

1 目的

磁束計を用いて電気機器用鉄板の B - H 曲線を求め、さらにエプスタイン装置を用いて鉄損を測定し、変圧器、直流機ならびに交流機に使用される電気用鉄板の磁気特性の概念を得る。

2 理論

2.1 ヒステリシス損

鉄の分子相互間の摩擦によって生じる損失のこと。

ヒステリシス損は鉄心内磁束の大きさ、方向の変動により鉄心中の磁気分子の方向、配列が変化し、分子相互間の摩擦損を生ずることによるもので、ヒステリシスループの囲む面積に比例する。

電圧の2乗に比例し周波数に反比例する。鉄損中、約80[%]はヒステリシス損で、ヒステリシス損は鉄板の厚みには無関係である。¹⁾

2.2 渦電流損

導体の一部で磁束が変化したり、磁束が導体を切ったりすると、電磁誘導作用によってその導体内部に起電力を誘起し、その部分だけに電流が流れる。この電流を渦電流という。このように渦電流が流れるとその通路は抵抗をもっているので電力損失を生じ、ジュール熱のために温度が上昇する。この損失を渦電流損という。

変圧器や発電機、電動機などは多量の鉄心を用い、また多くのコイルを巻くため、鉄塊のままでは渦電流損が大きくなる。²⁾

3 実験回路図

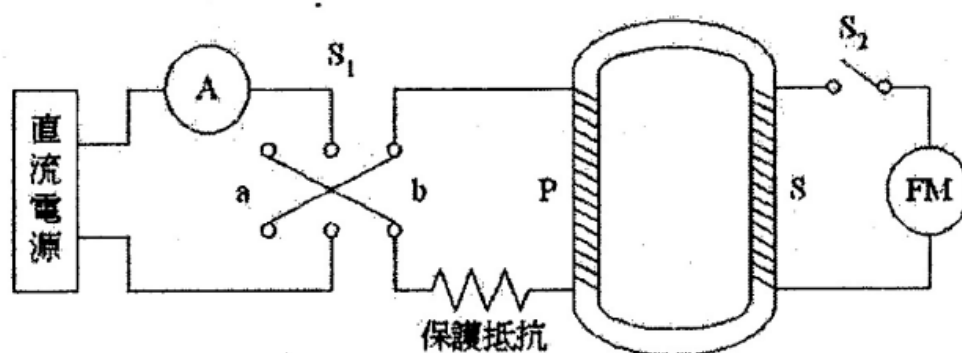


図1 磁束計による電気機器用鉄板の B - H 曲線の測定

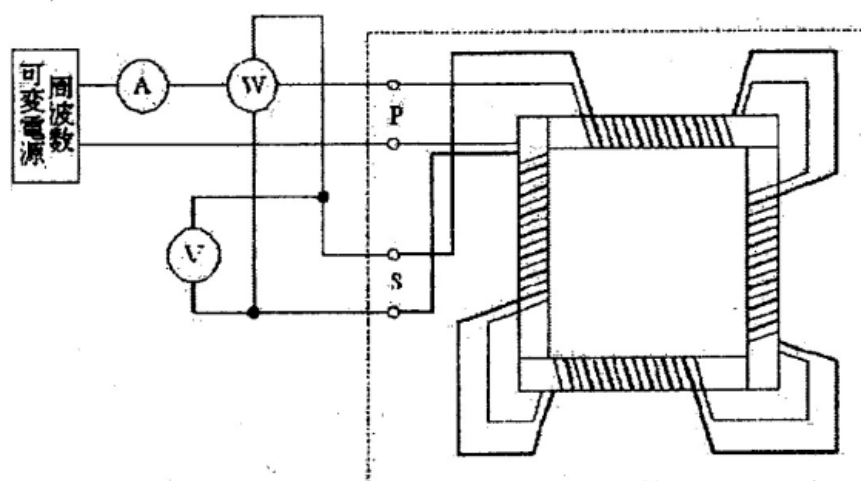


図2 エプスタイン装置による電気鉄板の鉄損測定

4 実験方法

4.1 磁束計による電気機器用鉄板の B - H 曲線の測定

4.1.1 磁束の測定

- 図1の通りに結線する。
- 試料の減磁作業を行う。磁束計スイッチ S2 を OFF にして、電源電圧を 0 から徐々に上昇させながら、S1を1回/秒ほどの割合で a⇄b側を切り換える。電流値が 1A 程度になったら、徐々に電流値0A まで減少させながら同様に S1を切り換える。
- 磁束計スイッチ S2 を「SHORT」にして、S2 を 2, 3回程度押してゼロ調整を行う。
- 電源電圧を調整して電流値を 0.1A に設定して、S1を OFF から a側に入れて磁束計を読む。
- S1 を b側に切り換えて同様に磁束計を読む。この測定を2, 3回程度繰り返して平均値を求める。
- 電流値を最大 1A まで変化させて測定する。
- 測定値から4.1.2を使用して各諸量を計算する。

4.1.2 諸量の計算

- 磁束 ϕ の計算使用している磁束計 (TFM-2000) で読み X の単位は [mWb] である。また、電気機器用鉄板の二次巻線巻数は 25 である。これらの数値から式(1) より、鉄板中の磁束 [Wb] を求める。

$$\phi = \frac{X}{25} \quad (1)$$

- 磁界 H の計算平均磁路の長さ $L = 0.32[\text{m}]$ 、一次巻線の巻数 $N_1 = 160$ である。これらの数値から式(2) より、磁界の強さ $H[\text{A/m}]$ を求める。

$$H = \frac{IN_1}{L} \quad (2)$$

3. 磁束密度 B の計算試料の断面は、縦 30mm、横20mm である。これより断面積 $A[\text{m}^2]$ を求め、式(3)より磁束密度 $B[\text{T}]$ を求める。

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (3)$$

4. 透磁率 μ の計算式(4) より、透磁率 $\mu[\text{H/m}]$ を求める。

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (4)$$

4.2 エプスタイン装置による電気鉄板の鉄損測定

4.2.1 鉄損計算のための電力ならびに電圧測定

1. 図2の通りに結線する。
2. 電源周波数を 50Hzに設定し、電源の出力電圧を変えて一次巻線 P の電流を段階的に変化させ、これに対する電力計と電圧計の読みを記録する。
3. 周波数を60Hzに設定し同様の測定を行う。
4. 測定値から Sec.4.2.2 を使用して各諸量を計算する。

4.2.2 諸量の計算

1. 鉄損 W_i の計算電圧計ならびに電流計の読みと、これらの電圧コイル等の抵抗値から、計器の銅損を除いた単位重量当たりの鉄損 $[\text{W/kg}]$ は式(5) で求めることができる。

$$W_i = \frac{1}{M} \left(W_0 - E_0^2 \left(\frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_W} \right) \right) \quad (5)$$

E_0 : 電圧計の読み $[\text{V}]$

W_0 : 電力計の読み $[\text{W}]$

R_V : 電圧計の電圧コイルの抵抗値 $[\Omega]$

R_W : 電力計の電圧コイルの抵抗値 $[\Omega]$

M : 重量 $[\text{kg}]$

2. 磁化電流 I_n の計算磁化電流 $[\text{A}]$ は、電流計の読みからその有効分電流を減じたものであるから式(6)で求めることができる。

$$I_m = \sqrt{I_0^2 - \left(\frac{W_0}{E_0} \right)^2} \quad (6)$$

$\frac{W_0}{E_0}$: 有効分電流 $[\text{A}]$

3. 磁界 (磁化力)の最大値 H/m の計算磁界の最大値 $[\text{A/m}]$ は、鉄心の平均長さ、磁化電流の大きさならびに磁化コイル巻数より、式(7)で求めることができる。

$$H_m = \frac{1}{L} \left(\sqrt{2} I_m N \right) \quad (7)$$

N : 磁化コイル巻数[回]

L : 鉄心の平均長さ[m]

4. 最大磁束密度 B_m の計算誘導起電力と最大磁束密度には比例の関係があり, その与えられる関係式を変形すると, 最大磁束密度は式(8) で求めることができる.

$$\begin{aligned} E_0 &= 4.44fAB_mN \\ B_m &= \frac{E_0}{4.44fAN} \end{aligned} \quad (8)$$

f : 周波数[Hz]

A : 鉄心の断面積[m²]

N : 巻数[回]

5. 透磁率 μ_e の計算最大磁束密度と磁界の最大値より, 透磁率 μ_e [H/m] は式(9) で求めることができる.

$$\mu_e = \frac{B_m}{H_m} \quad (9)$$

5 使用機器

5.1 磁束計による電気機器鉄板の B - H 曲線の測定

磁束計 : FLUX METER, TFM-200 TOYO MEASURING SYSTEM CO.LTD. , S/N 7A00669

電流計 : YEW AMPERES, 1965, NO.52B171

直流電源 : REGULATED DC POWER SUPPLY, MODEL PAB 18-3, 48245155 AC 100V 50/60Hz

切り替えスイッチ : 30A, 250V, 41-9346 MDM

5.2 エプスタイン装置による電気鉄板の鉄損測定

エプスタイン装置 : 25cm EPSTEIN CORE LOSS TESTER, TYPE B-EP-25 5038B20 1965,

YOKOGAWA ELECTRIC WORKS.LTD

電力計 : YEW WATTS SINGLE-PHASE 1965 NO.5147C225

低周波定電圧電源 : CVFT1-200H, 東京精電株式会社 VVVF POWER SUPPLY, SER-NO TC-06449

電流計 : Sanwa CD800A 15025013602

電圧計 : Sanwa CD800A 15025013608

6 実験結果

6.1 磁束計による電気機器用鉄板の B - H 曲線の測定

実験結果を表1, 表2及び図3に示す.

6.2 エプスタイン装置による電気鉄板の鉄損測定

実験結果を表2から表4, 及び図4から図6に示す.

表1 磁束の測定

電流 I [mA]		磁束の読み [mWb]												9 回目				8 回目				7 回目				6 回目				5 回目				4 回目				3 回目				2 回目				1 回目				平均	平均/2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和				a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側		和		a側		b側	

表2 磁束計による電気機器用鉄板の測定

電流 I [A]	平均[mWb]	磁束 ϕ [Wb]	磁界 H [A/m]	磁束密度 B [T]	透磁率 μ_e [H/m]	比透磁率 μ_s
0.05	7.96	0.0003183	25.00	0.531	0.02122	16886.34
0.10	10.18	0.0004073	50.00	0.679	0.01358	10802.91
0.15	10.52	0.0004208	75.00	0.701	0.00935	7441.73
0.20	10.50	0.0004200	100.00	0.700	0.00700	5570.69
0.30	14.20	0.0005679	150.00	0.947	0.00631	5021.69
0.40	16.57	0.0006627	200.00	1.105	0.00552	4394.93
0.50	16.66	0.0006665	250.00	1.111	0.00444	3536.10
0.60	18.74	0.0007497	300.00	1.249	0.00416	3314.25

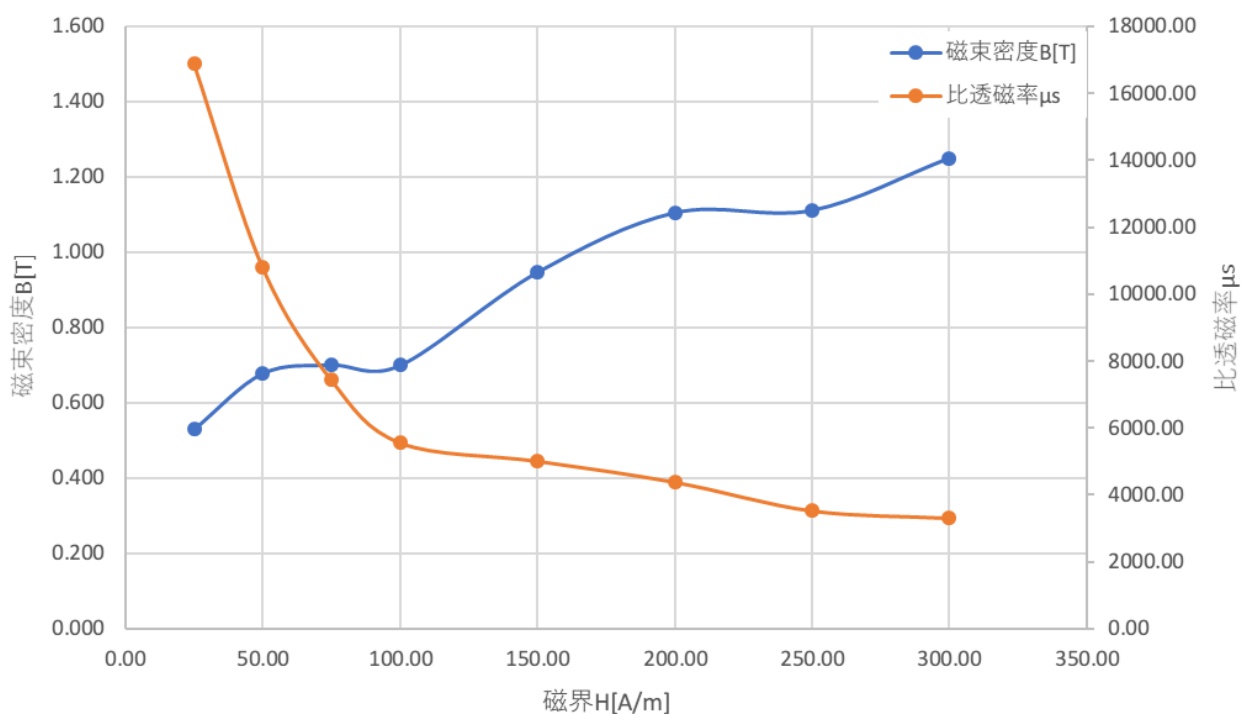


図3 磁界に対する磁束密度と比透磁率の関係

表3 電気鉄板の鉄損測定 (f=50Hz)

励磁電流 I_0 [mA]	誘導起電力 E_o [V]	損失電力 W_o [W]	磁化電流 I_m [A]	磁界最大値 H_m [A/m]	最大磁束密度 B_m [T]	透磁率 μ_e [H/m]	比透磁率 μ_s	鉄損 W_i [W/kg]
298	48.5	3	0.292	327.9316255	0.118894405	0.000362559	288.5149	1.10296301
270.5	47.9	2.9	0.264	296.5772447	0.117423546	0.000395929	315.07033	1.064402825
241.6	47.4	2.8	0.234	263.5370819	0.11619783	0.000440916	350.87015	1.024953482
209.3	46.7	2.7	0.201	226.2891832	0.114481829	0.000505909	402.58992	0.987093978
179.5	45.9	2.6	0.170	191.6091581	0.112520684	0.000587241	467.31125	0.949950863
150	44.9	2.4	0.140	157.6641128	0.110069253	0.000698125	555.55019	0.870659515
120	43.2	2.2	0.109	122.2339573	0.10590182	0.000866386	689.44827	0.796513769
90	40	1.8	0.078	87.68059875	0.098057241	0.001118346	889.95142	0.645316588
60	33.19	1.2	0.048	53.86563161	0.081362996	0.001510481	1202.0023	0.427164932
45	26.87	0.7	0.037	41.27675991	0.065869952	0.001595812	1269.9069	0.242250314
30	17.77	0.3	0.025	27.89733014	0.043561929	0.001561509	1242.6093	0.103267854
15	6.62	0.02	0.015	16.52833824	0.016228473	0.000981858	781.3374	0.004897409

表4 電気鉄板の鉄損測定 (f=60Hz)

励磁電流 I_0 [mA]	誘導起電力 E_o [V]	損失電力 W_o [W]	磁化電流 I_m [A]	磁界最大値 H_m [A/m]	最大磁束密度 B_m [T]	透磁率 μ_e [H/m]	比透磁率 μ_s	鉄損 W_i [W/kg]
300	58	4	0.292	328.4442461	0.118485833	0.000360749	287.07469	1.450751613
270.1	57.4	3.82	0.262	294.47946	0.117260117	0.000398195	316.87316	1.37830042
240.3	56.8	3.66	0.231	260.4236352	0.116034402	0.00044556	354.56553	1.314507839
210.2	56	3.58	0.200	225.261654	0.114400114	0.000507854	404.13766	1.28749625
180.1	55	3.4	0.169	190.2933521	0.112357255	0.000590442	469.8591	1.21868895
150	53.6	3.16	0.138	155.161689	0.109497252	0.000705698	561.57641	1.127298406
120.2	51.6	2.82	0.107	120.433449	0.105411534	0.000875268	696.51608	0.997393051
90	47.4	2.3	0.076	85.26959887	0.096831525	0.001135593	903.67588	0.806917549
60	38.62	1.42	0.047	53.33789828	0.078895222	0.001479159	1177.0772	0.489076387
45	30.84	0.9	0.034	38.53416229	0.063001777	0.001634959	1301.0591	0.309473125
30	20.01	0.38	0.023	26.12582581	0.040877612	0.001564644	1245.104	0.130769205
15	7.46	0.02	0.015	16.60243129	0.01523973	0.000917922	730.45876	0.003865391

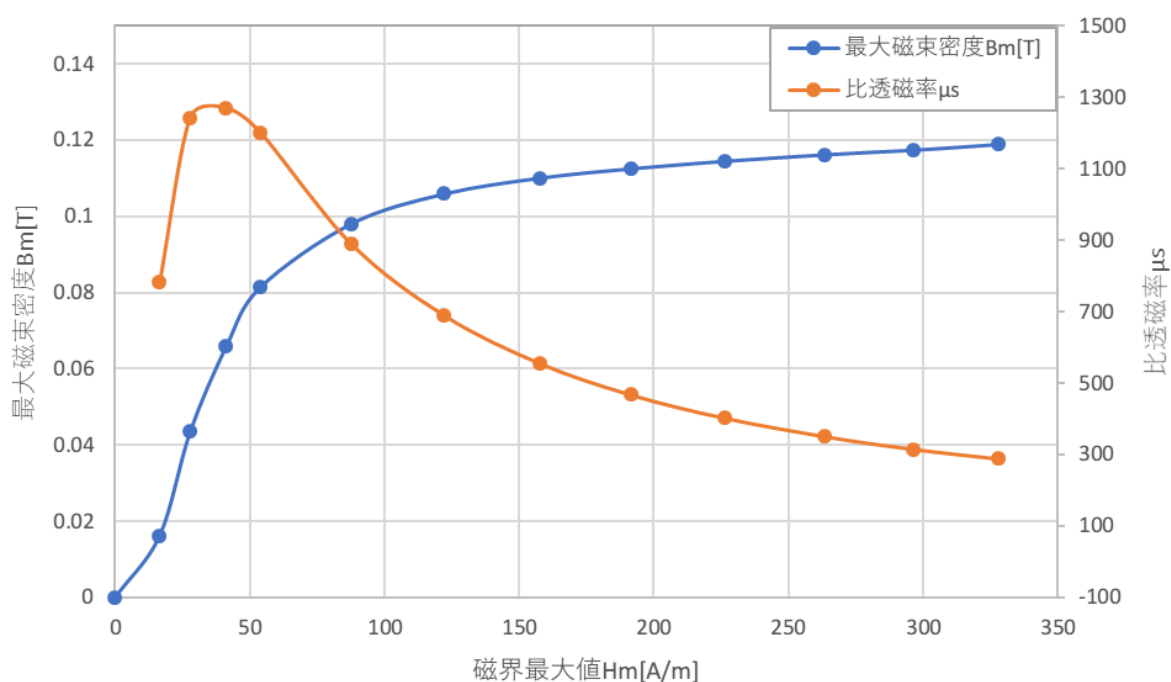


図4 磁界に対する最大磁束密度と比透磁率の関係 (f=50Hz)

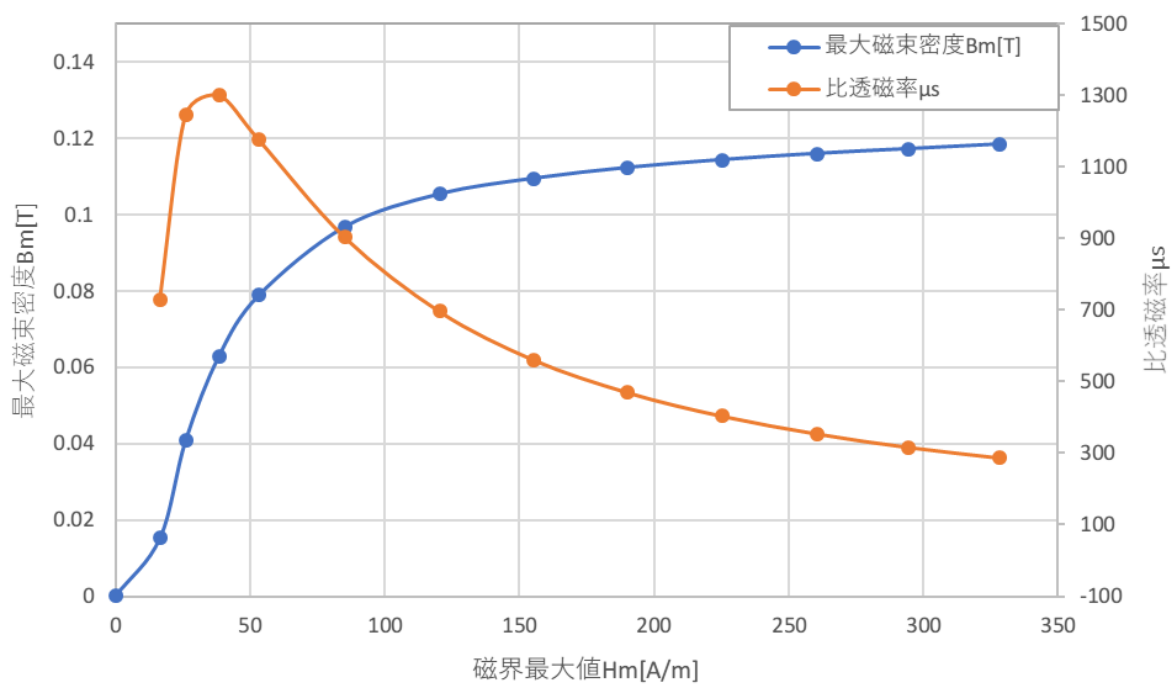
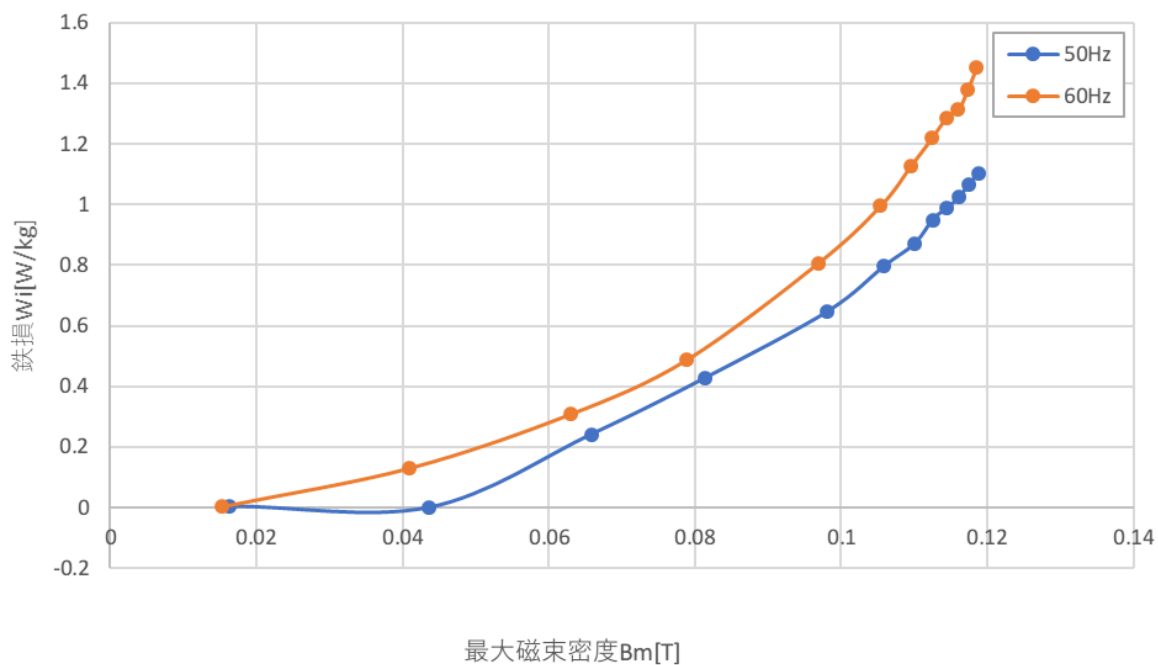
図5 磁界に対する最大磁束密度と比透磁率の関係 ($f=60\text{Hz}$)

図6 最大磁束密度に対する鉄損の関係

7 考察

磁束計による電気機器用鉄板の B-H 曲線の測定では、

図4と図5を比較すると、グラフの概形、はほぼ一致していた。このことから、磁界に対する磁束密度、及び磁界に対する比透磁率は周波数に依存しないと考えられる。

参考文献

- 1) ヒステリシス損とは - E&M JOBS, <https://em.ten-navi.com/dictionary/2758/>, 2019-7-9閲覧
- 2) 渦電流損とは - E&M JOBS, <https://em.ten-navi.com/dictionary/2759/>, 2019-7-9閲覧