

誘導起電力及び磁束密度変化の スペクトル解析を用いた鋼材の非破壊評価

NDE of ferromagnetic steel using spectrum analysis of changes in induced voltage and magnetic flux density

岩手大学	菊池 弘昭	Hiroaki KIKUCHI	Member
岩手大学	荒 克之	Katsuyuki ARA	Member
岩手大学	鎌田 康寛	Yasuhiro KAMADA	Member
岩手大学	小林 悟	Satoru KOBAYASHI	

Abstract

Magnetic NDE of ferromagnetic steel using spectrum analysis of induced voltage at pick-up coil and magnetic induction has been studied. Magnetic yoke, having an excitation coil and a pick-up coil, was located on a specimen, and a sinusoidal current was applied to the excitation coil for magnetizing the specimen. A voltage induced at the pick-up coil was measured, and the corresponding magnetic induction was calculated. Then, their frequency spectrums were obtained thorough Fourier analysis. For deformed specimen, higher harmonic components decrease as compared with undeformed specimen. Klirrfactors for the induced voltage and the magnetic induction were defined and evaluated. Those values decrease with increasing reduction ratio of the specimen; this means the waveforms of induced voltage and magnetic induction for a less deformed specimen has a large distortion in those waves. Those changes reflect nonlinearity of the magnetization curve of specimen. The results in this study indicate a capability of Magnetic NDE using spectrum analysis of measurement wave forms.

Keywords: NDE, magnetic yoke, spectrum analysis, magnetic induction, induced voltage, Klirrfactor

1. はじめに

鋼材の機械特性は転位や析出物などの材料組織に大きく依存する。また、鋼材の多くは鉄を多量に含んでおり強磁性を示す。強磁性体の特性はヒステリシス曲線によって表されるが、その磁化過程は磁壁の移動や磁化回転による。材料に転位や析出物が存在すると磁壁や磁化回転に相互作用を及ぼす。このことから、ヒステリシス曲線も材料組織に大きく依存する。以上のことから、機械特性と磁気特性の間には相関があり、間接的ではあるが、磁気特性の変化から機械特性の類推が可能である。よって、磁気特性を非破壊的に計測して材料の機械特性などを評価する技術が検討されている[1]。

これまで、保磁力や初透磁率などのヒステリシス曲線上で定義される磁気物理量[2],[3]が用いられてきた。しかし、ヒステリシス曲線の形状、傾きなども材料組織の変化に対応して大きく変化する。また、これらヒステリシス曲線は非線形である。よって、材料に磁界を印加した場合（正弦波励磁）の応答である磁束密度やその変化に基づいてコイルに生

じる誘起電圧は、波形がひずみを持つ。本研究では、この波形ひずみの違いを利用した非破壊評価について検討した。

2. 実験方法

本研究では、未圧延及び5 - 40%の圧延率で冷間圧延した低炭素鋼 S15C 鋼を試料として用いた（炭素 0.16 wt.%）。試料の寸法は 40 × 60 × 10 mm である。測定には磁気ヨークを用いた。

2.1 磁気ヨークと実験系

Fig. 1 は磁気ヨークの寸法及び測定系を示した図である。磁気ヨークは珪素鋼板を用いて作製し、励磁コイル、ピックアップコイルの巻数をそれぞれ 1000, 40 とした。計測では磁気ヨークを試料上に配置し、閉磁路を構成した。Fig. 2 は測定回路を示した図である。励磁コイルに振幅 0.5 A の正弦波電流を印加し、試料を励磁した。励磁周波数は 0.05, 0.1, 0.5, 1 Hz と変化させた。ピックアップコイルの誘起電圧は増幅した後、ローパスフィルタを通して PC に取り込んだ。励磁周波数 0.05, 0.1, 0.5, 1 Hz に対して増幅器のゲインはそれぞれ 20, 10, 5, 2 とし、ローパスフィルタは励磁周波数 0.05, 0.1 Hz の場合のみ用い、遮断周波数は 50 Hz とした。測定信号として

連絡先: 菊池弘昭, 〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5,
岩手大学, 電話: 019-621-6890, E-mail:
hkiku@iwate-u.ac.jp

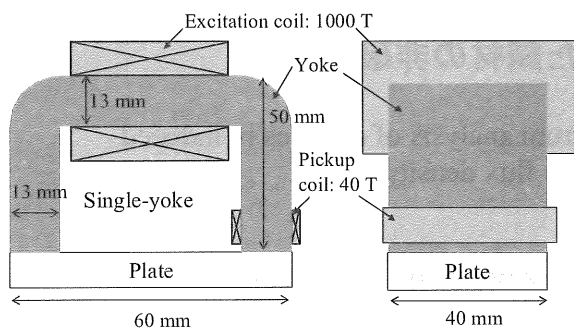


Fig. 1 Magnetic yoke and measurement system.

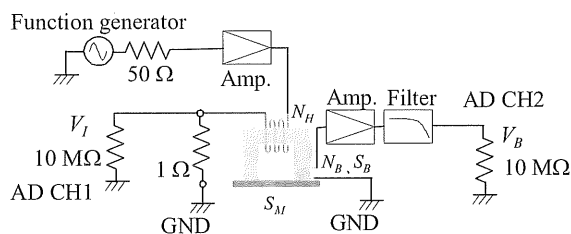


Fig. 2 Diagram of measurement circuit.

はピックアップコイルに誘起される電圧 V_B 、及びそれらを時間で積分して得られる磁束密度 B の2つを用いた。

2.2 スペクトル解析及びひずみ率

測定した信号はフーリエ変換を用い、スペクトル解析を行った。これらの結果よりそれぞれの波形のひずみ率 K_{fVB} , K_{fB} を式(1), (2) により算出した。

$$K_{fVB} = \frac{\sqrt{V_{B2}^2 + V_{B3}^2 + V_{B4}^2 + \dots}}{V_{B1}} \quad (1)$$

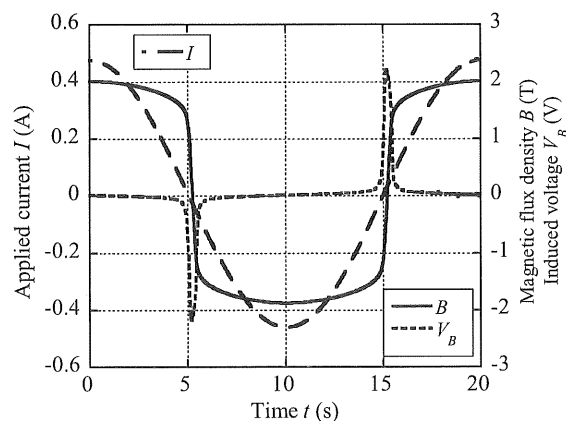
$$K_{fB} = \frac{\sqrt{B_2^2 + B_3^2 + B_4^2 + \dots}}{B_1} \quad (2)$$

ここで、 V_{B1} , B_1 はそれぞれの波形の基本波成分、 V_{B2} , V_{B3} , \dots , B_2 , B_3 , \dots は高調波成分を表す。

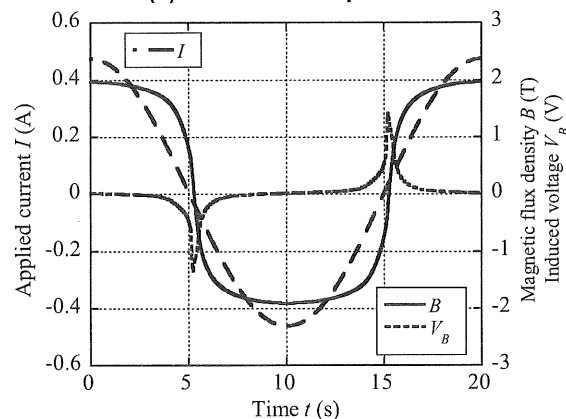
3. 実験結果

Fig. 3 は未圧延(0%)及び圧延率 40% の試料における励磁電流 I 、磁束密度 B 及びピックアップコイルの誘起電圧 V_B の時間変化波形を示した図である。励磁周波数は 0.05 Hz とした。磁束密度の変化は差がわかりにくい、飽和付近において未圧延と圧延試料で違いが見受けられる。未圧延材が急峻な立ち上がりを示すのに対し、圧延材はわずかながら立ち上がりが緩やかになる。また、誘起電圧については、圧延試料のほうがピーク値は減少し、波形の形状がブロードになっている。

Fig. 4, Fig. 5 は、Fig. 3 の測定結果を基にフーリエ変換を行い、磁束密度、誘起電圧変化それぞれのスペクトル解析を行った結果を示したものである。横



(a) Undeformed specimen



(b) Deformed specimen (40%)

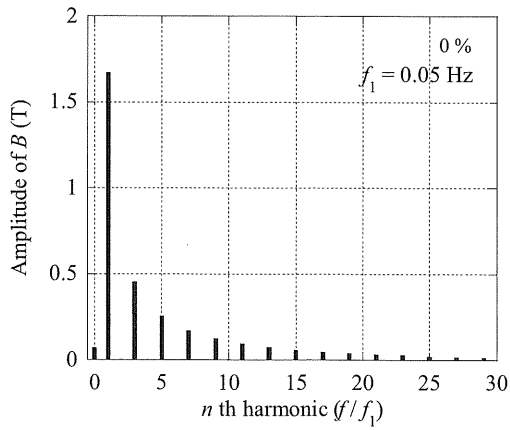
Fig. 3 Wave form of applied current I , induced voltage V_B and magnetic flux density B .

軸は基本波(0.05 Hz)で各周波数を除した値を示しており、(a)は未圧延材、(b)は圧延材(40%)の結果をそれぞれ示した。磁束密度のスペクトルは未圧延材と圧延材とで違いが明確ではない。一方、誘起電圧については、圧延材において高調波成分が減少していることが顕著にみとれる。

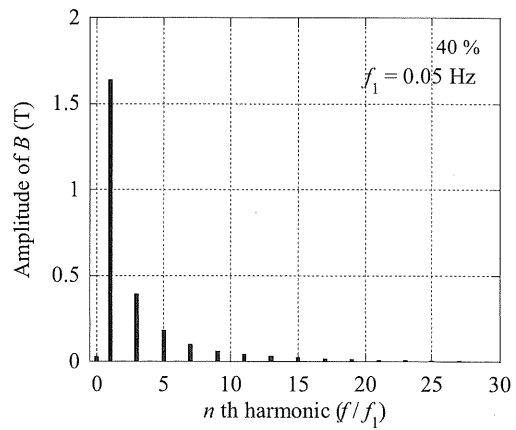
Fig. 6 は、スペクトル解析の結果から、式(1), (2) を用いてひずみ率を算出し、圧延率に対して示したものである。いずれの励磁周波数においても圧延率の増加とともにひずみ率が低下している。

4. 結言

磁気ヨークを用いてピックアップコイルに誘起される電圧及び磁束密度を測定し、それらをスペクトル解析した。未圧延と圧延した試料間にはスペクトル波形に顕著な差が見られた。これらの特徴づけるため、ひずみ率を算出した結果、圧延率が増加するに従ってひずみ率は低下した。すなわち、未圧延の試料ほど計測される誘起電圧波形、磁束密度波形のひずみが大きいことを意味している。以上の結果より、誘起電圧、磁束密度のスペクトル解析を利用した非破壊評価の可能性が示された。

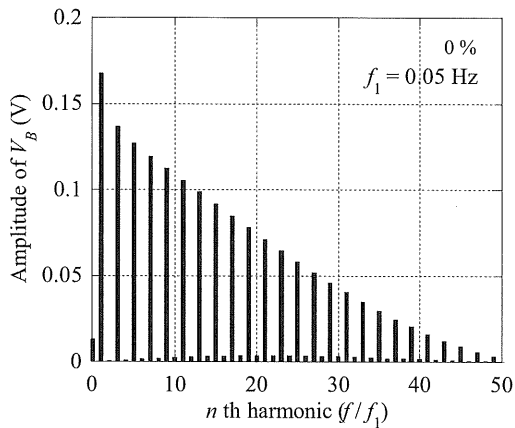


(a) Undeformed specimen

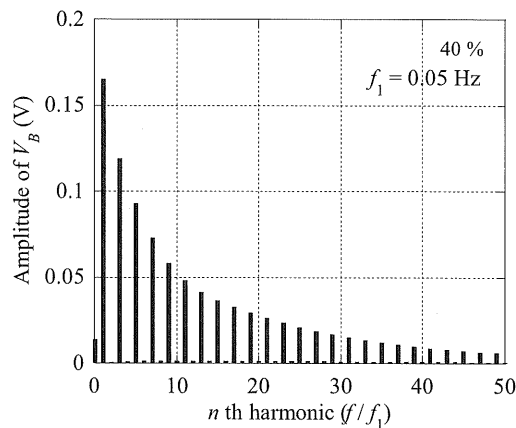


(b) Deformed specimen (40%)

Fig. 4 Spectrum of magnetic flux density.

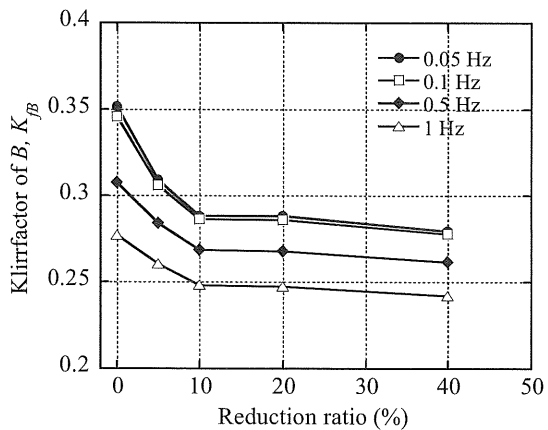


(a) Undeformed specimen

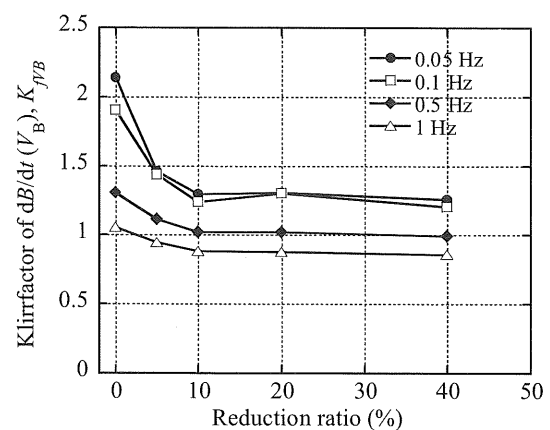


(b) Deformed specimen (40%)

Fig. 5 Spectrum of induced voltage.



(a) Magnetic flux density



(b) Induced voltage

Fig. 6 Relation between Klirrfactor and reduction ratio.

参考文献

- [1] H. Kikuchi, et al., "Diagnosis of degradation in structural ferromagnetic materials by magnetic measurement", CM2009-MFPT2009 Conference Proceedings, pp. 777-787 (2009).
 [2] H. Kronmüller, "Magnetic Techniques for the Study

- of Dislocations in Ferromagnetic Materials", *Int. J. Nondestruct. Testing*, Vol. 3, pp.315-350 (1972).
 [3] D.C. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, London UK, Chapman & Hall, 1991.