

## 論文の内容の要旨

Assessment of the finescale parameterizations of deep ocean mixing in the Antarctic Circumpolar Current region based on microstructure measurements and eikonal calculations

(南極周極流域における深海乱流パラメタリゼーションの有効性  
-乱流直接観測と波追跡シミュレーションの結果から-)

高橋 杏

### 1 イントロダクション

南大洋は、活発な渦活動を伴う世界最大級の海流・南極周極流と内部波場が共存する、非常に特殊な海域である。ここでは、上空を吹く偏西風の変動に伴い上層に励起される近慣性波と、南極周極流が急峻な海底地形と衝突することに伴い深層に励起される風下波が、それぞれ碎波することにより、強い乱流混合が生じると考えられている。南極周極流域における乱流混合強度の定量化は深層海洋大循環像を解明するためにも重要な課題である。

ファインスケール (鉛直波長  $O(10 - 100 \text{ m})$ ) の流速シアおよび密度ストレインの鉛直波数スペクトルのエネルギーレベルからマイクロスケール (鉛直波長  $1 \text{ m}$  以下) の乱流混合強度を推定するファインスケール・パラメタリゼーションは、直接観測が困難な乱流混合強度の空間分布を効率よく把握する方法として広く用いられてきた。

しかしながら、南極周極流域では、このパラメタリゼーションから推定した乱流エネルギー散逸率  $\varepsilon_{fine}$  が実際の乱流エネルギー散逸率を過大評価してしまうことが報告されている。この事実は、背景内部波間の非線形相互作用に伴うエネルギーカスケード過程を想定した既存のファインスケール・パラメタリゼーションでは、内部波場と地衡流場が共存する南極周極流域における乱流混合過程を把握するのに不十分であることを示唆する。本研究では、南極周極流域における乱流混合過程を解明するため、(1) 既存のファインスケール・パラメタリゼーションは何故過大評価傾向を示すのか、(2) 乱流混合の主要因である「内部波の碎波」において地衡流シアがどのような役割を果たすのか、に着目し、現場観測と数値実験の両面から検証する。

## 2 乱流直接観測データの解析

本章では、南極周極流域で実施された乱流混合強度、水平流速、水温・塩分の同時観測のデータセットの解析を行った。ファインスケール・パラメタリゼーションから推定した  $\varepsilon_{fine}$  は、特に乱流エネルギー散逸率が大きい場所で、直接観測値  $\varepsilon_{micro}$  を過大評価するという傾向が確認された。この過大評価傾向 ( $\varepsilon_{fine}/\varepsilon_{micro}$ ) は、シアーおよびストレインの鉛直波数スペクトルから計算される内部波パラメータと強く相関しており、内部波エネルギーレベル  $E_{IW}$  が大きく、シアー/ストレイン比  $R_\omega$  が小さい場所で顕著だった。

これを受けて、シアーとストレインの鉛直波数スペクトルの形状を調べたところ、過大評価傾向が大きい場所ではスペクトルが鉛直低波数側（鉛直波数  $\sim 0.01$  cpm）に“hump（こぶ）”を持ち、ファインスケール・パラメタリゼーションにおいて暗黙に仮定されている、平坦な形状の鉛直波数スペクトルを特徴とする Garrett-Munk (GM) スペクトルモデルからは大きく歪んでいることがわかった。

シアースペクトルの“hump”は主に上層 2000 m 以内で確認された一方、ストレインスペクトルの“hump”は主に海底から 1500 m 以内で確認された。さらに、鉛直波数スペクトルの歪みと、内部波パラメータや平均流シアー  $\overline{U}_z$  との関係について重相関解析を用いて調べたところ、“hump”は、鉛直低波数の近慣性波や風下波のポケットが GM-like な内部波場に重なり合うことによって形成され、これらの内部波ポケットは、南極周極流に伴う地衡流シアーによって励起または増幅されていた可能性が示唆された。

## 3 波追跡シミュレーション I：鉛直波数スペクトルの歪みが与える影響

本章では、第 2 章で確認された鉛直波数スペクトルの歪み (hump) がファインスケール・パラメタリゼーションの推定精度に与える影響について定量的に調べるために、「波追跡シミュレーション (eikonal calculations)」を用いて内部波の碎波に伴う乱流混合過程の再現実験を行った。

波追跡シミュレーションでは、背景内部波場を構成する内部波ポケット (test wave) ひとつひとつが背景場のシアーによる屈折を受け、周波数・波数を変化させながら伝播していく過程を追跡する。test wave の鉛直波数がある閾値 (碎波限界) を超えると「碎波した」とみなし、その test wave が持っていたエネルギーと碎波までに要した時間から乱流エネルギー散逸率  $\varepsilon$  を計算する。

本章では、背景内部波および test wave のエネルギー分布として (1) GM 内部波場を与える standard 実験、(2) GM スペクトルの上に鉛直低波数の内部波ポケットを重ね合わせた内部波場を与える hump 実験を行った。両実験の比較から、鉛直低波数の内部波ポケットは高波数の test wave を碎波させやすくする「背景シアー」としての役割を果たすものの、自らカスケードダウンして碎波することはないため、 $\varepsilon$  には大きく寄与しないことがわかった。

ファインスケール・パラメタリゼーションは、平坦な形状の鉛直波数スペクトルを持つ GM スペクトルに基づいて定式化されているため、観測機器のノイズの影響を受けにくい「スペクトルの低波数帯のみ」からスペクトルレベルを推定することが一般的である。乱流混合に直接的に寄与しない“hump”に対応する低波数帯から推定されたスペクトルレベルは、碎波限界に近い高波数帯のスペクトルレベルよりも大きくなるため、ファインスケール・パラメタリゼーションは真の  $\varepsilon$  を過大評価する、ということが確認された。

ファインスケール・パラメタリゼーションにおける過大評価傾向の程度は、スペクトルレベルの推定に使用する鉛直波数帯の上限、カットオフ波数  $m_c$  に依存した。特に、小さい  $m_c$  を使用する場合には内部波エネルギーレベル  $E_{IW}$  が大きく、シアー/ストレイン比  $R_\omega$  が小さいときに過大評価傾向が顕著となり、このような内部波パラメータに対する依存性は観測結果と整合的であった。

## 4 波追跡シミュレーション II : 平均流シアアが与える影響

先行研究 (Waterman et al. 2014, Kunze and Lien 2019) では, 南極周極流域におけるファインスケール・パラメタリゼーションの過大評価の原因は, 風下波と南極周極流に伴う平均流シアア  $\overline{U_z}$  との間の「波-平均流相互作用」によって, 風下波エネルギーの一部が平均流に吸収され, 乱流混合が抑制されることではないか, という考察がなされた。しかしながら, この仮説は, 単色の風下波パケットと平均流シアアのみを考慮した非常に単純化された理論に基づいており, 風下波パケットが背景内部波場 (または他の風下波) から受ける影響については一切考慮されていない。

そこで本章では, 平均流シアアが内部波の砕波に与える影響, 特に波-平均流相互作用を通じて与える影響を定量的に評価するために, (1) 海底から伝播する風下波パケットが, 平均流シアア, または GM 内部波場を作るシアア, またはその両方によるドップラーシフトを受けながら砕波にまで至る過程を追跡する lee wave packet 実験, (2) GM 内部波場と平均流シアアが重なり合う場における乱流混合過程を再現する spectrum 実験, という 2 種類の波追跡シミュレーションを行った。

lee wave packet 実験の結果から, 風下波が平均流シアアだけでなく背景内部波場とも共存する現実的な状況では, 平均流シアアによる波-平均流相互作用は非常に小さくなることがわかった。さらに spectrum 実験の結果から, 背景内部波場に平均流シアアが重なることで, 内部波パケットが砕波にまで要する時間が短縮され, 乱流混合は強化されるため, 「平均流シアアに伴う波-平均流相互作用はファインスケール・パラメタリゼーションの過大評価傾向の原因にはなり得ない」ことが示された。

## 5 まとめ

ファインスケール・パラメタリゼーションの原案が提示されて以降, これまでは背景内部波スペクトルの「周波数方向の歪み」に着目した改良が行われてきた。それに対して本研究では, 地衡流と内部波場が共存する南極周極流域において, 背景内部波スペクトルの「鉛直波数方向の歪み」が大きくなるため, このようなスペクトルに既存のファインスケール・パラメタリゼーションを適用する際には, 使用する鉛直波数帯に十分注意する必要がある, ということが初めて示された。本研究で得られた成果は, 中規模渦活動の活発な他海域 (黒潮流域等) における乱流混合過程の解明や, 深層海洋大循環モデルにおける乱流パラメタリゼーションの精度向上に大きく貢献すると考えられる。

南大洋における乱流混合過程 (Figure 1) として, これまでは「乱流混合は近慣性波 (near-inertial waves) や風下波 (internal lee waves) の砕波によって生じるが, これに加えて, これらの内部波と地衡流 (geostrophic flows) との波-平均流相互作用 (wave-mean flow interaction) が重要である」と考えられてきた。これに対して本研究では, 乱流直接観測と波追跡シミュレーションで得られた知見から新解釈を提示する。まず, 乱流混合に直接的に寄与するのは鉛直高波数の内部波の砕波である。南極周極流域では, 鉛直低波数 (鉛直波数  $\sim 0.01$  cpm) の近慣性波や風下波のパケットが「背景シアア」として鉛直高波数の内部波の砕波を促進し, 強い乱流混合をもたらす。これらの鉛直低波数の内部波パケットは, より大きな鉛直スケールを持つ地衡流シアアによって励起・増幅されると考えられる。

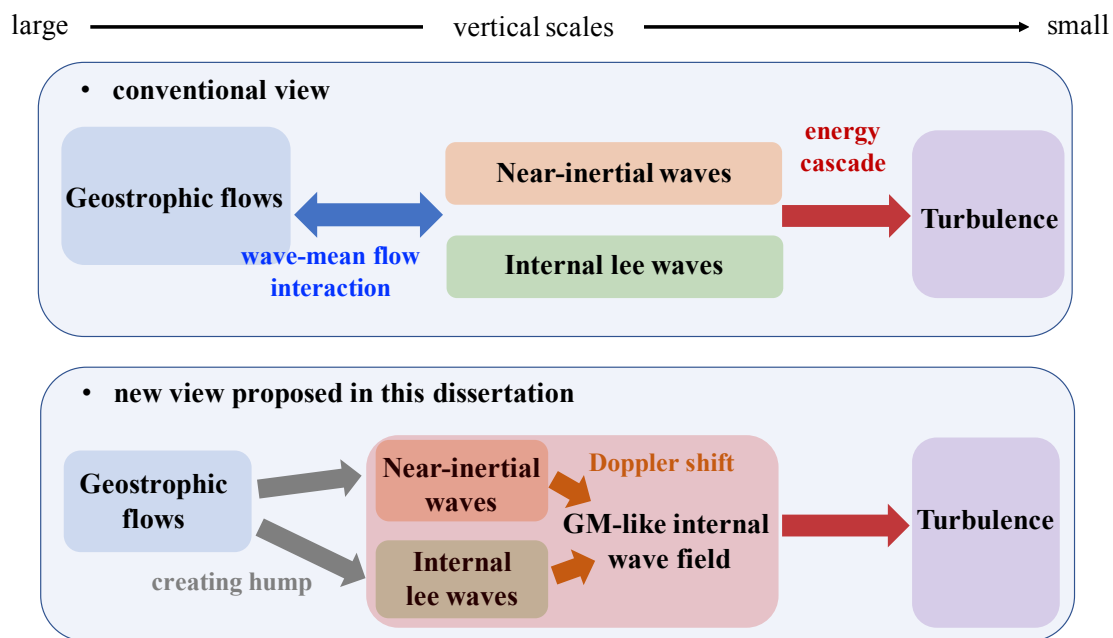


Figure 1: 南大洋における乱流混合過程の概略図. (上) 既存の解釈 (e.g., Waterman et al. 2014) と (下) 本論文で提示された新しい描像, が示されている.