

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18740223

研究課題名 (和文) 微細構造による超流動ヘリウム3薄膜の量子位相制御

研究課題名 (英文) Manipulation of quantum phase of superfluid helium-3 by micro fabricated device

研究代表者

齋藤 政通 (SAITOH MASAMICHI)

独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・協力研究員

研究者番号：70415165

研究成果の概要：

くし型電極と呼ばれる微細加工で作成した装置を1 mK以下の超低温度で用いることで、超流動ヘリウム3薄膜を自在に制御し、新たな巨視的量子現象の舞台としての可能性を探った。その結果、超流動転移温度の膜厚依存性を精密に測定することができ、超流動ヘリウム3薄膜の制御に必要な重要な知見を獲得することができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,000,000	0	2,000,000
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	180,000	3,780,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：超流動ヘリウム3、臨界温度、サイズ効果、微細加工、超低温、ジョセフソン接合、異方的秩序変数

## 1. 研究開始当初の背景

2つの超伝導体を薄い常伝導金属や絶縁膜で隔てて形成されるジョセフソン接合は、古くから研究が行われ、従来型超伝導体ではSQUID素子などとして広く応用されている。一方、高温超伝導体や $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ など、非従来型と呼ばれる異方的超伝導体でもジョセフソン接合の研究が行われているが、内部自由度を持つ異方的クーパ対であることや、試料作製の難しさなどのため、未だ未解明な点が多い。

一方、 $^3\text{He}$ は絶対零度で液体として存在で

き、不純物のない代表的なフェルミ粒子系として、数々の重要な概念を理解する上で大きく貢献してきた。バルク超流動 $^3\text{He}$ は、約1 mKで $p$ 波クーパ対により超流動状態に転移する異方的超流動体として良く理解されている。超流動 $^3\text{He}$ においても超伝導体と同様に、2つの凝縮体を微小な穴で弱く接合させることでジョセフソン接合が形成されることが、カリフォルニア大バークレー校のグループにより確認されている。

$^3\text{He}$ は液体であるため、飽和蒸気圧下では(自由表面があるので)外場によってその形状を

変えることができる。したがって、外場によって何らかの制御を行うことで、超流動 $^3\text{He}$ では、接合の強さを連続的に変えられるジョセフソン接合として、固体試料である超伝導体では不可能な実験が可能と考えられる。接合部形状の連続的な変化という切り口での異方的超伝導・超流動のジョセフソン接合の実験はこれまでに無かった。

## 2. 研究の目的

飽和蒸気圧下の超流動 $^3\text{He}$ では、気液相境界は自由表面となり、その形状を外場により自由に制御できる可能性がある。したがって、接合部分の形状や接合の強さを連続的に制御可能なジョセフソン接合の実現が考えられる。すなわち、接合部の形状が実験的に制御可能なパラメータとして加わり、これまでに無い視点からのジョセフソン接合研究が可能となる。具体的には、巨視的トンネル現象におけるトンネル障壁の高さ、あるいはアンドレーエフ束縛状態の形成に關与するペアポテンシャルの高さを、連続的に制御することが可能になると期待される。

同一試料でのトンネル障壁の連続的制御は、固体試料である超伝導体では不可能であり、飽和蒸気圧超流動 $^3\text{He}$ がその可能性を秘めた唯一の研究対象と言え、この研究による異方的超流動・超伝導の境界や接合系での普遍的知見獲得が期待される。 $^3\text{He}$ でジョセフソン接合を実現したパークレーの実験は、微細な穴で接合された密閉容器の圧力を精密に測定することでジョセフソン振動を観測している。そのため、接合部の形状は一定である。また、SQUIDによる高感度測定であるため、磁場印加によりバルク超流動相を変えた実験も困難であった。

本研究では、後述するくし型電極を用いた手法により、飽和蒸気圧下で超流動 $^3\text{He}$ 薄膜の形状を制御することで、自由表面下での超流動 $^3\text{He}$ ジョセフソン接合の実現を目指し、それに向けた基礎的知見の獲得を目的とした。

## 3. 研究の方法

くし型電極とは、図1にあるような、櫛の形をした電極2つが入れ子に配置されることで形成される、1対の平面展開型コンデンサーである。液体 $^3\text{He}$ は誘電体なので電極への印加電圧により静電的に制御・測定することができる。

図1のように、上側・下側の2対のくし型電極をバルク液面に対し垂直に設置し、上側電極に十分高い電圧(厚い膜: 超流動状態)を印加、下側電極に低い電圧(薄い膜: 常流動状態)を印加することで、バルクと上側電極上の超流動が弱くつながり、ジョセフソン接合の形成が可能と考えられる。

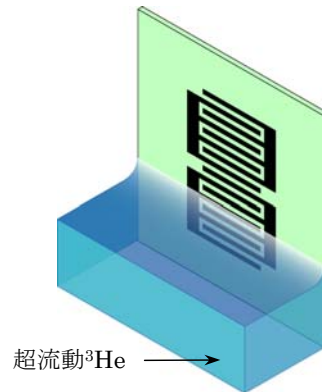


図1 くし型電極

### (1) 超流動転移温度の膜厚依存性

このため、くし型電極上で常流動-超流動状態を制御する上で、 $^3\text{He}$ 薄膜の超流動転移温度の膜厚依存性が、非常に重要な情報となる。上側電極へある直流電圧を印加した場合のフィルムフローの様子は、電極間の静電容量を測定することで測定できる。このとき、バルクから上側への流れの途中で下側電極を通ることとなる。この下側電極上の膜厚は、印加電圧によって変えることができるので、超流動転移温度の膜厚依存性を測定することができる。

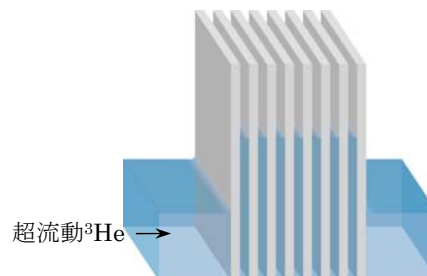


図2 液面制御装置

### (2) 磁場による超流動相の選択と温度計の導入

飽和蒸気圧下の $^3\text{He}$ では、バルクでの安定な超流動相はB相のみであるが、磁場を印加することで、A相を出現させることができる。したがって、磁場の印加により、内部自由度を持ったp波超流動体の特性をより多角的に調査できる。磁場中での実験を可能にするために、磁場中でも核比熱の小さい銀を使用して実験セルを作成した。また、磁場中では、ローレンツ力を利用した振動ワイヤーにより、液体 $^3\text{He}$ の温度を直接測定することが可能

なので、温度測定の信頼性向上を狙い振動ワイヤー温度計を設置した。

### (3) バルク液面の制御

ジョセフソン接合形成のためには、2つの超流動体を隔てる常流動領域をコヒーレンス長程度の数百nmオーダーの狭い領域に限定する必要があり、バルク液面位置の精密な調整が必要となる。通常、超低温下でバルク液面を制御するには、伸縮性のあるペローズとこれを駆動するためにもう1系統の加圧用ラインを備えた複雑な装置を備えた実験セルが必要となるが、図2のような平行平板コンデンサーによる静電的な液体<sup>3</sup>Heの制御という、極めてシンプルな機構でのバルク液面制御を開発した。これは厚さ0.1 mmの銀板60枚を0.1 mm間隔で並べて形成された並行平板コンデンサーであり、くし型電極と同様に、平行平板間への印加電圧 $V_{LLC}$ により液体<sup>3</sup>Heを操作する仕組みとなっている。

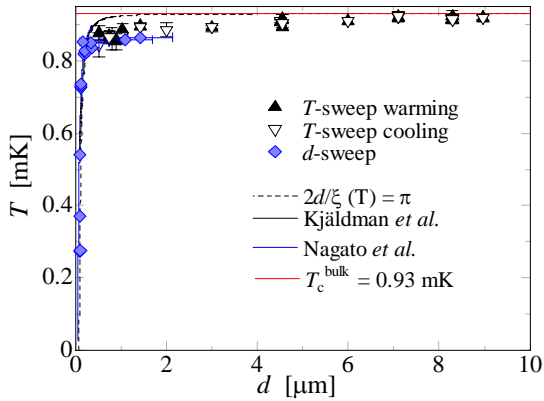


図3 超流動転移温度の膜厚依存性

## 4. 研究成果

### (1) 超流動転移温度の膜厚依存性

実験の結果、<sup>3</sup>He薄膜の超流動転移を観測し、0.1~8 μmの膜厚範囲にわたり転移温度の膜厚依存性測定することができた(図3)。実験では、くし型電極と液面制御装置とで同時測定を行ったので、薄膜の超流動転移温度を、バルクでの転移温度からの差として精密に測定することができた。厚い膜でのバルクとほぼ同じ転移温度から、薄い膜でのサイズ効果による転移温度の低下を、膜厚依存性として捉えることができた。特に、膜厚0.2 μm以下から転移温度が急激に下がる様子を、温度を固定し膜厚を変えて超流動転移を観測する手法で確認することができ、これまでに観測されたもっとも低い転移温度 0.27 mKを確認することができた。

### (2) 磁場中での結果

0.3 テスラの磁場中で、系全体をA相にした場合でも、同様に超流動転移温度の膜厚依存性を測定した。その結果、ゼロ磁場中とほぼ同じ膜厚依存性が得られ、ゼロ磁場中の薄膜において予測されている、常流動相からA相への転移と合致する結果となった。

また、振動ワイヤー温度計により、温度測定の信頼性が向上された。

### (3) バルク液面の制御

図4の白丸は、 $V_{LLC}$ に対するバルク液面の变化 $\Delta h$ をくし型電極の静電容量の変化として測定した結果である。この結果200Vの印加電圧に対し約0.2 mmのバルク液面変化が観測された。印加電圧に対し2乗で液面が変化の様子が確認でき、容器内の液面断面積と液面制御装置内の液体断面積の比から、定量的にも一致する結果が得られた。これにより、バルク液面位置を精密に制御できることが分かった。

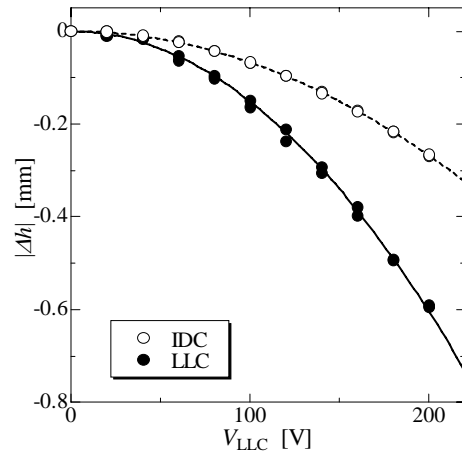


図4 バルク液面位置の印加電圧依存性

以上の結果より、磁場中の飽和蒸気圧超流動<sup>3</sup>Heにおいてジョセフソン接合を実現するための重要な情報として、転移温度の膜厚依存性を広い膜厚範囲において確認することができた。また、バルク液面位置を精密に制御する技術を確認することができた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① M. Saitoh、K. Kono、“Thickness Dependence of Critical Current of Superfluid  $^3\text{He}$  Film”、Journal of Low Temperature Physics、148、483-487、(2007 年)、査読有

[学会発表] (計 5 件)

① M. Saitoh、K. Kono、“Dynamic Property of Dissipative Flow of Superfluid  $^3\text{He}$  Film”、International Symposium on Quantum Fluids and Solids、2007 年 8 月、Kazan Russia

② 齋藤政通、池上弘樹、河野公俊、「膜厚制御によるサブミクロン $^3\text{He}$ 薄膜の超流動転移」、日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月、東京

③ 齋藤政通、池上弘樹、河野公俊、「くし型電極による超流動 $^3\text{He}$ 薄膜の磁場中測定」、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月、盛岡市

④ 齋藤政通、河野公俊、「膜厚制御による超流動 $^3\text{He}$ サブミクロン薄膜の相転移観測II」、日本物理学会 2006 年秋季大会、2006 年 9 月、千葉市

⑤ M. Saitoh、K. Kono、“Thickness Dependence of Critical Current of Superfluid  $^3\text{He}$  Film”、International Symposium on Quantum Fluids and Solids、2006 年 8 月、京都市

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

**齋藤 政通 (SAITOH MASAMICHI)**

**独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・協力研究員**

研究者番号：70415165