

鉛直微細構造の特性をトレーサーにする海況解析の試み —潮岬周辺微細海況への適用—

前川陽一¹⁾・中村 亨¹⁾・仲里慧子¹⁾・小池 隆²⁾・竹内淳一³⁾・永田 豊⁴⁾

Tracer analysis by using micro-structure found in vertical profiles of several quantities — Application for detailed analysis of oceanic structure in the vicinity of Cape Shionomisaki —

Yoichi MAEKAWA¹⁾, Toru NAKAMURA¹⁾, Keiko NAKAZATO¹⁾, Takashi KOIKE²⁾,
Junichi TAKEUCHI³⁾, and Yutaka NAGATA⁴⁾

Abstract : Detailed oceanic structure was investigated by setting dense observation network in the sea near Cape Shionomisaki. A cold water eddy was observed just off the cape in April, 2009. The Kuroshio was located very near the tip of the cape, and was flowing eastwards in October, 2009. MAEKAWA *et al.* (2011) discussed the horizontal distribution of sea level height by setting several reference levels. The sea level difference between Kushimoto and Uragami tide gauge stations is shown to be created essentially in the narrow zone just off Cape Shionomisaki. The sea level difference is related to the oceanic conditions in the surface layer above 300 m depth. They showed that the usual water mass analysis is not applicable because the correlation between temperature and salinity fields is not high enough. In this paper, we used micro-structures found in the vertical profiles of dissolved oxygen, turbidity and chlorophyll a together with temperature and salinity profiles, as passive tracers. We concluded: (1) maxima and/or minima found in profiles of dissolved oxygen in the layer shallow than 100m depth have small horizontal extent, and these maxima and minima are found only near the outer edge of the cold water belt. (2) water of high temperature, high salinity and high dissolved oxygen which was found in the depth range from 50 to 150m depth near station F7 in April, 2009. This water was shown to be the Kuroshio Water, which had been brought into Kumano-nada area a few days before the observation, (3) observed area in October, 2009 is classified into three sub-regions by vertical profiles of dissolved oxygen. The sub-region consisted of relatively lowest oxygen values are found extends from coast to offshore. The offshore margin of this sub-region is located more southward than the northern edge of the current zone of the Kuroshio. This indicates that the coastal water is entrained into the flow area of the Kuroshio in the area to the east of Cape Shionomisaki.

Keywords : Detailed oceanic structure in vicinity of Cape Shionomisaki, microstructure in vertical profiles, dissolved oxygen

1) 三重大学大学院生物資源学研究所附属練習船勢水丸
〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577
2) 三重大学大学院生物資源学研究所
〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577
3) 和歌山県農林水産総合技術センター水産試験場

〒649-3503 和歌山県東牟婁郡串本町串本 1557-20
4) (財)日本水路協会海洋情報研究センター
〒144-0041 東京都大田区羽田空港 1-6-6 第一綜合
ビル 6F

1. はじめに

串本・浦神間の水位差が、本州南方での黒潮が直進路を取るか蛇行路を取るかの指標を与えることはよく知られている。われわれは黒潮が直進路を取るときに、紀伊半島南西岸に生じる振り分け潮が、このことに大きな役割を果たすことを明らかにしてきた (TAKEUCHI *et al.*, 1998, NAGATA *et al.*, 1999, UCHIDA *et al.*, 2000)。すなわち、黒潮が直進路を取っているときに紀伊半島南西海岸に生じる振り分け潮に伴って、黒潮系水が沿岸域にもたらされ串本沖合の水位を高めるために、串本・浦神間の水位差が生まれることを明らかにしてきた。また、中村ら (2008) は潮岬すぐ沖に、黒潮とは逆方向に流れる強い西向流が現れる事例を紹介し、この流れが潮岬を挟む東西の水位差に起因することを示唆している。この強い西向流の発生は浦神検潮所の水位が串本検潮所の水位より顕著に高まる時に生じるが、両者の発生時期の間には若干の位相差が存在するらしい。このような現象を理解するためには、潮岬周辺の微細海況を調べ、串本・浦神間の水位差を生じさせる水位勾配が、両検潮所間で緩やかに起こっているのか、ある限られた海域で生じているのかを明確に示す必要がある。

われわれは、三重大学大学院生物資源学研究所附属練習船勢水丸 (以下、勢水丸と略す) によって、2009年4月と10月の2回にわたって、Fig. 1に示すような非常に密な観測点を設けて、潮岬周辺の微細海況観測を行い、串本・浦神間の水位差は潮岬半島部の沖、東西幅数 km の狭い範囲で起こっていることを見出した (前川ら, 2011)。また、この水位差は 500m (実質的には 300m) 以浅の海洋構造によって作り出されていることを示した。

2009年4月は黒潮北縁の小蛇行が潮岬沖を通過中の時にあたり、2009年10月は黒潮は典型的な直進路を取っている時にあたる。これらの海況は、200m 深の水温や塩分場にも現れているが、その細部の構造、例えば4月では冷水渦の中心の位置、10月では潮岬すぐ西方での振り分け潮につながる黒潮水の岸側への侵入域の構造は、水温場と塩分場でかなり異なっている。このような水温場と塩分場の非対応性は、深さが200mよりも浅くなると、より顕著になる。田中ら (2008) は、潮岬西方の海況解析で、流れの指標とされる200m 深の等温線が海岸にぶつかる形となることを報告している。そうして、微細な海洋構造を論じる場合には、厳密な定常的な状態は成り立たず、過渡的現象が観測されるためではないかとしている。

また、ADCPの観測による流速場と水温・塩分場との間にも、良い相関関係が認められない。4月の場合には、全体として、潮岬に接する形で低温・低塩分水域が見られるが、流速場は観測域全体が東向流域となっており、10月の場合にも潮岬の西で高温・高塩分水の岸方向への水の侵入が見られるにも関わらず、これに対応するような岸向きの流れは観測されていない。もちろん、黒潮系水の流入は連続的に起こっているとは限らず、間欠的に起こっている可能性があるから、岸向きの流れが観測時に観測されなくても、黒潮系水の沿岸域への流入は否定されるわけではない。

さらに、黒潮直進時の串本・浦神間の水位差を起こす要因が潮岬西方での黒潮水の岸近くへの侵入であると考えられるが、海面水位分布を決めているのが300m以浅の表層の水温・塩分構造であるという前川ら (2011) の結論は注目される。そうであるならば、岸近くに侵入してくる黒潮水は、その源泉を黒潮域の表層、主温度躍層の上の表層混合層に求めなければならない。黒潮流域の表層混合層は明確な季節変化を持つから、振り分け潮に伴って沿岸域にもたらされる黒潮系水も季節変動を持つことになるはずである。この問題は現在検討中であるが、前川ら (2011) がその Fig. 3 に示している串本・浦神間の水位差に明確な季節変動が現れている事例の原因を説明するものであろう。

われわれは、紀伊半島南西海岸に向かっての比較的高温・高塩分の水の張り出しから、黒潮系水の沿岸域への侵入を類推して、これから串本・浦神間の水位差と黒潮流路パターンの関係を論じてきたが、上述のようにその細部の機構についてはほとんどわかっていないのが現状である。もし、海水の動きを示すようなトレーサーが利用できれば、より詳細な海水流動の様子を知ることができよう。しかし、上述のように、水温・塩分の分布に必ずしも相関が見出せない以上、通常の水塊分析の手法を直接的に適用することは難しい。

勢水丸のCTDには水温・塩分その他に溶存酸素・クロロフィル *a*・濁度のセンサーが付けられている。4月の船上観測中に、溶存酸素の鉛直プロファイルに顕著な極大あるいは極小が現れる測点があることに気付いた。この溶存酸素の微細構造の形状を追うことによって海水の流動特性を調べようとした。しかし、Fig. 1で示すような密度の高い観測点網を用いても、隣り合った測点間でも殆ど形状の連続性は見出すことができなかった。しかし、このような微細構造が現れるのはある限られた海域に限られる。形状に連続性が見られないことは、その構造の成因や、海水の流

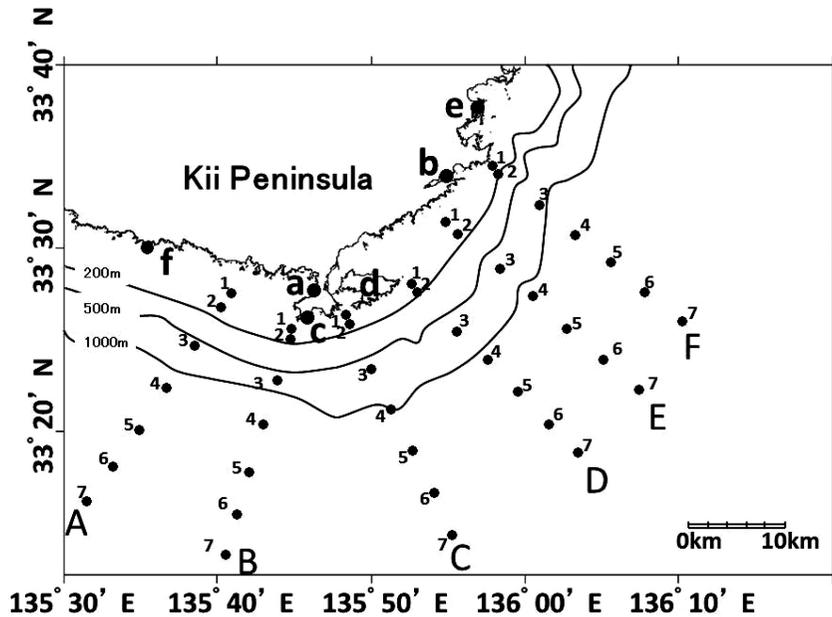


Fig. 1. Standard distribution of observation points. Some observation points were omitted due to limitation of available time. Real distributions of observation points in April 2009 and in October 2009 are shown in horizontal distribution maps of temperature, salinity and so on. Line names are indicated with capitals A, B, C, D, E and F from west to east. Station numbers are indicated with numbers 1 through 7 from coast to offshore. The small alphabets a through h indicate the position of tide gauge stations and positions of town; a: the Kushimoto tide gauge station, b: Uragami tide gauge station, c: Cape Shionomisaki, d: Ohshima Island, e: Katsuura, and f: Cape Esuzaki.

動の進行方向などを求めることが困難であることを意味する。しかし、海域が限られることは、何らかの微細海況特性のトレーサーとして用いられる可能性を示す。

2. 観測の概要と使用した観測器機

前川ら (2011) は、串本・浦神の検潮所間の水位差が、約 15km 離れた両地点間のどの場所で生起しているかを知るために潮岬周辺に Fig. 1 に示すような測点を設けて 2009 年 4 月 13 日～17 日と同年 10 月 19 日～20 日に、勢水丸によって微細海況観測を実施した。観測経緯及び水温・塩分構造と 300m 層を基準に計算された海面高度プロファイル等の観測結果については前川ら (2011) が報告している。この論文では、溶存酸素、クロロフィル *a*、濁度の鉛直プロファイルに見られた微細構造の空間分布に注目し、それを一種のトレーサーとして海況特性を論じる。水温・塩分等の水平分布等の海況は必要に応じて前論文 (前川ら, 2011) の結果を引用するが、観測時の海況の詳細については前論文を参照されたい。

使用した測器は主として勢水丸の所有する CTD と ADCP である。CTD は Sea-Bird 社製 SBE25 であるが、CTD オクトパス装置として溶存酸素センサー (Sea-Bird 社製 SBE-43)、クロロフィル *a* を測る蛍光光度センサー (Seapoint 社製 Seapoint Fluorometer)、濁度センサー (WET-Labs 社製 C-Star) が装備されている。ただし、時間の関係で各測点における採水観測は省略しているので、溶存酸素量については相対値を示すものである。ADCP は 128 層の観測が可能な RD 社製 (75kHz) である。

水温・塩分・溶存酸素・クロロフィル *a*・濁度のプロファイルには、多くの極大や極小が現れ、それらの出現する測点には地域的なつながりがあるように見える。しかし、これらのプロファイルの構造は、後に述べるように、観測点密度が非常に高いにもかかわらず、最も近い測点間でも非常に異なっており、極大・極小の空間的なつながりを見出すことは難しい。また、水温・塩分のプロファイルを含めて、諸量に共通に現れることは少なく、一つの量のプロファイルのみに現れるのが

通例である。そのため、通常の水塊分析の手法をそのまま適用することは困難である。

しかし、諸量のプロファイルに現れる極大・極小形状の出現が、ある地域的な空間に限られて見

出されることは、何らかの微細海況特性を示すはずである。上述のように、鉛直プロファイルの構造の形状の連続性を追うことが難しいことから、その成因や起源を議論することは諦め、微細構造

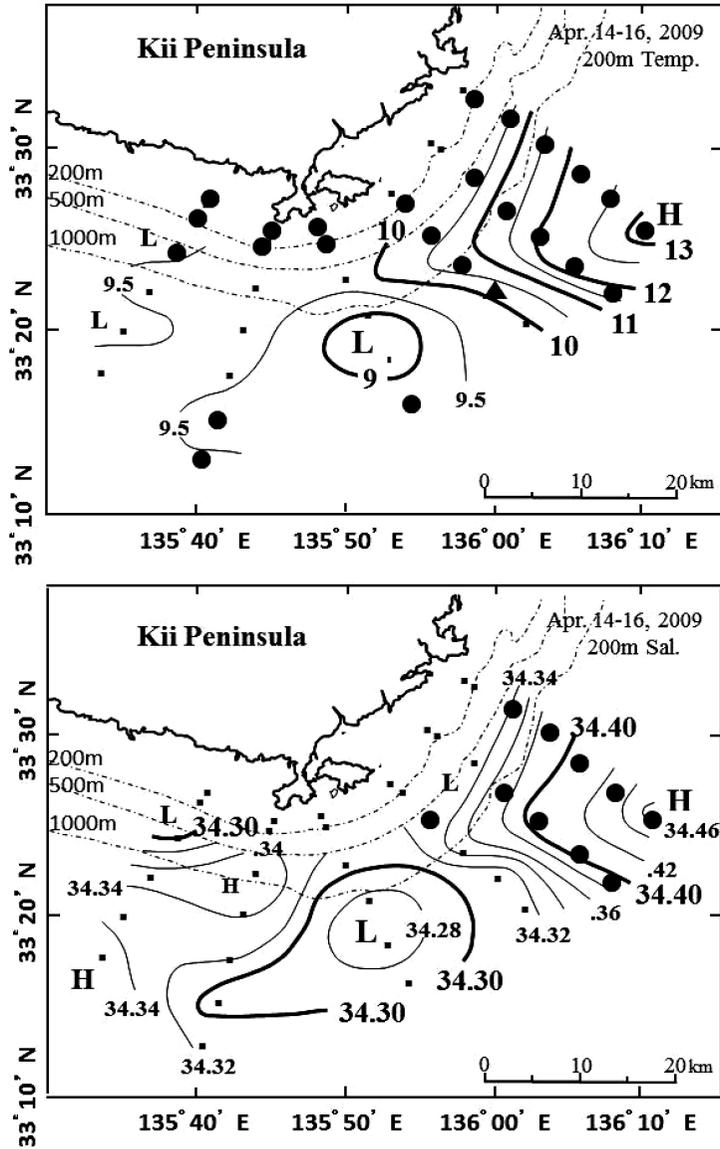


Fig. 2. Horizontal distributions of temperature (upper figure) and salinity (lower figure) at 200m depth on April 14–16, 2009. Isotherm is drawn at 0.5°C interval, and isohaline at 0.02‰ interval. The black circles in the upper figure indicate the observation points where micro-structure in vertical profile of dissolve oxygen was found in the layer shallower than 100m depth. The black triangle indicates the observation point where somewhat ambiguous micro-structure was found. The black circles in the lower figure indicate the observation points where thick high oxygen layer is found in the range from 60m and 150m.

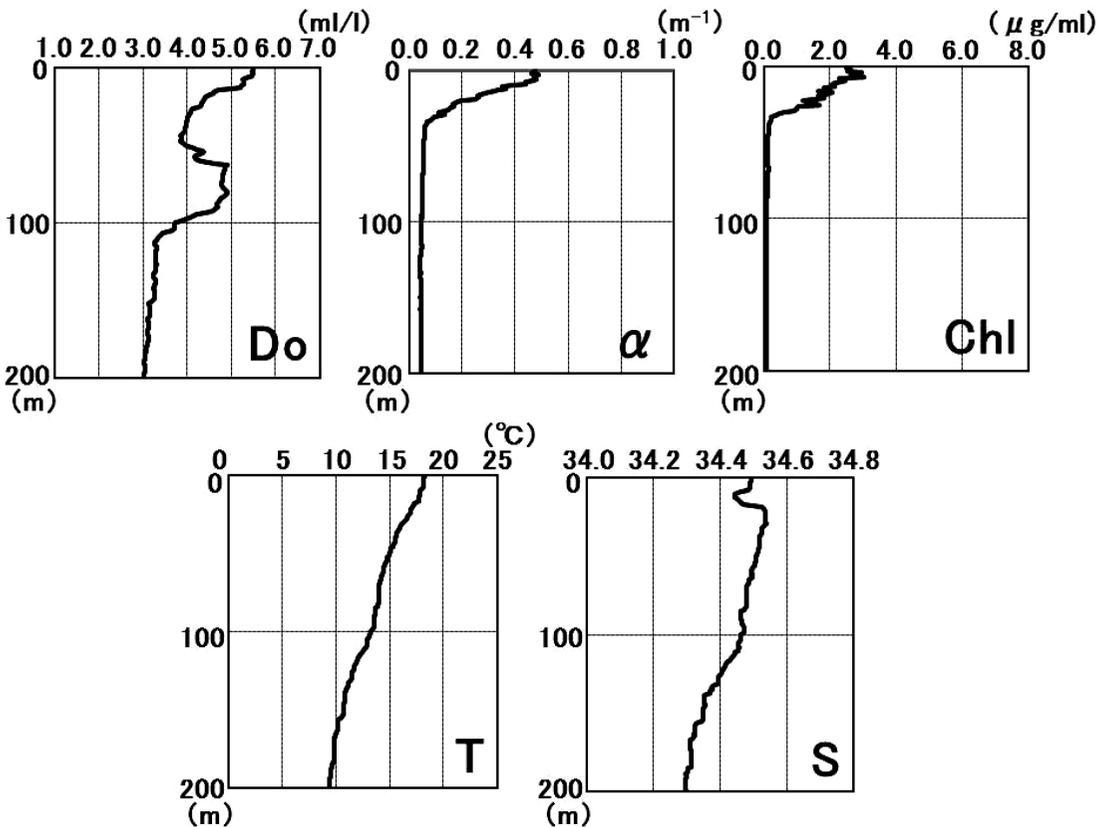


Fig. 3. Vertical profiles of dissolved oxygen (upper left: ml/l), turbidity (upper middle: shown by beam attenuation coefficient (660nm) in m^{-1}), chlorophyll a (upper right: $\mu g/ml$), temperature (lower left: $^{\circ}C$) and salinity (lower right) observed at station A3 on April 16, 2009.

の存在を一種のトレーサーとして利用し、海況微細構造の地域的な特性を調べることにする。

なお、以下の議論において、観測点の名称や、その位置を適宜引用するので、Fig. 1 (前川ら, 2011) に示した基本的な測点配置図を参照されたい。

3. 黒潮の北縁の小蛇行が潮岬沖を通過中の海況 (2009年4月) と溶存酸素の鉛直微細構造

3-1. 2009年4月の観測時の海況

2009年4月の観測時に得られた200m層の水温(上図)と塩分(下図)の水平分布をFig. 2に示す。潮岬沖に低温・低塩分の水塊が認められ、潮岬沖を黒潮北縁の小蛇行が通過中であることがわかる。観測層が狭く、この水塊の南縁は観測されていないが、衛星画像等から黒潮の北縁は観測域のすぐ南方に存在していたことが推測される。

この図からは、低温・低塩分域の中心位置は水温場でも塩分場でもほぼ一致しているが、潮岬東方沖の水温・塩分構造にはかなりの違いが見られる。観測層をさらに浅く取ると、水温・塩分場の相関が明確でなくなり、分布構造も層毎に変化する。

3-2. 2009年4月の観測で100m以浅に現れる高溶存酸素層

2009年4月のこの航海において、16日に測点A3で観測された溶存酸素、濁度(光束消散係数 α)、クロロフィル a (蛍光光度センサーで測定)の鉛直プロファイルを図3の上段に、水温・塩分の鉛直プロファイルを下段に示す。溶存酸素のプロファイルに注目すると、表層で溶存酸素が深さとともに減少する顕著な躍層が見られる。40m水深付近に極小が現れ、その下に高い溶存酸素の層を示す極大が現れる。しかし、このよう

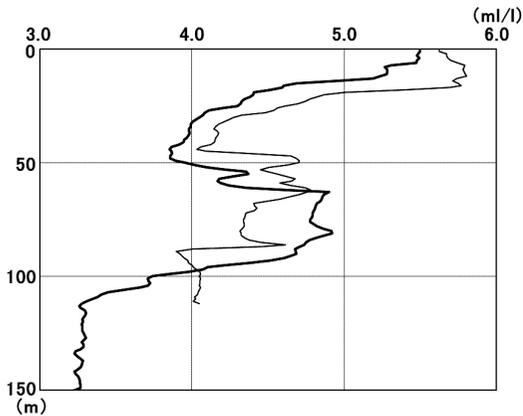


Fig. 4. Vertical profiles of dissolved oxygen at stations A3 (thick line) and B2 (thin line) on April 16, 2009.

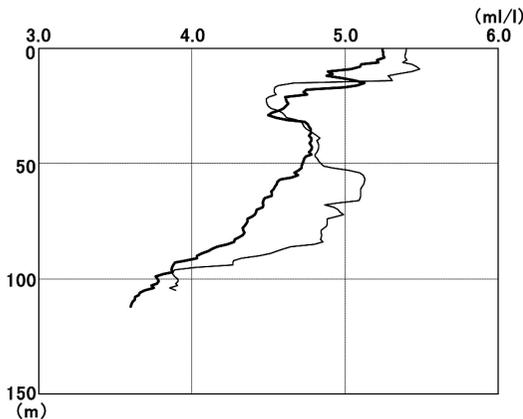


Fig. 5. Vertical profiles of dissolved oxygen at stations D2 (thick line) measured on April 15, 2009 and at F2 (thin line) on April 14, 2009

な構造は、水温・塩分、濁度 α やクロロフィル α 等の他のプロファイルには見られない。

また、近接する測点間のプロファイルを比べてみても、相互に関連していると思われる構造は殆ど見られない。わずかに測点 A3 と B2, D2 と F2 の間で似た形状が認められた。この二例を、Fig. 4 と Fig. 5 に示す。測点 A3 と B2 の間に 40m 深付近の極小、60m 深付近での極大の形状には類似性があり、測点 D2 と F2 の間には 30m 深付近の極小の間にある程度の類似性がある。しかし、隣り合う測点間で曲がりなりに相似性を認められたのはこの二例のみであり、このような構造の水平スケールは非常に小さいと考えら

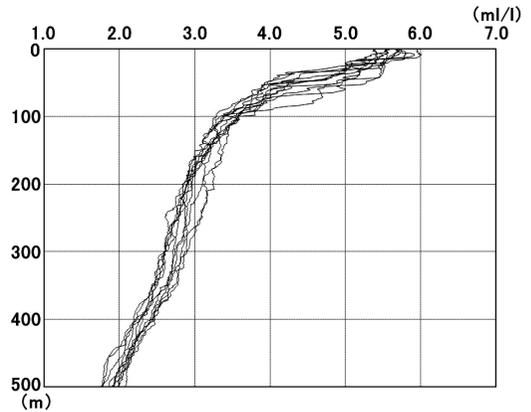


Fig. 6. Vertical profiles of dissolved oxygen (ml/l) in the central part of cold water eddy observed in April, 2009. Stations A4 through A6, B3 through B5, C3 through C5, and D5 and D6 are included in this central part.

れる。

このような構造が観測された測点を 200m 層の水温場 (Fig. 2 上図) 上に黒丸で示す (測点 D5 では 100m 深近くに小さな極小が見えるが、明確な構造が現れているとはいえないので黒三角にしてある)。微細構造は、低温・低塩分水塊の中心域に現れず、出現がその周辺部に限られることがわかる。低温・低塩分水塊の周辺部に溶存酸素の水平勾配の大きな部分があり、そこで活発な海水の水平交換が行われていることを示しているであろう。

鉛直プロファイルだけから、このような形状をもたらしたものが、低溶存酸素水の貫入によるものか、高溶存酸素水の貫入によるものかは判断できない。Fig. 2 において低温・低塩分水塊の中では、溶存酸素に特異な構造は現れず、プロファイルがスムーズである。このスムーズなプロファイルを全て一枚の図に描いたものが Fig. 6 である。これらのプロファイルや、全くこのような構造が見られなかった 2009 年 10 月の観測時の溶存酸素のプロファイル (Fig.13) を基準的なプロファイルと考えると、高溶存酸素水が侵入してきたと考える方が自然である。

もしも、高溶存酸素水の侵入が、その水の密度に応じて、それに見合う密度面に沿って水平に準静的に貫入してくるならば、プロファイルは空間的にある程度の広がりを持ち、その空間スケールを類推することが可能であるはずである。4 月の観測で 100m 以浅に現れたプロファイルの極小や極大構造が隣り合った測点間で類似性が認められ

なかったことは、その空間スケールが小さいことを示す。おそらく、小蛇行の通過に伴う渦動による攪拌、混合過程の中で高溶存酸素水の水平移流が起こったものであろう。

前川ら（2011）で示した4月の流速場には、低温・低塩分水塊域を取り巻くような流速場はみられず、冷水域は全般的に東流域となっている（前川ら、2011, Fig. 4上）。台風の右半円の風速が相対的に強くなる現象を、渦巻く風速場と、台風の移動に伴う風速場の重ね合わせで説明されている。海洋の渦について、それを運ぶ流速場を議論された例を知らないが、現在対象としている潮岬

沖を東に移動する低温・低塩分渦を取り巻く流れが小さければ、観測された流速場は渦の移動に伴う東向流が観測されたものと考えらるべきであろう。そうであるならば、ここで論じているような渦を取り巻いて存在する溶存酸素の微細構造が、ある期間保存されることが考えられる。

3-3. 4月の観測で水深50~150m付近に見られる厚さ100m内外の高溶存酸素層

2009年4月の観測で得られた溶存酸素の鉛直プロファイルには、100m以浅に見られる上述の構造の他に、50~150mの深度範囲に100m内外

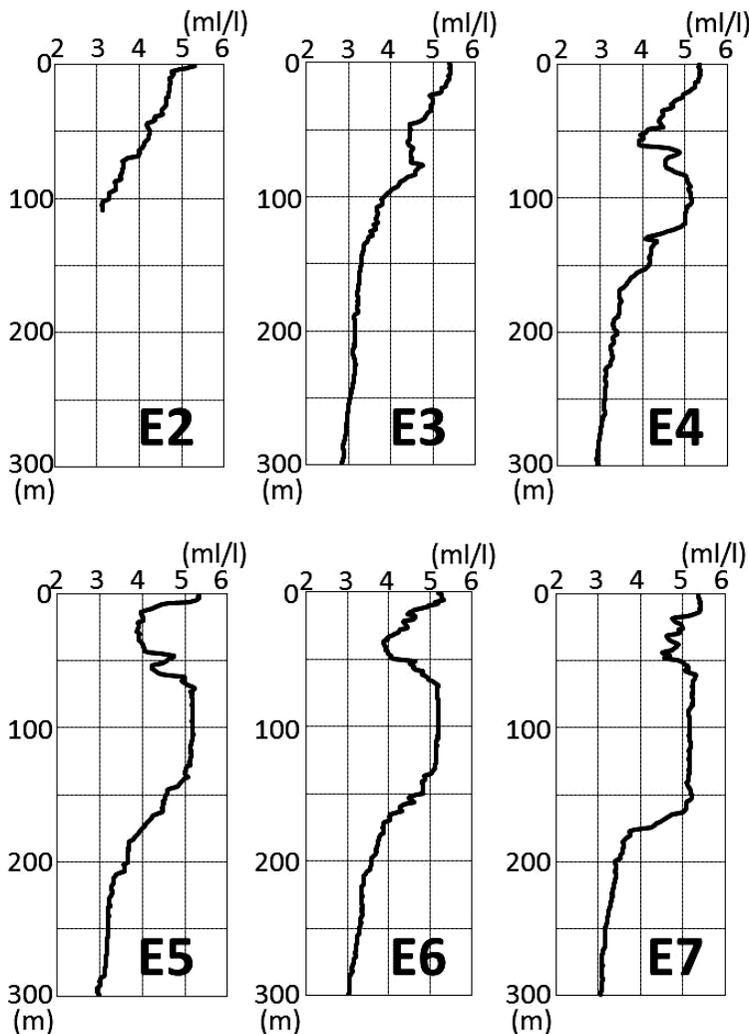


Fig. 7. Vertical profiles of dissolved oxygen (ml/l) at stations E2 though E7 observed on April 15, 2009.

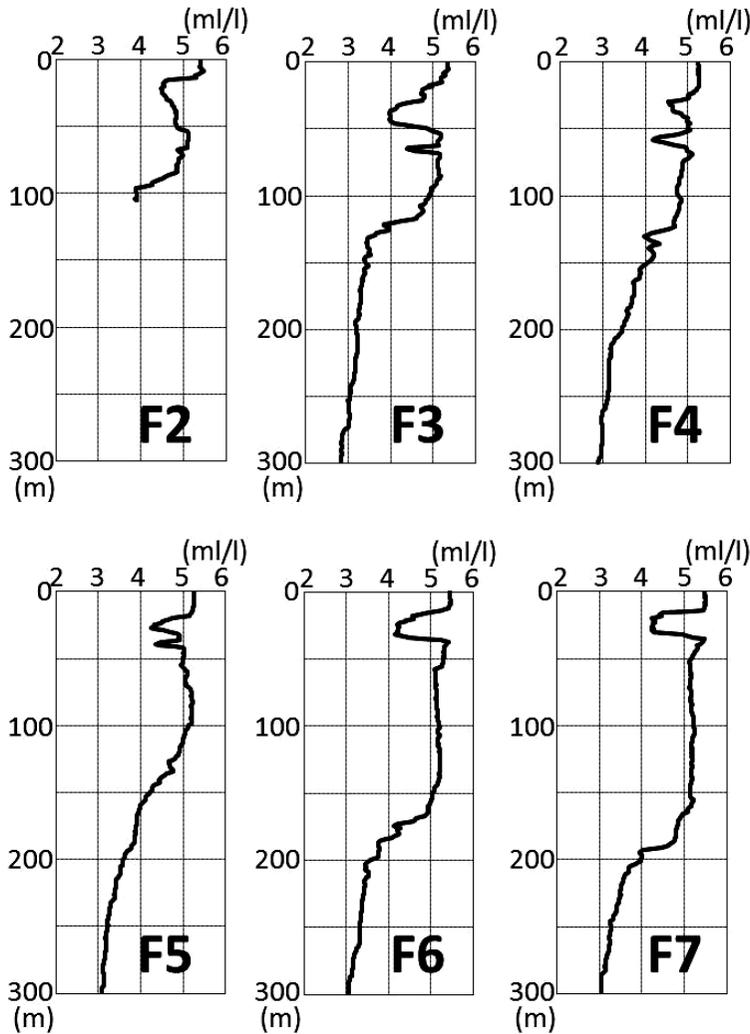


Fig. 8. Vertical profiles of dissolved oxygen (ml/l) at stations F2 through F7, observed on April 14, 2009.

の厚さを持つ高溶存酸素水が、測線 E あるいは測線 F 上で見出される。測線 E 上の各測点についてのプロファイルを図 7 に、測線 F 上の各測点についてのプロファイルを図 8 にそれぞれ示す。測点 E5~E7, F5~F7 のプロファイルに、厚さ 100m を超すような高溶存酸素水の層が存在している。厚さは少し減じるが、測点 E4, F3, F4 にも厚い高溶存酸素層が認められる。このような厚い高溶存酸素水層は、より西方の測線 A~D には、測点 D3 を除き全く見い出せない。この厚い高溶存酸素水層の現れた測点を 200m 層の塩分場 (Fig. 2 下) 上に黒丸で示す。存在域は

観測海域の東側に限られており、測点 F7 を中心とする高水温・高塩分域と一致している。

4 月の観測の全測点の溶存酸素プロファイルを図 9 にプロットしたのが、Fig. 9 である。この図で厚い高溶存酸素水の現れた測点 D3, E4~E7, F3~F7 のプロファイルを実線で、他の測点のプロファイルを点線でプロットしてある。水深 80m 付近から水深 200m 付近の間で、他の測点に比べて著しく高酸素の水が存在していることが明瞭に示されている。

ADCP による流速分布図 (前川ら, 2011 の Fig. 3 上) では、この測点での流れが弱く、この

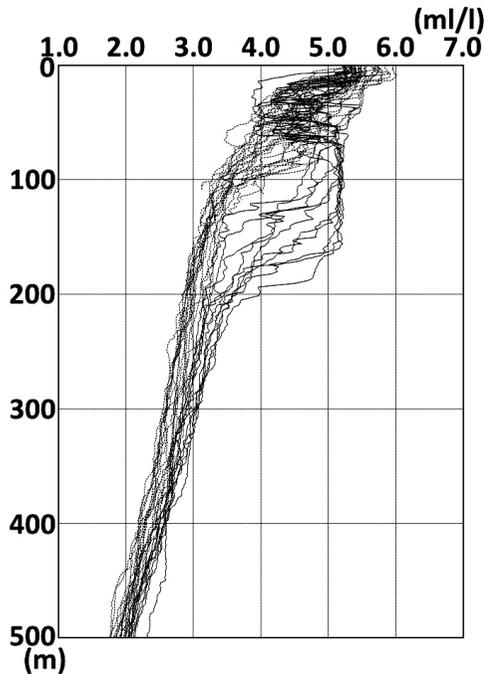


Fig. 9. All of vertical profiles of dissolved oxygen (ml/l) obtained during the observation in April, 2009. Solid curves indicate the profiles taken at stations D3, E4 through E7 and F3 through F7, and dotted lines indicate the profiles taken at other stations.

測点は黒潮流域から岸側に離れていると思われる。しかし、水温値・塩分値からみると、この地点に存在する海水は、黒潮系の水の特徴を持っている。2009年4月7～8日に三重県水産研究所がこの海域で ADCP 観測を行っている。その結果を Fig. 10 に示す。この図では、われわれの観測の直前に熊野灘三木崎沖に黒潮水が侵入していたことが分かる。2009年4月7日の NOAA による日合成画像を Fig. 11 に示すが、この画像でも熊野灘沖への黒潮水の侵入が認められる。観測された厚い高酸素水はこの侵入した黒潮水が、われわれの観測時に測点 F7 周辺にとどまっていたと考えるのが自然である。

Fig. 9 の実線で示したプロファイルが、80m 以浅で、他のプロファイルに比べ、むしろ低酸素にある。観測開始の1日前の4月13日の衛星画像では、観測域表層は全体に黒潮水よりも低温の水で覆われている。観測時には表層には、低酸素、低温の沿岸水系の水が沖側に張り出していたと類推される。そのため、表層中の溶存酸素プロファイルに極大・極小をとまなう微細構造が生じており、これ等の測点にも 3-1 で論じたような構造が現れている。しかし、その成因は、沿岸水が表層で沖側に張り出したもので、低温・低塩分水塊の回りに生じたものとは性質が異なっていると思われる。

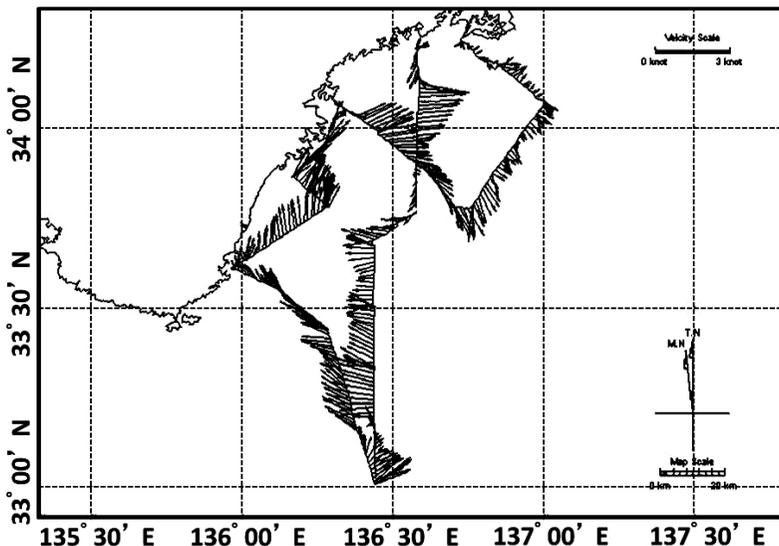


Fig. 10. Current velocity vectors measured with ADCP by the Mie Prefecture Fisheries Research Institute on April 7-8, 2009. A northward intrusion of the Kuroshio water was found off Kumano-nada.

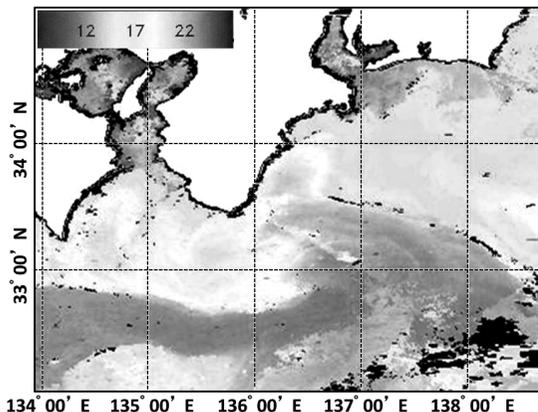


Fig. 11. Infrared image observed by NOAA satellite on April 7, 2009. One day composite picture is shown.

4. 黒潮の流路が典型的な直進路を取っていた時の潮岬周辺の微細海況（2009年10月）と溶解酸素の鉛直微細構造

4-1. 2009年10月の海況

2009年10月に観測された200m層の水温（上図）と塩分（下図）の水平構造を Fig. 12 に示す。この図で分かるように、黒潮はその北縁を潮岬先端に接する形で流れており、潮岬沖を通過後、北縁はやや沖側に離れるが、その後真東に流れる形を取っており、典型的な直進路を示している。前川ら（2011）は、この時の串本・浦神の水位差は潮岬半島の沖の数 km の狭い海域で生じていたと結論しているが、このことはこの図からも推定できよう。また、潮岬の西方で等温線・等塩分線が北にくびれており、この部分で黒潮系の水が岸近くに侵入していることを示唆される。しかし、ADCP の測定結果では、この部分でも北流成分は全く観測されておらず、また水温・塩分の分布パターンも特に 200m 以浅では良い相関を示していない。

4-2. 2009年10月の観測で得られた溶解酸素の鉛直プロファイルの特性

10月の全ての観測点で得られた溶解酸素の鉛直プロファイルを重ねてプロットしたのが Fig. 13 である。この図で、80m 付近から 350m 付近までの部分で溶解酸素の値の存在範囲が広がっている。100m から 250m 深の間を注目すると、溶解酸素量の相対的な値からプロファイルを三つのグループに分けることができる。図では相対的に酸素量が相対的に小さいグループを点線で、酸

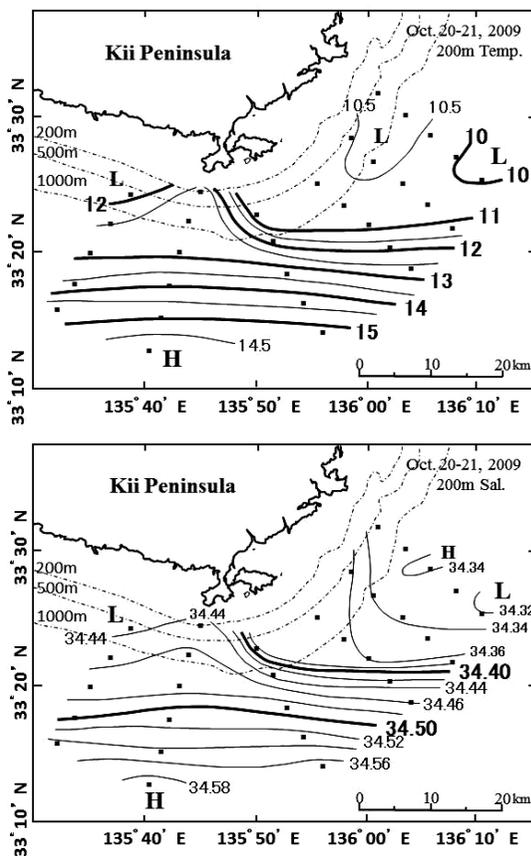


Fig. 12. Same as in Fig. 2 except for on October 20-21, 2009. Isotherm is drawn at 0.5°C interval, and isohaline at 0.02 interval.

素量が相対的に大きな値を持つグループを破線で、中間の値を持つグループを実線で示してある。点線のグループと実線のグループの間、実線と破線のグループの間には、プロファイルがほとんど存在しない空白部が存在している。それぞれのグループが観測された測点の分布を、Fig. 14 に示した。図では、最も高溶解酸素側のグループ (Fig. 12 で破線のグループ) を●で、中間のグループ (Fig. 12 で実線のグループ) を◎で、低溶解酸素側のグループ (Fig. 13 の点線のグループ) を○で示してある。注目すべきことは、これらのグループの地域的な現れ方は非常に規則的で、●が最も沖側に、◎がそれより岸側に、○がさらに岸側で海岸までの海域に現れている。これを見ると、少なくとも 80m 付近から 350m 付近までの深度範囲では、溶解酸素量は全体的に沖に行くほど高く

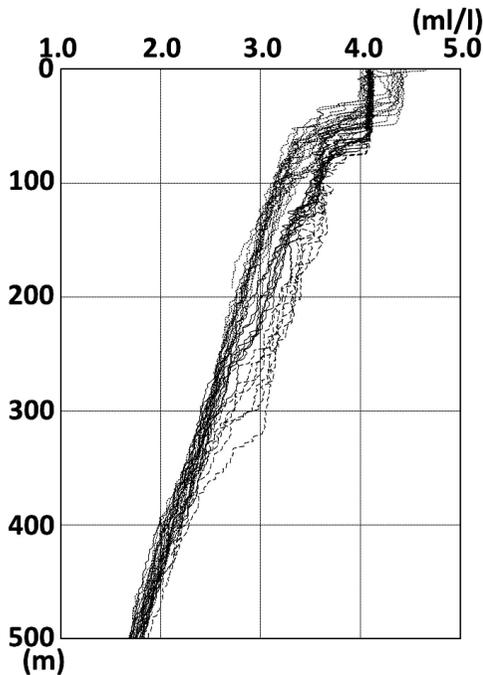


Fig. 13. All of vertical profiles of dissolved oxygen (ml/l) obtained during the observation in October, 2009. Dotted curves indicate the profile taken at stations B2, C2 through C4, D2 through D5, E2 through E7, and F2 through F7, solid curves indicate taken at stations A2 through A5, B3 and B4, C5, and D6 and D7, and broken curves indicate taken A6 and A7, B5 through B7, and C6 and C7.

なることが示されている。これは、前節の厚い高溶存酸素層の起源を黒潮系水に求めたことと矛盾しない。

Fig. 14 には、経験的に黒潮の流線を代表するとされる 200m 層の水温の水平分布から推定した黒潮北縁の位置を実線で示してある。(通常黒潮流軸は、この黒潮北縁から 24km 沖にあるとされている。また、黒潮北縁の位置は ADCP による表面流速の分布から求めても同じ結果が得られる。)ここで、最も低溶存酸素のグループ (○) の存在範囲が、この黒潮北縁の位置よりも沖側にまで及んでいることが注目される。潮岬より西方では○で示した低酸素水が認められないのに対して、潮岬東方では、低酸素の沿岸系の水が、黒潮北縁よりも黒潮流域側に広がっていることになる。プレュームやジェットの流れは、その中に周辺の水を吸い込んでいくエントレインメントという現象を起こ

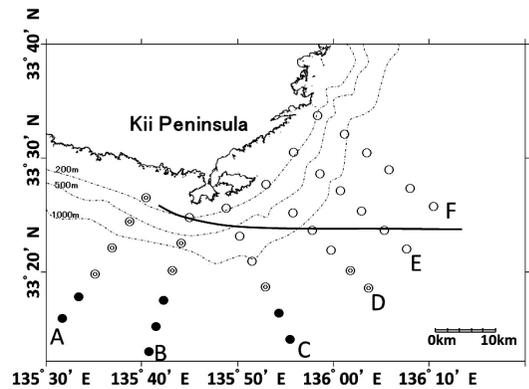


Fig. 14. Three sub-regions classified by characteristics of vertical profiles of dissolved oxygen shown in Fig. 13. The stations where broken curves are found are shown with black circles, those solid curves found are with double circles, and those dotted curves found are shown with single circles. The northern boundary of strong current zone of the Kuroshio deduced from temperature field at 200m depth surface is shown with a thick curve in figure.

すが、黒潮流域の中は、沿岸水域に比べてより強い乱流状態にあると考えられるから、沿岸系水が黒潮流の中にエントレインメントによって供給されることは十分考えられる。したがって、潮岬東方で沿岸水が黒潮に取り込まれて、その範囲が黒潮北縁に沿って、その沖側に帯状に延びている可能性がある。Fig.14 の結果はこの推論を支持するものと考えられる。潮岬東方の浦神沖の沿岸水が、黒潮の直進時に黒潮流に取り込まれるならば、浦神沖沿岸水が絶えず更新されることになり、潮岬東方の沿岸水を一様化する一因になるであろう。このことは、串本・浦神間の水位差が良い黒潮流路の指標となることに寄与しているのではなかろうか。

もしも、このような推論が正しければ、他の諸量、水温や塩分の分布にも同じようなエントレインメントの効果が出るはずである。そこで、溶存酸素量の鉛直プロファイルに適用した海域分類を、そのまま、水温・塩分のプロファイルに適用した結果が、Fig. 15 と Fig. 16 である。溶存酸素の地域区分に従って、点線・実線・破線に分けて示してある。これらのプロファイルでは、各区分の移り変わりがやや連続的であるが、水温・塩分においても 100m 以深で対応した地域分けができることは興味深い。

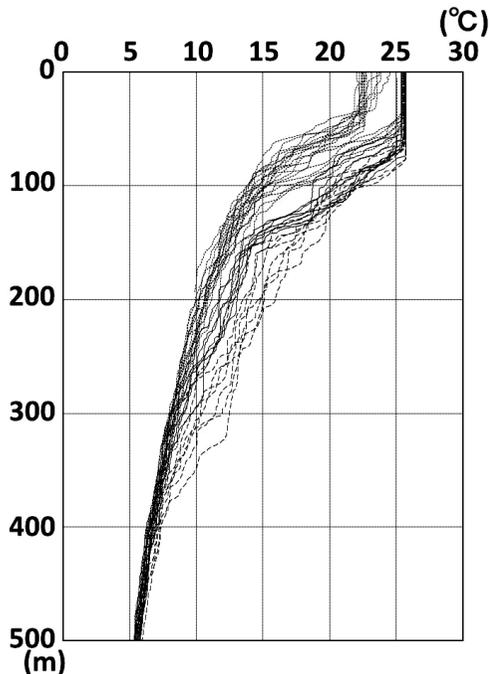


Fig. 15. Same as in Fig. 13, except for temperature in $^{\circ}\text{C}$.

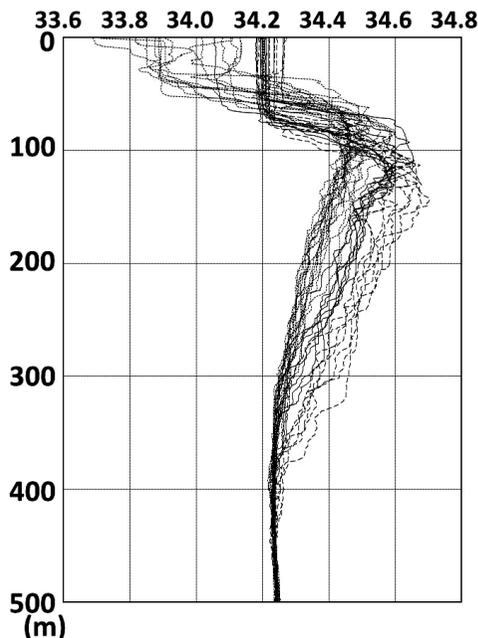


Fig. 16. Same as in Fig. 13, except for salinity.

5. 2009年4月および10月の観測で見出された濁度 α 、クロロフィル a のプロファイルの構造
濁度(α)やクロロフィル a は、少なくとも紀伊半島周辺部では、沿岸水域で高い値が観測される。また、一般に表層近くで大きな値を示す。したがって、その分布から、沿岸水の動向を探ることが可能であると考えられる。

溶存酸素と同様に濁度(α)やクロロフィル a についても、特異な水の侵入現象を示すような特異な極大・極小構造が見られることがある。濁度の例をFig. 17に、クロロフィル a の例をFig. 18に示す。Fig. 17は2009年10月19日に測点A3で季節躍層のすぐ下で観測された、顕著な特異構造であるが、近くの観測点ではこのような構造は全く観測されなかった。また、この構造に対応するような構造はこの点での他の諸量のプロファイルには全く認められなかった。Fig. 18のクロロフィル a の例は、2009年4月16日に測点C3で観測されたものである。この場合には、濁度や溶存酸素のプロファイルにも、海面のすぐ下にピークが現れており、50m以浅の表層水の流動を示していると思われる。しかし、細部のプロファイル構造は相互に大きく異なっている。これらの例

は、観測中で最も顕著な例であるが、いずれも、空間的な連続性を認めることができなかった。

溶存酸素のそれとは異なり、以上の結果に見られるように、濁度やクロロフィル a のプロファイルに顕著な構造が見出されるのは、極浅い表層に限られている。また、測点密度の高いわれわれの観測でも、構造の測点間の連続性は全く見出すことはできなかった。これらの量の解析から、有意な結論を得るには、さらに測点間隔を小さく取った観測が必要とされよう。

6. おわりに

串本の験潮所から浦神の験潮所までの直線距離は約15kmであるが、Fig. 1に示すように、この両地点沖を含めた海域において、水深50m沿いで約30kmの部分から、沖方向に扇状に広がる6本の観測線を設けるという、従来に見られないような細かい測点分布を持つ観測を実施した。2009年4月の観測時には、潮岬のすぐ南方に黒潮の小蛇行に伴う冷水渦が存在し、2009年10月の観測時には黒潮が潮岬にほとんど接する形で東進している典型的な直進路を取っていた。得られた海面水位の分布等の力学的な構造については前

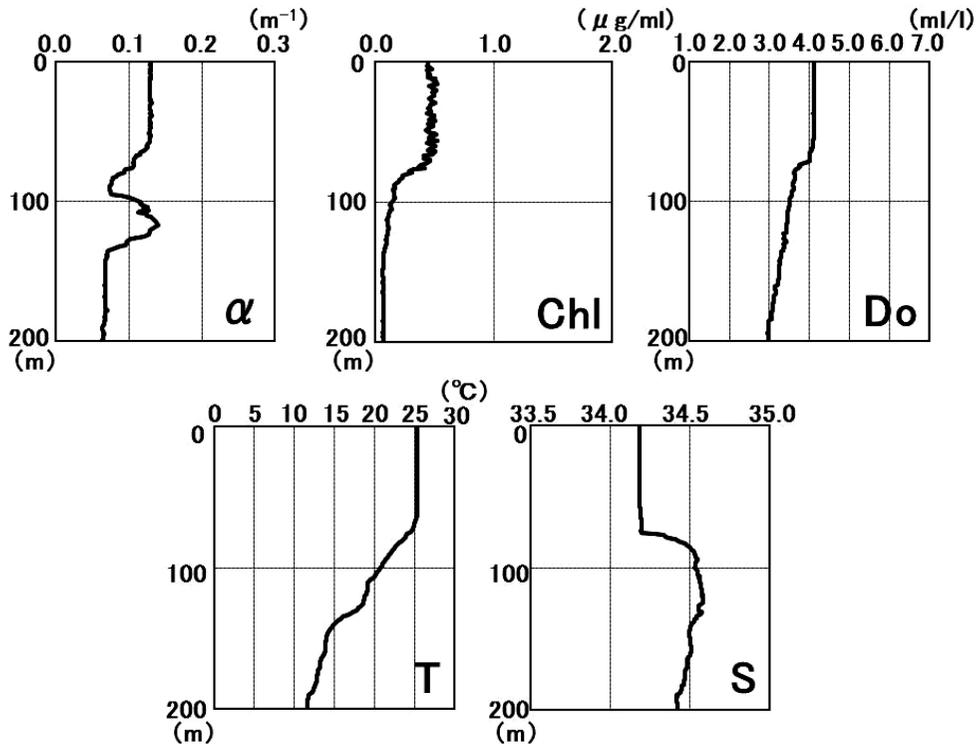


Fig. 17. Vertical profiles of turbidity (upper left: shown by beam attenuation coefficient (660nm) in m^{-1}), chlorophyll a (upper middle: $\mu g/ml$), dissolved oxygen (upper right: ml/l), temperature (lower left: $^{\circ}C$) and salinity (lower right) observed at station A3 on October 20, 2009.

川ら (2011) が報告している。この論文では、これを補足する形で、溶存酸素のプロファイルの形状に注目して、次のような結論を得た。

(1) 2009年4月の観測で100m以浅に現れる溶存酸素のプロファイルの極大(高溶存酸素層)の構造の空間スケールは小さく、実施された測点分布では水平構造を検討できなかった。しかし、そのような構造の見られるのは、潮岬沖の冷水渦の周辺部のみ限られていた。このような構造は渦の周辺部での激しい海水の拡散・混合の現れとして解釈できること

(2) 2009年4月の観測で、観測域の南東端測点F7を中心として水深50~150m付近に見出された高水温、高塩分、高酸素水は、この観測の直前に熊野灘に流入した黒潮水から構成されていること、

(3) 2009年10月の観測時において、溶存酸素の鉛直プロファイルのグルーピングから、観測海域を三つの副領域に分けることができた。この最も岸寄りの領域の南縁は、水温場や流速場から見

た黒潮強流部の北縁よりも沖側(南方)にある。これは、沿岸水が黒潮域に取り込まれるエンTRAINMENT現象として説明できる。

狭い海域の観測からでは、測点密度を高く取っても、諸量の鉛直プロファイルに現れる極小値や極大値を形作る海水の起源や移動経路を論ずることは非常に難しい。この論文では、諸量の値そのものや、プロファイルの空間的つながりを議論することもできなかった。ここでは、諸量の鉛直プロファイル上の微細な構造の存在域の空間的なつながりを、いわば一種の受動的なトレーサーとして活用する試みである。このような試みは、過去に殆ど例が無く、上記の結論の信頼性も、今後の観測研究を待つ必要がある。しかし、ここに得られた結果は種々の示唆に富んでおり、今後の研究に役立つものと考えられる。

謝辞

この研究に当たり、種々ご指導を頂いた勢水丸の内田誠船長をはじめとして、困難な観測に献身

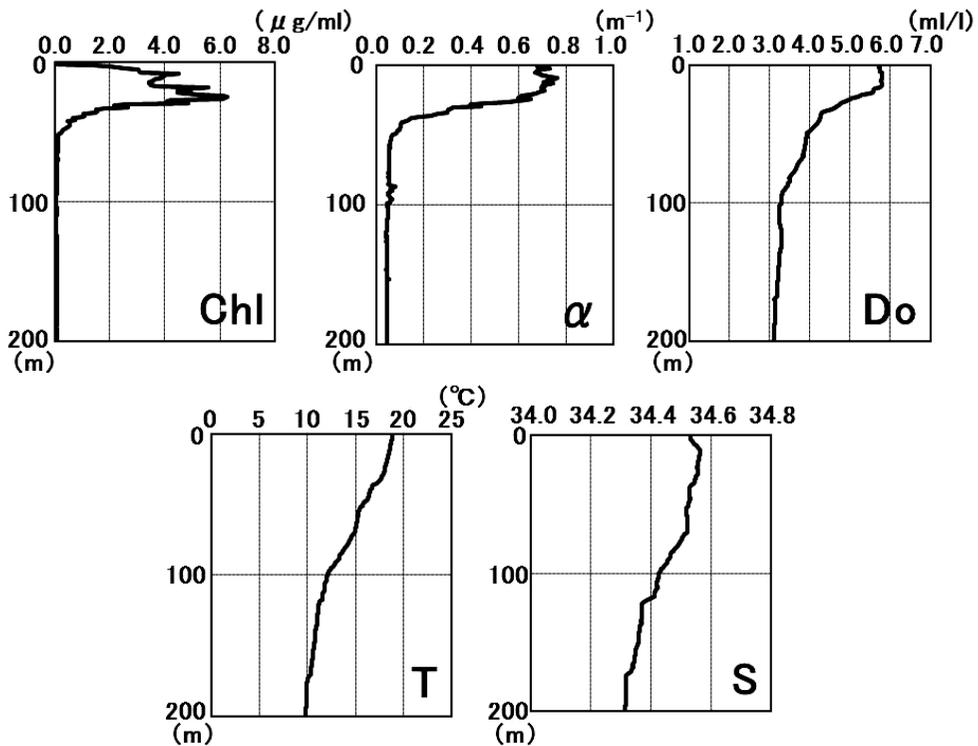


Fig. 18. Vertical profiles of chlorophyll a (upper left: $\mu\text{g/ml}$), turbidity (upper middle: shown by beam attenuation coefficient (660nm) in m^{-1}), dissolved oxygen (upper right: ml/l), temperature (lower left: $^{\circ}\text{C}$) and salinity (lower right) observed at station C3 on April 16, 2009.

的に従事していただいた勢水丸の乗組員に心からの感謝の意を表します。

引用文献

- 前川陽一・中村亨・仲里慧子・小池隆・竹内淳一・永田豊 (2011): 潮岬周辺海域の微細海況と串本・浦神間の水面高度分布。海の研究, 20, 167-177.
- NAGATA, Y., J. TAKEUCHI, M. UCHIDA, Y. MORIKAWA, and T. KOIKE (1999): Current nature of the Kuroshio in the vicinity of the Kii Peninsula. J. Oceanogr., 55, 407-416.
- 中村亨・田中綾子・前川陽一・内田誠・小池隆・中地良樹・竹内淳一・永田豊 (2008): 潮岬沖西向流について。海の研究, 17, 319-335.
- TAKEUCHI, J., J. HONDA, Y. MORIKAWA, T. KOIKE, and Y. NAGATA (1998): Bifurcation Current along the southeast coast of the Kii Peninsula. J. Oceanogr., 54, 45-52.
- 田中綾子・中村亨・前川陽一・内田誠・小池隆・中地良樹・竹内淳一・石田鉄平・永田豊 (2008): 振り分け潮と紀伊水道内の冷水渦。海の研究, 17, 193-204.

- UCHIDA, M., J. TAKEUCHI, Y. MORIKAWA, Y. MAEKAWA, O. MOMOSE, T. KOIKE, and Y. NAGATA (2000): On the structure and temporal variation of the Bifurcation Current off the Kii Peninsula. J. Oceanogr., 56, 17-30.

受付: 平成 23 年 12 月 3 日
 受理: 平成 24 年 3 月 9 日