研究論文

Gd 系高温超電導テープ材における長手方向の不均一直流通電特性 —システム設計のための統計学的検討—

中村 武恒^{*1,†}, 高村 豊^{*1}, 雨宮 尚之^{*1}, 中尾 公一^{*2}, 和泉 輝郎^{*2}

Longitudinal Inhomogeneity of DC Current Transport Properties in Gd-system HTS Tapes — Statistical Approach for System Design —

Taketsune NAKAMURA^{*1,†}, Yutaka TAKAMURA^{*1}, Naoyuki AMEMIYA^{*1}, Koichi NAKAO^{*2} and Teruo IZUMI^{*2}

Synopsis: In this paper, we studied the DC current transport properties of GdBCO-coated conductors, including the longitudinal distribution of critical current. Inhomogeneity of the local critical current was firstly measured by means of TapeStar™ at 77 K, and then characterized based on a statistical method. Current transport properties were also measured for different positions and/or distances of potential taps using a four-probe method. It was shown that the longitudinal inhomogeneity of the conductor was described by use of a simplified percolation depinning model that takes account of Gaussian distribution. We further distinguished the above-mentioned inhomogeneity between statistical distribution and random failure. Influence of the aforementioned statistically distributed current transport properties on the magnet performance was also elucidated for simple pancake coils. This information is important as it provides guidance for practical system design.

Keywords: GdBCO-coated conductor, inhomogeneous current transport, statistical method, TapeStar™, pancake coil

1. はじめに

RE 系高温超電導 (High Temperature Superconductor: HTS) テープ材は、高温領域における通電特性がビスマス系線材に比較して優れ、また機械歪に対する耐性が高いなどの利点を有することから、上記特性を活かした応用研究開発が精力的に実施されている。特に、送電ケーブル^{1,2)}や高磁界発生マグネット^{3,4)}は大きな応用分野と考えられる。

一方、RE 系高温超電導テープ材は別名“塗布線材”とも呼ばれており、薄膜作製技術を応用していることから、我が国発の IBAD 法⁵⁾と呼ばれる芸術的作製プロセスを端緒として一気に線材化が実現されているものの、上記実用化に際して解決しなければならない課題も多く存在する。例えば、筆頭著者を中心とするグループでは、磁気エネルギー

ギー貯蔵コイル用 Y 系線材について一軸引張応力—歪特性と臨界電流との関係を詳細に測定したところ、その弾性限界が 1 GPa を超えるものの、超電導層と中間層の界面がせん断応力に弱く剥離の危険性を報告した⁶⁾ (同じ国際会議にて、Ekin らも別の測定結果に基づいて剥離の問題を指摘している⁷⁾)。現在では、上記問題はクローズアップされ、例えば巻線技術の観点からその防止策が検討されている⁸⁾。また、上記剥離を起こす界面が大きな熱抵抗となる可能性についても実験的・解析的に指摘されている^{9,10)}。

上記課題を解決して、RE 系高温超電導応用の実用化を加速させるためには、成熟した製造プロセスの確立が不可欠である。特に、線材長手方向の超電導特性については、工業材料としての地位を築くために高い均一性(歩留まり)が要求される。しかしながら、前述した特有の作製プロセスに伴って、長尺方向に均質なテープ材製造技術を確認するためには結晶成長上の複雑な制御パラメータを高精度かつ広範囲に制御する必要がある。従って、長手方向不均一通電特性を系統的かつ定量的に扱っておくことは、線材特性改善の目標を設定する意味で重要である。さらには、不均一通電特性が超電導機器特性に与える影響を明確化すれば、ある程度の長手方向バラつきを許容したシステム設計も可能になると期待される。

Received January 7, 2013

^{*1} 京都大学大学院工学研究科

〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂一番地

Graduate School of Engineering, Kyoto University,

1 Kyoto-Daigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8510, Japan

^{*2} 公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター

超電導工学研究所

〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13

Superconductivity Research Laboratory, ISTEK,

1-10-13, Shinonome, Koto-ku, Tokyo 135-0062, Japan

† E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

Fig. 1 Schematic illustration of the calculation of current transport properties in HTS apparatuses. Local electric field (E_i) as a function of temperature (T_i), magnetic field vector (H_i) and strain (ϵ_i), which is mapped from actual geometrical shape of the apparatuses such as cables and magnets (upper figure), are summed to calculate total voltage (V_t) (lower figure).

本研究では、以上の背景に基づき、GdBCO テープ材における長手方向不均一通電特性の統計学的評価を目的とした。具体的には、まず検討対象とした試料について、長手方向の局所的臨界電流密度分布を TapeStar™ によって計測した。次に、上記結果を加算するとともに、4 端子法から得られる直流通電特性との比較検討を通して、統計学的検討を実施した。さらに、長手方向不均一通電特性を単純なパンケーキコイルに適用し、その影響を解析的に検討したので報告する。

なお、本検討は巨視的物理量でのみ実施しており、それが中間子のディメンジョン（量子化磁束格子と磁束ピン止め中心の要素的相互作用が支配する程度の空間分解能）の情報を畳み込んだ結果として得られているという意味で、そもそも均一な材料開発に際しての指標を与えるには至らない。ただし、TapeStar™ と 4 端子法の評価法を組み合わせることによって、それを応用する観点からの均一性の指標を与える基盤になり得ると考えられる。

2. 不均一通電特性評価の基本的考え方

2.1 HTS 機器における通電特性

低温超電導機器の設計に際しては、一般にその最大経験磁界と当該磁界に対する短尺試料の臨界電流に基づいて運転電流が決定されている。このことは、低温超電導線材のクエンチ伝搬速度が極めて速いことから、一ヶ所でも常伝導（若しくは磁束フロー）の芽が発生したところで機器全体のカタストロフィックなクエンチにつながってしまうためである^{11,12)}。

一方で、特に 20 K 以上の高温運転を前提とする HTS 機器では、常伝導伝搬速度が遅いこともあり、局所的な発熱

Fig. 2 Schematic diagram of the probability density function of the inhomogeneity of normalized critical current along the longitudinal direction of the HTS tape conductors (I_{c_ave} : mean value of critical current distribution; σ : standard deviation).

領域が発生してもその場所に留まって機器全体に拡大しにくい（ホットスポット）¹³⁾。このことは、前記低温超電導機器設計の考え方が一般性を失ってしまい、高温超電導線材の臨界電流だけでなくその電界－電流密度特性自身を高精度に記述することの必要性を導き¹⁴⁻¹⁶⁾、さらに機器全体に広範囲に分布する発熱を正確に評価することを要請することになる¹⁷⁾。

Fig. 1 には、上記通電特性評価の基本的考え方に関する説明図を示す（同図では、強制通電 I の条件下における特性評価法について説明しており、例えば i 番目の要素における線材幅方向の臨界電流分布は $I_{c,i}$ に包含されると仮定している。また、電磁誘導に伴う磁化電流やその緩和を考慮する際には、本方法を拡張する必要がある）。同上図では、コイルやケーブルなどの実形状について、局所点 x_i の温度 T_i 、磁界ベクトル H_i 、および歪 ϵ_i を線要素上に写像し、その加算として全体の電圧 V_t を計算する（同下図）。なお、 E_i vs. I 特性については、木須らがパーコレーション遷移モデル¹⁸⁾に基づいて定量評価式を提案しており¹⁴⁻¹⁶⁾、多くの通電特性解析において成功を収めている（具体的には後述する）。

筆頭著者のグループでは、上記方法を使って超電導コイル¹⁹⁻²⁵⁾や超電導送電ケーブル^{26,27)}の解析的検討を行っている。ただし、本稿では T_i や ϵ_i は考慮しないこととする。

2.2 通電特性の長手方向不均一性の表現²⁸⁾

本節では、2.1 節の通電特性評価法に、線材長手方向不均一性を考慮する方法について説明する。なお、前節で説明したパーコレーション遷移モデルにおいても、メゾスコピックスケールにおけるピン力の不均一性を認める立場から出発して定式化されている¹⁴⁻¹⁶⁾。即ち、上記スケールにおける局所電界をピン力分布によって畳み込み積分すれば解析式を得ることができる（詳細は文献[14]-[16]を参照）。

Table 1 Specifications of the GdBCO tape sample

Process	IBAD/PLD
Thickness of SC layer	~0.5 μm
Width	5.0 mm
Length subjected in this study	2400 mm

Fig. 3 Experimental result of the local critical current ($I_{c,l}$) in the GdBCO sample at 77 K obtained using TapeStar™. Distinctly damaged regions with respect to the local critical currents are marked by circles with alphabetical symbols, i.e., (A), (B) and (C).

Fig. 4 Histogram of the local critical current ($I_{c,l}$) obtained from Fig. 3. Solid circles are the experimental data (Fig. 3) and curves are the Gaussian distribution (solid curve: $\sigma=0.04$; broken curve: $\sigma=0.05$).

一方、本節で説明する長手方向不均一性は巨視的な要因によるものであり、それがダイレクトに（可観測な）通電特性に影響を与えることになる。従って、ここでは電界基準で定義される臨界電流 ($I_{c,i}$) に統計分布を仮定した長手方向不均一性を検討する。なお、仮に $I_{c,i}$ を定義する電界基

準が V_l (Fig. 1) に対応する基準と同等の場合、局所的発熱がテープ材全体の特性を支配してしまい、本統計的検討が不可能になってしまう。従って、前者は後者よりも十分低く設定する必要がある。

Fig. 2 には、 $I_{c,i}$ の長手方向分布を与える確率密度関数 (Gauss 分布) を模式的に示す。また、式(1)には Gauss 分布の確率密度関数 $P(I_{c,i})$ を示す。

$$P(I_{c,i}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{I_{c,i} - I_{c,ave}}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2 \quad (1)$$

ここで、 $I_{c,ave}$ は臨界電流分布の平均値であり、 σ はその標準偏差を与える。Fig. 1 の $I_{c,i}$ が Gauss 分布に従うとき、統計的不均一性と呼ぶことにする。一方、 $I_{c,i}$ が Gauss 分布に従わない場合を偶発故障的不均一性と呼び、両者を区別する。

3. 通電特性の評価結果と考察

3.1 測定対象とした試料の諸元

Table 1 には、測定対象とした GdBCO 試料の仕様を示す。IBAD/PLD プロセスで製造した長尺のテープ材（幅：10 mm）から、長さ 2400 mm を切り出した。また、レーザ切断機によって幅 5 mm に切断し、検討試料とした。なお、測定対象と同一ロットの試料について、切断前（幅 10 mm）の臨界電流平均値が上記切断後の値の約 2 倍であったことから、切断に伴う大きな超電導特性の劣化が無いことを確認している。

3.2 TapeStar™ による局所的臨界電流分布

まず、TapeStar™ によって温度 77 K における局所的臨界電流分布 ($I_{c,l}$) を測定した。TapeStar™ の詳細な測定原理は文献^{29,30)}に譲るが、所謂誘導法によって $I_{c,l}$ 値を測定する方法であり、テープ材長手方向に約 0.5 mm 間隔で測定している（外部印加磁界は 10~40 mT）。なお、誘導法では結晶粒内（intra-grain）と粒間（inter-grain）の両者の電流情報が包含されるが、本測定の空間分解能から考えて粒間特性が支配的と考えられる。さらに、 $I_{c,l}$ を定義する電界基準は 1 μVm^{-1} 程度であり、通電法に対して使用される一般的値 (100 μVm^{-1}) に比較して 2 桁程度小さい。

Fig. 3 には、長さ 2400 mm に亘って得られた $I_{c,l}$ の測定結果を示す。同図に示すように、 $I_{c,l}$ の平均値は 110 A 程度である。一方で、 $I_{c,l}$ には大きく 2 種類の不均一性が存在している。一つ目は、 $I_{c,l}$ の平均値に対して揺らぎのように変動している不均一性であり、大雑把に 200 mm 程度の周期で変動している。もう一つは、スパイク状に変化（主として平均値から低下）している箇所である。この不均一性は、その前後のパラつきとの相関が低い。本稿では、この後の議論のために、 2σ より大きく $I_{c,l}$ が低下しているポイントを○で囲んで(A)~(C)と記号を付した。

Fig. 5 Potential taps arrangement and tap numbers for four-probe measurement of current transport properties.

Fig. 6 Experimental results of current transport properties in the GdBCO sample (inset: enlarged view of the area around the take-off of the curve; for tap number, see Fig. 5).

Fig. 4 には、Fig. 3 の結果から得られた度数分布を示す。同図から明らかなように、度数分布はほぼ対称分布に従っているように見える。そこで、Gauss 分布関数 (式(1)) でフィッティングしたところ、 $\sigma = 0.04$ と 0.05 の範囲に収まることが分かった。即ち、Fig. 3 のように一見ランダムに見える $I_{c,l}$ のバラつきも、そのほとんどの領域について Gauss 分布に従い、つまり統計的考察に耐えろと期待される (2.2 節の統計的不均一性)。特に、 $I_{c,l}$ がおよそ 200 mm 程度の周期で変動 (Fig. 3) しているにもかかわらず Gauss 分布に従うという事実は興味深い。一方、偶発故障的不均一性の候補としては、Fig. 3 の (A), (B), および (C) の 3 箇所が考えられる。上記 3 箇所について、それらが偶発故障的不均一性を与えるのか、あるいは単純に標準偏差から大きく外れた統計的不均一性に従うのかについては、この後議論を進める。

3.3 4 端子法による通電特性の評価

3.1 節と同一の試料について、4 端子法による直流通電特性の測定を実施した。Fig. 5 には、試料に取り付けたポテンシャルタップの位置とタップ番号との関係を示す (両端を除いて、タップ間距離は 300 mm としている)。

Fig. 6 には、タップ<1>から<4>の間で測定した通電特性

Fig. 7 Schematic explanation for the summation of local flux-flow voltage, V_l . Total tape length is defined as $x_t - x_0$ and total voltage is denoted as V_l .

Fig. 8 Comparison between Eqs. (2) and (3) (Fig. 3) and Fig. 6 for taps <1>-<2>. The same agreements are also obtained for all tap combinations between tap <1> and <4>. Statistical inhomogeneity is dominant in this curve.

の測定結果を示す。同図から明らかなように、異なる 4 箇所のタップ間について測定した $E-I$ 特性はほぼ一致している (電界基準 $100 \mu\text{V/m}^{-1}$ における臨界電流は 135 A であり、TapeStar™ (Fig. 3) から得られる平均値 (110 A: 電界基準 $1 \mu\text{V/m}^{-1}$ 程度) よりも大きい)。この特性は、電界の立ち上がり付近を拡大してみても同様であり (挿入図参照)、即ち Fig. 3 の局所的不均一性があるにもかかわらず測定場所によらず一致するという事実は、少なくとも本測定範囲において同一の統計分布 (Fig. 4) に従っている可能性を示唆している。換言すると、タップ<1>~<4>間に偶発故障の特性劣化部分は明確には含まれていないと考えられ、特性低下部 (A) も統計的不均一性に属すると推測される。

上記検討をさらに進めるために、TapeStar™の結果 (Fig. 3) から通電特性を導出し、Fig. 6 との比較検討を実施した。ただし、Fig. 3 から通電特性を評価するためには、磁束フロー状態における発生電界の理論式を与える必要がある。筆者らは、既報告の解析¹⁹⁻²⁷⁾において、最も信頼性の高い評価式として木須らのパーコレーション遷移モデル¹⁴⁻¹⁶⁾を使用してきた。しかしながら、(最終的には上記モデルを

Fig. 9 Comparison between Eqs. (2) and (3) (Fig. 3) and Fig. 6 for taps <1>-<8>. Stochastic inhomogeneity (random failure) is dominant in this curve.

Fig. 10 Photograph of the burn-out point ((C) in Fig. 3) at the measurement process of Fig. 9.

直接使用した検討が必要であるものの) 上記モデル式は決定すべきパラメータを多く含み、長手方向不均一性を議論する際にそれら全てのパラメータに対する影響を考慮することから、本研究において合目的でない。そこで、次式のようにパーコレーション遷移モデルを単純化した評価式を仮定して議論する。

$$V_1(x_i, I) = K(I - I_{c,l}(x_i))^{n_p} \Delta x_i \quad (2)$$

ここで、 $I_{c,l}(x_i)$ は TapeStar™の測定結果から得られる局所的臨界電流 (Fig. 3) である。また、 K は単位長当りの抵抗値のディメンジョンを持つ係数であり、 n_p はべき指数である。 $\Delta x_i (= x_i - x_{i-1})$ は $I_{c,l}(x_i)$ を定義する線材間隔であり、0.5 mm 程度であるが測定点によって僅かに異なる。なお、式(2)は形式的には Generalized critical state model³¹⁾に一致している。さらに、テープ全体の電圧 V_t は、Fig. 7に基づいて次式により計算した。

$$V_t(I) = \sum_{i=1}^t V_1(x_i, I) \quad (3)$$

Fig. 11 Schematic diagram of the simple pancake coil for the analysis of inhomogeneous current transport properties (turn number: 100). The central magnetic field is designed for 0.123 T at 100 A.

式(2)、(3)の K と n_p をフィッティングパラメータとして、TapeStar™の結果 (Fig. 3) と4端子法の結果 (Fig. 6) の一致度を検討した。なお、繰り返しになるが V_1 は $1 \mu\text{Vm}^{-1}$ 以下のオーダーであるのに対して、 V_t は $10 \sim 100 \mu\text{Vm}^{-1}$ 程度であることから、少なくとも電圧の立ち上がり付近において、式(3)に基づく解析法は妥当であると考えられる。

Fig. 8 には、タップ間<1>-<2>について評価した結果を示す。同図から明らかなように、TapeStar™の結果と4端子法の結果は良く一致している。同様の一致は、タップ<1>と<4>間の全ての組み合わせについて得られた。本結果から、タップ<1>-<4>間における通電特性が Gauss 分布に支配されていることが明確になった。なお、このときのべき指数 n_p は全てのデータについて同一値(8)であった。この値の物理的意味については検討中である (なお、短尺試料の E - I 特性の磁界依存性を測定したところ、所謂パーコレーション遷移¹⁴⁻¹⁸⁾時のべき指数とほぼ同一値であった)。

しかしながら、同様の比較をタップ<1>-<8>間に対して実施すると、**Fig. 9**に示すように両者は全く一致していない。同様の結果は、タップ<4>-<8>を含む他の比較結果についても得られている。このことは、上記区間の通電特性が Gauss 分布に支配されていないことを示唆している。**Fig. 3**を見てみると、タップ<4>-<8>間には大きな特性低下箇所 (B) と (C) が含まれている。つまり、これら箇所が偶発故障的不均一性を与え、かつ統計的不均一性を凌駕することにより、その通電特性を大きく低下させていると推測される。偶発故障的不均一性を与える典型的事象の一例として、**Fig. 9**の測定中に電界基準 $100 \mu\text{Vm}^{-1}$ 程度の通電しか行っていないにもかかわらず焼損が発生した。この時の焼損箇所 (**Fig. 10**) は、実は最も臨界電流の低い(B)点ではなく(C)点であった (**Fig. 3** 参照)。即ち、偶発故障的不均一箇所は、ホットスポットの振る舞いに伴って焼損現象を招き、それが確率過程に支配されて予測困難と考えられる。

以上より、本研究対象の試料における長手方向不均一性について、統計的不均一性と偶発故障的不均一性の2種類

Fig. 12 External magnetic field dependence of critical current in GdBCO short sample at 77 K. The magnetic field is applied perpendicular to the broad surface of the tape. Symbols (circles) are the experimental data and the curve is the fitted property using Eq. (4).

Fig. 13 Analysis results of the total electric field (E_t) of the coil (Fig. 11) for different values of the transport current (I) and standard deviation (σ). The curves are obtained as the expected values by means of Eqs. (1)-(4).

に分類されることが明らかになった。統計的不均一性については、テープ材製造プロセスの更なる改善が要求されるが、一方で、それをある程度許容する設計も可能と考えられる。しかしながら、偶発故障的不均一性は最優先として除去すべきであることが分かる。

4. パンケーキコイルの不均一通電特性

4.1 解析方法

前章までの議論により、臨界電流の線材長手方向局所的不均一性と通電特性の関係が明らかになった。本章では、具体的機器を想定して、単純なパンケーキコイルについて

上記不均一性の影響を解析的に検討する。なお、本章では予測不可能な偶発故障的不均一性は対象にせず、統計的不均一性のみを扱うことにする。本検討を進展させることにより、システム設計に耐える長手方向均一度の目標値がクリアになる。さらには、コイル特性側から許容される不均一度も明確になり、システム開発を加速させる一助になると期待される。

Fig. 11 には、解析対象とした単純パンケーキコイルの概略図を示す。同図では、内径 30 mm、外径 79.9 mm、高さ 5 mm、巻数 100 の小型コイルを想定し、100 A 励磁時の中心発生磁界を 0.123 T として設計した。**Fig. 11** のコイルについて、予め強制通電時の各部における磁界ベクトル分布を電磁界解析に基づいてデータベース化しておき、第 2 章の方法を適用して以下のように損失特性の解析を実施した。

解析に際しては、GdBCO テープ材の通電特性の外部磁界依存性を測定し、**Fig. 12** の結果を得た (○印)。外部磁界 (B_e) は、テープ幅広面に対して垂直に印加している。また、馬渡らの報告³²⁾を利用して次式を仮定し、同図実線のようにうまくフィッティングすることができた。

$$I_{c1}(B_e) = \varepsilon K_1 B_e^{-\alpha} + (1 - \varepsilon) K_2 \exp^{-B_e} \quad (4)$$

ここで、第 1 項は低磁界特性を支配し、また第 2 項は高磁界特性を記述している。 K_1 ならびに K_2 は、上記それぞれを記載する係数であり、また ε は各項の重み係数である。

まず、式(2)を用いて、コイル中のテープ材各部における I_{c1} から局所電圧 V_l を計算し、その最大値をコイル長手方向要素分割長で除して最大局所電界 $E_{l,m}$ とした。また、コイル内全ての V_l を加算 (式(3)) して end-to-end の電圧 V_t を計算し、その結果と通電電流の積によって総発熱 W_t を求めた。さらに、コイル内全ての要素について、 I_{c1} のバラつきを式(1)の標準偏差 σ に従って乱数として与え、上記 $E_{l,m}$ と W_t の計算を 100 回繰り返して統計処理を実施した。なお、 $E_{l,m}$ と W_t の両者の検討は、それぞれホットスポットの制約ならびにコイル総発熱の制約に際して重要である²¹⁻²⁵⁾。

4.2 解析結果と考察

Fig. 13 には、コイル全体の電界 (E_t) について、異なる輸送電流 (I_t) と標準偏差 (σ) に対してプロットした結果を示す。 E_t は、 V_t (式(3); 統計処理結果の期待値を使用) をテープ全長で除して計算した。図に示すように、特に低電界領域の E_t は σ が 0.04 以上になると急激に大きくなっている。例えば、 $I = 70$ A における E_t は、 σ が 0 と 0.10 で 2 桁以上異なっている。このことから、期待値で評価した場合でさえも、テープ材長手方向不均一性がコイル通電特性に大きく影響することが分かった。

また、**Fig. 14** には(a)コイル内最大局所電界 ($E_{l,m}$) と(b)総発熱 (W_t) を示す。まず、**Fig. 13** と 14(a)の比較から明らかにように $E_{l,m}$ は E_t に比較して何桁も大きく、長手方向

(a) Maximum local electric field ($E_{l,m}$)

(b) Total heat generation (W_t)

Fig. 14 Analysis results of (a) the maximum local electric field ($E_{l,m}$) and (b) the total heat generation (W_t) of the coil (Fig. 11) for different values of the transport current (I) and standard deviation (σ). The curves are obtained as the expected values by means of Eqs. (1)–(4). Error bars are also shown for the event number 100.

不均一性が深刻なホットスポットを生み出す原因になることが分かる。また、 $E_{l,m}$ と W_t 共に σ が大きくなるほど増大しており、つまり長手方向不均一性の影響を強く受けている。さらには、100 回試行した際のエラーバーに着目すると、 W_t はそれほど大きな影響を受けていないものの、 $E_{l,m}$ は不均一性 (σ) が大きくなるほど深刻な影響を受けている。即ち、統計的不均一性が大きくなるほど、特に低電界領域における $E_{l,m}$ の一意性が損なわれていることが分かる。従って、 $E_{l,m}$ に関しては期待値で議論するだけでも不十分であり、上記エラーバーに代表される変化幅の中で、場合によってさらに悲観的制約を課す必要があると思われる。なお、同様の結果は磁気エネルギー貯蔵用コイルについても報告している³³⁾。

以上より、コイル形状のように磁界ベクトルが複雑に分布するシステムでは、線材長手方向のバラつきが通電特性に深刻かつ複雑な影響を与える可能性が示された。換言すると、機器の実形状に依存して長手方向不均一通電特性の影響度が大きく変わってくると考えられ、即ち許容される線材バラつきが異なってくる。

なお、最近では、評価する電極間距離によって見かけの臨界電流値が大きく異なる報告もあり³⁴⁾、このことも今後本検討によって明確化していく必要がある。また、第 1 章の最後で説明したように、本検討は巨視的物理量である TapeStar™ と 4 端子法にのみ着目していることから、材料開発に対しての指針を与えるには至っていない。当該検討を可能にするためには、例えば本須らが実施している超電導線材内局所損失の可視化³⁵⁾など、中間子の評価方法と本方法を連携すると共に、実際材料作製技術との対応を検討する必要がある、今後の課題である。いずれにしても、ある程度の短尺試料を用いて局所的臨界電流分布を測定し、かつ σ を導ければ、線材長手方向に対して統計的不均一性がどのように現れても、通電電流に対する局所最大電界や総発熱をある程度の精度をもって評価できる可能性がある。

5. まとめ

本稿では、GdBCO テープ材を使用した高温超電導システム実現に向けた研究開発の一環として、テープ材長手方向不均一通電特性の統計学的検討を実施した。まず、TapeStar™ によって得られた局所的臨界電流分布（電界基準： $1 \mu\text{Vm}^{-1}$ 程度；空間分解能：0.5 mm 程度）を加算し、かつ 4 端子法による通電特性（電界基準： $10 \sim 100 \mu\text{Vm}^{-1}$ 程度；空間分解能：300 mm～2400 mm 程度）と比較検討することによって、テープ材長手方向のバラつきが統計的不均一性（Gauss 分布）と偶発故障的不均一性に分類されることを示した。統計的不均一性の定量化は、今後のテープ材製造プロセス改善に際して、具体的応用研究に即した不均一性の指標になり得る可能性がある。一方、歩留まりに相当する偶発故障的不均一性は、予測困難であるが故に工業材料として優先的に排除されるべきものである。さらに、簡単なパンケーキコイルを設計するとともに、通電特性の統計的評価を通して、統計的不均一性が直流通電特性に与える影響を明らかにした。本稿で得られた知見を発展させることにより、例えば超電導マグネットや、超電導送電ケーブル、超電導回転機用巻線などの具体的アプリケーションについて、長手方向不均一性の許容値を検討する一助になると期待される。今後は、本論文の検討方法を局所損失評価技術³⁵⁾他と連携させることによって、長手方向不均一通電特性の具体的メカニズムを明らかにするとともに、材料開発へフィードバックできる情報を検討したい。

本研究の実施に際し、その一部を協力頂いた京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程（2011 年 3 月修了）・岡田奈々氏ならびに竹内活徳氏に感謝申し上げる。本研究の一部は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託のもと、国際超電導産業技術研究センターとの共同研究として実施されたものである。

参 考 文 献

- 1) M. Yagi, S. Mukoyama, N. Amemiya, A. Ishiyama, X. Wang, Y. Aoki, T. Saito, T. Ohkuma and O. Maruyama: "Progress of 275 kV-3 kA YBCO HTS cable," *Physica C* **471** (2011) 1274-1278
- 2) M. Ohya, H. Yumura, T. Masuda, N. Amemiya, A. Ishiyama and T. Ohkuma: "Design and evaluation of 66 kV-class HTS power cable using REBCO wires," *Physica C* **471** (2011) 1279-1282
- 3) K. Mizuno, M. Ogata and K. Nagashima: "Five tesla class YBCO magnet cooled by single stage cryocooler -Magnet fabrication and excitation test-," *Abstracts of CSSJ Conference* **86** (2012) 29
水野克俊, 小方正文, 長嶋 賢: 「5 T 発生可能な単段冷凍機冷却によるイットリウム系高温超電導磁石-磁石製作とその通電評価-」, 第 86 回 2012 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2012) 29
- 4) H. Miyazaki, S. Iwai, T. Tosaka, K. Tasaki and Y. Ishii: "Development of large scale racetrack coil wound with YBCO tapes," *Abstracts of CSSJ Conference* **86** (2012) 130
宮崎寛史, 岩井貞憲, 戸坂泰造, 田崎賢司, 石井祐介: 「イットリウム系大型レーストラックコイルの開発」, 第 86 回 2012 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2012) 130
- 5) Y. Iijima and K. Matsumoto: "High-temperature-superconductor coated conductors: technical progress in Japan," *Supercond. Sci. Technol.* **13** (2000) 68-81
- 6) M. Sugano, T. Nakamura, K. Shikimachi, N. Hirano, and S. Nagaya: "Stress tolerance and fracture mechanism of solder joint of YBCO coated conductor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** (2007) 3067-3070
- 7) N. Cheggour, J.W. Ekin, C.L.H. Thieme and Y.Y. Xie: "Effect of fatigue under transverse compressive stress on slit Y-Ba-Cu-O coated conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** (2007) 3063-3066
- 8) S. Nagaya, N. Hirano, T. Watanabe, S. Awaji and A. Ishiyama: "A new stress control structure for high strength pancake coil wound with ReBCO conductors -Proposal of new stress control structure-," *Abstracts of CSSJ Conference* **86** (2012) 24
長屋重夫, 平野直樹, 渡部智則, 淡路 智, 石山敦士: 「パンケーキコイル高強度化のための新コイル構造 (1) - 新コイル構造の提案 -」, 第 86 回 2012 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2012) 24
- 9) T. Manabe, T. Nakamura, K. Higashikawa, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya: "Study on heat loss characteristic of bundled MOCVD-YBCO coated conductors," *Abstracts of CSJ Conference* **77** (2007) 126
真鍋智之, 中村武恒, 東川甲平, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫: 「MOCVD-YBCO バンドル導体の熱損失特性に関する検討」, 第 77 回 2007 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2007) 126
- 10) Y. Nagasaki, T. Nakamura, I. Funaki, Y. Ashida and H. Yamakawa: "Thermal conduction characteristics of Bi- and Y-system tape conductors aiming at conduction-cooled magnet," *TEION KOGAKU* **47** (2012) 597-604 (in Japanese)
長崎 陽, 中村武恒, 船木一幸, 芦田康将, 山川 宏: 「伝導冷却マグネットを指向したビスマス系ならびにイットリウム系高温超電導テープ導体の伝熱特性」, *低温工学* **47** (2012) 597-604
- 11) M.N. Wilson: "Superconducting Magnets," Clarendon Press (1983)
- 12) Y. Iwasa: "Case Studies in Superconducting Magnets (second edition)," Springer (2009)
- 13) A. Ishiyama, M. Yanai, T. Morisaka, H. Ueda, Y. Shiohara, T. Izumi, Y. Iijima and T. Saitoh: "Normal transition and propagation characteristics of YBCO tape," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** (2005) 1659-1662
- 14) T. Kiss, T. Nakamura, M. Inoue, M. Takeo, F. Irie and K. Yamafuji: "Transport characteristics in high T_c superconductors," *Proceedings of MT15* **2** (1998) 1052-1055
- 15) T. Kiss, T. Nakamura, K. Hasegawa, M. Inoue, H. Okamoto, K. Funaki, M. Takeo, K. Yamafuji and F. Irie: "Nonlinear resistance in high T_c superconductors as a function of bias current density, temperature and magnetic field," *Proceedings of ICEC17* (1998) 427 - 430
- 16) T. Kiss, K. Hasegawa, M. Inoue, M. Takeo, H. Okamoto and F. Irie: "Critical current properties in high T_c superconductors," *TEION KOGAKU* **34** (1999) 322-331 (in Japanese)
木須隆暢, 長谷川和也, 井上昌睦, 竹尾正勝, 岡元 洋, 入江富士男: 「高温超伝導体の臨界電流特性」, *低温工学* **34** (1999) 322-331
- 17) 中村武恒: 「ビスマス系高温超伝導テープ材の評価技術と応用」, *機能材料* **24**(2)(2004) 40-49
- 18) K. Yamafuji and T. Kiss: "A new interpretation of the glass-liquid transition of pinned fluxoid in high T_c Superconductors," *Physica C* **258** (1996) 197-212
- 19) K. Higashikawa, T. Nakamura and T. Hoshino: "Anisotropic distributions of current density and electric field in Bi-2223/Ag coil with consideration of multifilamentary structure," *Physica C* **419** (2005) 129-140
- 20) K. Higashikawa, T. Nakamura, T. Hoshino and I. Muta: "Design of Bi-2223/Ag coil based on genetic algorithm and finite element method," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** (2005) 1895-1898
- 21) K. Higashikawa, T. Nakamura and H. Okamoto: "Optimal design of a Bi-2223/Ag coil for superconducting magnetic energy storage at different operating temperatures," *Superconductor Science and Technoogy* **18** (2005) 1445-1453
- 22) K. Higashikawa, T. Nakamura and H. Okamoto: "Analysis of discharging characteristics in a Bi-2223/Ag coil for SMES with consideration of cooling capacity of a cryocooler," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16** (2006) 578-581
- 23) K. Higashikawa, T. Nakamura, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, T. Kiss and M. Inoue: "Conceptual design of HTS coil for SMES using YBCO coated conductor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** (2007) 1990-1993
- 24) K. Higashikawa, T. Nakamura, M. Sugano, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya: "Performance improvement of YBCO coil for high-field HTS-SMES based on homogenized distribution of

- magnetically-mechanically influenced critical current,” IEEE Trans. Appl. Supercond. **18** (2008) 758-761
- 25) K. Higashikawa, T. Kiss, M. Inoue, K. Imamura, T. Nakamura, S. Awaji, K. Watanabe, H. Fukushima, Y. Yamada and Y. Shiohara: “Coupled analysis method for high-field magnet coil using coated conductor based on characteristics as a function of temperature, magnetic field vector and mechanical strain,” IEEE Trans. Appl. Supercond. **19** (2009) 1621-1625
- 26) T. Nakamura, H. Kanzaki, T. Tsuboi, K. Higashikawa, T. Hoshino and I. Muta: “Analysis of shielding property in Bi-2223/Ag multifilamentary tapes with multi-layer arrangement,” Journal of Materials Processing Technology **161**(1-2)(2005) 22-27
- 27) T. Nakamura, H. Kanzaki, K. Higashikawa, T. Hoshino and I. Muta: “Analysis of shielding layers in HTS cable taking account of spiral structure,” IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 1747-1750
- 28) T. Nakamura, K. Higashikawa, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya: “Influence of longitudinal inhomogeneity on current transport characteristics in Y-system HTS conductors for SMES,” The Papers of Technical Meeting on Applied Superconductivity, IEE Japan (2007) 13-17
中村武恒，東川甲平，式町浩二，平野直樹，長屋重夫：「SMES 用 Y 系高温超電導導体の長手方向バラつきが通電特性に与える影響」，電気学会超電導応用電力機器研究会資料 (2007) 13-17
- 29) S. Furtner, R. Nemetschek, R. Semerad, G. Sigl and W. Prusseit: “Reel-to-reel critical current measurements of coated conductors,” Superconductor Science and Technology **17** (2004) S281-284
- 30) K. Nakao, T. Machi, S. Miyata, T. Muroga, A. Ibi, T. Watanabe, M. Konishi, Y. Yamada, Y. Kitoh, H. Fujii, Y. Aoki, T. Izumi and Y. Shiohara: “Non-destructive characterization of long coated conductors using a Hall sensor array,” Physica C **445-448** (2006) 669-672
- 31) K. Yamafuji, T. Wakuda and T. Kiss: “Generalized critical state model in high-T_c superconductors,” Cryogenics **37** (1997) 421-430
- 32) Y. Mawatari, H. Yamasaki, S. Kosaka and M. Umeda: “Critical current properties and vortex-glass-liquid-transition in Ag-sheathed Bi-2223 tapes,” Cryogenics **35** (1995) 161-167
- 33) K. Higashikawa, T. Nakamura, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya: “Influence of longitudinal variation of critical current in MOCVD-YBCO conductor on current transport characteristics of SMES coil,” Abstracts of CSJ Conference **76** (2007) 184
東川甲平，中村武恒，式町浩二，平野直樹，長屋重夫：「MOCVD-YBCO 導体における長手方向の臨界電流のばらつきが SMES コイルの通電特性に及ぼす影響」，第 76 回 2007 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2007) 184
- 34) J.J. Cannon Jr., A.P. Malozemoff, R. Diehl, P. Antaya and A. Mori: “Effect of length scale on critical current measurement in high

temperature superconductor wires,” Preprint of Applied Superconductivity Conference 2013 (2012)

- 35) T. Kiss: “Spatially resolved measurements on local current flow and vortex dynamics in superconductors,” OYO BUTURI **79** (2010) 38-41 (in Japanese)
木須隆暢：「超伝導体中の電流分布・量子化磁束ダイナミクスの可視化技術」，応用物理 **79** (2010) 38-41

中 村 武 恒 1969 年生。1993 年九州大学工学部電子工学科卒業。1998 年同大学院システム情報科学研究科博士後期課程（電気電子システム工学専攻）修了。同年京都大学勤務。現在，同准教授。主として，先進電気機器，車載システム，分散電源，超電導回転機と同マグネット技術開発に従事。低温工学・超電導学会，電気学会，応用物理学会，未踏科学技術協会（超伝導科学技術研究会），The American Ceramic Society 会員。博士（工学）。

高 村 豊 1987 年生。2010 年京都大学工学部電気電子工学科卒業。2012 年同大学院工学研究科修士課程（電気工学専攻）修了。現在，(株)東芝勤務。在学中は，主として高温超電導線材における不均一通電特性の統計学的評価と同マグネット技術の研究に従事。

雨 宮 尚 之 1962 年生。1990 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年横浜国立大学勤務。2005 年同大学院工学研究院教授。2008 年京都大学大学院工学研究科教授。主として，超伝導体の電磁現象，超伝導マグネットの基盤技術の研究に従事。低温工学・超電導学会，電気学会，プラズマ・核融合学会，日本物理学会会員。Superconductor Science and Technology 誌 Asian Editor。工学博士。

中 尾 公 一 1951 年生。1979 年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。1979 年東京大学物性研究所磁気 I 部門助手。主としてパルス強磁場中の磁性体の研究に従事。1989 年超電導工学研究所第 3 研究室勤務。現在同研究所特別研究員。低温工学・超電導学会，日本物理学会会員。理学博士。

和 泉 輝 郎 1963 年生。1987 年東北大学工学部応用物理学科卒業。同年住友金属工業(株)入社。1989 年(財)国際超電導産業技術研究センター，超電導工学研究所に出向。1993 年住友金属工業(株)未来技術研究所にて単結晶シリコン引き上げプロセス開発に従事。1998 年超電導工学研究所第 4 研究部（現在線材研究開発部）勤務。現在，同研究所線材研究開発部長。主に Y 系超電導線材プロセス開発に従事。低温工学・超電導学会，日本金属学会，応用物理学会，The ASC, Inc. 理事。工学博士。