

学位論文題名

Daily fluctuations in flow of temperate glaciers
and their application to a glacier model

(温暖氷河における日流動速度変化とその氷河モデルへの応用)

学位論文内容の要旨

山岳氷河は水資源として重要であるだけでなく、近年の海面上昇に対する縮小に伴う融解水の寄与が大きい。したがって気候温暖化が環境に与える影響を考える上で、山岳氷河が気候変動に対しどのように応答するかを理解することはきわめて重要である。そのためには現地における観測だけではなく、気候変化に伴う質量収支並びに力学的特性の変化を考慮した数値モデルを用いた研究が不可欠である。現実の氷河により近い数値モデルを構築するためには、気候変動に対して氷河の流動特性がどのように変化するかを研究し、それを数値モデルに取り込む必要がある。特に温暖氷河を考える際には、底面すべりの取り扱いが重要となる。温暖氷河における多くの観測結果は、底面の水の状態が変化すると底面すべりの大きさも変化するというを示しているが、従来使われている数値モデルでは気候変動に伴う底面すべりの変化は考慮されていない。したがって底面すべりが流動の大部分を占める氷河においては、従来の数値モデルでは実際の振る舞いを再現できない可能性がある。

本研究では、多涵養・多消耗の温暖氷河で実際に流動観測を行い、底面すべりと気象条件との間の関係を明らかにした。また、得られた関係を用いて気候変動に伴う底面すべりの変化を数値モデルに取り入れる形にし、現実の氷河により近い数値モデルを構築した。さらに構築した数値モデルを用いて、過去の冬期降水量の推定を行った。

観測は、パタゴニアのソレール氷河の消耗域(1998年)、カムチャツカ半島のカレイタ氷河の消耗域並びに涵養域(2000年)で行った。今回観測を行った二つの氷河は、世界的に見ても極端な多涵養・多消耗の氷河である。そのために大量の融解水が氷河底面に供給され、底面すべりが流動の重要な部分を占めていると考えられる。氷河上の数地点でGPS(Global Positioning System)を用いて表面流動速度の日変化の測定を行い、塑性変形による流動は日変化しないという仮定のもとに、底面すべりの日変化を見積もった。また、同時期に氷河表面における日融解量並びに氷河末端付近で降水量を測定することによって、氷河への水の日流入量を求めた。

ソレール氷河並びにカレイタ氷河では、観測を行ったすべての点で表面流動速度の日変化が測定された。このことはすべての観測地点で底面すべりを生じていたということを示している。なお、平均流動速度に対する日流動速度の変化率は、ソレール氷河で約±20%、カレイタ氷河で約±15%であった。

ソレール氷河では、1985年から1998年の間に氷厚が約40m減少したが、表面流動速度は1985年に比べて1998年のほうが速かった。これは観測期間中の平均融解量が多かった1998年のほうが、1985

年とくらべて底面すべりが大きかったためであると考えられる。

カレイタ氷河において、観測期間中表面高度は低下する傾向であった。また、低下量は末端に近いほど大きい値を示し、もっとも下流の観測地点において観測期間中に 1.4 m 以上低下した。これは他の氷河で観測された値と比べると非常に大きい値である。垂直方向の流動速度の大きさは日変化を示し、観測期間中は基本的には負の値（表面を低下させる方向）を示した。しかしながら、正の値（表面を押し上げる方向）がいくつかの観測地点で同時に現れる期間があるということがわかった。垂直速度の原因について解析を行った結果、今回観測された負の速度は、氷河底面並びに氷河内に存在する水の層の厚さ変化によるものであるということが明らかになった。このことは、カレイタ氷河では融解期に多量の水が氷河底面ならびに氷河内に存在することを示している。

これらの結果より、観測を行った二つの氷河では、水の関与する底面すべりが流動機構として非常に重要であることがわかった。

氷河への水の流入量と表面流動速度との間には、流入量が増加すると表面流動速度が増加するという線形の関係が見られた。また、流入量の増加率に対する表面流動速度の増加率は、同じ氷河上であれば場所によらずほぼ同じ割合となった。このことより、底面すべりの変化（表面流動速度の日変化）は氷河への水の流入量の関数として表せる事がわかった。したがって、この関係式並びに融解量と気温との関係を用いることにより、底面すべりの大きさを気温の関数として取り扱うことができるようになった。

以上をふまえて気候変動に伴う底面すべりの変化を考慮したモデルを構築し、カレイタ氷河に応用した。なお、今回のモデルでは、従来チューニングパラメータとして使われていた流動パラメータを、底面すべりの季節変化を考慮することにより実際の観測結果から求めた。この点も従来のモデルと大きく異なっている点である。

構築したモデルの検証のために、1930 年の氷河を初期条件としそれ以後の氷河末端位置の計算を行った。なお、1930 年以降の平衡線高度の変動は近くの気象ステーションのデータより推定した。その結果、得られた計算結果と実際に測量された末端位置は良く一致した。このことから、今回構築したモデルは実際のカレイタ氷河の振る舞いを良く表していると考えられる。

小氷期以後のターミナルモレーンの位置並びに年輪データより得られた過去の夏期平均気温の変化を用いて、18 世紀以後の冬期降水量の推定を行った。その結果、この地域の 19 世紀後半から 20 世紀前半の冬期降水量は、最近 50 年間(1941-1990)と比較すると約 10%減少していた可能性が示唆された。

本研究によって、多涵養・多消耗の氷河では、底面すべりが流動機構において非常に重要であること、並びに底面すべりの大きさは氷河への水の流入量によって表すことができることが観測より明らかになった。さらに観測結果をふまえて構築した数値モデルから、多涵養・多消耗の氷河の気候変動に対する応答をより詳しく知ることができること、また構築したモデルと氷河地形のデータを用いることにより復元が難しい過去の降水量を知ることができることが示唆された。これは将来並びに過去の気候変動に対するより深い理解につながるものである。

学位論文審査の要旨

主査	教授	前野紀一
副査	助教授	成瀬廉二
副査	教授	小野有五
副査	教授	大畑哲夫

学位論文題名

Daily fluctuations in flow of temperate glaciers and their application to a glacier model

(温暖氷河における日流動速度変化とその氷河モデルへの応用)

山岳氷河は水資源として重要であるだけでなく、近年の海面上昇に対する氷河縮小の寄与が大きい。したがって気候温暖化が環境に与える影響を考える上で、山岳氷河が気候変動に対しどのように応答するかを理解することはきわめて重要である。そのためには、現実の氷河により近い数値モデルを構築する必要がある。本研究において申請者は、多涵養・多消耗の温暖氷河の流動特性を氷河の現地観測から明らかにするとともに、従来不可能であった底面流動の変動を数値モデルに組み入れることに成功した。

本論文は全8章からなり、第1章では、温暖氷河におけるこれまでの底面流動の研究を紹介するとともに現在使われている数値モデルの問題点を指摘し本研究の位置づけを示している。第2章では、申請者が実際に観測を行った二つの氷河の特徴ならびにこれまでの研究が、第3章ではそれらの観測方法が述べられている。第4章と5章では、観測より得られた結果が示されるとともにそれらに関する考察が行われている。本研究によって、多涵養・多消耗の温暖氷河では底面流動が非常に重要であること、融解期に多量の水が氷河底面ならびに氷河内に存在すること、また、底面流動の大きさを気温の関数として取りあつかい得ることが明らかにされた。

第6章では、観測結果をふまえて新しく構築した数値モデルの概要が説明されるとともに、その検証が行われている。検証の結果、モデルより得られた計算結果と実際に測量された末端位置は良く一致することがわかり、構築したモデルの有効性が明らかにされた。第7章では本モデルを用いた数値実験結果が示されており、1970年代後半からの急激な氷河の後退は降水量変化によるものであること、19世紀後半から20世紀前半の冬期降水量は、最近50年間

(1941-1990)と比較すると10%以上少なかった可能性が明らかにされた。第8章では本研究で得られた結果がまとめられている。

以上、本研究は、申請者自ら観測を行い、多涵養・多消耗の氷河の流動特性を明らかにしただけではなく、観測結果をふまえて現実の氷河の振る舞いを良く表す数値モデルを構築したものである。このことにより、申請者は、多涵養・多消耗の氷河の気候変動に対する応答、ならびに復元が難しい過去の降水量推定の有効な手段を提供した。この成果は、今後の気候変動にともなう氷河の挙動に関する深い理解につながるものである。

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、大学院過程における研究ならびに取得単位なども併せ申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと判断した。