

## 男女群島付近の内部潮汐†

佐藤 敏\*・下平保直\*

### INTERNAL TIDE NEAR DANZYO GUNTO IN EASTERN CHINA SEA†

Satosi Sato\* and Yasunao Simohira\*

#### Abstract

Internal tide was observed near Danzyo Gunto in Eastern China Sea. The amplitude of temperature fluctuation of M2 tidal frequency was 1°C at 90m depth where thermocline was situated. According to the vertical profile of temperature, it coincided with the vertical motion whose amplitude was 10m.

If temperature fluctuation was caused by the first mode internal wave, the amplitude of horizontal current was 27cm/sec at the surface layer. In its velocity field, we track the motions of fluid particles numerically. As a result, particles at the surface layer move more than 2km over 1 cycle in the direction which the wave propagates. On the other hand, particles in the middle layer move in the opposite direction.

#### 1. はじめに

周期的な現象である潮流によって物質が輸送されることに関して、内湾域においては数多くの研究がなされ、内湾環境に対して潮流による物質輸送が大きく関与することが明らかにされている。しかしながら、外洋域や外洋性沿岸域において潮流による物質輸送というものは、全く考慮されていない。これは、外洋域では、いわゆる海流によってある方向に向かって物質が輸送されるのに加えて、潮流の大きさがそもそもあまり大きくなく、内湾域のように空間的に小さなスケールで変動することもないからである。

しかしながら、近年、外洋性沿岸域で測流が数多く実施され、いろんな海域で内部潮汐が観測されてきている。この内部潮汐は、表面モードの潮汐波に比べて遙かにその空間スケールは小さいので、物質輸送に関して大きな役割を果たす可能性がある。次節では、内部モード波による物質輸送の可能性を明らかにし、第3節では、1987年6月に、九州西方男女群島付近で観測された内部潮汐波によって、どの程度、物質が輸送されるかを見積る。

#### 2. 内部波による物質輸送

純粋に正弦波的な波動というものは、媒質の運動が完全に周期的になるのではなく、波の伝播方向に物質が輸送される。例えば、音波のような圧縮性の波の場合、密度と運動が同位相となり、伝播方向に物質が移動することになる。

また、流速場が、

$$u = u_0 \sin(kx + \sigma t) \quad (1)$$

† Received 1st December 1987

\* 沿岸調査課 Coastal Surveys and Cartography Division

$u_0$  : 振幅,  $k$  : 波数,  $\sigma$  : 角振動数

で記述されるような流速場において, 流体粒子の運動に沿って積分すると,  $c \gg u_0$  時, 平均速度  $(u_0/2c)u_0$  ( $c = \sigma/k$  : 位相速度) で,  $X$  の負の方向, すなわち波の進行方向に流体粒子は移動する。

以下では, 線形の浅水波方程式で与えられる速度場において, 物質輸送がどのように扱われるかを考える。

### 2-1 一層モデル

水深一定の一次元水路での, 密度一様, 静水圧近似の線形方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} = -h \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

を用いて物質輸送を考える。但し,  $U$  : 流速,  $\eta$  : 表面水位,  $g$  : 重力加速度,  $h$  : 水深である。  $X$  の正の方向に進行する正弦波解を仮定すると,

$$\eta = \sqrt{\frac{h}{g}} u, \quad c = \frac{\sigma}{k} = \sqrt{gh} \quad (3)$$

のように, 流速と水位は同位相となる。

この解について, 1 周期間の断面通過流量を計算すると,

$$\int_0^T u(h + \eta) dt = \sqrt{\frac{h}{g}} \int_0^T u^2 dt = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h}{g}} u_0^2 T \quad (4)$$

但し,  $T$  : 周期である。これから, 流体粒子の平均移動速度  $V_a$  を求めると,

$$V_a = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h}{g}} u_0^2 T / (h \cdot T) = \frac{u_0^2}{2\sqrt{gh}} = \frac{u_0}{2c} u_0 \quad (5)$$

となる。

### 2-2 二層モデル

第1図のように, 上層, 下層に密度差  $\Delta\rho$  がある二層モデルの場合, 線形の浅水波方程式は,

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad \frac{\partial(\eta - \xi)}{\partial t} = -h_1 \frac{\partial u_1}{\partial x}$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -g \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho}\right) \frac{\partial \xi}{\partial t}, \quad \frac{\partial \xi}{\partial t} = -h_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \quad (6)$$

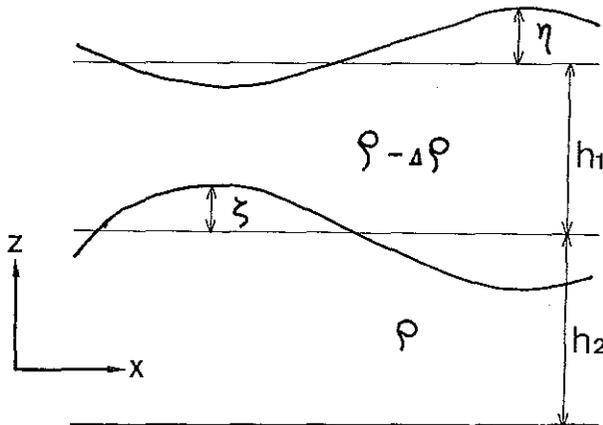


Figure 1. Schematic view of two-layer model

となる。 $\rho$ : 密度,  $\xi$ : 境界面の変位,  $h_1, h_2$ : 上層, 下層の厚さ,  $u_1, u_2$ : 上層, 下層の流速である。一層モデルと同様に波動解を仮定して, 分散方程式を求めると以下ようになる。

$$\sigma^4 - k^2 g (h_1 + h_2) \sigma^2 + \frac{\Delta \rho}{\rho} k^4 g^2 h_1 h_2 = 0$$

$$\sigma^2 = \frac{k^2 g}{2} (h_1 + h_2) \left\{ 1 \pm \left( 1 - \frac{4 h_1 h_2}{(h_1 + h_2)^2} \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (7)$$

(7)式で, 正の符号の場合は表面モードの波となり, 一層モデルと本質的には変わらない。負の符号の解が内部モードの解となる。この時, 上層の流れと下層の流れは逆位相となる。

$$\eta = \frac{c}{g} u_1, \quad \xi = \left( \frac{c}{g} - \frac{h_1}{c} \right) u_1 = \frac{h_2}{c} u_2, \quad c = \frac{\sigma}{k} \quad (8)$$

の關係を用いて, 断面通過流量を求めると, 両層の値は以下の通りである。

$$\int_0^T (\eta + h_1 - \xi) u_1 dt = \frac{u_{10}^2}{2c} h_1 T, \quad \int_0^T (h_2 + \xi) u_2 dt = \frac{u_{20}^2}{2c} h_2 T$$

$u_{10}, u_{20}$ : 上層, 下層の流速の振幅である。平均移動速度は, それぞれ,  $u_{10}^2/2c, u_{20}^2/2c$  となり, 共に, 波の伝播方向に進むことになる。

一層モデルの波でも, 二層モデルの波でも, 平均移動速度は  $u_0^2/2c$  の形で表わされるが, その大きさは位相速度が全く異なるため, かなり違う。例えば, 水深150mの水路を考えた場合, 一層モデルの位相速度は, 38.3 m/s, 上下両層の厚さが75mで,  $\Delta\rho/\rho=0.002$ の二層モデルの内部波の位相速度は0.86m/sとなる。この時, 流速の振幅を20cm/sとすれば, 平均移動速度はそれぞれ, 0.05cm/s, 2.3cm/sとなる。これらのモデルでは, 表面と境界面の発散によって波の伝播方向に物質が輸送されることになるが, 内部波の境界面の運動は表面の運動に比べて遙かに大きいため, 内部波による物質輸送が大きくなる。

### 2-3 連続成層モデル

上述のモデルは, 成層の境界面がはっきりしたモデルであった。その発散によって, 物質が一定方向に輸送された。ここでは, 鉛直断面全体では流量がゼロになる連続成層モデルを用いて物質輸送を考える。次節での議論の關係から, 地球自転を考慮し, プシネ近似の線形方程式を用いるが, 地球自転の効果は物質輸送には關係が無いので, 物質輸送を考える限り本質的に変わらない。

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\rho'}{\rho_0} g$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + w \frac{\partial \rho_0}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\rho = \rho_0(z) + \rho'(x, y, z, t) \quad (9)$$

$p$ : 圧力,  $w$ : 鉛直流速,  $f$ : コリオリの係数である。これらの方程式から  $w$  に関する方程式を求めると以下ようになる (梶浦 1976)。

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} + f^2 \right) \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho_0 \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho_0 \left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} + N^2 \right) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) w = 0, \quad N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} \quad (10)$$

$N$ : プラント=バイサラ振動数である。これから、鉛直モード解を

$$W = W(z)S(x, y)e^{i\sigma t} \quad (11)$$

と仮定して、海面および海底の境界条件として鉛直流速が無いという条件

$$W = 0, \quad z = 0, \quad -h \quad (12)$$

を用いて、 $N$ が一定として解くと、

$$W = W_0 e^{\frac{Nz}{2g}} \sin \left\{ \frac{n\pi}{h} (h + z) \right\} \quad n = 1, 2, \dots \quad (13)$$

となり、水平波数  $\ell$  は、

$$\ell^2 = \frac{\left\{ \left( \frac{\pi}{h} \right)^2 + \left( \frac{N^2}{2g} \right) \right\} (\sigma^2 - f^2)}{N^2 - \sigma^2} \quad (14)$$

になる。鉛直流速は第1モード ( $n=1$ ) の場合、中層で最大になるが、水平流速は海面で最大となる。この内部波解は、海面が変動しないため鉛直断面全体としての出入りは無いが、速度場がシアを持つために物質は輸送される。これを示したのが第2図である。第2図は、水深150m,  $N^2=2.0 \times 10^{-4}$  の第1モードで海面の水平流速振幅が20cm/s の速度場で流体粒子を波の進行方向に沿った鉛直断面において数値的に追跡したものである。また、コリオリの係数  $f=8.0 \times 10^{-5}$  1/s とし、周期はM<sub>2</sub>潮の周期44712秒を用いた。その時、位相速度は82cm/s となる。第2図で内部波はXの正の方向に進行する。水平流速がゼロになる時に流体粒子を  $X=0$  の位置 (太い縦の直線) に配置し1周期間追跡したものである。細線がそれぞれの流体粒子の軌跡を示し、歪曲した太線が1周期後の位置を結んだ線である。このモデルでは、鉛直流速がほとんど無い深度では平均移動速度  $u_0^2/2c$  程度で波の進行方向へ流体粒子は進むが、水平シアが強く、鉛直流速の大きなところでは、流体粒子は常に水平流速が負の場所に位置し、進行方向と逆方向に進行して、その平均移動速度は、表層あるいは底層よりも大きくなる。

無限小振幅の理論で物質輸送を扱うことには無理があり、これをそのまま海洋に適用してその物質輸送の効果を算出することは難しいと思われるが、この節で計算してみたように周期的運動であっても、内部波のようにその空間スケールが小さい場合は、その物質輸送の効果は大きいと考えられる。

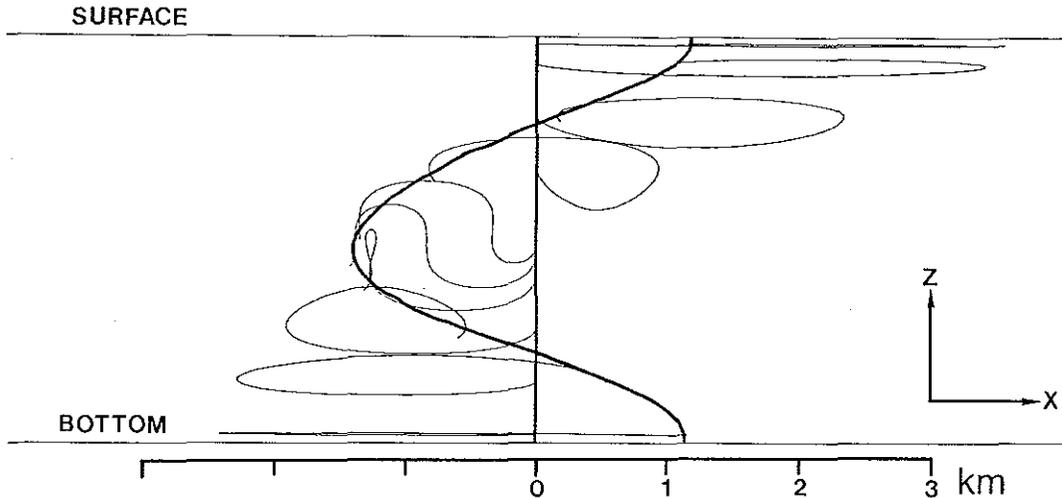


Figure 2. Trajectories of fluid particles in the velocity field of an internal wave  
Thin lines denote trajectories of particles. The straight thick line denotes initial positions of particles and the positions after 1 cycle are shown by another thick line.

### 3. 男女群島付近の内部潮汐

#### 3-1 観測の概要

1987年5月26日から6月18日まで、北緯32度13.8分、東経128度13.9分、水深約150mの位置で、水面下20m層と90m層の2層において測流を行った(第3図)。その流れと水温の変化の様子については第4図に示した。流れについては、両層とも明らかに潮流成分が卓越している。6月2日から15日間のデータを用いて調和分解した結果を第1表に示す。両層とも $M_2$ 潮流が最も大きく、20m層で長軸方向の振幅は24.7cm/s、90m層で21.4cm/sに達する。また、流れの観測期間中の平均は、20m層で北東方向に約13cm/s、90m層で北東方向に約3cm/sとなった。観測期間後半になると90m層の水温に約半日の周期で3~4℃の変動が現われる。この変動は周期から内部潮汐に起因すると考えられる。

6月7日に測流地点付近で行ったCTD観測から得た水温と塩分の鉛直分布と、それから計算したブラント=バイサラ振動数の鉛直分布を第5図に示した。そして、そのブラント=バイサラ振動数の分布から、前節の連続成層モデルの方程式を用い、水深150mの平坦な海であると仮定して、数値的に求めた $M_2$ 潮汐周期の内部波のモード解を第6図に示した。第1モードの位相速度は85cm/s、第2、第3モードについては、それぞれ、36cm/s、26cm/sとなる。90m層での水温変動が顕著であった時期とは成層状態がやや異っているかも知れないが、第1モードについては、多少成層状況が変化してもその鉛直分布はあまり変化しないので、内部潮汐がモード解で表現されるとするならば、この解を使って差支えないと考えられる。

第7図は、6月12日の測流地点付近でのXBT観測から得た水温の鉛直分布である。この観測時に、90m層の水温は日平均値よりも低いので、平均的な水温分布に比べて下層の水温は下がっていると思われる。図から躍層の水温はおよそ10m深くなるごとに、1℃下がるようである。したがって、水温の3~4℃の変動は30mから40mの鉛直運動に相当する。90m層の水温変動について、6月2日からの15日間で調和分解を行なうと、 $M_2$ 潮の周期の水温変動の振幅は1℃、遅角は74度となる。つまり、 $M_2$ 南中後2時間半後に水温値が極大になる。また、振幅1℃は、振幅10mの運動に相当し、鉛直流速の振幅に直すと1.4mm/sになる。

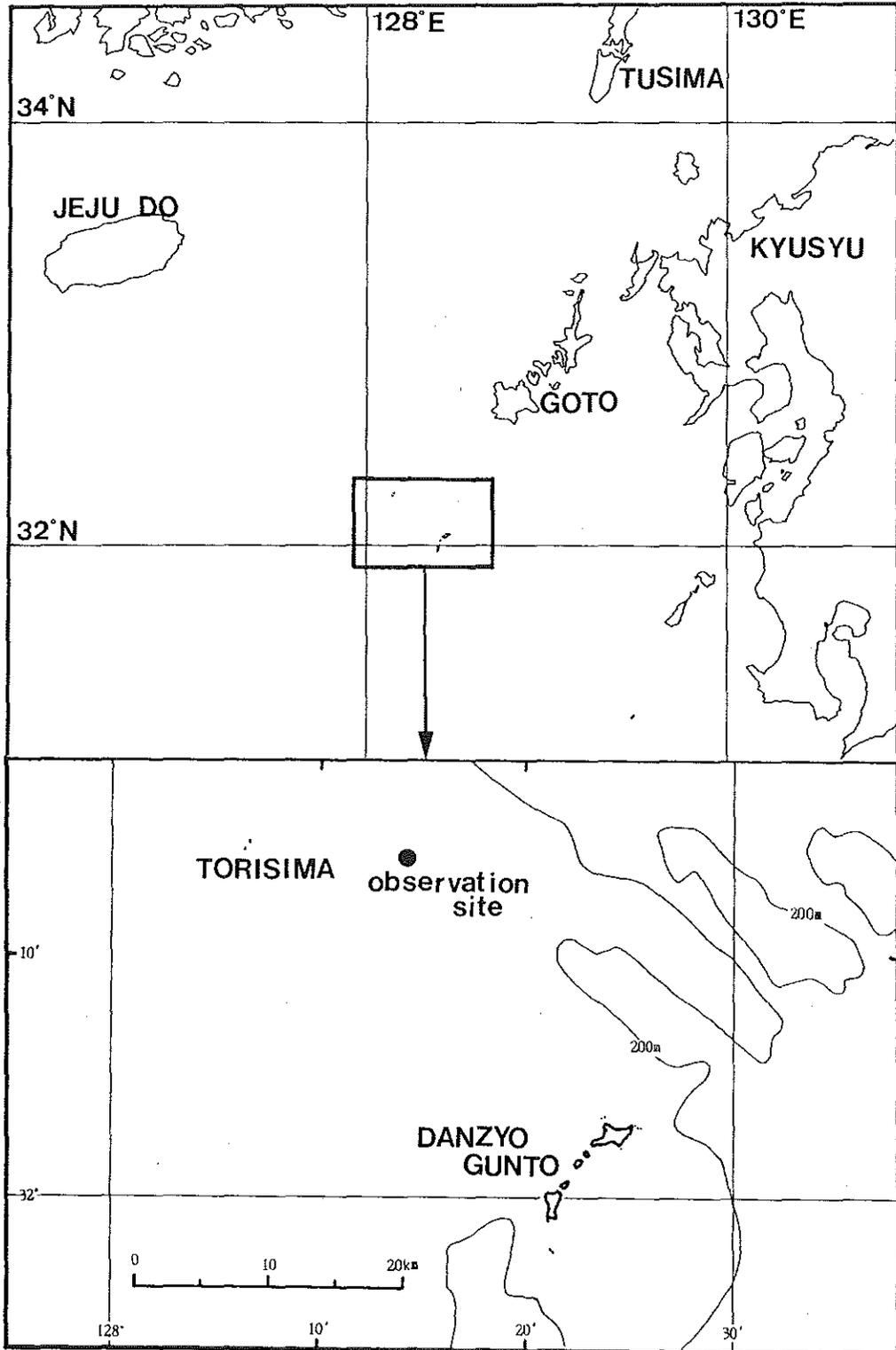


Figure 3. Current observation site.

Table 1. Harmonic constants of tidal current

20m layer

		M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	O <sub>1</sub>
North-component	amplitude(cm/sec)	24.6	2.0	1.6	9.9
	phase lag(degree)	209	320	129	151
East-component	amplitude(cm/sec)	10.0	3.5	1.8	8.7
	phase lag(degree)	292	122	175	246

90m layer

		M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	O <sub>1</sub>
North-component	amplitude(cm/sec)	18.0	7.5	7.2	4.4
	phase lag(degree)	247	251	223	226
East-component	amplitude(cm/sec)	13.5	4.5	7.4	2.5
	phase lag(degree)	29	30	328	0



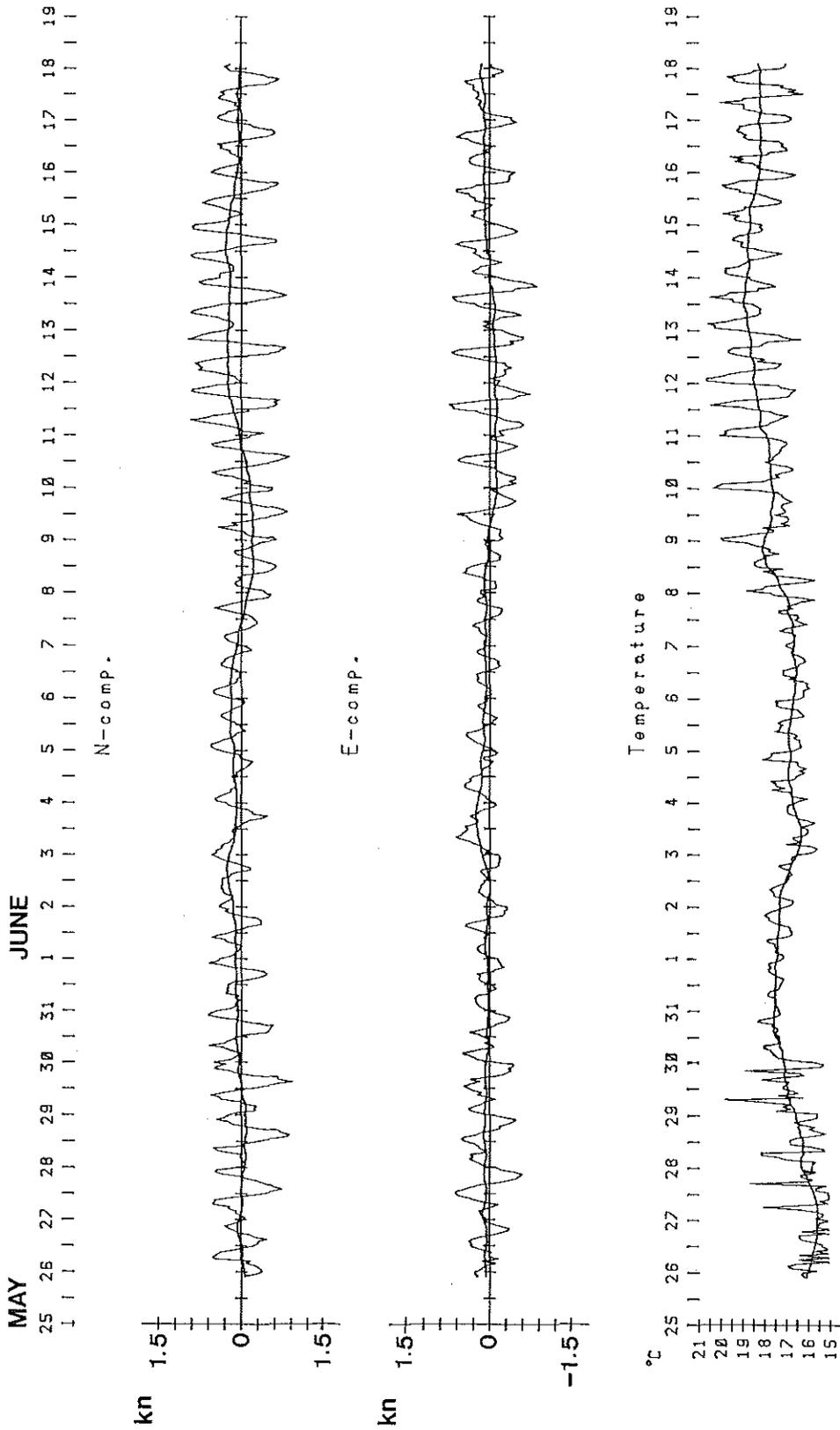


Figure 4(b). Time variation of current and temperature at 90m layer

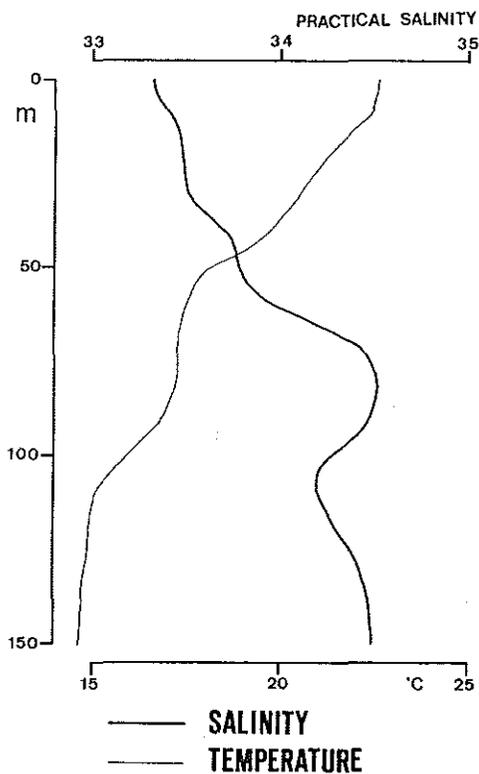


Figure 5(a). Vertical profiles of temperature and salinity on June 7

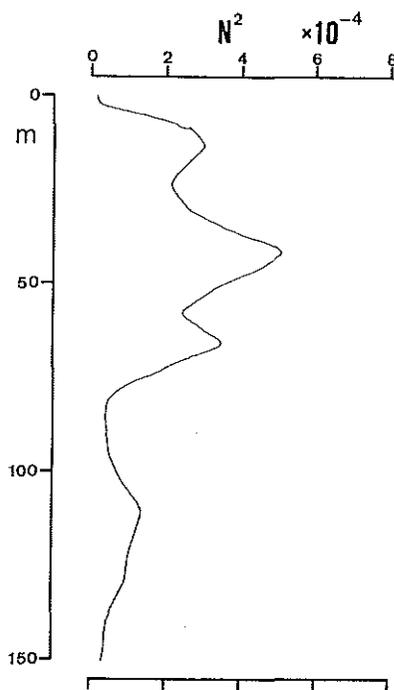


Figure 5(b). Vertical profile of the square value of Brunt-Väisälä frequency

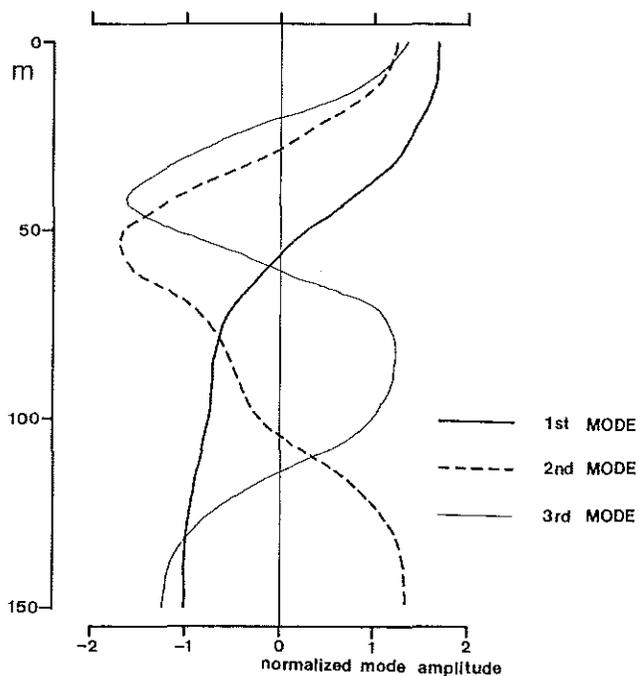


Figure 6. Normalized amplitude of horizontal current  $\sigma = 1.4 \times 10^{-4}$  sec.  $f = 7.8 \times 10^{-5}$  sec. The value of  $N$  is shown in Figure 5(b)

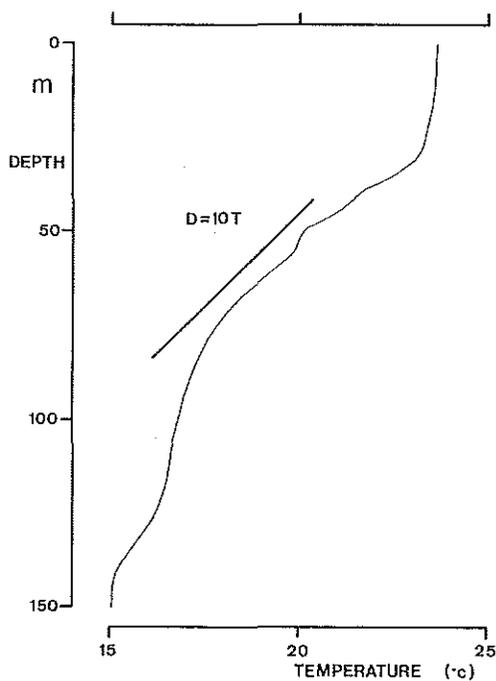


Figure 7. Vertical profile of temperature on June 12

### 3-2 M<sub>2</sub>潮の表面モードと内部モード

この小節では、卓越潮流であるM<sub>2</sub>潮流について内部モードは第1モードで表現されると考えて、表面モードと内部モードとに分離する。第6図には、第2モード以下のモードについても示したが、そのモード波の位相速度よりも大きな流速差が上層と下層間でたびたび観測されており、第1モードのみを内部モードとすることにした。

#### (1) 流速値のみからの算出

表面モードの流れは20m層と90m層で同じ、内部モードは第6図から、90m層の流速が20m層の46%で逆向きであるとして、2層のM<sub>2</sub>潮の定数から求めると、表面モードの流れと内部モードの流れは第2表のようになる。

内部モードの20m層での潮流楕円の長軸の大きさは、12.4cm/sとなり、方向は北向きを0度として247度方向、その遅角は44度となる。短軸の長軸に対する比は、0.8となり、進行波としての理論値の0.55よりもかなり大きく真円に近い楕円となっている。

#### (2) 水温変動を用いての算出

90mの流れをU<sub>90</sub>、その25時間移動平均値をV<sub>90</sub>とし、20m層での値をそれぞれU<sub>20</sub>V<sub>20</sub>とする。また、90m層の水温値をTe、25時間移動平均値をTaとする。90m層での変動成分の温度フラックスF<sub>90</sub>を、

$$F_{90} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} (U_{90} - V_{90}) \cdot (Te - Ta) dt, \quad T_1: \text{期間} \quad (15)$$

として、水温変動の顕著な期間について計算を行なうと152度方向に向かう。20m層の流速と90m層の水温から算出した温度フラックスとF<sub>90</sub>との平均を表面モードによるフラックス、差を内部モードによるフラックスFと仮定する。つまり、

$$F = \frac{1}{2} \left\{ F_{90} - \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} (U_{20} - V_{20}) \cdot (Te - Ta) dt \right\} \quad (16)$$

このとき、Fの方向は102度方向になる。この温度フラックスが内部波によるものとするれば、90m層は下層に位置するので波は282度方向に進行することになる。

M<sub>2</sub>潮の周期の水温変動の振幅1℃に相当する第1モードの20m層での水平流速の振幅は23.8cm/s、90m層の振幅は10.9cm/sとなるが、これを内部モードの振幅、位相として、水温の遅角74度、そしてその方向を上述の282度として内部モードを計算する。この時、第1表の値からこの内部モードの値を差引いたものが表面モードの値となる(第3表)。しかし、20m層と90m層の値を比較すると非常に異なる。振幅として(1)の方法で得た振幅12.4cm/sを用いると、当然のことながら20m層と90m層の値は非常に近くなる。

以上、2方法によって表面モードと内部モードとの分離を試みたが、きれいに分離することはできなかった。この原因としては、内部モードがモード解によって表現できない、あるいは、内部モードが高次のモード解によって表現される。内部モードが単一の進行波では表現できず、水平的に定在波の性質を持ち測流地点が波の腹に位置していた、などが考えられる。しかしながら、2方法の結果を比較してみると、内部波は東向きに進行し、その水平流速の振幅は10~20cm/s程度であると考えてもよいであろう。

Table 2 The amplitude and phase lag of surface mode and internal mode of  $M_2$  tidal current

	surface mode		internal mode	
	amplitude(cm/sec)	phase lag(degree)	amplitude(cm/sec)	phase lag(degree)
North component	19.0	232	10.4	162
East component	9.3	9	12.1	243

Table 3 The amplitude and phase lag of  $M_2$  tidal current $U_0=23.8\text{cm/sec}$ (major axis component of internal mode at 20m layer)

	layer (m)	$M_2$ tidal current		internal mode		residual value	
		amplitude (cm/sec)	phase lag (degree)	amplitude (cm/sec)	phase lag (degree)	amplitude (cm/sec)	phase lag (degree)
North component	20	24.6	209	13.7	143	22.8	343
	90	18.0	247	6.3	323	17.6	227
East component	20	10.0	292	23.4	247	17.8	44
	90	13.5	29	10.8	67	8.3	336

 $U_0=12.4\text{cm/sec}$ 

	layer (m)	$M_2$ tidal current		internal mode		residual value	
		amplitude (cm/sec)	phase lag (degree)	amplitude (cm/sec)	phase lag (degree)	amplitude (cm/sec)	phase lag (degree)
North component	20	24.6	209	7.2	143	22.6	226
	90	18.0	247	4.0	323	17.5	234
East component	20	10.0	292	12.2	247	8.7	13
	90	13.5	29	6.7	67	9.2	2

## 3-3 内部モードでの物質輸送

第8図は、20m層での水平流速の振幅12.4cm/sと23.8cm/sの第1モードの波の速度場における流体粒子の軌跡である。12.4cm/sの場合、1周期間の移動距離は表層で波の伝播方向に約600m、50m層では逆方向に約700mである。平均移動速度はそれぞれ1.4cm/s、1.6cm/sとあまり大きくない。しかし、23.8cm/sの場合はそれぞれ2kmを越え、その平均速度は5cm/s近くになる。したがって、90m層での温度変動に相当するような $M_2$ 潮の内部潮汐の進行波が仮に存在するとすれば、男女群島付近では $M_2$ 潮流単独で、平均流成分に匹敵するような物質輸送機能を持つことになる。

また、波による物質輸送は、波の水平流速に線形に比例して増大するのではなく、波の水平流速の2乗に比例して大きくなるので、波の振幅が大きくなると物質輸送は飛躍的に増大する。さらに、表面モードの流れや他の分潮流との相乗効果によって、海域全体としての波による物質輸送機能は大きくなると考えられる。

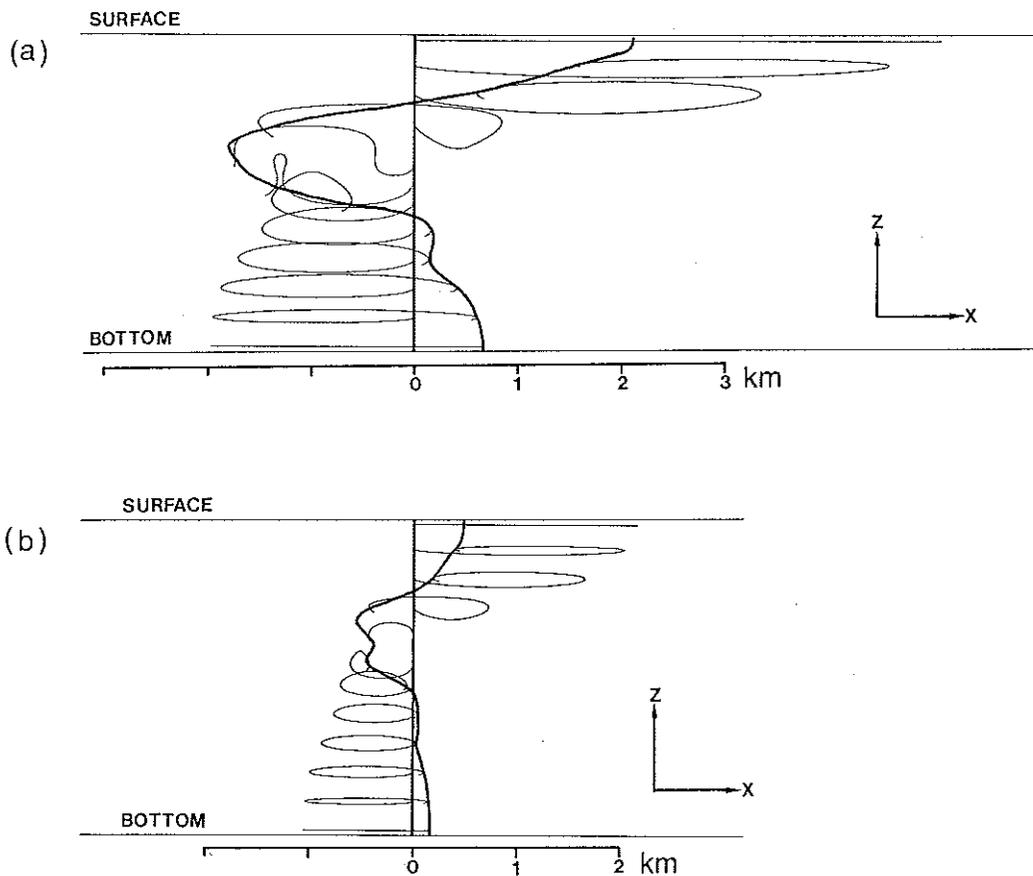


Figure 8. Trajectories of fluid particles in the velocity field of internal tidal wave.

(a)  $U_0 = 23.8$  cm/sec. (b)  $U_0 = 12.4$  cm/sec.

$U_0$ : amplitude of horizontal current at 20m layer

#### 4. まとめ

1987年6月に九州西方男女群島付近での測流を行なった。90m層では内部潮汐に起因すると考えられる半日周期の3~4℃の水温度変動が記録された。

その内部潮汐による物質輸送について考察したが、表層および底層においては東に、中層水は西に運ばれる可能性がある。近藤(1985)は、50m水深の水温度、塩分の分布から東シナ海の水塊の模式図を描いているが、それによると、夏期には九州西方海域において対馬暖流はほぼ真直ぐ北上するのに対して、冬期には男女群島付近で西向きに屈曲している。このような水塊分布の季節変化に、内部潮汐の消長が寄与することは充分考えられる。

測流期間中、XBT観測では水温度逆転層が見つかったが、この現象に内部潮汐のシアアが関与している可能性もある。この鉛直混合も含めて、卓越した平均流成分の観測されない九州西方海域では、内部潮汐が物質輸送の主たる担い手であるかも知れない。したがって、この海域における空間スケールの小さな潮汐現象は、黄海、対馬暖流域の海水形成過程にとって重要な現象であり、今後さらに検討しなければならない問題であると思われる。

おわりに、本報告で紹介した男女群島付近での測流に協力いただいた「拓洋」乗組員の方々に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 近藤正人：東シナ海・黄海漁場の海況に関する研究-I., 50m深及び底層における平均水温度・塩分の分布, 西海区水産研究所研究報告, 62号, p.19-66, (1985)
- 梶浦欣二郎：海洋における内部波, 海洋物理学II, 東京大学出版会, p.1-37, (1976)