

磁気センサによる強磁性体鋼の非破壊材質評価

Non-destructive material evaluation for ferromagnetic steels by using a magnetic sensor

大分大学工学部 梶田 雄二
大分大学工学部 榎園 正人

Yuji TSUCHIDA
Masato ENOKIZONO

Member

Abstract: This paper presents a frequency sweeping excitation and spectrogram method (FSES method) by magnetic sensor for non-destructive testing of hardened carbon steel. This method can evaluate the magnetic properties in materials which were changed after induction heating. And, we tried to examine the degree of yield strength which varies with hardened conditions.

Keywords: Non-destructive testing, Material evaluation, Magnetic sensor, ferromagnetic steels

1. はじめに

本研究は、電磁気的手法を用いて非破壊的な鉄鋼材の材質評価システムを開発し、実用化することが目的である。我々はこれまでに、炭素鋼の焼入れ領域では磁気特性が変化し、その変化は焼入れ深さや度合いに依存することを明らかにした。交流を用いた磁気特性の測定において、用いる周波数成分によって得られる情報が異なることを示してきた(1)~(3)。そして、試料内部の磁気特性の変化を外部から非破壊的に測定するために、周波数掃引励磁スペクトログラム法(Frequency Sweeping Excitation and Spectrogram method、以下 FSES 法)を開発し、FSES 法により、焼入れ領域や焼入れ温度の違いを定性的に評価可能であることを報告した(4)。本手法を実製品の製造ライン上に用いた場合に生じるリフトオフや、複雑な形状である実製品に適用した場合に生じる不均一なリフトオフの影響を明らかにし、リフトオフが生じた場合でも焼入れ評価が可能であることを示した(5)。次のステップとして、実製品に施された焼入れの度合いを評価する必要がある。ここで、実製品の焼入れ評価で重要なのは、焼入れによって得られた強度や機械的特性である。そこで、焼入れ度合いを示す指標値として、金属材料において重要な機械的特性を示す降伏応力を着目した。本論文では、降伏応力を定量的に評価するため、まず、降伏応力が既知である試料を用いて、測定結果から得られる磁気特性値と降伏応力との間に相関関係が得られるかについて検証を行った。

連絡先:梶田雄二、〒870-1192 大分市旦野原 70
0 番地、大分大学工学部電気電子工学科
E-mail: tsuchida@oita-u.ac.jp

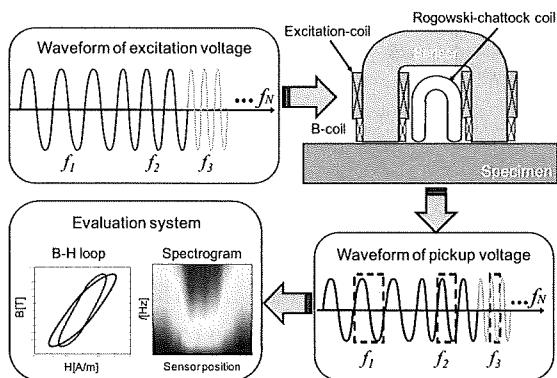


Fig. 1. Principle of FSES method.

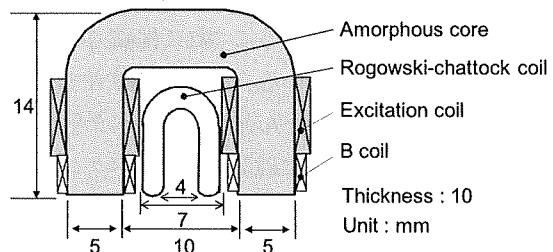


Fig. 2. Structure of magnetic sensor.

2. 降伏応力の評価

2.1 周波数掃引励磁スペクトログラム法

Fig. 1 に FSES 法の原理を示す。FSES 法は、複数の周波数成分を掃引励磁し、磁気センサより得られた測定結果から磁気特性値を求め、最終的にスペクトログラム法を用いて焼入れを評価するといった手法である(4, 5)。Fig. 1 に示すスペクトログラム法は、横軸を測定位置、縦軸を周波数として、複数の周波数成分から得られた磁気特性を二次元的に表わすことができ、焼入れ領域における磁気特性変化を定性的に評価することができる。Fig.

2に磁気センサの構造を示す。磁束密度測定用Bコイルと磁界強度測定用としてロゴスキー・チャトックコイル(Hコイル)が設置され、外部から非破壊的に磁束密度波形と磁界強度波形の測定が可能である。測定条件として励磁周波数や試料の磁気特性が異なる場合でも、Bコイルより得られる磁束密度の最大値を一定となるようにフィードバック制御を行った。そのため、試料の材料特性が異なる場合でも同じ磁束に対する磁気特性の比較が可能である。また、磁束密度を同条件とした場合、保磁力と磁気損失を用いることでリフトオフの影響をほとんど受けず焼入れの評価が可能であることを報告した(5)。本測定では保磁力 H_c [A/m]と磁気損失 W_m [W/kg]を用いて焼入れ評価を行った。磁気損失は、

$$W_m = \frac{1}{\rho T} \oint H \cdot dB \quad \dots \dots \dots (1)$$

にて計算した。ここで、 ρ は材料密度、 T は周期である。

2.2 降伏応力の定性的評価

FSES法を用いて母材試料の焼入れ評価を行う。Fig. 3に示すように、直線状に100 mm、1 mm間隔でセンサを走査して測定した。最大磁束密度を0.1 Tとし、励磁周波数は10 Hzから30 Hzまで、2 Hzごとに11個の周波数成分を用いた。

Fig. 4に保磁力のスペクトログラムを焼入れ条件ごとに示す。降伏応力が増加するにつれて保磁力の値も増加し、その違いを得られている。また、保磁力では周波数成分による値の変化がほとんど無く、スペクトログラムがほぼ一色である。Fig. 5に磁気損失のスペクトログラムを焼入れ条件ごとに示す。保磁力と同様、降伏応力の違いを得ることが可能である。磁気損失は保磁力とは異なり、周波数による値の変化が現れ、スペクトログラムの色度合いに変化が表れている。以上の結果より、本手法によって、降伏応力の違いを定性的に評価することが可能である。

2.3 降伏応力の定量的評価

保磁力と磁気損失を用いて降伏応力の定量的評価を行うため、それぞれの評価値における周波数特性及び絶対値の変化率を検証し、降伏応力と相関が得られる代表値の検討を行った。絶対値の変化率は、

$$\text{Rate of change}(H_c) = \frac{H_c(HA) - H_c(NH)}{H_c(NH)} \times 100 \quad \dots \dots \dots (2)$$

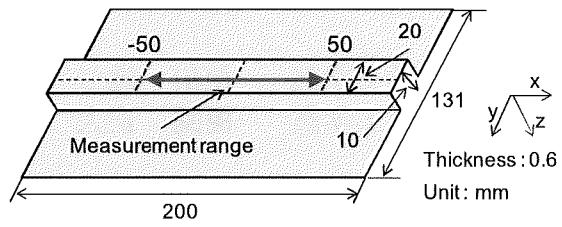


Fig. 3. Hardened carbon steel plate.

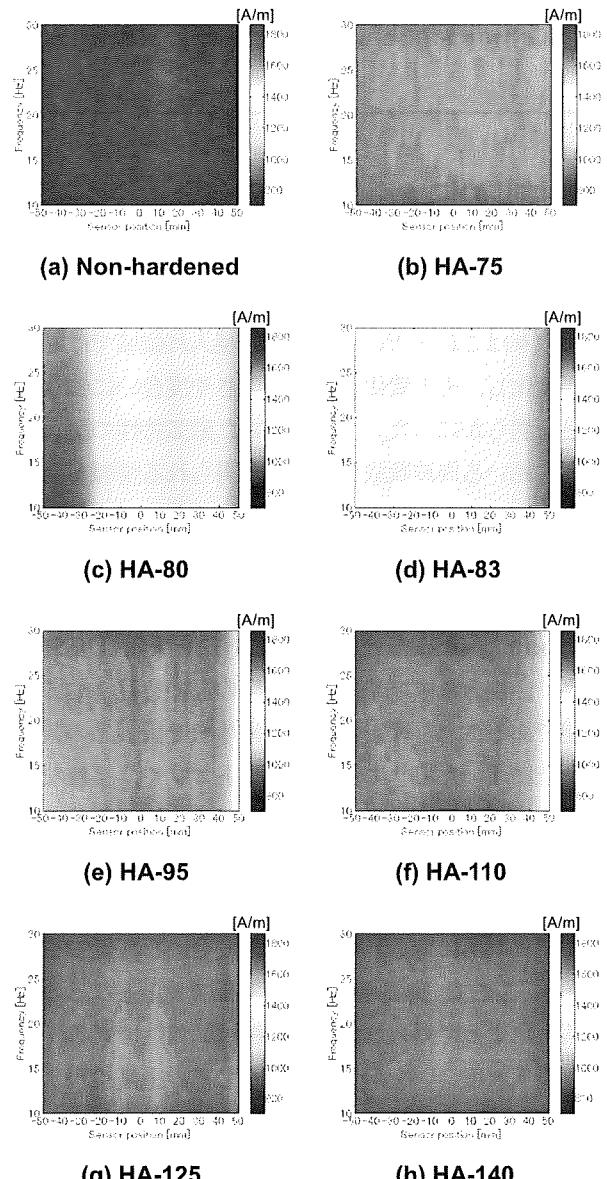


Fig. 4. Spectrogram of coercive force H_c (Base samples).

$$\text{Rate of change}(W_m) = \frac{W_m(HA) - W_m(NH)}{W_m(NH)} \times 100 \quad \dots \dots \dots (3)$$

にてそれぞれ計算した。ここで、 $H_c(HA)$ と $W_m(HA)$ は焼入れ試料測定時に得られた保磁力と磁気損失の値であり、

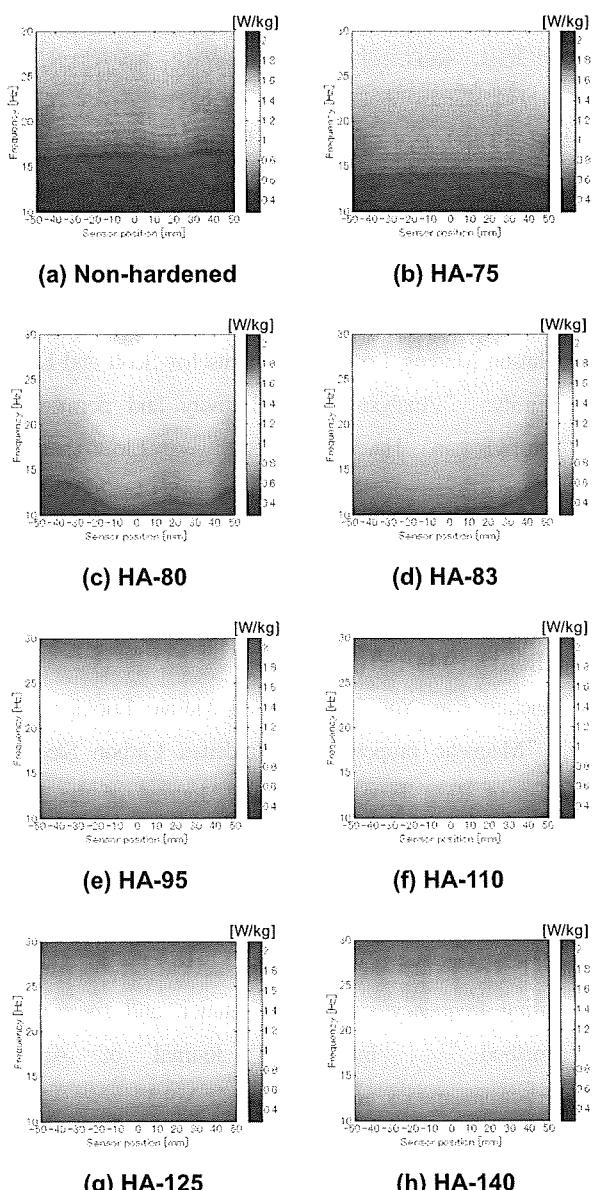


Fig. 5. Spectrogram of magnetic power loss W_m (Base samples).

$H_c(NH)$ と $W_m(NH)$ は焼入れ無し試料測定時に得られた値である。

Fig. 6 と Fig. 7 に、Fig. 3 に示す試料の中心($x=0$ mm)における保磁力及び磁気損失の周波数特性を示す。Fig. 4 のスペクトログラムと同様に、保磁力は降伏応力による違いは得られているが、周波数による値の変化がほとんど無い。それに対して磁気損失では、降伏応力の違いと周波数による値の変化が現れている。また、Fig. 7 より $f=10$ Hz 時と $f=30$ Hz 時を比較すると、降伏応力による値の差が増加していることがわかる。したがって、磁気損失の周波数勾配は降伏応力によって異なると考えられる。以上の結果より、磁気損失では周波数勾配を用いること

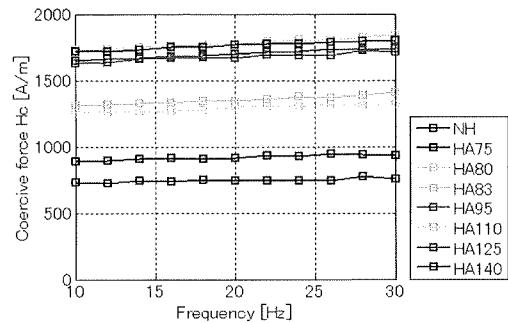


Fig. 6. Coercive force depending on frequency ($x=0$ mm, $f=10\sim30$ Hz).

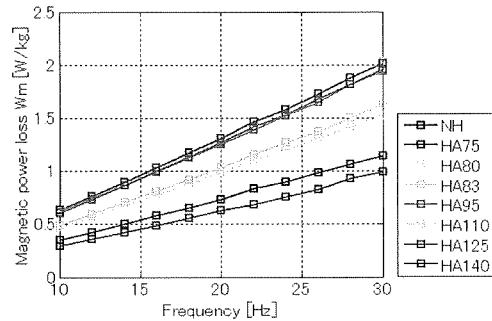


Fig. 7. Magnetic power loss depending on frequency ($x=0$ mm, $f=10\sim30$ Hz).

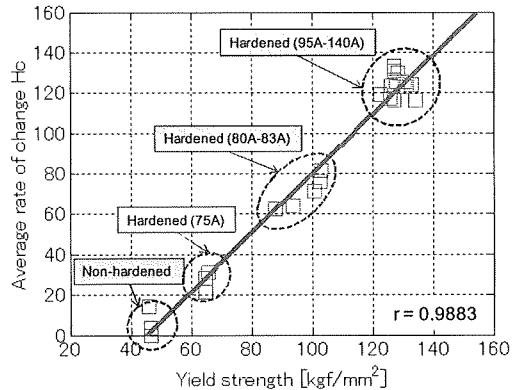


Fig. 8. Quantitative evaluation of degree of yield strength by average rate of change H_c .

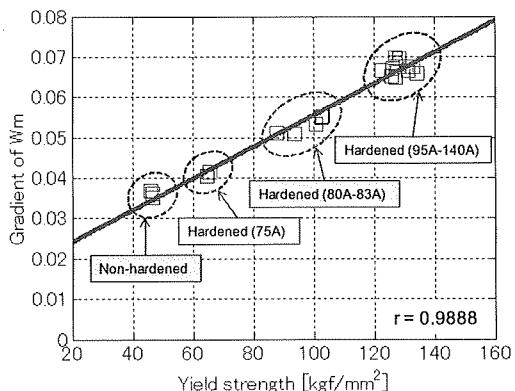


Fig. 9. Quantitative evaluation of degree of yield strength by gradient of W_m .

で降伏応力を定量的に評価することが可能と考えられる。

Fig. 8 と Fig. 9 に、23 個の母材試料からそれぞれ求めた代表値と降伏応力との相関関係を示す。保磁力の変化率における相関係数 r は 0.9883, 磁気損失の周波数勾配における相関係数 r は 0.9888 を示し、両者ともに強い相関が得られた。また、Non-hardened, HA75, HA80～83, HA95～140 のグループに大きく分けることができ、焼入れ条件による降伏応力の推定も可能であると考えられる。以上の結果より、Fig. 8 と Fig. 9 の結果を実製品に適用すれば、実製品における降伏応力の定量的評価が可能である。

3. まとめ

本論文では、電磁気的手法である周波数掃引励磁スペクトログラム法による非破壊材質評価を実用的に用いるため、焼入れ度合いによって異なる降伏応力の定量的評価方法の検討を行った。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 保磁力と磁気損失を用いたスペクトログラムによって、焼入れ条件によって異なる降伏応力を定性的に評価可能であることを示した。
- (2) 保磁力では絶対値を利用した変化率(焼入れ無し時の保磁力に対する割合)、磁気損失では周波数に対する値の勾配を利用してことで、降伏応力と強い相関を得ることができ、定量的評価が可能であることを示した。

今後の課題として、保磁力の変化率と磁気損失の周波数勾配を用いた降伏応力値の定量的評価の精度について検証する必要がある。また、異なる形状及び、異なる焼入れ条件の製品に本手法を適用し、焼入れ評価が可能であるか検証する必要がある。

謝辞

本研究は、特別会計に関する法律（エネルギー対策特別会計）に基づく文部科学省からの受託事業として、福井大学が実施した平成 23 年度「「もんじゅ」における高速増殖炉の実用化のための中核的研究開発」において、大分大学が再委託を受けて実施した成果を含みます。

参考文献

- [1] Johnson Marcus, Lo Chester, Hentscher Scott and Kinser Emily: “Analysis of conductivity and permeability profiles in Hardened steel” Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IX), pp. 135-142 (2005)
- [2] Y. Kai, Y. Tsuchida, M. Enokizono : “Nondestructive Evaluation of Case Hardening by Measuring Magnetic Properties”, Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IX), pp. 143-150 (2005)
- [3] Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida and Masato Enokizono : “Magnetic properties of Hardened Carbon Steel by Cutout Ring Type Specimen”, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.14, No.1 pp. 145-150 (2006)
- [4] Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida and Masato Enokizono : “Non-destructive evaluation for hardened carbon steel by using frequency sweeping excitation and spectrogram method ” , International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.32, No.3-4, pp. 1287-1294 (2010)
- [5] Taisuke Matsuda, Yuji Tsuchida, Masato Enokizono : “Frequency Sweeping Excitation and Spectrogram Method to Evaluate Hardened Carbon Steel”, Journal of Material Science Forum (under renewing)

(平成 24 年 7 月 2 日)