

電流バイアス運動インダクタンス超伝導検出器による中性子イメージング

大阪公立大学 大学院工学研究科 石田 武和

1. はじめに

超伝導を利用すると、著しく高感度であったり、格段に高性能のデバイスが実現できたりすることがある。高感度磁場測定には超伝導量子干渉計 (SQUID)、超伝導転移端センサー (TES) などの超伝導検出器、ノイマン型コンピューターの超高速動作を可能とする単一磁束量子素子 (SFQ)、量子コンピューティングを支える超伝導量子ビット素子 (Qubit) などが多くの実例が知られている。

本稿では、新しい動作原理の超伝導検出器の中性子イメージングへの応用について紹介する。

2. 新しい超伝導検出器

電流バイアス超伝導運動インダクタンス検出器 CB-KID (Current-Biased Kinetic Inductance Detector) は我々によって提案され¹⁾、発展されてきた超伝導検出器である。^{2,3)} 超伝導体の運動インダクタンスは $L_k = m_s \ell / n_s q_s^2 S$ で表される。ここで、 m_s は超伝導電子の質量、 n_s は超伝導電子の密度、 q_s は超伝導電子の電荷、 ℓ は細線の全長、 S は細線の断面積である。CB-KID にエネルギーを有する粒子が入射する場合に、粒子のエネルギーの一部が局所的に Nb 細線に付与されるとクーパ対が壊れ、ホットスポット長 $\Delta \ell \sim 1 \mu\text{m}$ ($\ll \ell \sim 150 \text{m}$) 部分の運動インダクタンス ΔL_k ($\ll L_k \sim 2 \mu\text{F}$) が局所的に変化し、このとき超伝導 Nb メアンダ細線に直流バイアス電流 I_b を供給しておくことでホットスポット (メゾ励起) で $V(t) \propto I_b d(\Delta L_k) / dt$ に依存する信号が発生する。荷電粒子のメアンダを通過する時間は短く ($\Delta t \sim 5 \text{fs}$)、対として発生する電磁波信号 $V^\pm(t)$ は非常に大きくなる。正極性の幅の狭い出力電磁波パルスがバイアス電流の上流側に向けて、負極性の電磁波パルスが下流側に向けて長距離 ($\sim 150 \text{m}$) を低減衰伝搬する。電磁波対が両端電極に到達する時間差を用いて遅延時間法でホットスポット発生位置を同定できる。

図 1 の CB-KID による中性子透過撮像素子システムであるが、電気的に中性である中性子を直接検出できる訳ではない。我々のシステムでは ^{10}B を中性子変換層として装備し、中性子と ^{10}B 核反応による大きなエネルギーを持って等方的にランダム方向に放射される荷電粒子 (^4He , ^7Li のどちらか) が $0.9 \mu\text{m}$ 幅、 50nm 厚の Nb メアンダ線に引き起こすメゾ励起の発生位置を知り、中性子飛来位

置を知る。撮像素子としては、図 1 に示す様に、X 軸メアンダ細線検出器と Y 軸メアンダ細線検出器は密着直交積層されており、XY 検出器に同時にホットスポットが形成される。4 つの中性子信号電磁波信号が発生・伝搬し、電極に到達する時間差からイベント発生位置 (X,Y) を特定できる。試料を透過する中性子のメゾ組織に対応した透過能差が、CB-KID 上の中性子核反応イベント頻度の差に転換されることで、強度コントラストのある中性子透過イメージング像を取得できる。^{2,3)} この装置を使うことで、大きな視野を確保しながら、同時に試料の微細なメゾ組織観察が可能となる。

撮像素子として CMOS がよく知られているが、この素子は、ピクセルの数だけ読出線や読出回路を装備して大画素撮像を実現してきた。実際、中性子検出にも中性子によるシンチレーター発光と CMOS を組み合わせる手法が使われている。一方、超伝導を原理として使ったデバイスは極低温に冷却する必要があるため、膨大な数の読出線や読出回路の実装は難しい。これに対して、CB-KID は大画素の撮像機能を確保しながら、検出系が僅か 4 系統の読出で済むことから、極低温技術で問題になるリード線を介した熱侵入が少なくできるメリ

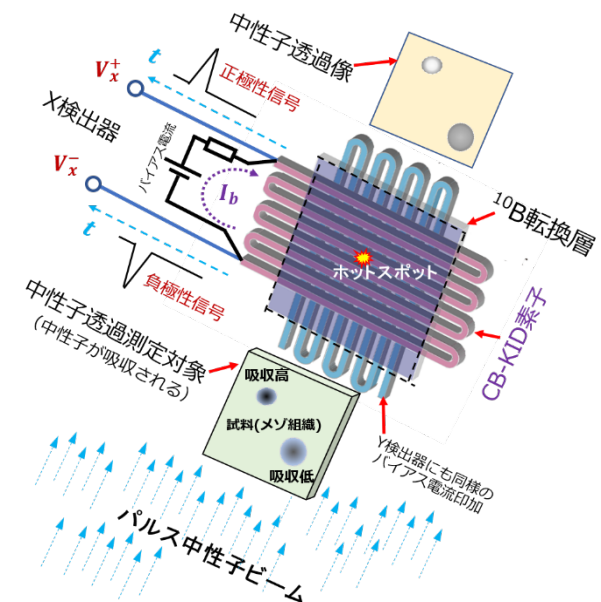


図 1 CB-KID による中性子透過イメージングシステム。 ^{10}B 変換層で中性子を捉え、核反応生成の荷電粒子が CB-KID のメアンダ構造の XY 検出器に同時にメゾ励起を創る。発生する電磁波信号 (2 対) が 4 つ電極に到達する時間差からメゾ組織の透過能差像を得る。パルス中性子下で使用する。

ットがある。装置も小型化できて、液体ヘリウム冷却ではなく、超小型のヘリウム循環型冷凍機で実現できるため、施設や国を選ばずとも設置できる汎用性の高い装置となる。

3. CB-KID を使った中性子イメージング

図1では、X位置を知るX検出器とY位置を知るY検出器があった。X検出器とY検出器のホットスポット（一つの核反応イベント）から合わせて4信号が発生する。2つの核反応イベントが同時に起こると、検出器内に合計8信号が同時に共存し、通常の中性子検出器では識別が困難となる。CB-KIDでは、線路上に発生時刻の異なる複数の核反応イベントパルスが同時に存在しても、同一イベントであるためには4信号イベントの発生時刻が同一であるべきだとする拘束条件を課すことで、複数イベントの識別が可能となる。他の中性子検出器と異なり、動作原理として超高速である超伝導素過程を使っていることもあるが、それに加えてこの特徴を利用できるために、他の中性子検出器では困難な高計数率($\sim 10^7$ cps)に対応できる。この優れた特徴は、中性子検出に限らず、CB-KIDを他の素励起検出に応用しても成立する。

CB-KIDの性能評価のために、強い中性子吸収体であるガドリニウム(Gd)で製作したジーマンス・スター標準試料を準備した。これは、分解能を評価するための標準的な試料としてよく知られており、 $5\mu\text{m}$ 厚のGd膜を微細加工して、中心から放射状にGdスポークが広がっている。360度対

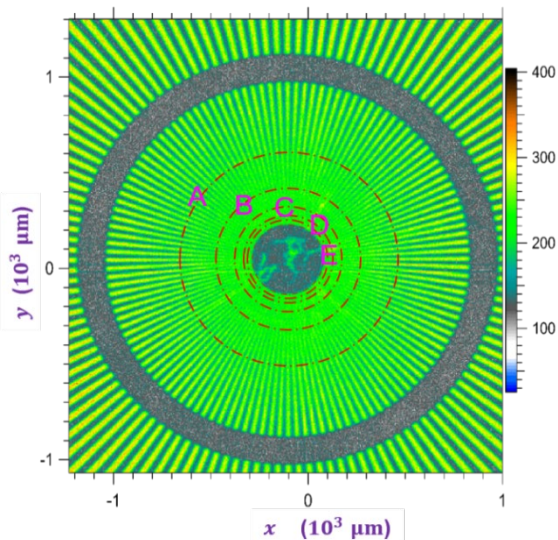


図2 ガドリニウム(Gd)膜で構成されたジーマンス・スター標準試料の中性子透過強度像である。撮像領域 $15\text{mm}\times 15\text{mm}$ で試料全体をカバーできるが、中心部の $2.2\text{mm}\times 2.2\text{mm}$ 領域を拡大して示している。Gd膜を中性子が透過した領域は、中性子強度が小さくなった透過像として見えている。

して、128本のGdスポークが配置されている。Gdスポークは、周辺部から中心に向かうにつれて細線化されていくので、性能の異なる様々な検出器に対して、中性子撮像の位置分解能を比較・評価するのに適している。この標準試料と超伝導中性子検出器CB-KIDの撮像イメージングシステムを大強度陽子加速器施設J-PARC(東海村)に持ち込み、中性子透過イメージング実験を実施した。図2は、CB-KIDを用いて取得したガドリニウム(Gd)のジーマンス・スター標準試料の中性子透過像であり、中性子波長 0.078nm から 1.13nm を利用して構成している。中性子透過像は $15\text{mm}\times 15\text{mm}$ と大きなセンシング面積に亘り高位置分解能で観測できるが、ここでは中心部の $2.2\text{mm}\times 2.2\text{mm}$ 領域だけを取り出して示している。図2の暗く見えるところは中性子吸収体であるGdにより中性子が吸収され、CB-KIDで計測される中性子検出イベント数が少なくなった部位を指している。位置分解能を評価するために、図2の中性子透過像のA, B, C, D, Eの同心円の各円周上に沿って中性子透過強度のリング状ラインプロファイルを求め、曲線の周期的変調を高速フーリエ変換(FFT)で解析することで、CB-KIDの $15\text{mm}\times 15\text{mm}$ の中性子撮像視野のどこまでのGd細線(スポーク)が識別できるかを評価した。その結果、CB-KID撮像系はGd細線の円周C($14\mu\text{m}$ ピッチ、 $7\mu\text{m}$ スポーク幅)までFFTによる基本波成分のピークが検出された。このことから、CB-KIDの中性子透過撮像系では $7\mu\text{m}$ 幅のGdスポーク構造を分解して識別できる性能を有することが分かった。

4. おわりに

CB-KID検出器を用いた中性子透過像は $15\text{mm}\times 15\text{mm}$ の大きな視野を確保しながら、世界最高級の位置分解能も実現している。今後は新しい構造のCB-KID(特許取得済)を用いて位置分解能をさらに向上させることを目指したい。

謝辞：本研究は、科研費 基盤研究(S)(No.23226019)、基盤研究(A)(No.16H02450、No.21H04666)の支援を得て、チームで取り組んだ。

5. 参考文献

- 1) T. Ishida *et al.*, J. Low Temp. Phys. **176**, 216–221 (2014).
- 2) H. Shishido *et al.*, Phys. Rev. Appl. **10**, 044044 (2018).
- 3) T. D. Vu *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **1006**, 165411 (2021).