

氏 名	なかむらともひろ 中村知裕
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2303 号
学位授与の日付	平成 13 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 地 球 惑 星 科 学 専 攻
学位論文題目	クリル海峡におけるオホーツク海水と北太平洋亜寒帯水の潮汐交換・混合機構に関する研究
論文調査委員	(主 査) 教 授 淡 路 敏 之 教 授 Matthews, John Philip 教 授 木 田 秀 次

論 文 内 容 の 要 旨

近年、目覚ましい進展を遂げつつある気候変動研究結果は、北太平洋中低緯度に広く分布し、塩分極小で特徴付けられる北太平洋中層水 (North Pacific Intermediate Water; 以後 NPIW と略記) の循環に伴って、二酸化炭素等の地球温暖化物質が全北太平洋中層へと効率的に輸送されているという事実を明確に示した。さらに、この NPIW の起源水は、オホーツク海中層の水がクリル (千島) 列島から流出する際に、強い鉛直混合によって変質した海水である可能性を指摘した。しかしながら、クリル列島におけるオホーツク海水と北太平洋水の海水交換及び混合の機構は、従来の理論的な研究や大循環モデルを用いた研究では説明できず、不明のまま残されていた。本研究は、縁辺に位置するクリル列島での時空間スケールの小さい非地衡的な潮汐による交換及び混合過程に着目して、北太平洋の海盆スケールの水塊構造を決定づける NPIW の起源水の形成機構の解明を試みた。

まず、主要 5 分潮の潮汐数値シミュレーションによって、クリル列島域での卓越流である順圧潮流場の詳細な構造を初めて明らかにした。その結果、クリル列島では日周潮成分の K_1 潮流が卓越しており、その平均海水交換量は列島全域で約 5.0Sv ($1\text{Sv}=10^6\text{m}^3\text{s}^{-1}$) にも達することが分かった。この値は観測的知見から推測されていた列島通過流量値とほぼ一致しており、これによって、長年論議を呼んできたオホーツク海と北太平洋間の海水交換を引き起こす主たる原因は、潮流によって発生する平均流であることが明らかになった。

さらに、平均流の形成機構を調べた結果、背の高いシルが存在する浅い海峡の平均流は従来の tidal rectification 理論によって説明できるが、深い海峡での平均流の生成は説明不可能であることが分かった。そこで、従来の平均流の形成機構では見落とされていた力学要素である地形性捕捉波の効果及び潮流との相乗効果による輸送も定式化できるよう平均流形成理論を拡張・発展させることによって、深い海峡での平均流は、地形性捕捉波と潮流との渦度輸送結合効果によって発生する時計回り循環の一環であることを突き止め、クリル列島全域での海水交換機構の解明に成功した。

次に、クリル列島での海水の変質機構を明らかにするために、列島域でのシルと順圧潮流との相互作用によって発生する内部波による鉛直混合過程に着目し、非静水圧モデルを用いて調べた。その結果、卓越流である subinertial な (すなわち、周期が慣性周期より長い) K_1 潮とシルとの相互作用によって、振幅が 100m にも達する大振幅内部波が生成し、それが碎波することによって、最大 $10^3\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ の鉛直拡散係数に相当する極めて大きな鉛直混合が生じること、しかもそれは NPIW の密度層の深さまで及ぶことから、NPIW の起源水は K_1 潮の潮汐混合によるオホーツク海水の変質によって形成されることを初めて明らかにした。以上の結果は最近の現場観測及び衛星観測によって確認された。

さらに、クリル列島での潮汐起源の内部波の励起・成長過程を検討した結果、従来の地形性内部波の理論を適用できない力学レジームに存在することが分かった。そこで、ラグランジュ的視点を新たに導入して振動流による地形性内部波の励起理論の再構築を試みた結果、潮汐起源の内部波には従来指摘されていた内部潮汐波以外に、非定常風下波と混合潮汐風下波が励起されるという新たな理論を提示するとともに、NPIW の形成に重要な役割を果たす内部波は非定常風下波と混合潮

汐風下波であることを特定することに成功した。

また、この理論を適用して地形性内部波の成長機構の一般化を行った。これによって、従来の理論で示されていた内部波の成長条件（臨界斜面や臨界フルード数）が満たされなくても、非定常風下波と一部の混合潮汐風下波は常に成長し得るという極めて重要な事実を明らかにしただけでなく、中高緯度での日周潮による潮汐混合の理論的取り扱いを初めて可能にした。加えて3次元混合過程についても考察し、浅い海峡で発生した相対的に強い内部波のエネルギーフラックスが列島沿いに伝播することによって、内部波エネルギーの発生効率が相対的に低い深い海峡においても有意な鉛直混合が発生することを示した。

以上の研究結果は、外洋の循環構造に大きな影響を与えるプロセスとして最近重視されている Boundary Mixing（陸棚縁辺海と外洋との相互作用）の解明に大きく貢献するものであると同時に、海洋内部波の理論を前進させる貴重な成果である。

論文審査の結果の要旨

北太平洋における10年スケールの気候変動の要因として注目されている shallow overturn（海洋中層 2000m 深まで達する南北循環）は、塩分極小で特徴づけられる北太平洋中層水の形成と循環によって駆動されている。しかもこの中層水は、二酸化炭素等の地球温暖化物質を効率的に取り込み、全北太平洋中層へ輸送していることが最近の観測結果によって指摘されたことから、北太平洋中層水の形成機構の解明は、気候変動メカニズム研究の当面する緊急課題として国際的に注目されるに至った。しかしながら、その形成機構は、大循環モデルを用いた研究や理論的な研究では説明できず不明のまま残されていた。

申請者は、この問題に関して、北太平洋中層水の起源水はオホーツク海中層の水がクリル（千島）列島から北太平洋亜寒帯海域に流出する際に鉛直混合によって変質され形成されるという観測的示唆に着目し、ほぼ地衡流バランスをした海盆スケールの中層水の循環過程には影響を及ぼさないとして無視されてきたクリル海峡での非地衡的な潮汐・潮流過程に焦点をあてたユニークな研究を行い、北太平洋中層水の形成機構の解明に成功した。

まず、主要5分潮の潮汐数値シミュレーションを行い、クリル列島域の順圧潮流場の詳細な構造を初めて明らかにするとともに、列島域の卓越流は日周潮成分の K_1 潮流であり、その平均海水交換量は観測的知見から推測されていた列島通過流量値とはほぼ一致することから、長年論議を呼んできたオホーツク海と北太平洋間の海水交換を引き起こす主たる原因は、潮流による長周期輸送であることを突き止めた。申請者はさらに平均流の生成機構について調べた結果、海水交換を主に担う深い海峡での平均流の生成は従来の理論では説明不可能であり、ミッシング・ファクターであった地形性捕捉波と潮流との相乗効果を考慮できるように平均流形成理論を発展させた。これによって、クリル列島全域での潮汐交換機構の解明に成功し、国内外の関係者に大きなインパクトを与えた。以上の結果は、オホーツク海と北太平洋という海盆間の海水交換に、クリル列島という局所的な海域での短周期の潮汐及び地形性捕捉波が決定的な役割を果たしているという点において地球物理学的に興味深いものである。

次に、クリル列島での海水の変質機構を明らかにするために、申請者は列島域でのシルと順圧潮流との相互作用によって発生する内部波の励起・成長機構及びそれに伴う鉛直混合過程に着目した非静水圧モデル実験を行い、卓越流である subinertial な（すなわち、周期が慣性周期より長い） K_1 潮とシルとの相互作用によって、振幅が 100m にも達する大振幅の内部波が生成・砕波することによって、最大 $10^3 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ の鉛直拡散係数に相当する極めて大きな鉛直混合が生じること、しかもそれは北太平洋中層水の密度層の深さにまで及ぶことから、北太平洋中層水の起源水は K_1 潮の潮汐混合によってオホーツク海水が変質したものであることを明らかにした。この結果は最近の現場観測及び衛星観測によって確認されるに至っている。

申請者は更に進んで、高緯度のクリル海峡で発生する潮汐起源の内部波には従来の理論を適用できないことから、ラグランジュ的視点を新たに導入して、振動流による地形性内部波の励起理論の再構築を試みた。その結果、従来示されていた内部潮汐波だけでなく、新たに非定常風下波と混合潮汐風下波が励起されるという新たな理論を提示するとともに、北太平洋中層水の形成に重要な役割を果たす内部波は、非定常風下波と混合潮汐風下波であることを特定することに成功した。さら

に、この理論を適用して地形性内部波の成長機構の一般化を行い、従来の理論で示されていた内部波の成長条件（臨界斜面や臨界フルード数）が満たされてなくても、非定常風下波と一部の混合潮汐風下波は常に成長し得るという極めて重要な事実を明らかにしただけでなく、中高緯度での日周潮による潮汐混合の理論的取り扱いを初めて可能にした。非定常風下波の存在は大気分野では知られていたが、海洋ではその存在は指摘されておらず、さらに混合潮汐風下波にいたっては、理論的にも観測的にも未発見であった新しい内部波である。以上の成果は、クリル海峡での具体的な物理過程の解明にとどまらず、その研究を通じて、地形性内部波の一般的な励起・増幅理論の発展にも大きく貢献するものとして国際的に高い評価を受けた。なお、申請者は3次元混合過程についても考察しており、浅い海峡で発生した相対的に強い内部波のエネルギーフラックスが列島沿いに伝播することによって、内部波エネルギーの発生効率が相対的に低い深い海峡においても有意な鉛直混合が発生することを示した。

以上のように、本研究は、外洋の循環構造に大きな影響を与えるプロセスとして最近重視されている Boundary Mixing（陸棚縁辺海と外洋との相互作用）の解明に大きく貢献するものであり、さらに海洋内部波の理論を前進させた貴重な研究として高く評価できる。

よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成13年1月29日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。