

5.4 漂着ゴミの発生源及び漂流経路に関わる調査

5.4.1 山形県赤川河口部における漂流シミュレーション

(1) 目的

漂着ゴミの削減施策立案のための基礎的な知見として、ゴミが漂流・漂着に至るまでの過程を把握することを目的として、山形県赤川河口部において調査を実施した。

(2) 調査内容

a. モデルの概要

解析に供したモデルは3次元レベルモデルで、使用された基礎方程式は以下の4つである。これらの式は、デカルト座標系(x, y, z)において非回転系（コリオリ力考慮せず）の非圧縮粘性流体を仮定し、静水圧近似およびブシネスク近似（密度 ρ の空間変化の影響を圧力勾配項でのみ考える）を仮定した。

- ①x, y 方向運動方程式
- ②連続式
- ③水温拡散方程式
- ④塩分拡散方程式

これらの方程式を陽に解くことでそれぞれの物理量を計算した。また、本モデル内では海面風応力を求めるために、風向・風速時系列データからの海面風応力のバルク式を用いた。以上の方程式を差分法で、数値シミュレーションを行なう。

b. 解析領域と格子分割

解析領域は海域が赤川河口から汀線平行方向(NNE)に南北それぞれ2.5km、汀線直角方向には汀線より沖方向に4.5km、赤川上流方向に約0.5km(袖浦橋地点)までの5kmとした。図 5.4-1 に解析領域の水深(m)を示す。水深は日本水路協会の海底地形デジタルデータ m7000 シリーズより作成した。また、河川の水深は参考とする資料がなかったため2mの一様水深とした。

格子間隔は、水平方向に25mとし、水深方向の分割は水深によって層数が異なるが表 5.4-1 に示す最大10層とした。

表 5.4-1 水深方向の層分割

層番号	水深(m)
1	平均海面～1.0
2	1.0～2.0
3	2.0～4.0
4	4.0～6.0
5	6.0～8.0
6	8.0～10.0
7	10.0～12.0
8	12.0～17.0
9	17.0～22.0
10	22.0～∞

図 5.4-2 に第1層の平面格子分割を示す。なお、第2層目以深は図 5.4-1 に示す河床標高と表 5.4-1 に示す層分割に従い、各セルの水深方向の層数は決められる。

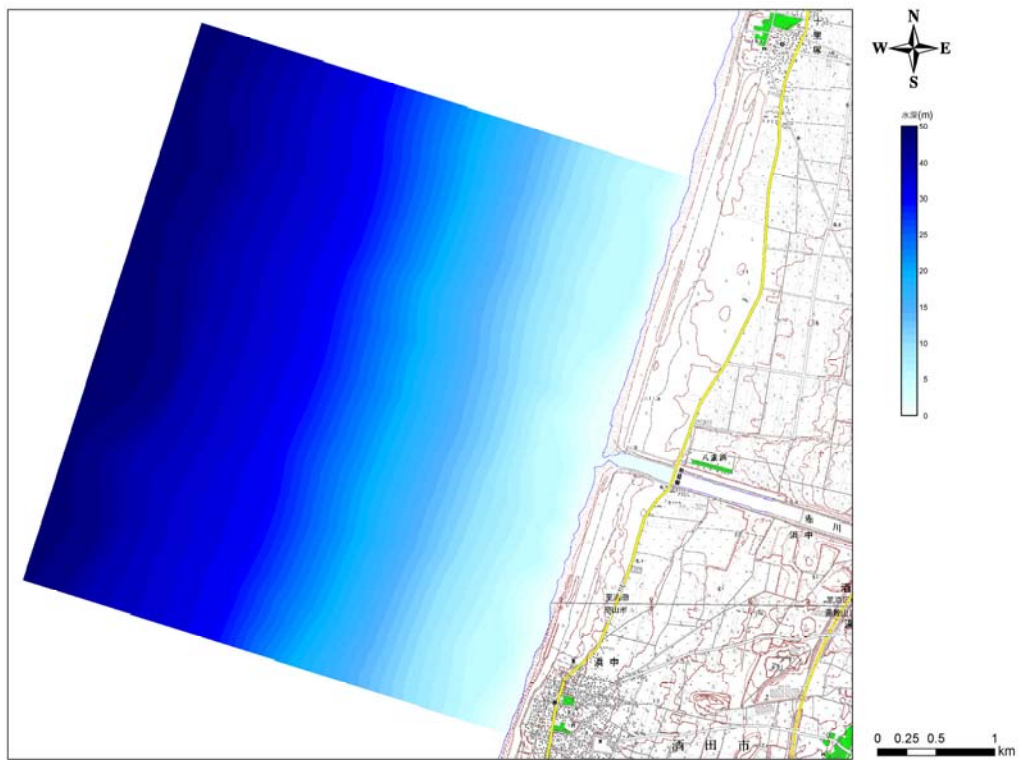


図 5.4-1 解析領域の水深

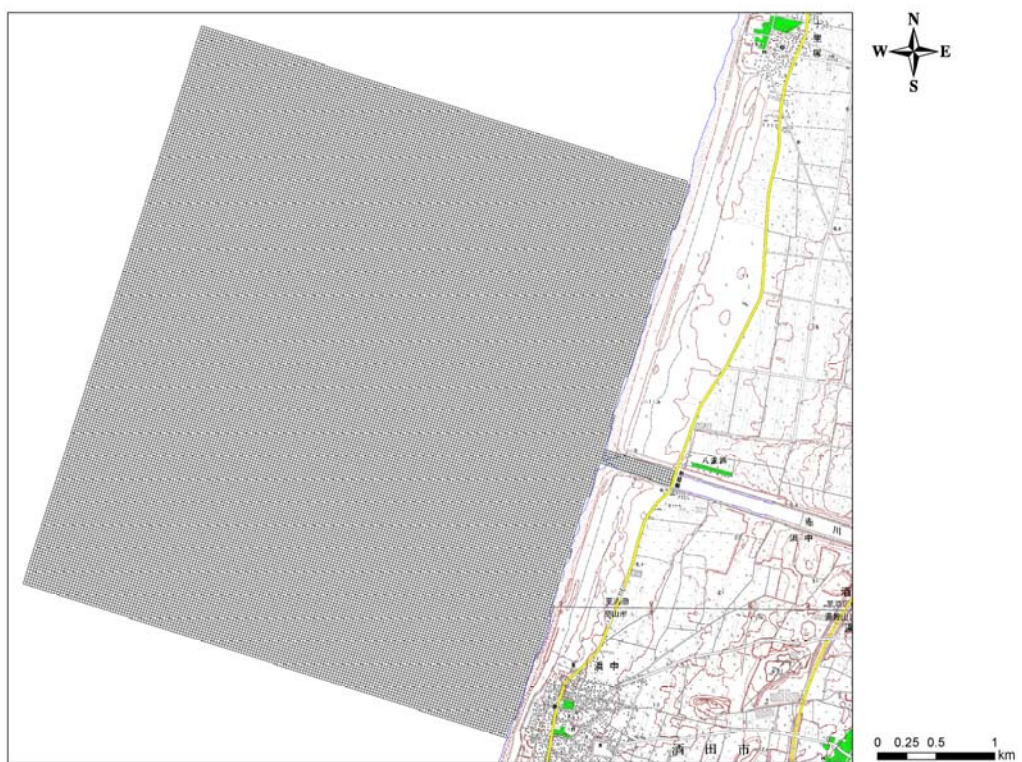
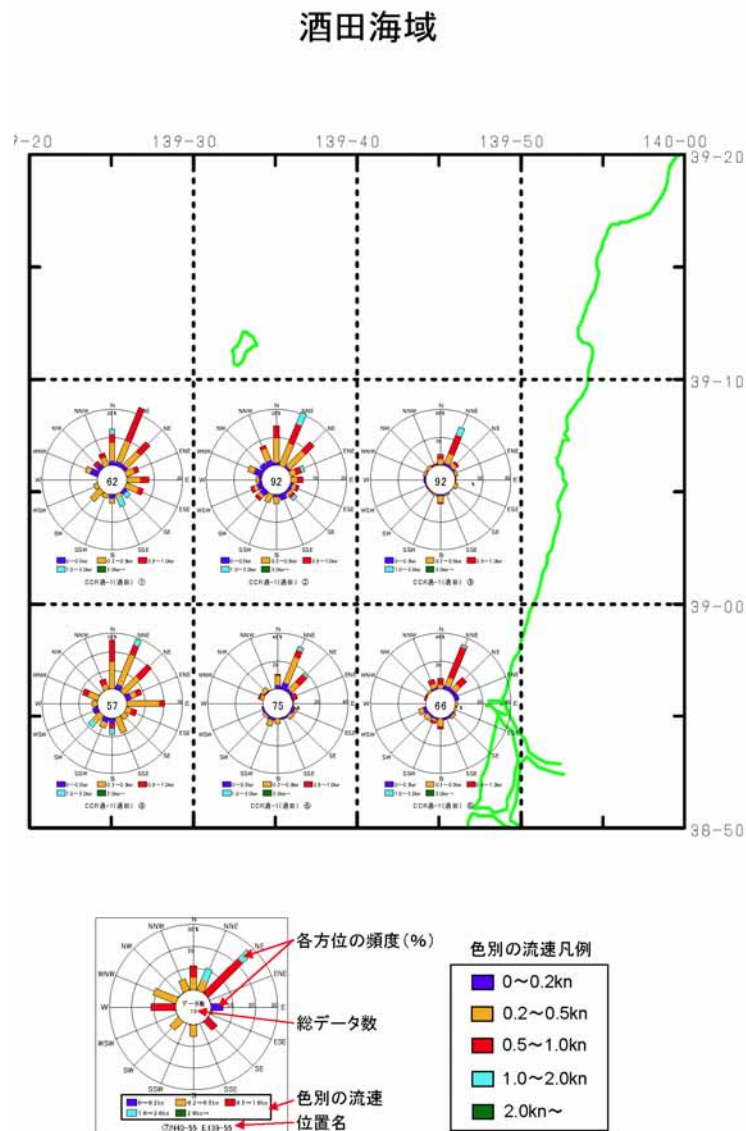


図 5.4-2 平面格子分割図

c. 流況の計算条件

(a) 流況計算の基本的考え方

解析対象の海域は、 $38^{\circ} 50' N \sim 39^{\circ} 00' N$ 、 $139^{\circ} 40' E \sim 139^{\circ} 50' E$ に含まれる海域である。この海域は図 5.4-3（日本海洋データセンター（Japan Oceanographic Data Center : JODC）の Web サイトからダウンロード）の流況頻度より、海域の流れの方向が NNE、流速が $0.5 \sim 1.0 \text{kn}$ の頻度が高いことがわかる。これらを考慮して今回の解析では、流れの方向が NNE、流速が $0.5 \sim 1.0 \text{kn}$ の海域流れを求めることとする。



<出典> 日本海洋データセンター（Japan Oceanographic Data Center : JODC）の HP
http://www.jodc.go.jp/index_j.html

図 5.4-3 酒田海域の流況頻度

(b) 計算期間

第2回及び第3回放流試験を対象とするため2007年12月17日1日間とした。

(c) 境界条件

1) 海域境界条件

解析領域南側では水位を0mで固定、解析領域北側では汀線平行方向(NNE)の流速を30cm/secで固定した。また、沖側は閉境界とした。海域境界条件を図5.4-4に示す。

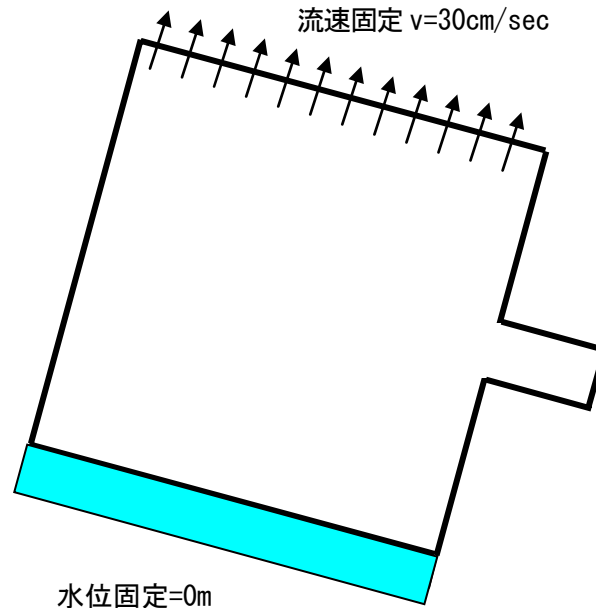


図 5.4-4 海域境界条件

2) 海面風応力

i) 底面摩擦係数

内湾等のシミュレーションで一般的に用いられている値0.0026を適用した。

ii) 水平渦動粘性係数・水平渦動拡散係数

$1 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{s}$ を適用した。

iii) 鉛直渦動粘性係数・鉛直渦動拡散係数

SGS (Sub Grid Scale) エネルギー及びリチャードソン数の関数を用いた骨格構造を用いた。

$$\nu = \nu_0 \cdot (1 + \beta \cdot Ri)^{-\alpha} \quad (\text{proposed by Rossby and Montgomery})$$

ここに、 ν_0 : 中立状態 ($Ri = 0$) の粘性・拡散係数、 α, β : 係数。数値は粘性係数 :

$\alpha = 1, \beta = 3$ 。拡散係数 : $\alpha = 3, \beta = 3$ 。

リチャードソン数 Ri は乱流エネルギーを用いて評価する方法 (turbulent Richardson number)を用いた。

$$\text{turbulent Richardson number : } Ri = -\frac{g \cdot (\partial \rho / \partial z)}{\rho \cdot e} \cdot L^2$$

ここに、 z : 鉛直上向きがプラス、 g : 重力加速度、 u : 流速、 ρ : 密度、 e : 乱流エネルギー、 L : 長さスケール (length scale)。

なお、長さスケール L は水表面及び底面からの距離を用いて以下のように示される。

$$L = k \cdot z \cdot (1 - z/d)^{1/2}$$

ここに、 k : Von Karman 定数 (=0.4)、 z : 底面からの鉛直距離、 d : 底面～水表面の鉛直距離。

さらに、乱流モデルを用いる際の中立状態の渦動粘性係数 ν_0 は以下の式で評価されることが多い。Kolmogorov and Prandtle の仮説によると渦動粘性係数は単位質量当たりの乱流エネルギー e の1/2乗と長さスケール L に比例するとし、渦動粘性係数 ν_0 は以下の式で表現できる。

$$\nu_0 = \rho \cdot L \cdot \sqrt{e}$$

3) 河川流入条件

赤川の河川流量は、浜中地点で2007年12月の毎正時の流量が得られているためその値を河川流量として解析した。河川流量¹⁾を図5.4-5に示す。

4) コリオリパラメータ

今回の解析では、計算対象範囲が小さいためコリオリは考慮していない。

<出典>

1) 国土交通省酒田河川国道事務所：赤川浜中観測所流量

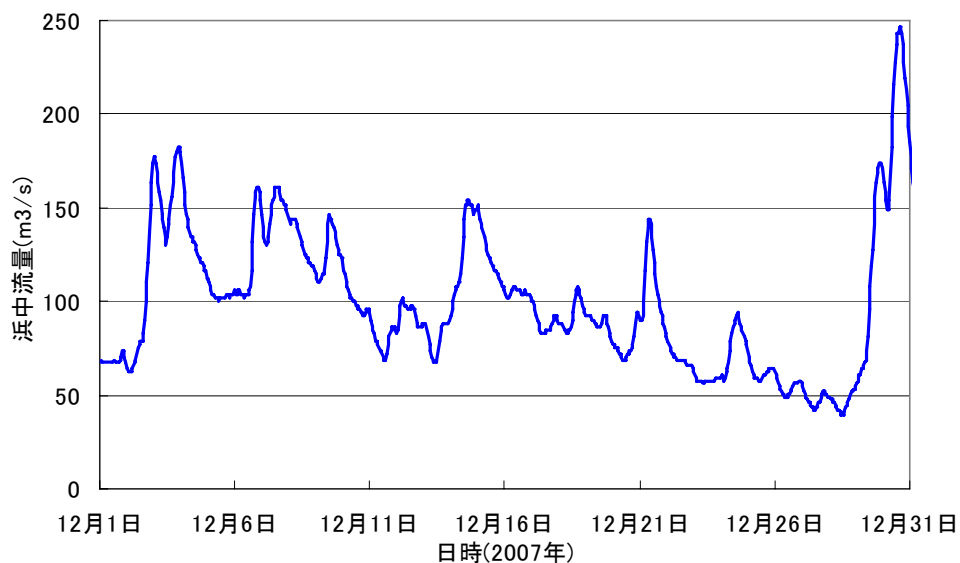


図 5.4-5 赤川の河川流量 (2007 年 12 月)

(d) 初期条件（水温、塩分）

水温・塩分濃度の12月の平均データは表5.4-2（日本海洋データセンター（Japan Oceanographic Data Center：JODC）のWebサイトからダウンロード）に示す通りである。水温は水深75mまではほぼ15°Cであることから、全域15°C一様とした。また、表層で密度の逆転が見られるが、塩分濃度を調整して逆転が生じないように設定した。水温15°Cの塩分、密度の初期値分布を図5.4-6に示す。

表 5.4-2 海域の水温及び塩分濃度

水深(m)	水温(°C)	塩分濃度(‰)	密度(g/m ³)
0	14.80	33.74	1.025064
10	15.02	33.50	1.024832
20	15.13	33.80	1.025039
30	15.13	33.88	1.025100
50	15.08	33.96	1.025173
75	14.98	33.99	1.025218
100	14.55	34.08	1.025380
125	13.23	34.10	1.025669
150	10.90	34.16	1.026160
200	6.11	34.16	1.026897
250	2.76	34.15	1.027250
300	1.53	34.22	1.027404

<出典>日本海洋データセンター（Japan Oceanographic Data Center：JODC）のHP
http://www.jodc.go.jp/index_j.html

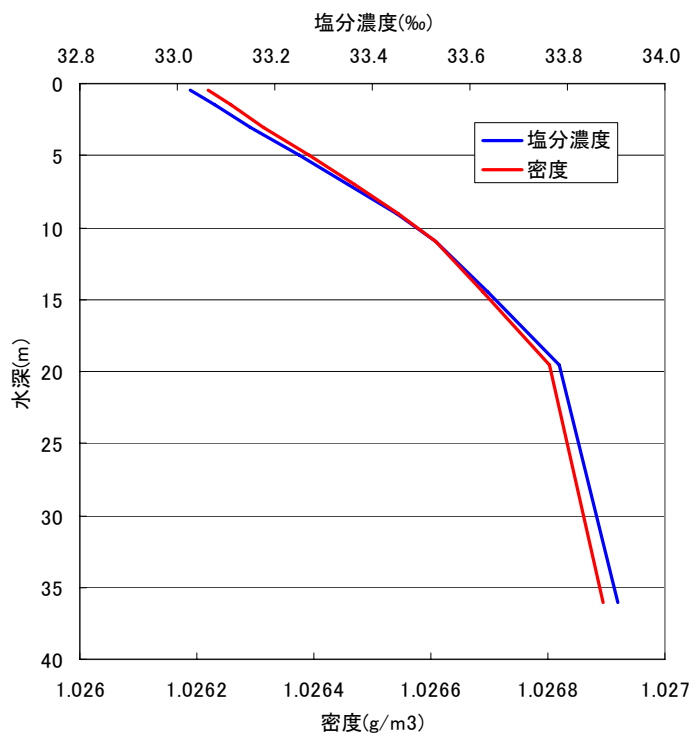


図 5.4-6 塩分・密度の初期鉛直分布

(e) 初期流動場の計算

12月17日の計算の前に以下の手順で初期流動場計算を実施した。

①河川流入なしで1日間海域流れの計算。解析領域北側の境界流速を30cm/secにした。

②①の流れを初期値として赤川の河川流量を考慮した流れの計算を3時間実施。赤川流量は3時間で12月17日0時の流量まで立ち上げた。

d. 漂流経路の計算条件

(a) 風圧流の算定

風圧流 U は以下の式で求められる。

$$U = K \times \sqrt{A/B} \times W$$

ここに、 U ：風圧流(m/s)

W ：風速(m/s)

A/B ：海面上面積 A と海面下面積 B の断面積比。対象とするペットボトルの海面上

面積91%、海面下面積9%とし、 $A/B=10.1$ とする。

K ：風圧係数。小田巻(1986)²⁾は風の状態や漂流物の浮かび方によって幅を持つものと考えたほうがよく0.02~0.05ぐらいの値を持つとしている。

風圧係数は小田巻(1986)によると、空ドラム缶で0.032、船舶で0.036等の値が示されているが、海上保安庁では風圧中心が高い場合0.035、風圧中心が低い場合0.025としている。漂流対象がペットボトルであるため風圧係数は0.035とした。

風速は酒田沖の緯度、経度毎に与えられた時々刻々の気象庁の予測値を用いて、図5.4-9の格子中央点毎に風速を内挿し、その風速を用いて漂流物位置の風速を求めた。なお、各格子内はどの位置でも同じ風速とし、時間方向は線形に内挿した。図5.4-7に代表して12月17日8時から12時までの格子中央点毎に内挿した解析領域全体の風速ベクトル(図5.4-7左側)と酒田沖の緯度、経度毎に与えられた時々刻々の気象庁予測値の風速ベクトル(図5.4-7右側)を示す。なお、内挿した解析領域全体の風速ベクトル(図5.4-7左側)は間引いて表示している。

<出典>

2)小田巻実(1986)：沿岸域における漂流予測の試み、沿岸海洋研究ノート、第23巻、第2号

(b) 偏角

風圧流は水上部の風圧中心と水中部の受圧中心とのバランスによって、風圧流の方向は、直接に風下よりも、風下に向かって右あるいは左に偏する傾向があると言われている。

ただし、この偏角は一定のものではなく漂流物によって異なり±15度のように表示されることが多い。偏角が全くランダムな現象と仮定されるなら最大偏角 α を設定し0~1の一様乱数randを用い $\alpha \times (2 \times \text{rand} - 1)$ のように設定することも可能である。しかし、未だ偏角を取り入れた風圧流の解析事例は見受けられないようである。今回の解析では偏角は考慮しないこととした。

(c) 移流による移動

漂流物の追跡のための表層流は海域の流れ \vec{V} と風圧流 \vec{U} を合成した表層流 \vec{D} とする。

ある時刻 t に座標 (X_E, X_N) に位置した漂流物の Δt 時間における表層流による移動ベクトル $(\Delta X_E^C, \Delta X_N^C)$ は座標 (X_E, X_N) における表層流ベクトル (D_E, D_N) を用い以下のように求められる。

$$\Delta X_E^C = D_E \times \Delta t$$

$$\Delta X_N^C = D_N \times \Delta t$$

(d) random diffusionによる移動

random diffusionによる移動は、ある時刻 t に座標 (X_E, X_N) に位置した漂流物の Δt 時間における乱流拡散による移動ベクトル $(\Delta X_E^D, \Delta X_N^D)$ は拡散係数 K_h を用いて以下のように示される。

$$\Delta X_E^D = R_i \cdot \cos(2\pi \cdot R_i') \cdot \sqrt{2 \cdot K_h \cdot \Delta t}$$

$$\Delta X_N^D = R_i \cdot \sin(2\pi \cdot R_i') \cdot \sqrt{2 \cdot K_h \cdot \Delta t}$$

ここに R_i, R_i' は $0 \sim 1$ の一様乱数、 K_h (m^2/s)は乱流拡散係数で Morales et al. (1997)³⁾により以下のように示される。

$$K_h = 10^{-4} \cdot (272.8 \cdot |V| + 21.1 \cdot |W|)$$

ここに、 $|V|$: 海表面流速の絶対値 (m/s)

$|W|$: 風速の絶対値 (m/s)

< 出典 >

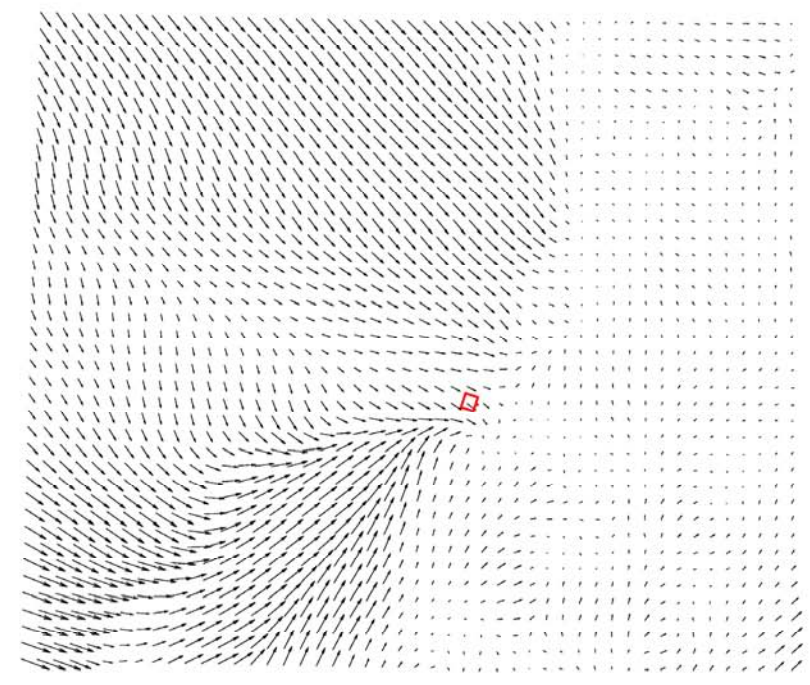
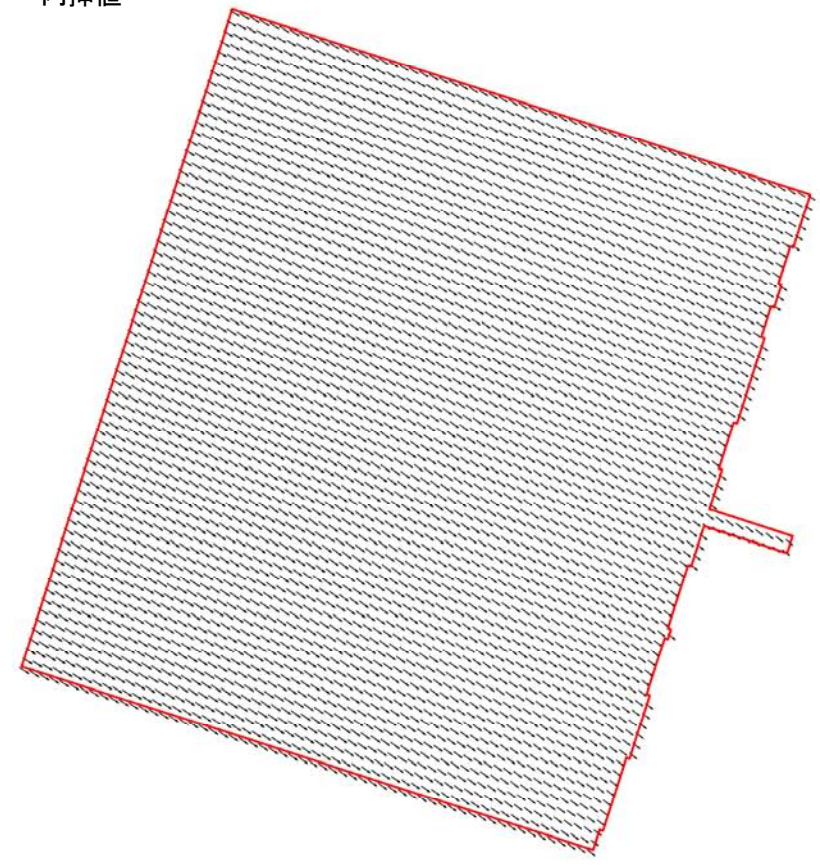
3) Morales, R. A., Elliott, A. J. & Lunel T. (1997) ; The Influence of tidal current and wind on mixing in the surface layers of the sea, Marine Pollution Bulletin, 34, pp. 15-25

12月17日 8時

内挿値 h^{***}

気象庁予測値

I-205



0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0km

20.0m/sec

0.0 20.0 40.0 60.0 80.0 100.0km

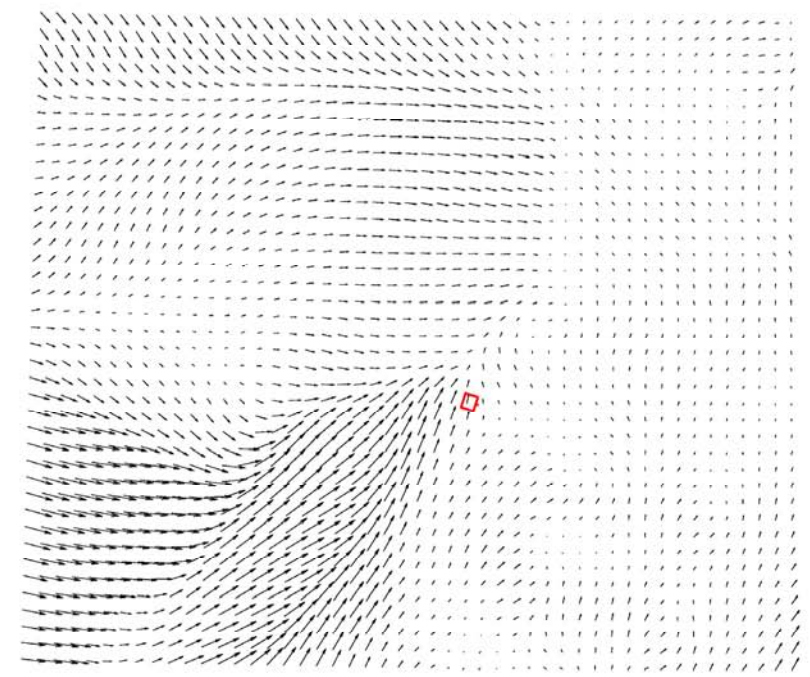
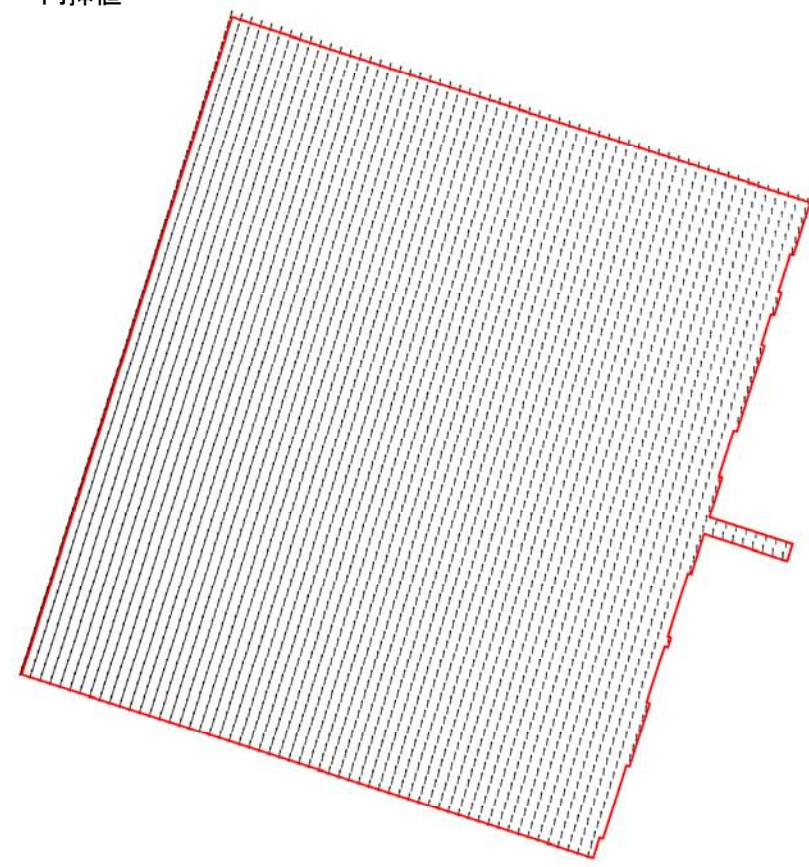
図 5.4-7(1) 風速ベクトル分布 (12月17日8時)

12月17日 9時

内挿値 t^{***}

気象庁予測値

I-206



0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0km

20.0m/sec

0.0 20.0 40.0 60.0 80.0 100.0km

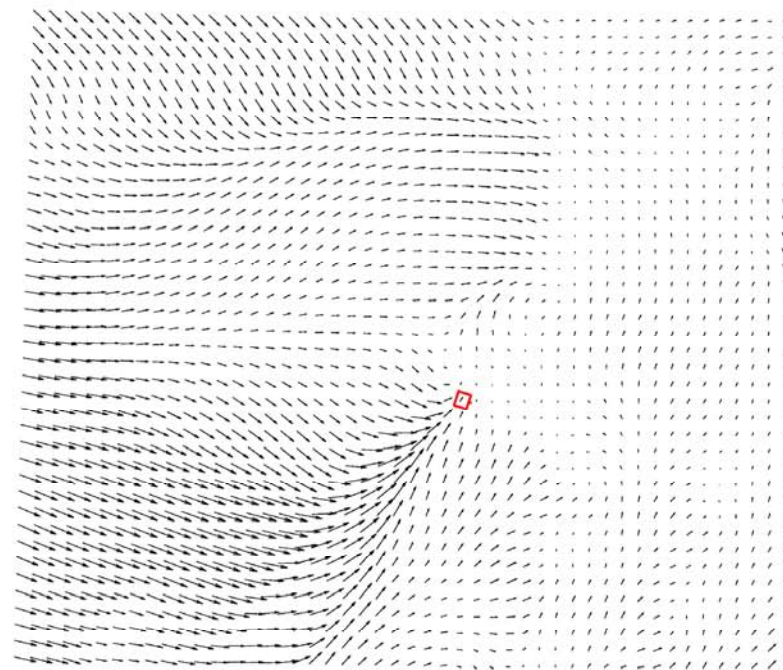
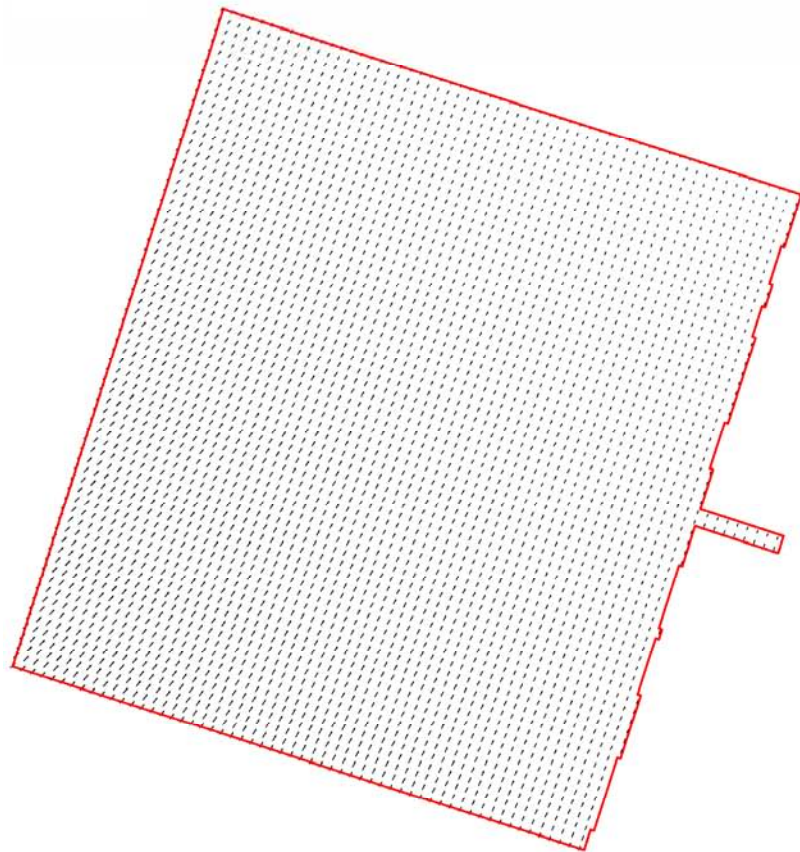
図 5.4-7(2) 風速ベクトル分布 (12月17日9時)

12月17日10時

内挿値 t^{***}

気象庁予測値

I-207



0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0km

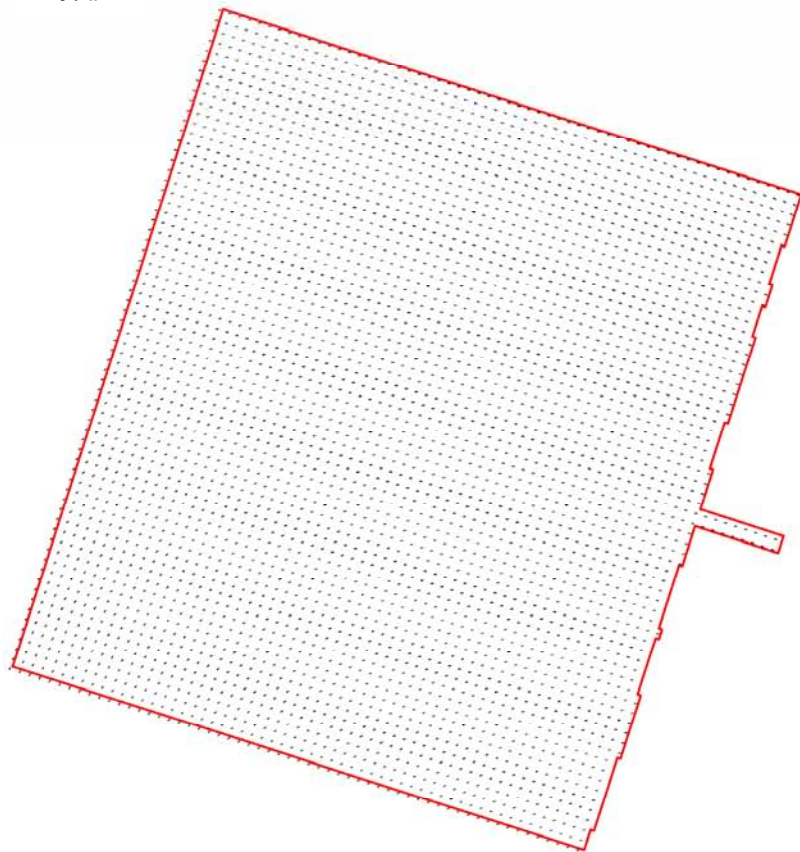
20.0m/sec

0.0 20.0 40.0 60.0 80.0 100.0km

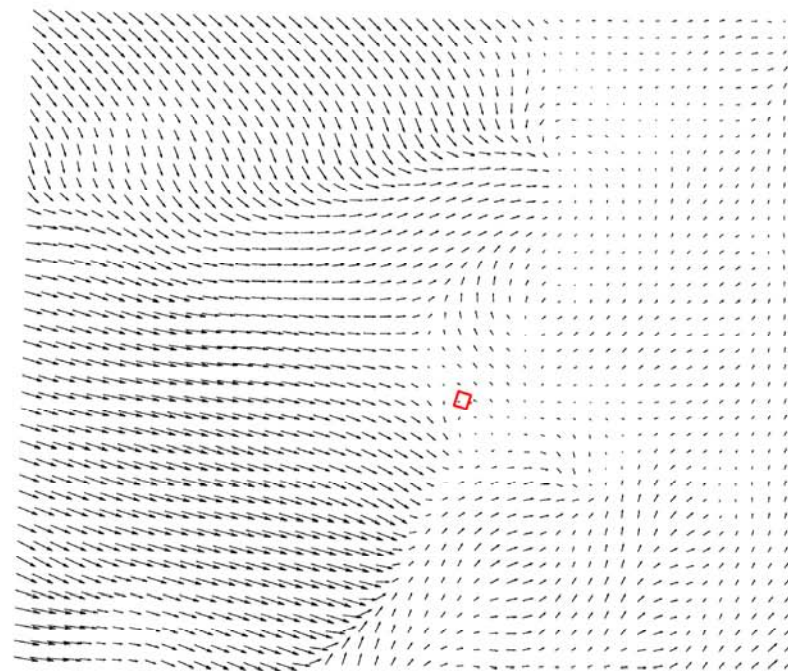
図 5.4-7(3) 風速ベクトル分布 (12月17日10時)

12月17日11時

内挿値 t^{***}



気象庁予測値



0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0km

20.0m/sec

0.0 20.0 40.0 60.0 80.0 100.0km

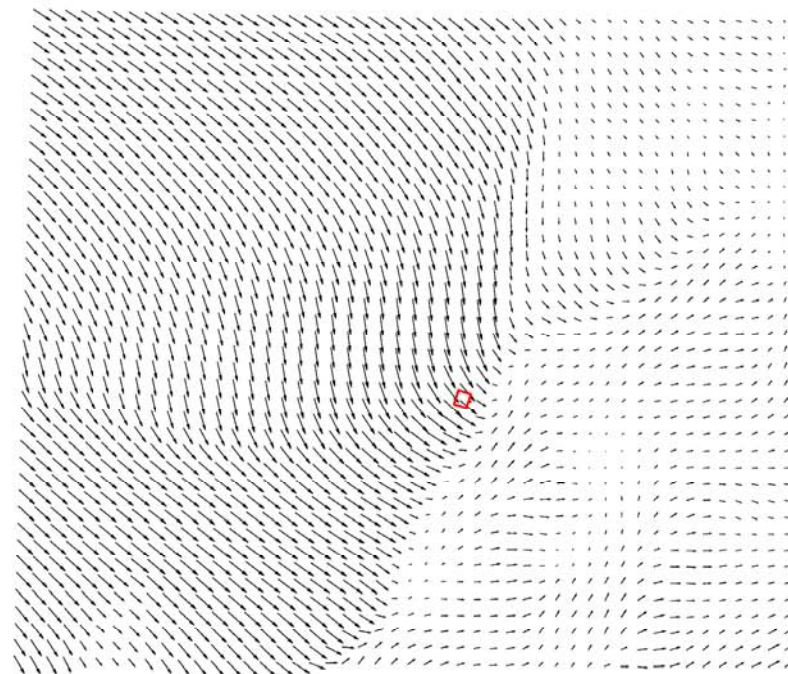
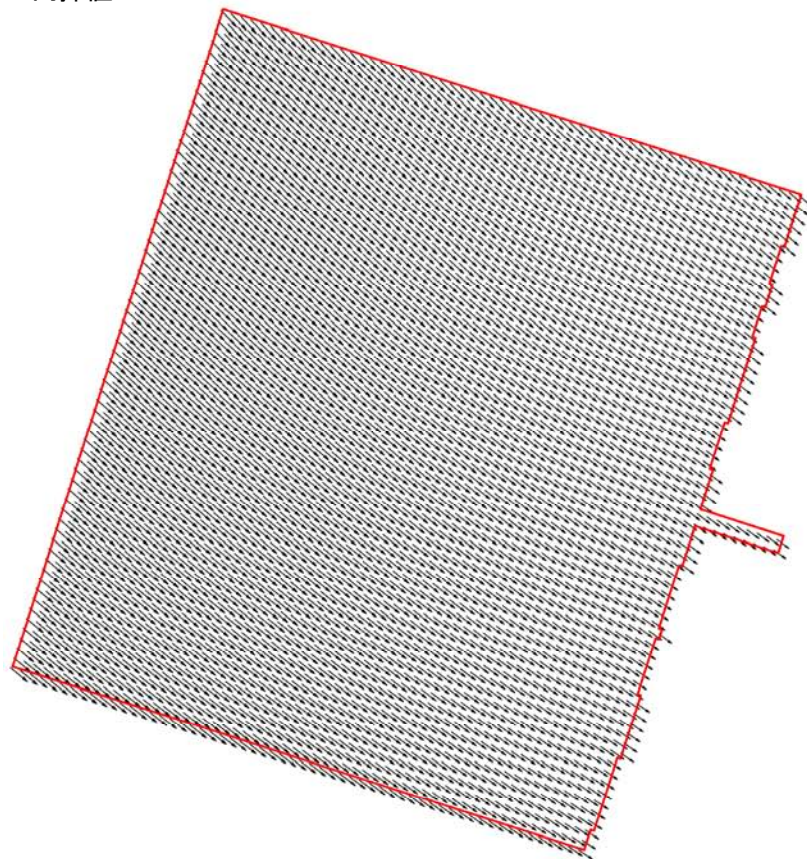
図 5.4-7(4) 風速ベクトル分布 (12月17日11時)

12月17日12時

内挿値 h^{***}

気象庁予測値

I-209



0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0km

20.0m/sec

0.0 20.0 40.0 60.0 80.0 100.0km

図 5.4-7(5) 風速ベクトル分布 (12月17日12時)

(3) 調査結果

a. 流況の計算結果

図 5.4-8 には代表 3 地点の 12 月 17 日の汀線平行方向 (NNE) 流速時系列を示す。図 5.4-9 には 12 月 17 日 8 時 50 分～12 時まで 10 分毎の赤川河口付近の流速ベクトル分布を示す。

流速は 3 地点平均で 25cm/sec～50cm/sec (0.5～1.0kn) の範囲内であり、この海域流れを用いて漂流物追跡解析を実施した。

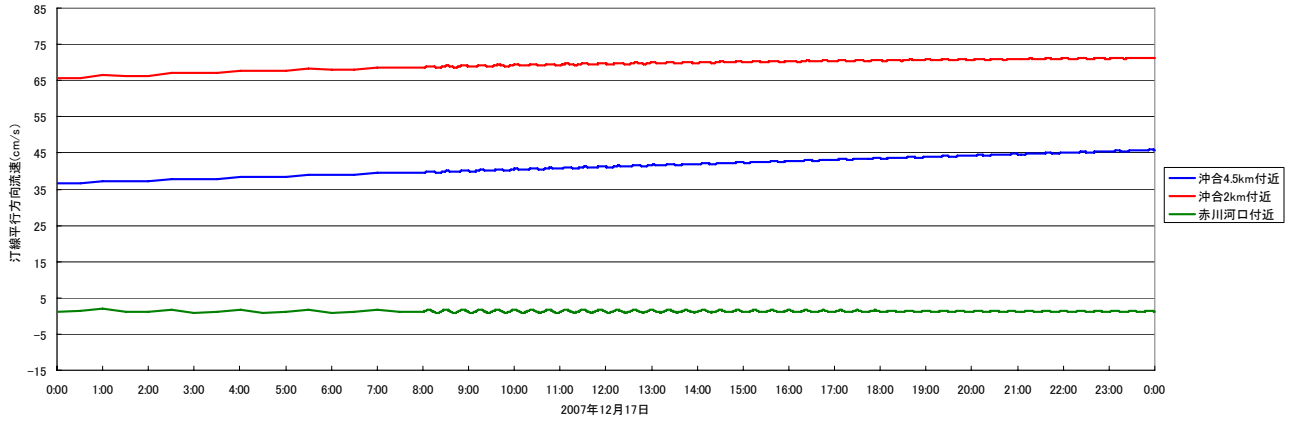


図 5.4-8 汀線平行方向 (NNE) 流速時系列

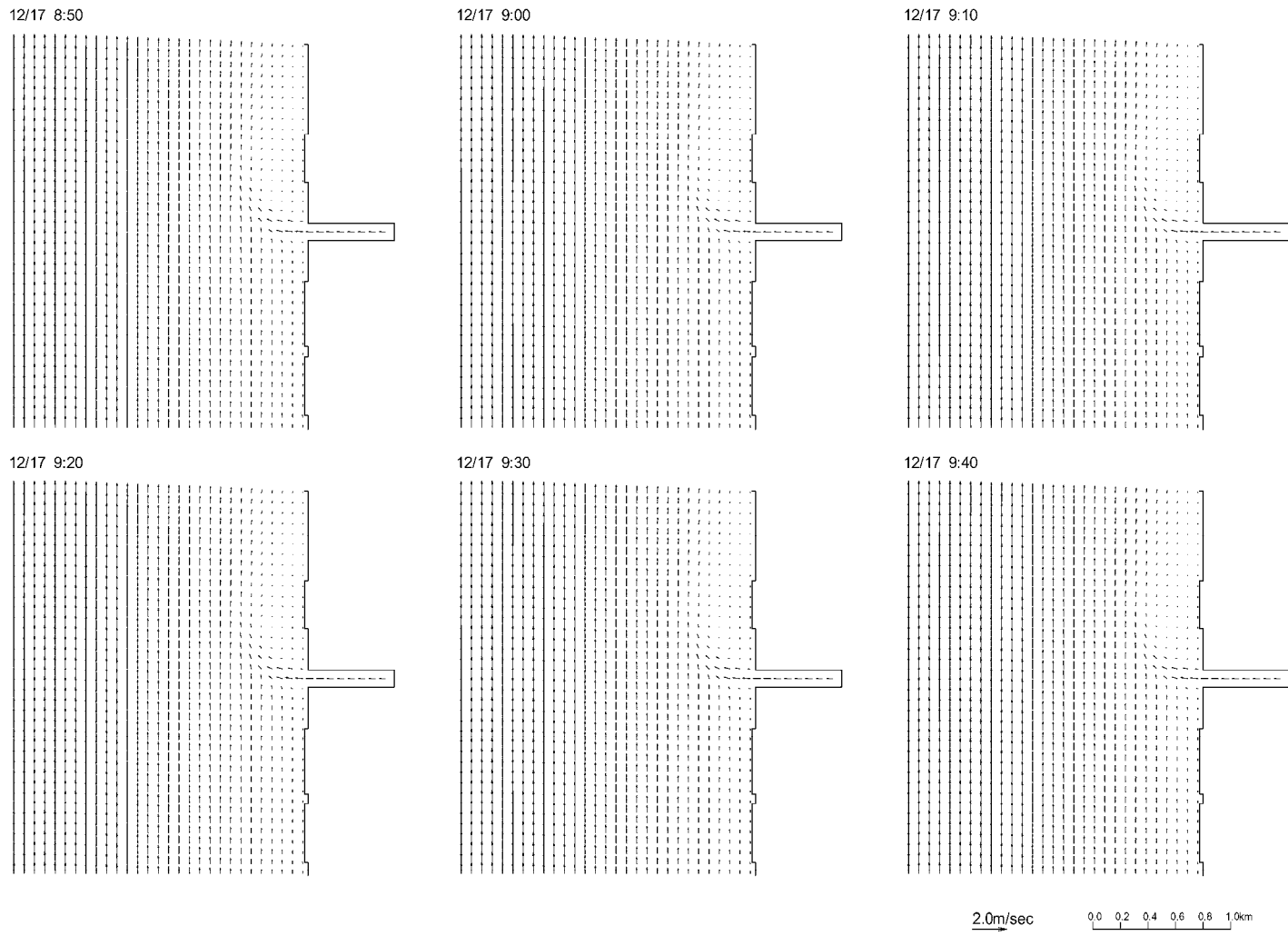


図 5.4-9(1) 赤川河口付近の流速ベクトル分布

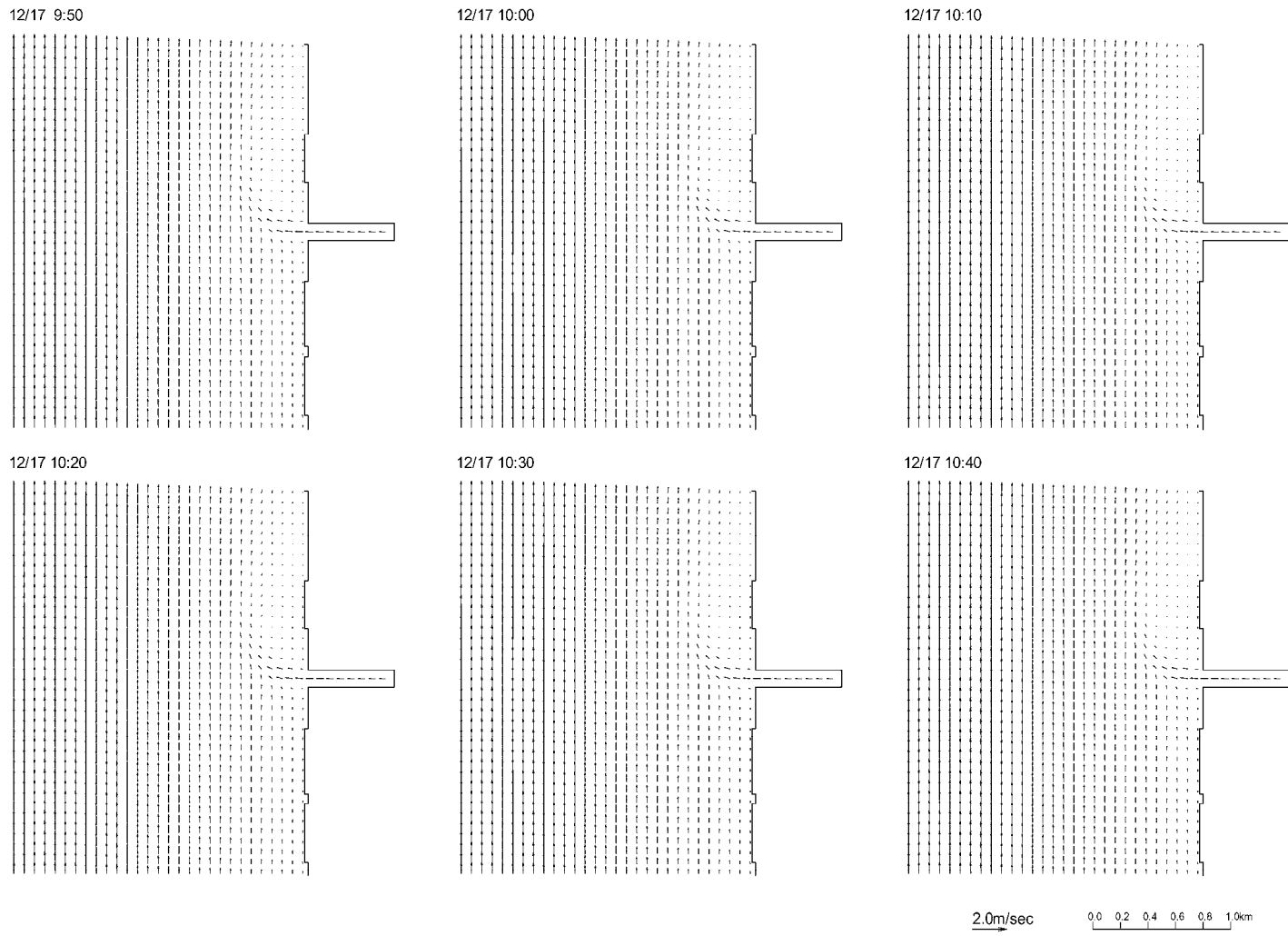


図 5.4-9(2) 赤川河口付近の流速ベクトル分布

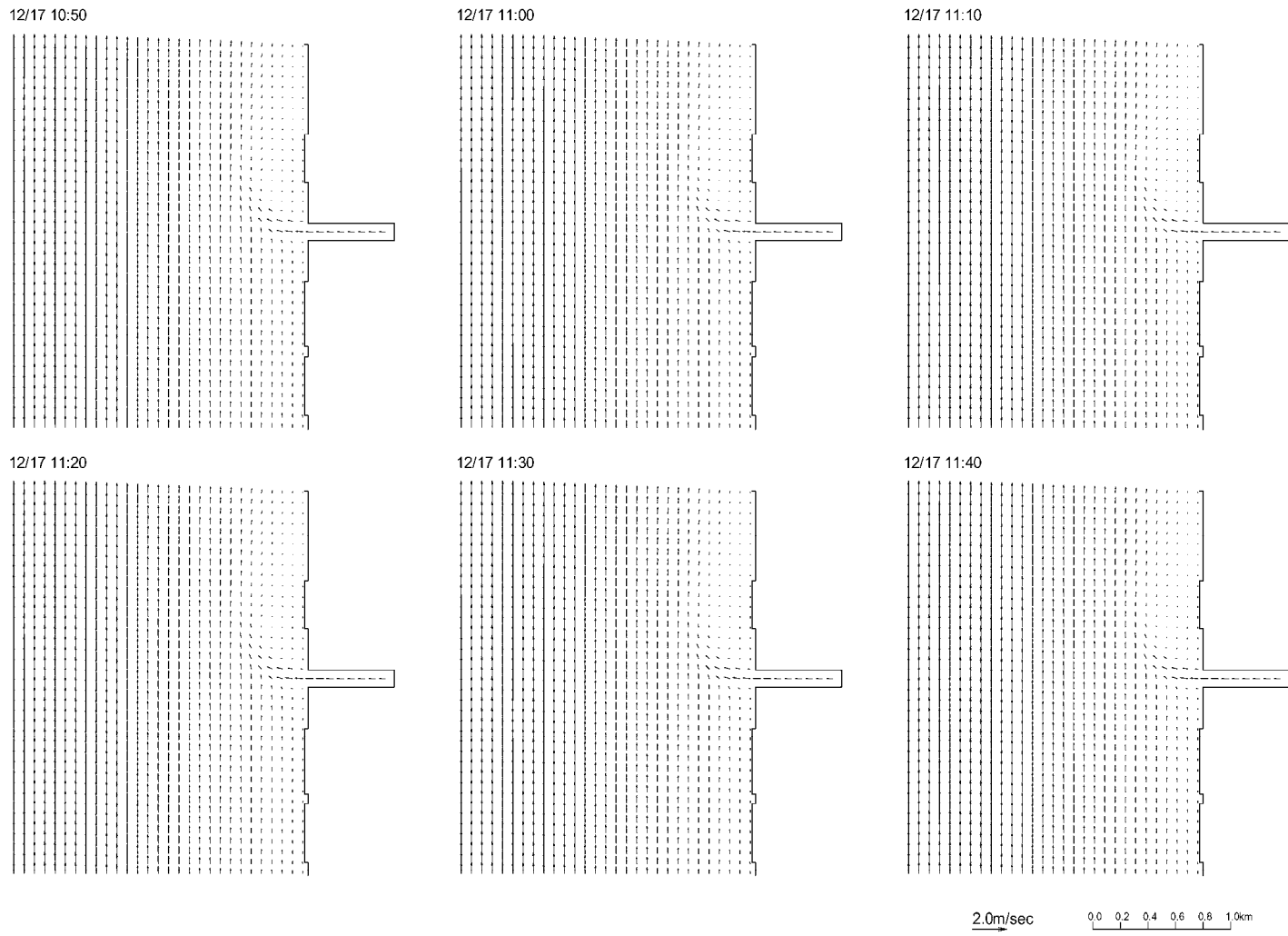


図 5.4-9(3) 赤川河口付近の流速ベクトル分布

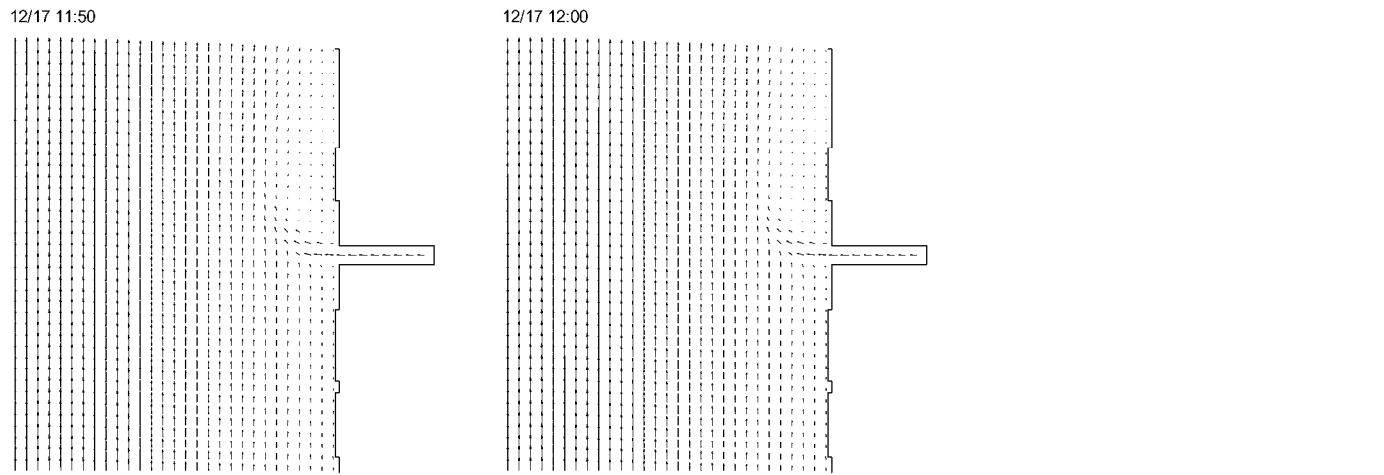


図 5.4-9(4) 赤川河口付近の流速ベクトル分布

b. 漂流物の追跡結果

(a) 漂流ボトル調査の概要

漂流シミュレーションの結果の再現性については、漂流ボトルの放流調査結果との比較により検証する。よって、シミュレーションで再現対照とする漂流ボトルの調査結果について以下に整理した。

2007年12月に図 5.4-10 に示す位置で3回の放流試験が実施された。放流試験の概要は、表 5.4-3、表 5.4-4 の通りである。

第1回の放流試験は12月15日に100個放流され、12月16日に78個、18日に15個、19日に4個、25日に1個、その他2個が回収されている。なお、これらの全てが領域A(図 5.4-10 中のA1-A2、A3-A4で囲まれた領域)で回収されている。

第2回の放流試験は第1回の放流試験で16日に回収された78個を用いて17日に実施され、同日中に76個、18日に2個が回収された。これらはいずれも図 5.4-10 に示す領域Bで回収された。

第3回の放流試験は第2回の放流試験で同日中に回収された76個を用いて17日に放流され、同日中に73個、その他1個の74個が回収され、領域Bで66個、領域Cで1個回収された。

第1回放流は河川内に漂着しているため再現対象として適切と考えにくい。したがって、第2回、第3回を再現の対象とした。

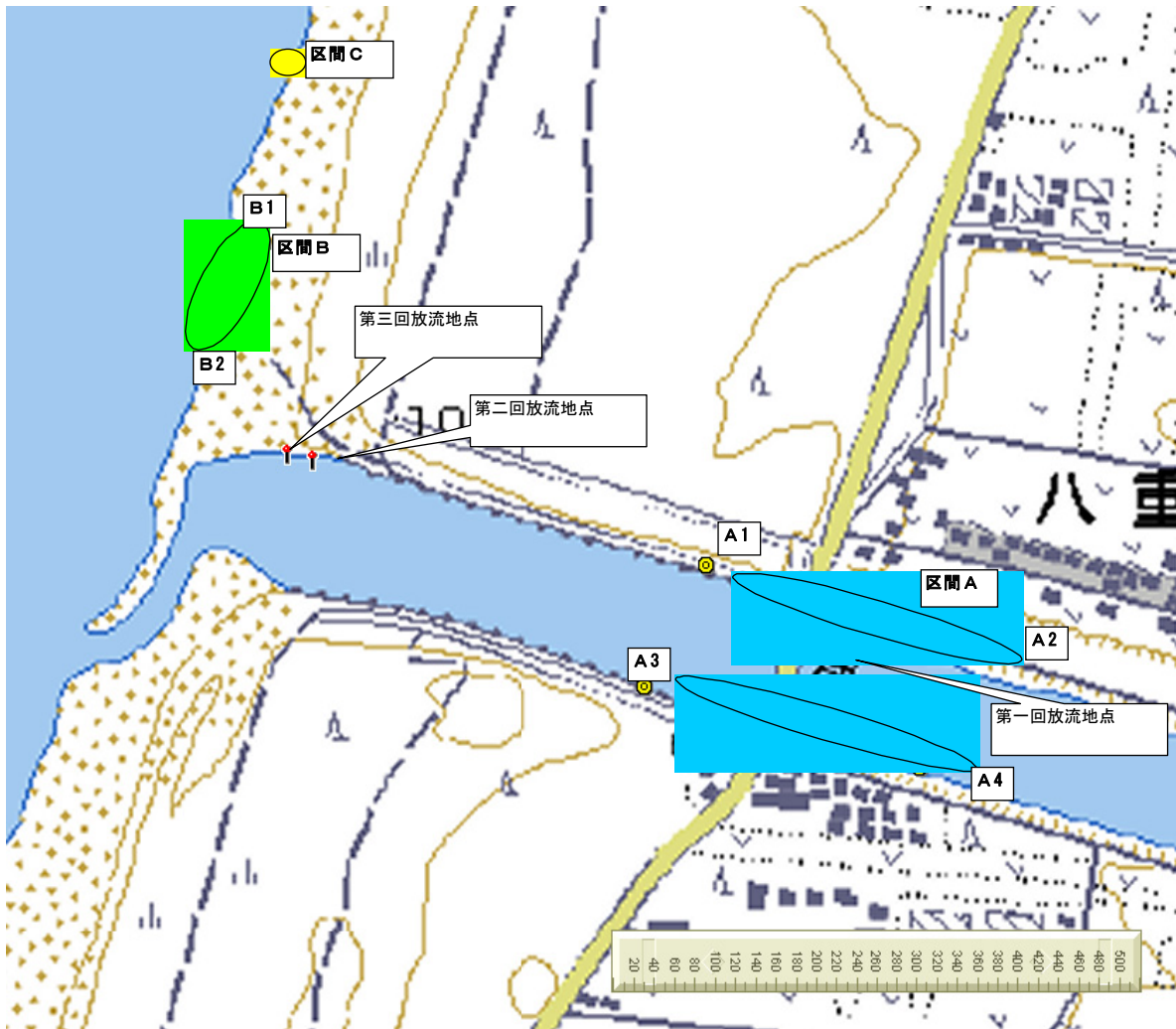


図 5.4-10 放流試験の実施位置

表 5.4-3 放流試験の概要

		放流時刻	緯度	経度	風向	風速	備考
第一回放流	12月15日	14:00~14:15	38-50-46.31	139-47-26.64	西北西	8.9m/s	
第二回放流	12月17日	8:50	38-50-52.24	139-47-06.43	南南東	4m/s	
第三回放流	12月17日	10:40	38-50-52.43	139-47-05.40	東南東	2.6m/s	

表 5.4-4 放流試験結果

	12月15日	12月16日	12月17日	12月18日	12月19日	12月25日	その他	回収状況
第1回放流	100	78	0	15	4	1	2	全て区間Aに漂着
第2回放流			78	76	2			全て区間Bに漂着
第3回放流			76	73			1	区間Bに66、区間Cに7、不明1

注) 赤字は放流、黒字は回収を示す

(b) 漂流物の追跡解析結果

漂流物追跡解析は第2回及び第3回放流試験を対象に風圧係数0.035及び0.025の計4ケース実施した。なお、漂流物は図5.4-10及び表5.4-4に示す場所及び時間に第2回は78個、第3回は76個を投入している。漂流物追跡解析結果を整理して以下に示す。

図5.4-11～図5.4-14には各ケースのある時間における漂流物の位置（図中赤丸）と水流速+風圧流を合成したベクトルを示す。

結果を要約すると以下の通りである。

- ・いずれの結果も漂流物の移動は移流（水流速+風圧流）が支配的で拡散による拡がりはいずれも小さい。これは4.2節に示した拡散係数が水流速 $|V|=0.3m/s$ 、風速 $|W|=3m/s$ 程度で計算すると $0.015m^2/s$ 程度の小さな値になること、放流開始から岸に漂着するまでの時間が再現計算では1時間以内であること等によると考えられる。
- ・図5.4-11、図5.4-12を見ると、第2回放流試験は投入開始後数分で河川右岸側に漂着している。
- ・図5.4-13、図5.4-14を見ると、第3回放流試験は河川から海域に流出し漂流物は河口から約200m北側に漂着しており、試験で漂着した位置とほぼ一致している。

第2回の放流試験の結果が満足に行えなかった要因として以下のことが考えられる。

- ・河口付近の地形表現が不十分であり、実際の河口付近の流れと異なっていると推察される（河口部には瀬が見られるなど河口閉塞的な現象が見られるが流れの解析には反映されていない）。
- ・漂流物はペットボトルを対象としており、岸壁にぶつかって流れる現象などは追跡解析に反映されていない。
- ・気象庁の風の子測値と現地の地上風の対応なども要因としては考えられる。

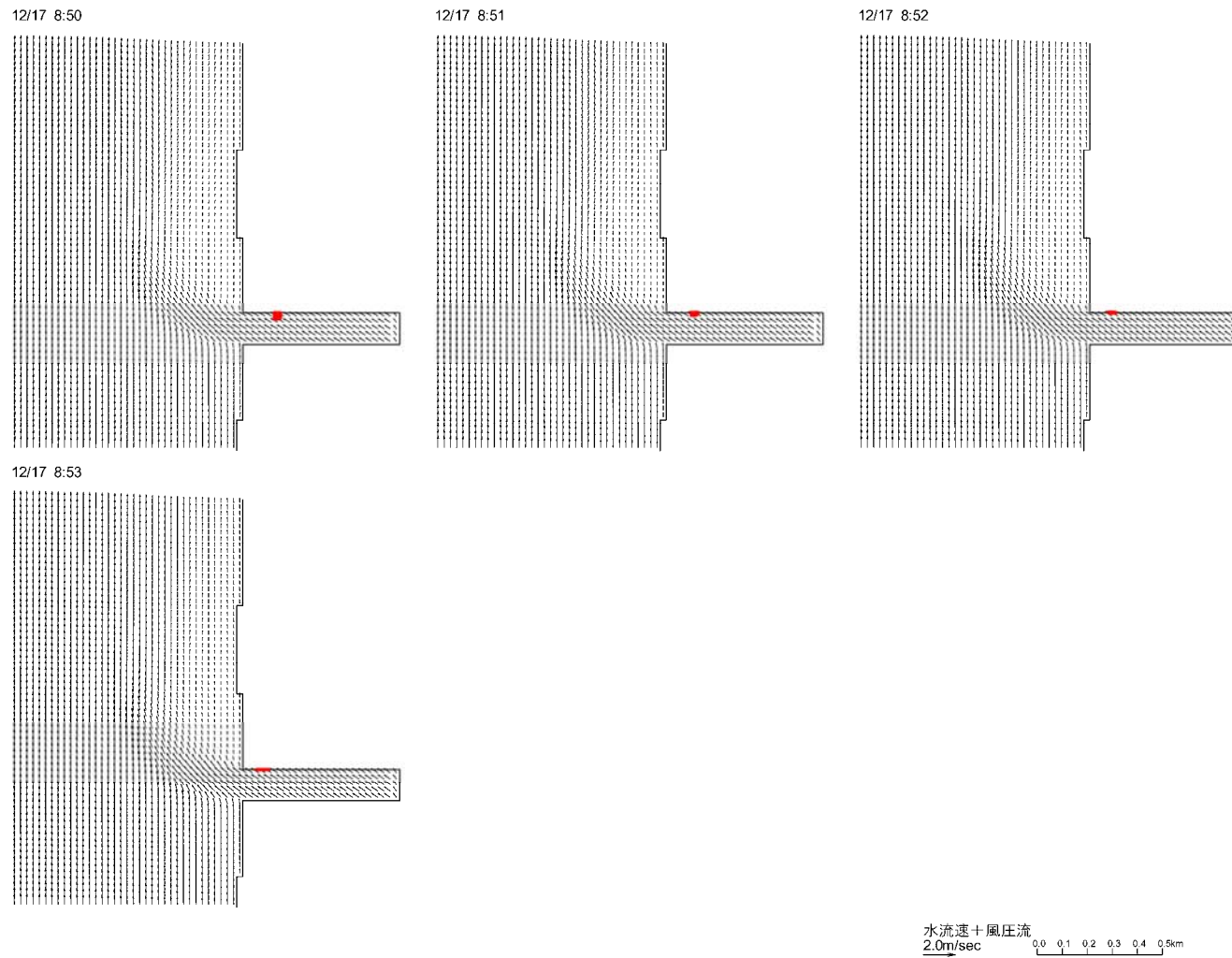


図 5.4-11 漂流物の位置と水流速+風圧流を合成したベクトル図（第2回放流試験、風圧係数0.035）

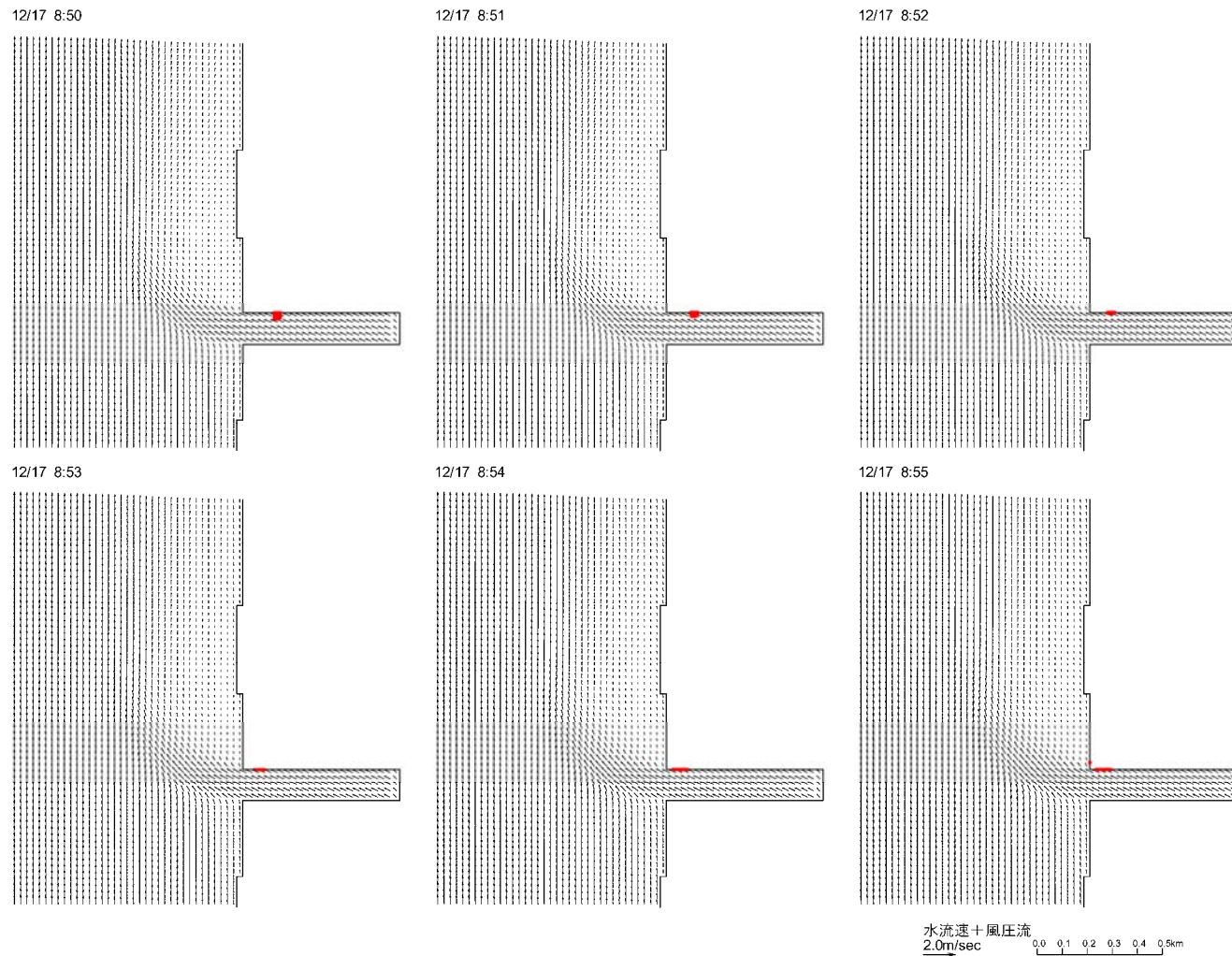


図 5.4-12 漂流物の位置と水流速+風圧流を合成したベクトル図 (第2回放流試験、風圧係数 0.025)

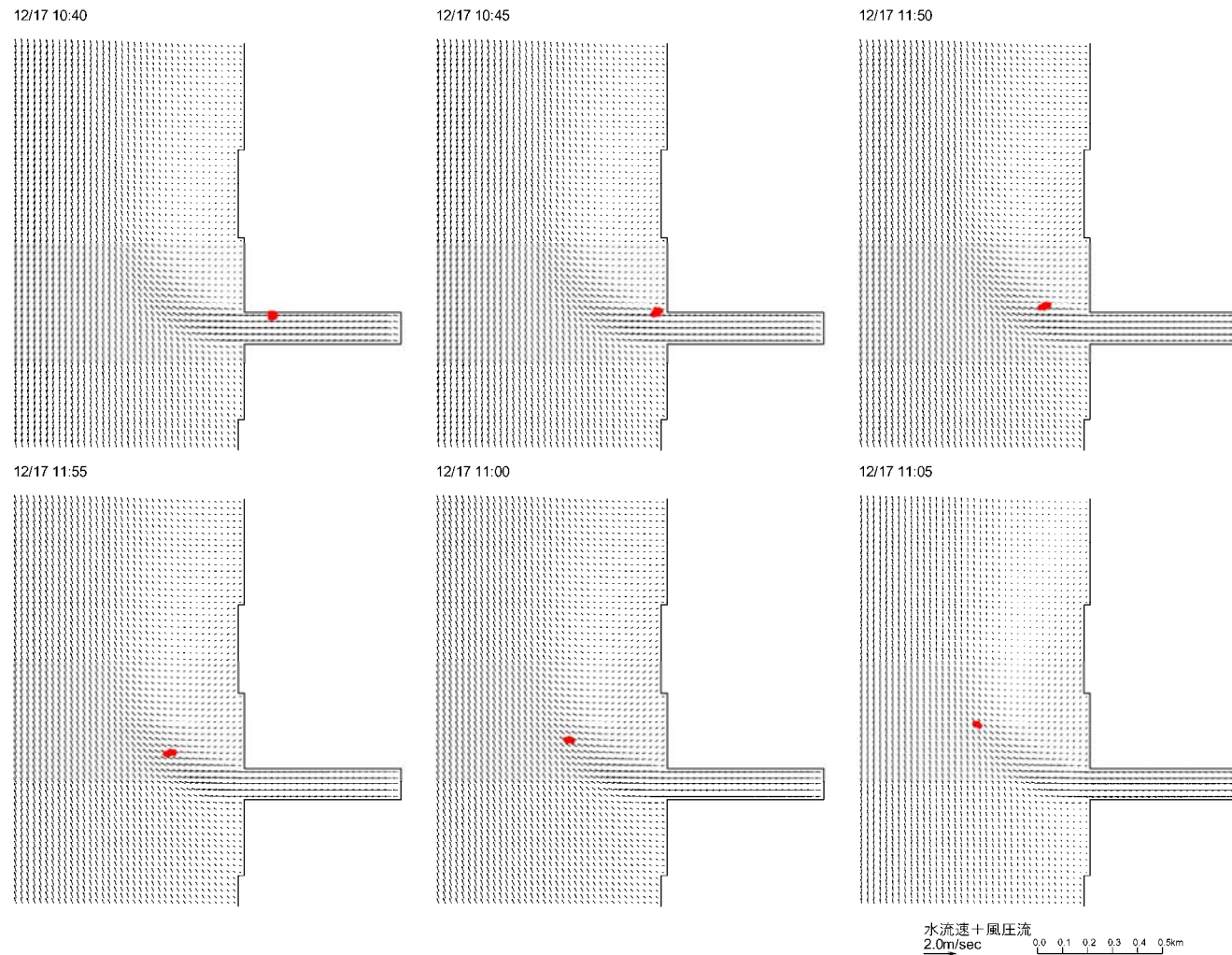


図 5.4-13(1) 漂流物の位置と水流速+風圧流を合成したベクトル図 (第3回放流試験、風圧係数 0.035)

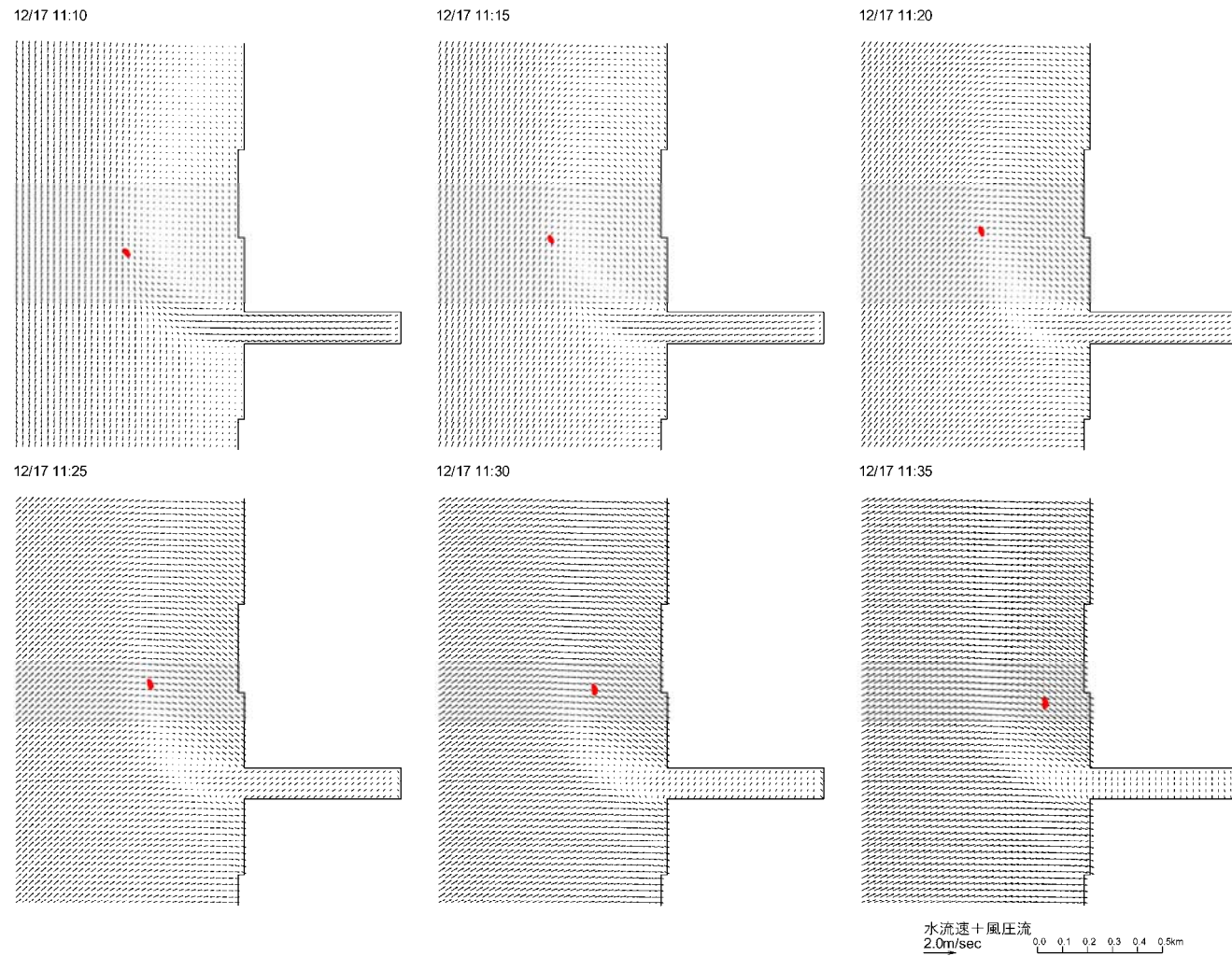
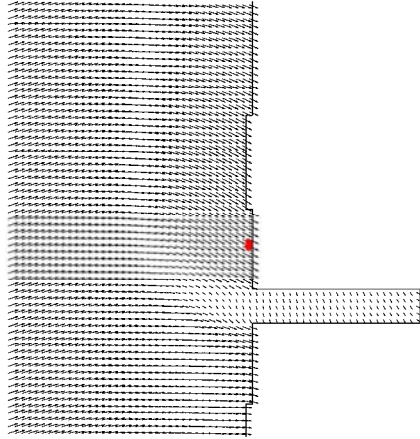


図 5.4-13(2) 漂流物の位置と水流速+風圧流を合成したベクトル図 (第3回放流試験、風圧係数 0.035)

12/17 11:41



I-222

水流速+風圧流
2.0m/sec 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5km

図 5.4-13(3) 漂流物の位置と水流速+風圧流を合成したベクトル図 (第3回放流試験、風圧係数 0.035)

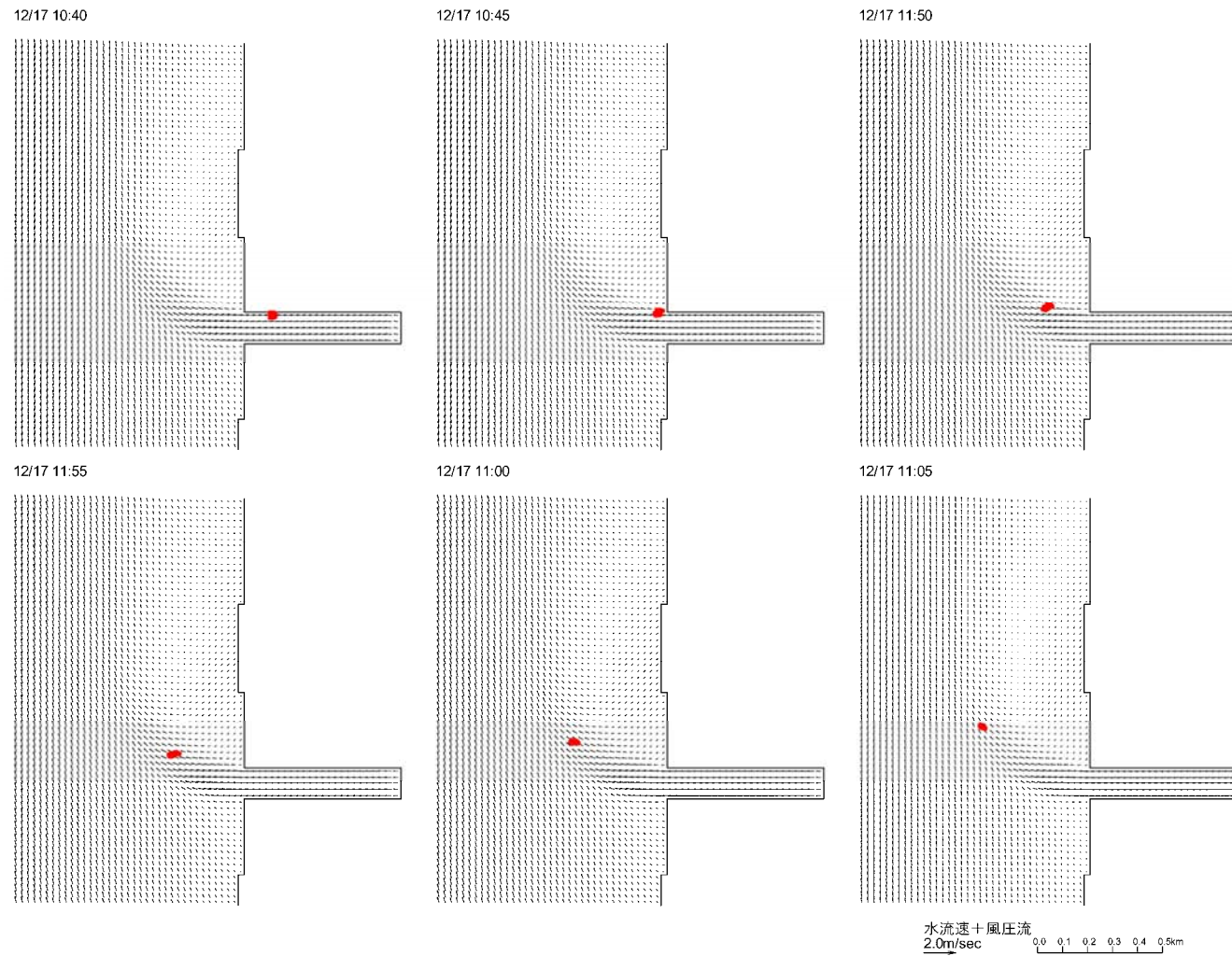


図 5.4-14(1) 漂流物の位置と水流速+風圧流を合成したベクトル図 (第3回放流試験、風圧係数 0.025)

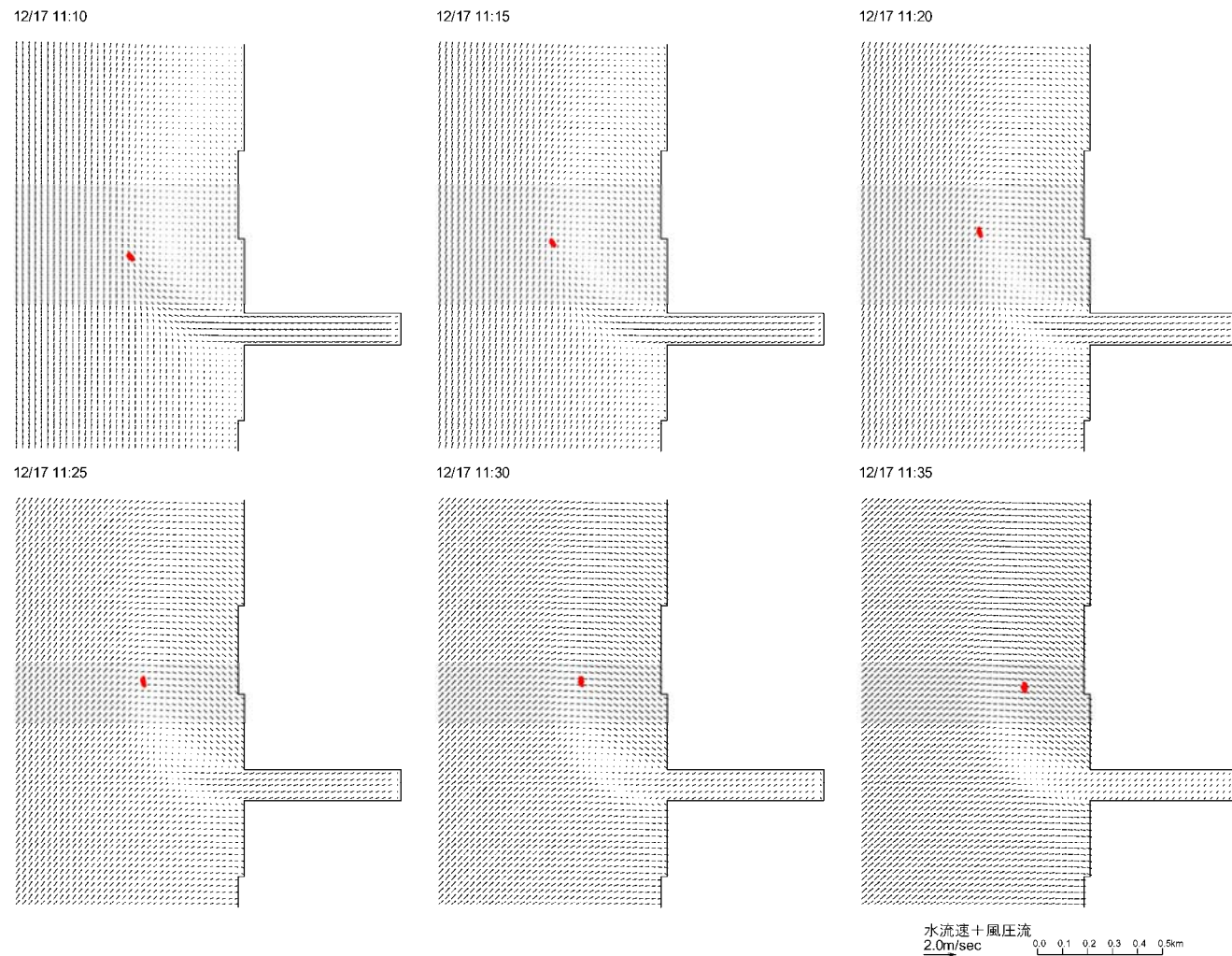


図 5.4-14(2) 漂流物の位置と水流速+風圧流を合成したベクトル図 (第3回放流試験、風圧係数 0.025)

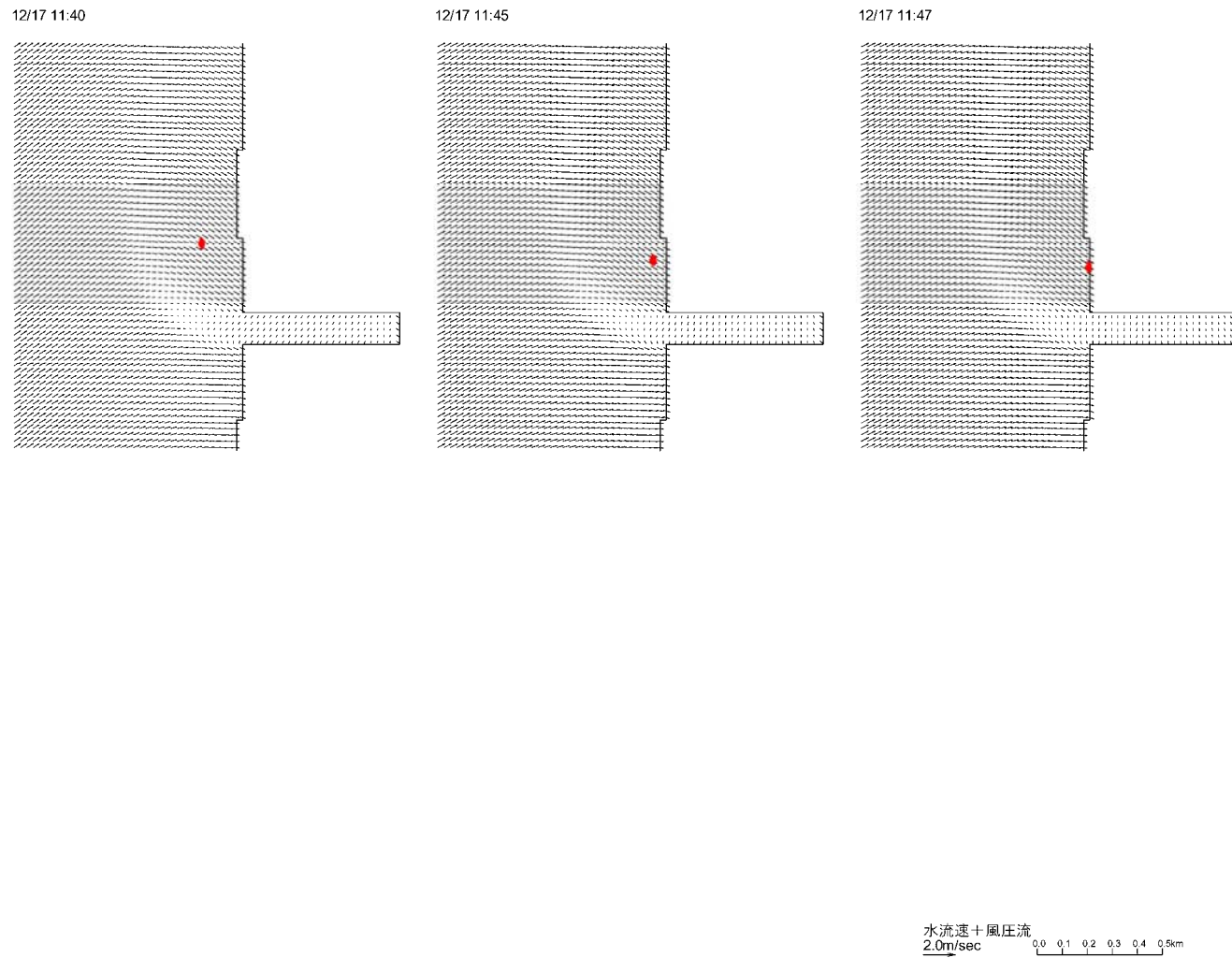


図 5.4-14(3) 漂流物の位置と水流速+風圧流を合成したベクトル図 (第3回放流試験、風圧係数 0.025)

5.4.2 伊勢湾における漂流シミュレーション

(1) 目的

漂着ゴミの削減施策立案のための基礎的な知見として、ゴミが漂流・漂着に至るまでの過程を把握することを目的として伊勢湾において調査を実施した。

(2) 調査内容

a. 冬季シミュレーションの内容（平成 19 年度）

(a) モデルの概要

解析に供したモデルは 3 次元レベルモデルで、使用された基礎方程式は以下の 4 つである。これらの式は、デカルト座標系 (x, y, z) において回転系の非圧縮粘性流体を仮定し、静水圧近似およびブシネスク近似（密度 ρ の空間変化の影響を圧力勾配項でのみ考える）を仮定した。

- ① x, y 方向運動方程式
- ② 連続式
- ③ 水温拡散方程式
- ④ 塩分拡散方程式

これらの方程式を陽に解くことでそれぞれの物理量を計算した。また、本モデル内では海面風応力を求めるために、風向・風速時系列データからの海面風応力のバルク式を用いた。以上の方程式を差分化して、数値シミュレーションを行なう。

(b) 解析領域と格子分割

解析領域は伊勢湾と三河湾全体を含む範囲とした。水平方向の解像度 $(\Delta x, \Delta y)$ は 300m とし、水平方向の格子数は $224 \times 208 = 46592$ 個である。鉛直方向には 3m 間隔とし、最大 10 層に分割した。図 5.4-15 に海底地形を示す。この海底地形データを作成するために使用したソースデータは、日本海洋データセンター（Japan Oceanographic Data Center : JODC）の Web サイトからダウンロードした J-EGG500 である。また、海岸線の再現には海上保安庁が刊行する海図を使用した。作成されたデータの最小水深は 2m と設定した。

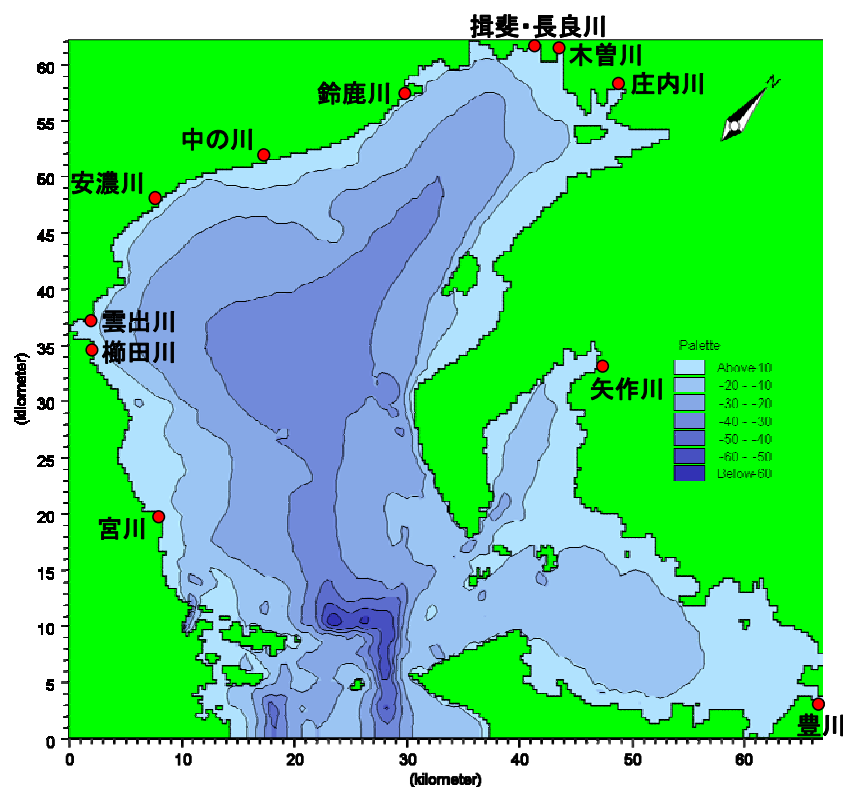


図 5.4-15 伊勢湾の海底地形

(c) 流況の計算条件

○計算期間

計算期間は2008年1月1日～1月31日の1ヶ月間とし、3ヶ月の助走期間を与えた。時間ステップは15秒とした。

○境界条件

1) 水位変動

開境界で鳥羽の潮位振幅の実測値を与えた。使用したデータは気象庁のWebサイトからダウンロードした1時間間隔の潮位の観測値である。この潮位データを東京湾平均海面(T.P.)基準に変換したものである。潮位データを図5.4-16に示す。

2) 海面風応力

計算期間に対応する気象庁から提供されるメソ数値予報モデルのGPVデータを計算領域内で空間補間して使用した。

3) 河川流入条件

主要河川である庄内川、木曾川、長良川、揖斐川、鈴鹿川、雲出川、櫛田川、宮川、矢作川、豊川と今回放流実験を行った中の川、安濃川の12河川からの河川水の流入を考慮した。各河川の流量は1999-2003年の流量年表より1月の流量の平均値を求めて使用した。中の川、安濃川については平成18年度公共用水域測定結果表の年平均値を使用した。各河川の流量を表5.4-5に示す。

○初期条件（水温、塩分）

関根（1999）の1月の観測値をもとに、湾内全体で水温 10℃、塩分 33.8psu を与えた。

○初期流動場の計算

数値計算の安定性とモデルのスピンアップ計算のために3ヶ月の助走期間を設けた。助走期間中の潮位振幅は潮位表に掲載されている鳥羽の主要4分潮の調和定数から潮位を計算して与えた。また、風向および風速は気象庁のWebサイトからダウンロードした津における2007年10月1日から12月31日の1時間間隔の風向・風速データを平均化した値を使用し、助走計算中は一定とした。

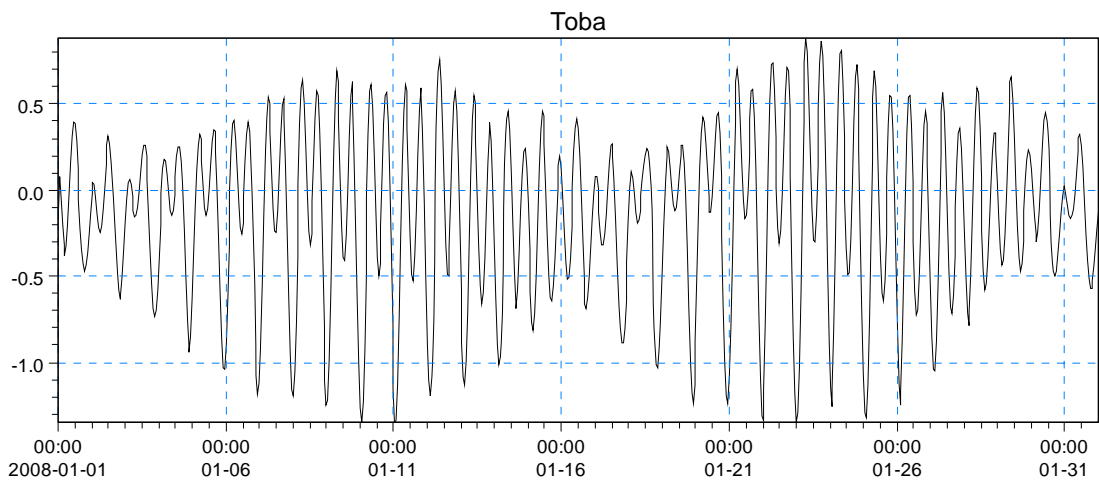


図 5.4-16 鳥羽の潮位（T.P.基準）

表 5.4-5 各河川の流量

河川名	流量[m ³ /s]	流量観測所
庄内川	17.50	枇杷島
木曾川	116.97	犬山
長良川	78.90	墨俣
揖斐川	70.81	万石・高淵
鈴鹿川	3.93	高岡
中の川	0.90*	木鎌橋
安濃川	2.40*	御山荘橋
雲出川	4.16	大仰
櫛田川	5.38	両郡
宮川	18.86	岩出
矢作川	26.75	米津
豊川	12.05	当古

(d) 漂流経路の計算条件

○風圧流の解析

1) 流速

風圧流 は以下の式で求められる。

$$U = K \times \sqrt{A/B} \times W$$

ここに、

U : 風圧流 (m/s)

W : 風速 (m/s)

A/B : 海面上面積 と海面下面積 の断面積比。対象とするペットボトルの海面上面積 91%、海面下面積 9%とし、 とする。

K : 風圧係数。

小田巻実(1986)¹⁾は風の状態や漂流物の浮かび方によって幅を持つものと考えたほうがよく 0.02~0.05 ぐらいの値を持つとしている。

風速は伊勢湾の緯度、経度毎に与えられた時々刻々の値から漂流物位置の風速を求めることとする。風圧係数は小田巻実(1986)によると、空ドラム缶で 0.032、船舶で 0.036 等の値が示されているが、海上保安庁では風圧中心が高い場合 0.035、風圧中心が低い場合 0.025 としている。漂流対象がペットボトルであるため風圧係数は 0.035 として風圧流を解析する。

○漂流物の追跡解析

漂流物の追跡のための表層流は海域の流れ \vec{V} と風圧流 \vec{U} を合成した表層流 \vec{D} とする。

ある時刻 t に座標 (X_E, X_N) に位置した漂流物の Δt 時間における表層流による移動ベクトル $(\Delta X_E^C, \Delta X_N^C)$ は座標 (X_E, X_N) における表層流ベクトル (D_E, D_N) を用い以下のように求められる。

$$\Delta X_E^C = D_E \times \Delta t$$

$$\Delta X_N^C = D_N \times \Delta t$$

2) random diffusion による移動

random diffusion による移動は、ある時刻 t に座標 (X_E, X_N) に位置した漂流物の Δt 時間における乱流拡散による移動ベクトル $(\Delta X_E^D, \Delta X_N^D)$ は拡散係数 K_h を用いて以下のよう
に示される。

$$\Delta X_E^D = R_i \cdot \cos(2\pi \cdot R_i') \cdot \sqrt{2 \cdot K_h \cdot \Delta t}$$

$$\Delta X_N^D = R_i \cdot \sin(2\pi \cdot R_i') \cdot \sqrt{2 \cdot K_h \cdot \Delta t}$$

ここに R_i, R_i' は 0~1 の一様乱数、 K_h (m/s) は乱流拡散係数で Morales et al. (1997)²⁾ により以下のように示される。

$$K_h = 10^{-4} \cdot (272.8 \cdot |V| + 21.1 \cdot |W|)$$

ここに、 $|V|$: 海表面流速の絶対値 (m/s)

$|W|$: 風速の絶対値 (m/s)

なお、本来の拡散現象であれば、 R_i は平均ゼロ、分散 1 の正規乱数であるべきであるが、ここでは拡散現象の標準偏差 $\sqrt{2 \cdot K_h \cdot \Delta t}$ のみを利用し、±標準偏差の範囲で random に拡散する（確率密度関数一定）、いわゆる random diffusion として扱っていることになる。九州大学応用力学研究所では Oil spill simulation でも同様の random diffusion の取り扱いとしている。また、参考のため示すと後藤(1983)³⁾ は津波による木材の流出の解析で同様の取り扱いを行っている。ただし、random diffusion による移動の範囲は ±0.5 × 標準偏差の範囲としている
各ボトルの沈下率は、表 5.4-6 に示すとおりである。

< 出典 >

- 1) 小田卷実(1986) : 沿岸域における漂流予測の試み、沿岸海洋研究ノート、第 23 巻、第 2 号
- 2) Morales, R. A., Elliott, A. J. & Lunell T. (1997) ; The Influence of tidal current and wind on mixing in the surface layers of the sea, Marine Pollution Bulletin, 34, pp. 15-25
- 3) 後藤智明(1997) ; 津波による木材の流出に関する計算、第 30 回海岸工学講演会論文集

表 5.4-6 各ボトルの沈下率（冬季シミュレーション）

漂流シミュレーションの対象	沈下率
GPS アルゴス発信機付漂流ボトル	59%
GPS 携帯電話発信機付漂流ボトル	29%
生分解性漂流ボトル	9%

b. 夏季シミュレーションの内容（平成 20 年度）

夏季シミュレーションについては、冬季シミュレーションのペットボトルを漂流させた期間のリアルなデータを使用するのではなく、夏季（想定しているのは 7 月）の平均的な海況および気象データを使用し、夏季における漂流ごみの予測計算を実施した。

(a) モデルの概要

解析には冬季と同じモデルを使用しており、方程式系、座標系等は同じである。

(b) 解析領域と格子分割

解析領域及び格子分割も、冬季のモデルと同じである。

(c) 流況の計算条件

○計算期間

計算期間は120日間であり、最初の100日は助走期間とした。計算は、7月の平均的な海況を想定した。

○境界条件

1) 水位変動

潮位表に掲載されている鳥羽の主要4分潮の調和定数から潮位変動を計算した。潮位データを図5.4-17に示す。

2) 水温・塩分

開境界の水温と塩分は関根(1999)の7月の鉛直断面図を参考に、図5.4-18のような鉛直プロファイルで与えた。

3) 海面風応力

使用した風向・風速データは気象庁のアメダス・気象台で観測された1時間毎の風向・風速データである。2008年の7月1日から31日まで平均化し、空間補間をして使用した。図5.4-19に補間に使用した伊勢湾周辺の12地点の気象台とアメダスの位置を示す。

冬季は実際に漂流物を放流し、シミュレーションによる漂流経路との比較・検証を行った。しかしながら、夏季は漂流物の放流実験は行わなかった。そのため、夏季の平均場として7月の風向・風速の平均値を使用する。図5.4-20に、メソ数値予報モデルのGPVデータと気象庁のアメダス・気象台における観測値との比較を示す。図より、GPVデータの方がわずかではあるが風速が大きい、予測値と観測値の間には大きな違いは見られない。そのため、気象庁のデータを7月の風の平均場として使用した。

図5.4-21、図5.4-22に2004年から2008年の5年間平均した風の場合と各年の7月の風の平均場を示す。地形の傾きに合わせて風向も40°西へ傾けている。2008年は他の4年と比較して風速が大きく東風の成分が強い。年変動の影響を小さくするため、2004年から2008年の5年間の平均場を使用する。

4) 河川流入条件

冬季の計算と同様に、主要河川である庄内川、木曾川、長良川、揖斐川、鈴鹿川、雲出川、櫛田川、宮川、矢作川、豊川と冬季に放流実験を行った中の川、安濃川の12河川からの河川水の流入を考慮した。各河川の流量は流量年表より1999-2003年の7月の流量の平均値を求めて使用した。中の川、安濃川については平成18年度公共用水域測定結果表の7月の値を使用した。各河川の流量を表5.4-7に示す。

○初期条件

境界条件と同様に関根(1999)の7月の鉛直断面図から、図5.4-23のような鉛直プロファイルを与えた。

○初期流動場の計算

数値計算の安定性とモデルのスピンアップ計算のために 100 日の助走期間を設けた。助走期間中の潮位振幅は潮位表に掲載されている鳥羽の主要 4 分潮の調和定数から潮位を計算して与えた。また、風向および風速は気象庁の Web サイトからダウンロードした伊勢湾周辺の 12 地点のデータを 2008 年 7 月 1 日から 31 日まで平均化した値を空間補間して使用し、河川水の拡がり安定した計算開始 90 日目から強制を開始した。

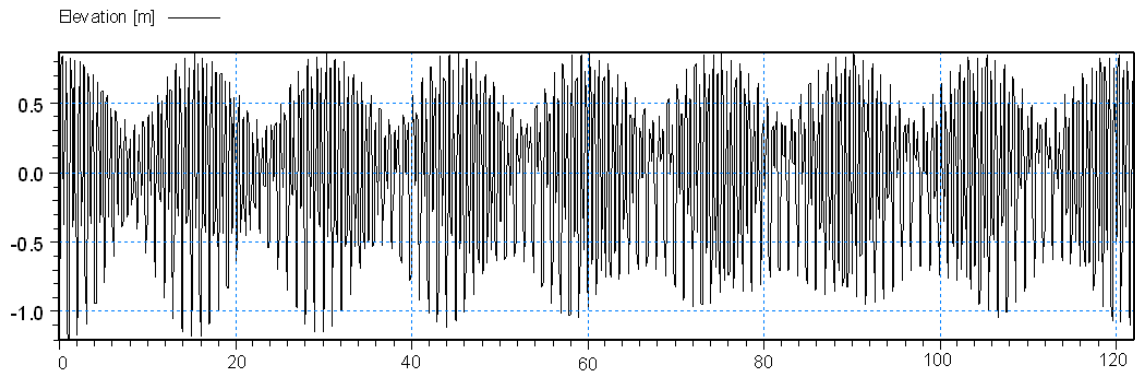


図 5.4-17 潮位変動（冬季と同様に鳥羽の潮位）

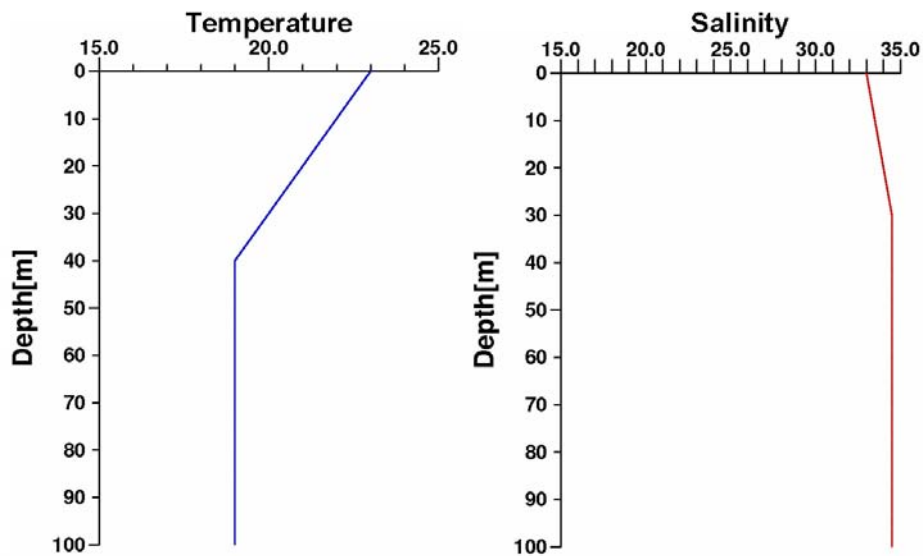


図 5.4-18 開境界の水溫と塩分の鉛直プロファイル

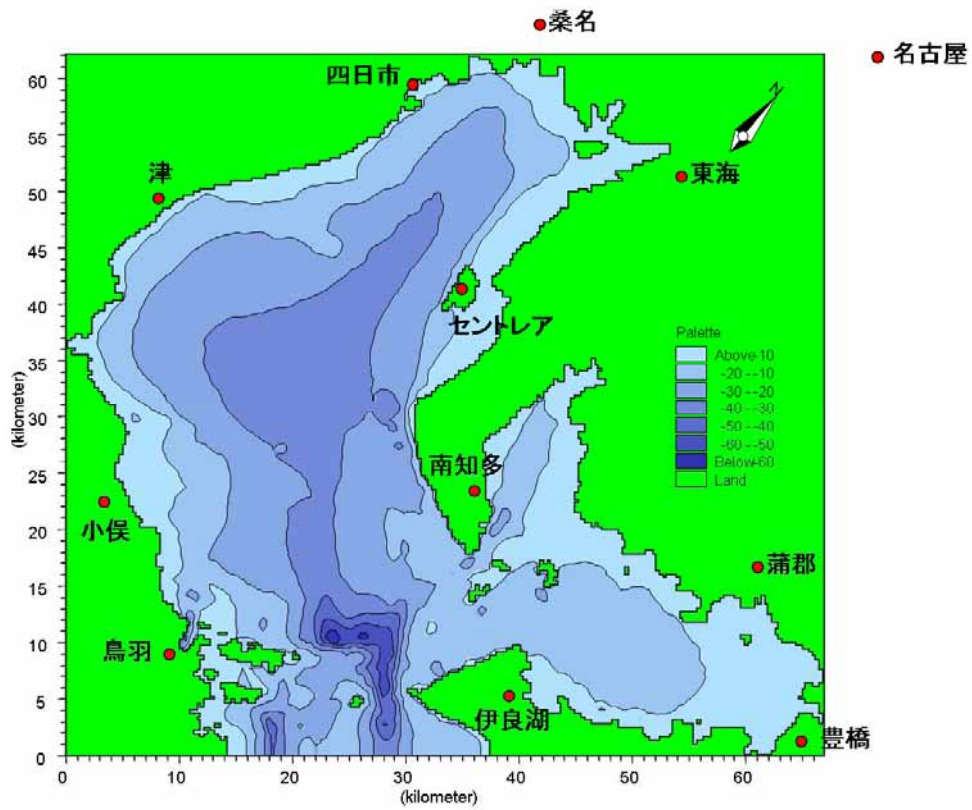


図 5.4-19 気象庁のデータ観測地点

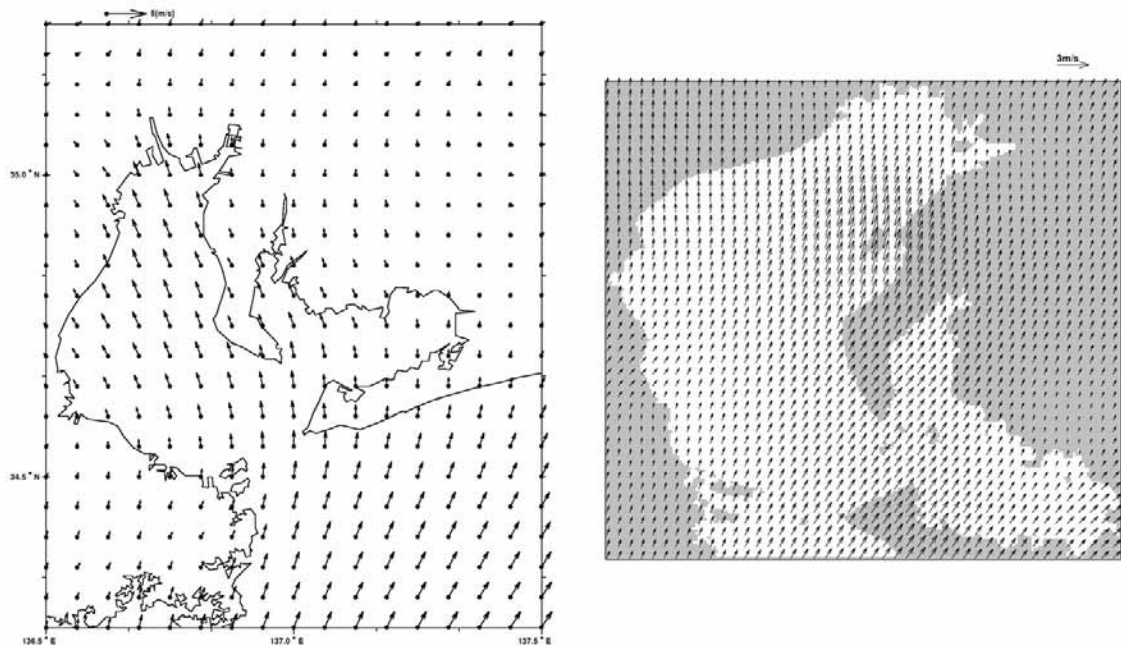


図 5.4-20 風データの比較

(左図：メソ数値予報モデルのGPVデータ、右図：気象台・アメダスデータ)

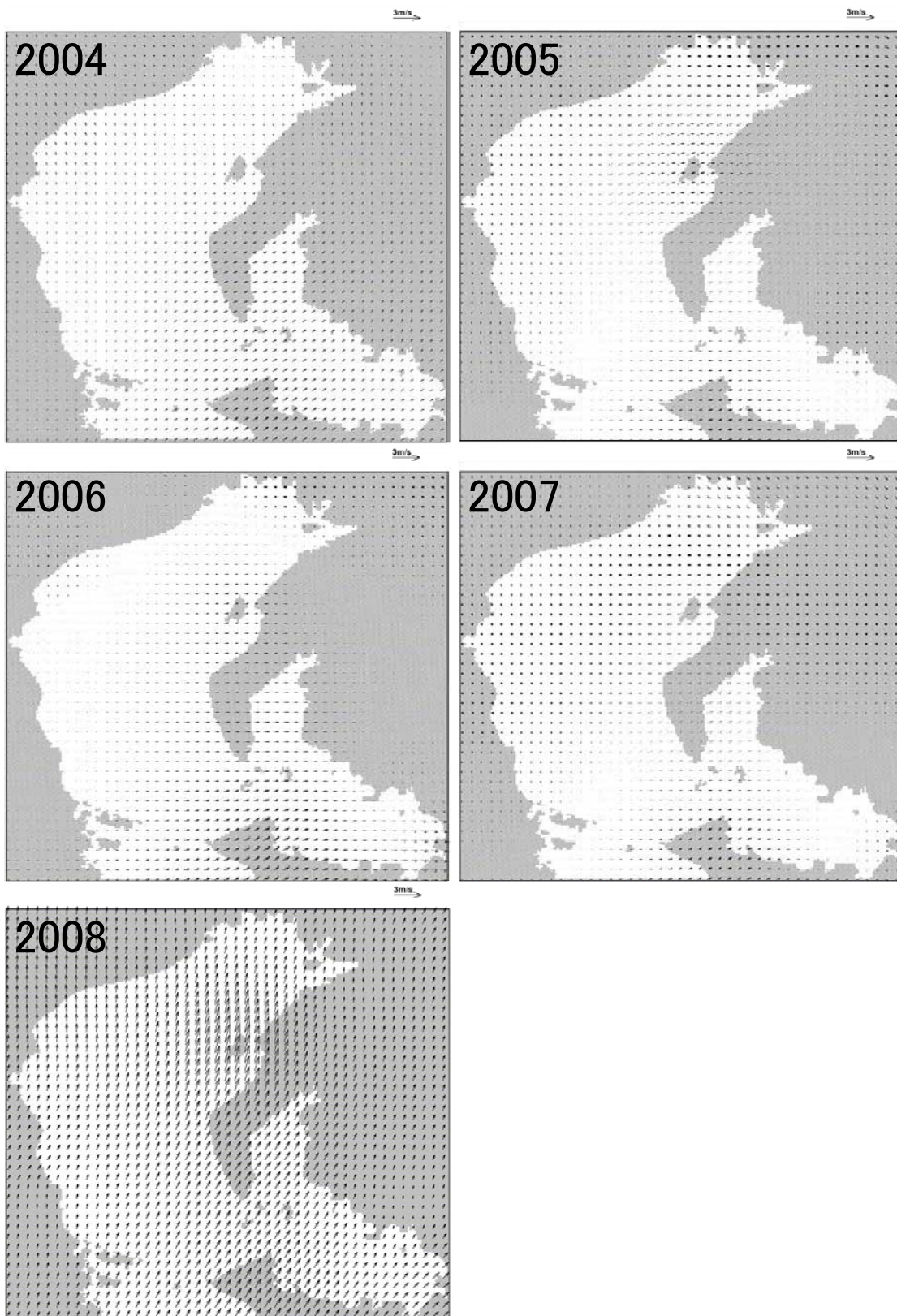


図 5.4-21 2004年～2008年の各年の7月の風のパターン

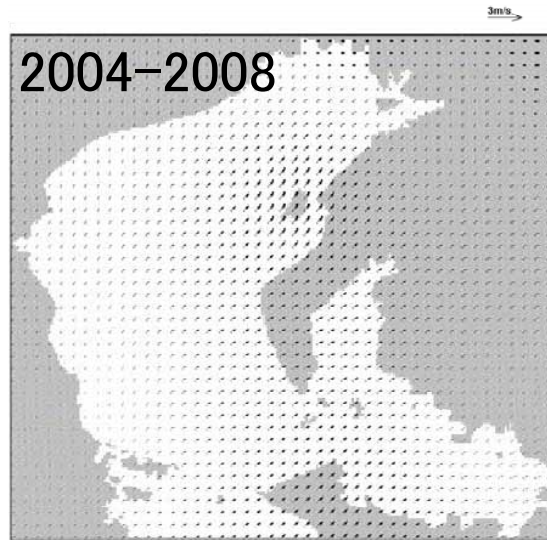


図 5.4-22 2004年～2008年の7月の風の平均場

表 5.4-7 各河川の流量

河川名	流量 [m ³ /s]	流量観測所
庄内川	34.93	枇杷島
木曾川	380.12	犬山
長良川	235.03	墨俣
揖斐川	165.06	万石、高淵
鈴鹿川	9.90	高岡
中の川	1.00	木鎌橋
安濃川	1.90	御山荘橋
雲出川	11.07	大仰
櫛田川	15.21	両郡
宮川	31.59	岩出
矢作川	62.57	米津
豊川	43.86	当古

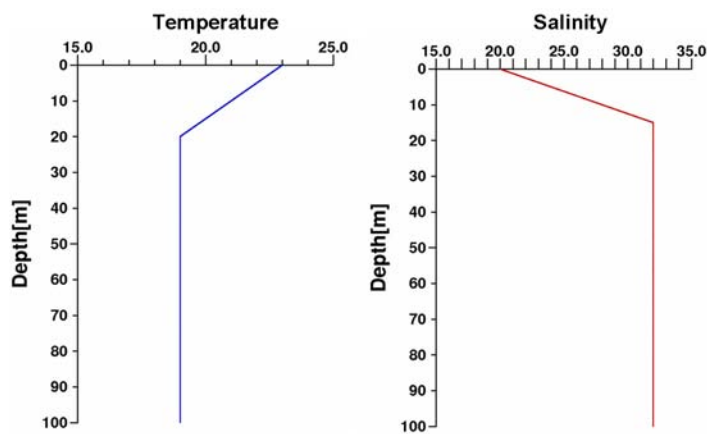


図 5.4-23 水温と塩分の初期値の鉛直プロファイル

(d) 漂流経路の計算条件

漂流経路の計算は冬季と同様の手法を使用する。漂流物として冬季の漂流調査に使用した GPS 携帯電話発信機付漂流ボトルとペットボトルを想定した。表 5.4-8 に各ボトルの沈下率を示す。

表 5.4-8 各ボトルの沈下率（夏季シミュレーション）

漂流シミュレーションの対象	沈下率
GPS 携帯電話発信機付漂流ボトル	29%
ペットボトル	14.5%

(3) 調査結果

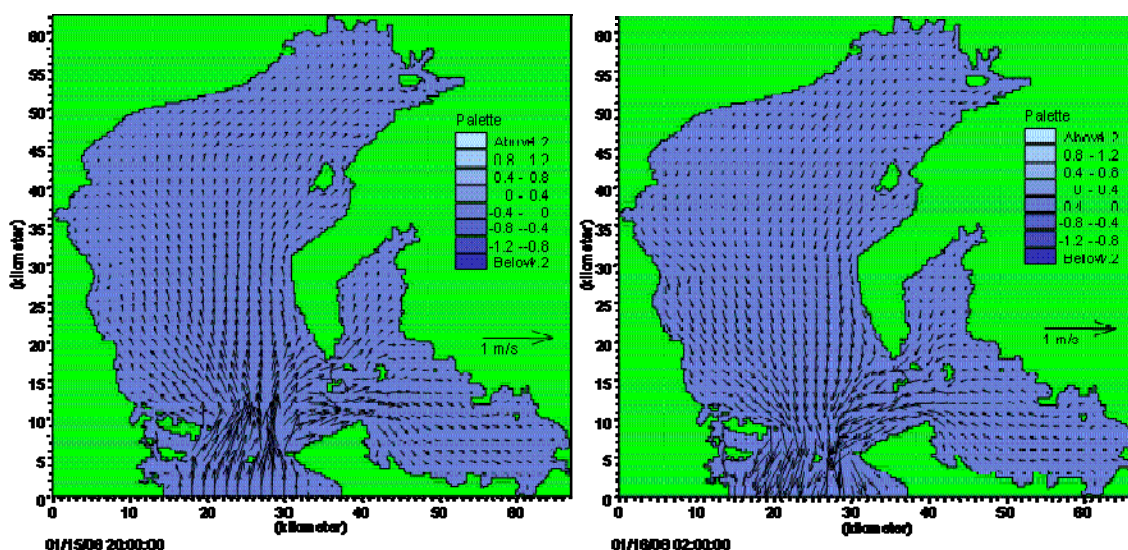
a. 冬季シミュレーション結果（平成 19 年度）

(a) 流動場の計算結果

小潮の期間における流入と流出最強時の表層流速ベクトルと海面変位の水平分布を図 5.4-24 に示す。流入最強時は湾全体で湾奥へ向かう流れ、流出最強時には湾全体で湾口へ向かう流れとなっている。流速は湾口で強く 0.5 m/s 程度であり、湾奥に向かって弱くなり湾奥では数 cm ほどの流れしか存在しない。

大潮の期間における流入と流出最強時の表層の流速ベクトルと海面変位の水平分布を 5 図 5.4-25 に示す。小潮の期間と同様に流入最強時は湾全体で湾奥へ向かう流れ、流出最強時は湾全体で湾口へ向かう流れとなる。流速は湾口部で 1 m/s となり、湾口部でも 0.1 m/s ほどの流れが存在する。

図 5.4-26 に計算期間 1 ヶ月平均した流速ベクトルの水平分布を示す。潮汐成分を除いた冬季の伊勢湾の恒流と考える。全体的に流れは弱く 0.1 m/s 以下となっている。湾口付近に時計回りと反時計回りの渦対が存在する。また、伊勢湾の西岸に沿って湾口に向かう流れが存在する。三河湾でははっきりとした流れが見られない。



流入最強時

流出最強時

図 5.4-24 小潮期の流れと推移の水平分布図

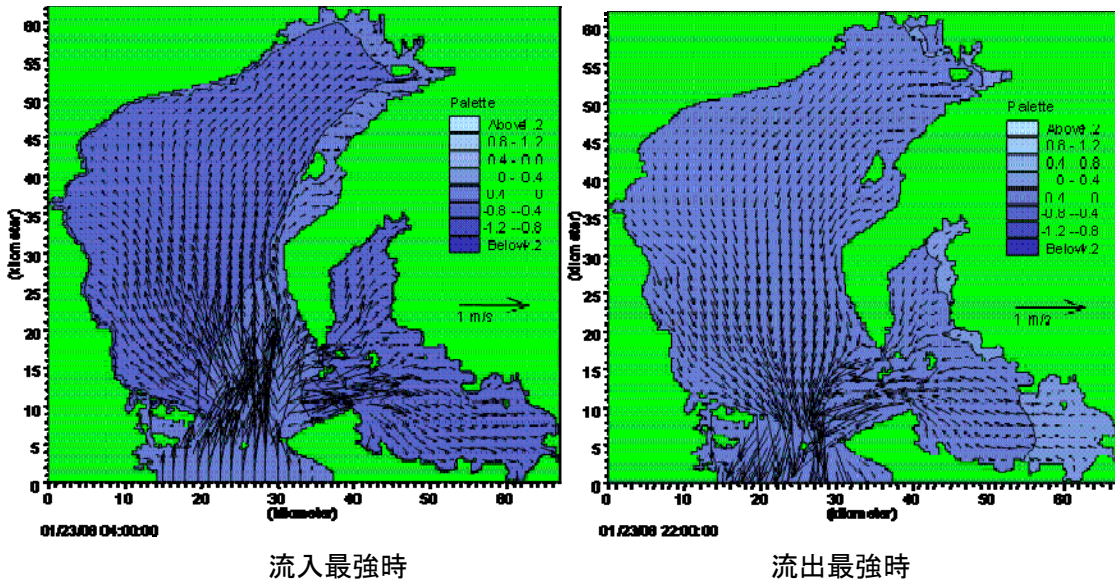


図 5.4-25 大潮期の流れの水平分布図

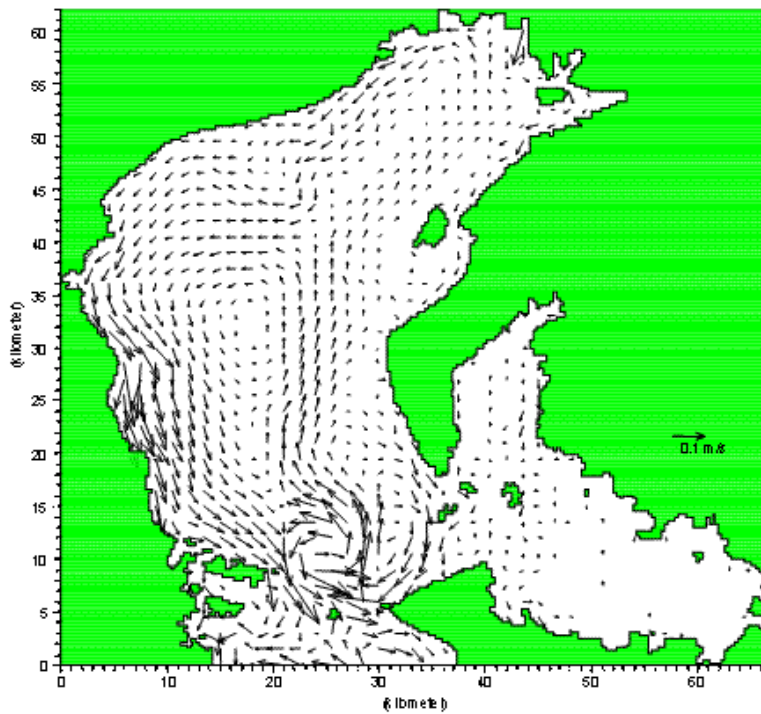


図 5.4-26 1ヶ月平均した流速の水平分布図

(b) 漂流物の追跡結果

漂流物追跡解析はアルゴスボトル、携帯ボトル、生分解性ボトルの3ケースを実施した。なお、漂流物は表 5.4-9 に示す時間および場所に各河川でアルゴスボトル1個、携帯ボト

ル 1 個、生分解性ボトル 100 個投入している。放流試験を行った河川の位置を図 5.4-27 に示す。また、計算に使用した GPV の地上の風を図 5.4-28 に示す。

アルゴスボトルの計算結果を図 5.4-29 に、携帯ボトルの計算結果を図 5.4-30 に、生分解性ボトルの計算結果を図 5.4-31 に示す。

表 5.4-9 放流試験の概要

番号	河川名	放流日	放流時刻	緯度	経度	風向	風速	備考
1	木曾川	平成20年1月7日	06:40~06:49	35-01-56.9	136-44-22.6	北北東	2.1m/s	右岸河口部より放流
2	鈴鹿川	平成20年1月7日	07:50~08:05	34-55-51.4	136-38-50.0	calm	0.4m/s以下	右岸河口部より放流
3	中の川	平成20年1月7日	09:10~09:15	34-48-13.6	136-34-14.0	北北西	1.2m/s	右岸河口部より放流
4	安濃川	平成20年1月7日	06:45~07:00	34-43-46.9	136-31-46.0	西	0.4m/s以下	右岸河口部より放流
5	櫛田川	平成20年1月7日	08:05~08:15	34-36-13.6	136-34-09.8	南東	0.4m/s以下	左岸河口部より放流
6	宮川	平成20年1月7日	10:00~10:15	34-32-23.0	136-43-24.0	西	5m/s	左岸河口部より放流

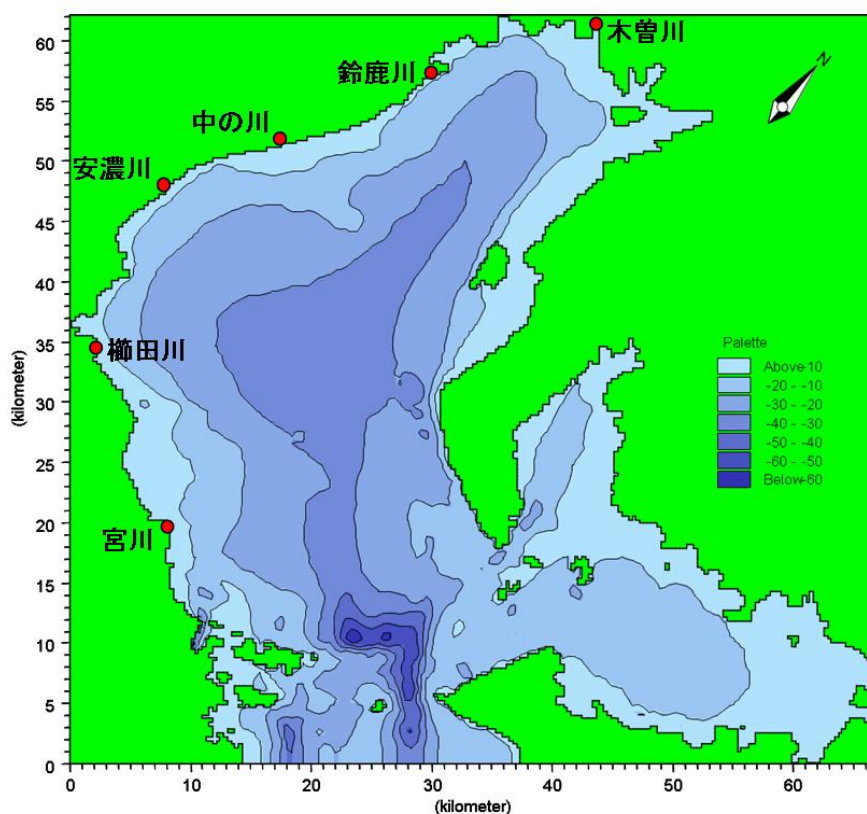


図 5.4-27 放流地点の位置図

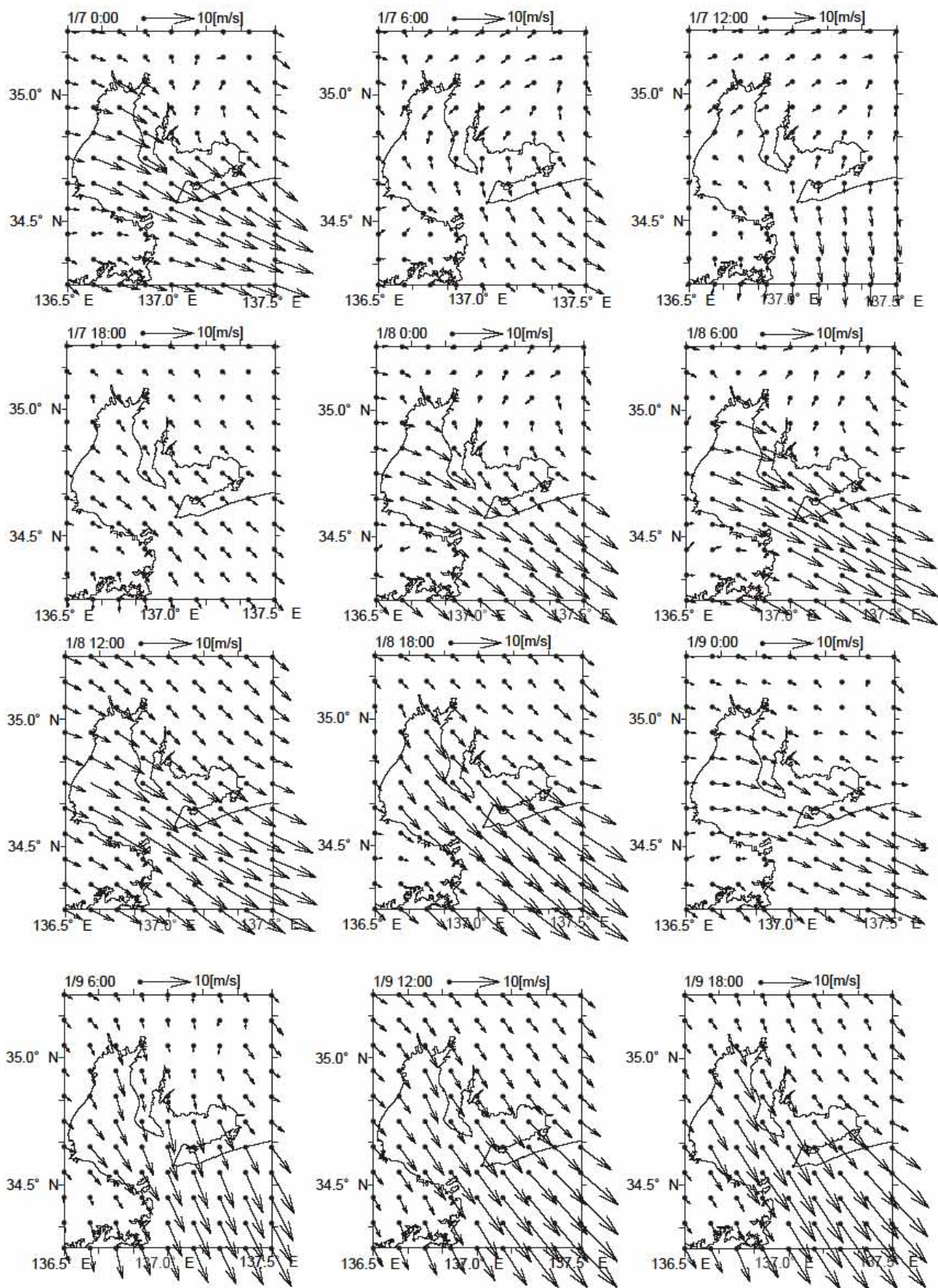


図 5.4-28(1) 伊勢湾の風の分布の時間変化

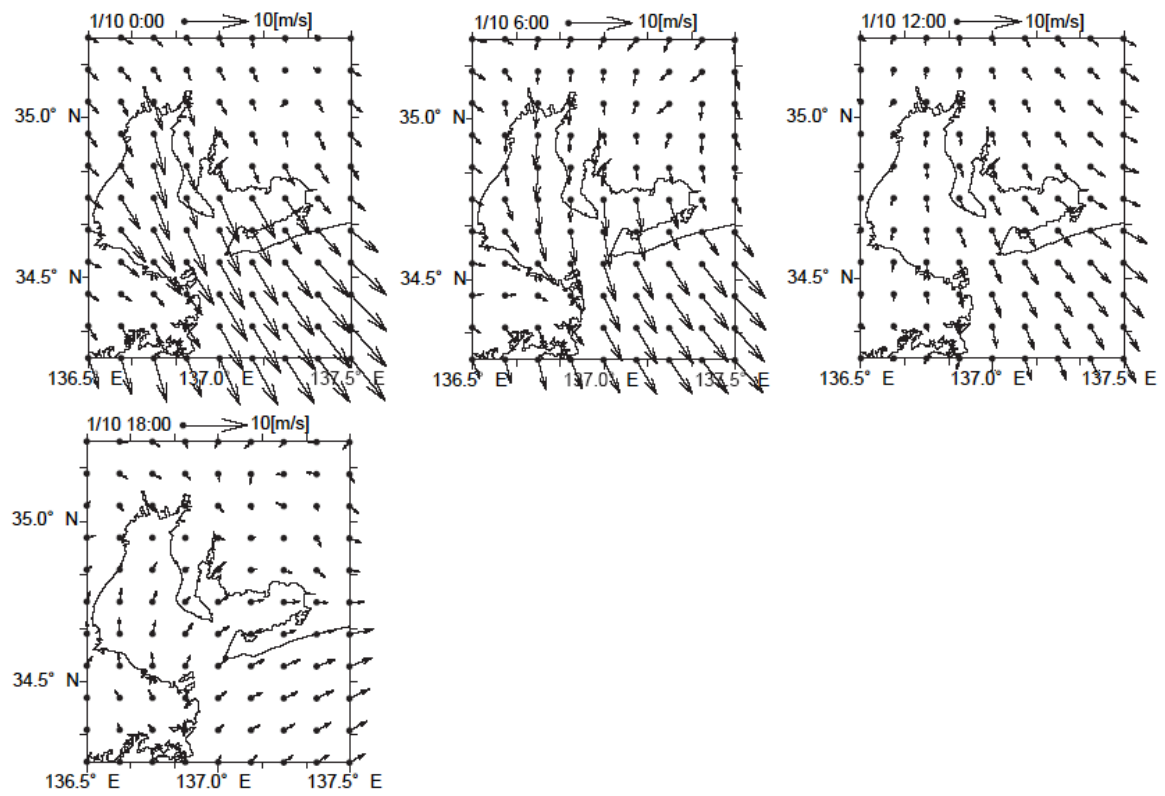


図 5.4-28 (2) 伊勢湾の風の分布の時間変化

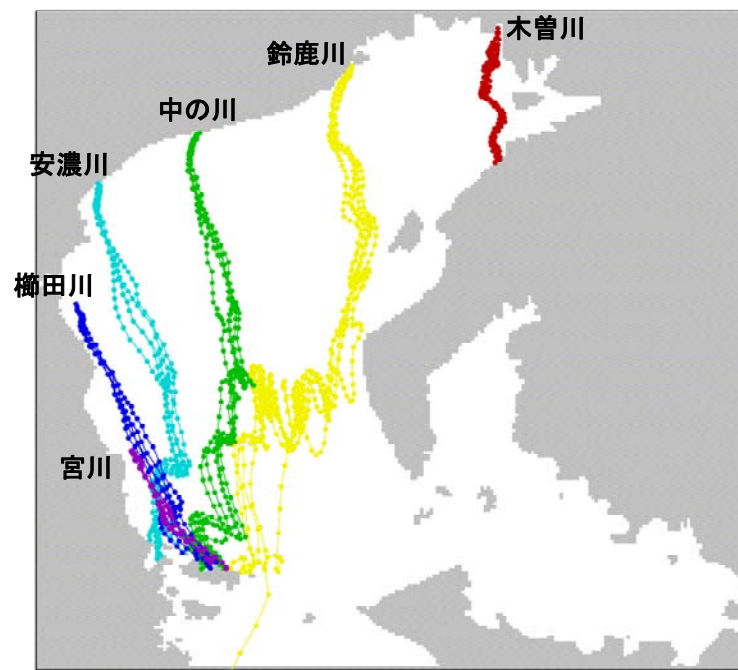


図 5.4-29 アルゴスポトルを対象とした漂流経路の計算結果

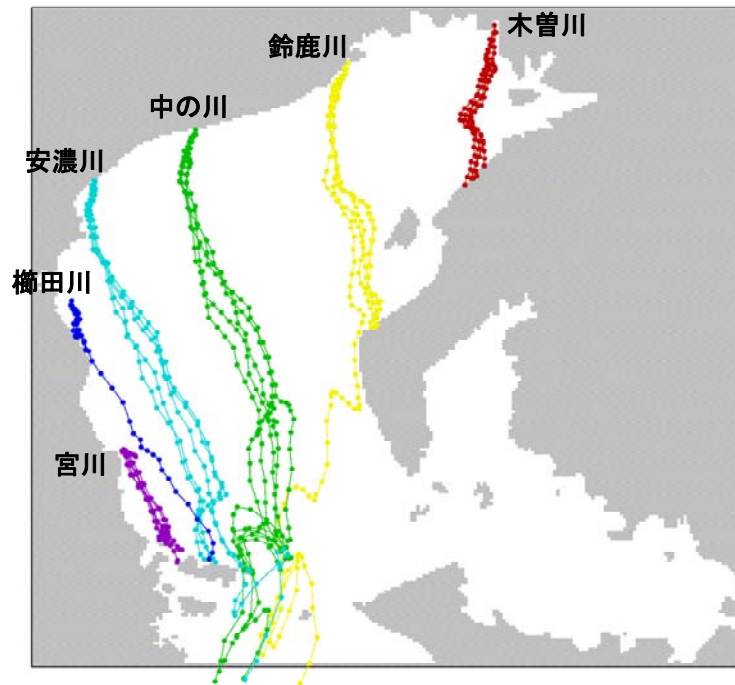


図 5.4-30 携帯ボトルを対象とした漂流経路の計算結果

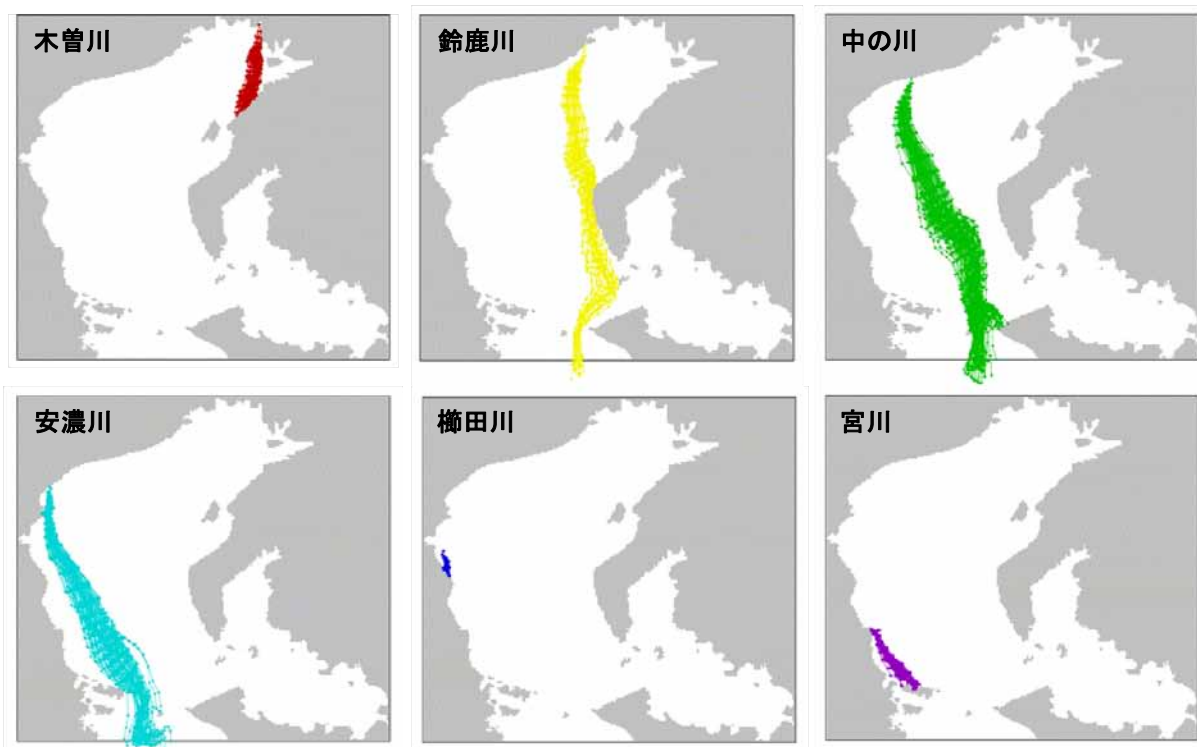


図 5.4-31 生分解性ボトルを対象とした漂流経路の計算結果

b. 夏季シミュレーション結果（平成 20 年度）

(a) 流動場の計算結果

小潮の期間における流入と流出最強時の表層流速ベクトルの水平分布図を図 5.4-32 に示す。流速は湾口部で大きく 0.7m/s 程度となっている。湾中央部や湾奥部では流れは弱く、流速は数 cm/s である。

大潮の期間における流入と流出の際教示の表層の流速ベクトルの水平分布図を図 5.4-33 に示す。小潮時と比較して伊勢湾全体で流速は強くなっており、湾口部では流速が 1m/s 以上となっている。また、湾中央部や湾奥部でも 10 から 20cm/s の流れが形成されている。

図 5.4-34 に 20 日間平均した表層流速ベクトルの水平分布図を示す。湾口部には反時計回りの渦が存在しており、0.3m/s 程度の流れが形成されている。湾奥部、湾中央部では東側の流れが強く、湾口に向かって流れている。

図 5.4-35 に日本全国沿岸海洋誌¹⁾に記載された伊勢湾の夏季の恒流図を示す。湾口部の反時計回りの循環、湾奥部に見られる時計回りの流向の変化や湾中央部に見られる反時計回りの流向の変化等が概ね再現できている。

<出典>

- 1) 日本海洋学会編(1985)：日本全国沿岸海洋誌、pp1106

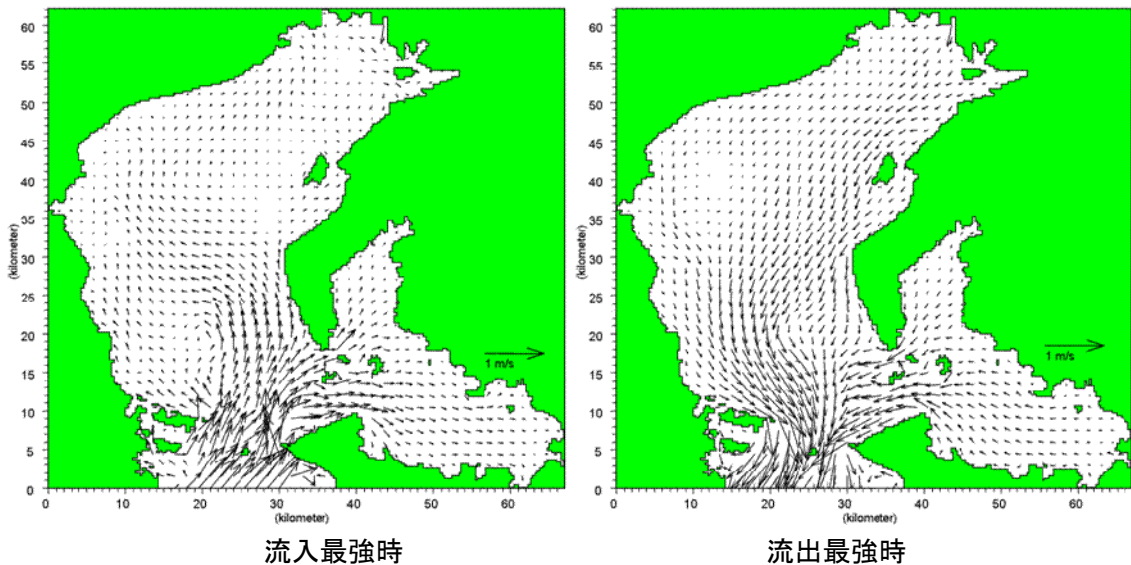


図 5.4-32 小潮期の流れの水平分布図

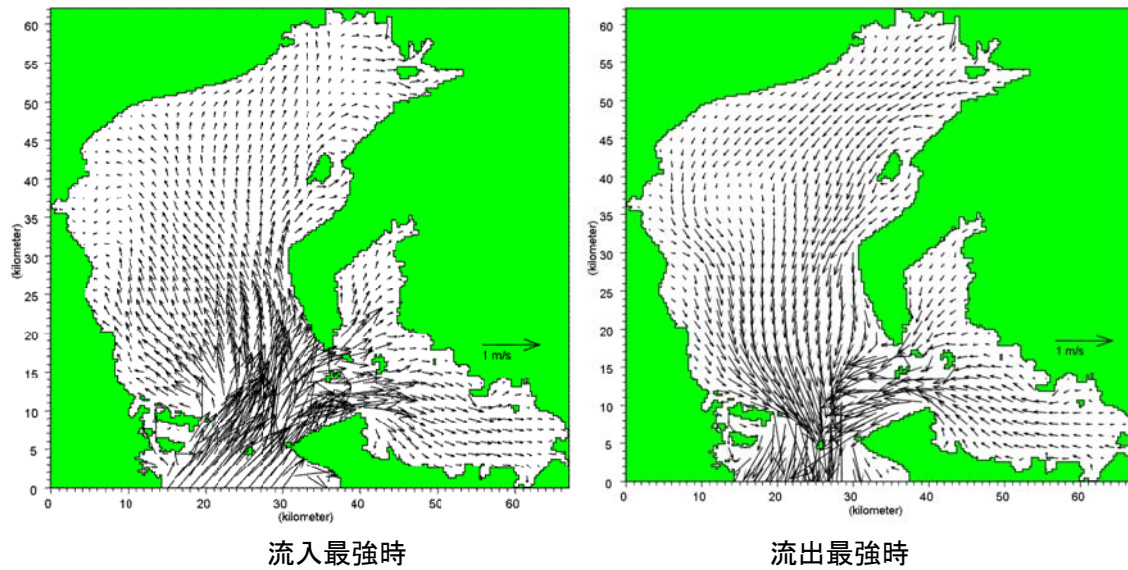


図 5.4-33 大潮期の流れの水平分布図

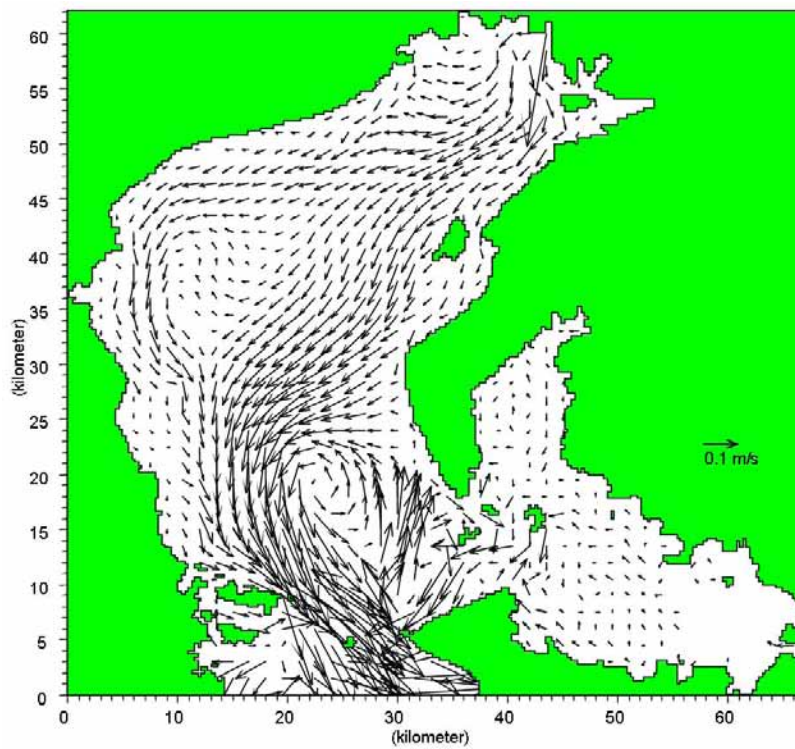
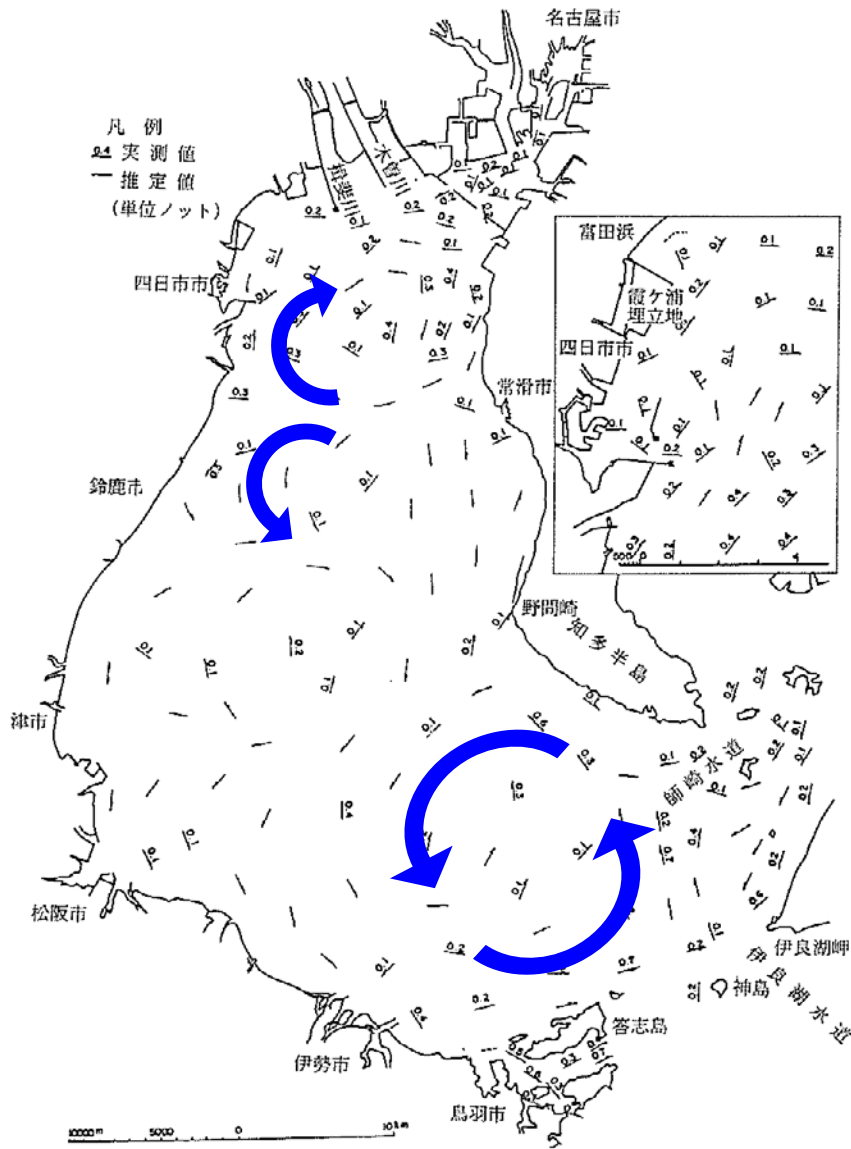


図 5.4-34 20日間平均した流速の水平分布図



第18図 伊勢湾の夏季の恒流, 単位 kt¹⁹⁾

図 5.4-35 伊勢湾の夏季恒流図

(b) 漂流物の追跡結果

漂流物追跡解析は、GPS 携帯電話発信機付漂流ボトルの沈下率のケース、ペットボトルを想定した沈下率のケース、風の影響をなしとしたケースの3ケースを実施した。なお、漂流物は計算開始時に各河川で100個投入している。放流開始日は100日間の助走計算が終了した直後の101日目の0時0分とし、その後20日間追跡を行った。放流は、図5.4-36に示すように上げ潮時に開始した。

図5.4-37にGPS携帯電話発信機付漂流ボトルのケース、図5.4-38にペットボトルを想定したケース、図5.4-39に風の影響をなしとしたケースでの漂流経路を示す。

GPS 携帯電話発信機付漂流ボトルのケースでは、木曾川、鈴鹿川、中の川の河口域に放出した漂流物は、南からの風によって湾奥部へ向かって移動し、比較的すぐに岸に漂着しており、冬季のケースとは漂流経路が異なっている。安濃川、櫛田川、宮川の河口域に放出した漂流物は、潮汐と風の影響を受けて伊勢湾内を漂流しつつ南下しており、冬季と似た傾向を示している。

ペットボトルを想定したケースでは、木曾川、鈴鹿川、中の川、安濃川の河口域に放出した漂流物は、南からの風によって湾奥部へ向かって移動し、比較的すぐに漂着してしまう。また、櫛田川、宮川の河口域に放出した漂流物は、潮汐と風の影響を受け、伊勢湾内を漂流している。

風の影響のないケースでは、全ての放流地点の漂流物が海域の流動の影響によって伊勢湾西岸を南下するが、安濃川、櫛田川、宮川の河口域で放出した漂流物は、湾口部の強い流れによって湾口部で往復する様子が見られる。

さらに、伊勢湾全体に均一に漂流物を配置させて行った追跡実験を行った。シミュレーションの解析格子の1格子に1個とし、合計23454個の漂流物を配置した。結果を、図5.4-40にペットボトルを想定したケース（ケース1）、図5.4-41に風の影響をなしとしたケース（ケース2）での追跡結果を示す。上から、追跡開始時、1日後、5日後、10日後、20日後の漂流物の位置（左図）と漂着物の量（右図）を示している。

ペットボトルを想定したケースでは、三重県側では四日市市～津市付近で多く、松坂市付近で少なくなり、伊勢市や鳥羽市付近で多くなっている。この傾向は、航空写真から見られる傾向と一致している。また、愛知県側では知多半島で多く漂着する結果となった。一方、風の影響なしのケースでは、答志島や神島などで多く漂着する結果となった。

また、伊勢湾内における漂着量は両者のケースで異なっており、表5.4-10に示す結果となっており、より沈んでいるケース（ケース1）で漂着量が多くなっていた。

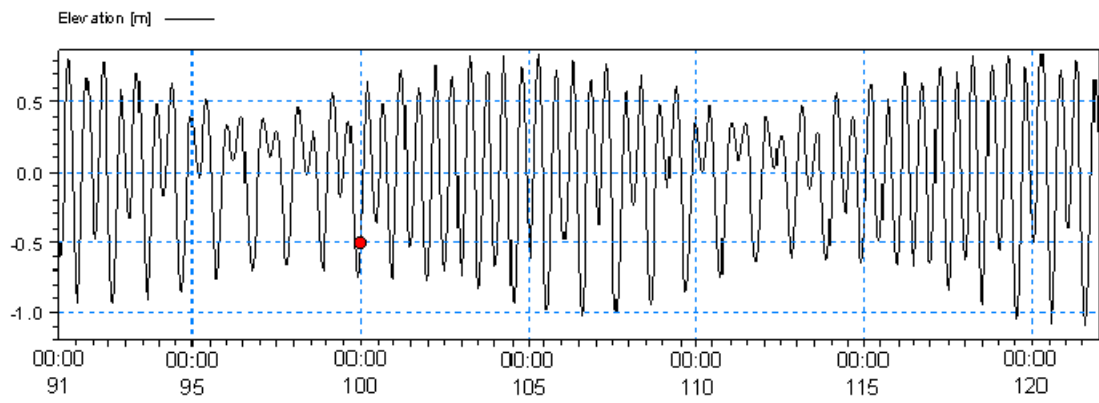


図 5.4-36 漂流物追跡時の潮位変動（●印：放流開始時刻）

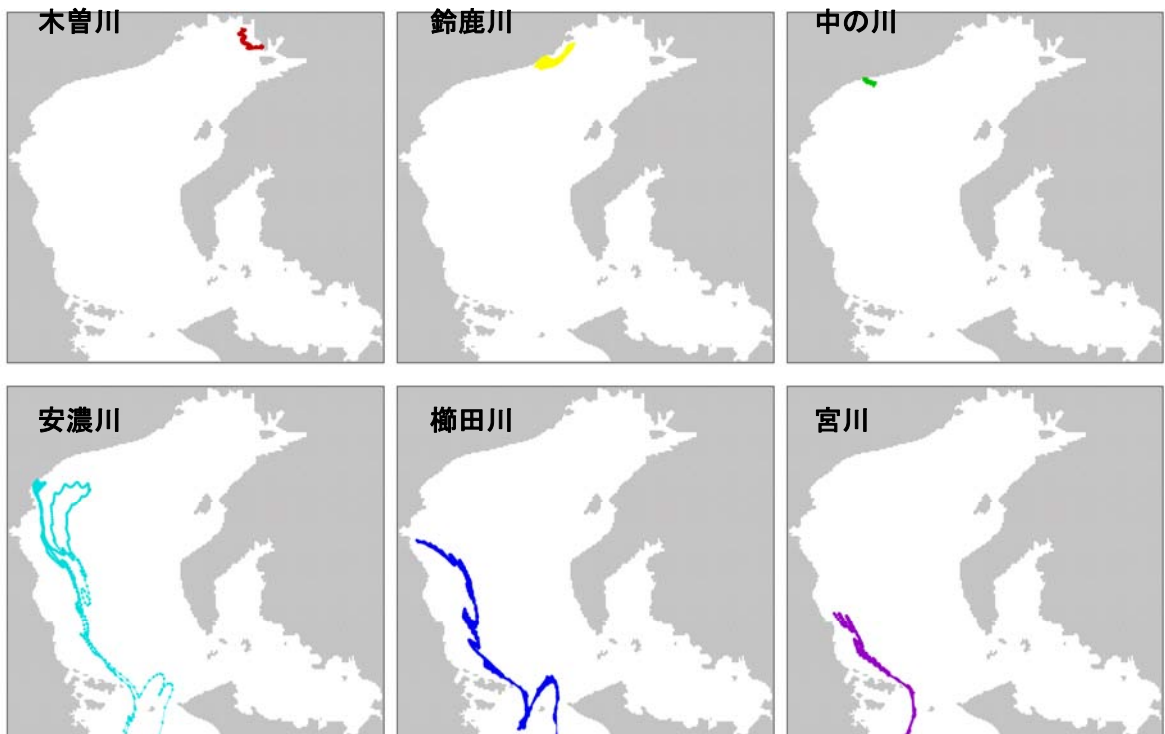


図 5.4-37 GPS 携帯電話発信機付漂流ボトルの計算結果

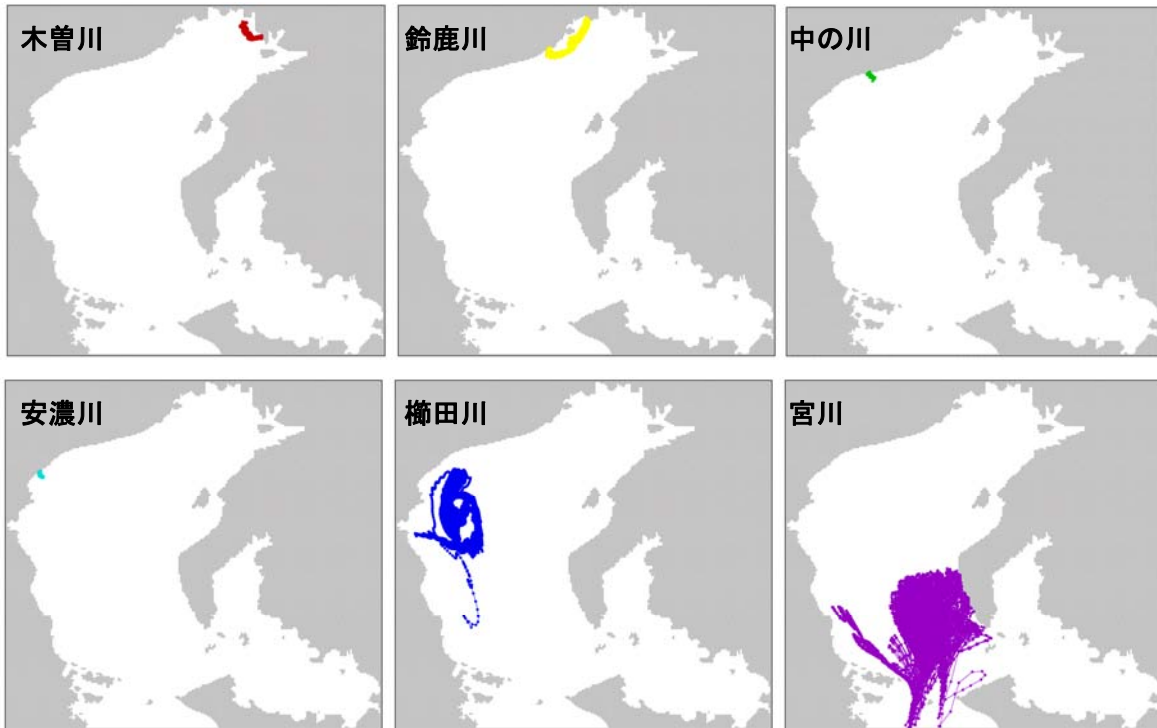


図 5.4-38 ペットボトルを対象とした漂流経路の計算結果

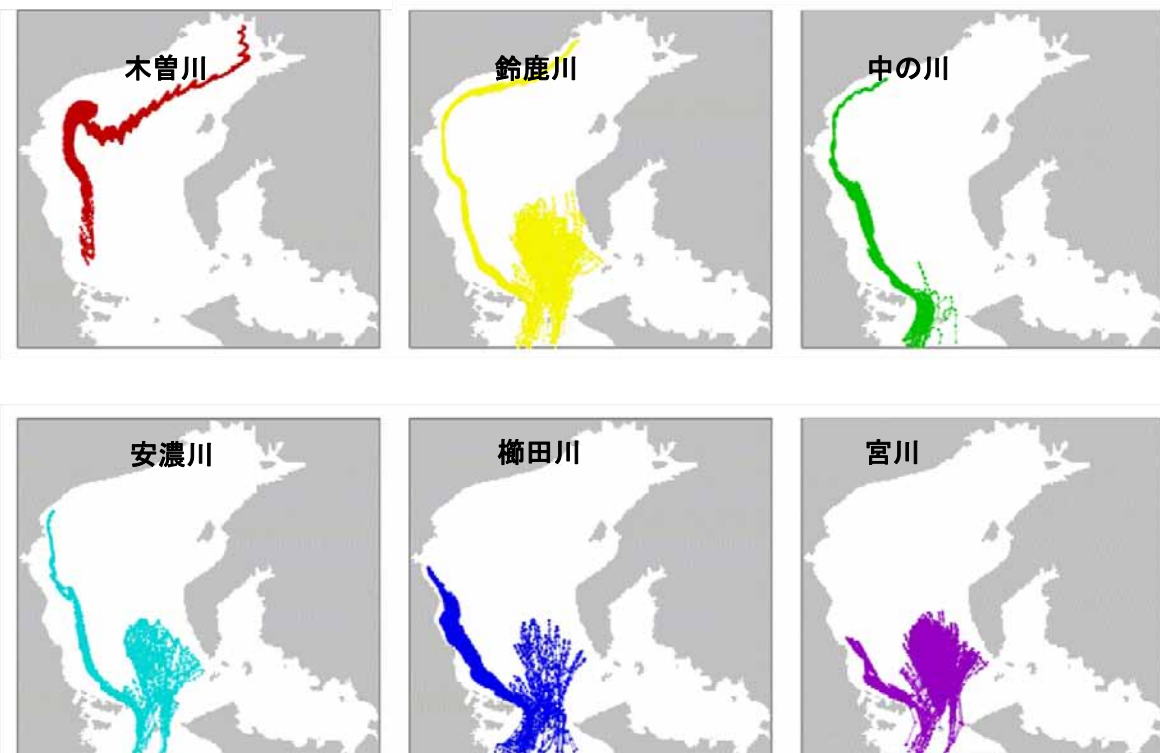


図 5.4-39 風の影響なしのケースの計算結果

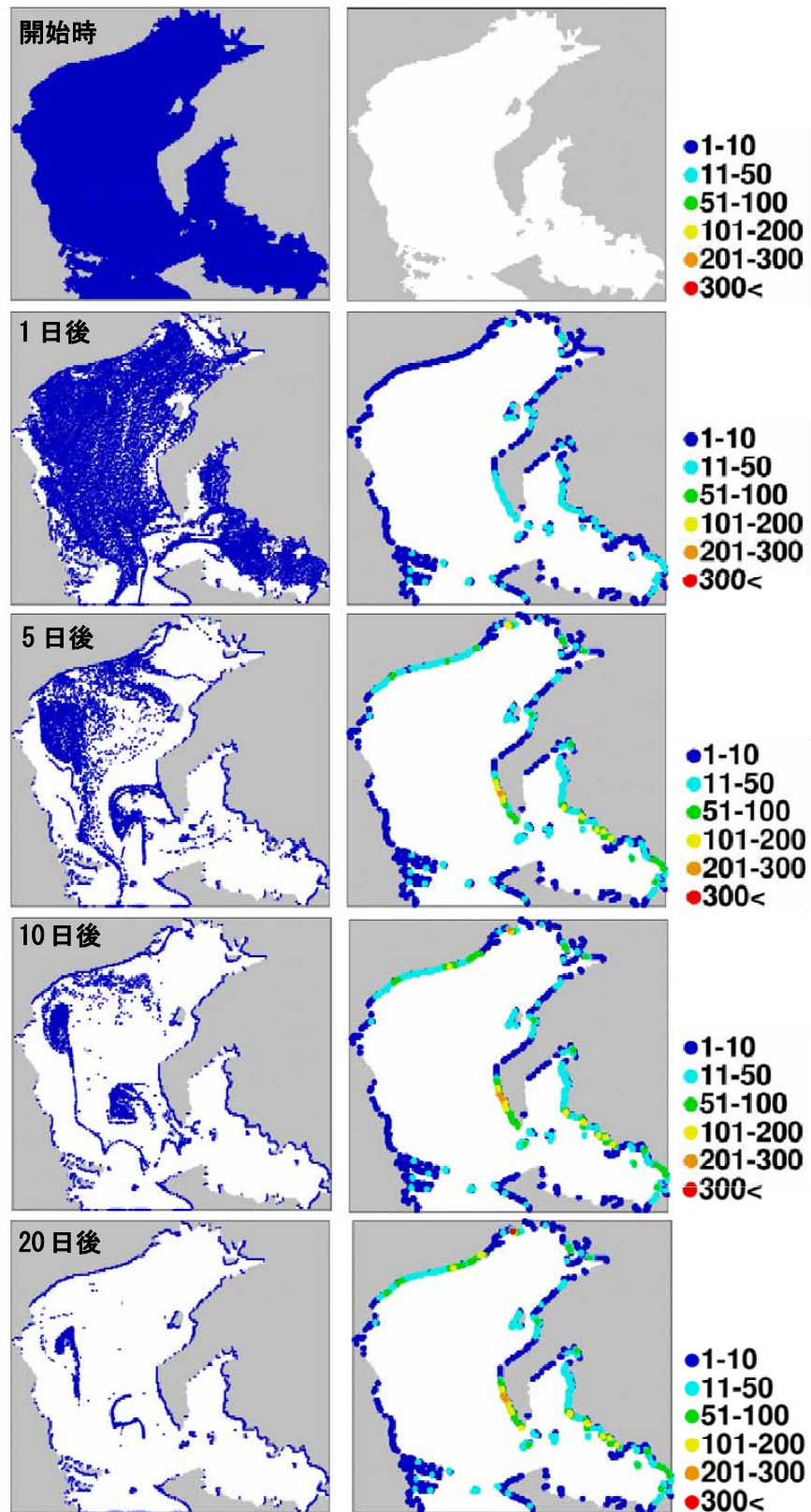


図 5.4-40 伊勢湾全域に漂流物を置いたシミュレーション結果(ケース1:ペットボトルを想定)
(左図:漂流物の分布、右図:漂着量[個])

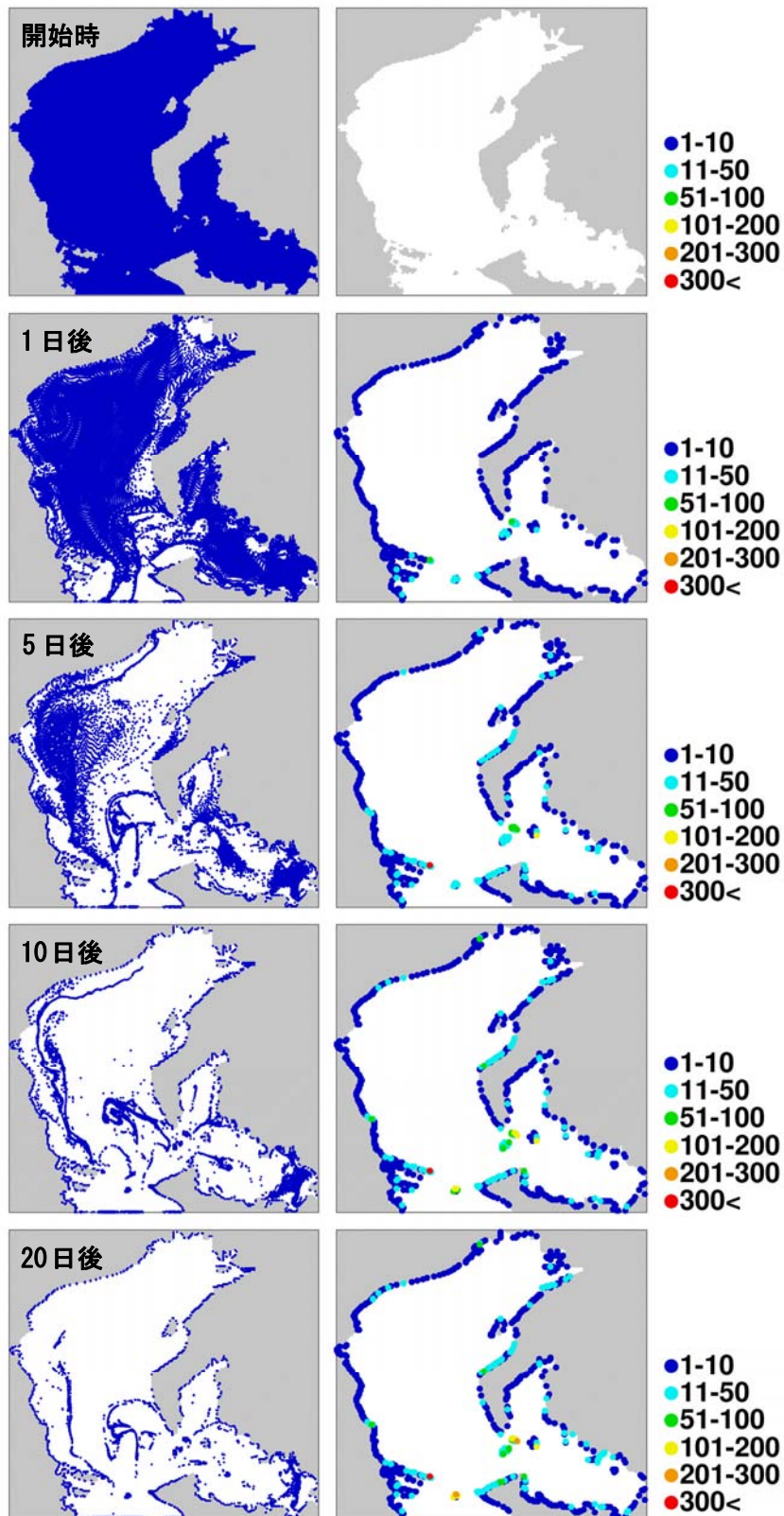


図 5.4-41 伊勢湾全域に漂流物を置いたシミュレーション結果（ケース2：風の影響なし）
 （左図：漂流物の分布、右図：漂着量[単位：個/メッシュ]）

表 5.4-10 シミュレーションによる漂流物の漂着割合

漂流物の状態	ケース 1 (ペットボトルを想定)	ケース 2 (風の影響なし)
伊勢湾内に漂着	82%	53%
伊勢湾内を漂流中	8%	16%
湾外に流出	10%	31%