

ADCP を用いた五ヶ所湾の内部潮汐観測

阿保勝之*・杜多 哲**・高柳和史***・藤原建紀****

1. はじめに

熊野灘沿岸には半閉鎖性の小湾が多く存在しており、多くは養殖場として利用されている。これらの湾では、成層期に内部潮汐が発達し、海水交換を促進する重要な要素となっている(藤原ら, 1995; 武内, 1996)。また、これらの湾で見られる間欠的な湾外水進入の発生については、内部潮汐と密接に関係した現象であることが指摘されている(阿保ら, 1996; 杜多・阿保, 1997)。

海水交換や物質輸送の把握には、内部潮汐などの傾圧的な流動機構の解明が必要であるが、この海域における流況調査は、これまで3層(上・中・下層)の流速測定により行われてきた。本報では、ADCP(超音波ドップラー流速プロファイラー)を用いて流れの鉛直分布を詳細に測定し、内部潮汐に伴う流動を明らかにした。

2. 現地調査

三重県の上ヶ所湾において、湾中央部に横断面(図-1, 測点1~4)を設定し、流れ、水温、塩分の鉛直分布を1時間間隔で13回測定した。調査は、大潮で日潮不等の少ない1997年9月3日に実施した。流れは、ADCP(RD Instruments社製, 600 kHz)を小型船に取り付けて測定し、水温と塩分は、CTD(ユニオンエンジニアリング社製)を用いて測定した。また、9月1日から5日には、測点A~Cに自記式水温計を多層(約5m間隔)に設置し、水温の鉛直分布を10分間隔で測定した。

3. 観測結果

3.1 水温変動特性

測点A~Cにおける水温鉛直分布の時間変化を示す(図-2)。ただし、図の最上段は五ヶ所湾の予報潮位である。等水温線は半日周期で上下に規則正しく変動しており、内部潮汐が発達していることが分かる。その波高は、大きいときには測点Aで10m以上、測点BとCでも5m程度である。また、半日周期の変動には、測点によ

て時間差がある。これらのことは、内部潮汐が湾内へ伝播し、減衰していることを示している。ADCP観測を実施した9月3日について見ると、測点A, B, Cでは、25°C等水温線がそれぞれ水深6m~16m, 12m~17m, 7m~13mの間を半日周期で上下動している。図-3に、湾の横断面(測点1~4)における水温、塩分、密度(σ_t)の分布(9月3日15時頃)を示す。いずれの分布も水深10m付近で等値線の間隔が短くなっている。つまり、この水深に躍層があり、水温25°C, 塩分33.25psu, 密度(σ_t)22を躍層の目安と考えることができる。この躍層面が、内部潮汐に伴って半日周期で上下動を繰り返す。図は示さないが、躍層面($\sigma_t=22$)は、内部潮汐の干潮にあたる7時頃には水深15m付近にあり、内部潮汐の満潮にあたる13時頃には水深9m付近にある。

3.2 流速変動特性

ADCPにより測定した流速の鉛直分布の時間変化を図-4に示す。ただし、流速は湾軸方向成分(横断面に垂直な成分, 流入が正)であり、1時間毎に右へずらして示してある。また、下部にはおおよその測定時刻を示してある。流れには、半日周期の変動が顕著に現れている。また、上層と下層でほぼ逆位相になっており、内部潮汐

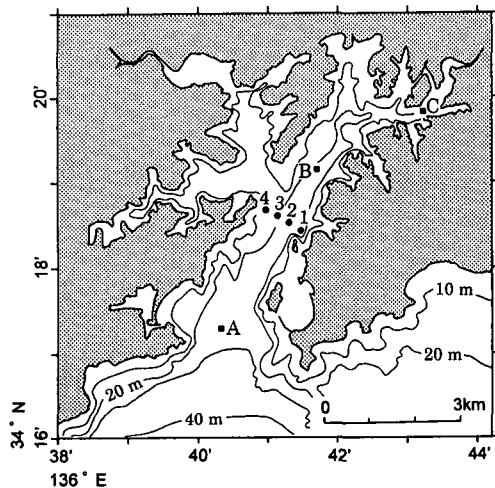


図-1 五ヶ所湾の地形と測点

* 正会員 農博 水産庁養殖研究所 環境制御研究室
** 正会員 農博 水産庁養殖研究所 企画連絡室
*** Ph.D. 水産庁養殖研究所 環境制御研究室長
**** 正会員 農博 京都大学大学院助教授 農学研究所海洋生物環境学

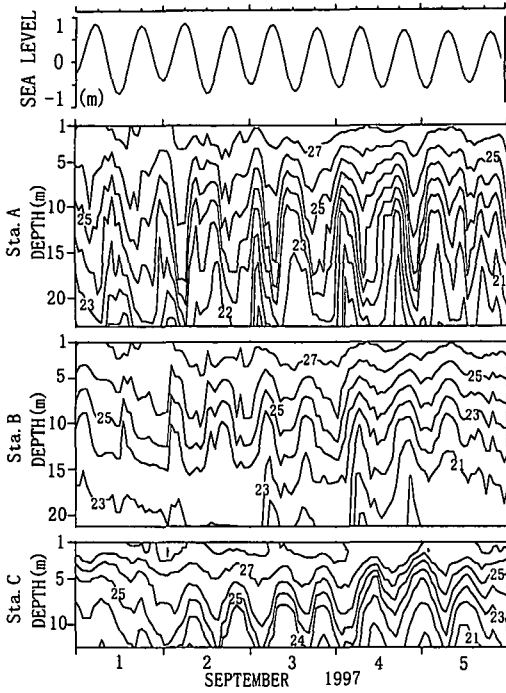


図-2 水位変動と水温変動

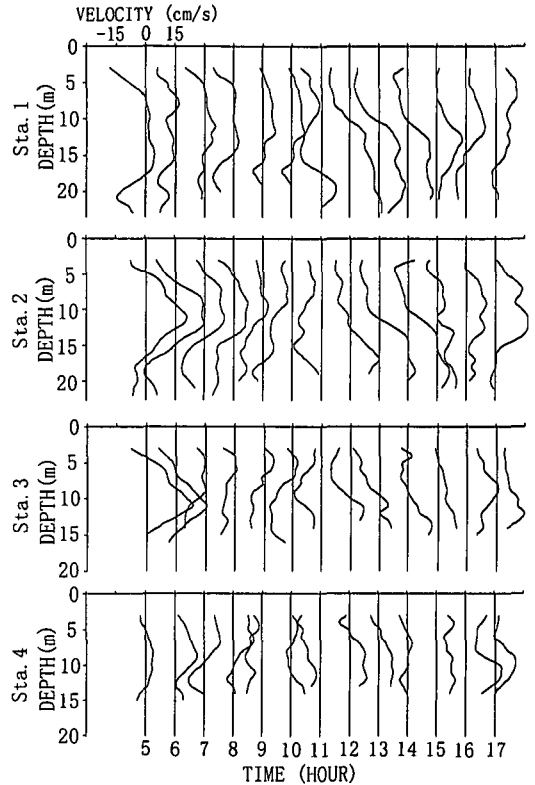


図-4 流速の鉛直分布の変動。流速は湾軸方向成分(流入が正)で1時間毎にずらして示してある。

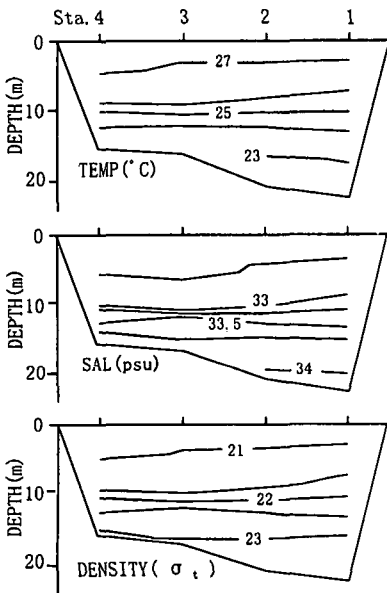


図-3 水温、塩分、密度の鉛直横断面分布(1997年9月3日)

の流出, 水深 19 m で 18.5 cm/s の流入となっている。そして, 15 時頃には再び流速が小さくなっている。また, 測点 3 と 4 は水深が浅く内部潮汐波の振動面が海底に近いので, 内部潮汐に伴う流速変動は小さい。

4. 解析結果

流速成分 u は, 次のように時間平均成分 \bar{u} (残差流成分), 潮汐周期成分 U および高周波成分 u' に分解できる。

$$u = \bar{u} + U + u' \dots\dots\dots (1)$$

ここでは, 潮汐周期成分として半日周潮 (M_2) のみを考え, 最小二乗法により各成分を求めた。さらに, 各測点毎に潮汐周期成分を鉛直平均することにより表面潮汐成分 (鉛直平均値) と内部潮汐成分 (鉛直平均値からの偏差) に分解した。

$$U = \langle U \rangle + U_d \dots\dots\dots (2)$$

ただし, $\langle \rangle$ は, 鉛直平均を表し, 添字 d はそれからの偏差を表す。ここで, $\langle U \rangle$ は流れの表面潮汐成分, U_d は内部潮汐成分に相当する。同様に, 塩分 s についても以下のように時間平均成分 \bar{s} , 潮汐周期成分 S および高周波

に伴う流動が卓越していることを示している。5 時頃には上層で流入, 下層で流出の傾向があるが, 9 時頃には流速が小さくなっている。その後, 上層で流出, 下層で流入に転じ, 測点 2 では 13 時頃に水深 4 m で 9.7 cm/s

成分 s' に分解し、さらに潮汐周期成分を表面潮汐成分 $\langle S \rangle$ と内部潮汐成分 S_a に分解した。

$$s = \bar{s} + S + s' \dots\dots\dots (3)$$

$$S = \langle S \rangle + S_a \dots\dots\dots (4)$$

つぎに、湾の海水交換の指標として塩フラックスを用い、内部潮汐、表面潮汐、残差流の役割を明らかにする。塩フラックス F は、流速と塩分の積として与えられる。塩フラックスの時間空間平均は、以下のように分解できる(藤原ら, 1995)。ただし、ここでは空間平均として鉛直平均を用い、各測点毎に計算する。

$$\begin{aligned} \langle \bar{F} \rangle &= \langle \bar{us} \rangle \\ &= \langle \bar{u} \rangle \langle \bar{s} \rangle + \langle \bar{u}_a \bar{s}_a \rangle + \langle \bar{U} \rangle \langle \bar{S} \rangle + \langle \bar{U}_a S_a \rangle \\ &\quad + \langle \bar{u}' \rangle \langle \bar{s}' \rangle + \langle \bar{u}'_a \bar{s}'_a \rangle \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

上式で、右辺第1項は移流項、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。ただし、移流項(右辺第1項)は、一般に誤差が大きいため、本報では比較の対象にできなかった。

4.1 残差流

残差流の鉛直断面分布を図-5に示す。ただし、流速は湾の横断面に垂直な成分を示しており、正の値(図中の点刻部)は湾内への流入を表している。残差流は、上層と下層から流出し、中層から流入している。水平的には、東側(測点1)から流出し、西側(測点4)から流入する傾向にある。流速は、測点1の表層で最大6 cm/sの流出、測点2の水深12 mで最大4.2 cm/sの流入となっている。

内部潮汐が発達する海域において流速を固定点で測定した場合、中層では流入方向の流れが現れる。図-6には、内部進行波に伴う流動の模式図を示した。躍層面の振動する水深範囲(図中の a)で流速を測定する場合、内部潮汐の満潮時には躍層以深の流れを測定し、干潮時には躍層以浅の流れを測定するため、流速は常に流入となる。したがって、残差流は中層で流入となる。

また、藤原ら(1995)は、内部潮汐の引き波時に海底付近に強い流出流が発生することを指摘している。この影響で、残差流は海底付近で流出していると考えられる。一方、鉛直循環流(エスチュアリー循環流)が卓越する場合、残差流の分布は上層で流出し下層で流入する傾向となる。今回得られた残差流の分布には、内部潮汐に伴う中層での流入と海底付近の強い流出流、および鉛直循環流とが重なっていると考えられる。

4.2 内部潮汐成分

第2式、第4式により得られた流速、塩分の内部潮汐成分について述べる。図-7(a)は、流速の内部潮汐成分

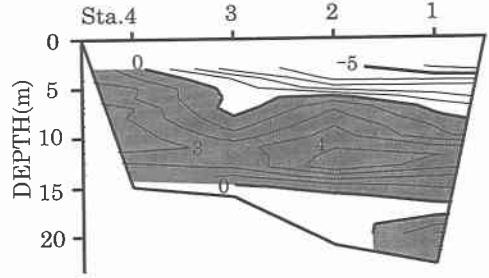


図-5 残差流の鉛直断面分布。図中の数値は流速 (cm/s, 流入が正) であり、点刻部は流入を示す。

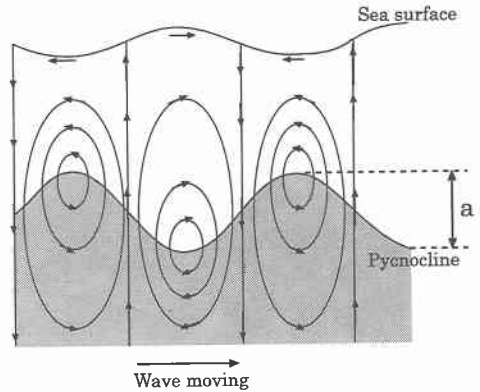


図-6 内部進行波に伴う流動の模式図。

の振幅および位相について、その鉛直分布を測点毎に示したものである。内部潮汐成分の振幅は、水深の深い測点1と2で大きく、水深の浅い測点3と4で小さい。各測点では、上層と下層に振幅の極大があつて大きな流れが起きているが、中層では波の節になるため流れが小さい。例えば測点1では、水深6 mと21 mに極大があつてそれぞれ6.8 cm/s, 8.9 cm/sの振幅であり、水深11 m付近には極小値が見られる。位相についてみると、振幅の極小値付近で上層と下層に明瞭に別れており、ほぼ逆位相になっている。一方、塩分の内部潮汐成分(図-7(b))は、流れと同様に測点1と2で振幅が大きく、上層と下層に極大値がある。また、位相については、上層と下層で逆位相になっており、流れとほぼ同位相である。この流れと塩分の位相関係は、内部潮汐が進行波として伝播していることを示している。

4.3 塩フラックス

図-8は、塩フラックスの内部潮汐成分の大きさを水深毎に示したものである。フラックスは、測点1と2で大きく、特に水深6 m付近と17 m付近で大きい。この傾向は、流れの内部潮汐成分の振幅分布とよく一致している。また、フラックスはほとんどの水深で流入となつて

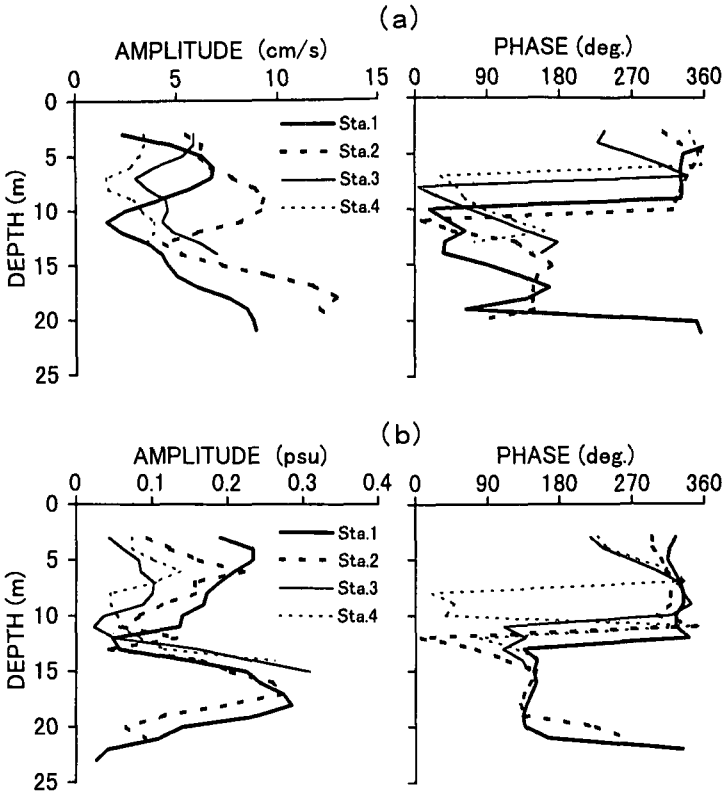


図-7 流速および塩分の内部潮汐成分の振幅と位相 (a): 流速, (b): 塩分

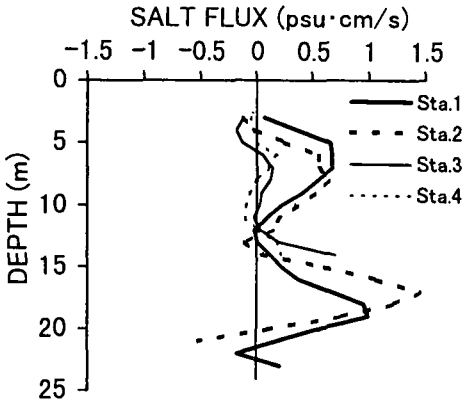


図-8 塩フラックスの内部潮汐成分の分布

よるフラックスが分散項の中で最も大きい。一方、測点3と4では、水深が浅く内部潮汐流が小さいため、内部潮汐によるフラックスは小さい。横断面全体で見ると、分散項の中では残差流のシア、内部潮汐、表面潮汐の順にフラックスへの寄与が大きく、内部潮汐は残差流のシアに匹敵する大きさであった。

5. おわりに

本研究では、流速・塩分の詳細な鉛直分布を用いて解析を行った。その結果、内部潮汐が五ヶ所湾の流動を支配しており、海水交換に重要な役割を果たしていることが明らかになった。このことは、3層(上・中・下層)の流速・塩分データを用いたこれまでの研究結果と一致する。また、残差流に関しては、内部潮汐流に伴う中層の流入と海底付近の流出流、および鉛直循環流の影響により、上層と下層で流出し中層で流入することが明らかとなった。

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, 第33巻, 第2号, pp.

いる。

つぎに、塩フラックスの各成分を比較し、各成分が海水交換に果たす役割を明らかにする。各測点毎の分散による塩フラックスの内訳を図-9に示す。測点1と2では、内部潮汐によるフラックスが大きく、表面潮汐によるフラックスより大きい。特に測点2では、内部潮汐に

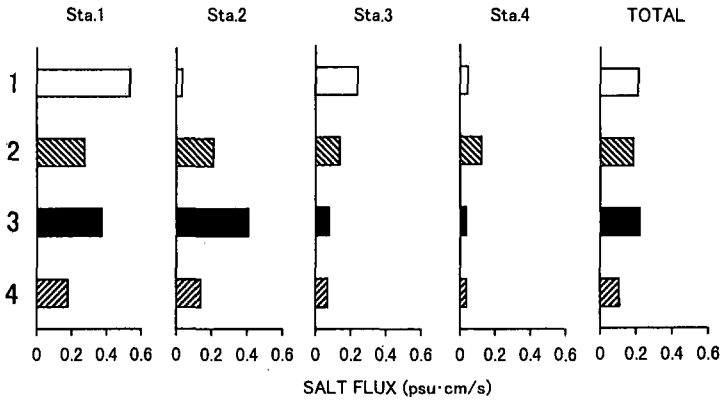


図-9 塩フラックスの内訳。1：残差流のシアア、2：表面潮汐、3：内部潮汐、4：高周波成分。

211-220.

武内智行 (1996): 内部潮汐を考慮した湾の流況シミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1141-1145.
 杜多 哲・阿保勝之 (1997): 内部潮汐のシル越えによる英虞湾

への湾外水の侵入, 海岸工学論文集, 第44巻, 1166-1170.
 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.