

夏季の周防灘における海底高濁度層の分布と短期変動

中西哲也¹⁾・井関和夫²⁾・宮下幸久²⁾・小池一彦²⁾・浜口昌巴^{2,3)}・手塚尚明³⁾

¹⁾ 広島大学生物生産学部生物生産学科, 〒739-8528 広島県東広島市鏡山1-4-4

²⁾ 広島大学大学院生物圏科学研究科, 〒739-8528 広島県東広島市鏡山1-4-4

³⁾ (独)水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所, 〒739-0452 広島県廿日市市丸石2-17-5

要 旨 2009年の6月29日-7月2日と8月22-23日に、周防灘において水温、塩分、クロロフィル *a* (以下 chl. *a*)、濁度の鉛直分布を調べた。6-7月には chl. *a* の亜表層極大と海底高濁度層がほぼ調査海域全体に形成されていた。8月には chl. *a* の亜表層極大は弱くなり、6-7月と較べて海底高濁度層の発達が顕著で、chl. *a* 濃度の増加も見られた。6-7月と8月の両観測期間は、それぞれ小潮と大潮の時期に相当していたことから、潮汐周期が海底高濁度層の発達に影響を及ぼしている可能性が示唆された。また、両観測期間中に、灘西部の2観測点(水深10mの浅海域と30mの沖合域)において1-3時間毎の連続観測を行って日周変動を調べた。海底高濁度層は水温・塩分(および密度)の急激な変化時に最大値を示し、濁度層の分布パターン・厚さは潮汐周期と底層の水温・塩分・密度分布によく対応していた。さらに、塩分-chl. *a*、塩分-濁度、chl. *a*-濁度の関係から、粒状懸濁物を陸(河川)起源、海底高濁度層、亜表層クロロフィル極大、異水塊に由来するものに分別することができた。

キーワード: 周防灘, 海底高濁度層, クロロフィル *a*, 短期変動, 潮汐周期

1. 緒 論

沿岸、外洋域を問わず、海底付近では一般に濁度が高く、所謂、海底高濁度層(“benthic nepheloid layer” “bottom turbid layer”)が観測されることが多い。特に、植物プランクトン生産力が高く、且つ潮流流が大きな河口域や湾、入り江などの沿岸海域(Kranck, 1980; Kawana and Tanimoto 1984; Iseki et al., 1987; 坂本・川名, 1989; 谷本・星加, 1991; Sanford, 1993; 田中ら, 2004; Uncloes, 2006; O'Brien et al., 2006)や縁辺海(岡村ら, 1997; Hoshika et al., 2003; Iseki et al., 2003)などでは海底高濁度層の発達が顕著で、その形成機構や物質循環に果たす役割が注目され、解明されつつある。海底高濁度層は光の遮蔽作用があるため、底層中の植物プランクトンや底生微細藻類の光合成を抑制するが、その一方で、再懸濁堆積物の分解による植物プランクトンへの栄養塩供給や、底層に生息する濾過捕食者への餌料供給の働きを持っている。

周防灘は瀬戸内海の西部に位置し平均水深24m、容積917億 m³の海域であり、灘西部には、瀬戸内海の全干潟面積の約6%を占める7,400haの広大な干潟が形成され、浮魚類に比べてアサリ・エビ・カニなどの底生生物の漁獲量が、瀬戸内海の中で最も高いことで知られている(瀬戸内海水産開発協議会, 1999)。しかし、近年はアサリの漁獲量が激減し、山・川・海が一体となった包括的環境保全と貝類漁業のあり方を探求することが、アサリの減少要因の解明と対策及び持続生産の鍵になるものと考えられている(浜口ら, 2008)。また、周防灘は干満差が大きな海域であるため、潮流による攪拌が大きく、表層堆積物の再懸濁が起きやすい海域でもある。このため、物質循環プロセスだけでなく底生生物の餌ともなる底層の懸濁粒子(植物プランクトン・底生微細藻類・デトライタス・沈降粒子など)の動態を把握することは、周防灘では特に重要である。

周防灘では海底高濁度層の発達が顕著で海域・季節変動が大きいことが明らかとなってきた（宮下ら，2008），水塊構造や生物生産との関連性，短期・中期変動（数時間から数週間程度），潮汐・残差流との関連性（中嶋ら，2010）を調べた研究は少なく，未解明な点が多い。そこで，本研究では，海底高濁度層が発達する夏季成層期において，周防灘における海洋構造，chl. *a*，濁度の海域分布及び日周変動を調べ，それらの分布特性と変動要因を把握することを目的とした。

2. 方 法

2.1 観測及びサンプリング

海洋調査は，2009年6月29日-7月2日にかけて広島大学生物生産学部練習船「豊潮丸」により，また2009年8月22-23日にかけて独立行政法人水産総合センター瀬戸内海区水産研究所調査船「しらふじ丸」により，Fig. 1に示す周防灘の観測点で実施した。観測では，多項目センサー型計測器（Compact CTD：アレック電子 ASTD687）を用いて，水温，塩分，蛍光光度及び濁度の鉛直分布を調べ，西部海域の2観測点（中央部の St.18 と中津干潟沖の St.20）では，1-3時間毎の連続観測を行った。豊潮丸航海ではロゼット型10L ニスキ採水器を用いて，水深0, 5, 10, 15, 20, 30, 40m 及び海底直上2m（B-2m）から試水を採取した。しらふじ丸航海では表層0m はバケツ採水，それ以深はポンプ採水とニスキ採水を併用して行った。試水はメッシュサイズ200 μ m のプランクトンネットで大型粒子を除去した後，chl. *a* 及びフェオ色素の分析に用いた。

2.2 分析方法

クロロフィル *a* (chl. *a*) 及びフェオ色素は，試水を25mm 径の Whatman GF/F フィルターで濾過し，フィルター上の残渣を N, N-ジメチルホルムアミド (DMF) で浸出し，分析前まで -20 $^{\circ}$ C の暗所で保存後，蛍光光度計 (Turner Designs 10-AU) を用いて蛍光法 (Suzuki and Ishimaru, 1990) により求めた。

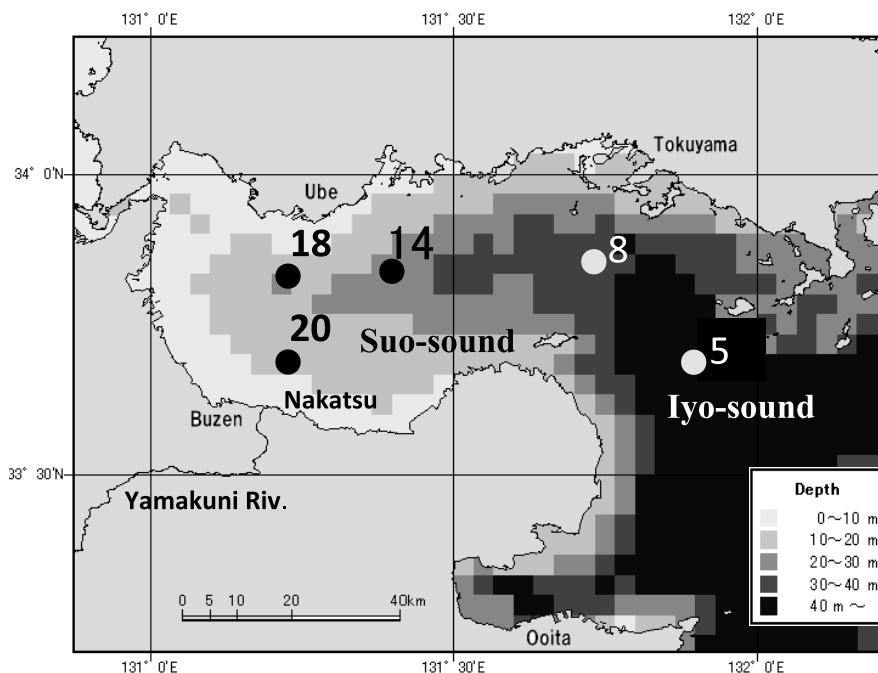


Fig. 1. Sampling stations in Suo-sound.

3. 結果

3.1 海域分布

水温と塩分の海域分布（鉛直断面図）を Fig. 2に示した。水温は周防灘（St.8-St.20）の表層10m 以浅では、6-7月から8月にかけて、全体として21-26℃から26-28℃程度まで、また20m以深では17.5-18.5℃から21.5-23℃まで、それぞれ上昇していた。一方、塩分は表層0.5m 以浅を除いて全水柱で見ると、6-7月から8月にかけて31.0-33.7psu から30.0-33.2psu 程度まで減少していた。6-7月に、St.20から St.18にかけての表層に低塩分水の張り出しが見られ、St.20の0.5m 以浅では5psu 以下の際立って低い値であった。また、St.8の0.2m 以浅でも5psu 以下の低塩分水が観測された。6-7月航海で観測された低塩分水は、梅雨期間中の6月28日から7月1日までの大量降雨（最大雨量：6月30日の115mm d⁻¹；4日間積算雨量：250mm）に伴う山国川からの流入量増大の影響と考えられる。8月にも、河川水の影響を示唆する30.0psu 以下の低塩分水が St.20と St.14の表層に見られたが、8月の観測1週間前からの積算降雨量は僅か15mm 程度であり、河川水の影響は少なかった。

各観測点における chl. *a* と濁度の鉛直分布とそれらの海域分布（断面図）を Fig. 3と Fig. 4に示した。6-7月には、St.20では海表面近くに chl. *a* の高濃度層が観測されたが、それ以外の観測点では亜表層極大が見られ、水深の増加に伴い亜表層極大も水深5m から25m まで深くなっていた。8月には、chl. *a* の亜表層極大は6-7月と較べて弱くなっていたが、底層に chl. *a* の高濃度層が発達し、特に St.20の海底付近は最大6 μ g l⁻¹に

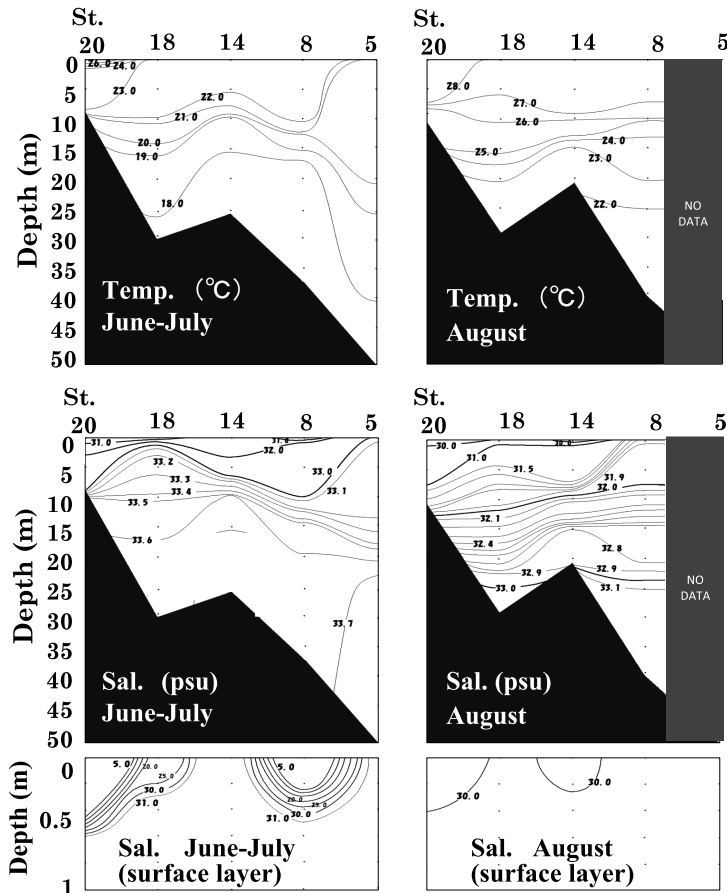


Fig. 2. Temperature and salinity distributions in Suo-sound, summer in 2009.

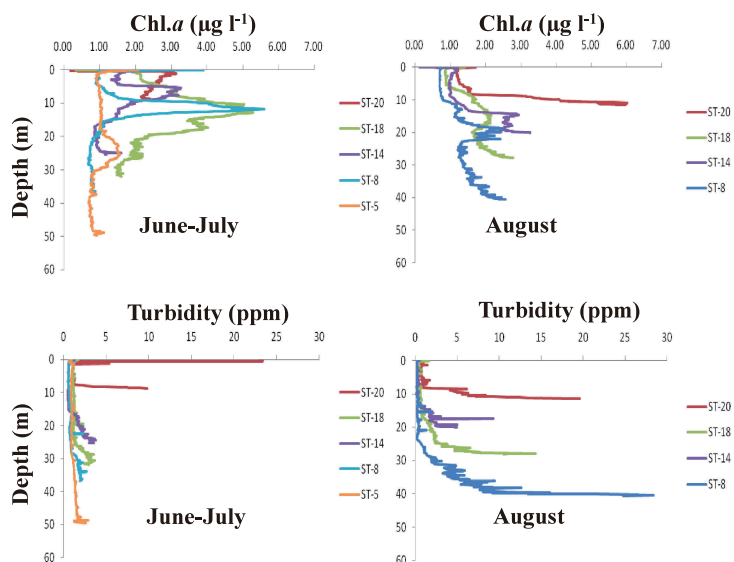


Fig. 3. Vertical profiles of chlorophyll *a* and turbidity in Suo-sound on June 29 - July 2 and August 22-23, 2009.

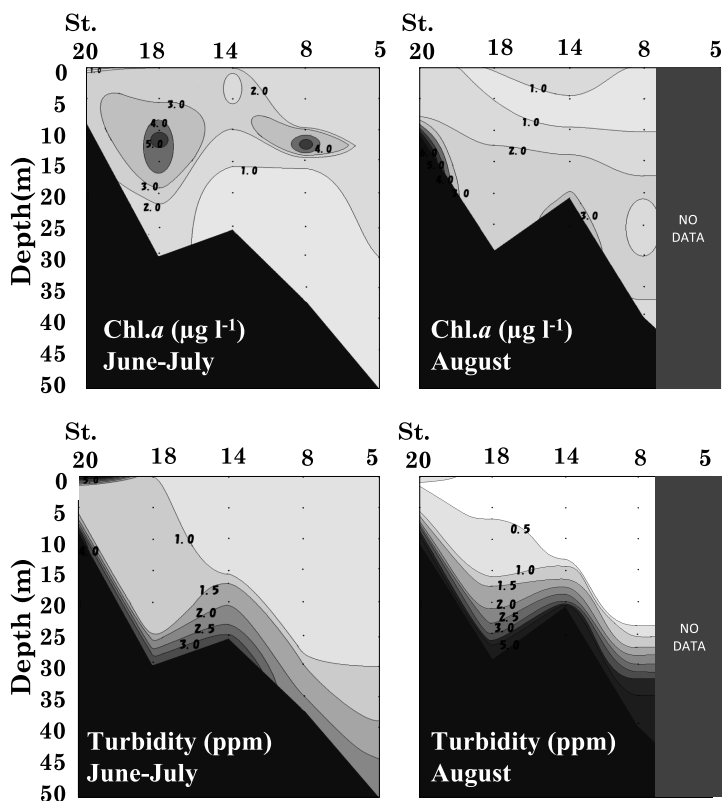


Fig. 4. Chlorophyll *a* and turbidity distributions in Suo-sound, summer in 2009.

達する値であった。6-7月の St.20では、表層に高濁度水が見られ、河川経由での大量の陸起源物質の流入が原因と考えられた。また、St.20では海底直上2m以内に海底高濁度層が見られ、陸起源物質の沈降・滞留によることが示唆された。その他の周防灘の観測点 (St.18, St.14 及び St.8) でも海底高濁度層が観測され、伊予灘 (St.5) では、水深30m以深で濁度の増加傾向は見られたが、海底高濁度層の発達は明瞭ではなかった。一方、8月には、海底高濁度層の顕著な発達が周防灘全域で観測された。

3.2 日周変動

6月29-30日は小潮時に相当し、この時の St.18における高頻度観測の結果 (Fig. 5) では、水温・塩分の変動は潮汐周期 (中津の満潮時と潮位：2時26分 (289cm) と15時6分 (257cm)；干潮時と潮位：19時46分 (112cm) と8時40分 (125cm)) に良く対応し、満潮時には中・底層の水温低下と塩分の若干の上昇傾向が見られた。また、表層0.5m以浅に大量降雨の影響と考えられる低塩分水 (10psu 以下) が6月29日の22時から6月30日の2時頃までと10時から14時頃までの間に観測された。chl. *a* の垂表層極大は、潮汐周期に対応して海底からの高さを変動していたが、海底高濁度層と潮汐周期との関連性は必ずしも明瞭ではなかった。

同様に、7月1-2日の小潮時における St.20の観測結果 (Fig. 6) では、水温・塩分の変動は観測後半では潮汐周期 (中津の満潮時：16時34分 (256cm) と4時21分 (268cm)；干潮時：9時56分 (121cm) と22時17分 (170cm)) に良く対応し、満潮時には中・底層の水温の低下傾向と、塩分の顕著な上昇が見られた。しかし、観測前半には、7月1日の13-18時の間に水温の若干の上昇と塩分の顕著な減少が、表層から海底までの全水柱にわたって観測され (海底上0-6mの高さで、塩分32.2から32.0psuの減少)、同時に、chl. *a* 濃度の顕著な増加 (特に、表層から中層) と、海底高濁度層の消失が見られた。この時間帯を除くと塩分の分布パターンと良く対応して底高濁度層が形成されていた。これらの事実から、観測期間中に異水塊の一時的な流入が起

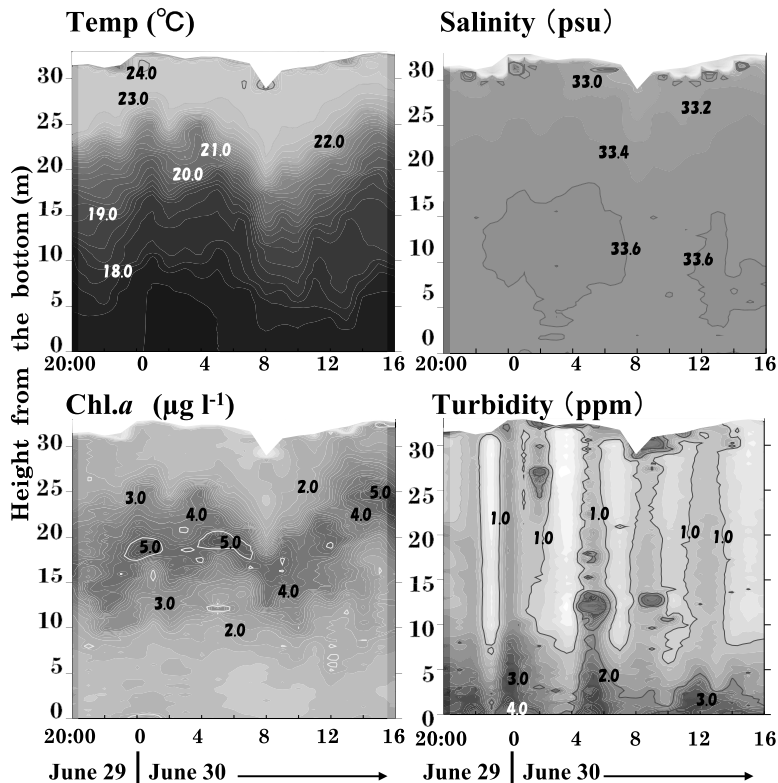


Fig. 5. Temporal variations of temperature, salinity, chl. *a*, and turbidity at St.18 observed at 1-hour intervals during June 29-30, 2009.

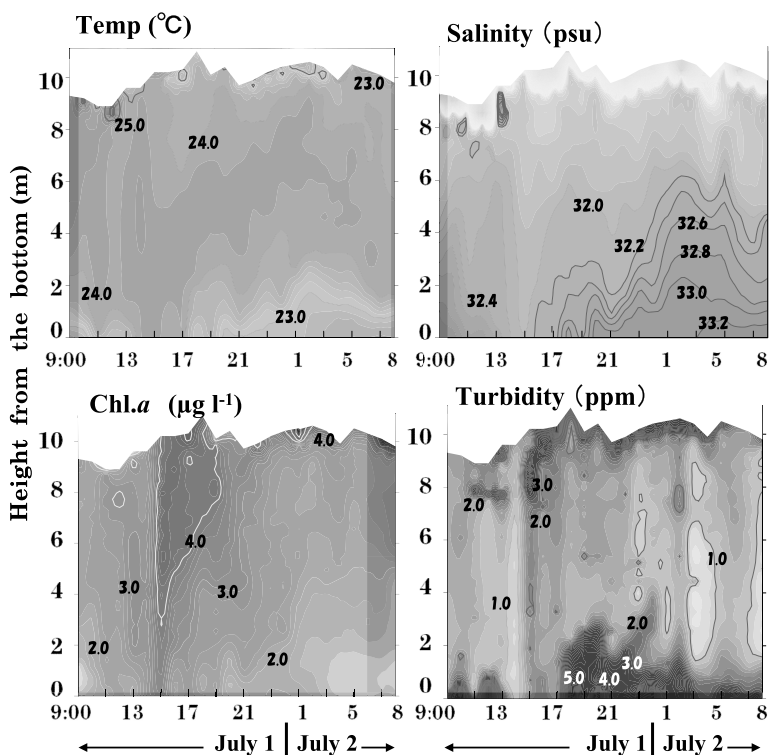


Fig. 6. Temporal variations of temperature, salinity, chl. *a*, and turbidity at St.20 observed at 1-hour intervals during July 1-2, 2009.

きていたことが推測される。また、表層0.5m以浅は、観測期間中を通して低塩分水に覆われ、高濁度で chl. *a* 濃度の変動は大きいもの高め傾向であることから、河川経由による大量の陸起源物質の流入があったことが推測された。

8月22-23日は大潮時に相当し、St.20における観測結果 (Fig. 7) では、水温と塩分だけでなく chl. *a* 濃度と濁度が潮汐周期 (中津の満潮時: 22時25分 (364cm) と10時31分 (359cm); 干潮時: 16時13分 (7.3cm) と4時33分 (49.0cm)) に良く対応した分布を示し、満潮時には中・底層の水温低下と塩分上昇が明瞭に見られた。7月1-2日の小潮時の観測結果とは異なり、海底高濁度層と高 chl. *a* 濃度層が同時に観測され、両者ともに7月1-2日の小潮時よりは数倍ほど高く、最大値は底層での水温・塩分の急激な変化時に出現していた。

4. 考 察

Fig. 3, 4に示すように、6-7月と8月の2度の広域観測の結果、海底高濁度層が周防灘全域に発達していることが確認できた。宮下ら (2008) の2007年の観測においても、5月から10月にかけて海底高濁度層の発達が見られ、とりわけ夏季の観測 (6月と8月) において顕著であった。これらのことから、夏季成層期の周防灘では海底高濁度層の発達は一般的な現象と考えられる。

6-7月の小潮時に較べて、8月の大潮時の方が海底高濁度層の発達がより顕著であり、8月には底層で高 chl. *a* 濃度層もほぼ同様に出現していた。6-7月の小潮時の St.18 と St.20 の観測では、底層における濁度と chl. *a* 濃度が比例関係にない (Fig. 5, 6, 8) ことから、海底高濁度層における懸濁粒子の主体は chl. *a* をほとんど含まない粒子 (分解の進んだ植物プランクトンや粘土鉱物粒子などのデトライタス、動物プランクトンの糞粒、有機凝集体など) で、海底から再懸濁したものや底層に滞留しているものと考えられる。一方、8月の大潮時には海底高濁度層の発達が顕著で高 chl. *a* 濃度層も見られた (Fig. 7, 8)。従って、春季から初秋

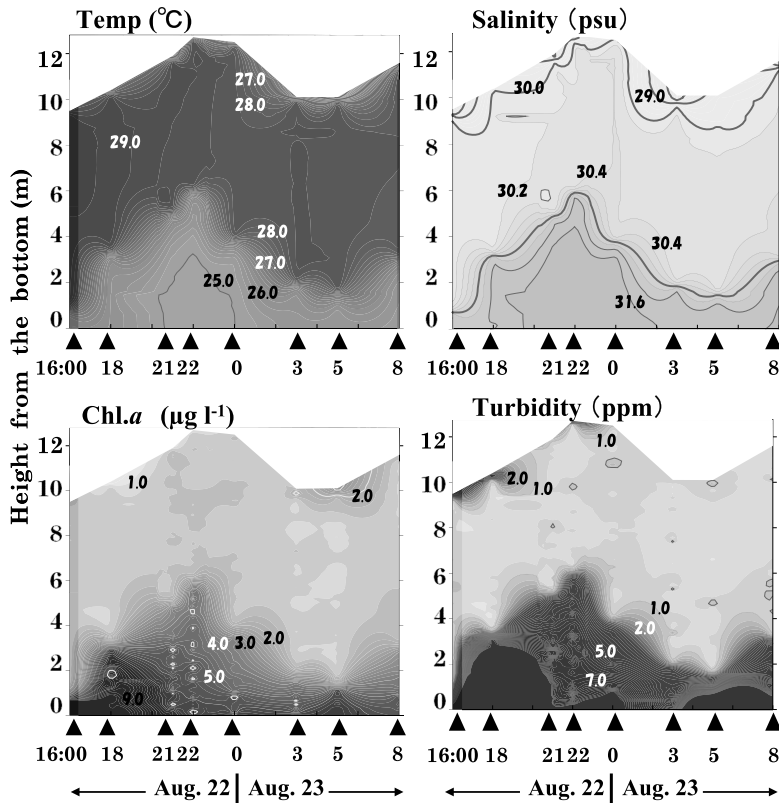


Fig. 7. Temporal variations of temperature, salinity, chl. *a*, and turbidity at St.20 observed at 1-3 hours intervals during August 22-23, 2009. Solid triangles indicate the observation time.

にかけて表層から海底に沈降・蓄積した粒子が、海底流速の強さに応じて再懸濁し、流れに乗って周防灘の広範囲に輸送されていると推察される。中嶋ら (2010) は数値計算により、夏季成層期の周防灘では海底直上2-5mの底層において、小潮時で 10cm s^{-1} 、大潮時で 20cm s^{-1} 以上の流速が得られたことから、広範囲に観測される海底高濁度層は、この海底流速により誘発されている可能性を指摘している。

St.18とSt.20における水温、塩分、chl. *a*及び濁度の日周変動の結果 (Fig. 5-7, 8) は、僅か1日間程度の観測から得られたものであるが、St.20における海底高濁度層の値は、水温・塩分 (および密度) の急激な変化時に最大値を示し、上げ潮・下げ潮時とほぼ一致していることから、海底流速との関連性が示唆された。また、海底高濁度層の厚さは潮汐周期と底層の水温・塩分・密度分布によく対応し、特に、8月の大潮時に顕著であったことから、潮汐周期が海底高濁度層の形成にとって重要であることが推測された。

以上のような chl. *a* 濃度と濁度の変動要因をより詳細に検証するため、chl. *a* 濃度と塩分、濁度と塩分、濁度と chl. *a* 濃度の関係について調べた (Fig. 8)。その結果、7月1-2日の St.20における懸濁粒子は、陸起源 (TP)、亜表層 chl. *a* 極大層 (SCM)、海底高濁度層 (BTL)、そして、異水塊 (DWM) に由来する粒子に大別することができた。7月とは対照的に、8月の懸濁粒子は、海底高濁度層の影響を主に受けていることが示され、また、7月1-2日と較べて、濁度と chl. *a* 濃度がほぼ比例関係にあったことから、海底高濁度層の構成粒子は植物プランクトンや底生微細藻が相対的に多いことが推測された。

海底高濁度層の形成機構については、海洋構造、流速、波浪、底質、河川水、基礎生産量、植物プランクトン組成、赤潮、貧酸素水などとの関連性について多くの研究があり、これらが複合的に作用して、大きな時空間変動が生じていることが知られている。このため、詳細な観測・解析のためには、少なくとも数週間

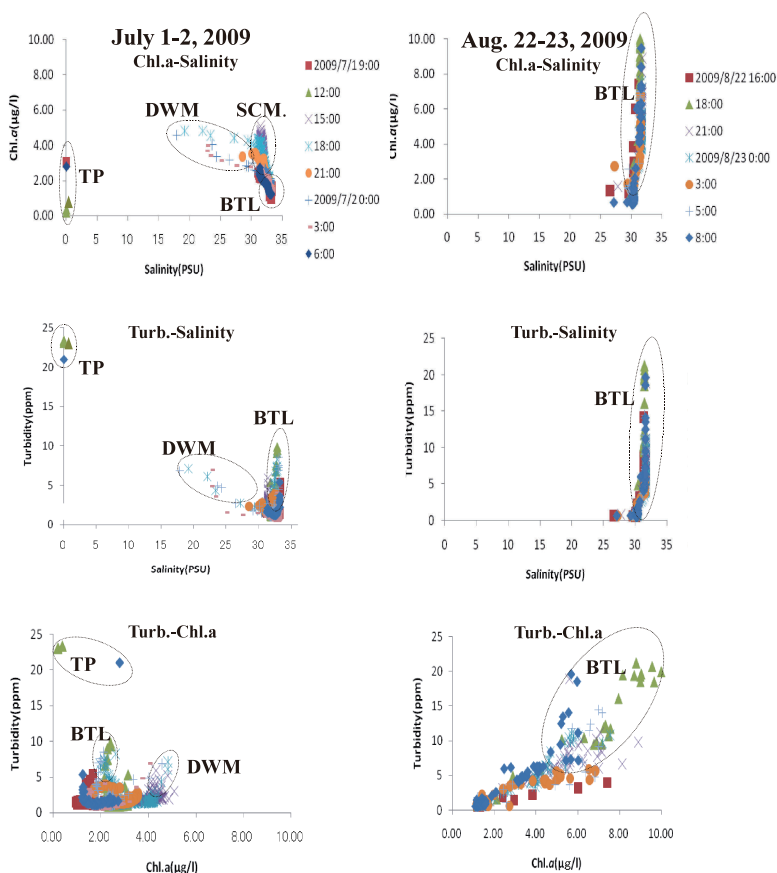


Fig. 8. Relationships between chl. *a* and salinity, turbidity and salinity, and turbidity and chl. *a* at St.20 observed during July 1-2 and August 22-23, 2009. TP: Terrigenous Particles; BTL: Bottom Turbid Layer; SCM: Subsurface Chl. *a* Maxima; DWM: Different Water Mass

程度の連続観測が望まれる。田中ら（2004）の有明海の連続観測結果によると、大潮時前後には干潮時に高濁度、満潮時に低濁度となる周期を持つが、小潮時には濁度は大きく低下し、大潮時前後のような濁度の変動は明瞭でないことを報告している。また、川名（1982）は、燧灘で濁度と流速の連続測定を行い、干潮と満潮時にはほとんど流速はなく、干潮・満潮時の約3時間後に流速が大きくなり、海底付近の濁度は流速変動と良く対応していることを述べている。

周防灘、特に浅海域では、海底高濁度層の分布・変動は、河川水や潮汐周期、海底流速、異水塊の流入、生物生産などに大きく影響されるため、海底高濁度層の形成機構や物質循環機構・機能の解明にとって、河川や、河口域から沖合域までの総合研究と連続観測の実施が不可欠と考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、観測時にご協力いただいた広島大学練習船「豊潮丸」および瀬戸内海区水産研究所調査船「しらふじ丸」の船長をはじめ乗組員の皆様に感謝の意を表します。なお、本研究は、広島大学と（独）水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所との共同研究「瀬戸内海におけるベントスの生産性評価手法の開発」の一環として行われ、「平成21年度連携機関との共同研究（大学院生物圏科学研究科）」の予算支援を受けたことに謝意を表す。

引用文献

- 浜口昌巳・手塚尚明・山崎誠・井関和夫. 2008. 包括的環境保全と貝類漁業のあり方について. 一山・河川とアサリの関係一. *水産海洋研究*. **72**: 311-317.
- Hoshika, A., Tanimoto, T., Mishima, Y., Iseki, K., Okamura, K., 2003. Variation of turbidity and particle transport in the bottom layer of the East China Sea. *Deep-Sea Research II*. **50**: 443-456.
- Iseki, K., Macdonald, R. W., Carmack, E., 1987. Distribution of particulate matter in the southeastern Beaufort Sea in late summer. *Proc. NIPR symp. Polar Biol.* **1**: 35-46.
- Iseki, K., Okamura, K., Kiyomoto, Y., 2003. Seasonality and composition of downward particulate fluxes at the continental shelf and Okinawa Trough in the East China Sea. *Deep-Sea Research II*. **50**: 457-473.
- 川名吉一郎. 1982. 瀬戸内海の夏季成層期の底層環境. *沿岸海洋研究ノート*, **20**: 53-62.
- Kawana, K., Tanimoto, T., 1984. Turbid bottom water layer and bottom sediment in the Seto Inland Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*. **40**: 175-183.
- Krank, K. 1980. Variability of particulate matter in a small coastal Inlet. *Can. J. Fish. Aquatic Sci.* **8**: 1209-1215.
- 宮下幸久・井関和夫・湯川翔太・小池一彦・手塚尚明・浜口昌巳. 2008. 周防灘における光環境, クロロフィル *a* 及び濁度の季節・海域変動. *広島大学大学院生物圏科学研究科紀要*. **47**: 41-51.
- 中嶋さやか・金山進・関本恒浩・井関和夫. 2010. 夏季周防灘の底層における孤立低温水塊の形成メカニズムと物理環境に関する一考察. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, **66**: 951-955.
- O'Brien, M. C., Macdonald, R. W., Melling, H., Iseki, K., 2006. Particle fluxes and geochemistry on the Canadian Beaufort Shelf: Implications for sediment transport and deposition. *Conti. Shelf Res.* **26**: 41-81.
- 岡村和磨・井関和夫・清本容子・星加章・谷本照巳. 1997. 春季の東シナ海陸棚縁辺部における広域濁度分布. *海の研究*. **6**: 361-369.
- Roland, S.B., Isobe, A., Shimizu, M., Kabeda, A., Takeuchi, T., Takeoka, H., 2002. Circulation and material transport in Suo-Nada during spring and summer. *J. Oceanogr.* **58**: 759-773.
- Sanford, L.P. 1993. New sedimentation, resuspension, and burial. *Limnol. and Oceanogr.* **3**: 1164-1178.
- 坂本 亘・川名吉一郎. 1989. 大阪湾における海底高濁度層の季節変動. *水産海洋研究*. **53**: 6-12.
- 瀬戸内海水産開発協議会. 1999. *瀬戸内海の漁業*. 161pp.
- Suzuki, R., Ishimaru, T., 1990. An improved method for determination of phytoplankton chlorophyll using N, N-dimethylformamide. *J. Oceanogr. Soc. Japan*. **46**: 190-194.
- 田中勝久・児玉真史・熊谷 香・藤本尚伸. 2004. 有明海筑後川河口域における冬季のクロロフィル蛍光と濁度変動. *海の研究*. **13**: 163-172.
- 谷本照巳・星加 章. 1991. 江田内湾における海底高濁度層の季節変動. *J. Oceanogr. Soc. Japan*. **47**: 286-296.
- Uncloes, R. J., Stephens, J. A., Law, D. J., 2006. Turbidity maximum in the macrotidal, highly turbid Humber Estuary, UK: Floccs, fluid mud, stationary suspensions and tidal bores. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **67**: 30-52.

Summer distribution and short-term variation of the bottom turbid layer in Suo-sound in the Western Seto Inland Sea, Japan

Tetuya NAKANISHI¹⁾, Kazuo ISEKI²⁾, Yukihiisa MIYASHITA²⁾, Kazuhiko KOIKE²⁾,
Masami HAMAGUCHI^{2),3)} and Naoaki TEZUKA³⁾

¹⁾ Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University,
1-4-4 Kagamiyama, Higashi-hiroshima, Hiroshima 739-8528 Japan

²⁾ Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University,
1-4-4 Kagamiyama, Higashi-hiroshima, Hiroshima 739-8528 Japan

³⁾ National Fisheries Research Institute of Seto Inland Sea,
2-17-5 Maruishi, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452 Japan

Abstract During June 28 to July 2 and August 22 to 23 in 2009, we investigated the distribution and diurnal variations of temperature, salinity, chlorophyll *a* (chl.*a*) and turbidity in Suo-sound, Seto Inland Sea. In June to July observation, the subsurface chl.*a* maximum layer (SCM) and the bottom turbid layer (BTL) were found throughout the Suo-sound. In August, the SCM almost diminished but the BTL significantly developed compared to June to July observations and chl.*a* also showed a noticeable increase in the bottom layer. June to July and August observations corresponded with a neap and spring tides, suggesting a close relation between the development of the BTL and the tidal cycle. The turbidity values of BTL showed a maximum when temperature and salinity changed rapidly, and the distribution pattern of the BTL well-corresponded to those of temperature and salinity, particularly in spring tide in August. Particulate matter was classified into four groups such as terrigenous matter, BTL, SCM, and different water mass according to salinity-chl.*a*, salinity-turbidity, and chl.*a*-turbidity relationships.

Keywords: bottom turbid water, Suo-sound, chlorophyll *a*, short-term variations, tidal cycle