ジャークセンサによる転がり軸受の損傷診断に関する研究* (第2報, 新しい診断法の提案と有効性の検証)

辺見 信彦^{*1}

Diagnosis of Rolling Bearing Failure Using Jerk Sensor (2nd Report, Proposition of New Diagnosis Method and Verification of Its Effectiveness)

Nobuhiko HENMI^{*1}

^{*1} Shinshu Univ. Dept. of Mechanical Systems Engineering
Wakasato 4-17-1, Nagano, 380-8553 Japan

Diagnosis technique of bearing failure in a rotating machine is very important for industry. There are a lot of researches and some practical diagnosis methods are applied in actual industrial systems. In the paper, problems of conventional diagnosis methods for the case of low-speed rotation are explained, a new diagnosis method for rolling bearings is proposed, and its principle is explained in detail. In the conventional diagnosis method, piezoelectric acceleration sensors are usually used to detect abnormal vibration signal of bearing during rotation. In the paper, a jerk sensor which is originally developed by the author is used for the proposed diagnosis method. When a failure such as flaking exists on outer or inner ring surface of the rolling bearing, impulse-like vibrations occur whenever each roller passes over the flaw. The period of the pulse-like vibration is called pass flaw period (PFP) in this paper. Both of the conventional and proposed methods diagnose bearing failure by detecting whether impulse-like vibrations which occur with the same period as the PFP, or not. However it is very difficult for conventional methods to diagnose a bearing rotating at low speed. Basic idea of the proposed method is similar to AND of bit-operation in digital signal processing. Multiplication among vibration waveforms divided by PFP is taken. The multiplication signalizes only the impulse-like vibration synchronized with the PFP. Effectiveness of the proposed method is verified using a test bearing with a scratch as simulated flaw for rotation speed of 40 and 10rpm.

Key Words : Diagnosis Technique, Jerk, Piezoelectric Sensor, Bearing, Rotating Machine, Low-Speed Rotation

1. 緒 言

産業機械の運転中の損傷は、製造品の精度を悪化させ歩留まり率を低下させたり、あるいは危険度の高い重工機械などでは大事故につながる場合もあるため、損傷を早期に発見して補修や部品交換し、機械の正常状態を維持管理することが求められる。産業機械の中で特に多用されているのは回転機械であり、軸受などの損傷診断は従来から積極的に研究され実用化もされている^{(1),(2)}。転がり軸受の場合、特に高負荷がかかった状態で運転されると、徐々に軸受面が疲労しフレーキングと呼ばれる剥離損傷が発生する。損傷度合いが過大になると重大な損害が発生する場合もあるため、初期の段階で発見することが強く望まれている。軸受の損傷診断では、軸受に塗布したグリース内の鉄粉濃度を調べる方法などもあるが⁽²⁾、損傷の初期段階での診断には対応しにくい。そのため損傷の早い段階から診断するための方法としては、主に加速度センサを用いて軸受近傍で振動をモニタリングすることで損傷の有無を診断する方法が取られる。転がり軸受のフレーキングなどのような損傷によって発生する異常振動はパルス状振動としてモニタ信号に現れる。この損傷によるパルス状の異常振動を検出することについては、軸の回転速度がある程度高い場合には比較的簡単に実現することができる。しかしながら低速回転の場

* 原稿受付 2012 年 9 月 13 日

^{*1} 正員, 信州大学 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)
E-mail: henmi@shinshu-u.ac.jp

合は損傷に起因する異常振動の大きさが小さいためその検出が難しい。特に、回転数が低だけでなく損傷度合いが小さいときは、加速度センサではまったく検出できなかったり、あるいは定常振動ノイズに埋もれてしまったりするため、検出自体が困難という問題がある。また、検出されたとしても軸受損傷による異常振動であると診断することが難しい。ローラー圧延機械などでは大きな負荷が軸受にかかりながら数十 rpm や数 rpm というごく低速で軸が回転する。軸受の損傷は重大事故につながりかねないため早期に確実に発見することが重要である。このように低速で回転する場合に有効とされる診断法には AE (Acoustic emission) 法があり、8rpm というごく低速回転の場合にも内輪傷の特性周波数に応じた信号が検出できている事例もある⁽²⁾。しかしながら AE 法の場合には、フレーキングの基となる転動疲労クラックの進展時にのみ AE 波が観測されるため、損傷進展の活性期には多く発生するが、安定期には AE 波の発生が少ないという欠点がある。迫ら⁽³⁾は測定帯域 100k~1MHz の AE センサ信号のエンベロープ (包絡線) 波形の周波数スペクトルの発生周波数から損傷を判断しており、低速回転軸受の損傷発生の有無を診断しているが、この場合も信号発生件数が変化したりレベルが増大したりすることを損傷の進展と関連付けている程度にとどまっていて、診断の精度は高くない。そのため低速で回転し高負荷下で運転される危険度の高い生産機械にあつては、実質的にはのべ運転時間数によって早めに部品交換するような対策を取らざるを得ない状況にある。そのためごく低速回転下においても高精度で確実に軸受損傷を診断できる新しい診断方法と検出センサの開発が強く望まれている。

本研究では、圧電式ジャークセンサを用いて、ごく低速回転で運転される転がり軸受の損傷診断が可能な高精度な診断方法を確立することを目的とし、本報では独自に考案した新しい方法を提案し、具体的原理とその有効性の検証を発表する。提案する手法は低速回転に適用できる方法であるが、一定速度であれば低速、高速にかかわらず適用できる方法である。本研究では今のところ低速側は回転数 10rpm まで実験でその効果を確認している。

また本報では外輪に損傷が 1 箇所ある場合を例に取り検証実験を実施しているが、本診断方法は従来法と同様に損傷箇所が軸受の外輪ではなく、内輪や転動体に発生している場合に対しても適用できる方法である。また、その信号処理方法は非常に簡便であるため、万人にとってその原理を理解し易く、かつ将来に実用化するときには簡易で安価な構成にてシステムが実現できる可能性を有するといった利点がある。

2. 転がり軸受の一般的な損傷診断法の考え方と低速回転時への適用の問題点

2・1 転がり軸受の損傷診断の考え方

転がり軸受の軸受面にフレーキングのような損傷が生じている場合、転動体はその損傷部分を通過するときにインパルス状の加振力が軸受に加わるために、軸受が一定速度で回転する場合には、そこで発生する振動は転動体が損傷を通過する時間間隔を周期とする一定時間間隔のパルス状振動となる。ここでパルスではなくパルス状振動と記述しているのは、その振動波形を時間を拡大してみたときに、単一のパルスではなく非常に速い振動数で振動し短時間で減衰するような波形も含んで称しているからである。また本研究ではこの転動体が損傷を通過する時間間隔周期のことを傷通過周期と呼んでいる。外輪や内輪など軸受のどの構成部品に発生した傷に着目しているのかを選択した上で、軸受の形状、軸受に使用されている転動体の数、および軸の回転数がわかれば、転動体にすべりがないうちの傷通過周期は理論的に算出することが出来る。すなわち言い方を変え、診断対象の設計値と運転条件がわかっていれば、測定しなくても傷通過周期の公称値は定まるということである。回転機械の軸受近傍で運転中の振動を計測すると、軸受に損傷がない場合であっても様々な原因によりパルス状の振動が重畳して現れる。例えばリテーナ (軸受の転動体保持器) が運転中に動くことによる不規則な振動や歯車やチェーンなどの伝達機構から発生する振動などである。軸受に損傷が発生しているかどうかを診断する方法の基本的な考え方は、様々な原因によるパルス状振動が重畳した振動検出信号の中に、この傷通過周期に一致した周期的パルス状振動が存在するかどうかを判定することによって診断するというものである。その中の代表的な診断法が次節に示すエンベロープ処理による診断法である。

2・2 エンベロープ処理による一般的な軸受診断の従来法

従来法では非常に低速な回転数の場合には対応できないということを示すために、従来から広く実施されているエンベロープ処理による軸受診断の従来法について簡単に説明する。この診断法は低速回転に対応できる方法

として利用されてきたが⁽⁴⁾、後述するように実質的には損傷度合いがかなり大きい場合か、あるいは回転数がある程度高い場合に有効な方法であり、損傷が小さい上にごく低速で回転するときのような、パルス状振動の励振力が小さい場合には、新たな診断方法が必要となる。なお、エンベロープ処理にはいくつかの方法があるが⁽¹⁾⁻⁽³⁾、ここではより一般に広く採用されている絶対値処理とローパスフィルター（LPF）を組み合わせる方法について説明する。

図1に一般的なエンベロープ処理による軸受損傷診断方法の信号処理法とその流れを示す。この従来の診断法はつぎのとおりである。図1(a)は軸受が損傷している場合の回転中の軸受近傍の振動を計測したときの元波形の模式図であり、時間軸を拡大した図を模している。振動波形には損傷によって発生したパルス状振動以外にも様々なパルス状波形が重畳している。しかしながら軸受損傷に転動体が通過する際にある程度の大きさのエネルギーで軸受が加振されると、それにより発生するパルス状振動は、軸受構造（例えば軸受外輪や内輪）の固有振動数の振動成分を大きく含む振動波形であるため、フィルタ処理によって抽出することができるので、他の原因によるパルス状振動と弁別することができる。図1(b)は(a)の元波形を、軸受構造の固有振動数付近にバンド幅を有するバンドパスフィルター（BPF）によって波形成形処理した結果を表している。これにより軸受損傷によって発生するパルス状振動のみ抽出することが出来る。基本的にこの時点で時間領域の波形観察である程度の診断は出来るが、さらに明確化するために図1(c)のように絶対値処理して一つのパルス状振動の波形密度を高め、その上で傷通過周期に対する周波数（傷通過周波数）に近いカットオフ周波数のLPFにより波形成形をする。すると図1(d)のように傷通過周期の山なりのパルス列が得られる。このパルス列波形を周波数分析すると傷通過周波数を基調とする調和スペクトルが観察され転がり軸受の軸受面に一箇所の損傷があることが診断できる。これがエンベロープ処理による軸受損傷の診断法である。エンベロープ処理は、エンベロープ（包絡線）と呼ばれているものの、この場合は元波形の包絡線を求めているのではなく、単にLPFにより平滑化したパルス列波形を求めているにすぎず、この信号処理法に対する用語としては適切ではないと考えられるが、設備診断の分野では広く用いられているのが現状である。

ここでわかるように、エンベロープ処理において、傷通過周期に一致したパルス状振動があるかどうかを弁別するキーとなる処理はBPFによる波形抽出であり、その基礎としている考え方は軸受損傷に起因するパルス状振動の周波数成分は軸受構造の固有振動数が主体的であるということに依っている。つまりたとえ傷に起因するパルス状振動がセンサで検出されていても、そのパルス状振動の軸受の固有振動による成分のレベルが小さいと有効に機能しないのである。この点について次節にて詳細に説明する。

Fig.1 Flow of the envelope processing

2・3 低速回転軸受に対するエンベロープ処理による損傷診断法の問題点

前節で述べたように、エンベロープ処理による従来法では、軸受損傷を原因とするパルス状振動は、軸受構造の固有振動数成分を主体的に含むためにその周波数を抽出するBPFによって弁別できるという考え方を基礎と

している。振動センサで検出されたパルス状振動に軸受構造の固有振動数成分が主体的に含まれるためには、損傷を転動体が通過するときの衝撃加振力で軸受が十分に振動する必要がある。つまり加振のエネルギーがある程度大きい場合にのみ該当することである。損傷度合いが小さくかつ軸の回転数が低い場合には、その加振のエネルギーが小さい。そのため、通常の加速度センサでは検出が難しい場合も多い。また仮に高感度な振動センサを用いてパルス状振動を検出できたとしても、軸受構造の固有振動成分を主体的に含む振動として検出されない場合もある。このような場合は前節のようなエンベロープ処理による診断法は有効ではない。

本研究では前報⁶⁾において、軸受損傷診断には、従来から多用されている加速度センサよりもジャークセンサを用いたほうが優位であることを検証した。ただし、ジャークは加速度の時間微分であるため、加速度センサとハイパスフィルターを組み合わせることにより、ジャークセンサと同様の機能を実現できる可能性はある。

さらに前報では軸受損傷による異常振動が低速回転時にどのようなものかについて調査し、低速回転での損傷診断が困難であることの本質的な理由を示した。その理由とは次の3点である。

- (1) 検出されたパルス状振動は軸受構造の固有振動数成分ではなく、検出に用いているセンサ構造の固有振動数成分が主体的に現れる。
- (2) 軸受損傷に起因するパルス状振動は周期的に発生するが、振動レベルが小さいため、レベルが一定していないこともある。しかも全てのパルス状振動が検出できずに時折検出漏れが発生することもある。
- (3) 軸受損傷以外を原因とするノイズとしてのパルス状振動が、ほぼ同じレベルで重畳する。

上記の3点は全て損傷による加振力とそのパルス状振動のレベルが非常に小さいことからくる現象である。特に(1)は、通常実施されているBPFを併用した軸受診断の従来法では、損傷度合いが小さくかつごく低速で回転するような条件に対応できないことを示す重要な事項である。通常の転がり軸受の損傷診断では、前述のようにBPFによる弁別を基礎としているため、上記(1)の事実を考えると、損傷レベルの小さい状態での低速回転軸受には対応できないことは明らかである。それにもかかわらず、文献を調査してみると、設備診断の分野の研究者や技術者は、特に上記(1)の事実があることを認識していない方が多いように思われる。損傷のごく初期の段階で診断が必要な場合には、本来の意味での低速回転に対応可能な新しい診断方法が必要である。著者らはこれらの事実に鑑み、転がり軸受損傷を診断するための、従来にない新しい信号処理方法を考案し、その有効性について実験により確認したので、次章にその原理を詳説する。

3. 新しい診断法の原理

図2に今回提案する転がり軸受のための新しい損傷診断法の処理手順と途中経過の処理波形の経過の概念を示す。想定している装置および計測系は次章に示す図3のような構成であり、損傷を診断したい対象軸受の近傍に振動ピックアップセンサ素子を設置しているケースである。診断法の考え方はデジタル信号処理におけるビット演算のANDに類似している。傷通過周期で区分した時間区間の振動センサ出力値を、区分した各起点からの時間毎に乗算していくことによって、傷通過周期に同期したパルスが1つ存在するとその部分の乗算値だけが他の時間部分に比べて大きな値となり乗算結果に1つのピークが現れるというものである。この信号処理によって傷通過周期に同期したパルス状振動の有無を判断できる。これが本提案手法の基本的な考え方である。ただし、実際の振動信号には実際上の問題がいくつかあり、本処理方法を有効にするためにはそれらを克服するための工夫が必要である。

傷通過周期は軸の回転数と転動体の数や外輪と内輪の直径などの軸受の仕様がわかればその公称値は算出することができる。しかし軸受の転動体のすべりや配列間の位置ずれによって実際の傷通過周期は時々刻々その値が多少変動する。軸受の損傷度合いがかなり激しくなったような場合や負荷が異常に大きくなってしまった場合などを除けば、転動体がリテーナによって配列されているときには、基本的にはリテーナと転動体との保持隙間の分だけ、隣接する転動体間の相対位置は変動し、それにより傷通過周期もその分が変動する。そのため傷通過周期の変動に対応しかつ乗算処理で結果が現れるために、変動があっても着目するそれぞれのパルス状振動の影響が、区分時間毎の波形の間で重なり合うことが必要となる。そこで本提案法ではピークホールド回路の放電時の一時遅れ復帰波形を利用することとした。パルス状波形をピークホールド回路に通すと、その出力波形

Fig.2 Process flow of the proposed diagnostic method

は立ち上がりが入力のパルス状振動とともに急峻に立ち上がり、入力波形が0に戻ると出力は設定した時定数による一時遅れ系の応答を示しながらなだらかに0に復帰する。そのため、傷通過周期が多少変動しても、その復帰動作部分の値が他のピークと重なり合うため、乗算した結果が増幅することになり、結果として傷通過周期が変動しても乗算結果にピーク状の波形が現れることになる。

以上の一連の処理を図2とともに手順を説明すると、次のようになる。センサで測定した信号（図2(a)）をピークホールド回路に通し図2(b)の波形を得る。これを傷通過周期ごとに区分する。図2(c)は区分した波形を一つのグラフに重ねて示した図である。なおこの時間区分については特に時間の基準は設けてはおらず、単純にデータの記録開始時点から傷通過周期の時間分毎に区分している。これら各区分波形の同じ時間の値同士を乗算する。その結果が図2(d)である。損傷箇所が1箇所の場合には同図のように区分内に1つのピーク状波形が現れることになる。

なお、本方法ではピークホールド回路を用いてはいるものの、従来法のようにエンベロープ（包絡線）信号を得ようとしているわけではない。パルス状振動を鈍らせるという点については従来法のエンベロープ処理と類似しているが、従来法ではエンベロープ信号を得るのはFFT解析してそのスペクトルの状況から診断しやすくするためであるのに対し、本方法ではタイミングのずれたパルス状波形を重ねさせることを目的として、その復帰時の波形を利用するためにピークホールド回路を利用しており、その意味合いはかなり異なる。その意味で従来のエンベロープ処理とは一線を画すると考えられる。

ところで、乗算処理する際に、1箇所でも0という値があると、その後に大きな値が乗算されても結果は0になってしまうため、実際のピークホールド回路のオフセット調整は若干の正側に設定しておく必要がある。本研究ではピークホールド回路のノイズ幅の値をもとにオフセットを+4mV程度に設定している。また定常振動ノイズや定常的な電氣的ノイズがそのままピークホールド回路に入ると、その影響が各パルス状振動の間の定常的な平坦部においてピークホールド回路の出力結果を隆起させ、結果として乗算結果のピーク波形の先鋭さを欠くことになる。そこでその定常ノイズの影響を除去するために、センサ出力には負側に定常振動幅分程度のオフセットを設定しておくほうが良い。定常振動の振幅は回転数が高くなるほど大きくなるが、本研究で使用了実験装

置を 40rpm で回転させた場合には、その定常振動部のノイズ振幅の値から判断して-0.2V 程度のオフセットに設定している。

また、前節で述べたように低速回転時にはパルス状振動の検出漏れが発生しうるが、本方法は重畳積算処理の回数に対して傷通過周期に同期したパルス状振動がある程度の頻度で検出されていれば、たとえパルス状振動の検出漏れがあったとしても損傷の診断が可能である。この点も本方法の従来法に対する優位点の一つである。

ところでここまでの説明で明らかなように、本診断法は不規則性を有する周期的パルス状信号の抽出法である。そのため傷通過周期に同期したパルス状のノイズ振動がある場合には軸受損傷によるものかどうかは弁別できないことになる。しかしそのような状況が発生することは基本的に偶発的であり、例えば軸受の転動体に他の部品が接触するような状態になってしまったような事故であったり、あるいは軸の回転と傷通過周期とが同期している場合のような特殊な場合であると考えられる。そのため実際上の問題は無いと考える。

さらに本研究の診断法の主対象は前述のように転がり軸受損傷の初期段階での損傷の検出であり、信号処理のために設定した傷通過周期に対して実際の転動体が損傷を通過する時間間隔はリテーナ隙間などに起因した転動体の位置ずれによるランダムな時間変動となる場合が多い。それに対して損傷度合いが進行した場合などは転動体の軌道面とのすべりが大きく生じてくるため、パルス状振動の時間間隔の変動は時間が長くなる方にのみ変化すると考えられる。この場合に本方法を適用すると、設定した信号処理上の傷通過周期に同期せずに区分時間の波形内でパルス発生時間が移動してしまうため、そのままの設定では損傷の存在を診断できないことになる。この点はパルス発生時間が短くなる方にのみ変化する場合も同様である。ただし、このパルス発生時間間隔が設定した初期の傷通過周期よりも長くなるということは、損傷度合いが進行しているという可能性が高いという情報であるので、対応方法を今後検討し将来的には積極的に利用するようにしたいと考えている。

本診断法は単純に傷通過周期に同期したパルス状振動を抽出しているだけなので、回転が高速であっても低速であっても適用できる方法である。本報では低速側で 10rpm まで実験検証したが、実際に実験検証を実施している状況からはさらに低速な回転であっても対応可能であると思われるので、今後検証していきたい。

また現在は検証実験であるため、センサの固有振動数 32kHz で振動する波形をデータとして残すために記録のサンプリング周波数を 100kHz にしているが、有効性が実証されて診断の演算に必要な波形だけを記録するのであれば、ピークホールド回路の出力だけを記録すればよいのと、急峻な立ち上がりを正確に記録する必要もないので、サンプリング周波数はかなり低く設定できると考えられる。振動計測による設備診断では、通常はパルス状振動を検出するために高速サンプリングが要求される。さらに低速回転時には振動波形の取り込み時間も長くなるためデータ量はかなり多くなる。このデータ量の多さが低速回転軸受の損傷診断の技術的困難さを招いている原因の一部であるので、このサンプリング周波数を低下させ、結果としてデータ量を大幅に減少させられるという点は本方法の大きな利点の一つでもある。

4. 検証実験装置

図 3 に本診断法の検証実験に用いた装置の概要図を示す。軸受損傷診断の模擬実験を実施する装置であるので、図の左端に示した DC サーボモータによって、両端を軸受で支持された無負荷の軸を回転させる簡単な装置である。軸受には円錐ころ軸受を正面合せで用いており、図 3 中で軸の右側に描かれた軸受に模擬損傷を施した供試軸受を用いている。また供試軸受側から押さえ蓋によって、軸が滑らかに回転する程度に軸受外輪間に軸方向予圧をかけている。供試軸受近傍のハウジング外面に振動検出用の圧電センサ素子を接着している。圧電センサ素子には市販の電荷出力型加速度ピックアップ素子を用いている。圧電センサ素子に接続するアンプを変更するだけで加速度センサあるいはジャークセンサとして機能させることができるため、同じ型式の圧電素子を 2 個用い、ジャークセンサの計測データに対する比較参考のために、加速度センサとして同時に計測している。

図 4 と表 1 に圧電センサ素子（株）富士セラミックス製、P51C）の写真とカタログ仕様の一部とを示す。本センサ素子はアンプを内蔵していない電荷出力型の汎用加速度ピックアップ素子である。このセンサ素子は供試軸受のハウジング壁に接着剤で固定されている。センサ素子に接続する検出アンプを、チャージアンプとした場合には加速度に比例した電圧出力が得られ、電流アンプとした場合にはジャークに比例した電圧出力を得ることができる。センサ素子の固有振動数はカタログ値で 32kHz であり、第 2・3 節に述べたように軸受がごく低速で回転

Fig.3 Experimental apparatus and measurement system

Fig.4 Sensor element

Table 1 Specifications of sensor element

Type of sensor	Charge output accelerometer
Product company	Fuji Ceramics Corp.
Product number	P51C
Dimensions [mm]	φ13.8 x h25.5
Weight [g]	25
Sensitivity [pC/(m/s ²)]	14
Natural frequency[kHz]	32
Capacitance [pF]	1000

した場合の軸受損傷を原因とするパルス状振動は、この固有振動数を主体的に含む振動として計測される。

ちなみに、センサの固有振動はその固有振動数よりも高い周波数成分を含む加振がないと原理的には励起されない。軸受等の構造系の固有振動は本装置の場合は5～10kHzであるので、この低速回転時に計測されるセンサの固有振動は、軸受構造により励起されたものではないといえる。センサの固有振動で振動が検出される理由は、転動体が軸受傷を通過する際に転がりながら傷に衝突するときのインパルス力が、軸受構造の固有振動以上の周波数成分を含むパルスになり、この高い周波数成分も含むパルス振動が伝播してきてセンサを加振するためではないかと考えられる。

図5と表2にそれぞれ模擬損傷軸受の写真と仕様とを示す。軸受は外輪47mm、内輪20mmの日本精工(株)製の円錐ころ軸受(型式HR30204C)であり、転動体の数は14個である。外輪のころに接触する軌道円錐表面上の一箇所には、損傷を模擬して、軸を含む平面に沿った方向にけがき傷を一本入れている。軸受寸法などの仕様から換算すると隣接する転動体(ころ)の平均間隔は約7.3mmである。また転動体を等間隔に配列するように保持しているリテーナと転動体との隙間は、実測により両側で約0.3mmであるので、リテーナの保持隙間分だけ転動体が回転中に位置変動すると仮定すると、その変動幅は4%強である。本研究では10～200rpmの間で検証実験を実施したが、各回転数に対するこの軸受の傷通過周期を表3に示す。この傷通過周期は、1回転あたりの転動体の損傷部分の通過回数の実測値と回転数から算出している。

5. 実験結果

5・1 提案法の検証結果

提案した軸受損傷の診断方法は回転数の高低に関わらず適用できる。特に回転数が高い場合には、軸受損傷に

Fig.5 Test bearing with scratch

Table 2 Specifications of bearing

Type of bearing	Tapered rolling bearing
Product company	NSK Ltd.
Product number	HR30204C
Diameter of outer ring [mm]	47
Diameter of inner ring [mm]	20
Number of rollers	14

Table 3 Pass flow period

Rotation speed [rpm]	Passing flow period T_0 [s]
200	0.052
40	0.258
20	0.516
10	1.033

よるパルス状振動が大きく安定的に現れるため、基本的に問題なく診断が可能である。そこでここでは低速回転の結果のみを示す。低速回転であるかどうかは相対的な問題ではあるが、重要なことは新しく提案した方法が有効であることを示すことと、設定条件の調整の影響などを明確に示しやすい条件で比較検討することである。そこで一般的な産業回転機械から考えて低速と考えられるということと、かつ比較検討のためにはできるだけ低速と考えられる範疇でも回転数はより高いほうが信号レベルも高く問題が明確化しやすいことから、主として回転数が40rpmの場合について結果を示す。

本方法は、ピークホールド回路の放電の時定数をいくらにすればよいか問題である。ここでは転動体の隣接間隔に対するリテーナとの隙間間隔が、前章で述べたように1個の転動体に対して4%強であることから、概ねこの値に合わせて傷通過周期の±5%相当分を時定数の暫定値とした。具体的には、回転数40rpmに対する傷通過周期 T_0 は0.258sであるので、ピークホールド回路の時定数の暫定値を25msとした。図6にこの条件で実施した検証実験の結果を示す。図6(a), (b)はそれぞれ加速度センサとジャークセンサで同時に計測した振動波形である。ここで加速度センサの出力は直接本診断法には関係ないが、ジャークセンサと振動検出の生波形がどの程度違うのかを比較するために示したものである。これらの図のように特に低速回転時における加速度センサとジャークセンサの出力の違いは明白であり、ジャークセンサのほうが定常振動に対してパルス状振動が明確にあらわれており、その意味でS/N比が高いと言える。図には傷通過周期分の時間間隔を両矢印で示してあるが、加速度センサであってもこの程度の低速回転時には、軸受に設けたけがき傷を原因とするパルス状振動が、定常振動に埋もれている部分が多いながらも程度検出できていると考えられる。そのためセンサ回路のオフセット調整などが多少必要ではあるが、(a)に図示されたような条件で計測された加速度センサの出力信号に本診断法を適用することで損傷の診断が可能であると考えられる。しかしながらいずれの信号を使用するかは本診断法の検証には本質的には関係ないので、ここではパルス状振動の検出が優れているジャークセンサの出力信号に対して本診断法を適用した結果を示すこととする。

図6(c)は(b)に示したジャークセンサの出力信号をピークホールド回路に通した結果である。ジャークセンサの出力に現れていたパルス状振動が、ほぼ等間隔で発生していたものも散発的に現れていたものも、立下りが一次遅れ系の復帰双曲線を示すパルスに置き換わっている。図6(d)は(c)を傷通過周期 T_0 ごとに分割し、横軸に各 T_0 区分した分割の起点からの時間をとって重ねて示したグラフである。図(c)では概ね等間隔で並んでいると思われるパルス状振動が、図(d)に示されるように重ねてみると各パルス状振動の発生のタイミングがそれぞれにずれていることがわかる。図(d)に示された各区分波形を同じ時間タイミング同士で乗算した結果が図(e)である。損傷に

Fig.6 Measurement and diagnostic results for the bearing with one failure rotating at 40rpm

よって発生したパルス状振動の頻度がそれ以外のタイミングで発生していてノイズと考えられるパルス状振動に比較して高いため、乗算結果には、各区分の時間 T_0 に対して、損傷箇所の数に対応する数である 1 個のパルスが現れている。今回は軸受外輪に 1 本のけがき傷を設けたが、 T_0 の周期に対して位相の異なる箇所にはけがき傷を施せばその位相のずれたけがき傷の数だけ最終結果にパルスの数として現れることになり、損傷の数も判定可能である。このことは従来法にはない機能である。本報には掲載しないが、予備実験により傷 2 箇所に対する本診断法の効果を確認しており、損傷が複数箇所にある場合については、さらに詳細に検討した上で、今後発表していく予定である。

ところで図(e)の縦軸は特にその値や単位に意味はないが、図 6 のデータは T_0 の 8 周期分であるので、この場合の単位は $[V^8]$ である。もちろんこの周期 T_0 で区分したできるだけ多くの数の波形を乗算したほうが高い S/N 比で結果を得ることができるが、 T_0 何周期分の乗算値を取ると図(e)のような明確な結果が表れるかは、損傷を原因とするパルス状振動の検出の頻度と大きさに依存する。何回か条件を変えて実験を進行させた状況から経験的に判断すると、主観的ではあるが次に示す 10rpm のときの検証結果が 5 周期分の乗算結果であることも考えて、最低 T_0 の 5 周期分程度の乗算であればよいと思われる。

今回の一連の実験的検討でもっとも低速であった回転数 10rpm の診断結果を図 7 に示す．この場合のピークホールド回路の時定数は傷通過周期 $T_0=1.033\text{s}$ の約 10% に相当する 100ms に設定している．この結果は T_0 が 5 周期分の約 5s の振動波形を処理している．現在は検証実験であるがゆえに，ジャークセンサや加速度センサの元波形に現れる約 32kHz のパルス状振動を捕らえねばならず，波形記録のサンプリング周波数を 100kHz にしている．そのためデータ数が 5 秒間で 1ch あたり 50 万点もあり，現在当方で論文作成などのために常用している現有の簡易なグラフ描画ソフトでは一括では取り扱えず，分割して描く必要があるため，ここではジャークセンサで計測した振動の元波形等は割愛し，最終結果の乗算波形のみ示す．図 7 の結果から， T_0 の区分時間に対してけがき傷の数に相当する 1 箇所のパルスが現れていることがわかる．

以上により本診断法の有効性が示された．暫定的にピークホールド回路の復帰の時定数を，リテーナ隙間による転動体の位置間隔変動の振れ幅である約 10% に相当する値（40rpm で 25ms，10rpm で 100ms）に設定したが，これが適切な値であったと言える．次節ではピークホールド回路の時定数が大きすぎる場合と小さすぎる場合の結果に与える影響について検討する．

Fig.7 Multiplication result for 10rpm rotation speed

5・2 ピークホールド回路の復帰時定数の影響

前節では使用している円錐ころ軸受の 40rpm で回転させた場合の傷通過周期 T_0 に対して約 10% である 25ms に，ピークホールド回路の復帰時の時定数を調整し，損傷の診断結果として良好な結果が示され，設定した時定数は適切な値であった．ここでは時定数の設定が大きすぎる場合と小さすぎる場合とでどのような結果になるかを示す．図 8 と図 9 は軸の回転数が 40rpm の場合で，ピークホールド回路の復帰動作の時定数を，適切値である 25ms の 2 倍および 2 分の 1，すなわち 50ms と 12.5ms にそれぞれ設定した場合の結果である．両図においていずれも，(a) はジャークセンサの計測結果，(b) はそれらに対するピークホールド回路の出力波形，および (c) はそれら (b) の波形を傷通過周期で区分した波形間で乗算値を計算した結果である．供試軸受は同じものを使用しており，外輪に設けたけがき傷は 1 箇所であるにも関わらず，いずれも 1 つではなく複数のパルス状波形が表れている．

ピークホールド回路を用いているのは，前章で解説したように転動体の回転中の滑りやリテーナとの隙間分だけの位置ずれなどによって発生すると考えられる傷通過周期の変動に対応するための処置である．図 8 のように時定数が長すぎる場合については，ピークホールド波形の復帰動作部分が十分に低い値まで収束し切らないうちに，損傷以外の原因によるノイズパルスが入るため，結果としてノイズパルスの影響を低減できず複数のピークが表れたのだと考えられる．また，図 9 のように時定数が小さすぎる場合については，ピークホールド回路の復帰が早すぎるため，傷通過周期の変動に対応しきれず，同じ軸受損傷を原因として発生しているパルスが時間変動して現れたパルスであるにもかかわらず，別の軸受損傷によるパルスがある場合のように複数のパルスに分かれて乗算結果に現れてしまったものと考えられる．いずれにしても，ピークホールド回路の復帰動作の時定数の設定は適切な値があり，今回の実験検討の範囲では，隣接する転動体の公称間隔に対するリテーナと転動体の隙間分の割合に相当する，傷通過周期の 10% 程度に時定数を設定するときに適切であった．ただし，この時定数の適切値とリテーナ隙間との関係は，恐らく偶然によるものとも考えられるので，一般性のある指標を今後検討する必要がある．

Fig.8 Result for 50ms time constant of the peak-hold circuit

Fig.9 Result for 12.5ms time constant of the peak-hold circuit

6. 結 論

低速回転の軸受損傷を診断することはこれまで非常に困難であった。低速回転時における振動信号の特長と、診断が困難であるという理由の本質と、そしてジャークセンサを用いることの優位性を示した前報⁽⁵⁾の結果を基礎に、ジャークセンサを用いた、ごく低速な回転数で回転する転がり軸受にも対応可能な新しい損傷診断法を提案し、その有効性を実験により検証した。本論文の内容と得られた結果を箇条書きでまとめると以下のようになる。

- (1) 低速回転軸受の損傷診断に用いられる代表的なエンベロープ処理による従来法について概説し、その本質的な問題点が、軸受構造の固有振動に基づいたバンドパスフィルタによる弁別が、損傷が小さくかつ低速で回転する場合にはできないことにあることを、前報で示した実験結果の事実に基づき指摘した。その上で従来にない新しい診断法が必要であることを示した。
- (2) 傷通過周期ごとに区分した波形間での乗算処理の積算により傷通過周期に同期したパルス状振動の抽出をするという、軸受損傷の新しい診断方法を提案し、その原理を詳説した。そして本方法の利点や制限などについても述べた。
- (3) 実機を用いた検証実験により本手法の有効性を示した。損傷を模擬したけがき傷を外輪の1箇所に施した転がり軸受を用い、40rpm および 10rpm という低速回転において外輪一箇所の損傷の存在が診断できることを示した。
- (4) 本診断法の中で、転動体の位置ずれやすべりによって生じる傷通過周期の変動に対応するためピークホールド回路の復帰動作を用いているが、その時定数の設定は大きすぎても小さすぎても良好な結果は得られないことを示した。その適切値は、今回使用した供試軸受の場合には、傷通過周期に対する比率が、軸受の転動体間隔に対するリテーナと転動体の隙間間隔の比率（具体的には約 10%）に相当する分の時間であった。ただし時定数の適切値の一般的な設定法については今後に検討が必要である。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究(C)、課題番号 23560284）、および公益財団法人三豊科学技術振興協会研究助成金によって助成された。記して謝意を表す。また、株式会社富士セラミックスの稲葉秀弘氏、吉留雄二氏ほかの皆様、IMV 株式会社の柿原正治氏、小林敏之氏ほかの皆様、三重大学の陳山鵬教授には本研究の初期の段階でご助言とご協力を頂いた。さらに元信州大学大学院生の黒岩政樹氏には在学時に本研究の実験とデータ整理を補助して頂いた。各位とも深く感謝する。

文 献

- (1) Robert B. Randall, Jerome Antoni, "Rolling element bearing diagnostics - A tutorial", *Mechanical Systems and Processing*, Vol.25 (2011), pp.485-520.
- (2) 設備管理技術事典編集委員会編, 設備管理技術事典 (2003), pp.453-588. 産業技術サービスセンター.
- (3) 迫孝司, 吉江修, "AE エンベロープ波形を用いた超低速転がり軸受診断法", 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol. 132, No. 4 (2012), pp. 501-509.
- (4) 迫幸司, "低速転がり軸受の診断技術", 検査技術, Vol. 2, No.3 (1997), pp. 30-37.
- (5) 辺見信彦, 高木良祐, "ジャークセンサによる転がり軸受の損傷診断に関する研究 (第1報, ジャークセンサ検出による低回転時の振動信号の特長)", 日本機械学会論文集C編, 掲載決定.