

## 2004年初冬季に対馬海峡東水道で観測された 低気圧性渦

鬼塚 剛\*<sup>1</sup>・滝川哲太郎\*<sup>2</sup>・森本昭彦\*<sup>3</sup>・三野義尚\*<sup>3</sup>・松田龍信\*<sup>4</sup>・水谷壮太郎\*<sup>5</sup>  
今 義英\*<sup>5</sup>・秦 一浩\*<sup>5</sup>・小藪宏文\*<sup>5</sup>・池田太郎\*<sup>5</sup>・酒井健一\*<sup>5</sup>

### Cyclonic eddy observed in the eastern channel of the Tsushima Straits in early winter 2004

Goh Onitsuka\*<sup>1</sup>, Tetsutaro Takikawa\*<sup>2</sup>, Akihiko Morimoto\*<sup>3</sup>, Yoshihisa Mino\*<sup>3</sup>  
Tatsunobu Matsuda\*<sup>4</sup>, Sotaro Mizutani\*<sup>5</sup>, Yoshihide Kon\*<sup>5</sup>, Kazuhiro Hata\*<sup>5</sup>  
Hirofumi Ozono\*<sup>5</sup>, Taro Ikeda\*<sup>5</sup>, and Kenichi Sakai\*<sup>5</sup>

A cyclonic eddy was found in the eastern channel of the Tsushima Straits in early winter 2004 by ship-board ADCP observations. High concentration of chlorophyll *a* was observed in the surface layer near the center of the cyclonic eddy. The water mass with low temperature, high salinity and low dissolved oxygen was also observed in the bottom layer of the eddy.

Key words : Hydrographic surveys, Current measurement, Oceanic eddies, Bottom water, Straits

#### 1 はじめに

対馬海峡は、九州と韓国を結ぶ幅約200km、平均水深約100mの狭く浅い海峡であり (Fig. 1), 対馬暖流の日本海への流入口として、古くから精力的に海洋観測が行われてきた<sup>1-5)</sup>。近年、福岡-釜山間を往復する旅客フェリー船底に設置された超音波ドップラー流速計 (ADCP: acoustic Doppler current profiler) や対馬海峡に設置された海底設置型ADCP観測により、対馬暖流の詳細な流動構造を観測することによって、その年間平均流量や季節変動が明らかになった<sup>6-8)</sup>。また、対馬海峡に位置する壱岐・対馬や九州沿岸に設置された短波海洋 (HF: High Frequency) レーダーにより、対馬周辺の表層流速ベクトルの空間分布も明らかになりつつある<sup>9)</sup>。これらの詳細な観測によって、対馬東部に南西向き反流を形成する渦の存在が確認された<sup>7,9)</sup>。

対馬東部での反流や渦については、古くは辻田ら<sup>10)</sup>によって報告され、その存在が知られているが、その構造や

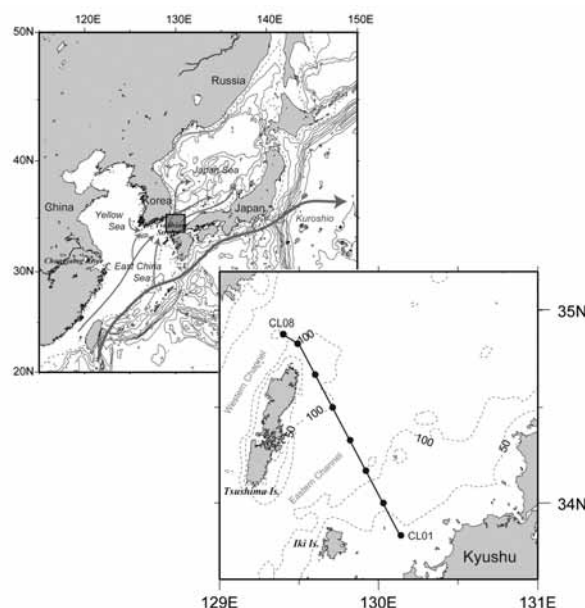


Fig. 1. A schematic view around the study area (upper-left panel) and a location map of the ADCP transect line (solid line) and the stations of CTD and CHLOROTEC observations (solid circle; lower-right panel). Contour lines show the bottom topography.

2005年5月19日受付. Received May 19, 2005.

- \* 1 水産大学校水産情報経営学科 (Department of Fishery Information and Management, National Fisheries University)
- \* 2 水産大学校海洋生産管理学科 (Department of Fishery Science and Technology, National Fisheries University)
- \* 3 名古屋大学地球水循環研究センター (Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University)
- \* 4 近畿大学大学院農学研究科 (Graduate school of Agriculture, Kinki University)
- \* 5 水産大学校練習船天鷹丸 (Training Vessel Tenyo Maru, National Fisheries University)

時空間変動に関する知見は少ない。本稿では、2004年初冬季に行われた観測によって対馬海峡東水道で確認された低気圧性渦の特徴について報告する。

## 2 観測資料

2004年初冬、水産大学校練習船天鷹丸によってCL測線上で2回の海洋観測が実施された。CL測線は、定期旅客船「かめりあ」によるADCP観測（以後、かめりあADCP観測）線上である<sup>9)</sup>。測点情報の詳細をTable 1に示す。以後、11月25-26日に行われた観測をCL-1、11月30日-12月1日に行われたものをCL-2と呼ぶ。本研究では、航走ADCP（3層式船底設置型=133kHz, 古野電気社製）観測、CTD（Conductivity Temperature Depth profiler, Seabird Electronics Inc.）観測、クロロテック（CHLOROTEC ACL-220, アレック電子社製）観測によって得られた資料を用いた。

ADCP観測深度は、CL-1観測で10, 30, 60m深、CL-2観測で10, 30, 80m深である。CL測線では、かめりあADCP観測によって潮流調和定数が明らかにされており、観測時の潮流成分（10分潮=Q<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>, MS<sub>f</sub>, M<sub>f</sub>）を推算することが可能である<sup>9)</sup>。しかしながら、調和定数は、水深18mから250mまで8m間隔で得られているため、本研究では10m深の潮流は18mのものを、その他は推算された潮流を鉛直方向に線形補間したものをを用いた。また、ADCP観測資料から潮流成分を除去したものを残差流とした。この残差流には、対馬暖流（傾圧

成分+傾圧成分）や潮汐残差流、吹送流など潮流以外の様々な成分が含まれている。

CTD観測による水温・塩分・溶存酸素資料、クロロテック観測による蛍光強度資料は、CL測線の各観測点で得られた（Fig. 1, Table 1）。また、CTDに装着されたニスキンボトルによって得られた試水を用いて塩分・クロロフィル濃度測定を実施した。これらの測定値を用いてCTDの塩分値の更正、蛍光強度からクロロフィルa濃度への変換を行った。ただし、CTDで測定される溶存酸素データの更正は行っていない。

## 3 対馬海峡東水道で観測された低気圧性渦

Fig. 2に、CL-1観測（11月25-26日）における潮流および潮流成分除去前後の深度別流速ベクトルを示す。各深度（10, 30, 60m深）の流速ベクトルを比較すると、潮流だけでなく潮流成分除去後の残差流も鉛直方向にほぼ同様である。この要因として海面冷却による表層混合層の発達によって、60m深付近まで密度がほぼ一定となっていることが挙げられる（Fig. 3）。また、潮流成分除去前後の流速ベクトルを比較すると、両者の構造は大きく異なっており、対馬海峡での流動場は潮流の影響を大きく受けている。Fig. 2 (c)の流速ベクトルによると、各深度でCL04付近に北東向き1.0kt（1.0kt=51.44cm s<sup>-1</sup>）以上の最強流部があり、少し弱いながらCL02付近にも流速の極大が観測されている。CL05-06において、流向は西向きに反転しており、CL05付近に反時計回りの渦の存在が示唆される。

Table 1. Observation locations and time table.

Date	Leg	Station	Start (JST)	Latitude (deg-min)	Longitude (deg-min)	End (JST)	Latitude (deg-min)	Longitude (deg-min)	Depth (m)
Nov. 25	CL-1	CL01	22:20	33-50.13	130-08.74	22:37	33-50.17	130-08.76	49
		CL02	23:48	33-59.94	130-02.12	0:09	34-00.00	130-02.00	80
Nov. 26		CL03	1:20	34-10.16	129-55.65	1:40	34-10.25	129-55.60	104
		CL04	2:47	23-20.00	129-48.92	3:09	34-20.10	129-48.86	111
		CL05	4:16	34-30.19	129-42.55	4:40	34-30.37	129-42.63	103
		CL06	5:41	34-39.86	129-35.85	6:01	34-39.89	129-35.88	89
Nov. 30	CL-2	CL08	22:53	34-54.02	129-23.55	23:25	34-54.15	129-23.82	224
Dec. 1		CL07	0:11	34-50.00	129-30.15	0:33	34-50.00	129-30.22	98
		CL06	1:38	34-39.95	129-36.05	1:54	34-39.91	129-36.04	90
		CL05	3:01	34-29.86	129-42.63	3:19	34-29.75	129-42.64	104
		CL04	4:27	34-19.94	129-49.15	4:49	34-19.89	129-48.93	110
		CL03	5:56	34-10.09	129-55.62	6:17	34-09.87	129-54.49	103
		CL02	7:21	33-59.82	130-01.93	7:52	33-59.62	130-01.67	80
		CL01	8:58	33-49.88	130-08.36	9:13	33-49.79	130-08.26	49

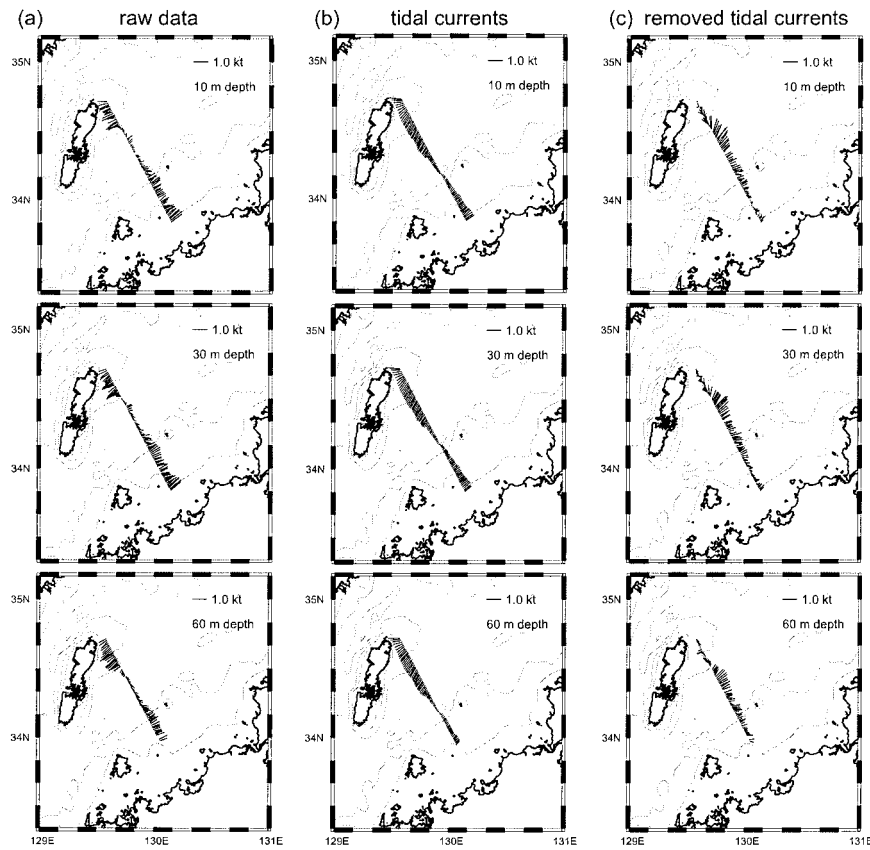


Fig. 2. Current vectors observed by ADCP (a), tidal currents (b) and current vectors removed tidal currents (c) at 10, 30, 60 m depths along the CL line during 25 to 26 November 2004.

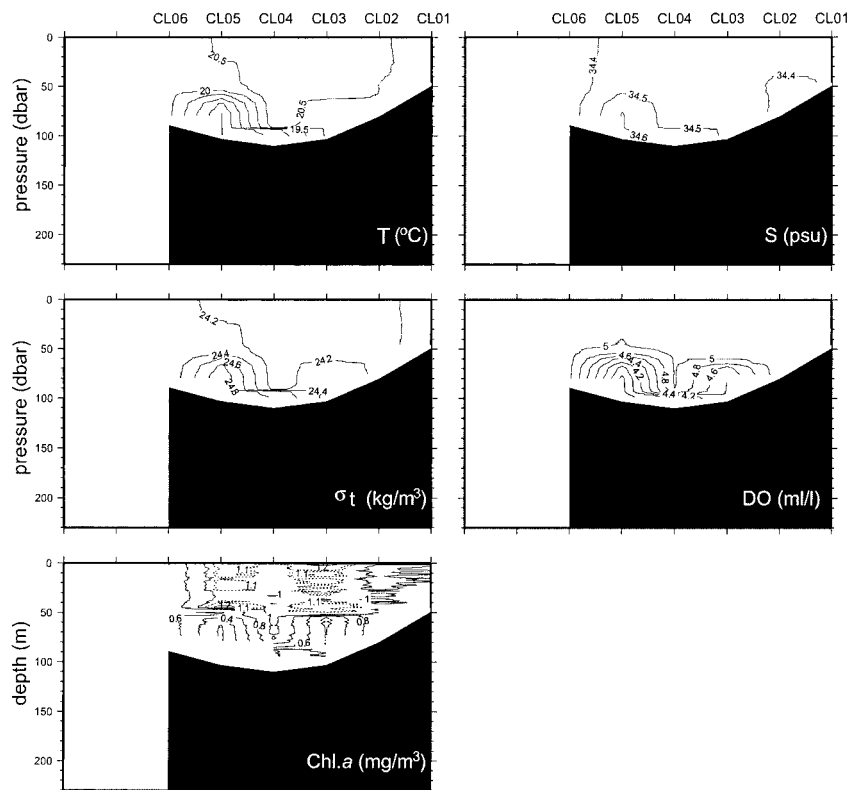


Fig. 3. Vertical sections of temperature, salinity, density, dissolved oxygen and chlorophyll *a* along the CL line during 25 to 26 November 2004.

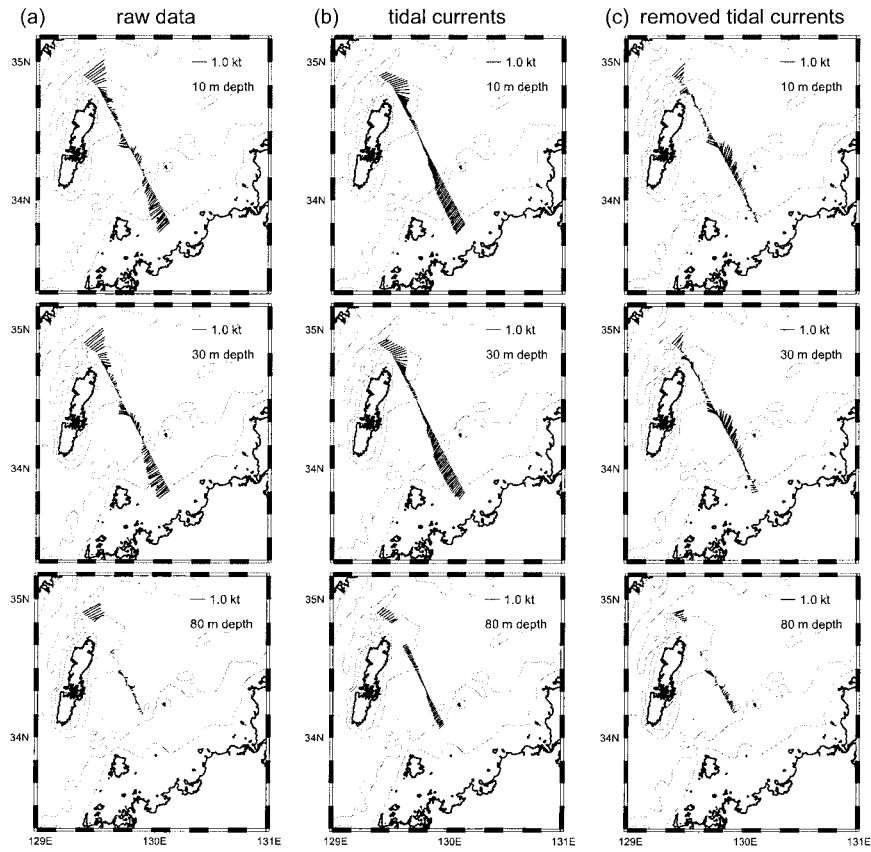


Fig. 4 . As Fig.2 except for 30 November to 1 December 2004.

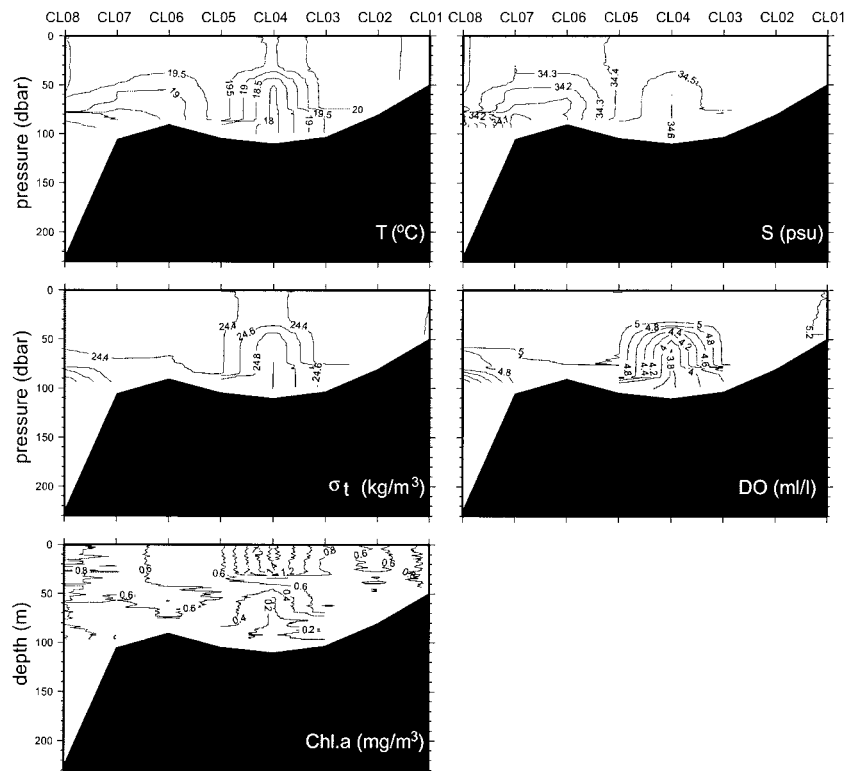


Fig. 5 . As Fig.3 except for 30 November to 1 December 2004.

CTD・クロロテックによる断面図 (Fig. 3) では、ADCP観測結果に対応して、反時計回りの渦の中心に近いCL05において50m以深に低温 (<19℃)・高塩 (>34.5psu)・低酸素の水塊が存在している。クロロフィル $a$ 濃度は、CL03と05の表層から50m深付近まで比較的高く (>1.1mg m<sup>-3</sup>)、底層の低温・高塩・低酸素の水塊中では低くなっている。

Fig. 4は、CL-2観測 (11月30日, 12月1日)における深度別流速ベクトルである。潮流成分除去後のFig. 4 (c)によると、西水道に位置するCL07-08において1.0kt以上の強い北東向きの流れが、またCL06-07において南西向きの反流が観測されている。一方、東水道では最強流部がCL03付近に移動し、CL04付近で流向が反転している。80m深の流速は上層より小さいが、流向はほぼ上層と同じである。東水道の残差流をCL-1観測結果と比較すると、5日間でその水平構造は大きく変化しており、反時計回りの渦の中心は、CL04付近に存在している。

CTD・クロロテック観測結果 (Fig. 5)によると、CL-1観測でCL05付近に存在していた低温 (<19℃)・高塩 (>34.5psu)・低酸素の水塊特性を持つ底層水は、CL04に存在している。また、CL04では、表層にクロロフィル $a$ 濃度の極大 (>1.2mg m<sup>-3</sup>)が存在しており、この濃度はCL-1観測時にCL05の表層で観測された値よりも高くなっている。

#### 4 考 察

Takikawa et al.<sup>7)</sup>によると対馬東部の南西向きの反流は、ほぼ周年存在し、夏季から秋季にかけて強くなる傾向がある。また、彼らは長崎大学練習船鶴洋丸によって2000年6月にCLラインの約10NM下流で行われたADCP観測結果とフェリーに搭載されたADCP観測結果を比較した。これらの観測結果により、対馬東部には北に時計回り、南に反時計回りの2つの渦が存在し、この2つの渦によって南西流が形成されていることが示唆された。また、丸山ら<sup>11)</sup>は浅水波モデルを用いて対馬東部の南西向き反流の発生機構を調べた。彼らは、この南西向き反流は、夏季に強まる傾圧構造下で、両水道を通過する分枝流が、対馬島陰に形成する暖・冷水性の地衡渦の境界流であると述べている。

ここで、本研究で観測された反時計回りの渦が、丸山ら<sup>11)</sup>の示した渦かどうか検討する。まず、Fig. 3およびFig. 5より、渦中心付近で密度が極大値をとることから、今回対馬海峡東水道で観測された反時計回りの渦は、低気圧性

渦であると考えられる。断面図によると、夏季と異なり上層は混合されているものの渦底層に低温・高塩の水塊があり、この低気圧性渦は丸山ら<sup>11)</sup>の示した傾圧構造下で対馬島陰にできる後流渦の条件と合致する。

一方、低気圧性渦の底層で観測された塩分は34.5psu以上と既往の研究結果<sup>3)</sup>と比較するとこの時期としては高く、春から初夏にかけて対馬暖流表層で観測されるものに近い。また、溶存酸素濃度は表層に比べ底層でかなり低いいため、この水塊は形成されてからかなりの時間を経過していると考えられる。これらの結果から、今回低気圧性渦の底層で観測された水塊は、局所的な力学で形成されたとは考え難く、低温・高塩分水の対馬海峡東水道への移動を示唆している。この水塊の起源を明らかにすることは、日本海や東シナ海における海水特性や水塊形成について考える上で重要な課題である。

Fig. 2からFig. 5によると、CL測線上の流動構造は5日間で大きく変化している。この要因として、今回CL-1, CL-2観測とともに観測された低気圧性渦の挙動の影響が考えられる。対馬東部の渦の挙動に関して、山本ら<sup>9)</sup>のHFレーダーによる観測結果によると、直径20-30kmの反時計回りの渦がレーダー視界内を南西から北東へ数日間移動していた。また、丸山ら<sup>11)</sup>によると傾圧構造下で島陰に生成される渦が剥離し、消滅するまでの期間は十数日であった。一方、対馬東部では流動場に対する潮流の寄与率が高く<sup>6)</sup>、潮汐混合によって大潮小潮の潮汐周期に関連した約2週間周期の変動<sup>12)</sup>が影響していることも考えられる。2004年11月27日が大潮であることから低気圧性渦が観測された時期は、潮汐混合が大きいことが予想されるが、潮汐と対馬海峡東水道の低気圧性渦の関係は不明瞭な部分が多く、今後の課題とする。

CL-2観測でCL04に存在していたクロロフィル $a$ の高濃度域は、衛星海色画像からも確認された (Fig. 6)。これらの結果から、低気圧性渦による下層からの高栄養塩水の湧昇が示唆される。CL-2と同様に低気圧性渦が確認されたCL-1観測では、クロロフィル $a$ 濃度はCL-2観測時より低いが、この原因として底層水の分布深度がCL-2観測のときより深いことや南西向きの反流が弱いことから測線が渦の中心から外れていたか、もしくは渦が未発達であった可能性がある。

#### 謝 辞

本観測に際して多大な御協力をいただいた水産大学校生物生産学科上野俊十郎教授、水産大学校海洋生産管理学科

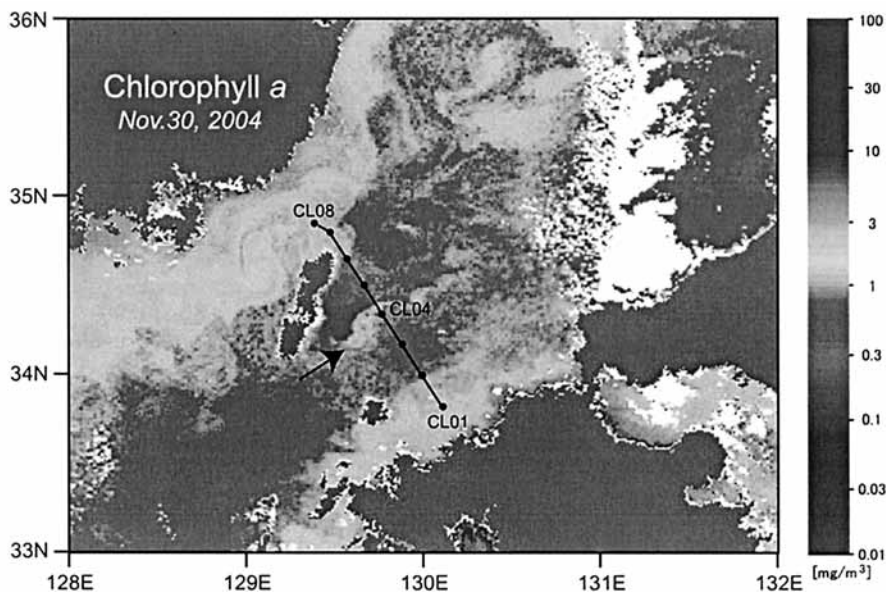


Fig. 6. Chlorophyll *a* distribution around the Tsushima Straits observed by MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) onboard on the Aqua (EOS PM-1) satellite on 30 November 2004. High concentration around CL04 is indicated by arrow.

中村武史教員，水産大学校練習船天鷹丸の乗組員の方々ならびに学生諸君に感謝いたします。

本稿で使用した衛星画像は，宇宙航空研究開発機構 (JAXA) / 東海大学 (TSIC/TRIC) によって提供されました (<http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/ADEOS/modnrt/index.html>)。

## 文 献

- 1) 日高孝次・鈴木皇：日本海洋学会誌，6，28-31 (1950).
- 2) 俵悟・三井田恒博・藤原建紀：沿岸海洋研究ノート，22，41-51 (1982).
- 3) 小川嘉彦：水産海洋研究会報，43，1-8 (1983).
- 4) 磯辺篤彦：海と空，69，159-174 (1993).
- 5) Isobe, A., M. Ando, T. Watanabe, T. Senjyu, S. Sugihara and A. Manda : *J. Geophys. Res.*, 107(C7), 3065, doi:10.1029/2000JC000702 (2002).
- 6) Takikawa, T., J.-H. Yoon and K.-D. Cho : *J. Oceanogr.*, 59, 37-47 (2003).
- 7) Takikawa, T., J.-H. Yoon and K.-D. Cho : *J. Phys. Oceanogr.*, 35, 1154-1168 (2005).
- 8) Teague, W. J., H. T. Perkins, G. A. Jacobs and J. W. Book : *Cont. Shelf Res.*, 21, 545-561 (2001).
- 9) 山本秀幸, 増田章, 草場忠夫, 丸林賢次, 石橋道芳, 奥野章, 藤井智史, 佐藤健治 : *Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.*, 122, 9-23 (2002).
- 10) 辻田時美：日本海洋学会誌，10，1-13 (1954).
- 11) 丸山直子・広瀬直毅・尹宗煥：九州大学大学院総合理工学報告，25，279-283 (2003).
- 12) Hibiya, T : *J. Phys. Oceanogr.*, 28, 1224-1235 (1998).