

# ガラス粉粒体中に析出するアイスレンズの成長温度とNaCl濃度の関係

Temperature at growth surface of ice lens in glass-powder saturated with NaCl solution

渡辺晋生\*、武藤由子\*、溝口 勝\*\*

Kunio WATANABE\*, Yoshiko MUTO\* and Masaru MIZOGUCHI\*\*

**はじめに** 土壌が凍結すると、地表が隆起することがある(凍上)。このとき土中には、土粒子をほとんど含まない氷晶アイスレンズ(以下 IL とする)が析出する。IL の析出を伴う凍上は数10 cm に及ぶことがあり、灌漑排水系や構造物の基礎に深刻な被害を与える。ところで、海岸などの塩類土壌では凍上が抑制されることが知られている。また、凍上対策として地表に塩を撒くこともある。しかし、こうした塩がIL の生成にどのように影響しているのかはよくわかっていない。そこで本研究では、土壌の代わりにNaCl 溶液で飽和したガラス粉粒体を凍結し、IL の成長面の温度と間隙溶液のNaCl 濃度の関係を調べた。

**試料と方法** 粒径の揃ったガラス粉粒体(直径 2.2  $\mu\text{m}$ )を異なる濃度の NaCl 溶液( $C_L = 0, 0.005, 0.01, 0.015, 0.03, 0.05, 0.1 \text{ mol/L}$ )で飽和し、 $70 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$  のガラスセルに詰めた。試料の含水比は80%である。セルは初期温度2  $^{\circ}\text{C}$  にならした。ここで、セルを一方向凍結装置に設置し、温度勾配 $G = 0.21 \text{ }^{\circ}\text{C/mm}$ と凍結速度( $V = 0.4 \text{ }\mu\text{m/s}$ )を与え凍結した(Fig.1)。

凍結面近傍の様子は、顕微鏡と CCD カメラを介し連続的に録画した。録画した画像はコンピュータを用いて、10  $\mu\text{m}$  の精度で解析した。IL 成長面の温度は、成長面の位置の相対的な変化と、 $G$  から算出した。また同様に、異なる濃度の NaCl 水溶液の凍結実験も行った。

**実験結果** NaCl 溶液で飽和したガラス粉粒体を一方向凍結すると、凍結面近傍に平滑な IL が観察された。Fig.2 に試料( $C_L = 0 \text{ mol/L}$ )に、 $V = 0.4 \text{ }\mu\text{m/s}$  を 10000s 間与えたときの凍結面近傍の様子を示す。IL はおよそ一定の位置(一定温度)で発生と成長を繰り返し、図のように層をなした。また、一定の  $V$  の下では、IL の厚さとその間隔はおよそ一定となった。Fig.3 に各 NaCl 濃度における、IL の平均厚さと間隔を示す。IL は間隙水の初期 NaCl 濃度が高いほど薄くなった。ここで、IL の厚さの総和を凍上量とすれば、間隙水の塩濃度の増加により凍上が抑制されたことがわかる。Fig.4 に各 NaCl 濃度における IL 成長面の温度を示す。IL の成長面の温度は、間隙水の初期 NaCl 濃度が高いほど低くなった。図中  $\times$  は NaCl 水溶液中の氷の成長面の温度である。NaCl 濃度による成長温度の低下は、粉粒体中では3-5 倍強く現れた。

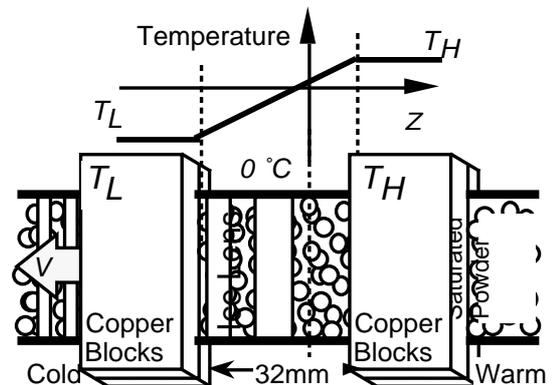


Fig. 1 Schematic illustration of the unidirectional freezing experiment.

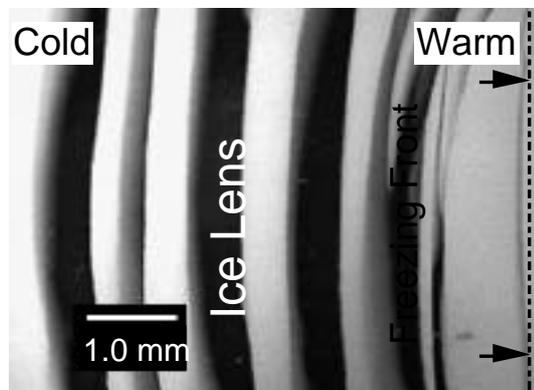


Fig. 2 Ice lenses observed in glass powder.

\* 三重大学生物資源学部 Faculty of Bioresources, Mie University

\*\* 東京大学大学院農学生命科学研究科 Department of Biological and Environmental Engineering, The University of Tokyo

**考察** ILは0度( $T_0$ )より低い温度 $T$ で成長した。この凝固点降下は以下に示される。

$$T_0 - T = T + T_{vdw} + T_q + T_{RT} \quad (1)$$

$T$ : ILの成長面の曲率、 $T_{vdw}$ : 成長面と粒子間の分子間力、 $T_q$ : クーロン力、 $T_{RT}$ : 成長面近傍の塩濃度、による凝固点降下である。ILの成長には曲率と分子間力が支配的であり、一定の成長速度下では  $T + T_{vdw}$  は一定値  $T_C$  をとると考えられる。また本実験では  $T_q$  は無視できる。一方、氷の成長面近傍では、界面の移動によって溶質濃度は蓄積・増大する。液相方向を  $z$  軸とし、移動する界面に原点0をとると溶液濃度は Fig.5 の様になる。ここで、界面の溶液濃度を  $C_I$ 、界面より十分離れた液相の溶液濃度を  $C_L$  とすると、定常状態では  $C_I = C_L \exp(-V/D)$  が成り立つ。ここで、 $D$  は拡散定数であり、 $D/V$  は界面拡散層を溶質が通過する速度と考えられる。これらの関係を用いると、IL成長面の温度について次の関係が得られる。

$$T_0 - T = T_C + (T_0/q) RT_0 C_L \exp(V/D)$$

は氷の密度、 $q$  は融解の潜熱、 $R$  は気体定数である。ここで、今回得られたIL成長面の温度から各NaCl濃度における  $D/V$  を求め、IL平均厚さとの関係を求めた(Fig.6)。溶液濃度が増し、ILが薄くなるにつれ  $D/V$  は速くなった。ILが成長すると、粒子は成長面より押し出され、成長面近傍に堆積する。つまり、ILが厚くなるにつれ成長面近傍の粒子数は増える。このため、溶液濃度が低いとき、溶質の拡散がIL近傍の粒子により強く妨げられたと思われる。

**おわりに** 異なる濃度のNaCl溶液で飽和したガラス粉粒体の一方向凍結実験を行った。この結果、粒径の揃ったガラス粉粒体中において、ILの平均厚さと間隙水のNaCl濃度の関係、IL成長面の温度とNaCl濃度の関係が明らかになった。これらの関係からIL成長面近傍の粒子による溶質拡散の遅延が示唆された。

**参考文献** <sup>1)</sup>J. S. Wettlaufer: Impurity effects in the premelting of ice, Physical Review Letters **82**, pp. 2516-2519 (1999).

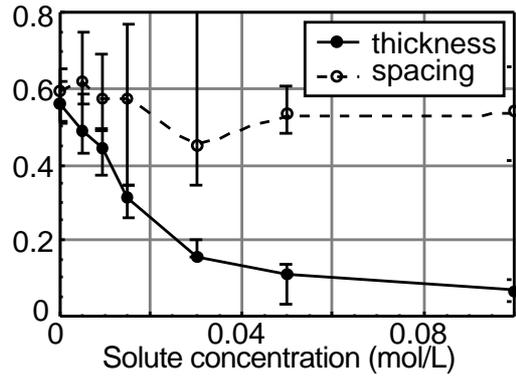


Fig. 3 Mean thickness of ice lenses and mean spacing between ice lenses,

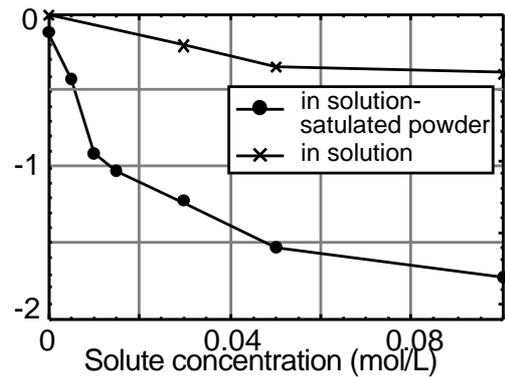


Fig. 4 Temperature at growth surface of ice lens.

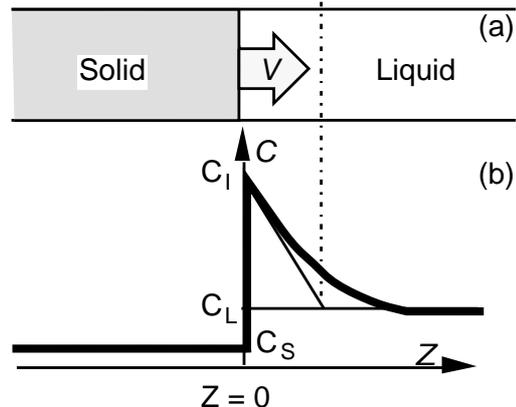


Fig. 5 Schematic illustration of solute distribution near the advancing interface during unidirectional freezing. (a) Solid-liquid interface. (b) Solute distribution.

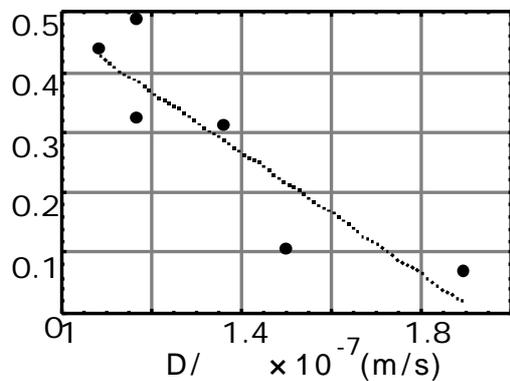


Fig. 6 Relationship between mean thickness of ice lens and  $D/V$ .