



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Modeling studies of ocean heat transport toward ice shelves in West and East Antarctica
Author(s)	瓢子, 俊太郎
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。利用可能日以前の閲覧方法は https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/ をご参照ください。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第16570号
Issue Date	2025-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16570
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/98180
Type	doctoral thesis
File Information	HYOGO_Shuntaro_summary.pdf, 全文の要約



学 位 論 文 内 容 の 要 約/Dissertation Summary

博士（環境科学）

氏 名/Applicant 瓢子 俊太郎

学 位 論 文 題 名/Title of Dissertation

Modeling studies of ocean heat transport toward ice shelves in West and East Antarctica
(西南極および東南極の棚氷に向かう海洋による熱輸送に関するモデル研究)

近年、南極氷床の質量減少が確認されており、2002年から2020年の間に地球全体の海水準上昇に対して年間 0.41 mm 程度の寄与が推定されている。この氷床損失の主な要因は、大陸棚縁から海底トラフを通じて沿岸部まで暖水が流入し、氷河末端部の海洋に浮いている棚氷の底面を融解させるためである。棚氷はこの底面融解により薄くなることで、上流水河を堰き止める効果を低下し、氷河の流動速度を加速させる。つまり、陸上にあった氷が海洋へ流出するため、海水準上昇が起きる。現在この棚氷底面へと向かう暖水流入に関する研究が、海水準上昇の将来予測のために喫緊の課題として進められている。西南極では、2000年代初頭に氷床の急速な質量減少が報告されて以降、ベリングスハウゼン海に隣接するアムンゼン海を中心に集中的な海洋観測が実施され、同海域は南極海大陸棚上の中で最も観測データが蓄積された地域となっている。アムンゼン海での観測・モデル研究から得られた重要な知見の1つは、棚氷の底面融解が水温躍層の深さに強く依存していることである。水温躍層は深さ方向に急激な水温変化を示す層のことで、棚氷下部への熱輸送を制御する役割を担うことが知られている。本論文では、近年アムンゼン海に次いで南極氷床の質量損失が大きいと推定される西南極ベリングスハウゼン海、および、東南極で最大の質量損失が生じているトッテン棚氷沖を対象に、棚氷に向かう海洋による熱輸送に関する研究を行った。

ベリングスハウゼン海は、顕著な棚氷底面融解と棚氷の薄化が進行する重要な海域である。同海域では水温躍層が深さ約200～300 mに形成されており、その水塊構造はアムンゼン海と類似する。ベリングスハウゼン海の暖水流入に関する詳細な研究はこれまでほとんど進められてこなかった。理由としては、西南極全体を対象とした既存モデルの計算領域には含まれていたが、観測データの不足により、モデル結果の詳細な検証ができなかったためである。しかし、コミュニティに認知されないままであった、ベリングスハウゼン海を対象とした2007年の大規模海洋観測のデータが2019年に発見された。本研究では、この観測データを用いることで既存の領域海洋数値モデルと観測データとの比較を行い、モデルの現実海洋への再現性を評価した。その結果、BelgicaトラフおよびMargueriteトラフを経由し、George VI棚氷下部へと向かう暖水流入とその経路がモデルで再現されていることを検証した。また、棚氷融解において重要な水温躍層の深さに関しても、ベリングスハウゼン海大陸棚上に存在する全ての海底トラフを対象に、各海底トラフを横断する計10セクションにお

いてモデルと観測データとの整合性を確認した。その後、モデルの出力結果を用いたベリングスハウゼン海大陸棚上の暖水流入及び氷河融解水の流出に関する解析を進めた。流速場や後方粒子追跡実験から、暖水は大陸棚縁からBelgicaトラフおよびMargueriteトラフを通過して約1年以内に棚氷下部へと到達し、棚氷底面融解の主要な熱源となっていることが示唆された。特にBelgicaトラフはMargueriteトラフに比べ、約3倍熱流量が多いことが明らかになった。また、ベリングスハウゼン海が保有する棚氷の1つであるVenable棚氷へと向かう暖水流入は沿岸域のみ季節変動が大きく、特に夏季に増加していた。この暖水が存在する地点における水深約500 mの西向き流速と、ベリングスハウゼン海上全域における西向き風応力との相関解析や流速に関する解析から、夏季に海水密接度が低下し、海洋へ伝わる西向き風応力が増加することで沿岸捕捉波が励起される可能性を示した。西南極の他地域の棚氷に向かう暖水流入ではこのような顕著な季節変動は確認されていない。このような季節変動が起きる要因として、ベリングスハウゼン海における西経80度～88度付近の海底トラフが海岸線と平行に延びていることが、沿岸捕捉波の発達を促進していることを海洋数値モデルの結果から示した。

一方、東南極トッテン棚氷は地球全体の海水準を約 4 m 上昇させる量の氷が保有する。近年船舶による海洋観測からトッテン棚氷前面において暖水が流入していることが発見され、西南極と同様に、この暖水がトッテン棚氷の底面を融解させていると考えられている。しかし、トッテン棚氷沖大陸棚上における水温躍層および塩分躍層の深さは、西南極のアムンゼン海およびベリングスハウゼン海で観測されている深さよりも約300mも深く、水深500～600mまで達することが明らかになっている。しかし、これまでトッテン棚氷沖を対象とした海洋数値モデルでは、この特徴的な深い水温躍層および塩分躍層を再現することが未だできていない。そこで本研究では、東南極トッテン棚氷沖を対象とし、大陸棚上における深い水温躍層および塩分躍層の形成メカニズムを理解し、水温躍層および塩分躍層の再現性を向上させたモデルを開発することを目的とした。手法としてはトッテン棚氷沖を対象とした既存の海洋数値モデルに対して、モデルパラメータや外力を変更および追加した感度実験を実施し、水温躍層や塩分躍層に対する変化を調べた。その結果、トッテン棚氷沖の大陸棚上における深い水温躍層および塩分躍層の形成において、(1) 沿岸域の風、(2) 氷山融解水、(3) 海面熱フラックスが重要な役割を果たすことを明らかにした。(1) 沿岸域の風に対する感度実験は、大気－海水間および海水－海洋間の抵抗係数を変化させることで実施した。その結果、沿岸域における東風が強まることにより、沿岸域の海面高度が岸向きエクマン輸送により上昇し、暖水流入を遮断する効果をもつ大陸棚斜面上を流れる西向き南極斜面流の流速を上昇させることが明らかになった。また、沿岸域の風が強まることにより、大陸棚上において下向きエクマンポンピング流速を強め、観測データと整合的な沿岸方向に密度面が深くなる構造をモデルが再現した。これらの結果は、モデル上で設定している風に対する抵抗係数が小さい、もしくは、モデル駆動時に風速データとして用いているERA-Interimの再解析データが、本海域における沿岸域の風を過小評価している可能性を示す。(2) 氷山融解水をモデル計算に考慮した感度実験では、氷山融解水は大陸棚上の上層から中層の水塊を冷却化・低塩化させ、既存モデルに比べ、水温躍層と塩分躍層を深くする結果が得られた。東南極では大陸棚上を氷山が密集して流れることや、水深の浅い箇所では氷山が多く座礁していることが先行研究から明らかにされており、感度実験の結果は、これらの氷山融解水が大陸

棚上の水温躍層・塩分躍層の深さを変化させることを示唆する。(3)海面熱フラックスに関する感度実験では、海面熱フラックスを増加させることで、既存モデルに比べ水温躍層は深く、塩分躍層は浅くなることが示された。これは海面熱フラックスの増加により海洋表層が冷却され、混合が強化したことにより、水温躍層が深まったと考えられる。また、海洋表層の冷却化は海氷生産を増加させ、海氷内に留まることができない余剰塩分が海洋へ排出され、沈み込むことによって海洋内部が高塩化し、塩分躍層が浅くなったと考えられる。これらの結果は、海面熱フラックスを増加させるのみでは、観測データから得られている深い水温・塩分躍層を再現することができないことを示す。これらの知見をもとに、パラメータ調整を行った海洋数値モデルでは、水温躍層および塩分躍層の深さに対する再現性を、既存モデルに比べ格段に向上させた。さらに、このモデル設定に加え、最新の海底地形データを用いた実験では、観測データから得られている水温躍層・塩分躍層の深さに加え、暖水の流入位置に関してもモデルでは再現された。

南極大陸棚上における暖水の流入メカニズムを解明することは、棚氷融解過程ならびに海水準変動を理解する上で不可欠である。本研究は、観測データと数値モデルを組み合わせた研究により、西南極および東南極の棚氷に向かう海洋による熱輸送に関する理解を深めた。