

## 陸棚縁辺部の海底直上における流れ

市川 洋<sup>\*1</sup>, 藤本顕治<sup>\*2</sup>, 東川勢二<sup>\*3</sup>, 内山正樹<sup>\*3</sup>,  
日高正康<sup>\*3</sup>, 高岡勝義<sup>\*4</sup>

## Benthic Current on the Continental Shelf Edge

Hiroshi Ichikawa<sup>\*1</sup>, Kenji Fujimoto<sup>\*2</sup>, Seiji Higashikawa<sup>\*3</sup>,  
Masaki Uchiyama<sup>\*3</sup>, Masayasu Hidaka<sup>\*3</sup>  
and Katsuyoshi Takaoka<sup>\*4</sup>

*Keywords* : Benthic Boundary Layer, Bottom Stress, Reynolds Stress,  
Bottom Sediments, Current measurement, South of Kyushu

### Abstract

The horizontal and vertical components of current fluctuations at 105 cm, 266 cm, and 277 cm above the sea bed were measured every 2 seconds during 25 hours in November of 1990 by electro-magnetic current meters fixed on a tripod deployed near the continental shelf edge of 220 m depth south of Kyushu. The sea bed was covered by silt and the more fine particles spreading tongue-like from south-east to northwest. It is demonstrated that the 20 minutes mean vertical velocity is induced by horizontal current acrossing the isobath. The vertical change of 25 hours mean horizontal current can be well explained by the bottom Ekman layer theory with vertical eddy kinematic viscosity of 0.90 cm<sup>2</sup>/sec, and the bottom shear stress is estimated to be 0.037 dyne/cm<sup>2</sup> northwestward. From the along-isobath component of 25 hours mean total shear Reynolds stress including tidal and turbulent current fluctuations, the vertical eddy kinematic viscosity is estimated to be 27 cm<sup>2</sup>/sec at 221.5 cm above the sea bed and 105 cm<sup>2</sup>/sec at 135.5 cm. The 20 minutes mean turbulent shear Reynolds stresses have large measurement error due to fluctuation of vertical velocity induced by bottom topography and do not have good correlation with vertical shear of horizontal velocity.

---

\*1 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)

\*2 鹿児島大学大学院水産学研究科海洋環境物理学講座 (Laboratory of Physical Oceanography, Graduate School of Fisheries Science, Kagoshima University, 50-20, Shimoarata 4, Kagoshima, 890 Japan)

\*3 鹿児島大学水産学部附属練習船かごしま丸 (Training Ship 'Kagoshima-maru', Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20, Shimoarata 4, Kagoshima, 890 Japan)

\*4 鹿児島大学水産学部機械工作室 (Machine Factory, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20, Shimoarata 4, Kagoshima, 890 Japan)

## 1. はじめに

河川から海洋中に流入した粒状物質および海中での生物活動・化学反応によって生じた沈降物質は海水とともに移動しながら沈降して海底に堆積する。堆積した粒状物質は海水流動が海底に及ぼしている摩擦力によって海底上を移動したり、あるいは巻き上げられる。したがって、海洋における物質循環機構を解明するため、あるいは海底に棲息する生物・卵を取り巻く環境の変動機構を解明するためには、海底における海水流動の実態を把握する必要がある。海底摩擦力が海底堆積物に及ぼす作用は堆積物の粒径に依存しているため、海底泥の粒度分布は海底直上の海水流動を反映していると言われて<sup>1)</sup>いる。しかしながら、海底直上での流速測定結果と粒度分布との比較が十分に行われていないため、粒度分布からの海底海水流動評価については未だに推測の域を脱していない現状である<sup>2)</sup>。

海底に堆積した粒状物質の移動と再懸濁（巻き上げ）は直上の流れが海底に堆積している粒状物質に及ぼす剪断摩擦応力の大きさや向きによって支配される。また、大洋規模の海水流動の運動量は海底境界層における運動量の鉛直輸送を通して海底での摩擦力に吸収されている。したがって、海底での剪断摩擦応力を推定・評価することは海底における粒度分布機構のみならず大規模な海水流動機構を解明する上でも重要な研究課題となっている。この剪断摩擦応力を推定する方法としては、鉛直渦動粘性係数を仮定して海底境界層における流れの鉛直勾配の実測値から推測する方法、海底乱流境界層内での平均流速の鉛直分布の対数則を用いて得られる摩擦速度から推測する方法、および流速変動から剪断レイノルズ応力を直接測定する方法の3つの方法がある。この中で、剪断レイノルズ応力を直接測定するのが最も望ましい方法である。

剪断レイノルズ応力を直接測定するためには流速変動の乱流成分の水平・鉛直成分を高精度で測定しなければならない。このためには、高精度の3成分流速計を振動しないように海底乱流境界層内の複数の点に固定して係留する必要がある。我々は、海底境界層内での剪断レイノルズ応力と底泥の粒度分布との対応を種々の海域で調べる手始めとして、高精度で流速の3成分を連続的に測定できる3台の記録内蔵式電磁流速計を装着した正三角錐形の固定係留枠を薩摩半島枕崎市の南方約30kmの陸棚縁辺の水深220mの地点に設置して、海底直上における流速変動の観測を1990年11月22日13時から25時間にわたって行った。このような観測装置はWilliams *et al.*<sup>3)</sup>によっても開発されている。彼らの装置は海底超音波応力計 (Benthic Acoustic Stress Sensor, 略称BASS) と呼ばれ、三角錐型のやぐらに複数の小型3成分超音波流速計を固定して乱流レイノルズ応力を測定するものである。Grant *et al.*<sup>4)</sup>はBASSを用いてカルフォルニア沖の水深90mの海底直上における4日間の乱流レイノルズ応力の変動を調べている。また、Gross *et al.*<sup>5)</sup>は大西洋のノバスコチア海嶺付近の水深4,800mの点で2ヶ月間行われたBASSによる海底乱流レイノルズ応力変動の測定結果を報告している。BASSの流速測定精度と測定時間間隔は我々が今回用いた電磁流速計よりも格段に優れており、BASSは海底付近の乱流の実体をより良く捉えているものと考えられる。しかし、彼らは時々刻々と変化する20分間平均流速の向きを基準軸にして鉛直2次元的に海底境界層内の乱流を取り扱っており、平均流に及ぼす地球回転効果およびレイノルズ応力に及ぼす潮流と海底地形の効果についての検討を行っていない<sup>6)</sup>。

本論文では、今回用いられた固定係留枠による海底直上の流速変動測定の概要を述べると

ともに, 資料解析から得られた海底地形が流速の鉛直成分に及ぼす影響, 海底付近の平均流鉛直分布に及ぼす地球回転効果, および乱流レイノルズ応力と鉛直渦動粘性係数に及ぼす潮流と海底地形の効果について論述する。

## 2. 観 測

海底付近の流速変動の観測は, 鹿児島大学水産学部附属練習船「かごしま丸」によって Fig. 1 に示す Stn. A (北緯 30 度 10.0 分, 東経 130 度 21.2 分, 水深 220 m) で 1990 年 11 月 22 日 13 時 00 分から翌 23 日 15 時 00 分まで行われた。設置作業開始直前に設置点で海底上 10 m までの CTD 観測を Niel Brown CTD System Mark 3 で行うとともに, 流速変動の係留観測期間中に Fig. 1 に示した線に添って航走して地形探査を行った。また, Fig. 1 中の Stns. 1~5 ではスミスマッキンタイヤー採泥器で底泥を採集した。CTD 観測結果を Appendix 1 に示す。また, S S I 式自動粒度分析装置 (丸東製作所) を用いた沈降法による粒度分析によって得られた底泥の中央粒径値  $Md\phi$ , 平均粒径値  $M\phi$ , 淘汰度  $\sigma\phi$ , および歪度  $\alpha\phi$  を Appendix 2 に示す。

今回の観測で使用した流速計はアレック電子 (株) 製のメモリー電磁流速計 ACM4 M-5 である。本流速計は基準方位角・傾斜角 (2 成分)・流速 (3 成分)・水温を測定・記録する測器で, 測定結果から流速の東向き成分・北向き成分・鉛直上向き成分の変動の時系列を得ることができる。今回は記録容量の制約から測定間隔を 2 秒とした。各々の測定精度を Appendix 3 に示す。

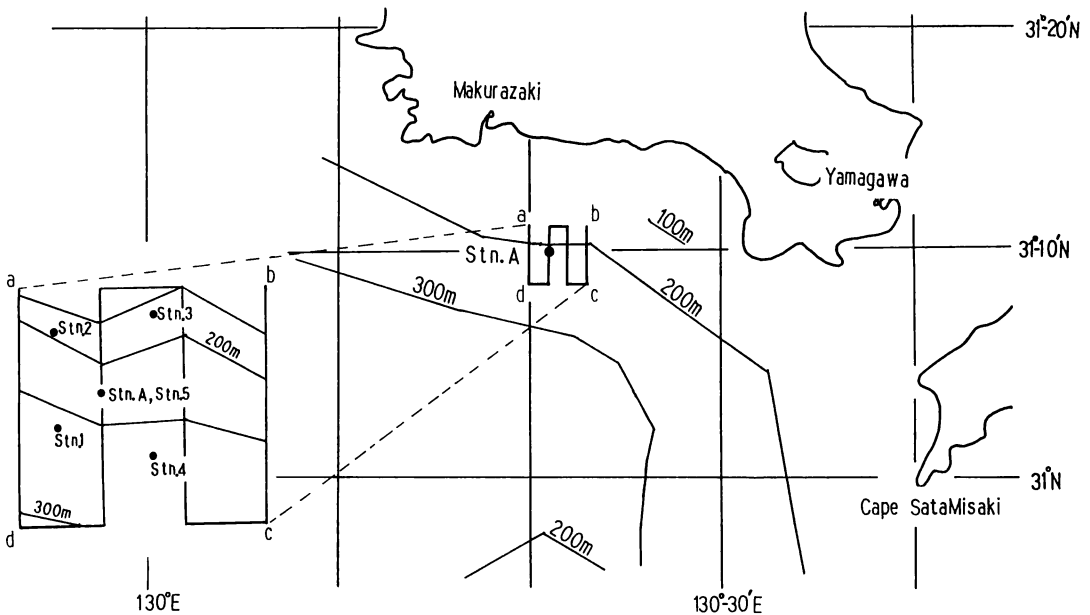


Fig. 1 Map showing the station (Stn. A) for 25 hours benthic current measurements from 13:00 on November 22, 1990. Closed circles (Stns. 1 to 5 in inserted map) indicate the locations of bottom sediment sampling, and thick line the ship track for bathymetric survey.

海底直上に流速計を設置するために、今回新たに本学部機械工作室で作成した鉄棒部分の概要を Fig. 2 に示す。鉄棒は直径 5cm の鉄パイプを組み合わせたもので、一辺の長さが 350 cm の正三角錐の形をしている。鉄棒の底泥への沈み込みを防ぐために、底部の 3 頂点の下 10cm には 30cm 四方の底板を取付けた。また、測得流速値への鉄棒の影響を避けるために、天頂と底部 3 頂点を結ぶ稜線から水平方向に延びる長さ 1m の支持パイプ先端の厚板に、固定バンドを介して流速計を取付けた。流速計の海底からの設置高度の変更は、支持パイプの各辺での固定位置を変えることで可能となるようにしてある。今回の観測では、1 つの稜線に 2 台の流速計を設置し、他の稜線に 1 台設置した。各流速計のセンサー部（突出した球の部分）の底板からの高さは 105cm, 166cm, 277cm である（以下では各流速計を最下部から CM1, CM2, CM3 と呼ぶ）。CM1 を CM2 および CM3 とは異なる稜線に設置したため、CM1 と CM2 間および CM1 と CM3 間の水平距離は各々 405cm, 355cm となっている。

主係留系を海底に固定しておくためのシンカーは音響切離装置のみを介して鉄棒の天頂部と連結されている。設置作業中のシンカーの運動を止めるためにシンカーに直径 2cm, 長さ 4m の丸棒を固定し、その両端は鉄棒底部の下側に接したまま留まるようにした。また、シンカー放棄後の音響切離装置の横揺れを防ぐために、音響切離装置を鉄棒に三方からロープで固定した。音響切離装置を作動させると、音響切離装置下部のリング以下がシンカーとともに鉄棒から離れ、鉄棒・音響切離装置本体・流速計の全体が余剰浮力によって海面に浮上する仕組みになっている。

係留した系の模式図を Fig. 3 に示す。今回の観測は Fig. 2 に示す流速計付鉄棒を設置・回収する初めての試みであった。このため、主係留系の最上部を海面まで延ばすとともに、長さ 600m のグランド・ロープで主係留系と結ばれた予備係留系の最上部を海面まで延ばすことによって、シンカー切り離し動作不良の事態に備えた。鉄棒部の重量が 250kg, 流速計

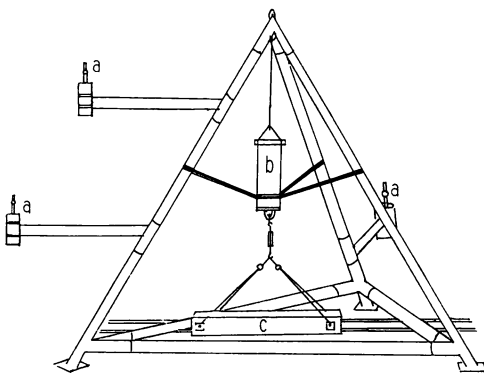


Fig. 2 Schematic of Tripod for benthic current measurements.  
a: Electromagnetic current meter,  
b: Acoustic releaser, c: Sinker.

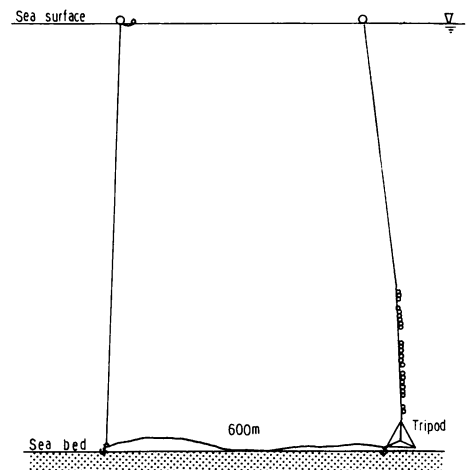


Fig. 3 Mooring design of Tripod for benthic current measurements.

の水中重量が3台合計で60kg, 音響切離装置の重量が20kgの他に, 今回はグランド・ロープの張力変動が直接鉄枠に影響を及ぼさないように, グランド・ロープと鉄枠の間に60kgの重りを設けた。これら合計390kgの海底設置物を浮上させるための浮力材として, 直径40cm (Benthos社製, 浮力25kg)の耐圧ガラス球を21個(総浮力525kg, 余剰浮力135kg)を鉄枠直上に連ねた。これらのガラス球は設置・回収作業の安全性確保のため, 3本の20mのロープによって4群に分けて係留した。主係留系を海底に固定しておくためのシンカーとして長さ1.5m, 水中重量65kgの古レール5本を音響切離装置のみを介して鉄枠部と連結し, 係留期間中の総荷重を190kgと設定した。

1990年11月22日11時00分に主係留系海面ブイの投入を開始し, 11時25分に海底設置部の投入が完了した。11時35分の予備係留系の海面ブイの投入を以て, 全設置作業を完了した。回収は翌23日15時20分に音響切離装置の駆動指令信号発信から開始された。駆動指令信号発信の5分後に鉄枠直上のブイが海面に浮上した。回収作業は, 当初の計画に従って, 予備係留系の海面ブイの揚収, グランド・ロープの揚収, 鉄枠部の揚収, 主係留系の海面ブイの揚収の順で行われた。

### 3. CTD観測結果と粒度分布

Fig. 4にCTD観測から得られた水温・塩分・海水密度( $\sigma_t$ )の鉛直分布を示す。表層の30m以浅は弱い水温逆転層となっているものの40m深まではほぼ等温であって, 40~70mに水温躍層がある。水温躍層下の80~90mで再び等温となり, その下層では深度の増加とともに水温は減少している。他方, 塩分は表層から70m深まで急激に増加しているが, 80~120mではほぼ一様になっている。120m層が塩分極大層となっており, その下では深度の増加とともに減少している。これら水温と塩分の鉛直分布は, 100m以深の海水はその上層の海水とは起源を異にしていることを示唆している。なお, 今回の観測では機材故障のためCTDによる測得塩分値については検定を行っていない。

Fig. 5に当海域の中央粒径値の分布を示す。当海域の中央粒径値( $Md\phi$ )が0.86~2.59 $\phi$ であることから当海域の海底は砂質であるといえる。この図から, 当海域200m以浅部の東側であるStn. 3で中央粒径値が最も大きくなっており, Stn. 4からStn. 2へ(南東角から北西方向へ)舌状に細かい粒子域が張り出しているように見える。

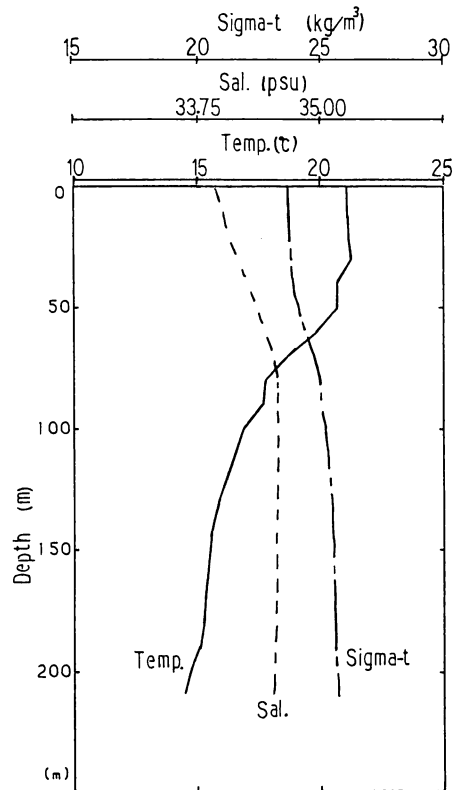


Fig. 4 Vertical profiles of water temperature, salinity, and water density ( $\sigma_t$ ) at the benthic current measurement site on November 22, 1990.

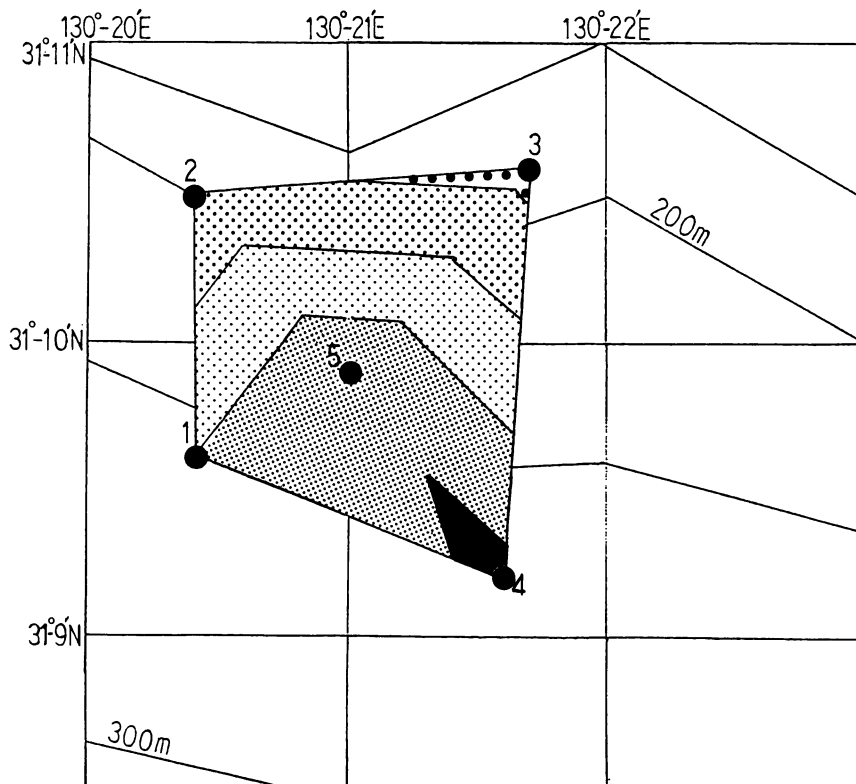


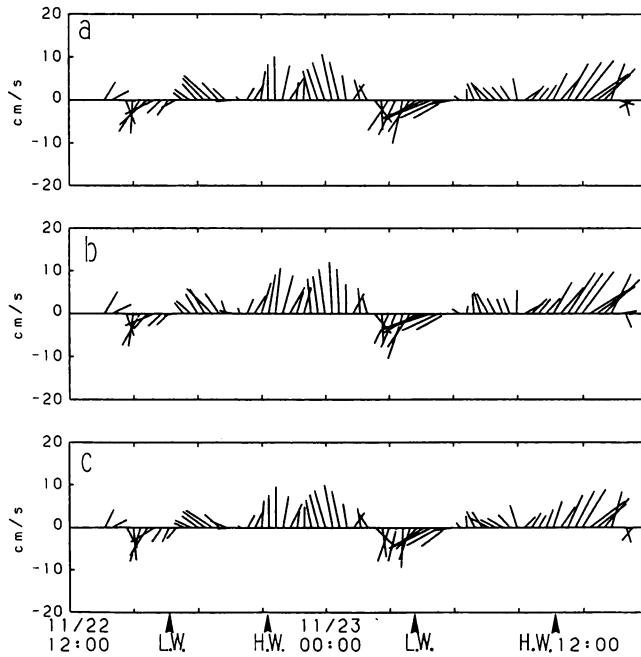
Fig. 5 Distribution of Medium of particle size in PHI unit around the benthic current measurement site.

●●● ~1φ    ⋯⋯⋯ 1~1.5φ    ×××× 1.5~2φ    ▨ 2~2.5φ    ■ 2.5φ~

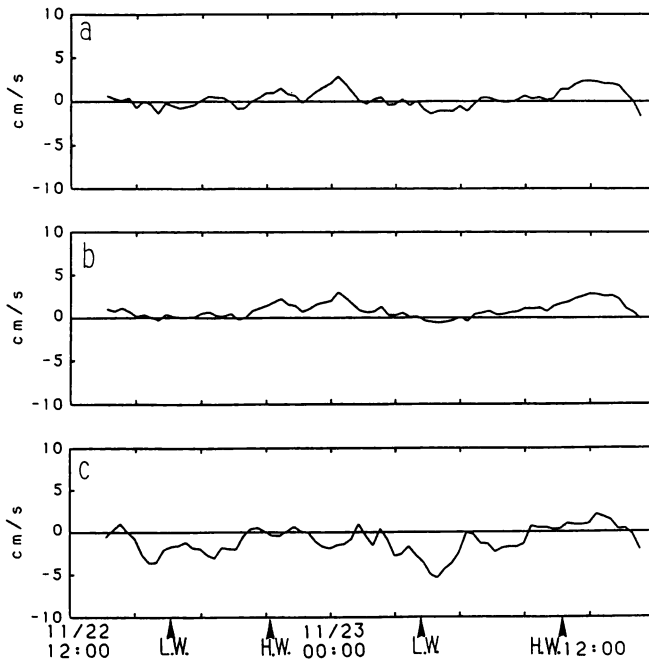
#### 4. 海底直上における流れ

##### 4. 1 潮汐周期変動

Fig. 6a と 6b に海底から 105cm, 166cm, と 277cm で 2 秒毎に測定された瞬間流速の東向き成分  $u$  と北向き成分  $v$  の 20 分間平均値から求めた 11 月 22 日 13 時 20 分から 23 日 (月齢 4.7) 14 時 20 分までの流速スティックダイアグラムと鉛直上向き成分流速  $w$  の 20 分間平均値の時間変動を各々示す。流速スティックダイアグラムでは、図の上方が北である。3 層での流速変動はほぼ同様の変化を示し、11 月 22 日 15 時頃と 23 日 3 時頃に南~南西向きの流れが最大となり、22 日 21 時~24 時には北向きの流れが、また 23 日 12 時頃には北東向きの流れが最大となっている。流速測定期間中の枕崎での干潮は 22 日 16 時 05 分 (潮位 230cm) と 23 日 04 時 15 分 (潮位 154cm) であり、満潮は 22 日 21 時 15 分 (潮位 315cm) と 23 日 10 時 45 分 (潮位 313cm) であった (鹿児島地方気象台潮位月報)。即ち、観測点での流れは枕崎での干潮の約 1 時間前に南~南西向きに最大となり、満潮の 1 時間後に北~北東向きに最大であった。観測点と枕崎とは約 30km しか離れていないことから、観測点での潮位変動は枕崎と同位相と考えると、観測点海底直上での潮汐周期の流速変動と潮位変動とはほぼ同位相であると言える。Fig. 7 に観測された 3 層での 11 月 22 日 13 時 20 分から 23 日 14 時 20 分



**Fig. 6a** Vector stick diagram of 20 minute mean current at 105cm, 166cm, and 277cm above the sea bottom. Northward current is shown by upward line. Times of High and Low Water at Makurazaki are shown by arrows. a)  $z=277\text{cm}$ ; b)  $z=166\text{cm}$ ; and c)  $z=105\text{cm}$ .



**Fig. 6b** Variation of 20 minute mean vertical velocity positive upward. Times of High and Low Water at Makurazaki are shown by arrows. a)  $z=277\text{cm}$ ; b)  $z=166\text{cm}$ ; and c)  $z=105\text{cm}$ .

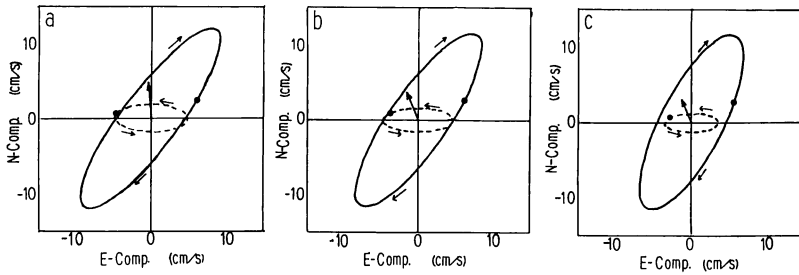


Fig. 7 Tidal current ellipses at 105cm, 166cm, and 277cm above the sea bottom. Full line indicates the semidiurnal component, broken line the diurnal component, and arrow the residual current. Closed circles on each ellipses indicate the current vector at 0:00 on November 23, 1990.  
a)  $z=277\text{cm}$ ; b)  $z=166\text{cm}$ ; and c)  $z=105\text{cm}$ .

までの 20 分間平均流速から最小二乗法で求めた潮流楕円を恒流とともに示す。図中の黒丸は 23 日 0 時を示す。3 層の潮流楕円は大きさと同軸方向および位相はほぼ等しく、半日周潮流が卓越している。その長軸の振幅と方向は各々約 10cm/sec と北東-南西であり、長軸は等深線とほぼ直交している。

#### 4. 2 水平流速に伴う鉛直流速

Fig. 6a と 6b を比較すると、鉛直流速は水平流速成分が北向きの時に上向き、南向きの時に下向きとなる傾向にある。これは測流地点の北側で水深が浅くなっている海底地形のためと考えられる。このことについて以下で検討する。

粘性と地球自転の効果を無視し、水深の変化が十分に小さいと仮定する。また  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸を東向き、北向き、および海底から鉛直上向きを正とし、水深を  $h$ 、等深線の方位角を  $\theta$  とする。このとき、鉛直方向に一様な定常水平流速の  $x$  成分  $u$  および  $y$  成分  $v$  に伴う鉛直上向きの流速成分  $w_b$  は、

$$\begin{aligned} w_b &= [(z-h)/h] [u(\partial h/\partial x) + v(\partial h/\partial y)] \\ &= [(z-h)/h] \cdot a \cdot (-u \cos \theta + v \sin \theta), \end{aligned} \quad (1)$$

で表される。ここで  $a$  は海底勾配の大きさを表す。この式は、海底付近 ( $z \approx 0$ ) では海底に沿って海水が流れるために、等深線に直交する水平流速に伴って流速の鉛直成分が生ずるのに対し、海面付近では水平面に沿って海水が流れるために、鉛直成分を伴わないことに対応している。等深線の方位角  $\theta$  および海底勾配の大きさ  $a$  は海底地形図あるいは観測点周辺の海底地形探査から決定することが可能である。しかし、 $w_b$  に及ぼす局所的な海底地形の影響が不明であり、また (1) 式は理論的に導出したものであるため、この式を検証する必要がある。

さて、方位角  $\theta$  へ向かって正とする流速成分  $V$  は

$$V = -u \cos \theta + v \sin \theta, \quad (2)$$

で表される。今、等深線の方位角  $\theta$  を未知としてすると、鉛直流速  $w$  と (2) 式で変換され



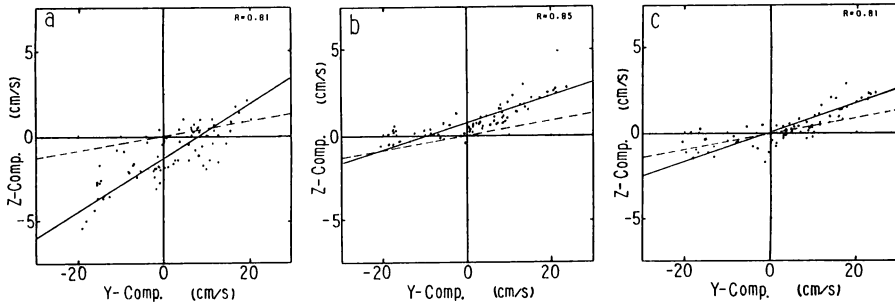


Fig. 8 Scatter diagram between observed vertical velocities (vertical axis) and upsloping horizontal current perpendicular to isobath (horizontal axis). The thick line represents the regression line determined by least square method, and broken line the theoretical line of Eq. (1) for bathymetric gradient of 0.047. a)  $z=277\text{cm}$ ; b)  $z=166\text{cm}$ ; and c)  $z=105\text{cm}$ .

た水平流速の方位角  $\theta$  向きの成分  $V$  との共分散  $\overline{Vw}$  は  $\theta$  が等深線の方位角に等しいときに最大となることが推定されるので,

$$\partial \overline{Vw} / \partial \theta = 0,$$

すなわち,

$$\theta = \tan^{-1} (-\overline{vw} / \overline{uw}), \quad (3)$$

として, 等深線の方位角  $\theta$  を流速測定値から求めることができる。ここで,  $\overline{\quad}$  は観測全期間の平均を表す。CM1, CM2, CM3の3層での流速測定値から(3)式を用いて求めた方位角  $\theta$  は各々 157, 112, 121度となった。また  $\overline{vw}$  と  $\overline{uw}$  の各々の3層平均値を用いて(3)式から求めた3層平均方位角は 131度となった。これらの値は Fig. 1 に示した観測点周辺の海底地形探査から求めた係留観測点西側の等深線の方位角 (120度) とほぼ等しい。

(2) 式で  $\theta=131$ 度として定義された等深線に直交する成分  $V$  と実際に観測された鉛直流速  $w$  の20分間平均値との共分散を Fig. 8 に示す。図中の直線は最小二乗法で求めた  $w$  の最適推定式であり, 破線は観測点周辺の海底地形探査から求めた海底勾配の大きさ  $a$  の値 (0.047) を用いて (1) 式から推定した鉛直流速である。観測された鉛直流速  $w$  の20分間平均値と等深線に直交する水平流速成分との間には高い相関があるが, 図中の実線の勾配は破線の勾配の約2倍となっている。このことは, 20分間平均鉛直流速と20分間平均水平流速とは局所的な海底地形を通して密接に結び付いていることを示唆している。

#### 4.3 海底エクマン境界層

Fig. 9 に3層で得た流速値の各々の22日13時20分からの25時間平均流ベクトルを示す。Yasuda and Zimmerman<sup>7)</sup>は潮汐流, 鉛直粘性, 地球回転および海底地形の効果による潮汐残差流の生成機構について理論的研究を詳細に行い, 海底境界層内で発達する潮汐残差流の大きさと向きが海底からの高さによって大きく変化することを示した。Fig. 9 は彼らの理論によって一部は説明されるものと思われる。しかし, 観測された平均流には潮汐残差流の

他に、観測海域周辺の中規模海水流動構造の一部としての恒流成分も含まれている。今回の観測期間はわずか25時間であって、潮汐残差流と中規模海水流動に伴う恒流成分とを分離することはできない。このため、Yasuda and Zimmerman (1986) の理論の結果と今回の観測結果とを直接比較することはできない。25時間平均流の生成・維持機構が何であれ、エクマン境界層が海底付近で発達したために25時間平均流の大きさと向きが海底からの高度によって大きく変化したものと考えて、以下で検討を加える。

今、25時間平均流は定常流であって、海底は平坦であると仮定し、非線形項と水平粘性項を無視すると、海底付近の粘性境界層内の運動方程式は次式で表される。

$$-fv = -fv_g + \nu_v \partial^2 U / \partial z^2, \quad (4)$$

$$fu = fu_g + \nu_v \partial^2 V / \partial z^2. \quad (5)$$

ここで、 $u_g$  と  $v_g$  はそれぞれエクマン境界層から十分離れたところでの地衡流の x 成分 (東向きが正) と y 成分 (北向きが正) であり、 $u$  と  $v$  はエクマン境界層の内外での定常流の x 成分と y 成分である。また、 $z$  は海底から鉛直上向きの距離、 $\nu_v$  は鉛直方向に一定とした鉛直渦動粘性係数、 $f$  はコリオリ係数である。

この2式を

$$z = 0 \text{ で } u = 0, \quad v = 0,$$

$$z = +\infty \text{ で } u = u_g, \quad v = v_g,$$

の境界条件の下で解くと、

$$u = u_g - u_g \exp(-z/h_B) \cos(z/h_B) - v_g \exp(-z/h_B) \sin(z/h_B), \quad (6)$$

$$v = v_g - v_g \exp(-z/h_B) \cos(z/h_B) + u_g \exp(-z/h_B) \sin(z/h_B), \quad (7)$$

という解が得られる。ここで、 $h_B = (2\nu_v/f)^{1/2}$  はエクマン境界層の厚さである。

また、摩擦応力  $F$  の x 成分  $F_x$  と y 成分  $F_y$  は各々

$$F_x = \rho \nu_v \partial u / \partial z, \quad (8)$$

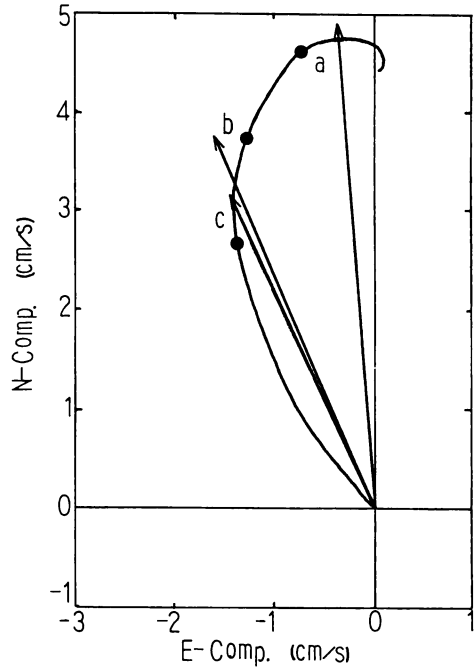


Fig. 9 25 hour mean current velocities at 105cm, 166cm, and 277cm from the sea bottom. The line shows the theoretical hodogram estimated from bottom Ekman Layer model for the value of 0.90  $cm^2/sec$ , the most optimum value for explaining the observed current profile. a)  $z=277cm$ ; b)  $z=166cm$ ; and c)  $z=105cm$ .

$$F_y = \rho \nu_v \partial v / \partial z, \quad (9)$$

で表される。 $\nu_v$ は1~100cm<sup>2</sup>/sec程度と言われており、 $f = 10^{-4} \text{sec}^{-1}$ とすると、 $h_B$ は1.4~14mである。したがって、今回設置した流速計はすべてエクマン境界層内にあったと予想される。 $u_g$ と $v_g$ は観測されていない未知数であるが、 $\nu_v$ の値と高度 $z = z_1$ での流速測定値( $u_1, v_1$ )とが与えられれば、(6)式と(7)式との連立方程式から $u_g$ と $v_g$ の値を求めることができる。

Fig. 9中の実線は3層での測得平均流速値の鉛直平均値( $z_1 = 178.5 \text{cm}$ で $u_1 = -1.245 \text{cm/sec}$ ,  $v_1 = 3.860 \text{cm/sec}$ )を基準として(6)式と(7)式から得られる $u_g$ と $v_g$ の値に対応する3層での流速の各成分( $u, v$ )の理論値と観測値との差の2乗平均が最も小さくなるように選ばれた $\nu_v$ の値(0.90cm<sup>2</sup>/sec)について得られた海底エクマン螺旋である。なお、このとき $h_B$ は155cm、 $u_g$ と $v_g$ は各々0.04cm/sec, 4.42cm/secであった。この図より、海底直上の平均流の大きさと向きとの海底からの高度による大きな違いが海底エクマン層理論では説明できることが判明した。CTD観測で得られた海底直上での $\rho$ の値(1.0257 g/cm<sup>3</sup>)を用いて、 $\nu_v$ を上で求めた0.90cm<sup>2</sup>/secとすると、(8)式と(9)式から求めた日平均流による海底( $z = 0$ )での摩擦力の大きさは0.037 dyne/cm<sup>2</sup>でその向きは北西向きとなる。

## 5. 乱流剪断レイノルズ応力

測定された流速変動から乱流剪断レイノルズ応力を求めるためには測得流速( $u, v, w$ )を平均流と乱流成分に分離する必要がある。流速の20分平均値を平均流成分( $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ )、流速の測定値からその前後の20分間平均値を差し引いた20分周期以下の短周期変動を乱流成分( $u', v', w'$ )とすると、平均流成分と乱流成分の各々は

$$\begin{aligned} \bar{u} &= [u]_{20M}, \\ \bar{v} &= [v]_{20M}, \\ \bar{w} &= [w]_{20M}, \\ u' &= u - [u]_{20M}, \\ v' &= v - [v]_{20M}, \\ w' &= w - [w]_{20M}, \end{aligned}$$

で定義される。ここで、 $u, v, w$ は $x$ 軸と $y$ 軸をそれぞれ等深線の方向および等深線に直交して浅くなる方向を正( $\partial h / \partial x = 0, \partial h / \partial y < 0$ )とし、 $z$ 軸を鉛直上向きを正とした場合の、流速の $x, y, z$ 成分である。また、 $[ ]_{20M}$ は $[ ]$ 内の物理量の20分間移動平均値を表す。

乱流の強さは潮流によって変化すると考えられるので、流速変動の乱流成分による $x$ 成分と $y$ 成分の運動量の鉛直輸送量の20分間平均値である乱流剪断レイノルズ応力( $s_{xz}, s_{yz}$ )は25時間平均値( $t_{xz}, t_{yz}$ )と変動成分( $t'_{xz}, t'_{yz}$ )とに分離できる。すなわち、

$$\begin{aligned} s_{xz} &= -[u' w']_{20M} \\ &= t_{xz} + t'_{xz}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} S_{yz} &= -[v'w']_{20M} \\ &= t_{yz} + t'_{yz}, \end{aligned} \quad (11)$$

となる。ここで、

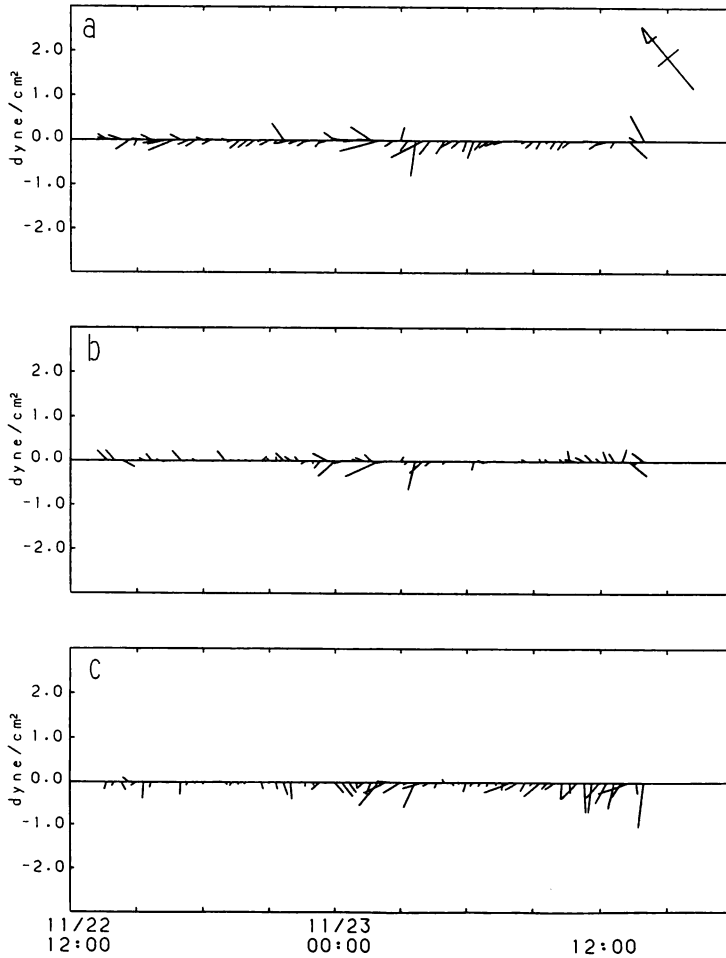
$$t_{xz} = [S_{xz}]_{25H}, \quad (12)$$

$$t_{yz} = [S_{yz}]_{25H}, \quad (13)$$

$$t'_{xz} = S_{xz} - [S_{xz}]_{25H}, \quad (14)$$

$$t'_{yz} = S_{yz} - [S_{yz}]_{25H}, \quad (15)$$

である。 $[ ]_{25H}$ は  $[ ]$ 内の量の25時間平均を表す。



**Fig. 10** Stick diagram of 20 minute mean turbulent Reynolds shear stress at 105cm, 166cm, and 277cm from the sea bottom. Upward is the direction of y-axis, positive towards upslope direction perpendicular to isobath. a)  $z=277\text{cm}$ ; b)  $z=166\text{cm}$ ; and c)  $z=105\text{cm}$ .

Fig. 10 に  $z = 277\text{cm}$ ,  $166\text{cm}$  および  $105\text{cm}$  での 20 分間平均乱流剪断レイノルズ応力 ( $s_{xz}$ ,  $s_{yz}$ ) の時間変動をスティックダイアグラムで示す。図の上方が  $y$  軸が正の方向 (等深線に直交して浅くなる方向) である。Fig. 10 と Fig. 6 とを比較すると, 20 分間平均剪断レイノルズ応力 ( $s_{xz}$ ,  $s_{yz}$ ) の大きさの時間変動は水平流速変動とほぼ対応して, 流れが強いときに大きくなる傾向にあるのに対し, 剪断レイノルズ応力の向きと潮流の向きとの間の相関は低い。20 分間平均レイノルズ剪断応力の大きさの 25 時間平均  $[(s_{xz}^2 + s_{yz}^2)^{1/2}]_{25H}$  は  $z = 277\text{cm}$ ,  $166\text{cm}$  および  $105\text{cm}$  で各々  $0.60$ ,  $0.36$ ,  $0.53\text{cm}^2/\text{sec}^2$  ( $1\text{cm}^2/\text{sec}^2$  は約  $1\text{dyne}/\text{cm}^2$  に対応する) とほぼ等しい。また, 20 分間平均レイノルズ剪断応力の 25 時間ベクトル平均値 ( $t_{xz}$ ,  $t_{yz}$ ) の向きと大きさは  $z = 277\text{cm}$  で  $252$  度と  $0.47\text{cm}^2/\text{sec}^2$ ,  $z = 166\text{cm}$  で  $282$  度と  $0.21\text{cm}^2/\text{sec}^2$ , および  $z = 105\text{cm}$  で  $205$  度と  $0.43\text{cm}^2/\text{sec}^2$  と大きさはほぼ等しいが, 向きは海底からの高さによって大きく異なる。

## 6. 鉛直渦動粘性係数

平坦な底面上の定常鉛直 2 次元境界層理論では, 分子粘性にならって, 剪断レイノルズ応力による運動量の鉛直輸送量を鉛直渦動粘性係数  $\nu$  を用いて,

$$s_{xz} = \nu \partial \bar{u} / \partial z, \quad (16)$$

または,

$$s_{yz} = \nu \partial \bar{v} / \partial z, \quad (17)$$

で表す。Fig. 11 に海底からの高さ  $z_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) での 20 分間平均流速の  $x$  成分  $\bar{u}_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) または  $y$  成分  $\bar{v}_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) と, 20 分間平均の剪断レイノルズ応力の  $x$  成分  $s_{xz}^i$  または  $y$  成分  $s_{yz}^i$  の実測値を用いて得られる  $z_{i+1/2} = 135.5\text{cm}$  と  $221.5\text{cm}$  ( $i = 1, 2$ ) での乱流レイノルズ剪断応力と流速の鉛直シアアの各々の 20 分間平均値の共分散 ( $\partial \bar{u} / \partial z$ ,  $s_{xz}^i$ ) $^{i+1/2}$  と ( $\partial \bar{v} / \partial z$ ,  $s_{yz}^i$ ) $^{i+1/2}$  を各々示す。ここで,

$$\begin{aligned} s_{xz}^{i+1/2} &= (s_{xz}^i + s_{xz}^{i+1}) / 2, \\ s_{yz}^{i+1/2} &= (s_{yz}^i + s_{yz}^{i+1}) / 2, \\ (\partial \bar{u} / \partial z)^{i+1/2} &= (\bar{u}_{i+1} - \bar{u}_i) / (z_{i+1} - z_i), \\ (\partial \bar{v} / \partial z)^{i+1/2} &= (\bar{v}_{i+1} - \bar{v}_i) / (z_{i+1} - z_i), \end{aligned}$$

である。

原点と図中の各点を結ぶ直線の勾配が 20 分間平均鉛直渦動粘性係数  $\nu$  に対応する。この図は流速の鉛直シアアの 20 分間平均値と乱流レイノルズ剪断応力との間では (16) または (17) 式で表される比例関係が成立せずに,  $\nu$  が見かけ上は負になる場合が多いことを示している。  $x$  成分の流速の鉛直シアアの 20 分間平均値と  $s_{xz}$  から (16) 式を用いて求めた鉛直渦動粘性係数  $\nu$  の 25 時間平均は上層 ( $z = 221.5\text{cm}$ ) では  $86.3\text{cm}^2/\text{sec}$ , 下層 ( $z = 135.5\text{cm}$ ) では  $15.2\text{cm}^2/\text{sec}$  となった。また,  $y$  成分の鉛直シアアの 20 分間平均値と  $s_{yz}$  から (17) 式を用いて求めた  $\nu$  の 25 時間平均は上層では  $8.7\text{cm}^2/\text{sec}$ , 下層では  $-19.8\text{cm}^2/\text{sec}$  となった。

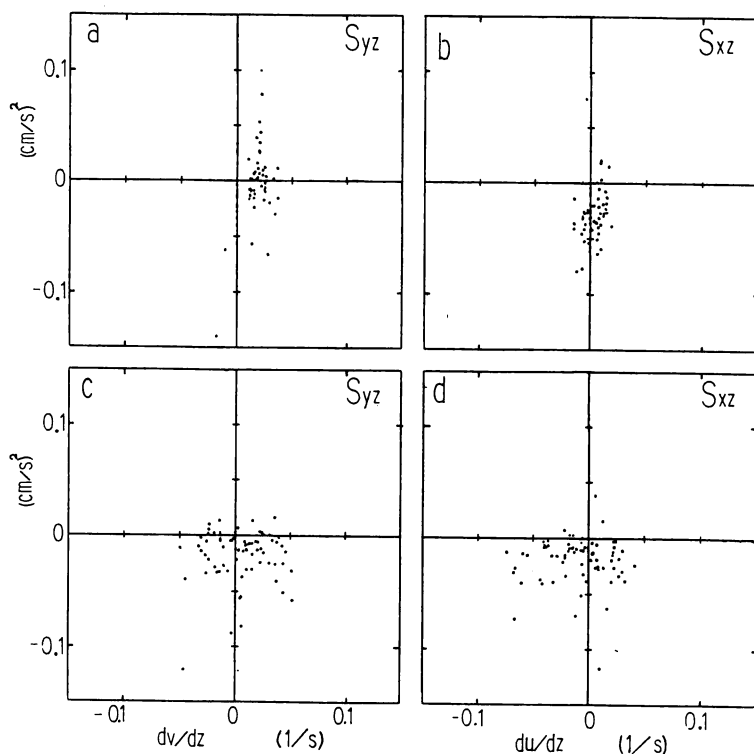


Fig. 11 Scatter diagram between 20 minutes means of vertical shear of velocity and turbulent Reynolds shear stress.  
 a) the y-component at  $z=135.5\text{cm}$ ; b) the x-component at  $z=221.5\text{cm}$ ; c) the y-component at  $z=221.5\text{cm}$ ; and d) the x-component at  $z=221.5\text{cm}$ .

鉛直渦動粘性係数が負となることはその物理的意味と矛盾する。このことは海底が平坦でないために乱流の鉛直成分の一部に流速の水平成分に誘起されたものが含まれ、 $s_{xz}$  と  $s_{yz}$  が必ずしも 20 分間平均流速の鉛直シアーに対応しないことを示唆している。また、 $\bar{u}$  と  $\bar{v}$  が潮汐周期変動していて定常ではないことおよび  $\bar{w}$  に海底勾配の影響が含まれていて必ずしも零ではないことより、平坦な底面上の定常鉛直 2 次元境界層理論で採用した仮定が観測現場では成立していないことも原因の一つと考えられる。

25 時間平均流に関する鉛直渦動粘性係数は (16) または (17) 式と同様にして

$$\nu = T_{xz} / [\partial u / \partial z]_{25H}, \quad (18)$$

または、

$$\nu = T_{yz} / [\partial v / \partial z]_{25H}, \quad (19)$$

として見積もることができる。 $T_{xz}$  と  $T_{yz}$  は平均時間を 25 時間とした場合の剪断レイノルズ応力であって、各々は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} T_{xz} &= -[(u - [u]_{25H}) \cdot (w - [w]_{25H})]_{25H} \\ &= \tau_{xz} + t_{xz}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} T_{yz} &= -[(v - [v]_{25H}) \cdot (w - [w]_{25H})]_{25H} \\ &= \tau_{yz} + t_{yz}, \end{aligned} \quad (21)$$

ここで  $\tau_{xz}$  と  $\tau_{yz}$  は潮流剪断応力の  $x$ ,  $y$  成分であって, 各々

$$\begin{aligned} \tau_{xz} &= -[\bar{u} \cdot \bar{w}]_{25H} + [\bar{u}]_{25H} \cdot [\bar{w}]_{25H}, \\ \tau_{yz} &= -[\bar{v} \cdot \bar{w}]_{25H} + [\bar{v}]_{25H} \cdot [\bar{w}]_{25H}, \end{aligned}$$

である。3層で得た各剪断応力と鉛直渦動粘性係数の値を Table 1 に示す。潮流剪断応力の  $x$  成分は乱流剪断レイノルズ応力と同程度の大きさであるが,  $y$  成分は非常に大きな負の値になっている。これは第 4. 2 節に示したように,  $\bar{v}$  と  $\bar{w}$  が強い正の相関をもって変動している為である。海底傾斜のために潮流剪断応力の  $y$  成分が非常に大きな負の値になっていることによって, (19) 式から得られた鉛直渦動粘性係数は負になっている。他方, 潮流剪断応力の  $x$  成分は海底傾斜の影響を大きくは受けず, (18) 式から得られた鉛直渦動粘性係数は上層で 27cm<sup>2</sup>/sec, 下層で 105cm<sup>2</sup>/sec と一般に言われている範囲内である。

**Table 1** 25 hours mean current velocities, turbulent Reynolds shear stresses  $t_{xz}$  and  $t_{yz}$ , and tidal shear stresses  $\tau_{xz}$  and  $\tau_{yz}$ , measured at three heights shown in the first column, and the total shear stresses  $T_{xz}$  and  $T_{yz}$ , and vertical eddy kinematic viscosity  $\nu$  estimated at the center of each measurement heights.

along-isobath component						
Height	u	$t_{xz}$	$\tau_{xz}$	$T_{xz}$	$\partial u / \partial z$	$\nu$
cm	cm/sec	cm <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>	sec <sup>-1</sup>	cm <sup>2</sup> /sec
105	-3.187	-0.176	-1.727	-1.903	-	-
135.5		-0.184	-0.758	-0.942	-0.0089	105.4
166	-3.732	-0.192	0.212	0.020	-	-
221.5		-0.309	0.351	0.042	0.0016	26.6
277	-3.557	-0.426	0.490	0.064	-	-
across-isobath component						
Height	v	$t_{yz}$	$\tau_{yz}$	$T_{yz}$	$\partial v / \partial z$	$\nu$
cm	cm/sec	cm <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>	sec <sup>-1</sup>	cm <sup>2</sup> /sec
105	1.529	-0.357	-13.055	-13.412	-	-
135.5		-0.164	-10.735	-10.899	0.0051	-2137.1
166	1.838	0.030	-8.415	-8.385	-	-
221.5		-0.067	-8.995	-9.062	0.0146	-622.1
277	3.455	-0.164	-9.574	-9.738	-	-

## 7. おわりに

海底境界層内での剪断レイノルズ応力と底泥の粒度分布との対応を種々の海域で調べる手始めとして、1990年11月に九州南部陸棚縁辺の水深220mの地点の海底上105cm, 166cm, 277cmで1昼夜の間、電磁流速計で2秒毎に水平2成分と鉛直成分の流速変動を測定するとともに、周辺で底泥を採集した。得られた底泥の粒度分布資料と流速変動資料を解析して以下の結果を得た。

- 1) 流速観測点周辺の底泥の中央粒径値から、当海域の底質は砂質であると言える。中央粒径値の分布図は細粒子域の南東角から北西方へ舌状の張り出しを示唆している。
- 2) 20分平均鉛直流速の変動は潮汐周期で変動するとともに、海底傾斜の影響を強く受けて、等深線に直交する向きの水平流速変動と高い相関を示す。
- 3) 25時間平均恒流の大きさと向きの深さ方向への変化は鉛直渦動粘性係数を $0.90\text{cm}^2/\text{sec}$ とした定常で無限に広い平坦な海底におけるエクマン境界層モデルで良く説明でき、恒流の鉛直シアーによる海底での剪断摩擦応力は北西向きに $0.037\text{dyne}/\text{cm}^2$ と見積もられた。
- 4) 海底傾斜および潮流に伴う非定常性の影響による測定誤差が大きいため、水平流速の鉛直シアーの20分間平均値と乱流剪断レイノルズ応力とから求めた鉛直渦動粘性係数は負となる場合が多いことが判明した。
- 5) 等深線に直交する向きの成分の剪断応力は海底傾斜による鉛直流速変動の影響を強く受けるのに対し、等深線に平行する向きの成分の剪断応力は海底傾斜の影響をあまり受けないことが示された。剪断応力と水平流速の鉛直シアーの各々の等深線に平行する向きの成分の25時間平均値から求めた鉛直渦動粘性係数は上層 ( $z = 221.5\text{cm}$ ) で $27\text{cm}^2/\text{sec}$ 、下層 ( $z = 135.5\text{cm}$ ) で $105\text{cm}^2/\text{sec}$ と見積もられた。

海底エクマン境界層モデルから求めた25時間平均流による海底での摩擦力の向きは流速観測点周辺の海底粒度分布で細粒子域が南東角から北西方へ舌状に張り出ししているのに対応しているように見える。このことは、日平均流についての海底エクマン境界層理論による海底摩擦力が中央粒径値の分布を説明できることを意味しているが、上流側で中央粒径値が小さくなっている点を説明できない。

剪断応力(潮流応力と乱流レイノルズ応力の和)と水平流速の鉛直シアーの等深線に平行する向きの成分の各々の25時間平均値から求めた鉛直渦動粘性係数は上層で $27\text{cm}^2/\text{sec}$ 、下層で $105\text{cm}^2/\text{sec}$ と見積もられた。これらの鉛直渦動粘性係数の実測値は従来から言われている範囲内( $1\sim 100\text{cm}^2/\text{sec}$ )にはあるが、海底エクマン境界層モデルを用いて25時間平均流速の鉛直分布から得た鉛直渦動粘性係数の値( $0.90\text{cm}^2/\text{sec}$ )に比べて非常に大きな値となっている。この矛盾は今回採用したエクマン境界層理論が平坦で無限に広い海底上の定常流を仮定しているのに対し、剪断レイノルズ応力の実測値には流れの非定常性および海底傾斜の影響が含まれていることによるものと思われる。

今後、乱流の鉛直成分から海底傾斜および潮流に伴う非定常性の影響を除去することによって、流速測定値から鉛直渦動粘性係数を直接的に評価する方法を開発する予定である。



## 要 約

海底境界層内での剪断レイノルズ応力と底泥の粒度分布との対応を種々の海域で調べる手始めとして, 1990年11月に九州南部陸棚縁辺の水深220mの地点の海底上105cm, 166cm, 277cmで1昼夜の間, 電磁流速計で2秒毎に水平2成分と鉛直成分の流速変動を測定するとともに, 周辺で底泥を採集した。当海域の底質は砂質であり, 中央粒径値の分布図は細粒子域の南東角から北西方へ舌状の張り出しを示唆していた。20分平均鉛直流速の変動は海底傾斜の影響を受けて水平流速変動によって引き起こされることが示された。25時間平均恒流の大きさと向きの深さ方向への変化は鉛直渦動粘性係数を $0.90\text{cm}^2/\text{sec}$ とした海底エクマン境界層モデルで良く説明でき, 恒流の鉛直シアーによる海底での剪断摩擦応力は北西向きに $0.037\text{dyne}/\text{cm}^2$ と見積もられた。他方, 等深線に平行する向きの成分の剪断レイノルズ応力と水平流速の鉛直シアーの各々の25時間平均値から求めた鉛直渦動粘性係数は上層で $27\text{cm}^2/\text{sec}$ , 下層で $105\text{cm}^2/\text{sec}$ と見積もられた。

## 謝 辞

本研究は1990年11月20日から11月30日まで行われた「かごしま丸」平成2年度第11次航海の期間中に行われた。観測作業と資料解析に貴重な助言を寄せられた九州大学応用力学研究所今脇資郎教授と, 資料解析について御助言戴いた鹿児島大学水産学部茶圃正明教授に深い感謝の意を表します。また, 観測作業に協力していただいた「かごしま丸」乗組員, 水産学部乗船実習生, ならびに鹿児島大学工学部前田明夫教授と山城徹助手に御礼申し上げます。

## 文 献

- 1) 川名吉一郎 (1986): 底層流の測定, 「沿岸環境調査マニュアル<底質・生物篇>」, 恒星社厚生閣, 東京。
- 2) 加賀美英雄・石奉 出 (1986): 深海底における底層流動と海底堆積物の挙動について—底層あらしとシルトの最頻値—, 日本海洋学会誌, 第42巻, 308-318。
- 3) Williams III, A. J., J. S. Tochko, R. L. Koehler, W. D. Grant, T. F. Gross and C. V. R. Dunn (1987): Measurement of turbulence in the oceanic bottom boundary layer with an acoustic current meter array. *J. Atmos. and Oceanic Tech.*, 4, 312-327.
- 4) Grant, W. D., A. J. Williams III and S. M. Glenn (1984): Bottom stress estimates and their prediction on the northern California continental shelf during CODE-1: The importance of wave-current interaction. *J. Physical Oceanogr.*, 14, 506-527.
- 5) Gross, T. F., A. J. Williams III and W. D. Grant (1986): Long-term in situ calculations of kinetic energy and Reynolds stress in a deep sea boundary layer. *J. Geophysical Res.*, 91 (C7), 8461-8469.
- 6) Grant, W. D. and O. S. Madsen (1986): The continental-shelf bottom boundary layer. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 18, 265-305.
- 7) Yasuda, H. and J. T. F. Zimmerman (1986): Tide induced residual currents with Stokes and Ekman layers over an undulatory sea floor. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 42, 276-293.

**Appendix 1** Results of the CTD observation at the mooring site for near-bottom current measurement.

Stn. Name: Stn. A  
 Date: Nov. 23, 1991 Time: 08:45 JST  
 Lat. : 31-09.47 N Lon. : 130-21.17 E  
 Depth: 220m

CTD Prs.	CTD Temp.	CTD Sal.	Sigma-t	CTD Prs.	CTD Temp.	CTD Sal.	Sigma-t
dbar	deg. C	PSU	kg/m <sup>3</sup>	dbar	deg. C	PSU	kg/m <sup>3</sup>
0	21.093	33.933	23.679	110	16.596	34.570	25.299
10	21.109	34.021	23.741	120	16.267	34.571	25.375
20	21.154	34.069	23.766	130	15.880	34.565	25.459
30	21.300	34.167	23.800	140	15.659	34.558	25.504
40	21.271	34.270	23.886	150	15.531	34.556	25.532
50	20.716	34.359	24.104	160	15.459	34.555	25.547
60	19.896	34.448	24.389	170	15.353	34.554	25.569
70	18.730	34.528	24.749	180	15.304	34.549	25.577
80	17.787	34.569	25.014	190	15.113	34.538	25.611
90	17.699	34.569	25.035	200	14.713	34.532	25.693
100	16.915	34.569	25.223	210	14.481	34.518	25.732

**Appendix 2** Results of particle size distribution of bottom sediments.

Stn.	Lat.	Long.	Depth	Md $\phi$	M $\phi$	$\sigma\phi$	$\alpha\phi$
	N	E	m				
1	31-09.6	130-20.4	259	2.02	2.155	1.501	0.210
2	31-10.5	130-20.4	178	1.10	1.390	1.266	0.451
3	31-10.6	130-21.7	165	0.85	0.956	0.856	0.192
4	31-09.2	130-21.7	260	2.60	2.533	1.425	0.045
5	31-09.9	130-21.0	220	2.41	2.303	1.766	0.105

**Appendix 3** Range, Accuracy, and precision of electromagnetic current meter Model ACM4M-5 manufactured by ALEC DENSHI Co., Ltd.

Component	Range	Accuracy	Precision
Velocity	0 - $\pm 250$ cm/sec	$\pm 2\%$ or 1 cm/sec	0.12 cm/sec
Orientation	0 - 360°	$\pm 2^\circ$	0.2°
Inclination	0 - 60°	$\pm 1^\circ$	0.03°
Temperature	-5 - 40°C	$\pm 0.05^\circ\text{C}$	0.02°C