AE 法による摩耗状態の評価*

(第 1 報, ウェーブレット変換結果の適用)

宅間 正則^{*1}, 新家 昇^{*1}西浦 隆夫^{*2}, 岡本 真一^{*2}Evaluation of Wear Conditions with AE Method
(1st Report, Application of Wavelet Transform Results)Masanori TAKUMA^{*3}, Noboru SHINKE,

Takao NISHIURA and Shinichi OKAMOTO

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Kansai University,
3-3-35 Yamate-cho, Suita-shi, Osaka, 564-8680 Japan

The evaluation of the wear conditions is an important subject in energy saving and resource conservation. Therefore, though the friction coefficient, etc. are measured, it is difficult to evaluate the wear conditions with Non-destructive inspection. In this study, the system which evaluated the wear conditions by the wavelet transform (WT) results of the detected AE signals during the wear testing was examined. As the result, the following things became clear. (1) From the WT results, the possibility of grasping the frequency ranges which rise from the wear phenomenon was able to be shown. (2) The possibility of deciding the sign of seizure was able to be shown. (3) The validity of this system could be explained by the collation with the experiment results.

Key Words: Acoustic Emission, Nondestructive Inspection, Wear, Wavelet Transform, Evaluation, Condition

1. 結 言

摩耗状態の把握・評価は、産業界と工業界において極めて重要な課題の一つとして取り挙げられている。しかし、凝着摩耗(内部クラックの発生, 移着素子の生成・成長・脱落)やアプレシブ摩耗(塑性変形やクラックの発生・成長)などの摩耗現象は『材料科学』『物理学』『化学』『機械工学』の内容が複雑に絡み合うために、摩耗状態を非破壊検査で定量的に評価することは極めて困難である⁰⁾。

そこで本研究では、ピンディスクによる摩耗試験の結果に基づいて摩耗状態を分類した。そして、各摩耗状態で検出された微小で複雑な摩耗現象によって発生した AE 信号のウェーブレット変換(Wavelet Transform: WT)結果から、摩耗状態を把握・評価するシステムについて検討した結果を報告する。

2. Wavelet と Wavelet 変換

波動現象の発生機構の解明に用いられる FFT は周波数スペクトルの時間依存性を持たないために、破壊現象に対応する周波数成分の発生時刻を同定することができない。一方、細波状の関数を基本パターンとする WT は、時間と周波数を同時に扱うことができる。この基本パターン(Mother wavelet)に時刻 0 で周波数 ω_0 となる式(1)の Gabor wavelet $\Psi(x)$ を用いると、関数 $f(x)$ の WT は式(2)

で定義される($a > 0$ で、 $\overline{\Psi(x)}$ は $\Psi(x)$ の複素共役)⁰⁾。

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega_0 x}{\gamma}\right)^2\right] \exp(i\omega_0 x) \quad (1)$$

$$(W_{\Psi} f)(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \overline{\Psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} f(x) dx \quad (2)$$

ここで、 $\Psi((x-b)/a)$ が解析する信号 $f(x)$ に似ていれば『波立ち』が生じ、その激しさが信号の振幅に対応するので、絶対値 $|(W_{\Psi} f)(a, b)|$ は時刻 b における角周波数 ω/a を有する成分の大きさを表すことになる⁰⁾。このとき、 $\Psi((x-b)/a)$ は $1/a$ に比例して幅が狭くなるので、 ω/a が高いほど時間分解能が高くなり、 b で時間軸上の位置が決定される。よって、 b と $1/a$ の平面上に変換結果を転写すれば、急峻な変動と複数の現象が混在する AE のような非定常信号における周波数成分の分布状態を把握することができる。また、mother wavelet から作成した種々の wavelet (時刻 b で周波数 ω/a) を重ね合わせれば、任意の関数表現が可能となる(任意の関数を移動・伸縮させた mother wavelet に分解可能)。

さて、実際の数値計算では wavelet の形状やパラメータ a と b を離散化し、正規直交化する必要がある。離散化は式(2)の関数 $\Psi_{(a,b)}(x)$ の a と b を 2^j と $2^j k$ に置き換え、

$$\Psi_{(j,k)}(x) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \Psi\left(\frac{x-2^j k}{2^j}\right) \quad (3)$$

のように wavelet を離散化し、これが正規直交基底であるとき、次式の級数表現が可能となる。なお、 $C_{j,k}$ は $f(x)$ の『時間一周波数分布』を表す wavelet 係数である⁰⁾。

* 原稿受付 2003 年 7 月 25 日。

^{*1} 正員、関西大学工学部(☎ 564-8680 吹田市山手町 3-3-35)。^{*2} 関西大学大学院工学研究科。

E-mail: t940081@ipc.kansai-u.ac.jp

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k} \Psi_{(j,k)}(\mathbf{x}) \quad (4)$$

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(\mathbf{x}) \overline{\Psi_{(j,k)}(\mathbf{x})} d\mathbf{x} \quad (5)$$

3. 実験装置および実験方法

図1は摩耗状態を評価する本システムの概念図を示したもので、図中には『試験片形状』『摩耗試験機』『信号と情報の流れ』が記されている。なお、ピンには焼鈍した黄銅(C2700B, 450℃で5時間保持後に除冷)、ディスクにはバフ研磨(R_{max} を1.5 μm 以下)で仕上げた炭素工具鋼SK5を使用した。

摩耗試験は、ディスクの回転数 160rpm (400mm/s)、接触面圧 0.936MPa、室温 20~25℃、湿度 50~60%とする乾式実験で行い、ピンの垂直変位をリニアゲージで検出した。一方、広帯域型センサ(株式会社NF回路設計ブロック: AE-900S-WB)で検出されたAE信号は、プリアンプ40dB、しきい値30dB、バンドパスフィルタ50~1200kHz、サンプリング周波数4MHz(16kword)で収集される。そして、『摩擦距離とピンの垂直変位との関係(以下、摩耗曲線と

略す)から得られる摩耗率やピンの上下振動』と『ピンとディスクの接触面の状態』などの情報を総合して摩耗状態(実験開始直後、初期摩耗前兆、..., 焼付き前兆、焼付き)を分類したのち、AE信号の『周波数成分の推移』や『各周波数域での wavelet 係数の時間変動波形の特徴(式(6)から導かれる時間成分と wavelet 係数成分からなる重心位置(G_t , G_w), 図2参照)』が摩耗状態の把握・評価に利用できるのかを検討する。

$$G_l = \frac{\sum_{i=1}^n (m(i) \cdot l(i))}{\sum_{i=1}^n m(i)} \quad (6)$$

ここで、 G_l は l の重心位置、 l は t (時間)または w (wavelet係数)、 n はデータ数、 $l(i)$ は t または w の i 番目の値、 $m(i)$ は t または w の i 番目の値($l \neq m$)を表す。

Fig.2 Center of gravity position on time fluctuation waveform of wavelet coefficient in WT result

Fig.1 Experimental equipments and flow of measurement information in this system

Fig.3 Distinction example of wear conditions in relationship between sliding distance and perpendicular displacement of pin

4. 実験結果および考察

4-1 摩耗曲線と周波数解析結果 図3は実験で得られた摩耗曲線を示したもので、この結果と接触面の状態から摩耗状態を『実験開始直後、初期摩耗前兆、初期摩耗前期・中期・後期、定常摩耗前期・中期・後期、焼付き前兆、焼付き』に分類し、各状態で検出された AE 信号の WT を行った。図4～図13は各摩耗状態での『接触面の写真、AE 信号、WT 結果』を示したもので、図中の AE 信号は各状態で検出された信号の中で wavelet 係数の時間変動波形の重心位置 (G_t , G_w) が比較的高い頻度を示した代表的なものの一例である。これらの結果から、以下のことを伺い知ることができる。

①実験開始直後(図4参照)： ピンには保護膜(酸化膜)、ディスクにはスリップ痕が認められる。AE 信号の振幅は小さく、50～100kHz と 300～400kHz に僅かな wavelet 係数の時間変動波形が認められ、その持続時間は長い。このことから、50～100kHz と 300～400kHz の小さな wavelet 係数は『ピンとディスクの接触やスリップ痕の発生』に対応するものと推察される。

②初期摩耗前兆(図5参照)： ピンの保護膜は消失し始め、ディスクには凝着した黄銅が認められるようになる。AE 信号の振幅は、600kHz 以下の wavelet 係数の増

加によって実験開始直後よりも大きくなる。以上のことから、600kHz 以下の wavelet 係数の増加は主に凝着痕同士の衝突と破壊によるものと推察され、摩耗進展の前兆を捕らえるための情報源として活用できる可能性がある。

③初期摩耗前期(図6参照)： ピンの表面は荒れ始め、ディスクには黄銅の凝着痕が著しくなる(凝着摩耗)。これは、ディスクに凝着した黄銅がピン表面の保護膜を消失させ、凝着した黄銅とピンが『ともしや状態』となって凝着が加速されたため⁽⁴⁾と推察される。AE 信号の振幅は、50～100kHz の wavelet 係数の急増と 800～1200kHz の微増により、初期摩耗前兆より大きくなる。また、50～100kHz と 300～400kHz の wavelet 係数の発生時間差や 100kHz 以下の発生要因となる現象が短時間に連続していることなどから、摩耗機構を解明する際の情報源となり得る可能性がある。

④初期摩耗中期(図7参照)： ディスクのスリップ痕の外側に摩耗粉が認められることから、凝着摩耗とアブレシブ摩耗が起こっていると推察される。AE 信号の振幅は、800kHz 以上の wavelet 係数の急増と 300～500kHz の微増により、初期摩耗前期よりも大きくなる(図13の焼付きと同程度)。このことから、800kHz 以上は摩耗粉の発生に関与していると推察される。

⑤初期摩耗後期(図8参照)： ディスクのスリップ痕の外側には中期よりも細かい摩耗粉が認められるようになる。このような現象はシビア摩耗からマイルド摩耗に遷移する際に観られることから⁽⁹⁾、定常摩耗への推移が始まっているといえる。一方、この区間での摩耗曲線の振幅(ピンの上下振動：前半は0.057mm、後半は0.035mm)と勾配(摩耗率：前半は 6.40×10^{-7} 、後半は 1.56×10^{-7})は減少傾向を示す。これは、2面間に介在した摩耗粉が3元アブレシブ摩耗を誘発して摩耗を促進させるが、摩耗粉による微細切削(転がりや滑りによる研磨)によってピン表面の凹凸が減少し、摩耗を緩和させているといえる⁽⁶⁾。AE 信号の振幅は初期摩耗中期よりも僅かに小さくなる。そして、摩耗粉の生成に関与していると推察される 800kHz 以上の wavelet 係数は中期よりも小さくなり、摩耗粉が細かくなっていることと対応する。このことは、摩耗の規模や発生機構が初期摩耗中期とは異なることを示しているといえる。

⑥定常摩耗前期(図9参照)： ディスク表面の凝着痕は成長し、ピン表面は実験前の状態に近づいている。摩耗曲線の勾配はほぼゼロで振幅も小さい。よって、初期摩耗後期での3元アブレシブ摩耗による微細切削や摩擦によって凝着した黄銅が押し延ばされて、両面間

Fig.4 Analysis results on right after experiment start

Fig.5 Analysis results on sign of initial wear

Fig.6 Analysis results on first stage of initial wear

Fig.7 Analysis results on middle stage of initial wear

Fig.8 Analysis results on latter stage of initial wear

Fig.9 Analysis results on first stage of steady wear

の『なじみ効果』によって定常状態に移したといえる⁶⁾。AE信号の振幅と各周波数域での wavelet 係数は、摩耗現象の安定に伴って減少傾向を示す。

⑦定常摩耗中期(図10参照)：ピンには黒い摩耗粉が付着し、ディスクのスリップ痕には僅かに黒ずみが観られる。このことから、酸化膜の形成による酸化摩耗が起こっている⁷⁾と推察される。摩耗量は殆ど増加せず、AE信号の振幅と wavelet 係数は定常摩耗前期より小さ

い。また、WT結果から、50~500kHzの wavelet 係数は小さいが、この周波数域に対応する摩耗現象が頻繁かつ突発的に起こっているといえる。

⑧定常摩耗後期(図11参照)：定常摩耗中期と同様に、摩耗量は殆ど増加せず、ピンには摩耗粉、ディスクには凝着痕の黒ずみが認められる。また、摩耗曲線の振幅が中期より小さいことから、『なじみ効果』の作用が継続しているといえる。AE信号の振幅と wavelet 係

Fig.10 Analysis results on middle stage of steady wear

Fig.11 Analysis results on latter stage of steady wear

Fig.12 Analysis results on sign of seizure

Fig.13 Analysis results on after seizure

数は、他の摩耗状態と比べて極めて小さい。

⑨焼付き前兆(図12参照)：発生時間が極めて短かいのでピンとディスクの表面状態を観察できず、AE波形の特徴から定常摩耗後期との違いを認識することができなかった。このようなことから、過去の研究報告⁽⁸⁾にも記されているように、焼付き前兆の把握は極めて困難であるといえる。しかし、WT結果では『50～800kHzにおいて、定常摩耗中期と同様に、連続的な現象よりも小規模で突発的な現象が頻繁に発生している』ということがわかるので、WTが焼付きの予知に有効な手法であるといえる。

⑩焼付き(図13参照)：ピンとディスクの接触面に黒くただれた跡が観られることから、接触面の温度上昇によって溶着が起こっているといえる。AE信号は振幅の大きな連続型と突発型が混在した波形で、他の摩耗状態と異なる。そして、『300～800kHz付近のwavelet係数が急増し、800～1000kHzのwavelet係数が再び増加する』という特徴が観られる。

以上のことから、AE信号のWT結果から得られる情

報(wavelet係数の値や発生時間など)が摩耗状態の評価や摩耗機構の解明に有効な情報となり得ることがわかった。

5. システムの構築手順と有効性

5-1 Wavelet係数の時間変動波形の特徴 図14は、初期摩耗前期と定常摩耗前期のWT結果における各周波数域[50～100(53.9～97.6)kHz, 100～200(108～195)kHz, 200～300(215～290)kHz, 300～400(302～400)kHz, 400～500(416～490)kHz, 500～600(510～577)kHz, 600～700(601～679)kHz, 700～800(707～799)kHz, 800～900(812～883)kHz, 900～1000(908～986)kHz, 1.0～1.1(1.013～1.102)MHz, 1.1～1.2(1.133～1.197)MHz]でのwavelet係数の時間変動波形を合成した一例で、両者の違いが現れている700kHzまでのデータが示されている。なお、各帯域はFFTによる周波数解析結果とwavelet係数が比較的高い値を示す特徴的な範囲を考慮して定めたものである。そして、各摩耗状態からランダムに選んだ30個(合計300個)のAE信号の各周波数域での時間変動波形の重心位置(G_r , G_w)に関するヒストグラムを作成した。

図15は初期摩耗前期と定常摩耗前期の各周波数域での

wavelet 係数の時間変動波形における重心位置のヒストグラムを示した一例で、その分布を最小二乗法で近似した曲線も記されている。なお、図中に示した右側の縦軸は、同じ周波数域での最小・最大頻度を閉区間[0, 1]に正規化した値(以下、適合度と略す)である。同図から、つぎのような特徴(差異)を見出すことができる。

- (1) 重心位置 G_t は約 $1.5 \sim 2.5 \text{ ms}$ に分布し、両者の差異を見出すのは困難である。しかし、 $50 \sim 100 \text{ kHz}$ での G_t のヒストグラムに関する回帰曲線が最大値を示す位置

Fig.14 Time fluctuation waveform of wavelet coefficient in each frequency range

は、定常摩耗前期の方が僅かに小さい値を示す傾向にある(比較的大きな係数値が比較的早い時間に発生している)。

- (2) 重心位置 G_w の頻度分布は、周波数域によって異なる。例えば、定常摩耗前期の wavelet 係数は小さい値を示す傾向にあるが、初期摩耗前期の $50 \sim 400 \text{ kHz}$ の係数値は比較的大きな値を示す傾向にある。

5-2 適合度の導出手順とシステムの有効性 図 16 は、検出信号の重心位置を初期摩耗前期と定常摩耗前期の 500 kHz までのヒストグラムに入力したときの適合度の導出過程を示した一例である。すなわち、重心位置(G_t , G_w)から各周波数域での適合度(図中の右側に示したカッコ内の数値)をヒストグラムの回帰曲線を用いて導き、それらを合わせて個々の摩耗状態に対する信号の適合度(評価)を導く。同図より、それぞれの適合度は 1.447 と 4.721 となるので、前述した2つの摩耗状態に関するヒストグラムのみを用いたときの信号は『定常摩耗前期』と評価される。

図 17 は、初期摩耗後期の検出信号を本システム(図 1 参照)に入力したときの動作例である。同図より、本システムによる摩耗状態の評価は妥当なものであるといえる。そこで、ヒストグラムを作成する際に使わなかった 50 個の検出信号に対する正答率を調べることにした。その結果を示したものが表 1 で、正答率の平均が 87%(最も低いものでも 75%)であることから、wavelet 係数の時間変動波形の重心位置(G_t , G_w)を摩耗状態の評価に活用することができ、その情報を用いた本システムの有効性を検証することができたといえる。さて、図 17 に示した動作例において、各摩耗状態での時間成分に対する適合度がほ

Fig.15 Examples of histogram for time and wavelet coefficient components in each frequency range

Fig. 16 A discrimination process example of wear conditions by detected AE signal

Fig. 17 An evaluation example of wear conditions by this system

Table 1 Validity of this system

Wear condition	Accuracy rate %
Just after experiment start	100 (100)
Sign of initial wear	80 (80)
First stage of initial wear	86 (71)
Middle stage of initial wear	80 (60)
Latter stage of initial wear	83 (50)
First stage of steady wear	83 (67)
Middle stage of steady wear	83 (83)
Latter stage of steady wear	75 (50)
Sign of seizure	100 (50)
After seizure	100 (100)

(): Evaluation on excluding center of gravity position about time component

ば同じ値を示していることから、wavelet 係数成分のみでの評価を試みた。その結果が表 1 のカッコ内の数値であり、多くの摩耗状態で正答率の低下が観られた。このことは、摩耗状態の評価に時間成分の情報も必要であるといえ、WT による『時間一周波数解析』の適用が有効であることを示している。ここで、正答率が 100%にならない理由として、ヒストグラムの作成に用いたデータ数が少なく、選択したデータに多少の偏りがあったと考えられる、などが挙げられる。

今後、WT 結果の特徴と摩耗状態・形態との関係性を詳しく調べて摩耗現象の解明に取り組むとともに、ヒストグラムの信頼性を高めて評価精度の向上を図る予定である。

6. 結 言

ピンディスクによる摩耗試験の結果に基づいて摩耗状態を分類し、各状態で検出された AE 信号の特徴抽出を試みた。そして、その特徴に基づいて摩耗状態を評価するシステムについて検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) AE 信号のウェーブレット変換結果から、摩耗現象に対応する周波数域や摩耗状態を把握できる可能性を示せた。
- (2) 極めて困難な焼付き前兆の把握を、AE 信号の WT 結果で捕らえられる可能性を示せた。
- (3) Wavelet 係数の時間変動波形の特徴 (時間成分と wavelet 係数成分からなる重心位置) から摩耗状態を評価するシステムを構築し、その有効性を実験結果との照合によって明らかにすることができた。

本研究の一部は、平成 15 年度関西大学学部共同研究費において、研究課題「非破壊検査法と固体・分子動力学を

用いた材料の設計・開発に関する研究」として研究費を受けたものの成果の一部として公表するものである。

参 考 文 献

- (1) H.チコス 著、桜井俊男 訳：トライボロジー、講談社 (1980)。
- (2) 例えば、榊原 進：数理学セミナー ウェーブレットビギナーズガイド、東京電機大学出版局 (1995)。井上祐嗣：ウェーブレットが拓く超音波材料評価の新境地、材料、**45**-12 (1996)、1353-1354。
- (3) 例えば、上野吉史、森 和男、笠島永吉、吉岡武雄：離散ウェーブレット変換を応用した転がり軸受の剥離発生予知、精密工学会誌、**61**-4 (1995)、521-526。
- (4) 例えば、岡本純三、中山景次、佐藤昌夫：トライボロジー入門、幸書房 (1997)。山本雄二、兼田楨宏：トライボロジ、理工学社 (1998)。桜井俊男、広中清一：トライボロジー、共立出版株式会社 (1984)。
- (5) 三科博司、蒔田祐之、笹田直、野呂瀬進：純金属間摩耗粉形成における移着成長過程の諸相、潤滑、**24**-7 (1979)、466-472。
- (6) 久門輝正、須田博、差復威望、津久井俊昌：アプレシブ摩耗における脱落砥粒の影響、トライボロジスト、**36**-10 (1991)、777-784。
- (7) 和田正毅、水野萬亀雄：AE 法による摩擦・摩耗の研究、精密工学会誌、**55**-4 (1989)、673-678。
- (8) 例えば、和田正毅、水野萬亀雄、笹田 直：摩擦・摩耗の AE によるインプロセス計測に関する研究、精密工学会誌、**56**-10 (1990)、1835-1840。