

氏 名	さかもとひろあき 坂 本 広 明
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 60 年 3 月 26 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 金属材料工学専攻
学 位 論 文 題 目	炭素鋼におけるバルクハウゼンノイズに関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 本間 基文
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 本間 基文 東北大学教授 西沢 泰二 東北大学教授 島田 平八

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

鉄鋼材料は他の材料と同じく使用目的に適する組織に調整され使用に供されている。したがって、材質およびその均一性あるいは安定性に対する要求が高い材料では組織を検知することが工業的に重要であり、材料の製造から最終製品に至る各段階において必要に応じて非破壊検査が実施されている。その中で、磁気的な特性による検査法は、鉄鋼材料の多くが強磁性体であること、しかも検出した磁気量の電気量への変換が容易であることから工業的に有用な方法である。本研究では、この磁気的な特性として磁化過程の広域において不連続磁化に起因して発生するバルクハウゼンノイズに注目した。すなわち、バルクハウゼンノイズの起因となる不連続磁化は逆磁区の発生や磁壁移動の磁化過程を通じて発生する。一方、それらの磁化機構は磁性体の組織に依存することから、バルクハウゼンノイズにも組織依存性が存在することになる。したがって、バルクハウゼンノイズの組織依存性を利用すれば組織の非破壊検査が可能であると推定されるからである。しかしながら、バルクハウゼンノイズの組織依存性の解明はもとより、それをを用いた組織評価も試みられていない。よって本研究では、バルクハウゼンノイズによる組織の非破壊検査への基礎資料を得る目的で、炭素鋼組織におけるバルクハウゼンノイズの磁化曲線上の発生位置およびその実効値電圧 (RMS) を測定し、組織との関係について検討した。

第2章 バルクハウゼンノイズの測定方法

図1(a)は共析鋼のパーライト組織の履歴曲線であり、試料の磁化の変化に応じて検出コイルに誘起される起電力を積分して測定される。これに対して誘起される起電力を直接測定すると図1(b)のような電圧-時間曲線($v-t$ 曲線)となる。ここで表示された $v-t$ 曲線は印加磁場が $-H_a$ から $+H_a$ へと変わる磁化反転過程で描かれたものである。この波形を基本波形と呼ぶことにする。図1(a)のAに示すように磁化が不連続的に進行している場合には、それに対応して基本波形よりも高い周波数の微小起電力が基本波形に相乗することになる。この微小起電力の高周波数成分がバルクハウゼンノイズである。そこで、基本波形の低周波数成分をフィルター回路によって除去し、残った高周波数成分を増幅して得られるバルクハウゼンノイズ波形を図1(c)に示した。図2は本研究で用いたバルクハウゼンノイズの測定回路のブロックダイアグラムである。最大印加磁場はバルクハウゼンノイズを磁化曲線上のすべての発生範囲において測定するため、炭素鋼の中で最も磁化しにくい焼入れ組織を磁化するのに必要な磁場の強さを考慮して $20 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ (250 Oe)とし、印加磁場周波数はうず電流効果と起電力の大きさを考慮して 0.5 Hz とし、印加磁場速度を一定とするため三角波を用いた。このような条件のもとで検出コイルに生じた起電力は、ハイ・パス・フィルター(H.P.F.)およびロー・パス・フィルター(L.P.F.)を通し $0.5 \sim 2 \text{ kHz}$ の周波数範囲で実効値電圧(RMS)として求めた。また、バルクハウゼンノイズの磁化曲線上における発生位置は、バルクハウゼンノイズ波形を基本波形と同一の印加磁場範囲で描き求めた。

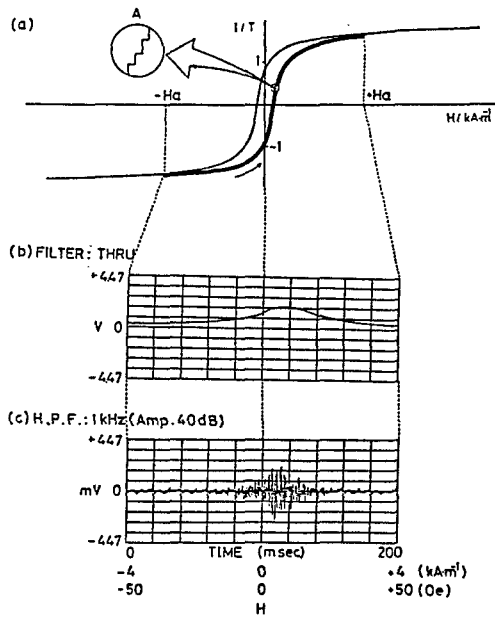


図1 共析鋼のパーライト組織における履歴曲線(a), $v-t$ 曲線(b), バルクハウゼンノイズ(c)

図2は本研究で用いたバルクハウゼンノイズの測定回路のブロックダイアグラムである。最大印加磁場はバルクハウゼンノイズを磁化曲線上のすべての発生範囲において測定するため、炭素鋼の中で最も磁化しにくい焼入れ組織を磁化するのに必要な磁場の強さを考慮して $20 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ (250 Oe)とし、印加磁場周波数はうず電流効果と起電力の大きさを考慮して 0.5 Hz とし、印加磁場速度を一定とするため三角波を用いた。このような条件のもとで検出コイルに生じた起電力は、ハイ・パス・フィルター

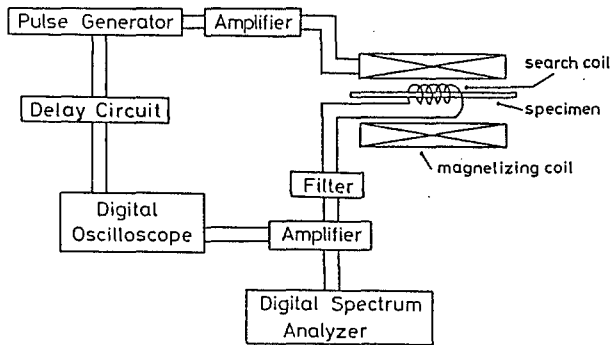


図2 バルクハウゼンノイズの測定装置の概略図

ー(H.P.F.)およびロー・パス・フィルター(L.P.F.)を通し $0.5 \sim 2 \text{ kHz}$ の周波数範囲で実効値電圧(RMS)として求めた。また、バルクハウゼンノイズの磁化曲線上における発生位置は、バルクハウゼンノイズ波形を基本波形と同一の印加磁場範囲で描き求めた。

第3章 結晶粒径およびセメントイト析出形態の相異がバルクハウゼンノイズに与える影響

本章では、フェライト単相および、そこにセメントイトが析出した炭素鋼組織のバルクハウゼン

ノイズを測定し、それぞれの組織とバルクハウゼンノイズの関係を検討した。それらの結果を要約すると以下ようになる。

(1)フェライト単相組織のバルクハウゼンノイズは磁化反転初期に大きく、その実効値電圧（RMS）は結晶粒径に依存し、図3に示すように結晶粒径が大きくなるにつれて減少する。

(2)セメンタイト粒子がフェライト粒界に析出している場合には、バルクハウゼンノイズは磁化反転初期に大きくなるが、粒内にほぼ同じ大きさのセメンタイト粒子が析出している場合には、磁化反転の全域に渡りほぼ同じ大きさのバルクハウゼンノイズが発生する。セメンタイトの析出したいずれの場合も結晶粒径によって実効値電圧（RMS）は変化せず、ほぼ一定値を示す。

(3)セメンタイト粒子の大きさが不均一な場合には、磁化反転初期に大きなバルクハウゼンノイズが発生し、中期から後期にかけては小さくなる傾向を示している。実効値電圧（RMS）は平均セメンタイト粒径に依存し、図4に示すように平均

粒径が約 $1\mu\text{m}$ 以下の場合には平均粒径が大きくなるにつれて増大する。しかし、平均粒径が約 $1\mu\text{m}$ 以上では粒径が大きくなるにつれて実効値電圧（RMS）は減少する。また、セメンタイトの充てん比が変化しても平均粒径が同じであれば実効値電圧（RMS）はほとんど変化しない。

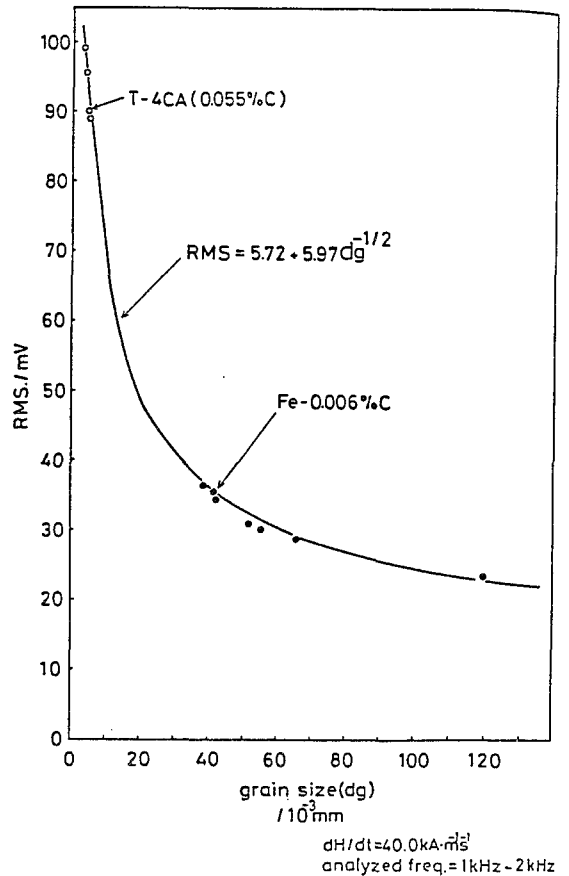


図3 フェライト結晶粒径と実効値電圧（RMS）の関係

第4章 共析鋼および2相鋼におけるバルクハウゼンノイズ

共析鋼および2相鋼のバルクハウゼンノイズを測定し、それぞれの組織とバルクハウゼンノイズの関係を検討した。それらの結果を要約すると以下ようになる。

(1)パーライト、ベイナイトおよびマルテンサイト組織では、いずれも磁化反転の中期においてバルクハウゼンノイズが大きくなる。また、パテンティング温度が低くなり、パーライト、ベイナイト、マルテンサイト組織へと変わるにつれて実効値電圧（RMS）は減少する。パーライト組織においては、パーライト層間隔に依存し、パーライト層間隔が狭くなるにつれて実効値電圧（RMS）は減少する。

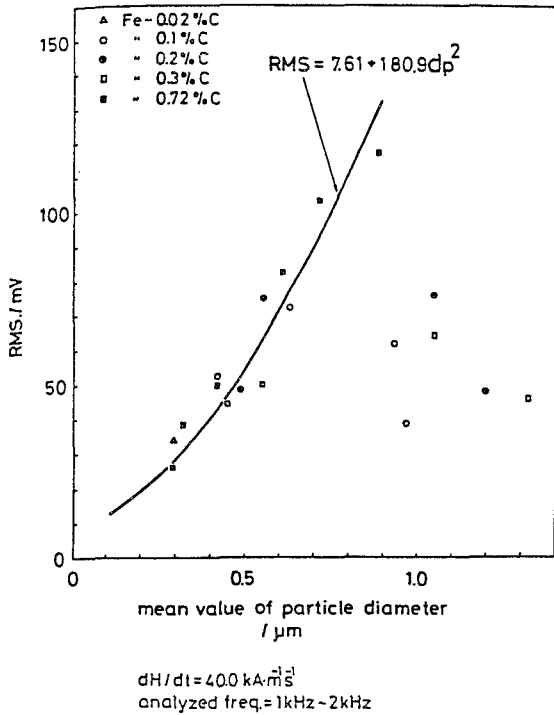


図4 球状化セメンタイト組織における平均セメンタイト粒径と実効値電圧 (RMS) の関係

場 (H_n) あるいは磁壁のピンニング磁場 (H_p) 以上の印加磁場のもとで磁性体内の個々の微小領域において次々と磁化が進行する。したがって、それらの微小領域の磁化反転に対応して起電力が次々と誘起される。その起電力をガウスパルスで近似すると、それらの総和から実効値電圧 (RMS) は次式のごとく示される。

$$V_{(RMS)} = C_R \cdot \frac{\tau^2}{\sigma^2} \dots\dots\dots (5-1)$$

ここで、 σ はガウスパルスの標準偏差、すなわちガウスパルスの持続時間に相当する。 τ はガウスパルスの発生間隔である。 C_R は磁化条件に依存する係数であり、磁化条件が一定ならば一定値となる。各組織における τ および σ は、フェライト単相組織では結晶粒界からの1つの逆磁区の発生によって1つのガウスパルスが発生し、一方、セメンタイトが析出したフェライト組織では磁壁が1つのセメンタイト粒子によるピンニングを脱出して1つのガウスパルスが発生するとして求めた。それらの結果より、実効値電圧と組織との関係は次のごとく表示される。

1. フェライト単相組織における結晶粒径 (d_g) と実効値電圧

$$V_{(RMS)} = C_g \cdot d_g^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (5-2)$$

ここで、 C_g は結晶粒径 d_g に依存しない定数である。上式を用いて前章の実験結果を整理すると相

(2) 2相鋼のバルクハウゼンノイズ波形は主相と副相のバルクハウゼンノイズ波形を加え合わせた形状を示しており、その実効値電圧 (RMS) は副相の変態組織および主相と副相の量比に依存し、副相が微細化するにつれて、また、副相の体積比が大きくなるにつれて減少する。

第5章 バルクハウゼンノイズの発生機構と実効値電圧 (RMS)

前章までに、炭素鋼におけるバルクハウゼンノイズを測定し、その組織依存性を見出すことができた。本章では、従来の研究から磁化機構が定性的に考察できるフェライト単相組織およびセメンタイトが析出したフェライト組織について、バルクハウゼンノイズの実効値電圧 (RMS) の組織依存性を理論的に検討した。

上記の炭素鋼組織では、逆磁区の発生磁

関係数 0.98 で図 3 に示すようになる。

2. セメントイト粒径 (d_p) と実効値電圧

$$V_{(RMS)} = C_p \cdot d_p^2 \quad \dots\dots\dots (5-3)$$

ここで、 C_p はセメントイト粒径 d_p に依存しない定数である。上式を用いて前章の実験結果を整理すると $d_p \leq 1 \mu\text{m}$ の範囲において相関係数 0.93 で図 4 に示すようになる。1 μm 以上の粒径においては、セメントイト粒からの逆磁区の発生がともなうため、上式の関係が適用できないものと考えられる。

なお、磁化機構が不明である共析鋼におけるバルクハウゼンノイズについても磁壁移動におけるピンニング機構を適用することによって定性的に説明することができる。

第 6 章 総 括

第 2 章から第 5 章までの研究結果を総括したもので、炭素鋼におけるバルクハウゼンノイズの測定とその組織依存性について、定量的および理論的に検討した結果を述べた。そして、それらの結果より、炭素鋼組織の非破壊検査にバルクハウゼンノイズの測定が適用できると結論した。

審 査 結 果 の 要 旨

鉄鋼材料における組織の非破壊検査は材質を制御する上で極めて重要な課題である。著者はバルクハウゼンノイズ（以下、ノイズと略記）として検出される磁化の不連続変化が磁性体の組織に依存することに着目し、炭素鋼組織の非破壊検査に関する基礎資料を得る目的で、炭素鋼におけるノイズの測定と解析を行った。本論文はそれらの成果をまとめたもので全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、炭素鋼の磁化反転におけるノイズの磁化曲線上の発生位置および実効値電圧の測定に必要な諸条件を検討している。

第3章はフェライト組織におけるノイズの測定結果で、ノイズの発生位置はフェライト単相組織では磁化反転の初期であり、セメンタイト析出組織では析出形態によって異なり、その実効値電圧はフェライト単相組織では平均結晶粒径に、球状セメンタイト組織では平均セメンタイト粒径に依存することを見出している。それらは有用な結果である。

第4章では、共析鋼および2相鋼におけるノイズの測定結果を述べている。共析鋼のノイズはいずれの変態組織においても磁化反転の大きいところで多発し、その実効値電圧はパーライト、ベーナイト、マルテンサイト組織の順に低下し、パーライト組織ではパーライト層間隔に依存する。2相鋼のノイズは副相の変態組織および主相と副相の量比に依存する。それらは有用な結果である。

第5章では、ノイズの実効値電圧を解析している。個々の領域での磁束変化による起電力をガウスパルスで近似し、それらの総和から実効値電圧を表示し、さらにフェライト単相組織には粒界での逆磁区の発生、セメンタイト析出組織にはセメンタイトによる磁壁のピンニング機構を導入して、実効値電圧の組織依存性を理論的に検討している。それらの結果は測定結果と一致している。また共析鋼におけるノイズの組織依存性も考察している。それらは重要な知見である。

第6章は総括である。

以上要するに本論文は、炭素鋼におけるノイズの組織依存性を明らかにし、ノイズによる炭素鋼組織の非破壊検査の開発に有用な指針を与えたもので、金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。