

凍上現象とその利用について

渡辺晋生 (三重大学)

1. はじめに

土が冷やされ凍結しつつあるとき、未凍土中の水が凍結面付近に集まり、純粋な氷の塊として析出することがある。この析出水をその形状からアイスレンズ(図1)と呼ぶ。アイスレンズは凍結面の進行とともに発生と成長を繰り返し、凍土中にアイスレンズと土の断続的な層構造を形成する。アイスレンズの析出を伴う地盤の凍結膨脹は、ときに地表を数十 cm も隆起させることがあり(凍上現象)、農地の灌漑排水系や道路、建物の基礎に深刻な被害を与える。また、アイスレンズ形成時の土中水の移動は、土中の塩(Watanabe et al., 2001)や汚染物質(渡辺・中西 2003)の集積や拡散、地盤の軟弱化を引き起こすこともある。一方、凍土はその透水性の低さや強度から材料として利用される。アイスレンズの形成は、こうした凍土の強度や透水性を著しく変化させる。寒冷地においては、土の凍上・融解は構造土の形成(Kessler and Werner, 2003; Peterson et al., 2003)や土壌侵食(Watanabe et al., 2003)、斜面崩壊(Harris and Smith, 2003)などの原因となる。こうした凍上害を防ぐため、あるいは凍土をより有効に利用するためにアイスレンズの形成メカニズムの解明が求められている。また、アイスレンズは土-水系だけでなく多くの多孔質体-溶液系(例えば、広井・水崎, 1991; Zhu et al., 2000)で生じる。このため、アイスレンズの形成メカニズムの解明は物理化学、生物(Mazur, 1970; Wisniewski et al., 1997)、材料工学、食品加工(Thyholt and Isaksson, 1997)、医学、宇宙開発など様々な分野からも求められている。

アイスレンズの析出を伴う凍上現象に関する研究は、Conte(1850)やTaber(1929)の先駆的な研究に始まり、今日までにも数多くなされてきた。現在、提唱されている主なアイスレンズの形成理論には毛管理論(Sill and Skapski, 1956; Penner, 1967)、二次凍上理論(Miller, 1972; Gilpin, 1980; Frolov, 2003)、氷晶析出能概念(Konrad and Morgenstern, 1980)を用いた理論などがある。しかしながら、アイスレンズと凍土の断続的な層状構造を説明できる理論は少なく、アイスレンズ近傍の非平衡な物質循環を扱えるモデルはない。また、アイスレンズ近傍の構造は実験的にはよくわかっておらず、詳細な観察が求められている。そこで、筆者らはこれまでにアイスレンズの成長過程の微視的観察を行い(渡辺ら, 1997; Watanabe et al., 1997; 武藤ら,

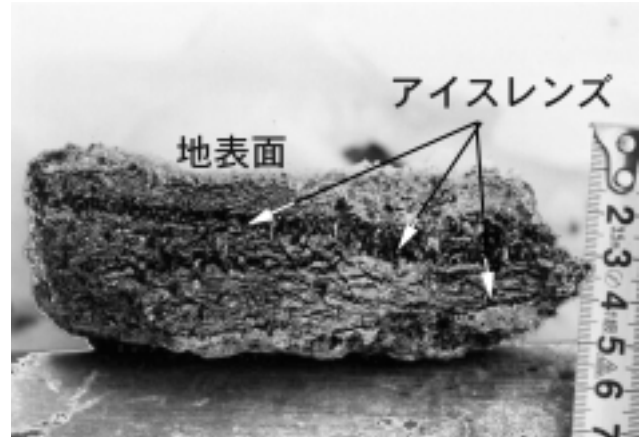


図1. 土中に析出したアイスレンズ

1998; Mutou et al, 1998; 渡辺ら, 1999a; Watanabe and Mizoguchi, 2000)、その形成モデル(渡辺ら, 1999b; Watanabe et al., 2000)を考えてきた。本報では、凍上現象についてこれらの結果をもとに説明する。また、アイスレンズ成長面近傍の物質移動(武藤ら, 2001; Watanabe et al., 2001; 中西・渡辺, 2003; 渡辺・中西, 2003)や凍土中のクラスレートハイドレートの成長(渡辺, 2002)など、凍上現象に関する知見の応用例について紹介する。

2. 一方向凍結実験

土粒子はその大きさや形、電気的性質などが不均一である。またアイスレンズの成長は、物質・エネルギー移動を伴う複雑な結晶成長現象である。アイスレンズの形成メカニズムを理解するには、こうした不均一性や複雑さをとりのぞいた理想的な試料の凍結を、連続的かつ微視的に直接観察することが有効である。そこで、一方向凍結装置を作製し、豊浦砂、藤の森土、粒径が均一なガラス粉粒体、およびガラス粉粒体混合試料を用いて凍結実験を行った。

藤の森土は凍上性に富むことで知られる実際の土、均一粒径ガラス粉粒体は直径の揃った(直径 = 2.2, 5.3, 9.7, 50, 200 μm)単分散性の真球状ガラス微粒子、ガラス粉粒体混合試料は、各均一粒径ガラス粉粒体を混合し、藤の森土と同様の粒度組成を持つように調整した試料である。なお、使用したガラス粉粒体は $120 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 以上の比表面積を持ち、 0°C 以下に冷やされても十分な不凍水を持つことが核磁気共鳴装置による測定から確認されている(Watanabe and Mizoguchi, 2002)。

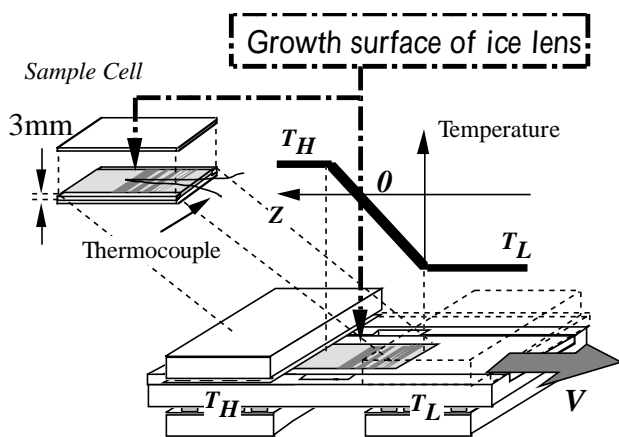


図2．一方向凍結装置と試料セルの模式図

一方向凍結装置により、試料の温度勾配と凍結速度を独立に制御でき、凍結面近傍を連続的かつ微視的に観察できる。

図2に一方向凍結実験の概要を示す。まず、薄い(厚み 3 mm) 板状のセルに、試料を詰める。セル両端に一定の温度差を与えると、試料低温側より凍結面が進行する。凍結面の進行が止まった後、セルを高温側から低温側へ一定速度で強制的に平行移動させる。このとき、セル内の温度勾配は一定に保たれ、凍結面はセル移動速度と同じ速度で反対方向に移動する。すなわち、この方法では温度勾配と凍結速度を独立した実験条件として与えられる。また、固定された温度勾配に対し凍結面の空間的な位置は移動しないので、アイスレンズや間隙氷の成長の時間変化を顕微鏡(例えば、渡辺ら, 1997; 武藤ら, 1998)や Raman 分光装置(Watanabe and Mizoguchi, 2000) X 線散乱装置などを用いて観察できる。さらに、セルに熱電対や圧力センサを組み込み、アイスレンズの成長による温度(渡辺ら, 1997; Watanabe et al., 1997)や間隙水圧(武藤ら, 2000)の変化を同時に測定したり、観察後の試料を用いて試料内の水分(Muto et al, 1999)や溶質濃度(Watanabe et al., 2001; 渡辺・中西, 2003)の変化を測定することも可能である。

3．アイスレンズ成長面近傍の微視的観察

アイスレンズがどのように発生と成長を繰り返しているのか、アイスレンズの形成に影響を及ぼす要因は何かを調べるために、まず、顕微鏡を用いてアイスレンズ成長過程の様子を観察した(渡辺ら, 1997; Watanabe et al., 1997; 武藤ら, 1998; Mutou et al, 1998; 渡辺ら, 1999a)。図3に藤の森土、均一粒径ガラス粉粒体、ガラス粉粒体混合試料中に見られたアイスレンズの様子を示す。図中、黒く見えるところがアイスレンズである。アイスレンズは低温側(図中右側)より発生と成長を繰り返し、断続的な層状構造をなした。

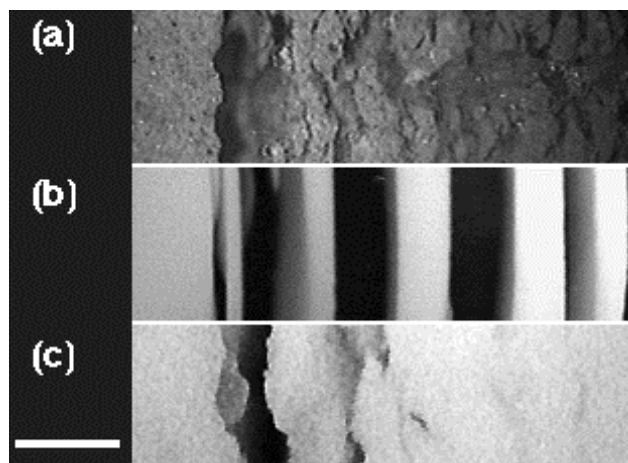


図3．試料の凍結面近傍の様子

(a) 藤森土, (b) 均一粒径ガラス粉粒体, (c) 粉粒体混合試料。図右側が低温側、左側が高温側。スケールは 1 mm を示す。

アイスレンズの形状や試料との境界の様子は、均一試料、混合試料、土試料の順で乱れた。このことから、試料の不均一さがアイスレンズの形状に影響を与えていることがわかる。また、均一粒径ガラス粉粒体を実験に用いることで、形成メカニズムを考えるのに理想的なアイスレンズを作成できることがわかる。これらの実験により、アイスレンズの形成について以下の結果が得られた。(1)アイスレンズの成長量は凍結速度に依存する。(2)アイスレンズの成長速度は成長面の過冷却度による。(3)アイスレンズの発生温度は凍結速度による。また、アイスレンズの形成には、成長面近傍の粒子の動きやつまり具合の影響があることが示唆された。これらの結果は、凍上現象を考える場合、凍結速度とアイスレンズ成長面の過冷却度、成長面近傍の粒子の挙動に着目する必要があることを意味している。

次に、アイスレンズの成長に伴い、その成長面や成長面近傍の粒子一粒一粒がそれぞれどのような挙動を示すのか、またこれらの挙動に影響を与える要因は何かを調べるため、ガラス粒子分散水中で成長している氷結晶の成長界面と、その近傍の粒子の様子を観察した(武藤ら, 1998; Mutou et al, 1998)。図4に氷結晶の成長面近傍の様子を示す。図中、凍結は右側より進行しており、ガラス粒子は白い点として観察される。なお、氷の結晶成長面を図中に点線で示した。ガラス粒子分散水中では2種類の結晶成長が観察された。図4aでは、氷は成長界面で粒子を押し出しながら成長した。このとき、粒子は氷の成長面近傍に集積した。こうした氷の成長は土中におけるアイスレンズの成長と同じ現象と考えられる。一方、図4bでは氷は成長界面で粒子を結晶内に取り込みながら成長した。こうした氷の成長は土中における間隙氷の形成と同じ現象と

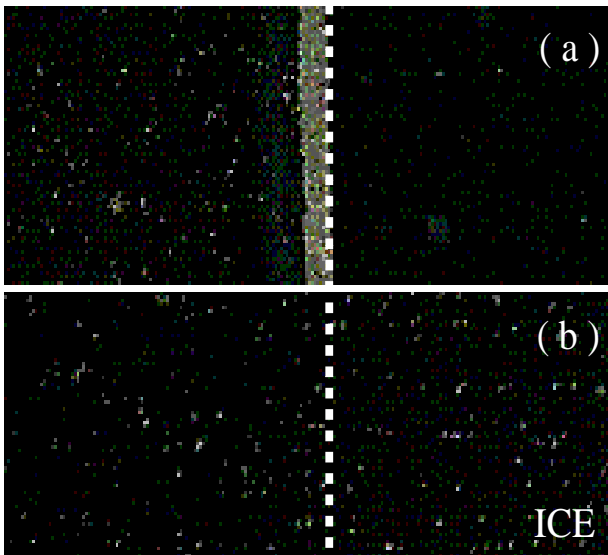


図4．ガラス粒子分散水中の氷結晶の成長の様子
 (a)は温度勾配 $0.3 (^{\circ}\text{C mm}^{-1})$ 、凍結速度 $1.5 (\mu\text{m s}^{-1})$ 、(b)は温度勾配 $0.3 (^{\circ}\text{C mm}^{-1})$ 、凍結速度 $2.0 (\mu\text{m s}^{-1})$ 。図右側が低温、左側が高温。白色の点はガラスビーズ粒子（粒径 $9.7 \mu\text{m}$ ）である。点線は氷の成長面を示す。

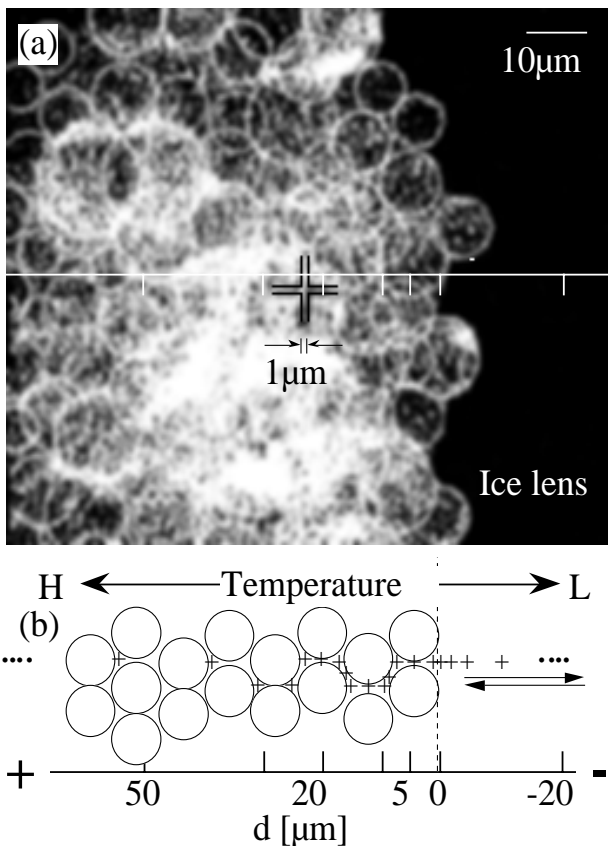


図5．ラマン分光装置による観察画像
 (a)アイスレンズ近傍の観察画像を画像処理したもの。白丸はガラスビーズ（粒径 $9.7 \mu\text{m}$ ）、右側の黒色部はアイスレンズ。(b) (a)の模式図。照準を図の用に $0.4 \mu\text{m}$ 刻みで動かし、各粒子間隙の水の状態を調べた。 $d (\mu\text{m})$ はアイスレンズ成長面からの距離。 d は成長面より高温側で+、低温側で-をとる。

考えられる。この実験の結果、氷が粒子を押し出す（取り込む）臨界の凍結速度は粒径に依存することがわかった。また、この臨界凍結速度は Köber et al. (1992)の理論で説明できることがわかった。これらの結果から、アイスレンズの発生やジャンプを考える場合、この臨界凍結速度に着目する必要があることが示唆された。

また、アイスレンズ成長面近傍の微視的構造を実験的に明らかにするため、ラマン分光装置を用いてアイスレンズ近傍の氷の分布を $1 \mu\text{m}$ の精度で測定した（Watanabe and Mizoguchi, 2000）。図5は、ラマン分光装置のモニターで観察された、アイスレンズの成長面近傍の様子である。図の右側の黒色部がアイスレンズであり、左側へ成長している。白い丸はそれぞれガラス粒子である。この解像度では粒子間隙そのものが観察できる。ラマン分光装置による観察の結果、最も高温側で成長を続けているアイスレンズより高温側の粒子間隙には、 $1 \mu\text{m}$ 以上の氷は存在しないことが明らかになった。

4．アイスレンズ成長面近傍の物質の挙動

アイスレンズの発生・成長に伴い、土中水や溶質がどのように移動するのかを調べるため、異なる濃度の NaCl 溶液、硝酸カドミウム溶液、硝酸・アンモニア混合溶液で飽和したガラス粉体中のアイスレンズの成長過程を観察し、成長面近傍の水・溶質濃度の分布を測定した（武藤, 2001; Watanabe et al., 2001; 中西・渡辺, 2003; 渡辺・中西, 2003）。アイスレンズの厚さ（成長量/凍上量）は加える溶質の濃度が高くなるにつれ薄くなった。また、アイスレンズの間隔は凍結速度にのみ依存し、溶質濃度にほとんど依存しなかった。アイスレンズの成長面の温度は、加える溶液の濃度に応じて低下した。また、こうした成長面の温度低下は、溶液濃度による凝固点降下より数倍から数十倍大きくなった。これはアイスレンズが溶質を吐き出しながら成長した結果、アイスレンズの成長面近傍の溶質濃度が初期濃度より高くなったためと考えられる。

図6に、アイスレンズ近傍の含水比分布と濃度分布を示す。図の横軸は最も高温側で成長を続けているアイスレンズの成長面を基準 ($Z = 0$) とした距離であり、高温側を正とする。含水比については、異なる濃度の NaCl 溶液で飽和した試料の実験結果を、濃度分布については、初期溶液濃度 (0.002 mol/L)、初期含水比 ($80\text{wt}\%$)、凍結条件がほぼ等しい各試料の実験結果を示した。アイスレンズの析出なしで試料が凍結した領域では、含水比、溶質濃度とも初期値に比べ数%程度高い値となった。アイスレンズが析出・成長を繰り返した領域 ($-4 \text{ mm} \leq Z \leq 0 \text{ mm}$) では、アイスレンズの

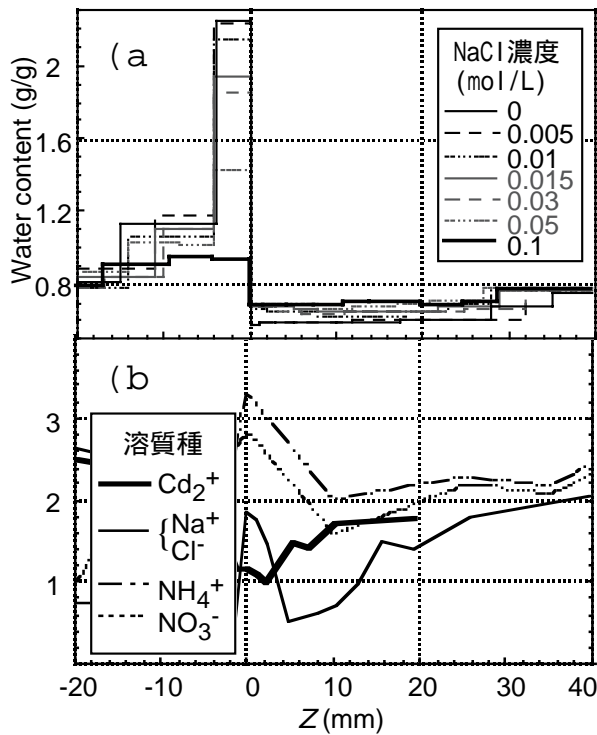


図6．アイスレンズ近傍の含水比分布と濃度分布
 (a)異なる NaCl 濃度の溶液で飽和した試料中の凍結処理後の含水比分布、(b)異なる溶液で飽和した試料中の凍結処理後の溶質濃度分布。Z=0 はアイスレンズの成長面を示す。

枚数、厚さに応じて含水比が高くなった。また、こうした領域では溶質濃度の高い試料と溶質濃度の低いアイスレンズが同程度含まれており、見掛け上の溶質濃度に初期濃度との違いは余り見られなかった。成長面より高温側（特に $0 < Z < 30$ mm）では含水比が低くなった。また、溶質濃度は凍結面から数 mm に欠けて低下し、 $2 \text{ mm} < Z < 4 \text{ mm}$ で最小となり、その後は凍結面から離れるにつれ初期濃度に近づいた。こうした含水比分布や溶質濃度分布はアイスレンズの成長（凍上現象）に伴う高温側から低温側への物質移動を示している。また、含水比や濃度の低下領域の長さは、溶質の自己拡散係数に依存していることが示唆された。

アイスレンズ近傍の溶質の挙動は、水の流れに起因する低温方向への移流、アイスレンズ成長面の吐き出しによる濃縮、成長面近傍に形成される濃度場に伴う高温方向への拡散、アイスレンズのジャンプによる封じ込めといった複数の要因の結果生じる。これらのメカニズムを理解し、凍結法や給排水処理を工夫すれば、土のような多孔質体中の溶質濃度のコントロール、あるいは汚染浄化の可能性が考えられる。実際の土壌レベルでこうした可能性を検討するためには、今後、pH などの性質やスケールの異なる多孔質体、あるいは非イオン性物質についての実験を行い、且つ、ガス吸引や揚水曝気などとの組み合わせ効果などについて調べていく必要がある。

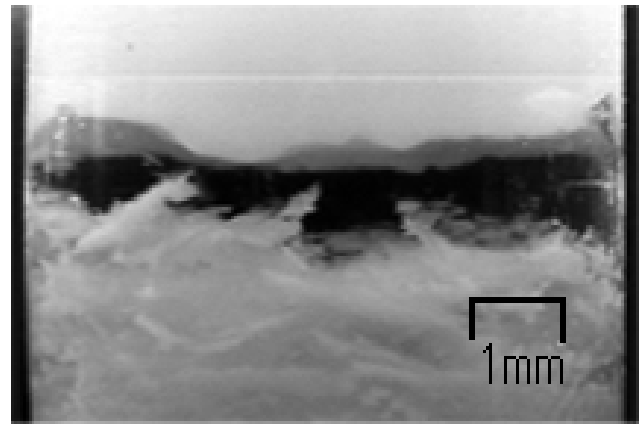


図7．均一ガラス粉粒体中の THF ハイドレートレンズ
 図下方が低温側、上方が高温側。半透明な部分および黒っぽいところが THF のハイドレートレンズ。



図8．ハイドレートレンズに火をつけた様子
 図7の最も高温側に析出したレンズ状結晶を取りだし火をつけたところ、炎をあげて燃焼した。このことからレンズ状結晶が THF のハイドレートであることが確認できる。

5．凍土中のクラスレートハイドレート

土-水系以外の凍上現象として、試料溶液にテトラヒドロフラン（THF）を加え一方向凍結実験を行い、ガラス粉粒体中の THF のクラスレートハイドレートの生成過程を観察した(渡辺, 2002)。クラスレートハイドレートとは、水分子が籠状の格子を作り、その中に気体分子（メタンや二酸化炭素など）や揮発性溶液の分子（ある種のアルコールや THF など）を取り込んで結晶化したものである(内田・本堂, 1996; 内田, 2001)。例えば、メタンハイドレートは海底堆積物や永久凍土中に $10^{12} \sim 10^{18} \text{ m}^3$ 程度存在すると見積もられており(Sloan, 1990; Matsumoto, 2002)、未利用天然ガス資源として期待されている。一方、天然ガス輸送においては、天然ガスハイドレートによるパイプの閉塞が問題となっている。また、大気への地球温暖化ガスの放出を減らすため、二酸化炭素をハイドレート化し地中へ埋設する計画が提案されている(Uchida, 1997;

Uchida et al., 1999)。さらに、CFCs の使用規制以降、THF 等のハイドレートは無害な代替冷媒の候補としても注目されている(Iida et al., 2000)。こうした環境や産業分野におけるハイドレートへの関心の高まりとともに、近年、ハイドレートの生成・解離メカニズムの解明が望まれている。

アイスレンズの観察実験同様に試料両端に温度差を与え試料を冷却したところ、THF ハイドレートがガラス粒子を押し出しながら析出・成長を繰り返し、断続的な層状構造を形成した。ここでは、こうした析出ハイドレートをハイドレートレンズと呼ぶこととする。図7に THF ハイドレートレンズの成長過程の様子を、図8にハイドレートレンズを取りだし火を近づけた時の様子をそれぞれ示す。実験の結果、ハイドレートレンズを作れば、高濃度のハイドレートが効率的に集められることが明らかになった。また、THF ハイドレートレンズの成長速度と過冷却度の関係や成長面温度の塩濃度依存性がアイスレンズの形成実験の結果やメカニズムを応用して説明できることが示された。今後は、ハイドレートレンズ成長面近傍の物質拡散場の観察や、メタンや二酸化炭素などの気体や実際の土を用いた実験を行う必要があると思われる。

6. おわりに

凍結過程にある土およびガラス粉粒体の観察から、アイスレンズ近傍の微視的構造が明らかになった。また、一方向凍結実験の結果、アイスレンズの形成に影響を与えるいくつかの要因とその相互作用が明らかになった。こうした結果は凍上メカニズムの基礎的知見を与えるものである。また、アイスレンズ厚さや成長温度と溶質濃度の関係、アイスレンズ成長面近傍の物質挙動が示された。これらの知見は、凍土や凍結多孔質体中の溶質濃度の制御や汚染物質の除去を考えるうえで活用できると考えられる。さらに、凍土中のクラスレートハイドレートの生成・解離メカニズムを考えるうえで、凍上現象に関する理論やモデルが応用できることが明らかになった。今後、新エネルギーや新材料の開発・利用において、凍結や凍上現象に関する理解が重要な知見を与えると思われる。

本研究はアイスレンズやハイドレートレンズの形成に関する一部の現象やメカニズムを明らかにしたものである。ここで示された結果や知見の多くは、理想的な粉粒体の凍結実験から得られたものであり、実際の土の凍結・凍上現象すべてを扱えるものではない。今後これらの知見をより実際の現象に利用していくためには、土の不均一性や非等方性をいかに評価すべきか、また様々な凍結条件、水分供給条件をどう扱うか、更には土中の微生物がどんな影響を及ぼしているのか

などを考えていく必要がある。

参考文献

- Conte, J. L. (1850): Observation on a remarkable exudation of ice from the stems of vegetables, and on a singular protrusion of icy columns from certain kinds of Earth during frosty weather. *Philosophical Magazine*, **36**, 329.
- Frolov, A. D. (2003): A physical model of frozen ground considered as a complex macrosystem. *In: Permafrost*, 259-264.
- Gilpin, R. R. (1980): A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils. *Water Resources Research*, **16**, 918-930.
- Harris, C. and Smith J. S. (2003): Modeling gelifluction processes: the significance of frost heave and slope gradient. *In: Permafrost*, 355-360.
- 広井政彦, 水崎隆雄 (1991): ^4He の凍上現象. *日本結晶成長学会誌*, **18**, 217-223.
- Iida, T., Mori, H., Mochizuki, T. and Mori, Y. H. (2001): Formation and dissociation of clathrate hydrate in stoichiometric tetrahydrofuran-water mixture subjected to one-directional cooling or heating. *Chemical Engineering Science*, **56**, 4747-4758.
- Kessler, M. A. and Werner, B. T. (2003): Self-organization of sorted patterned ground. *Science*, **299**, 380-383.
- Konrad, J. M. and Morgenstern, N. R. (1980): A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, **17**, 473-486.
- Körber, C., Lipp, G., Kochs, M. and Rau, G. (1992): Ice crystal growth in aqueous solutions and suspensions. *In: Physics and Chemistry of Ice*, 291-298.
- Matsumoto, R. (2002): Comparison of marine and permafrost gas hydrates: Examples from Nankai Trough and Mackenzie Delta. *In: Proceedings of the Fourth International Conference on Gas Hydrates*: 1-6.
- Mazur, P. (1970): Cryobiology: The freezing of biological systems. *Science*, **168**, 939-949.
- Miller, R. D. (1972): Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils. *Highway Research Record*, **393**, 1-11.
- Mutou, Y., Watanabe, K., Mizoguchi, M. and Ishizaki, T. (1998): Microscopic observation of ice lensing and frost heaves in glass beads. *In: Permafrost*, 783-787.
- 武藤由子, 渡辺晋生, 石崎武志, 溝口勝 (1998): 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*, **194**, 97-103.
- 武藤由子, 渡辺晋生, 溝口勝 (2000): 凍結過程にある多孔質体中の間隙水圧の測定. *農業土木学会大会講演要旨集*, 686-687.

- 武藤由子, 渡辺晋生, 石崎武志, 溝口勝 (2001): ガラス多孔質体中のアイスレンズの観察 –アイスレンズの成長と含水比について–. 雪氷, **63**, 3-9.
- 中西秀文, 渡辺晋生 (2003): 凍結過程にあるガラス粉体中の窒素化合物の挙動. 農業土木学会講演集, 234-235.
- Penner, E. (1967): Heaving pressure in soils during unidirectional freezing. Canadian Geotechnical Journal, **4**, 398-408.
- Peterson, R. A., Walker, D. A., Romanovsky, V. E., Knudson, J. A. and Reynolds M. K. (2003): A differential frost heave model: cryoturbation-vegetation interactions. *In*: Permafrost, 885-890.
- Sill, R. C. and Skapski, A. S. (1956): Method for the determination of the surface tension of solids, from their melting points in thin wedges. Journal of Chemical Physics, **24**, 644-651.
- Sloan, E. D. (1990): Clathrate hydrates of natural gases. p. 641, Marcel Dekker Inc, New York.
- Taber, S. (1929): Frost heaving. Journal of Geology, **37**, 428-461.
- Thyholt, K. and Isaksson, T. (1997): Differentiation of frozen and unfrozen beef using near-infrared spectroscopy. Journal of the Science of Food and Agriculture, **73**, 525-532.
- Uchida, T. (1997): Physical property measurements on CO₂ clathrate hydrates. Review of crystallography, hydration number, and mechanical properties. Waste Management, **17**, 343-352.
- 内田努 (2001): 環境問題とガスハイドレート結晶成長研究. 日本結晶成長学会誌, **28**: 70-76.
- Uchida, T., Ebinuma, T., Kawabata, J. and Narita H. (1999): Microscopic observation of formation processes of clathrate-hydrate films at an interface between water and carbon dioxide. Journal of Crystal Growth, **204**, 348-356.
- 内田努, 本堂武夫 (1996): ハイドレート中のガス含有量測定の現状, 地球, **18**, 679-684.
- 渡辺晋生, 溝口勝, 石崎武志 (1997): 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**, 53-58.
- Watanabe, K., Mizoguchi, M., Ishizaki, T. and Fukuda, M. (1997): Experimental study on microstructure near freezing front during soil freezing. *In*: Ground Freezing, 187-192.
- 渡辺晋生, 武藤由子, 溝口勝 (1999a): 不均一粒径ガラスビーズ中のアイスレンズの生成. 農業土木学会大会講演要旨集, 786-787.
- 渡辺晋生, 武藤由子, 溝口勝 (1999b): ガラス粉粒体中の層状氷生成モデル. 雪氷, **61**, 207-214.
- Watanabe, K. and Mizoguchi, M. (2000): Ice configuration near a growing ice lens in a freezing porous media consisting of micro glass particles. Journal of Crystal Growth. **213**, 135-140.
- Watanabe, K., Muto, Y. and Mizoguchi, M. (2000): A model for the formation of ice lenses in an unconfined, water-saturated, porous medium consisting of spherical particles. *In*: Ground Freezing, 55-60.
- Watanabe, K., Muto, Y. and Mizoguchi, M. (2001): Water and solute distributions near an ice lens in a glass-powder medium saturated with sodium chloride solution under unidirectional freezing. Crystal Growth & Design, **1**, 207-211.
- Watanabe, K. and Mizoguchi M. (2002): Amount of unfrozen water in frozen porous media saturated with solution. Cold Regions Science and Technology, **34**, 103-110.
- 渡辺晋生 (2002): 粉体中のクラスレートハイドレートの観察, 農業土木学会講演集, 356-357.
- Watanabe, K., Kiyosawa, H., Fukumura, K., Ezaki T. and Mizoguchi M. (2003): Spatial and temporal variation of thaw depth in Siberian tundra near Tiksi. *In*: Permafrost, 1211-1216.
- 渡辺晋生, 中西健一 (2003): 蛍光 X 線分光分析法を用いた凍結過程にあるガラス粉体中のカドミウム濃度分布の観察. 農業土木学会論文集, 印刷中.
- Wisniewski, M., Lindow, S. E. and Ashworth, E. N. (1997): Observations of ice nucleation and propagation in plants using infrared video thermography. Plant Physiology, **113**, 327-334.
- Zhu, D. M., Vilches, O. E., Dash, J. G. and Wettlaufer, J. S. (2000): Frost heave in argon. Physical Review Letters, **85**, 4908-4911.