

論文 複合磁性材料によるABS用電磁弁の小型化*

Compact Magnetic Solenoid Valves Using a Composite Magnetic Material

谷村 圭宏 竹内 桂三 寺田 利昭
 Yoshihiro TANIMURA Keizo TAKEUCHI Toshiaki TERADA
 杉浦 慎也 片山 義唯 乾 勉
 Shinya SUGIURA Yoshitada KATAYAMA Tsutomu INUI

A composite magnetic material has been developed with the aim of miniaturizing magnetic solenoid valves. The material is such that both ferromagnetic and paramagnetic sections coexist within a single material, and can contribute to optimization of the magnetic circuit of a solenoid valve. This composite material exhibited superior properties, having a magnetic flux density B_{40} (Induction at H of 4000A/m) of 0.8T in the ferromagnetic section, and relative permeability μ_r of 1.01 in the paramagnetic section. The application of this material to a solenoid valve for ABS could reduce by approximately 20% volume.

Key Words : Metallic Material, Actuator, ABS (antilock braking system), Austenitic Stainless Steel, Phase Transformation, Magnetic Property

1. 結 言

近年自動車は電子制御が進んでおり、EFI(電子制御燃料噴射システム)やABS(アンチロックブレーキシステム)などはほとんど標準装備されるまでになっている。これらの電子制御システムには多くの場合何らかのアクチュエータが必要である。しかしながら自動車の中にこれらのアクチュエータを搭載するスペースは限られており、また軽量化の観点からもその小型化が強く求められている。

ABSの場合アクチュエータはブレーキの油圧を制御するために必要であり、このため多数の油圧制御用電磁弁が組み込まれている (Fig. 1)。したがってアクチュエータを小型化するにはこの電磁弁の小型化が一つの方法である。

電磁弁はその磁気回路を効率化すれば小型化できる。本報告ではこの磁気回路の効率化を実現する材料として新材料：複合磁性材料を開発し、電磁弁に適用することを検討した。

2. 電磁弁磁気回路の効率化

ABS用電磁弁の基本構造を Fig. 2 に示す。電磁弁は、コイル、ムービングコア、ステータコア、ヨークで磁気回路を構成し、コイルに電流を印加するとこの

磁気回路に磁束が流れる。この磁束の大きさに比例しムービングコアとステータコアの間に吸引力が発生し、これによりムービングコアを可動させバルブを開閉する。

ABSの場合、上記部品に加え電磁弁の中のブレーキオイルを外部と分離するシール部品：スリーブが必要である。スリーブは一般的に非磁性材料でできており、ムービングコアからステータコアへ磁束を効率的に流すのに寄与している。しかしながらスリーブが非磁性であるがゆえ、ヨークとコアの間の磁束が渡る部分では磁束の流れを妨げている。

そこでこの磁気回路を改良し、Fig. 3のようにヨー

Magnetic Solenoid Valve for Controlling Oil Flow

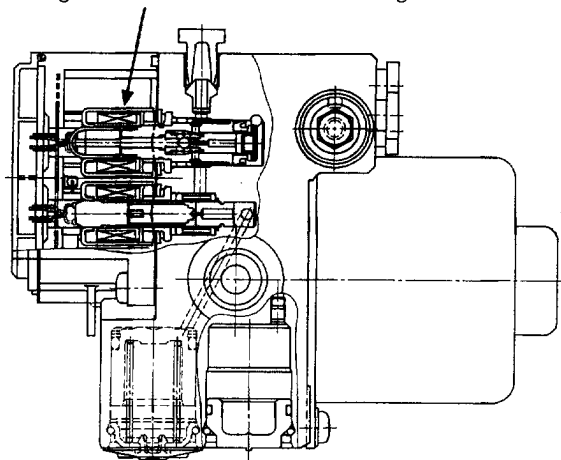


Fig.1 Actuator for ABS (Antilock Braking System)

* SAE PAPER 970852 を和文翻訳、加筆転載

クからコアへ磁束が流れる部分を強磁性にすると、磁束が流れやすくなり、必要吸引力を発生するのに要するコイルを小さくすることができる。その結果、電磁弁の外径も小さくなり小型化できる。

上記アイデアを実現するのに必要なスリーブの磁気特性を磁場解析技術を利用し求めた。その結果、強磁性部では B_{40} (4000 A/m の磁場を印加した時の磁束密度) が 0.3 T 以上、非磁性部では比透磁率: μr が 1.2 以下の磁気特性があればよいことがわかった。

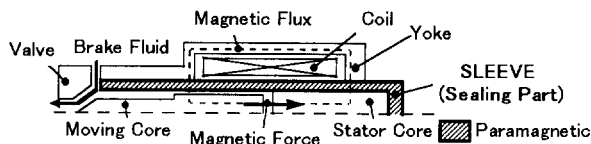


Fig. 2 Conventional Magnetic Solenoid Valve for ABS

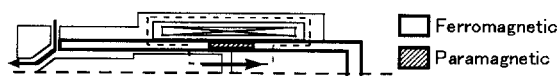


Fig. 3 Efficient Magnetic Solenoid Valve

3. 複合磁性材料の考え方

従来、強磁性の部分と非磁性の部分とを有する一体のスリーブを製造するには、強磁性と非磁性の部品を溶接やロウ付等で接合するのが一般的であった。しかしその場合、製造工数の増加および気密性・耐圧性の確保のため多くの費用が必要であった。

そこで強磁性特性と非磁性特性を一つの部材の中に共存可能な材料があれば、これらの問題点を克服できる。それには強磁性にも非磁性にも磁気特性が変化する材料が必要である。これを実現可能な材料を「複合磁性材料」と名づけた。

金属の磁気特性はその結晶構造により変化する。オーステナイト系ステンレスは溶体化状態ではオーステナイト組織であり、その磁気特性は非磁性である。しかしながらこれに冷間加工をおこなうと、マルテンサイト組織へ相変態し強磁性を示す¹⁾。

このオーステナイト系ステンレスの相変態を複合磁性材料に利用することを考えた。Fig. 4 のように非磁性オーステナイト組織の素材から、冷間加工により製品形状に変形すると同時にマルテンサイトへ変態させ強磁性にする。この一部分を加熱してもとのオーステナイトに戻すと強磁性の部分と非磁性の部分とを一つの部品の中に実現できる。

ただし、従来からあるオーステナイト系ステンレスではマルテンサイトへの変態量が小さく、製品に必要

な強磁性を生み出すことができない (SUS 304 の場合冷間圧延 80% で $B_{40}=0.015$ T)。そこで強磁性と非磁性の両方の目標を実現可能な材料組成を検討した。

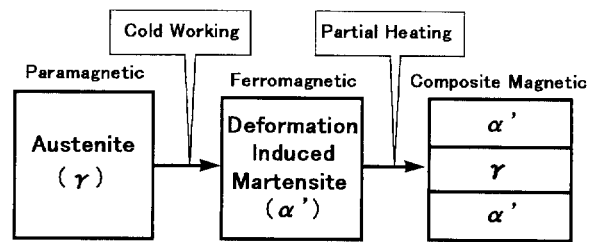


Fig. 4 Schematic of Production Process of Composite Magnetic Property

4. 最適材料組成の検討

オーステナイト系ステンレスの組織の安定性はその組成により変化することが知られている。オーステナイト系ステンレスの組織の安定性を示す指標として平山の Ni 当量²⁾ Heq :

$$Heq = Ni\% + 0.65 Cr\% + 1.05 Mn\% + 0.35 Si\% + 12.6 C\% \quad (1)$$

がある。 Heq が大きいとオーステナイトが安定であり、 Heq が小さいとマルテンサイトが安定であることを示している。

複合磁性材料として必要なのはオーステナイトとマルテンサイトが共に安定に存在しうることである。このため Heq を利用し複合磁性材料の材料組成を最適化することを試みた。

Table 1 に示すような Heq の異なる組成の溶体化処理材を用意した。これらをそれぞれ 70% 冷間圧延しマルテンサイト変態させ、圧延後の強磁性特性 B_{40} を測定した。さらにこれらに 1050°C で 30 分間熱処理しオーステナイトに逆変態させ、その時の非磁性特性 μr を測定した。各材料の磁気特性を Heq に対し整理すると、Fig. 5 のような結果が得られた。

Heq の増加に伴いマルテンサイトよりオーステナイトが安定となるため、強磁性特性 B_{40} が減少するのに対し非磁性特性 μr は 1 に近づき向上する。反対に Heq が小さくなるとマルテンサイトが安定となり強磁性特性 B_{40} が向上するが非磁性特性は低下する。したがって強磁性目標 $B_{40} \geq 0.3$ T と非磁性目標 $\mu r \leq 1.2$ を両立可能な最適材料組成は Heq で 20.5 ~ 21.5 の範囲であることが判明した。

5. 複合磁性特性の付与方法の検討

先述のように複合磁性特性は冷間加工と熱処理によ

Table 1 Chemical compositions of steels for pre-test

No.	C	Si	Mn	Ni	Cr	N	Heq
1	0.012	0.30	0.52	8.32	17.45	0.0018	20.5
2	0.023	0.30	0.50	8.39	17.58	0.0025	20.7
3	0.050	0.29	0.51	8.36	17.70	0.0033	21.1
4	0.030	0.10	0.50	8.34	17.84	0.0028	20.9
5	0.029	0.46	0.48	8.41	17.70	0.0042	21.0
6	0.031	0.86	0.51	8.33	17.91	0.0034	21.2
7	0.030	0.32	0.12	8.76	17.68	0.0011	20.9
8	0.031	0.31	0.79	8.38	17.72	0.0031	21.2
9	0.031	0.30	0.51	8.01	17.68	0.0028	20.5
10	0.030	0.29	0.51	8.17	17.90	0.0044	20.8
11	0.029	0.30	0.50	8.67	17.99	0.0036	21.4
12	0.030	0.28	0.50	8.37	17.23	0.0032	20.6
13	0.031	0.29	0.50	8.40	17.40	0.0022	20.7
14	0.031	0.29	0.52	8.37	18.32	0.0037	21.3
15	0.032	0.29	0.51	8.32	17.98	0.0120	21.1
16	0.032	0.29	0.50	8.35	17.98	0.0190	21.1

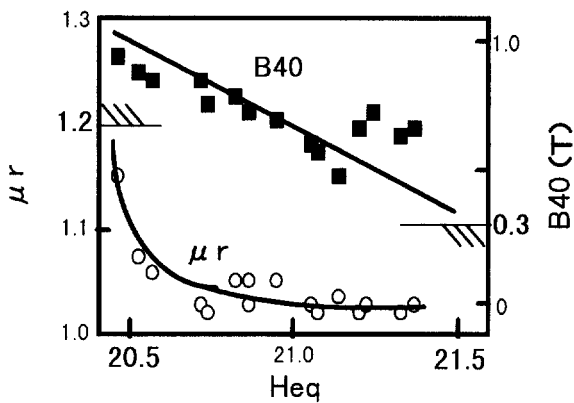


Fig.5 Variation of Magnetic Properties as a function of Heq (Hirayama's Ni equivalent)

り付与される (Fig. 4), したがって複合磁性特性を生み出すのに最適な加工技術を確認することが必要不可欠である。複合磁性化のための工程は強磁性化技術と非磁性化技術に大別できる。

5・1 強磁性化技術

強磁性化で重要なのは、オーステナイトからマルテンサイトへの変態量を可能な限り多くすることである。しかしながら、オーステナイト系ステンレスはある温度以上ではマルテンサイトへ変態しないことが知

られている³⁾。この温度を *Md* 点という。

そこでまず複合磁性材料の *Md* 点を明らかにすることを試みた。供試材には Table 2 に示すような *Heq*=20.6~21.8 の材料を用いた。これらに引張試験機で 30% の真ひずみを加え、オーステナイトからマルテンサイトへ変態させた。試験片はひずみを付与する間任意の温度で保持した。

Fig. 6 にひずみ付与時の試験片温度と発生したマルテンサイト量との関係を示す。試験片温度が低いほどどの材料もマルテンサイトの生成量が多かった。反対に試験片温度が高くなるとマルテンサイト生成量は少なくなり、どの材料も 80℃ 以上ではマルテンサイトを生成しなかった。このことから *Md* 点は組成に関わらず約 80℃ であることが判明した。

したがって効率的に強磁性化するには、少なくとも *Md* 点である 80℃ より低い温度で加工することが必要であり、可能ならより低温で加工することが望ましい。通常室温から加工をおこなうと、加工にともなう発熱のためワーク温度は 80℃ を容易に越える。そこで Fig. 7 の方法①のように極低温から加工すれば加工温度を 80℃ 以下に制御可能であるが、極低温にするには

Table 2 Chemical compositions of steels examined (wt%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	N	Heq
0.028	0.17	0.43	8.20	17.75	0.0017	20.6
0.038	0.23	0.52	8.45	18.11	0.0015	21.3
0.038	0.28	0.55	8.75	18.19	0.0017	21.8

かなりのコスト増を招く。そこで方法②のように加工工程を細分化し、各工程ごとにワークを冷却する工程を採用し、ワーク温度を 80°C 以下に制御した。

5・2 非磁性化技術

非磁性化技術で重要なのは、非磁性化後のオーステナイトの安定性である。オーステナイトは冷間加工によりマルテンサイトへ変態することはすでに説明し、強磁性化に活用してきた。しかしオーステナイトは低温にするだけでもマルテンサイトへ変態する。この変態が始まる温度を M_s 点という。

複合磁性材料を ABS 用電磁弁に使用する場合、自動車の使用温度の下限である -40°C まではその特性が変化しないことが必要である。したがって非磁性部の M_s 点は -40°C 以下でなければならない。

Table 2 の組成の材料を 1050°C で 30 分間非磁性化処理をおこない、その M_s 点を示差走査熱量計 (DSC) で測定した。Fig. 8 に Heq と M_s 点の関係を示す。この図より複合磁性材料の最適組成とした $Heq=20.5 \sim 21.5$ の範囲内でも、 Heq が小さい側では M_s 点が

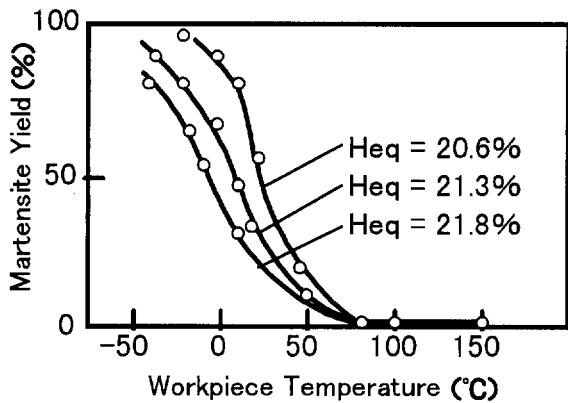


Fig.6 Martensite Yield with 30% True Strain vs. Workpiece Temperature

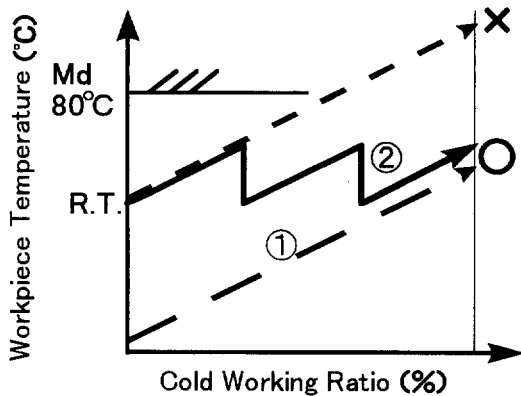


Fig.7 Concept to Maintain Workpiece Temperature below M_d Temperature

-40°C より高い温度であることがわかった。

M_s 点を -40°C 以下に制御するため材料組成を $Heq=21.0 \sim 21.5$ に制限することは、量産化を考えた場合とても対応できない。このため M_s 点を低下する他の方法を検討した。

Fe-Ni 合金や Fe-Ni-C 合金ではオーステナイト組織の結晶粒径が M_s 点に影響することが報告されている⁴⁾。これらの材料系ではオーステナイト組織の結晶粒径が 100 μm より小さくなると、大きく M_s 点が低下するといわれている。これをオーステナイト系ステンレス (Fe-Cr-Ni 合金) である複合磁性材料に当てはめることを考えた。

Table 2 の $Heq=20.6\%$ の材料に対し、熱処理温度を変化させオーステナイト組織の結晶粒径を制御した材料の M_s 点を Fig. 9 に示す。これを見ると結晶粒径が数 μm レベルになると M_s 点が大きく低下した。したがって、複合磁性材料に関してもオーステナイト結晶粒を微細化すれば M_s 点を低下できることが明らかになった。

5・3 複合磁性スリーブの加工工程

上記、強磁性化技術および非磁性化技術を ABS 電

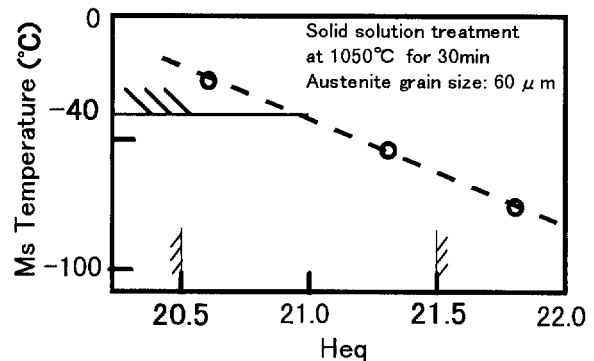


Fig.8 Variation of M_s Temperature as a Function of Heq

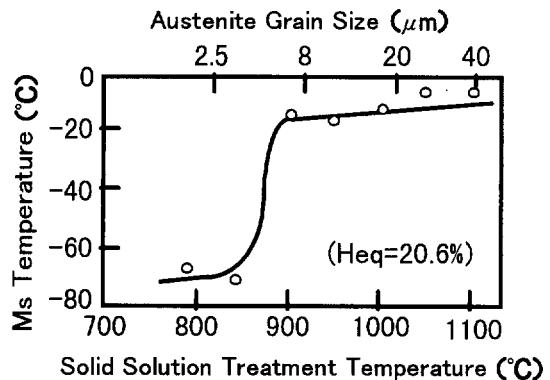


Fig.9 Effect of Austenite Grain Size on M_s Temperature

磁弁用スリーブの製造工程に導入し、Fig. 10 に示すような複合磁性化工程を確立した。

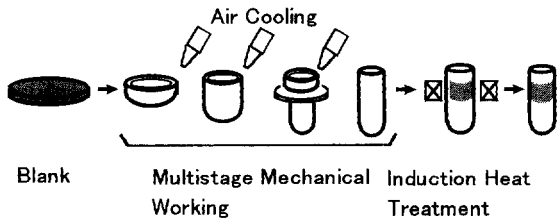


Fig.10 Production Process of Composite Magnetic Sleeve

まず非磁性オーステナイト組織の素材をプレス加工でスリーブ形状にし、同時に強磁性化する。このプレス加工を多工程に分割し、かつ各工程ごとにワークを空気で冷却することで、ワーク温度を M_d 点である 80°C 以下に制御し効率的な強磁性化を可能にした。さらに部分非磁性化処理には高周波加熱を利用し、その加熱条件を制御することでオーステナイト組織を微細化し、すべての材料組成領域で $M_s < -40^\circ\text{C}$ を実現した。

この工程から得られたスリーブの特性の代表値を Table 3 に示す。

Table 3 Magnetic properties and M_s temperature of composite magnetic sleeves

Heq	B40 (T)	μr	M_s ($^\circ\text{C}$)
20.6	0.38	1.007	-110
21.3	0.60	1.012	-105
21.8	0.80	1.020	-90

Target value for sleeve of ABS valve	≥ 0.3	≤ 1.2	< -40
--------------------------------------	------------	------------	---------

- B40 of ferromagnetic section is measured after press forming
- μr and M_s of paramagnetic section are measured after induction heat treatment

6. 複合磁性材料適用の効果

最後に Fig. 11 のような ABS 用電磁弁に複合磁性材料を適用した場合の効果 Table 4 に示す。スリーブに非磁性材料を使用した場合と比較すると、今回開発した複合磁性材料を使用すれば、同じ吸引力を生み出すために必要なコイル巻線数が少なくなり、その結果電磁弁を外径で約 20% 小型化することができた。

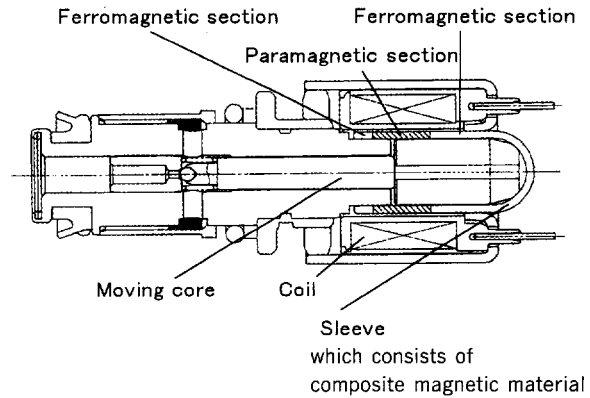


Fig.11 Schematic view of ABS magnetic solenoid valve

Table 4 Comparison of ABS magnetic solenoid valve performance

	Sleeve material	
	Composite magnetic material	Paramagnetic material
Outer diameter of ABS magnetic solenoid valve (mm)	$\phi 19$	$\phi 24$
Coil ampere turns (A·turns)	320	452
Magnetic force (N)	30	30

• Composite magnetic material has Heq of 21.3%

7. 結 言

一つの部材の中に強磁性特性と非磁性特性を共存することができる新材料：複合磁性材料を開発し、これを ABS 用電磁弁のスリーブ部品に適用した。その結果、電磁弁磁気回路を容易に効率化することが可能となり、これにより電磁弁を外径で 20% 小型化することに成功した。

複合磁性材料の開発上のポイントを以下にまとめた。

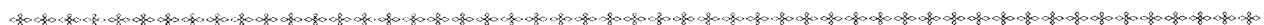
- ① オーステナイト系ステンレスの相変態を活用し、磁気特性の変換に成功した。
- ② 強磁性にも非磁性にも変換可能な最適材料組成は Heq を指標とした場合 20.5~21.5% であった。
- ③ 強磁性化を促進するためには加工温度を 80°C 以下に制御することが有効であることを見出し、加工工程に反映した。
- ④ 非磁性特性を低温で安定にするため、オーステナイト結晶粒径を微細化し、 M_s 点の低下に成功した。
- ⑤ 上記①~④の知見を活用し実現可能となった磁気特性レベルは

- ・強磁性特性： $B_{40}=0.3\sim 0.8\text{ T}$
- ・非磁性特性： $\mu_r\leq 1.2$

ただし B_{40} は 4000 A/m の磁場を印加した時の磁束密度。

＜参 考 文 献＞

- 1) 長谷川：ステンレス鋼便覧，日刊工業新聞社 (1960)，p. 44.
- 2) 平山，小切間：日本金属学会誌，34(1970)，p. 507.
- 3) 平山，小切間：日本金属学会誌，34(1970)，p. 826.
- 4) Umemoto, Owen, : Met. Trans., 5 (1974)，p. 2041.



＜著 者＞



谷村 圭宏 (たにむらよしひろ)
材料技術部
金属材料の開発および適用技術開発に従事。



杉浦 慎也 (すぎうら しんや)
材料技術部
金属材料に関する研究・開発および要素技術開発に従事。



竹内 桂三 (たけうちけいざう)
材料技術部
材料開発および要素技術開発に従事。



片山 義唯 (かたやまよしただ)
ABS 技術部
ABS 製品の開発・設計に従事。



寺田 利昭 (てらだ としあき)
DENSO INTERNATIONAL AMERICA, INC (DIAM)
金属材料の材料開発に従事。現在は DIAM にて北米での金属材料開発を担当。



乾 勉 (いぬい つとむ)
日立金属(株) 冶金研究所
機能材料グループ
電磁気材料特に磁性材，封着材の開発に従事。