

内部潮汐による五ヶ所湾の海水交換

藤原建紀*・高橋鉄哉**・阿保勝之***・杜多 哲****

1. はじめに

外洋に面したリアス式海岸には閉鎖性の内湾が多くあり、これらの湾では養殖が盛んに行われてきた。これらの湾は閉鎖性が強く、湾の面積も小さいため、潮汐（表面潮汐）による海水交流量（タイダルプリズム）は小さい。それにもかかわらず、近年までこれら内湾の水質は比較的良好であった。

萩野（1993）は野見湾（高知県）における調査から、成層期には海水交換が表面潮汐ではなく、内部潮汐によって行われていることを示した。内部潮汐は、成層期に特有の現象であり、軽い上層水と、重い下層水の境界面が潮汐周期（約12時間）で上下に変動する現象であり、内部波の一種である。流動でみると、上層が流入のとき下層は流出、上層が流出のとき下層は流入となっており、これらの状態が約6時間毎に交互に繰り返される。

野見湾では、秋季になると湾内の成層がなくなり、内部潮汐が起きなくなる。このため湾内の流動は小さくなり、海水交換も悪くなる。漁業者はこの現象を“潮どまり”と呼んでいる。

内部潮汐は、陸棚海域では普遍的にみられる現象である。内部潮汐が閉鎖性内湾の海水交換を支配することは、外洋に面した内湾に共通していると推定されるが、この現象はまだよく調べられていない。また、閉鎖性内湾に防波堤が建設される場合、海水交換に対する防波堤の影響は、表面潮汐をもとに予測・評価されるのが通例である。湾口部に防波堤が建設される場合、湾口部が狭くなると表面潮汐による海水交換率はむしろ増加する。一方、内部潮汐は防波堤により遮られ、内部潮汐による海水交換は減少すると予測される。内部潮汐の存在する内湾の開発にあたっては、内部潮汐などの内部モードの流動構造の把握が重要である。

本報では、熊野灘に面する五ヶ所湾（三重県）を例として、内部潮汐の実態を詳細に示し、また海水交換が内部潮汐によって行われていることを定量的に示す。

2. 現地調査

五ヶ所湾はリアス式の小湾であり、英虞湾の西隣に位置している（図-1）。湾口部の水深は約30mであり、ここから北北東に主水路がのびている。本報では、北から時計方向に20°回転した方向を湾軸方向とする。五ヶ所湾には多くの枝湾があるが、北西にのびる湾の先端には伊勢路川が流入している。また北東の湾奥部にも小河川が流入している。

三重県は、湾内および湾外の14測点において15昼夜の流況調査を年4回（1993年3, 6, 9, 11月）行った。流速計の設置水深は、海面下2m（表層）、1/2水深（中層）、海底上2m（底層）である。これらの調査の内、本研究に用いた測点の位置を黒丸で示す。また筆者らは、測点A～Dに多層水温計（センサーの水深間隔 約2.5m）を設置し、1994年9月に連続水温観測を行った。

3. 観測結果

多層水温計で得られた水温の時間変動を図-2に示

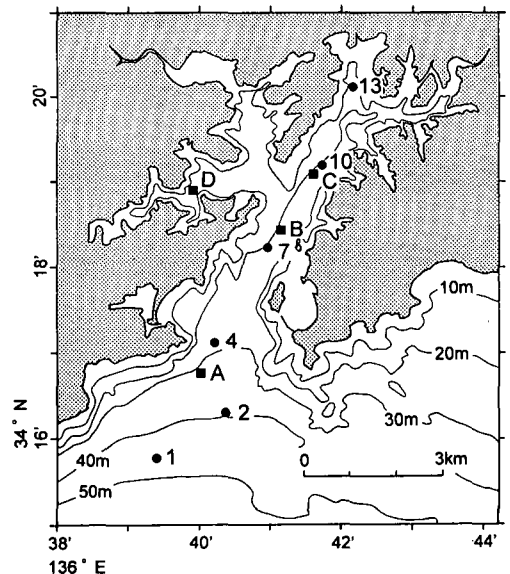


図-1 五ヶ所湾の地形と測点位置

* 正会員 農博 京都大学助教授 農学部水産学科

** 京都大学 農学部水産学科

*** 水産庁養殖研究所環境管理部

**** 正会員 農博 水産庁養殖研究所環境管理部

す。図の最上段は五ヶ所湾の水位（予報値）である。水位は半日周期で満干を繰り返しており、観測期間の前半は大潮、後半は小潮となっている。一方、等水温面も規則正しい半日周期の上下動を繰り返しており、内部潮汐の存在を示している。24°C面の水深に着目すると、湾口部の測点 A では、内部潮汐の波高は 20 m を越えている（9月8、9日）。湾中央部の測点 B では、内部潮汐がさらに純粋な形で現れており、その波高は約 10 m である。測点 D は湾の主軸から離れた枝湾内にある。ここでも半日周期の上下動は、波高はずっと小さくなっているものの、明瞭にみられる。

この図の一部を拡大して図-3 に示す。図の上部に満潮時刻を矢印で示す。満潮後 6.6 時間で測点 A の“内部潮汐の高潮”（等水温面が最も浅くなる）になる。内部潮汐は湾口から湾内に順に進行して伝播しており、測点 A の内部潮汐が高潮になった後、3.0 時間、4.7 時間、5.9 時間で、それぞれ測点 B、C、D の内部潮汐が高潮になる。

測点 A の内部潮汐の波形は、正弦波というよりは、矩

形波に近い形をしている。これが測点 B、C へと進行するにつれて前面が急で後面が緩やかな波形へと変形していく。

図-4 は湾口部（測点 4）における湾軸方向の流速であり、流入方向が正である。表層と底層はそれぞれ半日周期の振動をしながら、互いの位相関係は、ほぼ完全な逆位相となっており、内部潮汐による流動であることを示している。

この図の最初の部分（9月17日午前）の湾の縦断面における流況と等温面の変化を図-5 に示す。陰影部は水温 23°C 以下の領域である。23°C は躍層部の上面を表わしており、これ以深では急激に水温が低下している。陸棚域（測点 1、2）から湾口部（測点 4）では、躍層が大きく上下しており、これが湾内に伝わっている。

底層の流速のみを取り出して図-6 に示す。湾口部から流出が始まり、これが順次湾内に伝わっていく様子が明瞭に現れている。このことは内部潮汐（内部波）は進行波として湾内に伝搬・減衰していることを示してお

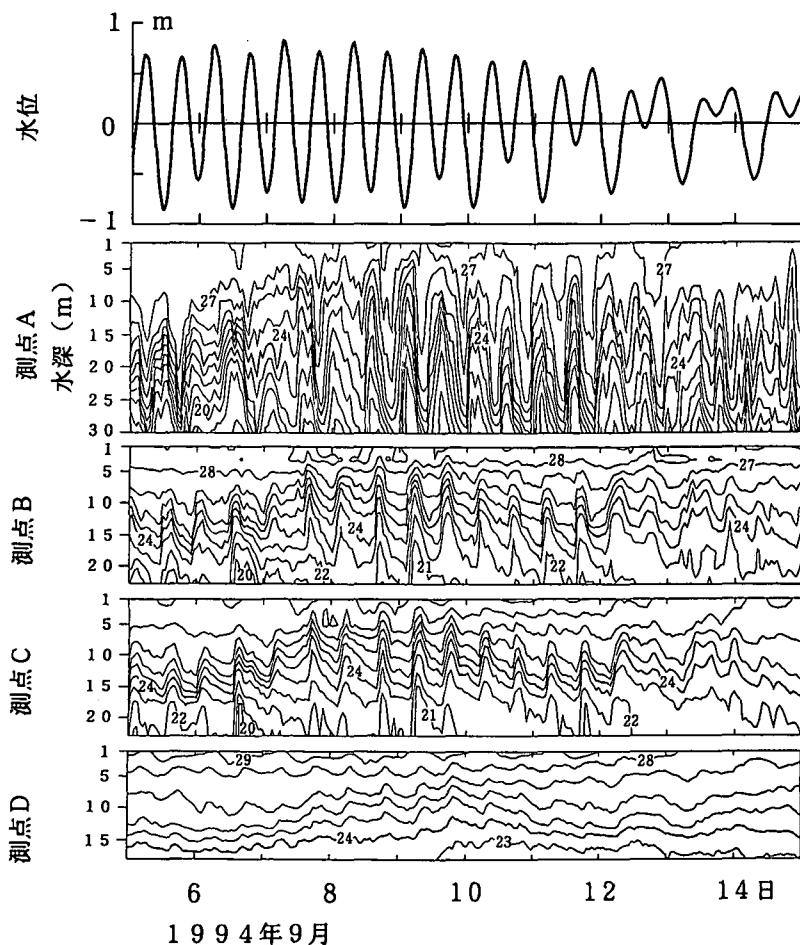


図-2 五ヶ所湾の水位（上）と水温変動（下）、1994年9月。

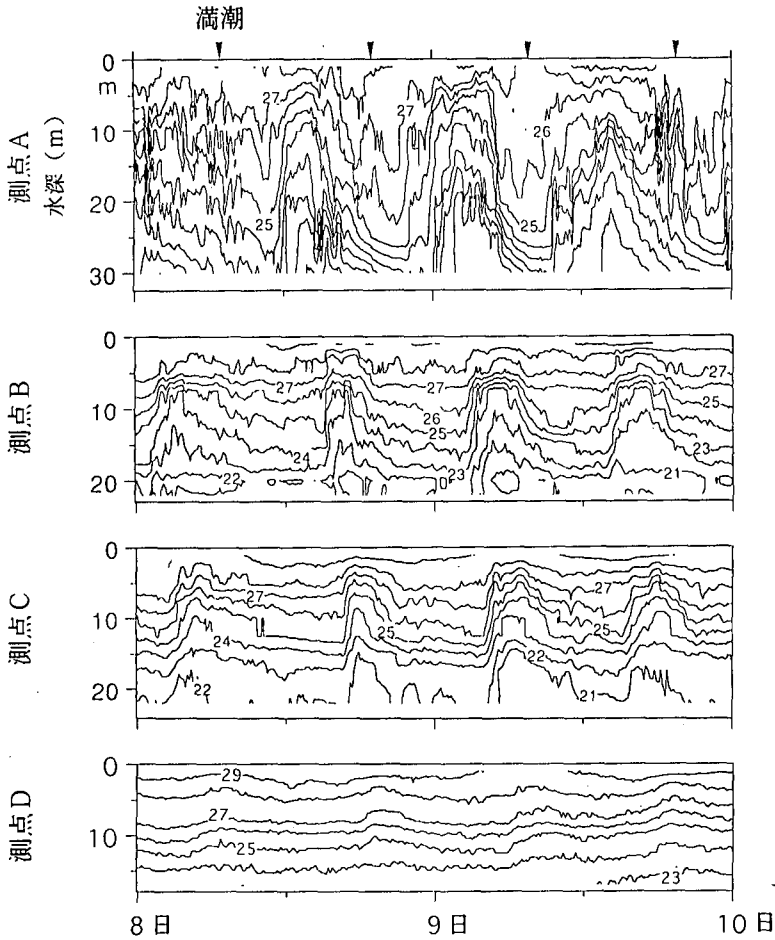


図-3 水温変動, 1994年9月8, 9日.

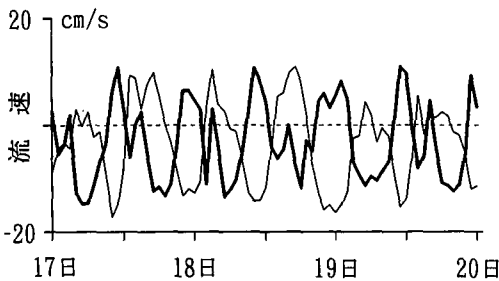


図-4 測点4における湾軸方向の流速, 流入方向が正. 1993年9月17日~19日. 太線は底層(底上2m), 細線は表層(海面下2m).

り, 湾奥部での反射は少ないと推定される. 図中の一点鎖線は, 進行速度 1.3 km/h (0.37 m/s) を表す. またこの図は, 湾口付近の測点2, 4で内部潮汐の“引き波”時に強い流れが現れることも示している(図-5の4時, 7時参照).

図-7には残差流を示す. 表層で流出傾向, 中層で流

入, 底層で流出となっている.

4. 海水交換

湾の海水交換の指標として塩分フラックスを用い, 塩分フラックスにおける残差流, 表面潮汐, 内部潮汐などの寄与割合を調べた.

使用したデータは, 図-7に矢印のある各点で測定された流速と塩分の1時間平均値であり, データの期間は1993年9月17日から19日の3日間である. それぞれの日について, 0時から翌日の0時までの25時間のデータセットを作り, これから塩分フラックスの各成分を計算した.

塩分フラックス (F) は塩分 (s) と流速 (u) の積として与えられる. ここで流速 u は, 流れの湾軸方向 ($N 20^\circ$) 成分であり, 湾奥に向かう流れが正である.

流速および塩分を, 変動周期によってそれぞれ3つの成分に分ける.

$$u = \bar{u} + U + u'$$

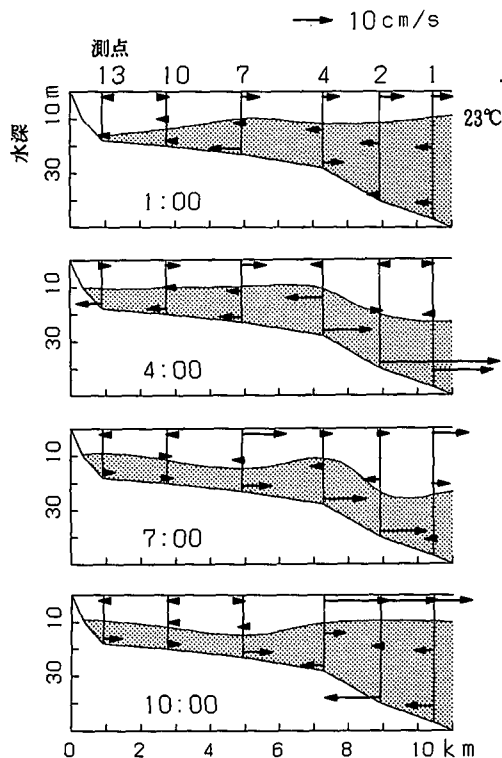


図-5 湾縦断面における流動と等温面変化。1993年9月17日1:00から10:00まで3時間間隔で示す。

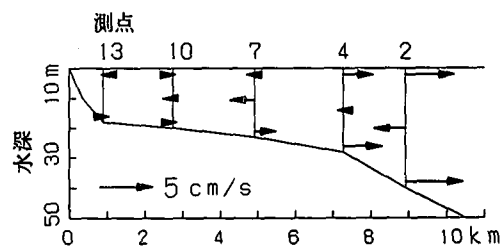


図-7 残差流, 1993年9月17日。

$$s = \bar{s} + S + s'$$

ここで右辺第1項は時間平均成分(流れの場合は残差流と呼ばれる)を表し, 第2項, 第3項はそれぞれ潮汐周期成分, 乱れ成分(高周波成分)を表す。この分解は, 潮汐成分が日周潮(M_1)と半日周潮(M_2)である調和分解法によって行った。

次にこれらの項を, さらに空間平均($\langle \rangle$)で表すとそれからの偏差(添字 d で表す)に分解する。ここで, 空間平均とは, 3層の平均である(測点13は2層)。例えば, 流れの潮汐周期成分は

$$U = \langle U \rangle + U_d$$

と分けられる。この様にして, 流速, 塩分はそれぞれ6個の成分に分解される。

これらを用いると, 塩分フラックスの時間空間平均($\overline{F}$)は

$$\begin{aligned} \langle \overline{F} \rangle = \langle \overline{us} \rangle = & \langle \overline{u} \rangle \langle \overline{s} \rangle + \langle \overline{u_d s_d} \rangle + \langle \overline{U} \rangle \langle \overline{S} \rangle + \langle \overline{U_d S_d} \rangle \\ & + \langle \overline{u' s'} \rangle + \langle \overline{u'_d s'_d} \rangle \end{aligned}$$

と表せられる。右辺第1項は移流項であり, 第2項以降が分散項である。分散項はさらに, 残差流のシア(右辺第2項), 表面潮汐(3項), 内部潮汐(4項), 乱れ(5, 6項)に分けられる。これを9月17日から19日までの各日のデータセットについて計算し, 得られた3日分の値を平均して最終結果とした。

塩分の分散によるフラックスの内訳を図-8に示す。ここで塩分の流入方向が正である。1は残差流のシア分散によるフラックスであり, 2は表面潮汐, 3は内部潮汐, 4は乱れによるフラックスである。計算の結果は, すべての測点で内部潮汐によるフラックスの方が表面潮汐によるフラックスよりも大きいことを示している。特に測点4では, 内部潮汐によるフラックスが大きな値となっている。これは, 中層で流速と塩分の潮汐周期変動が同位相となっているために起こっている。

5. 考 察

図-6に見られるように, 内部潮汐は湾内に進行波として伝わり, 湾内でそのエネルギーを消費している。湾内の伝搬速度は0.37 m/sである。一方, 2層に成層した

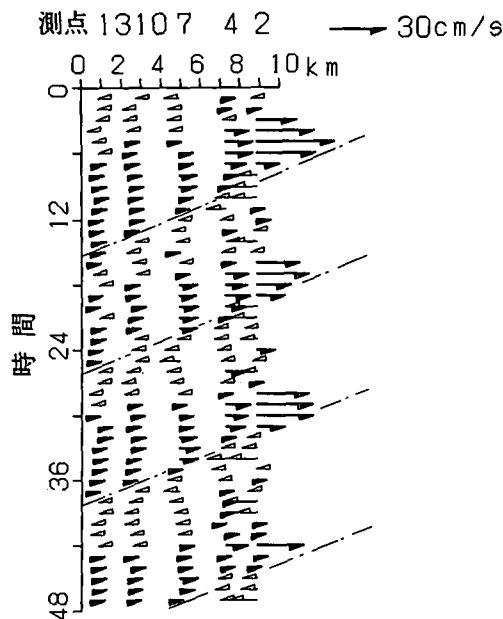


図-6 底層(底上2m)の流速。縦軸は1993年9月17日0時から経過時間であり, 横軸は湾の主軸方向の距離, 黒矢印は流出, 白矢印は流入を表す。

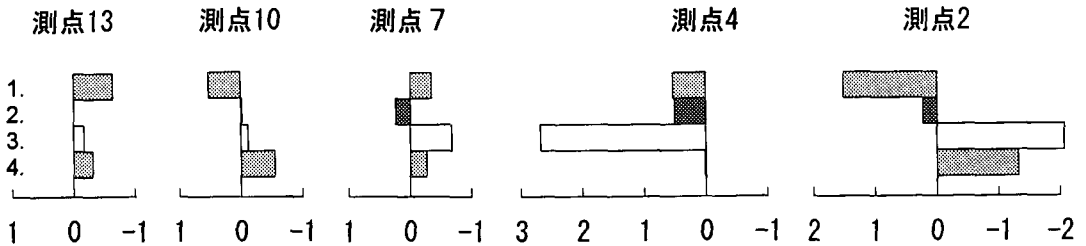


図-8 塩分フラックスの成分分け，流入为正。

単位：psu・cm/s. 1：残差流のシア，2：表面潮汐，3：内部潮汐，4：乱れ

海での内部波の伝搬速度 C は

$$C = \sqrt{\varepsilon g h_1 (h_0 - h_1) / h_0}$$

で与えられる。ここで、 h_0 は水深 (25 m) であり、 h_1 は躍層の深度 (12.5 m)、 g は重力加速度、 ε は下層と上層の密度差 (2 kg/m^3) と海水の密度 (1025 kg/m^3) の比である。この式を用いて計算した伝搬速度は 0.35 m/s であり、実測値とよく一致した。また、この速度から計算される内部潮汐の波長は 16.5 km であり、湾の長さよりはかなり長い。

次に、流況の時間変化 (図-5) から残差流 (図-7) を考える。底層において残差流が流出となるのは、内部潮汐波が斜面に打ち上げ、引き波となるときに底近くに強い流れが発生することが原因であると考えられる。また中層での残差流の流入は、概略次のような機構で起きていると考えられる。今、中層の流速計は、内部波の峰の高さと谷の高さ間の水深にあるとする。内部波は進行波として湾内に伝わるので、内部波の峰の部分では下層水は進行方向に動いており、また谷の部分の上層水も進行方向に動いている。このため、峰の高さと谷の高さ

の間にある流速計は、常に進行方向の流れを計測することになる。このような現象は、測点 2, 7 の中層で特に明瞭にみられ、ここではほぼ常時流入となっている。

6. まとめ

本研究の結果以下のことが明らかになった。成層期においては内部潮汐は湾外 (陸棚域) に常に存在し、湾口部へと伝播してくる。内部潮汐は、湾内へ進行波として伝播し、湾内で減衰し、そのエネルギーを失う。湾内の流動は内部潮汐により支配されており、また海水交換においても内部潮汐は主要な役割を果たしている。

謝辞：本研究に流速等のデータを提供して頂いた三重県水産部、また当湾についてご指導頂いた水産工学研究所の武内智行室長および中山哲蔵室長に深謝します。

参考文献

萩野静也 (1993): 成層した内湾の漁場水理環境に関する研究, 水産工学研究所報告, 14 号, pp. 1-49.