NbTi 極細多芯超伝導線の臨界電流密度とピンニング特性

II. 非熱処理線

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; II. Non-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:

Experimental results on non-heat-treated (NHT) samples with CuNi matrix, whose filament diameter d_f ranges from 0.061 to 0.314 μm , are given. In case of 4.2 K, J_c values at low fields are very different among samples. As d_f decreases to below 0.1 μm , the J_c surprisingly increases and exceeds 1×10^6 A/cm² at 2 T. However, samples which have high J_c values at low fields show a large decrease in J_c with magnetic field. A rise in temperature causes a marked decrease in J_c , especially, for samples with finer filaments. An anomalous change in J_c around 0.1 T was also seen at temperatures close to T_c for the sample with $d_f=0.314 \mu\text{m}$. The reduced pinning curves ($F_p/F_{p, \max}$ vs. B/B_{c2}) of each sample at various temperatures coincide with each other. Values of reduced field b_m indicating the position of $F_{p, \max}$ are lower, 0.15–0.2. The highest value of $F_{p, \max}$ was obtained for a sample with $d_f=0.072 \mu\text{m}$. Its pinning exponents p and q expressed in the form of $F_p=[B_{c2}]^n b^p(1-b)^q$ are ≈ 0.5 and ≈ 2.5 , respectively. The critical current density and the pinning properties of these samples are compared to those of heat-treated samples.

1. 序 論

フィラメント径が 0.1 μm 以下の NbTi 極細多芯線では, 低磁界で臨界電流密度が著しく上昇する現象が Hlásnik や Tateishi らにより見いだされた^{1,2)}。従来 NbTi の臨界電流密度特性は, 機械的加工と熱処理により形成される α -Ti 析出相での磁束ピンニング現象に起因すると言われている³⁾。しかしながらフィラメント径が 1 μm 以下になると, α -Ti を析出させて均一なフィラメントをもつ極細多芯線を製作することは困難になる。実際 Tateishi らの試料は, 熱処理を施さずに製作されている。そのため線材中での α -Ti 相の生成は, 非常に少なく, 磁束ピンニングに及ぼす効果は, 小さいと推測される。これらフィラメント径 0.1 μm 以下の極細多芯線で現われる大きな臨界電流密度を説

明するため, Hlásnik らは, 磁束の 1 次元配列の効果を描した。すなわち, バルクの場合と異なりフィラメントに沿って磁束線が 1 次元的に配列する場合のピンニング現象である。他方, 超伝導表面は, ピン止め中心として働く。フィラメントが細い極細多芯線では, 表面の効果が大きくなるため, 表面での磁束ピンニング現象も考慮する必要がある。

本論文では, フィラメント径が 0.061 μm から 0.314 μm の範囲にある NbTi 極細多芯線試料の臨界電流密度, 臨界温度と上部臨界磁場の結果を述べる。いずれの試料も α -Ti 相を析出させるための熱処理が施されていない。これらの臨界電流密度の測定結果およびピンニング特性の検討, さらに先に報告した NbTi 極細多芯線試料 (α -Ti 相析出のための熱処理を行っている)と比べて

Table 1 Specification of samples.

Sample	Wire diameter (mm)	Filament number	Filament diameter (μm)	Filament spacing (μm)	Ratio (NbTi:CuNi:Cu)	Twist pitch (mm)
I1	0.103	592, 116	0.061	0.013	1:3.80:0	1.35
J1	0.121	592, 116	0.072	0.016	1:3.80:0	1.32
J2 ^{a)}	0.121	592, 116	0.072	0.016	1:3.80:0	1.32
K	0.209	592, 116	0.098	0.022	1:3.80:0	∞
M	0.121	44, 407	0.182	0.181	1:8.90:0	0.97
N	0.209	44, 407	0.314	0.313	1:8.90:0	1.75
Ref. ^{b)}	0.686	2, 100	10	—	1:0:1.8	—

^{a)} Sample J2 was annealed for 24 hours at 200 °C in the fabrication process.

^{b)} Sample Ref. was given as a reference sample for comparison.⁷⁾

結果を報告する。

2. 測定試料および測定法

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、熱処理試料と同様な構成と方法で昭和電線電纜(株)によって製作され、 α -Ti 相析出のための熱処理は行われていない⁵⁾。NbTi の組成は Nb-53.5 wt%Ti であり、マトリックスには全て Cu-10 wt%Ni を採用した。フィラメント数は 44, 407 本と 592, 116 本である。フィラメント径 d_f は 0.061 μm から 0.314 μm 、フィラメント間隔 d_N は 0.013 μm から 0.313 μm の範囲にある。試料には、ツイストピッチ l_p が 1 mm 前後のものとツイストなしのものがある。特にフィラメント数が 592, 116 本の試料に関しては、臨界電流密度に対する熱処理の効果を検討するため、最終線引き前に 200 °C・24 時間の熱処理（以後低温熱処理と称す）したものも用意した。この低温熱処理は、 α -Ti 析出相の生成を意図したものではない。したがって、低温熱処理後の試料における α -Ti 相の析出量は少ないと考えている⁶⁾。本論文では、この低温熱処理された試料（試料 J2）も他の試料とともに非熱処理試料と呼ぶことにし、前報の熱処理試料と区別する。なお、本論文でも前報で引用した参考試料⁷⁾（前報の Larbalestier の試料で Sample Ref. として示す）を、本試料の測定データを検討するために利用した。参考試料の諸元を Table 1 に示す。

臨界電流密度 J_c の測定方法とその決定基準は、前報で述べた熱処理試料の場合と同様である。また、臨界温度 T_c および上部臨界磁場 B_{c2} の測定方法も同様である。

3. 臨界電流密度特性

Fig. 1 に、試料の 4.2 K における J_c の磁場依存性を示す。比較のため参考試料（試料名 Ref.）⁷⁾ の特性を示した。図に見られるように、低磁場では、フィラメント径が 0.1 μm に近い試料 J1, J2 および K で高い J_c が得られている。特に、試料 J1 と J2 ($d_f = 0.072 \mu\text{m}$) の J_c は、1 T では 10^6 A/cm^2 台の値に達し、熱処理試料に比較して明らかに高い。高磁場に

Fig.1 Critical current density at 4.2 K as a function of magnetic field for samples I1 ($d_f = 0.061 \mu\text{m}$), J1 ($d_f = 0.072 \mu\text{m}$), J2 ($d_f = 0.072 \mu\text{m}$), K ($d_f = 0.098 \mu\text{m}$), M ($d_f = 0.182 \mu\text{m}$) and N ($d_f = 0.314 \mu\text{m}$). Data on sample Ref. ($d_f = 10 \mu\text{m}$) were taken from Ref. 7.

Fig. 2 Critical current density at 2 and 3 T as a function of filament diameter. Here, NHT samples indicate present samples. Sample J2 annealed at 200 °C was included in the group of NHT samples. HT samples indicate all samples investigated in the previous work.⁴⁾

なると、熱処理試料の場合と同様小さなフィラメント径試料ほど、 J_c は低い。フィラメント径の大きな熱処理試料と比較すると、本試料の高磁場における J_c は明らかに低い。同一フィラメント径 ($d_f=0.072 \mu\text{m}$) 試料 J1 と J2 を比較すると、低温熱処理を施した試料 J2 では J_c の低下が見られる。同様な結果は他研究者からも報告されている⁹⁾。熱処理試料と本試料の結果を総合して考えると、 J_c の高磁場特性はフィラメント径に強く依存し、フィラメント径の減少とともに低下すると言える。

低磁場 (2 T および 3 T) での J_c とフィラメント径 d_f の関係を Fig. 2 に示す。熱処理試料の結果を図中に併記した。熱処理試料の場合には、 $0.755 \mu\text{m}$ のフィラメント径試料で J_c はピークを示すが、フィラメント径に対する J_c の変化は小さい。本試料の場合、 $0.182 \mu\text{m}$ 以下のフィラメント径領域であるが、フィラメント径の低下とともに急激な J_c 変化が見られる。最大の J_c は、フィラメント径 $0.072 \mu\text{m}$ の試料 J1 で得られ、 $1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ (磁場 2 T の時) に達する。試料 J1 より小さなフィラメント径試料 I1 ($d_f=0.061 \mu\text{m}$) では J_c の低下が見られているが、この点については試料中のフィラメントにスリップライン等が観測されており、フィラメントの異常が原因とされる⁹⁾。

Fig. 3 Critical current density at various temperatures as a function of magnetic field for samples (a) J1 ($d_f=0.072 \mu\text{m}$) and (b) J2 ($d_f=0.072 \mu\text{m}$).

いくつかの試料について、 J_c の磁場依存性を温度をパラメータにして測定した。フィラメント径 $0.072 \mu\text{m}$ の試料 J1 および J2 の結果を Fig. 3 に示す。(a)は低温熱処理なしの場合、(b)は低温熱処理を施した場合である。両者を比較すると、各温度で試料 J1 が高い J_c を示すが、全体的な磁場依存性は非常に類似している。また、熱処理試料と比較して、両試料とも低磁場では高い J_c を示し、 J_c の磁場依存性は大きい。Fig. 4 に、フィラメント径の大きな試料 N ($d_f=0.314 \mu\text{m}$)

Fig. 4 Critical current density at various temperatures as a function of magnetic field for sample N ($d_f=0.314 \mu\text{m}$).

の結果を示す。試料 J1 や J2 の結果と比較すると、全ての温度で試料 N の J_c は、低磁場では低く、高磁場では逆に高くなっている。また、試料 N は、 T_c 近くの温度 ($\sim 7.5 \text{ K}$) になると、低磁場で熱処理試料で見られたものと同様な J_c の急激な変化を示す。

Fig. 5 および Fig. 6 に、試料 J1 と N の臨界電流密度の温度依存性を磁場をパラメータにして示す。各温度での J_c を 4.2 K の J_c (4.2 K) で規格化して図示した。 4.2 K で高 J_c を示す試料 J1 では、温度上昇による J_c の低下が全般的に大きい。特に $B=2\sim 5 \text{ T}$ での J_c は、 4.5 K になると 20% 以上減少しており、熱処理試料の場合より明らかに大きな低下を示す。低 J_c 特性を示した試料 N では、温度上昇による J_c の低下は小さい。また、 J_c の温度依存性は磁場により異なり、高磁場では温度上昇により急激な J_c 低下が起きる。

4. ピンニング特性

Table 2 に、測定された試料の T_c と 4.2 K の B_{c2} を示す。 T_c は、 $7.78\sim 8.33 \text{ K}$ の範囲にあり、熱処理試料より全般的に低い。 1 mA の測定電流では、 $0.01\sim 0.04 \text{ K}$ ほど高い T_c が得られるが、その差は測定精度の限界に近い。

B_{c2} は、 $8.95\sim 9.94 \text{ T}$ の範囲にあり、 T_c と同様熱処理試料より低いものが多い。抵抗法とピンニング力

Fig. 5 Relative critical current density at various magnetic fields as a function of temperature for sample J1 ($d_f=0.072 \mu\text{m}$). Here, $J_c(4.2 \text{ K})$ indicates critical current density at 4.2 K .

Fig. 6 Relative critical current density at various magnetic fields as a function of temperature for sample N ($d_f=0.314 \mu\text{m}$).

のゼロ外挿法から求めた B_{c2} の差は、試料 I1 を除くと最大で $\sim 0.20 \text{ T}$ 程度である。試料 M や N では、両手法による B_{c2} の差は少し大きくなるが、熱処理試料の場合と同様 B_{c2} として抵抗法の値を使用する。なお、試料 I1 では、ピンニング力のゼロ外挿から求め

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 K) (T)	n	p	q
II	7.78(7.82 ^{a)})	8.95(8.35 ^{b)})	—	1.47	2.92
J1	8.16(8.17 ^{a)})	9.21(9.30 ^{b)})	3.46	0.497	2.54
J2	8.08(8.09 ^{a)})	9.06(9.10 ^{b)})	3.04	0.489	2.46
K	8.33(8.34 ^{a)})	9.94(9.90 ^{b)})	—	0.533	2.11
M	8.06(8.08 ^{a)})	9.30(9.50 ^{b)})	—	0.179	1.48
N	8.12(8.15 ^{a)})	9.74(9.85 ^{b)})	2.18	0.232	1.27

^{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.

Fig.7 Upper critical field as a function of temperature for samples J1 ($d_f=0.072 \mu\text{m}$), J2 ($d_f=0.072 \mu\text{m}$) and N ($d_f=0.314 \mu\text{m}$).

た B_{c2} は、抵抗法より 0.6 T ほど低下している。この試料は非常に細いフィラメント ($d_f=0.061 \mu\text{m}$) であり、加工によるフィラメントの異常が報告されている⁹⁾。したがって、試料の長さ方向で不均一性があれば、短尺試料で測定された抵抗法では B_{c2} が高くなることも予想されるが、明らかではない。Fig. 7 に、抵抗法で得られた試料 J1, J2 および N の B_{c2} の温度依存性を示す。温度の上昇とともに B_{c2} は、直線的に低下する傾向がある。

Fig. 8 と Fig. 9 に熱処理試料の結果を含めて、 T_c と 4.2 K の B_{c2} のフィラメント径 (d_f) 依存性を示す。両図より、 T_c と B_{c2} は同様な d_f 依存性を示し、

Fig.8 Transition temperature as a function of filament diameter for NHT and HT samples.

Fig.9 Upper critical field at 4.2 K as a function of filament diameter for NHT and HT samples.

Fig. 10 Pinning force at 4.2 K as a function of reduced field for all NHT samples.

全体的にはフィラメント径の低下とともに減少することがわかる。しかしながら、 d_f が $0.1 \mu\text{m}$ 以下の試料 I1, J1, J2, K では、他の試料から予想される傾向と異なり、 T_c と B_{c2} は不連続的に高くなっている。フィラメント数やバリア材、さらに加工処理などがそれぞれの試料で異なるため、単に d_f だけで T_c と B_{c2} の変化を説明することはできない。 T_c に関しては、フィラメントとバリア材の間で起きる近接効果¹⁰⁾による影響も指摘されており、今後この点も考慮してフィラメント径に対する依存性を求める必要があろう。

Fig. 10 は、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。図より明らかなように、フィラメント径が $0.1 \mu\text{m}$ より小さな 3 種類の試料 J1, J2 および K の F_p は、低磁場では非常に大きくなり、最大ピンニング力 $F_{p, \text{max}}$ は熱処理試料の値 ($\sim 9 \times 10^9 \text{ N/m}^3$) より大きい。他の試料 I1, M および N は、全磁場領域で F_p は小さく、 $F_{p, \text{max}}$ も熱処理試料の値を越えない。本試料の中で比較した場合、低磁場における F_p はフィラメント径により著しく変わり、全体的にはフィラメント径が小さくなるほど F_p は大きくなると言える。特に、フィラメント径 $0.072 \mu\text{m}$ の試料 J1 が最大の $F_{p, \text{max}}$ をとるが、低温処理を施す (試料 J2 を参照) と F_p は低下することがわかる。一方、最大ピンニング力を示す規格化磁場 b_m は、試料 I1 を除外すると、熱処理試料より低磁場側にシフトし、0.2 以下となっている。

Fig. 11 Reduced pinning force at 4.2 K as a function of reduced field for sample I1 ($d_f=0.061 \mu\text{m}$), J1 ($d_f=0.072 \mu\text{m}$), J2 ($d_f=0.072 \mu\text{m}$), M ($d_f=0.182 \mu\text{m}$) and N ($d_f=0.314 \mu\text{m}$).

試料の 4.2 K における規格化ピンニング力 $F_p/F_{p, \text{max}}$ と規格化磁場 b の関係を Fig. 11 に示す。参考試料とフィラメント異常のある試料 I1 を除いて考えると、最大ピンニング力を与える b_m は、各試料で良く一致している。しかしながら、 b_m から $b=1$ までの範囲になると各試料で差が現われ、フィラメント径が減少するにつれて上に凸から下に凸の曲線を示すようになる。

試料のピンニング力の温度スケールリングを検討するため、Fig. 12 に異なる温度で得られた規格化ピンニング力 $F_p/F_{p, \text{max}}$ と規格化磁場 b の関係を示す。ここで(a)は試料 J2 ($d_f=0.072 \mu\text{m}$), (b)は試料 N ($d_f=0.314 \mu\text{m}$) の結果である。試料 J2 は低温熱処理を施した試料であるが、広い温度範囲で測定できたため示した。これより、両試料とも規格化ピンニング力に対する温度スケールリングの程度は、高磁場側 (b_m から 1 の範囲) では低磁場側 (0 から b_m の範囲) ほどうくなくいことがわかる。すなわち、温度が上昇すると、 b_m 以上で規格化ピンニング力の低下が顕著になり、各温度での曲線にずれが生じている。また、試料 N では 7.25 K 以上の温度でスケールリング曲線から大きくはずれている。これは、Fig. 4 における 7.5 K の結果で示したように、 $B \sim 0.1 \text{ T}$ 付近の低磁場で現われる

Fig.12 Reduced pinning force as a function of reduced field at various temperatures for samples (a) J2 ($d_f=0.072 \mu\text{m}$) and (b) N ($d_f=0.314 \mu\text{m}$).

急激な J_c 変化に対応するものである。すなわち、 $F_{p, \max}$ を生じる b_m が急激に低下 (~ 0.05) するため、 $F_p/F_{p, \max}$ と B/B_{c2} の関係が他の温度で得られた結果と異なる。熱処理試料の場合にも、 T_c 近くの温度で類似した規格化ピンニング力の磁場依存性が観測された。熱処理試料のフィラメント径は、試料Nのものと同程度の大きさである。なお、フィラメント径 $0.072 \mu\text{m}$ の試料 J1 や J2 では、このような現象は観測されなかった。

Fig.13 Pinning exponents p and q at 4.2 K as a function of filament diameter for NHT and HT samples.

各温度における $F_{p, \max}$ と B/B_{c2} の関係および 4.2 K での $F_p/F_{p, \max}$ と B/B_{c2} の関係から算出された試料のピンニング指数 n, p, q を Table 2 に示す。フィラメントの細い試料では、いずれの指数も大きい値が得られている。Fig.13 に、指数 p と q のフィラメント径依存性を熱処理試料とともに示す。試料 I1 ($d_f=0.061 \mu\text{m}$) を除外して考えると、熱処理試料と比較して、本試料の p は明らかに小さい。また、 q は、本試料の場合強いフィラメント径依存性を示し、フィラメント径が 0.314 から $0.072 \mu\text{m}$ に低下するにつれて急激に増加する。

5. 考 察

J_c の磁場依存性を見ると、熱処理試料より小さなフィラメント径まで伸線加工された本試料では、フィラメント径により大きく異なる。Fig.1 の 4.2 K の結果に見られるように、低磁場では小さなフィラメント径試料で高 J_c が得られるが、高磁場では逆に大きいフィラメント径試料で高い J_c が得られた。また、Table 2 で示したようにフィラメントが細くなると B_{c2} は低下する傾向にあることから、熱処理試料の場合と同様ピンニング力の式¹¹⁾ を使って高磁場での J_c は、 B_{c2} の違いにより説明可能である。ピンニング力が $\{B_{c2}(T)\}^n$ に比例することを考慮すると、 B_{c2} の小さな試料では、全磁場領域で J_c が低下することになる。しかし、フィラメントが細い試料 J1, J2 および K などでは、低磁場で高 J_c が得られている。この

点が、ほぼ全磁場領域での J_c 特性をピンニング力の式に基づき単に B_{c2} の効果として説明できた熱処理試料の場合と異なる。低磁場で高 J_c の得られたフィラメント径 $0.072 \mu\text{m}$ の試料の場合では、低温熱処理を施した試料では明らかに J_c は低下する。この程度の熱処理でも、細いフィラメントでは表面が荒れて凹凸が形成されると言われている。 J_c の変化はフィラメント表面での磁束ピンニングの問題と関係がありそうである。

熱処理試料のピンニング指数 n は、0.746 から 1.17 の範囲にある (Fig. 13)。また q は 1.35 から 1.85 の値が得られ、ピンニング力の脱飽和現象と飽和現象を表わす $q=1$ と 2 の間になっている。したがって、熱処理後の加工によって引き起こされる $\alpha\text{-Ti}$ 析出相の変形程度はわからないが、ピンニング機構を支配するものはやはり $\alpha\text{-Ti}$ 相であろう。本試料のピンニング指数 n は、フィラメントに異常があると考えられる試料 I1 ($d_f=0.061 \mu\text{m}$) を除くと、一般に小さく 0.5 以下のものが多い。 q は、フィラメント径に依存し、フィラメント径の低下とともに 1.27 から 2 以上に急激に増加する。したがって、ピンニング指数の観点からも本試料のピンニング機構は熱処理試料の場合と異なると推察される。本試料が、いずれも $\alpha\text{-Ti}$ を析出させるための熱処理を受けなかった点を考慮すると、ピン止め中心として極細フィラメントの表面が加工にともなう転位セルがあげられる。転位セルは、一般に高磁場特性を改善すると言われ、 b_m を大きくする。フィラメント径の減少に対して b_m が高磁場側へシフトしないことから、ピン止め中心としてフィラメント表面いわゆる SN 境界層の効果が期待される。ところで、極細多芯線のフィラメント表面における SN 境界層がピンニング特性を支配する場合、 $F_{p, \max}$ がフィラメント径 d_f の低下とともに増加 ($F_{p, \max} \propto d_f^{-1}$) することが指摘されている¹²⁾。Fig. 14 に本試料と熱処理試料の $F_{p, \max}$ と d_f の関係を示す。熱処理試料の $F_{p, \max}$ は d_f に対する依存性が少なく、 d_f の減少とともにわずかに低下する程度であり、フィラメント内部で起きるピンニング機構が支配的と考えられる。しかしながら、本試料では $0.072 \sim 0.314 \mu\text{m}$ のフィラメント径領域で d_f の減少とともに $F_{p, \max}$ は急激に増加しており、SN 境界層がピンニング中心として働くことを示唆している。

一方、Fig. 11 に示した 4.2 K での規格化ピンニング力と規格化磁場の関係を見ると、高 J_c を示す細い

Fig. 14 Maximum pinning force at 4.2 K as a function of filament diameter for NHT and HT samples.

フィラメント試料では規格化磁場 b が b_m から 1 の範囲で規格化ピンニング力は下に凸の傾向を強く表している。高温になると、 b が b_m と 1 の範囲ではピンニング力のスケールが低下し、規格化ピンニング力は下がり、下に凸の傾向が認められる (Fig. 12)。したがって、 $b_m < b < 1$ では高温領域のピンニング特性は、細いフィラメント試料の 4.2 K のピンニング特性に類似している。一般に高温になると磁束線のサイズは広がり、等価的にフィラメント径の減少する状況が生じると期待される。SN 境界層におけるピンニングがフィラメント径の小さな試料で支配的になるとすれば、高温では SN 境界層の効果がますます強くなり、ピンニング力の温度スケール低下を生じるかもしれない。

J_c の温度依存性 (Fig. 5 および 6) を見ると、フィラメント径 $0.072 \mu\text{m}$ の試料 J1 は、いずれの磁場でも温度上昇にともない急激な J_c 低下を示す。他方試料 N ($d_f=0.314 \mu\text{m}$) では、温度上昇にともなう J_c の低下は小さいが、磁場の影響を受ける。4.2 ~ 5 K の範囲に限ると、高磁場になるほど試料 N では J_c の温度変化が大きくなる。これらの原因を、ピンニング力の式より、まず磁場に依存しない項 $\{B_{c2}(T)\}^n$ の温度変化で考える。フィラメントの細い試料では、ピンニング指数 n の値が大きいため、 B_{c2} の温度変化による効果が増大するからである。しかし、この効果だけでは温度上昇により単に J_c の低下が起きるだけで、磁場により J_c の温度依存性が異なるのを説明することはできない。そのため、両試料のピンニング力の磁

場依存性の項 $b^p(1-b)^q$ を考察する。試料 J1 は、最大ピンニング力に対応する b_m は小さく、また b_m を越えると急激にピンニング力は低下する。試料 N は、試料 J1 とあまり変わらない b_m 値であるが、 b_m 付近でのピンニング力の変化は小さい。両試料の b_m は 0.15~0.2 であり、4.2 K では 1~2 T の磁場に対応する。一定磁場下での温度上昇は、 B_{c2} が低下するため規格化磁場 b の上昇を意味する。すなわち、ピンニング力は温度上昇にともなう低下に加え、規格化磁場 b の増加による影響も受けることになる。例えば、磁場を 2 T に設定すれば、試料 J1 および N の場合、4.2 K での規格化磁場 b は b_m より少し高くなる。この磁場で温度上昇が起きれば、 b_m 以上で急激なピンニング力の低下が現われる試料 J1 は、規格化磁場 b の増加による影響を強く受け、大きな J_c 低下を示すと推測される。試料 N では、 b_m 付近でのピンニング力の変化が小さいため、温度上昇にともなう J_c の低下は小さくなるだろう。4.2 K での設定磁場が b_m より低ければ、温度上昇が起きてもピンニング力の顕著な低下は現われず、急激な J_c 低下は起きない。実際試料 N では、低磁場では J_c の温度依存性は弱く、高磁場になると、強い温度依存性が現われている。このように、磁場を 4.2 K での b_m より高く設定する場合と低くする場合では、 J_c の温度依存性は著しく異なると考えられる。熱処理試料(前報試料 A)の場合、 b_m が ~0.35 であるため、4 T 以上の磁場で J_c の温度変化は顕著になっている。導体構成された線材では、内部に配置する超伝導線に温度上昇が起きる可能性がある。ピンニング力が強い磁場依存性を示す極細フィラメント線を導体構成して使用する場合には、発生磁場や線材経験磁場の設定に充分考慮して仕様を決定する必要がある。

6. 結 論

本研究は交流用超伝導線の高臨界電流密度化に対する知見を得ることを目的とし、市販の NbTi 極細多芯超伝導線について、臨界電流密度の磁場依存性および温度特性を測定し、さらにピンニング特性を検討した。本論文では、熱処理を施さずに製作された 0.061 μm から 0.314 μm のフィラメント径試料の結果を報告するとともに、前報の熱処理試料の特性と比較し検討を加えた。その結果を要約すると次のようになる。

(1) 4.2 K の J_c は、低磁場ではフィラメント径に依存して著しく変化し、フィラメント径が小さくなる

と急激に増加する。特に、フィラメント径が 0.1 μm 以下になると低磁場では異常に大きな J_c を示す。高磁場では逆に J_c の低下は激しく、熱処理試料の場合と同様フィラメント径が小さくなるにつれて、高磁場特性は低下する。

(2) 高温においては、熱処理試料の場合と同様フィラメント径が小さいほど J_c が小さく、磁場上昇による J_c の低下が大きくなる。

(3) フィラメント径が 0.314 μm の試料は、熱処理試料の場合と同様、高温・低磁場(約 0.1 T)領域で異常に大きな J_c 変化を示す。

(4) 4.2 K では、フィラメント径が低下するとともにピンニング力は急激に増大する。特に、~0.1 μm 以下のフィラメント径試料は、熱処理試料を越える $F_{p, \max}$ を示す。最大ピンニング力に対応する規格化磁場 b_m は、小さく 0.15~0.2 の範囲である。ピンニング力は、低磁場では良く温度スケーリングするが、高磁場側では、スケーリングに低下が見られる。ピンニング指数 q は、フィラメント径が ~0.1 μm 以下になると急激に増大し、2 以上の値をとる。本試料のピンニング特性は、熱処理試料のものと異なる。

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) I. Hlásnik, 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
- 2) 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
- 3) E.W. Collings: *Applied Superconductivity, Metallurgy and Physics of Titanium Alloys*, Vol. 2, Plenum Press, New York, USA (1986) 70

- 4) 鈴木光政, 三橋 説: 低温工学 **28** (1993) 22
- 5) T. Kumano, M. Ichihara, E. Suzuki, E. Shimizu, D. Ito, I. Takano, H. Kasahara, S. Akita and T. Tanaka: Proc. of 11th Int. Conference on Magnet Technology, Tsukuba, 1989, Elsevier Applied Science (1990) 1045
- 6) 熊野智幸: 私信
- 7) D. C. Larbalestier: IEEE Trans. Magn. **MAG-17** (1981) 1668
- 8) 八十濱和彦, 加藤政利, 豊田明德, 小笠原武: 第36回低温工学研究発表会予稿集 (1986) A1-5
- 9) 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
- 10) E.W. Collings: *Applied Superconductivity, Metallurgy and Physics of Titanium Alloys*, Vol. 1, Plenum Press, New York, USA (1986) 419
- 11) 鈴木光政, 三橋 説: 低温工学 **28** (1993) 22の(1)式
- 12) 原田直幸, 馬渡康徳, 岩熊成卓, 山藤 馨, 舟木和夫, 竹尾正勝, 松下照男, 松本 要, 三浦大介, 田中靖三: 九州大学工学部超伝導マグネットセンター報告 **7** (1991) 119