

掲載内容 (サマリー) :

特集 : 超電導マイクロ波デバイス技術

- 超電導マイクロ波デバイス技術の展望
- デバイスと送受フロントエンド化
- 気象レーダー用超電導フィルタ技術の進展
- 高温超電導体の固有ジョセフソン接合を用いた THz 波発振技術の進展
- テラヘルツ波検査技術の進展
- 広帯域テラヘルツ波受信器開発とガス分光への応用

- 超電導関連 2-3 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン (12/20-1/19)
- 超電導速報—世界の動き (2008 年 12 月)
- 応用物理学会超伝導分科会第 38 回研究会
「エネルギー・環境問題解決の鍵を握る超伝導技術の進展」報告
- 隔月連載記事—超電導と MRI / NMR (その 1—原理と構造)
- 読者の広場(Q&A)—テラヘルツ波とはどのようなもののでしょうか?

[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) 3536-7318

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



この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



特集：超電導マイクロ波デバイス技術

「超電導マイクロ波デバイス技術の展望」

山形大学
大学院理工学研究科
教授 大嶋重利

大学や企業の研究者・技術者により、超電導分野技術戦略マップに関する検討委員会が 2005 年に結成され、その委員会により超電導技術の実用化戦略の調査が行われた。2006 年 3 月に、戦略マップや導入シナリオが提案されている。情報通信分野における超電導デバイスは、コンピュータ・ネットワーク機器（主に SFQ ルータ・スイッチ、SFQ コンピュータ、サーバ）と無線アクセス系機器（主に無線用 AD コンバータ、受信フィルタ、送信フィルタ、衛星通信機器）が重要検討課題として取り上げられた。あれから 3 年が経ち、現状ではどのような展開になっているのであろうか。最近の超電導マイクロ波デバイス技術の展望と題して、当時の戦略マップと現状を比較しながら述べてみたい。特に、私の研究と関連が深い無線アクセス系機器の超電導マイクロ波デバイス技術について言及したい。

2006 年 3 月に提案されたロードマップでは、3 年後の 2009 年には主に次の技術が確立・普及していると予想された。

A 受信用超電導フィルタ技術：

1 システム当たり 200 万円程度で供給できる。

B 送信用超電導フィルタ技術：

～30 W クラスのフィルタが実現

この 2 点の技術は今どのような現状であろうか。

(A) 受信用超電導フィルタ技術

超電導フィルタのコストは、大きく分けて ①小型冷凍機システム（含真空チャンバー等） 価格 ②超電導フィルタの価格 ③電子機器（制御系や増幅器等） 価格に大別できる。最近小型冷凍機の技術は大きく進歩し、富士電機システムズ（株）では 77 K・1 W 冷凍能力のパルス管冷凍機を、150 万円を切って市販している。超電導フィルタの価格は、薄膜の価格でほぼ決まる。安定に超電導薄膜を供給できる企業は、残念ながら未だドイツの THEVA 社だけである。日本でも幾つかの企業が「市販」を目指した取り組みを検討しているが、需要予測が掴めないことで、立ち往生している。電子機器の価格は、現有の常温フィルタと同じ価格でほぼ作製できるので問題はない。超電導フィルタ特有の低温低雑音増幅器（LNA）も問題なくクリアできている。従って、3 年前の予測、200 万円には遠いが、確実に予定価格に近付いてきている。

(B) 送信用超電導フィルタ技術（ハイパワー用超電導フィルタ）

超電導フィルタのもう一つの応用分野は、送信用フィルタである。現有の送信フィルタは、帯域外遮断特性が小さく、スカート特性が悪い。従って周波数の有効利用が難しく、また基地内の他の信号の回り込みを抑制できない。そのために、送信用の増幅器をオーバースペックで設計しなければならず、コスト高をまねいている。送信用フィルタも超電導で作製し、帯域外遮断特性を 60 dB 以上にし、またスカート特性も大きくできれば、現有の送信系のコストダウンを図ることが可能とな

る。送信用超電導フィルタは未だ、研究・開発段階である。ここ数年の間に報告されている幾つかの例を紹介したい。

日本：ハイパワー用超電導フィルタを精力的に検討しているのは、富士通（株）、（株）東芝と山形大学である。富士通は、ディスク型共振器を用いたデュアルモードフィルタの研究を行い、耐電力数十 W のフィルタの開発に成功している。東芝は、超電導薄膜と誘電体を組み合わせた複合フィルタを提案し数百 W 以上の耐電力フィルタの開発に成功している。山形大学では、バルク型フィルタや分割型マイクロストリップ線路を用いた平面型フィルタを提案し数 W 以上の耐電力を報告している。

海外での超電導フィルタの研究はどのようになっているのであろうか。超電導フィルタの研究・開発を行っている主な研究機関は、イギリスのバーミンガム大学 (Lancaster 教授)、中国の清華大学 (Cao 教授)、中国科学技術院 (He 教授)、台湾大葉大学 (Wang 教授)、米国の STI 社のグループと限られてきた。ドイツの Cryoelectra 社や韓国の RFtron 社は、活動をしているのであろうが、論文発表等はほとんどしていない。上記の研究機関でも、活発に論文発表等行っているのは、Cao 教授のグループである。ハイパワーフィルタ、超狭帯域バンドパスフィルタ、チューナブルフィルタなど、ここ数年精力的に発表している。

超電導マイクロ波デバイス、特にハイパワーバンドパスフィルタ、群遅延線路、衛星通信用マルチプレクサーなどは極めて高い性能を持っており、十分実用化の可能性はある。しかし、他の通常機器と比較して、コスト・信頼性・メンテナンスなどで「問題あり」という烙印を押されて苦戦している。これを払拭することが重要であるが、この問題は超電導機器全てに当てはまるものである。超電導機器のイメージを転換することが重要である。我々も「Yes, we can」で取り組む必要がある。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導マイクロ波デバイス技術
「デバイスと送受フロントエンド化」

富士通株式会社
モバイルシステム事業本部開発技術統括部
山中一典 栗原和明

UHF～低マイクロ波帯などで用いられる無線受信用の酸化物高温超電導(以下 HTS) フィルタは、より大きなマイクロ波電力を扱う HTS フィルタに比べ、比較的早く研究開発が進展しました。以前ご紹介したように¹⁾、マイクロ波電力 HTS フィルタの無線応用としては基地局、中継装置などの無線機高周波 (RF) 部の送信部の周波数選択が挙げられます(例えば図 1 の構成)。応用により周波数、周波数帯域、所要電力の大きさなどの条件は多様ですが、同じ無線システムにおいて、送信用は受信用に比べ多くの場合、数十 dB～百数十 dB 以上の高い電力を扱うことになります。高 Q 特性で高い周波数選択性のフィルタを送信部に用いることで、送信波のうち所要帯域外の不要成分の電磁波輻射を低減できるため、種々の無線システムの与干渉低減に効果が期待できます。例えば、隣接の周波数に異なる無線システムの高感度受信系を近隣に置くことも可能になるでしょう。このようなことから HTS 送信フィルタは送信系の高性能化の有望な候補と考えられます。以下では、HTS フィルタの電力化を図った方法と装置化の技術について、筆者らが関わり研究開発を進めた幾つかの事項について既述も含めご紹介いたします¹⁾。

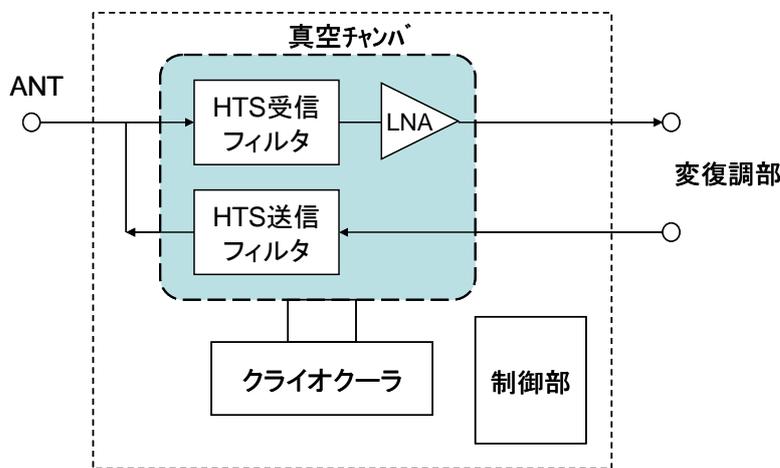


図 1 HTS 送受フロントエンドのブロック概要¹⁾

図 2 に示すように、受信用でよく用いられる比較的細いライン形状パターン共振器に比べて、扱える電力を向上するためにディスク形状パターン(以下、ディスクパッチ)にした共振器やそのフィルタは有効と考えられますが、多段化した場合、相対的にフィルタ寸法が大きくなり、共振器間の電磁的な結合も制御しにくくなります。以前にもご紹介したように¹⁾ 独自工夫の 2 重共振モードの HTS ディスクパッチ型の共振器や、さらに帯域外に減衰極を導入したフィルタ構造を検討し試作の結果、5 GHz 帯で -70 dBc (10 W 時) 以下の 3 次相互変調歪 (IMD3) 特性が得られる条件を明らかにしました^{2),3)}。また、ディスクパターン上に誘電体板を置き電力特性などを改善する方法なども開発しました^{4),5)}。2 重モードのディスクパッチ共振回路間結合のための課題明確化と結合方法

の改善を図りました⁶⁾。また、2重モードのディスクパッチ共振器をさらに多段化した HTS フィルタを試作し電力動作を確認しました⁷⁾。

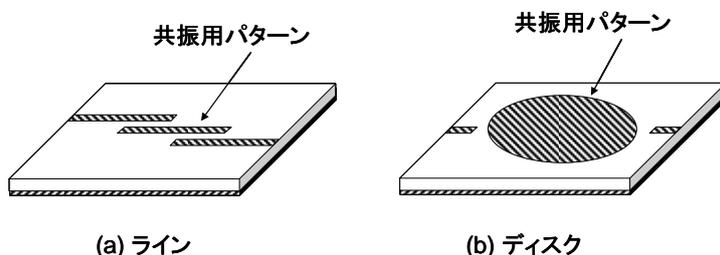


図2 共振用パターン典型例 (マイクロストリップ型半波長共振器の場合の模式図)

これらの技術を活かし HTS 送信フィルタを HTS 受信フィルタと共に搭載した、5 GHz 帯の無線基地局用フロントエンドを設計、試作して試験動作に成功しました^{8),9)}。試作フロントエンドは屋外仕様とし、容積 15 L 弱 (コネクタなどの突起部分を除く) と 1 人で可搬できる寸法にできました。このようなフロントエンドの冷却ユニットへの搭載に向け、高信頼動作・COP 改善を狙いパルスチューブ冷凍機が開発されました¹⁰⁾。RF 増幅器で増幅した広帯域のテスト変調信号を開発 HTS 送信フィルタに通過させて電力スペクトラム特性などを評価した結果、不要成分を十分に抑圧したスペクトラム特性を得ることができました¹¹⁾。

最後に、本稿で紹介した事柄の一部分は、総務省の「電波資源拡大のための研究開発」のうち「移動通信システムにおける高度な電波の共同利用に向けた要素技術」のうち「超伝導フィルタ技術の研究開発」について、総務省から委託された研究開発によります。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 山中、栗原、“超電導フィルタの電力応用技術の進展”、超電導 Web21, 2月号, p5-6, 2008.
- 2) M. Ishii, A. Akasegawa, T. Nakanishi, K. Yamanaka, J. of Phys. Conf. ser.97, (2008)012149.
- 3) 赤瀬川章彦, 中西輝, 山中一典, 石井雅俊, 信学技報, SCE2007-8, MW2007-8(2007-04), pp37-41, Apr. 2007.
- 4) Akasegawa, K. Yamanaka, T. Nakanishi, M. Kai, Physica C 445-448, pp.990-993, 2006.
- 5) K. Yamanaka, M. Kai, A. Akasegawa, T. Nakanishi, J.of Phys. Conf. Ser.43, pp.1358-1361 2006.
- 6) K. Yamanaka, M. Ishii, A. Akasegawa, T. Nakanishi, J.D. Baniecki, K. Kurihara, Physica C 468, pp.1950-1953, 2008.
- 7) 山中、石井、佐藤、赤瀬川、中西、栗原、応用物理学関係連合講演会、27p-NA-9, 春, 2008.
- 8) M. Shigaki, Y. Hagiwara, K. Yamanaka, K. Kurihara., “Design for a Superconducting Filter Front-End,” APMC 2007 proceedings.
- 9) K. Yamanaka, K. Kurihara, “Superconducting Tx and Rx Filters for the Low Microwave Band,” ISS 2008, FD-17-INV, Oct. 2008.
- 10) N. Matsumoto, Y. Yasukawa, K. Ohshima, T. Takeuchi, T. Matsushita, Y. Mizoguchi, J. of Power and Energy Sys., vol.2, No.5, 2008.
- 11) K. Yamanaka, K. Kurihara, A. Akasegawa, M. Ishii, T. Nakanishi, “Spurious suppression effect by transmit bandpass filters with HTS dual-mode resonators for 5 GHz band,” IEICE Trans. Electron., to be published.

特集：超電導マイクロ波デバイス技術
「気象レーダー用超電導フィルタ技術の進展」

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、デジタルテレビ、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、将来に向けた高速通信への期待が高まっている。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ますます重要になっている。特に 5 GHz 帯の無線 LAN は爆発的な利用増加のため、周波数の有効利用が急務となっている。弊社では、5 GHz 帯無線 LAN の周波数帯域拡大を想定し、5 GHz 帯気象レーダーシステムの狭帯域化のための研究開発を進めてきた。先の報告で 4 倍の信号密度で配置された信号を分離して受信するための受信用の狭帯域超電導フィルタを報告した^{1), 2)}。本報告では隣接信号への不要な電波放射を低減するための送信側の狭帯域フィルタに関して報告する。

図 1 に気象レーダー向け送信用フィルタに求められる耐電力性と超電導フィルタの耐電力性との比較を示す。一般的に受信フィルタでは通過する電力が小さいことから耐電力特性が問題となることはあまり無かったが、送信用フィルタでは通過する信号電力が大きいため、臨界電流密度特性を持つ超電導体では大きな問題となる。電流集中を低減させる共振器構造で数十ワット程度の送信用超電導フィルタが報告されているが、耐電力特性、狭帯域性と歪の問題等の多くの課題を抱えている。気象レーダーに求められる 3 桁以上の高耐電力性を実現するために、我々は耐電力性に優れた空洞共振器と狭帯域低損失性に優れた超電導共振器を用いるハイブリッドフィルタを開発した³⁾。その動作概念を図 2 に、動作原理を図 3 に示す。ハイブリッドフィルタでは大電力をバイパスさせる構成を持ち、小さな電力成分の不

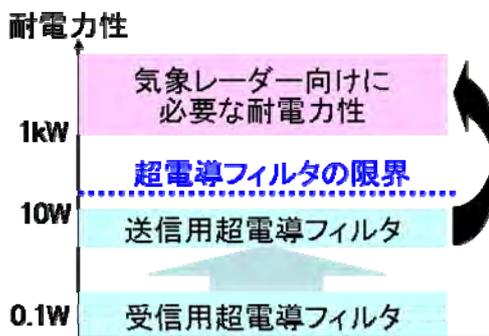


図 1 気象レーダーに必要な耐電力性

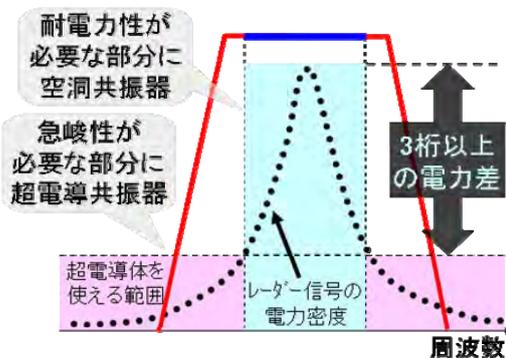


図 2 ハイブリッドフィルタの概念

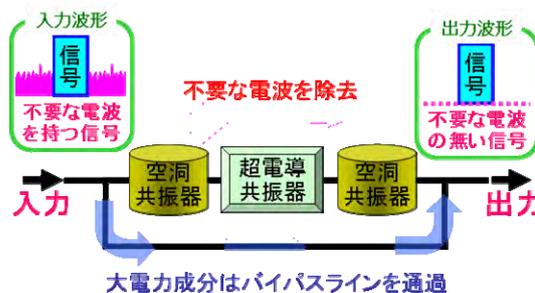


図 3 ハイブリッドフィルタの動作原理

要な信号のみを超電導共振器に通すことで急峻な特性と高耐電力特性の両立に成功した。開発したフィルタユニットの外観写真を図4に示す。19インチラックマウントタイプで15Uのサイズである。フィルタ特性としては挿入損失1.5 dB以下で比帯域は0.075%の狭帯域特性を実現した。また、気象レーダーとの接続試験により、3.5 kWでの動作を実証し、不要な電波放射を1/10以下に抑制可能であり、-60 dBc以下の低相互変調波歪特性を持つ信号波形を実現した。このフィルタにより最大4倍の周波数利用効率が期待できる

なお、本研究は総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発」の一環として実施された。

参考文献

- 1) 加屋野, 橋本, "気象レーダー用超電導フィルタの開発," 超電導 Web21, Feb. 2008.
- 2) 塩川, *et al.*, "気象レーダー用超電導フィルタの開発," 信学技報 SCI2008-14, MW2008-14, pp.75-80, Apr. 2008.
- 3) H. Kayano, *et al.*, "Narrow-band filter for transmitter of radar application," 38th European Microwave Conf., EuMC44-4, pp.853-856, Oct. 2008.



図4 ハイブリッドフィルタユニット

特集：超電導マイクロ波デバイス技術

「高温超電導体の固有ジョセフソン接合を用いた THz 波発振技術の進展」

筑波大学大学院数理物質科学研究科
物性・分子工学専攻
教授 門脇和男

高温超電導体の固有ジョセフソン接合から強力な THz 電磁波が連続 (CW) 発振することを実験的に確認したのが 2007 年の 6 月末であるから、それから約 1 年半が経過した^{1),2)}。その後、多くの実験結果が明らかになり、また、それに対する理論的な結果も発表されている³⁾⁻⁹⁾。これら全てを尽くすことはできないが、特にここでは実験事実を中心に述べ、現状での理解としたいと思う。

この発振現象の根底に交流ジョセフソン効果¹⁰⁾があることは疑いの余地はない。交流ジョセフソン効果そのものは電荷 (或いはその集団) が持つ異なった 2 つのエネルギー状態間の遷移に関する量子力学的な基本性質の 1 つであり、 $2eV=2e(V_2-V_1)=\Delta E_{2,1}=E_2-E_1=h\nu$ (V_1, V_2 は 2 つの超電導体の電位、 $\Delta E_{2,1}$ は超電導体間の電位 (エネルギー) 差、 h はプランク定数、 ν は電磁波の周波数) と表現できる。これは原子の発光と何ら違いはない¹⁾。単一ジョセフソン接合の交流ジョセフソン効果は良く理解されており、現在では電圧の標準として使われていることはよく知られている²⁾。

高温超電導体はこの様な単一ジョセフソン接合が直列積層した系であり、その典型的な例が $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212 と略記する) である。高温超電導は結晶中の CuO_2 面が担い、その間隔は約 1.5 nm であるから、Bi2212 は原子層レベルで高密度に積層されたジョセフソン接合系であることがわかる。この単結晶 Bi2212 をメサ状に加工し、数 100~数 1000 枚に直流を通電すると THz 帯域の強力な電磁波 (周波数は $\nu=2eV/h$) が連続発振として得られるのである。単結晶が理想的な結晶であれば、固有接合は全て等価であるから、量子力学的にコヒーレントに同期し、1 つの強力なジョセフソン接合として動作することが期待される。その発振の動作原理図を図 1 に示す。

この発振はどの電圧でも連続的に起こるわけではない。発振にはもう 1 つの重要な条件が必要である。それは、電磁波の波長 λ がメサの幅 w によって限定されることである。矩形のメサの場合、この幅 w は短い方に相当し、 $\nu=c_0/n\lambda=c_0/2nw$ の関係式が成り立つ。但し、 c_0 は真空中の光速、 n は Bi2212 の屈折率で $n \times 4.0 \sim 4.1$ である。これはちょうど、発振した電磁波の波長の半分が矩形メサの幅に等しいことを示しており、メサ自身が共鳴箱 (共振器) の役目をしていることがわかる。発振は交流ジョセフソン

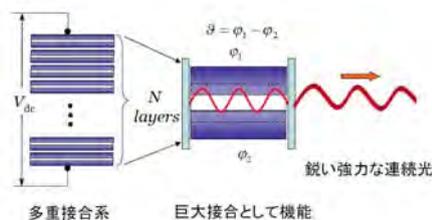


図 1 Bi2212 の全ての固有ジョセフソン接合が同期した振動状態となり、あたかも 1 つの巨大なジョセフソン接合として振る舞う。メサ自身が共振器の役目を果たし、レーザー発振する。

¹⁾ 強いて違いを言えば、原子は 1 電子の量子状態間の遷移であるのに対し、ジョセフソン接合では多電子系の量子準位間の遷移である。この場合、自由度が圧倒的に多いので連続的なエネルギー遷移や個別励起、集団励起など多彩な現象が起こりうる。

²⁾ ジョセフソン接合間の電圧を V とすると交流ジョセフソン効果は $h\nu=2eV$ であり、交流の周波数 ν は電圧に比例する。その比例係数 $K_J=2e/h$ は素電荷とプランク定数の比 $0.483597891 \pm 0.000000012$ (THz/mV) であり、ジョセフソン定数と呼ばれている。これはまた、 $K_J=1/\phi_0$ (ϕ_0 は量子化磁束) でもある。

効果とこの共鳴条件が同時に満たされなければ起こらない³。

大変興味あることはこの発振の強度の温度依存性である。多くの場合、発振は中間温度領域の 20～50 K で強く、それ以下の低温でも、また、それ以上の高温も発振しない。10 K 程度の狭い範囲でしか発振しないものもあり、メサの作成条件で発振の温度領域は大きく異なる (図 2 参照)。これは電圧状態では大きな抵抗のため発熱し、メサの温度は容易に T_c を超えてしまうので、発熱による熱をどの様に取り除くかで発振の状態が大きく異なるものと考えられている。発熱によるメサ内部の温度分布など詳しい情報を得るのは大変困難である¹¹⁾。メサ内部の温度は温度計のあるメサの基板から大きく遊離し、時には T_c を超える温度まで上昇し、強い非平衡状態にあると推察できる。多くの場合は T_c 以上の状態から電流をさげて T_c 以下になると、条件さえ整えば直ちに発振状態になる。この領域ではほとんどが準粒子であると考えられるが、この実験

事実にはむしろ準粒子が無ければ発振しないのではないかとさえ考えさせられることは大なる驚きである。図 2 に典型的な I - V 曲線と発振強度の温度依存性を示す。強度自身はメサ内の固有接合枚数 N の 2 乗に比例している¹⁾。また、 I - V 曲線自体、大変複雑な動きをするが、ここでは詳細に立ち入らないことにする。

通常、超電導体内の電磁波のエネルギーはフォノンを励起したり、電導電子の抵抗による損失で熱として消費され、減衰してしまう。超電導体では超電導ギャップがあるため、ギャップ内では準粒子は無く、電磁的な励起は (もしそれが可能なら) フォノンを励起する以外減衰が起こらないので、非常に安定した励起状態を維持できると考えられる⁴。この様な電磁的な励起の存在はマイクロ波領域で行われたジョセフソンプラズマ共鳴の実験から既に実証されている¹²⁾。この励起状態へ連続的に交流ジョセフソン効果によりエネルギー供給が行われ、メサ構造による自己共振器で増幅され、やがて反転分布が形成され発振するものと考えられる。これはレーザーと同じであるので、ジョセフソン・レーザーまたは STAR エミッター⁵ と名付けている⁹⁾。観測されるスペクトル幅は極めて鋭く、現状では使用している分光器の限界以下であり、約 8 GHz 以下であることもこれを支持している。

メサ内部の電磁波励起モードは、遠方での電磁波の強度分布を測定することで実験的に決定でき

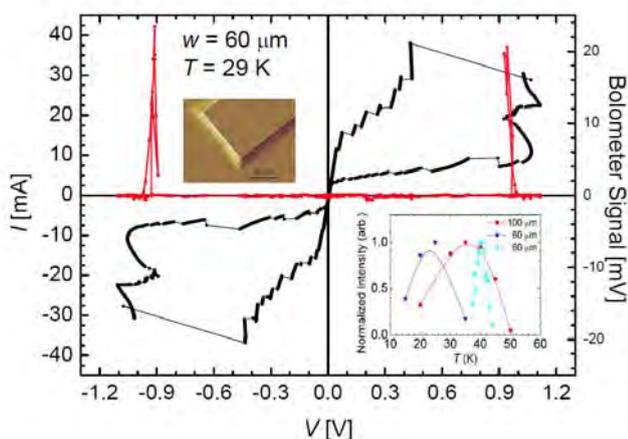


図 2 典型的な矩形型メサの発振出力 (赤線) と I - V 曲線 (黒線)。図右下は 3 種類のメサ (幅が 60, 80, 100 μm) の発振強度の温度依存性。検出器の出力が電圧の正負両側でそれぞれ 1 つピークを示し、発振していることを示す。高電圧側では接合は抵抗状態にあり、温度が T_c 以上に達している。温度はメサ基板の温度。図左上は加工されたメサの AFM 写真。幅 60 μm 、厚さ 1.2 μm であり、メサの形状は矩形ではなく末広がりになっていることがわかる。

³ これは必要条件であり、十分条件ではない。メサは同様に作成しても必ずしも発振するとは限らないからである。この原因は加工条件や冷却条件などが関与していると考えられているが、今のところよくわかっていない。

⁴ 実際には有限温度では準粒子があるため励起された電磁波 (プラズマモード) は減衰すると考えられる。s-波超電導体であるなら良いが、高温超電導体は d-波超電導体と考えられており、Bi2212 も例外ではなく、絶対零度付近でも強い準粒子効果が知られている。この THz 波の発振現象は、準粒子が支配的である T_c の直下でも強い強度で観測されることはおおきな驚きに値する。

⁵ STAR は Stimulated Terahertz Amplified Radiation の頭文字。

るはずである。現在、この実験を行っており、解析が進行中である。現状では発振源はメサ内の（ほぼ）一様な交流ジョセフソン電流であること、従って、モードは図3のように対称的なモードであること、高調波モードが励起されることなどが実験的に理解されている。

そもそも交流ジョセフソン効果は典型的な非線形現象である。多くの直列接続された固有ジョセフソン系で個々の交流ジョセフソン効果が発振源となり、全てが同期した集団励起モードとして励起できること、それがレーザー発振をすること、 T_c 近傍の非平衡状態でも十分強力な発振が起こること、など厳密にはまだまだ理解されていないことが多い。最近、理論計算も行われているが、必ずしも実験結果を再現しない³⁾⁻⁶⁾。その理由はいろいろ考えられるが、基本的にはこのような非線形現象をどの様に取り扱うかの方法論が確立していないこと、有限温度の効果、特に非平衡効果を取り入れられていないことなどが上げられる。非線形振動の立場から数学的なアプローチが新しい手法として興味深い¹³⁾。完全な理解には、今後、改善しなければならない重要な点が多々あることを指摘して筆を置きたい。

この研究は南英俊講師、山本卓研究員、八巻和宏、山口勇人、辻本学（大学院生）の実験によって行われた。また、立木昌名誉教授、古月暁博士、S. Lin, 福屋翔太（大学院生）、Dr. Wai K. Kwok, Dr. Ulrich Welp, Dr. Alexei Koshelev (Argonne 国立研究所) 諸氏には共同研究者として多くの有益な意見を戴いたことに感謝いたします。

文献

- 1) L. Ozyuzer, *et al.*, Science 318 (2007) 1291-1293.
- 2) Kadowaki, *et al.*, Physica C468 (2008) 634-639.
- 3) A. E. Koshelev and L. N. Bulaevskii, Phys. Rev. B77 (2008) 014530.
- 4) S. Lin, *et al.*, Phys. Rev. B77 (2008) 014507.
- 5) S. Lin and X. Hu, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 247006.
- 6) X. Hu and S. Lin, Phys. Rev. B78 (2008) 134510.
- 7) H. Matsumoto, *et al.*, to be published in the Proceedings of LT25, Amsterdam, 2007.
- 8) M. Tachiki, *et al.*, unpublished.
- 9) R. A. Klemm and K. Kaodowaki, condmat #0807.3082v1.
- 10) B. D. Josephson, Phys. Letters 1 (1962) 251-253.
- 11) 例えば、B. Verreet, *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) S48-S53.
- 12) 例えば、K. Kadowaki, *et al.*, Phys. Rev. B56 (1997) 5617-5621.
- 13) A. Balanov, *et al.*, "Synchronization : From Simple to Complex", Springer, 2009.

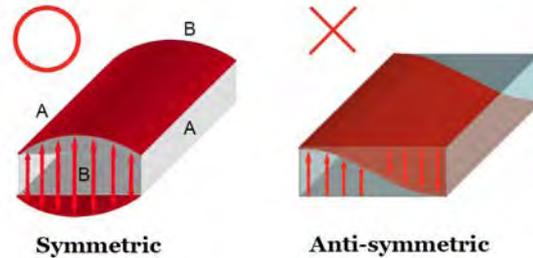


図3 実験から推察される矩形メサ内の電磁波モード。矢印は電場（ジョセフソン電流）を表す。長手方向は考慮していない。対称電場を仮定すれば、発振強度は長手面側（A面）からの方が短面側（B面）より強いこと、真上は最大強度の30~60%で極小であること、強度は真上よりA面に垂直方向へ約30°度傾いた方向で最大であり、基板面に平行方向は超電導基板のためにゼロへ単調に減少すること、電磁波はメサの厚さ方向に強く直線偏光していることなどの実験結果を矛盾無く説明できる。電場が反対称モードであると仮定すれば真上が最大で、基板面方向は超電導基板のためにゼロへ単調に減少するはずである⁹⁾。

特集：超電導マイクロ波デバイス技術 「テラヘルツ波検査技術の進展」

大阪大学
大学院基礎工学研究科
安井武史

1. 実時間 2 次元 THz トモグラフィー

物体の非破壊検査では、内部の様子を階層的に検査できる断層画像撮影技術は極めて有効であり、X 線 CT や超音波 CT が実用化されているが、これらの手法では高侵襲性や接触測定が測定対象に対する制限となっていた。そこであらためて THz 領域について断層画像取得の方法を考えてみると、THz パルスを利用すれば超音波エコーと同様にパルスエコー法が適用できるはずである (THz トモグラフィー)。我々は、このような方法を塗装膜厚¹⁾³⁾ やヒト皮膚断層⁴⁾ の非接触リモート測定に応用してきたが、従来法では時間遅延走査及びサンプル走査のために複数の機械的走査を行わなければならない、長い測定時間を必要としていた。その結果、測定対象が静止物体のみに制限されてきた。このような機械的な走査を無くし、リアルタイムで 2 次元断層像が取得できれば移動物体にも適用でき、THz トモグラフィーの応用性は飛躍的に高まるはずである。

ここで、THz 波の光としての並列性に注目し、電気光学的時間-空間変換による実時間 THz 時間波形計測と線集光 THz 結像光学系による実時間 THz ライン・イメージングを複合すれば (実時間 2 次元時空間 THz イメージング)、機械的走査機構を必要とすることなく、2 次元断層分布のリアルタイム取得 (実時間 2 次元 THz トモグラフィー) が可能になる⁵⁾。塗装膜厚計測への応用例として、ベルト・コンベヤー上の塗装製品を想定し、動体サンプルへの適用性を評価した。測定に用いたサンプルは、アルミ板上の半分の領域に塗装膜 (膜厚 175 μm) を施したもので、線集光された THz ビームと平行方向に秒速 5 mm で連続的に移動させた。図 1 は、測定された 2 次元断層イメージ (毎秒 10 フレーム) を示しており、水平座標が深さ情報、垂直座標が THz 集光ラインに沿ったラインイメージに対応している。線集光 THz ビームの照射位置の移動に伴い、非塗装部分-境界-塗装部分-境界-サンプル無しという順序で、2 次元断層イメージが変化している様子が確認できる。非塗装部分では平らなアルミ板表面からの THz エコー信号が垂直方向の 1 本のライン信号として確認でき、塗装部分では塗装膜表面及び塗装膜-アルミ板境界からの 2 つのエコー信号が時間的に分離されて確認できる。この時間差が塗装膜の光学的厚さに対応しており、塗料の群屈折率 ($=2.14$) を用いて膜厚にスケールリングしなおすと接触式膜厚計の値 ($=175 \mu\text{m}$) とよく一致している。次に、ウェット膜の乾燥過程モニタリングに応用した例を示す。測定に用いたサンプルは速乾性の塗料で、測定開始直前にアルミ板上に塗装を施し、その後の乾燥過程を測定した。図 2 は、塗装終了後 20 分間の早送り動画を示している。乾燥の進行に伴い、2 次元断層イメージが変化している様子が確認できる。ここで、左側のエコー信号は塗装膜表面からのもので

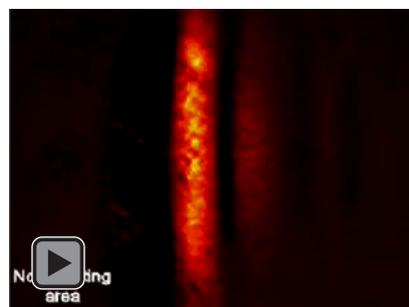


図 1 2 次元断層イメージ (毎秒 10 フレーム)



図 2 塗装終了後 早送り動画

あるのでこの変化が幾何学的厚さの変化に対応しているのに対し、左右の両エコー信号の時間差は光学的厚さに対応している。ウェット膜の乾燥過程に伴い塗装膜が幾何学的及び光学的に収縮していることが分かる。これらの収縮は約 10 分でほぼ終了しており、この時点で乾燥が完了していることを示している。これらの乾燥に伴う時間的变化は、ウェット膜の乾燥状態を示すパラメーターとして有用である。

2. THz カラーキャナー

我々はカラーキャナーを日常よく利用する。これは可視領域の分光画像を取得する機器であると言える。しかし可視光の物体浸透度の制限により表面近傍のみの情報しか得られないため、書類等の読み取りなどに限定されていた。このような技術を物質透過性の良好な THz 領域 (周波数 0.1~10 THz、波長 30 μm ~3000 μm) まで拡張できると、物体内部の情報も取得可能になる。さらに、カラー (分光) 画像も取得可能なので、各種物質固有の吸収スペクトル (THz 指紋スペクトル) を利用して『どこに』『なにが』あるかを識別できる。しかし、通常の点計測型イメージング法では、THz トモグラフィー同様、長い測定時間 (数時間以上) を要する。その結果、測定対象が静止物体のみに限定され、実用を損ねてきた。

我々は、実時間 2 次元 THz トモグラフィーで用いた実時間 2 次元時空間 THz イメージング技術を THz 分光イメージングに拡張することにより、実時間化を試みた。本システムでは、THz 線集光ラインを用い、一般のカラーキャナーと同じくラインの動き (または測定対象の動き) に合わせて実時間でラインイメージを連続測定することにより、従来法と比較して 10,000 倍以上の高速化を実現した⁶⁾。その結果、世界で初めて動体サンプルの THz 分光イメージングに成功した。図 3 は本システムによって得られたヒト歯切片 (1 mm 厚) の THz 分光画像を示している。各周波数による画像の差異は THz 波と歯牙結晶構造の相互作用が各周波数 (各波長) で異なることを意味しており、これらの結果から様々な生体情報 (例えば、虫歯や老化など) を抽出可能であると考えられる。また、生体以外にも、半導体 IC (図 4) や医薬品を始めとした各種工業製品の非破壊検査や品質評価にも適用可能であり、産業分野への応用が期待される。

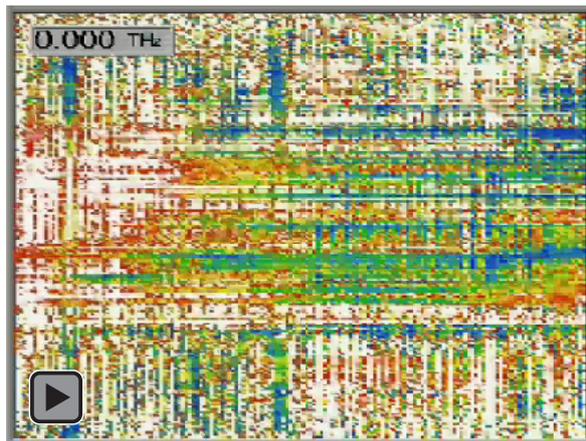


図 3 ヒト歯切片 THz 分光画像

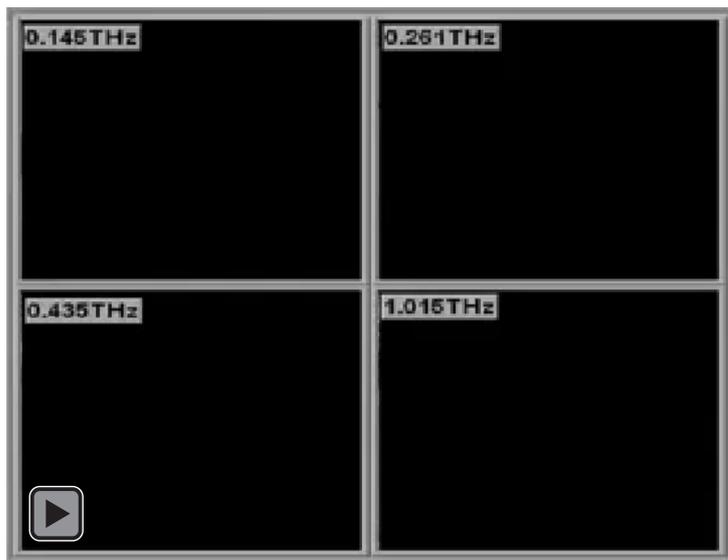


図 4 半導体 IC

本研究の一部は、科研費 18686008 より援助を受けた。また、両手法の原理や成果に関する詳細は下記ホームページを参照いただきたい。

http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/araki_lab/research/thz/

参考文献

- 1) T. Yasui *et al.*, Appl. Opt. 44, pp. 6849-6856 (2005).
- 2) T. Yasuda *et al.*, Appl. Opt. 46, pp. 7518-7526 (2007).
- 3) 安井武史他, 塗装工学 43, pp. 389-397 (2008).
- 4) 安井武史他, 生体医工学 42, pp.190-194 (2004).
- 5) T. Yasuda *et al.*, Opt. Comm. 267, pp. 128-136 (2006).
- 6) T. Yasui *et al.*, Opt. Express 16, pp. 1208-1221 (2008).

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導マイクロ波デバイス技術

「広帯域テラヘルツ波受信器開発とガス分光への応用」

独立行政法人 産業技術総合研究所
エレクトロニクス研究部門
神代 暁

テラヘルツ帯には、人体に有害な一酸化炭素、塩化水素、シアン化水素、二酸化硫黄等、少なからぬ**ガスの吸収スペクトル**が存在する。既存のガス分析法として、採取試料による質量分析法・クロマトグラフィ法や、中赤外レーザによる遠隔吸収分光法がある。しかし、**災害現場や火山等での発生ガス観測**に基づく対策立案においては、試料採取のため人が現場に近付くことが困難であるとともに、赤外光の透過しにくい煙・炎が立ち込めた状況が想定される。テラヘルツ波は、**遠隔検知**に適用できるとともに、波長が赤外光より長い分、煙の**粒子による散乱**を受けにくい。また、赤外領域に比べ、テラヘルツ帯では、異種ガスの吸収線どうしの周波数間隔が狭いため、**1台で多種のガスの成分分析**に適用できる汎用分光器の実現が期待できる。しかし、テラヘルツ帯は未開拓周波数領域と呼ばれ、スペクトル解析に必要な**電力と周波数の双方を高精度・高感度・広帯域に計測できる汎用分光器**は存在しなかった。標記要求を満たす計測器実現のためには、テラヘルツ帯の入力信号を、確立した高精度スペクトル解析技術の利用可能なマイクロ波帯の電気信号に、忠実に周波数変換する**ヘテロダイン受信技術**の採用が近道と考えられる。

ヘテロダイン受信器の性能は、周波数変換器（**ミキサ**）と、変換の基準となる周波数を供給する**局部発振器**という、2つの要素素子に依存する。最も広く使われている、化合物半導体ミキサと、マイクロ波発振を周波数通倍しテラヘルツ波を得る方式の局部発振器では、中心周波数で規格化した周波数帯域（以下「**比帯域**」という）は、各々**40%以下と30%以下**にとどまっている。そのため、広い周波数帯域のカバーには複数のミキサ・発振器対が必要となり、受信器システムの複雑化・巨大化・高価格化を招く問題があった。また、受信器雑音温度は量子雑音限界の数百倍もあり、微弱テラヘルツ信号の検出には長い計測時間が必要であった。

私達は、これまで電波天文・地球大気の観測用に開発され、量子雑音限界に迫る究極の低雑音性を示す一方で、**40%以下の比帯域**にとどまっていた**超電導トンネル型ミキサ**を広帯域化し、**比帯域60%以上**を実現した¹⁾。また、日本電信電話（株）（NTT）では、波長の異なる2つの近赤外半導体レーザの差周波のテラヘルツ波を高速フォトダイオードで発生する**光ベース局部発振器**を開発し、**100%以上の比帯域**を実証した。私達はNTTと共同で、**一対のミキサと局部発振器により200~500GHz帯（比帯域86%）**をカバーするとともに、**比帯域74%において、受信器雑音温度が量子雑音限界の20倍以下の低雑音性を示すヘテロダイン受信器**の開発に、世界で初めて成功した²⁾。さらにこの受信器を、災害現場での発生確率・致死可能性の高い一酸化炭素とよく似た吸収スペクトルを持つ**亜酸化窒素（N₂O）**ガスが放射する**100fW程度の微弱テラヘルツ波の分光**に適用した。

今後、遠隔分光用光学系開発や小型の機械式冷凍機へのミキサ実装技術開発により、標記応用の実現を目指す。

参考文献

- 1) S. Kohjiro *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, p. 355 (2007).
- 2) S. Kohjiro *et al.*, Appl. Phys. Lett., vol. 93, p. 093508 (2008).

超電導関連 2-3月の催し物案内

2/15-19

The Minerals, Metals & Materials Society, TMS 2009 Annual Meeting and Exhibition
場所：San Francisco, California, USA
問合せ：TMS Meeting Services、184 Thorn Hill Road, Warrendale, PA 15086 USA
Tel: (724) 776-9000 x243、Fax: (724) 776-3770、Email: mtgserv@tms.org

2/19

電気学会「超電導応用電力機器研究会」
場所：成蹊大学3号館1回101教室、武蔵野市吉祥寺
共賛：IEEE、Council on Superconductivity, Technical Committee of Japan
問合せ：高尾智明（上智大学）
<http://www2.iee.or.jp/ver2/honbu/15-research/2009/04BASC0219.pdf>

3/4

第8回冷凍部会例会/第4回超電導応用研究会シンポジウム「超電導電力機器の進展」
場所：東京電力 技術開発研究所 1F プレゼンテーション、横浜市鶴見区
主催：低温工学協会 冷凍部会 超電導応用研究会
問合せ：産業技術総合研究所 淵野修一郎
Tel: 0298-61-5819、Fax: 0298-61-5822、E-mail: s.fuchino@aist.go.jp

3/11

未踏科学超伝導科学技術研究会ワークショップ
「鉄系高温超伝導誕生から1年、新超伝導物質の可能性を探る」
場所：東京大学武田ホール、文京区弥生、東京大学浅野キャンパス
主催：(社)未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会
問合せ：(社)未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会 大貫
Tel: 03-3503-4681、Fax: 03-3597-0535、E-mail: fsst@sntt.or.jp

3/30

第56回応用物理学会関係連合講演会 シンポジウム「超伝導」使える技術から使われる技術へ
場所：筑波大学
主催：応用物理学会 超伝導分科会
問合せ：応用物理学会
<http://annex.jsap.or.jp/support/division/super/>

(編集局)

応用物理学会超伝導分科会
2009年春季第56回応用物理学会関係連合講演会シンポジウム
超伝導分科会企画
「超伝導」使える技術から使われる技術へ

高温超伝導体発見から20年が過ぎ、Bi線材・Y線材など一部はすでに商品化され、それらを用いた応用機器(ケーブル、SMES、モーター、発電機、変圧器)などの実証試験も国内外において行われつつあります。しかし、今後超伝導が「汎用技術」として使われるようになるためには、様々な市場化への壁を乗り越えていかなければなりません。シンポジウムでは超伝導技術の現状を俯瞰した上で、「使われる」ようになるには、今何が必要なのか、どのような課題があるのか、技術者、研究者に何が求められているのか、を議論していきます。

■日時：2009年3月30日(月) 13:00~17:45
■場所：筑波大学(教室は未定)

プログラム	
13:00-13:25	幹事長挨拶(主旨説明とアカデミックロードマップ説明) 藤巻 朗(名大)
13:25-13:50	今超伝導はどのくらい使われているか? -ヒッグス粒子発見、熱核融合研究を牽引する金属系超伝導線材- 田中靖三(ISTEC)
13:50-14:15	Bi系線材事業の現状と課題、応用展開 -送電、モーター、マグネット応用- 林 和彦(住友電工)
14:15-14:40	Y系線材による機器開発 -実証を迎えた単結晶薄膜テープ技術- 藤原 昇(ISTEC-SRL)
14:40-15:00 休憩	
15:00-15:25	新超伝導材料の可能性 -MgB ₂ 、鉄系高温超伝導、その他の新展開- 熊倉 浩明(物材機構)
15:25-15:50	超伝導技術の未来 -液体水素冷却時代は到来するか?- 濱島 高太郎(東北大)
15:50-16:15	社会は高温超伝導を待っていた - 潜在(線材)ユーザーを探せ - 黒川 卓(日経新聞)
16:15-16:35 休憩	
16:35-17:45	パネルディスカッション 「超伝導による先端技術、エネルギー・環境技術への展開、新経済効果」 司会：松本 要(九工大)

※応用物理学会関係連合講演会への参加登録が必要です。(http://www.jsap.or.jp)

問合せ先：濱本 和子(ISTEC-SRL) TEL:03-3536-5707 e-mail:chiku@istec.or.jp
青木 裕治(昭和電線) TEL:042-773-7163 e-mail:y.aoki346@cs.swcc.co.jp
廿日出 好(豊橋技大) TEL: 0532-44-1282 e-mail: hatukade@eco.tut.ac.jp
塚本 晃(日立基礎研) TEL: 042-323-1111(内3944) e-mail: akira.takamoto.tw@hitachi.com

新聞ヘッドライン (12/20-1/19)

- 文科省 FBR 向け 2 割増 原子力全体では微減 12/22 電気新聞
- 省エネタイプ 小型 AC モーター 12/22 日刊工業新聞
- 大型加速器 民間利用を促進 J-PARC あす稼動 中性子使いナノ構造測定 燃料電池・超電導など解明へ 12/22 日刊工業新聞
- 日本企業と成長 ～危機を好機に転じる サステナビリティをテコとした企業成長 IT に代わる新たな価値に 12/22 日刊工業新聞
- 理研の最前線 液体ヘリウムの中の宇宙 ビッグバン研究の鍵 絶対零度へ挑戦続く 12/23 日刊工業新聞
- 先端脳科学 進む実用化 消費者の意識を分析 市場調査・商品開発に活用 12/24 日経産業新聞
- 排出量購入義務づけ 業種ごと明暗くっきりと 12/24 電気新聞
- サマータイム延長による影響 米エネ省、評価まとまる 省エネ効果ごくわずか 12/24 電気新聞
- リニア調査を指示 国が JR 東海に 12/24 日本経済新聞 (夕)
- リニア調査を指示 国交相 建設費など 4 項目 JR 東海に 12/25 毎日新聞、朝日新聞、日刊工業新聞
- リニア新幹線 需要や工費、甘い見通し 橋山禮次郎教授 12/25 朝日新聞
- リニア「発車準備」JR 東海に国交省の調査指示 「25 年開業へ着実に」 12/25 日本経済新聞
- 直流九電取り組み活性化 太陽電池、普及後押し 安全性など課題 12/26 日経産業新聞
- リニア「各県に駅」 JR「名古屋ー東京、各停でも 1 時間」 12./27 朝日新聞、毎日新聞
- リニア新幹線への期待と課題 12/29 日本経済新聞
- 頭部・体幹部を高精細撮像 GE 横河メディカル MRI の最上位機種 12/30 日刊工業新聞
- 広帯域テラヘルツ波検出 有毒ガス検知に応用へ 産総研・NTT が技術 12/30 日刊工業新聞
- リニア中央新幹線 着工に向け 新たな一歩 直線ルートで建設の意向 JR 東海、技術向に力 実験線を延伸 費用は自社で 1/1 日刊工業新聞
- エネルギー開拓 宇宙空間で太陽光発電 オールジャパン研究を本格化 1/1 日刊工業新聞
- 「成田ー羽田 リニア開通を」 公明・太田代表 経済対策 公共事業前倒し訴え 1/3 読売新聞
- 風力 参入企業続々 安定電源化に道 1/5 Fujii Sankei Business i
- MRI 断層画像 均質に GE 横河が最上位機種 1/5 日経産業新聞
- バイオコーク技研 未利用木材で水素製造 効率的な量産技術確立へ 1/5 日経産業新聞
- 超電導研究 再び脚光 20 年振りフィーバーの兆し 期待膨らむ省エネ革命 リニア・原発、応用けん引 環境や医療、通信・・・新産業創出へ 1/5 日刊工業新聞
- バイオビュー 大型動物で創薬研究支援 神戸に臨床用 MRI 設置 1/7 日経産業新聞
- ユーラス テキサスに大型風力発電所 市場拡大想定、米 8 ヶ所目稼働 1/7 日経産業新聞
- 新エネ事始め 水の力 秘める巨大能力 1/9 日経産業新聞
- 技術力を世界に拓く 鉄道ビッグ 3 の影響力 「国際標準」獲得へ官民の発想転換を 1/11 日本経済新聞
- ILC「ノーベル賞」で急加速 政治主導 見えぬ評価 巨大化する計画 国民の理解不可欠 1/11 読売新聞
- フィリップス MRI 撮影画質向上 黒ずみ低減、時間大幅短縮 1/13 日経産業新聞
- 電磁石の建機で初 住友建機 ハイブリッド型開発 1/13 日経産業新聞

- 時代の証言者 科学と女性 米沢富美子 物理学のウッドストック 1/13 読売新聞
- オバマ新政権の政策分析 新エネ導入に積極的 財政負担が足かせに 1/14 日経産業新聞
- 圧力で超電導 誘起 鉄系物質の機構解明に道 神戸大・徳島大 1/15 日刊工業新聞
- 無接点重電用コイル 東光 小型化と大容量 両立 1/15 日経産業新聞
- 大型ビレットを処理 ウチノ、鍛造用誘導加熱装置 1/15 日刊工業新聞
- 超電導電力ケーブル 12年頃に IEC・国際規格化の見通し 日本勢が主導で制定へ 拡大する市場性に期待大 1/19 電線新聞
- 企業競争力を高めるホンモノづくり 「標準」を制するものがマーケットを制する 標準づくりを経営戦略化 欧米追随でなく自ら発信 技術が決めてではなく標準化とは仲間作り 1/19 日経産業新聞

(編集局)



[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き (2008年12月)

電力

Superconductor Technologies Inc. (2008年12月2日)

Superconductor Technologies Inc. (STI) は、米国エネルギー省 Los Alamos National Laboratory (LANL) と契約期間 5 年の HTS 電力応用のためのプロセス開発に向けた共同研究開発契約 CRADA (Cooperative Research and Development Agreement) に調印した。CRADA とは参加機関が開発成果、人員、施設を共有して、相互に利益のある研究開発を行う仕組みである。STI 社最高責任者 Jeff Quiram は次のように述べた。「この LANL との CRADA は高効率、低コスト次世代 HTS 線材商業化に向けた共同技術開発を行うものであり、両者の協力関係において重要なマイルストーンとなるものである。STI の知的財産である積層技術により、次世代線材を使ったケーブル製造のための費用対効果の高い手法への道筋がつけられるとともに、HTS ケーブルの商業展開のために必要な技術課題やコスト低減のための答えを提供できるであろう。送電ソリューションに向けて我々の世界第一級の低温技術や HTS 材料技術が使われることを大変嬉しく思っている。」

出典:

“Superconductor Technologies and Los Alamos National Laboratory Sign Cooperative Research and Development Agreement”

Superconductor Technologies Inc. press release (December 2, 2008)

<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1231586&highlight>

Zenergy Power plc (2008年12月8日)

Zenergy Power plc とその風力発電、水力発電応用開発パートナーである Converteam SAS は、再生エネルギー発電向け第 1 号フルスケール HTS コイルを完成し、成功裏にその機能を実証したと発表した。このコイルは E.ON Wasserkraft GmbH から商用目的で発注を受けた定格 1.7 MW の世界初の HTS 水力発電機に使われる予定である。

今後直ちに、Zenergy 社はドイツの E.ON 水力発電施設に必要な 32 のフルスケール HTS コイルの製造に着手する。この HTS 水力発電機は英国 Converteam 社の工場で組み立てられ、2009 年の適当な時期にドイツの商用水力ダムに据え付けられる予定である。HTS 技術によるエネルギー効率改善により、このダムの出力は 36 % 向上するものと期待されている。据付が終われば、この HTS 発電機は水力ダムの主要発電機として稼動する予定であり、当該地域 3,000 家庭向けベースロード電力供給の責を担う。

出典:

“Successful Testing and Validation of the World’s First Full-Scale HTS Coil for Renewable Power Generation”

Zenergy Power plc (December 8, 2008)

http://www.zenergypower.com/images/press_releases/2008-12-08-Hydro-Coil.pdf

Zenergy Power plc (2008年12月17日)

Zenergy Power plc は、EU が資金を提供する 2,150 万ユーロの船舶推進機プロジェクトに参加すると発表した。このプロジェクトへの寄与の一部として、Zenergy 社は商用電気推進船への適用を目指した一連の HTS モーター/発電機の開発を行い、所要の資金を受け取る。このプロジェクトは 2009 年 1 月に始まり、手始めとして電気推進船の地上デモ装置が製作される。このデモ試験では、HTS 材料、コンポーネント、その他先端技術の適切なものが取捨選択される。Converteam SAS と

Zenergy 社はこのモーター/発電機のデモに必要な次世代 HTS コンポーネントの供給を担当する。このプロジェクトは 4 年間で、30 以上の機関が参加する。Zenergy 社 CEO、Jens Müller は次のように述べた。「海事分野の市場に我々が初めて踏み込むことになるこのプロジェクトに我々の技術を提供できることは大きな喜びである。特にこのプロジェクトは、HTS コア技術に焦点を当て、我々が研究開発に大きな投資をすることなく新しいグローバル市場に参入できることを実証するものとなる。」

EU 委員会は全電化船舶により船舶業界が放出する CO₂ を大きく減少させることができると確信している。(国連の報告では 2008 年の放出 CO₂ の内 3.6 %が船舶業界からのものであるとしている。) EU 委員会は、必要とされる電気設備の大きさが全電化船舶採用のための大きな障害であるとしており、HTS 技術はこの障害に打ち勝ち、幅広い商用船舶に採用されるべき全電化船舶の概念を明確にするために大きな寄与を果たすものと期待されている。

出典:

“HTS Ship Propulsion Grant European Commission Project”

Zenergy Power plc press release (December 17, 2008)

http://www.zenergypower.com/images/press_releases/2008-12-17-poseidon.pdf

加速器

CERN (2008年12月5日)

CERN は、Large Hadron Collider (LHC) が 2009 年に再開し、2009 年夏には新しい衝突データが得られることを確認した。LHC の運転休止に繋がった 2008 年 9 月の不具合に関する最新の報告書は、初期の不具合は 2 台の加速マグネット間の電気接合不良が原因であることを明確にしている。この不具合が機械的な損傷、そして、マグネット本体から LHC トンネルへの He の放出を引き起こした。詳細な事故原因の究明により、将来起こる可能性のある同様な事故を防ぐための手段を明確にすることができた。この事故の結果、53 台のマグネットをトンネルから搬出、修理することが必要となる。内 28 台のマグネットはすでに搬出されており、最初の 2 台の再据付は完了している。現在の予定では、最後のマグネットの据付は 2009 年 3 月までに完了し、全体の冷却は 6 月末までに終了する見込みである。

出典:

“LHC to restart in 2009”

CERN press release (December 5, 2008)

<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2008/PR17.08E.html>

Science and Technology Facilities Council (2008年12月16日)

Science and Technology Facilities Council (英国) は、先端加速器 ALICE によるエネルギー回収に成功したと発表した。これは、従来の手法で必要であったエネルギーの一部のみで稼動する新しい加速器に向けた大きな一歩である。超電導線形加速器を用いて、電子が光速の 99.9 %まで加速された。そのエネルギーは 11 MeV である。今回初めて ALICE の電子ビームが全周周回に成功した。

ALICE はエネルギー回収プロセスを使って、各周回毎にビームエネルギーを捕捉、再利用する欧州で初めての加速器である。このエネルギー回収プロセスにより、大きな省エネが図れるほか、従来の加速器と同じ電力でずっと強力な光源や加速器が実現できる。現在の設計の正当性を評価し、回収エネルギーを定量化するための作業が進められているところである。

出典:

“A European first as ALICE achieves energy recovery at 11 million volts”
Science and Technology Facilities Council press release (December 16, 2008)
<http://www.scitech.ac.uk/PMC/PReI/STFC/ALICErecovery.aspx>

基礎

Brookhaven National Laboratory (2008年12月1日)

Brookhaven National Laboratory (BNL) とその共同研究者である National Institute of Standards and Technology (NIST) 及びドイツの研究者は、3次元超電導が消滅する領域 (Ba と Cu の比率が 1:8 の LBCO) で 2次元超電導を観測した。重要なことは、他の材料では 2次元超電導は 3次元超電導より高い温度 (40 K) で現れるということである。層状の LBCO 材料の水平及び垂直方向の電気抵抗を測定することにより 2次元超電導の存在が示唆された。ある特定の温度で、水平方向に電流が流れている時に抵抗が大きく低下したが、垂直方向に電流が流れたときにはそのような抵抗減少は見られなかった。さらに、2次元では弱い反磁性、即ち Meissner 効果が見られたが、3次元ではそのような現象は見られなかった。BNL 研究者の John Tranquada は次のように述べた。「我々の基本的な研究目標は、これら材料がなぜ、どのようにして超電導体として振舞うかを理解することである。その究極の目標は、その理解を通じ超電導体をさらに改善し、高効率送電線のような現実の世界での応用に使えるよう十分に高温で動作する超電導体を開発することである。」結果は Physical Review B 2008年11月号に掲載された。

出典:

“Disappearing Superconductivity Reappears—in 2-D”
Brookhaven National Laboratory press release (December 1, 2008)
http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/PR_display.asp?prID=865

University of Bristol (2008年12月11日)

University of Bristol は革新的な実験を行い、高温超電導が生じる金属状態に関する情報を得た。超強力パルスマグネットを用いて、超電導状態を破壊し、絶対 0 度近傍での電気抵抗の様子を調べた。その結果、超電導が強いほど、超電導体である金属ホスト材料の抵抗の原因となる散乱が大きいたことが分かった。しかし、ある点に達すると、高温超電導を生み出す相互作用が強くなりすぎ、超電導ペアーを生み出す電子状態を破壊してしまう。これらの結果は、理論家が高温超電導体の特性を説明するためのより完全な理論を生み出すために寄与するものと期待される。今後は、この超電導を破壊する相互作用の本質を見極め、このような現象を避けるような手法の開発につなげていきたいと考えている。このような知見は室温超電導体の開発に寄与する可能性を持っている。研究結果は Science の重要な報告をオンラインで速やかにアクセスできるサービスである Science Express に掲載された。

出典:

“Breakthrough experiment of high-temperature superconductors”
University of Bristol press release (December 11, 2008)
<http://www.bris.ac.uk/news/2008/6060.html>

(ISTEC 国際部長 津田井昭彦)

[超電導 Web21 トップページ](#)

応用物理学会超伝導分科会第 38 回研究会

「エネルギー・環境問題解決の鍵を握る超伝導技術の進展」報告

地球温暖化が問題視されている昨今、いかに CO₂ 排出量を抑えるかが重要課題となっているのは皆様ご承知の通りである。この研究会では、究極の省エネルギー技術といわれる超電導技術について、その応用開発の現状と、それを実現するための材料開発について各講師に講演いただき、今後の超電導技術の見通しについて議論を行うことを主旨として、開催された。

最初の畑氏（住友電工）の講演では、GENESIS 計画の内容と超電導電力ケーブル開発の現状について紹介があった。畑氏はまず、京都議定書で定められた CO₂ 排出量 6 %削減目標と増大するエネルギー需要を解決する手段として、原子力発電の増強が中国をはじめいくつかの国で計画されているが、例えばチェルノブイリ級の原発事故が起きてしまうとその周囲 100 km 圏内は 1 万年間入れないし、放射性廃棄物の処分の問題があり、最終的な解決策とはいえないことを指摘し、唯一の“解”として“太陽起源のエネルギー（太陽・風力・水力）の利用+超電導ケーブルネットワーク”を目指す GENESIS 計画を即実行する必要性を説いた。さらに GENESIS 計画の具体的進展について、まず小規模コミュニティにおける太陽電池等の導入から開始（Step I）し、Step IV において地球規模の超電導電力ネットワークを完遂することを提案し、Y 系線材等 HTS ケーブルの性能があがってきて実現可能性が大いにでてきたと述べた。なお、HTS ケーブルは直流の方が建設コストが低く経済効果が大きいと、本計画では直流ネットワークを想定しているとのことである。

次いで、SRL の塩原氏より Y 系線材の開発状況と 2008 年 6 月に開始した NEDO プロジェクト「Y 系超電導電力機器技術開発（M-PACC）」の紹介があった。IBAD-PLD 線材については、YBCO を GdBCO にかえたことで、高 $I_c(B)$ 化及びプロセスの高速化がはかられ、昨年度末で終了した応用基盤プロジェクトにおいて、最終的に 504 m 長で 350 A/cm のものが得られている。一方、設備投資が安く低コスト化が期待される IBAD-MOD 線材においても、HF ガス排出制御や Ba-deficient 組成の適用等で現在までに 500 m で 310 A/cm のものが得られるまでになった。M-PACC では、これらの技術をベースに SMES、変圧器、ケーブル等の大容量電力安定供給に必要な超電導電力機器とその普及・導入コスト条件に見合う線材の安定製造技術開発を行うことになる。

これらの応用の実現のためには材料開発、とくに臨界電流特性の向上が必要である。九工大の松本氏は、Y 系材料のナノ組織制御によるピン導入技術開発について紹介し、PLD-YBCO 膜では、BaSnO₃ の添加により一次元ピンを導入され、最も高いピン止め力 ($F_p^{\max}=28.3 \text{ GN/m}^3$) が得られることを報告した。一方、物材機構の熊倉氏は、MgB₂ 線材について製造法による材料組織の違いを示し、Mg 拡散法の開発により従来の PIT 法より高密度化がはかられた結果、4.2 K、10 T で 10^5 A/cm^2 、20 K、3 T で $1.3 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ と高い J_c 値が得られるようになり、応用開発の段階に入っていることを報告した。また、東京大学の下山氏は「新超伝導材料創成の指針」と題して、新超電導材料を二つのカテゴリー、(1) 新しい超電導物質による材料、(2) 既知超電導材料物質の物性改善によって 新用途に使える材料 に分類し、それぞれの指針について提案した。まず (1) については、最近発見された鉄系超電導材料を取り上げ、その資質については低温・高磁場応用に適するが、 T_c の向上が鍵であると述べた。一方、(2) について、Bi 系を例に挙げ、その T_c 及び I_c 特性が組成に敏感であり、まだまだ最適化の途上であること（つまり更に I_c 向上の可能性があること）を示すとともに、Y 系についてもその組成を詳細に検討する必要があることを指摘した。続いて講演をおこなった名古屋大の吉田氏は超電導材料という枠を超え、銅酸化物系超電導物質のファミリーともいえる銅酸化物系熱電材料の開発にも言及し、超電導材料でピン止め中心導入のために開発したナノ

組織制御技術が熱伝材料開発にも適用できることを紹介した。

超電導技術が直接的に環境改善に役立つ例として、大阪大学の西嶋氏より、超電導磁気分離技術を用いた工場排水処理や太陽電池用ウエハー加工の際の生成するスラリーのリサイクル処理の実例について紹介があった。水処理に関しては、2009年に新造船についてバラスト水処理装置の搭載義務が設けられることもあり、その分野への応用も期待されるとのことであった。

最後に産総研の菊池氏より地球環境計測で使われている超電導技術について紹介があった。具体的には、ミリ波・サブミリ波の信号を受信するヘテロダイン受信機において超電導ミキサが用いられており、上層大気におけるオゾンや NO_x 、 ClO_x 等の温暖化ガスの観測や宇宙における星間分子雲の観測などの分野で必要不可欠なものとなっているとのことである。また2009年度にJAXAとNICTが共同開発した4 K機械式冷凍機と超電導技術を用いたサブミリ波放射計が世界で初めて宇宙に打ち上げられる予定であることが紹介された。

本講演会を通じて、超電導技術が今直面しているエネルギー問題・環境問題の解決に多方面から貢献できる有用な技術であることを、改めて実感した。

なお超伝導分科会では、2009年春の学会（筑波大学）の初日に、シンポジウム「「超伝導」使える技術から使われる技術へ」（<http://annex.jsap.or.jp/support/division/super/>）を開催予定である。

(SRL/ISTEC 材料物性バルク研究部 筑本知子)

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導と MRI / NMR (その1—原理と構造)

(社団法人) 低温工学協会
副会長 堀上 徹

1.1 はじめに

今号より1年間、「超電導とMRI/NMR」について隔月連載するようにと編集局から要請があった。筆者は、超電導とは長年付き合ってきたが、MRIやNMRの専門家ではない。それにもかかわらず執筆をお引き受けしたのは、MRIやNMRを通じて超電導の魅力が読者に伝わればとの思いからである。

超電導研究の歴史は古く、2年後の2011年は超電導現象が発見されて100年になる。

また、高温超電導体が発見されて今年は23年目である。発見からこれだけの年月が経過しているにもかかわらず、実用化という点ではMRIとNMRへの適用以外には大きな市場を形成していない。超電導の技術開発に直接・間接に40年以上も携わってきた筆者には些か忸怩たるものがある。それはさておき、高温超電導体が発見後、実用化するための材料開発に世界中の研究者が懸命に努力しても20年以上の月日を要した。努力の甲斐があって、ここにきて何とか高温超電導材料を用いて機器開発ができる状況になってきた。

今後、高温超電導体を用いた実用機器が徐々に開発されていくことが期待されており、とりわけこの連載で取り上げるMRIとNMRは既に大きな市場を形成しているが、高温超電導体がこれらの機器に適用できるようになれば新たな応用も含めて普及が飛躍的に進むことが期待される。

本連載では、MRIやNMRの原理、超電導とのかかわり、これらが現在どのようなところで使われているのか、その市場規模はどの程度なのか、国内外の状況はどうか、今後どのような方向に展開していきそうなのかといったようなことを中心に書く予定である。最後までお付き合いいただければ幸いです。

1.2 MRI とは、NMR とは

「MRI (Magnetic Resonance Imaging : 磁気共鳴画像法) は、核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance) 現象を利用して、生体内部の情報を画像化する方法である。」とされている。核磁気共鳴現象については後で説明する。

MRI 装置 (以下 MRI) は、それが市場に投入される直前までは核磁気共鳴画像診断装置と呼ばれていた。しかし、「核」という言葉に対するアレルギーから、特に医療現場で使用するものに「核」という言葉は相応しくないのではないかという理由で Nuclear の使用をやめ、Magnetic Resonance (磁気共鳴) とし、画像表示にて診断するので、Imaging という言葉が使われるようになった。画像化して情報を得る以外に、核磁気共鳴によるスペクトルを観測して物質の原子や分子の結合状態などの情報を得る分光法 (MRS : Magnetic Resonance Spectroscopy) もある。これが所謂 NMR といわれているものである。

NMR 装置 (以下 NMR) は、化学分析の手法として用いられるため、物理現象そのものの「核磁気共鳴」という言葉がそのまま用いられている。したがって、MRI も NMR も同じ物理現象を利用していることになる。

通常 MRI は医療用の診断装置として病院で用いられる。1980年代に MRI が臨床に用いられるようになった。断層画像という形で生体内部を可視化して診断する。断層画像という点では X 線 CT

と一見よく似た画像が得られるが、CTとは全く異なる物質の物理的性質に着目した撮影法であるために、CTでは得られない情報が多く得られる。

その特長は、

- ① X線などの放射線を照射しないため、放射線被爆がない
(但し、MRIでは磁石を用いるので、磁界の人体への影響については懸念がないわけではないが、今までのところ影響は現れていない)
- ② 画像のコントラストがX線CTよりも高い
- ③ 造影剤を用いなくとも血管画像が撮影できる
- ④ 骨による画像への影響がない。
- ⑤ X線では診断できない椎間板ヘルニアや靭帯損傷、骨軟部腫瘍などの異常を診断できる等である。

余談ではあるが、筆者はMRIが商品として世の中に出る前から装置開発に関係していた。

当事、人気診断機種であったX線CT(今では単にCT)と競合するのではないかということで、MRIの市場投入時期について日米の企業幹部が悩んでいたのを思い出す。先に述べたように、MRI装置の大半は医療現場で用いられているが、過去に産業応用ということで、西瓜や桃の熟れ具合を非破壊で検査するとか、鮭の雌雄判別に用いるというようなことが検討された時期があったがコスト面で普及しなかったようである。

さて、今回はMRIやNMRの原理を理解するために必要な‘核磁気共鳴現象’の説明から始めよう。

‘核磁気共鳴現象’を簡単に表現すると、強い磁界の中におかれた原子核が特定の周波数の電波のエネルギーを吸収するという物理現象である。この現象を利用した画像診断法をMRIと呼んでいる。以下にもう少し詳しく説明する。

少々厳密性に欠ける表現になるが、原子は原子核と負の電荷を持つ電子から構成される。

原子核は正の電荷をもつ陽子と電氣的に中性な中性子とから成る。原子核は正の電荷を持って回転しているため磁石の性質(図1a)を持つが、複数の陽子が存在する場合は磁極が逆向きの陽子2個で1対となり、磁力を打消しあう。陽子の数が奇数になる原子では原子核全体で磁気モーメントを持つ(核磁気モーメント)。これらの原子核に外部から磁界(静磁界)をかけると、磁界の強さに応じて核磁気モーメントは磁界の方向と平行な軸を中心とした歳差運動(コマの首振り運動)を行う(図1b)。この歳差運動に共鳴するような周波数の高周波磁界を外部から照射するとそのエネルギーを吸収して首振り運動の開き角度が大きくなる。この現象を核磁気共鳴現象と呼んでいる。

首振り運動の開き具合は物質により異なると同時に外から加えた磁界の強さに比例する(図1c)。

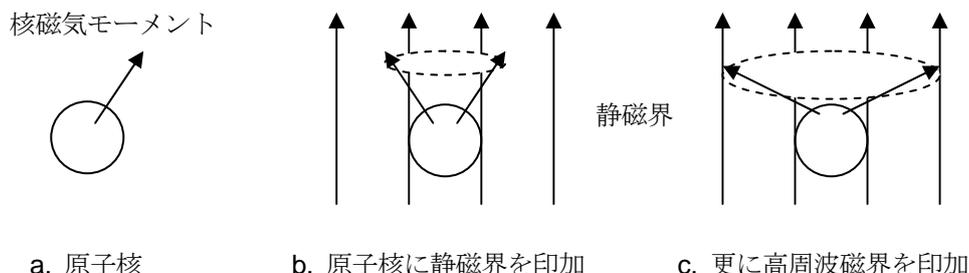


図1 核磁気共鳴現象：静磁界中に置かれた核磁気モーメント (b) と外部から加えた高周波磁界との共鳴現象 (c)

例えば静磁界が1テスラ (T) の場合、水素の原子核¹H (プロトン) の共鳴周波数は42.6 MHz となっている。静磁界の強度を B (T) とした場合のプロトンの共鳴周波数 f は (1) 式に表せる。

$$f=42.6 \cdot B \text{ (MHz)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

共鳴現象を起こしている状態で、外部の高周波磁界を切ると、原子核は電磁波を放出しながら元の状態 (図 1b) に戻る。高周波磁界を切った後、原子核が定常状態に戻るまでの時間 (緩和時間) が物質の化学的な結合状態や物理状態と関係する。実際にはこの高周波磁界はパルスのに加えらる。体内のそれぞれの組織 (例えば良性の腫瘍と悪性の腫瘍) によって緩和時間が異なる。これをある数学的手法を用いて画像化したものが MRI である。

人体の約 75 %が水分であるため、通常の MRI では水素原子の核磁気共鳴現象を利用して、水の分布状態を周囲の分子との結合状態を反映させて画像化する。水素原子のみならず体内に存在する炭素 (¹³C) や磷 (³¹P) などの画像化も行われている。

一方、NMR は共鳴周波数を測定して原子や分子の結合状態に関する情報を得るので、NMR 分光法とも呼ばれることは先に述べた。MRI が緩和時間を測定するのに対して、NMR は同じ原理を利用して共鳴周波数を測定し、試料に含まれる原子や分子の同定や結合状態などの情報を得るものである。最近では、数万の分子量を持つたんぱく質の構造解析にも有効な手段として必要不可欠なものとなっている。

1.3 MRI (装置) の構造

MRI は基本的には 3 種類の磁界発生コイルで構成される。

①静磁界コイル ②傾斜磁界コイル ③高周波磁界コイル である。

それぞれは図 2 に示したような配置となる。

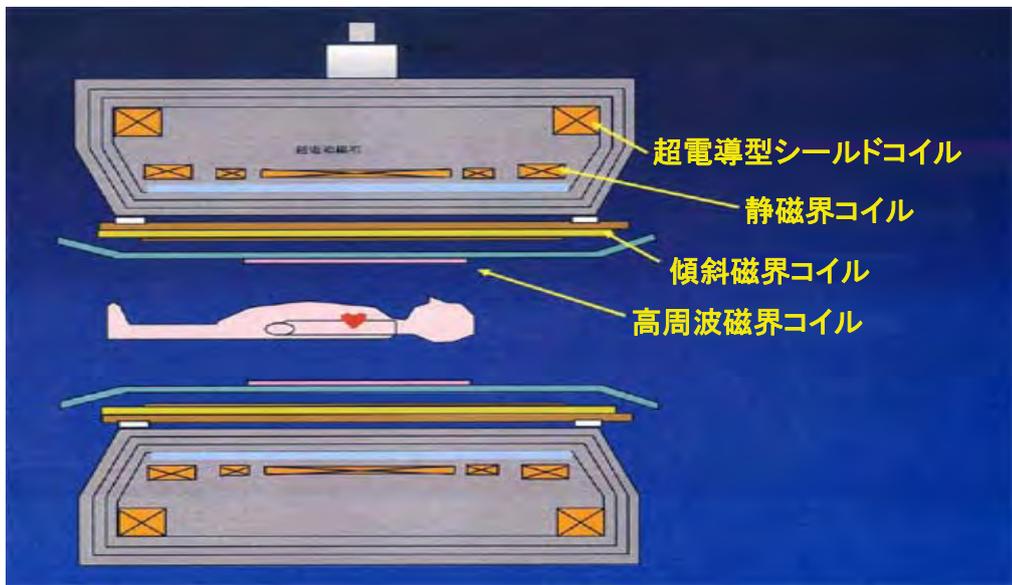


図 2 MRI 装置を構成する 3 つの磁界 (提供 東芝メディカルシステムズ(株))

① 静磁界：前に説明したように核磁気モーメントを持つ原子核に静磁界を印加して歳差運動を生じさせるための磁界。この磁界は前に式 (1) で示した B に相当するもので、共鳴周波数は B に比例するので、非検体の領域で磁界強度が一樣であることが要求される。どの程度の一樣さが要求されるかの説明は次回に譲る。

- ② 傾斜磁界：得られた信号が非検体のどの場所から出てきたものかを知るために必要な磁界である。この情報がないと断層画像を得ることができない。
- ③ 高周波磁界：共鳴現象を発生させるために必要な磁界。送信用高周波コイルにより、高周波磁界を被検体に照射する。共鳴後、高周波磁界を切ると原子核は電磁波を放出しながら元の状態（図 1b）に戻る。このときの放出された微弱な高周波磁界（MR 信号）は受信コイルにより検出される。

1.4 NMR（装置）の構造

(1) 式で表したように、共鳴周波数は外部から印加した磁界強度に厳密に比例するので、共鳴周波数を高精度に測定できれば原子や分子の化学結合状態を反映したスペクトルの僅かなズレの情報が取得できる。装置としては、試料に強い磁界を印加するためのコイルと高周波増幅器などを収納した信号の送・受信装置及びデータ処理用のコンピュータ等から構成されている。

1.5 第 1 回目を終えるにあたって

今回は MRI や NMR の原理について、やや厳密性には欠けるが部分もあるが、概略を紹介した。基本的には磁界を用いるということである。

次号ではこれらの装置と超電導との関わりや、超電導に要求される条件などについて紹介する予定である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q : 「テラヘルツ波とはどのようなものでしょうか？」

A : テラヘルツ波も電波の一種です。電波には周波数の低いものから高いものまで非常に多くの種類があります。図1に示すように、周波数が高くなるにつれて、応用分野はラジオ、テレビ、携帯電話、レーダ、電波天文というように変化していきます。一方、もっと高い周波数の電波は、電波というより光と言ったほうが分かり易いと思います。この領域は、赤外線、可視光線、紫外線などとよばれています。光も電波の一種ですが、一般に電波は周波数で表わし、光はその波長で表わすことが多いのです。たとえば、TOKYO FM 放送の周波数は 80.0 MHz、可視光線の赤の波長は 700 nm という言い方をします。

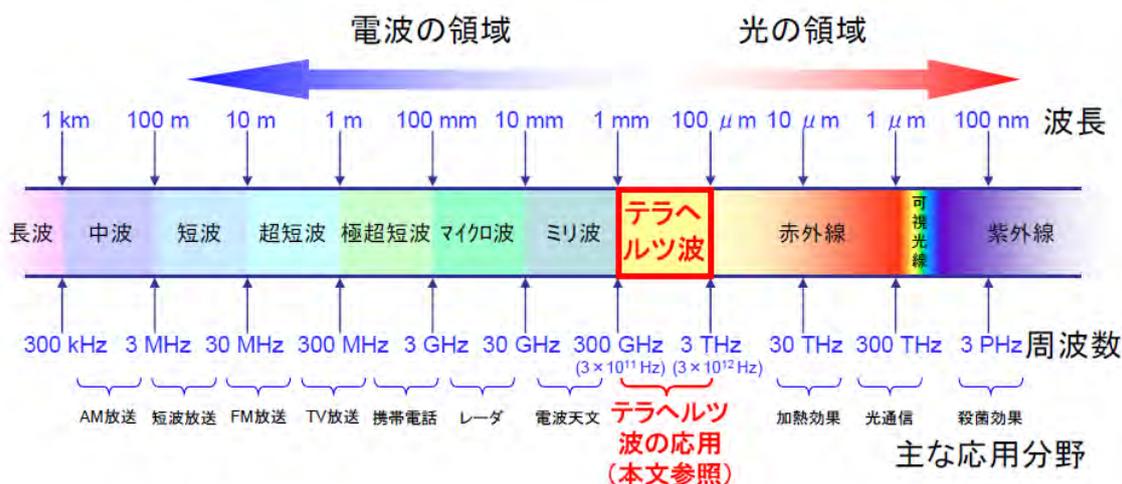


図1 いろいろな周波数の電波の名称とその主な応用

上の目盛りは電波の波長を示し、下の目盛りはその周波数を示しています。波長と周波数の間には、波長×周波数＝光の速度 (3.0×10^8 m/秒) という関係があります。この関係から、たとえば、波長 1 mm の電波の周波数は 300 GHz になります。

電波の応用分野はここに示しているだけでなく、もっと様々な分野がありますが、代表的なものだけを示しています。周波数 300 GHz 以下 (波長 1 mm 以上) は電波として扱われることが多く、周波数 3 THz 以上 (波長 100 μm 以下) は光と考えられています。電波と光の中間領域 (周波数 300 GHz～3 THz) がテラヘルツ波とよばれるものです。

光と電波の中間にテラヘルツ波とよばれる領域があります。サブミリ波とよばれることもあります。二つの呼び名があるのは、電波で考えると 1 テラヘルツ ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) 前後の周波数であり、光として考えると 1 ミリメートル以下の波長だからなのです。最近では、サブミリ波よりテラヘルツ波とよばれることが多くなっています。以下、テラヘルツ波を THz 波と表記します。

THz 波はこれまであまり利用されていませんでした。その理由は THz 波を発生させることが難しかったからです。電波の周波数を数百 GHz 以上に高くする方法は困難であり、光の波長を長くする方法からのアプローチも難しかったのです。しかし、ここ 10 年くらいの間にいろいろな方法が

開発され、THz 波の発生が比較的容易になりました。受信の方法も開発されて、THz 波が実用的な電波（あるいは光）として考えることができるようになったのです。

では、THz 波を用いるとどのような応用が可能なのでしょうか？

応用は大きく三つの分野に分けることができます。(1) THz 波で見たイメージング、(2) THz 波領域での分光分析、(3) THz 波を用いた超高速信号処理です。

(1) イメージング

THz 波も他の電波と同様の性質があります。たとえば、衣服や木材、プラスチックなど多くの物質を通り抜けることができますが、鉄などの金属にぶつかると反射されてしまいます。しかし、THz 波のように周波数が高いと、低い周波数の電波とは違って水や水蒸気の中を通過する時に吸収されて減衰してしまいます。THz 波は光の性質も持っていますので、レンズで集光したりミラーで反射させたりすることができます。このため THz 波をビーム状に絞って走査すれば、THz 波で見た画像を作ることができます。植物の水分の多少を調べたり、内ポケットに隠し持った危険物（銃やナイフなど）を発見したり、パッケージに入った LSI の断線箇所を調べたりすることもできます。

(2) 分光分析

麻薬などの禁止薬物や爆薬は、1 THz 前後のある特定の周波数だけを吸収することが知られています。このため吸収スペクトルをみるとその物質が封筒や箱の中に入れていても、見つけることが可能です。物質にいろいろな周波数の THz 波を照射し、透過する THz 波がどの周波数で吸収されているかが分かれば、その物質が何であるかを知ることができます。このようにして、いろいろな物質の同定ができます。

(3) 高速信号処理

マイクロ波などの高周波の電波に比べてさらに周波数が高いので、高速の信号処理が可能です。ただし、大気中では水分に吸収されるので、あまり遠くへ伝播させることはできません（数百メートル程度）。室内など限られた空間での超高速信号処理への応用が可能です。

以上のように THz 波は非常に多くの応用が可能ですが、本格的に応用されていくのはこれからです。システムのコストを下げることや、誰でも使いやすい簡易なシステムにすることが今後の課題です。さらに詳しく知りたい方は、テラヘルツテクノロジーフォーラムのホームページ <http://www.terahertzjapan.com/index.html> が参考になると思います。

回答者：SRL/ISTEC 特別研究員 蓮尾信也

[超電導 Web21 トップページ](#)