

リーフカレント等の観測手法及び発生機構 の解明に関する研究 その2

平成20年3月

財団法人 日本水路協会

この調査研究は、競艇公益資金による日本財団の事業助成金を受けて実施したものである。

まえがき

この報告書は、当協会が日本財団の助成事業として平成 19 年度に実施した「リーフカレント等の観測手法及び発生機構の解明に関する研究」の事業内容、成果等を取りまとめたものです。各位におかれましてご参考になれば幸甚です。

さんご礁を含む海域で最近マリンレジャーが活発に行われています。海底地形に強く影響を受けて発生するリーフカレントやダウンカレントが原因と思われる複雑な流れによる遊泳者、スキン・スキューバダイビング者の行方不明・死亡者が後を絶ちません。本研究の目的はリーフカレント・ダウンカレントについて、特有の条件に応じた観測手法の研究開発を行い、その観測手法により観測を実施し、発生メカニズムの解明や予測を行い、その成果を提供し、マリンレジャーにおける海浜事故の減少に寄与することにあります。

本研究のご指導を賜った 津嘉山正光 委員長 を初めとする委員の皆様、共同研究として一端を担っていただいた海洋情報部のご担当の皆様及び研究の実施を担当していただいた国際航業（株）の皆様には厚く御礼申し上げます。

平成 20 年 3 月

財団法人 日本水路協会

目 次

まえがき

第1章 研究の概要	1
1.1 研究の目的	1
1.2 研究の概要	2
1.3 委員会等	2
1.3.1 委員会の構成	2
1.3.2 審議経過	3
第2章 研究の内容	4
2.1 尾鷲沖調査	4
2.1.1 調査概要	4
2.1.2 調査データ解析	21
2.1.3 尾鷲沖調査結果のまとめ	31
2.2 石垣島吉原海岸調査	36
2.2.1 調査概要	36
2.2.2 調査データ解析	40
2.2.4 石垣島調査結果のまとめ	56
第3章 広報活動	61
3.1 講演会の開催	61
3.2 啓蒙資料の作成配付	62

第1章 研究の概要

1. 1 研究の目的

海洋、特に沿岸域では、様々な原因により発生する流れがある。うねり、潮汐の干満に伴う潮流、波浪が岸に向かって押し寄せることによって発生する海浜流、大気（風）が海面を引きずることにより発生する吹送流、その他沖合いの海流等である。

これらの流れが、岩礁・サンゴ礁域などの広い浅瀬を有する海岸に作用すると、海底地形に強く影響を受けた特殊な流れが発生する。このうち、特に広かつ複雑な浅瀬を形成するサンゴ礁上では、リーフカレントと呼ばれる複雑かつ強い流れが発生して、度々海水浴客やダイバーが沖へ流されるといった海難事故の原因となっている。また、すり鉢状の海底地形をした場所で、岩礁（又はリーフ）の外縁から深い海底に向かう沈込み流れの存在が、ダイバー等から指摘されており、ダウンカレントと呼んでたいへん恐れられている。

わが国では、東京都、鹿児島県、そして沖縄県の沿岸にサンゴ礁海域が広がる。また、鹿児島県内の渡瀬ラインあたりから沖縄県沿岸域に向かい、一般にサンゴ礁幅が広がり、沖縄県沿岸では最大で約3～4kmの幅を持つようになる。しかし、それでもサンゴ礁類型としては十分に発達した環礁型のものではなく、ほとんどが据礁型のものである。サンゴ礁の海域は、有孔虫の殻やサンゴ礁などの生物性材料からなる白い砂浜と、多様性に富むカラフルなサンゴ類、そして、エメラルドブルー（グリーン）の海が多く、海域利用者を魅了し、離島などに観光客を呼び込む主因の一つとなっている。一方、海域利用者を魅了するサンゴ礁地形は、礁池（イノー・ラグーン）と、それを取り囲む礁嶺（リーフフラット・リーフエッジ）、陸側の砂浜、そして、リーフが未発達した結果形成されるリーフギャップ（口、切れ目）より構成される。

このリーフの切れ目では、波の打ち込み、潮の干満、そして、風による吹き寄せ（吹送流）によって、沖に向かう強い流れ（リーフカレント）が発生することがある。また、この強いリーフカレントに伴って、リーフエッジから海底方向に潜り込むようなダウンカレントと呼ばれる流れが生じることがある。このリーフカレントやダウンカレントの発生メカニズム等を明らかにして、より詳細な情報提供を行うことを本研究の目的とする。

1. 2 研究の概要

リーフカレント、ダウンカレント等の流況、発生要因、海底地形・波浪・潮位・水温塩分等と流況の関連等々を把握し、その成果をもとに普及資料等を作成・配付することによりマリンレジャーの事故防止に資するものである。

平成 19 年度は、以下の研究を行なった。

(1) 観測手法の検討

既存の観測手法の調査・検討

(2) 現地観測

イ 石垣島において 18 年度の補足観測（冬季）を実施した。

ロ 三重県尾鷲沖においてダウンカレント調査を実施した。

(3) 観測データの整理解析

海底地形図の作成、ダウンカレントの発生分布、地形と流況の関連等について解析した。

1. 3 委員会等

1. 3. 1 委員会の構成

下記の方々により構成し、ご審議、ご指導をいただいた。

(敬称略、順序不同)

委員長 津嘉山 正光 琉球大学 名誉教授

委員 西 隆一郎 鹿児島大学水産学部 水産科 准教授

鯉渕 幸生 東京大学大学院新領域創成科学研究科 専任講師

関係官庁 寄高 博行 海上保安大学校 准教授

田中 博 第十一管区海上保安本部 次長

奥野 勝 海上保安庁海洋情報部 環境調査課長

藏野 隆夫 第四管区海上保安本部 海洋情報部長

熊谷 武 海上保安庁海洋情報部 環境調査課 主任環境調査官

福島 繁樹 海上保安庁海洋情報部

技術・国際課 海洋研究室 主任研究官

上之段 正博 海上保安庁警備救難部 救難課 海浜事故対策官

(作業部会)

熊谷 武 海上保安庁海洋情報部 環境調査課 主任環境調査官

事務局 陶 正史 (財)日本水路協会 専務理事

熊坂 文雄 (財)日本水路協会 調査研究部長

鈴木 直子 (財)日本水路協会 調査研究部

委託先 国際航業(株)

1. 3. 2 審議経過

平成19年	6月	7日	第1回研究委員会	事業計画の了承、事業実施計画書の 審議・承認
平成19年	12月	7日	第2回研究委員会	事業の中間報告の審議・承認
平成20年	2月	5日	第3回研究委員会	事業の最終報告及び総括、報告書 (案)の審議・承認

この他、平成19年5月25日、平成19年9月11日、平成19年12月3日、平成20年1月30日、に作業部会を開催し、細目細部の整理・検討等を行った。

第2章 研究内容

2.1 尾鷲沖調査

2.1.1 調査概要

(1) 調査目的

リーフカレント及びダウンカレントの流れの実態、発生メカニズムについて、その基本特性を把握することを目的に尾鷲湾における流況調査を主として実施した。

(2) 調査海域

本調査海域は、尾鷲湾南部にある桃頭島-アゴ島間の西側（水路）とアゴ島沖側（離れ）の2地点において観測機器を設置した。各測点の位置は図2.1.1に示すとおりである。

表 2.1.1 調査地点位置

測点	緯度	経度	観測層	測器	付番
桃頭島-アゴ島間	34° 03' 25.5"	136° 15' 52.0"	B+0.5m	ADCP	①
	34° 03' 27.3"	136° 15' 46.3"	B+0.5m		②
	34° 03' 26.8"	136° 15' 46.1"	B+1.0m	ウェーブハンター	③
	34° 03' 26.9"	136° 15' 53.5"	-2m, -6m	C-EM	④
	34° 03' 26.5"	136° 15' 45.5"	-2m, -6m		⑤
	34° 03' 26.9"	136° 15' 53.5"	-2m, H/2, B+1m	C-CT	⑥
	34° 03' 26.5"	136° 15' 45.5"	-2m, H/2, B+1m		⑦

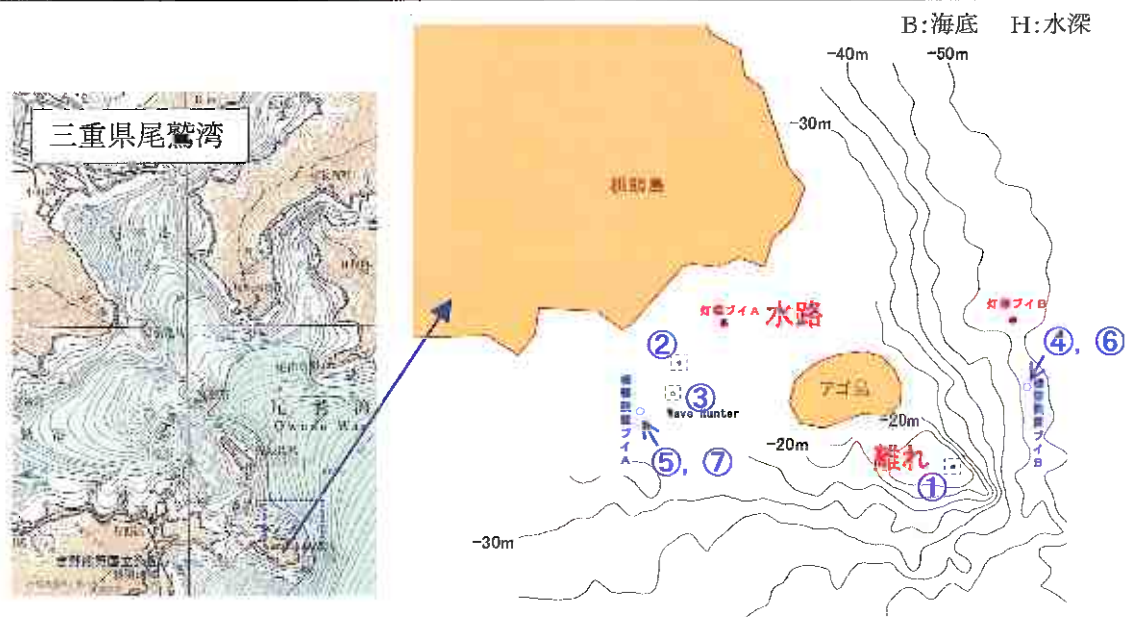


図 2.1.1 調査位置図

(3) 調査項目

本調査項目は表 2.1.2 に示すとおりであり、尾鷲周辺海域において 15 昼夜定点流況連続観測を行った。

表 2.1.2 調査項目及び数量

モデル水域	調査項目	数量	測点	日数
尾鷲周辺海域	流況観測	2	1, 2	15 昼夜
	水温塩分観測	6	1, 2	
	波浪観測	1	1	

(4) 調査期間

調査機器を設置した期間は下記のとおりである。なお、作業を実施した日程については別資料（作業日報）に示す。

自：平成19年 6月16日

至：平成19年 7月 2日

(5) 機器設定

使用した小型メモリー電磁流速計及び小型水温塩分計はアレック電子社製（以下、C-EM, C-CTと記す）及びワークホースADCP(RD Instruments社製 1200kHz 以下、ADCPと記す)を用い、観測間隔毎の流向・流速及び水温塩分を観測した。

また、観測層はC-EMが2層(-2.0m, -6.0m)、C-CTは3層(-2.0m, H/2m, B+1.0m)、ADCPは海底上1.5mを第1層とし以下0.5m毎に海面付近まで観測を行った。

なお、各測点の位置は、DGPSを使用して決定した。また各測器の記録の取得仕様は表 2.1.3 (1) ～表 2.1.3 (3) のとおりである。

表 2.1.3 (1) 記録の取得仕様(C-EM)

名称	小型メモリー流速計
観測項目	X・Y 軸流速, 方位, 水温
設定	観測間隔: 5分 サンプリング間隔: 1.0秒 サンプル個数: 30個

表 2.1.3 (2) 記録の取得仕様(C-CT)

名 称	小型メモリー水温塩分計
観測項目	水温, 塩分
設 定	観 測 間 隔 : 1 分 サ ン プ ル 個 数 : 1 個

表 2.1.3 (3) 記録の取得仕様(ADCP)

名 称	ワークホース ADCP (1200kHz)
観測項目	流向, 流速, 鉛直流
設 定	観 測 間 隔 : 1 分 発 信 数 : 60ping 設 置 水 深 : 桃頭島-アゴ島間 16m, アゴ島沖側 18m 発 信 間 隔 : 1 秒 層 厚 : 0.5m 観 測 層 数 : 50 層 標 準 偏 差 : 1.5cm/s 実測観測層 : 海底上 1.5m~海面下 2m(0.5m 毎)

(6) 調査地域の概況

イ 尾鷲湾の潮流

雀島南方の尾鷲湾中央部では、上げ潮流は西方へ、下げ潮流は東方へ流れ、西(東)流は低(高)潮時の約1時間後に最強となるが、その流速は0.3kn以下である。

また、佐波留島付近の港界部では、流速が0.3knを越える所があり、湾中央部が最強(憩流)のところに最強(憩流)となる(同傾向となる)。

ダイバーの話でも、湾内中央部では大潮の頃に流速は強く、流れに逆らって泳げない時があるようだ。

【出典：海上保安庁 書誌第101号 本州南・東岸水路誌】

ロ 海流

期間中の海流は図2.1.2に示すように、尾鷲湾前面の海域では、観測期間の前半(6月15日~22日)には、海流は北流もしくは、南からの海流が存在していたが、後半(6月22日以降になって)沿岸を南に下る強い南流が出現した。また、この期間の表面水温は当初23度程度から25度付近まで上昇した。

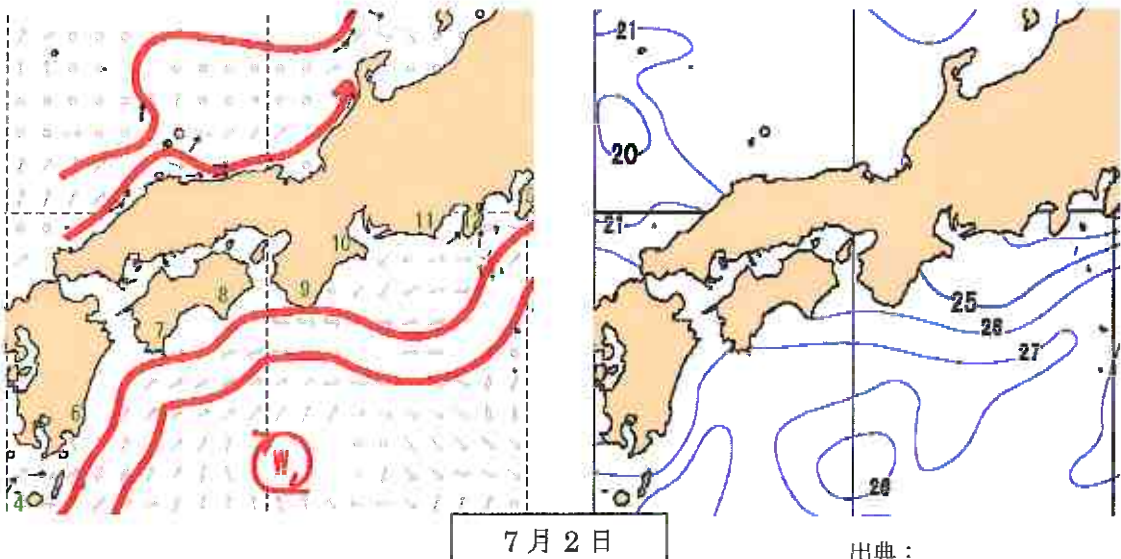
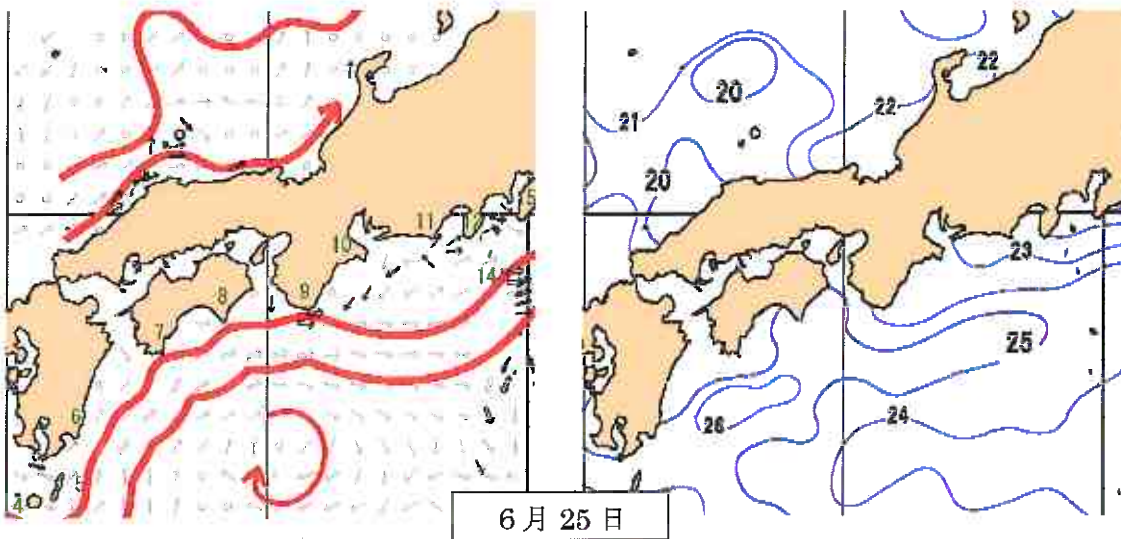
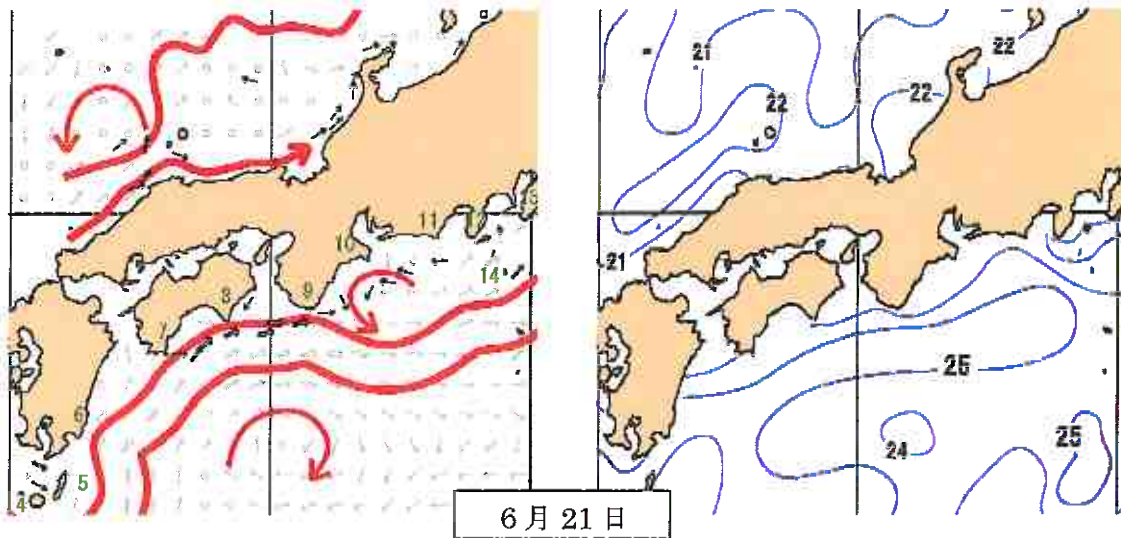
また、四管区海洋速報では、図2.1.3に示すように14号(6/12~6/21)が尾鷲方面に向かう西流6月21日、25日に反時計回りの南流が出現、15号(7/3~7/12)は、熊野灘~潮岬にかけて一様に南下する流れが認められる。

ハ 気象

図2.1.4に示すように、期間中の前半6月20日頃までは、太平洋側の高気圧が張り出し、前線は本州に近づけない状況であったが、22日以降は前線が紀伊半島の沖付近に停滞した。風は、表2.1.4のとおりであり観測期間を通じて東よりが卓越した。

表 2.1.4 尾鷲地域の天気概要(6月)

日	気圧(hPa)		降水量(mm)	気温(℃)	風向・風速(m/s)				日照時間(h)	天気概況 (06:00-18:00)
	現地	平均			最大風速		最大瞬間風速			
	平均	合計	平均	平均風速	風速	風向	風速	風向		
17	1011.3	5.5	21.2	1.6	4.5	東	6.7	東北東	0.2	曇後時々雨
18	1012.8	2.7	19.1	1.2	4.6	南南東	8.8	東南東	—	雨後時々曇
19	1013.5	—	21.2	1.8	4.1	東北東	6.1	東北東	1.8	曇一時晴
20	1012.6	—	22.8	2.5	6.1	南	9.3	南南西	5.1	晴時々曇
21	1007.9	—	23.4	2.5	5.8	東北東	8.1	東北東	11.7	晴時々曇
22	1000.8	1.5	23.9	1.2	3.1	東北東	6.4	東	0.4	曇時々雨
23	1003.3	0	24.7	2.5	7	北東	11.2	北北東	5.4	晴後曇
24	1003.6	4.7	21.3	1.1	3.9	東南東	7.2	東南東	—	雨
25	1000.4	8	21.8	1.8	4.1	東北東	6	東北東	1.1	曇
26	1001.6	—	23.8	2.1	5.1	東北東	7.2	東北東	9	曇一時曇
27	1004.3	0	24.7	1.9	5.4	東北東	7.9	東北東	4	曇曇
28	1007.4	—	24.5	2	5.4	東北東	7.7	東北東	4.2	晴後曇
29	1001.8	0	27	1.6	4.4	西	6.3	東	5.2	晴一時曇
30	1001	—	26.8	2.2	5.5	東北東	7.5	東	7.5	晴後一時曇



出典：
海上保安庁 海洋情報部
海洋速報

図 2.1.2 観測期間中の海況

四管区海洋速報 (平成19年14号)

平成19年6月22日発行

東管区海上保安本部海洋情報部

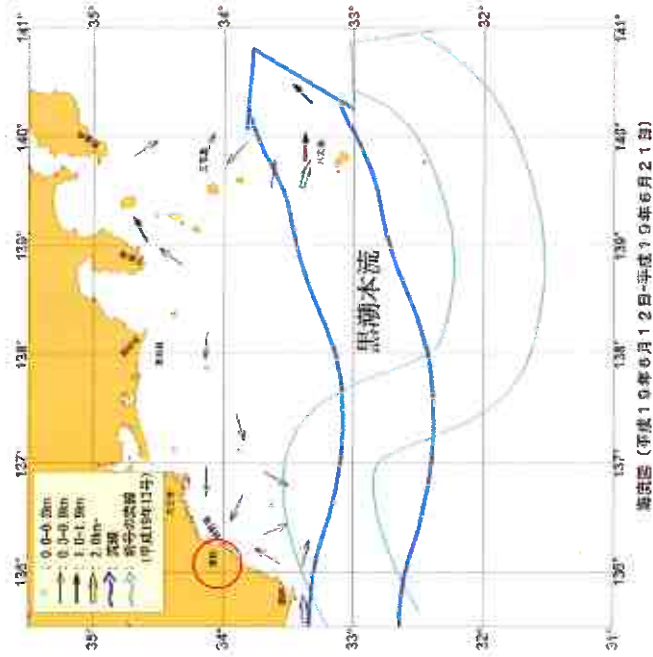
Tel: 052-661-1611 (内線2535)

URL: <http://www1.kaiho.nit.go.jp/KAMM/index.htm>

E-mail: suipro-4@kaiho.nit.go.jp

海況：黒潮本流は、瀬田南21海里、大正崎南8.5海里、御前崎南9.9海里、石廊崎南8.6海里、八丈島北1.3海里を通り、北東方に流れている。
 黒潮水温は、黒潮流域及びその沖合で2.5-2.6℃台となっており、通州浦沿岸域では2.3-2.4℃台、黒野浦沿岸域では2.4℃台となっている。
 ・伊勢湾内の水温... 2.2-2.4℃台 (平年より1℃程度め)
 ・三河湾内の水温... 2.0-2.3℃台 (平年並)
 (平年値：1991年-2000年の6月後半の平均値)

図中央付近は、緯経度15分メッシュ内のベクトル平均値である。



黒潮図 (平年値19年6月21日)

四管区海洋速報 (平成19年15号)

平成19年7月13日発行

東管区海上保安本部海洋情報部

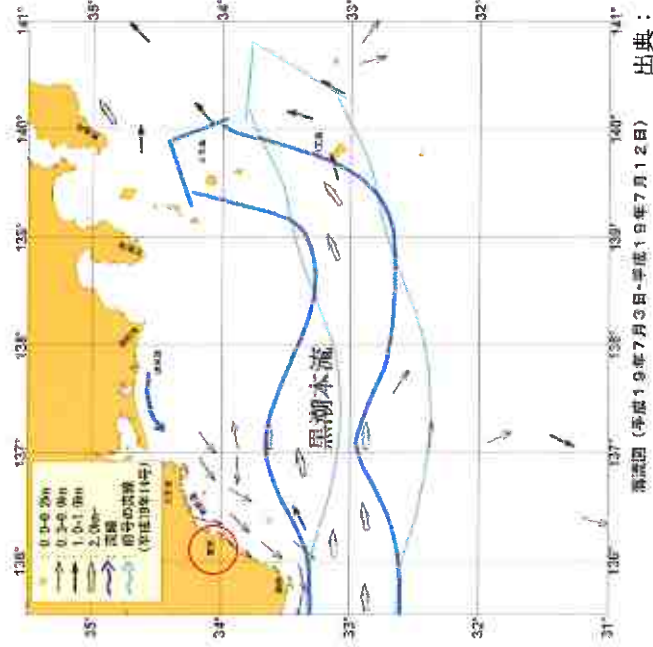
Tel: 052-661-1611 (内線2535)

URL: <http://www1.kaiho.nit.go.jp/KAMM/index.htm>

E-mail: suipro-4@kaiho.nit.go.jp

海況：黒潮本流は、瀬田南1.8海里、大正崎南6.4海里、御前崎南8.9海里、石廊崎南9.2海里、三宅島を通り、北東方に流れている。
 黒潮水温は、黒潮流域及びその沖合で2.5-2.7℃台となっており、通州浦沿岸域では2.2-2.3℃台、黒野浦沿岸域では2.3-2.4℃台となっている。
 ・伊勢湾内の水温... 2.2-2.4℃台 (平年より1℃程度め)
 ・三河湾内の水温... 2.3-2.5℃台 (平年並)
 (平年値：1991年-2000年の7月前半の平均値)

図中央付近は、緯経度15分メッシュ内のベクトル平均値である。



黒潮図 (平年値19年7月12日)

図 2.1.3 観測期間中の海況

海上保安庁 海洋情報部
 海洋速報

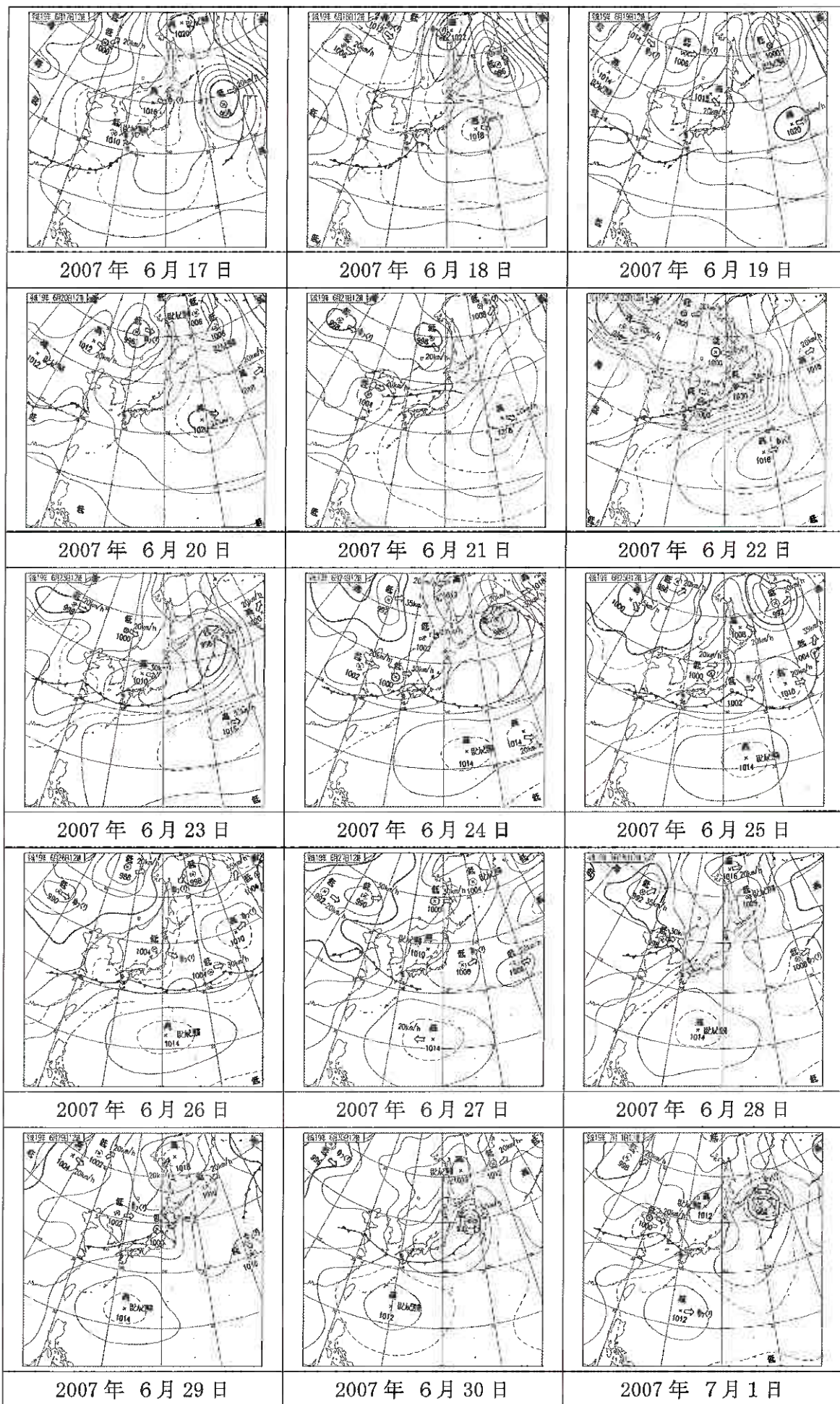


図 2.1.4 観測期間中の天気図

出典：
気象庁 ホームページ

ニ 潮 位

潮位差は図 2.1.5 に示す Wave Hunter の観測値から約 2 m であり、日潮不等の現象が顕著になっている。潮時の不等は高潮時に大きく、潮高の不等は低潮時に大きい。

Wave Hunter の観測値（水位）については【海上保安庁 書誌 742 号：日本沿岸潮汐調和定数表】の潮汐調和定数の値（主要 4 分潮和）と整合性を確認している。

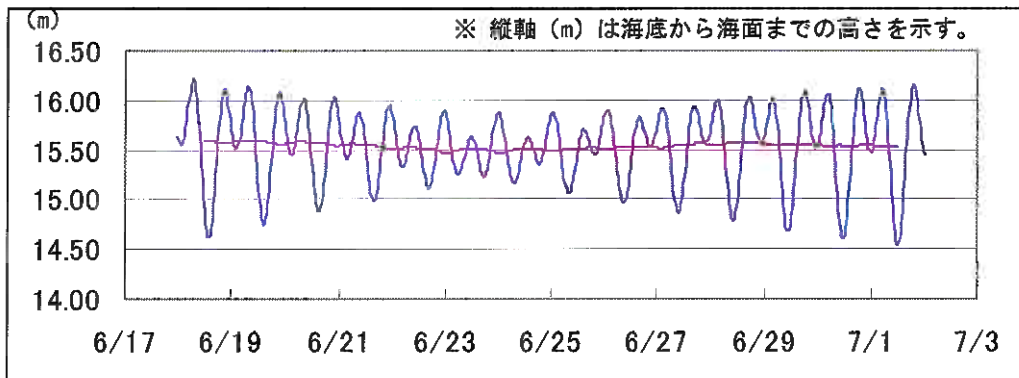


図 2.1.5 観測期間中の水位変動 (Wave hunter のデータより)

ホ 水温・塩分 (コンパクト CT)

水温・塩分の観測結果を図 2.1.6 に示す。

(イ) 水路

上層は水温がほぼ一貫して上昇し、塩分は低下する傾向がある。また、上層の塩分で、大潮時期の低いほうの干潮時に塩分が低下する現象が認められる（この現象は小潮時の 22 日から 26 日にはない）。24 日に 47mm の降水量がありこの時期に塩分低下が大きいことから、この塩分低下は降雨や陸水の影響によるものであろう。

中層の塩分は表層とほぼ同様な傾向を示すが、潮汐変動による塩分の変化は認められない。また、水温は傾向としては表層と同様であるが、6 月 23～25 日と、6 月 30～7 月 1 日にかけて、著しい水温のみの低下が認められる。この時期は、離れの中下層において塩分濃度の低下が生じている時期であり、その影響を受けたものと考えられる。

下層の塩分は、表層と異なりほとんど安定している。一方水温は、全体としてやや上昇する傾向にあるが、中層と同じ時期に数時間間隔で著しい低下が認められる。

(ロ) 離れ

上層は、水温が 6 月 23 日以降上昇を開始し、塩分は 6 月 24 日の降雨以降に低下する傾向がある。離れでは上層部の塩分は、水路と異なり、潮汐に伴う大潮時期の干潮時に低下する現象はない。

中層の塩分はほぼ安定しているが、水温は日変動が激しい。6/29 以降は周期的な変動が読み取れる。

下層は大潮時期にあたる前半と後半で、潮汐による周期的な変動が読み取れる。

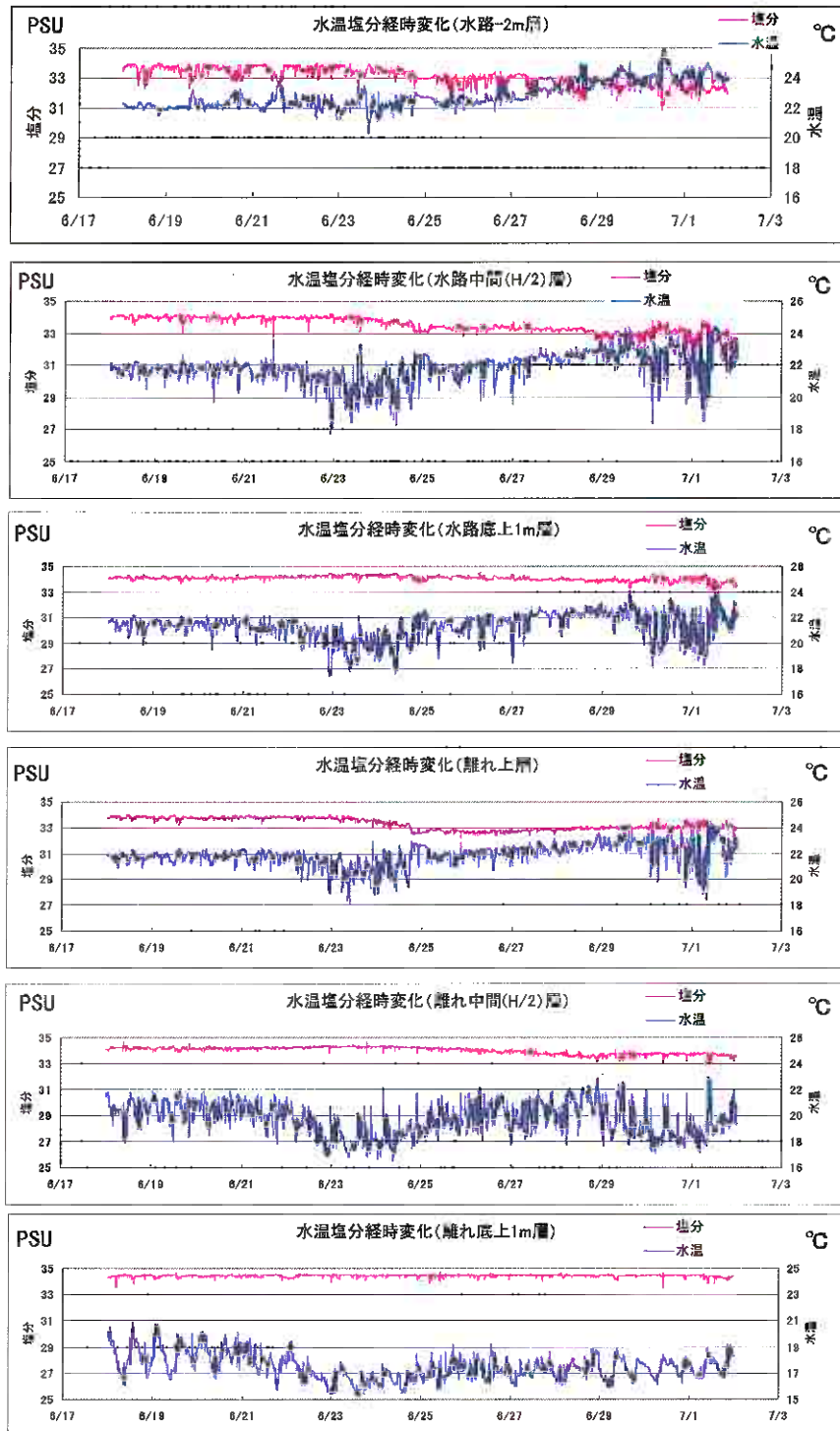


図 2.1.6 水温塩分測定結果 (コンパクトCT)

前半のデータを用いて、周波数解析を行った結果を数に示す。離れの上層は300分（周期）以上の低周波側にいくつものピークがあり顕著な周期性は認められないものとする。一方、底層の水温では683分（周期11.5時間程度）付近にピークがあり、これは半日周期の潮汐の影響を示している。中層は、前半データ解析ではこの潮汐振幅が認められないが、後半のデータ解析には、ピークの出現があった。離れの中層などで約6時間周期（375分付近）のスペクトルピークが見つかる場合がある。

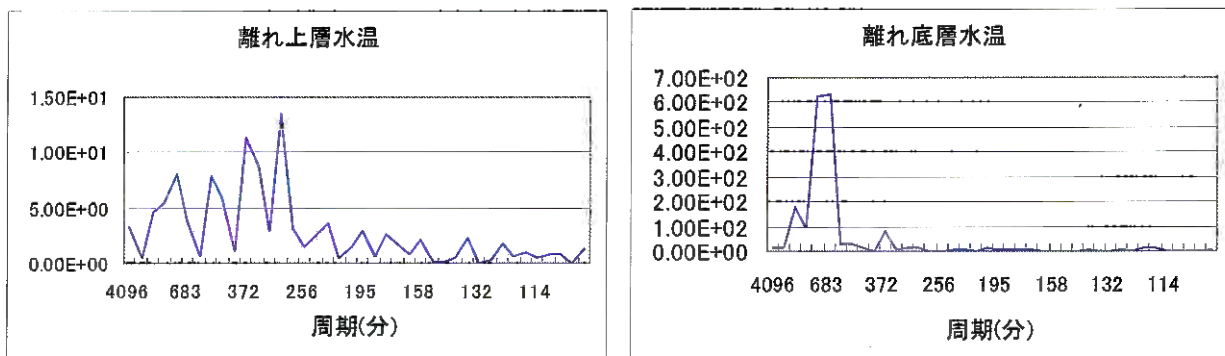


図 2.1.7 (1) スペクトル解析結果（6/18～6/20 データの解析：上層および下層）

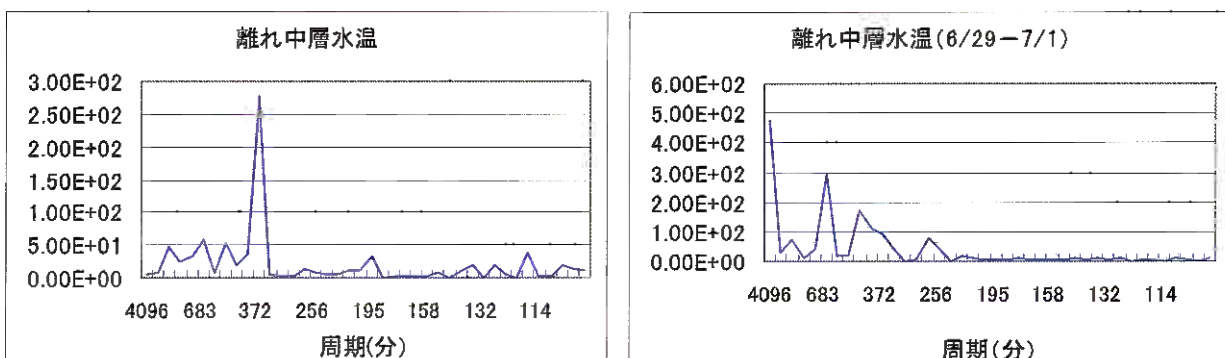


図 2.1.7 (2) スペクトル解析結果
（6/18～6/20 中層）

図 2.1.7 (3) スペクトル解析結果
（6/29～7/1 中層）

水路と離れの T-S グラフは図 2.1.8 に示すように、水路では塩分変化の幅が大きく、下層の水塊を含め、陸水の影響を受けやすくなっていることがわかる。一方離れでは、下層部は表層部の水とほとんど異なる、深層水のような高塩、低温水がほぼ安定的に存在している。

塩分は実用塩分値 (PSU) を示す。

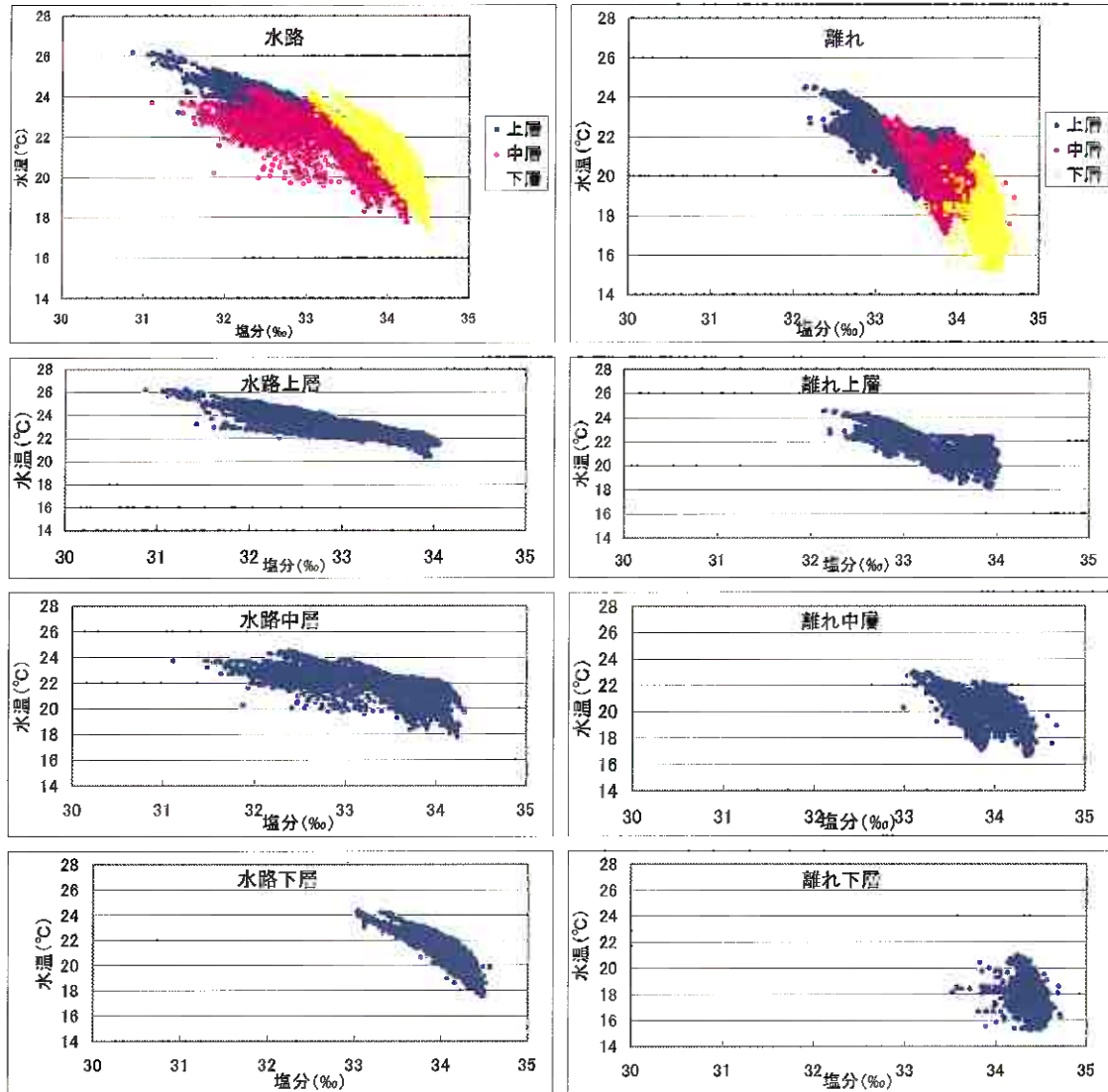


図 2.1.8 T-S グラフ

水路の上層は塩分濃度の変化が大きく、水温変化は少ない。これは沖合いの高塩分ではあるが、表層の温められた海水と沿岸の低塩分の水が交代して出現していることを示す。一方、離れの中層などでは、塩分変化は少ないが、水温変化が大きい分布であり、これは海水の鉛直混合が比較的頻繁に起きていることを示すものと考えられる。

へ 波 浪 (Wave Hunter)

有義波高は図 2.1.9 に示すとおり、概ね 0.5m 前後であり、期間中は比較的静穏な状況であったといえる。この値を超える波高が出現したのは、6/18 日～19 日と 24 日～25 日だけであった。

周期は、有義波周期の平均で 8 秒程度の波であった。

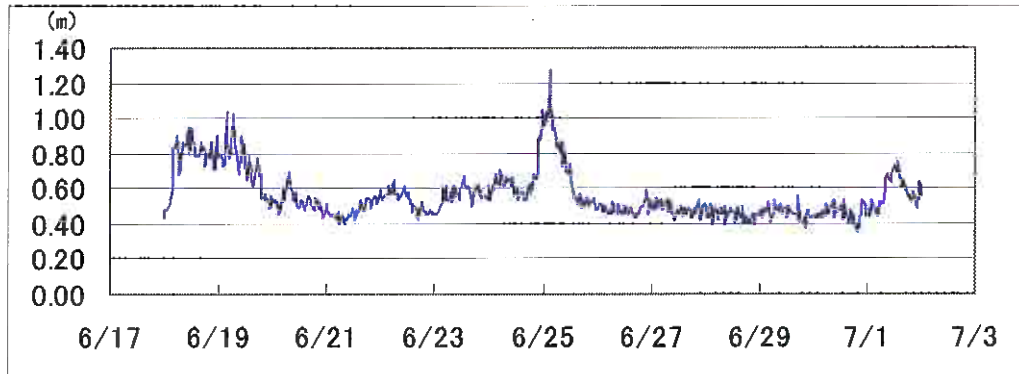


図 2.1.9 波浪データの経時変化図

ト 流況 (コンパクトEM)

流れの変動パターンをよくあらわしている北方分速の時間変化を図 2.1.10 に示す。桃頭島-アゴ島間の St 1 は近傍地形に沿った東北東⇄西北西の往復流、アゴ島沖合の St 2 は等深線に沿った南北方向の往復流を示すが、若干南に偏向した流況を示す。(−6 m層では流入よりも流出する流れが多い)

水路、離れともに前半の大潮期に、潮汐流の存在を示す流れが特に北方分速で顕著に現れている。一方、後半はすべてのデータ値が小さくなっている。

このため、前半のデータのみを用いてスペクトル解析を行い、図 2.1.11 に示す。離れ、水路ともほぼ6時間付近と4時間付近にピークが出現している。データからもほぼ6時間おきにピークが出現している。

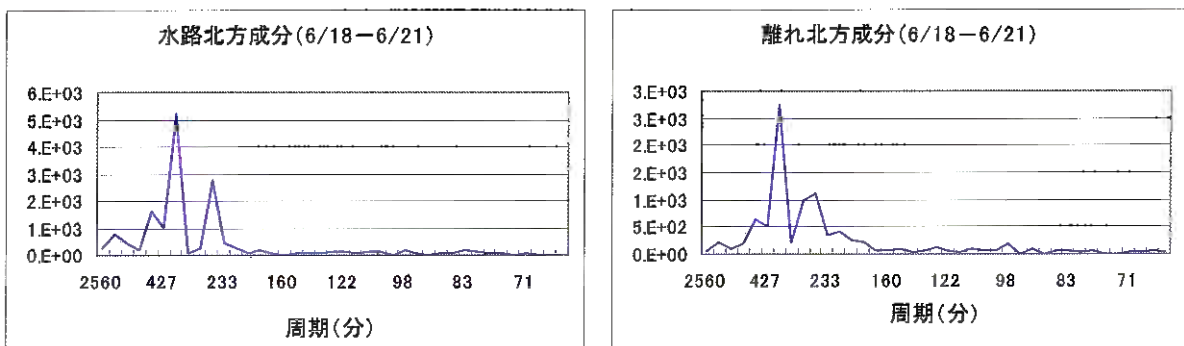
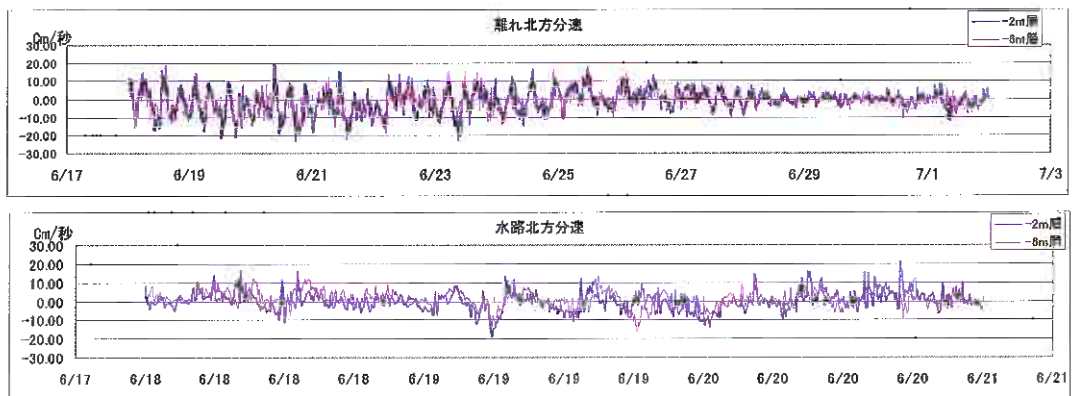


図 2.1.10 流れの周期特性 (コンパクトEMデータより)



※ 縦軸正方向が北向きを示す。

図 2.1.11 解析期間のデータ (上段：離れ、下段：水路)

これは、海域周辺で潮汐波が共振を起こした結果生じた4～6時間周期の長周期波または、沿岸近海のどこかで共振した長周期波が伝播してきたことが考えられる。観測期間の後半に水温が上昇し成層条件が変化し、地形的な共振条件が変化したか、もしくは波動伝達時の減衰が大きくなったことが原因で、後半にはこうした周期性の流れが弱まり流速も小さくなったと考えられる。ほぼ海底地形の等深線に平行な流れが卓越している。図 2.1.12、図 2.1.13 に流向、流速の出現頻度を示す。

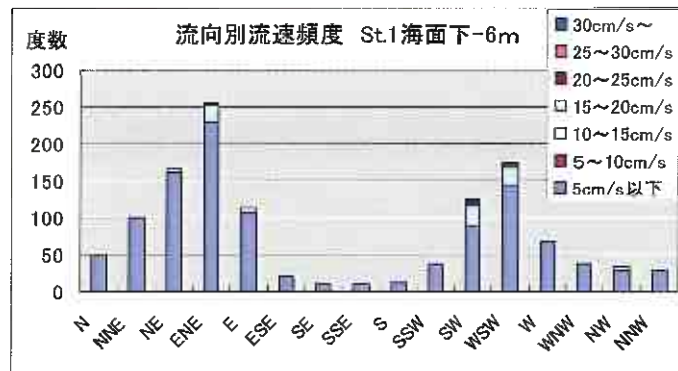
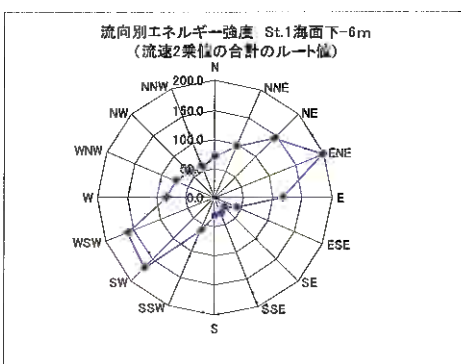
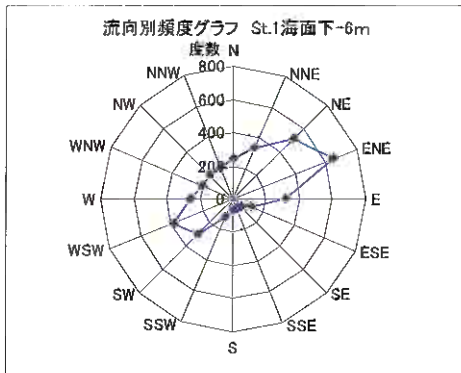
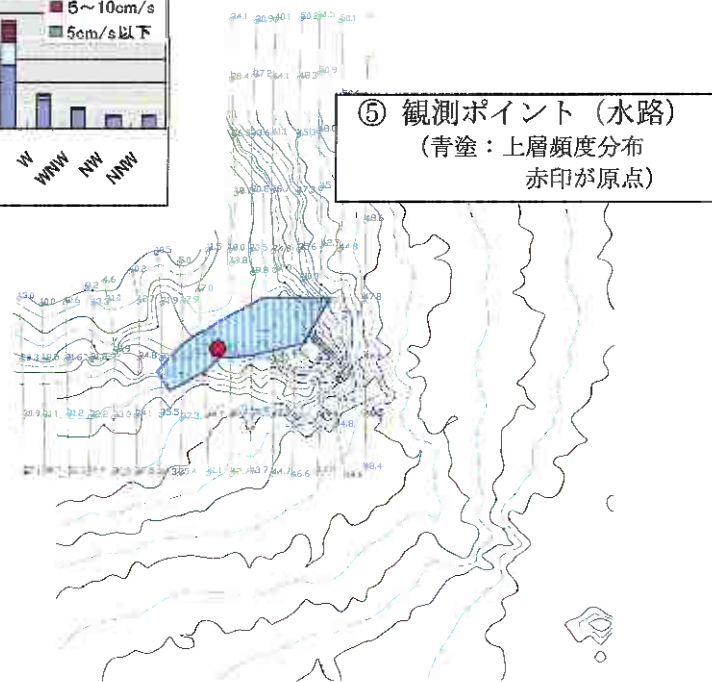
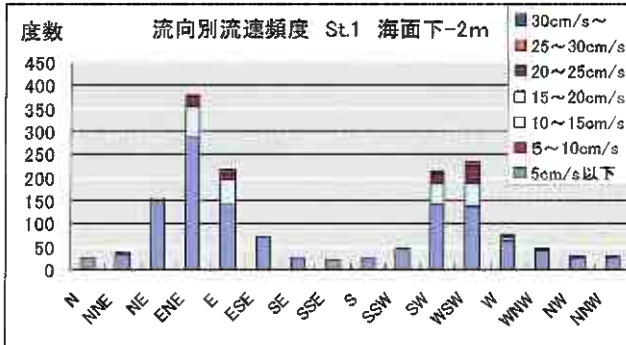
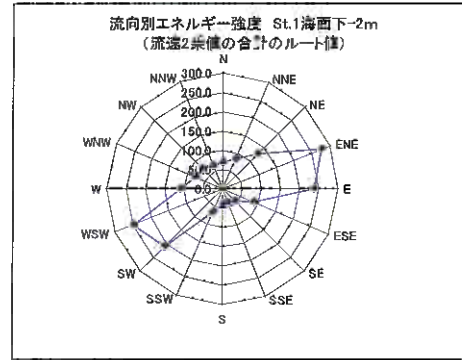
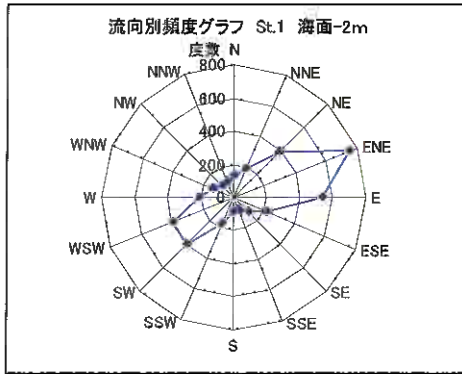


図 2.1.12 流向、流速の出現頻度 (ST.1 水路)

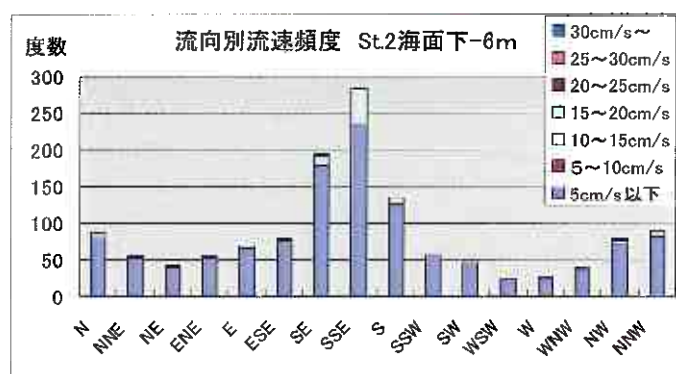
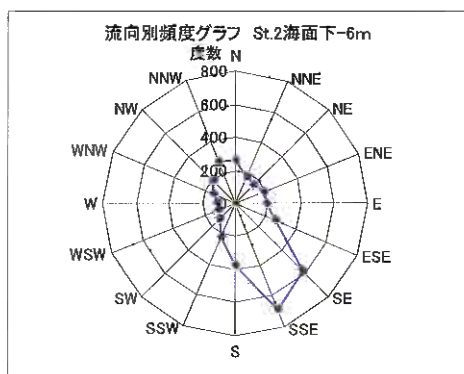
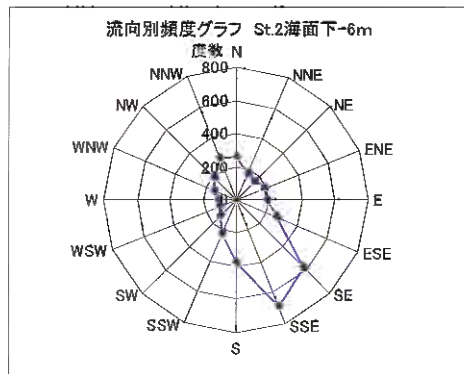
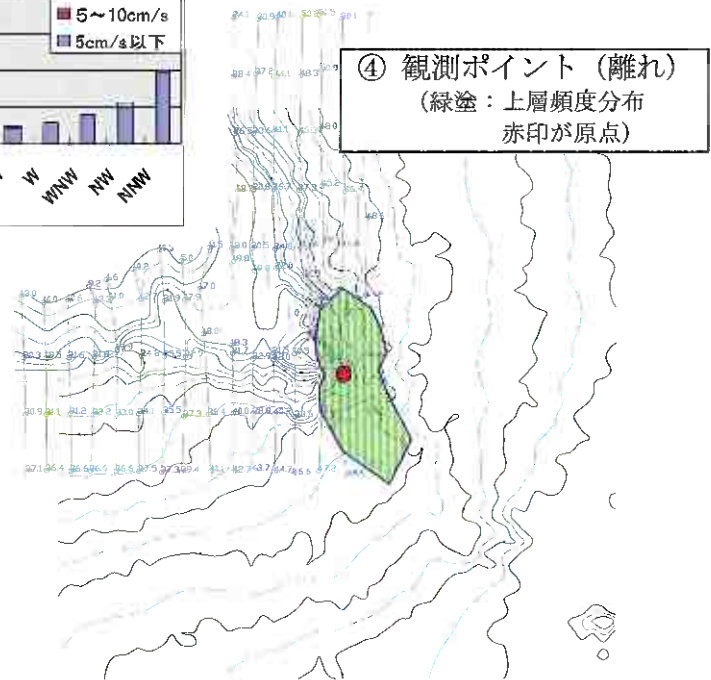
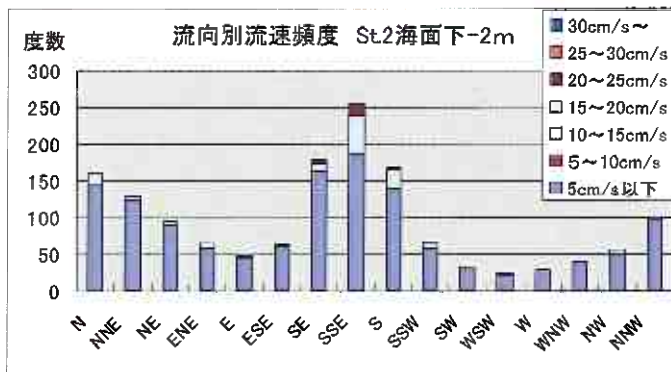
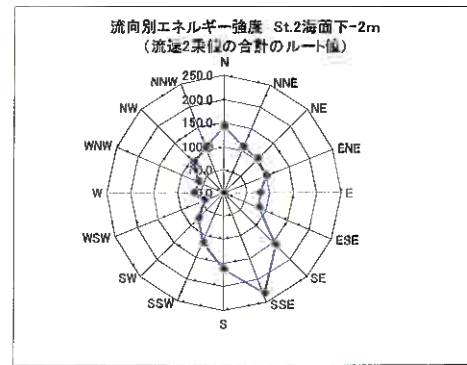
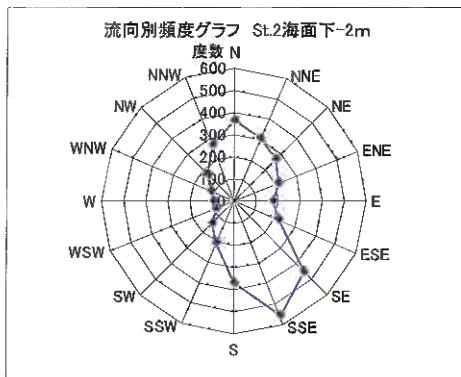


図 2. 1. 13 流向、流速の出現頻度 (ST. 2 離れ)

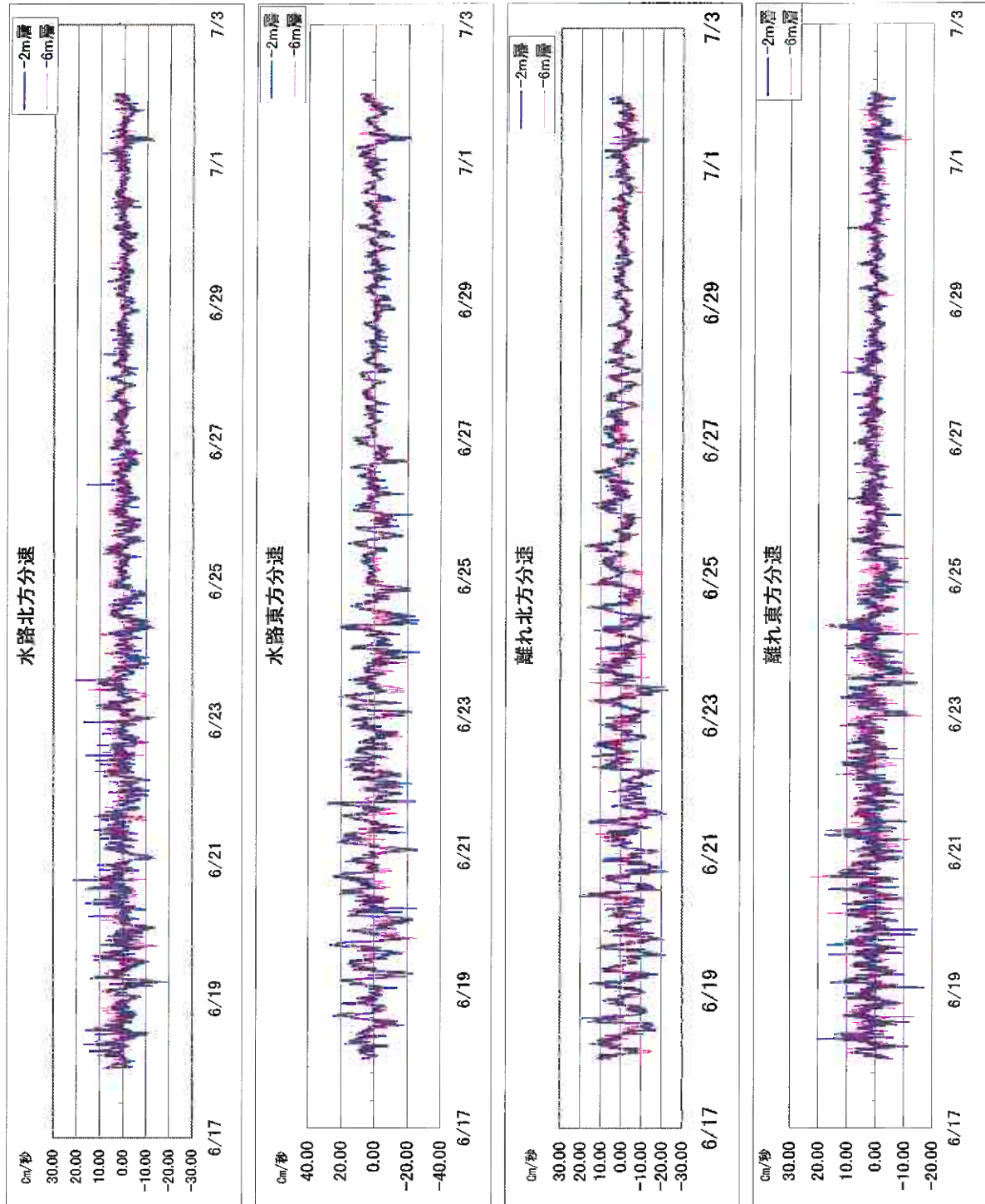


図 2.1.14 解析期間のデータ (水路)

地形

既存資料の補足として深淺測量した結果（図 2.1.15）、桃頭島とその南東に位置するアゴ島間では水深約 18m の水路状となっていることが分かった。またアゴ島のさらに南東側に柵状の地形もあり（ダイバーからは「離れ」と呼ばれている）、観測機設置点として採用した。

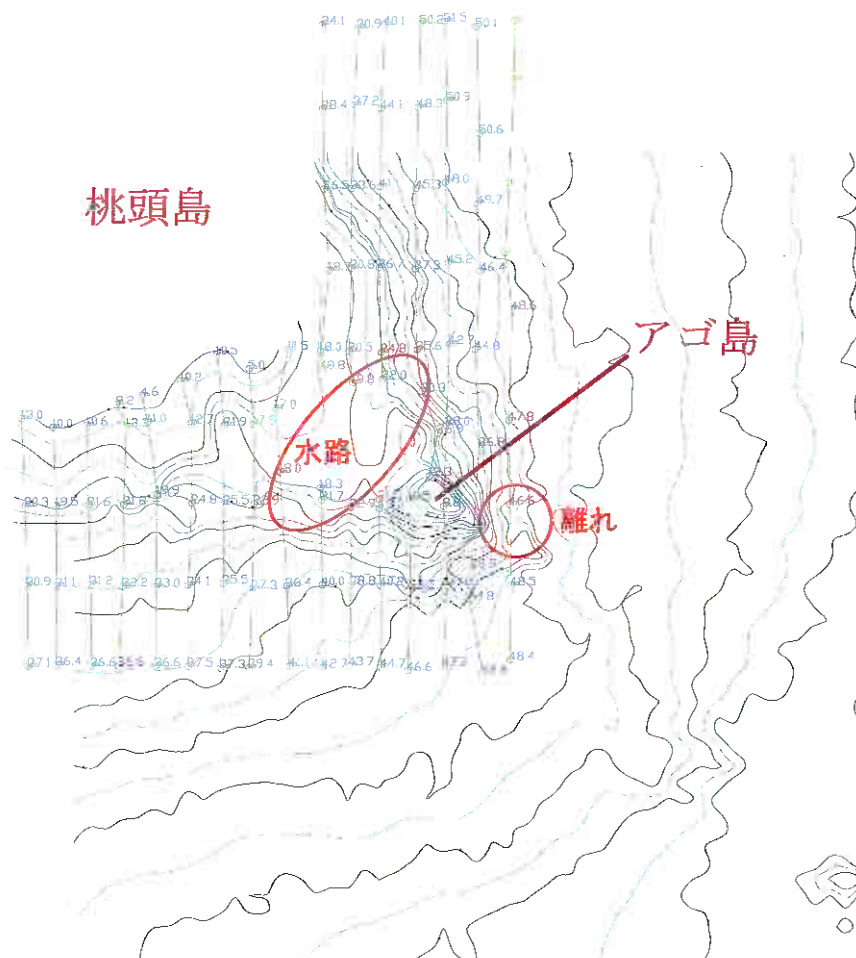


図 2.1.15 地形状況図

2. 1. 2 調査データ解析

流況観測結果を各地点、各層毎に水平流、鉛直流と合わせて水温、塩分、波高、風向速、水位を別紙に整理した。また鉛直流の顕著な日時を抽出し、図化整理した。

(1) ADCP (水平流)

桃頭島ーアゴ島間の St 1 は、コンパクト EM と類似した流況頻度を示している。鉛直方向では、海底上 4 m を境に流軸が南北から東北東⇄西北西へ変化している。荒天時及び晴天時でも概ね同様の流向出現傾向を示し、大きな変化はみられない。

アゴ島沖合の St 2 では、下層域から海底上 8 m までは地形的要因と見られる北西⇄南東を示すが、しかし海底上 8 m 以浅では北東方と南方の流れが多くなっている。

流速の鉛直分布をみると、ベクトル平均値とスカラー流速は水深が増すにつれて弱くなっている。最大流速は地形的な影響もあるが、桃頭島ーアゴ島間の St 1 ではベクトル平均値とスカラー流速同様水深が増すにつれて弱くなっている。

アゴ島沖合の St 2 では、桃頭島ーアゴ島間の St 1 とは若干異なり、中層域の水深帯で流速が強くなる傾向がみられた。

(2) ADCP (鉛直流)

鉛直流については全期間で最大で約 18cm/秒で、6/19、6/24、7/1 等に下降流が認められた。各日時において、周期や水温・塩分との関係、繰り返しパターンなどが異なることから、以下にその特徴を記載した。

■ 6月19日に発生した一時的な下降流について

6月19日午前2時頃一時的な下降流が図 2.1.16 に示すとおり生じている。このときの下降流は底上 6 m の下層部で生じているが、データを実際に転記すると下記のとおり数分間程度の継続である。欠測も多く、明確な議論はできないが、こうした現象は、何度か生じている。このときは、水温・塩分には目立った変化はないが、水平流が上下間で逆向きを示しているように見える。上層と下層では水温・塩分の特徴が異なるにもかかわらず、水温等の変化が上下間で生じていないので、下降流があったとしても水塊の混合をもたらすほどの規模の流れではなく、小規模かつ短期間の現象であるものと考えられる。

時刻	鉛直流速 (mm/sec)					北向き水平流 (マイナスは南流)				
	2m	4m	6m	8m	10m	2m	4m	6m	8m	10m
2:06:00	-30	-38	-62	-74	-75	21	-4	-73	19	143
2:07:00	-29		-77	-82	-84	-82		-117	22	104
2:08:00		-24	-91	-94			-110	48	149	
2:09:00	-14	-81	-118			-31	82	121		
2:10:00	-55	-98	-129			1	9	136		
2:11:00	-37	-71	-84		-83	-146	-76	23		145
2:12:00	-24	-42	-48	-68		-45	-77	17	145	

6/19

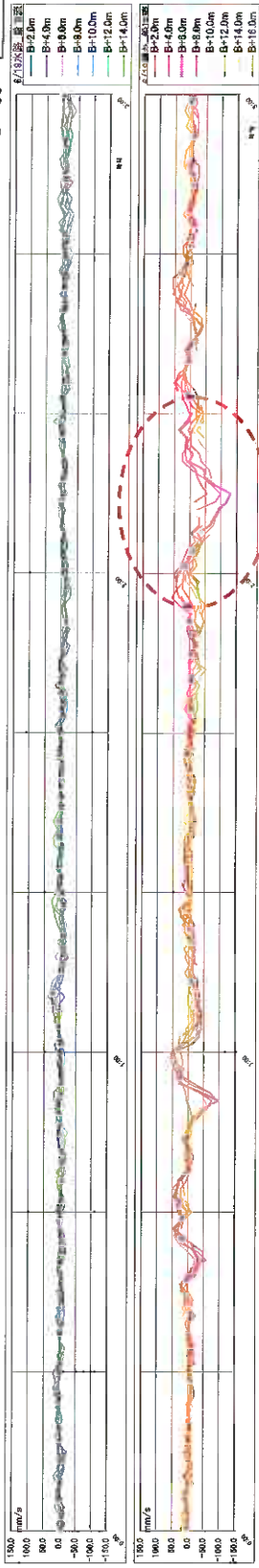
3:00

2:00

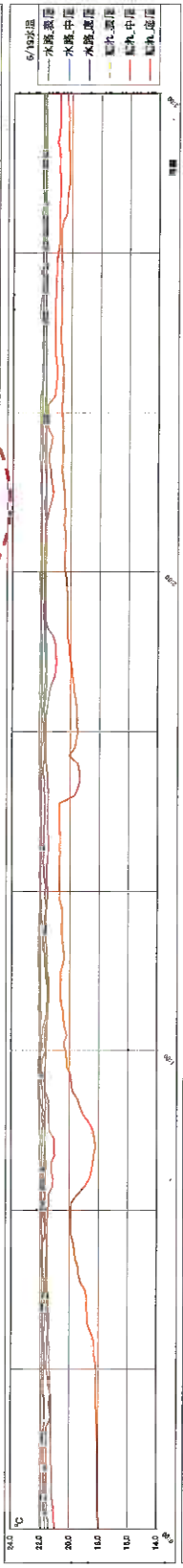
1:00

0:00

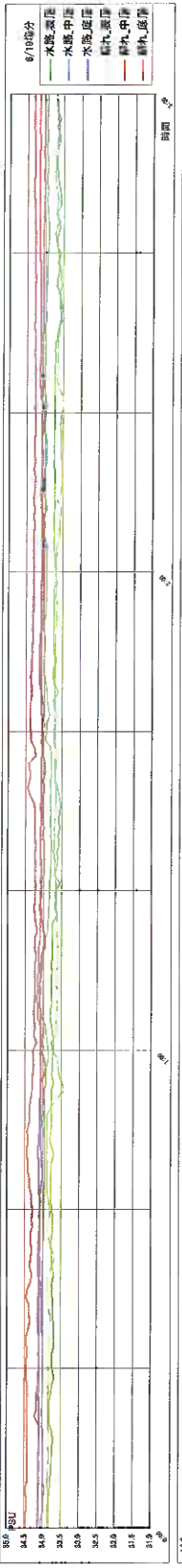
水路鉛直流離れ



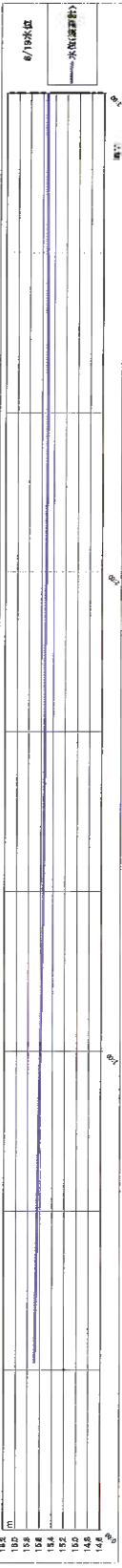
水温



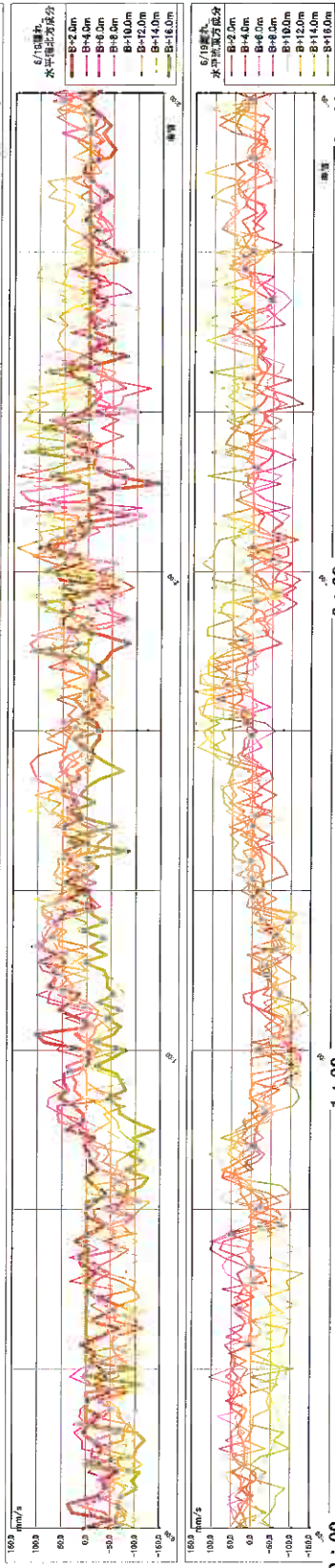
塩分



水位



北方成分 水平流 東方成分



3:00

2:00

1:00

0:00

図 2.1.16 流れの鉛直成分、水温・塩分濃度の変化 (6/19 0:00~3:00)

これらの変化を詳細に見るために、水平流速、鉛直流速、EMデータおよび水温・塩分データの鉛直分布を図 2.1.17 に示した。図の青と赤のベクトルは、上を北向きとした場合の水平流ベクトルであり、グリーンは鉛直流で下向きは下降流を表している。上層では北向き、底層では南向きの水平流があることを示している。中層水温がわずかに低下する傾向があるが、上層部の水温が高いので鉛直流との関係は不明であり、むしろ水平流（南から）やや低水温の水塊が中層部に到達したと考えられる。

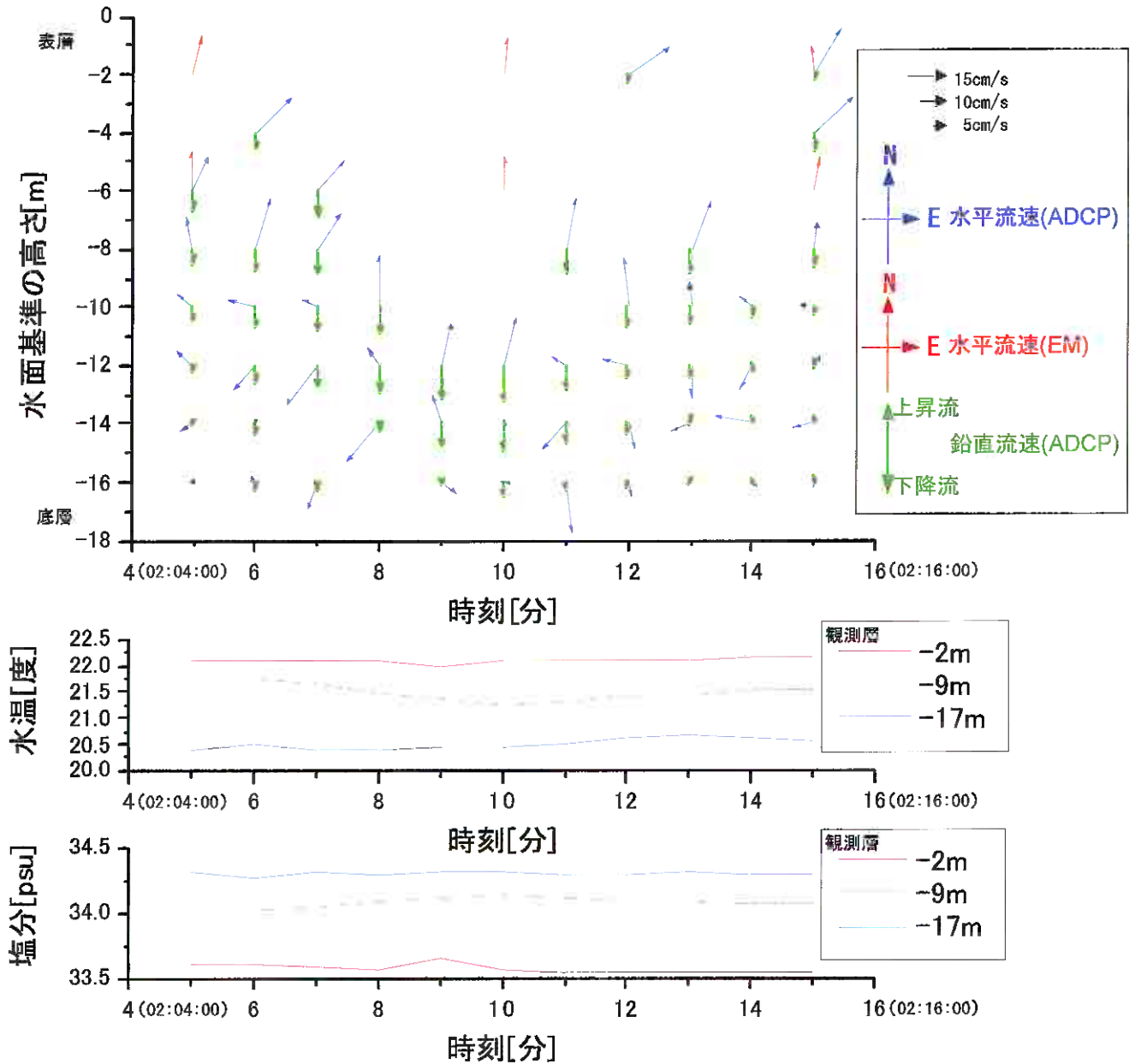


図 2.1.17 流れの鉛直成分、水温・塩分濃度の変化詳細図

■ 6月24日に生じた下降流の繰り返しについて

6月24日21時40分から22時20分にかけて、図2.1.18に示すとおり下降流と上昇流を繰り返すパターンが認められる。このときは、離れの中層水温がこの下降流に呼応するように上下を繰り返している。すなわち、下降流が生じた結果、中層部の水温が上昇しているように見える。

一方、水平流速は図2.1.19に示すように、20時30分ごろから急速に北向きの流れが強まっているのがわかる。北向き水平流速が急速に早まってから、鉛直流が発生し、その後水温の上昇、塩分の低下が始まる。したがって、これらの一連の変動は互いに関連したものであるものと推定できる。ただし、下層部では水温変動は少ない。

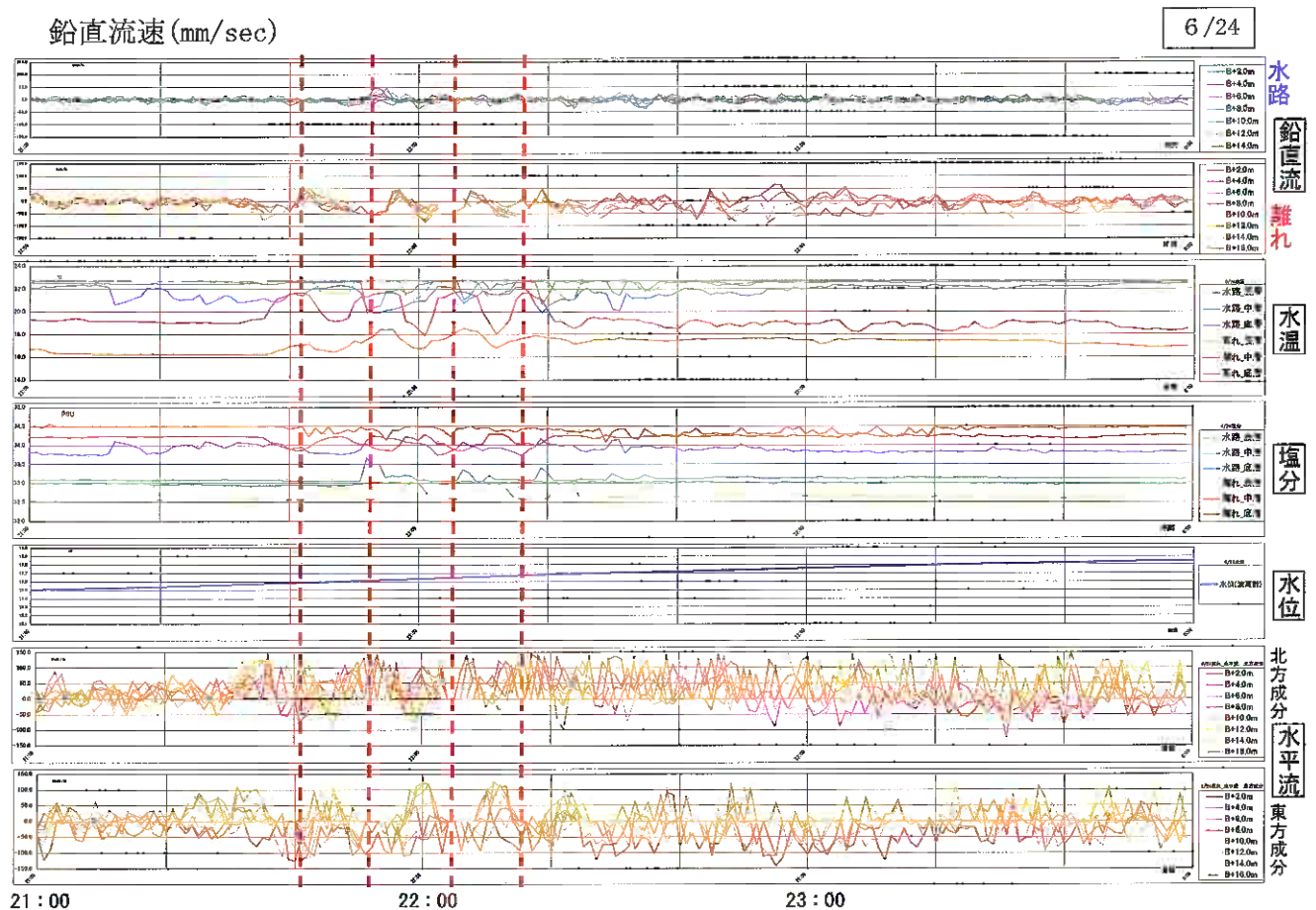


図 2.1.18 流れの鉛直成分、水温・塩分濃度の変化 (6/24 21:00~24:00)

鉛直流速 (mm/sec)

時刻	2m	4m	6m	8m	10m	12m	14m	16m
21:41:00	3	-11	-2	-12	-25	-16	-19	-24
21:42:00	54	61	28	44	46	22	9	-12
21:43:00	30	23	33	37	55	53	27	24
21:44:00	-7	-9	-16	-6	17	27	25	15
21:45:00	-1	-30	-11	-15	13	18		37
21:46:00	0	-39	-21	-1	24	11	24	
21:47:00	2	-22	-18	-11	-17	-9	-31	-12
21:48:00	-34	-37	-36	-30	-28	-28	-23	4
21:49:00	-43	-34	-38	-28	-32	-33	-17	-7
21:50:00	-39	-42	-30	-43	-39	-19	-4	
21:51:00	-19	-51						
21:52:00	-46							-24
21:53:00	-53	-56						
21:54:00	-41	-54						-20
21:55:00	-42	-33				-20		
21:56:00	34	41	20	-3	-2	-6	-2	-25
21:57:00	37	44	52	47	32	21	1	
21:58:00	2	-2	13	6	15	6	18	-3
21:59:00	-14	9	-8	-16	-16	-29	-22	-2
22:00:00	-41	-28	-34	-57	-52	-60	-32	-10
22:01:00	-23	-46	-52	-81	-87	-72	-44	-26
22:02:00	-45	-49	-57	-58	-56	-39	-13	-11
22:03:00	-27				-33	-15	-20	-15

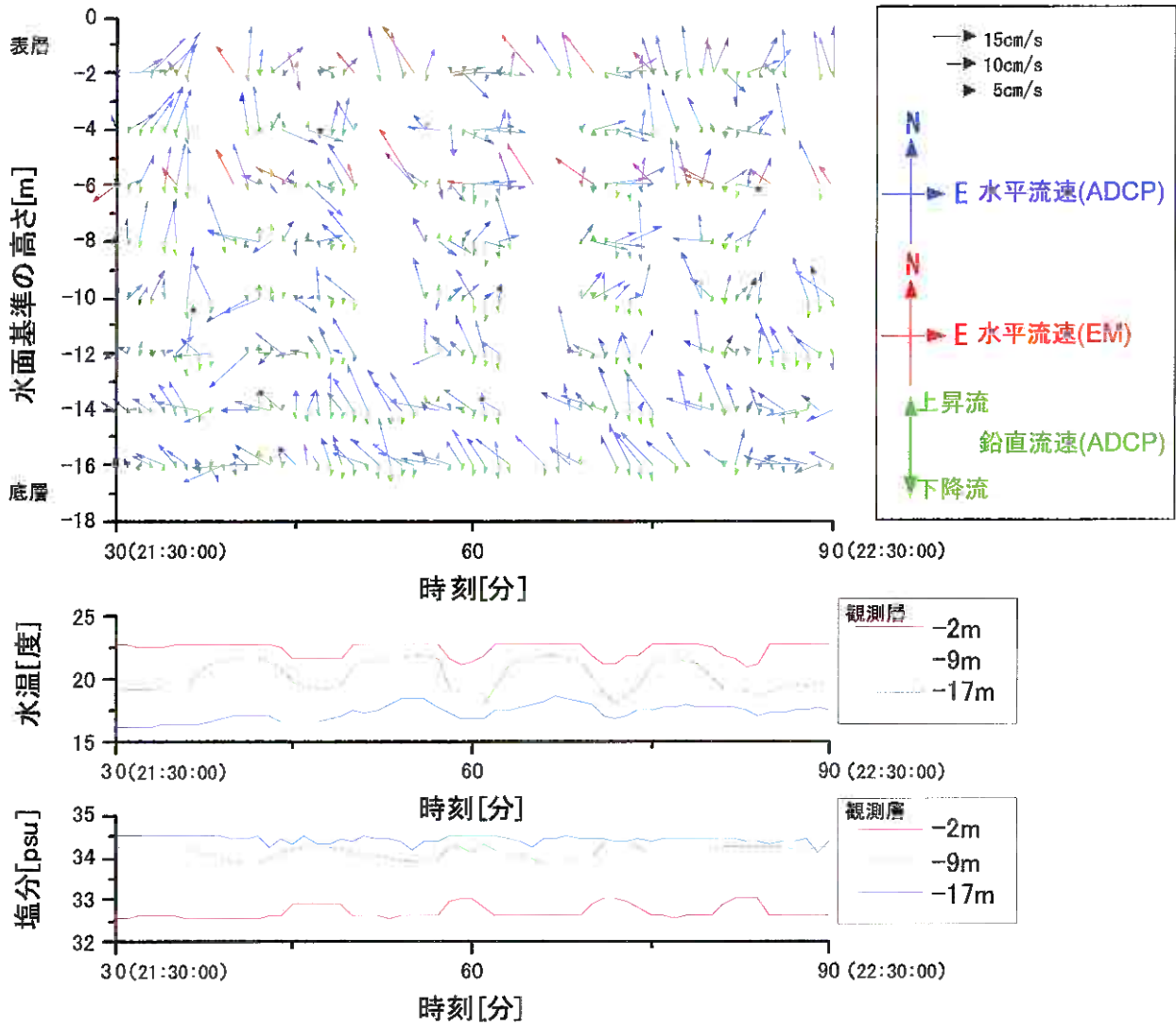


図 2.1.19 流れの鉛直成分、水温・塩分濃度の変化詳細図 (6/24 21:30~22:30)

■ 7月1日に生じた下降流の繰り返しについて

図 2.1.20 のとおり7月1日はさらに大規模な下降流の繰り返しが生じている。7時台の下降流は欠測が多いが、水温塩分も大きく振れている。8時台の下降流を以下に示す。概ね 10 分程度の周期で変動している。水平流もほぼこれと同じ程度に振動している。

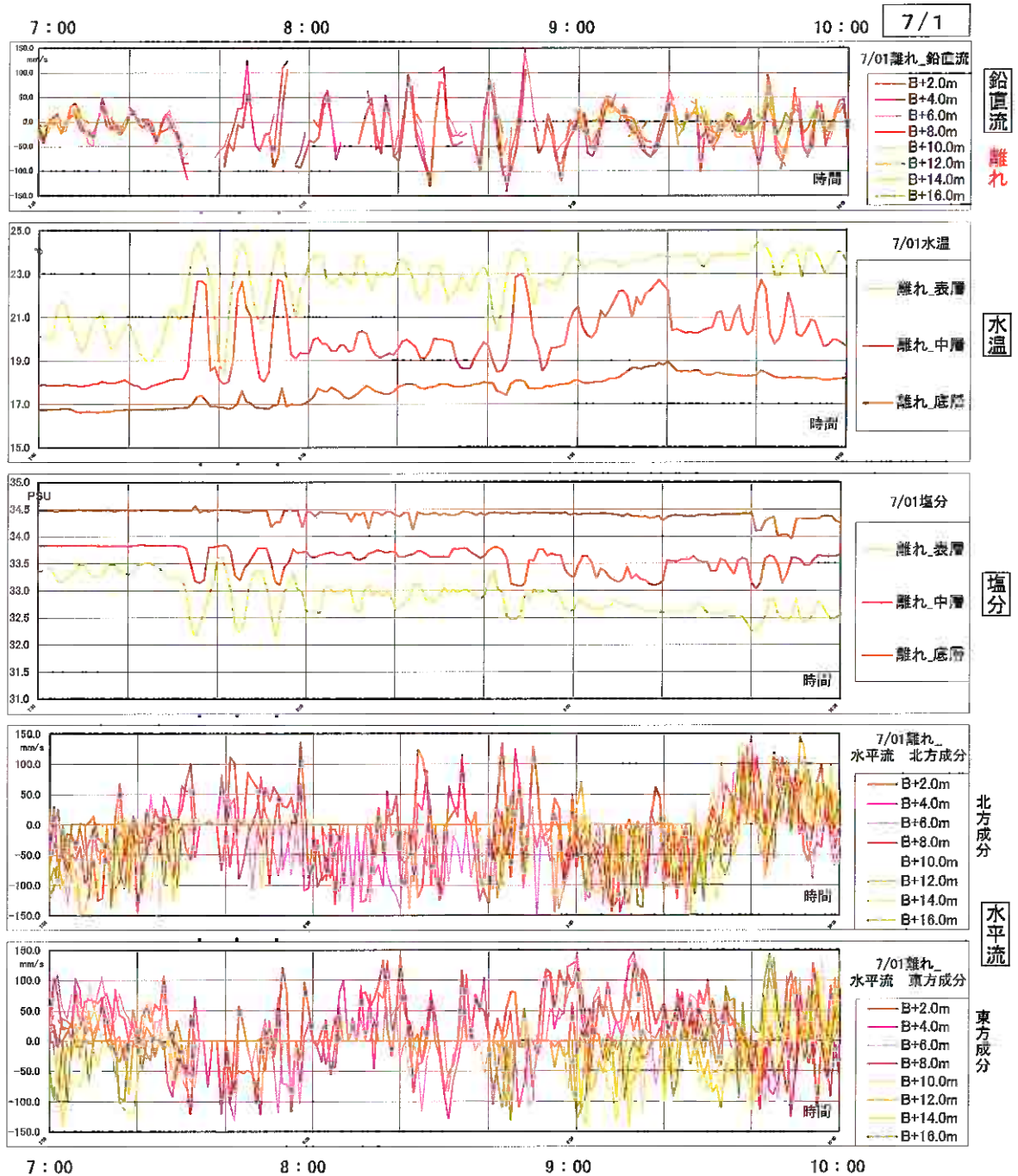


図 2.1.20 流れの鉛直成分、水温・塩分濃度の変化 (7/1 7:00~10:00)

このときは、上層部の水平流は南向きであるが、-14m層や-16m層では、水平流が北向きのときに下降流が観察され、南向きの時には上昇流が観測される傾向が認められる。鉛直流と水温・塩分の変動がやや不鮮明であるが、EM データをみると流向が時計回りに西から北、南へと変化しているように見える。

これは、水温が高く低塩分の海水と水温が低く高塩分の海水が混合する過程で、フロントが“離れ”を中心に南北に移動したこと、何らかの渦が生じたことの二つが考えられる。その結果、温度の低い海水が暖水塊の下にもぐり込んで下降流が生じたと考えられる*。

なお、渦の発生については次頁の図 2.1.22 に示すように既存の文献からのその存在が推定されている。

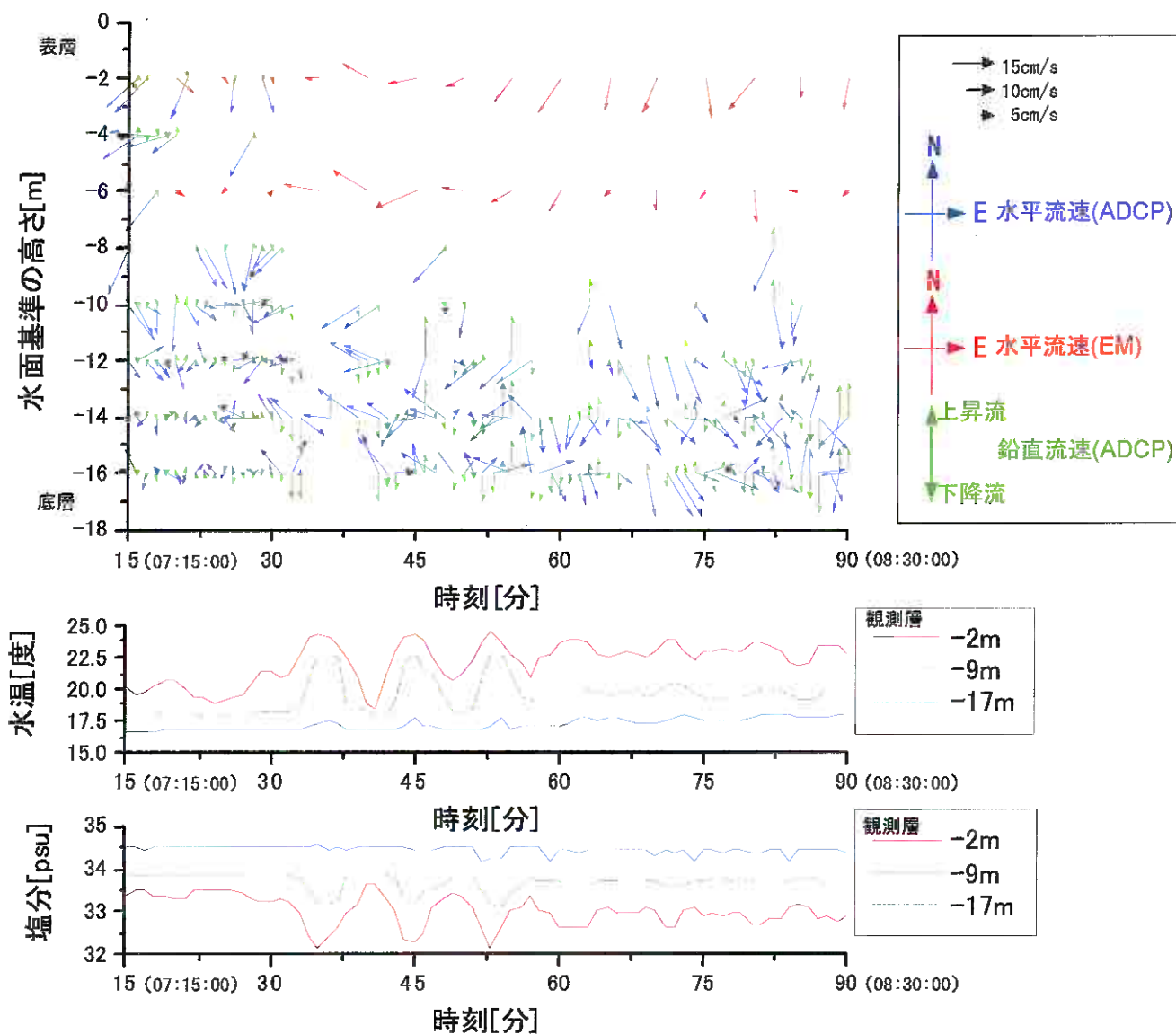


図 2.1.21 流れの鉛直成分、水温・塩分濃度の変化詳細図 (7/1 7:15~8:30)

*水平流ベクトルの変化を見ると南流で暖水が運ばれて、その後北流によって押し戻されているようにも見えるし、逆に表層部では南流や西流が連続しており、暖水塊と冷水塊が反時計回りに渦を巻いて混合しているようにも見える。

なお、中・表層部で水温が上昇しているときには超音波流速計のデータは欠測するケースが多い。これは、鉛直流発生時には明確な（密度）躍層が出現し、超音波流速計の発信する音波のサイドローブがこの躍層境界面などで乱反射したことが原因として考えられる。

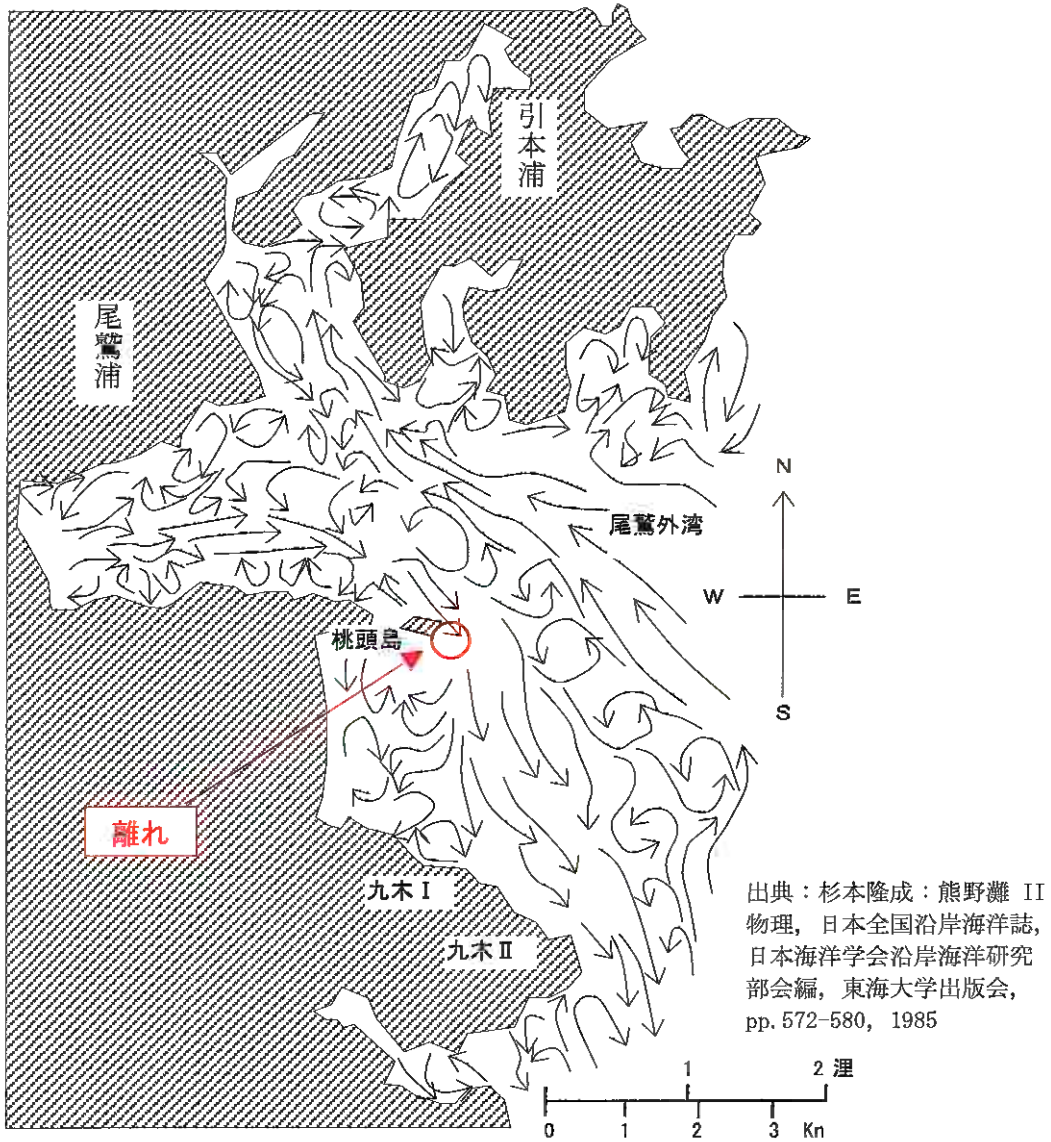


図 2.1.22 尾鷲の流況模式図

(3) 鉛直流の振動周期について

観測期間中に生じた周期的な鉛直流発生周期を下表に示す。3分程度のものから10分程度まで様々なタイプの振動が生じている。次頁図2.1.23は周期読み取りをした図である。

表 2.1.5 発生した鉛直流の概ねの振動周期

期日	周期
6/20 9:00~10:00	15分
6/22 8:00~9:00	7.5分
6/24 5:00~6:00	15分
6/24 21:30~22:30	12~15分
7/1 8:00~9:00	3.5分、7.5分、9.4分

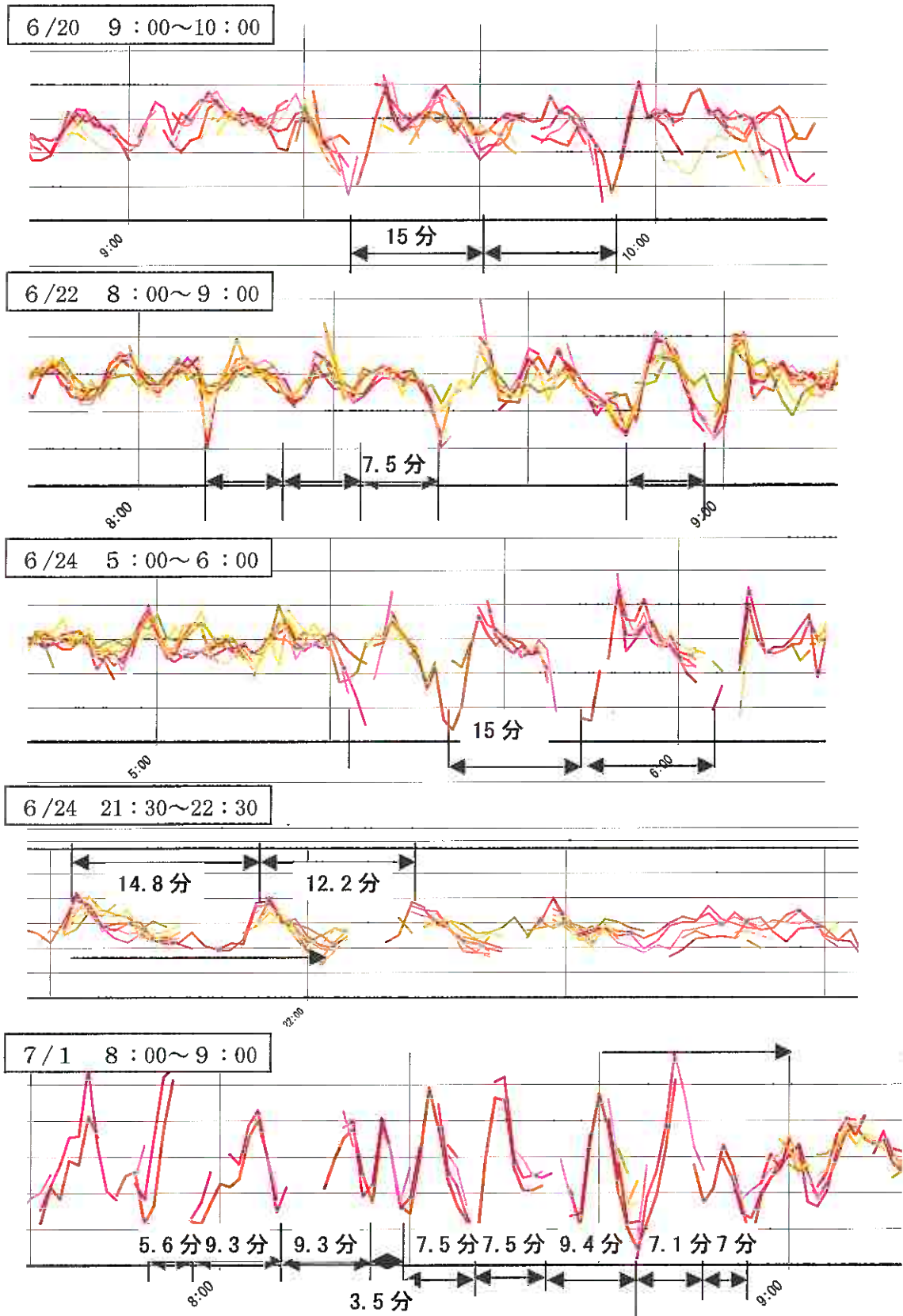


図 2.1.23 発生した主な振動鉛直流

2. 1. 3 尾鷲沖調査結果のまとめ

尾鷲での観測結果は以下のようにまとめられる。

- 離れで鉛直下降流が生じ（最大下降流速 17.6cm/s）、水路では顕著な現象（最大下降流速 10.2cm/s）は見られないことから、鉛直の下降流は海底地形が急斜面となっている場所で発生している可能性がある。
- ほとんどの場合に、この下降流の継続時間は数分以内である。
- 水路ではほとんど顕著な下降流は生じていないことから、現象としては局所的なものである。
- 鉛直下降流は、一回だけ発生する場合と、数回（一時間程度）以上繰り返し振動するように発生する場合がある。
- 繰り返し振動して発生する場合には、その振動は3分程度から15分程度まで様々な周期で繰り返すので、下降流の発生要因として、複数の原因が考えられる。

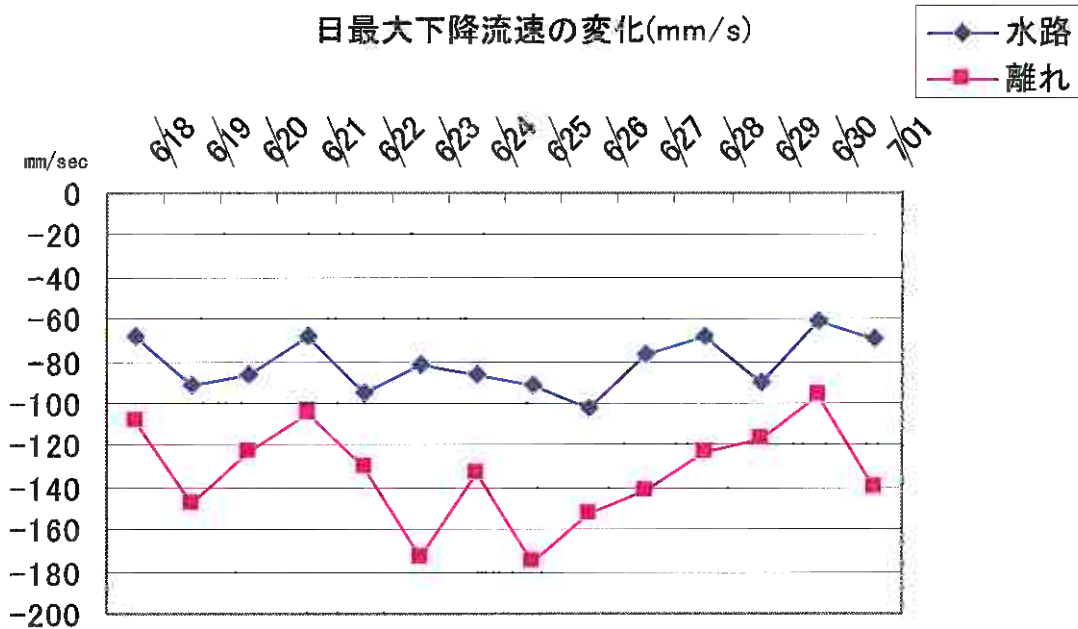


図 2. 1. 24 日最大下降流速値

(1) ダウンカレントの実態と特性について

イ 浅瀬を乗り越えるタイプ

北向きの強い流れが生じるときに浅瀬を通過すると、浅瀬上でさらに強い流れになり、その後急な深みがあると斜面に沿って下降する流れが生じることが想定される。この場合には、上下間で平行に流れる層流が生じる場合と、波を打つように流れる乱流が生じることが考えられる。乱流の場合には、鉛直渦の発生に伴う下降流が生じ、鉛直流の振動が発生するものと考えられる。

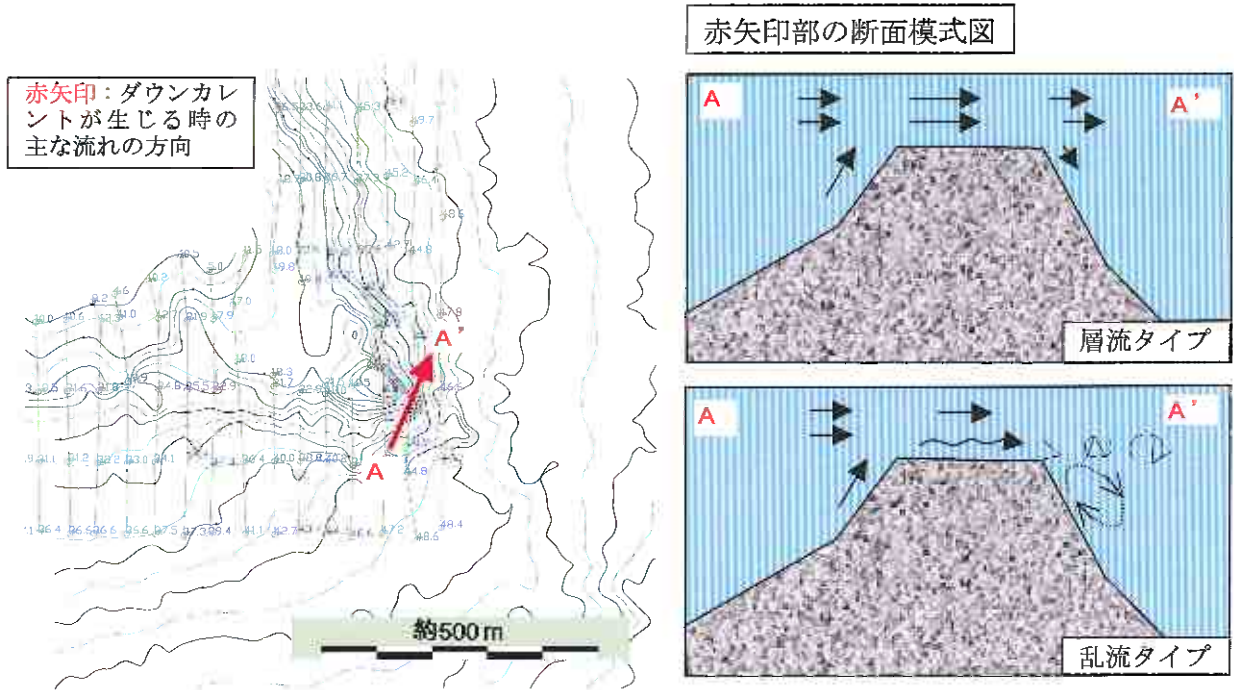


図 2.1.25 浅瀬を乗り越えるタイプの下降流

層流タイプは例えば6月19日のような、鉛直流が周期的に現れないとき、乱流タイプは鉛直流が、繰り返し発生するときで、かつ水温の変動が表層で顕著に現れないときであると考えられる。

ロ 水平流渦が生じて、潮目が交差するタイプ

鉛直流の発生した7月1日 (P. 30 図 2.1.23) には、北向き水平流が卓越して観測されているが、一日を通じた水平流北方成分の平均値は下表のとおりであり、南向きである。

この期間は、図 2.1.26 に示すように尾鷲の湾口沖で比較的強い黒潮反流が生じており (7月以降)、湾に流入する汽水はこれに引きずられるようにして、湾の南側沿岸を通じて流出していることを示すものと考えられる。

表 2.1.6 水平流北方成分の日平均値 (マイナスは南向きであることを示す) 7/1

海底上の高さ(m)	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0
日平均北方成分流速(mm/s)	-13	-16	-20	-25	-26	-24	-20	-9

その結果流出する流れを補償するために、湾の北側に湾に入り込む流れが生じて、文献に示したような小規模な渦が湾口部に生じた可能性がある。南流によって暖かい海水が滞留したところに、渦流れによって外洋系の冷たい水塊がぶつかる。そこに潮目が生じるとともに、急な海底地形が壁となって下降流が発生すると推定される。暖水と冷水が渦を形成して、交互に暖水・冷水を測定することになる。なお、潮目付近の水泡に巻き込まれると、浮力が低下して沈みこむ可能性もある。

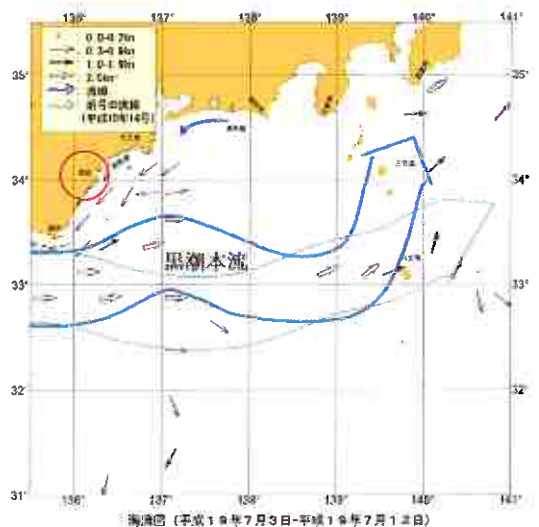


図 2.1.26 黒潮反流の発生

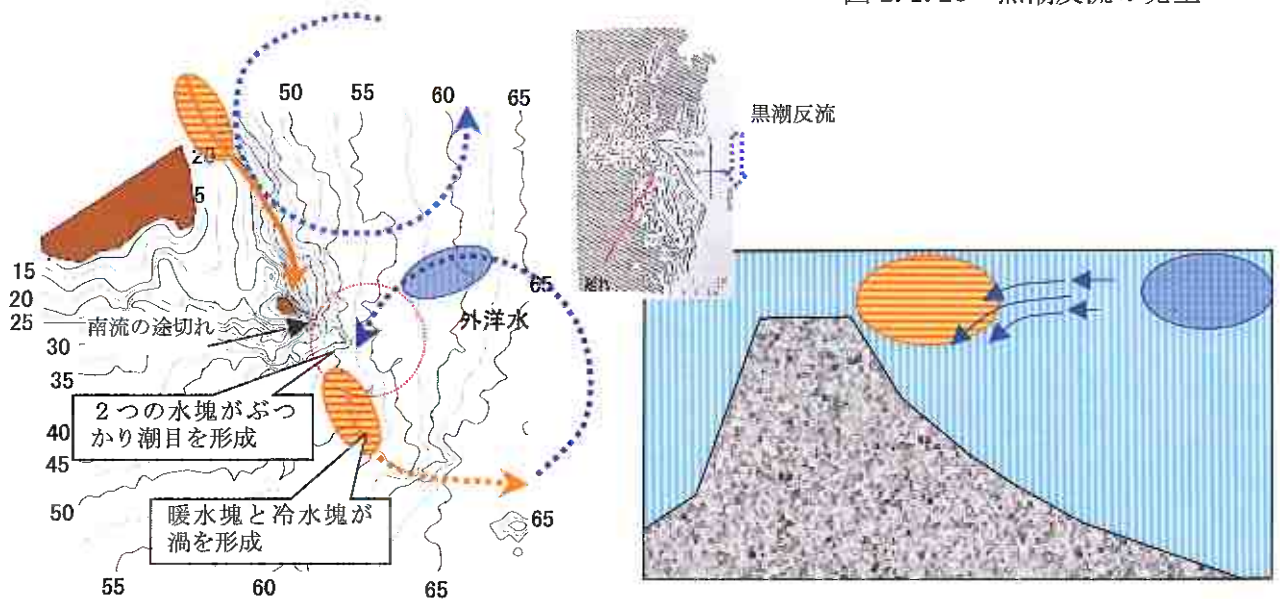


図 2.1.27 渦の発生と潮目、下降流の発生

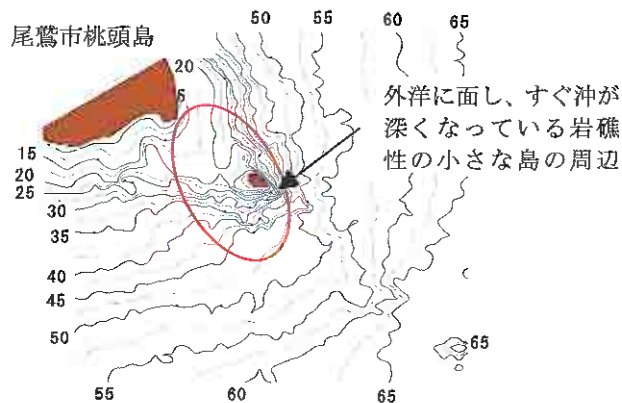
(2) ダウンカレントへの注意の喚起

尾鷲のような地形条件化におけるダウンカレントの発生は、こうした岩場などの海域でレジャーダイビングを楽しむ人々の安全にとって、重要な情報である。本研究調査では、下降流の存在を始めて明らかにしたが、これらの流れがどのようなメカニズムのもとで、発生するのか、下降流の強さは最大どの程度までありえるのか、またどの大きさの下降流がダイビングにとって危険な流れであるのか、今後の調査が必要となる課題も少なくない。

しかし、より安全なレジャーダイビングのために関係者への注意を喚起しておく必要があるため、今回の調査から以下の知見を提供することが可能となった。

■ダウンカレントの発生場所

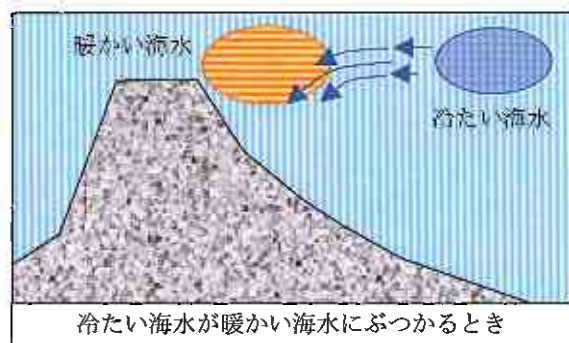
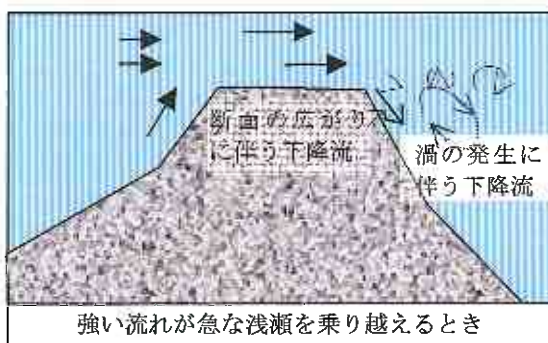
ダウンカレントは、さんご礁のエッジや、岩礁域などにある急深な海底地形のところで発生します。このような場所は、魚などの生き物が多く生息しており、ダイビングのスポットとして有名な場所であることも少なくない。



■ダウンカレントが発生する条件

岩礁域のダウンカレントは以下の条件で発生することが考えられる。

- ① 浅瀬などがあるところに強い海流が衝突すると、浅瀬の上では、流速が一層強まり、その先に急な落ち込みがあると、流れが地形に沿って落ち込み、または浅瀬の背後に渦等が生じ下降流が生じる可能性がある。
- ② 浅瀬が磯場に沿う場所などに暖かい海水が有るところに、冷たい海水がぶつかり、下降する流れが生じる可能性がある。



■ダウンカレントへの注意事項

ダウンカレントに対しては、以下のことに注意することが重要である。

- ① ダウンカレントは、波が静穏な場合でも発生する可能性があること。
特に、ダイビングを楽しむ海域の流れや波などの条件に詳しいガイドの指示によく従う必要がある。

- ② ダウカレントは突然発生する恐れがあること。
静穏な条件化で、突発的に発生する可能性があるので、常にガイドやバディとの位置関係に注意して、単独にならないようにすることが不可欠である。

- ③ ダウンカレントは短時間の現象であることが多いこと。
ダウンカレントは、短時間の現象である場合が多いものと考えられる。したがって、ダウンカレントに遭遇してもあわてず、急激な深度変化を避けるため、近くの岩などにつかまって流れが弱まるか助けがくるまで待機する。ダイビング中のエアに余裕が無い場合は、浮力確保により緊急浮上を行う。対応方法の詳細については事前にガイド等と確認しておくことが大切である。

2. 2 石垣島吉原海岸調査

2. 2. 1 調査概要

(1) 観測内容

イ 定点観測（連続観測）

発生要因としては波浪、潮位、風及びそれに伴う水位上昇を想定し、それらの要因の関連を定量的に把握するため、定点における連続観測を行った。

ロ 平面観測（リーフカレント発生確認時）

流れの構造を把握するため、リーフカレント発生確認時にその周辺域において、観測を行った。

表 2.2.1 観測内容の一覧

観測手法	使用機器	観測内容	台数	備 考
定点観測 (連続観測)	Wave Hunter	波浪、流向・流速、水温 観測、平均水位（潮位）	1台	リーフギャップ近くの水路内
	COMPACT-EM	流速・水温	1台	リーフギャップ近くの水路内
	COMPACT-WH	水位（波浪）観測	4台	リーフ内・外
平面観測 (一斉観測時)	GPS フロート	流況観測	3台	(発生位置・平均流速)
	モニタリング カメラ	現場状況の撮影	1台	

(2) 観測時期

現地観測は冬季に行うものとし、以下のとおり実施した。

観測期間：11月1日～12月7日（ただし、観測機材により期間が異なる）

(3) 観測場所

調査対象海域は、図 2.2.1 に示す石垣島吉原海岸とした。

観測機器の設置場所及び平面観測範囲は図 2.2.2 に示すとおりである。

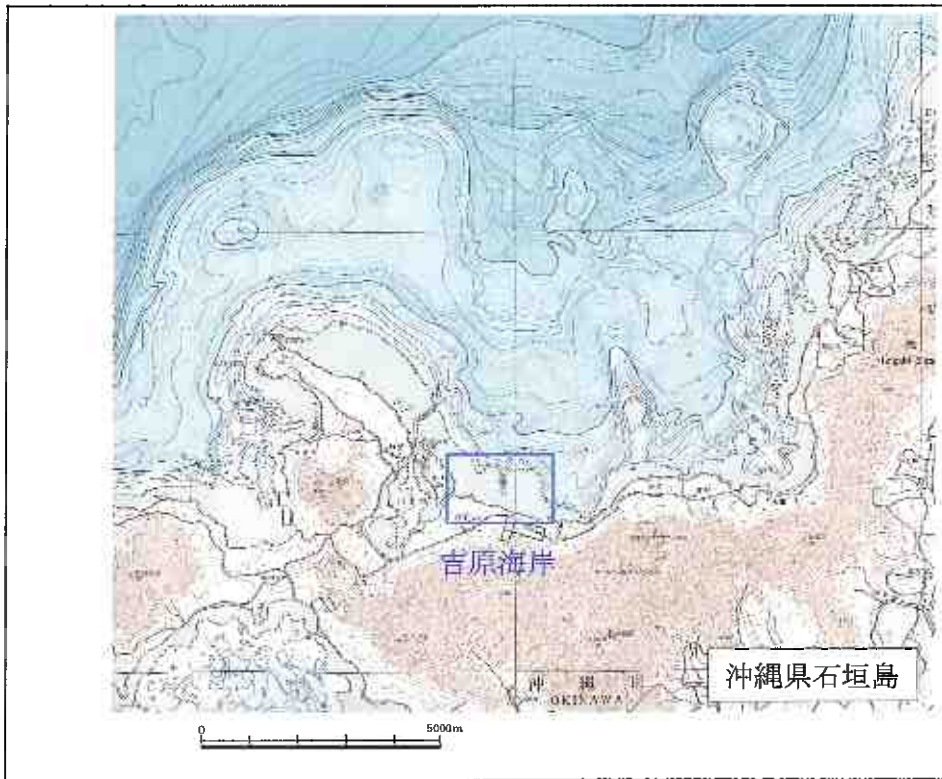


図 2.2.1 現地観測地海岸

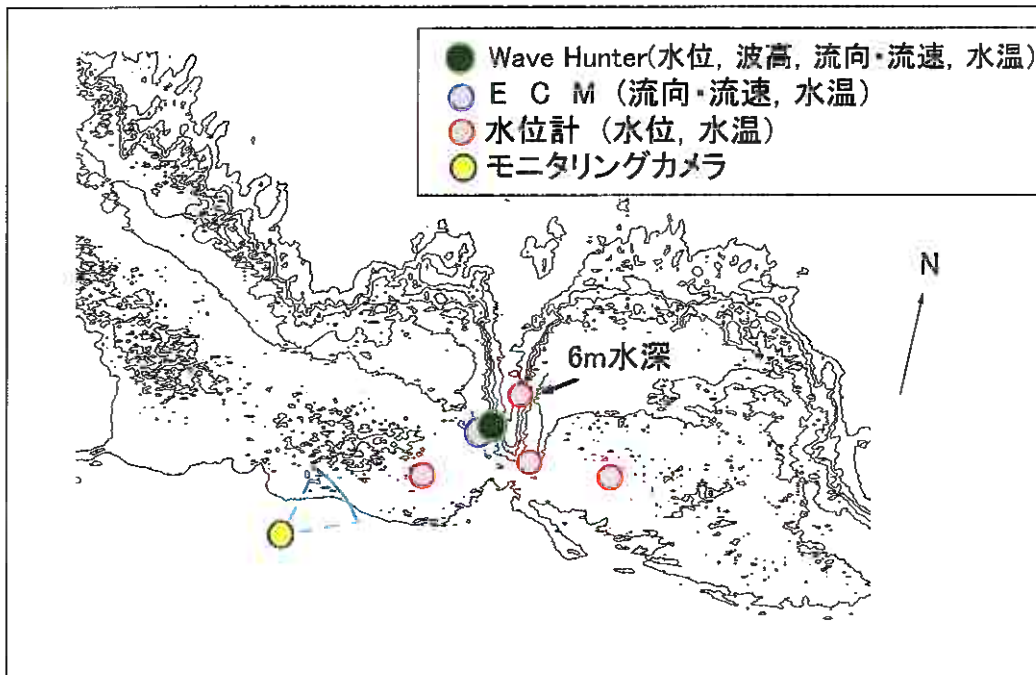


図 2.2.2 観測機材の設置位置

(4) 調査手法

イ 定点観測（連続観測）

(イ) リーフ内における波・流れ・水温の観測

Wave Hunter を設置し、リーフ内の波浪と流向・流速の1ヶ月間連続観測を行った。ただし、観測後半になり高波浪のために機材が転倒したために、転倒後の流速データは必ずしも適切でない。



Wave Hunter 外観

図 2.2.3 Wave Hunter の設置状況

(ロ) 水位観測

リーフカレントの直接要因はリーフ内とリーフ外の水位差の発生にあると考えられる。リーフ内の水位変動は大規模なタイドプールの形成、波浪によるセットアップ等が大きく関わっているものと考えられる。このため、リーフ内外の4箇所に Compact WH（水位計）を設置し岸沖方向の水位観測を行った。



COMPACT-WH 外観

図 2.2.4 COMPACT-WH の設置状況

(ハ) 海水温観測

Wave Hunter と COMPACT-EM 付属の水温センサーにより水温の連続観測を行った。

ロ 平面観測(流れの極大時)

(イ) GPS フロートによる流況観測

リーフカレントの発生が期待される(又は確認された)箇所に GPS を内蔵したフロートを投入し、流況観測を行った。



図 2.2.5 GPS フロート外観

(ロ) モニタリングカメラによる海岸状況の撮影

KADEC 社製モニタリングカメラを、図 2.2.6 に示すように海浜地に設置し、海岸の状況を 10 分間隔で撮影した。



図 2.2.6 海岸の立木に設置したモニタリングカメラ

2. 2. 2 調査データの解析

図 2.2.7 と図 2.2.8 に観測箇所の海底地形の概要と観測機材設置位置を示す。

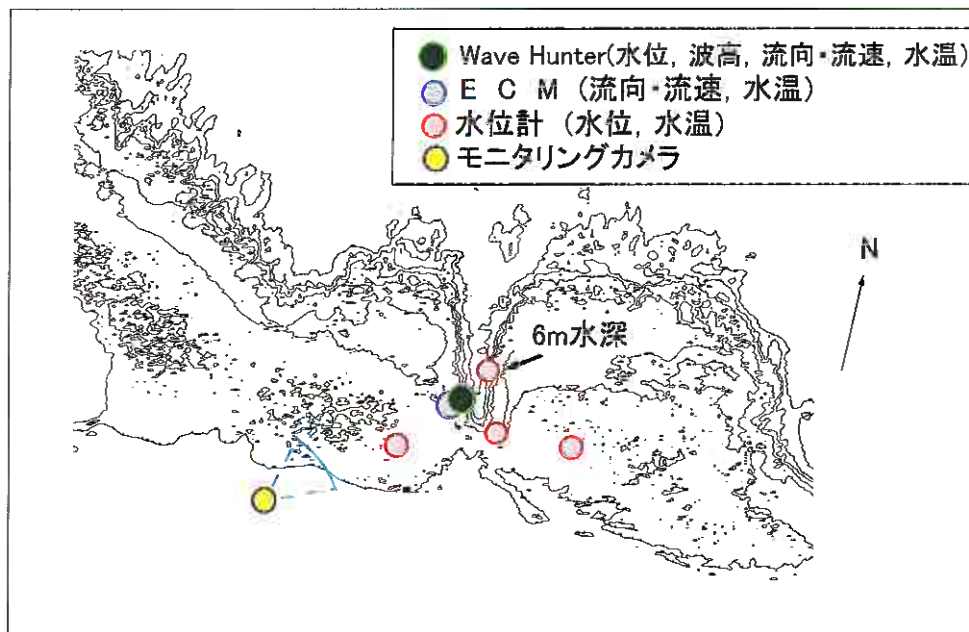


図 2.2.7 機材設置地点



図 2.2.8 吉原海岸 (航空機より海岸に向かって南方向に撮影)

(1) 平面観測(流れの極大時)

本観測地で得られた結果のうち、まずGPSフロートにより観測されたリーフギャップ周辺でのリーフカレントの代表的な流況と流速を図2.2.9と図2.2.10に示す。なお、観測時は、典型的な西高東低の気圧配置のために海側からの風と入射波浪が卓越する状況であり、干満の時間にかかわらず、沖向きの強い流れが常時観測される状況であり、計測終了後にリーフカレントに逆らいながら歩いて浜に帰る際には、観測者の足に強い抵抗を感じた。

図2.2.9に示すGPSフロートの漂流軌跡は、リーフギャップ背後の北側の水路状微地形に沿って投入したものであり、すべてリーフギャップに向かって流れている。GPSフロートの位置は1秒間隔で記録されているが、本システムの最終的な空間分解能が3mであるために生データのままでは流速変動が大きい。そこで、10秒の移動平均で求めた平均流速(漂流速度)が図2.2.10に実線で示されている。約20秒程度の流速変動を伴いながら、平均流速は0.5m/s~2m/sの間で変化し、リーフギャップ端部に近づいた160秒前後の時間帯においては、平均流速が3m/s程度まで増加していることが分かる。

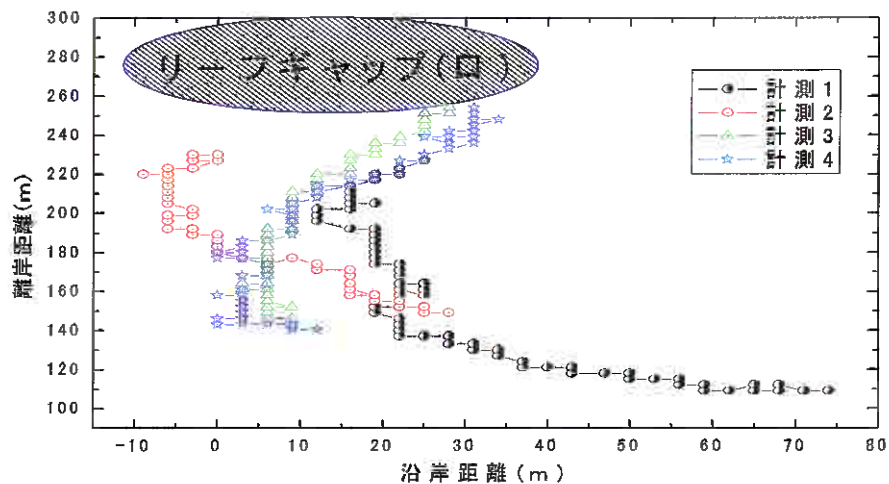


図 2.2.9 リーフギャップ周辺でのフロートの移動状況

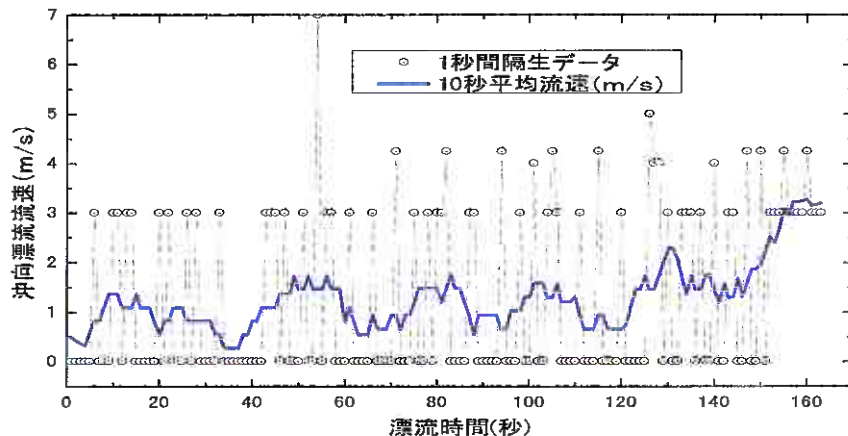


図 2.2.10 リーフギャップ周辺での沖向き平均流速 (GPS フロートの漂流速度)

(2) 各観測値の時系列データ

イ 流速

リーフギャップの流れが沖に出やすい水路状の微地形に設置した Wave Hunter により観測された流れの状況を図 2.2.11 と図 2.2.12 に示す。なお、観測後 26 日に波群津波状の波が本機材に作用したために、機材が転倒し、それ以降はリーフカレントデータとしては適切でない観測になったために、結果を本イベント前後に分けて示す。

観測機材を設置した水路状の微地形は北東方向に向いているために、当観測箇所では、2成分流速がそれぞれ、北向き及び東向きの時に流出側の流速となる。図から、本観測地点では、観測日 8 日、12 日、13 日、14 日、15 日、16 日、22 日、23 日、24 日、25 日の干潮時で海側からの上げ潮がこの水路状の微地形に侵入してくるわずかな時間を除いて、ほとんどの時間帯で流出、つまりリーフカレントが卓越していることが分かる。さらに、沖向きのリーフカレント成分が卓越しながらも、潮汐のサイクルに応じた流速変動が生じていることが分かる。加えて、0～4 日、4 日～8 日、8 日～13 日、17 日～22 日、そして 26 日以降に、それぞれ風のフロントあるいは入射波浪が大きく変わったことによると推定される流速変動が顕著に表れている。平成 17 年度までの現地観測結果は、主に潮汐に伴い発達したリーフカレントが計測されていたが、本年度の冬季観測では、入射波浪によるセットアップ効果、卓越風による吹き寄せ効果（吹送流）、および潮汐による効果が重なり合った流速が観測されたものと考えられる。

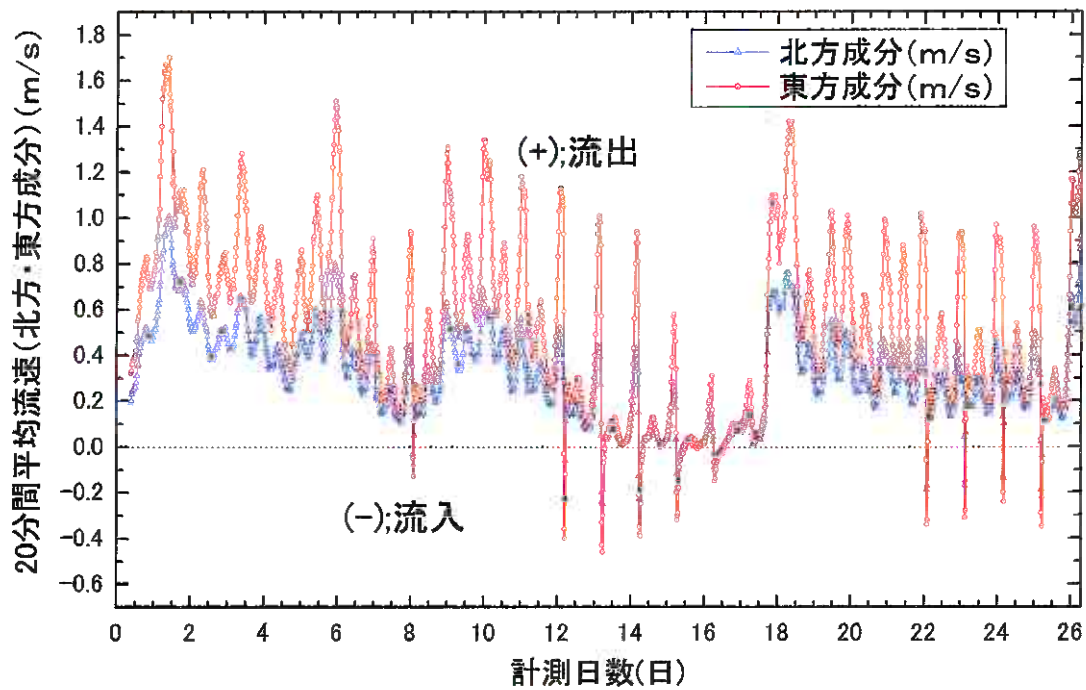


図 2.2.11 流速成分の時系列

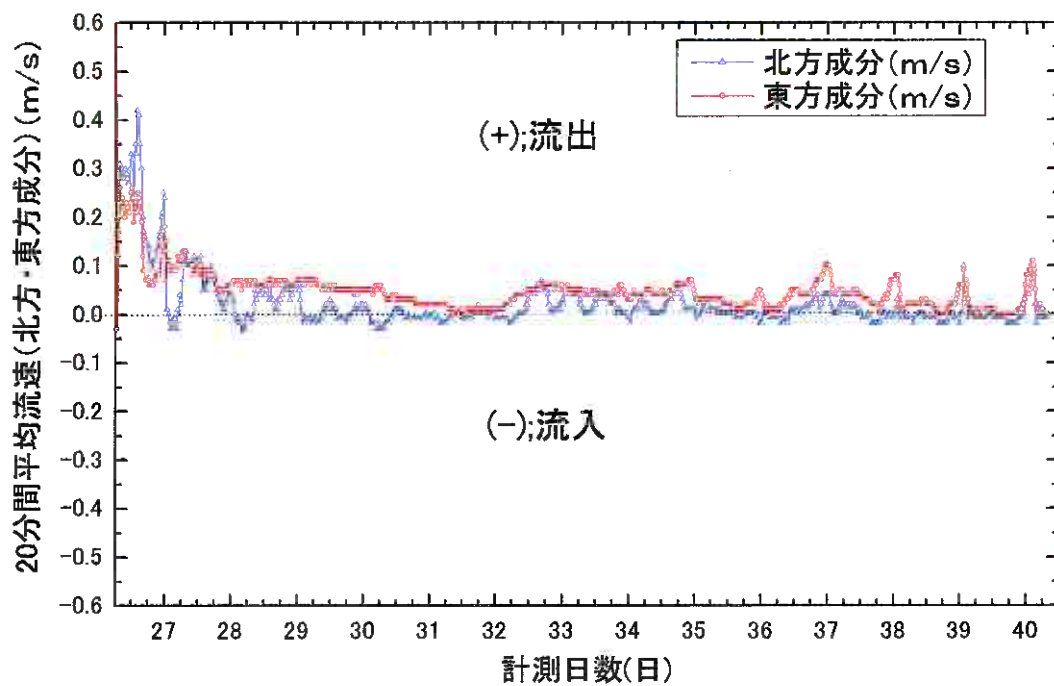


図 2.2.12 流速成分の時系列 (海象計転倒以後)

ロ 流向

流向に関しては、図 2.2.13 と図 2.2.14 に示すように 45° （北東）と 77.5° （東北東）の間にほぼ固定され、常時リーフ内から外に向かう流出状況が生じていたことが分かる。そして、波によるセットアップ効果と、風による吹寄せ効果が弱まった時期の干潮時上げ潮の限定的な時間だけが、流行が反転したことが分かる。風も波も弱い場合の夏季観測では、流向は潮汐に伴い反転していたのと比較すると、冬季においては対照的な結果が得られたことになる。

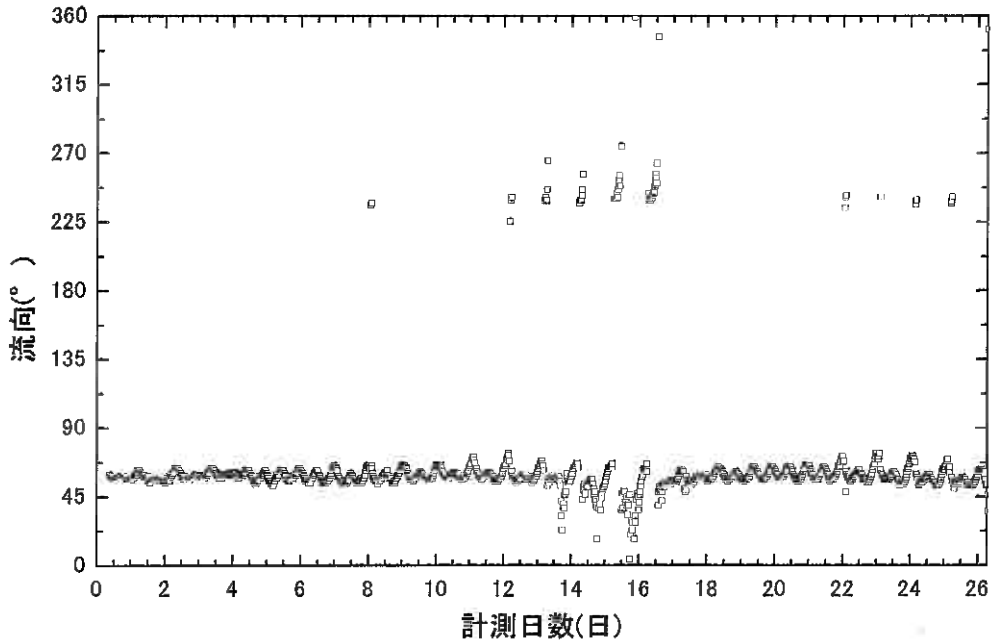


図 2.2.13 流向の時系列

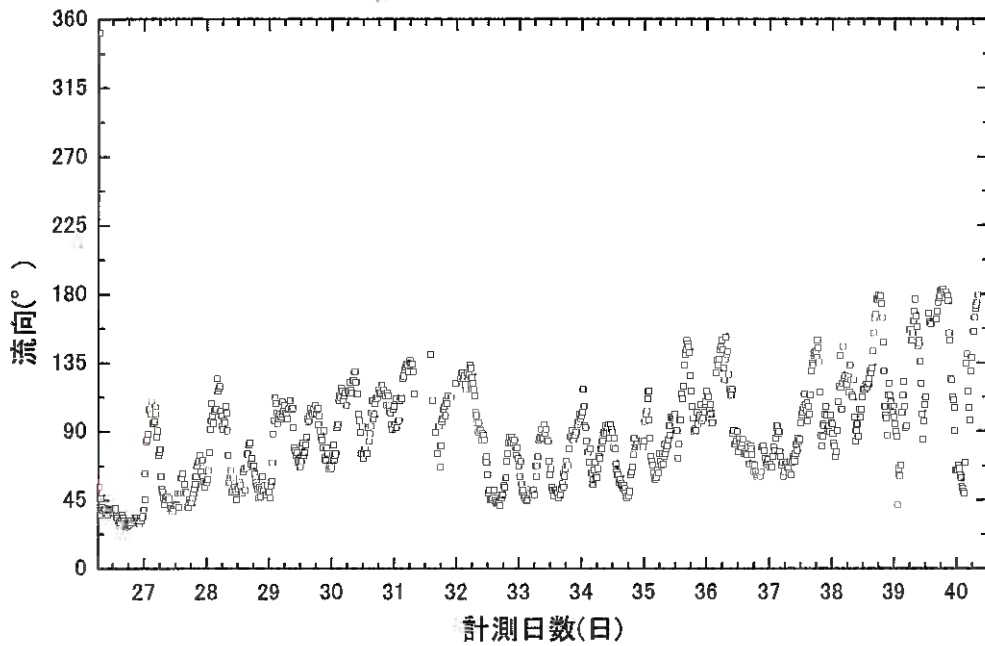


図 2.2.14 流向の時系列（海象計転倒以後）

ハ 波高

入射波浪に関して、リーフギャップの水路状微地形に設置した Wave Hunter で得られた有義波高と最大波高を図 2.2.15 と図 2.2.16 に示す。ただし、観測地点は、リーフギャップの一番最奥部のリーフフラット（礁嶺）にあるために、外洋側で海が非常に荒れているにもかかわらず、地形による波の減衰・砕波効果により小さめの波高が記録されるので、今回の観測値は外洋が荒れているかどうかの指標として用いるべきものである。

入射波浪としては、観測日約 1 日、5 日、9 日、18 日および 26 日当たりで波高の極大値が見られる。ただし、入射波高でいえば観測日 1 日より、18 日の方が大きい。対応する日時のリーフカレントは観測日 1 日の方が約 20cm/s 強速くなっている。対応するこのリーフカレントの時間帯は、潮位がほぼ同じであるので、風と波の効果（吹き寄せ効果）がこの差を生じたものと考えられる。

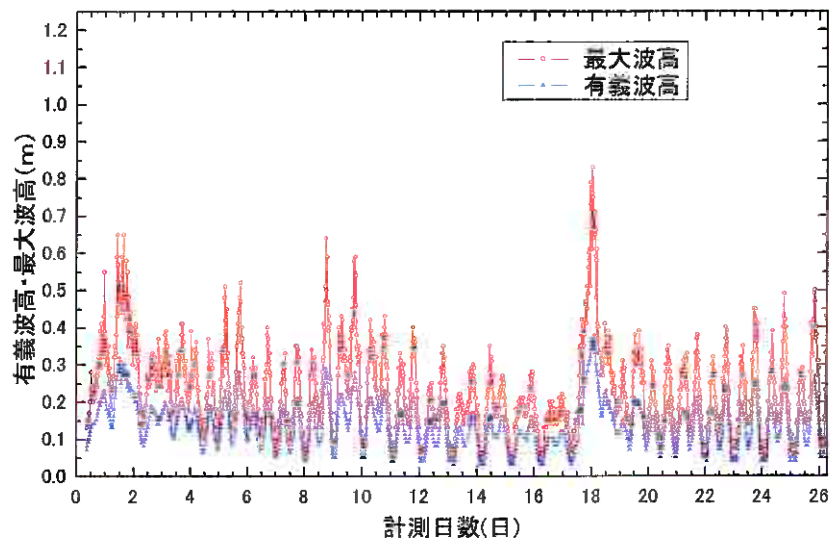


図 2.2.15 有義波高と最大波高の時系列

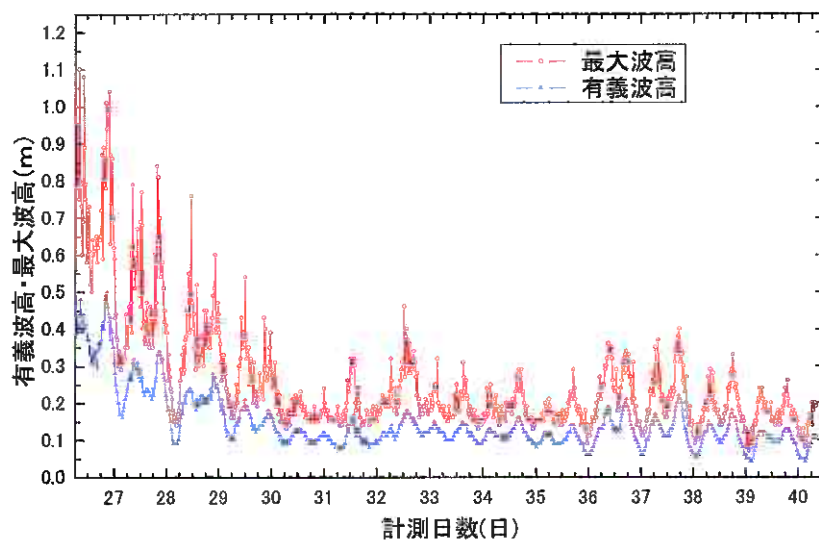


図 2.2.16 有義波高と最大波高の時系列（海象計転倒以後）

二 流速

潮汐とリーフカレントの流速の対応関係を図 2.2.16 と図 2.2.17 に示す。1 日にはほぼ 2 回生じる干潮の時間帯に流速のピークが表れるが、基本的には低低潮の時間帯の流速の方が大きいことが図からわかる。また、平成 17 年度の夏季の観測では、リーフカレントの発生要因として潮汐だけが効いている場合に、干潮時以外の流速はほぼゼロに近かったもので、例えば、本記録の観測日 1 日前後の様子を見ると、風と波の効果がこの時には約 0.8~0.9m/s 程リーフカレントの速度を増加させていることがわかる。

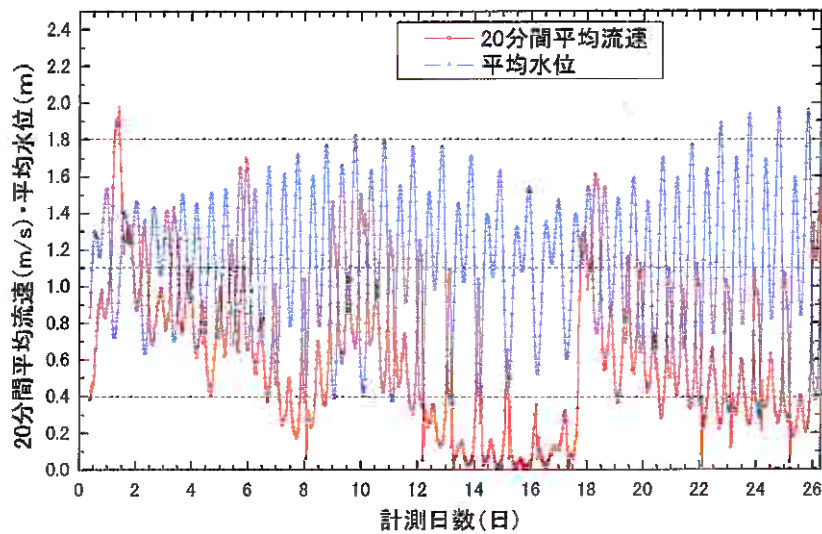


図 2.2.16 平均水位と 20 分間平均流速の時系列

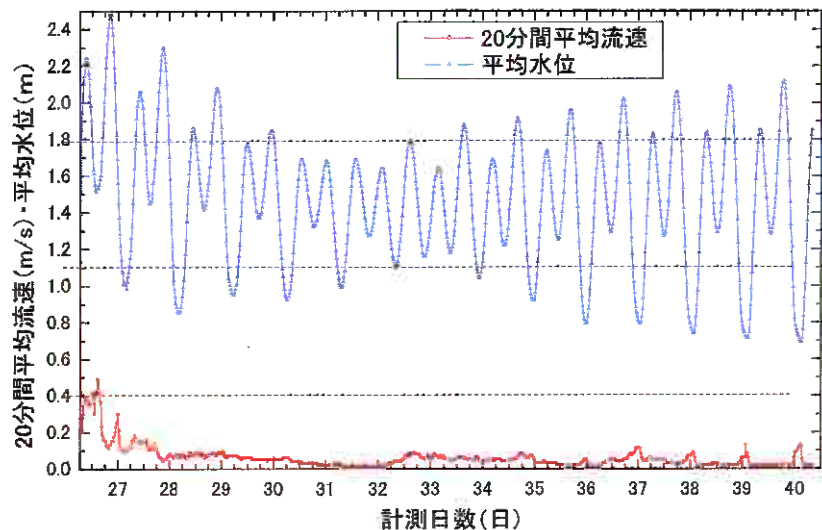


図 2.2.17 平均水位と 20 分間平均流速の時系列 (海象計転倒以後)

ホ 水温変化

水温変化を図 2.2.18 と図 2.2.19 に示す。11 月から 12 月に向かう観測期間内では、平均的に水温は低下傾向にある。しかし、海象条件が厳しくなり外洋の暖かい海水（黒潮起源？）が供給される状況が発生すると、水温が一時的に上昇している（図 2.2.18、16 日～19 日）。さらに、水温記録にはリーフ内の海水が昼間温められ、そして早朝にかけて水温が低下するという日変化と、例えば、計測日 31 日の午前中に見られるように、上げ潮に伴う外洋水の流入がある場合の急激な水温上昇が見られる。リーフカレントは、リーフ内の海水交換に重要な役割を持っており、水温変化からもその海水交換状況が推定できると言えよう。

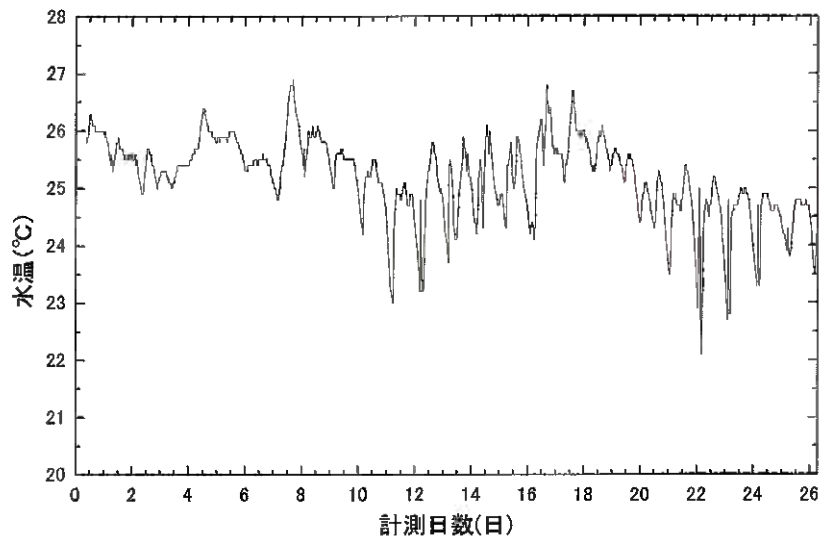


図 2.2.18 水温の時系列

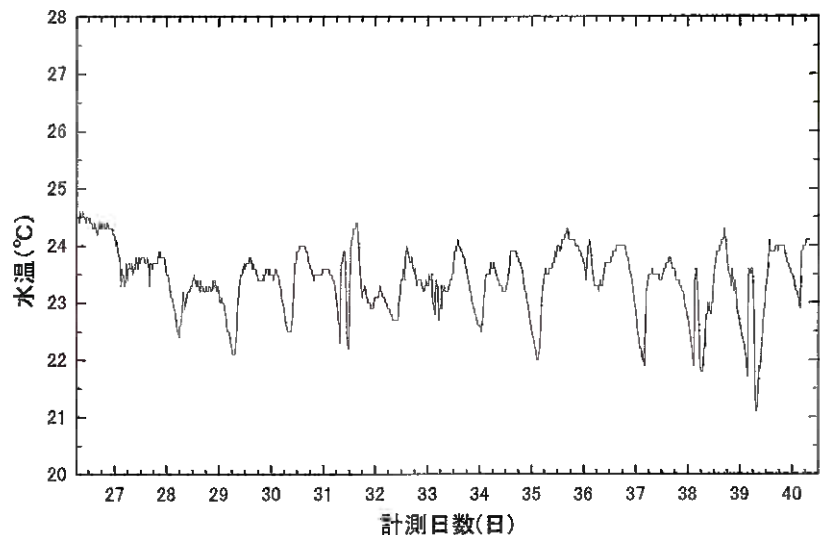


図 2.2.19 水温の時系列（海象計転倒以後）

へ 対象海岸の気象条件

観測海岸に最も近い伊原間のアメダス情報から、本海岸のリーフカレント発生に最も重要と考えられる風速と風向のデータを引用し、図 2.2.20 に示す。風向に関しては、海岸正面側の北ないしは東からの風が卓越していることが分かる。また、定常的に 2~4 m/s 以上の風が吹いており、気圧配置によっては 12m/s 程度の平均風速が発生している。この平均風速は、外洋で発達する波浪のフェッチと吹送時間の状況を示す一種のパラメーターと考えられ、平均的に、平均風速が速い時に観測波高が高くなり、また、リーフカレントの速さも早くなっている。

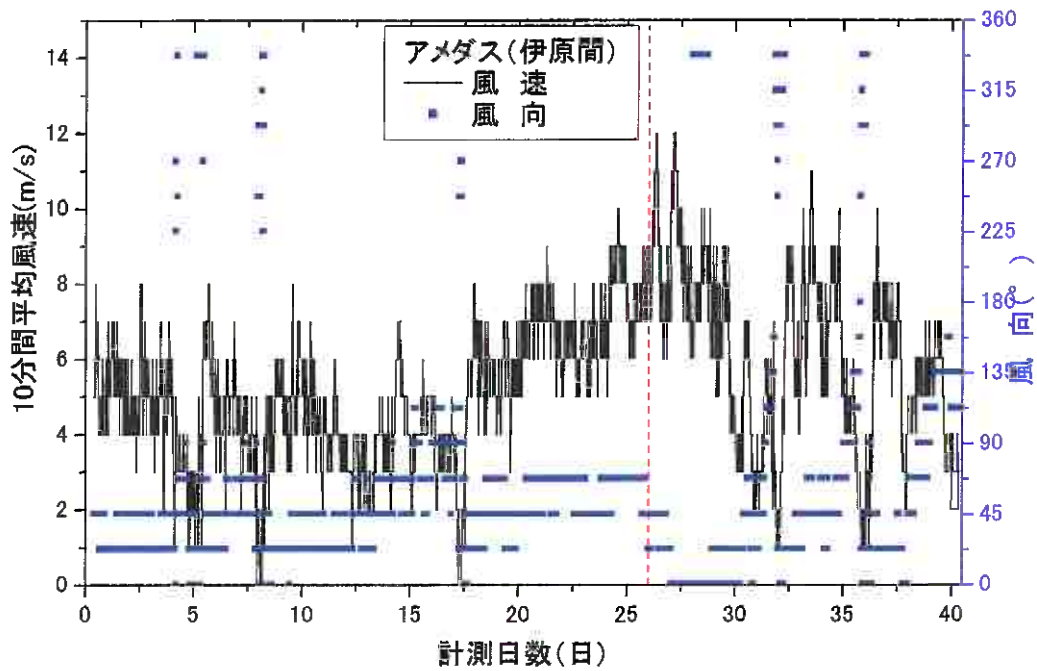


図 2.2.20 アメダス (伊原間) の風向・風速の時系列

(3) 流速相関分布及び統計分析結果

イ 流速相関分布

以下の図 2.2.21～図 2.2.28 に、波高と流速、水位と流速、そして水位と水温の相関図を、観測機材転倒前後についてそれぞれ示す。

観測地点では、概して有義波高が 0.2m を超えると、0.2m/s 以下の平均流速（海域利用の安全な下限流速）になりにくく、また、有義波高が増加すると平均流速が増加する傾向はあるが、相関はあまり高くないことが分かる。

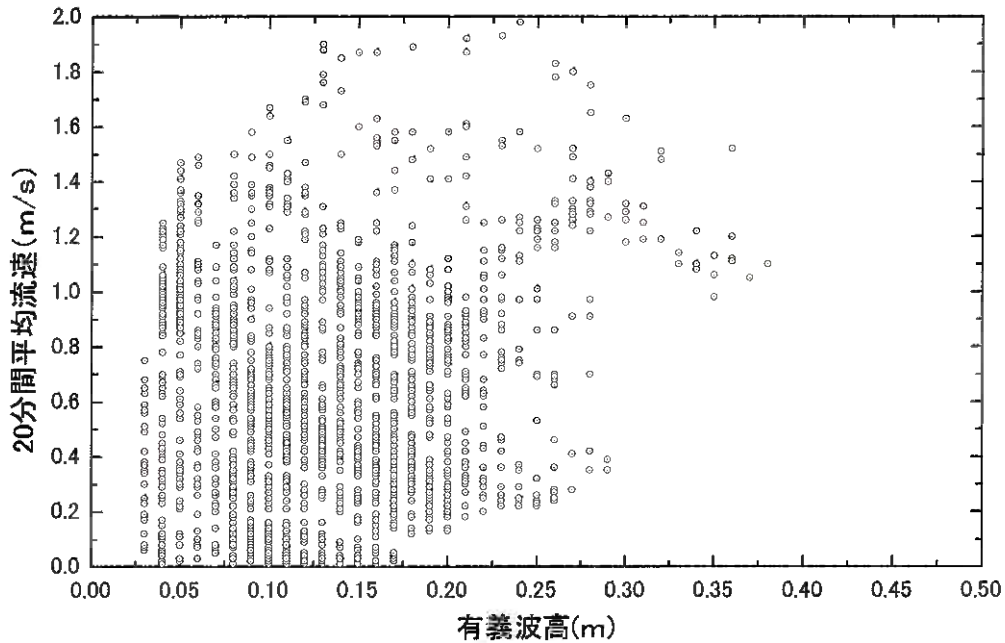


図 2.2.21 波高と流速相関関係

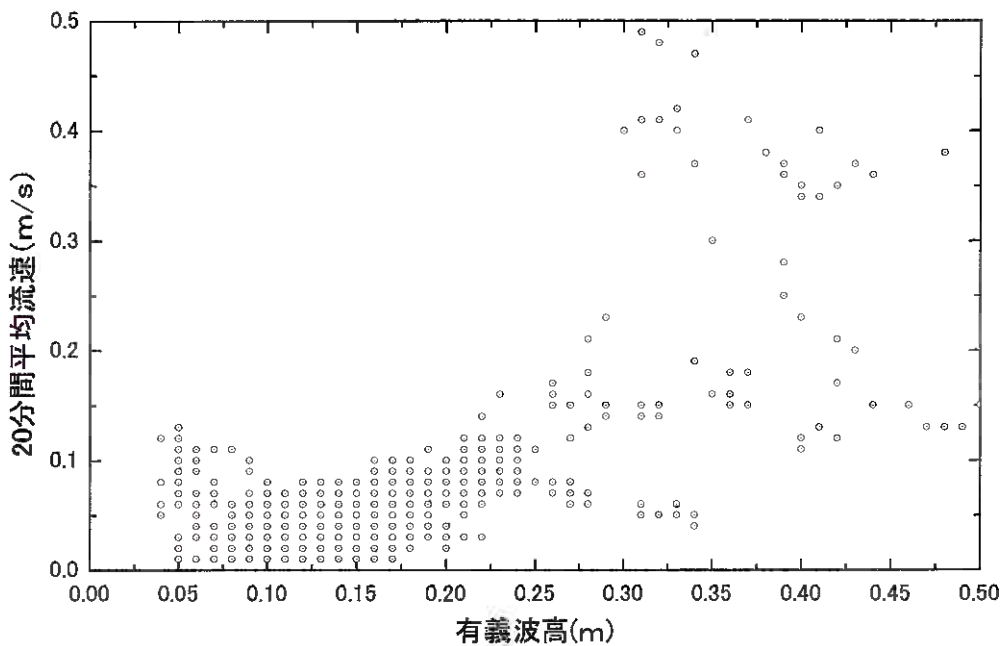


図 2.2.22 波高と流速相関関係（海象計転倒以後）

平均水位と平均流速に関しては、平成 17 年度夏季観測においては平均流速のピークが干潮（低低潮）レベルの平均水深にあったが、平成 18 年度冬季観測では平均流速のピークが平均水深 1.0m 前後にある。これは、平均流速のピークは干潮時にあるものの、波によるセットアップと風による吹き寄せにより平均水深が上昇しているためである。

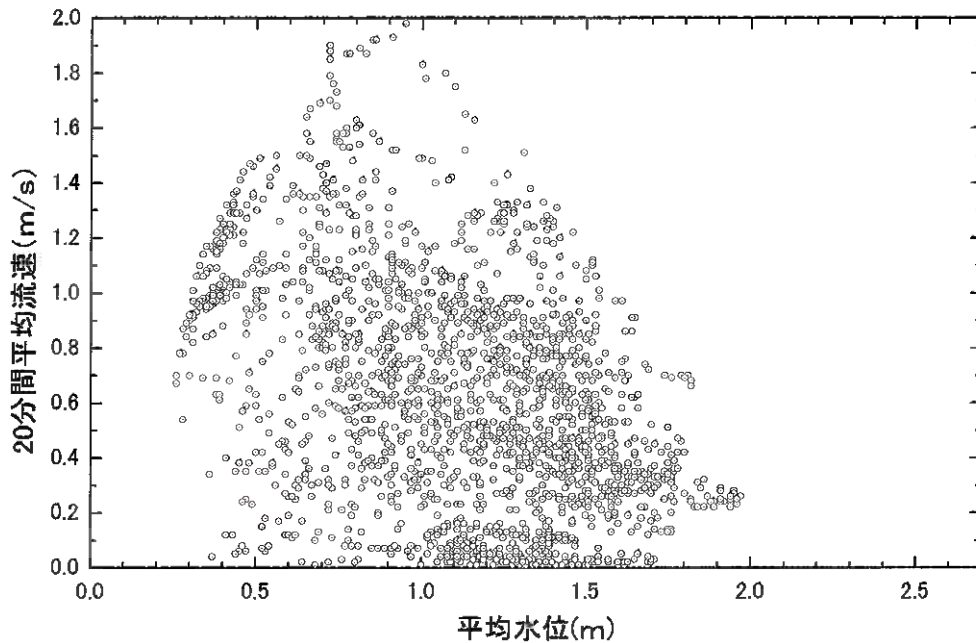


図 2. 2. 23 水位と流速の相関関係

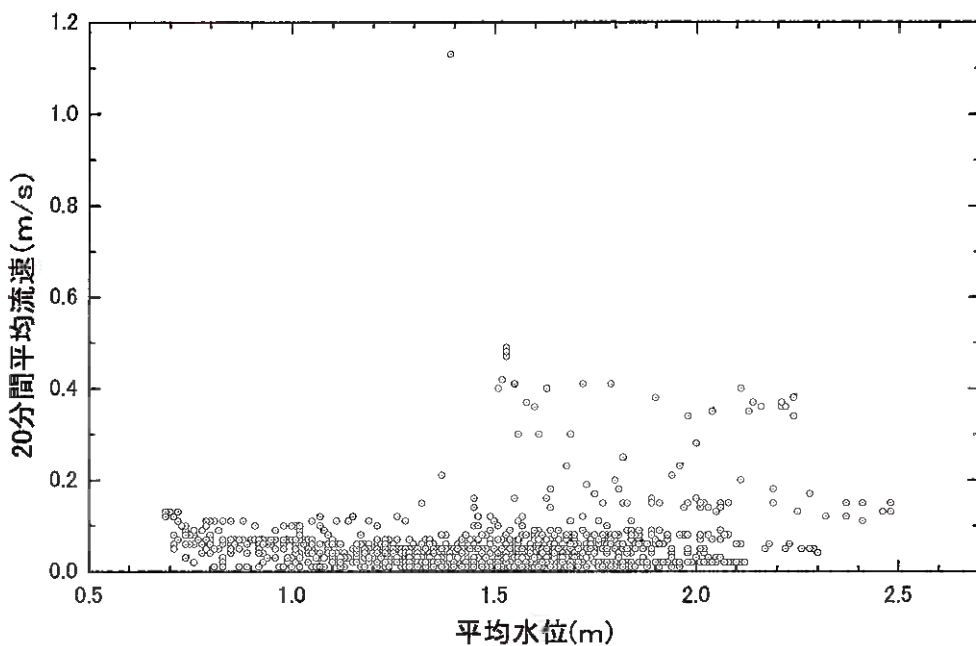


図 2. 2. 24 水位と流速の相関関係（海象計転倒以後）

観測期間中は、より水位が下がる時間帯は夜間から早朝にあるので、水位が下がると水温が下がる傾向と、平均水位が高めの日中は水温が上がる傾向に加えて、低低潮時付近の上げ潮の短時間だけ暖かい外洋水が流入する現象が重なり合っている。ただし、平均水位が高い方で平均水温が低いのは背後地の河川水が流入した可能性もある。

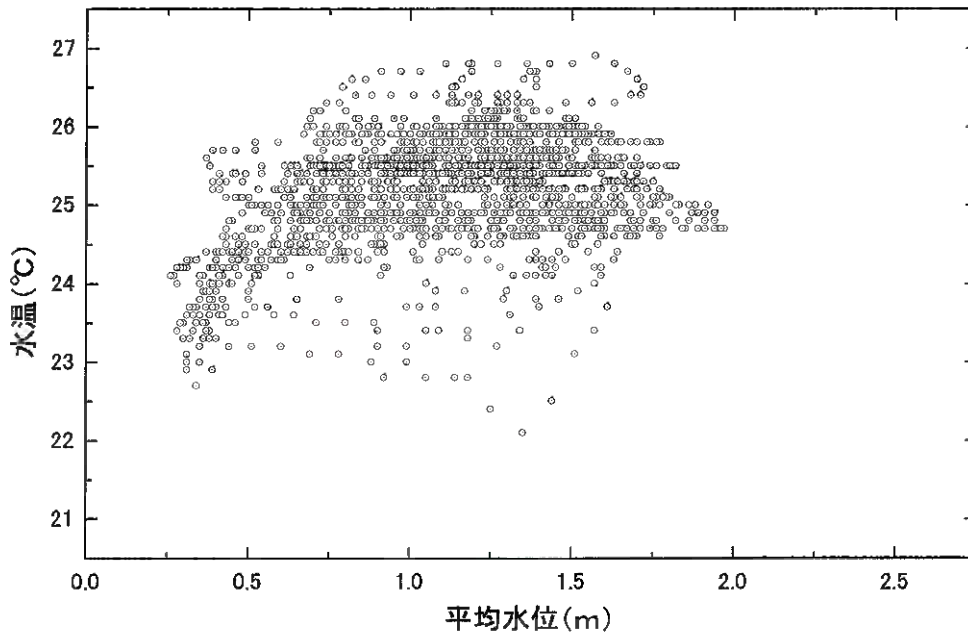


図 2.2.25 水位と水温の相関関係

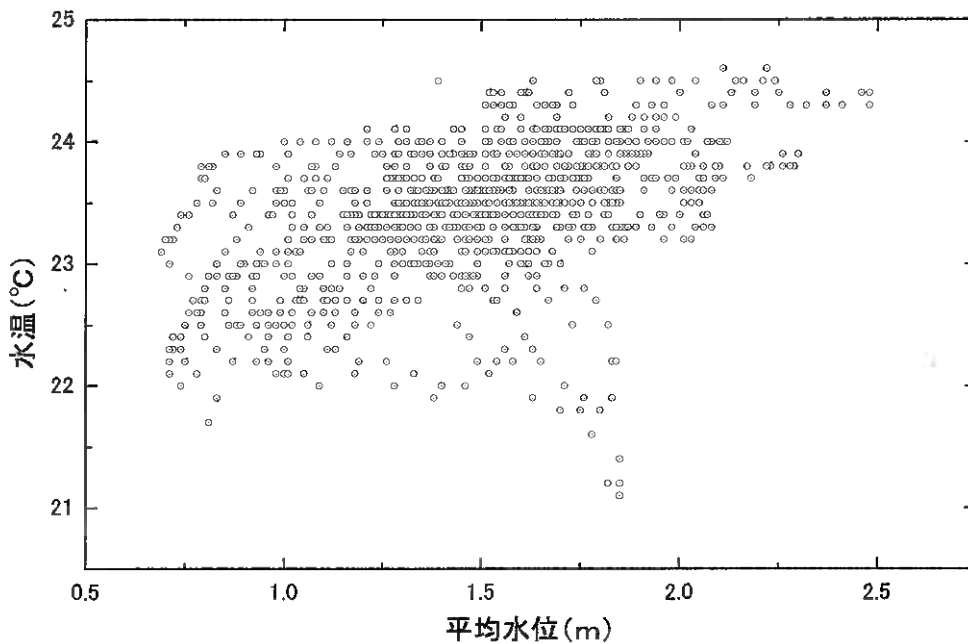


図 2.2.26 水位と水温の相関関係 (海象計転倒以後)

冬季においては、外洋の波が高くなると波による質量輸送の効果で、暖かい外洋水がリーフ内により輸送され、観測地点の水温が上昇するのではないかと考えられた。図 2.2.27 を見ると最大波高が 0.5m 以上になると水温が 25.5℃～26℃ の範囲にあり、水温がそれ以下に下がらない傾向にあることが分かる。また、最大波高が 0.1m より小さい場合は、基本的に風も波もほとんどない条件で、潮汐に伴う海水交換と日照条件だけが水温変動に寄与していると考えられ、水温は 23℃～26℃ の範囲で変化している。

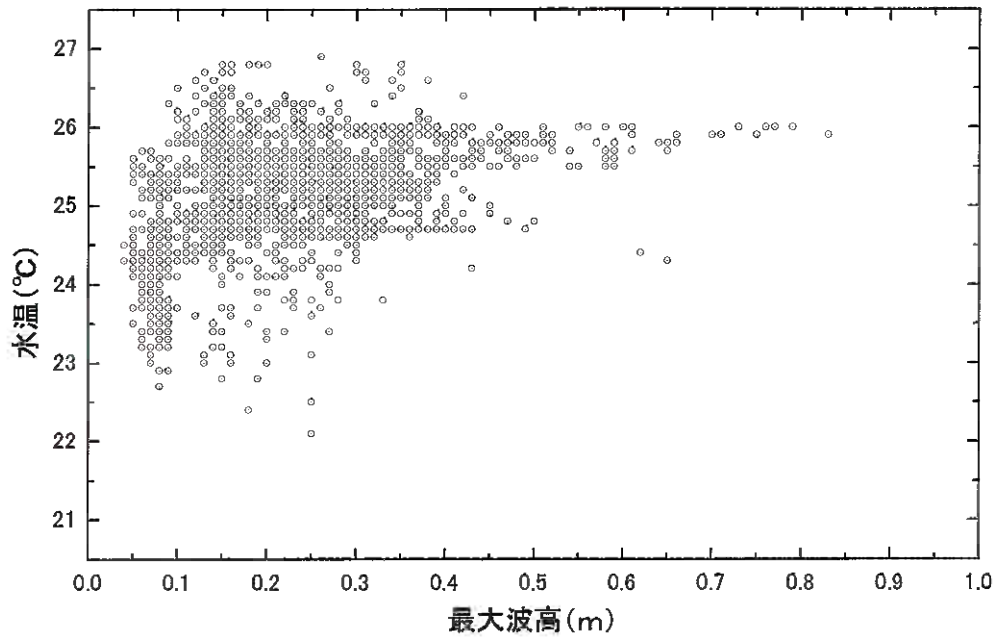


図 2.2.27 波高と水温の相関関係

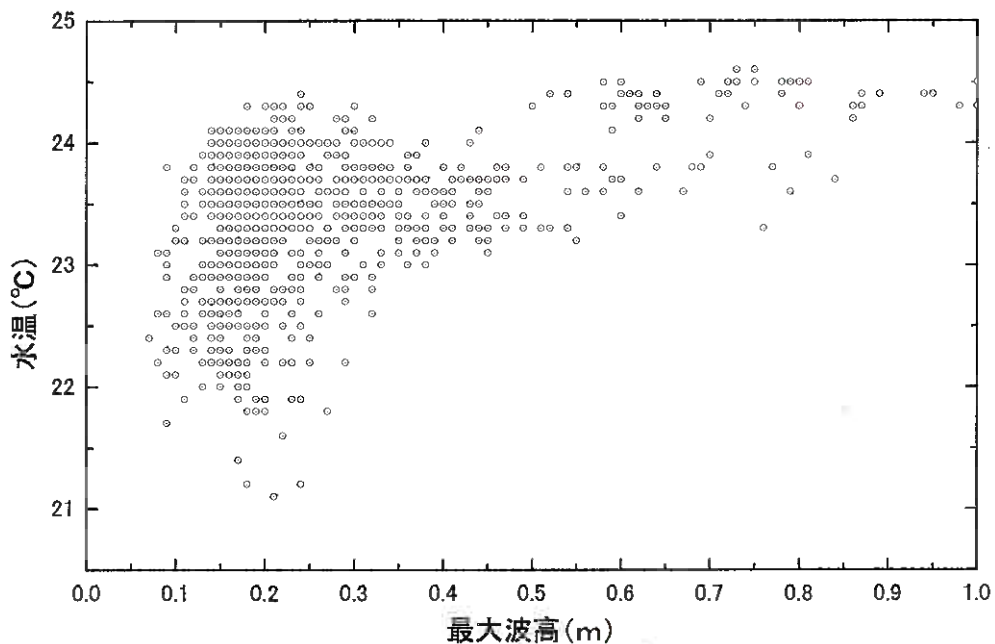


図 2.2.28 波高と水温の相関関係 (海象計転倒以後)

ロ 統計分析結果（流速出現頻度）

以下の図 2.2.29 と図 2.2.30 に 20 分間平均流速の頻度分布を観測機材転倒前後でそれぞれ示す。機材転倒前の平均流速をみると、安全な海域利用上の目安と言われる 0.2m/s を超える時間帯が非常に長く、さらに、水中作業上の閾値である 1 ノット (0.5m/s) を超える時間も本計測地点では長いことが特筆すべき点である。また、最大平均流速も 2m/s に達し、冬季においては海域利用上、気象・海象条件に十分な注意が必要なることを示している。なお、観測期間中の最大流速に関して、20 秒毎の瞬間流速を計測した電磁流速計の記録では、波群津波状の段波が入射しているときに約 6m/s の流速が計測されているので、水粒子の軌道流速成分に相当する流速に関しても注意が必要である。

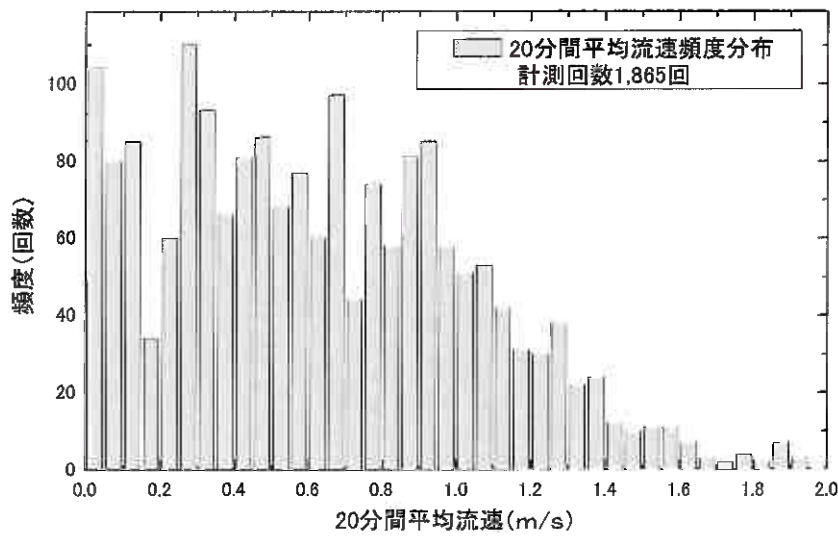


図 2.2.29 流速出現頻度分布

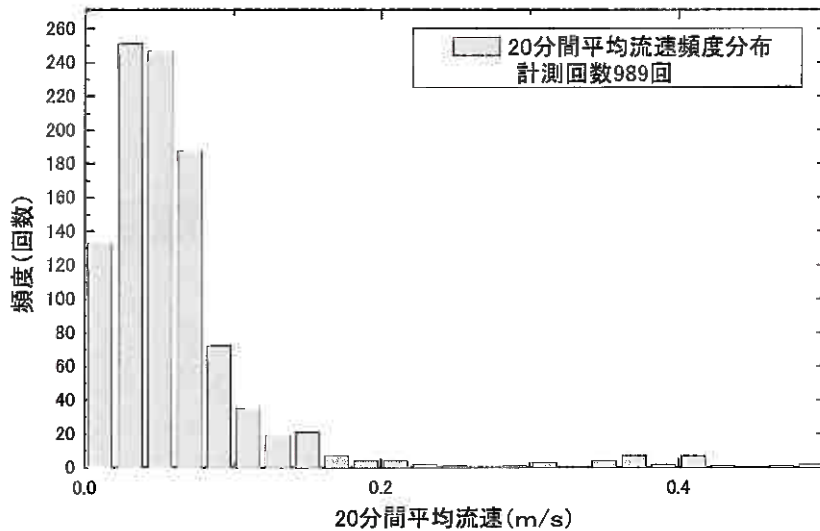


図 2.2.30 流速出現頻度分布（海象計転倒以後）

(4) 水路状微地形のリーフイノー側 10m地点での流速および水温特性

リーフカレント計測用に設置した Wave Hunter の上流側（礁池側）約 10m の海底面に設置した COMPACT-EM で計測された瞬間流速と海水温の記録を図 2. 2. 31 と図 2. 2. 32 に示す。流速変動の状況は、Wave Hunter で計測された様に、0～4日、4日～8日、8日～13日、17日～22日に、それぞれ風のフロントあるいは入射波浪が大きく変わったことによると推定される流速変動が顕著に表れている。しかも、本電磁流速計は海底面から約 10 cm の高さに設置されていることを考えると、リーフカレントは底面近傍でも数十 cm/秒というオーダーの強い流速を持つことがわかった。当然ながら、サンゴ礁海域の一般的な底質（砂）の限界流速はこのような観測値よりも小さいものであるために、本観測地点の海底面には砂が存在せずに、固いサンゴ礁だけが存在していた。

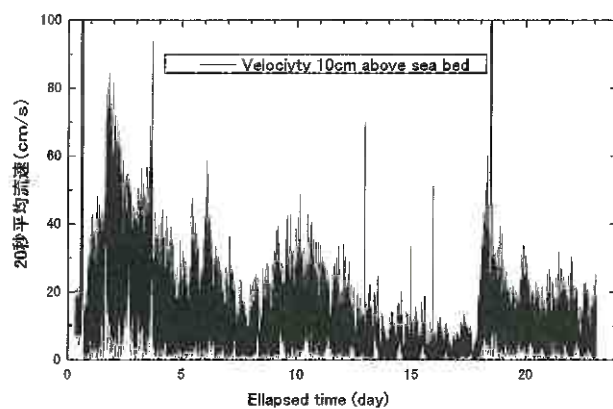


図 2. 2. 31 リーフカレント上流側（10m）での 20 秒間隔流速

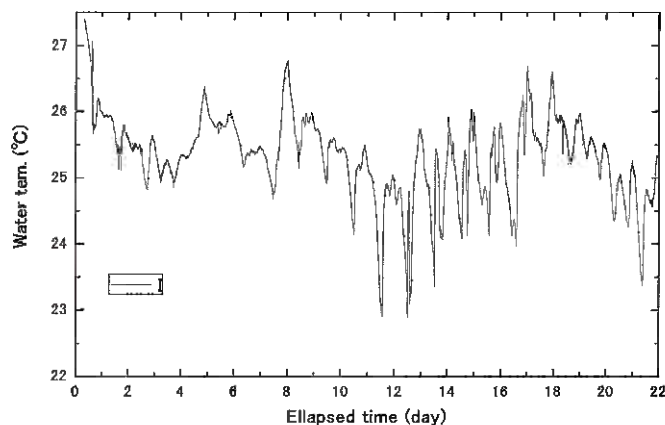


図 2. 2. 32 リーフカレント上流側（10m）での 20 秒間隔水温

(5) モニタリングカメラの画像による判読

海浜地の立木の地上高さ約 3.6mの所にモニタリングカメラを設置して、10 分間隔で当該海岸の状況を撮影した。その画像の例を、図 2.2.33 に、そしてその画像のズームアップを図 2.2.34 に示す。図 2.2.33 の画像は雲量が高く小雨の状況で撮影されたために全体的に暗く写っているが、点線で囲んだ領域に GPS フロート実験を行っている人影が認識可能である。本モニタリングカメラの位置は、図 2.2.35 の原点座標 (0 m, 0 m) であり、写真中の実験者は約 (130m, 140 m) 地点にいる状況である。写真原画のズームアップでは、リーフギャップの所在も認識可能であるので、もしも当該海岸で海域利用者が何らかの事故に遭遇した場合でも、事故状況の概略を把握するのに利用可能ではないかと考えられる。



図 2.2.33 モニタリングカメラの原画面像

図 2.2.34 原面のズームアップ

(リーフギャップと海域利用者の判読が可能)

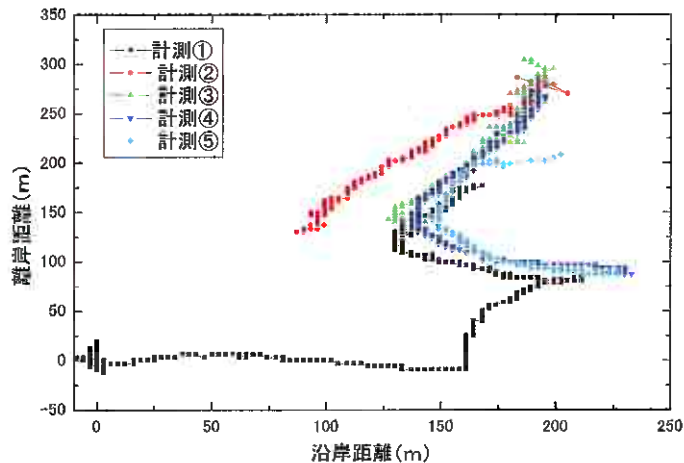


図 2.2.35 モニタリングカメラと対応した GPS フロート観測

2. 2. 3 石垣島調査結果のまとめ

(1) ダウンカレントの推定

平成18年11月2日に、リーフギャップ周辺では平均流速が2 m/sに達する強いリーフカレントが観測された。この時に、リーフギャップ周辺で水深が急激に深くなる辺りの状況を撮影したのが、図2.2.36である。横断面が急激に拡大するあたりに、浮力のある玉浮や発泡スチロール性のゴミが多数ある。これらのゴミは、リーフカレントに伴う水平流速が卓越しているのであれば徐々に沖に流されなければならないが、目視している間では、その位置がほとんど変わらなかった。つまり、開水路流れの段落部のように局所的に強い下向きの流れ（ダウンカレント）があるために沖に流されないのではないかと推測された。



図 2.2.36 リーフギャップ周辺のごみの集積状況

図 2.2.37 に示す測線を対象にイノーから沖合に流出する流れを数値モデルを用いて推算した。

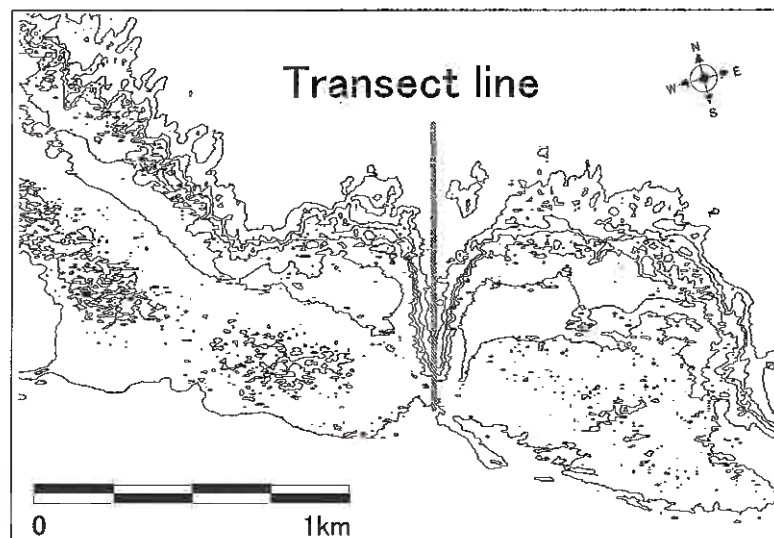


図 2.2.37 定常流の計算を行う測線

なお、本考察では、容易に解を求めるために SOL 法を用いた。支配方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \phi}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \phi}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4.3)$$

ただし

$$\phi = P / \rho$$

ここで、

u, w : 水平(x), 鉛直(w)方向の流速成分

ν : 動粘性係数 (μ / ρ)

μ : 粘性率

ρ : 密度

本数値計算に用いた格子図を、図 2. 2. 38 に示す。

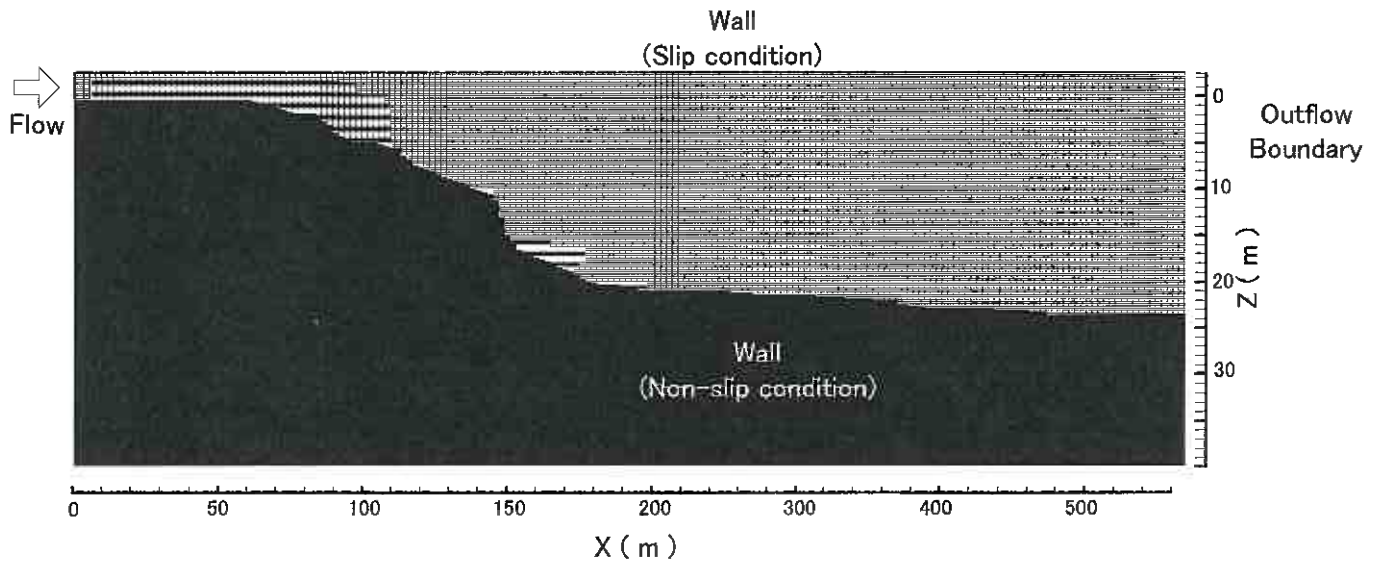


図 2. 2. 38 格子配置図

計算条件について、境界条件は海底面で流速が 0 となるノンスリップ条件とし、海面はスリップ条件とした。また、流出境界は速度勾配が 0 となる条件を採用した。本モデルは非定常計算モデルであるが、ここでは定常流を求めるため時間進行させずに、30,000 回の繰り返し計算回数を行った。

流入する流れは低潮時と高潮時を対象とし、インレットの水深を 50 cm 及び 250 cm の 2 ケースを対象とした。流入境界格子に与える流速は現地観測結果を参考に、 $U_{in}=1\text{ m/s}$ 、 2 m/s 、 3 m/s の 3 通りとした。

図 2.2.39 に高潮時を対象にした計算結果を示す。例えば、最も流入速度が大きい $U_{in}=3\text{ m/s}$ の場合、リーフエッジから 50m 沖合でも 1 m/s 以上の沖向きの流れが存在する。鉛直下向きの流れは地形の拡大に伴い、リーフエッジを先端から発生することがわかる。

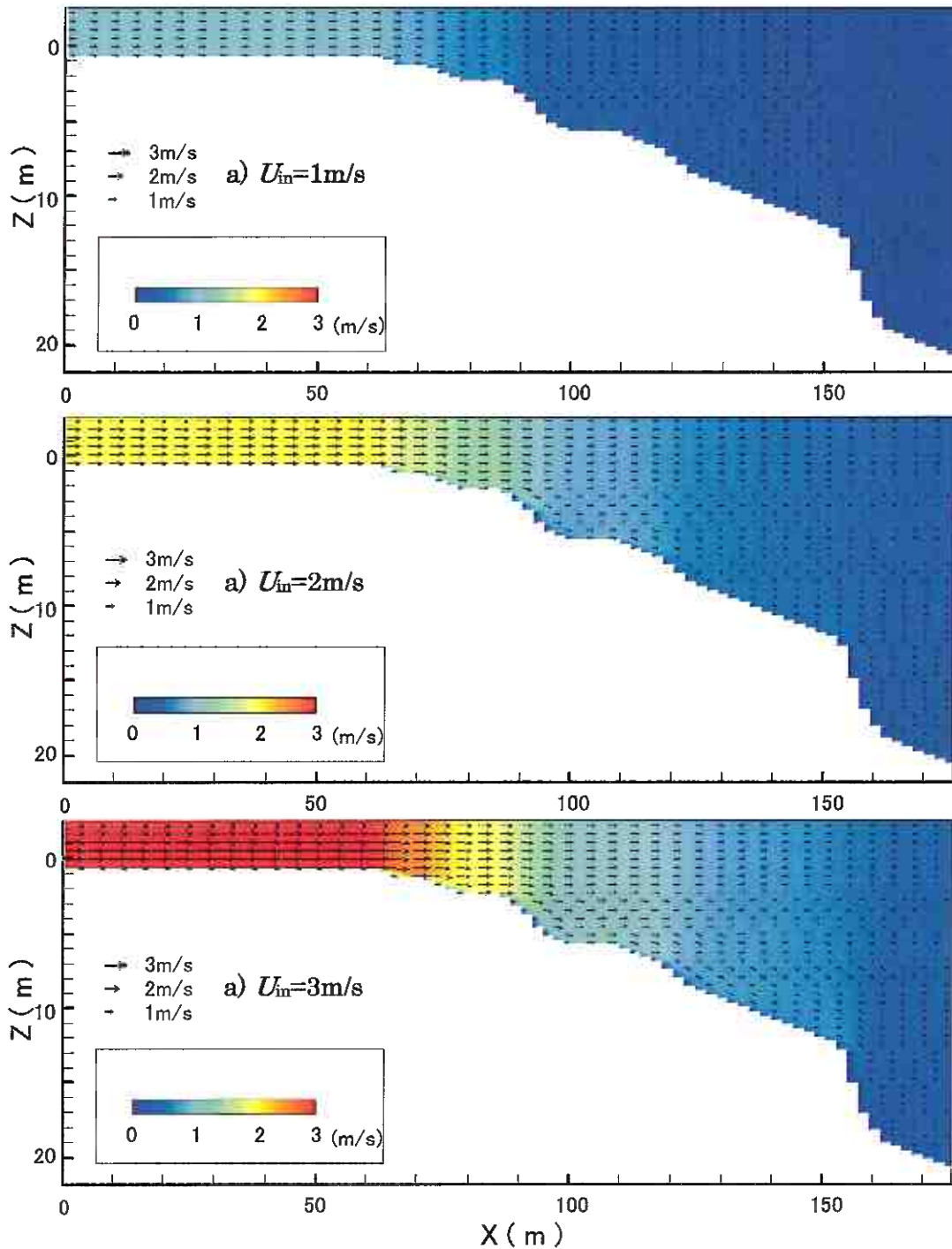


図 2.2.39 計算結果 (高潮時)

低潮時を対象にした計算結果を図 2.2.40 に示す。低潮時は水位が低く、流量が少ないため、早い流れの領域は高潮時（図 2.2.39）に比べて狭い。ただし、前例と同様に鉛直下向きの流れは、地形の拡大に伴い、リーフエッジを先端から発生する。

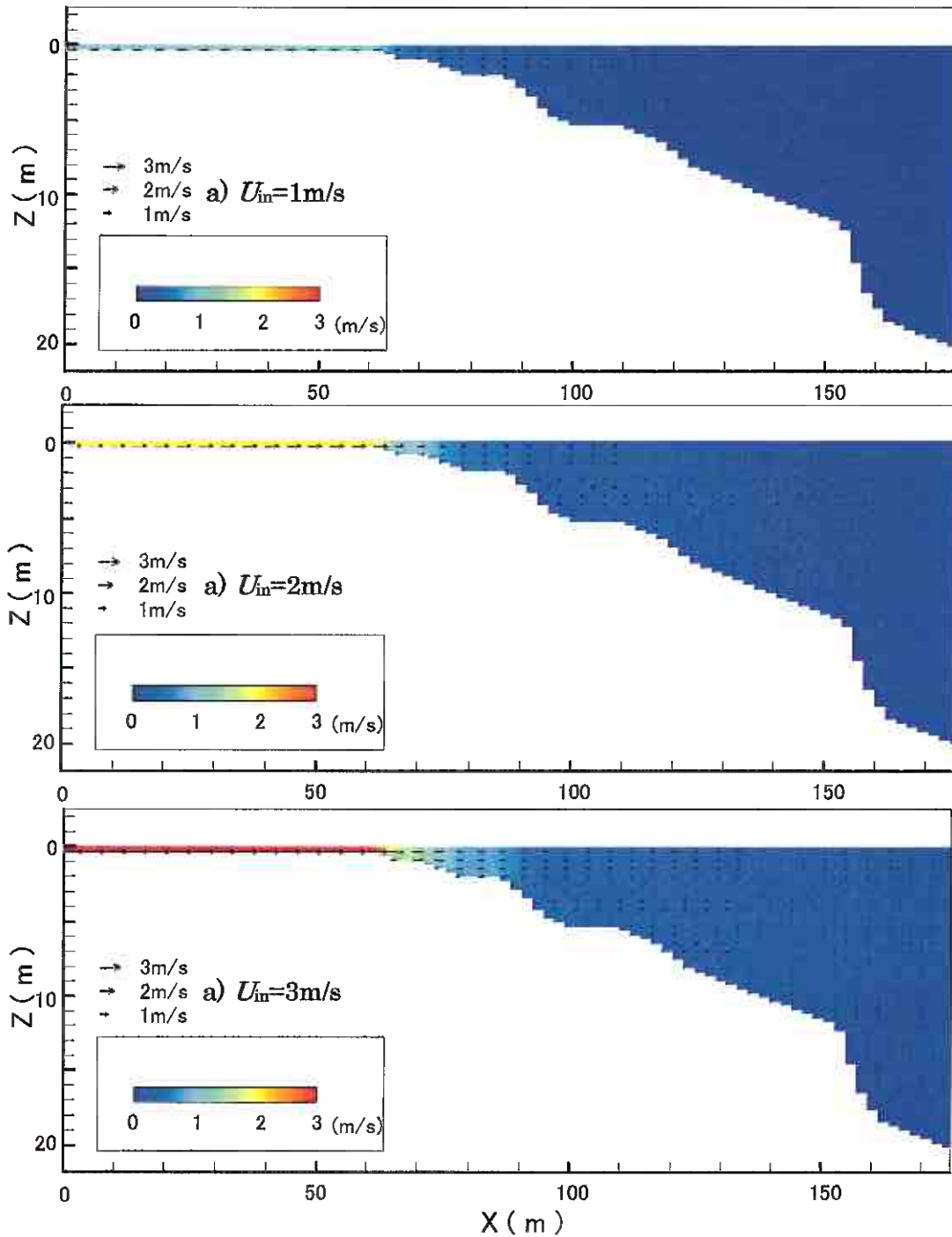


図 2.2.40 計算結果（低潮時）

(2) リーフカレントの実態と特性について

平成 18 年度までの観測で欠けていた冬季の観測結果について述べる。当該海岸は、黒潮の流れる東シナ海に面し、北に向けて開いた海岸であるために、リーフカレントの成長を助長すると考えられる海側からの風と入射波浪が冬季に定常的に作用しやすい海岸特性をもつ。今回の観測では、機材設置時から厳しい海象条件にあり、機材の設置、観測、および回収が順調に進まなかった反面、観測結果には従来観測されたことのないようなリーフカレントが測定された。平均流速で 2 m/s に達するようなリーフカレントの記録が得られたこと自体が、学術的にも、安全教育上も非常に有意義なものと言える。

なお、以下に示すような結論が得られた。

- イ 定常的な北（海側）からの冬季季節風と入射波浪が卓越する観測期間においては、リーフカレントの流速の絶対値は潮汐に応じて変化するが、流向はほぼ外洋側に固定されており、結果として冲向流れ（リーフカレント）が常時形成されがちである。
- ロ 海底面近傍であっても流速が数十 cm/s を超えていることから、リーフカレントは鉛直方向の減衰が顕著でないことが分かる。また、このことから数値計算を行う場合には底面の境界条件として slip 条件を使用することが望ましいと言える。
- ハ GPS フロート観測によれば、当該海岸では、季節にかかわらずリーフカレントが空間的に同じ個所で発生していた。したがって、リーフカレントは空間的な変動性が少ない水理現象と言える。
- ニ 冬季の観測結果からは、西高東低の気圧配置による風の発達およびその結果としての波の発達が、リーフカレントの強化要因として重要なことが示唆された。
- ホ 本モニタリングカメラ程度の解像度があれば、当該海岸程度のサンゴ礁海域の場合には海域利用者の利用状況あるいは事故状況の判読に十分役立つ可能性が示された。
- ヘ リーフカレントを測定するという目的の下では、現在の観測機器設置法及び回収法は安全が確保されているとは言い難く、今後の観測では何らかの改善が望まれる。
- ト 簡易的な数値計算からは、サンゴ礁上のリーフカレントの速度（水平吹出し速度）が $2\sim 3\text{ m/s}$ のオーダーであれば、リーフギャップサンゴ礁斜面上で、海域利用上リスクの高い流速が発生する可能性のあることが分かった。

第3章 広報活動

3.1 講演会の開催

本事業の委員会の委員長である津嘉山正光琉球大学名誉教授にリーフカレントの啓発の一環として沖縄県那覇において以下の講演を行っていただいた。

- (1) 開催日時：平成19年9月12日 15時～17時
- (2) 開催場所：第十一管区海上保安本部会議室
- (3) 講演題目：「珊瑚海岸の波と流れ」
- (4) 参加者：以下の組織から約80名の関係者が参加した。

1	第十一管区海上本部
2	海上保安友の会
3	沖縄電力
4	沖縄気象台
5	沖縄県農林水産部
6	海上自衛隊
7	東部消防組合消防署
8	島尻消防清掃組合消防本部
9	国頭地区行政事務組合消防本部
10	宜野湾市消防本部
11	比謝川行政事務組合ニライ消防本部
12	浦添市消防本部
13	沖縄県海洋レジャー事業共同組合
14	ダイビングサービス カフウ
15	(独) 情報通信研究開発機構沖縄亜熱帯計測技術センター
16	海洋研究開発機構国際海洋環境情報センター



講演風景

3. 2 啓蒙資料の作成配付

尾鷲沖調査および石垣島（吉原海岸）調査結果から以下のリーフレットを作成し、海上保安庁等から関係者に提供する。



日本財団
The Nippon Foundation

リーフカレントに ご注意ください！

リーフカレントとは、サンゴ礁の縁で潮が引くとリーフ内の海水が礁嶺の切れ目狭い場所に集中して沖合いへ流出する強い流れのことを言います。



サンゴ礁のリーフカレントは
切れ目に集中！



注意！ここにリーフカレント

図説：干潮時に水面の上に出てくるところ



強い流れが発生！

⚠ 保護者の方々・
引率の先生方へ

子供は体弱りに目が届かないことが多ります。必ず、景観音が安全に遊べるかどうか確認をお願いします。

サンゴ礁で楽しむ前に・・・

- 風の強い時、リーフ外の波が高い時はリーフの縁に近づかないようにしましょう。
- 海が穏やかでも流れが強い場所があるので注意しましょう。
- 最寄の関係機関への問い合わせ等、事故発生の有無や地形の情報を事前に入手しましょう。
- ライフジャケットを着用し、携帯電話を防水バックに入れて身につけましょう。

(第十一管区海上保安本部HP ⇒ <http://www.kaiho.niit.go.jp/11kanku/>)

リーフカレントに遭遇したら・・・

- 流れに逆らわず、流れを横切るように泳ぎましょう。
(岸向きに泳いでも逃げきれない可能性が高いです)
- リーフの外に流されてしまったら、流れが弱まってからリーフ沿いに泳ぎ、一番近い陸地を目指しましょう。
- 救助が必要なときは、海の緊急通報118へ電話しましょう。

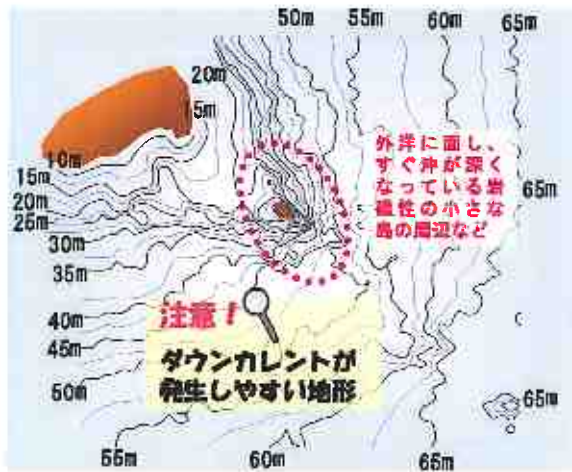
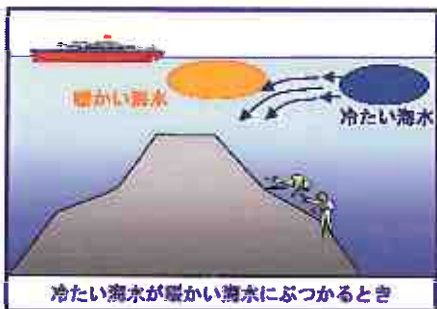
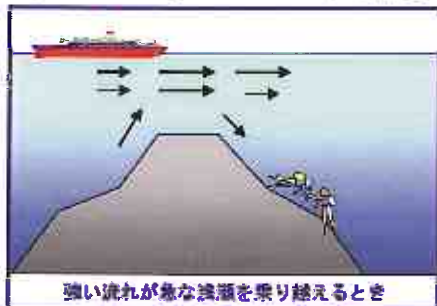
〒144-0041
東京都大田区羽田空港
1-5-6 第一総合ビル6F
TEL 03-5708-7076
FAX 03-5708-7075

図 3.1 リーフカレントの注意喚起のリーフレット

ダウンカレントに ご注意ください!!

ダウンカレントとは、さんご礁のエッジや岩礁域などの急峻な海底地形で発生する下向きの流れのことです。

【ダウンカレントの発生要因】



★岩礁域はダイビングス
ポットで、様々な生物を
観察できますが、
十分注意して下さい。

- 岩礁域に近づく前に・・・**
- 最寄の関係機関への問い合わせ等、事故発生例の有無や地形の情報を事前に入手してください。
 - 突然発生することがありますので、常にガイドやパティの位置関係を留意し、単独行動にならないようにしましょう。
 - ダイビングする場合はガイドの注意を良く聞き、流れの強いときは急斜面でのアプローチを避けましょう。
- (第四管区海上保安本部HP ⇒ <http://www.kaiho.mlit.go.jp/04kaniku/>)

- ダウンカレントに遭遇したら・・・**
- エア残圧に余裕がある場合は、落ち着いて近くの岩場につかまり、流れが弱まるのを待ちましょう。
 - エア残圧に余裕がない場合は、BCジャケットの活用やウエイトを捨てることにより浮力を確保し、脱出に努めましょう。
 - 救助が必要なときは、海の緊急通報118へ電話しましょう。

〒144-0041
東京都大田区羽田空港
1-5-6 第一綜合ビル6F
財団法人 日本水陸協会
TEL 03-5708-7076
FAX 03-5708-7075

図 3.2 ダウンカレントの注意喚起のリーフレット

この報告書の内容に関するお問い合わせは、下記宛にお願いします。

財団法人 日本水路協会 調査研究部

〒144-0041 東京都大田区羽田空港1-6-6

Tel 03-5708-7076 Fax 03-5708-7075

E-mail cho-sa@jha.jp

財団法人 日本水路協会 発行