収束発散は1時間移動平均したものを表示する。尚、各実験から求めた二次元変化率の1時間移動平均の時系列変化は付録に記す。

図4-1および表4-1に各実験の収束発散の平均値と概要を示す。この表で群と書いてあるものは計算を行った一連のブイの集団のことで、便宜上方位や大きさにより分類しているが、例えば西と書かれた実験は駿河湾西部海域を表しているわけではなく、幾つかある群の中で西にあるという意味である。

図4-1の平均値を見ると、出現頻度では収束より発散であることが多かったが、値として大きな収束が見られたのは2005年5月20日、6月23-24日の戸田沖及び土肥沖、6月24-25日、2006年5月31日-6月1日、6月29-30日の実験で特に2005年6月の値が著しく大きくなっており、全期間平均すると収束だった。2005年6月の値が著しく大きくなったのは、スケールが小さかった上に放流後に一列に並んで移動を続けたためであると考えられる。それ故推定精度も悪くなっている。

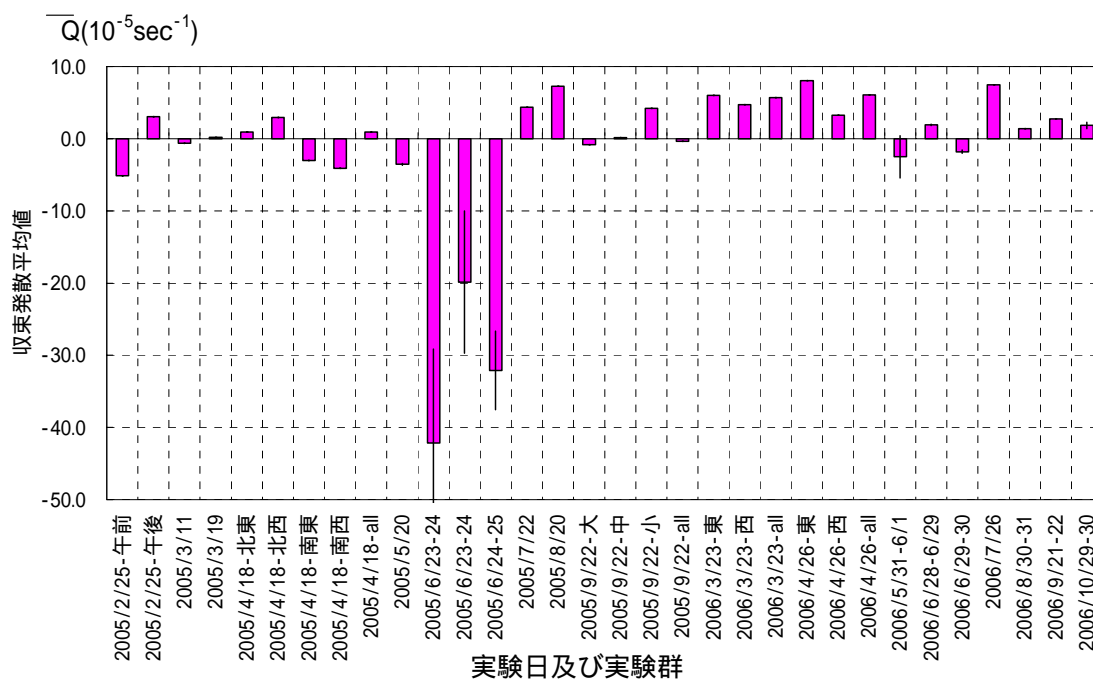


図4-1. 各実験の収束発散平均値

縦軸の単位は 10^{-5}sec^{-1} . エラーバーは収束発散の1時間移動平均値の推定精度

表 4 - 1 . 各実験の概要

実験日	群	放流開始時刻	回収時刻	放流時間	ブイ数	水平スケール		収束発散平均値 (10^{-5}sec^{-1})
						放流開始時	回収時	
2005/2/25	午前	9:20	10:25	1:05	4	363	326	-5.13
	午後	11:40	12:00	0:20	4	219	223	3.07
2005/3/11		8:25	11:55	3:30	6	451	518	-0.64
2005/3/19		10:35	15:00	4:25	5	309	380	0.18
2005/4/18	北東	10:10	14:20	4:10	4	2023	2762	0.91
	北西	10:10	14:20	4:10	4	2110	3190	2.96
	南東	10:10	14:20	4:10	4	1984	2620	-3.02
	南西	10:10	14:20	4:10	4	2185	2274	-4.08
	all	10:10	14:20	4:10	9	3188	4369	0.91
2005/5/20		9:00	13:35	4:35	4	254	217	-3.55
2005/6/23-24	戸田沖	16:40	4:40	12:00	3	146	765	-42.16
2005/6/23-24	土肥沖	17:20	11:20	18:00	3	191	374	-19.86
2005/6/24-25		10:40	9:20	22:40	3	216	141	-32.12
2005/7/22		10:05	14:40	4:35	12	553	917	4.33
2005/8/20		9:55	13:40	3:45	11	479	814	7.28
2005/9/22	大	9:15	13:05	3:50	4	830	847	-0.84
	中	9:15	13:05	3:50	4	451	493	0.14
	小	9:15	13:05	3:50	4	181	271	4.17
	all	9:15	13:05	3:50	12	504	534	-0.37
2006/3/23	東	8:05	10:25	2:20	6	325	429	5.99
	西	8:20	10:20	2:00	6	316	374	4.73
	all	8:20	10:20	2:00	12	430	583	5.67
2006/4/26	東	8:10	13:40	5:30	6	289	885	8.03
	西	8:25	13:35	5:10	6	326	368	3.28
	all	8:25	13:35	5:10	12	512	910	6.04
2006/5/31-6/1		12:50	10:40	21:50	5	631	539	-2.51
2006/6/28-6/29		13:40	14:00	24:20	4	592	3706	1.92
2006/6/29-30		18:00	7:20	13:20	5	633	748	-1.80
2006/7/26		5:10	11:25	6:15	9	501	1184	7.43
2006/8/30-31		12:31	13:21	24:50	5	629	1398	1.38
2006/9/21-22		13:20	7:10	17:50	5	603	2233	2.73
2006/10/29-30		12:40	8:30	19:50	5	526	1171	1.85

次に，実験の中で収束したときと発散したときの幾つかの例を紹介する．

収束した例 1：2006 年 5 月 31 日-6 月 1 日

まず初めに，強い収束が見られたときの例として 2006 年 5 月 31 日から 6 月 1 日にかけて行った実験について述べる．放流開始時刻は 5 月 31 日 12 時 50 分で回収時刻は 6 月 1 日 10 時 40 分，放流時間は 21 時間 50 分であった．図 4-2 にブイの放流図案を示す．戸田沖約 7 km の地点で 5 つのブイを放流し，そのうち 4 つは四角形を形作るように配置し残りの 1 つをその四角形の中心においた．2006 年 5 月以降に行った実験は，7 月にブイの個数が多い点を除いては全て同様の配置である．図 4-3 に収束発散の 1 時間移動平均と面積の変化率を示す．また，ブイの多角形の軌跡を図 4-4 に示す．

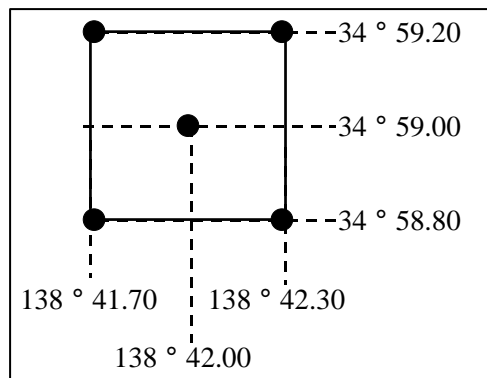


図 4 - 2 . ブイ放流図案

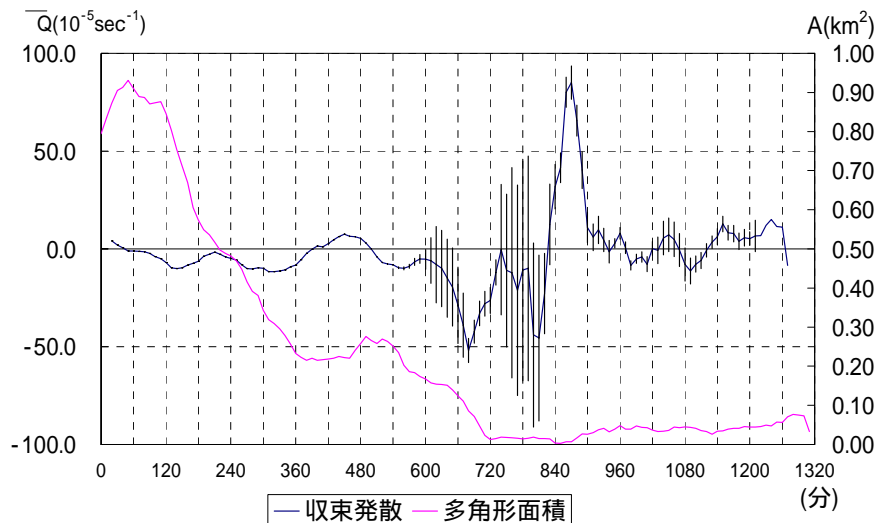


図 4-3 . 収束発散の 1 時間移動平均値及び面積の時系列変化
 左縦軸の単位は 10^{-5}sec^{-1} , 右縦軸の単位は km^2 .
 エラーバーは収束発散の 1 時間移動平均値の推定精度

これらの図を見ると、ブイ群は放流開始後 10 時間かけて北上しながら伊豆半島西岸へ近づき収束していったが、その後は流れの向きを南へ変えたとともに 5 つのブイは一列に並び、その後約 10 時間一列に並んだまま流れ続け、面積変化はほとんど無くなった。これは 12 時間経過時点で強い収束場に捉われ、その後はそのまま収束場に捉われつづけながら流れていったためであると考えられる。収束発散の平均値は $-2.51 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ であった。面積は放流開始時には $794,102 \text{m}^2$ であったが最も面積の小さくなった 14 時間 20 分経過時点では $2,785 \text{m}^2$ であり、開始時面積の約 0.35% の面積となっていることから強く収束したことが分かる。

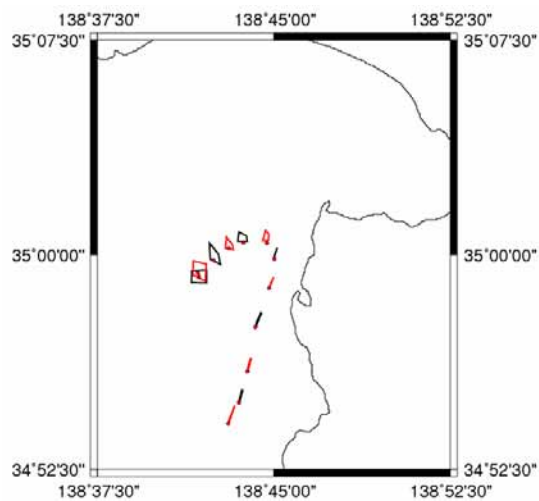


図 4-4 . 多角形の軌跡

5 月 31 日 12 時 50 分から 2 時間間隔 .
 ただし最後の多角形は 6 月 1 日 10 時 40 分時のもの . 赤丸は中央のブイ

収束した例 2 : 2005 年 6 月 23・24 日

次の強い収束が見られたときの例として 2005 年 6 月 23 日から 6 月 24 日にかけて行った実験について述べる . 放流開始時刻は 6 月 23 日 16 時 40 分で回収時刻は 6 月 24 日 4 時 40

分,放流時間は12時間であった.戸田沖約3kmの地点で3つのブイを放流した.

図4-5にブイの多角形の軌跡を,図4-6にこの実験の際の収束発散の1時間移動平均と面積の変化率を示す.図4-6をみると,放流開始後約3時間収束したのち,その後約4時間発散を続け面積も放流開始時に9,875m²だったものが,放流開始後7時間後には873,924m²にまで拡大し約90倍もの面積になっている.その後,収束した後に再び強く発散し,面積も本実験で最大となる903864m²を記録している.そして最後にはまた急激に収束した.このときの実験では実験開始時のスケールが小さかったことに加え,図4-5で分かるように実験開始後から実験期間中の全てを通してブイが一行に並んでいることが多く,強い収束場に捉われていると考えられる.そしてブイ群の形成する三角形が南北方向へ伸びたために,1つのブイが多角形の面積及び形状に与える影響が大きくなり,収束発散が大きく変動する原因となったと考えられる.また,それに伴い推定精度も悪くなっている.収束発散の平均値は $-4.22 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ であった.

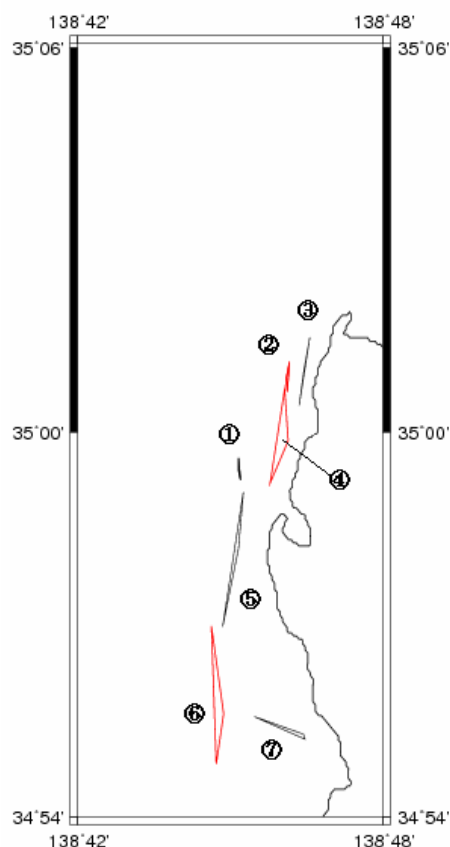


図4-5.多角形の軌跡
(6月23日16時40分)から順
に2時間間隔

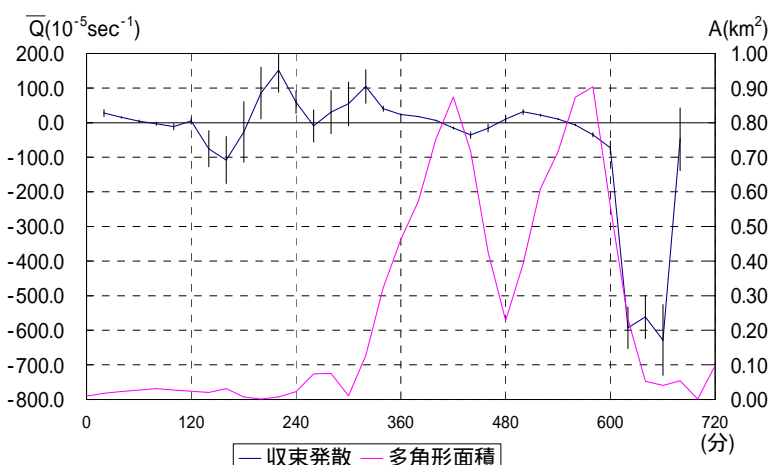


図4-6.収束発散の1時間移動平均値及び面積の時系列変化
縦軸の単位は 10^{-5}sec^{-1} ,右縦軸の単位は km^2 .
エラーバーは収束発散の1時間移動平均値の推定精度

発散した例：2006年9月21・22日

発散した例として、2006年9月21・22日に行った実験について述べる。放流開始時刻は9月21日13時20分で回収時刻は9月22日の7時10分、放流時間は17時間50分であった。放流したブイの数は5つで、放流開始時の配置は2006年5月の実験と同様である。ブイの多角形の軌跡を図4-7に、収束発散の1時間移動平均と面積の時系列変化を図4-8にそれぞれ示す。

これらの図を見ると、放流開始後4時間は北上しながら伊豆半島西岸へ近づき発散していったが、その後流れの向きを南へ変えたとともに、更に発散を続けながら流れていった。10時間経過後2時間程収束するが、その後は回収されるまでの間に発散し続

けた。収束発散の平均値は $2.73 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ であった。面積は放流開始時に $636,754 \text{ m}^2$ であったが17時間50分経過時回収する時に面積は最大となり、 $2,393,031 \text{ m}^2$ となった。これは開始時面積の約3.8倍の面積となっていることから発散したことが分かる。

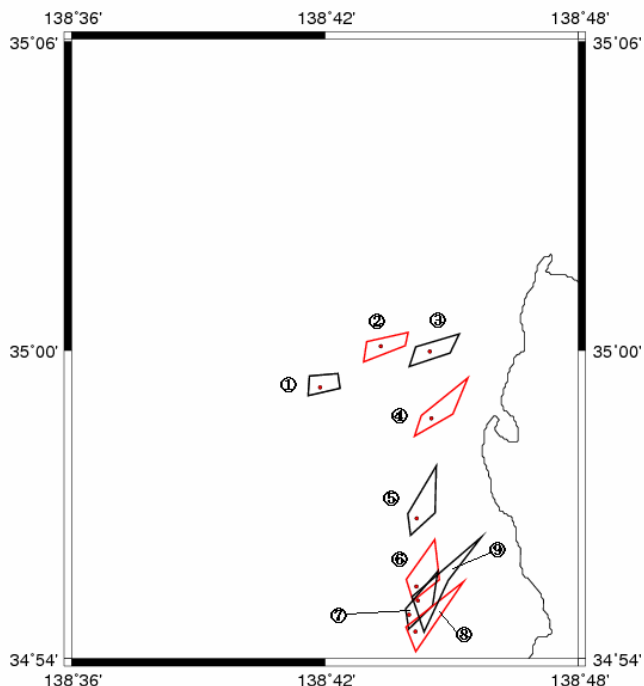


図4-7．多角形の軌跡

(9月21日13時20分)から順に2時間間隔
赤丸は中央のブイ

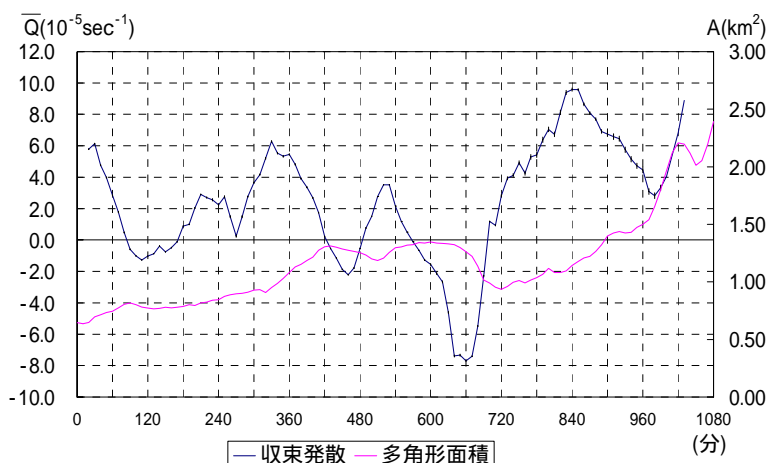


図4-8．収束発散の1時間移動平均値及び面積の時系列変化

縦軸の単位は 10^{-5} sec^{-1} ，右縦軸の単位は km^2 。

エラーバーは収束発散の1時間移動平均値の推定精度

しかし図 4-7 を中央のブイを使い東西南北 4 つの三角形に分割すると、西側の三角形は収束しているように見える。そこで 4 つの三角形の収束発散を求めたところ図 4-9 が得られた。この図を見ると、多角形の軌跡から推定されたように西側では強い収束が見られ、逆に東側では強い発散が見られた。

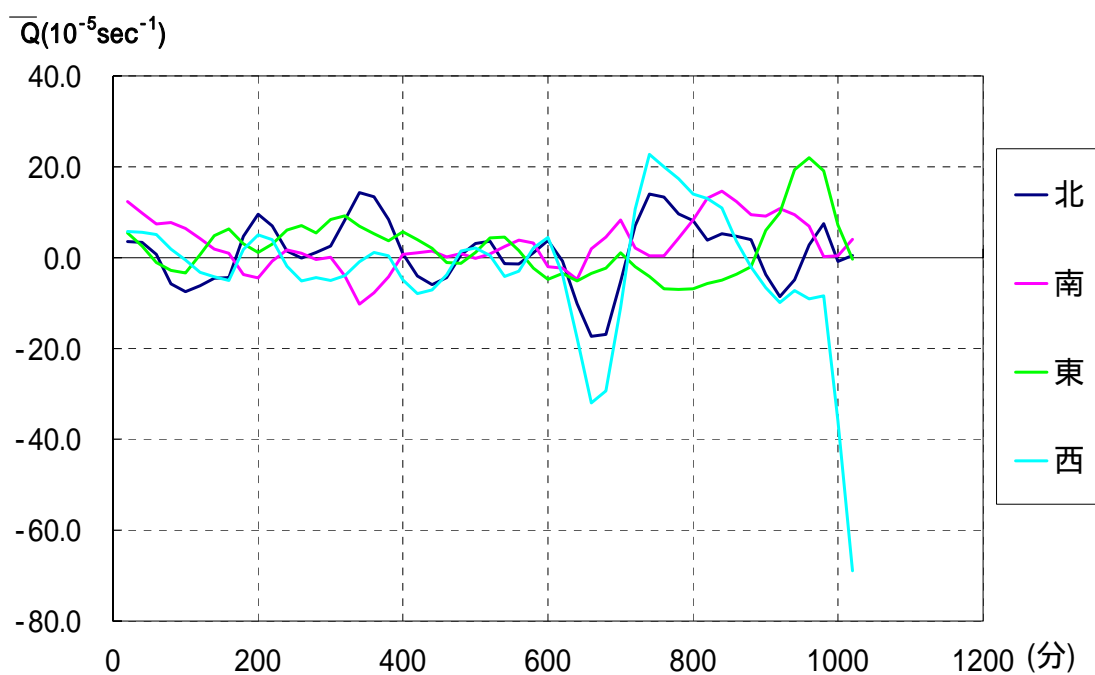


図 4-9 . 収束発散の 1 時間移動平均値の時系列変化
縦軸の単位は 10^{-5}sec^{-1} .



写真 3 . 左：流れ藻採集 右：ブイ待機中

第 5 章：考察

この章では本研究で行った浮子拡散実験から得られた結果を基に，収束発散場および変形率について考察を行う．

5 - 1 . 収束発散

初めに，駿河湾における収束発散場の分布図を図 5 - 1 に示す．これは各実験の収束発散の 1 時間移動平均した値を 1 時間置きにプロットしたものである．図の赤円が発散を，青円が収束を示しており，円の面積が発散の値に対応している．これを見ると伊豆半島西岸のごく沿岸近くに強い収束場及び発散場が見られるが平均すると収束場の方が強くなっている．沿岸域で収束発散が大きき値を示したのは，2005 年 6 月 23・24 日の戸田沖，土肥沖，同年 6 月 24・25 日の湾奥海域，2006 年 5 月 31 日-6 月 1 日の実験のときである．これらの実験の中には収束発散の値が大きいが同時に推定精度が悪いものも含まれている．しかしながら，このように沿岸域で収束発散の値が大きくなったのは，沿岸域でブイ群が強い収束場に捉われることで一列に分布し，少しのブイ群の変形により収束・発散ともに値が大きくなるためである．これは，ブイが厳密に海水と同じ挙動を示す物質であれば収束場では沈降流により沈んでいくが，ブイや流れ藻は浮力を持っているために，沈降せずに収束場と共に移動し，このような結果が得られたのだと考えられる．また，強い収束を示した 2005 年 6 月 23・24 日の戸田沖・土肥沖および 2006 年 5 月 31 日-6 月 1 日の実験は，共に沿岸近くでブイ群が強い収束場に捉われ一列に分布した状態を保ち続けた（図 4 - 3，4 - 6 参照）．これらのことから駿河湾東部海域の沿岸付近では強い収束場が存在し，流れ藻を始めとする浮遊物質が集積することが示唆される．同様にこれらの実験結果から，ブイ群が一旦収束場に捉えられ一列に分布した後は，再びブイ群が発散しばらばらに分布することはほとんど無い．このことから，一度収束場に捉えられた浮遊物質は収束した状態を保つ傾向があると考えられる．また，沿岸域では図 2 - 6 の 2005 年 6 月もしくは 2006 年 9 月のブイの軌跡を見ても分かるようにしばし駿河湾東部沿岸海域で，ブイが長時間滞留する様子が見られることから，収束場に集まった流れ藻が収束場に捉われながら沿岸域を漂流し，やがて浮力を失い沈降していつている可能性がある．

次に，これらの実験結果と Tanaka *et al.* (2007) の数値モデルとの比較を行う．Tanaka *et al.* の数値モデルは，駿河湾上空を吹く風により流れを駆動させたもので，図 5 - 2 は駿河湾表層における水平流速を，図 5 - 3 は表層における鉛直流速分布を表している．図 5 - 3 の赤影の部分は下向きの流速，即ち，水平流速場における収束場を表している．図 5 - 2 で再現された駿河湾表層の水平流速を見てみるとこの結果は稲葉（1982，1988）の結果と概ね一致している．もちろん，これは黒潮が駿河湾の循環に影響しないということではないが，同時に再現された図 5 - 3 の鉛直流速分布を見てみると，赤影である収束場が秋季を除いた冬季・春季・夏季には駿河湾東部海域で見られ，本研究の実験結果とも整合性がある．

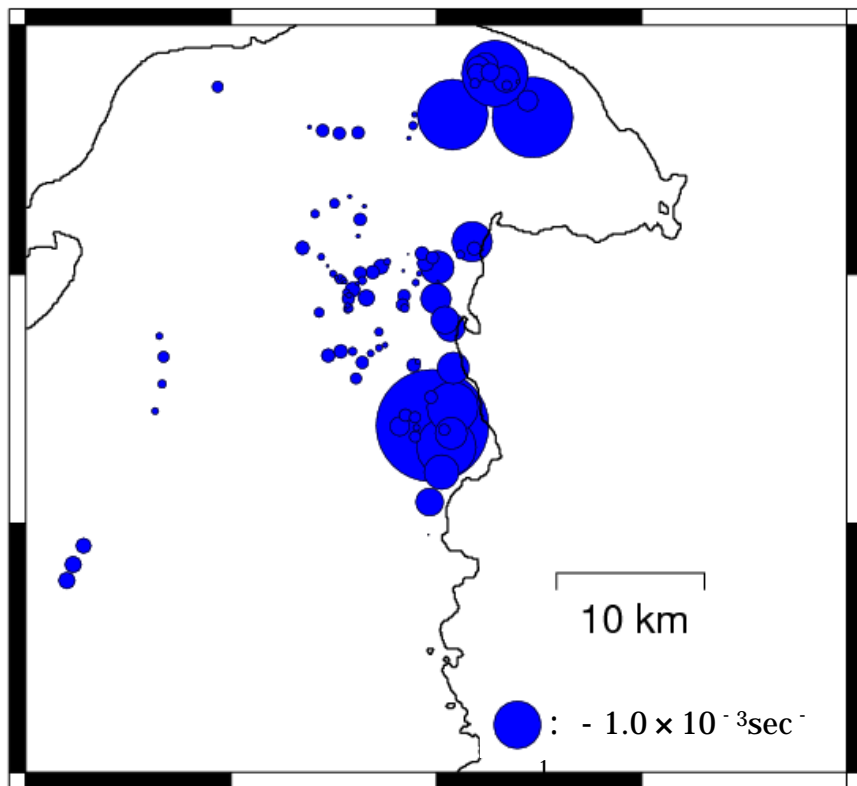
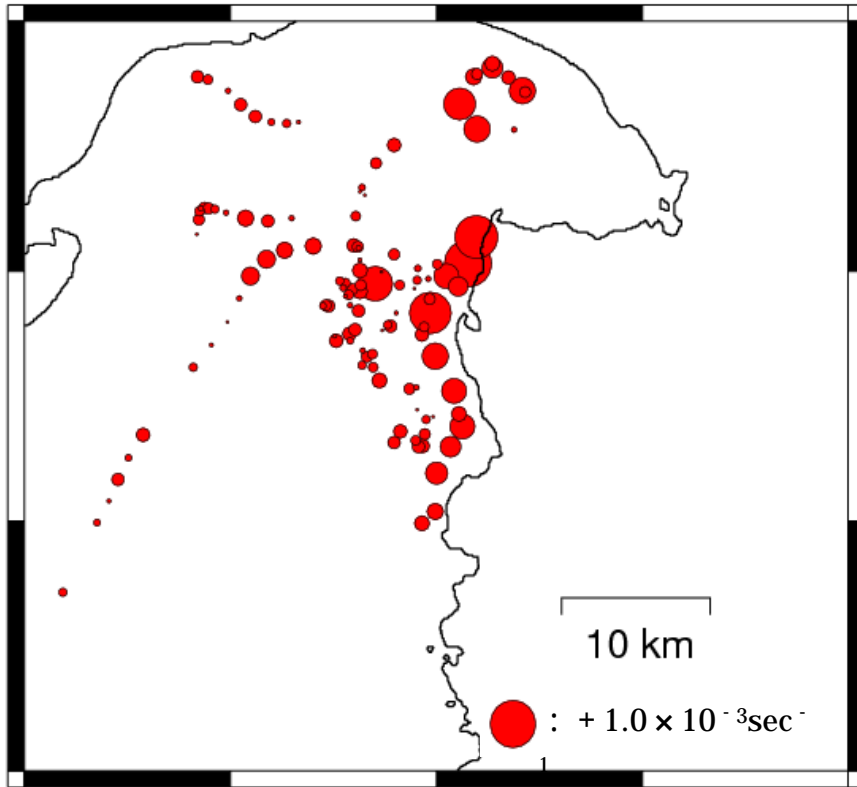


図5-1 . 収束発散の分布図 上：発散 下：収束
 (単位は sec^{-1} , 大きさは円の面積に比例する)

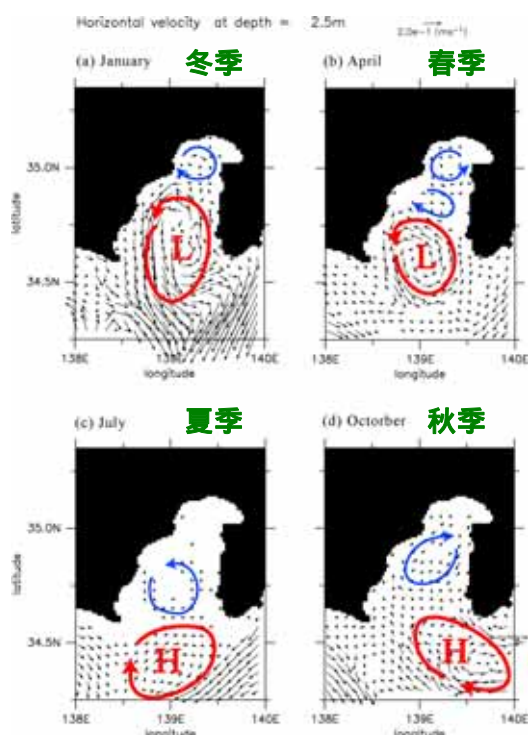


図 5 - 2 表層における水平流速分布
(Tanaka *et al.* (2007))

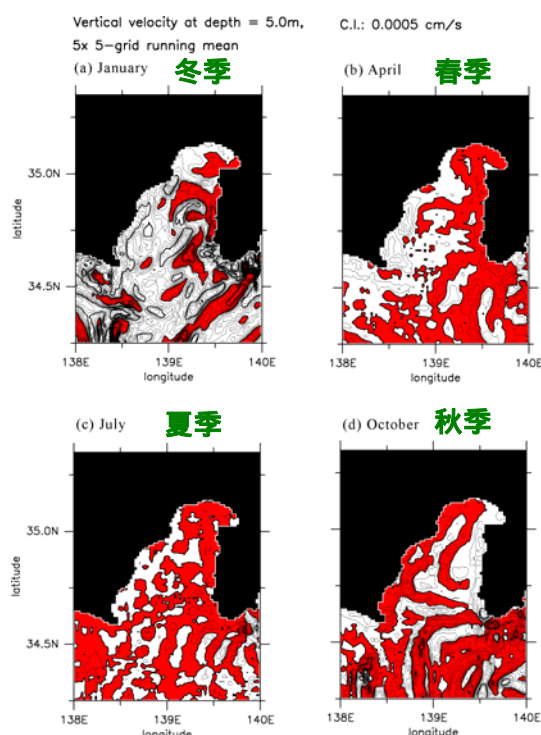


図 5 - 3 表層における鉛直流速分布
(Tanaka *et al.* (2007))

赤影の部分は下向きの流速，即ち，
水平流速場における収束場を表す．

5 - 2 . 流れ藻分布との比較

次に駿河湾で浮子拡散実験の結果と同時に行った流れ藻の目視調査の結果(日下ほか(未発表))を比較する．図 5 - 4 に 2006 年 5 月 31 日-6 月 1 日に行った目視調査による流れ藻の分布図と浮子拡散実験によるブイの軌跡図を示す．図 5 - 4 を見てみると，実際にブイ群が強い収束場に捉えられ一列に並んでいる海域において多くの流れ藻発見されることが分かる．また 2005 年 5 月と 6 月の収束発散の分布図を比較したものを図 5 - 5 及び図 5 - 6 に示す．両月とも，目視調査を行った海域は浮子拡散実験を行った海域に比べてかなり大きなスケールであると同時に，浮子拡散実験を行った海域は目視調査を行った海域に比べて沿岸よりではあるが，図 5 - 5 を見ると 2005 年 5 月の実験でも，駿河湾東部海域において流れ藻が多く目視されると共に戸田沖約 3 km の沿岸域で強い収束場が見られ，流れ藻が沿岸域に集積することが示唆される．また図 5 - 6 の 2005 年 6 月の実験における収束発散の分布図を見てみると，収束場と発散場が共に沿岸域で見られるが，平均すると強い収束場であることから，流れ藻が沿岸域に集積することが示唆される．

以上のことから流れ藻の目視調査が行われ流れ藻が駿河湾東部海域に多く目視されたときの浮子拡散実験ではいずれも沿岸域に収束場が見られ，沿岸域に流れ藻が集積する可能性が示唆された．

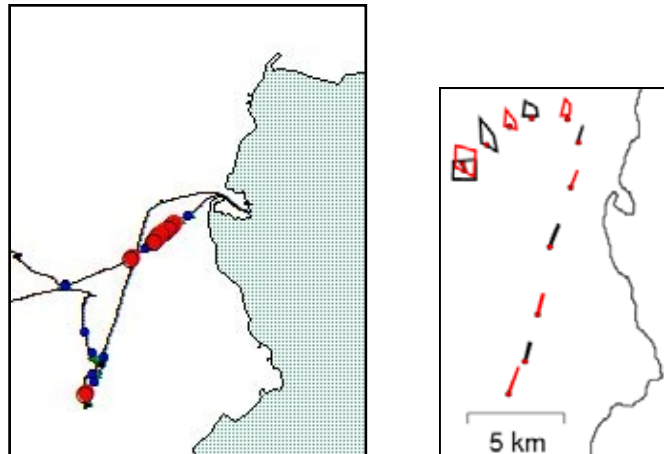


図5-4 . 2006年5月31日-6月1日流れ藻の分布(左図)(日下ほか(未発表))とブイの軌跡(右図) (左図の赤丸と青丸が流れ藻を表し, 黒線は航跡を表す.)

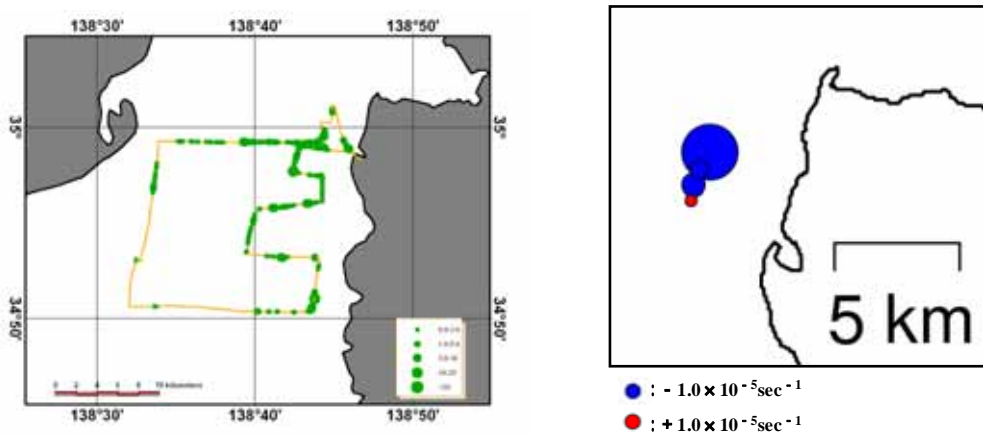


図5-5 2005年5月20日流れ藻の分布(左図)(日下ほか(未発表))とブイの軌跡(右図) (左図の緑丸は流れ藻の存在を表し, その大きさは量を示す. 右図の青丸は収束を赤丸は発散を表し, その面積が大きさを示す.)

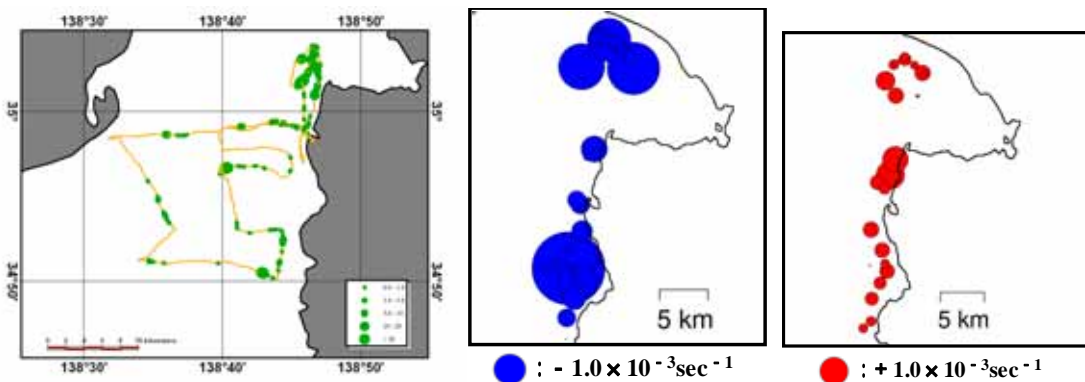


図5-6 2005年6月23日流れ藻の分布(左図)(日下ほか(未発表))とブイの軌跡(右図) (左図の緑丸は流れ藻の存在を表し, その大きさは量を示す. 右図の青丸は収束を赤丸は発散を表し, その面積が大きさを示す.)

5 - 3 . 伸び変形率最大値

今までは、収束発散について議論をしてきたが、浮子拡散実験を行うと、ある特定の方向へ収束または発散する様子がしばしば見られる。しかしながら収束発散では変形の方法を記述することが出来ない。例えば 2006 年 5 月 31 日-6 月 1 日のブイの軌跡図（図 4-4 参照）では、ブイ群は海岸線に沿う方向へ収束していくが、収束発散でそのことを表すことが出来ない。そこで本節では収束発散する方向および大きさを表すものとして変形率について考える。

ブイ群の変形率を表すものとしては伸び変形率・ずれ変形率がある。伸び変形率は、正のときに y 方向に比べて x 方向への粒子群の伸びが大きいことを示し、負のときは逆に x 方向に比べて y 方向への粒子群の伸びが大きいことを示すもので、ずれ変形率は、正のときに x 軸に対して +45 度の方向への伸びが大きいことを示し、負の時には x 軸に対して -45 度の方向へ伸びが大きいことを示すものである。そこで 2006 年 5 月 31 日・6 月 1 日の伸び変形率、ずれ変形率および収束発散の 1 時間移動平均の時系列変化を図 5-7 に示す。図 5-7 を見てみると、放流開始後 720 分経過時までの強く収束している間はほとんど伸び変形率は負の値をとっており、さらにこのときは収束であるために、東西方向に縮んでいくことがわかる。そして同時にずれ変形率は正の値をとっており、同様に収束であるためブイ群は北西方向へも縮んでいることがわかる。しかしながらこれらの図を見ても分かるように伸び変形率・ずれ変形率はお互いに大きく変動しており、二つの異なる方向への異なる大きさの変形を考えなければならず、取り扱いが難しくなっている。そこで本研究では軸にとらわれない変形率として伸び変形率最大値を以下のように導入した。

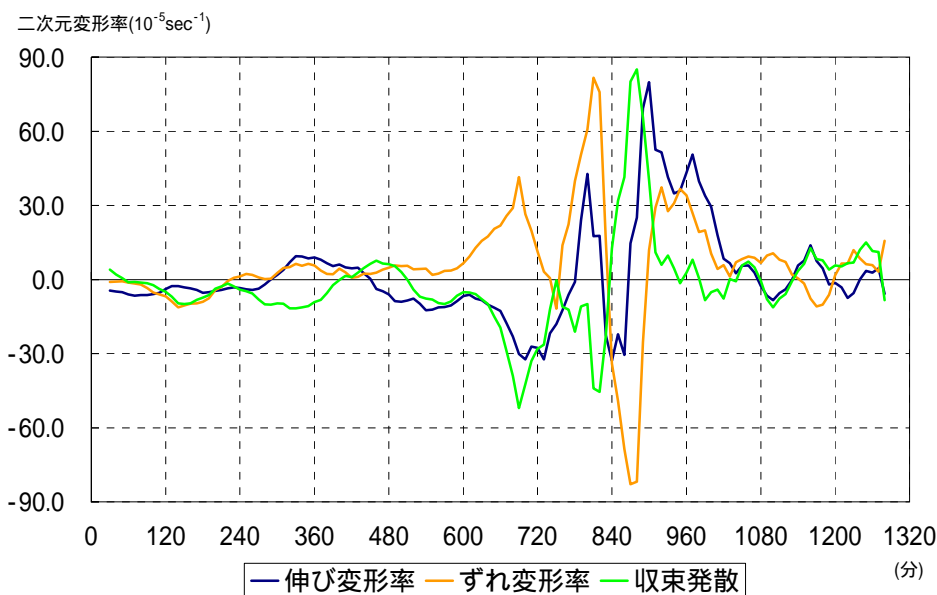


図 5-7 . 1 時間移動平均伸び変形率，ずれ変形率，収束発散の時系列変化
縦軸の単位は 10^{-5}sec^{-1} .

本研究では二次元変形率を計算する際に，東西方向東向きを正に x 軸，南北方向北向きを正に y 軸を取ったが， x 軸から反時計回り方向へ θ だけ回転した軸における座標を (x_θ, y_θ) ，流速を (u_θ, v_θ) とすると，流速勾配は以下のように表せる．

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_\theta}{\partial x_\theta} &= \cos^2 \theta \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \sin^2 \theta \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \sin \theta \cos \theta \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial \bar{u}_\theta}{\partial y_\theta} &= \cos^2 \theta \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \sin^2 \theta \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \sin \theta \cos \theta \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial x_\theta} &= -\sin^2 \theta \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \cos^2 \theta \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \sin \theta \cos \theta \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial y_\theta} &= \sin^2 \theta \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \cos^2 \theta \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \sin \theta \cos \theta \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\}$$

ここで，

$$\begin{pmatrix} x_\theta \\ y_\theta \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} u_\theta \\ v_\theta \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

従って， x 軸から反時計回り方向へ θ だけ回転した軸における二次元変形率は

$$\left. \begin{aligned} Q_\theta &= \frac{\partial \bar{u}_\theta}{\partial x_\theta} + \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial y_\theta} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = Q \\ \zeta_\theta &= \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial x_\theta} - \frac{\partial \bar{u}_\theta}{\partial y_\theta} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \zeta \\ \alpha_\theta &= \frac{\partial \bar{u}_\theta}{\partial x_\theta} - \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial y_\theta} = \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \cos 2\theta + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \sin 2\theta = \alpha \cos 2\theta + h \sin 2\theta \\ h_\theta &= \frac{\partial \bar{v}_\theta}{\partial x_\theta} + \frac{\partial \bar{u}_\theta}{\partial y_\theta} = \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \cos 2\theta - \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \sin 2\theta = h \cos 2\theta - \alpha \sin 2\theta \end{aligned} \right\}$$

と表せ，まとめると，

$$\left. \begin{aligned} \begin{pmatrix} Q_\theta \\ \zeta_\theta \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} Q \\ \zeta \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \alpha_\theta \\ h_\theta \end{pmatrix} &= A^2 \begin{pmatrix} \alpha \\ h \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad \text{ここで，} \quad A = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

となる．

以上のことから，収束発散および渦度は軸の取り方により変化しないが，伸び変形率とずれ変形率は軸の取り方によって値が異なることが分かる．そこで，伸び変形 α_θ が最大となるような角度 θ を求めた．つまり，これまで伸び変形率とずれ変形率で記述していた変形を，伸び変形率最大値とその時の変形方向 θ で記述することにより，今まで二つの方向への二つの大きさの変形を考えていたのが，ある一つの方向への一つの大きさの変形のみで考えることができ，変形の様子を理解が容易になる．

例えば図5-8は2006年5月30日-6月1日の伸び変形率最大値 α_θ ，その時の変形方向 θ ，伸び変形率及び収束発散の時系列変化である．尚角度 θ は東西方向東向きを0度として-90度から+90度の間で変化させた．またこの図を見ても分かるようにずれ変形率は0となり，考慮する必要がなくなる．図5-8を見てみると，3時間半経過後角度 θ が大きく変化しているがこれは，-90度から90度へ変化したことを表し変形方向としては殆ど変わっていない．この図から，初めの5時間は-60度から-90度そして85度から90度の方向に若干伸びており，その後5から20度の方向へ伸び，8時間後以降は60から80度の方向へ伸びていくことが分かる．駿河湾の地形図（図1-2参照）を見ると，駿河湾東部では約80度方向に等深線が伸びておりこのことから変形方向が地形に依存することが分かる．図5-8を見ることで収束発散と同時に変形方向及び大きさを知ることができ，実際に多角形の放流の軌跡（図4-4参照）からも分かるように等深線に沿う方向へ収束する様子が再現できている．

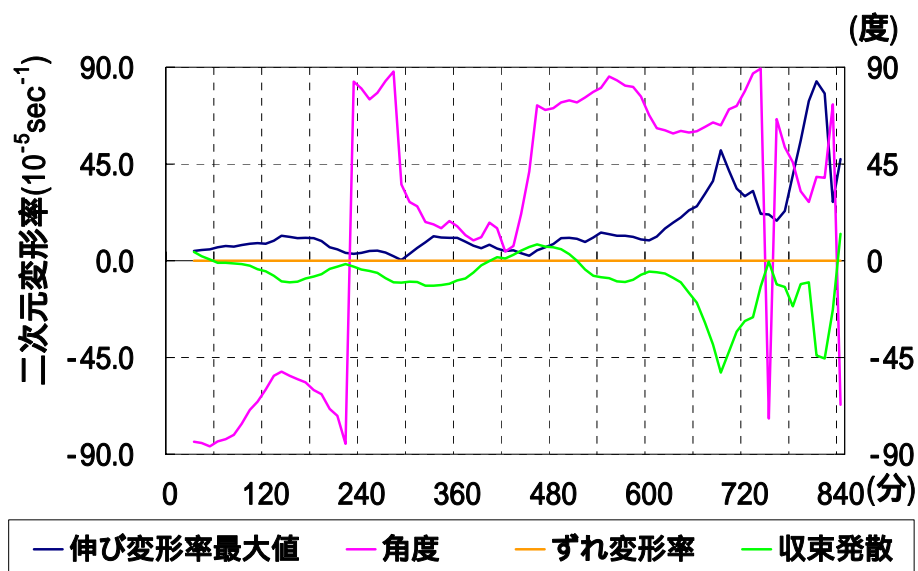


図5-8．1時間移動平均伸び変形率最大値，伸び変形率が最大となる時の角度 θ ，
 角度 θ におけるずれ変形率及び収束発散の時系列変化
 左縦軸の単位は 10^{-5}sec^{-1} ，右縦軸の単位は度

第6章 結論

駿河湾で行った浮子拡散実験では、沿岸海域に強く収束場が観測され、流れ藻を始めとする浮遊物質が集積することが示唆された。また流れ藻の目視調査により駿河湾東部海域に流れ藻が多く目視されたときの浮子拡散実験では、いずれも沿岸域に収束場が見られた。

収束発散する方向を記述する際、これまで伸び変形率とずれ変形率で記述していたものを、伸び変形率最大値とその時の変形方向 θ で記述することにより、今まで二つの方向への二つの大きさの変形を考えていたのが、ある一つの方向 θ への一つの大きさの変形のみで考えることができ、収束発散しながらブイ群が変形していく方向や大きさをより分かり易く記述することが可能となった。

今後の課題としては、大きなスケールによる浮遊物質の集積過程を調査することや収束発散が起こるメカニズムを定量的に解明することが必要となってくる。

謝辞

本研究の遂行及び論文の作成にあたって、親身且懇切な指導をして頂きました東京大学海洋研究所 道田豊 助教授 に深く感謝の意を表します。道田助教授からは研究生活や現場観測を通じて、考え動き、動き考えることの大切さ、楽しさとともに、万全の準備の上、全力で物事に挑む真摯な姿勢、そして、相手に的確に自分の意思を伝えることの大切さを教わりました。深く感謝しております(写真4)。

東京大学海洋研究所・海洋大循環分野のセミナーでお世話になった川邊正樹教授、藤尾伸三助教授、岡英太郎講師、柳本大吾助手、田中潔助手には、セミナー以外でも普段の研究生活で有益なご指摘を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

また、小松輝久助教授には駿河湾の現地観測でお世話になるとともに、研究に関して適切なご助言を頂き、研究の参考、励みとなりました。深く感謝しております。

海洋研究所の先輩である小牧加奈絵氏、加藤拓史氏、稲田真一氏、青柳大志氏、瀧本良太氏は、研究や観測に関して常に親切に教えて頂いたほかに、研究以外にも様々なことを教えて頂き、深く感謝しております。

最後になりましたが、駿河湾での現地観測を行うにあたって、静岡県沼津市戸田「いづ丸」船長 堤敏氏 には多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。



写真4 . 左：釣り船「いづ丸」 右：お世話になった方々

参考文献

- 青柳大志 (2006): 沿岸域における粒子分散に関する研究, 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻自然環境コース平成 17 年度修士論文, pp45 .
- 稲葉栄生 (1982): 駿河湾海況と黒潮流軸位置との関係, 沿岸海洋研究ノート, 第 19 巻, 第 2 号, 94-102 .
- 稲葉栄生 (1988): 駿河湾の海洋環境 - 海潮流及び水温の変動 - , 水産海洋研究会報, 第 52 巻, 第 3 号, 236-240 .
- 川合英夫 (1969): 黒潮表層水の収束発散に関する研究 - 海面における収束発散の実測とその解釈 - , 南西水研報告, (1), 1-14 .
- 川合英夫 (1976): 収束・発散と海の粒々物理学, 海洋物理学 (寺本編), 東京大学出版会, pp103-152 .
- 勝間田高明 (2003): 駿河湾への外洋水の流入過程, 東海大学大学院 2003 年度博士論文, pp110 .
- 日下崇, 小松輝久 (2007): 未発表
- 松山優治 (1988): 駿河湾及び相模湾の循環流と潮流, 沿岸海洋研究ノート, 第 26 巻, 第 1 号, 1988, 21-32 .
- 三上温子, 高井則之, 小松輝久 (2005): 駿河湾海底より採集された大型渦藻類, 第 29 回水産海洋学会研究発表会 .
- 水島雅文・坂井伸一 (1994): 常盤沖および黒潮続流域の流動・拡散特性 - アルゴスブイによる現地観測 - . 海岸工学論文集, 第 41 巻, 316-320 .
- Niiler, P. P., R. E. Davis and H. J. White (1987): Water-following characteristics of a mixed layer drifter. *Deep-Sea Res.*, **34**, No.11, 1867-1881 .
- Okubo ,A .and C .C .Ebbesmeyer (1976): Determination of vorticity, divergence, and deformation rates from analysis of drogue observations . *Deep-Sea Res.* , **23** , 349-352 .
- R.Molinari and A.D.Kirwan,Jr(1975): Calculations of Differential Kinematic Properties from Lagrangian Observations in the Western Caribbean Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, Volume 5, Issue 3, pp483-491 .
- Tanaka, K., Y. Michida and T. Komatsu (2007): A numerical experiment on seasonal variation of wind-driven circulation in Suruga Bay, Coastal Marine Science, (in press) .
- 宇野木早苗 (1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版, 672pp .
- 柳哲雄, 村下耕荘, 樋口明生 (1981): 沿岸海域の物質分散 () - 浮子拡散実験 - , 京大防災年報, 第 24 号, B-2 , 539-547 .

付録 各実験の二次元変形率の1時間移動平均の時系列変化

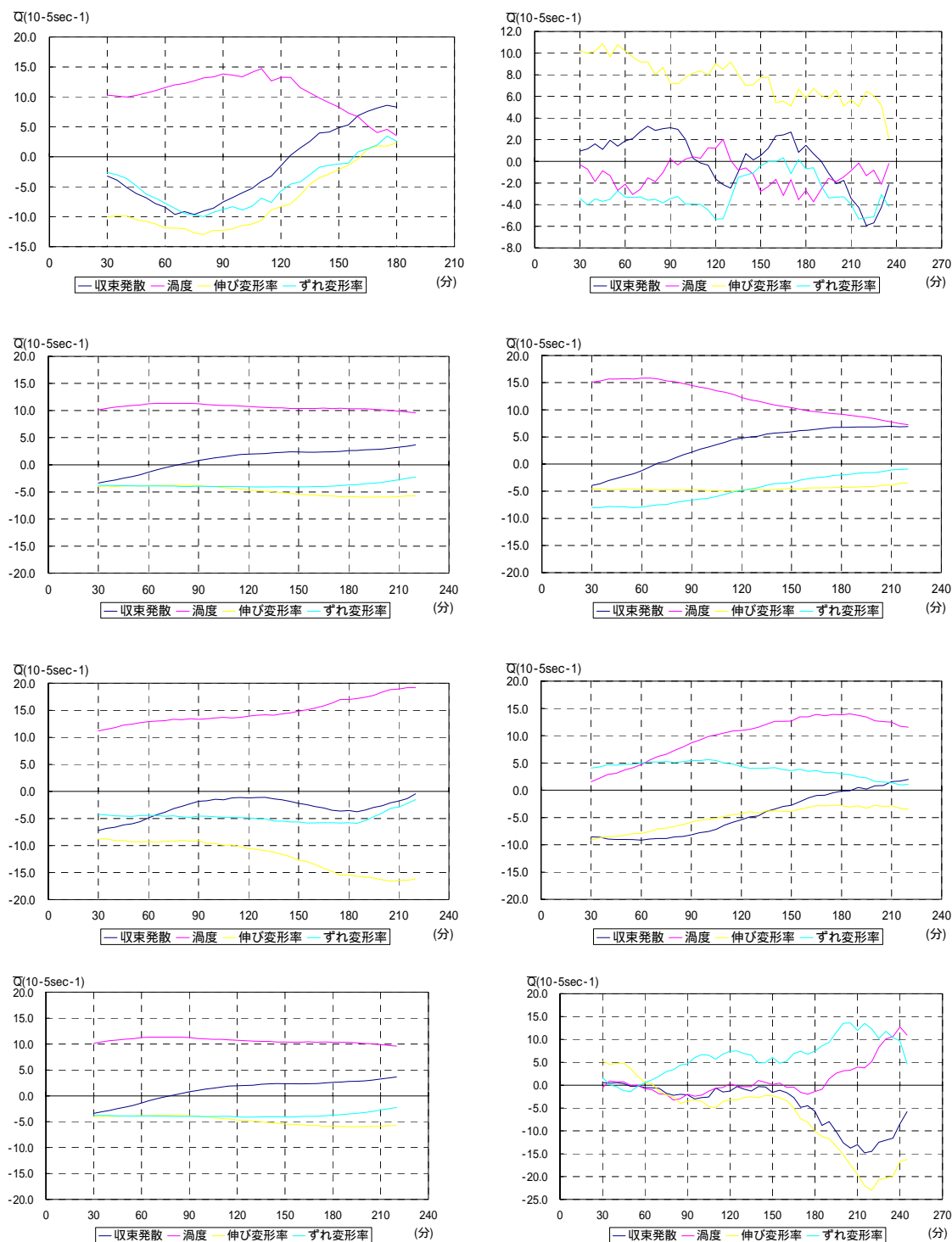


図 . 2005 年 3 ~ 5 月二次元変形率の時系列変化 (縦軸の単位は 10^{-5}sec^{-1})

一段目左 : 3 月 11 日 一段目右 : 3 月 19 日 二段目左 : 4 月 18 日北東
 二段目右 : 4 月 18 日北西 三段目左 : 4 月 18 日南東 三段目右 : 4 月 18 日南西
 四段目左 : 4 月 18 日 all 四段目右 : 5 月 20 日

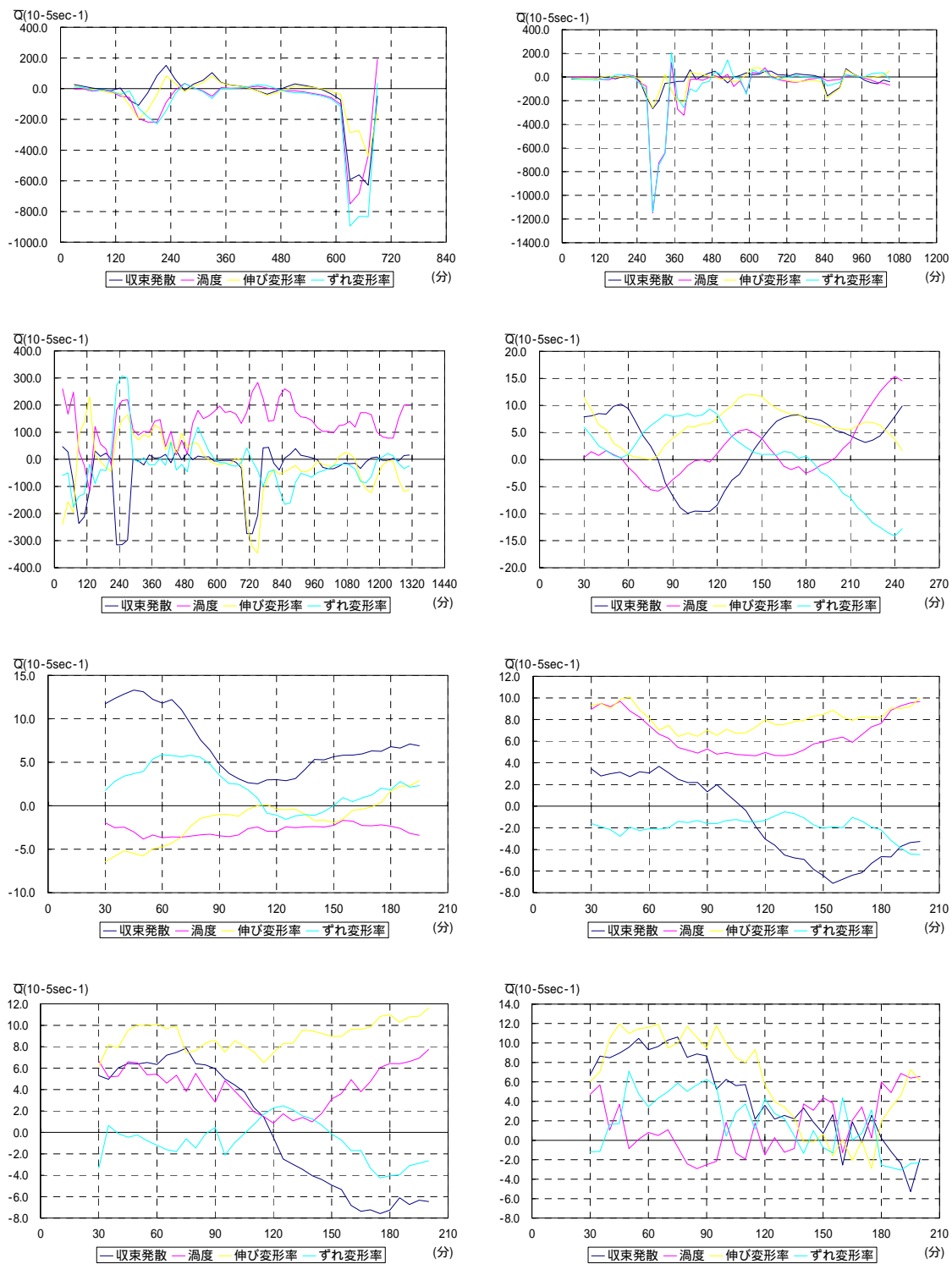


図 . 2005 年 6 ~ 9 月二次元変形率の時系列変化 (縦軸の単位は 10^{-5}sec^{-1})
 一段目左 : 6 月 23-24 日 戸田沖 一段目右 : 6 月 23-24 日 土肥沖
 二段目左 : 6 月 24-25 日 二段目右 : 7 月 22 日 三段目左 : 8 月 20 日
 三段目右 : 9 月 22 日大 四段目左 : 9 月 22 日中 四段目右 : 9 月 22 日小

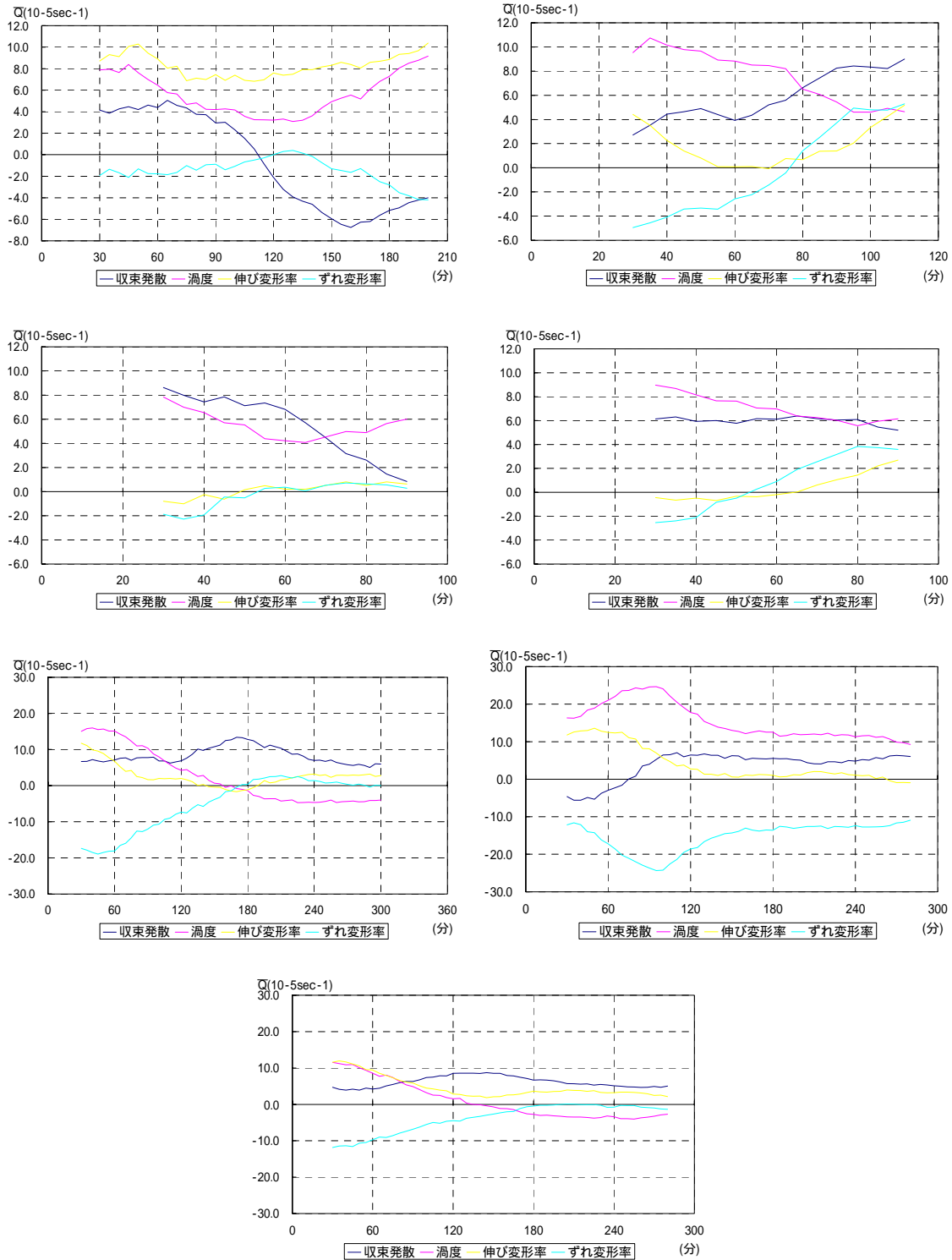
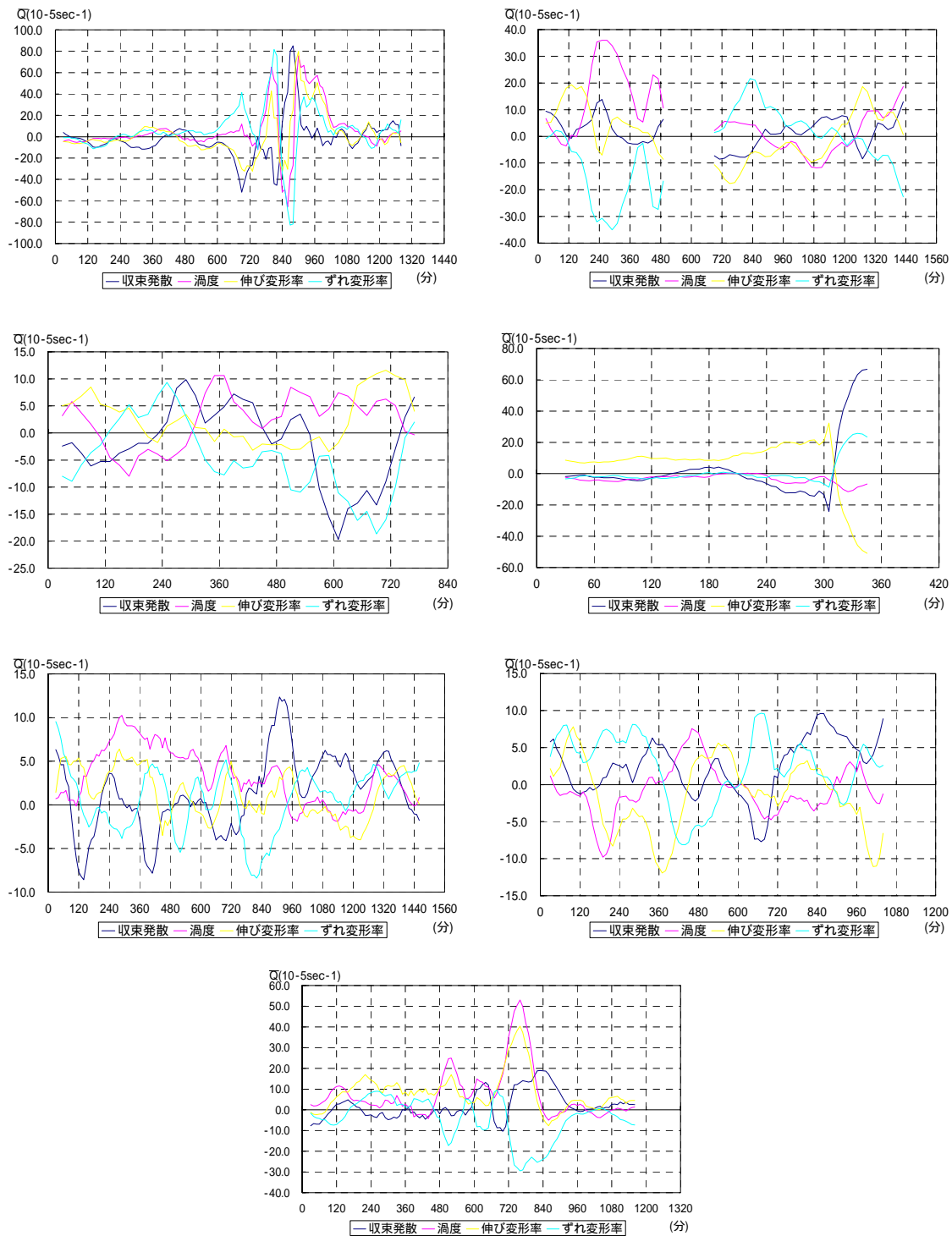


図 . 2005 年 9 月 , 2006 年 3 ・ 4 月 二次元変形率の時系列変化 (縦軸の単位は 10^{-5}sec^{-1})
 一段目左 : 2005 年 9 月 22 日 all 一段目右 : 2006 年 3 月 23 日東 (以降 2006 年)
 二段目左 : 3 月 23 日西 二段目右 : 3 月 23 日 all 三段目左 : 4 月 26 日東
 三段目右 : 4 月 26 日西 四段目 : 4 月 26 日 all



図．2006年5～10月二次元変形率の時系列変化（縦軸の単位は 10^{-5}sec^{-1} ）
 一段目左：5月31日～6月1日 一段目右：6月28・29日
 二段目左：6月29・30日 二段目右：7月26日 三段目左：8月30・31日
 三段目右：9月21・22日 四段目：10月29・30日

【要旨】 駿河湾東部海域における収束発散場に関する研究

2007年3月 自然環境学専攻 46868 石神健二

指導教員 助教授 道田豊

キーワード：駿河湾，浮子拡散実験，収束発散，流れ藻

1. はじめに

流れ藻とは海面に浮かんでいる海藻や海草の総称で，水産資源上非常に重要であると同時に，栄養塩や炭素を外洋と深海へ移送していることから，炭素循環においても重要な役割を担っていると考えられる．しかし，これらの重要性を認識されながらも，流れ藻の海洋における集積場所や沈降場所に関する情報は乏しく，それらに関する研究は困難であった．ところが，近年駿河湾東部海域に流れ藻が大量に堆積・分布している海域があることが確認された（三上ほか（2005），日下ほか（未発表））．そこで，本研究では，流れ藻が集中して堆積している駿河湾奥東部海域においては，表層を漂流する流れ藻が集積するメカニズムがあるという仮説に基づき，流れ藻など浮遊物質の集積に本質的に重要な役割を果たすと考えられる収束発散場を，駿河湾東部海域において浮子拡散実験により明らかにすることを目的とした．

2. 実験・解析方法および結果

駿河湾において収束発散を求めるために GPS 搭載漂流ブイを用いた浮子拡散実験を2005年2月から2006年10月まで合計17回行った．収束発散 $Q(t)$ を始めとする二次元変形率を求める方法としては，Okubo and Ebbesmeyer（1976）と川合（1976）の方法を用いた．この方法による収束発散の推定精度は，浮子群がばらばらに分布しているときは非常に高かったが，浮子群が一行にならび，面積の値が小さくなった時，つまり強い収束を示した時には悪くなった．

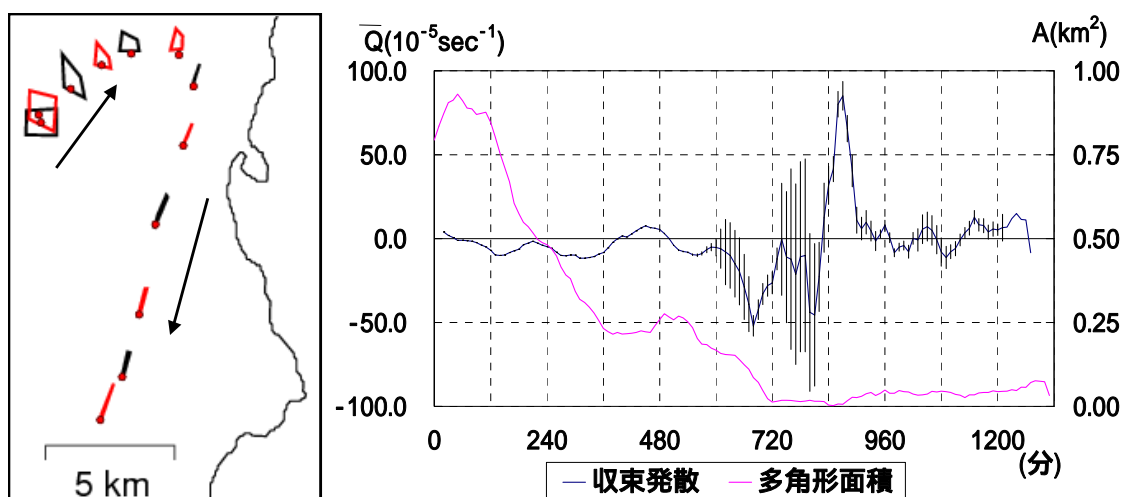
結果の一例として2006年5月31日-6月1日のブイ群の軌跡を図1に，一時間移動平均収束発散と面積の時系列変化を図2に示す．図1，図2から分かるようにブイ群は放流開始後10時間かけて北上しながら伊豆半島西岸へ近づき収束していったが，その後は流れの向きを南へ変えるとともに5つのブイは収束し一行に並び，その後約10時間一行に並んだまま流れ続け，面積変化はほとんど無くなった．これは12時間経過時点で強い収束場に捉われ，その後はそのまま収束場に捉われつづけながら流れていったためであると考えられる．収束発散の平均値は $-2.51 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ であった．面積は放流開始時には $794,102 \text{ m}^2$ であったが最も面積の小さくなった14時間20分経過時点では $2,785 \text{ m}^2$ であり，開始時面積の約0.35%の面積となっていることから強く収束したことが分かる．また2005年5月，2006年5月にも駿河湾東部海域において強い収束場が観測されたが，2006年5月の実験を含めて，これら強い収束場が観測された際には駿河湾東部海域において多数の流れ藻が目視された（日下ほか（未発表））．

3. まとめ

駿河湾で行った浮子拡散実験では、沿岸海域に強く収束場が観測され、流れ藻を始めとする浮遊物質が集積することが示唆された。また流れ藻の目視調査により駿河湾東部海域に流れ藻が多く目視されたときの浮子拡散実験では、いずれも沿岸域に収束場が見られた。

収束もしくは発散する方向を記述する際、これまで伸び変形率とずれ変形率で記述していたが、伸び変形率最大値とその時の変形方向 θ で記述することにより、今まで二つの方向への二つの大きさの変形を考えていたものを、ある一つの方向 θ への一つの大きさの変形のみで考えることができ、収束発散しながらブイ群が変形していく方向や大きさをより分かり易く記述することが可能となった。

今後の課題としては、大きなスケールによる浮遊物質の集積過程を調査することや収束発散が起こるメカニズムを定量的に解明することが必要となってくる。



左：図1．ブイ群の軌跡（2時間毎にプロットしたもので赤丸は中心のブイを表す）

右：図2．収束発散の1時間移動平均値及び面積の時系列変化

引用文献

川合英夫(1976): 収束・発散と海の粒々物理学, 海洋物理学 (寺本編), 東京大学出版会, pp103-152.

日下崇, 小松輝久(2007): 未発表

三上温子, 高井則之, 小松輝久(2005): 駿河湾海底より採集された大型渦藻類, 第29回水産海洋学会研究発表会.

Okubo, A. and C. C. Ebbesmeyer (1976): Determination of vorticity, divergence, and deformation rates from analysis of drogue observations. *Deep-Sea Res.*, **23**, 349-352.

【Summary】 Divergence and Convergence in Suruga Bay

March, 2007 Department of Natural Environmental Studies 46868 Ishigami Kenji

Supervisor ; Associate professor Michida Yutaka

Keywords :

Suruga Bay , GPS drifter experiments , divergence and convergence , Drifting seaweeds

1 . INTRODUCTION

Drifting seaweeds are extremely important from the perspective of fisheries sciences and carbon circulation. However, their accumulation process and settlement mechanism are not clearly understood. Considering a recent report that seaweeds pile up on the sea bottom in the eastern area of Suruga Bay (Mikami et al. (2005)), we make a hypothesis that there should be an accumulation mechanism of the drifting seaweeds in the surface layers, such as a convergence field. To clarify the convergence/divergence field in the surface layers in Suruga Bay, we conducted field surveys using drifting buoys equipped with GPS-logging cell-phone.

2 . EXPERIMENTS, METHOD and RESULT

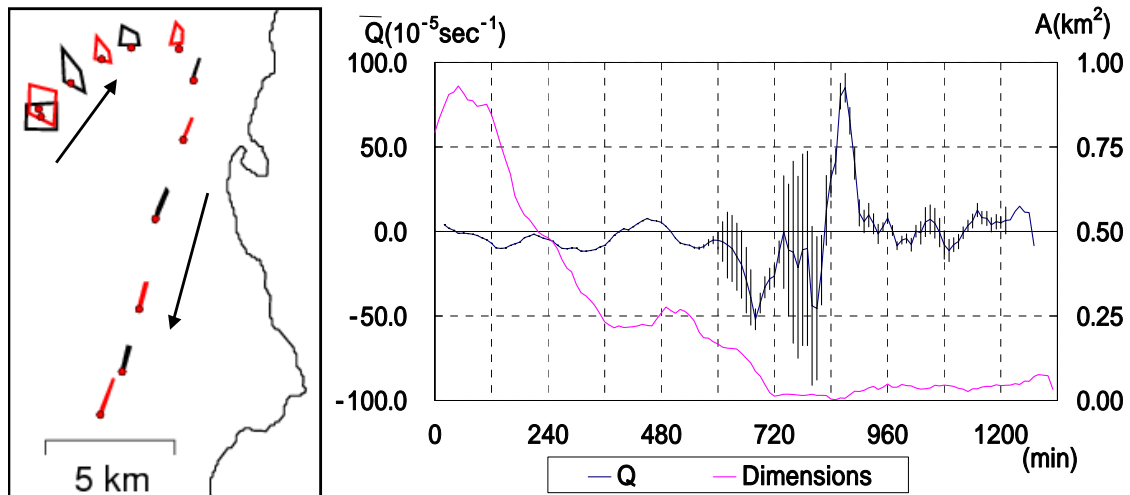
Experiments with drifting buoys equipped with GPS-logging cell-phone were carried out seventeen times in 2005 and 2006. By analyzing the location data of these drifters, we estimate the divergence/convergence: $Q(t)$ in the experimental fields based on the method presented by Okubo and Ebbesmeyer (1976) and Kawai (1976). The estimation error of divergence/convergence is negligibly small when a group of buoys is distributed separately. However, when it exhibits strong convergence, the error is unable to disregard.

For example, we introduce the result in May 31st and June 1st, 2006. Fig.1 shows trajectory of buoys and Fig.2 shows time series variation of Divergence/Convergence and Dimensions of quadrangle. Fig.1 indicates that buoys come closer to the coast of West Side of Izu Peninsula and dimensions of quadrangle become smaller at first 720 minutes. Subsequently buoys keep their dimensions small. It means strong convergence there and Fig.2 also indicates convergence. In addition, visual observations of drifting seaweeds conducted at the same time (Kusaka et al. (unpublished)) showed that they distributed in the same area of Suruga Bay. In May, 2005 and June, 2005, the result also showed convergence in the West Side of Ize Peninsula is association with the distribution of drifting seaweeds reported by visual observations.

3 . CONCLUSION

The result of the experiment showed strong convergence in the coast of West Side of Izu Peninsula. In addition, visual observations of drifting seaweeds conducted at the same time showed that they distributed in the same area of Suruga Bay. It indicates that floating solids like drifting seaweeds gather and bundle there.

Stretching deformation rate: $\alpha(t)$ and Shearing deformation rate: $h(t)$ depend on the definition of X-Y coordinate and they do not give unique values. Then we introduce maximum Stretching deformation rate and the angle giving the maximum deformation rate so that Shearing deformation rate can be ignored, and it provides clearer information on the major direction and magnitude of deformation of a group of drifting particles on the sea surface.



Left : Fig1 . Trajectory of Buoys. (Their locations are plotted every two hours.)

Right : Fig2 . Time series variation of Divergence/Convergence and Dimensions of quadrangle.

REFERENCES

- Kawai, H. (1976) 'Convergence. Divergence and the physical oceanography of particles' in Physical Oceanography II, Ed. T.Teramoto, Tokyo University Press, 103 – 155.
- Kusaka, T. and Komatsu Teruhisa (2007) : Unpublished
- Mikami, A., Takai, N., Komatsu, T. (2005), Seaweeds collected from the bottom of the sea of Suruga Bay. The 29th Annual Meeting. The Japanese Society of Phycology.
- Okubo, A. and C. C. Ebbesmeyer (1976) : Determination of vorticity, divergence, and deformation rates from analysis of drogoue observations .*Deep-Sea Res* . **23** ,349-352 .