



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	粉状物質における冷却速度と凍上速度の関係
Author(s)	堀口, 薫; HORIGUCHI, Kaoru
Citation	低温科学. 物理篇, 33, 227-235
Issue Date	1976-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18289
Type	departmental bulletin paper
File Information	33_p227-235.pdf



粉状物質における冷却速度と凍上速度の関係*

堀 口 薫
(低温科学研究所)
(昭和50年10月受理)

I. 緒 言

寒冷地方では、地面が冷やされると、土中の水が氷晶分離を起し、その結果地面の隆起が起る。いわゆる凍上現象がある。凍上が起るためには土のような粉状物質が水を含んでいて、その表面が 0°C 以下の温度に冷やされなければならない。水を含んだ同一の粉体でも、その表面の冷やされ方、つまり表面から外へ出て行く熱流量(これを冷却速度と定義する)によって表面の凍上速度が異なる。ゆっくりと冷却されて表面から霜柱が形成されるときには、凍結面は一定のところに停止する。しかし冷却速度すなわち表面から外へ出て行く熱流量がその土の水の氷晶分離に基づき、熱流量を越えるくらい大きくなると、凍結面の進行がはじまる。そして、冷却速度が大きい程、凍結速度も大きい。

凍上速度と冷却速度又は凍結速度との関係は、今日までに多くの研究者によって調べられて来た。Beskow (1947)¹⁾は低温室の温度が -2°C から -10°C の範囲で実験を行ない、凍上速度は冷却速度にほとんど影響されないという観測結果を得た。U. S. Army (1958)²⁾では、北アメリカやグリーンランドの代表的な土数十種類についての実験結果から、凍結速度が0.25~0.75 インチ/日の範囲では、凍上速度は凍結速度に依存しないと述べている。このように両者の間に直接関係がないという報告がある一方、Higashi (1958)³⁾は凍結速度が大きくなる程、凍上速度が小さくなるという実験結果を得た。これに反して、Penner 1960⁴⁾, 1972⁵⁾は平均凍結速度が0~3 インチ/日の範囲で、Freden (1966)⁶⁾は凍結速度が0.5~10.0 mm/時の範囲で、高志等 (1974)⁷⁾は凍結速度が約0~5 mm/時の範囲で、凍結速度が大きくなるにつれて凍上速度が大きくなるという実験結果を得た。Haas (1962)⁸⁾はHigashiとPennerの結論の違いに注目し、野外の4カ所において凍上速度と凍結面の進行速度との関係を測定した。その結果3カ所はHigashiの結果と一致し、1カ所はPennerの指摘するような結果を得た。この他Jackson等 (1965)⁹⁾は理論的な立場から、冷却速度が大きくなるにつれて、はじめのうちは凍上速度は増加するが、供試体によって決まる最大の凍上速度に達すると、これ以後は冷却速度に関係なく凍上速度はこの最大値を保ち、熱的条件を満たすように凍結面の進行が生ずると述べている。又Kapler (1970)¹⁰⁾によれば、凍結速度の増大とともにはじめのうちは凍上速度も大きくなるが、供試体によって決まる最大値に達した後は、凍上速度は一時減少する。しかし、間隙水が凍結

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1705号

面から押し出されることができないほど凍結速度が大きくなると、間隙水の凍結膨脹による体積増加の分が凍上速度に寄与し、凍上速度は凍結速度に比例して再び大きくなると述べている。

このように今日までに得られた結果はまちまちで、ときには反対の結果すらある。これらの実験で用いられた供試体としての土は複雑な内部構造をもち、その物理化学的な性質を詳細に把握することは難しい。そこで筆者は物理化学的に簡単な組成を持つ粉状物質についてこの冷却速度と凍上速度との関係を調べてみた。

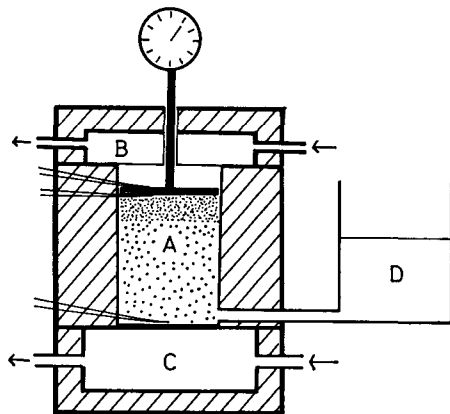
II. 実験装置と実験方法

試料を水飽和の状態にして開式の凍上実験をおこなった。

実験装置の略図を第1図に示す。Aは試料を入れるガラス製の容器で、下ほど細い円錐台の形をしている。この内側には凍着を防ぐために薄いテフロン膜が張ってある。直径は、上面が8cm、下面が7cm、であり、深さ10cmである。この底部には図に示すように水槽Dに通ずる穴が開いている。容器Aには底から6cmまでガラス球(粒径66~84 μ)をつめこんでいる。このガラス球の上に口紙を置き、更にもその上に約2cmの厚さだけ実験用の試料を入れる。水は水槽Dを通して容器Aの下部から入り、試料を水飽和の状態にする。この状態にしてから装置全体を数十回振動させ、試料をおちつかせた。Dの水位が試料の表面に近くにあっても、容器Aの底にあっても、試料の水飽和の状態は変わらず、従って実験結果にほとんど影響されないことが予備実験で確かめられた。

試料の表面に直径が7cmで中央に内径2mmの穴の開いている検定された円板状の熱流板を密着させて置いた。ダイマルゲージの下端が熱流板につくように設置して凍上量を測定した。Aの下に循環水を流す銅製の容器Cをおく。循環水の温度はAの底に入れてある熱電対で、その温度がほぼ0.1 $^{\circ}$ Cになるように調節された。銅製の容器Bは冷凍機に接続されその中を冷媒が循環する。試料の表面の温度が0 $^{\circ}$ Cになったら試料の表面に種つけをし、間隙水の過冷却を防いだ。その後冷媒の温度を1時間に4.5 $^{\circ}$ Cの割合で下げた。装置全体を断熱材でおおい熱損失を防いだ。

冷媒の温度を下げることにより、熱流板を通して試料から奪い去られる熱流の中には凍結面からの熱流と凍結面より上にある凍土を冷却するのに必要な熱があるが、この実験では凍土の厚さが薄いために後者は前者に比べて無視してよい。未凍結部分の温度は全層にわたってほぼ0 $^{\circ}$ Cであるので、未凍結部分から凍結面に向かって流れる熱流も非常に小さい。したがって熱流板を通る熱流 Q は凍結面で氷晶分離によって単位時間に発生する潜熱に等しいと考えてよい。実験では15分間の平均の熱流 Q [cal/cm 2 ·sec]とその間の平均の凍上速度[mm/日]との関係



第1図 実験装置

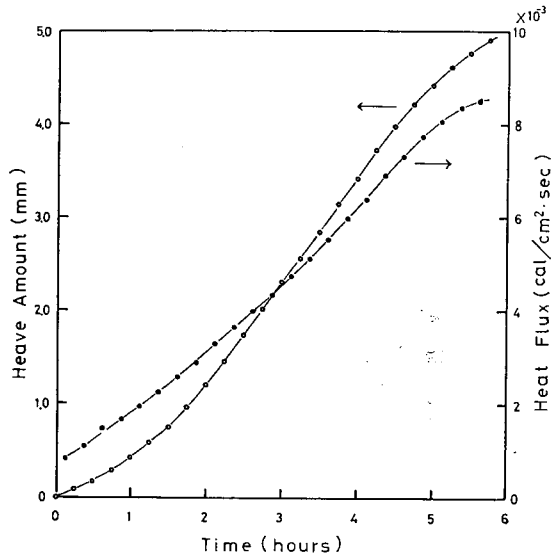
- A: 試料(上部)とガラス球(下部)を入れる容器
B, C: 恒温箱, D: 水槽

を求めた。

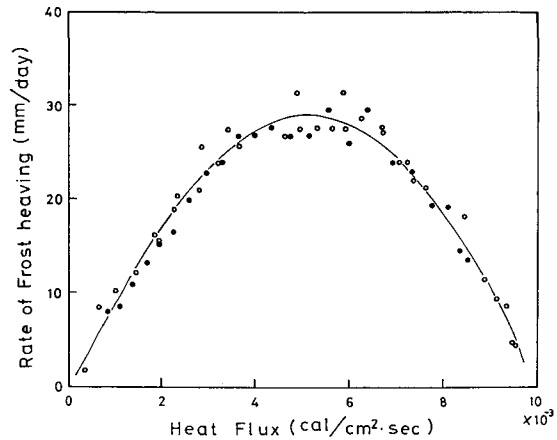
熱流の測定誤差を少なくするために、凍上性の粉体を用いて、熱流 Q を野外で一般に観測される値よりも大きくなるようにした。

III. 実験結果

モリキュラシーブの名で知られている人工沸石 (Ca, Na)-A¹¹⁾ について求めた実験結果の1例を第2図に示す。記号 (Ca, Na)-A は A 型の沸石であり、これに含まれている交換性陽イオンが Ca^{+} と Na^{+} イオンであることを示す。第2図の横軸は凍上を開始してから時間であり、縦軸の左側には凍上量を mm 単位で、右側には熱流板を通して試料の表面から出て行く熱流 Q を $cal/cm^2 \cdot sec$ の単位でとってある。実験は凍上開始後5時間45分にわたって行なわれた。この間に凍上量は 4.9 mm に達した。凍上量は 15 分間隔に測定し、熱流 Q にはこの 15 分間の平均値がとってある。即ち、凍上を始めてから最初の 15 分間の間に、凍上量は 0.09 mm に達し、その間の平均の熱流 Q は $0.82 \times 10^{-3} cal/cm^2 \cdot sec$ であった。冷媒の温度を $4.5^{\circ}C$ /時の速度で下げているので平均熱流 Q は時間がたつにつれて大きくなり、第2図からわかるように実験の終わりには $8.5 \times 10^{-3} cal/cm^2 \cdot sec$ にまで達した。熱流 Q の曲線が実験の終わり頃には次第に一定値に近づいてくるが、これは冷媒の温度が $-30^{\circ}C$ の限界に達したためである。平均凍上速度は凍上量一時間曲線の勾配から求まる。したがって第2図から、各 15 分間の平均凍上速度とこの時間の間の平均熱流 Q との関係を求めることができる。このようにして求めた平均熱流 Q と平均凍上速度との関係を第3図に示す。横軸には平均熱流 Q を $cal/cm^2 \cdot sec$ の単位でとり、縦軸は平均凍上速度を mm/日の単位でとってある。図中黒丸で示した点は第2図から求めた値であり、白丸は第2図に示した以外の実験結果から求めた値である。平均凍上速



第2図 沸石 (Ca, Na)-A の凍上量の曲線と表面から奪い去られる熱流 Q の曲線

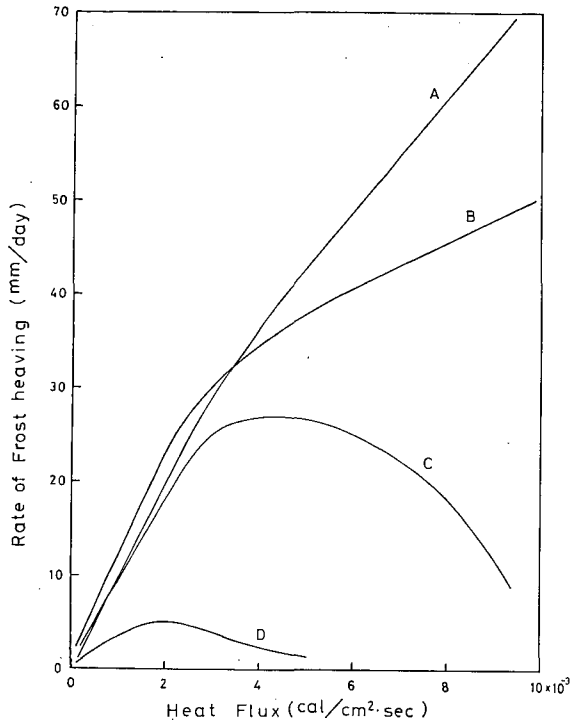


第3図 沸石 (Ca, Na)-A の凍上温度と冷却温度との関係、黒丸は第2図より求めた値

度と熱流 Q との関係はほぼ図の二次曲線で表わされるような関係があった。つまり、熱流 Q が約 $5.2 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ よりも少ないときには、凍上速度は熱流 Q が大きい程大きいが、熱流 Q が $5.2 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ よりも大きい場合には熱流 Q が大きいほど凍上速度は小さい。熱流 Q が約 $5.2 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ のとき凍上速度は最大となり、その値は約 20 mm/日であった。以後この $5.2 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ を (Ca, Na)-A の臨界熱流と呼ぶことにする。

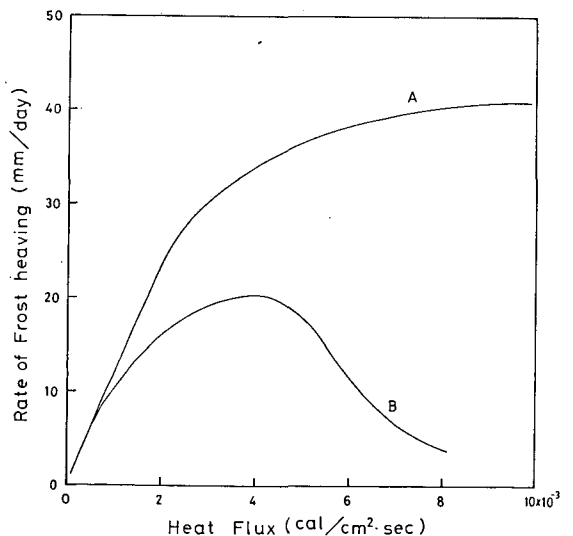
粒径を異にする粉状アルミナについて求めた凍上速度と熱流 Q との関係を図 4 に示す。曲線 A, B, C, D は、それぞれ、平均粒径が 2μ (#8,000), 8μ (#2,000), 40μ (#500), 80μ (#240) のアルミナである。これら 4 つの試料のうち、粒径が 2μ と 8μ の 2 つの試料では、熱流 Q が大きい程凍上速度は大きかった。一方、粒径が 50μ と 80μ のアルミナでは、共に臨界熱流が存在し、その値は、それぞれ、約 4.8×10^{-3} , $2 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ であった。そしてこれに対応する最大の凍上速度は、それぞれ、約 27, 5 mm/日であった。

研磨材として使われているグリーン・カーボランダムについて求めた凍上速度と熱流との関係を図 5 に示す。曲線 A は平均粒径が 4μ (#4,000) のグリーン・カーボランダムである。この試料では凍上速度は熱流 Q が大きい程大きかった。曲線 B は平均粒径が 48μ (#400) のグリーン・カーボランダムである。この試料では約 $4 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の臨界熱流が存在し、最大凍上速度は約 20 mm/日であった。



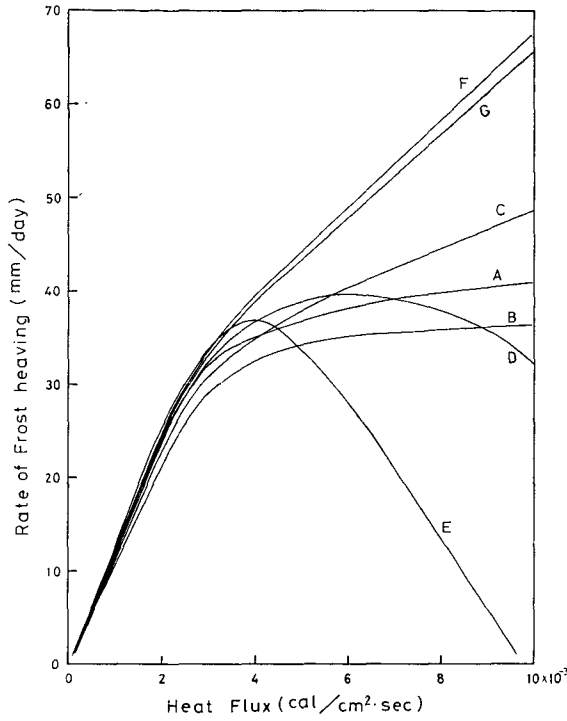
第4図 ヨーユーアルミナの凍上速度と冷却速度との関係

A: 2μ , B: 8μ , C: 40μ , D: 80μ



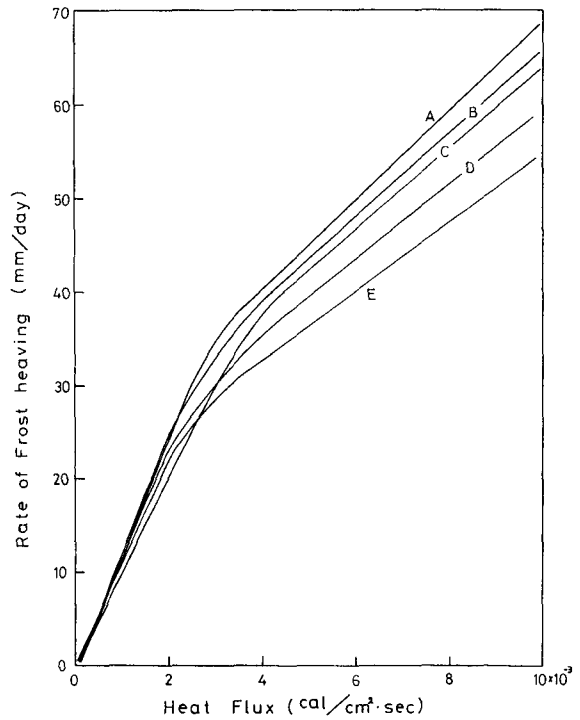
第5図 グリーン・カーボランダムの凍上速度と冷却速度との関係

A: 4μ , B: 48μ



第6図 A型の沸石の凍上速度と冷却速度との関係

A: (K, Na)-A, B: (Na)-A, C: (Li, Na)-A, D: (Ba, Na)-A, E: (Sr, Na)-A, F: (Mg, Na)-A, G: (Ni, Na)-A



第7図 X型の沸石の凍上速度と冷却速度との関係

A: (Ca, Na)-X, B: (Cd, Na)-X, C: (Ni, Na)-X, D: (Mg, Na)-X, E: (Co, Na)-X

結晶構造と粒子の大きさは同じであるが、交換性イオンを異にする沸石 A の凍上速度と熱流 Q との関係を図 6 に示す。曲線 A, B, C, D, E, F, G は、それぞれ、(K, Na)-A, (Na)-A, (Li, Na)-A, (Ba, Na)-A, (Sr, Na)-A, (Mg, Na)-A, (Ni, Na)-A である。これらのうち (Ba, Na)-A と (Sr, Na)-A は臨界熱流をもち、その値は、それぞれ、約 6×10^{-3} , 約 4×10^{-3} cal/cm²·sec であった。又この値に対応する最大凍上速度は、それぞれ、約 40, 37 mm/日 であった。(Na)-A では、熱流 Q が約 3×10^{-3} cal/cm²·sec よりも少ないときには、凍上速度は熱流に正比例して増大した。しかし、熱流 Q が約 5×10^{-3} cal/cm²·sec よりも大きい場合には、凍上速度は熱流 Q に係わりなく、ほぼ一定の約 35 mm/日 であった。(K, Na)-A も (Na)-A に近い傾向を示した。ところが、(Mg, Na)-A と (Ni, Na)-A とでは、凍上速度は熱流 Q にほぼ正比例して増大した。(Cd, K)-A は図には示されていないが量的に (Mg, Na)-A と同じ値を示した。(Li, Na)-A も (Mg, Na)-A と同じような傾向を示しているが、熱流 Q が大きい領域では (Mg, Na)-A に比べて凍上速度は小さかった。

粒子の大きさと結晶構造は同じであるが、ただ交換性陽イオンだけを異にする人工沸石 X についての実験結果を図 7 に示す。曲線 A, B, C, D, E は、それぞれ、(Ca, Na)-X, (Cd, Na)-X, (Ni, Na)-X, (Mg, Na)-X, (Co, Na)-X である。X 型の沸石の中には臨界熱流を持つものがなく、いずれの試料も熱流 Q が大きくなる程凍上速度は大きくなった。これらの試料の中、(Ca, Na)-X の凍上速度が僅かではあるが一番大きく、(Co, Na)-X の凍上速度が最も小さかった。

IV. 考 察

凍上速度と冷却速度又は凍結速度との関係をみるには凍結面での熱収支を考えると好都合である。間隙水の移動によって未凍結部分から凍結面に運ばれる熱量と凍土及び未凍土を冷やすに必要な熱量を無視すると凍結面近傍での熱収支は次式で表わされる。

$$K_1 \frac{\Delta T_1}{\Delta x} - K_2 \frac{\Delta T_2}{\Delta x} = \rho_w L_w \left(V + n \frac{\Delta X}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

ここで K_1, K_2 は、それぞれ、凍土と未凍土の熱伝導率であり、 T_1, T_2 は、それぞれ、凍結面近くの凍土と未凍土の温度である。 ρ_w と L_w は、それぞれ、水の密度と凍結潜熱であり、 n は空隙率、 $\frac{\Delta X}{\Delta t}$ は平均の凍結速度である。 V は凍結面が Δx なる距離進む間に凍結面に引き寄せられて来る水の速度である。もともと含まれていた間隙水の凍結による体積膨脹を無視すれば、凍結面が Δx の距離進む間の平均凍上速度は V/ρ_i である。 ρ_i は氷の密度である。

この実験では未凍結部分の温度をほぼ 0°C にすることにより (1) 式の左辺の第 2 項を無視した。又凍土の厚さを薄くすることにより左辺の第 1 項は表面に置かれた熱流板により直接測定した。

式 (1) にもとづいて、凍上速度と凍結速度の関係を考察する。まず 80μ のヨーユーアルミナについて考える。この n は 0.36 であった。第 4 図で熱流 Q が 0 のときには凍上速度も凍結速度も勿論 0 である。又熱流 Q が臨界熱流のとき、つまり 2×10^{-3} cal/cm²·sec のとき凍上速度は 5 mm/日 であった。このときの凍結速度は (1) 式より約 45 mm/日 である。熱流 Q がこの臨界熱流の値よりも大きくなると凍上速度が減少するので、(1) 式の右辺の第 2 項、つまり凍結

速度は大きくなることわかる。以上のことから $80\ \mu$ のヨーユーアルミナは、凍結速度が約 $45\ \text{mm/日}$ に致るまでは、凍上速度は凍結速度と共に大きくなるが、凍結速度が $45\ \text{mm/日}$ を越えると凍上速度は減少することがわかった。 $40\ \mu$ のヨーユーアルミナについても同じく計算すると、凍結速度が約 $58\ \text{mm/日}$ のとき凍上速度が最大になることがわかる。但しこのときの空隙率は 0.40 であった。ヨーユーアルミナ以外で最大の凍上速度を示した試料、つまり $48\ \mu$ のグリーン・カーボランダム、(Ba, Na)-A, (Ca, Na)-A, (Sr, Na)-A についても同じように、凍結速度がある値のときに最上速度が最大になった。

粒子の大きさと最大凍上速度の値とを、第4図に示したヨーユーアルミナについて比較すると、粒子が細かい程最大凍上速度は大きい。図では $8\ \mu$ と $2\ \mu$ のアルミナは最大凍上速度に達していないが、熱流 Q が $10 \times 10^{-3}\ \text{cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 以上の領域で最大凍上速度が存在することを予想することは困難でない。同じことが $4\ \mu$ のグリーン・カーボランダムについてもいえる。以上のことからすべての粉体が最大凍上速度を持つことがわかる。更に交換性イオンを持たない物質では粒子が細かい程凍上速度の最大値は大きい。

式(1)は凍結面の近傍での熱流の連続の式であり、左辺のある値に対して凍上速度と凍結速度が一義的に何如なる値をとるかを決めるものではない。この意味で(1)式から得られた量は実験結果の整理に役立つことがあっても、それ以上の有効さはない。まして与えられた試料が凍上性であるかどうかを判定することはできない。積極的な凍上性の判定の基準としては、現在のところ粒子の大きさが用いられていて、粒子が細かい程凍上性であることがわかっている。確かにヨーユーアルミナやカーボランダムの実験結果はこの一般則に一致している(しかし更に粒子が細くなりコロイド粒子のように水中に分散している状態での凍結は、一般にいわれている凍上とは別の現象である)。幾何学的な粒子の大きさだけでなく粒子自身の物理化学的な性質が氷晶分離の際に重要な影響を与えることを著者は指摘して来た¹⁾。次に考察する沸石についてもそのことがよくあらわれている。

人工沸石の A と X は粒子の結晶構造を変えることなく、本来含まれている交換性陽イオンを他の陽イオンで置き換えることができる。異なる交換性陽イオンを有する沸石 A の実験結果から、粒子の大きさが同じでも凍上速度は著しく異なることがわかる。更に、これらの試料はいずれも最大凍上速度をもつことが、ヨーユーアルミナの例から予想されるが、実験の範囲では (Sr, Na)-A と (Ba, Na)-A と (Ca, Na)-A の3つの試料についてのみ最大凍上速度が観測された。このことはすでに発表した¹²⁾ 次の実験結果と比較するとより明確になる。即ち、冷媒の温度を一定に保って、凍結前と凍結後の含水量の変化を調べると、氷晶分離のために凍結後の含水量の方が多い。この増加量は冷媒の温度が低くなるにつれて減少する。しかしこの減少の仕方に2通りあり、1つは冷媒の温度が下がるにつれて連続的に減少する場合であり、もう1つはある冷媒の温度を境にして急激に減少する場合である。最大凍上速度が観測された上記の3つの試料はいずれも後者にぞくする。例えば、(Ca, Na)-A では冷媒の温度が約 -16°C を境にして、この温度よりも高いときにはよく氷晶分離を起すがこれよりも低い温度ではほとんど凍上をしない。そして (Ca, Na)-A の臨界熱流が約 $4 \times 10^{-3}\ \text{cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ であることがこの実験よりわかった。(Sr, Na)-A と (Ba, Na)-A は冷媒の温度が、それぞれ、約 -14°C と約

-15°C のときを境にして凍上量が著しく異なった。そしてこれらの臨界熱流が、それぞれ、約 $4 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ と約 $6 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ であった。前の実験で (Cd, K)-A は冷媒の温度が約 -20°C のときを境にして凍上量が著しく異なったが、凍上速度—熱流 Q の曲線には最大凍上速度が観測されなかった。これは (Ca, Na)-A などに比べて、冷媒の温度がより低いことから、熱流 Q が $10 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ よりも大きいところで最大凍上速度をもつものと思われる。同じことが、冷媒の温度がそれぞれ、約 -21°C と約 -29°C のを境にして凍上量が異なった (Na-A) と (K, Na)-A についてもいえる

以上の考察より次のことが明らかになった。すべての試料について、凍上速度が最大になる熱的条件が存在する。この際粉体の組成が同一であれば、粒子が細かい程最大凍上速度と臨界熱流の値は共に大きい。しかし粉体の幾何学的な形状や大きさが同じであっても、交換性イオンが異なれば最大凍上速度と臨界熱流の値は著しく違って来る。このことは凍結面での氷晶分離の機構が粉体試料中の間隙の幾何学的な形状や大きさだけでなく、粒子自身の表面の物理化学的性質によって著しく影響されることを意味する。

この論文を書くにあたり、木下誠一教授、鈴木義男助教授に有益は助言をいただいた。深く感謝いたします。また本研究は文部省の凍上研究に対する臨時事業費及び文部省科学研究費補助金自然災害特別研究費によって行なわれた。

文 献

- 1) Beskow, F. D. G. 1935 Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroad. *Swed. Geol. Soc. Ser. C*, **375**, 26th Year Book No. 3: (Translation by J. O. Osterberg 1947 Tech. Inst. Northwestern Univ., Evanston, Ill. 145 pp).
- 2) U. S. Army, 1958 Cold room studies third interim report of investigations. *ACFEL Technical Rep.*, **43**, 1-19.
- 3) Higashi, A. 1958 Experimental study of frost heaving. *SIPRF Rep.*, **45**, 1-22.
- 4) Penner, E. 1960 The importance of freezing rate on frost action in soils. *In Proc. ASTM*, **60**, 1151-1165.
- 5) Penner, E. 1972 Influence of freezing rate on frost heaving. *Highway Res. Board Bull.*, **393**, 56-64.
- 6) Freden, S. 1966 Mechanism of frost heave and its relation to heat flow. *In Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, **1**, 41-45.
- 7) 高志 勤・益田 稔・山本英夫 1974 土の凍結膨脹率に及ぼす凍結速度、有効応力の影響に関する研究. 雪氷, **36**, 49-68.
- 8) Haas, W. M. 1962 Frost action theories compared with field observation. *Highway Res. Board Bull.*, **331**, 81-97.
- 9) Jackson, K. A., D. R. Uhlmann, B. Chalmers 1965 Frost heave in soils. *J. Appl. phys.*, **37**, 848-852.
- 10) Kaplar, C. W. 1970 Phenomenon and mechanism of frostheaving, *Highway Res. Rec.*, **304**, 1-13.
- 11) 堀口 薫 1970 粉体の結晶構造と氷晶分離能. 低温科学, 物理篇, **28**, 345-358.
- 12) 堀口 薫 1971 粉体の結晶構造と氷晶分離能 III. 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, 32.

Summary

Relations between the rate of frost heave and the rate of heat removal from the freezing front were examined under the following conditions: The temperature of unfrozen part of a sample saturated with water was kept at about 0°C for a period of experimental, and the temperature of coolant was reduced at the rate of 45°C/hour automatically. In order that an experimental error is lessened in the measurement of the quantity of heat, heat flux at the surface of sample was taken greater than that in the field.

A thermal balance through the freezing front is formulated by equation (1); the quantity of its left side was measured by a heat flow meter, which was put on the surface of a sample; the first term of its right side correspond to the rate of frost heave, and this quantity was measured by a dial gauge. The experimental results of fused alumina (2 μ , 8 μ , 40 μ , 80 μ) and green carbonrundum (4 μ , 48 μ) are shown in Figs. 4 and 5, respectively. The results of zeolites A and X whose exchangeable cations were exchanged by other cations are shown in Figs. 3, 6 and 7.

The following results were obtained: (1) With increasing of the rate of heat removal from the freezing front, the rate of frost heave increases, reaches the maximum, and then decreases; (2) This maximum rate of frost heave increased as the particles are reduced in size, but in the case of zeolites A and X having the same particle size this maximum rate depended on the kinds of exchangeable cations.