

## B-H アナライザを用いた電磁鋼板のコアロスの分離

### Separation of the steel sheet coreloss using the measurements of the B-H analyzer SY-8218

本レポートは、B-H アナライザ SY-8218 の測定値から電磁鋼板(6.5%Si)のコアロスを分離した例を記述したものです。残念ながらコアロスの正確な分離法は現在のところ確立していません。本レポートのコアロス分離法もその例外ではなく、あくまでも、その参考としてお読み下さい。

#### ■1. コアロス分離の原理

本レポートで用いているコアロス分離の原理を説明します。

まずコアロス  $P_{cv}$  は、ヒステリシス損  $P_h$ 、渦電流損  $P_c$ 、残留損  $P_e$  に分類され次の(1)式で表わされます。

$$P_{cv} = P_h + P_c + P_e \quad (1)$$

さらに、 $P_h$ 、 $P_c$ 、 $P_e$  をそれぞれ周波数  $f$  と最大磁束密度  $B_m$  の関数として表わした修正 Steinmetz と呼ばれている(2)式が知られています。これはヒステリシス損  $P_h$  が  $f$  と  $B_m^\beta$  に、渦電流損  $P_c$  が  $f B_m$  の 2 乗に、残留損  $P_e$  が  $f B_m$  の 1.5 乗に比例するというものです。本レポートでは、この(2)式を用いてコアロスを分離しました。

$$P_{cv} = K_h B_m^\beta f + K_c (B_m f)^2 + K_e (B_m f)^{1.5} \quad (2)$$

$K_h$  : ヒステリシス損失係数、 $K_c$  : 渦電流損失係数、 $K_e$  : 残留損失係数、 $\beta$  : Steinmetz 定数

(2)を用いてコアロスを分離するという事は、測定値から未知数である  $K_h$ 、 $K_c$ 、 $K_e$ 、 $\beta$  を定めることに他なりません。

#### ■2. 測定試料

測定に使用した試料は Fig.2-1 に示すトロイダル電磁鋼板(6.5%Si)で、その試料定数を Table 2-1 に示します。

Table 2-1 電磁鋼板(6.5%Si)の試料定数

実効磁路長 $L_e$ [mm]	83.878
実効断面積 $A_e$ [mm <sup>2</sup> ]	2.04
実効体積 $V_e$ [mm <sup>3</sup> ]	171.1
質量 $W_e$ [g]	1.22
1 次巻線数 $N_1$ [turn]	37
2 次巻線数 $N_2$ [turn]	37



Fig.2-1 電磁鋼板(6.5%Si)試料

#### ■3. 測定データからのコアロスの分離

当社の B-H アナライザ SY-8218 の測定結果を用い、(2)式に従ったコアロスの分離法について説明します。

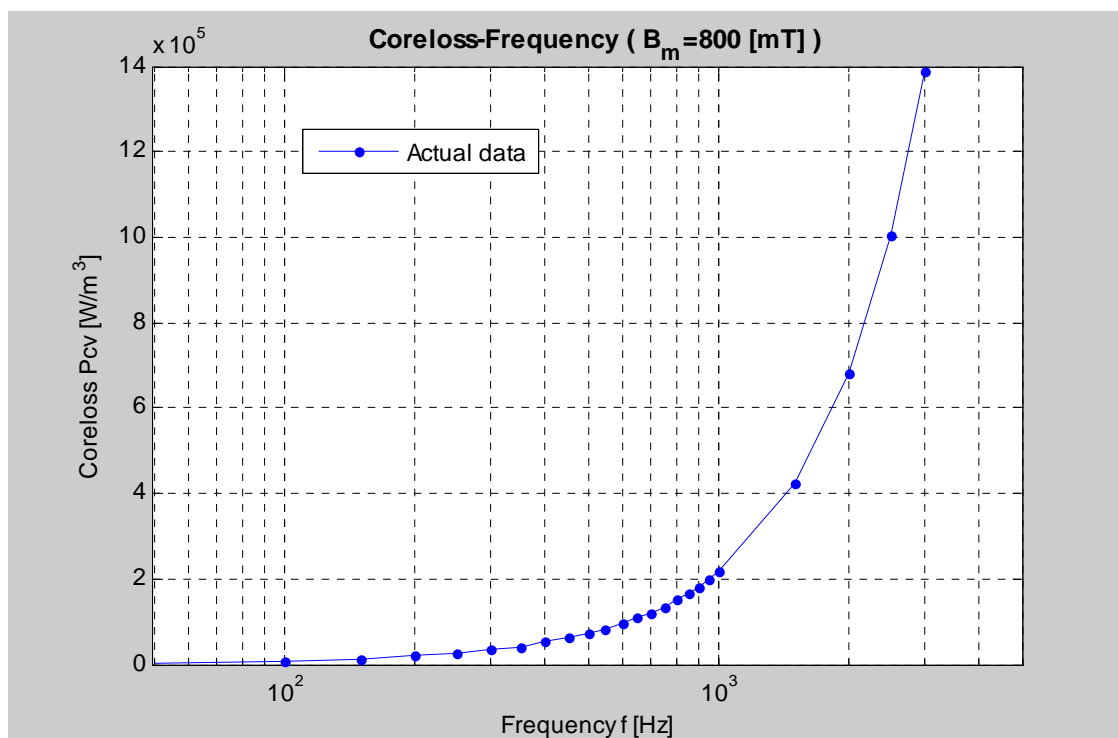
##### ■3-1. $B_m = \text{const}$ で $P_{cv} - f$ の測定

SY-8218 の測定モードを  $P_c$  モード、Fixed Parameter を  $B_m$  (最大磁束密度) に設定します。 $B_m = \text{const}$  の下で周波数  $f$  を可変しながらコアロス  $P_{cv}$  を測定します。SY-8218 の測定条件を Table 3-1 に、得られた測定結果のグラフを Fig.3-1 に示します。

尚、測定データは巻末の Table 4-1 に掲げておきます。

Table 3-1 SY-8218 の測定条件

測定条件	設定
Mode	P <sub>c</sub>
Fixed Parameter	B <sub>m</sub>
B <sub>m</sub> [mT]	800
Tolerance [%]	0.2
Function	Sine
Frequency [Hz]	50 ~ 3000

Fig.3-1 B<sub>m</sub>=800[mT] , P<sub>cv</sub>-f グラフ

### ■3-2. 渦電流損失係数 K<sub>c</sub> と残留損失係数 K<sub>e</sub> の算出

この■3-1の結果から、K<sub>c</sub>とK<sub>e</sub>を算出します。

■3-1は最大磁束密度 B<sub>m</sub>が800[mT]、一定の下での測定です。従って、前記(2)式において、

$$a = K_h B_m^\beta \quad b = K_c B_m^2 \quad c = K_e B_m^{1.5} \quad (3)$$

とおくと(2)式は

$$P_{cv} = a f + b f^2 + c f^{1.5} \quad (4)$$

となります。

未知数が a、b、c である(4)式をカーブフィッティングの適合式として、■3-1の測定データ(Table4-1)を用いてカーブフィッティングを行います。すると a、b、c が次のように求まります。

$$a = 43.31 \quad b = 0.09513 \quad c = 2.429 \quad (5)$$

この結果を(4)式に代入し、Fig.3-1のグラフに重ねると Fig.3-2のグラフとなります。

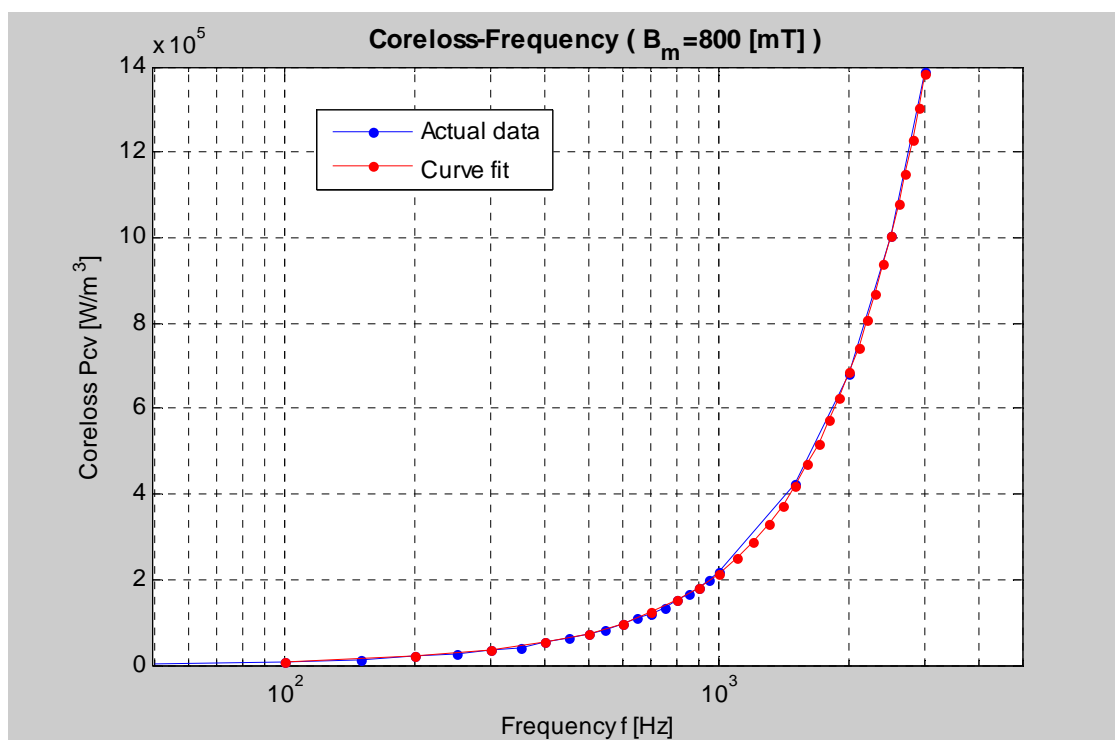


Fig.3-2  $B_m=800[\text{mT}]$ ,  $P_{cv}-f$  グラフ

$B_m=\text{const}$  の  $P_{cv}-f$  グラフでは、フィッティングカーブは Actual data によく一致しています。

さて、 $b$ 、 $c$  が求まったので、(3)式より  $K_c$ 、 $K_e$  を求めることができます。 $B_m=800[\text{mT}]$ 、一定であることから、

$$K_c = \frac{b}{B_m^2} = \frac{0.09513}{0.8^2} = 0.1486$$

$$K_e = \frac{c}{B_m^{1.5}} = \frac{2.429}{0.8^{1.5}} = 3.395$$
(6)

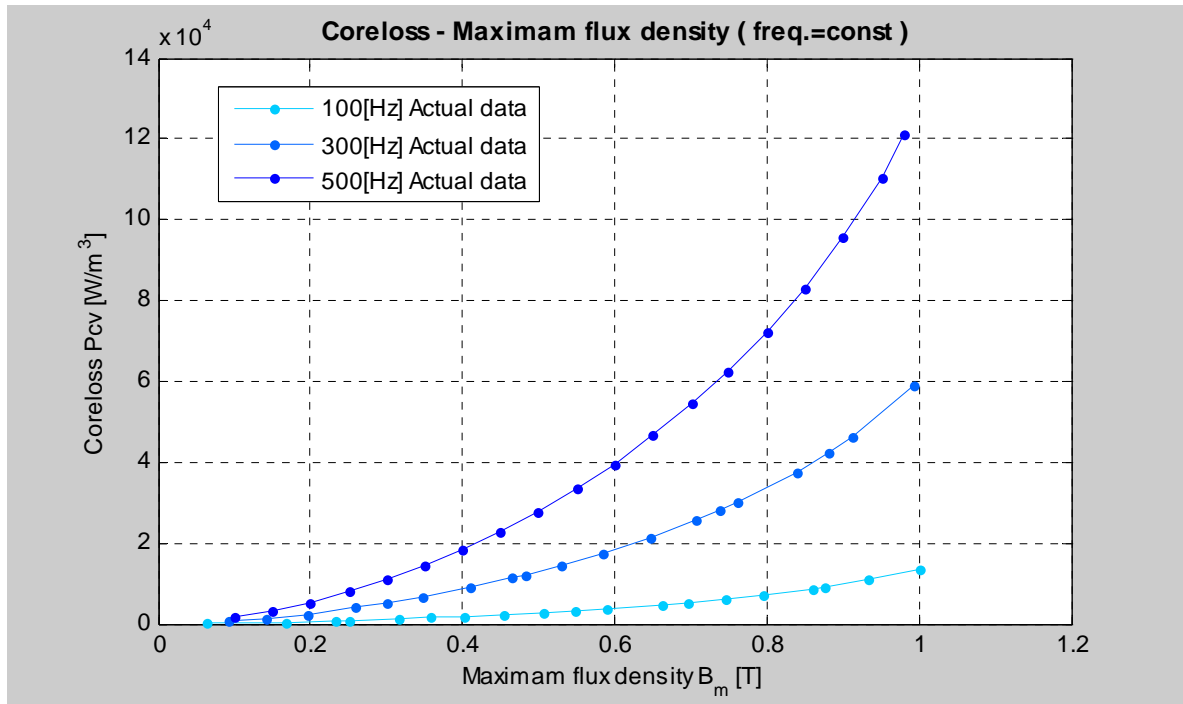
となり、渦電流損失係数  $K_c$  と残留損失係数  $K_e$  が求まります。

### ■3-3. $f=\text{const}$ で $P_{cv}-B_m$ の測定

残っている未知数であるヒステリシス損失係数  $K_h$  と Steinmetz 定数  $\beta$  を算出するために、今度は周波数  $f=\text{const}$  の下で最大磁束密度  $B_m$  を可変しながらコアロス  $P_{cv}$  を測定します。SY-8218 の測定条件を Table 3-2 に、得られた測定結果のグラフを Fig.3-3 に示します。尚、測定データは巻末の Table 4-2 に掲げておきます。

Table 3-2 SY-8218 の測定条件

測定条件	設定
Mode	$P_c$
Fixed Parameter	$B_m$
$B_m$ [mT]	約 100~1000
Tolerance [%]	0.2~5
Function	Sine
Frequency [Hz]	100、300、500

Fig.3-3  $f=\text{const}$ ,  $P_{cv}-B_m$  グラフ

### ■3-4. ヒステリシス損失係数 $K_h$ と Steinmetz 定数 $\beta$ の算出

この■3-3の結果から、 $K_h$  と  $\beta$  を算出します。

(2)式を変形すると

$$P_{cv} - K_c (B_m f)^2 - K_e (B_m f)^{1.5} = K_h B_m^\beta f \quad (7)$$

となります。ここで

$$P = P_{cv} - K_c (B_m f)^2 - K_e (B_m f)^{1.5} \quad (8)$$

とおけば(7)式は

$$P = K_h B_m^\beta f \quad (9)$$

となります。

既に■3-2で  $K_c$  と  $K_e$  は求まっているので、■3-3の測定データから(8)式の  $P$  を求めることができます。  $f=300[\text{Hz}]$  の時の算出した  $P$  の値を Table 4-2 に示します。

今度は未知数が  $K_h$ 、 $\beta$  である(9)式をカーブフィッティングの適合式として、Table4-2の  $P$  のデータを用いてカーブフィッティングを行います。するとヒステリシス損失係数  $K_h$ 、Steinmetz 定数  $\beta$  が次のように求められます。

$$K_h = 91.78 \quad \beta = 3.333 \quad (10)$$

これで(2)式の未知数すべてが求められました。(6)と(10)の結果をあらためて(2)式に適用すると、

$$P_{cv} = 91.78 B_m^{3.333} f + 0.1486 (B_m f)^2 + 3.395 (B_m f)^{1.5} \quad (11)$$

となり、修正 Steinmetz の式に従ったコアロス  $P_{cv}$  を求めることができます。

これを  $f=300[\text{Hz}]$  に適用して、Fig.3-3 のグラフに重ねた結果が Fig.3-4 のグラフです。

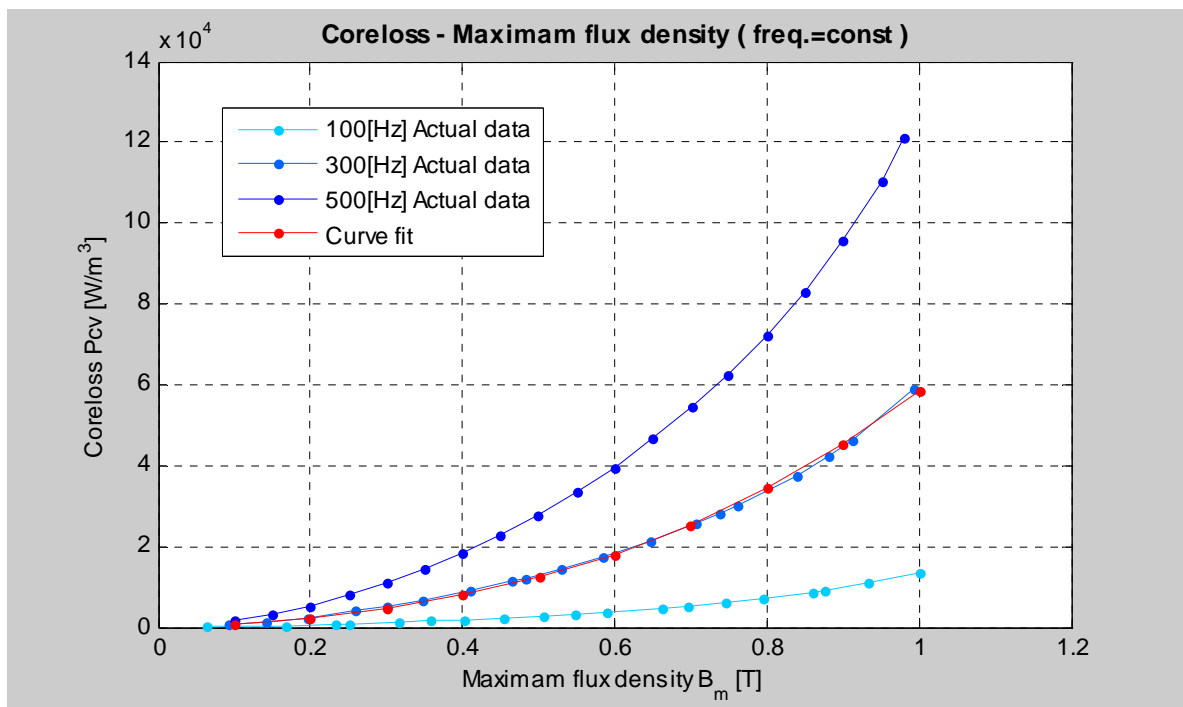


Fig.3-4  $f=\text{const}$ ,  $P_{cv}-B_m$  グラフ

同様に、 $f=100[\text{Hz}]$ 、 $500[\text{Hz}]$  にも適用した結果が Fig.3-5 のグラフです。

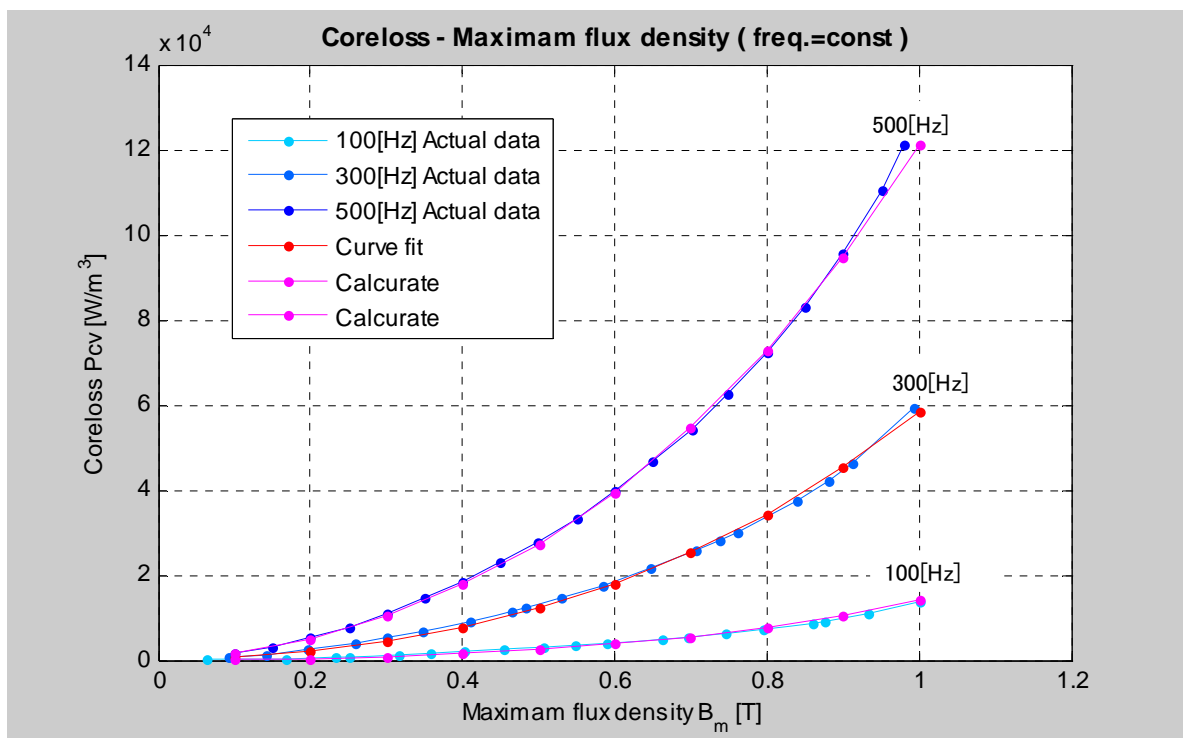


Fig.3-5  $f=\text{const}$ ,  $P_{cv}-B_m$  グラフ

いずれの周波数も、Actual data とよく近似しています。

### ■3-5. 残留損 $P_e$ を考慮しない場合

残留損  $P_e$  がないと仮定した場合も、今までと同様な手順にてそのフィッティングカーブを求めることができます。(2)式において  $P_e$  の項、即ち  $K_e(B_m f)^{1.5}$  を削除して算出するだけです。

その結果のみを(12)式に示します。  $f=500[\text{Hz}]$  に適用し、Fig.3-5 の  $f=500[\text{Hz}]$  の時のグラフに重ねた結果を Fig.3-6 に示します。

$$P_{cv} = 131.9 B_m^{2.319} f + 0.1954 (B_m f)^2 \quad (12)$$

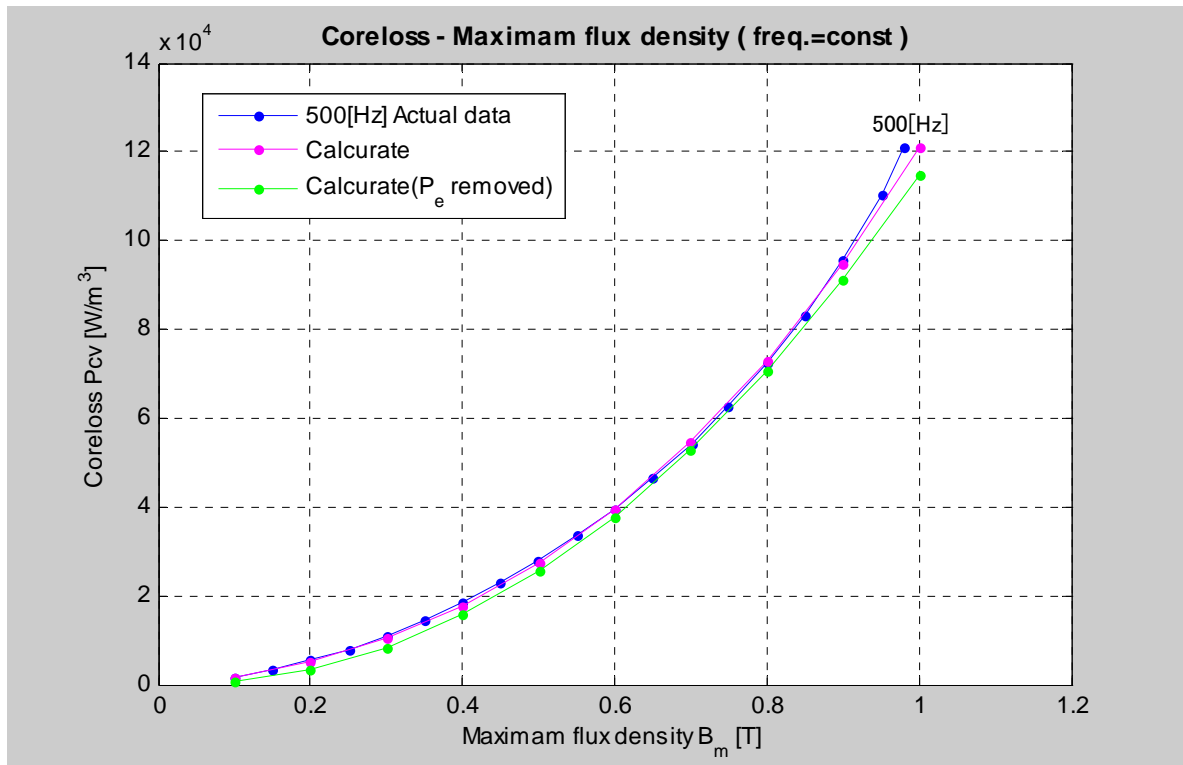


Fig.3-6  $f=\text{const}$ ,  $P_{cv}-B_m$  グラフ

残留損  $P_e$  を考慮した方が、考慮しない場合より Actual data に近似しているのが判ります。

#### ■4. 測定データ

本レポート内で引用した測定データを示します。

Table 4-1  $B_m=800[mT]$ ,  $P_{cv}-f$  測定データ

f [Hz]	$B_m$ [T]	$P_{cv}$ [ $W/m^3$ ]
50	0.80046	$2.9942 \times 10^3$
100	0.80135	$7.035 \times 10^3$
150	0.80026	$1.258 \times 10^4$
200	0.79989	$1.876 \times 10^4$
250	0.80113	$2.590 \times 10^4$
300	0.80153	$3.374 \times 10^4$
350	0.79935	$4.209 \times 10^4$
400	0.79962	$5.162 \times 10^4$
450	0.80084	$6.187 \times 10^4$
500	0.80028	$7.255 \times 10^4$
550	0.80032	$8.369 \times 10^4$
600	0.80321	$9.649 \times 10^4$
650	0.80074	$1.086 \times 10^5$
700	0.79982	$1.216 \times 10^5$
750	0.79982	$1.357 \times 10^5$
800	0.80164	$1.510 \times 10^5$
850	0.79939	$1.653 \times 10^5$
900	0.79859	$1.814 \times 10^5$
950	0.80096	$1.992 \times 10^5$
1000	0.80090	$2.165 \times 10^5$
1500	0.80103	$4.221 \times 10^5$
2000	0.80003	$6.815 \times 10^5$
2500	0.79949	$1.006 \times 10^6$
3000	0.80047	$1.386 \times 10^6$

Table 4-2  $f=const$ ,  $P_{cv}-B_m$  測定データ

f=100[Hz]		f=500[Hz]		f=300[Hz]		
$B_m$ [T]	$P_{cv}$ [ $W/m^3$ ]	$B_m$ [T]	$P_{cv}$ [ $W/m^3$ ]	$B_m$ [T]	$P_{cv}$ [ $W/m^3$ ]	P [ $W/m^3$ ]
0.064742	$7.4908 \times 10^1$	0.10003	$1.5680 \times 10^3$	0.093296	$6.3081 \times 10^2$	$3.8974 \times 10^{-2}$
0.16737	$4.0253 \times 10^2$	0.15002	$3.1283 \times 10^3$	0.14311	$1.3714 \times 10^3$	$4.7481 \times 10^{-1}$
0.23376	$7.2257 \times 10^2$	0.20032	$5.3529 \times 10^3$	0.19645	$2.4218 \times 10^3$	1.2321
0.25189	$8.2219 \times 10^2$	0.25015	$7.8642 \times 10^3$	0.25945	$3.9828 \times 10^3$	2.5041
0.31629	$1.2297 \times 10^3$	0.30045	$1.0950 \times 10^4$	0.29997	$5.1514 \times 10^3$	3.4990
0.35668	$1.5453 \times 10^3$	0.35017	$1.4450 \times 10^4$	0.34829	$6.7301 \times 10^3$	4.9390
0.40169	$1.9064 \times 10^3$	0.40020	$1.8440 \times 10^4$	0.41100	$9.0857 \times 10^3$	7.2612
0.45427	$2.3870 \times 10^3$	0.44957	$2.2870 \times 10^4$	0.46521	$1.1410 \times 10^4$	9.7269
0.50683	$2.9210 \times 10^3$	0.49953	$2.7850 \times 10^4$	0.48207	$1.2180 \times 10^4$	$1.0558 \times 10^1$
0.54833	$3.3832 \times 10^3$	0.55040	$3.3480 \times 10^4$	0.52901	$1.4490 \times 10^4$	$1.3199 \times 10^1$
0.59006	$3.8835 \times 10^3$	0.59998	$3.9570 \times 10^4$	0.58339	$1.7500 \times 10^4$	$1.6959 \times 10^1$
0.66360	$4.8831 \times 10^3$	0.65059	$4.6550 \times 10^4$	0.64709	$2.1440 \times 10^4$	$2.2191 \times 10^1$
0.69551	$5.3700 \times 10^3$	0.70088	$5.4380 \times 10^4$	0.70750	$2.5750 \times 10^4$	$2.8525 \times 10^1$
0.74704	$6.2445 \times 10^3$	0.74923	$6.2640 \times 10^4$	0.73723	$2.8100 \times 10^4$	$3.2215 \times 10^1$
0.79572	$7.1900 \times 10^3$	0.79979	$7.2370 \times 10^4$	0.76183	$3.0100 \times 10^4$	$3.5359 \times 10^1$
0.86008	$8.6457 \times 10^3$	0.85010	$8.3010 \times 10^4$	0.83978	$3.7570 \times 10^4$	$4.8541 \times 10^1$
0.87620	$9.0662 \times 10^3$	0.90002	$9.5500 \times 10^4$	0.88186	$4.2280 \times 10^4$	$5.7568 \times 10^1$
0.93400	$1.0800 \times 10^4$	0.95076	$1.1040 \times 10^5$	0.91257	$4.6170 \times 10^4$	$6.5512 \times 10^1$
1.0010	$1.3540 \times 10^4$	0.98102	$1.2100 \times 10^5$	0.99362	$5.9090 \times 10^4$	$9.4712 \times 10^1$