

論文内容の要旨

Evaluation of tidal mixing in the Kuril Straits and its impact on the formation of North Pacific Intermediate Water

(クリル海峡における潮汐混合の定量的見積もりと
その北太平洋中層水形成に果たす役割の評価)

田中 祐希

1 本研究の背景と目的

オホーツク海と北太平洋とを隔てるクリル海峡には、日周潮を主体とする強い潮汐流が存在する [Katsumata et al., 2001, 2004; Rabinovich and Thomson, 2001; Ohshima et al. 2002]。このような強い潮汐流が急峻な海底地形と相互作用することでクリル海峡では活発な鉛直乱流混合が誘起されている。例えば Nakamura et al. [2000] および Nakamura and Awaji [2004] は鉛直 2 次元モデルおよび 3 次元モデルを用いた数値実験を行い、 $1,000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ に達する大きな鉛直乱流拡散係数が海底地形直上に存在することを示した。さらに彼らは、この強い鉛直乱流混合が、海底地形を越える日周潮汐流により励起される風下波の碎波に伴って発生していると考えた。クリル海峡内における局所的に強い鉛直混合の存在は、乱流の直接観測によっても示されている [八木, 2008]。

この鉛直乱流混合は、北太平洋亜熱帯循環域の広範囲にわたって見られる塩分極小で特徴づけられた北太平洋中層水の形成を強くコントロールしていると考えられている。すなわちクリル海峡での鉛直混合は、北太平洋中層水の起源となるオホーツク海中層水をさらに低塩分化・低渦位化するとともに [Nakamura and Awaji, 2004; Yasuda, 2003; 2004]、深層からの湧昇とそれに伴う熱塩循環を強化することで、親潮による亜熱帯域への低塩分・低渦位水の輸送を促進することが指摘されている [Tatebe and Yasuda, 2004]。これらの結果を踏まえて、Nakamura et al. [2006] は、海洋大循環モデル内のクリル海峡全域にわたり一様に $200 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ という大きな鉛直乱流拡散係数を仮定した場合にのみ現実的な北太平洋中層水の空間分布が再現され得ることを示した。

しかしながら、この $200 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ という大きな鉛直乱流拡散係数は、あくまで北太平洋中層水を再現するためのチューニングパラメータとして与えられたものに過ぎない。観測や数値実験で得られている強い鉛直混合がクリル海峡内に普遍的に存在するものなのか、そして海洋大循環モデルで仮定されている $200 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$

という大きな鉛直拡散係数が海峡全域を代表する値として妥当なものなのかどうかについては明らかにされていない。

本研究では、まず、クリル海峡内における鉛直乱流拡散係数の正確な空間分布を明らかにした。さらに、得られた鉛直拡散係数を海洋大循環モデルへと組み込むことで、クリル海峡内の鉛直混合が北太平洋中層水の形成に果たす役割の再評価を行った。

2 衛星海面高度データを用いたクリル海峡内の潮汐エネルギー散逸量の見積もり

まず、水平2次元モデルで計算されるオホーツク海の潮位を人工衛星 TOPEX/POSEIDON によって得られる海面高度データと比較することで、内部波へのエネルギー変換という形でクリル海峡内で失われる潮汐エネルギー量を見積もった。

計算領域としてオホーツク海の全域と北太平洋の一部を含む領域を設定し、全球潮汐モデルで得られる主要4分潮それぞれの潮位を開境界で与えてモデルを駆動し、オホーツク海の潮汐場を再現することを試みた。数値実験で得られる潮位は、北太平洋においてはほぼ正確に観測結果を再現できるのに対し、オホーツク海内部では観測結果との差異が大きくなってしまったことがわかった。解析の結果、この差異を解消するには、北太平洋から流入する順圧潮汐がクリル海峡内で内部波を励起することでエネルギーを失う過程を考慮する必要性のあることが明らかになった。

この効果を考慮するため、モデル内の運動方程式中に、順圧潮汐流速と海底地形の勾配に依存する形の応力項を付け加えた。応力項中の内部波の波長に相当する値をチューニングパラメータとみなして様々に変化させ、オホーツク海内部の計算潮位が観測結果と最も合致するように内部波エネルギーへの変換率を決定した。この応力項を加えることによって、オホーツク海内部における計算潮位と衛星海面高度データとの2乗平均誤差は各分潮に対して半分程度にまで減少させることができた。この場合の計算結果に対するエネルギー解析から、最も主要な K_1 潮汐については、北太平洋からオホーツク海へと流入する潮汐エネルギーのうち 20.4 GW がクリル海峡内で失われ、そのうち 16.4 GW が内部波エネルギーへ変換すると見積もられた。主要4分潮の合計では、順圧潮汐から内部波へのエネルギー変換量は 36.6 GW と見積もられた。

3 3次元数値モデルを用いたクリル海峡内の K_1 内部潮汐に関する研究

前節で見積もられたエネルギー変換量をもとに鉛直拡散係数を見積もるには、励起された内部波エネルギーのうち局所的に散逸する割合（局所散逸係数） q 、その鉛直方向の減衰スケール ζ など明らかにする必要がある。そこで次に、前節で得られた日周潮 K_1 潮汐の順圧流速を3次元数値モデルの開境界で与え、内部波の励起・伝播・散逸を直接的に再現することによりこれらの値を見積もった。

エネルギー解析の結果、クリル海峡内で K_1 順圧潮汐から失われるエネルギーは前節の結果と整合的な値となった。得られたエネルギー散逸率の空間分布も前節の結果と酷似したものであった。さらに、海峡外へは K_1 周波数の2倍の周波数を持つ鉛直低次モードの内部重力波の形でエネルギーが伝播していくが、その割合はごくわずかであり、大部分の内部波エネルギーが海峡内で散逸してしまうため局所散逸係数は $q = 0.8-1.0$ となることが明らかとなった。この値は、一部の海域での観測結果に基づいて一般的に使用されている値 $q = 0.3$ の約3倍である。このように局所散逸係数が大きくなるのは、 K_1 潮汐の周波数がこの海域での慣性周波数以下であるために、励起された内部波エネルギーが島の周りに捕捉されながら散逸するためである。実際、各島の周りを時計回りに伝播する K_1 周波数の内部波が明瞭に認められ、その流速構造は低次モードの沿岸捕捉波で説明できることが示された（図1）。この沿岸捕捉波により海底近傍に形成された強い流速シアに伴って、鉛直方向の減衰スケール $\zeta \sim 200$ m の強い混合域が形成される。沿岸捕捉波の重要性は、慣性周波数を仮想的に0にすると海峡内のエネルギー散逸率が著しく小さくなってしまいうという実験結果からも確認することができた。クリル海峡での鉛直混合はこれまで風下波の碎波によって

説明されてきたが、本研究により沿岸捕捉波の存在の重要性が明らかにされた。

前節で見積もられた潮汐エネルギー変換量と本節で明らかにされた局所散逸係数 q およびエネルギー散逸率の鉛直方向の減衰スケール ζ に基づいて、クリル海峡内での鉛直拡散係数を見積もった。クリル諸島に沿った方向の鉛直断面図および鉛直平均した水平分布図を、それぞれ図2および図3に示す。海底近傍で局所的には $1,000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ に達する鉛直拡散係数も見出されるものの、クリル海峡全域（図3の黒線内）で平均した鉛直拡散係数は約 $25 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ となった。この値は従来の海洋大循環モデルにおいてクリル海峡内で仮定されてきた鉛直拡散係数 $200 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ と比べて1オーダーも小さい。

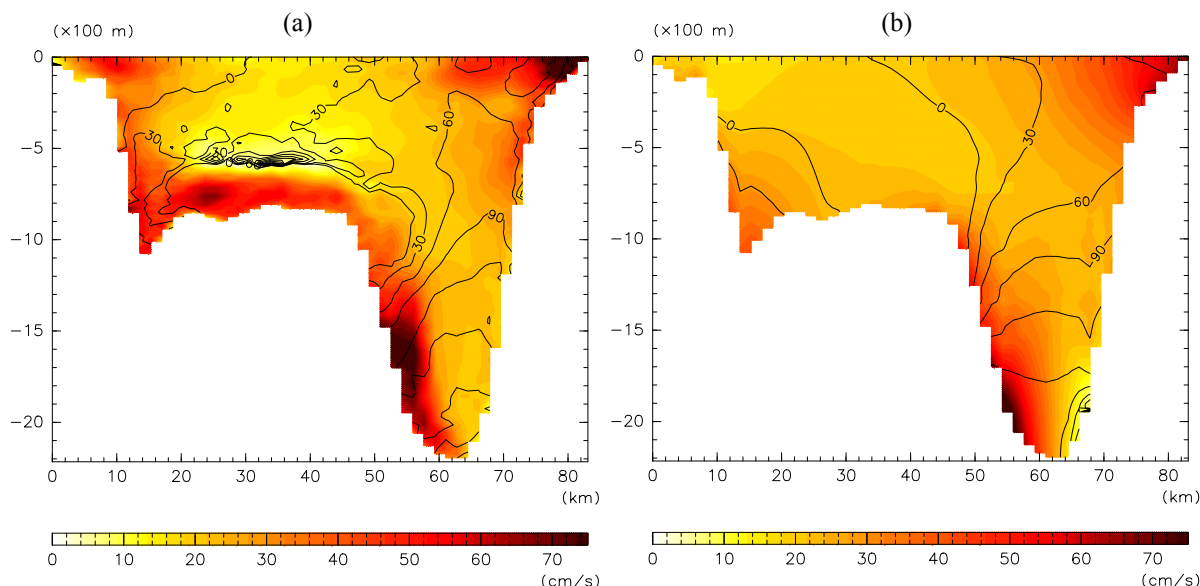


図1: ブッソル海峡（クリル海峡内の最深海峡）の横断面内における岸に平行な K_1 潮流の振幅（カラー）と位相（コンター）。(a) 数値実験から得られた分布。(b) (a)を再現するように各低次モードの沿岸捕捉波の振幅・位相を決定し、それらを重ね合わせて得られた分布。

4 クリル海峡内の潮汐混合が北太平洋中層水形成に果たす役割の再評価

最後に、前節までに見積もられたクリル海峡内の鉛直乱流拡散係数を渦許容海洋大循環モデルへ組み込むことで、その北太平洋中層水形成への役割の再評価を行った。計算の結果、従来の低解像度モデルではクリル海峡全域で一様に $200 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ という非現実的に大きな鉛直拡散係数を仮定しない限り再現できなかった北太平洋中層水が、渦許容海洋大循環モデルを用いた場合には本研究で得られた鉛直拡散係数を与えることで十分正確に再現できることが示された。そこでこのときの結果に基づいてクリル海峡での潮汐混合の効果を調べたところ、熱塩循環の強化、北太平洋中層水の低塩分化に対してそれぞれ約 0.5 Sv 、約 0.03 psu の寄与をもたらしているを見積もられた。これらの値は、いずれも従来クリル海峡での潮汐混合の効果へと帰着されてきた値と比べて1オーダー近く小さい。

これらの結果は、北太平洋中層水形成に対するクリル海峡内の潮汐混合の効果が実際にはわずかなものであり、渦許容モデルによって再現可能となる黒潮-親潮混合水域での中規模渦による等密度面混合などの効果の方がはるかに重要であることを強く示唆するものと考えられる。ただし、本研究では、オホーツク海陸棚域での海氷生成に伴って形成されて、北太平洋中層水の起源となる水塊の温度・塩分を気候値に緩和している。このため、クリル海峡内の潮汐混合が、北太平洋からオホーツク海へと流入する水塊を変質させ、このことによってオホーツク海陸棚域での水塊形成過程が変化して、最終的に北太平洋中層水の形成に影響を及ぼしている可能性は排除できない。この点を明らかにしていくには、海氷生成をはじめ、オホーツク海内部での物理過程を正確に再現できる海洋大循環モデルを用いた、より詳細な研究が必要不可欠である。

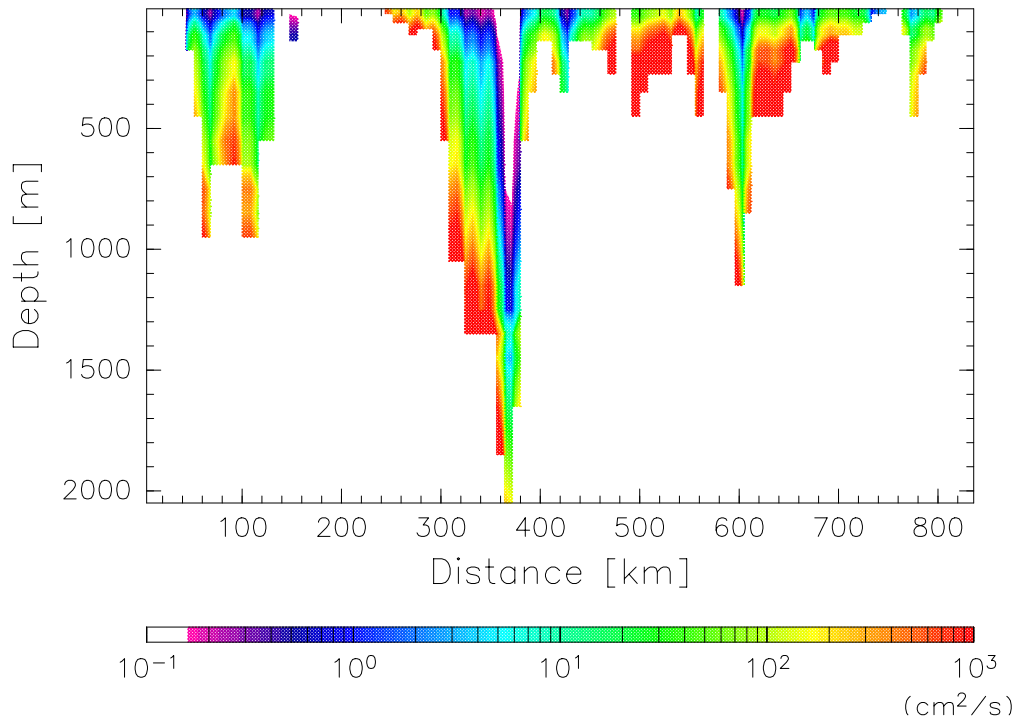


図 2: 本研究で見積もられた鉛直拡散係数の、クリル諸島に沿った方向の鉛直断面図。

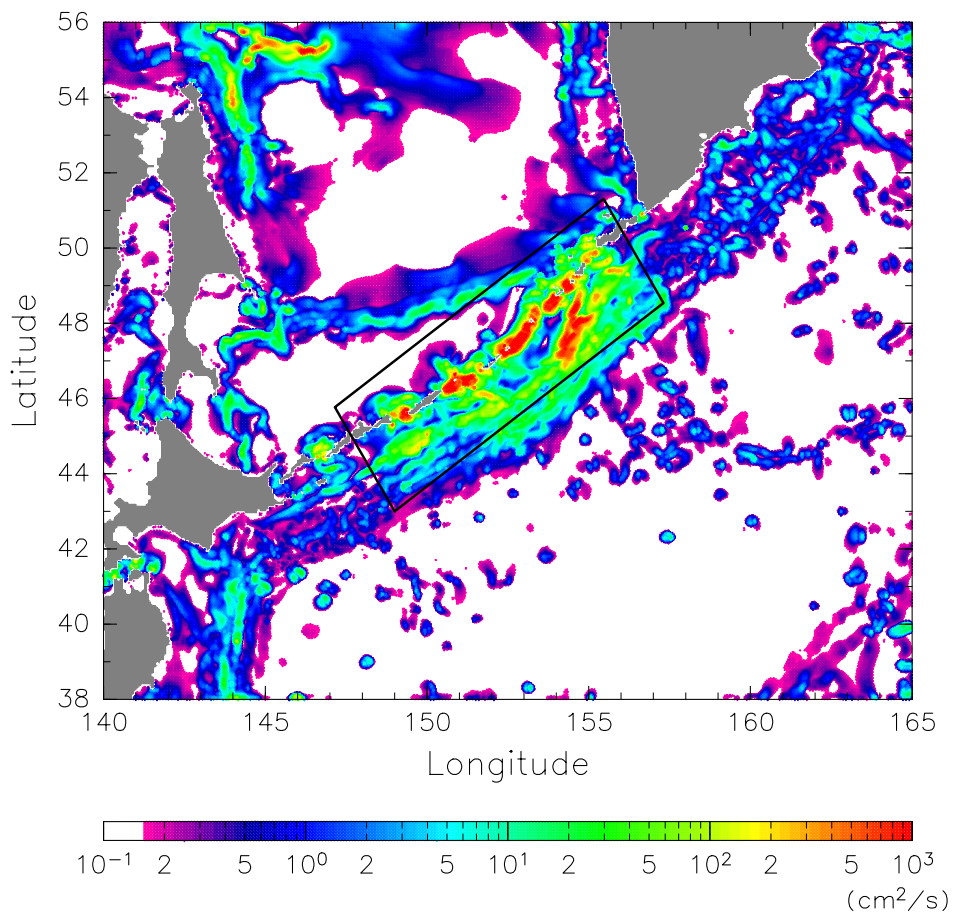


図 3: 本研究で見積もられた鉛直拡散係数を鉛直平均して得られた水平分布。