

5.2 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

(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。

- 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(Δx , Δy)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 5.2-1 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。

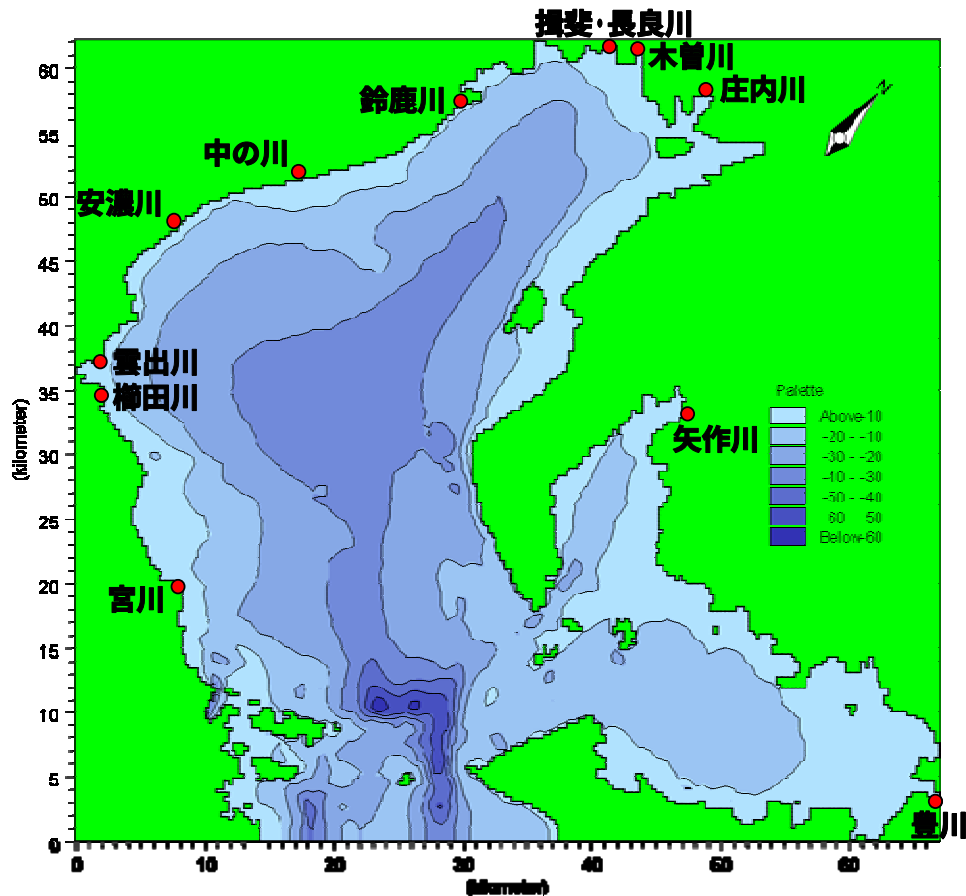


図 5.2-1 伊勢湾の海底地形

(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5.2-2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、木曽川、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 5.2-1 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。

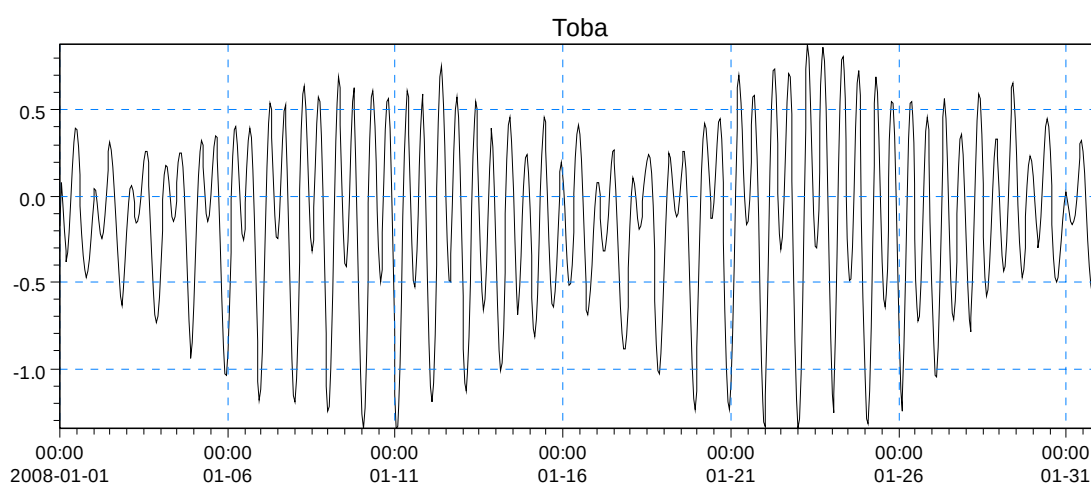


図 5.2-2 鳥羽の潮位（T.P. 基準）

表 5.2-1 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
木曽川	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)^{††}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。

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

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

^{††}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

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) ^{‡‡} 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) ^{§ §} 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、ranndom 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 5.2-2 に示すとおりである。

表 5.2-2 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%

^{‡‡} 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

^{§ §} 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

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 5.2-3 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 5.2-4 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 5.2-5 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 5.2-6 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が、予測値と観測値と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 5.2-7、図 5.2-8 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、木曽川、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 5.2-3 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 5.2-9 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。

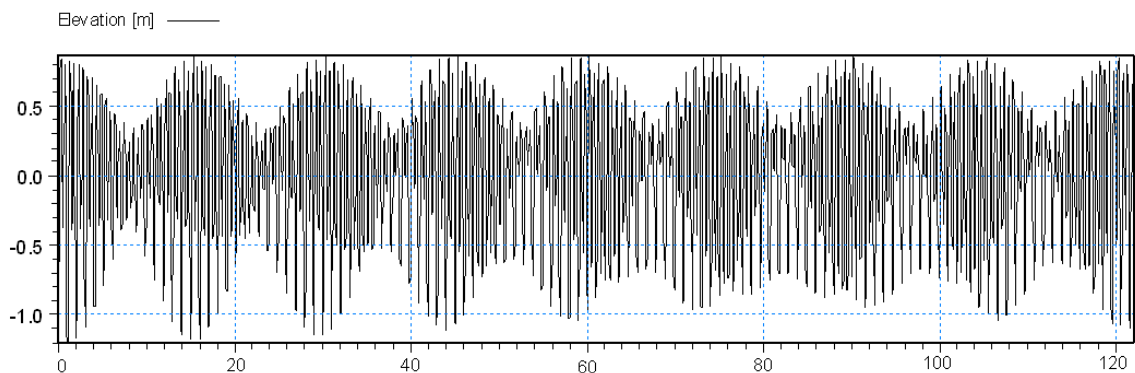


図 5.2-3 潮位変動（冬季と同様に鳥羽の潮位）

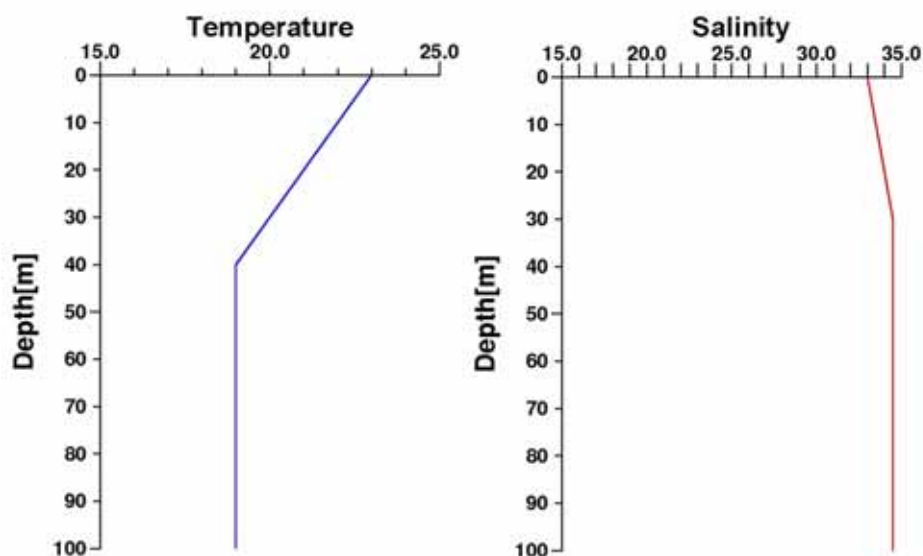


図 5.2-4 開境界の水温と塩分の鉛直プロファイル

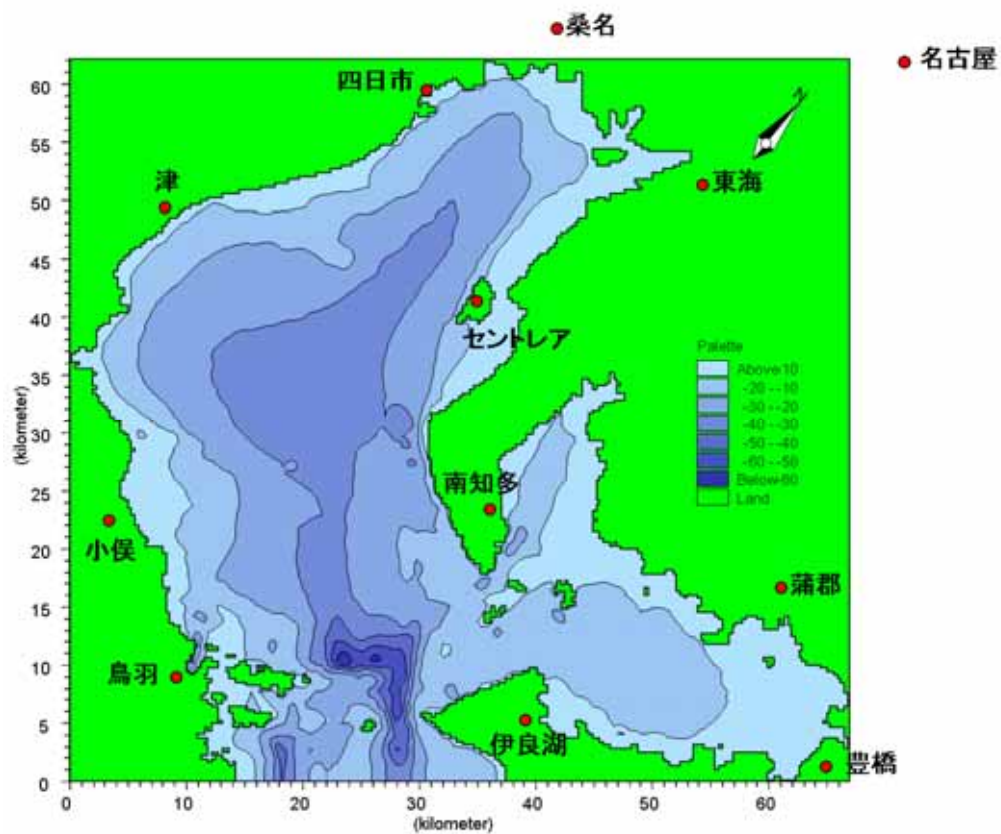


図 5.2-5 気象庁のデータ観測地点

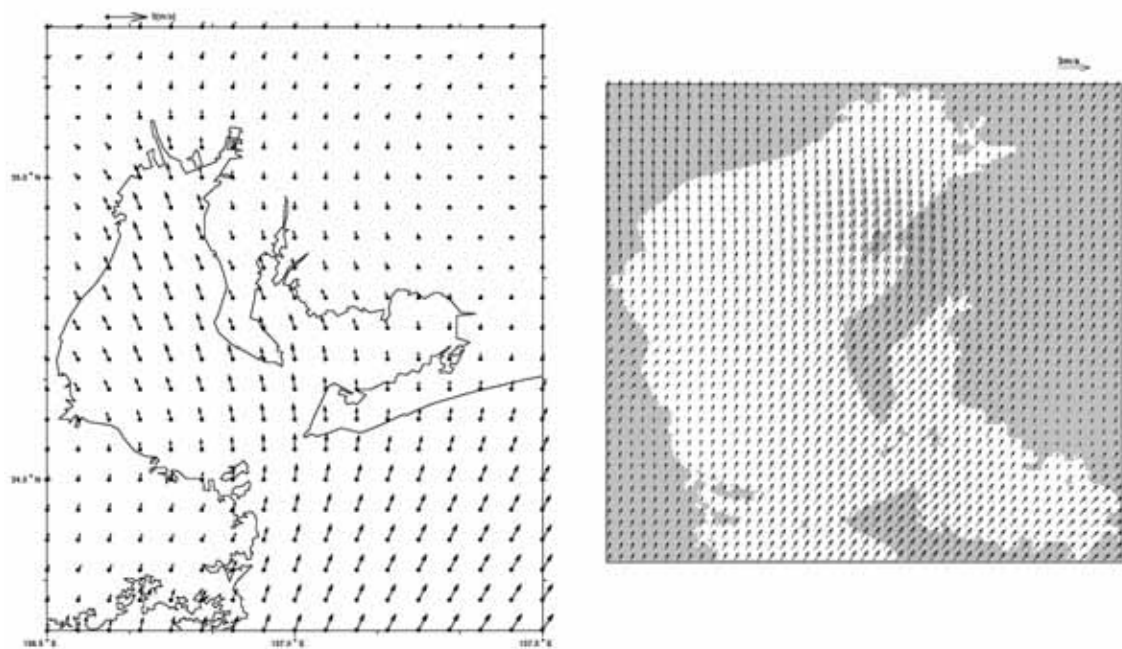


図 5.2-6 風データの比較

(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)

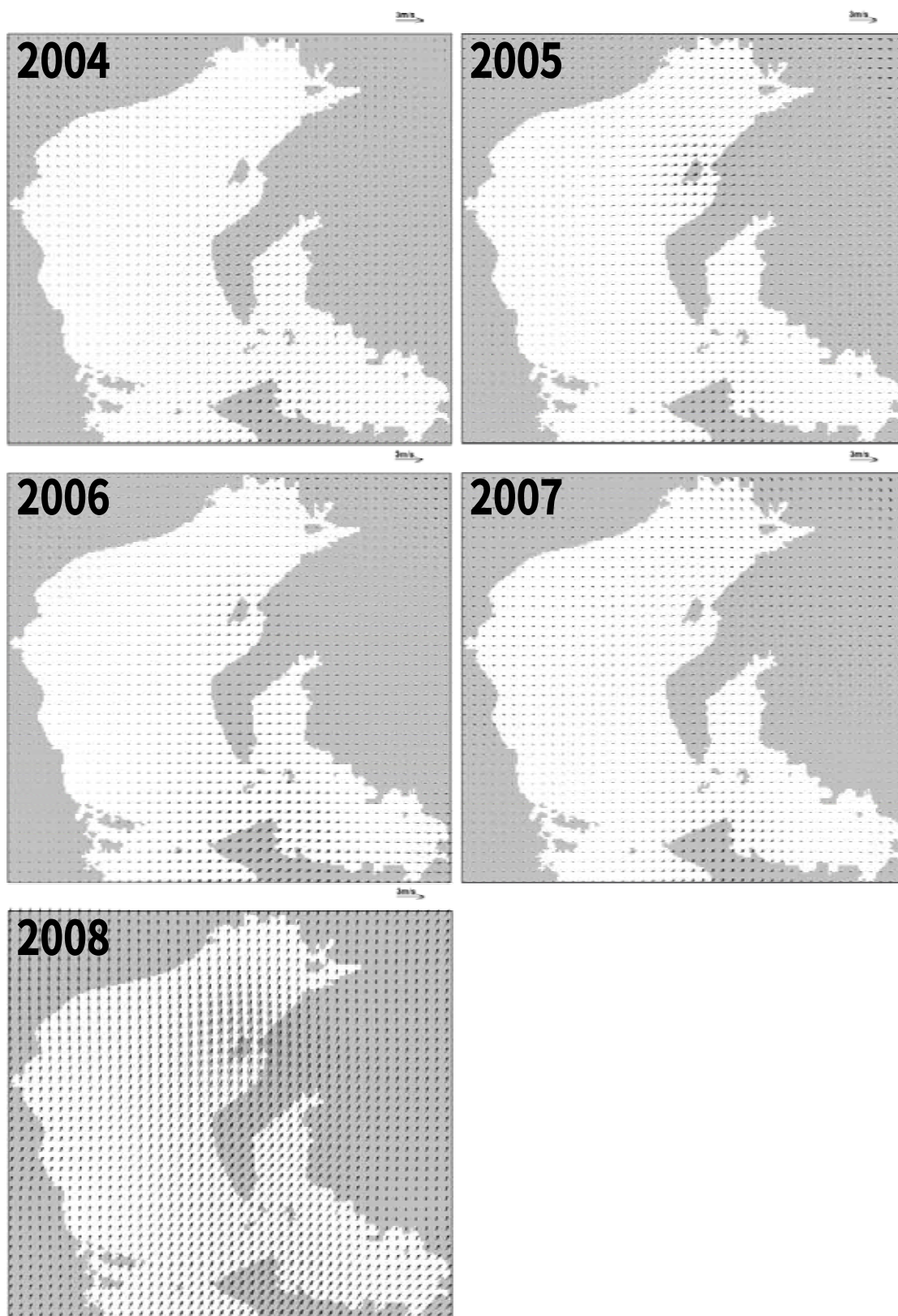


図 5.2-7 2004 年～2008 年の各年の 7 月の風の平均場



図 5.2-8 2004 年～2008 年の 7 月の風の平均場

表 5.2-3 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
木曽川	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

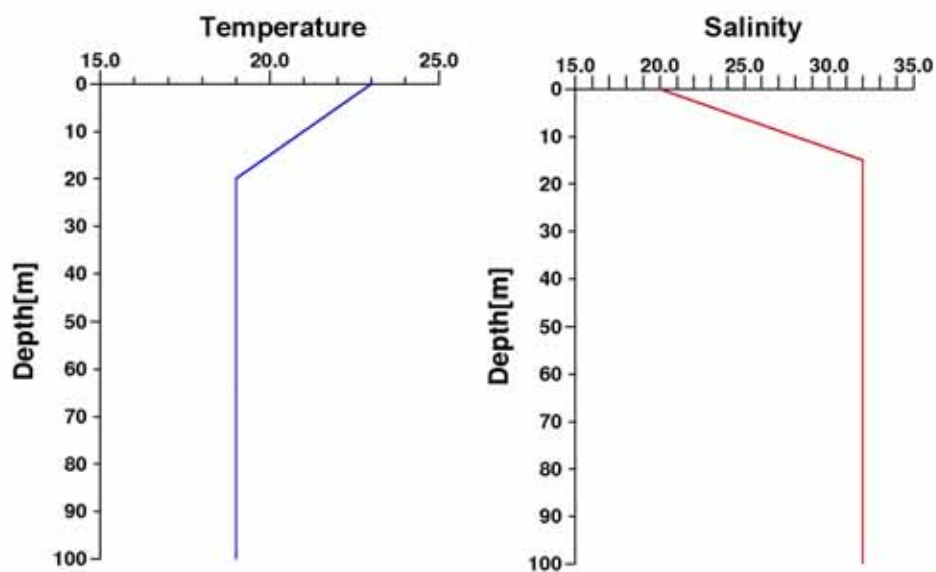


図 5.2-9 水温と塩分の初期値の鉛直プロファイル

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 5.2-4 に各ボトルの沈下率を示す。

表 5.2-4 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

(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図を図 5.2-10 と図 5.2-11 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図 5.2-12 と図 5.2-13 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 5.2-14 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。

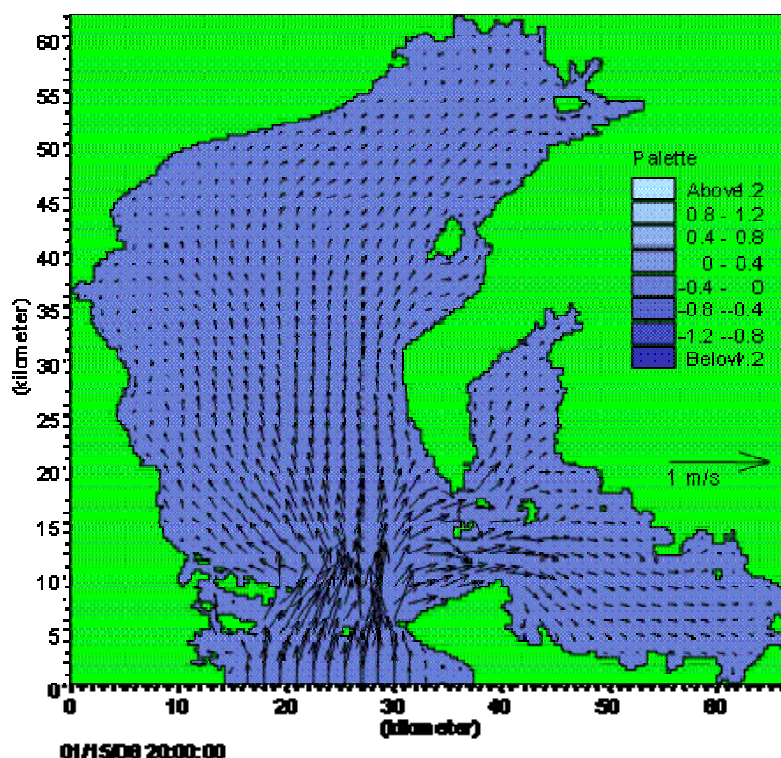


図 5.2-10 小潮期間の流入最強時の流れと推移の水平分布図

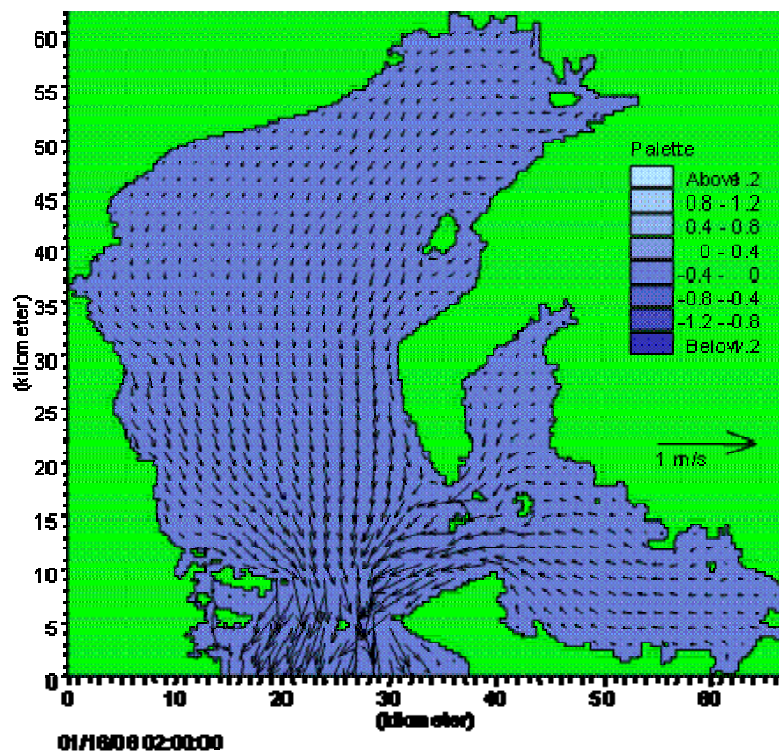


図 5.2-11 小潮期間の流出最強時の流れと水位の水平分布図

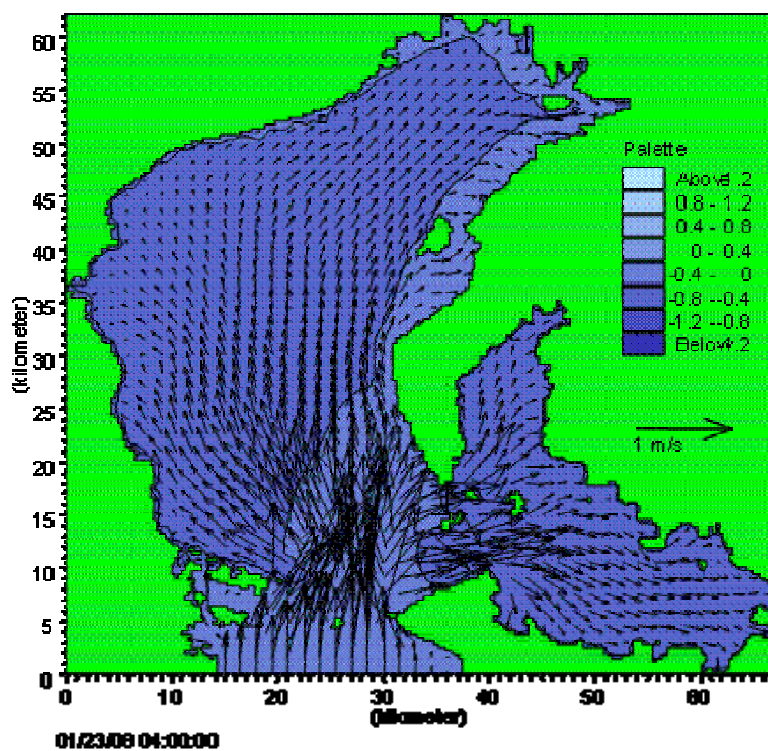


図 5.2-12 大潮期間の流入最強時の流れの水平分布図

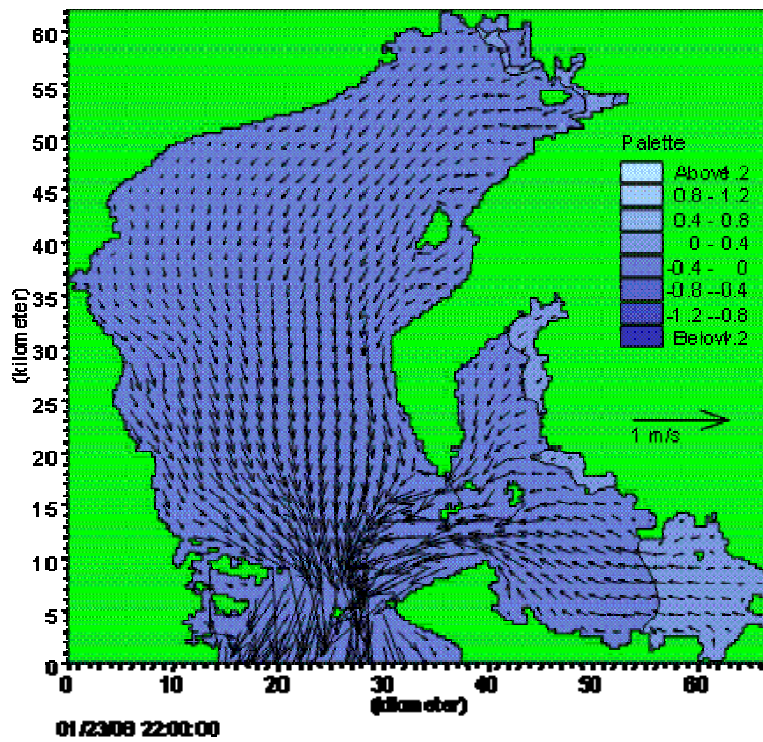


図 5.2-13 大潮期間の流出最強時の流れの水平分布図

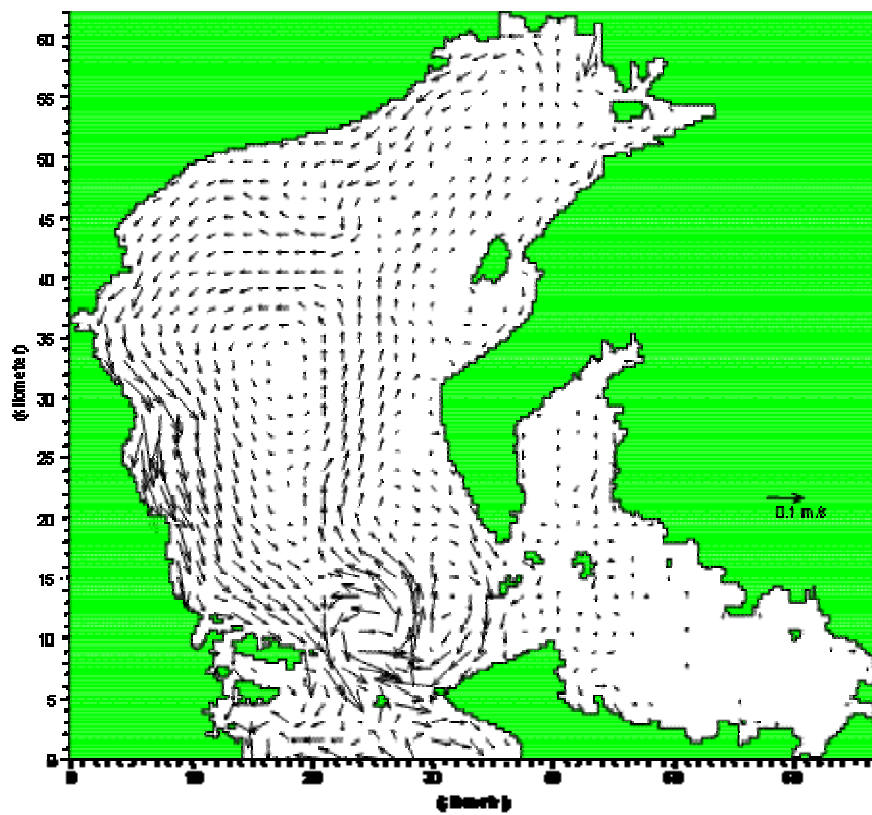


図 5.2-14 1 ヶ月平均した流速の水平分布図

(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 5.2-5 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 5.2-15 に示す。また、計算に使用した GPV の地上の風を図 5.2-16 に示す。

アルゴスボトルの計算結果を図 5.2-17 に、携帯ボトルの計算結果を図 5.2-18 に、生分解性ボトルの計算結果を図 5.2-19 に示す。

表 5.2-5 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	木曽川	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

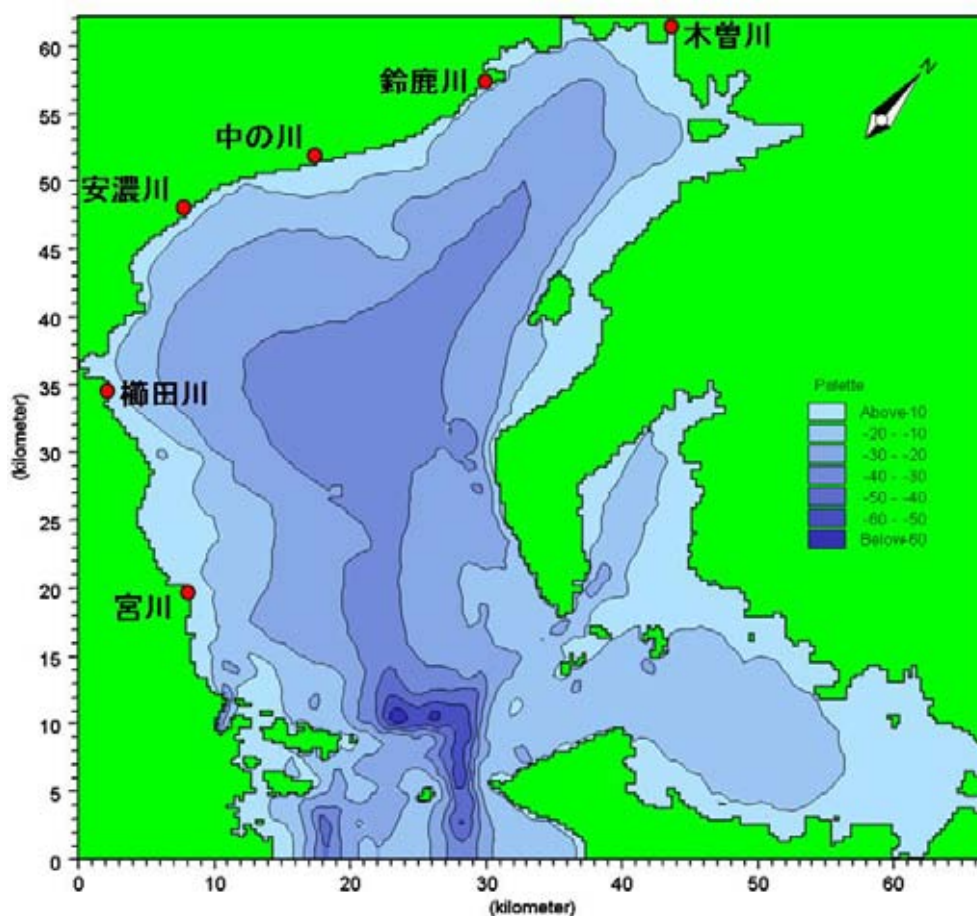


図 5.2-15 放流地点の位置図

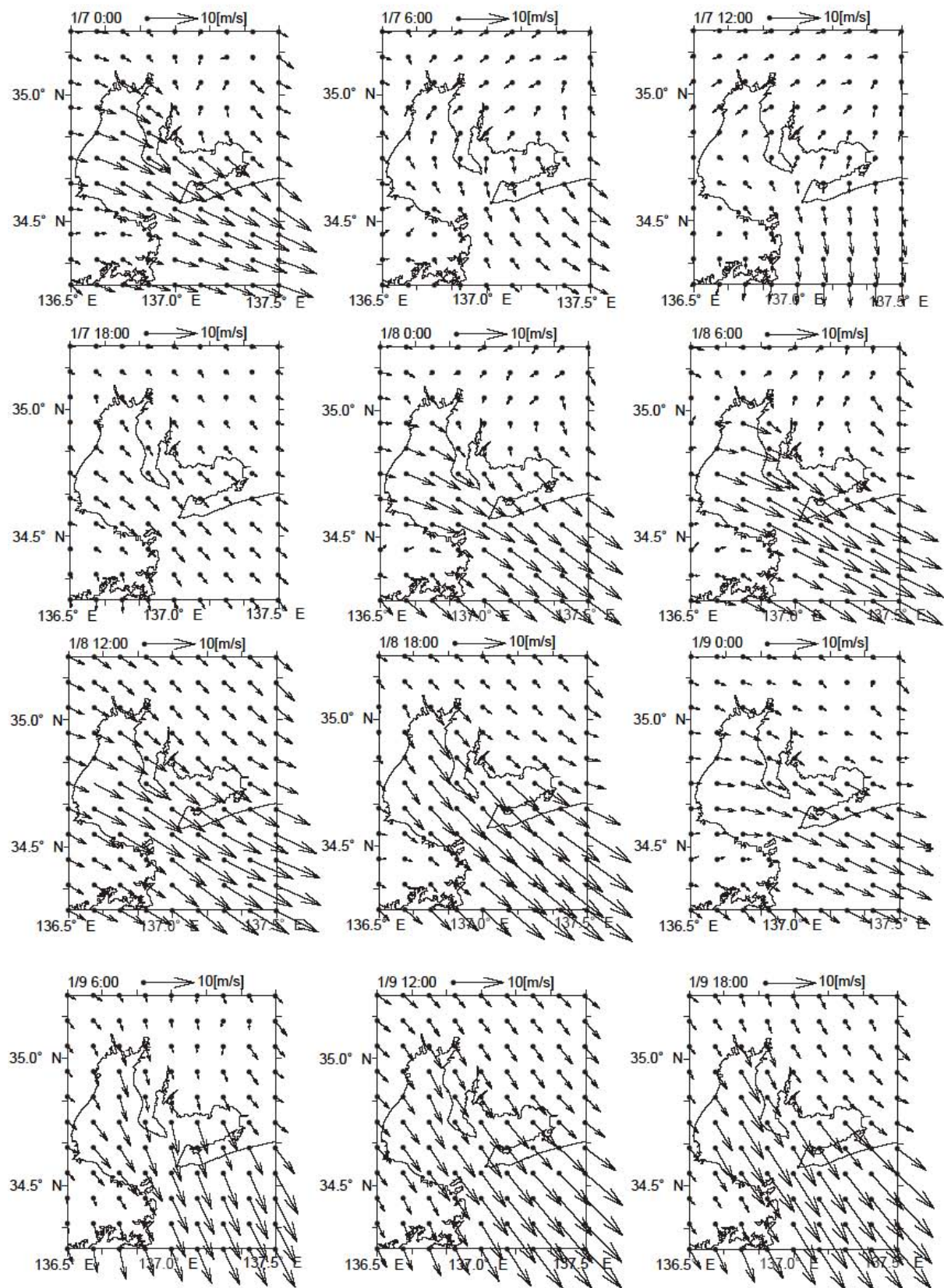


図 5.2-16(1) 伊勢湾の風の分布の時間変化

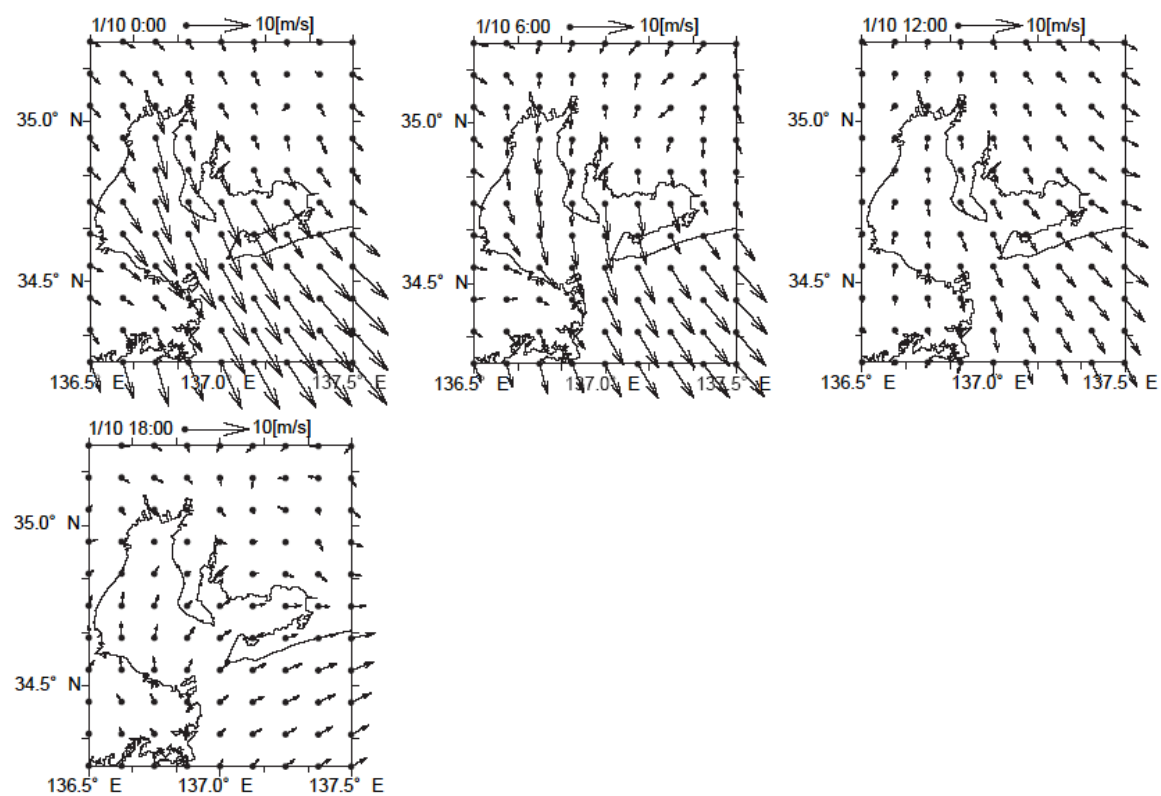


図 5.2-16 (2) 伊勢湾の風の分布の時間変化

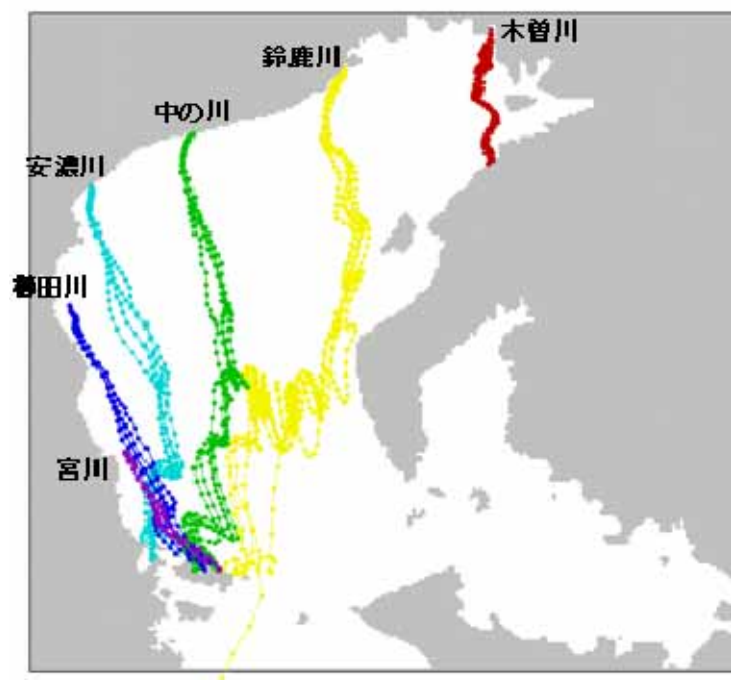


図 5.2-17 アルゴスボトルを対象とした漂流経路の計算結果

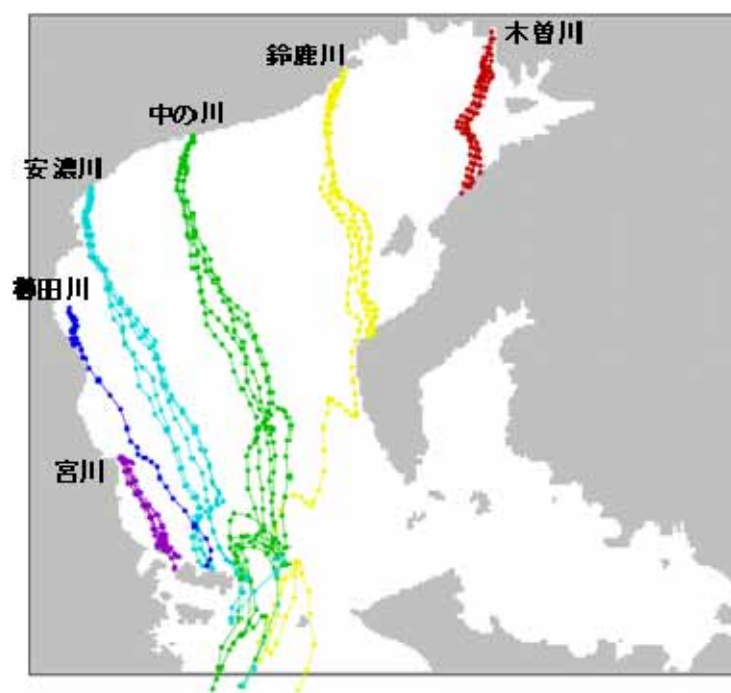


図 5.2-18 携帯ボトルを対象とした漂流経路の計算結果

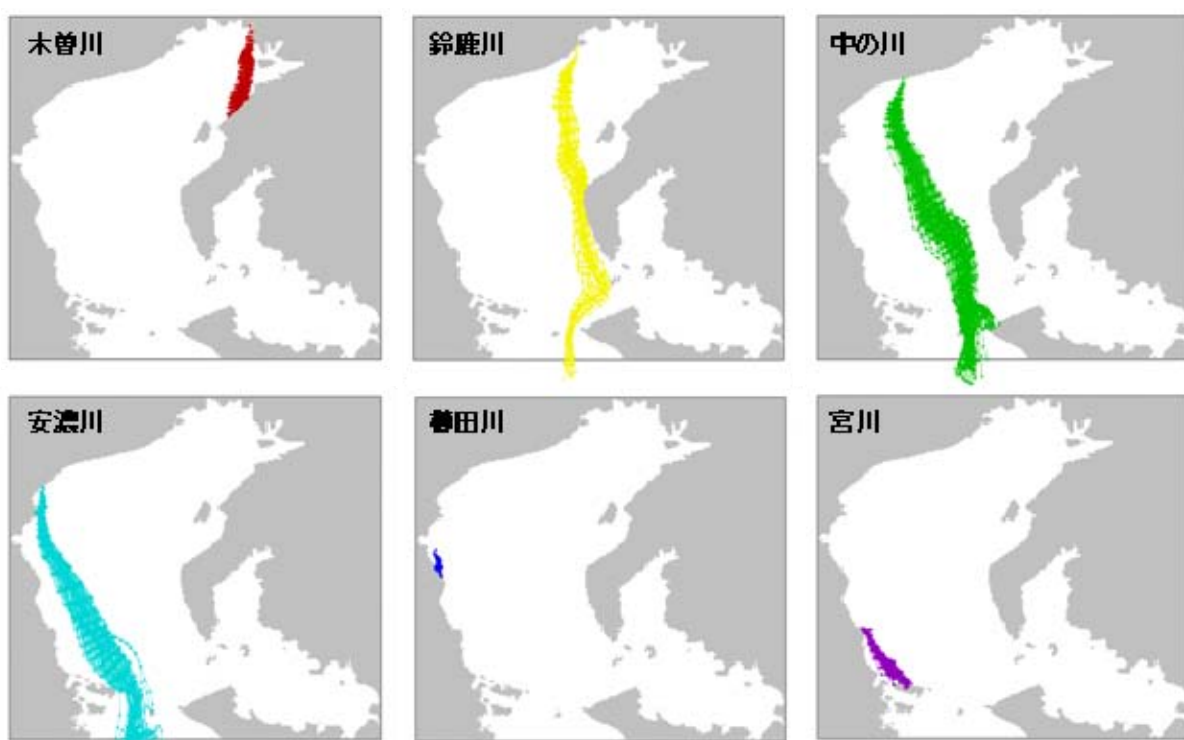


図 5.2-19 生分解性ボトルを対象とした漂流経路の計算結果

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 5.2-20 と図 5.2-21 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最強時の表層の流速ベクトルの水平分布図を図 5.2-22 と図 5.2-23 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 5.2-24 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 5.2-25 に日本全国沿岸海洋誌***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。

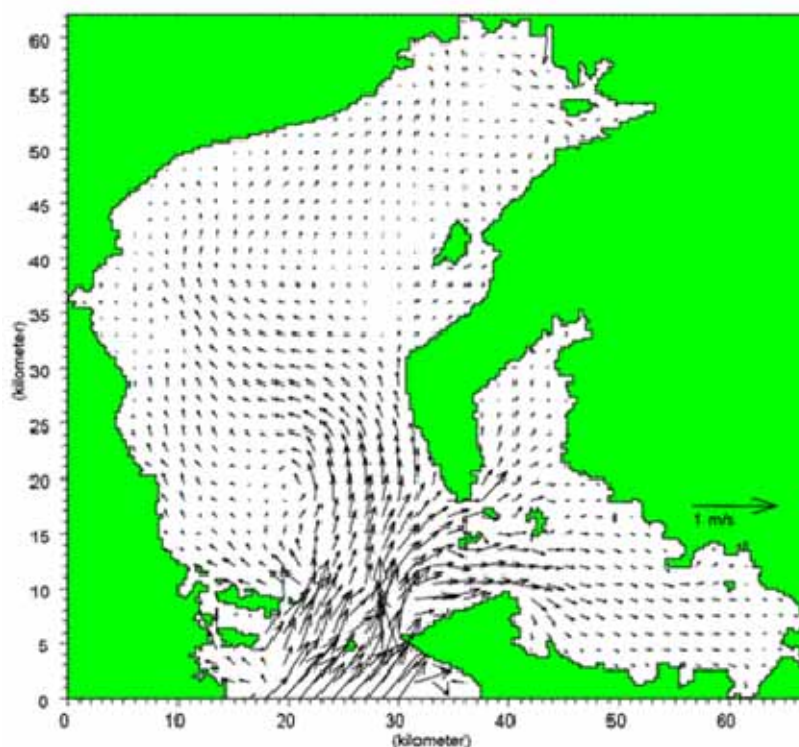


図 5.2-20 小潮期間の流入最強時の流れの水平分布図

*** 日本全国沿岸海洋誌(1985)

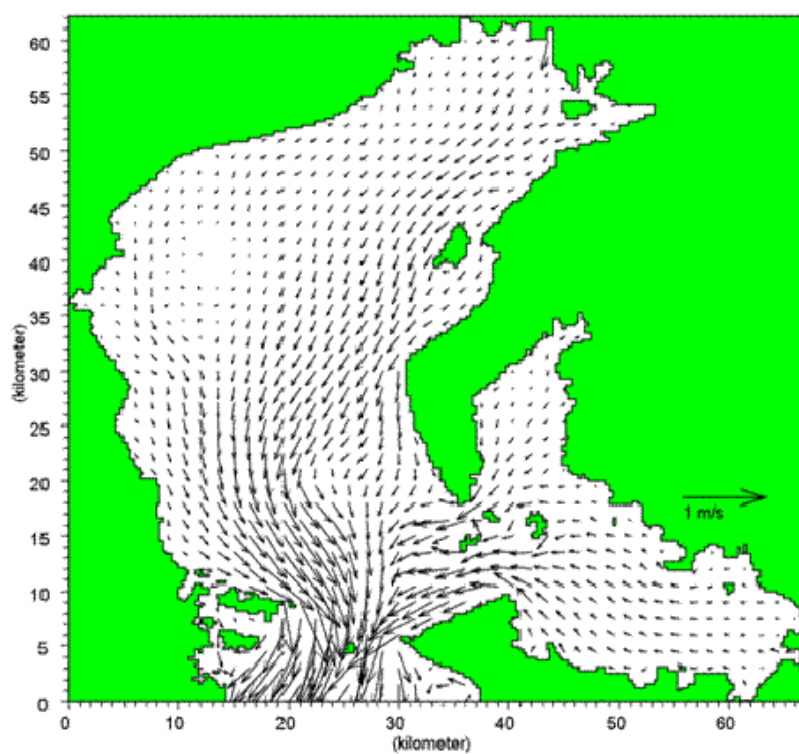


図 5.2-21 小潮期間の流出最強時の流れの水平分布図

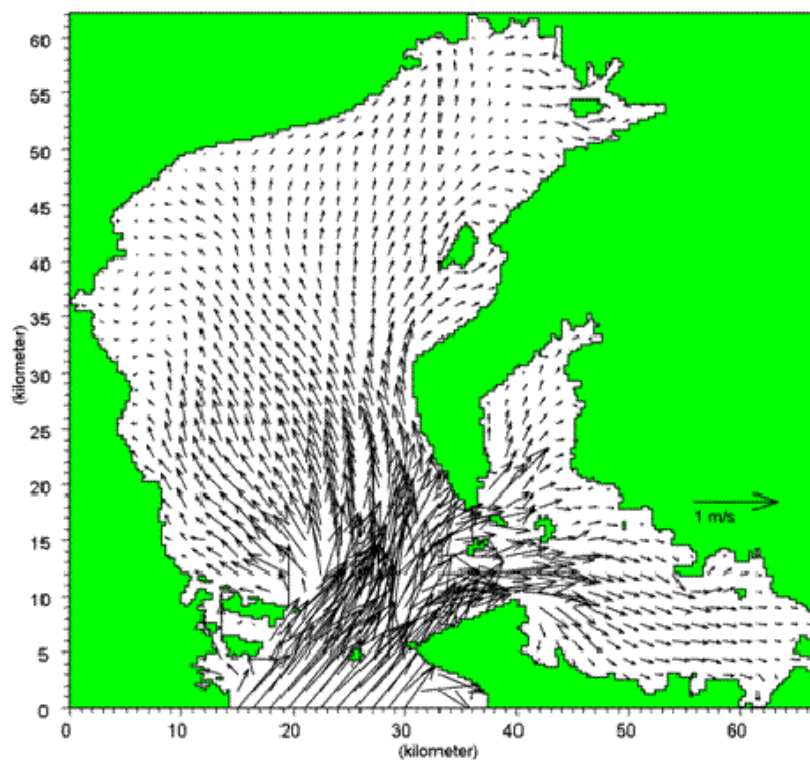


図 5.2-22 大潮期間の流入最強時の流れの水平分布図

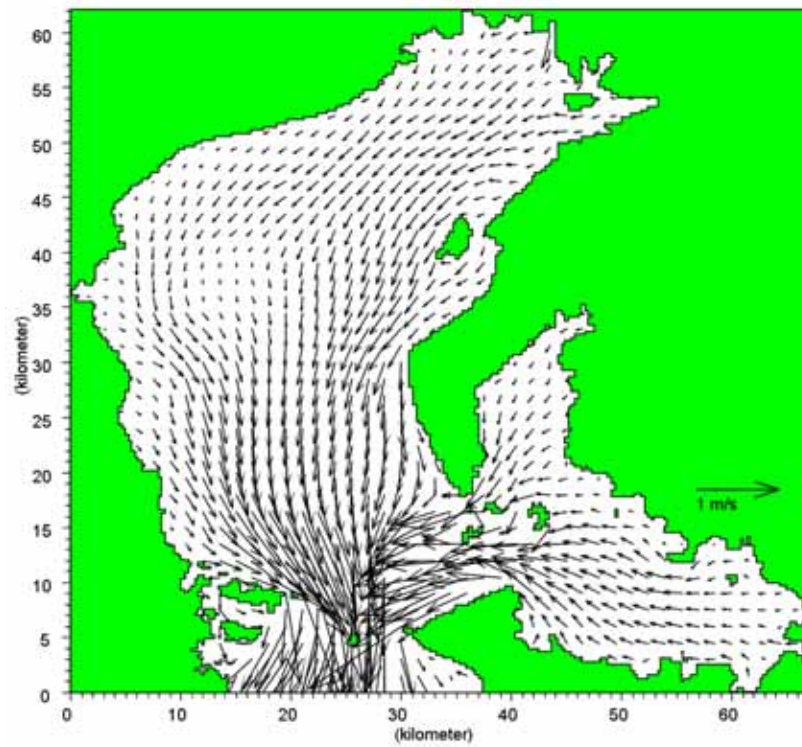


図 5.2-23 大潮期間の流出最強時の流れの水平分布図

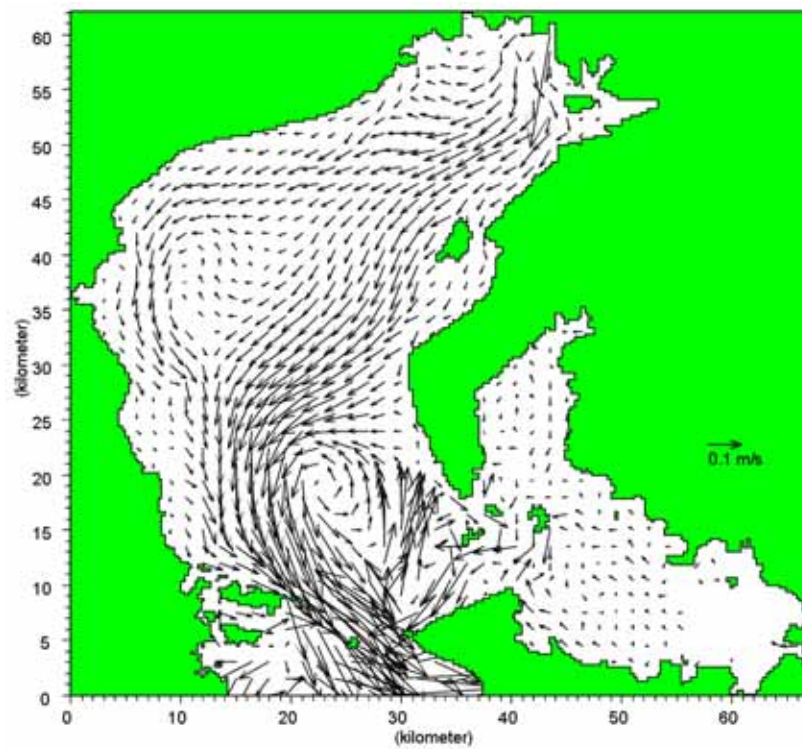
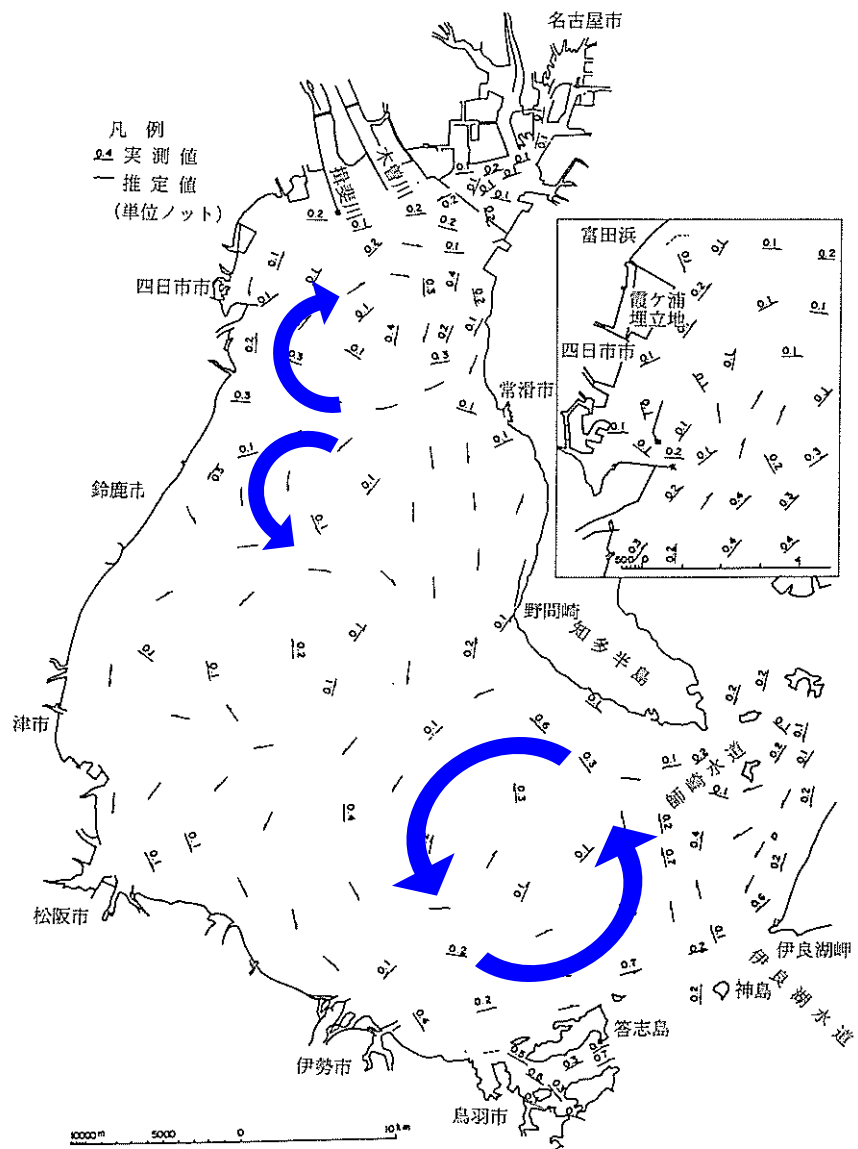


図 5.2-24 20 日間平均した流速の水平分布図



第18図 伊勢湾の夏季の恒流，単位 $kt^{19)}$

図 5.2-25 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 5.2-26 に示すように上げ潮時に開始した。

図 5.2-27 に GPS 携帯電話発信機付漂流ボトルのケース、図 5.2-28 にペットボトルを想定したケース、図 5.2-29 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、木曽川、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、木曽川、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 5.2-30 にペットボトルを想定したケース（ケース1）、図 5.2-31 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 5.2-6 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。

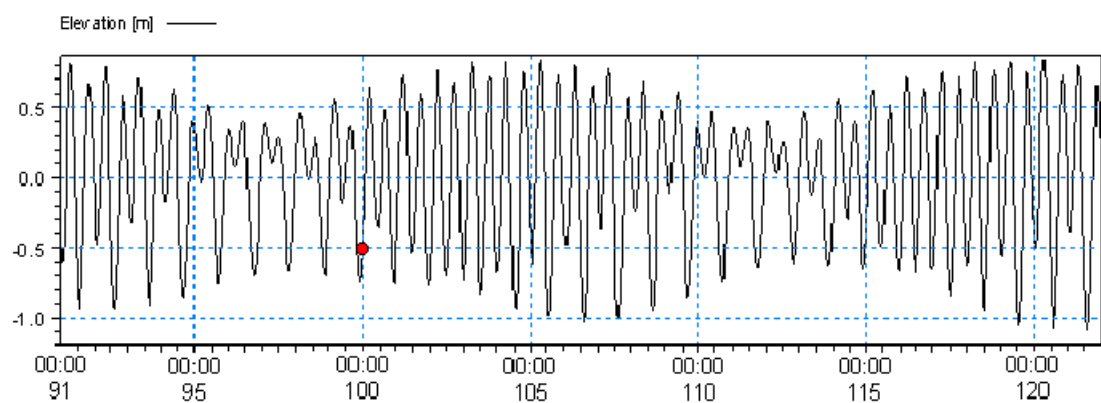


図 5.2-26 漂流物追跡時の潮位変動（●印：放流開始時刻）

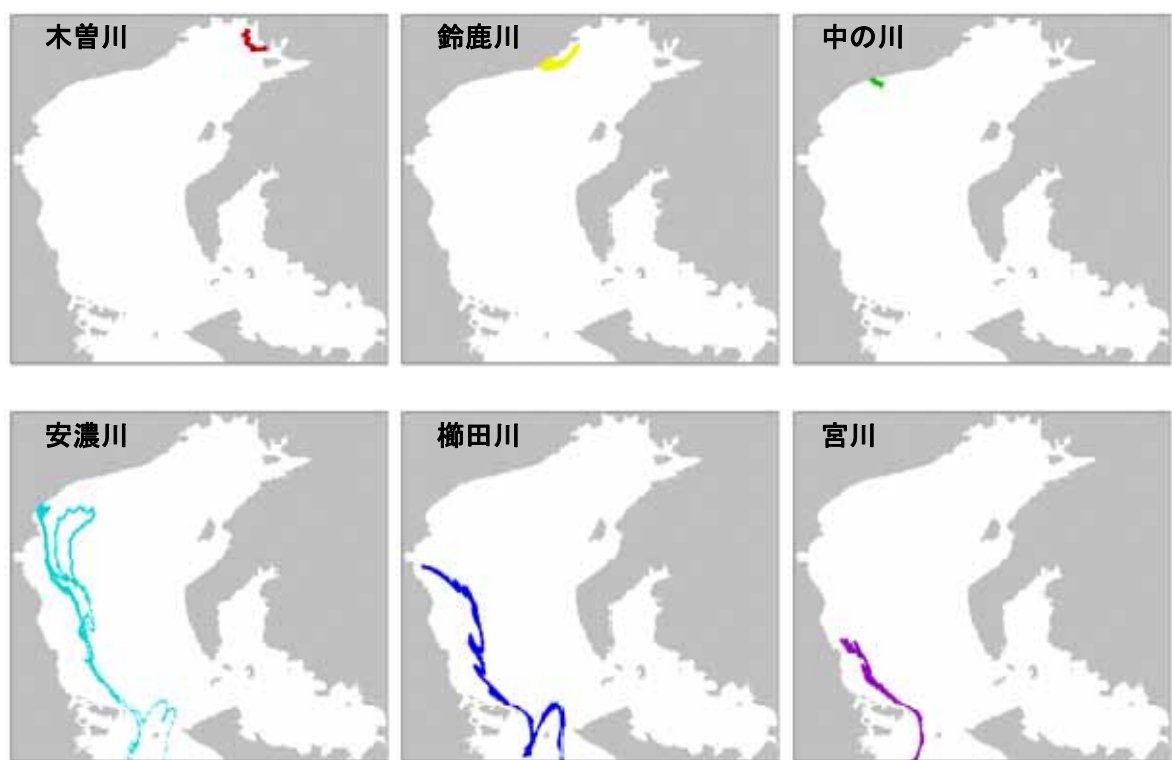


図 5.2-27 GPS 携帯電話発信機付漂流ボトルの計算結果

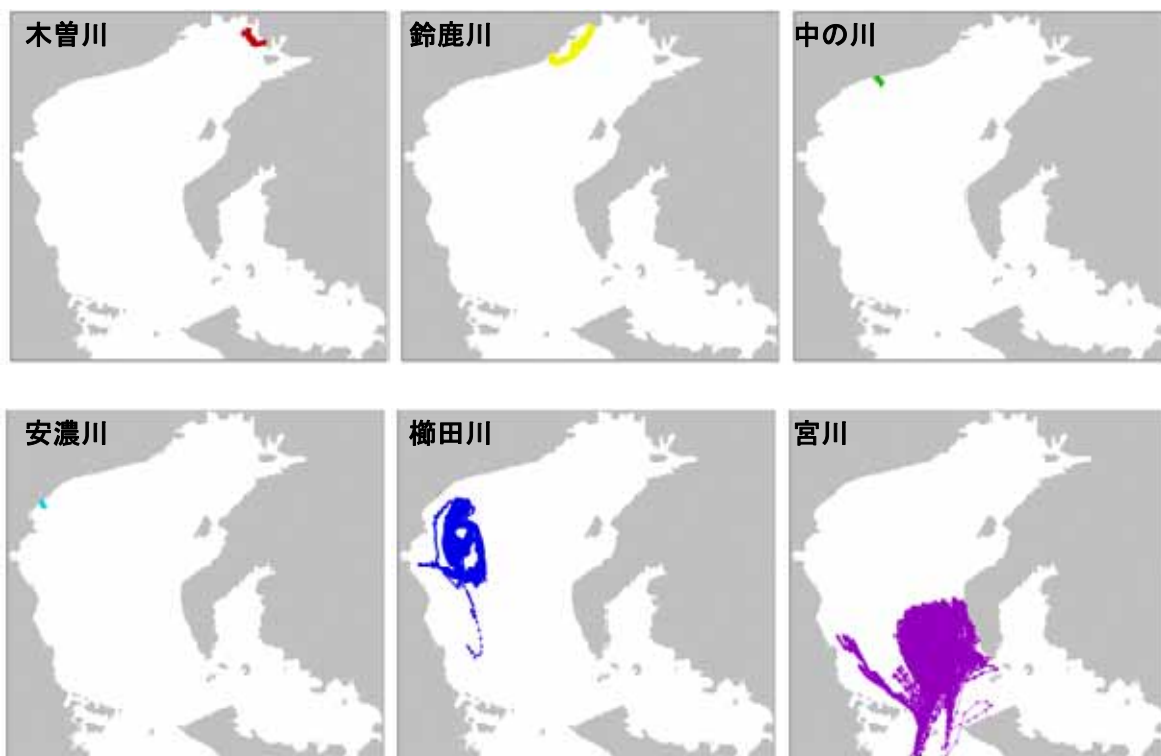


図 5.2-28 ペットボトルを対象とした漂流経路の計算結果

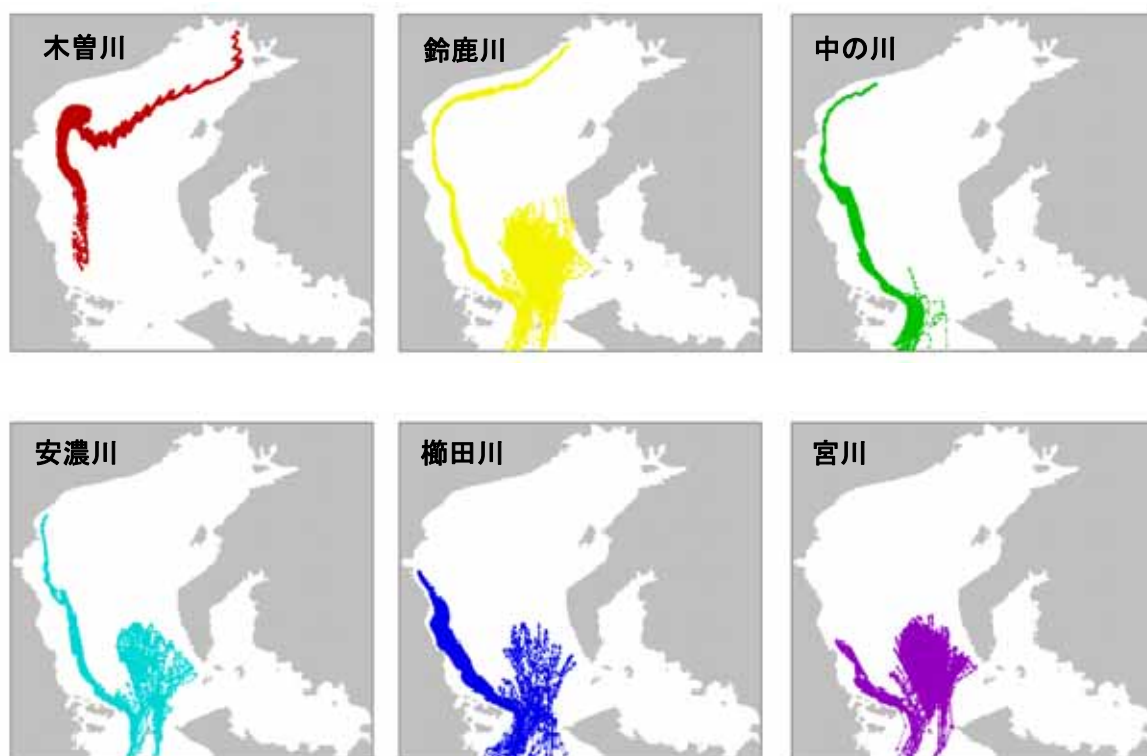


図 5.2-29 風の影響なしのケースの計算結果

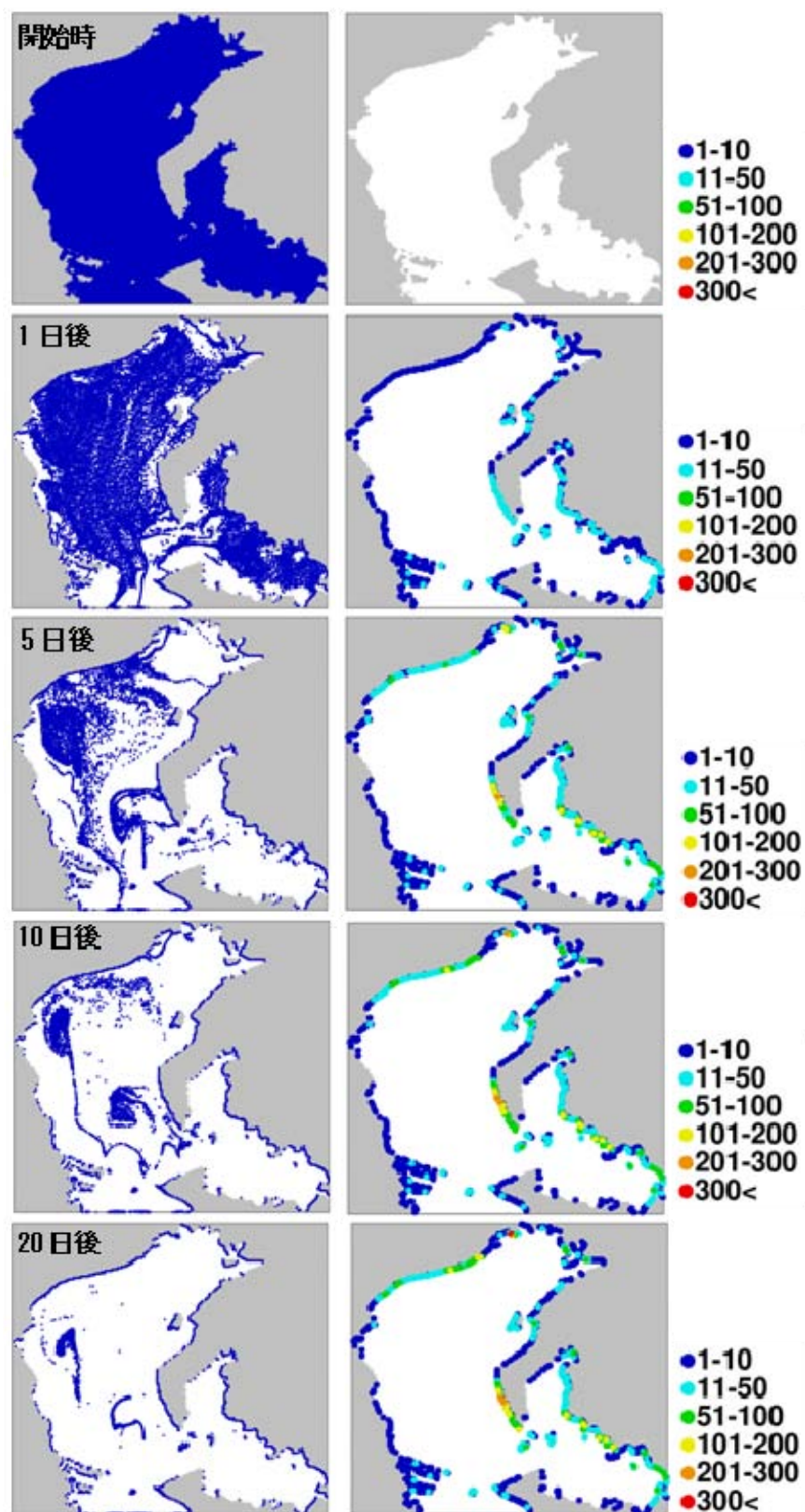


図 5.2-30 伊勢湾全域に漂流物を置いたシミュレーション結果(ケース1:ペットボトルを想定)
(左図:漂流物の分布、右図:漂着量[個])

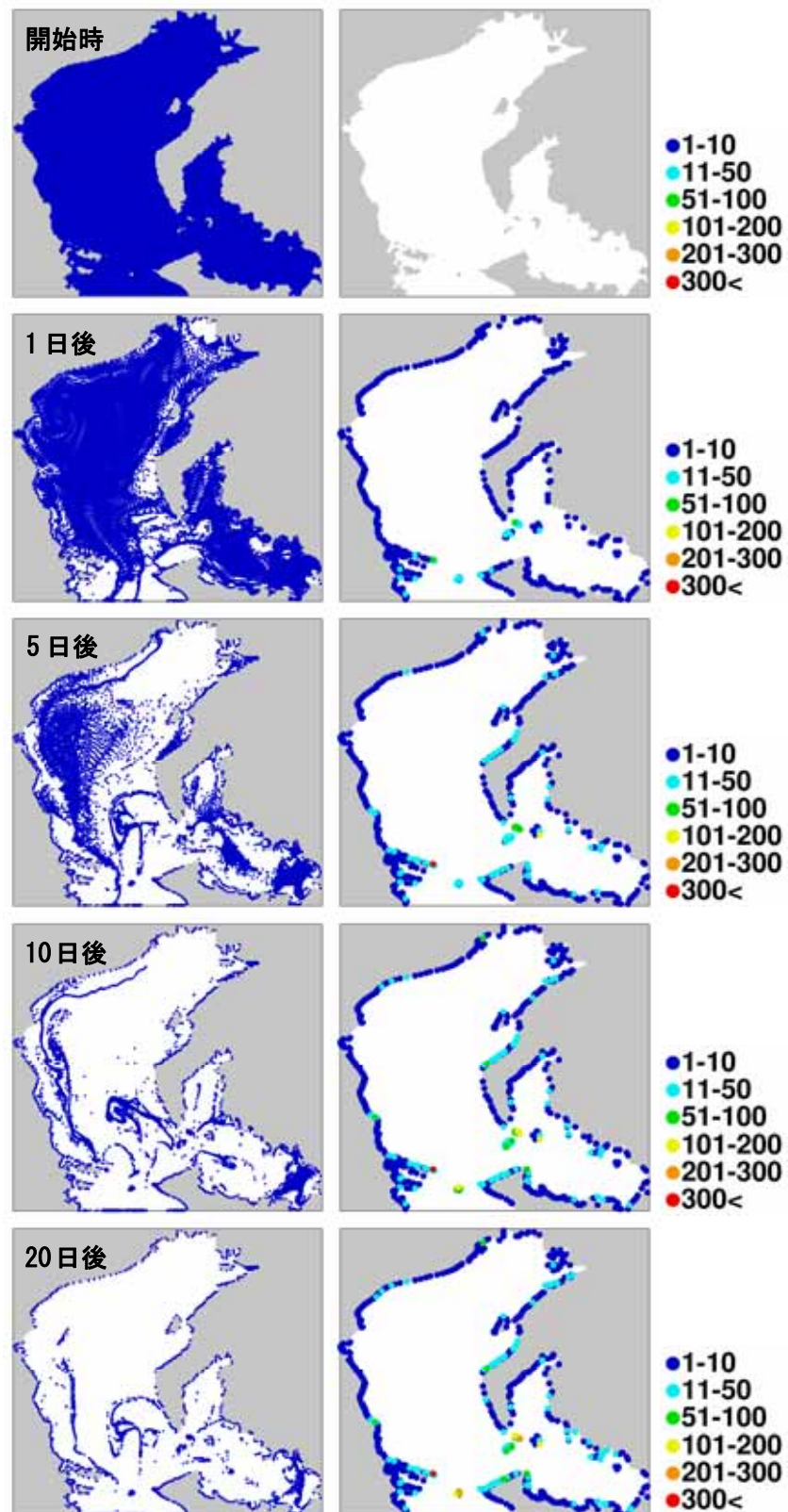


図 5.2-31 伊勢湾全域に漂流物を置いたシミュレーション結果（ケース 2：風の影響なし）
（左図：漂流物の分布、右図：漂着量[単位：個／メッシュ]）

表 5.2-6 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%