

熊野灘沿岸におけるダウンカレント発生機構 解明のための現地観測

FIELD OBSERVATION FOR GENERATION MECHANISM OF DOWN CURRENT NEAR THE COAST OF KUMANO NADA

神野有生¹・鯉渕幸生²・西隆一郎³・鈴木覚⁴・神田広信⁵・磯部雅彦⁶

Ariyo KANNO, Yukio KOIBUCHI, Ryuichiro NISHI, Satoru SUZUKI,
Hironobu KANDA and Masahiko ISOBE

¹学生会員 環修 東京大学大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

²正会員 工博 東京大学講師 大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

³正会員 工博 鹿児島大学准教授 水産学部水産学科 (〒890-0065 鹿児島市下荒田4丁目50-20)

⁴学生会員 東京大学大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

⁵非会員 理修 国際航業株式会社 東日本河川・環境部 (〒183-0057 東京都府中市晴見町2-24-1)

⁶フェロー 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

With the popularization of diving, its safety is an important issue. One of the factors of serious diving accidents is an abrupt downflow called “down current” by divers. However, its reality and mechanism are poorly understood. In order to make them clear, a continuous observation of current, wave, temperature, and salinity at the fatal accident site near the coast of Kumano Nada was conducted.

In the 15 days of observation, we succeeded in observing downflows with vertical velocity up to 22cm/s. Some of the major downflows were accompanied by oscillations of velocity, temperature, and salinity, which were associated with long-period waves. By analyzing an aerial photograph and satellite images, the frequent existence of a density interface between river water and seawater on the accident location was discovered. It is concluded that this interface, along with the steep slope topography, would convert horizontal velocities into vertical ones, and thereby be a cause of “down current.”

Key Words : down current, diving accident, Kumano Nada

1. はじめに

ダイビングの普及に伴い, その安全確保が重要な課題となっている. ダイバーの間で恐れられている事故要因の1つに, ダウンカレントと呼ばれる急激な下降流がある. ダウンカレントはダイバーを下方へ輸送し, 空気の不足やパニックなどの危険な状況を招くため, 十分な注意が必要であるが, その発生箇所や発生条件について, これまで現地をよく知るダイバーの経験に頼ってきたのが実情であり, 学術的な知見は十分に蓄積されていない.

そこで本研究では, 実際にダウンカレントによるダイビング中の死亡事故が発生した, 熊野灘沿岸の三重県尾鷲市地先を対象に流速などの連続観測を行い, ダウンカレント発生の実態および発生機構を解明することを目的とする.

2. 現地観測

三重県熊野市から志摩半島に至る熊野灘沿岸は, 起伏に富んだリアス式海岸を持ち, 黒潮系暖水¹⁾の影響でサンゴや色鮮やかな回遊魚が見られることから, ダイビングが盛んに行われている海域である. 2005年3月20日, 図-1に示す三重県尾鷲市桃頭島

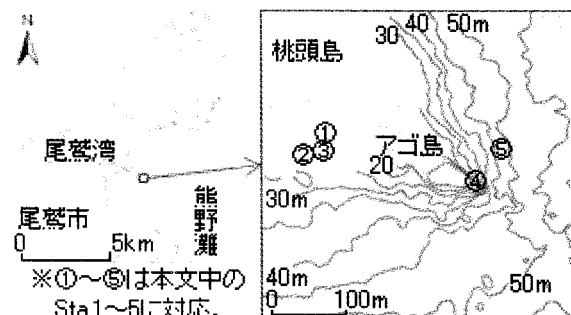


図-1 観測海域 (左) と観測地点拡大図 (右)

沖のアゴ島付近において、ダウンカレントが原因とみられるダイビングツアー参加者の死亡事故が発生した。事故の概要は、第四管区海上保安本部のWEBサイト(<http://www.kaiho.mlit.go.jp>)を参照されたい。事故の被害者がダウンカレントに遭遇した正確な位置は不明であるが、被害者は水深約30mの地点で発見されたため、より浅い地点でダウンカレントに巻き込まれたものと考えられる。そこで本研究では、桃頭島・アゴ島間およびアゴ島沖の浅部を中心に、2007年6月17日から7月1日までの15昼夜、流速・水位・水温・塩分の連続観測を行った。

主な設置機器と設置位置・観測内容を表-1に示す。流速の観測にはアレック電子社製の自記式電磁流速計 Compact-EM、および RD Instruments 社製の超音波式ドップラー多層流速計（以下、ADCP）である Workhorse ADCP(1200kHz)を用いた。水位の観測にはアイオーテック社製の波浪計である WAVE HUNTER を、水温・塩分の観測にはアレック電子社製の Compact-CT を用いた。ADCP と WAVE HUNTER はトランスデューサーを上向きに底面設置し、その他の機器はブイにより係留した。桃頭島・アゴ島間では、各機器を相近い Sta.1~Sta.3 に設置した。一方アゴ島沖では、急斜面上のわずかな平坦部である Sta.4 に ADCP を設置した。この平坦部は、ADCP の

架台（大きさ約 1m×1m）が辛うじて設置できる程度の小さな棚状地形であり、付近は急斜面であるため、その他の機器は約 60m 離れた Sta.5 に係留した。

3. 観測結果

(1) 観測期間中の気象・海象

図-2(a)~(c)に、(a)東京管区気象台尾鷲測候所に

表-1 各観測地点における観測内容

観測地点	観測項目	観測水深 [m]	観測機器	測定間隔 [min]
1	流速	2~14	ADCP	1
2	流速・水温	2,6	Compact-EM	5
2	水温	2,8,15	Compact-CT	1
2	塩分	2,8,15	Compact-CT	1
3	水位	-	WAVE HUNTER	30
4	流速	2~16	ADCP	1
5	流速・水温	2,6	Compact-EM	5
5	水温	2,23,45	Compact-CT	1
5	塩分	2,23,45	Compact-CT	1

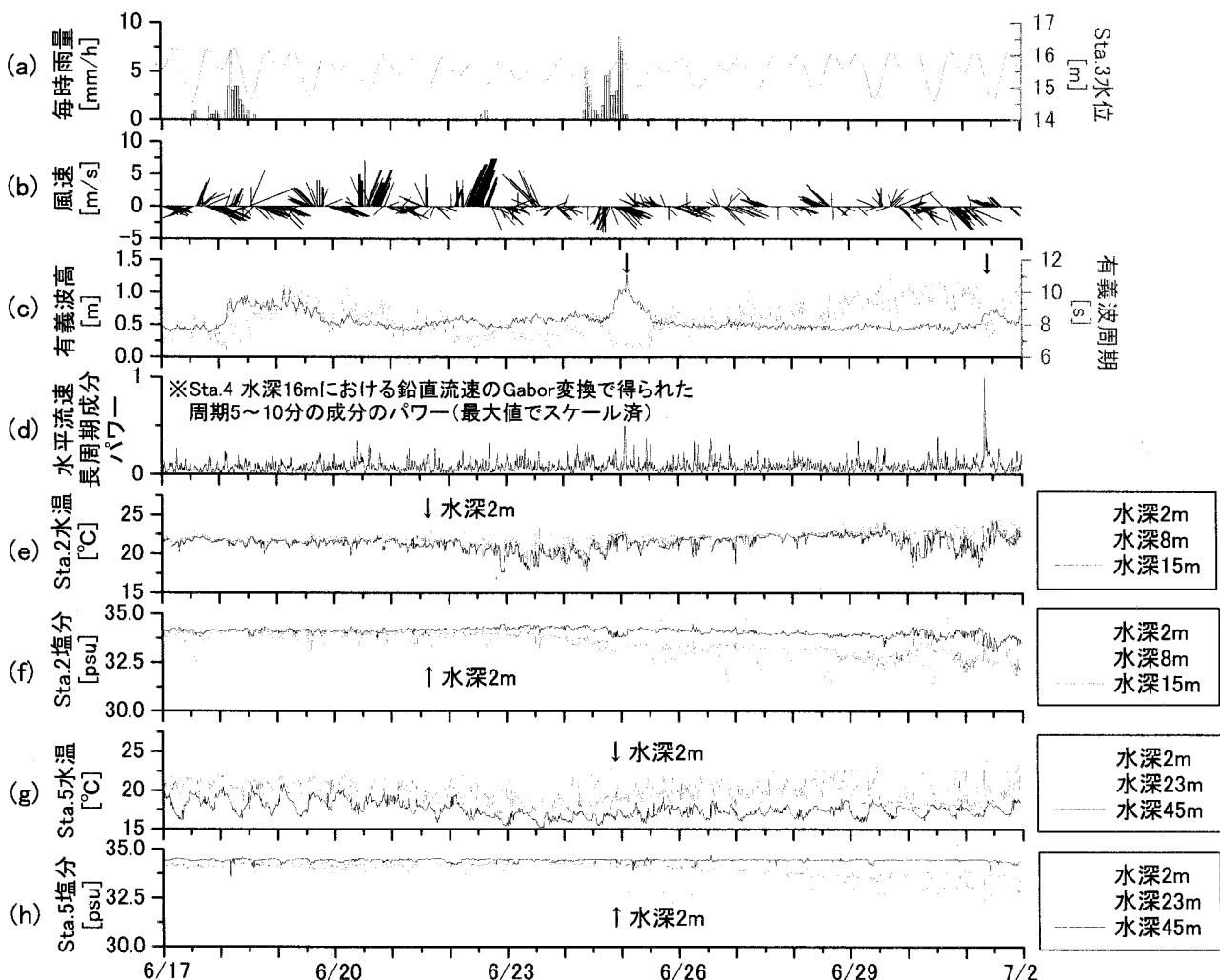


図-2 観測期間中の雨量、水位、有義波高、有義波周期、水平流速長周期成分のパワー、水温、および塩分の時系列

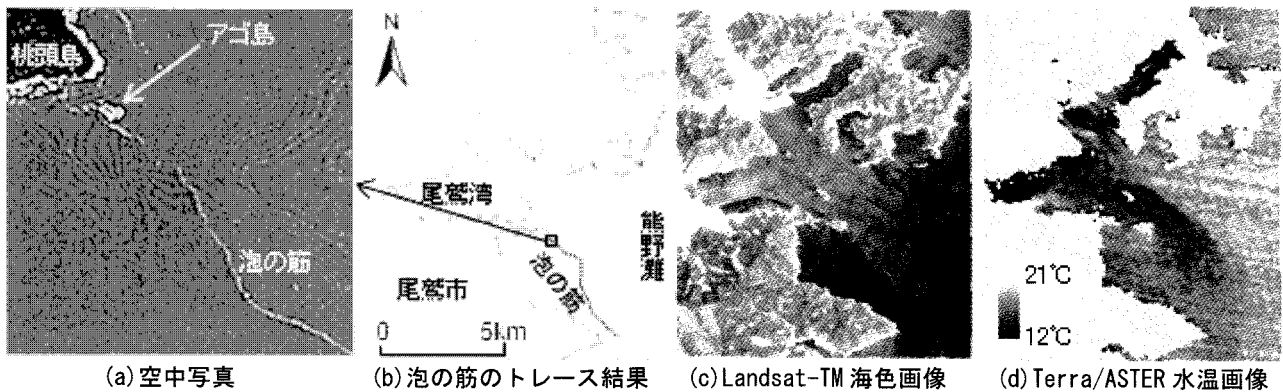


図-3 空中写真・衛星画像で観察された密度フロント

おける毎時雨量とSta. 3の水位, (b)桃頭島灯台における風速ベクトル, (c)Sta. 3における有義波高および有義波周期をそれぞれ示す。風速と有義波高の期間平均はそれぞれ2.4m/s, 0.55mであり, 全体的には穏やかな海況であった。ただし, 6月18日から6月19日にかけては, 有義波高と有義波周期が前後より大きい状態が続き, 西北西の風の持続的な吹送やうねりの到来が原因と考えられる。また, 図-2(c)中に矢印で示した6月25日2時頃と7月1日8時頃には, 有義波高が大きくなると同期して有義波周期が短くなる現象が観察され, 周期の短い風波が発達したものと考えられる。さらに梅雨前線の影響により, 6月17日から18日にかけて33mm, 6月24日から25日にかけて55mmの降雨があった。

(2) 流況

a) 水平流速・流向

観測された流れの時間変化は複雑であり, 潮汐の位相や水位, 風との単純な対応関係は見られなかった。ADCPを設置したSta. 1とSta. 4における水平流速の, 全層に関するスカラー平均値はそれぞれ7.0, 8.9[cm/s], 最大値はそれぞれ50, 66[cm/s]であり, Sta. 4の方が速い流況であった。Sta. 1の流向は, 桃頭島とアゴ島の間の水路状地形を反映した, 東北東⇄西南西方向が卓越した。一方, Sta. 4における流向は, 海底上8mまでは急斜面の等深線に沿った北西⇄南東方向の流れが卓越したが, それで浅では北東⇄南方向の流れが頻繁に出現した。Sta. 4の流れは, 海底に近づくほど等深線に沿うことから, 潮流などが急斜面にトラップされた流れであると考えられる。

b) 水平流速の周期成分

水平流速時系列全体のスペクトル解析を行った結果, いずれの観測点についても1/4日周期成分または1/2日周期成分が大きかった。つまり本海域の流動は, リアス式海岸地形を反映して複雑ではあるものの, 主に潮汐によって駆動されていると言える。さらに, 水平流速時系列にGabor変換(短時間フーリエ変換)を施して, より短周期の成分の非定常性を調べた。Sta. 4の水深16mにおける水平流速時系列の南北成分に関する, 5~10分の周期成分のパ

ワーを図-2(d)に例示する。このパワーはいくつかの大きなピークをもち, 水平流速が時に長周期波や, それがリアス式海岸地形にトラップされた固有振動の影響を受けていることがわかる。パワーの顕著なピークが, (1)で述べた風波の発達時(6月25日2時頃と7月1日8時頃)に同期していることから, 波群性長周期波(setdown波)が振動の成因の1つとして想定される。

(3) 水温・塩分の概況

a) 降雨の影響

図-2(e)~(h)に, Sta. 2とSta. 5において観測された水温・塩分の時系列を示す。6月17日から18日にかけて33mmの降雨があったにも関わらず, Sta. 2とSta. 5の水深2mにおける塩分は23日まで, 持続的に低下することがなかった。ところが, 6月24日から25日にかけての55mmの降雨の直前から, Sta. 2の水深2m, 8m, 15m(全層)と, Sta. 5の水深2m, 23mにおいて, 観測期間終了まで続く長期的な低塩分状態が始まった。このように本研究で観測したアゴ島付近の塩分環境は, 降雨に鋭敏に応答しないことから, 流域面積の比較的大きな河川やダムを擁する内湾である尾鷲湾の影響を受けていることが示唆される。過去の調査で, 尾鷲湾の表層流況に関して, 外洋系水が北岸沿いに流入し, ダム放流水を含む湾内水が南岸沿いに流出する傾向が確認されており²⁾, 上記の推察が裏づけられる。

b) 密度フロントの存在

またSta. 2では, 大潮の低潮時に, 1psu程度以上の塩分低下と最大約2°Cの水温上昇が, 急激に, 時に不安定な振動を伴って生じる現象が見られる。Sta. 5においても, Sta. 2とほぼ同期した塩分低下・水温上昇が観察される。このことから, 上記の尾鷲湾由来の低塩分水塊と, 相対的に高塩分の水塊との密度フロント(潮目)がアゴ島付近に存在し, 不安定に移動していることが示唆される。

図-3(a)に, 海上保安庁が1999年12月1日の満潮時に撮影した空中写真の一部を示したが, アゴ島付近に, 白い泡の筋が確認できる。このような泡の筋は, 観測機器の設置準備や回収を行った2007年6月15日や2007年7月2日にも船上から観察され,

泡の筋上には浮遊物（木枝）も確認された。この空中写真と、その撮影後 20 分の間に撮影された隣接海域の空中写真について、泡の筋をトレースした結果、図-3(b)のように、泡の筋は桃頭島からアゴ島を経て南東に伸びていた。一般に水塊の境界には気泡などが集まりやすいことから、この泡の筋は、上記の密度フロントに一致する可能性がある。

この仮説を裏付けるため、衛星画像の解析によって、泡の筋の位置での水質差を確認した。図-3(c)には、Landsat-TM センサが 1981 年 6 月 1 日の干潮時に撮影したトゥルーカラー画像（空間解像度 30m）に対し、ヒストグラム平坦化処理を施して色の差異を強調した結果を示す。さらに図-3(d)には、Terra 衛星 ASTER センサが 2007 年 1 月 10 日の満潮時に撮影した熱赤外画像（空間解像度 90m）から、松永³⁾の提案した推定式を用いて海面水温を推定した結果を示す。図-3(c)(d)ともに、図-3(b)に示した泡の筋の位置と近い位置に、海色と水温の境界がそれぞれ見られ、泡の筋が水塊の境界であることを示している。図-3(d)では、解像度と縞状ノイズの影響により、泡の筋の位置での色の差が図-3(c)ほど明瞭でないが、尾鷲湾に流入した低温の河川水が、湾の南岸沿いに熊野灘へ移流・拡散している様子や、アゴ島以南により外洋に近い水温の水塊が分布している様子が見て取れる。なお、尾鷲湾奥南部の高温水塊は、火力発電所の温排水⁴⁾であり、河川水との相互作用によって、尾鷲湾の温熱環境を大きく変化させることが知られている⁵⁾⁶⁾。

以上から、空中写真と現地観測で観察された泡の筋は、尾鷲湾へ流入する河川を起源とする低塩分水が、湾の南岸沿いに熊野灘へ流出する際に、アゴ島以南に存在する、より外洋水に近い水塊との間に形成した密度フロントであると考えられる。この密度フロントは、今回調べた範囲で季節や潮汐位相に関わらず観察されたことから、アゴ島付近を通して頻繁に存在しているものと推測される。

図-3(d)で、河川水が外洋水より低温であることは、一見上記の、Sta. 2 において塩分低下と同時に水温上昇が生じる現象と矛盾するように見える。しかし、本研究の観測が夏季、衛星画像の撮影が冬季に行われたこと、および河川水が火力発電所の温排水に影響されることを踏まえれば、密度フロント両側の水温の高低に変動が生じることは自然である。

(4) ダウンカレント

Sta. 1 と Sta. 4 の各水深における、下向きを正と

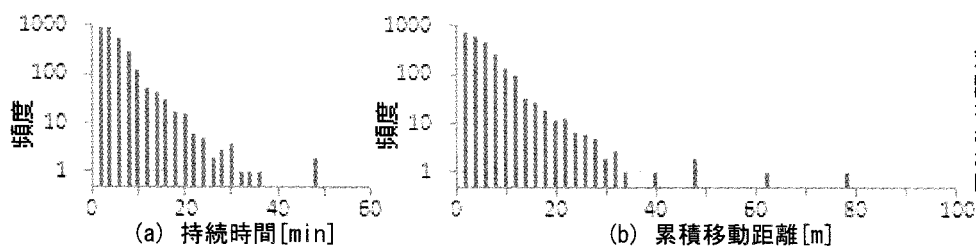


図-6 ダウンカレントの持続時間と累積移動距離の頻度分布および比例関係

した鉛直流速の平均値、最大値、および全時系列データ（21601 点）に対する欠測率を図-4(a)～(c)に示す。図-4(c)のように欠測率は、Sta. 1 では表層を除いてほぼ 0 である一方で、Sta. 4 では表層に近づくほど大きく、水深 2m においては 18%に達している。このように Sta. 4 では欠測率が高いにも関わらず、図-4(b)のように、各水深で Sta. 1 より下向き流速の最大値が大きい。また、水深 14m における下向きを正とした鉛直流速の頻度分布を図-5に例示するが、Sta. 4 は Sta. 1 に比べ大きな鉛直流速を頻繁に記録している。以上から、Sta. 4 は Sta. 1 に比べて強いダウンカレントが発生しやすいと考えられるため、以下では、Sta. 4 で観測されたダウンカレントに焦点を絞って議論する。なお欠測は、気泡や密度フロントにおける音波の散乱・反射などによるものと考えられるが、時系列の前後で大きな鉛直流速が観測されている際に多く見られたため、実際には、本研究で測定できたものより若干強いダウンカレントが発生していた可能性がある。

Sta. 4 で欠測率が最小であった水深 16m の時系列について、連続して下向きの鉛直流速が観測された区間を 1 ケースのダウンカレントとして数え、その持続時間と累積移動距離に関する頻度分布を図-6(a)(b)に示す。ここで累積移動距離は、鉛直流速の区間積分値であり、中性浮力をもつ受動粒子が下方に輸送される距離を表している。時系列は 1 分間隔なので、例えば時系列上で 3 点連続して 5cm/s の

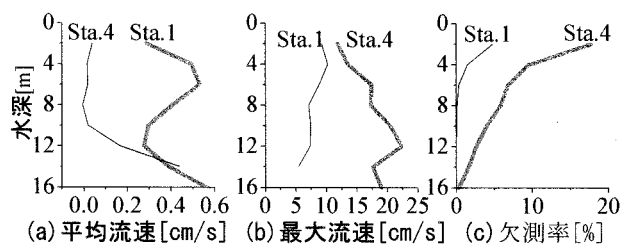


図-4 下向き鉛直流速の平均値・最大値・欠測率

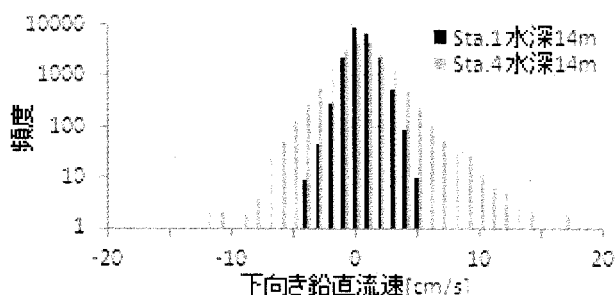


図-5 観測時系列における下向き鉛直流速の頻度分布

下向き鉛直流速が観測された区間は、持続時間 3 分、累積移動距離 9m となる。図-6(a) (b) から、ダウンカレントの頻度は、持続時間や累積移動距離の増加とともに指数関数的に減少する傾向を持っていることがわかる。持続時間に関しては、全 2966 ケースのうち 94% は 10 分以内、99% は 20 分以内であった。また図-6(c) のように、累積移動距離は持続時間との間に傾き 0.95m/min (1.6cm/s) の比例関係を持ち、多くのケースでは流れが緩やかであることが確認できる。しかし、5 分間で 25m を輸送するケースなど、強く体感されないとしても、中性浮力を保つダイバーの視点では注意を要するケースもみられた。

Sta. 4 における観測期間中の最大下向き流速は、6 月 25 日に水深 12m で観測された 22cm/s であった。この流速を観測したダウンカレントの際の水平・鉛直流速・水温・塩分時系列を図-7 に示す。欠測のなかった水深 14m について上記の方法で計算すると、持続時間は 9 分、累積移動距離は 65m に達する。ところが、約 60m 離れた Sta. 5 における水温・塩分の応答は小さく、ダウンカレントは地形などを反映した局所的なものであることが示唆される。

Sta. 4 で観測されたダウンカレントには、図-7 の場合のように単発的で、Sta. 5 における水温・塩分の応答が小さいタイプの他に、図-8 に例示するように、周期 5~10 分の鉛直流速の振動を伴い、Sta. 5 においても水温・塩分が振動的に反応するタイプが観察された。図-8 の振動期間には、全層で周期約 7 分かつ同振幅・同位相の鉛直流速振動が生じている。さらに図-9 に示すように、水平流速のスペクトルに関してほぼ同周期に振幅のピークが見られた。以上から、この振動の原因として(2)b) で議論した長周期表面波が疑われる。しかし、一般に長周期波の楕円運動の軌道流速は水平成分が卓越するため、図-8 の振動時のような水平振幅と同程度の鉛直振幅は、長周期波のみでは説明できない。つまり Sta. 4 においては、水平振動を鉛直振動に変換する何らかの機構が存在すると考えられる。

4. ダウンカレント発生機構の検討

(1) 急斜面地形によるダウンカレントの発生

Sta. 4 で欠測率が最小であった水深 16m の時系列について、水平流速のスカラー平均値を調べると、全時系列 (21601 点) に関しては 4.9cm/s であったが、5cm/s 以上の下向き鉛直流速が生じているデータ点集合 (296 点) に関しては 7.7cm/s に達した。これは、水平流速が鉛直流速に変換されることによってダウンカレントが生じるという 3. (4) の推察を支持する結果である。

また、Sta. 4 の水深 16m における水平流速の平均ベクトルを求めると、全時系列については絶対値 1.3cm/s、偏角 142 度 (北基準、時計回り) と等深線に沿う向きであったのに対し、5cm/s 以上の下向

き鉛直流速が生じたデータ点集合については、絶対値 3.8cm/s、偏角 53 度と、北東向きの急斜面を下る向きであった。図-10 に、後者に関する水平流速の分布を示すが、急斜面を下る向きであることが多いことが確認できる。すなわち、Sta. 4 の底層における水平流速は、全体的には 3. (2)a) で触れたように等深線沿いであるが、ダウンカレント発生時には急斜面を下る向きである場合が多いと言える。以上を踏まえると、ダウンカレントの成因の 1 つとして、図-11(a) のように、水平流が急斜面を下る際に鉛直方向に拡大することが挙げられる。石垣島で行われたリーフカレント調査⁷⁾でも、サンゴ礁の礁嶺の切れ目にある急斜面において水平流が拡大し、鉛直下向きの流速成分を生じることが確認されている。

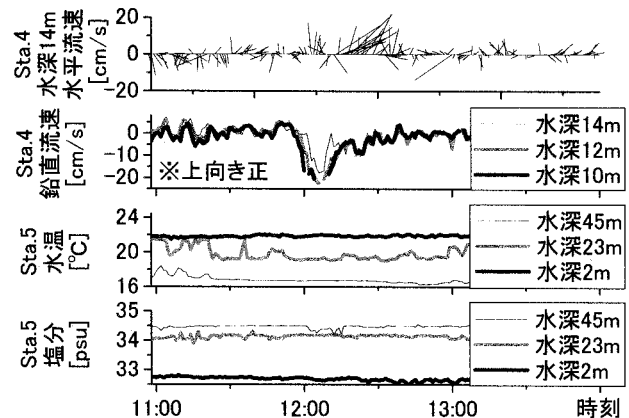


図-7 6/25 日に観測されたダウンカレント

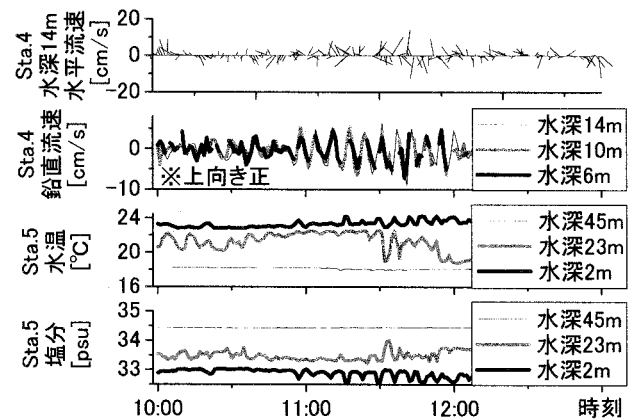


図-8 6/29 日に観測された鉛直振動現象

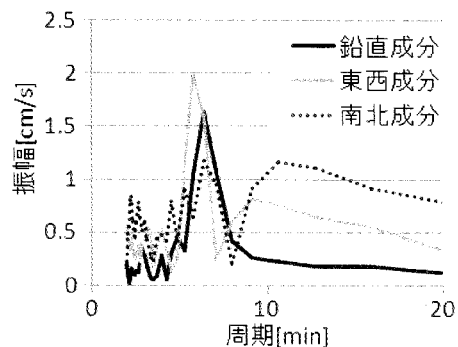


図-9 Sta. 4 水深 16m における、図-8 の振動期間の流速成分の振幅スペクトル

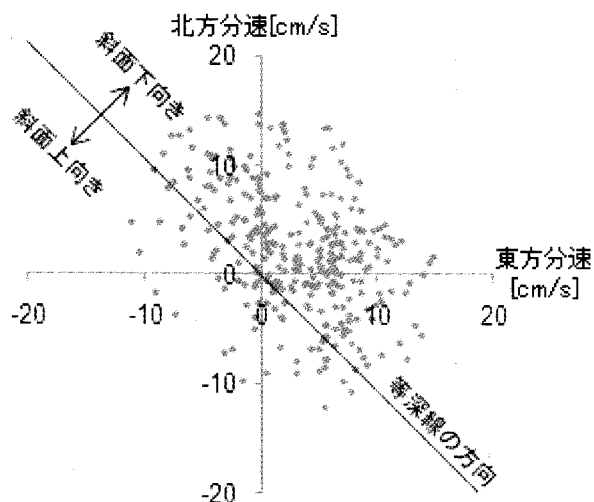
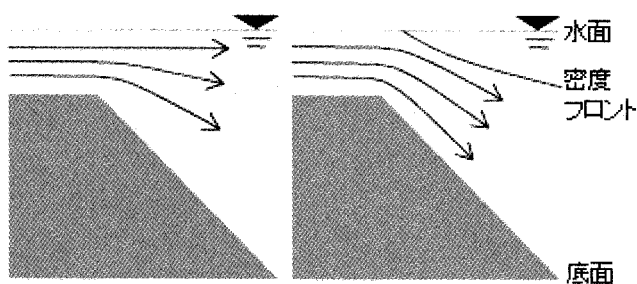


図-10 Sta. 4 水深 16m の流速時系列中で、下向き流速が 5cm/s 以上のデータ点集合に関する水平流速分布



(a) 急斜面における水平流の鉛直拡大 (b) 密度フロント沿いの潜り込みと(a)の重合

図-11 ダウンカレント発生機構の模式図

(2) 密度フロントにおけるダウンカレントの発生

3. (3b)で議論した密度フロントは、北東側表層にある尾鷲湾由来の低塩分水塊と、南西側にあるより外洋性の高塩分水塊が構成するものである。両水塊の水温差は火力発電所の運転状況やダム放水を含む河川流量、尾鷲湾の混合状態などの条件により異なると考えられるが、密度は塩分に強く依存するので、北東側が低密度、南西側が高密度となる場合が多いものと予想される。

密度フロントがSta. 4周辺を通過している場合、高塩分水塊の潜り込みや、長周期波などに励起される密度フロントの振動によって、ダウンカレントが発生する可能性がある。特に、Sta. 4において急斜面を下る北東向きは、南西側の水塊が北東側の水塊の下に潜り込む向きと一致するため、そのような水平流が生じると、(1)で述べた鉛直拡大と潜り込みの効果が重合することによって、強いダウンカレントが発生し得る。

ただし今回の観測結果のみでは、密度フロントや周辺の水塊の詳細な挙動を知ることはできない。今後、ビデオカメラなどの面的観測技術を併用した、さらに詳細な現地観測が望まれる。

5. まとめと今後の課題

本研究の主な結論は下記の通りである。

- 事故現場周辺でダウンカレントを捉えることに成功した。ダウンカレントには単発的なタイプと、長周期波が原因とみられる流速の振動を伴うタイプが観察され、鉛直流速は最大 22cm/s に及んだ。
- 事故現場周辺では、尾鷲湾由来の低塩分水塊が北東側表層に、より高塩分の水塊が南西側に分布する密度フロントが形成されやすい。ダウンカレントは両タイプとも、水平流の密度フロントにおける潜り込み、急斜面を下る際の鉛直拡大、またはそれらの重合によって、水平流速が局所的に鉛直流速に変換されることで発生すると考えられる。
- 当海域に関しては、さらに詳細な現地観測によって密度フロントや周辺の水塊の挙動を調べ、ダウンカレントの発生範囲・発生条件を明らかにすることが今後の課題である。また、より多くの海域を観測・研究し、本研究の対象海域とは異なる機構で発生するダウンカレントについても解明していくことが望まれる。

謝辞：本研究では、日本財団の助成により（財）日本水路協会が実施した現地調査データを使用させて頂いた。また、東京管区気象台尾鷲測候所の雨量データは気象庁のWEBサイトより、桃頭島灯台の風速データは日本海洋データセンターより頂いた。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 木村伸吾, 杉本隆成: 熊野灘・遠州灘沿岸海域への黒潮系暖水の流入過程, 水産海洋研究会報, 54, pp. 19-31, 1990.
- 2) 尾鷲湾ダム放水影響調査団編: 尾鷲湾ダム放水の漁業に及ぼす影響の予察調査論文集, 大学印刷株式会社, 1960.
- 3) 松永恒雄: ASTER TIR の観測輝度温度の線形式を利用した水温温度推定—日本周辺の気温および湿度データを用いた推定誤差の予備評価, 日本リモートセンシング学会誌, 16(5), pp. 2-13, 1996.
- 4) 関根義彦, 大久保孝之: 尾鷲湾における海況変動の観測, 沿岸海洋研究, 38(1), pp. 55-62, 2000.
- 5) Sekine, Y., Nakagawa, M., Kurifuji, K., Noda, K. and Takashiba, Y.: Horizontal distributions of temperature and salinity in Owase Bay, *Bull. Fac. Biores. Mie Univ.*, Vol.11, pp.113-144, 1993
- 6) Nakagawa, M., Kurifuji, K., Noda, K., Takashiba, Y. and Sekine, Y.: Vertical distributions of temperature and salinity in Owase Bay, *Bull. Fac. Biores. Mie Univ.*, Vol.12, pp.187-207, 1994
- 7) 日本水路協会編: リーフカレント等の観測手法および発生機構の解明に関する研究 その 2, pp. 36-60, 日本水路協会, 2008.