新補強法による10T級QMG[®](酸化物超電導バルク) マグネットの開発

Development of New Reinforcement Method and 10T Magnetization of QMG Magnet

森田 充* Mitsuru MORITA 手 嶋 英 一 Hidekazu TESHIMA 成木 紳 也 Shinya NARIKI

抄 録

新日鐵住金(株)が独自に開発したバルク超電導材料(QMG)を用いたリング状バルクマグネット応用に 関して、新しく開発した補強技術を用いて10T級の高磁場着磁に成功した。RE(希土類元素)系の酸化 物超電導物質を主成分とするQMGは、RE置換効果を用いた単結晶製造技術により、現在、大型の高特 性材料の製造が可能になっている。これにより、10T級の強磁場を発生するための十分なサイズおよび 高い臨界電流密度特性が得られるようになったが、素材の機械的強度は十分ではなく、強磁場を着磁し た時に発生する電磁気力で、材料が割れるという問題があったが、新しい補強方法を開発し、この割れを 防止することで安定に10T超級の磁場発生が可能となった。

Abstract

Recent progress in the application of the oxide bulk superconductor (QMG) has been reported. QMG is the high-T_c bulk superconductor originally developed by Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation. Regarding the ring-shaped QMG bulk magnet, we described the generation of a 10 T class high magnetic field which was made possible by developing new reinforcement technology. QMG consisting of a RE (rare earth element) -based oxide superconducting material as the main component is now enables the production of large high-performance materials by single crystallization techniques using the RE substitution effect. As a result, although it had potentially high superconducting properties of a bulk magnet functioning as a 10 T class powerful magnet, the material may become cracked due to the electromagnetic force generated when magnetized. By developing a new reinforcing method, we succeeded in preventing this cracking and generated a high magnetic field of more than 10 T.

1. 緒 言

現在の超電導関連技術市場の約8割は,MRI(磁気共鳴 画像診断装置)およびNMR(核磁気共鳴分光)であり,こ れらに用いられる超電導マグネットによる数Tの強磁場応 用である¹⁾。1908年にヘリウムの液化に成功し,この極低 温(4.2K)の液体ヘリウムを冷媒として用い,1911年に初 めて,超電導現象を発見したカマリン・オンネスも電気抵 抗が完全にゼロになる超電導の応用として,超電導材料の 線材化とマグネット応用に取り組んだとのことである²⁾。 現在では,超電導マグネットを応用したMRIは医療分野 において不可欠な診断装置として,また,NMRも創薬, 分析等の幅広い分野で不可欠な解析装置となっており,こ のような意味で超電導マグネットは身近な技術として社会 へ浸透している。超電導の発見以来,応用開発が進む一方, より高温で超電導になる物質探索も粘り強く進められ, 1986年のベドノルツとミュラーらの酸化物超電導物質の発 見を切っ掛けに,液体窒素(77K)で超電導を示す高温超電 導物質がその後2~3年の間に次々に発見された³⁻³。

これらの発見を期に,新日鐵住金(株)でも,酸化物超電 導材料の研究開発を開始し,この時,より高い臨界温度の 物質探索だけではなく,超電導材料の応用上最も重要なパ ラメーターの一つである臨界電流密度(J_c:超電導状態を 保ったままで通電できる電流の最大値)特性に注目し,材 料開発を行った。その結果,J_c特性に優れた単結晶状の超 電導材料(QMG)の開発に初めて成功した^{6,7}。この材料は, 約 90Kの臨界温度(超電導状態になる温度(T_c))特性を 有し,Yなどの希土類元素(RE),バリウム(Ba),銅(Cu)

^{*} 先端技術研究所 新材料·界面研究部 主幹研究員 工博 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

から成る複合酸化物であり, REBa₂Cu₃O_{7-x} で表される超電 導物質を主成分としている。

QMG の微細組織の特徴は、図1に示すように、単結晶 状の REBa₂Cu₃O_{7-x}(123) 相中に 1µm 程度の RE₂BaCuO₅(211) で表される絶縁体粒子が分散している点にある。また、材 料全体は、図2に示すように、種結晶から成長した 123 相 が全体に成長した単結晶体である。結晶成長したままの QMG 表面には、通常、c軸と法線とが同一方向になるよう に種結晶を接触させ成長させるため、種結晶からのびる 4 回対称の晶癖線が見られる。

このように QMG は,超電導電流の流れを妨げる結晶粒 界がない単結晶材料というマクロ組織の特徴と,磁束ピン ニング機能を担う 211 粒子の微細分散というミクロ組織の 特徴を有する。"QMG"という名称は、ミクロ組織が Quench and Melt Growth 法と呼ばれる製造方法により初め て製造されたことに由来している^{7,8)}。また,RE 組成を置 換し,より高温分解しない種結晶を用いる改良型 QMG 法 により,材料全体を単結晶化可能としたことで,基本的な 製造方法が確立した⁹⁻¹¹⁾。

これらの材料組織の特徴から QMG は,高い J_c特性を有 しており,現在,種々の応用開発が行われている。既に実 用化されている電流リード¹²⁾,実証試験段階にある電力貯 蔵用フライホイール用の磁気軸受部材¹³⁾の他,QMG内に 永久電流を流し,磁束を捕捉させることにより永久磁石的 に機能させるバルクマグネット応用¹⁴⁾が進展している。 バルクマグネット応用は、当初、液体窒素温度で進展し てきたが、最近では冷凍機技術の発展によって、小型の冷 凍機で 50K 以下の低温に冷却し、数 T から 10T 超の強磁 場を着磁させることでコンパクトな強磁場マグネット(永 久磁石)化が可能になっている¹⁵⁻¹⁷⁾。着磁の原理を図3に 示す。常伝導状態で磁場中に QMG を配置した後、超電導 状態に冷却する。その後、外部磁場を減磁、消磁すること によって、QMG 中に電磁誘導により超電導電流を誘起さ せる。QMG は、この永久電流により永久磁石化する。 QMG は十分に高い J。特性を有するため 10T 超の強磁場を 発生可能である。しかしながら、磁石材料としての材料強 度は、十分ではなく、着磁された QMG バルクマグネット に働く大きな電磁気力により材料が破壊するという問題が あった。

強磁場着磁による材料の割れに関しては、40K での超電導 マグネットの強磁場による着磁実験で初めて報告された¹⁸⁾。 その後、加工技術の進展により外周を精密に加工し、室温 で金属リングを接着し嵌め込むことで、冷却時の冷やし嵌 め効果によって電磁気力を抑え込み割れを防止する方法が 取られてきた¹⁹⁾。試料の大きさにもよるが、外径 60mm 級 の材料では、この補強法により 5T レベルの着磁が可能に なった。しかしながら、卓上NMR応用²⁰⁾や MDDS (Magnetic Drug Delivery System) 応用²¹⁾ などの特にリング形状の

図2 結晶成長後のQMG

Appearance of QMG

Seed



図1 QMGの微細組織 Microstructure of QMG



図3 QMG バルクマグネットの着磁工程 Magnetization procedure of QMG bulk magnet

QMGを用いる応用開発が進展し、さらなる強磁場化が求められてきており、新たな補強技術の開発が必要になってきた。一方、これまで、材料の割れに至るまでのメカニズムに関しては、ほとんど報告例はなく、また、割れの基となる材料のひずみ挙動に関しても知られていなかった²²⁾。

本稿では、特に最近応用開発が加速している外径約60 mmのリング形状のQMGの割れを抑制するための補強技 術の開発進捗に関して述べる。まず、着磁過程における捕 提磁東密度とひずみ挙動に関して調べた結果を述べ、次に 得られた知見に基づいて得られた補強方法のアイディアを 説明した上で、実際に試作、評価した結果について述べる。

2. 本 論

2.1 着磁過程における捕捉磁束密度とひずみ挙動^{23,24)} 図4に着磁過程の温度,外部印加磁場の時間変化を示す。 また,磁化過程におけるリング断面中に誘起される超電導 の分布を図5に示す。緑の部分が誘起された電流を示すが, 比較的高温(すなわち低いJ_e)で,かつ,十分な印加磁場 中で着磁を行った場合,④のように断面全体に超電導電流 が流れるフル着磁状態となる。逆に,比較的低温(すなわ ち高J_e)で着磁した場合,フル着磁状態とはならず②また は③のような超電導電流が流れていない領域を残したまま







図 5 着磁過程における超電導電流分布の変化 Distribution change of superconducting current in the cross section of QMG ring during the magnetization

着磁が完了する状況になる。

QMG に作用する応力 (F) は, 周方向と径方向に分けら れ,割れを引き起こす応力は,周方向の応力 (Hoop stress) である。この応力は,図6 に示すように考え方として概ね 誘起される超電導電流 (I) と磁場 (B) の積に比例し,磁場 (B) は,外部印加磁場 (B_e) と誘起された超電導電流による 捕捉磁場 (B_e) の和としてよいと思われる。

また,図6に示すように従来は金属リングを嵌めこみ冷 却することで,冷やし嵌め効果による圧縮力を加えること でひずみを低減し割れを防止していた。

次に着磁過程における捕捉磁束密度とQMGのひずみの 変化に関する実験結果の例を述べる。図7に実験に用いた 外径60mm,内径28mm,厚さ20mmのQMGに肉厚10mm のステンレス鋼リングを嵌め込んだ試料を示す。試料表面 内周付近および外周付近に周方向のひずみ変化が測定でき るようにひずみゲージを貼り付けた。また、リング中心部 にホール素子を配置し捕捉磁束密度の変化を記録した。4.5 Tの外部磁場中で70Kに冷却し外部磁場をゼロにする着 磁過程での捕捉磁束密度とひずみの変化量を図8に示す。 この時,x軸に外部磁場を取っているため、着磁のスター ト地点は4.5Tであり、着磁過程は、減磁過程であり外部 磁場を減らす原点に向かって進行する。ひずみ量変化は、 着磁直前のひずみ量を基準に伸びを正とし、捕捉磁束密度



図6 着磁されたバルクマグネットに作用する応力と外周リ ング補強

Hoop stress of magnetized bulk magnet and reinforcement of outer metal ring



図7 試料と各センサーの配置

Reinforced sample with a metal ring and placement of sensors



図 8 着磁過程におけるひずみ量変化および捕捉磁束密度 Change of strain and trapped field in the magnetization process

は, 試料中心のホールセンサーの示す値から外部印加磁場 を差し引いた値を示す。

初期の着磁過程 (① → ②) では、高い印加磁場中で減磁 量に比例して超電導電流が誘起されるため、ひずみ変化量、 捕捉磁束密度は、ほぼ比例して上昇する。一方、着磁過程 終盤(④) では、着磁条件がフル着磁条件となっているた め、誘起された超電導電流はほぼ一定となる。そのため、 捕捉磁束密度はほぼ一定となっており、また、ひずみ変化 量は、外部磁場の減少に伴い直線的に減少するが、捕捉し た自己磁場(B_t) があるためその分のひずみ変化量が最終 的に残る。これらのことから、着磁過程において、ひずみ 変化量にピークを有する場合があり、特に試料がリング形 状の場合、円柱試料に比べてフル着磁になりやすく、ピー クを持つことが多く発生することが分かる。また、この結 果から、ひずみ変化量は、従来の外周金属リング補強では、 内周付近のひずみ変化量が、外周付近のそれと比較して、 大きいことが分かる。

次に実際に割れが発生しなかった着磁条件と割れが発生 した着磁条件でのひずみ量変化の比較として図9(a)およ び(b)を示す。また、これらの着磁実験に用いた試料およ びひずみゲージの貼り付け位置を図9(c)に示す。割れが 発生しなかった 60K, 9T 着磁の場合,試料の上表面内周 付近および内周面のひずみゲージは、上表面外周付近に比 べ大きなひずみ変化量を示す。また、上表面内周付近のひ ずみは、内周面に比べ早くひずみ変化量が増加するが、ピー クに達し、減少に転ずるのも早く、着磁の終盤では、内周 面の方がより高い値に達することが分かる。

次に 55K, 10T 着磁の場合, 55K, 9T 着磁の場合と比べ, 外部磁場が大きい分, ひずみ量の増加が急峻になっており, 上表面内周付近のひずみ量が約 800με に達したところで割 れが発生しひずみの急激な減少が見られた。これらのこと から, リング状 QMG バルクマグネットの着磁過程におい て内周付近が割れの起点となり割れが発生すること,およ



図 9 (a) 割れが発生しなかった着磁条件でのひずみ量変化 Change of stress in the condition without cracking



図 9 (b) 割れが発生した着磁条件でのひずみ量変化 Change of stress in the condition with cracking



Sample and placement of sensors

び,図9(c)の様な外周金属リング補強では内周付近のひ ずみ量が800 µc 付近から割れが発生しやすくなることが分 かった。

2.2 新規補強方法の着想

これらの実験結果から,着磁過程において QMG は,電 磁気力により弾性体として変形し,ある値以上にひずみ量 が増加した場合,割れに至る機構が考えられた。この機構 では、大きな応力が作用する内側を補強するには外周から の圧縮応力のみでは不十分であると考えた。また、リング 形状の場合、ひずみが最大となる場所は、内周近傍であり 特にこの付近を補強することが有効と考えられた。そこで、 高強度金属板との多重積層することで複合材料化し素材の 高強度化をはかるとともに、内周金属リングによる内周部 分の補強による補強方法を考えた。次にこの新しい補強方 法の具体的な構成の例を示す。図 10(a)に新補強方法によ り補強されたリング QMG バルクマグネットの断面の例を 示す。図 10(b)にリング断面中央部の拡大図を示す。また、 図 10(c)に内周リング近傍の拡大図を示す。

まず,図10(b)の複合材料化に関して,QMGの素材そのものは,高いJ。特性を有することが必要であることから,従来の組織を維持した上で高強度の金属板と薄くスライス切断したQMGを積層することによる複合材料化を検討した。マグネットとして機能させる場合,超電導電流を同心円状に周方向に流す必要があるが,リング状の金属板との積層補強の場合,金属リングの体積率以上は,超電導電流の流れを阻害せず,積層補強が適していると考えた。また,金属リングとリング状QMG板との機械的な密着性を向上させるため,QMG板にAgコーティングを施した上で金属リングとの半田による結合を行った。

次に図10(c)の内周部の補強に関しては、内周近傍が割 れの起点となることから、外周金属リングに加え、内周金 属リングによる補強を検討した。この時、一般的な金属の 熱収縮率は、QMGのそれに比べ大きいため、外周金属リ ングのように冷却による圧縮力によってリングを固定する ことはできない。単に内周金属リングだけを接着した場合、 冷却による収縮でQMGリングから外れることになる。そ こで、内周金属リングと複合材料化に用いた金属板とを半 田を用いて強固に金属結合させることで、内周金属リング がQMGの変形を抑制して補強効果を発揮できるようにした。

2.3 新規補強バルクマグネットの試作と補強効果の評価 上記の考え方に基づき実際にリング状バルクマグネット を作製し,種々の着磁条件での各部分のひずみおよび中央 部での捕捉磁東密度を測定した。また,従来の補強方法に よるバルクマグネットとこれらを比較したので以下にその 詳細を述べる。

2.3.1 試料準備

図 11 に示す各補強部材を使用し,図12 に示すように直径 65 mm の Gd 系 QMG 材から切り出した 8 枚の QMG リングを 9 枚の SUS 補強板とを交互に積層・複合材料化しバルクマグネットを作製した。各補強部材の寸法は、以下の通りである。

1) QMG リング:

外径 60.0mm, 内径 28mm, 厚さ 2.0mm (Ag スパッタ成膜および熱処理)

- 2) SUS 補強板: 外径 64.0mm, 内径 24mm, 厚さ 0.5mm,
- 3) 上下の SUS 補強板: 外径 80.0 mm, 内径 24 mm, 厚さ 0.5 mm,
- 4) 最外周 SUS リング:
 外径 80.0 mm, 内径 64.0 mm, 厚さ 20.0 mm,
- 5) 外周 Cu リング: 外径 64.0mm, 内径 60.0mm, 厚さ 2.0mm,
- 6) 最内周 SUS リング:
 外径 24.0 mm, 内径 22.0 mm, 厚さ 20.0 mm,
- 7) 内周 SUS リング: 外径 28.0mm, 内径 24.0mm, 厚さ 2.0mm



図 10 (a) 新規補強法によるバルクマグネットの断面模式図, (b) 積層構造の拡大図, (c) 内周リング近傍の補強構造の拡大図 (a) Schematic illustration of cross section of bulk magnet by new reinforcement method, (b) Enlarged view of laminated structure, (c) Enlarged view of the reinforcing structure near the inner ring



これらの部材に予め半田下地処理を行った後,半田付け を行い作製した。図13に半田結合して得られた試料の外 観を示す。また,得られた試料の77Kでの捕捉磁東密度 を図14に示す。ほぼ同心円状の分布が得られており,ス ライス切断した各QMGリングには,組み立てによる劣化 はないものと思われる。

また,図15に示すように試料の内周面中央に1個,上 面内側に1個,外側に1個,外周補強リングの外周面中央 に,それぞれ周方向のひずみが検出できるようにひずみ ゲージを貼り付け,さらに、中央にホールセンサーを配置 した。コールドヘッドの中央に試料をグリースで固定する とともに外周リングをねじで固定した。

2.3.2 測定方法

冷凍機のコールドヘッド上の試料空間に He ガスを満た し、均熱性を確保し測定を行った。試料が取り付けられて いる冷凍機を超電導マグネットのボアに挿入した。室温か



図 13 新しい補強方法で作製した試料 A sample prepared by a new reinforcing method





図15 試料と合センサーの能直図 Sample and placement of sensors

ら95K(非超電導状態)まで試料を冷却した後,所定の磁場を印加,さらに所定の温度に冷却し十分安定した状態で マグネット電流を0.5A/分の速度で減らすことによって減 磁しながら各ひずみゲージの値と磁場を記録した。

2.3.3 測定結果,考察

温度(20K, 40K, 60K)での10T着磁における捕捉磁束 密度およびひずみ変化量を図16に示す。図のデータ線の 色は,図15に示すセンサーの色に対応している。

各温度での捕捉磁束密度に関しては、20Kでは、ほぼ直線的に変化する。この直線の傾きは、試料のアスペクト比で決まると考えられ、20Kでの直線は、試料の外周面に誘導電流が集中した状態と考えられる。これに対し、比較的

-41 -

高温の 60K では,8T 近傍からずれはじめ,同様に 40K で は 5T 近傍からずれ始めている。60K,40K でのこの直線 からずれは,試料内の臨界状態が内側に進展することによ る電流分布の変化,さらにフル着磁状態への移行後の電流 量の変化によるものと思われる。また,1T 付近でのピーク は,J_oのピーク効果が反映したものと思われる。図 16 のひ ずみ変化量の温度依存性の傾向に関しては,総じて,前述 の従来の外周リングのみによる補強法の傾向と一致するも のと思われる。

20Kにおいて9T,10Tで着磁した時の捕捉磁束密度, 各ひずみ変化量を図17に示す。20Kでの印加磁場依存性 における捕捉磁束密度,ひずみ変化量は,相似性がよく成 り立っているように思われる。これは,比較的低温にまで



図 16 10T 着磁過程におけるひずみ変化量と捕捉磁束密度 Change of strain and trapped field in the 10T magnetization process

冷却することによって,誘導される超電導電流のJ。の磁場 依存性に関して,自己磁場および印加磁場のレベルでは, 殆ど影響を受けない状況にあるためであると思われる。

図 16 と図 17 の結果を用い、従来の補強方法に対するこの新規補強方法の優位性を示す。

また,60K での比較として,従来の外周金属リングによる9T 着磁結果を図18(b)に示す。これを60K,10T の図18(a)結果と比較する。従来法では,内周面で最大700µε に達しているのに対し,新補強法では350µε 程度に留まっている。さらに,もし従来法で10T 着磁で割れが発生しなかった場合は,800µε に十分達していたものと考えられることから,新規補強方法は,従来の補強法に対し,ひずみ



図 17 9T および 10T 着磁におけるひずみ量変化と捕捉磁 束密度の比較

Change of trapped field and strain during the magnetization process



(a) 新補強材, (b) 従来補強材

Comparison of strain changes of samples prepared by the new reinforcement method and the conventional reinforcement method (a) New reinforcing material, (b) Conventional reinforcing material を40%に低減できているものと思われる。これらの比較から、新規補強方法は、従来の補強方法に対し優れた補強方法であると考えられる。また、10T 着磁においてひずみ量が低いことから、10T 超の着磁においても十分に耐え得るものと考えられる。

ー連の着磁試験の後に 77K での試料の捕捉磁束密度分 布測定を行ったが,捕捉磁束分布には変化が見られなかっ た。このことから,新規補強方法による QMG 試料は,繰 り返し着磁における応力においても試料にダメージを生じ させない十分な補強効果があることが確かめられた。

3. 結 言

高強度金属板とスライス切断した QMG との複合材料化 および内周リングによる内周部補強の考えに基づき,新規 のリング状 QMG バルクマグネットの補強方法を開発した。 具体例として,2mm 厚さの QMG リングと 0.5mm 厚さの SUS リングを積層し複合材料化し,外周および内周リング を半田結合し,リング内周面および試料表面に関しても補 強し,各温度で10T 級の着磁試験を行った。その結果,各 ひずみゲージの最大ひずみ量の低減が見られ,10T 級の繰 り返し着磁においても割れの発生は見られなかった。今後 は,種々の材質,サイズの補強材で効果を確認するとともに, 10T 超の高磁場着磁による実証試験を検討する。

一方,この成果は,開発中の各応用開発への大きなイン パクトを与えると思われる。現在,卓上 NMR や MDDS の 開発がすすめられているが,特に卓上 NMR 応用では,従 来の外周金属リングのみの補強を施した QMG バルクマグ ネットを使用し,4.7T (200 MHz)の磁場強度で,良好な NMR 信号の検出に成功しており,飛躍的に小型化された NMR の実用化が期待されている。現状の卓上 NMR の最も 重要な課題は,強磁場化,すなわち QMG バルクマグネット の割れの防止である。新規に開発した補強方法により 10T の磁場を安定に捕捉できたことで,従来の普及型の NMR の磁場強度 10T (400 MHz)の磁場発生が可能になった。こ のことから,今後,より一層実用化が加速するものと期待 される。

参照文献

- Conectus (CONsortium of European Companies Determined To Use Superconductivity). March 2012
- 2) Kamerlingh Onnes, H.: Akad. van Wetenschappen. 14, 818 (1911)
- Bednorz, J. G., Müller, K. A.: Z. Phys, B-Condensed Matter. 64, 189 (1986)
- 4) Wu, M. K. et al.: Phys. Rev. Letters. 58 (9), 908 (1987)
- 5) Maeda. H. et al.: U.S. Patent 7132388. 1988
- Morita, M. et al.: United States Patent, Patent Number 5, 278, 137, Priority Date: Jun.6, 1988
- 7) 森田充, 松田昭一: 溶融法による高臨界電流密度 Y 系バル

ク超伝導材料作製とその特性. 未踏科学技術協会, 新超伝 導材料研究会, New Superconducting Materials Forum News. (10), 15 (1988)

- Morita, M. et al.: Physica C. 172, 383-387 (1990) (English Translation of Reference 7))
- 9) Morita, M. et al.: Advances in Superconductivity, 1991, p. 733
- 10) U.S. Patent 5, 308, 799
- Morita, M. et al.: Processing and Properties of QMG. Physica C. 235-240, 209-212 (1994)
- 12) Teshima, H., Nariki, S., Morita, M.: Recent Progress in Compact, Robust, and Superior Field-Tolerant QMG Current Leads Using RE-Ba-Cu-O Bulk Superconductors. IEEE Trans. Applied Superconductivity. 26 (3), Article #4800204, April 2016
- 13) Yamashita, T. et al.: Abstracts of CSSJ Conference. 93, 2016, p. 127
- 14) 日本特許出願登録 特許第 2055511 号
- 15) Morita, M. et al.: Abstracts of CSJ Conference. 41, 1989, p. 14
- 16) Nariki, S., Sakai, N., Murakami, M.: 2005 Melt-processed Gd-Ba-Cu-O Superconductor with Trapped Field of 3T at 77K Supercond. Sci. Technol. 18 S126
- 17) Durrell, J. H. et al.:Supercond. Sci. Technol. 27 (082001), 5 (2014)
- 18) 森田充, 田中将元, 橋本操:応用磁気学会誌. 19, 744-747 (1995)
- 19) 日本特許出願登録 特許第 4012311 号
- 20) 仲村高志 ほか:低温工学. 46(3), 139-148(2011)
- 21) 佐保典英 ほか: 低温工学. 47 (7), 431-435 (2012)
- 22) 宮本毅:博士論文"大型超電導バルク体の機械的特評価に関する研究".第4章.2001
- 23) Morita, M. et al.: Abstracts of CSSJ Conference. 91, 2015, p. 170
- 24) Morita, M. et al.: Abstracts of CSSJ Conference. 92, 2015, p. 210



森田 充 Mitsuru MORITA 先端技術研究所 新材料・界面研究部 主幹研究員 工博 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



手嶋英一 Hidekazu TESHIMA 先端技術研究所 新材料・界面研究部 主幹研究員 工博



成木紳也 Shinya NARIKI 先端技術研究所 新材料·界面研究部 主幹研究員 工博