スペクトル解析を用いた経年劣化損傷材の 超音波減衰率測定の高精度化*

酒井 信介^{*1}, 藤縄 展宏^{*2}, 岡村 弘之^{*1}
松原 雅昭^{*3}, 新田 明人^{*3}, 高野 太刀雄^{*1}

Improvement of Measuring Accuracy of Ultrasonic Attenuation of Degraded Materials Using Spectrum Analysis

Shinsuke SAKAI, Nobuhiro FUJINAWA, Hiroyuki OKAMURA,
Masaaki MATUBARA, Akito NITTA, and Tachio TAKANO

A new algorithm for the improvement of measuring accuracy of ultrasonic attenuation using a spectrum analysis has been developed. Normally, the ultrasonic attenuation is evaluated from 1st and 2nd peak values of the pulse-echo ultrasonic wave. However, the attenuation values evaluated by this method possibly contain some error, because those values are greatly affected by the superimposed noise. The proposed method removes this problem by evaluating the attenuation values from the expected envelope curve of the original ultrasonic wave. The algorithm developed is incorporated in a measuring system which consists of a personal computer with ultrasonic apparatus and a digital storage oscilloscope. Several ultrasonic waves obtained from Monte Carlo simulations and high-temperature fatigue-damaged specimens are analyzed by using both the proposed method and the normal method. It is concluded that the measuring accuracy of ultrasonic attenuation by the present method is higher than that by the normal method.

Key Words: Material Testing, Ultrasonic Testing, Nondestructive Testing, Ultrasonic Attenuation, Personal Computer, High-Temperature Fatigue, Estimation of Remaining Life

1. 緒 言

近年、経年火力発電プラントの寿命延伸の必要性が認識されるにつれ、高温機器部材の余寿命評価の重要性が高まっている。経年損傷の非破壊的検出法としては材料の機械的性質の変化を直接モニタする方法⁽¹⁾⁽²⁾、電気抵抗⁽³⁾や渦電流⁽⁴⁾あるいは超音波物性量⁽⁵⁾⁽⁶⁾の変動をとらえ、間接的に測定する方法など数多くの方法が提案されている。その中でも超音波法は探傷技術としては確立されつつある技術であり、測定装置も幅広く普及している。したがって探傷に加えて超音波波形から物性量の変化を測定し経年損傷評価が行えるならば総合的な材料評価システムの構築が可能となり工業的に有意義なものであると考えられる。超音波物性量の代表的なものとしては伝ば速度、減衰率およびパワースペクトル特性⁽⁷⁾が挙げられるが、これらの諸量は材料内部のボイドや微小き裂の発生等の内部構造の変化に伴い変化することが知られている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

本報では、主に超音波減衰率に着目し、これを超音

波パルスエコー波から精度よく求めるため、スペクトル解析を適用する方法を新たに開発した。開発したアルゴリズムをパーソナルコンピュータ上に構築し、超音波測定装置と連結して劣化材の損傷検出に適用したところ、上記超音波物性量の測定精度の向上に寄与できることが明らかとなった。本報では測定アルゴリズムを示し、測定精度の検討を行うとともに、実際に劣化材の損傷検出評価に適用した結果を要約する。

2. 理 論

2.1 従来法の問題点 本報では超音波パルスエコー法を用い、超音波減衰率の測定精度の向上を図ることを考える。超音波減衰は一般には拡散減衰、反射減衰および、材料内の空孔の存在などによって生じる散乱減衰の加算したものとして観測されるが、経年損傷評価の観点からは散乱減衰のみを分離して測定する必要がある。しかし、ここではこれらを特に区別せずに取扱うことにする。たとえ、これらの加算値として評価される減衰値であっても、時間的、空間的な相対量として評価するとき、経年損傷評価の一指標となり得るものと考えからである。図1のようなパルスエコー波が得られたとき、通常は超音波減衰は次式により評価される。

* 平成元年4月5日 第66期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年10月17日。

^{*1} 正員、東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

^{*2} 学生員、東京大学工学部。

^{*3} 正員、(財)電力中央研究所 (〒201 柏江市岩戸北2-11-1)。

$$\alpha = \frac{1}{2B} \ln\left(\frac{L_1}{L_2}\right) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

B : 板厚

L_1, L_2 : 第1, 第2反射波の出力のピーク値

式(1)から評価される α 値は L_1 と L_2 の測定値によって大きな影響を受けるので、これらの諸量が正確に評価されなければならない。ところが、見かけ上の反射波のピーク値から L_1, L_2 を評価すると、以下のような要因により誤差を生ずるおそれがある。

(1) 各反射波は探触子の固有振動数を中心周波数とする波形に包絡線に乗じたような形で出力されるので見かけ上のピーク値と包絡線のピーク値との間にずれを生ずる〔図2(a)〕。

(2) 超音波経路上に存在する経年劣化損傷によって生成される微小欠陥等により反射される波形成分は超音波反射波の上に微小ノイズとして重畳され、ピーク値判定に誤差を生ずる〔図2(b)〕。

そこで、ここではこれらの誤差要因の影響を最小限におさえ、精度よく包絡線のピーク値を評価する方法を考案することとする。

2.2 包絡線の推定法 フーリエ変換による周波数領域での処理を導入することにより包絡線形状を精度良く推定する方法を考える。ここでは、図3に示すように、図1の波形の絶対値をとった全波整流波形について考え、この波形の包絡線のピーク値から減衰率を算出することにする。

いま、推定すべき包絡線関数を $\phi(t) \geq 0$ であるとすると、探触子の固有角振動数を ω_0 として、図1のパルスエコー波は、

$$f(t) = \phi(t) \sin \omega_0 t \dots\dots\dots (2)$$

と記述できる。一方、 $\sin \omega_0 t$ の絶対値 $|\sin \omega_0 t|$ をフーリエ級数展開すると、

$$|\sin \omega_0 t| = -\frac{2}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\exp(j2n\omega_0 t)}{4n^2-1} \dots\dots\dots (3)$$

と記述できる($j = \sqrt{-1}$)ので図3の全波整流波形 $g(t)$ は式(2)、(3)より

$$g(t) = -\frac{2}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\phi(t) \exp(j2n\omega_0 t)}{4n^2-1} \dots\dots\dots (4)$$

と求まる。いま、 $\phi(t), g(t)$ のフーリエ変換した関数を各々 $\Phi(\omega), G(\omega)$ とする。すなわち、

$$\Phi(\omega) = \mathcal{F}[\phi(t)]$$

$$G(\omega) = \mathcal{F}[g(t)] \dots\dots\dots (5)$$

ここで $\mathcal{F}[\]$ はフーリエ変換を示す。

フーリエ変換の基本的性質として

$$\mathcal{F}[\phi(t) \exp(j\omega_0 t)] = \phi(\omega - \omega_0) \dots\dots\dots (6)$$

という関係があるので、これを式(4)のフーリエ変換に適用すると

(a) 反射波の形状

(b) 微小ノイズの重畳

図2 ピーク値評価における誤差要因

図1 パルスエコー波形の例

図3 図1の波形の全波整流波形

$$G(\omega) = -\frac{2}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\phi(\omega - 2n\omega_0)}{4n^2 - 1} \dots\dots\dots (7)$$

が得られる。いま、 $g(t)$ 上に重畳している高周波ノイズを除去するため、システム関数 $H(\omega)$ が次式で表現される理想低域通過フィルタに印加することを考える。

$$H(\omega) = 1 \quad \omega \leq \omega_0 \\ 0 \quad \omega > \omega_0 \dots\dots\dots (8)$$

すると出力波形のフーリエスペクトル $G_1(\omega)$ は式(7)と式(8)の積として

$$G_1(\omega) = H(\omega) \cdot G(\omega) = \frac{2}{\pi} \phi(\omega) \dots\dots\dots (9)$$

と求まる。したがって包絡線 $\phi(t)$ は $G_1(\omega)$ を逆フーリエ変換し

$$\phi(t) = \mathcal{F}^{-1}[\phi(\omega)] = \frac{\pi}{2} \mathcal{F}^{-1}[G_1(\omega)] \dots\dots\dots (10)$$

により得ることができる。このように導かれた $\phi(t)$ に対してピーク値を評価すれば、2・1節で示した超音波減衰率評価における誤差要因を排除することができるものと考えられる。

つまり包絡線形状は次の三つのステップを踏むことにより推定することができる。

ステップ1：パルスエコー波の絶対値をとる。

ステップ2：フーリエ変換後、探触子固有周波数 $f_0(=\omega_0/2\pi)$ 以上のスペクトル成分をフィルタリングする。

ステップ3：逆フーリエ変換後、波形を $\pi/2$ 倍したものが推定すべき包絡線形状となる。

こうして得られた包絡線形状のピーク値を用いることにより、より高精度に超音波減衰率が評価できるものと考えられる。

3. 実験による検証

3・1 実験方法 提案する超音波減衰率測定法を検証するため、高温構造部材の経年劣化損傷に対して超音波パルスエコー法による測定を実施した。特に蒸気タービンロータの経年劣化損傷を模擬するようにロータ材に対して高温低サイクル疲労試験を実施し、寿命消費率と超音波減衰率との関係を求め、損傷劣化の非破壊検出の可能性を調べた(試験片形状、試験条件などは別報⁽¹⁰⁾に掲載)。減衰率の測定のためにパルスレシーバ(周波数帯域1~20 MHz)および中心波数10 MHzの縦波用垂直形探触子を用いてパルスエコー波を観測することとした。図4に測定システムを示すが、パルスエコー波はデジタルオシロスコープ上でA/D変換(分解能8ビット)された後、GPIBバスを介し

てパーソナルコンピュータ上に転送されデジタル処理される。フーリエ、逆フーリエ変換のために、パーソナルコンピュータ上でFFTプログラム(サンプリング点4096点)を実行することとした。探触子と試験片の接触は直接接点式(接触媒体：シリコン油)とした。

3・2 測定結果 図1に示した損傷試験片に対して測定されたパルスエコー波のパワースペクトルの例を図5に示す。波形の縦軸はA/D変換されたデジタル値で表示してある。サンプリング間隔は12.21nsである。10 MHz近傍に集中しているパワーは、探触子中心周波数 f_0 の影響によるものと考えられる。この波形を前記ステップ1に従って絶対値をとった波形が図3であり、そのパワースペクトル密度が図6である。このスペクトルが林状になっているのはパルスエコー波の各パルスが周期的に出現していることによると考えられる。例えば、パルスエコー波の包絡線形状が図7(a)のように与えられる場合、そのフーリエスペクトルは図7(b)のようになる。また、図6で $2f_0$ 近傍に集中するパワーは、波形の絶対値をとったために固有周期 f_0 の成分が移動したものと考えられる。

いま、上記ステップ2において、 f_0 以上の周波数帯のスペクトル成分をフィルタリングする際、一般には正確な f_0 が事前に求まっているとは限らない。そこで、この過程を一般化するため、 f_0 値に対応するものとしてパワースペクトルの極大値群の中の最小値に対

図4 システム構成

図5 図1のパワースペクトル

応する周波数 f_0 をもって f_0 に代用することにする。
 図 8 は全波整流波形のシミュレーション波形に対する
 パワースペクトル波形であるが、 f_0 の位置を図中の●
 印で示してある。ステップ 2 における f_0 値は、 $2f_0$ 近傍
 に集中するパワーの成分を除去するためのしきい値で
 あるから、 f_0 以下の包絡線に対応する成分と、 f_0 以上
 の成分とを分離できれば良く、上記の定義による f_0
 をしきい値として採用することは妥当であると考えら
 れる。また探触子の固有振動数がたとえ未知であって
 も使用することができ、一般性のある方法であると言
 える。

このフーリエスペクトルをステップ 3 に従って逆フ
 ーリエ変換し、 $\pi/2$ 倍して得られた時間波形が図 9

(a) である。また、その $2.0 \sim 3.0 \mu s$ の区間を拡大し原
 波形の全波整流波形と重ねて表示したものが図 9 (b)
 である。この図より明らかなとおり、本手法によって
 正確に包絡線を推定できていることがわかる。この推
 定された包絡線について、4 個のピーク値に対する最
 小二乗近似から減衰率を求めたところ、 $\alpha = 318.94$
 db/m となった。またピーク値間隔は部材内部を 1 回
 反射するのに要する時間であるから、板厚の 2 倍をこ
 の時間で除すことにより超音波速度を評価することも
 できる。

4. 測定精度

4.1 シミュレーションによる検討 包絡線を推
 定してピーク値を評価するのと、見かけ上のピーク値

図 6 全波整流波形のパワースペクトル

図 8 パワースペクトル周波数しきい値の決定法

(a) パルスエコー波形 (包絡形状)

(b) パワースペクトル

図 7 パルスエコー波形とパワースペクトルの関係

(a) 包絡線波形

(b) 包絡線波形 (拡大図)

図 9 提案法による解析結果

を評価する場合との減衰率の測定精度の違いを比較するため、モンテカルロシミュレーションを実施した。理想的なパルスエコー波形が、式(11)、(12)で表されるものと仮定する。

$$f(t) = \sum_{i=1}^{N_p} \{A \exp(-\alpha v t)\} \text{Env}(t-iT) \times \cos \omega_0 t \quad (11)$$

α : 減衰率 v : 超音波速度 T : ピーク間隔

ω_0 : 変調角振動数 N_p : 検出されるピーク数

Env(t) は包絡線形状を表す関数で、次式で定義する。

$$\text{Env}(t) = \frac{e}{\beta} t \exp(-t/\beta) \quad (12)$$

β : 包絡線形状を特徴づける定数

これによって発生したパルスエコー波形に有帯域の正規性雑音を付加した波形をコンピュータ上に発生させ、モンテカルロシミュレーション⁽¹¹⁾を行った。図10に発生したシミュレーション波形の例を示す。

式(11)中の減衰率 α を正解とし、上記2方法によって評価される α の値の正解値からのばらつきをもって評価精度の比較を行うこととする。シミュレーションに用いた計算条件は表1に示すとおりである。評価される減衰率の値は、波形形状およびノイズの影響によってばらつきをもつが、包絡線を推定してピーク評価を行った場合、これらの要因が排除されて算出される減衰率の値のばらつき、すなわち標準偏差が小さくなることが期待される。表2にシミュレーションの結果を示す。重畳する雑音の帯域にかかわらず、包絡線を推定した場合の方が標準偏差が小さく、包絡線を推定して評価した場合のほうがより高精度に減衰率を評価できることがわかる。

4.2 測定データに対する検討 減衰率を二つのピーク値の比から算出する場合、ピーク値のわずかな変動が大きな影響を及ぼす。理想的なパルスエコー波形では、第1ピークと第2ピークから求まる減衰率と、第2ピークと第3ピークから求まる減衰率は同じにな

るはずであるが、実際に測定されたデータについてはこれらは同じ値にならずかなりばらつくことが多い。したがって、単純に第1ピークと第2ピークから減衰定数を算出すると誤差を生ずるおそれがあることになる。ピークが多数検出された時はこれらから最小二乗近似を行い減衰曲線 $A \exp(-\alpha v t)$ を求めることになるが、この際評価するピーク値群の減衰曲線への近似度が良いほどより高精度の評価を行っているものと考えられる。推定した包絡線のピーク値を用いる場合、重畳されたノイズの影響をより小さくすることができると考えられ、近似度が高くなることが予想される。

このことを明らかにするため、実際に測定された波形について2方法でそれぞれ評価される減衰曲線に対する評価ピーク値群の近似度の程度を比較する。ただし従来法については原波形のピーク値群そのものを対象とし、提案法については推定された包絡線のピーク値群を対象とする。近似度の尺度としては、それぞれのピーク値群から評価される減衰曲線とそのピーク値群との残差二乗和を用いることとする。

表3には4種類の実験条件下の種々の寿命消費率時

表1 シミュレーションに用いた計算条件

Wave amplitude A	100
Attenuation α	108.625 db/m
Velocity v	8000 m/s
Peak interval T	2.5 μ s
Modulate freq. ω_0	10 MHz
Number of peak N_p	20
Envelope const. β	0.1 μ s
Sample size	100
Frequency band of noise	7 cases shown in Table 2
Standard deviation of super-imposed noise	0.5

図10 シミュレーション波形の例

表2 モンテカルロシミュレーションにおいて算出される減衰定数の標準偏差の比較

Frequency band of noise(MHz)	Proposed method (db/m)	Normal method (db/m)
0~30	2.5631	3.2282
10~30	2.4027	3.2137
20~30	1.5697	2.8734
0~40	1.8223	3.2657
10~40	2.3706	3.6969
20~40	1.0228	3.5867
30~40	1.1684	2.8453

表 3 2 方法における最小二乗近似時の残差二乗和の比較

Specimen	Life ratio	Nornmal method	Proposed method
IRM-1	0.564	3.421E-3	1.898E-3
IRM-1	0.902	1.651E-2	3.212E-2
IRM-1	0.997	7.408E-2	1.015E-2
IRM-1	1.094	1.302E-1	7.073E-2
IRM-2	0.231	7.725E-2	1.019E-2
IRM-2	0.377	4.064E-3	1.256E-2
IRM-2	0.708	1.548E-1	1.478E-3
IRM-2	0.817	5.749E-3	3.233E-4
IRM-2	0.898	5.447E-2	1.978E-3
IRM-3	0.951	7.196E-2	1.279E-3
IRM-3	1.032	2.941E-2	1.068E-1
IRM-3	1.116	1.639E-2	4.665E-3
IRM-4	0.828	1.091E-1	1.801E-2
IRM-4	0.984	7.054E-2	2.433E-3
IRM-4	1.006	1.451E-2	9.511E-3

点で測定した超音波波形に対して両者の方法の近似度の尺度を評価した結果を示す。実験条件は高温疲労ひずみ波形形状に対して設定したものであり、その詳細は別報に記す⁽¹⁰⁾。また寿命消費率は破損時点を 100 % としたときの寿命消費割合を示し、残差二乗和は超音波波形の初めの四つのピーク値から評価するものとする。この結果、都合 15 種類の波形のうち 12 種類については提案法の評価値のほうが小さく、多くの条件下において提案法のほうがピーク値に対してよりよい近似度を与える。

5. 結 言

超音波減衰率をパルスエコー波のスペクトル解析からより高精度に評価するためのアルゴリズムを提案し、シミュレーションおよび実測波に対して適用したところ、第 1、第 2 ピーク値から評価する従来法に比べて良好な結果が得られた。

まず、提案法では原波形をフーリエ変換後、その包絡線成分に対応する周波数領域のデータを逆フーリエ変換し、原波形の包絡線の推定波形を評価する。次に、この推定包絡線のピーク値から減衰率を評価することによって以下のような利点が生じた。

- (1) パルスエコー波の見かけ上のピーク値と包絡

線のピーク値のずれによる評価誤差を小さくできる〔図 2 (a)〕。

- (2) 超音波経路上に存在するボイド、微小き裂あるいは測定系に起因する高周波ノイズが測定波の上に重畳しても、減衰率評価には影響を与えない〔図 2 (b)〕。

また、提案法を超音波波形に適用し、減衰率の測定精度の検討を行ったところ、以下の結論が得られた。

- (1) モンテカルロシミュレーションにより、多くの帯域幅の雑音を原波形上に重畳させた波形について評価される減衰率のバラツキを調べたところ、従来法に比べ提案法のほうがバラツキが小さい (表 2)。

- (2) 種々の条件下で実施された高温低サイクル疲労試験片に対して測定された超音波波形について減衰率を評価し、ピーク値に対する減衰曲線の近似度を求めた。その結果、提案法は従来法に比べ、多くの条件下でより良い近似度を示す (表 3)。

したがって、提案法を用いることによって原波形のピーク値のみから評価する従来法よりはより高精度に減衰率が評価されることが期待される。

最後に本研究の一部は科学研究費試験研究 (2) (昭和 63 年度) からの助成を受けたことを付記し、感謝の意を表する。

文 献

- (1) Endo, T., *Int. Conf. on Creep*, Tokyo, panel Discussion, No. 10 (1986).
- (2) 科学技術庁 研究開発局編, 構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究 (第 1 期) 成果報告書, (1987-3).
- (3) 桐原・ほか 4 名, 材料, **33**-371 (1984), 1097.
- (4) 構造材料の信頼性評価技術委員会編, 構造材料の寿命・余寿命評価のための計測技術に関する調査, (昭 58), 日本鉄鋼協会.
- (5) Narayan, R. and Robert, E.G. Jr., *Eng. Fract. Mech.*, **4** (1972), 577-583.
- (6) Williams, J. H. Jr., Yuce, H. and Lee, S. S. *Materials Evaluation*, **42** (1984), 219-224.
- (7) 岡崎・矢田・橋本, 機講論, No. 880-2 (1988), 245-250.
- (8) 荒居, 配管技術, '87 増刊号, (1987), 134-136.
- (9) 松本・ほか 3 名, 非破壊検査, **34**-2 (1985), 140-141.
- (10) 酒井・ほか 5 名, 材料力学講演会講演論文集 No. 880-7, (1988), 21-22.
- (11) 星谷, 確率論手法による振動解析, (1974), 45, 鹿島出版会.