

学 位 論 文 題 名

Microscale Turbulent Structure and Turbulent Flux in the Upper Layer of the Western Equatorial Pacific Ocean

(西太平洋赤道域海洋表層の極微細乱流構造と乱流フラックス)

学位論文内容の要旨

大気-海洋相互作用においては海面水温が海洋の変動を大気に伝える窓口となるが、海洋混合層は海洋内部の変動をその海面水温に反映するメカニズムの鍵を握っている。エルニーニョ・南方振動（ENSO）現象の引き金となっていると考えられている西部太平洋赤道域では非常に深く海洋表層混合層が発達しており、海洋表層の変動に重要な役割を果たしていると考えられる微細乱流構造を把握することは、大気-海洋相互作用を理解する上で、極めて重要なことであるといえる。

本研究は、西部太平洋赤道域海洋表層の鉛直微細乱流観測のデータを解析することにより、海洋表層における鉛直微細乱流混合とそれに伴う乱流フラックスの構造の特性を把握すること、そして海洋内の物理的諸量のフラックスの見積もりや数値モデルにおいてサブグリッド・スケールの乱流を表現する上で必要とされる鉛直渦拡散係数のパラメタリゼーションについて検討することを目的として行った。

1984 年の $0^{\circ}, 140^{\circ}\text{W}$ における集中観測をきっかけとして、特に東部および中部太平洋赤道域において鉛直微細乱流構造の観測が、主にアメリカの研究者を中心としてさかんに行われるようになった。しかし、これまで西部太平洋赤道域では本格的な観測は行われてこなかった。本研究で用いたデータは、1992 年 11 月に赤道上の定点 ($0^{\circ}, 156^{\circ}\text{E}$) で約 2 週間にわたり行われた TOGA-COARE 集中観測で得たものである。その意味で、本研究は西部太平洋赤道上で行われた微細乱流観測の初めての解析と言える。

まず、第 2 節では、本研究で解析したデータを観測する際に用いた、Microstructure Profiler (MSP) について紹介した。MSP はサンプリング間隔が 0.01sec と非常に短く、またシアープロープと呼ばれる微細流速シアを観測することが出来る特殊なセンサーを備えており、これによって海洋表層 250~300m の微細乱流構造の観測を行う。取得されるデータは、水温、電気伝導度、深さ（圧力）、水温・電気伝導度それぞれの微細鉛直勾配、そして微細流速シアである。特に微細流速シアからは、乱流混合の基本的なパラメータである乱流エネルギー散逸率 (ϵ) が求められる。

第 3 節では、前半で 1992 年 2 月に TOGA-COARE 観測に先立って行われた JAPACS92 観測において得られた子午線観測 (160°E , 175°E) のデータを用いて、エネルギー散逸率の子午線分布を調べた。太平洋赤道域では、表層を西向きに流れる南赤道海流の下を赤道潜流が東向きに流れることによって、その間に平均流の鉛直シアが大きい領域が存在する。こ

のようなシアーが大きな領域では、しばしばリチャードソン数 $Ri (= N^2/S^2)$ 、 N は浮力振動数、 S は平均流の鉛直シアー) が臨界値 (0.25) を下回る。このような Ri の値が低い領域で発生する不安定が乱流を発生させる原因となることから、微細乱流観測で得られる代表的なパラメータである乱流エネルギー散逸率が子午線分布において赤道域でピークを持つことが予想される。このような特徴は、微細乱流観測が多く行われている東部太平洋赤道域において結果が報告されているが、本研究の解析結果からも、西部太平洋赤道域においても赤道近辺に散逸率のピークが存在する事を示した。特に 175°E では Ri が低い領域で散逸率が高くなるとの関連がはっきりと見られた。

第3節の後半では、1992年11月に行われた TOGA-COARE 観測のデータから、海洋表層における乱流熱フラックスと熱収支を見積もった。この観測では、特に2週間にわたる定点観測で 79 というこれまでにない多くの鉛直プロファイルを得た。微細乱流混合によって等密度面を横切るフラックスが駆動されることから、海洋表層内における乱流混合は、大気-海洋間の熱や塩分(淡水)交換の媒介としても重要な役割を果たしている。特に、warm water pool と呼ばれる西部太平洋赤道域は、暖かい海水面温度が大気に強い影響を及ぼすことから、海洋表層の熱収支を把握することは重要である。本研究の結果から、海洋表層の貯熱量の変化は主に海表面を通じての熱流量と南北の移流によって説明され、乱流熱フラックスは海洋表層内における熱を分配する役割を果たしているに過ぎないことを示した。

第4節では、次に、乱流を特徴づける2つの無次元数、オーバーターンフルイド数 ($Fr_T = \epsilon^{1/3} N^{-1} L_c^{-2/3}$) とオーバーターンレイノルズ数 ($Re_T = \epsilon^{1/3} L_c^{4/3} \nu^{-1}$) を用いて、海洋表層の微細乱流構造の特徴を調べた (L_c はオーバーターン・スケール、 ν は粘性係数、 N は浮力振動数)。ここでまず、海洋表層をその力学的特徴から、海表面の日射に応答して日変化する層 (mixing layer)、80m 以浅に発達したほぼ等温の層 (mixed layer)、80m 以深のサーモクラインの3つの領域に分類した。80m 以浅の二つの領域 (mixing layer, mixed layer) では、約90%の領域が鉛直フラックスを維持できるレベルで乱流が発達しているが、サーモクライン内では20~40%の領域に過ぎない。また、サーモクライン内における乱流の発達、海表面の冷却よりも風に強く影響されることが明らかになった。

最後に、第5節で鉛直渦拡散係数 (K_p) のパラメータ化について検討した。乱流混合のパラメータ化は通常用いられる測器で測定できる量と乱流混合とを関連付けられることが望ましいが、これは第1に比較的簡単な観測で乱流フラックスを見積もることが出来るようになること、第2に数値モデルにおいてサブグリッドスケールの現象である乱流混合の効果を表現できるようになること、という2つの要請にとって重要となる。まず、Pacanowski and Philander (1981) 型とよばれるリチャードソン数 Ri による渦拡散係数の関数化を試みた。その結果、これまでの研究 (Peters et al., 1989; Kanari et al., 1992) と同様に鉛直渦拡散係数を Ri の関数で表現できることを示したが、同時に関数に用いられる定数がこれまでのものと大きく異なること、データのばらつきが非常に大きいことという問題点があることを示した。これに対して、無次元パラメータの解析からオーバーターンレイノルズ数と乱流強度 ($\epsilon \nu^{-1} N^2$) の間に強い相関関係があることを見出した。この関係を用いると、 L_c と N によって、鉛直渦拡散係数が $K_p \propto L_c^2 N$ の形でパラメータ化できることを明らかにした。この結果は従来の Ri によるパラメータリゼーションに比べはるかにデータのばらつきが小さい結果を与えるものである。また L_c は密度のプロファイルから求められる量であることから、乱流混合のパラメータ化の目的に大きく前進したといえる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 成 誠 一
副 査 教 授 菊 地 勝 弘
副 査 教 授 播磨屋 敏 生
副 査 助教授 見 延 庄士郎

学 位 論 文 題 名

Microscale Turbulent Structure and Turbulent Flux in the Upper Layer of the Western Equatorial Pacific Ocean

(西太平洋赤道域海洋表層の極微細乱流構造と乱流フラックス)

世界の気候変動に大きな影響を与えている ENSO(エルニーニョ/南方振動)を総合的に解明する TOGA(熱帯海洋・全球大気研究計画)が 1985 年から 1995 年にかけて計画されたが、その一環として、大気・海洋相互作用の実験的研究計画(TOGA-COARE)が 1992 年から 1993 年に米、日、仏、豪などの協力で行われた。申請者は、この観測に実際に参加し、海洋表層の乱流観測を実行し、取得したデータの詳細な解析により、西太平洋赤道上の乱流特性を初めて明らかにしたものである。この観測に用いた乱流計測装置は、水温・塩分のみならず、微細流速変動の鉛直シアーならびに、微細水温変動の鉛直傾度を鉛直スケール数ミリ間隔で計測記録できる自由落下型の特殊な装置(略称 MSP)で、現在、世界でも数台しか存在しないものの一つである。この集中観測に先立って行われた JAPACS 計画の航海では、赤道を挟む南北 5 度の経線上の乱流強度分布観測を行った。これにつづき、1992 年 11 月に行われた TOGA-COARE の集中観測では、赤道上の東経 156 度で 3 乃至 6 時間間隔で MSP を投入し、表層から 250m 深までの各種物理量の分布時系列データを、連続 12 日間にわたり取得した。

まず、経度線上のデータについては、水面下 5 m から混合層ベースまでの平均の乱流運動エネルギーの散逸率を算出し、散逸率の分布が赤道に向かって上昇し、赤道上でピークをもつこと、また、これが表層の南赤道海流とその直下を逆流する赤道潜流の間の大きなシアーに起因するシアー不安定による乱流生成によるものであることを示した。

さらに、集中観測データをもとに、計測深度全域にわたる乱流渦拡散係数の分布時系列を評価し、赤道域海洋表層の乱流熱フラックスの分布時系列を初めて求めるとともに、これを用いて、海洋表層の熱収支の時間変動を明らかに

した。従来は、海洋表層の熱収支を行うに際しては、乱流熱フラックスは微小量として無視するのがつねであったが、この評価によって、実測の乱流熱フラックスを考慮に入れた精度の高い熱収支が初めて行えるようになった。この評価から、下向きの乱流熱フラックスは、表層 20m 以浅で 10W/m^2 、30-70m ではほぼ一定の 5W/m^2 、70m 以深ではほとんど無視できるレベルに減少することをつきとめた。また、移流効果を未知量として、表層と下層の熱フラックスの差が表層に貯熱されるとの考えから熱収支を評価し、海面から入る正味の熱量との差が移流に起因するとして見積もった移流効果は、正味流入熱量の約 17%であることを明らかにした。

次に、申請者は、観測層に対する乱流計測量から評価される 2 つの無次元数、オーバーターンフルード数、オーバーターンレイノルズ数を用い、乱流混合に対するパラメータ解析を行い、深度毎の乱流活動度がこの二つの無次元量平面上で明示的に区分され、層の乱流活性状況の判定にきわめて有効であることを見出すとともに、これを利用して、風の効果が直接影響しないと考えられていたサーモクライン内の乱流活動度（散逸率と成層パラメータの比）に及ぼす風の効果を明らかにした。また、この解析の重要な成果として、全層の乱流活動度がオーバーターンレイノルズ数と極めて良い相関を示すことを見出し、この結果から、乱流渦拡散係数がオーバーターン・レングス・スケール (L_c) と成層パラメータ (N) でパラメータ化できることを見出した。この結果をもとに、散逸率にもとづいて求められた拡散係数と $L_c^2 N$ の関係を調べ、実際に、このパラメータ化が、従来のリチャードソン数に基づくものに比べ極めてばらつきが小さく、しかも、パラメータである L_c や N は CTD のような既存の測器でも計測できる量であるという利点がある。このことは、申請者が、従来の懸案であった拡散係数のパラメータ化に新たな提案を行ったものと極めて高く評価できる。

1 月 30 日および 2 月 2 日に申請者に対する専門試験を行い、申請者が理学博士たるに十分な学力を有すると判定した。

よって審査委員一同は、申請者が、北海道大学博士（理学）の学位を授与されるに十分な資格があるものと認定した。