

ヘリウムにおける凍上の実験的検証

(1986年11月10日受理)

京大・理 広井政彦, 水崎隆雄

はじめに

水を含んだ土が凍るときに、地下水の供給がある場合、その地下水を吸い上げながら凍結が進行し、凍土の大きな体積膨張が起こることがある。この現象は凍上とよばれている。霜柱も身近に見られる凍上現象の一例である。凍上には、粘土のような細かい粒径の土の中に存在する 0° 以下でも凍らない不凍水が重要な働きをしていると考えられている。この現象は水と土以外にも、水と各種の多孔性物質の場合や、また、水以外の液体（ベンゼン等）を用いた場合でも観測されている。凍上については、地面隆起による建造物への被害防止や、地盤凍結工法上で生じる問題点という面もあり、多くの研究がされており、実際上の成果もあがっているが、凍上機構、特にその動的な側面は完全に解明されたとはいえないようである。

恒藤氏は、本誌¹⁾で凍上現象の解明の手がかりには、理想化された状況下の凍上実験（文献中の図2）が重要であり、そのためにHeの実験が役立つということを指摘した。そこで、我々は、低温下で ^4He と多孔質ガラスを用いて最大凍上力を測定する実験を試みた。この凍上実験に先立ち、孔径の異なる各種の多孔質ガラス中のHeの、固相-液相転移の相図の決定と相転移の機構を調べた。²⁾ その結果、多孔質ガラス中のHeの固相-液相転移線は、多孔質ガラスの孔径に依存し、バルクの固体の領域に入りこんでいることがわかった。その結果を踏まえて、低温で ^4He と多孔質ガラスを使った凍上実験の意義を考えると、次のようなことがいえる。

(1) 多孔質ガラスは、細孔径分布の散らばりが小さく、Heの液相-固相転移の相図が決定できた。従って、適当な温度・圧力を設定することによって、バルクは固体、多孔質ガラス中は液体で、多孔質ガラスの表面が液相-固相の界面という理想化された状況で実験ができる。

(2) ^4He は、常流動状態でも粘性が非常に小さく、また超流動状態では大きな臨界速度（多孔質中では $\sim 10^2$ cm/sec以上と思われる）までは粘性がないので、多孔質中の流れに要する時間は比較的少ないと考えられる。ちなみに、室内実験で観測された水と土の凍上の場合、最大凍上力に落ち着くのに数千時間必要とすると報告されている。⁴⁾（自然に存在する永久凍土の凍上では数千年に渡って凍上が続いている例がある。）従って、 ^4He の場合、実験時間の

短縮ができるので、より精度の高い信頼性のある結果が期待できる。また、超流動という特殊な状態が実現するので、多孔質中の流れが凍上に果す役割について情報が得られる可能性がある。

(3) 低温において He は非常に純粋で不純物の影響がないので、結晶成長を調べる上でも理想化された状況が実現できる。

(4) 低温では種々の条件を制御する上で有利であり、精密な測定ができることなども挙げることができる。

実験方法と結果

凍上を観測するためには、多孔質ガラス中は液体、その上のバルク部分は固体という温度、圧力に条件を設定する必要がある (図 1, 2)。そのときの固体の圧力を P_s 、多孔質ガラス中の液体の圧力を P_l とすると、 $\Delta P(t) = P_s(t) - P_l(t)$ が、最大凍上力 ΔP_m に達するまで圧力変化を続ける。水の場合、境界面の温度 T と最大凍上力 ΔP_m は、次のような変形された Clausius-Clapeyron の式に従うことが報告されている。^{1), 4)}

$$\Delta P_m = -\frac{Q_1}{V_s T} (T - T_M) = -\frac{Q_1}{V_s T} \Delta T \quad (1)$$

ここで、 V_s は固体のモル体積、 Q_1 は融解の潜熱、 T_M は圧力 P_l での融点である。 $T - T_M$ は ΔT と表記する。今回の実験では ^4He の最大凍上力を測定し、(1) 式との比較を行った。

測定に用いた試料室を図 3 に示す。上部を図 1 に示した状態になるように条件設定をして凍上を起こし、上部圧力計で P_s を測定する。試料室の下側の圧力計の部分の温度 T_{down} を $T_{\text{down}} > T_M$ にして、多孔質ガラス中はすべて液体の状態下部までつなぐと、下部の圧力計で P_l が測定できる (ただし、後から述べるが超流動状態ではこれはいえない)。

まず、多孔質ガラス中の圧力伝達にどれぐらいの時間を必要とするかを知るために、全体が液体の状態での流れを測定した。温度 3.5 K で下の圧力を一定 (39.1 bar) に保ったときの、上の圧力変化を測定した結果を図 4 に示した。この結果から、この試料室では多孔質ガラス中の圧力が平衡に達するのに数時間必要なことがわかる。

次に、凍上現象の観測を試みた。圧力 32 bar、 $T_M = 1.82\text{ K}$ 付近での $\Delta P(t) = P_s(t) - P_l(t)$ の時間変化を図 5 に示す。 $\Delta P(t)$ が平衡に達するまでの時間は多孔質ガラス中の流れに要する時間と同程度といえる (この事実、この場合は凍上速度は多孔質中の流れが決めていることを示している)。このようにして、種々の ΔT に対して最大凍上力 ΔP_m を測定した。これを図 6 に示す。実線は変形された Clausius-Clapeyron の式 (1) を示す。本実験で観

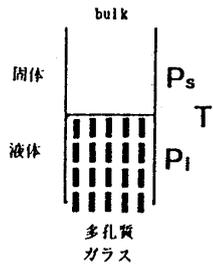


図1 多孔質ガラス上の凍上面の様子を模式的に示す。凍上面の温度 T , バルクの固体の圧力は P_s , 多孔質中の液体の圧力は P_l 。

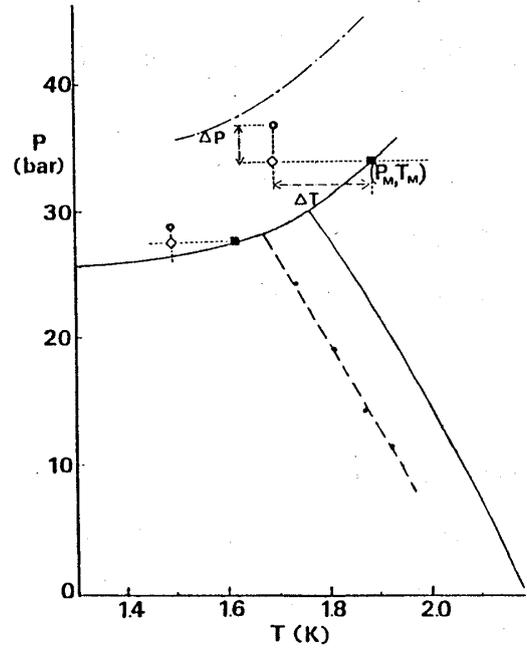


図2 ^4He の P - T 相図上に実験時の設定を示す。○◇は図1に示した凍上面付近でのバルクの固体と多孔質中の液体の点。■は圧力 P_l での融点。-はバルクの ^4He の相図, ...は多孔質ガラス中の超流動転移。多孔質ガラス中の液相-固相転位の一例として Adams ら³⁾ が得た融解曲線を---で示す。

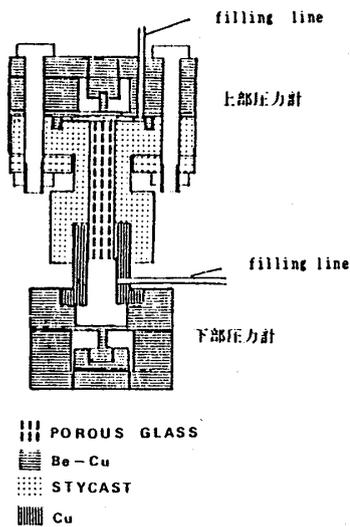


図3 試料室の構造

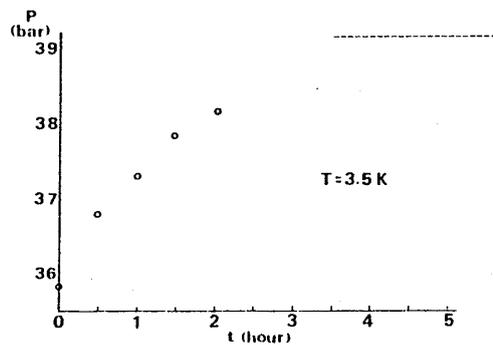


図4 多孔質中の液体の流れの測定。下側を 39.1 bar (破線で示す) に保ったときの上側の圧力の時間変化

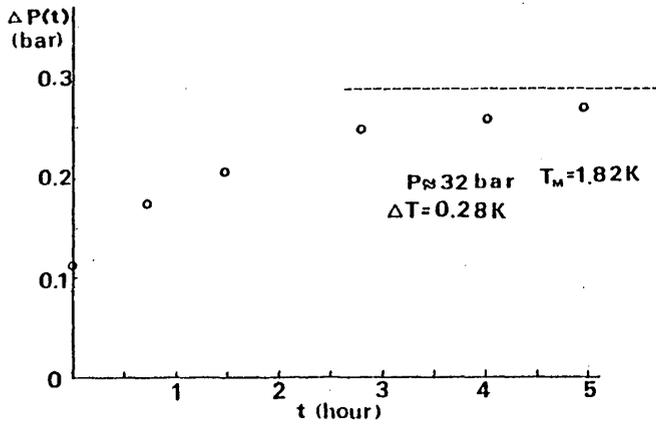


図5 多孔質ガラス中が常流動状態の液体の場合の凍上力 $\Delta P(t)$ の時間変化

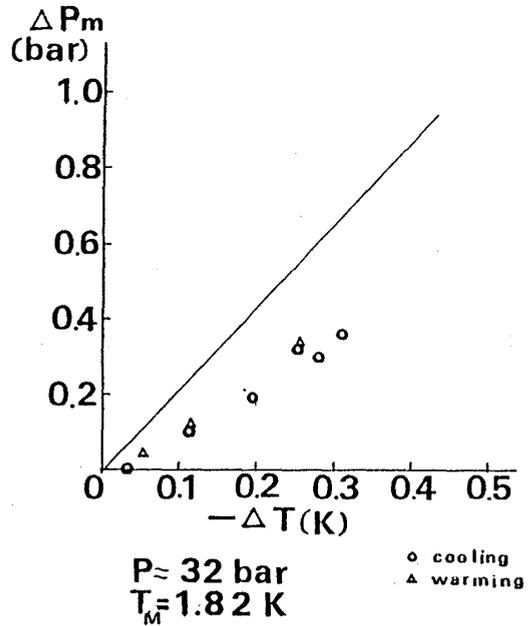


図6 多孔質ガラス中が常流動状態での最大凍上力 ΔP_m と $\Delta T = T - T_M$ の関係。実線は変形された Clausius-Clapeyron の式を示す。

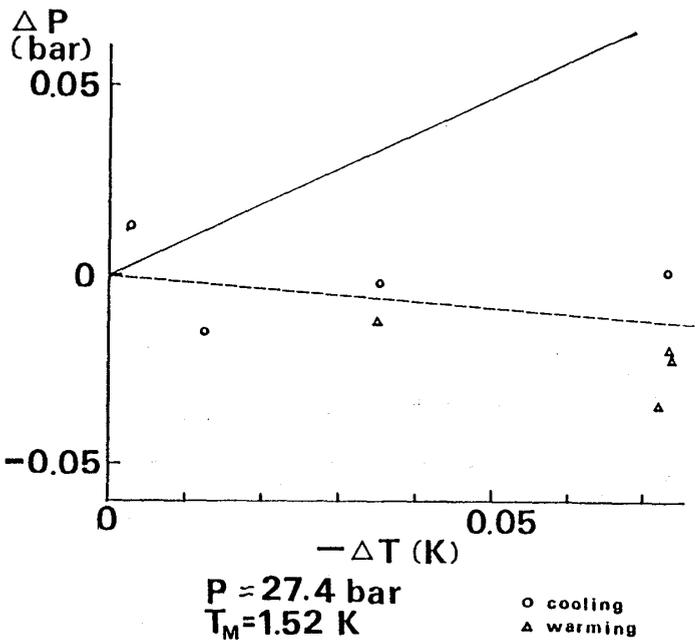


図7 多孔質ガラス中が超流動状態での $\Delta P = P_S - P_{\text{down}}$ と $\Delta T = T - T_M$ の関係。実線は変形された Clausius-Clapeyron の式。破線は(2)式で与えられる ΔP 。

測された最大凍上力は、それより小さい。

上に述べた実験では、多孔質ガラス中は常流動状態であったが、超流動状態での実験も試みた。多孔質ガラス中の超流動転移は低温側にずれる。そこで、その転移点を調べるために、Smithらの方法⁵⁾に習って、多孔質ガラスの一端の圧力変化に対するもう一端側の反応時間によって決定した。超流動状態での0.1 bar程度の加圧に対する反応は非常にすみやか(数秒程度)であった。図2に・で示したのが得られた転移点である。バルクが固体になる圧力以上の多孔質ガラス中の液体の超流動転移は、この試料室では測定できないので、この転移線を外挿した。

多孔質ガラス中をすべて超流動状態でつなぐために、試料室下部を多孔質ガラス中の超流動転移点以下の温度に設定する必要がある。今回の実験では、試料室下部を上記の温度域で、バルクの融解曲線上に設定し、上部で凍上させた(図2)。上部の固体の圧力変化が落ち着くまでにある程度の時間を必要としたので、30分経過したのちの、 $\Delta J = P_s - P_{\text{down}}$ と ΔT の関係を図7に示す($T_M = 1.52 \text{ K}$, $P = 27.4 \text{ bar}$ 付近, P_{down} は下部圧力計の示す圧力)。実線は変形されたClausius-Clapeyronの式を示す。この結果は凍上を示していないが、次のように考えることができる。多孔質ガラスの両端には温度差があるので、噴水圧 $\Delta P_F = (S_1/V_1)\Delta T$ が生じていると考えられる(S_1 , V_1 は液体1モルあたりのエントロピー及び体積)。一方、最大凍上圧は、 $\Delta P_m = -(S_1 - S_v)\Delta T/V_s$ ((1)式)。従って観測される ΔP は次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_F + \Delta P_m \\ &\approx \frac{S_v}{V_s} \Delta T \end{aligned} \tag{2}$$

この図を図8に破線で示した。しかし、今回の実験では、圧力の測定精度は十分とはいえず、また、圧力を外部から制御できないので、これらの点を改良して精度を上げた実験を行うことが必要である。

おわりに

⁴He-多孔質ガラスにおいても、凍上現象を観測することができた。予想通り、凍上平衡に達するまでの時間は従来の場合に比べて非常に短かった。問題点として、

- 1) 最大凍上圧 P_m が変形されたClausius-Clapeyronの式で与えられる値より小さいこと。
- 2) 超流動状態では、さらに精度よい測定を行い、噴水圧を実測して、最大凍上圧を正確に補

正すること。

3) 凍上速度に関する実験を行うこと。

が挙げられる。

本研究は、恒藤敏彦先生、巽友正先生から凍上の物理の話を教えていただいたのをきっかけに始まりました。また、平井章先生には本研究中いろいろなコメントや議論をいただきました。ここに、各氏に厚く感謝いたします。

文 献

- 1) 恒藤敏彦, 物性研究 **41**, 440 (1984).
- 2) M. Shimoda, T. Mizusaka, M. Hiroi, A. Hirai and K. Eguchi, J. Low. Temp. Phys. **64**, 285 (1986).
- 3) E. D. Adams, K. Uhlig, Yi-Hua Tang, and G. E. Haas, Phys. Rev. Lett. **52**, 2249 (1984).
⁴He の液相-固相転移については、他に 2), 3), 5) にあげられた文献を参照。
- 4) 木下誠一編 “凍土の物理学”, 森北出版, 1982.
第4章「凍上力と凍上機構」(高志勤)を参照。
- 5) Cao Lie-zhao, D. F. Brewer, C. Girit, E. N. Smith and J. D. Reppy, Phys. Rev. **B 33**, 106 (1986).