博士（理　学）　丹　羽　淑　博

学位論文題名

Numerical study of nonlinear energy transfer from large generation scale down to small dissipation scale across the oceanic internal wave spectrum

（海洋内部波スペクトル内における励起スケールから散逸スケールまでのエネルギー輸送過程に関する数値的研究）

学位論文内容の要旨

海洋大循環モデルで再現される循環のパターンが乱流混合パラメータの大きさに鋭敏に依存することからわかるように、高精度な海洋大循環モデルを構築するためには乱流混合の的確なパラメタリゼーションが必要不可欠である。海洋の中・深層における乱流混合を引き起こすために必要なエネルギーは、もともと大気擾乱や潮流と海底地形の相互作用などによって励起されるラージスケールの内部波のエネルギーが、非線形相互作用を通じて、乱流混合・散逸スケールまで海洋内部波スペクトル内をカスケードアップすることにより供給されている。したがって、海洋内部波の励起スケールから散逸スケールまでのエネルギーの流れを明らかにすることで、より観測しやすい内部波励起源の情報から乱流混合のパラメタリゼーションが出来るものと考えられる。本研究では、この乱流混合のパラメタリゼーションを行うための基礎研究として、海洋内部波の励起スケールから散逸スケールまでのエネルギー輸送過程を数値実験を行うことにより調べた。

本研究ではまず最初に、Garrett & Munk の海洋内部波スペクトルモデルを初期状態に設定してプリミティブ運動方程式を数値積分することにより、海洋深層で観測されるものと酷似した内部波平衡スペクトルを数値モデル内で再現した。特に、鉛直波長約 10m でスペクトルの勾配が変化してできるロールオフ領域の再現に成功したのは、本研究が初めてである。また特に、この内部波スペクトルの高鉛直波数・近慣性（$\omega \sim f$）領域が海洋の中・深層における乱流混合を大きくコントロールしていることが明らかになった。この領域のエネルギーレベルが上昇すると内部波場の所々に鉛直スケールの小さいシアー流構造が形成され、このシアー流に伴う臨界層において内部波が捕捉・砕波されることにより海洋の中・深層での乱流混合が引き起こされていると考えられる。

次に、こうして再現された内部波平衡スペクトルへの外力情報を得るために、海洋上を伝播する大気擾乱による内部波励起過程についての数値実験を行った。その結果、大気擾乱によって近慣性波（ω～f）が直接励起されるのに加え、鉛直低次モード・周波数 ω～2f の内部波が非線形効果によって励起されることが明らかになった。バイスペクトル解析を行った結果、この鉛直低次モード・ω～2f の内部波は、海洋上層に励起される鉛直高次モード・近慣性波の非線形相互作用を通じて効率的に励起されていることが分かった。

この大気擾乱のフォーシングに対する内部波平衡スペクトルの応答を調べるために、第１の数値実験で再現された内部波平衡スペクトルのそれぞれ低鉛直波数・近慣性領域および低鉛直波数・ω～2f の領域にスペクトルバンプを与え、その後のスペクトルの時間発展を調べた。その結果、近慣性領域にバンプを与えた場合はスペクトルの時間発展がほとんど見られないのに対し、ω～2f の領域にバンプを与えた場合はエネルギーが高鉛直波数・近慣性領域へとカスケードアップし、この結果、内部波場に鉛直スケールの小さいシアー流が強化されることが分かった。このことは、大気擾乱によって励起される鉛直低次モード・ω～2f の内部波が海洋の中・深層における乱流混合の効率的なエネルギー供給源となることを示している。

以上の数値実験の結果から、内部波の励起スケールから散逸スケールまでのエネルギー輸送過程に関して以下のようなシナリオを初めて提出することができた｛*大気擾乱 ⇒ 海洋上層の鉛直高次モード・近慣性波 ⇒ 鉛直低次モード・周波数 ω～2f の内部波 ⇒ 海洋深層の内部波スペクトル内における鉛直高波数・近慣性領域へのエネルギーカスケードアップ ⇒ 鉛直スケールの小さいシアー流に伴う臨界層での内部波の捕捉・砕波 ⇒ 乱流混合*｝。

さらに、このシナリオの中で特に重要な役割を担っている ω～2f の内部波が、大気擾乱の通過に伴って現実の海洋中で励起されていることを、長期係留系流速データを詳細に解析することにより確認できた。

今後は、(1) 現実の風応力場を数値モデルに組み込むことにより鉛直低次モード・ω～2f の内部波の時空間的分布を求める。(2) これを、各地点における内部波平衡スペクトルに外力として与えることで乱流混合領域へとカスケードアップするエネルギー量を見積もる。以上の結果をもとに、海洋の中・深層における乱流混合率のマッピングを行っていく予定である。

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

副　査　　助教授　　日比谷　紀　之（東京大学理学系研究科）

学位論文題名

Numerical study of nonlinear energy transfer from large generation scale down to small dissipation scale across the oceanic internal wave spectrum

（海洋内部波スペクトル内における励起スケールから散逸スケールまでのエネルギー輸送過程に関する数値的研究）

近年の大型計算機のめざましい発展とともに、高解像度の海洋大循環モデルがさかんに提出されている。しかしながら、計算手法として差分法を採用している限り、依然として未解決のままに残されているのが、サブグリッドスケールのパラメタリゼーションの問題である。実際、数値モデルで再現される熱塩海洋大循環のパターンやその強さは、モデル内で仮定される乱流拡散パラメータの値、特に、内部重力波の砕波に伴う等密度線を横切る方向の混合パラメータの値に依存して大きく変化してしまう。現状では、この乱流拡散率の大きさどころかオーダーさえもよくわかっておらず、海洋の中・深層におけるそのグローバルな時空間分布を明らかにすることが、海洋現象ひいては気候変動の予測に必要不可欠な課題となっている。

従来、乱流拡散率の見積りは、マイクロスケールプロファイラーなどの測器を海洋中で鉛直方向にゆっくりと自由落下させ、流速の鉛直シアーをはかることによってなされてきた。しかしながら、この方法では、グローバルな乱流拡散率のマッピングは到底望むことができない。これを解決するため、申請者は、乱流拡散に使われるエネルギーが、元々は大規模スケールにおいて大気擾乱や潮流により与えられ、それが、内部重力波の非線形干渉を通じて、広いパラメータ空間を乱流スケールまでカスケードアップしてくることに注目している。本論文は、このエネルギーの流れを理論的におさえることで、より観測

しやすい外力場の情報から乱流拡散のグローバルな時空間分布を解明していくための基礎研究を完成させたものである。

具体的には、まず、線形モード波の重ね合わせとして経験的に定義されたギャレット・ムンクの平衡スペクトルを初期状態として数値実験を行い、線形モード波間の長時間にわたる非線形干渉を行わせることで、海洋の中・深層で観測されるものと酷似した内部波平衡スペクトルを再現した。続いて、この内部波スペクトルに対する外力として、海上を伝播する大気擾乱に注目した数値実験を行い、大気擾乱の伝播によって、海洋上層に強い近慣性流（ω～f）が誘起されるとともに、それらの非線形干渉によって周期 ω～2f ・鉛直低モードの内部重力波が生成されることを示した。実際に、これらの外力を力学的に再現した内部波平衡スペクトルに加えることで、この鉛直低モード・ω～2f の内部重力波が、3 波共鳴機構を通じ、海洋の中・深層における鉛直スケールの小さな近慣性流シアーを次第に誘起していくこと、そして、この鉛直高波数の近慣性流シアーに伴う臨界層にスケールの小さな内部重力波が吸収（臨界層吸収）されることで、エネルギーの散逸が行われていることを初めて明らかにした。さらに、北太平洋の北緯 27 度から 33 度の深海に約 1 年間係留された流速計データを詳細に解析することにより、このエネルギーカスケードの鍵となる鉛直低モード・ω～2f の内部重力波が、冬季に活発となる中緯度低気圧の伝播に伴って実際に励起されていることを確かめ、このエネルギーカスケードアップのシナリオの存在を確認した。特に、このデータ解析から、乱流拡散率は時空間的に一定ではなくて、空間的には北太平洋の西側で大きいこと、また、冬季の乱流拡散率は夏季のそれに比べて、オーダーが異なるくらい大きくなることも示唆され、時空間的に一定の乱流拡散パラメータを用いている現在の海洋大循環モデルへの警鐘ともいうべき結果を得ている。

以上のように、申請者の博士論文は、内部重力波の非線形相互干渉によるエネルギーカスケードアップに注目することによって、より把握しやすい外力エネルギーの時空間分布、特に、大気擾乱や潮流によって励起された鉛直低モード・ω～２f の内部重力波エネルギーの空間分布から、海洋の中・深層での乱流拡散率のマッピングが可能となることを明確に示したものである。この結果は、今まで、局所的かつ小規模スケールにとどまっていた乱流混合の分野の研究をグローバルな観点から位置づけることに成功したものであり、海洋大循環を始めとする今後の広い分野の海洋物理学の発展にはかりしれない貢献をしたものと考えられる。

よって申請者は、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める。