



Title	海洋微細乱流観測のためのマルチ・スケール・プロファイラー
Author(s)	金成, 誠一
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 54, 1-13
Issue Date	1990-08-31
DOI	10.14943/gbhu.54.1
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/14210">http://hdl.handle.net/2115/14210</a>
Type	bulletin (article)
File Information	54_p1-13.pdf



[Instructions for use](#)

## 海洋微細乱流観測のためのマルチ・スケール・プロファイラー

金 成 誠 一

北海道大学理学部地球物理学教室

(1990年4月3日受理)

### Multi-Scale Profiler (MSP) for Measurement of Turbulence in the Upper Ocean

Sei-ichi KANARI

Department of Geophysics, Faculty of Science

Hokkaido University

(Received APRIL 3, 1990)

A free-fall multi-scale profiler (MSP) has been developed which can measure both of microscale and fine-scale velocity shear simultaneously. The measurable fine-scale shear nearly corresponds to the mean gradients over the vertical scale of a few meters. The MSP also can measure temperature gradients, conductivity gradients, mean profiles of temperature and conductivity. The MSP is designed to perform profiling to depths of 500 m, with fall speed of about 70 cm/s. Retrieval of the instrument is accomplished by the 700 m Kevlar string of 3 mm diameter, through a powered portable winch, after droppable weight has been released at a preset depth by a mechanical rupture disk.

#### 1. は じ め に

海洋における乱流場の構造を明かにする上で、粘性散逸率の測定は極めて重要であるが、外洋での粘性散逸率の計測の困難さのために、このような測定が行われ出したのは、1970年代に入ってからである。当初は水温の鉛直微細構造という観点から、微細水温傾度プロファイルを計測するための測器がCoxら (Cox et al., 1969) によって開発され、種々の海域の微細構造研究に適用された。その後、次第に応答速度の早い水温センサーに移行するようになり、測定対象がマイクロ・スケール (鉛直スケールで1 m以下数ミリメートルまで) にまで及び、極微細水温傾度スペクトルから粘性散逸率を評価しようという試みが行われるようになった (Caldwell, et al., 1975; Osborn, 1973)。

水温マイクロ・ストラクチャーの鉛直波数レンジは、一般に、流速シアのそれに比べて若干高い領域を占める。そのために、水温傾度測定によって粘性散逸率を評価するには極めて高レスポンス（数十サイクル）の水温センサーが必要である。現在、補正なしで Batchelor スペクトルの高周波領域まで完全にカバーし得るほどに高応答の水温センサーは存在せず、多くの場合、高周波側のパワー欠損を補正フィルターで補うことによって Batchelor スペクトルを求めることが行われた (Dillon and Caldwell, 1980 ; Oakey and Elliott, 1980)。このような方法は、ある程度成功し水温傾度スペクトルから粘性散逸率を評価する研究が 1970 年代に数多く行われた (Osborn, 1973 ; Gregg, 1976 ; Caldwell et al., 1980 ; Caldwell et al., 1981 ; Dillon, 1982 ; Caldwell, 1983)。

しかしながら、水温計測から散逸率を求めるには、きわめて高応答のセンサーが必要であるばかりでなく、水温に反映された極微細乱流場は必ずしもその場の乱流状態を反映したものではなく、多くの場合、単なる“Fossil” (乱流痕跡) である可能性が高い (Gibson, 1982) という指摘がなされた。こうした指摘を待つまでもなく、すでに水温傾度測定にかわる方法として、マイクロ・スケールの流速シアを測定するプローブの開発が Siddon によって行われ、Elliott and Oakey (1976) らによって最初の Free-Fall 型シア・プロファイラーが実現することになった。この型の測器は、その後、こうしたマイクロ・スケール乱流計測の主流となり、今日に至っている。

我国では、この方面の研究に対する要請がさほど強くなったためか、こうした測器の開発は殆ど行われていなかったが、昭和 62 年度から始まった気候変動国際協同研究計画の中の OMLET (Ocean Mixed Layer Experiment) 計画の一環として、混合層近傍の乱流過程の研究を推進する必要にせまられ、極微細乱流計測のための測器 (MSP) を開発することになった (金成, 1988)。現在、この測器は OMLET 計画及び JAPACS の一部で使われ、有用なデータを集積しつつある。今後、更に改善すべき点も明らかになり、これまでの観測経験を考慮したより高性能型の MSP の製作が現在進められているが、本稿では、そうした改良とは関わりのない基本原理及び性能について述べ、この測器による計測データの一例を紹介する。

## 2. シア・プローブ

Siddon が水中用に開発したシア・プローブは、本来は、水路中でシア・プローブの軸に平行に流れる平均流中の流軸に直角な変動成分を測定するために開発されたものであるが、これをフリー・フォール型ゾンデに適用したものが、現在、米国・カナダ等で用いられている。この型のプローブは、円錐型にモールドされたプローブ先端内部にプローブ中心軸に平行に埋め込まれた細長いバイモルフ板により、プローブ先端部にかかるベンディング・シア・ストレスをバイモルフ歪電圧として検出しようというものである。

このバイモルフ型プローブは、高周波特性が良好である。しかし、D. C. 成分あるいはその近傍の低周波成分は測定対象としていないようである。

著者は、バイモルフのかわりに、一端固定の金属弾性板の両面にストレイン・ゲージを張り付

けた形のプローブを開発した (Fig. 1). ストレイン・ゲージは直流型の変位にもよく応答し, D.

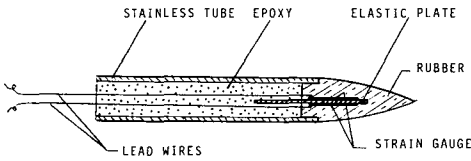


Fig. 1. Schematic diagram of shear probe.

C. 成分を含む広帯域の応答特性を持つシアー・プローブが可能である。

Fig. 2 は, シアー・プローブ及びプローブ後段に接続される増幅器及び微分回路の模式図であるが,  $w$  はプローブ軸に平行な流れ (計測時には自由沈降速度に応じた相対流),  $u$  はプローブ軸に直角な流れの成分である. このふたつの流速成分の合成ベクトル  $U$  は, プローブ軸と  $\alpha$  の角度でプローブ先端近傍に作用し, そのために, プローブ軸に直角に揚力  $F$  を生じ, これがプローブにまげ応力をもたらす. Siddon によると, 揚力  $F$  は,

$$F = \rho A U^2 \sin 2\alpha \tag{1}$$

で与えられる (Osborn and Crawford, 1977). ここに,  $U \sin \alpha = u$ ,  $U \cos \alpha = w$  で,  $A$  はプローブ先端に作用する  $U$  の実効面積,  $\rho$  は水の密度である. (1) の  $U$  のかわりに  $u, w$  を用いると,

$$F = 2 \rho A (U \sin \alpha) (U \cos \alpha) = 2 \rho A w u \tag{2}$$

となり,  $A, w$  が一定ならば, 揚力  $F$  は  $u$  に比例する. プローブにかかるまげ応力が揚力  $F$  に比例するならば, 線型応答の範囲内でプローブ出力  $E_a$  も  $F$  に比例する. 故に, シアー・プローブの電圧変換感度を  $S$  とすると, 出力電圧  $E_a$  は

$$E_a = 2 \rho S w u \tag{3}$$

となり, 微分回路通過後の出力電圧  $E_s$  は

$$E_s = \frac{dE_a}{dt} = 2 \rho S w \frac{du}{dt} \tag{4}$$

となる. プローブが水中を沈降する場合の鉛直座標を  $z$  とし,  $w$  を一定と仮定すると

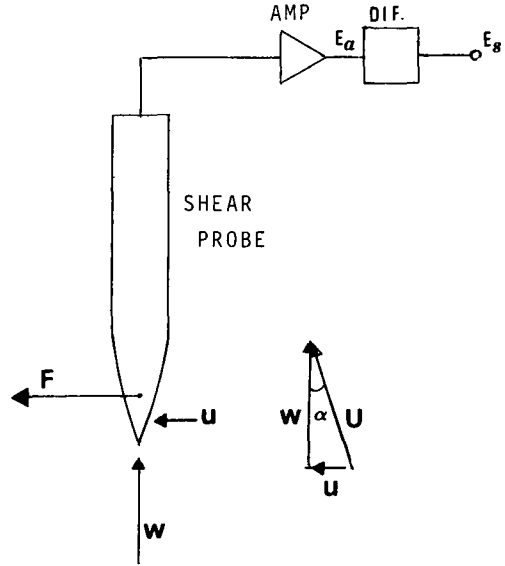


Fig. 2. Schematics of the flow vectors and the resultant lift force  $F$ . The output voltage of the pre-amplifier  $E_a$  is converted to  $E_s$  through the differentiator.

$$Es = 2 \rho S w^2 \frac{du}{dz} \quad (5)$$

により、流速シア  $dv/dz$  が次のように求められる。

$$\frac{du}{dz} = \frac{Es}{2 \rho S w^2} \quad (6)$$

### 3. シアー・プローブの較正

水平流速の鉛直シアは(6)式に基づいて決定できるが、右辺の分母に含まれる感度  $S$  はあらかじめ決定しておく必要がある。 $S$  の決定は、Fig. 3 に示すように、傾度  $\alpha$  でプローブを長水路の上

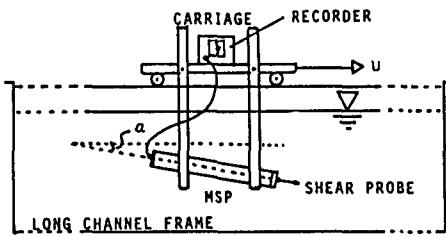


Fig. 3. Schematic configuration of the long framed channel with the carriage for calibration of shear probe.

の台車に固定し、一定速度  $U$  で台車を曳行しつつ、プローブ出力  $E_a$  を測定することにより行った。傾角  $\alpha$  は  $\pm 10$  度の範囲で変化させ、傾角  $\alpha$  に対する出力電圧  $E_a$  の関係を求めた結果を Fig. 4 に示す。台車の曳行速度  $U$  は(1)式中の  $U$  に相当し、Fig. 2 の  $u$ 、 $w$  に相当する流速は  $u = U \sin \alpha$ 、 $w = U \cos \alpha$  から求められる。

Fig. 4 は  $U = 50$  cm/s に対する特性で、実効面積  $A$  を感度  $S$  に含めて考えると、Fig. 4 から

$$S = \frac{E_a}{U^2 \sin^2 \alpha} = 0.04 \text{ (mV/dyne/cm}^2\text{)} \quad (7)$$

が得られる。

### 4. その他のセンサー

試作された MSP には、シアー・プローブの他に、水温、電気伝導度、圧力の3つのセンサーがある。水温センサーは極微細超小型白金抵抗測温体を用いた特殊プローブで、時定数は約 0.1 秒であるが、この応答速度は水温のマイクロ・ストラクチャー測定にはやや不十分である。したがって、Cox-数算出には特別な補正が必要である。

電気伝導度は直径 6 ミリメートル、長さ 20 ミリメートルの四電極型センサーが用いられてい

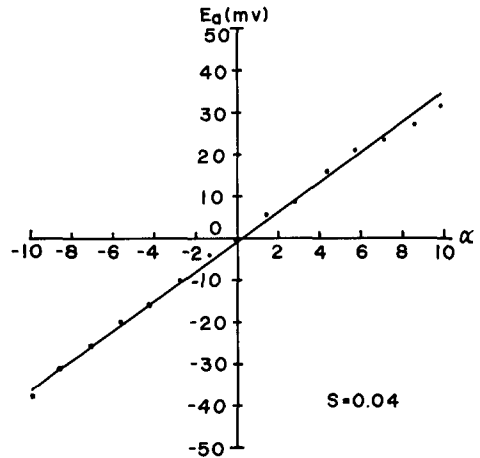


Fig. 4. Measured characteristics of the shear probe output  $E_a$  vs inclination angle  $\alpha$ .

る。応答速度の点では問題ないが、電気的ノイズの抑制と安定性の向上の面で現在改善がなされつつある。

水温、電気伝導度センサーの各出力は、それぞれが低周波成分と高周波成分に分離され、低周波成分は平均プロファイルとして、また高周波成分は更に微分回路を経て高周波グラジエント・プロファイルとしてA/D変換されロガーに収録される。

シャー・プローブを含む上記各センサー及びその出力の収録部までのMSPゾンデ内部回路のブロック図をFig.5に示す、A/Dコンバータは高速(170  $\mu$ sec)16ビットで、各チャンネルのサンプリング・レートは10ミリ秒、後段のICデータロガーの容量は8メガビットである。

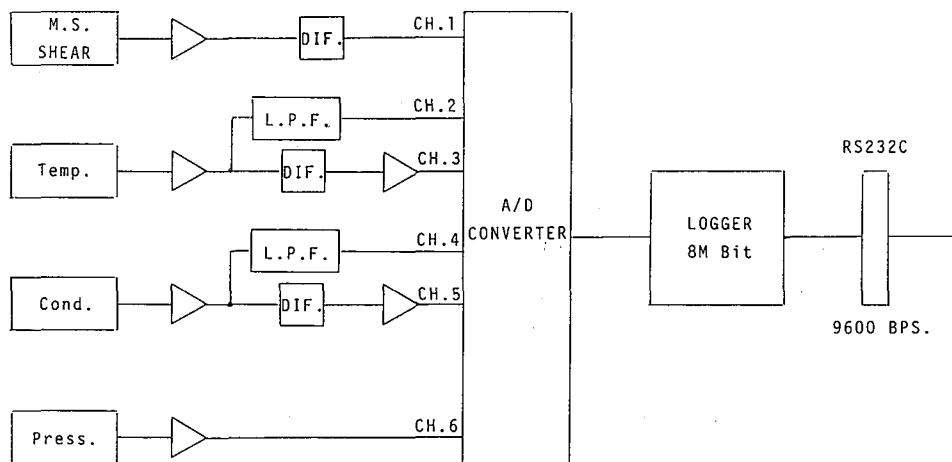


Fig. 5. Schematic configuration of MSP circuit.

### 5. ゾンデ外形とオペレーション

MSPゾンデ外形をFig.6及びPlate 1に、またMSPゾンデ回収用リールをPlate 2に示す。ゾンデは直径110ミリメートル、長さ800ミリメートルの耐圧アルミ容器からなり、容器下端面の中央にシャー・プローブが容器長軸に一致するように取り付けられている。その他のセンサー

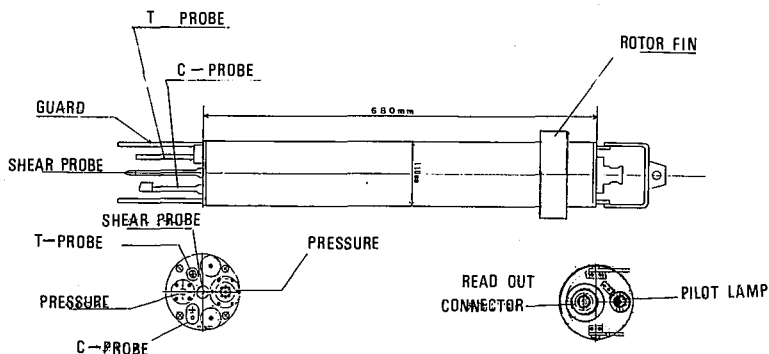


Fig. 6. Schematic drawing of MSP showing component locations.

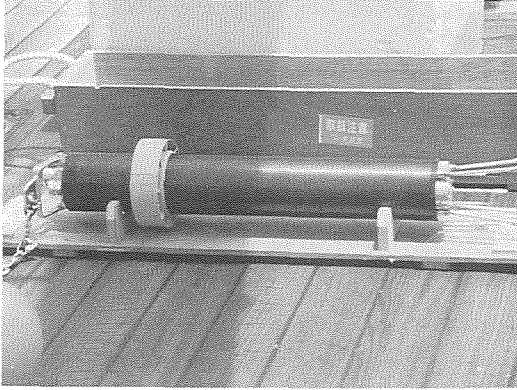


Plate 1. Photograph of MSP.

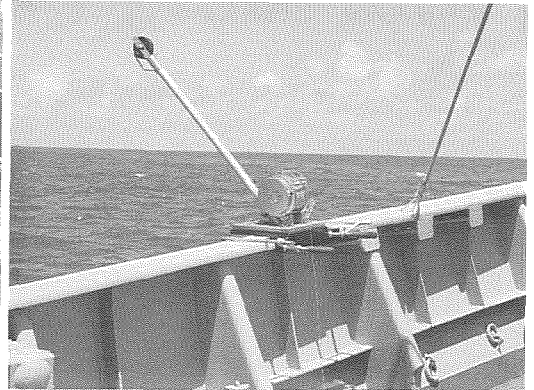


Plate 2. Photograph of the portable electric winch with a winch-liftpole for retrieval of MSP, attached on the ship's side. The retrieval string is a KEVLAR line of 700 meters with 3 milli meters dia.

はシャー・プローブのまわりに配置されているが、それぞれのセンサー先端部はシャー・プローブに擾乱を与えない程度に上方にずらしてある。また、ゾンデの上端近くには、沈降中ゾンデに軸まわりの自転を与えるための回転翼がつけてある。この回転翼により、約 70 cm/s の沈降速度で 3 rad/s の自転角速度が与えられる。

完成後のゾンデ水中重量は 3.8 kg である。これに水中浮力 1.5 kg を付与する目的で、ゾンデ上方に浮力 5.4 kg の球形浮体をつなぎ、ゾンデ下方には、圧力リリースを介して約 2 kg の投棄用オモリをつける。これにより、ゾンデ沈降時の正味水中重量は 500 g となり、計測終了に伴うオモリの投棄が行われると、浮力 1.2 kg で浮上に転ずる。

ゾンデには、回収を容易にする目的で、太さ 3 ミリメートルのケブラー・ストリング (全長 700 m) がつけてある。このストリングを電動リール (写真 2) で巻取ることにより、すみやかな回収が可能であるが、ゾンデ投入に際しては、回収用ストリングがゾンデの自由沈降を妨げないよう、十分な余裕をもって操り出すことが必要である。

## 6. 平均流シャーに対する考察

シャー・プローブの項で述べたように、MSP によるシャーはゾンデの沈降方向に直角な流速成分の時系列から求められるが、こうした流速成分はマイクロ・スケール乱流に起因する比較的高周波の変動成分から成ることを暗に期待している。しかし、現実の海洋中には、こうした高周波変動成分以外に、比較的変動のゆるやかな流れが共存し、その鉛直構造も一定ではない。そこで、この様な変動のゆるやかな流速場を計測時間内での平均流の場 (深さ  $z$  のみに依存する) とみなす。

場の流速ベクトルを  $u$  とし、 $u$  は平均流  $U(z)$  と変動成分  $u'(z, t)$  の和で表されるとする。

$$u(z, t) = U(z) + u'(z, t) \quad (8)$$

この流速場の中を MSP ゾンデが沈降速度  $w$  で自由沈降する場合、ゾンデ重心は、鉛直に  $w$  で沈降しながら一般流  $U(z)$  による水平移流も同時に受ける。時刻  $t$  におけるゾンデ重心の鉛直座標を  $z$ 、ゾンデ重心からシアープローブ先端までの距離を  $l$  とすると、 $U(z)$  で水平に動くゾンデに対し、深さ  $z+l$  にあるシアープローブ先端に作用する相対水平流速  $u_p$  は

$$\begin{aligned} u_p &= U(z+l) - U(z) + u'(z, t) \\ &= \Delta U(z) + u'(z, t) \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

ここで、ゾンデの自転角速度  $\omega_0$  で時計まわりに回転する MSP に固定した水平座標を  $x^*$ 、 $y^*$  とし、静止座標  $x$ 、 $y$  内の流速ベクトル分値  $u$ 、 $v$  を  $x^*$ 、 $y^*$  座標系で観測すると、自転座標系の流速分値  $u^*$ 、 $v^*$  は

$$u^* = u \cos \omega_0 t - v \sin \omega_0 t \quad (10)$$

$$v^* = u \sin \omega_0 t + v \cos \omega_0 t \quad (11)$$

となる。

さて、シアープローブの構造から明らかのように、プローブは内部の弾性板の幅に直角な成分のみに応答する。故に、弾性板の幅方向に  $x^*$  軸を固定し、 $t=0$  で  $y^*$  軸が  $y$  軸（北向き）と一致しているものとする、このプローブは  $v^*$  だけに反応することになる。したがって、このシアープローブの出力電圧  $E_a$  は(3)の関係によって

$$E_a = 2 \rho S w v^* \quad (12)$$

となる。

また、その微分出力  $E_s$  は

$$E_s = \frac{dE_a}{dt} = 2 \rho S w \frac{dv^*}{dt} \quad (13)$$

(11)式の右辺の  $u$ 、 $v$  はシアープローブに相対的な水平流速分値であるから(9)式の  $u_p$  の分値が  $u$ 、 $v$  であると考えて良い。そこで、(9)式右辺の分値をそれぞれ

$$u = \Delta u(z) + u'(z, t) \quad (14)$$

$$v = \Delta v(z) + v'(z, t) \quad (15)$$

で表すと、(13)式は



$$\begin{aligned}
 E_s = \frac{dE_a}{dt} &= 2\rho S w \omega_o \{ \Delta u \cos \omega_o t - \Delta v \sin \omega_o t \} \\
 &+ 2\rho S w \left\{ \frac{dv}{dt} \cos \omega_o t + \frac{du}{dt} \sin \omega_o t \right\}
 \end{aligned} \tag{16}$$

となる。さらに、 $dz = w dt$  の変換により(16)式は次のように書ける。

$$\frac{1}{2\rho S w^2} \frac{dE_a}{dt} = \frac{\omega_o}{w} \left| \Delta U \right| \cos(\omega_o t + \alpha) + \frac{dv}{dz} \sin \omega_o t + \frac{du}{dz} \cos \omega_o t \tag{17}$$

さて、乱流成分  $u'$ 、 $v'$  が角周波数  $\omega_H$  の高周波成分から成るとし、

$$u' = u_o(z) \sin \omega_H t \tag{18}$$

$$v' = v_o(z) \cos \omega_H t \tag{19}$$

のようにおけるならば、 $\omega_H > \omega_o$  のとき、(17)は次式で近似できる。

$$\frac{1}{2\rho S w^2} \frac{dE_a}{dt} = \frac{\omega_o}{w} \left| \Delta U \right| \cos(\omega_o t + \alpha) + \frac{du_o}{dz} \sin \omega_H t + \frac{dv_o}{dz} \sin \omega_H t \tag{20}$$

(9)式からは

$$\Delta U \doteq \frac{dU}{dz} l \tag{21}$$

が導かれ、さらに高周波成分  $u$ 、 $v$  については局所等方性を仮定すると最終的に(20)は次のように表される。

$$\frac{1}{2\rho S w^2} \frac{dE_a}{dt} = \frac{l\omega_o}{w} \left| \frac{dU}{dz} \right| \cos(\omega_o t + \alpha) + \frac{du'}{dz} \tag{22}$$

すなわち、鉛直シアーをもつ平均流と乱流変動成分が共存する場合、MSP のシアー・プローブの微分出力は、振幅が平均流のシアーの絶対値に比例し、角周波数  $\omega_o$  で変化する低周波成分と、乱流成分の鉛直シアーの和で表される。したがって、シアー・プローブの微分出力を低周波と高周波に分離することにより、低周波成分から平均流のシアーの大きさが、また、高周波成分からはマイクロ・スケール乱流成分が求められる。

(22)式の右辺第1項の低周波成分実効値を  $\phi_{r.m.s.}$  とおくと、平均流シアーは

$$\left| \frac{dU}{dz} \right| = \frac{\sqrt{2}w}{\omega_o l} \phi_{r.m.s.} \tag{23}$$

で与えられる。

## 7. 計測記録の一例

MSP による観測データの一例を Fig. 7 (a) ~ (f) に示す。このデータは東京大学海洋研究所の淡青丸による平成元年第9次航海(KT-89-9)の途中、北緯 29°59.9'、東経 139°00' での MSP

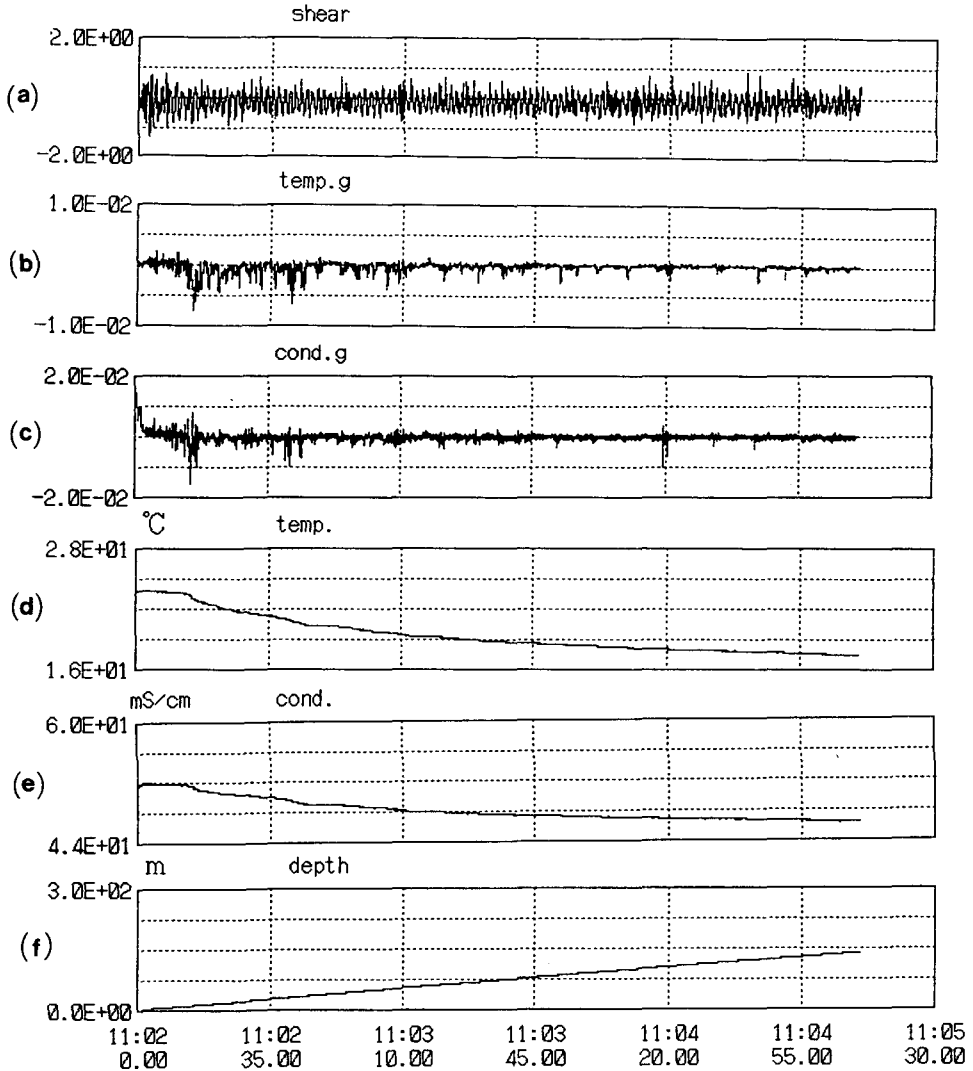


Fig. 7. (a)~(f). An example of the raw data profiles of velocity shear channel (a), temperature gradient (b), conductivity gradient (c), mean temperature profile (d), mean conductivity profile (e), and depth (f) respectively.

観測によるものであるが、上から流速シア・データ(a)、温度傾度(b)、電気伝導度傾度(c)、平均水温プロフィール(d)、平均電気伝導度プロフィール(e)、深度(f)、を示す。但し、シア・データ(a)については前節(20)式の右辺に相当するデータで、周波数  $\omega_0$  の振幅変調波とマイクロスケール・シア出力の合成波の形で表されている。横軸は投入時刻 11 時 02 分 00 秒から 11 時 05 分 30 秒までの経過時間を表すが、深度データ (f) の時間変化から MSP が約 71.4 cm/s でほぼ一様に沈降している様子が伺える。なお Fig. 7 の生データは深度 140 m 付近までしかないが、実際のかんそくは 300 m 付近まで行われたもので、Fig. 7 は取得データのおよそ半分だけを示したものである。

## 7・1. マイクロ・スケール・シア

取得シア・データは適当なフィルタリング操作により、平均流シアに対応する低周波成分

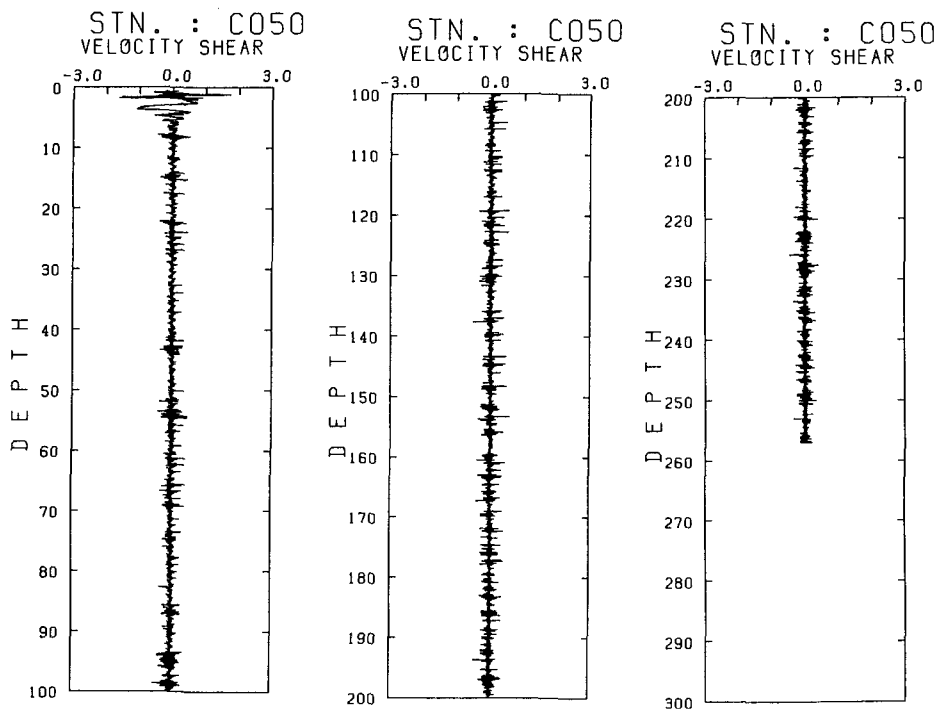


Fig. 8. Microscale shear profile at Stn. C050 (29°59.9'N, 139°00'E).

と、マイクロ・スケール・シアに対応する高周波成分に分離される。更に、分離処理が終ったデータは、その他のデータと共に、深度基準のデータセットに変換される。Fig. 8に分離処理されたマイクロ・シア・データの深度プロファイルの一例を示す。横軸は鉛直シア、縦軸は深さを示す。このデータから粘性散逸率  $\epsilon$  が、

$$\epsilon(z) = \frac{15}{2} \nu \overline{\left(\frac{du'}{dz}\right)^2} \quad (24)$$

として求められる。ここに、 $\nu$  は水の分子粘性係数、 $\overline{\left(\frac{du'}{dz}\right)^2}$  は Fig. 8 のプロファイルを適当なブロック (3~5 m 毎) に分割したときのブロック内の流速シアの分散値である。この分散値は、ブロック内のシア・データの波数スペクトルを波数について積分したもので与えられる。

さて、ここで、実際に計測された高周波シアがマイクロ・スケール・シアを表しているかどうかを確認してみよう。

等方性乱流場における流速シアの普遍スペクトル  $S(\hat{k})$  は

$$S(\hat{k}) = k_s^2 (\epsilon \nu^5)^{1/4} G_2(\hat{k}/k_s) \quad (25)$$

で与えられる (Oakey, 1982)。ここに  $k_s$  は、粘性カットオフ波数と呼ばれ、 $k_s = (\epsilon/\nu^3)^{1/4}$  で与えられる。また、 $\hat{k}$  は波数で鉛直スケールの逆数で与えられる。 $\epsilon$ 、 $\nu$  はそれぞれ場の粘性散逸率、

分子粘性係数を表し、 $G_2(\hat{k}/k_s)$  は、Nasmyth (1970) が普遍関数表の形で  $\hat{k}/k_s$  に対する  $G_2$  の値を与えている。従って粘性散逸率  $\epsilon$  が与えられると、(25)から波数  $k$  に対するスペクトル形が計算できる。

ここでは、実測されたシアール・プロファイルの適当なブロック・データについてパワー・スペクトルを計算し、このスペクトルの波数積分に基づいて(24)から  $\epsilon$  を計算した。この  $\epsilon$  の値を(25)に適用して、 $S(\hat{k})$  を計算し、 $S(\hat{k})$  と、シアール・データから計算したスペクトルを比較する。両者が一致すれば、観測値はマイクロ・スケール・シアールを表していると言える。

前出のデータで、任意に 76.93 m から 84.35 m の深度のブロック・データを抽出し、波数スペクトルを計算した結果を Fig. 9 に示す。このスペクトルの波数積分から(24)式にもとづいて計算した散逸率  $\epsilon$  は  $6.1 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}^3$  で、この値に対する理論シアール・スペクトル  $S(\hat{k})$  は、Fig. 9 のなめらかな実線で与えられる。実測スペクトルは低波数側で若干振動的であるが、平均的にみて、パワーのレベル及び高波数側でのスペクトルの低減の傾向は比較的良好に一致しており、実測値は主旨マイクロ・スケールのシアールを表していると言える。また、両者のほど良い一致は、マイクロ・スケールの領域における等方性の仮定がそれほど悪くないことをも示唆している。

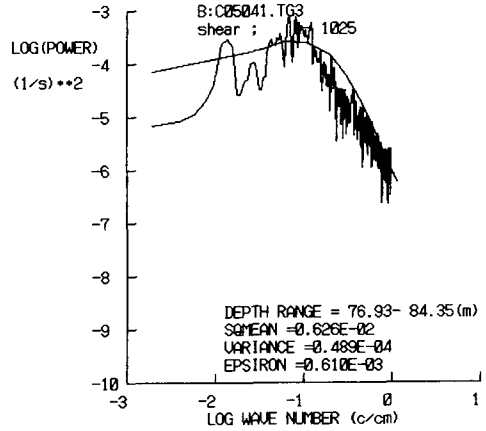


Fig. 9. The velocity shear spectrum for station C050 (fructuating curve). The estimated dissipation rate  $\epsilon$  was  $6.1 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}^3$ . The smooth curve is the theoretically estimated velocity shear spectrum for  $\epsilon = 6.1 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}^3$ .

### 7・2. ファイン・スケール・シアール

Fig. 7 (a) に示した流速シアールの合成データのうち、ローパス・フィルターを通過したものを時間→深度変換した結果の一部を Fig. 10 (b) に示す。この図の正弦波状の信号は、(20)式の右辺第 1 項に相当するもので、角周波数  $\omega_0 (=2\pi\omega/z)$  で変化している。Fig. 10 (a) は温度グラジェント (TG)、(c) は対応する高周波シアール (VS) を表す。また、Fig. 9 (d) の滑らかな曲線は水温プロファイル (T)、また、ステップ状の線は (b) 曲線振幅を約 3 m 深毎に平均した値を  $\phi_{r.m.s.}$  として(23)式に基づいて計算した  $du/dz$  の値 (スケールは右端 <MS>) を示す。

(23)式で、 $l$  は MSP 本体の 1/2 にとっているため、(21)の流速差に対応するスパンは約 50 cm になるが、 $\phi_{r.m.s.}$  の平均化によって、微分の空間スケールは若干大きくなり、およそ 3 m スケールの平均シアールになっていると考えられる。従って、ここで求めているシアールはファイン・スケールのうちのやや高波数側に位置する。ここで示したファイン・スケールのシアールが、実際の流速場の平均流シアールをどの程度代表するかについては、ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

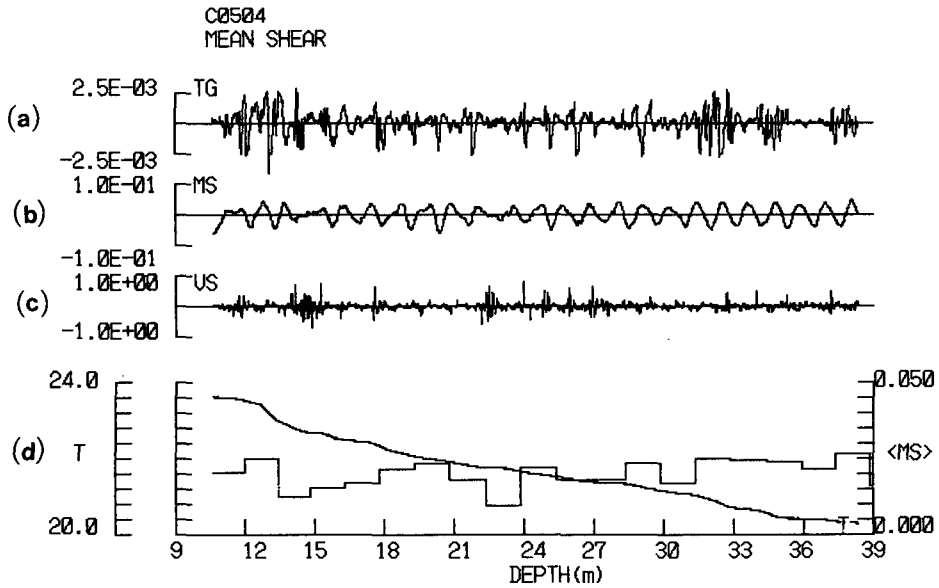


Fig. 10. An example of separated mean shear profile (step-like profile in (d)) from 9 to 39 meters of Stn. C050, compared with temperature gradient profile (a), low-frequency shear signal with an angular frequency of  $\omega_0$  (b), high frequency shear (c) and mean temperature profile (smooth curve in (d)).

等と比較測定をしてみる必要があるが、赤道域のデータについて同様な方法で見積ったファイン・スケール・シアアからリチャードソン数を計算し、渦拡散係数  $K_v$  がリチャードソン数の臨界値  $1/4$  以下で急激に増大するという物理的有意なデータが得られている(金成他, 1990)ことが、ファイン・スケール・シアア評価を間接的に支持しているように思われる。

## 8. む す び

現在、マイクロ・ストラクチャ観測手法に基づく海洋混合層の乱流混合過程の研究が米国、カナダ等で活発に進められており、従来の古典的の海洋観測手法では決して得られなかったであろう新しい事実が次々と明るみにされつつある。また、最近では、地球環境問題の一環として海洋深層循環モデリングの精密化が叫ばれているが、ここでも海洋内部の乱流混合過程の精密なパラメータ化の要請が高まり、モデラーと微小スケールの研究者との共同研究が重要視されるようになった。わが国では、これまで、こうした微小スケールの観測手段がなかったために、この方面の研究には殆ど手が出せなかったが、WCRPの研究計画を契機に、やっと自前のMSPを持てるようになり、散逸率観測を含む微細乱流過程の研究が可能になった。

本稿に紹介したMSPにより、1988年には赤道域の混合層観測が試験的に行われ、また1989年にはOMLET観測計画の一環として、本州南方小笠原西部海域の混合層観測が行われ、いずれも興味深いデータが集積されつつある。これらのデータの解析結果については、近日中に稿を改める予定である。

**謝辞** MSPの根幹をなすシャー・プローブの開発はアレック電子株式会社技術開発部長紅葉弘昭氏の御協力によるところ大であった。また、MSPの製作全般にわたり、同社社長・戸川弘氏はじめ社員一同の御協力をいただいた。本稿に用いた観測データの取得に際してはKT-89-9の乗船研究者の方々の協力をいただいた。また、本稿の準備に際しては、当研究室大学院学生小林智加志君並びに丹野由華嬢に作図及び原稿のタイピングの手を煩わせた。ここに併せて深甚の謝意を表します。MSPの製作は気候変動国際協同研究計画(WCRP)の中の海洋混合層実験観測計画(OMLET)の一環として行われたものである。この研究計画の中でMSP開発の機会を与えてくれた文部省はじめ各関係機関の方々に謝意を表します。

#### 参考文献

- CALDWELL D. R., Small-scale physics of the ocean, *Rev. Geophys., Phys.*, 21, 1192–1205, 1983.
- CALDWELL D. R., T. M. DILLON, J. M. BRUBAKER, P. A. NEWBERGER and C. A. PAULSON, The scaling of vertical gradient spectra, *J. Geophys. Res.*, 85, 1917–1924, 1980.
- CALDWELL D. R., S. D. WILCOX and M. MASTER, A relatively simple freelyfalling probe for small-scale temperature gradients, *Limnol. Oceanogr.*, 20, 1035–1042, 1975.
- COX C. S., HACKER P. W., JOHNSON B. P. and OSBORN T. R., Fine scale of temperature gradient, *Troms. Marine Temp. Symp. Marine Tech. Soc.*, 95–104, 1969a.
- DILLON T. M., Vertical overturns ; A comparison of Thorpe and Ozmidov length scales, *J. Geophys. Res.*, 87, 9601–9613, 1982.
- DILLON T. M. and D. R. CALDWELL, The Batchelor spectrum and dissipation in the upper ocean, *J. Geophys. Res.*, 85, 1910–1916, 1980.
- ELLIOTT J. A. and N. S. OAKEY, Spectrum of small-scale oceanic temperature gradients, *J. Fish. Res. Board Can.*, 33, 2296–2306, 1976.
- GIBSON C. H., Fossil turbulence and intermittency in sampling oceanic mixing process, *J. Geophys. Res.*, 92, 5, 5382–5404, 1982.
- GREGG M. C., Temperature and salinity microstructure in the Pacific Equatorial Undercurrent, *J. Geophys. Res.*, 81, 1180–1196, 1976.
- 金成誠一, 海洋表層混合層の極微細乱流計測のための、マイクロ・ストラクチャ・プロファイラー (MSP), 気候変動国際協同研究計画 (WCRP), 第2回シンポジウム報告集, 55–59, 1988
- KANARI S., T. KOBAYASHI and K. TAKEUCHI, Parameterization of Turbulent Mixing in the Western Equatorial Pacific, Abstract for 1990 Western Pacific Geophysical Meeting, Aug. 21–25 in Kanazawa, Japan (in press), 1990.
- NASMYTH P. W., Oceanic turbulence, Ph. D. Dissertation, 69 pp., Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada, 1970.
- OAKEY N. S., Determination of the rate of dissipation of turbulent energy from simultaneous temperature and velocity shear microstructure measurements, *J. Phys. Oceanogr.*, 12, 256–271, 1982.
- OAKEY N. S. and J. A. ELLIOTT, The variability of temperature gradient microstructure observed in the Denmark Strait, *J. Geophys. Res.*, 85, 1933–1944, 1980.
- OSBORN T. R., Temperature microstructure in Powell Lake, *J. Phys. Oceanogr.*, 3, 3, 302–307, 1973.