

氏名(本籍)	くろ だ つね お 黒田恒生(兵庫県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第1,110号
学位授与年月日	平成7年7月31日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
審査研究科	工学研究科
学位論文題目	超伝導材料の応力/ひずみ効果に関する研究
主査	筑波大学教授 工学博士 吉崎亮造
副査	高エネルギー物理学研究所教授 理学博士 新富孝和
副査	筑波大学教授 工学博士 滝田宏樹
副査	筑波大学教授 理学博士 前田弘
副査	筑波大学教授 理学博士 森茂樹

## 論文の要旨

超伝導線材をマグネットに使用する場合、超伝導線材にはマグネットの製作から運転までに種々の応力が生じ、超伝導特性が劣化する問題が起こる。この応力下における種々の超伝導線材の特性を調べ、併せてその劣化機構を解明することは、応力/ひずみに耐性のある超伝導線材の開発や超伝導マグネットの設計・製作のために有用な指針を与え、超伝導マグネットの性能の信頼性の向上に寄与する。

本論文では、実用線材として現在最も広く使用されている  $Nb_3Sn$  線材について、超伝導特性の応力/ひずみ効果を明らかにした。さらに、新超伝導マグネット用線材として実用化が最も期待されている  $Nb_3Al$  線材および酸化物高超伝導体の銀シース  $BiSrCaCuO$  テープ線材の応力下における超伝導特性の変化を明らかにした。また、 $Nb_3Sn$  線材の核融合炉用マグネット線材としての実用性の評価のため中性子線照射効果についての研究を行った。

ブロンズ法  $Nb_3Sn$  線材の応力/ひずみ下における超伝導特性の研究では、種々のブロンズ/ニオブ体積比を持つ  $Nb_3Sn$  線材を作製し、臨界温度 ( $T_c$ )、上部臨界磁場 ( $B_{c2}$ )、臨界電流 ( $I_c$ ) の応力/ひずみ特性を測定した。その結果、 $T_c$  および  $B_{c2}$  が応力/ひずみに対し可逆領域と非可逆領域のあることを明らかにし、さらに可逆領域における  $T_c$  と  $B_{c2}$  間に相関関係があることを明らかにした。そしてこれらの関係が、超伝導線材とブロンズマトリックスとの熱収縮率の相違から生じていることを定量的に解明した。一方、 $I_c$  について“ $n$  値”のひずみ依存性を詳しく調べ、“ $n$  値”が割れ等による  $I_c$  の劣化の指標として極めて有効であること初めて明らかにした。

新超伝導材料、Nb チューブ法  $Nb_3Al$  線材の応力/ひずみ下における超伝導特性の研究では、 $T_c$  および  $I_c$  の応力/ひずみ特性を調べた。その結果、応用上有効な予ひずみを与えるためには Cu-Ni 合金を複合した線材が有効であることを明らかにした。また、 $I_c$  が 1% を超える大きな可逆ひずみ領域を示し、 $I_c$  のひずみ劣化率が  $Nb_3Sn$  線材の値よりかなり小さいことを明らかにした。このため、 $Nb_3Al$  線材が大型超伝導マグネット用線材として極めて優秀であることを初めて明らかにした。

新超伝導材料、Bi 系酸化物超伝導テープ材については、高  $T_c$  相および低  $T_c$  相の両方について  $I_c$  - ひずみ特性を測定した。この結果、銀シーステープ材では線材の構成や酸化物芯の微細組織の改善により非可逆ひずみ値

を大きくできることを明らかにした。

これまでの研究は、応力／ひずみを線材の長さ方向（軸方向）に加えたものであったが、新たに線材の径方向（横方向）に圧縮応力を加えブロンズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材、Nb チューブ法 Nb<sub>3</sub>Al 線材、ジェリーロール法 Nb<sub>3</sub>Al 線材について超伝導特性の変化を測定した。円形断面線材の T<sub>c</sub> および I<sub>c</sub> の横方向圧縮応力依存性は、円形断面における応力分布を考慮して解析することによって軸方向の結果と本質的に同等であることを明らかにした。即ち、横方向圧縮応力下における I<sub>c</sub> の劣化は、可逆領域と非可逆領域に分けられ、可逆領域下の I<sub>c</sub> の劣化率は軸方向の場合とほぼ同等である。従って、ブロンズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材における横方向応力に対する著しい I<sub>c</sub> 低下は、ブロンズマトリックスの機能的強度が小さいためであると結論できる。

Nb<sub>3</sub>Al 線材の超伝導特性に及ぼす中性子照射効果の研究では、室温で 10<sup>18</sup>n/cm<sup>2</sup> から 10<sup>19</sup>n/cm<sup>2</sup> 程度の中性子を Nb チューブ法 Nb<sub>3</sub>Al 線材に照射し、超伝導特性の変化を測定した。T<sub>c</sub> は中性子照射に対し単調に低下したのに対し、I<sub>c</sub> は 1.4 × 10<sup>19</sup>n/cm<sup>2</sup> までは変化せず、それ以上の照射に対し急速に劣化した。この特異な照射量依存性は Nb<sub>3</sub>Al 超伝導体の組成が、非化学量論的であることとフィラメント径が極めて小さいことに起因するものと考えられる。

このように本研究では超伝導応用に欠かすことのできない、かつ特徴の異なる種類の超伝導線材（Nb<sub>3</sub>Sn, Nb<sub>3</sub>Al, Bi 酸化物）に対し、応用上重要な応力／ひずみ効果に関し軸方向と横方向の両方について T<sub>c</sub>, B<sub>c2</sub>, I<sub>c</sub> などの超伝導特性を測定・評価した。本研究の結果、臨界特性の応力／ひずみ効果がそれぞれに相関していることを明らかにすると共に複合線材としての応力／ひずみ特性の測定・解析からそれぞれの線材の特性を定性的かつ定量的に明らかにすることができた。

## 審 査 の 要 旨

本研究は、実用上重要な超伝導材料についてその応力／ひずみ特性を材料特性としてばかりでなく、実際に使用する複合線材の形態において測定し解析を行ったところに特徴がある。さらに詳細かつ精密な測定から系統的な超伝導特性の変化を明らかにし、入念な解析からその原因を解明し統一的な解釈を可能としたことは、高く評価される。

よって、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。