NbTi 極細多芯超伝導線の臨界電流密度とピンニング特性

I. 熱処理線

鈴木 光政, 三 橋 説

東北大学工学部電気工学科 仙台市青葉区荒巻字青葉

(1992年2月25日受理, 6月22日改訂受理)

Critical Current Density and Pinning Behavior in Multifilamentary NbTi Wires; I. Heat-Treated Wires

Mitsumasa SUZUKI and Setsu MITSUHASHI

Department of Electrical Engineering, Tohoku University, Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980

(Received February 25, 1992; Revised June 22, 1992)

Synopsis:

Critical current density J_c and its temperature dependence in multifilamentary NbTi wires were measured. Further their pinning behavior was examined. Used samples which have been fabricated by a double stacking method are divided into two groups. One group was heat-treated in the fabrication process in order to produce the precipitates of α -Ti and the filament diameter d_f of NbTi wires ranges from 0.39 to 1.53 μm . For the other group, such a heat-treatment was not done and the d_f of some samples was reduced to the level of below 0.1 μm . In this paper, the experimental results on the former group, namely heat-treated (HT) samples with Cu-CuNi mixed matrix or CuNi matrix, are given. The J_c of samples is affected by d_f . In case of 4.2 K, these samples show a slight difference in J_c at high fields. As the temperature rises, the effect of d_f on J_c becomes remarkable and the J_c - B curves are very different among samples. Normally, samples with small d_f show low J_c values and reveal a rapid decrease in J_c with increasing magnetic field. An anomalous change in J_c at low fields of below 0.1 T was seen at temperatures close to T_c for samples with sub-micron sized filaments. The pinning force F_p vs. reduced field $b(=B/B_{c2})$ curves at 4.2 K for different samples coincide with each other except for the sample with $d_f=0.39 \mu\text{m}$. The reduced pinning curves ($F_p/F_{p, \text{max}}$ vs. b) obtained at various temperatures have similar shapes for each sample. The b_m where the maximum of F_p takes place is around 0.35 except for the sample with $d_f=0.39 \mu\text{m}$. The pinning properties of these samples are discussed in terms of their upper critical field B_{c2} and transition temperature T_c .

1. 序 論

最近, 発電機や変圧器など商用周波数で使用される電力機器への超伝導の応用を目指し, 交流用超伝導線の開発が各方面で積極的に進められている¹⁾. 現在使用されている超伝導線の多くは, Cu の母材 (マトリックス) の中に小さな直径の超伝導フィラメントを多

数本埋め込んだ多芯構造をもつ複合超伝導線である。これらの超伝導線を変動磁場中使用したりパルス運転や交流励磁すると, 交流損失が発生する。近年, 超伝導線の電磁現象の研究により, 交流損失の大きさは, フィラメント径や線材構造に依存することが明らかにされた²⁾。交流用超伝導線の開発で重要な課題は, 交流損失の低減と高電流容量である。交流損失は, フィ

ラメントの細線化, ツイストピッチの短縮化およびマトリックスの高抵抗化(磁性不純物の添加も含む)等で低減される。低交流損失でかつ高電流量であるためにはフィラメントの細線化とともにその数の増大と高電流密度化が必要である。しかし, フィラメント数の増加はフィラメント間隔を減少させ, フィラメント間に近接効果を引きやすくする。近接効果による等価フィラメント径の増加は, 交流損失の増大をもたらす。したがって, 超伝導線の電流容量を増加させるためには, フィラメントの電流密度を向上させなければならない。Hlásnik や Tateishi らは^{3,4)}, 液体ヘリウム温度で NbTi 多芯線の臨界電流密度のフィラメント径依存性を系統的に実験し, フィラメント径が $0.1\ \mu\text{m}$ 以下の多芯線では臨界電流密度が著しく増加することを見いだした。極細フィラメント多芯線のピンニング特性をさらに明確にするためには, 臨界電流密度の温度変化に関する知見が必要とされる。

本論文では, 市販されている α -Ti 相の析出熱処理を施した NbTi 極細多芯線について臨界電流密度 J_c の温度依存性, 上部臨界磁場 B_{c2} , 臨界温度 T_c を測定し, ピンニング特性を検討した結果について述べる。

2. 測定試料

測定した 6 種類の NbTi 極細多芯線試料の諸元を Table 1 に示す。これらの試料はダブルスタック構成で, 静水圧押し出し法を用いて昭和電線電纜(株)によって製作された⁵⁾。NbTi の組成は Nb-53.5 wt% Ti である。試料のフィラメント数は 9,720 本, 15,367 本, 21,336 本の 3 種類である。マトリックスは CuNi と安定性を考慮して NbTi フィラメントを Cu で被覆した CuNi/Cu の 2 種類である。後者の場合は, マト

リックス比が異なるものもある。CuNi の組成は Cu-10 wt.%Ni である。試料のフィラメント径 d_f は $0.39\ \mu\text{m}$ から $1.53\ \mu\text{m}$, フィラメント間隔 d_N は $0.09\ \mu\text{m}$ から $0.65\ \mu\text{m}$ の範囲にある。試料のツイストピッチ l_p は 1 mm 前後のものが多い。これらの試料は, α -Ti 相を析出させるため約 300°C で 70 時間の熱処理を施した後, 30% の減面率で伸線加工し最終線径に仕上げられている。

なお, 試料のデータを検討する中で, 参考にした Larbalestier の $d_f=10\ \mu\text{m}$ の NbTi 多芯線の諸元⁶⁾ (Sample Ref. とし, 本稿では以後参考試料と呼ぶ) を, Table 1 に併記した。

3. 臨界電流密度, 臨界温度 および 上部臨界磁場の測定法

臨界電流測定用試料は, 約 100 cm の NbTi 極細多芯線を円筒状銅ブロック ($22\ \text{cm}\ \phi$) にコイル状に巻いたもので, 電圧端子間距離は 50 または 60 cm である。臨界電流は, 一定磁場の下で試料電流をスイープさせ, 発生する端子間電圧が $1\ \mu\text{V}/\text{cm}$ に対応する時の電流で決められた⁷⁾。4.2 K での測定は, コイル状試料を直接液体ヘリウム中に浸した状態で行われた。この温度では 50 A の電源を使い, 10 秒から 20 秒のスイープ時間をかけて試料の電圧対電流カーブを直接 X-Y レコーダに記録し, 臨界電流を測定した。4.2 K 以上では, コイル状試料をステンレス容器(断熱セル)に入れ, 真空断熱を形成した後, 液体ヘリウムに浸した。試料の温度は, 円筒状銅ブロックに巻きつけられたヒータ線の電力で制御された。臨界電流の測定に際し, 電流リード部に発生するジュール発熱の影響を少なくするため, 高速度で試料電流をスイープした。最大の電流スイープ速度は約 250 A/秒であるが, ほ

Table 1 Specification of samples.

Sample	Wire diameter (mm)	Filament number	Filament diameter (μm)	Filament spacing (μm)	Ratio (NbTi:Cu:CuNi)	Twist pitch (mm)
A	0.103	9,720	0.508	0.22	1:0.35:2.88	0.98
B	0.153	9,720	0.755	0.32	1:0.35:2.88	0.98
C	0.311	9,720	1.53	0.65	1:0.37:2.90	25.6
E	0.103	21,336	0.39	0.09	1:0.16:2.16	0.99
F	0.153	21,336	0.57	0.13	1:0.16:2.16	1.33
G	0.209	15,367	0.93	0.20	1:0.00:2.30	1.75
Ref. ^{a)}	0.686	2,100	10	—	1:1.80:0.00	—

^{a)} Sample Ref. was given as a reference sample for comparison.⁶⁾

とんどの測定で臨界電流値までのスイープ時間を約 0.1 秒になるように調整した。発生する端子電圧と電流は、2 チャンネルのデジタル・ストレージ・オシロスコープを通して、X-Y レコーダに読みだされた。臨界電流の測定は、磁場の上昇過程で行われた。一定温度での測定を終了した後、より高温度に試料温度を設定し、同様の測定を継続した。なお前報⁷⁾で断熱セルや高温領域での臨界電流密度測定法を紹介したので、詳細は前報に譲る。同一試料の臨界電流について、短時間 (0.1 秒) での電流スイープの場合と約 10 秒間のスイープの場合を比較した結果、両者がよく一致することをすでに確認している。また J_c は、NbTi の断面積で臨界電流 I_c を除した量である。測定システムの電流容量により、 I_c の温度依存性の測定は、 I_c が 20 A 以下の試料に限られた。

T_c および B_{c2} は、臨界電流測定の場合と同様四端子抵抗法により測定された。試料は、臨界電流測定に使用されたものと同一の超伝導線から長さ 15 mm に切り取られた短尺試料である。電圧端子間距離は 10 mm、測定電流は 10 mA である。 T_c 測定の場合は、試料は銅製の円筒容器に入れられた。銅容器を液体ヘリウムに浸した後、ヘリウム液面から約 1 cm の高さに容器を引き上げ、上昇温度過程で抵抗遷移曲線を測定した。遷移曲線から、完全に常伝導遷移した時の電圧の 10% の電圧が発生する温度を求め、 T_c として定義した。なお、測定電流が 1 mA の場合の抵抗遷移曲線を測定し、 T_c に及ぼす電流容量の影響を検討した。

B_{c2} は、4.2 K で測定されたほかいくつかの試料については 4.2 K から T_c までの温度範囲で測定された。4.2 K では、試料は直接液体ヘリウム中に浸された。高温では、温度制御可能な断熱セルが使用された。この断熱セルは、4 個までの試料を同時に測定できる。磁場方向は、測定電流の方向に垂直である。一定温度のもとで磁場を上昇させ、試料の抵抗遷移曲線を測定した。遷移曲線から、完全に常伝導遷移した時の電圧の 1% の電圧が発生する磁場を求め、 B_{c2} として定義した。なお、4.2 K の臨界電流の磁場依存性からピンニング力を算出し、そのゼロ外挿から B_{c2} を求め、抵抗法の結果と比較した。

4. 臨界電流密度特性

Fig. 1 に、6 種類の試料の 4.2 K における J_c の磁場依存性を示す。参考試料の J_c は、文献から引用した⁶⁾。Fig. 1 に見られるように、低磁場では各試料の

Fig. 1 Critical current density at 4.2 K as a function of magnetic field for samples E ($d_f=0.39 \mu\text{m}$), A ($d_f=0.508 \mu\text{m}$), F ($d_f=0.57 \mu\text{m}$), B ($d_f=0.755 \mu\text{m}$), G ($d_f=0.93 \mu\text{m}$) and C ($d_f=1.53 \mu\text{m}$). Data on sample Std. ($d_f=10 \mu\text{m}$) which is a reference sample, were taken from Ref. 6 and included for comparison.

J_c に顕著な違いは見られない。3~4 T 以上の磁場になると、フィラメント径に対する系統的な差が現われ、小さなフィラメント径試料の J_c は、磁場の増大とともに大きな減少を示す。高磁場では、明らかにフィラメント径が小さな試料ほど J_c は低い。

フィラメント径の異なる二つの試料 E ($d_f=0.39 \mu\text{m}$) と B ($d_f=0.755 \mu\text{m}$) について、4.2 K 以上の J_c の磁場依存性を Fig. 2 と Fig. 3 に示す。これらの図より、温度が高くなると全磁場領域で J_c は低下し、高温になるほど J_c の磁場依存性が大きくなることがわかる。また、フィラメント径の小さい試料 E の J_c は、いずれの温度でも試料 B より大きな磁場依存性を示す。 T_c 付近の温度になると、両試料とも、低磁場 (約 0.1 T) 領域で J_c の急激な変化が見られる。特に、試料 E の 7 および 7.5 K での J_c は、この現象を顕著に現わしている。

高温における J_c のフィラメント径依存性を調べるため、Fig. 4 に試料 A, B, C, E, F の 7.5 K の J_c -B 特性を示した。4.2 K の場合に比較して、フィラメント径による差は顕著になり、小さなフィラメント径

Fig. 2 Critical current density at various temperatures as a function of magnetic field for sample E ($d_f=0.39 \mu\text{m}$).

Fig. 3 Critical current density at various temperatures as a function magnetic field for sample B ($d_f=0.755 \mu\text{m}$).

Fig. 4 Critical current density at 7.5 K as a function of magnetic field for samples E ($d_f=0.39 \mu\text{m}$), A ($d_f=0.508 \mu\text{m}$), F ($d_f=0.57 \mu\text{m}$), B ($d_f=0.755 \mu\text{m}$) and C ($d_f=1.53 \mu\text{m}$).

Fig. 5 Relative critical current density at various magnetic fields as a function of temperature for sample A ($d_f=0.508 \mu\text{m}$). Here, $J_c(4.2 \text{ K})$ indicates critical current density at 4.2 K.

試料ほど全磁場領域で小さな J_c を示す。

Fig. 5 は、一定磁場における J_c の温度変化の一例である。4.2 K で比較的高 J_c を示す試料 A ($d_f=0.508 \mu\text{m}$) について、各温度の J_c を 4.2 K の J_c (4.2 K) で規格化して示した。 J_c は、4.2 K から 5 K

の範囲では温度の上昇とともに直線的に低下する傾向を示し、また、高磁場になるとその低下が大きくなることがわかる。電力機器で利用される $B=2\sim 3 \text{ T}$ に着目すると、4.2 K から 4.5 K の温度上昇により、 J_c

Table 2 Transition temperature T_c , upper critical field B_{c2} at 4.2 K and parameters (n, p, q) related to pinning characteristics for samples.

Sample	T_c (K)	$B_{c2}(4.2\text{ K})$ (T)	n	p	q
A	8.46(8.50 ^{a)})	9.93(10.05 ^{b)})	2.99	0.746	1.75
B	8.57(8.61 ^{a)})	10.30(10.35 ^{b)})	2.57	1.71	1.85
C	8.97(9.04 ^{a)})	10.50(10.50 ^{b)})	—	0.825	1.35
E	8.26(8.29 ^{a)})	9.67(9.75 ^{b)})	2.95	0.782	1.38
F	8.41(8.44 ^{a)})	9.96(10.00 ^{b)})	2.50	0.865	1.59
G	8.68(8.72 ^{a)})	10.20(10.10 ^{b)})	—	1.12	1.72

^{a)} Values were obtained from resistive transition curves measured with a current of 1 mA.

^{b)} Values were obtained by extrapolating pinning force density (F_p) to zero.

は～12%程度減少する。

5. ピンニング特性

Table 2 に、四端子抵抗法で測定された試料の T_c と 4.2 K の B_{c2} を示す。 T_c は、フィラメント径の減少とともに 8.97 K から 8.26 K へと低下している。測定電流の T_c への影響は少なく、1 mA で測定された T_c との差は 0.1 K 以内に収まっている。

B_{c2} は、 T_c と同様にフィラメント径の減少とともに、10.50 T から 9.67 T へと減少している。ピンニング力のゼロ外挿から求めた B_{c2} は、試料 G の場合を除いて高くなる。特に、試料 A では抵抗法との差が大きく、抵抗法での測定電流密度が高くなるためと推測される。ピンニング力のゼロ外挿法と抵抗法から求めた B_{c2} の差は、大きくても ～0.1 T 程度であることから、 B_{c2} として簡便に測定できる抵抗法の結果を使用する。Fig. 6 は、抵抗法で得られた試料 A, B, C, E および F の B_{c2} の温度依存性である。高温度になると各試料の B_{c2} の差は、4.2 K の場合より広がる。

Fig. 7 は、各試料の 4.2 K におけるピンニング力 F_p と規格化磁場 $b(=B/B_{c2})$ の関係である。この図より、試料 E($d_f=0.39\text{ }\mu\text{m}$) は全体的に小さな F_p を示すが、その他の試料は、参考試料とほぼ同様の F_p - B/B_{c2} 特性を示すことがわかる。フィラメント径が $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 以上の試料になると F_p の最大値 $F_{p, \max}$ に顕著な差は見られない。 $F_{p, \max}$ を示す規格化磁場 $b_m(b_m=B_m/B_{c2})$ であり、 B_m は $F_{p, \max}$ の時の磁場値を示す) は、参考試料より少し低磁場側にシフトし、

Fig. 6 Upper critical field as a function of temperature for samples E($d_f=0.39\text{ }\mu\text{m}$), A($d_f=0.508\text{ }\mu\text{m}$), F($d_f=0.57\text{ }\mu\text{m}$), B($d_f=0.755\text{ }\mu\text{m}$) and C($d_f=1.53\text{ }\mu\text{m}$).

約 0.3～0.4 である。また、 b_m もフィラメント径がこの程度の範囲で変化しても大きな違いは見られない。

Fig. 8 に、各試料の 4.2 K における規格化ピンニング力 $F_p/F_{p, \max}$ と規格化磁場 b の関係を示す。試料 C($d_f=1.53\text{ }\mu\text{m}$) は、参考試料とほぼ同様な特性が得られているが、他の試料では最大ピンニング力を示す規格化磁場 b_m が少しそれより低磁場側にシフトしている。全体的にはフィラメント径が変化しても曲線の

Fig. 7 Pinning force at 4.2 K as a function of reduced field for all samples.

Fig. 8 Reduced pinning force at 4.2 K as a function of reduced field for all samples.

形状に大きな違いは見られない。

試料のピンニング力の温度スケールを検討するため、Fig. 9 に異なる温度で得られた規格化ピンニング力 $F_p/F_{p, \max}$ と規格化磁場 b の関係を示す。(a)は試料 E ($d_f=0.39 \mu\text{m}$), (b)は試料 A ($d_f=0.508 \mu\text{m}$) の結果である。これより、両試料の規格化ピンニング力は、全体的にはよく温度スケールされると言える。特に b_m より低磁場側の場合、各温度で得られた規格化ピンニング力はよく一致しており、温度上昇によ

Fig. 9 Reduced pinning force at various temperatures as a function of reduced field for samples (a) E ($d_f=0.39 \mu\text{m}$) and (b) A ($d_f=0.508 \mu\text{m}$).

ってほとんど変化しない。一方、 b_m より高磁場側ではスケールの程度は低磁場側ほどよくない。特に、 b_m より僅かに高い磁場付近に着目すると、高温度になるほど規格化ピンニング力の低下が急激になる。なお試料 E の 7.5 K で測定された特性は、他の温度で測定されたものと著しく異なり、低規格化磁場 $b < 0.1$ 付近で最大ピンニング力が現われている。これは、Fig. 2 の 7.5 K の結果に示したように、 $B \sim 0.1 \text{ T}$ 付近で起きる大きな J_c 変化に対応するものである。この低

磁場でのデータを省くと試料Eのピンニング力は、全温度領域においてよくスケールしている。

6. 考 察

磁場下での超伝導線の臨界電流密度特性は、磁束ピンニングの理論を用いて検討されることが多い。ピンニング理論によれば⁸⁾、一般に超伝導体の体積的ピンニング力 F_p は、個々のピンニング機構あるいは summation モデルに無関係に 磁場依存性と 温度依存性の項に分けられ、

$$F_p = A \{B_{c2}(T)\}^n \cdot f(b) \quad (1)$$

の形でまとめることができる。 A は磁場、温度にあまり依らない係数である。ここで direct summation モデル、point ピン・モデルでは $n \sim 2$ 、Kramer モデルでは $n \sim 5/2$ である。 $B_{c2}(T)$ は規格化温度 $t (= T/T_c)$ と 0 K での値 B_{c20} を使用し、さらに細線化により T_c に比例して B_{c2} が低下すると仮定すると、(2)式のように書き表わすことができ、定性的なピンニング特性の温度依存性を検討できる。

$$B_{c2}(T) = B_{c20} (T_c/T_{c0}) (1 - t^2) \quad (2)$$

ここで、 T_{c0} は細線化される前の元の線材の臨界温度とする。また、磁場依存性の項 $f(b)$ の形については現象論的に、

$$f(b) = b^p (1 - b)^q \quad (3)$$

と書け、NbTi では $p \sim 1$ 、 $q \sim 1$ である。

本実験の 4.2 K の J_c (Fig. 1) は、低磁場では試料による大きな違いはないが、高磁場になるとフィラメント径の小さい試料で低下が顕著になる。また、高温度 (Fig. 4) ではフィラメント径が小さい試料ほど全磁場領域で J_c は低く、磁場増加による J_c の低下は著しい。これらを、ピンニング力を表現する (1) 式に基づき定性的に理解することは可能である。まず一定温度におけるピンニング特性は (3) 式より検討でき、高磁場のピンニング特性は $(1 - b)^q$ に支配されることがわかる。すなわち、 B_{c2} により制限されるため、 B_{c2} の低い試料では J_c の低下がより低い磁場で起こることになる。この予測は、Fig. 1 の結果と良く対応する。高温度の場合、(2) 式よりピンニング力は試料の T_c が低下すると $(1 - t^2)^n$ の項を通して減少することになる。さらに、 T_c の低下により B_{c2} も下がるため、高磁場における J_c の劣化が著しくなると推測される。したがって、高温度領域では T_c の低い試料の場合、高 J_c 特性を期待できない。実際、Table 2 に示したように T_c の低下が認められた小さなフィラ

メント径試料は、7.5 K では全磁場領域で低い J_c を示している (Fig. 4)。なお、(1) 式で係数 A が一定とすれば、最大ピンニング力 $F_{p, \max}$ は $\{B_{c2}\}^n$ に比例する。4.2 K の J_c (Fig. 1) を 3~4 T 以上の磁場領域で詳しく見ると、それらは B_{c2} と同様試料のフィラメント径が小さくなるに従って低下している。すなわち、本試料のピンニング特性の変化を B_{c2} のフィラメント径依存性で定性的には説明できる。

ここで試料のピンニング指数 n 、 p 、 q を検討する。各温度における $F_{p, \max}$ と B_{c2} から $\log F_{p, \max}$ と $\log B_{c2}$ をプロットし、その傾きとして指数 n を求める。ピンニング指数 p および q は、4.2 K での $F_p/F_{p, \max}$ と B/B_{c2} の関係から求めた。Table 2 に指数 n 、 p および q の結果を示す。本試料の指数 n は 2.50 ~ 2.99 の範囲にあり、フィラメント径が小さくなると n が大きくなる傾向が認められた。これは、小さなフィラメント径の試料では J_c の温度依存性が大きくなることを意味する。しかしながら、 n 値がフィラメント径により異なる原因は、不明である。 p および q は、大きなピンニング力を示す試料で増加する。 p は 0.75 ~ 1.17、 q は 1.35 ~ 1.85 の範囲にある。後で報告する極細多芯線試料 (非熱処理線)⁹⁾ の場合 (p は 0.179 ~ 1.47、 q は 1.27 ~ 2.92 の範囲にある) と比較すると、フィラメント径に対する p および q の変化は小さい。

NbTi 線のピン止め中心として、主に期待されるのは冷間加工により生じる転位セルと、加工後の熱処理によって形成される α -Ti 相である¹⁰⁾。転位セルが支配的な場合は、最大ピンニング力を示す規格化磁場 b_m は 0.6 ~ 0.7 で $F_{p, \max}$ は $2 \sim 3 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ 程度である¹¹⁾。他方 α -Ti 相の場合には b_m 低磁場側に移り約 0.25 となり、 $F_{p, \max}$ はより大きくなる。実用の多芯線では、熱処理の後さらに冷間加工を施し、リボン状の α -Ti 相に変形させてピン止め中心を増やし、高磁場特性を改善させている。本試料は参考試料に類似した J_c の磁場依存性 (Fig. 1) やピンニング特性 (Fig. 7 および Fig. 8) が見られ、 b_m はおよそ 0.35 であり、4.2 K の $F_{p, \max}$ は $6 \sim 10 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ である。したがって、主として α -Ti 相によるピンニング機構が本試料において働いていると考えられる。しかしながら、熱処理後の加工によってどの程度変形された α -Ti 相が形成され、ピンニング特性に影響しているかは把握できない。本試料のようにフィラメント径が小さい線材を製作する場合は、熱処理後の伸線

加工でフィラメントが断線することが充分予想され、ピンニング特性を向上させるために必要な加工工程を定量的に検討する必要がある。

ところで、Fig. 9 (a)と(b)に示すように、測定した試料のピンニング力は温度に対して比較的良好なスケールリングが見られたが、詳細に眺めると b_m より高磁場側では、いずれの試料でも類似した振舞いを示す。つまり高温で得られた規格化ピンニング力は b_m を越えると急激に低下するようになり、 b_m から1の範囲における温度スケールリングは低下する。同様な結果が、熱処理後の最終伸線加工工程での加工率が低い NbTi 線で見出されている¹²⁾。Meingast らは、試料中にピンニング特性の異なるピン止め中心が存在するためスケールリングの低下が起きると考え、 α -Ti 相のほかに転位セルの影響を指摘している。しかしながら、本試料のように超伝導フィラメントが細線化された場合には、フィラメント表面 (SN 境界層) の効果を無視できない。フィラメントの細い試料 E で b_m が低磁場側ヘシフトするのも、他研究者^{3,4)} や後で報告する $0.1 \mu\text{m}$ 以下のフィラメントをもつ非熱処理線⁹⁾ のピンニング特性 (b_m は 0.15 から 0.2 を示す) の結果を考慮すると表面での磁束ピンニングが影響しているためと推察される。

7. 結 論

本研究は、熱処理を行って製作したフィラメント径 $0.39 \mu\text{m}$ から $1.53 \mu\text{m}$ の範囲にある NbTi 極細多芯超伝導線について、臨界電流密度の磁場および温度依存性を測定し、ピンニング特性を検討した。その結果を要約すると以下になる。

(1) 4.2 K の J_c は、低磁場では大きな差が見られないが、高磁場になるとフィラメント径に対して系統的な違いが現われる。高磁場では、フィラメント径が小さな試料ほど、 J_c の低下が顕著である。

(2) 高温になると、フィラメント径が小さな試料ほど J_c は低く、また磁場依存性も大きい。

(3) フィラメント径が $0.39, 0.508, 0.57 \mu\text{m}$ の試料は、 T_c に近い温度になると低磁場 (約 0.1 T) で異常に大きな J_c 変化を示す。

(4) ピンニング力の磁場依存性は、比較的良好な温度スケールリングを示す。しかしながら、最大ピンニング力を示す規格化磁場 b_m より高磁場側ではスケール

リングの低下が現われる。 b_m は ~ 0.35 であり、本試料は、従来の NbTi 線と類似したピンニング特性を示す。

本研究を進めるにあたり、試料を提供していただきました昭和電線電纜(株)熊野智幸氏、(株)東芝伊藤大佐氏、電力中央研究所秋田 調氏に深謝いたします。また、日頃有益なご助言をいただきます本学部脇山徳雄教授、高中健二教授に感謝いたします。臨界電流の測定は、本学金属材料研究所附属超電導材料開発施設で行われました。測定にご協力いただきました施設の皆様にお礼申し上げます。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金一般研究(C)(研究課題番号63550198)の援助を受けました。

参 考 文 献

- 1) P. Dubots, A. Fevrier, J.C. Renard, J.C. Goyer and Hoang Gia Ky: J. Phys. Colloq. **C1-1984** (1984) C1-467
- 2) 例えば 小笠原武, 久保田洋二, 八十濱和彦: 低温工学 **22** (1987) 467
- 3) I. Hlášnik, S. Takacs, V.P. Burjak, M. Majoros, J. Krajcik, L. Krenpasky, M. Polak, M. Jergel, T.A. Korneeva, O.N. Mironova and I. Ivan: Cryogenics **25** (1985) 558
- 4) H. Tateishi, T. Onishi, K. Ohmatsu, K. Takei and M. Nagata: Proc. of the Int. Symposium on Flux Pinning and Electromagnetic Properties in Superconductors, Matsukuma Press, Fukuoka, Japan (1985) 208
- 5) 熊野智幸, 中村俊三郎, 市原政光, 鈴木英元: 昭和電線電纜レビュー **39**, No. 2 (1989) 123
- 6) D.C. Larbalestier: IEEE Trans. Magn. **MAG-17** (1981) 1668
- 7) 鈴木光政, 三橋 説, 舟山邦男: 低温工学 **28** (1993) 56
- 8) 例えば 入江富士男, 草柳英一郎: 低温工学 **14** (1979) 257
- 9) 鈴木光政, 三橋 説: 低温工学 **28** (1993) 30
- 10) 例えば 武井広見: 日本金属学会会報 **22** (1983) 228
- 11) H. Wada, K. Itoh, K. Tachikawa, Y. Yamada and S. Murase: J. Appl. Phys. **57** (1985) 4415
- 12) C. Meingast and D.C. Larbalestier: J. Appl. Phys. **66** (1989) 5971