

成層の発達した場合の浦の内湾の海水流動機構について

宗景志浩*・木村晴保**・宮本一之***

1. ま え が き

湾外での増養殖も充分可能となった現在もなお、内湾は生物生産の場として重要な海域である。浦の内湾では、昨年9月10～13日、湾中央部で養殖ハマチの大量斃死が発生した。これは降雨の後、湾奥深部の貧酸素水が表層部に移動したことによると言われているが、現在のところこのよう

な海水の流動を予測できるまでには至っていない。

浦の内湾は湾中央部までは浅く海水の交流も良いが、それより以奥は水深の大きい閉塞性の内湾である。このような湾では、一般に、高密度の外海水が海底斜面に沿って湾内底層部に流入し、表層からは低密度海水が流出する。しかし、高野¹⁾は密度成層をもつ海域を表面波が伝播する際、海底地形の急変によって内部波が生じることを指摘しており、中村²⁾は成層期の開放性の湾で内部潮汐と思われる現象をしばしば観測し、これによる流動機構を検討している。

今回は、1981年8月19～28日の間、浦の内湾で行なった水温各層観測の結果を示し、さらに同時期の湾内の海洋構造とその時間的変動を解析した。潮汐ときわめてよい対応を示す湾内下層部の水温変動は、浦の内湾のような閉塞性湾の密度躍層に発達した内部波動に起因するものと考えられ、これに基づく海水流動機構ならびに水温変動機構について検討を行なった。

2. 観 測 内 容

土佐湾中央部に位置する浦の内湾は、図-1に示すように東西12km、幅2kmの細長く複雑な地形をもつ内湾である。湾中央部の深浦-大崎以東は潮汐流が直接関与

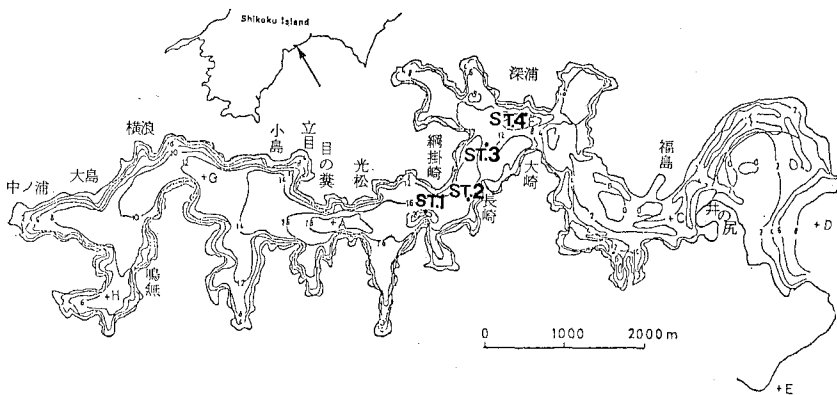


図-1 浦の内湾の地形と観測点

するが、以西は水深も深く、この付近をいわゆる湾口部とした閉塞性内湾を形成している。今回は、深浦沖(水深7m)にST.4を、湾中央部に向ってST.3(15m), ST.2(16m), ST.1(20m)の観測点を設け、次に示す観測を行なった。

(1) 1981年8月19～28日の間、ST.2では底上2.2mより2m間隔で、6層の水温を20分おきに計測した。これと並行して深浦漁港岸壁で潮位の測定を行なった。

(2) ST.1～4の定点では、8月26～27日に、約22時間にわたって、水温、塩分、流向・流速を水面下1mより2m間隔で1時間おきに測定し、成層期の海洋構造を解析した。

3. 観 測 結 果

3.1 水温各層観測

図-2はST.2における水温各層観測の結果と潮位記録である。上層から順に各層の水温を27～28℃の範囲で示した。約10日間にわたる水温および潮位の記録から次のような特徴をみることができる。

(1) No. 5, No. 6にみられる下層部の水温変動は潮位変動ときわめてよい対応を示している。すなわち、水温は上げ潮時に上昇し下げ潮時に低下する。水温変動量は日潮不等による潮位差の変化にも対応しており、潮位差の少ない潮時では水温変動量も小さい。また、これらの傾向は下層にいくほど顕著である。

* 正会員 農修 高知大学講師 農学部栽培漁業学科

** 正会員 農博 高知大学教授 農学部栽培漁業学科

*** 日本海工(株)

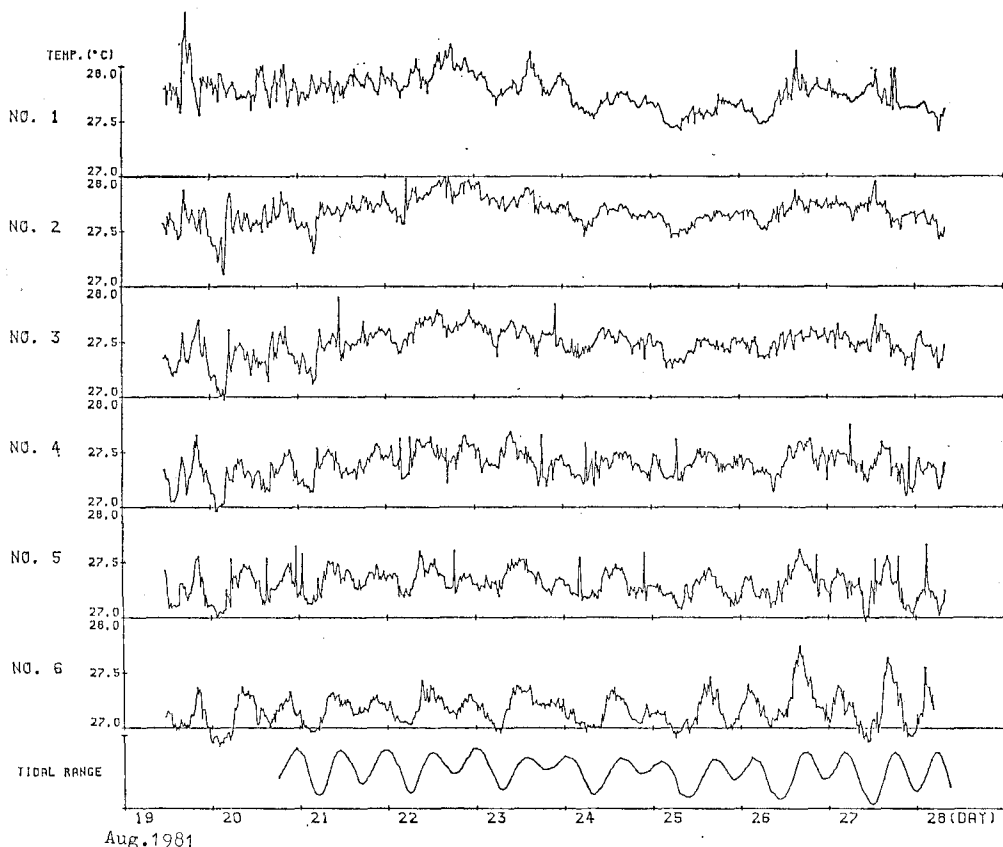


図-2 ST. 2 における水温変動と潮位

(2) No. 1, No. 2 に代表される上層部の水温は、下層部で特徴的にみられた潮汐周期に対応した変動ではない。比較的周期性のみられる 8 月 23 日以後では、日射に対応すると思われる一日周期の変動が認められる。

(3) いずれの層でも、2~3 時間にわたる微弱な水温変動が連続してみられる。

(4) No. 3~No. 5 の中層部ではスパイク状の 1~2 時間持続する水温上昇がみられる。

3.2 密度の水平構造と等密度線の鉛直変動

図-3 は 8 月 26 日~27 日の各潮時における密度の水平分布を示すもので、これにより湾口周辺の水平的な海洋構造を知ることができる。

(1) ST. 3 より湾口側では、海水の流れに沿う等値線の傾斜がみられるものの、これらはほぼ水平的で成層がよく発達している。また、上げ潮時 (13:00) の ST. 4 の流入海水の密度は、ST. 2 以奥の中層部の密度に等しく、下げ潮時 (8:00) には上層ないし中層部の水塊密度に類似している。

(2) 満潮および干潮に伴って下層部の等密度線は上下に大きく移動している。例えば、 $\sigma_t=22.00$ 等値線は干潮時には水面下 8m 付近にみられるが、満潮時には 14m まで下降する。

(3) 満潮および干潮時における水温と密度の等値線の最大鉛直変動量を横軸に、各等値線を縦軸にして描いたものが図-4 である。水温の場合は 27.4°C 以下の等温線の鉛直移動量が大きく、下層ほど顕著である。密度においては、密度躍層となっている $\sigma_t=22.00$ 付近の等密度線の移動が大きく、その移動量は 4~6m にも達する。

3.3 密度の鉛直分布とその時間的推移

図-5 は ST. 2 における密度の鉛直分布とその時間的経過を示す。縦軸は海底を基準とした水位を、横軸は $\sigma_t=22.00$ を基準として密度をとり、各観測時の密度の鉛直分布の時間的な推移を見ようとした。

(1) 鉛直分布線と縦軸との交点を時間方向に追ってみると、点線で示す等密度面は時間的に上下変動をしている。また、それぞれの鉛直分布線の上端は水面下 1m の観測値であるから、この点を時間方向にたどったものはほぼ潮位面を示すことになり、先の等密度面は潮汐と逆の位相をもつ変動であることがわかる。

(2) 8 月 27 日 4:00 の満潮時と 10:00 の干潮時における $\sigma_t=22.00$ の等密度面の鉛直移動量は、ST. 1, 2, 3 でそれぞれ 2.2m, 3.7m, 5m となっており、明らかに湾口にいくほど大きくなっている。

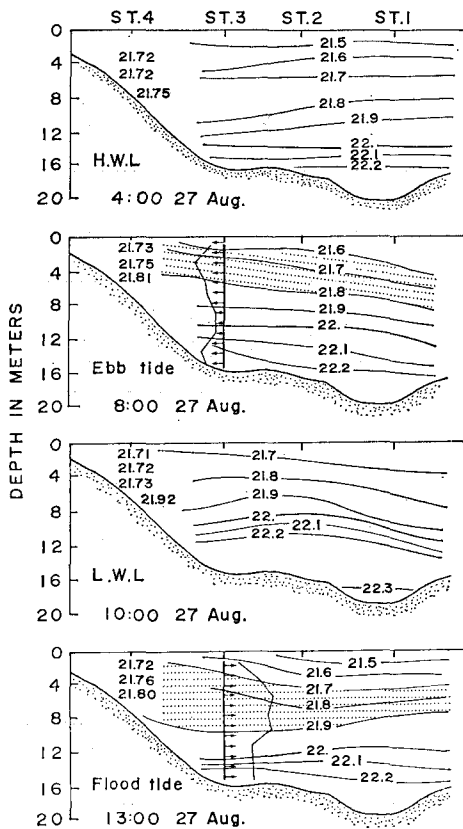


図-3 密度の水平分布と流速の鉛直分布

3.4 T-S ダイアグラム

図-6はST.1の満潮、下げ潮、干潮、上げ潮の各潮時におけるT-Sダイアグラムを示す。これは縦軸に水温横軸に塩分をとり、各水深における水温、塩分を水深と併せてプロットしたものである。

(1) 水温、塩分は2mの等間隔で測定したにもかかわらず、水深10~15m付近でT-S分布にはプロットの空白がみられる。これは水塊の密度が急変することによるもので、この水深で密度界面が形成されている。

(2) ST.1では、水深15m以深、すなわち上記の密度界面の下に低温の高密度水塊が干潮時に明瞭に出現す

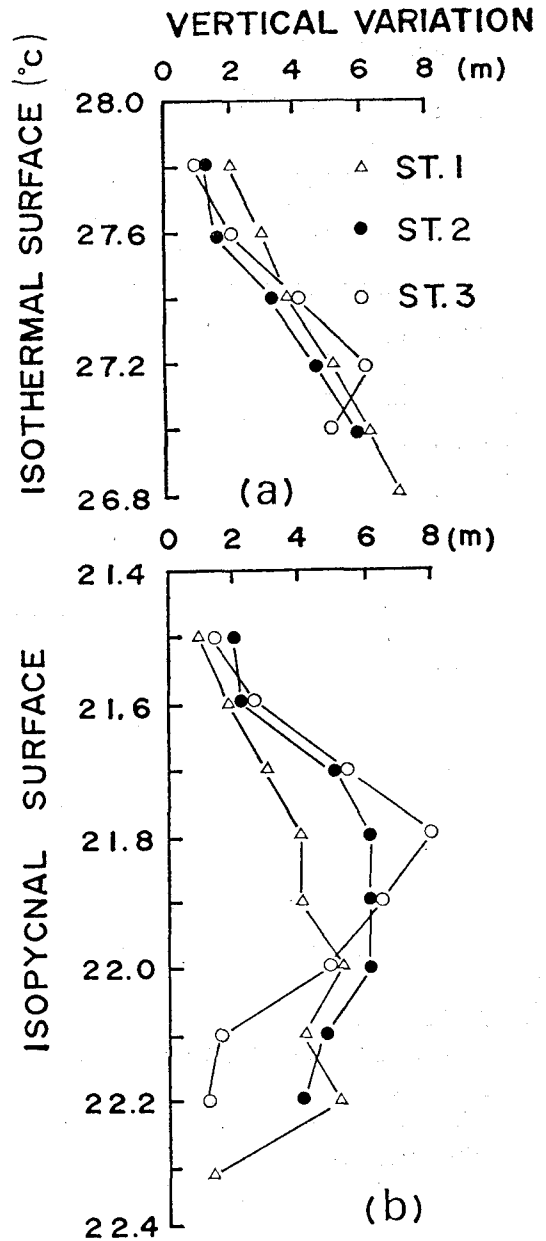


図-4 水温および密度の等値線の鉛直変動

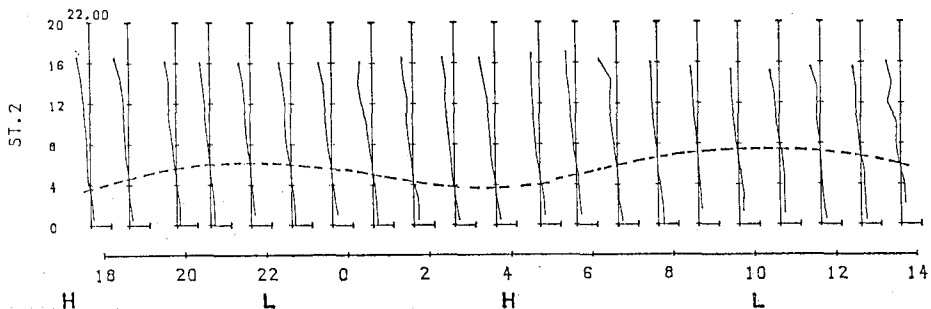


図-5 密度の鉛直分布とその時間的推移

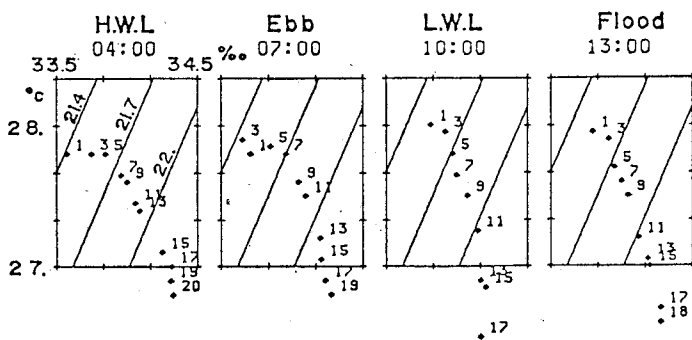


図-6 T-S ダイアグラム (ST. 1)

る。この水塊は塩分の鉛直変化が少なく水温勾配の大きい、いわゆる水温に依存した密度となっている。

4. 考察

4.1 浦の内湾の流動機構と水温変動

湾内の水温の水平構造は、密度の場合と同じくほぼ水平的である。このような水温成層のもとでは、海水の水平的な流動、あるいは高密度海水の一方的な下層からの流入などによっては、図-2 にみられた下層部の、潮汐ときわめてよく対応する水温変動を説明することは困難である。従って、湾内下層部では何らかの海水の鉛直的な流動過程が存在するはずである。

密度の水平分布の結果によれば、上げ潮時湾口に近い ST. 4 の流入海水の密度は、湾内 ST. 2, 1 の上層部の水塊より重く、底層部の海水より軽い。また、水深の浅い湾口から急激に深くなる ST. 2 付近にかけて、湾内の中層部への流入を示唆する等密度線のゆるやかな傾斜がみられる。さらに、密度水平分布図の中に載せた ST. 3 の流速の鉛直分布によると、湾口を通して流入する外海水は、湾内の中層部に卓越して流入していることがわかる。一方、下げ潮期には、湾口部水塊の密度は湾内の上・中層部の密度と近似しており、しかも ST. 3 の流速の流出成分は表層 5m 付近までが大きい。このように成層期に浦の内湾で、上げ潮時に外海水が湾内中層部に流入するという点は、従来の閉塞性湾に対する流動機構とは根本的に異なる。

湾外海水が湾内の中層に、すなわち最下層の高密度水塊の上に流入することによって、最下層の水塊は水深の大きい湾中央に向かって押し下げられ、底層では水平的な流動が生じる。ST. 3 の流速の鉛直分布の中で、上げ潮時水深 12m 以深で再び流速の増大がみられるのはこのことによると考えられる。このように湾内下層部の水塊が湾中央部に移流することにより、下層界面は下降し、高温水の流入による下層部の水温上昇が起こる。一方、下げ潮時には、上・中層の水塊が卓越して流出することにより、湾口付近で下層水塊との界面での圧力は低下する。

上げ潮時とは逆に、最上層の低温水塊の上昇と湾中央からの移流が行なわれ、界面の上昇および水温の低下が生じる。

このような湾内下層部の海水の動きは、T-S ダイアグラムで水深 14m, $\sigma_t = 22.00$ 付近で容易に認められる密度躍層に、潮汐に対応して界面波が生じた結果によると考えられる。密度の鉛直分布の変化(図-5)にみられる $\sigma_t = 22.00$ の等密度面(点線)の潮汐に対応した上下変動は、この密度躍層に発達した界面波を示すものである。さらに、図-4 (b) に示した等密度線の鉛直変動量が界面付近で最大となることも界面波の特徴である。また、等密度面の最大鉛直変動量が湾口に近い ST. 3 にいくほど大となる結果は、単節の定常界面波の特徴とも言えるが⁹⁾、ST. 1 以奥の観測によらねば明らかにならない。

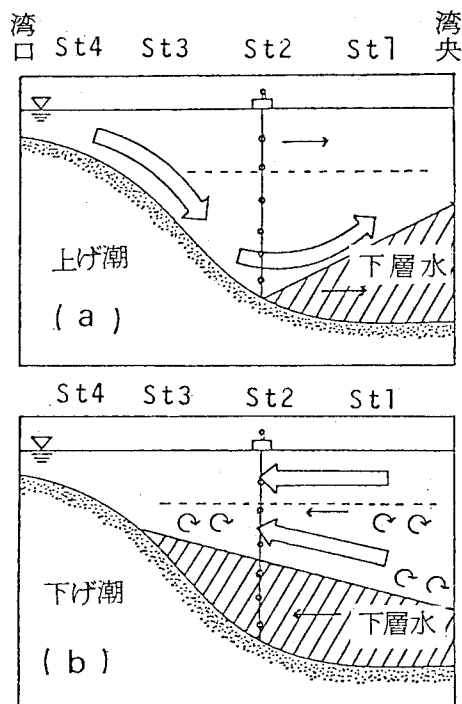


図-7 浦の内湾の流動模式図

むしろ、進行性の界面波ならば、湾奥の斜面上では砕波による mixing, 湧昇などの現象の起こることが考えられ⁴⁾、これらが湾内の全体的な流動機構を形成するものと思われる。

そこで、この界面波に支配された海水流動モデルを図-7の模式図で示し、これに ST. 2 付近の水温変動を対応させてみる。図-7(a)は上げ潮時の流動を示すもので、外海水は湾内の高密度底層水の上面に流れ込むことにより、底層水は湾中央深部に向かって流動し、湾口付近の下層界面が低下することを表わす。同図(b)は下げ潮時、上・中層からの海水の流出により、湾口付近では密度界面での圧力の低下が生じ、界面の上昇と低温の底層水の湾口方向への流動が起こることを示している。従って、湾口付近の海底斜面上に設置された水温センサーのうち、下層部のものは界面の上昇と下降に直接支配されることになる。

4.2 下層ほど卓越する水温変動量

界面波によって、密度の鉛直移動量は密度躍層で最大となる。しかし、図-4(a)にみられるように水温の等値線の鉛直移動量は必ずしも躍層付近で最大とはならず、むしろ下層にいくほど大きくなる。このことは、水温各層観測の結果でも示したように、No. 5 よりも下層の No. 6 の水温変動がより明瞭で振幅の大きいことと一致する。

図-8(左図)は干潮時(L)および満潮時(H)における水温の鉛直分布を示したものであるが、特に中層以深では異なる鉛直分布型となっている。湾中央深部の水塊の水温勾配は、ST. 2 付近でみられる満潮時のそれより大きい。この水温勾配の異なる水塊が下げ潮時に海底斜面

上を溯上することにより、上記の異なる鉛直分布型ができる。この2つの鉛直分布型から水深を一定にして水温差を求めたものが同図(右図)で、底上は除き、下層ほど水温変動が大である。海底斜面上を任意の水温鉛直分布をもつ水塊が流下、溯上する場合、特に下層では潮時によって異なる水温鉛直分布を形成し、下層ほど顕著な水温変動を示す現象が起り得る。この傾向は中村らによる野見湾の観測でも得られている²⁾。

5. む す び

(1) 夏期、浦の内湾内(ST. 2)において水温の各層連続観測を実施した結果、特に下層部の水温変動は潮汐とぎわめてよい対応を示した。

(2) 同時期に行なった一昼夜の水温、塩分、流向、流速の観測から、次の特徴が明らかになった。① 水温および密度は成層がよく発達しており、中層以深の各等値線は上げ潮時下降し、下げ潮時上昇する。② 等密度線の鉛直変動量は水深 10~15m 付近にみられる密度躍層で大きく、それより上下層では小さい。③ 上げ潮時湾口付近での流入海水の密度は、湾内の中層部の水塊密度と近似しており、④ ST. 3 付近の流入速度は中層部で卓越している。⑤ 下げ潮時には上・中層からの海水の流出が優勢である。⑥ 密度躍層付近の等密度面($\sigma_t = 22.00$)は潮位面と逆位相で変動する。

(3) 以上の結果、上げ潮時には湾内下層部の水塊よりも高温で低密度の海水が、中層部に流入し密度躍層を押し下げる。そして下層水塊は湾中央深部に移動し、ST. 2 付近の下層では水温は上昇する。一方、下げ潮時には上・中層からの流出により、湾口付近では界面の上昇、下層部の水温の低下が起こる。

(4) 上記の現象は水面下 10~15m に存在する密度躍層に、潮汐に対応して界面波が生じたものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) Takano, K. and N. Iida: Generation of internal waves by an abrupt change of depth, La mer, Tome 7, N° 2, pp. 150~160, 1969.
- 2) 中村 充・萩野静也: 密度成層流体中の海水交換機構に関する研究, 第26回海講演文集, pp. 544~548, 1979.
- 3) 木村晴保・細貫 啓: 一様傾斜底水域における二次元二層界面静振, 第27回海講演文集, pp. 70~74, 1980.
- 4) Cacchione, D. and C. Wunsch: Experimental study of internal waves over a slope, J. Fluid Mech., Vol. 66, Part 2, pp. 223~239, 1974.

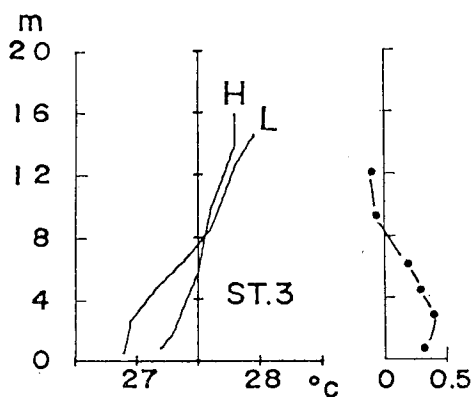


図-8 水温の鉛直分布と水温変動量