

「超伝導マグネットの新しい作製技術に関する研究—Nb₃Alへの適用—」

物質系専攻 56128 豊谷和晃

指導教員：和田 仁（教授）

キーワード：超伝導、強磁場、マグネット作製技術

緒言 医療（MRI）、エネルギー（核融合炉）、輸送（リニアモーターカー）など、多くの超伝導応用では超伝導マグネットによって強い磁場を発生させる。現在、超伝導体のマグネットを作るには、まず、キロメートル長の超伝導線材を作製する必要がある。これまでに膨大な数の超伝導体が発見されているが、産業レベルで線材化がなされたのはNbTiとNb₃Snのみである。我々はそれらより優れた特性の超伝導体を利用することができていないのであるが、その大きな障害となっているのは、他の超伝導体には適当な線材化法が開発されていないことである。

ほぼすべての超伝導応用分野で、種々の理由から、より強い磁場の発生が期待されている。例えば、タンパク質分子の立体構造解析に貢献しているNbTiとNb₃Snを用いて作製されたNMR用超伝導マグネットでは、現在の最高発生磁場は22.3 Tである。この磁場を23.5 Tに増加することができれば、タンパク質分子の立体構造解析は飛躍的に進展すると予想されているが、NbTiとNb₃Snではこの磁場を達成することは難しい。

図1に様々な超伝導体の臨界電流密度 J_c の磁場特性を示す。超伝導マグネットの発生磁場を現状より強くしようとすると、Nb₃Snより優れた特性を持つ超伝導体を利用することになる。それを実現するためには、現在の線材化法をさらに改良するか、新しい考え方で超伝導マグネットを作製することが必要である。

目的 本研究では、NbTiやNb₃Snよりも優れた超伝導特性と機械的特性を持ち、強磁場中での応用が期待されているA15型化合物Nb₃Alを対象に、線材化を必要としない新しい考え方に基づく超伝導マグネット作製技術の可能性を検討した。この考え方（ π D法と呼ぶ）では、円筒状基板の表面に超伝導の生成をらせん状に生成させることにより、線材を作るプロセスを経ないで超伝導コイルを作製する。研究の目的は、 π D法の有効性を示すことによって、優れた特性を持つ超伝導体を実用化する1つの可能性を示すことである。

方法 今回、本研究では平坦な銅基板表面上にNb/Al混合粉末をcold-spray法により積層させ、これに電子ビームを線状に照射して短尺Nb₃Al試料を作製した。cold-spray法とは、原料の金属粒子を常温で噴射して基板に衝突させ、塑性変形を伴って付着させる技術[1]である。電子ビーム照射技術は冶金学的Nb₃Al作成法で適用された経緯があり、本研究の作製法として採用した[2]。図2はNb-12.3at%Al組成の電子ビーム照射試料の断面元素分析の結果である。この結果よりNb₃Al組成の粒が観測でき、この実験方法によるNb₃Al

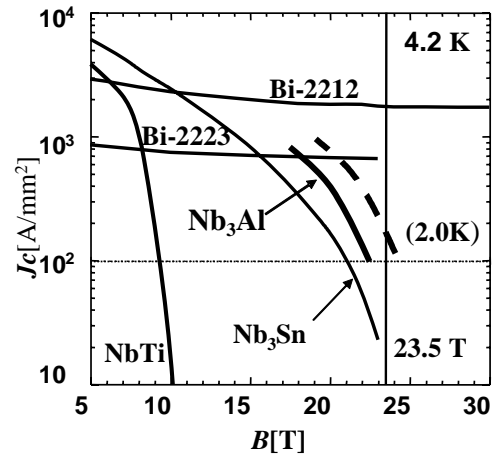


図1 超伝導体の臨界電流密度の磁場依存性

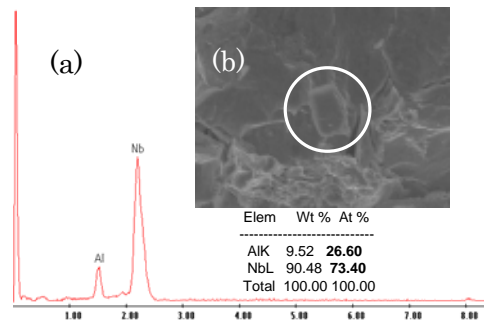


図2 試料元素分析結果

(a)EDX 元素分析 , (b)分析対象部分

生成の可能性を確認した。しかし、この組成ではNb₃Al層が十分に連続して形成されていない。そこで超伝導Nb₃Al粒子間の接続を考慮し、熱解析シミュレーションの結果とも併せて、cold-spray条件と電子ビーム照射条件を表1のように決めた。

表1 短尺試料における cold-spray 条件（作製条件）と電子ビーム照射条件（生成条件）

Cold-Spray 条件			電子ビーム照射条件				
Type	A	B	C	送り速度 v (m/min)	6	3	0.3
設計 (Nb/Al 比率)	3:1	1:1	3:1+中間Al層	投入熱量 Q (W)	200-1200 (200W 刻み)		1500
Nb/Al 膜厚 (μm)	300			電子ビーム径 φ (mm)	1 (設定値)		

作製した短尺試料について、臨界温度 T_c （抵抗法・磁化法）と臨界電流 I_c を測定した。臨界電流測定は、18 T 超伝導マグネットを使用し、0~12 T の磁場中において測定した。また、SEM を用いて電子ビーム照射部分での Nb/Al 組成の変化を観察した。

短尺試料の結果を元に、cold-spray/電子ビーム照射の条件を検討し、円筒コイル試料の作製条件を決めた。円筒銅基板は、外径 40 mm，肉厚 1 mm，高さ 50 mm を使用した。円筒試料の場合、表 1 の cold-spray 条件、各 A、B、C に対し、電子ビーム送り速度 6, 3 m/min において照射した。特性測定では、磁場履歴を固定し、各磁場での I_c を測定するとともに、円筒中心にホール素子を設置して、磁場の変化を計測した。図 3 に円筒試料の概観および、 I_c と磁場の計測時のセットアップを示す。磁場の掃引は いずれの試料に対しても 0 T→2 T→0 T→1 T の範囲で行い、2 T, 1 T, 0.7 T, 0.5 T の磁場値で計測を行った。磁場掃引速度は 18 T/60 min、磁場安定待機時間は 180 秒とした。電流の増加速度はおよそ 5 A/30 sec で、5 A 到達毎に 60 秒間電流を保持した。

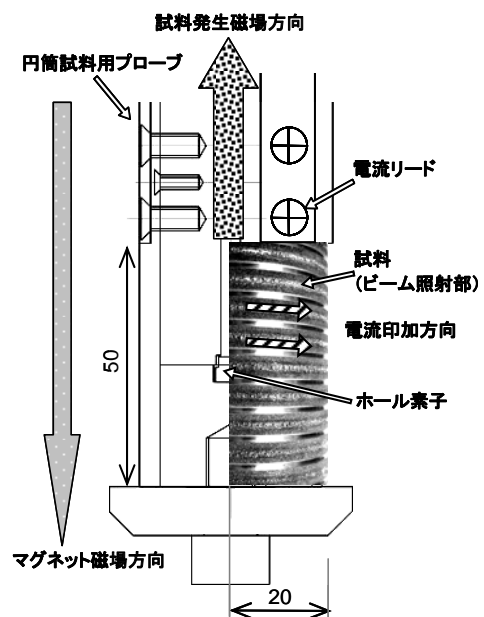


図3 円筒試料測定系

実験結果と考察

短尺試料の T_c の結果を図 4 に示す。 T_c onset の値は抵抗法では 12.5 K、磁化法では 16.6 K となった。このことから電子ビーム照射によって、Nb₃Al が生成していることが確認できたが、その存在量は極めて少ない。また、抵抗法と磁化法での T_c onset の違いから、Nb₃Al は連続していないことがわかる。

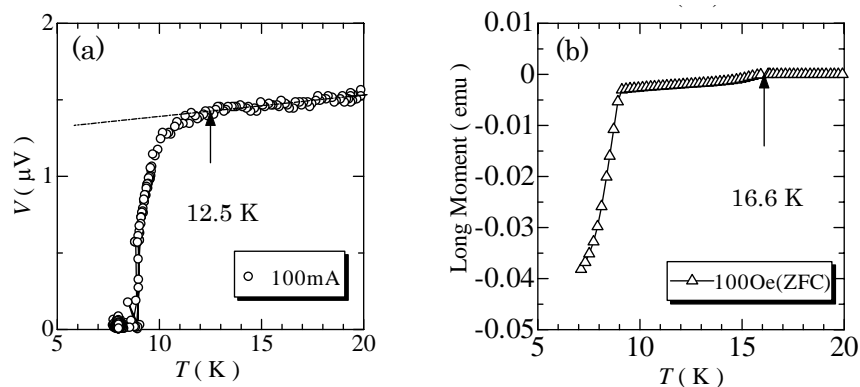


図4 T_c 測定結果
(a)抵抗法，(b)磁化法

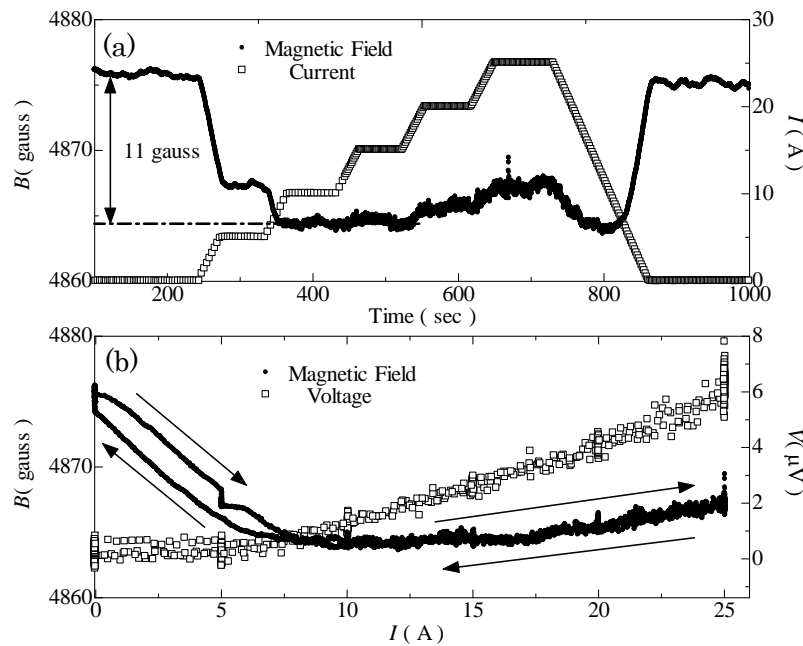


図5 0.5Tにおける印加電流と発生磁場との関係
(a)印加電流による磁場の時間変化，(b)磁場と試料電圧の電流依存性

短尺試料の結果から決定した電子ビーム照射条件で作製した円筒試料に電流を印加した場合の、測定時間に対する磁場変化と印加電流との関係を図5に示す。図5(a),(b)は磁場履歴における0.7 Tから0.5 Tへ減磁した直後の測定結果である。図5(a)は電流を時間変化させているために、磁場が時間変化している様子を表している。この磁場変化を電流に対してプロットしたものが図5(b)である。

図5の結果から、電流を印加することにより最大11 gaussの磁場変化があることが確認できた。しかし、6 Aを超えると変化を見せない部分が現れ、さらに電流が増すと減衰する傾向が観測された。6 A以下の低電流ではほぼ線形になっており、コイルが磁場を発生していることが確認できた。計算上では11 gaussの磁場を発生させるには、この試料では、5.76 Aの電流がコイル上を流れる必要があり、計算値と合っている。

結論 実験から、cold-spray法と電子ビーム照射法の組み合わせにより、 Nb_3Al を円筒基板の上にコイル状に生成させ、長尺の超伝導線材を作ることなく超伝導磁石を作製するという新しい考え方、すなわち π D法が原理的に可能であることを示すことができた。しかし、得られた超伝導特性はまだ極めて不十分なものであった。その理由は、生成する Nb_3Al 結晶粒間の接続に問題があるためと思われる。試料の初期構造の設定、cold-sprayと電子ビーム照射の条件、試料の冷却条件などをさらに検討する必要がある。

今後の展望 Nb/Al 層の構造やサイズ、製造方法、および、電子ビーム照射条件の最適化に取り組む。冷却速度がコントロールでき、らせん状に Nb_3Al を生成しコイルとする装置を作製する。これを用いてコイルを作製し、その超伝導特性を観測して短尺試料の結果と比較し、新しい超伝導マグネット作製技術としての完成度を高める。企業との共同研究に発展することが望まれる。

参考文献

- [1] T.Stoltenhoff, et al., J.Thermal Spray Tech 11 542 (2002)
- [2] H.Kumakura, et al., Appl.Phys.Lett. Vol49.No.1 601 (1986)