

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月18日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21740338

研究課題名（和文）振動数変化を考慮した内部波散乱の理論構築と散乱による鉛直混合の評価

研究課題名（英文） Internal wave scattering with frequency change and associated mixing

研究代表者

中村 知裕（NAKAMURA TOMOHIRO）

北海道大学・低温科学研究所・講師

研究者番号：60400008

研究成果の概要（和文）：振動数が増加する場合を含めた海洋内部波（浮力とコリオリ力を復元力とする海洋内部の波）の散乱・生成、それにより生じる海水の鉛直混合、および鉛直混合が海洋の構造や循環に与える影響について、理論・数値モデル・観測・データ解析から示した。

研究成果の概要（英文）：Scattering and generation of oceanic internal waves with frequency change, associated mixing, and the effects of mixing on ocean circulation are shown using theories, numerical models, observations, and data analyses.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 2010年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2011年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：気象・海洋物理・陸水学

キーワード：海洋物理、内部重力波、混合

1. 研究開始当初の背景

海洋における鉛直混合は海洋熱塩循環を通して気候の形成・変動や温暖化への海洋長期応答、および物質循環に影響を与えている。中でも陸棚斜面や海山などの海底地形上では非常に激しい混合が生じ、boundary mixing と呼ばれている。Boundary mixing の主な原因に内部波（内部重力波・内部慣性重力波）の散乱と生成が挙げられる。Boundary mixing による混合は全球熱塩循環の維持に有意な量に達すると見積もられており、内部波の散乱・生成は理論的興味のみならず、全球海洋循環の理解とモデリングに重要である。しかしながら、理論的に考察すると、内部波の散乱・生成時に振動数変化

が生じれば、内部波の性質や伝播については引き起こされる混合に大きく影響しうるにもかかわらず、そのような場合の散乱は全く検討されておらず、生成についても未だ分かっていないことが多い。

2. 研究の目的

振動数変化が生じる場合について、先ず、内部波の散乱過程を明らかにし、次に、現実海洋に於ける内部波の散乱・生成とそれによる鉛直混合を調べる。

3. 研究の方法

(1) 振動数保存を仮定した従来理論を拡張し、振動数変化が生じるパラメータ・レジーム

を含めた内部波散乱の理論を構築する。理論は準線形とし、非線形性の効果については数値実験で検討する。

(2) 現実の海洋において、振動数変化を伴う内部波の散乱・生成とそれによる鉛直混合を観測データと数値モデルを用いて調べる。

(3) 内部波による鉛直混合が海洋循環や下層大気に及ぼす影響を理論・数値モデルで調べる。(この項目(3)は申請時の計画には含まれていなかったが、内部波による混合の重要性を明らかにするためにいった。))

4. 研究成果

(1) 主な成果

① 散乱の理論

回転成層流体中の内部波は、地形(下側固体境界)で反射される際に地形の凹凸により波数が変わる「散乱」が生じ、散乱による波数空間でのエネルギー輸送により混合が促進される。研究代表者が導出した散乱波の準線形支配方程式とその理論解によると、地形の波数(k)が内部波による振動流の行程の逆数(ω/U)に比べて同程度か小さいとき、この散乱の際に振動数に変化する、すなわち従来理論の仮定していた振動数保存が成立しないパラメータ・レンジがある(ω と U は入射波の振動数と流速振幅)。内部波の鉛直波数と水平波数の比は振動数に依存するため、振動数が変わると波数空間でのエネルギー輸送が変わり、生じる混合の大きさに影響する。

② 散乱の数値実験

数値実験により、先ず準線形理論の予測通り、比 kU/ω に応じて振動数に変化し、それに伴い伝播の特徴が変わることを定量的に確認した。すなわち、比 kU/ω が $kU/\omega \ll 1$ のときは散乱波の振動数は入射波の振動数に漸近し波の伝播は内部潮汐の特徴を持ち、 $kU/\omega \gg 1$ のときは振動数は kU に漸近し伝播は風下波の特徴を持ち、 $kU/\omega \sim 1$ のときは振動数は前述2ケースの和と差で近似され、伝播は内部潮汐と風下波を合わせた特徴を持つ。また、振動数変化に伴う鉛直波数の変化、及び上記の伝播の違いにより、散乱が引き起こす混合は地形の波数に依存することが示された。次に、入射波と散乱波の相互作用を調べ、入射波(と反射波)による流れの場が、散乱波に対して臨界層を形成し、臨界層で散乱波が強い混合を引き起こすことを明らかにした。

③ 内部波生成時の振動数変化(潮流起源風下波の生成)とそれによる混合

こうした内部波の振動数変化とそれによ

る混合が現実の海で生じるのかを調べるにあたり、散乱そのものの観測には大規模な予算を要するので、振動数変化のメカニズムが同じである風下波について生成とそれに伴う混合を調べた。その結果、慣性周期より周期の長い日周潮による大振幅風下波の生成(すなわち生成時の振動数変化)とその碎波の空間構造を観測することに成功した。また、過去の観測データから千島列島クルゼンシユテルン海峡でも風下波が生成されていることが示唆された。碎波に伴う鉛直混合を評価したところ、外洋平均値の1万~10万倍に達することが明らかになった。そこで、潮流による風下波の生成可能性と可能最大波高を全球で評価し、風下波の碎波による混合過程を数値シミュレーションで調べた。

④ 混合の影響

内部波による鉛直混合が海洋の水塊形成・流動構造・物質循環に与える影響について、オホーツク海・北太平洋を対象に数値モデル・理論モデルを用いて調べ、オホーツク海における高密度水生成、亜寒帯循環と亜熱帯循環のコミュニケーション、フロンの海洋内への取り込みと海洋内循環、および鉄(微量栄養物質)の海洋内循環に多大な影響を与えうことを示した。

鉛直混合が強い海域では、混合により海面水温が変化し、結果として大気にも影響がおよぶ。特に夏季の千島列島域等では、表層下の冷水が海面まで混ぜられることで、海面水温が周囲に比べ数度~10度近く低い。こうした特殊な海域における大気下層雲について数値シミュレーションを行い、下層雲形成には低海面水温による冷却が重要で、下層雲形成は低い海面水温の維持に寄与することが示唆された。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

散乱は内部波による混合および内部波の減衰に重要な過程の一つである。この散乱時に振動数変化が生じること、そしてそれが混合と減衰に大きな影響を与えることが初めて明らかになった。これは従来の理論および評価に修正を迫ると言う意味で重要な成果である。

散乱時の振動数変化と同じ原理で生じる、潮流による高振動数内部波の生成について、大振幅風下波生成とその碎波の空間構造の直接観測に世界で初めて成功した。その結果、風下波の碎波が従来考えられていたより遙かに強い混合を引き起こすことが示された。全球評価によると、こうした過程が生じている海域は多数有り、その重要性が示唆された。

実際、数値シミュレーションにより、これらの混合はオホーツク海から北太平洋にお

ける熱塩循環・物質循環に多大な影響を与えることが示唆された。

これらの成果は、全球の鉛直混合の強さと分布、熱塩循環・物質循環ひいては生態系のより良い理解ならびに数値モデルによる再現と予測の向上に繋がる。

(3) 今後の展望

海洋における鉛直混合は、海洋熱塩循環、物質循環、ひいては生態系や気候、および大気下層にまで影響する重要な過程である。しかし、本質的に非線形のため未だ不明な点が多い。海洋において混合に要するエネルギーの主な供給源である内部波は、その線形理論が60年代から80年代にかけてほぼ整備された。しかし、非線形性の効く場合については、まだ良く分かっていない現象が多く、内部波による混合の理解と評価に曖昧さをもたらしている。例えば、上記の主な成果では省略したが、大振幅内部波の砕波の数値実験により、砕波から乱流混合に至るには密度不安定だけでなく複数の種類の力学的不安定を経ており、それが最終的な混合の強さにかかわることが示唆された。このような砕波から乱流への遷移過程の効果は、現在の鉛直混合の評価では考慮されていない。海洋や気候およびその変動の理解および精度の良い再現・予測のためには、今後内部波の力学や混合に関する研究をさらに進める必要があるだろう。

5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

- ① Koseki, S., T. Nakamura, H. Mitsudera, Y. Wang: Modeling low-level clouds over the Okhotsk Sea in summer: Cloud formation and its effects on the Okhotsk high. *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 117, 2012, D05208.
- ② Mitsudera, H., K. Uchimoto and T. Nakamura: Rotating stratified barotropic flow over topography: Mechanisms of the cold belt formation off the Soya Warm Current along the northeastern coast of Hokkaido. *Journal of Physical Oceanography*, 査読有, 41, 2120-2136.
- ③ Misumi, D., D. Tsumune, Y. Yoshida, K. Uchimoto, T. Nakamura, J. Nishioka, H. Mitsudera, F. O. Bryan, K. Lindsay, J. K. Moore, S. C. Doney: Mechanisms controlling dissolved iron distribution in the North Pacific: A model study. *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 116, 2011, G03005.
- ④ Uchimoto, K., T. Nakamura, J. Nishioka, H. Mitsudera, M. Yamamoto-Kawai, K. Misumi,

D. Tsumune: Simulations of chlorofluorocarbons in and around the Sea of Okhotsk: Effects of tidal mixing and brine rejection on the ventilation. *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 116, 2011, C02034.

- ⑤ Uchimoto, K., T. Nakamura, and H. Mitsudera: Tracing dense shelf water in the Sea of Okhotsk with an ocean general circulation model. *Hydrological Research Letters*, 査読有, 5, 2011, 1-5.
 - ⑥ Sasajima, Y., H. Hasumi, and T. Nakamura: A sensitivity study of the dense shelf water formation in the Okhotsk Sea. *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 115, 2010, C11007.
 - ⑦ Nakamura T., Y. Kawasaki, T. Kono, and T. Awaji: Large-amplitude internal waves observed in the Kruzenshtern Strait of the Kuril Island Chain and possible water transport and mixing. *Continental Shelf Research*, 査読有, 30, 2010, 598-607.
 - ⑧ Nakamura T., Y. Isoda, H. Mitsudera, S. Takagi, M. Nagasawa: Breaking of unsteady lee waves generated by diurnal tides. *Geophysical Research Letters*, 査読有, 37, 2010, L04602.
 - ⑨ Nakamura T., T. Toyoda, Y. Ishikawa, and T. Awaji: Effects of mass source/sink at the western boundary on the wind-driven gyres: Implications for the ventilation of the North Pacific intermediate layer through convection in the Okhotsk Sea and tidal mixing at the Kuril Straits. *Journal of Oceanography*, 査読有, 66, 2010, 41-60.
 - ⑩ Matsuda, J., H. Mitsudera, T. Nakamura, K. Uchimoto, T. Nakanowatari, N. Ebuchi: Wind and buoyancy driven overturning circulation in the Sea of Okhotsk. *Deep Sea Research, Part I*, 査読有, 56, 2009, 1401-1418.
 - ⑪ Nakamura T. and T. Awaji: Scattering of internal waves with frequency change over rough topography. *Journal of Physical Oceanography*, 査読有, 39, 2009, 1574-1594.
- [学会発表] (計 65 件)
- ① Abe, S. and T. Nakamura: Transition process from breaking large-amplitude internal waves to turbulence. 2012 Ocean Sciences Meeting, 2012/2/23, Salt Palace Convention Center (USA).
 - ② Nakamura, T., J. Nishioka, T. Ono, H. Mitsudera: Winter mixed layer development by subtropical water intrusion over subarctic water and associated iron supply. 2012 Ocean Sciences Meeting, 2012/2/22, Salt Palace Convention Center (USA).
 - ③ 内本圭亮, 中村知裕, 西岡純, 三寺史夫: 海洋

- 中の鉄循環のモデリング：オホーツク海とその周辺。第 10 回 HSS ワークショップ，2012/2/17，北海道大学（札幌）。
- ④ S. Abe and T. Nakamura: Diapycnal mixing generated by breaking of tide induced large-amplitude internal waves. IUGG2011, 2011/7/28, Melbourne Convention & Exhibition Centre (Australia).
- ⑤ 中村知裕：西岸境界における海水の流入流出が風成循環に与える影響—日本海とオホーツク海の効果—。2011 年度日本海洋学会春季大会，2011/3/25，東京大学（柏）。
- ⑥ 武内祐樹，中村知裕，内本圭亮：クリル海峡における拡散係数の時間変化に関する数値実験。2011 年度日本海洋学会春季大会，2011/3/23，東京大学（柏）。
- ⑦ 中村知裕：千島列島域における 順圧潮流による小規模渦生成。第 9 回 HSS ワークショップ，2011/2/24，北海道大学（札幌）。
- ⑧ 中村知裕：オホーツク海を起源とする熱塩循環の概略説明。2010 年度日本海洋学会秋季大会，2010/9/10，東京農業大学（網走）。
- ⑨ 中村知裕，豊田隆寛，石川洋一，淡路敏之，三寺史夫：西岸境界における海水の流入流出が風成循環に与える影響—オホーツク海と千島列島を念頭において—。2010 年度日本海洋学会秋季大会，2010/9/8，東京農業大学（網走）。
- ⑩ 中村知裕：環オホーツク圏を中心とした大気・海洋シミュレーション。JHPCN 第 1 回シンポジウム，2010/9/1，東京大学（東京）。
- ⑪ Nakamura, T., Y. Kawasaki, T. Kono, and T. Awaji: Large-Amplitude Internal Waves Observed in the Kruzenshtern Strait of the Kuril Island Chain and Possible Water Transport and Mixing. 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, 2010/6/24, Taipei International Convention Center (Taiwan).
- ⑫ Nakamura, T., T. Toyoda, Y. Ishikawa, and T. Awaji: Effects of Mass Source/Sink at the Western Boundary on the Wind-Driven Gyres: Implications for the Ventilation of the North Pacific Intermediate Layer through Convection in the Okhotsk Sea and Tidal Mixing at the Kuril Straits. 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, 2010/6/22, Taipei International Convention Center (Taiwan).
- ⑬ Nakamura, T.: Scattering of Internal Waves with Frequency Change over Rough Topography. EGU General Assembly 2010, 2010/5/7, Austria Center Vienna (Austria).
- ⑭ Abe, S. and T. Nakamura: Diapycnal Mixing Induced by Diurnal Tidal Flow in the Aleutian Passes. EGU General Assembly 2010, 2010/5/7, Austria Center Vienna (Austria).
- ⑮ Nakamura, T., Y. Isoda, H. Mitsudera, S. Takagi, M. Nagasawa, and S. Abe: Direct Observation of a Breaking Unsteady Lee Wave Generated by Diurnal Tides and an Estimate of its Global Occurrence. EGU General Assembly 2010, 2010/5/6, 2010/5/7, Austria Center Vienna (Austria).
- ⑯ 中村知裕，磯田豊，三寺史夫，高木省吾，長澤真樹，阿部祥子：日周潮流により生成された大振幅風下波とその碎波の直接観測。2010 年度日本海洋学会春季大会，2010/3/28，東京海洋大学（東京）。
- ⑰ 阿部祥子，中村知裕：アリューシャン列島域における潮流による鉛直混合の数値実験。2010 年度日本海洋学会春季大会，2010/3/28，東京海洋大学（東京）。
- ⑱ 中村知裕，古関俊也：オホーツク海高気圧と下層雲のシミュレーション。第 8 回 HSS ワークショップ第 1 回 GFRG ワークショップ合同会議，2010/3/11，北海道大学（札幌）。
- ⑲ Nakamura, T., Y. Isoda, H. Mitsudera, S. Takagi, M. Nagasawa: Breaking of Unsteady Lee Waves Generated by Diurnal Tides. 2010 Ocean Sciences Meeting, 2010/2/24, Oregon Convention Center (USA).
- ⑳ Nakamura, T.: Modeling the Pan-Okhotsk region. ILTS International Symposium "Frontier of Low Temperature Science", 2009/11/9, Hokkaido University (Sapporo).
- ㉑ 中村知裕，三寺史夫，小埜恒夫：冬季親潮前線付近のサブメソスケール過程と表層への栄養塩供給。2009 年度日本海洋学会秋季大会，2009/9/27，京都大学（京都）。
- ㉒ Nakamura, T., Y. Isoda, M. Nagasawa, S. Takagi, T. Wagawa, H. Mitsudera: Tidally-generated large-amplitude internal waves and associated mixing in the Amchitka Strait, the Aleutian Islands. MOCA-09, IAMAS, IAPSO, IACS 2009 Joint Assembly, 2009/7/21, Palais des Congres de Montreal (Canada).
- 〔図書〕（計 1 件）
- ① 三寺史夫，中村知裕：北海道大学出版会，環オホーツク海地域の環境と経済（第 3 章数値モデルを用いた環オホーツク地域の環境研究），2012，61-88。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 知裕 (TOMOHIRO NAKAMURA)
北海道大学・低温科学研究所・講師
研究者番号：60400008

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし