

アモルファス磁歪型油圧センサの開発

Development of Oil Pressure Sensor Using Magnetostrictive Characteristics of Amorphous Metal

福丸 智之* 町野 英樹* 高木 雅則*

Tomoyuki Fukumaru Hideki Machino Masanori Takagi

屋敷 哲也* 中島 豊平*

Tetsuya Yashiki Toyohi Nakajima

要 旨

自動車の油圧制御システム用として、アモルファス合金の磁歪特性を用いた、新しいタイプの油圧センサを開発した。

本センサは平面積層した Flexible Printed Circuit (以下 FPC とする) コイルを使用して、構造の簡略化と小型化を実現している。また、ダイヤフラムに予め応力を印加した状態でアモルファス合金を接着することにより、高感度かつ高精度なセンサ出力が得られた。

ABSTRACT

A new type of oil pressure sensor for automotive hydraulic control systems was developed which employs magnetostrictive characteristics of amorphous metal. The sensor uses a flat-piled flexible printed circuit to make its structure simple and compact. It has an amorphous metal with diaphragm pre-exposed to pressure attached to it, thus achieving highly sensitive and accurate sensor output.

1. まえがき

自動車のブレーキ・トランスミッション・サスペンション系統の油圧を電子制御することによって、安全性・安定性・快適性をより一層向上させるシステム開発が近年盛んに行われているのに伴い、これらのシステムを制御するのに必要な中高油圧センサのニーズが急速に高まってきた。

中高油圧を検知するのにさまざまな方式での開発が行われている中で、アモルファス金属薄帯の磁歪特性 (応力によって発生した金属の歪に対して、磁気特性が変化する性質) を応用した圧力センサも研究開発が進められている⁽¹⁾。

今回、以下に述べる新しい検出手法を用いたアモルファス磁歪型圧力センサを開発した。この結果シンプル・コンパクトで、高感度・高精度な圧力センサを実現することができたので、この開発における技術ポイントである圧力検出原理と温度特性、またアモルファス磁歪の高感

度検出手法について紹介する。

2. 方式の選択

油圧を検出する車載用センサとして既に量産されているものには、半導体歪ゲージ方式、スパッタリング歪ゲージ方式、静電容量方式などが使われている⁽²⁾。これらの検出方式の特徴を比較し Table 1 に示す。

半導体歪ゲージ方式は、気体などの低圧を検知するには適するが、高油圧検出ではサージ圧が発生するために直接シリコンダイアフラムで圧力を受けることが強度上困難であり、また油中の金属粉の影響を防ぐために、一般的には金属ダイアフラムを用いた2重構造をとる必要があり複雑になる。

スパッタリング歪ゲージ方式は、従来の接着による歪ゲージに比べ、取り付け精度・信頼性をスパッタリング技術を用いて向上させてきた有力手法であるが、検出部感

* 栃木研究所

Table 1 Comparison Chart of Pressure Sensors

	Amorphous	Semiconductor strain gage	Sputtering strain gage	Capacitance
Sensing method	 Amorphous metal	 Silicon PIEZO-resistor	 Sputtering strain gage	 Ceramic diaphragm
Response	Good	Good	Good	Fair
Sensitivity	Excellence	Good	Fair	Good
Structure	Simple	Complicated	Simple	Simple
Accuracy	Good	Good	Good	Good

度が低いため高増幅が必要となる。

静電容量方式は、構造がシンプルで温度特性に優れているが、極間ギャップを μm オーダーで管理する必要があり、高精度製造技術を要する。

アモルファス磁歪方式は、他方式に比較すると検知部の感度が高く⁽³⁾増幅回路を簡略化することができる。また可動部である圧力検知部とセンシングコイル部は、非接触構造であり耐久性に優れる。以上の理由によりアモルファス磁歪方式を選定した。

3. 構造

今回開発したアモルファス油圧センサの1 MPa仕様の構造概略をFig. 1に示す。Fig. 1の下部から油導入口⑩を経て油圧を受けるチタン製ダイアフラム⑦と、その上に接着されたアモルファス金属素子⑥(以下アモルファス素子)と、FPC 差動コイル④(以下センシングコイル)から構成され、圧力によるアモルファスの磁歪の変化は、センシングコイルのインダクタンスの変化として捉えられる。

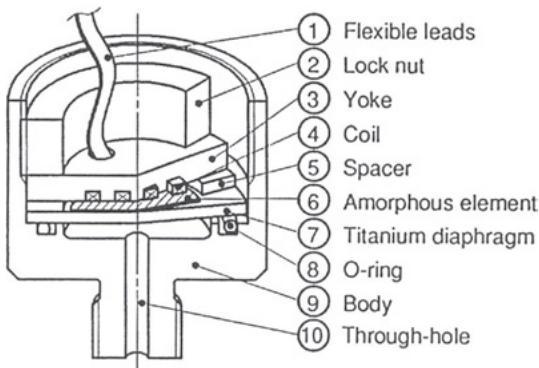


Fig. 1 Cross-Section View of Pressure Sensor

このセンシングコイルは、従来の巻線式コイルと異なり Fig. 2 (a) に示す様に耐熱性 FPC を使い、両面を渦巻状にエッチングしコイルを形成する。このコイルの巻線間ピッチは0.13mm で、微細なエッチング加工技術によって小さな平面同軸上に2つのコイルを形成することができた。またインダクタンスを確保するために積層構造となっているが、Fig. 2 (c) に示す様に一枚の FPC を折り返して積層することによって、その折り返し部は基板間結線を可能とし、積層による基板間の電氣的接合部を設ける必要がないため信頼性が高く、特性も安定している。更に磁気回路を形成するためにヨーク③内部に固定される。

また10MPa 以上の高圧仕様のものは、ダイアフラム構造の変更、たとえばダイアフラムとボディの一体化構造をとることによって対応ができています。

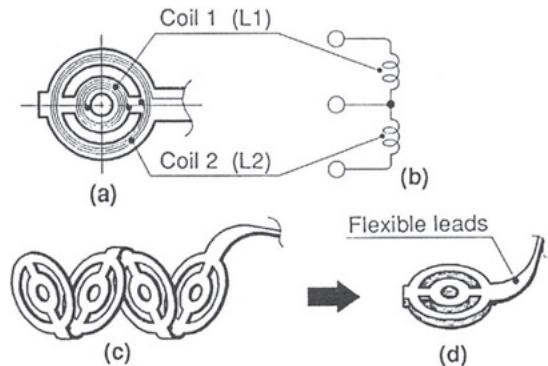


Fig. 2 Structure of FPC Sensing coil

4. 検出原理

本圧力センサは強磁性体の磁歪効果を応用し、圧力により応力を受けたダイアフラムの歪を検出することで圧力を測定している。

強磁性体は磁化が一定の方向をとる磁区とよばれる小領域の集合体として成立しているが、強磁性体に外部磁界を加えると内部の磁区の向きが磁界の方向に揃い、その方向に対して寸法的な伸びを生じる。この現象を磁歪効果という。逆に、強磁性体に外部応力を加え歪を起こさせることにより磁区の向きを変えることができ、磁区の向いている方向の透磁率が上がる。この透磁率変化をコイルの磁束変化として検出することで、外部応力を測定する事が可能であり、本センサはこの原理を応用して

Table 2 Properties of Amorphous metal

	Item	Specification
1	Composition	Fe Si B Co Cr
2	Strain-magnetic characteristics	58MPa (Upper limit in linear output area)
3	Anticorrosiveness	8.5% corrosion (After 18hours, HCl, 0.1N)
4	Permeability	1030 (5KHz)
5	Crystallization temperature	527 °C
6	Curie temperature	470 °C
7	Melting point	1136 °C
8	Young's modulus	117 GPa

いる。

磁歪特性は合金組成に左右され、本センサは大きな透磁率変化を得るために、鉄・シリコン・ボロンの組成を最適化させた材料を使用している。この組成比の合金は脆性が強く通常の製法では使用不可能であったが、急冷化製造法でアモルファス合金化することで、強靱な金属薄膜を得ることができた。今回使用したアモルファス合金の諸特性を Table 2 に示す。

また急冷化製造法により得られる金属薄膜は厚みが 30 μm 前後と薄く、交流磁場をかけたときの渦電流損失が小さいため高周波の交流磁場が使用でき、センサとしての感度を大きくとることができる。

検出部は磁性体とコイルを用いて磁気回路を形成し、磁力変化(圧力変化)をインダクタンス変化として検知する。

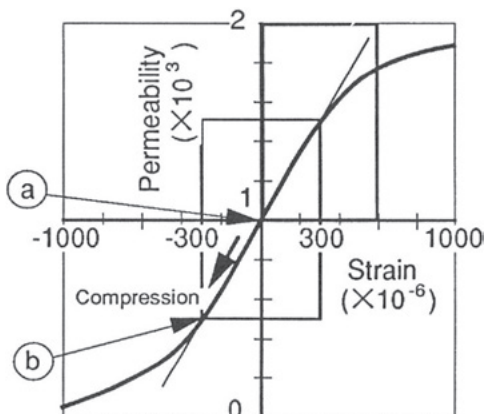


Fig. 3 Strain-Permeability Characteristics of Amorphous metal

引張り歪と圧縮歪によるアモルファス素子の透磁率の変化を Fig. 3 に示す。グラフからわかる様に $\pm 300 \mu\text{ストレイン}$ の歪範囲において、透磁率の変化はほぼ直線的となる。この歪範囲内に圧力に対するダイアフラムの歪を設定することによって、直線性の高い検出が可能となった。

ここでダイアフラムが圧力を受けた時のダイアフラムの半径方向の歪分布を Fig. 4 に示す。また、ダイアフラムに接着されたアモルファス素子の歪分布を Fig. 5 に示す。ダイアフラムは中央部では引張歪、外周部では圧縮歪を生じているが、アモルファス素子の外周部はダイアフラムの歪分布に追従しきれていないため、この部分を避けて歪を検出する必要がある。従ってダイアフラム中心部の引張り歪と、圧力によっても変動しない最も安定した歪零点を、それぞれインダクタンス変化として検知するために、それぞれに対応する位置にコイル 1 とコイル 2 を配置する⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

圧力の検出原理を Fig. 6 に示す。圧力の印加がない時は応力は 0 で、Fig. 6 (a) に示す様にコイル 1 とコイル 2

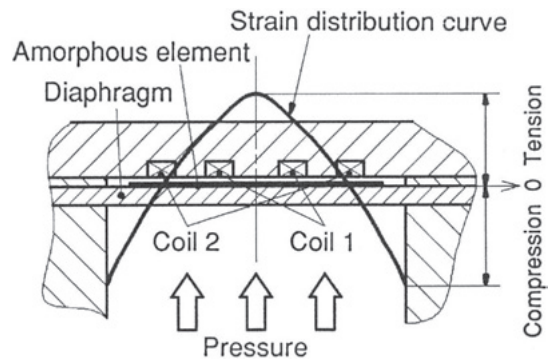


Fig. 4 Strain Distribution on Diaphragm

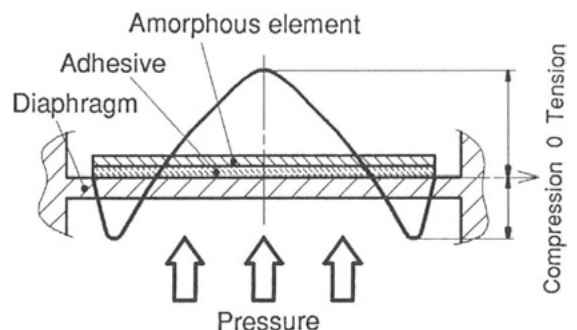


Fig. 5 Strain Distribution of Amorphous element

の磁束分布はほぼ等しい。次に、圧力が印加されるとダイアフラムの中心部の引張り歪によるアモルファス素子の透磁率が大きくなり、Fig. 6 (b) に示すようにコイル1の磁束が増加する。一方、コイル2は圧力が変化しても歪は0であり、磁束は一定である。実際にコイル1、2の圧力に対する自己インダクタンス変化は Fig. 6 (c) の様になる。

このコイル1、2のインダクタンスの差を Fig. 7 に示すインダクタンス L_1 、 L_2 と、抵抗 R_1 、 R_2 から成るブリッジ回路によって検出する。

このブリッジ回路に印加する交流電圧を E 、⑥④間、③⑤間の電位差を V_1 、 V_2 とすると

$$V_1 = E \frac{R_1}{\omega L_1 + R_1}, \quad V_2 = E \frac{R_2}{\omega L_2 + R_2}$$

$\omega : 2\pi f$, f : 励磁周波数

となり、センサ出力は V_1 と V_2 の差でこれを ΔV とおくと、

$$\Delta V = V_1 - V_2 \quad (V_2 : \text{Const})$$

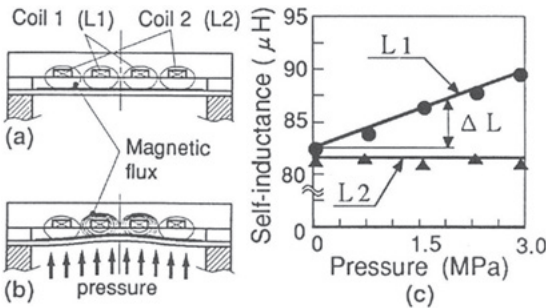


Fig. 6 Sensing Principle

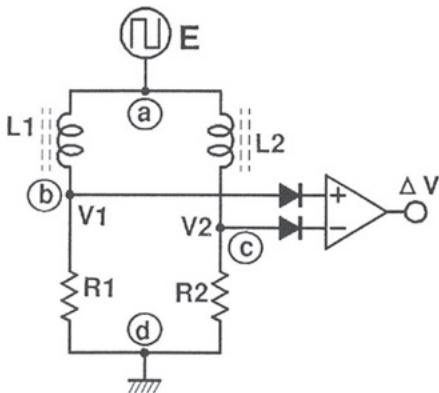


Fig. 7 Equivalent circuit of Detection

となる。コイル2は圧力によらず常に一定であるため、コイル1自身の変化による電圧がセンサ出力となる。

ここで圧力0の時のコイル1の自己インダクタンスを L_{1-0} とすると、圧力に対して L_{1-0} が ΔL だけ変化した時の出力は ΔV で、

$$\Delta V = E \frac{R_1}{[\omega(L_{1-0} + \Delta L) + R_1]} - E \frac{R_2}{\omega L_{1-0} + R_1}$$

$$= E \frac{-R_1 \omega \Delta L}{[\omega(L_{1-0} + \Delta L) + R_1] (\omega L_{1-0} + R_1)}$$

となる。 ΔL が L_{1-0} より十分に小さいとき分母は $(\omega L_{1-0} + R_1)^2$ となり、

$$\Delta L = k E \Delta L \quad \left[\begin{array}{l} k : \text{比例定数} \\ k = \frac{-R_1 \omega}{(\omega L_{1-0} + R_1)^2} \end{array} \right]$$

で、出力電圧は ΔL に比例する。

5. 高感度検出手法

以上の様にこの圧力センサは、コイル1により引張り歪による透磁率変化を検出するが、実際のアモルファス素子の応力磁気特性は、Fig. 3 に示す様に引張り歪が 300μ ストレイン付近から飽和領域に入り、使用可能な歪範囲が限定されるため、感度及びダイナミックレンジにも限界がある。一方、圧縮歪側にも同様な直線領域があることからそこに着目し、さらに広い直線性が得られる手法について検討した⁽⁶⁾。

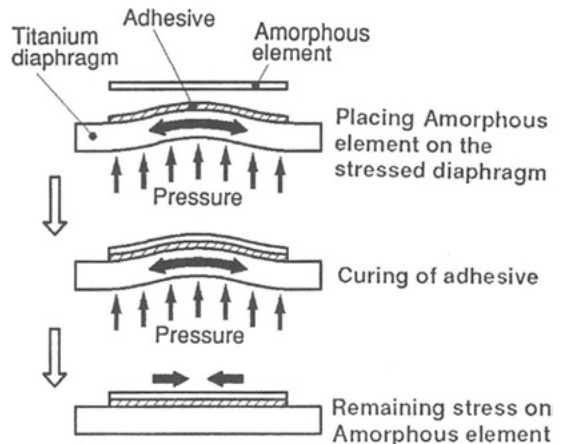


Fig. 8 Method of Fixing Amorphous element

具体的手法は、Fig. 8 に示す様にアモルファスに予め圧縮歪を与えることである。つまり、アモルファス素子の接着硬化時にダイアフラムに引張り歪(圧力印加)を与えることにより、圧力0の時の透磁率を圧縮歪側の直線域の下限(Fig. 3 ⑥点)迄引き降ろすことができ、従来の2倍の600 μ ストレインの広い直線領域を確保している。

この結果、Fig. 9 に示す様にセンサ出力はアモルファス素子固定時、圧縮歪のない状態に対し、圧縮歪を与えた状態では大幅に直線性を改善することができた。

6. 温度特性

アモルファス油圧センサの温度による特性変化は、主としてダイアフラムとアモルファス素子の熱膨張差によるものである。Fig. 10 にアモルファス素子とダイアフラム材の線膨張係数差により、アモルファス素子に発生する熱応力を示す。またダイアフラムにチタン合金とSUS304を使用した場合の、温度による熱応力を Fig. 11 に示す。これらのグラフからわかるように、ダイアフラム材質の線膨張係数がアモルファス素子に近いほど熱応力の影響は小さく、結果として温度特性を小さく抑えることができる。本センサでは、ダイアフラム材としてアモルファス素子に線膨張係数の近いチタンを使用し、良好な温度特性を得ている。

ダイアフラム部での温度特性変化のもうひとつの要因として、アモルファス素子をダイアフラムに接着固定している接着剤の影響が考えられる。本センサでは高強度で耐熱性に優れたエポキシ系接着剤を選定しているが、

線膨張係数が $40 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とアモルファス素子に対して5倍近く大きく、接着層の厚み次第では接着剤の熱膨張により、アモルファス素子に応力が加わる恐れがある。Fig. 12 に接着層厚さとアモルファス素子の熱応力の関係を、チタン材ダイアフラムの場合について示す。この結果より、接着層厚みが0.2mmを超えると接着剤の熱膨張の影響が大きくなるため、接着層厚みは0.2mm以下となるように管理する必要がある。実際の接着工程においては、接着剤のスクリーン印刷による厚み管理と、アモルファス素子を一定圧でダイアフラムに押しつけながら硬化させることにより、接着層厚みを0.03mm前後に管理

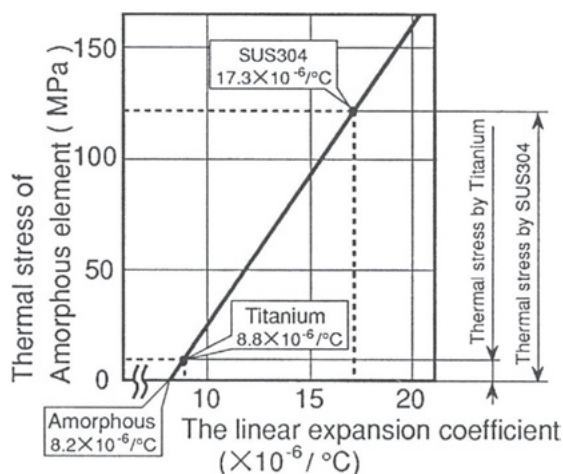


Fig. 10 Thermal Stress of the Amorphous element by the Difference of the Linear Expansion Coefficients at 80°C

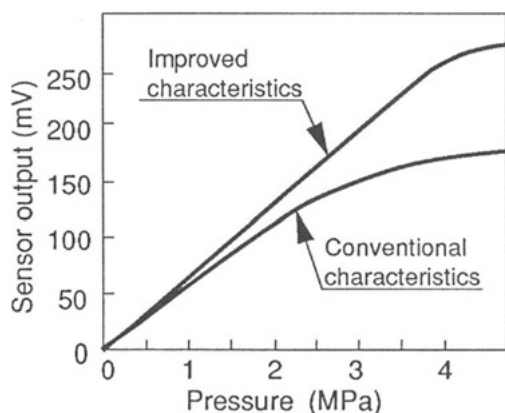


Fig. 9 Effect of Applying Pre-Strain on the Diaphragm

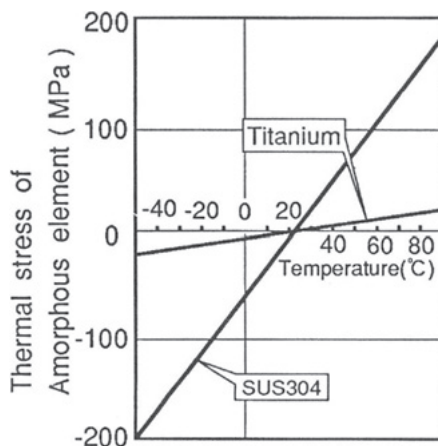


Fig. 11 Thermal Stress Properties of the Amorphous element

することが可能であり、接着層による熱応力の影響は微小なものに抑えられた。

次に温度変化による零点のドリフトは、差動コイルにより基準電圧補正を行うことで $\pm 1\%$ に低減することができた。その結果、Fig. 13 に示すように増幅後出力で $\pm 3\%$ の精度を達成した。

7. 耐久信頼性

本センサの代表的な耐久試験結果を Table 3 に示す。耐久試験においては初期の特性に対して微小変化であり、高い耐久信頼性が得られた。

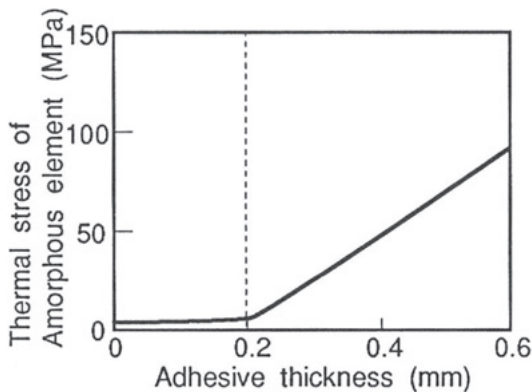


Fig. 12 Simulation of Relationship between Adhesive Thickness and Thermal Stress at 120°C

8. まとめ

この開発に於ける主な特徴は、以下の2つの点に要約することができる。

- (1) 圧力による磁歪を検知するセンシングコイルを平面的に形成することにより、全体の構造をシンプル・コンパクトにすることができた。
- (2) アモルファス素子の応力印加による固定手法により、圧縮領域の応力磁気特性の直線部を圧力検知に用いることが可能になった。

この結果として感度を大巾に向上させることができ、温度補償のための補助的なデバイスをを用いなく、車載用として実用化可能な検出精度と、高信頼性を達成した。

Table 3 Typical Endurance Test Results

	Test	Result
1	Fatigue test (2×10^7 cycles in rated pressure)	Less than $\pm 0.3\%$
2	Thermal shock test (-40/120°C each 90minutes 100cycles)	Less than $\pm 0.4\%$
3	Proof pressure	(Rated pressure $\times 3$) min.

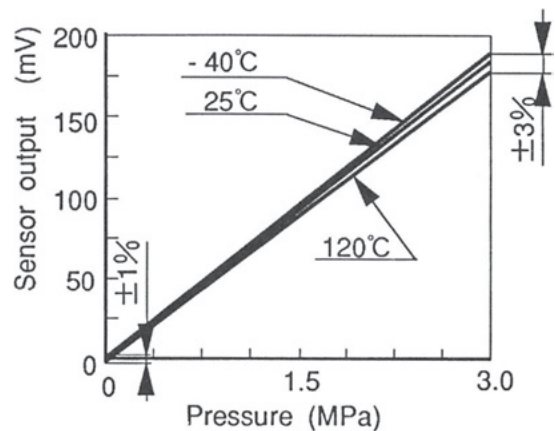


Fig. 13 Temperature Characteristics of Sensor output

9. 謝 辞

終わりに、本研究に於いて、FPC コイルの開発に多大なる御協力を頂きました住友電気工業株式会社、また社内内外の多くの方々に深く感謝いたします。

< 参考文献 >

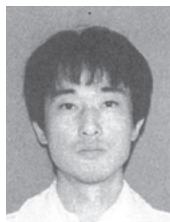
- (1) H. Hase, R. Shoji et al Pressure Sensor Using Amorphous Magnetic Alloy. (SAE 920700)
- (2) Anthony J. Sabetti, et al 「Automotive Pressure Transducer for Underhood Applications」Texas Instruments SAE Technical Paper. (1988)

- (3) 毛利、アモルファス磁性体の開発とセンサ応用動向
センサ技術 (P103) 1987. 1 月号
- (4) 社団法人 日本非破壊検査協会出版
「ひずみ測定 B」
圧力トランスジューサ P138(1980)
- (5) 日本機械学会編、機械工学便覧 第5章
平板の曲げ
- (6) 井上、広池他、「アモルファストルクトランスデュー
サにおけるバイアス磁気異方性について」
昭和 57 年度 電気四学会論文集 P389

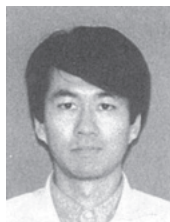
■著 者■



福丸 智之



町野 英樹



高木 雅則



屋敷 哲也



中島 豊平