

学 位 論 文 題 名

Hydrological characteristics and their seasonal changes of drainage systems of maritime temperate glaciers

（海洋性温暖氷河における流出システムの水文学的特徴とその季節変化）

学位論文内容の要旨

氷河における水循環プロセスは、氷河上・内・底面における様々な特徴を持った流出システムの存在と、それらが季節とともに大きく変化するという点によって特徴づけられる。たとえば氷河上の積雪内や底面の一部における流出システムの内部には融解水が貯留されるが、その分布や構造の変化にともなって排水が起こり、流域の水収支に大きな影響を及ぼす。このうち氷河底流出システムは、流速の大きな管状の水路系(channelized system)と、連結した間隙水脈網(linked cavity system)をはじめとする流速の小さな流路系との2種類に大別される(Fountain and Walder, 1998 など)。Nienow *et al.*, (1998) の研究により、融解期の初期には間隙水脈網が氷河底面全域に分布しているが、次第に末端付近から管状水路系が発達し、両システムの境界は常に季節的雪線の付近にあることが明らかになっている。また、このような構造変化に対応して、流出河川水の化学成分にも系統的な変化が現れることも知られている(Tranter *et al.*, 1996)。

上記のような知見は、主としてアルプス・北欧の氷河におけるこれまでの観測に基づいている。本研究では、アルプス・北欧とは大きく異なる気候条件下にある、多涵養・多消耗の温暖氷河(ロシア・カムチャツカ半島、南米・パタゴニアの氷河)を対象とした。そのような気候環境下の氷河における水収支の特徴を明らかにすること、また流出システムの季節変化、とくに氷河底流出システムの構造変化プロセスを明らかにすることが本研究の目的である。現地観測は1996、1997、2000年にカムチャツカ半島カレイタ氷河で、また1998年には北パタゴニア氷原ソレール氷河において実施した。

カムチャツカ半島カレイタ氷河における2000年8～9月の水文気象観測の結果から水収支各項を計算した結果、氷河流域からの流出量が流域へのインプット(融解量+降水量)を上回っており、氷河内に貯留していた融解水が期間を通じて排出していることが明らかになった。氷河表面の沈下量から底面における間隙水脈の体積縮小量を推定して比較すると、この期間の全貯留量変化の約20%が、間隙水脈の縮小にともなう排水によって説明されることが分かった。したがって貯留水の多くは主に氷河上の積雪・フィルン層や氷河内部にあったものと考えられる。また、観測期間以外の水収支項を推定した結果、融解期前半もアウトプットがインプットを上回り、氷河内への貯留は前年の冬から春にかけて起こることが示唆された。さらに年間でも負の貯留量変化が推定され、氷河の水収支には大きな年変化が見られることが分かった。このような貯留パターンは北米における多涵養・多消耗の氷河にも同様に見られ

ることから、海洋性温暖氷河の特徴であると考えられる。

次に、2つのタンクからなる流出モデル(linear reservoir model)と、氷河底流出システムごとの寄与を示す化学指標とを用いて、カレイタ氷河における流出システムの季節変化のパターンを検証した。流出モデルの2つのタンクはそれぞれ「涵養域表面から間隙水脈網まで」と「管状水路系」とを通過する流出経路を表現しており、両システムの境界が季節的雪線的位置にあるという仮定にもとづいて、それぞれのタンクへのインプットを配分した。その結果、モデルによる流量の計算値は実際の流出量のトレンドと日変化をよく再現した。一方、間隙水脈網起源の水の寄与を示す、硫酸イオンの重炭酸イオンに対する比は、融解期前半に大きく、後半にかけて小さくなる。したがって、融解期後半ほど間隙水脈網起源の水の寄与は少ないことが分かった。以上から、異なる気候条件下の氷河と同様に、カレイタ氷河においても管状水路系が季節的雪線の上昇にともなって上流方向へ発達していくことが確かめられた。また末端から約2 km の地点にあるムーランに食塩を投入するトレーサー流下実験によって、管状水路系内の平均的な流速が 0.3 m s^{-1} 程度であることが分かった。

2000 年の融解期後半において、カレイタ氷河流出河川の流量が1時間のうちに $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ も増加するイベント(outburst event)が発生した。またこのイベントに先立つ3日間には、河川水中の浮流土砂濃度と流量の関係が通常とは大きく異なり、流量が小さいにも関わらず土砂濃度が大きくなるというイベント(Sediment event)が観測された。このイベント中には、浮流土砂の粒径組成が氷河底ティルの粒径組成に極めて近づく場合があることも明らかになった。さらに Sediment イベントの前後には、硫酸イオンの重炭酸イオンに対する比など溶存化学成分に変化がみられた。また Sediment イベント時には、季節的雪線付近での氷河表面流速が一時的に急増加していることも観測されている。以上のことから、この2つのイベントの組み合わせは氷河底における間隙水脈網から管状水路系への構造変化にともなうものであると考えられる。つまり、氷河底面への融解水流入が増加して底面水圧が高まると、間隙水脈が拡大を始め、それによってまず間隙周辺に堆積していたティルが管状水路系へと流入して Sediment イベントが発生し、次いで融解水が急激に排出して流量増加イベントが発生したものであると推測される。

学位論文審査の要旨

主 査	助 教 授	成 瀬 廉 二
副 査	教 授	大 畑 哲 夫
副 査	助 教 授	知 北 和 久 (理学研究科)
副 査	教 授	平 川 一 臣
副 査	教 授	小 野 有 五
副 査	助 教 授	山 田 知 充

学 位 論 文 題 名

Hydrological characteristics and their seasonal changes of drainage systems of maritime temperate glaciers

(海洋性温暖氷河における流出システムの水文学的特徴とその季節変化)

氷河における水循環過程は、氷河表面・内部・底面における様々な形態と性質をもつ流出システムの組み合わせからなる。また、その流出システムの構造や特性が氷河の融解にともなって変化を示すこと、とくに底面における流出システムが、「流速の小さい網状の水脈」から「流速の大きな管状の水路」へと変化することによって、氷河流域の水収支や流出特性は顕著な季節変化を示す。しかし、そのような流出システムの構造変化がどのような過程で発生するかについては、直接的な観測が困難であるために、従来ほとんど明らかにされていない。また水収支についても、これまでの研究によって氷河ごとの相異が大きいことは知られているが、研究事例が少なく、気候がおよぼす影響などの詳細は明らかになっていない。

本研究は、水循環過程の季節変化が大きいと予想されるにもかかわらず、これまで研究の少なかった海洋性温暖氷河において現地観測を行ない、氷河流域の水収支と氷河底流出システムの季節変化というスケールの異なる2つの現象に注目して、その特徴を詳細に明らかにしたものである。

本論文は全7章からなり、第1章では温暖氷河における水循環過程とその変化に関する既存の研究を概観し、本研究の位置づけを示している。第2章では現地調査を実施した2カ所の氷河(カムチャツカ半島カレイタ氷河、北パタゴニア氷原ソレール氷河)についての概要が、また第3章では各氷河における観測方法と、その結果にもとづいて調査流域全体の水収支項を算出する方法とが記述されている。第4章では観測結果をふまえて、2カ所の氷河における水収支の特徴が示されている。海洋性温暖氷河

においては水収支の経年変化が大きく、融解期以前に貯留された融解水が融解期を通じて排出されるというパターンを示すことが明らかになった。また氷河底面における貯留の寄与が氷河表面低下量を用いて議論された。第5章では、既存の研究で知られている氷河底流出システムの季節変化パターンが海洋性温暖氷河の場合にもみられることを、流出モデルと溶存化学成分とを用いて確認した。また管状水路における流速の推定も行われた。第6章では、カレイタ氷河の底面からの急激な排水に先立ち、流出河川中の浮流土砂濃度が顕著な増加を示すイベントについて議論している。同じ期間に浮流土砂の粒径分布、溶存化学成分、氷河表面流速などにもみられた変化を考慮することで、このイベントが氷河底における流出システムの構造変化にともなって発生した現象であることを明らかにし、その過程について議論が行われた。第7章では、本研究における成果が結論としてまとめられている。

以上、本研究は温暖氷河の水循環過程に関する解明に重要な貢献をなすものと言うことができる。とくに、氷河水系の通年の水収支を定量的に見積もったこと、および流出・土砂イベントと氷河底構造変化との関係を明らかにしたことは、高く評価すべき点である。また、氷河底流出システムの構造変化に関する浮流土砂を用いた研究手法は、他の温暖氷河に応用され、さらなる発展が期待される。以上のように、スケールの異なる現象について、複数の手法を併用した観測と解析とを申請者自らが計画し、実施し得たことは、研究者としての資質の高さを示すものである。

審査委員一同は、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ること、大学院課程における研鑽や取得単位などもあわせて、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。