

## 平成16年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな		つかもと おさみ					
①研究代表者氏名		塚本 修巳		②所属研究機関・部局・職		横浜国立大学・大学院工学研究院・教授	
③研究課題名	和文	高温超伝導線材の微細構造電磁現象を基礎とした交流電気機器への応用要素技術の体系化－機器の磁界環境下で交流損失を大幅に低減する手法の研究－					
	英文	Systemization of elementary technology for high temperature superconductor AC applications based on electro-magnetics of fine structures of conductors -Study on methodlogies for reduction of AC losses in conductors as is used in apparatuses-					
④研究経費		平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	総合計
16年度以降は内約額 金額単位：千円		23,300	17,300	21,500	13,800	7,800	83,700
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）				
塚本 修巳	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授	超伝導工学	全般、実験の実施				
雨宮 尚之	横浜国立大学・大学院工学研究院・助教授	超伝導工学	解析、測定				
福井 聡	新潟大学・大学院自然科学研究科・助教授	超伝導工学	解析、測定法の開発				
小川 純 (平成16年度より)	新潟大学・大学院自然科学研究科・助手	超伝導工学	解析、測定法の開発				
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入しなさい。）							
<p>本研究は高温超伝導線材の微細構造の電磁現象に立脚した線材、集合導体巻線各レベルを関係づけた統合的な交流損失の大幅低減手法の体系化を目的としている。具体的な研究課題を下図に示す。</p>							
線材		集合導体			巻線		
<ul style="list-style-type: none"> <li>－断面構造、臨界電流密度分布と交流損失の関係の定量的把握</li> <li>－Bi2223銀シース線材（Bi系線材） <ul style="list-style-type: none"> <li>・フィラメント間の抵抗増大法の検討</li> <li>・機器中の印加磁界に対する損失テータの収集と解析</li> </ul> </li> <li>－YBCO線材（Y系線材） <ul style="list-style-type: none"> <li>・線材断面内の超伝導体の微細化構造の検討</li> <li>・交流用微細化構造、線材の試作、損失評価及び低損失化構造の検討、評価</li> <li>・クエンチ対策を施した交流用Y系線材の交流損失特性評価、損失増加抑制法の研究およびクエンチ温度上昇特性評価</li> </ul> </li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>－線材、集合導体の損失特性の関係の定量的把握</li> <li>－Bi系 <ul style="list-style-type: none"> <li>・多層大電流導体の高精度損失測定法の開発</li> <li>・使用機器に応じた低損失化のための導体構成法と最適化</li> <li>・kA級モデル導体試作による損失低減法の検証</li> </ul> </li> <li>－Y系 <ul style="list-style-type: none"> <li>・集合化した場合の損失特性の測定とBi系線材との類似性と違いの把握</li> <li>・縦磁界効果などBi系と同様な交流損失低減手法適用性評価</li> </ul> </li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>－線材、集合導体の損失特性と巻線の損失特性の関係把握</li> <li>－Bi系 <ul style="list-style-type: none"> <li>・巻線の高精度損失評価法の開発</li> <li>・線材を用いた小型モデル巻線による低損失化手法の検証</li> <li>・集合導体を用いたモデル巻線による損失低減法の検証</li> </ul> </li> <li>－Y系 <ul style="list-style-type: none"> <li>・クエンチ保護対策を施した交流用線材・導体でできた巻線の損失特性および巻線におけるクエンチ保護特性のシミュレーション検討</li> </ul> </li> </ul>		

## ⑦これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

平成14年度、15年度の2年間における研究の経過と成果を下記、線材、集合導体、巻線に分けて述べる。

### I. 線材

#### 1. Bi系線材

- i) 交流外部磁界下で交流通電を行った場合に生ずる損失の測定法として、電気的方法による測定法を我々は開発していたが、その妥当性を、熱的方法との同時測定を行い初めて実証した。これにより、線材単独の場合の交流損失の測定法を確立した【塚本-15】。
- ii) 磁気ナイフ法により線材断面の臨界電流密度  $J_c$  の分布を測定し、解析のための基礎データを得た。
- iii) 超伝導フィラメント間のスペースを大きく取り、フィラメント間の電磁結合を抑制したワイドスペース銀シース線材を用い、線材の長さ方向成分（縦方向成分）を持つ交流磁界をツイストの方向と合わせた方向に印加することにより交流損失が低減できることを電気的および熱的方法により確認した。両方法の測定結果は良く合い、縦磁界方向成分印加により条件が良ければ、ワイドスペース線材で2~3分の1に損失を低減できることが明らかになった【塚本-1, 6, 10】。今後、バリア線材（フィラメント回りに高抵抗層を入れた線材）を入手し、本低減効果の向上を確かめる予定である。
- iv) ツイストしたBi系線材の交流損失の解析プログラムを作り、実験結果によりその妥当性を検証した。この解析プログラムを用いフィラメント間の垂直抵抗および線材のテープ面に対する外部磁界の角度依存性について検討を行った。その結果、a)外部磁界がテープに垂直の場合、マルチフィラメント化/ツイストの効果により交流損失の低減効果が明確に表れるようにするため、フィラメント間の垂直抵抗を現状より1桁以上大きくする必要があり、b)テープ面に平行の外部磁界を印加した場合には現状の線材でもマルチフィラメント化/ツイストの効果が表れること、c)縦磁界効果を得るためにはフィラメント間の垂直抵抗の一層の改善が必要であることが示された【雨宮-1, 7】、【福井-1, 2, 3, 4】。

#### 2. Y系線材

- i) Y系線材に関しても我々が開発した電気的な全損失測定法を適用し、データを収集した。また、熱的な方法との同時測定を行い、両測定法による測定値が良く合うことがわかり、測定法の妥当性が示された。これにより、我々の測定法がBi系、Y系線材両方ともに適用できることが示された。収集した磁化損失データに関して、全侵入磁界より低い外部磁界に対しては薄膜のブーンモデルを仮定した理論値より大きな値を示すが、全侵入磁界より大きい外部磁界に対しては解析値に合うことが示された【塚本-5, 8, 17】。
- ii) Y系導体の通電損失は、Norrisのストリップモデルと楕円モデルとの中間的な特性を示し、導体によっては楕円モデル寄りであったりストリップモデル寄りであったりする。この理由を導体テープ幅方向の臨界電流密度分布に依存することを仮定し、ストリップモデル、楕円モデルの間の特性を記述する解析モデルを構築した。研究ナイフ法による  $J_c$  分布の計測結果と解析結果は良い対応をしていることがわかった【塚本-2, 18, 19】、【雨宮-6】。
- iii) Y系線材にテープ面垂直な交流磁界が加わると大きなAC損失を発生する。YBCO層を分割し、マルチフィラメント化することにより損失を低減できることは良く知られているが、問題はフィラメント間の電磁結合を抑制する方法である。テープそのものを撚る方法もあるが実用的でなく、その代わりに我々は斜にYBCO層を分割し、それを張り合わせ実質的に撚りの効果を得る方法を提案した。この方法の効果をシュミレーション計算で解析した結果、通電損失が若干増すものの磁化損を大幅に減じることが可能であることを示した。これにより、従来、磁化損の低減が非常に困難と考えられていたのに対し、その解決策の糸口を見出した【塚本-13】。また、YBCO層を分割した導体を試作し、分割により磁

化損が低減することを確かめた【雨宮-8】。

- iv) コイルがクエンチした場合、導体の焼損を防ぐために安定化材を付加する必要がある。安定化材が導体の交流損失へ与える影響について50 $\mu$ m厚の銀層のYBCO導体を用い測定を行ったが、50Hzにおいて安定化層の影響がないことを確かめた【塚本-16】。

### II. 集合導体

- i) 複数の線材を並列に配置した場合、隣接線材の作る磁界が損失に大きな影響を与え、また、線材個々の損失を電気的に測定するにあたっては、隣接線材の損失が測定値に影響を与えるため、これを正しく測定する方法は今までなかった。我々は、通電損失を矩形およびスパイラル型の電圧リードループを組み合わせた4端子法により測定する方法を開発し、Bi線材に関して、熱量的方法による同時測定を行いその妥当性を示した。これにより、集合導体中における個々の線材の通電損失を電気的に測定する方法を明らかにした。これによれば、テープ導体を平面状に配列した場合、隣接線材の磁界により、テープ面に垂直な磁界を減少するので損失が減少することが明らかになった【塚本-発表予定】。また、YBCO導体やBi線材を八角形、四角形に配置し通電損失を測定し、解析モデルによる計算値と比較し、解析モデルの妥当性を検証した【雨宮-9, 10】。
- ii) 円筒フォーマに高温超伝導テープ線材を多数本多層に巻付けた多層スパイラル集合導体の交流損失・電流分布を解析する数値モデルを開発した。本モデルに基づき、各層の巻ピッチ、巻方向、導体径などと交流損失との関係を定量的に調べ、交流損失が大幅に低減できる巻ピッチ・方向を明らかにした。また、解析モデルに基づき、スパイラル導体の交流損失を電気的に測定する方法について検討を行っている。既に短尺のサンプル導体入手し、測定を開始する準備を行っている【福井-6, 9】。

### III. 巻線

- i) Bi線材によるパンケーキコイルを構成し、交流印加磁界下での直流抵抗の発生を調べた。直流抵抗発生による損失は動的抵抗損失と呼ばれるもので、低温超伝導コイルで表れることは知られているが、高温超伝導コイルにおいても発生することが確認された。この現象は超伝導応用機器において、交流リップル磁界が超伝導巻線に印加される場合、損失の原因となるばかりでなく、永久電流モードで運転する場合、電流の減衰を早めるものである。これにより、動的抵抗損失を低減する運転条件を見出す必要があるとの知見を得た【塚本-11】。
- ii) 高温超伝導テープ線材によるソレノイド型交流コイルの交流損失を近似的に解析する手法を開発した。Bi系線材を用いたパンケーキ積層コイルの交流損失を評価し、モデルの妥当性の検討、問題点の抽出を行っている【福井-5, 7】。
- iii) Y系導体で巻いたコイルがクエンチをした場合、コイルのエネルギーが外部に放出されない前に導体が損傷を受けないようにするためには、導体に安定化材を付加する必要がある。必要な安定化材の量を導体の臨界電流  $I_c$  を想定して求めた。その結果、 $I_c$  に応じた適切な量の安定化材を付ければ損傷を受けないこと、また、 $I_c$  が300A/cm以上程度になると必要な安定化材の量が多くなり導体の  $I_c$  が大きくなっても導体全体の電流密度はあまり大きくならないことがわかった【塚本-7, 9, 14】。

⑧特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

I. 線材の全損失の測定法の確立と解析手法の系統化

線材の交流磁界下、交通通電時における全損失を電氣的に測定する方法について、従来、電氣的方法、熱的方法、両方兼ねて種々の方法が提案されてきた。電氣的方法は感度、分解能は良いが、測定結果の妥当性が不明確であり、熱的方法は感度、分解能は悪いが妥当性の検証はより問題が少ない。電氣的方法については、外部磁界を供給するコイル電源と、通電電流を供給する電源とが、測定試料を介して結合し、線材中のエネルギー損失のみを取り出すのは非常に困難とされ、従って測定結果の妥当性に対して疑問の余地があった。電氣的測定法としてポインティングベクトルの大きさを測定し、真の損失を測定する試みも他の研究者によって行われている(図1)。この方法はステップモータでピックアップコイルを線材の周りを回転させるものであり、このようにしなければ正しく測れないとされていた。しかし、我々の方法はより簡便な方式で(図2)、固定ピックアップコイルによる磁化損失測定とスパイラル電圧リードによる4端子法による通電損失測定を行い、両者の和を取って全損失のデータを得るものである。この方法は理論的には電源間の結合がなければ正しい測定結果を与えるものであるが、その妥当性は検証する必要がある。このため、熱的方法と本電氣的方法を用い、同じ箇所を同時に測定することにより、妥当性検証を行った。その結果、両測定データは良く一致し、我々の電氣的測定法および熱的測定法両者ともその妥当性が示された。これにより、線材の損失の測定法が確立したと考えることができる。このため、今後、導体の交流損失の評価を正しく行うことができるようになり、交流損失低減に向けた研究が大きく進展する基礎ができた。

さらに、線材幅方向の $J_c$ 分布等の測定方法の開発を行い、各種線材の実用環境下での特性を系統的に評価するための糸口を作った。今後、これらの線材レベルでの特性評価を集積して導体、巻き線レベルの評価へと発展させ、線材、導体、巻き線レベルでの最適化を組合せて機器の磁界環境下で交流損失を大幅に低減する手法の開発へと発展させていく道筋をつけた。

II. 擬似ツイスト YBCO 導体の提案

一般にテープ形状導体のテープ面に垂直な成分を持つ交流磁界が印加された場合、テープ幅にほぼ比例した交流損失が生じる。このため、テープ幅を小さくすることが損失の低減のために

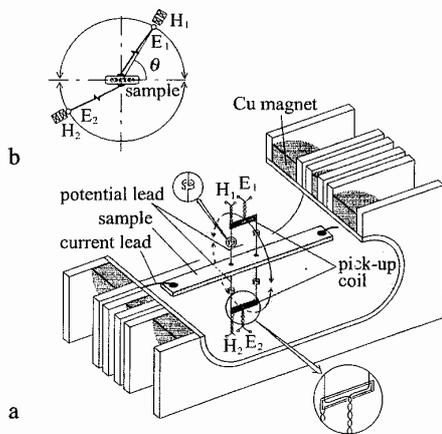


図1 ポインティングベクトル測定による方法 (住吉他、低温工学Vol.35, No.12, p575, 2000)

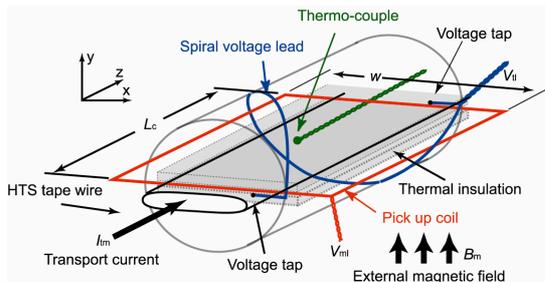


図2 固定ピックアップコイルおよび4端子法による我々の方法 (J.Ogawa, O.Tsukamoto, et al., presented at CEC/ICMC Anchorage USA Sep. 2003)

必要となる。しかし、実際問題として、幅が1mm以下のテープ線材を作ることは技術的に困難であるばかりでなく、実用的な電流容量を持つ集合導体を構成することが困難である。そのため、テープ上のYBCO層を分割し、フィラメント状にする方法が考えられている。この場合、フィラメント間に適当な結合抵抗があるようにすることが、通電電流をフィラメント間で分岐させるために必要である。しかし、この結合抵抗により外部磁界に対し超伝導フィラメントが結合し損失が増大する。この結合損失を抑制するためには、導体を何らかの方法でツイストする必要がある。実際、図3のように導体を機械的に捻ることがアメリカで提案されているが、この方法は導体のスペースファクタが悪くなるだけでなく、巻線の機械的一体性が悪くなる。これに対して、我々の提案している方法は図4に示すように互いに対称な方向に斜にYBCO層を分割した2枚の導体を向かい合わせにし、超伝導部端部を薄い半田層(数 $\mu\text{m}$ 厚)で接続した構成である。この方法では、導体の通電電流には半田層を介して流れるため完全な超伝導ではないが、発生するジュール損失は分割により低減された交流磁化損失よりさらに1桁程度以上小さくできる。この方法は形状的にはテープ状であり、通常のテープ導体と同様にスペースファクタが良く、機械的の一体にもすぐれた巻線を構成できる。現在は等価回路により交流損失低減効果を確認している段階で、今後モデル導体を作り、性能の実証を行う予定である。本方法は、従来大きな課題であったYBCO導体の交流損失の低減についてその糸口を与える新規性、独創性のある方法と考えられる。今後この種の導体の電磁氣的ふるまい、特性の解析にあたっては新しい考え方が必要になると考えられる。

III. 縦磁界効果の確認

ツイストを施したマルチフィラメントBi銀シース線材に適正な方向および大きさの縦磁界を印加することにより交流損失を低減できることが実験により実証された。この方法は低温超伝導交流線ではその有効性が我々によって実証されているものであり、同じ考え方が高温超伝導線材に適用できることが本研究で初めて示された。本方法はフィラメントの結合が少ない線材が開発されればより有効となり、バリア線材開発に対し、より一層の意義を与えるものと考えられる。

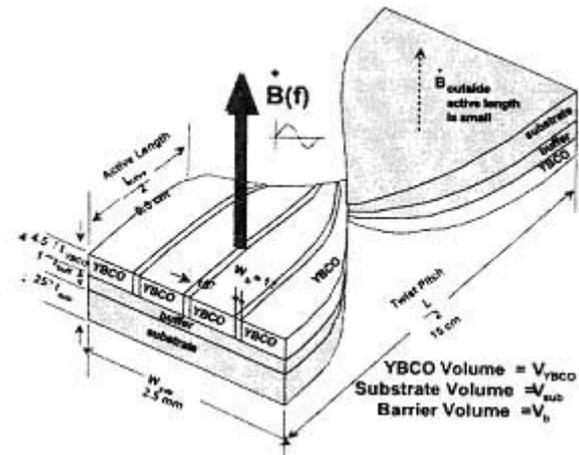


図3 米国で提案されているツイストの方法

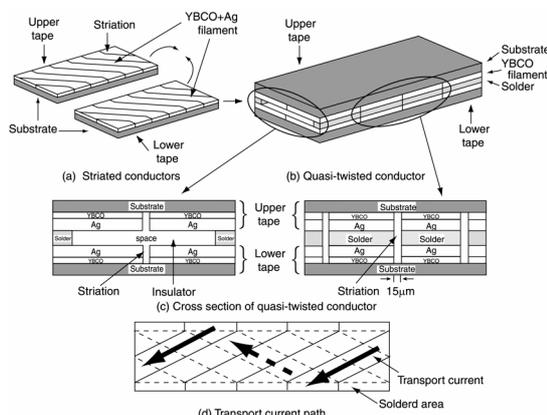


図4 擬似ツイスト導体の構築

⑨研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(発表予定のものを記入することも可能。)  
の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会  
等における発表状況について記入してください。)

以下に本研究組織の研究者毎に研究成果の発表状況を示す。

I. 塚本 修巳

- J. Ogawa, Y. Yanagihara, O. Tsukamoto, "Measurement of AC losses in twisted multifilamentary HTS wire carrying AC transport current and subject to AC longitudinal magnetic field by calorimetric method", Proc. of ICEC 19, Grenoble, France, pp. 289-291, 2002
- D. Miyagi and O. Tsukamoto, "Characteristics of AC Transport Current Losses in YBCO Coated Conductors and Their Dependence on Distributions of Critical Current Density in the Conductors", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, pp. 1628-1631, Mar. 2002
- D. Miyagi, Y. Niidome, Y. Yamato, O. Tsukamoto, S. Torii, S. Akita, Y. Ozawa, "AC transport current losses in HTS tapes in an assembled conductor", PHYSICA C 378-381, pp. 1128-1132, 2002
- D. Miyagi, H. Kawasaki, O. Tsukamoto, S. Honjo, Y. Takahashi, J. Fujikami, K. Hayashi, "AC loss characteristics of an assembled conductor of round Bi2223 Ag sheathed wires", PHYSICA C 372-376, pp. 1727-1729, 2002
- M. Cizek, O. Tsukamoto, J. Ogawa, and D. Miyagi, "Energy Losses in YBCO-123 Coated Conductors Carrying Transport Current in Perpendicular External Magnetic Field", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 48B, pp. 606-613, 2002
- J. Ogawa, O. Tsukamoto, M. Cizek, N. Amemiya and S. Fukui, "AC Transport Current Loss Characteristics of Twisted Multifilament Bi/Ag Sheathed Tape Subject to AC longitudinal Magnetic Field", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 48B, pp. 740-747, 2002
- 付 猷昆, 塚本修巳, 古瀬充徳, 「YBCO導体を用いたコイルのクエンチ保護」, 電気学会論文誌 B, 123巻5号, pp. 661-669, 2003年
- J. Ogawa, M. Shiokawa, M. Cizek, and O. Tsukamoto, "AC Losses in YBCO Coated Conductors Carrying AC Transport Currents in Perpendicular AC External Magnetic Field", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 1735-1738, Jun. 2003
- Y. Fu, O. Tsukamoto, and M. Furuse, "Copper Stabilization of YBCO Coated Conductor for Quench Protection", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 1780-1783, Jun. 2003
- J. Ogawa, M. Shiokawa, and O. Tsukamoto, "AC Loss Characteristics of Twisted Multifilament Bi2223/Ag Sheathed Tapes Carrying AC Transport Currents in AC Longitudinal Magnetic Fields", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 2364-2367, Jun. 2003
- J. Ogawa, Y. Zushi, M. Fukushima, O. Tsukamoto, E. Suzuki, M. Hirakawa, K. Kikukawa, "AC losses in a HTS coil carrying DC current in AC external magnetic field", PHYSICA C 392-396, pp. 1145-1149, 2003
- O. Tsukamoto, "Roads for HTS Power Applications to Go into the Real World", presented at EUCAS2003, Sep. 2003, Sorrento Italy (Invited)
- O. Tsukamoto, J. Ogawa, H. Yoshida, "A Method to Reduce AC Magnetization Losses in YBCO Thin Film Tape Conductors", presented at EUCAS2003, Sep. 2003, Sorrento Italy
- O. Tsukamoto, Y. Fu, H. Yoshida and M. Furuse, "Study on Quench Protection of Coil Wound of Copper or Silver Stabilized YBCO Conductors in Various Operation Temperature", presented at CEC/ICMC2003, Sep. 2003, Anchorage Alaska USA
- J. Ogawa, Y. Yanagihara, Y. Yamato, O. Tsukamoto, S. Honjo, "Measurements of Total AC Losses in HTS Short Sample Wires by Electric and Calorimetric Methods", presented at CEC/ICMC2003, Sep. 2003, Anchorage Alaska USA
- J. Ogawa, H. Nakayama and O. Tsukamoto, "Influence of Silver Protection Layers on AC Loss Characteristics of YBCO Coated Conductors", presented at ISS2003, Oct. 2003, Tsukuba Japan
- J. Ogawa, H. Nakayama, S. Odaka, and O. Tsukamoto, "AC loss characteristics of YBCO conductors carrying transport currents in external AC magnetic fields", presented at ACASC, Dec. 2003, Beijing China
- J. Ogawa, Y. Sawai, H. Nakayama, O. Tsukamoto, D. Miyagi, "n value and  $J_c$  distribution dependence of AC transport current losses in HTS conductors", PHYSICA C 401, pp. 171-175, 2004
- 宮城大輔, 塚本修巳, 「イットリウム系薄膜導体交流通電損失のn値および導体断面内臨界電流密度分布依存性」, 電気学会論文誌 B, 124巻1号, pp. 127-136, 2004年

II. 雨宮 尚之

- N. Amemiya, F. Jin, Z. Jiang, S. Shirai, B. ten Haken, J. Rabbers, N. Ayai and K. Hayashi, "Total AC losses in twisted and untwisted multifilamentary Bi-2223 superconducting tapes carrying AC transport current in AC longitudinal magnetic field", Superconductor Science and Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 314-321, Mar. 2003
- Z. Jiang, N. Amemiya, N. Ayai and K. Hayashi, "AC loss measurements of twisted and non-twisted BSCCO tapes in transverse magnetic field with various directions", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 3557-3560, Jun. 2003
- N. Amemiya, Z. Jiang, N. Ayai, and K. Hayashi, "Total AC loss characteristics of high Tc superconducting tapes", Physica C, Vol. 392-396, pp. 1083-1090, 2003
- Z. Jiang, N. Amemiya, "An experimental method for total AC loss measurement of high Tc superconductors", Superconductor Science and Technology, Vol. 17, No. 3, pp. 371-379, Mar. 2004
- N. Amemiya, T. Nishioka, Z. Jiang and K. Yasuda, "Influence of film width and magnetic field orientation on AC loss in YBCO thin film", Superconductor Science and Technology, Vol. 17, No. 3, pp. 485-492, Mar. 2004
- N. Enomoto, N. Amemiya, "Electromagnetic Field Analysis of Rectangular High Tc Superconductor with Large Aspect Ratio", To be published in Physica C, 2004
- Z. Jiang, N. Amemiya, N. Ayai, K. Hayashi, "Magnetization loss, transport loss and total loss in twisted and untwisted Bi-2223 multifilamentary tapes", submitted to Superconductor Science and Technology, 2004
- 西岡, 姜, 雨宮, 井上, 「YBCO超伝導薄膜の全交流損失の外部横磁界・膜幅依存性」, 第68回2003年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, p. 232, 2003年5月 つくば(茨城)
- 丸山, 姜, 雨宮, 安田, 「多角形配置したYBCO薄膜超伝導体の通電損失(1) -測定法と測定結果-」, 第69回2004年度春季低温工学・超電導学会講演概要集
- 榎本, 丸山, 雨宮, 「多角形配置したYBCO薄膜超伝導体の通電損失(2) -測定結果と数値解析結果の比較-」, 第69回2004年度春季低温工学・超電導学会講演概要集

III. 福井 聡

- S. Fukui, M. Ikeda, T. Yoshida, T. Sato, M. Yamaguchi, "Investigation of AC Loss Characteristics of Bi2223 Twisted Multifilamentary Tape", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, pp. 1612-1615, 2002
- H. Tonsho, S. Fukui, T. Sato, M. Yamaguchi, S. Torii, T. Takao, K. Ueda, "Theoretical and Experimental Study on AC Loss in HTS Tape in AC Magnetic Field Carrying AC Transport Current", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 2368-2371, 2003
- T. Yoshida, S. Fukui, M. Yamaguchi, T. Sato, "AC Loss Characteristics of Bi2223 Twisted Multifilamentary Tape in AC Longitudinal Magnetic Field", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 2372-2375, 2003
- S. Fukui, H. Tonsho, H. Nakayama, M. Yamaguchi, S. Torii, K. Ueda, T. Takao, "Numerical Evaluation of Measured AC loss in HTS Tape in AC Magnetic Field Carrying AC Transport Current", Physica C, Vol. 392-396, pp. 224-228, 2003
- H. Tonsho, M. Toyoda, S. Fukui, M. Yamaguchi, T. Sato, M. Furuse, H. Tanaka, K. Araki, M. Umeda, "Numerical Evaluation of AC Loss in High Temperature Superconducting Coil", Presented at 18<sup>th</sup> Conference on Magnet Technology, To be published in IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 14, 2003
- A. Watabe, S. Fukui, M. Yamaguchi, T. Sato, T. Takao, O. Tsukamoto, "Numerical Analysis of AC Loss and Current Distribution Characteristics of Co-axial Multi-layer High Temperature Superconducting Cable", Presented at 18<sup>th</sup> Conference on Magnet Technology, To be published in IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 14, 2004
- S. Fukui, H. Tonsho, M. Toyoda, M. Yamaguchi, T. Sato, M. Furuse, H. Tanaka, K. Araki, M. Umeda, T. Takao, "Analysis of AC Loss Characteristics of High Temperature Superconducting Coil", Presented at International Symposium on Superconductivity 2003, To be published in Physica C, 2004
- H. Nakayama, S. Fukui, Y. Kobayashi, T. Sato, M. Yamaguchi, S. Torii, K. Ueda, "Total AC Loss in Bi2223/Ag Tape Carrying AC Transport Current in External AC Magnetic Field of Various Directions", Presented at International Symposium on Superconductivity 2003, To be published in Physica C, 2004
- A. Watabe, S. Fukui, T. Sato, M. Yamaguchi, "Proposal of Numerical Model for Current Distribution Analysis in High Temperature Superconducting Parallel Conductor", Presented at International Symposium on Superconductivity 2003, To be published in Physica C, 2004