

パルサの形成過程に関する基礎的研究

Fundamental Study on Formation Process of Palsa

北海道大学工学部環境社会工学科
北海道大学大学院工学院
北海道大学工学研究院
北海道大学工学研究院

○学生員
学生員
正員
フェロー

石原寛也(Hiroya Ishihara)
白鳥良子(Ryoko Shiratori)
鄭好 (Hao Zheng)
蟹江俊仁(Shunji Kanie)

1. はじめに

寒冷な気候が地表に与える影響として、土壌ないし地層構成物質の凍結がみられる。寒冷度合いの著しい条件下では、年間を通じて凍結層が融解せずに存在する永久凍土が存在している。地形の凍結現象は、周期変動に応じて発生、発達する。永久凍土の存在に伴う周氷河地形・構造土として氷楔、ピンゴ(Pingo)、サーモカルスト(Thermokarst)などが観察出来る。パルサ(図-1)は不連続永久凍土帯でも見られ、日本でも北海道の大雪山に存在する。周氷河地形であるパルサの存在により永久凍土の存在が確認でき、大雪山においてはパルサによって永久凍土の下限高度が明らかにされた(高橋・曾根, 1988)。一般にパルサは高さ数 m~10m の泥炭質の永久凍土丘であり、内部はアイスレンズの分布であるとされている。氷河と同じく氷期に拡大して分布したので、地形発達や植生などに様々な影響を与えている(Washburn, 1973)。

パルサの形成過程は概念的には既に説明されているが、この過程の物理的および数値的モデルは未だ確立されていない。本研究では、パルサの形成過程を室内実験で再現し、実験供試体の凍結促進領域の縦横比や冷却環境、内部構造がどのようにこれらに影響を及ぼしているのかを明らかにすることを目的とする。



図-1.パルサ上空写真

2. 環境設定にあたって

既往の研究である閉鎖系ピンゴの形成過程に関する基礎的研究(中林, 2017)で行われた予備実験をもとに実験環境を設定した。予備実験との変更点は水のみでなく粘土も用いた点である。今回の実験では上部断熱の要因に着目し、アイスレンズの析出を目的として実験を行うため、アイスレンズが形成されやすく泥炭よりも扱いやすい粘土を用いた。本実験において冷却温度は、周氷河地形の発達している Mackenzie Delta の周囲環境を参考にし-8℃とした。パルサは前述のように不連続永久凍土でも見られるので、パルサの周囲環境温度は連続永久凍土帯のように極低温から凍結温度付近までと幅広く、実験での設定温度(-8℃)よりも高い場合がある。

3. 室内小規模冷却実験

3.1.実験目的

前述のように室内実験においてパルサを再現することを目指し実験を行う。ここではアイスレンズの形成による丘陵状の隆起が見られた場合、パルサの再現ができているものとする。また、析出するアイスレンズの形状が上部断熱状況によりどのように変化するかを確認する。

3.2.実験方法

作成した供試体を冷凍室に静置し、冷却することにより実験を行う。周囲全方向から冷却するため、スチールラックに供試体をのせ、下部に冷気を通るようにする。供試体には飽和させたカオリン粘土を試料として使用し、円筒形容器 A(底面直径 90mm)に入れたものを用いる。試料の量は容器 A に入れたときの試料の底面直径と高さの比が約 1:1 となるように体積 600ml とする。

供試体上方からの冷却状況を変化させるため、断熱材と容器 A に付属の蓋を使用する。断熱材は上方からの冷却速度を遅らせるために用い、蓋は試料上部の空気の流れをなくすために用いる。各供試体の断熱材厚の変化と蓋の有無を以下の表-1 に示す。供試体 i から iv になるにつれ上方からの冷却速度は側面からの冷却速度に近づいていく。供試体 i ~ iii では上部断熱の程度を変化させ、その影響を確認し、供試体 iii・iv においては、試料上部の対流層の有無による影響を確かめる。なお、断熱材は試料表面形状の変化に追従するよう発泡スチロール球(直径約 9mm)を用い、断熱材が試料に付着することを防ぐためにそれらの間にラップを敷く。

冷却は-10℃に設定した冷凍室で行い、凍結終了は水を用いての予備実験を参考に冷凍開始から 24 時間後とする(冷凍室内は一定温度ではなく温度変化しており、平均室内温度は約-8℃である)。

凍結終了後は試料の上面形状を型取りゲージで測定し、さらに断面の様子を観察するためにコンクリートカッターを用いて切断する。その後、観察しやすくするためカッターで断面を削り、形成されたアイスレンズと凍結後の粘土の観察を行う。

表-1.供試体条件一覧

	供試体 i	供試体 ii	供試体 iii	供試体 iv
蓋の有無	有	有	有	無
断熱材厚み	約 30mm	約 15mm	0mm	0mm

3.3.実験結果

表面形状は図-2 に示す通り、いずれの供試体でも程度の差はあるが隆起が見られる。供試体切断面の様子を図-3 に示す。上部断熱の違いにより形成されたアイスレンズの形状が異なることが確認できる。供試体 ii に関しては中央上部に気泡の混入が見られる。供試体 iii, iv を比べると試料断面上部の形状の違いが見られる。

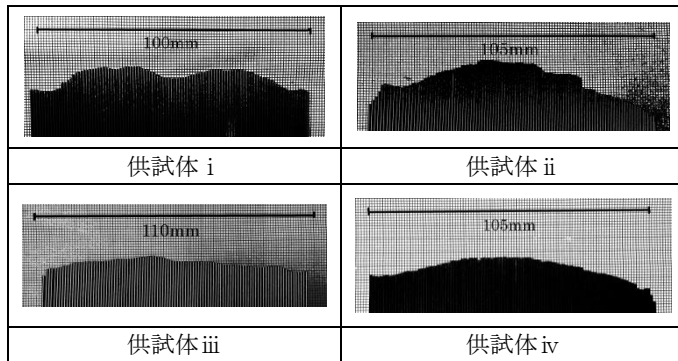


図-2.表面形状

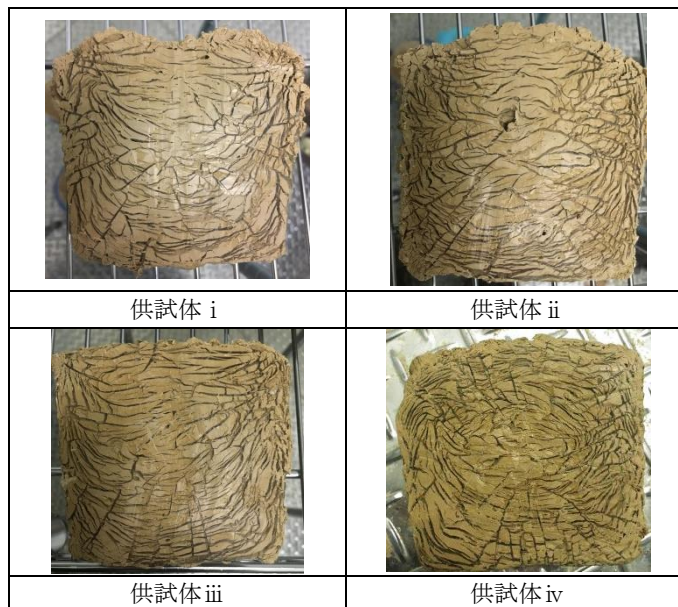


図-3.供試体断面

4. 数値解析との比較

二次元平面系において有限要素法を用いて数値解析シミュレーションを行い、形成されたアイスレンズの形状と解析結果の温度分布との関係を比較する。図-4 及び図-5 の左側の数値解析結果は周囲の初期温度を冷凍室の平均温度である -8°C とし、内部は初期温度 15°C の飽和粘土の物性値を入力する。諸量は密度 $1.9\text{g}/\text{cm}^3$ 、比熱 $0.2\text{cal}/(\text{g}\cdot\text{K})$ 、熱伝導率 $0.0024\text{cal}/(\text{s}\cdot\text{cm}\cdot\text{K})$ 、潜熱 $80\text{cal}/\text{g}$ 、含水比 0.4 とする。

数値解析シミュレーションにおいて時間変化による凍結温度面の移動に着目し、供試体のアイスレンズ形状を観察すると、供試体 i, iv のどちらにおいても、凍結温度面に平行にアイスレンズが形成されていることがわかる。さらに熱流方向にもアイスレンズの形成が見られる。

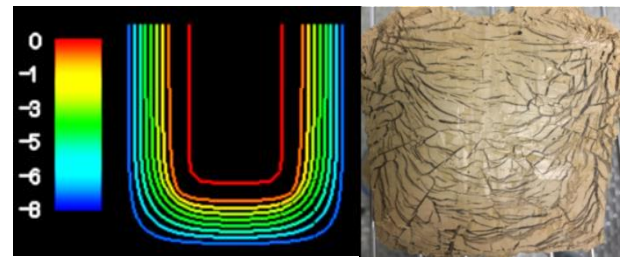


図-4.数値解析結果と断面の比較(供試体 i)

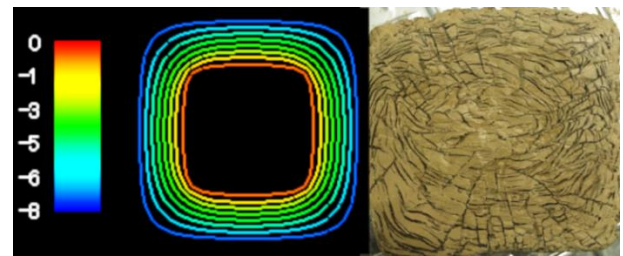


図-5.数値解析結果と断面の比較(供試体 iv)

5. まとめ

以上の結果から、どの条件においても丘陵状隆起は見られる。しかし、その隆起の大きさは断熱がある場合の方が大きく、断熱材が多すぎる場合でもやや小さくなることがわかる。供試体上方において、アイスレンズへの未凍結水の移動と水の凍結速度の関係で、アイスレンズの析出しやすい温度である時間が、供試体 ii において長かったものと考えられる。断熱がない場合でもやや隆起が見られるのは容器形状の影響が大きいと考えられる。

アイスレンズは凍結面に平行に形成されるものと凍結方向に形成されるものの2種類があり、凍結方向に形成されるものは凍結収縮により形成され则认为られる。

数値解析との比較から、供試体の上部断熱によるアイスレンズの形状の変化とシミュレーション結果が一致しており、実験結果の妥当性が示されたと言える。

6. 今後の展望

本研究では取り扱いの簡易化のため、冷却温度を -8°C とし粘土を用いた。今後は試料の底面直径と高さの比を変化させた実験や、実際のパルサの形成される泥炭を用いての実験、冷却温度を変更しての実験などを行い、形成されるアイスレンズの形状の変化や上部の隆起の様子を観察する。また、実際のパルサ内部のアイスレンズ形状を詳細に記録した文献は少ないので、実地調査も行っていく。

7. 参考文献

- 1) 高橋伸幸・曾根敏雄 1988. 北海道中央高地、大雪山平ヶ岳南方湿原のパルサ. 地理学評論
- 2) Washburn.L.A. 1973 . Periglacial process and Environment, 328pp, London
- 3) Washburn.L.A. Geocryology
- 4) 中林航 2017 閉鎖系ビンゴの形成過程に関する基礎的研究, 土木学会北海道支部論文集