UDC 669.782: 621.318.13.013-415
537.638.2: 536.48

論 文

53-A 79

けい素鋼板の低温における磁気特性

正 員 山 口 俊 尚 (九州大)

正 員 今 村 正 明 (岐阜大)

正 員 松 原 和 宣 (福岡工大)

正 員 成 田 賢 仁 (九州大)

1. ま え が き

近年電力需要の増大に伴って、電気機器の小形化・高効率化を目的として低温機器の開発が進められている。それには極低温域で動作させる超電導機器のほかに、20~120 K 程度の低温域で動作させる機器があげられる。これらの低温機器において、一般に鉄損は鉄心温度の低下に従って増加すると考えられるが、一方、巻線と鉄心との間の断熱構造の構成は必ずしも容易でないため、鉄心を冷却するか非冷却方式にするかは設計上重要な問題となる。これまで比較的検討の進んでいる低温変圧器を例にとれば、Wilkinson 氏⁽¹⁾および Lair 氏⁽²⁾らは 20 K (液体水素)で動作させる鉄心非冷却形の変圧器を設計しているが、Inui 氏ら⁽³⁾は最近その有効利用が望まれている LNG (液化天然ガス)の蒸発潜熱を活用して 120 K 付近で動作させる鉄心冷却形の変圧器を試作している。

いずれにしても、鉄心を使用する低温電気機器の開発・設計にあたっては、鉄心材料の低温での磁気特性に関する正しい知識が必要となる。しかしながら、電気鉄板の低温での磁気特性に関する研究は従来極めて少なく⁽⁴⁾、十分な資料が得られていない。そこで、本研究においては各種の商用けい素鋼板について

77~300 K の温度範囲における鉄損特性および磁化特性の測定を行なった。また、その結果に対して電気抵抗率、飽和磁化など基礎的性質の変化に基づいた検討を加え、大体の説明を得た。

2. 試料および測定法

〈2・1〉 試料 供試料として商用けい素鋼板の中から第 1 表に示すように方向性を 3 種類、無方向性を 3 種類選んだ。方向性については比較のために圧延方向に直角にさい断された試料を 1 種類加えた。

試料は 320 mm×30 mm の短ざく状にさい断後、窒素ふんい気中において方向性は 800℃、無方向性は 750℃ で 2 時間の焼きなましを施している。各試料ともエプスタイン試験法に準じて、試験器に各辺 4 枚、合計 16 枚を交互重ねに積んだ。実効磁路長および実効重量係数は温度により変化しないものとして取り扱った。

なお、本測定の温度範囲においては、測定後に試料の絶縁皮膜に外見上の異常は認められなかった。

〈2・2〉 温度調節 試料の温度調節のための恒温そうは第 1 図に示すように内辺 400 mm×400 mm、

第 1 表 供試料 (板厚は公称値、シリコン含有量は概略値を示す。試料記号中、H は高配向性種を、L は圧延方向に、C は圧延方向に直角にさい断された試料を表わす)

Table 1. Test specimens.

	試 料	板 厚 (mm)	シリコン含有量 (%)	備 考
方 向 性	G 6 H-L	0.30	3	高配向性種
	G 9-L	0.30	3	従来種
	G 6 H-C	0.30	3	直角方向にさい断
無 方 向 性	S 14	0.35	2.9	大形回転機等用
	S 23	0.35	1.5	はん用モータ等用
	S 60	0.65	0.1	家電品等用

Magnetic Properties of Commercially Available Silicon-Iron Laminations under Low Temperatures. By Toshinao Yamaguchi, Member (Kyushu University), Masaaki Imamura, Member (Gifu University), Kazunori Matsubara, Member (Fukuoka Institute of Technology) & Kenji Narita, Member (Kyushu University).

山口俊尚: 正員, 九州大学工学部電気工学教室
今村正明: 正員, 岐阜大学工学部電子工学教室
松原和宣: 正員, 福岡工業大学電子機械工学教室
成田賢仁: 正員, 九州大学工学部電気工学教室

第 1 図 エプスタイン試験器温度調節装置

Fig. 1. Apparatus for controlling the temperature of Epstein test frame.

深さ 200 mm の黄銅製二重容器の周辺を厚さ 75 mm の発ばうスチロール板で囲み断熱効果を持たせたもので、この中にエプスタイン試験器を装入する。およそ 120~240 K の温度範囲については容器内そうに冷媒として液体フロオン (フロオン 12, CCl_2F_2 : 沸点 244 K, 凝固点 115 K) を入れ、外そうに液体窒素を入れて周辺から冷却すると共に、内そう中に装着された電熱線 (無誘導巻きにしたマンガン線) により加熱し、オン・オフ制御によって温度調節を行なった。そう内温度を均一化するため、図に示すようにかくはん器で液体フロオンを常時かくはんしている。この装置により上記温度範囲で精度 $\pm 2\%$ の温度調節が可能であった。なお、フロオン 12 は抵抗率 $1.2 \times 10^4 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上の良好な絶縁体であり、試料および被覆線などに対する化学的安定性も良い。

なお、上述の温度範囲のほかに、室温での測定と内そうに直接液体窒素を入れることにより 77 K での測定を行なった。

〈2・3〉 磁気特性測定法 本研究では 50 Hz における鉄損および磁化特性、ならびに 0.5~200 Hz における鉄損の周波数依存性を測定した。第 2 図に磁気特性測定回路の構成図を示す。鉄損は時分割形電力計

(横河電機: 2836 形) を用いて測定した。20 Hz 以下での鉄損および磁束密度の正確な測定は通常の方法では困難であるため、2 チャンルの波形記憶装置 (8 ビット, 1,000 ワード) に磁束電圧および励磁電流をそれぞれ記憶させ、これらを適当な周波数に変換して時分割形電力計に入力せしめる中田氏⁽⁵⁾の方法を用いた。また、磁界は励磁電流の最大値をオシロスコープを用いて読取の方法で求めた。これは、高磁束密度域では励磁電流に含まれる高調波成分が極めて大きくなり、通常の相互誘導器法では最大値が正しく評価されないことがわかったためであるが、オシロスコープ法による最大値測定の誤差は十分な注意をはらって読取りを行なえば 3% 程度以内におさめ得るので、本研究の目的にかなっている。

消磁は対数減衰電圧と正弦波電圧とをアナログ乗算器で乗算して得られた減衰振動波形を用いて、各測定の前に測定周波数において減衰時定数 10 s で行なった。本消磁法は山田氏⁽⁶⁾によっても用いられているが、消磁過程の連続性および消磁条件の一定性において優れた方法である。なお、測定および消磁に際して磁束正弦波条件を保つために磁化器の三次巻線から負帰還をかけている。

3. 商用周波数における鉄損特性および磁化特性

〈3・1〉 鉄損特性 第 3 図に方向性試料 G 6 H-L および G 9 について、各磁束密度における鉄損-温度曲線を示す。図からわかるように、77~300 K の範囲では各磁束密度において鉄損は温度の低下と共にほぼ直線的に増加する。従って、この温度範囲内の特定の温度に対する鉄損は室温と 77 K とにおける値を知ることによって概略推定される。そこで以下では、室温および 77 K における測定値を主として示し、検討を進める。

第 2 図 磁気特性測定装置の構成図

Fig. 2. Block diagram of magnetic measurement system.

(a) G6H-L

(b) G9-L

第3図 77~297 Kにおける鉄損-温度曲線 ($f=50$ Hz)

Fig. 3. Power loss at 50 Hz plotted against temperature between 77 K and 297 K.

第4図には代表例として方向性 G6H-L および無方向性 S-14 の各試料について、励磁周波数 50 Hz、温度 297 ± 1 K および 77 K における鉄損-磁束密度曲線を示す。また、第5図(a)、(b)には各種方向性および無方向性試料について、297 K の鉄損に対する 77 K の鉄損の増加率、

$$\Delta W = \frac{W(77\text{K}) - W(297\text{K})}{W(297\text{K})} \times 100 (\%)$$

..... (1)

第4図 77 K および 297 K における鉄損-磁束密度曲線 ($f=50$ Hz)

Fig. 4. Power loss versus flux density curves at 77 K and 297 K ($f=50$ Hz).

(a) 方向性試料

(b) 無方向性試料

第5図 297 K の鉄損に対する 77 K の鉄損の増加率 ($f=50$ Hz)

Fig. 5. Relative increase in power loss at 77 K as compared with that at 297 K ($f=50$ Hz).

の磁束密度による変化を示す。方向性 (L) 試料では ΔW は 0.1 T 付近で 23~25%, 1.4~1.6 T 付近で 14~16% で、この間磁束密度の増加と共にゆるやかに低下するが、1.4~1.6 T を越えるとやや急激な低

下が見られる。低温における鉄損の増加は後述するように、電気抵抗率の減少による動損失*の増加による部分が多いが、方向性試料では 1.4~1.6 T 付近から静損失がやや急激に増加し⁽⁷⁾、その結果鉄損中に占める動損失の割合が減少するため、 ΔW が低下するものと考えられる。無方向性試料では等級によって ΔW がかなり異なる。すなわち、S-14 および S-23 では 10~18% で方向性試料に比べてやや小さいが、S-60 では 25~50% と大きい値を示す。これは後述するように、等級による抵抗率の温度変化の相違や、鉄損中に占める動損失の相対的割合の相違などによるものと考えられる。

〈3・2〉磁化特性 第6図に方向性 G6H-L および無方向性 S-14 の各試料について、周波数 50 Hz、温度 297±1 K および 77 K における交流磁化曲線を示す。ここで横軸の磁界は励磁電流の最大値から直接算定された値であり、この場合、励磁電流には純磁化力成分のほかに鉄損成分を含んでいる。第7図(a)、(b)には方向性および無方向性の各種試料について同一磁束密度に対して必要な 297 K と 77 K とにおける磁界 H_m の相対的変化率

$$\Delta H = \frac{H_m(77\text{ K}) - H_m(297\text{ K})}{H_m(297\text{ K})} \times 100 (\%)$$

.....(2)

を示す。方向性 (L) 試料の場合、低磁束密度では 77 K における磁界は 297 K におけるそれより 12~15% 大きい、およそ 1.6 T 以上の高磁束密度域では両者の大小関係は逆転している。無方向性試料につ

第6図 77 K および 297 K における交流磁化曲線 ($f=50$ Hz)

Fig. 6. AC magnetization curves at 77 K and 297 K ($f=50$ Hz).

*: 従来、静磁化損失をヒステリシス損失、鉄損(全損失)から静磁化損失を差し引いた値をうず電流損失と呼ぶのが一般的であったが、最近の Anomalous Loss の研究結果^{(10)~(12)} からかかる呼称の仕方には一部に疑問が持たれている。そこで、本論文では静磁化損失を静損失、全損失から静損失を差し引いた値を動損失と仮称することにした。

(a) 方向性試料

(b) 無方向性試料

第7図 同一磁束密度に対する 77 K と 297 K とにおける磁界の相対的变化

Fig. 7. Relative change in magnetizing force for the same flux density at 77 K and 297 K.

いてもこの傾向は同様であるが、定量的には試料の等級によってかなりの差が認められ、低温での鉄損の増加率 ΔW が大きい S-60 では、同じく低温で磁界の増加率 ΔH も大きいことがわかる。

交流透磁率の温度変化の要因としては次にあげるようなものが主要であろう。

(1) うず電流密度および鉄損の変化 温度の低下によって抵抗率が減少すれば同一磁束密度に対してうず電流密度は増加し、従って印加磁界に対するしゃへい効果は増大する。また、低温で鉄損が増加すれば、それが動損失であっても静損失であっても励磁電流中の鉄損成分が増加するため、同一磁束密度に対する励磁電流を増加する傾向にある。

(2) 飽和磁化の変化 飽和磁化 I_s は温度の低下と共に増加し、77 K における I_s は 297 K におけるそれに対して 3.2% Si-Fe で約 3%、Fe で約 2% 大きい⁽⁸⁾。 I_s が増加すれば同一磁束密度に対する磁界は一般的には減少する。

(3) 結晶磁気異方性エネルギーの変化 Si-Fe 合金では温度の低下と共に結晶異方性定数 K_1 は増加し、例えば 3% Si-Fe では 77 K における K_1 は 297 K におけるそれに対して約 18% 大きい⁽⁹⁾。回転磁化領域(磁化曲線の曲り角以降の領域)では K_1 が大きいほど同一磁束密度に対する磁化力は増大する。

上の説明からわかるように、(1)項と(3)項の要因は低温において交流透磁率の低下をもたらすが、(2)項は増大をもたらす。また、(1)項の要因は全磁束密度域で作用するが、(2)項および(3)項はその本質から高磁束密度域においてのみ顕著に作用するものである。上に述べた測定結果のうち、低磁束密度域における低温での H_m の増加は(1)項で説明できよう。高磁束密度域では相反する効果を持つ要因が作用するが、飽和に近づくに従って(2)項の作用が(1)項と(3)項の作用を凌駕(りょうが)し、大小関係の逆転がもたらされるものと考えられる。

4. 鉄損の周波数依存性

従来、電気鉄板の単位周期あたりの損失は

$$W/f = h + e f \dots\dots\dots (3)$$

(a) G6H-L

(b) S-23

第 8 図 77 K および 297 K における W/f - f 曲線

Fig. 8. W/f versus f curves at 77 K and 297 K.

W : 鉄損, f : 励磁周波数, h および e : 定数

ではほぼ表わされるものとされてきたが、近年、方向性けい素鋼板の進歩に伴って、いわゆる Anomalous Loss の研究が活発になされ、 W/f - f 曲線の低周波域における著しい非直線性が明らかにされた。また、その機構についても、動損失が磁区構造の動態に強く依存していることが明らかになった⁽¹⁰⁾ ほか、一部には磁気余効⁽¹¹⁾ やスピン緩和⁽¹²⁾ の寄与も検討されている。

前章で示された低温での鉄損の増加は鋼板の抵抗率の減少によるところが大きいものと一応予想されるが、詳細な検討をするためには上記の事情から W/f - f 曲線の測定が必要と思われる。そこで、低温での高周波損失に関する資料を得る目的を兼ねて、各試料について 0.5~200 Hz の範囲で 297 K および 77 K における鉄損の測定を行なった。

第 8 図(a), (b)に代表例として G6H-L および S-23 について W/f - f 曲線を示す。また、第 9 図(a), (b)に同じ試料について(1)式で計算された鉄損増加率 ΔW の周波数依存性を示す。この図から ΔW は周波数の増加と共に最初急激に増大し、次第

(a) G6H-L

(b) S-23

第 9 図 鉄損増加率の周波数依存性

Fig. 9. Frequency dependence of relative increase in power loss at 77 K as compared with that at 297 K.

第 10 図 77 K および 297 K における
静損失-磁束密度曲線

Fig. 10. Static loss versus frequency curves at 77 K and 297 K.

第 11 図 各種試料の抵抗率-温度曲線

Fig. 11. Resistivity versus temperature curves for each sample.

に飽和することがわかる。また、各磁束密度に対する $W/f-f$ 曲線を $f=0$ に外そうして得られた静損失-磁束密度曲線を第 10 図に示すが、一般に 77 K における静損失は 297 K におけるそれに対して数 % 程度大きいことがわかる。

動損失の温度変化と抵抗率のそれとの関係を検討するために、各試料について測定した抵抗率-温度曲線を第 11 図に示す。各試料とも抵抗率の温度係数には

第 2 表 各種試料についての 77 K と 297 K と
における抵抗率の比

Table 2. Ratio of resistivities at 77 K and 297 K.

試料	$\rho(77\text{ K})/\rho(297\text{ K})$
G 6 H-L	0.802
G 6 H-C	0.815
G 9-L	0.815
S 14	0.745
S 23	0.703
S 60	0.318

ほとんど差異がないが、その絶対値はかなり異なる。よく知られているように、この程度の温度域における金属の抵抗率 ρ は温度に依存しない部分 ρ_i と温度にほぼ比例する部分 ρ_e に分けられ、

$$\rho = \rho_i + \rho_e \dots \dots \dots (4)$$

で表わされるが、けい素鋼ではシリコン含有量の増加に伴って、 ρ_i が顕著に増加するのに対し ρ_e はほとんど変化しない。従って、77 K と 297 K とにおける抵抗率の比は、第 2 表に示すように試料のシリコン含有量の減少と共に小さくなっている。

低温における鉄損の温度変化の原因の検討のために、次式で定義される量 A を考える。

$$A = \frac{W_d(77\text{ K})}{W_d(297\text{ K})} \cdot \frac{\rho(77\text{ K})}{\rho(297\text{ K})} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 W_d は鉄損から $W/f-f$ 曲線の外そうによって得た静損失を差し引いて得た動損失である。もし、 W_d がすべてジュール損失で、かつ 77 K と 297 K とで磁区構造の動態に差異がなければ、すなわち W_d の温度変化がすべて ρ の変化によっているとすれば A は 1 となる。

第 12 図に代表例として G 6 H-L, G 6 H-C および S-23 について A と f の関係を示す。低周波域の一部を除いて A は 1 よりやや小さい値を示す傾向があるが、周波数が高くなるに従って 1 に近い一定値に近づく。 A の 1 からのずれは方向性 (L) 試料では G 9-L の場合も含めて 10~200 Hz の範囲で 0.05 以内であるのに対し、無方向性試料では最大 S-14 で -0.14, S-23 で -0.17, S-60 で -0.35 と等級が下がるに従って大きくなっていることがわかった。また、方向性でも C 方向の試料では L 方向の場合に比べてずれが大きい。しかしながら、 A の 1 からのずれが大きいのは 30~20 Hz 以下の周波数域においてであり、実用上主として問題となる商用周波数以上の領域ではずれはほぼ 0.1 以下であるので、この領域における動損失の温度変化の 90% 以上は抵抗率の変化によって説明できると考えてよいであろう。この説明は、本測定に用いた試料が第 2 表のように抵抗率の温

第 12 図 各種試料における A の周波数による変化

Fig. 12. " A " plotted against frequency.

度変化の大きく異なる種類にわたっていることを考慮すれば、ほぼ間違いないものと考えられる。

A の 1 からのずれに関しては周波数が低いほど、また鉄損中に含まれる静損失の割合が大きいほどずれが大きいことから、 $W/f-f$ 曲線の外そうによる静損失決定の誤差がある程度関与していることも考えられるが、それだけでは十分に説明できない。その原因としては、磁区構造の動態の変化その他の要因が考えられるが、その追求のためには更に多くの実験が必要であり、静損失の温度変化の原因と共に今後の研究の課題であろう。

5. む す び

本研究では主として実用的な観点から各種けい素鋼板の 77~297 K における鉄損および磁化特性の温度変化を実用試験法の規模で測定し、その原因を検討した。その結果は次のように要約できる。

(1) 鉄損は一般に温度の低下と共に増大する。このうち静損失も温度の低下と共にやや増大する傾向を示すが、商用周波数以上の周波数域では鉄損増加のほとんどの部分が抵抗率の減少に伴うジュール損失の増加によって説明できる。従って、シリコン含有量の少ない低級けい素鋼板では抵抗率の温度変化割合が大きいため低温における鉄損の増加も大きい。なお、30~20 Hz 以下の低周波域では、鉄損の温度変化の原因について、抵抗率の変化だけでは説明できない部分がかなり存在する。

(2) 商用周波数での交流透磁率は低磁束密度域では低温において小さくなるが、これは鉄損の増加と対

応している。しかし、高磁束密度域では逆に低温の方が透磁率が大きくなる。これは低温における飽和磁化の増大の影響が、磁気異方性エネルギーやうず電流密度増大の影響を凌駕するためと考えられる。

本研究では液体窒素温度までの測定にとどまったが、更に液体水素あるいは液体ヘリウム温度まで測定範囲を拡大することが実用的観点あるいは損失の機構解明の観点から望まれよう。

終りに、本研究にあたって試料の御提供をいただいた新日鉄生産技術研究所 山本孝明次長および野沢忠生氏、有益な御討論をいただいた日立製作所 奥山賢一氏および乾 芳彰氏、岐阜大学 佐々木 堂教授に深く感謝の意を表する。(昭和 53 年 3 月 6 日受付)

文 献

- (1) K. J. R. Wilkinson: "Prospect of Employing Conductors at Low Temperature in Power Cables and in Power Transformers", *Proc. Instn. Elect. Engrs*, **113**, 1509 (1966)
- (2) M. Lair: "Travaux de developement en vue de la construction dan protoyne de cryotransformateur", *Bull. Inst. Intern. Froid. Suppl.* **1**, 291 (1969)
- (3) Y. Inui, et al.: "A Feasibility Study and Experiments on a Cryoresistive Transformer Cooled at -150°C with Fluorocarbon", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* **96**, 1831 (1977)
- (4) E. H. Brown & J. R. Brennard: "Magnetic Losses at Low Temperatures", *J. Appl. Phys.* **30**, 112 (1959)
J. J. Gniwewek & E. Ploge: "Cryogenic Behavior of Selected Magnetic Materials", *J. Res. Nat. Bur. Stand.* **69-C**, No. 3 (1965)
- (5) 中田・石原・松原・中野: 「超低周波鉄損測定への波形記憶装置の応用」電気学会磁性材料研資 MAG-75-35 (昭 50-12)
- (6) 山田・太田: 「OP アンプを利用した繰り返し消磁回路」固体物理 **10**, 363 (昭 52-7)
- (7) 例えば, F. Brailsford: *Physical Principles of Magnetism*, p.232 (1966) D. Van Nostrand
- (8) C. D. Graham, Jr.: "Temperature Dependence of Anisotropy and Saturation Magnetization in Iron and Iron-Silicon Alloys", *J. Appl. Phys.* **31-S**, 150 (1960)
- (9) A. Ferro, et al.: "Temperature Dependence of Power Loss Anomalies in Directional FeSi-3%", *IEEE Trans. Magnetics MAG-12*, 870 (1976)
- (10) 例えば, C. R. Boon & J. A. Robey: "Effect of Domain Wall Motion on Power Loss in Grain-Oriented Silicon-Iron Sheet", *Proc. Instn. Elect. Engrs*, **115**, 1535 (1968)
K. J. Overshott, et al.: "Magnetic Properties of Grain-Oriented Silicon-Iron", *ibid.* **115**, 1840 (1968)
K. J. Overshott: "The Use of Domain Observations in Understanding and Improving the Magnetic Properties of Transformer Steels", *IEEE Trans. Magnetics MAG-12*, 840 (1976)
- (11) 佐々木・桂川: 「低周波における軟質磁性材料の異常磁気損失」電学論 A, **97**, 601 (昭 52-12)
F. Brailsford & R. Fogg: "Anomalous Iron Losses in Cold Reduced Grain-Oriented Transformer Steel at Very Low Frequencies", *Proc. Instn. Elect. Engrs*, **113**, 1562 (1966)
- (12) 榊・山岸: 「磁壁の制動係数に寄与する一因子について」昭 52 電気学会全大 No. 418