

掲載内容（サマリー）：

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デバイス技術

- 超電導マイクロ波～光デバイス技術の最近の動向
- 超伝導トンネル接合を用いたマイクロ波・ミリ波帯雑音源の開発
- 気象レーダ用狭帯域ハイブリッド送信フィルタ技術
- キャリア・アグリゲーションと複数帯域同時通過フィルタ
- SSPD を使用した高速量子鍵配送システム
- テラヘルツイメージング技術の進展
- アタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計（ALMA）計画用 Band 10 受信機の量産化

- 超電導関連 2012 年 2-3 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（12/19-1/17）
- 超電導速報—世界の動き（2011 年 12 月）
- 「6th Workshop of Mechanical-Electromagnetic Properties of Superconducting Materials (MEM11)」報告
- 隔月連載記事—超電導マグネット開発のこれまでとこれから（その 1）
- 読者の広場(Q&A)—最近、金属原子 1 層で超電導状態になることを発見、との記事がありました、今後どのような展開が期待されるのでしょうか？

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

〈発行者〉

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13

Tel (03) 3536-7283 Fax(03) 3536-5717

超電導 Web21 トップページ：<http://www.istec.or.jp/web21/web21.html>



この「超電導 Web21」は、JKA の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デバイス技術

「超電導マイクロ波～光デバイス技術の最近の動向」

山形大学
大学院理工学研究科
教授 大嶋重利

超電導デバイスの研究動向を知る最善の指針は、国際会議での発表件数の推移であろう。昨年 9 月に行われた EUCAS-ISEC-ICMC の合同国際会議は直近の国際会議として、その指標を出すのに好都合な会議である。今回は超伝導発見 100 年を記念としたシンポジウムであったので、発表件数も多く、デバイス関連だけでも 300 を超えていた。超伝導エレクトロニクス関連の発表種目を大ざっぱに分けると、図 1 ようになっていた。SQUID 関連とジョセフソン接合関連の発表が極めて多かったが、マイクロ波～光デバイスなどのデバイスに関する発表も比較的多く、図で示されるように、主としてフィルタ関連、テラヘルツ波関連、TES/ボロメータ関連等に分類される。マイクロ波～光デバイスの中で最近精力的に研究されているテーマや私が興味を持っている研究について以下に紹介したい。

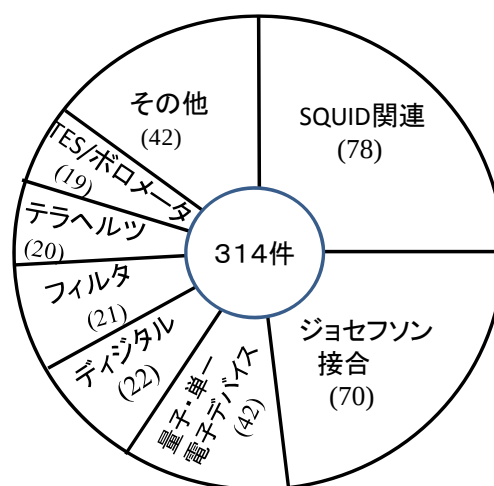


図 1 EUCAS-ISEC-ICMC 会議で発表されたデバイス関連の論文数

1. マイクロ波分野

マイクロ波超伝導デバイスとして現在精力的に検討されているのはやはりバンドパスフィルタである。その中でも最近、次の 3 種類のフィルタについて多く検討されている。

- ・デュアルバンドバンドパスフィルタ (DBPF)
- ・UWB (Ultra Wide Band) 通信フィルタ
- ・高耐電力バンドパスフィルタ

DBPF については、この特集号で檜林氏が解説しているので詳しい説明は避けたいが、2 つの周波数帯域を通過するバンドパスフィルタのことである。もともとは、米国の携帯電話の周波数割り当てで問題となった、A-B 問題を解決するために検討されたフィルタである¹⁾。しかしそれ以外の目的で最近良好な特性を示すフィルタが幾つか報告されている。中でも中国の清華大学の Cao 教授のグループ²⁾、中国科学アカデミーの He 教授グル

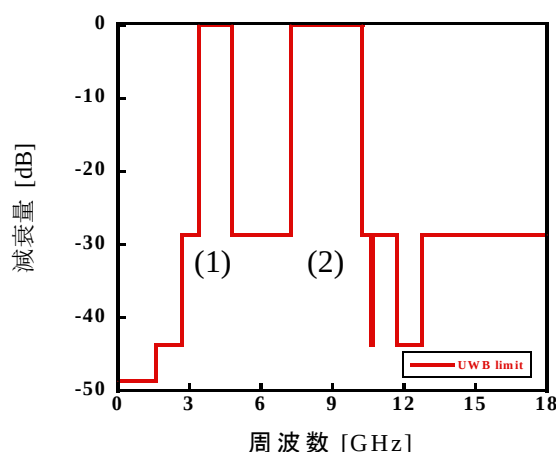


図 2 日本の UWB 通信の周波数スペクトルマスク図 (1)3.4~4.8 GHz, (2)7.25~10.25 GHz

ープ³⁾は新たな応用を目指して、DBPF を提案している。日本でも NTTDoCoMo の佐藤らは、独自の共振器形状で DBPF を実現している⁴⁾。また、3 つ以上の帯域を持つマルチバンドバンドパスフィルタ (MBPF) も提案され始めている。

UWB 通信は、周波数帯域を極めて広くした通信で、近距離の超高速通信用に開発されたものである。日本でも、総務省が UWB 通信用周波数帯域を提示しており (図 2)、3.4~4.8 GHz と 7.25~10.25 GHz の 2 つの周波数帯が使用されることになっている。挿入損失が小さく、超広帯域 (1~3 GHz) でかつ急峻な帯域外遮断特性を有するフィルタとしては、超伝導フィルタが有利である。我々のグループ⁵⁾や台湾の国立台湾大学の研究者たち⁶⁾中国の清華大学の Cao 教授グループ⁷⁾が、良好な超伝導 UWB フィルタを報告している。

高耐電力超伝導バンドパスフィルタは大きく分けて 3 つの手法が検討されている。①特殊な共振器形状フィルタ②バルク共振器フィルタ③ハイブリッドフィルタ、③に関しては、この特集号で加屋野氏が解説しているので省略する。①に関しては現在我々のグループや中国の清華大学の Cao 教授グループが精力的に検討している。我々は、マイクロストリップ線路に細いスリットを入れ、線路端に集中する電流を低減させることにより耐電力が向上することを確認している⁸⁾。また、Cao 教授のグループは、各共振器に流れる電流が異なることに着目し、各共振器の幅を変化させ耐電力を向上させるのに成功している⁹⁾。バルク共振器を用いた耐電力向上も我々のグループで報告している。

2. テラヘルツ波分野

この分野での研究は、テラヘルツ波発振デバイスと受信デバイスである。テラヘルツ波発振デバイスに関しては、実験・理論ともに現在日本がリードしている。Bi 系の固有ジョセフソン接合を用いたメサ構造から良好なテラヘルツ波が発振されることを始めて実験的に見出したのも日本のグループであり、筑波大学の門脇教授グループ¹⁰⁾、NIMS の Wang 博士のグループ¹¹⁾などから素晴らしい成果が報告されている。また、テラヘルツ波の高感度受信器も多く検討されている。トンネル接合を用いた受信機は従来から検討されているデバイスであるが、最近注目されているのは、MKIDs (Microwave Kinetic Inductance Devices) である。マイクロ波共振器にテラヘルツ波が照射されると、その共振周波数が変化する。その周波数シフトからテラヘルツ波を検知するものである。小型でアレー化も容易であるので、今後の実用化が期待できるデバイスである。

3. 光～X 線分野

光～X 線を検出する超伝導デバイスは、やはり Transition-Edge Sensor (TES) が主流である。EUCAS2011 においても幾つか報告されていたが¹²⁾、分解能や高粒子エネルギーの検知を向上させるために、色々と工夫している。TES に関する詳しい説明は K.D.Irwin and G.C.Hilton 著¹³⁾に載っているのでそれを参考にしてください。

参考文献：

1. A. M. Abu Hudrouss *et al.* 'An Asymmetric Dual-Band HTS Band-pass Filter for American Mobile Phone System' Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceeding, Cambridge, USA (2010) 183
2. C.Feng *et al.* " Design and performance of a compact superconducting duplexer at VHF-band" Physica C; Superconductivity Vol.470 (2010) 1959
3. J. Wang *et al.* " An L-band HTS duplexer with improved performance" Chinese Science Bulletin, Condensed Matter Physics Vol. 55 (2010) 3527
4. K.Sato *et al.* " New Method to Increase Power Handling Capability of High Temperature Superconducting Dual-Band Band Pass Filter" EUCAS2011. 1 EA-06

5. 石井博之ら「マイクロストリップスタブ付き 3 モード共振器を用いた高温超伝導 UWB 帯域通過フィルタの開発」信学技法 SCE2011-1(2011-7)
6. Li-Min Wang *et al.* " Characteristics of Ultra-Wideband Bandpass YBCO Filter With Impedence Stub" IEEE Trans. Applied Superconductivity Vol.21 (2011) 551
7. XB Guo *et al.* " Design of a compact microstrip ultra-wideband bandpass filter at P-Band" Microwave and Optical Technology Letters Vol 51 (2009) 2797
8. S. Takeuchi *et al.* " Power handling capability improvement of HTS filter with sliced microstrip line resonator" Physica C 468 (2008) 1954
9. XB Guo *et al.* " Design of a High-power Superconducting Filter Using Resonators With Different Linewidth" Microwave Theory and Techniques (2007) 2555.
10. T.M. Benseman *et al.* " Tunable terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ mesa devices" Phys. Rev.B Vol 84 (2011)
11. HB Wang " Coherent Terahertz Emission of Intrinsic Josephson Junction Stacks in the Hot Spot Regime" Phys. Rev.Letters Vol.105 (2010)
12. J. Ullom *et al.* "Transition-Edge Sensor Development for X-and Gamma-Ray Spectroscopy" EUCAS2011. 1-EA-09
13. K.D.Irwin and G.C.Hilton 著 Transition-Edge Sensors ; Cryogenics Detection, Topics in Applied Physic Vol. 99 (2005) 63-152, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デバイス技術

「超伝導トンネル接合を用いたマイクロ波・ミリ波帯雑音源の開発」

東京大学大学院
天文学教育研究センター
井上裕文

電波天文学では天体からの微弱な信号を検出するために超伝導トンネル接合（以下 SIS）をセンサーとして利用した受信機が用いられる。この受信機は SIS の材料である Nb の転移温度よりも低い 4.2 K まで冷却され、理論的限界である量子雑音に迫る物が登場している。SIS 受信機は超高感度であるがゆえに、入力信号が大きい場合、出力強度が入力強度に対して線形に増加しない飽和という現象が生じ得る。受信機の入力に対する出力の線形性が保証されていなければ、強度校正した際、天体からの信号強度を誤って見積もってしまい、天体の物理を正しく理解できないため問題となる。受信機の線形性は連続的に出力強度を変えることのできる白色雑音源を用いて調査することができる。しかしミリ波でそもそも白色雑音を出力できるデバイスは少なく、電波天文学用受信機の特性評価においては、常温と液体窒素に浸した電波吸収体を熱雑音源として用いる方法が最も一般的である。

SIS のような二つの導体で数 nm の絶縁体を挟んだ構造に電圧を掛けるとトンネル電流が流れる。トンネル電流をになう電荷はお互いに独立かつランダムに流れるためショットノイズと呼ばれる雑音を生じる。このショットノイズは接合にかかるバイアスを変えることで出力強度を制御できるため飽和の調査に用いることができる可能性を秘めている。マイクロ波帯においては SIS で生じるショットノイズに関する研究は既に行われているが、100 GHz を超えるミリ波サブミリ波帯においてはまだ検出されたことすら無い。そこで本研究ではまず 100 GHz 帯において SIS で生じるショットノイズの検出を試みた。

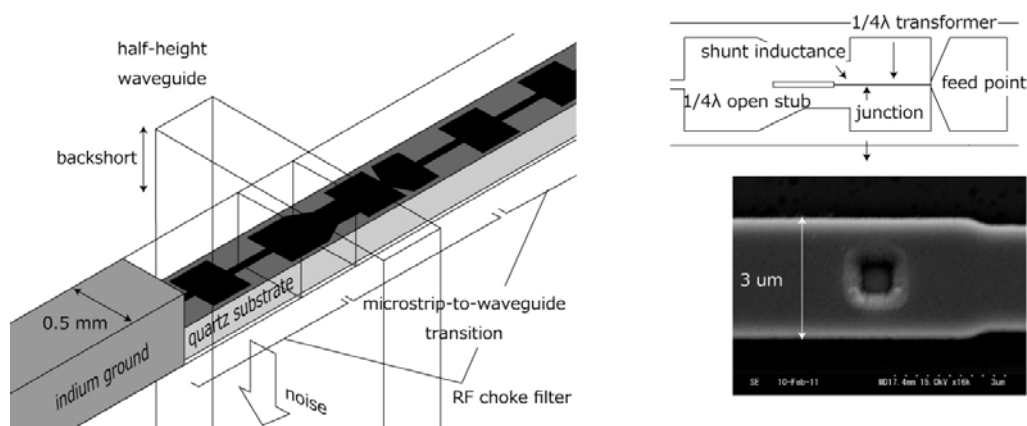


図1 製作した100 GHz帯SIS雑音源全体図（左）。接合、同調回路、インピーダンス変換回路（右上）。接合の拡大写真（右下）。

設計した SIS 雑音源は図 1 に示すようにチップと筐体から構成される。チップはトンネル接合、マッチング回路、バイアス回路の役目も果たすチョークフィルタ、マイクロストリップ-導波管変換

から構成され雑音電力は導波管から出力される。ミリ波という高い周波数帯では SIS 接合自身の幾何学的容量が無視できなくなるため、接合容量を打ち消すためのマッチング回路が必要となる。本研究では接合と並列にインダクタンスを並べたマッチング回路を用いた。広帯域で動作するようにマッチング回路を最適化し、90-110 GHz で反射係数が-20 dB となる SIS 雑音源を設計した。

図2にSIS雑音源の出力をSIS受信機を用いて世界で初めて検出した結果を示す。SIS雑音源の出力は期待された通り、バイアス電圧に対して単調増加する振る舞いを示した。SIS雑音源出力の等価温度を見積もるために、既存の熱雑音源に対するSIS受信機の応答と比較した結果、理論が予測する値の8割程度の等価温度をSIS受信機が検出していることが分かった。

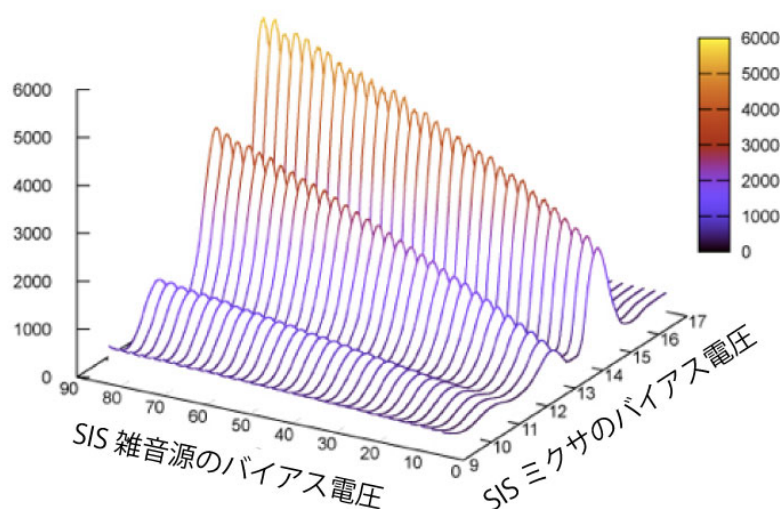


図2. 100 GHz帯でのSIS接合で生じるショットノイズ。
SIS雑音源のバイアス電圧に対して単調増加している。

今後はこのSIS雑音源を用いて、これまでほとんど先行例の無いSIS受信機の線形性の直接評価に取り組むと共に、SIS雑音源自身の広帯域化、高出力化といった改良を進めていく予定である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デバイス技術 「気象レーダ用狭帯域ハイブリッド送信フィルタ技術」

株式会社東芝
研究開発センター 機能材料ラボラトリー
加屋野 博幸

近年、テレビ、携帯電話、無線 LAN 等の電波を利用する機器の利用が拡大し、特にスマートフォンの利用が拡大するにつれて、将来に向けた高速通信への期待が高まっています。こうした期待に答えるために限られた周波数資源を有効に利用し、適正な電波利用環境を確保することが重要になっています。一方、局所的集中豪雨、通称ゲリラ豪雨による水害対策が注目されています。そのゲリラ豪雨対策の一貫として、きめ細かく雨量データを観測する高性能気象レーダの増設が進められております。しかし従来システムのまま気象レーダを増設するためには、多くの周波数帯域が必要となる問題点がありました。そこで割り当て周波数帯域を変えずに運用数を増加させることを目指し、気象レーダーの狭帯域化に向けた研究開発を進めてきました。図 1 に示すような気象レーダごとに割り当てられている周波数間隔が狭まると、気象レーダどうしの相互干渉が課題となります。そこで相互干渉を起こすノイズを遮断するための高耐電力・狭帯域フィルタが求められています。



図 1 気象レーダのイメージ

相互干渉となるノイズを除去する狭帯域なフィルタ特性は超伝導フィルタでしか実現することが出来ませんが、送信用フィルタでは通過する信号電力が大きいために、臨界電流密度特性を持つ超伝導体では大きな問題となります。そこで従来我々は 3.5 kW 固体増幅素子を用いた 5 GHz 帯気象レーダ向けに送信用超伝導ハイブリッドフィルタを開発しました¹⁾。現在の気象レーダは 5 GHz 帯と 9 GHz 帯を利用しており、今回我々は適用範囲拡大を目指して、100 kW クライストロン増幅器を用いた 9 GHz 帯気象レーダ向けの送信用超伝導ハイブリッドフィルタの開発に成功いたしました²⁾。従来以上の高い耐電力性を実現する超伝導共振器と空洞共振器を組み合わせるハイブリッドフィルタ構成をもち、100 kW の耐電力特性と比帯域 0.08 % の狭帯域特性の両立を実現しました。その簡易な動作原理を図 2 に示します。また、開発したフィルタユニットの外観写真を図 3 に示します。本フィルタの狭帯域特性により、相互干渉の原因となるノイズを 1/100 以下にできる特性を実現しました。この技術は気象レーダを日本全国にたくさん運用することが可能であり、ゲリラ豪雨の早期観測に寄与しています。

なお、本研究は総務省の平成 21 年度電波利用料財源技術試験事務「5GHz 帯及び 9GHz 帯レーダの周波数有効利用技術に係る調査検討委員会」の技術成果です。

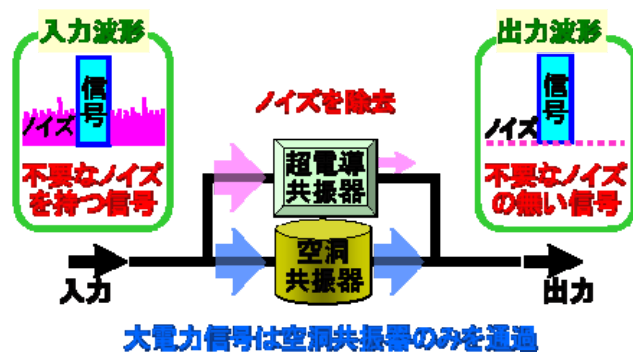


図 2 送信用ハイブリッドフィルタの動作原理



図 3 9 GHz 帯気象レーダ用超伝導ハイブリッドフィルタユニット

参考文献：

1. H. Kayano, *et al.*, "Narrow-band filter for transmitter of radar application," 38th European Microwave Conf., EuMC44-4, pp.853-856, Oct. 2008.
2. H. Kayano, *et al.*, "Narrow-Band Superconducting Hybrid Filter for 100kW Transmitter of X-Band Radar Application," 2011 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., WE2A-5, June 2011.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デバイス技術

「キャリア・アグリゲーションと複数帯域同時通過フィルタ」

株式会社 NTT ドコモ

先進技術研究所 アンテナ・デバイス研究グループ

主幹研究員 檜橋祥一

近年、複数のコンポーネントキャリア（CC）と呼ばれる基本周波数ブロックを同時に用いて通信を行うキャリア・アグリゲーション（CA）¹⁾が、次世代移動通信システムにおける伝送速度向上の要素技術として注目されている（図 1 参照）。CA のシナリオ例（図 2 参照）において、Intra-band CA では低損失で広帯域なフィルタが、Inter-band Non-contiguous CA では低損失かつ複数の通過帯域を有するフィルタ（マルチバンドフィルタ）が、それぞれ重要な役割を担う。

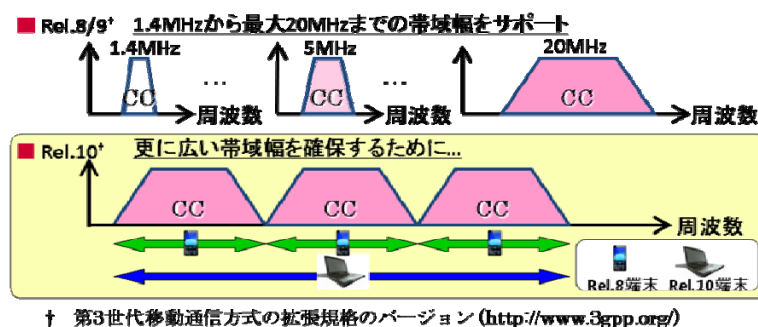


図 1 キャリア・アグリゲーション（CA）

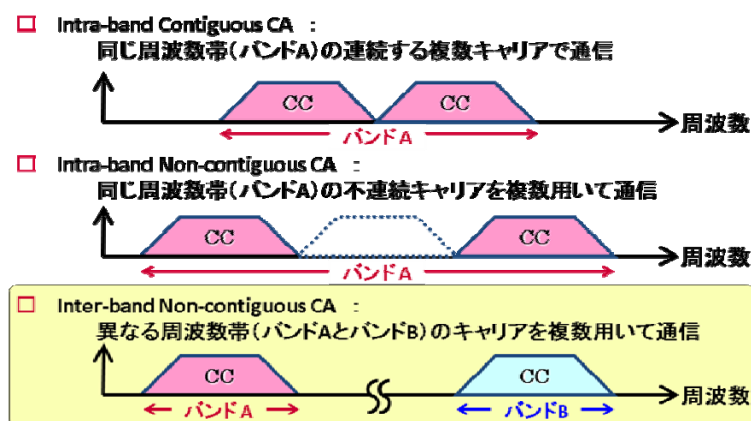


図 2 CA のシナリオ例

一般に無線通信システムの仕様はその通信システムに対する要求条件のみならず、他のシステムとの関係（送信電力、各システムの周波数帯離調間隔等）にも依存するので、マルチバンドフィルタは通過帯域における低い挿入損失に加えて急峻なスカート特性および大きな帯域外減衰量を有することが望ましい。したがって、高温超伝導（HTS）フィルタはマルチバンドフィルタの候補になると考えられる。

ドコモではマルチバンドフィルタの初期検討として、HTS デュアルバンド帯域通過フィルタ (HTS-DBPF) 構成法の研究を進めている²⁾。この HTS-DBPF は多段化を目的とした、共振器間結合係数を各通過帯域で容易に調整可能な構造、すなわちコプレーナ線路 1/4 波長共振器の中心導体と開放スタブを近接配置した構造を有し、中心導体と開放スタブ間で奇・偶モード共振するため、デュアルバンド共振器として動作する (図 3 参照)。また、共振器間の磁界結合に寄与する電流集中部が各モードで異なるため、各モード別に結合係数の調整が容易という特長を持つ (図 4 参照)。

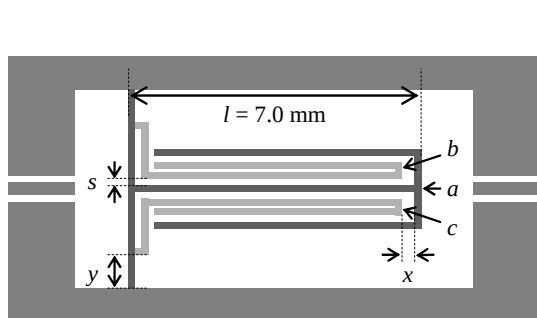


図 3 デュアルバンド共振器

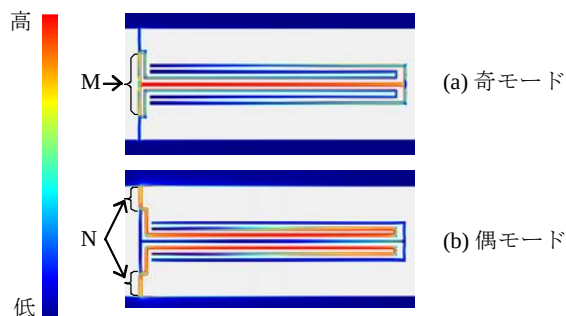
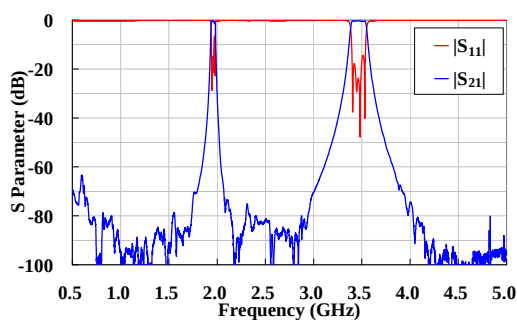


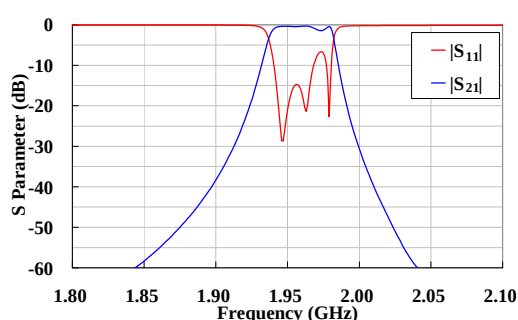
図 4 デュアルバンド共振器の各モードにおける電流密度分布

本構成の有効性を確認するために製作した、チェビシェフ型 4 段 2.0/3.5 GHz 帯 HTS-DBPF の周波数特性を示す (図 5 参照)。このフィルタは比帯域の異なる 2 つの通過帯域をもち、各帯域ともに従来の単一帯域通過フィルタと比較してほぼ同等の特性を得ている。

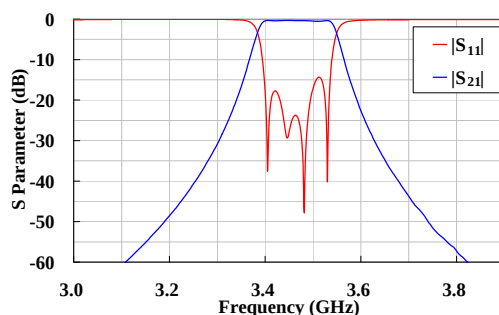
現在、各共振モードの高 Q 化、入出力結合設計自由度の拡張、通過帯域として 3 帯域以上を有するマルチバンド化などの検討も進めている。



(a) 2.0/3.5 GHz 帯



(b) 3.5 GHz 帯



(c) 2.0 GHz 帯

図 5 チェビシェフ型 4 段 2.0/3.5 GHz 帯 HTS-DBPF の周波数特性

参考文献：

1. 三木他 “LTE-Advanced における広帯域化を実現する Carrier Aggregation,” NTT DOCOMO テクニカルジャーナル Vol.18, No.2
2. 佐藤他 “4 段 CPW デュアルバンドフィルタ,” 信学技法 MW08-36, June 2008.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デバイス技術

「SSPD を使用した高速量子鍵配送システム」

独立行政法人情報通信研究機構

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室

三木茂人

急速に発達したネットワーク社会において、情報通信に対する安全性の保証がますます重要になってきている。このような中、理論上どのような技術でも盗聴されずに 2 者間で乱数を共有する技術として量子鍵配送が注目されており、1 ビットごとに排他的論理和を送受信双方で行うことにより情報理論的に安全な通信が可能となる。これまで米国防省や欧州連合のプロジェクトにおける量子鍵配送システムでは、音声データの暗号化が限界で、伝送距離も敷設光ファイバで数 10 km 程度が限界であった。日本では、2001 年から情報通信研究機構（NICT）の産学官連携プロジェクトにより、都市圏で完全秘匿なテレビ会議が実現できる世界最高速の量子鍵配送技術の研究開発に取り組んできた。この、量子鍵配送において、単一光子検出器はその性能を大きく作用するキーデバイスとなっている。ファイバ通信で使用されている波長帯での単一光子検出器として、従来は InGaAs ベースのアバランシェフォトダイオード（APD）が gated Geiger mode で使用されてきたが、超伝導単一光子検出器（SSPD）は InGaAs APD に対して、低ジッタ・低雑音・高速動作等の優位性を示し、量子鍵配送試験にも実際に使用されている。本稿では、2010 年 10 月から試験運用が開始された東京 QKD(Quantum Key Distribution) ネットワークおよび、このネットワークで開発された量子鍵配送に使用されている超伝導単一光子検出システムを紹介する。

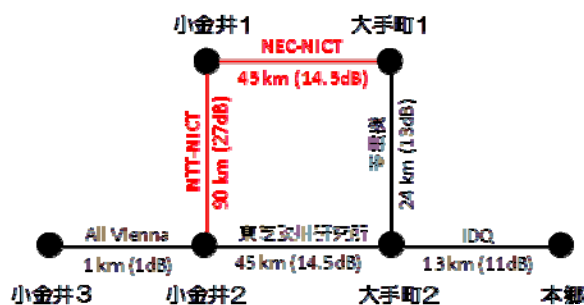


図 1 東京 QKD ネットワーク構成図

東京 QKD ネットワークは、NICT の研究開発用テストベッドネットワークである JGN2plus を元に構成されており、その中で大手町、小金井、白山、本郷の 4 つの拠点を結ぶネットワークとなる。図 1 にネットワーク構成を示す¹⁾。各研究チーム（NEC、三菱、NTT、東芝、IDQ、All Vienna）の装置がそれぞれ対抗で配置されグループ化されており、6 つのノードが存在する。このうち、NTT-NICT、および NEC-NICT ノードにおいて超伝導単一光子検出システムがそれぞれ用いられた。NTT-NICT ノードでは、NTT が開発した差動位相シフト量子鍵配送（DPS-QKD）装置が採用されており、リンク間総距離 90 km（伝送ロス 27-28 dB）において 15 kbps のシフト鍵生成レートを達成することに成功している²⁾。DPS-QKD では 2 つの光子検出器が必要となり、両方に SSPD が用いられた。NEC-NICT ノードでは、波長多重を用いたデコイ法 BB84 プロトコルによる QKD システムを採用しており、45 km 間において 200 kbps 超の暗号鍵生成に成功している³⁾。この際、3 波

長多重を用いる為、試験では、 λ_1 にアバランシェフォトダイオード、 λ_2 、 λ_3 に SSPD（計 8 個）を使用している。2010 年 10 月 18-20 日に開催された量子暗号・量子通信国際会議 2010 では、東京 QKD ネットワークのライブデモが行われ、東京小金井～大手町間での量子鍵配送を用いたビデオ会議の実演が行われた（図 2）。実演時の映像や詳細等は ⁴⁾ において参照する事が可能となっている。



図 2 量子暗号・量子通信国際会議 2010 におけるビデオ会議実演の様子

東京 QKD ネットワークに使用されている SSPD システムの外観を図 3 に示す。AC100 V で駆動可能な機械式 GM 冷凍機を用いる事で、液体寒剤や高電圧電源を必要とせず連続駆動可能なシステムとなっている。また、最大で 6 個の超伝導単一光子検出素子（SSPD）を 1 台の冷凍機システムに搭載することが可能であり、複数個の単一光子検出器を必要とする量子鍵配送に 1 台で対応することが可能となっている。SSPD 素子は、1550 nm 波長帯の入射光子を効率よく吸収するため、光キャビティ構造が付加されており、素子と入射光子の高効率結合を実現するためのパッケージング技術も開発された。これにより、SSPD システムの検出効率が飛躍的に向上し、最大で 30 % 程度のシステム検出効率を得ることに成功している ⁵⁾。また、SSPD システム性能は発展途上であり、今後さらなる性能向上が実現すれば、量子鍵配送システムへのさらなる寄与だけでなく、基礎量子光学や医療、生体イメージング等、様々な研究分野への発展も期待出来る。

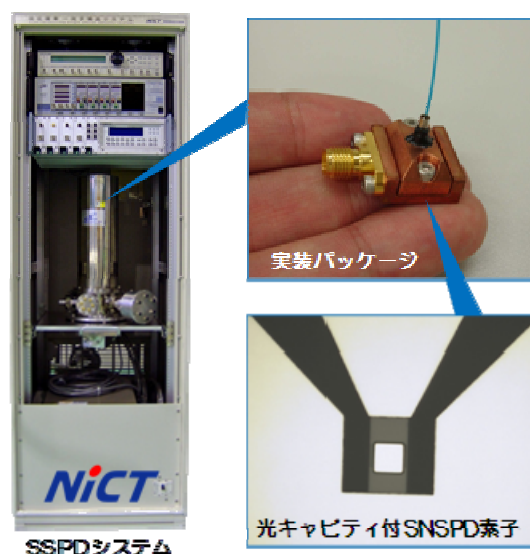


図 3 SSPD システム写真

参考文献：

1. <http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/h22/101014/101014.html> (報道資料)
2. M.Sasaki, *et al.*, Optics Express, Vol. 19, No. 11, pp. 10387-10409, 2011.
3. K. Yoshino, *et al.*, Optics Letters, Vol. 37, No. 2, pp. 223-225, 2012.
4. <http://www.uqcc.org/index.html>
5. S. Miki, *et al.*, Optics Letters, Vol. 35, No. 13, pp. 2133-2135, 2010.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デバイス技術

「テラヘルツイメージング技術の進展」

独立行政法人 理化学研究所

基幹研究所 テラヘルツ光研究プログラム テラヘルツイメージング研究チーム

チームリーダー 大谷知行

テラヘルツ (THz) 波は周波数 0.3-30 THz (波長 3 mm-30 μm) の電磁波であり、赤外線と電波の中間領域のため両者の性質を備える。電波的側面ではソフトマテリアルに対する物質透過性が挙げられ、その中でも最短波長域のため回折が小さく波長程度 (サブ mm) の空間分解能のイメージングが可能であり、様々な工業製品の透視イメージング検査への応用が提案されてきた¹⁾⁻⁵⁾。特に、近年のテロ活動などへの危機感が高まる中、透過性を活用したボディースキャナなど安全・安心分野への展開が本格化している (図 1)⁶⁾。また、結晶性の物質に見られる特徴的な吸収スペクトル構造 (指紋スペクトル) を活用した分光イメージングにより、パッケージ内の物質を透視・弁別することも可能である^{7),8)}。さらに、近距離無線通信でも数 10 Gbps にも至る技術が実現している⁹⁾⁻¹¹⁾。

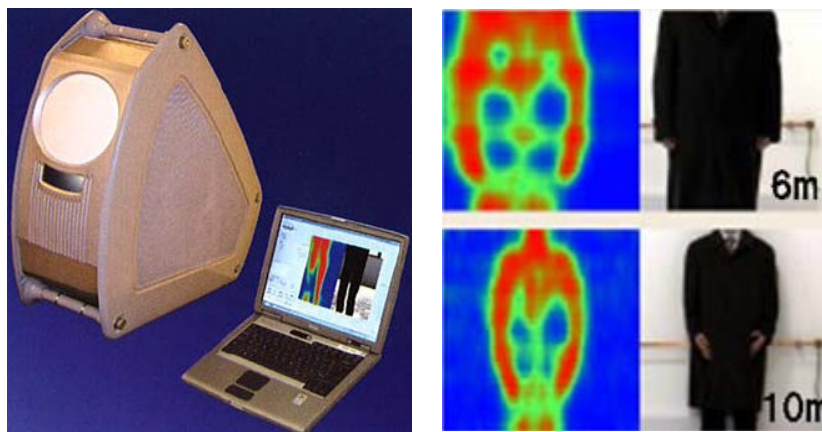


図 1 Thruvision 社の THz イメージング装置 T4000 と THz 画像と可視画像⁶⁾
(コートの下に財布と携帯電話および 4 つの麻薬袋を保持している)

これまでの THz イメージングでは、検出器やサンプルを走査して撮像するものが大半であった。これに対し、NEC は 10 μm 帯の常温赤外カメラを改良して開発したボロメータ型 2 次元アレイセンサの市販を始めた (図 2)¹²⁾。同様のカメラは海外でも開発されてきており、今後 THz カメラの需要が高まると期待される。また、(株) アドバンテスト研究所は、3 次元 THz 断層イメージング



図 2 NEC 製ボロメータ型 THz カメラ¹²⁾

が可能な装置の販売を始め、3 次元イメージングも実用化の域に突入した¹³⁾。NICT の福永らは美術品の非破壊検査を精力的に進めている¹⁴⁾。ルーブル美術館、清水寺など名だたる名所・旧跡で THz イメージング技術が活用されているのは非常に興味深い。また、ソウル大の Song らは、金のナノ粒子ががん細胞に集まるのを利用して、マウスを用いたがんのイメージングをデモして注目を集めた¹⁵⁾。

超電導検出器の活用する宇宙分野でもイメージング技術の進展が加速している。天文観測用の新たな超高感度検出器として注目されるマイクロ波力学インダクタンス検出器 (MKIDs) は、ミリ波・THz 波などの吸収でマイクロ波共振周波数が変化する検出部と数 GHz の信号を送らせる信号読み出し伝送線路とで構成され、1 系統のリードアウトで 100-1000 画素の信号を同時読み出しが可能である¹⁶⁾。このため、大規模アレイ化が容易であり数年以内に 100 万ピクセル級の極低温検出器が登場することが確実視されている。この流れは 1000 ピクセル級の検出器開発が進んでいる超電導転移端センサ (TES) の開発グループにも危機感を与えており、TES の並列読み出し技術の開発も急速に進むと予想される。また、MKIDs は薄膜に特定のパターンを刻むだけで検出器として動作するため、超電導デバイスとしては異例なほど作製が容易であり、開発スピードが速いことも大きな利点である。国内における開発は、高エネ研、岡山大、国立天文台で 2008 年度に開始され、現在では理研、埼玉大、山形大などでも研究が急ピッチで進められており、今後の広がりが注目される (図 3)。

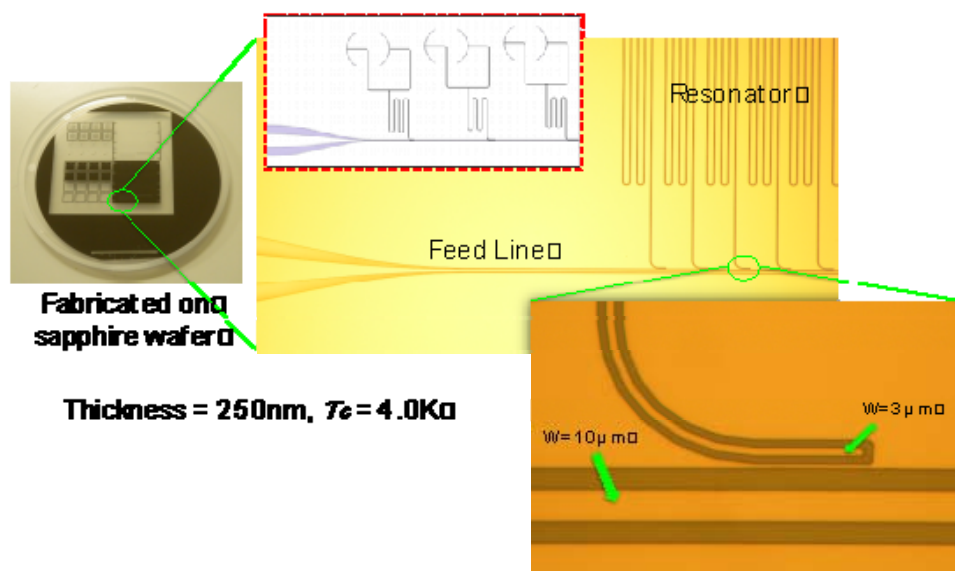


図3 TiN薄膜を用いて作製したMKIDsデバイス¹⁷⁾

宇宙応用以外の超電導デバイスの利用可能性に目を向けると、応用の広がりに伴って THz イメージングへのニーズは著しく高まっているが、常温システムの感度は限定的であるため、そこに低温検出器へのニーズが存在していると見られる。現時点では宇宙用の検出デバイスは感度が $NEP < 10^{-19} W/\sqrt{Hz}$ (@ 0.1 K) と圧倒的であるが、地上利用では 300 K 輻射があるために $NEP \sim 10^{-14} W/\sqrt{Hz}$ で十分であり、機械式冷凍機で実現可能な温度で動作する小型・簡便・安価なシステムが重要となるであろう。

参考文献：

1. T. S. Hartwick *et al.*, Appl. Opt. 15, 1919 (1976).
2. B. B. Hu, M. C. Nuss, Opt. Lett. 20, 1716 (1995).
3. D. M. Mittleman *et al.*, Opt. Lett. 22, 904 (1997).
4. Z. Jiang *et al.*, Appl. Opt. 39, 2982 (2000).
5. M. Tonouchi, Nature Photonics, 1, 97 (2007).
6. <http://www.thruvision.com/>
7. Y. Watanabe *et al.*, Appl. Phys. Lett., 83, 800 (2003).
8. K. Kawase *et al.*, Opt. Express, 11, 2549 (2003).

9. <http://ieee802.org/15/pub/IGthz.html>
10. <http://www.rohm.co.jp/news/111121.html>
11. <http://www.nict.go.jp/press/2011/08/20-1.html>
12. <http://www.nec.co.jp/press/ja/1103/0802.html>
13. <http://www.advantest.co.jp/news/press-2011/20110901/index.shtml>
14. <http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/h20/090225/090225.html>
15. S. J. Oh *et al.*, J. Infrared Milli. Terahz Waves, Online First (2011).
16. P. Day *et al.*, Nature 425, 817 (2003).
17. K. Koga *et al.*, Abstracts of 'Int. Symposium MW/THz Science and Applications (MTSA 2011)', p. 71 (2011).

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デバイス技術

「アタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計 (ALMA) 計画用 Band 10 受信機の量産化」

国立天文台
先端技術センター
鵜澤佳徳

現在、南米チリの標高 5000 m のアタカマ砂漠に、東アジア、北米、欧州の共同プロジェクトである ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) 望遠鏡の建設が急ピッチで進んでいる (図 1)。このうち 16 台の直径 12 m 高精度パラボラアンテナを用いて、ALMA 望遠鏡として初の科学観測となる「初期科学運用」が昨年 9 月末から開始され、すでに画期的な成果を提供し始めている¹⁾。ALMA は、本格運用では合計 66 台のアンテナで構成され、各々のアンテナで受信した天体からの電波信号を、開口合成の方法で処理して天体の電波画像を描く。感度、解像度ともに既存望遠鏡の性能を 1 ケタ以上も凌ぐ、まさに究極の地上電波望遠鏡である。これにより、星や惑星系がどのように誕生するか、宇宙初期にどのように星や銀河が作られたのか、活動銀河核の正体は何か、宇宙のなかで生命につながる物質がどのように形成されてきたかなど、宇宙物理学、天文学、惑星科学における重要問題が次々と解明されることが期待されている。



図 1 建設中の ALMA 望遠鏡。アルマ天文台提供

ALMA はミリ波からサブミリ波帯にいたる波長域のうち、地上から観測できるところをすべて観測する。現計画の観測周波数範囲は 31.5 GHz から 950 GHz までとなっており、それを 10 の周波数帯に分割している。各周波数帯に対応する超高感度ヘテロダイン受信機を用いて、天体からの信号を「波」として捉え、位相情報を保ったままマイクロ波帯の中間周波 (IF) 信号に変換・増幅する。このうち Band 10 は、ALMA の最高周波数帯となる 787-950 GHz であり、受信機技術として最難関である。情報通信研究機構の協力などもあって、1 THz 以上にギャップ周波数を有する窒化ニオブチタンを用いた SIS ミキサの開発に成功し²⁾、最近ようやく世界最高性能の感度を受信機レベルで実証するまでになった³⁾。しかし、この性能をもってしても天文学からの要請で定められた ALMA の仕様 (量子雑音の 5 倍以下) を「カツカツで」適合するレベルなのである。その他にも入力光学特性、偏波特性、振幅・位相安定性、利得特性など多数の電氣的仕様があるのに加えて、機械的強度に対しても仕様が定められている。これは受信機の輸送やアンテナ搭載時に掛かる機械

的負荷にも耐える構造になっている必要があるからだ。このような最高レベルの受信機を 73 台（アンテナ 66 台搭載用とスペア 7 台）ALMA に供給しなければならない。

テラヘルツ領域における受信機の電氣的性能試験方法の確立や機械的構造解析、振動試験などを経て、ALMA 仕様を満足する受信機が完成した。いよいよ量産である。図 2 の写真は、これまで製造した 6 台の Band 10 受信機である。このうち 1 台はすでに出荷試験に合格し、昨年 12 月に北米のインテグレーションセンターに送られた。同センターでクライオスタットに装着され、性能確認試験が行われる。その後チリに送られ、Band 10 受信機のファーストライトを迎えることになる。重要なマイルストーン達成ではあるが、これで喜んではいけない。約 2 年後の ALMA 望遠鏡の本格運用に間に合わせるという国際的責任を果たすためにも、しっかりと量産を推進していく所存である。これからが勝負である。

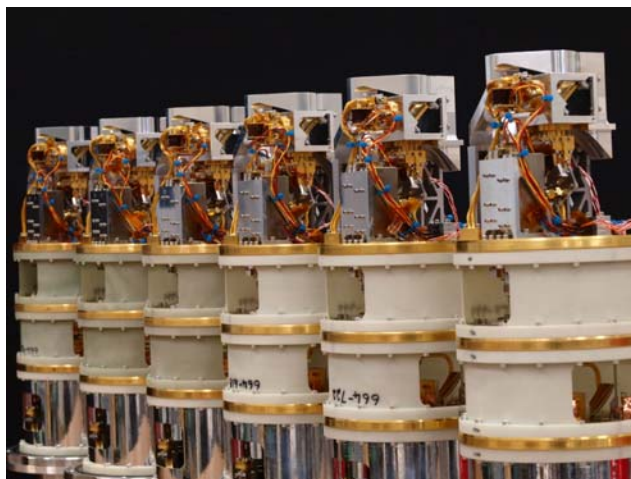


図 2 これまで製造した 6 台の ALMA Band 10 受信機。73 台を製造予定。

本研究開発の遂行には、国立天文台 ALMA グループだけでなく、情報通信研究機構、大阪府大、紫金山天文台など国内外の多くの人の協力、支援を得て達成されたものであり、この場を借りて感謝を申し上げたい。

参照：

1. <http://alma.mtk.nao.ac.jp/>
2. T. Kojima *et al.*, "Three Quanta Sensitivity Superconductor-Insulator-Superconductor Mixer for the 0.78-0.95 THz Band," Appl. Phys. Exp., Vol. 2, 102201, 2009.
3. Y.Fujii *et al.*, "Performance of the ALMA Band 10 SIS Receiver Prototype Model," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.21, 606, 2011.

超電導関連 ‘12/2 月-3 月の催し物案内

2/09

第 4 回超電導応用研究会・第 3 回材料研究会合同シンポジウム/見学会「高品質薄膜と超電導デバイス」

場所：(財) 国際超電導産業技術研究センター

問合せ：http://www.csj.or.jp/application/2012/4th_0209.pdf

2/27－3/2

APS March Meeting

場所：Boston Convention Center, Boston, Massachusetts, USA

問合せ：<http://www.aps.org/meetings/march/index.cfm>

3/15－17

2nd International Lunar Superconductor Applications Workshop

場所：Houston, TX, USA

問合せ：

<http://lunarscience2011.arc.nasa.gov/2nd-international-lunar-superconductor-applications-workshop>

3/15－18

2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会

場所：早稲田大学

問合せ：<http://www.jsap.or.jp/activities/annualmeetings/index.html>

3/19－23

9th International Temperature Symposium

場所：Los Angeles, CA, USA

問合せ：<http://www.its9.org/>

3/24－27

日本物理学会第 67 回年次大会

場所：関西学院大学

問合せ：<http://sci-tech.ksc.kwansei.ac.jp/jps2012sp/>

3/28-30

日本金属学会 2012 年春期大会

場所：横浜国立大学

問合せ：<http://www.soc.nii.ac.jp/jim/>

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (12/19-1/17)

- リニア中央新幹線 ルート選定・駅建設 JR 東海、14 年にも着工 日刊工業新聞 12/19
- レアアース市場独占 重いツケ 内蒙古含鋼稀土が生産再開 Fuji Sankei Business i. 12/22
- 看板電力、風力と太陽光で 外部電源使わず 夜・曇りでも安定 日経産業新聞 12/22
- レアアース、下落続く 7 月ピーク時比 セリウムは 7 割弱安 日本経済新聞 12/22
- レアアース合金原料 昭電、ベトナムで生産 3 倍 中国依存を見直し 日本経済新聞 12/25
- 科技基本計画が本格指導 応用研究に重点、全面に 日本経済新聞 12/26
- 洋上風力発電に参入 日立造船 需要拡大にらみ開発再開 漁業配慮し”網”設置も 電気新聞 12/26
- 中国 レアアース輸出枠維持 来年も 3 万トン ただし管理は強化 朝日新聞 12/28
- 繊維を超電導体に フラーレンナノウィスカー 物材機構が技術 糸や布への加工に道 日刊工業新聞 12/28
- 米で広域送電網事業 現地企業に 2 割出資 三井物産 日本経済新聞 12/28
- 中国、レアアース輸出規制厳格化 来年から「中重希土類」別枠管理 Fuji Sankei Business i. 12/30
- リニアで電力消費増加 周辺住民に不安の声 日刊工業新聞 1/04
- 超電導の炭素繊維 物材機構が開発 糸や布状加工 OK 日経産業新聞 1/05
- 欧州エネ大手、風力に軸足 英 BP が大型投資 日本経済新聞 1/05
- 日中官民が協議会 レアアース 安定供給求める 中国、技術獲得狙う 4 月初回合 日経産業新聞 1/06
- レアアース、調達難の懸念 中国新規制、価格再上昇も 日経産業新聞 1/10
- 洋上風力発電を商用化 清水建設など 超高層ビル技術を応用 読売新聞 1/10
- 風力発電導入量 34%減 11 年、補助金打ち切り影響 日経産業新聞 1/11
- レアアース不要 モーター量産へ 日本電産 Fuji Sankei Business i. 1/12
- 大林組、国際航業と洋上風力発電調査 Fuji Sankei Business i. 1/13
- THK、小型風力向け参入 主軸部品 抵抗抑え微風で回転 日経産業新聞 1/13
- ネオジウム磁石 レアアース 脱中国 本格化 大同特殊鋼、来年 1 月から生産 Fuji Sankei Business i. 1/14
- 磁石合弁、13 年に操業開始 大同特殊鋼 三菱商事など 日経産業新聞 1/16
- 磁性で超電導に 鉄酸化物 より高温の材料に道 岡山大 日経産業新聞 1/17
- 秋田市沖で洋上風力の FS 実施 大林組など 電気新聞 1/17

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き（2011 年 12 月）

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
特別研究員 蓮尾信也

グリッド接続プロジェクト

Tres Amigas（2011 年 12 月 27 日）

Tres Amigas 社は、三井物産株式会社が 12 百万ドルを Tres Amigas SuperStation（全米で実施されているグリッド相互接続の国家プロジェクト）に投資することに合意したことを発表した。その見返りとして、三井物産は出資者としての地位を確立し、プロジェクトに積極的に参加するなど、同社の“スマートグリーン情報技術”のビジネスモデルが一層国際化されることになる。Tres Amigas 社の会長、社長、そして最高経営責任者である Phillip Harris 氏は、「SuperStation の営業運転をするには、大規模なインフラストラクチャの管理と同様に、情報システムと技術を集中的に利用する必要がある。これらの分野における三井物産のグローバルな事業実績は、非常に貴重なものである。」と述べた。SuperStation の建設は 2012 年に着工し、2015 年にはその営業運転の第 1 段階が開始される予定である。

（出典）

“Tres Amigas Announces \$12 Million Investment from Mitsui & Co., Ltd.”

Tres Amigas press release (December 27, 2011)

センサー

National Institute of Standards and Technology（2011 年 12 月 6 日）

はるか遠くの星域を含む、今までに見たこともない宇宙をスキャンできる世界最大のサブミリ波カメラが、ハワイ島マウナケア山頂天文台群にある James Clerk Maxwell 望遠鏡に取り付けられた。このことによって、恒星、惑星、そして銀河の起源についての研究が加速するとの期待が寄せられている。米国立標準技術研究所（NIST）の物理学者 Gene Hilton は、「このサブミリ波カメラは天体画像に残された最後のフロンティアと言える。この波長で作動するカメラを開発するのは非常に困難である。サブミリ波はほとんど未踏技術の領域なのだ。」と語った。カメラには、当機関で開発された 10,000 以上の超電導センサーが採用されている。各センサーはカメラ内で単一ピクセルとして機能し、正確にサブミリ波放射を測定する。当機関が製作したこのカメラは今までにはない世界最大の超電導カメラである。また信号強度を高めるため、センサアレイには超電導アンプがいっしょに組み込まれている。このアンプを使用することによって、低温側にある装置とデータ解析に使用される室温側のエレクトロニクス装置とを結ぶワイヤーの数を大きく減らすことができ、大規模なセンサアレイの実現が可能になる。

（出典）

“Powerful NIST detectors on Hawaiian telescope to probe origins of stars, planets, and galaxies”

National Institute of Standards and Technology press release (December 6, 2011)

<http://www.nist.gov/pml/div686/scuba2-array.cfm>

Aalto University (2011 年 12 月 15 日)

フィンランド、Aalto 大学の物理学者たちは、ナノメカニカル振動子を使ってデバイスを作り、微弱電波やマイクロ波を検出し増幅するのに成功した。このデバイスを使用すれば、測定の際の障害を最小限に抑えることができる。デバイスを構成しているナノメカニカル振動子は、超電導空洞共振器と接触し、ナノメカニカル共振器とエネルギーを交換することによって、共振運動の増幅を可能にさせる。この現象は、ギターの弦とエコーチェンバーが同じ周波数で音を反響させる状況とよく似ている。このデバイスが、近い将来、特定のアプリケーションとして実用化されることは間違いないが、現時点では一層の研究が必要である。尚、当研究グループの実験結果については、最近の *Nature* に掲載されている。

(出典)

“Aalto University researchers demonstrate an almost noiseless nanomechanical microwave amplifier”

Aalto University press release (December 15, 2011)

<http://www.aalto.fi/en/current/news/view/2011-12-15/>

加速器

CERN (2011 年 12 月 13 日)

欧州原子核研究機構 (CERN) で行われた最近のセミナーで、ATLAS^{注1)}とCMS^{注2)}の実験によるスタンダードモデルのヒッグスボソン (ヒッグス粒子) 探索の現状について発表があった。ヒッグスボソンの存在の有無についての結論に達するには、依然としてさらなるデータが必要ではあるものの、その探索実験を大きな進展に導くために十分とも言える大量のデータ分析に基づいて今回の実験結果が出されている。もしヒッグスボソンが存在するとすれば、その質量は116 GeV から130 GeV (ATLAS実験に基づく)、または115 GeVから127 GeV (CMS実験に基づく) の範囲内に制限されていそうであるというのが今回の実験の主な結論である。両実験の質量領域内に興味深いヒントが見られるが、この観察結果ではまだ発見を主張するのに十分とは言えない。ATLAS実験のスークスマンであるFabiola Gianotti氏は、「我々はここ数週間にかけて、125 GeV周辺での質量範囲で興味深い過剰現象を観察し始めている。この過剰現象は振動によるものかもしれないが、もっと興味深いものが起因かもしれない。この時点では何も結論づけることはできない、さらなる研究とデータが必要だ。しかし今年のLHCの見事なパフォーマンスのおかげで、我々は十分とも言えるデータを長く待つ必要もなくなり、2012年にはこのパズルを解くという期待に向けて取り組んでいきたい。」と付け加えた。

注1. A Troidal LHC Apparatus

注2. Compact Muon Solenoid

(出典)

“ATLAS and CMS experiments present Higgs search status”

CERN press release (December 13, 2011)

ヘリウムガス価格

Air Products (2011 年 12 月 15 日)

Air Products 社は、2012 年 1 月 1 日付けで、北米における液体およびバルクヘリウムガス価格を引き上げる旨発表した。値上げの理由として、世界的なヘリウム需要の増加に伴って、ヘリウム市

場の供給不足がより深刻化していることが背景にある。当社は、この供給不足により顧客の要求を満たすことがますます困難になっているため、現状が当面続くことはやむを得ないと述べた。当社担当チームは一丸となって、顧客へ連続した安定供給を維持するために日々困難な状況に対処し、管理徹底に取り組んでいる。

(出典)

“Air Products Announces North America Price Increase for Liquid and Bulk Helium Gases”

Air Products press release (December 15, 2011)

基礎

National Institute of Standards and Technology (「2011 年 12 月 8 日」)

米国立標準技術研究所 (NIST) の物理学者たちは、レーザーを使って原子の内部状態を操作する方法を発見した。これにより、ある特定の方法で原子の相互作用に劇的な影響を与えられることが判明した。光で振られたこれら原子を身代りとして使用することで、実際に他の実験では観察することが困難または不可能な現象を研究することができるのである。最近では、量子計算など超電導応用物理学にとって重要とされる新しいタイプの相互作用が、当研究グループによって実証された。彼らはまず、磁場を使ってルビジウム 87 原子を捕捉し、その後原子を 100 ナノケルビンにまで冷却した。この温度に達すると、原子はボーズアインシュタイン凝縮体を生成し、緩慢に移動する。その後、原子はレーザーを浴びせられ、異なったエネルギー状態と一緒に混ぜ合わされる。この時点で凝縮体は分割され、2 つの部分が発生し合うことでその相互作用がどのように行われるかを確認することができる。レーザーを浴びなかった原子は、主に単純な低エネルギーの相互作用を起こし、均一な球体を形成するが、レーザーを浴びた原子はある一定の方向に散らばる傾向があり、興味深い形を形成する。これは極低温に冷却された原子では通常見られない複雑な相互作用の影響を受けて、このような興味深い形が形成されたことを示唆する。このような相互作用を引き起こす能力によって、全く新しい量子現象の分野が切り開かれ、この分野が一層探求されていくであろう。今後は、この考え方を極低温冷却フェルミ粒子に適用して研究を進めていく予定である。その理由は、フェルミ粒子の研究において、超電導システムに関与し量子計算に重要であると考えられている理論上の粒子“マヨラナフェルミ粒子”の存在を見つけだせることに大きな期待を寄せているからである。当研究グループの最新研究成果は *Science* に掲載されている。

(出典)

“Atoms dressed with light show new interactions, could reveal way to observe enigmatic particle”

National Institute of Standards and Technology press release (December 8, 2011)

<http://www.nist.gov/pml/div684/atoms-dressed-with-light-show-new-interactions-could-reveal-way-to-observe-enigmatic-particle.cfm>

Caltech (2011 年 12 月 13 日)

高温超電導体の性質を説明し、さらに高温の超電導体を作成する手段を提唱した仮説が、カリフォルニア工科大学にいる二人の化学者たちによって立てられた。ストロンチウム原子（ランタン原子を置換する）でドーピングした銅酸化物と最新の量子力学計算を使用し、彼らは、ドーピングされた原子がストロンチウムの周りにある銅原子の中央に 4 個の穴が一まとめとなったユニットを形成することを発見した。彼らはそのユニットを“プラケット”と呼んでいる。プラケットの中にある電子は小さな金属のようにふるまい、そしてプラケットの外にある電子は絶縁体として磁石のような働きをする。この結果は、ドーピングされた原子が追加されたときに何が起るかという疑

問に対して一般的によく知られた予想とは全く逆のものである。5 年間に亘る研究の末、彼らはプラケットの中の穴がどのように超電導に繋がっているのかをついに発見したのである。彼らは、ドーピングされた原子を十分加えると、プラケットが電子の通り道を形成し、物質を通して電子が流れるようになるかと仮定した。プラケットの外側にある磁気電子は、プラケットの経路を移動する電子と相互作用する。この相互作用が電子をペアリング（対に）させ、超電導体に導くのである。さらに、彼らは疑ギャップ現象が起こるのは、他のプラケットと相互作用できない隔離されたプラケットの位置が関係していると仮定した。隔離されたこれらのプラケットには、等しいエネルギーを持つ 2 つの異なった量子状態が存在する。これら 2 つの量子状態は近くにある隔離されたプラケットと相互作用することができ、相互作用した地点でエネルギーに違いが生じ、その違いが疑ギャップ現象を引き起こす原因となるというのである。この仮定によれば、疑ギャップのサイズは、隔離されたプラケットの数を単純に数え、そのプラケットのお互いの距離を測定することで決定することができるという。さらに、当大学の教授である William Goddard III 氏は、「疑ギャップ現象に関与している電子は、超電導に貢献しないという点では無駄な電子である。しかしこの電子の重要な点は、隔離されたプラケットが疑ギャップを引き起こすのであれば、もし我々がドーピングされた位置を制御してこの隔離されたプラケットを除去すれば、超電導温度を上昇させることができるということを示していることにある。」という説明を加えた。化学者たちの予想では、ドーピングされた原子を慎重に管理することで、最高温度約-73 °C で超電導物質を作り出せる可能性があるという。そうなれば、これは真の高温超電導体の創出に向けた重要な一歩となる。当研究グループの最新記事は、The Journal of Physical Chemistry Letters に掲載されている。

（出典）

“Caltech Chemists Propose Explanation for Superconductivity at High Temperatures”

Caltech press release (December 13, 2011)

http://media.caltech.edu/press_releases/13481

Harvard University (2011 年 12 月 22 日)

ハーバード大学の物理学者たちは、余分なエネルギーを除去する量子アルゴリズムを利用して、物質を冷却する新しい方法を発見した。この発見は、極低温の原子気体による“アルゴリズム冷却”の最初の応用ということになる。当研究グループは、単純な量子力学的粒子が相互作用する際に生じる特殊で複雑な挙動を特徴とする量子多体物理学を研究している。このような挙動は、量子コンピュータに応用される可能性のある高温超電導や量子磁性を生じさせる。大学院生である Waseem Bakr 氏は、「我々は、光格子に閉じ込められた極低温原子で合成物質を作成し、実世界の物質をシュミレーションした。このアプローチにより、実際の物質ではできない方法で、個々の粒子をイメージし操作することが可能になる。」と説明した。しかし、このような観察では、ナノケルビン程度の極端に低い温度が必要である。原理を証明するために行われた実験では、温度の原因である原子の揺らぎが蒸発冷却によって収まるのを待つのではなく、その揺らぎを能動的に取り除けることを実証した。“軌道励起ブロケード”というこの現象は、正確に 1 つの原子が 1 つのサイトにできるまで、余分な原子を結晶から取り除くことができる。当研究グループの実験結果は Nature で報告されている。

（出典）

“Harvard physicists demonstrate a new cooling technique for quantum gases”

Harvard University press release (December 22, 2011)

超電導 Web21 トップページ

「6th Workshop of Mechanical-Electromagnetic Properties of Superconducting Materials (MEM11)」報告

独立行政法人物質・材料研究機構
超伝導線材ユニット
西島 元

第 6 回超電導材料の機械-電磁気学的性質に関する国際会議 (MEM11) は 2011 年 12 月 5 日 (月) から 7 日 (水) にかけて、沖縄コンベンションセンター (初日および 2 日目、沖縄県宜野湾市) および万国津梁館 (3 日目、沖縄県名護市) において開催された。

ASC、MT、ISS といった国際会議ではセッションが並列に開催されるため、興味ある講演全てを聞く事が難しい。これに対して MEM ではシリーズセッションで十分な議論が交わされる。小さなコミュニティだからこそ可能な、この会議の特色と言ってよいだろう。第 1 回の MEM は、2001 年の ISS のサテライト会議として神戸で開催された。その後 2003 年 (京都)、2005 年 (京都)、2006 年 (Durham, UK)、2007 年 (Princeton, USA) とほぼ 2 年毎に開催されてきた。2009 年は開催されなかったが、前述の特色もあって関係者の間では再開開催を望む声が多かった。

昨年、長村氏 (応用科学研) および淡路氏 (東北大) を中心に MEM11 開催に向けて現地実行委員が組織された。そして、量子ビームによる歪計測を主たるトピックとし、原子力機構および J-PARC へのテクニカルツアーを含めて茨城県水戸市で開催する計画が動き出した。しかし、東日本大震災後、開催予定地の被災状況や福島第一原子力発電所事故の影響等を考慮し、開催地が沖縄県に変更された。

紆余曲折の末に開催された MEM11 には 10 カ国から 64 人の参加者 (日本からは 29 人) があった。講演数は LTS 歪効果 8 件、ITER 関連 10 件、BSCCO 線材 2 件、量子ビーム関連 10 件、磁束ピンニング 3 件、標準化 (VAMAS-TWA16 年次会議との共催) 8 件、HTS 歪効果 9 件、HTS ケーブル 2 件、強磁場マグネット 4 件の 9 分野、56 件であった。各講演には 5 分の質疑応答を含む 20 分が割り当てられたが、多くの講演に対して熱心な質疑応答が交わされ、座長が議論を打ち切る場面も散見された。

LTS 歪効果では、主として磁場中における Nb_3Sn 臨界電流の歪依存性について、引張り型、Walters Spring、U-shape、Pacman 等様々な技術を駆使したデータが報告され、装置間比較、3 次元歪モデルによる解釈、量子ビームによる格子歪変化観察結果に基づく解釈等、広範な議論が交わされた。

ITER 関連では大電磁力 (大電流×強磁場) によるケーブル・イン・コンジット導体 (CICC) 劣化や電磁現象の解明が続けられている。分布定数回路、材料力学、伝熱等の連成解析であるが、現象を十分に説明できるモデルはまだ見出されていないようである。

量子ビーム関連としては、J-PARC 「匠」と JRR-3 RESA の装置担当者から装置の現状について紹介があった。J-PARC は震災により大きな被害があったものの復旧が進み、年内に再起動を予定しているとの前向きな報告であった。これらの量子ビームを使った RE 系テープ線材の格子歪測定結果についても数件の報告があり、歪効果の ab 面内異方性と格子歪の異方性の関連が議論された。

HTS 歪効果としては、Hampshire が LTS の温度・歪スケーリングと HTS のそれとの違いを示し、新たなスケーリング則を提案した。これは Durham 大の広範な実験データに基づくものであるが、今後他グループによる検証が望まれる。

3 日目は会場を万国津梁館に移し、会議およびバンケットが催された。会場は美しい海を望む高

台にあるブセナリゾートの一角であり、好天に恵まれたこともあって参加者も気分転換できたようである。会議の最後には、次回 MEM が 2013 年 3 月にエクス・アン・プロヴァンス（フランス）で開催されることも報告された。バンケットでは夕日を見ながらアペリティフを楽しみ、多くの沖縄料理、泡盛に加えてハブ酒も提供され、外国からの参加者も十分に楽しめたようであった。

通常であれば講演内容を中心に記すべきところを、筆者が実行委員の一人であったこともあり、本稿では運営側の立場から記した。最後に、沖縄ポートホテル、沖縄コンベンションセンター、万国津梁館を始めとする沖縄の皆さんのホスピタリティに感謝するとともに、本会議に協賛し、開催に協力して下さった企業の皆さんにも厚く御礼申し上げる。



MEM11 集合写真

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導マグネット開発のこれまでとこれから（その 1）

独立行政法人 理化学研究所
生命分子システム基盤研究領域 NMR 装置技術研究チーム
チームリーダー 前田秀明

本連載では、はじめに超電導マグネット技術の歩みを簡単に紹介します。次に実用的な超電導マグネットの開発について述べ、最後に、高温超電導マグネットの技術課題と今後の方向について述べます。

1. Kammerlingh Onnes の試み

1911 年に Kammerlingh Onnes は超電導を発見した直後に、鉛のワイヤで小さなコイルを作り、液体ヘリウム中で通電しました。これが世界初の超電導マグネットです(図 1)。結果はさんざんで、少しの電流を流しただけでコイルが常伝導に転移してしまい、数百ガウスしか磁場を発生できませんでした。鉛の臨界磁場を越えることができなかったわけです。これにより、彼は超電導線を用いてマグネットを作ることは不可能であると考えました。彼が製作したマグネットは今でもオランダの博物館に展示してあります。このころ、彼は「30 cm 径の超電導マグネットで 10 テスラ (10 T) の磁場を得る」という夢を語っています。夢の実現には、半世紀の歳月が必要でした。



図 1 Kammerlingh Onnes の超電導コイル¹⁾

2. 超電導マグネットの黎明期

Kammerlingh Onnes による挫折の後で、長いブランクを経て、1950 年代にニオブ (Nb) ワイヤによる超電導マグネットが試作されました。Nb は第 2 種超電導体で、0.4 T の上部臨界磁場を持ちます。当時は第 2 種超電導体という認識はありませんでしたが、高磁場まで耐える線材として注目されていました。1954 年にイリノイ大学の Yntema らが Nb 線を鉄芯に巻いた超電導コイルで 0.71 T の発生に成功しました²⁾。また、1960 年には MIT の Autler らが空芯で 0.43 T、鉄芯で 1.4 T の発生に成功しています³⁾。Autler のマグネットを図 2 に示します。これらは大変大きな技術の飛躍であり、新しい時代の先駆けとなりました。

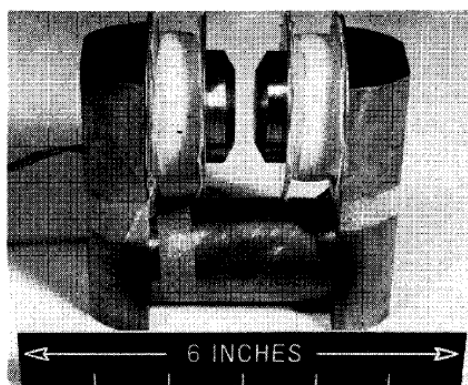


図 2 Autler による Nb 線を巻いた 1.4 T 鉄心マグネット³⁾

1960 年代は超電導マグネットにとって画期的な時代でした。1961 年に Bell 研の Kunzler ら⁴⁾が、Nb のチューブに Nb_3Sn または Nb と Sn の粉末を入れて加工して Nb_3Sn の線材化に成功しました。同じころ、Westinghouse の Hulm ら⁵⁾が合金系の NbZr を用いた超電導線材を開発しました。金属間化合物系の Nb_3Sn 線材と合金系の NbTi 線材は、今に至る二つの実用超電導線材の流れを形成しています。両者がほぼ同じ時期に発明されたのは大変興味深いことです。1961 年に MIT で開催された高磁場会議は、さながらマグネット磁場の競技会になりました。Kunzler らは Nb_3Sn マグネットで 6.8 T、Hulm らは NbZr マグネットで 6 T の中心磁場を報告しています。図 3 に、Kunzler らによる世界初の超電導マグネットの特許を示します⁶⁾。

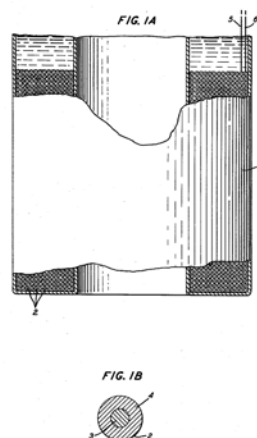


図 3 世界初の超電導マグネットの特許、上はマグネット、下は Nb_3Sn 線材⁶⁾

粉末法による Nb_3Sn 線材は、その後、拡散テープ線材として独自の発展を遂げました。これは Nb と Sn を直接反応させてテープ表面に Nb_3Sn 層を生成するもので、IGC 社から 10 テスラ以上の高磁場マグネットが製品化されました。但し、フラックスジャンプによるクエンチが発生しやすいこと、遮蔽電流による磁場ヒステリシスが大きいことなどの欠点がありました。後者は、テープ線材に特有の現象であり、現在の高温超電導マグネットでも問題になっています。これらの欠点のために、拡散法の Nb_3Sn テープマグネットは現在では使用されていません。1970 年代に、金属材料技術研究所の太刀川ら⁷⁾の研究などにより Nb と Sn の間に銅を介在させることで、低温で効率よく線材を製造できることが明らかになりました（ブロンズ法）。現在では、この製法の Nb_3Sn 線材がマグネットに広く使用されています。

合金系線材では、加工性に優れ臨界磁場が高い NbTi 線が利用されるようになりました。1965 年には Hulm らが、NbZr と NbTi 線材を用いて 10 T を発生したことを報告しています。

3. 超電導マグネット基礎技術の構築

1960 年代の技術革新により超電導線材が製造され、容易に入手できるようになると共に、多くの超電導マグネットが製作されました。それに伴って、超電導マグネットに固有の問題が明らかになってきました。中でも、線材の臨界電流よりずっと低い電流でマグネットが突然常伝導に転移するクエンチが開発者を悩ませました。クエンチが起こると、電源が落ち、液体ヘリウムが蒸発するばかりか、コイルが焼損することもありました。

第 2 種超電導体に外部から磁場を加えると磁場を遮蔽する超電導電流が流れます。外部磁場の増加と共に磁場は超電導表面から徐々に内部に侵入しますが、瞬間的に外部磁場が線材内部に侵入することがあり、これをフラックスジャンプといいます。このころクエンチは主にフラックスジャンプにより生じることが明らかになってきました。

1965 年に米国 AVCO-Everett 研究所の Stekly らは、超電導線材に銅材をたくさん付加し、液体ヘリウムによる冷却を十分にとれば、たとえ線材の一部が常伝導になっても再び超電導状態に復帰できることを示しました⁸⁾。これを完全安定化法といいます。クエンチさせたくない大きなマグネットでは今でも広く使われています。

完全安定化を採用すればクエンチは防げますが、マグネットの電流密度は低くなります。そこで、クエンチの原因であるフラックスジャンプを防ぐ手法が研究されました。1970 年に英国 Rutherford 研究所の Wilson らは、安定化銅マトリクスの中に数十ミクロンの細い超電導フィラメントを多数埋め込んで線材を作り、よじり加工を施せば、フラックスジャンプを抑制できることを示しました⁹⁾。これを複合多芯線と呼びます（図 4）。この手法は、今でも、超電導線材の基本的な製造方法になっています。

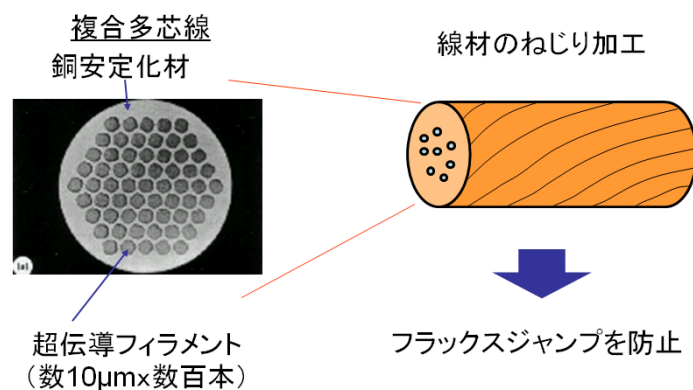


図 4 複合多芯線

線材の複合多芯化によりフラックスジャンプは防止できるようになりましたが、クエンチは依然として残っていました。このクエンチは、電磁力で超電導線材がわずか（数ミクロン）に動き、摩擦熱で温度が上昇して生じることが分かってきました。巻き線をエポキシ樹脂で含浸すると、電磁力による線材の動きを抑える上で有効なのですが、この場合も電磁力による剥離でクエンチが生じます。この種の発熱を機械的擾乱と呼びます。1980 年代に、岩佐ら¹⁰⁾により、機械的擾乱によるクエンチの研究がなされましたが、今に至るまで低温超電導の課題として残っています。

4. まとめ

以上のように構築された超電導マグネット技術が基礎になり、たくさんの超電導プロジェクトが立ち上がりました。次回は、この種の実用超電導マグネットについて 2 回に分けて解説します。

参考文献:

1. <http://www.physicscentral.com/explore/pictures/supercoil.cfm>
2. G. B. Yntema, Superconducting winding for electromagnets **98**, Physical Review, 1197 (1955).
3. S. H. Autler, Superconducting electromagnet, Rev. Sci. Inst. **31**, p369 (1960).
4. J. E. Kunzler, Superconductivity in High Magnetic Fields **33**, p501 (1961).
5. H. Riemersma et al., A variable composition, high field solenoid, J. Appl. Phys. **33**, 3499 (1962)
6. USP 3,124,455
7. 太刀川恭治、金属系超伝導線材[1]研究開発の歩み、低温工学、**44**, p456(2009).
8. Z. J. J. Stekly and J. L. Zar, IEEE Trans. **NS12**, 367 (1965).
9. Superconducting Applications Group, Experimental and theoretical studies of superconducting composites, J. Phys. D: Appl. Phys. **3**, 1517 (1970).
10. H. Maeda, O. Tsukamoto and Y. Iwasa, The mechanism of frictional motion and its effects at 4.2K in superconducting magnet, Cryogenics **22**, 287 (1982) .

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q:「最近、金属原子 1 層で超電導状態になることを発見、との記事がありました。今後どのような展開が期待されるのでしょうか?」

A: 主として 2 つの方向性を考えています。一つは、物質探索などによって超電導転移温度 (T_c) を上昇させることです。新聞発表などでは一般の読者にとってわかりやすくするために、金属原子 1 層という言い方をしましたが、厳密に言うと基板のシリコンが及ぼす影響を考える必要があります。すなわち、シリコン原子と金属原子（この場合はインジウム原子）はかなり強く結合しており、超電導になるのは、このシリコンと金属原子が一体になった表面系であると考えた方がより正確です。このような系は、専門的には表面超構造と言われている、表面に吸着した金属原子や基板の種類、基板の面方位、試料作製時の温度などによって、極めて多種多様な構造をとることが知られています。すなわち、物質探索には非常に適した系であって、このような中には、当然超電導になるものもたくさんあると考えられます。基本的にバルクとは異なった物質ですから、 T_c がバルクの金属より高くなることも十分に考えられます。また、究極的に薄い超電導体であることを利用して、ゲート電極によってキャリアを注入して、 T_c を上げることもできるかもしれません。

もう一つは、デバイス応用です。近年注目されている単一量子磁束演算素子や超電導単一光子検出器には超電導薄膜が使われますが、ここで扱っているものは 1 原子層の膜厚の超電導体ですから、微細化して高集積化や高速化を目指すのには適していると思われます。特に私たちが期待しているのが、超電導単一光子検出器への応用です。マイクロカロリメータ方式では、光子の吸収がもたらす温度上昇によって超電導状態が破壊されることを利用しています。ここでは単原子層の薄膜であるため、熱容量が極めて小さいため感度が上がり、基板との密着性も良いので、熱が基板に容易に拡散して応答速度が上がることも期待できます。また、シリコンなどの基板には単原子の高さに相当するステップ構造があって、そこで金属原子層は断絶しています(図 1 を参照)。私たちの実験結果は、そこでジョセフソン接合ができていることを示唆しています。ステップ構造は原子スケールで均一ですから、ジョセフソン接合の特性も均一のはずです。すなわち、特性のそろった天然のジョセフソン接合が大量に存在していることになります。このようなジョセフソン接合を取り出してナノテクノロジーを駆使して制御し、デバイスに応用することも考えています。

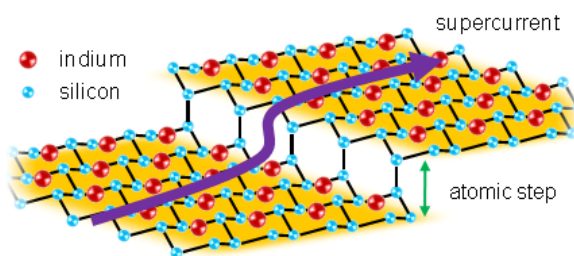


図 1 シリコン基板上にインジウム原子が一層配列した試料の模式図。基板上には単原子の高さに相当するステップがある。

回答者：独立行政法人 物質・材料研究機構 内橋 隆 様

[超電導 Web21 トップページ](#)

「Web21 についてのご意見・ご感想、「読者の広場」その他で取り上げて欲しい事項、その他のお問い合わせは、超電導 Web21 編集局メール web21@istec.or.jp までお願いします。」