

グラファイト基板上のHe吸着膜のスリップ現象

電気通信大学 電気通信学部 細見 斉子,¹ 滝沢 伸次, 渡 和久, 鈴木 勝

He吸着膜とグラファイト基板間の界面摩擦の性質を明らかにするため、水晶マイクロバランス法による測定を行った。測定の結果、原子層2層以上の不活性なHe吸着膜では低温で摩擦力が減少し基板振動に対してスリップする現象を見出した。スリップ開始温度はHe吸着膜の面密度に強く依存し、また摩擦力は粘性的摩擦ではなく基板振動に対して強い非線形性を示した。

1 はじめに

近年、原子スケールの摩擦が研究の対象となり、ナノトライボロジーと呼ばれる分野が生まれている。その中で物理吸着膜の摩擦は、摩擦の素過程の問題にミクロな視点からアプローチができるとして、実験的にも理論的にも興味をもたれている。1998年にKrimらは水晶マイクロバランス法(QCM)を用い、液体N₂温度でAu基板上のKr単原子層膜の摩擦力の測定を行った。[1] 測定の結果、Kr単原子層膜は摩擦力は大きいながら基板振動に対してある程度滑り、低面密度の液相では摩擦力が大きく、高面密度の不整合な固相では摩擦力が小さいと報告している。一方、我々の研究室では低温のHe吸着膜を用いて物理吸着膜の界面摩擦の研究を行っている。He吸着膜の選択の利点は、He原子は基板との相互作用が小さく多様な現象が期待でき、また低温環境では清浄な基板を長時間維持できることである。これまでに超音波測定法を用いた2次元多孔質基板ヘクトライト上のHe吸着膜の摩擦力の研究を行ってきた。[2] その結果He吸着膜の摩擦が膜の構造に依存すると示唆された。現在、グラファイト基板上のHe吸着膜の摩擦力の測定を行っている。

2 実験方法

グラファイト基板に吸着したHe吸着膜の界面摩擦の測定は、水晶マイクロバランスを用いて行った。[3] ATカット水晶は両面の電極間に交流電圧を加えることで横ずれ振動を起こす。実験では基本周波数が5MHzおよび3MHzの水晶のAg電極上にグラファイト(Grafoil)を圧着して試料を用意した。グラファイトに吸着したHe吸着膜の摩擦力が減少し基板振動に対してスリップが起こると、有効な質量が減少することにより共振周波数が上昇する。また、これに対応して共振のQ値も変化する。実験では⁴He吸着膜の面密度ごとに基板温度を変化させてそのときの共振周波数とQ値を測定した。

¹ E-mail: hosomi@phys.uec.ac.jp

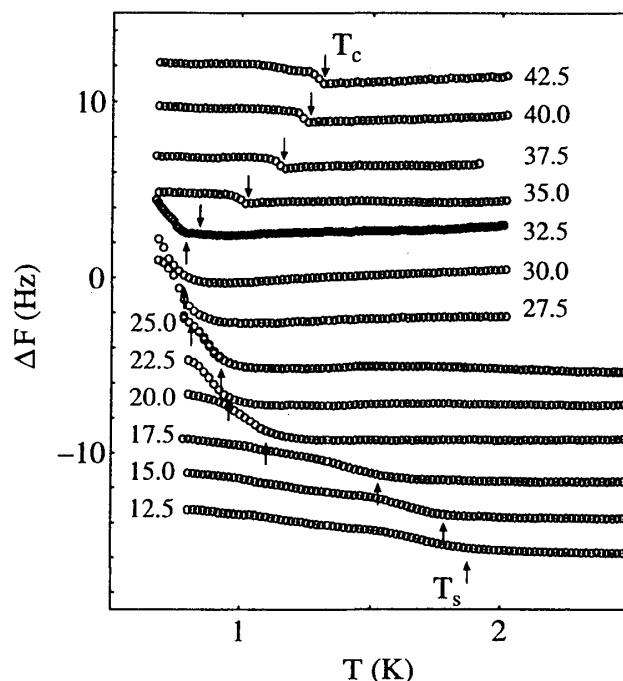


図 1: ^4He 吸着膜の面密度ごとの共振周波数の温度変化. 図中の数値は ^4He 吸着膜の面密度を表し, 単位は atoms/nm^2 である. 矢印はスリップ開始温度 T_s (上向き) および超流動開始温度 T_c (下向き) を表す. 共振周波数は面密度ごとにシフトして示している.

3 結果と議論

図 1 に ^4He 吸着膜の面密度ごとの水晶の共振周波数の温度変化を示す. この測定では基本共振周波数が 5MHz の水晶を用い, 基板振幅は 2.0 nm で行った. 各面密度での低温における共振周波数の上昇はその温度以下で ^4He 吸着膜が基板振動に追従できなくなったことを意味している. 4 原子層完結 ($35\text{ atoms}/\text{nm}^2$) 以上から 1 K 以上で見られる周波数の階段状の上昇は ^4He 吸着膜の 2 次元超流動転移に対応する. 一方, 4 原子層完結 ($35\text{ atoms}/\text{nm}^2$) 未満では, この温度域で超流動は観測されないことが知られている. したがって, 1 原子層完結 ($12.5\text{ atoms}/\text{nm}^2$) 以上から見られる周波数の上昇は, 不活性な ^4He 膜の界面摩擦が減少し ^4He 吸着膜がスリップしたことを意味する. またこのスリップによる周波数の上昇は, 2 原子層完結 ($18\text{ atoms}/\text{nm}^2$) を境に緩やかな上昇から急な上昇へと変化した.

基板表面の形状によりスリップと超流動の観測される ^4He 吸着膜の割合は制限される. 4 原子層完結以上で観測された超流動による周波数の上昇は K-T 転移であるから, 超流動の面密度と転移温度のユニバーサルな関係を用いることにより周波数変化とそれに対応する面密度を決定できる. スリップと超流動の観測される割合が同じであると仮定するとスリップする膜の面密度は吸着させた膜の面密度にほぼ等しいという結論が得られる. 以上のことにより, 我々は不活性な ^4He 膜のスリップは ^4He 吸着膜と基板間で起きていると考えている.

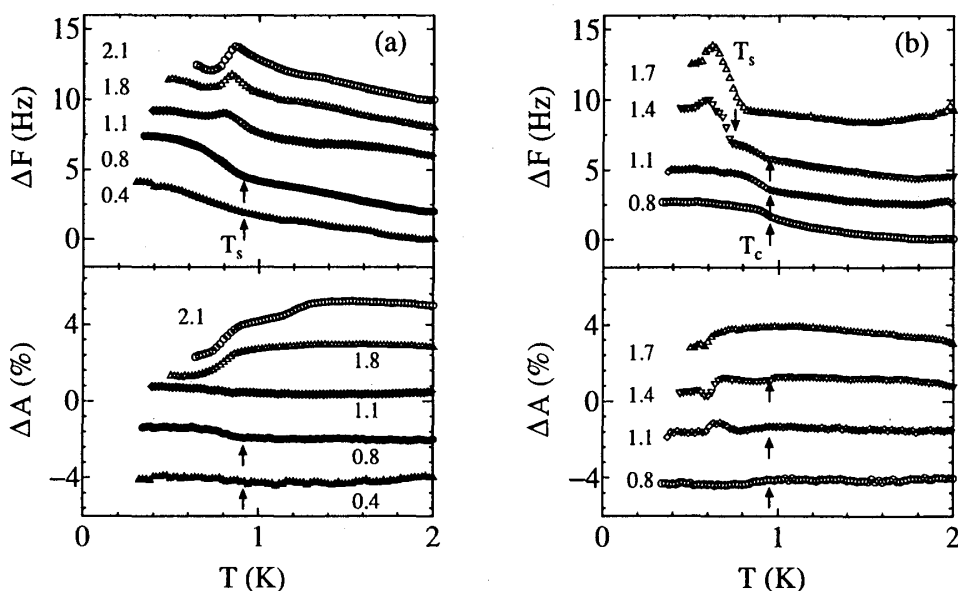


図 2: 水晶の基板振幅に対する共振周波数および共振の Q 値の変化. (a) は不活性な ^4He 膜 (3 原子層完結 (27.5 atoms/nm^2)), (b) は超流動 ^4He 膜 (4 原子層完結 (35 atoms/nm^2)). 図中の数値は基板の振幅の大きさを表し単位は nm である.

He 吸着膜の摩擦力の基板振動振幅に対する依存性を調べるためにさまざまな基板振幅に対する共振周波数の温度変化を測定した. 図 2 に不活性な ^4He 膜および超流動 ^4He 膜における基板振幅の変化に対する共振周波数と共振の Q 値の変化を示す. 図 2(a) は不活性な ^4He 膜であり超流動は観測されない. この膜では基板振幅の小さいときはスリップによる周波数の上昇は小さい. しかし基板振幅を大きくしていくと周波数は 1 K 程度ではっきりと上昇し, さらに大きな振幅においては 0.9 K 程度でピークを持った後に低温で抑制される. このようにスリップは基板振幅に対し強い非線形性を示す. 図 2(b) はおよそ 1 K で超流動が出現する ^4He 吸着膜である. 超流動により周波数の上昇する量は基板の振幅が小さいときは変わらない. 一方, 基板の振幅が大きい場合に周波数の上昇が超流動転移温度より低温側で観測される. これは ^4He 吸着膜の表面層の超流動のしたの ^4He 固相膜が基板振動に対してスリップを起こしたことを意味する. このように大きな振幅のもとでは超流動とスリップが同時に観測されることが明らかとなった.

これまでに得られた超流動転移温度 T_c およびスリップ開始温度 T_s を膜の面密度の関数として図 3 に示す. 5 MHz の水晶の T_s は 2 原子層ではおよそ 2 K であり, 2 原子層完結 (18 atoms/nm^2) 付近で急激に 1 K まで低下する. また高振幅においては超流動と同時にスリップを観測しており, 4 原子層完結 (35 atoms/nm^2) 以上から T_c 以下の温度で現れる T_s は, 完結までの T_s と滑らかにつながる. 一方, 3 MHz の水晶の測定における T_s は 2 原子層までは 5 MHz より低温であり, 3 原子層ではほぼ等しくなる. これらの結果から, 2 原子層と 3 原子層以上では界面摩擦の性質が異なることが明らかになった.

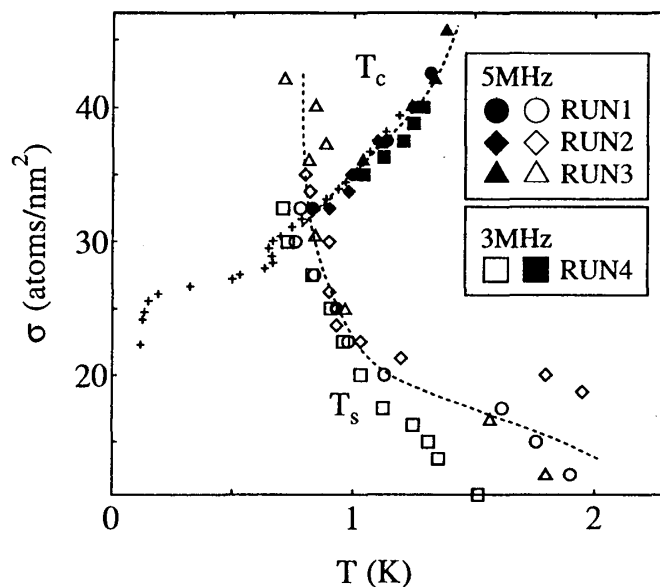


図 3: 超流動開始温度 T_c とスリップ開始温度 T_s の ^4He 面密度変化. 閉じた記号は T_c , 開いた記号は T_s を表す. 異なる記号は異なる測定回を意味する. 十字の記号は Reppy 等の行ったねじれ振子の実験により得られた T_c である. [4]

4 まとめ

He 不活性膜の摩擦力が低温で著しく小さくなる現象は 2 次元多孔質基板でも観測されている. これらの He 吸着膜の摩擦力の減少は, 吸着膜が高温の液体的な状態から固相的な状態へと変化することで定性的に説明される. しかし, グラファイト基板ではヘクトライト基板と異なり, 多原子層膜においても低温での摩擦力の減少が観測され, 摩擦力は基板振動振幅に依存する. また, グラファイト基板上の ^4He 吸着膜においては 2 原子層と 3 原子層以上とでは摩擦力の性質が異なる. このように, 基板と He 吸着膜の性質を変えることで摩擦力が多様な振る舞いを示すことが明らかになった. 今後, 基板と He 吸着膜の性質を系統的に変化させ摩擦力を調べることにより, 摩擦の素過程についての知見が得られるものと考えられる.

参考文献

- [1] C. Mak and J. Krim, *Phys. Rev. B* **58** (1998) 5176.
- [2] M. Hieda, T. Nishino, M. Suzuki, N. Wada, K. Torii, *Phys. Rev. Lett.* **85** (2000) 5142.
- [3] N. Hosomi, M. Suzuki and M. Hieda, *J. Low Temp. Phys.* to be published.
- [4] P. A. Crowell and J. D. Reppy, *Phys. Rev. B* **53** (1996) 2701.