

# 東シナ海陸棚上成層期における $M_2$ 分潮流

前田 明夫

(受理 昭和55年5月31日)

## Tidal currents of $M_2$ component in a stratified period on the continental shelf of the East China Sea.

Akio Maeda

### Abstract

Current measurements were made on the continental shelf (110m deep) of the East China Sea during several days in August of 1977 and 1978. Tidal currents of  $M_2$  component predominate over other components by a result derived from the measurements by harmonic analysis. The tidal waves of  $M_2$  component are Sverdrup waves progressing to north-west under little influence of bottom friction. However, the tidal currents are subject to an influence by a horizontal velocity of semidiurnal internal waves which seems to generate on the continental slope of the East China Sea by coupling with surface tides.

### 1. はじめに

奄美大島西方約180マイルの東シナ海陸棚上水深110mで数日間の測流を1977年8月および1978年8月の2回行った(図1)。1977年には深度34mおよび92m

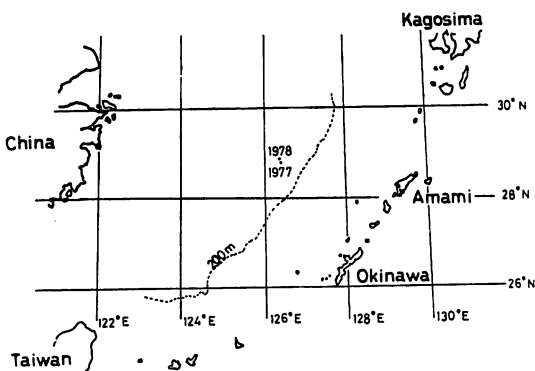


図1 測流点

1977年の測流点は $28^{\circ}45.9'N$ ,  $126^{\circ}23.4'E$

1978年の測流点は $28^{\circ}49.0'N$ ,  $126.22.5'$

の2層, 1978年には深度40m, 64m, 88mの3層で測流した。この付近は陸棚水と黒潮水との間に前線が形成されるため, 複雑な流況を示すが(前田, 1980)<sup>2)</sup>最も卓越した流速変動は半日周期の潮流である(前田,

1979)<sup>3)</sup>。

陸棚斜面および陸棚上の潮汐はその場の起潮力による強制振動とこの海域に接した深海の潮汐により励起された自由進行波との組み合わせであると考えられている。起潮力は体積力であるため, 起潮力による海面から海底まで積分した流量は水深に比例する。南西諸島太平洋側は5000mを越す深海域であり, 平均水深100m以下の東シナ海陸棚上での起潮力による流量の50倍にも達するため, 測流点での潮汐は自由進行波の様相を示す可能性が強い。

海底摩擦のきく浅海域では海底に向かうに従って潮流の振幅と潮流楕円の短軸の主軸に対する比が小さくなり, 主軸の方向は北半球では時計回りに回転することが理論的に推定されている(Sverup, 1927)<sup>4)</sup>。

潮汐は海底地形の空間変化を介して内部潮汐を発生する(Cox and Sandstrom, 1962)<sup>5)</sup>。東シナ海陸棚斜面付近では半日周期( $M_2$ 成分)の等潮時線は等深線にほぼ平行しており(小倉, 1964)<sup>6)</sup>, 最も効率よく半日周期の内部潮汐が発達する可能性が強い。内部潮汐は流速の鉛直シャーが大きく減衰しやすいが, 測流点は大陸棚縁からわずか30マイル程しか離れておらず, その間の減衰の効果はほとんどないと考えられる。従って測流された潮流には内部潮汐による流れが混在している可能性がある。

海底摩擦および内部潮汐の他に平均流の水平シャーとの相互作用による潮流の変形も考えられるが、水平方向1点での測流ではこの問題を検討することはできない。ここでは測流結果を調和分析し、潮流楕円を求め、自由進行波の仮定に基づき、海底摩擦と内部潮汐とのいずれの効果が潮流に影響しているかを検討する。

2. 調和分析

流速計は MTCM-5 (鶴見精機) を用いた。流速の分解能は 1cm/s であり、方向の分解能は5°である。測定の時間間隔は22秒であるが、見かけ上の周期を消却するために66秒間の移動平均をほどこし、解析上では時間間隔を66秒とした。

日本近海の潮汐は主太陰半日周潮 (M<sub>2</sub>分潮, 周期12.42時間) が最も卓越し、次いで日月合成日周潮 (K<sub>1</sub>分潮, 周期23.93時間) が卓越している。その他の成分は小さく、測定期間も短いので、この2成分を調和分析で求めることにした。調和分析の方針は Darwin の方法、Doodson の方法等があるが、ここでは電子計算機利用に適した最小自乗法によって調和分析することにした。

流速の東成分を *u* とし、北成分を *v* としてこの2流速成分が M<sub>2</sub> 分潮および K<sub>1</sub> 分潮の周期で次の様な時間変動をしていると仮定する。

$$u = m + \alpha t + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T_1}t - \theta_1\right) + a_2 \cos\left(\frac{2\pi}{T_2}t - \theta_2\right) \dots (1)$$

$$v = m' + \alpha't + a_1'\cos\left(\frac{2\pi}{T_1}t - \theta_1'\right) + a_2'\cos\left(\frac{2\pi}{T_2}t - \theta_2'\right) \dots (2)$$

ここで

*t*: 時間

T<sub>1</sub>: K<sub>1</sub>分潮の周期

T<sub>2</sub>: M<sub>2</sub>分潮の周期

*m*(*m'*): 測定期間中の東成分(北成分)の平均流

$\alpha$ ( $\alpha'$ ): 時間に関する東成分(北成分)の線型傾向の係数

a<sub>1</sub>(a<sub>1</sub>') : K<sub>1</sub>分潮流の東成分(北成分)の振幅

a<sub>2</sub>(a<sub>2</sub>') : M<sub>2</sub>分潮流の東成分(北成分)の振幅

$\theta_1$ ( $\theta_1'$ ): K<sub>1</sub>分潮流の東成分(北成分)の位相

$\theta_2$ ( $\theta_2'$ ): M<sub>2</sub>分潮流の東成分(北成分)の位相

である。潮流結果と (1), (2) との差の平方を最小とする平均流、線型傾向の係数、振幅、および位相を求め、表1に示した。ここで、*t*=0 は測定開始時すなわち1977年には8月3日3時45分、1978年には8月6日23時である。両年とも M<sub>2</sub> 分潮流の振幅は平均流および K<sub>1</sub> 分潮流よりかなり大きく、卓越している。M<sub>2</sub> 分潮流の位相の深度間の差は小さい。

測流結果に66秒間の移動平均をほどこしたのから最小自乗法で求めた平均流および線型傾向を消却した流速変動と最小自乗法で求めた潮流との比較を図2、図3に示した。両年とも流速変動に良く一致しており、潮流以外の短周期変動が小さい。また M<sub>2</sub> 分潮流の深度間の位相が良く一致している。

表1 M<sub>2</sub>, K<sub>1</sub>分潮流, 平均流および線型傾向係数

	深度 (m)	流速成分	平均流 (cm/s)	線型傾向係数 (cm/66sec)	M <sub>2</sub> 分 潮 流		K <sub>1</sub> 分 潮 流	
					振幅 (cm/s)	位相 (deg.)	振幅 (cm/s)	位相 (deg.)
1977年	34	U	-1.2	-1.54 × 10 <sup>-3</sup>	20.0	-27.7	2.3	15.7
		V	-2.4	2.38 × 10 <sup>-3</sup>	16.5	8.1	2.7	57.8
	92	U	1.4	0.48 × 10 <sup>-3</sup>	32.0	-32.0	1.9	-80.2
		V	-1.9	1.70 × 10 <sup>-3</sup>	24.2	18.2	1.1	-67.5
1978年	40	U	16.9	3.95 × 10 <sup>-3</sup>	29.1	70.4	4.5	-6.3
		V	-4.1	1.42 × 10 <sup>-3</sup>	20.1	-52.9	2.2	8.2
	64	U	5.0	-0.24 × 10 <sup>-3</sup>	22.3	65.1	9.2	6.2
		V	4.4	-2.03 × 10 <sup>-3</sup>	18.9	-62.6	13.6	-4.9
	88	U	1.7	-0.75 × 10 <sup>-3</sup>	23.5	80.1	10.1	-2.2
		V	2.6	-2.73 × 10 <sup>-3</sup>	21.2	-48.7	10.44	-81.3

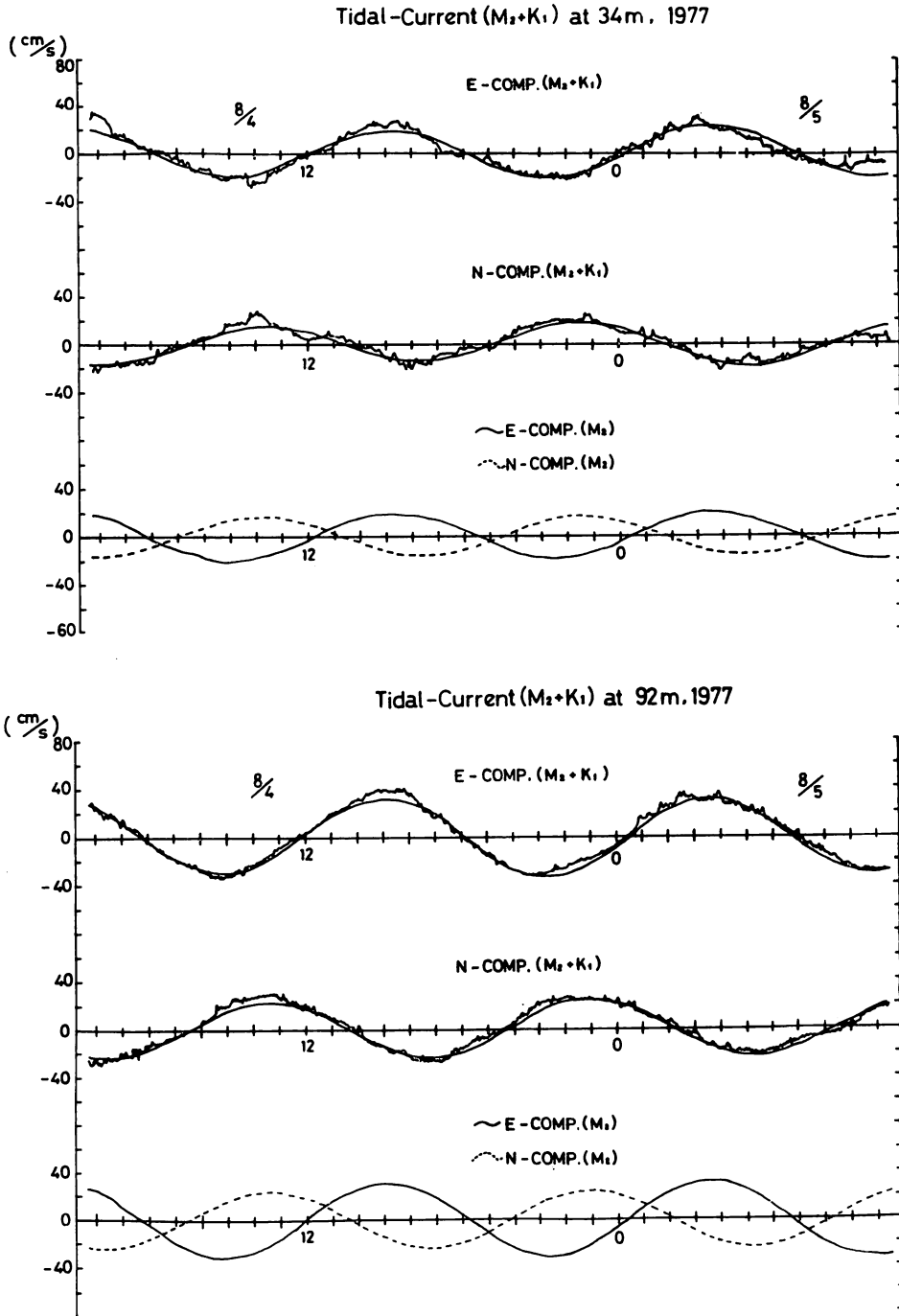


図2 34m 深と 92m 深の流速変動と  $M_2$ ,  $K_1$  分潮流 (1977年)  
 上段: ( $M_2$  分潮流+ $K_1$  分潮流) の東成分と流速の東成分の比較  
 中段: ( $M_2$  分潮流+ $K_1$  分潮流) の北成分と流速の北成分の比較  
 下段: —  $M_2$  分潮流の東成分, .....  $M_2$  分潮流の北成分

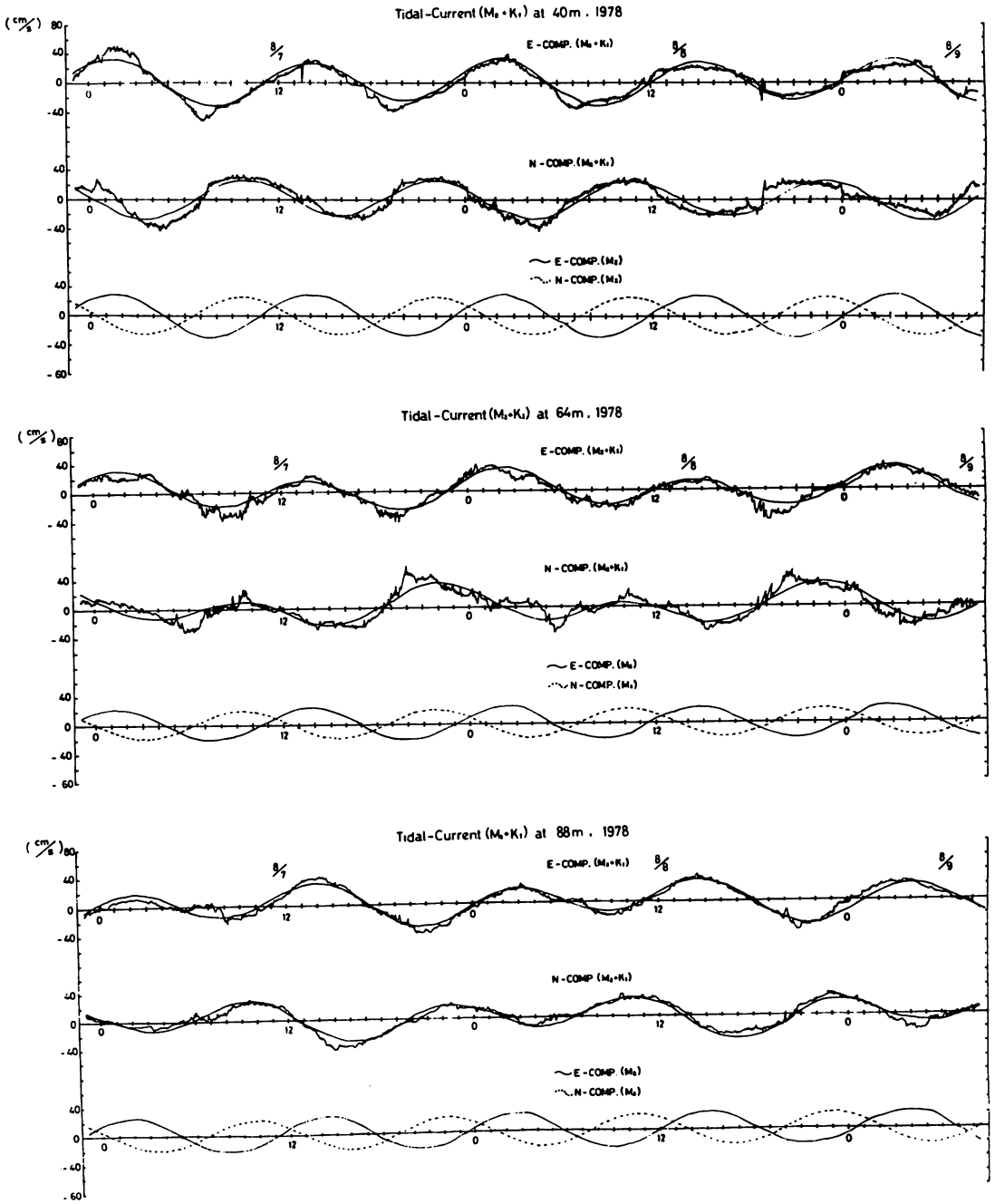


図3 40m 深, 64m 深, 88m 深の流速変動と M<sub>2</sub>, K<sub>1</sub> 分潮流(1978年)

上段: (M<sub>2</sub>分潮流+K<sub>1</sub>分潮流) の東成分と流速の東成分の比較  
 中段: (M<sub>2</sub>分潮流+K<sub>1</sub>分潮流) の北成分と流速の北成分の比較  
 下段: ——M<sub>2</sub>分潮流の東成分. ....M<sub>2</sub>分潮流の北成分

3. 潮流楕円

潮汐の伝搬方向は潮流楕円の主軸の方向である（ただし、伝搬の向きではない）。そこで潮流楕円の主軸の方向を求めることにする。周期Tの分潮流の東成分をu<sub>T</sub>、北成分をv<sub>T</sub>とすると、

$$u_T = a \cos \frac{2\pi}{T}t + b \sin \frac{2\pi}{T}t \quad \dots\dots(3)$$

$$v_T = c \cos \frac{2\pi}{T}t + d \sin \frac{2\pi}{T}t \quad \dots\dots(4)$$

と表現できる。(3)、(4)の平方の和をW<sup>2</sup>とすると、

$$W^2 = u_T^2 + v_T^2 = \frac{1}{2}(a^2 + b^2 + c^2 + d^2) + D \cos \left( \frac{4\pi}{T}t - 2\beta \right) \quad \dots\dots(5)$$

ただし、

$$D = \sqrt{\frac{1}{4}(a^2 - b^2 + c^2 - d^2)^2 + (ab + cd)^2}$$

$$\tan 2\beta = \frac{2(ab + cd)}{(a^2 - b^2 + c^2 - d^2)}$$

である。W<sup>2</sup>はβ =  $\frac{2\pi}{T}t$ で最大値W<sup>2</sup><sub>max</sub>となり、W<sub>max</sub>が主軸方向の振幅である。W<sup>2</sup>の最小値W<sup>2</sup><sub>min</sub>はβ =  $\frac{2\pi}{T}t - \frac{\pi}{2}$ の時にとり、W<sub>min</sub>が短軸方向の振幅である。従って、

$$W_{max} = \sqrt{\frac{1}{2}(a^2 + b^2 + c^2 + d^2) + D} \quad \dots\dots(6)$$

$$W_{min} = \sqrt{\frac{1}{2}(a^2 + b^2 + c^2 + d^2) - D} \quad \dots\dots(7)$$

主軸と東向きとの成す角を反時計回りを正としてγ<sub>max</sub>とすると、

$$u_T = W_{max} \cdot \cos \gamma_{max}, \quad v_T = W_{max} \cdot \sin \gamma_{max}$$

となり、主軸の方向は、

$$\gamma_{max} = \tan^{-1} \frac{c \cos \beta + d \sin \beta}{a \cos \beta + b \sin \beta} \quad \dots\dots(8)$$

となり短軸の方向γ<sub>min</sub>は同様にして、

$$\gamma_{min} = \tan^{-1} \frac{-c \sin \beta + d \cos \beta}{-a \sin \beta + b \cos \beta} \quad \dots\dots(9)$$

となる。これらの式で、a, b, c, dは、例えばM<sub>2</sub>分潮流で言えば最小自乗法で求めたa<sub>2</sub>, a<sub>2</sub>', θ<sub>2</sub>, θ<sub>2</sub>'から計算できる。この計算結果を表2に示す。M<sub>2</sub>分潮流の主軸方向の振幅は、K<sub>1</sub>分潮流の数倍から10倍である。M<sub>2</sub>分潮流の主軸の方向の深度による相違は両年とも比較的小さいが、K<sub>1</sub>分潮流の主軸の方向の深度による相違は振巾の大きな1978年の64m深と88m深の間の場合を除けば大きい。また、M<sub>2</sub>分潮流の主軸方向およびその振巾の両年の間の相違も小さいが、K<sub>1</sub>分潮流の場合には大きい。なお1977年8月1日と1978年8月4日が満月であり、両年の測流期間の月令の差はそれ程大きくない。

測流点付近のM<sub>2</sub>分潮の等潮時線は南西から北東に伸びており（小倉，測1934）<sup>7)</sup>、測定されたM<sub>2</sub>分潮流の主軸とほぼ直交する。従ってM<sub>2</sub>分潮は北西に伝搬している可能性が強い。名瀬における満潮は1977年8月3日には9時10分であり、34m深ではこれより31分遅れてM<sub>2</sub>分潮の主軸方向の流速が最大になり、92m深では27分遅れて最大になっている（図4）。1978年8月7日の名瀬における満潮は8時46分であり、40m深ではこれより1時間遅れて最大になり、64m深では56分、88m深では41分遅れて遅れて最大になっている（図5）。測流点では名瀬より1時間弱で満潮になることが小倉（1934）の等潮時線から推定できる。従ってM<sub>2</sub>分潮流は測流点のほぼ満潮時において伝搬方向の流速が最大になり、干潮時には伝搬方向と逆向きで流速が最大になる。このことはM<sub>2</sub>分潮が進行波であることを示す（次章参照）。

表2 潮流楕円の主軸および短軸

深度 (m)	M <sub>2</sub> 分 潮 流				K <sub>1</sub> 分 潮 流				
	主軸振幅 (cm/s)	主軸方向 (deg.)	短軸振幅 (cm/s)	短軸方向 (deg.)	主軸振幅 (cm/s)	主軸方向 (deg.)	短軸振幅 (cm/s)	短軸方向 (deg.)	
1977年	34	24.9	-37.8	7.8	52.2	3.3	-50.5	1.3	39.5
	92	36.7	-33.0	16.2	57.0	2.2	-30.4	0.2	59.6
1978年	40	34.0	-35.6	18.1	54.4	4.5	-1.1	2.2	88.9
	64	26.4	-35.0	12.7	55.0	14.4	67.6	8.0	-22.4
	88	28.5	-48.0	13.6	42.0	11.2	59.8	9.2	-30.2

方向は東向きから反時計回りを正とする。

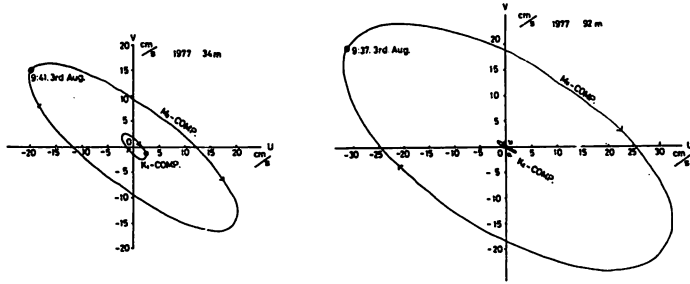


図4 各深度の潮流楕円(1977年)

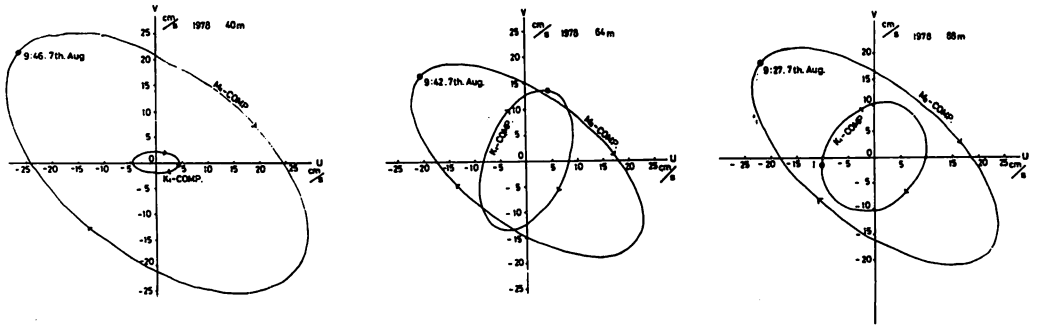


図5 各深度の潮流楕円(1978年)

4. 考 察

$K_1$ 分潮流の振幅が小さいため、位相の誤差が大きくなりそのため位相のパラツキが大きい。そこで以後  $M_2$ 分潮流のみについて考察を進める。

水深が浅い場合には海底摩擦と地球自転の偏向力により下層に向かうに従い潮流の振幅が小さくなり、潮流楕円の短軸の主軸に対する比が小さくなり、位相がずれて北半球では潮流楕円の主軸の方向が時計回りにまわると理論的に推定されている (Sverdrup, 1927)<sup>9)</sup>。しかし観測結果はその様な傾向を示していない(表2, 図4, 図5)。従って水深100m程度では海底の極く近くでない限り、摩擦の影響はあまり大きくないと考えられる。

海底摩擦の影響がない場合、潮汐を  $x$  方向に進む自由進行波と仮定すると、

$$\eta = \eta_0 \cos(kx - \sigma t) \quad \dots\dots (10)$$

$$\sigma = \sqrt{f^2 + k^2 g h} \quad \dots\dots (11)$$

$$\begin{aligned} U &= \frac{\sigma \eta_0}{kh} \cos(kx - \sigma t) \dots\dots \\ V &= \frac{f \eta_0}{kh} \sin(kx - \sigma t) \dots\dots \end{aligned} \quad \dots\dots (12)$$

となる (宮田, 1974)<sup>4)</sup>。

ここで、

$\eta$ : 潮汐による平均海面からの上昇量

$\eta_0$ : 潮汐の振幅

$k$ : 潮汐の波数

$\sigma$ : 潮汐の周波数

$f$ : コリオリのパラメーター ( $2\omega \sin\phi$ ,  $\omega$  は地球自転の角速度,  $\phi$  は緯度)

$g$ : 重力の加速度

$h$ : 水深

$U$ :  $x$  方向 (進行方向) の流速

$V$ :  $y$  方向 (進行方向に向いて左直角方向を正とする) の流速

(10), (12)から潮汐を自由進行波とすると潮位が最大になる時進行方向の流速が最大になる。(12)式より

$$\frac{U^2}{\left(\frac{\sigma \eta_0}{kh}\right)^2} + \frac{V^2}{\left(\frac{f \eta_0}{kh}\right)^2} = 1 \quad \dots\dots (13)$$

となり、 hodograph (潮流楕円) は楕円になり、回転の向きは北半球では時計回りである。我々の測流結果でも  $M_2$ 分潮流の潮流楕円の回転の向きは時計回りであり、満潮時に流速が北西方向に最大となっている

(表2, 図4, 図5). この意味においては兩年ともこの海域でM<sub>2</sub>分潮流は自由進行波と見なし得る.

潮流楕円の主軸と短軸の比は(13)式より,

$$A = \frac{f}{\sigma} \quad \dots\dots (14)$$

となる. この比を測流点におけるM<sub>2</sub>分潮流について求めると,  $A=0.498$ となる. 観測されたM<sub>2</sub>分潮流の短軸の主軸に対する比は1978年の場合はほぼ理論値に近いが, 1977年の場合は多少ちがっている(表3).

表3 M<sub>2</sub>分潮流の短軸と主軸の比

	深度 (m)	短軸と主軸の比
1977年	34	0.313
	92	0.441
1978年	40	0.532
	64	0.481
	88	0.477

摩擦の影響を受けない場合には潮流の振幅も位相も海面から海底まで一様であり(12式), 摩擦の影響を受ける場合には海底に向かうに従って小さくなる. ところが1977年にはM<sub>2</sub>分潮流の振幅は海底近く(92m深の方が34m深におけるより大きい(表2). これは内部潮汐による効果である可能性が高い.

1977年には測流点で2時間に1回のSTD観測を行った. この観測結果から, 等温線の深さの時間変化を求め, 図6に示した. この図から半日周期の内部潮汐が

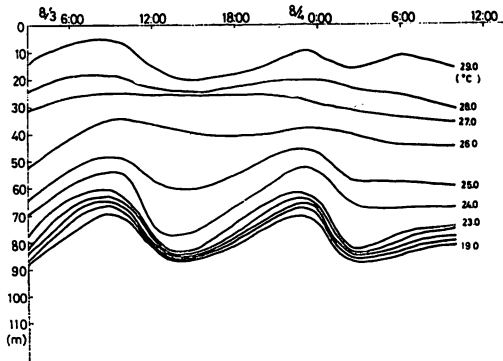


図6 測流点における等温線の時間変化(1977年)

卓越していることがわかる. 水温の鉛直勾配の最も大きな層は平均的に見て65m深から80m深にあり(図6), この層より上層と下層では内部潮汐の流速変動の位相は互いに180°ずれているはずである. M<sub>2</sub>分潮流の位

相と半日周期の内部潮汐による下層の流速変動の位相とがほぼ一致すれば, 測流結果の様にM<sub>2</sub>分潮流の下層の振幅が上層の振幅より大きくなる.

1978年には測流点におけるSTD観測は3時間ないし5時間30分に1回の割合で行ったが, 観測の時間間隔が大きく, 一定していないため, 水温場の時間変化から内部潮汐の存在に関する検討はできない. しかし測流点周辺の水温, 塩分場がかなり複雑であり(前田, 1980)<sup>9)</sup>, 例え内部潮汐が存在していて, 短い時間間隔でSTD観測を行ったとしても, STD観測から内部潮汐の存在を指摘することは難しいであろう. とにかく測流結果ではM<sub>2</sub>分潮流には内部潮汐の影響がほとんど現われていないので, あまり卓越していなかったと思われる.

## 5. 検 討

観測の目的が黒潮と東シナ海陸棚水の混合過程への短周期流速変動の役割であり, 潮流の研究ではないため, 潮流の振舞の記述には不十分な面もあるが, 東シナ海陸棚上での長崎海洋気象台の測流結果(1970<sup>9)</sup>, 1971)<sup>6)</sup>もM<sub>2</sub>分潮流が卓越しており海底摩擦の影響が小さい自由進行波である可能性を支持している. 長崎海洋気象台の測流は水深100m前後の所でほとんど50m深より上層に限られているが, その内100m深での測流は1例だけである. その結果ではM<sub>2</sub>分潮流の振幅は30m深より100m深の方が大きい(長崎海洋気象台, 1970)<sup>9)</sup>. この結果なども内部潮汐の影響を受けたためと考えられる.

1977年8月のSTD観測の結果を利用し2層モデルを仮定すると, 半日周期の内部潮汐の伝搬速度は, 0.8m/sである. 陸棚斜面でM<sub>2</sub>分に潮よって半日周期の内部潮汐が発生し, 測流点と発生域との間の水温・塩分場が単純ならば測流点まで伝搬して来るのに約12.8時間かかる. M<sub>2</sub>分潮流が内部波発生域から測流点まで進むのに約0.3時間であり, 測流点ではM<sub>2</sub>分潮流と半日周期の内部潮汐との位相の差は約360°になる. この場合には内部潮汐による下層の流速変動はM<sub>2</sub>分潮流と一致する. 従って東シナ海陸棚斜面で内部潮汐が発生し, 測流点に伝搬して来た可能性が高い.

## 謝 辞

この研究は1977年8月と1978年8月の鹿児島大学水産学部練習船敬天丸の航海を利用して観測させていた

だいた資料にもとづくものです。辺見船長をはじめ乗組員の皆様方には絶大な協力をいただきました。心からお礼を申し上げます。観測の際には一諸に乗船していただき、協力していただいた鹿児島大学水産学部茶円正明氏、同工学部桜井仁人氏をはじめ両学部の学生諸君に感謝致します。

#### 参 考 文 献

- 1) Cox, C. and H. Sandstrom: Coupling of Internal and Surface Waves in Water of Variable Depth, Jour. Oceanogr. SOC. Japan, 20th Anniversary Volume. 1962
- 2) Maeda, A: Shart Internal Waves on the Margin of the Continental Shelf of the East China Sea, La mer, vol. 17, No. 1, 1979
- 3) 前田明夫: 東シナ海陸棚縁における流速の短周期変動, 文部省総合研究(A)「黒潮大蛇行と大冷水塊(その消長と予測に関する研究)」昭和54年度研究成果報告書
- 4) 宮田元靖: 長周期波, 海洋物理学 I, 東京大学出版会, 1974.
- 5) 長崎海洋気象台: 1970年5月~6月東シナ海陸棚海域測流観測報告, 海洋速報, 第58号, 1970.
- 6) 長崎海洋気象台: 1971年4月~5月東シナ海陸棚域ニゴリ・測流観測報告, 海洋速報, 第62号, 1971.
- 7) 小倉伸吉: 潮汐学, 岩波全書, 1934.
- 8) Sverdrup, H.U.: Dynamics of tides on the North Siberian Shelf, Geofysiske Publikasjoner, vol. 4, No. 5, 1927