

## 学位論文題名

## Instabilities and diapycnal mixing caused by tidally-generated large-amplitude lee waves

(潮流により生成された大振幅風下波が引き起こす不安定と鉛直混合)

## 学位論文内容の要旨

海洋における鉛直混合は、全球スケールまたは海盆スケールの熱塩循環だけではなく、物質循環や生態系にも影響を与える重要な物理過程であり、その主なエネルギー源は内部波の碎波である。特に潮流が速い陸棚域や列島域では、内部波の一種である大振幅非定常風下波が碎波した結果、外洋域と比べて強い鉛直混合が引き起こされている。碎波する非定常風下波と鉛直混合を引き起こす乱流の空間スケールは大きく異なることから、碎波から乱流に至るまで遷移過程が存在する。しかし、この遷移過程は現象の強非線形性と空間スケールが小さいことから鉛直2次元空間でさえよくわかっていない。そこで、本論文では高解像度の鉛直2次元非静水圧モデルを用いて大振幅非定常風下波の碎波が鉛直混合を引き起こす過程を調べた。

前半では、大振幅非定常風下波の碎波が観測されたアリューシャン列島域アムチカ海峡をモデルケースとした数値実験を行った。その結果、大振幅非定常風下波の第一谷の上流側と下流側では遷移過程が異なることがわかった。上流側では、遷移過程を碎波から始まる三つの段階に分けることができる。第一段階では、大振幅非定常風下波の成長により密度逆転の領域が形成され、密度逆転領域で対流が生じた、つまり、大振幅非定常風下波が碎波し始めた。碎波は、過去の研究により示されてきた風下波の山のの上流側(前方碎波)だけでなく、下流側(後方碎波)でも生じることが本論文で初めて示された。第二段階では、不安定なシアで成長するKelvin-Helmholtz (KH)波がKH billowを形成するほど発達した。そして第三段階では、海底境界層が不安定となって成長するTollmien-Schlichting (TS)波が励起され、海底境界層内に渦を形成し、崩壊した。海洋においてもTS波が励起する可能性を示したのは本論文が初めてである。下流側では、大振幅非定常風下波による逆圧力勾配によって海底境界層が剥離し、渦が形成・崩壊を繰り返した。KH波とTS波の成長と崩壊および海底境界層由来の渦の崩壊は、大振幅非定常風下波の密度逆転に起因する対流と同様に鉛直混合を強化していることが示唆された。大振幅非定常風下波が碎波していることがわかっている他の海域または碎波することが予測されている海域においても、上記と似た遷移過程を経て鉛直混合が引き起こされている可能性がある。

前半の実験で励起されたKH波とTS波はそれぞれの波長と位相速度が近く、またKH billowの直下でTS波が発達していることから、KH波とTS波が共鳴することによってこれ

まで海洋で考えられてこなかった不安定が生じていることが示唆される。そこで後半では、前半で示した遷移過程の一部であるKH波とTS波の共鳴メカニズムを理論的に考察し、数値実験により検証した。先行研究によると、KH波は2つの渦波の共鳴によって成長し、TS波は渦波と粘着条件を満たすように生じる粘性応答の共鳴によって成長する。この2つの成長理論から、KH波とTS波の共鳴は2つの渦波と粘性応答の共鳴によって生じることが考えられる。数値実験によって共鳴メカニズムを検証した結果、2つの渦波と粘性応答は共鳴する位相関係にあり、新しい不安定が発達した。従って、理論的に考察したメカニズムによってKH波とTS波が共鳴し、新しい不安定が発達することが確かめられた。また、対流が生じる数値実験を行ったところ、KH波とTS波の共鳴による不安定は振幅が大きい擾乱が存在する流れ場においても発達できることが明らかになった。KH波とTS波の共鳴による不安定は大振幅非定常風下波が碎波している海域だけではなく、海底近くにジェットのような流れ場が存在する海域、例えばoverflowや密度流が生じる海域で生じる可能性がある。また、この不安定は海洋に限った現象ではなく、大気境界層でも生じる可能性があり、壁近くにジェット流がある流れ場にも適用できる。

本論文で明らかになった鉛直混合を引き起こす遷移過程の知見は、鉛直混合の理解とその見積り改良に寄与し、熱塩循環と物質循環の理解にも繋がることが期待される。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	三寺史夫
副査	教授	久保川 厚
副査	教授	大島 慶一郎
副査	講師	中村 知裕
副査	准教授	磯田 豊 (大学院水産科学研究院)

## 学位論文題名

### Instabilities and diapycnal mixing caused by tidally-generated large-amplitude lee waves

(潮流により生成された大振幅風下波が引き起こす不安定と鉛直混合)

海洋における鉛直混合は、全球から海盆スケールの熱塩循環に加えて、物質循環や生態系にも影響を与える重要な物理過程である。その主なエネルギー源は内部波の碎波である。特に潮流が速い陸棚域や列島域では、内部波の一種である非定常風下波が大振幅になり碎波した結果、外洋域より遙かに強い鉛直混合が引き起こされている。しかし、空間スケールの大きく異なる大振幅風下波の碎波と乱流との間に存在する遷移過程は、非線形性が強く空間スケールが小さいことから鉛直2次元空間でさえよく分かっていない。そこで、本論文では高解像度の鉛直2次元非静水圧モデルを用いて大振幅非定常風下波の碎波から鉛直混合に至る力学過程を調べた。

先ず第2章では、大振幅非定常風下波の碎波が観測されたアリューシャン列島域アムチトカ海峡をモデルケースとした数値実験を行った。その結果、大振幅非定常風下波の第一谷の上流側と下流側では遷移過程が異なることがわかった。上流側では、遷移過程を碎波から始まる三段階に分けることができる。第一段階として、大振幅非定常風下波の成長により密度逆転域が形成され、そこで対流が生じる、つまり、大振幅非定常風下波の碎波が始まった。碎波は、過去の研究により示されてきた風下波の山の上流側(波の進行方向)だけでなく、下流側(波の後方)でも生じることが本論文で初めて示された。第二段階では、不安定な流速シアで成長するKelvin-Helmholtz (KH)波が発達しKH billowを形成した。そして第三段階では、海底境界層が不安定となって成長するTollmien-Schlichting (TS)波が励起され、海底境界層内に渦を形成し、崩壊した。下流側では、大振幅非定常風下波による逆圧力勾配によって海底境界層が剥離し、渦が形成・崩壊を繰り返した。以上のKH波とTS波の成長と崩壊および海底境界層由来の渦の崩壊は、大振幅非定常風下波の密度逆転に起因する対流と同様に鉛直混合を強化していることが示唆された。

次に第3章では、上記の実験で見つかった、KH波とTS波が結合してできる新しい不安定モードについて理論的に考察し、数値実験により調べた。先行研究によると、KH波は2つの渦波の共鳴によって成長し、TS波は1つの渦波と粘着条件を満たすように生じる粘性モードの共鳴によって成長する。この2つの理論を組み合わせると、2つの渦波と粘性モードの共鳴によってKH波とTS波が結合する不安定モードが考えられる。実際、アムチトカの実験では

KH波とTS波は波長と位相速度が近く、上下に並んでいた。そこでアムチトカ実験の流速場を理想化した3角形のジェットについて、数値実験によって共鳴メカニズムを検証したところ、2つの渦波と粘性応答は増幅し合う位相関係を保ち、理論的考察通りに新しい不安定モードが発達した。ジェットの形状を変えた実験により、結合モードの成長率がKH波やTS波の数倍～十倍になる場合や、位相速度と波数がKH波とTS波のどちらか或いは両方と大きく異なる場合があることが示された。また、対流も加えた実験から、この結合モードは大振幅の擾乱が存在する流れ場においても発達できることが明らかになった。

第2章の遷移過程および第3章の不安定モードは、大振幅非定常風下波の碎波が起きていると推定されている世界各地で生じ、鉛直混合を引き起こしている可能性がある。従来、海洋学においてTS波とその重要性は全く認識されていなかった上に、全球鉛直混合を見積もる研究のほとんどで密度不安定のみが考慮されていたが、申請者の成果はこれらに修正を迫る重要な知見である。さらに第3章の不安定モードは、海底近くにジェットのような流れが存在する海域、例えばoverflowや密度流により深層水が形成される海域にも適用できることから、深層・底層の海水・物質循環に影響している可能性がある。さらには海洋以外、例えば大気境界層や一般に壁近くにジェット流がある流れ場にも適用できる。

以上のように、本論文で明らかになった鉛直混合を引き起こす遷移過程および新しい不安定モードの知見は、海洋中の鉛直混合の理解とその見積もりの改良に寄与し、熱塩循環と物質循環の理解を深めるのに加えて、不安定モードのメカニズムは海洋を含む流れの安定性に関して広く応用できる。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士（環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。