

氷河湖決壊洪水(GLOF)の発生リスク評価法確立のための研究

ー現地観測結果を用いた数値解析ー

三重大大学 ○鈴木 心, 堤 大三
立命館大学 里深好文, 高山翔揮

1. はじめに

近年, 地球温暖化の影響で, 高山地帯において氷河の縮小が進んでいる。それに伴い, 氷河湖の拡大が進行しており, 氷河湖決壊の発生頻度やそのリスクが高まっている。氷河湖決壊が原因で発生する洪水を氷河湖決壊洪水(GLOF: Glacial Lake Outburst Flood)という。GLOFは, 大量の水が土砂を巻き込み流下するため, 下流域の自然やインフラ, 人々の暮らしに大きな被害をもたらす。

GLOF 発生原因の一つに, モレーンの融解がある。モレーンは構成材質・形状の点から非常に不安定であるが, 堤体内部が凍結していることで強度が保たれていると考えられる。もし, 地球温暖化によりモレーン全体が融解する様な場合, その強度は低下し, GLOF 発生リスクが高まると予想される。そのため, モレーンの温度変化を把握することは, GLOF 発生の危険度を評価するために非常に重要である。

本研究では, GLOF 発生の危険性が指摘されている場所の一つである, ネパールの Tsho Rolpa を対象地とする(図-1)。当該地のモレーンの比高は約 150 m あり, このような巨大なモレーンの内部温度を直接測定することは困難である。そのため, モレーンの表面温度をもとに熱伝導解析を行い, 内部温度の推定を試みる。本稿では, 一年間現地にてモレーン表面温度の観測を行い, その結果を用いて現地スケールの熱伝導解析を行った結果を報告する。

2. 現地観測

2.1 観測概要

2018年11月18日から2019年11月9日にかけて, 現地にて観測を行った。観測事項は, モレーン地表面の温度, 気温, 気圧である。また, インターバルカメラを設置し, 湖面の様子モニタリングも行った。すべて1時間間隔で計測を行った(図-2)。

表面温度の観測は, 計8地点9か所の温度を測定した。観測地点は, 上流から No.1~No.8 とした。温度計の設置方法2パターンあり, 巨礫の表面に温度計を



図-1 Tsho Rolpa のモレーン

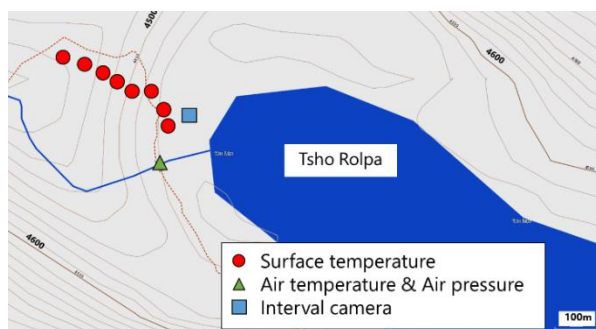


図-2 観測機器の設置場所

表-1 表面温度の観測結果 (単位: °C)

	air	No.1	No.2	No.3	No.4
max	21.6	44.8	10.5	7.7	9.9
min	-21.6	-18.8	-11.4	-9.2	-9.4
ave	0.4	4.9	0.4	0.5	0.8
	No.5	No.6	No.7	No.8-1	No.8-2
max	13.0	19.2	14.6	33.3	12.8
min	-9.5	-13.8	-12.7	-17.6	-11.1
ave	2.1	1.4	3.0	2.5	1.8

露出させた状態で取り付けた露出型、地面に設置した温度計に石礫を覆いかぶせた埋没型である。No.1、No.8-1 が露出型で, No.2~No.8-2 が埋没型である。最下流の地点 No.8 では, 同じ地点で2パターンの温度計測を行った。

2.2 観測結果

観測温度の結果を表-1に示す。露出型の No.1 と No.8-1 では, 日射や風などの影響で温度変化の振れ幅が大きく, 平均温度が高くなる結果となった。一方の埋没型では, 比較的安定した温度変動となった(図-3)。また, 各地点の平均温度を比較すると, 埋没型の平均温度では, 地点標高と温度に正の相関がみられた。

3. 熱伝導解析

3.1 解析手法

現地観測によって得られた表面温度を入力値とした、モレーン縦断面の二次元熱伝導解析を行った。この解析では土層の凍結融解を考慮している。二次元熱伝導方程式(1)と相変化時の熱収支式(2)を連立させ、不凍水率 θ と凍結融解温度 T_L の関係式(3)を用いることで、水の相変化を伴う熱伝導を解いた。

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + L_w \frac{\partial \phi}{\partial t} = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad \dots (1)$$

$$\Delta \phi(i, t) = C \times \{T_L(i, t) - T(i, t)\} / L_w \quad \dots (2)$$

$$T_L = \theta - 0.4 \quad \dots (3)$$

ここで、 T は温度(K), T_L は凍結融解温度, L_w は水の融解潜熱(J/m³), λ は土層の熱伝導度(W/m/K), C は土層の熱容量(J/m³/K), ϕ は凍結水率, θ は不凍水率, $\Delta \phi$ は凍結融解体積変化量, i は節点番号, t は時間である。

3.2 解析シナリオ

全層凍結しているモレーンの表面温度が、100年間で10℃上昇した場合、どのように融解するかを確かめた。融解挙動を確認するため、IPCC(2013)の報告の10倍以上の温度上昇ペースという非現実的な温暖化シナリオを想定した。入力した表面温度は、埋没型の観測結果の平均温度を標高によって配分し、0.1℃/yearのペースで温度を上昇させた。土層の水分条件は、上流の湖水面から最下流地点の地下20mを結んだ直線を地下水位と仮定し、砂質土の条件で含水率を与えた。土層の間隙は0.3で一定とした。

初期条件は、堤体内部温度を-0.3℃一定とし、全層完全凍結した状態から解析を始めた。境界条件として、モレーン表面には実測温度、湖水の温度を一定と考え、湖水と接している上流面には0.05℃、底面はフラックス0の条件をそれぞれ与えた。モレーンの断面を1×1mの正方メッシュに区切り、時間ステップ1時間で計算を行った。

3.3 解析結果

解析後のモレーン縦断面温度分布の一例を図-4に示す。図中の線は0℃の等温線を示している。計算開始から20年ほど経過するまでに、地下水面より上の不飽和土層の熱伝導が急激に進行した。その後、飽和

土層まで融解が進むと、融解速度が減少した。モレーンのトップ部は地下水位が低いため、最大で深さ52mまで融解が進行した。

4. おわりに

本研究で明らかとなった事項を以下に示す。

- ① 現地観測により、モレーン表面温度と標高に相関がみられた。また、温度計を埋没させて観測することにより、安定した表面温度変動を観測することができた。
- ② 観測結果を用いた、現地スケールでの熱伝導解析を行うことができた。

以上の結果を踏まえて、モレーン内部の温度変化を考慮したGLOF発生危険度評価法の確立を目指す。

5. 参考文献

- ・IPCC 第5次報告書 (2013)

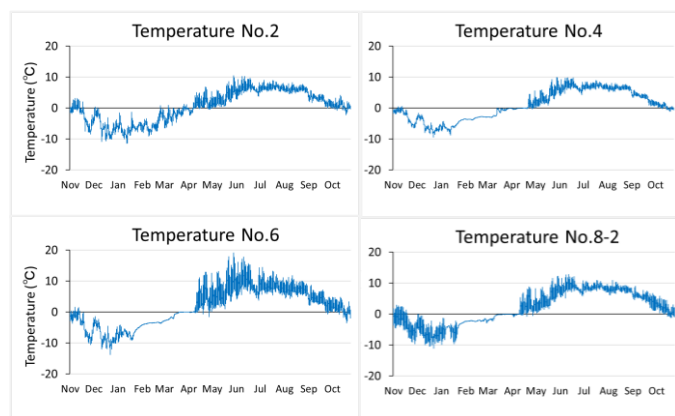


図-3 埋没型の観測結果

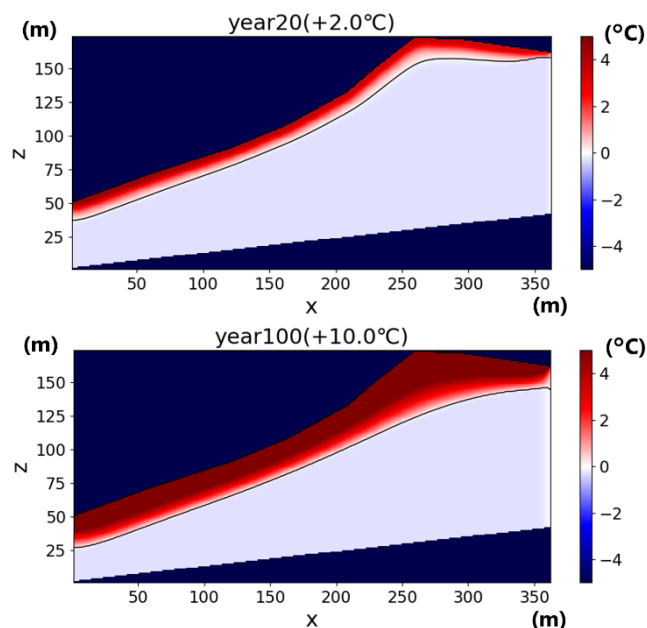


図-4 計算開始から20年後の結果(上)と100年後の結果(下)