

## 極低温強磁場下で使用する3次元試料回転機構の製作

大学院理学研究科 物理学専攻 低温物理学研究室 森野 正行, 関根 恵, 岩田 一樹,  
鈴木 三千郎, 澤田 安樹

### 1. 製作の目的

我々は量子ホール効果に関する平行磁場と電流との異方性を調べることを目的に、実験準備を進めています。この研究のためには、超伝導マグネット内の狭い試料空間 ( $\phi 34\text{ mm}$  の円筒内) で比較的大きな試料 (幅  $10\text{ mm} \times$  奥行き  $8\text{ mm} \times$  高さ  $2.5\text{ mm}$ ) を3次元的に回転させる必要がありますが、そのような装置は市販されていません。そこで、十分に満足できる性能を持った装置製作のため、新たに数値制御工作機械を導入して極低温強磁場環境で使用する2軸回転機構の製作を行いました。この装置は、量子ホール効果の研究だけではなく、様々な単結晶試料の異方的性質を調べることに大きな威力を発揮すると思っておりますので、その製作に関する詳細や、低温で試料回転制御テストを行った結果について紹介します。

### 2. 回転方式

試料の3次元回転は、図1のようにA、B軸という2軸の回転を組み合わせて行うことができます [1]。A軸とB軸の歯車は、同じ歯数のものを使用します。それぞれの軸への回転トルクの伝達は、A軸上の2つの歯車の回転方向を制御することによって切り換えることができます。たとえば、A軸上の2つの歯車を同じ向きに同じ速さで回転させた場合は、B軸上の歯車によってA軸の歯車同士が連結され、A軸だけ回転させることができます。また、A軸上の2つの歯車を互いに逆向きに同じ速さで回転させた場合は、A軸上のトルクは消しあい、B軸の歯車だけが回転することになります。

測定試料はA軸とB軸の交点に配置するので、常に回転中心に居ることになります。試料の回

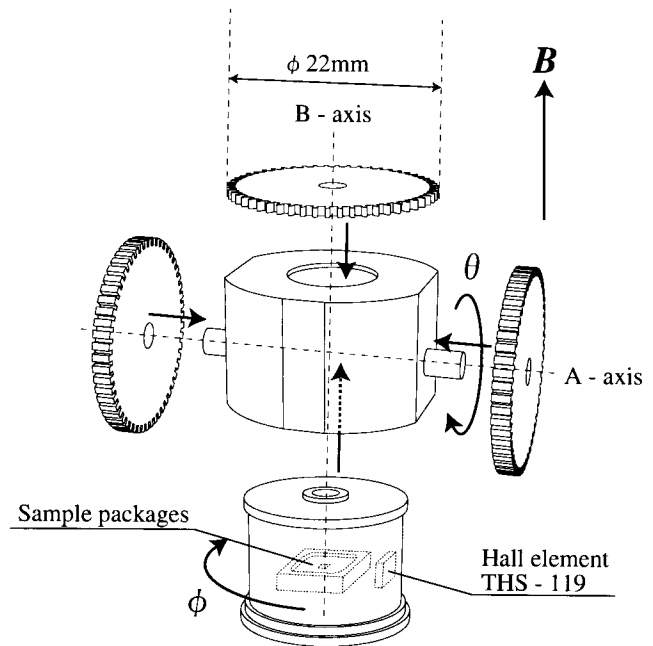


図1. 2軸回転方式の図解。

転角は、ホール素子を使用して測定します。量子ホール効果測定試料自身のホール電圧からA軸方向の回転角を検出することができます。A軸の回転角を $\theta$ とし、 $\theta = 0^\circ$ のときに試料のホール電圧が最大値をとるように定義すると、試料のホール電圧  $V_{H,A}(\theta)$  は

$$V_{H,A}(\theta) = V_{H,A}(0^\circ) \cos \theta \quad (1)$$

となります。  $V_{H,A}(\theta)$  はB軸方向の回転について変化しないので、B軸の回転角を測定するために市販のホール素子(東芝セミコンダクター社 THS-119)を試料の磁場感应方向と直交する向きの磁場に感应するように配置します。B軸の回転角を $\phi$ とし、 $\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ$ のときに、THS-119のホール電圧が最大値をとるように定義すると、

THS-119 のホール電圧  $V_{H,B}(\theta, \phi)$  は

$$V_{H,B}(\theta, \phi) = V_{H,B}(90^\circ, 0^\circ) \sin \theta \cos \phi \quad (2)$$

となり、式(1)と式(2)からA軸とB軸の回転角を求めることができます。

### 3. 動力伝達系

回転動力は市販のステッピングモーター(セイコーエプソン社製 STP15NI20L)を使用します。このモーターは  $\phi 15\text{mm} \times$  長さ  $15\text{mm}$  と小型で、ネオジウム鉄ボロン系プラスチック磁石のローターを20個の磁極で回転する構造です。励磁コイルを超伝導線で巻き直すことによって、励磁電流による系の発熱を防ぐことができます。低温でのモーター回転動作に支障がないように、金属部分に残っている潤滑油などを石油ベンジン中で超音波洗浄して落としておきます。実験用超伝導マグネットによる磁場(最大磁場17テスラ)でモーターの磁気回路が飽和しないように、設置する場所は十分に外部磁場が小さい領域(最大でも0.1テスラ程度の大きさ)を選びます。

このステッピングモーターの回転単位は  $18^\circ$  という大きな値ですが、これを減速して伝達することで細かい角度制御をすることができます。狭い場所で大きな減速を得るため、ハイポサイクロ

イド機構と呼ばれる減速機構をステッピングモーターの直後に設置しました。

この機構は平歯車とそれよりも歯の数が多い内歯車によって構成されています。平歯車が常にどこかで内歯車と噛むようにしながら、平歯車の中心を内歯車の中心の周りに回転させていくと、平歯車がゆっくりとうねりますが、このとき平歯車のピッチ円上の点の描く軌跡がハイポサイクロイドになるため、このような名前を持っています。平歯車の中心の回転量に対する平歯車自身の回転量は、内歯車の歯数を  $Z_I$ 、平歯車の歯数を  $Z_E$  とすると、簡単な計算から  $(Z_I - Z_E) / Z_E$  に減速されることがわかります。実際に製作した機構では、 $Z_I = 31$ 、 $Z_E = 30$  としたので、 $1/30$  の減速比であり、1段で大きな減速が可能です。

平歯車の中心を内歯車の中心の周りに回転させるため、ステッピングモーターのローターを旋盤で偏心させた状態にしてつかみ、図3のように仕上げたものを平歯車の中心に開けた穴に通します。この状態でステッピングモーターを回転させることで、平歯車の中心が図2の中心付近に描いてある矢印のように移動します。

この平歯車と同軸にガラスFRPのパイプを接続し、強磁場領域にある試料回転部へと動力を伝達します。ガラスFRPの先には小さな歯車を取り付けますが、これは図1のA軸上の2つの歯車の歯数に対し  $1/6$  の歯数のものを製作し、取り

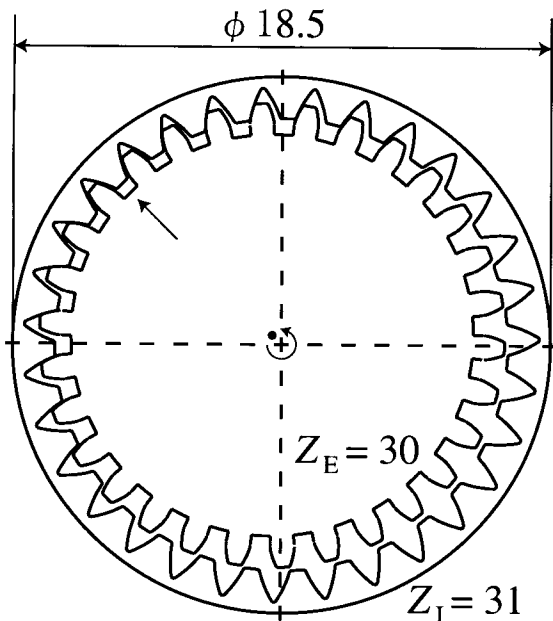


図2. ハイポサイクロイド機構.

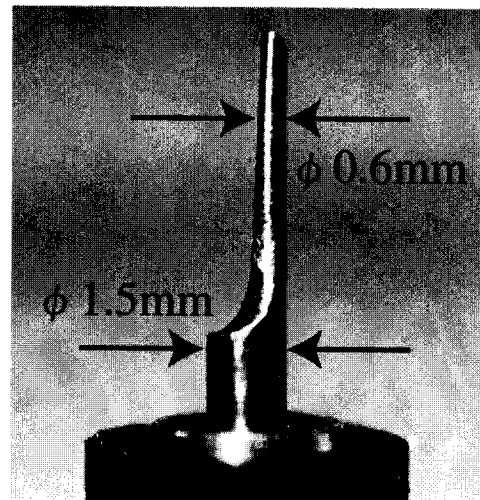


図3. 旋盤で偏らせながら削ったモーターのローター.

つけました。これによってさらに1/6の減速となり、最終的には

$$18^\circ \times \frac{1}{30} \times \frac{1}{6} = 0.1^\circ$$

という単位で試料を回転することができます。

#### 4. NCフライスの導入

回転部やハイポサイクロイド機構の歯車については、設計初期は市販のものを使用することを考えましたが、限られた試料空間で使用可能な丁度良いサイズの市販品が見つからず、別の手段を考える必要がありました。そこで、コンピュータで予め用意した工作手順データに従って、自動で工作を行う数値制御工作機械 (NC 工作機械) を導入し、自前で歯車などを製作することにしました。

機種を選定は、いくつか候補が挙がりました。工場などで大量生産するためのものは精度も良いのですが、コスト的に問題があります。クラブ用として個人向けに市販されている小型のNCフライスは、コスト的には手の届く範囲にありますが、精度が悪いため注意して使用する必要があります。結局、後者の小型のNCフライスを導入することに決めました。購入したのはローランド DG 社製 MDX-500 で (図4 参照)、カタログ記載の機械的精度は  $1\mu\text{m}$  であり、我々が製作したい歯車のサイズ程度であれば十分な精度でした。ただし、購入時に添付されるソフトウェアで工作手順データ (NC コード) を生成すると、分解能が  $10\mu\text{m}$  で計算されるため、とても満足できるものではありませんでした。そこで、MDX-500 の性能をフルに生かすため、CAD (設計支援ソフトウェア) と CAM (NC コード生成ソフトウェア) のシステムを導入することに決めました。CAD は Rhinoceros, CAM は VisualMill がセットで比較的安価なパッケージとして限定販売されていた物を購入しました。新しいソフトウェアに使い慣れるまで多少の訓練が必要でしたが、システムが補強されたことで高精度加工ができるようになりました。

磁場掃引で導電性物質に発生する渦電流による発熱をなくすため、大きな磁場にさらされる試料

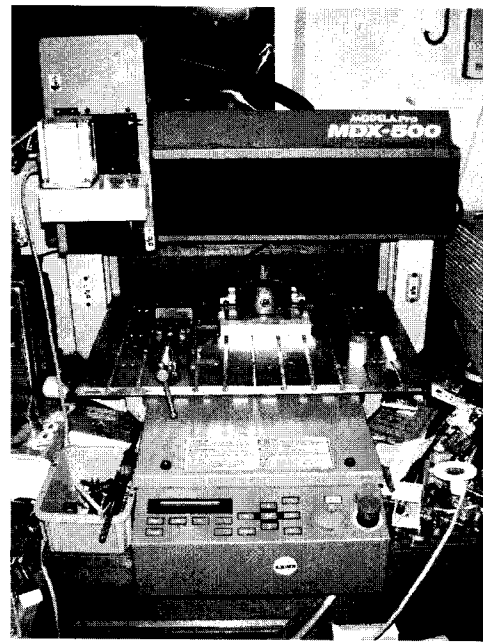


図4. NCフライス MDX-500.

付近はプラスチック部品 (PEEK 材) で構成しました。PEEK 材は熱膨張係数が小さく、かつ加工時にバリが出にくいと考えられるために選んだ材料です。また、ハイポサイクロイド機構の歯車も、やはりバリが出にくい快削アルミを使用しました。歯車の加工は材料の丸棒の断面を掘るように行い、出来上がったら旋盤で必要な厚みを持たせて落とします。バリが多少残るので、粒径  $5\mu\text{m}$  程度の研磨粉を撒いた綿布の上で削り出した歯車を移動させることで歯に残ったバリを落としました。

加工には、OSG 社製 CRN-LN-EDS  $\phi 0.5\text{mm}$  (刃長  $2.5\text{mm}$ ) と EXML  $\phi 3\text{mm}$  (刃長  $30\text{mm}$ ) の2本のエンドミルを使用して、前者は歯車などの細かい加工に、後者は試料収納部を削り出すような深さを要求する加工に使用しました。前者の細かいエンドミルは高価で (7,000 円程度)、しかも折れやすいため、無理な力がかからないように送り速度設定するなどの注意が必要です。MDX-500 は仕様で  $30\mu\text{m}$  程度のバックラッシュがあるため往復運動には向いていません。そのため、移動する部分をゴムバンドで1方向に引っ張ってバックラッシュをなくしてから、エンドミルに歯車の形をトレースさせる加工方法できれいな部品を削り出す

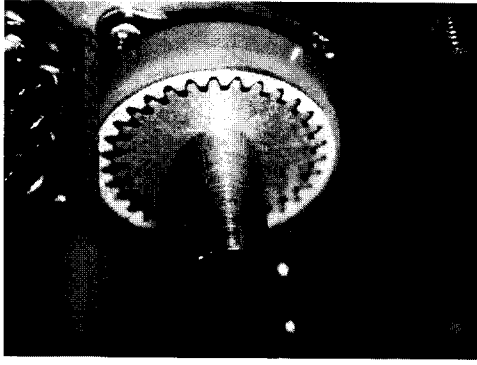


図 5. ハイポサイクロイド機構.

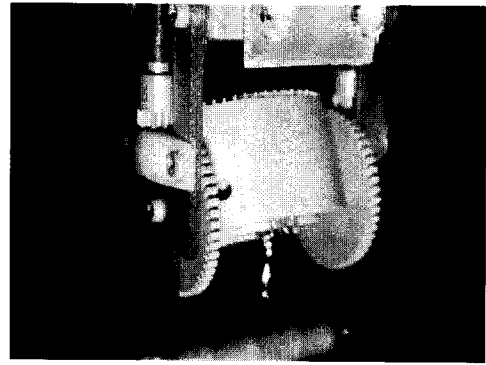


図 6. 試料回転部.

ことができました.

### 5. 低温での回転結果

実際に部品を削り出し、回転部を組み上げたものが図 5, 6 です. 図 5 のハイポサイクロイド機構部は、低温での部品間の熱収縮率の差によって影響を受けないように、歯車にある程度の厚みを持たせて、熱収縮率の差によって歯車が回転軸方向に移動したとしても、確実に噛むようにしてあります. 図 6 の試料回転部は、市販のガラス FRP 基板を細長く切断し、それらを螺子で連結したもので吊り下げられています. 試料の回転のダイナミックレンジは A 軸, B 軸ともに  $-180^\circ$  から  $+180^\circ$  で、全方位に回転可能です.

試料に接続する導線が回転の際に引っかかって切れたりしないように導線を一旦 B 軸上に取り出し、次いで A 軸上に取りまわす工夫もしてあります. これにより、試料が回転しても導線はそれぞれの軸上でねじれるだけとなり、切断するような力はかかりません.

回転テストのため、試料回転部に小さなコイルを固定して電流を流し、この機構を 4.2K まで冷却して A 軸方向の回転を与え、ロックインアンプで  $V_{H,A}(\theta)$  と  $V_{H,B}(\theta, 0^\circ)$  を測定した結果が図 7 です. きれいな三角関数を描いていることがわかります. 低温でも余裕を持って回転させるため、バックラッシュは 20 パルス分程度と大きめに取りましたが、図 1 の A 軸にポピンを取りつけ、バネを繋いだ線を巻き付けることでバックラッシュレスにすることができます.

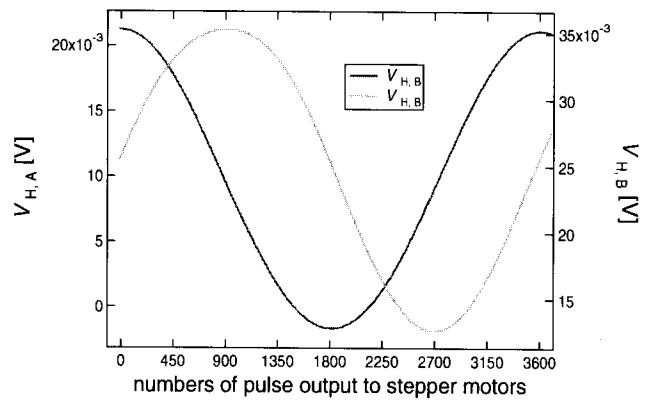


図 7. 4.2K での回転テスト.

### 6. まとめ

極低温強磁場下の狭い空間で 3 次元的な試料回転を行うため、2 軸の回転機構を製作を行いました. 系の発熱のことを考えて材料や回転モーターの選定を行い、省スペースで大きな減速を行うためハイポサイクロイド機構を導入しました. また、市販の歯車の使用が不可能であったため、数値制御フライスを購入し、ソフトウェアの補強を行うことで必要な歯車や部品を削り出すことが可能となりました. さらに、低温での回転テストを行い、要求される回転を十分に行うことができることがわかりました.

### 参考文献

- [1] M. Suzuki, A. Sawada, A. Ishiguro and K. Maruya, *Cryogenics* **37** (1997) 275-277.

### 連絡先

e-mail : m-morino@lowtemp.phys.tohoku.ac.jp