

Heにおける凍上現象

京都大学 理学部 水崎隆雄

凍上現象とは寒冷地などで土が凍結し、地面が隆起する現象である。土などの多孔質物質中では氷点下でも凍らない不凍水が存在する。その不凍水が土中の間隙に出来たバルクの氷晶（その形からアイスレンズと云われる）に吸い寄せられ、アイスレンズが成長するに従って凍土全体に大きな体積膨張が起こることが凍上の機構である¹⁾。凍上現象は凍土の隆起現象のみならず、食品の冷凍、生体細胞の低温保存や地下工事などにおいて水分の多い土壌を凍結して安定化させる凍結工法などに重要な影響をもつ現象であり、多くの分野で広く研究されてきた。実際の凍上現象は多孔質物質の粒径分布、不純物効果やアイスレンズの周辺での部分凍結土中の物質移動機構等、大変複雑な状況が絡み合っ起こる非平衡、開放系の現象であり、その基本的機構について十分に解明されているとは云えない。

凍上機構の基本的な問題としては、バルクの融点以下でも凍らない多孔質物質中の液体とバルクの固体の界面が微視的にどのような状態にあるのかということと、そこでの結晶成長機構を解明することが挙げられる。そのためには理想化、単純化された状況下での凍上実験を行うことが重要であり、⁴Heによる多孔質ガラス上の凍上を研究した²⁾。多孔質ガラス中の細孔径分布は非常に均一であり、⁴Heの液体の固化する温度がバルクのものより大きく低温、高压側にずれているので、適当な条件下では多孔質中は液体、その外側の部分は固体、凍上面は多孔質ガラスの表面という明確な状況（完全凍上と呼ばれている）での実験が可能である。常流動⁴Heの粘性は室温の水と比較して2桁程小さく、さらにある温度以下では多孔質ガラス中の液体⁴Heも超流動になり完全に粘性がなくなるので、多孔質中の物質移動が容易であり、かつ実験的に制御出来る。⁴Heは非常に純粋な物質であり、不純物効果は無い。これらの理由から⁴Heを用いた多孔質ガラス上の凍上は明確に制御された完全凍上実験である。また現在までに水以外に2、3の物質で凍上が観測されているが³⁾、現象の普遍性を検証する上で絶対零度近傍での⁴Heを用いての凍上の検証は重要である。

まず、凍上現象の静的性質、すなわち凍上が平衡状態になる時の最大加重（最大凍上圧と云う）について述べる。凍上面の温度を T とし、そのときのバルクの融解温度 T_m として、最大凍上圧 ΔP_{FH} は

$$\Delta P_{FH} = \frac{L}{V_S T_m} \Delta T_m - \frac{C_L}{2V_S T_m} \Delta T_m^2 \quad (1)$$

で与えられることを実験的に確認し、⁴Heにおいても普遍的に凍上現象が起こることを示した。ここで $\Delta T_m = T_m - T$ であり、 L , V_S , C_L は各々固体の融解潜熱、分子容、液体の比熱である。ただし融解圧の最小値近傍の固体⁴Heでは凍上現象が観測されなかったため、今後詳細に調べる必要がある。(1)式は既に水の場合に観測されているが⁴⁾、水の場合は実測された ΔT_m が小さい範囲であるので第一項のみで十分である。(1)式は凍上面で圧力のとび

ΔP_{FH} があるとして $\mu_L(T, P) = \mu_S(T, P + \Delta P_{FH})$ の熱力学的平衡条件より導かれることを示した²⁾。

凍上面での微視的な機構を探る上では凍上の動的性質、特に凍上速度を V としてその凍上速度係数、 $K = V/(\mu_L - \mu_S)$ の測定が重要な情報を与える⁵⁾。この場合、多孔質ガラス中の液体⁴Heが超流動状態において、 K を温度、圧力および多孔質ガラスの細孔径を変えて調べることにより、凍上面での微視的観点からの物質移動機構と結晶成長機構の情報を得られることが期待される。 K の予備的実験の結果では、 K の細孔径と温度の依存性は小さく、バルクの固体の結晶構造がhcpとbccの場合で大きく異なった。今後 K についての詳細な研究が必要である。

1) 木下誠一編、凍上の物理学 (森北出版、1982)

2) M. Hiroi, T. Mizusaki, T. Tsuneto, A. Hirai and K. Eguchi, Phys. Rev. B40, 6581, (1989)

3) S. Taber, J. Geol. 37, 428, (1929)

4) 高志勤、生頼孝博、山本英夫、岡本純、雪氷43、207、(1981)

F.J. Read and D.H. Oertle, in Permafrost, 2nd Int. Conf. (National Academy of Science 1973) p377

M.B.G.M. Biermans, K.M. Dijkema and D.A. de Vries, J. Hydrol, 37, 137 (1987)

5) T. Tsuneto, J. Phys. Soc. Jpn. 63, 2231 (1994)