スライダ搭載薄膜圧電 AE センサの出力特性の実験的検討*

今 井 郷 充^{*1}Output Characteristics of a Thin-Film Piezoelectric
Acoustic Emission Sensor Array on a Si Slider

Satomitsu IMAI

Output characteristics of a thin-film piezoelectric acoustic emission (AE) sensor array (sputtered ZnO, 0.1×0.1 mm) fabricated on a 2-mm-long Si slider for detecting head-disk interactions in hard disk drive systems were determined. The output characteristics were compared with those of a bulk AE sensor ($0.7 \times 0.7 \times 1.0$) attached to the back of the slider. Sensitivity of the thin-film sensor was about 1.7 mV/N, almost half of that of the bulk sensor. The thin-film sensor could detect AE waves caused by the contact force about 1.7 mm away from the sensor. When the slider contacted a bump on the disk, the output waveforms of the thin-film sensor were almost the same as those of the bulk sensor, and the noise level of the thin-film sensor was lower than that of the bulk sensor. Output signals of the array sensor matched the slider flying height at the position of each sensor.

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

1. 緒 言

磁気ディスク装置では、大記憶容量化に対する要求が強く、記憶密度向上のためスライダの低浮上量が進んでいる。現在の主要な製品では、記憶密度は約 $800 \sim 900$ Mb/in²、スライダの浮上量は $40 \sim 50$ nm といったレベルにある。今後もスライダの低浮上量は進み、スライダは間欠接触状態で浮上するようになると予想される。

スライダの浮上量の低下は、スライダとディスクとの接触頻度の増加をもたらす。接触現象を正確に把握する必要性が増す。従来、スライダとディスクの接触検出には、バルク圧電素子をスライダに取付ける方法を用いてきたが、センサとしては今後さらに、サイズの小型化および精度の向上が要求されると考えられる。

このような課題に対して、小形で高精度のセンサとして薄膜圧電材料を用いた AE センサをスライダ内部に構成する方式を考え、この方式によるセンサの出力特性をシミュレーションにより検討した⁽¹⁾。また 3

mm 長(幅 2.4 mm)スライダに本方式のセンサを搭載したものを製作し、出力に関する基礎実験を実施した⁽²⁾。

本報ではスライダサイズを 2 mm 長とし、さらに薄膜センサのアレイパターンを変えたものを製作してセンサの出力特性を測定した。実験ではバルクセンサとの出力を比較するため、薄膜センサ搭載スライダの背面にバルクセンサを取付けた。

2. センサスライダの構造

2.1 薄膜 AE センサの構造 薄膜 AE センサの構造を図 1 に示す。薄膜センサは、蒸着で形成した電極の上に、酸化亜鉛(ZnO)の圧電膜(厚さ $2 \mu\text{m}$)をスパッタで形成し、さらにその上に電極を形成した構造からなり、分極方向はその厚さ方向である。

薄膜センサは Si 基板上(厚さ 0.38 mm)に形成され

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

* 原稿受付 1996 年 10 月 2 日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所ストレージシステム事業部(〒256 小田原市国府津 2880)。

Fig. 2 Structure of the sensor-slider

ている。Si基板の反対側には浮上レールが形成されており、接触で生じたAE波は浮上面からSi基板内を伝ばし薄膜センサで検出される。薄膜センサ背面に接着されたパイレックスガラスは、センサの出力を増加させる役目と、センサ背面でAE波の反射を防ぐ音響整合材としての役目を果たしている。

薄膜センサは上部電極をアレイ化することによりマルチセンサ化されており(センサ数:3, 配置:図2参照), 各上部電極のサイズは 0.1×0.1 mmである。

2・2 センサ搭載スライダの構造 図2にセンサ搭載スライダの構造を示す。スライダは、Si基板とバックギング材料であるパイレックスガラスを接合した構造である。スライダのサイズは長さが2.05 mm, 幅が1.6 mmであるが, 厚さは約0.88 mmである。Si基板の一方の面に薄膜センサ, 反対側の面にはスライダの浮上面(Air bearing surface: ABS)が形成してある。浮上面の形状は流入端にステップが形成された2本の直線形である⁽³⁾⁽⁴⁾。薄膜センサと浮上レ

Table 1 Process of the sensor-slider

Process step	Process
1. Deposition of SiO ₂ for an ABS protection layer and an insulation layer of the sensors	Wet oxidation (1150 °C)
2. Patterning of the ABS	Wet etching (buffered HF)
3. Etching of the front steps	Dry etching: Reactive Ion Etching (RIE) of SF ₆ and O ₂

Process step	Process
4. Sensor fabrication	1. Deposition of the lower electrode (0.2 μm thick tungsten on 75 nm thick titanium)
5. Etching of an ABS slot	2. Sputtering the piezoelectric layer (2 μm thick ZnO) 3. Deposition of the upper electrodes (0.5 μm thick Al)
6. Bonding of a backing material	Dry etching: RIE of SF ₆ and O ₂
	Adhesive (araldite)
7. Separating of sliders	Sawing

ールの位置関係を図2に示す。また表1に薄膜センサ搭載スライダのプロセスを示す。

3. 実験方法

3・1 スライダとサスペンションのアセンブル センサ搭載スライダのサスペンションへの取り付け方法を示す。まず流入端に形成されている、ボンディングパッドへ信号線($\phi 30 \mu\text{m}$)を超音波ボンディングで取付ける。次にスライダをサスペンションのスライダ取り付け部の所定の位置に接着する。最後に、スライダをピッチングおよびローリング方向に柔軟に支持するためのばねであるジンバルの剛性を変化させないように信号線を引き回し、外部端子と接続する。

設定したスライダ荷重および荷重位置を図3に示す。スライダの浮上条件は、浮上量計算に基づいて設定した。三つの薄膜センサの位置に対応する、浮上レール上の点における浮上量の計算結果を図4に示す。図4において、 h_1 はアウトレール流入端、 $h_{1.5}$ はアウトレール長手方向中点、 h_{2o} はアウトレール流出端(h_{2i} はインナレール流出端)の浮上量を表す。スライダの浮上量は通常干渉じま法で測定されるが、本スライダの浮上レール面には耐しゅう動性のためのSiO₂膜を付けており⁽⁵⁾, SiおよびSiO₂両表面で反射した光が多重干渉するために、浮上量を測定することが困難である。ただしディスク周速を変えてスライダの浮上量を変化させ、どの周速のときに薄膜圧電センサの

Fig. 3 Slider assembly

Fig. 4 Calculated slider flying height

Fig. 5 Experimental setup

Disk		
size	2.5"	3.5"
substrate	glass	Al
Bump		
height(nm)	40, 70	140
width(μm)	3	10

Fig. 6 Bump disks

出力が生じ始めるかを調べることによって、スライダの浮上量が計算に対して妥当かを確認した。

3.2 実験装置 図5に実験装置を示す。薄膜センサとバルクセンサ(PZT)の出力特性を比較するため、図3に示すようにバルクセンサをスライダ背面に取付けた。バルクセンサのサイズは約 $0.7 \times 0.7 \times 1.0$

Fig. 7 Experimental setup for sensor output test
(d : Distance between the input force and the sensor)

Fig. 8 Output signals of the bulk sensor and the thin-film sensors by dropping the ball

mmである。薄膜センサに対しては電気容量の小さいアンプを使用することが感度の点で望ましいが、バルクセンサとの比較を行うため同じアンプを使用した。浮上状態でのセンサ出力を測定するためにバンプディスクを使用した。バンプディスクの仕様を図6に示す。またバンプと接触した際のスライダ挙動を計測するため、レーザドップラー振動計(LDV)を用いてスライダの中央部の浮上方向の振動を計測した。

4. 実験結果

4.1 センサの感度測定 薄膜センサの感度を、鋼球を落下させたときの衝撃力を入力として測定した。図7に測定状態を示す。スライダの浮上面から20 mmの高さから $\phi 1$ mmの鋼球を流出端の薄膜センサ②(図2参照)の中心に落下させ、センサの出力を計測した。このときに発生する衝撃力の最大値は1.87 Nである⁽¹⁾。またスライダ背面のほぼ中央に取付けたバルクセンサの出力も測定し、薄膜センサと比較した。

図8に各センサの出力を示す。出力振幅の最大値か

ら各センサの感度を求めると、バルクセンサは約 3.86 mV/N、薄膜センサ②は約 1.69 mV/N である。薄膜センサの出力はバルクセンサの約半分であるが、これはセンサの面積の差のためであると考えられる。また、薄膜センサの感度は前報⁽¹⁾で実施した感度試験の結果(約 7.1 mV/N)よりも低下したが、これは測定に用いたアンプの電気容量が大きいと考えられる[前報のアンプの電気容量は約 3 pF、本実験のアンプ電気容量は約 70 pF、これにケーブル、コネクタ等(約 60 pF)の電気容量が加わり、本実験の全浮遊容量は前報の約 3 倍程度である]。鋼球の落下点から約 1.3 mm 離れた薄膜センサ③の感度を求めると、約 0.34 mV/N で薄膜センサ②の約 1/5 になっている。センササイズが小さいと、入力点からの距離の増加によって出力の減少が大きい。

薄膜センサ①～③の感度と、入力点からの距離の関係は図 9 のようになる。本実験と同レベルの入力の場合、薄膜センサと入力位置との距離が約 1.8 mm 以下であれば AE 波を検出できると考えられる。また入力位置がこれ以上離れる場合があるならば、センサのアレイ化が必要である。前報⁽¹⁾で行った 2 mm 長スライダに形成された薄膜センサの出力シミュレーションでは、入力位置から約 2.5 mm 離れたセンサの出力はほぼ零であったから、本結果はほぼこれに一致している。

4.2 バンプ接触時のセンサの出力比較 浮上時に、ディスク上に形成されたバンプとの接触によって生ずる、センサの出力を測定した。薄膜センサとバルクセンサの出力の測定のほか、スライダの浮上方向の挙動を LDV で計測して各センサの出力のタイミングを比較した。測定はスライダの浮上量が大きい場合と小さい場合について行った。

浮上量が大きい場合に、高いバンプを形成するために、3.5" スパッタディスク表面にカットナイフで切込

Fig. 9 Relation between output of the thin-film sensor and the distance between the sensor and the point of the input force

みを入れてバンプを形成した。このバンプ高さは約 140 nm である。ディスク周速を 9 m/s、スライダ荷重を 9.8 mN (1 gf) に設定してスライダを浮上させた。このときのスライダの浮上量は、図 4 からアウトレー流入端が約 260 nm、流出端が約 110 nm で、バンプの高さはスライダの流入端から長手方向の約 3/4 の位置の浮上量に相当する。測定した各センサの出力を図 10 に示す。図 10 の波形は上から順に、スライダ浮上方向挙動(LDV)、バルクセンサ出力、薄膜センサ②の出力である。

LDV の波形はスライダがバンプと接触した際に変動しており、スライダの接触によりバルクセンサおよび薄膜センサの出力が発生したと考えられる。両センサの出力波形は、位相はずれているが波形は似ており、出力波の継続時間もほぼ同じである。薄膜センサのアンプゲインはバルクセンサよりも 20 dB 高いので、薄膜センサの出力はバルクセンサの約 1/10 である。この結果は感度試験で得た比と一致していないが、薄膜センサの出力はセンサと接触位置の距離により大きく影響されるので、接触位置の影響と考える。図 10 においてバンプと接触する前の出力波形のノイズレベルを比較すると、薄膜センサのノイズはバルクセンサより小さいが、S/N は同等と考えられる。

次にスライダの浮上量が小さい場合を示す。図 6 に示した高さ 40 nm のバンプが形成された 2.5" ガラスディスク上にスライダを浮上させた。ディスク周速を 6 m/s、スライダ荷重を 14.7 mN (1.5 gf) に設定した。このときのスライダの浮上量は図 4 より、アウトレー流入端が約 58 nm、流出端が約 34 nm である。バンプの高さはスライダ長手方向の中央付近の浮上量とほぼ同じである。

Fig. 10 Output signals of the bulk and the thin-film sensor when the slider collides with the bump (140 nm high)

Fig. 11 Output signals of the bulk and the thin-film sensor when the slider collides with the bump (40 nm high)

センサの出力結果を図 11 に示す。図 11 の波形は図 10 と同様に、上からスライダの浮上方向挙動(LDV)、バルクセンサの出力、薄膜センサの出力である。スライダの流入側の浮上量と、流出側の浮上量の比である姿勢角が小さいためか(図 10 の場合の約 1/5)、LDV の出力から接触したときのスライダの浮上方向の変動ははっきり現れていない。センサの出力波形はバルクセンサ、薄膜センサともに浮上量が多い図 10 の場合と大きく異なっていない。ただし出力レベルは両センサともに小さくなっている。図 10 の場合に比べ、スライダの姿勢角やディスク周速が小さくなったためと思われる。図 10 と出力振幅の最大値を比較すると、薄膜センサが約 1/2 になったのに対しバルクセンサは約 1/10 となっており、バルクセンサの出力の減少が大きい。

入力の大きさとセンサの出力に非線形性があるかどうかは確認していないが、小さな入力に対して高感度化する方法として、薄膜センサでは基板厚さの低減やセンサ面積の増加が考えられる。

4.3 薄膜アレイセンサの出力比較 スライダがバンプディスクと接触したときの三つの薄膜アレイセンサの出力について比較した。本実験で使用した 2.5" のガラスディスクには高さ 70 nm のバンプが形成されている。スライダ荷重を 14.7 mN (1.5 gf)、ディスク周速を 7 m/s に設定してスライダがバンプに接触するようにした。この場合のスライダの浮上量は図 4 から、アウトレール流入端で約 93 nm、流出端で約 48 nm である。

各薄膜センサの出力を図 12 に示す。出力を比較すると、流出端の二つのセンサ②および③の波形は相似で振幅もほぼ同じである。この二つのセンサ位置にお

Table 2 AE wave propagation velocity of Si substrate

	Density ρ kg/m ³	Young's modulus $E \times 10^{11}$ Pa	Poisson's ratio ν	Wave velocity c m/s
Si(100)	2332	1.302	0.28	8449

Fig. 12 Output signals of the thin-film array sensor

ける浮上量はほぼ同じであるから、この結果は妥当と思われる。一方センサ①と②の出力を比較すると、出力レベルは浮上量の大きいセンサ①の方が小さくなっている。①と②の出力波形では、立上がり部に時間差ははっきりと現れていない。接触位置が薄膜センサ①と②のほぼ中点の可能性もあるが、表 2 に示した Si 基板における AE 波の伝ば速度から距離 1 mm 当たりの伝ば時間を計算すると、約 0.12 μ s と小さいことも一因であると思われる。また使用したアンプの電気容量が大きいために、センサの出力の立上がり部分がややなまっているように感じられた。出力の時間差を測定する場合は浮遊容量の小さな測定系にする必要がある。

4.4 薄膜センサの出力特性の検討 薄膜センサとバルクセンサの構造上の最も大きな相違は、薄膜センサはスライダの内部に形成されている点である。そのためスライダの弾性振動が薄膜センサの出力に影響することが考えられる⁽⁶⁾。この点について以下に検討した。

薄膜センサ搭載スライダの固有振動数と、モードを有限要素法で計算した結果を図 13 に示す。低次の固

Fig. 13 Calculated natural frequencies and modes of the sensor slider

有振動数は数 100 kHz のオーダにあり、計測している AE 波の帯域 (100 kHz ~ 2 GHz) と重なっている。

本実験でセンサの出力測定には、100 kHz のハイパスフィルタを使用した。ハイパスフィルタの設定を 500 kHz とした場合のセンサ出力の測定結果を以下に示す。

図 14 は、3 章と同様の落球によって生じた薄膜センサの出力である。落下高さは 15 mm で衝撃力の最大値は 1.57 N である。出力波形では、最初に大きな振幅が生じた後、次第に減衰している。この波の周期は約 2 μ s で、周波数は図 13 に示したスライダの一次固有振動数に近い。

また図 15 に、スライダが浮上時にディスク上のバンパ (3.5" ディスク、バンパ高さ 140 nm) と接触したときの薄膜センサの出力波形を示す。この出力においても、次第に振幅が大きくなり、その後減衰する波形が現れており、その振動数はスライダの一次固有振動数にほぼ一致している。この波形は今まで示した薄膜センサの出力波形よりも時間が長く、落球やバンパとの接触でスライダに励起された固有振動による応力が薄膜センサの出力に影響していると思われる。薄膜センサ自体の固有振動数は非常に高いので⁽¹⁾、数 100 kHz オーダの周波数帯域ではセンサ自体の周波数特性はフラットである。したがってスライダの固有振動からずれた周波数帯域では、薄膜センサの出力信号は接触状態に対応したものとなると思われる。

薄膜センサスライダの空気膜振動(ピッチ)は、荷重 1.47 mN (1.5 gf)、周速 7 m/s の場合、約 50 kHz であるが、スライダがディスク上を接触せずに浮上している場合には、この周波数の出力は検出されない。したがって、このようなスライダの剛体運動では、薄膜

Fig. 14 Output signal of the thin-film sensor by dropping the ball (500 kHz HPF)

Fig. 15 Output signal of the thin-film sensor when the slider collides with the bump on the disk (500 kHz HPF)

センサの出力は生じないと思われる。

5. ま と め

Si 基板のナノスライダに搭載した薄膜(スパッタ ZnO)圧電 AE センサの出力試験を行い、出力特性を検討した。

(1) 0.1 mm 角の薄膜センサ中央にボールを落下させた場合のセンサ出力は約 1.7 mV/N で、衝撃入力から離れるにつれてセンサの出力は小さくなり、距離と出力の関係から約 1.8 mm でセンサ出力は零となる。したがって、スライダサイズを考慮してセンサのアレイ化をする必要がある。

(2) バンパディスクを用いた浮上接触試験により、薄膜センサとパルクセンサの出力比較を行った。両センサの出力のタイミングは同じで、出力波形もほぼ相似であった。薄膜センサの出力はパルクセンサより小さいが、S/N は同等である。

(3) 浮上時のバンパとの接触による三つのアレイセンサの出力は、スライダの浮上姿勢に対応しており、アレイ化によりスライダの挙動に関するより多くの情報が得られることを確認した。

(4) 薄膜センサはスライダ内部に形成されているため、接触により励起されるスライダの固有振動と同じ周波数成分の出力が含まれる(一次固有振動数: 約

575 kHz). またスライダの空気膜振動による薄膜センサの出力は生じていない。

文 献

- (1) 今井郷充, Burger, G. J., Lammerink, T. S. J., Fluitman, J. H. J., 磁気ヘッド接触検出用薄膜圧電 AE センサの出力特性に関する検討, 機論, **62**-595, C(1996), 118-125.
- (2) Imai, S., A Thin-Film Piezoelectric Impact Sensor Array Fabricated on a Si Slider for Measuring Head-Disk Interaction, *IEEE Trans. Magne.*, **31**-6(1995), 3009-3011.
- (3) Wickert, J. A., Towards a Micromachined Dual Slider and Suspension Assembly for Contact Recording, *ASME Trib.*, **3**, Concept of Contact Recording, (1992), 27-39.
- (4) 梶谷浩司・橋本雅伸・多川則男, ナノ浮上負圧2ステージ Si スライダの基礎的検討, IIP'92 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, No. 920-67 (1992), 61-63.
- (5) Bhushan, B., Dominiak, M. and Lazzari, J. P., Contact-Start-Stop Studies with Silicon Planar Head Sliders Against Thin-Film Disks, *IEEE Trans. Magne.*, **28**-5 (1992), 2874-2876.
- (6) Mochizuki, K., Sato, I. and Hayashi, T., Detection of a Impulse Force in Head-Disk Media Contact using Small Piezoelectric Transducer, *Proc. 9th Int. Acoustic Emission Symp.*, (1988), 148-155.