

学 位 論 文 題 名

Short-term flow variations under the control
of basal conditions in a temperate valley glacier

（温暖山岳氷河における底面状態に起因した短期流動変化）

学位論文内容の要旨

研究の背景：温暖氷河は、氷体の粘性変形と底面流動によって流動する。水圧や岩盤形状、堆積物の有無といった氷河の底面状態は、底面流動だけでなく氷河内部の応力分布を通じて粘性変形にも影響を与えるため、氷河の流動を決定する重要な要素である。夏期の温暖山岳氷河においては数時間のうちに表面流動速度が 100–200% 変化する事も珍しくなく、特に底面水圧の変化との関係に注目して研究が進められてきた。底面水圧の上昇によって底面流動が促進すると考えられるが、氷が粘性流体である以上は、底面流動が表面に直接伝えられるわけではない。氷河底面での流動と氷体内部の流動分布の関係は、氷の粘性の性質が支配するからである。しかしながら短期流動変化に着目した従来の観測は氷河表面での測定が多く、氷体内部を含めた流動場の変化を議論し得る観測結果は得られていない。また山岳氷河だけでなく、南極やグリーンランド氷床でも底面流動の重要性が明らかになっており、底面状態に起因した流動変化の理解が急がれている。

研究目的：本研究では、氷河表面流動速度、氷体内部の歪み、底面水圧を高い時間分解能で測定し、底面状態に起因する温暖山岳氷河の流動変化機構を解明することを目的とする。具体的には以下の 3 点に注目して研究を進めた。

- (1) 表面流動速度と底面水圧との関係
- (2) 氷河表面の鉛直上向きの動き
- (3) 氷体内部鉛直歪みの時間的变化

水圧測定によって得られる底面状態の変化が、氷体内部と表面を含めた氷河流動場にどのような影響を与えるか、が研究の焦点である。さらに、有限要素法を用いて氷河縦断面内の応力歪み場を計算する 2 次元氷河流動モデルを構築し、観測された流動変化と底面状態とを結びつける仮説の提案と検証を行なう。短い時空間スケールで変化する温暖山岳氷河の流動を理解する事は、地球規模の環境変化をもたらす氷床変動を予測するための基礎研究と捉えることもできる。

研究成果：観測は 2001 年 6–10 月にかけて、スイスアルプスの Unteraar 氷河にて実施した。その主な内容は、GPS を用いた表面流動速度測定、氷河底面水圧測定、掘削孔内での氷体

鉛直歪み測定、の3点である。GPSによる観測では基準点までの距離を極力短くする事によって測量精度が±5mm以下に向上し、数時間というスケールでの流動変化を捉える事に成功した。氷河底面に達する掘削孔内で3ヶ月間連続的に測定された底面水圧は、融解や降雨に起因する変動に加えて、底面排水機構の季節変化による影響を示した。また、1日数回という頻度で測定された鉛直歪みによって、氷河内部における応力歪み場の変化が高い時間分解能で議論可能となった。

上記期間中に1-2週間の連続測定を4回行い、注目した3点それぞれに関して次のような観測結果を得た。

- (1) 底面水圧と関連した日周期流速変化
- (2) 流速の増加に伴って氷河表面が数10mm上昇する現象
- (3) 鉛直歪みの日周期変動

表面流速は底面水圧の上昇する夕方に2-3倍の値を示し、氷河の流動が底面水圧に強く支配されていることが明らかになった。また、水圧の増加と減少に対して流速がわずかに異なる振る舞いを示し、水圧増加時により加速される上流側の氷から応力が伝えられた結果と考えられる。氷河の流動がその前後の氷体との力のやり取りによって決定されるという考えは想像にたやすいが、そのような影響を直接的に示す観測事実が得られたのは初めてのことである。氷河の加速に伴う表面の鉛直上向きの動きはこれまでも観測されており、氷河底面の水で満たされた空隙の成長がその原因として提案されていた。本研究では鉛直歪みの測定結果との比較によって、氷体の歪みと底面での空隙成長の両者がこの現象の原因であることを確認した。また、鉛直歪みの変動が短い時間スケールで観測されたことから、短期流動変化を考える上では一定成分と見なされることの多い粘性変形が、底面状態によって著しく変化する事が明らかになった。この結果は底面状態による底面流動の促進、という単純な図式を押し進めて、底面状態が氷河内部の応力歪み場と強く関連することを示している。

観測結果に定量的な説明を与えるため、定常状態のStokes方程式に非線形な氷の構成方程式を適用した氷河流動モデルを構築した。空間的に一様でない底面状態とその時間的な変化を想定して流動場の変化を求めるとともに、観測データを数値実験によって再現することがその目的である。限られた空間に与えられた底面流動が氷河流動場に与える影響を調べたところ、氷厚の10倍程度の水平距離内で底面状態が表面流速に有意な影響を与えることが明らかになった。この結果は、氷河の流動が周辺の広い範囲にわたる底面状態分布に起因するという仮説を支持するものである。また上流から下流へと日周期で移動する底面流動場を仮定する事によって、鉛直歪みの日周期変化が定性的に再現された。

以上の研究成果は、温暖山岳氷河に特有な短周期流動変化機構を明らかにすると共に、多くの氷河の流動が底面状態によって著しく変化する事を示している。表面融解を通じて、気候変化が底面状態に影響を与える事を考慮すれば、氷河変動と気候との新しい相互作用が示唆されよう。さらに本研究で得られた知見と研究手法を、南極氷床の変動に大きな役割を担う氷流の動機構へと応用することが今後の課題である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 本 堂 武 夫

副 査 助 教 授 成 瀬 廉 二

副 査 教 授 平 川 一 臣

副 査 教 授 Heinz Blatter (スイス連邦工科大学)

学 位 論 文 題 名

Short-term flow variations under the control of basal conditions in a temperate valley glacier

(温暖山岳氷河における底面状態に起因した短期流動変化)

氷河や氷床は、地球気候システムの重要な要素であり、気候変動に対するその応答特性を明らかにすることは、地球温暖化をはじめとする地球環境変動の将来予測には不可欠の重要な研究課題である。氷河・氷床の流動は、氷体の塑性変形と底面流動によって生ずるが、底面流動の研究は氷体の塑性変形の研究に比べて著しく立ち遅れているのが現状である。最近の研究において、山岳氷河に限らず南極氷床やグリーンランド氷床でも、底面流動による局所的な流動の重要性が指摘されており、そのメカニズムの解明が強く望まれているところである。

底面流動の特徴はその短期的な変動にあり、夏期の温暖山岳氷河においては、数時間のうちに表面流動速度が 100–200% 変化する事も珍しくない。このような短期的変動は、底面水圧の変動によってもたらされると考えられているが、従来の観測は氷河表面での測定が多く、氷体内部を含めた流動場の変化を議論し得る観測結果は得られていない。

本研究は、これまでにない高い時間分解能で氷河表面と内部の流動を測定し、底面水圧との関係を詳細に調べたものである。新規に開発した氷河流動モデルによる数値実験と合わせて、温暖氷河の底面状態の変化に対する流動場の応答を明らかにした。

本論文は5章からなり、第1章では、氷河底面での流動機構と底面流動に起因した短期流動変化について過去の研究を俯瞰し、本研究が明らかにすべき課題を示している。第2章では、スイス・ウンターアール氷河において融解期を通して行なわれた観測の手法と結果が記述されており、氷河表面と内部の流動および底面水圧の変動を同時に高い時間分解能で測定する特徴的な方法が述べら

れている。第3章では、観測結果の詳細な解析と議論が行なわれており、①底面水圧と流動速度の関係、②氷河表面の鉛直方向の動き、および③氷河内部鉛直ひずみの時間変化を高い時間分解能で明らかにし、変動のメカニズムを議論している。第4章では、非線形塑性体の流動を有限要素法によって解く氷河流動モデルを構築し、空間的に一様でない底面流動が氷河流動場に与える影響を数値実験によって議論している。その結果、本研究で得られた1地点の流動変化が、その上流と下流における底面状態の相違によってもたらされることを明らかにし、温暖山岳氷河における短期的な変動の普遍的なメカニズムを提示している。第5章では本研究の成果がまとめられ、今後への展望が述べられている。

以上本研究は、氷河流動における短期的な変動のメカニズム解明に重要な貢献をなすものである。本研究の手法を他の山岳氷河や南極、グリーンランドの氷流研究に応用する事によって、気候変動に対する氷河・氷床の応答の理解が一層進むものと期待される。また、新たな手法を導入して実施した氷河観測から独自の数値計算モデルの開発に至るまで、いずれも申請者自らが計画、実施したものであり、研究者としての資質の高さを知るに十分なものである。

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、大学院課程における研鑽や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定した。