

学 位 論 文 題 名

Amplification of diurnal tidal currents by
topographic waves in the Sea of Okhotsk and
its interaction with sea ice

(オホーツク海における地形性波動によって増幅された
日周潮流とその海水との相互作用)

学位論文内容の要旨

オホーツク海のカシェバロババンクおよびサハリン東岸沖は、特に日周潮流が強い海域であることが順圧の潮汐数値シミュレーションによって示されている。カシェバロババンクは、夏に低海面水温、冬に低海水密度が維持されている海域である。一方、サハリン東岸沖は、北太平洋中層水の起源水の1つと考えられている高密度陸棚水や海水の輸送経路となっている。したがって、これらの海域における潮流が海水や海水混合に与える影響を調べることは重要である。しかしながら、長期間にわたって直接これらの海域における潮流を計測した例は少なく、季節変化および鉛直構造を含めて、潮流場については十分にわかっていない。日露米共同による戦略的基礎研究「オホーツク海氷」では、1998年から2年間にわたって、長期係留観測を行なった。本研究の目的は、カシェバロババンクおよびサハリン東岸沖における潮位・潮流特性を明らかにし、その物理機構および海洋・海氷場を与えるインパクトを調べることである。

(1) カシェバロババンクにおける潮位・潮流特性

カシェバロババンク上における流速、水位、海底(水深 126 m)における水温は、顕著な日周期および大潮小潮に伴う~14 日周期の変動によって特徴付けられていた。大潮時の流速は、 $\sim 1.4 \text{ m s}^{-1}$ にも達していた。K1(周期 23.93 時間)とO1(周期 25.82 時間)の潮流楕円は、等方的で時計回りの回転をしており、順圧的な構造であった。また、それらの季節変化は小さかった。カシェバロババンク上で日周潮流が増幅する物理機構を解釈するために、成層を考慮した海山捕捉波の線形理論を適用した。分散関係から、動径波数0、方位波数1の海山捕捉波の周波数は、日周潮(K1、O1)の周波数に近かった。その海山捕捉波の流速楕円は、等方的で時計回り回転をした順圧的な構造であり、観測結果と一致していた。以上の結果から、カシェバロババンク上での強い日周潮流は、海山捕捉波との共鳴によって生じていることが明らかになった。さらに、この強い日周潮流による海水混合および海氷への影響を調べた。大潮時には、表層と海底における水温差が小さくなり、鉛直一様になるほどの強い潮汐混合が起こっていることが示唆された。また、大潮時の海底における水温は、秋に冷たく冬に暖かくなり、 0.5°C 付近に近づくような季節変化を示した。これは、カシェバロババンク周囲の水深 140~200 m に存在し、一年を通じてほぼ一定水温($\sim 0.5^{\circ}\text{C}$)の海水が移流してきたシグナルを捉えていることが示唆された。海氷は大潮小潮周期で変動し、潮流と1日遅れで強い負の相関(-0.70)を示した。また、密度度は小潮時よりも大潮時に低く、そ

れに伴って大気海洋間の熱フラックスも大潮小潮の影響を受けていることがわかった。

(2) サハリン東岸沖における潮位・潮流特性

サハリン東岸北部の陸棚上では、K1 と O1 の日周潮流が卓越し、その鉛直構造はほとんど順圧的で、厚さ ~ 10 m の海底エクマン層が形成されていた。K1 と O1 の潮流楕円は、等深線に沿って伸長した形で時計回り回転をして、 3.4 と 3.8 m s^{-1} の位相速度で、岸を右に見る方向に伝播していた。一方、斜面および沖における潮流楕円は小さく、顕著な日周潮流は陸棚上のみに限られていた。これらの特徴から、日周期の沿岸捕捉波が励起されていることが示唆される。そこで、成層を考慮した沿岸捕捉波の線形理論を適用して、観測結果の物理機構を解釈した。沿岸捕捉波の分散曲線から、サハリン東岸北部では、日周期の第1モードの沿岸捕捉波が存在し得ることがわかった。その潮流楕円構造は、陸棚上では時計回り回転をした岸沿い方向に伸長した形をしており、斜面や沖では急激に小さくなっていた。また、鉛直構造はほとんど順圧的で、位相速度も観測結果に近かった。これらの特徴から、サハリン東岸北部の陸棚上における潮流場は、日周期の第1モードの沿岸捕捉波によってほぼ説明できることが明らかになった。一方、北緯 ~ 52 度以南では、日周期の沿岸捕捉波が存在し得ないことが分散曲線から示唆された。これは観測と矛盾しない結果であった。日周期の沿岸捕捉波は、密度成層の影響をほとんど受けず、水位には $\sim 1/4$ しか寄与しないことが示された。また、観測結果から得られた K1 および O1 の位相速度は、冬に $\sim 0.2 \text{ m s}^{-1}$ 増加していた。これは、1月に最大流速に達する東樺太海流の移流の効果によって説明できることが、平均流を考慮した順圧の理論解との比較から示された。

北緯 53 度の陸棚上では、1 ~ 3 月に流速の振幅が有意に減少していることが観測された。これは、海水密度が高い(80%以上)時期に一致していた。短期間の調和解析の結果から、K1 と O1 の潮流楕円の振幅は、鉛直一様に、冬に $\sim 30\%$ 減少していることが示された。この特徴は、北緯 53 度の陸棚上のみに限られており、斜面や沖では観測されなかった。高密度度時に、陸棚上における潮流のみが弱まる理由として、次のようなシナリオが考えられる。サハリン東岸北部の陸棚上における潮流場を決めている日周期の第1モードの沿岸捕捉波は、渦モードの波であるため、海海底面での摩擦によってスピンドアウンを受けて減衰し、冬の日周潮流は弱まる。

(3) 成層を考慮した三次元潮汐数値モデル

観測的知見に基づいて、潮位および潮流を再現しうる、成層を考慮した三次元潮汐数値モデルを開発した。カシェバロババンクおよびサハリン東岸沖における潮位・潮流場を再現するには、 $300 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の鉛直渦粘性係数(鉛直一定)を用いるのが適当であった。この値は、 ~ 22 m のエクマン層の厚さに相当し、観測結果のおよそ二倍であった。本研究では、この値を用いたモデルによって、(1) と (2) で適用された線形理論の妥当性を調べ、日周潮流の増幅機構に関する密度成層、海底地形、海水の影響を考察した。

非線形項を含むこのモデルにおいても、カシェバロババンク上の海山捕捉波やサハリン東岸北部陸棚上の沿岸捕捉波の構造が再現された。これは、観測結果を線形理論によって解釈することは、本質的に悪くない近似であることを示唆している。また、沿岸捕捉波の線形理論によって説明できなかった潮位場も再現することできた。夏と冬の密度成層を与えた実験から、潮流楕円構造は順圧の場合と一致しており、成層の影響はほとんどないことが示された。これは観測結果と整合的であり、順圧モデルでもカシェバロババンクおよびサハリン東岸沖の潮流場を説明できることを示唆している。

海底地形の効果を調べた実験から、サハリン東岸北部の陸棚上における潮流場は、北緯 54 度付近の陸棚で励起された日周期の沿岸捕捉波に加えて、カシェバロババンクおよびサハリン湾の影響を強く受けて、

増幅することが示唆された。また、海氷の効果を調べた実験から、高密度度時の海水は、海底摩擦と同様な効果を海水底面に持ち、二重のスピンダウン効果によって、渦モードの波である沿岸捕捉波を減衰させ、冬の日周潮流を弱めるというシナリオを示すことができた。

学位論文審査の要旨

主 査 助 授 大 島 慶一郎

副 査 教 授 若 土 正 暁

副 査 教 授 三 寺 史 夫

副 査 講 師 中 村 知 裕

副 査 教 授 久保田 雅 久 (東海大学大学院海洋学
研究科)

学 位 論 文 題 名

Amplification of diurnal tidal currents by topographic waves in the Sea of Okhotsk and its interaction with sea ice

(オホーツク海における地形性波動によって増幅された
日周潮流とその海水との相互作用)

オホーツク海北西陸棚域は、大きな海水生産による高塩分水排出により北太平洋の表層では最も重い水（高密度陸棚水）が生成され、北太平洋の中層へ唯一直接に表層の水が潜り込まれる場所である。最近の研究ではこの高密度陸棚水に伴って生物生産に不可欠な鉄分も中層に送り込まれ、それがここを起源として北太平洋へ拡がっていることが示唆されている。従って、この海域は、北太平洋規模での、大気・海洋間の物質・熱交換、さらには生物生産にとって鍵を握る海域である。一方、オホーツク海は潮流が非常に強い海域として知られており、潮流は高密度陸棚水の変質・輸送及びそれに伴う水塊形成にも重要な働きをしていると考えられている。カシェバロババンクおよびサハリン東岸沖は、高密度水生成域に近い場所に位置し、かつ日周潮流が非常に強い海域であることが示唆されている。これらの海域で潮流が大きくなるのは高緯度であるために地形性ロスビー波が励起されやすいことが考えられ、地球流体力学的にも興味深い海域と言える。以上から、これらの海域では特に潮流の実態を明らかにすることは重要であり、一方で潮流が増幅されるメカニズムは力学的にも興味深いテーマである。しかし、今までは十分な実測データも力学的な研究もなされていなかった。日露米共同による戦略的基礎研究「オホーツク海水」では、これらの海域で1998年から2年間にわたって、はじめて冬を含む長期係留観測が行われた。

申請者は、まず、これらのデータに基づき、カシェバロババンクおよびサハリン東岸沖における潮位・潮流特性を明らかにし、地形性波動の理論解との比較から日周潮流の増幅機構を調べた。カシェバロババンクおよびサハリン東岸沖における流速、水位、水温は、顕著な日周期変動によって特徴付けられていた。潮流の鉛直構造は順圧的であり、サハリン東岸沖の陸棚上では潮流の強い北部ほど海底エクマン層が厚いことがわかった。

これらの海域で日周潮流が増幅する物理機構を解釈するために、成層を考慮した海山捕捉波および沿岸捕捉波の線形理論を適用した。カシェバロババンクでは、動径波数0、方位波数1の海山捕捉波の周波数は日周潮の周波数に近く、その流速楕円は等方的で時計回り回転をした順圧的な構造であり、観測結果と一致していた。この結果から、カシェバロババンクでは、海山捕捉波との共鳴によって日周潮流が増幅することが明らかになった。また、サハリン東岸沖では、北部の陸棚上における日周潮流場は、第1モードの日周期の沿岸捕捉波によってほぼ説明できることがわかった。一方、南部では、そこでの地形が日周期の沿岸捕捉波を励起し得ないために、潮流は北部に比べてかなり小さいことが示された。上記の地形性波動は、密度成層およびその季節変化による影響をほとんど受けず、水位場への寄与は小さいことがわかった。

次に、申請者は、今までほとんど研究がされていなかった潮流と海氷の相互作用について調べ、興味深い知見を示した。カシェバロババンクでは、強い日周潮流によって引き起こされた海水混合によって、低海氷密接度が維持され、潮流が海氷に影響を与えていることを見出した。一方、サハリン東岸沖では、沿岸捕捉波が日周潮流場を決める北部の陸棚上のみで、海氷期における日周潮流の振幅が有意に減少し、海氷が潮流に影響を与えていることを見出した。この結果から、申請者は、海氷底面での摩擦によって生じるスピンドウン効果が、日周期の沿岸捕捉波を減衰させ、日周潮流を弱めるというシナリオを提案した。

さらに、申請者は、上記の観測で明らかとなった潮位・潮流場を再現し得る、成層を考慮した三次元潮汐数値モデルを開発した。現実的な海底地形を考慮した数値モデルにおいても、カシェバロババンク上の海山捕捉波やサハリン東岸北部の陸棚上における沿岸捕捉波の構造が再現され、線形理論による観測結果の解釈の妥当性が示された。日周潮流に対する密度成層およびその季節変化による影響は小さく、観測結果と整合的であった。これは、順圧モデルでも潮流場を再現できることを示唆している。サハリン東岸北部の日周潮流は、沿岸捕捉波が存在し得る陸棚地形が始まる角で、外洋からの潮汐エネルギーが沿岸捕捉波に変換されて生じていることが推察された。また、カシェバロババンクおよびサハリン湾の影響を受けて、日周潮流はさらに増幅することが示された。高密度度時の海氷は、海底と海氷底面の両方からの摩擦によるスピンドウン効果によって日周期の沿岸捕捉波を減衰させ、陸棚上のみで日周潮流を弱めるというシナリオを示唆することができた。

審査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（地球環境科学）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。