

内部潮汐の sill 越えによる英虞湾への湾外低温水の侵入

杜 多 哲*・阿 保 勝 之**

1. 緒 言

熊野灘にはリアス式の小湾が数多く面しており、養殖場として利用されている。これらの湾において成層期には沿岸湧昇（阿保ら, 1996）や内部潮汐（藤原ら, 1995）などの傾圧的な海象変動が養殖場の環境を大きく左右すると考えられるが、その具体的な機構や湾の地形との関係などについては不明な部分が多い。

本論文では熊野灘北部に位置し真珠漁場として有名な英虞湾において、傾圧的な海象変動が海水交換に及ぼす影響を湾口部の sill と関連づけて検討する。

2. 観測と資料

英虞湾の地形・水深を図-1に示す。湾口部には水深 (D.L) 15 m 以浅の sill が 1 km 以上続き、最も浅いところで約 13 m である。また湾内の最大水深は 38 m である。

英虞湾に面する各町で構成する英虞湾汚染対策協議会は、湾内および湾外の 11 測点において 31 昼夜の流況観測を 1993 年 8 月 27 日から 9 月 26 日にかけて行った。流速計（ユニオン流速計 PU-2 型、水温・電気伝導度計付）の設置水深は海面下 2 m（表層）、海底上 2 m（底層）を基本とし、水深に応じてその間に 0~2 層を選んでいる。

本研究ではこれらの調査のうち湾外から湾口部を経て支湾の入口にいたる 5 測点（図-1）の水温と流速データを用いて解析を行った。5 測点での流速計の設置水深を図-4に示す。風向・風速データは大王埼航路標識事務所観測されたものを使用した。

3. 観測結果

(1) 沿岸湧昇

a) 湾外の沿岸湧昇

測定結果のうち 9 月 1 日から 20 日について水温鉛直分布の時間変動を図-2に示す。図の最上段は英虞湾の水位（予報値）であり 9 月 9 日が小潮である。湾外の測点 A₁, A₂に注目すると等水温面の水深の時間変動には、

数日周期の長周期変動と半日周期の変動が顕著に見られる。そこでまず長周期変動について検討する。

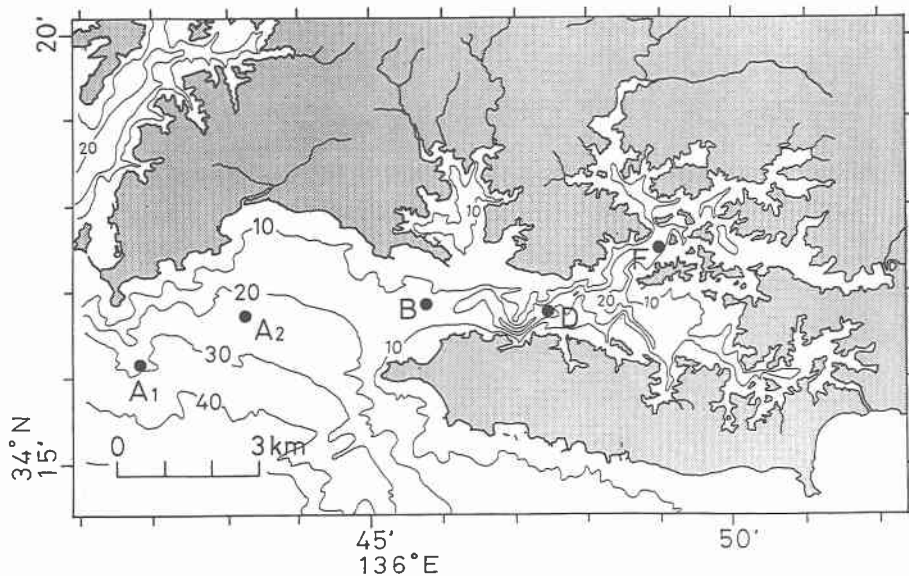
阿保ら（1996）は隣接する五ヶ所湾外で西風に対応して躍層が上昇することを観測し、これが沿岸湧昇であることを明らかにしている。英虞湾でも同様の現象が生じている可能性を検討する。24 時間タイドクリアフィルター（花輪・三寺, 1985）を用いて短周期成分を除いた風の東西および南北成分と湾外 (Stn. A₁) での水温分布の時間変動を図-3に示す。西風と湾外の等温面の上昇はよく対応している。例えば 9 月 4 日, 9 日, 14 日, 16 日, 17 日に東風から西風に転じた時には等温面（例えば 23°C）の上昇が始まっている。また 9 月 14 日以降は西風の頻度が多いため、これに対応して Stn. A₁における 23°C等温面は上昇傾向にある。さらに 9 月 3 日から 4 日にかけての等温面の急速な降下は 9 月 3 日の東風とよく対応している。以上のことから湾外では西風に対応した沿岸湧昇が存在し、これが躍層面の長周期変動の機構のひとつになっていると考えられる。

b) 沿岸湧昇の湾内への影響

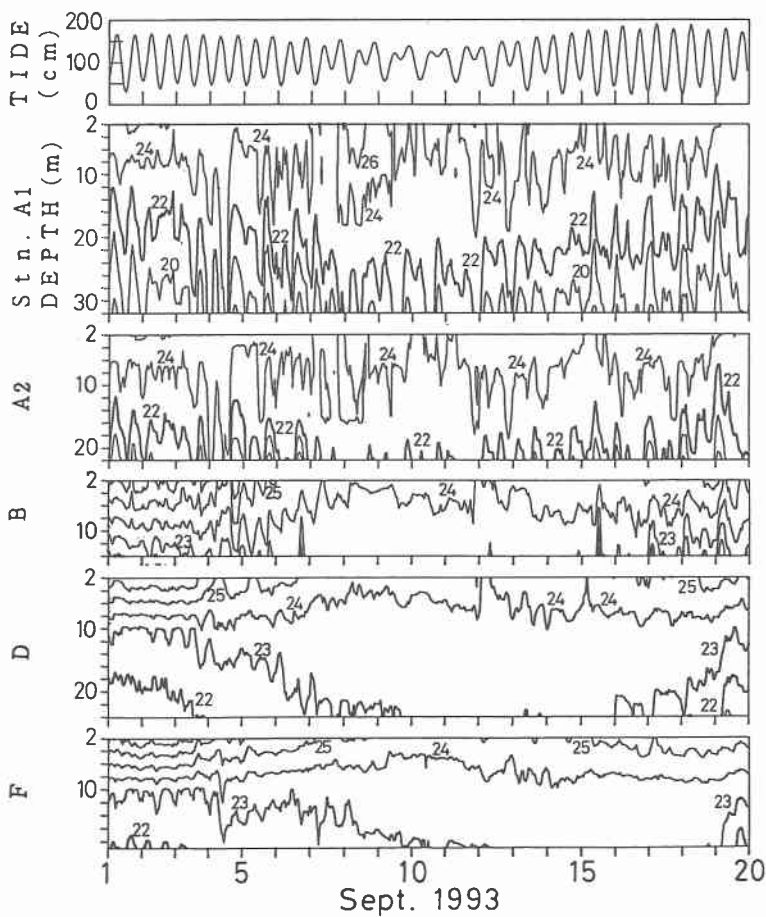
湾内 (Stn. D) の等温面の長周期変動（図-3）をみると 9 月 1 日に水深 11 m にあった 23°C等温面は徐々に深くなり、9 月 9 日に消滅している。これは同期間に湾外 (Stn. A₁) において 23°C等温面が水深 12 m から 21 m に下降した長期傾向に対応する。また 9 月 16 日から 19 日にかけて Stn. D の 23°C等温面は水深 24 m 以深から 12 m まで上昇している。これは 14 日以降、西風の頻度が高く Stn. A₁の等水温面が沿岸湧昇によって上昇したことと一致する。これらの結果は湾内躍層の長周期上下変動が、沿岸湧昇による湾外の躍層の変動によって決まっていることを示している。

一方、湾外 (Stn. A₁) および湾内 (Stn. D) での 22°C等温面の長周期変動をみると、全期間を通じその深さは湾口部水深 (14 m) より浅くなることはない。従って 9 月 19 日のように湾外の 22°C以下の低温水が湾内に侵入するには沿岸湧昇になんらかの物理機構がプラスされる必要がある。この物理機構として湾外から進行する内部潮汐が湾口部の sill を越える現象が重要であることを以下に述べる。

* 正会員 農林 水産庁養殖研究所 環境管理部
 ** 水産庁養殖研究所 環境管理部



図一 英虞湾の地形と測点位置



図二 英虞湾の水位（上図）と水温変動

(2) 内部潮汐の sill 越えによる湾外底層水の湾内への侵入

湾外の測点 A₁, A₂では内部潮汐と思われる半日周期の変動が顕著である(図-2)。22°Cの等温面の鉛直変動をみると、その波高はときには10 m以上に及んでおり変動の振幅は大潮時に大きい。以下では内部潮汐による湾外低温水の湾内への侵入に焦点をあて、湾内 (Stn. D)

の底層が低温化していく期間(9月16日~19日)について検討する。

湾外 (Stn. A₁) における水温分布の長周期変動(図-3)をみると、沿岸湧昇によって22°C等温面は9月16日から19日に水深22 mから14 mに上昇し、湾口部水深(14 m)と近くなる。この長周期の躍層面の変動に内部潮汐による短周期の変動が加わり、22°C等温面は内部潮汐の高潮時に湾口部水深より浅くなり(図-2)、特に19日には水深8 mまで上昇している。9月19日の1時から13時までの22°C以下の水塊の分布を図-4に示した。同図には Stn. B, D における流速の東西成分も同時に示した。湾外から進行してきた内部潮汐が湾口部 (Stn. B) に達し、湾外低温水が上げ潮時に湾口部を越えて湾内 (Stn. D) に侵入し、その後湾内の底層部にに残される様子が示されている。

図-5は湾外 (Stn. A₂), 湾口部 (Stn. B) および湾内 (Stn. D) の等温面の変動を拡大して描いたものである。9月16日から19日においては、Stn. A₂における内部潮汐の高潮(等温面が最も浅くなる)はほぼ外部潮汐の干潮時にあっている。Stn. B ではそれより遅れて内部潮汐の高潮となり、これは外部潮汐の上げ潮時にあたる。Stn. B における内部潮汐の高潮時を△印で示した。

湾内 (Stn. D) ではそれまで認められなかった23°C等温面が16日にみられ、22°C等温面は19日に初めて出現する(図-5)。これらの等温面には潮汐周期の変動は認められないが、その出現は Stn. B における内部潮汐の高潮に引き続いて生じている。

4. 海水交換

湾外から進行してきた内部潮汐の sill 越えが湾内の海

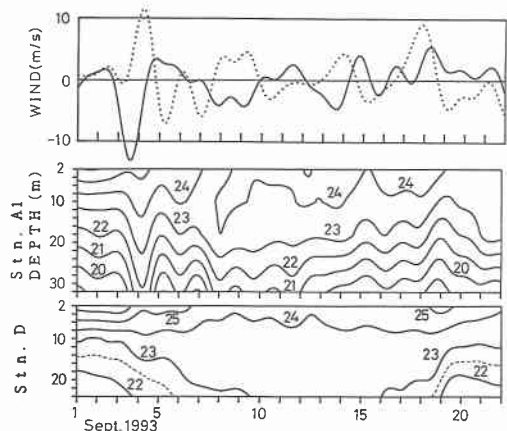


図-3 風の東向成分(上図, 実線)と北向成分(点線)および水温変動の長周期成分

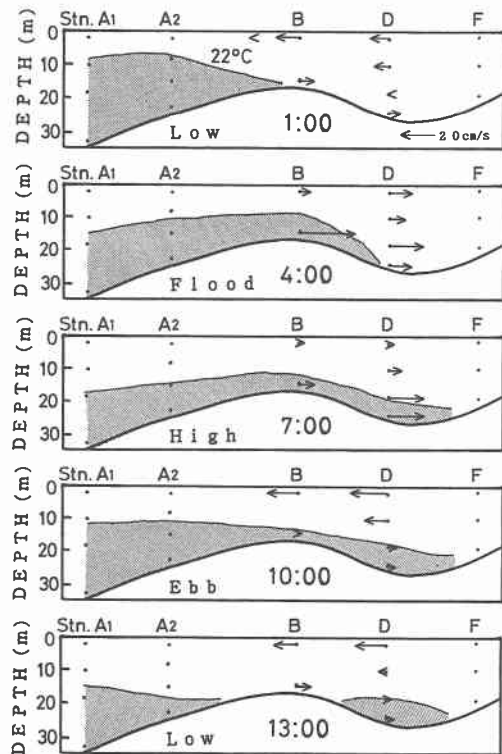


図-4 湾軸断面における等水温面変化

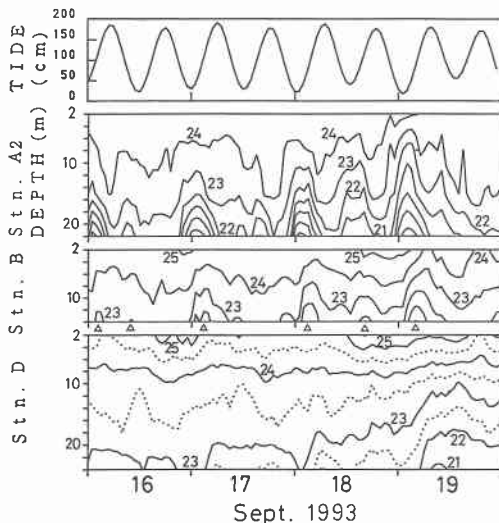


図-5 英虞湾の水位と水温変動

水交換に与える影響について検討する。方法としては湾口部での熱フラックスを求めて内部潮汐の役割を評価する。また湾口部における低温の水塊の流入量を求め、湾内で増加した低温水塊の水量と比較して、湾内底層水の更新に対する内部潮汐の寄与を検討する。

(1) 湾口部における熱フラックス

湾外内部潮汐の sill 越えがみられた期間 (9月16日から19日) について、湾口部での熱フラックスを検討する。

a) 流れの成分分解

Stn. B における流速 (海面下 2 m, 底上 2 m) の東西成分と水温の時間変化を示す (図-6)。内部潮汐の高潮時 (図中に△で示す) には流れは湾内に向かい最大 35 cm/s に達している。この時は上げ潮による流れと、内部潮汐による流れの位相が一致していると考えられる。

湾口部の表層および底層における流速 u_1 , u_2 が次式のように表わされると仮定する。

$$u_1 = \bar{u}_1 + u_T + u_{11} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$u_2 = \bar{u}_2 + u_T + u_{12} \quad \dots\dots\dots (2)$$

右辺第1項は時間平均成分、第2項は潮汐流成分 (下層で一様と仮定)、第3項は内部潮汐による流速である。なお乱れ成分は無視した。平均を求める時間として湾内の潮位が等しくなるようにとると

$$\langle \bar{u} \rangle = \frac{a_1 \bar{u}_1 + a_2 \bar{u}_2}{a_1 + a_2} = m_1 \bar{u}_1 + m_2 \bar{u}_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに $\langle \rangle$ は空間平均を表す。また上層および底層の測点が代表する通水断面積を a_1 , a_2 とし、時間変動は無視した。さらに $m_1 = a_1 / (a_1 + a_2)$, $m_2 = a_2 / (a_1 + a_2)$ である。また内部潮汐による流量は無視できると考えると

$$m_1 u_{11} + m_2 u_{12} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

が得られる。従って式 (1)~(4) を用いて

$$u_T = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

より、潮汐流成分を求めることができる。

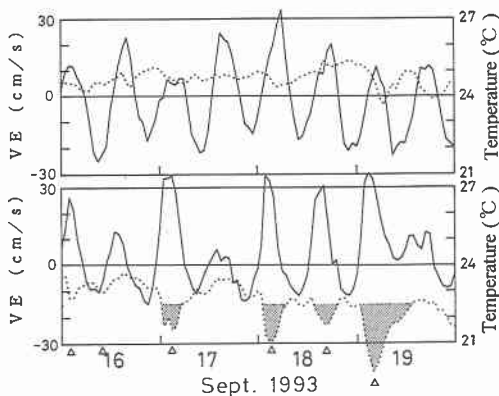


図-6 湾口部での流れの東向成分(実線)および水温(点線)。上図は海面下 2 m, 下図は底面上 2 m

9月16日0時と9月20日0時には予測潮位が 46 cm と 45 cm であり、ほぼ等しいのでこの期間について計算を行った。その結果、式 (3) より $m_1 = 0.765$, $m_2 = 0.235$ が得られた。これは Stn. B を含む湾口断面の形状から推定すると、表層の測定点は水面から 9.5 m 深までを代表し、底層の測定点は海底から 6.5 m 上方までを代表することに相当する。

図-7 の上図の○印は式 (5) で求めた u_T をプロットしたものである。また実線は予測潮位から次式にしたがって求めた潮流の予測値である。

$$u_T = \frac{S}{A} \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに η は予測潮位、 S は湾内表面積 ($2.6 \times 10^7 \text{ m}^2$)、 A は Stn. B を含む断面の通水断面積 ($1.7 \times 10^4 \text{ m}^2$) であり一定とみなした。図より両者はよく一致し、式 (5) が妥当であることを示している。そこで潮汐流成分は式 (5) で表されるとして、式 (1), (2) より u_{11} , u_{12} を求めた (図-7, 下段)。

内部潮汐流による底層からの流入のピークは内部潮汐の高潮時 (図中の△印) と一致しており、外部潮汐の干潮時より 2~3 時間遅れている。従って上げ潮時のうち 3~4 時間は、上げ潮流と内部潮汐流が加算され、内部潮汐の高潮によって sill 上に上昇した低温水が効率よく湾内に流入していたと考えられる。

b) 熱フラックス

9月16日には 22.5°C 以下の低温の水塊は湾内 (Stn. D) にみられていない。また湾外 (Stn. A₂) でも湾口部水深 (14 m) 以深にしか認められない (図-5)。一方湾口部 (Stn. B) においては 9月17日から19日12時の間に内部潮汐の高潮時に底層で大きな流入 (東向流) とと

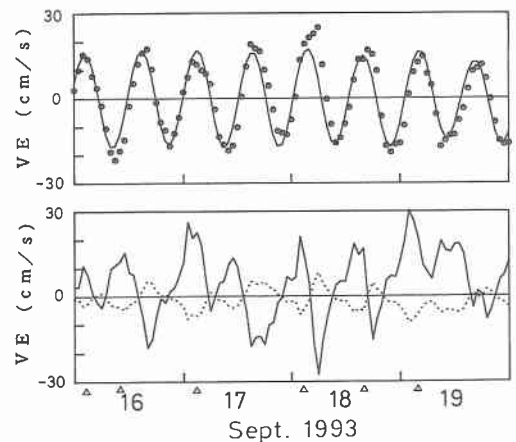


図-7 湾口部での潮汐流 (上図, ○印は式 (5) より実線は式 (6) より求めた) および内部潮汐流 (下図) の推定。下図実線は底面上 2 m, 点線は海面下 2 m

もにパルス状に低水温となる特徴がみられた。このうち 22.5°Cより低温の水塊(図-6の陰影部)は湾外低温水が内部潮汐によって上昇したものと考えて水温を次式のよう分解した。

$$T_1 = \bar{T}_1 + T_{r1} \dots\dots\dots (7)$$

$$T_2 = \bar{T}_2 + T_{r2} + T_{l2} \dots\dots\dots (8)$$

右辺第1項は時間平均成分である。なお $\bar{T}_2$ については内部潮汐による成分を除いたものの時間平均である。添字 T は潮汐成分を含むその他の成分、添字 I は内部潮汐による成分を表す。

式(1), (2), (7), (8)を用いると湾口部(Stn. B)における熱フラックス(F)は単位時間、単位断面積あたり

$$F = \rho C_p \langle u \bar{T} \rangle \dots\dots\dots (9)$$

$$\begin{aligned} \langle u \bar{T} \rangle &= m_1 \bar{u}_1 \bar{T}_1 + m_2 \bar{u}_2 \bar{T}_2 \\ &= (m_1 \bar{T}_1 \bar{u}_1 + m_2 \bar{T}_2 \bar{u}_2) \\ &\quad + \{ (m_1 \bar{T}_{r1} \bar{u}_{r1} + m_2 \bar{T}_{r2} \bar{u}_{r2}) \\ &\quad + (m_1 \bar{T}_{l1} \bar{u}_{l1} + m_2 \bar{T}_{l2} \bar{u}_{l2}) \} \\ &\quad + m_2 \bar{T}_{l2} (\bar{u}_2 + \bar{u}_{r2} + \bar{u}_{l2}) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

と表わされる。ここに C_p は定圧比熱 ($1 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)、 ρ は密度 ($1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) である。式(10)中の右辺第1項の括弧内は鉛直的な残差流のシアによるフラックス、第2の括弧は潮汐その他の要因による水温変動と関連するフラックス、最後の項が底層において内部潮汐による水温低下と残差流、潮汐流、内部潮汐流が重なって生じるフラックスである。

9月16日0時から20日0時の単位時間、単位面積当りのフラックス ($-4.3 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) と通水断面積および時間から計算すると、この4日間の熱フラックスは湾全体の温度を 1.37°C 下降させるのに相当した。このうち残差流のシアによるフラックス ($1.9 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) と内部潮汐による水温低下に関連したフラックス ($-1.5 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) が大きな割合を占めている。残差流によるフラックスは、一般的に誤差が大きいと考えられる。これを除外したフラックス ($-2.4 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) のうち底層で内部潮汐と潮汐流の相互作用による寄与が $-0.53 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と22%を占め、内部潮汐流による寄与が $-0.58 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と24%を占める。両者の合計は46%

を占めており、内部潮汐により湾外低温水が上昇し、潮汐流および内部潮汐流により湾内に運ばれることが海水交換に主要な役割を果たしていたことがわかる。

(2) 低温水の流入量

内部潮汐の sill 越えによって湾口部底層を通過した低温水は混合を受けながら湾内底層に到達する。9月17日から19日午前中にかけて、湾口部底層における 22.5°C 以下の水塊の出現はほとんど流入時である(図-6)。この低温水の流入量は、底層における水温が 22.5°C 以下の場合の流速測定値の積分値と、通水断面積から $7.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ と見積られる。流入量に対する寄与を流れの成分別にみると上げ潮流が36%、内部潮汐流が41%とほぼ同じであった。

一方、Stn. Dにおいては9月16日までは 22.5°C 以下の低温水はみられず、9月17日に初めて出現する(図-5)。9月17日以前には湾内には 22.5°C 以下の水塊はなく、9月19日にいたって水深14mまで達したと仮定すると、この間に増加した低温の水塊の容積は湾内の14m以深の容積から $3.8 \times 10^7 \text{ m}^3$ と推定される。これは流入量の約50%に相当する。

5. 結 言

夏季の英虞湾の海水交換について検討した。西風による沿岸湧昇によって湾外の躍層が sill の高さと近くなった場合に、湾外から進行してくる内部潮汐によって上昇した湾外低温水が、上げ潮流および内部潮汐による流れによって sill を越える。これによる湾外低温水の湾内底層への流入が英虞湾の海水交換に大きく寄与している。

最後に貴重なデータを提供して頂いた英虞湾汚染対策協議会に深謝します。

参 考 文 献

- 阿保勝之・杜多 哲・西村昭史 (1996): 五ヶ所湾への湾外水の侵入と沿岸湧昇, 沿岸海洋研究, 33-2, pp. 211-220.
- 藤原建紀・高橋鉄哉・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巻, pp. 1111-1115.
- 花輪公雄・三寺史夫 (1985): 海洋資料における日平均値の作成について—日平均潮位を扱う際の留意点—, 沿岸海洋研究ノート, 23-1, pp. 79-87.