

磁気ヘッド接触計測用 薄膜圧電 AE センサの出力特性に関する検討*

今井 郷 充*¹, Gert-Jan BURGER*²
Theo S. J. LAMMERINK*², Jan H. J. FLUITMAN*²

Output Characteristics of a Thin-Film Piezoelectric AE Sensor for Magnetic Head-Disk Interaction

Satomitsu IMAI, G. J. BURGER,
T. S. J. LAMMERINK and J. H. J. FLUITMAN

A new type of acoustic emission (AE) sensor was developed for detecting head disk interaction in magnetic disk devices. In order to develop a small sensor, we used a thin film piezoelectric material and mounted it on the Si slider using micromachining techniques. We conducted a basic experiment and a simulation of sensor output, and confirmed that the simulation used here can predict sensor output characteristics. This paper describes the structure of the sensor and the method of simulation. We also performed several other simulations of sensor output characteristics using this method, and confirmed that the new sensor is applicable to tribological research on head disk interaction.

Key Words: Sensor, Piezo Element, Impact, Acoustic Emission, Sensitivity Analysis, Tribology, Magnetic Disk, Micromachine

1. 緒 言

磁気ディスク装置のスライダでは、記憶容量の向上のために浮上量は年々小さくなっており、現在の主流製品では数10nmのレベルにある。そのためスライダとディスクの接触検出は、スライダとディスクのインタフェース設計において重要である。従来はバルクの圧電材料を用いたセンサをスライダに貼る方法によって接触によりスライダに生じたアコースティックエミッション(AE)波を検出していたが、スライダの小形化およびスライダとディスクのマイクロトライボロジ現象の解明のため、さらに小さく精度の高いAEセンサが必要とされている。そこで新たなAEセンサの開発のためにマイクロマシンプロセスを用いて薄膜圧電材料による小形のAEセンサをスライダ上に形成する方法を検討し、センサを製作して基礎特性実験を実施した⁽¹⁾⁽²⁾。本報では、開発した薄膜AEセンサの出力特性を検討するため、センサの出力をシミュレーションする方法を検討し、実験との比較によって妥当性を確

認した。またこのシミュレーションを用いて薄膜AEセンサの出力特性について検討した。

2. 薄膜 AE センサおよびスライダの構造

2.1 薄膜 AE センサの構造 開発した薄膜AEセンサの構造を図1に示す。薄膜AEセンサは高周波スパッタによる酸化亜鉛(ZnO)の薄膜圧電層(厚さ:2 μ m)を蒸着で形成した上下電極でサンドイッチした構造で、圧電層の分極軸は基板に垂直な方向である。本薄膜AEセンサではセンサの位置と出力の関係を検討するためセンサのアレイ化を行っている。アレイ化は上部電極をパターン化することによって実現しており、アレイ化された各電極のサイズは0.1mm角であ

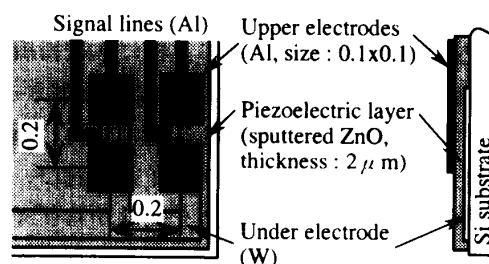


Fig.1 Structure of the thin film piezoelectric AE sensor array

* 原稿受付 1995年6月26日。

*¹ 正員、(株)日立製作所機械研究所(〒300 土浦市神立町502)。

*² MESA Research Institute, University of Twente, 7500 AE Enschede, the Netherlands.

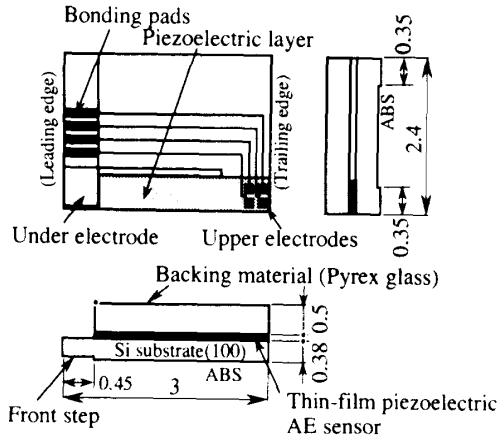


Fig. 2 Structure of the slider carrying the thin film piezoelectric sensor array (Depth of the ABS slot is 20μm)

る。

2・2 スライダの構造 薄膜 AE センサを搭載したスライダの構造を図2に示す。スライダは薄膜 AE センサが形成された Si 基板とセンサの音響整合層としての背面部材とを接着した構造である。このような構造にしたのは、センサの出力信号においてノイズとなる自由境界面での反射 AE 波をなくすため、背面部材には Si 基板と音響インピーダンスが近いパイレックスガラスを選んでいる。スライダの浮上面(ABS)は薄膜 AE センサが形成された Si 基板の反対側の面に形成され、ディスクとの接触によって生じた AE 波は、Si 基板から薄膜 AE センサへ伝ばする。スライダの浮上面は従来のスライダと同じ 2 本の直線レールタイプで、空気流入端にステップを設けている⁽³⁾。

スライダのサイズは、長さが 3 mm、幅が 2.4 mm (すなわち 70%スライダ)で、厚さは、Si 基板が 0.38 mm、背面部材が 0.5 mm で、スライダ全体では約 0.88 mm である。薄膜 AE センサの形成位置はスライダにおいて浮上量が最小となる流出端とし、センサの信号はスライダ流入側のボンディングパッドから取出すようにしている。

3. 出力特性シミュレーション

3・1 手法 図2の薄膜 AE センサを搭載したスライダの物理モデルを図3に示す。ここでは薄膜圧電層(p)を、Si 基板(a)から入力する AE 波と背面部材(b)へ伝ばする AE 波によって電圧を発生する 3 端子の系としてモデル化している。浮上面に作用した接触力 F_i による AE 波が平面波として伝ばするものとして、薄膜圧電層の両境界面 1, 2 におけるその力および速度を $F_n, v_n (n=1, 2)$, Si 基板および背面部材の音

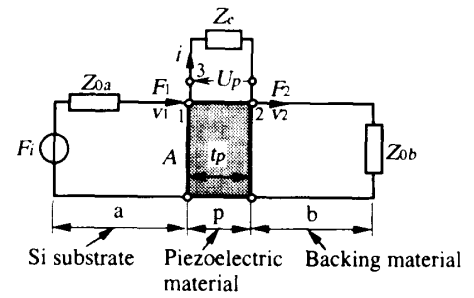


Fig. 3 Physical model of the thin film AE sensor and slider

響インピーダンスを Z_{0a}, Z_{0b} 、薄膜圧電層の音響インピーダンスおよび電気インピーダンスを Z_{0p}, Z_c 、薄膜圧電層の厚さおよび面積を t_p, A 、材料の密度を ρ とすると、薄膜圧電層の境界面における音響の入出力端子 1, 2 および電圧出力端子 3 において以下の関係が成立する⁽⁴⁾。

$$F_1 = F_i - v_1 Z_{0a} \dots\dots\dots (1)$$

$$F_2 = v_2 Z_{0b} \dots\dots\dots (2)$$

$$u_p = -i Z_c \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ u_p \end{bmatrix} = -j Z_{0p} \begin{bmatrix} \cot(k_p t_p) & -\csc(k_p t_p) & h_{33}/\omega Z_{0p} \\ \csc(k_p t_p) & -\cot(k_p t_p) & h_{33}/\omega Z_{0p} \\ h_{33}/\omega Z_{0p} & -h_{33}/\omega Z_{0p} & 1/\omega C_0 Z_{0p} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ i \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} Z_{0a} &= A\sqrt{\rho_a/s_{33a}} \\ Z_{0b} &= A\sqrt{\rho_b/s_{33b}} \\ Z_{0p} &= A\sqrt{\rho_p/s_{33p}^d} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$k_p = \omega\sqrt{\rho_p s_{33p}^d} \dots\dots\dots (6)$$

(k_p : 波数, ω : 角周波数, s_{33} : 弾性コンプライアンス)

$$C_0 = \epsilon_{33}^s A/t_p \dots\dots\dots (7)$$

添字 33 は厚さ方向を示す。

圧電材の定数を以下に示す。

d_{33} : 圧電定数(単位電界を与えたときのひずみ)

h_{33} : 圧電定数(単位ひずみを与えたときの電界)

$$h_{33} = -d_{33}/(\epsilon_{33}^I s_{33}^I - d_{33}^2) \dots\dots\dots (8)$$

ϵ_{33}^s : 誘電率(ひずみ拘束状態)

ϵ_{33}^I : 誘電率(ひずみ非拘束状態)

s_{33p}^d : 弾性コンプライアンス(電荷拘束状態)

Table 1 Material properties

Material	Density ρ kg/m ³	Young's modulus $E \times 10^{11}$ Pa	Poisson's ratio ν	Wave velocity c m/s (*3)	Acoustic impedance $Z_0 \times 10^7$ Ns/m ³ (*4)
Si (100)	2332	1.302	0.28	8449	1.970
ZnO	5720	1.951	0.3	6775	3.875
Pyrex glass	7650	1.111	0.25	4175	3.194
PZT(*1)	7550	1.075	0.328	4576	3.455
Al ₂ O ₃ · TiC(*2)	4270	4.50	0.3	11911	5.086

(*1) Zr / Ti = 50 / 50
 (*2) Al₂O₃ / TiC = 65 / 35
 (*3) $c = \sqrt{(1-\nu)E / ((1+\nu)(1-2\nu)\rho)}$ (5)
 (*4) $Z_0 = \rho c$

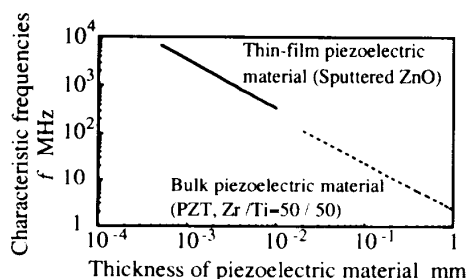


Fig. 4 Characteristic frequencies of piezoelectric materials in the thickness directions
 ($f = c / (2t_p)$, c : wave velocity, see Table 1)

s_{33p} : 弾性コンプライアンス (電荷非拘束状態)

薄膜圧電層の固有振動数を表1に示したAE波の速度から計算すると図4のようになる。検出するAE波の周波数帯域は薄膜圧電層の厚さ方向の固有振動数よりも十分低いため、式(4)で k_{plp} は零に近似できる。また圧電層が薄膜であることを考慮して $F_1 = F_2 = F$ と仮定すると式(4)は次のように単純化できる。

$$\begin{bmatrix} F \\ u_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & h_{33} \\ j\omega C_m & j\omega \\ h_{33} & 1 \\ j\omega & j\omega C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 - v_2 \\ i \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、

$$C_m = s_{33p}^0 / A \dots\dots\dots (10)$$

式(1)~(3)、(9)から圧電層に生ずる電圧 u_p を求めると、

$$u_p = \frac{d_{33t_p}}{A \epsilon_{33}^t} \frac{Z_{0b}}{Z_{0a} + Z_{0b}} F_i \dots\dots\dots (11)$$

これより薄膜AEセンサの電気容量 C_p は次式で表される。

$$C_p = \frac{A \epsilon_{33}^t}{t_p} \dots\dots\dots (12)$$

ところで実際に薄膜AEセンサに生じた電圧 u_p を検出する場合、測定回路の浮遊容量によって計測される電圧 u_o は小さくなる($u_o < u_p$)。薄膜AEセンサの電気容量を C_p 、計測回路の浮遊容量を C_e 、計測回路

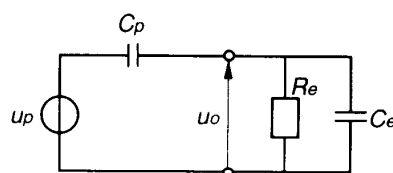


Fig. 5 Electric model of a measuring system

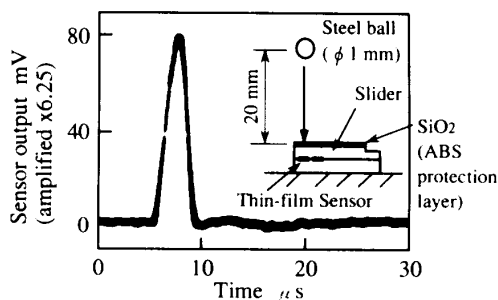


Fig. 6 Sensor output signal by the ball drop test

Specification of the amplifier
 amplification factor: $\times 6.25$, bandwidth 10 Hz
 20 MHz, parasitic capacitance: 3 pF

の電気抵抗を R_e とするとこれらで構成される計測回路は図5の回路と等価で、これより計測される電圧 u_o は次式で表される。

$$u_o = u_p \frac{j\omega R_e C_p}{1 + j\omega R_e (C_p + C_e)} \dots\dots\dots (13)$$

ここで計測するAE波の周波数帯域が高いことを考慮すれば式(13)は以下のように表される。

$$u_o = u_p C_p / (C_p + C_e) = F_i \frac{d_{33t_p}}{A \epsilon_{33}^t} \frac{Z_{0b}}{Z_{0a} + Z_{0b}} \frac{C_p}{C_p + C_e} \dots\dots\dots (14)$$

なお式(14)を圧電層に生ずる厚さ方向の応力 σ_z により表せば次のようになる(σ_z : 圧縮-, 引張+).

$$u_o = -\sigma_z \frac{d_{33t_p}}{\epsilon_{33}^t} \frac{C_p}{C_p + C_e}$$

Table 2 Material properties

ρ	Mass density of the ball	kg/m ³	7.78 x 10 ³
r	Radius of the ball	m	0.0005
v	Velocity of the ball before impact	m/s	0.626
E_1	Young's modulus of the ball	Pa	2.06 x 10 ¹¹
ν_1	Poisson's ratio of the ball		0.3
E_2	Young's modulus of the ABS protection layer (SiO ₂)	Pa	0.724 x 10 ¹¹
ν_2	Poisson's ratio of the ABS protection layer (SiO ₂)		0.26

Table 3 Piezoelectric constants

Properties	ZnO(*1)	PZT(*2)
ϵ_{33}^T X10 ⁻⁹ F/m	0.073	7.491
ϵ_{33}^S X10 ⁻⁹ F/m	0.053	5.240
d_{33} X10 ⁻¹² C/N	12.3	173
h_{33} X10 ¹⁰ N/C	-3.29	-0.248
s_{33}^E X10 ⁻¹² m ² /N	7.20	13.3
s_{33}^D X10 ⁻¹² m ² /N	5.13	9.304
ρ kg/m ³	5720	7550

(*1): Sputtered ZnO
 (*2): Zr / Ti = 50 / 50 (5)

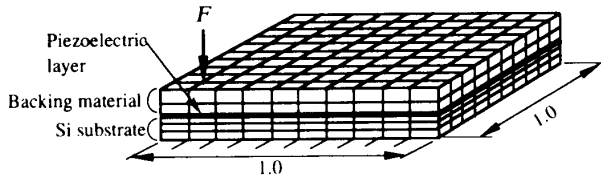


Fig. 7 Finite element model for the simulation of the sensor output test

$$= -\sigma_z d_{33} A \frac{1}{A \epsilon_{33}^T t_p + C_p} \dots \dots \dots (15)$$

センサの出力電圧 u_0 は応力 σ_z やセンサの電気容量 C_p に影響されるが、応力はセンサの構造、面積や厚さ、位置等によって変化し、センサの電気容量は式(12)に示す各値によって変化する。これらのうちセンサの面積 A および圧電層の厚さ t_p は応力と電気容量両方に関係するので、これらのパラメータを最適に設計することがセンサの出力を高めるうえで重要となる。

3.2 手法の妥当性の検証

(a) 鋼球の落下試験 鋼球の落下による衝撃力を入力として薄膜 AE センサの出力信号を測定した。スライダの背面部材側を図6の右側に示すように固定し、スライダの浮上面から 20 mm の高さから $\phi 1$ mm の鋼球をセンサの中心に落下させた。この落下による最大衝撃力 F_{max} 、衝撃時間 T および衝撃力の時間関数 $f(t)$ は以下の式から求められる⁽⁶⁾。材料定数を表2に示す。

$$F_{max} = \pi a^2 P_{max} \dots \dots \dots (16)$$

$$a = 1.31 \rho^{0.2} k^{0.2} r^{0.4}$$

$$k = (1 - \nu_1^2) / E_1 + (1 - \nu_2^2) / E_2$$

$$P_{max} = 0.558 \rho^{0.2} v^{0.4} k^{-0.8}$$

$$T = 5.08 r \rho^{0.4} k^{0.4} v^{-0.2} \dots \dots \dots (17)$$

$$f(t) = F_{max} \sin^{1.63}(\pi t / T) \dots \dots \dots (18)$$

式(16)、(17)から計算した最大衝撃力は 1.88 N、衝撃時間は 4.94 μ s である。この実験で得られた薄膜 AE

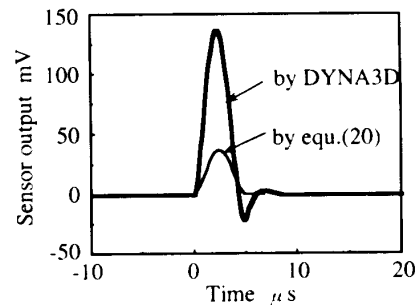


Fig. 8 Simulation of the sensor output test

Stress of the ZnO layer was calculated by DYNA3D and equation (20)
 Simulation parameters sensor size: 0.1 mm x 0.1 mm, thickness: Si substrate 0.38 mm, ZnO layer 0.002 mm, backing material 0.5 mm, $F = 1.88$ N, $C_p = 0.365$ pF, $C_e = 63$ pF, material properties: Table 1, 3

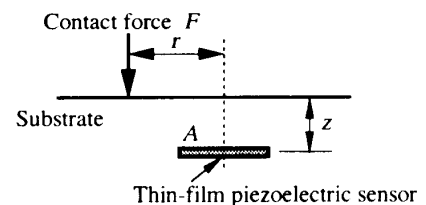


Fig. 9 Definition of position of the thin film piezoelectric sensor

センサの出力信号を図6に示す。信号の最大電圧は 84 mV(アンプにより増幅x6.25)で、薄膜 AE センサ自体の出力は約 7.1 mV/N となる。式(17)から得られた接触時間は実験における信号時間(約 5 μ s)にほぼ一致している。

(b) 鋼球落下試験のシミュレーション 前項(a)の実験におけるセンサ出力を3.1節の手法によりシミュレーションしその妥当性を検討した。式(15)において薄膜圧電層に生ずる厚さ方向の応力 σ_z は有限要素法により計算した。図7にスライダの有限要素モデルを示す。応力解析には衝撃解析用プログラム

“DYNA 3D” (米国ローレンスリバモア研究所開発) 使用した。鋼球の落下による衝撃力は式(18)から求めこれを入力した。計算に使用した材料定数を表1, 3に示す。計算で用いた圧電材料の弾性定数は s_{33} である。式(15)において薄膜 AE センサの電気容量 C_p は式(12)から計算し (0.365 pF)、計測回路の浮遊容量 C_e は測定値を使用した (63 pF)。

図8にこのシミュレーションで得られた薄膜 AE センサの出力電圧を示す。図6の実験結果と比較すると、実験でのセンサの最大出力(84 mV)は、シミュレーションによる最大出力 [137 mV(増幅率考慮)] より小さい(約63%)。実験では背面部材やスライダの取付のための接着層があり、これによる応力の低下が原因と考えている。

参考として静的な荷重によって半無限体に生ずる応力の式(19)から求めた応力によりセンサの出力電圧を求めた。式(19)を薄膜センサの面積 ($r \pm 0.05$ mm, $z = 0.38$ mm) において面積分することにより圧電層に生ずる平均応力が求められ [式(20)]、この応力から求めたセンサの出力電圧を図8に示す。この場合のセンサの最大出力電圧(36.7 mV)は入力を静荷重として計算したので実験結果よりも小さくなり(約0.44倍)。

実験結果とこれらのシミュレーション結果の大小関係は妥当と考えられる。

以上から3・1節のシミュレーション手法は妥当であると考えられる。

$$\sigma_z = -\frac{3F}{2\pi} z^3 (r^2 + z^2)^{-2.5} \dots\dots\dots (19)$$

$$\sigma_z = 1/A \int_A \sigma_z dA \dots\dots\dots (20)$$

4. センサの出力特性

図2の薄膜 AE センサの出力特性を3章のシミュレーション手法により検討した。シミュレーションにおいて圧電層の応力 σ_z は、センサの各層の境界面で応力波の反射が生ずることを考慮して有限要素法(DYNA 3D)によって求めた。応力解析に用いた有限要素モデル(断面図)を図10に示す。図10(a)は図2のセンサ搭載スライダのモデル、図10(b)は比較のため

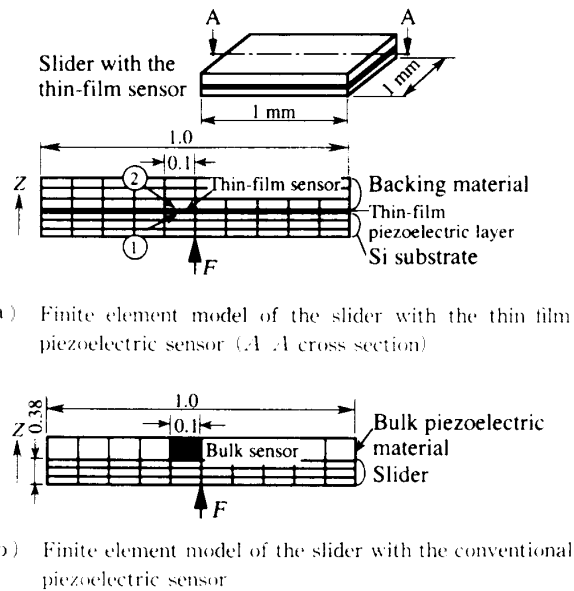


Fig. 10 Finite element models for stress calculation

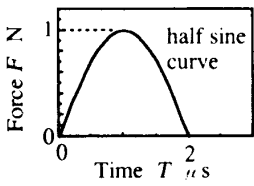


Fig. 11 Input force for the simulations

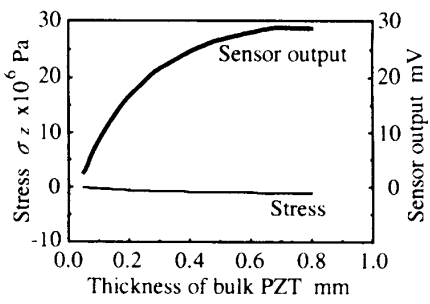


Fig. 12 Simulation of maximum stress and maximum sensor output of the conventional AE sensor

Simulation conditions
input force: Fig. 11, sensor size: 0.1 mm × 0.1 mm, thickness: slider (Al₂O₃ · TiC) 0.38 mm, C_p: from equ. (12), C_e = 60 pF, stress calculation: by DYNA3D

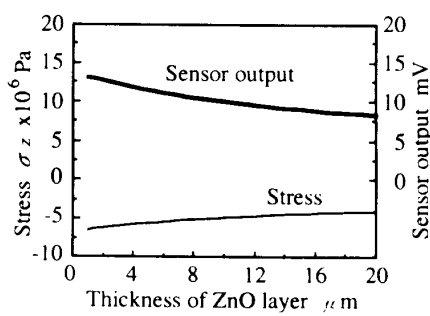


Fig. 13 Simulation of maximum stress and maximum sensor output of the thin film piezoelectric AE sensor

Simulation conditions
input force: Fig. 11, sensor size: 0.1 mm × 0.1 mm, thickness: Si substrate 0.38 mm, backing material 0.5 mm, C_p: from equ. (12), C_e = 60 pF, stress calculation: by DYNA3D

めの従来形センサを搭載したスライダのモデルで、AEセンサのサイズは比較のために同じ(0.1 mm角)にした。モデルの拘束条件はスライダの浮上状態にあわせてフリーとした。材料定数および圧電定数は表1, 3を用いた。入力衝撃荷重 F は図11に示すような正弦波と仮定し、接触時間 T は通常計測されるスライダとディスクの接触時間から定めた。また出力電圧を求めるにあたり式(15)の浮遊容量 C_e は60 pFと仮定した。

4.1 薄膜 AE センサと従来形センサの出力比較

図2の薄膜 AE センサとバルクの圧電材料を用いた従来形センサの出力について比較した。

従来形センサの出力シミュレーションにおいて、通

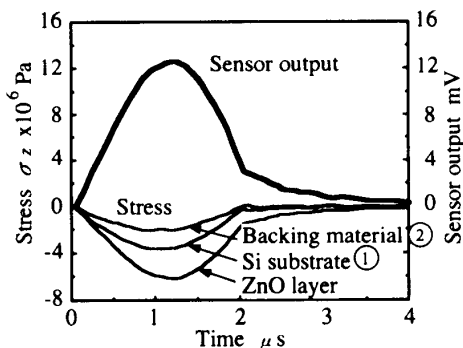


Fig. 14 Simulation of stress and sensor output of the thin-film piezoelectric AE sensor (with backing material)

Simulation conditions
input force: Fig. 11, sensor size: 0.1 mm × 0.1 mm, thickness: Si substrate 0.38 mm, ZnO layer 0.002 mm, backing material 0.5 mm, $C_p = 0.365$ pF, $C_e = 60$ pF, stress calculation: by DYNA3D

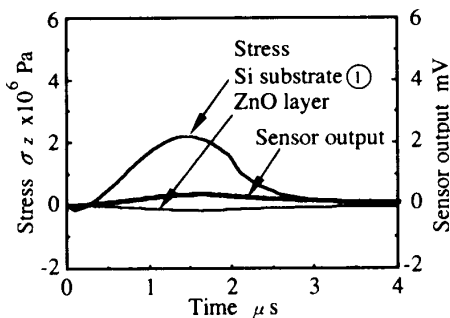


Fig. 15 Simulation of stress and sensor output of the thin-film piezoelectric AE sensor (without backing material)

Simulation conditions
input force: Fig. 11, sensor size: 0.1 mm × 0.1 mm, thickness: Si substrate 0.38 mm, ZnO layer 0.002 mm, $C_p = 0.365$ pF, $C_e = 60$ pF, stress calculation: by DYNA3D

常用いられる材料としてスライダ材料をアルミナ・チタン・カーバイド (Al_2O_3 , TiC), 圧電材料はジルコニウム酸チタン酸鉛 (PZT) とした。スライダの厚さは0.38 mm, 圧電材料の厚さは通常用いられる範囲でパラメータとした。

従来形センサの圧電材厚さと図11の入力による最大出力電圧の関係を図12に示す。センサの出力は圧電材が厚いほうが大きい。これはセンサが圧電材のマスと厚さ方向の剛性に相当するばねからなる振動的に挙動し、圧電材の慣性力の増加が応力の増加につながるためと考えられる。

薄膜 AE センサの圧電膜の厚さと図11の入力による最大出力電圧のシミュレーション結果を図13に示す。図12とは逆に圧電層の厚さが増加するとセンサの出力は低下しているが、これはセンサがスライダ内部に存在するために応力が衝撃波の入力位置から遠くなると小さくなり、圧電層の厚さが大きくなると電極間の平均応力が低下するためと考えられる。バルクのセンサの場合、圧電材の厚さが0.5 mmのときのセンサ出力は約26.6 mV/Nであるのに対し、薄膜センサで圧電層の厚さが2 μmの場合のセンサ出力は約半分の12.6 mV/Nで、センササイズの差ほど小さくない。

4.2 薄膜 AE センサにおける背面部材の効果

図2の薄膜 AE センサにおいて、背面部材の効果を検討した。図10(a)のモデルにおいて背面部材がある場合とない場合の圧電層の応力 σ_z およびセンサ出力は図14および15のようになる。図14および15を比較すると、背面部材がない場合は圧電層に生ずる応力

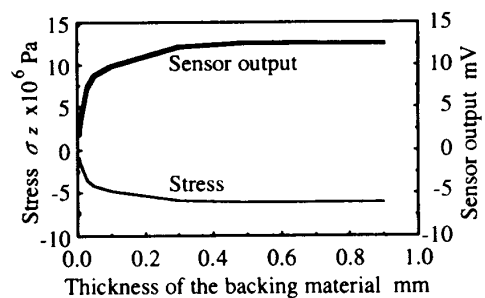


Fig. 16 Simulation of relationship between thickness of the backing material and maximum output of the thin film sensor

Simulation conditions
input force: Fig. 11, sensor size: 0.1 mm × 0.1 mm, thickness: Si substrate 0.38 mm, ZnO layer 0.002 mm, $C_p = 0.365$ pF, $C_e = 60$ pF, stress calculation: by DYNA3D

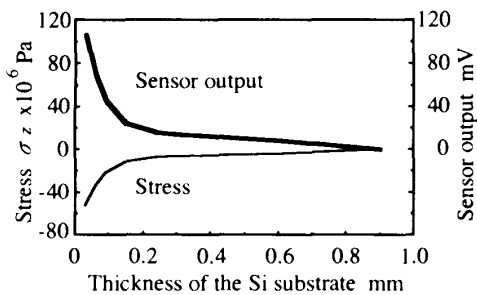


Fig. 17 Simulation of relationship between thickness of the Si substrate and maximum output of the thin film sensor

Simulation conditions
 input force: Fig. 11, sensor size: 0.1 mm × 0.1 mm, thickness: ZnO layer 0.002 mm, backing material 0.5 mm, $C_p = 0.365$ pF, $C_e = 60$ pF, stress calculation: by DYNA3D

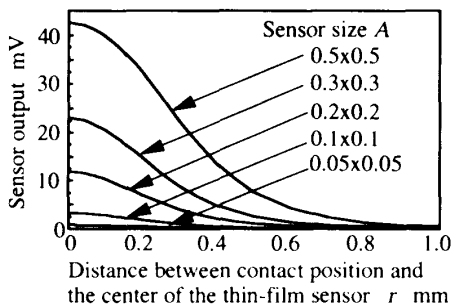


Fig. 18 Simulation of relationship between position of a contact force and sensor output

Simulation conditions
 thickness: Si substrate 0.38 mm, ZnO layer 0.002 mm, $F = 1$ N, C_p : from equ. (12), $C_e = 60$ pF, stress calculation: by equ. (20)

が非常に小さくセンサの出力は零に近い。これは式(14)において背面部材の音響インピーダンス Z_{ob} を零とおいた場合にセンサの出力が零になることに対応しており、薄膜センサにおいて背面部材は出力の点で必要である。なお背面部材の厚さとセンサ出力の関係のシミュレーション結果を図16に示すが、背面部材の厚さが増加するにつれてセンサ出力は増加するが、ある程度以上ではセンサ出力はほとんど変化しなくなる。

次に背面部材によるセンサ背面でのAE波の反射低減効果を調べるため、薄膜圧電層とそれに隣接する部分の応力分布を検討した(図14, 15)。図14, 15における丸数字は図10(a)における圧電層に隣接している部分を示す。

図14で、Si基板上部①、薄膜圧電層および背面部材下部②の応力の時間波形は入力波に相似でいずれも

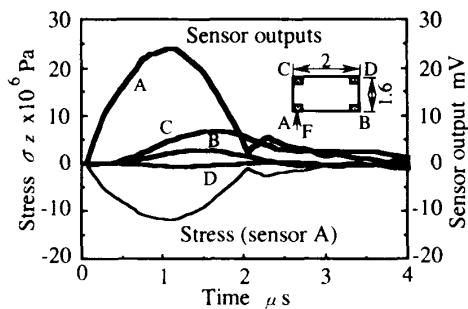


Fig. 19 Simulation of stress and sensor outputs of the thin film sensors on the 2 mm long slider [Simulation conditions: same as Fig. 14]

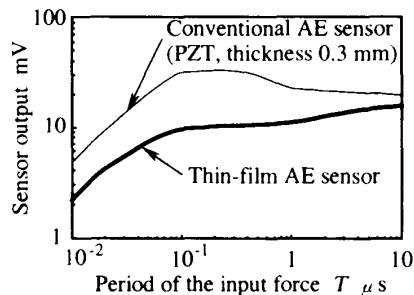


Fig. 20 Simulation of relationship between sensor output and period of the input force

Simulation conditions
 input force: Fig. 11, stress calculation: by DYNA3D
 thin film AE sensor: Same as Fig. 14
 conventional AE sensor sensor size: 0.1 mm × 0.1 mm, thickness: slider ($Al_2O_3 \cdot TiC$) 0.38 mm, piezoelectric material (PZT) 0.3 mm, $C_p = 0.250$ pF, $C_e = 60$ pF

圧縮であることから、背面部材がある場合は薄膜圧電層の両境界面でAE波の反射は発生せず、AE波はSi基板から薄膜圧電層を通過して背面部材へ伝ばしていると考えられる。一方背面部材がない図15の場合では、Si基板上部①の応力は引張り、薄膜圧電層の応力は圧縮になっており、Si基板と薄膜圧電層の境界面でAE波が反射し、そのため圧電層に生ずる応力が非常に小さいと考えられる。

4・3 Si基板の厚さとのセンサ出力 Si基板の厚さと薄膜AEセンサの出力電圧のシミュレーション結果を図17に示す。図17からSi基板は薄いほどセンサの出力は大きく、センサの出力を高めるためにはセンサを接触面へできるだけ近づけることが重要である。

4・4 センサ位置と出力 センサ位置とセンサ出力の関係を検討した。接触位置と薄膜AEセンサの位置を図9における z および r で定義し、センサの面積を A とする。 z はSi基板の厚さに相当し、この関係は

4・3節で述べているのでここでは $z=0.38\text{ mm}$ 一定として r および A とセンサの出力の関係を調べた。結果を図18に示す。なおここではセンサの面積 A に対する応力 σ_z を式(20)から求めている。図18において、 r が大きくなるにつれてセンサ出力は低下し、センサが接触位置から遠くなると検出不能になる。またセンサの面積 A が大きいほうがセンサ出力は大きい、 r が大きいと面積 A はセンサ出力にあまり影響しないことがわかる。

この r とセンサ出力の関係をセンサがスライダに搭載された状態で検討した結果を次に示す。スライダサイズを50%サイズ(2 mm長)とし、その四隅に0.1 mm角の薄膜AEセンサを形成した場合、各センサの出力は図19のようになる。図18と同様に各センサの出力は接触点に近いものほど大きい、センサ D では出力は零に近く、面積 A が0.1 mm角の場合に接触を検出できる r の最大値は約2.5 mmである。

4・5 接触時間とセンサ出力 センサの周波数特性を接触時間とセンサの出力電圧の関係により検討した。ここでは図11の接触時間 T を変化させている。シミュレーション結果を図20に示す。

図20において、薄膜、従来形どちらのセンサも接触時間と出力電圧の関係は類似しており、 T が0.1 μs 以上ではほぼフラットな特性といえる。しかし T が0.1 μs 以下ではセンサ出力はどちらも低下しており、センサのバンド幅を高めるためにはこの原因を検討する必要がある。

そこで薄膜センサの各材料の厚さ方向の固有振動の周期を調べると、圧電層の周期は非常に小さいがSi基板は約0.09 μs である。AE波はSi基板からセンサへ伝播するのでSi基板の固有周期よりも接触時間が小さい場合は圧電層に引き起こされる応力が小さくなり、これが出力が低下する原因と考えられる。一方従来形センサでは、スライダ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiC}$)および圧電材(PZT)の厚さ方向の固有周期は0.06 μs および0.13 μs で、この場合は接触時間が圧電材の固有周期よりも小さいためと考えられる。

薄膜AEセンサにより検出できる最小接触時間は0.01 μs 程度であると考えられるが、バンド幅の向上を計るためにはSi基板の厚さを小さくする必要があ

ると考えられる。

5. ま と め

スライダに搭載した接触検出用の薄膜圧電AEセンサの出力特性を検討するためのシミュレーション方法を導き、センサの出力実験との比較からその妥当性を確認した。また本シミュレーションによって開発した薄膜AEセンサの出力特性に関して以下の点がわかった。

(1) 単位接触力(1 N)によるセンサ出力(センサ面積:0.1 mm角)において、薄膜AEセンサの出力は約12.6 mVで、従来形センサ(圧電材料:PZT, 厚さ0.3 mm)の約1/2である。

(2) 薄膜AEセンサに背面部材を設けることによって、センサの出力電圧の向上と境界面でのAE波の反射を防ぐことができる。

(3) 薄膜AEセンサの出力は、薄膜圧電層および背面部材の厚さに対して大きな変化はなく、最も影響する因子は接触点との距離に関係するSi基板の厚さである。

(4) 薄膜AEセンサが検出できる最小接触時間は約0.01 μs で、基板材料の厚さ方向の振動周期に依存する。

文 献

- (1) Burger, G. J., Piezoelectric impact force sensor array for tribological research on rigid disk storage media, *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Workshop, Amsterdam, the Netherlands*, (1995), 294-299.
- (2) Imai, S., A thin film piezoelectric impact sensor array on a Si slider for measuring head disk interaction, *Proc. IEEE INTERMAG '95*, (1995), IIC 08.
- (3) Wickert, J. A., Towards a Micromachined Dual Slider and Suspension Assembly for Contact Recording, *ASME, Trib., Concept of Contact Recording*, 3 (1992), 27-39.
- (4) Auld, B. A., *ACOUSTIC FIELDS AND WAVES IN SOLID*, (1990), 324-343, Kreiger publishing company.
- (5) 例えば、川端昭, 超音波工学, (1988), 18, 61, 工業調査会.
- (6) Lange, Y. V., *Impact excitation of vibrations in the acoustic spectral inspection method*, (1979), 677-684, Plenum publishing corp.
- (7) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., *Theory of Elasticity*, (1934), 413-417, McGraw Hill Book.