

## 凍結過程における土の凍結面近傍の微視的観察

北海道大学低温科学研究所 ○渡辺晋生 石崎武志 武藤由子  
三重大学生物資源学部 溝口 勝

### はじめに

冬期に地面が冷やされると、土中の水は地表面近くに集まり氷の塊（アイスレンズ：以下ILとする）として析出する。この氷塊の成長に伴い地面が隆起する現象が凍上現象である。凍上量は時に数10CMにもなり、この結果さまざまな建築物、道路や鉄道の基盤、農地の灌漑排水系などに深刻な被害を与える。このような凍上害を克服するために、凍上のメカニズムを解明する必要がある。

凍上のメカニズムを考えるとILや0℃面の位置など凍結面近くの構造が重要である。しかし今迄に、こういった微視的構造を詳しく調べた例は殆どない。そこで本研究では凍上のメカニズムの解明の糸口を得ることを目的に、凍結過程における土の凍結面近傍の微視的構造を顕微鏡を用いて直接観察した。

### 実験方法

**試料：**試料は藤の森粘土(表1)である。試料を脱気水で飽和し、1MPaで一週間以上圧密した。これを厚さ3mmに切り出し、顕微鏡用スライドガラスで挟み試料セルとした。セルの大きさは76×26×5(mm)である。

**装置：**図1に実験装置を示す。試料セルは図中斜線部に置く。試料の温度勾配 $\alpha$ は試料両端の温度をコントロールして与えた。試料の凍結過程の観察は顕微鏡を介しCCDカメラとVTRシステムで行った。この画像の解析はコンピュータを用い20 $\mu$ mの解像度で行った。

この装置のステッピングモータを用い、一定速度で試料を低温側に押し込むことができる(図2)。このとき試料は固定された温度勾配中を定速で動き、一定の凍結速度(等温面の進行速度) $V_f$ が与えられる。

### 実験結果

様々な温度勾配 $\alpha$ 、凍結速度 $V_f$ で実験を行った。

図3は凍結速度 $V_f = 0 \mu\text{m/s}$ における試料の凍結過程の様子である。図中上部が低温側で $\alpha = 0.2 \text{ }^\circ\text{C/mm}$ の温度勾配がかかっている。実験開始後、連続的にILが成長しWarmest IL(IL<sub>w</sub>)に達した。

含水比	(%)	30
比表面積	(m <sup>2</sup> /g)	24.5
乾燥密度	(g/cm <sup>3</sup> )	1.18
透水係数	(cm/s)	$2.22 \times 10^{-7}$
熱伝導率	(cal/sm/ s <sup>3</sup> °C)	$2.68 \times 10^{-3}$

表1 藤の森粘土の主な特性

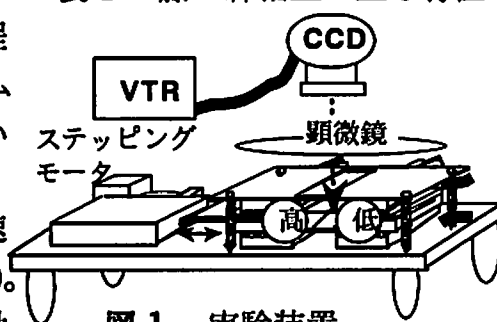


図1 実験装置

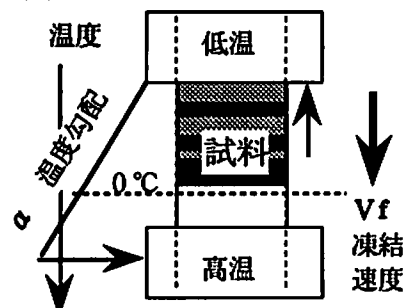


図2 温度勾配と凍結速度

IL<sub>w</sub>の成長が始まると、先に成長していた凍土側のILの成長は止った、またこれより高温側の土粒子には氷の成長による構造の乱れは見られなかった。そこでIL<sub>w</sub>の発生時刻を開始時間とし、IL<sub>w</sub>の成長量、成長速度、成長面の温度を測定した。

図4にIL<sub>w</sub>の成長面の過冷却度と成長速度の関係を示す。A0は $\alpha=0.2$ 、B0は $\alpha=0.125$ °C/mmの結果である。IL<sub>w</sub>の成長速度が温度勾配によらず過冷却度によって決まっているがわかる。

次に試料を一定速度で動かした。図5は凍結速度 $V_f=0.6$   $\mu$ m/s、温度勾配 $\alpha=0.2$ °C/mmにおける試料の凍結過程の様子である。試料を等速で動かすとおよそ等間隔に等幅のリズミックアイスレンズ(IL<sub>R</sub>)が生じた。新しくILが生じる温度は一定であった。そこで試料の動かし始めを開始時間とし、IL<sub>R</sub>の発生、成長による全体の凍上量と凍上速度、新しくILが発生する温度を測定した。

図6にILの発生する温度と凍結速度の関係を示す。凍結速度が速いほど、温度勾配が小さいほどILの発生する温度は低くなった。このとき温度勾配より凍結速度の影響が大きいことがわかる。

### まとめ

IL<sub>w</sub>が成長しているとき、これより高温側、低温側のいずれにおいても氷の成長は見られなかった。また試料を等速で動かしたとき、等間隔等幅のIL<sub>R</sub>が観察された。

実験の結果、凍結速度や温度勾配が大きいほど凍上量が大きくなった。この時、特に凍結速度の影響が大きいことがわかった。また凍上速度はILの成長面の温度によって決まっていることがわかった。さらにILの発生する温度が土の状態によって決まっており、この温度が凍結速度によって低くなることがわかった。以上のように、凍上現象を考える場合、土の凍結面近傍の過冷却度と凍結速度に着目するべきであると言える。

また、凍上量が過冷却度に伴い増大するという今回の実験結果は、現在考えられている凍上理論ではうまく説明できない。今後こういった実験結果を説明できるような凍上モデルを考えていく必要がある。

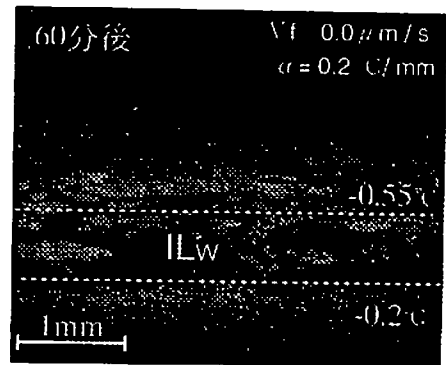


図3 試料の凍結過程

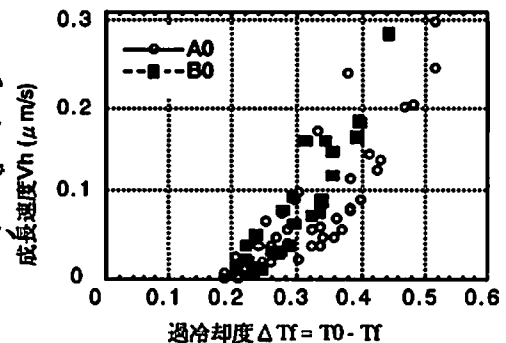


図4 IL<sub>w</sub>の過冷却度と成長速度

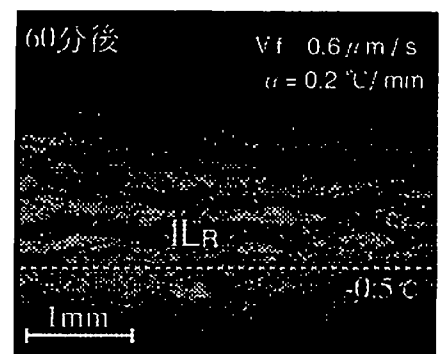


図5 試料の凍結過程

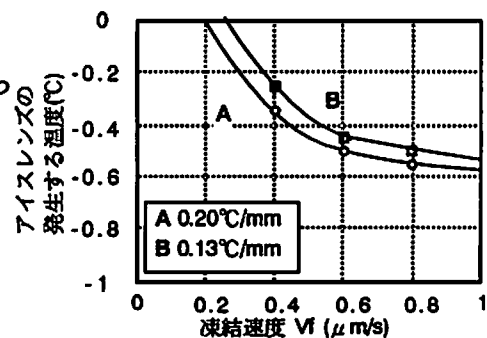


図6 IL発生温度と凍結速度