すべり摩擦時に発生するアコースティックエミッションに
及ぼす極薄潤滑膜の影響*田 浦 裕 生^{*1}, 高 木 聡 彦^{*2}, 川 口 雅 弘^{*3}
金 子 覚^{*1}, 加 藤 孝 久^{*4}Effect of Ultrathin Lubricant Films on Acoustic Emission Generated
by Sliding FrictionHiroo TAURA^{*5}, Toshihiko TAKAKI, Masahiro KAWAGUCHI,
Satoru KANEKO and Takahisa KATO^{*5} Faculty of Engineering, Nagaoka University of Technology,
1603 1 Kamitokioka-machi, Nagaoka-shi, Niigata, 940-2188 Japan

This paper shows the effect of ultrathin lubricant films between sliding bodies on acoustic emission (AE) signals induced by the sliding friction and discusses the application of the AE techniques to the monitoring of the lubricant films. Experiments were conducted with a ball-on-disk friction tester to measure the AE signals. The ball was a glass ball of 5 mm diameter. The disk was a magnetic disk with a DLC protective layer on its surface, and was coated with PFPE Z-dol 4 000 about 1.5 nm thick. The noticeable AE envelope signals were induced by the local decrease in the mobile layer at the initial stage of the friction test, and then the magnitude of AE envelope signals increased with the decrease of both the mobile and the bonded layers. The AE map, which is a cascade graph of the AE envelope signals measured in time order, was proposed to monitor the time variation of the spatial distribution of PFPE film thickness, and showed that the mobile layer moved to the direction of friction.

Key Words: Tribology, Friction, Acoustic Emission, Perfluoropolyether, Ultrathin Lubricant Film

1. 結 論

アコースティックエミッション (AE, acoustic emission) は, 固体が変形, 破壊する際にそれまで蓄積されたひずみエネルギーが解放されることにより生じる弾性波^①で, 工学的な有用性から多くの分野で利用されている。摩擦などによっても生じることから, トライボロジーの分野でも研究が進められ, 摩擦・摩耗との関連性^{②③}が明らかにされてきた。近年では, 微小な接触の検知が可能であることや応答性の良さ等を活かし, 磁気ディスク装置におけるヘッドとディスクの接触の検知^④や, ヘッドの浮上量推定^⑤, ヘッドの摩耗量推定^⑥など, 積極的に応用されている。AE は固体同士の接触によって発生することから潤滑状態に影響されることはいうまでもないが, 上記論文では, 固

体間に存在するごく薄い潤滑膜の影響, とりわけ固体表面に吸着した潤滑剤がどのような影響を与えるかについては, 十分に考慮されてきたとは言えない。

著者らはボール・オン・ディスク型摩擦試験機を用いて, PFPE (Perfluoropolyether) を薄く一様な厚さで塗布したディスクを摩擦した際, ある試験時間で降ディスクの一部分で AE 信号の振幅が増加し, さらに時間とともに振幅が増加した部分が周方向に拡大することを明らかにした。この AE 信号の振幅の変化は, 潤滑膜厚の減少に起因すると推測されるものの, 発生した AE 信号と潤滑膜厚との対応は現在のところ明らかではない。

本稿では, AE 信号におよぼす潤滑膜の影響を明らかにすべく, 摩擦試験中に測定された AE 信号と試験停止直後に測定した膜厚を比較した結果を報告する。

2. 実験

2.1 実験装置 本研究では既報^⑦と同様, 市販のボール・オン・ディスク型摩擦試験機 (株式会社 FRP-2000) を用い, これに AE 測定装置を組付けて

* 原稿受付 2005 年 6 月 20 日。

^{*1} 正員, 長岡技術科学大学工学部 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)。^{*2} ソニーセミコンダクタ九州 (株) (〒899-4393 国分市野口北 5-1)。^{*3} 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)。^{*4} 正員, 東京大学大学院工学系研究科。

E-mail: htaura@mech.nagaokaut.ac.jp

使用した。ボールは、直径5mm、材質BK7のガラス球、ディスクは、2.5inchのハードディスク（DLC保護膜5nm/磁性膜ガラス基板/Ra0.8nm）であり、ディスクには潤滑剤を塗布している。

図1に、AE信号の測定系の概略を示す。AEセンサ（NF回路ブロック社製 AE-903N）は、ボール保持部の外面に接着した。その出力は、プリアンプ（NF回路ブロック社製 AE-912）、ディスクリミネータ（NF回路ブロック社製 AE-922）により増幅、包絡線処理された後、AD変換器に入力され集録される。また、ディスクリミネータを出た後の信号は、デジタルオシロスコープにも入力され、リアルタイムで信号波形が観測される。AE信号の集録は、ディスクに取り付けた遮光板がフォトインタラプタを通過する瞬間に発生するパルス信号を集録開始のトリガ信号として用いた。サンプリング周波数は10kHz、サンプリング点数は2048点、これを1回のサンプリングとし、1から5秒間隔で実験終了まで繰り返し集録を行った。

2.2 ディスク 本実験では、潤滑剤を一樣な厚さに塗布したディスクを適当な時間摩擦した後、潤滑膜厚を測定し、摩擦を停止する直前に測定されたAE信号と比較を行う。使用した潤滑剤は、PFPE Zdd4000（分画処理済み）で、約1mmの厚さになるようディスクに塗布する。ここで、潤滑膜の厚さが数nmと分子レベルであることから、固体表面に化学吸着した分子（固定層）と、それ以外の分子（流動層）とを区別する必要があるため、以下で潤滑膜の総膜厚に加えて、固定層膜厚も記すものとする。なお、潤滑剤の塗布はディップ法を用いており、その後で固定層を厚化するために、加熱処理を加えている。また、比較のため、加熱処理後にリンス処理を施して流動層を除去したディスクでも実験を行った。

潤滑膜厚は、反射型エリプソメータ（Ficfab社製 MARY-102）を使用し、摩擦トラックの周りを周方向に2°間隔で180点、半径方向に0.1mm間隔で5点測定した。測定の詳細は文献12)に記す通りである。測定に際して必要となる潤滑膜の屈折率および吸収率はそれぞれ1.298、0、ディスクの屈折率および吸収率は潤滑剤を塗布する前にディスクの広範囲をあらかじめ測定し、その平均値を用いた。潤滑膜厚の測定精度は±0.5nmで、これは本来ディスク面上で分布を持つディスクの屈折率および吸収率を一樣であるとし、その平均値を用いたために生じる誤差の影響が大きい。そのため、次章で述べるように周方向に膜厚分布の定性的な変化を見る際には、さらに高い精度で膜厚の変化を捉えられるものと考えられる。

Fig.1 Schematic of AE measurement system

2.3 実験条件 全ての実験は、荷重0.98N、ディスク回転速度200rpm、ボールと接触するディスクの半径は24mmとし、大気圧、室温下で行った。

3. 実験結果

図2に今回の実験で測定された摩擦係数とAE実効値の時間変化の一例を示す。既報^{10,12)}で報告されているものと定性的に一致した結果であり、図中の点線部分で摩擦係数とAE実効値の傾向が変化しており、この時点を超えて「流動層の摩耗を主とした領域」から「固定層の摩耗を主とした領域」に移移した¹²⁾と考えられる。遷移前の「流動層の摩耗を主とした領域」では、AE信号はディスク周方向に一樣であるため、以下では、「固定層の摩耗を主とした領域」に移移した直後（図中のA付近）、およびAから数十秒経過した時点（図中のB付近）、さらに十分な摩擦時間が経過して摩擦係数が非常に大きな振幅で振動した時点（図中のC）の三箇所を摩擦実験を停止させてAE包絡線信号と潤滑膜の周方向膜厚分布を比較する。なお、実験中断の影響を避けるためAからCの点では、潤滑剤を同時に塗布した異なるディスクを用いた。

Fig.2 Typical time variation of Friction coefficient

図2のAの付近で実験を停止した場合の結果を図3に示す。図3(a)は実験停止直前で測定されたAE包絡線信号、図3(b)は実験停止直後に測定した潤滑膜の周方向膜厚分布である。横軸はディスクの回転角を表しており、摩擦方向はディスクの回転角の大きな方向である。図3(b)では、ボールが摩擦したトラックにおける膜厚を実線、それと比較する目的で摩擦していないトラックにおける膜厚を破線で示す。さらに潤滑膜の総膜厚を太線、固定層膜厚を細線で示す。

図3(a)のAE包絡線信号は大部分では一定値で推移しているものの、210°と260°を中心とした二箇所小さなピークが見られる。図3(b)の膜厚分布を見ると、210°と260°付近を除けば実験前に比べて総膜厚、固定層膜厚とも全体的に若干の減少が見られるのみで、実験前に比べて局所的に大きく減少している部分は見られない。一方、210°と260°を中心とした部分では、固定層膜厚は他の場所の値に比べて大きな変化が見られないものの、総膜厚については他の部分よりも明らかな減少が見られ、主として流動層膜厚が減少していることが分かる。この結果より、流動層膜厚の減少に対応し、AE包絡線信号のレベルが増加したものと推測される。

続いて、図2のB付近での結果を図4に示す。図4(a)よりAE包絡線信号には50°、180°、240°を中心とした三箇所明らかなピークが見られ、前二つは

最後のものに比べてピークが高くなっている。図4(b)より、上記ピーク位置における潤滑膜厚を見ていくと、まず低いピークの見られる240°付近では、総膜厚の低下が見られるものの、固定層膜厚の変化が小さなことから、主に流動層膜厚が低下していることが分かる。これは図3の210°と260°で見られた結果と同様と考えられる。一方、AE包絡線信号で高いピークが見られる50°、180°付近の潤滑膜厚を見ると、総膜厚は50°では大きな変化はないのに対し、180°では大きく減少しているという違いがある。しかし、両者とも固定層膜厚が明らかに減少していることが分かり、AE包絡線信号の上昇が固定層膜厚の減少に対応していると考えられる。また、330°を中心とした部分では、AE包絡線信号は低いに関わらず、総膜厚、固定層膜厚とも大きく減少している結果が得られている。

最後に図2のC付近での結果を図5に示す。図5(a)のAE包絡線信号は、全体的には図3(a)や図4(a)と比べて大きな値を示しているものの、90°、300°を中心とした二箇所での値が他の部分に比べて明らかに小さくなっている。図5(b)の潤滑膜厚を見ると、固定層はディスクのほぼ全域で見られないものの、総膜厚はAE包絡線信号が比較的小さな90°を中心とした部分で見られることから、この部分では流動層が存在していることが分かる。300°付近でも

Fig.3 Comparison between AE envelope signal and lubricant film thickness distribution at point A shown in Fig. 2

Fig.4 Comparison between AE envelope signal and lubricant film thickness distribution at point B shown in Fig. 2

90° 付近と比べれば小さいものの、潤滑膜の存在が確認できる。これから、比較的低い AE 包絡線信号となる領域は、流動層の存在する部分と対応していることが分かる。

以上の結果から、AE 包絡線信号と潤滑膜厚とに対応関係が見られることが明らかとなった。具体的には、その出力がノイズレベルである場合には、十分な膜厚の流動層が存在する。若干の出力の上昇があれば流動層膜厚が減少した状態に対応し、さらに出力が増加すると固定層膜厚が減少していることを示していると考えられる。ただし、図 4 の 330° 付近のように膜厚が低下しているにもかかわらず AE 包絡線信号の出力が小さな部分や、図 4 の 50° 付近のように十分な流動層があるにもかかわらず、固定層膜厚が減少し AE 包絡線信号に比較的大きなピークがみられるなど、十分説明できない点も見られる。これらの原因については、現在のところボールに付着した潤滑剤の影響が大きいと考えているが、詳細は明らかでなく、さらに検討する必要がある。

図 5 の 90° 付近では、固定層がほぼなくなっているにもかかわらず、流動層が存在する結果となった。流動層が存在するにもかかわらず、より強固に固体表面に吸着したと考えられる固定層のみが減少することは考えにくいことから、流動層、固定層の順に潤滑膜が減少した後に流動層が外部から流入し

膜厚を回復したと考えるのが妥当である。この点から、潤滑膜の減少過程の把握には、膜厚の時間的な変化を知ることが必要であると考えられる。

4. 考察

前章の実験結果から、AE 包絡線信号はディスク上の局所的な膜厚に対応してその値が変化していることが明らかとなった。このことから、潤滑膜厚を直接測定しなくても、AE を用いて空間的な膜厚分布がある程度把握可能であると考えられる。さらに直接的な膜厚測定と比べ、AE 測定の摩擦実験を中断することなく高速でデータを取得可能という特長を利用すれば、潤滑膜厚の時間的な変化および空間的な変化がより詳細に調べられる可能性が見いだされる。

そこで、繰返し摩擦の際に得られる摩擦力の時間的、空間的な変化を調べた福田の研究⁽¹³⁾を参考にし、図 5 の結果を得るまでに取得した AE 包絡線信号を時間順に重ね合わせて、AE 包絡線信号の時間的、空間的な変化を視覚化したグラフ（以下、AE マップ）を作成し、図 6 に示す。横軸はディスク回転角であり、AE 包絡線信号は時間が新しいものほど上になるように表示してある。摩擦方向は左から右である。なお、前述の通り、図 5 は図 3、4 と異なるディスクを用いた結果であるため、潤滑剤の減少した位置、進行状況は後者と若干異なるものとなる。

図 6 を見ると、実験開始後ディスク全面で低い値を示していた AE 包絡線信号は、ほぼ同時期に 45°、110°、240°、270° の四箇所ピークが現れ、時間とともにその幅を拡大しながら摩擦方向に移動していく。さらに時間が経過すると、周方向位置が変化しない、より高いピークが現れる。

上記結果と比較するため、潤滑剤を固定層のみとしたディスクでの AE マップを図 7 に示す。実験初期では AE 包絡線信号はディスク周方向にほぼ一様な高さとなっているのに対し、実験時間が経過するとディスクの特定の部分で高いピークが現れるようになる。このピークは一定の位置で発生し続けており、図 6 の実験後期に見られたピークと同じ傾向を示している。

図 6 を図 7 と比較すると、AE 包絡線信号のピークが摩擦方向に移動する点で大きく異なっており、この相違は流動層の存在に起因しているものと考えられる。図 6 における AE 包絡線信号のピークの摩擦方向への移動は、流動層が摩擦方向の上流から下流へ向かい移動していることを表していると考えられる。一方図 7 では、AE 包絡線信号のピークが摩

Fig.5 Comparison between AE envelope signal and lubricant film thickness distribution at point C shown in Fig.2

Fig.6 Cascade graph of AE envelope signals for the disk shown in Fig. 5

Fig.7 Cascade graph of AE envelope signals for the disk with bonded films.

擦方向に移動することではなく、一定の位置で発生し続けることから、固定層は摩擦方向に流動しておらず、その流動性は流動層に比べて明らかに小さいことが理解できる。また、図6でもある程度摩擦すると、ディスクの特定の位置で発生し続けるピークが見られるようになる。これは、ピーク発生部分の流動層が除去され固定層のみとなったことを表していると考えられる。

また、AE 包絡線信号の摩擦方向への移動を、一定のディスク位置（例えば図6の60°）で見ると、AE 包絡線信号が一旦増加した後に低下することになる。潤滑膜の状態としては、流動層、続いて、固定層が減少した後に、外部から潤滑剤が供給され流動層が修復されたと考えられる。供給された潤滑剤については、AE マップ全体の傾向とあわせると、ボールによって強制的に摩擦方向へ移動させられた流動層が主体となっており、摩擦方向に垂直な方向からの流入の影響は小さいものと考えられる。先に示した図5(b)は、図6の最後の状態における膜厚分布である。固定層がディスクのほぼ全域でなくなっているのに対し、AE 包絡線出力の低い部分に対応して流動層が厚く存在しており、上記の潤滑膜の修復作用が確認できる。このことから、修復作用のある潤滑膜の状態を理解するには、限定された瞬間における情報だけでは限界があり、時間履歴を含めて知らなくてはならない。また、時間履歴を知ることができれば、現在流動層、固定層のいずれかが減少しているのかも判別可能となる。

以上の結果をもとに、今回の実験における PFPE 潤滑膜の膜厚減少の過程は図8のように推測される。まずディスクのある位置で流動層が減少する(図8(a))。この段階では固定層は減少しておらず十分な厚さで存在している。その後摩擦方向に流動層の減少領域が拡大していくとともに、流動層の膜厚が低下により固定層膜厚の減少が始まる(図8(b))。さらに摩擦を続けると、流動層、固定層とも膜厚が減少した範囲が摩擦方向に拡大していく。これとともに、上流側には潤

滑剤が供給され、一度無くなった流動層が回復する(図8(c))。最終的には固定層はほぼなくなり、流動層のみが部分的に存在するようになる(図8(d))。

5. 結 論

ボール・オン・ディスク型摩擦試験機を用いて PFPE 潤滑膜を塗布したディスクを摩擦した際に得られる AE 包絡線信号と、対応する潤滑膜厚の関係を調べた結果、以下の知見が得られた。

1. AE 包絡線信号の出力は、ディスクの局所的な流動層、固定層の膜厚と相関関係があり、膜厚の低下により増加する。
2. 摩擦開始から終わりまでの間に測定した AE 包絡線信号を順番に重ね合わせて作成した AE マップを用いれば、潤滑膜の時間的、空間的な変化の把握が可能となる。

文 献

- (1) Isono, E. et al, Acoustic Emission, (1990), The Japanese Society for Non-Destructive Inspection.
- (2) Lingard, S. et al, An Investigation of Acoustic Emission in Sliding Friction and Wear of Metals, Wear, Vol. 130, (1989), pp.367-379.
- (3) Wada, M. et al, Study on Friction and Wear Utilizing Acoustic Emission, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 55, No. 4(1989), pp.673-678.
- (4) Jia, C.L. et al, Experimental Studies of Sliding Friction and Wear via Acoustic Emission Signal Analysis, Wear, Vol. 139, No. 2(1990), pp.403-424.
- (5) Kita, T. et al, New Method of Detecting Contact Between Floating-Head And Disk, IEEE Trans. On Mag, Vol. MAG-16, No.5(1980), pp. 873-875.
- (6) Khurshudov, A. et al, Head-Disk Contact Detection in the Hard-Disk Drives, Wear, Vol. 255, (2003), pp.1314-1322.
- (7) Jia, C.L. et al, Evaluation of Head/Disk Pseudo-Impact Contact by Acoustic Emission Techniques, Tribology Letters, Vol. 3, (1997), pp.165-174.
- (8) Gitis, N.V. et al, Study of Low Flying Height Using Acoustic Emission and Friction Techniques, Advances in Information Storage Systems, Vol. 6, (1995), pp.107-120.
- (9) Matsuoka, K. et al, In-Situ Wear Monitoring of Slider and Disk Using Acoustic Emission, J. of Tribology, Vol. 123, (2001), pp.175-180.
- (10) Taura, H. et al, An Observation of Wear Process of Bi-Layered Molecular Films with Acoustic Emission (Part 1)-Relationship between AE Effective Value and Friction Coefficient- Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol. 50, No. 4(2004), pp.338-345.
- (11) Ma, X. et al, Spreading of Perfluoropolyether Films on Amorphous Carbon Surfaces, J. Chem. Phys., Vol. 110, No. 6(1999), pp.3129-3137.
- (12) Kawaguchi, M. et al, Durability of PFPE Lubricant Films with Bonded and Mobile Layers, Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol. 48, No. 5(2003), pp.410-417.
- (13) K. Fukuda, Friction Force Distribution and Its Alternation with Repeated Sliding, Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol. 43, No. 9(1993), pp. 788-795

Fig.8 Wear process of Lubricant film