

AE 振幅分布のフラクタル次元を用いた金属の硬さ評価法

奈良工業高等専門学校 電子制御工学科 ○越智 陸斗 ◎西田 茂生

要旨

今日、金属材料は日常生活に必要不可欠であり、様々な機器や構造物に用いられている。そこで求められるのが効率的な点検や保守管理の高度化である。そのためには材料の特性を把握しておく必要がある。そこで硬度に着目し、擬似 AE 波を用いた金属の硬さ評価法を提案する。提案する手法では従来の圧痕解析型の硬さ評価法とは違い、材料内部に人為的な微小弾性波を発生させ、その弾性波を解析することで硬さを評価するというものである。

1. 緒言

1975 年、マンデルブロは、フラクタル及びフラクタル次元という革命的な新概念を発表し、自然界の多くの無秩序現象が本質的にフラクタル的な性状を持っていることを指摘した。AE(Acoustic Emission)波の最大振幅の頻度分布を表す AE 振幅分布のほとんどは事象数がべき関数的に減少し、べき乗則分布のフラクタル構造を示す。AE 波を解析するために、フラクタルの視点からアプローチすることが可能である。^[1]

金属材料は現在、日常生活等において必要不可欠であり、様々な機器や構造物で使われている。そこで重要なのが健全性の維持である。この健全性を維持するために保守管理や定期検査の効率化、寿命延伸などが求められる。その際、材料の特性を定量的に評価する必要がある。そこで有用なのが AE 法の利用である。AE 法とは材料に局所的な変形や亀裂の進展した際に放出される弾性波であり、亀裂の入っている箇所などを事前に診断するもので、特にフラクタル構造を示す AE 振幅分布による構造物の健全性の診断法には期待が寄せられている。^[1]

今日、超音波を用いた検査や測定方法などが普及し、非破壊で物質の特性などが分かるようになってきている。しかし、高精度な超音波計測器などは高価で手に入れるのは容易ではない。そこで超音波領域であるから数 10kHz~数 MHz の AE 波を用いた材料の強度測定法を提案する。

本研究では、材料の硬度に焦点をあて、金属材料の硬さ評価法を提案する。従来の超音波硬度計では材料に一定の強さで圧痕をつけ、圧痕の深さで拘束力が決まり、共振周波数が変化する。その共振周波数から硬度を測るというものである。^[2]それに対し、提案手法では鋼球を金属材料に落下させ、インパルス入力を与えることにより、擬似的な AE 波を発生させ、その波形からフラクタル次元を求める。この手法を用いることにより手軽に金属の硬さを数値化し、定量的に評価することが可能となる。

2. 原理

2.1 AE 振幅分布とフラクタル次元

AE 振幅分布とそのフラクタル次元について説明する。Fig.2 に示す縦軸を事象数 $f(x)$ 、横軸を振幅値 x とする線形グラフに AE 波形のデータをプロットすると、高振幅の頻度は低いため、振幅が増加するにつれて事象数がべき関数的に減少することになる。このとき、プロットされたデータは Fig.1(i) のような形となり、以下のようなべき乗則分布となる。

$$f(x) = cx^{-m} \quad (1)$$

ここで、 x は AE 振幅値、 $f(x)$ は AE 事象数を表す。

次に、両辺の対数をとると Fig.1(ii) のような直線となり、次式のように表される。

$$\log f(x) = -m(\log x) + \log c \quad (2)$$

ここで、Fig.1 における直線の傾き m をフラクタル次元と呼ぶ。 m は材料によって異なる値を持つため、その値を知ることで AE 波を定量的に評価できる。

2.2 音響インピーダンスについて

次に音響インピーダンスについて以下に述べる。

超音波の伝播性は音響インピーダンスが大きいものほど良い。音

響インピーダンス Z は音速 c と密度 ρ を用いて次式のように表される。^[2]

$$Z = c \cdot \rho \quad (3)$$

Table 1 に今回の実験で使用した金属の音響インピーダンスを示す。

硬いものほど音響インピーダンスは大きくなることを考慮するとフラクタル次元は次のようになると予想される。

Aluminum > Brass > Copper > SUS304

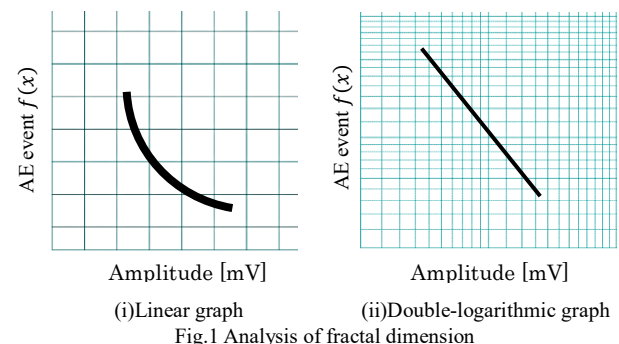


Table 1 Acoustic impedance of various materials^{[3][4]}

material	acoustic impedance Z [$\text{kg/m}^2\text{s}$]
Aluminum	17220
Zinc	30815
Brass	37315
Copper	41664
SUS304	44884

3. 実験概要

この仮説を検証するため、Fig.3 に示す実験装置を用いて、以下の実験を行った。

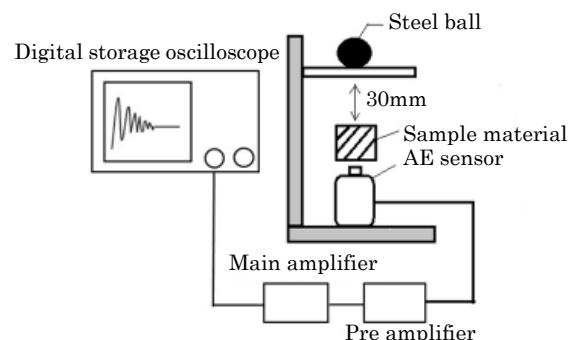


Fig.2 Schematic diagram of experimental system

実験装置の流れを説明する。まず、高さ 30mm から鋼球を落下させ擬似 AE 波を発生させる。発生した擬似 AE 波を AE センサで検知しプリアンプで増幅させる。その後メインアンプでさらに増幅させ、同時にノイズを除去する。増幅された擬似 AE 波をデジタルストレージオシロスコープで読み取り、解析する。

3. 実験結果および考察

それぞれの金属材料から得られた AE 波形とフラクタル次元導出の例を Fig.4 に示す。

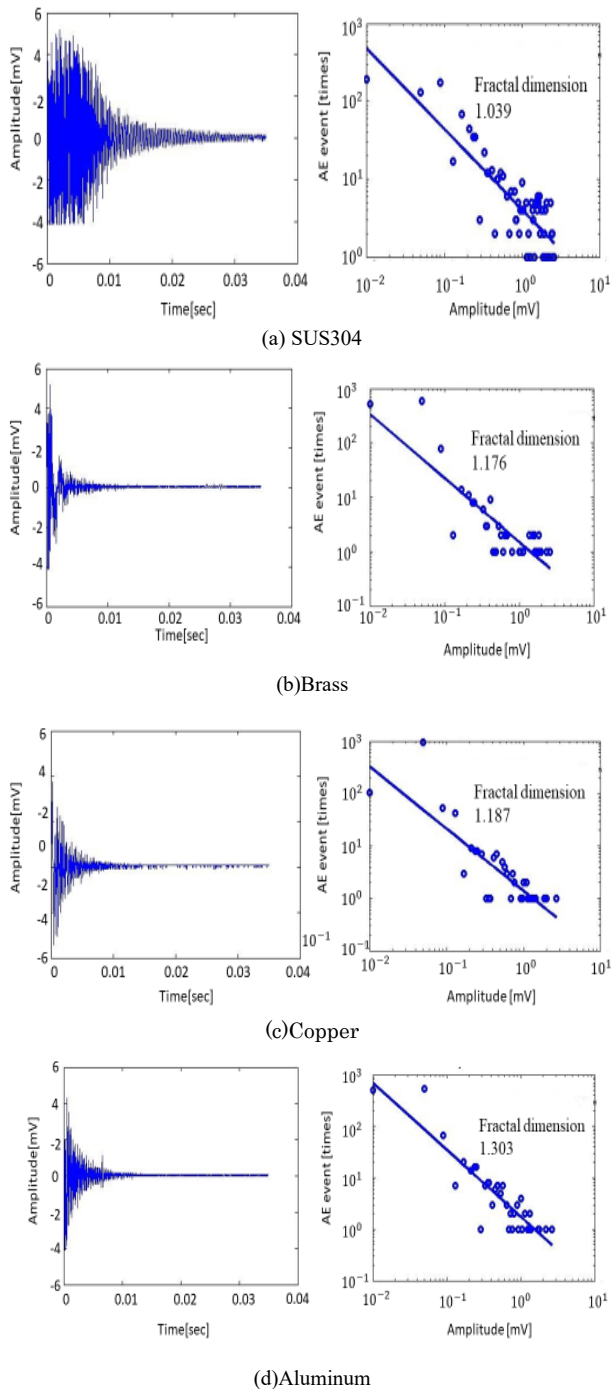


Fig.3 Experimental results

実験結果より得られたフラクタル次元とマイクロピッカース硬さ試験機で測定したピッカース硬さを Table 2 に示す。フラクタル次元及びピッカース硬さは 10 回の集合平均を示す。

Table 2 Fractal dimension and Vickers hardness of various materials

	Fractal dimension (Ensemble average)	Vickers hardness [kgf/mm ²]
SUS304	1.032±0.004	175.1±7.490
Brass	1.175±0.003	131.9±8.290
Copper	1.190±0.001	102.8±2.360
Aluminum	1.310±0.002	75.73±4.852

Table 2 よりフラクタル次元とピッカース硬さの関係は以下のようなになる。

フラクタル次元：Aluminum>Copper>Brass>SUS304
ピッカース硬さ：Aluminum<Copper<Brass<SUS304

フラクタル次元と金属の硬さには何らかの相関があることが分かる。これらの要因として、AE 波の伝播性がそれぞれの金属がもつ固有の音響インピーダンスによって決まってくるものがあげられる。Table 1 より音響インピーダンスが大きいものほど AE 波は良く伝わり、AE 振幅が大きくなるためフラクタル次元が小さくなっている。真鍮は銅と亜鉛の合金で、硬度などは銅よりも優れている。しかし、亜鉛を混ぜていることで音響インピーダンスは銅よりも小さくなっていると考えることができる。しかし、実験結果より、それぞれの硬さが AE 波の伝わり方に音響インピーダンス以外の要因があることが分かる。

金属の硬さ評価に AE 波でのアプローチが有効であることが示された。またマイクロピッカース硬さ試験機では誤差率が 9.64%であるのに対し、AE 波を用いた測定法では 0.44%と精度の違いが明らかである。ここで誤差率とは、材料のフラクタル次元及びピッカース硬さをそれぞれ 10 回測定し、その平均値からの分散をそれぞれの金属材料で計算し足し合わせたものの平均値をとったものである。硬さ試験機では圧痕をつける場所を毎回変えなければいけないため、表面の状態などに大きく左右されるが、AE 波を用いた測定法ではインパルス入力を与えることさえできれば、高精度の測定法になる。

5. 結言

今回提案した手法では、従来の硬度評価法とは異なり、人為的に材料内に発生させた擬似 AE 波を解析することで硬さを定量的に示すことができ、硬い金属ほど小さなフラクタル次元が得られることが分かった。超音波の伝わり方に硬さが何らかの影響を与えているといえる結果が得られた。従来の硬度測定では誤差率 10%程度であるのに対し、今回の提案手法では 0.4%と、極めて精度の高い評価法だと言える。

参考文献

- [1] 仲佐博裕, 「アコースティックエミッションの理論と実際—非破壊検査におけるフラクタル評価法—」, 地人書館(1994)
- [2] 鈴木陽一, 赤木正人, 伊藤彰則, 佐藤洋, 荻木禎史, 中村健太郎, 「音響学入門」, コロナ社(2011)
- [3] 日本機械学会, 「機械工学便覧 B4 材料学・工業材料」, 日本機械学会(1984)
- [4] 「各種材料の音速」(アクセス日: 2018/01/23)
<https://www.dakotajapan.com/mpseries/point/speed-sound.html>
- [5] 「ハンディー硬さ計(硬度計)SONOHARD」
<www.jfe-advantech.co.jp/atsusa/handy/>(アクセス日: 2018/01/18)