

バルク超電導体の着磁現象

藤代 博之*

Magnetization of Superconducting Bulks

Hiroyuki FUJISHIRO*

Synopsis: The applications of REBaCuO superconducting bulks (RE: rare earth element or Y) have been investigated recently because of the enhancement of the superconducting characteristics such as critical current density J_c and the trapped field B_T . A superconducting bulk can trap higher B_T of over 17 T via conventional field-cooled magnetization (FCM) and $B_T=5.2$ T via pulsed field magnetization (PFM), which has been intensively studied because a superconducting magnet is not used. This review article summarizes the magnetizing mechanism of the superconductors, the recent activities of PFM conducted experimentally and numerically, and the practical applications of several superconducting bulk magnet devices.

Keywords: bulk superconductor, pulse field magnetizing, trapped field, heat generation, bulk magnet

1. はじめに

超電導体は超電導転移温度 T_c 以下では電気抵抗がゼロであるため、電磁誘導を利用して超電導体内に電流を誘導すれば電流はそのまま流れ続ける。この永久電流が超電導体に磁場を捕捉させて磁石化する原理である。この原理を用いて、1970年代に Nb_3Sn のリボンを螺旋状に巻いた円筒状試料内部に 4.2 K で 2.24 T の磁場が捕捉されているが、比熱が小さく熱的不安定性から生じる flux jump や機械的強度の問題から実用化は行われなかった¹⁾。1986年に高温超電導体が発見され、その T_c が高いことに加え、比熱や不可逆磁界 H_{irr} が大きいため flux jump が起こりにくく安定性が高く、さらに液体窒素冷却で実現できる容易さのため超電導疑似永久磁石が可能となった。最大の捕捉磁場 B_{max} は臨界電流密度 J_c やバルクサイズの増大と共に増加するが、高温超電導体の中でも大型サイズの c 軸配向結晶が作製でき、しかも J_c が高いのは熔融法を用いた REBaCuO 系超電導バルク (RE: 希土類元素または Y) だけである。REBaCuO 系バルクは、 $REBa_2Cu_3O_7$ (RE123) 超電導体の疑似単結晶中に磁束ピン止め中心となる非超電導相 RE_2BaCuO_5 (RE211) や Ag などの第2相粒子が微細分散した複合材料である。作製プロセスの改良により J_c

や機械的強度が向上しており、すでに磁場中冷却着磁法 (Field cooled magnetization: FCM) により、29 K で 17 T を超す捕捉磁場が報告されている²⁾。2000年に発見された MgB_2 を用いたバルク磁石研究は、Yoo らがスパークプラズマ法を用いた MgB_2 バルクに FCM 法により 27.5 K で 1 T の磁場を捕捉することを報告した³⁾。最近、Yamamoto らは空气中焼結で MgB_2 バルクを作製し、13 K で 1.3 T の磁場を捕捉し、REBaCuO 系以外の超電導バルク磁石の検討も行われている⁴⁾。

超電導バルクを磁化 (着磁) する方法には、一般的な磁場中冷却着磁法の他に、ゼロ磁場中冷却着磁法 (Zero field cooled magnetization: ZFC) やパルス着磁法 (Pulsed field magnetization: PFM) があるが、最近、超電導マグネットを用いない安価な着磁法としてパルス着磁法が盛んに研究されている。本解説は超電導体の着磁のメカニズムと、特に REBaCuO 系バルクを中心にパルス着磁法の発展と捕捉磁場向上の経緯、シミュレーションによる捕捉磁場向上の検討、様々な超電導バルク磁石装置について解説する。著者の調査した範囲の解説であり全てを網羅できていないが、この分野の研究に興味を持つ参考になればと思い、参考文献を多く掲載した。

2. 超電導体の磁化過程と着磁方法^{5,6)}

Bean モデルによれば、不均質な第2種超電導体内部の磁場勾配 dB/dx は $\mu_0 J_c$ に等しく、直径 d の無限に長い円柱状の超電導体に捕捉される磁場は Fig. 1(a) に示すように円錐状の磁場分布になり、試料中心で最大値 $B_{max}=(1/2)\mu_0 J_c d$

Received November 27, 2010

* 岩手大学工学部マテリアル工学科
〒020-8551 岩手県盛岡市上田4丁目3-5
Department of Materials Science and Technology,
Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka, Iwate 020-8551, Japan
E-mail: fujishiro@iwate-u.ac.jp

となる⁷⁾。これより B_{\max} は J_c と円柱の直径 d に比例して大きくなるのが分かる。ただし、この円錐状の捕捉磁場分布は超電導電流が試料全体にわたり均一に同心円状に流れる場合にのみ実現され、試料内に粒界などがある場合は高さの低い複数の山が存在する不均一な磁場分布となる。従って、発生磁場の大きなバルク磁石を実現するには J_c が高い大型単一結晶が必要となる。また実際のバルクの長さ(厚さ)は有限であるため、外部に発生する磁場の大きさは $(1/2)\mu_0 J_c d$ よりも小さくなる。

静磁場を用いた着磁方法の1つである FCM 法は、超電導転移温度 T_c 以上の温度において外部磁場 B_{ex} を印加し、 T_c 以下に冷却した後、外部磁場を取り除く方法である (Fig. 1(a))。 $B_{\text{ex}} < (1/2)\mu_0 J_c d$ の場合は、台形型の捕捉磁場分布となる (Fig. 1(b))。一方 ZFC 法は、超電導体を T_c 以下の温度に冷却した後外部磁場を最大 B_{ex} まで増加させて磁束を侵入させた後、外部磁場を取り除く方法である。

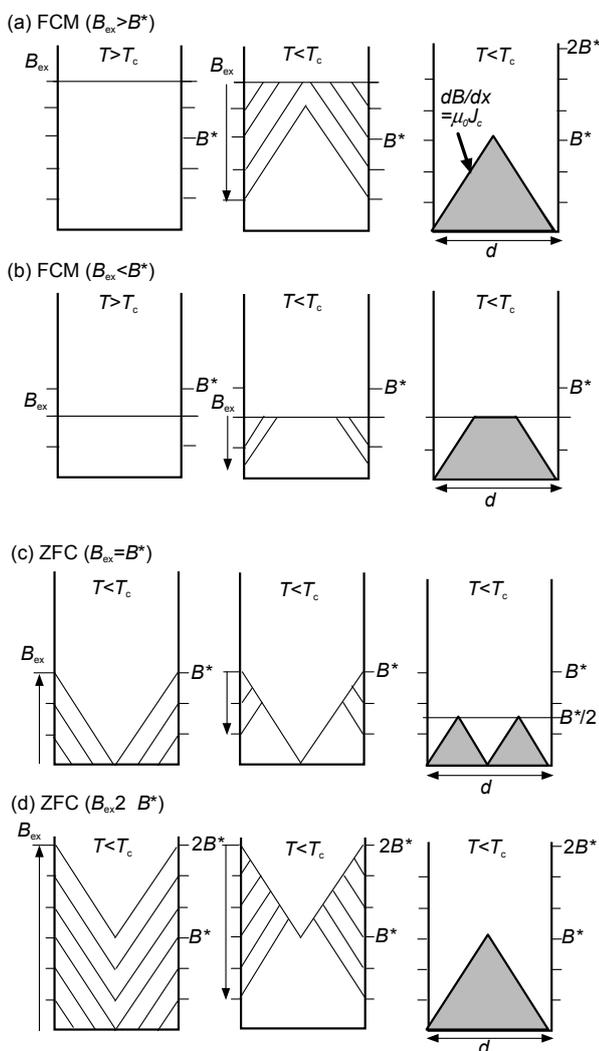


Fig. 1 Schematic illustration of the mechanism of flux trapping in the framework of Bean's critical-state model: (a) FCM ($B_{\text{ex}} > B^*$), (b) FCM ($B_{\text{ex}} < B^*$), (c) ZFC ($B_{\text{ex}} = B^*$), (d) ZFC ($B_{\text{ex}} \geq 2B^*$).

ZFC 法の場合には、増磁過程の初期には超電導体端部付近にのみ磁束が侵入する。超電導体の両端から侵入した磁束が最初に試料中心で出会うときの外部磁場を B^* (中心到達磁場) とすると、 $B^* = (1/2)\mu_0 J_c d$ である。減磁過程も同様に考えることができ、最終的にはふた山のピークを持つ捕捉磁場分布となる (Fig. 1(c))。超電導体を完全に磁化するためには FCM 法では B^* 以上の静磁場が必要であるが、ZFC 法では $2B^*$ 以上の高い印加磁場が必要であるため実用的には用いられていない (Fig. 1(d))。バルク温度の低下により J_c (すなわち山の傾斜) が増大し、最大捕捉磁場 B_{\max} は増大する。しかし、低温では自分自身が捕捉した磁束による磁気応力(フープ力)が試料の機械的強度を上回る場合に破壊が起こる。そのためバルク自体の機械的強度の向上や金属リングなどによる補強が必須である。理論的には FCM 法と ZFC 法は平衡状態での着磁であるが、実際には有限の時間で磁束の運動が起こるので数 K 程度の温度の上昇が生じ、外部磁場の掃引速度が速いほど温度上昇が大きいことが実験的に確認されている^{8,9)}。

3. パルス着磁法の研究の進展

FCM 法を用いて高磁場を超電導体に捕捉させるには超電導マグネットを使う必要があり、応用上の制約があった。1995 年頃、名古屋大の Mizutani とイムラ材料開発研究所のグループは、永久磁石の着磁方法と類似したパルス磁場による超電導バルクの着磁方法 (PFM 法) を考案した¹⁰⁾。この方法は寒剤または冷凍機を用いて超電導バルクを T_c 以下の温度に冷却した後、周囲に配置したソレノイド型銅コイルに 1 s 以下のパルス状電流を流し、超電導体に短時間だけ大きなパルス磁場を印加し磁束をバルクに捕捉させる方法である。Fig. 2 に冷凍機冷却したバルクに対するパルス着磁の概念図を示す。パルス磁場の継続時間を例えば、500~1000 s に長くした究極の PFM 法が ZFC 法ということになる。PFM 法は、高価な超電導マグネットを用いずに銅コイルとコンデンサ電源によるパルス磁場を用いて超電導バルクを着磁することができ、着磁コイルとバルクを一体化した装置 (例えば、バルク磁石の界磁により回転力を得る超電導モータ) に実際に組み込むことができる^{11, 12)}。

イムラ材研の Itoh らは、77 K における YBaCuO 系バルクのパルス磁場に対する磁気的挙動を明らかにする研究を行った¹³⁾。その中でパルス磁場印加後の捕捉磁場分布の測定、バルク表面の複数地点での磁束密度の時間的変化の測定、ピックアップコイル法による磁束線総量の時間的変化の測定などを行い、印加磁場 B_{ex} の増大と共に捕捉磁場 B_T や総磁束量 Φ_T は増大するが、ある印加磁場を越えると B_T , Φ_T が減少することを示した^{14, 15)}。これは磁束が有限の速度で超電導体内を運動することにより発熱が生じるためにバルクの温度が上昇し、 J_c の低下をもたらすためと推定したが、液体窒素中でのバルクの温度測定の困難さから系統的

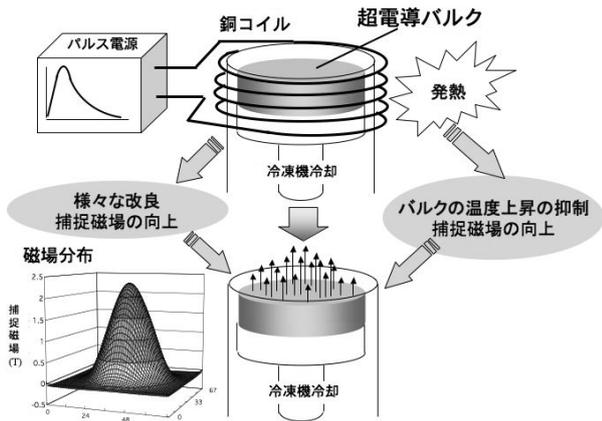


Fig. 2 Schematic illustration of the concept of the pulsed field magnetization (PFM).

な温度上昇の確認はなされなかった。

近年の冷凍機の普及によりバルクの冷却に冷凍機が用いられ、名古屋大とイムラ材研のグループ、SRL/ISTEC のグループなどが中心になり、捕捉磁場の向上を目指して冷凍機冷却したバルクのパルス着磁の研究が行われた¹⁶⁻¹⁹⁾。筆者らも 2003 年から研究をスタートしたが、パルス着磁におけるバルクの温度上昇と捕捉磁場の関係に注目したところに研究の特徴がある²⁰⁻²³⁾。

Fig. 3 に伝導冷却した直径 45 mm の GdBaCuO 系バルクに $B_{ex}=5.53$ T のパルス磁場（立ち上がり時間: $\tau=0.013$ s）を印加した時のバルク温度 T_s と表面の温度上昇および捕捉磁場の関係を示す²⁴⁾。パルス磁場を印加すると、磁束の侵入と捕捉に伴う粘性力損失 Q_v とピン止め損失 Q_p により温度が上昇する⁶⁾。最大温度上昇 ΔT_{max} は T_s の低下及び B_{ex} の増加と共に大きくなり、例えば $T_s=40$ K で $B_{ex}=5.53$ T では $T_{max}=71$ K にも達する。温度上昇は冷凍機の冷却能力やバルクと冷却ステージの接触熱抵抗の大きさにも依存するが数 s でピークを示し、約 10 min で初期温度 T_s に戻る。一般に FCM 法では、低温ほど臨界電流密度 J_c が向上するためピン止め力が増大し捕捉磁場が向上する。しかし PFM 法におけるバルク中心での捕捉磁場は、 T_s により最大となる印加磁場が異なり、ピン止め力の増大による発熱（ピン止め損失 Q_p ）の増加と比熱 C の減少による温度上昇の増加があり、必ずしも T_s が低い方が捕捉磁場は大きくなるとは限らないことが分かる。

Fig. 4 に冷凍機を用いて 70 K から 16 K まで冷却した GdBaCuO 系バルクに印加する単一パルス磁場 B_{ex} とバルク中心表面での捕捉磁場 B_T の関係および 0.5 mm 上の捕捉磁場分布を示す²⁵⁾。 B_{ex} が小さい場合は磁束はバルクの周辺だけに捕捉されるが、印加磁場の増大と共にバルク中心へ磁束が捕捉される。さらに B_{ex} を増大させると温度上昇により中心の捕捉磁場は減少する。温度 T_s の低下により

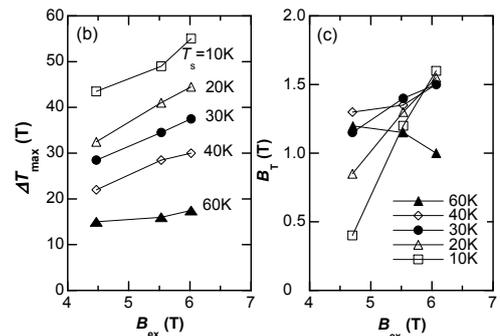
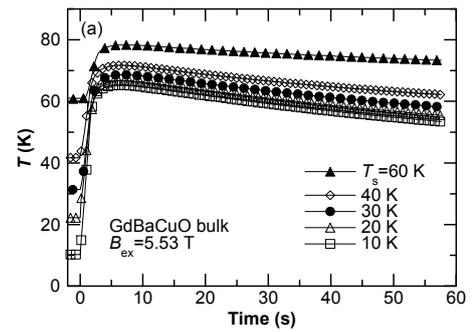


Fig. 3 (a) Time evolution of temperature $T(t)$ after applying a pulsed field of $B_{ex}=5.53$ T at various temperatures T_s , (b) the maximum temperature rise ΔT_{max} and (c) the trapped field B_T at the bulk center.²⁴⁾

バルク中心への磁場の侵入と捕捉を開始する磁場は高磁場側へずれ、バルクは強い粘性力とピン止め力のために強く遮蔽され高い印加磁場が必要になる。FCM 法とは異なり捕捉磁場分布は温度の低下と共に不均一が顕著になる。これは $J_c(B, T)$ の不均一性を反映していると考えられるが、この関係は PFM の捕捉磁場向上の重要な要素であり、現在も検討が行われている²⁶⁾。

4. マルチパルス磁場印加による捕捉磁場向上

パルス着磁により捕捉磁場を向上させる方法はいくつか提案されているが、その中で複数のパルス磁場を印加する着磁法は非常に有効である。**Fig. 5** にこれまでに提案されているマルチパルス磁場印加による PFM 法をまとめた。その中で一定温度で一定パルス磁場を複数回印加する同一パルス磁場印加法 (Sequential pulsed field application, SPA) は最も一般的な方法である (Fig. 5(a))。Fig. 6 に 45 mm SmBaCuO バルクの $T_s=40$ K と 60 K で $B_{ex}=3.01$ T と 4.64 T のパルス磁場を印加した場合の、バルク中心での最大温度上昇 ΔT_{max} と捕捉磁場 B_T^P のパルス磁場印加回数依存性を示す²¹⁾。いずれの場合も No.1 pulse での温度上昇が最も大きく、印加回数の増加とともに ΔT_{max} は減少し一定値に近づく。 ΔT_{max} は T_s が低いほど大きく B_{ex} が大きいほど大きくなる。 B_T^P は No.1 pulse で最終値の 80%以上が捕捉され、磁場印加回数の増加とともに一定値に近づく。

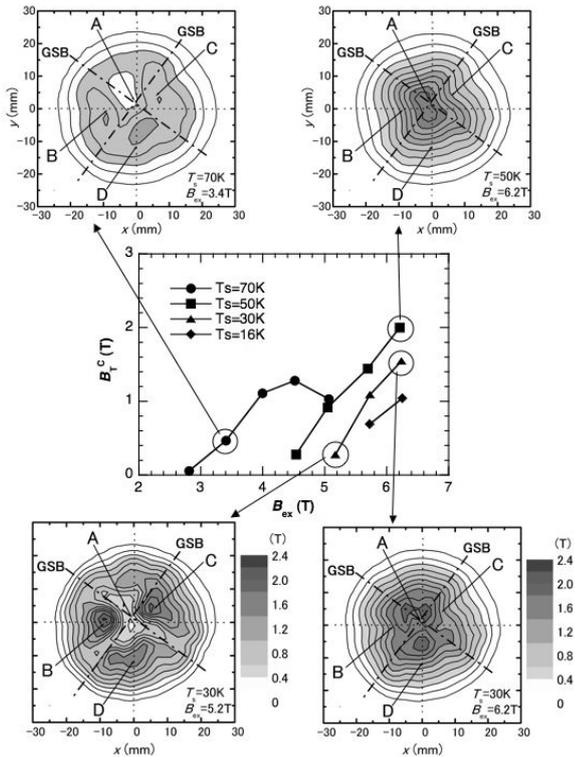


Fig. 4 The trapped field B_T^C at the bulk center and the trapped field distribution as a function of the applied pulsed field B_{ex} for various starting temperatures T_s .²⁵⁾

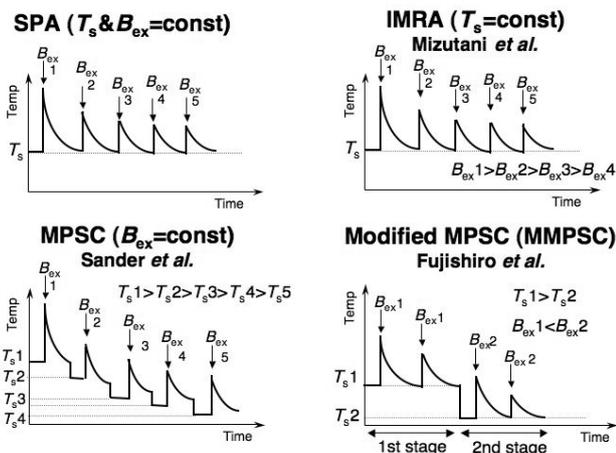


Fig. 5 Schematic illustration of the PFM techniques using multi-pulse application.

ΔT_{\max} と B_T^P の飽和傾向は類似しており、磁場捕捉と温度上昇が密接に関係していることを示唆している。No. 2 以降のパルス磁場でバルクに侵入する磁束は、すでにバルクに磁場が捕捉されているため、新たに印加した磁場によって形成されるバルク内外の磁場勾配は緩和され、磁束運動と発熱が抑えられ捕捉磁束は増大すると考えられる。

名古屋大学の Mizutani らにより、一定温度 T_s でパルス磁場 B_{ex} を段階的に減少させて複数回印加する逐次パルス磁

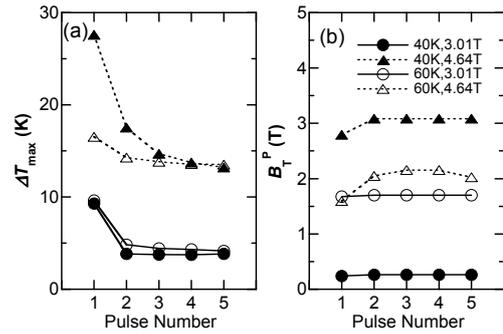


Fig. 6 The pulse number dependence of (a) the maximum temperature rise ΔT_{\max} and (b) the trapped field B_T^P for various T_s and B_{ex} .²¹⁾

場印加法 (IMRA 法) が提案され (Fig. 5(b)), 2003 年時点においてこの方法を用いて直径 35 mm の SmBaCuO 系バルクの表面に捕捉された最大の磁場は 3.8 T、総磁束量は 1.5 mWb であった²⁷⁾。IMRA 法では最初に強い磁場を印加してバルク中央部に磁束を捕捉させた後に、これより弱い磁場を反復して印加することが総磁束量増大に有効であることが明らかにされた¹⁹⁾。さらにバルクを軟磁性ヨークで挟んで着磁することで、磁場の变化速度が鈍り磁束の運動が抑制されたことで捕捉磁場の向上が確認されている²⁸⁾。著者らはパルス磁場の立ち上がり時間を変化させた実験からも同様の効果を確認している²⁹⁾。また Sander らにより複数回の同一強度のパルス磁場をバルクの温度を段階的に冷却しながら印加する PFM 法 (MPSC 法) が提案され (Fig. 5(c)), 捕捉磁場の向上が報告されている³⁰⁾。

著者はこれまでの一連の実験から、比較的高い温度で磁束をある程度捕捉させてピン止め損失 Q_p を低減し、その後ピン止め力の大きい低温で強いパルス磁場を印加すれば、発熱を低減できて捕捉磁場 B_T^P が増大できると考え、バルク温度 T_s と印加磁場 B_{ex} を最適化する 2 段階着磁法 (MMPSC 法) を提案した³¹⁾。Fig. 5(d) に概念図を示す。

MMPSC 法は、第 1 段階でバルクを比較的高温 T_{s1} に冷却して、比較的弱いパルス磁場 B_{ex1} を 2 回印加して、バルク中心に約 1 T の磁場を捕捉させる。次に第 2 段階でバルクをさらに低温 T_{s2} に冷却し、最適な強いパルス磁場 B_{ex2} を 2 回印加する。この方法を用いて 2005 年に、GdBaCuO 系バルク (直径 45 mm、厚さ 20 mm) 表面で $B_T^P=4.47$ T の磁場捕捉を確認した³¹⁾。さらに同じバルクにステンレス製リングを装着し、熱容量の増大効果により $B_T^P=5.20$ T を達成した³²⁾。このように MMPSC 法が高い磁場を捕捉する有効な方法であることが明らかになった。

5. MMPSC 法による 5 T を超える磁場捕捉の実現

Fig. 7 に GdBaCuO 系バルクを用いて $B_T^P=5.20$ T を捕捉したときの印加磁場 $B_{ex}=\mu_0 H_a(t)$ とバルク表面 3 カ所 (C:

center, M: middle, E: edge) の局所磁場 $B_L(t)$ を示す³²⁾. No. 1 pulse ($T_s=47$ K, $B_{ex}=4.80$ T) を印加した場合, バルク中心 (C) よりも周辺部 (E) がより多くの磁束を捕捉している (実はこの捕捉磁場分布 (断面形状は M 字型) が第 2 段階の捕捉磁場向上には重要である). No. 3 pulse ($T_s=28$ K, $B_{ex2}=6.73$ T) を印加した場合には, 磁場分布は中心ほど強い円錐型になり, 中心で $B_T^P=5.20$ T を捕捉した. $B_{ex2}=7.01$ T の場合には発熱による flux jump が起こり磁場が逃げ, $B_{ex2}=6.04$ T の場合には十分に磁束が侵入しないことが分かり, B_{ex2} の最適化も重要な条件である. また第 1 段階での M 字型磁場分布が小さい場合や円錐型に着磁した場合には, 第 2 段階での捕捉磁場は増大しないことも分かった.

Fig. 8 に No. 1 から No. 4 pulse のバルク中心での捕捉磁場及び最大温度上昇をまとめて示す. 図中には比較のために, SPA 法の場合の結果も示す³²⁾. 第 1 段階でバルク中心に 1 T 程度の M 字型磁場捕捉を行ったため, No. 3 pulse の印加での温度上昇は 29 K と SPA の No. 1 pulse の温度上昇 33 K よりも温度上昇が小さい. この温度上昇の減少のため捕捉磁場は大きく増大し, 最終的に 5.20 T を捕捉した. さらに, MMPSC 法が直径 65 mm の大型バルク等に対しても適用可能な一般的方法であることを確認した³³⁾. また現在, MMPSC 法の捕捉磁場向上のメカニズムについても検討している³⁴⁾. 超電導バルクは真空容器内に保持されているので, バルク表面で 5 T の磁場が捕捉されていても約 4 mm 離れた室温空間では約 2.5 T の磁場しか実際には活用できない. バルク表面を真空容器内壁にさらに近づける断熱技術の確立も必要である.

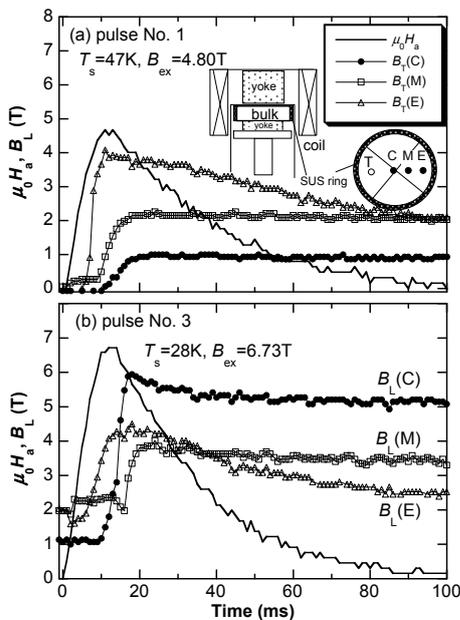


Fig. 7 The time dependences of the applied field $\mu_0 H_a(t)$ and the local fields $B_L(t)$ at positions C, M and E for (a) the No. 1 pulse, and (b) the No. 3 pulse applications.³²⁾

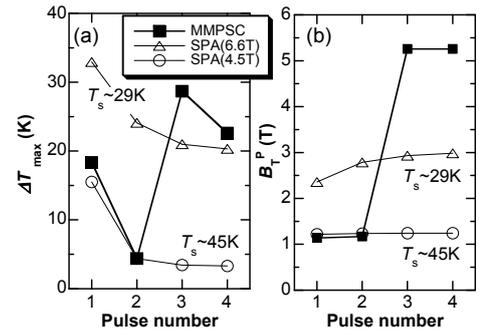


Fig. 8 The pulse number dependences of (a) the maximum temperature rise ΔT_{max} and (b) trapped field B_T^P for MMPSC.³²⁾

6. PFM 法におけるシミュレーションによる捕捉磁場向上の検討

パルス着磁現象の理解のため, また捕捉磁場の向上のため, シミュレーションの手法を用いた検討が行われている. Tsuchimoto らは, バルク全体に流れる電流分布を用いて捕捉磁場の実験結果を数値解析により再現した³⁵⁻³⁷⁾. Ohsaki らは電磁界・熱連成解析を用いて樹脂含浸したバルクのパルス着磁における温度変化と捕捉磁場特性や, 冷却ステージとバルクとの介在物の影響を解析した^{38, 39)}. また, 不均質な J_c 分布を考慮した磁束運動と温度上昇についても解析している^{40, 41)}. Kajikawa らは MMPSC 法の捕捉磁場の向上についての解析を行っている⁴²⁾. Baeck⁴³⁾, Berger⁴⁴⁾, Xu⁴⁵⁾ らも電磁界・熱連成解析を用いた PFM 法の解析を報告している.

著者はこれまで PFM 法における捕捉磁場の向上のための実験的検討を行ってきたが, 実験で検討できる範囲は限りがあり, 捕捉磁場向上の統一的な指針が必要と考えた. そこで Ohsaki らの手法を参考に電磁場-温度の連成シミュレーション法を構築し, 捕捉磁場決定の要因を明らかにし, 捕捉磁場向上への方向性を検討している⁴⁶⁾. Fig. 9 に直径 45 mm の超電導バルクを 40 K に冷却し, バルクの J_c を変化させた場合のバルク表面中心 ($r=0$) での最終的な捕捉磁場の印加磁場 B_{ex} 依存性のシミュレーション結果を示す. 印加磁場の増加と共に捕捉磁場は増加し, 最大を示した後に減少する. また J_c の増加とともにバルク表面中心に磁束が捕捉され始める印加磁場は増加する. J_c の増加は温度の低下と等価に考えることができ, これらの結果は定性的に実験結果を再現している. Fig. 10 に $J_c=3.3 \times 10^8$ A/m² のバルクに, $T_s=40$ K で $B_{ex}=6$ T 及び, 8 T を印加した後のバルク表面中心での磁場 B_z と温度 T の時間依存性を示す. 中心磁場は約 0.01 s にピークを示し, その後磁束クリープにより減少するが, この原因は中心温度の上昇のためと解釈することができる. すなわち中心温度は約 7 s にピークを迎えた後に低下するが, これ以降に磁場の減少はなくなる

ことで説明できる。最大温度に達する時刻は超電導バルクの熱伝導率と冷凍機の冷凍能力で決まるため、実際の実験では大きく変化させることはできないが、磁場のピークを温度のピークを近づけることができれば、磁束クリープを低減できる。ロングパルス（立ち上がり時間 $\tau=1, 10$ s）印加の場合の捕捉磁場の印加磁場依存性も Fig. 9 に示すが、 $\tau=10$ s の場合に $B_{ex}=8$ T で $B_z=4.3$ T の捕捉磁場をシミュレーション結果から得た。その他、マルチパルス磁場印加の場合の着磁解析も行っている^{47, 48}。また最近、後述する渦巻き型コイルを用いたパルス着磁の解析を行い、Izumi らの実験結果を再現している⁴⁹。

7. スプリットコイル、渦巻き型コイルを用いた PFM 法と新しい超電導マルチバルク磁石の開発

以上述べてきた超電導バルク磁石は、バルクの底面 (ab 面) を冷凍機の冷却ステージに密着させて c 軸方向に冷却し、ソレノイド型パルスコイルを用いて着磁するタイプ (Fig. 2 参照) であった。この方法では 1 台の冷凍機で 1 個のバルク磁石しか実現できなかった。対向型バルク磁石は製品化され、磁気分離への応用が検討されているが⁵⁰、バルク磁石の応用範囲を広めるには、列状または面状に複

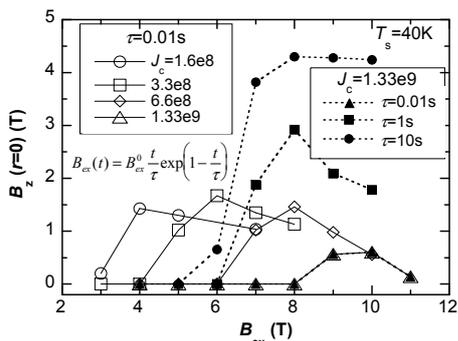


Fig. 9 The applied field dependence of the trapped field B_z at the bulk surface center for $\tau=0.01$ s for various J_c values ($T_s=40$ K). The τ dependence of B_z for $J_c=1.33 \times 10^9$ A/m² for a long magnetic pulses ($\tau=1$ s, 10 s) is also shown.⁴⁶⁾

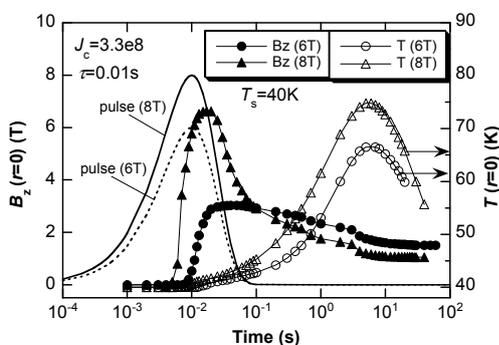


Fig. 10 The time dependence of the local field B_z and the temperature T at the bulk center ($r=0$) after applying a pulsed field of $B_{ex}=6$ and 8 T ($J_c=3.3 \times 10^8$ A/m², $\tau=0.01$ s).⁴⁶⁾

数個配列したマルチバルク磁石を開発が必要である。しかし、マルチバルク磁石を FCM 法で実現するには大口径のソレノイド型超電導マグネットが必要であり⁵¹、列状に並んだバルク磁石の着磁はスプリット型超電導マグネットを用いて FCM 法による 5 連型バルク磁石装置は報告されているが⁵²、応用上は問題が多い。著者は複数個のバルクを ab 面方向から冷却し、スプリット型パルスコイルを用いてバルクの c 軸方向に磁場を印加する手法を提案し、バルクを 2 個または 5 個列状に配置した超電導マルチバルク磁石装置を試作した^{53, 54}。

Fig. 11(a)に 5 連型マルチバルク磁石の概略図を示す。5 個の角形バルクは ab 面 (側面) 方向から銅部材で締め付け、銅部材を冷凍機の冷却ステージに熱的に接続した。1 つのバルクを着磁後、スプリットコイルを次のバルクへ移動しパルス着磁を行った。Fig. 11(b)にバルクに最適な着磁を行った後の磁場分布を示す⁵⁴。真空容器表面で最大 2.0 T の磁場を確認し、さらに表裏ほぼ同一な磁場分布を得ることができた。この両面利用可能なバルク磁石を用いて磁気分離の実験を行った⁵⁵。超電導バルク磁石は、停電がなければ磁場の減少 (クリープ) はなく、連続して運転できることを確認している。

東京海洋大の Izumi らはモータへの応用を考え、集中巻き線した渦巻き型コイル (vortex-type coil) をバルクの両側にスプリット型コイル状に配置して着磁するパルス着磁法を提案した⁵⁶。その結果、ソレノイドコイルよりも低いパルス磁場からバルク中心に磁場が捕捉され、最大捕捉磁場が増大することを示している (Fig. 12 参照)⁵⁷。この方法の特徴は大型バルクの着磁に適していることである。すでに直径 140 mm の大型バルクのパルス着磁を行った⁵⁸。

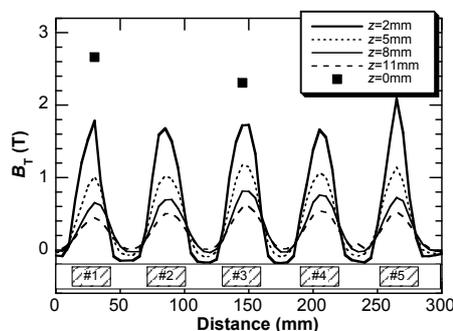
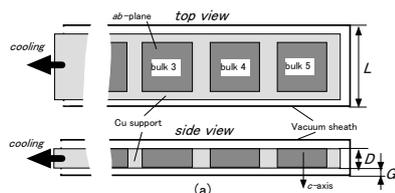


Fig. 11 (a) Top and side views of the five-aligned superconducting bulk magnets, and (b) the line scan profile of the trapped field $B_T(z)$ in open space.⁵⁴⁾

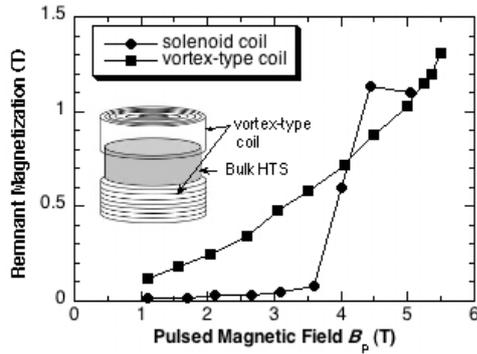


Fig. 12 Remnant magnetization versus the applied pulsed field using the solenoid coil and the vortex-type coil.⁵⁶⁾

超電導バルク磁石はスパッタカソード、磁気分離、DDS、NMR、アンジュレータなどへの応用が検討されているが、著者らが最近行っている有機半導体薄膜の液相成長へのバルク磁石応用について最後に紹介する⁵⁹⁾。有機溶媒などの反磁性の液体を強磁場中に置くと、液体には磁場の外に出ようとする力（モーゼ効果）が生じ、液の外形が変化する。有機溶媒に溶質であるペンタセンなどの有機半導体を溶解させた溶液から溶媒に局所的に磁場を印加すると、溶液が最も薄い場所で局所的に濃縮され、磁石の位置により意図的に結晶成長を起こすことが可能である。今回、2 Tに着磁された超電導バルク磁石を用いてモーゼ効果を利用した有機半導体の成膜を行い、約 1 mm のサイズの高品質な有機半導体単結晶薄膜を得た。

参 考 文 献

- 1) M. Robinowitz, et al. : "Dependence of maximum trapped field on superconducting Nb_3Sn cylinder wall thickness", *Appl. Phys. Lett.* **30** (1977) 607-609
- 2) M. Tomita and M. Murakami : "High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K", *Nature* **421** (2003) 517-520
- 3) S.I. Yoo : "Critical current densities and trapped fields of dense MgB_2 bulk superconductors", The 11th Int. Workshop on Critical Currents in Supercond. (IWCC11) (2003. 7.30) [MB3]
- 4) A. Yamamoto, et al. : "Development of MgB_2 bulk superconducting magnet", 23rd Int. Symp. on Supercond. (ISS2010) (2010.11.3) [BLP-20]
- 5) 石原裕将 : 「パルス磁場による Sm-Ba-Cu-O 溶融バルク超電導体の磁化過程」, 名古屋大学大学院工学研究科修士学位論文 (2000 年度)
- 6) 松下照男 : 「磁束ピンニングと電磁現象」, 産業図書(株), 東京, 1994
- 7) C.P. Bean : "Magnetization of hard superconductors", *Phys. Rev. Lett.* **8** (1962) 250-253
- 8) T. Oka, et al. : "Temperature changes in a melt-processed YBCO superconductor activated by field cooling magnetizing process", *Physica C* **426-431** (2005) 794-799

- 9) T. Oka, et al. : "Thermal and magnetic behaviors of a melt-textured superconducting bulk magnet in the zero-field cooling magnetizing process", *Supercond. Sci. Technol.* **22** (2009) 065014
- 10) Y. Itoh and U. Mizutani : "Pulsed field magnetization of melt-processed Y-Ba-Cu-O superconducting bulk magnet", *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** (1996) 2114-2125
- 11) Y. Itoh, et al. : "High-temperature superconducting motor using Y-Ba-Cu-O bulk magnets", *Jpn. J. Appl. Phys.* **34** (1995) 5574-5578
- 12) M. Miki, et al. : "Development of a synchronous motor with Gd-Ba-Cu-O bulk superconductors as pole-field magnets for propulsion system", *Supercond. Sci. Technol.* **19** (2006) S494-S499
- 13) Y. Itoh, Y. Yanagi and U. Mizutani : "Flux motion during pulsed field magnetization in Y-Ba-Cu-O superconducting bulk magnet", *J. Appl. Phys.* **82** (1997) 5600-5611
- 14) A. Terasaki, et al. : "Flux motion during pulsed-field magnetization in melt-processed YBCO", *Advances in Superconductivity X*, Springer-Verlag, Tokyo (1998) 945-948
- 15) H. Ikuta, et al. : "Pulsed field magnetization of melt-processed Sm-Ba-Cu-O", *Supercond. Sci. Technol.* **13** (2000) 846-849
- 16) Y. Yanagi, et al. : "Low temperature pulsed field magnetization of melt-processed Y-Ba-Cu-O superconducting bulk magnet", *Advances in Superconductivity IX*, Springer-Verlag, Tokyo (1997) 733-736
- 17) U. Mizutani, et al. : "Pulsed-field magnetization applied to high- T_c superconductors", *Appl. Supercond.* **6** (1998) 235-246
- 18) H. Fukai, et al. : "The effect of inhomogeneous flux penetration into bulk superconductor by pulsed field magnetization", *Supercond. Sci. Technol.* **18** (2005) 1179-1182
- 19) Y. Yanagi, et al. : "Pulsed field magnetization of a 36 mm diameter single-domain Sm-Ba-Cu-O bulk superconductor at 30, 35 and 77 K", *Supercond. Sci. Technol.* **18** (2005) 839-849
- 20) H. Fujishiro, et al. : "Time evolution and spatial distribution of temperature in YBCO bulk superconductor after pulse field magnetizing", *Supercond. Sci. Technol.* **16** (2003) 809-814
- 21) H. Fujishiro, et al. : "Temperature rise in an Sm-based bulk superconductor after applying iterative pulse fields", *Supercond. Sci. Technol.* **17** (2004) 51-57
- 22) H. Fujishiro, et al. : "Estimation of generated heat in pulse field magnetizing for SmBaCuO bulk superconductors", *Physica C* **412-414** (2004) 646-650
- 23) H. Fujishiro, et al. : "Generated heat during pulse field magnetization for REBaCuO (RE=Gd, Sm, Y) bulk superconductors with different pinning abilities", *Supercond. Sci. Technol.* **18** (2005) 158-165
- 24) K. Yokoyama, et al. : "Temperature rise and trapped field in a GdBaCuO bulk superconductor cooled down to 10 K after applying pulsed magnetic field", *Physica C* **426-431** (2005) 671-675
- 25) H. Fujishiro, et al. : "Pulsed field magnetization for GdBaCuO bulk with strong pinning characteristics", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009) 3545-3548
- 26) D. Furuta, et al. : " J_c distribution and trapped field distribution by pulsed field magnetization in superconducting bulk (II)", *Abstracts of CSJ Conference* **83** (2010) 159 (in Japanese)
古田大樹ら : 「超伝導バルクの J_c 分布とパルス着磁特性 (II)」, 第 83 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2010) 159

- 27) Y. Yanagi, et al. : "Trapped field distribution on Sm-Ba-Cu-O bulk superconductor by pulsed field magnetization", *Advances in Superconductivity XII*, Springer-Verlag, Tokyo (2000) 470-472
- 28) H. Ikuta, et al. : "Extracting the utmost from the high performance of Sm-Ba-Cu-O bulk superconductors by pulse field magnetizing", *Supercond. Sci. Technol.* **15** (2002) 606-612
- 29) H. Fujishiro, et al. : "Rise-time elongation effects on trapped field and temperature rise in pulse field magnetization for high temperature superconducting bulk", *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** (2005) 4919-4925
- 30) M. Sander, et al. : "Pulsed magnetization of HTS bulk parts at $T < 77$ K", *Supercond. Sci. Technol.* **13** (2000) 841-845
- 31) H. Fujishiro, et al. : "Record-high trapped magnetic field by pulse field magnetization using GdBaCuO bulk superconductor", *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** (2005) L1221-L1224
- 32) H. Fujishiro, et al. : "Higher trapped field over 5 T on HTSC bulk by modified pulse field magnetizing", *Physica C* **445-448** (2006) 334-338
- 33) H. Fujishiro, et al. : "Trapped field characteristics on $\phi 65$ mm GdBaCuO bulk by modified multi-pulse technique with stepwise cooling (MMPSC)", *Physica C* **468** (2008) 1477-1480
- 34) H. Fujishiro, et al. : "Possible explanation for trapped field enhancement on REBaCuO bulk by modified multi-pulse technique with stepwise cooling (MMPSC)", *Mat. Sci. Eng. B* **151** (2008) 95-100
- 35) M. Tsuchimoto, et al. : "Numerical evaluation of pulsed field magnetization of a bulk high T_c superconductor", *Cryogenics* **37** (1997) 43-47
- 36) K. Murata, et al. : "Repulsed magnetization of a bulk superconductor by long and low field with temperature control", *Physica C* **412-414** (2004) 704-707
- 37) M. Tsuchimoto, H. Kamijo and H. Fujimoto : "Maximum repulsed magnetization of a bulk superconductor with low pulsed field", *Physica C* **426-431** (2005) 800-803
- 38) H. Ohsaki, T. Shimosaki and N. Nozawa : "Pulsed field magnetization of a ring-shaped bulk superconductor", *Supercond. Sci. Technol.* **15** (2002) 754-758
- 39) H. Ohsaki, et al. : "Numerical simulation of pulsed field magnetization of cryocooler-cooled bulk superconductors", *AIP Conf. Proc.* **985** (2008) 999-1006
- 40) R. Shiraishi and H. Ohsaki : "Flux dynamics in inhomogeneous bulk superconductor during pulsed field magnetization", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16** (2006) 1794-1797
- 41) Y. Komi, M. Sekino and H. Ohsaki : "Three-dimensional numerical analysis of magnetic and thermal fields during pulsed field magnetization of bulk superconductors with inhomogeneous superconducting properties", *Physica C* **469** (2009) 1262-1265
- 42) K. Kajikawa, et al. : "Finite element analysis of pulsed field magnetization process in a cylindrical bulk superconductor", *Physica C* **468** (2008) 1494-1497
- 43) S. Braeck, et al. : "Superconducting trapped field magnets: Temperature and field distribution during pulsed field activation", *J. Appl. Phys.* **92** (2002) 6235-6240
- 44) K. Berger, et al. : "Influence of temperature and/or field dependences of the E - J power law on trapped magnetic field in bulk YBaCuO", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** (2007) 3028-3031
- 45) Z. Xu, et al. : "Theoretical simulation studies of pulsed field magnetisation of (RE)BCO bulk superconductors", *J. Phys.: Conf. Series* **234** (2010) 012049
- 46) H. Fujishiro and T. Naito : "Simulation of temperature and magnetic field distribution in superconducting bulk during pulsed field magnetization", *Supercond. Sci. Technol.* **23** (2010) 105021
- 47) H. Fujishiro, T. Naito and D. Furuta : "Analysis of temperature and magnetic field distribution in superconducting bulk during pulsed field magnetization", to be published in *IEEE Trans. Appl. Supercond.* (2011)
- 48) H. Fujishiro, T. Naito and M. Oyama : "Simulation of flux dynamics in a superconducting bulk magnetized by multi-pulse technique", to be published in *Physica C* (2011)
- 49) H. Fujishiro, et al. : "Simulation of pulsed field magnetization on HTSC bulk using vortex-coil", *Abstracts of CSJ Conference* **83** (2010) 157 (in Japanese)
藤代博之ら : 「Vortex-coil を用いたパルス着磁の捕捉磁場のシミュレーション」, 第 83 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2010) 157
- 50) T. Oka, et al. : "A 3 T magnetic field generator using melt-processed bulk superconductors as trapped field magnets and its application", *Physica C* **392-396** (2003) 739-742
- 51) T. Oka, et al. : "Construction of strong magnetic field generators by high T_c bulk superconductors and its applications", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **14** (2004) 1058-1061
- 52) N. Nishijima, et al. : "Magnetization method for long high- T_c bulk superconductors used for magnetic separation", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** (2003) 1580-1583
- 53) H. Fujishiro, et al. : "New type superconducting bulk magnet by pulse field magnetizing with usable surface on both-sides in open space", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16** (2006) 1080-1083
- 54) T. Hiyama, et al. : "Trapped field enhancement of five-aligned superconducting bulk magnetized by pulse field for magnetic separation", *Physica C* **468** (2008) 1469-1472
- 55) H. Fujishiro, et al. : "Highly efficient magnetic separation using five-aligned superconducting bulk magnet", *J. Phys. Conf. Series* **234** (2010) 032015
- 56) T. Ida, et al. : "Magnetization properties for Gd-Ba-Cu-O bulk superconductors with a couple of pulsed-field vortex-type coil", *Physica C* **412-414** (2004) 638-645
- 57) E. Morita, et al. : "Study of single pulsed-field magnetization of Gd-Ba-Cu-O bulk high-temperature superconductor with a split type of armature coil for rotating machinery", *Supercond. Sci. Technol.* **19** (2006) S486-S490
- 58) K. Yamaguchi, et al. : "Pulsed field magnetization properties for a large single-grain Gd-Ba-Cu-O high temperature superconductor bulk with a diameter of 140 mm by using a new type of pulsed field magnetization", *J. Phys. Conf. Series* **97** (2008) 012278
- 59) 吉本則之ら : 「磁場中有機半導体結晶薄膜作製法及び作製装置」(特願 2010-044727)

藤代博之 昭和 32 年 3 月 8 日生. 昭和 55 年東北大学工学部電子工学科卒業. 昭和 60 年同大学院工学研究科博士後期課程(電子工学専攻)修了.(財)半導体研究振興会研究員,九州工業大学助手,岩手大学工学部材料物性工学科助教授を経て,平成 18 年教授,現在に至る. 専門は電子材料学, 応用物理学. 低温工学協会, 日本物理学会, 応用物理学会会員. 工学博士.