

## 海洋表層混合層厚微細分布と混合層底面での鉛直熱輸送

市川 洋\*<sup>1</sup>, 茶園正明\*<sup>1</sup>, 内山正樹\*<sup>2</sup>, 日高正康\*<sup>2</sup>

Small scale distribution of surface mixed layer depth  
and vertical heat advection at the bottom of mixed layer

Hiroshi Ichikawa\*<sup>1</sup>, Masaaki Chaen\*<sup>2</sup>, Masaki Uchiyama\*<sup>2</sup>,  
and Masayasu Hidaka\*<sup>2</sup>

*Keywords:* Air-sea interaction, Ocean mixed layer, Heat flux,  
Heat advection, Beta-spiral

### Abstract

Using CTD data obtained on the T/S Kagoshima-maru during 20 hours on December 2-3, 1989 in a triangular area centered at 29-09 N, 134-51 E (each distance between three tips are 35 miles), the small scale spatial distribution of ocean surface mixed layer depth (MLD) and the vertical heat flux at the bottom of surface mixed layer were examined. Assuming the spatial homogeneousness of internal tide, the contribution of internal tide to MLD defined by sea surface temperature (SST) minus 1.0°C depth, is estimated to  $\pm 20$ m, about 20% of mean MLD. Spatial distribution of MLD corrected by reducing the internal tidal components by least square method has good similarity with temperature distribution at 200m depth, suggesting that MLD distribution is well correlated with two cyclonic small eddies at 200m depth of which radii are 15-40 miles. Vertical velocity component of the current flowing along isopycnal surface at 100m depth is calculated to be  $2.2 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  by beta-spiral method using CTD data which does not contain the contribution of internal tide but eddy. Then, vertical heat flux (positive upward) at the bottom of surface mixed layer (100 m depth) was estimated to be  $-78 \text{ W m}^{-2}$  using mean temperatures at 75 and 100 m depth.

### 1 はじめに

海洋は低緯度域で大気から受け取った熱量を高緯度域で大気に放出することによって、地球規模での熱の再分配（南北輸送）に大きく寄与していると考えられている。この海洋・大

---

\*<sup>1</sup>鹿児島大学水産学部海洋環境物理学講座 (Laboratory of Physical Oceanography, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890 Japan)

\*<sup>2</sup>鹿児島大学水産学部附属練習船かごしま丸 (Training Ship 'Kagashima-maru', Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890 Japan)

気間の熱交換過程で重要な役割を果たしている海面水温と密接な関係がある海洋表層混合層水温は海洋表層混合層熱収支過程（貯熱量の時間変化、海面を通した大気との熱交換、水平方向の移流・拡散および底面での鉛直移流・拡散）に支配されている。したがって、地球規模での熱の再分配における海洋の役割を定量的に評価するためには、種々の海域・季節での海洋表層混合層における熱収支過程の実態を把握しなければならない。

海洋表層混合層の熱収支過程を把握しようとする場合、この層の厚さの時間・空間変動を把握することが重要な測定事項となっている。船舶で観測される混合層の厚さの水平分布には水平分布観測期間中の内部潮汐にともなう時間変動と海面での大気・海洋間の熱交換の日変動にともなう時間変動の効果が含まれており、大規模な海水流動にともなう水平分布そのものを表しているわけではない。したがって、大規模な海水流動による水平移流効果が混合層の厚さの水平分布に果たす役割を推測するためには、何らかの方法で観測期間中の潮汐周期変動成分を各測点での観測結果から除去する必要がある。また、混合層底面での鉛直流による熱輸送量は従来の研究ではほとんど考慮されていないが、水平流と同程度に寄与している可能性が指摘されており<sup>1)</sup>、何らかの方法でこの量を評価する必要がある。

上述の目的のため1989年12月に鹿児島大学水産学部附属練習船かごしま丸によって本州南方の気象庁海洋気象ブイ付近の北緯29度09分、東経134度51分をほぼ中心とする一辺約35マイルの正三角形の各頂点と各辺の中点および三角形の中心点の合計7点で1500mまでのCTD観測を8回実施した。また、CTD観測点での停船時および測点間を航走中には30分間隔で海上気象要素とともに、表層、50m層、および100m層の対地流速を船上 ADCP で測定した。これらの観測で得られた海洋気象ブイ付近上層の海洋構造、特に海洋表層混合層厚微細分布と表層混合層底部での鉛直移流による熱輸送量についてここで述べる。

## 2. 観 測

CTD観測は「かごしま丸」搭載の Niel Brown Instrument 社製の CTD System Mark III B を用いて、Fig. 1 に示す8点で1500 dbまで行った。12月2日18時34分から三角形の中心点である Stn.1 で観測を開始した。その後、Stn.2 から Stn.7 までの三角形周回観測を行ったが、台風31号の接近のため、12月3日14時14分の三角形の中心点での2回目のCTD観測(Stn. 8)終了をもって、約20時間の係留点周辺海洋観測を中止した。

Stn. 1 でのCTD観測時のロゼット多筒採水器による採水で取得された表層下の海水と、他の観測点で採水された表層海水の鶴見精機(株)製のサリノメータ (Model E-2, SM2339) による塩分検定値を用いて、本観測時の電気伝導度の補正係数(セルフクター)を求めた。得られた本観測時の補正係数は1.00041で、その誤差範囲(サリノメータによる塩分値とCTDによる塩分値の差)は $\pm 0.015$  PSU となった。CTDを降下中に1秒間隔で取得されたCTD生資料(電気伝導度・水温・圧力の値)を格納した磁気テープを陸上に持ち帰り、鹿児島大学情報処理センターのIBM3801-Kによって水温と補正塩分値を求めた。以下の資料解析では Appendix に記載した標準層での水温・塩分資料を用いている。

表層、50m層および100m層の流速は「かごしま丸」搭載の船上 ADCP (海上電機(株)製ドップラー流速計 (DCG-30B)) で得られた船底下5m層準拠の50m層および100m層流速の5

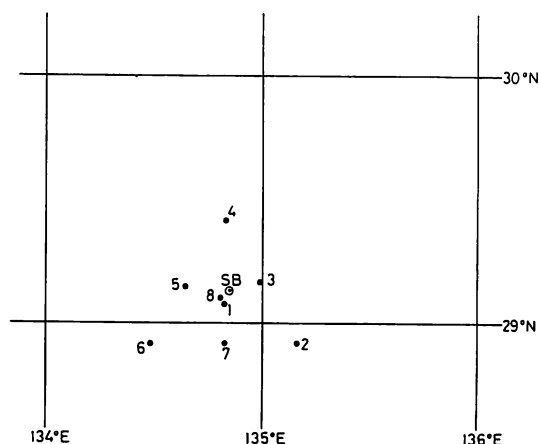


Fig. 1. Map showing the locations of hydrographic stations. Numerals indicate the station number and SB the location of moored surface buoy.

分間平均値, 電磁ログとジャイロコンパスで得られた対水船速・針路方位, とロランCまたはGPSによる対地船速・針路方位を用いて算出した。測定分解能は流速が $0.1$ ノット, 流向が $1$ 度であるが, 今回使用した測定システムは十分に検定されていないため, その測定精度は不明である。以下の資料解析では, 観測海域での流速はさほど大きくないと考えて, 流速の絶対値が $50$  cm/sec 以下の測得流速資料のみを用いている。

### 3. CTD 観測結果

Fig.2 に正三角形の一辺 (Stns. 2, 3, 4) での水温と塩分の鉛直断面分布を示す。80m 以浅の表層混合層の水温は $22^{\circ}\text{C}$  台, 塩分は $34.6$  PSU 台を示している。 $19\sim 22^{\circ}\text{C}$  の水温季節躍層と  $9\sim 14^{\circ}\text{C}$  の水温主躍層は各々  $80\sim 140\text{m}$  および  $400\sim 600\text{m}$  にある。 $34.8$  PSU 以上の塩分極大層が  $100\sim 250\text{m}$  深にあり,  $34.3$  PSU 以上の塩分極大層が  $600\sim 770\text{m}$  深にみられる。本観測海域での塩分極大層での最大塩分値は  $34.844\sim 34.859$  PSU, 塩分極小層での最小塩分値は  $34.231\sim 34.287$  PSU であった。

三角形の中央点での約19時間間隔の2回のCTD観測時 (Stn.1 と Stn.8) における水温の鉛直分布を Fig.3 に示す。海面水温との温度差が $0.1^{\circ}\text{C}$  以下の表層混合層の厚さ (MLD-A) は Stn.1 と Stn.8 の間で4mの差しかないのに対し, 海面水温との温度差が $1^{\circ}\text{C}$  以下の層と定義した表層混合層の厚さ (MLD-B) は季節水温躍層の鉛直変位の影響を受けて, 19時間の間に12mも変化している。また,  $1000\text{m}$  以浅の全層で, Stn.8 の水温が Stn.1 の水温より $0.2\sim 1.0^{\circ}\text{C}$  低くなっている。Stns.1 ~ 7 の標準層での観測資料を用いて作成した, MLD-A と MLD-B の空間分布と表層混合層水温を代表する50m層水温, 水温季節躍層直下の200m層水温および水温主躍層内の500m層水温の水平分布を Fig.4 に各々示す。MLD-A の空間変化は $76\sim 102\text{m}$  であるのに対し, MLD-B は $85\sim 125\text{m}$  と空間的により大きく変化しているが, 両者ともに観測海域の北東~東側で浅く, 北西~西側で深くなるとい

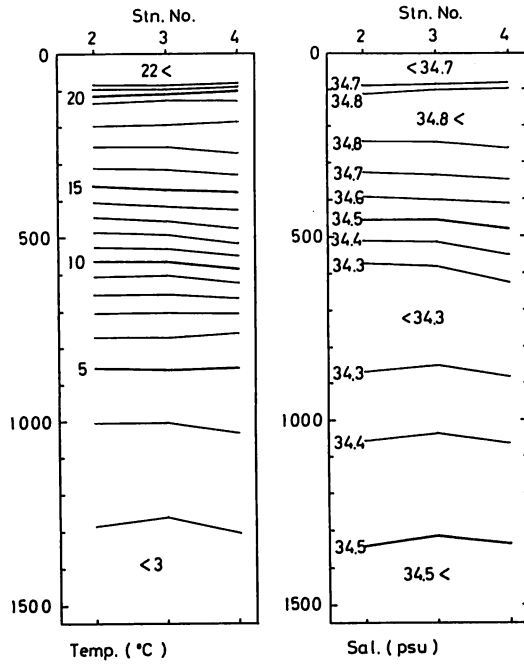


Fig. 2. Temperature and salinity section along Stns. 2, 3, and 4 (See Fig.1).

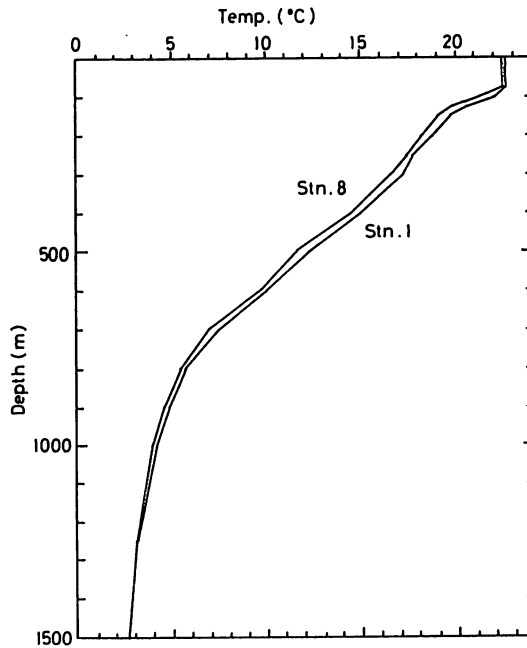
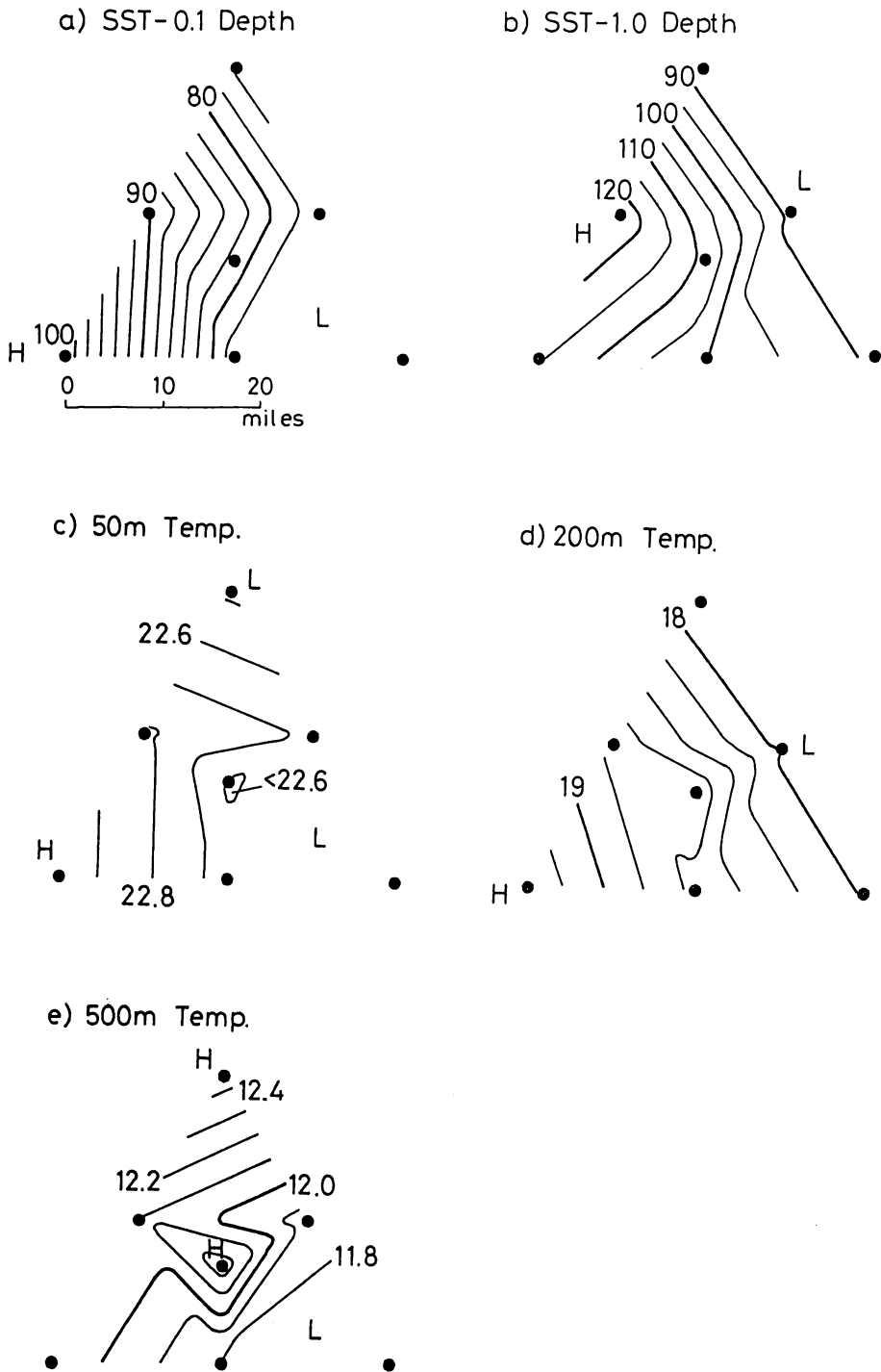


Fig. 3. Difference of vertical profile of temperature at Stn.1 from that at Stn.8, 19 hours later than Stn. 1.



**Fig. 4.** Spatial distribution of a) SST-0.1 °C depth (MLD-A); b) SST-1.0°C depth (MLD-B); c) temperature at 50 m layer; d) temperature at 200 m layer; and e) temperature at 500 m layer. All figures are made for the original data containing contributions of internal tide and small scale eddy.

う傾向が見られる。50m層水温は Stn.1 で極小となっている他は MLD-A とほぼ同じ分布であり、200m層水温もまた MLD-A と類似した分布となっている。他方、500m層水温は観測海域の北～北西側では12℃以上であって、北西から中心点へ高温水が舌状に張り出しているように見える。しかしながら、Fig.3 と Fig.4 の鉛直のおよび水平分布には周年観測期間中の内部潮汐ともなう時間変動と海面での大気・海洋間の熱交換の日変動ともなう時間変動の効果が含まれており、Fig.4 は大規模な海水流動に対応した水平分布を表している

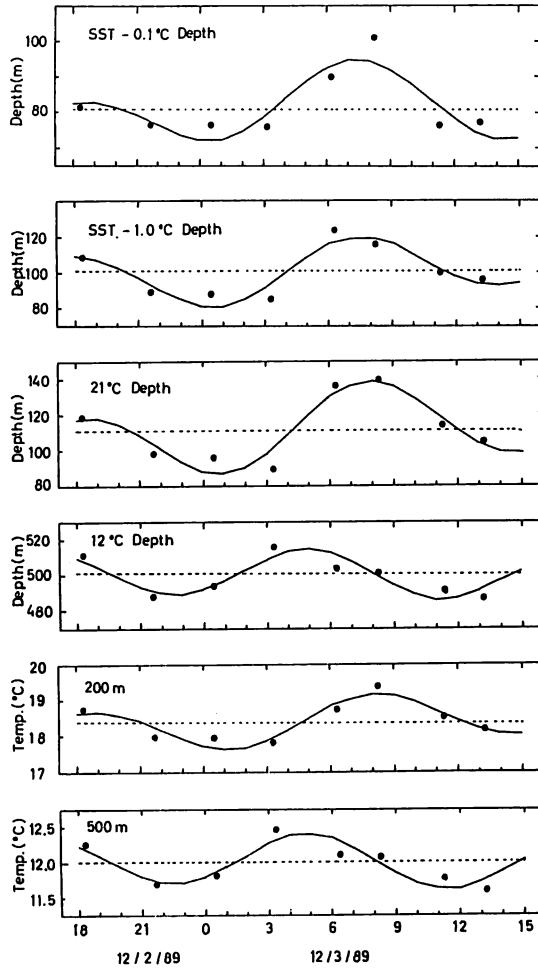


Fig. 5. Temporal variations of a) SST-0.1 °C depth (MLD-A); b) SST-1.0°C depth; c) 21°C isotherm depth; d) 12°C isotherm depth; e) temperature at 200 m layer; and f) temperature at 500 m layer, in which are neglected the differences in location of each hydrographic station. Thin lines indicate semi-diurnal and diurnal tidal component determined by least square method.

わけではない。実際, Fig.3での500m層での2回の観測の間の $0.7^{\circ}\text{C}$ の降温を Fig.4の500m層水温分布から得られる Stn.1と2の間の平均水温水平勾配 ( $0.025^{\circ}\text{C}/\text{mile}$ ) を用いて水平移流のみで説明しようとする, 500m層での観測期間 (19時間) 平均水流として1ノット以上の非常に強い流れを必要とする。このことは, 500m層での19時間の間の $0.7^{\circ}\text{C}$ の水温変化は水平移流よりは, むしろ水塊の鉛直変位 (鉛直移流) に起因することを示唆している。すなわち, 大規模な海水流動にともなう水平移流効果を水温の水平分布から推測するためには, 何らかの方法で1日 (観測期間) 以下の短周期鉛直変動成分を各測点での観測結果から除去する必要がある。

Fig.5にCTD観測期間中のMLD-A, MLD-B, 季節温度躍層深度と主温度躍層深度の各々を代表する $21^{\circ}\text{C}$ と $12^{\circ}\text{C}$ 等温線の深度, および200m層と500m層水温の時間変動を示す。図中の曲線は最小二乗法によって求めた潮汐周期 (12.5時間および25時間) 変動成分である。この周期変動成分が1) 半径20マイルの観測海域で一様であって, 2) 空間変化よりも十分に大きい場合には, 図中の曲線は内部潮汐または慣性振動にともなう時間変動を表していることになる。MLD-Aの変動幅は23m, MLD-Aの振幅は38m, 内部潮汐にともなう季節温度躍層深度の潮汐周期変動成分の変動幅は $3.0^{\circ}\text{C}$ であり, とともに3日8時頃 (Stn.6付近) で最大, 3日1時頃 (Stn.4付近) で最小になる。このことはMLD-AとMLD-Bの時間変動が季節温度躍層の鉛直移動と密接に結びついていて, 季節温度躍層の鉛直移動がMLD-Bに及ぼす影響はMLD-Aへの影響より大きくなることを示している。また, 内部潮汐にともなう主水温躍層の潮汐周期変動成分の変動幅は25m, 500m層水温の潮汐周期変動成分の変動幅は $0.8^{\circ}\text{C}$ であり, とともに3日5時頃 (Stn.4と5の間) で最大, 3日11時頃 (Stn.7付近) で最小になる。内部潮汐周期変動の振動と初期位相が季節温度躍層と主温度躍層で大きく異なっていることが注目される。Fig.6に潮汐周期変動成分の鉛直変位の

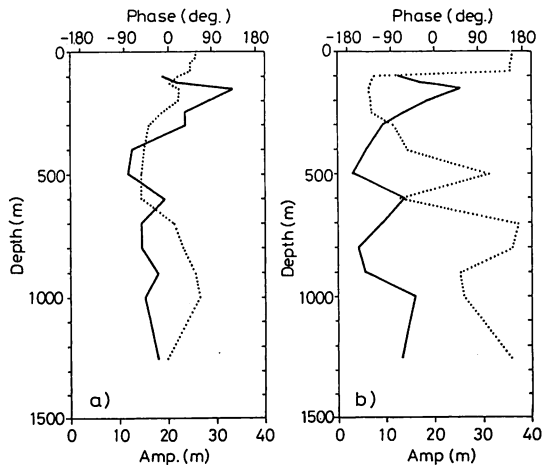


Fig. 6. Vertical profile of amplitude (solid line) and initial phase (dotted line) of isotherm of mean temperature at each depth determined by least square method for a) semi-diurnal component and b) diurnal component.

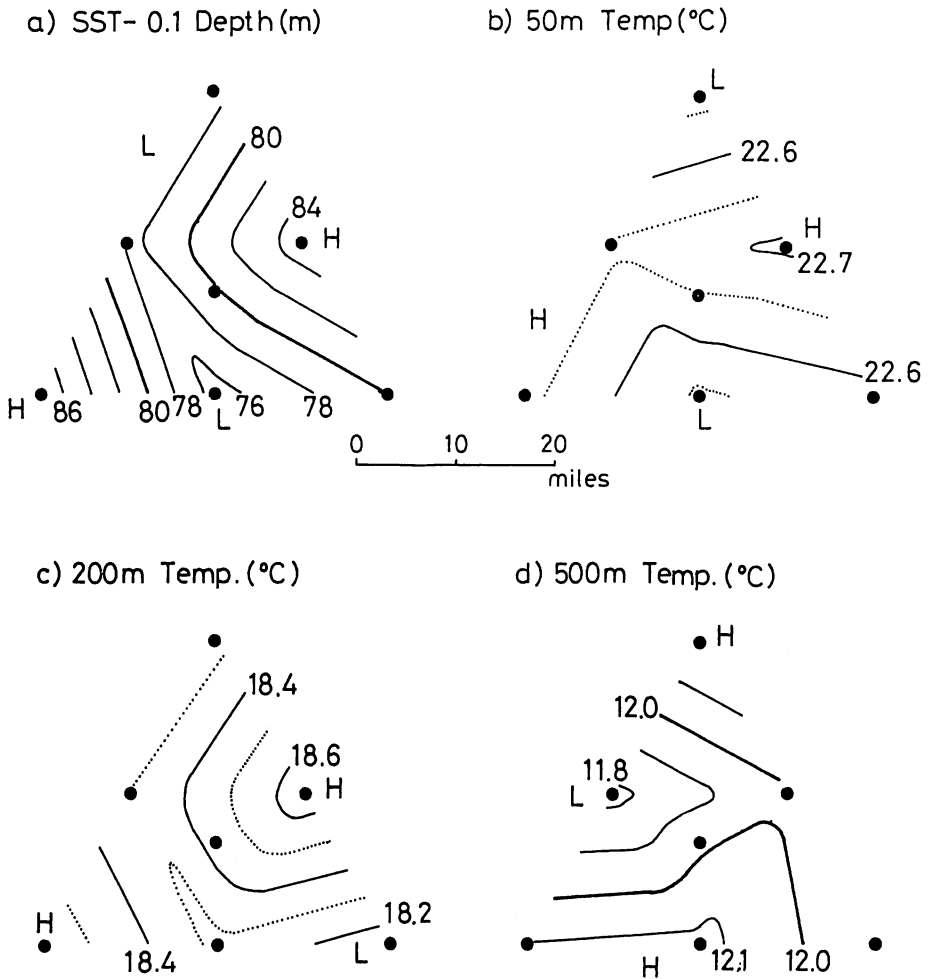


Fig. 7. Spatial distribution of a) SST-0.1 °C depth (MLD-A); b) temperature at 50 m layer; c) temperature at 200 m layer; and d) temperature at 500 m layer. All figures are made for the data in which the contribution of internal tide is reduced by least square method.

振幅（水温変動の振幅/水温鉛直勾配）と初期位相（Stn.1 観測時基準）の鉛直分布を示す。この図は内部潮汐の振動特性が深度によって大きく異なることを明瞭に示している。

Fig.7 に最小二乗法で求めた潮汐周期変動成分を観測値から差し引いた、MLD-A の分布と50m, 200mと500m層水温分布を示す。Fig.7 は Fig.4 の対応する図と比べて、空間的な変動幅が小さくなっており、潮汐周期変動成分が空間分布図に及ぼす影響がいかに大きいかを如実に示している。MLD-A は200m層水温分布と良く対応して、観測海域の北部と南部で浅く（低温）、北東部と南西部で深い（高温）傾向を示し、2個の高気圧性渦の一端をと



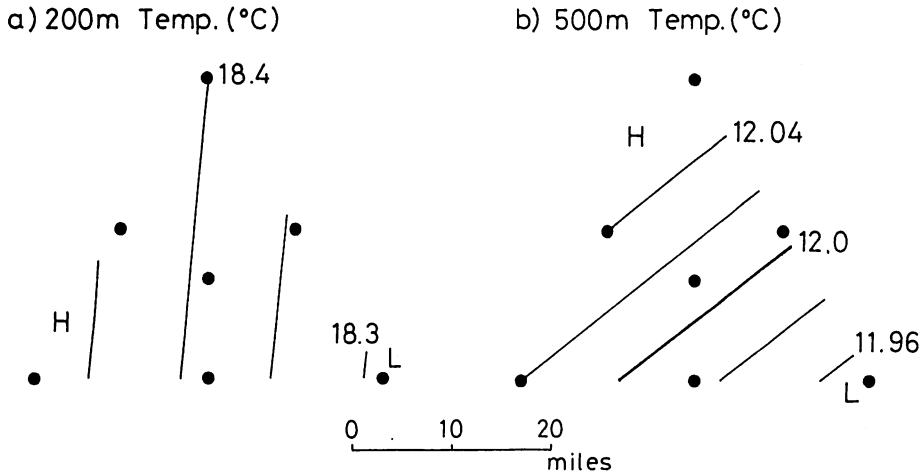


Fig. 8. Spatial distribution of a) temperature at 200 m layer and b) temperature at 500 m layer. All figures are made for the data in which the contribution of internal tide and small scale eddies are reduced by least square method.

らえている。また、50m層水温も200m層水温とほぼ同様の分布をしている。表層混合層水温が高い(低い)所でMLD-Aが厚い(薄い)ことは混合層の貯熱量分布も水平渦の影響を受けていることを意味している。また、500m層水温は観測海域の北部と南部で高く北西部で低いという傾向を示し、高気圧性渦と低気圧性渦が相接して存在している。50m, 200と500m層の水温分布に現われた水平渦の半径はともに15~40マイルであるが、200m層と500m層の水平渦の位置の対応は良くない。

渦成分を除去するために8点での潮汐周期変動成分除去済み水温値から最小二乗法で水平位置座標に関するリニア・トレンド成分を抽出した。渦成分除去済みの200mと500m層水温分布をFig.8に示す。200m深では西から東へ水温が下降している対し、500m深では北西から南東へ下降しているが、その勾配は渦成分を含めた水平分布(Fig.7)の勾配の約1/20と非常に小さい。

## 5. 船上 ADCP 観測結果

Fig.9に測定点の時間的移動を無視して、船上ADCP(ドップラー流速計)で得られた流速観測資料から作成した表層流速の北分と東分の観測海域における時間変動を、最小二乗法によって求めた潮汐周期(12.5時間と25時間)変動成分とともに示す。この図より、ドップラー流速計による実測流速には測定誤差に起因すると思われる大きな変動が含まれていることがわかる。当海域での流速の北分では潮汐周期変動が卓越して3日1時と13時に最大、2日19時と3日7時に最小になるが、東分での潮汐周期変動は北分ほどには顕著でない。Fig.9に示した潮汐流の北向き成分の位相と前節で述べた内部潮汐にともなう季節温度躍層深度の潮汐周期変動の位相がほぼ等しいことは、当海域の潮汐が北へ向かう進行波であるこ

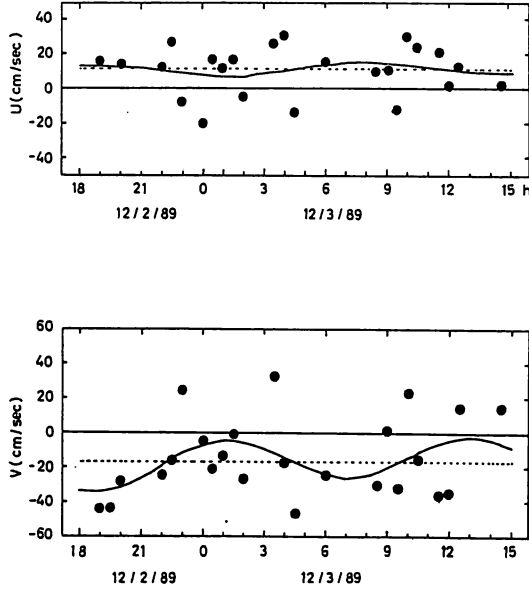


Fig. 9. Temporal variations of a) east component and b) north component of current velocity at sea surface measured by ADCP, in which are neglected the differences in location of each current measurement. Thin lines indicate semi-diurnal and diurnal tidal component determined by least square method.

とを意味している。

### 6. 地衡流螺旋

今、 $x$ 軸を東向きに正、 $y$ 軸を北向きに正、 $z$ 軸を海面から鉛直上向きに正とすると、海水密度  $\rho$  の水平勾配は等密度面の深さ  $h$  の勾配の  $x$  成分 ( $\partial h / \partial x$ ) と  $y$  成分 ( $\partial h / \partial y$ ) および密度の鉛直勾配 ( $\partial \rho / \partial z$ ) を用いると、

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right) \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right), \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial y} = \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right) \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right), \dots\dots\dots (2)$$

で近似される。したがって、流速の  $x$  成分  $u$  と  $y$  成分  $v$  の鉛直シア率は地衡流近似と静水圧近似から

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{g}{f\rho_0} \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right) \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right), \dots\dots\dots (3)$$

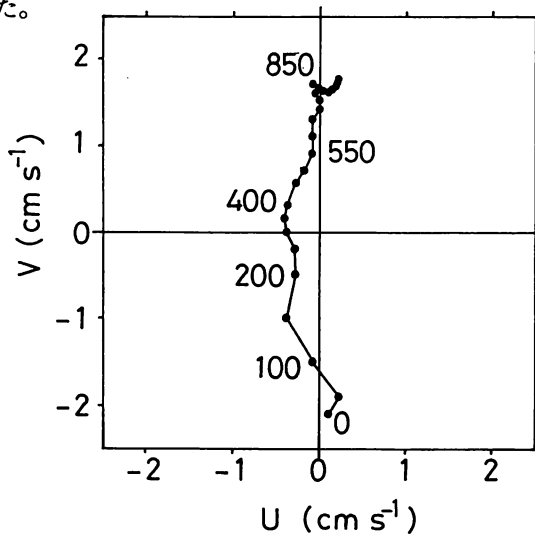
$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{g}{f\rho_0} \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right) \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right), \dots\dots\dots (4)$$

で表される<sup>2)</sup>。ここで  $g$  は重加速度、 $f$  はコリオンパラメータである。(3)、(4)を基準面から

各深度まで鉛直積分することによって各深度での相対地衡流流速を求めることができる。本論文では3観測点の標準層深度での水温・塩分値を内挿して50m毎の海水密度を求め、各深度における3観測点平均密度の鉛直勾配と3観測点各々の位置と密度とから算出した等密度面の水平勾配を(3), (4)に代入し、基準面から各深度まで鉛直積分することによって各深度での相対地衡流流速を求めた。各深度での絶対地衡流流速を求めるためには基準面での絶対流速の東向き成分  $u_0$  と北向き成分  $v_0$  を何らかの方法で決定する必要がある。 $(u_0, v_0)$  の決定方法としては ADCP または係留流速計による実測流速を用いることが考えられる。しかしながら、今回の ADCP 観測で得られた実測流速値には内部潮汐・水平渦に起因する誤差と測定誤差が含まれており、基準絶対流速として採用するのは困難である。このため、本論文では Stommel and Schott<sup>2)</sup> が提案しているベータ・スパイラル法によって、 $(u_0, v_0)$  を決定した。この方法は、各深度での相対流速  $(u_r, v_r)$  を用いて、線形化した渦度保存式と流れが等密度面に沿っているとする仮定から導かれる次式を満たす最適な  $(u_0, v_0)$  を最小二乗法で求めるものである。

$$(u_r + u_0) \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial z} + (v_r + v_0) \left( \frac{\partial^2 h}{\partial y \partial z} + \beta \right) = 0. \dots\dots\dots (5)$$

ここで  $\beta$  は  $f$  の緯度変化率である。この解は最小二乗法を適用する深度領域に依存する。ここでは得られた解に対する左辺の値の深度領域内二乗平均 (二乗残差誤差) と(5)左辺の定数項 ( $u_0$  と  $v_0$  を含まない項) の同一領域内二乗平均値との比が最小となる深度領域 (100-500m) を採用した。



**Fig. 10.** Absolute velocity spiral obtained by beta-spiral method using hydrographic data in which the contributions of internal tide and small scale eddies are reduced by least square method. Absolute reference velocity is determined by applying least square method in the depth domain from 100 to 500 m.

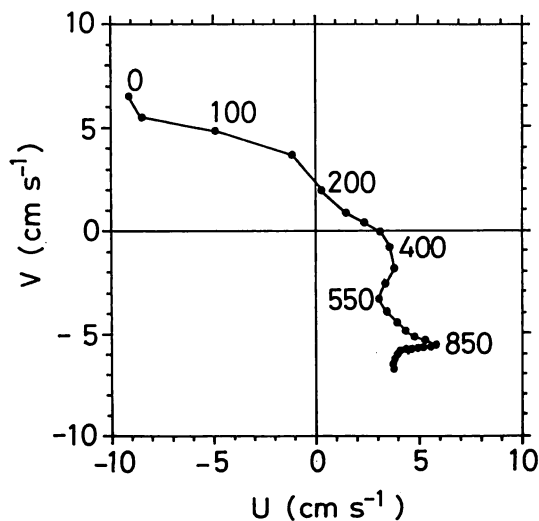
水温・塩分の空間座標へのリニア・トレンド成分 (Fig.8 参照) からベータ・スパイラル法によって算出した絶対地衡流流速の流速螺旋を Fig.10 に示す。図の縦軸が北分、横軸が

東分の流速であり、数字は各流速を算出した深度を示している。渦成分除去済みの絶対地衡流は表層で南向き、下層で北向きとなっているが、その大きさは  $2 \text{ cm s}^{-1}$  未満と全層にわたって非常に微弱であって、ほぼ順圧流となっている。最小二乗法で求められた、今回の観測期間中の流速の平均値（実測潮汐残差法）を Fig. 10 に示した絶対地衡流速とともに Table 1 に示す。実測流速の向きは表層から100m層まではほぼ一様に南東向きとなっていて渦成分除去済み絶対地衡流速と比べて非常に大きい。実測潮汐残差流には水平渦ともなう流速成分が含まれているのに対し、Fig.10 の絶対地衡流は渦成分除去済みの水温・塩分値から算出したものであって水平渦に伴う流速を含んでいないために、両者の差が大きくなったものと思われる。

Fig.11 に Stn.3, 5, 7 の3点での潮汐周期変動成分除去済み水温・塩分値からベータ・ス

**Table 1.** Absolute mean velocity UADCP, UEDDY, and UNO EDDY at surface layers. UADCP is mean value of velocity measured by ADCP during whole period of triangle observation, UEDDY is estimated by beta-spiral method using density distribution at Stns.3, 5, and 7 which contains contribution of eddies but not internal tide, and UNO EDDY estimated by beta-spiral method using density distribution which does not contain neither contribution of eddies nor internal tide.

Depth m	UADCP		UEDDY		UNO EDDY	
	E Comp. $\text{cm s}^{-1}$	N Comp. $\text{cm s}^{-1}$	E Comp. $\text{cm s}^{-1}$	N Comp. $\text{cm s}^{-1}$	E Comp. $\text{cm s}^{-1}$	N Comp. $\text{cm s}^{-1}$
0	13.77	-16.8	-9.1	6.5	0.2	-2.1
50	10.97	-9.4	-8.5	5.5	0.2	-1.9
100	10.44	-13.2	-4.9	4.9	-0.1	-1.5



**Fig. 11** Absolute velocity spiral obtained by beta-spiral method using hydrographic data at Stns. 3, 5, and 7 in which the contribution of internal tide is reduced by least square method (See Fig. 10).

パイラル法によって求めた絶対地衡流流速螺旋を示す。Stn.3, 5, 7が形成する三角形は水平渦の規模より小さいため、この図に示した地衡流螺旋は水平渦に伴う流れの一部分を充分に表していると考えられるが、実測潮汐残差流とは大きさ・向きともに大きく異なっている (Table 1)。これは Fig.11 の絶対地衡流が観測海域中央部の小三角形内の面平均値であるのに対し、実測潮汐残差流は観測海域航海中の全平均値であるためと思われる。この図より、流速の鉛直シアーは0~400mと550~850mでは北西向きとなっているのに対し、450~550mと850m以深では北北東~東北東となっていることがわかる。300m層以深の流速の鉛直シアーはさほど大きくはないが、100m層付近で特に大きくなっている。

## 6. 表層混合層底部での鉛直流速と熱流束

海水流動場と密度場が定常で、流れが等密度面に沿っているとすると、鉛直流速  $w$  (鉛直上向きを正) は(1)と(2)から得られる等密度面の水平勾配を用いて、

$$(u_r + u_0) \frac{\partial h}{\partial x} + (v_r + v_0) \frac{\partial h}{\partial y} = -w \dots \dots \dots (6)$$

で表される<sup>2)</sup>。Fig.12にFig.10に示した渦成分除去済みの絶対地衡流の流速螺旋から上式を用いて得られる鉛直分布を示す。表層混合層底部 (100m) での鉛直流速は上向きに  $6.7 \times$

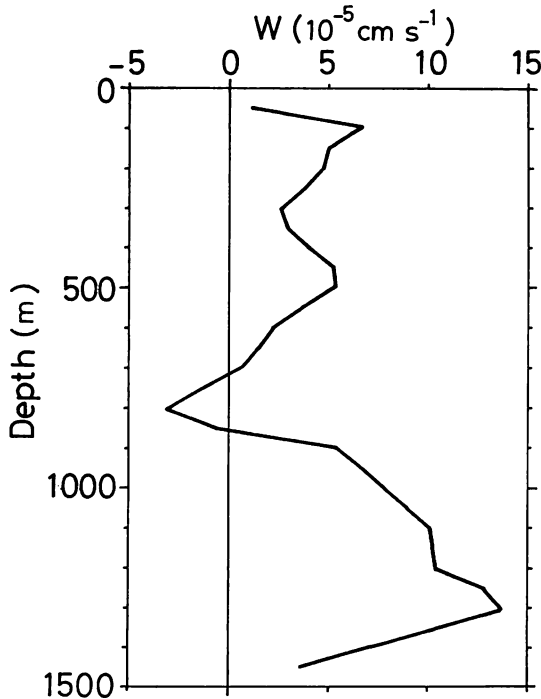


Fig. 12 Profile of vertical component of velocity estimated from the absolute velocity shown in Fig. 10.

$10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$ である。鉛直流速は表層混合層底部（季節水温躍層）と主水躍層内の500m深で極大値を持ち、主水躍層直下の800m深で極小となり、さらに1300mで $1.4 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ と最大になる。

表層混合層底部（100m層、水温  $T_1$  °C）から表層混合層（水温  $T_2$  °C）への鉛直移流による上向きの熱流束  $Q$  は

$$Q = \rho C_p w (T_1 - T_2) \dots\dots\dots(7)$$

で表される。鉛直流速  $w$  として渦成分除去済みの絶対地衡流に伴う  $6.7 \times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$  を採用し、 $T_1$  として全観測点での渦成分除去済み100m層平均水温 ( $T_1 = 21.50$  °C),  $T_2$  として全観測点での渦成分除去済み75m層平均水温 ( $T_2 = 22.65$  °C), を用いて、 $\rho C_p = 4.0 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$  とすると、渦成分除去済みの鉛直流による熱流束  $Q_{\text{NO EDDY}}$  は  $-3.0 \text{ W m}^{-2}$  となる（負符号は表層混合層の熱量損失率を示す）。この値は当海域の海面での熱流束の年平均値 ( $-50 \sim -100 \text{ W m}^{-2}$ )<sup>3)</sup> に比べて非常に小さい。

Fig.13 にFig.11 に示した渦成分（潮汐周期成分除去済み）絶対地衡流の流速螺旋から得られた鉛直流速の鉛直分布を示す。表層混合層底部（100m）での鉛直流速は上向きに  $2.2 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  と渦成分除去済みの場合の約30倍である。渦成分鉛直流速の鉛直分布は渦成分除去済みの鉛直流と同様に、表層混合層底部（季節水温躍層）と主水躍層内で極大値を持ち、主水躍層直下の800m深で極小となる。最大値は1050mでの  $4.2 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  である。鉛直流速  $w$  として渦成分絶対地衡流に伴う  $2.2 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  を採用し、 $T_1$  として Stn.3, 5, 7 での潮汐周期成分除去済み100m層平均水温 ( $T_1 = 21.75$  °C),  $T_2$  として同じく3観測点での潮汐周期成分除去済み75m層平均水温 ( $T_2 = 22.64$  °C) を用いると、渦成分除去済みの鉛

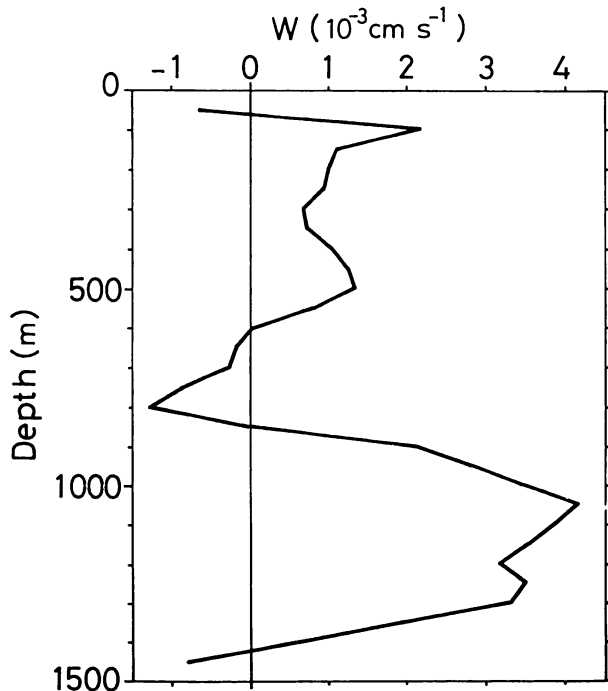


Fig. 13 Profile of vertical component of velocity estimated from the absolute velocity shown in Fig. 11.

直流による熱流束  $Q_{\text{EDDY}}$  は  $-78 \text{ W m}^{-2}$  と  $Q_{\text{NO EDDY}}$  の約30倍となっており、当海域の海面での熱流束の年平均値と同程度である。この結果は、表層混合層水温の変動機構を解明するうえで、表層混合層底部での水平渦に伴う熱量の鉛直移流を無視できないことを示唆している。

### おわりに

1989年12月に鹿児島大学水産学部附属練習船かごしま丸により日本南方で行われたCTD・船上 ADCP 三角形周回観測で得られた資料を用いて、海洋表層混合層厚の分布と混合層底面での鉛直流による熱輸送量について解析した結果を述べた。観測時の風向は北北東～北東であった。絶対地衡流流速と表層での実測流速の差から表層エクマン層についての検討が試みられたが、観測時の風速が10 m/sec 未満と微弱であったことと実測流速の測定誤差が不明なため、表層エクマン層については今回は評価できなかった。

本論文では標準層 (75, 100, 125 m) での水温値からの線形内挿値を用いてMLDの水平分布を求めている。したがって、ここで求めたMLD-AとMLD-Bは内挿に起因する大きな誤差が含まれているために季節水温躍層の潮汐周期変動と強く結びついたものと考えられる。今後、より鉛直方向の分解能の高い資料を用いて、このことを明らかにしたいと考えている。また、今回採用した潮汐周期成分の除去法には、潮汐成分の観測海域での一様性が仮定されている。CTD・船上 ADCP観測と同時期にここで述べた三角形周回観測のほぼ中央 (Fig.1のSB点) で鹿児島大学工学部によって行われた海面係留観測の結果を用いて、この仮定の検証を今後行う予定である。ベータ・スパイラル法を用いて密度場から求めた絶対地衡流流速螺旋とそれから算出した鉛直流速値が実際にどのようになっているのか検証しなければならないが、今回の観測資料のみからは調べることができなかった。海面係留観測結果を用いて実測流速の測定誤差と密度場への内部潮汐の影響を考慮して、水平・鉛直流速の評価の精度を向上させることが今後の重要な解析課題として残されている。なお、表層混合層水温の変動機構に果たす水平・鉛直移流項の役割の評価のためのベータ・スパイラル法の改良を今後行う予定である。

### 要 約

本論文では、日本南方で1989年12月に行われた約20時間のCTD, ADCP周回観測結果から得られた当観測海域の海洋構造、特に表層混合層の厚さの分布に及ぼす潮汐周期 (12.5時間と25時間) 変動成分の影響と表層混合層の底部における鉛直流速と熱輸送量、について述べた。主な結果は次のとおりである。

- 1) 海面水温との温度差が $0.1^{\circ}\text{C}$ 以下の表層混合層の厚さ (MLD-A) に比べて海面水温との温度差が $1^{\circ}\text{C}$ 以下の層と定義した表層混合層の厚さ (MLD-B) は季節水温躍層の内部潮汐による鉛直変位の影響をより大きく受ける。
- 2) 内部潮汐の振動特性 (振幅と初期位相) は深度によって大きく異なる。
- 3) 表層混合層の厚さと水温は水平渦の影響を受けて、混合層が厚いところの水温は高くなり、貯熱量分布も半径が15～40マイルの水平渦の影響を強く受けている。上層と500 m

層の水平渦の位置の対応は良くない。

4) 今回の観測期間中に得られた船上 ADCP による測得流速の平均 (潮汐残差流) の向きは表層から100m層まではほぼ一様に南東向きであり, 流速は $14\sim 21\text{ cm s}^{-1}$ であった。

5) ベータ・スパイラル法で求めた渦成分除去済みの密度場に対応する絶対地衡流の向きは表層で南, 下層で北で, その大きさは $2\text{ cm s}^{-1}$ 未満と全層にわたって非常に微弱であって, ほぼ順圧流となっているといえる。この絶対地衡流から求めた表層混合層底部 (100m) での鉛直流速は上向きに $6.7\times 10^{-5}\text{ cm s}^{-1}$ であり, 鉛直流による熱流束  $Q_{\text{NO EDDY}}$  は $-3.0\text{ W m}^{-2}$  (負符号は表層混合層の熱量損失率を示す) と見積られた。

6) 潮汐周期変動成分のみを除去して渦成分を含んだ密度場からベータ・スパイラル法で求めた絶対地衡流は150m以浅の表層で北西向き, 400m以深の下層で南東向きで, その大きさは $15\text{ cm s}^{-1}$ 未満である。絶対地衡流から求めた表層混合層底部 (100m) での鉛直流速は上向きに $2.2\times 10^{-3}\text{ cm s}^{-1}$ であり, この鉛直流による熱流束  $Q_{\text{EDDY}}$  は $-78\text{ W m}^{-2}$ と見積られた。

謝辞: 本研究は文部省科学研究補助金 (一般研究 A) 「本州南方海域における熱輸送に関する研究」 (代表者: 前田明夫, 課題番号63420015) および文部省特別事業費「気候変動国際協同研究計画 (World Climate Research Programme, 略称 WCRP) の課題 4. 海洋混合層の実験観測 (Ocean Mixed Layer Experiment, 略称 OMLET)」の一環として実施されたものである。観測に協力していただいた鹿児島大学水産学部附属練習船「かごしま丸」の東川勢二船長他の乗組員の皆様と, 乗船学生諸君に感謝します。

## 文 献

- 1) H. L. Bryden (1976): Horizontal advection of temperature for low frequency motions. *Deep-Sea Res.*, **23**, 1165-1174.
- 2) H. Stommel and F. Schott (1977): The beta-spiral and determination of absolute velocity field from hydrographic station data. *Deep-Sea Res.*, **24**, 325-329.
- 3) G. L. Pickard and W. J. Emery (1982): "Descriptive Physical Oceanography An Introduction", pp.69-72, Pergamon Press, Oxford.



Appendix Hydrographic data obtained on board the T/S Kagoshima-maru on December 2-3, 1989.

Explanation

The data in the following table were collected on board the T/S 'Kagoshima-maru' of Faculty of Fisheries, Kagoshima University, during the cruise for 'Ocean Mixed Layer Experiment', from Dec. 1 to 3 in 1989, in the area near 29 N, 135E, and processed by H. Ichikawa. Everyone can obtain these data through Computer Compatible Magnetic Tape (1/2 inches) or mini-floppy disk in MS-DOS format.

Please contact to:

Hiroshi Ichikawa  
Faculty of Fisheries  
Kagoshima University  
4-50-20, Shimoarata  
Kagoshima, 890 Japan

Akio Maeda  
Faculty of Engineering  
Kagoshima University  
1-21-40, Koorimoto  
Kagoshima, 890 Japan

Heading

- STN. :Sequential number given for each observational station.  
DATA :Lower two digits of year, month, and day of measurements in the Japan Standard Time (JST), which is nine hours ahead of the Greenwich Mean Time.  
TIME :Hour and minutes of beginning of measurements.  
LAT :Latitude in degrees, and minutes.  
LON :Latitude in degrees, and minutes.

Hydrographic data

Following data are measured by Neil Brown CTD III B. Salinity is corrected by changing the Cell Factor to 1.00041 which was determined from RMS values at Stn. 1 and sea surface values at all stations.

- PRS. :In-situ pressure in deci-bar except 0 db which means 1 or 2 meters below the sea surface.  
TMP :In-situ water temperatur in degrees Celsius.  
SAL :In-situ salinity in 'the practical sainity scale, 1978'.

## Appendix (continued)

STN.1 89/12/ 2 18 : 34 JST LAT.= 29- 6.61 N LON.=134-48.80 E			STN.2 89/12/ 2 21 : 45 JST LAT.= 28-54.99 N LON.=135- 9.99 E			STN.3 89/12/ 3 00 : 30 JST LAT.= 29-10.03 N LON.=135- 0.00 E			STN.4 89/12/ 3 3 : 15 JST LAT.= 29-24.99 N LON.=134-49.95 E		
PRS	TMP	SAL	PRS	TMP	SAL	PRS	TMP	SAL	PRS	TMP	SAL
0	22.561	34.133	0	22.676	34.613	0	22.683	34.622	0	22.468	34.646
10	22.573	34.367	10	22.686	34.615	10	22.683	34.622	10	22.473	34.646
20	22.571	34.500	20	22.687	34.615	20	22.684	34.623	20	22.472	34.646
30	22.571	34.530	30	22.691	34.616	30	22.685	34.622	30	22.475	34.646
50	22.577	34.558	50	22.690	34.615	50	22.689	34.622	50	22.480	34.646
75	22.584	34.569	75	22.690	34.615	75	22.689	34.623	75	22.440	34.651
100	22.094	34.720	100	20.842	34.764	100	20.802	34.811	100	20.054	34.833
125	20.602	34.812	125	19.260	34.844	125	19.080	34.849	125	19.112	34.855
150	19.731	34.844	150	18.768	34.847	150	18.573	34.849	150	18.473	34.850
200	18.756	34.839	200	17.982	34.830	200	17.948	34.833	200	17.823	34.830
250	17.753	34.816	250	17.082	34.795	250	17.083	34.794	250	17.286	34.807
300	17.185	34.794	300	16.252	34.741	300	16.360	34.746	300	16.621	34.771
400	14.993	34.642	400	14.209	34.593	400	14.444	34.607	400	14.607	34.624
500	12.258	34.445	500	11.702	34.417	500	11.839	34.426	500	12.455	34.475
600	10.007	34.319	600	9.058	34.264	600	9.011	34.270	600	9.534	34.325
700	7.374	34.261	700	7.057	34.233	700	7.069	34.233	700	7.132	34.230
800	5.667	34.255	800	5.542	34.267	800	5.597	34.268	800	5.236	34.270
900	4.791	34.307	900	4.570	34.316	900	4.608	34.331	900	4.791	34.307
1000	4.076	34.370	1000	4.012	34.376	1000	4.006	34.385	1000	4.130	34.374
1250	3.092	34.442	1250	3.078	34.477	1250	3.021	34.486	1250	3.119	34.477
1500	2.615	34.529	1500	2.553	34.540	1500	2.583	34.541	1500	2.583	34.544

STN.5 89/12/ 3 5 : 55 JST LAT.= 29- 9.10 N LON.=134-39.10 E			STN.6 89/12/ 3 8 : 31 JST LAT.= 28-55.00 N LON.=134-28.99 E			STN.7 89/12/ 3 11 : 14 JST LAT.= 28-54.89 N LON.=134-49.83 E			STN.8 89/12/ 3 13 : 13 JST LAT.= 29- 4.72 N LON.=134-49.85 E		
PRS	TMP	SAL	PRS	TMP	SAL	PRS	TMP	SAL	PRS	TMP	SAL
0	22.794	34.577	0	22.952	34.601	0	22.699	34.577	0	22.503	34.596
10	22.806	34.577	10	22.964	34.600	10	22.701	34.577	10	22.519	34.596
20	22.806	34.577	20	22.965	34.600	20	22.699	34.577	20	22.509	34.596
30	22.813	34.576	30	22.968	34.601	30	22.689	34.578	30	22.509	34.596
50	22.817	34.576	50	22.973	34.601	50	22.654	34.580	50	22.511	34.597
75	22.822	34.576	75	22.980	34.607	75	22.657	34.543	75	22.495	34.608
100	22.608	34.593	100	22.925	34.629	100	21.705	34.726	100	21.311	34.800
125	21.748	34.780	125	21.360	34.850	125	20.419	34.856	125	19.806	34.855
150	20.036	34.844	150	20.704	34.855	150	19.808	34.857	150	19.027	34.836
200	18.737	34.849	200	19.369	34.859	200	18.548	34.849	200	18.184	34.839
250	17.936	34.825	250	18.027	34.836	250	17.295	34.794	250	17.407	34.811
300	17.230	34.779	300	16.910	34.771	300	16.477	34.741	300	16.594	34.769
400	14.681	34.622	400	14.800	34.634	400	14.316	34.598	400	14.534	34.617
500	12.095	34.444	500	12.077	34.441	500	11.786	34.447	500	11.609	34.420
600	9.734	34.359	600	9.796	34.351	600	9.168	34.343	600	9.691	34.348
700	7.579	34.283	700	7.668	34.287	700	7.230	34.292	700	6.859	34.231
800	5.816	34.286	800	5.787	34.276	800	5.450	34.277	800	5.449	34.273
900	4.746	34.329	900	4.605	34.341	900	4.527	34.341	900	4.510	34.341
1000	4.007	34.390	1000	3.925	34.401	1000	3.890	34.399	1000	3.883	34.399
1250	3.139	34.475	1250	3.167	34.473	1250	3.047	34.487	1250	3.026	34.491
1500	2.617	34.539	1500	2.643	34.535	1500	2.509	34.551	1500	2.537	34.548