

# バルクハウゼンノイズの材料評価への適用

伊藤 勇一

## Application of Barkhausen Noise to Materials Evaluation

Yuichi Ito

### 1. はじめに

強磁性体材料が磁化する際、材料内の磁壁が不連続に移動することによってバルクハウゼンノイズと呼ばれる磁気ノイズが発生する。この磁気ノイズは、Fig.1のような装置を組むことにより、その発生を簡単に確かめることができる。これは鉄などの強磁性体材料にコイルを巻き、それを増幅器を通してスピーカーにつないだものである。そして磁性体に磁石を近づけて磁化させると、スピーカーからは雑音が聞こえてくる。この磁気ノイズ、すなわちバルクハウゼンノイズは1917年に Barkhausen<sup>1)</sup>によって発見されたためこのように呼ばれている。以後、この信号をBHNと称していく。その後このBHNは、金属材料の組織や応力状態に敏感であることが報告され<sup>2)</sup>、さらに材料の非破壊的評価法として利用した場合、他の非破壊的検出法にはない優れた特性も一部有していることが確認されてきている。

そこで本報ではこのBHNを利用した材料特性の評価を試みた例を、筆者の行った結果も交えて紹介し、さらにこの手法の利点および欠点などに

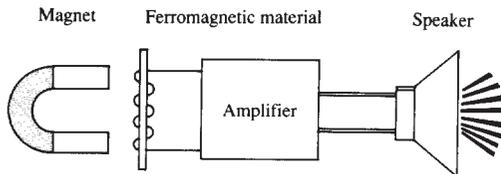


Fig.1 Barkhausen experiment.

いても考察してみる。

### 2. BHNの原理と測定装置

Fig.2はBHN測定装置の構成図である。まずファンクションジェネレータから電圧を発生させて、それを磁化コアに接続して試験片を磁化させる。試験片の磁化変化は検出コアで検出し、その信号をアンプで増幅してFFTアナライザで解析を行う。Fig.3はこのFFTアナライザのCRT画面の一例である。縦軸は電圧を、横軸は時間を示している。点線で示したのが、磁化コアに与えている電圧（以後磁化電圧と称する）であり、実線で示したのが、検出コアによって検出した電圧である。ところでこの検出電圧には、図のように高周波のノイズが載っていることが分かる。これがBHNと呼ばれているものである。BHNの発生原理を模式的に示したのがFig.4である<sup>3)</sup>。これは強磁性体材料の磁区構造であり、図の矢印は磁区のモーメントの方向

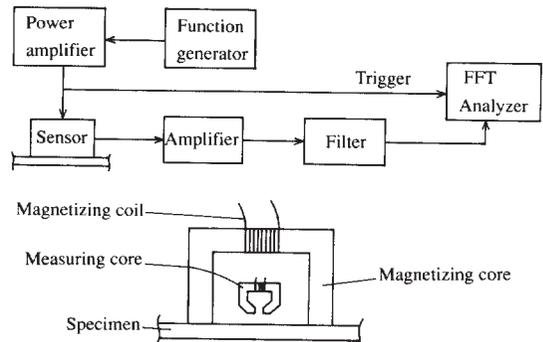


Fig.2 Block diagram of BHN measurement and sensor.

キーワード

バルクハウゼンノイズ, 非破壊検査, 磁気ひずみ応力測定法, 材質試験, 波形解析, 材質劣化, 鉄鋼材料

を示しており、磁区と磁区の境界は磁壁と呼ばれている。ここで図のような方向に磁場を与えたとすると、磁場と同じ方向を向いた磁区が大きくなる方向に、すなわち図では向かって右方向に磁壁が移動し始める。その際材料内に、析出物や欠陥などがあると磁壁は滑らかに移動せずに、不連続に移動する。そのため磁気ノイズ (BHN) が発生するといわれている。

なお検出電圧 (V) と試験片の磁束変化とは次式のような関係がある。

$$V = -k \frac{d\Phi}{dt} \dots \dots \dots (1)$$

- k; 定数
- Φ; 磁束
- t; 時間

そのため、Fig.3に示した検出電圧を時間に関して積分し (B)、それを磁化電圧 (H) との関係で示すとFig.5のようになる。これは強磁性体材料の磁化曲線 (ヒステレシスループ) である。そして、

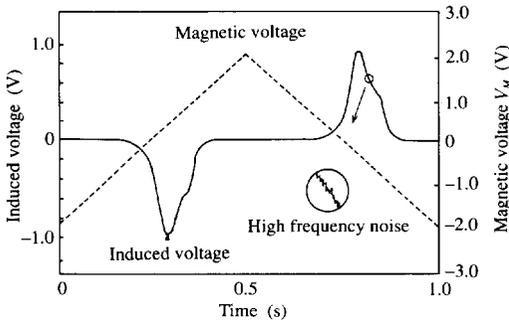


Fig.3 CRT display of FFT analyzer.

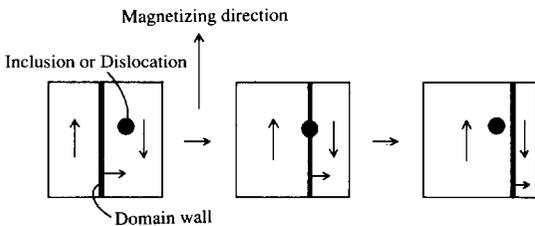


Fig.4 Schematic illustration of magnetization process.

BHNは磁化曲線上では図のように階段状になっている。ところでFig.3から分かるように、BHNは全体の出力に比べて非常に小さいのでこのままの状態では非常に解析しにくい。そのためBHN成分のみを取り出すため、フィルタ処理により低周波成分を除去して解析を行う。この処理によりCRT画面はFig.6のようになる。ところでBHNの発生機構は大変複雑であるため、その出力の大きさを、理論的に考察した報告例は非常に少ない。ここでは理論的な考察を行っている数少ない報告例の中で特に、Sakamoto<sup>4)</sup>らの考察した内容を紹介する。Sakamotoらはまず、材料内の個々の場所で発生するBHN出力を電圧パルスと考え、その大きさ

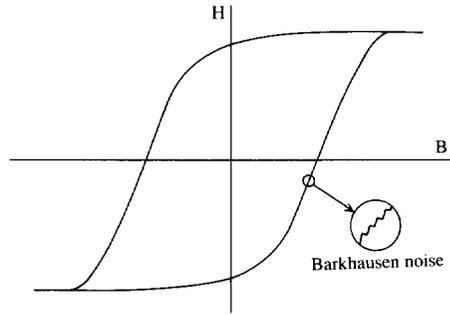


Fig.5 Hysteresis loop for magnetic material showing discontinuities that produce BHN.

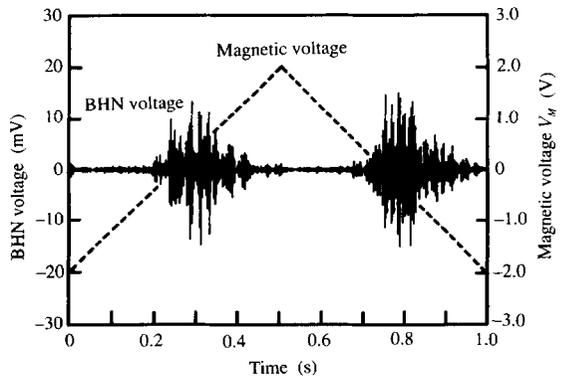


Fig.6 BHN voltage amplitude.

$e(t)$  を式(2)に示すガウスパルスで近似した。

$$e(t) = \frac{\Delta\Phi}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{(2\sigma^2)}\right] \dots\dots (2)$$

$t_0$ ; ガウスパルスの最大値での時間

$\sigma$ ; ガウスパルスの標準偏差

そして検出されるBHNの全出力は、材料内の個々の場所で発生する電圧パルスの総和であるとして、式の導出の詳細は省略するが、次式を導いている。

$$BHN = C_R \cdot \frac{\tau^2}{\sigma^2} \dots\dots (3)$$

$$C_R = \frac{(dH/dt)}{8\sqrt{2\pi} \cdot H_{max}} (N \cdot \Delta\Phi)$$

$\tau$ ; パルス発生時間の間隔

$H$ ; 印加磁場の強さ

$N$ ; ガウスパルスの総数

そのため発生するBHN出力は、ガウスパルスの標準偏差すなわちパルスの発生している時間 $\sigma$ と、パルス発生時間の間隔 $\tau$ を、金属組織の状態から推定し、その値を式(3)に代入することによって、BHN出力の大きさを決定することができる。ただし磁壁移動と組織との相互関係は大変複雑であり、BHNの発生原理は完全には解明されていないのが現状である。

### 3. 鉄鋼材料の組織評価

BHNは、2章で説明したように金属材料中を磁壁が移動していくことによって発生するものであるから、その出力は組織状態によって影響を受ける。この章では、BHNの代表的な発生源であり、また金属材料の機械的特性に大きく影響を及ぼす因子でもある結晶粒径、転位、析出物などの評価にBHNを適用した例を紹介する。

#### 3.1 結晶粒径

鉄鋼材料の機械的特性は、結晶粒径の大きさによって影響を受ける。そのため、非破壊的かつ迅速に結晶粒径を評価できれば有用といえる。結晶粒径の評価に、BHNを適用した報告例は数多くある<sup>5-14)</sup>が、それらの報告を要約すると、結晶粒径が小さいものでは発生するBHN出力は大きく、粒径が大きいものではBHN出力は小さいようである。先に紹介したSakamotoらは、炭素鋼のフェライト単層組織において理論的考察を行い、フェラ

イトの結晶粒径を $d_g$ とした場合、 $\sigma$ と $\tau$ を次式のように導いた。

$$\sigma = \frac{4I_s}{9\pi r C_V} \cdot d_g^2 \dots\dots (4)$$

$C_V$ ; 定数

$r$ ; 単位面積あたりの磁壁エネルギー

$I_s$ ; 飽和磁化

$$\tau = \frac{1.32 t_{total} \cdot r^{1/4}}{C_s \cdot k^{1/4}} \cdot d_g^{7/4} \dots\dots (5)$$

$C_s$ ; 定数

$K$ ; 磁気異方性定数

$t_{total}$ ; パルスの総発生時間

そしてこの式(4)、式(5)を、式(3)に代入するとBHN出力は次式ようになる。

$$BHN = C_g \cdot d_g^{-12}$$

$$C_g = C_R \left[ \frac{9.3 C_V \cdot t_{total} \cdot r^{5/4}}{I_s \cdot K^{1/4}} \right]^2 \dots\dots (6)$$

なお式(6)の $C_g$ はフェライト粒径に無関係であり、ここでは定数になる。そのためBHN出力は、粒径の平方根の逆数に比例することになる。Fig.7は、実際に測定したBHNと粒径との関係図であり、曲線は実験点に最小自乗法を適用して式(6)の形式に近似し

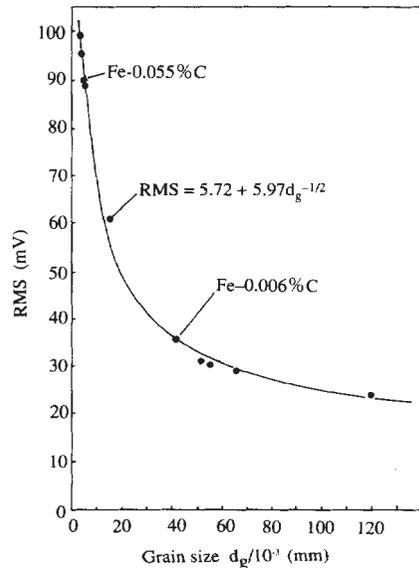


Fig.7 Dependence of RMS values on ferrite grain size. ( $dH/dt = 40kA \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ , analyzed freq. = 1-2kHz)

たものである。これより実験点は、式(6)の関係をよく満たしていることが分かる。

またSaynajakangasら<sup>5-9)</sup>はBHN出力波形の成分を調べて、BHN振幅の確率分布を計算し、粒径が小さいものの方が大きいものより確率分布の分散( $m$ )が小さくなることを確かめている。この理由は、BHNは粒界に限らず、転位や析出物によっても発生するが、粒径が小さいもののほうが大きいものより発生するBHNは粒界の影響を大きく受ける。そのため、粒径が小さいものの方が大きいものより、他の因子の影響が相対的に少なくなり、BHN波形の分散( $m$ )が小さくなったものと考察している。

3.2 転位との関係

材料中に存在する線欠陥である転位は、磁壁の不連続移動を誘発しBHN出力の発生源となる。Scherpereelら<sup>15)</sup>は磁壁と転位との磁気弾性的相互関係を理論的に考察し、転位の存在は磁壁の不連続移動を誘発すること、そして磁壁の中でも特に、180°磁壁が転位線と平行に通過する際最も磁気弾性エネルギーが低く安定な状態になるため、その際に磁壁の不連続移動すなわちBHN出力が最も大きく発生すると考察している。

またButtleら<sup>16)</sup>は実際の鉄鋼材料においてBHN出力と転位との関係を調査するため、冷間圧延を施して転位を多数導入した純鉄において、焼なまし処理を行った際にBHN出力がどのように変化するかを調査している。その結果、焼なまし温度が高くなり転位密度が低くなっていくにつれてBHN出力も徐々に小さくなっていくことを報告している<sup>17)</sup>。その理由は、転位はBHNの発生源となるため、転位密度が高いものの方が低いものより発生するBHN出力は大きくなったものと考えられる。ただ転位密度とBHNの関係は、どのような場合にも1:1に対応するわけではないようである。例えば古屋ら<sup>18, 19)</sup>は、純鉄に塑性変形を与えた際のBHN出力変化を、詳細に転位観察を行いながら調査している。そして、塑性変形量が小さいうちは変形量とともにBHN出力は増加していくが、変形量がさらに大きくなっていくと今度は逆にBHN出力は減少してくることを報告している。その理由は、塑性変形量が小さいうちはBHNの発生源ともいえる

転位が増加してくるので、それにともないBHN出力が増加したことが考えられる。しかし転位密度がさらに増加してくると、それとともに今度は硬さが大きく増加して材料が磁化されにくい状態になってしまう。そのためBHNは途中から減少し始めたのではないかと筆者は考えている。

3.3 析出物

フェライト結晶粒の中に直径 $d_p$ のセメンタイトの粒子が析出した組織において、先に紹介したSakamotoらは、 $\sigma$ と $\tau$ を次式のように導いた。

$$\sigma = \frac{I_s}{5C_V \cdot K \cdot \delta} \cdot \frac{d_p^2}{\alpha} \dots \dots \dots (7)$$

$$\tau = \frac{\pi \cdot t_{total}}{6} \cdot \frac{d_p^3}{\alpha} \dots \dots \dots (8)$$

$\alpha$  ; セメンタイト粒子の比質量偏差

そして式(7), (8)を、式(3)に代入するとBHN出力は次式のようになる。

$$BHN = C_p d_p^2 \dots \dots \dots (9)$$

$$C_p = C_R \left( \frac{2.6C_V \cdot K \cdot \delta \cdot t_{total}}{I_s} \right)^2$$

Fig.8は、実際に測定したBHNと粒子径との関係図であり、曲線は実験点に最小自乗法を適用して式(9)の形式に近似したものである。これより実験点は、上式の間関係をよく満たしていることが分かる。

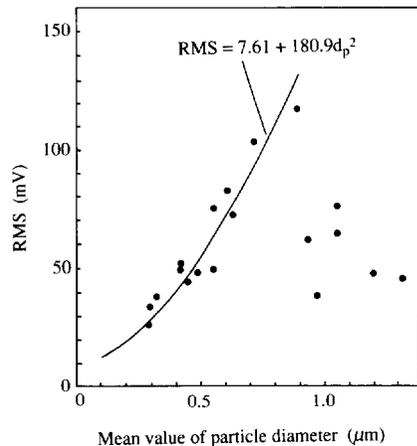


Fig.8 Dependence of RMS values on mean value of cementite particle diameter.  
(dH/dt = 40kA·m<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>, analyzed freq. = 1-2kHz)

Sakamotoらの結果は、炭素鋼においてのものであったが、中居らは、0.4C-5Cr-Mo-V 熱間工具鋼においても、両者の関係は同様に成り立つことを報告している<sup>20-22)</sup>。

また古屋<sup>23)</sup>らは、フェライト母相に黒鉛が析出した材料、すなわち球状黒鉛鑄鉄の組織評価にBHN法を適用している。ここでは、BHN出力波形にFFT処理を施し、その周波数成分を調べることにより、鑄鉄の黒鉛含有量や黒鉛の大きさが評価できることを確かめている。

以上、BHNによる組織評価の例を幾つか紹介した。BHNの発生原理を理論的に考察し、定式化している報告例は一部あるものの、磁壁と組織との相互関係は非常に複雑であり、その関係は完全には解明されていないのが現状である。

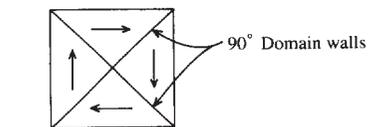
#### 4. 応力評価

BHNが実際の非破壊的計測に実用化されたのは、残留応力測定分野が最初であった。残留応力の非破壊的測定法としては、X線による方法が最も一般的である<sup>24)</sup>。しかし、X線法によって得られる情報は、材料の最表面(約10 $\mu$ m程度)に限られ、内部の値を知るためには電解研磨を行う必要がある。その点BHN法では、測定深さはX線法の約10倍程度といわれており、装置もX線法よりは比較的小型に構成できる。この章では、BHNによる応力測定の原理について述べ、さらに実際の応用例について紹介する。

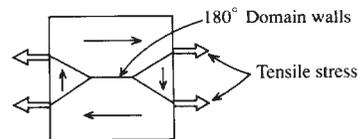
##### 4.1 単軸、二軸応力評価

鉄鋼材料などの強磁性体材料に応力が作用すると、BHN出力が変化することを報告した例は数々ある<sup>25-35)</sup>。まずそれに関する研究は、アメリカのSouthwest Research Institute (SWRI)で行われたものが最初の報告といえる<sup>25)</sup>。ここではまず試作したBHN検出装置を用いて、曲げモーメントを作用させたときのBHN出力の変化を計測し、引張応力ではBHN出力は増加し、圧縮応力だと減少することを確認している。この変化の理由をPasleyは次のように説明している。Fig.9は、強磁性体材料に応力が作用した際の磁区構造変化を模式的に示したものである。まず(a)は無負荷状態での磁区構造であり図中の磁壁は、隣り合った磁区のモー

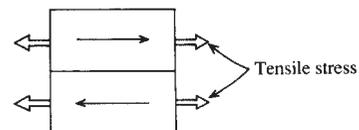
メントの方向が直交していることから、90°磁壁と呼ばれている。この状態から(b)に示すように、引張応力を作用させると、磁気弾性効果の影響で、磁気ひずみ定数が正の材料では、応力と同じ方向を向いた磁区の面積が広がるように磁壁が移動し始める。そうすると図に示したように、隣り合った磁区のモーメントの方向が逆である180°磁壁が生成してくる。そして3章で述べたように、90°磁壁より180°磁壁が移動するときの方が、エネルギーギャップが大きいので、BHN出力は大きく発生するといわれている。そのため、引張応力が負荷されるにつれて180°磁壁が増加しBHN出力も増大したものと考察している。ところで単軸引張試験では、主軸方向のひずみ比はポアソン比であり、その値は材料により一定である。そのため単軸引張試験では、BHN出力の大きさが応力のどのような成分と相関性があるのか判断できない。BHNと応力との基礎的な相関関係を調査するためには、主軸方向のひずみ比を変えて測定を行わねばならず、実際には二軸応力場での測定を行う必要がある。そこで筆者らは実際に二軸応力場でBHN計測を行い、Fig.10に示すようにBHN出力は主ひずみとは相関性が得られなかったが、Fig.11に示すように



(a) Initial condition : Domains randomly oriented, no applied stress.



(b) Same specimen as (a) except with moderate applied stress.



(c) Same specimen as (b) except with increased applied stress.

Fig.9 Schematic illustration of the effect of stress on domain structure.

主ひずみ差とは1:1に対応することを確かめている<sup>31, 32)</sup>。

#### 4.2 実際の応用例

以上のように、BHNは応力状態によって敏感に変化することが分かる。そのためこの性質を利用して残留応力測定を行うことが考えられる。実際の応用例としてKarjalainenら<sup>33)</sup>は溶接部の残留応力測定に應用している。また先に紹介したSWRIでは、航空機用のガスタービンエンジン部品の残留応力測定などに應用している<sup>35)</sup>。またアメリカのAmerican Stress Technology社では、実際にBHN法による残留応力測定装置を作製し商品化している。

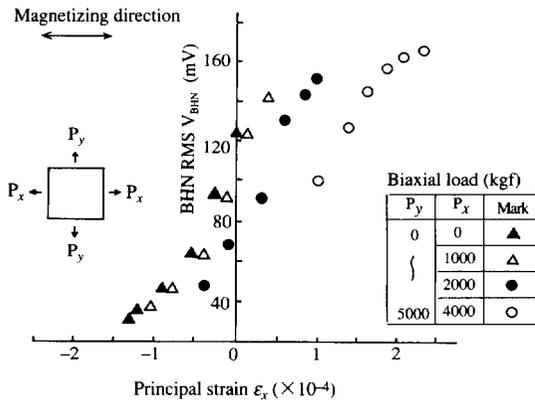


Fig.10 Relationship between BHN voltage and principal strain,  $\epsilon_x$  in biaxial test.

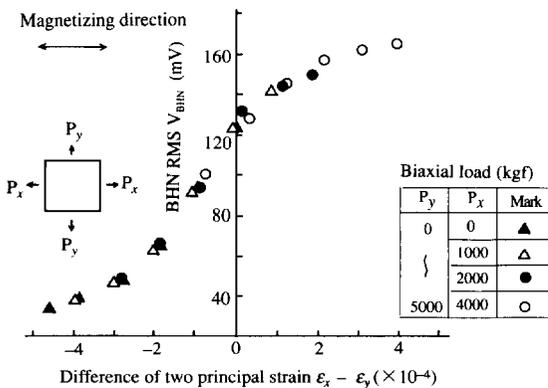


Fig.11 Relationship between BHN voltage and the difference of two principal strain,  $\epsilon_x$  and  $\epsilon_y$  in biaxial test.

以上、BHNによる応力測定を紹介してきたが、この方法の欠点としては、BHNは主応力差と相関はあるものの、主応力の値は求めることができないことである。またBHN出力は応力だけでなく、材料の組織の違いによっても敏感に変化するので、対象とする材料の検定線をあらかじめ作成しておかねばならない<sup>36)</sup>。また測定品の形状、大きさなどが変化した場合磁化のされ方が変化するので、出力が異なってしまう。このように考えると、BHNによる汎用的な応力測定装置を作成することは実用的でないといわざるを得ない。さらに、得られた値の信頼性は、X線法では、X線の回折線図の形状や $2\theta \cdot \sin^2 \psi$ 線図のばらつきなどからある程度判断できるのに対し、BHN法では判断が難しい。これは他の残留応力測定法として提案されている音弾性法<sup>37)</sup>や磁気ひずみ法<sup>38)</sup>でもある程度同様といえる。信頼性の判断ができることがX線法の最大の利点であると筆者は考えている。ただしBHN法は測定自体はX線法より迅速・簡便であるので、この方法を活用するには例えば、材質や形状があらかじめ定まっていて大量生産されている部品の検査、として専用に利用することにした場合、あらかじめその部品について検定線を作成しておけば良いので、非常に効果的と考えられる。

## 5. 材質劣化の評価

### 5.1 疲労評価

#### 5.1.1 疲労損傷評価

材料の疲労損傷を非破壊的に検出し、疲労破壊の予知を行うことは安全保障上非常に重要である。疲労の非破壊的検出法としてはこれまで、X線法<sup>39)</sup>、電気抵抗法<sup>40)</sup>、超音波法<sup>41)</sup>、磁気ひずみ法<sup>42)</sup>などによる方法が報告されてはいるものの、一長一短あり広く実用化されているものはないのが現状である。この節ではBHN法を利用した疲労損傷評価を試みた例を紹介する。

#### (a) 低炭素鋼

BHN法で疲労評価を試みた最初の例はKarjalainenら<sup>43, 44)</sup>の報告である。ここでは低炭素鋼(0.12% C鋼)において繰返し曲げ疲労試験を行い、それにとまなうBHN出力変化を調べている。その結果、疲労過程においてBHN出力が減少することを

報告しており、その変化は、残留応力変化によるものと述べている。また古屋ら<sup>45, 46)</sup>も低炭素鋼において、疲労にともないBHN出力が徐々に減少していることを報告している。しかしここでは比較的 low サイクル疲労で試験を行っているため、試験中に材料が巨視的に塑性変形しているため、硬さが大きく増加していることも報告されている。そのためBHN出力は、硬さの増加にともない減少したものと筆者は考えている。

#### (b) 中炭素鋼

低炭素鋼では、材料の耐久限と降伏応力の値が比較的接近しているため、これまでの報告例を見ると、繰返し負荷応力が降伏応力以上である。そのため塑性変形による巨視的な材質変化を検出していたり、残留応力変化を検出しているものが多い。そこで筆者ら<sup>47)</sup>は、耐久限と降伏応力の差が比較的大きいS55C中炭素鋼の焼ならし材及び調質材において、巨視的な降伏応力以下の繰返し負荷を与えた際の疲労過程におけるBHN出力変化を調査した。Fig.12は焼ならし材における試験結果であり、(a)は疲労過程におけるBHN出力変化、(b)と(c)は比較のため測定した、硬さとX線半価幅変化を示したものである。これより、疲労にともないBHN出力は徐々に増加していることが分かる。また硬さは(b)に示すように、疲労にともない若干硬化する傾向を示しており、X線半価幅は(c)に示すように若干増加していた。そしてこれらのパラメータにおいて、破断までの変化量に対するばらつき量の割合を比較してみると、BHNによる方法が最もばらつきが小さく、疲労を敏感に検出できていることが分かる。次にS55C調質材において同様に、疲労過程におけるBHN出力、硬さ、X線半価幅の変化を調査した結果をFig.13に示す。これによるとBHN出力は、調質材の場合と異なり、(a)に示すように疲労過程において徐々に減少してくることが分かる。また硬さは(b)のように若干軟化しており、X線半価幅は(c)のように若干減少していくことが分かる。さて、このような変化をした理由の詳細は今のところ明らかでないが、金属材料の疲労破壊は一般的に、材料に繰返し塑性変形が作用することによって発生する。そしてこの塑性変形は、転位の運動によって生じ

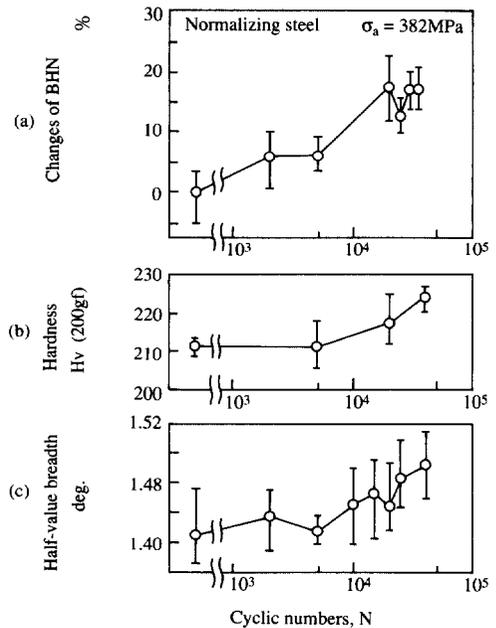


Fig.12 Changes of BHN, hardness, and half-value breadth in cyclic numbers. (Normalizing steel)

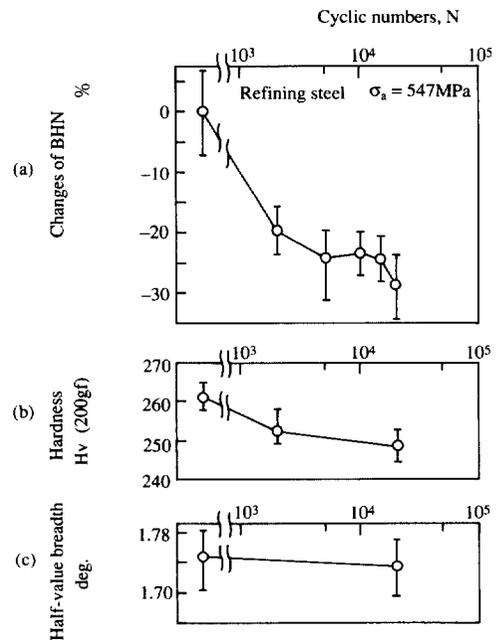


Fig.13 Changes of BHN, hardness, and half-value breadth in cyclic numbers. (Refining steel)

る。ところで一般的に、十分に焼なました材料で疲労前の転位密度が低いもの場合は、疲労にともない転位が増殖して硬化してくる。それに対して極度に冷間圧延などされ硬化した材料では、加工時に多数導入された転位が疲労とともに再配列して転位密度が減少して軟化してくる<sup>48)</sup>。転位が増加するとBHN発生源が増加することになるので、BHN出力が増加し、逆に転位が少なくなるとBHN出力が減少してくることが考えられる。Fig.12に示したように、焼ならし材において疲労過程においてBHN出力が増加したのは、前者の現象が起こったためと考えてもおかしくない。しかし、Fig.13のように調質材においてBHN出力が減少したのは、後者の現象が起こったためとは一概にいえない。それは、焼入れ時には転位が多数導入されてもその後の調質処理によって転位密度が減少しているからである。この原因の詳細については現在のところ明らかではなく、現象の解明は今後の検討課題である。

### (c) 高強度鋼

平沢ら<sup>49, 50)</sup>は蒸気タービンロータ材であるCr-Mo系合金鋼(Cr-Mo-V鋼)において、低サイクル疲労にともなうBHN出力変化を調べている。ここでは疲労過程において、BHN出力は徐々に減少してくることを確かめ、これは疲労過程における微小亀裂の発生、成長挙動と相関があると述べている。

また、Desvignes<sup>51)</sup>らはショットピーニングを施して圧縮残留応力を付加したSi-Mn系合金鋼において、疲労にともなうBHN出力変化を調査している。ここでは疲労過程において圧縮残留応力が徐々に緩和されてくるので、BHN出力が疲労にともない増加してくることを報告している。

またTitto<sup>52)</sup>は、高強度鋼においてBHN出力を測定し、BHN出力が高い部品ほど疲労寿命が短いことを報告している。これは製造の際、研削焼けなどによって材料の表面硬度が低下し、脆弱化していたためと述べている。

以上のようにBHNによる疲労損傷評価の例を、幾つかあげてみたが、その内容を参照してみると、BHNによって、塑性変形による巨視的な硬さ変化を検出している場合、残留応力変化を検出している場合、微小亀裂の生成を検出している場合など

様々であり、その計測対象は同一ではない。しかしもともと金属材料の疲労現象そのものも、材料によってその現象が全く同等というわけではない。そのためその材料がどのような疲労損傷を受けるか理解し、どの因子に注目するのがその材料の破壊を評価する上で重要か考察し、その因子の変化をBHNによって検出できるか否か判断して利用していくことが良いと思われる。

### 5.1.2 耐久限評価

磁気的バルクハウゼンノイズとは強磁性体材料を磁化させた際に発生するものであるが、Ruuskanenら<sup>54)</sup>は材料に繰返し負荷を与えただけでも磁気ノイズが発生することを報告している。この信号をRuuskanenらは機械的バルクハウゼンノイズ(以後、Mechanical BHNと称する。)と呼んでいる。

この信号の発生原理は、今まで述べてきた磁気的BHNとほぼ同等であり、磁壁を移動させる駆動力が磁場か応力かの相違のみといえる。

この信号を利用した応用例としてRuuskanenらは、鉄鋼材料の耐久限評価を試みている<sup>54-56)</sup>。その方法をFig.14に示す。これは応力振幅を大きくしていったときのMechanical BHN出力を計測したものであるが、その関係には図に示すように極大点があることが分かる。そしてその最大点での応力振幅値 $\sigma_B$ がその材料の耐久限にほぼ相当すると述べている。この手法で耐久限が評価できる理由は、材料の微小な塑性変形成分を検出してい

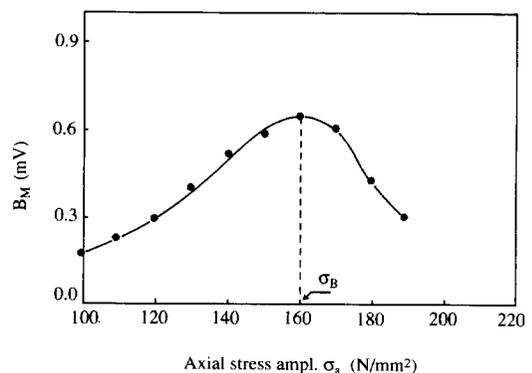


Fig.14 The effective value  $B_M$  of the magnetic pulses induced during cycling as a function of the axial stress amplitude  $\sigma_a$ .

るためではないかと筆者は考えている。鉄鋼部材の耐久限は、その材料の硬さや形状、負荷の種類などが分かれば、それらよりある程度推定できる場合が多い。しかしそれらが明らかでない場合など特殊な場合の評価には、この手法の適用も考えられよう。

## 5.2 その他の劣化評価

最後に、BHNを利用したその他の材質劣化評価を試みたものの中で、興味深いものを幾つか紹介してみる。

### 5.2.1 Cr-Mo系合金鋼の焼戻し脆化評価

Cr-Mo系合金鋼は優れた高温機器材料として利用されているが、高温で長期間にわたって使用された場合、焼戻し脆化と呼ばれる劣化現象が起こる。これは粒界にP、Sなどの不純物元素が偏析するため起こる脆化現象である。ただしこの劣化現象は、粒界に微小な不純物が偏析するものの巨視的な金属組織や、硬さなどはほとんど変化していない。その劣化を検出するため、様々な非破壊的検出方法が検討されてはいるものの決定的な方法はないのが現状である<sup>57, 58)</sup>。この劣化の評価にBHN法を適用し可能性を明らかにした例は幾つかあるが<sup>59-61)</sup>、Fig.15,16に筆者らの行った結果を示す。ここでは劣化したCr-Mo系合金鋼(Ni-Cr-Mo-V鋼)において、BHN出力やさらに比較のため他の磁気パラメータを測定している。図より、BHN以外の磁気パラメータでは劣化しても全く変化は認められていないのに対し、BHN出力は劣化とともに変化していることが分かる。このことは、BHNが他のパラメータより微小な組織変化を検出できる可能性のあることを示している。

### 5.2.2 合金鋼のクリープ損傷評価

高温用として使用されるCr-Mo系合金鋼では、使用中に時効による損傷とともにクリープによる損傷を受ける。そのため両者の損傷の分離を行うことが重要である。このような損傷の評価に野中ら<sup>62, 63)</sup>はBHN法を適用し、硬さ測定とBHN出力とを組み合わせ、時効による損傷とクリープによる損傷の分離を試みている。また大高ら<sup>64)</sup>は超伝導量子干渉素子(SQUIDセンサ)を用いて、様々な磁気パラメータを利用して、同様に時効による損傷とクリープによる損傷の分離を試みてい

る。材料評価を行う場合、単一のパラメータのみでは様々な因子の影響を同時に検出してしまうので、その各々を分離するためには、いろいろなパラメータを組み合わせ、評価を行っていくことも重要と思われる。

また詳細は割愛するが、BHNを利用して水素脆化を予測した報告<sup>2, 65)</sup>や、研削焼けした部位の検出<sup>53)</sup>などに応用している例もある。

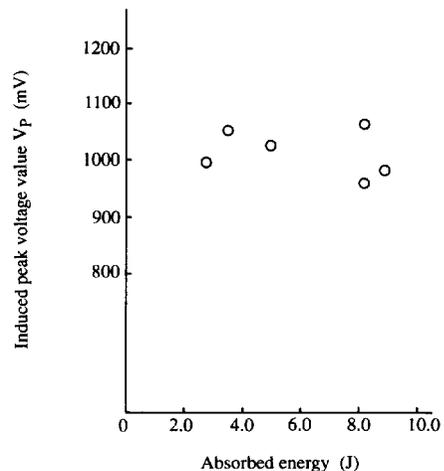


Fig.15 Relationship between  $V_p$  and absorbed energy.

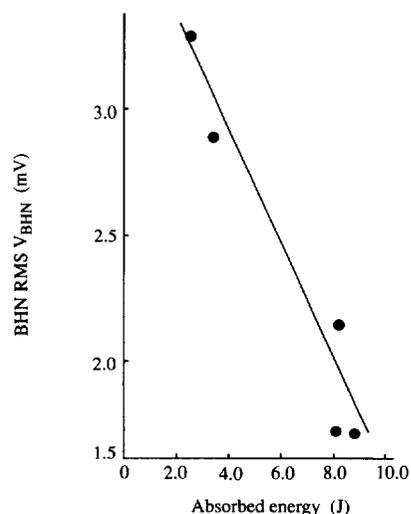


Fig.16 Relationship between BHN and absorbed energy.

## 6. まとめ

以上のようにBHNを利用した材料特性の非破壊的検出例を筆者らの行った結果も交えて紹介した。BHN法は最初は応力測定においてその利用が試みられ、最近では微小な組織変化を伴う劣化評価へその利用が検討されている。本文では、BHNを利用した材料特性の非破壊的検出例を紹介するとともに、この手法の利点および欠点などについて、筆者の思うところについて述べた。BHNはいろいろな要因が関係し合って発生しているので、その発生機構はまだ完全には解明されていないのが現状である。だからこそBHNは従来の非破壊的検出法では検出が難しかったものにも、適用できる可能性を秘めているともいえる。本文を読んで少しでもBHNに興味をもっていただけたら幸いである。

### 参 考 文 献

- 1) Barkhausen, H. : Phys. Zeitschrift, 20(1919), 201
- 2) Lomaev, G. V. and Malyshev, V. S. : Defektoskopiya, No.3 (1984), 54
- 3) Rudyak, V. M. : Soviet Phys. Uspekhi, 13-4(1971), 461
- 4) Sakamoto, H., Okada, M. and Homma, M. : IEEE Trans. Magn., 23-5(1987), 2236
- 5) Saynajakangas, S. : IEEE Trans. Magn., 10-1(1974), 39
- 6) Saynajakangas, S. and Ojala, M. : IEEE Trans. Magn., 9-4(1973), 641
- 7) Titto, S. and Saynajakangas, S. : IEEE Trans. Magn., 11-6 (1975), 1666
- 8) Titto, S., Ojala, M. and Saynajakangas, S. : Non Destruct. Test., 7(1976), 117
- 9) Titto, S. and Saynajakangas, S. : IEEE Trans. Magn., 12-4 (1976), 406
- 10) Gajdusek, J. and Potocky, L. : J. Magn. Magn. Mater., 41 (1984), 272
- 11) Gajdusek, J. and Potocky, L. : J. Magn. Magn. Mater., 19 (1980), 374
- 12) Ranjan, R., Jiles, D. C. and Thompson, R. : J. Appl. Phys., 61-8(1987), 3199
- 13) Hill, R., Cowking, A., Mackersie, J. : NDT & E Int., 24-4 (1991), 179
- 14) 古屋泰文, 島田平八 : 非破壊検査, 35-11(1986), 811
- 15) Scherpereel, D. E., Kazmerski, L. and Allen, C. W. : Metall. Trans., 1-2(1970), 517
- 16) Buttle, D., Scruby, C. and Jakubovics, J. : Philos. Mag. A, 55- 6(1987), 717
- 17) Ranjan, R., Jiles, D. and Thompson, R. : ref. 12), p.3196
- 18) 古屋泰文, 持田哲男, 加藤久詞, 小幡充男 : 非破壊検査
- 平成3年度春期大会講演概要集, (1991), 67
- 19) 古屋泰文, 持田哲男, 加藤久詞 : NDI資料, 3976(1991), 32
- 20) Nakai, N., Furuya, Y. and Obata, M. : Mater. Trans., JIM, 30-3(1989), 197
- 21) 中居則彦, 小幡充男 : 鉄と鋼, 75 (1989), 833
- 22) 中居則彦, 小幡充男 : 鉄と鋼, 77 (1991), 147
- 23) 古屋泰文, 島田平八, 荒砥孝二 : 日本金属学会誌, 52-3 (1988), 267
- 24) 例えば, X線応力測定法, 日本材料学会編, (1965), 385, 養賢堂
- 25) Pasley, R. L. : Mater. Eval., 28-7(1970), 157
- 26) Karjalainen, L. P. and Rautioaho, R. : Pap. Summ. ASNT. Natl. Conf., 22-5(1980), 196
- 27) Ruud, C. : NDT Int., 15-1 (1982), 15
- 28) 古屋泰文, 島田平八 : 非破壊検査, 35- 8(1986), 532
- 29) Jagadish, C. and Clapham, L. : NDT Int., 22-5(1989), 297
- 30) 北川 茂 : 日本機械学会関西支部第140回講習会教材 (1987), 41
- 31) 古屋泰文, 島田平八, 伊藤勇一 : 非破壊検査, 36-8(1987), 530
- 32) 伊藤勇一, 古屋泰文, 島田平八 : 非破壊検査, 37-8(1988), 649
- 33) Karjalainen, L. P. and Moilainen, M. : Materialpruf, 22-5 (1980), 196
- 34) 古屋泰文, 島田平八 : 非破壊検査, 38-5 (1989), 426
- 35) Barton, J. R. and Kusenberger, F. N. : Trans. ASME, Ser. A No.4(1974), 349
- 36) Langman, R. : NDT Int., 20-2(1987), 93
- 37) 例えば, 福岡秀和 : 非破壊検査, 33-9(1984), 633
- 38) 例えば, 吉永昭男 : 機械の研究, 18-12(966), 14
- 39) 平修二, 本多和男 : 日本機械学会論文集, 26-167(1967), 926
- 40) Charsley, P. and Robins, B. : Mater. Sci. Eng., 17 (1975), 117
- 41) 尾野英夫, 仁瓶寛太, 吉田昌平, 堀川武 : 溶接学会誌, 56-7(1987), 35
- 42) 遠藤和芳, 吉永昭男, 中野政身, 岡崎洋二 : ref. 28), p.671
- 43) Karjalainen, L. P. and Moilainen, M. : NDT Int., 12-2 (1987), 51
- 44) Karjalainen, L. P. and Moilainen, M. : IEEE Trans. Magn., 16-3(1980), 514
- 45) 古屋泰文, 島田平八 : 第21回SSMシンポジウム講演概要集, (1989), 131
- 46) 古屋泰文, 島田平八 : 非破壊検査, 41-4 (1992), 215
- 47) 伊藤勇一, 猿木勝司 : 第36回材料研究連合講演会前刷集, (1992), 147
- 48) Klesnil, M. and Lukas, P. : 金属疲労の力学と組織学, (1984), 217, 養賢堂
- 49) 平沢泰治, 藤山一成, 古村一朗, 恩田勝弘 : 日本機械学会第68期全国大会講演論文集, (1990), 392

- 50) 恩田勝弘, 平沢泰治, 藤山一成, 古村一朗 : 非破壊検査平成2年度秋季大会講演概要集, (1990), 185
- 51) Desvignes, M. and Gentil, B. : Residual Stresses Sci. Technol., 1(1987), 441
- 52) Titto, K. : Non Destr. Test. Eval., 5(1989), 29
- 53) 益子羊子, 三島勇 : センサ技術, 8-5 (1988), 29
- 54) Ruuskanen, P. and Kettunen, P. : Adv. Fract. Res., 5(1984), 3449
- 55) Ruuskanen, P. and Kettunen, P. : Rey. Prog. Quant. Nondestr. Eval., 4B, (1985), 947
- 56) Ruuskanen, P. and Kettunen, P. : NDT Int., 5-3(1980), 105
- 57) 長谷川祐蔵 : 溶接学会誌, 56-7(1987), 401
- 58) 北川正樹 : 溶接学会誌, 59-3(1990), 401
- 59) Kameda, J. and Ranjan, R. : Acta Metall., 35-7 (1987), 1515
- 60) Kameda, J. and Ranjan, R. : ref.59, p.1527
- 61) 小幡充男, 伊藤勇一, 古屋泰文, 飯島克己, 福井寛 : 日本機械学会論文集(A編), 56-527(1990), 1677
- 62) 加藤久詞, 古屋泰文, 小幡充男, 野中勇, 北川正樹 : ref. 18), p. 65
- 63) 野中勇, 北川正樹, 古屋泰文 : 日本鉄鋼協会 平成3年春期講演大会概要集, (1991), 843
- 64) 大高正広, Evanson, S., 長谷川邦夫 : 日本機械学会論文集(A編), 57-540(1991), 1891
- 65) Moskvina, V. N. and Leshchenko, A. I. : Defectoskopiya, 1 (1983), 35

## 著者紹介



伊藤勇一 Yuichi Ito  
 生年：1964年。  
 所属：強度評価研究室。  
 分野：材料の強度評価に関する研究。  
 学会等：日本非破壊検査協会，日本材料学会会員。