



斗内 政吉

大阪大学超伝導フォトンクス研究センター

プロフィール：1959年7月5日生。1988年3月大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士後期課程修了。工博。同年4月大阪大学基礎工学部助手、1989年4月九州工業大学情報工学部助手、1994年4月郵政省通信総合研究所関西先端研究センター主任研究官、1996年11月大阪大学超伝導エレクトロニクス研究センター助教授、2000年5月大阪大学超伝導フォトンクス研究センター教授、現在に至る。専門は、超伝導エレクトロニクス、電子材料および物性。趣味は、スポーツ全般と映画。

## 磁束の量子化過渡現象と新規物性の解明

### 要旨

極短パルスレーザーの進展により、フェムト秒時間スケールにおける電荷の励起およびそのダイナミクス観測技術が開発されつつある。フェムト秒は、キャリアの散乱の中で、最も高速な成分に対応する時間スケールであり、それゆえ励起された電荷の振る舞いには、従来の統計的な概念では説明できない事象が現れてくる。一方、超伝導現象とは、集団的引力相互作用に基づく長距離コヒーレンス状態であり、個々の粒子のダイナミクスを個別に扱うことは容易ではない。そのような超伝導状態において、極短光パルスによる過渡的非平衡状態が誘起されれば、今までにない状態を作り出すことも可能となることが期待される。本研究では、新しい現象を生み出す素材として、統計的記述により理解される特徴的な現象である、超伝導ループならびに超伝導体中における磁束量子に着目した。これらは、電子波の境界条件より離散的な量子化状態を持ち、その状態の変化には、非超伝導状態を経由ことが要請される。しかし、極短光パルスによる超高速過渡状態の誘起により、超伝導状態を維持したまま量子化状態を変化させることが実現できる可能性がある。ここでは、極短光パルスを用いて磁束量子の生成・変調を実現し、またその発現する機構を解明することを、研究の主題としている。

図1のような2つの穴を持つ試料の一方から超伝導電流を印加しておき、レーザーを中央に照射する。この時、瞬時的なエネルギー放射が発生し、電流再配分の時間的余裕はなく、ループ内に磁束が存在する初期条件が実現されることになり、磁束量子が生成されることになる。その様子を、図2に示す。電流バイアスを変化させ、バイアス中に、レーザーを照射し、電流を取り除いた後に電流分布を観測した結果である。2つのループに大きさが同じで、周回方向の異なる電流がかがれていることから、磁束量子がループ内に生成されていることが判る。このような現象は、これまで超伝導理論では理解されず、新しい現象としての研究テーマを与える。その機構を解明するために、テラヘルツ (THz) 電磁波放射現象を利用して、超伝導体中の電荷ダイナミクスを観測する方法を提案した。

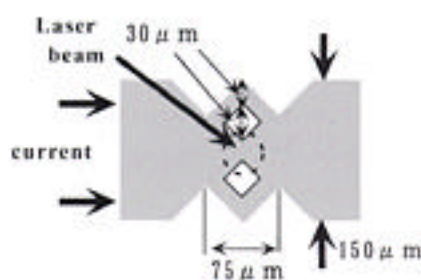


図1 2つの穴を持つ超伝導ループ。

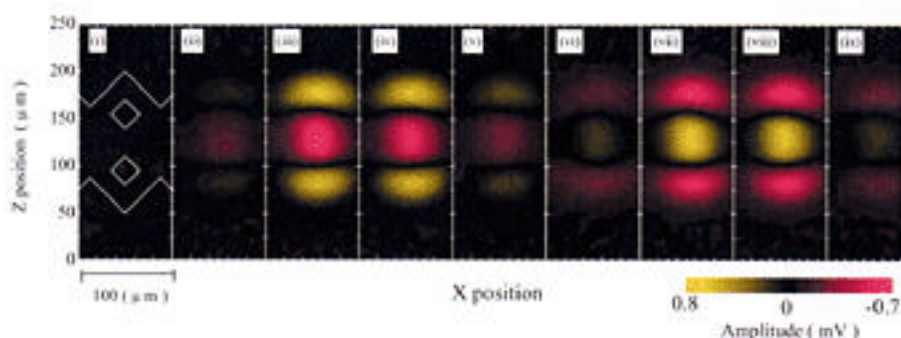


図2 磁束量子生成後の超伝導ループにおける電流分布。

高温超伝導体からTHz電磁波放射は、高速電流変調で説明され、放射電界は電流の時間微分で与えられる。即ち、超伝導体中では、クーパ対の破壊や、再結合など、様々な、散乱が発生する。そこで、時間差を与えた2つレーザーパルスによりTHz電磁波を励起し、検出パルスによって励起されたTHz波振幅が、励起光の影響をどのように受けるのかを観測することで、光パルス程度の分解能を持つダイナミクスを観測した。

図3に、励起光と検出光に時間差を与えて試料に入射させたときに放射される時間分解電磁波波形を示す。実験では、この両者の時間間隔を変化させ、一方の振幅の変化を観測する。図4に、2パルス間の時間を横軸としたときの、検出パルスの最大振幅の変化を示す。低温成長(LT-)GaAsからの特性変化では、光励起による200fs程度の分極誘起と同程度の時間の

緩和現象が観測されている。主な緩和過程は、インターバレー散乱、Asプレシビテートへのホット電子のトラップならびにそのプレシビテート準位中の電子とホールの再結合が複雑に絡み合っていることが明らかにされた。一方、YBCO超伝導体の場合は、先ず、検出電磁波振幅が減少し、回復し、オーバーシュート過程を経て最終的には時間6 ps程度の点で初期状態に復元することが見て取れる。マイナス時間での現象は、先に入射したプローブ光が後で入射したポンプ光に影響を受けていることを示しており、その時間が、約2 psにも及んでいることが示されている。この初期過程では、電子-電子散乱による対粒子破壊の雪崩現象として解釈でき、クーバー対密度の減少が、検出電磁波振幅を減少させている。

以上のように、フェムト秒レーザーを用いて、超伝導体中の磁束量子を生成・制御することが可能であり、その機構が雪崩対粒子破壊過程などを経た過渡的非平衡状態に起因していることなどを明らかにすることができた。今後は、更に大きな常識を打ち破る研究へと展開していきたい。

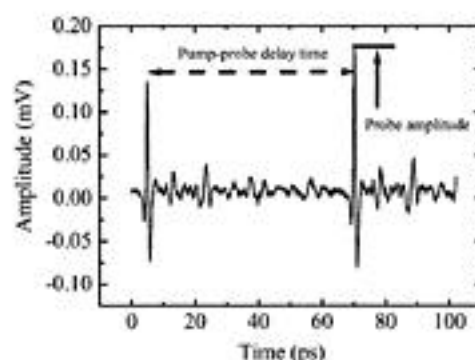


図3 ダブルパルス励起によるTHz電磁波の例

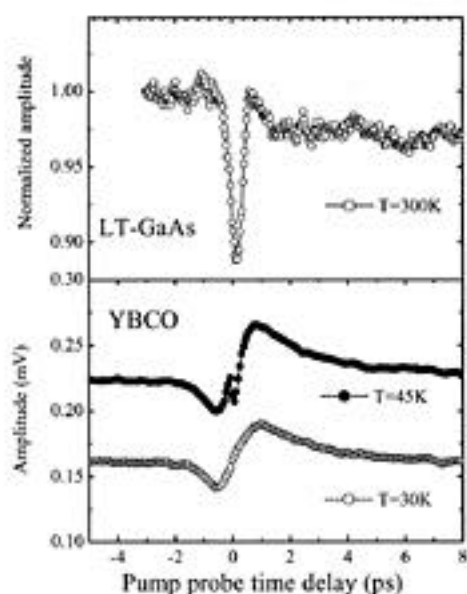


図4 低温成長GaAsおよびYBCO薄膜から放射される検出電磁波最大振幅の時間依存性

## 研究成果

### 【主な研究業績】

1. O. Morikawa, M. Yamashita, H. Saijo, M. Morimoto, M. Tonouchi and M. Hangyo, "Vector Imaging of Supercurrent Flow in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Thin Films Using Terahertz Radiation", *Appl. Phys. Lett.*, 75 (1999) 3387-3389.
2. M. Tonouchi, M. Yamashita, and M. Hangyo, "Terahertz radiation imaging of supercurrent distribution in vortex-penetrated  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  thin film strips", *J. Appl. Phys.*, 87 (2000) 7366-7375.
3. A. Moto, M. Hangyo, and M. Tonouchi, "Terahertz Radiation Imaging of Vortex Penetration into YBCO Thin Films with and without Ordered Arrays of Antidots", *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E84-C (2001) 67-73.
4. M. Tonouchi, A. Moto, M. Yamashita, and M. Hangyo, "Terahertz Radiation Imaging of Vortices Penetrated into YBCO Thin Films", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 11 (2001) 3230-3233.
5. M. Tonouchi, K. Shikita, M. Morimoto, and M. Hangyo, "Optical Control of Magnetic Flux Quanta in YBCO Thin Film Loops by Selected Femtosecond Laser Pulses", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 11 (2001) 3939-3942.

6. M. Tonouchi, "Magnetic Flux Quanta in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Thin-Film Loops Controlled by Femtosecond Optical Pulses", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40 (2001) L542 - L544.
7. W. Hagen, P. Seidel, and M. Tonouchi, "Pump and Probe Terahertz Beam Excitation Technique to Investigate Carrier Dynamics in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Thin Films", *Physica C*, 357 (2001) 146-148.
8. A. Moto and M. Tonouchi, "Temperature Dependence of Supercurrent Distribution in YBCO Thin Film Strips Observed by Terahertz Radiation Imaging", *Physica C*, 357 (2001) 1603-1606.
9. H. Wald, P. Seidel and M. Tonouchi, "Pump and Probe Terahertz Method to Investigate  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Thin Films", *Physica C*, (2001) in press.
10. M. Tonouchi and A. Moto, "Vortex Penetration Effect on Supercurrent Distribution in YBCO Thin Film Strips", *Physica C*, (2001) in press.
11. M. Tonouchi and K. Shikita, "Magnetic Flux Generation in an YBCO Thin Film Loop with a Single Shot Femtosecond Optical Pulse", *Physica C*, (2001) in press.