

学 位 論 文 題 名

Development and evolution of water drainage channels in temperate and polar glaciers

(温暖氷河と極地氷河における水路の発達と変化)

学位論文内容の要旨

The water flowing on the glacier surface and penetrating into the inner and subglacial parts makes a complicated channel network. The questions of where and how water circulates within glaciers are of considerable interest from various points of view. The study of glacial drainage systems is essential for understanding of glacier dynamics, inner ablation, outflow hydrograph, and other hydrological processes in the glacier. It is also helpful to water resource use planning in glacial regions and forecasting of the outflow hydrograph during ice-dammed lake outbursts (jökulhlaups). In this work we studied the behavior of a single channel in cold and temperate ice to clarify the channel evolution and the dependency on its size, ice temperature and depth in the glacier.

In order to know evolution of a glacial water channel, we have to calculate the rate and direction of phase change on the channel walls and the ice creep rate at all points along the channel. For that we calculate the heat flowing into the ice wall and energy dissipation within the water flow. The relation between these two parameters determines the ice melting/freezing rate that, along with the rate of ice creep, allows us to evaluate the change of the channel form. Fully 3-dimensional modeling of such system is obviously overcomplicated and extremely resource consuming. That is why we developed a 2-dimensional cross-sectional model, with which changes in the cross-section form at some particular points of a channel can be calculated. This cross-sectional model calculates ice temperature distribution around the channel, energy dissipation distribution along the channel walls, and ice creep rate.

The structure and evolution of glacial drainage systems depend on many factors, one of the most important factors being the water temperature because it controls the melting rate on the channel walls. The water temperature can vary along its flow line because the water temperature depends on the air temperature, solar radiation, the flow discharge, the amount of sediments, and also channel's form, size, and slope. The temperature of water flowing in a glacial channel tends to the equilibrium temperature, that is usually less than 0.1 °C, unless there is no environmental influence such as heat exchange with the air or warming by the solar radiation. Otherwise, the water temperature can rise up to 0.4 °C or even more. The equilibrium water temperature is proportional to the channel cross-section and the slope. If the water temperature in a channel does not equal the equilibrium value, then it exponentially tends to the equilibrium value as the water flows along the channel.

Series of field measurements at glaciers and cold room experiments were conducted to testify our theoretical approaches. We carried out field measurements at Perito Moreno Glacier, Patagonia in 2003, and Fisht Glacier, West Caucasus in 1998. We measured the water temperature, water flow speed, and ice melting rate on the ice walls in small glacial water channels. In the cold room experiments, we measured the change of the diameter of an artificial channel and water temperature change along the channel under the condition of the constant water flow discharge. Both field measurements and the experimental results were in good agreements with the theory.

Our theoretical achievements were implemented in a software program using numerical techniques. This allowed us to carry out a great variety of numerical simulations for different conditions.

Two numerical models were developed. They are based on the same physical principles, but the first one deals with a channel with any cross-section, and gives rather qualitative pattern of a channel development than strict quantitative results. The second model deals with channels of cylindrical geometry. The simulations with this model are very fast and the accuracy of the results is very high. Another difference is that the first model does not take into account the deformation of ice under overburden pressure.

According to the results obtained with the help of the first model, the pressurized channels, as expected, have a tendency to become circular in their cross-sections independently on the initial form. On the other hand, the open (non pressurized) channels deepen into the ice making corridor-like passages.

Using the second model, we defined two main scenarios corresponding respectively to the channels at the initial stages of formation and to the fully developed channels. The first scenario revealed some critical parameters (channel radius, ice depth, ice temperature etc.) on which possibility of the channel developing depends, and the most favorable conditions for the channel growth. Using the second scenario we found out that already developed channels tend to become equilibrium in size. Long-term (several years) modeling showed that ice depth is more critical than ice temperature for a channel to survive till the next melting season.

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 成 瀬 廉 二

副 査 教 授 福 田 正 巳

副 査 教 授 Ralf Greve

副 査 教 授 池 川 昌 弘 (北大大学院工学研究科)

学 位 論 文 題 名

Development and evolution of water drainage channels in temperate and polar glaciers

(温暖氷河と極地氷河における水路の発達と変化)

温暖氷河では春の融解期が始まると、氷河表面の融解水は細い氷の割れ目や水脈を通して氷河内部に浸透する。水の流下にともない発生する摩擦熱により、水脈の周囲の氷を融かし、数ヶ月の間に直径数 m 以上の水管、水路に発達する。このような、氷河内部、底部の水路システムの形成過程は、氷河内の貯水、氷河からの排水、出水、および氷河底面滑り、サージ等により多くの影響を与え、氷河動力学、氷河水文学および流域の水文環境にとって重要な問題となっている。また、水路の発達メカニズムの解明は、氷河湖決壊時の流量予測、したがって災害防止、および氷河地域の水資源の利用計画に大きく貢献する。

しかしながら、氷河内部の水路は直接観測が難しく、現在までは間接的測定および理論的研究が行われてきたにすぎない。本研究は、氷河内の水路の形態変化に関する数値モデル実験、低温室内の模型実験、氷河における観測をもとに、さまざまな条件下の氷河内水路の発達、形成過程を明らかにしたものである。

まず、氷河内の水路形成の理論を各種物理法則にもとづき組み立てた。水路内の水の位置エネルギーの変化、水中発熱、氷と水との熱交換、水路氷壁での相変化(融解、凍結)、氷の歪による水路の収縮等、さまざまな現象を考慮に入れた。氷河水路を変化させる最も主要な要素の一つは水のもつ熱エネルギーである。それ故、水温の問題は特に詳しく考察し、水路の直径と傾斜を与えると、水温が一定となる平衡水温を定量的に導いた。また、理想的な水路と比較すると、日射の影響、空気との熱交換、堆積物の量、水路の形などにより、水温はおおよそ $+0.5^{\circ}\text{C}$ まで上昇し得ることが分かった(学位論文第2章)。

次に、理論から計算された水温変化および水路内の氷壁の融解速度を実測データにより検証することを目的に、氷河現地調査と室内実験を行った。1998 年にカフカス

Fisht 氷河、および 2003 年にパタゴニア Perito Moreno 氷河にて、氷河上水流の水温、流速、氷壁融解速度を測定した(第3章)。低温科学研究所の低温実験室では、氷ブロック内の人工水路の拡大過程、および水温分布と変化を測定した。実験装置は、長さ 1-2m の氷ブロック、水温調節できる給水システム、温度計からなり、上部水槽から供給される水は、氷ブロック内の水路を流れて下部水槽に流入する。実験の前後に水路の直径分布を計測した(第4章)。

以上の氷河現地調査と室内実験から得られたデータは計算結果と非常によく一致することが分かった。これを踏まえ数値モデルを作成した(第5章)。モデルの初期パラメーターを変えることにより、多種類の数値実験を行うことができる。このモデルにより、水流のない冬季から、消耗季節の初期、最盛期に至るまでの水路の季節変化、および発達した水路の数年間にわたる変化過程等に関するシミュレーションを行った。本数値実験結果にもとづいて、氷河水路がどんな条件下で発達できるか、冬季間を通して生存し続けることができるか、を明らかにした(第6章)。

以上の研究は、温暖氷河の水循環過程の解明に重要な貢献をなすと言うことができる。とくに、水路が拡大するか縮小するかの臨界条件、および水路が水の供給のない冬季に安定して存在しうる条件を明示したことの意義は大きい(第7章)。将来、地球温暖化などの気候変動により、氷河からの流出特性がどのように変化するか、本研究の成果はさらなる発展が期待される。以上のように、理論計算、数値モデル実験、室内実験、野外調査とを、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、本研究のモデルの緻密さ、さまざまな条件下における数値実験の成果を高く評価し、また研究者としての積極性、堅実性を認めるとともに、大学院課程における勉学、研究成果発表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。