

非線形電磁場解析とその鉄鋼材料の劣化評価への応用

Nonlinear Electromagnetic Field Analysis and Its Application to Nondestructive Evaluation in Material Degradation of Steel Samples

神戸大学自然科学研究科 小島 史男 Fumio KOJIMA Member
神戸大学自然科学研究科 西山 亮 Ryo NISHIYAMA Student Member

This paper is concerned with a computational method for evaluating a degradation level of magnetic materials. Applying current to a probe with magnetic yoke, the detecting signal can be measured by pick-up coil attached with the probe. An inspection model is described by a nonlinear Euler equation in two dimensions with the state dependent magnetic permeability. The nonlinear output least square problem is formulated for identifying the material degradation parameter. Some numerical experiments are summarized.

Keywords: Material degradation, magnetic permeability, parameter estimation

1. 緒言

近年、高経年構造物の健全性評価が強く求められており、構造物に用いられている鉄鋼材料の経年劣化とその評価に関する調査研究が行われ、今まで多くの知見が得られている[1][2]。原子炉壁に用いられる炭素鋼等の強磁性材料は、き裂発生へとつながる転位密度と磁氣的性質には強い相関関係があることが確かめられている。そのため、磁氣的性質を用いて材料の転位密度を検知することで、き裂発生の前段階となる劣化状態を知ることが期待できる。本報告では、強磁性材料 SM490A 鋼を試験材料とし、B-H 曲線の実測データを基に、空間 2 次元の非線形オイラー方程式を用いて

シミュレーション環境を構築する。材料劣化指標パラメータを推定する計算アルゴリズムを提案し、数値計算実験を通してその有効性を検討する。

2. Cパラメータと B-H 曲線

磁性と転位の相関関係は、Fig.1 に示すとおり、転位密度の増加に従い、保持力の増加や残留磁束密度の減少といった点が確かめられている。しかし、保磁力は転位密度の大きい領域で飽和すること、残留磁束密度は材料を飽和磁化させなくてはならないといったことから、劣化指標パラメータとして用いるには不適当である。そこで、新たにパラメータ c を定義することによりこの問題を解決する。 c は転位密度に比例したパラメータであり、材料劣化に対して高感度であることが確かめられている[4]。強磁性体の磁束密度 B と磁場 H に生じる非線形関係は、 c を用いると

$$B(c, H) = \mu_0 H + M(c, H) \quad (1)$$

$$M = M_s \left(1 - \frac{c}{2H^2}\right) \quad (2)$$

と記述できる。 μ_0 、 M 、 M_s はそれぞれ真空透磁率、磁気モーメント、自発磁化である。Fig.2 は SM490A 鋼のリング試験片に引張り試験を施すことにより計測された、試験前後の B-H 曲線の実測データである。劣化進行に従って、 c パラメータが増加していることが確認できる。

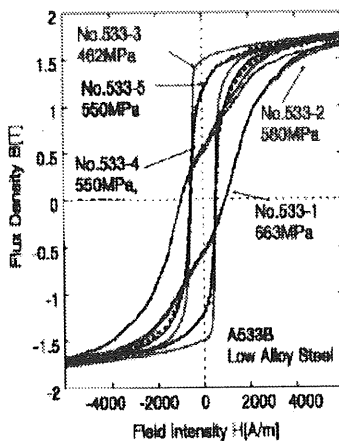


Fig.1 Hysteresis loop of A533B[3]

連絡先:小島史男 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1
神戸大学自然科学研究科 e-mail:kojima@cs.kobe-u.ac.jp

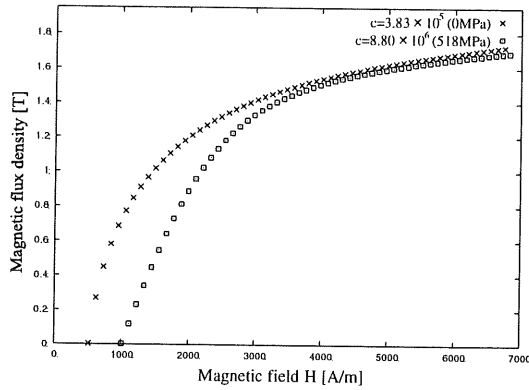


Fig2. B-H curve and c parameter

また B-H 曲線の湾曲部分において c パラメータが劣化進行を高感度にとらえていることがわかる。

3. 検査モデル

シミュレーション環境を仮想的な 2 次元平面に限定すると、位置 x における磁気ベクトルポテンシャル $A = A(x)$ は非線形オイラー方程式に従う。したがって観測モデル $Y(c)$ は以下のように記述する。

$$Y(c) = CA, \quad -\nabla \cdot \nu(c, |\nabla \times A|^2) \nabla A = \chi J \quad (3)$$

ここで、 χ は励磁コイルの巻き線部を 1 とする特性関数、 J は励磁コイルに流す強制電流密度、 C はピックアップコイル領域での補間を意味する。 ν は磁気抵抗率であり、 c と $B = |\nabla \times A|$ の関数である。磁気抵抗率は材料状態に依存する非線形問題となることから、各有限要素領域での磁束密度の値によって磁束密度を更新しながら計算する必要がある。ここでは有限要素法(分割数 N)を用いて、ニュートン・ラプソンの反復法によりシステムの状態を求める。材料の磁化過程における電流密度 $(J_i)_{obs}$ を与えたときに得られる観測磁場データ $(\tilde{Y}_i)_{obs}$ との c パラメータベクトルの有限要素モデル出力 $Y^N(J_i, c(x))$ との出力誤差関数

$$E(c) = \sum_{i=1}^{N_p} |Y^N(J_i, c(x)) - \tilde{Y}_i|^2 \quad (4)$$

を最小にする劣化評価パラメータ $c(x^*)$ を求めることが逆問題解析となる。パラメータベクトル $c(x)$ の更新には多次元関数の最適解を求めるパウエル法を用いる。

4. 計算実験

提案した手法の有効性を検証するため、数値計算シミュレーションを行った。観測データは、数値実験によって推定すべき c パラメータに対応したモデル出力として取得する。実験環境として試験材料 SM490A の薄板を想定し、劣化箇所に適当な c パラメータ分布を与える。材料表面をスキャンし、パラメータベクトル $c(x)$ ($x=1,2,\dots,6$) の値を求める。観測磁場データには 1% ノイズを付加し、その推定結果を Table.1 に示す。他の劣化箇所におけるパラメータ推定に関しては当日報告する。

Table.1 Estimated value of c parameter

	True Value	Estimated Value (Noise free)	Estimated Value (1% Noise)
$c(1)$	3.83×10^5	3.22×10^5	3.67×10^5
$c(2)$	6.00×10^6	6.52×10^6	5.64×10^6
$c(3)$	4.00×10^6	3.54×10^6	3.63×10^6
$c(4)$	8.83×10^5	8.86×10^5	1.18×10^6
$c(5)$	6.00×10^5	7.31×10^5	7.94×10^5
$c(6)$	3.83×10^5	3.23×10^5	2.95×10^5

参考文献

- [1] F. Kojima. Inverse Problems related to Electromagnetic Nondestructive Evaluation. In: R.C. Smith and M. Demetriou (eds.) Research Directions in Distributed Parameter Systems, SIAM, Philadelphia, 2003, pp. 225-241.
- [2] H. Kikuchi, K. Ara, N. Ebine, and Y. Sakai. A probe using a Magnetic Yoke for NDE of Ferromagnetic Steels. In: T. Sollier, D. Premel, and D. Lesselier (eds.), Electromagnetic Nondestructive Evaluation (VIII), IOS Press, Amsterdam, 2004, pp. 146-152.
- [3] M. Uesaka, T. Sukegawa, K. Miya, K. Yamada, S. Toyooka, N. Kasai, S. Takahashi, J. Echigoya, K. Morishita, K. Ara, N. Ebine, Y. Isobe, NDE-Based Life Science of Japanese Nuclear Reactors, The fifth International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation 1999 ENDE Short Papers, pp. 57-58, 1999.
- [4] S. Takahashi, J. Echigoya, and Z. Motoki. Magnetization Curves of Plastically Deformed Fe Metals and Alloys, Journal of Applied Physics 87(2000) 805-813.