

浦の内湾の夏季成層期における流動特性

宗 景 志 浩*・木 村 晴 保**

1. ま え が き

浦の内湾では、'81年の8月および'82年の夏季から秋季にかけて、水温、塩分、流向・流速の定期的な観測と水温の多層連続観測とを行なった。その結果、夏季の密度成層期には、潮汐に対応した明瞭な水温変化が観測された。この水温変化は湾内の下層部に形成された密度躍層の鉛直変動に起因するもので、これは、湾口部の水深急変部を潮汐波が侵入する際に励起する内部波によるものであることをすでに報告した^{1),2)}。

今回は、等水温線の鉛直変化から内部界面波の特性と規模を推定し、さらに、観測流速を一般流(恒流)、潮汐流および内部波流に分離し、それぞれの大きさと流動特性について検討を加えた。

2. 観 測 内 容

湾内に7点の観測点を設定した(図-7, 上段)。水温、塩分、流向・流速についての観測は、'81年8月19日および26日の場合 ST. 1, 2, 3 で、'82年8月18日の場合は ST. 4 を除く6点で行なった。また、それぞれの観測は1~2 潮汐の間、ほぼ1時間間隔で、各観測点に係船後、水面下1mより2m おきに行なった。さらに、'81年8月3日から20日の間、ST. 3の水面下5mに係留された自記流向・流速計(MTCM-5)による10分間隔の記録を得た。潮位については高知港における記録を利用した。

3. 観 測 結 果

3.1 等水温線の水平分布と鉛直変化

図-1は、'82年8月18日の1潮汐間における時間経過に伴う水温等値線の変化を示したもので、これらは各潮時ごとの水平分布図から、特定的水温等値線を1潮時にわたって、海底を基準に同一紙面上に描いたものである。図-1に示した26.2°Cの等水温線は水温躍層を形成するもので、水面下11m付近にみられる密度躍層とも一致する。

① この等水温線は潮位変化に対応して変化しており、湾口部(ST. 1~2)では、上げ潮時低下し、下げ潮時には上昇する。湾奥部(ST. 21)では湾口部と逆位相の鉛直変化を示しており、これらの2点での鉛直変位量はもっとも大きくなる。

② 湾中央部の ST. 3 では、潮位変化にかかわらず水温等値線の鉛直変位は見られない。

③ 等密度面の変化を反映するこれらの等水温線の鉛直変化の特徴は単節の定常界面波のもので、湾口部と奥湾部では腹、中央部では節を形成している。湾口部の腹の位置での等水温線の鉛直変位量は4mに達する。

④ 躍層の上下に位置する等水温線も上記と同様の特徴を示すが、変位量は躍層部のものに比較して小さい。

⑤ 等水温線の平均水位は、常に湾口側で深く、湾奥に向って浅く傾斜している。しかし、躍層が浅では、降雨の影響で、塩分は湾口で高く湾奥で低いことが予測されるから、等密度線の定常的な傾斜はこれより小さいものと考えられる。

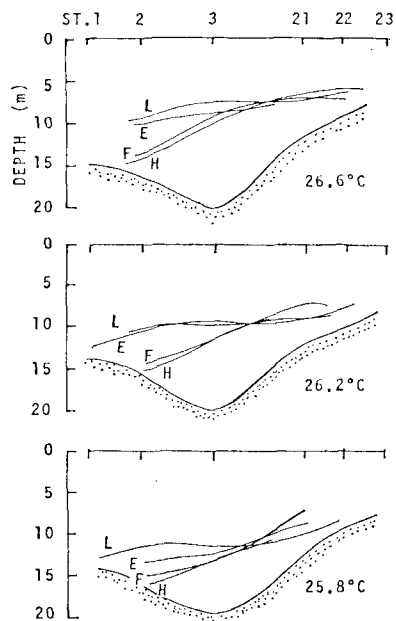


図-1 等水温線の水平分布('82年8月18日)

* 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

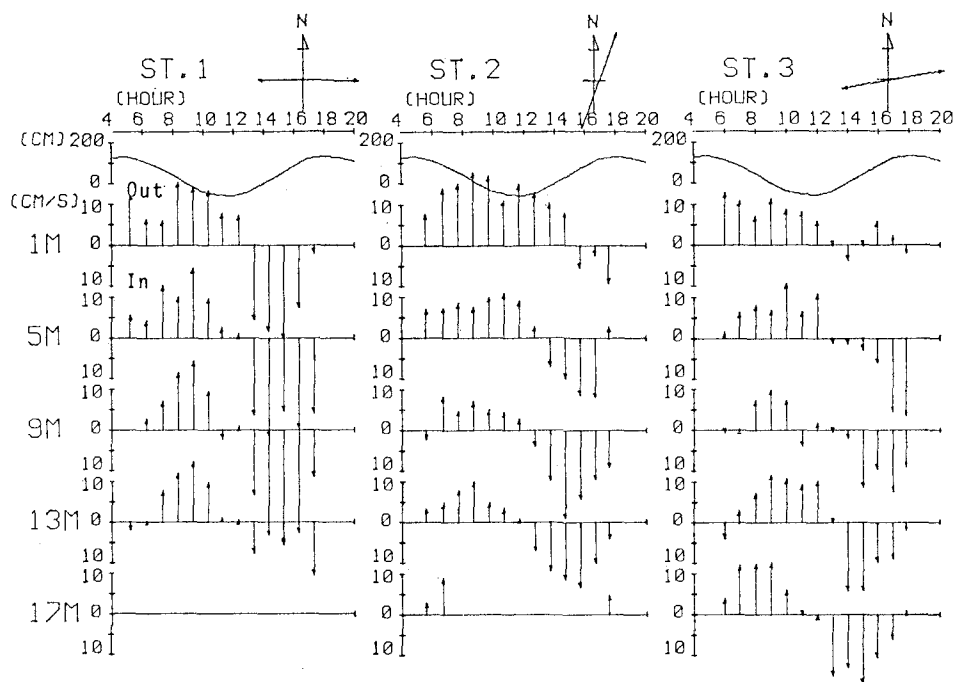


図-2 湾軸方向の流速の時間的変化 ('82年8月18日)

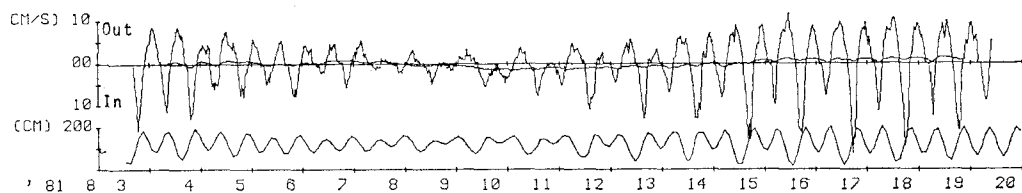


図-3 流速の連続記録と恒流成分 (ST. 3, 水深 5m)

3.2 湾軸方向の流速成分

図-2 は, '82年8月18日における各観測点の湾軸方向の流速成分の時系列変化を, 潮位変化と対応させて各水深ごとに示したものである. 流速の場合, 縦軸の正は流出, 負は流入成分を示す.

ST. 2, 3 では,

① 水面下7m以深では, 流速変化は潮位変化に対して1/2の位相のずれを持ち, 停潮時と転流時とが比較的良好に一致し, かつ正弦的な変化である.

② 表層部(3m以浅)では, 流出成分が卓越しており, 転流時の遅れが見られる.

一方, 湾口部 ST. 1 では,

③ 表層から下層まで流速はよく発達し, 上下層での流速の差は見られない. また, その変化は潮位変化に対応しており, ②で指摘した転流時の位相の遅れも小さい.

3.3 流速の連続観測

図-3 は, 湾中央部 ST. 3 における流速の連続記録の一例で, 湾軸方向の流速と2潮汐間の移動平均値を示す.

した. また, 同じ記録による進行ベクトルを図-4に示す.

① 湾軸に沿う流速は, 振幅, 位相とも潮汐との対応

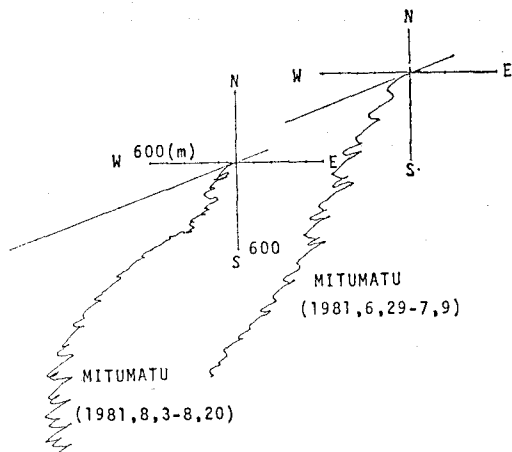


図-4 進行ベクトル (ST. 3, 水深 5m)

がみられるが、小潮時には、上げ潮時の流入成分に比較して、下げ潮時の流出成分が小さい。

② 2 潮汐間の移動平均による恒流成分は、一定方向に 5~6 日持続しており、小潮時に流入、大潮時に流出の傾向が見られる。恒流成分の値は 0.5~1.5 cm/sec である。

③ 進行ベクトルによると、ほぼ N-230° に進む流入成分が卓越するが、特に小潮時にその傾向が強く、大潮時には振動流となっている。この特徴は 6 月 29~7 月 9 日の場合にも見られた。

4. 考 察

4.1 恒流成分の分離

観測流速 u は一般に恒流成分 $\bar{u}$ と変動成分 u' の和からなる。恒流成分は平均のとり方によって異なる値を得る。ここでは、湾軸方向の時系列変化が正弦的となる様に時間軸を平行移動することによって得た。この方法による恒流は、各観測期間での単純平均とほぼ一致する。図-5 には、'82 年 8 月 18 日の場合の恒流の鉛直分布を各観測点ごとに示した。

① '81 年および '82 年とも、恒流成分は、表層部からの流出と中層部への流入とからなる。ST. 21 以奥の浅海部では、流向の逆転する水深が浅くなり、流速は微弱となるものの、湾口部と同様の傾向が見られる。このような表層からの流出、中層への流入は、強い密度成層を形成した湾口の浅い内湾において、しばしば見られるもので³⁾、降雨による淡水の流出と、それに伴う体積と物質の平衡に基づく流動である。

② 転流水深は、'82 年度 ST. 2~3 で水面下 5~7 m に形成されるが、ST. 1 では水面下 3 m での恒流成分が流入方向を示しており、ST. 2, 3 に比較して浅い。淡水は表層部のごく薄い層から流出し、高密度外海水が、ST. 2 付近から密度流を形成して潜入し、さらに高密度な底層水を押し込めながら中層部へ流入する。

③ 恒流成分の値は、'82 年 8 月 18 日は 4~5 cm/sec '81 年 8 月 26 日は 1~2 cm/sec である。ST. 3 では、'81 年 8 月 19 日水面下 5 m の恒流値は、同水深、同時期の連続流速計で得たものとほぼ一致し、約 2 cm/sec の流出となっている。

④ ST. 1~2 における転流水深は、'81 年度の 7~8 m に比較し、'82 年度は 1~5 m となっている。転流水深の大小は密度の鉛直構造の違いを反映するもので、その時期の降雨量に支配される。ちなみに 7 月 1 日~8 月 20 日の総降雨量は '81 年度 502 mm、'82 年度 832 mm であった。

4.2 変動流速の分離

湾軸方向の流速成分から前節で求めた恒流成分を差し引いたものが変動流速に相等するもので、これらの一例を図-6 に示した。

① '82 年 8 月 18 日の場合、ST. 1~3 のいずれの観測点でも、変動流速は全層にわたって正弦的な時間変化を示し、高・低潮時と停流時とはほぼ一致する。

② 最大流速は、ST. 1 から ST. 3 にかけて徐々に小さくなる。ST. 1 および ST. 2 では、上下層での差は見られないものの、ST. 3 では、5 m 以浅と 7 m 以深とを比較すると、下層部で明らかに大きく、12~16 cm/sec の流速で、これは上層部の値の 2 倍となっている。

4.3 変動流速の推算

内部波によって生じる流速が潮汐流に比較して無視し得ない値であり、かつ流動特性(時間的、空間的な流速分布)のいかんによっては変動流速の特性を左右することになる。ここでは、潮汐流と内部波流を別々に推算し、それらの合成流を求め、それぞれの流動特性について考察する。

1) 潮 汐 流

浦の内湾は複雑な地形を呈しているが、湾幅は表面から海底まで一様であるから、任意の断面は矩形状とみなし得る。表面潮汐波は

$$\eta = \eta_0(x) \cos(\sigma t - \epsilon) \dots\dots\dots (1)$$

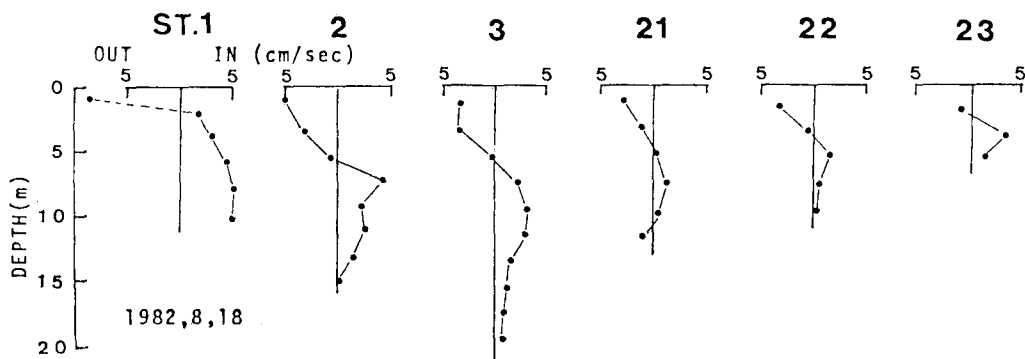


図-5 恒流の鉛直成分

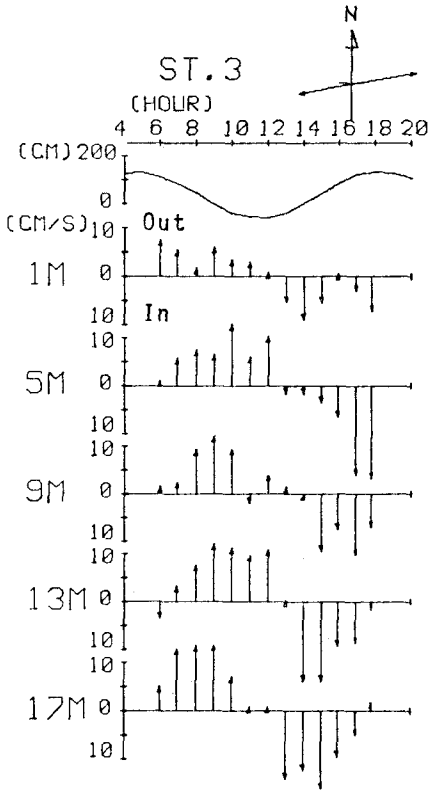


図-6 変動流速の時間的変化 ('82年8月18日)

で与える. ここでは, Defant の方法⁹⁾を用いて任意潮位に対する各断面での潮汐流を求める.

図-7 (上図) に示すように, 湾軸に沿って 500m 程度に区切り, それぞれの表面積 v_n と断面積 S_n とを求める. 湾奥では流速 $u=0$, 潮位差 1.7m を与え, 各断面での潮汐流 $u_{\text{Defant}}(T)$ を求め, ● で示した. 潮汐流の観測値は流速に対する内部波の影響の少ない密度躍層付近, すなわち水面下 11m の変動流速を用いた. これを $u_{11m}(T)$ とし, ○ で示した.

① 潮汐流の計算値 ● は湾口部 ST. 1 でもっとも大きく, 25 cm/sec 程度, 湾奥 ST. 21 では 3 cm/sec 程度で, 幅の狭い ST. 3 を除き徐々に流速は小さくなる.

② 観測値 ○ と比較すると, ST. 2 および ST. 21 での計算値はやや小さいものの, 潮汐流のオーダーとその水平分布の特性をかなりよく表現している.

2) 内部波による流動

浦の内湾に見られる内部波は潮位と同一位相で, ST. 1 および ST. 21 を腹とし, 湾中央部 ST. 3 付近に節を有する単節の定常界面波である. 簡単のために湾を等水深で一次元的な水路と仮定し, 内部静振の周期 T_f を求める.

上下層の厚さおよび密度差をそれぞれ $h_1, h_2, \Delta\rho$ とすると '82 年 8 月 18 日の場合, $h_1 \approx 11\text{m}$, $h_2 \approx 7\text{m}$, $\Delta\rho/\rho \approx 9.8 \times 10^{-4}$, ST. 1~ST. 21 間の距離 $l=4.5\text{km}$ で

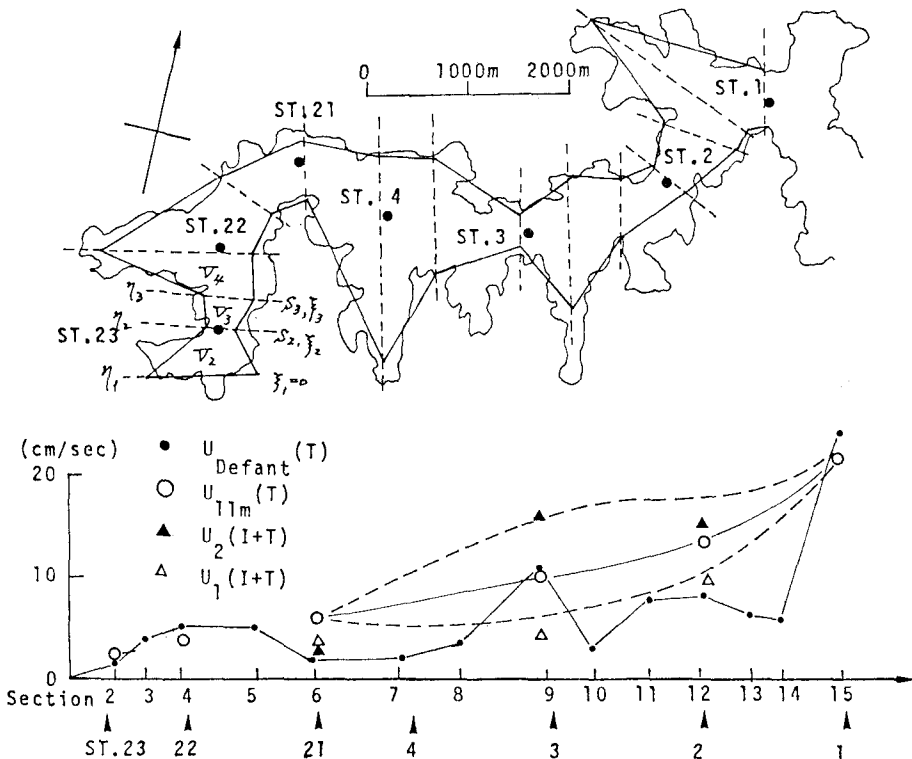


図-7 浦の内湾の地形と観測点および潮汐流, 変動流速の水平分布

ある。モード1の周期は $T_f = 12.33$ hr となり、これは潮汐周期にほぼ等しく、観測で予測された単節の定常界面波の生じ得ることを示している。

定常界面波の波形 ζ と流速 $u_2^1(I)$ は次式で与える。

$$\zeta = 2a \cos kx \sin \sigma t \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$u_1(I) = -2 \frac{\sigma a}{kh_1} \sin kx \sin \sigma t \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$u_2(I) = 2 \frac{\sigma a}{kh_2} \sin kx \sin \sigma t \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに $k = 2\pi/L$, $\sigma = 2\pi/T_f$, $L = 2l$ で、波長 L と周期 T_f は先の値を用い、界面波の振幅 $2a = 2$ m として計算する。

① 最大流速は、界面波の節の位置 ST. 3 で生じ、上層で 4 cm/sec, 下層で 6 cm/sec 程度、腹の位置 ST. 1 および ST. 21 では 0 となる。

② 最大流速は上げ潮および下げ潮時に生じ、干潮および満潮時には 0 となる。

③ 界面波によって生じる流速は、潮汐流に対し界面下では同位相、界面上では逆位相となる。

3) 潮汐流と界面波流の合成

潮汐流と界面波流の合成による変動流速 $u_2^2(I+T)$ を (5) 式で求め、図-7 の下図中の破線で示した。

$$u_2^2(I+T) = u_2^1(I) + u_{11m}(T) \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、4.2 節で示した変動流速のうち密度界面より上層および下層の代表値を、それぞれ Δ と $\blacktriangle$ とで示した。これらは (5) 式で示した $u_2^2(I+T)$ の観測値にあたるものである。

① 変動流速の推算値と観測値はほぼ一致する。

② 下層部の変動流速 $u_2(I+T)$ は潮汐流の観測値 $u_{11m}(T)$ に比較し大きく、上層部のそれ $u_1(I+T)$ は小さい。この傾向は ST. 2~21 の間で見られ、かつ ST. 3 でもっとも明瞭である。

③ ST. 3 での $u_2(I+T)$ は 16 cm/sec, $u_1(I+T)$ は 6 cm/sec 程度である。

4.2 節の結果②で述べた、流速の変動成分が下層で大きく上層で小さくなる現象は、内部波によって生じる流速が、潮汐流に対し下層で同位相、上層で逆位相であることによる。また、内部波流が潮汐流の値に比較して

無視できない大きさであると言える。

5. む す び

'81 年および '82 年の観測から、浦の内湾には内部波の存在することをすでに報告した。今回は、内部波の規模と内部波流の実測値に占める割合、流動特性について検討した。

(1) 浦の内湾の夏季に見られる内部波は水面下 11 m 付近の密度躍層に発達するもので、ST. 1 および 21 を腹、ST. 3 を節とする潮汐周期の単節の定常界面波とみなされる。

(2) 湾軸方向の流速成分を恒流と変動成分とに分離し、さらに変動成分を潮汐流と界面波流とに分離した。

(3) 恒流は中層への流入、表層からの流出からなり、恒流値はその時期の降雨量に影響される。

(4) 潮汐流は Defant の方法により推算し、流速に対する界面波の影響の少ない密度躍層付近の変動流速と比較した。

(5) 単節の定常界面波(波高 4 m)により、最大流速は ST. 3 で生じ、上層で 4 cm/sec, 下層で 6 cm/sec 程度となる。この値は潮汐流に比較し無視できない。

(6) 界面波による流速は潮汐流に対し、界面下では同一位相、界面上では逆位相となる。その結果、

(7) 界面波と潮汐流との和である変動流速は、潮汐流に比較し下層で大きく、上層で小さくなる。ST. 3 でこの影響がもっとも大きく、下層の最大値は 16 cm/sec, 上層のそれは 6 cm/sec 程度であった。

参 考 文 献

- 1) 宗景志浩・木村晴保・宮本一之: 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, 第 29 回海工論文集, pp. 560~564, 1982.
- 2) 宗景志浩・木村晴保: 夏季および秋季における浦の内湾の水理環境と海水流動機構について, 第 30 回海工論文集, pp. 526~530, 1983.
- 3) Pickard, G. L. and W. J. Emery: Descriptive Physical Oceanography, Pergamon Press, 4th ed., 249 p., 1982.
- 4) Defant, A.: Physical Oceanography II, Pergamon Press, 729 p., 1961.