超電導 Nb-Zr-Ti 合金線材の交流損失 (II)

椎木 一夫・相原 勝蔵・工藤 実弘

日立製作所中央研究所 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280

(1973年 9 月19日 受理)

A. C. Losses in Superconducting Nb-Zr-Ti Wires (II)

Kazuo SHINKI, Katsuzo AIHARA and Mitsuhiro KUDO

Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
1-280, Higashikoigakubo, Kokubunji, Tokyo

(Received September 19, 1973)

Synopsis :

Losses in single- and multi-core superconducting composite conductors were studied experimentally in the range from 20 to 500 Hz and below the current of 100 A. Composites consist of Nb-60.8 Ti-2.8 Zr ternary superconducting alloy embedded in Cu matrix. Volume of He gas evaporated by the loss when sinusoidal current was passed through the wire was measured. A mechanism of the loss was investigated using a frequency dependence.

The single-core composite generates the hysteresis loss in the superconductor and the eddy current loss in Cu matrix. The loss in the multi-core composite is expressed in terms of the hysteresis in an equivalent superconductor which has same volume of superconducting filaments involved and the eddy current loss in an outer region of Cu matrix.

1. 緒 言

近年強電用超電導材料を交流分野たとえば交流発電機、モータ、トランス、送電などに応用するという要求が高まっている。しかし実用的な強電用超電導材料(第2種不均質超電導材料)は高磁界中で大電流を流しうが熱力学的に不可逆な性質をもつために交流磁界が加わると損失を発生する。また同じ理由によってこの材料は本来不安定であるためその単独使用は困難で、多量の常電導金属を併用するか¹⁾ または超電導材料を極細線化して少量の常電導金属中に埋めこむ²⁾ など安定化技術が必要になる。すでに超電導体に銅被覆を施した単心線などについて報告³⁾ されているように安定化のための常電導金属部分は交流磁界中で損失を発生し、しかも超電導体自身の損失を大きく上まわることがある。このような損失の発生は超電導の交流応用に大きな障害となっているが、その困難を克服し交流機器設計を行なうための第一歩として超電導線材が

発生する損失の様子を詳しく知ることが必要である。

すでに単一周波数における交流損失の測定結果から銅被覆単心線および多心複合線についての簡単な損失モデルが得られている³⁾ が、本論文においては損失の周波数特性を解析することによってこのモデルを精密化する。特に多心複合線に交流電流を流した場合に発生する損失についてはこれまで不明な点も多かったが、本論文における解析によりその損失を計算することができる簡単なモデルが確立された。なお本研究の結論は外部から交流電流を流した場合の損失に関してのみ成立するもので、外部交流磁界が印加される場合には別に検討を行なう必要がある。

2. 実験方法

交流損失の測定には「液体 He の蒸発量測定法」を用いた。測定装置はすでに報告されたもの³⁾ と同様である。線長約 5m の超電導線材をベークライト製ボビンに無誘導まきし周波数 20~500 Hz, 電流値 100rms

Table 1 Samples

	Single-core				Multi-core								
	1	2	3	4	5	6	7	8*	9**	10	11***	12	13
Composite diameter D (mm)	0.319	0.356	0.407	0.505	0.279	0.352	0.382	0.450	0.451	0.455	0.466	0.499	0.563
Filament diameter d_f (μm)	250	254	252	253	41.9	51.9	57.1	67.9	73.3	65.5	69.6	61.6	82.2
Number of filaments N	1	1	1	1	16	19	16	16	16	16	16	16	16
Cross sectional area of copper A_{cu} (10^{-4}cm^2)	3.09	4.88	8.01	15.0	3.91	5.72	7.32	10.1	9.22	10.9	11.0	14.6	16.4
Copper ratio A_{cu}/A_{sc}	0.63	0.96	1.61	2.98	1.77	1.42	1.81	1.74	1.37	2.02	1.81	3.05	1.93

* 5 mm ピッチツイスト ** 2 mm ピッチツイスト *** 20 mm ピッチツイスト

A 以下の交流電流を流してその時に発生する液体 He の蒸発量をガス流量計により測定した。交流電流源として商用電源のかわりに周波数可変電源を用いた点のみが前回の報告と異なる。この電源について歪率を実測したところ 3 ~ 4 % 程度の第 3 高調波成分を含むことがわかった。しかし両電源の周波数 50 Hz における交流損失の測定結果はよく一致しておりこの程度の歪率は無視できるものとした。

測定に使用した超電導線材の仕様を Table 1 にまとめた。使用した超電導合金はすべて Nb-60.8% Ti-2.8% Zr 付近の組成をもつ 3 元合金である。直径約 250 μm ϕ の超電導素線に種々の厚みで銅被覆した単心線とその銅被覆を硝酸で溶かしさった裸線および直径 40 ~ 80 μm ϕ の超電導素線 16 本または 19 本を銅マトリックス中包含む多心複合線に対し交流損失を測定した。なお使用した銅マトリックスの比抵抗は 12K において $1.0 \sim 3.0 \times 10^{-8} \Omega\text{cm}$ であった。

3. 実験結果と考察

3.1 銅被覆単心線の交流損失

実験結果の一例として銅厚み 51 μm を有する単心線の交流損失を Fig. 1 に示した。線材に流れこむ交流電流はすべて超電導素線を通れるものとし実験結果は次式で計算される素線のピーク表面磁界 $H_m[\text{Oe}]$ に対しあらわした。

$$H_m = \frac{2\sqrt{2}\tilde{I}_w}{5d} \tag{3.1}$$

ただし $\tilde{I}_w$ は線材に流れる交流電流の実効値 [r.m.s.

Fig. 1 Losses in the single-core composite wire (Thickness of the copper is about 51 μm).

A], d は素線の直径 [cm] である。交流損失は両対数グラフ上でほぼ直線関係によりあらわされているが、その勾配は周波数が高くなるにつれてゆるやかになる。

銅被覆単心線の損失はそれを構成する超電導素線の交流損失と被覆銅部分に誘起される渦電流損失の和で与えられるとする仮定は第0次近似として正しいことはすでに確かめられている³⁾。本論文においては損失の周波数特性の面からこのことを確認しておく。上述の仮定をみると損失 Q_t は A, B を適当な係数として

$$Q_t = Af + Bf^2 \quad (3.2)$$

で与えられる。第1項は周波数 f [Hz] に比例する超電導素線の履歴損失に対応する。素線の交流損失測定結果の一部は前回すでに報告したが、周波数を変化させた今回の結果からつぎの実験式が成立することが確かめられた。

$$Q_{sc} = 7 \times 10^{-17} f H_m^{3.5} S \quad (3.3)$$

これは後述するように式 (3.2) の第1項に一致する。ただし式 (3.3) において Q_{sc} は超電導素線の交流損失 [W], S は素線表面積 [cm²] である。

式 (3.2) の第2項は被覆銅部分の渦電流損失に対応する。ただし表皮効果は本研究の実験範囲では問題にならないので無視した。実際の複合線材では表皮効果を考慮する必要も起こることに注意しておく。式 (3.2) は縦軸に Q_t/f , 横軸に f をとって実験値をプロットすると直線関係が得られることを示しているが、実際に Fig. 2 に示すような結果が得られ仮定の妥当性が確

Fig. 2 Linear relations between the loss per cycle Q_t/f and the frequency f . $Q_t = Af + Bf^2$.

められる。このグラフの切片から定数 A , 勾配から定数 B が求められる。最小自乗法により定数 A, B を決定する。

このようにして求めた式 (3.2) の第1項は被覆銅厚みによらず一定で式 (3.3) の素線の交流損失と実験誤差の範囲で一致していることが確かめられた。一方式 (3.2) の第2項は銅厚みに依存し、ピーク表面磁界のほぼ二乗に比例する。この項はつぎの実験式によりほぼ記述される。

$$Q_e = \frac{2\pi^2 f^2 t^2 H_m^2}{3\rho} V \times 10^{-16} \quad (3.4)$$

ただし Q_e は渦電流損失 [W], t は被覆銅厚み [cm], V は銅体積 [cm³], ρ は銅の比抵抗 [Ω cm] である。

式 (3.4) は完全には正しくなく銅厚みが薄くなるにつれ実験結果の磁界依存性は二乗からずれ急激な変化を示すようになる。Irie⁴⁾ らは被覆銅中の磁界が超電導素線によって生じる非線形効果により高調波成分を有することを考慮すべきであることを指摘し、この高次の依存性の項を導いている。しかし磁界が低い場合には二乗の依存性だけで十分であって、実用上式

Fig. 3 Losses in the multi-core composite wire ($D=0.455$ mm, $d_f=65.5 \mu$ m, $N=16$, $A_{cu}/A_{sc}=2.02$).

(3.4) を用いてさしつかえない。したがってこの近似の範囲で式 (3.2) が成立し、銅被覆単心線の電力損失は次式により表わされる。

$$Q_t = Q_{sc} + Q_e \tag{3.5}$$

3.2 多心複合線の交流損失

前節に述べた単心線の交流損失に関する議論は交流電流を流す場合のみでなく数値に若干の変更を加えて外部から交流磁界を印加する場合にも適用できる。しかし多心複合線においては両者はまったく異なることに注意せねばならない。とくに電流を流した場合にはツイスト効果を議論することはできない。多心複合線に交流磁界を印加する場合については別に報告する予定であるので、ここでは交流電流を流した場合のみに話を限定する。

Fig. 3 は多心複合線に対する実験結果の一例である。交流損失の挙動は単心線の場合とよく似ており式 (3.2) を用いて整理することができる。この実験値に対して周波数依存性の異なる各項を求めると Fig. 4

Fig. 4 Components of the loss in the multi-core composite wire ($A_{cu}=1.09\times10^{-3}\text{cm}^2$, $A_{cu}/A_{sc}=2.02$).

に示す結果が得られる。この多心線とほぼ同体積の超電導体と銅を含む単心線に対する結果を比較のために Fig. 5 に示す。図はいずれも周波数が 100 Hz の場合について整理してあらわしてある。Fig. 4 と 5 を比較すると両者において周波数に比例する損失すなわち超電導体部分の損失はほぼ等しいが、周波数の二乗に比例する損失すなわち銅部分の発生する損失は多心複合線の場合は非常に小さいことがわかる。

以上の結果から多心複合線における超電導体部分の損失は同体積の超電導素線の損失で代表できると考えられる。線材に流れこむ交流電流はすべて超電導素線を通れるものと仮定すると式 (3.1) および式 (3.3) を用いて周波数に比例する損失成分からそれと同じ損失を発生する等価超電導素線の直径 d_e を逆算することができる。ただしこの計算において式 (3.3) 中の表面積 S は線長を L として $\pi d_e L$ をとった。一方線材断面の顕微鏡観察から超電導体体積を等しくする幾何学的な等価直径 d_p が求められる。種々の異なった多心複合

Fig. 5 Components of the loss in the single-core composite wire ($A_{cu}=8.01\times10^{-4}\text{cm}^2$, $A_{cu}/A_{sc}=1.61$).

線に対し両者を対応させた結果が Fig. 6 である。両者はほぼ1対1の関係にあり、ツイストの有無、素線本数には依存していない。したがって今回の実験領域においては多心複合線化することによって超電導体部分の交流損失を減少させることはできないことがわかる。

しかし銅部分の発生する損失は多心複合線にすることによって減少している。銅マトリックスに誘起される渦電流分布を正確に求め損失を理論的に計算することは非常に難しいが、超電導素線にとり囲まれた銅マトリックスの部分に加わる磁界は外側に比較して小さいであろうことは容易に推測される。したがって以前の報告⁹⁾において提案されたような、すべての銅体積に等しい銅被覆をもつ単心線とみなす近似はよくない。超電導素線の外側に存在する銅マトリックス部分で発生する損失が大部分であって内側の銅部分で発生する損失は小さいと考えられる。Fig. 7 に示す4つの損失モデルに対し式 (3.4) を用いて渦電流損失を計算し実験値から得た周波数の二乗に比例する損失成分と比較する。Fig. 8 にその対応の一例を示す。

Model I は前報⁹⁾に示した等量の銅被覆を有する単心線とみなす近似であり、Model II はIと構成は同じで銅被覆部分に加わる磁界 h_m として銅マトリッ

クス中の最外超電導素線が存在する位置における値をとったものである。

Model III およびIVは超電導素線の外側の銅マトリックス部分のみで損失が発生すると考えるモデルで Model III においてはIと同じく前記等価超電導素線のピーク表面磁界が、Model IV においてはIIに導入した磁界が加わるとする近似である。

実際の計算では「超電導素線の外側」をどのようにとるか問題となるが、線材断面の顕微鏡観察から素線群についていくつかのもっともらしい外接円を取り平均してその外側をとった。この選び方にはかなり任意性を生じるが、計算値と実験値は Model III またはIVに対して比較的よく一致しており内部に存在する銅は損失に寄与していないとする近似がよいことを示している。銅量が異なる線材やツイストされた線材、さらには線材中心部に超電導素線の密度が疎である場合に対して同様に計算値と実験値の対応を行ない一般には Model IV がよい近似であることを確かめた。

以上の考察の結果多心複合線に交流電流を流した場合に発生する損失は中心部に等量の等価超電導素線をもち銅部分としてはすべての超電導線の外部に存在する部分のみを有する仮想単心線の交流損失によって近似されることがわかる。

Fig. 6 An equivalent superconducting wire model for the hysteresis loss in superconducting filaments.

Fig. 7 Four models for the eddy current loss in Cu matrix.

Fig. 8 Comparison between the eddy current loss observed and calculated from the models.

4. 結 言

超電導素線，銅被覆単心線および多心複合線に交流電流を流したときに発生する損失を液体 He の蒸発量測定法により求め，その周波数依存性の解析から損失機構を明らかにした。多心複合線における交流損失は同容量の単心線の交流損失よりも小さいがそれは銅マトリックス部分の渦電流損失が前者において小さいためであって 超電導体部分の損失は両者において等しい。また交流損失を計算する簡便法が得られたが今後は理論計算などによる裏づけを行なう必要がある。

本研究を行なうにあたり九大入江教授，日立中研木村主任研究員，黒田主任研究員に有益な討論をしていただいた。また実験試料の製作については日立日研多田主任研究員の御協力をいただいた。以上の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Z. J. J. Stekly, et al. : I. E. E. E. Trans. on Nuclear Science NS-12 (1965) 367
- 2) M. N. Wilson, et al. : Brit. J. appl. Phys. 3 (1970) 1517
- 3) 荒井，工藤：低温工学，6 (1971) 156
- 4) 入江，他：第10回低温工学研究発表会