

1.はじめに 土のような多孔質体中の水が冷やされると、純粋な氷の塊(ice lens: IL)が多孔質体を押し上げながら成長することがある。このILの析出による多孔質体の膨張を凍上現象という。たとえばガラスビーズが一方向から凍結すると、図1のようにILが生成する(白色部: ガラスビーズ, 黒色部: IL)。しかしこうしたILがいつ、どこに生じるのか?なぜ、周期的な発生と成長を繰り返すのか?その生成機構に関する基礎理論は未だ確立されていない。

そこで本発表では、昨年までの筆者らの実験結果をもとにして、ILの生成モデルを提案する。

2.実験事実 多孔質体中を凍結温度面が進行する速度(V_f)が臨界速度(V_c)を下回ったとき、その場所でILが発生する¹⁾。ILの成長速度(V_{il})はIL成長面の過冷却度(T_f)に比例する²⁾($V_{il}=b \cdot T_f$)。ここで、 b は水の融解の潜熱や未凍結部の透水性等を考慮した係数である。また試料に一定の凍結速度(V_s)が与えられたとき、ILの成長面の温度は一定となり、ILは一定速度で成長する²⁾。ILの成長中は、凍結面はILの成長面と一致する($V_f=V_{il}$)³⁾。

3.アイスレンズの生成モデル

(i) **前提条件** 直径 $10 \mu\text{m}$ の球粒子が数密度($N_0=500$)で水と混合しているとする。この試料を一方向から凍結し、全体の温度勾配が 0.3 K/mm の定常状態に達した状態を初期状態とし、ここではその後試料に $V_s=0.6 (\mu\text{m}/\text{sec})$ を与えたときに生成するILについて考える。

(ii) **臨界速度** 氷は小さな粒子ほど吐出しやすく、粒子間隔が広いほどILとして析出しやすいことが知られている¹⁾。そこで凍結面近傍の粒子数密度を N とすると、臨界速度は

$$V_c = a/N \quad (1),$$

とかける。ここで、 a は氷の表面張力や水の粘性を考慮した係数である。 $N=N_0$ とすると V_c はおおよそ $1 \mu\text{m}/\text{sec}$ となる。

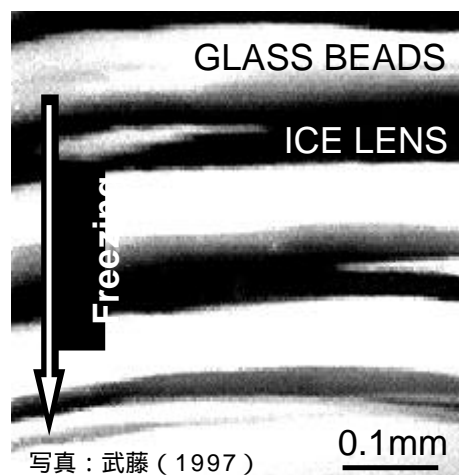


写真: 武藤 (1997)

図1 ガラスビーズ中のアイスレンズ

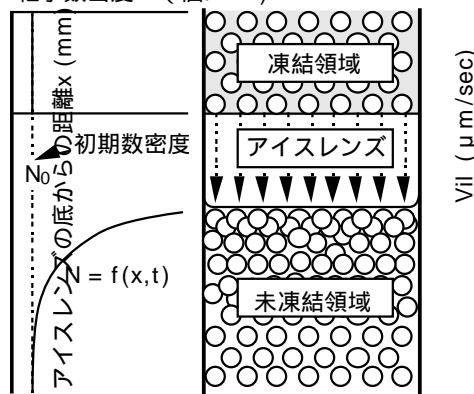


図2 アイスレンズの成長とNの変化

(iii) **熱移動** ILが成長しているとき(成長面=凍結面)と、ILが発生せず、凍結面が試料中を進むときの凍結面の熱流はそれぞれ

$$k_{il} \frac{dT}{dx} + L \cdot V_{il} = k_u \frac{dT}{dx} \quad (2),$$

$$k_f \frac{dT}{dx} = k_u \frac{dT}{dx} \quad (3),$$

とあわせる。ここで、 T は温度(K)、 t は時間(sec)、 L は氷の潜熱、 ρ は氷の密度、 k_{il} 、 k_u 、 k_f はそれぞれILと未凍結領域、凍結領域の熱伝導率($\text{W mm}^{-1} \text{K}^{-1}$)である。

(iv) **成長面近傍の粒子数密度** ILが成長すると、成長面が粒子を未凍結領域に押し込むことが予想される。押し込まれた粒子は成長面近傍の N を図2のように局所的に増大させるであろう。そこで N をIL成長面からの距離(x)と成長が始

まっぺからの時間(t)の関数であるとし、今回は

$$N = a \left\{ x - \left(V_{il}t + \sqrt[3]{\frac{N_0}{a} V_{il}t} \right)^2 + N_0 \right. \\ \left. V_{il}t < x < V_{il}t + \sqrt[3]{\frac{N_0}{a} V_{il}t} \right. \quad (4),$$

であらわす。

(v) ILの生成 試料に V_s を与えると、 $V_s < V_c$ なので凍結面にILが発生する。このILは V_{il} で成長し、試料中には式(2)に従い、図3実線のような温度分布が形成される。ILが成長しはじめると、式(1)(4)より成長面の V_c は図4のように減少する。しかし実験結果から一定の V_s の下で V_{il} は一定なので、図4で V_c は V_{il} を下回る。このときILの成長はとまり、試料中に式(3)による温度分布が形成される。ここで、今まで発生していたILの大きな潜熱がなくなるので、凍結面は図3矢印のように $V_f = dx/dt |_{T=T_0}$ で進行する。この V_f は系が定常状態に向かうにつれ次第に遅くなると予想される。また、凍結面の進行に伴い N は N_0 に戻り、凍結面の V_c は徐々に $V_c |_{N=N_0}$ に戻る(図4)。こうして再び図4で $V_f < V_c$ となり、次のILが発生すると考えられる。このILでも先のILと同様に成長面近傍の N が変化し、さらに新しいILが発生する(図4)。

4. モデルによる計算結果 以上のモデルを用い、 V_s の与え始めから計算したILの成長量を図5に実線で示す。黒点はガラスビーズを用いた凍上実験の結果である。モデルは実測のILの周期的な発生と、成長量を良く表現できた。成長速度が大きくなったのは、各係数の違いによるとおもわれる。

5. おわりに 凍結速度を基にしてILの周期的な発生と成長のモデルを考えた。残る課題は各係数の物理的意味の検討と、凍上圧の算出できるモデルへの拡張である。

参考文献 1)武藤ら:ガラスビーズ中におけるアイスレンズ形成過程の顕微鏡観察,農業土木学会論文集,印刷中 2)渡辺ら:凍結過程における土の凍結面近傍の微視的構造についての実験研究,農業土木学会論文集191(1997) 3)渡辺,溝口:ラマン分光法によるアイスレンズ近傍の観察,1997日本雪氷学会全国大会講演予稿集

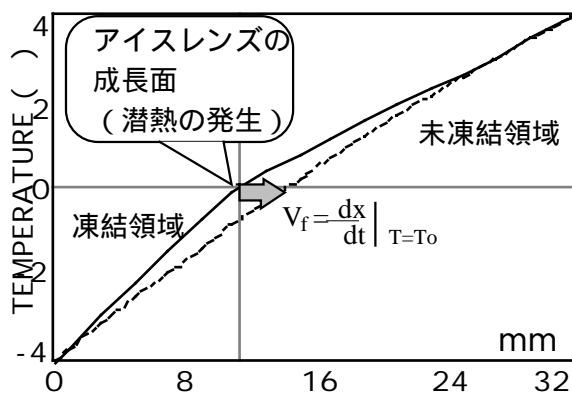


図3 試料内の温度分布

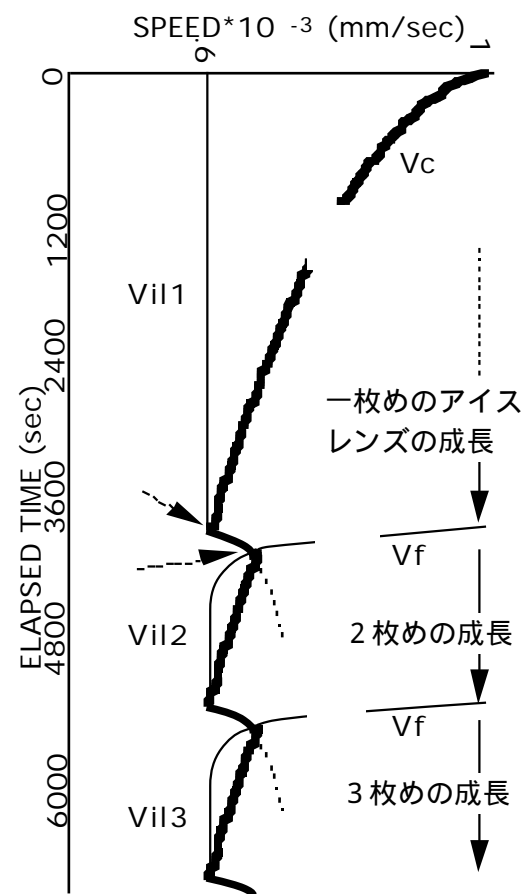


図4 凍結速度と臨界速度

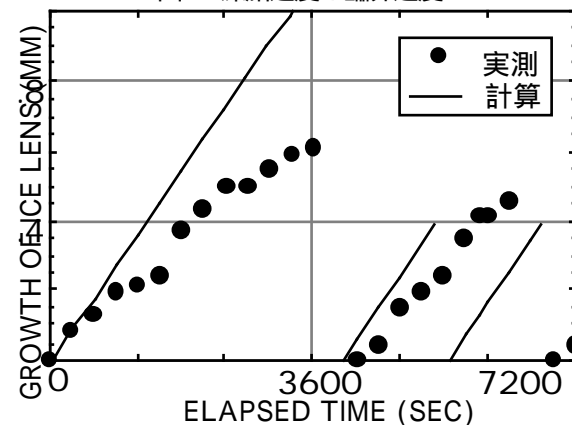


図5 アイスレンズの厚

