

エアロジェル中でのヘリウム 4 の結晶化に見られる動的転移と臨界性

東工大院理工 野村竜司、増本亮太、松田弘文、上野健一、奥田雄一

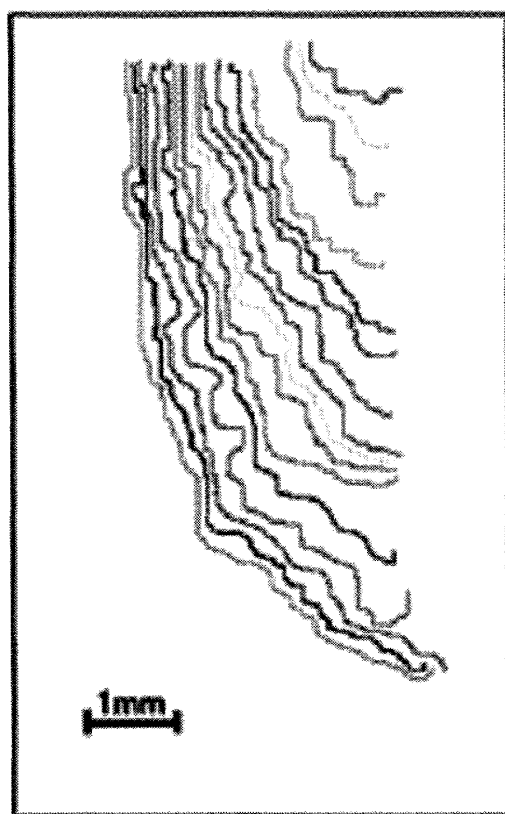
土中の水分が氷点下でも凍らないなど、多孔質中での相転移にかかわる現象は身近に存在する。霜柱形成は一例であり、寒冷地では道路や建物に大きなダメージを与えることで知られている。しかしよく制御した環境でこのような実験を行うことは簡単でなく、その物理的基礎についての理解は十分になされていない。我々はシリカエアロジェルという、シリカ粒子がナノメートル域でフラクタル的な構造を持つ多孔質中で、ヘリウム 4 の結晶化がどの様に進行するかを直接に可視化して調べた。エアロジェルは空孔率が非常に大きく透明であり、乱れの元で進行する一次相転移の動態を直接観測できる。一般に結晶化が進行するには、結晶の核生成、界面の進行、質量や潜熱の輸送、界面の濡れやピンニングなど複雑な過程が影響する。ヘリウムを用いた研究の最大の利点は、幅広い温度域で粘性の無い超流動状態での実験が可能であることにある。エアロジェル中での粘性流の影響を除去した実験が可能になり、結晶化の進行に本質的にかかわる現象を分離して観測できると思われる。体積可変セルを一定温度で収縮して加圧したときの、エアロジェル中で進行する結晶成長をシャドウグラフ法で観測した。

エアロジェル中は超流動ヘリウム 4 液体で満たされており、エアロジェル外部はヘリウム 4 固体が占めている低圧の初期状態から、外部固体を一定温度で塑性変形することによって加圧し、ある加圧量に達するとエアロジェル中で結晶化が始まる。高温ではエアロジェルの周囲から固液界面が現れ、ほぼ一定の速度で内部へ進行した。高温では熱揺らぎにより、ミクロなスケールのピン止め力を乗り越えることが出来るので、結晶成長が滑らかに進行したと考えられる。マクロには滑らかに進行したように見えるが、ミクロな雪崩の連続で成長していると思われる。しかし 650 mK を境として低温では界面の進行は間欠的になった。界面の一部分が非常に速く雪崩的に数 100 μm 進んで止まり、次に別の領域が雪崩を起こしということを繰り返して、全体として界面が進行した。熱揺らぎと乱れの競合による、固化様式の動的相転移を観測したと考えられる¹。

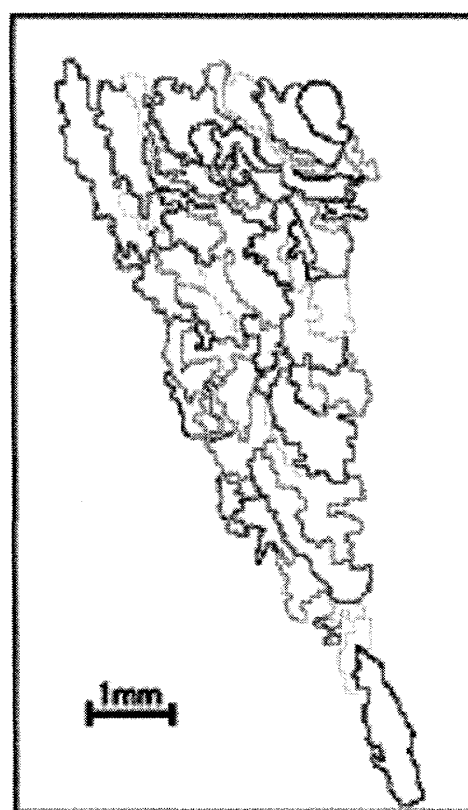
この観測で用いたエアロジェルは全面が剥き出しで、エアロジェル外のバルクヘリウム固体とは全面で接している。この観測からはエアロジェル中で生じた固体は、エアロジェル外のバルク固体が加圧によりエアロジェル中に浸入してきたか、バルク固体が一旦融解し液体状態でエアロジェル中に浸入した後、再結晶化したかを区別できない。結晶化にともなう質量輸送機構を明らかにすることは、動的相転移の理解にも重要であるが、結論が得られていなかった。我々はエアロジェルとバルク固体の接触面積を制限することで、質量輸送についての情報が得られると考え、ガラスチューブ内に作成したエアロジェルを用いて同様の実験を行った。この場合、生成した固体は外部の固体と一切接しておらず、エアロジェル中に直接核生成した。したがって外部のバルク固体がエアロジェル中に侵入して生じることはあり得ない。バルク固体は一旦融解して液体として

エアロジェル内に入り、再結晶化するという質量輸送機構が明らかになった²。

エアロジェル中の結晶成長速度の測定も行った。高温域では温度の低下とともに遅くなり、熱活性型の温度依存性を示し、熱揺らぎによる成長を支持する結果となった。乱れによるポテンシャルは約1Kであった。更に冷却すると成長速度は、中間温度で小さい極小値をとったのち少し増加し、低温域では温度変化しなかった。低温域では巨視的量子トンネル効果によって乱れを超えている可能性がある。また低温域での雪崩のサイズ分布を調べたところ、冪的依存性を示し臨界的振舞いが見られた。量子的成長と思われる低温極限で、このような自己組織化臨界現象が見られたとすると興味深い。



高温での滑らかな界面進行



低温での雪崩的界面進行

1. R. Nomura, A. Osawa, T. Mimori, K. Ueno, H. Kato and Y. Okuda
Phys. Rev. Lett. **101**, 175703 (2008)
2. K. Ueno, R. Masumoto, T. Mimori, A. Osawa, R. Nomura and Y. Okuda
J. Low Temp. Phys. **158**, 490 (2010)