

© 1991 ISIJ

技術報告

軟磁性ステンレス鋼のパルス応答性に及ぼす
Cr および Al 量の影響

本 蔵 義 信*・藤 井 秀 樹*

Effects of Cr and Al Contents on the Pulse Response Property
in Soft Magnetic Stainless Steels

Yoshinobu HONKURA and Hideki FUJII

Synopsis:

Soft magnetic stainless steels are used for the yoke in fuel injectors to require a good corrosion resistance. The pulse response property of the yoke material is essential to the dynamical performance of fuel injectors. However, effects of alloying elements on the property is not clear.

An equipment measuring the pulse response property is devised to investigate various Fe-Cr-Al alloys including commercial magnetic stainless steels. The ring specimens used in the equipment are provided with a slit to simulate the injector system. The magnetic response to a magnetizing pulse current is measured so that the relaxation time can be obtained to estimate the pulse response property.

The results obtained show that the relaxation time mainly depends on the specific resistance of the alloy specimens. It decreases with the increase in the specific resistance, though the magnetic properties such as the coercive force are hardly affected. As a result, it has been found that a soft magnetic stainless steel of 10Cr-3Al composition is recommendable to the yoke material, better than 45Ni-permalloy or 12Cr-0.8Si-0.3Al stainless steel previously used.

Key words: soft magnetic stainless; alloying element; pulse response; specific resistance; fuel injector.

1. 緒 言

耐食性に優れた軟磁性ステンレス鋼は、腐食環境で使われる電磁弁、磁気センサーおよび磁界発生機器などのヨーク材料として広く使用されている。代表的な軟磁性ステンレス鋼には 12Cr-2Si 鋼¹⁾ 及び 12Cr-0.8Si-0.3Al 鋼²⁾ があり、これらは耐食性に優れた 12Cr ステンレス鋼に Al あるいは Si を添加して磁気特性を改善したものである³⁾。軟磁性ステンレス鋼は、純鉄や珪素鉄あるいはパーマロイに比べて透磁率が劣るので、これまで主要な実用軟磁性材料としては位置づけられていなかった。しかしながら最近開発されたパルス駆動型電磁弁においては、軟磁性ステンレス鋼がパルス応答性すなわち入力パルス信号に対する材料中に発生する磁化の時間応答性に優れた軟磁性材料として注目され始めている⁴⁾。

この種の電磁弁は、弁の開閉時間をパルス信号で制御して、流量を計量する。代表的なものに自動車用の電子燃料噴射弁⁵⁾ がある。これは、電子制御式の燃料噴射装

置で燃料を高精度に計量してエンジンに供給するものである。この装置の性能はパルス信号に対する弁の開閉時間の応答性⁶⁾ によって評価される。弁の磁芯に使用される軟磁性材料のパルス応答性は、原理的には交流磁界に対する動的磁化特性と同じものと考えられる。一般に動的磁化特性は交流磁界に対する位相の遅れあるいは交流電力の損失で評価され、それらの特性値は、材料の磁気特性と抵抗率によって左右される⁷⁾。しかしながらパルス応答性では、パルス磁場に対する材料の磁化の緩和速度を問題とし、その特性に対する材料特性の影響に関しては系統的な研究が行われていない。これは、その特性が試料の形状や大きさにも依存するために標準的な評価方法を確立することが困難であることに関係しているものと思われる。特に自動車用のパルス駆動型電磁弁は、最近に開発された装置で、パルス応答性の計測に関しては、適当な試験方法がまだ確立されていない。

そこで本研究では、パルス駆動型電磁弁を想定したパルス応答試験方法を新たに考案した。これについては 3 節で詳細に記述する。次に、合金元素量を変化した種々

平成 2 年 4 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 9 月 3 日受付 (Received Sep. 3, 1990)

* 愛知製鋼(株)研究開発部 (Technical Research Department, Aichi Steel Works, Ltd., Wanowari Arao-cho Tokai 476)

の軟磁性ステンレス鋼について、磁気特性、抵抗率ならびにパルス応答性を測定し、それらの抵抗率ならびに磁気特性がパルス応答性に及ぼす影響を検討する。

2. 試料と試験方法

2.1 試料

用いた試料は、Cr 量を 5, 10, 15 および 20% の 4 水準に、Al 量を 0, 3 および 6% の 3 水準にして、それらを組み合わせた 12 種類の Fe-Cr-Al 合金である。これらの化学組成を Table 1 に示す。ここで C や Si などの不純物元素は可能な限り低く抑えた。

これらの試料は、いずれも 30 kg 真空誘導炉で溶製した後 30 mm ϕ に熱間鍛伸された。その後、機械加工を施した後に熱処理して磁気測定、電気抵抗測定及びパルス応答性試験に供した。その熱処理の条件は、真空中で 900°C-2 h 保持後、100°C/min の速度で 600°C まで冷却するものである。

なお比較のために、これまで燃料噴射弁に実用されている主な軟磁性材料である、軟鋼、45Ni パーマロイ及び 13Cr-0.8Si-0.3Al 鋼などを取り上げ、それらのパルス応答性を比較評価した。これらの試料の化学組成を参考のために Table 2 に示す。

2.2 磁気測定および電気抵抗率の測定法

磁気測定には、BH トレーサー（理研電子製タイプ BHU60）を用いて最大磁場 1600 A/m までのヒステリシス曲線を測定した。リング試験片の大きさは内径 16 mm、外径 24 mm、高さ 16 mm とした。得られたヒステリシス曲線から保磁力 H_c と磁場 1600 A/m (20 Oe) に

おける磁束密度の値 B_{20} を決定した。ここで 1600 A/m は電磁弁において用いられる印加磁場を想定した値で、電磁弁に加えられる電磁力は B_{20} 値の自乗にほぼ比例する。いっぽう材料の磁化の難易は保磁力あるいは透磁率で表され、保磁力と透磁率とは逆比例することが知られている。本実験では、透磁率の代わりに測定値のばらつきの小さい保磁力を主に用いることにした。

電気抵抗率の測定には、定電流タイプの電気抵抗測定装置（真空理工製タイプ TER2000）を使用した。

3. パルス応答性の試験片

3.1 パルス応答性の試験装置

パルス駆動型の電磁弁では、パルス電流が印加されると電磁弁内の磁芯に磁束密度のパルスが発生し、弁の開閉が行われる。その際のパルス電流に対する磁束密度の応答性が電磁弁の性能を左右する。この応答性については、これまで標準的な試験方法が確立されていないので、実用的な試験装置を試作した。その試験装置の回路ブロック図を Fig. 1 に示す。

実際にコイルに印加するパルス電流は、パルス回路の制約から厳密には台形パルスとなる（Fig. 3 参照）。パルス電流によって軟磁性材料にはパルス状の磁束密度が発生するが、磁束密度の立ち上がりの挙動と立ち下がりの挙動は、指数部の符号が異なるだけの類似の指数関数で表される。そこで、パルス応答性の試験には、立ち下がり、すなわち磁束密度がその最大値から零までパルス的に変化する時間に注目することにした。実際の電磁弁

Table 1. Chemical compositions of specimens (wt%).

Samples	C	Si	Mn	Cr	Al	N
1	0.010	0.01	0.03	4.82	0.001	0.0025
2	0.006	0.03	0.00	9.73	0.001	0.0026
3	0.016	0.03	0.01	15.03	0.000	0.0034
4	0.013	0.01	0.00	19.47	0.001	0.0072
5	0.003	0.06	0.02	4.71	3.011	0.0027
6	0.004	0.06	0.09	10.02	2.949	0.0028
7	0.004	0.04	0.04	15.11	2.961	0.0050
8	0.006	0.04	0.07	19.06	2.698	0.0048
9	0.006	0.10	0.09	5.52	6.146	0.0035
10	0.006	0.10	0.19	9.71	6.570	0.0040
11	0.006	0.07	0.20	14.62	6.139	0.0043
12	0.006	0.11	0.19	19.71	6.128	0.0008

S $\leq$ 0.005% Mo, Cu, Ni $\leq$ 0.10%

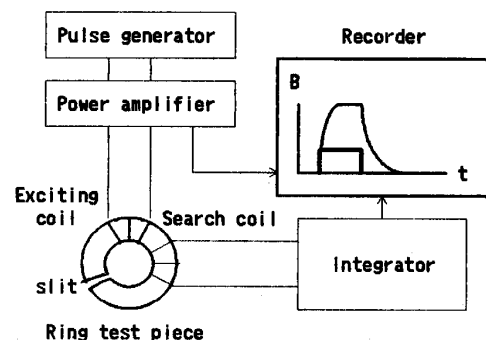


Fig. 1. Block diagram of the equipment for measuring the pulse response property.

Table 2. Chemical compositions of soft magnetic steels used for fuel injectors (wt%).

Samples	C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Al	N	Pb
S10C	0.0	0.02	0.21	0.005	0.01	0.02	0.013	0.0014	—
45Ni permalloy	0.002	0.02	0.61	0.002	44.8	0.05	0.005	0.0032	—
12Cr-0.8Si-0.3Al	0.008	0.76	0.24	0.018	0.16	12.23	0.251	0.0063	0.20

Cu, Mo $\leq$ 0.05%

は可動子と固定子との間に空隙を持っていることを考慮して、試験片としては空隙付のリング試料を用いている。この空隙によって試験に用いる磁性材の磁気回路を実際の電磁弁の磁芯のそれに十分に近づけることができる。本試験が適切であることは、著者らが先に報告した電磁弁そのものの応答性試験と比較することによって確認した⁸⁾。

回路ブロック図に見られるように、まず発振器で作られた1個のパルス信号は、電力増幅器で増幅されて試料の励磁コイルに加えられる。記録計に現れる磁束密度の立ち下がり、図のように、指数関数的な減衰過程を示す。これは次式によって表すことができる。

$$B(t) = B_{\max} \exp(-t/\tau) \dots\dots\dots (1)$$

ここで τ は緩和時間と呼ばれる減衰の速さの目安となるパラメーターである。式(1)を変形して両辺の対数を取ると

$$\ln B(t) = \ln B_{\max} - t/\tau \dots\dots\dots (2)$$

となるので、 $\ln B(t)$ を時間 t に対してプロットすると、 $\ln B_{\max}$ から出発する右下がりの直線に乗る。実際に測定した例をFig. 2に示す。ここで $\ln B_{\max}$ が $1/e$ に低下する時間を求めれば緩和時間 τ が決定される。図では $B_{\max} = 1.1 \text{ T}$ であるので、その $1/e$ の値は 0.4 T にあたる水平線との交点がそれぞれの緩和時間となる。

しかしながら、先に述べたように実際のパルスは台形であるので、必然的にわずかな時間の遅れ Δt の影響が測定した緩和時間の中に加わる。その影響を取り除くために次の実験を行った。パルス回路を調整して $\Delta t = 10 \sim 240 \mu\text{s}$ に変化させ、種々の材料の緩和時間 τ を測定

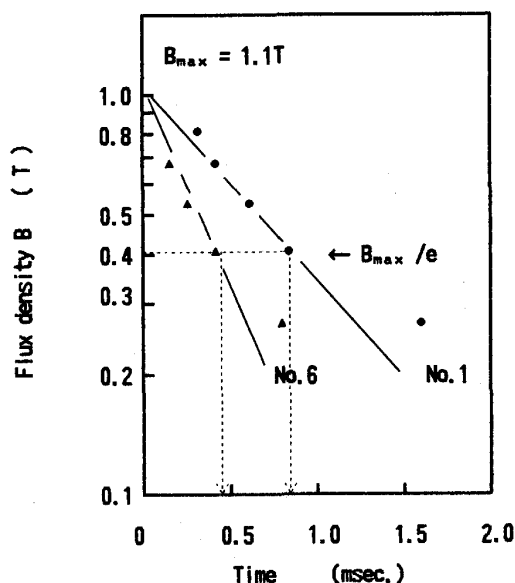


Fig. 2. Time dependence of the flux density B .

し、Fig. 3に τ と Δt の関係をプロットした。見られるように、いずれの材料についても τ は Δt に対して良い直線関係を示す。 $\Delta t = 0$ に外挿した τ の値は、理想的な矩形パルスに対応する緩和時間と考えられ、以下の評価にはこのようにして求められた τ を用いる。

3.2 試験条件の設定

パルス応答性評価試験で測定される緩和時間 τ は、最大磁束密度 $B_{\max}$ 、試験片の形状およびパルスの形状などの試験条件に左右されることが予測される。そこで試

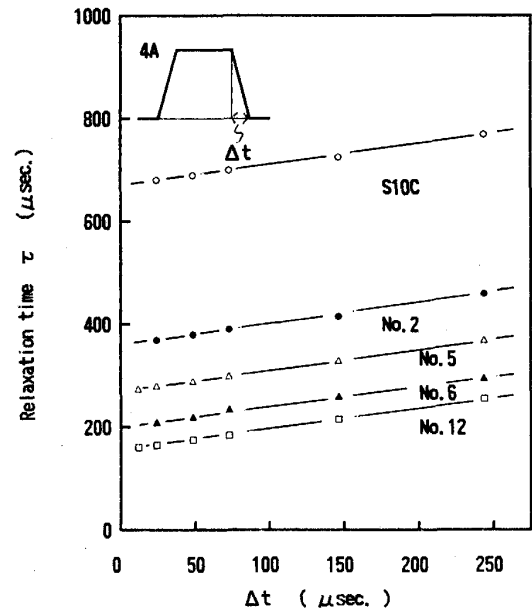


Fig. 3. Relationship between the relaxation time and Δt , where Δt means the interval for the pulse current to decrease from 4A to zero.

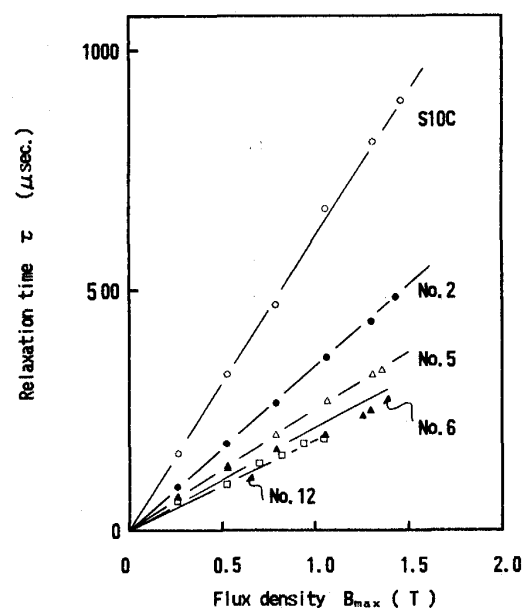


Fig. 4. Relationship between the relaxation time τ and the flux density $B_{\max}$.

験条件を設定するために τ とこれらの試験条件との関係を調査した。

3・2・1 緩和時間と磁束密度 B_{max} との関係

Fig. 4 は、いくつかの試料についてパルス磁場の強さを変えることによって求めた緩和時間 τ と磁束密度 B_{max} との関係である。この図から明らかなように、緩和時間 τ は、いずれの試料においても磁束密度 B_{max} の増加に伴って直線的に増加し、その関係はいずれの試料においても、

$$\tau = c \times B_{max} \cdots \cdots (3)$$

で表される。ここで、その傾き c は試料によって異なった値を取る。

このように、緩和時間 τ は実験条件の一つである磁束密度 B_{max} の影響を強く受け、しかもその影響の大きさは試料によって異なっている。従って材料固有の緩和時間については、磁束密度 B_{max} の大きさを一定にして求めるべきである。しかしながらそれを一定にするのは困難であるので、本実験では、その代わりにパルス電流の波高値を一定すなわち 4A として、 τ と磁束密度 B_{max} を測定して、 $\tau^* = \tau/B_{max}$ でもって定義した規格化した緩和時間 τ^* を求めた。そしてこの値でもって材料固有の緩和時間を評価することにした。

3・2・2 試験片形状

試料 No. 6 を使用して緩和時間 τ^* に及ぼすリング試験片の高さと幅の影響を調査した。測定は、いずれの試験片にも同一のパルス磁場を負荷して行った。 τ^* はリング試験片の高さが高くなるにつれて、またその幅が大きくなるにつれて大きくなる。これは試験片の寸法と形状によって渦電流の大きさが異なるためと考えられる。

試験片の寸法と形状の違いは、静的な磁気特性の測定では問題とならないが、動的な磁気特性であるパルス応答性においては、大きな影響を与える。そこで、本研究では、実際の電磁弁の大きさを考慮してリング試験片は外径 24 mm ϕ 、内径 16 mm ϕ 、高さ 16 mm に固定することにした。

3・2・3 リング試験片の空隙

前に述べたように、電磁弁は可動子と固定子との間に空隙を持っているので、空隙付のリング試験片を用いる方が望ましい。これを確認するために、パルス磁化過程に及ぼす空隙の影響について調査した。

Fig. 5 は単純なリング試験片と 0.3 mm の空隙付のリング試験片に 1600 A/m のパルス磁場を入力した時に両試験片に発生する磁束密度の時間的な変化の様子を示したものである。

単純なリング試験片に発生する磁束密度は、0.2 T 程度であるが、空隙を付けると、磁束密度は 1.1 T 以上へと著しく増加する。外部磁場が 1600 A/m から零まで変化すると、反磁場が働かないリング試験片の場合には、材料の磁束密度は B_r 以下には減少せず、磁束密度 B_{20} と残留磁束密度 B_r の間を変化するだけである。しかし、空隙付リング試験片の場合は、反磁場の力によって残留磁束密度はほぼ消失してしまい、次のパルス信号が入力されたとき、磁束密度はほぼ零から B_{20} まで大きく変化するためであると考えられる。

いっぽう、磁束の立ち下がりについては空隙付の試験片の方が急峻となる。これは、磁壁の移動が急速に行われるようになることを意味している。よく知られているように、磁壁の移動はミクロ的に見るとスピンの回転の

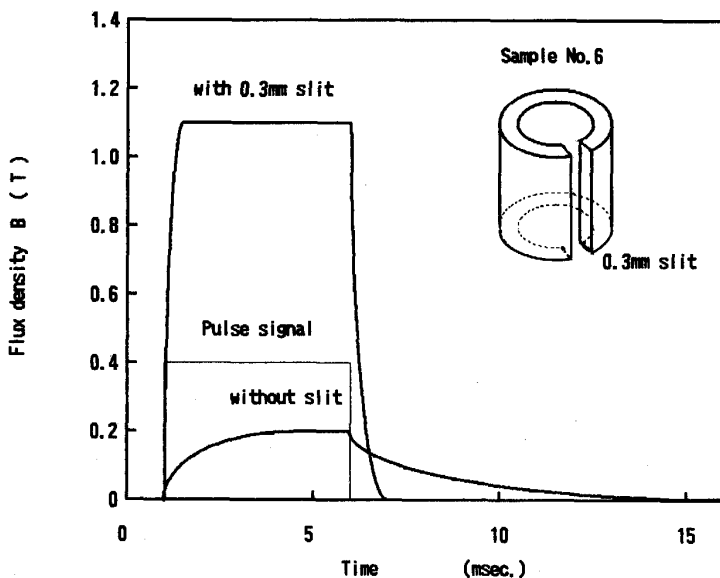


Fig. 5. Effect of the slit attached to the ring test piece on the time dependence of flux density.

伝播で、磁壁を動かそうとする圧力は磁化と反対向きに負荷された外部磁場の大きさに比例する⁷⁾。空隙を付けることにより大きな反磁場が発生するが、これが磁壁への圧力となってその移動を加速することになるものと考えられる。

このように磁化過程は空隙の有無によって大きく変化し、空隙を付けることによって、実際の電磁弁の挙動にかなり近くなる。試験片には空隙を付けることにした。

さらに空隙幅を選定するために、次の実験を行った。Fig. 6 は、空隙幅を 0.3 mm と 0.8 mm の 2 種類に変化して、パルス応答性に及ぼす影響を調べた結果である。 τ^* は空隙幅にはほとんど影響を受けないことが分かる。これは、外部磁場の大きさが同じ場合に、空隙幅が長くなると磁束密度が小さくなるが、一方それに比例して緩和時間 τ が小さくなるためである。この結果に基づいて空隙幅を 0.3 mm に選定した。

3.2.4 パルス電流の波形

試験に用いるパルス電流の波形は、実際の電磁弁に使用されているパルス波形を参照して高さ 4A、幅 5 ms の角形パルスとした。

以上の検討結果を基にして設定した試験条件を Table

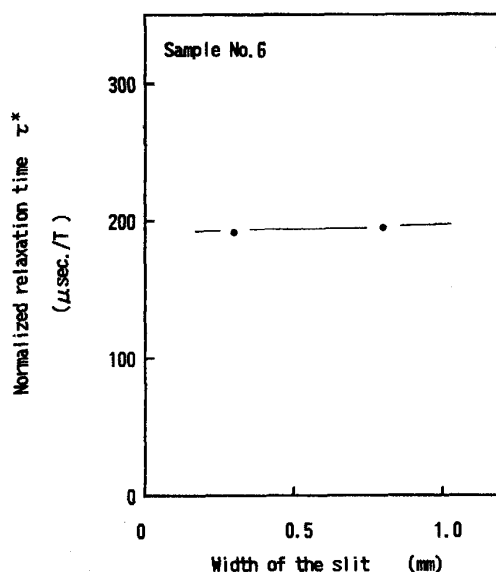


Fig. 6. Effect of the width of slit on the normalized relaxation time τ^* .

Table 3. Test conditions.

Current pulse	Height Width	4A 5 ms
Size of test piece	Height Outer diameter Inner diameter	16 mm 24 mm 16 mm
Slit width Magnetizing force		0.3 mm 3184 A/m

3 にまとめた。

4. 実験結果

4.1 軟磁気特性

まず試料をその Al 量に応じて 3 グループに分け、それらの保磁力の値を試料の Cr 含有量に対して Fig. 7 にプロットした。これらの合金の軟磁気特性は Al 量の増加にともなって向上するが、Cr 量にはあまり依存しない。この結果は、H. FALENBRACH の Fe-Cr-Al 合金の磁気特性に関する研究結果³⁾ とほぼ同じ傾向を示している。

いっぽう Fig. 8 は、磁束密度 B_{20} の値を同じように

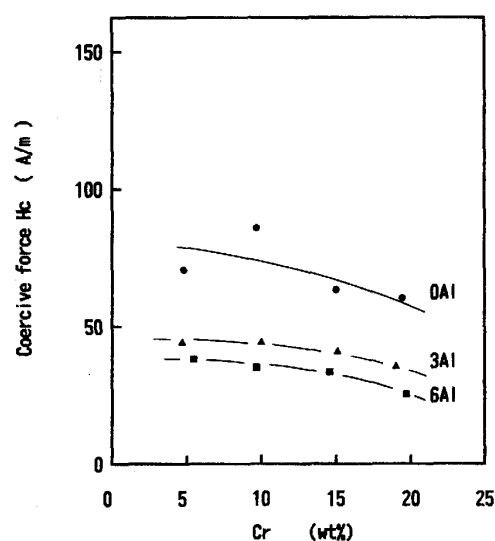


Fig. 7. Effect of Al and Cr contents on the coercive force H_c .

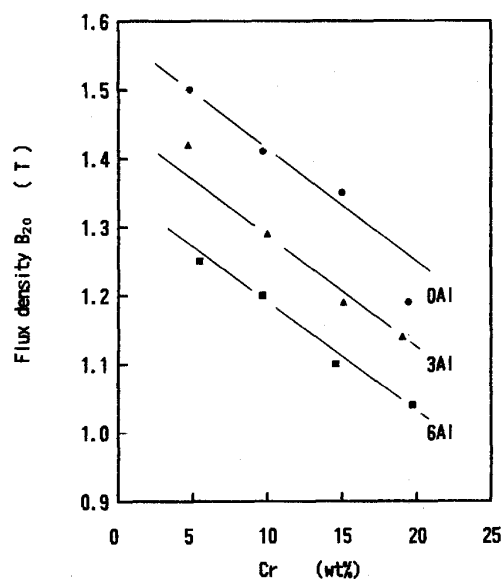


Fig. 8. Effect of Al and Cr contents on the flux density B_{20} .

して示したものである。いずれの Al 量においても Cr 量の増加にともなって直線的に減少する。これに対して、同一の Cr 量について比較すると、Al 量の増加にともなってそれはほぼ直線的に減少する。従って、大きな磁束密度 B_{20} を得るためには、Cr と Al の添加量は可能な限り少なくすることが必要である。

4.2 抵抗率

抵抗率の測定結果を同じようにして Fig. 9 に示す。その値は $30 \sim 137 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ まで変化する。いずれの Al 量においても抵抗率は Cr 量の増加にともなって増

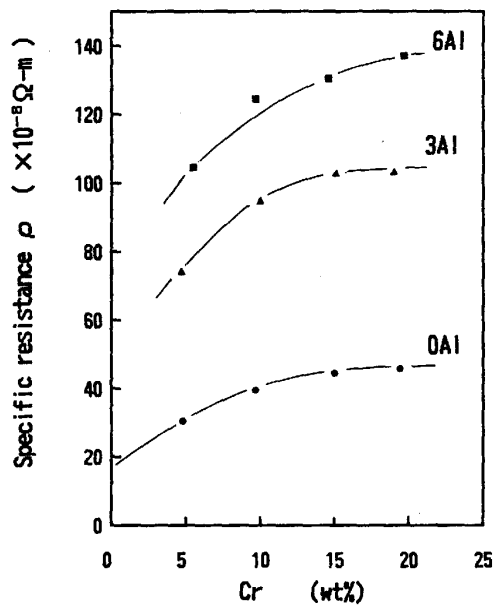


Fig. 9. Effect of Al and Cr contents on the specific resistance ρ .

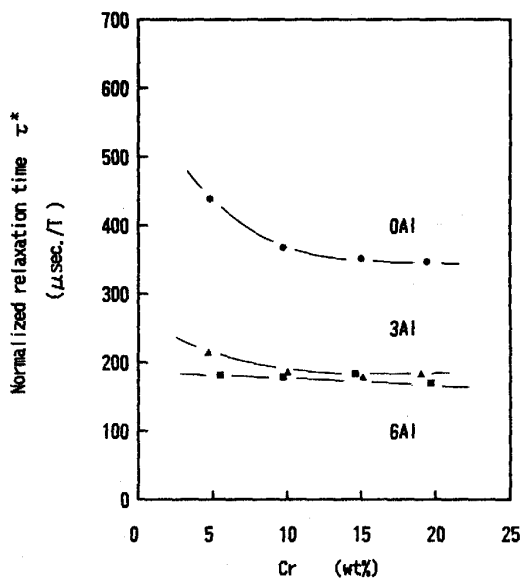


Fig. 10. Effect of Al and Cr contents on the normalized relaxation time τ^* .

加するが、Cr 量に対する増加率はしだいに小さくなる。いっぽう Al 量の増加によって抵抗率は著しく増大することが分かる。この結果は、三島や山田らの Fe-Cr-Al 合金の抵抗率に関する研究結果⁹⁾¹⁰⁾ とほぼ一致している。

4.3 パルス応答性

パルス応答性試験によって求められた緩和時間 τ^* の値の組成依存性を Fig. 10 に示す。0%Al の場合には、緩和時間は Cr 量の増加にともなって減少傾向を示すが、3% と 6%Al の場合には Cr 量の影響はほとんど見られない。Al 量が 0 から 3% に増加すると緩和時間は大きく減少するが、3%Al 以上ではほとんど変化しない。

このようになり複雑な合金元素とパルス応答性との関係を解析するために、パルス応答性に及ぼす抵抗率および磁気特性の影響を総合的に検討することにした。

4.4 パルス応答性と抵抗率の関係

まずパルス応答性と抵抗率に関する実験結果を総合して、パルス応答性 τ^* を抵抗率 ρ の関数として整理すると Fig. 11 のようになる。図中の ●印は本研究に用いた Fe-Cr-Al 合金であるが、○印は従来使用されている各種実用軟磁性材料の測定値を示す。

緩和時間は、抵抗率が $10 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ から増加するに伴って急激に低下するが、抵抗率 $100 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 以上ではほぼ飽和傾向を示す。この結果を基にして、 τ^* と抵抗率との回帰式を作成すると、測定値の分散の 96% で

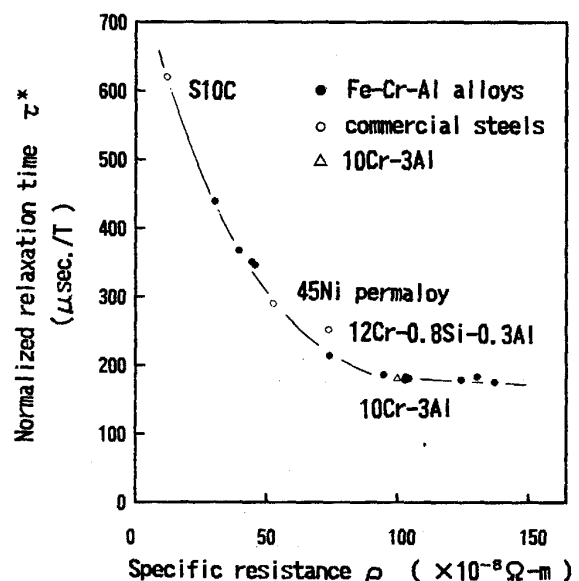


Fig. 11. Relationship between the normalized relaxation time τ^* of FeCr-Al alloys and the specific resistance ρ .

$$\log \tau^* = 2.5 - 0.6 \log \rho \dots\dots\dots (4)$$

が得られる。従って τ^* の対数と ρ の対数とは直線関係にある。

4.5 パルス応答性と磁気特性との関係

最後に、パルス応答性と磁気特性（保磁力）の関係を調べるために、試料 No. 2 を 700, 900 および 1000°C で熱処理してその保磁力と抵抗率を測定した。その結果、これらの試料の抵抗率の値は同じであるにもかかわらず、保磁力は 180, 75, 30 A/m と変化する。（透磁率としては、1500, 3500, 8500 となる。）ここで、この保磁力の範囲は通常の軟磁性ステンレス鋼の保磁力である 60~160 よりかなり広いものである。

これらの試料のパルス応答性試験を行い、 τ^* を求めてそれぞれの保磁力に対してプロットすると Fig. 12 になる。図に見られるように、緩和時間は保磁力すなわち磁気特性にはほとんど左右されないことが分かる。

パルス応答性は、先に述べたように原理的には交流磁界に対する動的磁化特性と同じであり、そのためそれは磁気特性に強く影響されると考えられる。しかしながらパルス応答性試験の結果は磁気特性の影響は小さく、これは従来の考え方とはかなり異なるように思われる。

先に報告した空隙の無い単純な試験片のパルス応答性については保磁力にかなり強く依存する⁸⁾。従って、これらの現象はおそらく試験片の空隙が作りだす反磁場が影響していると考えられる。材料の透磁率 30~180 A/m とかなり広く変化しても、空隙付の試験片の見かけ状の透磁率は、その反磁場のために 290 から 320 とほとんど変わらない。そのために、透磁率すなわち磁気特性の影響が隠れたものと考えられる。実際の電磁弁の

磁気回路においては必ず空隙が含まれるので、この結果はきわめて重要である。

5. 考 察

常識的な立場から考えれば、磁芯の電磁力によって駆動される電磁弁においては、磁芯材料の磁気的性質がその機能を支配する重要な要素であるが、自動車用の燃料噴射弁のように 5 ms 程度の短い電流パルスによって駆動される場合には、問題となる磁気特性は静的磁気特性ではなく、その周波数に応じた動的な磁気特性に注目しなければならない。

パルス磁界に対する動的磁気特性の測定は、一般にかなり複雑なものになると思われる。これに対してここに提案するパルス応答性試験は、実際の電磁弁による実機テストに近いもので、簡便な電磁弁用磁芯材料の実用試験である。実際にこの試験で評価した軟磁性ステンレス鋼を用いて電磁弁を試作し、実機テストを行った結果、このパルス応答性試験が十分に信頼性を持つことが確認された⁸⁾。

前節に示したように、軟磁性ステンレス鋼のパルス応答性は、磁気特性にはほとんど依存せず、むしろその抵抗率に強く依存すると結論される。これらの結論は、透磁率よりはむしろ抵抗率に注目することによって、従来の軟磁性材料よりパルス応答性に優れた軟磁性ステンレス鋼の開発が可能であることを示唆している。

そこで、各種電磁弁用材料のパルス応答性試験の結果を比較検討する。Fig. 11 によれば、実用材料（○印）を含めてすべての材料について緩和時間 τ^* はその抵抗率に依存することが明らかである。ここで注目すべきことは、従来使用されている、S10C, 45Ni パーマロイおよび 12Cr-0.8Si-0.3Al 鋼の緩和時間はかなり大きい、すなわち応答性がかなり低いことである。特に、パーマロイはその優れた軟磁気特性からパルス応答性にも優れていると考えられるが、パルス応答性に関しては必ずしも軟磁性ステンレス鋼よりも優れているとは言えないようである。これは、パーマロイが軟磁性ステンレス鋼に比較して抵抗率が小さいことによると考えられる。それに対して、本実験で試作した試料、例えば No. 6 すなわち 10Cr-3Al 鋼（△印）のそれは緩和時間 τ^* が 180 μ s/T で現用材料に比べて小さく、優れたパルス応答性を具えていることがわかる。

以上述べたように優れたパルス応答性を得るためには抵抗率を $100 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 程度に大きくすることが必要であるが、そのような高い抵抗率を得るために、Fig. 9 を使って本研究で試作した材料の抵抗率の組成依存性に

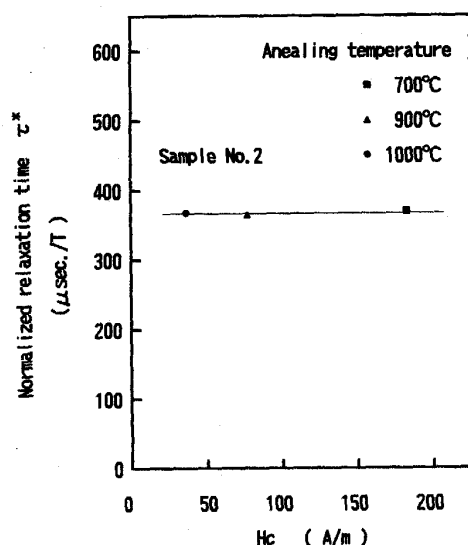


Fig. 12. Effect of the coercive force H_c on the normalized relaxation time τ^* .

ついて考察する。図から読み取られるように、10~13% Cr の軟磁性ステンレス鋼においては、抵抗率の増加に関して、Al 量の添加がきわめて有効であり、3% の添加量で $100 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 程度の抵抗率を得ることが可能になる。この事実に基づいて上記 No. 6, すなわち 10Cr-3Al 鋼が優れたパルス応答性を具えた電磁弁用磁芯材料として提案される。

6. 結 論

5~20 wt% Cr, 0~6 wt% Al の 12 種類の Fe-Cr-Al 系合金を作製し、磁気特性および抵抗率を測定した。さらに実用的なパルス応答性評価試験装置を試作し、それらの合金のパルス応答性を評価し、測定結果を合金組成に関して整理した結果、以下の結論を得た。

(1) 試作した試験装置では、空隙付のリング試験片にパルス電流を入力し、その磁束密度の減衰曲線から緩和時間 τ^* を測定する。この装置は動的磁気特性に追従するもので、電磁弁の実機テストに対応する。

(2) 緩和時間 τ^* は主として抵抗率に依存する。それは抵抗率の増加とともに減少し、抵抗率が $100 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 以上で飽和傾向を示す。

(3) 従来優れた軟磁性材料として注目されていた 45Ni パーマロイは、パルス応答性に関してはむしろ軟磁性ステンレス鋼よりも劣ることがわかった。その理由

は抵抗率が低く動的磁気特性が低いためと結論される。

(4) Fe-Cr-Al 合金の抵抗率は、Cr と Al 量の増加にともなう増加するが、Cr 10~13% の範囲では Al の添加が特に有効である。

(5) 10Cr-3Al の軟磁性ステンレス鋼は、高い抵抗率を持ち従来の実用軟磁性材料に比べて優れたパルス応答性を示す。

終わりに臨み、本論文の作成に際して有益な御助言をいただいた岩間義郎名古屋大学名誉教授に感謝を申し上げます。

文 献

- 1) 阿部有道: 油圧技術, **6** (1976), p. 48
- 2) 加藤哲男, 関尾 勲, 草加勝司: 電気製鋼, **41** (1970), p. 127
- 3) H. FAHLENBRACH: Arch. Eisenhüttenwes., **20** (1949), p. 293
- 4) 小出 紘, 加藤祐三, 田坂一美, 藤田 眞, 高城孝明: トヨタ技術, **35** (1985), p. 110
- 5) 大森徳郎, 近藤利夫: 自動車技術, **43** (1989), p. 62
- 6) 野村俊夫, 高岡良保, 谷野智康, 入野博史: 自動車技術, **40** (1986), p. 1128
- 7) 太田忠造: 磁気工学の基礎 (1986), p. 287 [共立出版]
- 8) Y. HONKURA, H. FUJII and K. HAYASHI: SAE Paper 890476 (1989)
- 9) 三島徳七, 川勝一郎, 難波雄一: 鉄と鋼, **28** (1942), p. 563
- 10) 山田誠吉, 大沢秀雄: 電気製鋼, **38** (1967), p. 136