テーマ解説

無絶縁 REBCO パンケーキ・コイルにおける数値解析技術

—解析手法の比較および解析事例—

野口 聡^{*1,†}, 植田 浩史^{*2}, 石山 敦士^{*3}

Numerical Simulation Techniques for No-Insulation REBCO Pancake Coils — Comparison of Models and Simulation—

So NOGUCHI^{*1,†}, Hiroshi UEDA^{*2} and Atsushi ISHIYAMA^{*3}

Synopsis: A no-insulation (NI) winding technique was proposed by Hahn. This technique drastically improves the thermal stability of REBCO pancake coils. Using the technique, a 45.5-T DC field was achieved at the National High Magnetic Field Laboratory in August 2018. Now, Iwasa, of the Plasma Science and Fusion Center, Massachusetts Institute of Technology, is developing an insert NI REBCO magnet for the 1.3-GHz LTS/HTS NMR magnet. However, since the electromagnetic behavior in NI REBCO pancake coils is complicated, it is desirable to evaluate the magnet stability using simulation. Hence, a few simulation methods for NI REBCO pancake coils have been developed and reported, such as a lumped circuit model, a partial element equivalent circuit (PEEC) model, and a distributed network model. In this review paper, we discuss these simulation methods and describe the specifications for each of them. Finally, we compare the simulation results of each method. Accurate simulation of the lumped circuit model and radially-divided circuit model with a small number of elements was not possible because the magnet coupling between elements or coils was not correctly modeled. As a result, we had to use the PEEC model, distributed network model, or a radially-divided circuit model with many elements in order to accurately express the normal zone propagation.

Keywords: no-insulation winding technique, numerical simulation, REBCO pancake coil

(Some figures in this article may appear in color only in the electronic version.)

1. はじめに

Hahn 氏が No-Insulation (NI) Winding Technique を考案し¹⁾、高温超電導マグネットの熱的安定性を飛躍的に向上させた。特に、REBa₂Cu₃O_y (REBCO, RE = Rare Earth) パンケー

キ・コイルで、NI 技術の性能は最大に発揮できる。NI 技術を採用することで、2018 年には 45.5 T の発生 (31.1 T 中で NI REBCO パンケーキで 14.4 T の発生) に成功した²⁾。さらに、MIT では 1.3 GHz NMR マグネットのインサート・マグネット (18.79 T 発生) に、NI 技術が採用されている³⁾。高磁場発生用マグネットには、必要不可欠な技術の一つになってきている。

NI 技術の開発当初は、励磁遅れが大きな問題となり、現象を把握するための解析技術が開発されてきた。解析の初期は、周方向電流経路を表すインダクタンス成分と径方向電流経路を表す抵抗成分の並列回路が考案された³⁾。その後、より複雑な電磁場現象を解析するために、Partial Element Equivalent Circuit (PEEC) モデル⁴⁾ (もしくは Distributed Network Model⁵⁾) が考案された。PEEC モデルでは、一つのパンケーキ・コイル内をターン数分だけ径方向に分割するのに加えて、各ターン内にも周方向に分割することで、詳細な電流経路が表現でき、解析精度の向上が見られる。さらにその後、PEEC モデルでは、解析時間を要

Received January 9, 2019

^{*1} 北海道大学 大学院情報科学研究科
〒060-0814 北海道札幌市北区北 14 条西 9 丁目
Graduate School of Information Science and Technology,
Hokkaido University, Kita 14 Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido
060-0814, Japan

^{*2} 岡山大学 大学院自然科学研究科
〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1
Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama
University, 3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama 700-8530,
Japan

^{*3} 早稲田大学 理工学術院
〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1
Faculty of Science and Engineering, Waseda University,
3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

[†] E-mail: noguchi@ssi.ist.hokudai.ac.jp
DOI: 10.2221/jcsj.54.103

することから、一つのパンケーキ・コイルを径方向にだけ分割する解析手法も提案されてきた。

これらの電磁現象解析手法の開発とともに、熱、応力との連成解析手法も開発され、さらに詳細な NI REBCO パンケーキ・コイルの現象が解析できるようになってきている。

2. NI REBCO パンケーキ・コイル解析手法

2.1 集中型解析手法 (Lumped Circuit Model)

NI REBCO パンケーキ・コイルは、ターン間の絶縁がないため、周方向だけでなく、径方向にも電気経路を持つ。そこで、Fig. 1 に示すように、周方向と径方向電気経路の並列回路で NI REBCO パンケーキ・コイルの電流現象を表現している。Fig. 1 中で、 R_{ct} は径方向抵抗 (ターン間接触抵抗もしくは Characteristic Resistance)、 L はパンケーキ・コイルの自己インダクタンス、 R_{mt} は REBCO テープ線母材の周方向抵抗、 R_{sc} は REBCO の周方向抵抗を表す。そして、キルヒホッフの法則より、次の式を解くことで、周方向電流 I_θ と径方向電流 I_r を求めることができる。

$$L \frac{dI_\theta}{dt} + \frac{R_{sc}R_{mt}}{R_{sc}+R_{mt}} I_\theta = R_{ct} I_r \quad (1)$$

ただし、 $I_\theta + I_r (= I_{op})$ が電源電流となる。ここで、径方向抵抗は実験から求めるしかない。径方向抵抗を求める実験方法は、遮断テスト⁶⁾と交流電流法⁷⁾が提案されている。そして、自己インダクタンス L は、長岡係数を使用する式⁸⁾、有限要素法もしくは数値積分から求められる。

集中型解析法と連成する熱解析では、パンケーキ・コイル内の熱分布は計算できない。そこで、連成する熱方程式は、一般に以下の式となる。

Fig. 1 Lumped Circuit Model.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} V = Q - Q_{cool} \quad (2)$$

ここで、 ρ は比重、 c は熱容量、 T は温度、 t は時間、 V はコイル巻線体積、 Q は発熱量、 Q_{cool} は冷却量を表す。そして、発熱量 Q は以下の式で与えられる。

$$Q = \frac{R_{sc}+R_{mt}}{R_{sc}R_{mt}} I_\theta^2 + R_{ct} I_r^2 \quad (3)$$

続いて、応力解析は以下の式で、与えられる。

$$r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \sigma_r - \sigma_\theta + r J_\theta B_z(r) = 0 \quad (4)$$

ここで、 r は半径、 σ_r 、 σ_θ はそれぞれ径方向、周方向応力、 J_θ は周方向電流密度、 $B_z(r)$ は軸方向磁束密度を表す。求めた応力から、以下のように添字方向の歪み ε_r 、 ε_θ 、 ε_z が求まる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\sigma_r}{E_r} - \nu_{\theta r} \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \nu_{zr} \frac{\sigma_z}{E_z} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \nu_{r\theta} \frac{\sigma_r}{E_r} - \nu_{z\theta} \frac{\sigma_z}{E_z} \\ \varepsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E_z} - \nu_{rz} \frac{\sigma_r}{E_r} - \nu_{\theta z} \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 E_r 、 E_θ 、 E_z は添字方向のヤング率、 $\nu_{12} \equiv -\nu_1/\nu_2$ はポアソン比である。

集中型解析法では、パンケーキ・コイル内の電流分布や温度分布を求めることはできないが、未知数も少なく、積層された複数パンケーキ・コイルもしくは入れ子構造をしたパンケーキ・コイルの解析に向いている。

2.2 詳細解析手法 (Distributed Network Model もしくは Partial Element Equivalent Model)

Fig. 2 に示すように、パンケーキ・コイルを REBCO テープに沿って、周方向に分割する手法が、Distributed Network Model⁹⁾として提案されている (同様の考え方で Partial Element Equivalent Circuit (PEEC) Model⁴⁾とも呼ばれている。両者は同一手法である)。これまでに、提案さ

Fig. 2 Partial Element Equivalent Circuit Model.

れてきた手法との違いは、各要素および要素間のインダクタンスの算出方法である。自己および相互インダクタンスは、有限要素法もしくは数値積分によって求めることが可能である。Fig. 2 の回路方程式は、以下になる。

$$I_{L,i} - I_{L,i-1} + I_{ct,i} - I_{ct,i-d} = 0$$

$$(I_0 = I_{m-1} = I_{op}) \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{i-d-1} \left(\sum_{k=1}^n L_{j,k} \frac{dI_{L,k}}{dt} + \frac{R_{sc,j} R_{mt,j}}{R_{sc,j} + R_{mt,j}} \right) = I_{ct,i} R_{ct,i} \quad (7)$$

ここで、 i は要素番号、 d は周方向分割数、 n は要素の総数であり、接触抵抗 $R_{ct,i}$ は以下の式で表される。

$$R_{ct,i} = \frac{R_{ct}^{exp}}{d(N-1)} = d \frac{\rho_{ct}}{2\pi r_i w} \quad (8)$$

ここで、 R_{ct}^{exp} は接触抵抗の測定値、 N はターン数、 ρ_{ct} は接触抵抗率、 r_i は i ターン目の半径、 w は REBCO テープ幅を表す。

詳細解析手法と熱解析手法を連成させるためには、2次元場を考慮する必要があり、熱解析の支配方程式は以下になる。

$$wpc \iint \frac{\partial T}{\partial t} r dr d\theta = w \iint \left(\lambda_r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \lambda_\theta \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) r dr d\theta + Q - Q_{cool} \quad (9)$$

ここで、 λ_r と λ_θ は径方向と周方向の熱伝導率を表す。有限要素法などにより、求める必要がある。

応力、および歪みに関しては、式(4)および(5)から導出できる。

2.3 径方向分割型解析手法

詳細解析手法は、優れた電磁解析手法であるが、膨大な解析時間を要する。特に、積層されたパンケーキ・コイルを解析するためには、インダクタンス計算を含めて甚大な計算時間を要する。一方で、集中型解析手法は容易かつ短時間に NI REBCO マグネットを解析できるが、パンケーキ・コイル内の現象まで表現できないため、局所常電導転移を表現できない。そこで、近年、提案されたのが径方向分割型解析手法である。径方向分割型解析手法では、パンケーキ・コイルを周方向には分割せず、径方向にだけ分割する手法である。Fig. 3 に等価回路図を示す。一つの要素で、1 から数十ターンを表現することになる。

Fig. 3 の回路方程式は以下の通りである。

$$\sum_{j=1}^m L_{i,j} \frac{dI_{\theta}}{dt} + \frac{R_{sc,i} R_{mt,i}}{R_{sc,i} + R_{mt,i}} I_{\theta,i} = R_{ct,i} (I_{op} - I_{\theta,i}) \quad (10)$$

ここで、 m はパンケーキ・コイルの分割数であり、ターン間接触抵抗 $R_{ct,i}$ は以下の式で表される。

Fig. 3 Radially Subdivide Electrical Circuit Model.

$$R_{ct,i} = \left(\frac{N}{m} - \beta_i \right) \frac{R_{ct}^{exp}}{N-1} = \sum_{j=1}^{i+N/m} \gamma_j \frac{\rho_{ct}}{2\pi r_j w} \quad (11)$$

ここで、 β_i と γ_j の係数は以下の通りである。

$$\beta_i = \begin{cases} 0.5 & i = 1 \text{ or } m \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$\gamma_j = \begin{cases} 0.5 & j = 1 \text{ or } m \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

径方向分割型解析手法では、周方向の分割がないので、熱伝導方程式は、1次元となり、次のように表現できる。

$$2\pi wpc \int \frac{\partial T}{\partial t} r dr = 2\pi w \lambda_r \int \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} r dr + Q - Q_{cool} \quad (14)$$

上記式を有限要素法などで解くことにより、コイル内の温度分布が得られる。

さらに、式(4)および(5)から応力および歪みも導出できる。

2.4 各解析手法の比較

集中型解析手法、詳細解析手法、径方向分割型解析手法の特徴について比較する。

- 解析精度は、詳細解析手法が最も高く、集中型解析手法が最も低い。そして、計算時間も詳細解析手法が最も長く、集中型解析手法が最も短い。
- 各手法でコイルもしくは要素の自己および相互インダクタンスを計算する必要があるが、詳細解析手法のインダクタンス計算は大変に難度が高い。
- 集中型解析手法では、局所常電導転移が表現できない。径方向分割型解析手法でも、詳細な局所常電導転移は表現できないが、要素（数ターン）単位での常電導転移は表現できる。詳細解析手法では、詳細な常電導転移や常電導伝播が表現可能である。
- REBCO パンケーキ・コイルでは、遮蔽電流磁場が問題になることが多い。遮蔽電流磁場解析は、有限要素法などの比較的計算負荷の高い手法が必要であるが、最近、等価回路を用いた簡易計算手法が提案された^{6,7)}。この簡易遮蔽電磁場計算手法は、

Table 1 Comparison between models.

	Lumped circuit model	Radially-divided model	PEEC model
Accuracy	×	○	◎
Comutation time	◎	○	×
Used memory	◎	○	×
Inductance computation	◎	△	×
Local normal transition	×	○	◎
SC computation	○	○	×
Thermal coupling	△	○	○
Stress compling	○	○	○

集中型解析手法および径方向分割型解析手法に適用できる。すなわち、両手法では遮蔽電流磁場の計算が可能である。

- 集中型解析手法では、コイル内の熱伝導は計算できない。径方向分割型解析手法では、周方向の熱伝導は表現できないが、詳細解析手法では周方向、径方向の熱伝導解析が可能である。
- 応力および歪み解析には、共通して式(4)および(5)を使用しているので、差異はない。

ここで、これらの違いを **Table 1** にまとめる。Table 1 から、径方向分割解析手法がバランスのとれた手法であることが分かる。

3. NI REBCO パンケーキ・コイル解析事例（その 1）

Fig. 4 および **Table 2** に示すような 12 個のシングル・パンケーキからなる無絶縁 REBCO パンケーキ・コイルの解析を、集中型解析手法、径方向分割型解析手法（10 分割と 20 分割）、詳細解析手法で実施し、比較してみた。なお、それぞれの解析手法におけるシングル・パンケーキ 1 個あたりの要素分割数を **Table 3** に示す。

なお、このマグネットはインサート・マグネットを想定しており、20 T の磁場中で 200 A で励磁中に、一番下のシングル・パンケーキが突然常電導転移した場合を想定したシミュレーションを実施している。また、4.2 K でマグネットでの運転を想定し、断熱条件とした。

3.1 周方向電流の比較

Fig. 5 に 4 種類の解析手法による解析結果（各パンケーキ・コイルの周方向電流）を示す。図から明らかなように、集中型と径方向分割-10 の解析結果が類似しており、径方向分割-20 と詳細解析手法の結果が類似しており、それらに違いが見受けられる。これは、局所常電導転移に伴い、その部分で電流減衰が起こり、他の部分に誘導電流が発生する。この誘導電流が、 r 方向に隣接した要素に主に発生するか、 z 方向に隣接した要素に主に発生するかにより、現象が異なると考えられる。

Fig. 4 Insert NI REBCO magnet.**Table 2** Specifications of the magnet.

REBCO tape width	4.0 mm
REBCO tape thickness	0.1 mm
REBCO layer thickness	1.0 μ m
Cu matrix thickness	20 μ m (both sides)
Critical current (77 K, s.f.)	115 A
Number of single pancakes	12
Coil i.d.; o.d.	60; 100 mm
Pancake coil height	4.0 mm
No. of turns of pancake	200
Contact resistivity	70 $\mu\Omega$ cm ²
Operating current	200 A
Magnet constant	30.4 mT/A
Operating temperature	4.2 K
External field	20 T

Table 3 Division of elements.

	Radial div.	Azimuthal div.
Lumped	1	—
Radial div-10	10	—
Radial div-20	20	—
PEEC	200	4

Fig. 5 Time transition of azimuthal current (a) lumped, (b) radial div-10, (c) radial div-20, and (d) PEEC.

Fig. 6 に径方向分割の異なるマグネットの誘導電流の発生様子を図示した。もし径方向分割が荒く、径方向隣接要素より軸方向隣接要素に近い場合 ($\Delta r > \Delta z$)、軸方向隣接要素の方が相互インダクタンスが大きいので、軸方向隣接要素に大きく誘導電流が発生する。一方、径方向分割が細

Fig. 6 Behavior of current induction.

かく、軸方向隣接要素より径方向隣接要素に近い場合 ($\Delta z > \Delta r$)、径方向隣接要素との相互インダクタンスが大きくなるため、大きな電流が径方向隣接要素に誘導される。

本来、REBCO テープ線の幅は数ミリ程度であり、厚みは 0.1 mm 程度である。したがって、明らかに径方向に誘導電流が伝播していく方が正しいと考えられる。そこで、径方向分割解析手法を用いる場合には、 $\Delta z > \Delta r$ となることに注意を払う必要がある。そして、集中型解析手法では、このような表現力がないことから、解析精度は悪くなると言わざるを得ない。

4. NI REBCO パンケーキ・コイル解析事例（その 2）

第 3 章では、常電導転移の r 方向と z 方向の伝播について紹介した。本章では、運転温度の違いによる z 方向（パンケーキ・コイル間）の常電導伝播⁸⁾について紹介する。

Table 4 に 6 つのダブル・パンケーキ・コイル（6DP）が積層されているマグネットの諸元および REBCO 線材情報を記載する。また、マグネットの外観図を **Fig. 7** に示す。**Table 5** には、シミュレーション条件を示す。なお、シミュレーションには、詳細解析手法を使用している。

この解析事例では、6 つあるダブル・パンケーキ・コイルの 1 番下の方 1 つのシングル・パンケーキ・コイルが常電導転移した時に、どのように常電導部が伝播していくかを、運転温度ごとに調査している。

Fig. 8 に運転温度 10 K の時で、常電導転移後 3 秒時の周方向電流と温度分布図を示す。

続いて、**Fig. 9** に初期温度 10 K の時の各シングル・パンケーキの平均周方向電流と温度の時間推移を示す。これら

Table 4 Specifications of 6-DP coil and REBCO tape.

Parameters	Values
REBCO tape	
REBCO tape width [mm]	4.0
REBCO tape thickness [mm]	0.096
Copper stabilizer thickness [μm]	20.0
REBCO layer thickness [μm]	1.0
I_c @ 77 K, self-field [A]	115.0
Single pancake coil	
Coil i.d, o.d [mm]	60.0, 79.2
Flange (insulator) width [mm]	1.0
Number of turns (each pancake)	100
Contact resistivity [$\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$]	70.0
Magnet	
Number of double pancakes	6
Coil height [mm]	59.0
Inductance [mH]	66.1

Table 5 Simulation conditions.

Parameters	Values
Time step [s]	0.1
Simulation time [s]	50.0
Load factor [%]	100
Operating temperature [K]	4.2, 10, 15, 20, 25, 30, 40

Fig. 7 Six DP coils.

の図より、常電導部はパンケーキ間を数秒の間に伝播していることが分かる。そして、**Fig. 10** に初期温度 20 K の時の各シングル・パンケーキの平均周方向電流と温度の時間推移も同様に示す。初期温度が 20 K の時は、運転電流を低く設定しているため（各温度で I_c 通電している）、発熱量が低く、常電導部が隣数個のパンケーキまでしか伝播していない。

Fig. 11 に初期運転温度ごとの最高到達温度を示す。図から明らかなように、初期運転温度が低いほど、到達温度が高く、20 K 以降はさほどの温度上昇は見受けられない。し

(a) Azimuthal current distribution **(b)** Temperature distribution**Fig. 8** (a) Azimuthal current distribution and (b) temperature distribution at 3 s after the bottom coil quenched, at 10 K.

かし、いずれの温度もコイル損傷が起きるような値ではなく、無絶縁巻線技術を施された REBCO パンケーキ・コイルが熱的に非常に安定であることをうかがわせる。

一方で近年、機械的破損（臨界電流値悪化）が注目を浴びている。**Fig. 9** から分かるように、パンケーキ・コイル間常電導伝播が速いぶん、誘導される電流も大きくなっている。誘導電流があるために、磁場減衰も遅く、結果的に大きなフープ力（BJR 力）が働くことになり、機械的損傷へとつながっていると考えられる。したがって、4.2 K などの極低温下でも、クエンチ保護の観点から、運転電流を大きくとることは難しいと思われる。

5. まとめ

本解説では、無絶縁 REBCO パンケーキ・コイルの解析手法として 3 種類（集中型解析手法、径方向分割型解析手法、詳細解析手法）を紹介した。さらに、それらの手法と連成する際の熱解析手法および応力（歪み）解析手法も併せて紹介した。それらの手法を比較した結果、径方向分割型解析手法が、パフォーマンスと精度のバランスが取れている手法であり、かつ遮蔽電流も計算可能で効果的であると思われる。ただし、解析結果の比較検討から、径方向分

(a)

(b)

Fig. 9 Time transition of (a) azimuthal current and (b) temperature at 10 K.

割数が解析精度に大きく影響することが明白になった。詳細解析手法ほどの要素分割は不要であるが、隣接パンケーキ・コイルまでの距離よりも小さな要素分割が必要である。

さらに、シミュレーション結果から、大電流通電時（低初期温度時）には、パンケーキ・コイル間の常電導伝播が速く、誘導電流が大きくなることが分かる。近年、実験で臨界電流値低下や REBCO 層の基板層からの剥離など、機械的劣化が報告されており、この誘導電流が原因と思われる。今後は、シミュレーションを通して、大電流通電時のコイル保護法を検討していく必要がある。

6. 付録

6.1 インダクタンス算出

インダクタンスの算出には、有限要素法などを使用する方法があるが、ここでは数値積分による算出法を紹介する。

まず、自己インダクタンス L は以下の式から求められる。

(a)

(b)

Fig. 10 Time transition of (a) azimuthal current and (b) temperature at 20 K.

Fig. 11 Temperature rise at different initial temperatures.

$$L = \frac{1}{I^2} \int \mathbf{A}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{J}(\mathbf{x}) d\mathbf{v} \quad (15)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} d\mathbf{v}' \quad (16)$$

ここで、 I は運転電流、 $\mathbf{J}$ は電流密度、 μ_0 は真空の透磁率、 $\mathbf{x}$ および $\mathbf{x}'$ はそれぞれコイル体積 $\mathbf{v}$ および $\mathbf{v}'$ 内の位置ベクトルを表す。式(15)と式(16)の二重積分を数値積分により求め

る必要があるが、それぞれ積分点数を変えることで、ゼロ割を防ぐ必要がある。

続いて、相互インダクタンス M_{12} は以下のように求めることができる。

$$M_{12} = \frac{E_m - \frac{1}{2}L_1I_1^2 - \frac{1}{2}L_2I_2^2}{I_1I_2} \quad (17)$$

$$E_m = \frac{1}{2} \int \mathbf{A}(\mathbf{x}_1) \cdot \mathbf{J}(\mathbf{x}_1) d\mathbf{v}_1 + \frac{1}{2} \int \mathbf{A}(\mathbf{x}_2) \cdot \mathbf{J}(\mathbf{x}_2) d\mathbf{v}_2 \quad (18)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{x}'_i)}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}'_i|} d\mathbf{v}'_i + \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{x}'_j)}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}'_j|} d\mathbf{v}'_j \right\} \quad (19)$$

ただし、 $(i, j) = (1, 2)$ もしくは $(2, 1)$ である。

6.2 遮蔽電流および遮蔽電流磁場の算出

これまでに、有限要素法などによる遮蔽電流および遮蔽電流磁場が提案されてきたが、文献⁶⁾で、集中型解析手法および、径方向分割型解析手法で遮蔽電流および遮蔽電流磁場を算出する手法が提案されている。また、その手法は、<https://hbd.ist.hokudai.ac.jp/scifweb/>で使用することが可能である⁷⁾。

参 考 文 献

- 1) S. Hahn, D.K. Park, J. Bascuñán and Y. Iwasa: "HTS pancake coils without turn-to-turn insulation," IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 1592-1595
- 2) S. Hahn, et al.: "World record DC magnetic field using an REBa₂Cu₃O_x (RE = Y, Gd) superconducting magnet," presented at Coated Conductors for Applications Workshop 2018
- 3) Y. Iwasa, J. Bascuñán, S. Hahn, J. Voccio, Y. Kim, T. Lècrevisse, J. Song and K. Kajikawa: "A high-resolution 1.3-GHz/54-mm LTS/HTS NMR magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015) 4301205
- 4) T. Wang, S. Noguchi, X. Wang, I. Arakawa, K. Minami, K. Monma, A. Ishiyama, S. Hahn and Y. Iwasa: "Analyses of transient behaviors of no-insulation REBCO pancake coils during sudden discharging and overcurrent," IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015), 4603409
- 5) W.D. Markiewicz, J.J. Jaroszynski, D.V. Abraimov, R.E. Joyner, and A. Khan: "Quench analysis of pancake wound REBCO coils with low resistance between turns," Supercond. Sci. Technol. **29** (2015) 025001
- 6) S. Noguchi, S. Hahn and Y. Iwasa: "A facile simulation method of screening current-induced field in REBCO pancake coil -an equivalent electrical circuit model-, " Abstracts of CSSJ Conference **95** (2017) 20

野口 聡, HAHN Seungyong, 岩佐幸和:「REBCO パンケーキコイルの遮蔽電流磁場簡易計算法 -等価回路計算法-,」第 95 回 2017 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2017) 20

- 7) S. Noguchi, T. Imai, D.K. Park, S. Hahn and Y. Iwasa: "Web page for simulation of screening current-induced field for REBCO pancake coils," Abstracts of CSSJ Conference **97** (2018) 94

野口 聡, 今井 適, PARK Dongkeun, HAHN Seungyong, 岩佐幸和:「REBCO パンケーキコイルの遮蔽電流磁場計算ウェブサイト,」第 97 回 2018 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2018) 94

- 8) R. Miyao, H. Igarashi, A. Ishiyama, and S. Noguchi: "Thermal and electromagnetic simulation of multi-Stacked no-insulation REBCO pancake coils on normal-state transition by PEEC method," IEEE Trans. Appl. Supercond. **28** (2018) 4601405

野 口 聡

1994 年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。1999 年同大学院理工学研究科博士前期課程（電気工学専攻）修了。1999 年広島大学工学助手。2004 年より北海道大学大学院情報科学研究科准教授。主に超電導シミュレーションに従事。低温工学・超電導学会、電気学会、IEEE、ICS 会員。博士（工学）。

植 田 浩 史 2004 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。2003 年 4 月同大学理工学部助手、2006 年 4 月同大学理工学術院総合研究所客員講師（専任扱）、2010 年 4 月（財）国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所主任研究員、2010 年 10 月大阪大学核物理研究センター特任助教、2016 年 3 月岡山大学大学院准教授、現在に至る。主として超電導応用機器および電磁界数値解析に関する研究に従事。低温工学・超電導学会、日本加速器学会、電気学会会員、IEEE 会員。博士（工学）。

石 山 敦 士 1983 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。1979 年 4 月同大学理工学部助手、1991 年 4 月同教授、現在に至る。主として超電導応用機器、電磁界数値解析法および生体磁気に関する研究に従事。低温工学・超電導学会、電気学会会員。工学博士。