

学位論文題名

Changes in ice flow regime due to
proglacial lake formation in an alpine glacier

(氷河前縁湖の形成に起因する山岳氷河の流動変化)

学位論文内容の要旨

本論文は100mスケールの空間分解能で観測を実施し、氷河前縁湖(氷河湖)の形成に起因した山岳氷河の流動変化を明らかにしたものである。氷河前縁湖とは、融解水が氷河前縁の岩盤もしくは堆積物に堰き止められて形成するダム湖である。近年の気候変動の影響を受けて、世界各地の山岳氷河は著しく縮小・後退し、その一部では新しい氷河前縁湖が形成されている。氷河末端に湖が形成された場合、1) 底面水圧の増加による氷河末端の加速、2) 末端の加速に起因する氷厚の減少、3) 底面水圧の増加と氷厚の減少に起因する氷河の隆起と崩壊の3過程が段階的に発生し、氷河の後退を加速させる恐れがある。それぞれの過程を観測に基づいて明らかにすることで、湖と隣接した氷河の変動に新たな知見を提供できる。しかしながら、湖の形成直後から長期的かつ高空間分解能で流動の変化を観測した例は少なく、流動変化の定量的な評価やそのメカニズムの理解は不十分である。山岳温暖氷河では融解水が底面流動を活発にすると考えられ、氷河流動に対する底面排水システムの寄与の重要性が議論されてきた。この排水システムの変化は、熱水ドリルによる全層掘削と掘削孔を用いた底面水圧の観測により明らかにされてきた。湖が形成された氷河末端の底面流動は、湖水の影響を大きく受けることが予想される。しかしながら湖周辺の氷河を多点で掘削し、底面水圧の分布を高空間分解能で観測した例は少なく、湖水の底面流動への影響は深く議論されてこなかった。

そこで本研究は、湖の形成に起因する流動の変化とそのメカニズムの解明、特に上記過程1) に関して、氷河湖形成前後の表面流動速度の時間変化、2) に関して、水平方向の氷の圧縮・伸張流の空間的・時間的变化、および3) の発生につながる有効圧力(氷の上載荷重と底面水圧の差)の空間分布を明らかにすることを目的とした。

上記の目的を達成するには、湖が形成して間もない氷河を選定し、高空間分解能で観測を実施することが望ましい。そこで2005年に新しく氷河湖

が形成されたスイスアルプスのローヌ氷河において、3年間にわたり100mスケールの空間分解能で観測を行った。研究方法は熱水ドリルによる氷河の全層掘削、GPS測定による水平・鉛直方向の表面流動速度と氷河の表面高度測量、圧力センサーや水位ゲージを用いた掘削孔内の水位測定である。また観測された流動場の再現、流動変化メカニズムを考察するために3次元氷河流動モデルを構築した。

本研究で得られた結果は以下の通りである。

(1) ローヌ氷河末端の表面流動速度は、2006年から2007年にかけて約2倍に増加した。掘削孔の水位測定の結果、氷河末端から上流側200mの領域における水位は湖の水位とほぼ等しく、また氷厚の90%に達することが明らかとなった。これらの結果から、高い氷河底面水圧が底面流動を促進し、流動の加速を引き起こしたことが示唆された。

(2) 氷河末端における水平方向の流動場は、湖の形成前後で圧縮流から伸張流へ変化した。この結果は、形成前は上流側が速く流動して水平方向に氷を圧縮する、つまり氷厚を増加させる流動場が形成されていたが、形成後の末端の加速によって伸張流が出現し、氷厚の減少を加速させたことを示唆するものであった。

(3) 2008、2009年には湖周辺において最大5mの氷河表面の隆起が観測された。表面高度測量と熱水掘削より求めた氷厚分布を基に有効圧力を計算したところ、隆起した領域は有効圧力が0に達した領域とよい一致を示した。これらの結果から、氷の上載荷重の減少によって有効圧力が0に達し、湖水の浮力の働きで氷が持ち上げられたことを示唆するものであった。

(4) 底面の流動機構に対する氷河湖形成の寄与を検討するために、氷河流動モデルによる数値実験を行った。その結果、底面ずり応力の大きさに比例する底面流動を導入した場合に上流側の流動場が再現された。一方で湖周辺の流動速度は観測値の50%以下であり、末端流動の加速は部分的な底面流動の強い促進によってもたらされたことを示唆する結果を得た。

本研究は、氷河湖形成の前後における流動の変化を高空間分解能で明らかにし、湖と隣接した氷河の変動予測に新たな知見を提供した。得られた成果は氷河湖拡大の予測や、氷河湖決壊洪水など災害の防止に貢献するものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 グレーベ ラルフ
副 査 教 授 平 川 一 臣
副 査 准教授 白 岩 孝 行
副 査 講 師 杉 山 慎
副 査 教 授 榎 本 浩 之 (北見工業大学工学部)

学 位 論 文 題 名

Changes in ice flow regime due to proglacial lake formation in an alpine glacier

(氷河前縁湖の形成に起因する山岳氷河の流動変化)

本論文は100mスケールの空間分解能で観測を実施し、氷河前縁湖(氷河湖)の形成に起因した山岳氷河の流動変化を明らかにしたものである。氷河前縁湖とは、融解水が氷河前縁の岩盤もしくは堆積物に堰き止められて形成するダム湖である。近年の気候変動の影響を受けて、世界各地の山岳氷河は著しく縮小・後退し、その一部では新しい氷河前縁湖が形成されている。氷河末端に湖が形成された場合、1)底面水圧の増加による氷河末端の加速、2)末端の加速に起因する氷厚の減少、3)底面水圧の増加と氷厚の減少に起因する氷河の隆起と崩壊の3過程が段階的に発生し、氷河の後退を加速させる恐れがある。それぞれの過程を観測に基づいて明らかにすることで、湖と隣接した氷河の変動に新たな知見を提供できる。しかしながら、湖の形成直後から長期的かつ高空間分解能で流動の変化を観測した例は少なく、流動変化の定量的な評価やそのメカニズムの理解は不十分である。山岳温暖氷河では融解水が底面流動を活発にすると考えられ、氷河流動に対する底面排水システムの寄与の重要性が議論されてきた。この排水システムの変化は、熱水ドリルによる全層掘削と掘削孔を用いた底面水圧の観測により明らかにされてきた。湖が形成された氷河末端の底面流動は、湖水の影響を大きく受けることが予想される。しかしながら湖周辺の氷河を多点で掘削し、底面水圧の分布を高空間分解能で観測した例は少なく、湖水の底面流動への影響は深く議論されてこなかった。

以上のような背景に基づいて本研究は、湖の形成に起因する流動の変化とそのメカニズムの解明、特に上記過程1)に関して、氷河湖形成前後の表面流動速度の時間変化、2)に関して、水平方向の氷の圧縮・伸張流の空間的・時間的変化、および3)の発

生につながる有効圧力(氷の上載荷重と底面水圧の差)の空間分布を明らかにすることを目的とした。

上記の目的を達成するには、湖が形成して間もない氷河を選定し、高空間分解能で観測を実施することが望ましい。そこで2005年に新しく氷河湖が形成されたスイスアルプスのローヌ氷河において、3年間にわたり100mスケールの空間分解能で観測を行った。研究方法は熱水ドリルによる氷河の全層掘削、GPS測定による水平・鉛直方向の表面流動速度と氷河の表面高度測量、圧力センサーや水位ゲージを用いた掘削孔内の水位測定である。また観測された流動場の再現、流動変化メカニズムを考察するために3次元氷河流動モデルを構築した。

本研究で得られた結果は以下の通りである。

- (1) ローヌ氷河末端の表面流動速度は、2006年から2007年にかけて約2倍に増加した。掘削孔の水位測定の結果、氷河末端から上流側200mの領域における水位は湖の水位とほぼ等しく、また氷厚の90%に達することが明らかとなった。これらの結果から、高い氷河底面水圧が底面流動を促進し、流動の加速を引き起こしたことが示唆された。
- (2) 氷河末端における水平方向の流動場は、湖の形成前後で圧縮流から伸張流へ変化した。この結果は、形成前は上流側が速く流動して水平方向に氷を圧縮する、つまり氷厚を増加させる流動場が形成されていたが、形成後の末端の加速によって伸張流が出現し、氷厚の減少を加速させたことを示唆するものであった。
- (3) 2008, 2009年には湖周辺において最大5mの氷河表面の隆起が観測された。表面高度測量と熱水掘削より求めた氷厚分布を基に有効圧力を計算したところ、隆起した領域は有効圧力が0に達した領域とよい一致を示した。これらの結果から、氷の上載荷重の減少によって有効圧力が0に達し、湖水の浮力の働きで氷が持ち上げられたことを示唆するものであった。
- (4) 底面の流動機構に対する氷河湖形成の寄与を検討するために、氷河流動モデルによる数値実験を行った。その結果、底面ずり応力の大きさに比例する底面流動を導入した場合に上流側の流動場が再現された。一方で湖周辺の流動速度は観測値の50%以下であり、末端流動の加速は部分的な底面流動の強い促進によってもたらされたことを示唆する結果を得た。

以上の結果は、氷河湖形成の前後における流動の変化を高空間分解能で明らかにし、湖と隣接した氷河の変動予測に新たな知見を提供するものである。得られた成果は氷河湖拡大の予測や、氷河湖決壊現象の理解に貢献することが期待される。

審査員一同は、氷河湖形成が氷河の流動と変動に及ぼす影響について、本研究が明らかにした成果を高く評価する。申請者の真摯な研究姿勢、海外での観測活動を含めた研究経験、大学院課程における取得単位、学術論文や学会における研究成果の公表状況などを総合的に判断して、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。