

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23710002

研究課題名(和文)既存の海洋観測プラットフォームを利用した海洋乱流の簡易計測システムの構築

研究課題名(英文)Construction of the microstructure measurement system using common device used in ocean observations

研究代表者

長澤 真樹 (Nagasawa, Maki)

東京大学・大気海洋研究所・技術専門職員

研究者番号：60447448

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：海洋乱流の計測は、乱流データの質を維持するために、従来、自由落下型の専用の測器を用いて行われてきた。しかし、観測には専門的な技術や観測時間が必要なため、乱流の現場観測は極めて希少である。本研究では、一般的な海洋観測機器(CTD)の架台に小型の乱流計測機器MicroRider6000を搭載し、質は劣るものの、低コストで大量にデータを取得する方式に着目した。この方式で観測された結果と従来の精度よく観測できる自由落下型の乱流計測器の観測結果を比較し、様々な条件のもとで観測されたデータの質を評価することでCTD架台搭載型の観測の限界と有用性を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：Since microstructure measurements of velocity shear are very sensitive and fragile to noise from instruments, measurements have been performed with free-fall instruments whose vibrations to generate noise are minimized. Because of the difficulty in microstructure measurements, turbulence observations have been quite limited. In order to efficiently obtain much more turbulence data, we propose a new method in which a microstructure profiler is attached to a CTD-frame, which is a common device used in ocean observations. Comparing the turbulence intensity measured using this method with which from free-fall instruments, we evaluate the performance of microstructure measurements using instruments attached to a CTD-frame.

研究分野：海洋計測

キーワード：乱流計測

1. 研究開始当初の背景

海洋乱流の計測は、流速や水温の微細構造を乱す事なく測定する必要があり、従来、自由落下型の専用の測器(例：VMP2000・VMP500(Rockland Scientific 社製))を用いて行われてきた。しかし、観測には専門的な技術や観測時間が必要なため、乱流の現場観測は極めて希少であった。

最近では一般的な海洋観測機器に小型の乱流計測機器を搭載し、質は劣るものの、低コストで大量にデータを取得する方式にも徐々に目が向けられ始めている。東京大学大気海洋研究所の乱流観測グループでは、2009年より、いくつかの観測航海において内部記録式の乱流計測機器 MicroRider6000 (以下 MR、Rockland Scientific 社製)を一般的な海洋観測機器である CTD(電気伝導度・水温・水深計)の架台に搭載して観測を行い、データを蓄積してきた。CTD 架台は、常に張ったケーブルで船とつながっているため、船体の動揺やウインチの加減速が MR に伝わってしまう。このことが MR の測定する乱流場に与える影響が、よく分かっておらず、CTD 架台に搭載した MR のデータから、乱流強度を見積もる方法は実用化されていなかった。

2. 研究の目的

乱流鉛直混合は、海洋大循環を制御する重要な物理過程の一つである。乱流混合は時空間変動が大きいため、その実態を明らかにするには、多くの回数の観測が必要である。一方、前述したように、海洋乱流の観測は、観測自体が難しいため、観測は希少である。

本研究では、MR と VMP により観測されたデータを比較し、CTD 架台の動揺が MR のデータにどのような影響を与えるのかを調べる。MR による観測の限界と有用性を明らかにすることによって、この手法の実用化を目指す。

3. 研究の方法

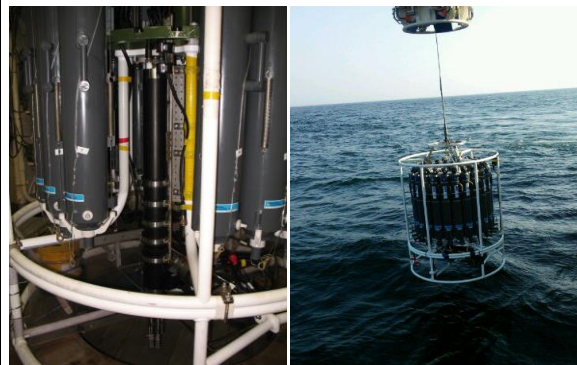
(1)観測機器について

自由落下型乱流計 VMP2000(右写真)は、ウインチと同期したラインプラーでケーブルを水中へ繰り出し、ケーブルに張力がかからない状態を保つことで、降下速度 0.6~0.7 [m/s] の自由落下の状態での所定水深(耐圧 2000m)までの乱流観測を行う。



MR はデータを内部メモリに記憶する測器であり、本研究では CTD 架台に搭載して使用する。張ったケーブルで船と繋がった状態で約 1.0 [m/s] で降下させ、所定水深(最大

耐圧 6000m) までの乱流観測を行う。両測器には圧力センサー、加速度センサーが搭載され、両測器の先端には、流速シアプローブ(SPM-38)、高速水温計、高速電気伝導度計(SBE-7)の各種乱流センサーが搭載されている。VMP には Sea Bird 社製の水時計、電気伝導度計も搭載されており、一般的な CTD 観測で取得される水温、電気伝導度データを取得することが可能である。一方、MR は CTD の水温、電気伝導度センサーからケーブルをバイパスすることで CTD の水温、電気伝導度データも同時に取得している。MR のデータへの CTD 架台の影響を最小限にするため MR の乱流センサーの先端が CTD 架台の最下部に来るように位置を調整している。



左：CTD 架台に搭載した MR
右：CTD 観測

(2)観測航海

本研究では、2009 年より蓄積されてきた MR 観測データのうち、比較のための VMP 観測のデータが揃っているデータセットを抜粋して、両データを比較した。

本研究期間中に実施された以下の観測航海においても CTD 観測の際には、CTD 架台に MR を搭載し、乱流データを取得した。一部の航海においては、比較のための VMP 観測も実施した。

学術研究船淡青丸(海洋研究開発機構所属)
KT-11-5 次航海(2011/4/13-4/22)、KT-11-23 次航海(2011/9/18-30)、KT-12-5 次航海(2012/4/9-4/16)

学術研究船白鳳丸(海洋研究開発機構所属)
KH-12-5 次航海(2012/10/7-11/8)、KH-13-3 次航海(2013/4/2-5/1)、KH-13-7 次航海(2013/12/11-2014/2/12)、KH-15-1 次航海(2015/3/6-3/26)

海洋地球研究船みらい(海洋研究開発機構所属)

WOCE-P01 ライン観測航海(2014/7/17-8/24)
ロシア船ゴルディエンコ号
(2011/7/25-8/22)

ロシア船マルタノフスキー号
(2014/6/2-7/8)

(3)解析手法

MR および VMP の流速シアプローブに

より得られた流速シアア、および、高速水温計により得られた水温の鉛直微細プロファイルは約 10m の小区間にわけ、それぞれ鉛直波数スペクトルを計算した。流速シアアのスペクトル解析の際には加速度データを用いて本体の振動の影響はできる限り取り除いた。一例として、代表的な深度区間でのスペクトルを図 1 に示す。スペクトルの形状から積分上限の波数を定め、流速シアアスペクトルの積分からは乱流エネルギー散逸率 ϵ (W/kg) を 温度の鉛直勾配のスペクトルの積分からは水温消散率 χ_T (K²/s) を求めた。

等方性乱流の流速シアアスペクトルの普遍的な形状は、観測データからのスペクトルとして Nasmyth (1970) によって提唱されている。測定されたシアアスペクトルの良否の判断にはこれを用いる。温度勾配のスペクトルについては、Batchelor (1959) や Kraichnan (1968) により、普遍的スペクトル (Batchelor スペクトル、Kraichnan スペクトル) が導かれており、本研究の解析では Kraichnan スペクトルを使用した。温度勾配に対する普遍的なスペクトルは ϵ と χ_T に依存するため、普遍的スペクトルの形状に観測されたスペクトルをフィットすることで温度の鉛直微細プロファイルから ϵ を見積もることも可能である。

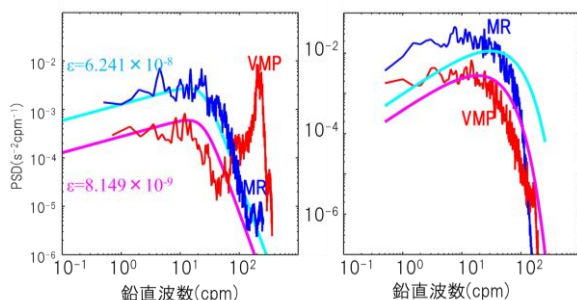


図 1 流速シアアスペクトル(左)と温度勾配のスペクトル(右)。それぞれ普遍的スペクトルを重ねてある。

4. 研究成果

(1) 淡青丸の KT-10-19 次航海(2010 年 9 月)において行われた MR および VMP500 の観測結果の比較を行った。MR のデータについては深度区間ごとに降下速度の標準偏差 σ (m/s) を求め分類の指標とした。図 2 上に VMP および MR により観測された流速シアアスペクトルから求めた乱流エネルギー散逸率 ϵ (W/kg) の比較を示す。Nasmyth スペクトルから外れてしまう区間での結果も比較のためプロットした。こうした区間では σ が大きいことがわかる。MR データのほうが、かなり過小評価の傾向があるが $\sigma < 0.1$ の場合にほぼ右上がりの分布となっている。一方、温度勾配のスペクトルから求めた水温消散率 χ_T (K²/s) の比較 (図 2 下) では、 σ の値にかかわらずほぼ右上がりの分布となっており、乱流エネルギー散逸率に比べ船体の動揺の影響を受けにくいことがわかった。

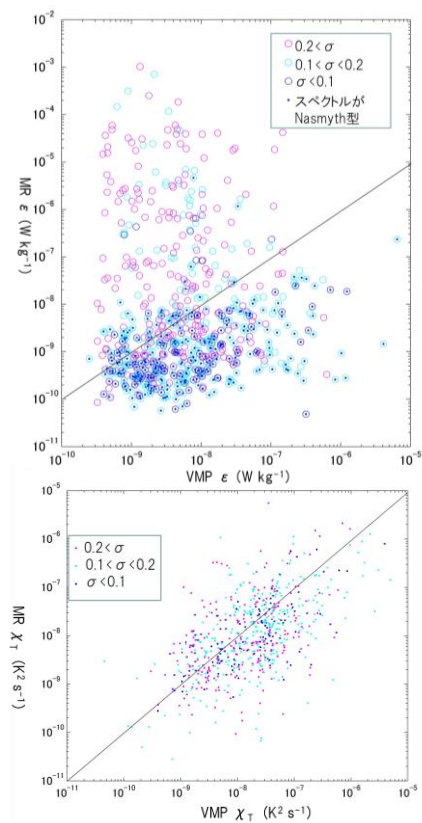


図 2 VMP および MR により観測された ϵ (上)および χ_T (下)の比較。

(2) (1)の結果を踏まえて、MR のデータから乱流強度を見積もるには、動揺の影響を受けやすいシアアプローブではなく、高速水温計により得られる、温度の鉛直微細プロファイルを利用することとした。高速水温計は、水に触れてから、その温度を感知するまでに、僅かな時間差があり、水温変動の測定値は高波数領域ほど、真の値と比べ小さな値となる。このためシアアプローブに比べ、強乱流域の測定には適していない。この差を補正するための高速水温計の周波数応答関数は、先行研究により様々な結果が得られているが、どのような周波数特性を持つかについては、用いるセンサーの規格や測定システムにも依存している可能性がある。本研究における周波数応答関数については、白鳳丸 KH-09-4 次航海中にアリューシャン列島周辺海域で行った VMP の観測で得られた、高速水温計、シアアプローブのデータを比較(図 3)すること

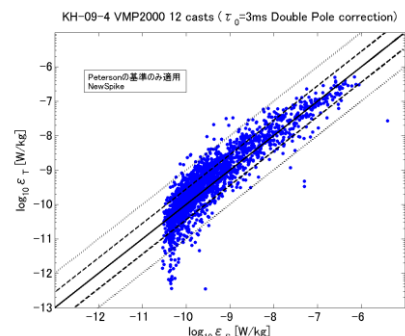


図 3 高速水温計、シアアプローブにより得られた ϵ の比較。

で、検討した。その結果、 $T/T_{true}=1/[1+(2\pi f\tau)^2]$ (T :測定温度、 T_{true} :真の温度、 f :周波数、 τ :時定数)で表される二極のローパスフィルタの形で $\tau=3[\text{ms}]$ の時にシアープローブからの見積もり値と最も整合的であるとみなされた。

(3) CTD 搭載型観測では、フレームの動揺に起因する降下速度 W の変動が大きい場合に、精度の悪化が目立った。精度の悪化の原因を詳しく調べてみると、 $(dW/dz)/W$ が大きい程、テイラーの凍結仮説から逸脱する波数領域で水温勾配スペクトルが乱され、スペクトルのピークが不明瞭となり、普遍的スペクトルと適合しなくなるデータの割合が増えていることが分かった。図4に示されるように $\log_{10}(dW/dz)/W > -0.5$ となるデータを除外すれば、MR が過大評価となってしまう点を自動的に除外することができる。

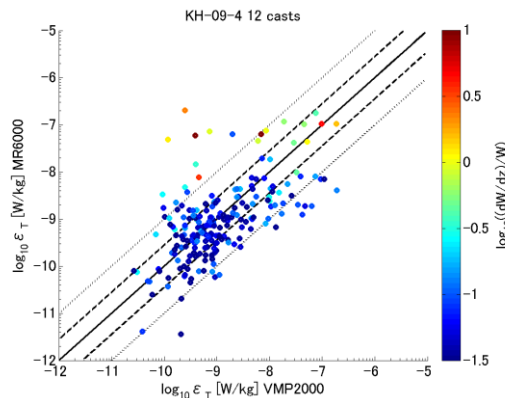


図4 MR と VMP に搭載した高速水温計のデータから求めた ϵ の比較。高速水温計のデータには(2)で分かった二極のローパスフィルタをかけてある。

dW/dz と W の関係を図5に示す。 W が $0.7[\text{m/s}]$ を下回ると $\log_{10}(dW/dz)/W > -0.5$ (図中実線より上) となるデータが表れ始める。本研究で用いたデータにおいては、 $0.7[\text{m/s}]$ を超える降下速度で観測を行えばスペクトル高波数側への異常を持たない良質なデータをより多く取得できたことになる。

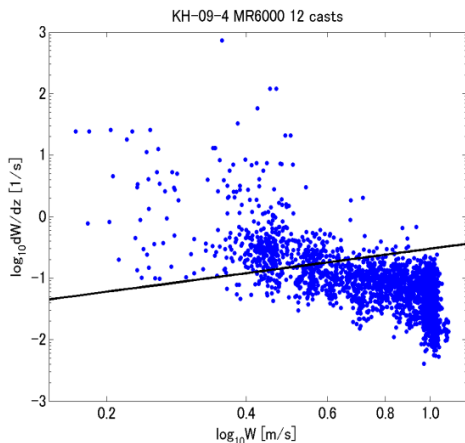


図5 dW/dz と W の関係。

(4)MR を用いて測定した水温勾配スペクトルは、VMP と比較して、スペクトルの質は僅かに劣っていた。しかし VMP と比較するとはるかに多くの観測を行うことができるため、動揺の影響で除外すべきデータが多くとも、有用なデータを大量に取得することができる。JAMSTEC 所属の研究船みらいによる、2014年7-8月の観測航海(WOCE-P01)の際にMRにより取得された乱流データを用いて、(2)(3)の結果に基づきデータを吟味することで、北太平洋 47°N 測線を横切る海底までの乱流鉛直横断面分布(図6)を得ることができた。

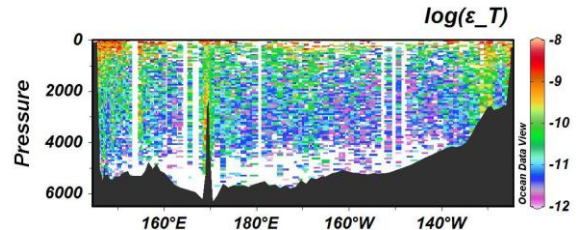


図6 ϵ の北太平洋 47°N 測線鉛直横断面分布図。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 2 件)

① 発表者名:長澤真樹・安田一郎
発表タイトル:CTD に搭載した乱流計測機器(MicriRider6000)による乱流観測の実用化に向けて

学会等名:日本海洋学会 発表年月日:平成25年3月24日

発表場所:東京海洋大学

② 発表者名:後藤 恭敬・安田 一郎・長澤真樹

発表タイトル:高速水温センサの精度検証及びCTD フレーム搭載型乱流計への適用

学会等名:日本海洋学会 発表年月日:平成26年9月15日

発表場所:長崎大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

長澤真樹 (Maki Nagasawa)

東京大学大気海洋研究所・技術専門職員

研究者番号:60447448

(2)研究協力者

安田一郎 (Ichiro Yasuda)

東京大学大気海洋研究所・教授

研究者番号:80270792

後藤恭敬(Yasutaka Goto)

東京大学大気海洋研究所・大学院生