AEによる転がり疲れ過程における初期損傷モニタリングの研究

A Study on Incipient Damage Monitoring in Rolling Contact Fatigue Process using Acoustic Emission

Acoustic Emissions (AE) technique was applied to rolling contact fatigue tests with radially loaded two rollers running under constant load and velocity to detect the incipient damage and damage location. Signals detected from contacts were processed using signal conditioning and enhancement techniques by an AE source locator to bring out the difference between the signals from the sound and damaged rollers. It is found that AE hit counts pulse observations by the AE source locator can provide an indication of the damage at its very initial stage. The conventional AE parameters and AE signal features were studied, and correlated with AE source locator counts. Results obtained demonstrate the successful use of the AE monitoring combination with the AE source locator as a new technique for detecting incipient damage and forecasting the position of the damage in roller, and thus allowing the user to monitor the rate of deterioration of the rolling elements.

大場 宏明 Hiroaki Ohba 吉岡 武雄 Takeo Yoshioka ムハマド ジアウル ラーマン Md. Ziaur Rahman 山本 隆司 Takashi Yamamoto 神長 史人 Fumito Kaminaga

1. まえがき

鉄道用電気車においては,損傷や故障,更には予期せぬ運 転停止を回避するために,動力伝達用駆動装置の歯車や転が り軸受などの転がり接触要素を対象として定期検査時に振動 加速度法等を用いた異常診断が行われている。それに対して, 定期検査の延長をはかりながら,しかも品質を確保して無保 守で長期間の運転をするためには,損傷モニタリングにより 早期に異常を検知出来るような状態監視が重要となってきて いる。

その手法として,アコースティック・エミッション(AE) 法⁽¹⁾は振動加速度法よりも高感度で早期に異常を検出できる ことから,異常診断や残余寿命の評価に有効に活用できると 考えられる。AEは,固体が変形あるいは破壊する際に,固 体がそれまで蓄えていたひずみエネルギーを開放する結果と して発生する弾性波などと定義されている。

AE法を適用した損傷モニタリングの研究は,振動加速度 法と比較する形で実施される場合が多く,軸受,歯車等を対 象とした転がり接触要素に関する報告がある^{(2)~(5)}。その評価 のために,多くの研究者はあらかじめ試験片に人工欠陥を設 けたり,潤滑油の中に異物を混入させたりして実施している ^{(6)~(9)}。また,小さな損傷を早期段階で検出するという観点か らの研究も報告されている^{(10)~(12)}。

我々は、AE法に着目してその基礎的研究として二円筒試 験での転がり接触条件下における損傷のモニタリングに取り 組んでいる。本報告では、実際の歯車装置の歯車材料の組合 せである炭素鋼S40Cの高周波焼入れ材と低合金鋼SNCM420 の浸炭焼入れ材を用いて二円筒試験を行い、その初期損傷の 発生箇所の検出にAE法を適用した結果について述べる。

2. 実験方法

2.1 供験材

供試材の化学成分を表1に示す。転がり疲れ試験片の形状 は図1に示すとおりであり,損傷検出の対象となる低速側試 験片はS40C材,相手材の高速側試験片はSNCM420材である。 低速側試験片は,実歯車素材の歯部から切り出して製作した 外径 ϕ 30mm,幅8mmの円筒試験片であり,高周波焼入れを 行い,表面硬さをHV600~650,硬化層深さ(HV400判定) を約3.5mmとした。相手材の高速側試験片は浸炭焼入れを行 い,表面硬さをHV650~700,硬化層深さ(HV513判定)を 約2mmとした。接触面形状は接触端で発生するエッジロー ドを考慮して,高速側試験片のみR15の円弧形状とした。ま た,接触面粗さはいずれも研削加工により最大高さRz:1~ 2 μ mに仕上げた。

接触応力算出のためのヤング率及びポアソン比はそれぞ れ206GPa及び0.295とした。

■ 表 1 供試材の化学成分(質量%)

Table1 Chemical compositions (mass %) of specimens

	SNCM420	S40C
С	0.21	0.40
Si	0.26	0.19
Mn	0.62	0.73
Р	0.014	0.012
S	0.015	0.014
Ni	1.62	0.02
Cr	0.61	0.08
Мо	0.16	-

■ 図1 転がり疲れ試験片形状 Fig.1 Geometry of rollers



2.2 AE計測方法

本AE計測系では、AE発生信号と円筒試験片の1回転に対応するパルス信号を組合せて、低速側試験片の円周方向でのAE発生位置を特定できるため、転がり疲れ過程における初期損傷を検出することが可能である。そのAE計測条件を表 2に、AE損傷モニタリングシステムの計測系ブロック図を図2に示す。

二つの円筒試験片の転がり接触点から発生するAEは, 試 験片から油槽を伝播して油槽外部に取り付けられたAEセン サで検出される。そのAEはプリアンプで40dB増幅された後 AEデータ解析装置に送られ, **表2**に示す周波数範囲のしき い値45dB(この増幅度は主増幅器だけの増幅度であり, これ 以降に記す増幅度も同じ主増幅器のみの増幅度である。)以上 のAEはすべて波形が取り込まれ, AEパラメータ(事象数, 事象率,振幅,エネルギー,立上り時間,持続時間等)が記 録される。また,弁別装置では,図3に示すように検出AE 信号でしきい値を超える信号が包絡線検波され, AEヒット すなわち1事象としてパルス信号に変換される。

AE位置標定装置は、試験体に取り付けた位置マーカが渦 電流センサである位置検出センサの前を通過する際に渦電流 センサに発生する電気信号をもとに図4のように回転同期信 号を作成し、さらにその回転同期信号の1周期を100分割し たAE位置標定サイクルを作る。位置標定サイクルを作るの は、AEが発生した瞬間に接触している試験片の外周位置を 決定するためである。したがって、AEの発生位置は発生し た瞬間の位置標定サイクルの番号からすなわち番地として決 定され、AE発生位置の標定においてはその番地に1事象が 加えられる。AE位置標定装置は,標定した結果をコンピュー タのモニタに表示し、オンラインで転がり接触面の異なる位 置でのAE発生状況を把握することができる。そして、AE事 象数がいずれかの番地で設定した試験停止レベルに到達した ときに、二円筒試験機を停止する機構になっている。

■ 表2 AE 計測条件

Table2 AE measurement conditions

AE センサ	100 ~ 600kHz(共振周波数 225kHz)	
増幅度	40dB	
周波数範囲	100 ~ 400kHz	
しきい値	45dB	
サンプリング	2MS / s	
実験停止レベル	15 ヒット/番地/ 2min	

[■] 図2 AE 損傷モニタリングシステムのブロック図 Fig.2 Schematic diagram of AE damage monitoring system.



■ 図3 AE 信号のパルス信号への変換 Fig.3 Definition of AE hit signal and pulse signal.



■ 図4 AE 位置標定サイクル図 Fig.4 AE source locator data acquisition system and estimation of damage position.



2.3 転がり疲れ試験

使用した二円筒試験機は西原式金属摩耗試験機である。試 験機の試験片取付部の外観を図5に示す。高速側試験片の回 転数:約800rpm,最大ヘルツ接触圧力:4.0GPa,すべり率: 9%,高速側試験片の下端外周部を潤滑油に浸漬する油浴潤 滑(ギヤ油:API:GL-5,粘度:40°C 173.7cSt,100°C 17.57cSt, 比重:0.887)の条件下で初期損傷が発生し試験装置が停止する まで実施した。最小油膜厚さは、油温50°Cの潤滑下で Hamrock-Dowsonの式より、最小油膜厚さ $h_{min} < 0.4 \mu$ mであ る。また試験装置は、荷重センサ、トルクセンサ、振動加速 度センサ及び油温センサを備えている。

図5 試験片取付部の外観

Fig.5 Setup of test machine (A- AE sensor-below oil bath, B-Driver test roller, C- Follower test roller, D- AE source position sensor, E- Oil bath, F- Oil input line, G- Vibration acceleration sensor).



3.試験結果および考察

3.1 AE事象率と振動加速度

本実験における初期損傷発生までのAE事象率(単位時間 (1min)あたりの事象数)と振動加速度の変化の一例を,図6 に示す。試験開始初期段階において,AE事象率が次第に増 加しているが,これは試験片接触面の表面粗さの干渉や塑性 変形等によるものと考えられ,初期なじみ段階(ステージ1) と呼ぶことができる。この領域は,運転開始から約27時間 (N=1.3×10⁶)という試験全体の約30%を占める。次に転がり 接触による初期の表面粗さが平滑になり初期損傷が生じるま でAE事象率が少ない状態に移行する。この段階を安定段階 (ステージ2)と呼ぶことができる。その後,突然,AE事象 率が急激に増加して78時間20分(N_f=3.8×10⁶)に損傷発生段 階(ステージ3)を迎え運転は終了となる。この間,振動加速 度においては損傷に関係した特別な変化は見られない。歯車 装置での歯面損傷発生過程において類似の実験結果の報告も されている¹³。 ■ 図6 AE 事象率と振動加速度の変化

Fig.6 AE hit counts rate and its corresponding vibration signals during a test.



3.2 AE信号とAE位置標定

転がり疲れ試験を通してAE検出波形と周波数スペクトル をすべて記録している。AE信号の振幅値は45dB(0.017V) ~77dB(0.7V)の範囲に分布していた。図7は試験過程にお けるAE事象率の変化をAE信号の振幅値ごとにクラス分け して示した結果である。まずステージ1の試験初期には、明 らかに振幅値50dB以上の比率が高いことがわかる。次のス テージ2の安定段階ではAE事象率が低下して、50dB以上の 比率もごくわずかになっている。

試験開始24時間(N=1.1×10⁶)後(ステージ1)と60時間 (N=2.9×10⁶)後(ステージ2)のAEヒットの代表的なAE検出 波形とFFT解析結果を図8及び図9にそれぞれ示す。検出さ れたAEは、いわゆる突発形AEと呼ばれる波形に相当する。 支配的な振幅レベルは、ステージ1では73~77dBであり、 ステージ2では45~50dBである。ステージ1ではAE事象 数が多く,高い振幅値を示しているが,初期損傷は生じてい ない。この理由としては、図10(a)が初期なじみ段階の試験 開始24時間(N=1.1×10⁶)後10分間のAE位置標定結果である が、円筒試験片の円周全体で一様なAE事象数であり、特定 の番地で設定した試験停止レベルまでAE事象数が到達して いないことがわかる。このことは、円周で一様に塑性変形を 伴いながら摩擦、摩耗によってAE信号が発生したものと考 えられる。60時間(N=2.9×10⁶)後の安定段階の10分間におけ るAE位置標定結果が図10(b)であり、AE事象数の低下が見 られるが、同様に試験片の全周で一様な結果が得られている。

図11は、最終の損傷発生段階におけるAE検出波形と FFT解析結果である。検出されたAEは安定段階の振幅値と は異なり、しきい値0.017V(45dB)を大きく越えているが、 FFT解析による周波数に違いは見られない。図12は、試験 停止前10分間のAE位置標定結果である。円周上の特定の番 地上にAE事象数が蓄積されており、それは初期損傷により 試験片表面に現れたき裂の箇所と一致していて、67番地付近 においてAE事象数が最大となっている。更に、最終の損傷 発生段階を評価するために、試験停止前1分間のAE位置標定 結果を図13に示す。明らかにき裂発生に対応した67番地に おいて、AEヒット数が突出して設定した試験停止レベルに AE事象数が到達し、試験が停止したものと考えられる。

図14は、AE位置標定と転がり接触面上の損傷箇所の関係 を示した結果である。AE位置標定結果と損傷箇所とのずれ は最大でも5mm程度しか見られず、位置検出精度は再現よ く得られている。このことは本AE計測系が転がり要素の初 期損傷検出とその位置標定のための状態監視ツールとして有 効であるものと判断できる。

Fig.7 Magnitudes of AE hit amplitude and AE hit counts rate.

■ 図7 AE 信号の振幅値とその事象率







■ 図9 AE 検出波形とFFT 解析結果(ステージ2) Fig.9 Typical AE signature and corresponding frequency spectrum for a single hit at stage 2.



■ 図10 AE 位置標定(上段:ステージ1,下段:ステージ2) Fig.10 AE hit counts at different AE source locations : a) 10 min data (after 24h) : at stage 1, and b) 10 min data (after 60h) : at stage 2.



■ 図11 AE 検出波形とFFT 解析結果(ステージ3) Fig.11 Typical AE signature and corresponding frequency spectrum for a single hit from an incipient damage on roller at stage 3.



■ 図12 AE 発生箇所の位置標定(最終10 分間) Fig.12 AE hit counts at different AE source locations : 10 min data at the last state.



図13 AE 発生箇所の位置標定(最終1分間)

Fig.13 AE hit counts at different AE source locations: last 1 min data before stoppage.



■ 図14 初期損傷の発生箇所とAE 位置標定

Fig.14 Detected incipient damage position on roller with its AE source location.



3.3 転がり疲れ損傷状況

転がり疲れ損傷は、すべての試験において低速側試験片で あるS40C高周波焼入れ材で発生した。その損傷に伴う質量 減は、低速側試験片及び高速側試験片において、それぞれ0.25 $\pm 0.05 mg$ 及び0.30 $\pm 0.05 mg$ である。振動加速度の平均値は13 m/s^2 、トルクは3.8 N-mである。また試験中に潤滑油の特性 は変化せず、油温の平均値は48℃、最大で50℃であった。

低速側試験片の表面に生じた損傷は、目視により観察する ことができて、AE位置標定装置で検出された67番地と一致 している。図15は、AEヒット数がAE位置標定装置で設定 したレベルに達して試験が停止した時点の低速側試験片表面 の転がり疲れの損傷状態を示す。表面起点のき裂が発生して、 スポーリング発生に至る前に停止した状況が確認できる。全 接触面積315.75mm²に対して損傷箇所面積は0.60mm²(0.18 %)程度である。また、すべての試験において、試験片表面 上に生じた損傷は1箇所だけであった。図16は、低速側試験 片の円周方向断面写真であり、き裂の進展状況を示している。

■ 図15 転がり疲れき裂の発生状況 Fig.15 Morphology of the detected incipient damage on rolling contact surface of follower roller.



■ 図16 転がり疲れき裂の断面状況

Fig.16 Cross-sectional view of damage in follower roller.



4.まとめ

二円筒試験の転がり疲れ過程で発生するAEを計測し、AE 発生箇所の位置標定を試み、次のことがわかった。

- 1) AE事象率の変化を計測することにより、転がり疲れ損傷の過程が、初期なじみ段階、安定段階を経て、損傷発生段階へ移行していることが監視でき、AE事象率が初期損傷を検出する上で、重要なパラメータであることがわかった。
- 2) AE事象率とその位置標定を組合せた損傷モニタリングシステムにより、転がり疲れ損傷の初期段階を捉えることができ、その時点で試験を停止することが可能であった。
- 3)以上のことから,異常診断のための基礎データを得ること ができたので,実機への適用も期待できる。

参考文献

- Moore, P.O. ed. (2005), Nondestructive Testing Handbook, volume 6-Acoustic Emission Testing, American Society for Nondestructive Testing Inc., Ohio.
- (2) Tandon N., Choudhury A. (1999), "A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Damages in Rolling Element Bearings," *Trib. Int.*, 32, pp 469-480
- (3) Mba, D., Tan, C.K. (2005), "Identification of the Acoustic Emission Source during a Comparative Study on Diagnosis of a Spur Gearbox," *Trib. Int.*, 38, pp 469-480.

- (4) Yoshioka, T. and Fujiwara, T. (1986), "Measurement of Propagation Initiation and Propagation Time of Rolling Contact Fatigue by Observation of Acoustic Emission and Vibration," in *Proc. of the 14th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, Tribology Series 12, pp 29-33.
- (5) Al-Ghamd, A. and Mba, D. (2006), "A Comparative Experimental Study on the use of Acoustic Emission and Vibration Analysis for Bearing Defect Identification and Estimation of Defect Size," *Mech. Sys. Sig. Proc.*, 20, pp 1537-1571.
- (6) Shiroishi J., Li Y., Liang S., Kurfess T., Danyluk S. (1997), "Bearing Condition Diagnostics via Vibration and Acoustic Emission Measurements," *Mech. Sys. Sig. Proc.*, 11, pp 693-705.
- (7) Choudhury A., Tandon N. (2000), "Application of Acoustic Emission Technique for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings," *Trib. Int.*, 33, pp 39-45.
- (8) Miettinen J., Andersson P. (2000), "Acoustic Emission of Rolling Bearings Lubricated with Contaminated Grease," *Trib. Int.*, 33, pp 777–787.
- (9) Toutountzakis T, Tan C.K., Mba D. (2005),
 "Application of Acoustic Emission to Seeded Gear Fault Detection," NDT & E Int., 38, pp 27-36.
- (10) Tandon, N. and Mata, S. (1999), "Detection of Defects in Gears by Acoustic Emission Measurements," J. Acoust. Emi., 17, pp 23-27.
- (11) Singh A., Houser D.R., Vijayakar S. (1996), "Early Detection of Gear Pitting," in *Proc. Of the Power Transmission and Gearing Conference*," ASME. DEvol. 88, pp 673-678.
- (12) Singh A., Houser D.R., Vijayakar S. (1999), "Detecting Gear Tooth Breakage using Acoustic Emission: A Feasibility and Sensor Placement Study," *J. Mech. Des.*, 121, pp 587-593.
- (13) Miwa, H., Haizuka, S., Higuchi, Y., Kaneko, K. and Yoshioka, T. (2001), "Validity of Acoustic Emission Technique on Tooth Surface Strength (Detection of Spalling Failure and the Specification of Spalled Tooth)," *Trans. JSME*, 67, pp 285-292.

技術論文

執筆者略歴



大場宏明

1981年入社。現在,研究センター技 術研究グループにて,材料の評価試験, 材料の応用および寿命・信頼性等の研 究に従事。 博士(工学)。日本トライボロジー学会 会員(転がり疲れ研究会主査),日本材

料学会会員,日本機械学会会員他。



ムハマド ジアウル ラーマン 2006年入社。研究センターにて、A E法による損傷モニタリングの研究に 従事。

Ph.D.。現在, Laurentian University。STLE(American Society of Tribologists and Lubrication Engineers)会員。



神長 史人 2007年入社。現在,研究センター技 術研究グループにて,材料の寿命評価 試験および調査,AE法による損傷モ ニタリングの研究に従事。 日本トライボロジー学会会員。



吉岡 武雄

1963年3月富山大学文理学部卒業, 同年4月工業技術院機械試験所((独) 産業技術総合研究所の前身)に入所。 2000年3月同所を定年退職。同年4 月~2003年3月東京農工大学非常勤 講師。2003年4月~2006年3月明 治大学客員教授。2000年11月~現 在THK㈱顧問。2007年4月~現在 トライボ・テックス㈱顧問。博士(工 学)。転がり軸受の信頼性,AE法によ る転がり軸受の言類、セラミック転が り軸受の高温への応用などの研究に従 事。

日本トライボロジー学会会員,日本機 械学会会員,日本非破壊検査協会会員。



山本隆司

1973年6月から2009年3月まで東 京農工大学工学部に在職し,自動車に 関連するトライボロジー,トライボロ ジーに関する基礎的現象の研究に従 事。

工学博士。現在,同大学国際センター 客員教授。日本トライボロジー学会会 員,日本機械学会会員,STLE会員。

