

ヘリウム吸着膜の摩擦

電通大 檜枝 光憲, 西野 知範, 鈴木 勝¹
 東大院総合 和田 信雄

近年、原子間力顕微鏡（AFM）に代表される新しい実験技術と計算機の発達により、原子スケールの摩擦研究が可能になった。その研究の一つとして、平坦な基板上の吸着膜の界面摩擦に興味を持たれている [1]。Krim らは 77K で水晶マイクロバランスを用いて貴金属基板上に吸着した希ガス吸着膜の界面摩擦を測定した [2]。測定の結果、彼等らは、吸着膜の界面摩擦は滑り速度に比例した粘性的な摩擦であること、また液相膜に対して不整合固体相膜の摩擦力はやや小さいことを見出した。一方、松川ら [3] の吸着膜のモデル計算では、界面摩擦は基板－吸着原子間の分子間力に強く依存し、分子間力が弱い場合は静摩擦力がゼロになる。

松川らの計算に従うと、基板との分子間力が非常に弱いヘリウム吸着膜は他の吸着膜よりも滑り易いことが期待され興味深い。以上から、我々は超音波を用いてヘリウム単原子層膜及び 2 原子層膜の界面摩擦の研究を行った [4]。図 1 に実験で吸着基板として用いた 2 次元多孔体ヘクトライトの模式図を示す。ヘクトライトは $500 \text{ m}^2/\text{g}$ 程度の大きな比表面積を持ち、その表面は原子スケールで平坦である。

はじめに、吸着膜が多孔体試料ペレットの音速と吸収に与える影響を説明する。吸着膜は基板振動に対して滑り、吸着膜－基板界面に摩擦力が働く場合を考える。吸着膜のスリップ時間を τ とすると、単位面積あたりの摩擦力 F は $F = \sigma V / \tau$ (ここで、 σ は吸着膜の面密度、 V は吸着膜の基板に対する滑り速度である。) と表される。摩擦力の大きさ

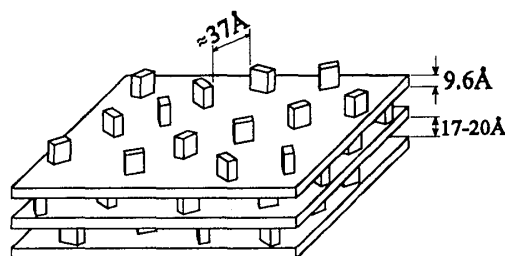


図 1: ヘクトライトの構造

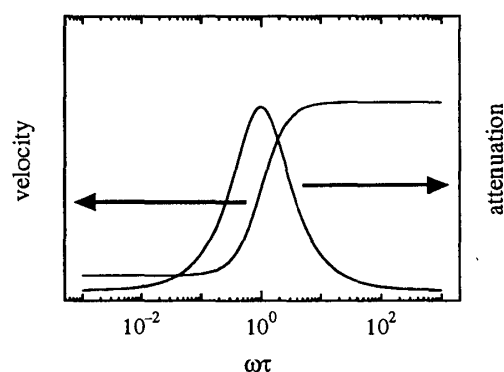


図 2: 吸着膜の摩擦による音速と吸収の変化

¹E-mail: suzuki@phys.uec.ac.jp

を特徴づけるスリップ時間 τ は滑り速度が $1/e$ になる時間に対応する。このとき多孔体試料ペレットの音速と吸収は吸着膜との摩擦力により変化する。吸着膜がないときの試料ペレットの密度と音速をそれぞれ ρ_{sub} 、 v_0 とすると、音速と吸収の変化は以下のように求められる。

$$\frac{\Delta v}{v_0} = -\frac{\Delta \rho}{2\rho_{sub}} \left\{ \chi_n + \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} (1 - \chi_n) \right\} \quad (1)$$

$$\Delta \alpha = \frac{\Delta \rho \omega}{2\rho_{sub} v_0} \cdot \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} (1 - \chi_n) \quad (2)$$

ここで、 χ_n は吸着膜が基板振動に追従する割合を表し、表面の形態等に依存する。 $\Delta \rho$ は吸着膜の密度、 ω は超音波の角振動数である。音速と吸収の変化は、スリップ時間 τ と基板の振動数 ω との積 $\omega \tau$ で決まる (図 2 を参照)。 τ が十分小さく $\omega \tau \ll 1$ の場合、吸着膜は基板振動に追従する (locking 状態)。 τ が長くなると吸着膜は基板振動からスリップし、音速が増加する。さらに、 $\omega \tau \gg 1$ では吸着膜は基板振動に追従しない decoupling 状態になる。また、 $\omega \tau = 1$ で吸収ピークが生じる。

測定したヘリウム (^4He) 吸着膜の音速と吸収の温度変化を図 3 に示す。ここでは、2 原子層膜の $0.11 \text{ atoms}/\text{\AA}^2$ 以上に限って話を進める。図に示した吸収については吸着膜がない試料のデータを、また音速については高温側から直線で外挿した温度依存性をバックグラウンドとして引いた。

吸着量 $\sim 0.15 \text{ atoms}/\text{\AA}^2$ 以上では、超流動相が出現することが知られている [5]。我々の測定においても、吸着量に依存してある温度以下で音速の増加が観測されている。この音速の増加は、超流動成分が基板振動に追従しなる decoupling と考えられる。超流動の場合でも表面の形態等によりすべての超流動成分が基板振動からスリップすることはない。超流動成分のスリップが観測される割合 $1 - \chi$ は、0.32 と求められた。

一方で、 $0.15 \text{ atoms}/\text{\AA}^2$ 以下の超流動相の現れない吸着量においても音速の増加と吸収ピークが観測された。我々は、この音速の増加と吸収ピークは吸着膜のスリップによると考えている。音速の増加は吸着量を増加に伴い減少し、 $T = 0 \text{ K}$ で液相が出現する吸着量 $\sim 0.15 \text{ atoms}/\text{\AA}^2$ で消滅した。 $0.110 \text{ atoms}/\text{\AA}^2$ の音速の温度変化から、吸着膜のスリップの割合 $1 - \chi_n$ を見積もると 0.35 となる。これは超流動成分のスリップが観測される割合とほぼ等しい。過去にグラフアイト上のごく微量の ^4He 単原子層がスリップしたという報告例 [6] はあるが、本実験のようにスリップが明瞭に観測されたのは初めてである。

次に、 $0.15 \text{ atoms}/\text{\AA}^2$ 以下の吸着膜のスリップによる音速の増加と吸収の温度依存性について議論する。我々は、式 (1)、(2) に現れるスリップ時間にアレニウス式 $\tau = \tau_0 \exp(E/k_B T)$ を仮定した。図 3 の実線はこの計算による曲線である。図から明らかなように、計算された曲線は実験結果を非常に良く説明する。これは熱緩和過程がヘリウム吸着膜のスリップに重要な役割を果たしていることを意味する。計算より得られた熱活性化エネルギー E は、吸着量 $0.110 \text{ atoms}/\text{\AA}^2$ で $\sim 5 \text{ K}$ を示し、吸着量が増加するとともに小さくなり、 $\sim 0.15 \text{ atoms}/\text{\AA}^2$ でゼロになった。

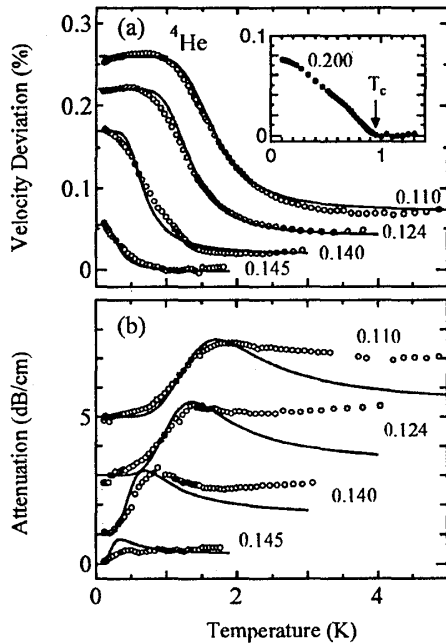


図 3: 2 原子層膜の音速と吸収の変化。実線はスリップ時間にアレニウス式を用いた計算。 $\sim 0.15 \text{ atoms}/\text{\AA}^2$ 以上で超流動転移を観測した（挿入図）。

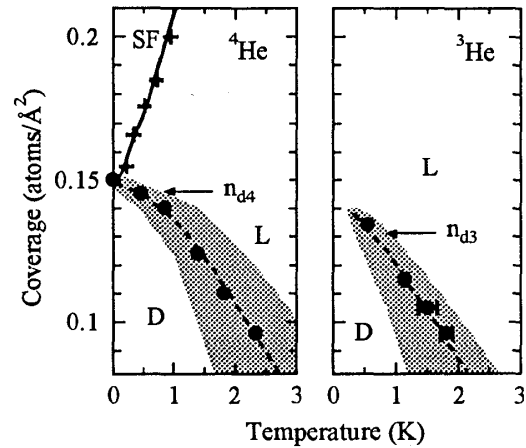


図 4: ヘリウム吸着膜の 10MHz 基板に対する応答状態。●と + はそれぞれ吸収のピーク温度と超流動転移温度をプロットした。応答状態は $\omega\tau$ に依存している。D: decoupling 状態 ($\omega\tau > 10$)、L: locking 状態 ($\omega\tau < 0.1$)、SF: 超流動。影を付けた領域は $0.1 \leq \omega\tau \leq 10$ のスリップ状態に対応する。

次に、観測されたスリップの温度依存性と膜構造の関係を議論したい。ヘリウム吸着膜の摩擦力は温度が低下すると小さくなる。これは吸着膜が基板ポテンシャルのピン止め障壁を熱的に超えてスリップするという単純な pinning-depinning のメカニズムでは説明できない。この場合は温度の低下とともにスリップが起こり難くなり、我々の測定結果と矛盾する。Krim らの水晶マイクロバランスの測定 [2] や分子動力学法によるシミュレーション [7] では、不整合固相が液相よりも摩擦力が小さい。本実験で観測されたヘリウム吸着膜の摩擦力の温度依存性も、低温で不整合固相、高温で液相になるという膜構造の変化に対応し、以下のように説明できる。つまり吸着膜には活性化エネルギー E を持った構造の乱れを作る熱励起があり、この膜の乱れが摩擦を増加させる。さらに、低温での液相の出現（超流動相）はスリップを妨げることから、低温での decoupling 状態は不整合固相、また locking 状態は吸着膜の一部が流体相の状態であることを示している。このようにヘリウム吸着膜の摩擦の性質と膜構造と密接に関係してる。

図 4 に 10MHz の基板振動に対する応答の状態に示す。吸収のピーク温度と超流動転移温度をプロットした。図中の D は decoupling 状態 ($\omega\tau > 10$)、L は locking 状態 ($\omega\tau < 0.1$)、SF は超流動状態である。影を付けた領域は $0.1 \leq \omega\tau \leq 10$ の吸着膜が基板振動に対してスリップを始める状態に対応する。

ここでは、我々のヘリウム吸着膜の界面摩擦の測定結果を述べた。 $\sim 0.15 \text{ atoms}/\text{\AA}^2$ 以

下の吸着量では、低温で界面摩擦が減少し吸着膜はスリップする。界面摩擦の温度依存性から、吸着膜の熱励起による構造の乱れが界面摩擦に重要な役割を担っていることが明らかになった。今後、異なる基板上のヘリウム吸着膜を調べることで界面摩擦と膜構造の関係がより明確になると期待される。

参考文献

- [1] 鈴木勝、固体物理、vol.35、No.10、845 (2000).
- [2] J. Krim, D. H. Solina, and R. Chiarello, Phys. Rev. Lett. **66**, 181 (1991).
- [3] H. Matsukawa and H. Fukuyama, Phys. Rev. B **49** 17286 (1994).
- [4] M. Hieda, T. Nishino, M. Suzuki, N. Wada, and K. Torii, Phys. Rev. Lett. **85**, 5142 (2000).
- [5] N. Wada, A. Inoue, H. Yano, and K. Torii, Phys. Rev. B **52**, 1167 (1995).
- [6] P. Mohandas, C. P. Lusher, V. A. Mikheev, B. Cowan, and J. Saunders, J. Low Temp. Phys. **101**, 481 (1995).
- [7] E. D. Smith, M. O. Robbins, and M. Cieplak, Phys. Rev. B **54** 8252 (1996).