ウェーブレット解析によるエレベータワイヤロープの損傷検出

兼 田 昌 子*・川 田 明*・林 重 雄*・徳 井 一 雄**

Defect Detection of Elevator Wire Rope by Using Wavelet Analysis

Masako KANEDA*, Akira KAWATA*, Shigeo HAYASHI* and Kazuo TOKUI**

The rope tester for elevator wire rope detects pulse signal induced by magnetic leakage flux from defected part, such as breaking of strand. At the same time, noise is induced by variation of magnetic leakage flux, due to vibration of wire rope.

In this paper, the data processing method using wavelet transform is proposed to detect pulse signal from the noisy data. The characteristics of pulse signal from defected part and noise are made clear by analyzing measured data using multiresolution decomposition based on Haar basis. The threshold value for diagnosis is set up based on these results and diagnosed if the wire rope has defect part or not by the threshold value. The effectiveness of the proposed method is confirmed by comparing the results of diagnosis by this method with the result of visual check of inspector. It is expected to replace the data processing work by visual check with the automatic processing.

Key Words : wavelet, multiresolution decomposition, pulse signal, noise, detection of defect

1. はじめに

近年、エレベータの設置台数が増加し、今後老朽化したエレベータが増加することが予測される。これにともない、保守点検業務の重要性和負担がこれまで以上に増すことが予測される。検査員の負担を軽減するために、エレベータの保守点検業務の1つであるワイヤロープの損傷検出を自動的に行うデータ処理法の確立が望まれている。

現在、エレベータのワイヤロープの素線断線や局所的な摩耗などの検出には、ロープテストを用いる方法がとられている。これは電磁石によってワイヤロープを磁化し、損傷部分を漏れ磁束として検出するものである¹⁾。損傷部分はパルス状信号を発生する。このとき、ワイヤロープの踊りなどによる磁束漏れ変化が雑音となり、パルス状信号と雑音が混ざり合う。この波形データを検査員が目視で点検し、大きなパルス状信号を、損傷の可能性が高い部分として選別し、さらに、ワイヤロープのその箇所を目視および触診することによって損傷部分の検出を行なっている。

損傷部分のデータを自動的に検出するために、ARモデルを用いた短時間スペクトル推定や、ゼロクロス法での診断が検討されている²⁾³⁾。ARモデルを用いた短時間スペクトル推定は、データ列を分割してその区間ごとにパワースペクトル密度を求めて診断する方法である。パルス状信号は非定常信号であり区間内での平均パワーが小さいため、信号の確実な検出が困難である。また、ゼロクロス法での診断は、平均値を軸としてデータがこの軸と交差してからつぎに交差するまでの時間を測り、その時間長で診断を行う方法である。損傷部分を検出することができるが、雑音を損傷部分として誤って検出してしまうことが多い。また、両者においてシミュレーションデータでの診断はされているが、実測データでの診断はされていない。

本論文では、非定常信号の解析に有効なウェーブレット変換^{4)・11)}を用いて実測データでの損傷部分の検出を行う方法を提案する。今回、FFTではなくウェーブレット変換を用いたのは、FFTでは周波数解析しかできないのに対して、ウェーブレット変換では時間(位置)解析と周波数解析ができるからである。FFTで解析すると、損傷信号のような非定常信号は平均化されてしまうが、ウェーブレット変換では各位置における周波数解析ができ、損傷信号の検出に有効である。実測データをウェーブレット解析するにあたっては、Mallatの発案した多重解像度分解¹¹⁾を用いて、ハール基底により解析する。その解析結果から、損傷部分のパルス状信号と雑音の特徴を捉え、それをもとに両者間のしきい値を設定す

* 関西大学工学部 吹田市山手町 3-3-35

** 三菱電機ビルテクノサービス(株) 東京都荒川区荒川 7-19-1

* Faculty of Engineering, Kansai University, Suita

** Mitsubishi Electric Building Techno-Service Co., Ltd, Arakawa-ku, Tokyo

(Received March 17, 1997)

(Received June 18, 1998)

る。これを診断基準として損傷部分の有無を判断し、目視による診断結果と照合することによって、この手法の有効性を明らかにする。

2. 損傷部分の測定原理と処理の流れ

磁化されたワイヤロープの損傷部分は、磁気双極子とみなすことができる。損傷部分には漏洩磁束が発生する。この磁束が、ロープテストのプローブに微小な電圧を発生させる。測定原理を Fig.1 に示す。

Fig. 1 Principle of measurement

素線断線や摩耗などによる損傷が大きいほど、漏洩磁束は大きくなり信号電圧も大きくなる。この電圧を増幅し、大きなパルス状信号を損傷として検出する。電圧が大きくなると増幅器の飽和のために歪んで、Fig.2 に示す矩形波のような形になる。矢印で示した部分が損傷信号である。検査員はペンレコーダの波形を目視で点検し、「損傷部分のパルス状信号は大きい」との判断基準のもとに、損傷部分を検出する。測定装置の接続を Fig.3 に、診断の流れを Fig.4 に示す。

Fig. 2 Measured waveform of detected voltage

3. 実測データ

データレコーダによって記録している測定データを再生する。再生の際、エイリアシングを防止するため、データを 500 [Hz] の低域通過フィルタに通した後、サンプリング周波数 1 [kHz] で A/D 変換を施す。実測したロープの本

Fig. 3 Measuring equipment

Fig. 4 Flow of diagnosis

数は4本、ロープ1本あたりの測定時間は約3分(データ数168,000個)である。

検査員がペンレコーダの実測波形を目視で点検し確認した結果、ロープ番号2のワイヤロープに3箇所の損傷部分が発見された。また、ロープテストをロープに押し付ける際の押し付け度合いによって、データがどのように変化するかを見るために、ロープ番号2について、押し付け度合いを変えて測定を行った。全測定時間帯の波形と、それらの損傷部分の拡大波形を Fig.5 に示す。Fig.5(a) は通常どおりロープテストをしっかりと押し付けて測定したもの、Fig.5(b) はロープテストの押し付け度合いが弱い状態で測定したものである。また、損傷信号 a1 と b1, a2 と b2, a3 と b3 は同じ損傷部分から発生している。押し付け度合いが弱いと損傷部分のパルス状信号の出力が弱くなり、雑音レベルは高くなっている。

Fig. 5 Measured waveform of detected voltage

4. ウェーブレット変換による実測データの分析

4.1 分析に用いたウェーブレット変換

直交ウェーブレットであるハール基底を用いて離散データの多重解像度分解を行う。いくつかのウェーブレット関数について

Fig. 6 Basic function of Haar

て実測データの解析を試行した結果、損傷部分のパルス状信号に対して検出感度が良く、計算が簡単な Fig.6 に示すハール基底を用いることにした。

ハールのスケール関数 ϕ とマザーウェーブレット ψ は次式で定義される。

$$\phi(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < 1 \\ 0, & \text{その他} \end{cases}$$

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq x < 1 \\ 0, & \text{その他} \end{cases} \quad (1)$$

アナログ信号を A/D 変換して得られた離散データを $\{c_k^{(0)}\}$, $k=0,1,2,\dots$ とすれば、もとの信号は

$$f_0(x) = \sum_k c_k^{(0)} \phi(x-k), \quad k=0,1,2,\dots \quad (2)$$

と、近似することができる。 $f_0(x)$ の添字 0 および $c_k^{(0)}$ の右上の添字 0 はレベルを表す。つぎにサンプリング周波数を 2^{-1} 倍にした場合を考える。このときのレベル $j=1$ とすれば、A/D 変換後の離散データ $\{c_k^{(-1)}\}$ は Fig.7 に示すように

$$c_k^{(-1)} = \frac{1}{2} (c_{2k}^{(0)} + c_{2k+1}^{(0)}) \quad (3)$$

となる。 $\phi(x)$ の波長を 2 倍にしたものは $\phi(2^{-1}x)$ であるからもとの信号は

$$f_{-1}(x) = \sum_k c_k^{(-1)} \phi(2^{-1}x-k), \quad k=0,1,2,\dots \quad (4)$$

と近似される。この近似関数は $f_0(x)$ よりも粗い近似になっている。 $f_0(x)$ と $f_{-1}(x)$ の差を $g_{-1}(x)$ とすれば

$$g_{-1}(x) = f_0(x) - f_{-1}(x) \quad (5)$$

であり、Fig.7 より

$$d_k^{(-1)} = \frac{1}{2} (c_{2k}^{(0)} - c_{2k+1}^{(0)}) \quad (6)$$

$$g_{-1}(x) = \sum_k d_k^{(-1)} \phi(2^{-1}x-k), \quad k=0,1,2,\dots \quad (7)$$

を得る。また(5)式を移項すると

$$f_0(x) = f_{-1}(x) + g_{-1}(x) \quad (8)$$

となる。これはレベル $j=0$ の $f_0(x)$ がレベル $j=1$ の関数の和に分解できることを示している。 $f_0(x)$ が $f_{-1}(x)$ にレベルが下がることと解像度は半分になる。つまり、 $f_0(x)$ の離散データ $\{c_k^{(0)}\}$ の周波数帯域を 2 等分したうちの低周波成分が $\{c_k^{(-1)}\}$ 、高周波成分が $\{d_k^{(-1)}\}$ となる。こうして異なる周波数帯域の成分に分解(サブバンド分解)することができる。(8)式において、右辺の $f_{-1}(x)$ に

Fig. 7 Decomposition of data

$f_i(x)=f_{i-1}(x)+g_{i-1}(x)$ を代入し、これをつぎつぎ繰り返せば(8)式は

$$f_0(x)=g_{-1}(x)+g_{-2}(x)+g_{-3}(x)+\dots \quad (9)$$

と、変形することができる。これは $f_i(x)$ が各レベルに対応する解像度の成分に分解されていることを示す。この処理により、多重解像度分解が行われる。

4.2 実測データの多重解像度分解

実測データをウェーブレット解析する。

まず、実測データの中から損傷部分を含まないデータ列(雑

Fig. 8 Noise data

Fig. 9 Multiresolution decomposition of noise data

音) 2 5 6 個(=2⁸個)を取り出し、ハール基底でレベル $j=1 \sim 8$ まで分解を行う。対象とする雑音データを Fig.8 に、分解結果のうち、 $j=4 \sim 8$ を Fig.9 に示す。

同様に、Fig.2の損傷部分の信号を含んだデータ列 2 5 6 個についても分解を行う。結果を Fig.10 に示す。ここで、Fig.10の f_6 から f_7 と g_7 に分解する課程に注目し、この部分を取り出して Fig.11 に示す。 f_6 から f_7 にレベルが下がるとパルス高が急激に下がり、その分 g_7 の振幅が大きくなっている。この現象は隣り合う $c_0^{(-6)}$ と $c_1^{(-6)}$ の差が大きいために生じている。このように、ある程度の幅と高さをもつパルス状信号を含むとき、低いレベルでの $\{d_k^{(j)}\}$ に大きな値が含まれる。一方、Fig.8のような雑音の場合には損傷信号と比較して、パルス状部分の幅が狭いため、低いレベルでの $\{d_k^{(j)}\}$ に大きな値が含まれることはない。また、トレンドと呼ばれる周波数の非常に低い雑音については、変化が緩やかなため、やはり $\{d_k^{(j)}\}$ は大きくならない。このことを利用して、S/N比が小さい場合でも損傷信号を検出することができる。

Fig. 10 Multiresolution decomposition of data including signal of defect

Fig. 11 Decomposition from f_6

4.3 ウェーブレット解析による診断法

損傷信号と雑音を分離するためのしきい値を決定する手順について述べる。

まず、ロープごとのデータ列を2⁸である256個づつに区切っていく。損傷部分もしくはそれらしきものを含むブロックを取り除き、雑音のみのブロックをハール基底でウェーブレット解析を行う。ロープごとに各々のレベル j での $\{d_k^{(j)}\}$ の最大値を結線した結果を Fig.12 に示す。

Fig. 12 Analysis of noise data

白色雑音の場合には直線 a のように右下がりになる。なぜなら、白色雑音は全周波数成分を均等に含む。よって、 $j=1$ には全体の半分の周波数領域(500~1000 [Hz])の成分が、 $j=2$ にはその半分の周波数領域の成分が、 $j=3$ にはさらにその半分、というように半減していくため、このような特性を示す。これは白色雑音の模擬信号でも確認できた。また、Fig.12では $j=4$ と 5 の間に変曲点が存在し直線 b が生じている。これはロープテストに50 [Hz]の低域通過フィルタが内蔵されているためである。

Fig.10の損傷部分の信号を含んだデータの多重解像度分解の各レベルでの $\{d_k^{(j)}\}$ の最大値、 $d_k^{(j)\max}$ を Fig.12 にプロットしたものを Fig.13 に示す。雑音の場合には2本の直線の下におさまっているのに対し、損傷部分を含んでいる場合には、いく

Fig. 13 Analysis of data including signal of defect

つかの点が直線の上にはみ出している。特にレベル j が低いときに顕著に現れている。そこで、低域である $j=4 \sim 8$ において、この2本の直線をしきい値とし、この値を超える点が存在するときに「損傷部分」と診断することとした。

5. 診断結果およびその考察

診断結果を Fig.14 に示す。なお、測定中に検査員がペンレコーダの波形を観測して、損傷と判断しなかったものについては損傷部分であるか、雑音であるかの確認がなされていないため「Other(未確認)」と表記した。目視により損傷と確認された箇所については、本手法によりすべて検出できた。

(a) Normal mode(at all ropes)

(b) Normal and reduced pressure mode(at rope No.2)

Fig. 14 Defect detection by using wavelet analysis

ロープテストは決して軽いものではない。従って、長時間強い力で一定に押し付け続けるのは重労働である。ロープテストの押し付けが弱いと損傷部分のパルス状信号の出力が小さくなり、逆に雑音は大きくなる。S/N比が小さくなると、目視での検出が難しくなる。この場合においても本手法で損傷部分を3箇所すべて検出することができた。また、Fig.14のロープテストの押し付けの強弱の比較において、損傷部分以外におおの1つつつ未確認のデータが検出されている。この未確認データが同一箇所であることから、小さな損傷が存在した可能性がある。損傷が存在しなかったとしても、損傷の疑いのある箇所を検出できることは、検査として安全側にある。

今回ウェーブレット変換に用いたハール基底は計算処理時間が短いため、測定しながら解析することも可能であると考えられる。

6. むすび

エレベータ用ワイヤロープのロープテストによる実測データを、ウェーブレット変換を用いて解析し、損傷部分を検出する手法を提案した。

ハール基底を用いて、多重解像度分解を行うことにより、損傷部分の発生するパルス状信号を雑音の中から検出できる。実験の結果、検査員がペンレコーダの波形を点検して損傷部分であると判断し損傷を確認したものについては、提案する手法によりS/N比が小さい場合においても、損傷部分3箇所すべてを検出できた。さらに、パルス状信号が弱く、検査員の目視点検では見落とされる場合にも、本方式で検出できる可能性があり、検査として安全側にあることがわかった。

ここで提案する手法の有効性が確認でき、これによって、従来、目視に頼っていたデータ処理の作業を自動化できる見通しを得た。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会・共同研究会・品質管理部会非破壊検査小委員会編集: 鉄鋼製品の漏洩磁束探傷法, 東京 日本鉄鋼協会(1990)
- 2) 高木, 川田, 林: 雑音の中に埋もれたパルス状信号のARモデルを用いた検出, 電気関係学会関西支部連合大会論文集, G2-1 (1994)
- 3) 上田, 川田, 林, 板倉: ゼロクロス法によるエレベータワイヤロープの損傷検出, 電気学会全国大会, 626 (1996)
- 4) 榎原 進: 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)
- 5) 山口, 山田: ウェーブレット解析, 科学, 60, 398/405 (1990)

- 6) 佐藤 雅昭: ウェーブレット理論の数学的基礎Ⅰ, 日本音響学会誌, 47, 405/415 (1991)
- 7) 佐藤 雅昭: ウェーブレット理論の数学的基礎Ⅱ, 日本音響学会誌, 47, 416/423 (1991)
- 8) マーチン ヴェターリ: ウェーブレット変換とサブバンド符号化, 電子情報通信学会誌, 74, 1275/1278 (1991)
- 9) 山田 道夫: ウェーブレット変換とは何か, 数理科学 12月号, 11/17 (1992)
- 10) 上野山, 小沢: ウェーブレット変換による打楽器の分析・合成, 数理科学 12月号, 31/35 (1992)
- 11) S.G.Mallat: Multiresolution Approach To Wavelet In Computer Vision, Wavelets, 313/327 (1989)

「著者紹介」

兼田 昌子

1990年, 関西大学工学部電気工学科卒業。同年松下電器産業(株)入社。96年関西大学工学部員外研究員, 電気工学専攻。ウェーブレット変換, 異常診断に関する研究に従事。97年大阪府立大学大学院工学研究科入学, 現在に至る。

川田 明(正会員)

1964年, 神戸大学工学部電気工学科卒業。同年関西大学工学部電気工学科副手, 現在, 同専任講師。主として, 確率システムの同定, 状態推定, 異常診断に関する研究に従事(工学博士)。計測自動制御学会, システム制御情報学会, 電気学会などの会員。

林 重雄(正会員)

1957年, 京都大学工学部電気工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。87年関西大学, 現在, 工学部電気工学科教授。その間, 電力システムの解析・制御, 状態推定, 異常診断に関する研究に従事(工学博士)。62年電気学会論文賞, 86年同進歩賞, 94年同著作賞, 86年日本原子力学会技術開発賞受賞。計測自動制御学会, システム制御情報学会, 電気学会, IEEEなどの会員。

徳井 一雄

1967年, 金沢大学工学部電子工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。92年三菱電機ビルテクノサービス(株)に出向。テレビジョンチューナ, エレベータ用電子装置, ビル管理システムの開発に従事。