

学 位 論 文 題 名

Subglacial hydraulic interpretation of streamlined
glacial erosional bedforms along the Soya Coast, East Antarctica

（南極宗谷海岸沿岸域における流線型氷床基盤岩侵食地形の水理学的検討）

学位論文内容の要旨

本論文は、南極・宗谷海岸露岩域に分布する流線型氷床基盤岩侵食地形について、現地調査、空中写真判読および地形数値解析を行った結果を基に、南極氷床周縁部での地形侵食過程を論じたものである。

南極氷床に関する研究によって、現在の氷床下に氷底湖が存在することや、南極氷床底の一部がぬれ底であることが報告されている。また、最終氷期にローレンタイド氷床やスカンジナビア氷床に覆われた地域においてドラムリンやs-formなどの氷河地形が古くから記載されてきたが、近年になって、それらの形成メカニズムに氷底水流が深く関わっていたとする議論が展開されるようになった。このように、氷床下における地形形成に関わる氷底水流の役割や、現在の氷床の特性の解明および過去の氷床変動の復元に関して、氷底水の挙動の解明が重要な課題となってきた。

南極・リュツォホルム湾の宗谷海岸地域では、温暖氷河によると考えられる氷食地形が記載され、これまで、アブレーションやブラッキングなどのプロセスで説明されてきた。筆者は、宗谷海岸露岩域において南極氷床の面的氷食作用を受けた地形の調査を行い、基盤岩の侵食に氷底水流が関与したことを示唆する地形を見いだした。今回認定した氷底水流によると考えられる侵食地形を地形発達過程の解釈に導入することによって、地形記載の段階から、形成メカニズムや地形発達過程の解明にむけての段階へと進める可能性が出てきた。特に、南極氷床下に水が存在した可能性を地形学的に検討した例は皆無に等しく、過去の南極氷床の変動を復元する意味でも重要であると考えられる。本研究はこのような視点から、南極・宗谷海岸地域における面的氷食作用を受けた基盤岩地形を見直し、その形成プロセスへの水の関与の可能性を検討し、南極氷床周縁部の地形発達過程をこれまでになく精度で復元することと目的とする。

本論文は、以下の7章で構成されている。第1章では、氷床侵食地形と南極氷床に関するこれまでの研究を概観し、本研究の意義と本論文の構成について述べ、第2章では、研究対象地域の概要を説明する。

第3章では、現地調査および空中写真判読によって、宗谷海岸露岩域に分布する流線型基盤岩侵食地形とそれに付随するs-formを記載し、南極氷床底の侵食作用に氷底水流が関与したことを示す地形的証拠として初めての解釈を行った。宗谷海岸の露岩域では表面が磨かれた氷食岩盤が露出しており、数百メートル〜数キロメートルオーダーの流線型の基盤岩侵食地形がみられる。特に、tadpole rockやtransverse ridgeなどの形態として分類できる地形は、s-formなどの小規模な侵食痕を伴っており、宗谷海岸の基盤岩の侵食に氷底水流が関与した可能性を示唆する。また、流線型基盤岩地形は面的に分布すること、それらの伸長方向は地質構造に起因する基盤岩の抵抗性を反映しており、最終的に氷床の侵食作用によ

て修飾された形態であることが明らかとなった。さらに、アブレーションやブラッキングによると考えられる地形に流線型地形がスーパーインポーズしていることや、伸長方向や規模の異なる流線型地形が見られることから、これらの地形は氷床の流動方向およびその侵食力・侵食形態の変化も反映していると考えられる。

かつて宗谷海岸沿岸を覆った氷床の下に布状水流が存在し、それによって基盤岩上に水流侵食地形が形成されるには、大きな流量と流速をもつ水流が氷底において突発的発生する必要がある。第4章では、このようなイベントの可能性を検討するため、氷底水を溜めるような帯水盆の形成環境について宗谷海岸上流域のケースを水理学的に解析した。氷床中あるいは氷床底の静水面は、氷の荷重による圧力水頭と位置水頭の和が等しい点を結んだ等ポテンシャル面と等しくなる。等ポテンシャル面は、氷床表面傾斜の約11倍の大きさで氷床表面傾斜とは逆向きに傾き、氷底水はこの面を水面とするように氷底基盤地形の凹地に帯水すると考えられる。この考えに基づいて解析を行った結果、現在のしらせ氷河流域と同等の底面せん断応力が100kPa程度の氷床を仮定した場合、白瀬流域の測線に沿った断面で、湖水面の直径1-6km、深度2-300m程度の複数の氷底湖が存在可能であることが明らかとなった。

第5章では、宗谷海岸露岩域で見られる流線型基盤岩地形が氷底下の布状水流による侵食地形であることを検証するため、水理学的数値実験を行った。数値実験では、氷底に布状水流が存在した場合を想定し、氷底水流の挙動と地形の面的配列パターンとの整合性に注目した。氷底水はそれを覆う水体によって被圧されているため、基盤地形と氷床底との間隙を流れる水流の挙動は、氷による圧力水頭と位置水頭(基盤岩高度)の和の勾配、すなわち動水勾配に従うと考えられる。そこで、解析図化機を用いて数値的に再現した基盤岩地形モデルと、氷厚や氷床表面勾配および傾斜方向の異なる数値氷床モデルとを作成し、それぞれの氷床モデルについて基盤岩地形モデルに対する動水勾配の対応を計算した。氷底水流の動水勾配は、氷床の表面傾斜に大きく依存するが、基盤地形のローカルな変化にも対応して変化する。数値実験の結果、流線型基盤岩地形の伸長方向に沿った方向に傾く氷厚約400mの氷床を仮定した場合に、氷底水流の流れが地形の配列と整合的になることが明らかとなり、数値モデルで再現した氷底水流の流れは、実際に見られる地形を無理なく説明できることが確認できた。同時に、現在の露岩域で見られる流線型の基盤岩地形を形成したと考えられる氷床の傾斜方向が復元できた。

第6章では、3章、4章、5章で得られた結果をもとに、氷底水流の発生過程、および宗谷海岸露岩域の氷食基盤岩地形の発達過程について考察した。氷床の後退に伴って等ポテンシャル面の傾斜は急になるので、基盤地形に変化がなければ、氷底湖の断面積は縮小する。この間、氷底湖の出口付近が凍結などでふさがれていると、貯留水が帯水盆の容量に対して過剰な状態となることが予想される。引き続きダム部分の融解が起こると、過剰分の貯留水が一気に解放されることになる。また、氷底水流地形とそれに整合的になる氷底水流を可能にする氷床モデルを考慮することによって、初期のアブレーションとブラッキングによる侵食地形が、氷床の後退期に発生した複数回の氷底水流によって再侵食をうけるという一連の基盤岩地形の発達過程が復元できた。

第7章では、本研究で得られた成果をまとめ、結論を述べる。地形の記載および数値解析によって導かれる主な結論は以下の通りである。(1) 宗谷海岸露岩域の流線型基盤岩地形は、地質構造に起因した伸長方向を持ち、被圧水流を伴う氷床底の侵食作用によって修飾された形態である。(2) 氷底水流は、みずほ高原氷床下の融解水が氷底湖を形成し、底面融解ゾーンにそって氷床縁辺部へ急激に排出されたものと考えられる。(3) ある特定の条件の氷床表面傾斜モデルを適用することにより、流線型基盤岩地形

の面的配列と整合的な被圧氷底水流を再現できると同時に、地形形成期の氷床を復元することができる。

(4) 氷底水流地形を考慮することにより地形の発達過程をより詳細に復元できる。すなわち、宗谷海岸露岩域の侵食地形は、氷床末端付近の400m内外の氷床下で、アブレーションとブラッキングおよび氷底水流の侵食作用による一連の過程で形成されたと考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 野 有 五

副 査 教 授 平 川 一 臣 (大学院地球環境科学研究科)

副 査 助 教 授 成 瀬 廉 二 (大学院地球環境科学研究科)

副 査 助 教 授 渡 邊 悌 二 (大学院地球環境科学研究科)

学 位 論 文 題 名

Subglacial hydraulic interpretation of streamlined glacial erosional bedforms along the Soya Coast, East Antarctica

(南極宗谷海岸沿岸域における流線型氷床基盤岩侵食地形の水理学的検討)

本研究は、南極・宗谷海岸地域における氷食基盤岩地形を記載・分類し、その形成プロセスへの氷床底水の関与の可能性を検討し、南極氷床周縁部の地形発達過程をこれまでにない精度で復元すること目的としている。

近年、氷床下における地形形成に関わる氷底水流の役割や、現在の氷床の特性の解明および過去の氷床変動の復元に関して、氷底水の挙動の解明が重要な課題となってきた。例えば、現在の南極氷床に氷底湖が存在することや、南極氷床底の一部がぬれ底であることが報告されており、また、かつて氷床に覆われた地域で古くから記載されてきたドラムリンやs-formなどの氷河地形の形成メカニズムに、氷底水流が深く関わっていたとする議論が展開されるようになってきている。南極・リュツォホルム湾の宗谷海岸地域の氷食地形については、これまで、氷による直接的な侵食プロセスで説明されてきた。これに対して本論文では、宗谷海岸露岩域の基盤岩の侵食に氷底水流が関与したことを示唆する地形を見だし、その解釈の妥当性について検討を行い、さらにその解釈を地形発達の復元に導入している。このことによって、記載の段階にとどまっていた南極氷床周縁部の地形について、具体的な地形侵食メカニズムや地形発達過程の解明の段階へと進める可能性が示されたものと考えられる。特に、南極氷床下に水が存在した可能性を地形学的に検討した研究は、これまでに例がなく、過去の南極氷床の変動を復元する意味でも重要であると考えられる。

本論文は、以下の7章で構成されている。第1章では、氷床侵食地形と南極氷床に関する研究を概観し、本研究の意義と本論文の構成について述べ、第2章では、研究対象地域の概要を説明している。

第3章では、宗谷海岸露岩域の現地調査と空中写真判読により、南極において初めて、流線型基盤岩侵食

地形を系統的に記載・分類し、南極氷床底の侵食作用に氷底水流が関与したことを示す地形的証拠としての解釈を行った。また、流線型基盤岩地形が面的に分布することや、地形の伸長方向が地質構造に起因する基盤岩の抵抗性を反映しており、最終的に氷床の侵食作用によって修飾された形態であることを明らかにした。さらに、アブレーションやブラッキングによると考えられる地形と流線型地形が共存していることや、伸長方向や規模の異なる流線型地形が見られることから、これらの地形は氷床の流動方向およびその侵食力・侵食形態の変化も反映していると結論づけている。

第4章では、かつて宗谷海岸沿岸を覆った氷床下での水流の可能性を検討するため、氷底水を溜めるような地形環境について氷床中の等ポテンシャル面を用いて水理学的に解析している。解析の結果、現在のしらせ氷河流域と同等の底面せん断応力の氷床を仮定した場合、白瀬流域の測線に沿った断面で、湖水面の直径1-6km、深度2-300m程度の複数の氷底湖が存在可能であることを明らかにした。

第5章では、氷底水流の挙動と地形の面的配列パターンとの整合性を検討する水理学的数値実験を行っている。数値実験の結果、流線型基盤地形の伸長方向に沿った方向に傾く氷厚約400mの氷床を仮定した場合に、氷底水流の流れが地形の配列と整合的になることを明らかにした。さらに、数値モデルで再現した氷底水流の流れは、実際に見られる地形を無理なく説明できることを示すと同時に、現在の基盤岩地形を形成したと考えられる氷床の傾斜方向の復元に成功した。

第6章では、3章、4章、5章で得られた結果をもとに、氷底水流の発生過程、および宗谷海岸露岩域の氷食基盤岩地形の発達過程について考察している。氷床の後退に伴う氷底湖の断面積の縮小により過剰となった貯留水が、ダム部分の融解によって一気に解放される排水モデルを提唱し、また、初期のアブレーションとブラッキングによる侵食地形が、氷床の後退期に発生した複数回の氷底水流によって再侵食をうけるという一連の基盤岩地形の発達過程を復元した。

第7章では、本研究で得られた成果をまとめ、以下の結論を述べている。(1) 宗谷海岸露岩域の流線型基盤岩地形は、地質構造に起因した伸長方向を持ち、被圧水流を伴う氷床底の侵食作用によって修飾された形態である。(2) 氷底水流は、みずほ高原氷床下の融解水が氷底湖を形成し、底面融解ゾーンにそって氷床縁辺部へ急激に排出されたものと考えられる。(3) ある特定の条件の氷床表面傾斜モデルを適用することにより、流線型基盤岩地形の面的配列と整合的な被圧氷底水流を再現できると同時に、地形形成期の氷床を復元することができる。(4) 氷底水流地形を考慮することにより地形の発達過程をより詳細に復元できる。

審査担当者一同は、これらの成果を高く評価し、また申請者は堅実かつ熱心であり、研究者としての資質を十分備えているものと考え、大学院課程における研鑽や単位取得なども併せ、申請者が博士（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。