AEを用いた Mn-Zn フェライトのオンライン摩耗検出法*

松岡 薫^{*1}, David FORREST^{*2}, Ming-Kai TSE^{*2}

On-line Wear Monitoring of Mn-Zn Ferrite Using Acoustic Emission

Kaoru MATSUOKA, David FORREST and Ming-Kai TSE

On-line estimation of the wear rate of materials subjected to abrasion has been accomplished using acoustic emission (AE) sensing. The energy in the AE signal is directly related to the energy required for material removal in the abrasion process. The technique has been successfully applied to monitoring the wear of magnetic recording head materials using lapping tapes over a wide range of wear rates. A methodology has been developed to calibrate the AE monitoring system on line and to estimate the total wear volume. Such a system provides a very powerful quantitative measurement technique for tribological studies, as well as for on-line machine or process diagnostic.

Key Words: Acoustic Emission, Head Medium, Wear, Life Prediction, Accelerated Wear Testing
Mn-Zn Ferrite, Ultrasonic Method

1. 緒 言

情報機器の基幹部品である磁気ヘッドや磁気媒体をはじめ、機構要素開発における問題の大半は、これら部品の摩擦・摩耗に関するものである。したがって機構要素の開発においては、摩耗寿命を短時間で予測するための加速摩耗試験法が、また連続試験においては、部品の摩耗や破壊に起因する故障の診断技術が、摩擦・摩耗のメカニズムの解明と同様に、たいへん重要な技術になる。機構要素の劣化の検出や、摩耗のメカニズムを解明するためには、従来の post-mortem 試験法ではおのずと限界があり、摩耗や劣化、破損をリアル・タイムで検出するインプロセス検出法が望まれてきた。

さて、互いに接触しながら相対運動する二物体の表面においては、同時にさまざまな現象が生じる⁽⁶⁾。おもな現象はもちろん摩擦と摩耗であり、この現象は接触面の温度上昇を引き起こす。副次的な現象としては、音響の放出による弾性波(Acoustic Emission; AE)

の生成、接触面における電荷の蓄積、電子の拡散、材料によっては磁場の形成などがある。接触面の現象は非常に複雑怪奇ではあるが、副次的な現象をトライボロジーの諸問題の解析と解決に利用できることは、よく知られていることである。

これら副次的な現象の中で最も多く利用されているのが、二物体のすべり運動中や摩耗時に発生する AE 波である。AE は機構要素のすべり接触下における摩擦・摩耗を、リアルタイムで検出するために用いられてきた。例えば AE を用いて、研削工具の摩耗や寿命を検出するために、多くの研究がなされている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。磁気記録装置の分野では、フロッピーディスクやハードディスクの表面を解析するために、AE が用いられている⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。トライボロジーの基礎的な研究においては、Belyi ら⁽⁹⁾ がすべり過程における AE のエネルギーと摩耗体積の関係を示唆している。Lingard ら⁽¹⁰⁾ は、2 物体のすべり接触における AE 累積計数値と摩耗率の間に一貫した関係を見出せなかったものの、これらの間の相関関係を無視することはできないと指摘している。Boness ら⁽¹¹⁾ は、ボール・オン・シリンダ試験機を用いて、AE 実効値の積分値とボールの摩耗量の関係を実験的に得ている。

しかしトライボロジーに関連した AE について、多

* 原稿受付 平成 5 年 12 月 22 日。

^{*1} 正員、松下電器産業(株)AV 研究所 (〒571 門真市松葉町 2-15)。

^{*2} Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, MA 02139 USA)。

くの研究がなされてきたにもかかわらず、すべり接触におけるAE信号の挙動と材料の摩耗の関係について、明確にかつ、定量的に解き明かしたものはない。本研究の目的は、すべり接触におけるAE信号と材料の摩耗量との関係を明らかにし、AE信号を摩耗量に定量的に翻訳する手法を開発することにある。さらに、実際に摩耗量を測定しなくとも、AE信号を用いてインプロセスで材料の摩耗量を逐次予測できる手法を提供するものである。

2. 実験

2.1 実験材料 摩耗実験の試料として、磁気記録用ヘッド材料として一般的に用いられている、2種類の単結晶 Mn-Zn フェライトを用いた。表1にその材料組成と物理的特性を示す。タイプAとタイプBの単結晶 Mn-Zn フェライトの諸特性は、材料組成の体積比以外はほとんど同じである。また試料の形状は、面方位(211)のすべり面を円弧状に加工した四角柱状である。

アプレシブは、市販の1/2"幅のポリエステルベースのAl₂O₃ラッピングテープを、1/2" VHSカセットに巻き込んで用いた。Al₂O₃粒子は、見掛けの粒径が0.3 μm から60 μmのものを10種類採用した。また粒子径はSEMならびに表面粗度計で観察し、確認した。

2.2 実験装置 図1に摩耗試験装置の概要を示す。実験用材料は、ストレインリング上で支持され、二軸方向のステージによりラッピングテープに対する相

対位置が調整される。また、ストレインリングには、二組のひずみゲージが組み込まれ、それぞれ独立して垂直力、摩擦力を測定できるように構成されている。これらひずみゲージからの信号は、増幅回路とアナログフィルタを介して、パーソナルコンピュータに送られる。

ラッピングテープを巻き込んだカセットはリール台に回転自在に係合され、リール台はタイミングベルトを介して供給側と巻取り側の二つのモータにより駆動される。テープ速度は巻取り側のモータにより、またテープテンションは供給側のモータにより制御される。テープ速度は、テープの高速走行時に発生するヘッド/テープ間のエア・フィルムの影響を排除するため、約2~3 m/sに設定した。

試験装置に設けたLEDとフォトランジスタによる光式の検出器が、ラッピングテープの両終端に設けた透明テープ部を検出することにより、テープの終端が検出される。テープの終端が検出されると、テープリフタがソレノイドにより反時計方向に回転してテ

表1 タイプAとタイプBのMn-Znフェライトの組成と物理的特性

	Composition MOL%			Vickers Hardness GPa	Density kg/m ³	Elastic Modulus GPa	Poisson's Ratio
	Fe ₂ O ₃	MnO	ZnO				
Type A	54.5	27.0	18.5	6.37	5130	163	0.24
Type B	64.5	21.0	14.5	6.37	5130	170	0.29

図1 摩耗試験装置

ブをもち上げ、テープと試料の接触が断たれた状態でテープの巻き戻しが行われる。再び検出器がテープの終端を検出すると、ソレノイドへの通電が絶たれ、テープリフタが反時計方向に回転することによりラッピングテープと試料は再び接触する。こうして、ラッピングテープは一方向からのみ、試料を摩耗させることになる。

AE 信号は共振周波数が 500 kHz であるフィジカル・アコースティック社の、チタン酸ジルコン酸鉛のセンサを用いて検出した。このセンサを、低融点の結晶物質(Phenyl Salicylate)を接着剤として用い、図 1 に示すように直接試料の側面に取り付けた。AE センサからの信号は、プリアンプ、メインアンプにより増幅され、周波数帯域が 1 MHz である rms メータを介して、実効値電圧としてコンピュータに取込まれる。また AE 波形を得るために、高速波形ディジタイザを用いた。前述した垂直力、摩擦力、テープ速度、AE 実効値、AE 信号波形のデータはすべてパーソナルコンピュータに取り込まれ、計算処理した。

所定のテープパス回数ごとに試料を装置から取り外し、最小目盛りが 0.01 mg である秤量計を用いて試料単品の重量の変化を測定することにより、体積損失を求めた。この体積損失から、以下の Archard の摩耗式により摩耗係数 k を計算した。

$$k = \frac{VH}{Nx} \quad (1)$$

ただし V は試料の摩耗体積、 H は試料の硬度、 N は垂直力、 x はすべり距離である。

また AE 信号レベルの大きさに影響を与える材料の弾性波の減衰率は、超音波法を用いて測定した。なお、減衰率の測定に用いた周波数は 10 MHz である。

3. 結果と考察

3.1 AE と摩耗の相関について アプレシブ摩

図 2 AE 実効値電圧と摩擦による仕事率の関係

耗のプロセスにおいて、このシステムに外部から与えられた摩擦による全仕事率は次式のように表すことができる。

$$W_{friction} = \mu N v \quad (2)$$

ただし、 μ は摩擦係数、 N は垂直力、 v はすべり速度である。この仕事率は、アプレシブ摩耗による材料の変形と、材料の取除きに消費される仕事率の和に等価である。またこの過程においては、熱、音、応力、弾性波(AE)等が発生する。

図 2 は、本実験における AE の実効値電圧とすべりシステムに与えられた摩擦仕事の関係を示したものである。AE と、すべりシステムに与えられた摩擦の仕事率(もしくはエネルギー率)との関係を見出すため、Jiaa ら⁽¹²⁾をはじめ、いくつかの研究がなされてきた。しかしながら図 2 から明らかなように、Tse ら⁽⁶⁾の研究に指摘されている結果と同様、これら二つのパラメータの間に明確な関係を見出すことは困難である。

さて前述のように、全体の摩擦仕事率の一部は材料の取除きのために費やされる。材料を取り除くために要する仕事 W_r は、取り除かれた体積を V 、材料の硬度を H とすると、次式のように表すことができ

図 3 AE 実効値電圧と材料の取除きに要する仕事率の関係(タイプ A の Mn-Zn フェライト)

図 4 AE 実効値電圧と材料の取除きに要する仕事率の関係(タイプ B の Mn-Zn フェライト)

る⁽¹³⁾.

$$W_r = VH \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(1)を式(3)に代入して時間項で微分すれば、材料の取り除きに要する仕事率は、次式のように表すことができる。

$$\dot{W}_r = \frac{dW_r}{dt} = \frac{d(VH)}{dt} = \frac{d(kNx)}{dt} = kNv \quad \dots\dots\dots (4)$$

本研究においては図3, 4に示すように、材料の取除きに要する仕事率と、AE実効値電圧の間に明確な関係を見出すことができた。これはAE波の発生源の観点から説明することができる。AE波は、物質の内部に蓄えられたひずみエネルギーが瞬時に開放されたときに発生する。一方、材料を取り除くときのせん断ひずみは、材料の変形時におけるせん断ひずみよりもはるかに大きい。したがってAE波が、材料の取除きのプロセスと材料変形のプロセスの二つのプロセスで発生するにもかかわらず、AE信号のパワーは、主として材料の取除きのプロセスで占められる。この関係は次式で表すことができる。

$$\frac{(V_{rms} - \beta)^2}{Z} = kNv \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 V_{rms} はAE実効値電圧、 Z は弾性波が伝ばするときのシステムのインピーダンス、 β はすべり系の雑音である。したがって、AE実効値電圧は式(5)を書き換えることによって得られる。

$$V_{rms} = \alpha \sqrt{kNv} + \beta \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 α はインピーダンス Z の平方根である。

図3, 4は、粒径が0.3~60 μm の Al_2O_3 を用いた摩耗試験における、AE実効値電圧と材料の取除きに要する仕事率の関係を示したものである。なお、AE実効値、摩耗係数、垂直力、テープ速度の各値は、所定のテープパス回数における平均値を採用した。両図中、点線は式(6)の関係を表したものである。両図から、実験値は式(6)の関係を満たしていることがわかる。

3・2 AE実効値の較正 たとえ材料の取除きに要する仕事率が等しくとも、図3, 4に示すように、Mn-ZnフェライトのタイプAとBにおけるAE実効値の大きさに差がある。この差は、材料内を通過する弾性波の減衰率の違いに起因する。そこで超音波法により各材料の弾性波の減衰率を調べた。図5にタイプAとBの超音波出力を示す。図5から明らかなように、フェライトの含有量の多いタイプBのほうが、減衰率の大きいことがわかる。

さて、材料を通過する弾性波の減衰率(attenuation coefficient) a は、次式で表すことができる⁽¹⁴⁾。

$$ad = 20 \log \frac{P_0}{P} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 d は信号源から2番めの基準位置までのパルス伝ば距離、 P_0 は信号源の音圧(電圧出力)、もしくは基準位置の音圧、 P は2番めの基準位置の音圧である。

ここで単結晶Mn-ZnフェライトのタイプA, Bの減衰率をそれぞれ、 a_A, a_B とすると、同一の信号源の音圧に対する二つの材料A, Bの出力の関係は次式のように表すことができる。

$$P_A = 10^{(a_B - a_A)d/20} \cdot P_B \quad \dots\dots\dots (8)$$

この関係を用いて、各AE実効値を較正した。較正さ

図5 タイプAとBのMn-Znフェライトの超音波出力

図6 AE実効値電圧と材料の取除きに要する仕事率の関係(タイプBのAE実効値電圧を較正)

れた AE 実効値と材料の取除きに要する仕事率の関係を図 6 に示す。図 6 から明らかなように、較正された AE 実効値と材料の取除きに要する仕事率の関係もまた、式 (6) を満たすことがわかる。

3・3 摩耗のオンライン検出法 連続的に摩耗量を、直接オンラインで測定することは不可能である。しかし図 6 に示したように、単に AE 実効値を評価するだけで、間接的に摩耗量を測定することができる。つまり、垂直力、すべり速度、AE 実効値の三つの非常に測定が容易なパラメータを検出するだけで、式 (6) の AE と摩耗率の関係を用いて逐次試料の摩耗係数、

つまり摩耗量をインプロセスでかつリアルタイムで予測することができる。

式 (6) には、この実験測定システムを特徴づける α と β の二つの項が含まれている。 β 項は単純に、材料の取除き以外のすべての音圧源による AE 実効値に一致する。この項は、バックグラウンドの雑音はじめ、材料の弾性変形による弾性波等も含まれる。 α 項は材料の取除きに要する仕事率と AE レベルの間の比例定数である。したがって、この項は材料の減衰率の逆数に比例する。 α を決定するその他の多くの要因(例えば、試料のサイズ、AE センサの特性、センサの取付け位置、

(a) タイプ A の Mn-Zn フェライト

(d) タイプ B の Mn-Zn フェライト

(b) タイプ A の Mn-Zn フェライト

(e) タイプ B の Mn-Zn フェライト

(c) タイプ A の Mn-Zn フェライト

(f) タイプ B の Mn-Zn フェライト

図 7 Al_2O_3 に対する Mn-Zn フェライトの摩耗係数の実測値と予測値

信号増幅器の特性等)は、非常に複雑に組み合わせられているので、理論的にこの値を求めることは困難である。

さて式(6)の α と β は、実験的に容易に決定することができる。これらの値を決定するためには、少なくとも2組の摩耗係数、AE実効値、垂直力、テープ速度を測定すればこと足りる。図1の本実験システムでは、図6の点線で示したように、すべての実験の範囲にわたって α と β はほぼ一定である。こうしていったん α と β が決定すれば、どのような試料の摩耗係数であろうとも、式(6)を用いて容易に予測、評価することができる。

より精度の高い摩耗係数を得るためには、おのこの摩耗試験に対応した特定の α と β を求めればよい。図7(a)~(f)は、本システムを用いた摩耗試験における摩耗係数の予測と実測値の比較を示したものである。AE実効値に基づき、式(6)により計算した摩耗係数の予測値を実線で示す。これらの図において、摩耗係数もAE信号レベルも、ともに初期の数回のテープパスで急激に減少する。したがって α と β を決定する場合、これら初期のテープパス回数で得られた値を用いることで、測定誤差が α と β に与える影響を極力小さくすることができる。図7(a)~(f)の各図において、黒丸で示した実験値と一致する点線は、 α と β を決定するために用いたテープパス回数の領域における計算値である。各図から明らかなように、各テープパス回数における摩耗係数は高い精度で予測することができる。この手法は、実際に摩耗量を測定しなくても、オンラインで摩耗を検出するための基礎となる。

4. 結 論

すべり接触におけるAE実効値信号と摩耗の関係ならびに、AE実効値信号を用いたMn-Znフェライトの摩耗のオンライン検出法を検討した。得られた結果は以下のとおりである。

(1) AE実効値と、材料の取除きに要する仕事率は直接比例する。

(2) AE実効値と、すべり系に与えられた仕事率の間に、直接的な関係を見出すことはできない。

(3) 摩耗係数は、実際に摩耗量を測定しなくても、AE実効値を用いたオンライン検出法で逐次検出し、予測することができる。

(4) 摩耗のオンライン検出法において、AE実効値を摩耗量に変換するための較正は、摩耗試験の初期の所定のテープパス回数の各パラメータ(摩耗係数、垂直力、速度)を直接測定して行う。

(5) たとえ異なった材料のAE実効値であっても、超音波法を用いておのこの材料の減衰率を測定し、較正することにより、直接比較することができる。

文 献

- (1) Tse, M. K. and Briggs, J. C., In-process Tool Wear Sensing by Acoustic Emission, *Proc. 11th World Conf. on Nondestructive Testing*, **1**(1985), 70.
- (2) Kannatey-Asibu, E. and Dornfeld, D. A., Quantitative Relationship for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting, *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, **103**(1981), 330.
- (3) Kannatey-Asibu, E. and Dornfeld, D. A., A Study of Tool Wear Using Statistical Analysis of Metal-Cutting Acoustic Emission, *Wear*, **76**(1982), 247.
- (4) Bulm, T. and Inasaki, I., A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process, *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, **112**(1990), 203.
- (5) Moriwaki, T. and Tobito, M., A New Approach to Automatic Detection of Life of Coated Tool Based on Acoustic Emission Measurement, *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, **112**(1990), 212.
- (6) Tse, M. K. and Lewis, A. F., Triboacoustics of Nonwoven Fabric/Floppy Disk Dynamic Contact, *Trib. and Mech. of Magnetic Storage Syst.*, **SP-21**(1986), 63.
- (7) Briggs, J. C., Chang, M. K. and Tse, M. K., High Frequency Slider Vibrations During Asperity Impacts in Rigid Magnetic Disk Systems, *Advances in Information Storage Systems*, **4**(1992), 181.
- (8) Briggs, J. C. and Tse, M. K., Impact Force Identification Using Extracted Model Parameters and Pattern Matching, *Int. J. Impact Eng.*, (1992).
- (9) Belyi, V. A., Kholodilov, O. V. and Sviridyonok, A. I., Acoustic Spectrometry as Used for the Evaluation of Tribological Systems, *Wear*, **69**(1981), 309.
- (10) Lingard, S. and Ng, K. K., An Investigation of Acoustic Emission in Sliding Friction and Wear of Metals, *Wear*, **130**(1989), 367.
- (11) Boness, R. J. and McBride, S. L., Adhesive and Abrasive Wear Studies Using Acoustic Emission Techniques, *Wear*, **149**(1991), 41.
- (12) Jiaa, C. L. and Dornfeld, D. A., Experimental Studies of Sliding Friction and Wear via Acoustic Emission Signal Analysis, *Wear*, **139**(1990), 403.
- (13) Shaw, M. C., *Metal Cutting Principles* (3rd edn.), (1954), MIT Press, Cambridge, MA.
- (14) Krautkrämer, J. and Krautkrämer, H., Attenuation of Ultrasonic Waves in Solids, *Ultrasonic Testing of Materials*, (1983), 107, Springer-Verlag, Berlin.