

東京湾における船舶航行監視・解析システムと
海況監視システムの開発

2007年3月
東京海洋大学

はしがき

東京海洋大学は、研究プロジェクト「東京湾における船舶航行監視・解析システムと海況監視システムの開発」を、2005年度・2006年度日本財団助成事業として実施した。本報告書は、2006年度の研究成果をまとめたものである。

内容は、第1章「東京湾における船舶航行監視・解析システムの開発」と第2章「リアルタイム海況監視システムの構築」からなっている。

第1章の執筆は海洋工学部が担当し、2局のリモートレーダと1局のリモートAIS（船舶自動識別装置）により得られる東京湾の船舶航行状況を公開するWebサイトの開発について述べた。また、10日間の長期レーダ観測を行い、得られたレーダ画像データに自動トラッキングシステムを適用して船舶航跡を取得し、それに基づいて東京湾における船舶交通輻輳海域や衝突危険海域等について調査した。

第2章の執筆は海洋科学部が担当し、準リアルタイムで東京湾および相模湾における5地点の海況（水温・流速）を連続的にリモート監視できる耐圧型ブイシステムの構築と観測データを公開するWebサイトの開発について述べた。また、高速・高解像度の海況予測モデルを開発し、東京湾とその周辺海域における流速や水温の分布等について、計算結果に基づき解析を行った。

この報告書が、東京湾における船舶航行の安全性向上と東京湾における海況の現状把握と予測に大きく寄与出来ることを望むものである。

2007年3月31日

東京海洋大学

海洋工学部 萩原秀樹

海洋科学部 北出裕二郎

目次

第1章	東京湾における船舶航行監視・解析システムの開発	
1.1	船舶航行監視システムの構築	1
1.1.1	Web サーバファイルの構成	2
1.1.2	レーダ観測海域と東京湾海上交通の概要	4
1.1.3	AIS 搭載船舶の表示方法	7
1.1.4	レーダ画像と AIS 情報の重畳表示	10
1.1.5	船舶位置の補正	13
1.1.6	航跡の表示	15
1.1.7	Java アプレットを構成する各クラスの役割	16
1.1.8	船舶航行監視システムに関するまとめ	17
1.2	東京湾における船舶交通特性の調査	18
1.2.1	長期観測データを用いた船舶航跡のトラッキング	18
1.2.2	トラッキングシステムによる長期観測データの処理	19
1.2.3	L 換算密度による東京湾の船舶交通輻輳度の評価	29
1.2.4	バンパーモデルによる東京湾の衝突危険海域の評価	34
1.2.5	TCPA・DCPA による東京湾の衝突危険海域の評価	41
1.2.6	SJ 値による東京湾の衝突危険海域の評価	47
1.3	船舶航行監視・解析システムに関するまとめ	56
第2章	リアルタイム海況監視システムの構築	
2.1	水質監視装置	57
2.1.1	水質・海況監視装置の設置と実施状況	60
2.1.2	データの解析結果とシステムの有効性 ～富山町沖の水質・流速記録から～	64
2.1.3	観測データ公開	77
2.1.4	研究成果および観測データ公開	78
2.2	海況予測モデルの開発	83
2.2.1	モデルの高速化	83
2.2.2	モデルの再現性	87
2.2.3	風による沿岸捕捉波の発生と東京湾の海水交換の計算結果例	93
2.3	海況監視システムに関するまとめ	103

第1章 東京湾における船舶航行監視・解析システムの開発

東京湾は世界有数の船舶交通の輻輳水域であり、衝突や座礁等の大きな海難が発生すれば、経済活動や自然環境に与えるダメージは計り知れない。輻輳水域での海難を防止し、海上交通の効率向上を図るには、水域の交通特性を把握し、適切な海上交通管理を行うことが重要である。また港湾や架橋、航路等の新設・変更を行う場合、あらかじめ海上交通への影響を検討しておくことが不可欠である。

海上交通特性の調査には、その水域における船舶交通観測と観測結果の解析が欠かせない。従来の船舶交通観測は、観測のためのレーダを装備した船舶や自動車および熟練した観測員など、多大の資材と労力を要するものであったため、限られた水域についての限られた期間の情報しか入手出来なかった。

そこで東京海洋大学・海洋工学部では、横須賀の防衛大学校屋上と川崎の東扇島にある倉庫会社の屋上にリモートレーダを設置し、さらに東扇島のレーダに AIS 受信機を併設して、大学の監視局から完全にリモートで東京湾の船舶交通観測が行えるシステムを開発してきた。

前年度の研究では、2つのレーダ局からのレーダ画像を統合し、それに AIS 情報を重畳して表示する船舶航行監視システムを構築し、それを Web サイトで公開するシステムを開発した。また、観測されたレーダ画像から航行船舶の映像を自動的に抽出し、船舶航跡を取得する自動トラッキングシステムを開発した。

本年度は、Web サイトの機能充実を図り、レーダ画像と AIS 情報の重畳画面を見やすくし、AIS の針路・速度情報から船舶の予測位置を計算して表示する機能を付加した。また、2006年3月30日00時00分から4月8日23時59分までの10日間に及ぶ長期レーダ観測を実施し、得られたレーダ画像データに自動トラッキングシステムを適用して船舶航跡データを取得した。そして、船舶航跡データを解析し、L 換算密度による船舶交通輻輳度の評価、バンパーモデル、TCPA・DCPA、SJ 値による衝突危険船舶の抽出を行った。

以下に本研究の成果を述べる。

1.1 船舶航行監視システムの構築

東京湾の海上交通特性の調査を目的として、東扇島と防衛大学校にレーダ局を設置し、東京海洋大学に設置された監視局でレーダ画像と AIS のデータが収集できるシステムを開発してきた。2局のレーダと AIS を起動することで、東京海洋大学からリモートで東京湾の海上交通観測を行うことが可能である。本年度は、レーダ画像と AIS 情報を Web サーバを用いて閲覧するシステムの機能向上を図った。

1.1.1 Webサーバのファイル構成

Web サーバは、AIS 情報とレーダ画像を保存するフォルダと HTML によるデータを公開するフォルダに分けられる。Web サーバの基本設定は次の通りである。

CPU	Pentium4 1.8GHz
Memory	512MB
LAN	1Port-100/10Base-T
OS	Windows2000 Professional
電源	システムスタンバイは無し、無停電電源装置接続
ソフトウェア	WEB Service (Apache 1.3.33)、Active Perl

PC のブラウザを使って Web サーバにアクセスした閲覧者は、リアルタイムに近い情報を観ることが可能となる。

Fig.1.1-1 に監視局、Web サーバ、閲覧者の間における信号のタイムスケジュールを示す。東扇島局、防衛大局に接続された監視局は、設定された時間間隔で Web サーバに AIS 情報ファイルとレーダ画像ファイルを転送する。閲覧者はインターネットを介して Web サーバにアクセスする。1 回目のアクセスで HTML ファイル等が閲覧者の PC にダウンロードされる。それ以降は、ダウンロードされた Java アプレットが WEB サーバ上の更新される AIS 情報ファイルとレーダ画像ファイルを読み込み、閲覧者の PC に表示することで、リアルタイムに近い東京湾の海上交通を観ることが可能となる。

Java アプレットの開発・試験は Fig.1.1-2 に示す開発専用の PC を用意し、Java アプレットの開発・試験を行った後、Web サーバへ転送した。

コンテンツとして用意した主なファイルを次に示す。

① TOP ページ(<http://202.212.165.70/index.html>)

②レーダ観測海域(<http://202.212.165.70/radarpic.html>)

設置した 2 局のレーダの観測範囲を示すため Fig.1.1-3 を掲載している。

③東京湾海上交通(<http://202.212.165.70/guide1.html>)

東京湾の海上交通を把握するため必要な法規、海上保安庁の指導内容をまとめて掲載している。(1.1.2 を参照)

④レーダ画像(<http://202.212.165.70/aisradarlap.html>)

レーダによって得られる画像を示す。レーダを実際に作動させていない場合は、長期間観測したときの画像データの一部 (2006 年 3 月 31 日 09:00 ~ 09:59) を WWW サーバに保存し、その画像ファイルを任意の時間間隔で表示する。表示させる画像は、各局の画像 (東扇島レーダ局と防衛大レーダ局)、2 局の合成画像、AIS との重畳表示である。

⑤ AIS 情報の表示(http://202.212.165.70/ais_menu.html)

東扇島局の AIS 受信機で受信されたデータを表示させる。

船舶毎のデータ表示 (リアルタイム表示)

航行状態別の隻数表示（リアルタイム表示）

予測位置と航跡の表示（保存されている過去のデータを使用して表示）

次項からコンテンツの詳細な内容と表示方法について述べる。

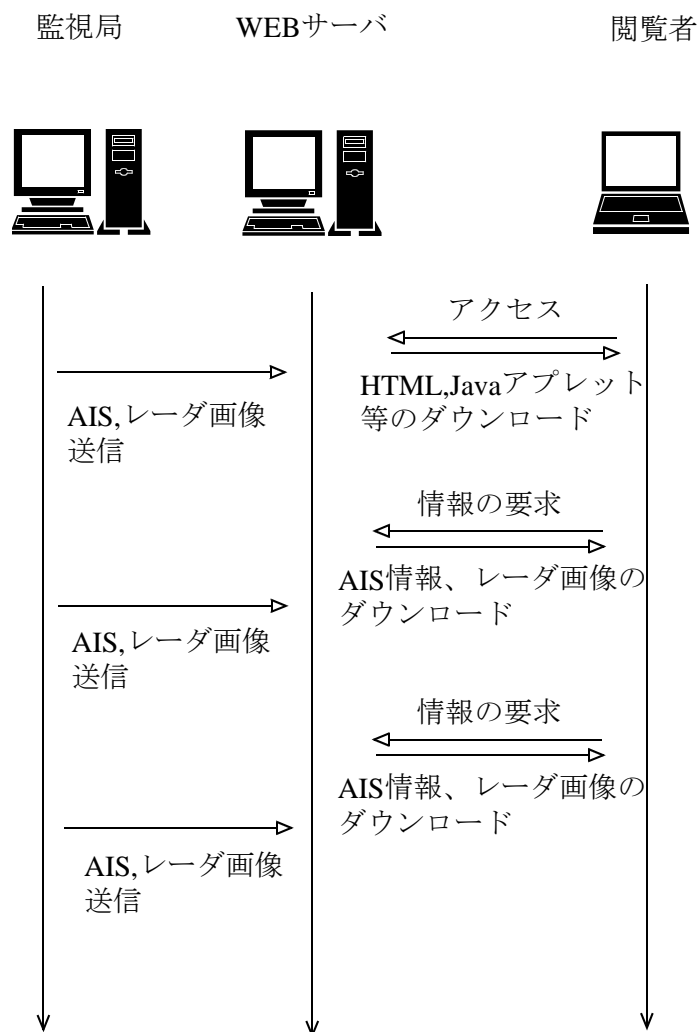


Fig.1.1-1 AIS 情報、レーダ画像ファイル更新と閲覧者のアクセス

各ページからは、次のページにリンクを設定している。

海況監視(<http://www2.s.kaiyodai.ac.jp/~kankyoaf/emoni/tokyo/>)

日本財団(<http://www.nippon-foundation.or.jp/>)

東京海洋大学(<http://www.kaiyodai.ac.jp/>)

Java(<http://java.com/ja/>)



Fig.1.1-2 Java アプレット開発・試験用計算機

1.1.2 レーダ観測海域と東京湾海上交通の概要

Fig.1.1-3 は、本システムにおいて観測した 2 局レーダ画像の合成図であり、浦賀水道航路、中ノ瀬航路と主要な地名を示す。東京湾を熟知している閲覧者やレーダを使用したことがある閲覧者には、このレーダ画像から船舶とブイ、陸地の区別を容易に行うことができるが、Web サーバへアクセスするすべての閲覧者がレーダ画像から船舶の判断ができるとは限らない。

そこで、Web サーバに用意するコンテンツの中に、東京湾の海上交通に関する概略図と簡単な法規、航行義務について解説するページを追加することとした。これには、本州南・東岸水路誌を参考に、海上交通に関係する項目を簡潔に掲載した。Fig.1.1-4 には、東京湾の概要図を示している。Fig.1.1-3 と Fig.1.1-4 を見比べると、地形とブイの位置を把握できるため、レーダ画像のどの映像が船舶であるか判断することができる。輻輳する東京湾内の安全航行のため、湾内には様々な規則が定められ、船舶もその規則に従って航行している。本システムで観測される船舶も通常はこの規則に従って航行しているので、閲覧者にとっては重要な情報であり、コンテンツに加えるとともに、以下に概略を説明する。

東京湾には、海上交通安全法で定められた浦賀水道航路、中ノ瀬航路が設置されている。(Fig.1.1-3 では緑色の線で示されている。航路を示すブイがレーダ画像にも表示されることが確認できる。) 浦賀水道航路は、右側航行の原則に従い、入湾する船舶は東側のレーン、出湾する船舶は西側のレーンを航行しなければならない。中ノ瀬航路は幅が 700m

しかないため、中ノ瀬を中心に東京湾内の交通流を反時計回りに整流する目的で、北航専用としている。入湾した船舶が、千葉、京浜へ向かう場合には、浦賀水道航路北航レーンに接続している中ノ瀬航路を北上することとなる。

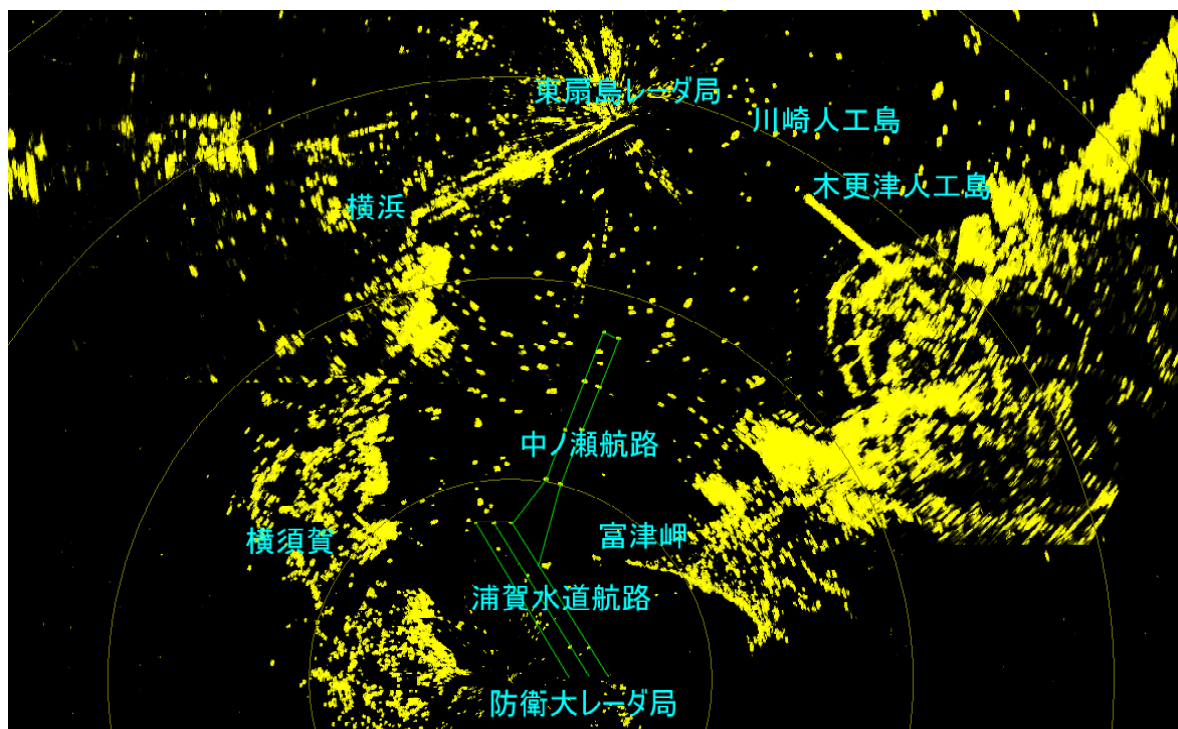


Fig.1.1-3 2局レーダ合成画像

中ノ瀬航路の北側に木更津港沖灯浮標が設置されているが (Fig.1.1-4 参照)、中ノ瀬航路を航行してくる船舶と木更津港を出港して中ノ瀬航路北側付近を航行する船舶の危険な遭遇を避けるため、木更津港を出港し中ノ瀬航路北側付近を航行する場合には、木更津港沖灯浮標を左舷側に見て航行しなければならない。

中ノ瀬航路、浦賀水道航路は、全長 50m 以上の船舶に航路航行義務が定められているため、現在 AIS を搭載している船舶のほとんどがこの航路を航行することとなる。

東京湾中ノ瀬西側海域を南航する船舶は、東京湾中ノ瀬西方第三号、第二号及び第一号の各灯浮標 (Fig.1.1-4 では、(三)、(二)、(一) と表記、以下「整流用灯浮標」という) を左舷側に見て航過する。

東京湾中ノ瀬西側海域を北航する船舶 (京浜港横浜区第 5 区根岸方面に向かう船舶を除く。) は、行き先に向けて所定の針路とするまでは、各整流用灯浮標を左舷側に見て航過する。

東京湾中ノ瀬西側海域を北航する喫水 17m 以上の船舶は、東京湾中ノ瀬 A,B,C 及び D の各灯浮標を結んだ線から 400m 以上離して航過する。

中ノ瀬西側海域に錨泊しようとする船舶は、3 基の各整流用灯浮標を結んだ線から

1,000m 以上離して錨泊することとする。Fig.1.1-3 のレーダ画像を見てわかるように、中ノ瀬西側は、東京湾中ノ瀬西方第三号、第二号及び第一号の各灯浮標、東京湾中ノ瀬 A,B,C 及び D の各灯浮標と南航船、北航船、錨泊船の映像が表示され、船舶の映像の判別がしにくい海域である。

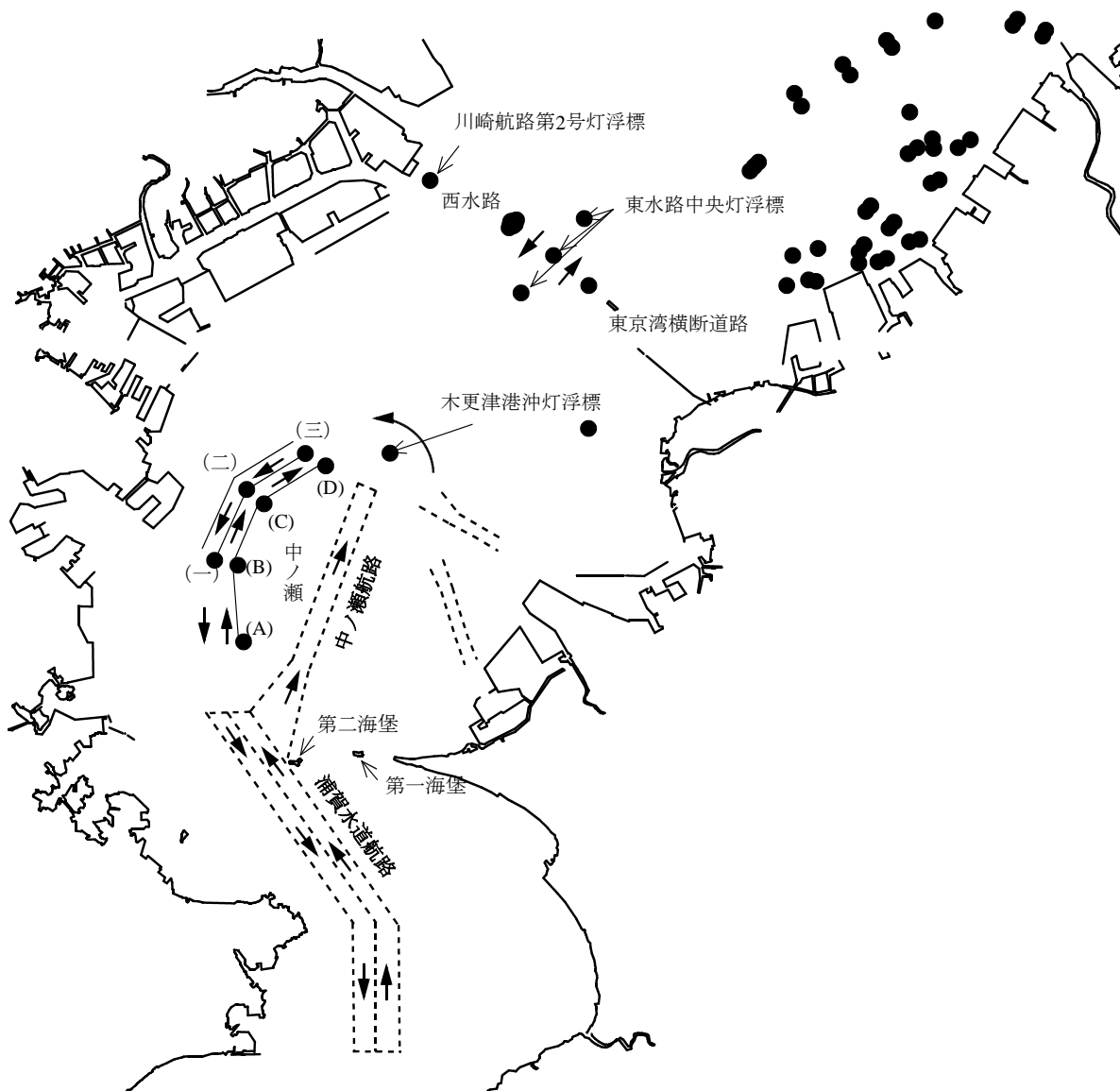


Fig.1.1-4 東京湾内航行規則の概略図

第三管区海上保安本部は、東京湾横断道路付近について次の航行安全指導を行っている。

(1) 東京方面から川崎沖を南航する船舶は、川崎航路第2号灯浮標から東側に1,000m以上離して航過すること。

(2) 総トン数10,000t以上の船舶は、東京湾横断道路を横切ろうとするときは、東京湾横断道路東水路を航行すること。ただし、午後7時から翌日午前5時までの間であって、東京湾横断道路西水路を安全に航行する余地があるときは、同水路を航行することができる。

また、総トン数 10,000t 未満の船舶も、できる限り東水路を航行すること。

(3) 船舶は、東水路を航行するときは、東京湾東水路中央第一号灯浮標、同第二号灯浮標および同第三号灯浮標（以下中央灯浮標）を左舷側に見て航行すること。

(4) 東水路をこれに沿って北の方向に航行する船舶は、千葉港方面に向かって航行するときは、できる限り中央灯浮標から遠ざかり、また、京浜港東京区方面に向かって航行するときは、できる限り中央灯浮標に近寄り航行すること。

(5) 東水路をこれに沿って南の方向に航行する船舶は、千葉港方面から航行するときは、できる限り中央灯浮標に近寄り、また、京浜港東京区方面から航行するときは、できる限り中央灯浮標から遠ざかって航行すること。

(6) 木更津人工島斜路部(木更津人工島西方灯標と同人工島ロープ式緩衝工西端との間の海域をいう)を航行する船舶は、斜路部地形と水深を的確に把握し、航行すること。

1.1.3 AIS搭載船舶の表示方法

一般の閲覧者が AIS 情報を観るためには、インターネットを介して Web サーバへアクセスすることになる。AIS データをリアルタイムで表示させるためには、表示専用のソフトウェアを各ユーザのパソコンにインストールしてもらい、そのソフトウェア上で各データを表示させる方法もあるが、ここでは、最近のパソコンには標準でインストールされているブラウザで閲覧できるように HTML に Java アプレットを指定し表示できるようにする。(Java アプレットをブラウザ上で動かすためには、JavaRuntime が必要であるが、JavaRuntime がインストールされていないパソコンを使用している場合には、リンクに設定した Java のページに行き JavaRuntime をダウンロードし、PC にインストールすることで表示が可能となる。)

Table 1.1-1 AIS 受信機で受信できる AIS の情報

*	項目	表示/非表示	備考
S	MMSI	非表示	
S	クラス	非表示	A または B
S	航海状態	表示	0~15 (Table 1.1-2 を参照)
D	回頭率	非表示	
D	対地速力	表示	
D	対地針路	表示	
D	位置精度	非表示	高、低
D	緯度	表示	北緯なら+、南緯なら-
D	経度	表示	東経なら+、西経なら-
D	船首方位	非表示	
D	タイムスタンプ	表示	計測してからの経過時間
S	AIS バージョン	非表示	

S	IMO 番号	非表示	
S	Call Sign	非表示	
S	船名	非表示	
S	船種、積荷コード	非表示	
S	センサ位置	表示	前後左右からの距離が示されている。
S	測位装置	非表示	
S	到着予定時刻	非表示	
S	最大喫水	非表示	
S	目的地	非表示	

* 表の D は動的情報、S は静的情報を示している。

AIS 情報のプロット画面を Fig.1.1-5 に示す。緑色で東京湾の沿岸線を示し、黄色の丸印の中心が船舶の位置を示す。対地針路と対地速力を基に、船体位置から速度ベクトルを描いている。○印のみ表示されている船舶は錨泊中、係留中であると考えられる。

Web サーバで扱う AIS 情報を Table 1.1-2 に示すが、船舶を特定できる情報は非表示とした。船舶の位置をクリックすると画面の右下にその船舶情報を表示できる。

表示する内容は、船舶が特定される情報を除く次の 6 つとした。

Navigation state	: 航海状態
Speed over the ground	: 対地速度
Course over the ground	: 対地針路
Heading	: 船首方位
Length	: 船体長
Breadth	: 船幅

Table 1.1-2 航海状態の対応表

Navigation state number	Navigation state
0	Under Way Using Engine
1	At Anchor
2	Not Under Command
3	Restricted Manoeuvrability
4	Constrained by Her Draught
5	Moored
6	Aground
7	Engaged in Fishing
8	Under Way Sailing

Others

Not Defined

Navigation State の情報は Table 1.1-2 の左列に示す値が送られてくるので、その数値に対応した状態を示した。

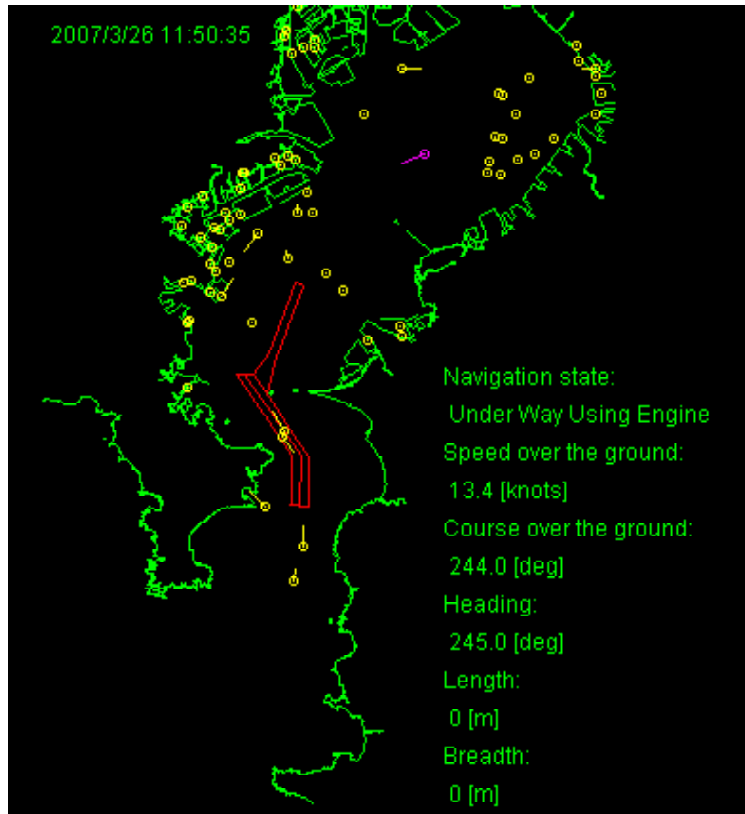


Fig.1.1-5 AIS データプロット図

Fig.1.1-5 で使用した情報を用いて、受信した船舶隻数を Table 1.1-2 の航行状態毎に表示させるページも作成した。これらの数値は、AIS 情報を送信する船舶の静的情報の設定によるため、必ずしも現状を反映していない。Fig.1.1-6 に示されている航行状態毎の総隻数は 81 隻であり、このうち 55 隻が航行中であることになっている。しかしプロットした船舶の速度ベクトルを観てわかるように、航行中の船舶は 20 隻未満であり、係留中、錨泊中の船舶が多いと判断できる。船舶によっては AIS の設定を航行中のまま、錨泊、係留していることが考えられる。

AIS 静的情報の中には、船種別のコードも含まれているため、船種別の表示も可能であるが、現状で静的情報を正確に受信できる隻数が半分程度のため、Web 上で閲覧できるシステムは作成しなかった。AIS 受信局を増やすことや、ある程度のデータベースとして AIS 静的情報を保存しておくことで、この点の改良は可能と考えられる。

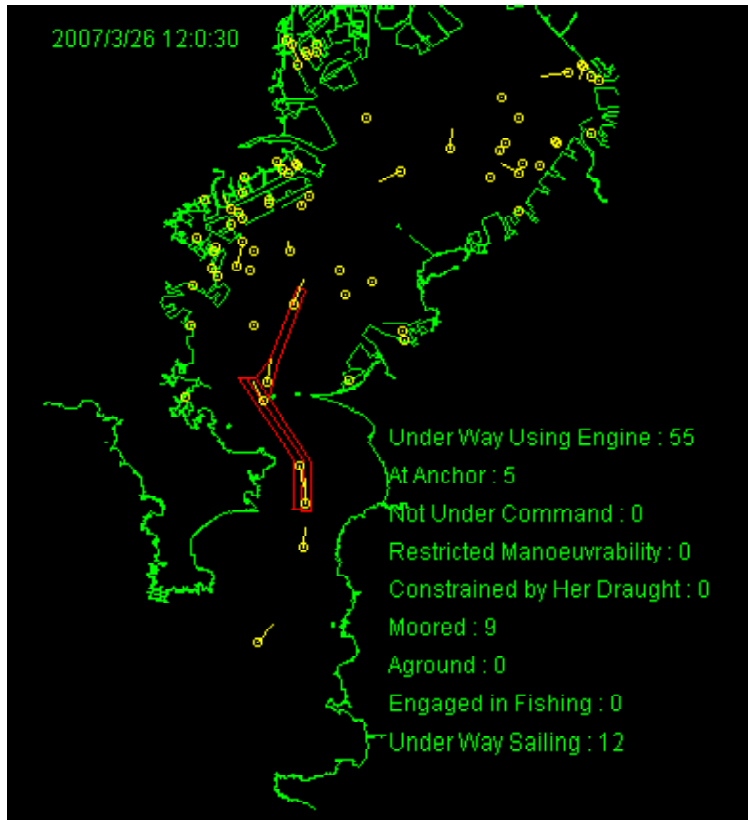


Fig.1.1-6 航海状態毎のプロット図

1.1.4 レーダ画像とAIS情報の重畳表示

ここではレーダ画像と AIS 情報を重畳表示させる方法を示す。

レーダ画像の影像以外の画素は透過処理が施されている。ここでは、黒色の背景を設定し、その上に AIS のプロット図の描写、レーダ画像の貼り付け、沿岸線の描写の順で AIS とレーダの重畳画像を作成した。(Fig.1.1-7 参照)。レーダ画像は、映像が映っていない場所に透過処理が施されているため、過去の画像データを重ね合わせることで、船舶の航跡を表示させることができる。

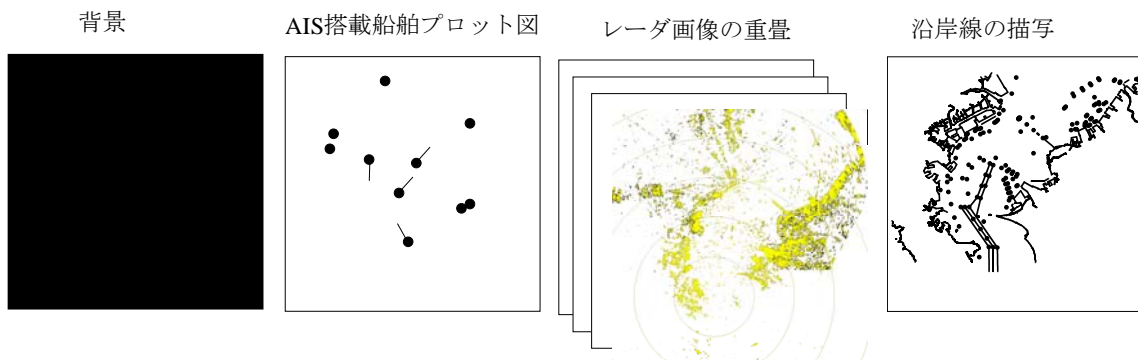


Fig.1.1-7 AIS 情報とレーダ画像の重畳

レーダ画像と AIS 情報の重畳表示の例を Fig.1.1-8 に示す。ある時刻の AIS 情報と同時刻のレーダ画像、1 分前のレーダ画像、2 分前のレーダ画像、3 分前のレーダ画像を重畳させて表示している。この表示例を見てわかるように、4 つの映像が重なっている映像が航行中の船舶であり、赤い点が AIS 情報からプロットしたシンボルである。(速度ベクトルがある場合には船体位置から針路・速力に応じた線を描いている。) レーダ画像と重畳させることで、AIS を搭載していない船舶が多いことが確認できるとともに、AIS 情報には遅れが生じていることがわかる。中ノ瀬航路を航行中の船舶は明らかに AIS 情報が遅れていることがわかる。

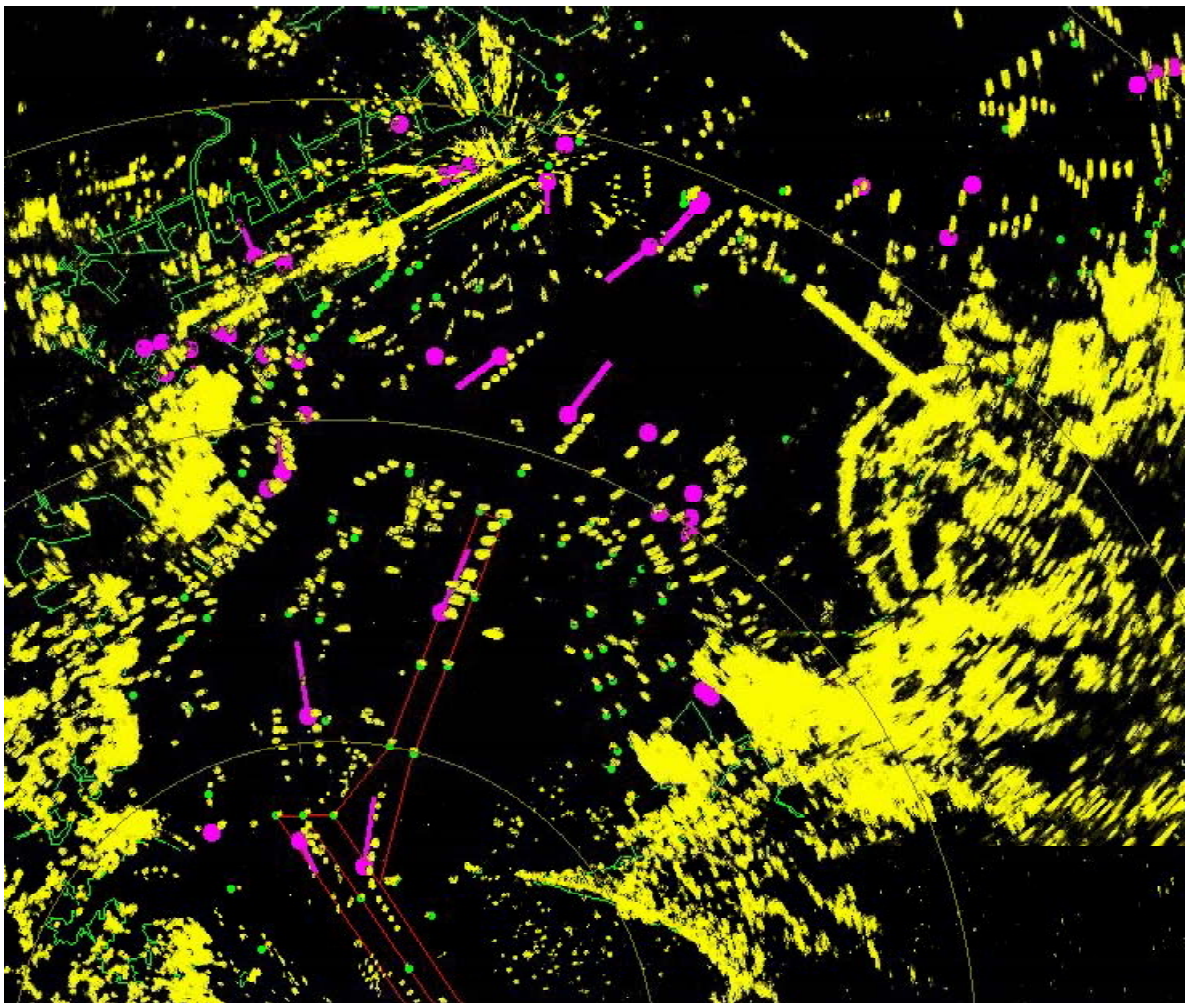


Fig.1.1-8 レーダ重畳表示と AIS データプロット図

レーダ画像のアニメーションを表示させるために、東扇島局レーダ画像、防衛大局レーダ画像、2 局レーダ合成画像を 1 分間隔で表示できるようにした。ただしファイルサイズが大きいため、高速の通信回線に接続されている環境が必要である。



Fig.1.1-9 レーダ画像から取得した船舶位置と AIS による位置のプロット図

Fig.1.1-9 は、AIS 情報の位置とレーダ画像から取得した位置を比較するためプロットした図である。レーダ画像から取得した船舶は航行中の船舶であり、係留中の船舶や錨泊中の船舶の位置は含まれていない。AIS 情報の位置は、受信できた位置情報すべてをプロットした。図中の A 船、B 船はレーダ画像から取得した位置と AIS 位置情報が重なっており同一船舶であると判断できる。C 船は、2つの位置が離れているが連続観測から中ノ瀬西側を南航し、浦賀水道航路南航レーンに向かっていることと、他船が近くにいないことから同一船舶であると判断できた。中ノ瀬に停泊している2隻の船舶(D, E)と木更津沖に停泊している船舶(F, G)は錨泊中であり、レーダ画像から取得されたデータには表示されていなかった。このほかの○印は、レーダ画像のみからのデータであり、AIS を搭載していない船舶、または東扇島の AIS 受信局で受信できなかった船舶と考えられる。レーダ観測から得られた東京湾内を航行中の船舶は1日あたり1400隻程度となるが、AIS 受信機で得ら

れた船舶の隻数は停泊中、錨泊中の船舶も含め1日100隻程度であり、現状では東京湾内でのAIS搭載船は少ない。

1.1.5 船舶位置の補正

レーダ画像とAISと重畳させたFig.1.1-8からわかるように、受信したAIS情報をそのまま表示したのでは、閲覧者のブラウザには不自然な船舶の動きとして表示されることになる。Fig.1.1-10は、ある船舶の本システムで受信したAIS位置情報の航跡図である。この船舶は、第二海堡の南1000m付近で観測され、浦賀水道航路から中ノ瀬航路に入り北上している。この船舶はAISの対地速度情報からほぼ一定速度で航行していることが確認されているにもかかわらず、情報の更新間隔が不規則である。AIS動的情報の更新間隔をTable 1.1-3に示す。12ノットでは10秒ごとに更新されるはずであるが、東扇島で正しく受信できなかったためにWebサーバの更新間隔が長くなる場合がある。そこで、データが更新されない船舶については、最新のデータ更新時刻と現在の時刻から現在位置を計算しプロットさせることとした。



Fig.1.1-10 AIS搭載船の位置プロット図

Table 1.1-3 AIS 動的情報の更新間隔

錨泊中で 3knots 以下	3 分
錨泊中で 3knots 以上	10 秒
0 ～ 14knots	10 秒
0 ～ 14knots 変針中	3 1/3 秒
14 ～ 23knots	6 秒
14 ～ 23knots 変針中	2 秒
23knots 以上	2 秒
23knots 以上変針中	2 秒

静的情報は6分ごと、または要求に応じて更新することになっている。運用しているシステムは、受信専用となっているため、静的情報も6分を目安に入ってくることになる。

Fig.1.1-11 に予測位置のプロット概念図を示す。○印が東扇島 AIS 受信局で受信し WWW サーバに送られてきた各船舶のデータである。この情報には位置、船速等の他、各船舶の送信したタイムスタンプが付加されている。この時刻が正しいものとして、任意時刻

(Fig.1.1-11 では 10:52:10) の位置 (灰色の丸印) を対地速力、対地針路から求めることができる。

10:52:10の船舶情報の表示

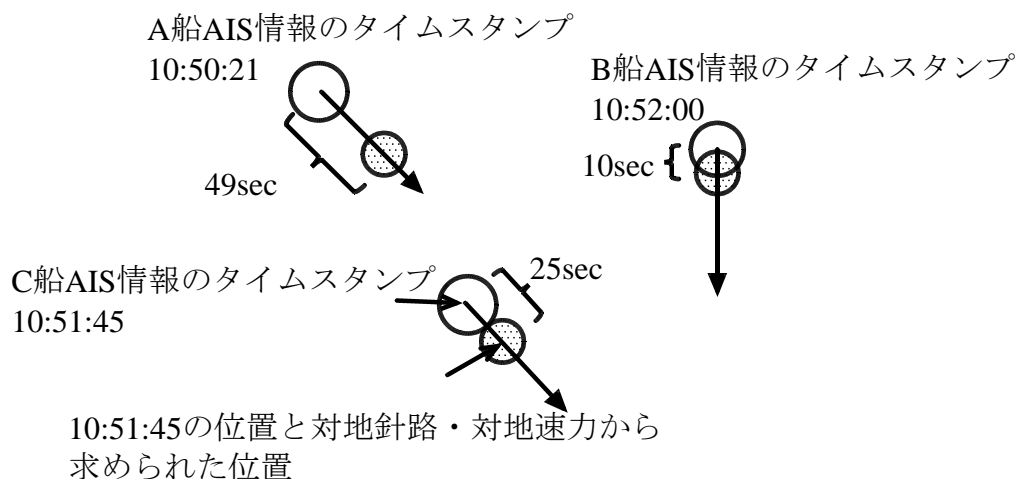


Fig.1.1-11 対地針路・対地速力による任意時刻の船舶位置の推定

対地速度を V 、観測時刻と表示時刻の差を Δt とした場合、表示時刻における予測位置の緯度・経度 (lat, lon) は、観測位置を (lat1, lon1) とすれば

$$\text{lat} = \text{lat1} + V \times \Delta t \times \cos(\text{Co})$$

$$\text{lon} = \text{lon1} + V \times \Delta t \times \sin(\text{Co}) / \cos((\text{lat} + \text{lat1})/2)$$

により与えられる。ここで Co は対地針路を表す。

実際の AIS 受信データとその受信データから予測位置を計算してプロットした例を Fig.1.1-12 に示す。ピンクの丸印が AIS データを受信した位置を示している。黄色の丸印が船舶の予測位置を示している。予測位置の計算を行う船舶は、対地速度が 3 knots 以上の場合に限るものとした。

ただし、この方法では、情報の更新レートによっては予測位置がずれる場合も多い。Fig.1.1-12 に示したように、浦賀水道航路から中ノ瀬航路に向かう船舶の場合、変針により予測位置が大きくずれることがある。

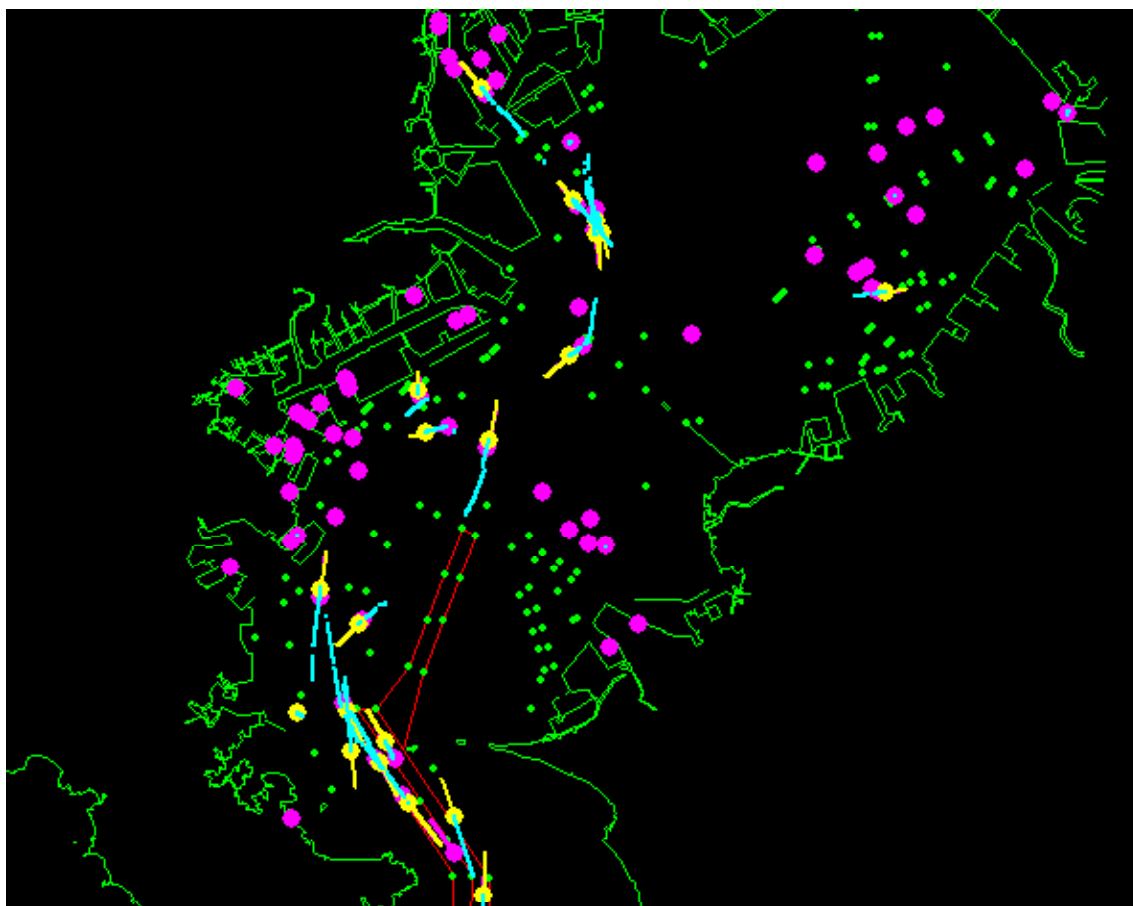


Fig.1.1-12 AIS データを受信した時の位置、予測位置、航跡を表示したモニタ画面

1.1.6 航跡の表示

各船舶の航跡を表示させることで、船舶の行動がより明確に判断できる。Fig.1.1-12 の青色の線が、過去 10 分間の航跡である。

前節で述べたように、船舶の航行状態によって受信データ間隔が異なるため、予測したデータを任意時間間隔で保存し表示させることとした。受信データの更新間隔が短い船舶の場合には、航跡もほぼ正常に表示されているが (Fig.1.1-12 において東水路を南航している船舶や中ノ瀬航路北側から川崎方面へ向かっている船舶など)、時間間隔が長くなる場合、正しい航跡を示すためには位置データのスムージング処理が必要となる。

1.1.7 Javaアプレットを構成する各クラスの役割

各コンテンツで使用される Java アプレットは、次に示すクラスに機能を分けて作成されている。

① AISData

Web サーバから 1 隻の船舶のデータを読み込む。Table 1.1-1 の「表示」とした項目の他、更新時刻を求める。

② DrawAIS

WEB サーバ上に保存されている AIS 情報を読み込み、Java アプレット上にプロットする。任意の間隔で Web サーバ上の更新されたデータを読み込み、プロットを繰り返すことで、ブラウザ上ではほぼ現時点での船舶位置をプロットできるようにした。初回時に沿岸線データを読み込んでいるので、ここで沿岸線を描き、AIS 搭載船の位置とベクトルを描くことができる。更新された船舶のデータを保存していく。

また、サーバ上には船舶交通のサンプルを保存している場所があり、AIS 受信機の故障時等には、過去の交通流を表示させる。

ユーザが任意の船舶をクリックし、その情報を表示する機能、航行状態毎に隻数を数え表示する機能もここで設定した。

③ AIS_Est

DrawAIS を継承したクラスである。読み込んだ AIS 情報から任意時刻の船体位置を計算し表示させる。また、予測位置を任意の間隔で保存しておき、過去の任意時刻の予測位置から航跡を描く。

この機能も現在は、リアルタイムではなく、保存した過去のサンプルデータを再現することになっている。

④ DrawRadarImage

DrawAIS を継承したクラスである。ここではレーダ画像を読み込み、画像を表示させることと、AIS 情報のプロット、沿岸線の描写が可能となる。レーダ局が動いていない時間が多いため、現在は、過去に計測したレーダ画像と、同時に観測した AIS 情報をサーバに保存しておき、そこにアクセスすることで、ブラウザ上にはレーダ画像と AIS 位置を重畳した状態で表示させることが可能である。

レーダが起動し、画像データが順次送られてくる場合には、そのデータを読み込むことで、リアルタイムの表示が可能である。

1.1.8 船舶航行監視システムに関するまとめ

Web サーバに転送されたデータファイルを用いることにより、船舶交通流を把握するための様々なコンテンツを作成した。現在のインターネット環境と閲覧者の PC の性能から、ブラウザを使用した閲覧システムの構築は比較的容易に実現できたが、閲覧者にとってわかりやすいモニタの設定を行うには工夫が必要であった。

データの更新間隔が長い状態の時でも、船舶の対地針路、対地速力から予測位置を計算することで、実際の運動に近い表示を行うことが可能となった。

今後の課題として、画像データをあつかう場合、ファイルサイズの調整が必要であり、今後、Web サーバにアクセスが増えた場合への対応として、通信間隔、通信容量を減少させる工夫が必要となる。

1.2 東京湾における船舶交通特性の調査

1.2.1 長期観測データを用いた船舶航跡のトラッキング

前年度の報告において、東京湾を航行する船舶交通流の調査・研究を行うため、川崎の東扇島（東扇島局）と横須賀の防衛大学校（防衛大局）の2ヶ所に船用レーダを設置し（東扇島局にはAIS受信機も併設）、東京海洋大学越中島キャンパス（監視局）からリモート操作する事で船舶交通観測が行えるシステムを開発してきたことを示した。また、このシステムを用いることにより、従来の船舶交通観測で必要であった観測船、レーダ観測車、観測員などの多大の労力と資材を軽減できるようになった事も示した。

さらに、交通観測で記録されたレーダ画像から航行する船舶の航跡を短期間で取得するため、トラッキングシステムを開発してきたことも示した。このシステムを用いる事で、従来の手動のみによるトラッキング作業（航跡取得作業）の人的・時間的な負担を大幅に軽減できるようになった事も示した。Fig.1.2-1は、実際に構築したトラッキングシステムのアルゴリズムの概念図を示している。処理過程は、予めレーダを用いた交通観測によって記録されたレーダ画像（連続した1分毎のレーダ画像）から航行する船舶映像情報（船舶の位置情報、船舶映像の画素数情報）だけを抽出するマスキング作業（船舶映像情報抽出作業）と、抽出された船舶映像情報を用いて船舶の航跡取得を行うトラッキング作業により構成されている。

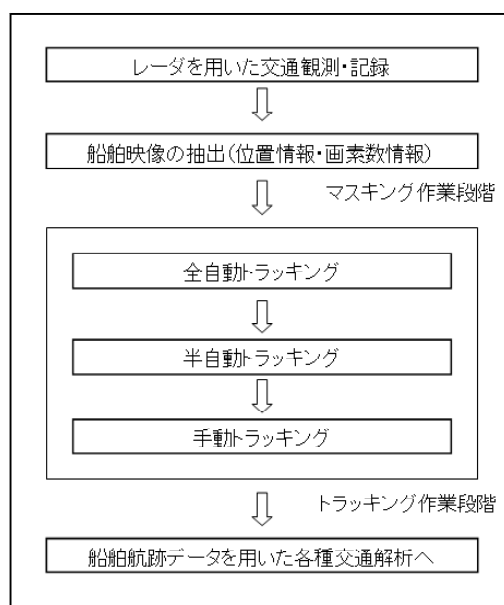


Fig.1.2-1 トラッキングシステムのアルゴリズムの概念図

なお、前年度の報告書では、トラッキング作業に関して、全自動トラッキング・半自動ト

ラッキング・手動トラッキングの三段階の処理方法を提案した。全自動トラッキングでは、予めプログラムされたアルゴリズムに従い、船舶座標の初期認識および航跡取得を全て自動で行う。半自動トラッキングでは、初期認識だけを人間が手動で行い、航跡取得を全自動と同様に自動で行う。手動トラッキングでは、初期認識から航跡取得に至るまでの全てを人間が手動で行うものであった。また、全自動および半自動トラッキングの自動航跡取得において、船舶映像の乗り移りやロスト現象等の発生により上手くいかなかったケースに対しては、手動トラッキングを用い人間が確認しながら航跡取得を行うようにして、トラッキング中の様々な問題に対応できるようにしていた。

このように、前回の短期観測データ（1日分）では全自動・半自動・手動トラッキングの三段階トラッキング処理を用いて航跡取得作業を行ったが、今回の長期観測データ（10日分）については、全自動および手動の二段階トラッキング処理を用いた。二段階トラッキングを適用した観測データは、2006年3月30日00時00分から4月8日23時59分までの10日分である。

この二段階トラッキング処理では、最初に自動トラッキングによって取得された船舶の航跡を確認し、同一船舶の航跡として間違いないかどうかを判断する。次に、トラッキング中にロスト現象や乗り移り現象等が生じたと判断できる船舶に関しては、手動トラッキングによって人間が補完する。この手法を用いる事で、10日間の観測データから13,125隻の船舶の航跡を抽出する事ができた。

1.2.2 トラッキングシステムによる長期観測データの処理

① 雨天による観測の中止

レーダを用いた交通観測では、レーダ画面上で船舶の航行が確認できるように、記録されたレーダ画像が鮮明である事が求められる。しかし、長期間にわたる交通観測では、観測期間中の全てが天候に恵まれている事はなく、雨天などの悪天候に影響される事になる。今回の10日間にわたる交通観測中（2006年3月30日00時00分から4月8日23時59分まで）にも、雨天によるレーダ画像への影響が見られた。Fig.1.2-2とFig.1.2-3は、2006年4月2日19時16分の東扇島局と防衛大局から送信されてきたレーダ画像を示している。両局ともレーダ画面上で雨天による降水の影響を見る事ができる。

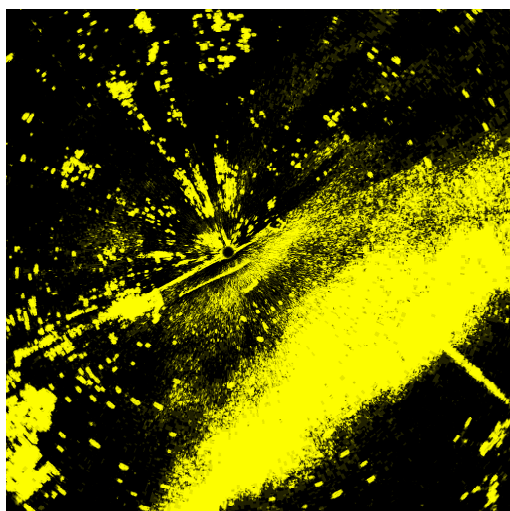


Fig.1.2-2 東扇島局のレーダ画像

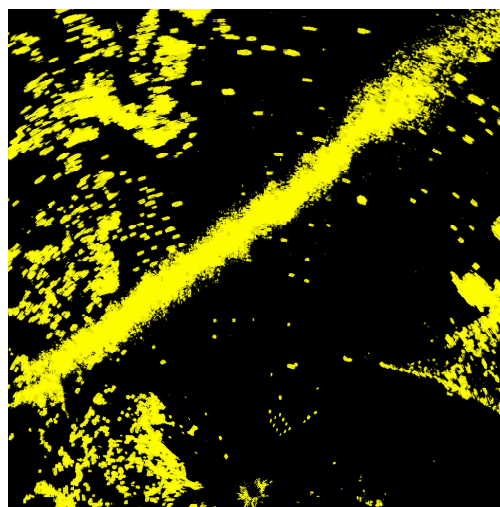


Fig.1.2-3 防衛大局のレーダ画像

Fig.1.2-4 は、Fig.1.2-2（東扇島局）と Fig.1.2-3（防衛大局）のレーダ画像を用いて、前章で述べたマスキング作業を施し、統合したものを示している（図中中央のラインは両局の接合部）。この図に示すように、雨天中のレーダ画像では、湾内を航行中の船舶の映像が雨により遮られ、交通観測が不可能である事がわかる。

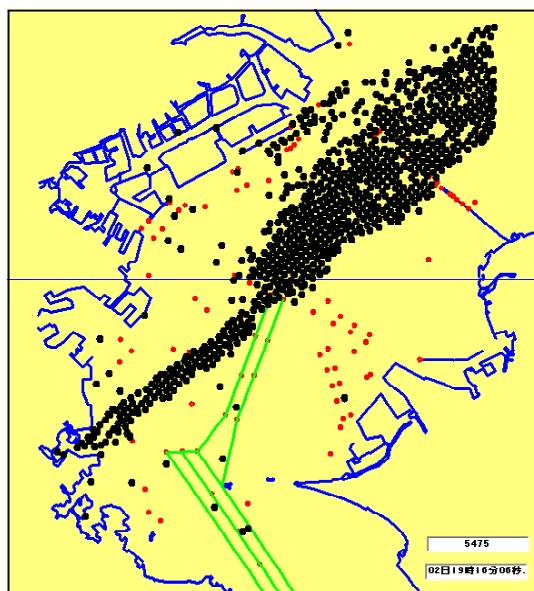


Fig.1.2-4 雨天影響下のレーダ画像（マスキング処理後）

Fig.1.2-5 は、今回の 10 日間の交通観測における降水時間を示したものである。図に示すように、4 日目と 7 日目と 10 日目に降水が見られた。なお、これらの降水時間は何れもレ

一ダ画像を用いた交通観測が不可能であったため、二段階トラッキングを行う対象期間から取り除いた。

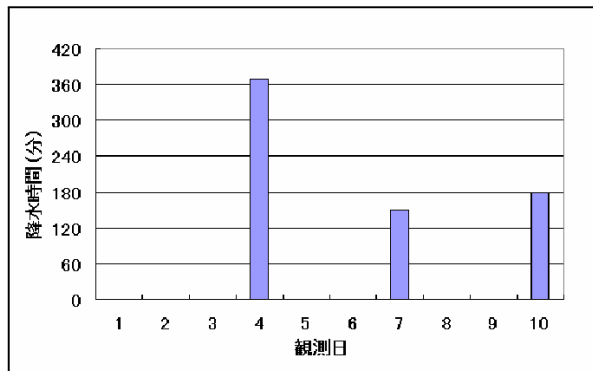


Fig.1.2-5 観測期間中の降水時間

② 二段階トラッキングシステムの航跡取得効果

ここでは、全自動トラッキングおよび手動トラッキングの二段階トラッキングによる取得航跡とその取得隻数を総括し、観測期間中におけるトラッキングの取得効果について検証する。

(1) 取得された船舶の航跡と取得隻数の検証

Fig.1.2-6 から Fig.1.2-15 は、観測日の1日目から10日目までの二段階トラッキングによる取得船舶の全航跡および全取得隻数を示している。特に4日目と10日目に生じた降水の時間帯は、東京湾の船舶の交通量が最も多くなる夕方の時間帯であったため、取得できた船舶の隻数に大幅な減少が見られた。他の観測日には、取得された船舶の航跡と取得隻数に多くの差異は見られなかった。なお、10日間における1日あたりの取得隻数の平均は1332.2隻であった。

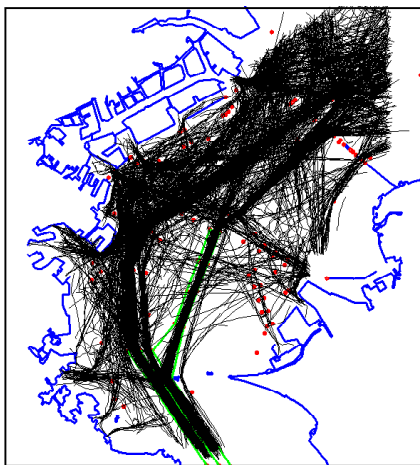


Fig.1.2-6 交通観測1日目 (1562隻)

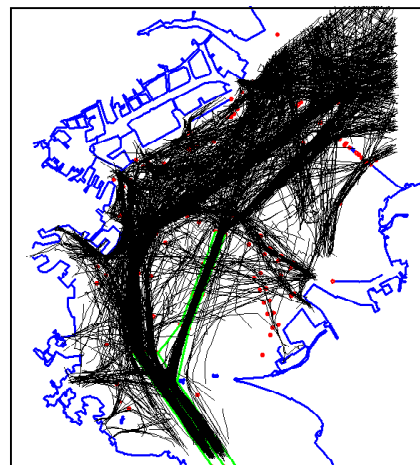


Fig.1.2-7 交通観測2日目 (1504隻)

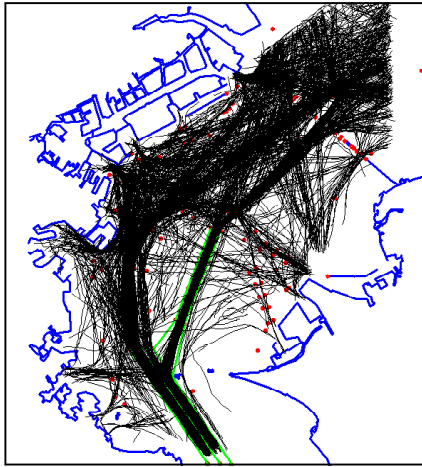


Fig.1.2-8 交通観測 3 日目 (1461 隻)

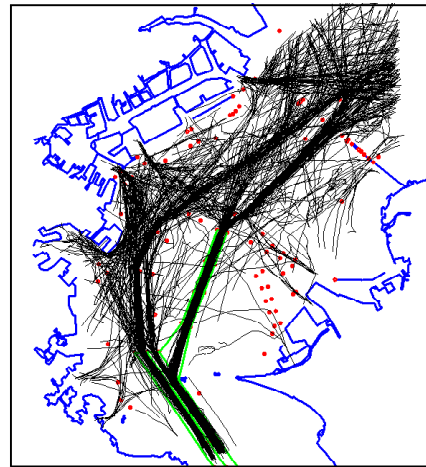


Fig.1.2-9 交通観測 4 日目 (703 隻)

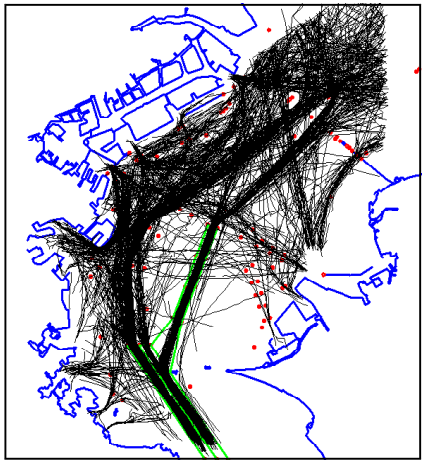


Fig.1.2-10 交通観測 5 日目 (1160 隻)

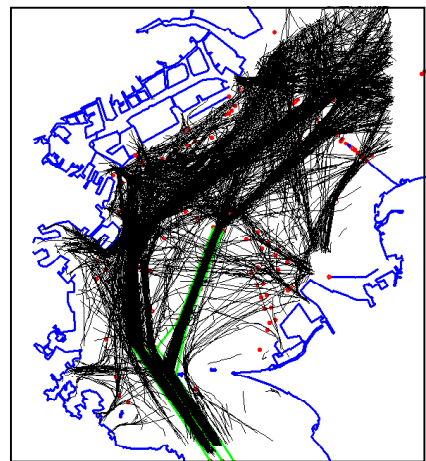


Fig.1.2-11 交通観測 6 日目 (1531 隻)

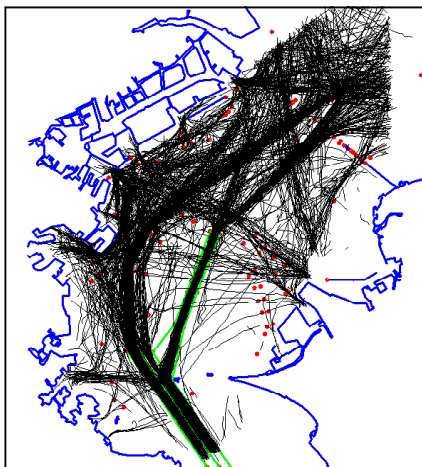


Fig.1.2-12 交通観測 7 日目 (1555 隻)

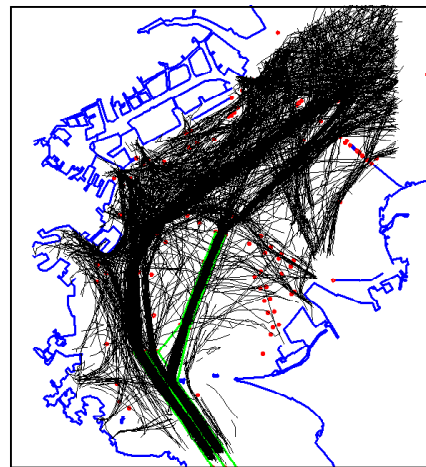


Fig.1.2-13 交通観測 8 日目 (1384 隻)

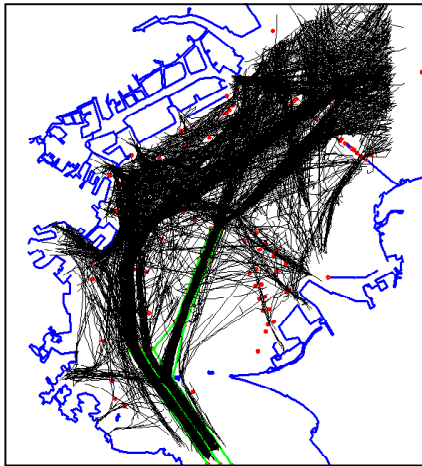


Fig.1.2-14 交通観測 9 日目 (1593 隻)

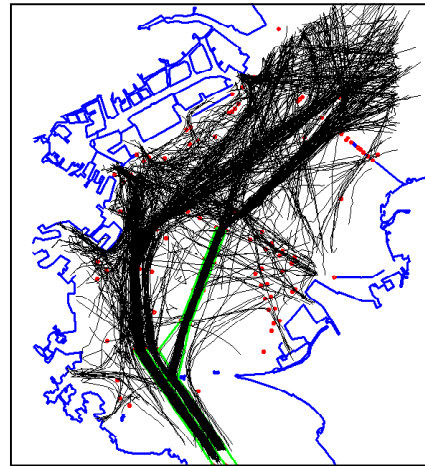


Fig.1.2-15 交通観測 10 日目 (869 隻)

Fig.1.2-16 は、二段階トラッキングで取得できた 10 日間分 (13,125 隻) の全航跡を示したものである。この航跡図により、東京湾のほぼ全ての海域において船舶が航行していることが確認できた。また、Fig.1.2-17 は Fig.1.2-16 に示した航跡の内、全自動トラッキングによって取得された 10 日間分 (6,243 隻) の全航跡を、Fig.1.2-18 は手動トラッキングによって取得された 10 日間分 (6,882 隻) の全航跡を示している。

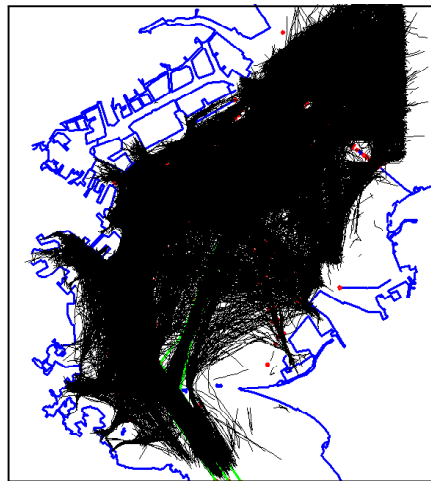


Fig.1.2-16 二段階トラッキングによる取得航跡 (13,125 隻)

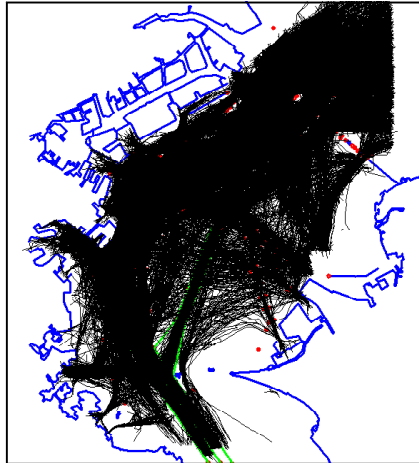


Fig.1.2-17 全自動トラッキングによる取得航跡 (6,243 隻)

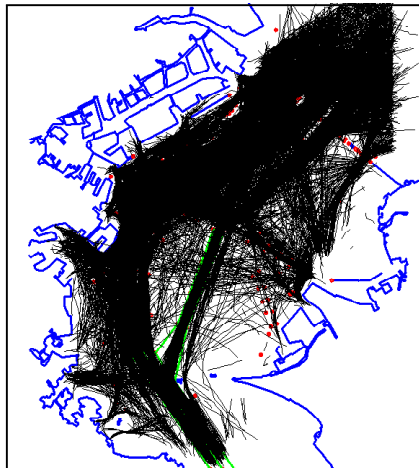


Fig.1.2-18 手動トラッキングによる取得航跡 (6,882 隻)

(2) 全自動トラッキングによる取得率の検証

ここでは、二段階トラッキングで取得された全航跡データの内、全自動トラッキングによって取得された航跡データの比率について検証する。なお、二段階トラッキングの取得船舶隻数に対する全自動トラッキングの取得船舶隻数の割合を、取得率として定義する。

Fig.1.2-19 は、二段階トラッキングによって取得された船舶隻数の変化を示したものである。図中では、青色で示した棒グラフが全自動トラッキングで取得された船舶隻数、赤色で示した棒グラフが手動トラッキングで取得された船舶隻数を示している。4 日目と 10 日目は、雨天による観測中止のため大きく取得隻数が減少している。Fig.1.2-20 は、Fig.1.2-19 の取得隻数データをもとに全自動トラッキングによる取得率を調べたものである。取得率は、40 %から 60 %の間を推移しており、観測日によりバラツキがある事が示された。なお、10 日間の取得率の平均値は 48.89 %であった。

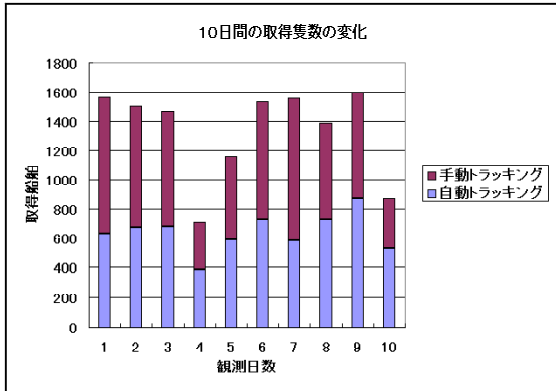


Fig.1.2-19 10日間の取得隻数の変化

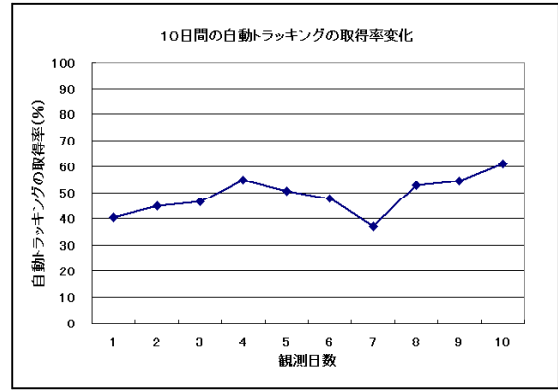


Fig.1.2-20 10日間の取得率の変化

Fig.1.2-21 は、10日間における取得率の変化を時間帯別に分けて示したものである。観測日ごとの変化は見られたが、平均すると交通量の減少する夜間では全自動トラッキングによる取得率が増加し、逆に交通量の増加する日中では取得率が減少する傾向が示された。

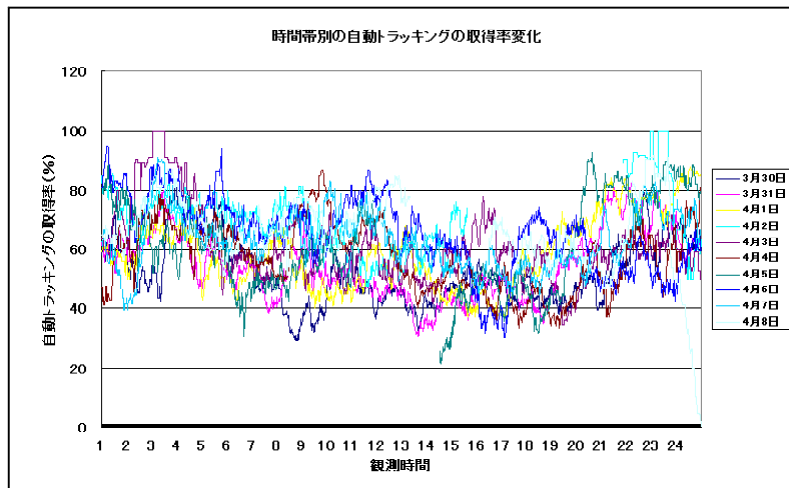


Fig.1.2-21 時間帯別の自動トラッキングの取得率変化 (10日間分)

(3) ロスト現象と乗り移り現象の検証

ここでは、二段階トラッキング中に発生した船舶映像のロスト現象および乗り移り現象について検証する。なお、検証は、ロスト現象および乗り移り現象が発生した海域に関する解析と、現象が発生した時間帯に関する解析とを行う。

(ロスト現象と乗り移り現象の空間解析)

まず、ロスト現象および乗り移り現象が発生した海域に関する解析を行う。なお、ロスト現象は、全自動トラッキングによって自動的に処理されたものと、手動トラッキングによって補足的に手動入力されたものとに分けて行う。

Fig.1.2-22 は、二段階トラッキングによる航跡取得時に対処したロスト現象の発生位置を示している。この図により、航路を中心として東京湾のあらゆる海域でロスト現象が発生していた事が分かる。Fig.1.2-23 と Fig.1.2-24 は、Fig.1.2-22 に示したロスト現象の発生位置の内、全自動トラッキングおよび手動トラッキングによって対処した位置を示している。Fig.1.2-23 ではロスト現象の発生位置が海域全体に及んでいるのに対し、Fig.1.2-24 では航路内を中心として発生している事が分かる。このことから、航路内で接近して航行する船舶同士の間で船舶映像のロスト現象が頻繁に生じていた事が分かる。

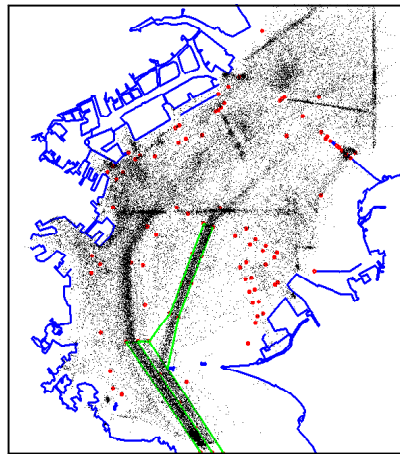


Fig.1.2-22 二段階トラッキングのロスト現象発生位置

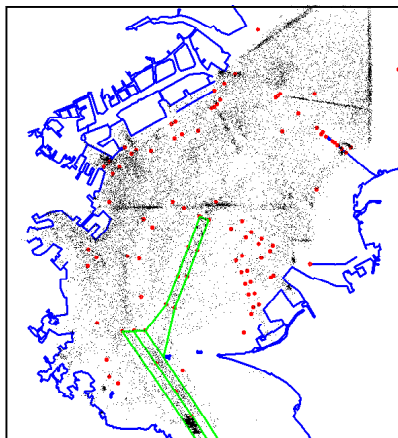


Fig.1.2-23 全自動トラッキングの
ロスト現象発生位置

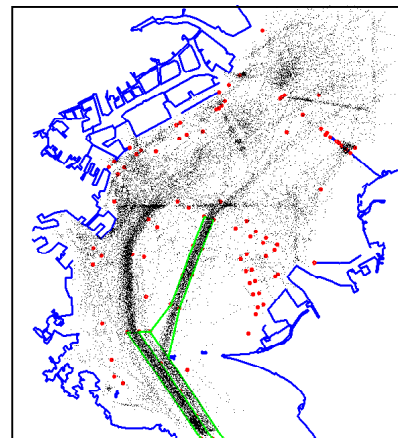


Fig.1.2-24 手動トラッキングの
ロスト現象発生位置

Fig.1.2-25 は、二段階トラッキングにおける乗り移り現象の発生位置を示している。なお、乗り移り現象に対する対処は、人間が判断して行うために、手動トラッキングによる手法だけで行っている。この図により、乗り移り現象の発生に対する処置を行った海域は、航路を中心として同航船が接近して航行する海域に集中して事が分かる。つまり、乗り移り

現象が多く発生する船舶同士の見合い関係は、追い越しなど同航パターンに集中しており、横切りや行会いのパターンでは殆ど見られない事を示している。

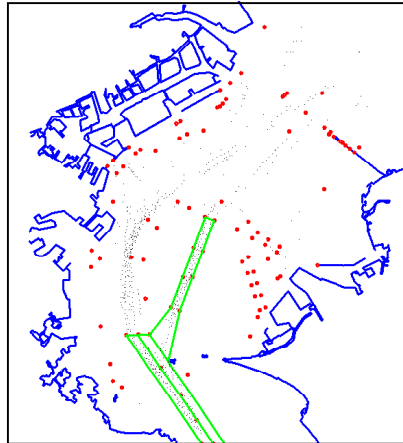


Fig.1.2-25 二段階トラッキングの乗り移り現象発生位置（手動トラッキング）

（ロスト現象と乗り移り現象の時間解析）

次に、ロスト現象および乗り移り現象が発生した時間帯に関する解析を行う。なお、ロスト現象は、先の解析ケースと同様に全自動トラッキングによって自動的に処理されたものと、手動トラッキングによって補足的に手動入力されたものとに分けて行う。

Fig.1.2-26 は、二段階トラッキングによる航跡取得時に対処したロスト現象の発生時間を示している。この図により、ロスト現象の発生時間は、船舶の交通量が増加する朝方と夕方方に集中していることが分かる。なお、ロスト現象の発生・対処回数を10日間分のデータで平均すると1日あたり4352.3回であった。

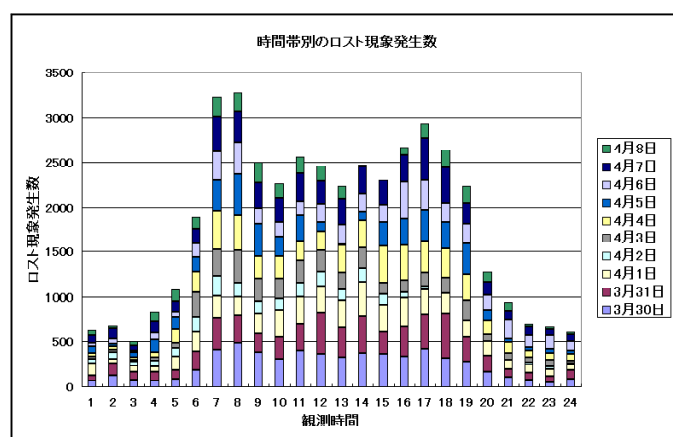


Fig.1.2-26 二段階トラッキングにおける時間帯別のロスト現象発生数

Fig.1.2-27 と Fig.1.2-28 は、Fig.1.2-26 に示したロスト現象のデータの内、全自動トラッキ

ングおよび手動トラッキングによって対処したものを示している。Fig.1.2-27 と Fig.1.2-28 の両ケースにおいても、日中の交通量の増加にあわせてロスト現象発生に伴う対処回数が増加している事が分かる。なお、Fig.1.2-27 の全自動トラッキングによるロスト現象の発生・対処回数は10日間分のデータで平均すると1日あたり1869.7回、Fig.1.2-28の手動トラッキングによるロスト現象の発生・対処回数は1日あたり2482.6回であった。全自動トラッキングによるロスト現象は不連続的（単発的）なものであるのに対し、手動トラッキングによるロスト現象は連続的なものなので、発生・対処回数に差が生じたと考えられる。

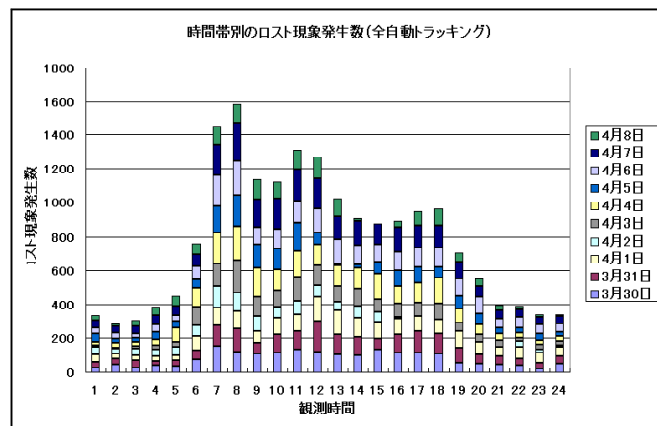


Fig.1.2-27 全自動トラッキングのロスト現象

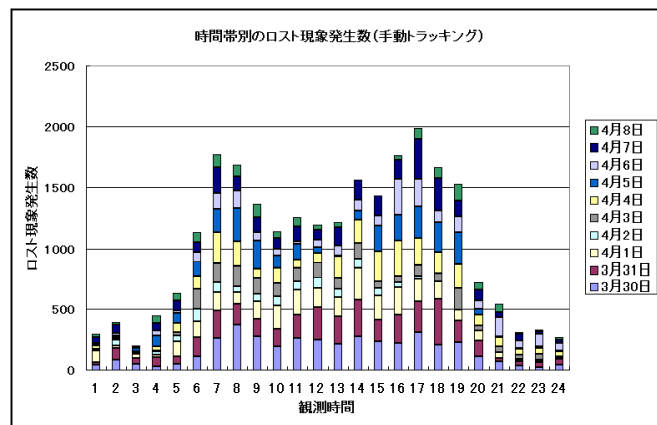


Fig.1.2-28 手動トラッキングのロスト現象

Fig.1.2-29 は、二段階トラッキングにおける乗り移り現象の発生時間を示している。この図により、乗り移り現象の発生は、航路内の船舶交通量が増加する朝方と夕方の2つの時間帯に集中して分布している事がわかる。なお、乗り移り現象の発生・対処回数は10日間分のデータで平均すると1日あたり62回とロスト現象の回数に比べかなり少ないものとなっていた。つまり、全自動トラッキングの航跡取得作業に弊害を与える原因となってい

るのは、船舶映像のロスト現象によるものであって、乗り移り現象によるものは全体からみると僅かである事がわかる。

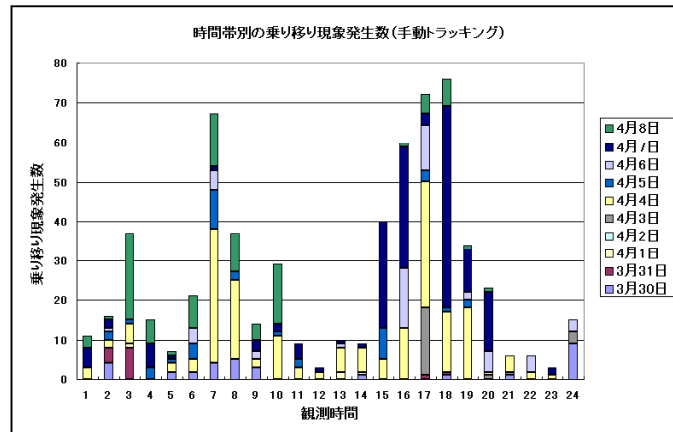


Fig.1.2-29 二段階トラッキングの乗り移り現象（手動トラッキング）

1.2.3 L換算密度による東京湾の船舶交通輻輳度の評価

ここでは10日間の観測データを用いてL換算密度を計算し、東京湾における船舶交通の輻輳度を評価する。まずL換算密度の概念について述べる。航行船舶の長さには大きなばらつきがあり、また衝突危険度は船舶の長さに比例すると考えられるので、船舶交通の輻輳度を評価する場合、例えば長さ50mの船と長さ300mの船を同じ1隻としてカウントするのは不合理である。

そこで海上交通工学では、ある長さの標準船を決めて、この船舶を1隻とカウントし、長さがN倍の船舶はN隻とカウントする方法がある。このようにしてカウントされた隻数がL換算隻数であり、単位面積あたりのL換算隻数をL換算密度と定義する。本研究では、標準船の長さを海上交通工学の研究例にならい、70mとした。

Fig.1.2-30は、観測した10日間の全時間帯における東京湾のL換算平均密度分布図である。なおL換算密度は1km²あたりのL換算隻数なので、図中の500m四方のメッシュでカウントされたL換算隻数を4倍した値である。

次に平均密度分布図とL換算平均密度分布図を比較する。Fig.1.2-31が10日間の全時間帯における東京湾の平均密度分布である。Fig.1.2-30とFig.1.2-31を比較すると、平均密度分布に比べてL換算平均密度分布は、航路筋が際立って密度が高いことが見て取れる。またL換算平均密度分布では、横浜港に出入りする大型船舶が浦賀水道航路から東京湾奥へかけての船舶交通流の主流に出入りする傾向が分かる。このL換算平均密度と平均密度を比較することにより、東京湾における大型船舶（標準船以上の船舶）の交通流は航路筋に沿っていることが分かる。L換算平均密度分布は平均密度分布に比べ、大型船舶の交通輻輳度をより強く表すものと言える。

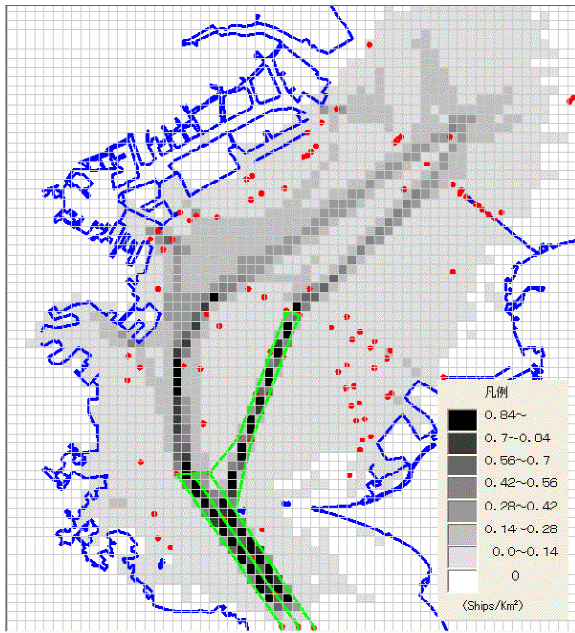


Fig.1.2-30 10日間の全時間帯における
東京湾のL換算平均密度分布

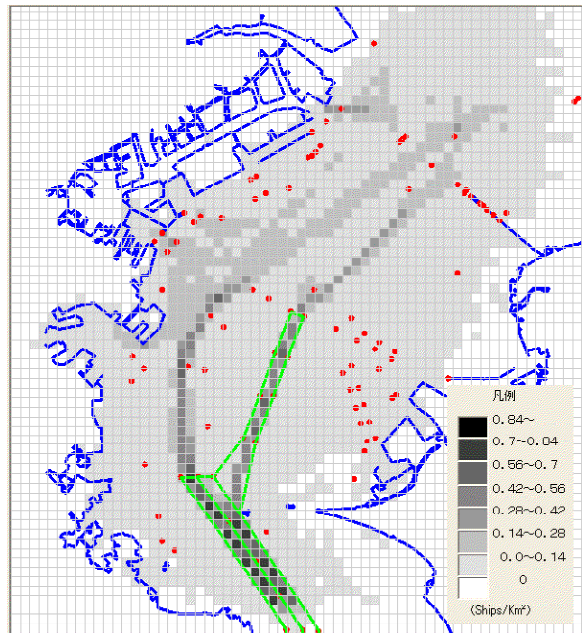


Fig.1.2-31 10日間の全時間帯における
東京湾の平均密度分布

次に10日間分の東京湾の1時間毎のL換算平均密度分布を Fig.1.2-32 に示す。各時間帯において、航路や航路への接続水域における船舶交通が多いことが際立っている。また船舶交通の時間特性については、朝方は浦賀水道航路北航レーンや中ノ瀬航路を航行する北航船が多く、夕方は浦賀水道航路南航レーンを航行する南航船が多いことが分かる。

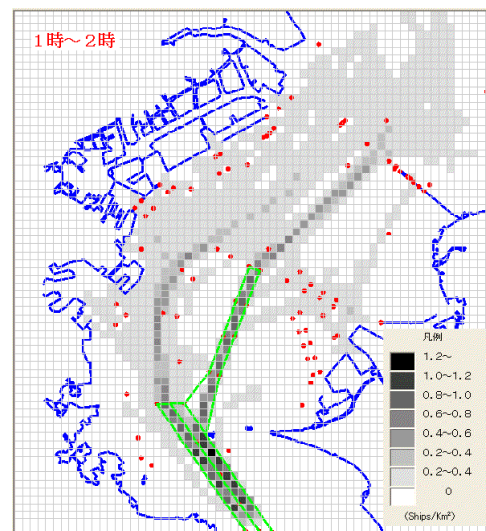
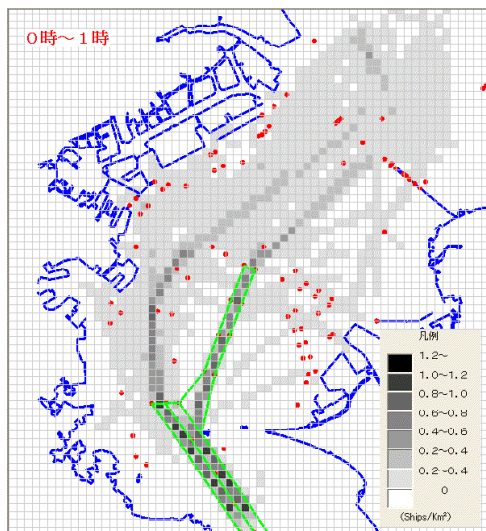


Fig.1.2-32 東京湾の1時間毎のL換算平均密度分布

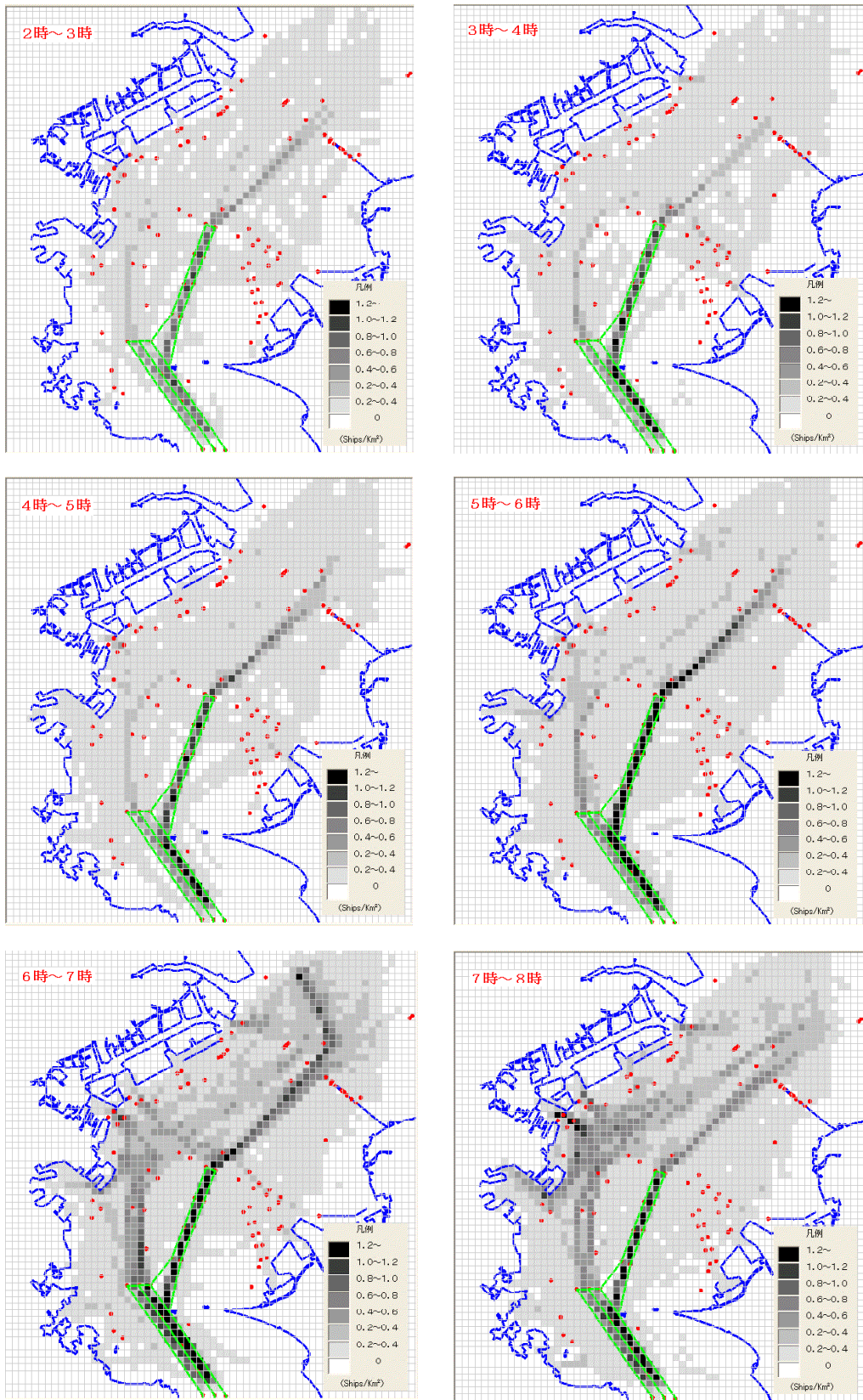


Fig.1.2-32 東京湾の1時間毎のL換算平均密度分布

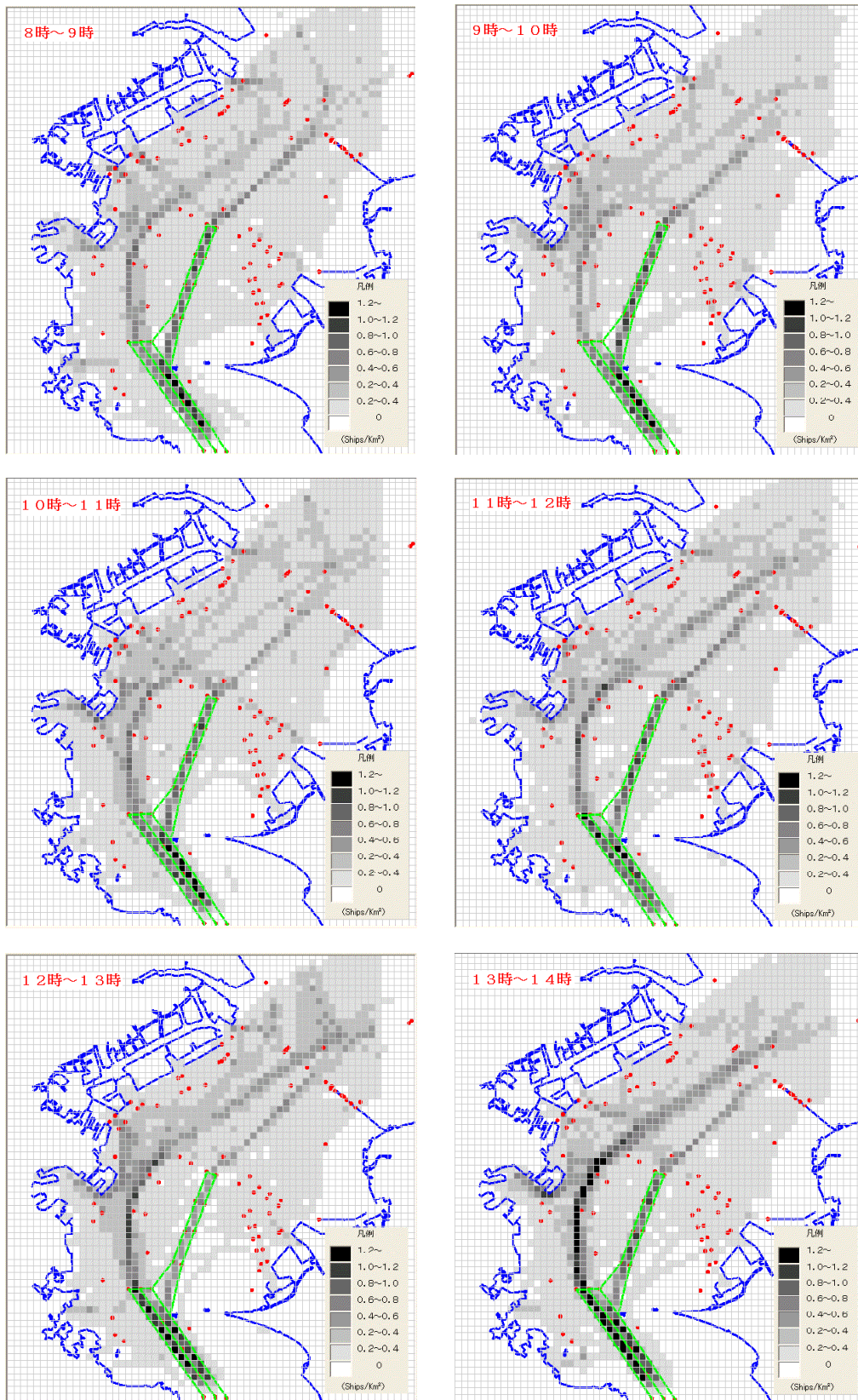


Fig.1.2-32 東京湾の1時間毎のL換算平均密度分布

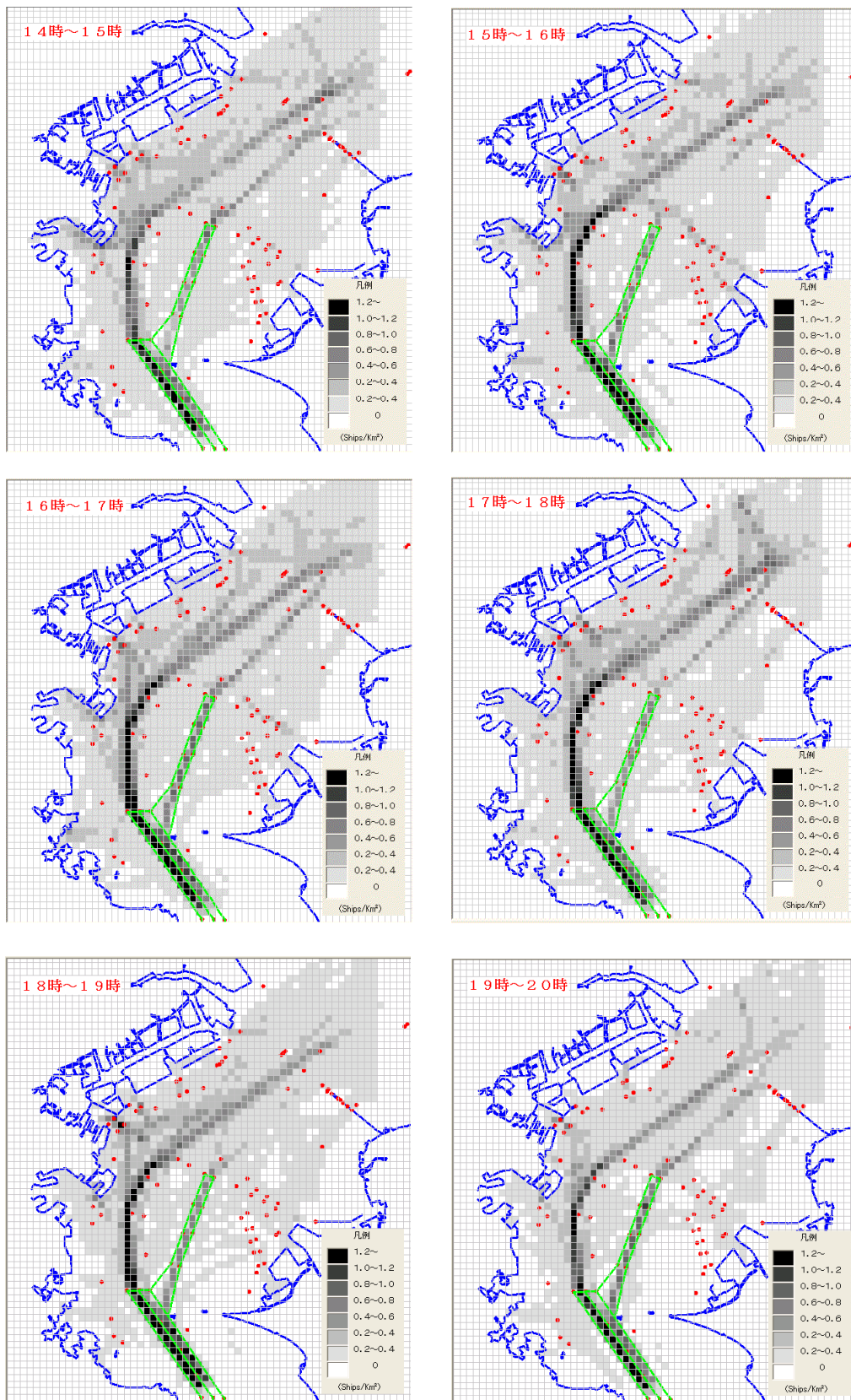


Fig.1.2-32 東京湾の1時間毎のL換算平均密度分布

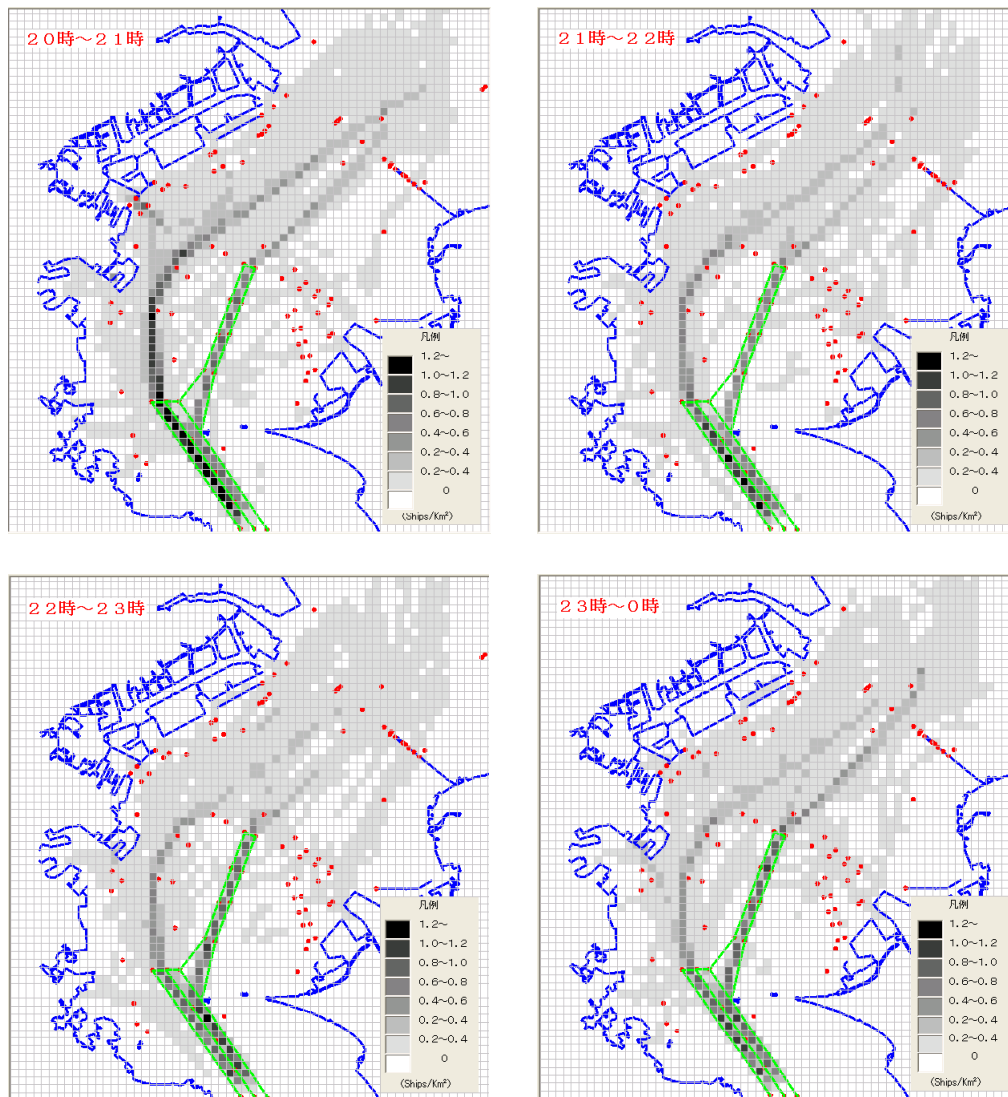


Fig.1.2-32 東京湾の1時間毎のL換算平均密度分布

1.2.4 バンパーモデルによる東京湾の衝突危険海域の評価

ここでは、船舶の衝突危険を評価するバンパーモデルを用いて10日間の航跡データを解析し、東京湾における船舶の衝突危険海域を抽出する。バンパーモデルでは、Fig.1.2-33の左図に示すように、自船の周囲に船首方向に長半径 $6.4L$ 、短半径 $1.6L$ の半楕円、船尾方向および両舷方向に半径 $1.6L$ の半円のバンパーを設定し、他船を入れたくないエリアとする(L は自船の全長)。そして、この自船のバンパーが他船のバンパーと重なった場合、衝突の危険が発生したと考える。

本研究では、計算を簡略化するため、Fig.1.2-33の右図に示すようにバンパーの形状を長方形として計算を行い、自船と他船のバンパーが重なった場合、両船を衝突危険船舶としてカウントする事にした。以下では、バンパーモデルによる解析結果を示す。

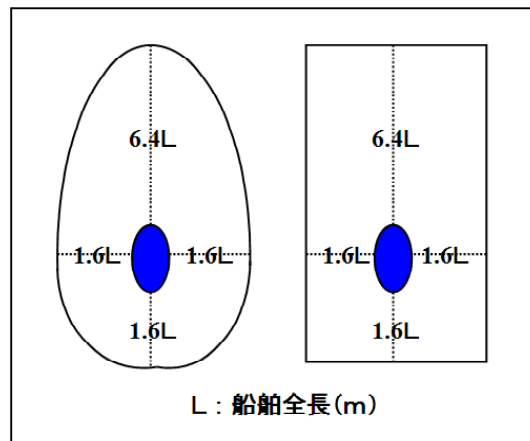


Fig.1.2-33 バンパーモデルの概念図

Fig.1.2-34 は、10 日間の観測の全期間において、東京湾を一辺 500 m のメッシュに区切り、そのメッシュに存在した危険船舶の隻数を算出し、レーダ画像数で割った値を平均密度として示した平均密度分布図である。この図において、危険船舶隻数は自船に対して危険な他船の隻数を自船の位置においてカウントしている。したがって、3 隻以上の船のバンパーが重なる多重遭遇も考慮されたものとなっている。浦賀水道航路と中ノ瀬航路、中ノ瀬の西側海域は、船舶が接近して航行している海域であることが分かる。

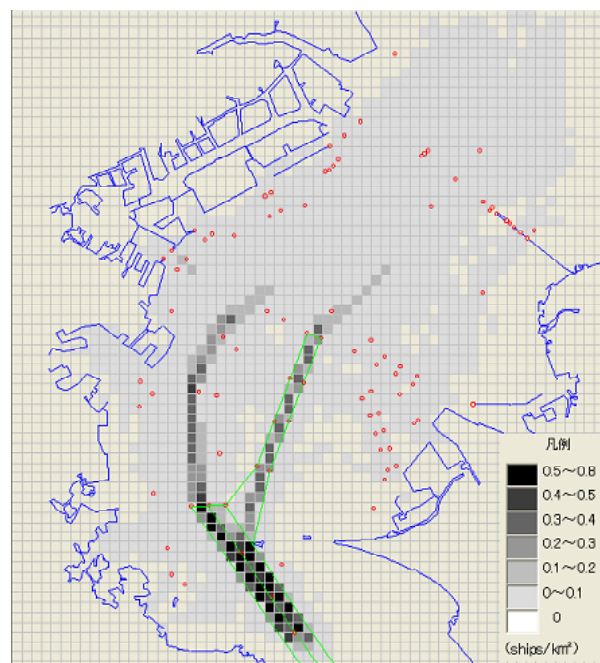


Fig.1.2-34 10 日間の全期間におけるバンパーモデルによる衝突危険船舶の平均密度分布

Fig.1.2-35 に示すように、衝突危険船舶の密度分布を時間帯別に見てみると、浦賀水道航路内は他の海域に比べ衝突危険船舶の密度がかなり高い。朝方 06:00 ~ 09:00 については、浦賀水道航路北航レーンと中ノ瀬航路にバンパーの重なりが集中していることが確認できる。12時を過ぎたころから浦賀水道航路の南航レーンが北航レーンよりも密度が高くなっていく。徐々に浦賀水道航路を南航していく船舶は増加していき、夕方 16:00 ~ 19:00 に衝突危険船舶数が最も多くなる。朝方は浦賀水道航路北航レーンと中ノ瀬航路の密度が高かったが、夕方は中ノ瀬の西側付近から浦賀水道航路南航レーンの密度が高くなっている。

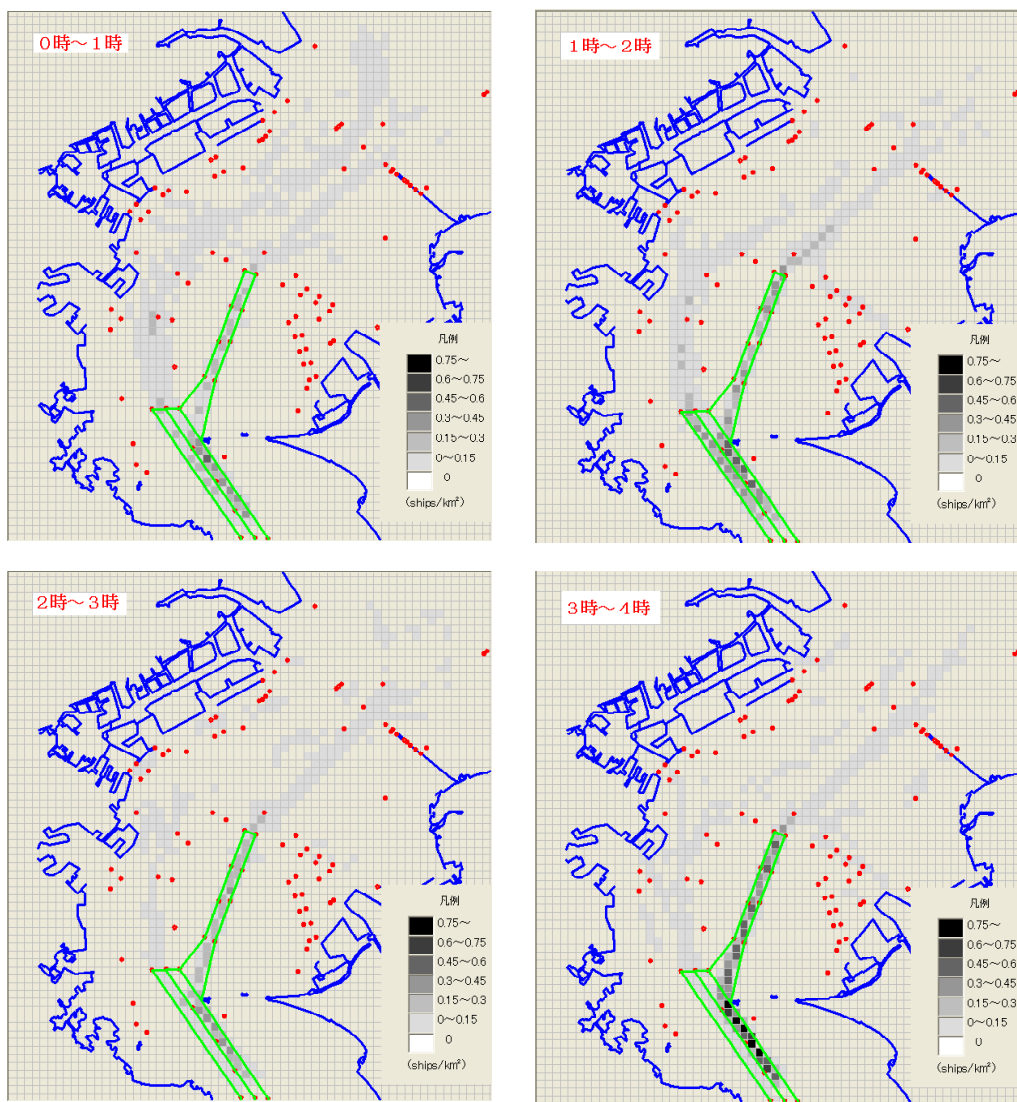


Fig.1.2-35 バンパーモデルによる衝突危険船舶の1時間毎の平均密度分布

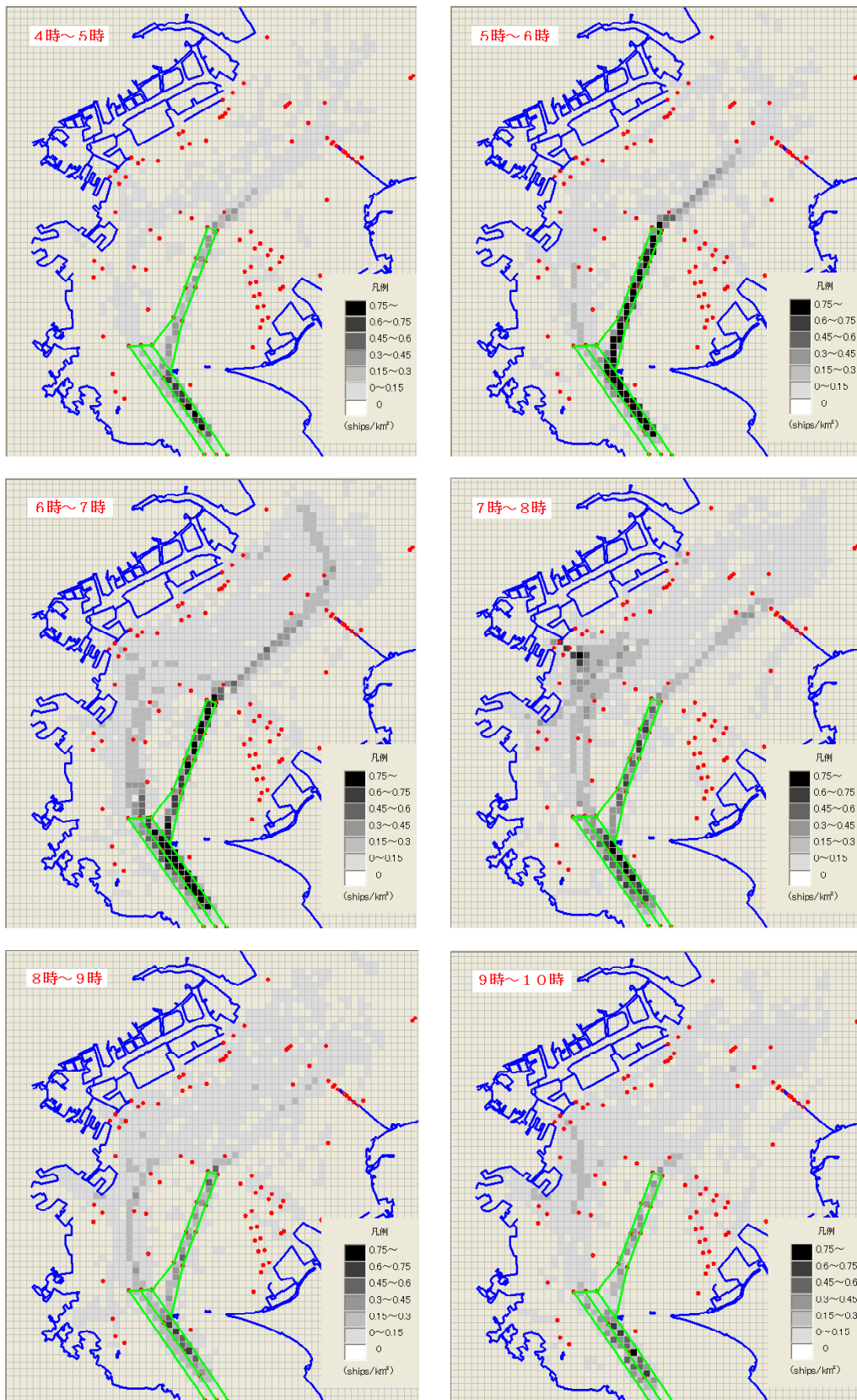


Fig.1.2-35 バンパーモデルによる衝突危険船舶の1時間毎の平均密度分布

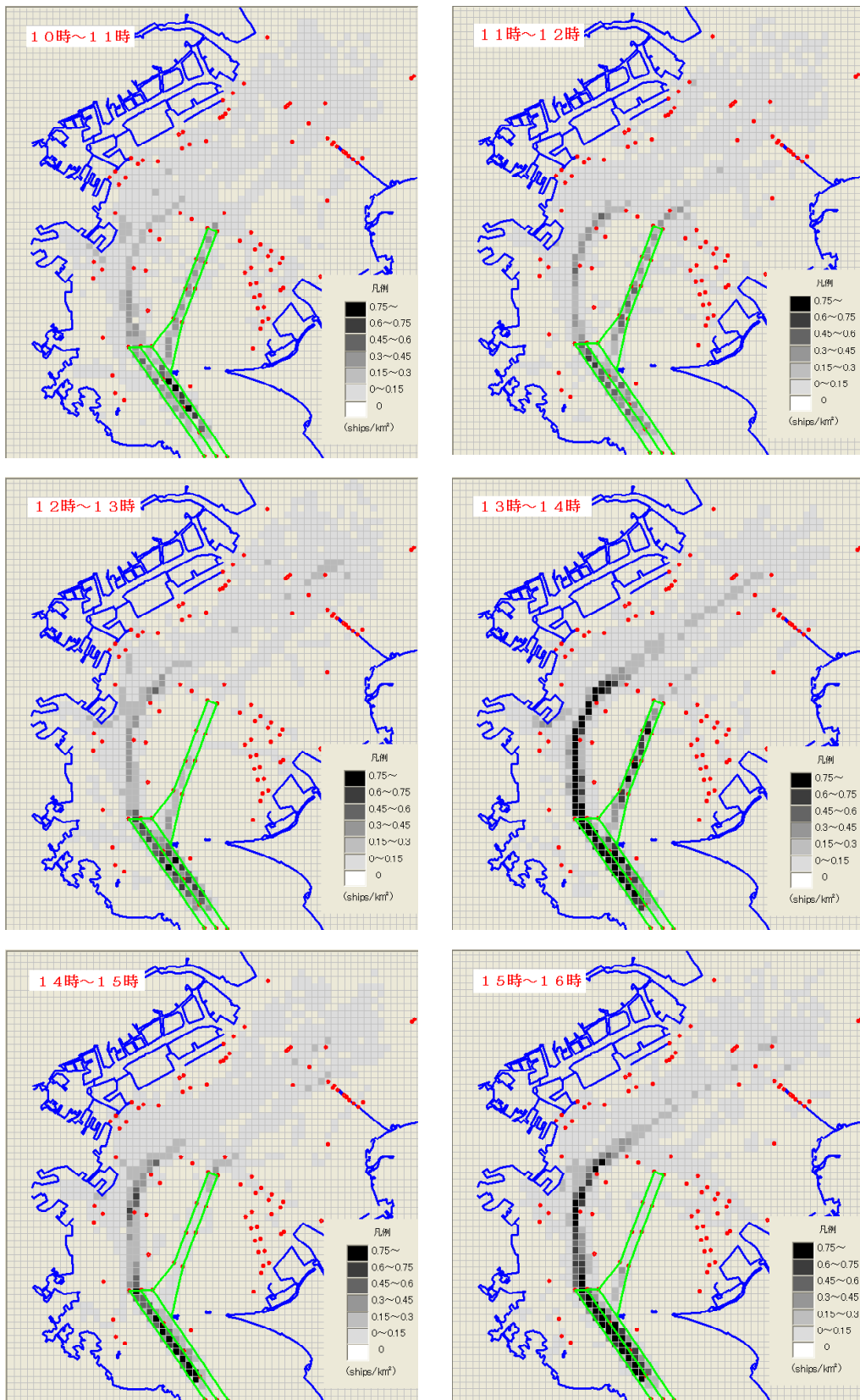


Fig.1.2-35 バンパーモデルによる衝突危険船舶の1時間毎の平均密度分布

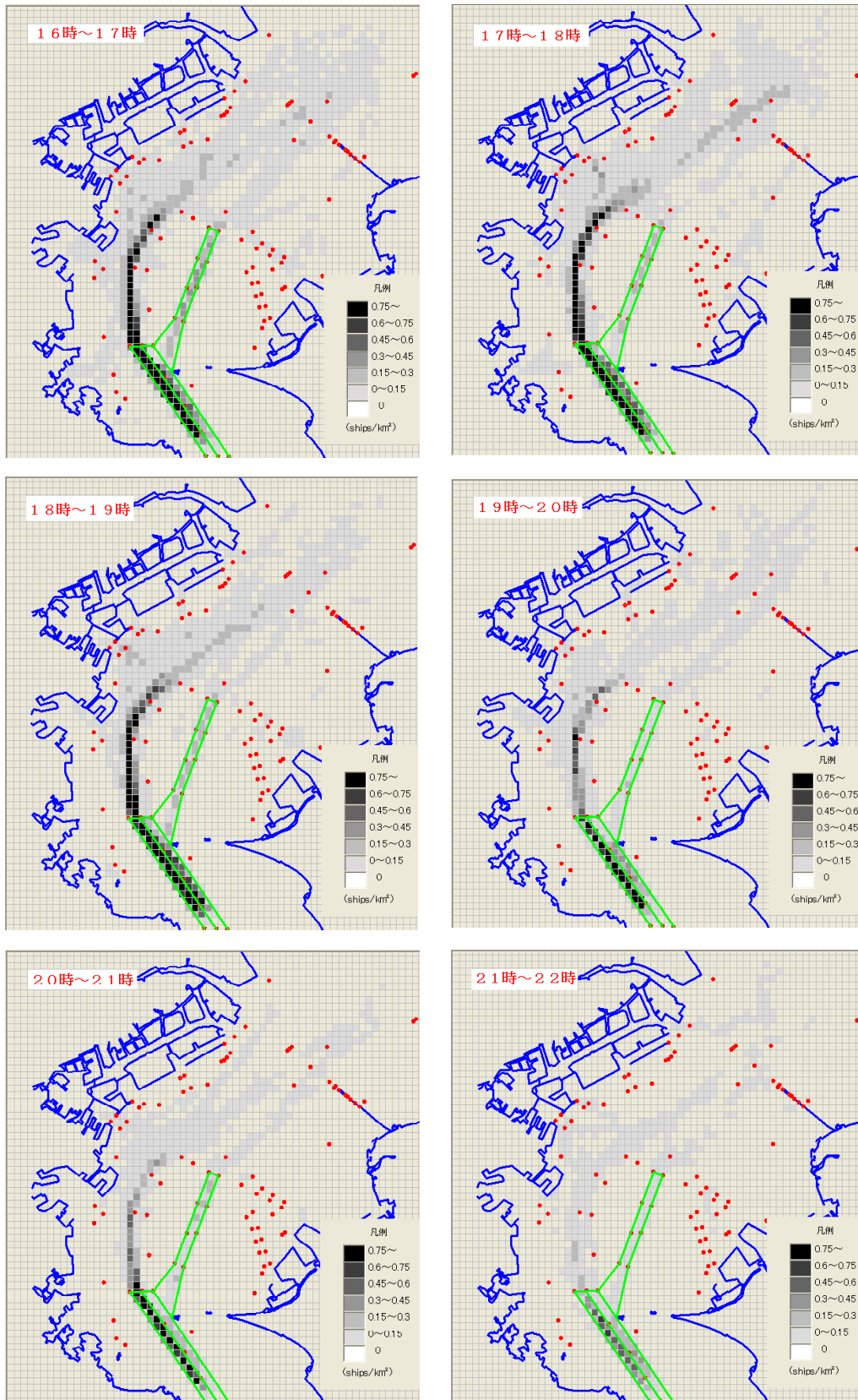


Fig.1.2-35 バンパーモデルによる衝突危険船舶の1時間毎の平均密度分布

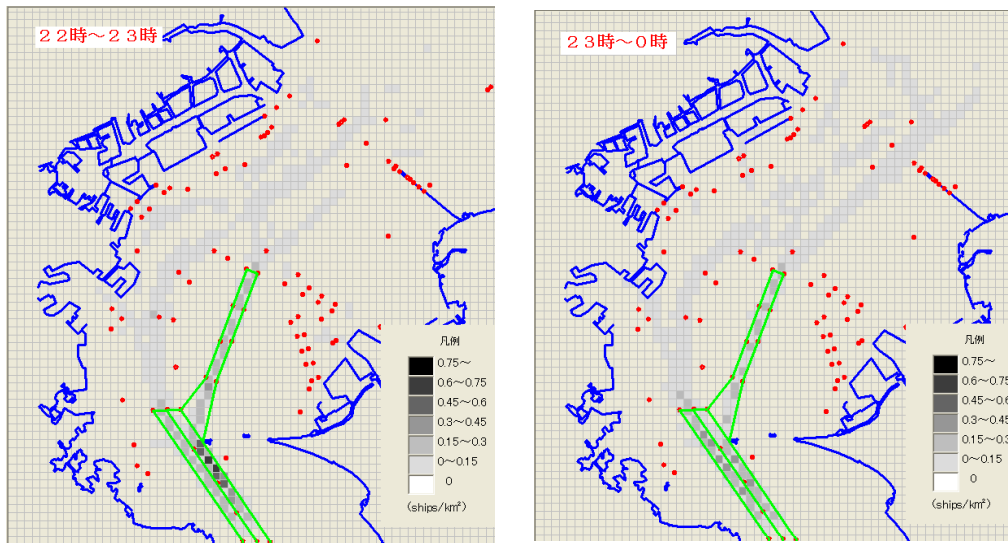


Fig.1.2-35 バンパーモデルによる衝突危険船舶の1時間毎の平均密度分布

Fig.1.2-36 は、バンパーモデルによる衝突危険船舶数の時間変化を示したものである。なお、図中では10日間の平均値を赤色のラインで示している。これによると、バンパーモデルによる危険船舶は船舶同士の接近する朝方と夕方集中しており、海域全体における1分間あたりの危険船舶の発生隻数は、朝方では33.3隻、夕方では26.2隻であった。

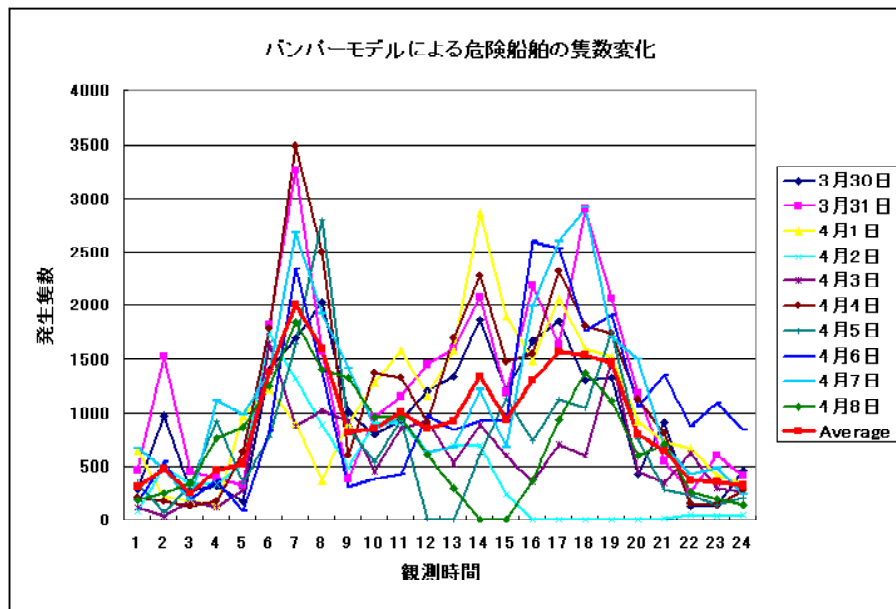


Fig.1.2-36 バンパーモデルによる衝突危険船舶数の時間変化

1.2.5 TCPA・DCPAによる東京湾の衝突危険海域の評価

ここでは、他船との衝突の危険を判断するためによく用いられるレーダの ARPA (Automatic Radar Plotting Aids) システムにおける TCPA・DCPA を用いて 10 日間の航跡データを解析し、東京湾における船舶の衝突危険海域を抽出する。

Fig.1.2-37 は、TCPA と DCPA の概念図を示したものである。図に示すように TCPA (Time to Closest Point of Approach : 最接近時間) とは、二船が現在の針路と速力をそのまま維持して航行した時に CPA (Closest Point of Approach : 最接近点) に到達するまでの時間を示している。また、DCPA (Distance of Closest Point of Approach) とは、CPA における二船間の距離を示している。

本研究では、TCPA が 5 分以内であり、かつ DCPA が 2 船のバンパーがぎりぎり接する最短距離である $3.2 L$ (L : 二船の平均全長) 以内である場合、その 2 船を衝突危険船舶とした。以下に、TCPA・DCPA による解析結果を示す。

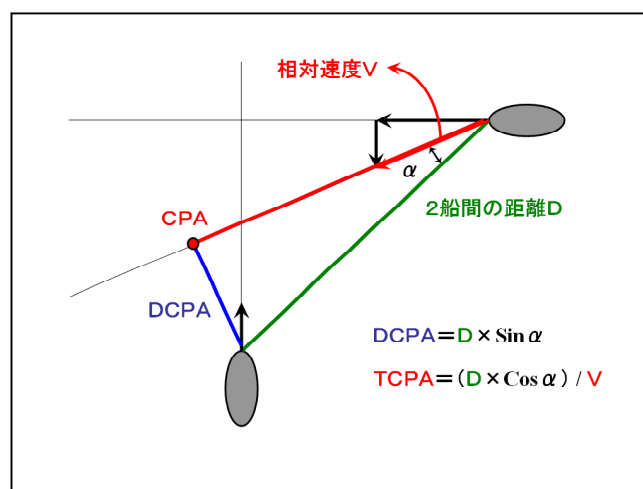


Fig.1.2-37 TCPA・DCPA の概念図

Fig.1.2-38 に、10 日間の全期間における DCPA・TCPA による衝突危険船舶の平均密度分布を示す。航路筋や横浜港の出入り口付近において衝突危険船舶が密集していることが分かる。またバンパーモデルによる評価と比べると、中ノ瀬航路の出口付近や横浜港の出入り口付近において衝突危険船舶が多くカウントされていることが分かる。

次に 10 日間の 1 時間毎の時間帯における DCPA・TCPA による衝突危険船舶の平均密度分布を Fig.1.2-39 に示す。朝方は横浜港の出入り口付近と中ノ瀬航路の出口、夕方は横浜港の出入り口から浦賀水道航路南航レーンの出入り口付近にかけてが、衝突危険海域として顕著である。

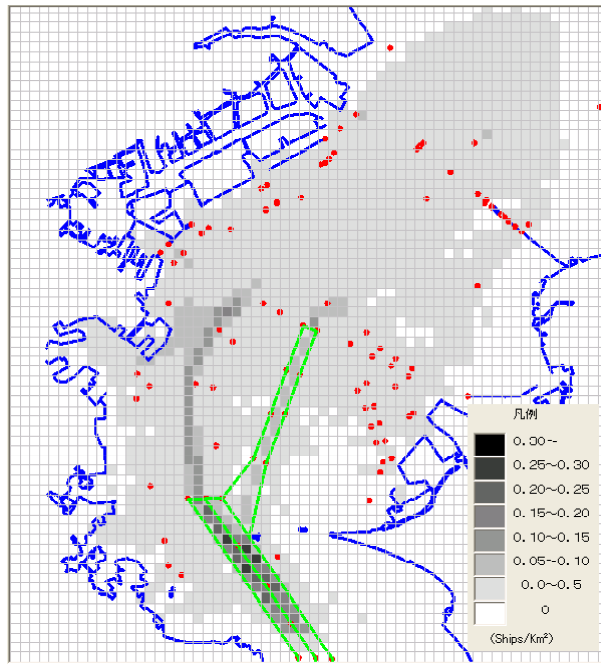


Fig.1.2-38 10日間の全期間における TCPA・DCPA による衝突危険船舶の平均密度分布

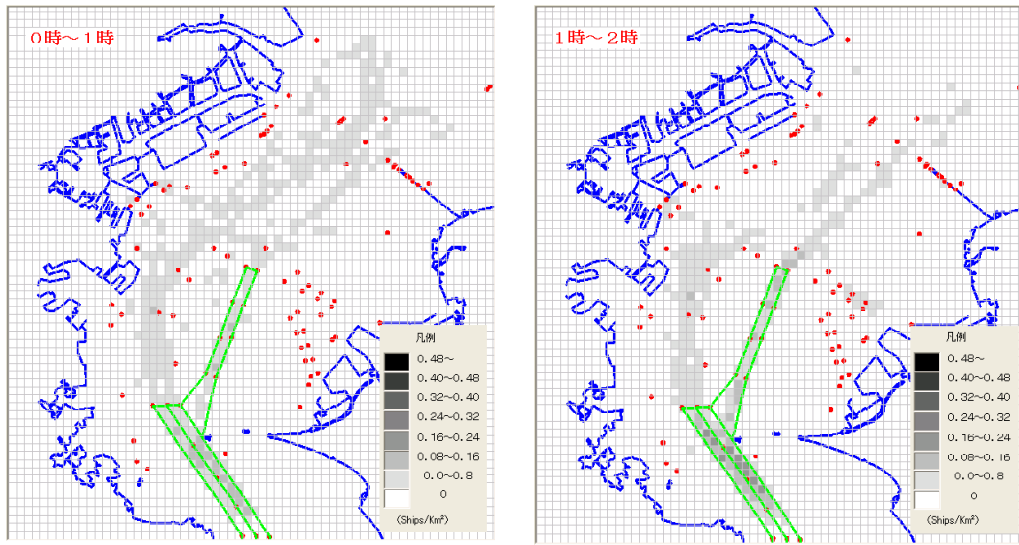


Fig.1.2-39 TCPA・DCPA による衝突危険船舶の1時間毎の平均密度分布

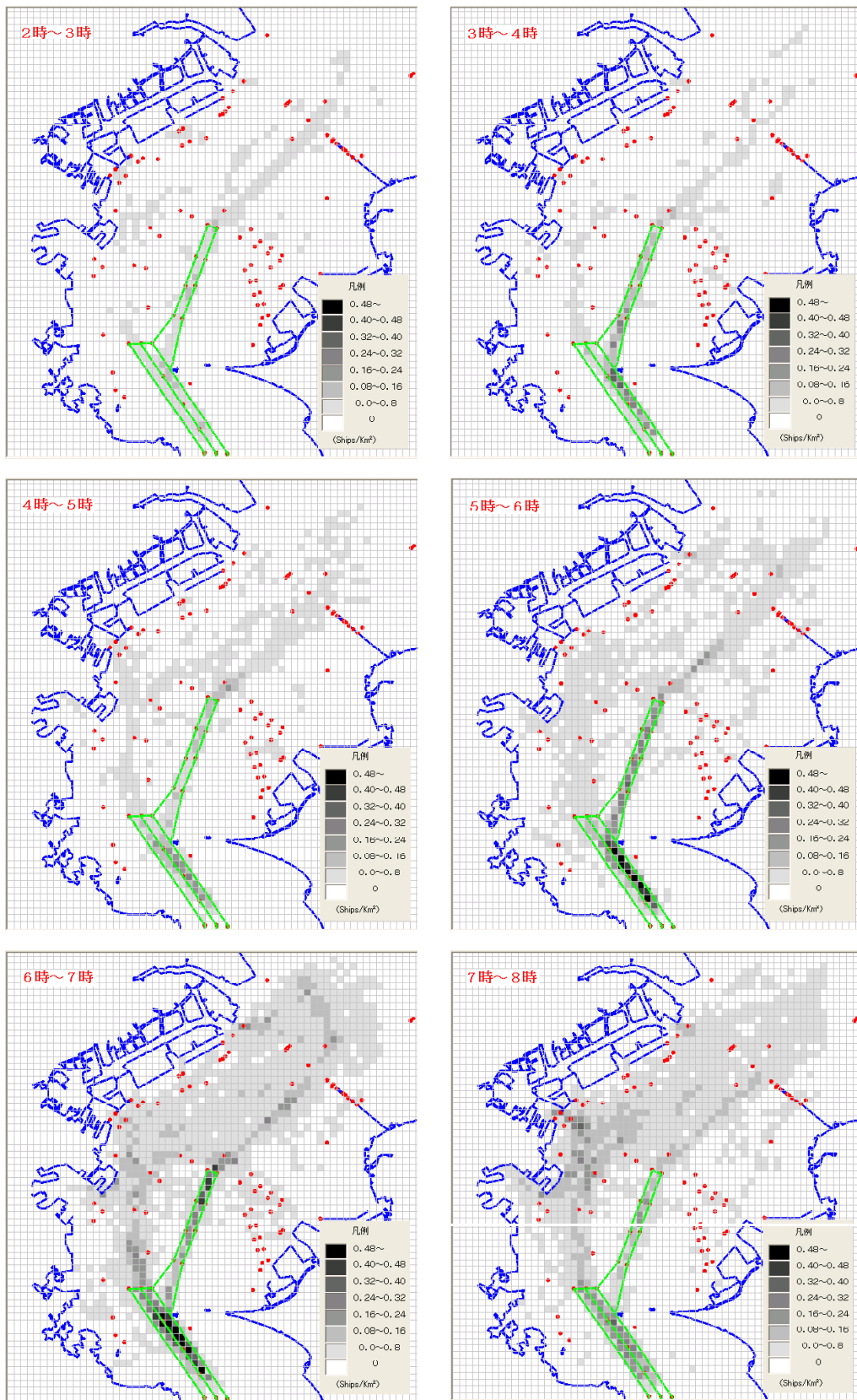


Fig.1.2-39 TCPA・DCPAによる衝突危険船舶の1時間毎の平均密度分布

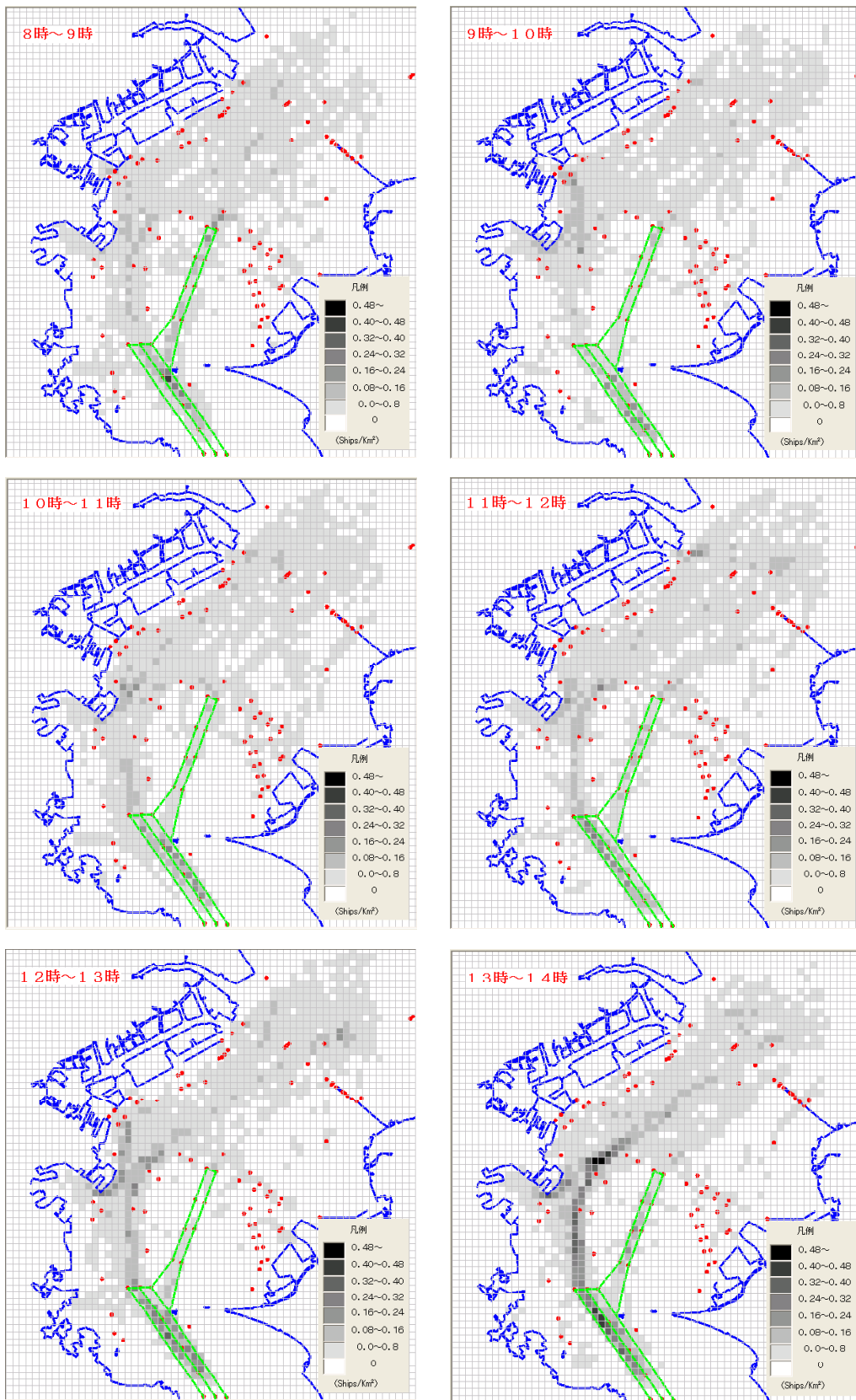


Fig.1.2-39 TCPA・DCPAによる衝突危険船舶の1時間毎の平均密度分布

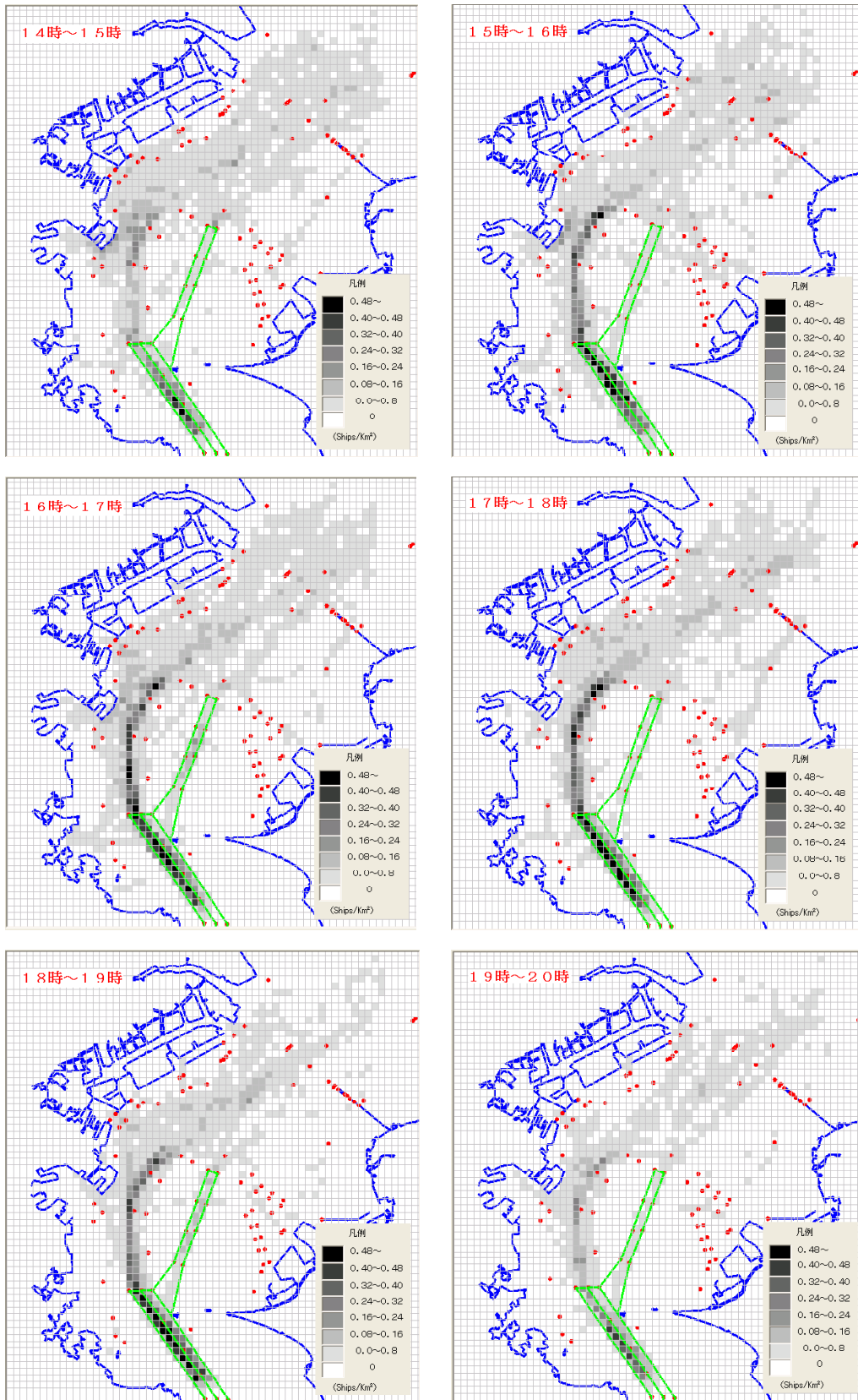


Fig.1.2-39 TCPA・DCPAによる衝突危険船舶の1時間毎の平均密度分布

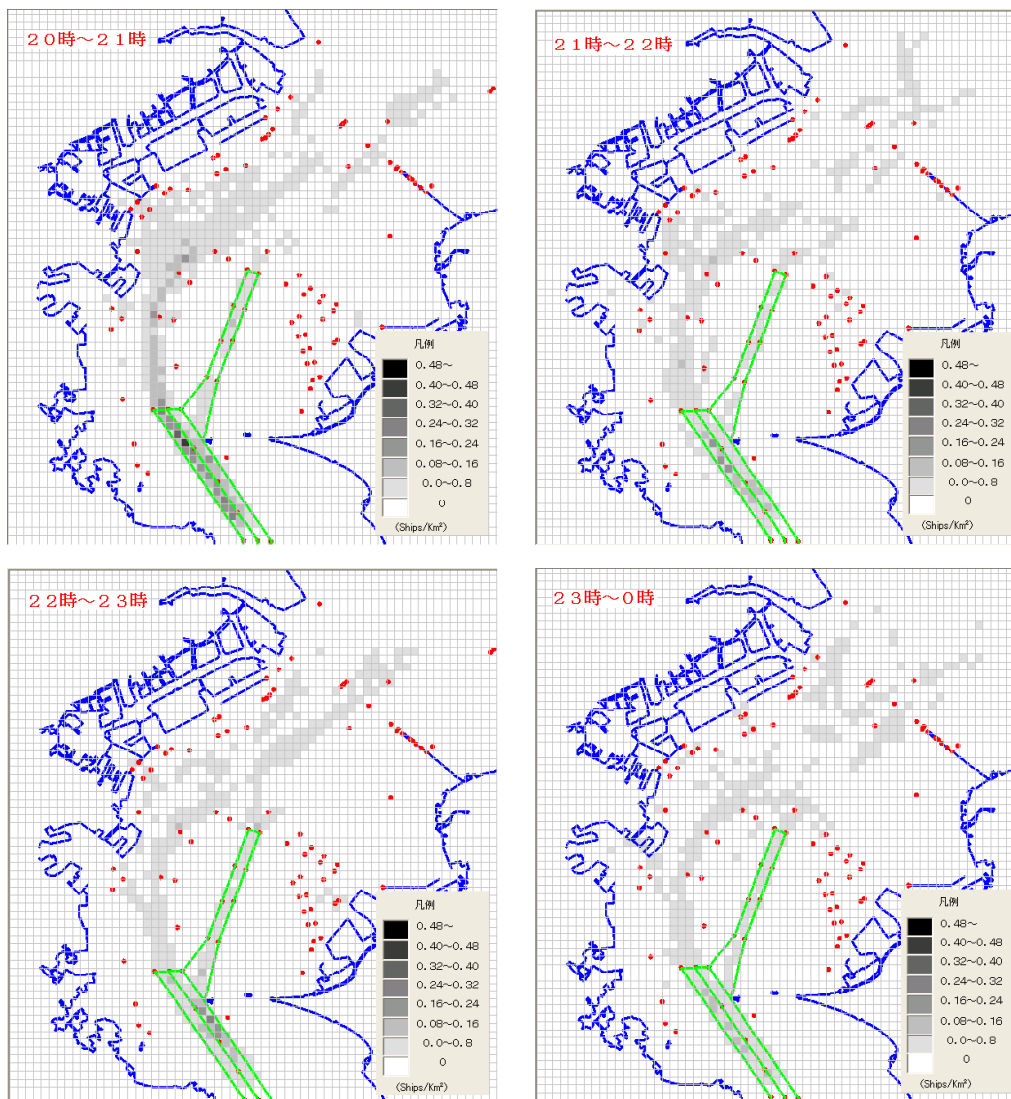


Fig.1.2-39 TCPA・DCPAによる衝突危険船舶の1時間毎の平均密度分布

次に Fig.1.2-40 に 1 日毎の TCPA・DCPA による衝突危険船舶数の時間変化を示す。どの日においても朝方と夕方に衝突危険船舶数のピークが来ており、衝突危険船舶数の時間変化は日によらないことが見て取れる。図中、衝突危険船舶数が 0 隻とされている時間帯は、降雨のために船舶画像が取得できなかった時間帯を表している。

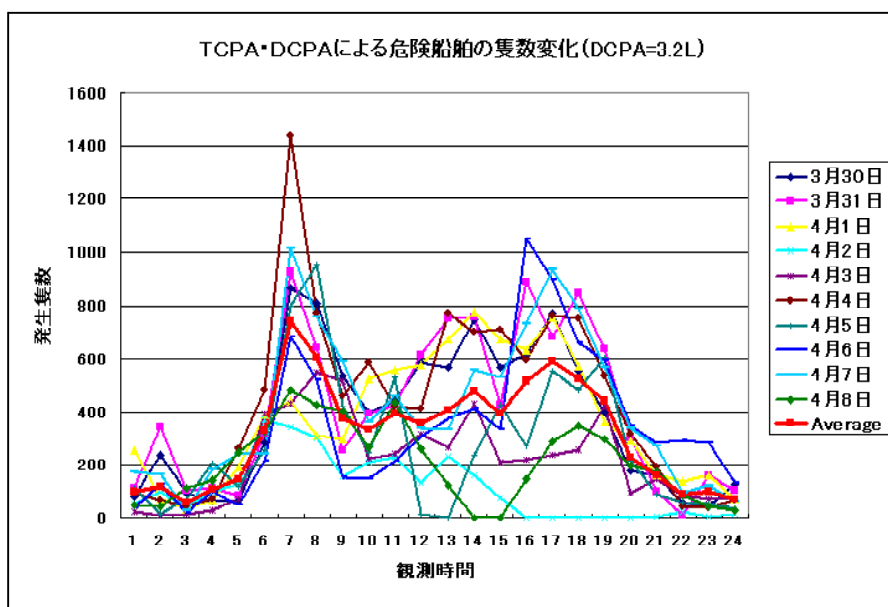


Fig.1.2-40 TCPA・DCPAによる衝突危険船舶数の時間変化

1.2.6 SJ 値による東京湾の衝突危険海域の評価

ここでは、操船者の主観的な衝突危険度を表す指標として使用される SJ 値（Subjective Judgment Value：主観的衝突危険度）を用いて 10 日間の航跡データを解析し、東京湾における船舶の衝突危険海域を抽出する。

SJ 値とは、『操船者が他船に対して感じる主観的な衝突危険度』を表わすもので、操船シミュレータ実験により得られたものである。SJ 値は、他船との相対方位変化率、距離、距離変化率および自船と他船の長さと速力を用いて回帰式で計算される。

本研究では、見合い関係を簡略化し、2 船の針路差が 170 度から 180 度である場合を行会い、10 度以内である場合を追越し、それ以外の場合を横切りの見合い関係とし、それぞれの見合い関係について、以下に示す実験式を用いて SJ 値を計算した。なお、SJ 値は実験式において、+3（極めて安全）から -3（極めて危険）までの値によって衝突危険度を表すものである。

(SJ 値の計算式)

(1) 横切り関係

$$\text{自船が避航船の場合} : \text{SJ} = 6.00 \Omega + 0.09R' - 2.32$$

$$\text{自船が保持船の場合} : \text{SJ} = 7.01 \Omega + 0.08R' - 1.53$$

(2) 行会い関係

$$\text{SJ} = 6.00 \Omega + 0.09R' - 2.32$$

(3) 追越し関係

$$\text{SJ} = 54.43 \Omega + 0.24R' + 2.77dR'/dt - 0.784$$

ここで

$$\Omega = |d\theta / dt| \times (L_o / V_o)$$

$$R' = R / ((L_o + L_t) / 2)$$

$$dR' / dt = V_r / V_o$$

L_o : 自船の全長 (m)

L_t : 他船の全長 (m)

V_o : 自船の船速 (m/min)

V_r : 自船と他船との相対速力 (m/min)

R : 自船と他船との距離 (m)

θ : 他船の相対方位 (rad)

$d\theta / dt$: 相対方位変化率 (rad/min)

Fig.1.2-41 から Fig.1.2-43 は、10 日間の観測中、SJ 値の解析により危険な遭遇状態と判断された船舶の位置分布を SJ 値の値別に示している (SJ 値が 0 ~ -1 : やや危険、SJ 値が -1 ~ -2 : かなり危険、SJ 値が -2 ~ -3 : 非常に危険)。

これらの図に示すように、SJ 値で危険と判定された船舶の位置は、北航船と南航船が行会いの見合い関係を持つ浦賀水道航路内、木更津港方面から来た船舶が中ノ瀬航路を北上して来た船舶と危険な横切りの見合い関係を持つ中ノ瀬航路の出口付近の海域、東京湾を南下する船舶と横浜港に出入りする船舶が危険な横切りの見合い関係を持つ横浜港の出口海域など、船舶が輻輳する海域に集中している。なお、観測海域を一辺 500m のメッシュに区切り、各メッシュにおける危険船舶の密度を 10 日間分のデータで平均すると、最も密度の高い海域においては、Fig.1.2-41 では 1.129 (隻/km²)、Fig.1.2-42 では 0.689 (隻/km²)、Fig.1.2-43 では 0.102 (隻/km²) であった。

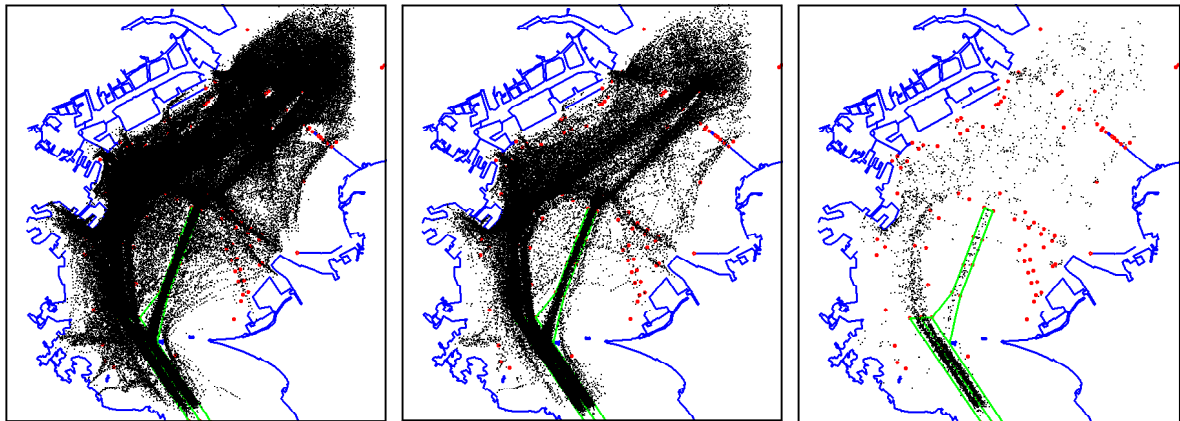


Fig.1.2-41 SJ 値 : 0 ~ -1 Fig.1.2-42 SJ 値 : -1 ~ -2 Fig.1.2-43 SJ 値 : -2 ~ -3
衝突危険船舶の位置分布 (10 日間の観測データ)

同様に、Fig.1.2-44 から Fig.1.2-55 は、それぞれ 04 ~ 08 時、10 ~ 14 時、16 ~ 20 時、22 ~ 02 時における SJ 値の値別の船舶の位置分布を示している (SJ 値が 0 ~ -1 : やや危険、SJ 値が -1 ~ -2 : かなり危険、SJ 値が -2 ~ -3 : 非常に危険)。

これらの図から、各時間帯の交通量に応じた危険な遭遇状態を把握する事ができる。なお、それぞれの時間帯において最も危険船舶密度の高い海域の値は、04～08時では (Fig.1.2-44 : 1.575 (隻/km²)、Fig.1.2-45 : 0.943 (隻/km²)、Fig.1.2-46 : 0.180 (隻/km²))、10～14時では (Fig.1.2-47 : 1.286 (隻/km²)、Fig.1.2-48 : 0.773 (隻/km²)、Fig.1.2-49 : 0.126 (隻/km²))、16～20時では (Fig.1.2-50 : 1.670 (隻/km²)、Fig.1.2-51 : 1.005 (隻/km²)、Fig.1.2-52 : 0.191 (隻/km²))、22～02時では (Fig.1.2-53 : 0.768 (隻/km²)、Fig.1.2-54 : 0.370 (隻/km²)、Fig.1.2-55 : 0.056 (隻/km²)) であった。

10日間の全期間のデータについて見ると、SJ値が0以下の危険船舶数を100%とすると、SJ値が0～-1の範囲の危険船舶数は58.802%、SJ値が-1～-2の範囲の危険船舶数は35.885%、SJ値が-2～-3の範囲の危険船舶数は5.313%となっている。

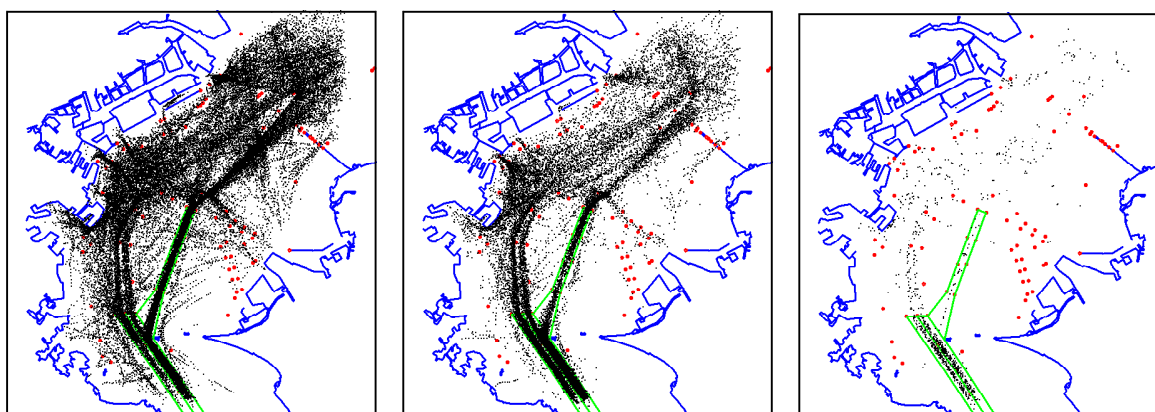


Fig.1.2-44 SJ値 : 0～-1 Fig.1.2-45 SJ値 : -1～-2 Fig.1.2-46 SJ値 : -2～-3
衝突危険船舶の位置分布 (04～08時の観測データ)

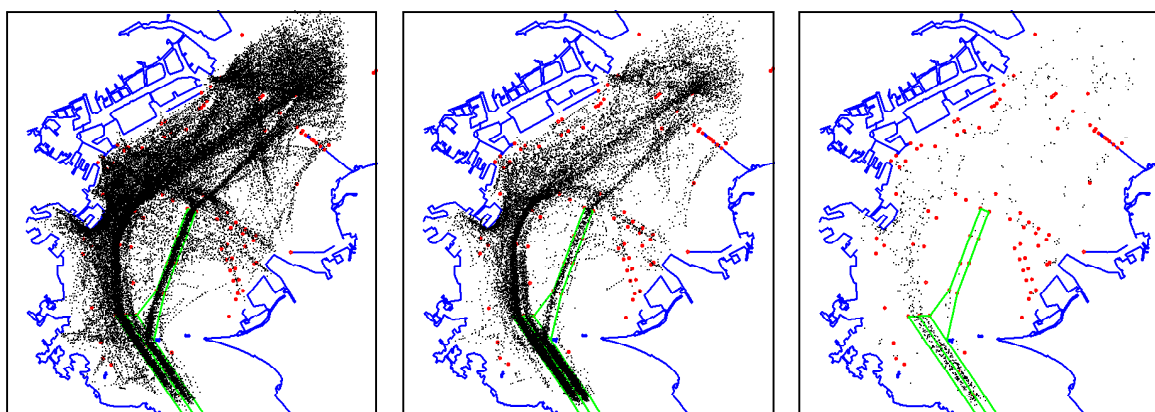


Fig.1.2-47 SJ値 : 0～-1 Fig.1.2-48 SJ値 : -1～-2 Fig.1.2-49 SJ値 : -2～-3
衝突危険船舶の位置分布 (10～14時の観測データ)

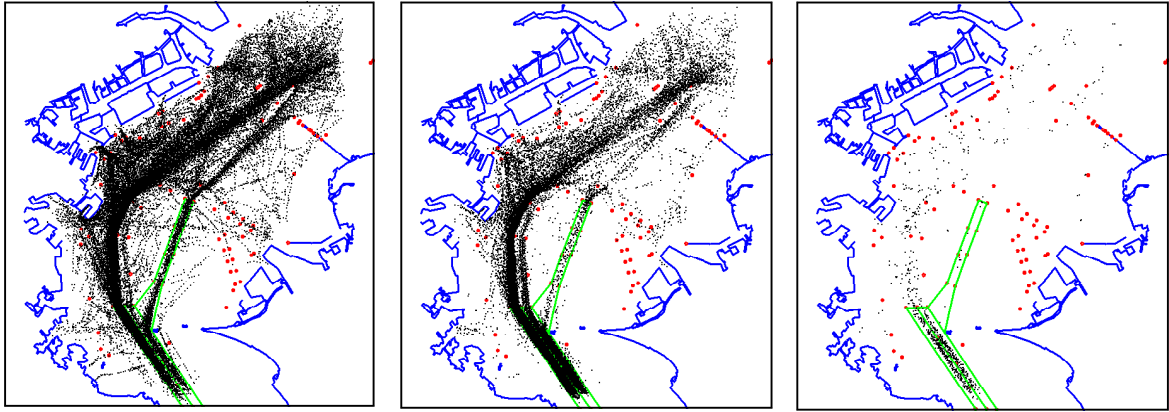


Fig.1.2-50 SJ 値 : 0 ~-1 Fig.1.2-51 SJ 値 : -1 ~-2 Fig.1.2-52 SJ 値 : -2 ~-3
衝突危険船舶の位置分布 (16 ~ 20 時の観測データ)

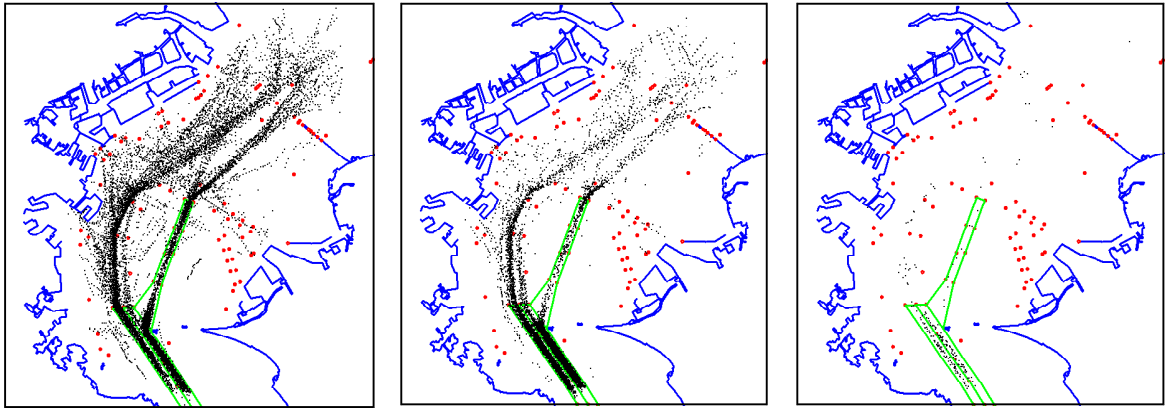


Fig.1.2-53 SJ 値 : 0 ~-1 Fig.1.2-54 SJ 値 : -1 ~-2 Fig.1.2-55 SJ 値 : -2 ~-3
衝突危険船舶の位置分布 (22 ~ 02 時の観測データ)

Fig.1.2-56 から Fig.1.2-58 は、10 日間の観測中、SJ 値の解析により危険な遭遇状態 (SJ 値が 0 以下の場合を危険とする) と判断された船舶の位置分布を、見合い関係別 (追越し関係、行会い関係、横切り関係) に示したものである。これらの図より、SJ 値で危険と判定された船舶は、Fig.1.2-56 の追越し関係では同航船が集中する中ノ瀬航路内や浦賀水道航路内に集中しており、Fig.1.2-57 の行会い関係では北航船と南航船とが反航する川崎から横浜そして浦賀水道航路に至るまでの海域に集中しており、Fig.1.2-58 の横切り関係では北航船および南航船と港を出入りする船舶がクロスする海域に集中していることがわかる。

なお、観測海域を一辺 500m のメッシュに区切り、各メッシュにおける衝突危険船舶の密度を 10 日間分のデータで平均すると、最も密度の高い海域においては、Fig.1.2-56 では 0.019 (隻/km²)、Fig.1.2-57 では 0.995 (隻/km²)、Fig.1.2-58 では 1.119 (隻/km²) であった。

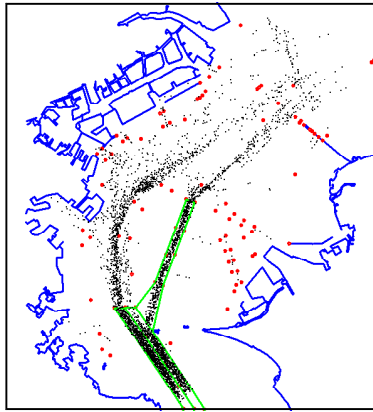


Fig.1.2-56 追越し関係

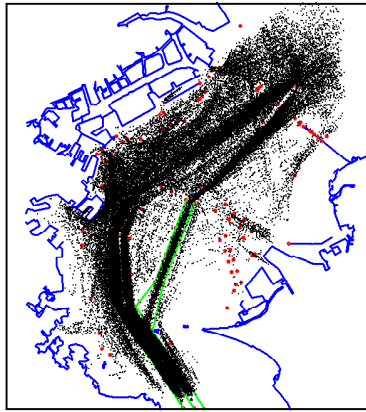


Fig.1.2-57 行会い関係

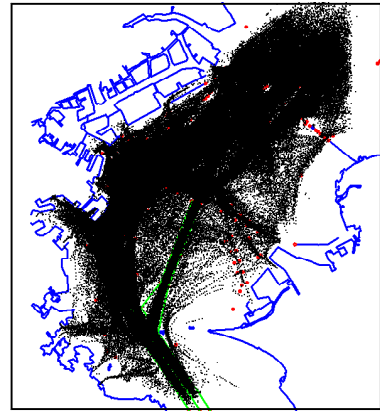


Fig.1.2-58 横切り関係

SJ 値による衝突危険船舶の位置分布 (10 日間の観測データ)

同様に、Fig.1.2-59 から Fig.1.2-70 は、それぞれ 04 ～ 08 時、10 ～ 14 時、16 ～ 20 時、22 ～ 02 時における SJ 値による見合い関係別（追越し関係、行会い関係、横切り関係）の衝突危険船舶の位置分布を示している。これらの図より、各時間帯の交通量に応じた危険な遭遇状態を把握する事ができる。

なお、それぞれの時間帯において最も危険船舶密度の高い海域の値は、04 ～ 08 時では (Fig.1.2-59 : 0.040 (隻/km²)、Fig.1.2-60 : 0.962 (隻/km²)、Fig.1.2-61 : 1.452 (隻/km²))、10 ～ 14 時では (Fig.1.2-62 : 0.028 (隻/km²)、Fig.1.2-63 : 1.146 (隻/km²)、Fig.1.2-64 : 1.582 (隻/km²))、16 ～ 20 時では (Fig.1.2-65 : 0.054 (隻/km²)、Fig.1.2-66 : 1.702 (隻/km²)、Fig.1.2-67 : 2.448 (隻/km²))、22 ～ 02 時では (Fig.1.2-68 : 0.012 (隻/km²)、Fig.1.2-69 : 0.791 (隻/km²)、Fig.1.2-70 : 0.522 (隻/km²)) であった。

10 日間の全期間のデータで見ると、全ての見合い関係における危険船舶数を 100 % とすると、追越し関係の危険船舶数は 0.891 %、行会い関係の危険船舶数は 46.648 %、横切り関係の危険船舶数は 52.461 % となっている。

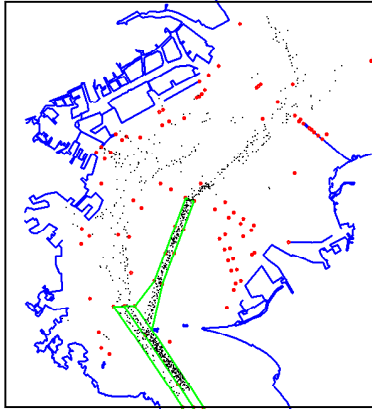


Fig.1.2-59 追越し関係

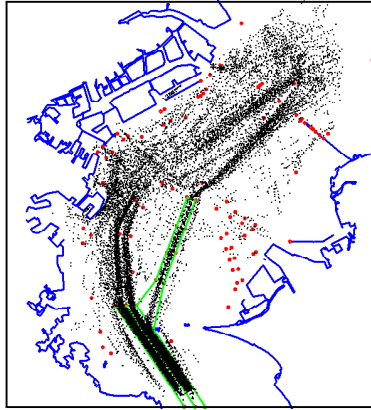


Fig.1.2-60 行会い関係

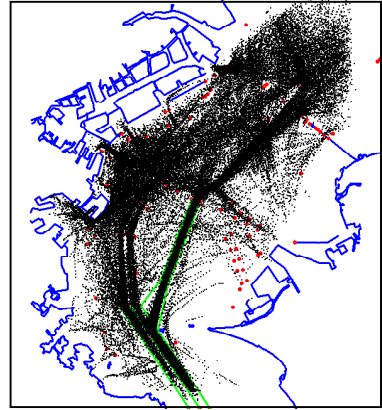


Fig.1.2-61 横切り関係

SJ 値による衝突危険船舶の位置分布 (04 ~ 08 時の観測データ)

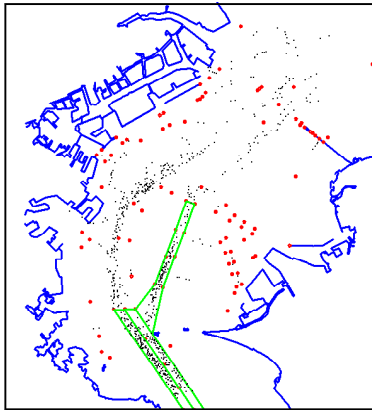


Fig.1.2-62 追越し関係

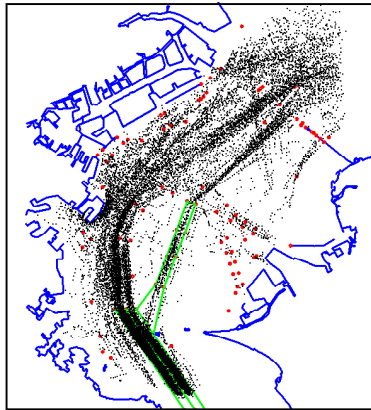


Fig.1.2-63 行会い関係

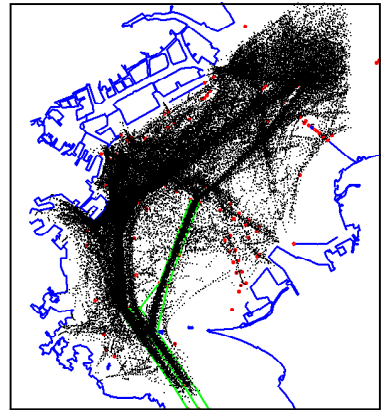


Fig.1.2-64 横切り関係

SJ 値による衝突危険船舶の位置分布 (10 ~ 14 時の観測データ)

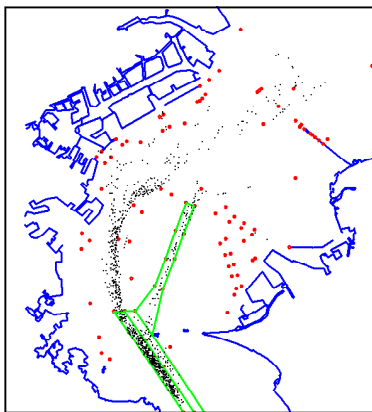


Fig.1.2-65 追越し関係

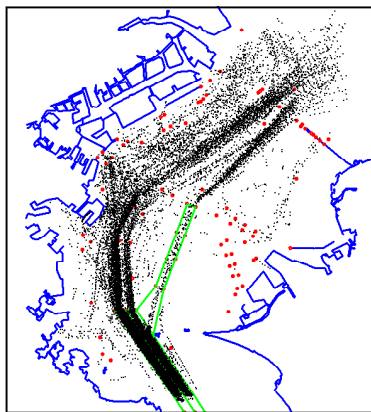


Fig.1.2-66 行会い関係

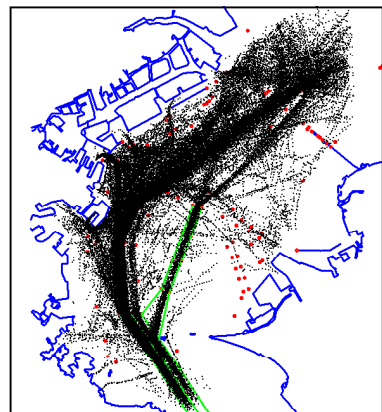


Fig.1.2-67 横切り関係

SJ 値による衝突危険船舶の位置分布 (16 ~ 20 時の観測データ)

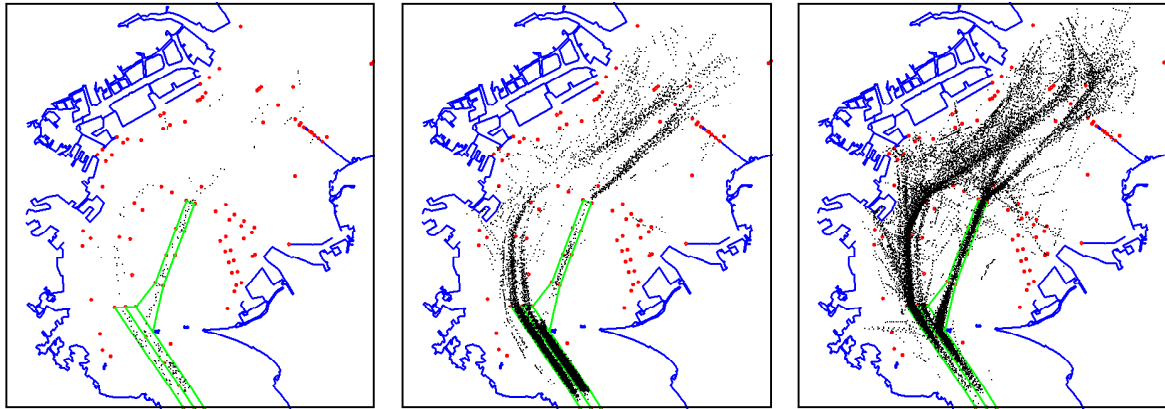


Fig.1.2-68 追越し関係 Fig.1.2-69 行会い関係 Fig.1.2-70 横切り関係
 SJ 値による衝突危険船舶の位置分布 (22 ~ 02 時の観測データ)

Fig.1.2-71 は、SJ 値による衝突危険船舶数 の時間変化を示したものである (SJ 値が 0 以下の場合を危険とする)。Fig.1.2-72 から Fig.1.2-74 は、これらのデータの内、見合い関係 (追越し関係、行会い関係、横切り関係) による内訳を示している。なお、それぞれの図において、10 日間の平均値を赤色のラインで示している。いずれの見合い関係もほぼ同様の変化を示しており、衝突危険船舶の発生は交通量の増加する朝方と夕方の時間帯に集中している事がわかる。なお、朝方のピーク時 1 時間あたりの東京湾全域における衝突危険状態の平均発生回数は 6813.5 回 (この内、追越し関係は 35.5 回、行会い関係は 1259 回、横切り関係は 5519 回)、夕方のピーク時 1 時間あたりの衝突危険状態の平均発生回数は 5132.3 回 (この内、追越し関係は 36.1 回、行会い関係は 999.2 回、横切り関係は 4097 回) であった。

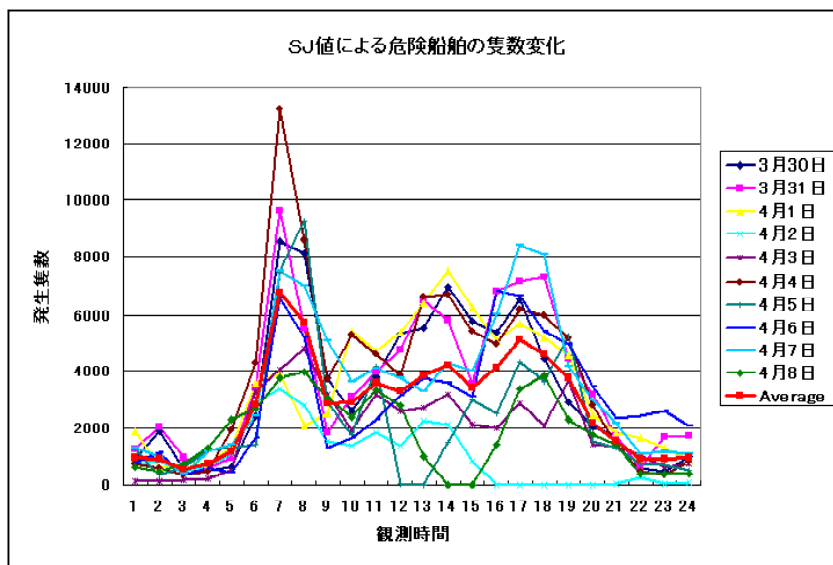


Fig.1.2-71 SJ 値による衝突危険船舶数の時間変化

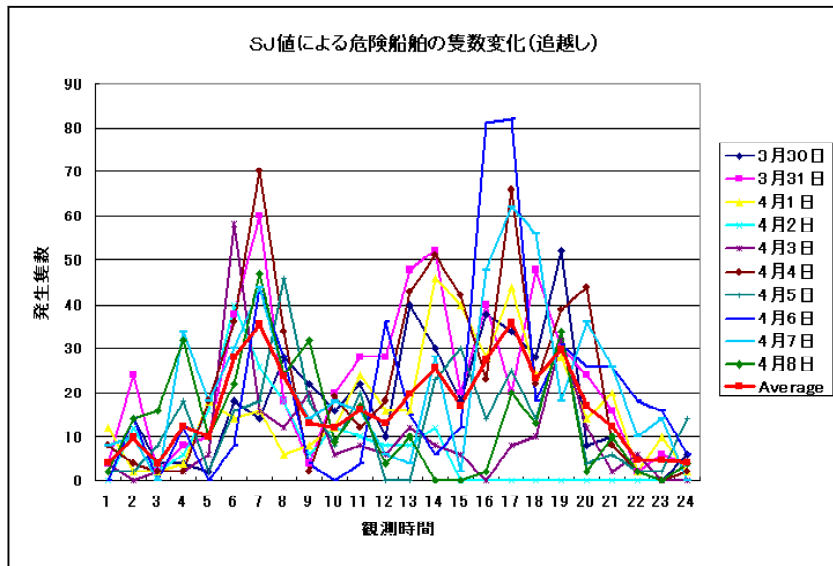


Fig.1.2-72 SJ 値による追越しの危険船舶数の時間変化

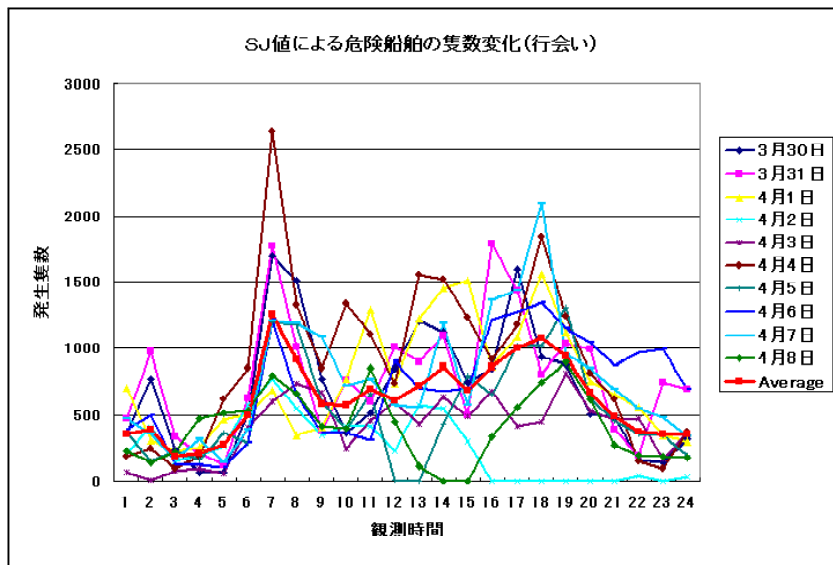


Fig.1.2-73 SJ 値による行会いの危険船舶数の時間変化

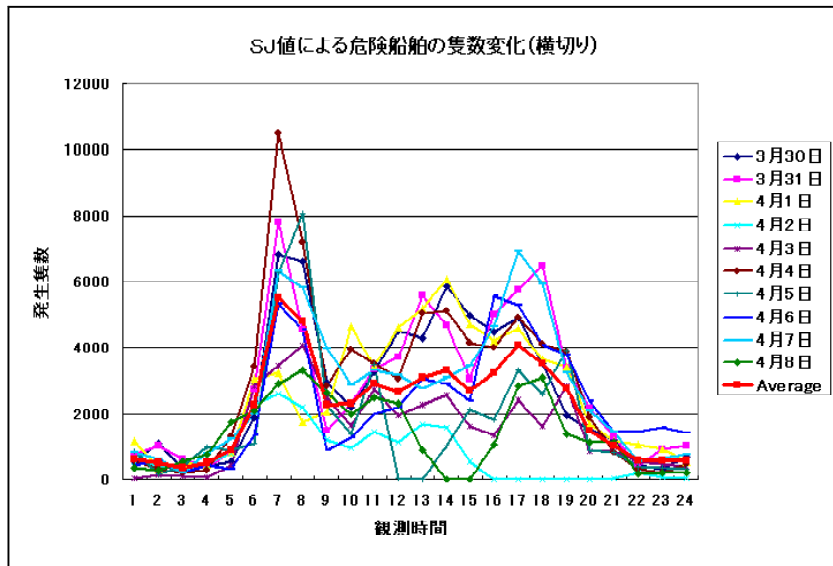


Fig.1.2-74 SJ 値による横切りの危険船舶数の時間変化

1.3 船舶航行監視・解析システムに関するまとめ

以上、東京湾における船舶航行監視・解析システムについて、今年度の研究成果を述べた。

船舶航行監視システムについては、前年度に開発した2つのレーダ局からのレーダ画像を統合し、それにAIS情報を重畳表示させるWebサイトの機能強化を図った。2局レーダ合成画像を大きく見やすくし、それにAIS情報による船位と速度ベクトルを重畳表示させるメニューを作成した。

AIS情報の単独表示メニューにおいては、マウスで船位をクリックした船舶の航海状態や対地針路・対地速度、船の長さ、船の幅などが表示される機能の他に、画面に表示されているすべての船舶の航海状態別の隻数を表示する機能や、直前のAISによる船位と対地針路・対地速度から現在位置を推定する機能、過去の航跡を表示する機能などを付加した。

また、東京湾を航行する船舶に適用される海上交通安全法の法規や、第三管区海上保安本部による航行安全指導の解説もWebサイトに掲載した。東京湾内の船舶航行状態をほぼリアルタイムで2局のレーダとAISにより監視出来るこのWebサイトは、今後、様々な目的で利用されると考えられる。

東京湾における船舶交通特性の調査については、2006年3月30日00時00分から4月8日23時59分までの10日間に及ぶ長期観測を実施し、得られた14,400枚のレーダ画像に昨年度開発した自動トラッキングシステムを適用して、合計13,125隻の船舶の航跡を取得した。このトラッキングのプロセスにおいては、全自動トラッキングによる航跡取得率の検討や、船舶映像のロスト現象や乗り移り現象に関する検討も行った。

そして、得られた13,125隻の船舶の航跡データを解析し、L換算密度分布による東京湾の船舶交通輻輳度の調査を行った。また、バンパーモデル、TCPA・DCPA、SJ値という3通りの衝突危険度評価指標を用いて、東京湾における衝突危険船舶の位置分布や衝突危険船舶数の時間変化などについて、詳細な調査を行った。この長期観測データの解析により、東京湾における船舶交通の輻輳状態や、衝突危険度の高い水域および時間帯の詳細を明らかにすることができた。この船舶交通特性の調査結果は、東京湾における船舶航行の安全性を論ずる際、貴重な資料となるだろう。

最後に、2006年度において本研究の成果を発表した論文を示す。

(1) Hideki Hagiwara, Ruri Shoji, Hitoi Tamaru, Shun Liu and Tadashi Okano : Development of Remote Radar/AIS Network System for Observing and Analyzing Vessel Traffic in Tokyo Bay, Proceedings of 12th IAIN World Congress, pp.151-156, October 18-20 2006, Jeju Korea

第2章 リアルタイム海況監視システムの構築

東京湾は、古くから海苔養殖や底引き網など様々な漁業が行われてきた豊かな内湾である。1960年代の高度経済成長と引き換えに、東京湾の水質は著しく悪化した。その後、法的措置が取られ、近年改善されてきてはいるが、今でもその影響は深刻な環境問題となっている。最近では、東京湾の環境改善のため様々な研究・対策が実施されるようになり、環境保全を目的とした海況変動予想の研究も進められている。東京湾の環境・海況変動に及ぼす自然現象としては、潮汐や風、黒潮あるいは、それらに起因する現象など幾つか考えられる。このうち海面の風波や潮汐といった現象については、安全・防災という観点から研究が進められ、現在では気象庁や海上保安庁による予報業務に活用されるまでになっている。しかし、海水交換や物質循環に重要な役割を果たすと考えられる1日から数日の時間スケールで発生する現象に関する研究は十分に進んでいるとは言い難い。この時間スケールの現象には黒潮の波及や沿岸捕捉波といった現象がある。これらの現象は湾口を通した海水の流入出をもたらしており、物質循環において重要な現象である。すなわち、このスケールの現象を理解することは油流失事故などの災害時における対策を講じる上で必要不可欠である。本事業研究では、このような数時間から数日のスケールの現象について、その特性を把握し予測することを目指して、水質監視装置の開発と観測網の強化、および、簡易で処理速度が速く再現性の高い予報モデルの開発という両側面からアプローチした。

2.1 水質監視装置

東京海洋大学海洋科学部の海洋物理学研究室では、東京湾内湾から相模灘全域の海況を精度良く予報することを目指し、広範囲での海況モニタリングとデータ同化・予報モデルの開発が進められている。本研究事業では、リアルタイムで海況を監視するモニタリングシステムとして、海上に安定なプラットフォームが無くて、容易に海況モニタリングが可能な、耐水圧式ブイ型の e monitor が開発された。東京湾の海況モニタリングの第1段階として、まず外洋から東京湾内への影響を監視するため、東京湾湾口東部に位置する富山町沖の定置網において、2005年6月9日から水温のモニタリングを開始した。観測当初から数度にわたり、耐水圧や構造上の問題点が改善され、データを安定して得ることができるようになった。モニタリングに用いられている観測機器としては、水温計には日油技研工業製の水温計アレイ（精度 ± 0.1 ）、流速計にはRDI社のワークホース ADCP（300kHz）である。

2006年度は、前年度に開発したブイ型水質監視装置を、東京湾内に増設し、東京湾の海況監視体制の強化とモデルの予報制度の向上を目的とした観測装置の実用試験が行われた。2006年5月20日からは、改良したブイシステムによる流速モニタリングも同じ場所で開始した。保守管理の観点から、東京湾内に追加するモニター点は富津沖の1地点とした。また、東京湾外からの影響を監視することを目指して、相模湾中央部の拓海にアクア e モニターを設置し、水温場の記録を取得した。

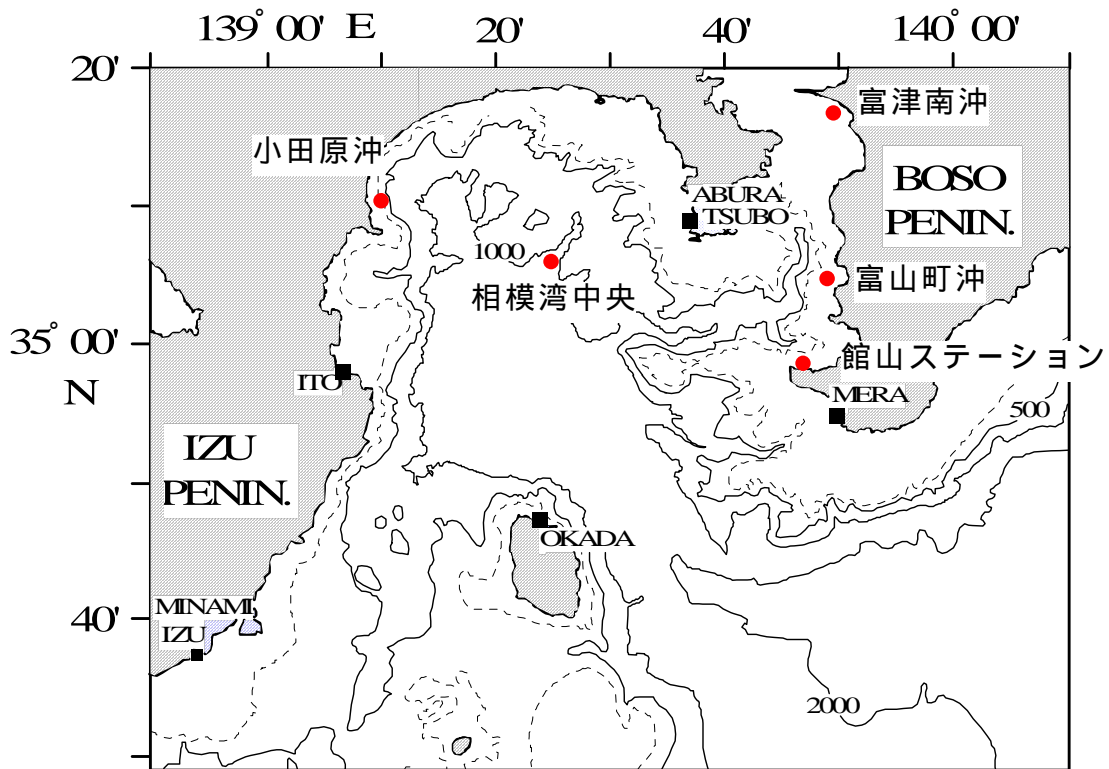
2.1.1 水質・海況監視装置の設置と実施状況

2006年度の事業に関して実施された観測・Web関連の作業は大まかにTable 2.1-1とおりで、これらに加えて、7月以降随時モデル開発が実施された。

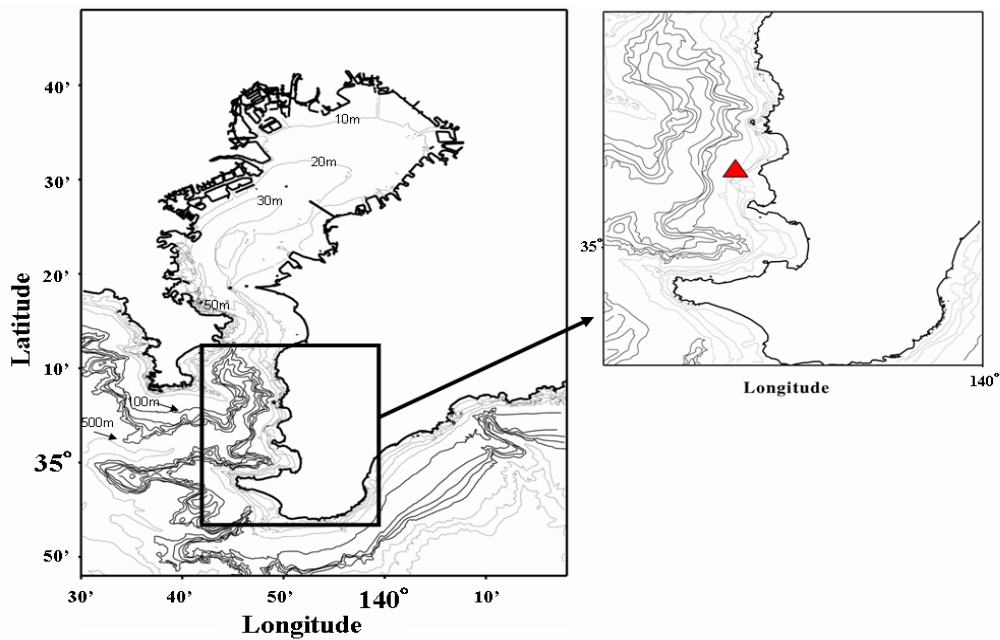
Table 2.1-1 観測・Web関連作業実施経緯概略

4月10日	Webサイト用リアルタイム取得データの自動更新および作図ソフト開発開始
5月中旬	新しいホームページをWebサイトへアップ開始
5月20日	改良した流速の監視装置を設置
6月1日	携帯電話端末用のリアルタイムデータ公開サイトの開発開始
6月13日	神奈川県水産技術センター 相模湾中央部への海況モニタリングシステム(水温計・CTセンサー)の設置作業
7月1日	高解像モデル作成開始
7月中旬	携帯電話端末用リアルタイムデータ公開サイトのアップを開始 (URL： http://www2.s.kaiyodai.ac.jp/~kankyoaf/emoni/keitai/index.html)
8月29日	千葉県水産総合研究センター、新富津漁業協同組合の惨事および定置網船長らとの海況モニタリングシステム設置に関する打ち合わせ
9月1日	富津南沖合いにモニタリングブイを設置に関して、木更津海上保安署と打ち合わせを開始
9月8-9日	青鷹丸による東京湾口から相模湾の観測
9月11日	富津南沖合い(新富津漁業協同組合が管理する海苔養殖漁業海域南端)に海況モニタリング装置を設置
9月25	
- 28日	日本海洋学会秋季大会における講演(名古屋大学東山キャンパス)
11月22日	富山町漁業協同組合における2005年度の観測成果報告会の開催
12月20日	千葉県水産総合研究センターと東京海洋大学にて今後の方針打ち合わせ
1月9日	富山町沖ブイのメンテナンス作業
1月12日	リプレイスのための回収作業
3月13日	水温タイプの再設置作業、館山ステーションのCT計のメンテナンス

富山町沖では、6層(5,10,15,20,30,40m深)で10分ごとに水温データが、4m深から海底まで2m毎に約20層で30分ごとに流速データが得られた。富津南沖では、3層(1,5,8m深)で10分ごとに水温データが得られた。館山ステーションでは生物飼育用に取水した海水の水温と塩分が計測されている。また、相模湾中央部の観測には、深層水くみ上げ装置「拓海」にアクアeモニターが設置され、5層(5,15,25,35,50m深)で10分ごとに水温記録が得られている。



(a)



(b)

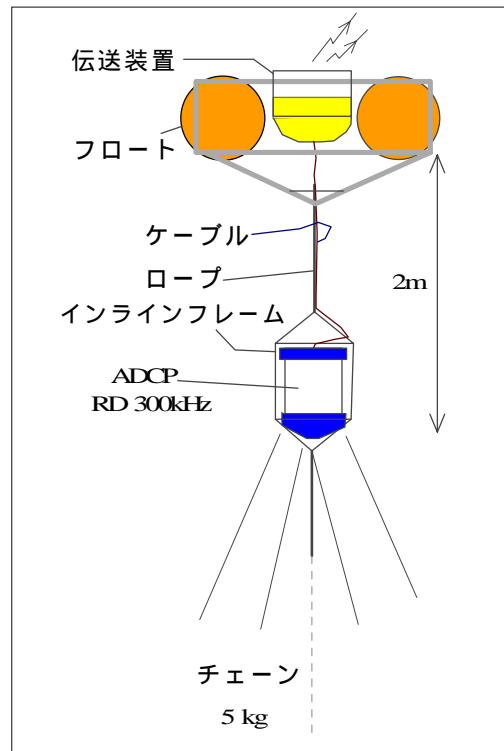
Fig. 2.1-1 (a)東京湾湾口から相模湾にかけての地形。赤点はモニタリング地点を示す。
 (b)東京湾の地形と湾口付近の拡大図。 は富山町沖のモニタリング地点を示す。等深線間隔は100m~500mで100m間隔、1000m以深では500m間隔。



(a)



(b)



(c)

Fig.2.1-2 (a)開発されたブイの全景(左)と太陽電池パネル部(右)。 (b) 富山町沖に2006年5月に流速計用ブイを再設置した際の様子。水温計用モニタリングブイ(奥側)と流速計用のモニタリングブイ(手前側)。 (c)流速計タイプのシステム概要。ADCPの電源はADCP本体に内蔵されている電池による。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 2.2-3 富津南沖に設置したモニタリングシステム。(a)設置のための準備。(b)標識ブイの夜間フラッシュライトのポール部分。(c)設置作業。(d)設置場所への曳航風景。(e)最終的に設置された状況。

モニタリングシステムを設置している千葉県安房郡富山町の漁業協同組合にて、報告説明会を実施した(資料1、Fig.2.1-4)。当日は漁協関係者20名、千葉県水産総合研究センターから3名、東京海洋大学から5名が出席し、モニタリングシステムの設置に関する経過説明と観測データの解析結果、東京湾および周辺海域の漁海況に関する研究成果の説明がなされた。漁協関係者からは、夏季に操業に支障をきたすような強い流れがあることや稀に赤茶色の水が押し寄せてくること、など当該海域における問題が紹介され、その予測の可能性について活発な意見交換がなされた。

資料1

海況監視装置設置に関する経過・成果報告説明会

主 催：東京海洋大学海洋科学部（海洋物理学研究室）
 協力団体：千葉県水産総合研究センター、富山町漁業協同組合、日油技研工業
 助 成：日本財団

日 時：2006年11月22日（水）13：30～15：00
 会 場：富山町漁業協同組合 会議室

1. 海況監視装置の概要	13：30
東京海洋大学助教授 北出 裕二郎	
2. 海況監視装置で得られた記録の紹介 ～内部潮汐について	13：35
東京海洋大学大学院2年 藤井 亮平	
3. 数日周期の海況変動とその効果について	13：50
東京海洋大学研究員 井桁 庸介	
4. 東京湾湾口付近における黒潮の影響について	14：05
東京海洋大学助教授 北出 裕二郎	
5. 富山町漁業協同組合定置網における漁獲変動について	14：20
千葉県水産総合研究センター上席研究員 石井 光廣	
6. 総合解説・討論	14：40
解説・コメント	
東京海洋大学助教授 根本 雅生（漁況関係）	
北出 裕二郎（海況関係）	



Fig. 2.1-4 富山町漁業協同組合で開催された海況監視装置の説明報告会の風景

2.1.2 データの解析結果とシステムの有効性 ~ 富山町沖の水温・流速記録から ~

ここでは、得られるデータの有効性を示す一例として、東京湾湾口東部に位置する富山町沖に設置された水温・流速モニタリングデータの解析結果を紹介する。富山町沖を含む東京湾湾口一帯では、サバ・アジなどの回遊魚を対象とした定置網漁業が行われている。定置網漁とは固定漁具を用い、魚が来遊する期間に一定の場所に常設し、魚群を漁具内部に滞留させる仕掛けを持つもので、その滞留した魚を「網起こし」により取上げ漁を行う。網起こしは、通常、上げ潮と下げ潮の間の転流時などの流れが弱い時間帯に実施する。しかし、この海域では転流時にも流れがおさまらないこと、表層で流れが弱くても中下層での流れが強く網起こしができないことがある。夏季から周期には、そのような状況が数日間にわたって続くという深刻な問題を抱えている。そこで、モニタリングシステムにより得られたデータから、東京湾湾口東部での流れ場の変動特性を明らかにし、操業に障害をもたらすほど流れが強化される要因について調べた。

(1) モニタリングシステムおよび得られたデータについて

Fig.2.1-1(b)に示すように、東京湾湾口東部に位置する富山町の約 1km 沖(水深約 45m)で富山町漁業協同組合が管理する定置網の土台ブイにモニタリングシステムを係留した。2005年6月9日にまず水温モニタリングを開始し、翌年2006年5月20日には同じ場所に流速計タイプのブイ型 e monitor を並べて係留し、モニタリングを開始した。水温計には日油技研工業製の水温計アレイ(精度 ± 0.1)を、流速計には RDI 社のワークホース ADCP(300kHz)を使用している。本システムより、全 6 層(5,10,15,20,30,40m)、測定間隔 10 分の水温データ、4m 深から海底まで 2m 毎に約 20 層、測定間隔 30 分の流速データが得られている。水温・流速データともに、観測開始から長期間に渡りおおむね安定したデータが得られている。

通信等の問題によりデータが欠損した場合の取り扱い及び補正は以下の通りとした。水温の欠損データは、その欠損間隔が 6 時間以内のときは、同じ深さのデータを用いて欠損前後のデータで線形内挿により補間し、6 時間以上長い場合は欠測とした。ADCP には 4 つのトランスデューサーがついており、各トランスデューサーから超音波を出し反射音の変調を測定することにより流速を求めている。その際、反射波の回収率がパーセントグットにより表される。本研究では、このパーセントグットが 60% 以下の場合は欠損とした。流速データについても欠損間隔が 6 時間以内の場合、水温と同様に同じ深度のデータを用い線形内挿により補間した。また、ADCP により観測された流向は、方位磁石により求められているため、真方位とはずれが生じる。そこで、海図に示されている相模湾の磁気偏差の値を用い、磁気補正を行った。

潮位は、気象庁のホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/>)より得られる布良と三宅島の 1 時間ごとのデータを用いた。この潮位データは気圧変化による影響を取り除くため、気圧補正を行う必要がある。そこで、気圧補正を行う際に、布良では気圧データが得られなかったため、布良から近い館山の 1 時間ごとのデータを、三宅島では同じ三宅島の 1 時間ごとのデータを用いた。

風向・風速記録については東京湾海上交通センターのホームページ (<http://www6.kaiho.mlit.go.jp/tokyowan/index.htm>)より、伊豆大島の15分ごとのデータを用いた。

(2) 富山町沖での水温・流速変化の特徴

水温と流速のモニタリングを同時に開始してから約6ヶ月に渡り観測された東西・南北流(10m, 20m, 30m深)および水温(5, 10, 15, 20, 30, 40m深)をFig.2.1-5に示す。図には、モニタリングシステムで得られた記録に加えて、潮位、東西・南北風の時系列が示されている。この時系列図では、細かい周期変動を取り除くため、水温、流速、風については2時間の移動平均を施している。

観測全期間を通して、東西・南北流はともに同じような周期変動をし、観測開始当初の5月、6月では時折突発的に強い流れがみられるが基本的に流れは弱く、夏季に近づくにつれ流速変動は強くなっている。そして9月上旬には最も変動が大きくなり、10月後半まで約1ヶ月半にわたり強い変動が継続している。水温は、観測当初から8月上旬まで上層と下層で約5℃の水温差を保ちながら変動している。夏季の8月下旬には下層での変動が急激に大きくなる様子が見られる。この変動の大きさは約7℃に達する。その後は表層混合層が発達し全層の水温が一様になるが、時折下層だけで水温が変動する様子が見られる。

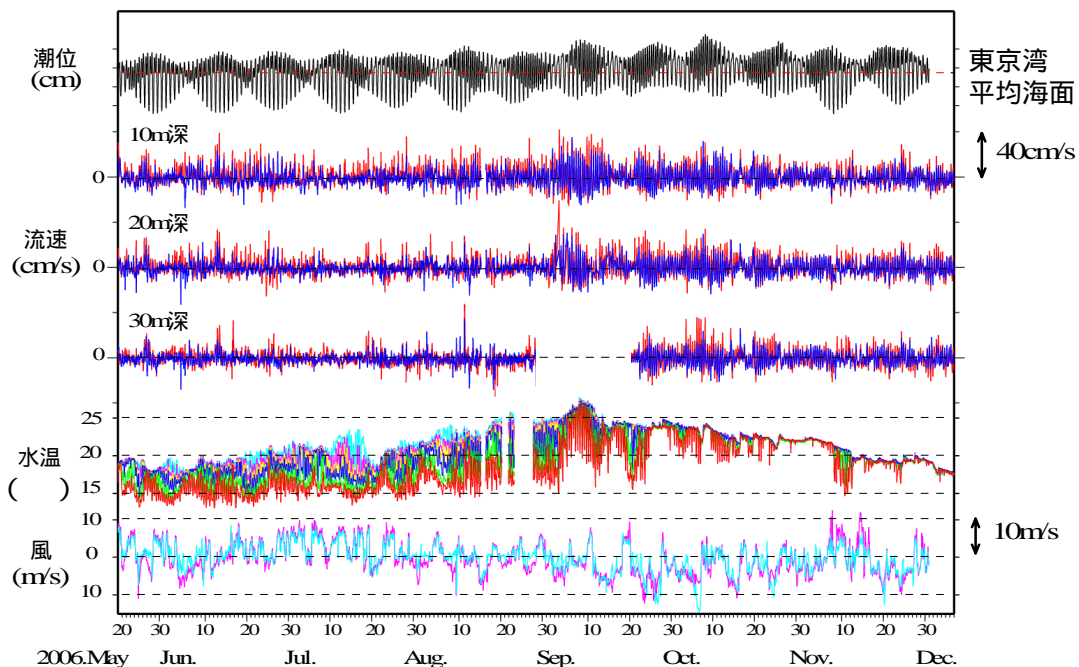


Fig.2.1-5 各データの時系列。上から、布良の潮位、富山町沖の東西流(赤)、南北流(青)、水深5(水色)、10(ピンク)、15(黄)、20(青)、30(緑)、40(赤)m深、伊豆大島の東西風(ピンク)、南北風(水色)をそれぞれ括弧内の色で示している。

次に、この周期変動の鉛直構造を調べるため、観測期間の前半（6月16日～25日）、中頃（9月19日～28日）、後半（11月1日～10日）の10日間ごとの3期間について、水温、流速の鉛直分布時系列を Fig.2.1-6 に示す。図より明らかなように全期間で水温・流速ともに1日に2回の上昇・下降を繰り返す、半日周期の変動が卓越していることがわかる。前半では、等温線は全層でほぼ一様に10m～20mの鉛直変位をもって変動し、位相は上層から下層に少しずつ遅れているように見える。等温線の下降と北向きの流れ、上昇と南向きの流れが良く対応している。中頃では、半日周期変動の等温線の鉛直変位は30m以上、水温変動にして約7に達している。これらに付随して、東西流で約30cm/s、南北流で20cm/sの強い流速変動がみられた。後半では、全層でほぼ水温が一様になり混合層が発達していて、半日周期変動は、11月8日から下層のほうで見られるがそれ以外は存在しない。しかし、流速は今までの期間同様に、全層で半日周期変動をしている。水温変動がないのに流速が変動していることは興味深い。

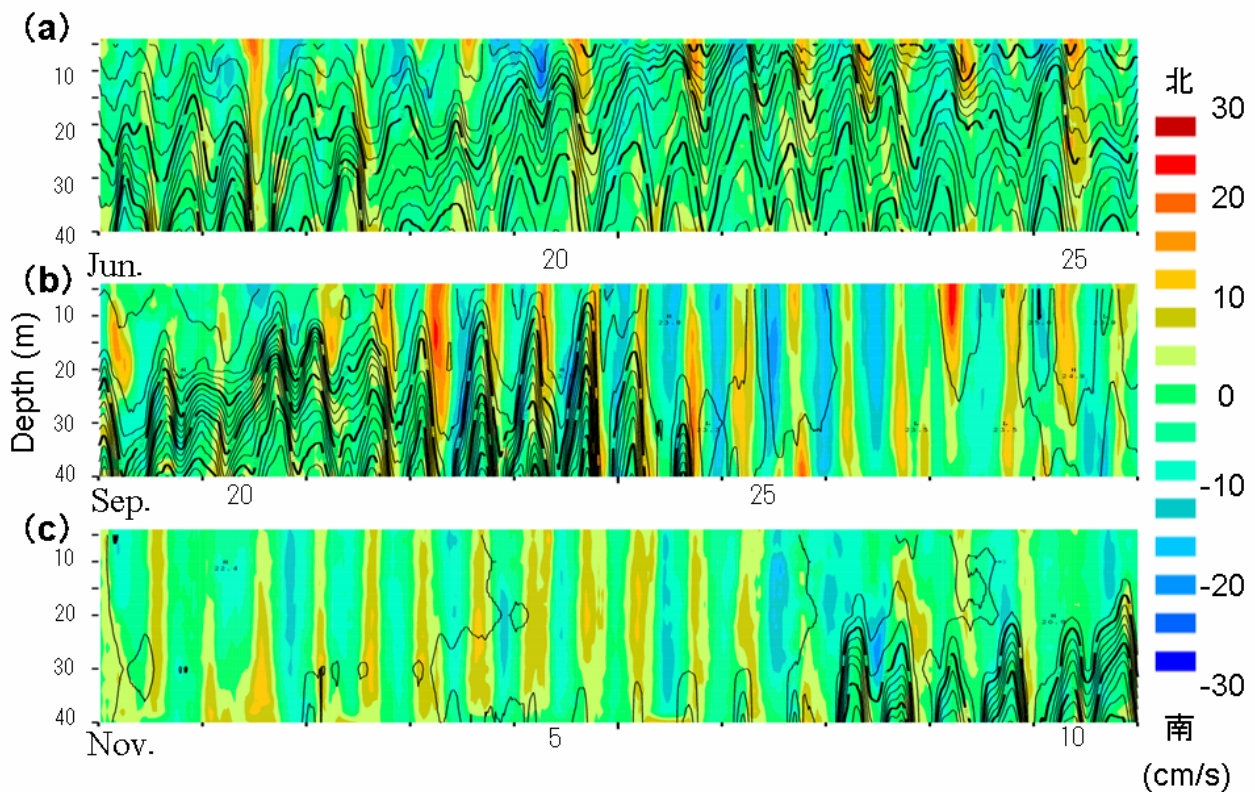


Fig.2.1-6 (a) 6月16日～25日、(b) 9月19日～28日、(c) 11月1日～10日、における、南北流(カラー濃淡)と水温(等値線)の時系列。水温の等値線間隔は0.5。

潮位との関係

潮位と水温・流速変動の関係について調べるため、6月9日～6月18日までの10日間の潮位と水温・流速断面図を並べた時系列図を Fig.2.1-7 に示す。全記録において半日周期変動がみられるので、その変動の仕方について詳しく見てみる。まず潮位と流速に注目すると、

潮位上昇に対し南西向き、下降に対し北東向きの流れが上層から下層まで対応している様子がわかる。順圧的な潮汐を考えると、東京湾では上げ潮時に湾内へと向かう北あるいは北東向き、下げ潮時に湾外へ向かう南あるいは南西向きの流れになると期待されるが、観測結果では逆の関係になっている。次に、潮位と水温の関係についてみると、潮位変動と水温変動が一見対応しているように見えるが、水温変動の位相が遅れていることがわかる。この位相関係や、先述の 30m 以上の等温線の鉛直変位を持つ特徴から、これらの半日周期変動は内部潮汐によるものと考えられる。

特に、定置網漁業の操業に深刻な問題をもたらしていた 9 月頃の強い流れは、この内部潮汐によるものと考えられる。以降では、この内部潮汐の特性を明らかにするため詳細な解析を実施した。

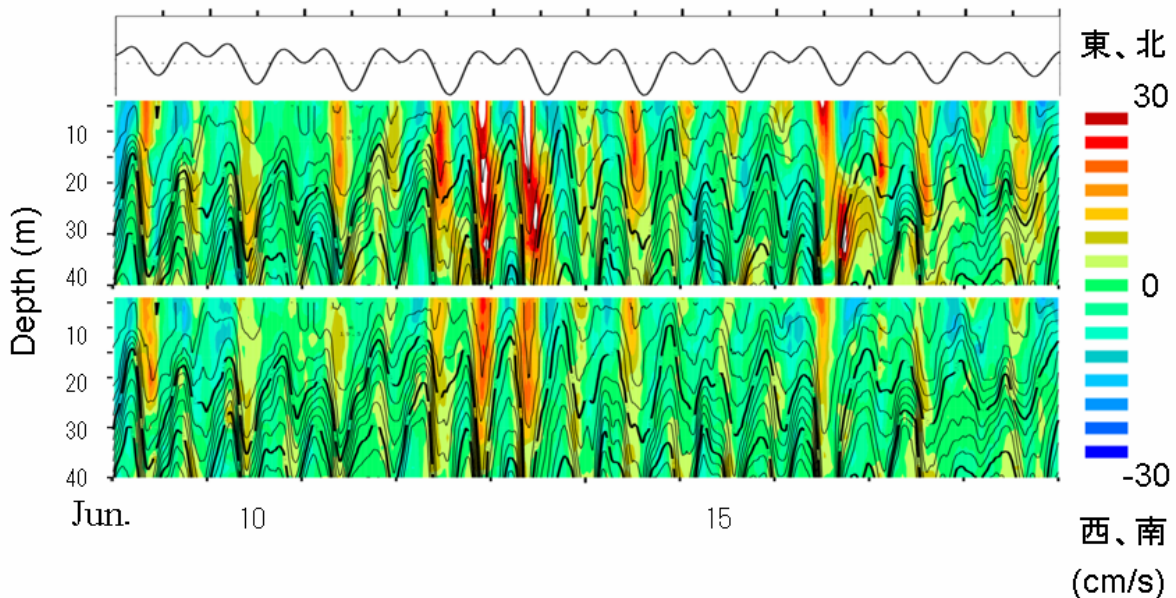


Fig.2.1-7 布良の潮位（上段）、東西流と水温（中段）、南北流と水温（下段）の時系列。水温の等値線間隔は 0.5 。

(3)内部潮汐の特性

周期特性

東西・南北流、水温の各記録の変動に関して、卓越周期を統計的に検出するために、パワースペクトルを算出した。データの期間が長いため、成層が弱い時期、強い時期、混合層が発達している時期の 3 期間のうち代表的な 15 日（期間：6 月 16 日～6 月 30 日、期間：9 月 1 日～9 月 15 日、期間：11 月 1 日～11 月 15 日）（以下、期間を成層の弱い時期、期間を成層の強い時期、期間を混合層が発達している時期に区分けする。）を選んで算出したパワースペクトルを Fig.2.1-8 に示す。本解析では、得られた生スペクトルに自由度 7 のスペクトルウィンドーを施した。図には、自由度 7 の 95%信頼限界を示している。

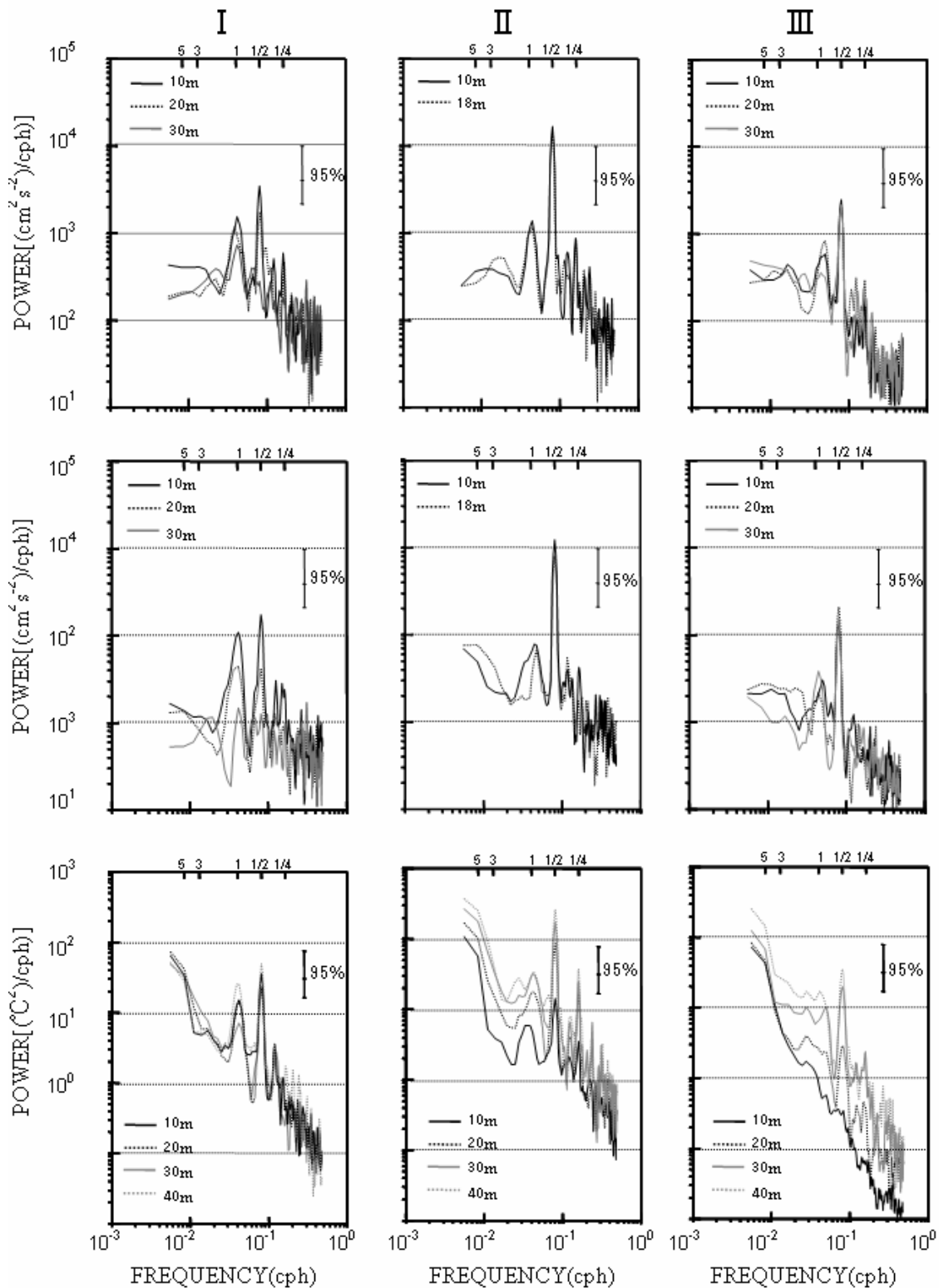


Fig.2.1-8 代表的な深度における東西流（上段）南北流（中段）水温（下段）のパワースペクトル。期間は6月16日～6月30日、期間は9月1日～9月15日、期間は11月1日～11月15日。

流速のスペクトルは、東西・南北流ともに水深に関係なく 3 期間すべてで半日周期に顕著なピークが見られる。そのエネルギーレベルは期間ごとに比較すると、期間 で他の期間よりも一桁高くなっている。深度方向に比較すると、期間 で東西・南北流ともに、10m 深と 18m 深ではほぼ同じスペクトル形状を示すが、期間 と では異なる。期間 では、東西・南北流ともに深くなるにつれエネルギーレベルが低く、さらにその減少幅は東西流に比べ南北流のほうが大きいことがわかる。一方、期間 では、半日周期のエネルギーレベルは東西・南北流ともに鉛直方向でほぼ同じだが、1 日周期は 20m 深では東西流、30m 深では南北流が最大になっている。

水温のスペクトルは、流速と同様に 3 期間とも全層で半日周期が卓越している。流速のエネルギーレベルが高い期間 において、水温でも半日周期のエネルギーレベルは最も高い値を示す。鉛直方向の分布は流速とは異なり、特に期間 と では深くなるにつれて全周波数帯でエネルギーレベルが高くなっている。

流速・水温ともに、期間 では半日周期とほぼ同レベルの 1 日周期のピークが存在する。この 1 日周期のエネルギーレベルが高いことは、この海域のすぐ西方にある相模湾内ではあまり観測されないため、興味深い現象である。

流速の鉛直構造

前節でエネルギーレベルが最も高かった半日周期の内部潮汐の鉛直構造を調べるため、半日周期帯（8～16 時間）のバンドパスフィルターを施した流速記録を用いて 2 期間（A：6 月 1 日～7 月 15 日、B：10 月 1 日～11 月 15 日）において解析を行った。

内部波の鉛直構造を調べる手段として、一般的には 力学モードを用いて求める方法と EOF 解析により求める方法がある。 を用いるには、この海域は海底地形が複雑でその場でカップリングが生じている可能性がある。また、実際に観測されている鉛直変位は非常に大きく、成層場も季節的に変化していることから、力学モードを仮定して鉛直モードを調べることは必ずしも良い結果をもたらさないものと考えられる。そこで本研究では、 の方法を用いた。解析により得られた各モードの鉛直構造を Fig.2.1-9 に示し、各モードの固有値と寄与率を Table.2.1-2 に示す。

Table 2.1-2 期間ごとの各モードの固有値。括弧内は寄与率を示す。

		1st	2nd	3rd
I	東西	302.1(71.2%)	70.4(16.6%)	25.7(6.1%)
	南北	161.4(76.9%)	20.5(9.8%)	12.4(5.9%)
II	東西	813.9(91.0%)	58.4(6.5%)	10.9(1.2%)
	南北	554.2(94.3%)	16.9(2.9%)	7.7(1.3%)

期間 A で東西流の第 1 モードは上層から下層に向けて小さくなる分布を示し、下層では 0 になっていた。それに対し、南北流は上層から下層まで固有ベクトルの大きさは一様、つまり順圧的な構造をしている。期間 B では第 1 モードの寄与率が 90%にも達し、その固有ベクトルは鉛直的に一様となっており、期間 A に比べ、より順圧的な構造をしているといえる。他に寄与率が比較的高いところとしては、期間 A での東西流の第 2 モードの 16%であり、この上層と下層で固有ベクトルが逆向きになるような鉛直構造を持つ、力学的モードの内部波の第 1 モードに近い。固有値と固有ベクトルから換算した流速振幅は、表層で期間 A は約 12.7cm/s、期間 B は約 17.7cm/s である。観測された流れは内部潮汐に関連したものと考えられたにもかかわらず、流速において鉛直に一様な構造、すなわち順圧的な構造をしていることは非常に興味深い。これらのことについて後で考察する。

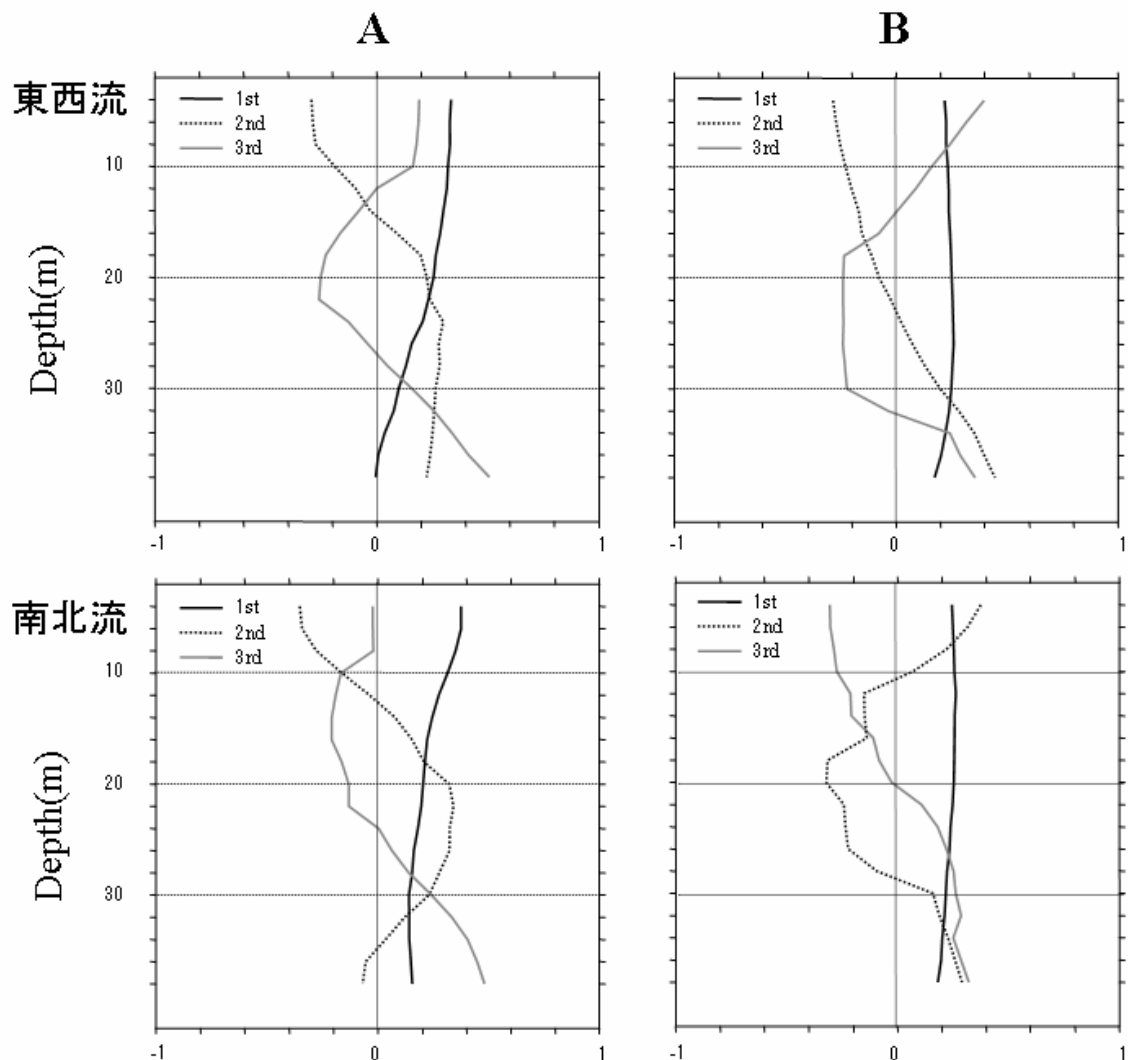


Fig.2.1-9 8~16時間のバンドパスフィルターを施した記録から計算された、期間A(6月1日~7月15日)、期間B(10月1日~11月15日)での流速のEOFモードの鉛直プロファイル。

エネルギーレベル、位相関係の時間変化

流速のデータについて半日周期変動に注目し、エネルギーレベルの時間変化をみるため、3日間毎に1日ずつずらしながらパワースペクトルを計算した。これと同じ方法で、流速（10m 深）と潮位、流速（10m 深）と水温（30m 深）、水温（30m 深）と潮位の、コヒーレンスと位相差を算出した（Fig.2.1-10）。図ではコヒーレンスが95%の信頼限界を越えた時の位相差のみを示している。例えば流速（10m 深）と潮位では位相差が 90° を示している場合、半日周期において満潮時に対し東・北向き流れが最大になる時間が約 90° （3時間）遅れていることを示す。流速に関しては、全期間でデータが安定して得られている10m 深の記録を用い、水温に関しては半日周期内部潮汐の変動が顕著な30m 深の記録を用いた。

エネルギーレベルは東西・南北流ともに5月後半から9月にかけて上昇し、冬季に向けて下降している様子が見られる。その長期的な変動に加え大潮、小潮周期でエネルギーレベルが上下変動している様子が見られる。流速と潮位では、東西・南北流で時系列図に顕著な違いはなく、5月～7月中旬までは流速の位相は $150^\circ \sim 180^\circ$ （5～6時間）遅れているが、その遅れは夏季に近づくにつれて小さくなり、エネルギーレベルの高い9月上旬になるとほぼ無くなる。その後位相差は、エネルギーレベルが高くなると 0° に近づき、低くなると遅れるといった周期的な変動をしている。他の組み合わせでも同様に位相差が季節的に変動する様子が認められ、流速と水温の位相差は、観測当初 $-30^\circ \sim -60^\circ$ （1～2時間）の間で大きく変化しているが、9月上旬になると -90° （3時間）早いところで安定していた。水温と潮位では、観測当初は 200° （7時間）程度水温の位相が遅れていたが、9月上旬になると 90° （3時間）となり遅れが減っていた。この水温と流速の位相差が 90° という関係は、波の伝播特性を考慮すると、定在波の性質が強くなったことを意味する。

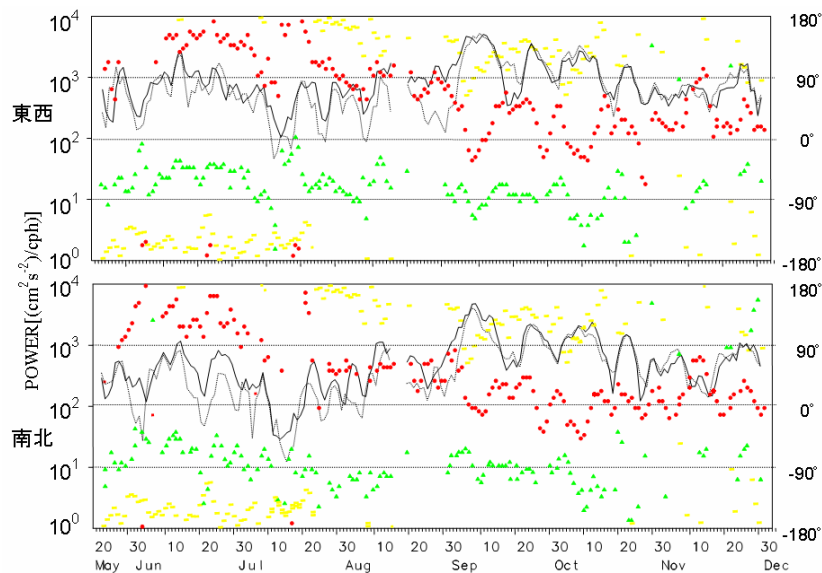


Fig.2.1-10 半日周期（12.4時間）の東西流（上段）南北流（下段）の10m（実線）、18m（点線）深のパワー（ $\text{cm}^2\text{s}^{-2}/\text{cph}$ ）の時間変化。 は、流速（10m 深）と潮位、 は流速（10m 深）と水温（30m 深）、 は水温（30m 深）と潮位の位相差を示す。

(4)内部潮汐波の鉛直構造と伝播過程について

富山町沖に伝播してくる内部波は、房総半島西岸の浅瀬が発生域であることが数値実験により示されている (Kitade and Matsuyama, 1997)。今回観測された内部波も、房総半島西岸の浅瀬で発生した内部波が富山町沖に伝播してきたと考えられる。通常、内部波は傾圧的な鉛直構造を持っているが、Fig.2.1-9のように富山町沖で観測された内部波は、成層の弱い6月の東西流では上層から下層にかけて変動が小さくなる鉛直構造を示していたが、南北流では鉛直的に一様な構造を示していた。さらに、成層の強い9月においては、東西・南北流ともに鉛直に一様な構造を示していた。この特徴は観測点の地形が強く作用したものと考えられる。相模湾東部の深いところを伝播している内部波は第1モードの構造となるが、浅い陸棚上には第1モード上部だけが波及し、順圧的な構造をする可能性がある。つまり、房総半島西岸の浅瀬で発生した内部波は、Fig.2.1-11に示したように東京湾湾口の水深が深いところ(500m)を第1モードの内部波として伝播し、富山町沖の浅い陸棚周辺に近づくとき、上層の部分のみが陸棚に波及することで、鉛直に一様な構造をもつ強い流れが生じると考えると観測結果を説明できる。

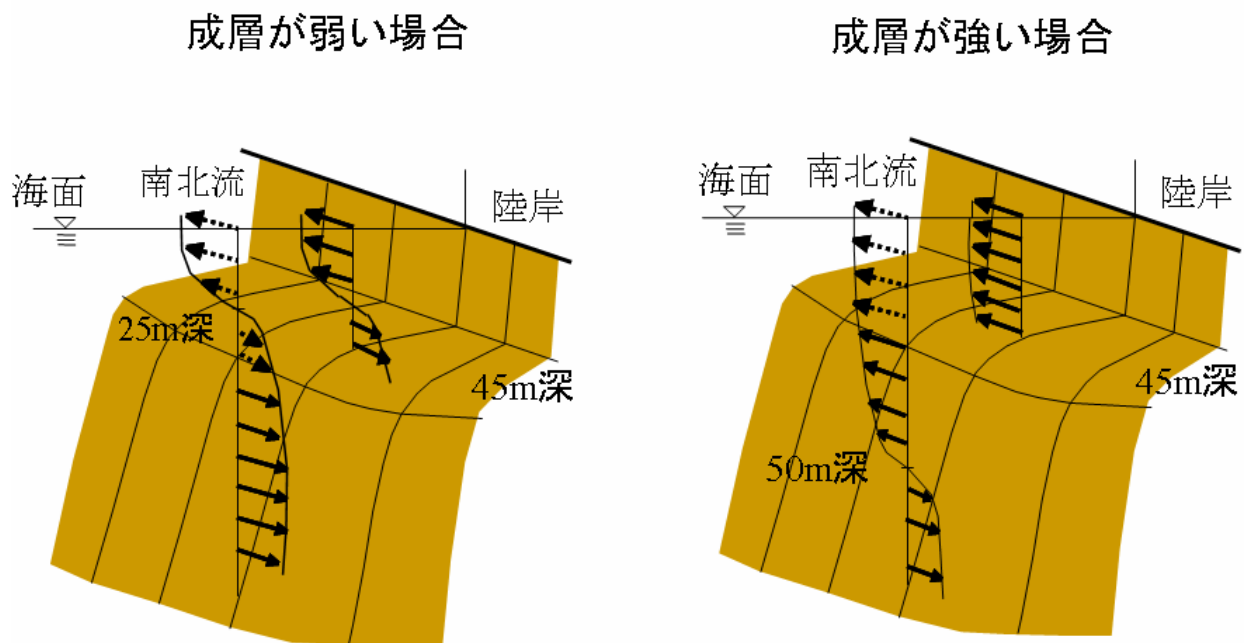


Fig.2.1-11 富山町沖における内部波伝播の模式図。

内部潮汐が強化される機構について

解析の結果9月に内部潮汐が強化されていた。そこで次に、内部潮汐が強い時期と弱い時期の2期間で特性を調べ、内部潮汐が強化される機構について考察した。この解析には周波数分解能が十分取れるように、45日間ごとの期間(6月1日~7月15日)、期間(9月

1日～10月15日)に分けて統計的に解析した。はじめに、期間ごとにパワースペクトルを算出した結果を Fig.2.1-12 に示す。半日周期について比較すると、期間の方が東西・南北流ともにエネルギーレベルは大きくなっていて、南北流の方が上昇し一桁大きくなっている。加えてその周期のピークの周波数幅に注目してみると、期間の半日周期のピークは幅が狭く約2時間の周期幅であるのに対し、期間でのピークは幅が広く2倍の約4時間の周期幅であった。しかし、期間は、半日周期帯より長い約15.2時間周期にあまり大きくないがピークが見られ、半日より短い1/4日周期でも期間でエネルギーレベルが高い。1日周期のエネルギーレベルは両期間とも同等である。

定在波的性質が強化されたということは、富山沖の近くで効果的な反射が起きていることが考えられ、それに伴い共鳴が生じた可能性を示すだろう。これを裏付ける特徴は、先ほどのパワースペクトルにも見られ、期間で固有振動が半日周期で共鳴しているとするれば、期間と比べ成層の弱い期間では固有振動の周期が長くなる。Fig.2.1-12を見ると、期間

では先ほど述べたように半日周期よりも少し長い15.2時間周期に小さなピークが見られた。これが期間での固有振動周期である可能性が考えられる。

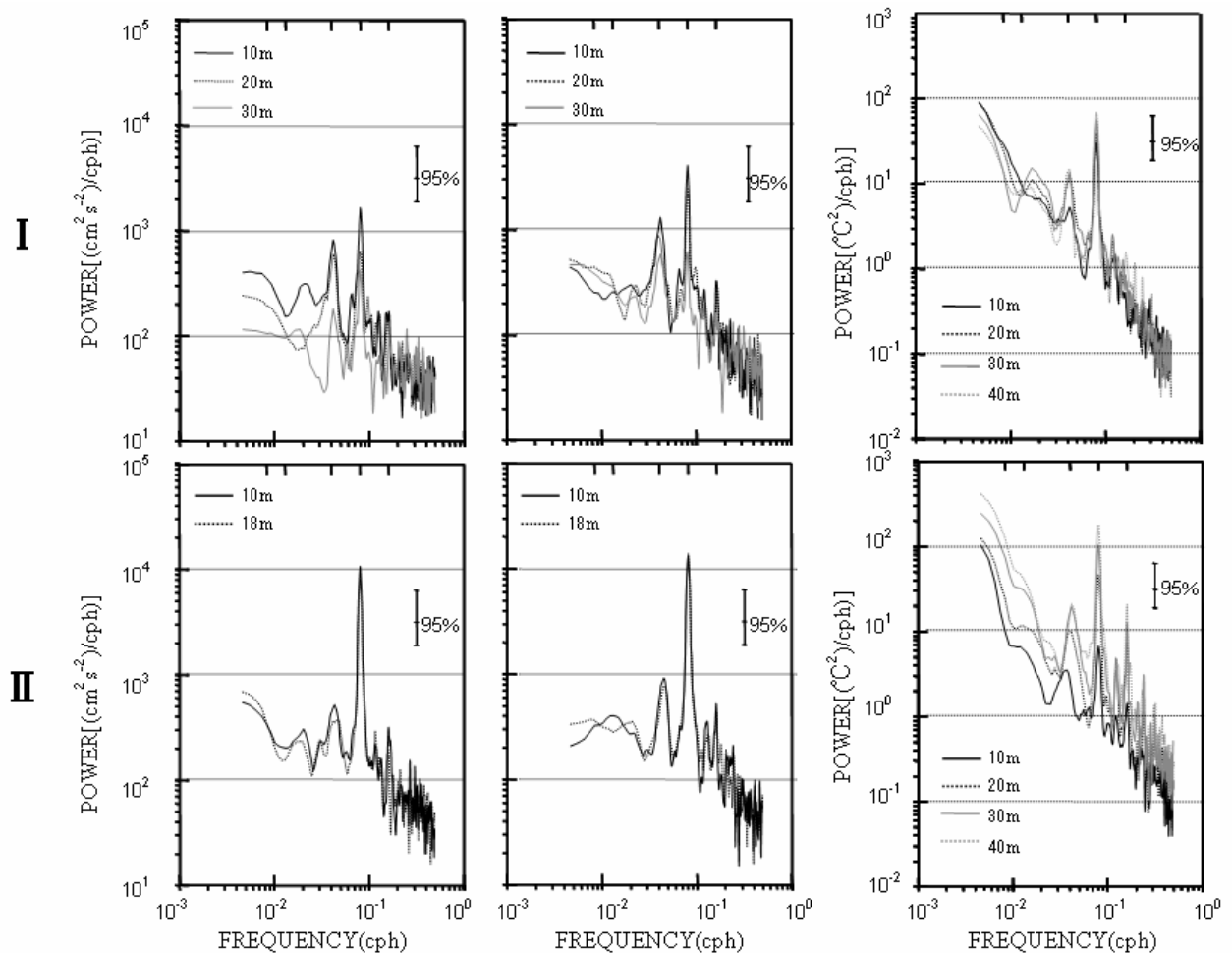


Fig.2.1-12 期間 (6月1日～7月15日) 期間 (9月1日～10月15日)における、東西流(左)、南北流(中央)、水温(右)のパワースペクトル。

そこで、固有振動および共鳴が生じている海域を、2層モデル海を仮定して考えてみる。位相速度を C 、上層と下層の密度差を $\Delta\rho$ 、重力加速度を $g=9.8(\text{m/s}^2)$ 、上層と下層の厚みをそれぞれ h_1 、 h_2 、水深を $H=500\text{m}$ 一定とする。位相速度は、期間の躍層を $\Delta\rho/\rho=0.025$ 、 $h_1=25\text{m}$ と仮定すると $C=0.76(\text{m/s})$ となる。東京湾湾口は狭い海峡で南北に深い谷であることから、両端が開いた固有モードの存在が期待される。すなわち、海域の長さが波の半波長のとき共鳴する。そこで 15.2 時間を固有振動周期として波長を求めると、波長は 41km、その半波長として、21km と見積もられる。一方、期間では、固有振動周期を 12.4 時間、躍層を $\Delta\rho/\rho=0.003$ 、 $h_1=40\text{m}$ と仮定すると $C=1.04(\text{m/s})$ となる。このとき、波長は 46km で、その半波長は 23km と見積もられる。これらの距離がほぼ同じであることは、期間に内部潮汐が共鳴により強化されたことの根拠のひとつと言えるだろう。すなわち、海底地形の幅が 21~23km の場所で共鳴が起きていると考えられる。これらの見積もりは、東京湾湾口部における深い谷の南北距離とほぼ一致するため、両端が開いた固有モードの存在が期待される。Fig.2.1-13 に内部潮汐がこの海域で共鳴的に強化されるプロセスを模式的に示す。半日周期順圧潮流により上げ潮（北向き）時、房総半島西部に位置する沖の山周辺の浅瀬において、沈降を伴う内部波が発生し北へ伝播する。それが東京湾湾口付近の浦賀水道周辺へ達する時間と、潮流が下げ潮（南向き）に転流し浦賀水道周辺で沈降部が形成される時間が、約 6 時間後と一致していることから、北へ伝播してきたものとその場で形成したものが強めあう機構が考えられる。

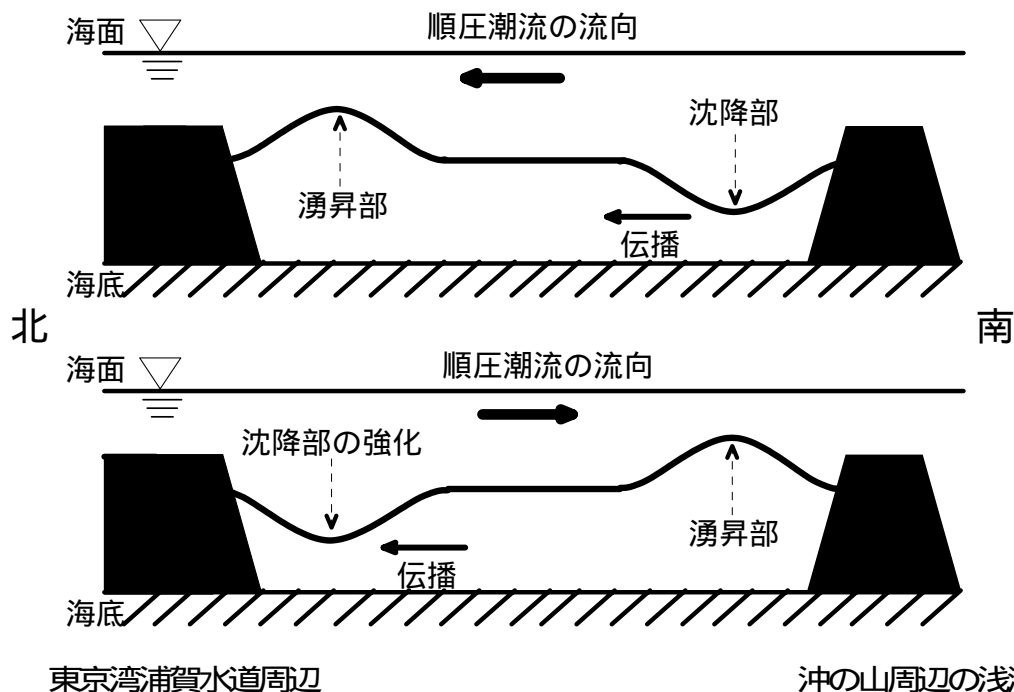


Fig.2.1-13 共鳴機構の模式図（上段：上げ潮時、下段：下げ潮時）。上げ潮時に沖の山の北側に形成された沈降部が北へ伝播し、約 6 時間後に東京湾湾口（浦賀水道の南側）へ達すると、半日周期順圧潮流の下げ潮により沈降部が強化されることを示す。

内部潮汐波が強化される外的要因について

9月上旬の内部潮汐が強化された時期に黒潮が接岸し湾内に暖水流入があったことが NOAA の水温分布の衛星画像 (Fig.2.1-14) より推察できる。黒潮の流軸変動は東京湾湾口部での成層場にかかなり影響することが考えられ、その変動が三宅島の潮位に現れることが期待される。そこで、黒潮の流軸変動と内部潮汐の強弱との関係を見るために、東西・南北流、水温、さらに三宅島と布良の潮位を加えた時系列図を Fig.2.1-15 に示す。潮位データは潮汐変動を取り除くため、タイドキラーフィルター (花輪・三寺,1985) を施したものを示している。

三宅島と布良の潮位は、5月～12月において幾度かの高潮位が確認された。期間を通して見たところ、9月に三宅島では平均海面よりも30cm以上高い期間が10日以上継続していた。他に、6月中旬にも潮位が高くなっていたが、8月初旬では低くなっていたことから、約3ヶ月周期で変動している様子がわかる。この変動に伴い東西・南北流は、潮位が高いときに流れの半日周期変動が大きく、低いときに小さいという対応関係をしていた。さらに、潮位が最も高かった9月は、半日周期内部潮汐が強い期間とよく対応していた。このことから、潮位の変動と内部潮汐の強弱が良く関連していることがわかる。従って黒潮の接岸に伴い黒潮系水が岸に波及し、東京湾湾口付近に暖水が流入することで、成層が強化された可能性がある。以上のことから、成層が強められ東京湾湾内の固有振動周期が半日周期に近くなり、内部潮汐が共鳴を起こすことで流速変動が強化されたと考えられる。

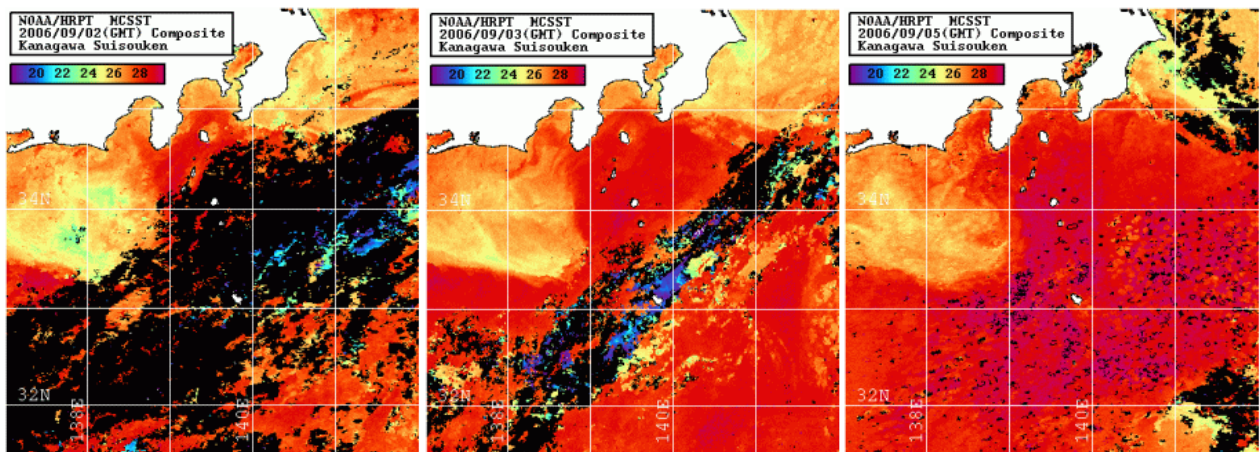


Fig.2.1-14 2006年9月2～5日の海面水温の分布図 (NOAAの衛星画像より)。

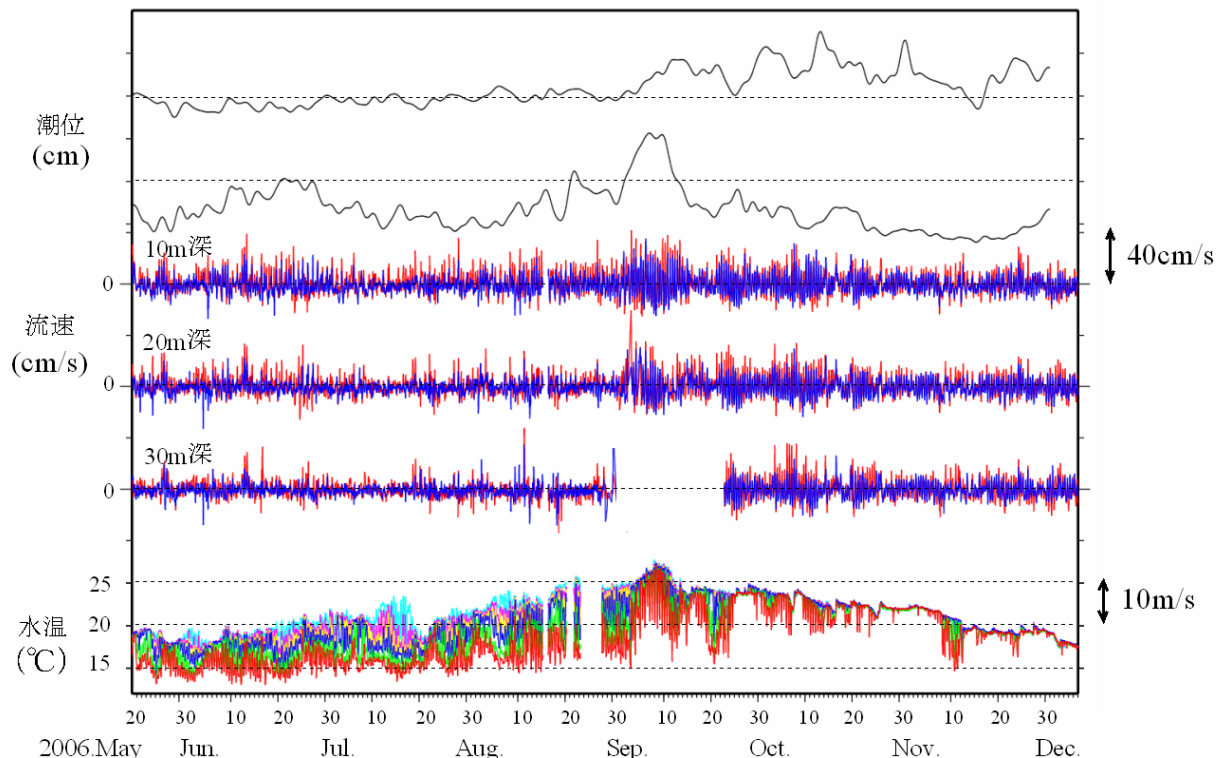


Fig.2.1-15 潮位（上段：布良、下段：三宅島）と流速、水温の時系列。潮位の点線は各地の平均海面水位を示す。

参考文献

Kitade, Y. and M. Matsuyama (1997) : Characteristics of Internal Tides in the Upper Layer of Sagami Bay. *J. Oceanogr.* 53, 143-159.

Kitade, Y., M. Matsuyama., S. Iwata and I. Watabe (1998) : SDP and LP Fluctuations Observed along the Coast of Sagami Bay. *J. Oceanogr.* 54, 297-312.

北出裕二郎,松山優治,岩田静夫 (1993) : 相模湾上層部で観測された内部潮汐の特性. *海の研究*, 2(5), 333-341.

北出裕二郎,松山優治,石丸隆,才野敏郎,中村哲也,石井美帆 (2004) : 相模湾中央部で観測された内部潮汐の鉛直構造と間欠性. *海の研究*, 13(5), 1-4.

Ohwaki, A., M. Matsuyama and H. Nagashima(1994) : Difference in the Predominance of Internal Tidal Currents in Sagami and Suruga Bays. *J. Oceanogr. Soc. Japan.*, 47, 194-206.

2.1.3 観測データ公開

観測データは Fig.2.1-16 のホームページにて準リアルタイムで公開している。

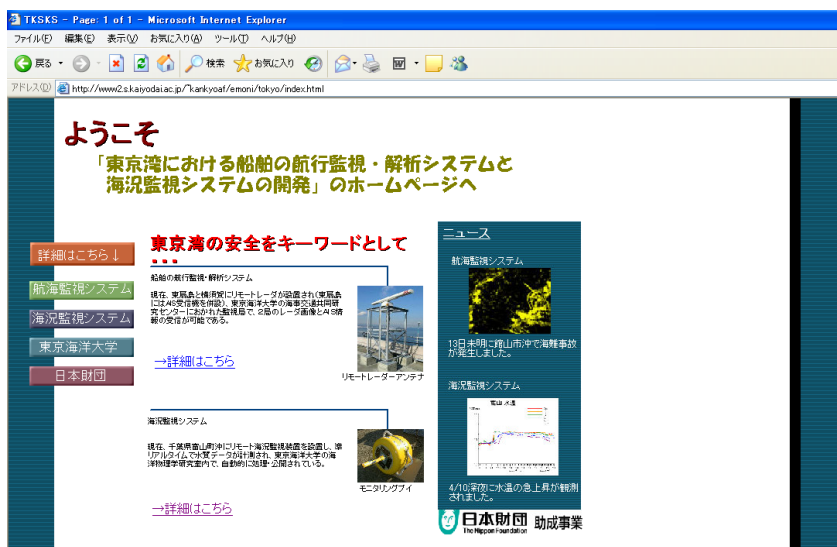
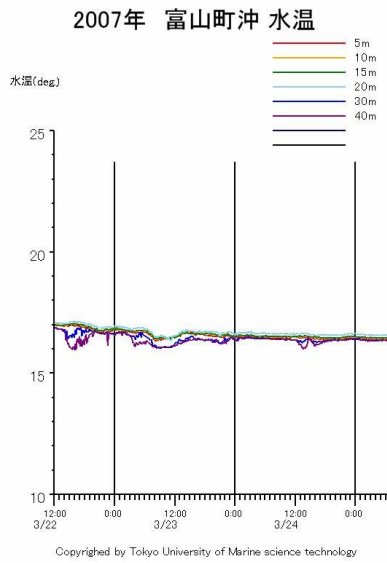
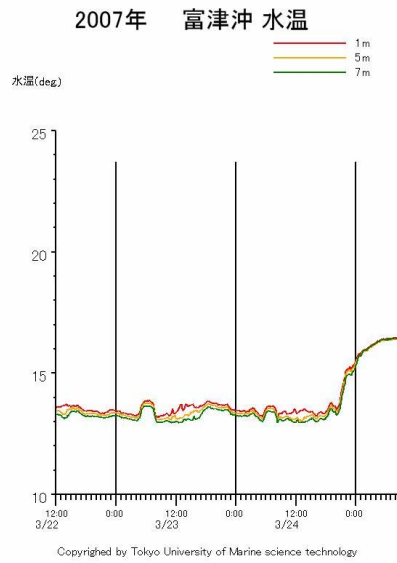


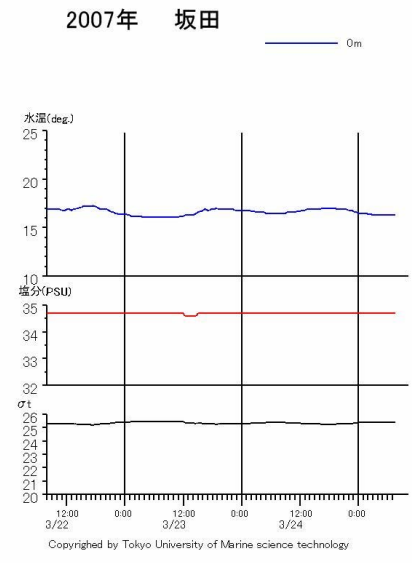
Fig. 2.1-16 公開中のホームページ。今年度では、モニタリング点の追加、観測項目の追加、携帯サイトの追加がなされている(上)。本研究事業のトップページ(左)。



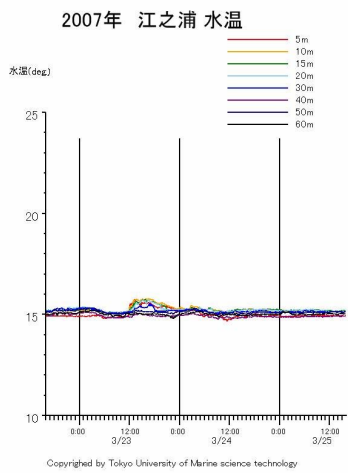
(a)



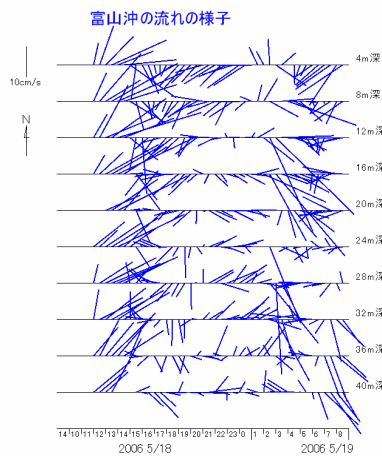
(b)



(c)



(d)



(e)



東京海洋大学
海洋科学部
海洋物理学研究室
リアルタイムモニタリング
携帯電話用サイト
以下をクリックすると
グラフのページにジャンプします。

[水温最新値\(富津・富山\)](#)

[千葉県富津沖](#)

[千葉県富山町沖定置網](#)

[千葉県坂田沖](#)

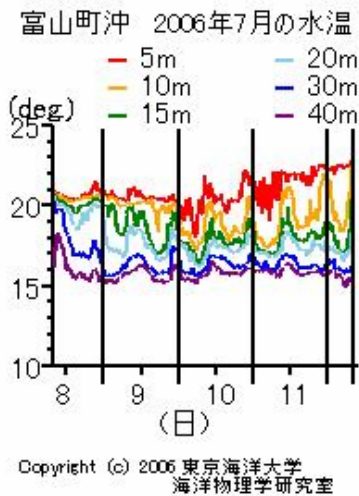
[神奈川県小田原沖](#)

[相模湾沖 拓海](#)

[静岡県 三津](#)

[静岡県 足保](#)

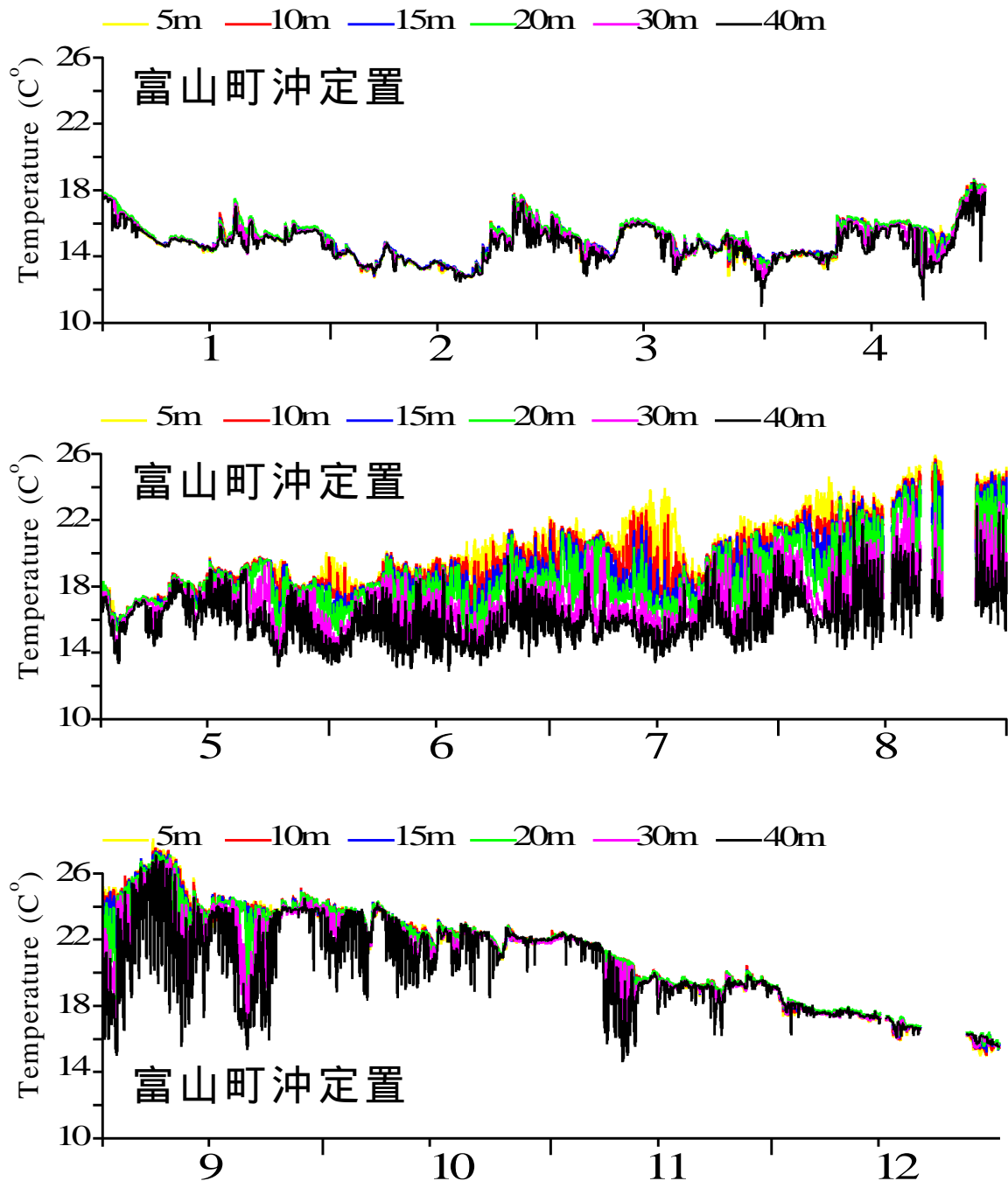
(f)



(g)左図

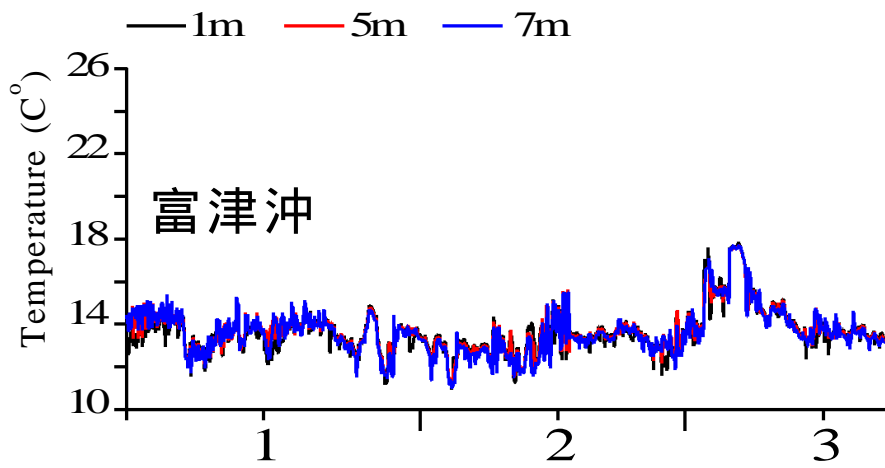
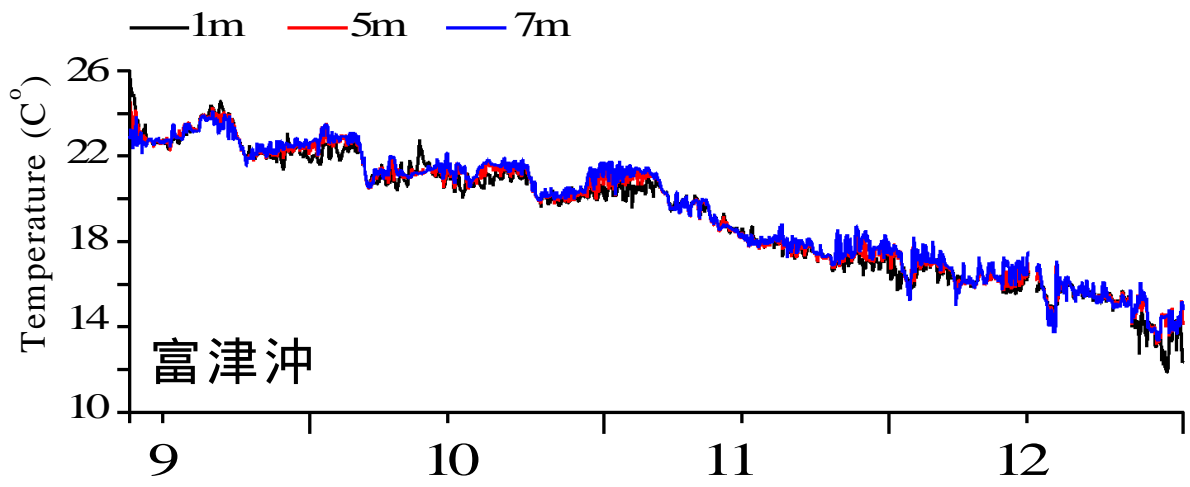
Fig. 2.1-17 ホームページで公開しているデータ例。
(a) ~ (e)は PC サイトで公開している水温流速データの
図の例。(f)は携帯サイトのトップページ。(g)は携帯サ
イト用の図の例。

Web サイトでは最近の 4 日分について図示するように設定してある (Fig. 2.1-17)。本研究期間に、各モニタリング地点では 1 年から 1 年半にわたる貴重な記録が得られている。そこで、Fig.2.1-18 に各モニタリング地点での記録を示す。また、Fig.2.1-19 には、富山町沖データの拡大図を示す。



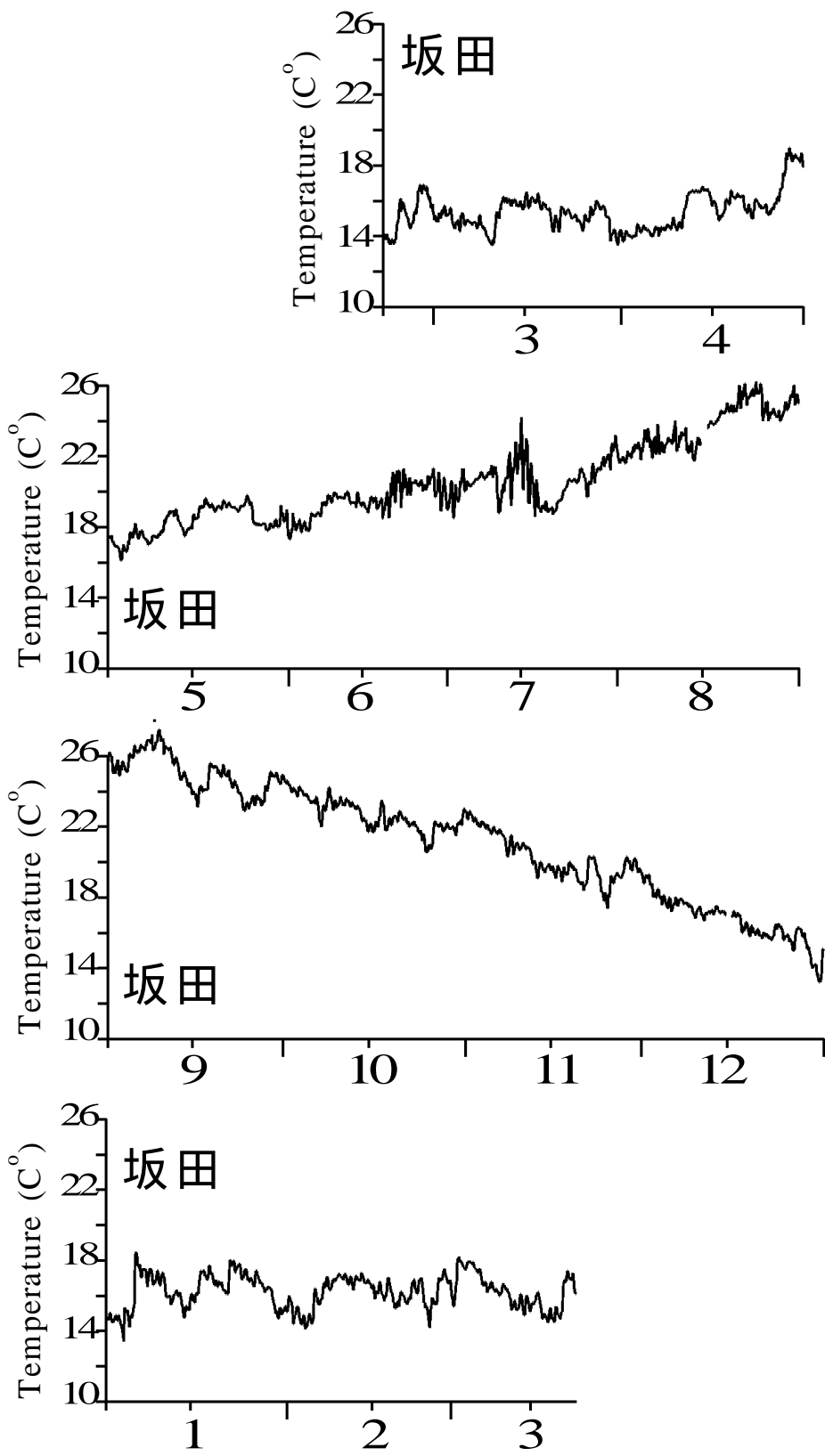
(a)

Fig. 2.1-18 各地点で得られた水温記録の時間変化。横軸の数字は月を示す。(a)富山町沖での水温、(b)富津南沖での水温、(c)館山ステーション(坂田)での水温。



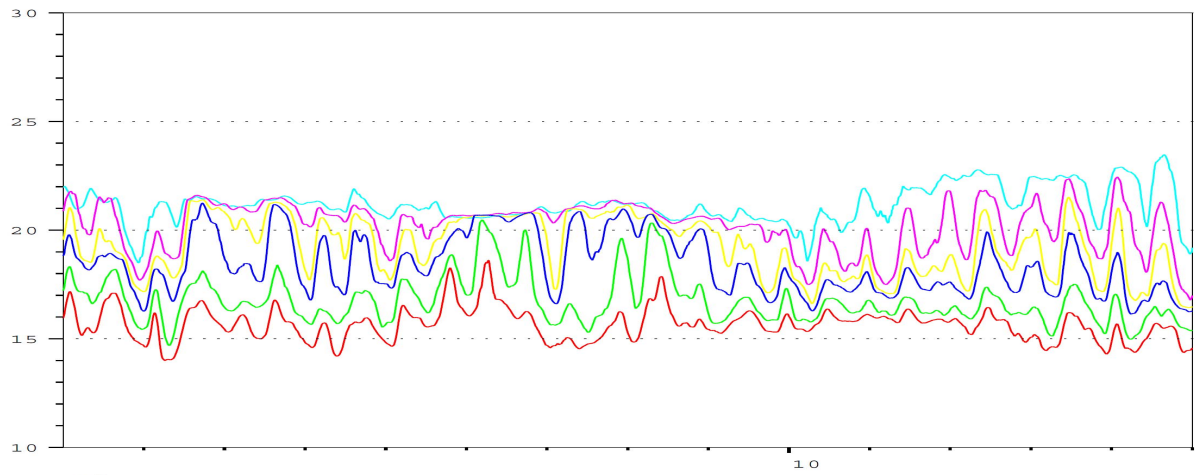
(b)

Fig. 2.1-18 つづき

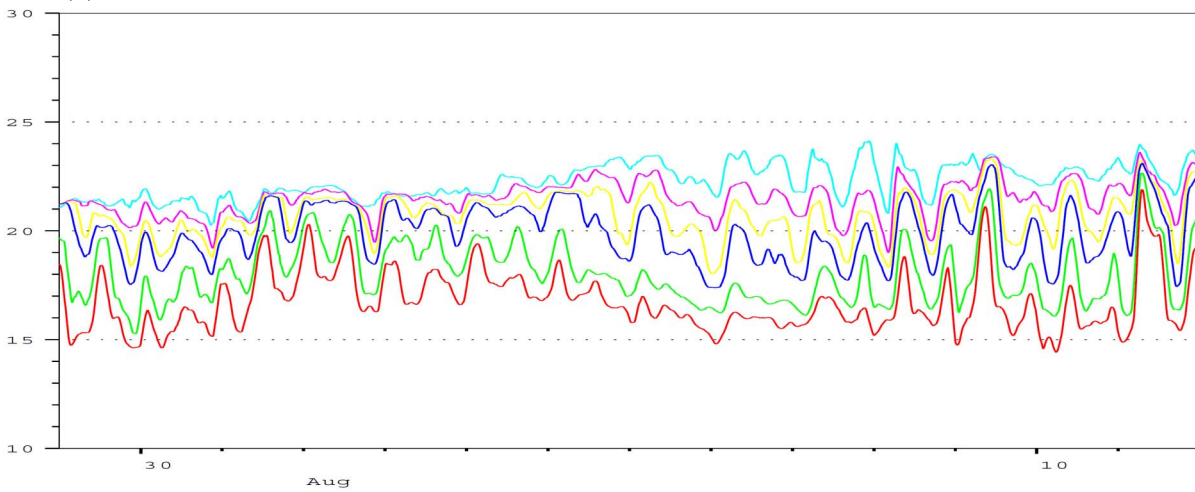


(c)

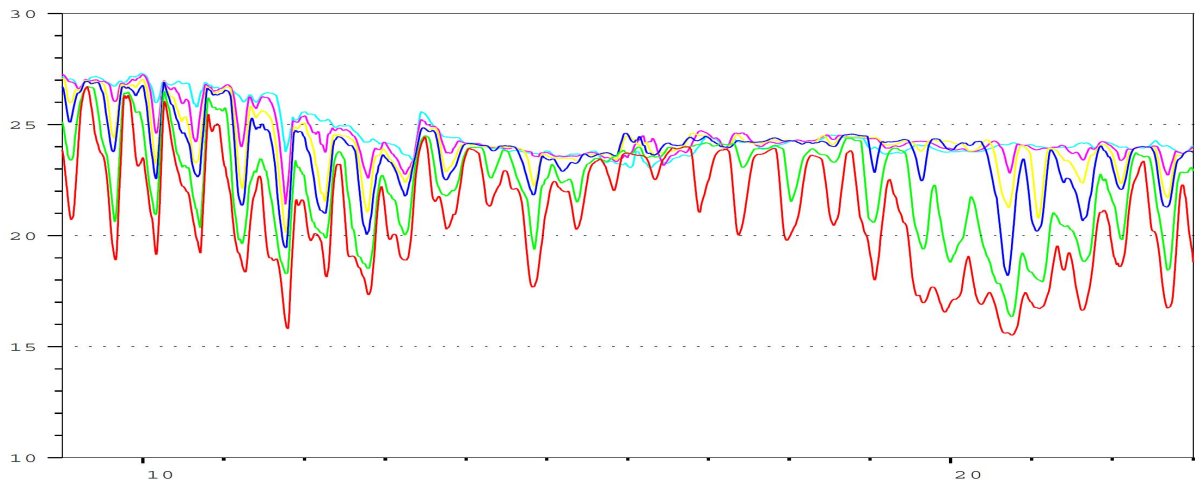
Fig. 2.1-18 つづき



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.1-19 富山町沖で観測された水温記録の例。1時間の移動平均を施してある。(a)7月1日から7月14日、(b)7月29日から8月11日、(c)9月9日から9月22日。内部潮汐による水温変動の信号を見ることができる。水温変化は9月上旬の大きい時には8°Cを超える(移動平均を施さない実際の水温変化は10°Cに達していた)。

2.2 海況予測モデルの開発

2.2.1 モデルの高速化

一般に水平スケールに対して鉛直スケールが十分に小さいような地球流体力学に関する数値予報モデルには、静水圧近似およびブシネスク近似を施した 3 次元のプリミティブ方程式系を用いる。数値計算では、これらの方程式を差分化し、得られた差分方程式を連立させて数値積分し解を得る。計算には高速コンピュータを用いるが、解を得るためにかかる計算時間には、数値積分を行う際の時間ステップが非常に重要なファクターとなる。時間ステップは CFL 条件により決定されるが、その条件は、簡単に言うと、モデル海内に生じている現象が与えられた時間ステップ間に格子を飛び越えることがないように制限する条件である。海洋および海洋内部において最も早く伝播する現象は、音波を除くけば海面の重力波である。(ここでは、以後この海面の重力波を含む海面の変動と関連した現象を外部モードの現象と呼ぶことにする。)したがって、陽解法によって得られた差分方程式を数値積分する場合には、外部モードの現象を小さい格子間隔においても十分表現できるような時間ステップを設定する必要がある。一方、海洋内部における現象や物質輸送は外部モードの現象に比べるとかなり遅い速度で伝わる。そのため、海洋内部の運動だけを表現する場合には時間ステップを海面の重力波を表現する場合の 10 倍程度大きく取ることができる。したがって、海洋内部の現象と外部モードの現象を基本方程式系において分離し、それぞれ異なる時間ステップ、すなわち、外部モードの現象を Δt という時間ステップで計算し、より多くの計算時間を要する海洋内部の現象を表わす方程式系を 10 倍程度長い時間ステップで計算してやることによって、計算時間を大幅に短縮することができる。

(1) 基本方程式系

本モデルで用いる基本方程式系(2.1)から(2.6)を以下に示す。海況予測モデルに用いた方程式系はブシネスク近似と静水圧近似を施した非圧縮性流体の基本方程式系で、静止海面を原点、東向きに x 軸、北向きに y 軸、鉛直上方に z 軸をとると、

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2.2)$$

$$\rho g = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = K_{hT} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{K_{vT}}{\delta} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = K_{hS} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{K_{vS}}{\delta} \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (2.6)$$

となる。ここで、 g は重力加速度、 f はコリオリ・パラメーター、 p は圧力、密度 ρ は $\rho_{(x,y,z,t)} = \rho_{0(z)} + \rho'_{(x,y,z,t)}$ で表され、 ρ_0 は基本場の密度、 ρ' は擾乱による密度である。 A_h は水平渦動粘性係数、 A_v は鉛直渦動粘性係数、 K_{hT} 、 K_{hS} はそれぞれ熱（水温）と塩分の水平渦拡散係数、 K_{vT} と K_{vS} はそれぞれ熱（水温）と塩分の鉛直渦拡散係数である。また、 δ は対流調節パラメータで、海水の密度が安定な場合は $\delta=1$ 、不安定な場合は鉛直拡散係数が無限大になるように $\delta=0$ となるように、

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{for } \frac{\partial \rho}{\partial z} < 0 \\ 0 & \text{for } \frac{\partial \rho}{\partial z} > 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

と定義される。また、海面と海底における境界条件は、それぞれ以下の(2.8)、(2.9)で与えられる。

$$A_v \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = \gamma_s^2 \frac{\rho_a}{\rho_0} W(W_x, W_y) \quad (2.8)$$

$$A_v \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H(x,y)} = \gamma_b^2 U_b(u_b, v_b) \quad (2.9)$$

ここで、

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \quad U_b = \sqrt{u_b^2 + v_b^2}$$

ただし、 W_x 、 W_y は風速の x 、 y 成分、 u_b 、 v_b は海底直上の流速の x 、 y 成分、 H は水深、 γ_s^2 は風応力による海面での摩擦係数、 γ_b^2 は海底摩擦係数、 ρ_a は空気の密度である。

(2) 外部モードの方程式系

運動方程式および連続の式(2.1)から(2.4)において、外部モード式を求めると、

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial U}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} (H + \eta) - \frac{1}{\rho} \int_H^0 \frac{\partial p}{\partial x} dz + A_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + F_{sx} - F_{bx} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial V}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} (H + \eta) - \frac{1}{\rho} \int_H^0 \frac{\partial p}{\partial y} dz + A_h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + F_{sy} - F_{by} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (2.12)$$

である。ここで、 U, V はそれぞれ x, y 軸方向の流速を鉛直積分したもの、 η は海面変位、 F_{sx}, F_{sy} はそれぞれ x, y 軸方向の海面の応力、 F_{bx}, F_{by} はそれぞれ x, y 軸方向の海面の応力である。この方程式系において、通常の順圧のみの運動方程式と異なる点は、(2.10)、(2.11)式の右辺第二項の傾圧成分の圧力勾配を鉛直積分した項が付加されていることである。順圧モードの計算は傾圧モードの計算より短い時間ステップで積分されるが、その間この傾圧モードの圧力勾配項は一定としている。

数値積分においては、外部モードの式(2.10)~(2.12)、および基本方程式系(2.1)~(2.5)の両方程式系をそれぞれ時間および空間に関して中央差分で差分化した。リーブフログスキームは時間積分の際に不安定を生じるため、時間ステップ毎に時間方向にフィルターを施し、解を安定化させた。

(3) モデル海域および諸条件

モデル海域は、Fig.2.2-1 に示したように、東西には房総半島九十九里浜沖から伊豆半島南端まで、南北には新島から東京湾奥までの海域である。この海域を $1\text{km} \times 1\text{km}$ の正方格子に分割した。ここで示すテストケースにおいて、水深は、 4m より浅い所を 4m 、 1000m より深いところを 1000m と簡略化して用いた。図中外洋側の破線部は開境界を示し、実測の潮位の分布と合うように、開境界での潮汐振幅、位相を与えている。開境界で擾乱が反射する影響を抑えるため、開境界から 10km の領域にスポンジ条件を採用した。一方、陸岸境界には non-slip の条件を採用し、岸で流れが無いとした。

このモデルでは、外部モードの現象に対する CFL 条件を満足させるため、時間ステップは外部モードの計算においては 3 秒であるが、内部モードの計算においてはその 10 倍程度取ることができる。しかし、強い流れや鉛直流が生じることを考慮して 15 秒とした。これでも単純に従来のモデルよりも約 4 倍以上の高速化が図れる。各パラメータの値は、一般に良く用いられている $\rho_a = 1.2 \text{ kg m}^{-3}$ 、 $A_v = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 $K_{hT} = K_{hS} = 100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 $K_{vT} = K_{vS} = 2.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 $\gamma_s^2 = 0.0016$ 、 $\gamma_b^2 = 0.0026$ を採用した。コリオリ・パラメータは $f = 2\omega \sin\phi$ (ω :角速度 ($=7.292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), ϕ :緯度) から見積もった値を用いた。強い風強制力下でも計算が安定し、かつ

陸岸境界近傍での流速の減衰を少しでも防げるように、水平渦動粘性係数は $A_h = 300 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ を用いた。さらに、計算時間を軽減するため、鉛直に 15 層のレベルを設定した。各層の厚さは上層から 4m、4m、4m、8m、10m、20m、30m、50m、70m、100m、100m、100m、200m、300m、500m とした。ただし、このテストケースではモデルの最深層を 1000m としているため、15 層目は計算されていない。

モニタリングによって得られる水温、塩分等の記録を組み込む際には、初期の成層場として与える方法、ある時間間隔でネスティングにより与える方法、境界条件として与える方法とがある。の方法は非常に簡便であるが、モデル内で発生する現象の力学を理解するのに最も適した方法であると言える。の方法は予報を実用化レベルに上げる際には必要となると考えられる。の方法は閉鎖海域など開境界が限られている場合で、なおかつ流速などの力学的項目が得られている場合には非常に有効である。現在のモニター点の数と観測項目から考えると、との方法で条件を与えるにはまだ問題がある。そこで、ここではの方法で初期条件としての成層場を与えるようにモデルの開発を進めた。モデルの結果を以降で紹介する。特に前述の 2.1.2 節で紹介したように、成層が強まったときに共鳴的に内部潮汐波が強化されることが本モデルによって実証された。このことは、単にモニタリングデータを初期条件として与えるだけでも、モデルの精度を向上させることに役立ち、観測結果を組み込むことの有効性を示しているといえるだろう。

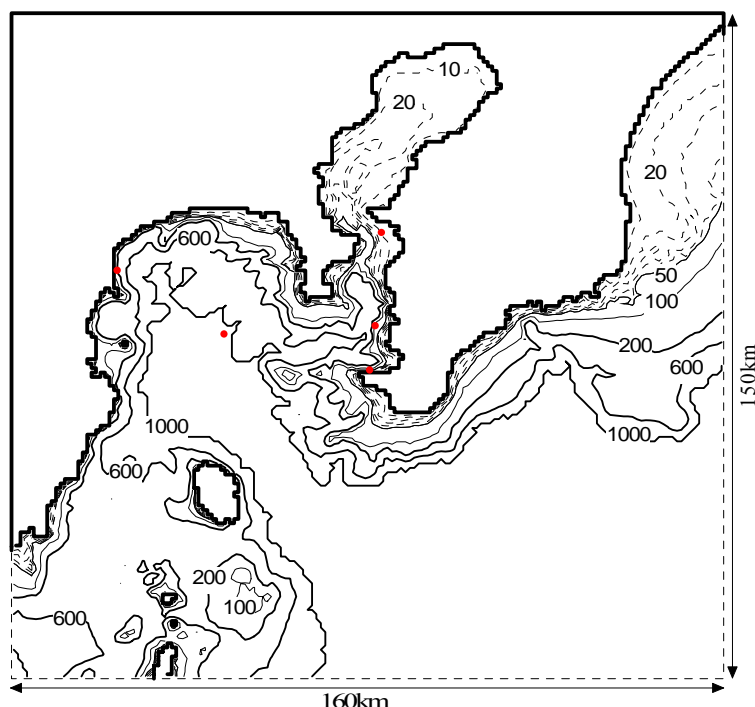


Fig. 2.2-1 東京湾予報モデルの計算領域と海底地形。外洋側の破線部は開境界を示し、外部潮汐を振幅および位相に空間的差をつけて与えることができる。図中の丸点はモニタリングシステムを設置している地点。

2.2.2 モデルの再現性

潮汐のみを与えた結果について、東京湾湾口付近でのながれの様子を紹介する。このモデルでは初期は静止状態とし、開境界から M2 分潮の海面変位のみを与えている。振幅・位相は、勝浦、南伊豆、神津島、三宅島の検潮所の値を参考にして適切な位相差をつけて与えている。初期に与えた基本成層場は 8 月下旬ごろを想定している (Fig. 2.2-2)。

Fig. 2.2-3 は、計算領域のほぼ全域における 2m 深の流れの分布を計算開始後 200 時間目から 2 時間ごとに示したものである。東京湾湾口や大島南側の浅瀬海域に比較的強い流れが見られる。そのほかの相模湾内や房総半島の南側の海域には、流速ベクトルの大きいところと小さいところが縞状に分布している様子が見える。これらは発生した内部潮汐が伝播して、陸岸で反射し干渉していることを示す。

東京湾付近を拡大した流速ベクトルの 2m 深と 65m 深の分布をそれぞれ Fig. 2.2-4 と Fig. 2.2-5 に示す。表層の流速分布 (Fig. 2.2-3) から大まかな特徴として、2/4T で浦賀水道での下げ潮が最も強くなっており、4/4T の時上げ潮が最も強いこと、浦賀水道での最大流速は 80cm/s 程度であること、富山町沖での流れは浦賀水道での流れと逆になっていることなどが分かる。このうちの特徴は、富山町沖で観測した流速データの結果と良く一致している。富山町沖での 65m 深の流速分布 (Fig. 2.2-4) を調べてみると、2/4T、4/4T とともに 2 m 深と 65m 深のでは流向が逆転していることが分かる。このことはこの強い流れが内部モードの現象であることを示している。細かい時間発展は示さないが、この強い流れは特に伝播するというよりは、その場で流れの流向が変化する振動を示した。すなわち、ここでの内部潮汐は定在波的特性を強く持っている。以上のことから、富山町沖で観測された流れは、定在波になった内部潮汐による流れを示すものと考えてよいだろう。

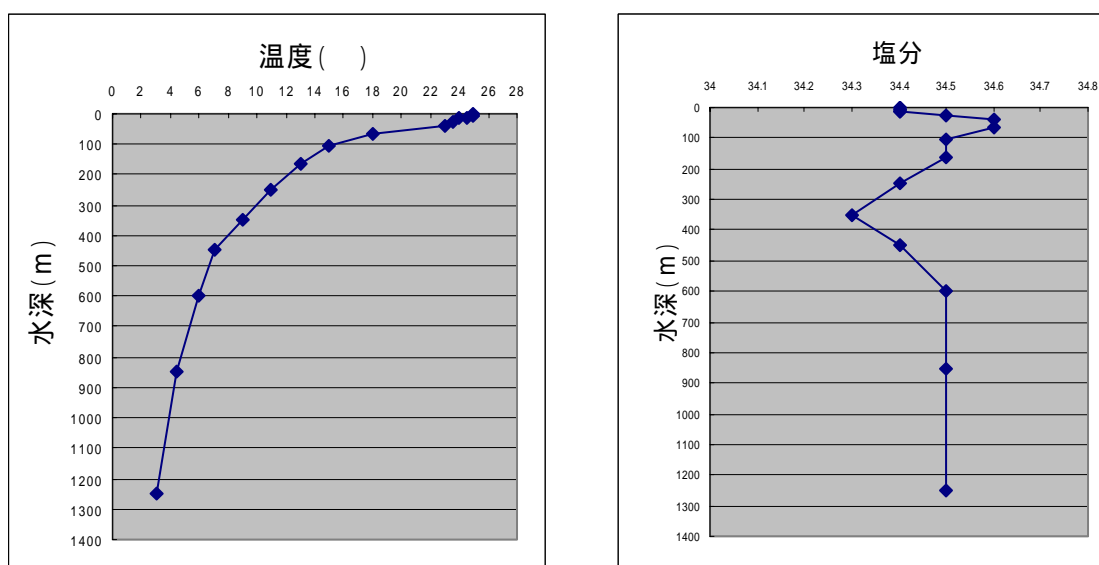


Fig. 2.2-2 計算に用いた水温(左)と塩分(右)の鉛直プロファイル。

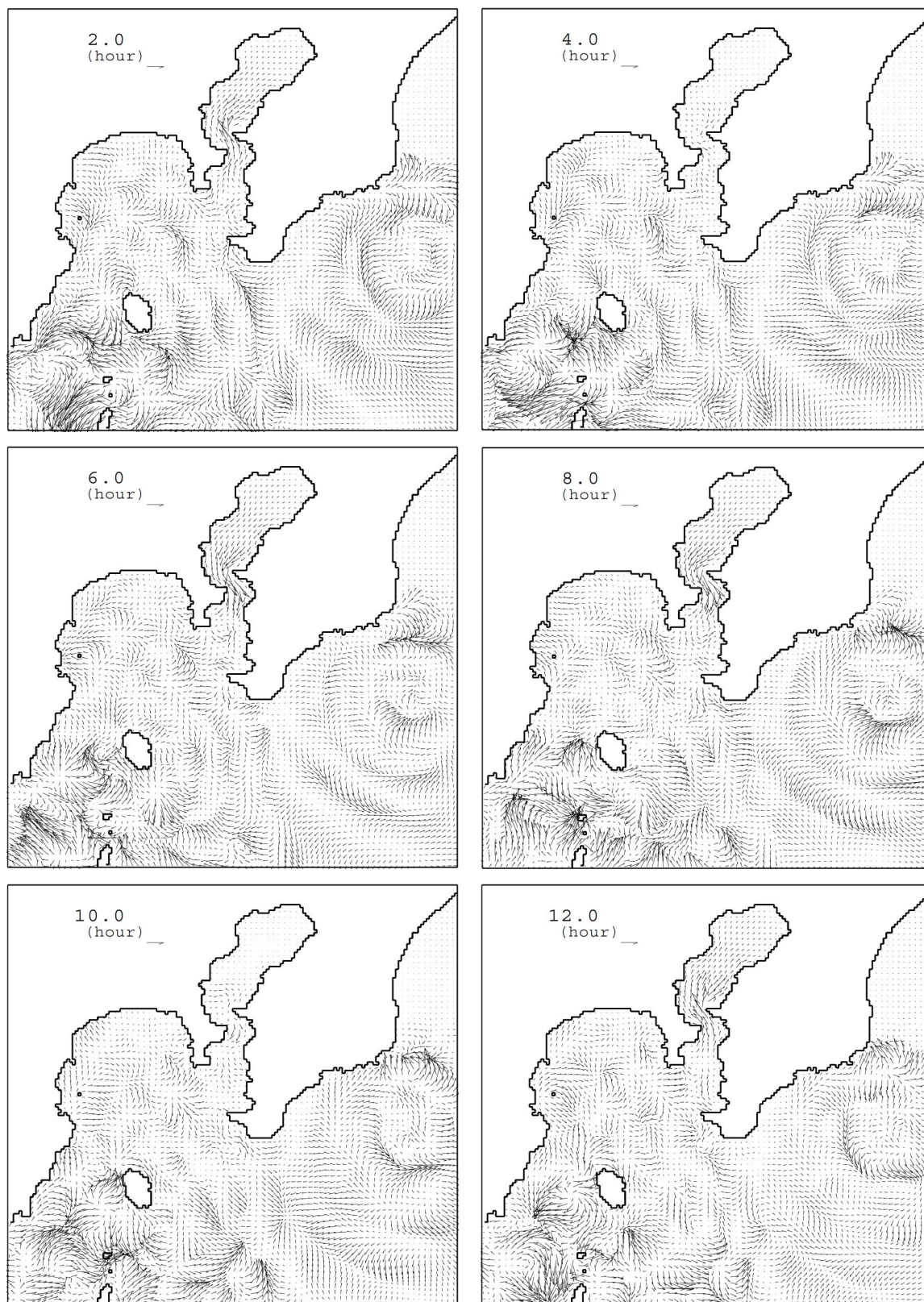


Fig. 2.2-3 M2 外部潮汐のみを与えた実験結果の例。図中右上の時間は、計算開始後 200 時間後からの経過時間。図中右上の矢印は 50cm/s のベクトルの大きさを示している。

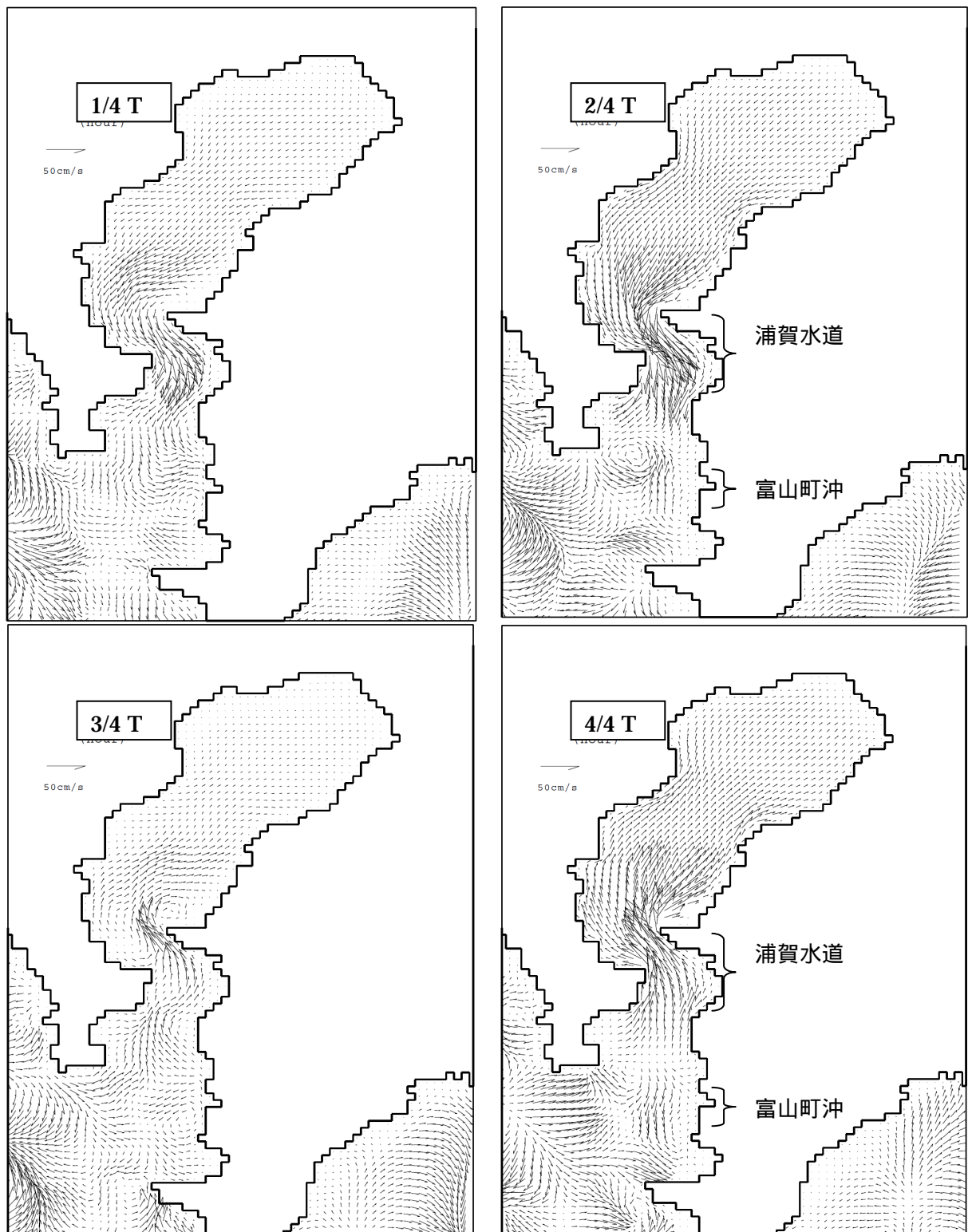


Fig. 2.2-4 東京湾から東京湾湾口にかけての拡大図。2m深の流速ベクトルの分布を示す。TはM2周期を示す。图中右上の矢印は50cm/sのベクトルの大きさを示している。

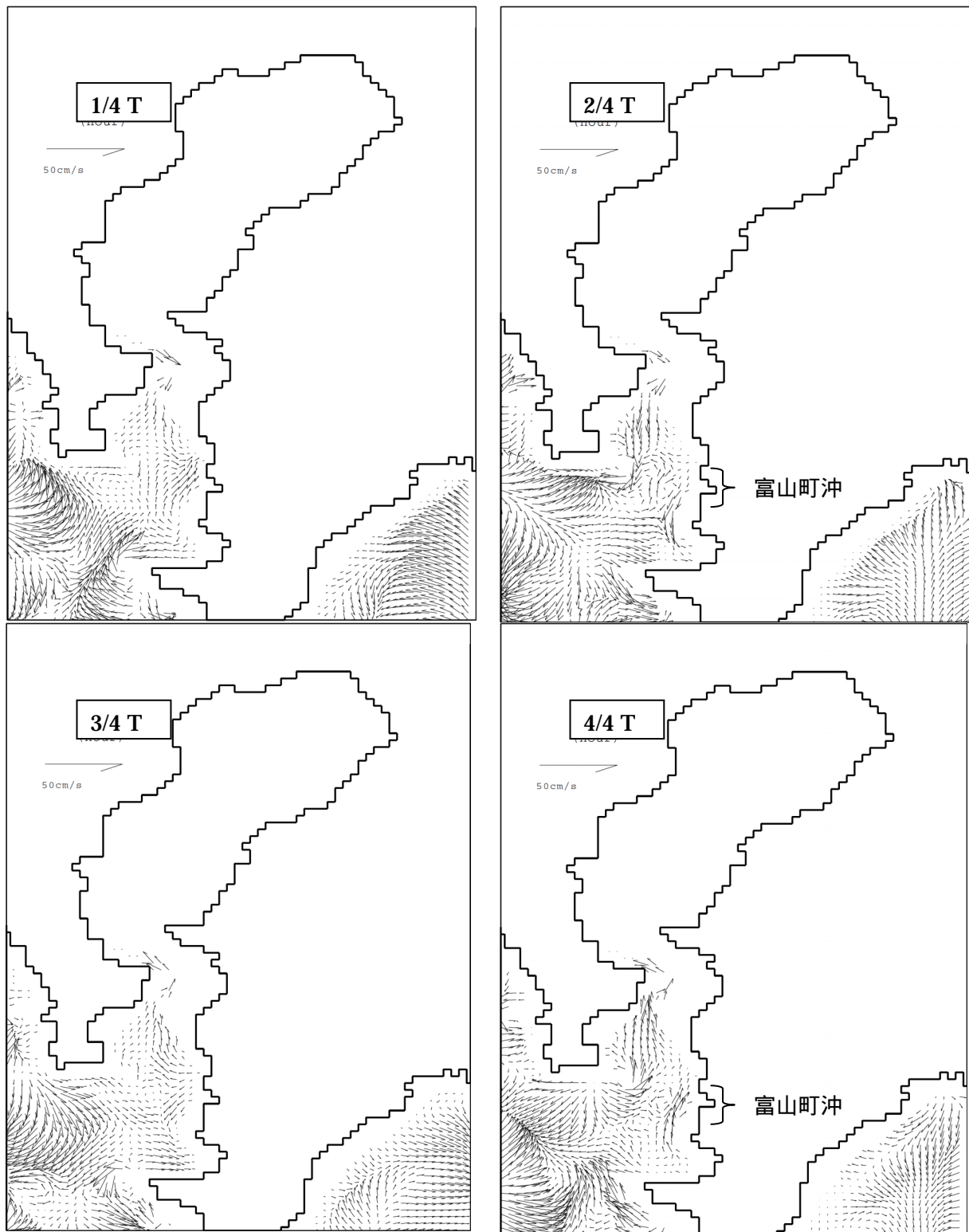


Fig. 2.2-5 東京湾から東京湾湾口にかけての拡大図。65m深の流速ベクトルの分布を示す。TはM2周期を示す。图中右上の矢印は50cm/sのベクトルの大きさを示している。

東京湾湾口の内部潮汐波の発生域と振動系の様子を調べるために、水温振幅の分布を作成した (Fig. 2.2-6)。値が大きい地点というのは、外部潮汐による流れで生じる鉛直流によって大きな水温変化がもたらされている所か、あるいは定在波の振動の腹となって鉛直変位 (鉛直流) が大きくなっていることを示す。東京湾湾口の金田湾と館山湾および洲崎周辺で振幅が大きいことが分かる。これらの大きいところでは水温振幅 2 (温度変化で 4) を示している。東京湾湾口付近は潮流が非常に強く (Fig. 2.2-4) 水深変化も著しい (Fig. 2.2-1) ことから、内部潮汐の発生域であると考えられる。一方、その間の富山町沖には水温振幅の小さいところがある。この地点は内部潮汐による流れが強いところと一致することから、この密度成層場において富山町沖は、鉛直変位の節、水平流速の腹に相当するといえるだろう。つまり、この実験で与えた 8 月下旬頃の成層状態の時には、東京湾湾口付近では内部静振がシーソーのように振動し、それが内部潮汐と共鳴するような機構が考えられる。このモデルの結果はモニタリングデータを解析した結果明らかにされた内部潮汐の特性をよく説明している。

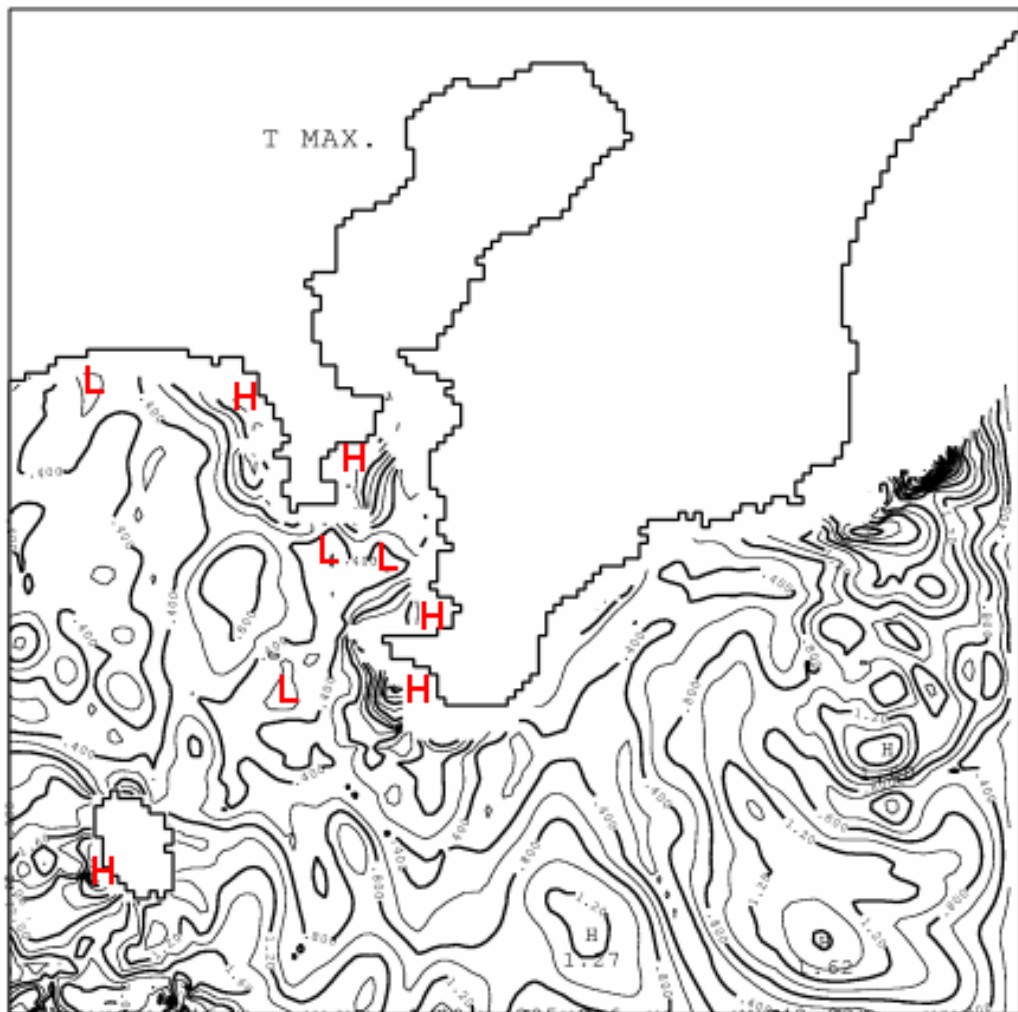


Fig. 2.2-6 計算開始 200 時間から 30 時間分のデータを用いて作成した 65m 深における水温振幅の分布。東京湾湾口付近の極大極小に H,L の印をつけている。

次に、位相と流速値について、定量的な議論をするために、富山町沖での流速の時間変化を東京湾湾口部での潮位変化とともに Fig. 2.2-7 に示す。興味深い現象として、潮位と上層の流れの関係において、満潮から干潮に変わるときに上層 25m 以浅では北向きの流れになっている点が挙げられる。一般的に、沿岸域で潮汐流は干潮から満潮になるときに岸に向かう流れ（この場合東京湾へ向かう北向きの流れ）、満潮から干潮になるときに沖へ向かう（この場合は東京湾から流れ出る南向きの流れ）となる。モデルの結果に見られる南北流は、これらの順圧潮流の特徴とは異なっているが、富山町沖でモニタリングにより観測された位相関係と良く一致する。また、上層 25m と下層 165m 以深で流れが強く、上層と下層ではほぼ逆位相で振動していることが分かる。このことは鉛直第一モードが卓越していることを示す。モデルと観測が定量的にどの程度あっているかを流速値で比較する。モデルの流速振幅は 18cm/s であるのに対し、観測では大きいときに 25cm/s から 30cm/s になっていることが分かる。しかし、モデルの結果は M2 分潮の振幅（約 40cm）だけを考慮しているので、S2 分潮の潮位振幅（約 20cm）を境界条件として与えることによって、単純に考えても約 1.5 倍モデルの流速振幅が増加する。したがって、観測された流速振幅を十分再現できることが分かる。

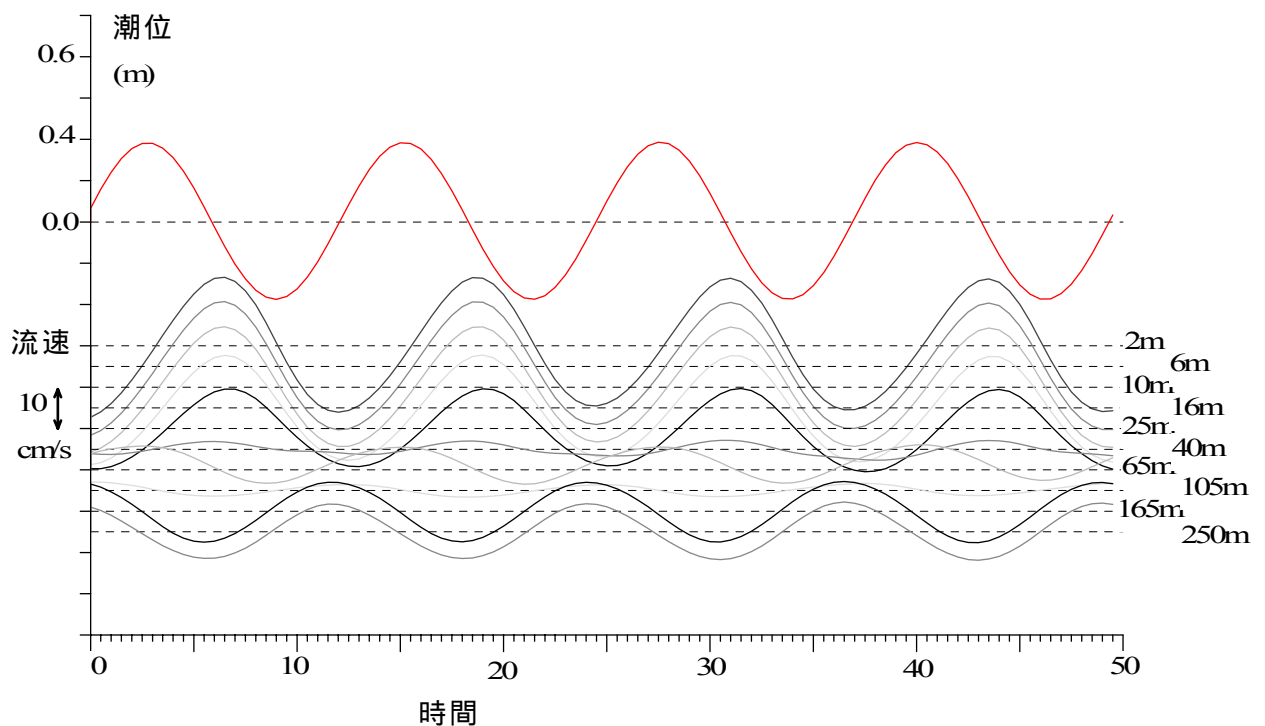


Fig. 2.2-7 東京湾湾口での潮位と富山町沖での流れ（上層から 10 層分）の時間変化。流速変動の右側にそれぞれの深度を示している。時間は計算開始から 200 時間目からの経過時間を示す。

2.2.3 風による沿岸捕捉波の発生と東京湾の海水交換の計算結果例

(1) 水温のモニタリングデータに見られる7月下旬の海況変動の特徴

7月28日から8月4日に淡青丸による観測が実施されていた。そこで、この期間に注目してその海況変動を調べ、モデルによる再現を試みた。2006年7月27日から8月3日に、拓海に設置した水温計アレイで得られた水温記録を Fig. 2.2-8 に示す。7月31日頃までは内部潮汐はそれほど発達しておらず、潮汐周期より短い周期変動が目立つ。7月31日から8月1日にかけて15mと25m深の水温が上昇し、内部潮汐による水温変動は、8月1日以降、急に大きくなっている。拓海に設置してある ADCP で計測したこの期間の流れ(Fig. 2.2-9)は、はじめ潮汐あるいはそれよりも短い周期変動で比較的流れの弱い状態が続いていたが、7月31日から北北西方向の流れが強まり、その流れは8月4日まで続いていた。この北北西流は、半日周期で強められており、強いときには50cm/sに達している。従って、半日周期の潮汐流は10~20cm/s、平均流速は20~30cm/sであろう。この様に、7月31日を境に、相模湾の海況、特に水温・流速変動の特徴が大きく変化した。

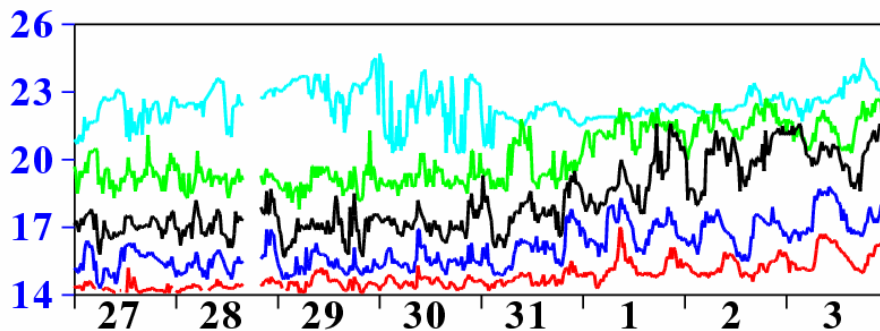


Fig. 2.2-8 7月27日から8月3日に、拓海で得られた水温記録。上から5、15、25、35、50m深の水温。

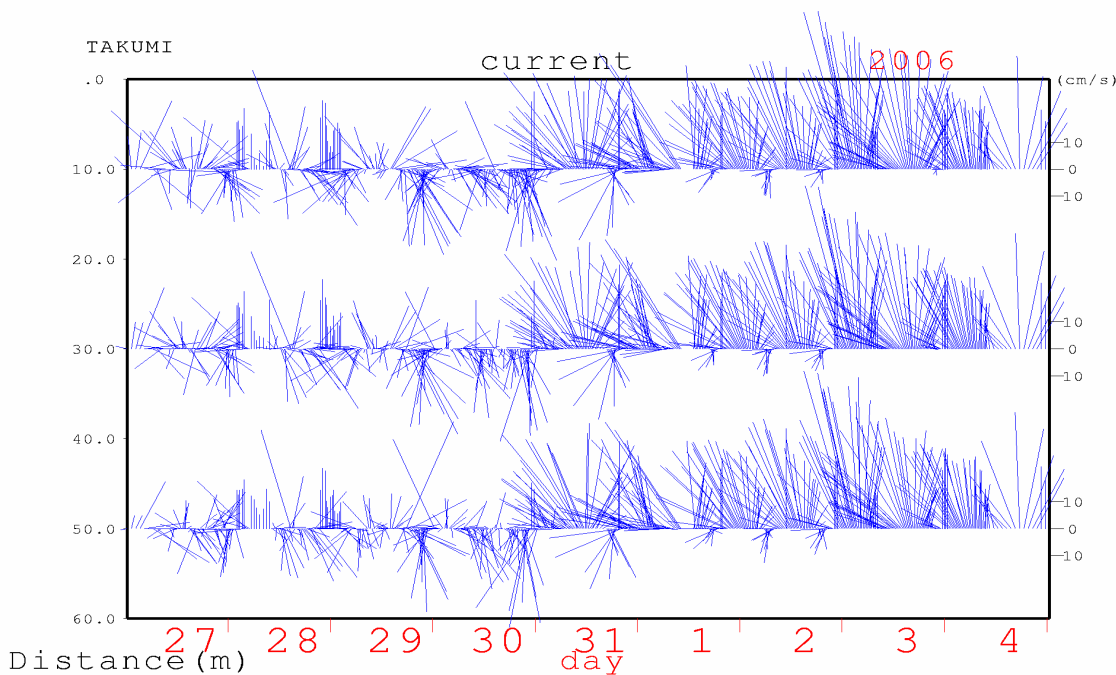


Fig. 2.2-9 相模湾中央(拓海)でサイドルック式 ADCP で得られた流速のスティックダイアグラム。左の軸は拓海からの距離を示す。

相模湾中央、富山町沖、小田原沖で得られた水温の長期的な変化 (Fig. 2.2-10) を見ると、各地点で 8 月 1 日に水温上昇していることが分かる。8 月 1 日の水温上昇は相模湾全域で起こっていたが、同様の水温上昇は、図示した期間においても幾度か見られる。その中でも 9 月上旬の水温上昇は規模が大きい。この 9 月の水温上昇は黒潮から分岐した流れが大島東水道から相模湾へ流入したもので、海洋速報 (Fig. 2.2-11) の黒潮流軸にそのときの状況がきれいに示されている。8 月 1 日の水温上昇は、9 月の変動と比べるとそれほど大きくない。7 月から 8 月の黒潮の分布について、同じく海洋速報の黒潮流軸分布で見てみる。Fig. 2.2-12 は 5 月 4 日から 9 月 9 日までの黒潮流軸の北縁位置をトレースしたものである。淡青丸による観測期間 (7 月 28 日から 8 月 4 日) には、黒潮は比較的沖合を流れており、あまり変動していない。またここでは図示していないが、NOAA の衛星画像にも、黒潮流軸の変化を示す海面水温の明確な変化はあらわれていない。このことから、8 月 1 日の水温上昇は、この期間に黒潮の流軸等が変化したことによって引き起こされたものとは考え難い。

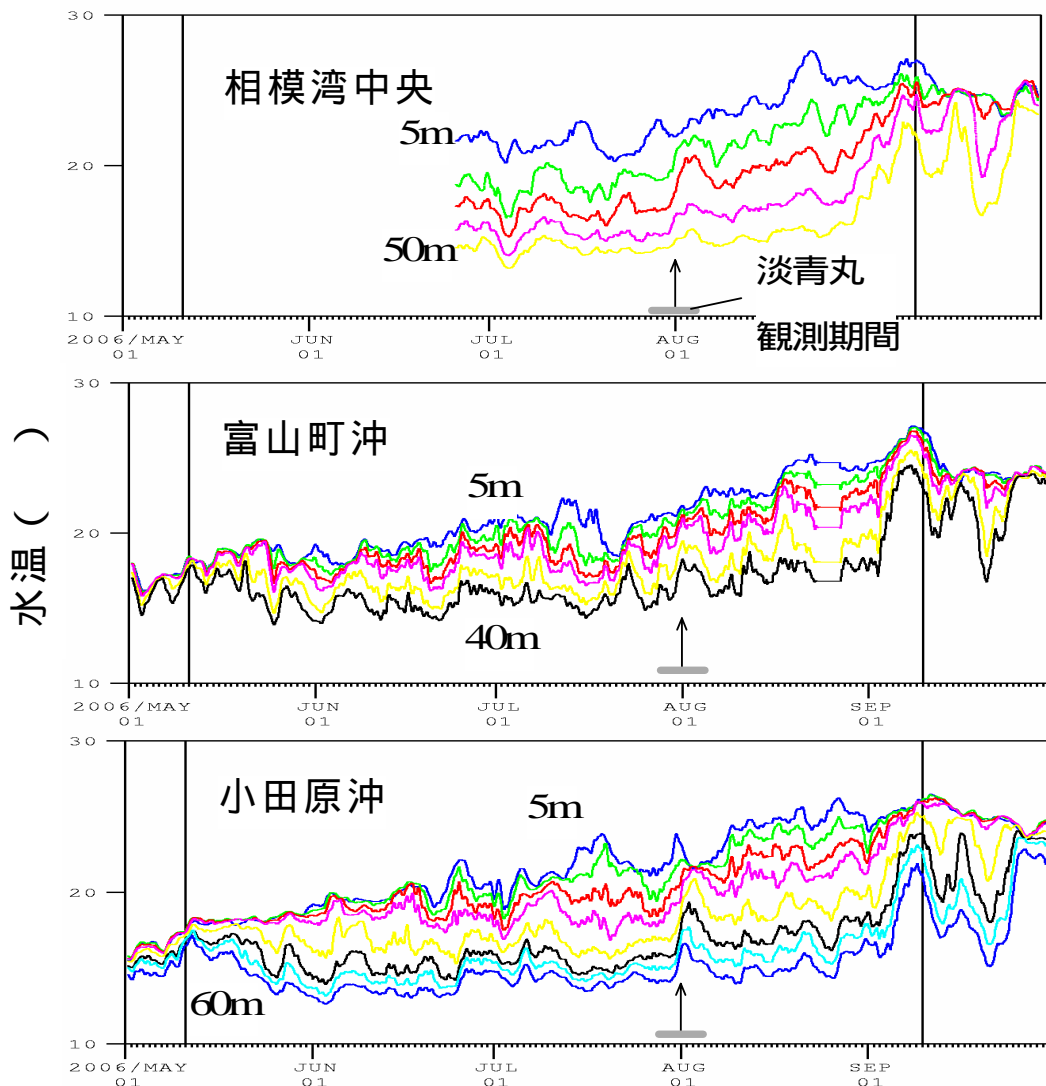


Fig. 2.2-10 相模湾中央 (拓海)、富山町、小田原沖で得られた水温の長期的な変化。25 時間の移動平均により潮汐周期変動を除去した。矢印は水温上昇を示す。

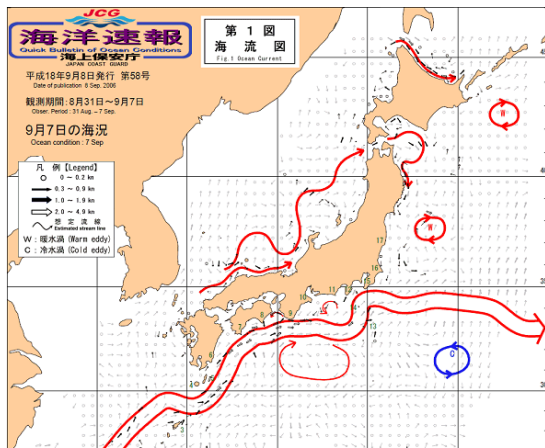


Fig. 2.2-11 海洋速報による黒潮流軸 9月7日。

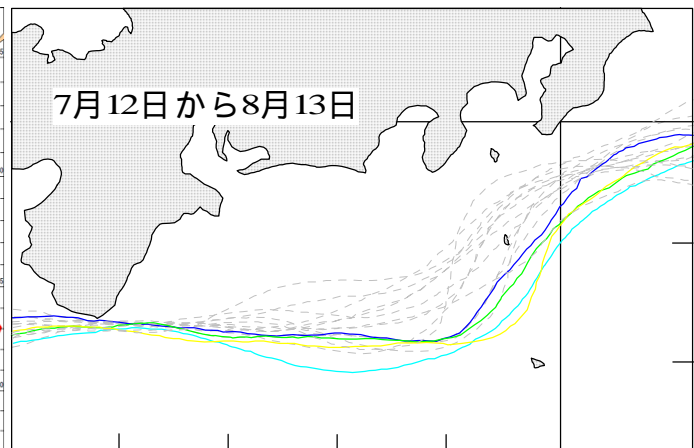


Fig. 2.2-12 海洋速報をもとに5月4日から9月9日までの黒潮北縁を1週間ごとにトレースしたもので、色が7月12日から8月13日のもので、寒色から暖色に推移している。破線はその他の期間。

相模湾での風は、淡青丸での観測期間中にはそれほど強くなかったと記録されているが、これまでの研究(例えば、Kitade and Matsuyama, 2000)から、8月上旬に見られるような数日で変化する水温変動は風によって励起された沿岸捕捉波に起因する可能性が考えられる。そこで次に、この観測期間の風の変動について調べた。Fig. 2.2-13は5月から9月の大島と銚子の風のスティックダイアグラムである。大島と銚子の風はほぼ同じように数日周期で変動しているが、7月下旬から8月上旬ではあまり合っておらず、特に7月30日から8月1日にかけて大島での風は弱い。銚子での風は10m/sを超える北北東からの風が吹き続けていたことが分かる。この北北東からの風は7月29日の午後から吹き始め、30日昼頃に12.5m/sに達し、2日以上にわたり吹き続けていた。このことから、この風によって房総半島の東で沿岸捕捉波が励起され、それが相模湾へ波及してきた可能性が考えられる。そこで次に、この様に銚子付近でのみ風が吹いた場合、相模湾の海況にどのような影響を及ぼすのかについて簡単な数値実験により調べた。

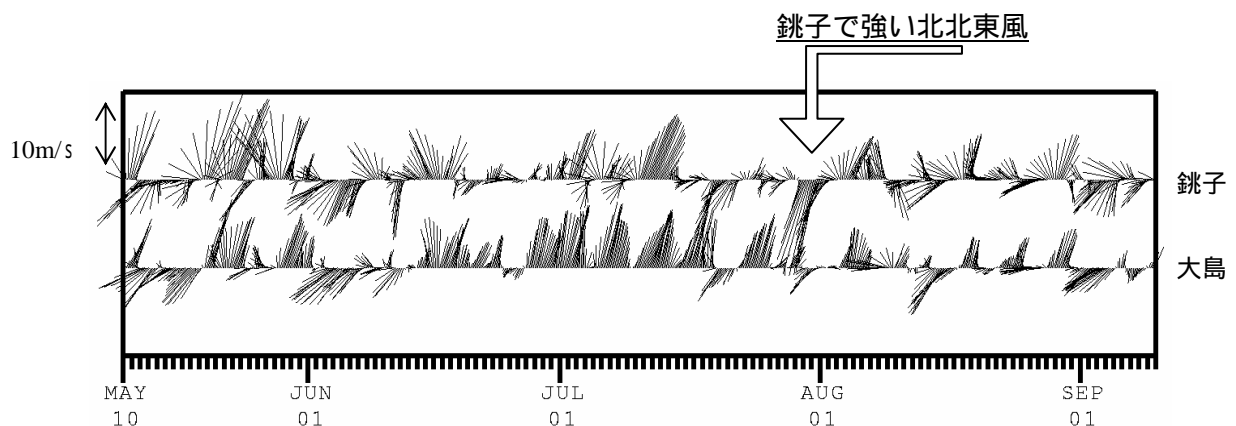


Fig. 2-2-13 25時間移動平均を施した銚子および大島の風速のスティックダイアグラム。風が吹き去る方向にスティックが伸びている。

(2)モデル

本実験のモデルは前述のモデルと基本的な点において同じであるが、風の効果を考慮するために、計算領域は Fig. 2.2-14 に示したように伊豆半島から房総半島東沖合までの海域で、東西に 250km 南北に 200km とした。格子間隔は水平に 1km×1km の正方格子、鉛直には 15 層 (4, 4, 4, 8, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 100, 100, 200, 300, 500m) とした。ここでは簡単のため、モデルの最深深度を 1500m とした。開境界にはスリップの境界条件を用い、海面を変化させることによって外部潮汐を与えることもできる。また、開境界から 10km 以内の範囲では、内部モードの現象に対してスポンジ境界条件を用いた。陸岸は nonslip の境界条件を用いた。与える風の外力は、7月29日から8月2日にかけての風の変化、Fig. 2.2-13 を参考に簡略化したものを用いた (大島から北東方向に線形で徐々に風が強くなる分布を与えた)。計算に用いた成層条件は浅い部分は水温計アレイと CTD で計測した値を、また深い部分の水温・塩分はこの時期の典型的な値を参考にして定められた (Fig. 2.2-15)。発生した沿岸流の減衰を極力抑えるようにするため、ここでは Smagorinsky の渦粘性パラメタリゼーションを用いている。

黒潮が相模湾から南に離れていたこと、拓海に設置されている ADCP で観測された流れが弱かったことから、モデルの初期状態を静止状態とし、風のみを与える実験を行った。前述の風の分布を用い、はじめの 12 時間まで風速を線形的に増加させ、その後 48 時間風速 12m/s の風を与えた。60 時間以降では 12 時間かけて線形的に風速を弱めるように与えた。

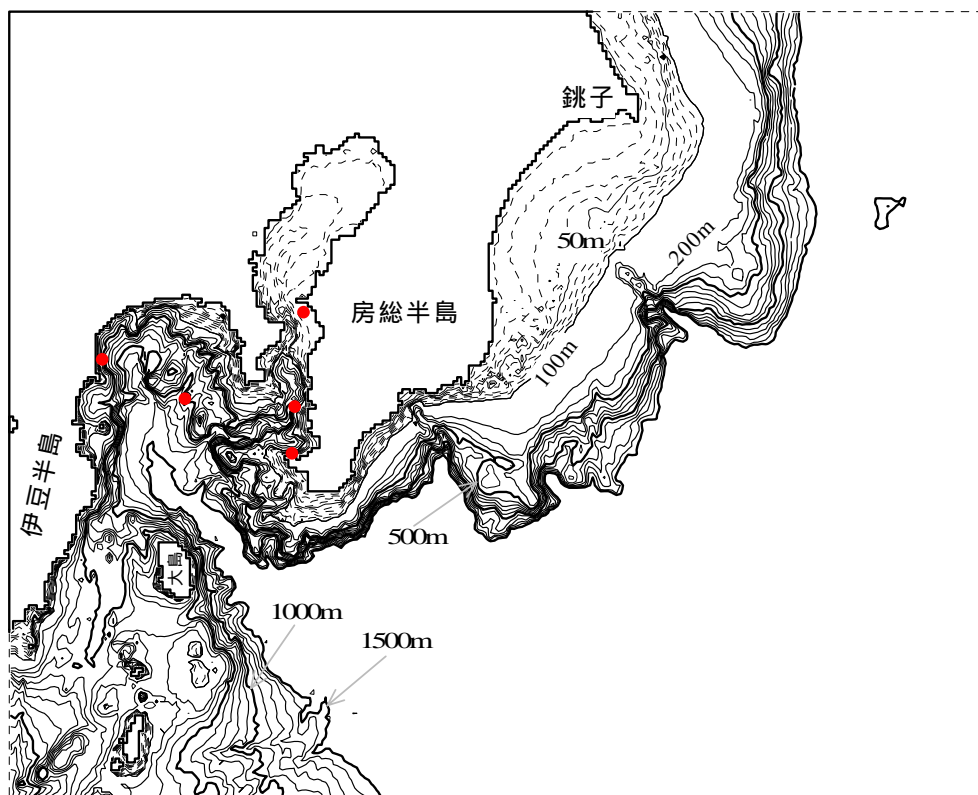


Fig. 2.2-14 計算領域。1500m より深い海域を 1500m と簡略化している。赤点は拓海的位置を示す。

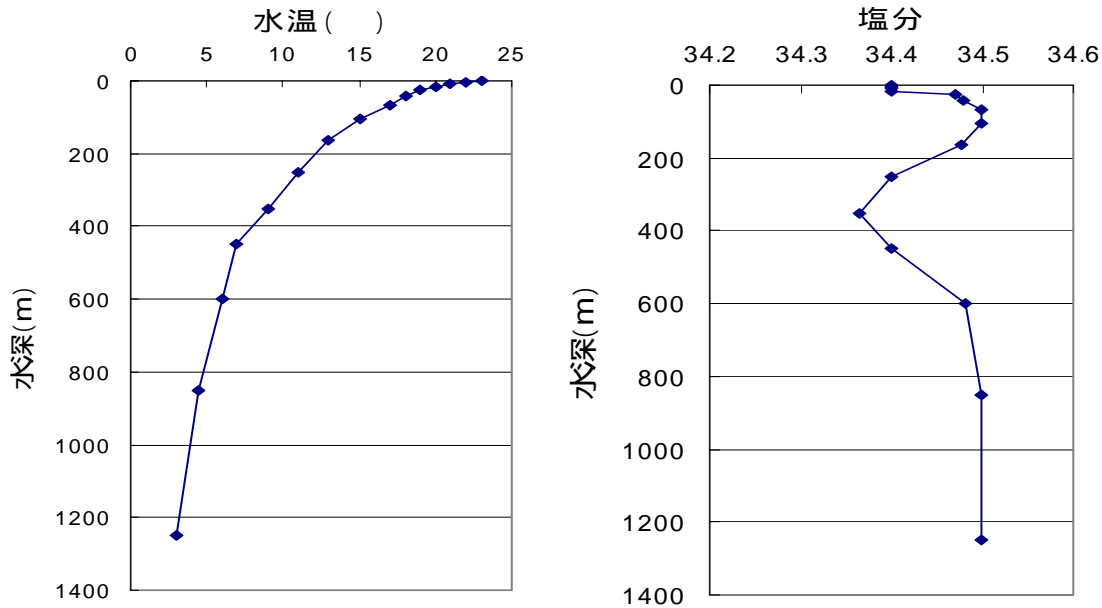


Fig. 2.2-15 モデルで用いた初期成層状態。

(3) モデルの結果と考察

計算開始から 24 時間目以降の第 1 層目 (0~4m 深) と第 6 層目 (30~50m 深) の鉛直平均流速ベクトルの分布をそれぞれ Fig. 2.2-16 と Fig. 2.2-17 に示す。7 月 30 日 0 時に相当する 24 時間後には、房総半島の東側一帯に岸に沿った強い流れが形成されている。このとき、20m 深の水温分布 (Fig. 2.2-18) から、勝浦の東側沖合で水温上昇していることが分かる。この水温上昇は、表層の暖かい海水がエクマン輸送により岸に寄せられ、岸近くに暖水が蓄積されて沈降域が形成されることによる。また、岸に沿った流れは、沈降域が作る圧力勾配に調節するように形成された地衡流バランスした流れである。房総半島東側の流れと水温上昇は風が吹き続けている 7 月 30 日から 7 月 31 日の間に強められ、風が止んだ 8 月 1 日以降は徐々に弱まっている。この水温上昇と流れは、沿岸捕捉波として伝播し、風が吹いている間もその先端部が相模湾へと進入していくことがわかる。

相模湾内での風は非常に弱いため、銚子で風が吹き始めてから 24 時間後には相模湾内で特に目立った変化は見られない。48 時間 (7 月 31 日) には大島東水道から相模湾へ入る流れが見られ始め、72 時間 (8 月 1 日) になると大島西水道から出る南向流が見られ始める。96~120 時間 (8 月 2~3 日) には、相模湾奥での反時計回りの流れが強くなると同時に、大島西水道での南向流も強くなっている。20m 深の水温分布は流れよりも少し遅れた感じで相模湾へ進入して湾内に広がり、結果的には 1~2 湾内の水温を上昇させている。台風ほど強くない風で励起された沿岸捕捉波の場合では、亜表層の水温は上昇するが、海面の水温はほとんど上昇しない。これらの流れ・水温の分布やそれらの時間変動の特徴は、淡青丸による観測期間中の海況やその時間変動をよく説明するものであった。また、このモデルで再現された相模湾内での流れは約 25cm/s であった。この値は、実際観測された流れとほぼ一致する。

以上のことから、7月下旬から8月上旬にかけて見られた相模湾亜表層の水温上昇は風によって励起された沿岸捕捉波によるものであると考えるのが妥当である。沿岸捕捉波は、北半球では岸や浅瀬を右に見て伝播する特性を持った波動で、その波長は長いものでは1000kmに達する。今回の場合では、拓海で観測した温度上昇が3日以上続いていたことから、その波長は500km程度であったと推測される。この沿岸捕捉波に伴う流れにより、3日以上にわたって外洋水が相模湾へ運ばれたと考えられる。従って、相模湾内にいる観測者からすればあたかも外洋から黒潮などの海流が流れ込んできているように見受けられるだろう。

次に、この沿岸捕捉波の波及が東京湾の流れ場にどのように影響しているかについて、東京湾・湾口の流れ (Fig. 2.2-17, Fig. 2.2-18) を詳しく見てみる。24時間目に東京湾内千葉よりで南下流が見られるが、これはこの海域に吹いている北北東の風 (約 5m/s) によるもので、48時間目まで徐々に強まっている。72時間目になると房総半島で発生した沿岸捕捉波による強い流れが東京湾の湾口へ進入している。この流れは92時間目、120時間目と時間とともに奥へ進み、横浜沖あたりまで進入していることが分かる。表層で東京湾へ進入している時、東京湾湾口付近で下層に相当する第6層目の流れは、流出を示している。また、Fig. 2.2-19では湾口から浦賀水道辺りまでの水温が3程度上昇していることが分かる。以上のことから、この沿岸捕捉波の波及により浦賀水道あたりまでの海水が交換していることを示すだろう。

(4) その他の実験例

西側の境界から黒潮を流入させた実験の結果を Fig. 2.2-19 に示す。計算開始60時間後に北風7m/sを吹かせ、東京湾内の主要河川からは淡水を流入させている。各図の左上の数字は経過時間、右向き矢印は1m/sの流速ベクトルのスケールである。大島南西付近で2ノットを超えるような非常に強い流れが表現されている。はじめ(40時間後)、大島西水道から流入し大島のすぐ北側を通って東水道から流出する流れとなっているが、風が吹き始め40時間経過(100時間後)すると、大島西水道から相模湾へ流入する流れが強化されている様子が伺える。これは、風によるエクマン輸送により、表層の密度場が変化することに起因するためと考えられる。Fig. 2.2-20は東京湾の主要な4つの河川から夏季の典型的な流量の淡水を東京湾へ流入させた様子。淡水が神奈川県側に沿って南下し、80時間後には低塩分水が東京湾口から出て行く様子がみられる。いずれの実験もリーズナブルな結果を示している。

以上本研究で開発された高解像度モデルは、それぞれ観測結果を良く説明する結果を示した。各モデル結果では、モデルの有効性のテストであるため、各ケースで計算領域を適宜変更しているが、これは開発されたモデルが海底地形データさえあればどのような海域にもすぐに適用できることによるものである。本モデルは、順応性が高いということも重要な特徴の一つと言えるだろう。

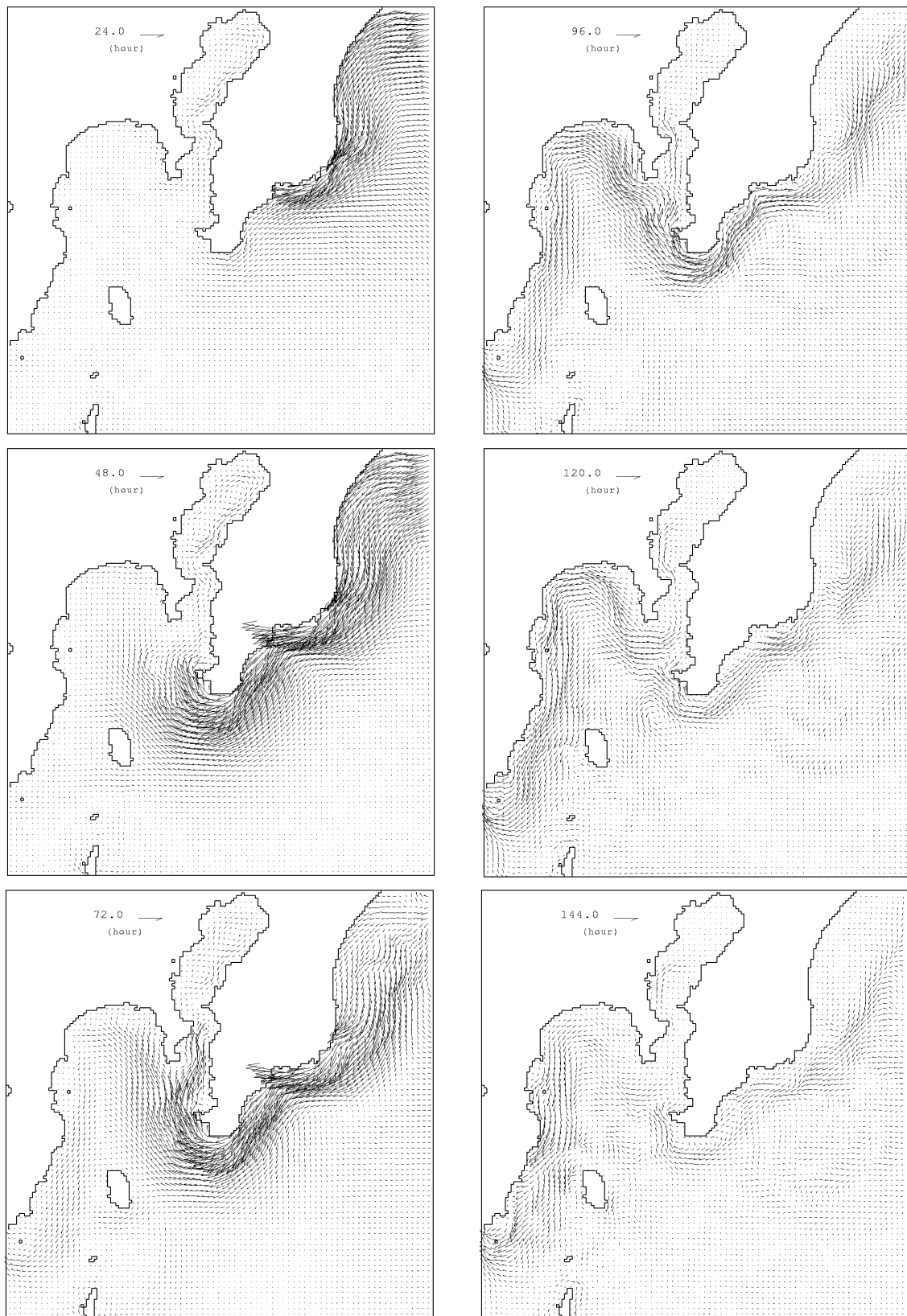


Fig. 2.2-16 第1層目(0~4m深)の鉛直平均流ベクトルの水平分布。

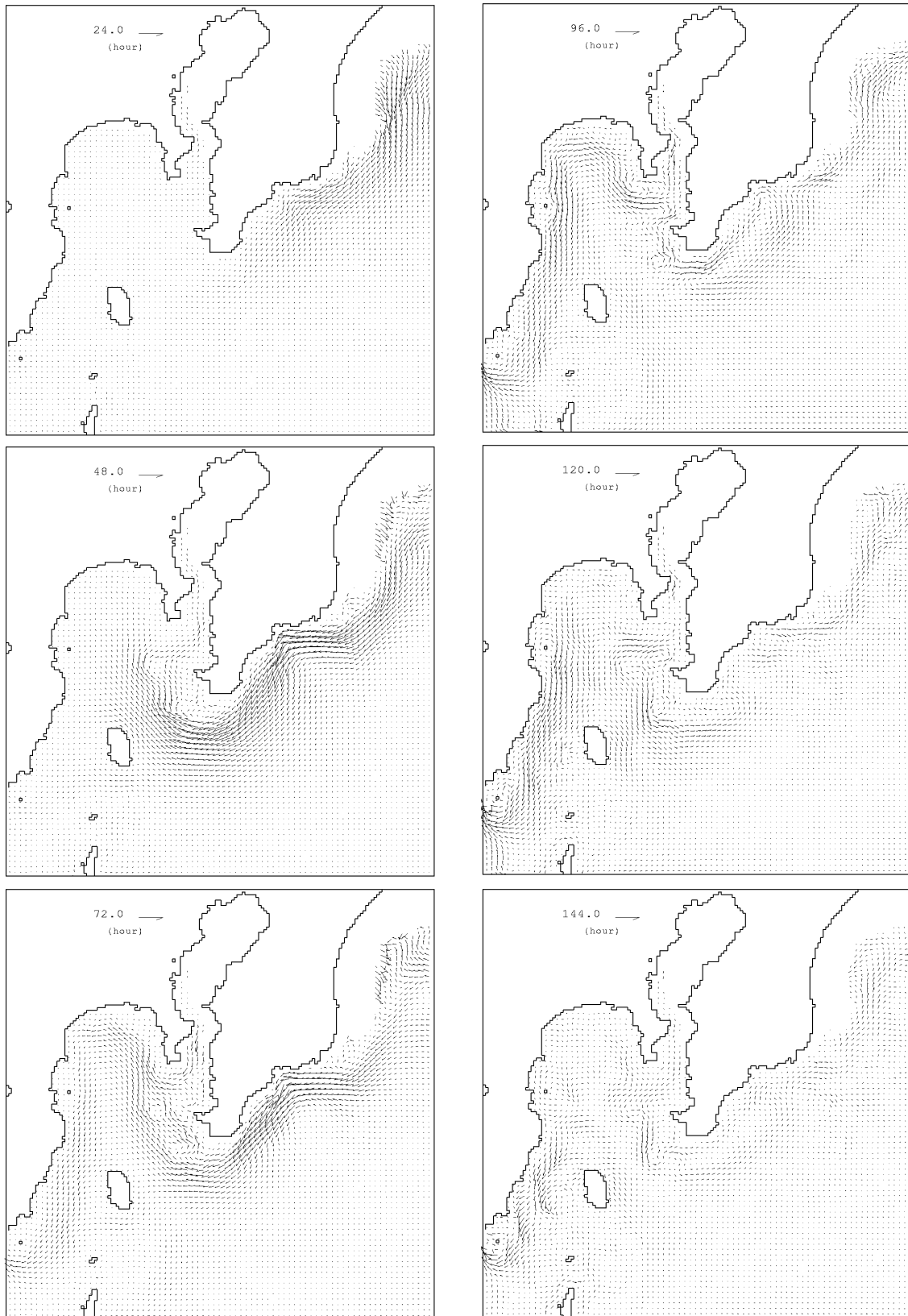


Fig. 2.2-17 第6層目 (30~50m深) の鉛直平均流速ベクトルの水平分布。

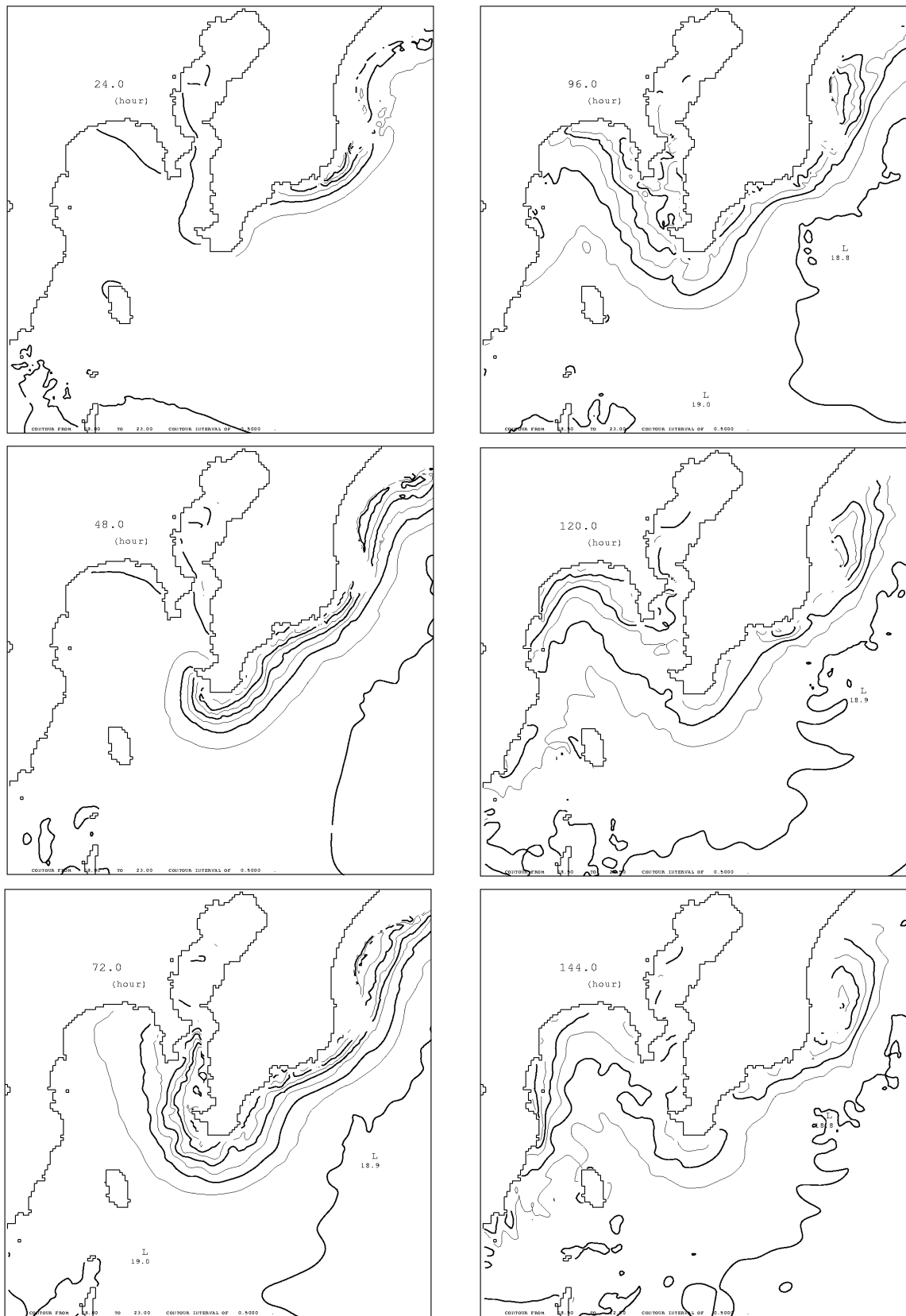
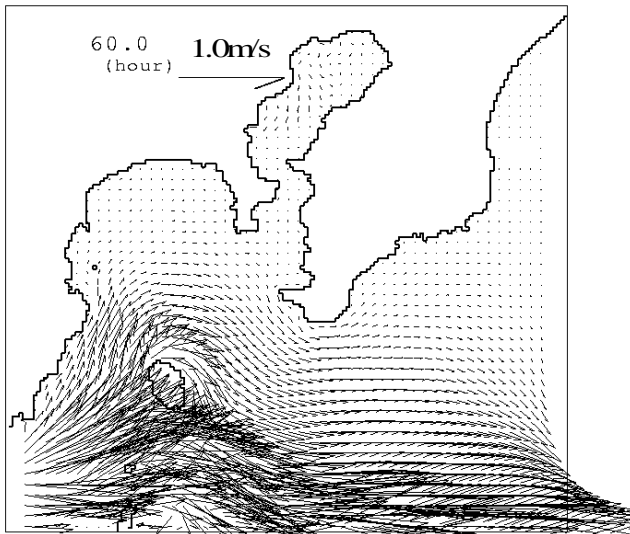
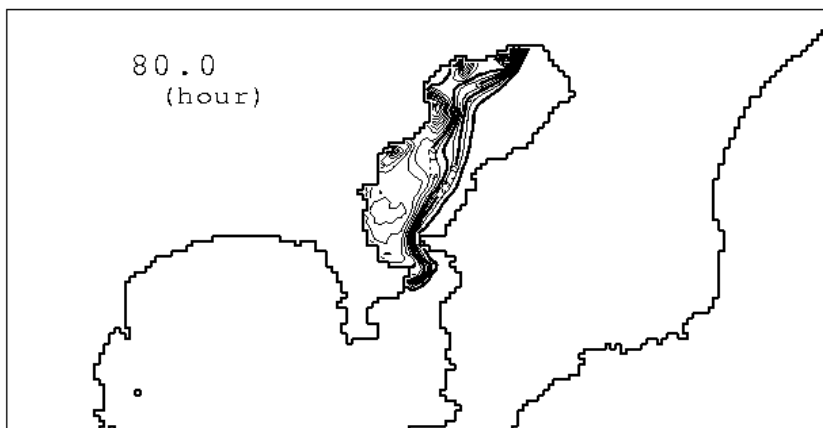
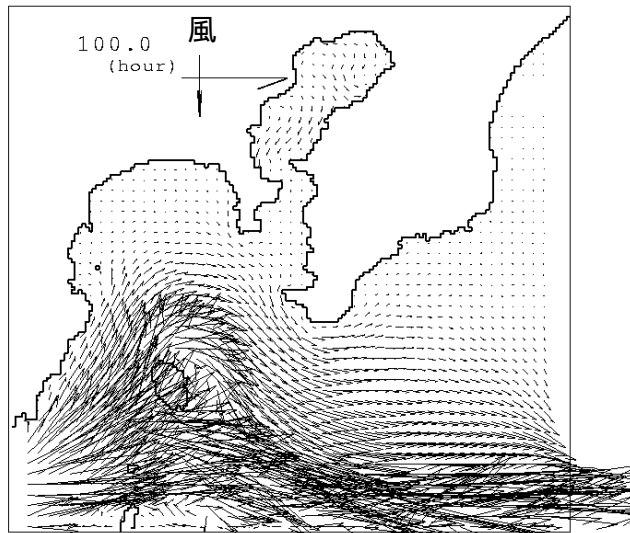


Fig. 2.2-18 第5層目(20~30m深)の鉛直平均水温の水平分布。



黒潮流入実験例

Fig. 2.2-19 黒潮を西側の開境界から流入させた実験結果の例。表層の流速ベクトルの分布を示す。計算開始 60 時間後に北風 5m/s を吹かせ、東京湾内の主要河川からは淡水を流入させている。各図の左上の数字は経過時間、右向き矢印は 1m/s の流速ベクトルスケール。大島南西付近で 2 ノットを超えるような非常に強い流れが表現されている。大島西水道から相模湾へ流入する流れが強化されている様子が伺える。これは、風によるエクマン輸送により、表層の密度場が変化することに起因するためと考えられる。



河川水流入実験例

Fig. 2.2-20 東京湾の主要な河川から下記の典型的な流量の淡水を東京湾へ流入させた様子。淡水が神奈川県側に沿って南下し、80 時間後には低塩分水が東京湾口から出て行く様子。

2.3 海況監視システムに関するまとめ

本事業研究は、東京湾の環境保全をテーマとして、東京湾で起こり得る数時間から数日の時間スケールの現象に焦点を当てたシステム作りを目指した。このシステムには、特に災害時に正確な海況を知り、予測する上で、不可欠なリアルタイムの海況監視装置の開発とその観測データを活用するためのモデルの開発などが含まれている。研究・開発の結果、海況を準リアルタイムでモニタリングする耐圧型のブイシステムの開発、データ処理・公開システム構築に成功した。現時点では、東京湾の3地点、相模湾の2地点に設置され、順調に稼働している。取得されたデータはPCのWebサイトおよび携帯サイトにおいて、常に最新のデータが公開されるようになっている。また、観測されたデータから、特に東京湾湾口での現象について、海洋物理学的な観点から詳細な解析を実施した。その結果、当該海域で漁業活動に障害をもたらす現象が内部潮汐によるものであることを突き止め、その内部潮汐が強化される機構について調べた。この海域では成層が強くなったときに、内部潮汐と固有振動が共鳴し、増幅する機構があることが分かった。このことから、開発されたモニタリングシステムが非常に有効なデータを取得していることが分かり、そのデータをWebサイトで公開していることを示す。このモニタリングシステムを運用し続けることにより、今後、より多くの成果や効果をもたらすことができると期待される。

さらに本事業研究では、海況予測モデルについて、高解像度で高速計算が可能なモデルの開発が進められた。最終的に、従来の約10分の1の時間で数値解を求めることができるモデルの開発に成功した。これによりモデルの高解像度化を進めることができる。モデルの有効性を示すために、様々な観測結果との比較実験を行った。モニタリングで得られた流速・水温の分布とその変動をモデルで良く再現することができた。その結果、先述の内部潮汐が強化される機構について、東京湾湾口の金田湾と館山湾の間に共鳴を起こす振動系が形成されていることが明らかにされた。また、2006年7月下旬から8月上旬に東京湾湾口から相模湾一帯で観測された水温上昇現象については、風によって励起された沿岸捕捉波の波及によると説明された。以上の比較再現実験から、開発したモデルの有効性が明らかとなった。ここで開発したモデルは、単に計算時間が短く高解像であるというだけでなく、順応性にも優れており様々な海域に容易に適用できることがもうひとつの重要な特徴といえる。本モデルでは、特に数時間から数日間の変動の再現性を向上させるようなチューニングが施されていることから、近年、日本各地で問題となっている沿岸急潮の予報への活用など、本モデルが幅広く活用されるものと期待される。