

第 5 章 クリープ誘導型低透磁率コアの磁気特性

5.1 はじめに

1.3 節で述べたように、現在の透磁率制御型磁気コアとしてはハンドリングの良さから、ギャップ付きのフェライトコアや圧粉コアが広く用いられている。今後の環境に対する関心の高まりおよび省電力を考慮すると、簡素に作製できかつ安定して低損失が期待でき、なおかつ小型化が可能な材料を提案する必要があると考えられる。

本章では第 3, 4 章の結果を総括し、クリープ誘導磁気異方性を付与した長尺のナノ結晶薄帯を用いてトロイダルコアを実際に作製した。また、今後のスイッチング電源の駆動周波数の MHz 帯域へ移行を考慮し、0.1~1 MHz における磁気特性を評価した。さらに今後の機器の高密度実装化に伴い要求されると考えられる高温下での振舞いに着目し、磁気特性の温度依存性を評価した。これらの結果を通じ、本研究で開発した材料を用い作製した低透磁率コアが、現存の低透磁率コアを凌ぐ高性能コアとして期待されることを示す。

5.2 コア径が磁気特性に与える影響

5.2.1 コア径が磁気損失に与える影響

軟磁性材料を扱うにあたり、磁気弾性効果による磁気特性の劣化は重要な問題の 1 つである。試料作製時の機械的加工、急冷等により、試料内部には応力が残存する。残存応力は試料の有する磁気歪みを介して異方性を誘起し、磁気特性を劣化させる原因となる。本実験では熱処理後の薄帯をトロイダルコアに成形する。コア成形により薄帯に応力が加わるため、試料が磁気歪みを有すると、磁気弾性効果により新たに異方性が誘起される。この磁気弾性効果により生じた異方性は、誘起される方向によっては付与したクリープ誘導磁気異方性を弱め、磁気特性を劣化させる要因となると考えられる。この磁気弾性効果による誘導磁気異方性の強度は、磁気歪み定数 λ と曲げによる応力の大きさに依存する。このうち応力の大きさは、試料の彎曲率すなわちコア径に依存する。Luborsky らは Fe-B-Si 系アモルファス薄帯を用いて、コア径が磁気特性に与える影響を検討し、コア径の減少に伴い磁気特性が劣化することを報告している[1]。コア径の減少に伴う磁気特性の劣化は、 $\lambda=0$ でない限り、本研究のコアでも起こり得る問題である。コア成形に伴う磁気特性の劣化に関する一例として、熱処理後の薄帯およびその薄帯をトロイダルコアに成形した際の直流ヒステリシスループを Fig.5-1 に示す。

薄帯状態では直線的であったループがコアに成形することで、わずかに透磁率が上昇し飽和部分が緩やかになることがわかる。これは、コア成形の際の曲げ歪みが引き起こす磁気特性の劣化であると考えられる。そこで、まず作製したコアにおいてコア径が磁気特性に与える影響を検討した。

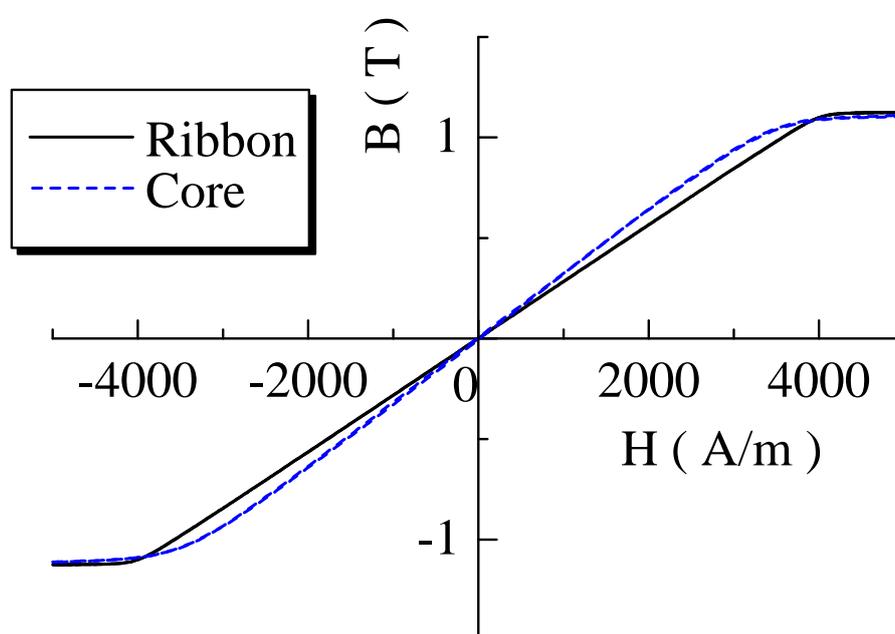


Fig.5-1 Dc-hysteresis loops of a ribbon and a core. The core was made from the ribbon. Shape of the loop is changed by formation of the ribbon into the toroidal core.

張力熱処理を施し、異方性を付与した 5 mm 幅長尺 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 薄帯を用いてトロイダルコアを作製した。最大磁束密度 $B_m = 0.1 \text{ T}$ で固定し、印加磁界周波数を $f = 0.1 \sim 1 \text{ MHz}$ の範囲で変化させ、作製したコアの磁気損失を評価した。コア径 D の異なるコアボビンを作製し、同一薄帯をそれぞれの径のボビンにその都度巻き直し測定を行った。Fig.5-2 にコア径をパラメータとした時の磁気損失の周波数依存性を示す。また Fig.5-2 には磁化回転を仮定し表皮効果を考慮したうず電流損失の計算値を併記した。

$D = 32 \text{ mm}$ の時、作製したコアの損失値はほぼうず電流の計算値と一致した。本結果は、作製したコアではヒステリシス損失や残留損失が極めて小さく、理論限界まで損失の低減が達成されたことを示唆している。また、コア径の減少に伴い損失が増加することが了解される。これは、Luborsky らの報告と一致するものである。

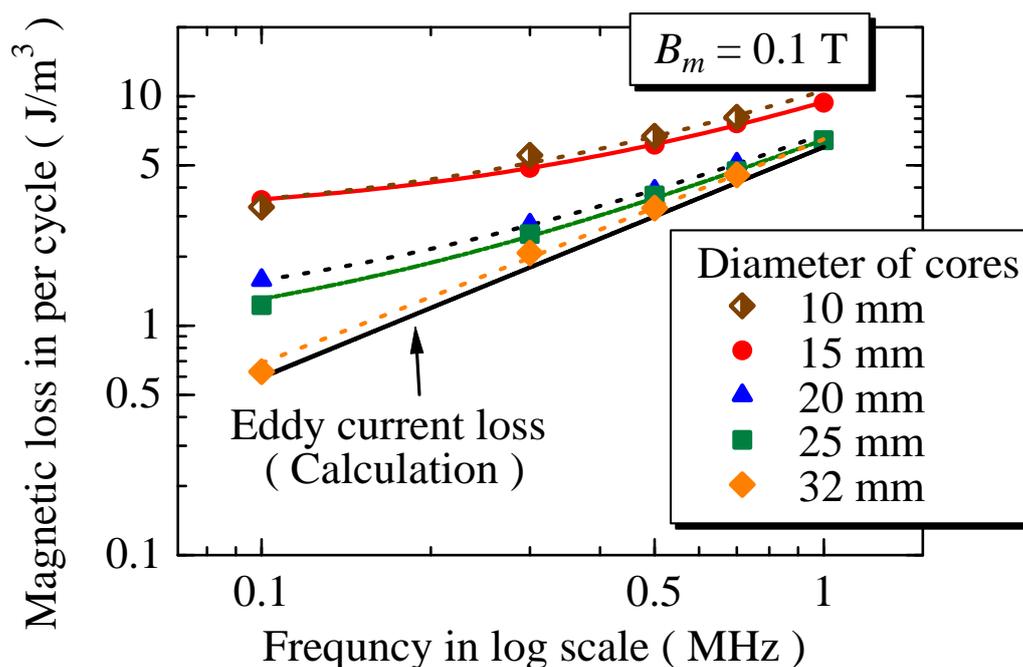


Fig.5-2 Magnetic loss of cores as a function of frequency. Diameter of a core was changed from 10 to 32 mm.

5.2.2 限界コア径

Fig.5-1 ではコア径の減少に伴い磁気損失の増加がみられた。本研究で用いた $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 薄帯では、ナノ結晶化後 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度の正の磁気歪み定数（測定値は 3.3×10^{-6} ）を有するため、コア成形する際、薄帯外側の引っ張り応力と薄帯内側の圧縮応力（Fig.5-3）を介して磁気弾性効果により新たに異方性が誘起される。薄帯内側の圧縮応力は、付与したクリープ誘導磁気異方性と同方向である試料の長手方向に対して垂直方向に異方性を誘導し、クリープ誘導磁気異方性を強める。一方、薄帯外側の引っ張り応力は長手方向に異方性を誘導しクリープ誘導磁気異方性を弱める。この長手方向に誘起される異方性により新たに磁壁移動を伴う磁化過程が試料の一部で生じ、損失を増加させる可能性がある。そこで、クリープ誘導磁気異方性を減少させる薄帯外側の引っ張り応力を介して誘起される応力磁気異方性について磁気エネルギーの観点から考察する。

磁気弾性効果による応力異方性のエネルギー E_σ は、応力 σ_m と飽和磁気歪み定数 λ_s を用いて、

$$E_\sigma = \frac{3}{2} \lambda_s \times \sigma_m \tag{5-1}$$

と与えられる[2]。また、 σ_m は試料のヤング率 Y と機械的歪み率 ε を用いて、

$$\sigma_m = Y \times \varepsilon \tag{5-2}$$

と与えられる。

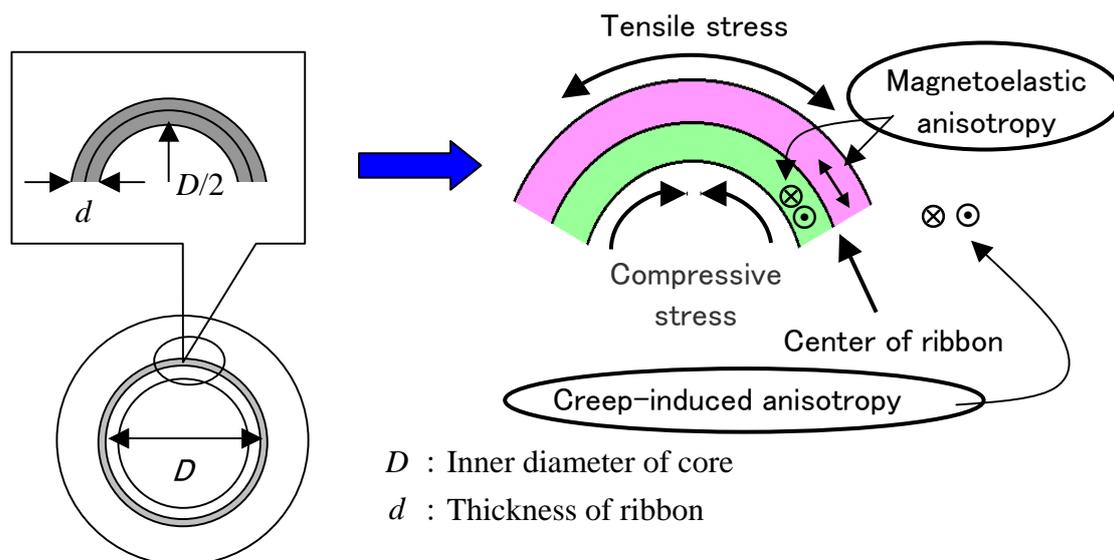


Fig.5-3 Model of mechanical stress, σ_m , due to formation of a ribbon into a toroidal core.

最も大きな延び歪みとなるのはトロイダルコアの最内部の薄帯の外側表面である。薄帯を曲げた際に薄帯の厚さ方向の中央は歪まないとし、最内部の薄帯外側表面での機械的歪み率を計算すると、

$$\varepsilon \approx \frac{2\pi \left\{ (r+d) - \left(r + \frac{d}{2} \right) \right\}}{2\pi \left(r + \frac{d}{2} \right)} = \frac{d}{2r+d} \approx \frac{d}{D} \quad (5-3)$$

となる。ここで r, d はそれぞれコア半径、薄帯の厚さであり、 $D \gg d$ とした。 E_σ が K_{uc} を上回ると、磁化容易軸方向が薄帯の幅方向から長手方向に変化するため、磁壁移動を伴う磁化過程が試料の一部で生じ、磁気損失が増加すると考えられる。すなわち、優れた磁気特性が維持されるためには、

$$K_{uc} \geq \frac{3}{2} \lambda_s \left(Y \times \frac{d}{D} \right) \quad (5-4)$$

が必要と考えられる。 D について整理すると、

$$D \geq \frac{3 \cdot \lambda_s \cdot Y \cdot d}{2 \cdot K_{uc}} \quad (5-5)$$

となり、 D が等号成立時の値を下回ると、 E_σ が K_{uc} を上回る。すなわち、この時クリーブ異方性は応力異方性により打ち消され、磁気特性が劣化すると考えられる。この等号が成立する時のコア径を本研究では限界コア径 D_c と呼ぶ。

(5-5)式より、磁気特性を劣化させることなくコアを小型化するためには、

- ① 大きな異方性の付与
- ② λ_s の絶対値の小さな試料の使用

が必要であることが了解される。

以上を踏まえ、コア径と磁気損失の関係を整理して Fig.5-4 に示す。縦軸は $f = 0.1$ MHz の時の損失値、横軸は D/D_c である。なお、 D_c 算出に必要な E, λ_s, K_{uc} は実験値を用いた。 $D/D_c = 1$ を境に損失の振舞いに顕著な差異が確認され、 $D/D_c < 1$ の時は D/D_c の減少に伴って急激な損失の増加がみられた。また $D/D_c > 1$ の時の損失値はうず電流の計算値と一致した。本結果から、磁気特性が急激に劣化するコア径の存在が確認される。また、磁気損失の測定値が磁化回転を仮定した際のうず電流損失の計算値と一致することから、コアの磁化過程が理想的な磁化回転に近いことが推測される。

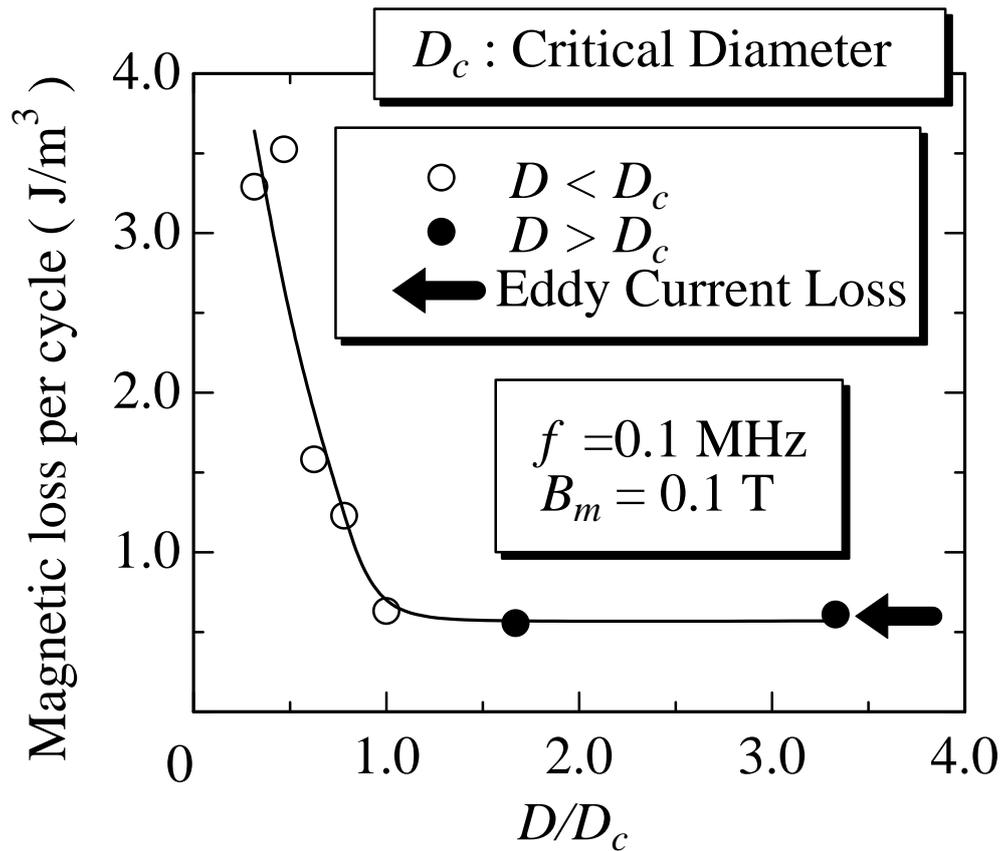


Fig.5-4 Magnetic loss of cores as a function of ratio of the core diameter to the critical diameter, D/D_c . The arrow indicates the classical eddy current loss calculated in consideration of the skin effect.

5.3 最適熱処理を施し作製したコアの磁気特性

5.3.1 透磁率の周波数特性

第3章および第4章で得られた結果から、熱処理条件を最適化し作製したトロイダルコアの磁気特性を評価した。まず熱処理を施した5 mm幅の $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{15.5}\text{B}_7$ 薄帯の直流ヒステリシスループをFig.5-5に示す。熱処理は室温から400 °Cまで10 min, 400 °Cから530 °Cまで30 min, 印加張力200 MPaとし、赤外線加熱炉を用いて行った。試料が長いため、15 cm程度ずつループを測定した。その結果をFig.5-4に示す。

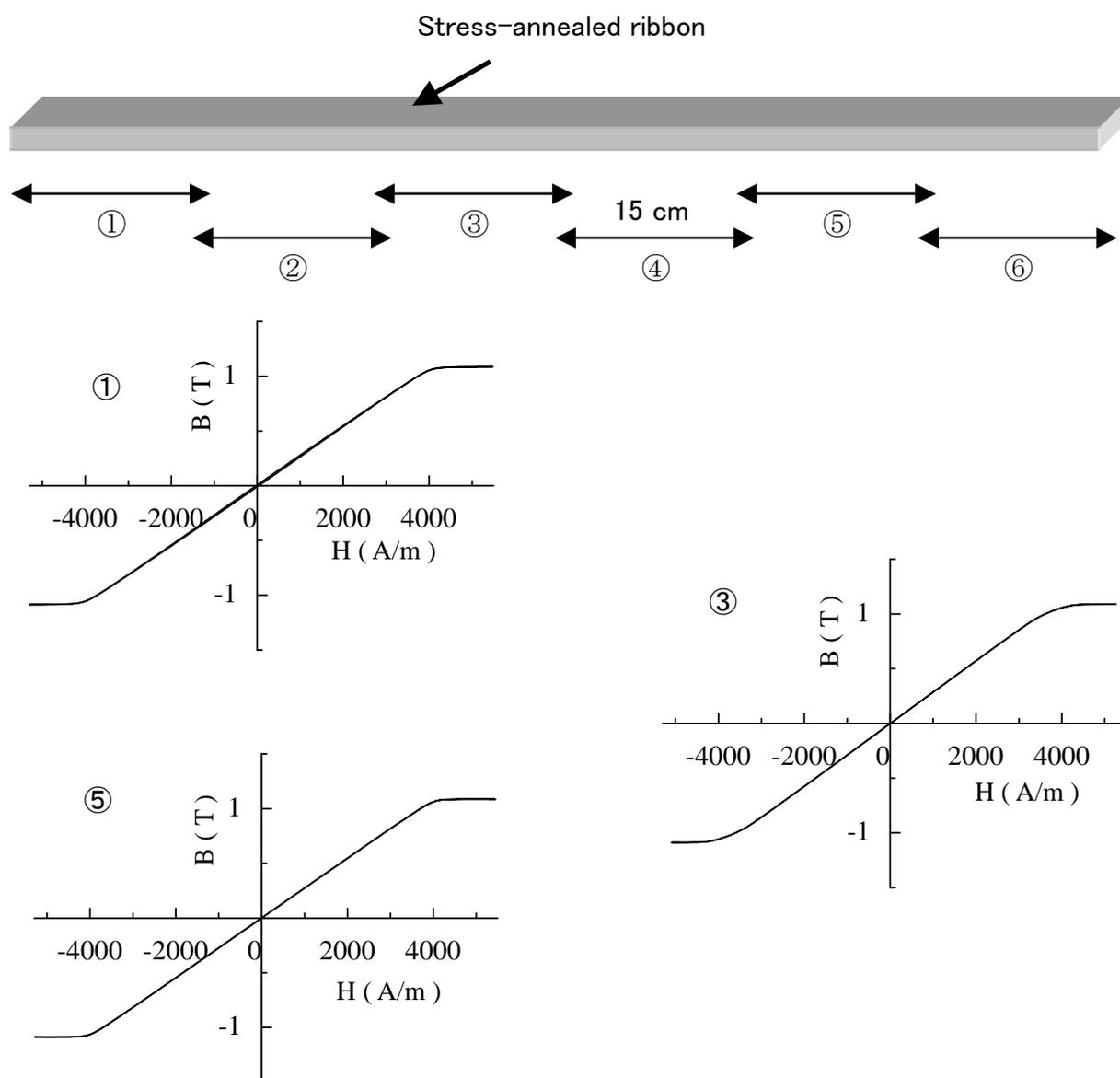
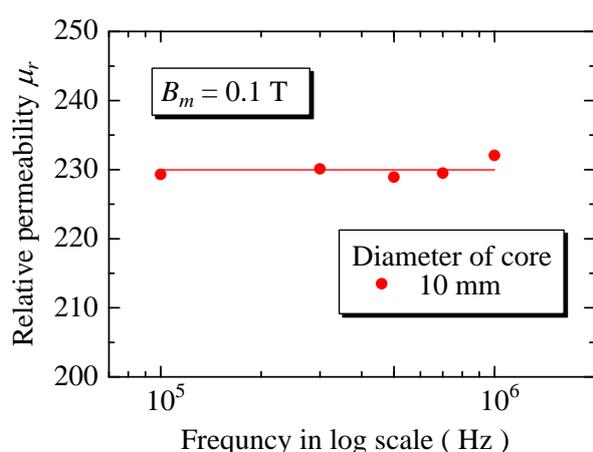


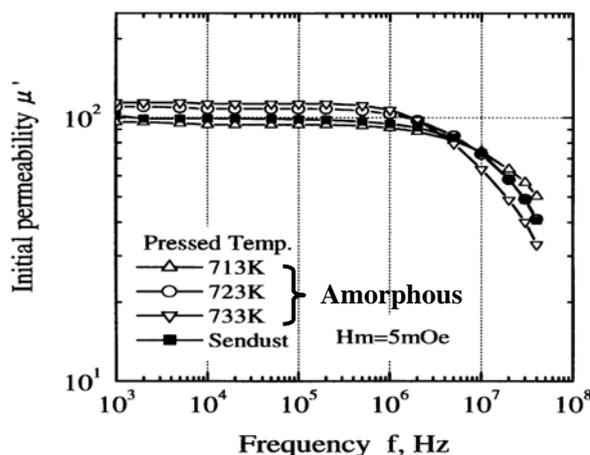
Fig.5-5 Dc-hysteresis loops for a 70 cm-long annealed-ribbon measured at the positions indicated by the upper figure.

各部において大きな保磁力が観測されることなく、約 2000 J/m^3 の異方性エネルギーが得られた。(5-5)式より算定した限界コア径は 6 mm 程度となり、理論上コア径 6 mm までは磁気特性を劣化させることなく、コアが作製可能である。本測定では、結晶化による試料の脆弱化に起因するトロイダル成形時の機械的破断を避けるため (2.3 節)、若干の余裕を持たせ $D = 10 \text{ mm}$ としてコアを作製した。

作製した $D = 10 \text{ mm}$ コアの透磁率を $B_m = 0.1 \text{ T}$, $f = 0.1 \sim 1 \text{ MHz}$ の範囲で測定した。その結果を Fig.5-6(a)に示す。また、Fig.5-6(b)に文献[3]より抜粋したセンダストパウダーコアとアモルファスパウダーコアの透磁率の周波数特性を示す。各低透磁率コアの形状等を同論文[3]より抜粋し Table 5-1 に示す。なお、センダストおよびアモルファスパウダーコアの測定においては、 H_m は 5 mOe (0.4 A/m) に固定した初透磁率が評価されている。図中“Pressed Temp.”はアモルファスパウダーコアのホットプレス成形時の温度である。本実験で作製したコアおよびセンダスト、アモルファスパウダーコアとも 1 MHz 程度まではほぼ一定の透磁率を示しており、透磁率の周波数特性に関しては既存の低透磁率コアと同程度となった。



(a) Developed core



(b) Sendust and amorphous powder cores [3]

Fig.5-6 Relative or initial permeability of developed, Sendust powder, amorphous powder cores as a function of frequency.

Table 5-1 Specifications of the various low permeability cores [3] used for comparison of magnetic loss.

	Amorphous powder core	Gapped ferrite core	Sendust powder core	Developed core
Core size (mm)	Φ 30.3 × Φ 19.8 × 10	Φ 31.2 × Φ 20.5 × 10.1	Φ 27.4 × Φ 14.3 × 7.3	Φ 10.5 × Φ 10 × 5.0
B_s (T)	1.2	0.5	0.8	1.22
Magnetic pass (mm)	78.6	81.2	64.5	1.6
Cross section (mm ²)	52.6	54.3	48.0	32.3
Air-gap length (mm)	-	1.5	-	-
Permeability	125	124	102	230

5.3.2 磁気損失の周波数特性

次に、作製した $D = 10$ mm コアの磁気損失の周波数特性を評価した。測定条件は 5.3.1 節で示した透磁率の周波数特性の測定と同条件である。結果を Fig.5-7 に示す。比較のため、文献[3]より抜粋した他の代表的な低透磁率コアの損失値を同図に示した。なお、図中の黒の破線はうず電流損失の計算値である。また、 $f = 0.1$ MHz での各低透磁率コアの損失値とそれぞれの飽和磁化の値を Table 5-2 に示す。

Fig.5-6 より、作製したコアの損失値はうず電流損失の計算値と一致し、他の代表的な低透磁率コアと比較して十分な低損失が達成されていることが了解される。 $f = 0.1$ MHz の時の損失値 (Table 5-2) で比較すると、アモルファスやセンダストのパウダーコアおよびギャップ付きのフェライトコアの損失値よりも 80 % 強の低減が実現された。さらに、本研究で開発したコアはその飽和磁化がフェライトやセンダストと比較して 1.5~2.5 倍大きいことから、小型化にも有効である。5.3.3 節では、その一例として作製したコアの直流重畳特性を示す。

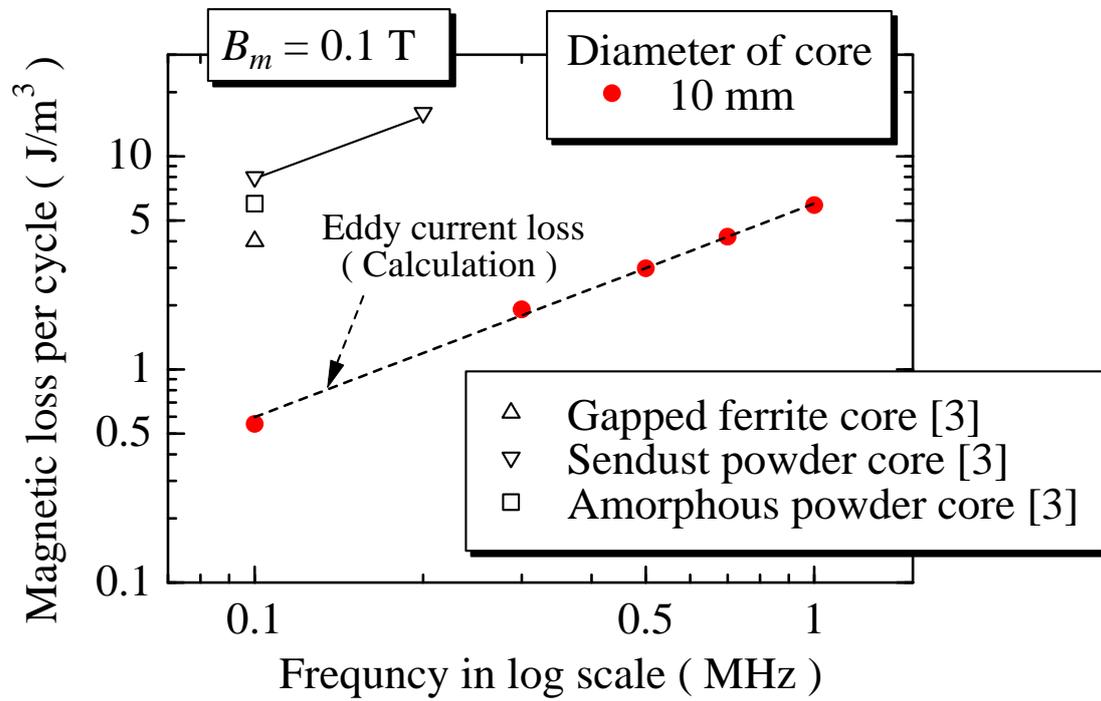


Fig.5-7 Magnetic loss of a developed core as a function of frequency, together with those for different types of cores with low permeability [3].

Table 5-2 Saturation magnetization, I_s , and magnetic loss at $f=0.1$ MHz for various cores with low permeability.

	Cores	I_s (T)	Loss (J/m^3)
Ferrite	Gapped-ferrite core	≈ 0.5	4
	Developed core	≈ 1.2	0.6
Fe-based	Sendust powder core	≈ 0.8	8
	Amorphous powder core	≈ 1.2	6

* $B_m = 0.1 \text{ T}$, $f = 0.1 \text{ MHz}$

Table 5-3 Specification of the ferrite core TDK H₃S.H₃S : High permeability material

Saturation flux density (T)	0.45
Electrical resistivity (Ω・m)	0.3
Magnetic length (mm)	75.0
Cross section (mm ²)	41.5
Relative permeability μ_r (Gap-less)	6000

5.3.3 直流重畳特性

5.3.1 および 5.3.2 節では動作点を B-H 平面上の原点とした対称波励磁で磁気特性を評価した。一方、チョークコイル用コアに代表される低透磁率コアは、直流重畳磁界下で動作するため、これらのコアへの応用を考慮すれば、直流重畳下での磁気特性を評価する必要がある。そこで、透磁率と磁気損失について直流重畳特性を評価した。磁気特性の比較のため、市販のギャップレス高透磁率フェライトリングコア (TDK H₃S) の磁路の一部にエアギャップを設け、本研究で作製したコアと同程度に透磁率を制御したギャップ付きフェライトコアを作製し、その直流重畳特性も測定した。H₃S の仕様を Table 5-3 に記す。

(a) 透磁率の直流重畳特性

作製した $D = 10$ mm コアの透磁率の直流重畳特性を Fig.5-8 に示す。測定条件は $B_m = 0.1$ T, $f = 0.1$ MHz とした。直流重畳磁界 H_{dc} は重畳磁界発生用巻線の電流値を制御することで 0~3100 A/m まで変化させた。

作製したコアは約 3000 A/m の H_{dc} までほぼ一定の透磁率を示した。 $H_{dc} = 3000$ A/m 付近の透磁率の低下は、 H_{dc} が磁気飽和領域に達し始めたためであると考えられる。この透磁率の減少が始まる重畳磁界値 H_{dc_lim} を比較すると、クリープ誘導型 Fe-Cu-Nb-Si-B コアの H_{dc_lim} は 2900 A/m、ギャップ付き H₃S の H_{dc_lim} は 1100 A/m 程度であり、作製したコアの H_{dc_lim} の方が約 2.5 倍大きくなった。本結果は作製したコアの飽和磁化が H₃S の飽和磁化の約 2.5 倍であることが反映されたも

のである。インダクタンス L およびコアの大きさを一定とした時、コイルに流すことができる最大の直流電流 I_{dc_max} は、 $\mu^{1/2}$ と H_{dc_lim} の積に比例する。作製したコアの H_{dc_lim} はギャップ付き H_3S コアの 2.5 倍であり、透磁率が同程度であれば、作製したコアにはギャップ付き H_3S コアの 2.5 倍の I_{dc_max} を流すことができる。逆に、 I_{dc_max} を一定とした時に、作製したコアはギャップ付き H_3S コアと比較してその磁路長を 2.5 分の 1 に低減できることを示唆しており、コアの小型化が達成できることが了解される。

Fig.5-9(a)に本実験で作製したコアの、(b)に 5.3.1 節および 5.3.2 節で示したセンダストおよびアモルファスのパウダーコアのヒステリシスループ[3]をそれぞれ示す。パウダーコアはいずれもループが全体的に丸みを帯びているのに対し、作製したコアのループはほぼ異方性磁界 H_A まで直線的である。丸みを帯びたループでは動作点 (H_{dc} の値) により透磁率が変化するため、回路設計の際不利になる場合があると考えられる。本研究で提案するコアは、直流重畳下で異方性磁界付近まで透磁率が一定であることを生かした回路設計も可能にすると期待される。

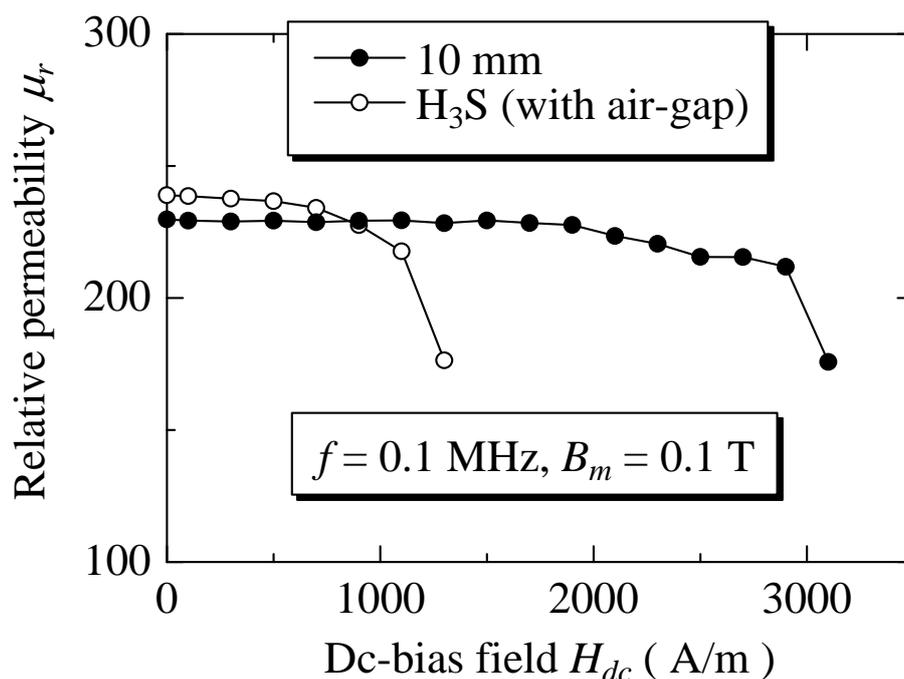
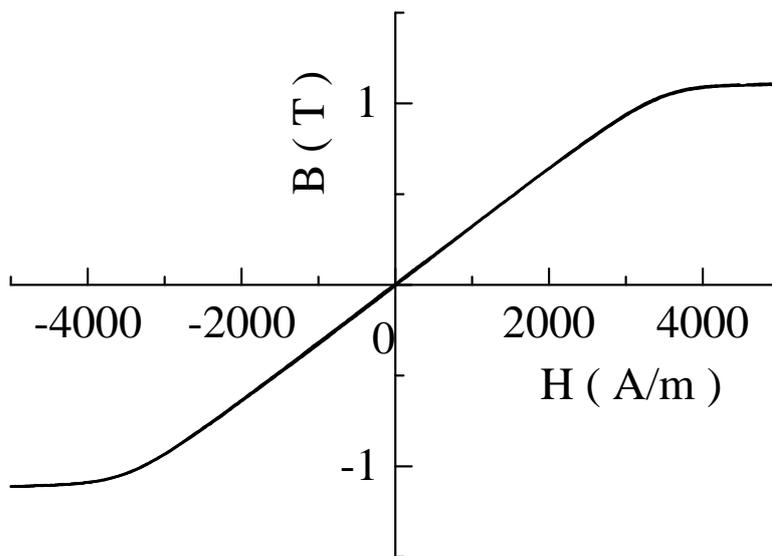
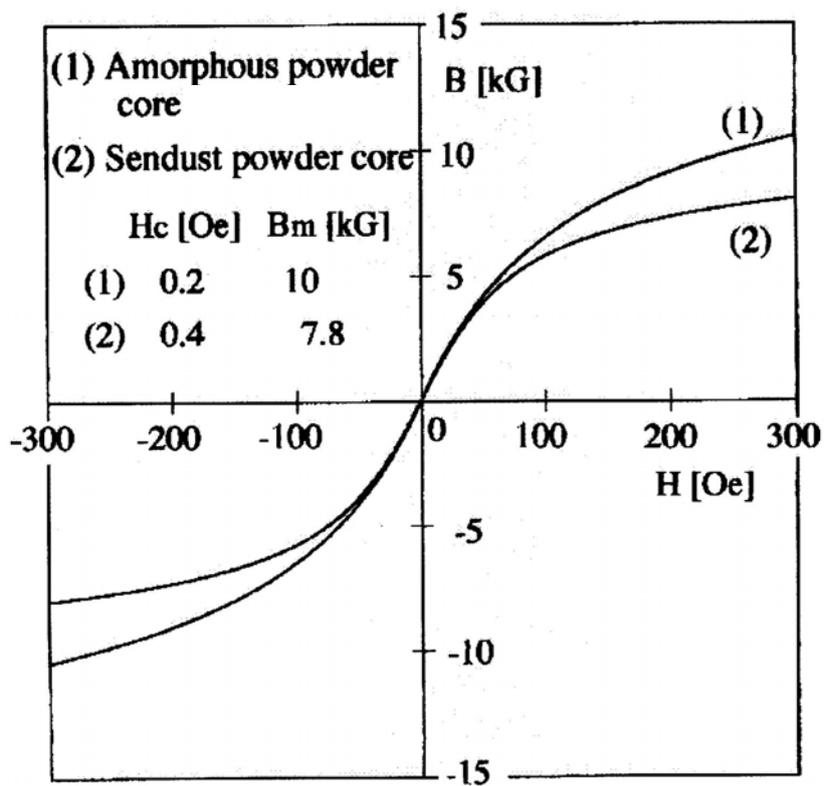


Fig.5-8 Dependence of relative permeability, μ_r , on dc-bias field, H_{dc} .



(a) Developed core



(b) Sendust and amorphous powder cores

Fig.5-9 Dc-hysteresis loops of developed core (a), Sendust and amorphous powder cores (b) [3].

(b) 磁気損失の直流重畳特性

次に、作製したコアの磁気損失の直流重畳特性を評価した。その結果を Fig.5-10 に示す。透磁率の直流重畳特性と同様に、ギャップ付き H₃S フェライトコアの磁気損失の直流重畳特性を併記した。測定条件は透磁率の直流重畳特性の評価と同様に $B_m = 0.1 \text{ T}$, $f = 0.1 \text{ MHz}$ とした。作製したコアの損失値は、低直流重畳磁界側でわずかに電流損失の計算値と一致し、ギャップ付き H₃S コアと比較して低損失を示した。なお、Table 5-2 にて示したギャップ付きフェライトコアの損失値と Fig.5-10 中に示したギャップ付き H₃S コアの損失値との相違は、Table5-2 にて示した損失値が文献値でありコア作製条件が異なるためである。透磁率の場合と同様、 $H_{dc} = 3000 \text{ A/m}$ 程度になると損失が急増し、磁気特性の劣化がみられた。作製したトロイダルコアの直流ヒステリシスループを Fig.5-11 に、 $H_{dc} = 1500 \text{ A/m}$ および $H_{dc} = 3100 \text{ A/m}$ を動作点とした時の交流ヒステリシスループを Fig.5-12 にそれぞれ示す。直流ヒステリシスループより、作製したコアは $H_{dc} = 3000 \text{ A/m}$ 付近から磁気飽和領域に達し始めると予測される。実際に交流ループに着目すると、 $H_{dc} = 1500 \text{ A/m}$ における交流ループは保磁力が極めて小さく、低ヒステリシス損失かつ $B_m = 0.1 \text{ T}$ まで一定の透磁率を示すのに対し、 $H_{dc} = 3100 \text{ A/m}$ の時の交流ループは、若干のヒステリシスと透磁率の低減が了解され、飽和領域に達していることが了解される。すなわち、 $H_{dc} = 3000 \text{ A/m}$ 付近で作製したコアは磁気飽和に達し、透磁率の低下および磁気損失の増加を引き起こしたと解釈できる。

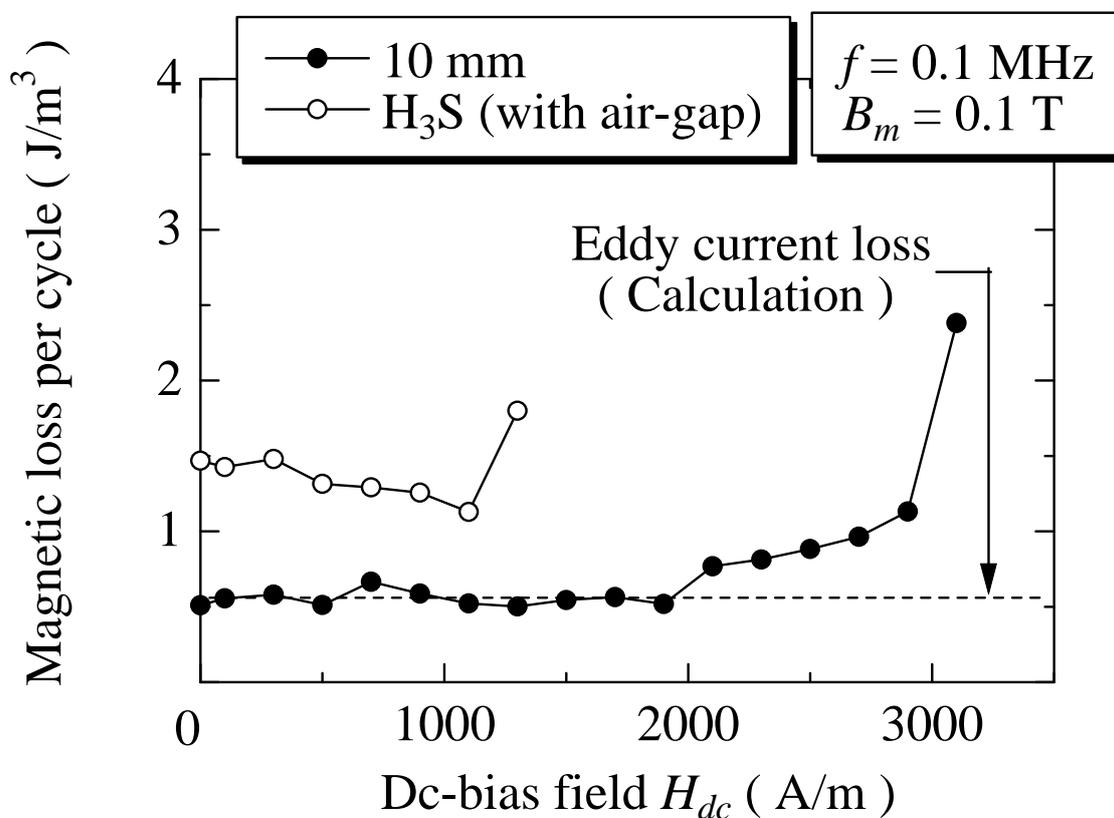


Fig.5-10 Dependence of magnetic loss on dc-bias field, H_{dc} .

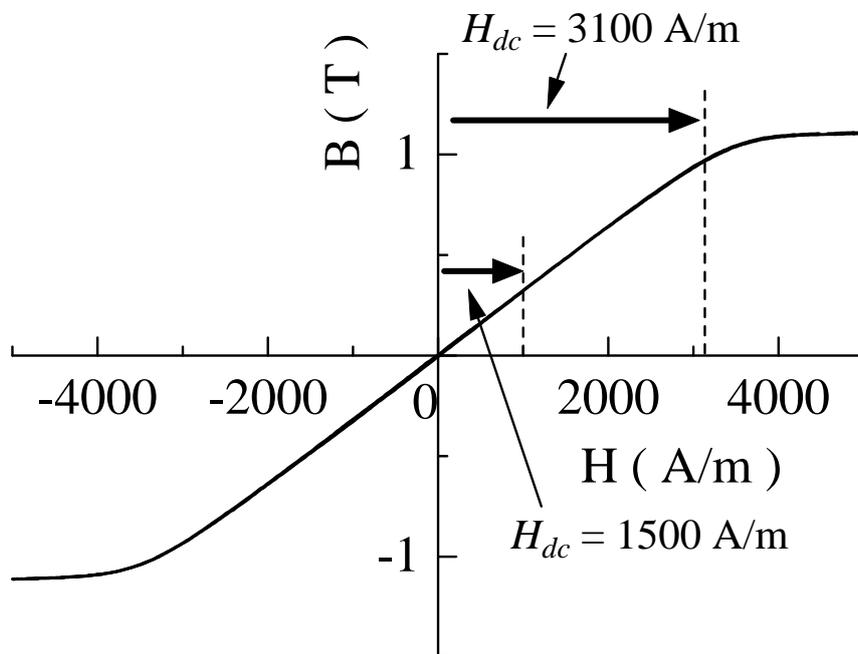


Fig.5-11 Dc-hysteresis loops of a ribbon and a core. The core was made from the ribbon. Shape of the loop is changed by formation of the ribbon into the toroidal core.

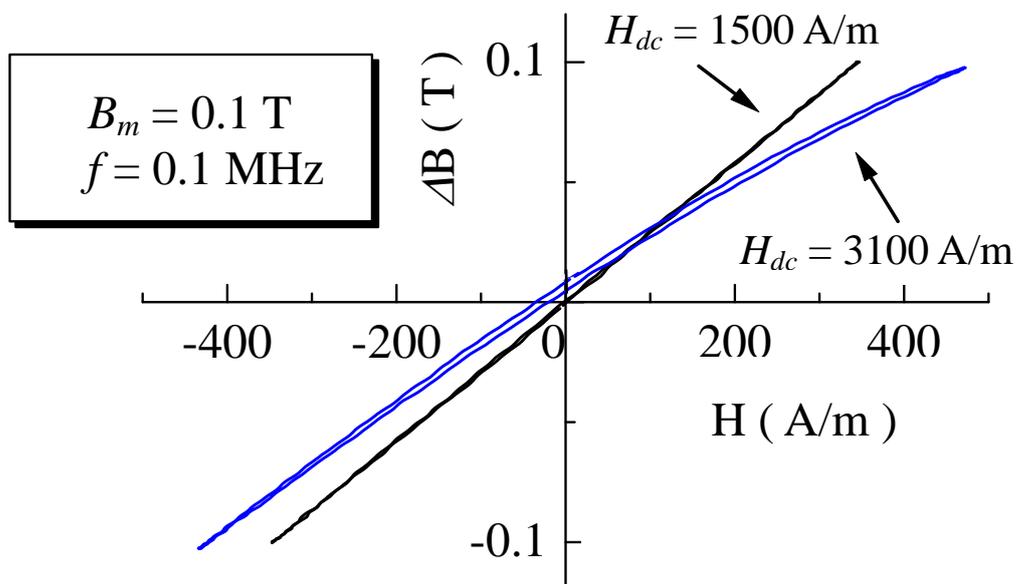


Fig.5-12 Ac-hysteresis loops measured under dc-bias fields of 1500 and 3100 A/m.

5.4 コアの小型化の可能性

5.3 節において、本研究で作製したコアは磁気特性において他の代表的な低透磁率コアの特性を凌駕することを示した。本章では更なるコアの小型化の可能性を検証するために、連続焼鈍により異方性を付与した幅 2 mm の $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{15.5}\text{B}_7$ 薄帯を用いてコア径 3 mm の小型コアを作製し、その磁気特性を評価した。

(a) $D = 3$ mm の小型コアの磁気特性

作製したコアをサイズ比較のため 1 円玉とともに Fig.5-13 に示す。作製したコアは 1 円玉よりも十分小さいものとなっている。また、トロイダルコア成形において、結晶化した試料の脆弱化による機械的な破断は $D = 3$ mm においては起こらなかった。

$D = 3$ mm のコアの透磁率および磁気損失を $B_m = 0.1$ T, $f = 0.1 \sim 3$ MHz の範囲で測定した。 D/D_c は 1.1 である。その結果を Fig.5-14 に示す。損失の比較のために、Fig.5-6 に示した $D = 10$ mm のコアの損失値、他の代表的な低透磁率コアの損失値[3]および電流損失の計算値をそれぞれ同図に示した。透磁率は 1 MHz まではほぼ一定であり、1 MHz を超えたあたりから若干減少した。また磁気損失は、Fig.5-6 で示した $D = 10$ mm のコアおよび電流損失の計算値と比較して若干増加したものの、他の代表的な低透磁率コアよりも低損失を示した。これらのことから $D = 3$ mm という小型なコアにおいても、本研究で開発した低透磁率軟磁気コア用材料は、低透磁率・低磁気損失をともに満足する高性能なコア作製を可能にすることが明らかとなった。

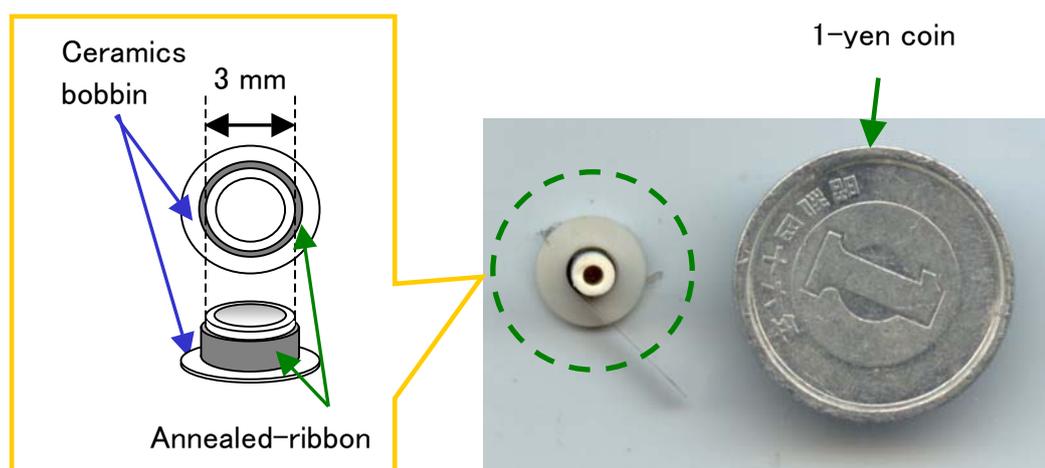


Fig.5-13 Scanner image of a developed core with $D = 3$ mm.

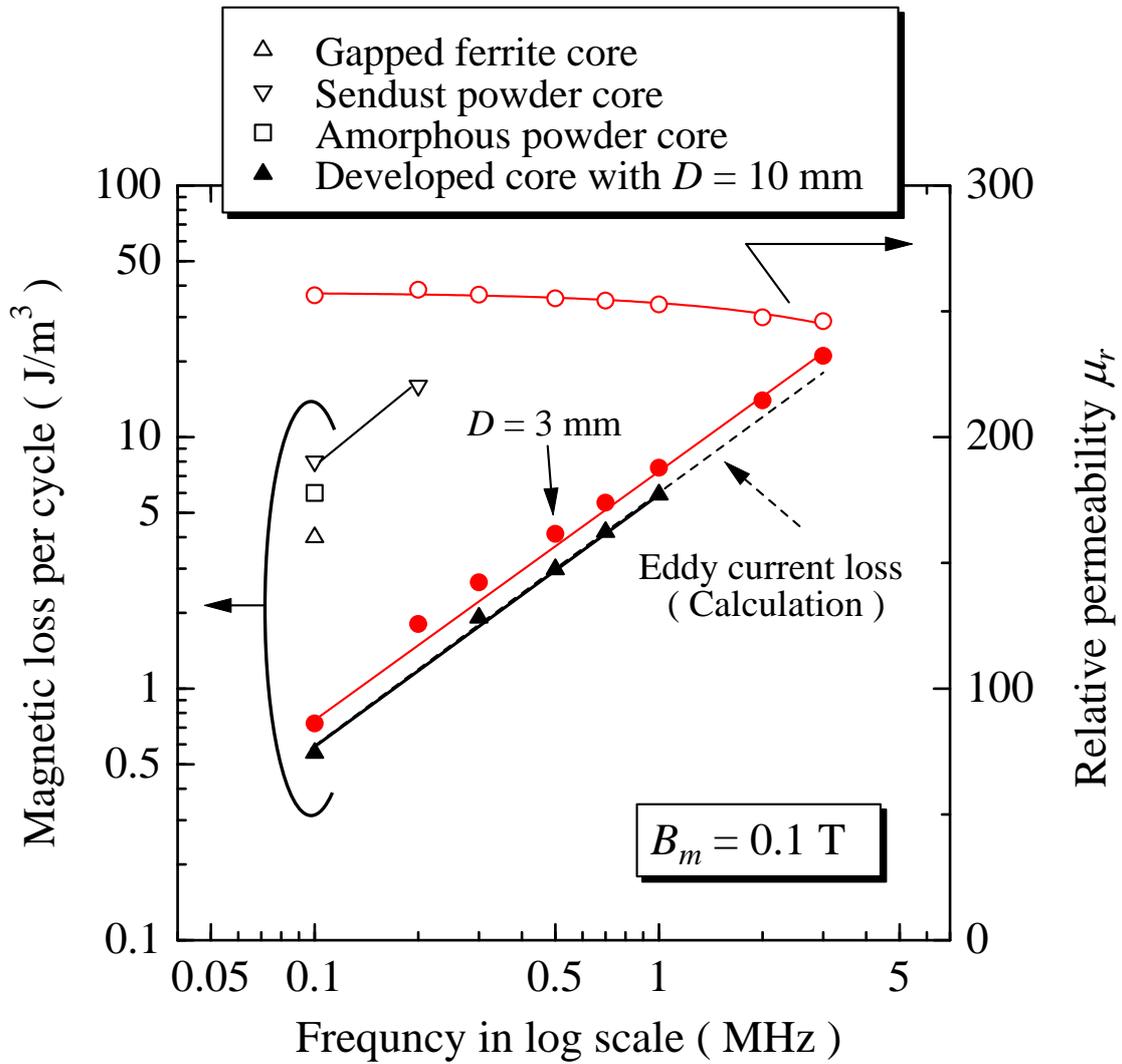


Fig.5-14 Magnetic loss and relative permeability, μ_r , of a developed core with $D = 3$ mm as a function of frequency, together with results for different types of cores with low permeability [3].

5.5 コアの高温特性

現在、機器の小型化・高密度実装化が急速に進行している。これに伴い機器内の温度が上昇する傾向にあるが、一般的な電気・電子素子はその動作温度に限界が存在するため、冷却機構が必要不可欠となり小型化を妨げる要因の一つとなっている。本研究にて作製したコアは、5.3節にて示したように、低損失であるため熱の発生を低減できると考えられる。また、材料自身のキュリー温度が高いため、ある程度の高温下においても動作可能であると考えられる。しかしながら、温度によって異方性の大きさが変化することが予測されるため、高温時では室温時と比較して透磁率が変化する可能性がある。以上のことを考慮し、本節ではクリーブ誘導型低透磁率コアの高温磁気特性を評価する。

5.5.1 飽和磁化，異方性エネルギーの温度依存性

先に述べたように、異方性の大きさが温度の影響を受け変化することが予測されるため、高温下では透磁率が変化することが推測される。そこで、異方性エネルギーの温度依存性を評価した。また、(2-3)式で示したように、試料の飽和磁化も透磁率に影響を与えるため、飽和磁化の温度依存性も併せて評価した。その結果を Fig.5-15 に示す。Fig.5-15 中では異方性エネルギー，飽和磁化とも室温での値 ($K_{uc/RT}$, I_s/RT) で規格化して示している。ここで添字の RT は室温における物性値であることを示している。Fig.5-15 に示されるように、温度の増加に伴い異方性エネルギー，飽和磁化とも減少した。また、その減少の割合は、異方性エネルギーの方が大きくなった。

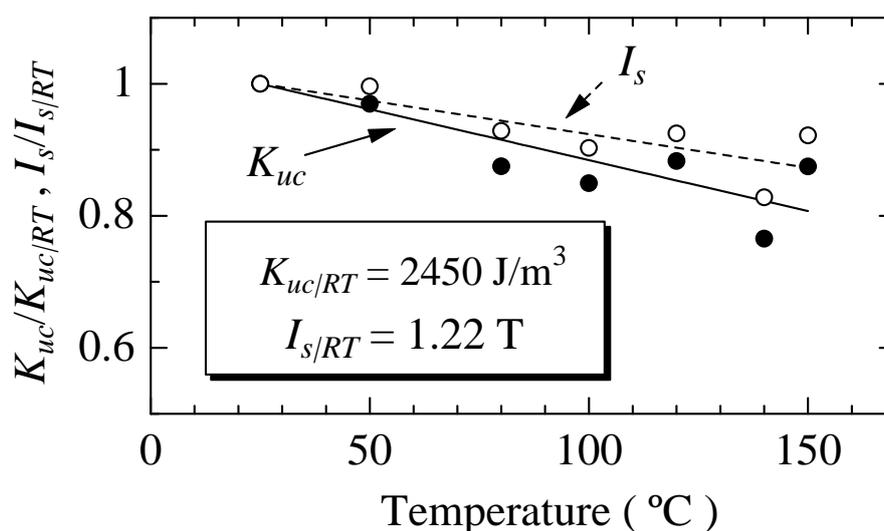


Fig.5-15 Reduced anisotropy energy, $K_{uc}/K_{uc/RT}$, and saturation magnetization, $I_s/I_{s/RT}$, of a prepared core as a function of temperature.

(2-3)式に示されるように、透磁率は飽和磁化 I_s の2乗に比例し、異方性エネルギー K_{uc} に反比例する。そこで、 K_{uc} と I_s^2 の関係を検証するため、 K_{uc} を I_s の関数として Fig.5-16 にプロットした。図中に示した破線が $K_{uc} \propto I_s^2$ 成立時の傾きとなる。実験により得られた傾きと破線の傾きは一致しており、 K_{uc} が I_s^2 に比例することが明らかとなった。本結果より $K_{uc} \propto I_s^2$ の関係が温度によらず保たれることが明らかとなった。このことから、作製したコアの透磁率は温度の影響を受けず一定値を示すと推測される。

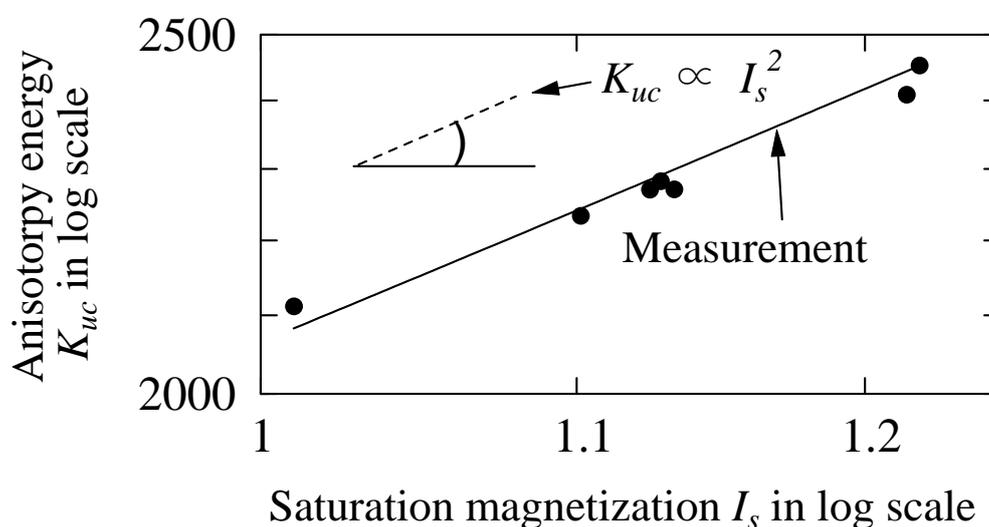


Fig.5-16 Relationship between creep-induced anisotropy energy, K_{uc} , and saturation magnetization, I_s , of a prepared core.

5.5.2 透磁率および磁気損失の温度依存性

(a) 限界コア径に温度が与える影響

5.2.2 節で述べたように、限界コア径 D_c は (5-5) 式において等号成立時のコア径 D の値である。5.5.1 節に示されるように、異方性エネルギーが温度とともに変化することに加えて、飽和磁気歪み定数 λ_s 、ヤング率 Y も温度に伴って変化することから、 D_c は温度により変化すると考えられる。 D_c の温度による変化を検討するため、5.5.1 節で得られた K_{uc} の温度依存性、Twarowski らが報告した $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{15.5}\text{B}_7$ ナノ結晶薄帯における λ_s の温度依存性[4]、鉄鋼のヤング率 Y_s の温度依存性[5]をそれぞれ Fig.5-17 に示す。 K_{uc} 、 λ_s 、 Y_s はそれぞれ室温の時の値で規格化した。Fig.5-17 より K_{uc} 、 λ_s 、 Y_s とも温度の増加に伴い減少することが了解される。Fig.5-16 には鉄鋼のヤング率を示したが、一般的な金属材料は温度の増加に伴いヤング率は減少する[5]ことから、本実験で用いた試料のヤング率も温度の増加に伴い減少すると推測される。

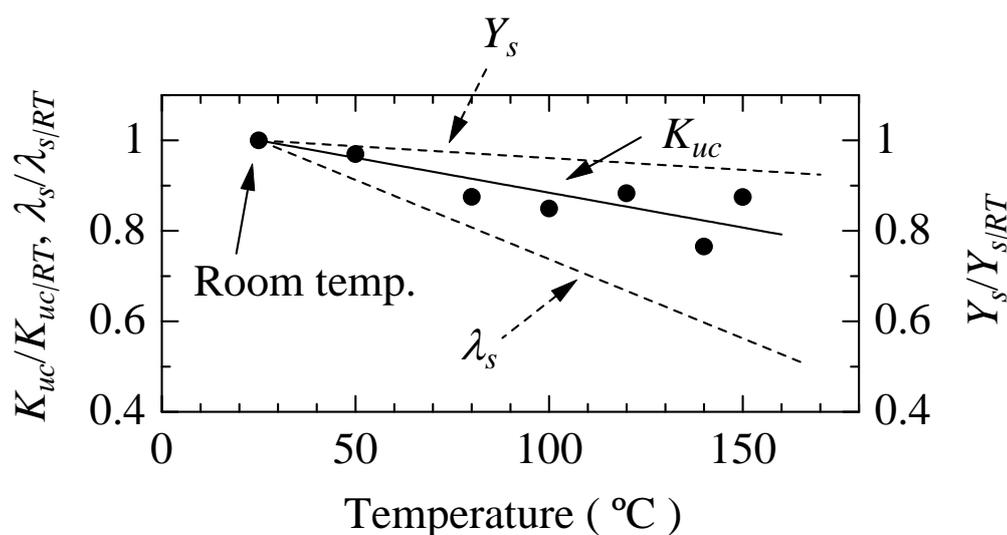


Fig.5-17 Reduced anisotropy energy, $K_{uc}/K_{uc/RT}$, of a developed core, saturation magnetostriction, $\lambda_s/\lambda_{s/RT}$, and Young modulus of Iron-Steel, Y_s , as a function of temperature. The temperature dependences of λ_s and Y_s were quoted from references [4] and [5], respectively.

室温での限界コア径の値を $D_{c/RT}$ と定義すると,

$$D_{c/RT} = \frac{3 \cdot \lambda_{s/RT} \cdot Y_{/RT} \cdot d}{2 \cdot K_{uc/RT}} \quad (5-6)$$

と表記できる. 温度により試料の厚さ d が変化しないと仮定すると, 温度 T における限界コア径 $D_{c/T}$ と $D_{c/RT}$ の比は,

$$\frac{D_{c/T}}{D_{c/RT}} = \frac{\frac{3 \cdot \lambda_{s/T} \cdot Y_{/T} \cdot d}{2 \cdot K_{uc/T}}}{\frac{3 \cdot \lambda_{s/RT} \cdot Y_{/RT} \cdot d}{2 \cdot K_{uc/RT}}} = \frac{\lambda_{s/T} \cdot Y_{/T}}{K_{uc/T}} \cdot \frac{K_{uc/RT}}{\lambda_{s/RT} \cdot Y_{/RT}} \quad (5-7)$$

となる. Fig.5-17 と(5-7)式を用いて, $D_{c/T}/D_{c/RT}$ の温度依存性を算出すると Fig.5-18 となり, 限界コア径は温度の増加に伴って減少すると予測される.

本実験では, 高温下で限界コア径の変化が推測されることを考慮し, コアの高温特性を $D/D_{c/RT}$ をパラメータとして評価した.

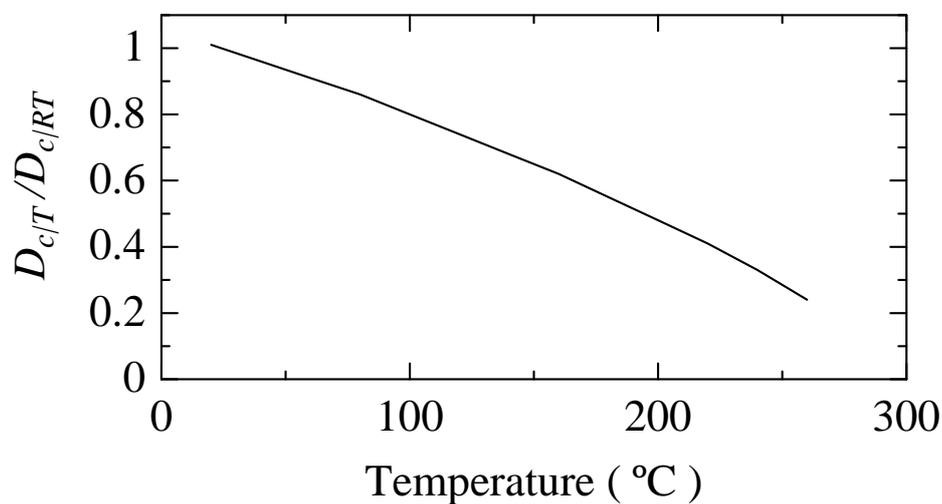


Fig.5-18 Relationship between $D_{c/T}/D_{c/RT}$ and temperature calculated from Fig.5-16 and Eq. (5-7).

(b) $D > D_{c/RT}$ のコアの高温特性

コア径 D が室温での限界コア径 $D_{c/RT}$ よりも大きい $D/D_{c/RT} = 1.17$ のコアについて、 $B_m = 0.1$ T, $f = 0.5 \sim 1$ MHz の条件で、透磁率および磁気損失の温度依存性を評価した。その結果を Fig.5-19 に示す。透磁率・損失とも本研究での最高測定温度である 250 °C までほぼ一定値となった。透磁率に関しては、5.5.1 節にて示したように、温度によらず $K_{uc} \propto I_s^2$ の関係が保たれることが反映された結果であると了解される。また損失に関しては、5.5.2 節(a)での議論から D_c が温度の増加により減少することが予測され、 $D > D_c$ の関係が温度によらず保たれたためであると考えられる。すなわち、 $D > D_{c/RT}$ を満足するコアでは、温度の影響によらず透磁率および損失は一定値を示すことが明らかとなった。

フェライト材料は動作温度で最も低損失を示すように設計・作製されるが、本実験で作製したコアでは温度に依存せず透磁率・磁気損失ともほぼ一定となるため、回路設計の際に動作温度の影響を考慮する必要はない。さらに、一般的な高周波用フェライトである Mn-Zn や Ni-Zn フェライトがキュリー温度に達する温度（約 200 °C）においても作製したコアは動作可能であり、高温下においても $D > D_{c/RT}$ の条件下では優れた磁気特性を示すことが明らかとなった。

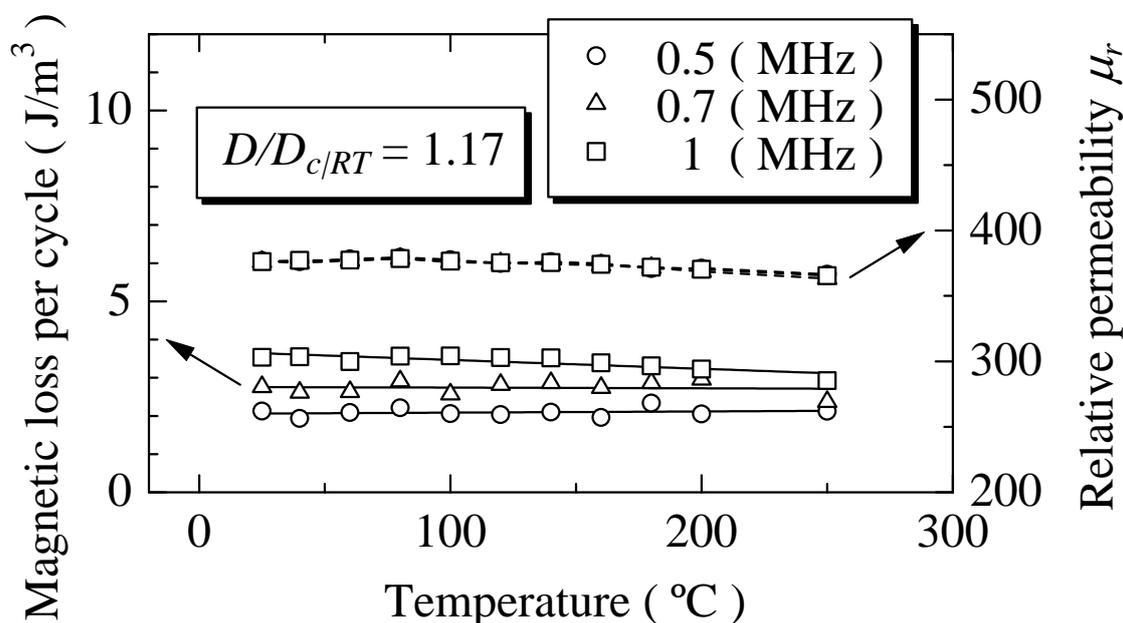


Fig.5-19 Magnetic loss and relative permeability, μ_r , at $B_m = 0.1$ T of a prepared core with $D/D_{c/RT} = 1.17$ as a function of temperature.

(c) $D < D_{c/RT}$ のコアの高温特性

次に、コア径 D が室温での限界コア径 $D_{c/RT}$ よりも小さい $D/D_{c/RT} = 0.32$ のコアについて、 $B_m = 0.1$ T, $f = 0.5 \sim 1$ MHz の条件で、磁気損失および透磁率の温度依存性を評価した。その結果を Fig.5-20 に示す。透磁率はほぼ 300 °C 付近まで一定であった。一方、磁気損失は温度の影響が顕著に現れ、温度の増加に伴い、損失が減少する傾向が得られた。300 °C 付近ではその損失値が、Fig.5-19 に示した $D > D_{c/RT}$ のコアで得られた値に近づいた。これは、5.5.2 節(a)で議論したように、温度の増加に伴い D_c が減少することに起因すると考えられる。すなわち、温度の上昇に伴い $D/D_{c/T}$ が増加し、損失の減少が飽和し始める 200 °C 付近で $D/D_{c/T}$ が 1 を超えたため、 $D > D_{c/RT}$ の時の損失値に近づいたと考えられる。

以上の結果より、本研究で作製したコアは $D < D_{c/RT}$ 、 $D < D_{c/RT}$ いずれの場合においても温度の上昇による磁気特性の劣化はないことが明らかとなった。

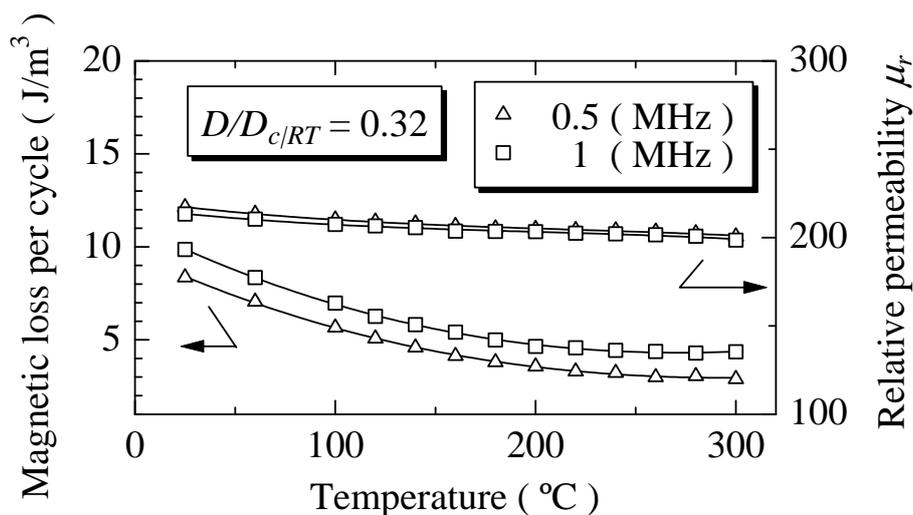


Fig.5-20 Magnetic loss and relative permeability, μ_r , at $B_m = 0.1$ T of a prepared core with $D/D_c = 0.32$ as a function temperature.

5.6 まとめ

本章では第 3, 4 章の結果を受け, クリープ誘導磁気異方性を付与した長尺のナノ結晶薄帯を用いてトロイダルコアを実際に作製した. また, 作製したコアの磁気特性を評価し, 既存の低透磁率コアよりも優れた磁気特性を有することを示した. 更に, 作製したコアの高温での磁気特性を評価し, フェライト材料に比べ高温で使用可能であることを示した. 以下に得られた知見を示す.

- (1) 薄帯をトロイダルコアに成形した際の機械的応力と磁気歪みの相互作用により, 良好な磁気特性を維持できる限界のコア径が存在することが明らかとなった. 作製したコアの径が限界コア径よりも大きい時は, コアの損失値はうず電流損失の計算値と一致し, 理論限界までの低損失化を達成できた. 一方, コア径が限界コア径よりも小さい時は, コア径の減少に伴って急激に磁気損失が増加することが明らかとなった. また, コア損失値がうず電流損失の計算値と一致することおよび理論計算より得られた限界コア径の前後で急激に磁気特性が変化することから, 試料内に良質な一軸異方性が形成されていると考えられる.
- (2) 最適な熱処理条件を施した薄帯にて作製したトロイダルコアの磁気特性を評価した. その結果, 透磁率は 1 MHz まで一定な値を示し, 損失は 0.1~1 MHz の範囲でうず電流損失の計算値に一致する低い値を示した. 他の代表的な低透磁率コアの損失値と比較して, 最大磁束密度 0.1 T, 励磁周波数 0.1 MHz において, 約 8 割強の損失低減が達成された. また, 作製したコアの飽和磁化が高いことから, 現在広く用いられているギャップ付きのフェライトコアよりも 2.5 分の 1 程度に小型化が可能である.
- (3) 直流重畳下での磁気特性を評価したところ, 異方性磁界付近までほぼ一定な透磁率および損失値が得られた. また磁気特性が劣化する重畳磁界の値は, 本研究で用いた材料の飽和磁化の大きさが反映されて, ギャップ付きのフェライトコアよりも約 2.5 倍大きくなった. さらに, コア径 3 mm の小型な低透磁率・低磁気損失コアを実現した.
- (4) コア径が室温における限界コア径より大きいコアを作製し, 高温特性を評価したところ, 300 °C 付近まで透磁率・損失とも一定値を示し, 優れた磁気特性が得られた. 故意に限界コア径よりも小さなコア径のコアを作製し, その高温特性を評価したところ, 損失は温度増加に伴って減少し, 200 °C 付近から損失の減少が飽和した. この現象は, 限界コア径が温度の増加とともに減少し, 200 °C 付近でコア径と限界コア径の大小関係が反転することで説明できる. 一方, 透磁率に関しては, 両コアとも温度によらずほぼ一定の値を示した. これはクリープ誘導磁気異方性が温度とともに飽和磁化の 2 乗に比例して変化することで説明される.

Table 5-4 Comparison of magnetic properties and productivity between a gapped ferrite core and a toroidal core with creep-induced anisotropy.

	Ferrite core	Developed core
Magnetic properties		
Saturation magnetization		○
Curie temperature		○
Loss ($B_m = 0.1$ T, $f = 0.1$ MHz)		○
High temperature properties		○
Dc-bias characteristic		○
Productivity		
Reduction in permeability	○	
Easiness of fabrication	○	
Material cost	○	

本研究で作製したコアに関する検討から得られた結果をまとめ、各種特性をギャップ付きフェライトコアと比較して Table 5-4 示す。本研究を通じ、磁気特性の面でギャップ付きフェライトコアを凌駕するコアが作製できた。今後、生産面が改善できれば、飛躍的な電力損失の低減とコアの小型化に貢献できると考えられる。

近年は機器の動作周波数が上昇し、GHz 帯域で動作するデバイスへの要求が高まっている。現在は、電気抵抗率が高く結晶磁気異方性を有する六方晶フェライト等が使用されている。一般に磁気特性はフェライト系材料よりも金属系材料の方が良好であるため、金属系材料をより高周波側で動作させることができれば機器の飛躍的な高性能化が望める。提案したコアの使用限界周波数をより高周波側に移行させることができれば、さらに応用の幅が広がると考えられる。

参考論文

- [1] F. E. Luborsky, J. J. Becker, *IEEE Trans. Magn.*, **15** (1979) 1939.
- [2] 例えば, 太田 恵造, 磁気工学の基礎 II, 共立出版, (1973) 246.
- [3] M. Yagi, I. Endo, I. Otsuka, H. Yamamoto, R. Okuno, H. Koshimoto, A. Shintani, *J. Magn. Magn. Mater.*, **215-216** (2000) 284.
- [4] K. Twarowski, M. Kuzminski, A. Slawska-Waniewska, H.K. Lachowicz, G. Herzer, *J. Magn. Magn. Mater.*, **140-144** (1995) 449.
- [5] 日本機械学会, 金属材料の弾性係数, 明善印刷, (1980) 19.