

ジャークセンサによる低速回転転がり軸受対応の新しい高信頼性損傷診断法の研究

研究代表者 信州大学工学部機械システム工学科 辺見信彦

1. 緒言

ジャークとは加速度の微分値であり、運動の変化を表す一物理量である。研究代表者は圧電素子を用いてジャークを測定する簡易なジャークセンサを考案し(1)、高感度化素子の開発などを実施してきた(2)。このセンサは、通常の振動センサである加速度センサに比べ、低周波数帯域の振動成分の影響を抑制し、高周波数帯域で感度が高いという特徴があるため、転がり軸受の異常振動の検出などに適している。

一方、回転機械の振動を加速度ピックアップで計測して異常を診断することは古くから行われており、実用化もなされている(3),(4)。転がり軸受の損傷の有無を診断する場合、比較的高速に回転する場合や、損傷度合いが大きめの場合には有効に診断可能であるが、低速回転の場合や、損傷が小さい場合には適用できないことが多い。低速回転機械では異常診断が難しいのである。しかしながらこれまでいくつもの異常診断法が提案されてはいるものの、低速回転時の異常診断が困難な理由の本質を明確に詳説した例は少ない。従来検討されている診断方法は信号を特徴付けることに専念しており、低速回転の際に検出される信号にどのような特徴があって、損傷診断がなぜ難しいのかということの本質を十分に捉え切れていないように思われるのが現状である。

本研究ではごく低速で回転している転がり軸受の損傷の有無を診断できる実用的な測定システムを開発することを最終的な将来目標とし、ここでは、まずは低速回転時に振動センサで計測される信号出力の特徴を示し、加速度センサに対するジャークセンサの優位性を示す。次に独自に考案した軸受診断法の原理を説明し、さらにその手法をリアルタイム処理するために作成した処理システムについて解説する。最後に転がり軸受の外輪と転動体に傷がある場合の診断結果を示し、本手法およびシステムの有効性を検証した結果を示す。

2. 実験装置の概要

はじめに本研究で製作した実験装置構成の概略について説明する。図 1 に実験装置の構成を図示する。実験装置は両端を軸受で支持された無負荷の軸を DC サーボモータによって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 1 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式ジャークセンサ素子

を接着している。

ジャークセンサの出力をピークホールド回路で波形成形し，レコーダに記録する．取り込んだデータはパソコンにより演算処理するか，今回新たに製作した DSP を用いたりアルタイム処理システムで損傷診断のための演算処理を実施する．

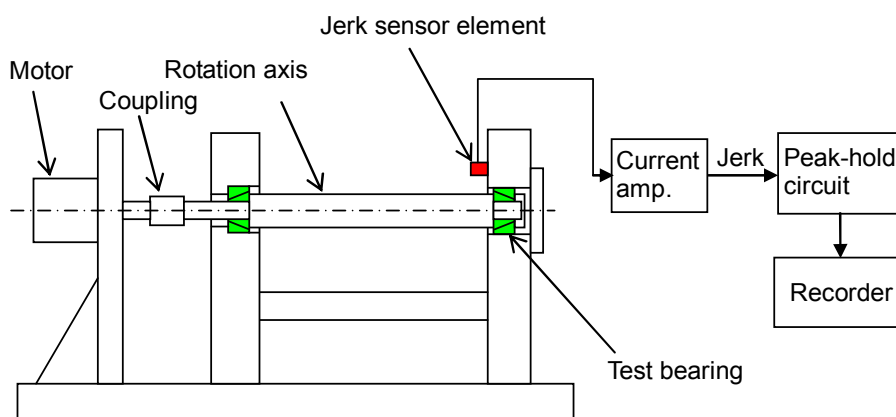
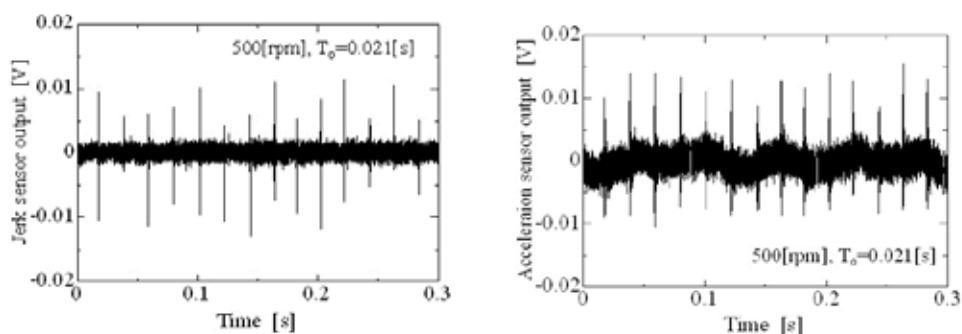


図1 転がり軸受の損傷診断法検討のための実験装置構成の概略

3. 低速回転時の軸受損傷振動信号の特徴

3.1 回転数が高い場合の信号

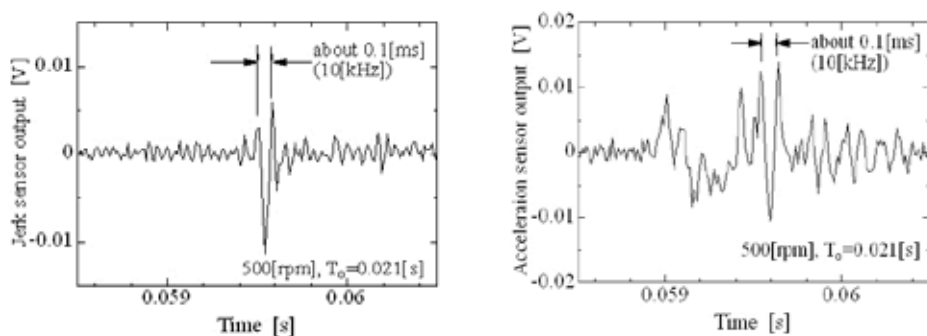
図2は軸受の外輪にけがき傷をつけた円錐転がり軸受を500rpmで回転させたときの，軸受近傍で計測した(a)ジャークセンサと，(b)加速度センサの振動検出波形である．また図3は図2の加速度センサ出力波形の横軸を拡大した図である．500rpm(1回転0.12s)における傷通過周期は0.021sである．ここで傷通過周期とは，転動体が傷を通過するごとに発生するパルス状振動の周期のことである．加速度センサの出力に全体的にふらついた振動波形が現れてはいるものの，いずれのセンサ出力においても500rpmのときの傷通過周期にほぼ一致した周期のパルス状振動波形が明確に現れている．このように回転数が速い場合にはいずれのセンサであっても軸受損傷に起因すると思われる周期的なパルス状振動を容易に検出することができる．また時間軸を拡大した図3を見ると，図2では単一のパルスに見えた信号は，ジャークセンサも加速度センサも約10kHzの振動成分を含む過渡振動信号であることがわかる．これは軸受外輪に施したけがき傷を転動体が通過するときの衝撃力で軸受構造の固有振動が励起されてセンサにより検出されたものと考えられる．このことから，高速回転時は軸受構造系の固有振動数を抽出する周波数帯域のバンドパスフィルタを用いた弁別とエンベロープ処理の組み合わせによる従来法によって，容易に軸受損傷を診断できることが類推できる．



(a) ジャークセンサによる出力

(b) 加速度センサによる出力

図 2 回転数 500rpm に対する損傷軸受近傍の振動検出信号



(a) ジャークセンサによる出力

(b) 加速度センサによる出力

図 3 図 1 の時間軸を拡大した図

3.2 回転数が低い場合の信号

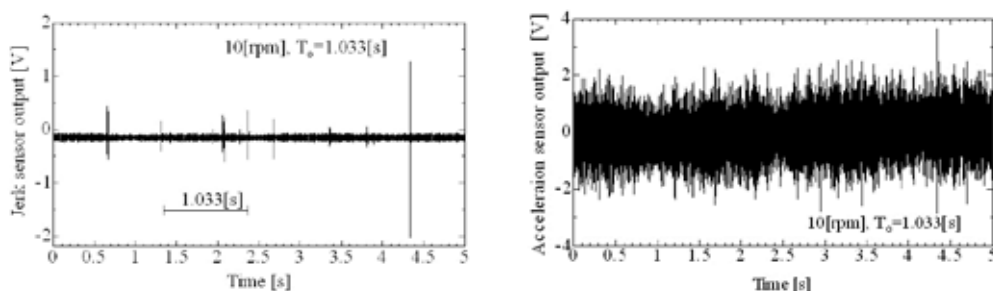
図 4 に軸の回転数が 10rpm の場合の、(a)ジャークセンサと、(b)加速度センサの出力波形を示す。回転数が低くなると振動レベルが低下し、ジャークセンサと加速度センサのいずれにおいても定常振動とパルス状振動がともに小さくなる。そのため各センサからの出力は図 2 と図 3 に示した回転数 500rpm のときよりも増幅してある。500rpm のときに対する 10rpm のときのセンサ出力電圧の感度はジャークセンサで 100 倍、加速度センサで 316 倍にしている。図 4 を観察すると、同時計測であるにもかかわらず、加速度センサにはパルス状の振動と定常振動の大きさが同じ程度であり、軸受損傷によるパルス状振動が存在するのかどうか判断できない状況である。それに対してジャークセンサの出力は定常振動信号に比較してパルス状振動の信号レベルが大きく現れている。

また回転数 10rpm における傷通過周期は 1.033s であり、目視によっても転動体のすべりが無いことを確認している。しかし図 4(a)のジャークセンサの出力信号には傷通過周期で発生しているパルスに加えて、傷通過周期の時間間隔に一致しない時間でのパル

スもまた同程度の頻度と大ききで観察されている。この原因は軸受損傷以外の原因による振動パルスの重畳であると考えられる。回転数が低くなり軸受損傷によるパルス状振動のレベルが低下したことにより、軸受損傷以外の原因、例えばリテーナの動きなどによる散発的な微弱パルス振動や軸受以外の部分で発生した振動などが相対的に大きくなり観察されているものと考えられる。また図示した 5 秒間では、傷通過周期の変動を考慮すると 5 ないし 6 個のパルス状振動が観察されるはずであるが、ジャークセンサの出力信号には傷通過周期の時間間隔でのパルスは 4 箇所に見られ、やや少ない。この原因は、軸受損傷によるパルス状振動のレベルが小さすぎてセンサによって検出できなかったものと考えられる。つまり、軸受外輪に施したけがき傷を転動体が通過するときの衝撃力が、低速回転ゆえに非常に小さくなり、結果として発生する振動も小さいため、ジャークセンサであっても全ての転動体の傷通過時の周期的振動を感知できずに検出漏れが発生するからと考えられる。ここに挙げた 2 つの原因、すなわち軸受損傷以外の原因によるパルス状振動が同じレベルで重畳することと検出漏れが発生することとの 2 点は、軸受損傷の診断と損傷による振動の検出の困難さを示すものであり、低速回転時の損傷診断が困難であることの主要原因の一つである。

図 5 には図 4 の時間軸を拡大した図を示す。図 4(a)で観察された上述の傷通過周期で発生している 4 つのパルスのうちの最初のパルスの部分 (1.32 秒付近) を拡大している。振動波形の拡大調査は、図 4(a)に観察される全てのパルス状振動波形の時間タイミングに対して実施したが、基本的に 1.32 秒付近のパルス状波形と同じ結果であった。この時間軸を拡大した図を観察すると、まず図 5(a)からジャークセンサ出力のパルス状振動が約 33kHz の主振動が 3kHz のうなりを伴って発生していることがわかる。うなりの原因は不明であるが、この 33kHz はピックアップ素子のカタログ値から判断して、センサ自身の固有振動である。さらに図 5(b)から、ジャークセンサ出力よりも信号レベルは小さいものの、加速度センサにおいても対応する時間にセンサの固有振動と思われる約 33kHz の過渡信号が検出されている。ただし、加速度センサ出力には約 2kHz の定常振動が大きく重畳しており、パルス状振動を抽出するにはフィルタ処理が必要であろう。

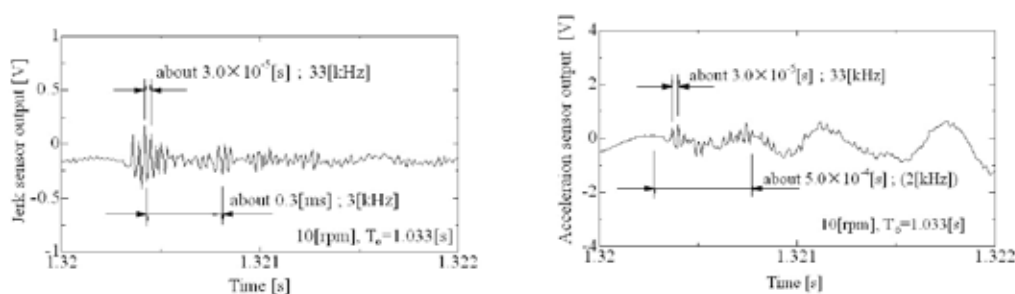
前述のように、低速回転時に検出されるパルス状振動のセンサ信号はセンサ自身の固有振動数が主体であり、センサの固有振動はその発生原因に関わらずすべてのパルス状振動に含まれる。本研究ではバンドパスフィルタを用いないで弁別するための、従来法とは異なった考え方の診断アルゴリズムを考案した。



(a) ジャークセンサによる出力

(b) 加速度センサによる出力

図4 回転数 10rpm に対する損傷軸受近傍の振動検出信号



(a) ジャークセンサによる出力

(b) 加速度センサによる出力

図5 図3の時間軸を拡大した図

4. 損傷診断アルゴリズム

図6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第2章に示した図1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。しかし実際には軸受の転動体のすべりが無い場

合であっても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するので、傷通過周期は変動する。そのため傷通過周期の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。

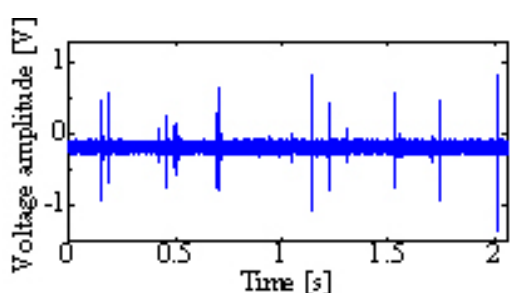
以上の一連の処理を図 5 とともに手順を説明すると、次のようになる。センサで測定した信号 (図 6(a)) をピークホールド回路に通し図 6(b)の波形を得る。これを傷通過周期ごとに区分する。図 6(c)は区分した波形を一つのグラフに重ねて示した図である。異なる区分波形であることがわかるように区分ごとに色を違えて示してある。なおこの時間区分については特に時間の基準は設けてはおらず、単純にデータの記録開始時点から傷通過周期の時間分毎に区分している。これら各区分波形の同じ時間の値同士を乗算する。その結果が図 6(d)である。損傷箇所が 1 箇所の場合には同図のように区分内に 1 つのピーク状波形が現れることになる。

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+数 mV 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、本研究で使用した実験装置を 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。

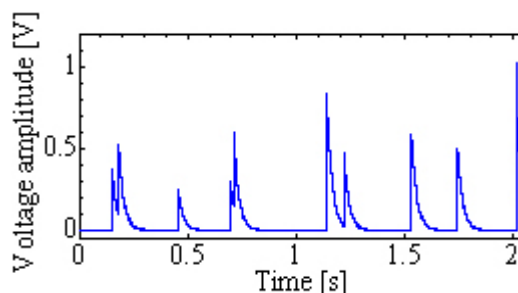
また、前節で述べたように低速回転時にはパルス状振動の検出漏れが発生しうるが、本方法は重畳積算処理の回数に対して傷通過周期に同期したパルス状振動がある程度の頻度で検出されていれば、たとえパルス状振動の検出漏れがあったとしても損傷の診断が可能である。この点も本方法の従来法に対する優位点の一つである。

さらに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

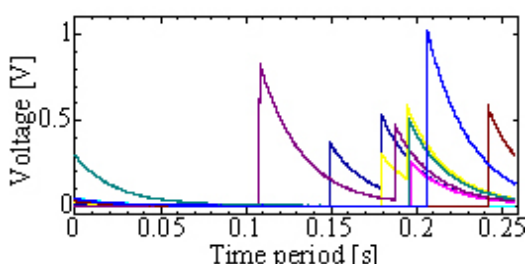
タとして残すために記録のサンプリング周波数を 100kHz にしているが，診断にはピークホールド回路の出力だけを記録すればよいのと，急峻な立ち上がりを正確に取り込む必要もないので，サンプリング周波数はかなり低く設定できる．振動計測による設備診断では，通常はパルス状振動を検出するために高速サンプリングが要求される．その上低速回転時には振動波形の取り込み時間も長くなるためデータ量は膨大になる．このデータ量の多さが低速回転軸受の損傷診断の技術的困難さを招いている原因の一部であるので，このサンプリング周波数を低下させ，結果としてデータ量を大幅に減少させられるという点は本方法の大きな利点の一つでもある．



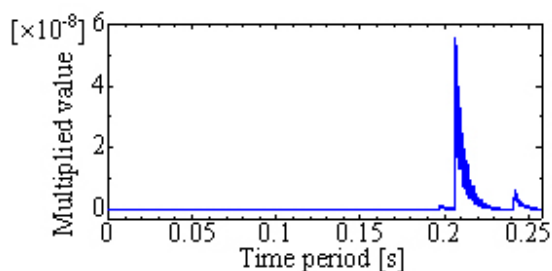
(a) 損傷軸受近傍の振動波形の例



(b) ピークホールド回路で成形した波形



(c) 傷通過周期ごとに時間区分した波形の重ね合わせグラフ

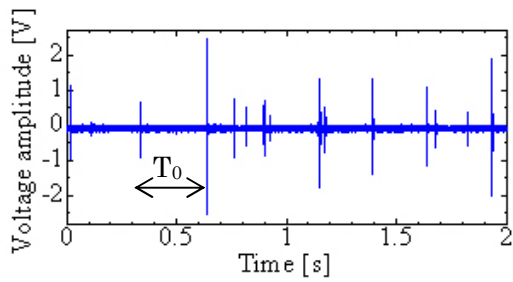


(d) 区分波形の時間ごとの乗算処理結果 (診断結果の波形)

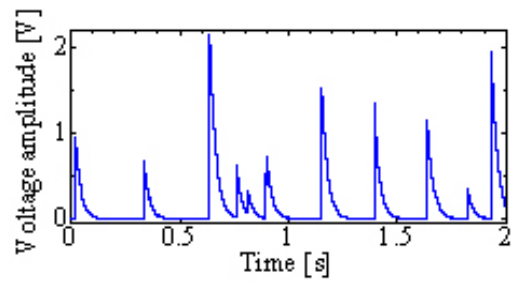
図 6 提案した損傷診断法の処理手順

5. 外輪損傷と転動体損傷に対する検証

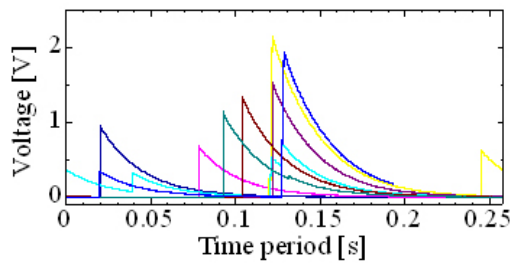
図 7 と図 8 は，それぞれ軸受外輪に 1 ヶ所の傷を入れてある場合と軸受の一個の転動体の一か所に傷を入れてある場合の診断のための信号波形である．軸の回転数はともに



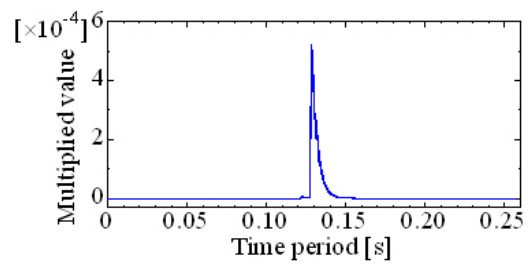
(a) ジャークセンサ出力



(b) ピークホールド回路出力

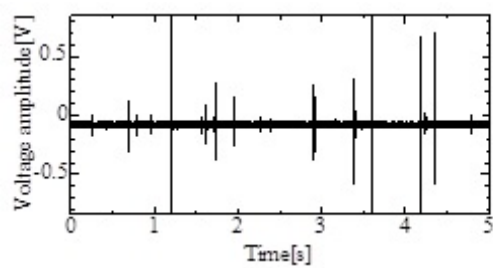


(c) 傷通過周期ごとの時間区分波形の重ね合わせ

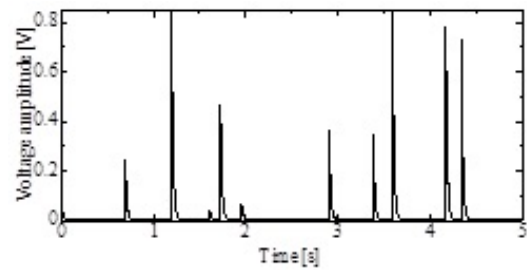


(d) 乗算処理結果

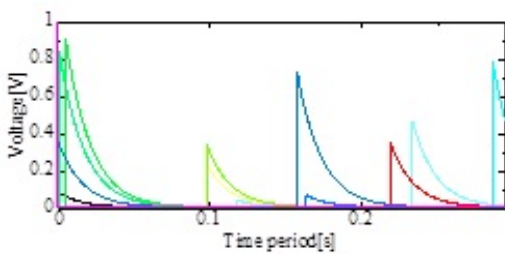
図7 外輪の一方所に傷がある場合の振動波形と演算結果 (回転数 40rpm)



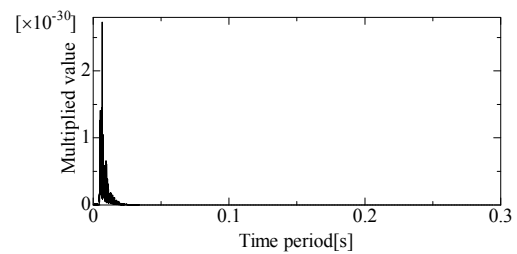
(a) ジャークセンサ出力



(b) ピークホールド回路出力



(c) 傷通過周期ごとの時間区分波形の重ね合わせ



(d) 乗算処理結果

図8 1個の回転体の一方所に傷がある場合の振動波形と演算結果 (回転数 40rpm)

40rpm である。この回転数での傷通過周期は、外輪両図ともに(a)がジャークセンサの出力信号、(b)がピークホールド回路に通した信号波形、(c)が(b)の波形を傷通過周期ごとに時間区分してそのすべての区分波形を重ねて描いた波形群、(d)が(c)の一つ一つの波形の同じ時間タイミングで乗算処理した結果の波形である。使用した軸受において外輪と転動体に傷がある場合の 40rpm のときの傷通過周期 T_0 は、前者が 0.258s、後者が 0.294s である。外輪の場合は隣接する転動体が通過する時間周期であるが、転動体の場合は外輪と内輪にそれぞれ転動体の傷が当たるときに振動が発生するので、転動体の回転数の 2 倍にあたる周期が傷通過周期となる。

図 7、図 8 ともに最終結果の(d)の波形を見てわかるように、傷通過周期で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 7(c)は(b)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。この図においても異なる区分波形であることがわかるように区分ごとに色を違えて示してある。図(b)では概ね等間隔で並んでいると思われたパルス状振動が、図(c)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(c)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(d)である。損傷に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。

6. リアルタイム処理の構成と適用結果

これまでは、回転時に検出したジャークセンサの振動検出データを取得した後に、パーソナルコンピュータ上でオフライン処理により前節で述べた軸受損傷診断アルゴリズムの信号処理を実施していた。実用化に向けた検討の一環として同信号処理をリアルタイムで実施するためのシステムを構築した。図 9 に実験装置と信号処理システムの構成を図示する。実験装置は図 1 に示したものと同じである。ジャークセンサの出力をピークホールド回路で波形成形し、DSP ユニット (s-box) により傷通過周期ごとに取り込んだ時間波形の演算処理を実施する。DSP ユニットでの信号処理のプログラムは C 言語を用いてパーソナルコンピュータ上で開発し、DSP に移植してリアルタイム処理を実現する。プログラムの開発には解析処理ソフト MATLAB/Simulink 等も検討に併用した。傷通

過周期の時間長さごとの波形データを乗算処理し、さらに乗算結果を保存するため、その処理演算にかかる時間以上のインターバルでピークホールド回路出力信号を取り込まねばならない。傷通過周期の3つ分の時間をインターバル時間に設定した。またサンプリング周期はピークホールド回路の波形を取り込むだけなので、ある程度遅くても構わない。ここでは軸の回転数が40rpmでは2.5kHzに設定している。

図10に本リアルタイム信号処理システムにより計測し信号処理した乗算結果波形を示す。回転数が40rpmのときの結果で、同図の(a)が軸受外輪に1ヶ所の傷を入れてある場合、(b)が一個の転動体の一か所に傷を入れてある場合の診断結果の波形である。ともに1ヶ所のパルス状波形が抽出されており、リアルタイム処理システムでの演算が成功していることを示している。

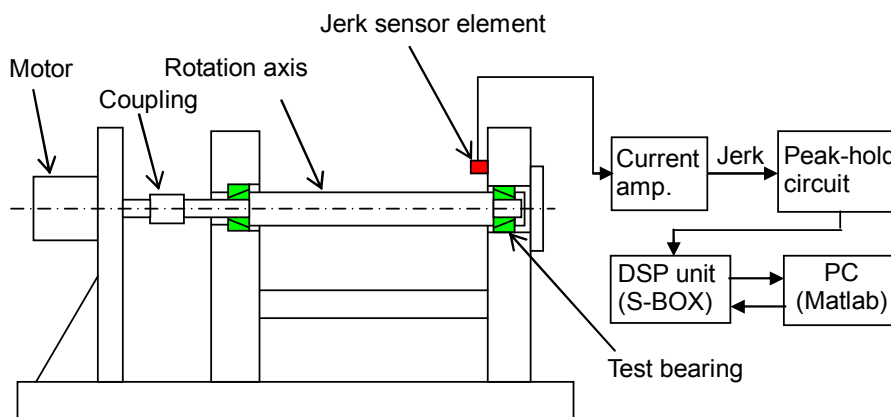
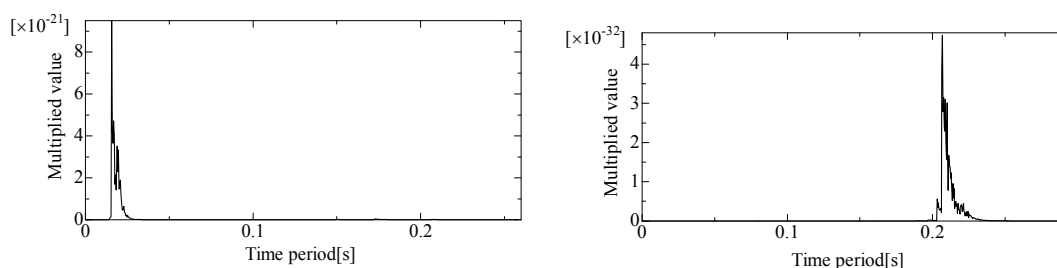


図9 実験装置とリアルタイム診断のための信号処理ハードウェアの構成



(a) 外輪に傷がある場合

(b) 転動体に傷がある場合

図10 リアルタイム演算システムによる診断結果波形 (40rpm)

7. まとめ

損傷した転がり軸受が高速回転する場合と低速回転する場合の振動波形の特徴を示し、低速で回転する場合の特殊性と従来法の適用が困難であることを示した。その上で、低

速回転軸受の損傷が診断可能な新しいアルゴリズムを考案し、その有効性を示した。軸受の外輪に損傷がある場合と、転動体に損傷がある場合について適切に診断が可能であることを示した。さらにその信号処理アルゴリズムをリアルタイムに実施するためのシステムを構築し、その有効性を確認した。リアルタイム処理が可能になったため、さらに種々の条件下での試行や検討が容易になったので、今後はより広範囲の条件について調査検討し、実用化に向けた検討を遂行する予定である。

謝 辞

本研究は公益財団法人 JFE21 世紀財団の技術研究助成の援助を受けて実施され、特に転動体損傷事例に対する提案診断法の適用および有効性の検証と、リアルタイム処理システムの実現に重点を置いてその目標を達成することができた。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- (1) Henmi, N., Ikeda, K., Akashi, S., and Tanaka, M., "A study of a novel piezoelectric jerk sensor", Proceedings of the 1st International Conference on Positioning Technology, (2004), pp. 333-334.
- (2) 辺見信彦, 吉村一生, 田中道彦, 山木宗人, "圧電式ジャークセンサ — 高感度試作品の性能 —", 自動車技術会論文集, Vol. 41, No. 2 (2010), pp. 425-430.
- (3) 宮崎容治, 土井克彦, 小松重之, 鷲沢忍, 押谷侃, "転がり軸受の異常診断装置の開発", 川崎製鉄技報, Vol.13, No.3 (1981), pp.451-469.
- (4) Robert B. Randall, Jerome Antoni, "Rolling element bearing diagnostics - A tutorial", Mechanical Systems and Processing, Vol.25 (2011), pp.485-520.