

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

- モデル実験と数値解析 -

三重大学 ○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。モレーンは材質・形状の点から非常に不安定であるが, 永久凍土となることで強度が保たれている。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, このように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, 熱伝導解析によってその内部温度を把握し, GLOF 発生の予測を行うことが本研究の最終目標である。今回はその前段階として, 実験室サイズでのモデル実験を行い, その温度変化をシミュレーションすることで, 熱伝導解析の有効性の検証を行った。

2. 現地観測

現地にて観測を行っている。観測事項は, モレーン地表面の温度, 気温, 気圧, 氷河湖水位, 水温である。また, インターバルカメラを設置し, 湖面の様子をモニタリングも行っている(図-2)。すべて 1 時間間隔で計測を行っている。

3. モデル実験

実験は 2019 年 1 月 13 日～15 日にかけて, 岐阜県高山市にある京都大学防災研究所 穂高砂防観測所にて行った。発泡スチロール製実験水路(流路全長 90 cm, 流路高 20 cm, 流路幅 10 cm)の下流端にモレーン模型を作成し, 屋外に自然状態で放置して土砂を凍結させた。その後, 氷水をモレーン模型の上流側に投入し, 温室にてモレーン模型を融解することで, その決壊過程と温度変化を観測した。土砂の種類, モレーンの形状を変えて 5 ケースの実験を行ったが, 今回は空隙率



図-1 Tsho Rolpa のモレーン

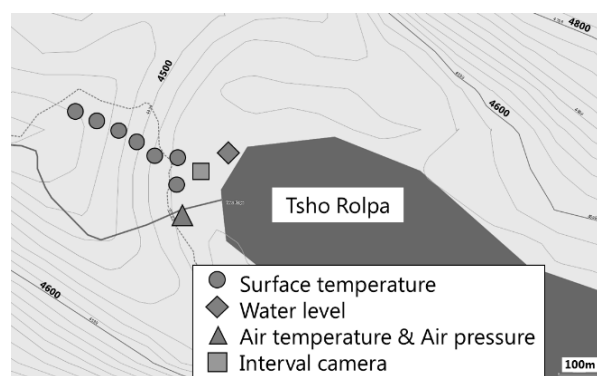


図-2 各観測機器の設置場所

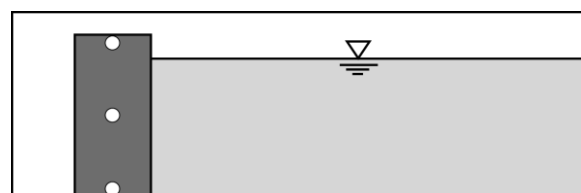


図-3 矩形型モレーンの断面

0.40 の土砂を用いた幅 10 cm、高さ 10 cm、厚さ 5 cm の矩形型モレーンの結果のみを示す。矩形型モレーンの実験では、矩形の天端・中心・底面・壁面の計 4 箇所の温度を 10 秒間隔で測定した（図-3）。

4. 数値シミュレーション

土層の凍結融解を考慮した断面二次元の熱伝導解析を行った。二次元の熱伝導方程式(1)と凍結融解体積の計算式(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)を用いて、差分法により解いた。

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

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

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

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。

断面すべてに、実測値である-3.65℃を初期値として与え、土中の水分はすべて凍結した状態から解析を始めた。境界条件として、モレーン表面には天端の実測温度、水と接している部分には 0℃、底面は熱移動がないという条件をそれぞれ与えた。矩形型モレーンの断面を 1×1 mm の正方メッシュに区切り、時間ステップ $\Delta t = 0.1$ s で計算を行った。

5. 結果と考察

5.1 モデル実験

温室に移動後、表面と壁面から融解が始まった。水を投入して 3 時間 2 分後に左岸側の壁面から決壊が起きた。発泡スチロール板による断熱が完全ではなかったため、壁面の融解が支配的となり、その部分から決壊したが、モレーン内部の融解が堤体を不安定にする現象が確認できた。ただし決壊発生時、モレーン中心部は凍結した状態であった。

温度の測定結果を図-4, 5 に示す。中心温度は、水の投入と同時に-0.09℃まで急激に上昇したが、その後、-0.25℃付近で推移した。底面温度は水を投入後、時間経過に伴い温度の上昇速度は弱まり、-0.3℃付近で推移した。

5.2 数値シミュレーション

熱伝導解析により得られた、中心温度と底面温度の結果を測定結果とともに図-4, 5 に示す。底面温度については、計測された温度と非常に近い値をとった。中心温度は、水投入直後の急激な温度上昇を再現することはできなかったが、0℃付近の氷点下の温度で推移するという実験結果と、同じような結果が得られた。

モレーン全体の解析結果については、時間経過に伴いモレーン表層から融解が始まり、モレーンの底面からコアの部分にかけては最後まで氷点下を維持するという、実験結果と同様の温度変化を再現することができた。

6. 結論

本研究で明らかとなった事項を以下に示す。

- ① 実験では、凍結した土砂が融解することでその強度が弱まり、決壊を起こした。
- ② モデル実験により得られた表面温度をもとに熱伝導解析を行うことで、矩形型モレーン内部の温度変化を再現することができた。

以上の結果を踏まえて、今後は実際のモレーンを対象とした熱伝導解析を行い、モレーン内部の温度変化を把握することで、GLOF 発生の危険度評価法の確立を目指す。

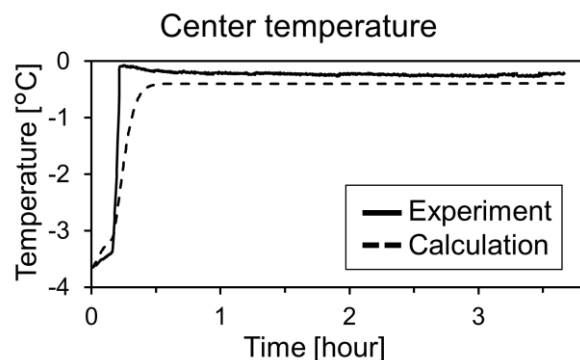


図-4. 中心温度の実験結果と解析結果

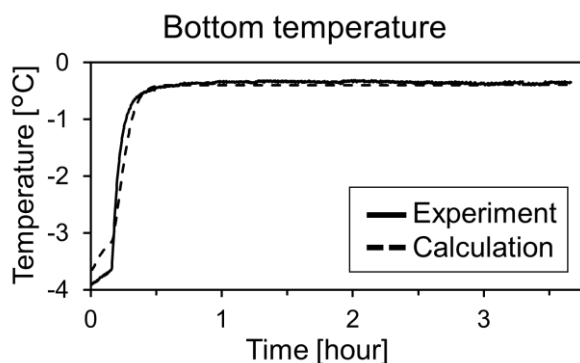


図-5. 底面温度の実験結果と解析結果