

## 角度分解熱膨張測定による強相関電子系の研究

田山 孝 富山大学理学部



### はじめに

異方的超伝導は従来の超伝導理論（BCS 理論）では説明がつかず，その機構解明は現在の固体物理学の重要な研究課題の1つとなっている．異方的超伝導の機構解明には超伝導の秩序変数を明らかにする必要がある．それには超伝導ギャップのノード構造を決定することが重要となる．点状や線状のノードが存在するかどうかについては比熱や核磁気緩和率の温度変化が温度のべき乗則に従うかどうかで分かるが，運動量空間のどの方向にノードが存在するのまでは分からない．近年，この問題に関して超伝導混合状態における比熱や熱伝導度の磁場方向依存性からノード構造を明らかにする研究が，主に国内の研究者によって精力的に行われ，大きな成果を収めている．例えば，重い電子系超伝導体  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  のギャップ構造については，比熱と熱伝導度の磁場依存性の測定から明らかにされ，結論は整合している．一方，重い電子系超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  の場合，当初の比熱と熱伝導度から得られた結論は一致しなかった（最近， $\text{CeCoIn}_5$  の比熱の結果については， $T_c$  の10分の1以下の十分な低温まで実験を行うと，熱伝導率から得られた結論と矛盾しないことが報告されている<sup>1)</sup>）．このようなとき，他の物理量の磁場角度依存性からも超伝導ギャップ構造の情報が得られると，問題解決の糸口となりうる．

理論的には，磁化の磁場角度依存性からも超伝導ギャップ構造を探ることは可能であるとされている．そのような実験的試みは，以前所属していた東大物性研榊原研究室で行われていた．しかし残念ながら，磁化測定では超伝導ギャップのノード構造を探るのに必要な測定精度を得ることは難しいことがわかった．磁化以外の有力な候補としては熱膨張率がある．一般に比熱と体積熱膨張率の間には熱力学関係式が成り立っているが，測定で得られるのは体積熱膨張率ではなく線熱膨張率である．そのため，線熱膨張率から比熱と同じように超伝導ギャップ構造の情報が得られるかどうかは自明ではないが，可

能性としては考えられる．そこで，数年前から熱膨張の精密な磁場角度依存性測定装置の開発を行っているので，ここに紹介する．

### 角度分解熱膨張測定装置の開発

熱膨張測定には歪みゲージ法，キャパシタンス法，X線回折法，光学的測定法などがあるが，超伝導体のギャップ構造に起因した熱膨張の磁場角度依存性の変化はかなり小さなものになると予想される．このことから測定法としては最も感度がよいとされるキャパシタンス法を選んだ．キャパシタンス法は原理的に発熱の心配や磁場の影響をほとんど受けないため，極低温・強磁場での測定に向いているという点も選んだ理由の一つである．一方，キャパシタンス法の問題点は，平行板コンデンサーの平行度を保つために試料の向かい合う2つの側面を平行に精度よく加工する必要があることである．このことは小さな試料や柔らかい試料など成形の難しい試料の測定には不向きであることを意味する．また，様々な結晶方位の熱膨張を調べるためには1つの試料だけで行うことは難しく，いくつかの試料を用意する必要がある．このため，試料依存性の大きい試料の研究においても熱膨張測定は問題がある．他にもまだ理由はあると思うが，熱膨張は比熱や磁化と同じ基礎的な熱力学的物理量であるにもかかわらず，比熱や磁化ほど多くの研究者によって実験が行われていないのが実状である．

我々は少しでも熱膨張の実験を簡単にするため，精密な試料成形が必要のないキャパシタンス式の熱膨張計の開発を行った．これは長年培ってきたキャパシタンス式磁力計の技術を応用したものである．ここでキャパシタンス式磁力計の特徴について説明する．試料台は十字に交差させた燐青銅ワイヤー2本を2段にして，合計4本の燐青銅ワイヤーによって支えられている．このワイヤー構造により，試料台は水平を保ったまま上下動しやすくなっている．試料台の底面は平行板コンデンサーの可動電極面に

もなっているため、試料台が動いても平行板コンデンサーの可動電極面と固定電極面のあいだの平行度は保たれるというのがこの磁力計の特徴である。熱膨張計では、この磁力計の試料台の上に天井を設け、試料は天井にグリースやワニス等で固定する。そして天井の高さを試料と試料台がわずかに接するように調整すれば、試料の伸び縮みによって可動電極の位置が変化し、試料の熱膨張を測定することができる。この方法だと試料台と試料は点で接していればよく、試料台に試料を直接固定する必要がない。そのため、試料の向かい合った2つの側面を平行に加工する必要もない。したがって、小さな試料や柔らかい試料を測定することが可能となる。これと似たような特徴をもつ熱膨張計は数十年前にすでに開発されていた<sup>2)</sup>。しかし昔のものは構造がかなり複雑で製作が難しそうであったが、我々の熱膨張計はシンプルで製作は容易である。

次に角度分解熱膨張測定システムについて説明する。主要な実験装置は、キャパシタンス式熱膨張計、スプリットペア超伝導マグネット(最大時場8テスラ)、ヘリウム3冷凍機(Heliox VL, Oxford Instruments社)、およびローテーターである。スプリットペア超伝導マグネットは横磁場を発生させるためのものである。このヘリウム3冷凍機は細く軽量なため、冷凍機を回転させるのに都合がよい。この冷凍機に熱膨張計を取り付けスプリットペアマグネットの入ったヘリウム貯蔵容器の中に入れて、コンピュータ制御により冷凍機をローテーターで回転させる。これによって、横磁場中で試料を連続的に回転させることができる。図に測定する試料の長さの方向( $L$ )と、磁場( $H$ )の関係を示す。測定する試料の方向は垂直方向( $z$ 方向)で、磁場の向きはそれに垂直な水平面内( $x$ - $y$ 平面)である。この装置の測定感度はおおよそ $\Delta L/L=10^{-8}$ で高感度である。したがって、試料の長さが1mmの場合、0.1Åの微小変化を測定することができる。また、熱膨張測定は比熱や熱伝導度の測定と比べると測定時間が短いため、液体ヘリウムの使用量が少なく経済的である。このことは我々にとって大きなメリットとなっている。この装置開発は、富山大学に移る前の東大物性研榊原研究室に所属していたときに始めたものである。そこでは、この装置を用いて充填スクテルライト PrFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub> の秩序状態の研究を行った<sup>3)</sup>。そ

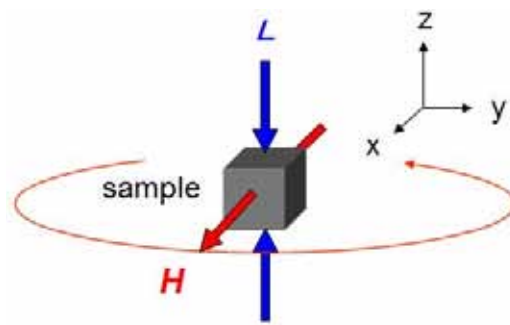


図1 測定する試料の長さの方向( $L$ )と外部磁場( $H$ )との関係

のあと富山大学へ移ったため研究はストップしていた。しかし幸いにも、本公募研究を含めた科研費のおかげで新たに装置を買い揃えることができ、最近ようやく装置を立ち上げることができた。したがって、これから重い電子系超伝導体の研究に挑戦していく予定である。もし超伝導ギャップ構造の研究が難しくても、多極子秩序や磁気秩序の研究には十分利用できる筈である。今後は、この新しい実験装置を用いて精力的に研究を進めていく予定である。

### おわりに

本公募研究で採択していただいた研究課題名は「基底状態に高次多極子自由度を有する希土類化合物の極低温精密物性測定」である。これは富山大に移った際、同じ研究室の石川義和教授が多極子秩序を示す新しい立方晶系希土類化合物の探索を行っていたことから、この研究課題を選んだ。なかなか興味深い物質は見つからなかったが、最近ようやく高次多極子秩序らしき異常を示す物質がいくつか見つかった。残念ながら本公募の研究期間には間に合いそうもないが、夏頃にはまとまった成果を報告できるのではないかと考えている。

ところで話は少し変わるが、富山大学のヘリウム液化機が今年春ようやく更新される。前回更新されたのは30年以上前であり、液化機の老朽化が著しく、液化作業に苦勞していた。しかし今年4月以降は液体ヘリウム利用環境が良くなる。この点からも今後の富山大学の研究に期待していただきたい。

### 参考文献

- 1) K. An *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107** (2010) 037002.
- 2) R. Pott *et al.*, J. Phys. E: Sci. Instrum. **16** (1983) 444.
- 3) T. Tyama *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 044708.