

論文の内容の要旨

Development and application of turbulence estimation using a fast-response thermistor attached to a CTD frame

(CTD フレーム搭載型高速水温計を用いた乱流見積もり手法の開発と適用)

氏名 後藤恭敬

はじめに

乱流鉛直混合は、熱や物質を鉛直方向へ輸送し、海洋子午面循環や物質循環を制御し、栄養塩供給を通じて生物生産に影響する、極めて重要な物理過程である。時空間変動の大きな乱流鉛直混合の実態を明らかにするためには、多くの観測データが必要である。しかし、乱流微細構造の測定は難しく、特に深層に至る乱流観測は現在でも僅かである (Waterhouse et al., 2014 等)。このため、より簡便かつ頻繁に深層に至る乱流観測を行うことができる手法の開発が必要である。

乱流強度は流速シアプローブや高速水温計を用いて測定された、数 cm スケールの流速・水温変動から見積もられる。このうち、高速水温計は応答が十分ではないため、流速シアプローブが一般的に用いられている (Lueck et al., 2002)。流速微細構造測定は測器の振動に影響されるため、安定して自由落下する測器を用いる等、振動を極力抑えた機器を用いる必要がある。これらの観測には時間・手間がかかり、網羅的な観測には適していない。

本研究では、簡便な乱流観測を行うことを可能にするために、船舶観測において広く行われている CTD 観測 (Conductivity-Temperature-Depth) を取り付けたフレームに、小型乱流計を搭載する観測システムを導入する。このシステムで乱流観測が可能になれば、CTD 観測と同時に乱流データが取得されるため、広域・海底に至る乱流データを CTD

観測の度に得ることが可能となる。ただし、CTD 観測用フレームは、鋼製のケーブルで船体に繋がっており、船体の動揺の影響を直接に受けるため、振動に敏感な流速シアプローブを用いて乱流計測を行うことはできない。一方、鉛直下方に降下する CTD に取り付けられた高速水温計であれば、鉛直方向に変化が大きい水温の微細構造を測定でき、その情報から乱流強度を見積もることができる可能性がある。本研究では、CTD に取り付けられた高速水温計の測定によって乱流強度を見積もる手法の開発に挑戦するとともに、開発された手法を適用して広域かつ深層に至る観測に適用して乱流分布を明らかにすることを目的として、次の研究を行った。1) 時間的な応答が十分でないために現在用いられていない高速水温計を用いた乱流強度測定がどの程度可能なのか、高速水温計を用いた乱流計測の有効性を検証する。2) 高速水温計を CTD フレームに搭載した場合の有効性検証を行い、CTD 搭載型高速水温計観測という新たな乱流見積もり手法を開発する。その上で、3) 本手法を広域 CTD 観測に適用し、未だ知見の少ない北西太平洋深層の乱流分布を明らかにする。

手法・データ

1) 高速水温計の有効性検証のために、自由落下型乱流計に同時に搭載した高速水温計と流速シアプローブそれぞれから見積もった乱流エネルギー散逸率 ε を比較する。 ε は流速シアプローブによって測定した $\partial u'/\partial z$ を用いて $\varepsilon = 7.5\nu \langle (\partial u'/\partial z)^2 \rangle$ と表される。ここで u' は微細な水平流速、 ν は動粘性係数である。一方、高速水温計からは、Batchelor (1959) によって提案され Kraichnan (1968) によって改良された、等方性乱流の普遍水温スペクトルを、測定された水温勾配スペクトルにあてはめることで、水温拡散の影響を受け始める Batchelor 波数 k_B を見積もり、 $\varepsilon = k_B^4 \nu \kappa_T^2$ の関係式から ε を見積もる。ここで κ_T は水温の分子拡散係数である。本章では、千島列島、アリューシャン列島周辺及び北太平洋外洋域で得られた 112 測点分の自由落下型乱流計のデータを使用する。2) 高速水温計を CTD フレームに搭載した場合の有効性検証では、CTD フレーム搭載型観測と自由落下型観測を同地点で 2 時間以内に実施し、それぞれから見積もった同深度での ε を比較する。合計 72 測点分のデータを使用する。3) 気象庁及び海洋研究開発機構所属の海洋調査船の CTD フレームに高速水温計を搭載し、水温微細構造の広域観測を実施することで、北西太平洋深層乱流分布を示す。

結果

1) 高速水温計の有効性検証

高速水温計を用いて見積もった ε_T は、シアプローブを用いて見積もった信頼できる ε_S と比較して、 ε_S が大きくなる程、過小評価となった (図 1a)。 ε に従って k_B が大きくなる

ことから、大きな k_B 程、正確に見積もられていない。

高速水温計の応答不足のために、水温勾配の周波数スペクトルは、高周波数成分ほど真値から減衰する。この減衰は、単極もしくは双極のローパスフィルタ型の応答関数に近い周波数特性を持つことが知られている（それぞれ

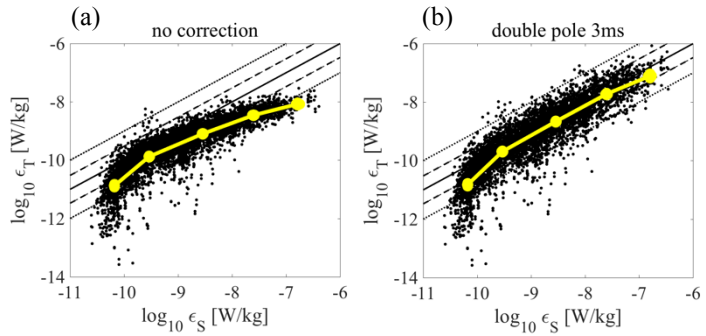


図 1. 自由落下型乱流計に搭載した流速シアプローブ（横軸）と高速水温計（縦軸）から見積もった ϵ の比較。(a) スペクトルを補正しない場合。(b) 時定数を 3 ミリ秒（双極型関数）として補正した場合。

れ Lueck et al., 1997; Gregg and Meagher, 1980)。そこで、これらの応答関数の逆数を水温勾配スペクトルに乗じることにより、高周波数成分を補正する。応答関数の時定数を 7 ミリ秒（単極）及び 3 ミリ秒（双極）とした場合、 $\epsilon_S = 10^{-10}$ - 10^{-7} Wkg $^{-1}$ の広い範囲で、 ϵ_T と ϵ_S の比が 3 以内と整合的であることがわかった（図 1b）。以上から、応答速度の不足を考慮した補正をスペクトルに施すことで、高速水温計を用いた ϵ の見積もりは流速シアプローブと同様に有効であることが明らかとなった。

2) CTD フレーム搭載型観測の有効性検証

CTD フレーム搭載型高速水温計から見積もった ϵ の多く（84%）は、同地点でほぼ同時に行った自由落下型観測から見積もった ϵ と整合した（図 2a）。一方、CTD フレームの降下速度 W [ms $^{-1}$] が小さく、その標準偏差 W_{sd} [ms $^{-1}$] が大きな場合には、CTD フレーム搭載型から観測から見積もった ϵ が、自由落下型と比較して 10 倍を超える過大評価となるデータが存在した。 $W_{sd} > 0.2W - 0.06$ となるデータ及び、 W が極小値を取るデータを除外した場合には、過大評価が無く、自由落下型と $\epsilon = 10^{-10}$ - 10^{-8} Wkg $^{-1}$ の範囲で整合する（比が 3 倍以内）データを得ることができた（図 2b）。以上より、CTD フレームの降下速度とその標準偏差で指標されるデータを除くことで、CTD フレーム搭載型観測が有効になることが明らかとなった。

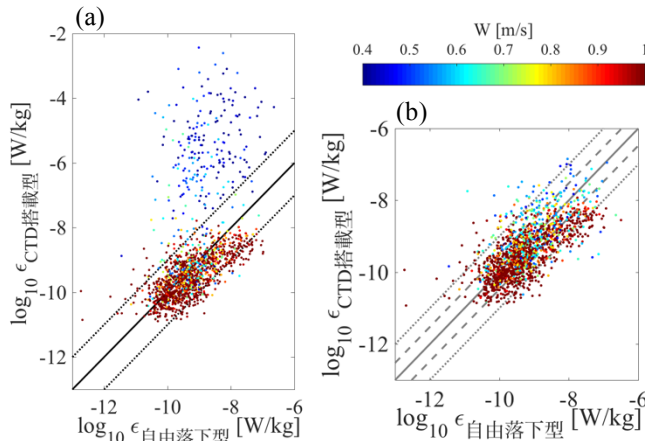


図 2. 自由落下型乱流計（横軸）と CTD フレーム搭載型乱流計（縦軸）から見積もった ϵ の比較。50 m 平均した後、同地点、同深度のデータを比較した。(a) 過大評価データを除外する前、(b) $W_{sd} > 0.2W - 0.06$ を満たす、または W が極小値を取るデータを除外した後。

3) 広域乱流観測への適用

1)、2)で開発した高速水温計を用いた乱流見積もり手法を広域観測データに適用することで、乱流微細構造に基づいた北西太平洋の深層乱流マップを初めて示した(図 3a)。 ε は密度躍層以浅・表層で比較的大きく、海山や海嶺など海底地形の複雑さに対応して大きな ε が観測される特徴が見られた。観測された ε を、深層水塊放射性炭素分布を再現した海洋大循環モデル (Oka and Niwa, 2013) で用いられ、内部潮汐エネルギー分布に基づいた ε と比較した。定性的な対応は見られたが(相関係数: 0.55)、定量的には数値モデルが 10 倍以上大きな値を示した(図 3b)。そこで、数値モデルのパラメータの中で、観測値に基づいて決定されていない、内部潮汐発生の直接影響から離れた領域(far-field)の ε_{FAR} と、背景場の拡散係数一定値 K_{BACK} を観測値に整合するように変更した。 ε_{FAR} を、既存の研究では鉛直一様であった構造から、浮力振動数 N^2 に比例する構造に変え、 $\varepsilon_{\text{BACK}}$ を鉛直拡散係数 $K = 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ から、観測で得られた最低値 ($K = 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) に変更した。この場合、現行のモデルよりも観測に近い分布を得た(相関係数: 0.50、比の平均値: 2.4、図 3c)。今後、強乱流海域、海底近傍、潮汐変動等を捉える時空間密度の高い観測データの蓄積によって、観測に基づくモデルで利用可能な乱流分布が得られることが期待できる。

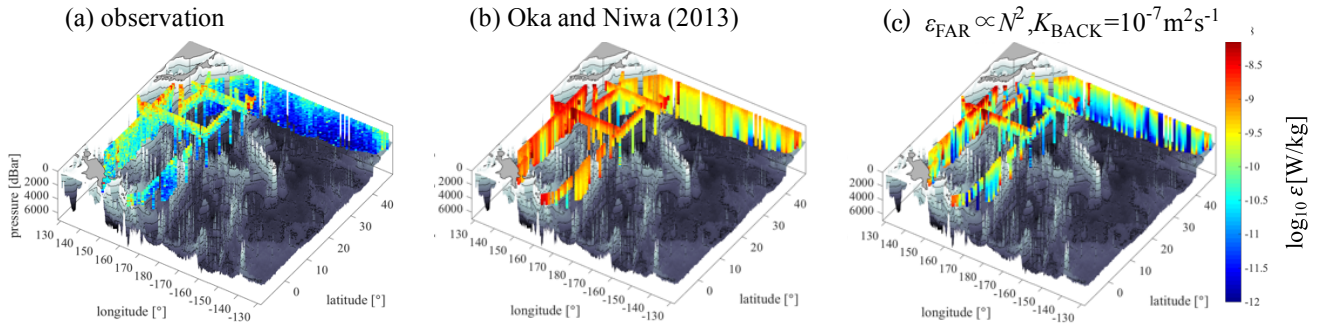


図 3. 北西太平洋における ε の空間分布。(a) CTD 搭載型高速水温計を用いて観測された ε 、(b) 海洋大循環モデル (Oka and Niwa, 2013) と同条件の ε 、(c) far-field の ε を N^2 に比例させ、バックグラウンドの鉛直拡散係数 K_{BACK} を $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ とした場合の ε 。