

湾内で潮汐により励起される二層界面長波の特性

木村 晴保*・宗景 志浩**

1. ま え が き

過去3年間にわたる高知県浦の内湾での観測結果^{1)~3)}によると、夏季においては水温、塩分に起因した密度躍層が形成されて、①湾口側および湾奥側とも、各層連続観測による水温の経時変化は潮汐変動と良い対応を成すこと、②流速は深さ方向で一様でなく、時には上下層で流向が逆となる場合もあり得ること、③停潮時においても流れが存在すること、などが明らかとなった。これらが潮汐によって励起された内部波（界面長波）の現象として説明し得ることを示す。

一般に、潮汐によって励起される内部波は、湾の形状、密度成層の発達程度により、その特性を異にする。ここでは、浦の内湾を対象とし、湾形は湾口で浅く湾内部で深い形状とし、密度躍層は湾口部の水深よりも深い位置に形成される場合（図-1 Model I）と浅い位置に形成される場合（図-1 Model II）を考える。これら2ケースについて、潮汐により励起される界面長波を論文I⁴⁾の理論に基づき算出し、界面長波の発達の難易、潮位と界面変位の位相の関係、湾内の流動特性を明らかにし、夏季における浦の内湾の水理現象を説明する。本論文の記号は断りのない限り論文Iと同じとする。

2. 理論解析

(1) モデル I

湾の形状と密度躍層の関係を図-1に示す。すなわち、湾は湾口部の水域〔1〕と湾内部の水域〔2〕から成り、これらの水深はそれぞれ d_1 、 d_2 、幅は二水域で等しく一定、水域〔2〕の長さは l である。密度躍層は水面下 D の深さに形成されていて、 $d_2 > D \geq d_1$ である。表面長波（潮汐波） f_1 が水域〔1〕から〔2〕に入射す

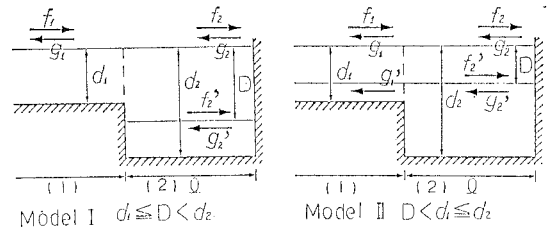


図-1 数値モデル I と II の模式図

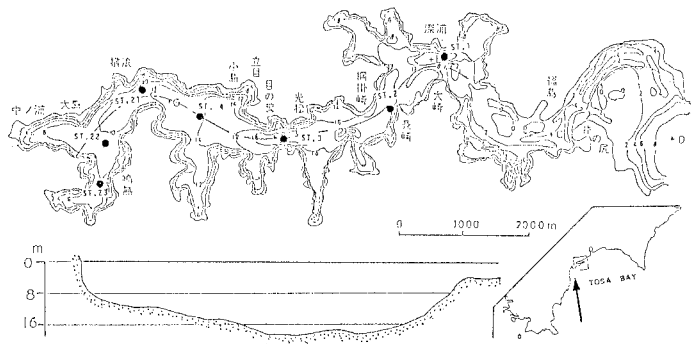


図-2 浦の内湾の位置及びその深浅図と縦断面図

ると、水域〔1〕においては反射波である表面長波 g_1 が、水域〔2〕においては表面長波の進行波 f_2 と逆行波 g_2 、界面長波の進行波 f'_2 と逆行波 g'_2 が形成される。 x 軸を水深が d_1 から d_2 に変る地点を基点とし右方を正にとると、 $x=0$ と l での水域条件はそれぞれ論文Iの図-2に示すCASE(3)と(4)に相当し、算定基本式として、表面長波については論文Iの式(7)の第1、第2式および式(12)の第1式より次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{2} \left\{ \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) F_2 + \left(1 - \frac{c_2}{c_1} \right) G_2 \right\} \\ G_1 &= \frac{1}{2} \left\{ \left(1 - \frac{c_2}{c_1} \right) F_2 + \left(1 + \frac{c_2}{c_1} \right) G_2 \right\} \\ F_2 &= G_2 e^{i \cdot 2k_2 l} \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

界面長波については、論文Iの式(10)と式(12)の第2式より次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} G'_2 &= F'_2 + (d_2 - D) \frac{U_2(0)}{c'_2} \\ F'_2 &= G'_2 e^{i \cdot 2k'_2 l} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

* 正会員 農博 高知大学教授 栽培漁業学科

** 正会員 農修 高知大学講師 栽培漁業学科

a) 表面長波

式(1)より G_1 , F_2 , G_2 と F_1 の関係式として次式を得る.

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \frac{c_1 \cos k_2 l - i c_2 \sin k_2 l}{c_1 \cos k_2 l + i c_2 \sin k_2 l} F_1 \\ F_2 &= \frac{c_1 e^{i k_2 l}}{c_1 \cos k_2 l + i c_2 \sin k_2 l} F_1 \\ G_2 &= \frac{c_1 e^{-i k_2 l}}{c_1 \cos k_2 l + i c_2 \sin k_2 l} F_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

水域〔2〕の水面変位は, 半振幅を $H_2(x)$ で表わすと $H_2(x) = F_2 e^{-i k_2 x} + G_2 e^{i k_2 x}$ であるから, 式(3)を代入し次式を得る.

$$H_2(x) = \frac{\cos k_2(l-x)}{\cos k_2 l} H_2(0) \dots\dots\dots (4)$$

ここに, $H_2(0)$ は湾口での水面変位の半振幅で, $H_2(0) = 2c_1 \cos k_2 l / (c_1 \cos k_2 l + i c_2 \sin k_2 l) \cdot F_1$ である.

表面長波による水域〔2〕の断面流速 $U_2(x)$ は, $U_2(x) = \{F_2 e^{-i k_2 x} - G_2 e^{i k_2 x}\} c_2 / d_2$ であることから次式を得る.

$$U_2(x) = i \tan k_2(l-x) c_2 H_2(x) / d_2 \dots\dots\dots (5)$$

b) 界面長波

式(2)より次式を得る.

$$\left. \begin{aligned} F_2' &= i \frac{1}{2} (d_2 - D) \frac{e^{i k_2' l}}{\sin k_2' l} \frac{U_2(0)}{c_2'} \\ G_2' &= i \frac{1}{2} (d_2 - D) \frac{e^{-i k_2' l}}{\sin k_2' l} \frac{U_2(0)}{c_2'} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

界面長波による界面変位 $H_2'(x)$ は式(7)で, 下層の断面流速 $U_2'(x)$ は式(8)で与えられる.

$$\begin{aligned} H_2'(x) &= i(d_2 - D) \frac{\cos k_2'(l-x)}{\sin k_2' l} \frac{U_2(0)}{c_2'} \\ &= -\left(1 - \frac{D}{d_2}\right) \frac{\cos k_2'(l-x)}{\sin k_2' l} \frac{c_2}{c_2'} \\ &\quad \times \tan k_2 l \cdot H_2(0) \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$U_2'(x) = -\frac{\sin k_2'(l-x)}{\sin k_2' l} U_2(0) \dots\dots\dots (8)$$

c) 界面の変位

界面の変位 ζ' は界面長波による変位 η' と表面長波による変位 $(1-D/d)\eta$ の和で与えられ, 水域〔2〕の界面の変位を $\zeta'_2 = z'_2(x) e^{i\omega t}$ で表わすと, $z'_2(x)$ は次式となる.

$$z'_2(x) = H_2'(x) + \left(1 - \frac{D}{d_2}\right) H_2(x) \dots\dots\dots (9)$$

さらに, 式(4)と式(7)を代入し次式を得る.

$$\frac{z'_2(x)}{H_2(0)} = -\left(1 - \frac{D}{d_2}\right) \frac{\tan k_2 l}{k_2 l} \left\{ \frac{k_2' l \cos k_2'(l-x)}{\sin k_2' l} - \frac{k_2 l \cos k_2(l-x)}{\sin k_2 l} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

$$k_2' l = \frac{2\pi l}{T \sqrt{g d_2}} \sqrt{\epsilon \frac{D}{d_2} \left(1 - \frac{D}{d_2}\right)} \dots\dots\dots (11)$$

ここに, T は表面長波の周期, $\epsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$ である.

図-2 は浦の内湾の地形図である. いま, これに基づ

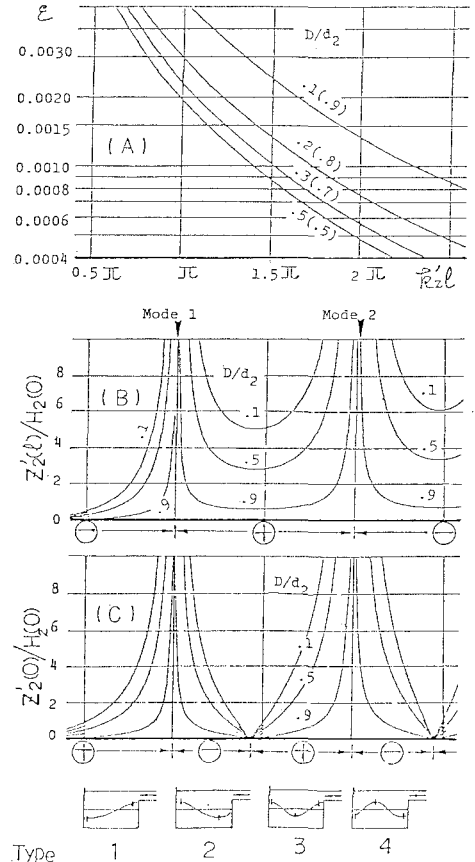


図-3 モデル I ($l=6000$ m, $d_2=15$ m) において潮汐により励起される界面長波の特性, (A) は式(11)を $\epsilon \sim k'l$ 面に図化したものであり, (B) と (C) はそれぞれ $k'l$ の変化に伴う湾奥と湾口での界面の変位 $z'_2(l)$, $z'_2(0)$ を湾口での海面の変位 $H_2(0)$ に対して示したものである. $\oplus$ は海面変位と同位相を示し, $\ominus$ は逆位相を示す. 最下段の模式図 Type 1~4 は漲潮時における界面の変動形態を示す.

き $l=6000$ m, $d_2=15$ m, T は表面長波を潮汐とし, 12 時間 25 分で与え, 式(10)と(11)を図化したのが図-3 である. 図中の Mode 1, 2 は水域〔2〕における界面長波の固有モードで, $k_2' l$ がそれぞれ π , 2π に相当する. 記号の $\oplus$, $\ominus$ は水面の変位と界面の変位の位相を示し, $\oplus$ は同位相 (位相差 0°) を, $\ominus$ は逆位相 (位相差 180°) を意味する.

以上の結果からモデル I の水理特性として次のことが言える.

① 水域〔1〕と〔2〕において, 表面長波の進行波と逆行波は波高が等しく (式(3)), 水域〔2〕の水面波形は $x=l$ を腹とした完全重複波の様相を呈する (式(4)).

② 潮汐波では $k_2 l$ は一般に微小であり, $\tan k_2 l$ は正である. よって潮汐流は水面変位に対して 90° 位相が進む (式(5)).

③ 界面長波についても進行波と逆行波の波高が等しく(式(6)), 界面波形は $x=l$ を腹とした完全重複波となる(式(7)).

④ 界面長波の断面流速は上下層で逆位相であるから, $\sin k_2'(l-x)/\sin k_2'l$ が正のとき, 界面長波による下層の流速(上層の流速)は潮流流に対して逆位相(同位相), 負のとき, 同位相(逆位相)となる(式(8)).

⑤ 界面長波の波長が水域長 l に比べて大きくなって, $k_2'l$ が 0.5 以下となる場合とか, 密度躍層が海底近くに形成され, D/d_2 が 0.9 以上となる場合を除けば, 界面変位は潮汐変位と同等ないしはそれ以上となる. とくに $k_2'l$ が $n\pi$ (n は正整数) に近づくとき界面の変位は湾口, 湾奥とも非常に大きくなる(図-3 では, $k_2'l = n\pi$ で無限大となっている. これは, 理論が流体を粘性, 波を微小振幅波として導かれているためである).

⑥ 界面変位は潮汐変位に対して同位相ないしは逆位相で, これらの関係は $k_2'l$ のみによって決まる(図-3). 例えば, $k_2'l$ が π よりも小さいときには, 湾口での界面の変位は潮位と同位相 $\oplus$ となり, 湾奥では逆位相 $\ominus$ となる. 換言すれば, 張潮時には湾口での界面は上昇し, 湾奥では下降する. 図-3 の最下段の模式図は, 張潮時における界面の変動形態を示したものである.

⑦ 界面の変動形態は湾内の流動様式と密接に関係する(図-3). 例えば, Type 1 では張潮時には, 界面の変動によって上層水は湾奥に向い, 下層水は湾口に向う. その結果, 上層の流速は潮流流に界面長波による流速が加算され, 下層では減算される. Type 2 では Type 1 とは逆に, 上層では減算, 下層では加算される.

⑧ その結果, 界面長波が発達し, 界面長波による流速が潮流流よりも大きくなると, 上下層で流向が逆となる場合もありえることになる.

(2) モデル II

モデル I において密度躍層の形成位置が浅くなり, 上層厚が湾口部の水深よりも小さくなった場合で(図-1 モデル II), このときには, 潮汐波によってモデル I の各波に加え, さらに水域 [1] において界面長波の逆行波 g_1' が形成される. $x=0$ と l での水域条件は, 表面長波についてはモデル I に等しく, 界面長波については論文 I の図-2 に示す CASE (1) と CASE (4) に対応する. よって, 算定基本式は, 表面長波については式(1)で, 界面長波については論文 I の式(7)の第3, 第4式と式(12)の第2式より, 次式で与えられる.注)

$$\left. \begin{aligned} F_2' &= \frac{1}{2} \left\{ \left(1 - \frac{c_1'}{c_2'} \right) G_1' + D \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right) \right\} \\ &\quad \times \left(\frac{U_2(0)}{c_2'} + \frac{H_2(0)}{d_2} \right) \\ G_2' &= \frac{1}{2} \left\{ \left(1 + \frac{c_1'}{c_2'} \right) G_1' - D \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right) \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$$\left. \begin{aligned} &\times \left(\frac{U_2(0)}{c_2'} - \frac{H_2(0)}{d_2} \right) \right\} \\ F_3' &= G_2' e^{i \cdot 2k_2' l} \end{aligned} \right\}$$

a) 界面長波

式(5), (12) より次式を得る.

$$\left. \begin{aligned} F_2' &= \frac{1}{2} \frac{c_2 e^{ik_2' l}}{c_1' \cos k_2' l + i c_2' \sin k_2' l} \frac{D}{d_2} \\ &\quad \times \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right) \left(\frac{c_1'}{c_2} + i \tan k_2 l \right) H_2(0) \\ G_2' &= \frac{1}{2} \frac{c_2 e^{-ik_2' l}}{c_1' \cos k_2' l + i c_2' \sin k_2' l} \frac{D}{d_2} \\ &\quad \times \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right) \left(\frac{c_1'}{c_2} + i \tan k_2 l \right) H_2(0) \\ G_1' &= \frac{D}{d_2} \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right) \left\{ \frac{c_2 \cos k_2 l}{c_1' \cos k_2' l + i c_2' \sin k_2' l} \right. \\ &\quad \times \left. \left(\frac{c_1'}{c_2} + i \tan k_2 l \right) - 1 \right\} H_2(0) \\ F_1' &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

水域 [2] における界面長波による界面の変位 $H_2'(x)$ と下層の流速 $U_2'(x)$ は式(13)よりそれぞれ次式で与えられる.

$$\begin{aligned} H_2'(x) &= \frac{c_2 \cos k_2'(l-x)}{c_1' \cos k_2' l + i c_2' \sin k_2' l} \frac{D}{d_2} \\ &\quad \times \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right) \left(\frac{c_1'}{c_2} + i \tan k_2 l \right) H_2(0) \end{aligned} \dots\dots\dots (14)$$

$$\begin{aligned} U_2'(x) &= i \frac{c_2 \sin k_2'(l-x)}{c_1' \cos k_2' l + i c_2' \sin k_2' l} \frac{D}{d_2} \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right) \\ &\quad \times \left(\frac{c_1'}{c_2} + i \tan k_2 l \right) \frac{c_2'}{d_2 - D} H_2(0) \end{aligned} \dots\dots\dots (15)$$

b) 界面の変位

水域 [2] における界面の表面長波と界面長波による変位は, 式(9)に式(4)と式(14)を代入し, 次式で与えられる.

$$\begin{aligned} z_2'(x) &= \left\{ \frac{c_2 \cos k_2'(l-x)}{c_1' \cos k_2' l + i c_2' \sin k_2' l} \frac{D}{d_2} \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right) \right. \\ &\quad \times \left. \left(\frac{c_1'}{c_2} + i \tan k_2 l \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \frac{D}{d_2} \right) \frac{\cos k_2(l-x)}{\cos k_2 l} \right\} H_2(0) \end{aligned} \dots\dots\dots (16)$$

図-4 は, 図-2 を考慮し, 式(16)において $d_2=4$ m, $d_2=15$ m, $D=3$ m, $l=6000$ m, $T=12.42$ h を与え図化したものである.

モデル II の水理特性はモデル I とは次の点で本質的に異なる.

① モデル I では界面の変位は潮位と同位相 ($\theta=0^\circ$) ないしは逆位相 (180°) のいずれかであったのに対し,

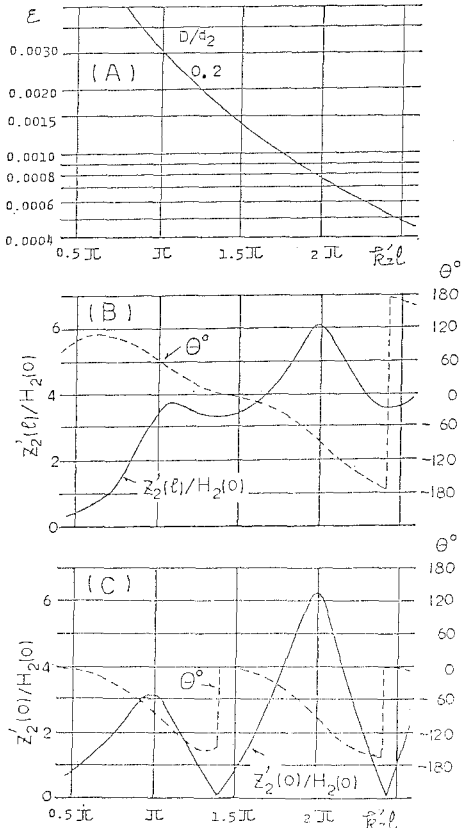


図-4 モデル II ($d_1=4\text{ m}$, $d_2=15\text{ m}$, $D=3\text{ m}$, $l=6000\text{ m}$) において潮汐により励起される界面長波の特性. (A) は式 (11) を, (B), (C) は式 (16) を図化したものである. θ° は湾口での海面変位に対する界面変位の位相角を示す.

モデル II では同位相と逆位相の他に, さらにこれらの中間の位相も存在することである (図-4). このことは, 満潮ないしは干潮の停潮時に潮汐流が零となるとき, モデル I では内部潮汐流 (界面長波による流速) も零となり, 湾内水は静止し正しく停潮となるのに対し, モデル II では内部潮汐流は必ずしも零とはならない. 換言すれ

ば, モデル II では停潮時にも流れが存在することもあり得る.

② 湾口では, 界面の変位は潮位に対して必ず位相が遅れる (図-4).

3. 浦の内湾の水理特性

(1) 各層水温の経時変化

図-5 は 1982 年 8 月に実施したサーミスタチェンによる水温の各層連続観測の結果と潮位を示したもので, 湾口側 St. 2 においては底上 2 m 層より 2 m 間隔で 6 層の水温を, 湾奥側 St. 21 においては底上 0.5 m 層より 1.5 m 間隔で同じく 6 層の水温をそれぞれ 10 分間隔で計測した.

両測点とも, 台風前に見られる潮位に対応した 1°C 以上に及ぶ水温変動は, 水温成層の発達した水塊の鉛直移動によるものと考えられる. すなわち, 各層水温の上昇ないしは低下は, より水温の高い上層水ないしは低い下層水が降下ないしは上昇したことによるもので, 図-5 から次のことが示唆される.

① 湾口側水塊は, 台風前においては, 張潮時下方に, 落潮時上方に移動し, 湾奥側水塊は張潮時上方に, 落潮時下方に移動している.

(2) 流速の鉛直分布

図-6 は各潮時において実測した水温, 塩分から求めた密度 (σ_t) の湾内縦断分布と流速の湾軸成分の鉛直分布を示したもので, これより

② 流速は深さ方向で一様でないことおよび上層と下層で流向が逆の場合もあり得ること,

③ 満潮時ないし干潮時においても他の潮時と同程度の流速が存在すること, などは一目瞭然である.

以上, 夏季における浦の内湾の水理特性として 3 つを挙げた. これらの特性は程度の差はあるけれども, 過去 3 年間に実施したいずれの年度においてもみられた.

4. 結 論

内湾の水理現象は, 吹送流, 地形性渦流などにも強く影響されるため, 流速分布の細部に至るまで, 内部波による現象として説明できる訳ではないけれども, モデル II の内部波は浦の内湾において夏季成層期にみられた前記 ①~③ の水理特性を同時に矛盾なく説明できる. また, 図-5 で見られるように, 成層が破壊された台風後においては, 台風前の潮位に対応した水温変動は見られない. さらに, 浦の内湾の夏季においては, 図-1

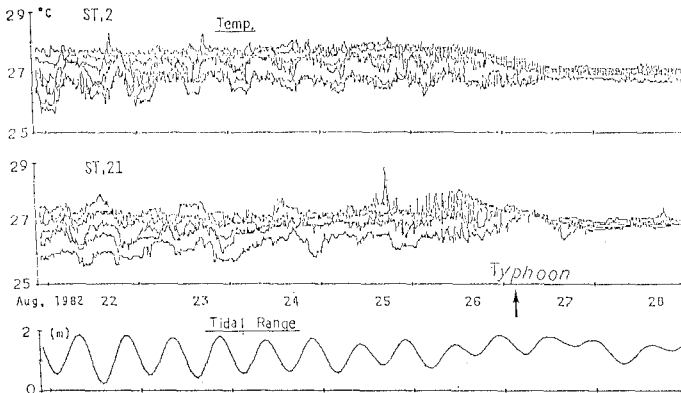


図-5 図-2 に示す St. 2 と St. 21 における 6 層の水温と潮位の経時変動

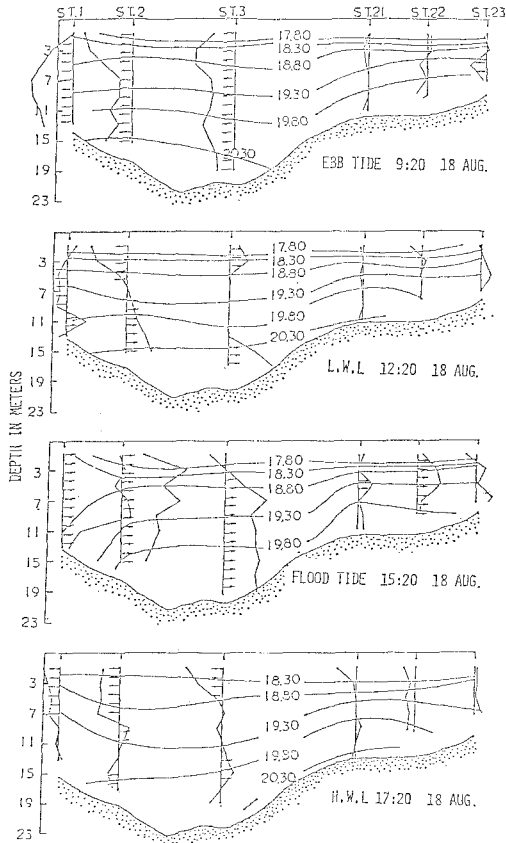


図-6 各潮時における浦の内湾の密度(σ_t)の縦断分布と流速の鉛直分布 (1982)

6 からも分るように、湾口部水深よりも浅い水面下 3 m 付近に密度躍層が発達する。これらのことから考えて、夏季の浦の内湾においてはモデルⅡの潮汐による内部波が形成されていると言える。

注) 論文Ⅰの式(5)の第3式は、界面長波のみによる界面の変位 η_n の接続条件である。界面は表面長波による水面の変位 η_n によっても変位 $(d_n - D)\eta_n/d_n$ を受ける。この量が η_n に比べて無視できない場合、言い換えれば界面長波があまり発達しない場合には、式(5)の第3式は次式で表わすべきである。

$$\eta_n + (d_n - D)\eta_n/d_n = \eta_{n+1} + (d_{n+1} - D)\eta_{n+1}/d_{n+1}$$

このときには、論文Ⅰの式(7)の第3、第4式の右辺第3項は U_{n+1}/c_n' にさらに $H_n(x)/d_{n+1}$ が加わる。本論の式(12)はこのようにして導かれている。

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回海岸工学講演会論文集, 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回海岸工学講演会論文集, pp. 526~530, 1983.
- 3) 宗景志浩・木村晴保: 浦の内湾の夏季成層期における流動特性, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 660~664, 1984.
- 4) 木村晴保・渡辺 貢: 潮汐波により励起される2次元二層界面長波の数値計算法について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 133~137, 1983.