

FSST NEWS

Forum of Superconductivity	No. 130
Science and Technology News	

(社)未踏科学技術協会
平成 23 年 7 月 20 日発行
〒105-0003
東京都港区西新橋 1-5-10
新橋アマノビル 6 階
Tel : 03-3503-4681
Fax : 03-3597-0535
Email : fsst@sntt.or.jp

<FSST NEWS No.130 目次>

<トピックス>

頂点フッ素系多層型銅酸化物超伝導体における超伝導と磁性の共存

大阪大学 清水 直2

<第 15 回超伝導科学技術賞を受賞して>

(1) 超伝導マグネットの不安定性と安定化

横浜国立大学 塚本 修巳5

(2) $LnFeAs(O,F)$ 薄膜の MBE 成長

名古屋大学 生田 博志8

(3) 超伝導磁場センサによる新しい脊髄疾患診断をめざして

金沢工業大学 足立 善昭12

(4) 5 GHz 帯気象レーダ用高温超伝導送受信フィルタの開発

東芝 研究開発センター 加屋野 博幸15

(5) 超伝導センサーによる真の質量分析の実現

産業技術総合研究所 大久保 雅隆17

(6) 先進的プラズマ実験装置 RT-1 用高温超伝導磁石の開発

東芝 電力システム社 水牧 祥一20

(7) 輸送機器用高温超伝導誘導同期機への挑戦

京都大学 中村 武恒22

<会議報告 1>

CEC/ICMC2011 会議報告

物質・材料研究機構 松本 明善25

<会議報告 2>

第 37 回シンポジウム会議報告

物質・材料研究機構 北口 仁26

<受賞発表>

「第 15 回超伝導科学技術賞」発表

審査委員会委員長 太刀川 恭治27

○The 15th Japan-US workshop on advanced superconductors

..... 30

○研究会の動き

..... 31

○平成 22 年度 事業報告

..... 32

○平成 22 年度 収支決算書

..... 33

○国内超伝導関連会議／国際会議及び国外の主要な会議

..... 34

<トピックス>

頂点フッ素系多層型銅酸化物超伝導体 における超伝導と磁性の共存

Coexistence of superconductivity and
antiferromagnetism in apical-fluorine
multilayered high- T_c cuprates

大阪大学大学院 基礎工学研究科
清水 直, 椋田 秀和, 北岡 良雄

Osaka Univ., Graduate School of Engineering Science
S. Shimizu, H. Mukuda, and Y. Kitaoka

1. はじめに

1979年に重い電子系物質である CeCu_2Si_2 で1 K以下の低温において非従来型の超伝導が発見されて以来[1]、1986年に発見された銅酸化物高温超伝導体[2]、そして新たに2008年に発見された鉄を含む超伝導体[3]など、いずれも反強磁性相に隣接して新奇な超伝導が発見され、磁性と超伝導が絡み合う境界領域に超伝導のフロンティアがあることが近年強く認識されてきた。

その中でも銅酸化物高温超伝導体は、キャリアドーピングにより超伝導転移温度(T_c)が160 Kを越える現在最も高い T_c を持つ物質群である[4]。全ての銅酸化物高温超伝導体は、超伝導の舞台である二次元の CuO_2 面と、それ

を挟み込む電荷供給層からなる積層構造をもつ。その CuO_2 面内のホール(キャリア)濃度 p がゼロの母物質は反強磁性(AF)を示し、ホールドーピングにより超伝導(SC)が実現することが理解されている。これまで良く研究されてきた典型的な物質である $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO)と $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+y}$ (YBCO) の相図をそれぞれ図1(a)、1(b)に示す。これらの相図において、SCに隣接してAFが描かれているが、この2つの相は共存しないと考えられている[5, 6, 7, 8]。

一方、 CuO_2 面を5枚積み重ねた構造をもつ Hg1245 においては低ドーピング領域でSCとAFが共存することが指摘され[9]、 CuO_2 面の積層数(n)が電子状態に強く影響することがわかってきた。そこで我々は、銅酸化物超伝導体の中でも特に頂点フッ素系と呼ばれる物質に注目した。この物質は $\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n}(\text{F},\text{O})_2$ とあらわされ、異なる n をもつ試料を合成することが可能である[10]。ここで n が3以上の物質を多層型と呼び、 $n=3$ において T_c が最大値をとることが知られている[11]。また、頂点位置(図2(a)参照)におけるフッ素 F^{1-} と酸素 O^{2-} の比を変えることにより、試料の p (つまり T_c)をコントロールすることができ[12,13,14]。つまり、この頂点フッ素系物質を用いることにより、 n 依存性まで含めた銅酸化物高温超伝導体の系統的な研究が可能となる。

我々のグループは、磁性・超伝導などのミクロな性質を明らかにできる核磁気共鳴法(NMR)という実験手法を用いて $\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n}(\text{F},\text{O})_2$ の系統的な測定を行った。その結果、i) 銅酸化物の温度 T – ホール濃度 p 相図が単位胞内の CuO_2 面数 n に強く依存すること、ii) $n \geq 3$ の場合にSCとAFの共存相(図1(c)-(e)の網掛け)が存在することを明らかにした [15,16,17]。図1に示すように、 n を増やすと反強磁性相の臨界点が高ホール濃度側に移動し、 $n=3, 4, 5$ では反強磁性と超伝導が一緒に共存する。これは $n=1$ であるLSCOや $n=2$ であるYBCOでは観測されなかった秩序相で、 CuO_2 面を3枚以上もつ多層型物質の研究から初めて明らかになった。これらの結果は高温超伝導の起源が反強磁性磁気秩序と深く関係していることを示唆するものである。

本稿ではこれらの結果を踏まえ、五層型($n=5$)銅酸化物高温超伝導体の中でも最も低い T_c をもつ $\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{F},\text{O})_2$ ($T_c = 52$ K)について、我々の最新の研究成果を報告したい [16]。

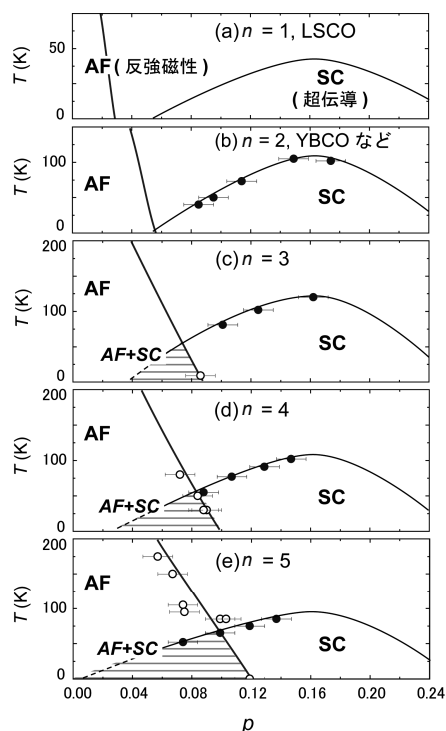


図1 銅酸化物高温超伝導体の相図。 n は単位胞内の CuO_2 面の数を示す。

2. 反強磁性磁気秩序と共存する高温超伝導現象

図2(a)に、 $\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{F},\text{O})_2$ の結晶構造を示す。この物質は単位胞内に5枚の CuO_2 面を持ち、 $T_c=52\text{ K}$ で超伝導状態に転移する。またホール濃度 p は約6%程度と見積もられ、これまで報告されている五層型物質のなかで最も低ドーピングな物質であることがわかっている。図2(b)に $T=1.5\text{ K}$ で測定したゼロ磁場NMRスペクトルを示す[16]。これを図2(c)の三層型 $\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_6(\text{F},\text{O})_2$ と比較すると、外側の CuO_2 面(OP)、内側の CuO_2 面(IP)ともに、スペクトルが高周波側にシフトしていることが分かる。ここで、三層型 $\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_6(\text{F},\text{O})_2$ は磁気秩序を示さず、図2(c)は非磁性状態で得られる典型的なNQRスペクトルを表している。すなわち、図2(b)で見られるスペクトルの高周波側へのシフトは、OP・IPともに反強磁性秩序状態であることを意味している。またスペクトルの解析から、反強磁性磁気モーメントの大きさはOPで $0.14\ \mu_B$ 、IPにおいて $0.20\ \mu_B$ と見積もられた。この結果は、 $T_c=52\text{ K}$ の超伝導体である五層型 $\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{F},\text{O})_2$ において、 $T=1.5\text{ K}$ で静的な反強磁性秩序と超伝導が共存していることを示している。

$T=1.5\text{ K}$ で観測された反強磁性磁気秩序の発達を調べるため、フッ素サイトでのNMRを行った。図3はF-NMRスペクトルの温度変化であり、外部磁場を CuO_2 面に対し垂直方向($H//c$)に印加して測定した[16]。図に示すように、 $T=240\text{ K}$ ではシャープな単一ピークのスペクトルが観測されるのに対し、温度を下げていくと二つのピークをもつブロードなスペクトルに変化する。これは反強磁性磁気秩序にともなう内部磁場の影響を反映しており、磁気秩序の発達のために低温に向けてスペクトルの分裂幅が大きくなっていると考えられる。スペクトルの分裂幅から見積もられる、フッ素サイトにおける内

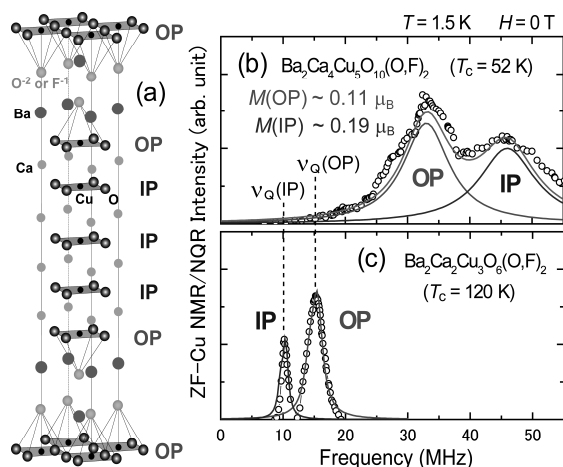


図2 (a) $\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{F},\text{O})_2$ の結晶構造。
(b) $T=1.5\text{ K}$ でのゼロ磁場NMRスペクトル[16]。
(c) 非磁性状態のスペクトル [16,17]。

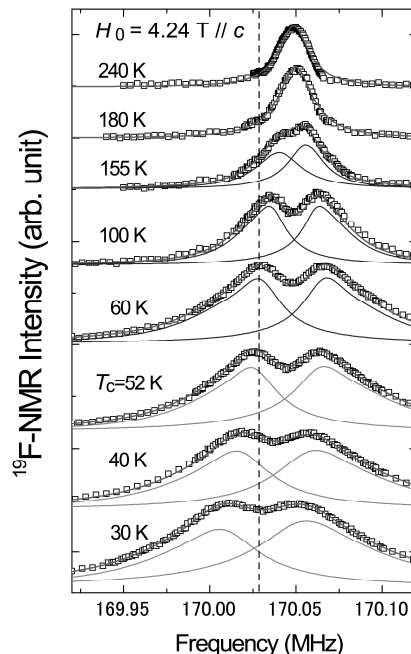


図3 F-NMRスペクトルの温度変化[16]。 $T_N=175\text{ K}$ 以下で二つのピークに分裂する。点線は $K=0$ 。

部磁場 H_{int} (外部磁場 H に平行な成分)の温度変化を図4(a)に示す[16]。 $T=175\text{ K}$ から内部磁場が発生し、低温にむけて $(T_N - T)^{1/2}$ に比例して増大することから、ネール温度 $T_N=175\text{ K}$ の長距離的な反強磁性磁気秩序が発生していることがわかる。

図4(b)に、ナイトシフト K の温度依存性を示す[16]。ナイトシフトとはNMRの共鳴条件 $\omega_0 = \gamma H$ からの共鳴周波数 ω_{res} のずれとして定義され、図3における点線(ω_0)とスペクトルのピーク(ω_{res})の差として求められる。 $T_N=175\text{ K}$ 以下では、二つのピークの中心の値を ω_{res} としてナイトシフトを求めた。室温から温度を下げていくと、ほぼ温度変化をしない一定値をとるが、 $T_c=52\text{ K}$ で減少し始める。これは超伝導転移にともなう反強磁性シフトであり、「 $T_N=175\text{ K}$ をもつ反強磁性秩序のバックグラウンドのなかで、一様に超伝導が発現している」ことを示している。また、この超伝導転移にともない、内部磁場 H_{int} の温度依存性が $(T_N - T)^{1/2}$ のライン (図4(a)の実線)からずれ始めるが、これは反強磁性磁気モーメントの配列が超伝導転移の影響でわずかに変調されたことを示唆している。これはすなわち、銅酸化物高温超伝導体において、超伝導と反強磁性の秩序変数が互いに相関していることの証拠である。

3. 高い T_c を生み出す反強磁性相互作用

これまで述べてきたように、銅酸化物高温超伝導体において反強磁性秩序と超伝導は同じ CuO_2 面内で一様に共存する。この一様共存相は前節で紹介した

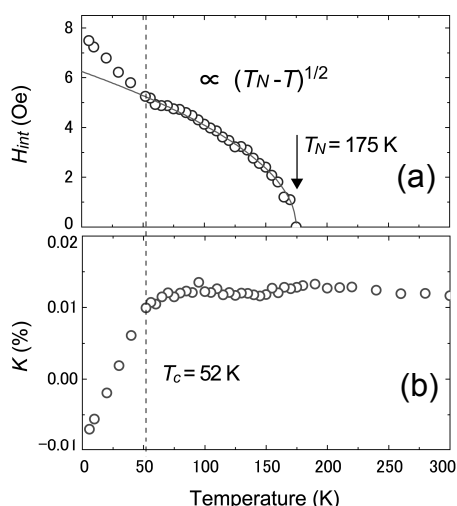


図4 (a)フッ素サイトでの内部磁場 H_{int} 。 T_c 以下で $(T_N - T)^{1/2}$ に比例した温度依存性からずれる。(b)ナイトシフト K の温度依存性。 $T_c = 52$ K以下で超伝導転移にともない減少する。

$\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{F},\text{O})_2$ だけでなく低ドーピングな多層型物質で共通して観測され、そのAF-SC相図は図1(c)-1(e)のようにまとめることができる。一方この相図(図1(c)-1(e))は、長年研究されてきた単層型($n=1$) LSCO、二層型($n=2$) YBCOにおける、それぞれ2%、5%程度で反強磁性長距離秩序が消失する相図(図1(a), 1(b))とは著しく異なる。これは、 CuO_2 面数 n を増やすことにより CuO_2 面間の磁氣的相互作用が強まり、高いホール濃度域まで反強磁性秩序が安定化された結果であると考えられる。

銅酸化物高温超伝導が発見後25年を経てもなお完全なる理解に至っていない一つの要因として、現在「銅酸化物高温超伝導体の相図」として信じられている単層La系の超伝導相図(図1(a))が理論的に説明できないことがある。これに対し多層型の研究結果は、 CuO_2 面数 n の増加により張り出した反強磁性金属相と超伝導相の様に混ざった安定状態があり、そのような状況においても高い超伝導転移温度が維持できていることを示す。この事実から、高温超伝導は反強磁性と「競合」しているというよりも、「協奏・協力」していると考えられ、その高温超伝導の起源は「反強磁性を生み出すものと同一のもの」、つまり反強磁性を生み出す超交換相互作用(J)と考えることで全体をすっきりと見通せると思われる。

またLSCOやYBCOの低ドーピング域では、 CuO_2 面の見せるさまざまな異常(磁場誘起反強磁性、ホールポケットの観測、擬ギャップ、ストライプ構造など)と超伝導との関係が、重要な未解決の課題として残っている。一方、多層型物質の研究は、均一にドーピングされた乱れない理想的な CuO_2 面には最適ドーピング域(～16%)近傍まで本質的に反強磁性モーメントが存在することを示唆して

いる[18]。このことは、LSCOやYBCOでは弱い層間結合のため最適ドーピング域近傍まで反強磁性秩序が隠れている(抑えられている)可能性を示唆しており、低ドーピング域での様々な異常の解決への糸口になると考えている。

4. まとめ

銅酸化物超伝導体は現在最も高い超伝導転移温度 T_c を示し、その発現機構の解明は固体物理学の中心課題であり続けてきた。とくに、AF相とSC相の境界領域において両相が共存しうるとかという疑問について、実験・理論の両面から精力的に研究されてきた。これは重い電子系、有機超伝導体、鉄系超伝導体など、他の強相関電子系超伝導に共通する問題でもある。

我々は産総研・伊豫グループとの共同研究のもと、一連の多層型物質の研究から反強磁性と超伝導が共存することを指摘してきたが、本稿で紹介した五層型 $\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{F},\text{O})_2$ のNMR測定の結果[16]は両相が共存するという事実をはっきりと示している。すなわち銅酸化物高温超伝導は反強磁性秩序と「協奏・協力」していると考えられ、その高温超伝導の起源は反強磁性を生み出す超交換相互作用(J)と考えることで全体をすっきりと見通せるのではないだろうか。

現在、国内外において様々な実験手法により、 $\text{Ba}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{10}(\text{F},\text{O})_2$ を中心とした多層型物質の共同研究が始まっている。多層型物質の研究の進展により、銅酸化物超伝導の発現機構の理解がさらに進むとことを期待したい。

参考文献

- [1] F. Steglich, J. Aarts, C. D. Bredl, W. Lieke D. Meschede, W. Franz, and H. Schäfer: Phys. Rev. Lett. **43** (1979) 1892-1896.
- [2] J. G. Bednorz and K. A. Müller: Z. Phys. B **64** (1986) 189-193.
- [3] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hosono: J. Am. Chem. Soc. **130** (2008) 3296-3297.
- [4] L. Gao, Y. Y. Xue, F. Chen, Q. Xiong, R. L. Meng, D. Ramirez, C. W. Chu, J. H. Eggert, and H. K. Mao: Phys. Rev. B **50** (1994) 4260-4263.
- [5] B. Keimer, N. Belk, R. J. Birgeneau, A. Cassanho, C. Y. Chen, M. Greven, M. A. Kastner, A. Aharony, Y. Endoh, R. W. Erwin, and G. Shirane: Phys. Rev. B **46** (1992) 14034-14053.
- [6] V. F. Mitrovic, M.-H. Julien, C. de Vaulx, M. Horvatic, C. Berthier, T. Suzuki, and K. Yamada:

- Phys. Rev. B **78** (2008) 014504.
- [7] S. Sanna, G. Allodi, G. Concas, A. D. Hillier, and R. De Renzi: Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 207001.
 - [8] F. Coneri, S. Sanna, K. Zheng, J. Lord, and R. De Renzi: Phys. Rev. B **81** (2010) 104507.
 - [9] H. Mukuda, Y. Yamaguchi, S. Shimizu, Y. Kitaoka, P. M. Shirage, and A. Iyo: J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 124706.
 - [10] A. Iyo, Y. Tanaka, M. Tokumoto, H. Ihara: Physica C **366** (2001) 43-50.
 - [11] A. Iyo, Y. Tanaka, H. Kito, Y. Kodama, P. M. Shirage, D. D. Shivagan, H. Matsuhata, K. Tokiwa, and T. Watanabe: J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 094711.
 - [12] A. Iyo, M. Hirai, K. Tokiwa, T. Watabane, and Y. Tanaka: Physica C **392-396** (2003) 140-144.
 - [13] P. M. Shirage, D. D. Shivagan, Y. Tanaka, Y. Kodama, H. Kito, and A. Iyo: Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 222501.
 - [14] S. Shimizu, S. Iwai, S.-I. Tabata, H. Mukuda, Y. Kitaoka, P. M. Shirage, H. Kito, A. Iyo: Phys. Rev. B **83** (2011) 144523.
 - [15] S. Shimizu, H. Mukuda, Y. Kitaoka, H. Kito, Y. Kodama, P. M. Shirage, and A. Iyo: J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 064705.
 - [16] S. Shimizu, S.-I. Tabata, H. Mukuda, Y. Kitaoka, P. M. Shirage, H. Kito, and A. Iyo: J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 043706.
 - [17] S. Shimizu, S.-I. Tabata, H. Mukuda, Y. Kitaoka, P. M. Shirage, H. Kito, and A. Iyo: Phys. Rev. B **83** (2011) 214514.
 - [18] S. Shimizu *et al.*: in preparation.

＜第15回超伝導科学技術賞を受賞して＞

(1) 超伝導マグネットの不安定性と安定化

Instability and stabilization of superconducting magnets

横浜国立大学

塚本修巳

Yokohama National University

O. Tsukamoto

1. はじめに一低温超伝導マグネットと不安定性

超伝導の発見から約半世紀たった1950年代後半から1960年代前半にかけて、Nb₃SnやNbTiなど高磁界で高い電流密度を持ち現在も実用に供されている低温超伝導 (LTS) 材料が次々と発見された。これらの材料の発見直後から超伝導マグネットの試作が行われたが、非常に小型なものを除き、超伝導線材の臨界電流よりはるかに低い電流でマグネットはクエンチを起こしてしまうことが分かった。その原因が分からず、一時は超伝導マグネットの実現が絶望視されることもあった。

その後の研究で、早期クエンチは何らかの原因で擾乱が線材に加わり局所的に常伝導転移が起こり、その部分での発熱が回りの線材の温度を上昇させ、常伝導部が拡がりマグネット全体に及ぶためであることが分かってきた。これに対して、超伝導素線に多くの銅を付加した導体を作り、液体ヘリウムとの接触面積を大きくし、常伝導転移部のジュール発熱を抑えた安定化複合導体が開発された。特に、導体の臨界電流を超えてもマグネットがクエンチしないほどに銅の量を増やした完全安定化導体を用いて当時としては大型の安定なコイルが開発された。その後、完全安定化導体を用いた素粒子検出用の泡箱用やMHD発電装置用等大型超伝導マグネットが各国で次々と開発された。しかし、完全安定化マグネットの巻線部の電流密度は高々3000 A/cm²程度と低く、超伝導マグネットの応用範囲は限られたものであった。多くの分野に応用を広げるためには電流密度をより大きくする必要があり、安定化のための銅の減量と安定性の両立が大きな課題となった。その後の研究開発でマグネットに生じる擾乱は突発的、局所的かつ一過性であって、その擾乱に対して安定なら、完全安定化しなくてもマグネットは安定に動作することが分かってきた。すなわち、完全安定化は過剰安定化と考えられるようになった。

完全安定化基準より少ない安定化銅の量を評価する基準として、最小伝播領域 (MPZ) や最小クエンチエネルギー (MQE) などの評価基準が提案された。前者は導

体に発生した常伝導部が拡大し始める最小の常伝導部の大きさであり、後者はマグネットをクエンチさせる最小の擾乱エネルギーである。しかし、これらの評価基準の問題点はMPZやMQEをいくらにしたらマグネットは安定かという問題の答えを与えるものではないことである。すなわち、必要なのはマグネットをどのように作ったら安定かという安定性を設計する手法の開発である。このような認識は超伝導マグネットの技術者にはあったが具体的な手法がなかった。

2. マグネットに発生する擾乱ー導体の動き

2.1 導体の動きによるクエンチ

LTS導体を用いたマグネットの予期しないクエンチの原因となる突発的な擾乱は磁気的不安定性と電磁力による導体の微小の動きであることが知られていた。このうち磁気的不安定性は超伝導線をフィラメント化し、そのフィラメントを複数束ね銅などの常伝導金属母材に埋め込んだマルチフィラメント複合導体が開発されてほぼ完全に防げるようになった。しかし、導体の動きに対する安定化は課題として残った。LTSマグネットは4.2 K領域で運転されるが、この温度領域では銅などの常伝導金属比熱は室温の1000分の1程度となり、導体がわずかに数mm～数cmにわたって数 μm の動いただけでもその摩擦熱で導体の温度が上昇しクエンチにつながる。導体の動きがクエンチの原因になるということに関して、ある研究者は、メートル単位の大きさのコイルで、わずかに数 μm の導体の動きを防ぐことは現実的にできるはずがないと言っていたし、また、超伝導発電機の開発に携わっていたメーカの技術者は超伝導界磁コイルの固定はしっかりしているから導体は動かないと食ってかかれたこともあった。このように、導体の動きによるクエンチに関して理解はあまり進んでいなかった。

2.2 導体の動きによるクエンチの実例

筆者がMITのフランスビッターマグネット研究所に客員研究員として滞在していたとき、ブルックヘブン研究所で開発中の粒子加速器用2重極マグネットのモデルコイルについて、クエンチの原因を調べる機会があった。図1はその時測ったクエンチ直前のマグネットの発するアコースティックエミッション(AE)信号とクエンチ検出用のマグネット端子のバランス電圧Vである。パルス的な電圧の発生と同時に突発的なAE信号が発生し、その後、バランス電圧は増加して行きマグネットはクエンチにいたっている。パルス電圧は導体の一部が磁界中で動いたために発生した誘導電圧で、AE信号は導体の動きに伴う音であると考えられる。すなわちこのグラフは導体の動きによりクエンチが誘発されたことを直接的に示すものである。このような、クエンチの直前にパルス電圧と

AE信号が同時に発生する現象は他のコイルでも種々観測されている。臨界電流に達してクエンチした場合や、コイル内部の導体短絡によるクエンチではAE信号の発生を伴わずクエンチすることは確かめられている。

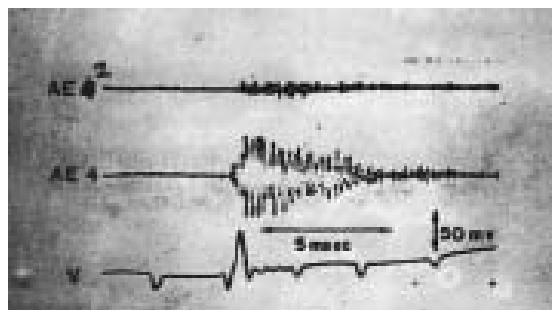


図1 粒子加速器用モデルコイルの導体の動きによるクエンチ (AE2, AE4: AE信号、V: マグネット端子バランス電圧)

2.3 導体の動きに伴う放出エネルギーの定量的評価

導体の動きによる安定性を評価するには、総長が数百m～数kmに及ぶマグネット導体のどこかで数 μm 程度動いて放出される擾乱エネルギーの大きさを評価する必要があり、厄介な問題であると考えられる。筆者はこの問題にチャレンジするためにまず導体の動きで放出されるエネルギーの定量的な評価を試みた。導体にかかる電磁力が導体を支持する力を上回った部分で導体が動き、導体が図2に示すように撓むと考えられる。導体が動く部分の長さ、導体を梁と考え導体の断面2次モーメントが分かれば導体の動きの量は式で計算できるので、放出されるエネルギーの大きさを計算する式を導出できる [1]。この式によれば擾乱エネルギーは導体に加わる電磁力の2乗と導体の可動部分の長さの5乗に比例し、導体の可動部分の長さが擾乱エネルギーの大きさを大きく左右することが分かる。

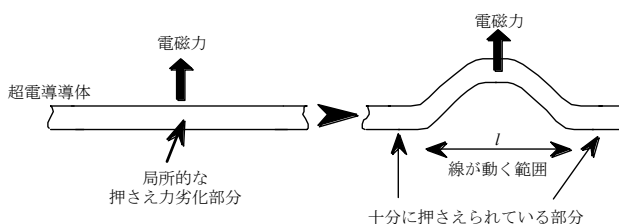


図2 導体の動き

2.4 導体の固定と銅比

安定性を保ちながらマグネットの巻線部の電流密度を高くするのに導体の安定化銅と超伝導部の比率(銅比)をどのようにすればよいかという問題があり、米国で、安定化銅を含む複合導体の断面積を一定にし、銅比を変え導体をつくり、モデルコイルによりクエンチを何回繰

り返せば所定の電流値に達するかを調べる研究が行われた[2]。銅比が小さければ超伝導部の比率が大きくなり導体の臨界電流も大きくなるので通電電流に対する余裕が大きくなる。一方銅比が大きくなると導体の臨界電流は少なくなるが銅による安定化の効果が大きくなる。この実験で、銅比が1.4や1.6の場合は繰り返すクエンチの数が多く、1.8にするとクエンチをほとんど繰り返さずに所定の電流に達するとの結果を得ている。その理由として、銅比1.8の方が銅比が少ない場合に比べてMQEが大きいかと結論付けている[2]。しかし、筆者は安定性にかかなり違いがあるのにMQEの違いがわずかであることに疑問を持ち、このような安定性の違いはもっと別な理由であると考えた。すなわち、一般に超伝導材料に比べ銅のほうが柔軟性があるため、図3に示すようにコイル巻線部を押さえ場合、銅比が大きいほうが銅部分の変形が大きく導体の寸法不整が良く吸収され、導体の固定が良くなるため安定性が向上する。このように考えると実験結果をよく説明できることが分かった。

以上より、安定化銅の役割は常伝導部の抵抗を下げるという役割と導体や導体間のスペーサ等の絶縁物の寸法不整を吸収し導体の固定をよくするという2重の役割があると考えられる。

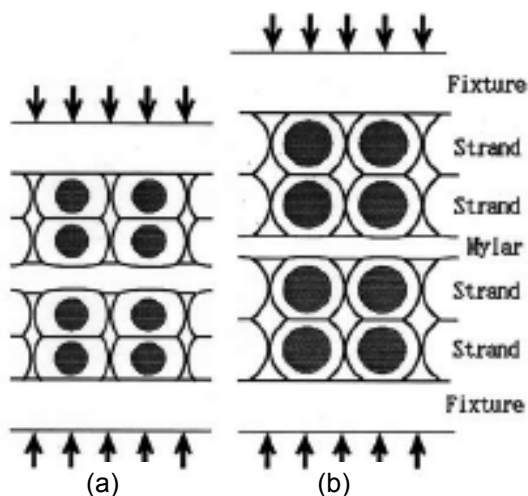


図3 銅比の違いによるコイル巻線部の変形の度合い
a) 銅比大、b) 銅比小

3. 統計的手法によるクエンチ発生確率の評価

マグネットは導巻棒に導体を巻き付けた構造となっており、導体にかかる張力や巻線部外部から加える締め付け力により導体は固定される。中規模以下のマグネットでは巻線を樹脂などで含浸して導体を固定することもあるが、ある程度以上の規模のマグネットでは導体とスペーサなどの層間絶縁物との摩擦力により導体は固定される。この場合、導体やスペーサには不可避免的に寸法不整があり、導体とスペーサ間との接触面圧の不整

に伴う導体の支持力の不整が生じる。我々は一般に寸法不整はガウス信号で表されることに着目し、導体の支持力不整を統計的に表現することによってクエンチ回数の期待値を評価する手法を提案した[3]。導体、スペーサ等の寸法公差を基にこれらの寸法不整をガウス信号で表現することにより、巻線部に加えられる締め付け力により導体にかかる面圧の分布を導体の変形を考慮し計算できる。これにより、導体の面圧による導体の摩擦支持力の不整の分布を求めれば、導体にかかる電磁力が支持力を上回る部分の長さ、すなわち、導体が動く長さの発生確率を導体電流に応じて計算できる。導体の動く長さが計算できれば擾乱エネルギーが計算できるので、MQEを超える擾乱エネルギーの発生確率、すなわちクエンチの発生確率を求めることが可能となる。クエンチの発生確率が1になる導体電流でクエンチが起き、一旦導体動いたところは導体の変形に関わるエネルギーはリセットされると仮定すれば、さらに電流を増した場合の次のクエンチの発生確率を評価できる。このようにすれば、クエンチを繰り返すごとにクエンチ電流が増えていくトレーニング現象の予測も可能になる。

この方法を用いて実際に作られたマグネットのトレーニング効果を予測した例を図4に示す[4]。また、この手法を用いて、超伝導発電機の界磁コイルの必要な銅比の値、コイル巻線固定に必要な締め付け力の値を計算し、設計の参考に供した。以上のように、本方法の有効性を示すことができた[4]。

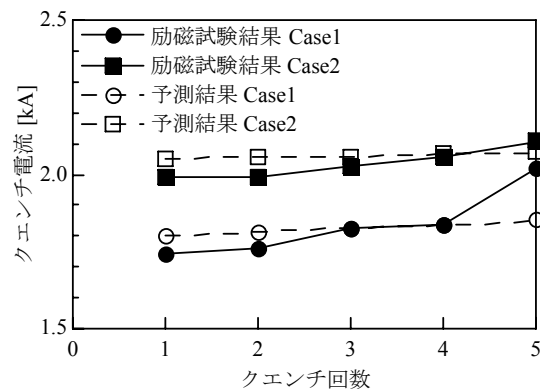


図4 クエンチトレーニング予測と励磁試験結果の比較例 [4]
(コイル内/外径：1.5 m/1.8 m、液体He冷却)

4. おわりに

HTS導体は運転温度が低くても20 K程度と考えられ(MgB₂は除く)、導体の比熱は4.2 Kの場合に比べ2桁程度以上大きく、臨界温度も高いので安定性が良く、導体の微小な動きがクエンチの原因になることはまずない。したがって、LTSマグネットを前提とした上記クエンチ評価手法をHTSマグネットには適用しにくい。しかし、

MgB₂線材についてはより低い温度で運転されることがあり、導体の動きが原因のクエンチは発生する可能性があり、本方法を適用できる。

また、大型マグネットや高電流密度マグネットなどは今後とも依然としてLTS導体が用いられると考えられ、我々の開発した手法の使える余地がまだ大いにあると考えられる。

今回受賞の対象となった研究は、ほとんどの研究者が難しいとしていた導体の動きによるクエンチに対する定量的な安定性評価に関わるものである。従来は経験と勘によって設計されていたマグネットの安定性に関して、本研究は定量的に設計する手法を提案するものとして筆者個人としてはひそかに自慢に思っていたものである。今回これを評価し表彰していただき、筆者としては望外のよろこびである。審査をしていただいた各位に感謝するしだいである。また、本研究の成果は筆者の研究室の大学院生による精力的な研究によるものが大きく、彼らにも感謝するしだいである。

参考文献

- [1] T. Takao, S. Honjo and O. Tsukamoto : “Frictional motion of conductor in superconducting magnet and quantification of disturbance energy”, *Advances in Cryogenic Engineering*, **35**, 737-745 (1989)
- [2] A. K. Ghosh *et.al*, “Training in Test Samples of Superconduc Cables for Accelerator Magnets”, *IEEE Trans. Magn* Vol. 25, pp.1831-1834 (1989)
- [3] T. Takao, P. C. Michael and O. Tsukamoto, “Influence of Copper-to-Superconductor Ratio on the Stability of High Current Density Superconductor”, *IEEE Trans. Magn*, Vol. 30, No. 4, pp. 2439-2442, (1994)
- [4] 古瀬充穂, 塚本修巳, 「統計的手法による超伝導コイルのクエンチ特性評価と安定性設計」, 電気学会論文誌 B, 122 巻 2 号, pp. 275-286, 2002 年 2 月

(2) *LnFeAs*(O,F) 薄膜の MBE 成長 MBE growth of *LnFeAs*(O,F) thin films

名古屋大学工学研究科

生田 博志

Department of Crystalline Materials Science

Nagoya University

Hiroshi Ikuta

1. はじめに

今回、「鉄系超伝導体*LnFeAs*(O,F)の分子線エピタキシー成長に関する先駆的研究」により、名古屋大学の竹田美和教授、宇治原徹教授、田淵雅夫准教授と共同で、超伝導科学技術賞を受賞させていただいた。非常に光栄なことであり、関係者各位に深く感謝する次第である。本稿では、この受賞につながった研究について、学術論文などではあまり表に出てこない、成果を得るまでの紆余曲折などを紹介したい。研究の現場で我々がどのように苦闘し、何を学んでいったのか、その雰囲気伝われば幸いである。

2. 薄膜成長に着手するまで

2008年の東工大細野グループによるLaFeAs(O,F)の超伝導の報告[1]を契機として、瞬間に鉄系超伝導の研究が世界中に広がり、超伝導転移温度*T_c*も最高で56 Kに達した。私自身も、超伝導研究に携わる者として、この新しい高温超伝導体に関心ではいらなかった。しかしながら、それまでAsを扱った経験がなかったため、当初は手を出しかねていた。そのような時に、同じ専攻に実はIII-V族半導体の薄膜成長の専門家である竹田教授がおられることを思い出した。丁度、毎年恒例の修士2年生の中間発表会があり、その終了後にAsについて教えを乞うつもりで声をかけてみたところ、竹田先生も非常に興味を示された。しかも、研究室に使用してないMBE装置がある、とのことであった。一方、私の研究室では修士1年に在籍していた川口昂彦君が鉄系超伝導体に強い関心を示していた。そこで、トントン拍子に話が進み、川口君が竹田研の装置を借りて共同研究を開始することとなった。

さらに、折よく科学技術振興機構(JST)で「新規材料による高温超伝導基盤技術(TRiP)」の研究課題公募があった。幸い、我々の提案課題が採択され、研究費の面でも研究に打ち込める体制が整ったのである。

3. 最初の*LnFeAsO*相薄膜までの道のり

我々が研究を開始したころ、東工大のグループからパルス蒸着(PLD)法でのLaFeAsO薄膜作製の報告が

あったが、この薄膜は超伝導を示さなかった[2]。続けて、ドイツから超伝導転移を示すLaFeAs (O,F)薄膜の報告があったが[3]、これは室温でPLD蒸着した薄膜を多結晶ペレットと共にガラス封管して1000℃近くで熱処理することで相の形成とフッ素ドーピングを実現している。これらの例からも分かるように、 $LnFeAsO$ (Ln : ランタノイド、以後1111)相の超伝導薄膜の成長は、決して容易ではない。これは、5つの構成元素を持ち、しかもAsとFという、非常に蒸気圧の高い元素を含んでいるためである。しかし、1111系は鉄系の中で T_c が最も高いのが魅力である。あとから考えると、無謀な選択だったかもしれないが、我々はほとんど迷うことなく1111系をターゲットとした。また、 Ln 元素としては、Ndを選択した。1111系の T_c は Ln 元素の原子番号とともに上昇し、NdもしくはSmで最大値を持つ。研究を始める際、NdとSm両方の原料を用意したが、特に深い意味もなく、まずはNdを選択した。なお、詳細は省くが、一部Laの実験も行っている。

一方、基板にはGaAsを用いた。GaAsのAs-As間隔は3.99 Åである。一方、ノンドーピングのNdFeAsOでは3.97 Åである。したがって、鉄系超伝導体とGaAsはかなり格子マッチングがいい。また、GaAsは原子平坦性の高い基板表面を得る手法が確立されている。したがって、理想的な基板と言える。実は、後述のように、GaAsを基板に選択したことは全く思いがけない効果があったが、この時はまだそれを知る由もなかった。

実際に薄膜成長を行うにあたって、最初の重要なポイントは原料選択である。必要とする元素はNd、Fe、As、O、Fの5つである。このうち、AsとFeは単体元素を原料とすることでほとんど問題がなかった。一方、希土類元素は一般に酸化し易く単体元素は扱いにくい。そのため、最初は酸化物を原料に使用することを考えた。我々のMBEでは分子線はKnudsen cell (K-cell)を使用して供給している。実は、 Nd_2O_3 等の希土類元素の酸化物は蒸気圧が低いため、十分な分子線圧を得るのが難しいことは、銅酸化物超伝導体の薄膜成長の研究者から聞いていた。しかし、とにかく一度、試してみよう、ということで Nd_2O_3 を最初を選択した。 Nd_2O_3 を用いれば、同時に酸素源としても期待できるからである。また、超伝導化はあとから考えるとして、とりあえずFの供給なしでスタートすることとした。

そこで、最初にFe、As、 Nd_2O_3 を原料に成長を始めた。しかし、得られた薄膜を組成分析したところ、すぐにNdの量が少ないことが分かった。これは、上述のように Nd_2O_3 の蒸気圧が低いため、十分な分子線圧が得られなかったためである。そこで、次にNd源としてNdF₃に注目した。NdF₃は蒸気圧も十分に大きく、十分な量のNdが供給されるものと期待できる。またFを含むため、F

がドーピングされて超伝導転移を示す薄膜が得られる期待もある。

そこで、次にFe、As、 Nd_2O_3 、NdF₃を原料に薄膜成長を試みた。その結果、薄膜中に含まれるNd量は確かに増加した。しかし、様々に条件を変えても、目的の1111相が形成される兆候が一向に見えず、不純物しか観測されなかった。そこで、形成された相をよく調べてみると、いずれの条件でも酸化物が無いことがわかった。つまり、酸素供給量が足りないことが考えられる。そこで、着目したのが、Fe₂O₃である。Fe₂O₃はある程度高温ではFe₃O₄に還元し、その際にOを放出する。その温度ではFe₃O₄そのものの蒸気圧は十分に低いため、得られる分子線はほぼ純粋な酸素と考えられる。実際、試してみると、K-cell温度を変えても薄膜中のFe量はほぼ一定であった。しかも、酸素の分子線圧はK-cell温度により、かなり精密に制御可能であることがわかった。

そこで今度は、Fe、As、NdF₃、Fe₂O₃を原料とした。しかし、それでも1111相の形成は容易に見られなかった。そこで、各原料の供給量と、形成される相の関係を丹念に調べ、どのような条件でどのような不純物相が形成され易いかを探った。このころまでは、実験は前述の川口昂彦君が一手に引き受けていたが、2009年4月からは上村彦樹君と大野俊也君が加わり、実験のペースも上がった。我々の装置ではシュラウドに液体窒素を流しているため、成膜を行うと翌日は真空引きのために実験ができない。そこで、ほぼ2日に1回のペースで、3~4つの異なる条件で薄膜を成長し、翌日はX線回折や組成分析などを行い、私も加わって解析結果を深夜までにらみながら、その次の日の成膜条件を考える日々がしばらく続いた。そのような苦しい期間がしばらく続いたが、2009年5月15日に成長した薄膜で、不純物ピークに交じって、待望の1111相のX線回折ピークらしきものが、初めて観測された。

ここまで来れば、見通しも立てやすい。それまで散々に苦労したおかげで、それぞれの不純物相は成膜条件をどの方向に変えれば消失するかは、ある程度、予想ができるようになっていた。さらに、成膜温度や、各分子線圧など微妙な調整を行って、2009年6月23日に、とうとうX線回折で不純物ピークが観測されない単相のエピタキシャル薄膜を成長することに成功した[4]。この薄膜は、最初から数えて、ほぼ100枚目であった。1111相が成長する条件が分かってみると、実は非常に狭い範囲の条件でしか単相試料が得られないことも分かった。しかし、この最適条件で成長すれば、ほぼ確実に単相試料が得られ、再現性は非常に高いことも明らかになった。

4. 超伝導薄膜までの道のり

このように、かなり苦労したものの、MBE法で初めて1111薄膜の成長に成功した。ところが、抵抗率を測定してみると、低温で温度低下とともに上昇し、超伝導転移は観測されなかった。色々と条件を変えて成長を行ったりしたが、どうしても超伝導の薄膜を得ることができなかった。その理由は、最初、皆目分からなかったが、気になったのは、膜厚が薄いことである。1111系は成長速度が非常に遅く、我々の標準的な成長条件では約15 nm/hである。一般に膜厚が薄いと基板との界面で生じる乱れのために物性が変化する可能性があり、もしかしたらそれが理由かもしれないと考えていた。

そこで、いろいろ試す中で、6時間の長時間、つまり比較的厚い薄膜を成長してみた。その結果、意外なことが起きた。成長中には反射高速電子回折(RHEED)観察を行っているが、初期は非常に安定に1111相が成長した。ところが、成長条件を全く変えていないにも関わらず、4時間を過ぎたころからRHEED像が変化し、何らかの不純物が形成されたことを示唆した。X線回折で調べてみると、1111相に加えて、NdOF相が検出された。しかし、この6時間成長膜を測定したところ、オンセットで48 K、ゼロ抵抗で42 Kという高い T_c を持つ超伝導薄膜であることが分かった[5]。

このように、超伝導薄膜を得ることに成功したが、なぜ、単純に成長時間を延ばすことで超伝導化したのかは、不明であった。そこで、オージェ電子分光法により、薄膜の深さ方向の組成分析を行った。その結果、成長開始から最初の約4時間は1111相が成長しているが、その後はNdOFが形成されていることが分かった。一方、電子顕微鏡(SEM)観察を行うと、多くの孔(ピット)が形成されていることが示唆された。成長した1111膜をエッチングして露出した基板表面を原子間力顕微鏡(AFM)で観察すると、これらのピットは1111膜そのものではなく、その下の基板に形成されていることが分かった。当然、1111膜を形成する前の基板では、このようなピットは存在しない。以上のことから、次のようなことが起きていることが分かった。

まず、原料にNdF₃を用いているが、これでは本来はFが供給過剰である。しかし、GaAsをF雰囲気暴露するとGaF₃を形成し、このGaF₃は260°C以上で昇華することが報告されている[6]。我々の基板温度(典型的には650°C)はこれよりもかなり高い。したがって、1111膜の成長初期には、Fは全てGaAsと反応してこれをエッチングする。このエッチングに消費されるため、結果的にFのない状態で1111相が成長し、そのために超伝導は発現しない。一方、膜厚が厚くなるとともに基板表面が覆われるため、基板とFの反応が抑えられる。しかし、元々のF

供給量が過剰であるため、この状態は1111相の成長領域からは外れており、NdOF相が形成されたものと考えられる。

以上の機構によって、1111相上にNdOFの層が成長したと考えられるが、NdOFはOとFに大きな不定比性を持つ。そのため、NdOFから1111相にFが拡散してFがドーピングされたものと考えられる。実際、NdOFの層が形成される前に成長を止めた薄膜をオージェ分光で調べると、1111相にはFが全く検出されなかった。

5. 最近の進展

以上のような経緯で、我々は1111系の超伝導薄膜の成長に成功した。1111系では、上述のように、ドイツのグループが成膜後に高温焼成することで超伝導薄膜を得ているが、我々はそのような熱処理をあとから施す必要がない、その場(in-situ)成長で初めて超伝導薄膜を得ることに成功した。しかし、いくつかの問題点も明らかになった。

まず、GaAs基板がFと反応してGaF₃を形成することでエッチングされて、薄膜との界面に多数のピットが形成されている。そのために膜表面の平坦性が損なわれてしまう。そこで1111相成長中にGaを供給したところ、ピットの形成を抑えることができた。これは、GaとFが反応してGaF₃を形成することで、GaがFのゲッターとして働いたためであろう[7]。

次に、そもそもFが供給過剰という問題がある。基板にGaAsを使用した場合には、たまたま基板をエッチングすることでFが消費され、1111相が成長した。しかし、他の基板では同様の効果は期待できない。実際、MgOを基板として同様の条件で成長しても、1111相は得られない。Fが供給過剰になるのは、NdF₃がNdとFの両方の供給源であるため、両者を独立に制御できないためである。そこで、Nd源として別の原料を使用することが考えられるが、既に述べたようにNd₂O₃では蒸気圧が低すぎる。また、単体のNdも試みたが、1111相成長のために供給する酸素によってNd原料が容易に酸化してしまい、安定した成長が困難であった。しかし、上述のようにGaにFのゲッター作用があることがわかったので、NdF₃を原料としつつ、過剰なFをGaによって取り除くことを試みた。これは非常にうまくいき、MgO上にも1111相を成長することに成功した[8]。

次に、Fドーピングの課題がある。上述のGaゲッターの手法を用いれば、F量の調整が可能である。Ga量が足りない時にはF過剰となり、1111相が成長しない。Ga量を増やすと1111相が成長するが、Fが不足すると1111相にはドーピングされない。そのちょうど境目を狙えば、Fドーピングした1111相が得られると期待される。しかし、残念ながらこ

の方法はまだ成功していない。基板温度など、他のパラメーターが関係するのか、この方法では今のところ良質な超伝導薄膜は得られていない。そこで、これに代わる方法として、まずFをドーピングしていない1111相を1時間(約15 nm)成長し、そのあとにNdOFを成長してみたところ、超伝導転移を示した[8]。つまり、6時間成長した薄膜で生じたことを意図的に起こしたところ、NdOF相からFが拡散して1111相にドーピングされたものと考えられる。この方法で様々な基板上に薄膜を成長したところ、CaF₂上にオンセットが56 K、ゼロ抵抗が52 Kの薄膜が得られた。これは、バルク試料の最高のT_cとほぼ遜色のない値が得られた最初の薄膜でもある。

6. おわりに

我々がNdFeAs (O,F) 薄膜の成長に成功するまでの道のりは決して平坦ではなかった。また、いくつかの幸運が重なった面もある。たとえば最初にGaAsを基板に選択したが、これがFと反応して余分なFを取り除く効果があった。違う基板を選択していたら1111相の成長条件を見つけてきたかどうか、正直、わからない。しかし、それらの幸運があったとしてもなお、多くの困難を乗り越える必要があった。例えば、原料選択一つをとっても、色々な可能性を検討したり、実際に試したりと、様々な紆余曲折があった。それは苦しい道のりであったが、その問題が解決した時は、非常に大きな喜びをも与えてくれた。我々の強みは、専門が異なる2グループが協力していることである。お互いに知恵を出し合いながら、研究を進めていることが、非常に大きな原動力となっている。

今後解決しなくてはならない課題もまだまだ残されている。例えば、Fドーピングのために、現状ではNdOF層を1111上に成長する必要がある。しかし、将来的に積層型の超伝導接合を作製する場合、これはあまり望ましい方法ではない。実は、最近、新たなアイデアを試みることで、NdOF層を形成することなく、Fドーピングが可能であることが分かっている。その結果はまた改めて報告したいが、このように、より高品位の薄膜を成長するための工夫の余地はまだ残っている。頭を絞り、様々な可能性を考えて、山を一つ一つ越えることが必要である。これこそが、この研究の醍醐味であり、ものづくりの何物にも代えがたい喜びでもある。

なお、最後になったが、今回の受賞の成果に至ったのには、本文中に名前が出た3名の学生諸君の貢献が非常に大であった。賞の規定上、同一機関からは4名までしか受賞できない、とのことである。そのため、今回は代表して我々教員が受賞したが、本研究に限らず、若い学生諸君の情熱と努力が研究の現場を支えているこ

とを最後にあらためて強調したい。

参考文献

- [1] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hosono: *J. Am. Chem. Soc.* **130** (2008) 3296.
- [2] H. Hiramatsu, T. Katase, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono: *Appl. Phys. Lett.* **93** (2008) 162504.
- [3] E. Backen, S. Haindl, T. Niemeier, R. Hühne, T. Freudenberg, J. Werner, G. Behr, L. Schultz, and B. Holzapfel: *Supercond. Sci. Technol.* **21** (2008) 122001.
- [4] T. Kawaguchi, H. Uemura, T. Ohno, R. Watanabe, M. Tabuchi, T. Ujihara, K. Takenaka, Y. Takeda, and H. Ikuta: *Appl. Phys. Express* **2** (2009) 093002.
- [5] T. Kawaguchi, H. Uemura, T. Ohno, M. Tabuchi, T. Ujihara, K. Takenaka, Y. Takeda, and H. Ikuta: *Appl. Phys. Lett.* **97** (2010) 042509.
- [6] W. C. Simpson, T. D. Durbin, P. R. Varekamp, J. A. Yarmoff: *J. Appl. Phys.* **77** (1995) 2751.
- [7] H. Uemura, T. Kawaguchi, T. Ohno, M. Tabuchi, T. Ujihara, K. Takenaka, Y. Takeda, and H. Ikuta: *submitted*.
- [8] T. Kawaguchi, H. Uemura, T. Ohno, M. Tabuchi, T. Ujihara, Y. Takeda, and H. Ikuta: *submitted*.

(3) 超伝導磁場センサによる 新しい脊髄疾患診断をめざして

A new diagnosis method of spinal cord disease with SQUID magnetic flux sensors

金沢工業大学 先端電子技術応用研究所

足立 善昭

Applied Electronics Laboratory,

Kanazawa Institute of Technology

Yoshiaki Adachi

1. はじめに

わが国には脊椎症性脊髄症や椎間板ヘルニアなどの脊椎・脊髄変性疾患が多く、その患者数は高齢化社会を迎えて増加の一途にある。これらの疾患は椎間板の膨隆などによって脊髄が局所的に圧迫されて起こる。その結果、神経信号の伝導が阻害され、四肢のしびれや麻痺、歩行障害、巧緻運動障害などが症状として現れる。言い換えれば、手足のしびれや麻痺などの症状は、手足自体に原因があるとは限らず、手足から脳に至る途中の脊髄神経の圧迫による伝導障害が原因である場合があり、その見極めが重要である。

脊髄神経圧迫による疾患は外科的な手術で圧迫を取り除くことによって、治療が可能である。そのためには術前に障害部位を特定しておくことが肝要である。従来、このような障害部位の特定は、神経学的な所見やX線画像、MRIなどの形態的な画像診断情報に頼っていた。しかし、形態的に確認できる異常がすべて神経障害と結びつくわけではなく、正確な障害部位の特定が困難な場合が多い[1]。そこで、神経生理学的な脊髄の機能検査を適用し、他の検査の結果との一致を見ることが、より精度の高い診断のためには不可欠である。

神経生理学的な脊髄の機能検査とは、神経に何らかの電気的な刺激を与え、それに誘起されて脊髄を伝搬する神経信号を観測し、神経が正しく機能しているかどうかを調べる検査である。従来は、神経信号を体表に付着した表面電極、あるいは脊柱管内に挿入した硬膜外カテーテル電極によって電位の変化として検出するほかなかった[2]。しかし、表面電極による電位計測は体内の導電率分布による歪みが大きく、障害部位特定に必要な空間分解能が得られない。また、硬膜外カテーテル電極による電位計測は、脊柱管内(硬膜外腔)への電極の挿入が必要で、患者への侵襲性が高くならざるを得ない。とりわけ頸部への電極挿入は、特殊な手技を必要とするため、施術できる医療機関が限定されており、その必要性は認識されながらも、広くは普及していないのが現状である。

上記のような背景を踏まえ、東京医科歯科大学整形外科と金沢工業大学先端電子技術応用研究所が共同で、超伝導量子干渉素子(SQUID)による脊髄機能検査の研究を1999年にスタートさせた。これは脊髄神経の電気的な活動を高感度な磁場センサで磁場信号として体表から検出し、非侵襲的に脊髄機能検査を行うための技術開発と、脊髄疾患の診断プロトコルの確立を目的としている。

2. 脊髄誘発磁場

SQUIDによる脊髄誘発磁場の研究は、過去にもドイツ連邦物理工学研究所(PTB)などで例があったが、臨床応用には至ってなかった[3][4]。脊髄磁場は、その磁場源が体幹のほぼ中央を通り、体表からの距離が遠く、検出できる磁場強度が心臓磁場や脳磁場と比べても著しく小さく、十数fT～数十fT程度しかない。そのため、臨床応用のためには、計測の安定性と再現性の確保がとくに重要な課題となる。

筆者らは、まず実験動物用の脊髄磁場計測装置を試作し、脊髄疾患モデルの疾患部位での磁場分布の変化を観測した。試作した計測装置はSQUIDベクトル差分型磁束計を2×4の8箇所配置し、体表面に対して法線方向成分のみならず、磁場の接線方向成分も同時に検出することができるようにした[5]。

脊髄誘発磁場の磁場源は、軸索を伝搬する神経信号である。軸索を伝搬する神経信号は、図1のように、賦活部位における細胞内電流と細胞外体積電流が体表面に磁場を生じさせ、沸き出しと吸い込みの極が2対ずつある四重極様パターンの磁場分布を呈することが知られている[6]。

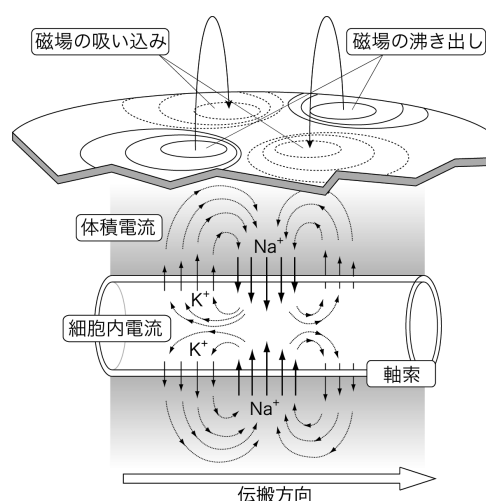


図1 脊髄磁場の模式図

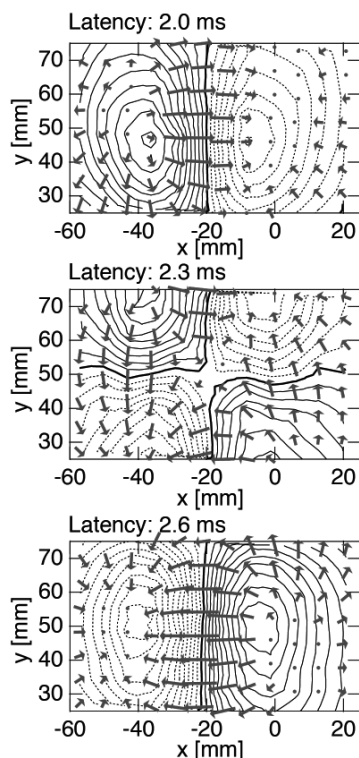


図2 ウサギの頸部脊髄磁場分布; 等磁場線図は体表に対して法線方向成分、アロー図は接線方向成分の分布をそれぞれ表す

試作した計測装置でネコやウサギの脊髄から誘発する磁場を観測したところ、図2に示すように明瞭な四重極パターンの磁場分布が脊髄に沿って伝搬していくようすを確認できた[7]。また、脊髄障害部位における磁場信号の減衰や伝搬遅延から、非侵襲的に障害部位の位置同定が可能であることを示した[8][9]。とくに体表面に対して、接線方向成分の磁場には、周囲から細胞内へ流れ込む体積電流の情報が含まれており、この成分が障害部位同定に重要であることがわかった[10]。

3. 臨床応用へ向けて

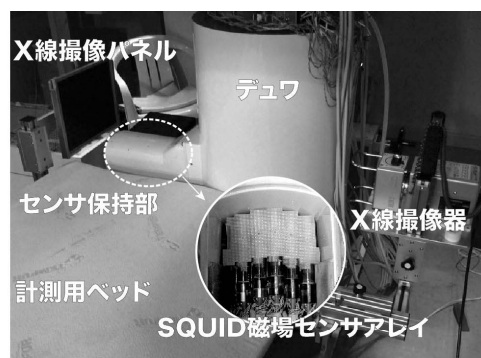
脊髄疾患モデルの動物実験で一連の成果を得た後、2004年からヒトを対象として安定的に脊髄誘発磁場を計測する装置の開発に着手した。ヒト用の計測装置ではとくにデュワの構造に工夫を加えた。底面にSQUID磁束計を配置する従来のデュワの構造では、背側の磁場を計測するために、被験者がうつぶせになり、上方からセンサを密着させることになる。しかし、計測中、ずっとうつぶせの状態では被験者が耐えられず、姿勢を安定的に保てないという問題がある。とくに脊髄疾患の患者を対象とする場合には、これを考慮しなければならない。そこで、幾度かの試作を重ね、被験者が苦痛なく姿勢を保てるように、仰臥位の状態で計測できる特殊な形状のデュワを新たに開発した。このデュワは、液体ヘリウムを

溜める円筒状の本体の側面からセンサ保持部が水平方向に突き出たような構造を持つ。このセンサ保持部の上面に沿ってSQUIDベクトル差分型磁束計が 5×8 の40箇所に配置されている。被験者は頭部と頸部がはみ出すようにベッドに横になり、頸部をセンサ保持部で支えて観測部位に密着させる。センサ保持部上面は頸部背側の形状に合わせて、円筒面になっている。また、円筒面構造にすることによって、強度を保たせながら、デュワの真空断熱層を3 mmに抑え、全体で7 mm程度の短い室温-低温間距離を実現できた。また、脊髄信号の帯域における磁場分解能は $3 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 程度であった。

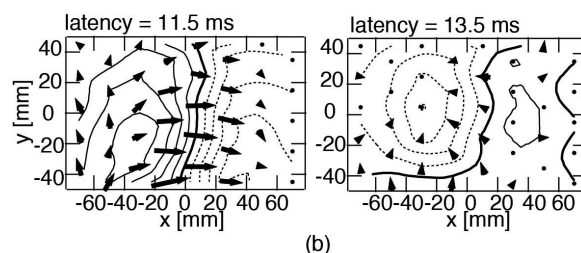
この仰臥位型のデュワ構造により、被験者が計測中の姿勢を維持することができるようになり、脊髄磁場の信号検出が安定的に可能となった。開発した装置の外観と左手首正中神経刺激にて得られた頸部脊髄誘発磁場信号の計測例を図3に示す[11]。動物実験で得られたものと同様の四重極パターンが確認できた。

4. 空間フィルタ法による機能イメージング

脊髄磁場計測による脊髄障害部位の同定には、脊髄周囲から脊髄へ流れ込む体積電流の解析が重要である。そのためには、磁場源を無限小の長さの電流素片として仮定する従来の電流双極子法だけでは十分ではなかった。また、脊髄は周囲を不導体である脊椎骨に囲まれ、複雑な解剖学的構造を持つため、脳磁場や心臓磁場の解析に広く用いられている導体球モデルや平面モデルを適用することができない。そこで、2006年から研究グループに首都大学東京が加わり、広がりのある



(a)



(b)

図3 (a) 仰臥位型脊髄磁場計測装置;
(b) 健康被験者の脊髄磁場計測例

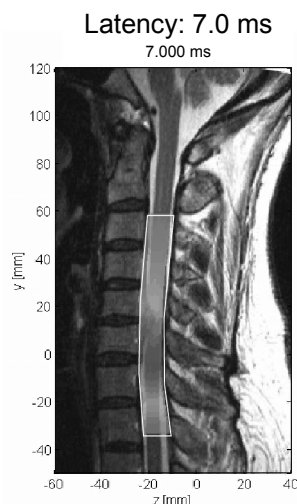


図4 空間フィルタ法による
脊髄機能イメージングの一例

電流分布として磁場源を再構成する空間フィルタ法を適用した脊髄磁場の解析方法を共同で提案した[12]。

図4は、脊髄磁場計測データにUnit gain minimum norm空間フィルタ法による電流源再構成を適用し、脊髄に流れ込む体積電流分布を被験者の頸部MRIに重畳させて表示した脊髄機能イメージングの例である。実際に脊髄疾患の患者を対象とした場合には、このような機能イメージングにより、脊髄を伝搬する信号の電流密度強度が、疾患部位において顕著に低下したり、伝搬遅延が生じたりするのを可視化することができた。

5. おわりに

本稿では、第15回超伝導科学技術賞の受賞対象となったSQUIDによる非侵襲脊髄機能イメージングの概略について、これまでの12年以上にわたる研究開発の経緯も含めて述べた。東京医科歯科大学では試作機を運用して、すでに100名を超える脊髄疾患の患者からデータを得ており、本技術が診断装置として高いポテンシャルを持つことが確認されている。現在は、実用化・事業化を加速するために、脊髄機能イメージングの適用範囲を広げる研究[13]や、冷凍機を統合し、ランニングコストを下げるための研究開発などに取り組んでいる。昨今の社会情勢から、今後、いっそう資金的には厳しくなることが予想されるが、この技術をなんとしても医療機器としてテイクオフさせ、脊髄疾患で苦しむ人たちの一助となりたい。また、再生医療やリハビリテーション分野への応用展開も検討している。

本研究はSQUID生体磁気計測装置開発の豊富なノウハウを持つ金沢工業大学、脊髄電位計測の知見と経験を持つ東京医科歯科大学、電流源再構成の数理アルゴリズムの研究において実績のある首都大学東京と

いう分野を越えたフォーメーションの妙により初めて成し得たと筆者は考える。また、今回受賞した3名以外の多くの研究スタッフによっても本研究は支えられてきた。医療機器開発のようなシステムインテグレーションは、すなわちその要素技術や知見を持つ「人」をインテグレートすることでもある。

参考文献

- [1] S.D. Borden, P.R. McCowin, D.O. Davis, T.S. Dina, A.S. Marl, S. Wiesel, *J. Bone. Joint. Surg. Am.*, **72** (1990), 1178–1184.
- [2] K. Shinomiya, K. Furuya, R. Sato, Y. Okamoto, Y. Kurosa, M. Fuchioka, *Spine*, **13** (1988), 1225–1233.
- [3] G. Curio, S.N. Ern , J. Standfort, J. Scheer, R. Stehr, L. Trahms, *Electroenc. Clin. Neurophysiol.*, **81** (1991), 450–453.
- [4] B.M. Mackert, *Clin. Neurophys.*, **115** (2004), 2667–2676.
- [5] Y. Adachi, J. Kawai, M. Miyamoto, G. Uehara, S. Kawabata, H. Okubo, Y. Fukuoka, H. Komori, *Supercond. Sci. Tech.*, **16** (2003), 1442–1446.
- [6] I. Hashimoto, T. Mashiko, T. Mizuta, T. Imada, K. Iwase, H. Okazawaki, *Electroenc. Clin. Neurophysiol.*, **93** (1994), 459–467.
- [7] S. Kawabata, H. Komori, K. Mochida, H. Ohkubo, K. Shinomiya, *Spine*, **27** (2002), 465–479.
- [8] Y. Fukuoka, H. Komori, S. Kawabata, H. Ohkubo, K. Shinomiya, O. Terasaki, *Clin. Neurophys.*, **113** (2002), 1985–1992.
- [9] Y. Fukuoka, H. Komori, S. Kawabata, H. Ohkubo, K. Shinomiya, *Clin. Neurophys.*, **115** (2004), 2113–2122.
- [10] Y. Hoshino, S. Kawabata, H. Komori, H. Ohkubo, M. Tomizawa, K. Shinomiya, *Int. Congr. Ser.*, **1278** (2005), 309–312.
- [11] 足立善昭, 宮本政和, 河合淳, 上原弦, 川端茂徳, 佐藤朋也, *電学論 E*, **129** (2009), 181–186.
- [12] T. Sato, Y. Adachi, M. Tomori, S. Ishii, S. Kawabata, K. Sekihara, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **56** (2009), 2452–2460.
- [13] Y. Adachi, M. Miyamoto, J. Kawai, G. Uehara, H. Ogata, S. Kawabata, K. Sekihara, H. Kado, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **21** (2011), 526–529.

(4) 5 GHz 帯気象レーダ用高温超伝導送受信フィルタの開発

Development of superconducting receiving/transmitting filter for 5 GHz band weather radar

(株)東芝 研究開発センター
加屋野 博幸, 中山 浩平, 塩川 教次, 河口 民雄
Corporate Research & Development Center, Toshiba Corporation

H. Kayano, K. Nakayama,
N. Shiokawa and T. Kawaguchi

1. はじめに

近年、携帯電話や無線LAN等の無線機器の高速大容量化へのニーズが増大しており、電波利用における周波数資源の逼迫は深刻化しつつある。また、最先端のワイヤレスブロードバンド環境を構築するためには、信号帯域幅を広帯域化する必要があるが、現状の周波数割り当てでは十分な帯域が得られないなど、周波数割り当ての再編が必要となってきた。

平成15年に世界無線通信会議(WRC-03)において5.15~5.35 GHz及び5.47~5.725 GHz帯が世界的に無線LANを含む無線アクセスシステムに追加分配されたことから、平成17年5月より4ch (5.25~5.33 GHz)が新たに開放された。この結果、現在の気象レーダの周波数帯5.25~5.35 GHz(帯域幅100 MHz)と重なってしまう問題が起きている。そこで、周波数再編のアクションプラン(平成19年11月改定版)によると、気象レーダーシステムの周波数帯域を5.33~5.37 GHz(帯域幅40 MHz)へ狭帯域化し、周波数移行させることが検討されている。これを受け弊社では、5 GHz帯気象レーダーシステムの狭帯域化、低スプリアス化に関する研究開発を行ってきた。狭帯域化のためには、送信スペクトルを狭帯域化すると共に、受信側の周波数選択性を高めるためのフィルタが必要となる。しかし、従来技術では狭帯域特性を実現するのに必要な無負荷Q値が十分得られない問題があった。一方、高Q値を実現する手段として超電導体を利用した超電導フィルタが開発されている[1-3]。しかし、その耐電力は数十W程度であり、気象レーダの送信用には用いることができない問題点があった[4-5]。

本報告では、気象レーダ用送受信フィルタとして狭帯域特性を持つバンドパスフィルタに関して報告する。受信フィルタは、減衰極を持つ8段擬似楕円関数型フィルタに関して報告する。また送信フィルタは、空洞共振器の高耐電力と超電導共振器の高Q特性を組み合わせたハイブリッドフィルタに関して報告する。

2. 超伝導受信フィルタ

受信フィルタでは、帯域外の減衰特性と低挿入損失を満たすのに必要なフィルタの構造として、8段擬似楕円関数特性フィルタを用いる。図1に共振器構成を示す。 M_{14} と M_{58} の飛び越し結合により減衰極を作り、少ない共振器数で急峻なフィルタ特性を実現することができる。また共振器数が少なくなったことで、より低損失なフィルタ特性を実現することができる。図2に実際に試作した超伝導受信フィルタの周波数特性を示す。通過帯域の両側に減衰極を持たせたことで、低損失と急峻性を合わせ持つフィルタ特性を実現した。

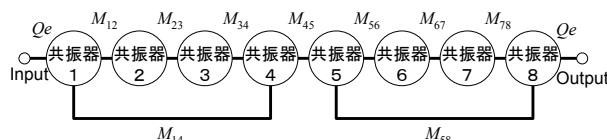


図1 8段擬似楕円関数型フィルタの構成

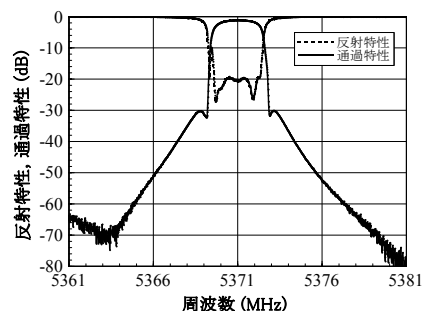


図2 超伝導受信フィルタの入出力特性

3. 超伝導送信フィルタ

前節で示したとおり狭帯域な特性を実現できる超電導共振器ではあるが、超電導体を持つ臨界電流密度の特性により共振器に入力できる電力には限界を持っている。特に気象レーダに使われるような大電力に耐えられる超電導共振器は存在しないことから回路的な工夫が必要となる。一般的なフィルタでは図1に示すように共振器が縦列接続されており、全ての共振器をほぼ同じ電力が通過してしまう。送信用フィルタに用いるためには全ての共振器に高い耐電力特性が必要となってしまう。そこで図3に示すようにレーダ信号の電力は周波数軸上で分布を持っており、中心周波数付近に大きな電力が集中している。そこで周波数軸上で共振器ごとに通過する電力が異なるフィルタを用いることが有効となる。ハイブリッドフィルタ[6]の回路構成を図4に示す。反射型の空洞共振器にはさまれて超電導共振器が配置されており、中心周波数の大きな電力は超電導共振器を通らずにマジックTどうしをつなぐバイパス線路を介して出力される。一方、空洞共振器を通過する中心周波数以外の弱い電力だけが超電導共振器に入り、帯域

端の急峻な特性を実現する。実際に試作したユニット構成と概観写真を図5に示す。実際に気象レーダ装置と接続し、3.5 kWの電力を通過させ、スプリアス低減効果を確認した。

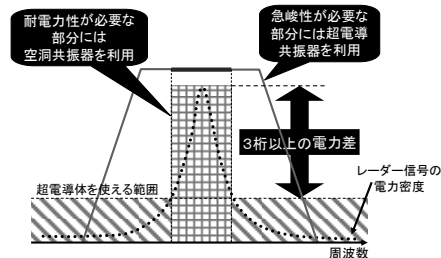


図3 ハイブリッドフィルタの基本構想

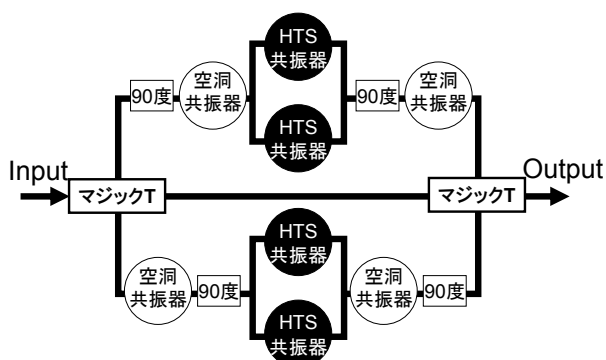


図4 ハイブリッドフィルタの回路構成

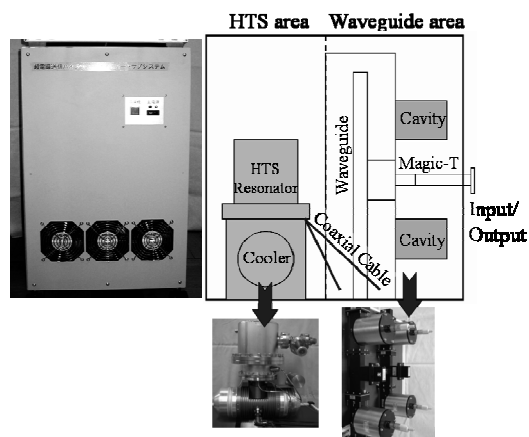


図5 ハイブリッドフィルタユニットの構成

5. まとめ

5 GHz帯気象レーダ向け受信／送信用超電導フィルタの開発を行った。受信フィルタでは狭帯域な特性と低損失な特性を合わせ持つ8段疑似楕円関数型フィルタを試作し、良好な特性を得た。また、送信フィルタでは超電導共振器と空洞共振器を用いたハイブリッドフィルタを試作し、3.5 kW動作を実現した。

謝辞

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] G. Tsuzuki, S. Ye, and S. Berkowitz: IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. TH4E-2 (2002) 1963-1966.
- [2] J. S. Hong and P. E. McErlean: IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. WEIF-20 (2004) 1105-1108.
- [3] H. Kayano, N. Shiokawa, M. Yamazaki, T. Watanabe, F. Aiga, and T. Hashimoto: IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., WEP-6 (2006) 1201-1204.
- [4] G. C. Liang, D. Zhang, C. F. Shih, M. E. Johansson, R. S. Withers, D. E. Oates, A. C. Anderson, P. Polakos, P. Mankiewicz, E. Obaldia, R. E. Miller: IEEE Trans. Microwave Theory & Tech. **43** 12 (1995) 3020-3029.
- [5] Z. Y. Shen, C. Wilker, P. Pang, D. W. Face, C. F. Carter III, and C. M. Harrington: IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** 2 (1997) 2446-2453.
- [6] H. Kayano, T. Kawaguchi, N. Shiokawa, K. Nakayama, T. Watanabe, T. Hashimoto: 38th European Microwave Conf. EuMC44-4 (2008) 853-856

(5) 超伝導センサーによる真の質量分析の実現

Realization of true mass spectrometry by superconducting detectors

産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門

大久保 雅隆

Research Institute of Instrumentation Frontier (RIIF),
National Institute of Advanced Industrial Science and
Technology (AIST)
M. Ohkubo

1. はじめに

質量分析 (MS) は、環境、ライフサイエンスなど幅広い分野において、最も重要な分析法の1つである。携わっている研究人工も多く、米国質量分析学会の年会には、毎年6,500人程度が参加する。質量分析機器開発に加えて、化学、地質学、科学捜査、バイオロジー、物理の分野における基礎的研究や応用などについて、最新結果が報告される。このように多岐に渡る分野で使用されているMSではあるが、原理的限界がある。その1つは、決定できる物理量が、質量電荷数比 (m/z) であって質量ではないということである。基本となる質量スペクトルは、横軸 m/z 、縦軸イオン強度である。質量分析は、その名前とは裏腹に質量を一意に決定できない。これは、イオンの電磁気力に対する応答は m/z で決まるため、常に z 値に不確実性が生じるからである。例えば、単純な例では $^{14}\text{N}^+$ と $^{14}\text{N}_2^{2+}$ は $m/z=14$ であり如何に高分解能な質量分析装置を用いても、これらの異なるイオンを区別することは原理的にできなかった。我々は、超伝導技術を使うことにより原理的限界を克服し、始めてこのような2つのイオンを分離することに成功した[1]。すなわち、 m/z 分析ではない真の質量分析を実現した。

2. 質量分析法の紹介

MSでは、まず分子や原子はイオン化される。イオン化法には、電子衝撃イオン化 (EI)、高速原子衝撃 (FAB)イオン化、マトリクス支援レーザー脱離イオン化 (MALDI)、エレクトロスプレーイオン化 (ESI) などがある。特に、MALDIとESIは生体高分子用で田中耕一氏、John Fenn氏が2002年にノーベル賞を受賞したことは記憶に新しい。イオン化された原子や分子は、数kVの電位勾配 (V) で加速され、 zeV の運動エネルギーを得る。イオンは、 m/z に応じイオンの飛行速度の違いや電磁場への応答の違いを利用して、時間的あるいは空間的に分離され、最後にイオン検出器で検出される。図1に飛行時間型質量分析装置 (TOF MS) の模式図を示す。

イオン検出には、通常、マイクロチャネルプレート (MCP) や二次電子増倍管が用いられる。これらの検出器では、イオンが物質表面に衝突したときに放出される2次電子を増倍することにより、電気信号としてイオンの到来を知ることができる。2次電子の放出効率は、イオンの速度に比例する。ほとんどの場合、2次電子の数は1個か数個であり、タンパク質のような巨大分子になると、量子効率数は数%でしかない。単にMCPを使用する場合もあるが、高分子の感度を高めるために様々な工夫を凝らしたイオン検出器も開発されている。

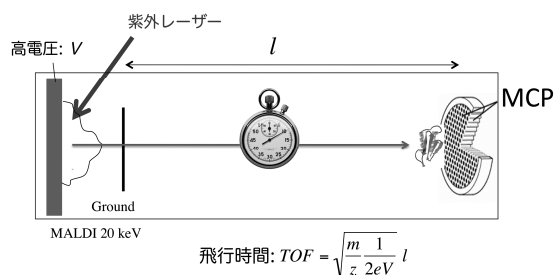


図1 時間型質量分析 (TOF-MS) において、最も単純なリニアモードと呼ばれる場合の装置の模式図。イオンの飛行時間を測定することにより、 m/z を測定する。

電気信号の大きさは運動エネルギーにほとんど依存しない。従って、問題は、既存技術では、分離部、検出部においても、運動エネルギーを区別することができないことである。このため、横軸 m/z 、縦軸イオン強度の質量スペクトルが得られるのみで、同じ m/z の異なるイオンは区別できない。したがって、質量分析法は、「イオンの質量電荷数比 (m/z) を求めるときに使用される分析法である」と定義されている。

3. 超伝導検出技術による原理的限界の突破

常温動作のイオン検出器に対して、超伝導現象を使うと、イオン (数keV) の運動エネルギー測定ができる。超伝導体の 2Δ は、デバイエネルギーより十分小さく、フォノンに感度がある。イオンが超伝導体表面に衝突したときには (生体高分子では表面に付着する)、2次粒子が持ち去るエネルギーを除いた分が、超伝導体に付与される。このとき、直接的な電子励起に加えて、格子振動が励起される。格子振動はクーパー対を壊すので準粒子を測定できれば、超伝導体に付与されたエネルギー (zeV 、即ちイオンの価数) を知ることができる[2, 3]。

クーパー対が壊れて生成された準粒子を読み出すには、トンネル接合 (STJ、いわゆるジョセフソン接合) を使う。準粒子の熱的励起がないように、0.3 Kまで冷却後に、接合と並行に数10 Gの磁場を印加してDCジョセフソン

効果を抑制した状態で、サブギャップ領域にバイアスする。この状態で接合電極表面に分子が衝突すると、フォノンを介して準粒子が生成され、トンネル電流が増加し、準粒子寿命に応じて元の状態に戻る。従って、分子1個が衝突したときに、接合の構造にも依るが立ち下がり時間1-3 μs の電流パルスが出力される。この電流パルスの後段の半導体アンプ等で読み出すためには、トンネル接合の品質は、ジョセフソン効果を応用する際に必要とされる品質より、格段に高い必要がある。リーク電流は従来より3桁低い必要がある。さらに、検出器応用では十分な数の分子が当たるように広い有感面積が重要であり、3桁低いリーク電流を、数100 μm の接合面積で実現する必要がある。この品質を得るために、我々は、トンネル接合の層構造、薄膜堆積条件、エッチングプロセスの最適化、マスクデザインの最適化といった地道な調

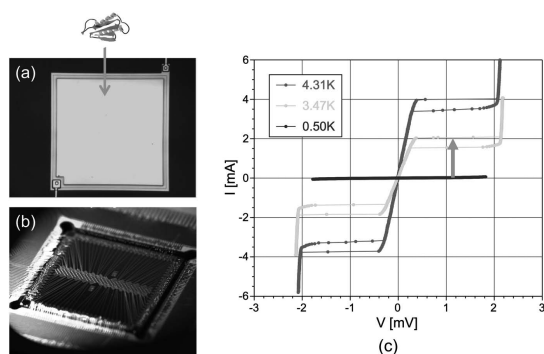


図2 超伝導トンネル接合検出器の写真と準粒子の読み出し：(a)単一接合の拡大図、(b)100素子からなるアレイ検出器、(c)分子1個の衝突により生じるトンネル電流変化。

整を行った。

実際のTOF-MSで得られる信号の例を図3に示す。Taターゲットをレーザー照射して生成されたTaの1価イオンと、Ta69個のクラスターの2価イオンが観測されている。レーザー照射の時間からイオンが検出されるまでの飛行時間から、図1中の式を使って、 m/z は、それぞれ180.95、6,243と計算される。Ta-69イオンは Ta^+ の2倍のパルス波高となっており、2倍の運動エネルギーすなわち2価であることが分かる。したがって、 m は、 $m/z=6,243$ の2倍の12,486と一意に決定できる。

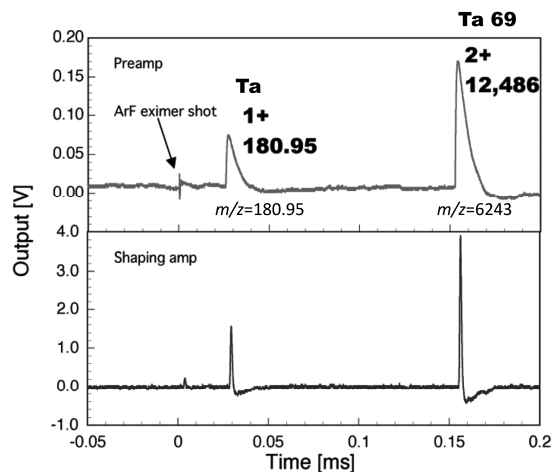


図3 Taターゲットをレーザー照射して生成されたイオンを超伝導TOF-MSで測定した例。Ta原子の1価イオンとTa69個のクラスターの2価イオンが観測されている。2価イオンは、1価イオンの2倍のパルス波高となっている。

4. 超伝導検出器を搭載した質量分析装置の例

電子衝撃イオン源を備えたセクタータイプ質量分析に超伝導検出器を組み合わせた装置の写真を図4に示す。イオンの m/z と運動エネルギーに応じて、イオン毎にプロットした散布図を図5(a)に示す。空気中に含まれる分子、原子のイオンが観測される。図5(b)は運動エネルギーとイオン強度の関係を示した図で、1価イオンと2価イオンを明瞭に区別することができる。 $m/z=14$ と16において、既存質量分析では不可能であった、 $^{14}\text{N}^+$ と $^{14}\text{N}_2^{2+}$ 、 $^{16}\text{O}^+$ と $^{16}\text{O}_2^{2+}$ をはじめて分離することに成功した[1]。単純な二原子分子の2価イオンが今まで測定できていなかったことは、驚きである。この成果は、米国化学会のニュースとして取り上げられた[4]。

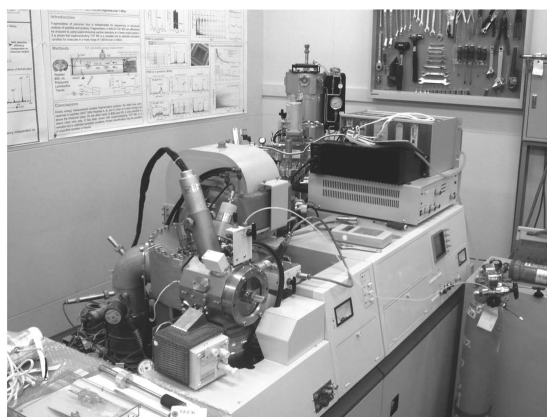


図4 超伝導検出器を搭載したセクター型質量分析装置

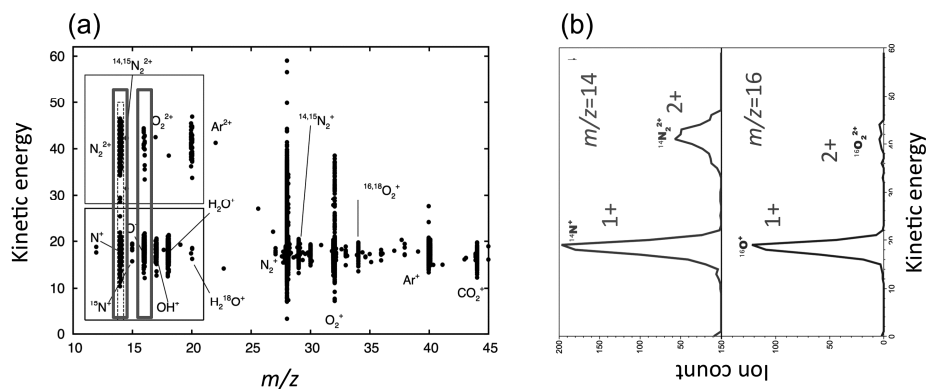


図5 (a) m/z と運動エネルギーの同時測定により、真の質量分析を実現した。
(b) $^{14}\text{N}^+$ と $^{14}\text{N}_2^{2+}$ 、 $^{16}\text{O}^+$ と $^{16}\text{O}_2^{2+}$ をはじめて分離することにはじめて成功した。

生体分子用の装置の例を図6に示す。この装置は、MALDIイオン源、液体ヘリウムといった寒剤の供給を必要とせず0.3 Kが得られるクライオスタット、赤外反射分子透過フィルター、Field Programmable Gate Array (FPGA) ベースのデジタル信号処理回路、STJアレイ検出器からなる。図3の信号をデジタル処理し、分子1個毎にTOFと運動エネルギーを求め、質量スペクトルの生成、特定価数のイオンの選択といったデータ処理を行うことができる。この装置では、窒素分子と同様の m/z の重なりが分子量146,000という巨大な分子である免疫グロブリン(抗体)のフラグメントや複合体で起こることを確認した[5]。

5. まとめ

超伝導センサーを用いて z 値を測定できるようになり、 m を一意に決めることができる真の質量分析が実現した。超伝導センサーの動作には、0.3 Kが必要であるが、寒剤の供給を必要としない全自動冷却となっており、極低温実験の経験がなくても装置を操作できる。最近、イオンの価数識別に加えて、異なる中性分子を分離することにも最近成功している[6]。さらに、STJ検出器より、超高速応答の超伝導ナノストリップ検出器を開発している[7-9]。



図6 伝導検出器を搭載した生体分子用の質量分析装置

— 謝辞 —

本稿は、(社)未踏科学技術協会第15回超伝導科学技術賞を大久保雅隆、浮辺雅宏、志岐成友、千葉かおり、富田成夫、早川滋雄が受賞した記念として執筆させていただきました。本稿のデータは、主に、JST先端計測分析技術・機器開発プログラムの成果を掲載しました。

参考文献

- [1] S. Shiki, M. Ukibe, Y. Sato, S. Tomita, S. Hayakawa, M. Ohkubo: J. Mass Spectrom. **43** (2008)1686-1691.
- [2] M. Ohkubo: IEICE Trans. Electron. **E90-C** (2007) 550-555.
- [3] M. Ohkubo: Physica C **468** (2008) 1987-1991.
- [4] <http://pubs.acs.org/action/showStoryContent?doi=10.1021%2Fon.2008.11.13.163784>.
- [5] K. Kobayashi, M. Ukibe, K. Chiba-Kamoshida, H. Nakanishi, S. Shiki, K. Suzuki, M. Ohkubo: Physica C **468** (2008) 2009-2013.
- [6] M. Ohkubo, S. Shiki, M. Ukibe, S. Tomita, S. Hayakawa: Int. J. Mass Spectrom. **299** (2011) 94-101.
- [7] N. Zen, A. Casaburi, S. Shiki, K. Suzuki, M. Ejrnaes, R. Cristiano, M. Ohkubo: Appl. Phys. Lett. **95** (2009) 172508.
- [8] K. Suzuki, M. Ohkubo, M. Ukibe, K. Chiba-Kamoshida, S. Shiki, S. Miki, Z. Wang: Rapid Commun. Mass Spectrom. **24** (2010) 3290-3296.
- [9] A. Casaburi, M. Ejrnaes, N. Zen, M. Ohkubo, S. Pagano, and R. Cristiano: Appl. Phys. Lett. **98** (2011) 023702.

(6) 先進的プラズマ実験装置 RT-1 用 高温超伝導磁石の開発

Development of a high temperature superconducting magnet for the advanced plasma confinement device RT-1

(株)東芝 電力システム社

水牧 祥一, 丸川 宏太郎, 戸坂 泰造, 大谷 安見

Toshiba Corporation Power Systems Company

S. Mizumaki, K. Marukawa, T. Tosaka and Y. Ohtani

東京大学

吉田 善章, 小川 雄一, 森川 惇二

University of Tokyo

Z. Yoshida, Y. Ogawa, and J. Morikawa

1. はじめに

プラズマは、宇宙に遍在する物質状態であり、その物理的性質を解明することは「物質世界としての宇宙」を理解するために必須である。とりわけ宇宙の根源的エネルギー生成プロセスである核融合を地上で実現し、その無限といえるエネルギーを利用するためには、天体の活動原理を解明する必要がある。宇宙におけるプラズマの最も基本的な存在形態は「磁気圏構造」である。およそ全ての天体は磁場を持ち、その磁場に捉えられたプラズマが渦構造を形成している。磁気圏でどのようなプラズマ現象が起こるのかを実験的に研究することは、まさに地上で宇宙のプロセスを再現し探求することを意味する。この研究で世界に先駆けたのが、RT-1実験装置である[1-2]。同装置は、高温超伝導磁石(以下HTS磁石)を真空容器中で磁気浮上させて天体磁気圏構造を作り出す。2006年に磁気浮上プラズマ生成に世界で初めて成功し、その後、安定して運用されている。現在、「地上の磁気圏」は、このRT-1とMIT(米国)に建設されたLDXの2つだけであり、両装置で競争的に先端研究が進められている。

2. RT-1実験装置の特徴

本装置の特長は、高温超伝導材を用いて起磁力250 kA、重量110 kgの永久電流モード運転可能な磁石を製作した点にある[3]。このために最大8時間にのぼる実験時間(冷凍機から切り離し、真空容器内で磁気浮上状態に保持する)を実現している。また高い装置精度を有し、多くのパラメタで最高性能を得ている。特に、先進核融合(究極の核融合反応といわれるD-³He核融合に必要な10億度を超えるプラズマの高性能閉じ込め)に道を拓く超高ベータプラズマの高性能閉じ込め(電子温度 ≥ 10 keV, 電子密度 $\leq 10^{17} \text{ m}^{-3}$, 電子ベータ ≥ 0.7 , エネルギー

一・粒子閉じ込め時間 ≥ 0.5 s: 同時データ)を実証し、注目を集めている。

初めての磁気浮上およびプラズマ生成の成功[4]以来、本装置では、継続的に実験が繰り返されている。頻度としては、冷却から昇温までの1サイクルの実験を年間に約8サイクル、1サイクルの実験では約15回の実験を磁気浮上運転の下で行っている。他のHTS磁石の開発例では、開発後に継続的に運転されていないものも多いが、冷却・昇温の繰り返し頻度も含めて、本装置のように日常的な運用実績を積んでいることは、HTS磁石の有用性の実証という意味においても非常に価値が高い。

3. RT-1実験装置を支える技術

図1にRT-1装置の中核部である磁気浮上HTS磁石の構成を示す。この磁石を開発し磁気浮上実験を実現するために、4つの技術が開発された。一つめは、誤差磁場を最小化するための複雑な接続構造を実現しつつ、永久電流スイッチも含めた電流ループ内の発生抵抗の低減を実現した、永久電流モードにおいて電流減衰率が少ない**高温超伝導コイル技術**である。二つめは、冷却手段を切り離した後に熱容量だけで低温を維持する**断熱技術**であり、三つめは、プラズマ実験中に真空容器上部に設置した吊上げコイルの電流帰還制御による安定的な浮上磁石の位置を制御する**磁気浮上制御技術**である。そして四つめは、真空容器内に設置された高温超伝導磁石の**冷却・励磁技術**である。このうち、冷却技術に関しては、超高真空中でも着脱可能なトランスファチューブを開発し、低温ヘリウムガスを高温超伝導コイル内に直接導入し、循環させて冷却することを実現した。また、励磁技術に関しては、外部電源からの直接励磁法を採用したが、先端部を80 Kに冷却した着脱可能な電流リードを開発し、断熱構造の簡略化と熱侵入量低減を実現させた[5]。

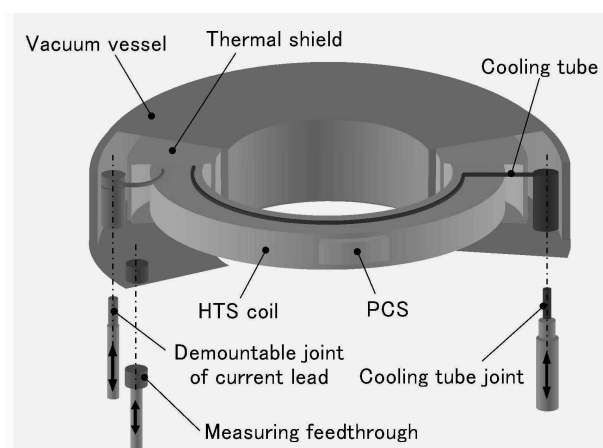


図1 Schematic configuration of the HTS floating magnet.

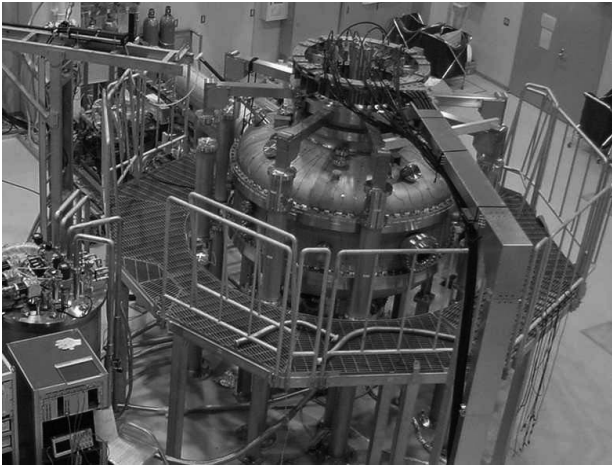


図2 Advanced plasma confinement device RT-1

4. RT-1実験装置の運転と磁石の保護

図3にHTS磁石の運転シーケンスを示す。室温から約20 Kまでの初期冷却には約2日を要し、その後、励磁～浮上実験～回収・消磁を経て、夜間に再冷却を行うというサイクルで運転される。

HTS磁石内には、保護抵抗が組み込まれており、消磁時に電流リードが接続できない場合などの異常時を想定した永久電流スイッチOffによる強制消磁などの実証工場試験を行っている。また、浮上実験終了後に電流リードも計測系も接続できないような場合については、自然昇温によるフラックスフロー抵抗増加と電流減衰をバランスさせ、熱暴走させずに永久電流を徐々に減衰されるという、“ソフトランディング”と呼ぶ新しい保護の概念を導入し、計算上では安全にコイルの蓄積エネルギーを回収できることを確認していたが、コイルの焼損リスクがゼロではないため検証を行っていなかった。しかし、2009年9月、プラズマ実験終了後、HTS磁石を消磁・冷却するメンテナンス位置まで移動させる機構にトラブルが発生し、定格の永久電流モードのまま消磁も冷却もできない状態になり、自然昇温により消磁を行った。その際の磁場モニタデータから、自然昇温時の電流減衰がほぼ予測通りであったことが確認され、また移動機構修理後のHTS磁石の再冷却励磁試験において、性

能上の変化が全くなかったことから、“ソフトランディング”によってHTS磁石の保護が可能なことを実証することができた[6]。

5. まとめ

地上に磁気圏プラズマを作りだし宇宙のプロセスを解明するチャレンジは、超伝導技術、とりわけ高温超伝導技術がなければ実現できなかったものである。この未踏技術の開発によって、プラズマ・核融合エネルギーの最先端を切り拓く学術研究が可能になるとともに、高温超伝導コイル活用に関する新たな可能性が示すことができた。

参考文献

- [1] S. Mizumaki *et al.* : IEEE Trans. Appl. Supercond., **16**, (2006) 918-921.
- [2] T. Tosaka *et al.* : IEEE Trans. Appl. Supercond., **16**, (2006) 910-913.
- [3] T. Tosaka *et al.* : IEEE Trans. Appl. Supercond., **17**, (2007) 1402-1405.
- [4] Z. Yoshida *et al.* : Plasma Fusion Res. **1**, (2006), 008-1-2.
- [5] Y. Ohtani *et al.* : Proc. 21th Int. Cryo. Eng. Conf. (2006) 159-162.
- [6] 齋藤, 吉田, 小川, 森川, 矢野, 水島, 水牧, 戸坂: 低温工学, Vol. 45, (2010) 107-110.
- [7] 小川, 三戸, 柳: プラズマ核融合学会誌, 第82巻12号 (2006) 807-816.

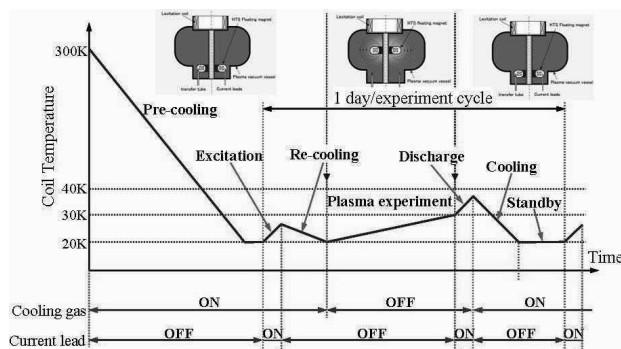


図3 Operating sequence of the HTS floating magnet.

(7) 輸送機器用高温超伝導誘導同期機 への挑戦

Challenges to high temperature superconductor induction/synchronous machine for transportation systems

京都大学
中村 武恒
Kyoto University
T. Nakamura

1. はじめに

この度、第15回超伝導科学技術賞を受賞頂き、これまでご尽力頂いた皆様、ならびに推薦頂いた関係各位に深く感謝申し上げます。思えば、工作室にあるような小さなモータを分解して、学生と汗かきかき旋盤やハンダコテと悪戦苦闘するとともに、本当に実現するのか苦悶しながら何度も計算や解析を繰り返していた日々が懐かしく思い出される。現在では、様々な研究分野の方々から多方面のご協力を頂き、ここまでくることができた。

高温超伝導誘導同期機(High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine: 以下、HTS-ISM)は、高温超伝導線材の二つの特長を利用した回転機ということができる。一つ目は、超伝導線材の第一義的特長である超低損失大電流輸送特性である。多くの超伝導回転機では、超伝導線材のコイル化に伴う高磁界発生特性を利用しており、即ち磁気装荷を極大化する設計のものが殆どである。それに対し、HTS-ISMは大電流通電特性を有効に利用しており、所謂電気装荷を極大化する回転機ということができる。もう一つの特長としては、高温超伝導線材の非線形磁束フロー抵抗を積極的に利用していることが挙げられる。即ち、高温超伝導体の混合状態における電界－電流密度特性はその立ち上がりが一般に実用低温超伝導線材に比較してブロードであり、高温動作に伴う高い比熱も幸いして、冷却系とのバランスさえ問題無ければ定常的な発熱も許容される。この特性を積極的に利用した超伝導回転機は、世界的にもほとんど例が無いと思われる。本授賞は、上記HTS-ISMを輸送機器に適用するための研究成果が評価された。

2. 高温超伝導誘導同期機(HTS-ISM)の動作原理

図1には、かご形誘導機における二次巻線の概略図を示す。HTS-ISMの基本的考え方は、上記巻線を高温超伝導化することにある[1-5]。即ち、かご形誘導機の簡易な構造を最大限に維持しつつ、高温超伝導技術の最適導入を図ることによってさらなる高性能化・高機能化を実現することが重要なポイントである。

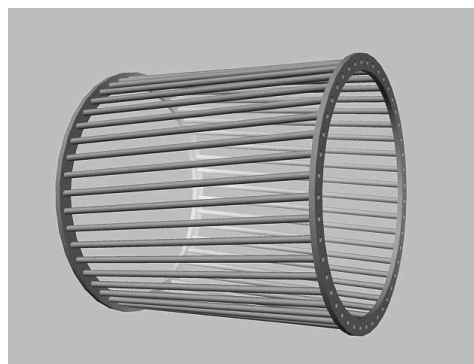


図1 かご形二次巻線の概略図

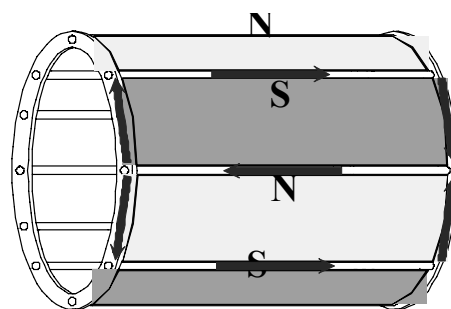


図2 高温超伝導かご形二次巻線に磁極が形成される概念図

ゼロ抵抗状態にある高温超伝導かご形巻線に十分な大きさの起磁力を与え、同巻線のロータバーを磁束フロー状態に遷移させる。そうすると、起磁力依存非線形磁束フロー抵抗によって始動し、その後加速に伴って発生電界が小さくなり、最終的には図2のような磁極が形成される。この状態は、永久磁石回転機のように磁極が形成されることから、誘導機であるにもかかわらず同期回転が可能になる。このような特性は、真に超伝導技術で初めて実現される特筆すべき特性である。HTS-ISMの特長をまとめると以下ようになる。

(1) 同期トルクと非同期トルクの両立性

従来形誘導機は非同期(すべり)トルクしかもたず、従来形同期機は同期トルクしかもたない。一方、上記したように HTS-ISM は両者を有しており、回転機としての性能に大きな広がりがある。

(2) 同期定常運転に伴う高効率化

HTS-ISM の定常運転はあくまで同期回転を考えている。従って、誘導機の構造的利点を兼ね備えつつ、高効率な回転機が実現される。

(3) 自己始動特性

HTS-ISMは、HTS材料の非線形通電特性に伴って大きな始動トルクを有し、かつ積極的な制御も必要なく加速ならびに同期引き入れが可能である。即ち、言わば二次抵抗自己制御形のインテリジェントな始動が実現される。このことは、HTS材料のゼロ抵抗状態だけでなく、その非線形通電特性(磁束フロー特性)をも機器特性に積極的に取り入れた発想に基づく特長である。

(4) 定トルクに近い垂下加速特性

従来形誘導機のトルク(τ)—すべり(s)カーブは、あるすべり値 s_m で最大値(これを停動トルクという)を示し、定常的には $0 < s < s_m$ のすべり範囲でしか使用できない。しかしながら、HTS材料の急峻な通電特性(電界—電流密度特性)を利用することにより、定トルクに近い垂下加速特性を有することが分かっている(実際にはやや複雑な現象も起こっているが、紙面の都合により割愛する)。このことは、HTS-ISMが $0 < s < 1$ の広範なすべり領域に亘って安定に動作することを示している。

(5) 過負荷に対するロバスト制御性

従来形同期機では、ある限界の過負荷がかかると不安定(乱調)となったり止まったり(脱調)してしまう。一方、HTS-ISMはすべりモードへ移行してほぼ定トルクで運転状態を継続することが可能であり、かつ除荷されれば速やかに同期モードへ復帰する。即ち、HTS-ISMは機器特性として過負荷に対するロバスト性を兼ね備えている。

(6) 高出力密度化・小型軽量化

HTS材料には、従来機の巻線材料(アルミや銅)に比較して非常に大きな電流を無損失で流すことが可能となる。従って、一次側起磁力の大きさによって制約があるものの、同じ回転機の体格で出力を大きくすることが可能となる。このことは、換言すると同一の出力で小形・軽量化が可能であることを示している。

(7) 究極の誘導機

HTS-ISMは同期トルクを有することを示したが、駆動原理はあくまで誘導機であり、いわば二次巻線抵抗をゼロにした究極の誘導機であると言える。従って、同期機で問題となる例えば電機子反作用 (armature reaction) などの問題は起こらない。

図3には、HTS-ISMにおける τ - s 特性の一例を示す。同図から明らかなように、HTS-ISMの本質的特性として同期トルクとすべりトルクの両立が達成されていることが分かる(シンボル: 実験結果、実線: 解析結果)。

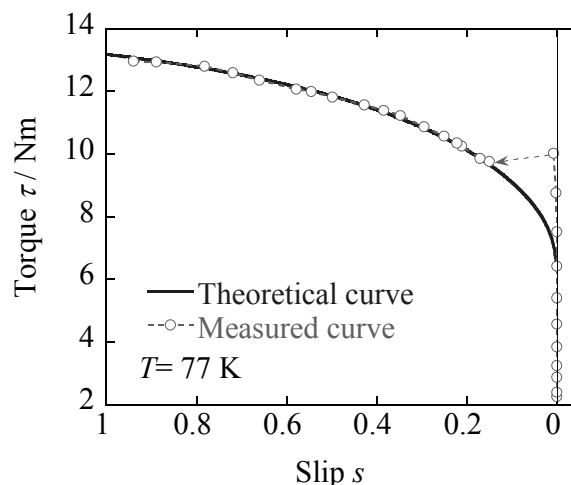


図3 77 Kにおける負荷試験結果の一例
(シンボルは実験結果、実線は理論曲線) [4]

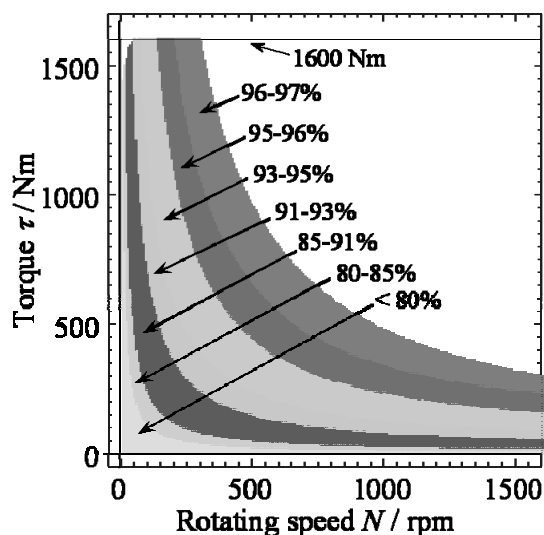


図4 最大出力50 kW級HTS-ISMにおける
効率マップの解析例 [6]

3. 高温超伝導誘導同期機 (HTS-ISM) の輸送機器への応用現状

HTS-ISMの輸送機器応用を目指し、精力的検討を実施している。本プロジェクトの一部は、NEDOの支援を得て行った。我々は、特に、実用時のインパクトの大きい電気駆動式自動車をターゲットとして研究開発を進めており、既にその実現可能性と技術開発課題を多角的に検討済である。

図4には、最大出力50 kW級HTS-ISMにおける効率マップの解析例を示す[6]。上記出力は、第二世代ブリウスの駆動モータと同一である。同図から明らかなように、HTS-ISMは広範な速度(N)とトルク(τ)の範囲で高効率である。さらに、最大トルクが1600 Nm程度に達しており、このことはトランスミッションギアを省略するダイレクトドライブの可能性を示唆している。トランスミッションは、



図5 NEDOプロで開発した20 kW級HTS-ISM
プロトタイプ機の外観写真[6]

車内スペースを取る、重量が重い、損失が大きいなど、車載する上で大きな課題を抱えている。従って、可変速に対して高効率という特長だけでなく、高トルク密度のHTS-ISMを実現することにより、パワートレイン全体で考えた場合の省エネ化を達成することができる。図5には、NEDOプロとして開発した20 kW級HTS-ISMプロトタイプ機の外観写真を示す。現在、各種実証試験を実施しており、実用化研究フェーズのための課題を抽出している。

4. まとめ

我々は、本受賞を励みにさらなる研究開発を推進し、輸送機器用HTS-ISMの真の実用化を目指したいと考えている。

謝辞

本研究成果の一部は、NEDOの委託事業「H21年度省エネルギー革新技术開発事業(第二次公募)」の一環として実施したものである。

参考文献

- [1] G. Morita, T. Nakamura, and I. Muta: Supercond. Sci. Technol. **19** (2006) 473-478.
- [2] T. Nakamura, Y. Ogama, H. Miyake, K. Nagao, and T. Nishimura: Supercond. Sci. Technol. **20** (2007) 911-918.
- [3] T. Nakamura, K. Nagao, T. Nishimura, Y. Ogama, M. Kawamoto, T. Okazaki, N. Ayai, and H. Oyama: Supercond. Sci. Technol. **21** (2008) 085006.
- [4] T. Nakamura, T. Nishimura, K. Nagao, K. Matsumura, and Y. Ogama: Proc. of ICEM'08 (2008) 1278.
- [5] T. Nakamura, K. Matsumura, T. Nishimura, K. Nagao, Y. Yamada, N. Amemiya, Y. Itoh, T. Terazawa and K. Osamura: Supercond. Sci. Technol. **24** (2011) 015014.
- [6] 中村武恒: 第31回モータ技術シンポジウム配布資料(東京ビッグサイト, 2011年7月21日) (2011) C3.

<会議報告 1>

CEC/ICMC2011 会議報告 Report on CEC/ICMC2011

物質・材料研究機構

松本 明善

National Institute for Materials Science

A. Matsumoto

ワシントン州スポーケンで行われたCEC/ICMC2011について報告する。まず基調講演について報告したい。2011年は超伝導発見100周年、酸化物超伝導体発見25周年等、様々な節目の年である。本会議においても6人の基調講演があり、それぞれの分野からの報告があった。まず、P. M. Grant(W2AGZ Technologies)からは超伝導の昨日・今日・明日と題して、これまでの歴史およびこれからの将来に向けた希望について講演があった(図)。V. Ganni(Jefferson Lab.)からは冷凍機の歴史についての講演があった。H. C. Freyhardt(Göttingen 大学)からは応用をする上で重要なフラックススピニングとその応用先についての講演があった。M. N. Wilsonからはマグネット応用に関する歴史とこれからについての講演があり、W. V. Hassenzahl(Advanced Energy Analysis)からは電力応用に関するこれまでとこれからについて講演があった。P. J. Masson(Advanced Magnet Lab.)からは特に風力用モータ等への応用について講演があった。最後に住友電工の佐藤氏から実用化されたBSCCO線材とその最近の応用について講演があった。以上のように6名からの基調講演は超伝導現象発見という物理現象ではなく、それを用いた応用に重点が置かれた講演であったことはこの会議の特徴でもある。また、J. Ekin(NIST)による基調講演“Cryogenic measurements Foible”において低温機器の設計、取り扱い等超伝導測定を行う上で常識あるいはこれまで培ってきたデータ等を交えての講演は個人的には大変興味深いものであった。

CEC/ICMCにおけるICMCはCECが米国内の国内会議であることからICMCも米国内の現状をある程度反映している。そのため、特にセッションを見るとその動向がある程度わかる。材料別でそのセッション数を見るとBSCCOが3セッション、 MgB_2 が3セッション、金属系超伝導体が2セッション、Y系線材で3セッション(ただし、材料自体のセッションはなく、コイル化等の応用と一緒にされている)、新物質が1セッションであった。特にこれまでY系セッションとして材料特性に特化していたが、前回に比べても少なくなった印象を持った。もちろん、Y系

線材が応用化へ向かっていることが大きな要因の一つではあるが、DOEのプログラムが縮小されていったことも影響があると考えるのが普通かもしれない。一方、BSCCO線材に関してはここ2年プロジェクトが続いたBi2212線材のもので、これも米国の予算をそのまま反映している。一方で、これまであまり大きなセッションとはなっていなかったSRF超伝導空洞のセッションが設けられていたことも一つの特徴ではなかったかと思う。

さて、本会議の全てを報告するのは困難であるため、ICMCのBSCCO線材と MgB_2 線材を中心に報告を行う。



図 P. M. Grantの基調講演の様子

前述したようにBi2212線材に関してはここ数年予算が配分されていたため、それに関連した発表が見られる。その中心となっているのが、NHMFL(国立強磁場研究所)とNCSU(ノースカロライナ州立大学)である。これらのグループでは、Bi2212線材が唯一の丸線形状で作製できる高温超伝導材料であり、高磁場特性がよいことから超強磁場発生マグネットの線材として研究が盛んに行われている。H. Miao(OST)は招待講演の中で線材の特性が、粉末、製法等を見直し、これまでと比べて上がってきており、短尺線材で $J_E = 400 \text{ A/mm}^2$ (4.2 K, 12 T)、25.5 mm ϕ ボアのコイルにおいて20 Tのバックアップ磁場中で2.5 T (4.2 K)を達成できていることを報告した。また、J. Jiang(NHMFL)からはBi2212線材における問題点およびその解決法等を示した。Bi2212線材は加熱時に溶融した領域以外に大きな空洞が発生してしまう。彼らが示した写真には、まるで配列した柱が所々虫食いにあったような組織が得られており、これらが加熱時のバブリングの問題を引き起こしていることを示した。これらのバブリングをなくすためにCIPやスウェーピング加工により低減できることを示した。得られた線材において J_c が2倍も上昇していたことを報告した。

また、 MgB_2 に関してはHyperTechとOSU(オハイオ州立大学)のグループからの報告が多数あった。OSUのグループから種々の線材の報告があった。通常のパウダ

ー・イン・チューブ法の他に拡散法を利用した研究、さらにはSiC(0001)基板上にPLDで蒸着した薄膜の報告があり、高い T_c 、および磁化法によって測定した J_c が得られていることを報告した。4日目の口頭発表ではR. L. Flükiger(Genova 大)から、近年高特性が得られている4方向からのアンビルを用いて高密度化を達成したMgB₂線材についての報告があった。最近の進展としては長尺線材の作製するために連続して圧力がかけられるアンビルのセットアップを行っていることを報告した。また、Y. Yang(OSU)からは種々の線材の n 値の考察を行った報告が為された。さらにMg浸透法によってバルク作製を行っているA. F. Albisetti(Edison 社)らからは最近の結果についての報告があった。特に興味深い報告としては不十分ながら、浸透法を利用して線材の接続を行っていることを報告した。また、MgB₂ではないが、C. Ferdeghini(CNR-SPIN)よりFe(Se,Te)の薄膜でバルクより高い $T_c = 21$ Kが得られたことが報告された。

なお、次回ICEC/ICMCは2012年、福岡にて開催される。なお、この国際会議が行われるため、来年春の低温工学・超電導学会はこの会議との共催となっている。さらにCEC/ICMCは2013年アラスカ州アンカレッジで行われる。2年後の会議で超伝導に関するセッションがどのように変化するかも楽しみの一つである。

<会議報告 2>

超伝導科学技術研究会 第37回シンポジウム報告 Report on the 37th FSST Symposium

独立行政法人物質・材料研究機構

北口 仁

National Institute for Materials Science

H. Kitaguchi

超伝導科学技術研究会第37回シンポジウムが、6月24日(金)にタワーホール船堀(小ホール)で開催された。当初、科学技術週間中の4月12日開催で予定されていたが、大震災の影響で繰り延べとなった。参加者は全部で103名であった。

午前中の超伝導科学技術賞受賞講演(横浜国立大学・塚本氏、東芝・水牧氏、産総研・大久保氏)の詳しい内容については本号特集記事に御本人から述べられることと思う。筆者としては、3件の講演を通じて、「超伝導だからこそ実現できる」小型で高効率の回転機(モータ

ー、発電機)がエネルギー分野で社会に貢献し、「高温超伝導だからこそ実現できる」浮上型超伝導コイル磁石が高エネルギー物理学の進歩に寄与し、「超伝導センサーによって初めて可能となった」真の質量分析が科学の先端を切り拓いていくといった、超伝導技術の多岐にわたる活躍が印象的であった。

午後は、<グリーン・イノベーションと超伝導>と題し、筆者も企画に関わった講演特集が行われた。グリーン・イノベーションに向けた科学技術的な取り組みを俯瞰しながら、その中で超伝導技術開発と応用の方向性を論じようとの意図である。

特集前半では、低炭素社会実現へ向けた技術開発への我が国としての政策的取り組みの紹介等を中心とする講演が行われた。経済産業省・産業技術環境局・研究開発課・研究開発調査官・嘉藤氏から、経済産業省における超伝導技術開発についてと題して、施策の紹介があった。送配電に関する技術、モーター関連、エレクトロニクス関連を中心として技術開発を着実に進めていくとの姿勢であった。嘉藤氏は超伝導技術に期待を寄せているとの筆者の印象であった。続いて、鉄道分野における超伝導技術の可能性について、鉄道総合技術研究所・浮上鉄道技術研究部・岩松氏による講演があった。磁気浮上式リニアについては営業開始に向けて既に本格的な動きが始まっているが、その他にも鉄道分野で超伝導技術が活躍できそうである。直流電化区間では、き電線への超伝導ケーブルの応用が検討されている。超伝導ケーブルのき電への適用で、変電所間の負荷平準化による省エネルギーや回生エネルギーを遠くまで運べることで失効低減が期待できる。また、回生失効低減では超伝導フライホイールも活躍できそうである。文部科学省の取り組みは研究開発局・環境エネルギー課・地球観測推進専門官・湯本氏から紹介された。低炭素社会実現へ向け、炭素排出を減らすための技術等の「緩和策」と気象変動予測や解析などの「適応策」を二つの柱とし、これに、社会システム改革のために新技術導入の社会シナリオやフィールド検証を組み合わせようとのことであった。また、公的機関・大学等の研究者は我が国施策としての科学技術の方向性の中で自らの研究をしっかりと位置づけられるような意識をもって研究に臨む必要があるとの意見も述べられた。休憩をはさんで、研究実施側ということで、超伝導システムに関するJSTの二つの事業(先端的低炭素化技術開発、及び、戦略的イノベーション創出推進)が紹介された。

5件の講演を受けて、パネルディスカッションが行われた。始めに、東大・大崎氏による話題提供があり、講演者他のパネラーにより意見が交わされた。筆者の独断

ではあるが、パネル討論の主な論旨を纏めると次のようであった。再生可能エネルギーを大胆に組み込んだ将来の電力系統やスマートグリッド等で、特に系統安定のために超伝導技術が活躍できる(或いは、必要とされる)と見込まれる。震災を契機として我が国の電力網に関する情勢が変化し、発送配電に関する新しい技術への期待は飛躍的に増している。超伝導も期待される技術の一つであるが、残念ながら現時点では社会の期待に比べて直ぐにでも大規模に導入できるまでの成熟には至っていない。しかしながら、20年後、50年後といった将来のエネルギーシステムを見通し、超伝導技術を信頼性や耐久性も保証できるレベルに育てて行かねばならない。そのためには、システム技術、材料技術が両輪となって相補的に進化することが必要である。また、冷却技術のように超伝導機器に欠かせない技術とも連携すべきである。冷却に関しては、我が国では高压ガスの規制が液体窒素冷却等にも適用されることが技術を難しくしたり経済性を損なうとも懸念され、法や規制の合理化も望まれる。

講演特集及びパネル討論を通じて、3月11日の震災を契機とした我が国のエネルギー供給に関する情勢の変化も含めて様々な角度から、超伝導技術の研究開発について考える機会となったと自負する。



パネルディスカッションの様子

＜授賞発表＞

「第15回超伝導科学技術賞」発表 On the 15th Superconductivity Science and Technology Award

審査委員会 委員長

太刀川 恭治

The Chairman of The Selection Committee

K.Tachikawa

(1) 「第15回超伝導科学技術賞」の選考にあたって

本賞は、超伝導関連分野における永年の功労者に対する感謝、強いインパクトのある研究の評価、活発な若手への応援、企業グループへの精神的応援、学会、官界、報道界からの貢献に対する感謝等の表明を目的としております。平成9年に発足してから、これまでの14年間で100件を越す合計101件に達するテーマが受賞されております。

今回の応募に対しては平成22年12月16日に第15回超伝導科学技術賞審査委員会が開かれ、合計28件の御推薦に対して慎重な審査が行われた結果、7件(内特別賞1件)が選定されました。受賞の運びとなりました各位に心からお祝いを申し上げますとともに益々の御活躍をお祈りいたします。

本年は超伝導現象発見100周年、また高磁界超伝導線材が現れて50年の節目の年となっております。今後も省エネルギーの重要性が強く認識されて超伝導分野への期待が一層増して行くことと考えられます。それに迎えるためには、応用分野ではさきのMRIのような目玉商品の出現と材料面では高性能で扱い易い線材の提供がのぞまれます。また今回はエレクトロニクス分野からの受賞が例年より多くありましたが、この分野における新しい展開も大いに期待されます。

今回の賞がいささかでも受賞者各位の功績に報い、またこれからの超伝導分野の一層の活性化に役立って、冒頭に述べた目的に沿うことが出来たら誠に幸いに存じます。終わりに今後も本賞の公募に対し広い関連分野から多数の応募をいただくことを期待して選考経過の御報告といたします。

(2) 受賞者、授賞テーマと授賞理由

特 別 賞

塚本 修巳 殿

「超伝導マグネットの安定性向上および関連技術開発への貢献」

40年余にわたり、低温超伝導線を使用した超伝導マグネットの安定性改善の研究や、低温超伝導線、さらに高温超伝導線の交流損失特性の研究などの関連技術の開発を通して、我が国における交流超伝導機器分野の開発の基礎を築いた。とくに超伝導コイル内の機械的擾乱のAcoustic Emission信号による評価法の確立や、導体寸法精度を考慮した起こり得る機械的擾乱の定量的な解析についての先駆的な功績は高く評価される。

また、多くの研究・開発者を育成、指導し、超伝導技術の発展に寄与できる人材を産官学に送り出しただけでなく、我が国を代表する研究者の一人として内外の学協会等における要職をつとめるなど、この方面における貢献も極めて顕著である。

科学技術賞

① 生田 博志 殿、宇治原 徹 殿、 田淵 雅夫 殿、竹田 美和 殿 「鉄系超伝導体 $\text{LnFeAs}(\text{O}, \text{F})$ の分子線エピタキシー成長に関する先駆的研究」

2008年に発見された鉄系超伝導体の T_c は、現在までに、 $\text{LnFeAs}(\text{O}, \text{F})$ ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}$)で銅酸化物に次ぐ $\sim 56 \text{ K}$ にまで達している。超伝導エレクトロニクス応用には、高品質エピタキシャル薄膜成長技術の確立が最初の一步である。名古屋大学の本受賞者は、五元化合物の $\text{NdFeAs}(\text{O}, \text{F})$ の分子線エピタキシー成長に果敢に挑戦し、当初の困難を乗り越え、現在までに世界最高のオンセット T_c が 56 K 、ゼロ抵抗温度が 52 K を有する薄膜を得ている。成長プロセスを厳密に追跡する過程から、成長後半に薄膜表面に堆積する NdOF 層が、薄膜へのフッ素の供給、および、薄膜からのフッ素の脱離抑制という超伝導の発現に重要な2つの役割を果たしていることを明らかにした。

本成果は、鉄系超伝導薄膜成長における大きな一步であると高く評価される。

② 足立 善昭 殿、川端 茂徳 殿、 関原 謙介 殿 「超伝導量子干渉素子(SQUID)による脊髄機能イメージングに関する研究」

本研究は、脊髄の神経活動に伴って発生する微弱な磁場を超伝導量子干渉素子(SQUID)で検出し、脊髄機能を非侵襲的にイメージングするシステムの開発研究である。

脊髄磁場の強度はきわめて微弱で、脳磁場のさらに10分の1(10 fT:地磁気の100億分の2)程度しかないため、これまで再現性のよい安定した測定が困難であった。受賞者らはSQUIDセンサ、駆動回路(FLL)、デューワー、

測定プロトコルなどに独自のアイデアを盛り込み、脊髄磁場計測を実用性の高いものにした。このように、工学系のSQUID生体磁気計測装置の開発ポテンシャルと医学系の脊髄電位計測の知見と経験を融合し、脊髄機能イメージングという世界でも類を見ないユニークな診断装置の開発に成功した。

本研究成果は、SQUIDの応用分野を広げるのみならず、整形外科医や神経科医にとってこれまで見たくても見られなかった脊髄神経の機能を非侵襲的に可視化するものである。脊髄機能イメージングによる革新的な脊髄障害の診断方法の確立は、手術時間の短縮、患者の負担軽減などにつながり、社会への広い波及効果も期待でき意義深いものと位置付けられる。

③ 加屋野 博幸 殿、中山 浩平 殿、 塩川 教次 殿、河口 民雄 殿 「5 GHz 帯気象レーダ用高温超伝導送受信フィルタの開発」

超伝導体のマイクロ波導体損は通常の金属と比較し3桁以上小さい。その性質を利用して受賞者は、気象レーダ用高温超伝導フィルタを開発し実用化の目処を付けた。

無線LANの周波数帯域拡大に押される形で狭帯域化される気象レーダの仕様を満足する超狭帯域・高周波数選択性を有するフィルタは超伝導体を用いてしか実現できない。受賞者らは、他に先駆け、高温超伝導体を用いて帯域1.2 MHz、帯域中心から1.9 MHz離れた周波数で30 dB以上の減衰特性を有する8段擬似楕円関数超伝導受信フィルタの開発に成功し、このフィルタを組み込んだ装置の実用化に目処をつけた。また、従来不可能と言われていた耐電力4 kWの送信用超伝導フィルタを空洞共振器フィルタとのハイブリッド型で実現することにも成功した。

以上本研究成果は、超伝導フィルタの性能を大きく向上しただけでなく、超伝導フィルタの新たな応用分野を広げるものとして意義深いものと位置付けられる。

④ 大久保 雅隆 殿、浮辺 雅宏 殿、 志岐 成友 殿、千葉 香り 殿、 早川 滋雄 殿、富田 成夫 殿 「超伝導トンネル接合分子検出器による質量分析の実現」

質量分析は環境、バイオテクノロジーなどの広い分野で必要不可欠な分析手法であるが、イオンを電磁気力により質量/電荷数比(m/z)に従って分離するため、分子の質量 m を一意に決定することはできなかった。受賞者らはこの原理的限界を超伝導トンネル接合(STJ)分

子検出器により克服し、真の質量分析を実現した。

STJ分子検出器は、表面に分子が付着する程度のソフトな衝突であってもイオン電荷数に比例する運動エネルギーを測定できるため、質量/電荷数比が全く同じで今まで分離不可能であった窒素や酸素の二原子分子2価イオンと原子1価イオンの分離に初めて成功し、さらに、免疫グロブリン(抗体)などの生体分子多量体やフラグメント分析に応用した。

本研究成果は、従来技術の原理的限界を打破しただけでなく、超伝導検出器を搭載した先端計測分析機器として完成し、超伝導の新しい可能性を拓いた意義深いものと位置付けられる。

- ⑤ 水牧 祥一 殿、戸坂 泰造 殿、
丸川 宏太郎 殿、大谷 安見 殿、
吉田 善章 殿、小川 雄一 殿、
森川 惇二 殿

「先進的プラズマ実験装置(RT-1)用高温超伝導磁石の開発」

究極の核融合反応といわれるD-³He核融合の実現に向け、受賞者らは真空中で磁気浮上させた超伝導磁石が発生する磁場を用いて、超高ベータプラズマを長時間、安定に閉じ込めるという画期的な装置の開発にチャレンジした。永久電流モードでの電流減衰が少ない高温超伝導コイルの開発、冷却手段を切り離した後に熱容量だけで極低温を維持する断熱手段の確立、プラズマ実験中に安定に浮上磁石の位置を制御する磁気浮上制御手段の確立など、困難な技術課題を克服した結果、連続磁場発生時間8時間以上、浮上高さ制御の精度0.1 mm以下、コイル傾き角度精度0.05度以下という世界初の成果を得て、このスケールのプラズマ閉じ込めで

は驚異的に長い閉じ込め時間(≥0.5s)を得ることに成功した。

本成果は、高温超伝導コイル活用の新たな可能性を示した意義深いものと位置付けられる。

- ⑥ 中村 武恒 殿、伊藤 佳孝 殿、
吉川 雅章 殿、寺澤 俊久 殿、
長村 光造 殿、大橋 義正 殿、
奥村 暢朗 殿

「輸送機器用高温超伝導誘導同期回転機の研究開発」

モータの高性能化のためその超伝導化が各方面から期待されており、これまでも様々な超伝導モータの開発が行われてきた。本受賞者らは、さらに実用的で普及可能なモータ構造や構成材料についての検討を進め、独創的な誘導同期モータという高温超伝導ならではの高性能、高効率モータを生み出した。

本受賞者らが開発した高温超伝導誘導同期モータは、既存機として最も汎用されているかご形誘導機構造を有しながらも、定常時は高効率な同期回転が可能であり、一方過負荷時はフェールセーフモードとしてすべり回転も可能である。これまでに上記の特筆すべき性能を理論や実験によって示し、その回転基本原理を解明した。さらに新しく上記モータ冷却用の高効率スターリング冷凍機や輸送機器用低熱侵入クライオスタットを開発し、高温超伝導モータシステム全体の研究開発を完成した。

以上本研究成果は、高性能超伝導モータの実現だけでなく、超伝導モータの普及の道を拓いた意義深いものと位置付けられる。



第15回超伝導科学技術賞 授賞式(平成23年6月24日)

First Announcement
**The 15th Japan-US Workshop
on Advanced Superconductors**
October 27-29, 2011

Program (tentative):

The 15th Japan-US workshop on advanced superconductors will cover the following research fields of superconductivity.

- (1) HTS Tape (BSCCO Tape, YBCO Tape)
- (2) Critical Current AC loss
- (3) Thin Film Devices
- (4) New Materials
- (5) Al₅, MgB₂
- (6) Large Scale

Conference site:

Oct. 27-28 Sumitomo Club

1-13-10 Edobori, Nishi-ku, Osaka, Japan
TEL.06-6443-1986, FAX.06-6443-1907

Oct. 29 Osaka Works of Sumitomo Electric Industries, Ltd.

1-1-3 Shimaya, Konohana-ku, Osaka, Japan

http://global-sei.com/sei_info/office/index.html#osaka

Organized and Supported by:

- Forum of Superconductivity Science and Technology (FSST),
The Society of Non-Traditional Technology
- Sumitomo Electric Industries, Ltd. (SEI)

Schedule (tentative):

Oct. 27 (Thu.) — Registration/Welcome party(evening)
at Sumitomo Club in Osaka-city

Oct. 28 (Fri.) — Conference (at Sumitomo Club)

Oct. 29 (Sat.) — Conference, “Super Car” Test-Driving
and exhibition of “Smart Grid” system
(at Osaka Works of SEI)

** ISS2011 is scheduled to be held on Oct. 24-26, 2011 in Tokyo.*

Important Dates:

August 20 — Registration Dead Line

September — Second Announcement

Secretary General: Jun-ichi Shimoyama

The University of Tokyo

E-Mail: shimo@sogo.t.u-tokyo.ac.jp

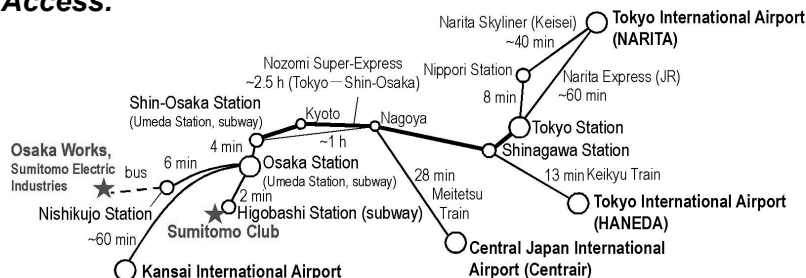
Secretariat :

Forum of Superconductivity Science and Technology (FSST)

The Society of Non-Traditional Technology

E-Mail: Japan-US2011@sntt.or.jp

Access:



研究会の動き

〔平成 23 年 (2011 年) 4 月 1 日～平成 23 年 (2011 年) 6 月 30 日〕

幹事会

平成 23 年度第 1 回

日 時:平成 23 年 4 月 13 日(水)15:30～17:30

場 所:ビジネススクール・インターナショナル ルーム D

出席者:幹事 10 名 事務局 1 名

議 事:(1) 第 77 回ワークショップ開催報告

(2) 第 37 回シンポジウムについて

(3) 第 78 回ワークショップについて

(4) 第 15 回日米ワークショップについて

(5) 平成 22 年度本会活動の内部評価

(6) 平成 23 年度事業計画及び収支予算について

(7) 平成 23 年度総会について

(8) FSST NEWS について

第 37 回シンポジウム／

第 15 回超伝導科学技術賞授賞式

日 時:平成 23 年 6 月 24 日(金)10:00～17:30

場 所:タワーホール船堀 小ホール

テーマ:「超伝導 2011 -新たな 100 年の幕開け-」

出席者数: 103 名

展 示:5 件 (企業 5 社)

プログラム:

司会 木村昭夫(古河電気工業)

10:00-10:10 「開会の挨拶」

下山淳一(超伝導科学技術研究会会長)

10:10-11:00 「大型超伝導回転機への期待」

塚本修己(横浜国立大学)

11:00-11:30 「先進的プラズマ実験装置用高温超伝導磁石の開発」

水牧祥一(東芝 電力システム社)

11:30-12:00 「超伝導センサーによる真の質量分析の実現」

大久保雅隆(産業技術総合研究所)

12:00-12:30 超伝導科学技術賞授賞式

＜グリーン・イノベーションと超伝導＞

司会 北口 仁(物質・材料研究機構)

13:30-13:40 インタロダクトリートーク

北口 仁(物質・材料研究機構)

13:40-14:10 「経済産業省における超伝導技術開発について」

嘉藤 徹(経済産業省産業技術環境局)

14:10-14:40 「鉄道における省エネへの取り組みと超伝導技術」

岩松 勝(鉄道総合技術研究所)

14:40-15:10 「グリーンイノベーションのための文部科学省の取組の現状について」

湯本道明(文部科学省研究開発局)

司会 熊倉浩明(物質・材料研究機構)

15:30-16:00 「先端的低炭素化技術開発

Advanced Low Carbon Technology

R&D Program (ALCA アルカ)について」

佐藤雅裕(科学技術振興機構)

16:00-16:30 「JST 戦略的イノベーション創出推進

ー超伝導システムによる先進エネルギー

エレクトロニクス産業の創出ー」

佐藤謙一(科学技術振興機構／

住友電気工業)

コーディネーター 小原春彦(産業技術総合研究所)

16:30-17:25 パネルディスカッション

パネリスト 下山淳一、大崎博之他

17:25-17:30 閉会の挨拶

木村茂行(未踏科学技術協会理事長)

第 3 回総会

日 時:平成 23 年 6 月 27 日(月)14:00～14:40

場 所:学術総合センター11 階 共用会議室

出席者:会員 5 名 オブザーバー 3 名 事務局 1 名

議 事:(1) 平成 22 年度事業報告及び収支決算について

(2) 平成 23 年度事業計画及び収支予算について

幹事会

平成 23 年度第 2 回

日 時:平成 23 年 6 月 27 日(月)14:50～17:00

場 所:学術総合センター11 階 共用会議室

出席者: 幹事 8 名 事務局 1 名

議 事:(1) 第 37 回シンポジウム開催報告

(2) 第 78 回ワークショップについて

(3) 第 15 回日米ワークショップについて

(4) 平成 23 年度総会開催報告

(5) FSST NEWS について

超伝導科学技術研究会 平成 22 年度 事業報告 平成 22 年 4 月 1 日～平成 23 年 3 月 31 日

超伝導科学技術研究会が、平成22年度(平成22年4月1日から平成23年3月31日まで)の行った諸事業は次のとおりである。

1. シンポジウムの開催:1回

第36回

日 時:平成22年4月13日(火)10:00～17:00

協賛団体:(社)応用物理学会、
(社)低温工学協会、
(社)日本物理学会、
(社)科学技術振興機構

場 所:タワーホール船堀 小ホール

テ ー マ:超伝導2010

ー超伝導の新たな可能性へー

参加者数:120名

2. 超伝導科学技術賞

第14回授賞式

日 時:平成22年4月13日(火)11:30～11:50

場 所:タワーホール船堀 小ホール

※第36回シンポジウムにて開催

3. ワークショップの開催:3回

第75回

日 時:平成22年6月16日(水)13:00～18:00

共 催:(社)低温工学協会材料研究会

場 所:東京大学 本郷キャンパス武田ホール

テ ー マ:超伝導線材オールスターズ

ー開発・応用動向と高性能化の可能性ー

参加者数:113名

第76回

日 時:平成22年12月15日(水)13:00～17:15

共 催:(社)応用物理学会超伝導分科会

場 所:埼玉大学 東京ステーションカレッジ

テ ー マ:省エネ・低炭素社会を目指す取り組みと
超伝導

参加者数:71名

第77回

日 時:平成23年3月10日(木)13:30～17:45

場 所:東京大学 本郷キャンパス 武田ホール

テ ー マ:極限を測る超伝導技術の最前線

参加者数:49名

4. FSST NEWS の発行:4 回(1回/3ヶ月)

No.125 (2010年 4月26日)

No.126 (2010年 7月15日)

No.127 (2010年10月15日)

No.128 (2011年 1月20日)

5. その他

期間中に会の運営を円滑に展開するため、開催された幹事会、賞審査委員会、総会、編集委員会は次のとおりである。

<幹事会:6回>

平成22年4月13日(火) 12:00～13:00

タワーホール船堀 小ホール控室

平成22年6月16日(水) 10:00～11:30

東京大学 工学部9号館大会議室

平成22年9月7日(火) 15:00～17:00

NIMS東京事務所 会議室

平成22年11月8日(月) 15:00～17:00

NIMS東京事務所 会議室

平成22年12月16日(木) 16:00～17:30

NIMS東京事務所 会議室

平成23年2月2日(水) 15:30～17:30

NIMS東京事務所 会議室

<賞審査委員会:2回>

平成22年12月16日(木) 13:00～15:50

NIMS東京事務所 会議室

平成23年2月2日(水) 13:30～15:15

NIMS東京事務所 会議室

<総会:1回>

平成22年6月16日(水) 11:30～12:00

東京大学 工学部9号館大会議室

<編集委員会:4回>

平成22年4月19日(月) 15:30～17:30

(社)未踏科学技術協会 会議室

平成22年7月6日(火) 15:30～17:30

(社)未踏科学技術協会 会議室

平成22年10月5日(火) 15:30～17:30

(社)未踏科学技術協会 会議室

平成23年1月11日(木) 15:30～17:30

(社)未踏科学技術協会 会議室

<会員の状況> (H23.3.31 現在)

団体会員 17社17口

個人会員 16名

超伝導科学技術研究会

平成 22 年度収支決算書

平成 22 年 4 月 1 日～平成 23 年 3 月 31 日

(単位:円)

	項目	予算額 (X)	決算額 (Y)	予算額-決算額 (X-Y)
収入の部	団体会費	3,400,000	3,400,000	0
	個人会費	160,000	150,000	10,000
	事業参加費収入	300,000	361,000	△ 61,000
	事業資料代収入	500,000	507,000	△ 7,000
	調査研究収入	0	0	0
	雑収入	0	2,174	△ 2,174
	当期収入合計(A)	4,360,000	4,420,174	△ 60,174
	前期繰越収支差額	866,000	866,041	△ 41
	収入合計(B)	5,226,000	5,286,215	△ 60,215
支出の部	シンポジウム・ワークショップ開催費	1,500,000	1,635,987	△ 135,987
	会議開催費	550,000	576,625	△ 26,625
	印刷出版諸経費	800,000	757,791	42,209
	調査研究経費	200,000	0	200,000
	共回事務費	0	2,375	△ 2,375
	管理費	654,000	663,026	△ 9,026
	基本人件費	1,200,000	1,200,000	0
	当期支出合計(C)	4,904,000	4,835,804	68,196
当期収支差額(A)－(C)		△ 544,000	△ 415,630	△ 128,370
次期繰越差額(B)－(C)		322,000	450,411	△ 128,411

平成 23 年 6 月 27 日の総会で承認済み

国内超伝導関連会議

Conferences related to Superconductivity (Domestic)

会 議 名	日 付	開催場所	主催及び問合せ先
応用物理学会／秋季	H23.8.29～9.2	山形大学 小白川キャンパス (山形県山形市)	応用物理学会
電子情報通信学会 ソサイエティ大会	H23.9.13～9.16	北海道大学 (札幌市)	電子情報通信学会
日本物理学会／秋季	H23.9.21～9.24	富山大学 五福キャンパス (富山県富山市)	日本物理学会
日本金属学会／秋期	H23.11.7～11.9	沖縄コンベンションセンター・ カルチャーリゾートフェストーネ (沖縄県宜野湾市)	日本金属学会

国際会議及び国外の主要な会議

Conferences related to Superconductivity (International/Abroad)

会 議 名	日 付	開催場所	主催及び問合せ先
26 th International Conference on Low Temperature Physics - Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences(LT-26)	2011.8.10～8.17	Beijing (China)	http://lt26.iphy.ac.cn/
22 nd International Conference on Magnet Technology (MT-22)	2011.9.12～9.16	Marseille (France)	http://www.mt22.org/
Superconductivity Centennial Conference (EUCAS/ISEC/ICMC)	2011.9.18～9.23	Hague (Netherlands)	http://www.eucas2011.org/
24 th International Symposium on Superconductivity (ISS2011)	2011.10.24～10.26	Funabori (Japan)	http://www.istec.or.jp/ISS/main_J.html

超伝導科学技術研究会 編集委員会 委員

松本 明善	(独)物質・材料研究機構 超伝導線材ユニット 主任研究員	小泉 勉	昭和電線ケーブルシステム㈱ 技術開発センター 超伝導線材開発グループ 主査
荒井 有気	(公財)鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室 研究員	日高 睦夫	(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 低温デバイス開発室 室長
伊豫 彰	(独)産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 超伝導エレクトロニクスグループ 主任研究員	木村 茂行	(社) 未踏科学技術協会 理事長
		大貫留美子	(社) 未踏科学技術協会