閉鎖系ピンゴの形成過程に関する基礎的研究

Fundamental Study on Formation Process of Closed-System Pingo

北海道大学工学部環境社会工学系　○学生員　中林航　(Wataru Nakabayashi)
北海道大学大学院工学院　白鳥良子(Ryoko Shiratori)
北海道大学大学院工学院　学生員　岩本太一(Taichi Iwamoto)
北海道大学工学研究院　正　員　鄭好　(Hao Zheng)
北海道大学工学研究院　フェロー　蟹江俊仁(Shunji Kanie)

1. はじめに

凍上現象は構造物に損傷を与える変形の一つであり、ピンゴと呼ばれる永久凍土域の氷丘陵はこれにより生成、成長する。ピンゴは生成過程における地下水の供給の有無によって開放系と閉鎖系に大別される。開放系では、永久凍土層の切れ目に出来た山型の不凍部分から被圧地下水が上昇し、活動層まで達した部分でアイスレンズを形成することによって凍上が発生する。閉鎖系ピンゴは永久凍土層が自由水に侵食された箇所で発生することが主である。マッケンジーデルタの多くの閉鎖系ピンゴは急激に排水された湖底でのものであるが[1) 2)]、稀に河川の流路変動と関連する例が確認されている[3) 4) 5) 6)]。閉鎖系は開放系に比べ一般的で識別も容易である[7)]。閉鎖系では底部に不凍層が存在することが非常に重要であり、閉鎖系ピンゴの直径と形状は底部不凍層の大きさと形状に依存する[4)]ことが知られている。

本研究では閉鎖系ピンゴの生成過程を屋内実験で再現し、メチレンブルーを用いて凍上過程を視覚化すると共に有限差分法による数値解析を行い、縦横比および冷却環境がピンゴの生成、ひいては凍上現象全般に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

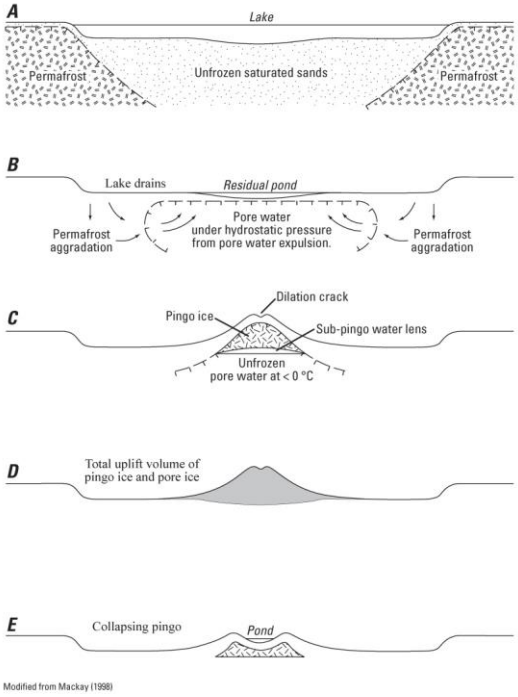

図 1. Ibyuk Pingo の成長過程

2. 環境設定にあたって

実験環境の設定にあたって実際の閉鎖系ピンゴの周辺環境を参考とした。Ibyuk Pingo は世界最大のピンゴの一つ[8)]であり、Tuktoyaktuk の南に位置する。このピンゴは高さ 49m、基底直径 300m。周辺平均気温-11℃、平均地温-8℃であり、深さ 500m 以上の無秩序な永久凍土地帯に位置している。頂部は 2.3cm/年のほぼ一定速度で成長し続けている[2)]。

図 1 に Ibyuk Pingo の発生と成長の経過[1)]を示す。

A）飽和不凍砂の盆地の上に湖が存在
B）凍結過程で間隙水が押し出される
C）ピンゴ氷の形成
D）ピンゴの成長に必要な水は周囲の氷面低下によって賄われる
E）夏季における融解と溜池の形成

3. 小規模冷却実験

3.1. 実験目的

本実験では閉鎖系ピンゴの冷却状況をモデル化し(図 2, 3)、Ibyuk Pingo の周辺気温とほぼ同じ-10℃の冷凍庫内でメチレンブルー溶液を冷却した。凍結時にメチレンブルーは不凍部に排除されるため、用いることで凍結方向および凍結段階の視認が容易となる(図 4)。

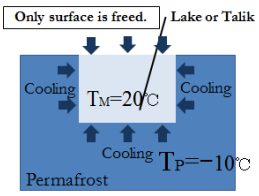

図 2. 冷却のモデル化

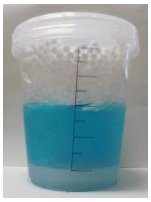

図 3. 冷却前

図 4. 冷却中

3.2. 実験手順

底面を棚上げし冷気が通過できるようにし、底面と側面から冷凍庫内で冷却し実験を行う。底部の膨張を抑制するため 100ml の水を PE 容器(高さ 150mm 底面直径 90mm 上部直径 113mm)内であらかじめ凍結させ、400ml のメチレンブルー水溶液と鉄板も 1℃程度に冷却しておく。完全に凍結した前氷の中央に浮上防止のため円形鉄板を置き，冷却されたメチレンブルー水溶液(400ml)を流入する。上部に存在する植物層による断熱を再現するため、液面にラップを敷き、その上に発泡スチロール球

(直径 6mm)の断熱材を充填する。冷却開始から完全凍結まで 1 時間毎に赤外線放射温度計で表面温度を測定し、完全凍結後の表面形状を型取りゲージ(300 本/300mm)で計測する。

3.3. 実験結果

Mackay モデル(図 1)の丘状隆起と頂上部の膨張割れが確認された。型取りゲージを用いて凹凸を直交二軸で計測を行った (図 5)。

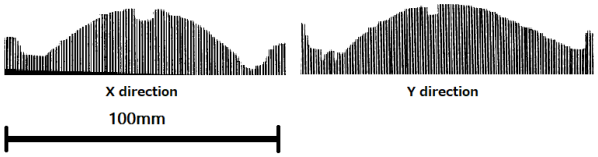

図 5. 小規模実験生成ピンゴ(二軸)

4. 数値解析

4.1. 対流の効果

対流および縦横比の影響を比較すべく、二次元平面系において有限差分法を用いて数値解析を行った。対流のある場合、熱伝導のみの場合と比較して熱輸送量が増加する。図 6 は冷却を受ける同一モデルの平均温度の時間変化を解析したものである。橙線は熱伝導のみ、青線は対流(Gr=50)を加味したモデルの平均温度時間変化を表す。対流の度合いを表す指標の一つに Gr：グラスホフ数があり、これは粘性力に対する密度差浮力の相対的影響度である。図 7 は温度分布をある時間で切り取ったものであり、左半分は対流のあるモデル、右半分は対流のないモデルである。対流の熱輸送によって冷却速度が上昇していることが確認できる。また、熱伝導のみでは自明であった温度分布に不規則性が生じており、対流の効果は冷却速度の上昇のみならず最終未凍結部を決定する必要因子であると考えられる。

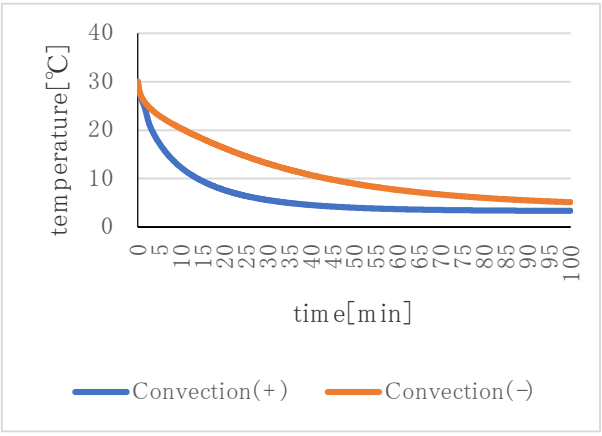

図 6. 平均温度の時間変化

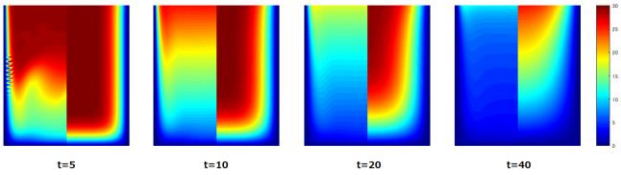

図 7. 温度分布の時間変化 (+/−)

4.2. 縦横比の影響

次に供試体の縦横比が生成ピンゴに与える影響を考察する。側面および底面からの冷却を受ける場合、横長の薄い供試体では全体が速やかに凍結し、丘状隆起の生成は見込めない。また、縦長の棒状供試体では凍結による体積膨張は全体の伸長に費やされる。これらから、水体積辺りのピンゴ長さに対する最適縦横比なるものの存在が予想される。

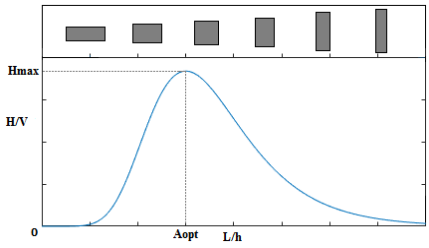

図 8. 最適縦横比

5. 今後の展望

現在の容器では壁面と液面降下の影響が大きく、生成ピンゴの評価が困難である。また、数値解析では純水のパラメータを用いたが、実際の閉鎖系ピンゴの土壌は不凍飽和砂と貫入氷で構成されており、透水係数および熱伝導係数を実態に近付ける必要性があるものと考えられる。飽和砂、あるいはゲル質等で流動低下させた溶液の使用を検討する。数値解析においては、凍結膨張現象のモデル化を進め、液面に加えられる内圧と最終未凍結部の位置を求めることで、透水係数と冷却環境がピンゴ生成に与える影響を分析可能にする。また、丘状隆起の評価値を設計するとともに、最終未凍結部高さとの関連を解明することを今後の課題とする。

参考文献

1） Mackay, J.Ross. (1973). The Growth of Pingos, Western Arctic Coast, Canada. Canadian Journal of Earth Sciences (Vol. 10), 979-1004.
2） Mackay, J.Ross (1979). Pingos of the Tuktoyaktuk Peninsula Area, Northwest Territories . Géographie physique et Quaternaire (Vol. 33), 3-61.
3） Craig, B.C. (1959). Pingo in the Thelon Valley, Northwest Territories; rediocabon age and historical significance of the contained organic material. Geological Society of America Bulletin (Vol. 70), 509-510.
4） Pissart, A and French, H.M. (1976). Pingo investigations, north-central Banks Island, Canadian Arctic. Canadian Journal of Earth Sciences, 937-946.
5） French, H.M. (1976). The Periblacial Environment. New York: Longman, 309.
6） Dutkiewicz, L. (1976). Pingos and pingo-like forms, Banks Island, westernCanadian Arctic. Biuletyn Peryglacijalny, 211-222.
7） Yoshikawa, K. (2013). Treatise on Geomorphology. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences (Vol. 8), 274-297.
8） Mackay, J.Ross. (1986). Growth of Ibyuk Pingo, Western Arctic Coast, Canada, and some implications for environmental reconstructions. Quaternary Research (Vol. 26), 68-80.