

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560887

研究課題名(和文) 傷形状の復元アルゴリズム統合による磁気計測探傷法の新展開

研究課題名(英文) New development in magnetic NDT by unification with reconstruction algorithm

研究代表者

笹本 明 (SASAMOTO, AKIRA)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造研究部門・主任研究員

研究者番号：90357129

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：亀裂が表面や内包された半無限導体に、電位差法をその表面に適用した場合の表面電位を表現する陽的な解を構成し、その数値計算を行った。空間2次元ではあるが、漏洩磁束法など磁気計測探傷法での利用が期待される。亀裂両端でノイマン値、ディリクレ値のそれぞれに差を有するLaplace方程式の可解性を示した。小型半導体3軸磁気センサを用いて3方向の磁場強度を計測できるプローブを専用アンプ回路と共に設計して製作した。このプローブによって表面亀裂を有する磁性金属平板の表面の漏洩磁束を計測したところ、3軸それぞれに今後の逆解析の基礎的知見となりうる興味深い計測値が計測された。

研究成果の概要(英文)：(1)Development of reconstruction algorithm for magnetic NDT: Explicit solution of Laplace equation with crack in half domain in  $R$  has been given with singular integral equation theory. This expression is quite useful to evaluate mathematically reconstruction algorithm. In addition, the expression give a some methodology to determine geometric parameter with flaw from measured data. The existence of solution of the modified jump problem for Laplace equation in the exterior of cracks in a plane has been proved.

(2) 3 axial magnetic probe with 3 axial semiconductor sensor and amplifier circuit are designed and assembled. This probe has wide frequency range, from DC to 1MHz. Flux leakage on metal plate around line flaw has been measured. Three components of magnetic data show interesting behavior around crack.

研究分野：応用数学

キーワード：渦電流探傷法 漏洩磁束法 き裂形状推定 特異積分方程式 逆解析 3軸磁気センシング

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 渦電流深傷法は、1950年代より使われており、高速度な検出が可能であること、シンプルな構造であることを長所として非磁性体金属構造物の保全に貢献してきた。現在では航空機、発電所、製鉄所等での保守および製品検査に広く利用されている。しかし、的確な判断は検査者に熟達した知識がなければ下せない。例えば点状の穴傷のある平板表面の傷近傍をスキャンした出力を見ても、予備知識を持たない検査者が抱く期待“傷部に信号が現れる”とは全く異なる。これが多様な傷形状の、数十種類もの特性が異なるプローブを使う現実での検査は、熟練検査者にとっても容易ではない。この判断の容易化は渦電流深傷法に求められる改善点である。

(2) 磁場計測による非破壊検査手法は、空間1方向の磁場情報を用いて推定するものが主流である。しかし研究開始当初は1チップで3次元交流磁場を計測できる磁気半導体センサが販売され始めた状況にあった。

## 2. 研究の目的

### (1) 傷形状の直接法復元アルゴリズムの探求

研究代表者は金属表面の傷の渦電流による計測データから傷形状を高速復元する計算アルゴリズムを考案しており、市販渦電流深傷プローブで得たデータに適用したところ、傷の表面形状と傷の相対的な深さ形状が元のデータよりも良く復元可能であることを見いだしていた。この復元アルゴリズムは分岐形状傷や深さ方向に傾斜状や階段状の傷に適用したが、深さの推定値は最悪で50%程の誤差を生じ、十分ではなかった。より精密な数理的な考察と3次元ベクトル値の計測データを使用することによって復元アルゴリズムの高精度化を図ること、さらにまたこれ以外の復元アルゴリズムも検討することとした。後者の可能性は、その復元精度と高速性を両立させる解析方法であることに重点を置く。計算時間が長過ぎると現実の機器にそのアルゴリズムを取込むことが困難になるからである。この開発した復元アルゴリズムを検査機器に統合することで、確実性と復元精度向上に改善をもたらすことを目的とした。

### (2) 復元アルゴリズム先導プローブ開発

研究代表者は同心円状の磁場印加構造である市販の渦電流プローブを利用してはいたが、これが一方向への一様な磁場の印加構造であれば、復元精度をさらに向上できること、言い換えればこの磁場印加条件が、アルゴリズムとプローブの間の不整合が、復元精度の障害となっていると考えられた。そこでアルゴリズムを優先して、このアルゴリズムの要請に沿った磁場一様印加型のプローブを開発する。また磁気センサは、渦電流探傷ではコイル、漏洩磁束法では1次元半導体センサが用いられてきたが、これら1方向成分のみしか計測出来ないセンサに替えて、近年に登場した3次元ベクトル磁場を計測可能な半導体磁気センサを用いて、平面成分と垂直成分の3次元ベクトル値を取得できるプローブを設計して製作し、3次元データを活用することで高精度の傷形状

復元を目的とした。とくに、非破壊検査のための3次元磁気測定は、これまでの報告がなく、どのような有用性が示されるか、基礎的な知見としても意義がある。

### (3) 漏洩磁束法での展開

センサは直流磁場から計測できるから、プローブは磁性体の検査に用いられる漏洩磁束法との共用を前提とした設計が可能である。また渦電流のアルゴリズムも、多少の修正程度で利用可能であると考えられた。そこでこれら磁場探傷検査の両方において、復元アルゴリズムの要請によってプローブ構造を決定し、3次元データと逆解析アルゴリズムが高速性と復元精度をどの程度まで両立可能かということを目的にした。

## 3. 研究の方法

### (1) 傷形状の直接法復元アルゴリズムの探求

先の計算アルゴリズムの3次元への拡張方法を検討した。また同時に高速な復元アルゴリズムの評価に必要な基盤研究も実施した。復元アルゴリズムの評価に、それまでは実験データとの比較を用いており、これは現実的な観点から正しいが、厳密に数理的なアルゴリズムによる逆解析の評価を与えるためには、十分な精度を有する解を元にした比較も重要である。だが亀裂という強い特異性を有する数値解析には、差分法や有限要素法では特異性を十分表現できないため不十分な精度しか得られないと考えられる。この点で、もし厳密解が得られれば、探傷問題の復元アルゴリズムの数理的正当性の議論に大きな手がかりとなる。ここで渦電流の厳密解を得ることはかなり困難であるため、漏洩磁束法での厳密解を得るための試みとして、ロシアケルディッシュユ 응용数学研究所のPavel Krutitskii氏を招へいし、同氏との共同研究において特異積分方程式論の援用による亀裂境界を有するLaplace方程式の厳密解の具体的構成方法を研究した。漏洩磁束法はLaplace方程式で記述され、またMaxwell方程式の低周波近似はLaplace方程式とみなせることから、アルゴリズムの評価は両者でほぼ同様の結果が得られると想定されるからである。3次元プローブの製作が完了するまでの間は、この解法による解の構築での逆解析手法を集中的に研究した。これにより、アルゴリズムの高精度化を複眼的視点で獲得する事を意図した。

### (2) 復元アルゴリズム先導プローブ開発

3次元半導体センサ利用プローブ:米国ハネウエル社製の3次元磁場センサを利用した。図1に先端部を示す。

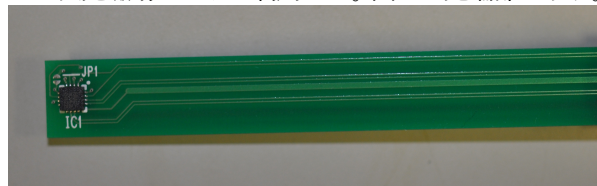


図1: センサー先端部 IC

素子単独のフルスケール感度は $\pm 6$  Gaussで周波数帯域も直流から5 MHz(メーカ公称値)と、渦電流および漏洩磁束の両手法に利用可能である。このセン

サーと組み合わせる、高周波特性の優れた専用の信号増幅回路を設計し製作した。磁場の印加方法として、コの字型のフェライトにコイルを巻いた。これに直流電源および高周波電力回路を接続することで、直流から高周波の印加を可能とした。ここでコイルに交流電流を流すために、高耐圧コンデンサとの回路を構成して、インピーダンスマッチングをはかることで、高圧電源装置を用いずに必要な電流を流すことを可能とした。磁場の印加方法としては、試料表面に当てて一方向に様な磁場を印加する構造を作成した。漏洩磁束法での磁場は磁気センサから水平方向に対称に一定距離を離して配置したネオジウム磁石によって検査体を傷近傍で磁化させるしくみを用いた。

### (3) 漏洩磁束法での展開

このプローブは、図に見る通り半導体磁気センサのもので計測できるようになっており、半導体センサは直流から対応しており、その感度も十分であって、漏洩磁束法にも問題なく利用できるものである。

## 4. 研究成果

### (1) 復元アルゴリズム直接計算手法の開発

① 開発していたアルゴリズムは渦電流探傷法にのみ適用実績があったが、漏洩磁束法に対しても、有効に機能するかその検証が必要である。まずは簡単な1次元のGMRセンサを用いてデータを取得し、適用可能性を確認した。結果として渦電流の場合と同様に、漏洩磁束法に対しても復元アルゴリズムが有効に機能することが確認出来た。3次元データへの拡張は、3空間方向それぞれの評価値に重みをつけた総和を取るアルゴリズムをインプリメントした。しかし渦電流データへの適用は、(3)で用いたセンシングが、半導体センシングにおける難しさ(印加磁場により影響されやすいこと、センシングの非線形性、半導体センサのエラーらしい挙動など)によって安定してデータを取得出来ない問題を十分に克服できず、公開できるだけの信頼性あるデータ取得と解析の実施に至らなかった。

② 半無限導体表面に垂直亀裂が入っている状況に、電位差法を用いるとラプラス方程式となる。この解を傷上の単一層およびアンギュラーポテンシャルによる境界積分で表現する。この密度関数は特異積分方程式論を用いることで、求めることが出来る。これから導体内の電位  $v(x_1, x_2)$  は下記のような表現で得られることを明らかとした。

$$\int_{-a}^a \frac{-Is}{\pi^2 \sqrt{a^2 - s^2}} \left\{ \frac{\operatorname{sgn}(d_1) \sqrt{a^2 + d_1^2}}{s^2 + d_1^2} - \frac{\operatorname{sgn}(d_2) \sqrt{a^2 + d_2^2}}{s^2 + d_2^2} \right\} \arctan \frac{x_2 - s}{x_1} ds$$

ここで  $(d_1, d_2, a)$  は正負電極位置と形状に関するパラメータで、(左針位置、右針位置、 $x_1 = 0$ にある  $x_2$  方向の亀裂深さ) であって、このパラメータだけで解が陽的に表されている。計算例を図2に示した。(半無限金属の表面鉛直方向が図の  $y$  軸方向で境界が  $y = 0$  の位置にある。) この厳密解が陽的表現として

得られるのは興味深いが、留意すべきは、この表現によれば表面電位分布の情報から、パラメータ値を推定できることである。すなわち計測データから直接計算により亀裂深さと位置を推定できる。もちろん、これは垂直傷であることが事前に分かっているのであって、現実問題は傷の形状自体が不明であるから、この表現だけでは傷形状の推定はできない。重要な事は、より複雑な定式化の基礎表現となりうることである。さらにこの結果に加えて亀裂が導体内部に内包されている場合に対しても、(複雑な表現ではあるが) 陽的な表現を得ることができた。空間2次元という制約があるものの、数理的な観点からはこれら2つの厳密解の陽的な表記とその手法はこの分野での銘記すべき成果と考える。

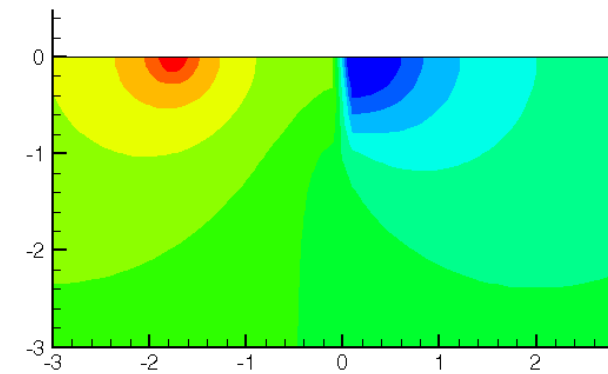


図 2:  $v(x_1, x_2), u(x_1, x_2)$  for  $(d_1, d_2, a) = (-1.75, 0.25, 1.0)$ .

③ 漏洩磁束法でも渦電流探傷法でも亀裂を挟んだ両側でギャップのある物理量が発生するとモデリング化されるが、このモデル化の考え方によって、境界条件の設定に違いが出る。そこでディリクレ値とノイマン値が共に境界上の関数と係数で定められる差を持つ境界条件の問題を考え、その存在について研究を進めた。この結果、特に複雑な条件の下で存在が保証されている従来の報告に代えて、境界積分方程式のオペレータのコンパクト性を条件を見直す事で、直接的に Fredholm Alternative を用いる事ができ、これによって解の可解性と、従来の報告に比べて大幅に簡略化された境界積分表現を示した。

### (2) 3次元磁気センシングによる磁場データ取得

① 作成した3次元磁場センサシステムを用いて、表面に単一直線傷を有する鋼材平板(SUS-400製、図3)を磁化し、その一様磁化した試料の漏洩磁束を表面近傍で計測した。その傷の平行方向(図4)、垂直方向(図5)、平面上(図6)、そして表面に対して鉛直方向(図7)のそれぞれにおいて、特徴ある振舞が観測された。これまでの1つのスカラー量しか取得しなかった磁場センシングに比べると、各方向の多様性と情報量を大幅に増やすことが出来た。図6では、傷平面上での磁場の流れを図示したが、これによると、右から左に向かう磁場が、傷の中央部に向かって曲がっている様子が分かる。これらの結果は、今後の3次元磁場計測データの逆解析における基礎的知見の一つになると考えられる。



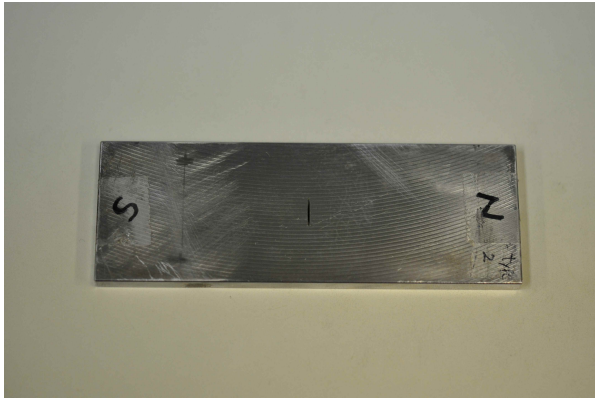


図 3: 一様磁化された試料

(以下の図中の赤色線分は、試料表面上の人工亀裂の位置を示す。)

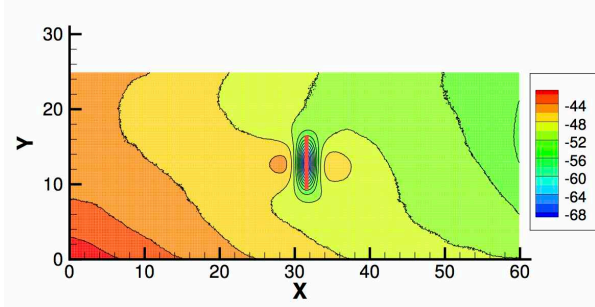


図 4: 漏洩磁束の X 方向成分

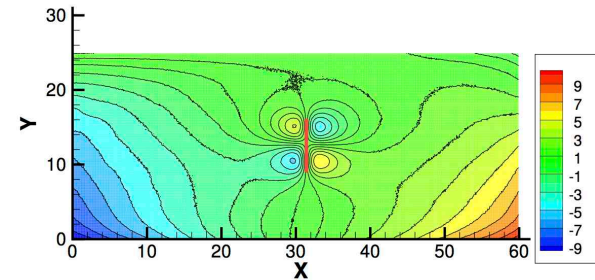


図 5: 漏洩磁束の Y 方向成分

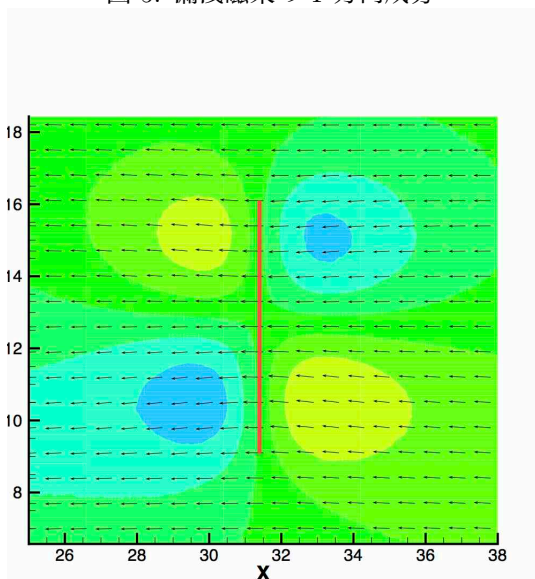


図 6: 漏洩磁束の XY 平面上での磁束の流れ

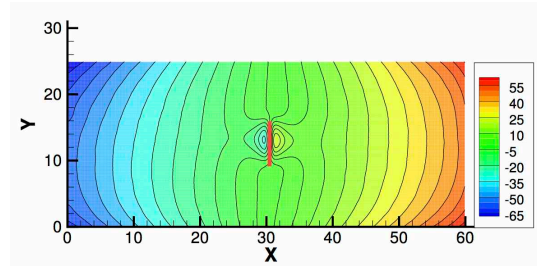


図 7: 漏洩磁束の Z 方向成分

## 5. 主な発表論文等

【雑誌論文】(2 件)

- [1] Sasamoto Akira and P. A. Krutitskii. Integral representation of voltage in half-plane conductor with embedded crack by d.c. potential difference method. AIP Conference Proceedings, volume 1558, pages 415–418, 2013.(査読有)
- [2] PA Krutitskii and A. Sasamoto. On the modified jump problem for the laplace equation in the exterior of cracks in a plane. International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences, volume 2012, 2012.(査読有)

【その他】(3 件)

- [1] Akira Sasamoto Feasibility study on 3 axis magnetic sensor for flux leakage method In Proc. SPIE , pages 90630S–90630S-6. volume 9063, International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [2] Akira Sasamoto and Takayuki Suzuki. Novel designed magnetic leakage testing sensor with gmr for image reconstruction algorithm. In Proc. SPIE, pages 83472O–83472O-5. volume 8347, International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [3] Akira Sasamoto and Takayuki Suzuki. Combination of a gmr sensor and reconstruction algorithm: a novel magnetic sensing system. In Proc. SPIE, pages 79833Q–79833Q-6. volume 7983, International Society for Optics and Photonics, 2011.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹本 明 (SASAMOTO Akira)  
産業技術総合研究所 主任研究員  
研究者番号 : 90357129