

2次元静磁場解析におけるGAを用いた透磁率分布逆解析手法の検討

Study on Inverse Analysis Method for Reconstruction of Magnetic Permeability Distribution using 2D Magnetostatic Analysis with GA

京都大学エネルギー科学研究科 安部 正高 Masataka ABE Member
京都大学エネルギー科学研究科 松本 英治 Eiji MATSUMOTO Member

In this paper, we propose new inverse analysis method for reconstruction of magnetic permeability distribution using 2D magnetostatic analysis with Genetic Algorithm. We use Finite Element Method for 2D magnetostatic analysis, where the array of material number of each element is considered as genetic code. First, we produce genetic codes, i.e., individuals, randomly. We perform the FEM analysis to obtain the distribution of magnetic flux density near the specimen surface with respect to each individual. Subsequently, we calculate the fitness of each individual based on square error between the target value and the calculated value. Then we reproduce the generation by performing genetic operation on each individual stochastically according to its fitness. Finally, by repeating same procedure, we obtain the optimum solution, i.e., the individual which has the highest fitness in the final generation. It is found that the proposed method can reconstruct the distribution of magnetic permeability correctly and identify the defect shape.

Keywords: Inverse Analysis, Magnetic Permeability, Magnetostatic Analysis, Genetic Algorithm

1. 緒言

近年、磁氣的に材料の劣化や損傷を評価する手法が注目されている。材料の透磁率や保磁力などの磁気特性はき裂などの欠損部だけでなく、き裂発生以前の疲労・劣化部においても変化する。このような磁気特性の非均一な分布は材料近傍の空間磁場の分布として測定可能であるため、磁氣的手法によってき裂の検出や形状同定だけでなく、材料の疲労や材質分布の評価を行うことができる[1]。これまでに、数値解析や知能工学的手法に基づき、空間磁場から材料中の欠陥形状や磁気特性分布を逆解析する手法がいくつか提案されている。和木らは、Wexlerらの手法を基に、2次元有限要素法(Finite Element Method)により得られる空間磁場から材料中の透磁率分布を反復計算により求める手法を提案した[2]。しかし、この手法では解の収束に膨大な時間を要するという問題がある。また、高屋らは、材料中の磁化分布をニューラルネットワーク(Neural Network)や遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm)を用いて逆解析する手法を提案した[3][4]。この手法においては、材料の厚さ方向の磁気特性分布が考慮されていないため、材料表面の評価に限定される。

一方、欠陥形状の逆解析に関しては、植竹、迎らが簡単な形状の表面および表面下欠陥について欠陥形状と漏洩磁束分布との間の相関関係を求め、逆解析を行う手法を提案している[5][6][7]。また、関根らは様々な開口端形状の欠陥を定量的に評価する手法の検討を行っている[8][9]。著者らも、これまでNNを用いた溝状欠陥や傾斜欠陥の評価手法について検討を行ってきた[10][11]。しかし、これらの手法においては、欠陥形状や個数をあらかじめ仮定した上で評価を行うことがほとんどである。実際の探傷試験においては、欠陥形状や個数は未知であり、これらの手法を用いた欠陥評価には限界がある。

そこで、本研究では、2次元FEMとGAを併用することで、材料中の透磁率分布を再構成し、欠陥形状を推定する手法について検討を行った。この手法では、欠陥形状や個数をあらかじめ仮定する必要はなく、さらに、将来的には透磁率分布から材料評価を行う手法へと拡張することも可能である。

2. 透磁率分布の逆解析

2.1 透磁率分布逆解析手法

Fig. 1に本研究における透磁率分布逆解析の流れを示した。まず、材料中の透磁率分布をGAで取り扱えるような遺伝子配列にコーディングし個体を生成する。続いて、生成された各個体毎に2次元静磁

連絡先:安部正高、〒606-8411 京都市左京区吉田本町、
京都大学エネルギー科学研究科、電話: 075-753-3304、
e-mail:m.abe@ax7.ecs.kyoto-u.ac.jp

場解析を行う。最後に、得られた解析結果と目標値との誤差から算出される適合度に応じて、交叉や突然変異などの遺伝的操作を行い、次世代の個体を生成する。これらのステップを予め設定した世代数に達するまで繰り返し、最終世代に得られた最も適合度の高い個体が示す透磁率分布を最良解として採用する。

2.2 解析モデルと透磁率分布のコーディング

Fig. 2 に 2 次元静磁場解析の解析モデルを示す。解析は 2 次元有限要素法に基づいて行った。各領域は三角形要素により分割されている。材料中では 1 辺の長さが 0.5mm の二等辺三角形となるように設定した。x 軸正方向には地磁気と同レベルの一樣磁場 ($5 \times 10^{-5}(\text{T})$) を与えている。材料の比透磁率は一般的な鉄鋼材料を想定し 3300 とし、線形解析を行った。

材料中の透磁率分布のコーディングは材料中央 4mm×4mm の範囲の 128 要素について行った。これは、逆解析領域を限定することで解の収束性を向上させるためである。Fig. 3 には対象領域に存在する 128 要素のコーディング方法を図示した。今回は簡単のため 8 つの三角形要素を組にした 1 辺が 1mm の正方形領域をコーディング単位とし、各正方形領域に含まれる各要素には要素番号として材料部に対応

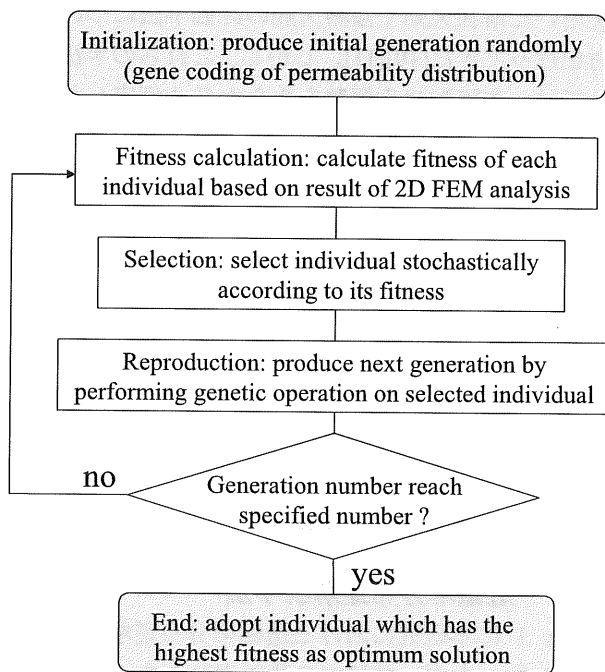


Fig. 1 Flow of inverse analysis of permeability distribution.

する 1 または空気部に対応する 0 を割り振り、その数値配列を各個体の遺伝子配列とした。本論文では遺伝子が 0 または 1 をとる 2 値解析による欠損部形状の逆解析を行う。

2.3 適合度計算方法および GA パラメータ

予め、目標とする欠陥形状について静磁場解析を行い、材料表面から 1mm 離れた空気中での磁束密度分布を計算した。続いて、各個体について同様に計算される磁束密度分布の各方向成分 B_x 、 B_y と目標値 B_x' 、 B_y' から、以下の式を用いて適合度を算出した。

$$fitness = \frac{10^{-100}}{10^{-100} + \sum \left[(B_x' - B_x)^2 + (B_y' - B_y)^2 \right]} \quad (1)$$

上式において、適合度は最大で 1 をとる。

解析における各 GA パラメータは、各世代の個体数 50、世代ギャップ 0.94、突然変異率 0.1、交叉率 0.9、最大世代数 50 で選択にはルーレット選択を採用した。またエリート戦略を採用し、エリート率は 0.6 とした。

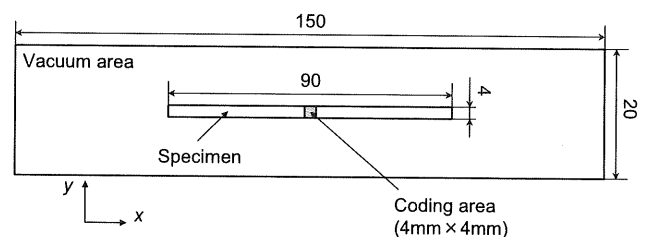


Fig. 2 Analysis model.

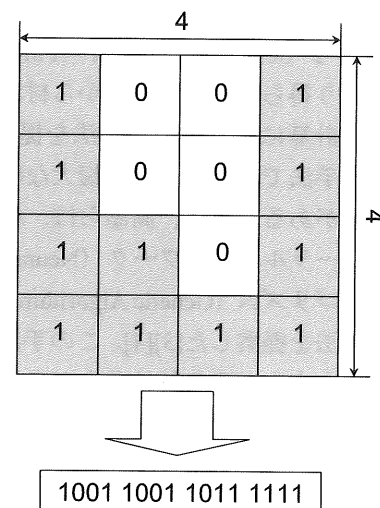


Fig. 3 Gene coding of permeability distribution.

Table 1 Results of inverse analysis.

No.	Defect shape	Gene code	Analyzed result	Achievement generation	No.	Defect shape	Gene code	Analyzed result	Achievement generation
1		[1001 1001 1111 1111]		17	11		[1111 1001 1111 1111]		14
2		[1111 1111 1001 1001]		7	12		[1111 1111 1001 1111]		17
3		[1001 1001 1001 1111]		23	13		[1111 1101 1111 1111]		7
4		[1111 1001 1001 1001]		24	14		[1111 1111 1011 1111]		6
5		[1101 1101 1111 1111]		12	15		[1101 1001 1011 1111]		6
6		[1111 1111 1011 1011]		12	16		[1111 1011 1001 1101]		21
7		[1101 1111 1111 1111]		7	17		[1011 1011 1010 1110]		12
8		[1111 1111 1111 1011]		14	18		[1100 1001 1111 1011]		2
9		[0000 1111 1111 1111]		9	19		[0101 1101 1111 1110]		11
10		[1111 1111 1111 0000]		8	20		[1100 0111 0101 0101]		45

2.4 逆解析結果

Table 1 に逆解析の実行結果を示した。今回は 20 種類の欠陥形状について逆解析を行った。Table 1 の欠陥形状の図では、黒い部分が材料部を、白い部分が空気部を表す。単純な溝状の表面欠陥や背面欠陥だけでなく、内部欠陥や屈曲した形状の欠陥、複数欠陥についても正しく逆解析を行えていることがわ

かる。最適解に到達した世代数を見ると、一番早く収束したのが番号 18 の欠陥の第 2 世代であり、また、一番収束が遅かったのが番号 20 の欠陥で、第 45 世代となっている。全体の平均では第 13.7 世代で最適解に到達している。最適解に到達した世代数をそれぞれ比較すると、欠陥の種類や形状との相関はほとんど見られない。

3. 結言

- 1) 2次元 FEM と GA を併用することで、材料中の透磁率分布を再構成し、欠陥形状を推定する手法について検討を行った。
- 2) 本手法により、単純な溝状の表面欠陥や背面欠陥だけでなく、内部欠陥や屈曲した形状の欠陥、それらの組み合わせさせた複合欠陥についても正しく逆解析を行うことができた。
- 3) 欠陥の種類や形状の複雑さと、収束までに要する世代数には相関は見られなかった。

今回の解析においては、コーディング単位が 1mm 四方と大きかったため、全ての解析において最適解と真の欠陥形状が一致した。今後、より小さいコーディング単位でより細かく複雑な欠陥形状について逆解析を行う場合には、最適解と真の欠陥形状は異なってくることが予想される。そのため、より効率的に真の欠陥形状に近い最適解を得られるような GA 設計に関する検討が必要になってくると考えられる。さらに、今回用いた解析手法を、遺伝子が 2 値ではなく、段階的な値を取るよう改良することで、欠損部形状だけでなく、材料の疲労や材質分布の評価等にも応用できるようになると考えている。

参考文献

- [1] 高橋正氣、“磁性と塑性 - 非破壊検査への応用”、日本 AEM 学会誌、Vol. 9、No. 2、2001、pp.131-139.
- [2] 和木浩、五十嵐一、本間利久、“構造物内部の透磁率分布の逆解析”、日本 AEM 学会誌、Vol. 11、No. 2、2003、pp.82-87.
- [3] 高屋茂、鈴木隆之、内一哲哉、宮健三、“マルチスケール磁気測定による材料劣化診断”、日本 AEM 学会誌、Vol. 9、No. 2、2001、pp.157-165.
- [4] Ovidu Mihalache、陳振茂、宮健三、“先進漏洩磁束探傷法に関する最近の研究動向”、日本 AEM 学会誌、Vol. 9、No. 1、2001、pp.72-77.
- [5] 植竹一蔵、伊藤秀之、斉藤鉄哉、“漏洩磁束探傷試験における表面きずの定量的評価システムについて”、非破壊検査、Vol. 41、No. 11、1992、pp.657-664.
- [6] 迎静雄、加藤光昭、西尾一政、“漏洩磁束探傷法における欠陥の定量化と漏洩磁束密度に及ぼす因子の影響の検討”、非破壊検査、Vol. 37、No. 11、1988、pp.885-894.
- [7] 迎静雄、西尾、河野 “表面下の欠陥の検出に関する基礎的検討 (第 1 報) - 磁気探傷試験に関する検討 - ”、非破壊検査、Vol. 39、No. 11、1990、pp.930-936.
- [8] 笠井尚哉、関根和喜、丸山裕章、“Far-side 漏洩磁束探傷法による開口端に角度のあるきずの評価”、非破壊検査、Vol. 51、No. 10、2002、pp.657-666.
- [9] 楊旭、笠井尚哉、関根和喜、“Far-side 漏洩磁束探傷法におけるニューラルネットワークを用いたきずの定量的評価手法”、圧力技術、Vol. 43、No. 6、2005、pp.327-334.
- [10] 安部正高、琵琶志朗、松本英治、“ニューラルネットワークを用いた 2 軸 MFLT による傾斜欠陥の形状推定 - 2 次元静磁場解析による検討 - ”、日本 AEM 学会誌、Vol. 17、No. 2、2009、pp.206-210.
- [11] Masataka ABE, Shiro BIWA, Eiji MATSUMOTO 、 “Three dimensional evaluation of parallelepiped flaw using amorphous MI sensor and neural network in biaxial MFLT ”、Proceedings of the 3rd International Conference on Sensing Technology、Tainan、2008、pp.238-241.
- [12] 青木繁、“逆解析を利用した鉄筋腐食の検出”、日本機械学会誌、Vol. 111、No. 1070、2008、p.59.