

## ナノ結晶材料を用いた磁性コアの特性評価

### CHARACTERIZATION OF MAGNETIC CORES USING NANOCRYSTALLINE MATERIALS

中田 恭輔<sup>#</sup>, 生駒 直弥, 虫邊 陽一, 徳地 明  
Kyosuke Nakata <sup>#</sup>, Naoya Ikoma, Yoichi Mushibe, Akira Tokuchi  
Pulsed Power Japan Laboratory Ltd. (PPJ)

#### Abstract

Pulse transformers are often used in accelerators to generate high-voltage, high-current pulses of more than 100 kV. In order to reduce the size of the pulse transformer, a high saturation magnetic flux density and a high angular ratio are required for the magnetic core material. Recently, magnetic cores made of nanocrystalline materials have superior properties compared to other materials, but their properties differ depending on the manufacturing process and the manufacturer. In this presentation, the basic properties and B-H curves and losses of several types of nanocrystalline materials were evaluated for each core when AC and pulse voltages are applied.

#### 1. はじめに

キッカー電磁石電源やクライストロンモジュレータをはじめとする加速器の電源には、高電圧を出力するパルス電源を必要とするものが多い。高電圧のパルスを発生させる電源方式はいくつか考えられるが、一次側と二次側を電氣的に絶縁でき、信頼性が高いパルストランスを用いる手法が一般的である。パルストランスはほとんどの場合、漏れ磁束を少なくするため磁性コアを用いる。1回巻きの一次コイルに電圧  $V[V]$ 、パルス幅  $t_w[s]$ の矩形パルスを印加したとき、飽和磁束密度  $B_m[T]$ 、残留磁束密度  $B_r[T]$ と断面積  $s[mm^2]$ の磁性コアが飽和しない条件は以下の式で表される。

$$s > \frac{1}{B_m + B_r} \cdot V \cdot t_w \quad (1)$$

上式より  $B_m$ と  $B_r$ が高いほど  $s$ を小さくできることがわかる。 $B_m$ と  $B_r$ は、磁性コアの材質によって異なるが、高いものでも1.5程度である。一般的に  $B_m$ が高いものは損失が大きく、低いものは損失が小さいという特性を持つ。また、それらの特性は磁性コアに印加する磁束密度  $B[T]$ と磁界  $H[A/m]$ の関係の特性(以下 B-H 特性)より読み取ることができる。この特性は印加電圧の直流や交流、周波数といった条件により変化する。 $s$ は材質による制約を持たないが、 $s$ を大きくするとパルストランス全体のサイズが大きくなってしまふ。

近年登場したナノ結晶材料を用いた磁性コアは、他の材質と比較したとき高い  $B_m$ を持ち、同じくらいの  $B_m$ を持つ従来の素材と比較して損失が小さくなっている。しかし、製作の過程や製造元により各特性が異なっている。本発表では、製作過程や製造元の異なる3種類のナノ結晶材料を用いた磁性コアにおける交流電圧やパルス電圧印加時の B-H 特性と損失を評価したので報告する。

#### 2. 評価した磁性コア

Table 1 に示す3種類のナノ結晶材料を用いたトロイダルコアの特性を評価した。製品 A、C は共に高

角型比の特徴を持つが、製造会社が異なっている。製品 A、B は、製造会社は同じだが、それぞれ高角型比、低損失と特徴が異なっている。

Table 1: The List of Nanocrystalline Magnetic Core Tested

	Product A	Product B	Product c
Outer diameter	153	153	153
Inner diameter	89	89	83
Thickness	25	25	28
Feature	Company A High squareness ratio	Company A Low loss	Company B High squareness ratio

#### 3. 実験方法

##### 3.1 500Hz 交流電圧印加実験

500Hz の交流電圧を3種類の磁性コアに印加し、磁性コアにかかる電圧  $V_c[V]$ と電流  $I_c[A]$ を測定する実験を行った。Figure 1 に実験時の配線図を示す。また、測定した  $V_c$ と  $I_c$ から下記式を用いて磁束密度  $B[T]$ 、磁界  $H[A/m]$ 、磁性コアに入る磁気エネルギー  $E[J]$ を算出した。ただし、 $s[mm^2]$ は磁性コアの断面積であり、 $r[m]$ は磁性コアの外径と内径の幾何平均をとった半径である

$$B(t) = \frac{1}{s} \int V_c(t) dt \quad (2)$$

$$H(t) = \frac{I_c(t)}{2\pi r} \quad (3)$$

$$E(t) = \int I_c(t) \cdot V_c(t) dt \quad (4)$$

<sup>#</sup> nakata@myppj.com

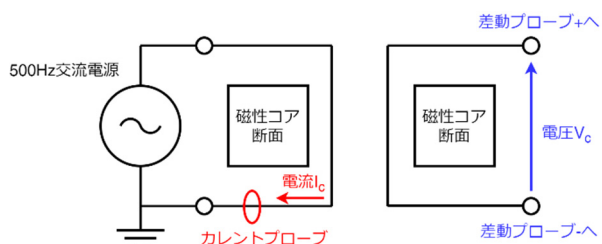


Figure 1: Wiring diagram for the experiment of applying 500Hz AC voltage.

### 3.2 パルス電圧印加実験

続いて 800V、2.0 $\mu$ s の矩形パルス電圧を 3 種類の磁性コアに印加し、磁性コアにかかる電圧  $V_c$ [V]と電流  $I_c$ [A]を測定する実験を行った。磁性コアに加えるバイアス電流は 1.5A で固定とした。Figure 2 に実験時の配線図を示す。また、測定した  $V_c$ と  $I_c$ から(2)~(4)式を用いて磁束密度  $B$ [T]、磁界  $H$ [A/m]、磁性コアに入る磁気エネルギー  $E$ [J]を算出した。

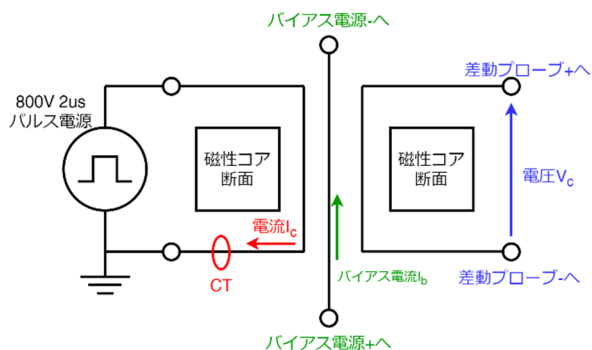


Figure 2: Wiring diagram for pulse voltage application experiments.

## 4. 実験結果

### 4.1 500Hz 交流電圧印加実験結果

測定した磁性コアにかかる電圧  $V_c$ [V]と電流  $I_c$ [A]の波形を Fig. 3 に示す。Figure 3 より、製品 A と C の電圧電流波形が似ていることがわかる。

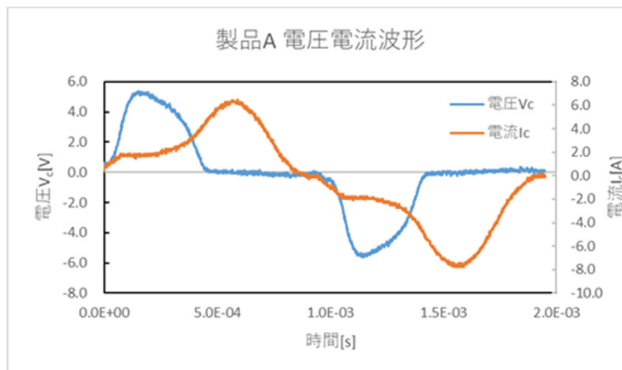
また、測定した  $V_c$ と  $I_c$ から(2)~(4)式を用いて算出した B-H 特性を Fig. 4、E-t 特性を Fig. 5 に、Fig. 4、5 より得られた磁性コアの特性を Fig. 6 に示す。

Figure 4 より製品 A、C は  $B_r$ が製品 B に比べて高く、角型比の大きい四角型の B-H 特性を取ることがわかる。また、H の変化に対する B の立ち上がり、立下りが急峻である。製品 B は  $B_r$ が低く、H の変化に対する B の立ち上がり、立下りが緩やかである。

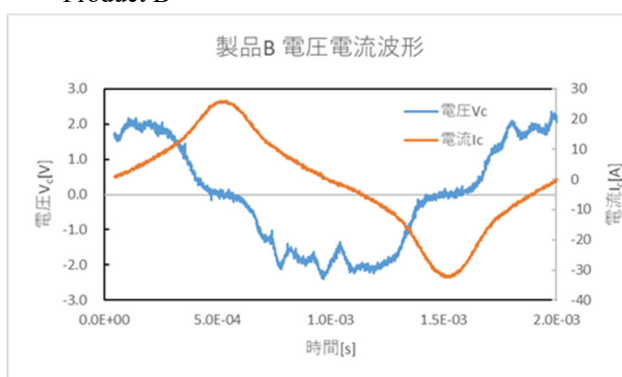
Figure 5 は磁性コアに印加される磁気エネルギー  $E$  を縦軸、時間  $t$  を横軸に取ったグラフである。最初の 4 分の 1 周期では製品 B に一番多くエネルギーが入力されているが、半周期立つ頃には 85%程度のエネルギーが

出力されている。それに対し、製品 A と C は出力されるエネルギーがほとんどなく、入力されたエネルギーのほとんどを損失してしまっていることがわかる。

- Product A



- Product B



- Product C

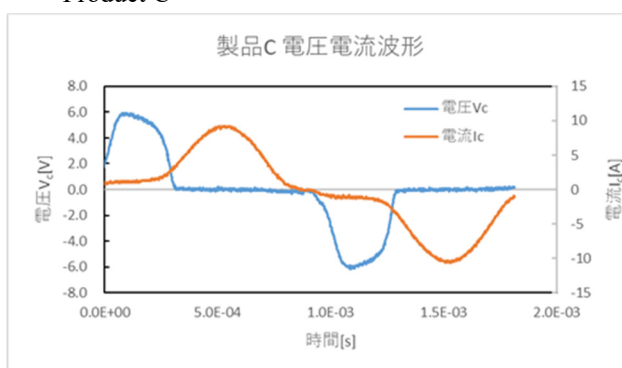


Figure 3: Voltage and current waveform applied to each nanocrystalline magnetic core.

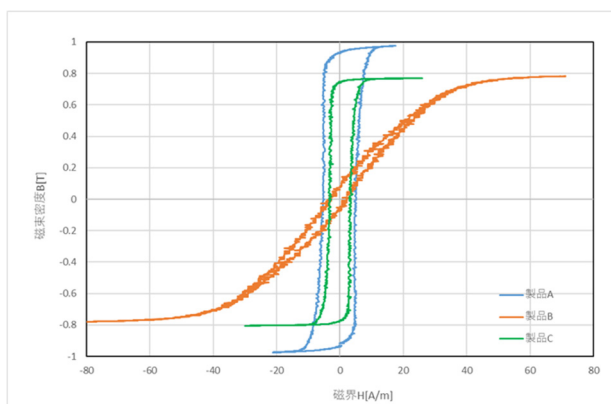


Figure 4: 500Hz AC B-H characteristics of nanocrystalline magnetic cores.

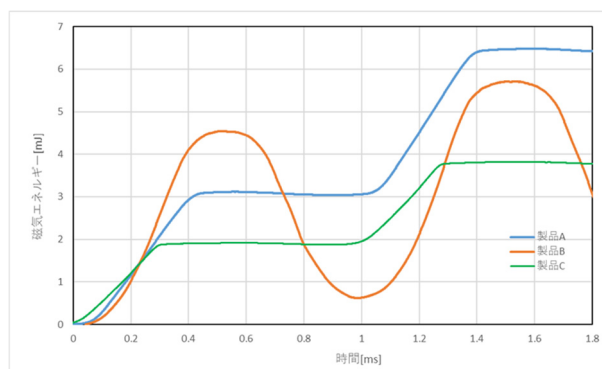


Figure 5: 500Hz AC magnetic energy properties of nanocrystalline magnetic cores.

	製品A	製品B	製品C
飽和磁束密度[T]	0.98	0.78	0.77
保持力[A/m]	5.1	3.1	3.4
残留磁束密度[T]	0.93	0.06	0.75
半周期辺りの損失 [mJ]	3.0	0.62	1.9
B-H特性の特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>立ち上がりが急</li> <li>カーブに囲まれた面積が大きい</li> <li>残留磁束密度が大きい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>立ち上がりが緩やか</li> <li>カーブに囲まれた面積が小さい</li> <li>残留磁束密度が小さい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>立ち上がりが急</li> <li>カーブに囲まれた面積が大きい</li> <li>残留磁束密度が大きい</li> </ul>

Figure 6: Experimental results of applying 500Hz AC voltage.

#### 4.2 パルス電圧印加実験結果

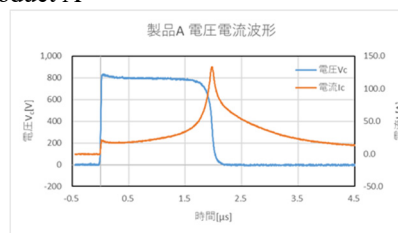
800V 2.0 $\mu$ s のパルス電圧を印加したときの磁性コアにかかる電圧  $V_c$ [V]と電流  $I_c$ [A]の波形を Fig. 7 に示す。ただし、製品 B に関しては 800V を印加した際、電流が大きくなり、測定が難しかったため、印加するパルス電圧を 400V 2.0 $\mu$ s とした。Figure 7 を Fig. 3 と比較すると、ピーク時の電流が 100 倍近く流れていることがわかる。

また、測定した  $V_c$  と  $I_c$  から(2)~(4)式を用いて算出した B-H 特性を Fig. 8、E-t 特性を Fig. 9 に、Fig. 8、9 より得られた磁性コアの特性を Fig. 10 に示す。

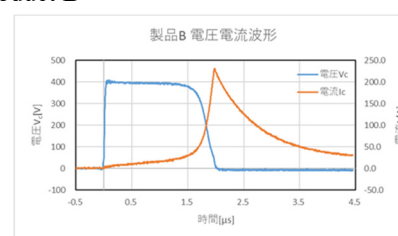
Figure 8 に示されるパルス電圧印加時の B-H 特性は Fig. 4 に対して各コアが飽和するまでに必要な磁界が数十倍になっていることがわかる。そのため、H の変化に対する B の立ち上がり、立下りが全体的に緩やかである。しかし、製品 B と比較した製品 A、C の変化は急峻である。また、製品 C の磁束密度変化量が約半分程度となっている。

Figure 5 では製品 C は半周期ごとに入力されたエネルギーの 85%程が出力されていたのに対して、Fig. 9 ではほとんど出力されていない。また、全ての製品において半周期ごとの損失が大きくなっていることがわかる。

- Product A



- Product B



- Product C

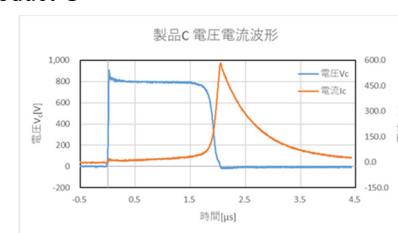


Figure 7: Voltage and current waveform applied to each nanocrystalline magnetic core.

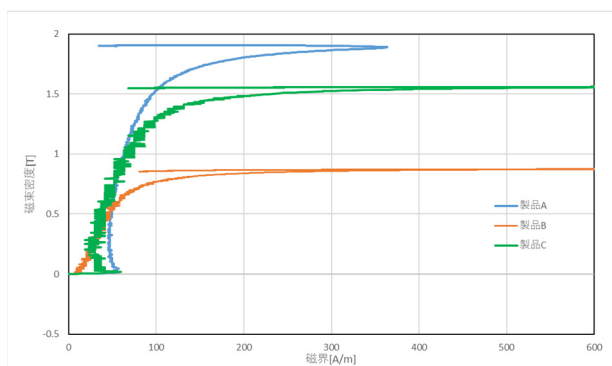


Figure 8: Pulse B-H characteristics of nanocrystalline magnetic cores.

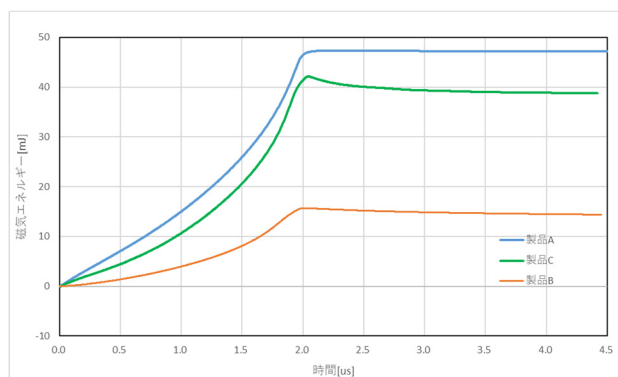


Figure 9: Pulse magnetic energy properties of nanocrystalline magnetic cores.

	製品A	製品B	製品C
磁束密度変化量[T]	1.9	0.88	1.6
保持力[A/m]	61	63	65
半周期辺りの損失[mJ]	47	15	39
B-H特性の特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・立ち上がりが急</li> <li>・磁束密度変化量が大きい</li> <li>・半周期辺りの損失が大きい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・立ち上がりが緩やか</li> <li>・磁束密度変化量が小さい</li> <li>・半周期辺りの損失が小さい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・立ち上がりが急</li> <li>・磁束密度変化量が大きい</li> <li>・半周期辺りの損失が大きい</li> </ul>

Figure 10: Experimental results of applying pulse voltage.

## 5. まとめと今後の展望

製法の異なるナノ結晶材料を用いた 3 種類の磁性コアに対して、交流電圧やパルス電圧を印加した場合の B-H 特性と損失を評価した。製品 A、C は飽和磁束密度  $B_m$  や残留磁束密度  $B_r$  が高く、パルス電圧印加時の磁束密度変化量も大きいためパルストランス向きの特徴をしていると言えるだろう。製品 B は  $B_r$  が低いが、損失が小さい。また、交流電圧印加時は製品 C より大きな磁束密度変化量を持つ。損失を減らしたく、交流電圧を印加するような電源では製品 B を使うことが適している。

今後は本研究の試験結果を参照して、当社電源製品の高効率化と小型化を行う。