小形圧電素子による浮動ヘッドスライダの 接触検出および動特性の評価*

林 武 文^{*1}, 大久保 俊 文^{*2}
望 月 研 二^{*3}, 佐 藤 勇 武^{*3}

Contact Detection and Evaluation of Dynamic Characteristics of Flying Head Slider Using a Small Piezoelectric Transducer

Takefumi HAYASHI, Toshifumi OHKUBO,
Kenji MOCHIZUKI and Isamu SATO

Signal output from a small piezoelectric transducer bonded to a flying head slider is analyzed. Slider-core natural vibrations and slider rigid body oscillations are identified with the frequency peaks of the signal output. These analyses are applied to a highly sensitive contact detection and an evaluation of dynamic characteristics of a slider on a real medium.

Key Words: Tribology, Hydrodynamic Bearing, Flying Head Slider, Head/Medium Interface, Contact Detection, Slider Dynamics, Mixed Lubrication, Piezoelectric Transducer, Acoustic Emission, Magnetic Disk Storage

1. ま え が き

磁気ディスク装置の高記録密度化には、浮動ヘッドスライダの浮上すきまの微小化が必須であるが、それに伴ってスライダの安定浮上を阻害するさまざまな外乱の影響が顕在化し、ヘッド・媒体の接触損傷に至る危険性が増大する。記録密度の向上を図るとともに装置の信頼性を確保するためには、高感度な接触検出と実媒体上でのスライダの動特性評価に基づいたスライダ・媒体系の設計が不可欠である。

Tseng ら⁽¹⁾は、電気抵抗法を用いてスライダのCSS(Contact Start/Stop)時における間欠的な接触状態を観察した。しかし、この方法は導電性のスライダと媒体を必要とするために、実際のスライダ・媒体系への適用が困難である。北ら⁽²⁾は、スライダの接触時に発生する弾性波を、図1に示すような支持機構に設置したアコースティック・エミッション(AE)センサを用いて検出する方法を提案した。この方法を用いた

CSS時のヘッドクラッシュ現象の観察⁽³⁾やスライダの動的挙動の測定⁽⁴⁾が行われているが、センサの信号出力は弾性波の伝ば経路の影響を受けるために詳細な解析が困難である。Yeack-Scranton⁽⁵⁾は、図2に示すように、小形の圧電素子をスライダに接着して接触時の弾性波とスライダの加速度を検出する方法を提案した。この方法は、圧電素子の信号出力を周波数分析

図1 AEセンサを用いた接触検出法

図2 スライダ・コアに接着した小形圧電素子の外観

* 平成元年5月23日 メカトロニクス国際会議において講演、
原稿受付 平成元年11月16日。

^{*1} 正員、(株)ATR 視覚機構研究所 (〒619-02 京都府相楽郡精華町乾谷三平谷)。

^{*2} 正員、日本電信電話(株) (〒180 武蔵野市緑町3-9-11)。

^{*3} 日本電信電話(株)。

することにより、スライダ・媒体間の接触とスライダの運動の両方を同時に測定することが可能である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、信号出力とスライダ・媒体の界面で起こる現象の対応付けが必ずしも十分になされていない。

本研究では、接触検出の高感度化と実媒体上でのスライダの動特性の評価を目的に、スライダに接着した圧電素子の信号出力の解析を行った。スライダ・媒体の接触時に検出されるスライダ・コアの固有振動を同定するとともに、従来の AE センサによる接触検出法との比較を行い、本手法および従来法において検出感度を向上させるための指針を示した。また、圧電素子の信号出力の低周波成分がスライダの剛体運動によく対応し、静止状態から浮上状態までのスライダの動的挙動の測定に有効であることを示した。

2. 実験系および供試スライダ

供試スライダには正圧形テーパフラットスライダを、また支持機構にはワトラス形ジンバル(押付荷重 68 mN)を用いた。表 1 に示す材料および寸法の異なる 3 種類のスライダ(スライダ A~C)を作製した。スライダの材料の機械的特性値を表 2 に示す。弾性定数は、スライダと同じ材料で 6 mm×6 mm×4 mm の直

表 1 供試スライダの諸元

Slider		A	B	C
Dimension [mm]	l_1	3.7	3.7	4.6
	l_2	2.8	2.8	3.2
	l_3	0.9	0.9	1.0
	d	0.1	0.1	0.1
	b	0.32	0.32	0.32
Mass * [mg]		40	48	61
Material		Al ₂ O ₃ -TiC	Zn-Ferrite	Al ₂ O ₃ -TiC

* Mass includes PZT and flexure part of gimbal suspension

表 2 スライダの材料の機械的特性値

Material	Al ₂ O ₃ -TiC	Zn-Ferrite
Density [g/cm ³]	4.2	5.3
Shear Modulus [GPa]	151	74
Poisson Ratio	0.35	0.32

表 3 供試媒体の表面粗さ

Medium		A	B
Surface Roughness [μm]	R_a	0.009	0.003
	R_{max}	0.06	0.03

方体の試験片を作製し、三次元共振法⁽⁸⁾⁽⁹⁾を用いて測定した。

供試媒体は、直径 5.25 インチの Co-Ni 系連続薄膜媒体で、2 種類の表面粗さのもの(媒体 A および B)を用いた。表 3 に光学式粗さ計で測定した各媒体の中心線平均粗さ R_a と基準長さ 0.25 mm に対する最大高さ R_{max} の平均値を示す。

圧電素子は PbTiO₃ 系の寸法 2.5 mm×0.3 mm×0.25 mm のものを用い、図 2 に示すようにスライダ・コアの背面部で流出端側に接着して信号出力を測定した。出力の信号処理は、ハイパス・フィルタにより 1 kHz 以下の成分をカットした。

3. 供試スライダの浮上特性

図 3 に媒体 A 上でのスライダ A の走行面速度に対する浮上すきま(テーパー端: h_i , 流出端: h_o)の計算値と測定値および圧電素子出力の実効電圧 V_{PZT} を示す。浮上すきまの計算には 1 次のスリップ流れ近似に基づく修正レイノルズ方程式⁽¹¹⁾を用い、走行面速度が小さい時点では図 4 に示すように媒体面の平均突起高さに相当する厚さ h_m の仮想潤滑膜上をスライダが走行すると仮定する混合潤滑モデル⁽¹²⁾によりスライダの姿勢を決定した。ここでは、媒体面の平均突起高

図 3 スライダ A の浮上特性と圧電素子の出力

図 4 起動・停止時のスライダの浮上状態(F_s : 押付荷重, F_h : 空気膜の浮上力, h : 浮上すきま, h_m : 仮想潤滑膜, U : 走行面速度)

さとして表3に示した $R_{\max}$ 値($=0.06\ \mu\text{m}$)を用いた。浮上すきまの測定値はガラスディスク上で可視レーザー光干渉法⁽¹⁰⁾を用いて測定した。非接触浮上状態では、計算値は測定値にほぼ一致している。圧電素子の出力は中心周波数 500 kHz、バンド幅 50 kHz のバンドパスフィルタで処理した。

浮上特性の計算結果と V_{PZT} の測定結果の対応から、CSS 時のスライドの浮上状態は次の領域 I~IV に分類される。

領域 I：摺動状態

領域 II：混合潤滑状態

領域 III：間欠接触状態

領域 IV：非接触浮上状態

それぞれの状態におけるスライドの姿勢を図4に示す。間欠接触状態(領域 III)は、突起高さの平均値 h_m より高い突起とスライドがディスク一周につき数箇所接触するために生ずる。この領域では、走行面速度の増加に伴って図3中に示した圧電素子出力 V_{PZT} は低下し、非接触浮上状態でノイズレベルに達する。

4. 結果および考察

4・1 小形圧電素子の信号出力スペクトル スライド A と媒体 A を用いた時の走行面速度 0 m/s、2 m/s、6 m/s、8 m/s における圧電素子の信号出力スペクトルを図5に示す。各速度はスライド・媒体の静止状態および図4に示した摺動状態(領域 I)、間欠接触状態(領域 III)、非接触浮上状態(領域 IV)に対応する。摺動状態では、数箇所に共振ピークが現れる。200 kHz 以下の共振は走行面速度の変化に伴って著しく変化するのに対し、200 kHz 以上の共振は、走行面速度にはほとんど依存しない。間欠接触状態では、スペクトル全体のバックグラウンドが低下して 200 kHz 以上の共振ピークが尖鋭化するとともに、摺動状態で観測された 200 kHz 以下の共振は、100 kHz 以下までシフトする。スライドが完全に浮上すると高域の共振がすべて消失し、50 kHz 以下の成分のみが残る。

図6にスライド B およびスライド C の間欠接触状態(走行面速度 6 m/s)における信号出力のスペクトル

(a) 静止状態, 走行面速度 $U = 0\ \text{m/s}$

(b) 摺動状態, 走行面速度 $U = 2\ \text{m/s}$

(c) 間欠接触状態, 走行面速度 $U = 6\ \text{m/s}$

(d) 非接触浮上状態, 走行面速度 $U = 8\ \text{m/s}$

図5 スライド A の走行面速度に対する信号出力スペクトルの変化(媒体 A)

(a) スライド B, 走行面速度 $U = 6\ \text{m/s}$

(b) スライド C, 走行面速度 $U = 6\ \text{m/s}$

図6 スライド B, C の間欠接触状態における信号出力スペクトル(媒体 A)

を示す。200 kHz 以上にスライド A と同様の共振が見られるが、ピーク位置がスライドによって異なり、これらの共振はスライドの材料定数と形状に固有のものであることがわかる。

4.2 スライド・コアの固有振動数の同定と接触検出法への適用 図 5, 6 に示したスライド・媒体の間欠接触時に起こる 200 kHz 以上のピークを解析するため、スライド・コアの固有振動数を求め比較を行った。測定および計算には、微小試験片の弾性定数の測定に用いられる三次元共振法⁽⁸⁾⁽⁹⁾の手法を適用した。測定装置の構成を図 7 に示す。スライドを 2 枚の圧電素子の板で挟み、一方でスイープ加振を行い、もう一方で固有振動を検出した。スライドの固有振動数の計算値は、スライドを直方体で近似し、レーレー・リッツ法⁽⁹⁾により求めた。

間欠接触状態(走行面速度 6 m/s)での各スライドにおける圧電素子の信号出力の 200 kHz 以上の共振周波数 [図 5 (c), 図 6 (a), (b) で 1~4 まで番号を付けたもの] とスライド・コアの固有振動数の測定値および計算値の 4 次モードまでの値を表 4 に示す。各スライドにおいて三者はほぼ良い一致を示し、スライドと媒体の接触時には小形圧電素子により主として 200 kHz 以上の帯域にスライド・コアの固有振動による共振が検出されることを確認した。なお、1~4 次までの固有振動モードは、それぞれ 1 次のねじり、長手方向の 1 次の曲げ、2 次のねじり、幅方向の 1 次の曲げ

表 4 信号出力のピークとスライドの固有振動数の比較

Slider A			
Mode No.	Slider-core Natural Freq. [kHz]		PZT Output Peak Value [kHz]
	Measured	Calculated	
1	399	395	396
2	512	505	500
3	799	848	788
4	856	864	830

Slider B			
Mode No.	Slider-core Natural Freq. [kHz]		PZT Output Peak Value [kHz]
	Measured	Calculated	
1	245	247	238
2	321	313	310
3	515	528	498
4	528	529	519

Slider C			
Mode No.	Slider-core Natural Freq. [kHz]		Pzt Output Peak Value [kHz]
	Measured	Calculated	
1	321	315	315
2	383	376	365
3	682	671	643
4	696	743	673

振動に対応する。図 8 に固有振動モードの形状を示す。これら 200 kHz 以上の共振ピークのうち、単一のピークについてバンド幅を狭めて測定することにより接触検出の SN 比が向上し、浮上状態の高精度な識別が可能である。

4.3 AE センサによる接触検出法との比較 スライド A と媒体 A を用いた場合の、間欠接触状態における圧電素子の信号出力と、支持機構に取付けた AE センサ(図 1)の信号出力の周波数成分の比較を図 9 に示す。AE センサは 100 kHz~1 MHz の間でほぼフラットな周波数特性のものを用い、圧電素子と同時に測定を行った。AE センサの信号出力は、600 kHz 以上の帯域で、弾性波の伝ば経路およびセンサの接触

図 7 スライド・コアの固有振動数測定装置の構成

図 8 スライド・コアの共振モード

図 9 AE センサを用いた接触検出法との比較
(スライド A の間欠接触状態における信号出力スペクトル, 走行面速度 $U=7$ m/s)

面でのエネルギーの損失のために減衰するが、これ以下では PZT とほぼ同じ帯域に共振ピークをもつことがわかる。AE センサを用いてスライド・媒体の接触検出を行う場合には、センサの共振周波数を前節で同定したスライド・コアの固有振動周波数のうち、低次のものの付近に一致させることにより検出感度を向上させることが可能である。

4・4 PZT の信号出力とスライドの剛体運動の比較
次に、スライドの浮上状態で観測される圧電素子からの信号出力の 50 kHz 以下の周波数成分を解析するため、レーザ光干渉⁽¹⁰⁾により求めたスライド流出端の

(a) 突起幅 $\delta = 0.05$ mm

(b) 突起幅 $\delta = 1.0$ mm

図 10 く形状突起通過時の流出端浮上すきま変動

浮上すきま変動との比較を行った。図 10 にガラスディスク上に形成したく形断面状の突起がスライドの両方のレールを同時に通過する場合のスライド流出端の過渡応答と圧電素子の信号出力を示す。ここでは、圧電素子の出力を 2 回積分することにより変位に変換した。また振動振幅をレーザ干渉法による測定結果に一致させてある。ハイパスフィルタの影響により低周波成分に差異が見られるものの、圧電素子の出力は、スライドの剛体運動の成分である数十 kHz の信号に対しても良い対応を示すことが確認された。

4・5 静止状態から浮上状態までのスライドの動特性評価

表面粗さの異なる媒体 A, B について、走行面速度を 25 m/s から連続的に静止状態まで変えた場合の信号出力スペクトルの 100 kHz 以下の成分の変化を測定した。図 11 に、スライド A と媒体 A を用いた場合の測定結果を示す。図中の領域 I ~ IV は、図 4 に示すスライドの各浮上状態に対応する。非接触浮上状態では、空気膜の共振が 15 kHz ~ 40 kHz に励起される。走行面速度が低下するに従ってスライドの浮上すきまが減少し、空気膜剛性が増加するため共振周波数は増加する。6 m/s 以下の走行面速度で 10 kHz 以下の帯域に支持機構の固有振動が励起される。また

図 12 空気膜および支持機構の共振周波数の計算結果

図 11 走行面速度と出力スペクトルの変化 (スライド A & 媒体 A)

図 13 走行面速度と出力スペクトルの変化 (スライド A & 媒体 B)

空気膜の共振ピークの幅が増大するとともに、高域側へ著しくシフトする。

図 12 に数値計算により求めた空気膜の共振周波数および支持機構の固有振動数と走行面速度の関係を示す。摺動状態および混合潤滑状態のスライダの姿勢は前述の混合潤滑モデルにより求め、摂動法に基づく線形解析法⁽¹³⁾を適用して空気膜の共振周波数を計算した。また支持機構の固有振動数の計算は有限要素法を用いた、 P_1 , P_2 , P_3 はそれぞれスライダの並進、ピッチングおよびローリングモードの共振を、また S_1 , S_2 , S_3 はそれぞれ支持機構の 1 次～3 次モードの共振を示す。非接触浮上状態と間欠接触状態では、計算結果と実験とはほぼ良い一致を示している。摺動状態(領域 I)の空気膜の共振周波数が走行面速度の低下に伴って減少するのは、仮想潤滑膜 h_m (図 4)によってスライダの姿勢が拘束され、空気膜剛性が減少するためである。しかし、実際にはこの領域では、スライダの運動はスライダ・媒体表面間の接触に起因するものが支配的となるため、計算結果と実験結果の間に差異が生じている。

図 13 に表面の平滑な媒体 B に対する同様の測定結果を示す。表面の粗さが平滑になるほど、浮上状態での空気膜共振の出力レベルが低下することがわかる。媒体 B では、1 m/s でスライダと媒体の間の吸着が起こり、支持機構の共振のレベルが急増するとともに、90 kHz 付近にレベルの高い共振ピークが現れた。

小形圧電素子の信号出力スペクトルの低周波成分を連続測定することにより、静止状態から浮上状態に至るまでの確度の高いスライダの動特性の評価が可能である。

5. ま と め

本研究では、スライダ・媒体の接触検出の高感度化と実媒体上でのスライダの動特性の評価を目的に、スライダに接着した圧電素子の信号出力の解析を行った。得られた結果は以下のとおりである。

(1) スライダ・コアの固有振動の測定および計算により、スライダ・媒体の摺動時および間欠接触時には主として 200 kHz 以上の周波数領域にスライダ・コアの固有振動が検出されることを明らかにした。これらの固有振動数に中心周波数をもつ狭帯域のバンドパ

スフィルタを用いて信号のフィルタリングを行うことにより、高感度なスライダ・媒体の接触検出が可能である。

(2) 従来の AE センサを用いた接触検出法との比較を行い、AE センサの信号出力は数百 kHz の比較的低い周波数帯域では圧電素子と同じ共振ピークをもつことを確認した。AE センサを用いてスライダ・媒体の接触検出を行う場合には、センサの共振周波数をスライダ・コアの固有振動数のうち、低次のものの付近に一致させることにより検出感度を向上させることが可能である。

(3) レーザ干渉法との比較により圧電素子の信号出力は、スライダの剛体運動の成分である数十 kHz の信号に対しても良い対応を示すことを確認した。信号出力スペクトルの 100 kHz 以下の低周波数成分の連続測定により、静止状態から非接触浮上状態に至るまでの確度の高いスライダの動特性の評価が可能であることを示した。

最後に、三次元共振法に関してご指導いただいた名古屋大学工学部機械学科、松室昭仁助手に感謝する。また有限要素法による固有振動数の計算に協力いただいた NTT 研究所、下倉健一郎、南條義人両研究主任に感謝する。

文 献

- (1) Tseng, R. C. and Talke, F. E., *IBM J. Res. Develop.*, **18**-6(1974), 534.
- (2) Kita, T., Kogure, K., Mitsuya, Y. and Nakanishi, T., *IEEE Trans. Mag.*, **16**-5(1980), 873.
- (3) Kawakubo, Y., Ishihara, H. and Seo, Y., *IEEE Trans. Mag.*, **20**-5(1980), 993.
- (4) Benson, R. C., Sundaram, R. and Talke, F. E., *STLE SP-2*, **3**(1988), 87.
- (5) Yeak-Scranton, C. E., *IEEE Trans. Mag.*, **55**-5(1986), 1011.
- (6) 高橋・米岡・大江, 信学会講演論文集, 半導体・材料部門 S3-4, (1987), 1-275.
- (7) Mochizuki, K., Sato, I. and Hayashi, T., *Trans. IEICE*, E71-4(1988), 360.
- (8) 妹尾・平野・西村, 機論, **50**-451, A(1984), 440.
- (9) Ohno, I., *J. Phys. Earth*, **24**(1976), 355.
- (10) 大久保・岸上・福井・安田, 機論, **45**-391, C(1987), 356.
- (11) Burgdorfer, A., *Trans. ASME, Ser. D*, **81**(1959), 94.
- (12) 北・木暮・三矢, 潤滑, **29**-3(1983), 39.
- (13) 小野・木暮・三矢, 機論, **45**-391, C(1979), 356.