

浮上式 MSP による内湾の鉛直混合強度の測定

橋 本 英 資*・高 杉 由 夫**

1. はじめに

内湾における鉛直混合の強さは、成層の形成・崩壊や潮汐フロント、密度流等の変化に深く関わっているのみならず、プランクトンの挙動等の生物過程や粒子の鉛直輸送にも直接影響を及ぼしており、貧酸素化等の内湾の環境問題を考える上で重要な意味を持っている。しかしながら、実海域で鉛直混合強度を測定することは容易ではなく、その実態は明らかではない。

海域の鉛直混合強度の尺度は鉛直渦動拡散係数 (K_z) で表すことができる。この K_z の鉛直プロファイルは拡散方程式を用いて、トレーサの濃度分布からも間接的に見積もることができる (Gargett, 1984) が、この方法は時間的・空間的に平滑化された値であり、内湾域のような海洋構造が激しく変動する場の K_z の詳細な分布を

捉えるには、現場で直接測定する方法が必要となる。

直接測定した例として、外洋では Osborn (1974) や Kanari (1991) が自由落下する MSP (Micro-Scale Profiler) を使用し、流速の鉛直シアの乱れを測定している。さらに Oakey and Elliott (1982), Kanari et al. (1992), 松野 (1993) 等は、エネルギー逸散率や K_z 等の鉛直プロファイルについて述べている。しかしながら、これらは外洋における結果であり、さらに、この自由落下式 MSP は投入直後の海面付近での動揺が大きいため、海底との衝突を回避するために着底する前に回収する必要がある。そのため水深の浅い内湾では計測範囲が非常に狭くなり、自由落下式の MSP による測定は適さない。そこで、海底近くから海面近くまでの測定が可能な自由浮上式 MSP を新たに試作した。本論文では、この浮上式 MSP を紹介すると共に、貧酸素水塊が発生する

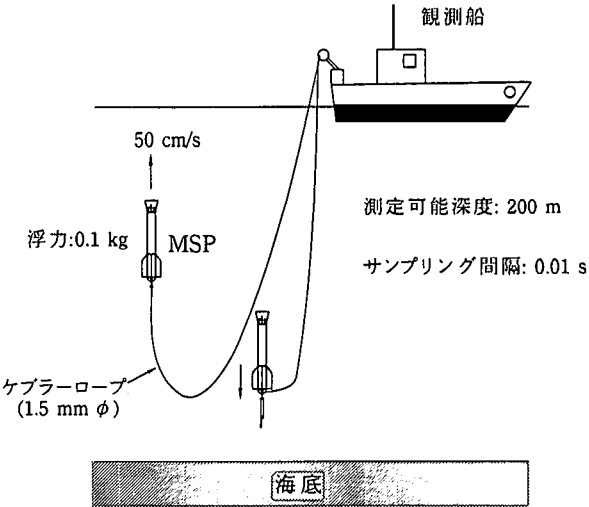
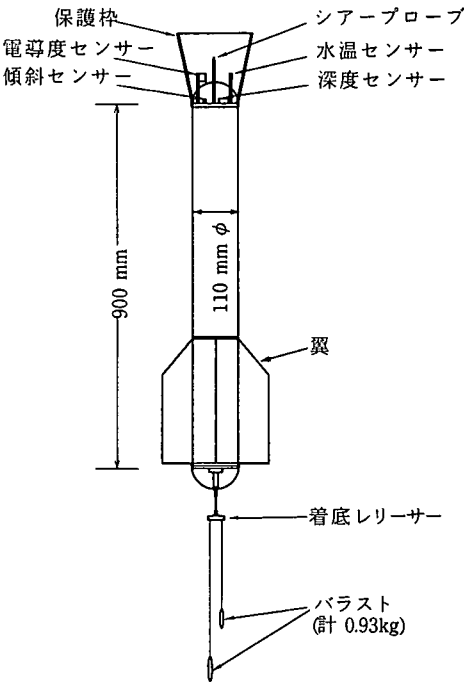


図-1 浮上式 MSP の概略図

* 正会員 通産省中国工業技術研究所
** 農博 通産省中国工業技術研究所

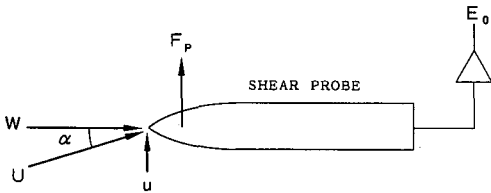


図-2 シアープローブの模式図

広島湾北部及び呉湾について得られた、エネルギー逸散率や鉛直渦動拡散係数等の鉛直プロファイルについて述べる。

2. 浮上式 MSP の開発と鉛直混合強度

2.1 浮上式 MSP

浮上式 MSP(図-1)は直径 11 cm、長さ 90 cm の円筒状をしており、上部にバイモルフタイプ(セラミック圧電素子)のシアープローブ、水温、電気伝導度、深度の各センサーのほか、MSP 本体の振舞いを見るための傾斜センサー(X, Y の 2 成分)を取り付けている。本体ゾンデの重量は空中で約 10 kg であるが、上部に空洞部を設けてあり、水中では 640 g の浮力で浮くように設計されている。測定時にはゾンデ下部に着底レリーサーとバラスト(約 930 g)を装着し、センサー部が上向きの状態で投入する。ゾンデが海底に着底すると同時にバラストが切り離され、浮上を始めるが、この浮上時に各項目の値をチャンパー内のディスクパックに 0.01 秒間隔で

記録する。実際の測定時には、浮上速度が約 50 cm/s、浮力が約 100 g となるように、微小バラストにより浮力調節を行っている。なお回収を容易にするために、ゾンデには 1.5 mm のケブラーローブを付けている。

この浮上式 MSP のシアープローブはバイモルフタイプであり、これは円錐形をしたプローブ先端内部に細長いバイモルフ板をプローブ中心軸に平行に埋め込んだもので、プローブ先端にかかる曲げ応力を歪電圧として検出する。図-2 はシアープローブの模式図である。W はプローブ軸に平行な流速で浮上速度に応じた相対流速、u はプローブに直角な流速成分(乱流成分)、U はこれら 2 つの合成流速で、α はプローブ軸と U とのなす角度である。U はプローブ軸に直角に揚力 F_p を生じ、曲げ応力としてプローブに作用する。この揚力 F_p は

$$F_p = \frac{1}{2} \rho A U^2 \sin(2\alpha) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、A はプローブ先端部に作用する U の実効面積、ρ は海水の密度である。また、 $U \sin(\alpha) = u$ 、 $U \cos(\alpha) = W$ 、であるので式(1)を書き換えると

$$F_p = \rho A W u \quad (2)$$

となる。A と W が一定であれば、 F_p は u に比例する。プローブに作用する曲げ応力が F_p に線形的に比例するならばプローブの歪電圧出力も F_p に比例する。したがって、出力電圧 E_0 は

$$E_0 = \rho S_v W u \quad (3)$$

となる。ここで S_v はシアープローブの電圧変換係数であ

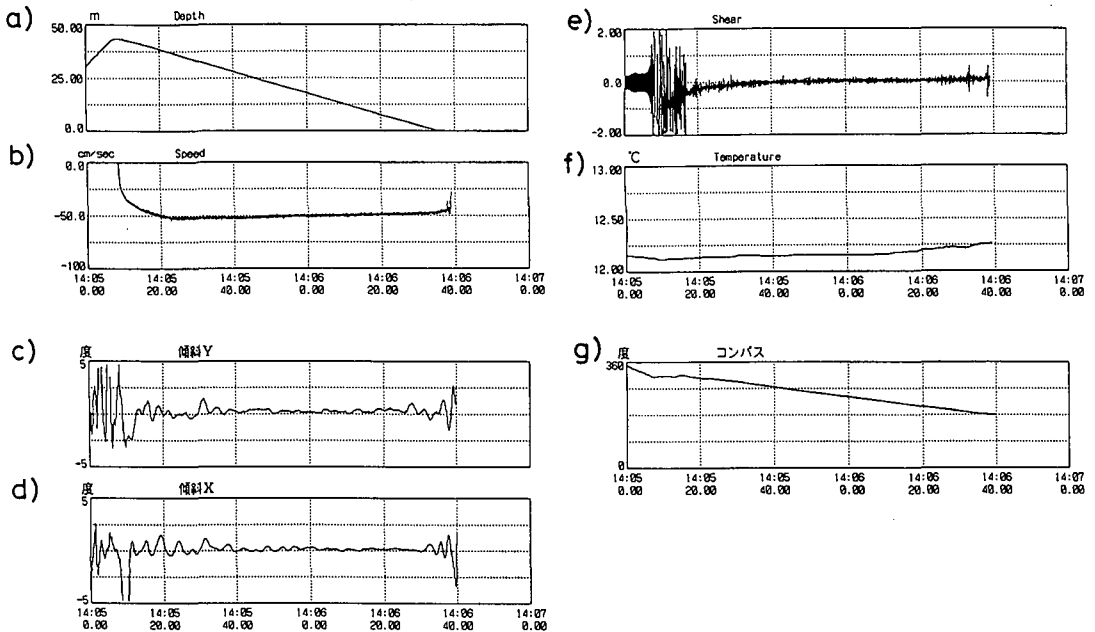


図-3 浮上式 MSP の動態試験結果

る。鉛直座標を z ，プローブ浮上速度 W を一定とすると， $du/dt = Wdu/dz$ により水平流速の鉛直シアーは

$$\frac{du}{dz} = \frac{1}{\rho S_0 W^2} \frac{dE_0}{dt} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で求めることができる。シアープローブの電圧変換係数 S_0 は，あらかじめ検定により求めておく。

その他のセンサーについては，水温は超小型白金測温抵抗体を用いたセンサーで，精度 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ ，応答速度 0.05 s である。電気伝導度は小型の電磁誘導セルセンサーで精度 $\pm 0.01\text{ mmho/cm}$ ，応答速度 0.015 s である。深度は半導体圧力センサーを用い，精度 $\pm 0.1\%$ ，応答速度 0.2 s である。傾斜は電解液面式センサーで精度 $\pm 0.5^\circ$ ，応答速度 0.02 s である。鉛直微細構造を測定するという観点では精度や応答速度等の面で改良の余地が残されている。

MSPにより鉛直シアーを正確に測定するためには，測定時の浮上速度が一定であり，かつ，ゾンデ本体が安定している必要がある。図-3は水深約 40 m の海域において前述のセンサーに加えてコンパス方位計を取り付けて行った動態試験の結果である。図で左上から深度，速度， Y 方向傾斜角， X 方向傾斜角，右上から流速シアー，水温，コンパス方位角を示す。横軸は時間である。深度を見ると測定開始後約 8 s のあたりで海底に到達し，着底後，一定の勾配で深度が減少している。この時のゾンデの浮上速度は着底後約 10 s ，海底上 $4\sim 5\text{ m}$ で安定した速度 50 cm/s となっている。傾斜を見ると，着底直後は

大きく傾斜しており，流速シアーのデータも大きく変動しているが，それ以外では X, Y 両成分とも 1° 以下の傾斜である。この間はコンパス方位も一定の勾配で変化しており，ゾンデが一定速度で回転していることを示している。そして，流速シアーも安定したものが得られている。このように海底上の数 m を除いては，海面近くまでの流速シアーの鉛直プロファイルの測定が可能である。

2.2 鉛直混合強度

浮上式MSPによる鉛直混合強度の測定では，そのデータから水深約 2.5 m 間隔，データ数にして 512 個毎のブロックに分けてエネルギー逸散率および鉛直渦動拡散係数を求めた。エネルギー逸散率(ϵ)は流速の鉛直シアーデータのスペクトルを積分して得られるシアーの分散から次式により求められる。

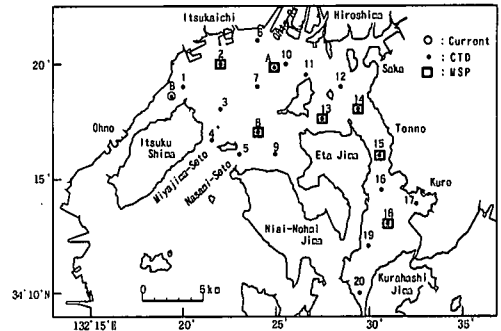


図-4 観測地点 (□: MSPによる鉛直混合強度測定点)

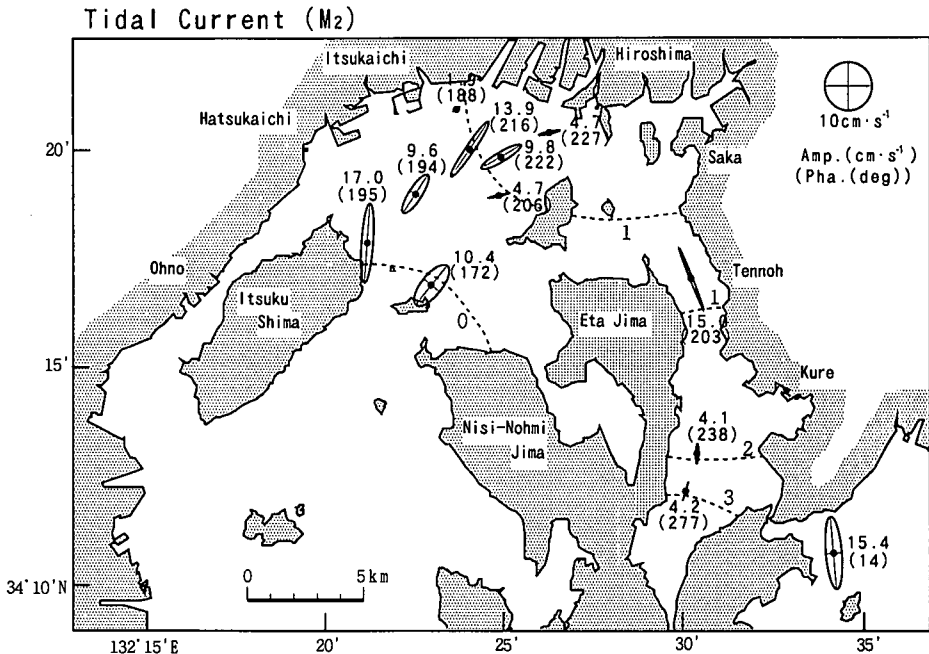


図-5 広島湾における半日周期 (M_2) の潮流楕円の分布 (高杉ら, 1998)

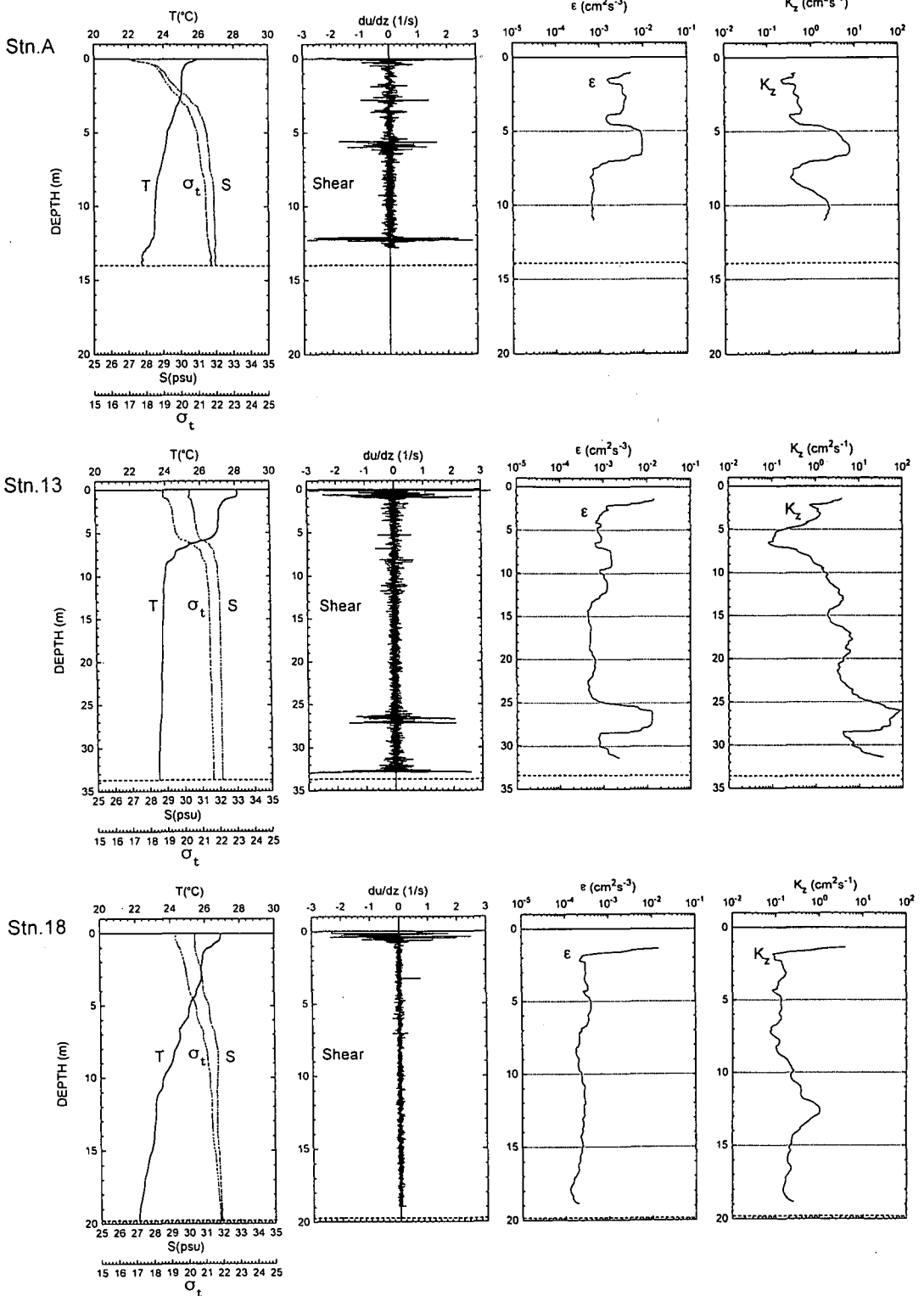


図-6 広島湾・呉湾における鉛直混合強度の鉛直分布
水温 (T), 塩分 (S), 密度 (σ_t), シアー (du/dz), エネルギー逸散率 (ϵ) および鉛直渦動拡散係数 (K_z)

$$\varepsilon = \frac{15}{2} \nu \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 ν は動粘性係数である。また鉛直渦動拡散係数(K_z)は、この ε と水温、塩分のデータから

$$K_z = \frac{\gamma \varepsilon}{N^2} \dots\dots\dots (6)$$

で計算できる。ここで、 N はバイサラの振動数であり、成層の安定度を示すものである。また、 γ はフラックスリチャードソン数に関係した係数で、一般には0.2以下の値と考えられているが、ここでは $\gamma=0.2$ とした。

3. 測定結果および考察

鉛直混合強度の観測を1997年8月26日(小潮)と9月2日(大潮)に行った。観測船にはADCPも搭載し、鉛直混合強度と同時に流速の鉛直プロファイルも測定した。図-4に測定地点を示す。また、この海域における半日周期(M_2)の潮流楕円を図-5に示す。流速は全体的に10 cm/s程度であるが、沿岸域や呉湾では5 cm/sと弱くなっている。鉛直混合強度の測定結果として、太田川河口沖合のStn. Aと瀬戸部に近いStn. 13および呉湾中央部のStn. 18で得られた水温(T)、塩分(S)、密度(σ_t)、シア (du/dz)、エネルギー逸散率(ε)、および鉛直渦動拡散係数(K_z)の鉛直分布を図-6に示す。 ε はStn. A, 13, 18の順に小さくなり、 K_z は広島湾では $10^0 \sim 10^1 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度の大きさであるが、呉湾では広島湾より1桁程度小さい $10^{-1} \sim 10^0 \text{ cm}^2/\text{s}$ であった。このことは呉湾では海水を鉛直的に混合する作用が非常に弱いことを示しており、図-5に示す呉湾内の潮流が弱いこととあいまって、粒子が堆積しやすい状況であることを示している。この結果は、星加ら(1982)が測定した呉湾の堆積速度が、他の瀬戸内海沿岸海域の値より速く、さらにその堆積量も多いことから裏付けられる。

次に鉛直構造について詳しく見ると、Stn. 13の水深5 m~8 mのところに水温躍層が見られ、この躍層中では K_z は $10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ と躍層の上下の $10^0 \text{ cm}^2/\text{s}$ に比べて1桁小さい値が得られた。この躍層中での K_z の低下に見られるように、躍層の存在が上層と下層との鉛直混合を強く妨げ、これによる表層からの酸素供給の減少が、広島湾・呉湾の貧酸素化(湯浅, 1990)の原因と考えられる。またシア (du/dz) では、Stn. Aの6 m層とStn. 13の26 m~27 m層に局部的に大きな乱れが見られるが、海水中のこのような乱れの存在が、生物粒子の輸送等に果たす役割は大きいのではないかと考えられる。さらに、水温、塩分の測定結果から均一な水塊の層と見られる、Stn. 13の13 m層と18 m層及びStn. 18の13 m層では、 K_z が

大きくなる結果が得られたが、これは K_z が成層の強さに反比例する形で見積もられているためである。このように K_z の鉛直プロファイルは多層構造をしていることが明らかになった。

4. おわりに

新たに流速の鉛直シアの乱れを直接測定できる浮上式MSPを試作し、実際に測定した結果、エネルギー逸散率や鉛直渦動拡散係数などの鉛直プロファイルを明らかにすることが可能となり、その有効性が実証された。また夏季に見られる水温躍層の存在が、上層と下層との鉛直混合を強く妨げていることを定量的に把握することができた。さらに内湾では鉛直的には多層構造をしていることが明らかになった。

浮上式MSPによる沿岸域の測定は緒についたばかりであり、鉛直混合強度の分布を明らかにするためには、今後、測器のさらなる精度の向上も指向しつつ、多くの海域で測定をかさね、データを蓄積していく必要がある。また、モデリングの精度向上のためには鉛直渦動拡散係数の詳細な鉛直プロファイルを加味する必要がある。

謝辞：最後に、本装置の開発に関しては、制作から現場での測定までアレック電子(株)の矢津敏弘氏に多大な御協力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 高杉由夫・埜口英昭・安田秀一(1998): 広島湾における風による鉛直循環流と底泥プランクトンシスト分布, 水産海洋研究, Vol. 62, No. 3 (印刷中)。
- 星加 章・塩沢孝之(1982): 堆積物からみた呉湾の汚染の歴史, 中国工業技術試験所報告, No. 18, pp. 9-18。
- 松野 健(1993): 鉛直拡散係数の計測とパラメタリゼーション, 沿岸海洋研究ノート, 第31巻, 第1号, pp. 67-80。
- 湯浅一郎(1990): 瀬戸内海の貧酸素水塊, 海の気象, 第35巻, 5-6号, pp. 90-102。
- Gargett, A. E. (1984): Vertical eddy diffusivity in the ocean interior, J. Mar. Res., Vol. 42, No. 2, pp. 359-393。
- Kanari, S. (1991): Micro-scale profiler (MSP) for measurement of small-scale turbulence in the ocean, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 47, pp. 17-25。
- Kanari, S., C. Kobayashi and K. Takeuchi (1992): Turbulent structure in the upper layer of the Western Equatorial Pacific Ocean, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 48, pp. 117-127。
- Oakey, N. S. and J. A. Elliott (1982): Dissipation within the surface mixed layer, J. Phys. Oceanogr., Vol. 12, pp. 171-185。
- Osborn, T. R. (1974): Vertical profiling of velocity micro-structure, J. Phys. Oceanogr., Vol. 4, pp. 109-115。