研究論文

Cu-Ni-Mn 合金を複合化した 超極細多芯交流用 Nb-Ti 超電導線材 ——交流損失——

宮下 克己, 酒井 修二, 鎌田 岡尚, 田中 浩樹*

日立電線株式会社システムマテリアル研究所 土浦市木田余町 3550

* 超電導発電関連機器・材料技術研究組合 (Super-GM) 大阪市北区西天満 5-14-10

(1994 年 1 月 12 日受理)

Sub-Micron Filament Nb-Ti Superconducting Wires with Cu-Ni-Mn Alloy for AC Use—AC Loss

Katsumi MIYASHITA, Shuji SAKAI, Kunihisa KAMATA and Hiroki TANAKA*

System's Material Lab., Hitachi Cable, Ltd., 3550 Kidamari-cho, Tsuchiura 300

* Super-GM, 5-14-10 Nishitenma, Kita-ku, Osaka 530

(Received January 12, 1994)

Synopsis :

AC loss characteristics of sub-micron filament Nb-Ti superconducting wires with Cu-Ni-Mn alloy matrix for AC use are described. To investigate the relationship between the proximity effect and hysteresis loss, the Nb-Ti superconducting wires are prepared, 1) changing Ni (10 and 30 wt %) and Mn (0-1.78 wt %) contents in Cu-Ni-Mn alloy matrix, 2) the variation of ratio of filament spacing (d_n) to filament diameter (d_f). The addition of Mn to Cu-Ni matrix reduces the proximity effect by magnetic scattering and the allowed efficient Mn content to reduce hysteresis losses of Nb-Ti filaments is in the range of 0.9 wt % to 1.78 wt %. The relationships between d_n and hysteresis losses were investigated and the optimum d_n to reduce the proximity effect were $d_n=0.2 \mu\text{m}$ (Cu-10% Ni matrix), $d_n=0.08 \mu\text{m}$ (Cu-10% Ni-0.9% Mn), $d_n=0.052 \mu\text{m}$ (Cu-30% Ni-0.9% Mn) and $d_n=0.048 \mu\text{m}$ (Cu-30% Ni-1.34% Mn). Weak coupling due to the proximity effect has no influence on increasing hysteresis loss at an amplitude field of more than $B_m=0.6-0.8 \text{ T}$.

Keywords : sub-micron filament, Nb-Ti superconducting wire, Cu-Ni-Mn alloy, AC loss

1. はじめに

超電導電力機器に適応するための交流用超電導素線には、低交流損失、高電流密度、高安定性の3特性が要求され、大電流容量導体の特性が素線の性能をそのまま反映した特性になるかどうか、高性能な超電導素線によるところが大きい。

超電導素線の交流損失（以下 Q_t と記す）は、ヒステリシス損失（以下 Q_h と記す）、結合損失（以下 Q_c と記す）および渦電流損失（以下 Q_e と記す）の和からなり、高抵抗マトリックス Cu-Ni 合金の使用、ツ

イストピッチの短縮等により、 Q_c 、 Q_e は十分低減された¹⁾。その結果、 Q_h の低減が大きな課題となっている。 Q_h は、ビーンモデル²⁾によればフィラメント径に比例して減少する。しかし、フィラメントの極細化に伴う、フィラメント間隔の縮小はマトリックスを介した近接効果によるフィラメント同士の電磁氣的結合を引き起こし、 Q_h を増加させる。このため、フィラメント間のマトリックスには近接効果抑制作用が求められ、マトリックスに適したフィラメント間隔の最適化も必要となる。

本報では、従来の Cu-Ni 合金に磁性元素 Mn を添

加した Cu-Ni-Mn 合金を用いることで近接効果を抑制した Cu/Cu-Ni-Mn/Nb-Ti 超極細多芯超電導線のヒステリシス損失を中心とした交流損失 Q_t について述べる^{3,4)}。

2. 近接効果とその抑制対策

近接効果は電磁気的なフィラメント径 d_{eff} を増加させ、その結果 Q_h が増加する。超電導フィラメントから常電導金属（合金）であるマトリックスへしみ出した超電導電子の密度はマトリックス中で散乱により指数関数的に減少し、フィラメントとマトリックスとの界面からの距離を x とすると x での超電導電子の存在確率 P は以下で示される。

$$P \propto \exp(-k_n \cdot x) \quad (1)$$

k_n^{-1} はマトリックス中での超電導電子の散乱距離で材料に固有の値であり、Cu-Ni 合金のような純銅に比較して電子の平均自由工程 l が十分小さな合金の場合、 k_n^{-1} と次式で示される合金のコヒーレンス長 ξ_n は等しくなる。

$$\xi_n = (\hbar v_F l / 6\pi k_B T)^{1/2} \quad (2)$$

ただし、 v_F はフェルミ速度。近接効果を抑制するには k_n^{-1} の小さな材料を使用する必要があり、線材設計上の観点から近接効果による Q_h の増大を抑えるためには、実験的に d_n が ξ_n の6倍以上は必要とされている⁵⁾。

また、マトリックス中の超電導電子は温度と磁界の関数でもあり、温度 $T(K)$ 、外部磁界 $B(T)$ のときのフィラメント間のマトリックス中を流れる超電導電流密度 J_{cs} は、次式で与えられる⁶⁾。

$$J_{cs} = J_{cs0} \cdot \exp(-T/T_0) \cdot \exp(-B/B_0) \quad (3)$$

ただし、 J_{cs0} 、 T_0 、 B_0 は定数。(3)式より J_{cs} は温度と磁界の増加により、指数関数的に減少する。

マトリックス中での超電導電子の散乱要因には抵抗性散乱と磁性散乱の2種類があり、現在交流用線材では、Cu に Ni を添加した Cu-Ni 合金を用いた抵抗性散乱により、 ξ_n を減少させる方法が一般的である。マトリックスの抵抗率 ρ と ξ_n の間には、 $\xi_n \propto \sqrt{1/\rho}$ の関係が存在し、Ni 濃度と合金の電気抵抗率 ρ がほぼ比例する Cu-Ni 合金の場合、Ni 濃度を c とおくと $\xi_n \propto 1/\sqrt{c}$ の関係が成り立つ。

一方、磁性散乱による近接効果抑制法としてはマトリックスへの Mn 等の磁性元素を添加する方法^{5~8)}がある。ただし、この場合マトリックス自身の磁化が大きなヒステリシス損失を持つ可能性があるため、磁性

Table 1 Hysteresis losses (± 1 T/cycle) of Cu-Ni and Cu-Ni-Mn alloy.

Cu-Ni, Cu-Ni-Mn (wt %)	Hysteresis loss (kJ/m ³)
Cu-10% Ni	<0.005
Cu-30% Ni	<0.005
Cu-10% Ni-0.9% Mn	<0.005
Cu-30% Ni-0.9% Mn	<0.005
Cu-30% Ni-1.34% Mn	0.07
Cu-30% Ni-1.78% Mn	0.24

元素が Cu に十分固溶し、ヒステリシス損失を生じさせないこと、および結合損失低減の観点から高抵抗率であることが条件となる。

そのため、Cu に比較的固溶しやすく、かつ合金中で磁気モーメントが大きい Mn⁸⁾ を従来より用いられてきた Cu-Ni 合金に第3元素として添加した Cu-Ni-Mn 3元合金の 4.5 K における磁化特性を調査した。測定に用いた Cu-Ni-Mn 合金試料は超電導線の製作時とほぼ同様の加工履歴で作製した。

Table 1 に調査した合金と ± 1 T/cycle のヒステリシス損失を示す。Cu-10% Ni-0.9% Mn のヒステリシス損失は Mn 無添加の Cu-10% Ni と Cu-30% Ni のヒステリシス損失と同様に 0.005 kJ/m³ 以下の非常に小さい値であった。Mn 濃度を 0.9% から 1.78 wt% まで高くするに従い、ヒステリシス損失は急激に増加し、Cu-30% Ni-1.78% Mn 合金のそれは、交流用超電導線材のマトリックス材料としては無視できないほど大きくなることがわかった。以上の結果より、近接効果抑制に必要な磁性元素の添加量と合金のヒステリシス損失の点で Cu-Ni-Mn 合金がマトリックス合金として適していると判断した。

なお、実測した Cu-30% Ni-0.9% Mn の電気抵抗率 $\rho = 38 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ に対し、Mn を含まない Cu-30% Ni の $\rho = 36 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ であり⁹⁾、Mn 添加による ρ の増加は小さい。

3. 試料

Table 2 に作製した素線の諸元を、Fig. 1 に作製した素線の模式的な断面構成を示す。素線はいわゆるトリプルスタック方式で作製した。近接効果抑制を目的としたフィラメント周りのマトリックス合金組成、 d_t と d_n の比 (d_t/d_n)、の2つの因子を変えた9種類の素線を作製した。フィラメント周りのマトリックス合

Table 2 The wire specifications for AC use.

Sample	Matrix	$d_f : d_n$	Nb-Ti (%)	Cu/Nb-Ti	Wire diameter at $d_f=0.1 \mu\text{m}$ (mm)
Type-1	Cu-10 wt % Ni	1 : 0.4	16.3	1.44	0.154
Type-2	Cu-10% Ni-0.9% Mn	1 : 0.4	16.3	1.44	0.154
Type-3	Cu-30% Ni-0.9% Mn	1 : 0.4	16.3	1.44	0.154
Type-4	Cu-30% Ni-1.34% Mn	1 : 0.4	16.3	1.44	0.154
Type-5	Cu-30% Ni-1.78% Mn	1 : 0.4	16.3	1.44	0.154
Type-6	Cu-10% Ni-0.9% Mn	1 : 0.7	10.8	2.13	0.189
Type-7	Cu-10% Ni-0.9% Mn	1 : 1	8.3	2.84	0.217
Type-8	Cu-30% Ni-0.9% Mn	1 : 0.5	13	1.63	0.174
Type-9	Cu-30% Ni-0.9% Mn	1 : 0.65	11	1.92	0.186

Fig. 1 Cross section of wire.

金は、Mn 無添加の Cu-10 wt % Ni, Mn 添加の Cu-10% Ni-0.9% Mn, Ni 濃度を高めた Cu-30% Ni-0.9% Mn, Mn 濃度を高めた Cu-30% Ni-1.34% Mn, Cu-30% Ni-1.78% Mn の計 5 種類とし、 d_n/d_f を変えた試料は 0.4~1 の範囲で 4 種類とした。安定化銅の比率や配置の変化による線材の結合損失における等価抵抗率 $\rho_{\perp}$ の変動を防止するため、素線全体に占める安定化銅の体積率は全ての線において統一して 23% とし、線材中心部に配置した。フィラメント周り以外のマトリックスには Cu-10% Ni-0.9% Mn を用いた。ツイストピッチは素線径の 6 倍である。

Fig. 2 に一例として素線 Type-3 ($\phi 0.19 \text{ mm}$) の断面写真を示す。いずれの Type の素線も線径 0.1mm まで断面の健全性を保ったまま伸線可能であった。

Fig. 2 Cross sectional photo of Type-3 wire.

4. 実験方法

ヒステリシス損失 Q_h の測定は、5 mm に切断した線材の長さ方向に対して垂直方向の磁界を印加したときの磁化特性を 4.5 K で高分解能 SQUID 磁束計にて測定した。 Q_h は磁化曲線内の面積を測定試料の全体的積で除した値とした。

全交流損失 Q_t は、サーチコイルとキャンセルコイルからなるピックアップコイル内にターン間絶縁した外径 14 mm, 長さ 30 mm の 1 層巻コイル状サンプルを挿入し、外部から水冷の銅コイルにより交流磁界を印加して磁化法により測定した。

5. ヒステリシス損失

Fig. 3 (a) に Type-1~5 素線, Fig. 3 (b) に Type-3

Fig. 3 (a) Dependence of hysteresis losses at ± 0.5 T/cycle on filament diameter for Types-1-5. (b) Dependence of hysteresis losses at ± 0.5 T/cycle on filament diameter for Types-2-9.

と6～9素線のヒステリシス損失 Q_h (± 0.5 T/cycle) とフィラメント径 d_f の関係を示す。

Fig. 3 (a) において、マトリックスに Mn を含まない Cu-10% Ni を用いた Type-1 線材は、 $d_f=0.5$ μm (フィラメント間隔 $d_n=0.2$ μm) 以下で Q_h が増大しているのに対し、0.9% Mn を添加した Type-2 線材は $d_f=0.18$ μm ($d_n=0.072$ μm) まで Q_h が減少し、Mn の近接効果抑制作用が確認できる。Ni 濃度を 10% から 30% に増加させた Type-3 は、Ni 濃度増加による高抵抗化により $d_f=0.13$ μm ($d_n=0.052$ μm) まで Q_h が減少し、その最小値は $Q_h=0.14$ kJ/m³ であった。Mn 濃度を 0.9% から 1.34% に向上させた Type-4 は、 $d_f=0.12$ μm ($d_n=0.048$ μm) まで Q_h が減少した。 Q_h が最小となる d_f は Type-3 とほとんど差がないが、 Q_h の最小値を比較すると Type-3 の 0.14 kJ/m³ に対し、Type-4 は、その 1/2 以下の 0.054 kJ/

Fig. 4 (a) Magnetizations of Type-9 ($d_f=0.38$ μm) wire at 4.5 K and 10 K. (b) Magnetizations of Type-9 wires ($d_f=0.38, 0.2, 0.12, 0.1, 0.08$ μm).

m³ まで低減されており、その差は近接効果によるフィラメント間の弱結合の度合によるものと考えられる。また、Mn 濃度を 1.78% まで高めた Type-5 線材の Q_h 特性は、 $d_f=0.1\sim 0.2$ μm の間で他の Type 線材とは異なる特性を示した。Table 1 の Cu-Ni-Mn 合金のヒステリシス損失 (± 1 T/cycle) において Cu-30% Ni-1.78% Mn の Q_h は、Cu-30% Ni-1.34% Mn の Q_h の 3 倍以上に増加しており、Cu-Ni 合金中に Mn が十分固溶する濃度は 1.34%～1.78% の間に存在すると考えられる。Type-3, 4 および 5 より、近接効果抑制によるヒステリシス損失低減のための Cu-Ni-Mn 合金中の最大許容 Mn 濃度は 0.9～1.78 wt % の間にあるといえる。

Type-1～5 は、 d_n/d_f を 0.4 一定としたが、一方 Fig. 3 (b) において、 d_f に対してフィラメント間隔 d_n を広げた Type-7 ($d_n/d_f=1$, Cu-10% Ni-0.9% Mn) と Type-9 ($d_n/d_f=0.65$, Cu-30% Ni-0.9% Mn) は、Nb-Ti フィラメントからしみ出した超電導電子が、マトリックス中で無視できるほど減衰したため、0.1

μm まで Q_h を低減できた。また、同じマトリックス合金を用いた場合、フィラメント間隔 d_n を広げるにつれて Q_h が減少していくことが図中の Type-3, 8, 9 の関係から確認できた。上記各線材においてヒステリシス損失が最小値を示した d_n は、Type-3 で $d_n=0.052\ \mu\text{m}$ 、Type-8 で $d_n=0.05\ \mu\text{m}$ 、Type-9 で $d_n=0.065\ \mu\text{m}$ であった。特に、Type-7 および Type-9 は、 Q_h と d_f の関係に $Q_h \propto d_f^4$ 関係が成り立ち、ビーンモデルにおける $Q_h \propto d_f$ から完全に逸脱している。

マトリックスの ξ_n と近接効果抑制のために必要なフィラメント間隔 d_n の関係に経験式 $d_n=6\xi_n^{5/3}$ を用いると、実験結果より求めたマトリックス合金の ξ_n は、Type-1 より ξ Cu-10 Ni=30 nm、Type-2 および 5 より ξ Cu-10 Ni-0.9 Mn=12~16 nm、Type-3 および 7 より ξ Cu-30 Ni-0.9 Mn=10 nm、Type-4 より ξ Cu-30 Ni-1.34 Mn=8 nm であった。Mn を含まない Cu-30% Ni の ξ_n が 15~18 nm^{10,11)} であることから、近接効果抑制上、Cu-10% Ni の Ni 濃度を 3 倍 (Cu-30% Ni) にするよりも、0.9 wt% の Mn を添加したほうが Q_h 低減に有効であることがわかる。

Fig. 4 (a) に Type-9, $d_f=0.38\ \mu\text{m}$ 線材の磁化曲線を示す。4.5 K において測定した線材の磁化は Cu-30% Ni-0.9% Mn マトリックスの磁化の影響で磁化曲線全体が右上がりに傾いている。より明確な Nb-Ti フィラメントの磁化曲線を得るため、4.5 K における磁化から T_c 直上の 10 K におけるマトリックスの磁化曲線を差し引いた結果、初期磁化 dM/dB と下部臨界磁界 B_{c1} がより明確となった。

Fig. 4 (b) にフィラメント径 d_f の異なる ($d_f=0.08 \sim 0.38\ \mu\text{m}$) Type-9 線材の磁化曲線を示す。各々の磁化曲線は Fig. 4 (a) と同様にマトリックスの磁化を差し引いた結果を示した。マイスナー効果による初期磁化の傾き dM/dB は、フィラメント径が $d_f=0.38\ \mu\text{m}$ から $d_f=0.2\ \mu\text{m}$ に減少すると、非常に小さくなり、 $d_f=0.12\ \mu\text{m}$ 以下においては、磁化曲線上での dM/dB がゼロに漸近し、マイスナー効果 (反磁性) は無視できるほど小さくなる。これは、 d_f と磁束侵入長 $\lambda_L (=0.2 \sim 0.4\ \mu\text{m})$ ¹²⁾ との関係が $d_f < 2\lambda_L$ になったためであり¹¹⁾、 $d_f=0.12\ \mu\text{m}$ においては、 d_f は λ_L の約半分まで極細化されている。 d_f および d_n と量子磁束間隔を比較すると、超電導線内において正三角形配列で分布している量子磁束 $\Phi_0 (2.07 \times 10^{-15}\ \text{wb})$ の間隔 a_f は、次式で表される。

$$a_f = 1.075 \times (\Phi_0/B)^{1/2} \quad (\text{m}) \quad (4)$$

Fig. 5 Magnetizations of Type-3 ($d_f=0.13\ \mu\text{m}$) and Type-9 ($d_f=0.1\ \mu\text{m}$) wires (amplitude field $B_m=0.35, 0.5, 0.65, 0.8, 1\ \text{T}$).

ここで、 B は外部印加磁界 (T)。(4) 式に Fig. 4 における磁界振幅 $B=0.5\ \text{T}$ を代入すると $a_f=0.07\ \mu\text{m}$ が得られ、図中の $d_f=0.12\ \mu\text{m}$ ($d_n=0.08\ \mu\text{m}$) 以下の線材においては、磁束量子間隔と d_f および d_n が同程度まで極細化されていることがわかる。このような超極細多芯超電導線材中では、 a_f と d_f や d_n が同程度の低磁界中で磁束が可逆運動 (Reversible Movement) するため¹³⁾、磁化曲線から見積もられる下部臨界磁界 B_{c1} が著しく上昇する¹¹⁾。Fig. 4 中において、ヒステリシス損失は $d_f=0.1\ \mu\text{m}$ ($d_n=0.065\ \mu\text{m}$) で最小値を示し、さらに極細化した $d_f=0.08\ \mu\text{m}$ 線材では $d_n < 6\xi_n$ となり、近接効果による低磁界中 (磁界振幅 0.3 T 以下) での磁化の不可逆性が出現してヒステリシス損失が増加する³⁾。

Fig. 5 (a)(b) に Type-3 の $d_f=0.13\ \mu\text{m}$ ($d_n=0.052\ \mu\text{m}$) 線材と Type-9 の $d_f=0.1\ \mu\text{m}$ ($d_n=0.065\ \mu\text{m}$) 線材の磁界振幅 B_m が異なる磁化曲線を示す。

Fig. 5 (a) において、Type-3 線材の初期磁化特性は 0.03 T 付近でピークに達し、見かけ上 “最初の” 下部臨界磁界 B_{c1} が現れる。この非常に小さい B_{c1} は、近接効果によって超電導状態になっているフィラメント間のマトリックス部分に磁束が侵入していく過程を示していると考えられる。“最初の” 下部臨界磁界からさらに磁界を増加させていくと、マトリックス部分

(a)

(b)

(c)

の弱い超電導状態が破壊され、Nb-Ti フィラメント内に磁束が侵入していき、0.3~0.4 T 付近に“2 番目の”下部臨界境界が現れる。

$d_n/d_f=0.4$ の Type-3 線材に対し、 $d_n/d_f=0.65$ までフィラメント間隔を広げた Type-9 の $d_f=0.1 \mu\text{m}$ 線材の磁化曲線は、Type-3 線材に見られた低磁界中での近接効果による磁化の不可逆性が消えて、磁界振幅 $B_m=0.5 \text{ T}$ での磁化曲線は、可逆性の程度が高くなっている。 $B_m=0.65 \text{ T}$ になると、磁化の不可

(d)

(e)

Fig. 6 Dependence of hysteresis losses of types on amplitude of applied field.
(a) Type-1, 2. (b) Type-3. (c) Types-3, 4.
(d) Types-6, 7. (e) Types-8, 9.

逆性が顕著になり、さらに B_m を増加させるにつれてその傾向が強くなる。

Fig. 6 に各 Type 線材のヒステリシス損失 Q_h の磁界振幅 B_m 依存性を示す。

Fig. 6 (a) は、Type-1 と 2 の特性を示した。 $d_f=0.3 \mu\text{m}$ における Type-1 線材は、近接効果による強いフィラメント間の電磁気的結合のために Q_h が増加した。磁界振幅 $B_m=0.5 \text{ T}$ における Q_h と λJ_c の実測値を次式で表されるビーンモデルの式へ代入して求めた有効フィラメント径 d_{eff} は、実際のフィラメント径 d_f の約 12 倍になり、サブエレメント径にほぼ等しい値を示した。

$$d_{\text{eff}} = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{Q_h}{\lambda J_c \cdot B_m} \quad (5)$$

一方、Type-2 の $d_f=0.3 \mu\text{m}$ 線材は、Cu-10% Ni マトリックス合金への Mn 添加により近接効果が抑制され、Type-1 の $0.3 \mu\text{m}$ 線材に比較して Q_h が約 1

析低減されている。Type-2 の $d_f=0.3\ \mu\text{m}$ と $0.2\ \mu\text{m}$ 線材の Q_h は、 B_m の変化に伴い3段階に変化する。まず、 $B_m=0.2\sim 0.3\ \text{T}$ 以下の低磁界中では $Q_h \propto B_m$ の関係が成り立つ。これは、低磁界中でフィラメント同士が近接効果により弱結合していることを示している^{3,14)}。次に、 $B_m=0.2\sim 0.8\ \text{T}$ の範囲では、およそ $Q_h \propto B_m^2$ の関係が成り立ち、この磁界領域ではマトリックス中での弱い超電導状態は破壊され、磁束が Nb-Ti フィラメント内に侵入していく領域であることを示す。ピーンモデルによれば侵入磁界 B_p 以下では $Q_h \propto B_m^3$ の関係が成り立つはずであるが、この線材の場合、純粋な Nb-Ti フィラメントの $Q_h(B_m^3)$ に比例)のほかに、低磁界中での近接効果によるヒステリシス損失 (B_m に比例) が加算されるため、見かけ上 $Q_h \propto B_m^2$ の関係になったと考えられる。 $B_m > 1\ \text{T}$ では、磁束がフィラメントの中心部に達し $Q_h \propto B_m$ の関係になる。 $d_f=0.15\ \mu\text{m}$ 線材の Q_h は、低磁界中 (約 $0.5\ \text{T}$ 以下) では近接効果の影響が、より強く現れるため増大するが、 $B_m=0.8\ \text{T}$ 以上では $d_f=0.15\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 線材の間で差がなくなり、 $B_m=2\ \text{T}$ においては、ほぼ同じ Q_h を示す。(3) 式で示した近接効果によるマトリックス中の電流密度が印加磁界により指数関数的に変化するため、Type-2 の $d_f=0.15\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 線材では、 B_m が増加すると近接効果によるフィラメント間の電磁氣的結合が弱くなり、その結果、 d_f の異なる線材の Q_h の大小が B_m とともに変化する。

電力機器への応用の際には、機器の経験磁界を考慮に入れて線材設計 (d_f , d_n および d_n/d_f) を行う必要がある¹⁴⁾。

Fig. 6 (b) に Type-3 線材の Q_h - B_m 特性を示した。 $d_f=0.3\ \mu\text{m}$ 線材は、 B_m が約 $0.4\ \text{T}$ 以下において $Q_h \propto B_m^3$ 、 $0.5\ \text{T}$ 以上では $Q_h \propto B_m$ が成り立つ、ただし、 $0.1\ \text{T}$ 以下での非常に低い磁界領域で $Q_h \propto B_m^3$ の関係が成り立たなくなる。Cave らは、この $0.1\ \text{T}$ 以下の Q_h の変化を、 d_f がロンドンの侵入長 λ の2倍以下のサイズになったときのフィラメント表面におけるマيسナー磁界と下部臨界磁界の関係から説明している¹⁵⁾。 $d_f=0.13\ \mu\text{m}$ 線材では、Type-2 の $d_f=0.2, 0.3\ \mu\text{m}$ 線材と同様、低磁界領域での弱い近接効果により生じるヒステリシス損失の影響が $B_m < 0.3\ \text{T}$ で観察される。Fig. 6 (b) において異なった B_m における $d_f=0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 線材の Q_h を比較すると、 $B_m=0.2\ \text{T}$ 以下では $d_f=0.3\ \mu\text{m}$ 線材の Q_h が最小、

$0.2\ \text{T}$ 以上では $d_f=0.13\ \mu\text{m}$ 線材が最小となり、Fig. 6 (a) 同様に B_m が変わると各線材の Q_h の大小が変化する。

Fig. 6 (c) に Type-4 線材の Q_h - B_m 特性を示す。図中には Type-3 の $d_f=0.13\ \mu\text{m}$ 線材の特性も示した。Mn 濃度を 0.9% (Type-3) から 1.34% (Type-4) へ高めることにより、Cu-30% Ni-1.34% Mn 合金中での超電導電子散乱距離 k_n^{-1} は Cu-30% Ni-0.9% Mn 中での k_n^{-1} に比較してさらに短縮され、 $B_m=0\sim 2\ \text{T}$ の範囲では Type-3 の線材よりさらにヒステリシス損失の低減が可能であった。

Fig. 6 (d) に Cu-10% Ni-0.9% Mn マトリックスを用いた Type-6, 7 線材の Q_h - B_m 特性を示す。 $d_f=0.1\ \mu\text{m}$ の Type-6 と 7 線材の特性より Type-6 線材 ($d_n=0.07\ \mu\text{m}$) は、低磁界中で近接効果による弱結合に起因する $Q_h \propto B_m$ の関係が存在するのに対し、同じ d_f でも Type-7 線材 ($d_n=0.1\ \mu\text{m}$) の特性には低磁界中での近接効果の影響が観察されず、約 $0.8\ \text{T}$ を境に、 $Q_h \propto B_m^4$ と $Q_h \propto B_m$ の関係に分かれる。このことから、マトリックスに Cu-10% Ni-0.9% Mn を用いた場合、フィラメント間隔 d_n を $0.1\ \mu\text{m}$ 以上にすることで、完全に近接効果を防ぐことが可能であることがわかった。電力機器への応用を考えたとき、最大経験磁界が $0.5\ \text{T}$ 以下の限流器等に応用した場合、その超電導巻線のヒステリシス損失は無視できるほど低減可能になる。また、 $d_n=0.07\sim 0.1\ \mu\text{m}$ の範囲でも最大経験磁界が $1\ \text{T}$ 以上の発電機電機子巻線等への応用になれば、低磁界中での弱い近接効果によるヒステリシス損失増加が無視でき、 d_n の短縮による λJ_c 特性向上 (λ の向上) が期待できる。

次に、Fig. 6 (e) に示した Cu-30% Ni-0.9% Mn マトリックスを用いた Type-8 と 9 の線材は、Type-6, 7 に比較してマトリックスの Ni 濃度が3倍に向上するため、 $d_n=0.065\ \mu\text{m}$ まで近接効果を完全に抑制することができた。Type-9 線材の $d_f=0.1\ \mu\text{m}$ 線材と $0.08\ \mu\text{m}$ 線材を比較すると $B_m=0.8\ \text{T}$ を境に Q_h の大小が逆転しており、 $1\ \text{T}$ 以上でのヒステリシス低減には、多少の近接効果によるフィラメント間の弱結合は無視できる。先に示したマトリックスの ξ_n と近接効果抑制のために必要なフィラメント間隔 d_n の関係式 $d_n=6\xi_n$ を用いると B_m が約 $0.8\ \text{T}$ より低い磁界振幅ではヒステリシス損失低減のために $d_n > 6\xi_n$ が条件となるが、 $0.8\ \text{T}$ より高い B_m では d_n を $4.5\sim 5\xi_n$ まで小さくしてもヒステリシス損失を低減でき

ることがわかった。

以上, Fig. 6 (a)~(e) の結果より Cu-Ni-Mn 合金を用いた Nb-Ti 超電導線のヒステリシス損失は, d_f や d_n が $2\lambda_L$ (λ_L : 磁束侵入深さ) の半分以下で, 低磁界中では量子磁束間隔と d_f , d_n がほぼ同程度となるため, ビーンモデルの臨界状態から求められる Q_h よりはるかに低い値を示すことがわかった。

6. 結合損失と渦電流損失

全交流損失 Q_t は, キャンセルコイルとサーチコイルからなるピックアップ法により測定した。しかし, 5章で示したように近接効果を抑制した Cu-Ni-Mn 複合超極細多芯 Nb-Ti 超電導線のヒステリシス損失は非常に小さく, かつ 1 mm 程度のツイストピッチと高抵抗マトリックス Cu-Ni-Mn の使用等により Q_e , Q_c も低減されており, 実際の $d_f=0.1\ \mu\text{m}$ 線材の Q_t は, ピックアップコイル法の分解能を越えて測定できなかった。そこで, 各 Type 線材において, 測定の分解能の範囲内に入るようなフィラメント径, 素線径, ツイストピッチ l_p の大きい線材の交流損失をピックアップコイル法により測定し, その測定結果と結合損失の計算式より, 各タイプに用いたマトリックス合金の縦抵抗率 $\rho_{\perp}$ を算出し, $\rho_{\perp}$ と計算式より $d_f=0.1\ \mu\text{m}$ 級線材の Q_c を求めた。

Fig. 7 に Type-9 (Cu-30% Ni-0.9% Mn) の $d_f=0.38\ \mu\text{m}$ 線材 (線径 0.72 mm, ツイストピッチ $l_p=4\text{ mm}$) の交流損失 Q_t の周波数 f 依存性を示す。 $f=0\text{ Hz}$ 近傍での交流損失は, ヒステリシス損失に相当し, 高分解能 SQUID 磁束計により別途に実測した値とほぼ一致した。交流損失 Q_t から周波数に依存した成分 (Q_c+Q_e) を取り出し, $Q_c \gg Q_e$ の関係から周波数依存成分を全て結合損失と仮定して次式に代入し, 縦抵抗率 $\rho_{\perp}$ を求めた。

$$Q_c = \frac{B_m^2 \cdot l_p^2 \cdot f}{2\rho_{\perp}} \quad [\text{J/m}^3] \quad (6)$$

ここで, B_m は磁界振幅 (T), l_p はツイストピッチ (m)。(6) 式より求めた $\rho_{\perp}$ は, $1.7 \times 10^7\ \Omega \cdot \text{m}$ であった。この値は中心の安定化銅の存在を無視し, 線材が Cu-30% Ni-0.9% Mn と Nb-Ti のみで形成されていると仮定したときの $\rho_{\perp}$ の計算式, $\rho_{\perp} = \rho_m \times \{(1-\lambda)/(1+\lambda)\}$ に Type-9 の Nb-Ti 占積率 $\lambda=0.11$ と $\rho_m=3.8 \times 10^{-7}\ \Omega \cdot \text{m}$ を代入して求めた $\rho_{\perp}=3.0 \times 10^{-7}\ \Omega \cdot \text{m}$ に比較して約 40% ほど低い値であり, 中心の安定化銅の存在により, $\rho_{\perp}$ が低下していることが

Fig. 7 Dependence of AC losses Q_t of Type-9 wire ($d_f=0.38\ \mu\text{m}$, $l_p=4\text{ mm}$) on frequency of AC field ($B=0.285 \sin(2\pi ft)$).

わかる。 λ の異なる Cu-30% Ni-0.9% Mn を用いた他の Type 線材においても安定化銅の影響が大きく, Type-9 と同様に磁化法と計算式を併用して求めた $\rho_{\perp}$ は Type-3 において $\rho_{\perp}=1.6 \times 10^{-7}\ \Omega \cdot \text{m}$ となり, Type-9 の $\rho_{\perp}$ とほとんど一致した。よって, Cu-30% Ni-0.9% Mn を用いた他の Type 線材にも $\rho_{\perp}=1.7 \times 10^{-7}\ \Omega \cdot \text{m}$ は適応可能と考えられる。

また, フィラメント周りに Cu-10% Ni-0.9% Mn を用いた Type-2 線材の $\rho_{\perp}$ は, 同様の測定の結果, $8 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$ であった。

Fig. 3 に示した Q_h - d_f 特性と $\rho_{\perp}$ より求めた Q_c から今回試作した素線の中で, 振幅 0.5 T の交流磁界中で最も交流損失が低かったのは, Type-9, $d_f=0.1\ \mu\text{m}$ ($d_n=0.065\ \mu\text{m}$, 素線径 0.19 mm, $l_p=1.2\text{ mm}$) 線材であった。上記線材の周波数 $f=50\text{ Hz}$, 磁界振幅 $B_m=0.5\text{ T}$ の交流磁界における結合損失は, (6) 式より $Q_c=50\text{ J/m}^3$ であった。

安定化銅部の渦電流損失 Q_e は次式で表される¹⁶⁾。

$$Q_e = \pi^2 \frac{R_{Cu}^2 \cdot B_m^2 \cdot f \cdot \beta}{\rho_{Cu}} \quad [\text{J/m}^3] \quad (7)$$

ここで, R_{Cu} は Cu-10% Ni で分割された個々の安定化銅の半径, β は安定化銅比, ρ_{Cu} は安定化銅の抵抗率。(7) 式に前述の Type-7 の $d_f=0.1\ \mu\text{m}$ 線材 (素線径 0.19 mm) の $R_{Cu}=7 \times 10^{-6}\text{ m}$ と, 10 K における線材の T_c 直上抵抗 (実測値) より求めた $\rho_{Cu}=5 \times 10^{-10}\ \Omega \cdot \text{m}$, 銅比 $\beta=0.23$, $B_m=0.5\text{ T}$, $f=50\text{ Hz}$ を代入すると $Q_e=3\text{ J/m}^3$ となり, 結合損失 Q_c に比較して非常に小さい値であった。同素線のヒステリシス損失 Q_h は, SQUID 磁束計による実測結果より $Q_h=13\text{ J/m}^3$ なので, 全交流損失 $Q_t=Q_h+Q_c+Q_e$

$=66 \text{ J/m}^3 (3.3 \text{ kW/m}^3)$ となり、全損失の約 75% が結合損失 Q_c で占められる。

7. 結 論

Nb-Ti フィラメント周りに Cu-Ni-Mn 合金を複合化し、マトリックス、フィラメント径およびフィラメント間隔の異なる交流用 Nb-Ti 超電導線を作製した。試作線材を交流損失の観点から調査検討し、以下の結果を得た。

1) Cu-Ni 合金への磁性元素 Mn の添加は、ヒステリシス損失低減に有効であり、近接効果抑制の点から Cu-Ni-Mn 合金中の最大許容 Mn 濃度は 0.9~1.78 wt% の間に存在した。

2) 各種マトリックス合金線材の $B_m=0.5 \text{ T} (\pm 0.5 \text{ T/cycle})$ でのヒステリシス損失が最小となるときのフィラメント間隔 d_n は Cu-10% Ni で $d_n=0.2 \mu\text{m}$, Cu-10% Ni-0.9% Mn で $d_n=0.07\sim 0.1 \mu\text{m}$, Cu-30% Ni-0.9% Mn で $d_n=0.052\sim 0.065 \mu\text{m}$, Cu-30% Ni-1.34% Mn で $d_n=0.048 \mu\text{m}$ となり、近接効果抑制の観点から各マトリックス合金の最適フィラメント間隔が決定できた。

3) 近接効果のほぼ完全な抑制、ロンドン侵入長 λ の半分まで極細化されたフィラメント径 d_f , および d_f , フィラメント間隔 d_n と量子磁束間隔の整合、以上の 3 条件が満たされたとき下部臨界磁界 B_{c1} が向上し、 $B_m=0.5 \text{ T}$ でのヒステリシス損失は、 10 J/m^3 程度まで低下する。

4) 磁界振幅 B_m が変化すると、ヒステリシス損失が最小値を示すフィラメント径も変化する。

5) ヒステリシス損失低減の点からのフィラメント間隔の最適値は $B_m=0.8 \text{ T}$ 付近を境にして、 0.8 T 以下の磁界では $d_n=6\xi_n$, 0.8 T 以上の高磁界側では $d_n=4.5\sim 5\xi_n$ となり、弱い近接効果によるフィラメント間結合は高磁界側でヒステリシス損失の増加にほとんど影響しない。

6) 試作した超電導線材の縦抵抗率 ρ_L は、フィラメント周りに Cu-10% Ni-0.9% Mn を用いた線材で $\rho_L=8\times 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$, Cu-30% Ni-0.9% Mn を用いた線材で $\rho_L=1.7\times 10^{-7} \Omega\cdot\text{m}$ であり、ヒステリシス損失が十分に低減された線材では、交流損失の 70% 以上が結合損失で占められた。

本研究は、通産省工業技術院ニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術開発」の一環として新エネル

ギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの受託により、実施したものである。

参 考 文 献

- 1) P. Dubots, A. Fevrier, J. C. Renard, J. P. Tavergnier, J. Goyer and Hoang Gia Ky: IEEE Trans. Magn. **MAG-21** (1985) 255
- 2) C. P. Bean: Rev. Mod. Phys. **36** (1964) 31
- 3) K. Miyashita, M. Toyama, S. Sakai, K. Kamata and H. Tanaka: Proc. ICFA Workshop on AC Superconductivity, Japan (1992) 152
- 4) K. Miyashita, M. Toyama, S. Sakai, K. Kamata and H. Tanaka: Adv. Cryo. Eng. (Materials) **40** (1993) to be published
- 5) E. W. Collings: Adv. Cryo. Eng. (Materials) **34** (1988) 871
- 6) T. Y. Hsiang and D. K. Finnemore: Phys. Rev. **B22** (1980) 154
- 7) D. K. Finnemore, H. C. Yang, V. G. Kogan and S. L. Miller: Adv. Cryo. Eng. (Materials) **30** (1984) 909
- 8) R. B. Goldfarb, D. L. Ried, T. S. Kreilick and E. Gregory: IEEE Trans Magn. **MAG-25** (1989) 1953
- 9) *Handbook on Materials for Superconducting Machinery*, Metals and Ceramics Information Center, Battelle Columbus Laboratories, MCIC, HB-04 (1974) 5.3.3-3
- 10) J. Y. Georges, A. Fevrier, Y. Laumond, A. Lacaze and P. Bonnet: Magnet Technology **11** (1989) 598
- 11) J. R. Cave: Cryogenics **29** (1989) 304
- 12) I. Hlasnik, S. Takacs, V. P. Burjak, M. Majoros, J. Krajcik, L. Krenpasky, M. Polak, M. Jergel, T. A. Koneeva, O. N. Mironova and I. Ivan: Cryogenics **25** (1985) 558
- 13) F. Sumiyoshi, M. Matsushita, M. Noda, T. Matsushita, K. Funaki, M. Iwakuma and K. Yamafuji: Jpn. J. Appl. Phys. **25** (1986) 501
- 14) H. Tateishi and Y. Z. Lei: Proc. ICFA Workshop on AC Superconductivity, Japan (1992) 77
- 15) J. R. Cave and A. M. Cambell: Adv. Cryo. Eng. (Materials) **38** (1991) 501
- 16) 電子技術総合研究所資料: 超電導技術の電力系統への応用の研究開発 (1984) 110