

## 2007年宇和海下波湾における有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* 赤潮の 底入り潮の発生による消滅

兼田淳史<sup>1†</sup>, 小泉喜嗣<sup>2</sup>, 高橋大介<sup>3</sup>, 福森香代子<sup>4</sup>, 郭 新宇<sup>5</sup>, 武岡英隆<sup>5</sup>

### Disappearance of the bloom of the harmful dinoflagellate *Karenia mikimotoi* induced by the occurrence of bottom intrusion in Shitaba Bay, Uwa Sea, in 2007

Atsushi KANEDA<sup>1†</sup>, Yoshitsugu KOIZUMI<sup>2</sup>, Daisuke TAKAHASHI<sup>3</sup>, Kayoko FUKUMORI<sup>4</sup>,  
Xinyu GUO<sup>5</sup> and Hidetaka TAKEOKA<sup>5</sup>

As a blooming (or akashio) of a harmful dinoflagellate *Karenia mikimotoi* occurred in coastal areas of the Uwa Sea, Japan, in the summer of 2007, intensive observations were conducted in Shitaba Bay on the Uwa Sea. These observations were to examine how spatio-temporal distributions of *K. mikimotoi*'s akashio are related to physical phenomena, such as *kyucho* (intrusion of warm oceanic water into the surface layer) and bottom intrusion (intrusion of cold oceanic water into the bottom layer from the shelf-slope region). The population density of *K. mikimotoi* in the surface layer began to decrease on around 17 July before disappearing entirely on around 21 July. Mooring observation and repeated surveys showed that vertical circulation due to a bottom intrusion occurred on around 17 July. With the occurrence of the phenomenon, chlorophyll *a* (chl-*a*) concentration, which is an index of *K. mikimotoi* abundance, varied. In addition, the area of high chl-*a* concentration was likely moved passively by ocean currents along with the bottom intrusion. Time-series sampling data from an adjacent bay exhibited temporal changes that were similar to those of the *K. mikimotoi* blooming in Shitaba Bay, suggesting that physical oceanic perturbations significantly affect the disappearance of *K. mikimotoi* bloom in the Uwa Sea.

**Key words:** *Karenia mikimotoi*, red tide, Uwa Sea, bottom intrusion, water exchange

#### はじめに

宇和海は豊後水道の東側に位置し、複雑に入り組んだ海岸線は多くの内湾を形成している (Fig. 1)。宇和海の中央部

に位置する下波湾は湾口幅1.8 km程度、奥行き2.8 km程度の内湾で、海岸線付近は渚をもたず急峻であり、湾奥付近の水深は30 m程度、湾中央部から湾口にかけては50–60 m、湾外は70 m程度である (Fig. 1c)。湾外の流れは潮流の強い豊後水道中央付近に近づくため湾内より強く、三浦半島先端付近や島周辺 (Fig. 1cの矢印の周辺) では下げ潮時に小規模渦が形成され、水平シアや渦による湧昇あるいは鉛直混合が生じる (西村・武岡, 1999)。また、これまでの研究によって宇和海の内湾の流れは通常弱く、外洋系水の進入現象である急潮と底入り潮が発生した際に一時的に強くなることが明らかにされている (たとえば, Takeoka and Yoshimura, 1988; 速水ほか, 2006)。ここで急潮とは上層で発生する黒潮域由来の暖水の進入現象である (武岡ほか, 1992)。底入り潮は下層で発生する陸棚斜面域由来の冷水の進入現象で、宇和海に栄養塩を供給する重要な現象であることから「底入り潮」と名づけられた (武岡, 2001)。宇和海における急潮の調査は宇和島湾で最初に実施され、急潮の発生による水温や流速の変化が調べられた

2009年7月10日受付, 2010年5月17日受理

1 福井県立大学海洋生物資源学部

Fukui Prefectural University, Department of Marine Bioscience, 1–1 Gakuen-cho, Obama, Fukui 917–0003, Japan

2 愛媛県農林水産研究所水産研究センター

Ehime Research Institute of Agriculture, Forestry and Fisheries, Fisheries Research Center, 5516 Shitaba, Uwajima, Ehime 798–0104, Japan

3 名古屋大学地球水循環研究センター

Hydrosphere Atmospheric Research Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464–8601, Japan

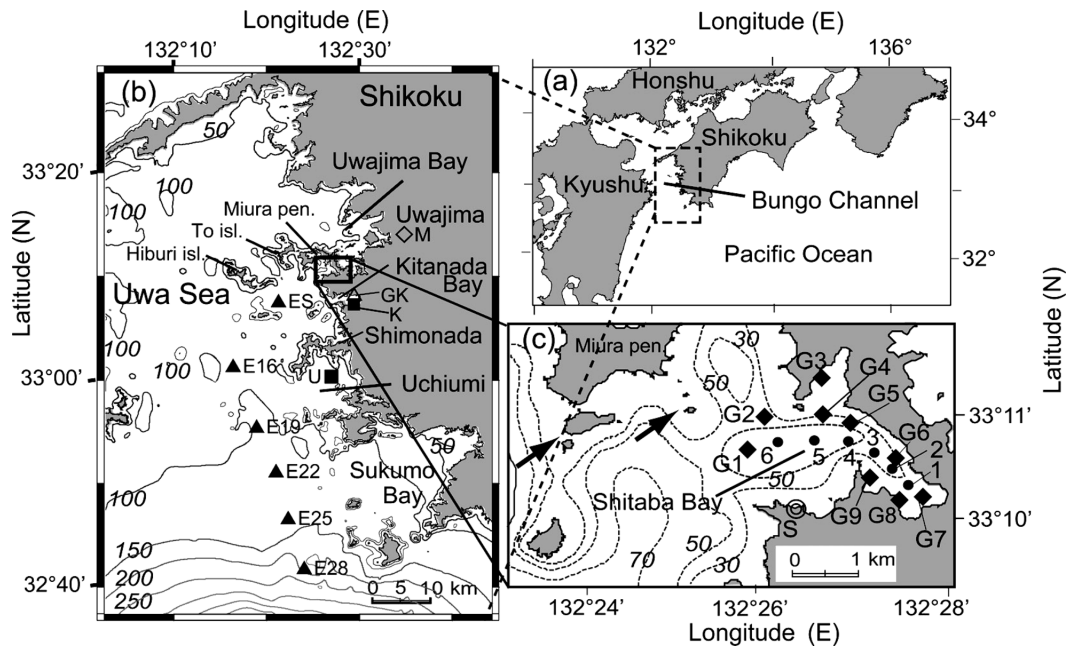
4 京大学生態学研究センター

Center for Ecological Research, Kyoto University, 2–509–3 Hirano, Otsu, Shiga 520–2113, Japan

5 愛媛大学沿岸環境科学研究センター

Center for Marine Environmental Studies, Ehime University, 2–5 Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime 790–8577, Japan

† kaneda@fpu.ac.jp



**Figure 1.** Location and bathymetry maps of the Bungo Channel, Uwa Sea and Shitaba Bay. (b) ▲: ES, E16, E19, E22, E25, E28; sample sites of the Ehime Fisheries Research Center. ◇: Meteorological data observed at station M. ■: Water temperature monitoring stations, U in Uchiumi and K in Kitanada Bay. △: Water sampling point in Kitanada Bay (GK). (c) ●: 1-6; observation points in Shitaba Bay. Water samplings were conducted at stations S (◎) and G1-G9 (◆). Water temperature was also measured at S. Arrows indicate areas where topographic eddies develop (after Nishimura and Takeoka, 1999). Numbers on the isobaths are depth in meters.

(Takeoka and Yoshimura, 1988). その後、急潮の特徴や発生機構を解明するための多くの研究が行われ、宇和海の急潮は豊後水道南部から黒潮系の海水が四国西岸を沿うように間欠的に北上する現象であることが明らかにされている(たとえば、武岡ほか, 1992)。急潮は内湾の海水交換を促進させる働きがあり、珪藻類の増殖に重要な役割を果たしている(小泉, 1991; 川端・佐竹, 1992; 小泉・河野, 1994)。一方、底入り潮に関する研究は、豊後水道への栄養塩の供給に関する研究が契機となっている。小泉・河野(1994)は下波湾で急潮後に湾外から栄養塩を豊富に含む冷水が流入することを指摘し、その後、小泉(1999)は豊後水道南部底層の栄養塩の豊富な冷水が下波湾まで到達していることを報告した。Kaneda et al. (2002)は陸棚斜面上における流速計の係留観測と内海(うちうみ, Fig. 1b)での水温計の係留観測の結果から、係留観測期間中に発生した底入り潮の速さは約  $15 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  であったこと、そして底入り潮が成層期に繰り返し発生することを示した。また、速水ほか(2005)は北灘湾(Fig. 1b)において、底入り潮の発生に伴い栄養塩の豊富な冷水が進入し、湾内の植物プランクトンの生産を支えていることを報告した。

宇和海の内湾では、魚類や真珠などの養殖が盛んに行われているが、しばしば有害赤潮が発生して甚大な漁業被害を与えている。赤潮の発生や被害状況をとりまとめた「瀬

戸内海の赤潮」によると、1975年以降に宇和海で最も多くの赤潮被害を引き起こした種は *Karenia mikimotoi* であり、赤潮被害事例計30件のうち18件の被害を引き起こしている(瀬戸内海漁業調整事務所, 2008)。過去に行われた *K. mikimotoi* に関する研究から、その出現域は流れによって大きく変化することが知られている。たとえば、小泉ほか(1994)は、西部瀬戸内海において *K. mikimotoi* 赤潮が移流・拡散によって初期出現域から広範囲に拡大したことを報告している。また、宮村ほか(2005)は、2003年に豊後水道北西部に位置する臼杵沿岸で発生した *K. mikimotoi* 赤潮の出現特性を調べ、初期出現域から移流によって臼杵湾に到達したことを示した。宇和海で *K. mikimotoi* の出現域の変化について報告された例はないが、*K. mikimotoi* などの有害赤潮が発生した際に、急潮の発生によって赤潮の出現域が減少することが経験的に知られている。また、底入り潮も内湾で海水交換を引き起こすことを考えると、急潮と同様に赤潮の出現域の変化を引き起こす可能性がある。

2007年6月22日、宇和島湾と北灘湾において海水が着色し、愛媛県水産研究センター(以下、水研センター)によって *K. mikimotoi* 赤潮の発生が確認された。その後、*K. mikimotoi* 赤潮は下波湾など宇和海の中・北部域を中心にその出現域を拡大しながら、約1ヶ月にわたり継続し、養

殖魚介類に約3億7400万円もの被害を与えた。

われわれは、*K. mikimotoi* 赤潮の出現域の変化とその変化を引き起こす要因を明らかにするため、赤潮の発生当初より下波湾で調査を開始した。可能な限り毎日 *K. mikimotoi* の出現状況を調べたところ、7月中旬に *K. mikimotoi* 遊泳細胞の急速な減少が観察され、わずか数日後に赤潮は消滅した。この *K. mikimotoi* の急速な減少に着目し、その要因について検討したところ、底入り潮の発生が関係していることがわかった。この結果は宇和海の *K. mikimotoi* 赤潮に関する新たな知見であり、有害赤潮対策として効果的な養殖生簀の配置や避難先を考えるうえで有効かつ重要な情報になることから、ここに報告する。

### 観測および解析資料・データ

本研究では、下波湾に面した水研センター棧橋（測点S, Fig. 1c）における採水調査、湾内の測点5（Fig. 1c）における係留観測、水研センターの試験船「よしゅう」と「しぶき」を用いた船舶調査を実施した。

測点Sで行った採水調査は、2007年6月22日から7月23日まで可能な限り1日に1回実施した。クロロフィル蛍光センサーを備えた多項目水質計（AAQ1182；アレック電子社製）を用いて海面から海底（水深約12m）までのクロロフィル蛍光値を測定し、最大値を示した深さの海水を北原式採水器で採水した。顕微鏡下でSedgwick-Rafter計数板を用いて、採取した海水1ml中の *K. mikimotoi* の遊泳細胞数を数えた。

測点5で実施した係留観測では、水温、流向、流速を測定した。水温は、メモリ式水温計（Hobo Water Temp Pro v2；Onset Computer社製）を用いて海面下2mから50mまでの計11層（2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50m）で10分おきに測定した。流向、流速はADCP（超音波ドップラー流速計、Workhorse ADCP Sentinel 600kHz；RD-Instruments社製）を海底に設置し、海面下8mから52mまで4m間隔で20分おきに測定した。係留系は6月28日から8月23日まで設置したが、本研究におけるデータの解析期間は観測点Sで *K. mikimotoi* が確認されなくなった7月23日までとした。流向、流速値は5–8 cm·s<sup>-1</sup> の振幅を持つ半日周期の潮流成分が卓越していることを示していたが、本研究の解析では、急潮、底入り潮などの潮流以外の流れの大きさを明確にするため、両現象に関する過去の研究に従い（たとえば、小泉・河野, 1994）、25時間の移動平均を用いて潮流成分などの短周期成分を取り除いた値を解析に用いた。

船舶調査は、7月6, 8, 18, 19日の計4回実施した。測点はFig. 1cに示す1–6である。各測点では、クロロフィル蛍光センサーを備えたCTD（Conductivity Temperature Depth profiler, ACL-215DK；アレック電子社製）を用いて、海面から海底までの水温、塩分、クロロフィル蛍光値を測

定した。7月18, 19日の観測は大型の試験船「よしゅう」を用いて行ったため、養殖生簀近傍の測点1, 4は欠測となった。解析にあたり、得られたクロロフィル蛍光値は現場海水のクロロフィルa濃度（以下、chl-a）の測定結果を用いてクロロフィル濃度に換算した。

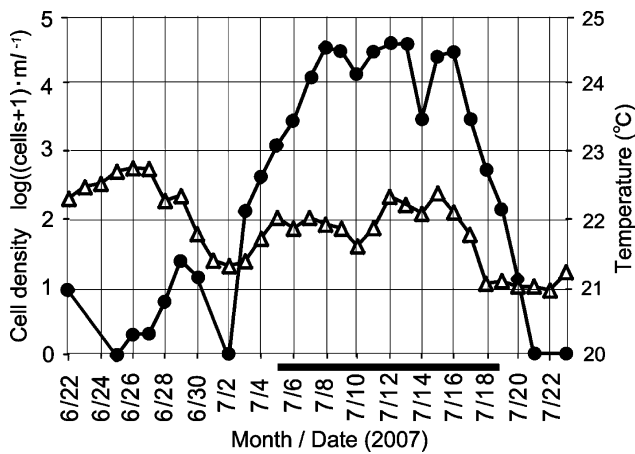
水研センター、愛媛大学、愛媛県漁連は共同で、下波湾の測点S（Fig. 1c）、北灘湾の測点K（Fig. 1b）など宇和海沿岸の9測点で通信衛星オープンコム対応型水温観測ブイ（ZFU-WT2-S；ゼニライトブイ社製）を設置し、海面下5mの水温を2時間おきに測定している。本研究では下波湾、北灘湾で測定されている海面下5mの水温データを用いて日平均値を算出し、赤潮の出現状況の変化と比較した。また、内海の測点U（Fig. 1b）では同じ観測ブイを利用して、計9層（海面下2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60m）の水温が30分おきに測定されている。測点Uで測定された多層水温データは、底入り潮の発生状況を調べるために用いた。海面下15, 20m層は欠測であったため、解析にはそれら以外の層の7月7–23日のデータを用いた。

本赤潮発生期間中、水研センターは沿海漁業協同組合と協力して大規模な赤潮調査を下波湾、北灘湾、下灘、宇和島湾、戸島などで実施した。調査は宇和海一帯の着色海域で行われ、測点Sと同じ方法で海水1ml中の *K. mikimotoi* の遊泳細胞数を数えている。本研究では、この赤潮調査のデータが記載された資料を解析し、下波湾および下波湾以外での出現状況を調べた。下波湾における測点はFig. 1cに示すG1–G9で、湾奥から湾口付近までの *K. mikimotoi* の出現状況を把握した。これらの測点における採水層は海面下0–1mと5mである。調査は *K. mikimotoi* による赤潮が確認された7月5日から赤潮がみられなくなった20日まで、台風4号により欠測となった7月14, 15日を除き毎日行われた。下波湾以外においても同様の調査が実施されたが、調査頻度が一定ではなかった。そこで、本研究では2007年7月中旬に、*K. mikimotoi* の遊泳細胞がほぼ毎日計数されていた北灘湾の測点GK（Fig. 1b）のデータを用いた。

赤潮発生期間中における豊後水道の水温、塩分分布を理解するため、「豊後水道海況情報」を利用した。「豊後水道海況情報」は、水研センターが豊後水道の定点で実施する海洋観測の結果をとりまとめた資料で、豊後水道の水温、塩分の分布を理解することができる。本研究では、7月18, 19日の観測結果を示した同情報の6測点（Fig. 1bに示す測点ES, E16, E19, E22, E25, E28）のデータを利用した（愛媛県水産試験場, 2007）。また、宇和島のアメダスデータ（測点M, Fig. 1b）の風、日照時間、降水量のデータを利用した（気象業務支援センター, 2009）。

### 結果

測点Sにおける *K. mikimotoi* の細胞密度（Fig. 2）は、6月下旬から次第に増加しはじめ、7月2日に一時的に減少し



**Figure 2.** Fluctuations in water temperature at a depth of 5 m (open triangles) and cell density of *Karenia mikimotoi* (solid circles) at station S. The solid horizontal bar under the x-axis shows the period when the blooming (akashio) of *K. mikimotoi* appeared in Shitaba Bay.

たが、7月5日には $1,000 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ を超えた。同日、海水の着色が視認されたことから、下波湾における *K. mikimotoi* 赤潮の発生日を7月5日とした。7月7日には細胞密度は $10,000 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ を超え、一時的な減少は認められるものの、7月16日までは高濃度の赤潮が継続した。7月17日から細胞密度は減少傾向に転じ、7月18日には $1,000 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ を下回り、同日以降、赤潮は視認できなくなった。その後も *K. mikimotoi* は減少し続け、7月23日には $1 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 以下となった。水温は細胞密度が高濃度であった7月上旬から中旬まで $22^\circ\text{C}$ 程度で推移していたが、細胞密度が減少した7月17日から $22^\circ\text{C}$ 以下に低下し、その後は $21^\circ\text{C}$ 程度で推移した。

下波湾内の測点G1-G9で実施された赤潮調査の結果 (Fig. 3) をみると、7月5日以降、*K. mikimotoi* が測点Sだけでなく湾内全域で急激に増加したことが明瞭である。海面下0-1 mでは、7月7日から16日までの間、 $10,000 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ を上回る高濃度の赤潮が形成され、海面下5 mにおいても7月10日から17日までの間、 $1,000 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 以上の細胞密度が確認された。7月17日以降、いずれの層においても細胞密度は低下しており、*K. mikimotoi* の急速な減少は、測点Sのみならず、湾内全域での共通の現象であった。なお、上記の期間、採取した海水中には常に *K. mikimotoi* が優占しており、他の植物プランクトンはほとんど観察されなかった。

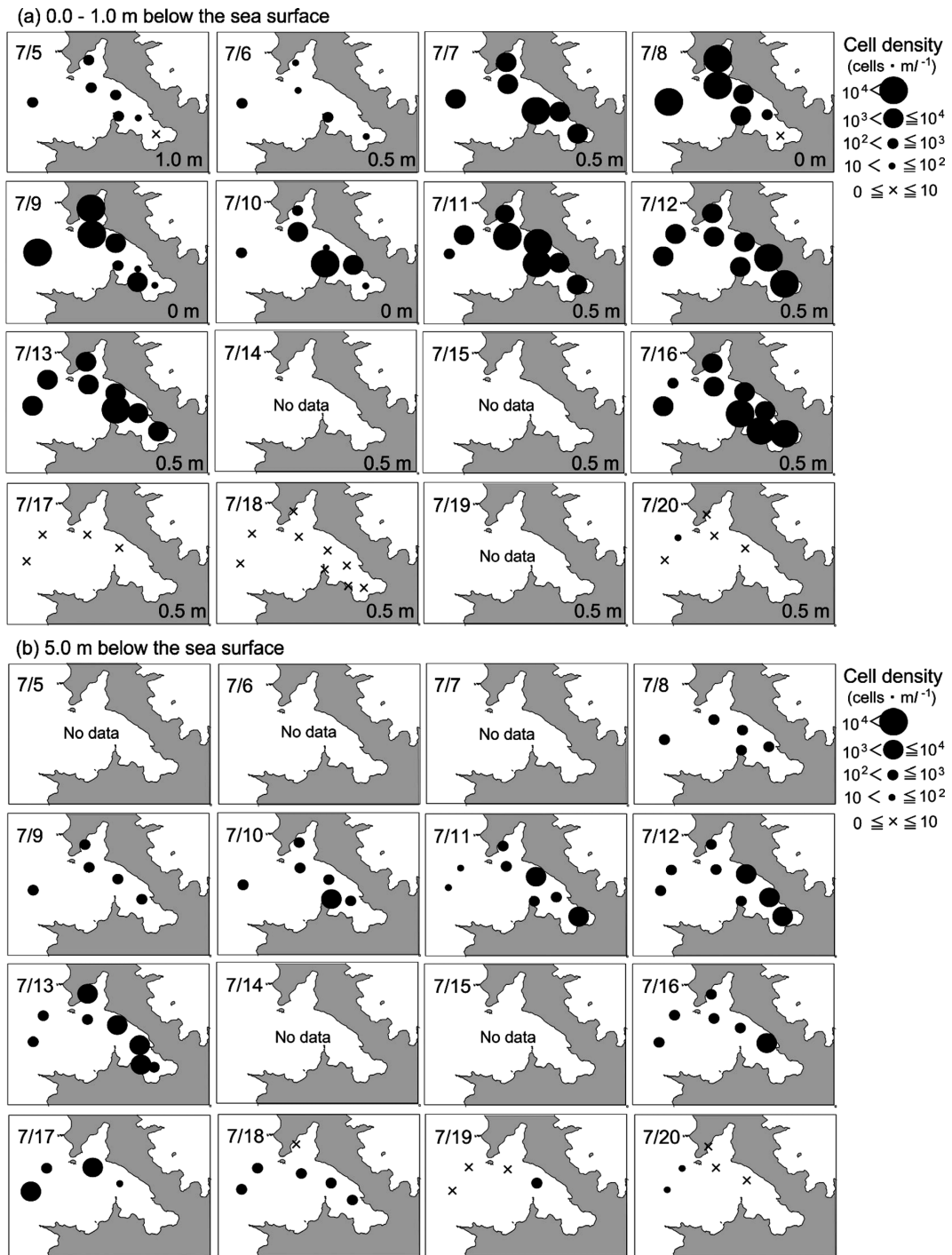
測点5における係留観測によって得たデータを用いて、6月30日から7月23日までの水温、流向・流速の変化について述べる (Fig. 4)。水温の時系列をみると、海面下2 mの水温は7月上旬から7月17日頃まで約 $22.5^\circ\text{C}$ で推移し、大きな変化はない。海面下10 mから50 mまでの水温は6

月30日から7月15日頃まで、それぞれ $2^\circ\text{C}$ 程度の幅で変化している。7月13-15日にかけて台風4号が通過した際に、中・下層の水温は $1^\circ\text{C}$ 程度変動している。その期間の流れをみると、7月13-14日は上層で流入、下層で流出の鉛直循環流が発生し、15日からは鉛直循環流の向きが変わり上層で流出、下層で流入の流れが発生している。7月17日の後半には下層の水温が以前よりも低下しはじめ、その後、海面下40 m以深で $19^\circ\text{C}$ 以下になった。また、7月16-18日にかけて下層で $1-2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度の湾奥に向かう流れが発生し、上層では同程度の湾口への流れが生じている。7月17日以降 *K. mikimotoi* の細胞密度が減少した際には、湾内下層では冷水が湾内に流入し、上層では湾外へ流出する流れが生じていた。

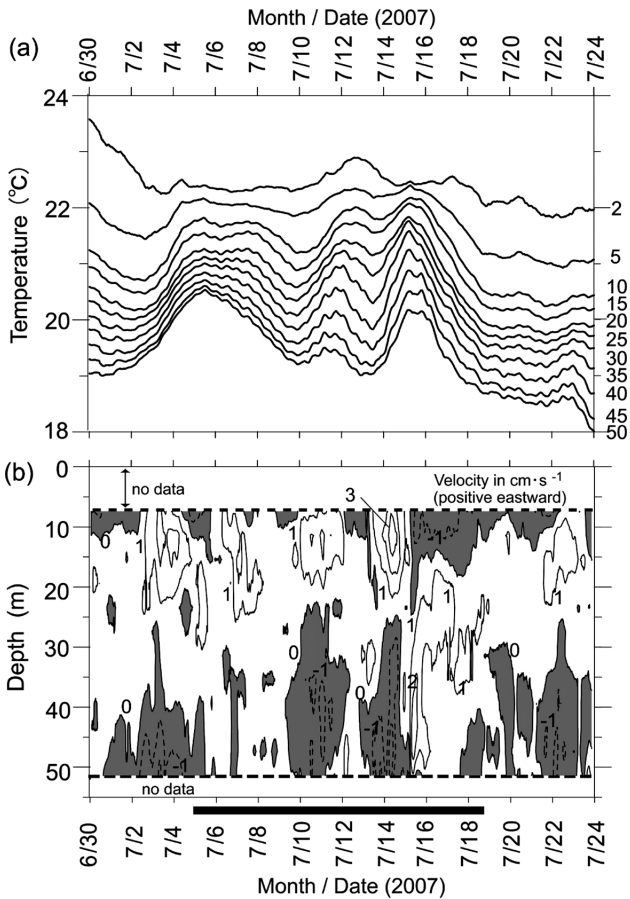
船舶調査の結果 (Fig. 5) から、7月6, 8日の水温の鉛直断面図 (a, b) をみると、上層は $21.0-22.5^\circ\text{C}$ 程度、下層は $20^\circ\text{C}$ 程度の海水が存在している。湾内に河川がないため塩分の分布に大きな差はないが、7月上旬は頻りに降雨があり (気象業務支援センター, 2009)、表層がやや低塩分化していた。密度は表層で23.5程度、下層では24.5程度で、chl-aは湾内全域の表層から中層で高濃度になっている。7月18, 19日 (c, d) の断面図をみると、湾内下層には $19^\circ\text{C}$ 以下の冷水が存在しており、冷水の進入は湾スケールで発生したことがわかる。

7月6日と18日のデータを用いて作成したTSダイアグラム (Fig. 6) から、上層は0.2-0.5程度、低塩分化したことがわかる。これは降雨の影響と思われる。7月18日のデータをみると、40 m以深で7月6日に観測されなかった $19^\circ\text{C}$ 以下の海水が存在し、その上層には7月6日の底層水と同様の性質を持つ水が存在している。TSダイアグラム及び、この期間の流れのデータから、7月17日頃に湾内下層には低温水が湾外から流入し、それまで下層にあった海水は中層へ位置するようになり、上層からは湾内水が湾外へ流出したと考えられる。次に、その期間のchl-aの分布の変化 (Fig. 5) に着目する。前述したように、各観測日に測点S, G1-G9で実施された採水調査では、上層には *K. mikimotoi* が優占し、他の植物プランクトンはほとんど観察されなかったことから、chl-aの分布変化は *K. mikimotoi* の細胞密度の変化を表していると考えられる。7月6, 8日の断面図には上層付近に $4.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ を超えるchl-aが存在していた。7月18日には湾奥側は低濃度となり、湾口側の海面下15 m以浅だけで高濃度域が存在する状況に変化していた。7月19日はさらに低濃度になり、全層で $4.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下となった。

下波湾で生じた水温低下や流れの変化と底入り潮との関連性をみるために、宇和海南部・内海の測点U (Fig. 1b) における水温時系列 (Fig. 7) と、7月18, 19日に観測された下波湾沖から豊後水道南部の陸棚斜面域にかけての水温、塩分、密度の断面図 (Fig. 8) をそれぞれ示す。Fig. 7



**Figure 3.** Horizontal distributions of *Karenia mikimotoi* at (a) 0.0–1.0 m below the sea surface and (b) 5.0 m below the sea surface in Shitaba Bay from 5 to 20 July 2007. The depth of sampling layer is shown at the lower right of each panel (a).



**Figure 4.** (a) Fluctuations in water temperature measured at 11 layers (2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 and 50 m below the sea surface) and (b) velocity (eastward component) from 30 June to 24 July at station 5. Data were calculated using a 25-h running mean. Contour interval is  $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Shaded areas are for negative values. Eastward (westward) flow is consistent with the component of flow toward the head (mouth) of the bay. The solid horizontal bar under the x-axis shows the period when the blooming (akashio) of *Karenia mikimotoi* appeared in Shitaba Bay.

から、7月16日から海面下50m以深で $17.5^\circ\text{C}$ 以下の冷水が進入し、その冷水の進入に伴ってほぼ全層で水温が低下したことがわかる。また、Fig. 8の水温、塩分の鉛直断面図から、陸棚斜面域から豊後水道底層へ低温・高塩分の海水が張り出していることがわかる。

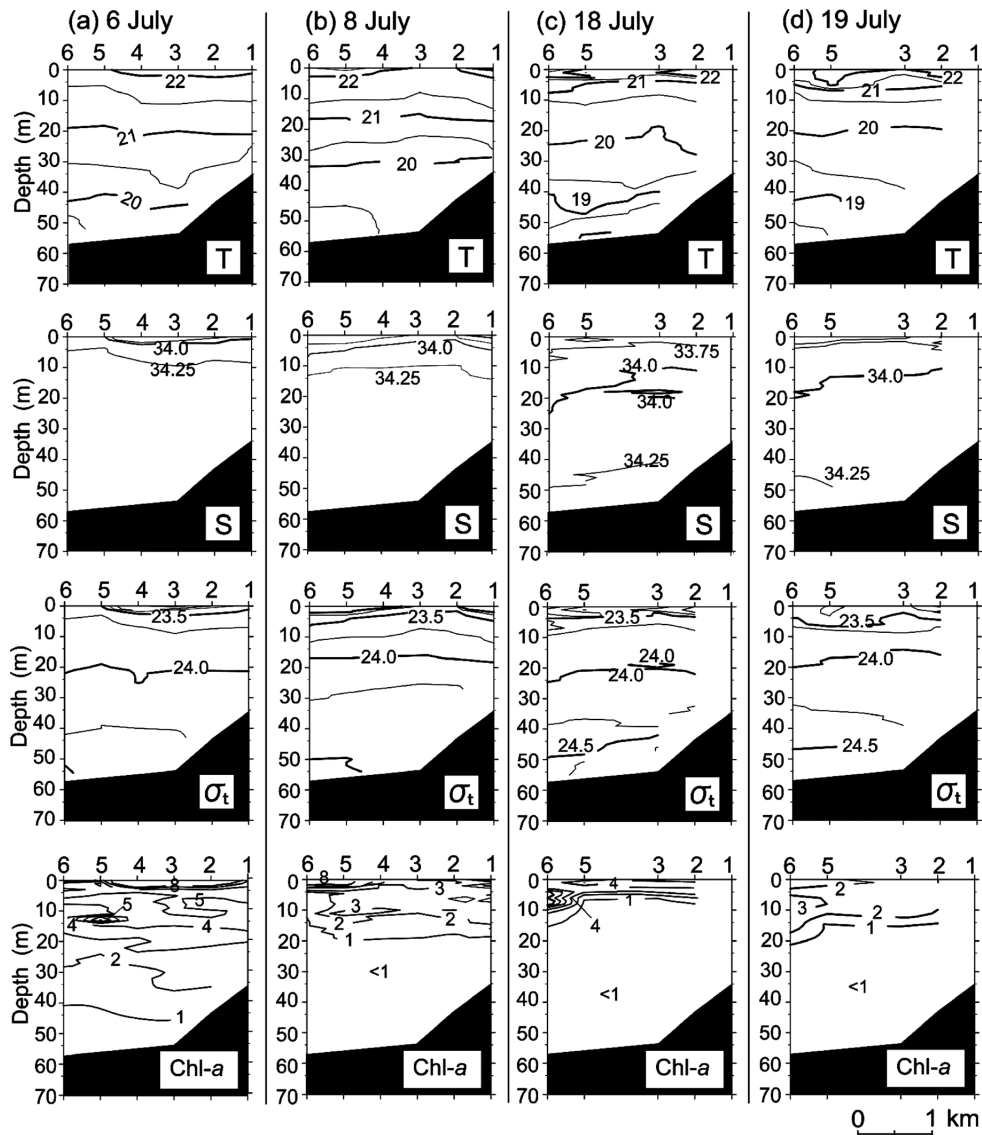
北灘湾 (Fig. 1b) における海面の *K. mikimotoi* の細胞密度と海面下5mの水温の時系列 (Fig. 9) は、7月17日まで細胞密度は $500\text{--}10,000 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 程度で推移していたが18日から減少し、水温は7月17日頃まで $22^\circ\text{C}$ 程度で推移したが18日から低下したことを示した。

### 考察

下波湾では7月17日から *K. mikimotoi* が急速に減少した。測点Sでの採水調査の結果は、4日後の21日に *K. mikimotoi* の細胞密度が $1 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ まで低下したことを示した (Fig. 2)。また、同時期に湾内下層に低温水が流入し、上層では湾内水が湾外へ流出していたことが確認された (Fig. 4)。この7月17日頃から生じた流れや水温の変化が、*K. mikimotoi* の減少と密接に関係している可能性がある。そこで、本章では最初にこの物理環境の変化が生じた要因について検討し、次に *K. mikimotoi* が減少した要因および下波湾以外において類似の現象が生じていた可能性について考察する。

宇和海南部の内海では、7月16日から海面下50m以深で水温が低下していた (Fig. 7)。7月18, 19日の豊後水道南部の水温、塩分の断面図は、陸棚斜面域底層から豊後水道底層へ低温・高塩分の海水が張り出した構造になっていた (Fig. 8)。底入り潮の発生については厳密な定義はないが、単に豊後水道底層水の北向きの流れをいうのではなく、底層水の流入によりそれ以前よりも水温が低下することが判断基準の一つになると考えられている (武岡, 2001)。この基準に従うと、内海の底層水温はそれ以前よりも低下したことから、7月16日に底入り潮が発生したと考えられる。一方、下波湾の水温は内海よりも1.5日程度遅く (Fig. 4)、7月17日の後半から低下し始めたが、これは冷水が宇和海を北上するために生じた時間差と推察される。Kaneda et al. (2002) は豊後水道南部底層で流速計の係留観測を行い、底入り潮による流れの大きさが約 $15 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ であったことを報告している。内海沖から下波湾までの距離は約20kmで、その間を底入り潮が約 $15 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ の速度で北上したと仮定すると到達までに1.5日程度かかると算出され、今回の結果とおおむね一致している。したがって、下波湾で7月17日から生じた下層への冷水の進入は、豊後水道南部底層での底入り潮の発生によって生じたと考えられた。

7月17日頃の流れ (底入り潮) 以外の栄養塩、光条件、水温、塩分等の変化と、その変化と *K. mikimotoi* の減少との関連性について検討する。下波湾下層へ進入する冷水には豊富な栄養塩が含まれている観測例があり (小泉・河野, 1994)、また、*K. mikimotoi* は下層の栄養塩を摂取可能な鉛直移動能力を持つこと (たとえば、Koizumi et al., 1996) から、栄養塩環境は冷水進入前よりもむしろ進入後のほうが増殖に適した条件になったと推察される。光条件については、7月13–15日は台風4号の影響で日照時間が非常に少なかったが (宇和島の日照時間は $0.0\text{--}0.3$ 時間)、17日には天候が回復して日照時間は増加 (宇和島の16–18日の日照時間は $3.9\text{--}11.1$ 時間) しており (気象業務支援センター, 2009)、17日以降のほうが *K. mikimotoi* の増殖にとって好ましい光条件が形成されたと推察される。ここで、7月17日頃の水温、塩分の変化と *K. mikimotoi* の増殖速度の



**Figure 5.** Vertical transects of water temperature, salinity, sigma-t and chlorophyll a from stations 1 to 6, observed on 6 (a), 8 (b), 18 (c) and 19 (d) July 2007. Panels from the top to the bottom are for T: Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), S: Salinity,  $\sigma_t$ : Density, and Chl-a ( $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ), respectively.

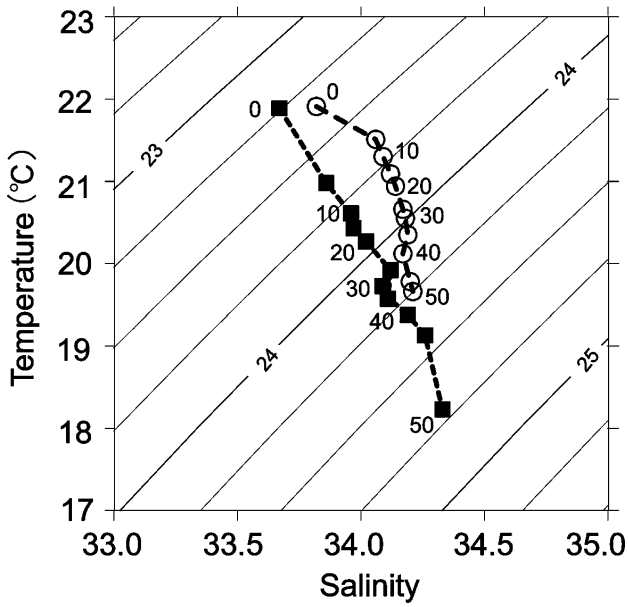
関連性について検討する。山口・本城 (1989) は光や栄養塩などの制限要因を考慮しない場合の水温 (T,  $^{\circ}\text{C}$ )、塩分 (S) による *K. mikimotoi* の増殖速度 ( $\mu$ ) の算定式を示している。

$$\begin{aligned} \mu = & 1.05753 - 0.30220 \cdot T \\ & + 0.01777 \cdot T^2 - 0.00035 \cdot T^3 \\ & + 0.00515 \cdot T \cdot S - 0.00010 \cdot T \cdot S^2 \end{aligned}$$

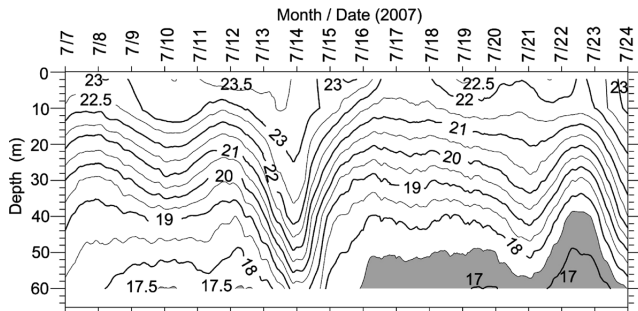
7月18, 19日の船舶調査の結果 (Fig. 5) から上層の水温 (20.5–22.0 $^{\circ}\text{C}$ )、塩分 (33.75) の値をそれぞれ代入すると 0.54–0.60 divisions $\cdot\text{day}^{-1}$ と算出された。現場海域での実際の増殖速度は光や栄養塩による制限を受けて小さくなって

いる可能性はあるが、冷水進入後の水温、塩分条件下でも *K. mikimotoi* は増殖可能であったことを示唆しており、水温、塩分の変化では急速な *K. mikimotoi* の減少を説明することはできない。

次に、*K. mikimotoi* の減少と流れの関連性について検討する。7月17日頃から上層で湾口へ、下層で湾奥への流れが発生した。25時間移動平均処理した上層の流れの大きさは 1–2  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  程度であった。採水調査および chl-a の分布 (Fig. 5) から *K. mikimotoi* は主に上層に存在していたと考えられるので、湾内の *K. mikimotoi* が湾口に向かう流れによって輸送されたとすると、その輸送距離は7月19日までの間で 2–5 km 程度と見積られる。この流れによって、



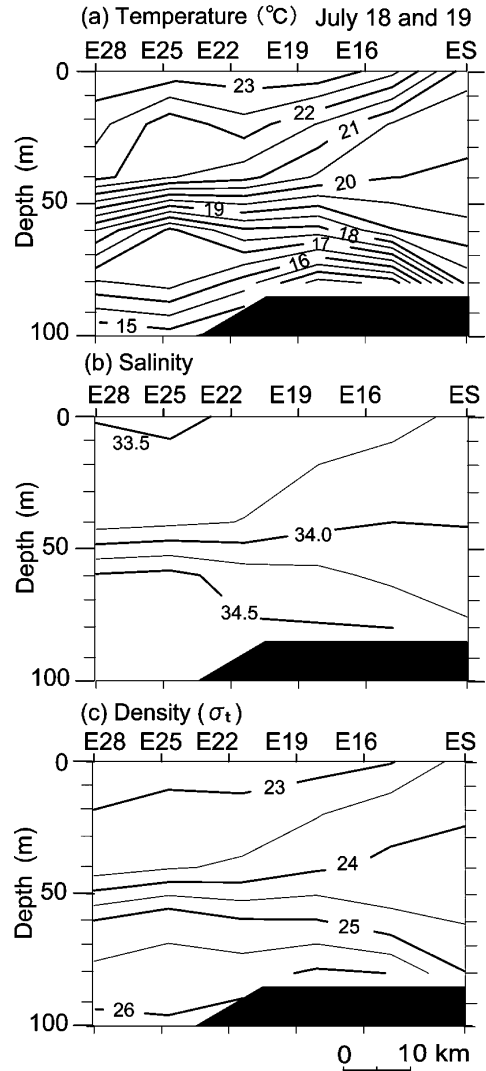
**Figure 6.** T-S diagram showing data collected at station 5, on 6 and 18 July. Open circles and solid squares show the data collected on 6 and 18 July, respectively. Data are plotted every 5 m from the sea surface to the sea bottom.



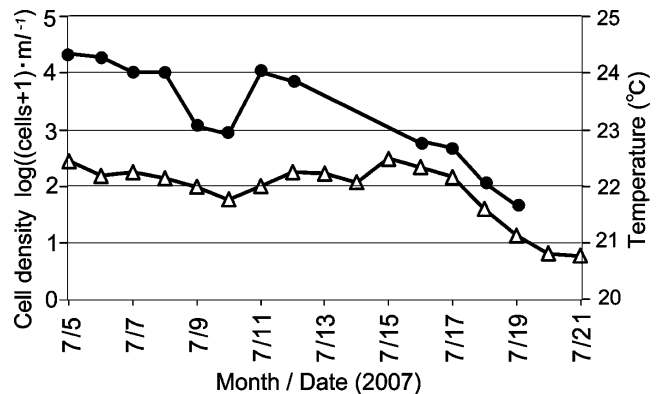
**Figure 7.** Fluctuations in water temperature at station U. Seawater at temperatures of 17.5°C or less are colored grey. Data were calculated using a 25-h running mean.

湾奥付近に存在した *K. mikimotoi* は湾口付近へ、湾中央部から湾口付近に存在した *K. mikimotoi* は湾外へ達したと考えられる。湾外は三浦半島や小島周辺に形成される渦によるシアや混合が強いことから (西村・武岡, 1999), 到達した *K. mikimotoi* は湾外水と混ざりながら分散したと推察される。Fig. 5 に示した chl-*a* の分布変化で明らかなように、7月18日に湾奥で濃度が下がり、湾口付近のみで高濃度になったこと、19日にはより低濃度になったことから、この推察は妥当であろう。したがって、7月16日以降に下波湾で生じた *K. mikimotoi* の急激な減少は、底入り潮の発生に伴って湾内で生じた流れによる移流・拡散が主要要因であったと考えられる。

下波湾以外の内湾においても、*K. mikimotoi* は底入り潮



**Figure 8.** Vertical transects of water temperature, salinity and sigma-t from stations ES to E28, observed on 18 and 19 July 2007.



**Figure 9.** Fluctuations in cell density of *Karenia mikimotoi* at the sea surface (solid circles) and water temperature at a depth of 5 m (open triangles) in Kitanada Bay.



の発生に伴って減少したのだろうか。北灘湾では7月18日頃から *K. mikimotoi* の細胞密度の減少と水温の低下が生じたことを確認した (Fig. 9)。北灘湾においても、底入り潮の発生に伴い下層に冷水が進入することから (速水ほか, 2005), 18日頃以降の水温低下は底入り潮の発生に伴う変化と推察され、底入り潮による湾内水の海水交換が *K. mikimotoi* の減少を引き起こした可能性がある。

## 謝 辞

愛媛県水産研究センター試験船「よしゅう」の船長および乗組員の方々には多くの調査を実施していただいた。愛媛県水産研究センター山下亜純氏、福井県立大学西川真史氏、岩井卓也氏、樋田裕基氏には係留観測の実施にあたりご協力をいただいた。水研センター、愛媛大学が運営する宇和海水温情報システムが収集した水温データを提供していただいた。また、査読者の方々、編集委員には有益なご意見、コメントをいただいた。ここに深甚なる謝意を述べる。本研究は、文部科学省科学研究費補助金 (課題番号: 19740295) の助成を受けたものである。

## 引用文献

- 愛媛県水産試験場 (2007) 豊後水道海況情報。平成19年7月号, 5 pp.
- 速水祐一・兼田淳史・小濱 剛・中野伸一・武岡英隆 (2006) 豊後水道における外洋起源栄養塩の供給機構とその生態系への影響。沿岸海洋研究, **43**, 143-149.
- 速水祐一・扇山 舟・山田正徳・山田政彦・竹村公宏・武岡英隆 (2005) 宇和海・北灘湾におけるクロロフィル a 濃度の季節・経年変化。水産海洋研究, **69**, 1-9.
- Kaneda, A., H. Takeoka, E. Nagaura and Y. Koizumi (2002) Periodic intrusion of cold water from the Pacific Ocean into the bottom layer of the Bungo Channel in Japan. *J. Oceanogr.*, **58**, 547-556.

- 川端善一郎・佐竹宗徳 (1992) 急潮による湾内の物理構造・栄養塩・植物プランクトンの変化。沿岸海洋研究ノート, **30**, 27-36.
- 気象業務支援センター (2009) 気象データベース・アメダスフルセット版一。CD-ROM.
- 小泉喜嗣 (1991) 急潮時の下波湾における海水交換過程。沿岸海洋研究ノート, **29**, 82-89.
- 小泉喜嗣 (1999) 豊後水道東岸域における急潮と植物プランクトンの増殖機構に関する研究。東京大学大学院農学生命科学研究科博士論文, 145.
- 小泉喜嗣・河野芳巳 (1994) 夏季の下波湾の珪藻プランクトン増殖機構に対する急潮の影響。沿岸海洋研究ノート, **32**, 81-89.
- 小泉喜嗣・高島 景・神蘭真人・江藤拓也・馬場俊典・檜山節久・池田武彦・岩男 昂・樋下雄一・内間満明・矢沼 隆・内田卓志・本城凡夫 (1994) 西部瀬戸内海における *Gymnodinium mikimotoi* の増殖域の環境特性と分布拡大機構。海の研究, **3**, 99-110.
- Koizumi, Y., T. Uchida and T. Honjo (1996) Diurnal vertical migration of *Gymnodinium mikimotoi* during a red tide in Hoketsu Bay, Japan. *J. Plankton Res.*, **18**, 289-294.
- 宮村和良・三ヶ尻孝文・金澤 健 (2005) 2003年大分県臼杵湾沿岸に発生した有害渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* 赤潮の出現特性。水産海洋研究, **69**, 91-98.
- 西村芳夫・武岡英隆 (1999) 豊後水道沿岸域の小規模渦。沿岸海洋研究, **37**, 41-47.
- 瀬戸内海漁業調整事務所 (2008) 平成19年度瀬戸内海の赤潮, 67.
- 武岡英隆 (2001) 栄養塩供給機構調査。宇和海漁場環境調査検討報告書。宇和海漁場環境調査検討会, 53-88.
- 武岡英隆・秋山秀樹・菊池隆展 (1992) 豊後水道の急潮。沿岸海洋研究ノート, **30**, 16-26.
- Takeoka, H. and T. Yoshimura (1988) The *Kyūcho* in Uwajima Bay. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **44**, 6-16.
- 山口峰生・本城凡夫 (1989) 有害赤潮鞭毛藻 *Gymnodinium nagasakiense* の増殖におよぼす水温、塩分および光強度の影響。日本誌, **55**, 2029-2036.