

水質環境の動的変化に着目した英虞湾の現地観測

上野成三* ・灘岡和夫** ・高山百合子*** ・片倉徳男***
岡田美穂**** ・関根義彦***** ・勝井秀博*****

1. はじめに

代表的な水質問題である赤潮や貧酸素化は、2,3日の短い時間スケールで動的に変化する現象である。近年、赤潮や貧酸素化を数値計算で再現する試みが数多く実施されているものの、水質の動的変化を捕らえた現地データがほとんどないことから、計算精度の検証が課題となっている。そこで、数値計算の検証に耐え得る現地データを得るために、三重県英虞湾を対象に50日間の連続観測を行った。本観測の特徴は、約100台の計測器群により流れ・水温・塩分などの物理変化を捕らえた上で、植物プランクトン、栄養塩などの水質項目を2日間隔という高頻度で計測し、物理・水質の動的データセットを構築することにある。本観測結果から、内部潮汐や黒潮系水塊による海水交換と水質変化、貧酸素水・赤潮の発生特性などを取りまとめた。

2. 現地観測の概要

英虞湾の地形と観測点を図-1に示す。英虞湾は湾口部(St. C)に浅瀬(以下、シルと呼ぶ)があり、そのシルを越えて内部潮汐が間欠的に湾内へ侵入し、湾内への海水交換が増大する特徴を持つ(杜多・阿保, 1997)。本観測では、この内部潮汐の湾内侵入を詳細に捕らえるために、湾口部から湾奥部までの7点に観測点を設定した。計測器の配置を図-2に、計測項目を表-1に示す。水温・塩分計、水温計、ADCP、プロベラ流速計、溶存酸素計、蛍光強度計など約100台の計測器を設置し10分間隔で連続データを得た。観測期間は1998年6月1日から7月20日の50日間である。6月14日から7月20日の期間は2日間隔で、船上から水温 T 、塩分 S 、溶存酸素 DO 、浮遊物質 SS (光電管式濁度計から換算)の鉛直分布計測と採水を行った。採水試料からクロロフィル a ($chl-a$)、窒素・リン各態、有機炭素などの水質分析を行った。な

お、観測期間の特筆すべき現象として、黒潮系水塊が熊野灘沿岸に滞留したこと、内部潮汐が数回湾内へ侵入したことが上げられる。

3. 現地観測結果

(1) 内部潮汐の湾内侵入による水質変化

湾口部(St. A)と湾奥部(St. F)の表・底層の水温 T 、塩分 S と、St. F 底層の溶存酸素 DO の経時変化を図-3に示す。St. A の底層における T と S には間欠的な変動が見られる。この変動に対応して、St. F 底層の T と S は急激に上昇している(図中の↑)。これは、内部潮汐が湾内へ侵入したため、高水温・高塩分の湾外水が湾内の底層部へ流入したことを示している。また、St. F の底層の DO は、内部潮汐の侵入期に急激に増加している(図中の↑)。内部潮汐が湾内へ侵入する前後における DO の湾軸断面分布を図-4に示す。内部潮汐侵入前の6/18, 6/20では、低酸素水塊が湾奥部の底層から湾中央の底層へ広がっている。これに対して、内部潮汐侵入後の6/22では、湾中央の底層部で DO が上昇している。このことから湾外の高酸素水塊がシルを越えて湾内底層へ流入している様子が分かる。このような底層への高酸素水塊の流入に対応して、湾内の低酸素水塊は中層に沿って湾外へ流出している。

以上より、内部潮汐の湾内への侵入は、湾内の水温、塩分、溶存酸素の急激な変化をひき起こすこと、特に、

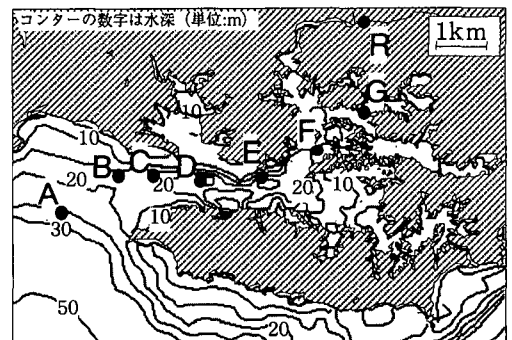


図-1 英虞湾の地形と観測点

* 正会員 工修 大成建設(株)技術研究所海洋水理研究室
** フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究所
*** 正会員 大成建設(株)技術研究所海洋水理研究室
**** 正会員 農修 大成建設(株)技術研究所海洋水理研究室
***** 理博 三重大学生物資源学部教授
***** 正会員 工博 大成建設(株)技術研究所海洋水理研究室

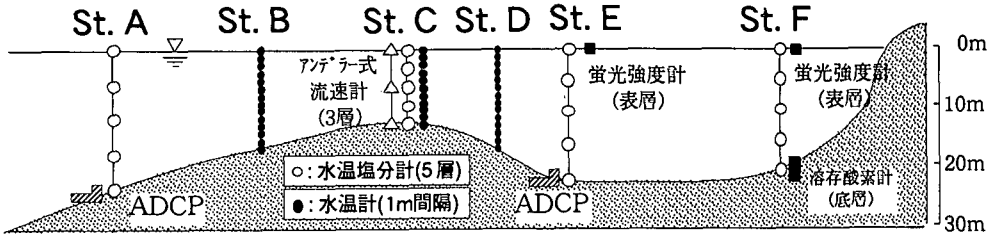


図-2 計測器の配置

表-1 計測項目

計測項目	St. A	St. B	St. C	St. D	St. E	St. F	St. G	計測機器
流速 (鉛直分布)	○	—	—	—	○	—	—	超音波流速計/SEA社 ADCP, NORTEK社 ADP
流速	—	—	3層	—	—	—	—	アンダー式流速計/アンダー社 PU-2
水温・塩分	5層	—	5層	—	5層	5層	—	メモリー式水温塩分計/アレック社 MDS-CT
水温分布	—	17層	13層	26層	—	—	—	メモリー式水温計/アレック社 MDS-T
蛍光強度	—	—	—	—	表層	表層	—	蛍光強度計/アレック社 ACL 11-8 M
溶存酸素	—	—	—	—	—	—	底層	多項目水質計/YSI社 Model 6000
採水・水質分析	4層	—	—	—	4層	4層	4層	船上より採水 (2日間隔)
水温・塩分・酸素・濁度	○	○	○	○	○	○	○	船上より鉛直分布計測 (1m間隔、2日間隔)

湾内の貧酸素化を解消することが明らかになった。なお、この現象は、阿保ら (1998) により五ヶ所湾の枝湾部でも観測されており、シルを持つ湾では頻繁に生じるものと考えられる。

(2) 黒潮系水塊の滞留に伴う水質変化

St. A, F, G の表層における透明度とクロロフィル a (chl-a) の経時変化を図-5 に示す。6/30 から 7/10 の期間で、湾内外の全ての観測点で透明度は上昇し chl-a は低下した。すなわち、湾内外とも非常に清純な水質になった。この時期における表層の T は、St. A, St. F とも、約 30°C まで上昇した (図-3 参照)。この時期の平年値 (約 25°C) と比較しても、異常に水温が高いと言える。一般に、高水温期には植物プランクトンの増殖や酸素消費が活発化し、水質が悪化する傾向にある。これに対して、本観測結果では、この一般傾向とは逆に、高水温期で水質が清純化される結果となった。この原因を、湾外水塊に着目して検討する。観測期間中の黒潮流路と黒潮系水塊の変化を図-6 に示す。図-6 は三重県水産技術センター (1998) が発行している人工衛星海況速報で、NOAA の熱赤外データより黒潮流路や海表面水温分布が得られている。英虞湾で異常高水温が発生する前の 6/16 では、黒潮流路に小さな蛇行が発生し、その水塊の一部が熊野灘沿岸へ進行しつつある。異常高水温が発生中の 7/4-5 では、黒潮流路は大きく蛇行し、熊野灘から遠州灘にかけての沿岸部で 27°C 以上の高水温の黒潮系水塊が滞留している。その後、異常高水温のピークが過ぎた 7/18-19

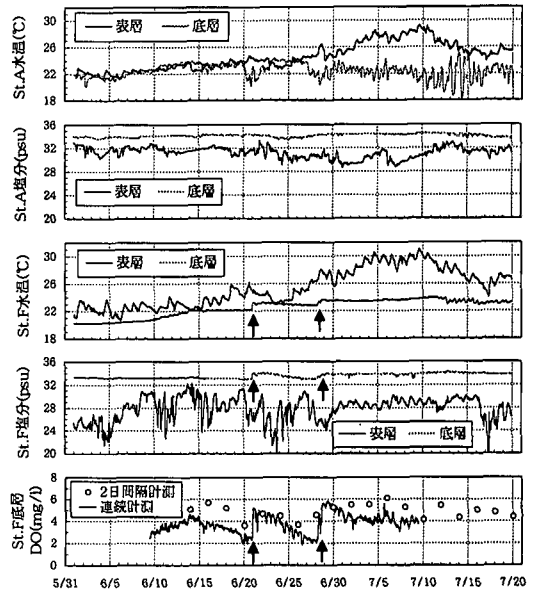


図-3 水温・塩分・DO の経時変化 (St. A, F)

では、伊豆沖から遠州灘にかけて 25°C 以下の低水温の水塊が侵入し始め、熊野灘沿岸の水温も低下した。

以上より、本観測期間で水質が清純化、かつ、高水温化した 7 月上旬には、熊野灘沿岸で黒潮系水塊が滞留していたことが明らかになった。黒潮系水塊は高温であり、かつ、この時期に晴天が続いたこともあり、湾内で異常

に高い水温が発生したと考えられる。また、清純な黒潮系水塊が湾内へ流入したため、透明度の上昇、chl-a の低下などの清純化が生じたと考えられる。黒潮系水塊などの外洋の水質変化に対応して湾内の水質は敏感に応答することが明らかになった。湾内の水質予測にとって、外洋の水質変化が重要な要素であることが言える。

(3) 植物プランクトンの増殖特性

St. F 表層の chl-a の経時変化と潮汐・気象の関係を検討する(図-7)。Chl-a の増大期と降雨期は非常に高い相関を示す(図中の←参照)。一方、潮汐の大潮・小潮や風速の大小との相関は明確でない。日射量が小さい時期

と Chl-a の増大期との相関は良いが、これは降雨期に日射量が減少するため日射量が直接 chl-a の増大に寄与すると言えない。以上より、降雨に対応して chl-a が増大することから、降雨時に河川から供給される栄養塩が植物プランクトンの増殖に寄与している可能性が示唆される。

St. F における浮遊物質 SS, chl-a, リン各態(全リン TP, 溶存性全リン D-TP, リン酸態リン PO₄), DO の鉛直分布を降雨時(6/22)と無降雨時(7/6)と比較した結果を図-8 に示す。なお、SS は光電管式濁度計からの換算値である。降雨時の 6/22 では、SS, chl-a とも極表層で大きく、植物プランクトンが表層で増大している。これに対して、無降雨時の 7/6 では、SS, chl-a は中層で大きく、中層で植物プランクトンの極大値が生じた。その他の本観測データにおいても、植物プランクトンのピーク層は、降雨時には表層付近、無降雨時には中層をとる傾向が強い。以上より、植物プランクトンの分布は降雨と密接な関係があることが示された。次に、リン各態の分布を比較する。植物プランクトンの増殖に必要な PO₄ の分布は、降雨時・無降雨時とも、表層で定量限界以下と小さく、中・底層で大きい。表層の PO₄ は、降雨のありなしに関わらず、本観測の全期間で、定量限界以下と小さくなった。よって、降雨時に河川から供給される栄養塩は植物プランクトンへ速やかに吸収され、本観測点に達するまで栄養塩が枯渇したと予想される。これに対して、中・底層で PO₄ が増大する層は DO が減少する層と一致する。さらに、無降雨時には、PO₄ が増大し DO が減少する層で chl-a がピークをとる。図-9 に示した無降雨時(7/6)における DO と chl-a の湾軸断面分布によると、St. E, F, G の広い範囲で chl-a の極大層は低酸素水塊の上部境界付近と一致する傾向が見られる。すなわち、無降雨時における植物プランクトンは栄養塩が豊富な中層で増殖する傾向がある。

以上より、植物プランクトンの増殖する層は降雨と密接に関係することが明らかになった。降雨時には河川か

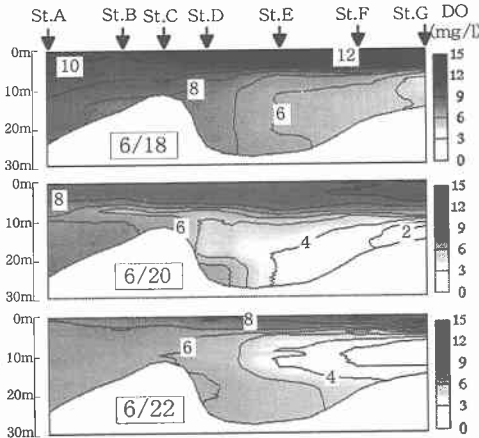


図-4 DO の湾軸断面分布

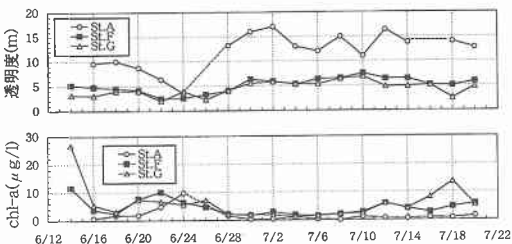


図-5 透明度・chl-a の経時変化 (St. A, F, G 表層)

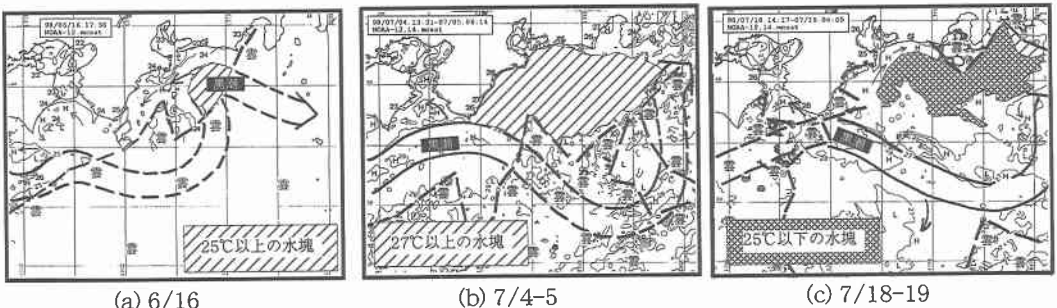


図-6 黒潮系水塊の変動 (三重県水産技術センター, 1998)

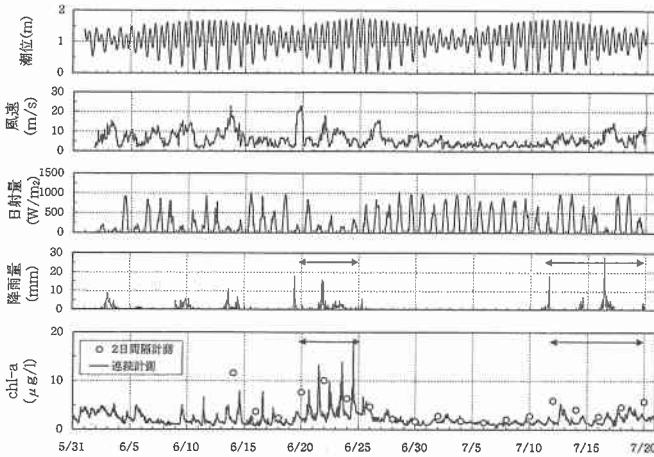


図-7 chl-a (St. F 表層) と潮汐・気象の経時変化

らの栄養塩供給により植物プランクトンは表層で増殖し、一方、無降雨時には栄養塩の豊富な低酸素水塊の上部境界付近で生じる可能性が示唆された。英虞湾の植物プランクトンの増殖にとって栄養塩濃度が律則条件にあると予想される。

(4) 内部潮汐による海水交換

内部潮汐による海水交換特性として、内部潮汐の来襲により湾外水がシルを越えて湾内底層部へ流入する実態が明らかになっており(杜多・阿保, 1997; 上野ら, 1999 a), 内部潮汐の湾内侵入は英虞湾で頻繁に生じている現象と言える。ここでは、内部潮汐による海水交換能力を定量的に調べる。湾口部 (St. A) とシル上 (St. C) における熱フラックスの各変動成分の鉛直分布を、

内部潮汐の強度が弱い期間(7/1-10)と強い期間(7/10-20)で比較する(図-10)。熱フラックスの変動成分は、時間平均成分、長周期成分(周期 25 時間以上)、潮汐成分(周期 25 時間以下)に分解した。ただし、長周期成分については、算定誤差の大きい鉛直平均成分を除外し、時間平均流のシア成分のみとした。内部潮汐が弱い期間(7/1-10)では、St. A, C ともに、各成分ともほぼ一様な分布形で、その絶対値も小さい。これに対して、内部潮汐が強い期間(7/10-20)では、時間平均成分と潮汐成分の寄与が大きい。両成分とも、St. A は中底層で熱流出、St. C は表・底層で熱流出という分布形となる。これは、時間平均的な鉛直循環流と内部潮汐の侵入により、底層で外洋の低温水が流入し、表層で湾内の高温水が流出する鉛直構造によるものである。以上より、内部潮汐が湾内へ侵入する時に熱フラックスが極めて大きくなることが明らかになった。

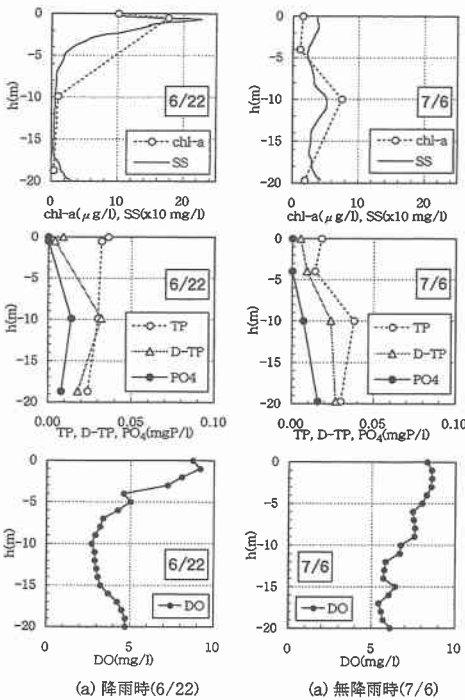


図-8 SS・chl-a・P各態・DOの鉛直分布 (St. F)

4. 結 論

本研究の主要な結論を以下に示す。

- ①内部潮汐が湾内へ侵入すると、外洋水が湾内底層部へ流入し、湾内の水温・塩分の急変や貧酸素水塊の解消などの水質変化が生じる。
- ②高温で清純な黒潮系水塊が湾口部に滞留した場合、湾内で水温が上昇し、透明度が高く、植物プランクトン量が低下する。湾内の水質変化を考える場合、外洋の水質変動が重要な要素であると言える。
- ③植物プランクトンの増殖期と降雨との相関が高く、河川からの栄養塩供給が植物プランクトンの増殖に大きく寄与することが示唆された。無降雨時には、栄養塩の豊富な低酸素水塊の上部境界付近で植物プランクトンが増殖する傾向がある。

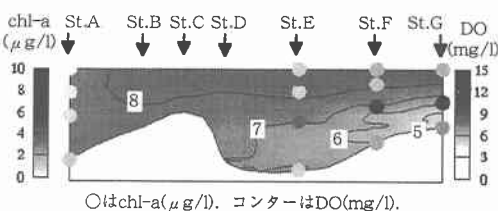


図-9 chl-a・DOの湾軸断面分布 (7/6)

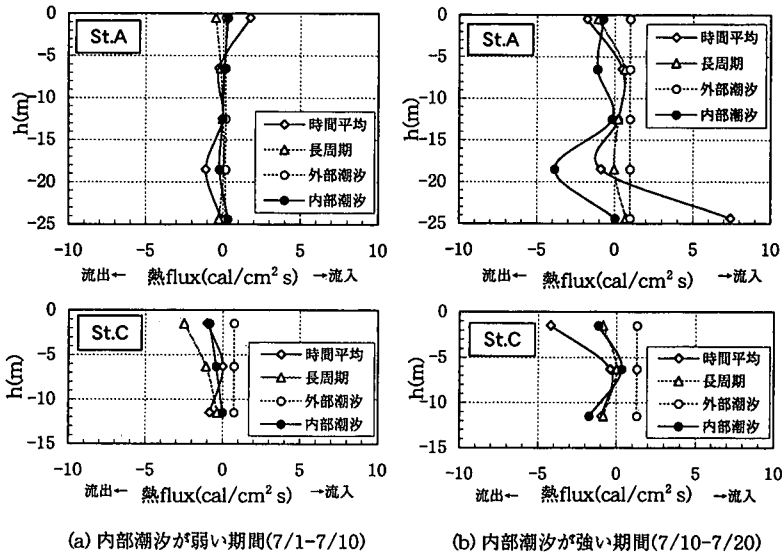


図10 熱フラックスの各成分の鉛直分布 (St. A, C)

④熱フラックスの各変動成分の比較から、内部潮汐侵入時に、時間平均流と内部潮汐による海水交換が増大する。

謝辞：本研究は農林水産新産業技術開発事業「水産養殖海域の水質汚染を予防する環境管理エキスパートシステムの開発」の成果である。また、現地観測作業では芙蓉海洋開発株式会社の協力を得た。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

阿保勝之・杜多 哲・藤原建紀・武内智行 (1998): 五ヶ所湾における中層貧酸素水塊の発生と予測, 海岸工学論文集, 第 45 卷, pp. 971-975.
 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・勝井秀博 (1998): 湾口シル

で碎波する内部潮汐の海水交換能力に関する数値実験, 海岸工学論文集, 第 45 卷, pp. 461-465.
 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・片倉徳男・岡田美穂・勝井秀博 (1999a): 英虞湾における黒潮系水塊と内部潮汐による海水交換, 平成 11 年度日本水産工学講演会, pp. 63-66.
 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・勝井秀博 (1999b): 内部潮汐を考慮した英虞湾の流動シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 46 卷, pp. 466-470.
 杜多 哲・阿保勝之 (1997): 内部潮汐の sill 越えによる英虞湾への湾外低温水の侵入, 海岸工学論文集, 第 44 卷, pp. 1166-1170.
 藤原建紀・高橋哲哉・阿保勝之・杜多 哲 (1995): 内部潮汐による五ヶ所湾の海水交換, 海岸工学論文集, 第 42 卷, pp. 1111-1115.
 三重県水産技術センター (1998): 人工衛星海況速報, 1998-61号~1998-85号。