研究論文 摩擦・摩耗の AE によるインプロセス計測に関する研究*

——焼付き過程の AE 計測——

和田 正 毅** 水野 萬 亀雄** 笹 田 直***

Study on the In-process Measurement of the Friction and Wear with AE Technique
—Monitoring of Seizure Process through AE Analysis—

Masaki WADA, Makio MIZUNO and Tadasu SASADA

AE signals, which are occurred on friction and wear, have a good correlation with the phenomena of friction and wear. In this paper, the seizure process of journal bearing were measured by AE technique. It was found that AE signals can detect the unusual phenomenon of the bearing condition at in-process and higher sensitivity than that of other monitoring method, such as the measurement of frictional force and frictional temperature. That is based on the following results. (1) The processes of seizure have several different cases, do not always change regularly. (2) But, in the case of generate seizure, AE signals are characterized by the AE frequency spectrum of above 0.5 MHz. (3) Moreover, this characteristic appears much earlier than the seizure. (4) As mentioned above, the measurement of AE signals is effective in the prediction of seizure.

Key words: friction, wear, acoustic emission(AE), seizure, in-process measurement, AE spectrum, journal bearing, prediction of seizure

1. 緒 言

軸受やしゅう動部の焼付きは、機械の運転に重大な支障をもたらす危険な現象である。焼付きの発生機構の議論は数多くされているが、まだ明らかとは言えない。摩擦・摩耗の現象それ自体が複雑で現在もお研究過程であることから考えると仕方のないことであろう。しかし、実際の機械において、焼付きが起こったときに考えられる損害は大きいことが多い。そのため、焼付きの予知、さらに予防は重要な課題となっている。焼付きの予知には、それに至る現象つまり焼付きの発生機構を明らかにすることが重要である。

すべり軸受に発生する焼付きのような異常状態の検出の方法としては、(1) 摩擦温度(軸受メタルや潤滑油の温度)の測定、(2) 振動検出、(3) 潤滑剤

中の摩耗粉を分析するフェログラフィ、などいくつかの方法がある。しかしながら、(1)、(2)の方法ではすべり軸受の異常を見つけるまでに時間がかかりすぎる。たとえ異常を検出したとしても、そのときはすでに危険な状態にあり、予知情報とすることは困難であると考えられる。また、フェログラフィ技術は摩擦面に損傷が発生し、メタルの一部が遊離摩耗粉となり、潤滑油中に混入したものを観察していることから、遊離摩耗粉として観察される以前の異常情報は検出できないことになる。

一方、アコースティックエミッション(AE)法はミクロ的な破壊現象を、インプロセス計測できることから焼付きのような異常検出のセンシング技術として最適と言える。しかも、筆者らはさきに摩擦摩耗の挙動を摩擦摩耗時に発生するAE信号によって認識できることを報告した¹⁾。さらに、AE信号の周波数分布から、摩耗を伴わない摩擦か摩耗を伴う摩擦現象かが分かった²⁾。また、三科³⁾は焼付きに至る過程の実験観察から、焼付き現象を凝着摩耗における摩耗粉の生成過程の延長上に捕らえるべきであることを提案している。そこで、筆者らは、焼付きに至る現象を凝着摩

* 原稿受付 平成 2 年 1 月 18 日。1989 年度精密工学会秋季大会学術講演会(平成元年 11 月 7 日)にて発表

** 正会員 職業訓練大学校(相模原市相原 1960)

*** 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山 2-12-1)

Fig. 1 Schematic diagram of testing apparatus

耗が主たる要因との考えを前提として、その焼付きプロセスをAE信号により認識し、かつ焼付きの予知を目的としている。本報告では、とくに焼付きに至るプロセスをAE信号と摩擦トルクおよび焼付き面の観察から比較検討を行い、AE法による焼付き予知の可能性を述べている。

2. 実験方法

2. 1 焼付き試験装置

図1は本実験に用いたジャーナル軸受方式の焼付き試験装置の概略を示す。本装置は軸試験片とブッシュ試験片との摩擦トルクが、ある値を超えたときに焼付きと判断し、軸試験片の回転を停止するようになっている。軸試験片はコレット式のチャックと回転センタによって支持され、ブッシュ試験片内を回転する。さらに、モータとチャックの間には軸試験片へ回転力を伝達するための電磁クラッチを介している。ブッシュ試験片は、内側ハウジングにはめ込まれている。内側ハウジングは、ひずみゲージを貼付した4枚の板ばねによって外側ハウジングに連結され、外側ハウジングは案内レールに沿って上下方向に移動することができ

Table 1 Experimental conditions

Bushe specimen	Cu, $\phi 6H7 \times 12$
Shaft specimen	SK3, $\phi 6h7$
Load	40N
Sliding speed	0.1m/s
Lubricant	White oil

る。摩擦力は、ブッシュ試験片に働く接線力を上記した板ばねに貼付したひずみゲージによって測定した。

軸試験片とブッシュ試験片との摩擦あるいは摩耗によって発生するAE信号を検出するため、AEセンサはブッシュ試験片の外周の一部に平面部を設け、接触面にワセリンを塗布して取り付けした。

2. 2 実験条件と方法

表1は実験条件を示す。摩擦速度は0.1m/s、荷重は40Nとした。なお、荷重は外側ハウジングに重錘をつるして与えた。実験はすべて室温、大気中で行った。潤滑剤は流動パラフィンを用い、実験開始直前に軸試験片と軸受試験片に塗布し、実験中は供給しなかった。試験片材質は軸試験片に炭素工具鋼3種(SK3)、ブッシュ試験片にCuを使用した。軸試験片は外径6mm(h7)のロッド材を使用し、ブッシュ試験片は内径を6mm(H7)にリーマ加工し、摩擦部分の幅を12mmとした。各試験片は、アセトン中で超音波洗浄した後、実験に供した。

焼付き判定の摩擦力設定にあたっては、いくつかの予備実験から1000Nの摩擦力で軸試験片とブッシュ試験片とが容易に分離できないようになること、および本実験に用いた電磁クラッチの最大伝達トルク等を考慮した。その上で、直径6mmの試験片の摩擦面に1600N以上の摩擦抵抗を生じたときに、電磁クラッチが自動的に切れるようにした。

AEセンサ(エヌエフ回路設計ブロック社製; AE-906S)により検出されるAE信号はアンプで総合利得80dB増幅し、その信号のAE計数率と、500kHzのハイパスフィルタ(HPF(減衰特性; 24dB/oct))通過後のAE計数率の2種類のAE計数率を測定した。さらに、AE信号の周波数解析(データプレジジョン社製; DATA-6000A)を行った。AE信号の周波数解析は、AE信号を一度メモリーに記録(分解能8ビットADコンバータ、サンプリング周波数10MHz)し、実験終了後まとめて行った。これは各AE信号の周波数解析に時間がかかり、計測できるAE信号のサンプリング間隔が延びるのを避けるためである。

Fig.2 Variations of friction force and AE count rates in friction process

3. 実験結果

3.1 摩擦抵抗とAE計数率

図2は実験開始から焼付きに至るまでの摩擦力、AE計数率の変化の代表的な例である。摩擦力は125 min までほとんど大きな変化もなく、しかも小さい値を示している。その後、わずかながら変化を示し、145 min 経過したあたりから変化が少し大きくなり、しかも摩擦力の値そのものも少し大きくなっている。そして、180 min を経過したところでもかなり大きな変化を示す。しかし、数min 後ほぼ以前の値に減少し、215 min を経過したところで急激に上昇し、摩擦力はついに1600 Nに達し、電磁クラッチが作動して実験を終了した。

一方AE計数率は、フィルタ無しのAE計数率、および500 kHz のHPFを通した後のAE計数率は、ともに、摩擦力ではほとんど変化がみられていない摩擦時間80 min あたりから変化が現れ始めている。ここで注目すべきことは、AE計数率が変化し始めてからしばらくの間、AE計数率は低周波数成分(500 kHz 以下の成分)を含むAE信号が全体の数割を占めていることである。

そして、150 min あたりから次第に両計数率が同じ値を示すようになる。このことは、発生したAE信号が500 kHz 以下の周波数成分を主体とする現象でなくなり、ほとんどが500 kHz 以上の高周波数成分を主体とした現象であることを示している。この傾向は実験終了まで継続する。もちろん停止直前では摩擦力と同様に急激な変化を示している。

図3は頻繁ではないが、図2とは異なるパターンの例を示している。この場合、実験開始直後からAE計数率が上昇している。しかも、AE計数率の大半

は高周波数成分である。実験開始からしばらくの間、計数率は上昇し、その後ほぼ一定のAE計数率で進行し最終的に急激に上昇し焼付きに至る。この場合、焼付き直前を除けば、摩擦力の大きな変化はほとんど見られない。この例は、図2の後半の部分に相当すると考えられるところで、初期に与えた潤滑油の量や初期摩擦面の状態等によって変化したものと考えられる。

3.2 AE周波数の変化

図4は図2に示す5つの領域で発生したAE信号の周波数分析結果を示している。それぞれの図は、ある

Fig.3 Variations of friction force and AE count rates in friction process

Fig. 4 Variations of AE frequency spectra

摩擦時間内に発生したAE信号のスペクトルの経時変化である。そして、それぞれの1本1本のスペクトルの間には、時間的あるいは摩擦距離との直接的な関係はない。つまり、発生したAE信号に対し、設定したトリガ条件を満たしたものが順次記録されており、そのAE信号を周波数解析している。なおこの場合の周波数スペクトルはフィルタを使用していないAE信号を解析している。

図4(a), (b)ではAEが計数され始めたところでフィルタ無しのAE計数率が500kHzのHPFを使用したAE計数率より多くカウントされている領域である。特徴は200kHz以下と1MHz領域に周波数成分を持つAEが観察される。ただし、本実験に用いたAEセンサの共振周波数は1MHz強のところであり、他の周波数域より20dB程感度が高いことから、1MHz領域の周波数成分は差し引いて考える必要がある。つまり、500kHz以下の低周波成分が主体と観察できるから、このあたりは油切れによる軸試験片とブッシュ試験片との固体接触が起こり始め、摩耗をほとんど伴っていない摩擦現象が主体であると考えられる。次に、図4(c)は500kHzのHPFを通した後のAE計数率がフィルタ無しのAE計数率とほぼ同じ値を示すようになる領域のAE周波数の変化を示している。500kHzから1MHz領域と、さらに2MHzあたりに周波数成分を持つことが特徴である。さらに、200kHz以下の成分が徐々に減少しているのが観察される。これは摩耗を伴わない摩擦が少なくなっていることを示している。図4(d), (e)は、フィルタ無しのAE計数率と500kHzのHPFをかけたAE計数率がほとんど同じ値を示す領域でのAEスペクトルである。この領域では低い周波数成分はほとんど見られない。このように高周波成分の発生は、凝着現象を主体とする摩耗が発生しているためと考えられる。

3.3 焼付き面の観察

図5は焼付いた部分の、軸方向と直角な断面のSEM写真を示す。図5(b)は図5(a)の四角に囲んだ部分を拡大した写真である。図5(b)に示す領域が原因で、つまり軸試験片とブッシュ試験片のすきまに凝着物が堆積し、2面間のすきまがなくなり、摩擦力の上昇つまり焼付きが生じている。しかもブッシュ試験片の一部にクラックが発生しているのが観察される。これは焼付き時に、局部的にしろ相当な力が働いたためである。

さらに、図6は図5と同じ条件のもとで焼付いた

Fig. 5 SEM photographs of cross section of seized portion

(a) Bush specimen

(b) Shaft specimen

Fig. 6 SEM photographs on seized surface

試験片を軸方向に分断して、それぞれ試験片摩擦面を観察したSEM写真である。図6 (a) がブッシュ試験片で、図6 (b) が軸試験片の摩擦面である。Cuのブッシュ試験片側は深くえぐられているのが観察できる。一方軸試験片側には相手試験片のCuが凝着しているのが観察される。図7は図6に示したブッシュ試験片および軸試験片の摩擦面を表面粗さ計で測定した断面曲線である。いずれも軸方向に、つまり図6に示す領域を上下方向に測定した。図7(a)のブッシュ試験片の深くえぐられた溝の深さは100 μm以上もある。同様に(b)の軸試験片の凸部つまり凝着部も100 μm以上あり、この凝着物が溝に入った状態であったことが分かる。ブッシュ試験片の溝は一周同じように形成されていた。一方軸試験片に形成された凝着部は円周上に連続して生成されているのではなく、一部分に存在していた。このように摩擦面等の観察からも、凝着による摩耗粉の移着成長によって、部分的にしる両試験片間のすきまをなくし、摩擦トルクを上昇させ、その結果いわゆる焼付きに至ったものと考えられる。

4. 考 察

本実験の結果から、焼付きに至った最終的な原因は、図6で明かなように、かなり大きな凝着物が摩擦面

Fig. 7 Profiles of wear track

間に介在し、その結果2面間のすきまが減少し摩擦トルクが上昇したためである。そこで、焼付きに至るプロセスをAE信号から考えてみる。

図2の現象は次のように変化していると考えられる。

- ① 実験開始後、はじめのうちは潤滑剤の影響で軸試験片とブッシュ試験片とは流体潤滑状態にあり、そのため、固体接触を伴わず運動し、AE信号は観測されない。
- ② 潤滑剤の減少で境界潤滑に変わる。固体接触によりAE信号の発生が活発になってくる。観察されるA

E信号の低周波数成分が主体であることから、摩耗をほとんど伴わない摩擦である。(図2(a)で示す領域)

③ 数min後、AEの高周波数成分が現れるがその後しばらくは、高周波数成分と低周波数成分が共存する状態が続く。このころから、軸試験片へブッシュ試験片Cuの凝着が始まり、摩耗粉が生じ始める。(図2(a)で示す領域から(c)で示される領域まで)

④ ③の状態が続いた後、AEの低周波成分がほとんどなくなる。つまりここでは摩耗を伴う摩擦が行われている。(図2(c)以降)

⑤ ④の状態が続き、AE計数率の上昇変化に伴い、ついに焼付く。摩擦トルクの方は最終的には急激に上昇して焼付きに至っている。これは、凝着摩耗粉の移着成長が生じ、いわゆるこの粒子が駆動力を超える力で軸試験片とブッシュ試験片を結合させたと考えられる。ところで、図2の(e)領域の数min前に摩擦係数およびAE計数率が上昇して、その後以前の値に戻っている場所は、最後の焼付きの過程とほぼ同様の現象が生じていたと考えている。ただし、移着成長した凝着物が摩擦抵抗などにより脱落したためであろう。この場合も、現象によっては焼付きに至ったことも十分に考えられる。

また、図3の場合は、次のように変化していると考えられる。

① 実験開始からAE計数率の高周波数成分が上昇する。(低周波数成分はほとんどない)このことは、実験開始直後からすぐに凝着が始まっていることを示している。

② AE計数率はピークを過ぎると、後はそのままの値を維持する。実験開始からここまでの間、凝着はまだ続いている。

③ 摩耗粉の影響で急激なAE計数率の増加に伴い、ついに焼付く。

実験では、図2で示すような現象が主として現れた。このように、焼付きに至るプロセスはAE信号の計数率あるいはAE信号の周波数スペクトルの変化によって認識可能である。

ここで重要なことは、焼付きのような異常状態の予知は、できるかぎり早く、しかもメンテナンスが容易なうちに行えることである。本実験において、焼付き直前のAE計数率および摩擦力の急上昇が生じた時点では、異常状態の予知情報としてはすでに遅すぎる。では、どこで焼付きの予知情報となりうるであろうか。焼付きプロセスをもう一度見直してみると、まず潤滑油の膜が局部的にしり破断され固体接触部が発生する。そして、それが進むと凝着摩耗が発生し、いわゆる凝

着物の移着、成長、脱落が生じる。そして、あるとき移着、成長過程が急速に進み脱落に至らずに焼付きへと導かれることになる。ゆえに、焼付きの最適な予知情報としては、凝着摩耗を生じ始めるとき、いわゆる摩耗に起因する高周波成分を持つAEが発生するときと言える。もっと安全な情報としては、流体潤滑が行われていることが前提であるが、摩耗に起因するAE信号の周波数成分はそれほど大きくないが、固体接触の状態が続くような場合があげられる。なぜなら、それはいずれ摩耗を生じる現象の前触れと言えるからである。

図2, 3に示す結果は凝着摩耗粉が急激に成長し焼付きに至った結果である。しかし、個体接触が生じ、さらに進んで摩耗が生じたとしても必ずしも焼付きに至るとは限らない。たとえば、クリアランスが大きく摩耗粉として摩擦面外に排出され潤滑が良好に行われるような場合である。本実験においては、軸受すきまや潤滑条件にはとくに注意をはらわず、しかも焼付きが生じた実験のみデータ収集を行った。今後は、摩擦条件や、軸受すきまなどもパラメータとして実験を行うことにより、焼付きの機構と、異常予知の条件および限界等を調べる必要がある。

5. 結 言

ジャーナル軸受の焼付き現象をインプロセス計測によって認識し、さらに焼付きの予知を目的に、焼付きに至る過程をAE信号の計測によって調べた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 実験から、焼付きに至る過程は必ずしも規則的な変化を示さない。しかし、焼付きに至るとき、摩耗に起因するAE信号の周波数成分、とくに0.5 MHz以上の成分に特徴が現れる。
- (2) さらに、この特徴は焼付きのかなり前から現れることが分かった。
- (3) このことから、焼付きの予知には、AE計測が大変有望であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 和田正毅, 水野萬亀雄: AEによる摩擦・摩耗の観測—危険予知につて, 精密工学会誌, 52, 10(1986)1719.
- 2) 和田正毅, 水野萬亀雄: AEによる摩擦・摩耗の研究—摩耗形態とAE信号, 精密工学会誌, 55, 4(1989)673.
- 3) 三科博司: 軸・円筒間の摩擦面における焼けつき機構, 潤滑, 31, 11(1986)821.