

交流用高電流密度超伝導線材の開発に関する研究

三浦, 大介

<https://doi.org/10.11501/3120512>

出版情報 : 九州大学, 1996, 博士 (工学), 論文博士
バージョン :
権利関係 :

2.3 Nbアイランド型人工ピンNbTi単芯及び多芯線材の試作とその特性

2.3.1 人工ピンパラメーターの設計

上述したように様々な方法により、ピンニングセンターの種類、形状及びその体積率を変化させることで J_c 向上がなされてきた。ここでは得られた知見に基づき、交流用NbTi極細多芯線に導入可能でかつ高 J_c 化が期待できる人工ピンニングセンターの設計を行う。

1) ピンニングセンターの形状

従来のNbTi線材のピン形状としては α -Ti型に見られるリボン形状、そして人工ピン線材ではラメラ形状、ヘキサゴナル形状が試みられている。しかしここでは交流用線材に適した新しいピン形状として円柱ロッドをフィラメント内部に多数本埋め込んだアイランド型を提案する。ヘキサゴナル型のように人工ピンがNbTiフィラメントを取り囲んでいる形状では、ピンニングセンターとのS-N境界が多いため近接効果による T_c 、 B_{c2} などの超伝導特性の劣化が起こり易いこと、またスタック回数が多くなるので加工性の面からも好ましいピン形状とは言えない。一方、ピン力が大きく、比較的ピン力の設計が容易であると考えられるラメラ型を交流線材に導入する場合は、一つの積層クラスターとフィラメントのサイズが同程度になってしまうために磁束とピンニングセンターとの位置関係において極端な異方性がでてしまい、長手方向に部分的なピン力低下領域をもたらすことが予想される。またヘキサゴナル型と同様にS-N境界が多く、近接効果による特性劣化も懸念される。

交流用線材はフィラメント径が $0.5\mu\text{m}$ 以下と小さいため、ピンを導入しなくても T_c 、 B_{c2} の劣化が現れはじめる領域である。従って、ピンとNbTiの界面を極力少なくすることが近接効果による母材の超伝導特性劣化の抑制につながる。この

ことは要素的ピン力を大きくする従来の方法とは一見、相反することのように思えるが、交流線材のフィラメントサイズの特異性を考えると非常に重要なことである。これらを考慮して、NbTiフィラメントにピンを円柱型フィラメント状に埋め込んだアイランド形状を採用した。この形状の特徴としては上記の他に、製作工程で比較的形が崩れにくいと考えられるので設計サイズと実際のサイズとの対応が容易であること、製作がダブルスタック方式でよいため従来の交流用線材と同等の良好な加工性が期待されること、さらには製作コストが従来の交流用線材とほとんど変わらないこと等が挙げられる。

2) ピンニングセンターの分布

ピンニングセンターの配列は極力異方性を持たせず、かつ磁束格子との幾何学的組み合わせの良さを考慮して磁束格子と同様な形状、すなわち三角形の頂点にピンニングセンターがくるような配置にした。またピン径とピン間隔の比は1 : 2となる設計を行った。

3) ピン体積率

ピン体積率は従来の α -Ti型および人工ピン型NbTi線材で最大級の J_c を有しているピン体積率20~30%の間の値として21%と設定した。

4) ピンに用いる物質

NbTiとの複合加工性に優れ、かつ有効なピンニングセンターとして作用している実績のあるNbを選んだ。Nbは超伝導体であるが B_{c2} が0.2~0.4T程度であるので、実際に使用する磁界領域では常伝導的に振る舞うことが予想される。

以上の人工ピン導入方針に基づき設計した人工ピン型NbTi線材の諸元を表2-2に示す。

表2-2 Nbアイランド型人工ピンNbTi線材の諸元

線材	線径 (mm)	フィラメント径 (μ m)	フィラメント数	ピンサイズ (nm)	ピン間隔 (nm)	ピン体積率 (%)
# 1	0.203	156.5	1	309	617	21
	0.102	78.6	-	155	310	-
	0.078	61.1	-	119	237	-
	0.06	46.3	-	91	182	-
# 2	0.85	20.6	517	40	79.9	21
	0.69	16.3	-	32.4	64.9	-
	0.454	10.7	-	21.3	42.7	-
	0.25	5.9	-	11.8	23.5	-
	0.102	2.4	-	4.8	9.6	-

線材# 1はフィラメントが単芯の段階で所定の線径まで伸線加工を施したものの、また、線材# 2はそれをさらにスタックして熱間押し出しを行い、多芯線材にしたものである。これらの線材のピン力の磁界依存性を測定することにより、上記のピン設計の評価を行う。

使用したNbTiおよびNbピンの各成分含有率を表2-3に示す。製作は通常のNbTi線材製作方法と同様で、ビレットメイキング→熱間押しだし→伸線加工を繰り返したマルチスタッキング法(Multi-stacking method)である。製作方法は次の通りである。

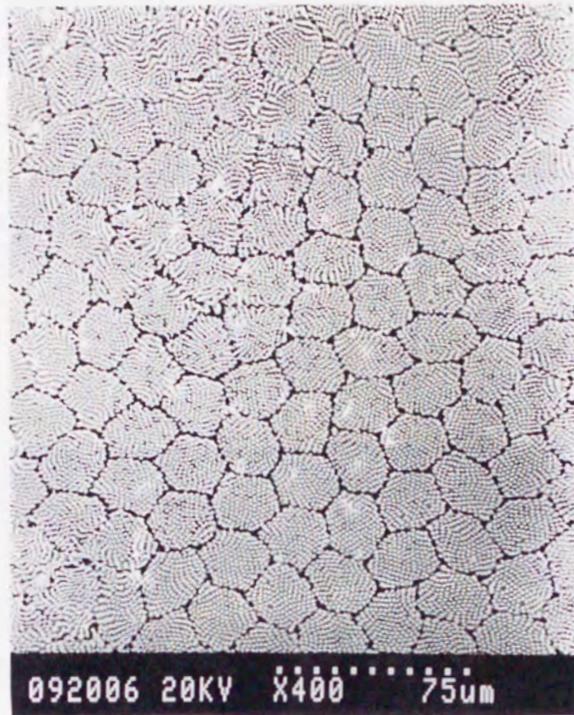
- ①外径59mmφのNb-46.5wt%Tiインゴットに2.2mmの穴を間隔4.4mmで151本あけ、その中に人工ピンニングセンターとなるNbロッドを挿入する。
- ②上記のインゴットを外径67mmφのCu-Ni管に挿入し、700℃で熱間静水圧押し出しを行う。
- ③押し出し後、伸線加工を行い対辺長2の六角素線に加工する。
- ④硝酸でマトリクスを除去し、対辺長1.8の六角素線とする。
- ⑤この六角素線333本を厚さ0.1mmのNb箔で覆い一つのフィラメントバンドルとする。さらに外径50mmφのCu-10wt%Ni管に挿入してHIP処理を施した後、外径を45mmφに外削加工する。
- ⑥700℃で熱間押し出しを行い、さらに伸線加工を施し対辺長2の2次六角素線を製作する。また一部は所定の線径になるまで伸線加工を施し線材# 1を製作する。
- ⑦2次素線をさらに外径67mmφのCu-Ni管に挿入し、700℃で熱間静水圧押し出しを行う。その後、所定の線径になるまで伸線加工を行い線材# 2を製作する。

製作した線材の人工ピン構造のSEM観察を行った。Nbピン観察はNbTiフィラメントをフッ硝酸でエッチングして行った。図2-11は線材# 1の最終線径に加工

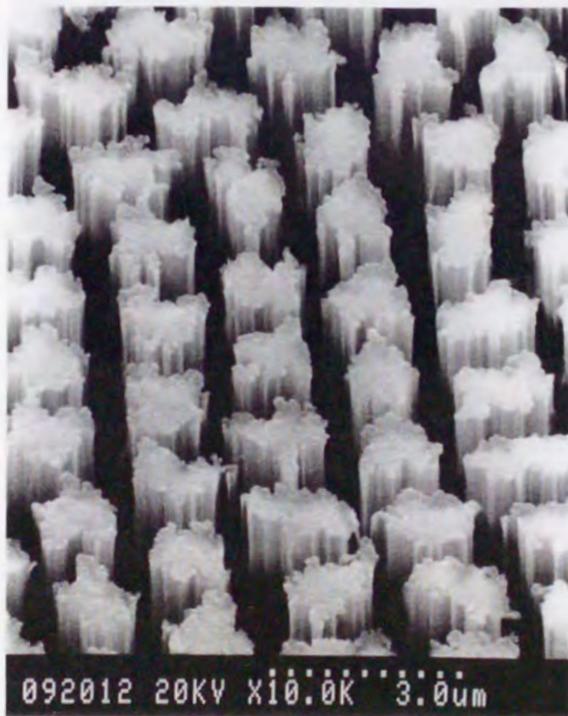
表2-3 Nbアイランド型人工ピン線材#1、#2に使用したNbTi合金および
Nbピンの各成分含有率

NbTi		
O	0.029	wt%
N	0.0051	wt%
H	0.0030	wt%
C	0.0048	wt%
Fe	70	wt ppm
Nb	52.8	wt%

Nb		
O	0.01	wt%
C	0.004	wt%
N	0.003	wt%
H	0.001	wt%
Zr	0.005	wt%
Ta	0.085	wt%
W	0.005	wt%
Ti	0.002	wt%
Fe	0.002	wt%



(a)



(b)

図2-11 Nbアイランド型人工ピン線材#1の最終線径0.6mm時の線材断面SEM観察結果。(a) Nbフィラメント群、(b) その拡大。ピニングセンターとなるNbフィラメントは多少歪んでいるがその配列は維持されている。

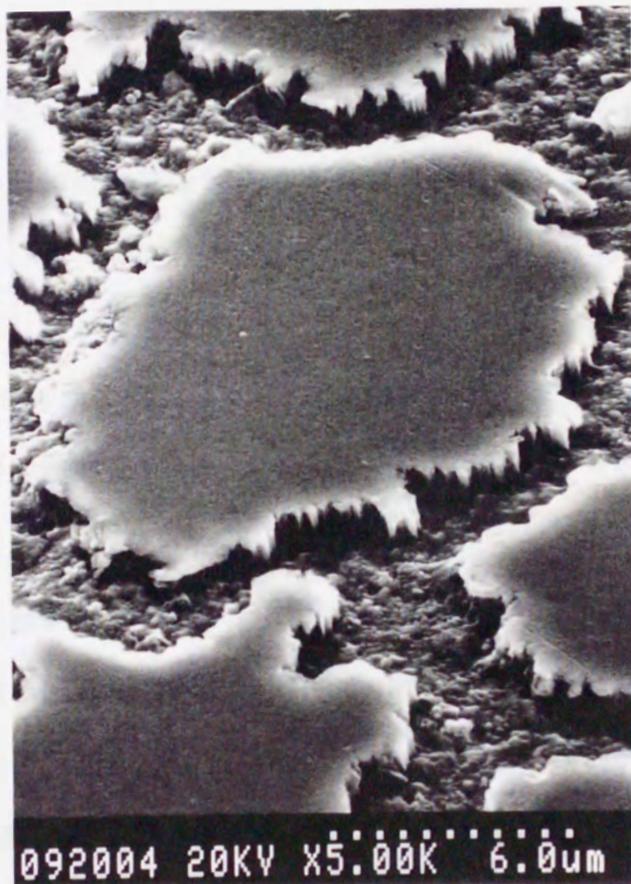


図2-12 多芯線材#2の最終線径0.56mm時のフィラメントSEM観察結果。押し出し温度が高いこと、及びビレットの充填率不足によりフィラメントの変形がみられる。またSEMの分解能を越えるためNbピンの観察は不可能であった。

途中の0.6mm ϕ の時のSEM観察結果である。Nbピンの断面形状は導入時の円形から周囲が多少歪んでいるのが分かる。これは伸線加工時のNbの変形抵抗がNbTiと比較して半分以下であるために起きたものである。しかしながら設計時のピン配列は維持されており、最終線材においても相似計算で予測される設計値にほぼ近い状態で人工ピンの導入がなされていると考えられる。

次に多芯の線材#2の最終押し出し後、線径0.56mm時のフィラメント観察の結果を図2-12に示す。フィラメントはビレットメイキングの際の充填率の低下が原因で多少変形している。一方、この線径でのNbピンの径の予想値は26.3nmであるが、SEMの分解能の範囲を越えるため観察不可能であった。

2.3.2 ピンニング特性

4.2Kにおいて4端子法により J_c の磁界依存性の測定を実施した。試料長は50mmで電圧タップ間距離は10mmである。 J_c の定義はNbピンを含めたNbTi当たりの比抵抗定義、 $10^{-14}\Omega m$ で行った。

線材#1の各試料の J_c の磁界依存性を図2-13に示す。線径を0.203から0.06mm ϕ と細めるに従い、8T以上の磁界で J_c は増加し、特に2T以下では急激に増加する傾向が観測された。線径0.06mmでは1Tで J_c が20000A/mm²に達し、従来の α -Ti型による最適化された線材の最大値9000A/mm²の2倍以上の値を示した。また、他の人工ピン法による線材と比較しても低磁界での値は非常に大きい。アイランド型の人工ピン導入により、低磁界において従来線材を初めて越える J_c 値が達成されたと言える。

図2-14は各試料のピン力の磁界依存性である。ピン力は線径を細めるに従い増加し、線径0.06mmで1.1Tで最大ピン力20.3GN/m³が得られた。また各試料における最大ピン力の磁界も0.9Tから1.1Tへとわずかながら高磁界側へのシフトが観測された。一方、ピン力の外挿から求めた B_{c2} は約11Tであり、バルク値からの

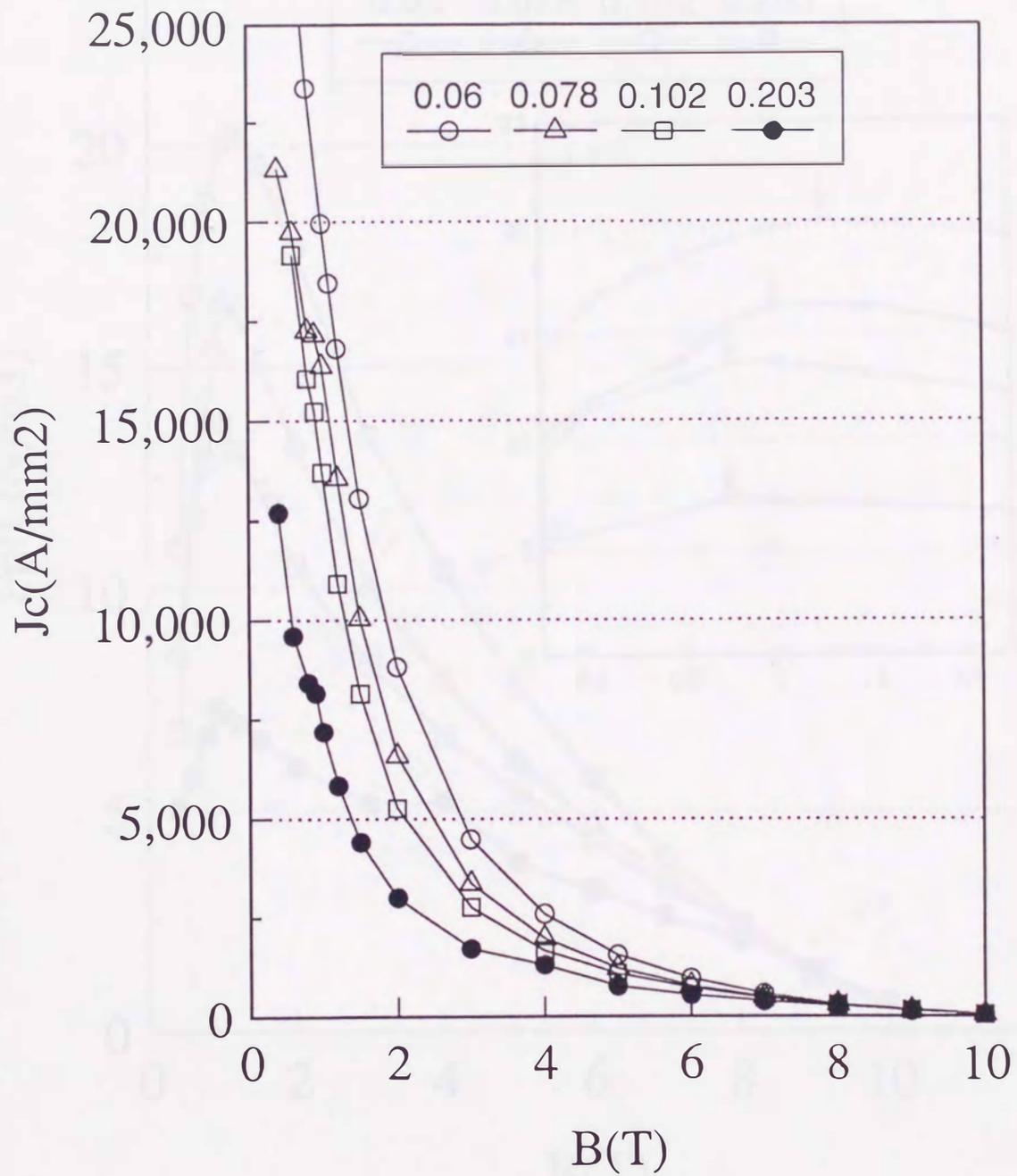


図2-13 線材#1の J_c の磁界依存性。Nbアイランド型人工ピンニングセンターの導入により、2 T以下の低磁界で従来線材の J_c を初めて上回る高 J_c 化が達成されている。

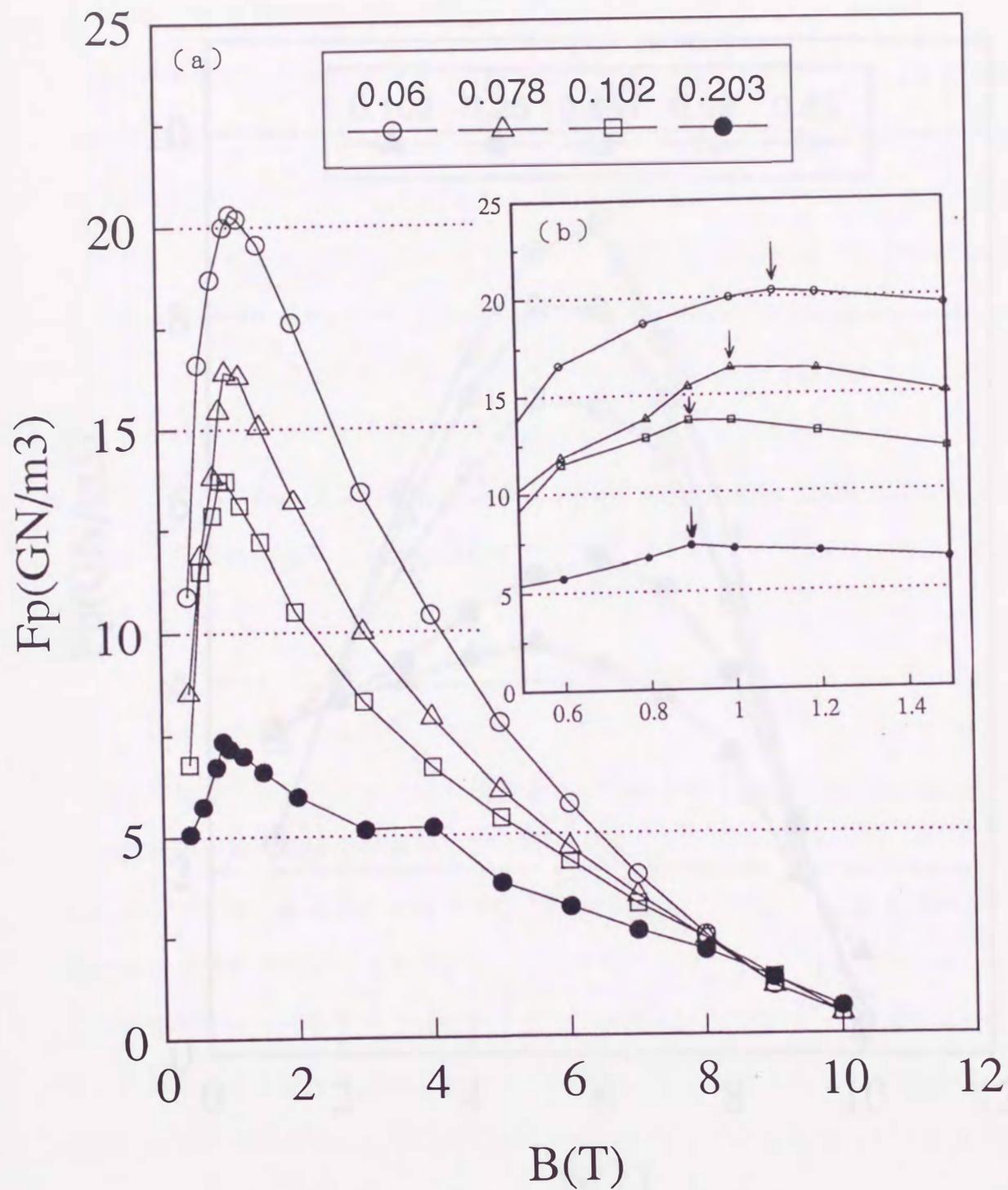


図2-14 線材#1の各線径のピン力の磁界依存性 (a)。8 T以下の磁界領域ではピン形状の変化に伴うピン力の増加が顕著に現れている。(b)はピン力のピーク磁界付近の拡大を示す。ピーク位置がわずかながら高磁界側にシフトしているのが理解される。

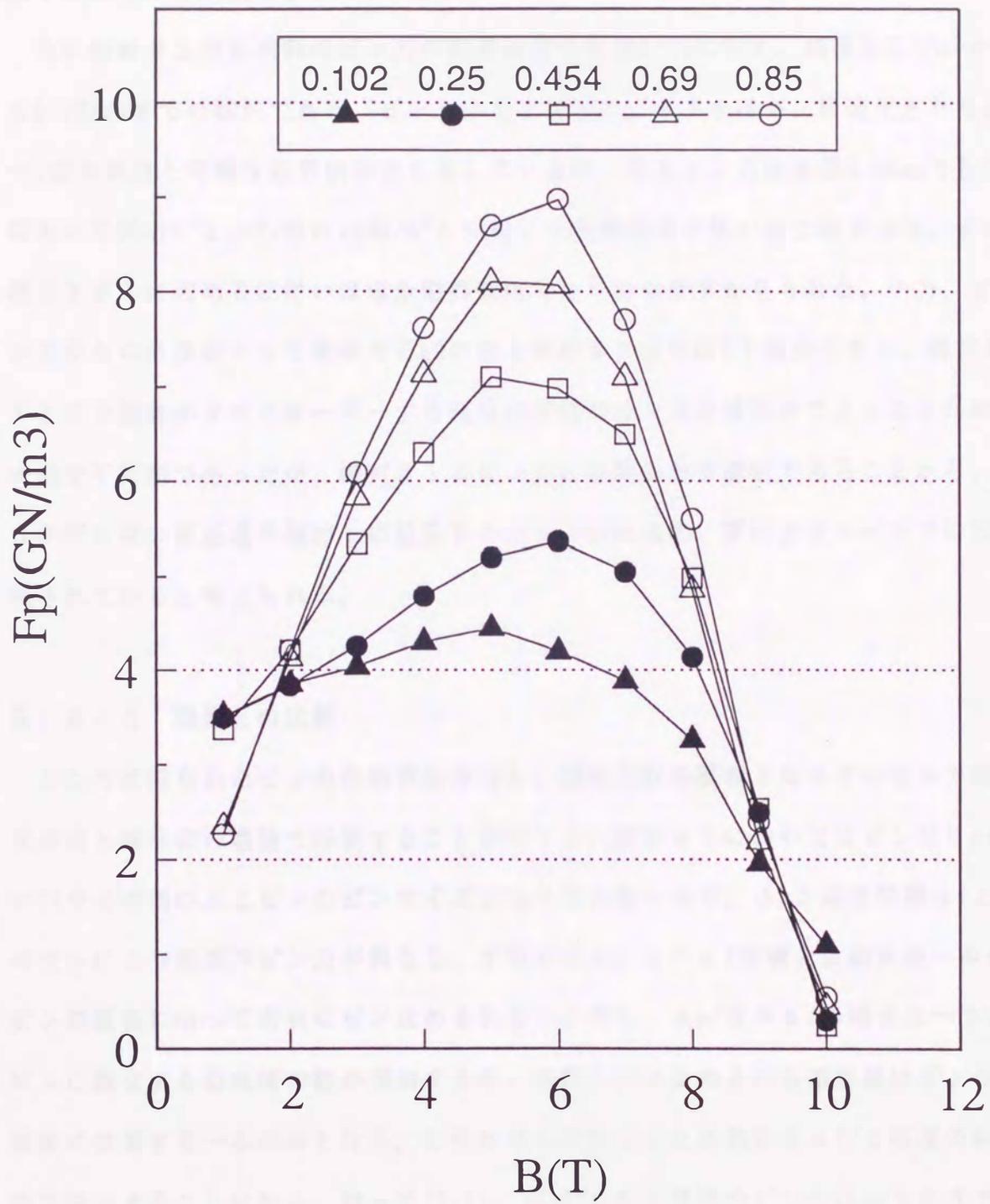


図2-15 線材#2の各線径のピン力の磁界依存性。ピン力のピークは5 T付近にあり、最適化された $\alpha-Ti$ 型線材と同様な磁界依存性を示すが、その大きさは低下している。

低下はほとんど観測されなかった。

次に線材#2の各試料のピン力の磁界依存性を図2-15に示す。線径は0.85mmから0.102mmまでの試料である。ピン力は5 T付近にピークを持ち、最適化された α -Ti型の線材と同様な磁界依存性を示しているが、最大ピン力は線径0.85mmで5 Tにおいて 9GN/m^3 と α -Ti型の 15GN/m^3 と比較して6割程度の低い値に留まった。また線径をさらに細めるに従いほぼ全磁界領域でピン力の低下が見られた。一方、ピン力からの外挿によって求めた B_{c2} の値も線材#1より0.5 T程度小さい。線材#1とピン設計がクロスオーバーする領域の線材のピン力は線径が大きくなるために測定不可能であったが、線材#1のピン力との関係が不連続であることから、3次押し時の熱処理や強加工に起因するNbピンの形状的、質的变化がピン力に反映されていると考えられる。

2.3.3 理論との比較

ここでは得られたピン力の磁界依存性を、設計方針の基礎となっているコア相互作用と線形和の理論で評価することを試みる。線材#1においてはピン径 d_p が α -Tiやその他の人工ピンのピンサイズと比べて大きいので、 d_p と磁束間隔 a_f と
の大小により要素的ピン力が異なる。すなわち $d_p/2 < a_f$ の場合は磁束線一本がピンの表面に沿って有効にピン止めされるのに対し、 $d_p/2 > a_f$ の場合は一つのピンに鎖交する磁束線の数が増加するが、実際にピン止めされる磁束線はピンの端部に位置する一本のみとなる。しかもその有効ピン止め長は $2 a_f/d$ 程度の割合で減少することになる。従って(2-1)、(2-2)式から要素的ピン力は以下の式で表せる。

$$f_p \simeq (B_{c2}^2 / 4 \mu_0 \kappa^2) (1 - B / B_{c2}) \pi \xi^2 d / 2 \xi \quad (2-5)$$

ここで有効ピン止め長 d は、

$$d \simeq \pi d_p / 2, \quad d_p / 2 < a f \quad (2-5a)$$

$$d \simeq \pi a f, \quad d_p / 2 > a f \quad (2-5b)$$

となる。一方、有効ピン密度は N_{pe} はピン間隔が $a f$ に比べてかなり大きいために、すべてのピンがピン止めに寄与する。

$$N_{pe} = (2 / (\sqrt{3} d_p))^2 (2 / (\sqrt{3} a f)) \quad a f \ll d_p \quad (2-6)$$

ここで線形和、 $F_p = \eta N_{pe} f_p$ を用いて各線材のピン力評価を行う。ピンニング係数 η はすべてのピンが有効に作用すると考え、 $\eta = 1$ とする。ピン力の磁界依存性は規格化磁界 $b = B / B_{c2}$ を用いて式(2-5a)、(2-5b)及び(2-6)により、

$$F_p \propto b^{0.5} (1 - b) \quad b \leq b_m \quad (2-7)$$

$$F_p \propto (1 - b) \quad b \geq b_m \quad (2-8)$$

となる。ここで b_m は最大ピン力の規格化磁界で、

$$b_m = (\pi / \sqrt{3}) (4 \xi / d_p)^2 \quad (2-9)$$

である。強加工された Nb-46.5wt%Ti の $B_{c2} = 11 \text{ T}$ 、 $\kappa = 45$ とし [71]、 $\xi = (\Phi_0 / 2 \pi B_{c2})^{0.5}$ から最大ピン力とその磁界を求める。表2-4に線材 # 1 の各試料の

表2-4 線材#1の各試料の最大ピン力、及びその磁界の測定値と計算値の比較

試料	測定値		計算値	
	F _{pmax} (GN/m ³)	B _{max} (T)	F _{pmax} (GN/m ³)	B _{max} (T)
#1-0.203	7.3	0.9	1.3	0.1
#1-0.102	13.7	0.9	5.0	0.4
#1-0.078	16.4	1.0	8.2	0.68
#1-0.06	20.3	1.1	13.3	1.15

最大ピン力、及びその磁界位置の計算結果を測定結果と合わせて示す。最大ピン力は1.3から13.3GN/m³まで急激に増加し、またその磁界位置も0.1Tから1.2Tまで増加した。これは測定結果の傾向と定性的に一致している。ここで最大ピン力の測定値が計算値より大きいこと、および線材#1-1、#1-2の最大ピン力の磁界が計算値より高磁界にずれている原因として、転位によるピン力のバックグラウンドやピンの変形による要素的ピン力の増加などが考えられる。

規格化磁界が $b \leq b_m$ の磁界では(2-7)式および(2-9)式より $F_p \propto d_p / d_s^2$ となる。図2-16に1T以下における測定されたピン力と d_p / d_s^2 の関係を示す。 F_p は d_p / d_s^2 にほぼ比例しており、実際に線形和が成立していることが理解される。従ってこのサイズのアイランド型人工ピンにおいては線形和によるピン力設計が可能であることが明らかとなった。

次に、線材#2のようにピンニングセンターの径 d_p が小さい場合は各ピンニングセンターが一本の磁束をその長さにわたりトラップする。従って要素的ピン力は以下の式で与えられる。

$$f_p \cong (B_c^2 / 4 \mu_0 \kappa^2) (1 - B / B_c) \pi \xi^2 d_p / 2 \xi \quad (2-10)$$

また有効ピン密度はピン間隔が磁束間隔より小さい場合は、

$$N_{p,e} = (2 / (\sqrt{3} d_s)) (2 / (\sqrt{3} a f))^2 \quad a f > d_s \quad (2-11)$$

となる。式(2-10)、(2-11)からピン力の磁界依存性、および最大ピン力の規格化磁界 b_m は以下の式で表される。

$$F_p = b (1 - b), \quad b_m = 1 / 2 \quad (2-12)$$

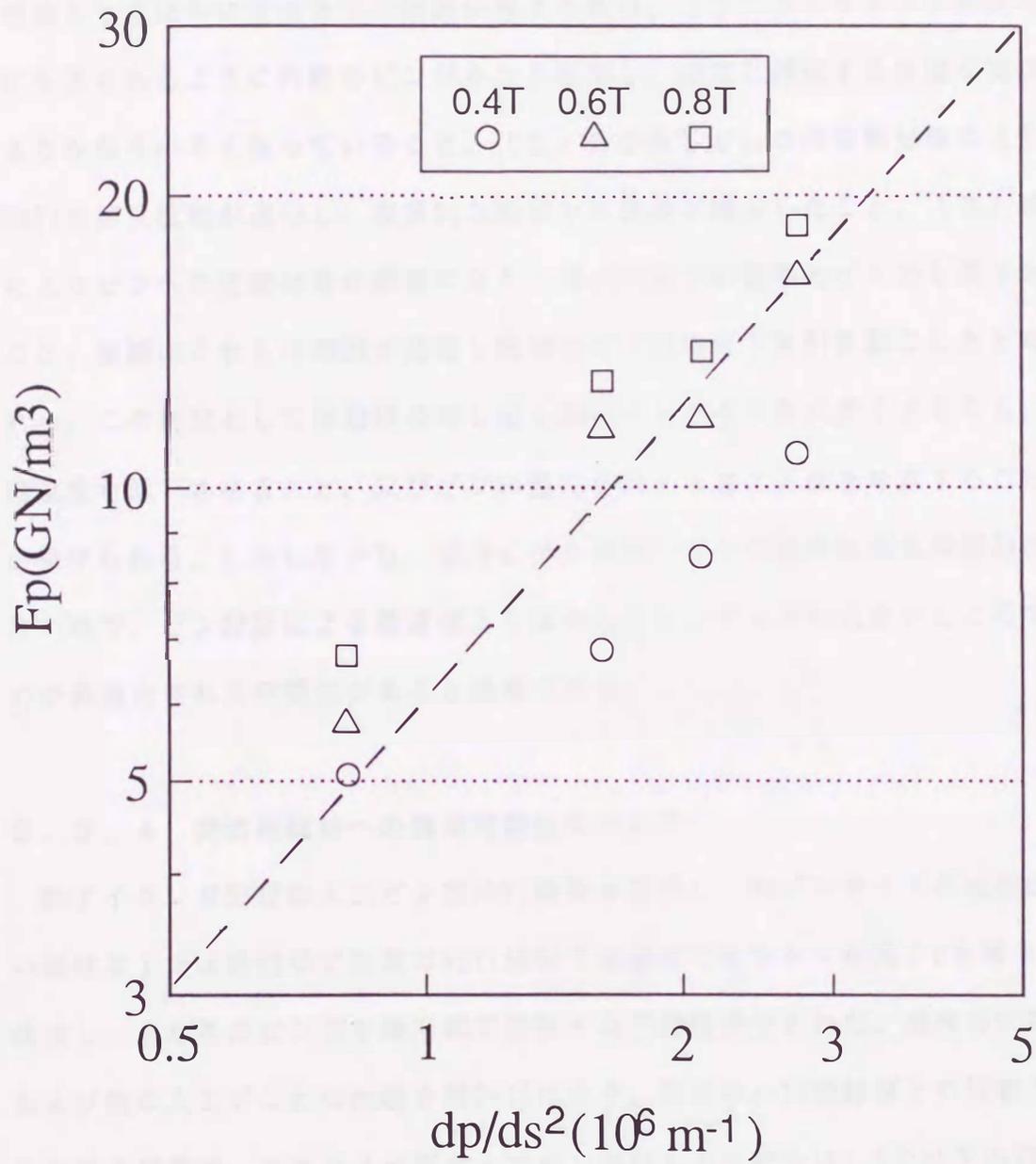


図2-16 線材#1の1T以下の磁界における実際のピン力と dp/ds^2 の関係を示す。ほぼ比例関係が成立している。

これらの式から線形和を用いて線材#2-0.85の測定値との比較を試みる。その結果を図2-17に示す。最大ピン力を示す磁界は測定値と一致するが、最大ピン力を測定値と一致させる為にはピンニング係数 $\eta=0.13$ と極端に低い値となる。この理由としては主に次の3つの原因が考えられる。(1)フィラメント形状の歪みにも見られるように内部のピンがかなり変形し、磁束と鎖交する体積が実際の値よりかなり小さくなっていること。(2)3次押し出しの際の熱処理によりNb-NbTiの相互拡散が進行し、実質的なNbピンの体積が減少したこと。(3)縮径化によりピンへの近接効果が顕著になり、 B_{c2} の低下が要素的ピン力を低下させたこと。実際はこれらの原因が重複し極端なピン力の低下を引き起こしたと考えられる。この対策としては最終の押し出し時のピンサイズを大きくすること、熱処理温度を低下させること、及びピンの歪みを抑える加工方法を考案することなどが挙げられる。しかしながら、製作に伴う実際のピンの歪みはある程度避けられないので、ピン設計による最適値よりはかなりピンサイズが大きいところでピン力が最適化される可能性があるかと推察できる。

2.3.4 交流用線材への適用可能性について

Nbアイランド形状の人工ピン型NbTi線材を製作し、Nbピンサイズの比較的大きい線材#1では低磁界で従来のNbTi線材では達成できなかった高 J_c を得ることに成功し、またそのピン力を線形和で設計する可能性が示された。従来のNbTi線材および他の人工ピンとの比較を図2-18に示す。従来の α -Ti型線材との比較では3T以下の磁界で、またラメラ型の人工ピン線材との比較では1.5T以下の磁界でピン力が大きくなっている。超伝導交流応用機器のほとんどは2T以下で使用されるため、今回の人工ピンの設計を交流用線材に適用することが十分に考えられる。また近接効果による B_{c2} の劣化についてもラメラ型、ヘキサゴナル型と比較して劣化が少ないことが確認された。

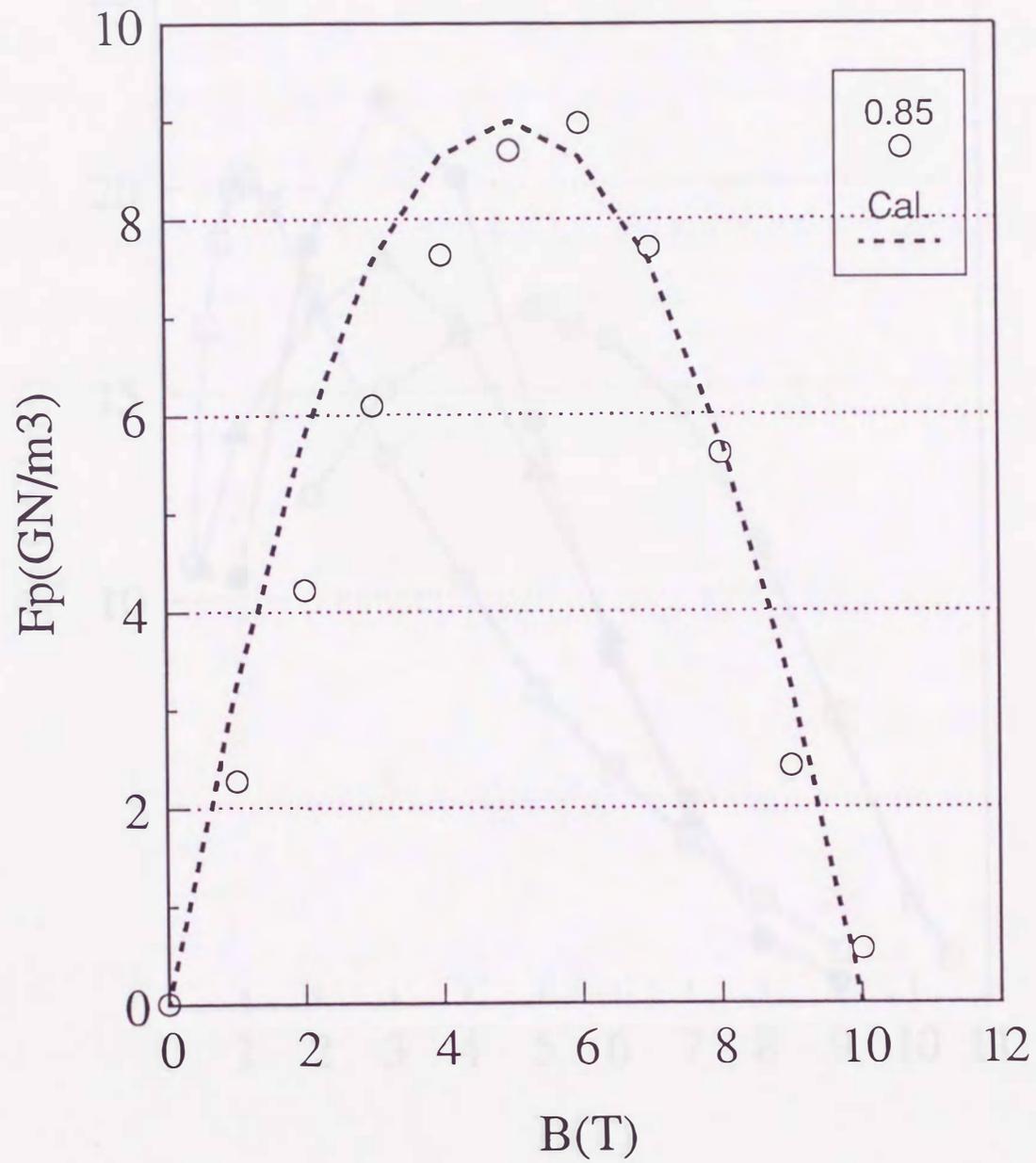


図2-17 線材#2-0.85試料のピン力の磁界依存性の実測値と計算値の比較。
 $\eta = 0.13$ としてほぼ一致した特性が得られる。

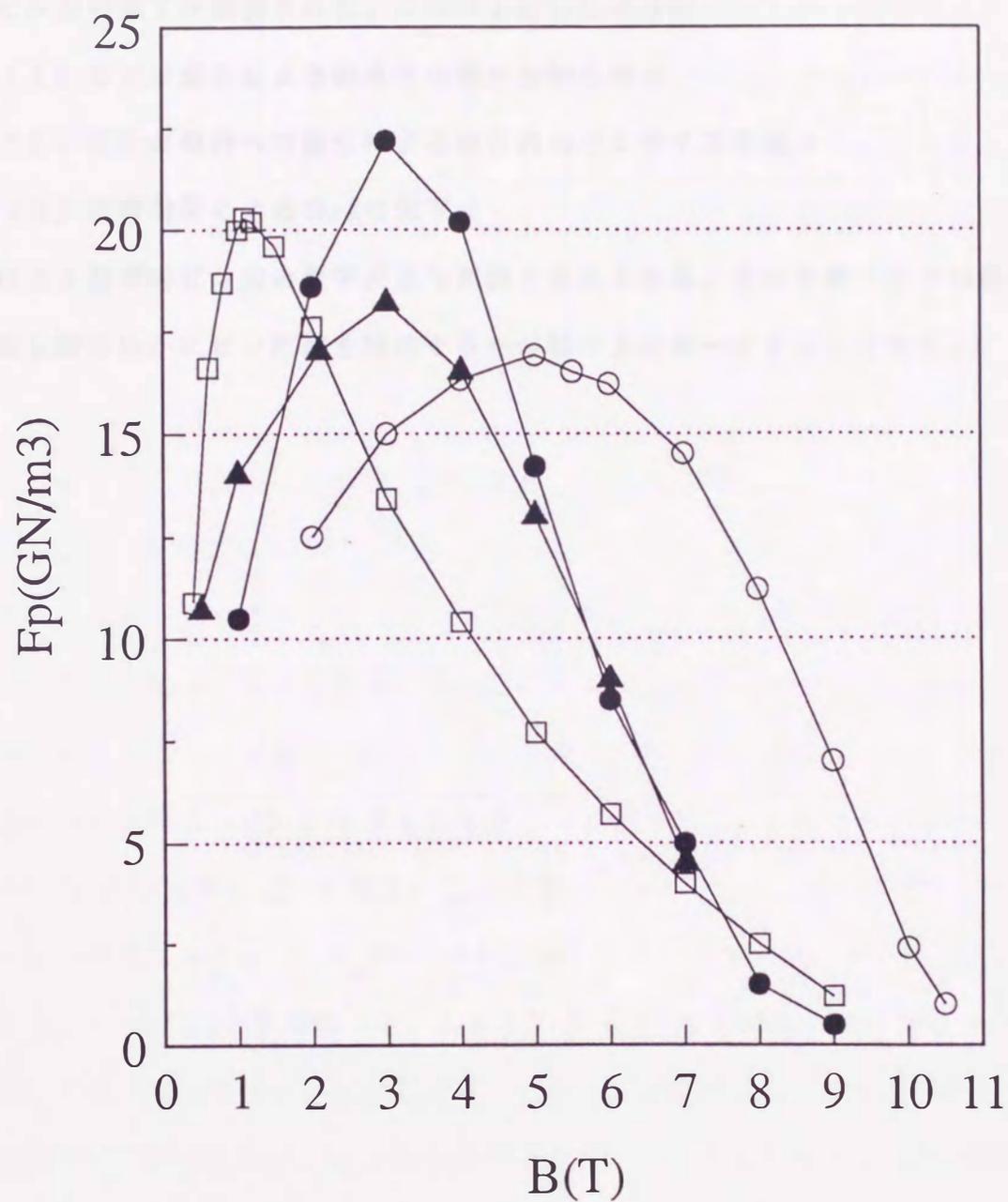


図2-18 各種人工ピン型線材及び従来の α -Ti型線材の典型的なピン力の磁界依存性と今回のアイランド型人工ピン線材の最大のピン力を示した試料との比較。
 ●：ラメラ型[98]、▲：ヘキサゴナル型、○： α -Ti型、□：アイランド型

しかしながら交流線材のフィラメントにピンを導入するためにはピンサイズをさらに縮径化する必要があり、その程度のピンサイズをもつ線材#2においてはピン力の低下が観測された。これは上述したように

- (1) ピンの変形による磁束との鎖交体積の減少
- (2) ピンの母材への拡散による実質的なピンサイズの減少
- (3) 近接効果による B_c2 の低下

による要素的ピン力の低下が主な原因と考えられる。この対策としては最終押し出し時にいかにピン形態を維持するかが製作上のキーポイントとなる。

2.4 人工ピンを導入した交流用線材の開発

Nbアイランド形状の人工ピン型NbTi線材の試作により、熱処理を施さずにJc向上を図ることが可能になり、交流線材への適用の見通しが得られた。次に本論文の主目的である交流用線材への導入を実施する。ここでは今まで得られた人工ピンニングセンター導入に関する知見に基づき、人工ピン型交流用NbTi線材のJc設計指針を得るために適切な範囲でピンパラメーターを変化させた線材の設計・製作を行った。

2.4.1 人工ピン型交流用NbTi線材の設計と製作

表2-5にNbアイランド型人工ピンを導入した交流用線材の諸元を示す。設計フィラメントサイズはすべてサブミクロンであり、ピンサイズ、ピン間隔を変化させた5種類の線材とピンを導入しない比較用線材1種類を製作した。線材#1、#2、#3はピンサイズのみを変化させたシリーズで、他のパラメーターは、ほぼ同一な設計がなされている。各種線材とも線径を変化させることによりフィラメント径を0.74~0.21 μm まで変化させている。フィラメント当たりのピン本数は19本であり、ピン体積率はそれぞれ14%、17%、24%である。ピンサイズはそのピン体積率に応じて異なり、83~18nmの範囲にある。またピン間隔は140~40nm程度まで変化する。線材#4は線径に対するフィラメント径、フィラメント間隔及びピン体積率は線材#2とほぼ同一設計であるが、ピン数が37本と多く、ピンをより細かく分散させたタイプである。線材#5は線径に対するフィラメント径が上記の線材より小さく、0.43~0.13 μm の範囲で変化する。フィラメント径が小さいためピン数は7本と少なく、ピン体積率もフィラメント内部の近接効果を考慮して11%と低く設計されている。線材#6は比較用として人工ピンを導入せず、また熱処理も施していない従来タイプの交流用線材である。なお、すべての線材は近接効果を防ぐ為、マトリックス

表2-5 Nbアイランド型人工ピン交流用NbTi線材の諸元
D(mm) は線材径を示す。

線材	#1-D	#2-D	#3-D	#4-D	#5-D	#6-D
フィラメント径, df (μm)	2.01xD	1.95xD	2.01xD	1.95xD	1.17xD	1.24xD
フィラメント間隔, dn (μm)	1.12xD	1.08xD	1.12xD	1.08xD	0.88xD	1.11xD
ピン直径, dp (nm)	176.1xD	185.8xD	224.4xD	134.8xD	147.7xD	-
ピン間隔, ds (nm)	388.0xD	376.9xD	388.0xD	270.2xD	370.5xD	-
ピン数	19	19	19	37	7	-
CuNi比	6.94	6.72	7.35	7.06	15.95	9.43
ピン占積率(%)	14.6	17.2	23.7	17.7	11.2	-

にCu-10wt%Ni合金を用い、フィラメント間隔も $0.1\mu\text{m}$ 以上に制御されている。

線材の製作過程を図2-19に示す。製作方法は従来の交流用線材と同様なビレットメイクを2回繰り返すダブルスタッキング法により実施した。例として線材#1の製作手順を以下に述べる。

- ①外径 $29.1\text{mm}\phi$ のNb-46.5wt%Tiインゴットに $2.6\text{mm}\phi$ の穴を間隔 5.6mm で三角形配置となるように19本あけ、その中に人工ピンニングセンターとなるNbロッドを挿入する。
- ②そのインゴットを外径 $46\text{mm}\phi$ のCu-10wt%Niビレットに挿入し、1次熱間押しだしを行う。
- ③押し出し後伸線加工を行い、対辺長 2mm の六角素線に加工する。
- ④この1次六角素線を複数本を外径 $46\text{mm}\phi$ のCu-10wt%Niビレットに挿入し、2次熱間押しだしを行う。
- ⑤押し出し後伸線加工を行い、対辺長 3.05mm の六角素線に加工する。
- ⑥この2次六角素線を複数本を $46\text{mm}\phi$ のCu-10wt%Niビレットに挿入し、3次熱間押しだしを行う。
- ⑦押し出し後、所定の線径まで伸線加工を行う。

最終の押し出し温度は前回の結果を考慮し押し出し比を下げ、通常温度より低下させた 500°C で行った。またこれらの工程中、 $\alpha\text{-Ti}$ 析出のための時効熱処理は行わず、押し出し温度も $\alpha\text{-Ti}$ が析出する温度領域では実施していない。製作過程における線材の加工性は従来の交流線と同様に非常に良好であり、無断線で線材の長尺化が可能であった。

図2-20に例として線材#1の線径 0.203 の試料の外観とフィラメントのSEM観察による結果を示す。フィラメント径は $0.4\mu\text{m}$ で従来の交流用線材と同様に健全

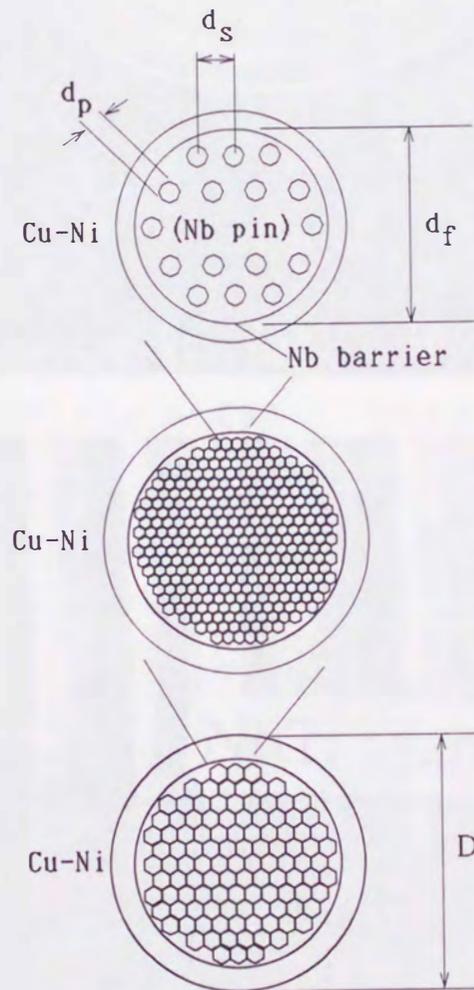
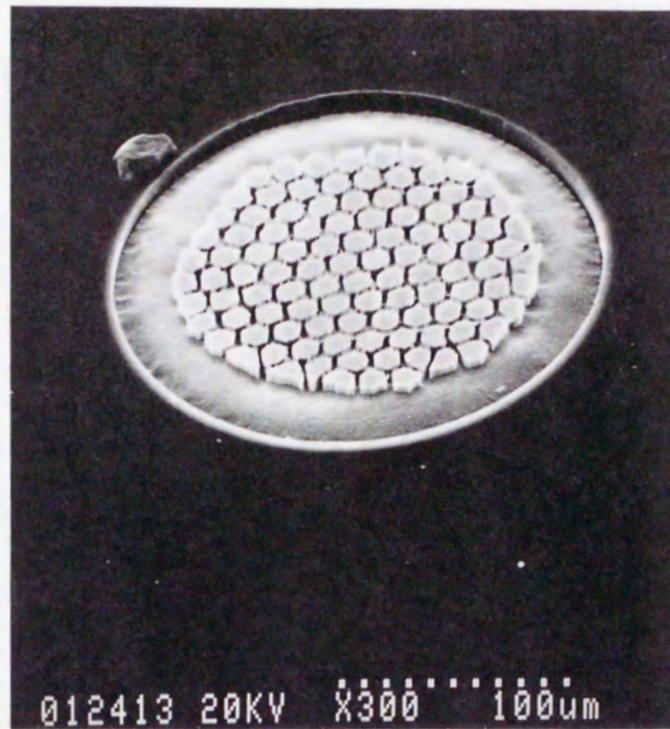


図2-19 Nbアイランド形状の人工ピン型NbTi交流用超伝導線材の製作方法。
一次ビレットにNbピンを挿入する工程以外は、従来の交流用線材の製作方法と
同様のダブルスタッキング法で製作される。



(a)



(b)

図2-20 SEMによる線材#1-0.203試料の外観(a)とそのフィラメント形状(b)の観察結果。従来の交流線材と同様に、均一なサブミクロンレベルのフィラメントが製作されている。

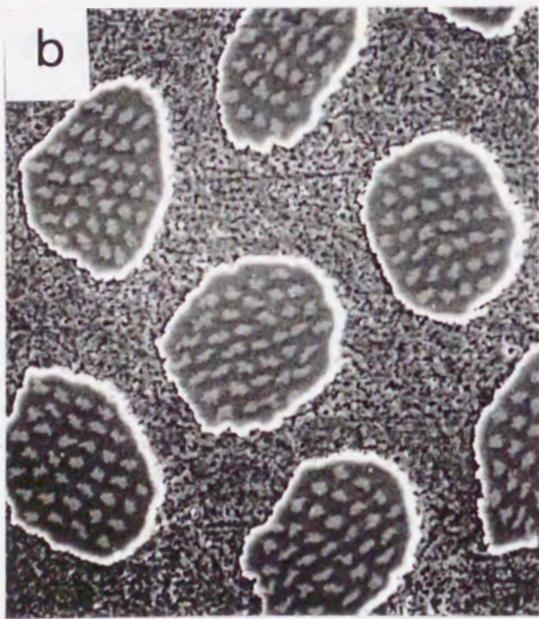
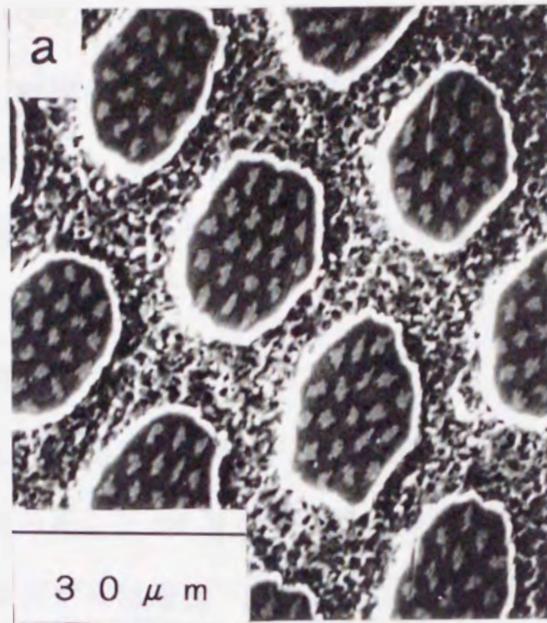


図2-21 SEMによる線材#2 (a)、#4 (b) 及び#5 (c) の最終線径10.2mm時のフィラメント形状および内部組織の観察結果。各線材ともピンングセンターであるNb形状の歪みが観察されているが、ピン間隔、及び配置はほぼ設計通り加工されている。

な加工がなされていることがわかる。図2-21a, b, cに同様に線材#2, #4, #5の最終押しだし後、線径10.2mm時のフィラメント内部のピン形状の観察結果を示す。各線材ともピンニングセンターであるNbは真円からの変形が見られるが、ピン間隔及び配置はほぼ設計通り加工されていることがわかる。

2.4.2 実験方法

線材の特性評価として臨界電流密度 J_c 、臨界温度 T_c 、上部臨界磁界 B_{c2} 及び履歴損失の測定を行った。 J_c の測定は4.2K、磁界中(0~10T)において四端子法を用いて行われた。サンプルは電圧タップ距離100mm、線材長500mmの無誘導巻きコイル形状である。 J_c の定義はピン及びNbバリアを含めた、NbTi+Nb断面積当たりで、比抵抗定義 $10^{-14} \Omega m$ で行った。 T_c は外部磁界1mT中で、VSM磁化測定装置により磁化の温度依存性の測定を行い、反磁性から常磁性に変わる温度として求めた。この際の温度制御は0.1Kで行った。 B_{c2} の測定は4.2kにおいて四端子法を用いて行い、 J_c が $0.1 A/mm^2$ となる磁界として求めた。また、高磁界側のピン力を外挿して、ピン力が0となる値としての定義も合わせて行った。履歴損失は、両端部を十分に研磨した長さ6mmの短尺試料を用いて、VSMにより最大振幅1Tまでの磁化測定から求めた。

2.4.3 各線材の J_c 特性

ここではフィラメントへ導入したピン数の異なる各線材で線径を変化させた試料において、最大級の J_c を示した試料#2-0.203, #4-0.203及び#5-0.156の J_c の磁界依存性の結果を、線材#6の同一フィラメント径の試料と比較して図2-22に示す。フィラメント径が小さく7ピンを導入した線材#5では、 $0.18 \mu m$ のフィラメント径を有する#5-0.156が1T以下の低磁界における J_c 増大が顕著にみられた。その値は0.5Tにおいて $2.70 \times 10^{10} A/m^2$ に達し、従来の $0.1 \mu m$ レベルの交流用線材と比較し

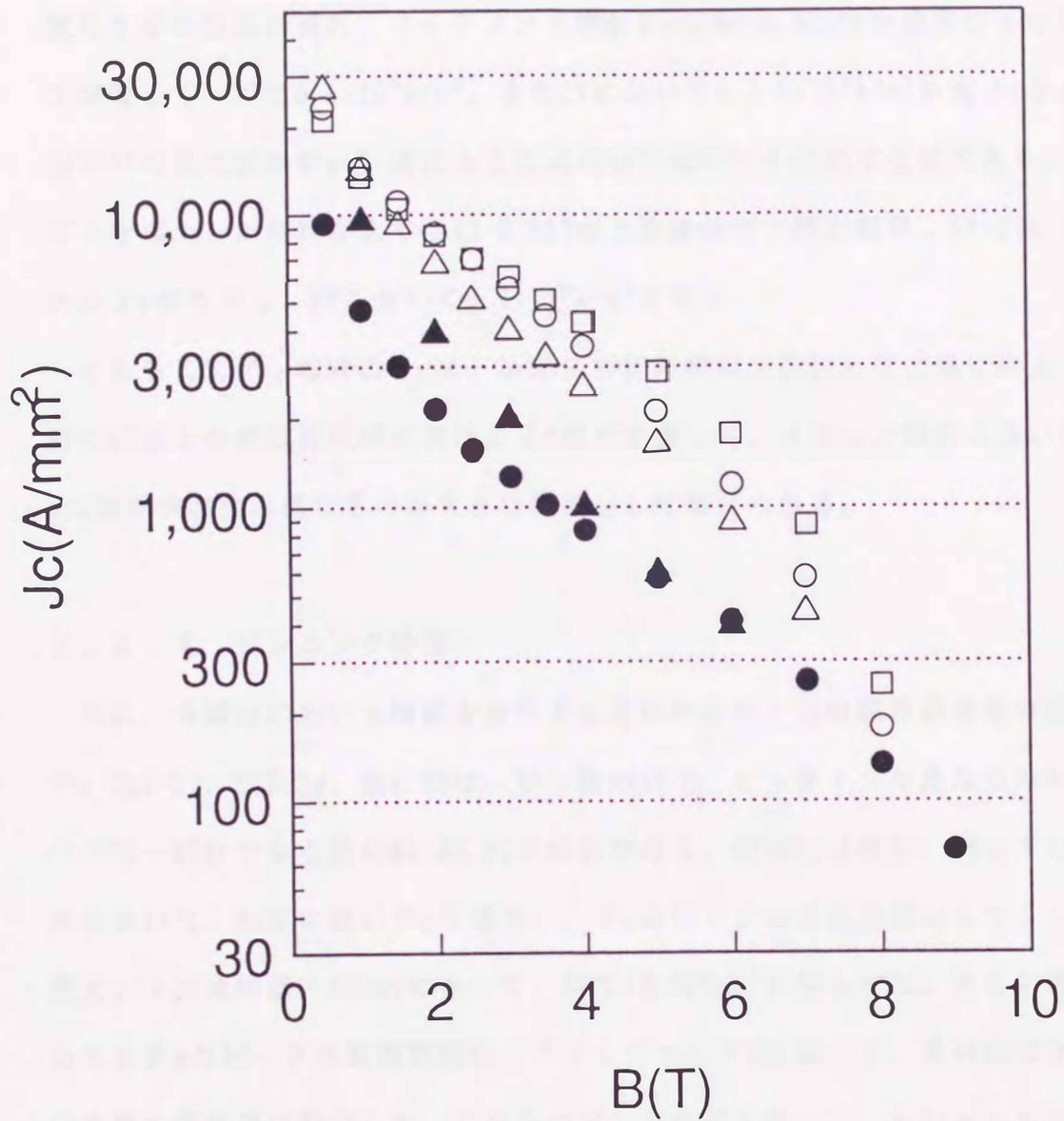


図2-22 人工ピンニングセンターのピン数の異なる各線材において最大の J_c を示した試料#2-0.203、#4-0.203及び#5-0.156の J_c の磁界依存性。比較として線材#6の同一のフィラメント径の試料も示す。○：#2-0.203、△：#5-0.156、□：#4-0.203、●：#6-0.299、▲：#6-0.102

て2倍以上も向上した。さらに中磁界においても、従来の交流用線材に見られるような J_c の急激な低下は起こらず、人工ピンがピンニングセンターとして有効に作用していることが確認された。一方、37ピンを導入した線材#4ではピンを分散化させた効果が現れ、フィラメント径 $0.4\mu\text{m}$ の#4-0.203で中磁界における J_c 増大が著しく、3Tで $6.1 \times 10^9 \text{A/m}^2$ 、また5Tにおいても $2.9 \times 10^9 \text{A/m}^2$ の高 J_c を達成した。特に5Tの値は従来の $\alpha\text{-Ti}$ 法による直流用NbTi線材にも匹敵する値である。また19ピンを導入した線材#2では#2-0.203が上記線材の中間の磁界、1T~2Tにおいて最大の J_c 値を示し、2Tにおいて $8.7 \times 10^9 \text{A/m}^2$ を得た。

これら人工ピン線材の J_c は、従来の交流用線材と比較して大幅に向上しており、特に1T以上の高磁界領域における J_c 増大が著しい。またピン設計の違いにより J_c の磁界依存性が異なるのが大きな特徴として挙げられる。

2.4.4 ピンニング特性

次に、各線材において線径を変化させた試料のピン力の磁界依存性の結果を示す。図2-23、図2-24、図2-25は、ピン数が19で、ピンサイズが異なるほかは、すべて同一設計である線材#1、#2、#3の結果である。線材#1は最初、7T以下の磁界領域において、加工に伴い F_p は増加し、 F_p のピークは高磁界側にシフトしていく。最大ピン力は線径 0.203mm において、3Tで 13.9GN/m^3 が得られた。さらに線径を細めると F_p のピークは高磁界側にシフトしつつも F_p は減少し、最終的にはピークの位置も低磁界に移行した。これらのピン力の振る舞いは、 $\alpha\text{-Ti}$ ピンを加工した場合に見られる非飽和現象[89]と類似しており、フィラメントに導入されたNbが $\alpha\text{-Ti}$ と同様に強いピンニングセンターとして作用していることが理解される。ピン体積率が17%と大きい線材#2は#1と同様なピン力の振る舞いを示すが、ピン力はさらに向上し、線径 0.203mm の試料で、2.5Tにおいて最大ピン力 17.5GN/m^3 を達成した。また線径 0.118mm においても#1に見られたピン力の急激な減少は観測されな

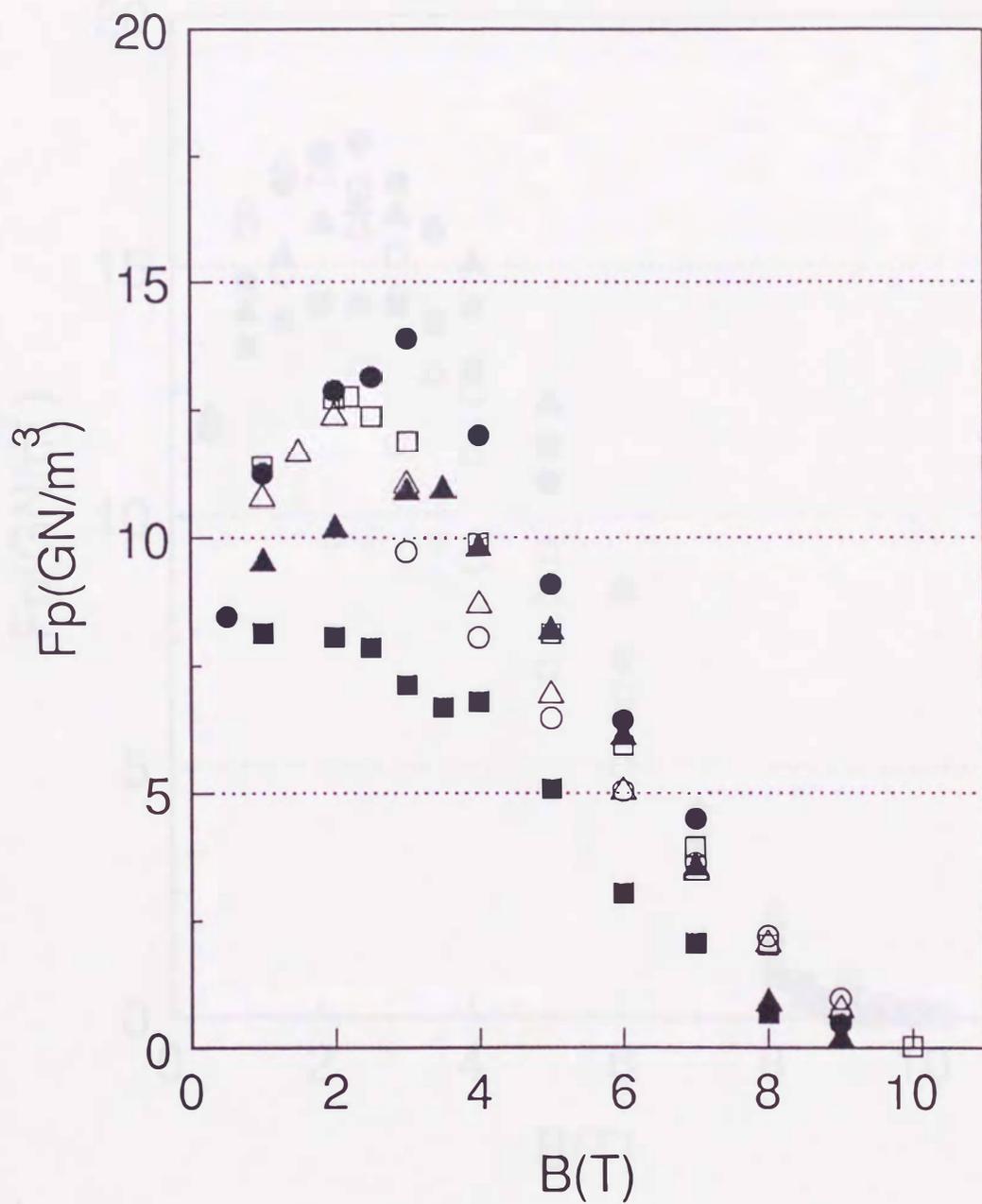


図2-23 線材#1におけるピン力の磁界依存性。○：#1-0.369, △：#1-0.299, □：#1-0.25, ●：#1-0.203, ▲：#1-0.156, ■：#1-0.102

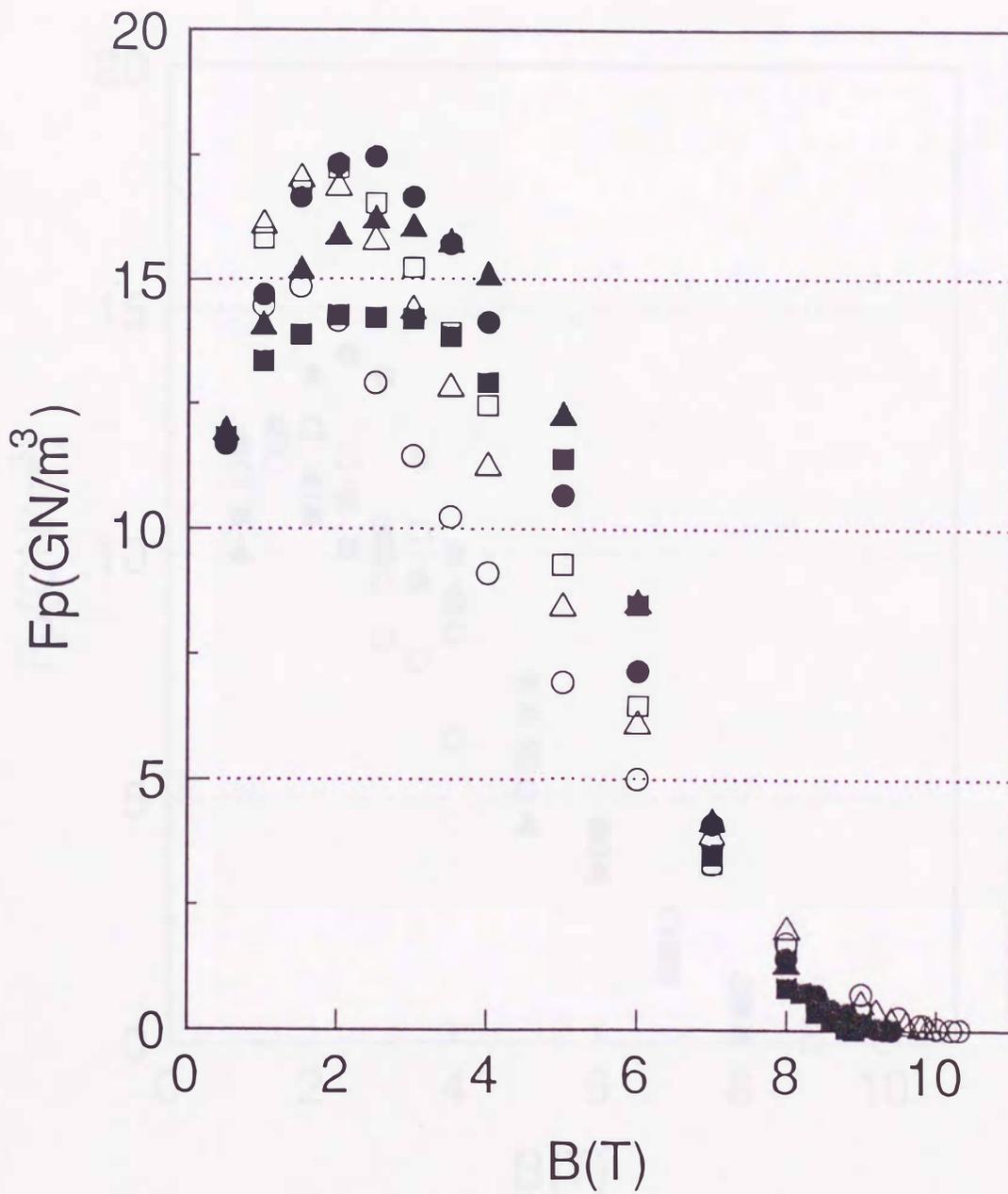


図2-24 線材#2におけるピン力の磁界依存性。○：#2-0.369, △：#2-0.299, □：#2-0.25, ●：#2-0.203, ▲：#2-0.156, ■：#2-0.118

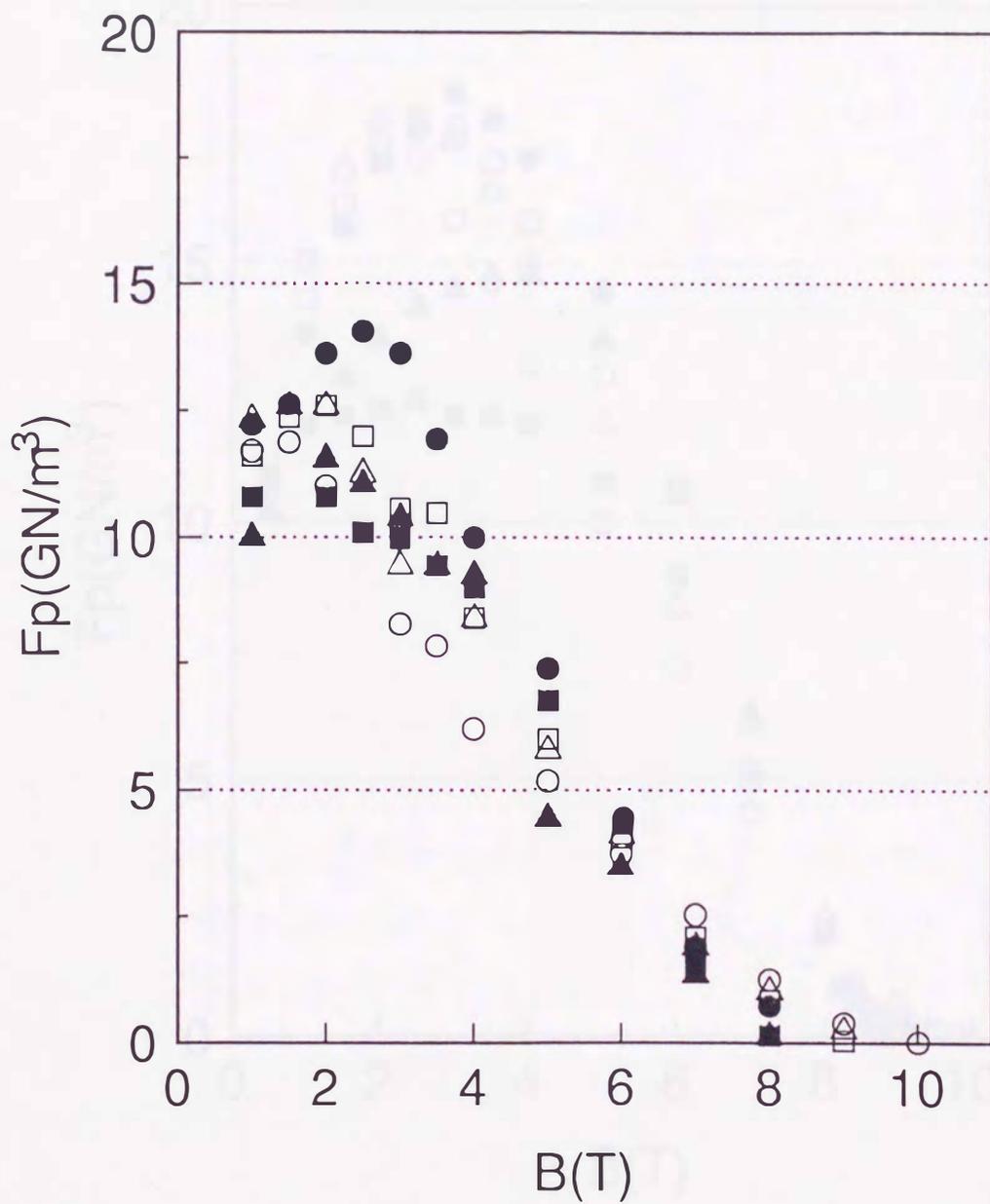


図2-25 線材#3におけるピン力の磁界依存性。○：#3-0.369, △：#3-0.299, □：#3-0.25, ●：#3-0.203, ▲：#3-0.156, ■：#3-0.102

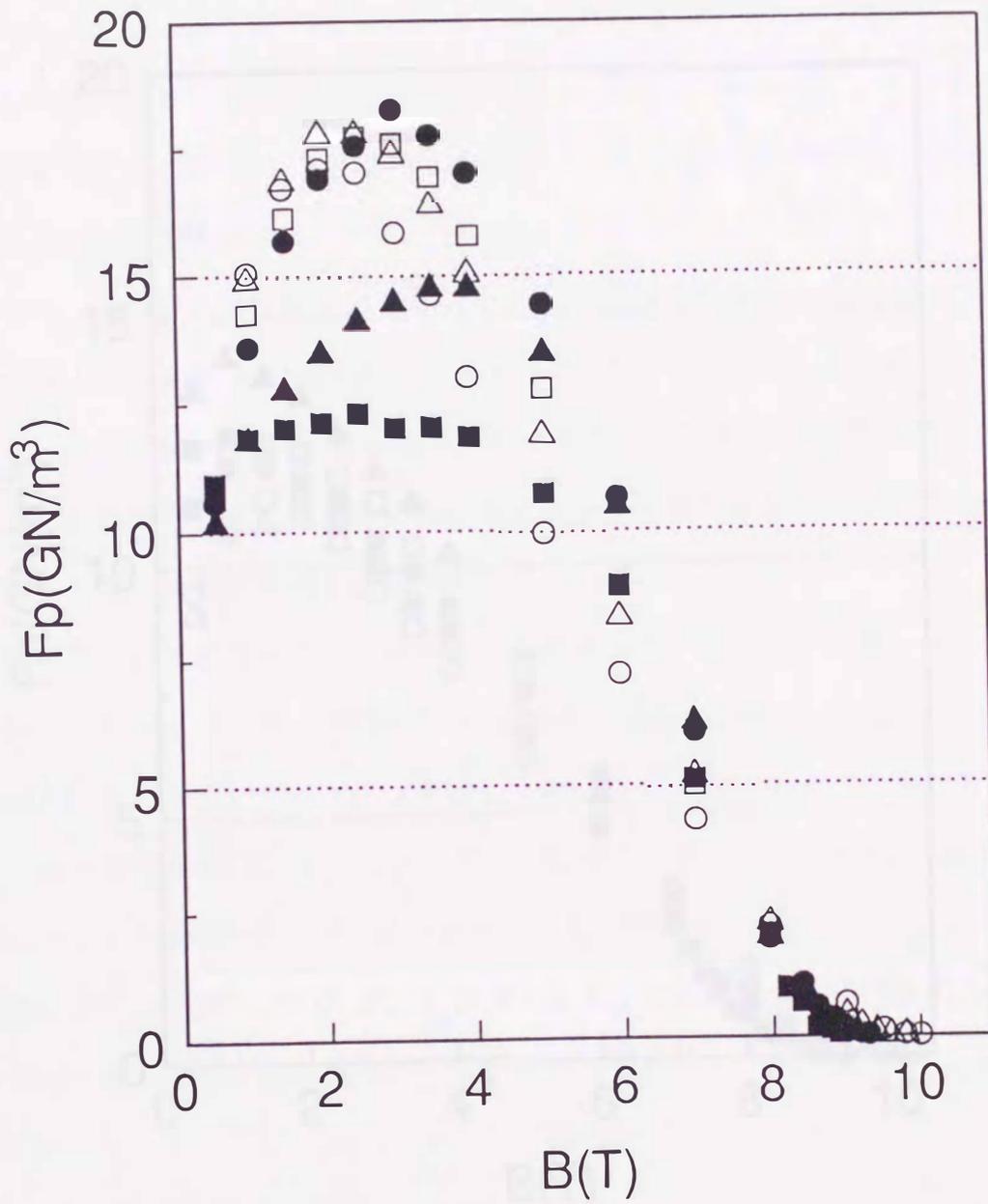


図2-26 線材#4におけるピン力の磁界依存性。○：#4-0.369, △：#4-0.299, □：#4-0.25, ●：#4-0.203, ▲：#4-0.156, ■：#4-0.118

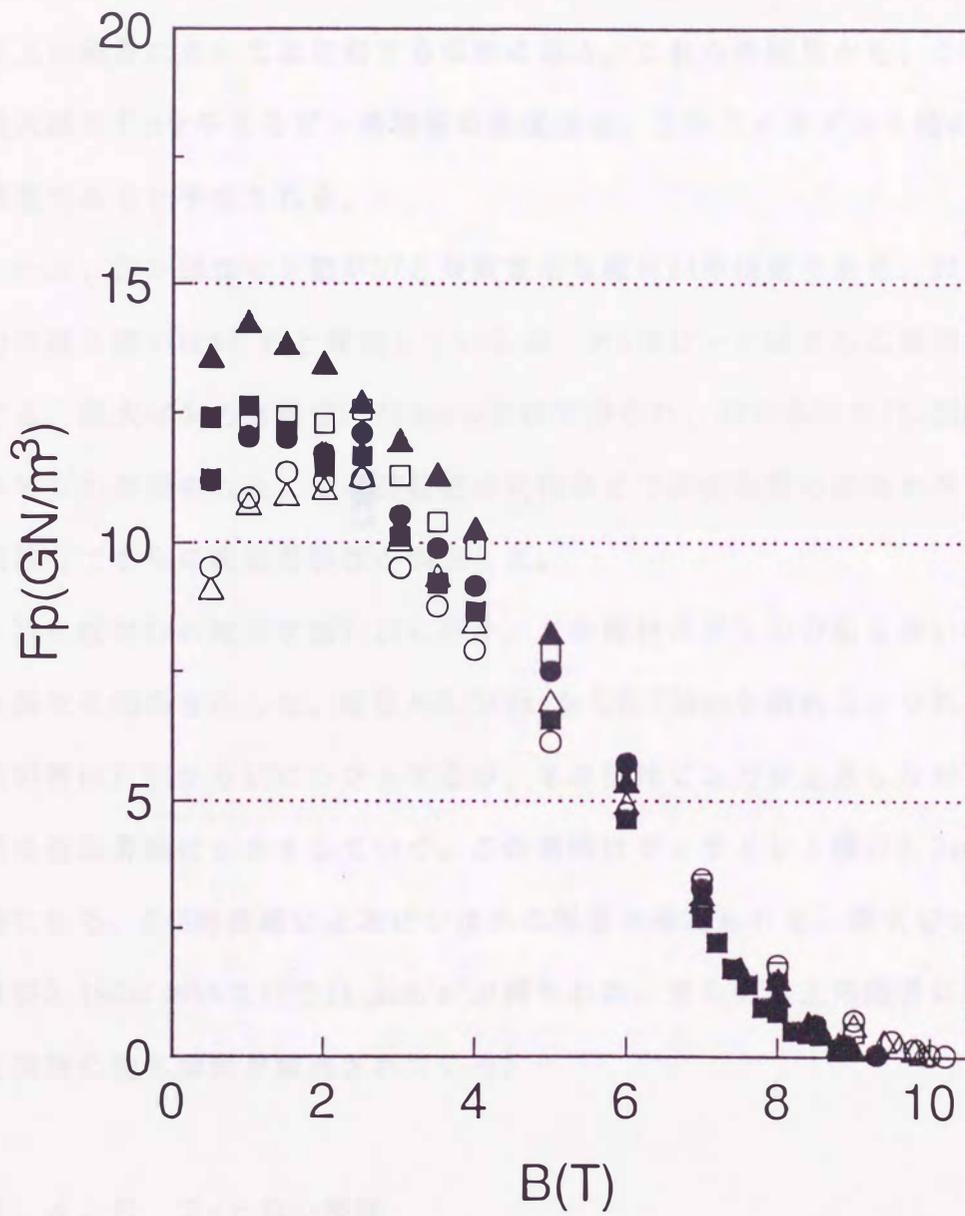


図2-27 線材#5におけるピンカの磁界依存性。○：#5-0.369, △：#5-0.299, □：
#5-0.25, ●：#5-0.203, ▲：#5-0.156, ■：#5-0.118

かった。一方、さらにピン体積率が大きい#3は、線径0.203mmまでは#1、#2と同様な振る舞いを示すが、ピン力は#2より低下し、さらに線径を細めると F_p のピークの磁界は上記の線材のように高磁界側にはシフトせず、低磁界側に留まる傾向を示した。また、線材#1、#2と比較して、高磁界側における F_p の減少が大きく、6T以上の磁界においては飽和する傾向にある。これらの結果から、この系における最大級の F_p を与えるピン体積率の最適値は、このフィラメント径の範囲では17%程度であると予想される。

一方、図2-26はピン数が37と分散させた線材#4の結果である。加工に伴うピン力の振る舞いは#1、#2と類似しているが、 F_p のピークはさらに高磁界側にシフトする。最大ピン力は線径0.203mmの試料で得られ、3Tにおいて 18.3GN/m^3 もの大きいピン力が得られた。また8T程度の高磁界まで非飽和型の傾向を示し、線材#2と比較してさらに高磁界特性が向上した。

次に線材#5の結果を図2-27に示す。この線材のピン力の振る舞いは上記線材とは異なる傾向を示した。線径が0.369mmから0.299mmと細めるにつれて F_p のピークの磁界は1.5Tから2Tにシフトするが、その後はピン力が上昇しながらピークの磁界は低磁界側にシフトしていく。この原因はフィラメント径が $0.3\mu\text{m}$ 程度以下で顕著になる、S-N境界相によるピン止めの影響と考えられる。最大ピン力としては、試料0.156において1Tで 14.2GN/m^3 が得られた。また6T以上の磁界においては、#3と同様に飽和傾向が観測されている。

2.4.5 T_c と B_{c2} 特性

図2-28は線材#1、#2及び#6の T_c のフィラメント径依存性の結果である。各線材ともフィラメント径の減少に伴って、 T_c はバルク値である9.4Kより8.8K付近まで単調に低下する。一方、人工ピン導入の有無による T_c の差はほとんど観測されなかった。 T_c のフィラメント径依存性は近接効果の理論によってTakacsら[102]に

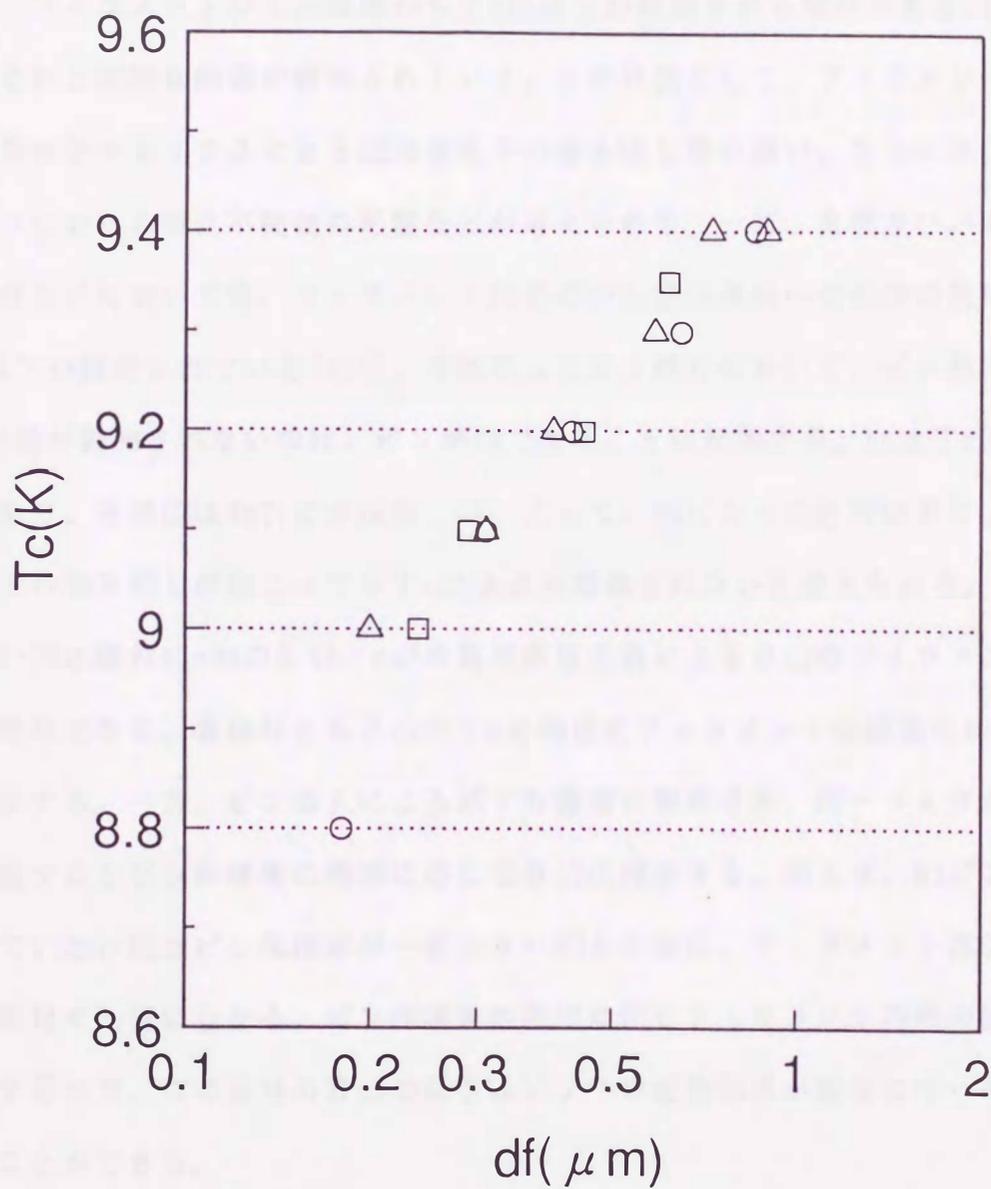


図2-28 線材#1、線材#2及び線材#6の臨界温度 T_c のフィラメント径依存性。
 T_c はフィラメント径の減少に伴い単調に低下し、従来の交流用線材と同様なフィラメント径依存性を示す。○：線材#6、△：線材#1、□：線材#2

指摘されており、NbTi極細多芯線では $df < 0.1 \mu\text{m}$ 程度において T_c の低下が起こりはじめる。Hlasnik[38]、Yasohama[103]らのCuマトリクスにおける実験は、それを支持する結果となっている。しかしながら、CuNiマトリクスの交流用線材においては、フィラメントが $1 \mu\text{m}$ 程度から T_c の低下が観測される傾向がある[104]。今回もそれと同様な結果が観測されている。この原因として、フィラメント形状の歪み具合やマトリクスによる超伝導電子の滲み出し量の違い、さらにはCuNiマトリクスにおける磁性不純物の影響などが考えられる。一方、直流及びパルス用NbTi線材などにおいては、フィラメント内部の α -Ti常伝導相への近接効果による T_c の低下が観測されている[105]。今回の人工ピン線材において、ピン導入による T_c の差が観測されないのは、ピンがNbであることに起因する。Nbは T_c が9.2K程度であり、その値はNbTiにほぼ等しい。よって、Nbピンへの近接効果による超伝導電子の染みだしが起こっても T_c には直接観測されないと考えられる。

図2-29は線材#1~#6の $0.1 \text{A}/\text{mm}^2$ の電流密度定義による B_{c2} のフィラメント径依存の結果である。各線材とも B_{c2} は T_c と同様にフィラメントの縮径化により単調に減少する。一方、ピン導入による低下も顕著に観測され、同一フィラメント径で比較するとピン体積率の増加に応じて B_{c2} は減少する。例えば、Nbピンが導入されていない#6とピン体積率が一番大きい#3との差は、フィラメント径 $0.4 \mu\text{m}$ レベルの試料で1.5Tにもなる。ピン体積率の増加に伴いフィラメント内部のS-N境界は増加するので、この母材の B_{c2} の低下はピンへの近接効果が顕著になった為と考えることができる。

一方、ピン力の高磁界への外挿によって求めた B_{c2}^* の測定結果を線材#4、#5において上記定義と比較して図2-30に示す。 B_{c2}^* は B_{c2} より0.2~0.8Tほど低い値となっている。また、線材#5より線材#4の方がその差は大きい。従来の交流用線材においては、 B_{c2} の定義の違いによる差はほとんど観測されていない[106]。今回のこの原因は F_p の高磁界におけるテイルの存在と関係がある。高磁界におけるピ

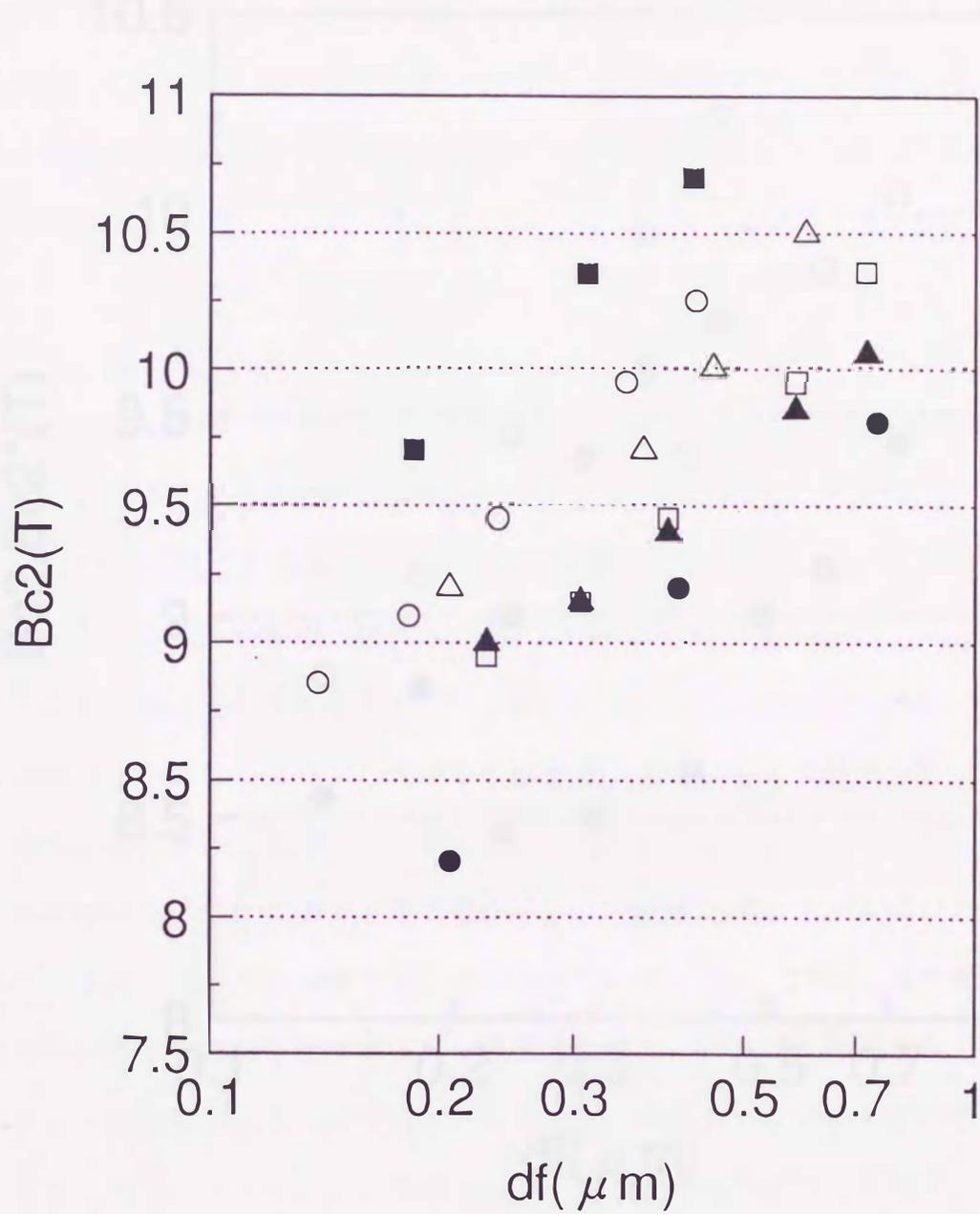


図2-29 各線材の $0.1\text{A}/\text{mm}^2$ の電流密度定義による上部臨界磁界 B_{c2} のフィラメント径依存性。ピン導入に伴う B_{c2} の劣化が観測されている。○：線材#5、△：線材#1、□：線材#2、●：線材#3、▲：線材#4、■：線材#6

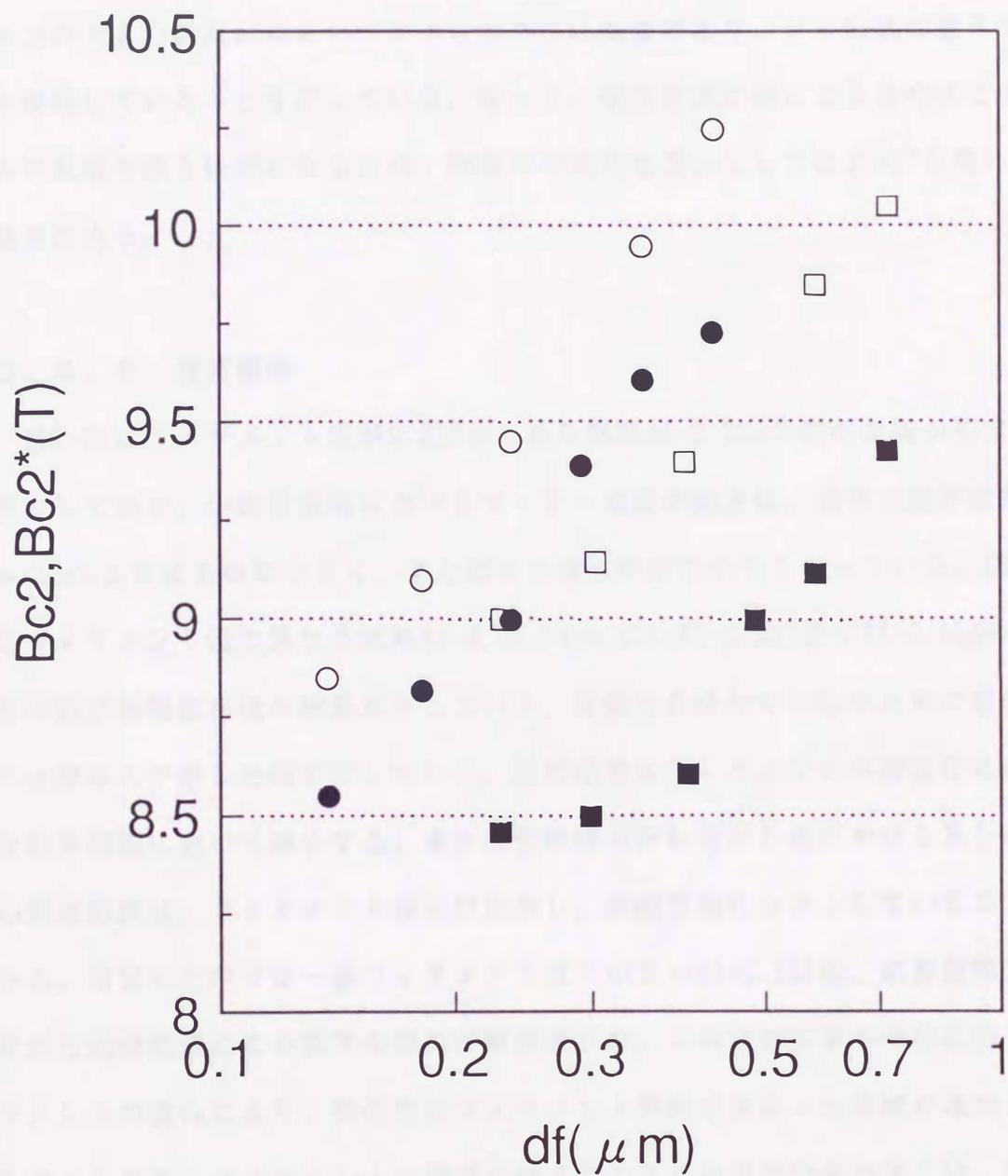


図2-30 ピン力の高磁界への外挿により求めた B_{c2}^* と抵抗法により求めた B_{c2} との比較。 B_{c2}^* は B_{c2} より低い値を示す。○：線材#5の B_{c2} 、●：線材#5の B_{c2}^* 、□：線材#4の B_{c2} 、■：線材#4の B_{c2}^*

ンカのテイル現象[89]は、ピンなどの物質の不均質部分における局所的な超伝導特性のばらつきにより起こるとされている。今回の場合、特にピン数が多く、ピン力の大きい線材#4においてテイルの存在は顕著であり、ピン形状の歪みの分布を反映していることを示している。従って、電流密度定義による B_{c2} はこのテイルの末端を捨てる格好になるため、物質の平均的な B_{c2} としては B_{c2}^* を用いるのが適当である。

2.4.6 履歴損失

図2-31にフィラメント径が $0.237\mu\text{m}$ である試料#5-0.203の磁化曲線の測定結果を例として示す。小磁界振幅におけるマイナー曲線の傾きは、通常の臨界状態モデルの μ_0 よりはるかに小さく、また磁化の値も非常に小さくなっている。図2-32にはフィラメント径の異なる試料#4-0.25、#4-0.203、#5-0.203及び#5-0.156の履歴損失の磁界振幅依存性の結果を示している。縦軸は各線材の比較のために超伝導体の占積率 λ で除した値で示している。履歴損失はフィラメントの縮径化に伴い、全磁界振幅において減少する。また損失曲線の折れ曲がり点における見かけの中心到達磁界は、フィラメント径に反比例し、高磁界側にシフトしていることがわかる。測定した中では一番フィラメント径の小さい#5-0.156は、磁界振幅 0.15T 程度から近接効果による損失の増加が観測された。これは加工率の増加に伴うフィラメントの歪みにより、局所的にフィラメント間隔が狭まった領域が増加したと考えられる。フィラメントの縮径に伴うこのような履歴損失の低下は、従来の交流用線材と同様に磁束線のピン内部における可逆運動の効果[60]によるものである。次に履歴損失の評価として交流用線材としての有効性を示すパラメーターである規格化損失、 $P_h / \lambda J_c (0.5\text{T}, 50\text{Hz換算})$ で評価すると[25]、試料#5-0.156での評価指数は $6.98 \times 10^{-6} \text{W/Am}$ と十分に低下している。この値は、現在開発が行われている低損失型交流用線材と同レベルの値である[25]。従って、人工ピンに

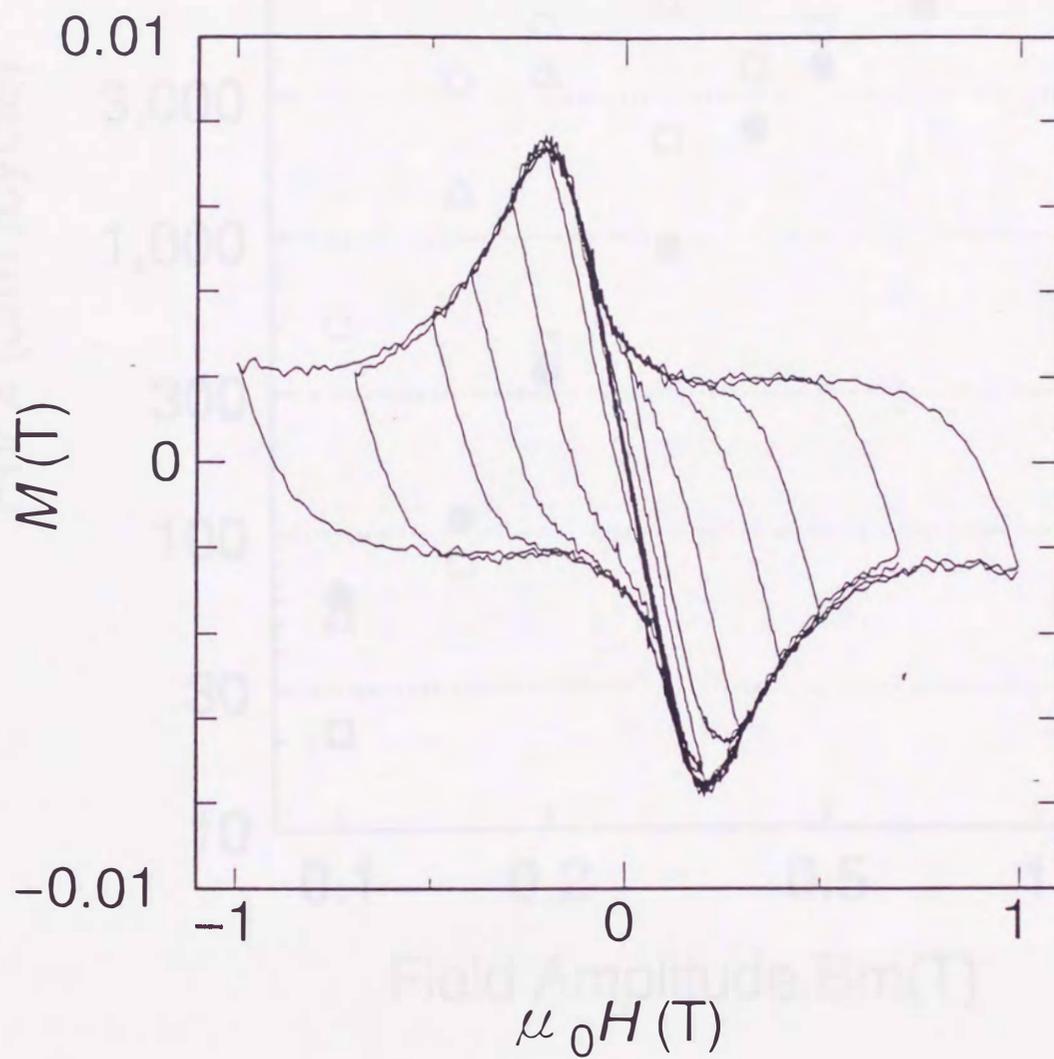


図2-31 VSMによる線材#5-0.203の磁化曲線。フィラメント径は $0.237\mu\text{m}$ 。小磁界振幅では磁化曲線の面積（履歴損失）が急激に小さくなる。

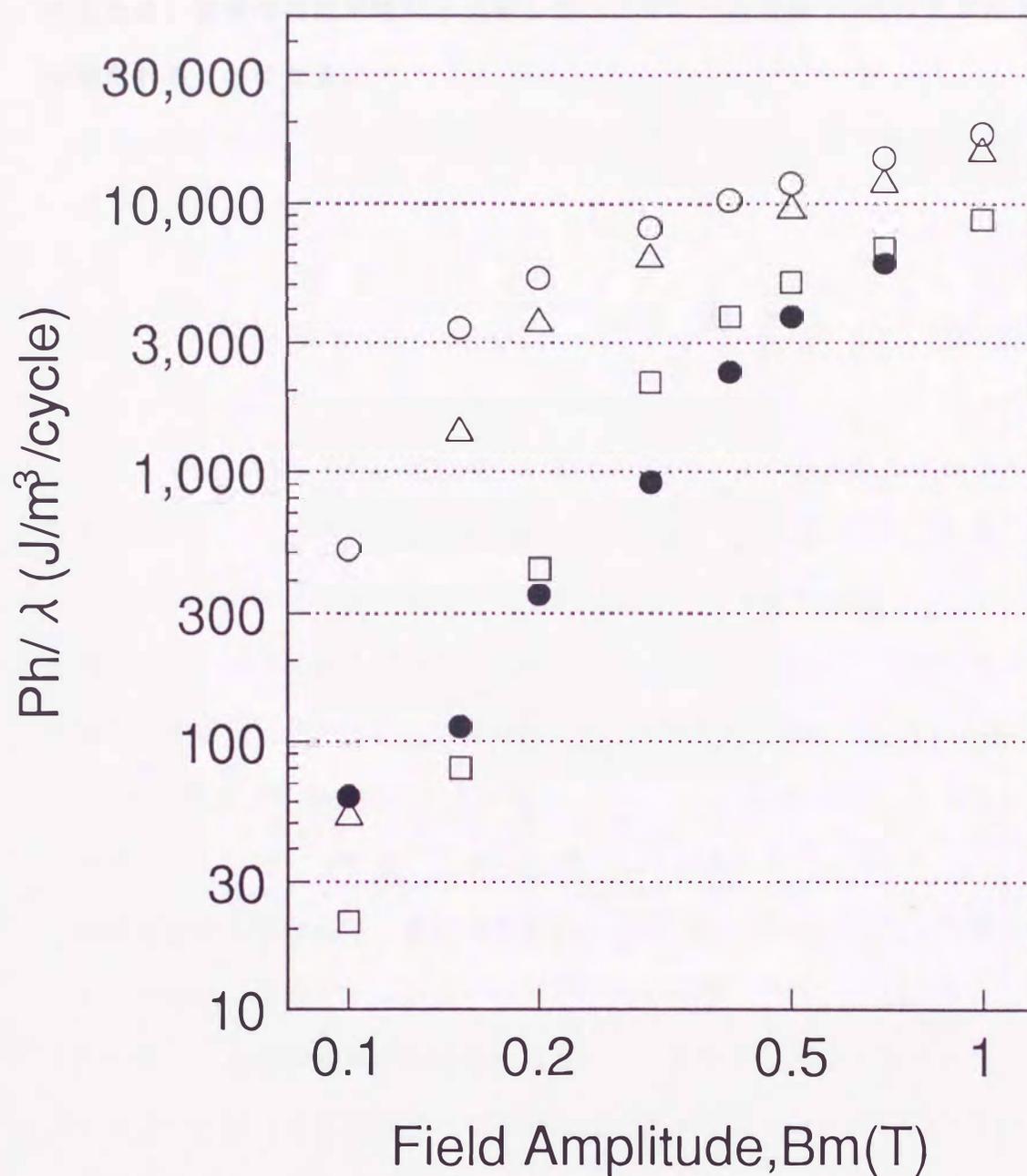


図2-32 フィラメント径の異なる各試料において超伝導体の占積率λで規格化した履歴損失の磁界振幅依存性。履歴損失はフィラメント径の減少に伴って全磁界領域で低下し、磁束の可逆運動の効果[60]が表れている。試料#5-0.156は低磁界で近接効果による磁化の増大の影響が表れている。○：#4-0.25, △：#4-0.203, □：#5-0.203, ●：#5-0.156

より J_c が増大しても、大磁界振幅における規格化損失はフィラメント径で決定されるため、従来の交流用線材と比較して人工ピンによる高 J_c 化のアドバンテージは保たれることになる。

2.5 考察

2.5.1 ピン力のスケーリング則

ピン力は温度依存性及び磁界依存性の項に分離でき、一般的に次のスケール則で表される。

$$F_p = C [Bc_2(T)]^m \cdot b^p (1-b)^q \quad (2-13)$$

ここでは(2-13)式を用い一定温度、4.2kにおける、ピン力の磁界依存性について考察する。規格化磁界 b は Bc_2^* で規格化した値 $b = B / Bc_2^*$ を用いる。通常、スケーリングパラメーター p , q の値によりピンニング特性は、二つのタイプに大別される。一つは α -Tiピンを有するNbTiに代表されるもので、ピン形状、ピン密度などの変化に伴い p , q が変化し、高 J_c を有する最適化されたもので $p = 1$, $q = 1$ をとる非飽和特性型のものである。もう一つは Nb_3Sn に見られるもので、そのパラメーターはピン形状、ピン密度の変化に関係せず、 $p = 0.5$, $q = 2$ となる飽和特性型のものである。飽和特性型のは高磁界におけるピン力が急激に減少するために、そのピンニング特性は非飽和特性型に劣る。また、 p , q が変化しないため、任意の磁界における最大ピン力の設計ができず、設計に対する自由度も少ない。従来の交流用線材は有効なピンニングセンターが少ないため、その磁界依存性はこの飽和特性型に近い。このようにピン力が小さくピンニング特性が飽和型の材料に新たにピンニングセンターを導入して非飽和型の特性改善が行われる現象を脱飽和現象という[89, 107]。そこで人工ピン導入により高 J_c 化のみならず、その磁界特性がどの程度改善されたかを明かにする必要がある。図2-33、図2-34は線材#2、#3の規格化ピン力特性である。19ピンシリーズでは最高のピン力を示した線材#2は、縮径化に伴うピンパラメーター d_p , d_s の変化により、 p ,

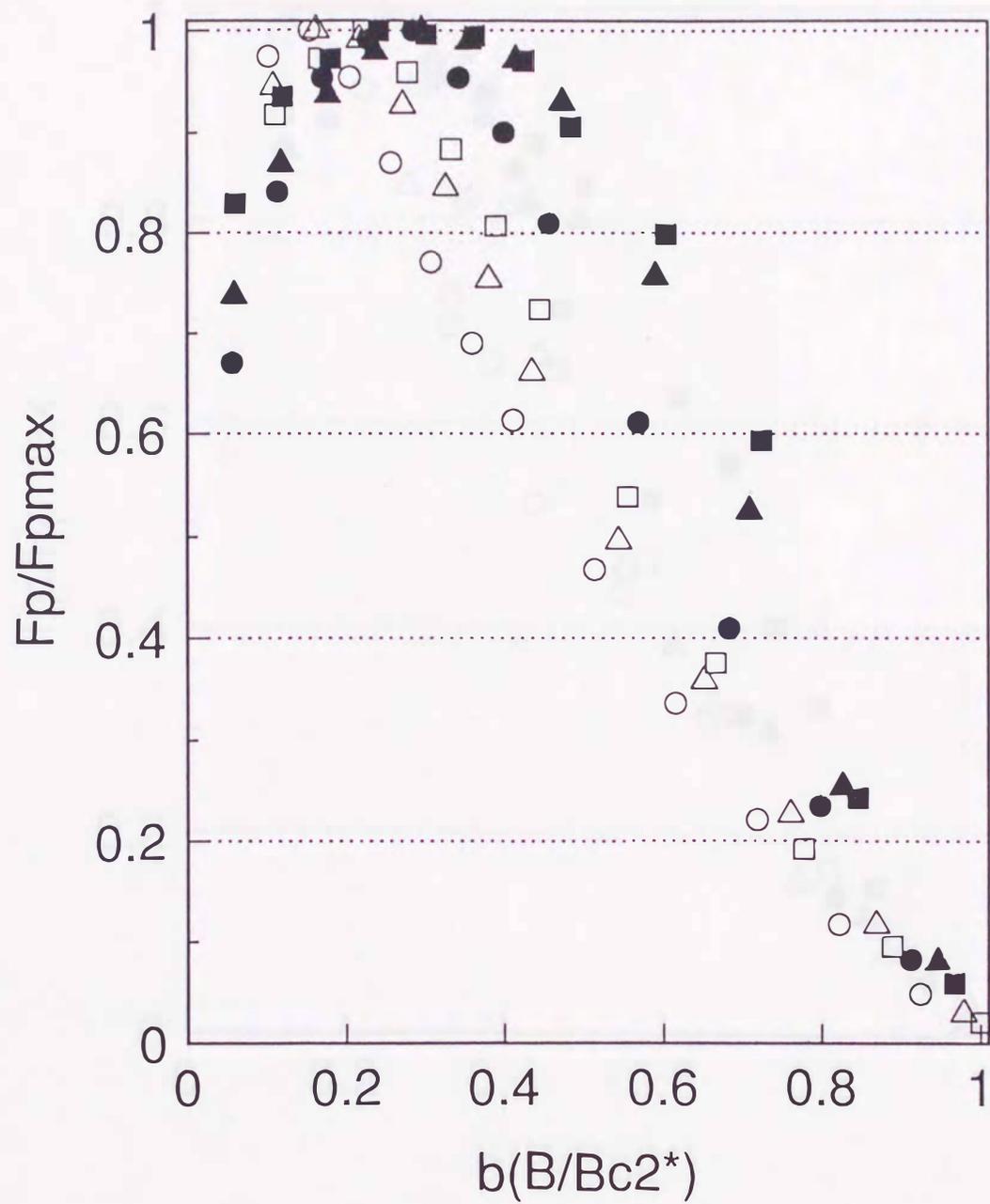


図2-33 線材#2における規格化されたピン力の磁界依存性。○：#2-0.369, △：
#2-0.299, □：#2-0.25, ●：#2-0.203, ▲：#2-0.156, ■：#2-0.118

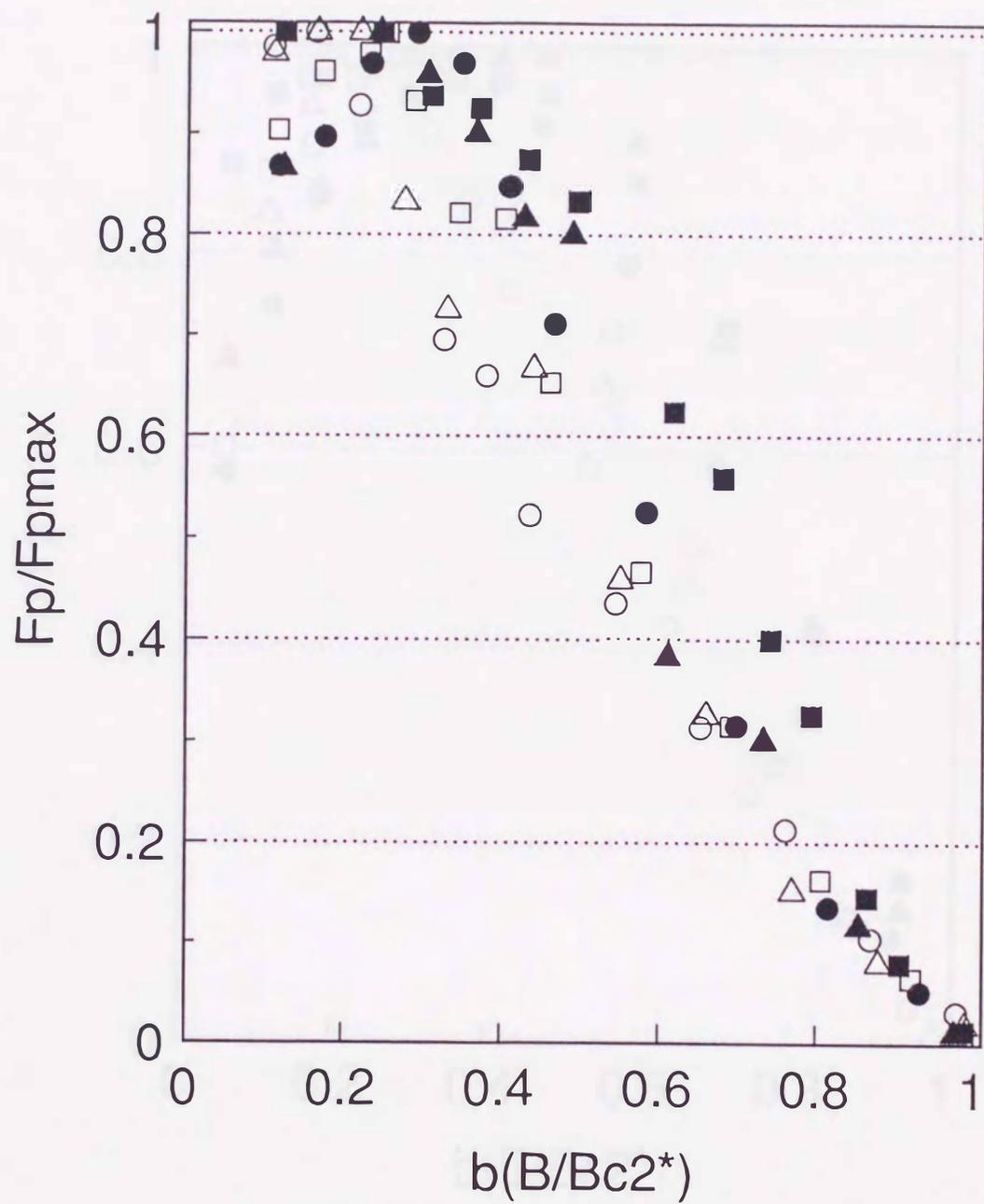


図2-34 線材#3における規格化されたピン力の磁界依存性。○：#3-0.369, △：#3-0.299, □：#3-0.25, ●：#3-0.203, ▲：#3-0.156, ■：#3-0.102

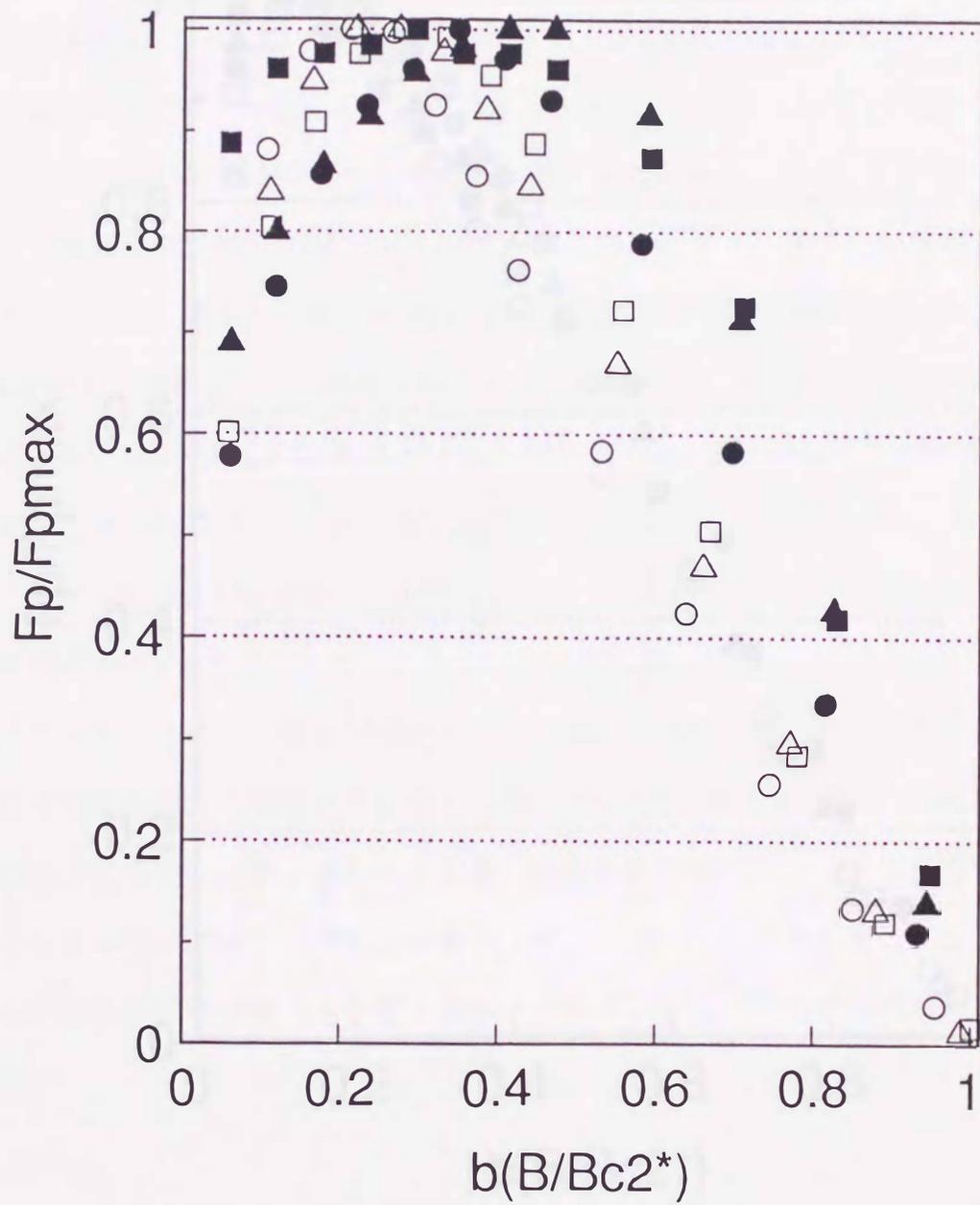


図2-35 線材#4における規格化されたピン力の磁界依存性。○：#4-0.369, △：#4-0.299, □：#4-0.25, ●：#4-0.203, ▲：#4-0.156, ■：#4-0.118

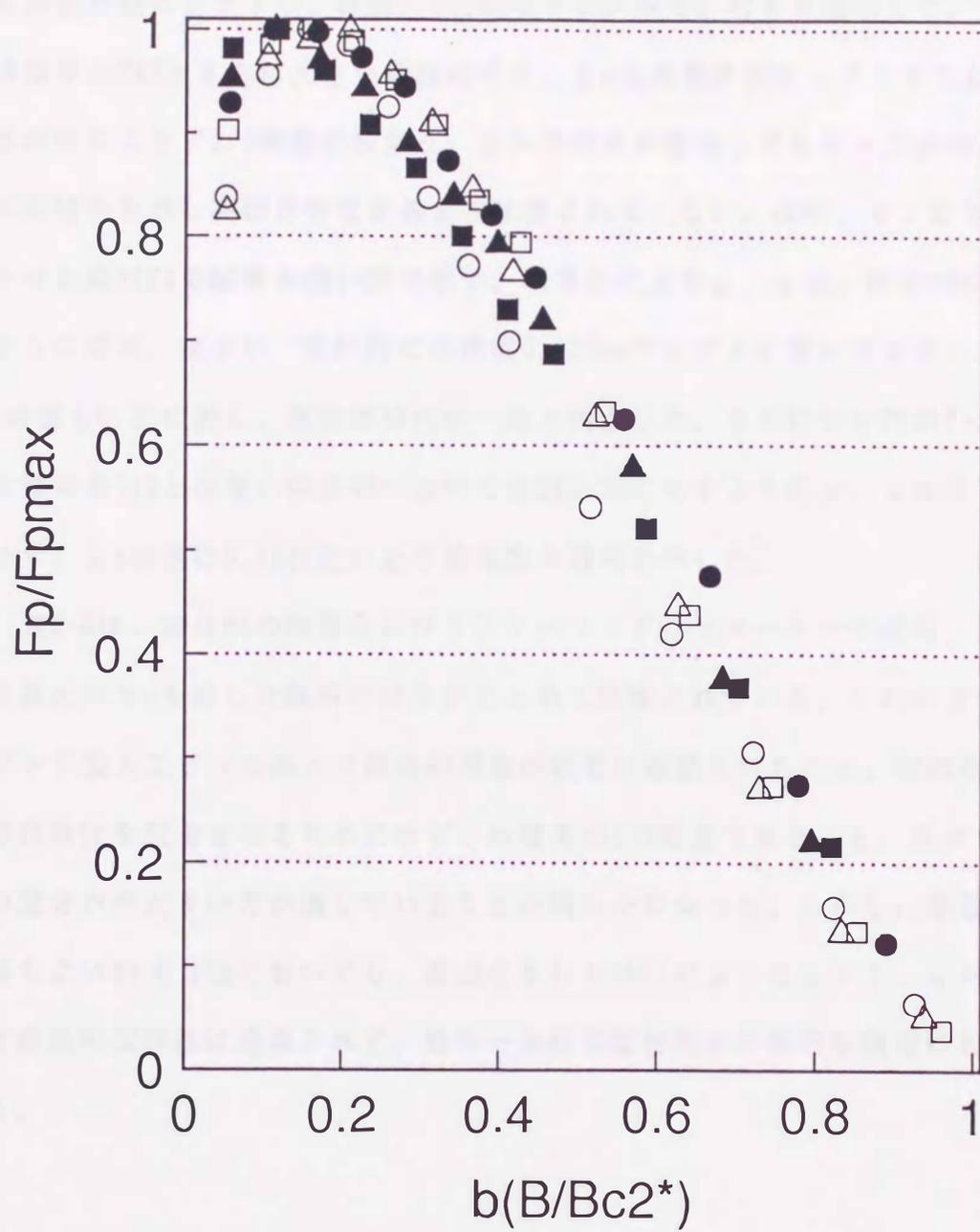


図2-36 線材#5における規格化されたピン力の磁界依存性。○：#5-0.369, △：#5-0.299, □：#5-0.25, ●：#5-0.203, ▲：#5-0.156, ■：#5-0.118

q はそれぞれ単調に増加、減少し、最終的に $p = 0.5$ 程度に、また高磁界特性を示す q は 1.3 程度まで改善された。それに対応して最大ピン力を示す規格化磁界 b_m も高磁界側にシフトし、線径 0.156mm のサンプルで 0.27 まで増加した。一方、ピン体積率が 24% とさらに大きい線材 #3 では、 b_m は高磁界側にシフトするものの、q は線径によらず 1.9 程度に留まり、ピン体積率が増加してもピン力が向上しない飽和的傾向を示し高磁界特性があまり改善されていない。次に、ピン数を 37 と分散させた線材 #4 の結果を図 2-35 に示す。縮径化により p、q は、線材 #2 の場合よりさらに増加、減少し、最終的には線径 0.156mm サンプルにおいて q は 1.1、また b_m の値も 0.39 に達し、高磁界特性は一段と向上した。さらにピン数が 7 ピンでピン体積率が 11% と少ない線材 #5 においては図 2-36 に示すように p、q はほとんど変化せず、 b_m は常に 0.16 付近にあり飽和型の傾向を示した。

表 2-6 は、線材 #4 の縮径化に伴うスケーリングパラメーターの変化、及び各線材の最大の b_m を示した試料の結果がまとめて記載されている。これにより、Nb アイランド型人工ピンの導入で脱飽和現象が顕著に観測されたこと、交流用線材の高磁界特性を改善させるためにはピン体積率が 17% 程度であること、及びピンの分散の度合いが大きい方が適していることが明らかになった。しかし、高磁界特性の最もよい #4-0.156 においても、最適化された NbTi のような $p = 1$ 、 $q = 1$ の完全な非飽和型特性は達成されず、飽和—非飽和型特性の中間的な領域にあると言える。

2.5.2 最大ピン力の磁界依存性

製作した線材の多くは、線径の縮径化によるピンパラメーター d_s 、 d_p の変化に応じて p、q が変化し広範囲の磁界領域においてピン力の向上が顕著である。よって設計方針として用いた (2-1)、(2-2)、(2-3) 式の線形和モデルにより、ピン力の評価を行うことが可能である。

表2-6 各試料におけるピニングパラメーター p , q と b_m

線材	p	q	b_m
#4-0.369	0.26	1.42	0.15
#4-0.25	0.59	1.58	0.27
#4-0.203	0.57	1.24	0.31
#4-0.156	0.74	1.14	0.39
#1-0.156	0.71	1.62	0.30
#2-0.156	0.50	1.36	0.27
#3-0.203	0.70	1.90	0.27
#5-0.156	0.27	1.46	0.16

今回のデザインのような2次元的なピンと磁束が鎖交する単位体積当たり有効ピン密度 N_{p0} は、Nbピンと磁束格子との幾何学的配置により決定され、磁束線間隔 a_f とピン間隔 d_s の差が相対的に大きい場合は(2-14)、(2-15)式で表せられる。

$$N_{p0} = (2 / (\sqrt{3} d_s)) (2 / (\sqrt{3} a_f))^2 \quad a_f \gg d_s \quad (2-14)$$

$$N_{p0} = (2 / (\sqrt{3} d_s))^2 (2 / (\sqrt{3} a_f)) \quad a_f \ll d_s \quad (2-15)$$

また、 $a_f \simeq d_s$ の領域においても $a_f > d_s$ の場合は、磁束間隔が大きく磁束間の相互作用が比較的小さいことから、個々の磁束はある程度自由に移動できる。そのため要素的ピン力が強ければ、磁束は近くのピンにトラップされ易く、結果として(2-14)式と同じになると考えられる。一方 $a_f < d_s$ の場合は、例えば $3 a_f = 2 d_s$ などの場合、真ん中のピンの列はピンニングセンターとしては作用できないためにピン止め効率は悪くなる。以上を考慮すると、 N_{p0} は磁界上昇に伴い増加し、 $a_f = d_s$ となる磁界で極大値を取ると考えられる。一方、要素的ピン力は(2-10)式により、 $(1 - B/B_{c2})$ の磁界依存性を持つ。

ここでピン力を設計する際に重要なポイントになる各線材の最大 F_p (F_{pmax}) の磁界依存性について考察する。線形和により F_p は N_p と f_p の積に比例する。上述のように、磁界を上昇させるにつれて N_p は増加し、 $a_f = d_s$ で極大になる。一方、 f_p の磁界依存の項は $(1 - B/B_{c2})$ であり、1次で減少する。しかしながら $a_f = d_s$ になる磁界までは f_p の低下の度合は小さいため、 F_p は $a_f = d_s$ となる磁界で最大となることが予想される。図2-37に各線材の各試料の F_{pmax} における磁界の a_f とその試料の d_s との関係を示す。事実、各線材とも縮径化に伴い、ある d_s の値までは比例関係が成立していることがわかる。ここで予想したように、 $a_f = d_s$ となる磁界で F_{pmax} が達成されず、その磁界が高磁界側にずれた原因と

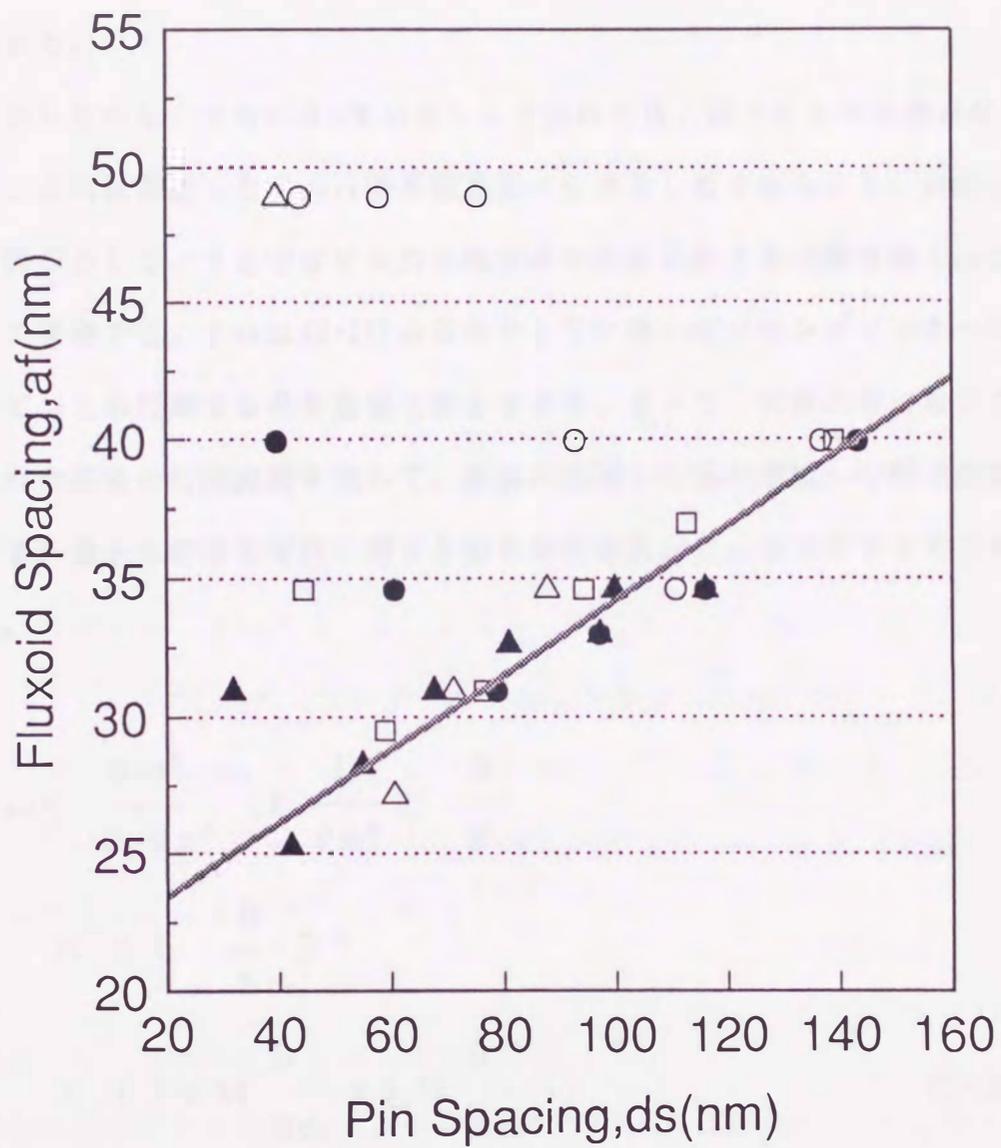


図2-37 各試料のピンカのピーク磁界の磁束間隔 a_f とその試料のピン間隔 d_s との関係。各線材とも縮径化に伴いある d_s の試料までは a_f と比例関係が成立している。○：線材#5、△：線材#1、□：線材#2、●：線材#3、▲：線材#4

しては、加工率の増大によりピンが変形した結果、折れ曲がりなどによる有効ピンニングサイトが増加し[92]、等価的なピン間隔が小さくなった為と考えることができる。この有効ピン間隔 d_s^* (nm) は実験結果から、 $d_s^* = 0.14 d_s + 20.8$ と推測される。

しかしながら、さらに d_s を小さくした試料では、徐々にこの関係が成立しなくなる。これは前述した $F_{p_{max}}$ が高磁界側へシフトしなくなることに対応している。この原因として、ここではピン力と磁束間の揃断に関する相関距離 l_{66} の関係について考察する。 l_{66} は(2-17)式に示すように強いピンニングセンターほど短く、磁束ピン止め現象では最も重要な働きをする。よって、試料内部においてピン止めされた磁束の相関距離を求めて、脱飽和領域から飽和領域への移り変わりを評価する。量子化磁束の揃断に関する磁気弾性係数、 C_{66} は次式で与えられる[108, 109]。

$$\begin{aligned}
 C_{66} = & \frac{B c_2^2}{8 \mu_0 \kappa^2} \left(1 - \frac{1}{2 \kappa^2} \right) \frac{B}{B c_2} \\
 & \times \left(1 - \frac{B}{B c_2} \right)^2 \\
 & \times \left(1 - 0.58 \frac{B}{B c_2} + 0.29 \frac{B^2}{B c_2^2} \right) \quad (2-16)
 \end{aligned}$$

一方、 l_{66} は求めたピン力を用い次式で与えられる[110]。

$$l_{66} = \left(\frac{C_{66}}{F_p / d_i} \right)^{1/2} \quad (2-17)$$

ここで、 d_i は相互作用距離であり NbTi フィラメントにおいては実験的に求められ

ており、 $d_i = 0.25af$ 程度である[89]。例として線材#3における l_{66} 磁界依存性の結果を図2-38に示す。線材#3の場合、線径0.203の試料までは図2-37に示されるように ds に比例して $F_{p_{max}}$ の位置が高磁界側にシフトしていくが、これらの試料においては、 $F_{p_{max}}$ の磁界までは $2l_{66} < af$ が成立していることがわかる。このように $2l_{66} < af$ では隣接する磁束に対して相関が無く、磁束は近くのピンに対して独立にピン止めされる状態にある。これにより、 $ds^* = af$ となる磁界でピン力の最大値が達成されることになる。一方、さらに線径を細めた試料では、 $F_{p_{max}}$ が期待される磁界において、 $2l_{66} > af$ となっている。このために磁束は相互作用が強まり格子化し、磁束間でピン力の打ち消しが生じることになる。その結果、 $ds^* = af$ となる磁界において $F_{p_{max}}$ は達成されず、また高磁界特性も飽和現象で観測される磁界依存性に近づくことになる。線材の中で高磁界特性が最も優れていた線材#4においては、図2-39のように試料0.118を除くすべての試料において、 $2l_{66} < af$ が成立しており、その良好な高磁界特性を裏づける結果となっている。他の線材においても上記の関係が成立しており、揃断に関する相関距離 l_{66} がこの系においてもピン力の飽和-脱飽和特性を決定する重要な役割を果たしていることがわかる。

2.5.3 要素的ピン止め力の見積もり

飽和特性の原因となる l_{66} の増大は(2-17)式から、 F_p の低下によると考えられる。さらに、 ds がほぼ同一の設計である線材#1~#3の試料のように、同じ線径において N_{p6} がほぼ一定であっても、 $F_{p_{max}}$ が高磁界にシフトせずに低下する線径に違いが見られること、また縮径化に伴う N_{p6} の増加にもかかわらず、 F_p が低下していることを考えると、 l_{66} の増大は主に要素的ピン力 f_p の低下に起因すると考えられる。一般に f_p は飽和-脱飽和現象に直接関わっていることが知られている。よって、観測された F_p を用い線形和の(2-3)式により f_p の評価を行う。ピン

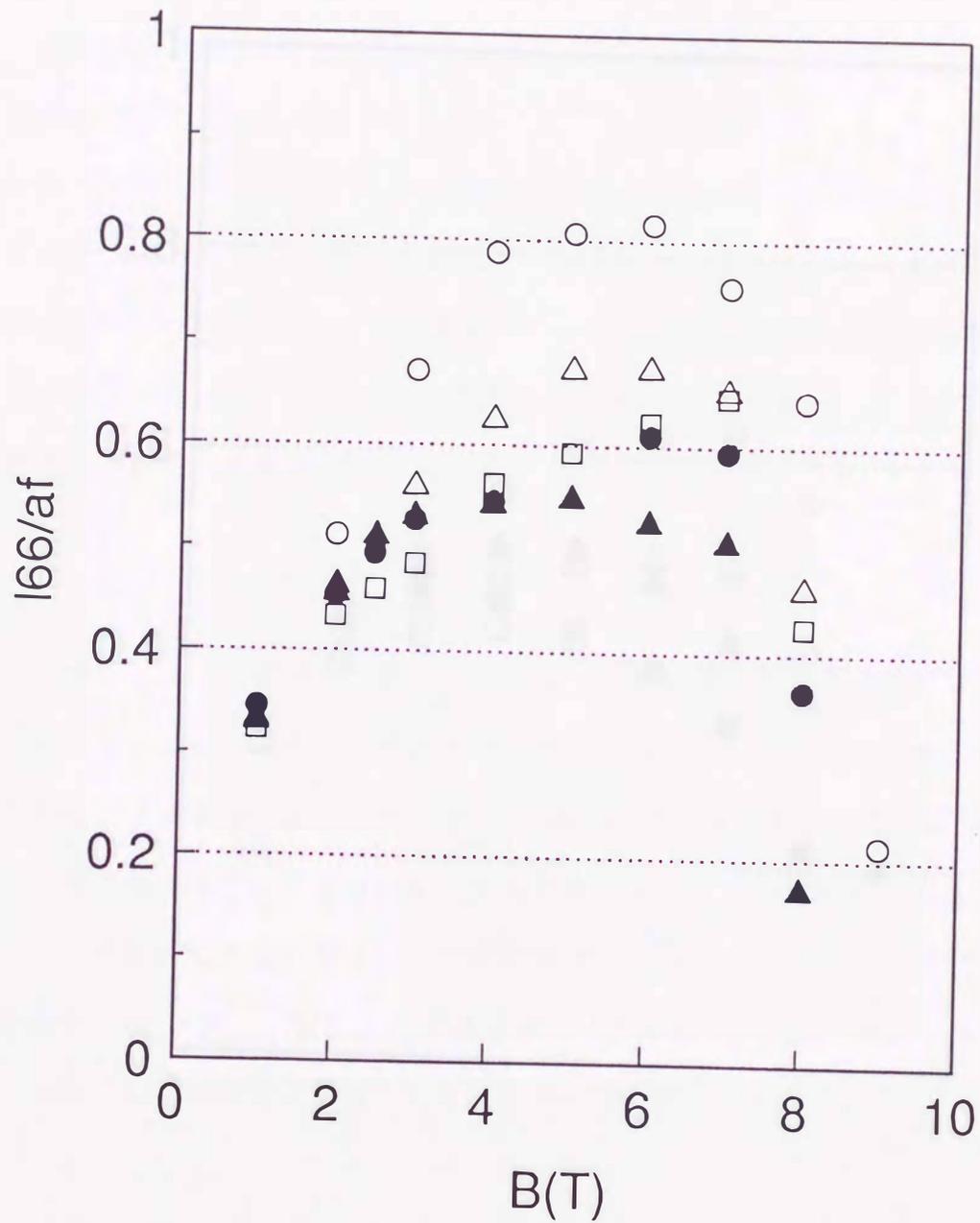


図2-38 線材#3における相関距離 l_{66} の磁界依存性。線径0.203までの試料ではピン力がピークになる磁界までは $2 l_{66} < a f$ が成立しており、ピン間隔 d_s によりピン力のピークの磁界が決定されることに対応している。○：#3-0.369, △：#3-0.25, □：#3-0.203, ●：#3-0.156, ▲：#3-0.102

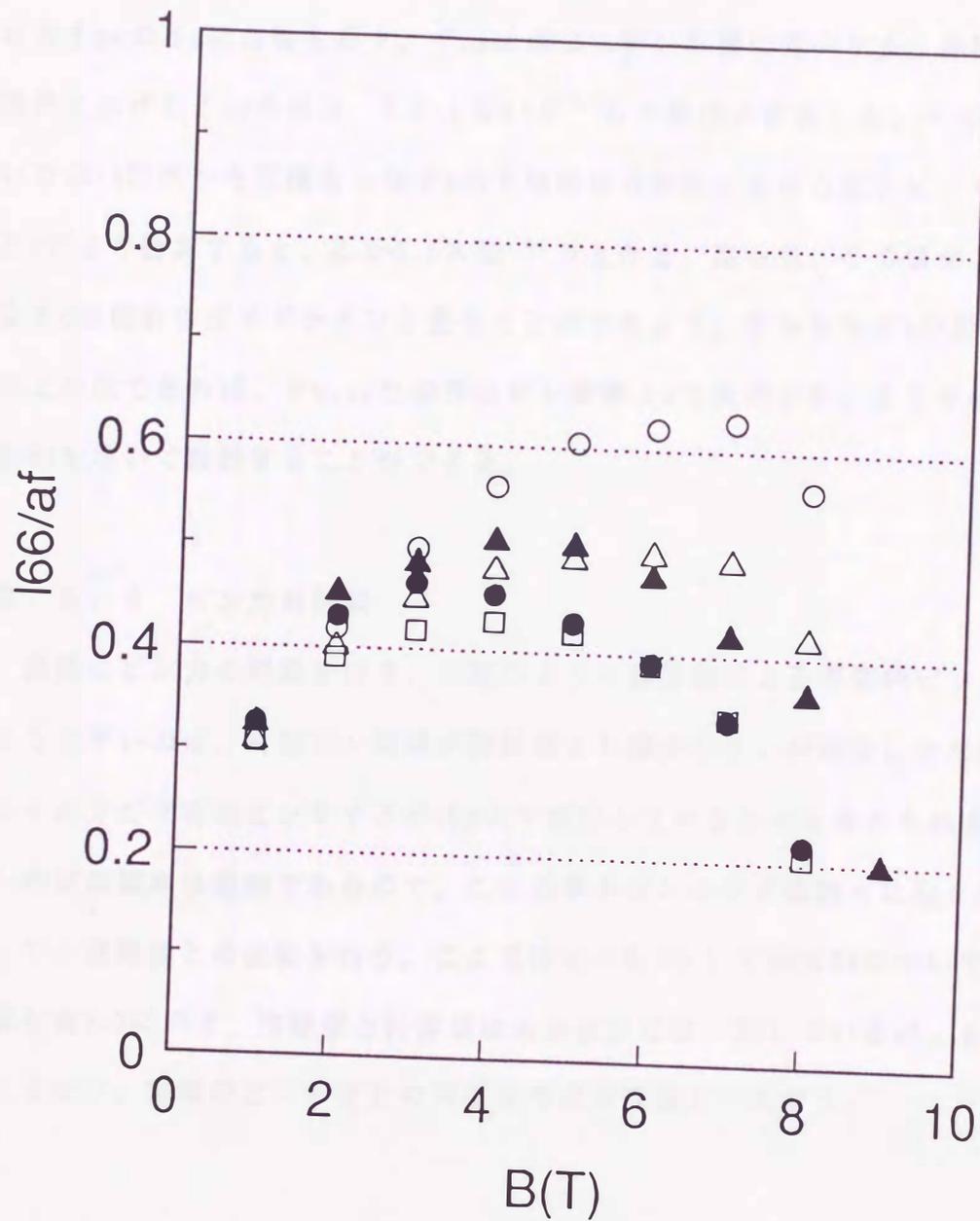


図2-39 線材#4における相関距離 l_{66} の磁界依存性。線径0.118を除く試料ではピンカがピークになる磁界までは $2 l_{66} < af$ が成立しており、ピン間隔 ds によりピンカのピークの磁界が決定されることに対応している。○: #4-0.369, △: #4-0.25, □: #4-0.203, ●: #4-0.156, ▲: #4-0.118

密度は有効ピン間隔、 d_s^* から計算した有効ピン密度 N_{pe}^* を用い、 $\eta = 1$ として計算を行う。図2-40に線材#4の脱飽和領域における各試料の $F_{p_{max}}$ より計算された f_{pe} の d_s 依存性を示す。 f_{pe} は縮径に伴い単調に減少する。各線材の脱飽和限界における f_{pe} の値は、 $3.2 \sim 1.6 \times 10^{-13} N$ の範囲に存在した。一方、設計で用いた(2-10)式から見積もった f_p の下限値は各線径における設計ピンサイズ、及び Bc^2 より計算すると、 $2.2 \sim 0.6 \times 10^{-12} N$ となる。従って、この値がこの系における f_p の設計のガイドラインと見ることができよう。すなわち f_p の設計値が上記以上の値であれば、 $F_{p_{max}}$ の磁界はピン間隔 d_s で決定され、またそのピン力は線形和を用いて設計することができる。

2.5.4 ピン力の評価

最後にピン力の評価を行う。上記のように設計値による要素的ピン力が実験値より大きいのは、有効ピン間隔が設計値より減少し N_{pe} が増加したため、結果的にその分だけ有効ピンサイズが d_p より減少しているためと考えられる。実際のピン形状の観察は困難であるので、この効果をピンニング係数 η に取り込むことにして、実験値との比較を行う。ここでは $\eta = 0.2$ として線材#4について計算した結果を表2-7に示す。実験値と計算値はおおまかには一致しているが、まだ充分とはいえない。実際のピン形状との対応は今後の課題といえよう。

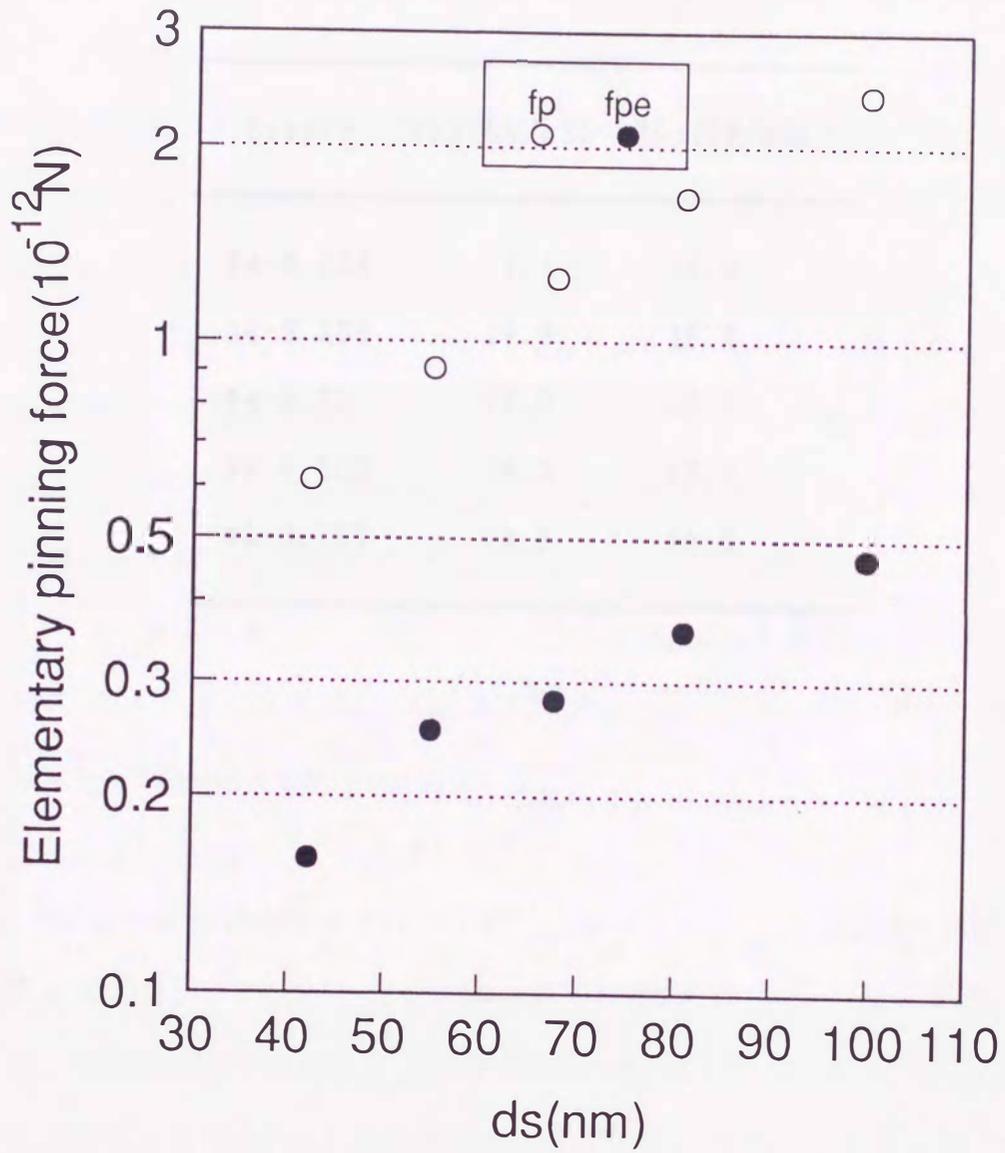


図2-40 線材#4の脱飽和領域による各試料の最大 F_p より計算した要素的ピン力 f_{pe} と(2-10)式より見積もった設計における要素的ピン力 f_p のピン間隔 d_s 依存性の比較。

表2-7 線材#4におけるピンカの測定値と計算値の比較

Sample	Fpe (GN/m3)	Fpc (GN/m3)
#4-0.369	17.1	17.9
#4-0.299	17.8	16.4
#4-0.25	17.6	15.1
#4-0.203	18.3	12.4
#4-0.156	14.8	10.3

2.6 まとめ

本章では交流用NbTi極細多芯線のJc向上に適したNbアイランド型的人工ピンニングセンターをピンニング理論に基づき導入した線材を設計・製作し、それらのピンニング特性及び超伝導特性の解析と考察を行った。その結果、従来の交流用線材では不可能であった広範囲の磁界における高Jc化を達成し、ピンニングセンターを制御された範囲内で任意に設計・導入することにより、Jc設計の見通しが得られた。その研究成果は以下に要約される。

- 1) 交流用NbTi極細多芯線のJc向上に適したNbアイランド型的人工ピンニングセンターをピンニング理論に基づき導入した線材を設計・製作し、従来の交流用線材と比較して大幅なJc向上を達成した。特に1T以上の磁界におけるJcの増大が顕著であり、フィラメント径が0.1 μm 級のもので、1Tで $1.42 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ 、フィラメント径が0.4 μm 級のものでは、2Tで $8.7 \times 10^9 \text{ A/m}^2$ 、また3Tでは $6.1 \times 10^9 \text{ A/m}^2$ もの高Jcを得た。
- 2) Tcに関しては従来交流用線材と同様にフィラメント径の縮径化に伴う減少が観測されたが、人工ピンの有無による差は観測されなかった。一方、Bc2はピン体積率の増加に伴って減少する傾向が観測された。また、高磁界のピン力外挿によるBc2*はさらに減少が大きく、ピン導入により超伝導体内部の近接効果、及びその不均質性が增大していることが明らかになった。
- 3) 履歴損失は従来線材と同様に磁束のピン内部での可逆運動により、小振幅においてはフィラメントの縮径化による大幅な低下が観測された。さらに、規格化損失、 $P_h / \lambda J_c$ の値は、#5-0.156では $6.98 \times 10^{-6} \text{ W/Am}$ (0.5T, 50Hz換算)

となり現在開発中の従来型低損失用交流用線材と比較しても遜色ない値が得られた。

4) 縮径に伴うピン力の振る舞いは従来交流用線材と大きく異なり、各線材とも F_p はある程度広範囲の磁界領域において増加し、最大ピン力も高磁界側にシフトする脱飽和現象が観測された。その結果、ピン力の高磁界特性を示すスケーリングパラメータ q は、最も良かった線材#4においては1に近づいた。しかし、さらに縮径を行うとピン力は減少し、また最大ピン力も高磁界にシフトしない飽和型の傾向が見られた。

5) 最大ピン力の磁界は、磁束間の揃断に関する相関距離 l_{ee} と磁束格子間隔 a_f との間に、 $2l_{ee} < a_f$ の関係が成立すれば、ピン間隔 d_s によって決定されることを明らかにした。さらに、その成立条件として、要素的ピン力の下限值を示した。また、線形和のモデルによる計算値との比較をおこない実験値との大まかな一致をみた。

以上の結果、人工ピンによるNbTi交流用線材のピン力の設計は実用的なレベルに達していると考えられる。次章では実用化を目指した次のステップとして大型ビレットによる線材長尺化を実施し、100KVA級の交流マグネット用線材への適用を通じて高 J_c 線材の有効性を検証していく。