

三角形ループ電流モデルを用いた励磁電流の可視化と 励磁コイルの概念設計

遠藤 久 , 阿部 利彦 , 内一 哲哉 , 高木 敏行 (東北大学流体科学研究所)

八島 芳信 ((株) I F G)

齋藤 兆古 (法政大学)

Exciting Current Visualization Using Triangular Loop Coil Model

Hisashi ENDO, Toshihiko ABE, Tetsuya UCHIMOTO, Toshiyuki TAKAGI,
Yoshinobu YASHIMA and Yoshifuru SAITO

ABSTRACT

A triangular loop current model visualizes exciting currents giving the desired magnetic field distribution by means of inverse problems. Combining a set of three line currents as a triangular loop represents magnetic field sources holding the conservation of currents, as well as magnetic fluxes. For designing exciting coils, at first, the region for the coils is filled with the current elements. Second, the desired magnetic field distribution represented as an input vector derives a system of equations from the relation between the magnetic field distribution and currents. Third, solving this ill-posed linear system determines the intensity of current in each of the elements. Finally, the current vector visualization performs designing exciting coils. The applications in homogeneous and concentrated magnetic field generation are presented.

Keywords: Loop current model, Current visualization, Coil design

1. 緒 論

磁気効果を利用したセンサ, アクチュエータなどの磁気デバイスは, 非接触で情報あるいはエネルギーの授受が可能であるという大きな利点をもつ。半導体技術による高速スイッチング技術を背景にこれらの磁気デバイスは, 小型かつ軽量化に拍車がかかり, 今や多種多様の産業応用が存在する。より精緻で高効率な磁気デバイス実現へのカギの一つは, 磁場分布の最適制御である¹⁾。磁場分布の制御には, 磁性体コアで磁路を形成する方法と励磁コイル形状を工夫する方法が考えられる。前者は最も単純で効率的であるが, 高透磁率を保つにはコア面積を広くすることが必要不可欠で重量化の原因となる。後者は軽量化が可能である一方, 空芯であるために均一磁場など繊細な磁場分布を作るのは至難の業である。

以上を背景に本研究は, 所望の磁場分布を生成する励磁コイルの逆問題的設計手法を提案する。すなわち, 磁場分布を与えておき, この磁場分布を満たす励磁コイルを設計する方法である。

2. ループ電流モデル

励磁コイルのモデリングとして Fig.1 に概略されるように CAD 等で得られるメッシュデータを用いて微小ループ電流で表現する。ここでは Fig.2 に示すような三角形の辺に電流がループ状に流れている要素を考え, 位置ベクトル s 上を流れる線電流と磁場の関係をビオ・サバールの法則より連立方程式として定式化し, これを解くことによって所望の磁場分布を満たす励磁コイル形状を導く。磁場分布から電流分布を推定する問題は, IS (Inverse Source) 問題に分類される。この場合, 式(1)のシステム方程式を解くことに帰する²⁾。

$$\{Y\} = [C]\{X\} \quad (1)$$

式(1)の $\{Y\}$, $\{X\}$ はそれぞれ p 次の磁場分布に対応する入力ベクトル, q 次の電流分布に対応する解ベクトルである。ここで, 式(1)における入力ベクトル $\{Y\}$ の次数 p と解ベクトル $\{X\}$ の次数 q が必ずしも等しくない。また $[C]$ はループ電流モデルより導かれる p 行 q 列の長方形列

である。本論文では、 $\{Y\}$ と $[C]\{X\}$ の内積を利用した連立方程式の反復解法であるGVSPM法^{3,4)}を用いてこの不適切な線形システム方程式を解く。解ベクトル $\{Y\}$ よりループ電流要素の電流値が決まるから、結果の励磁コイル形状は、Fig.3に示すように隣接するループ電流の差分で得られる電流ベクトルによって可視化される。

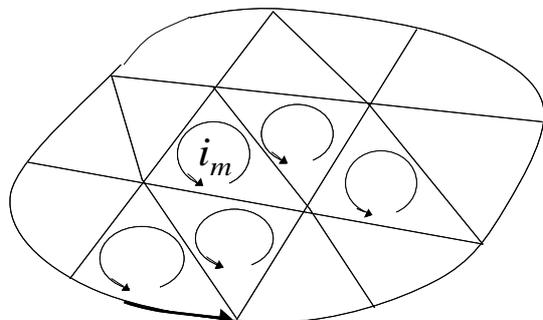


Fig.1 Magnetic field sources represented by closed-loop currents.

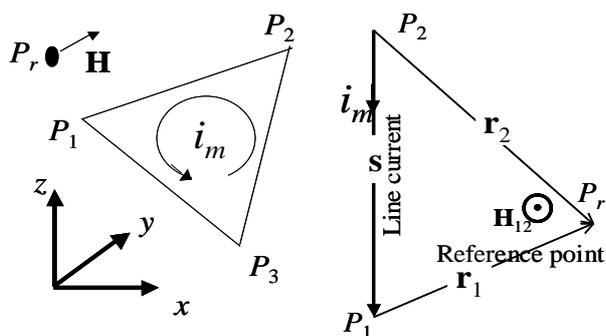


Fig.2 Triangular loop current element. Left: Three line currents consisting of an element. Right: Calculation of magnetic field caused by the line current from P_2 to P_1 .

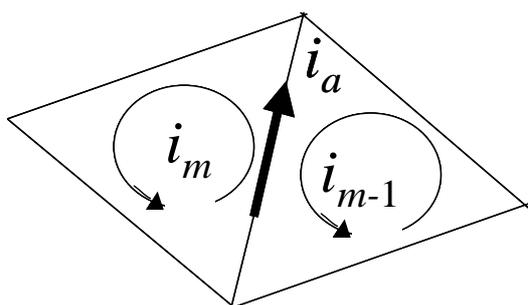
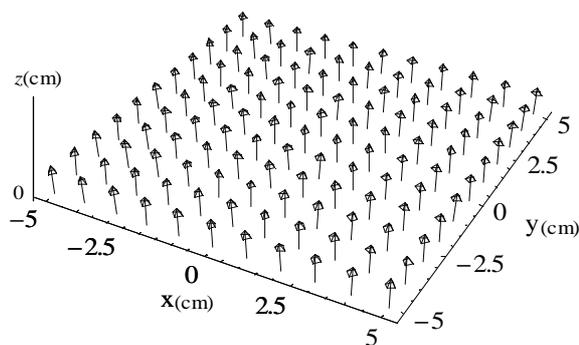


Fig.3 Current vector visualization by means of loop current connections.

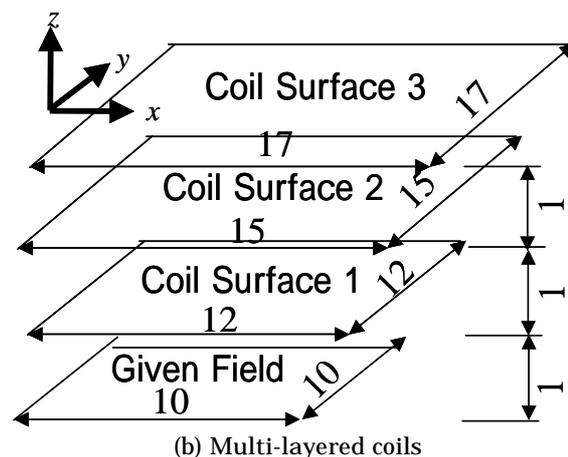
3. 多層コイルによる一様磁場生成コイル

実際の励磁コイル設計例として、Fig.4に示すような $z=0$ の平面で z 軸方向に均一な1 A/mの磁場を生成する多層コイルを考える。励磁コイルは、 z 方向に1cm毎に離れた3層から成る。各層を三角形ループ電流要素で離散化し、連立方程式を構成する。ループ電流要素数は、Coil Surface 1から3までそ

れぞれ 288, 450, 578 であり、要素総数は、1316 である。また Fig.4 の磁場分布データ点数は、 $z=0$ で 10cmx10cm の x - y 平面を各軸に対して 10 等分した 121 点である。式(1)における入力ベクトル $\{Y\}$ は磁場の x, y, z の方向成分をもつことから $121 \times 3 = 363$ 要素から成る。したがって、363 行 1316 列の行列をもつシステム方程式を解くことになる。



(a) Given magnetic field



(b) Multi-layered coils

Fig.4 Given magnetic field and coil surfaces as field sources. (unit:cm)

Fig.5は、GVSPM法で得られた反復回数300000回の解ベクトル $\{Y\}$ よりループ電流分布(左)と電流ベクトル分布(右)である。ループ電流分布は、各三角形ループ電流要素の電流値をグレースケールで図示する。一方、電流ベクトル分布は、Fig.3に示す方法で、隣接するループ電流の差分を算出することで各枝に流れる電流をベクトルとして可視化することができる。そのためFig.5右図では、三角形の各辺上に図示されているベクトルによって電流の通電方向と強度が可視化されている。

Fig.6は、算出された電流分布より生成した磁場分布とその各方向成分値を図示したものである。目標とした磁場成分は $\mathbf{H}=(H_x, H_y, H_z)=(0,0,1)$ A/mであり、Fig.6(b)より約 $\pm 0.2\%$ の成分値の誤差で所望の磁場分布が生成されていることがわかる。

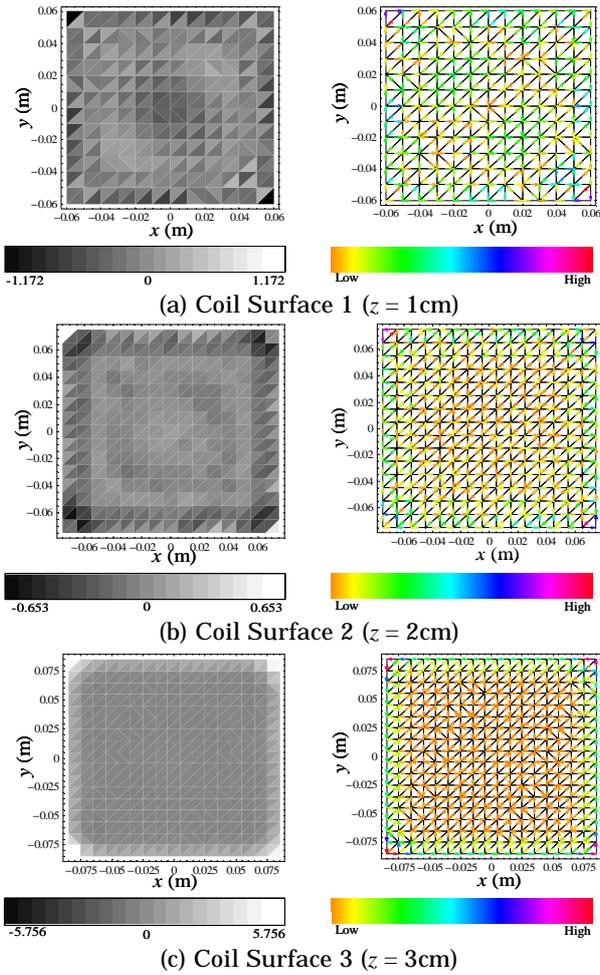
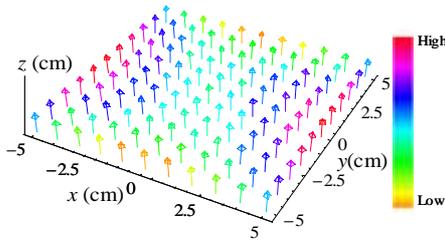
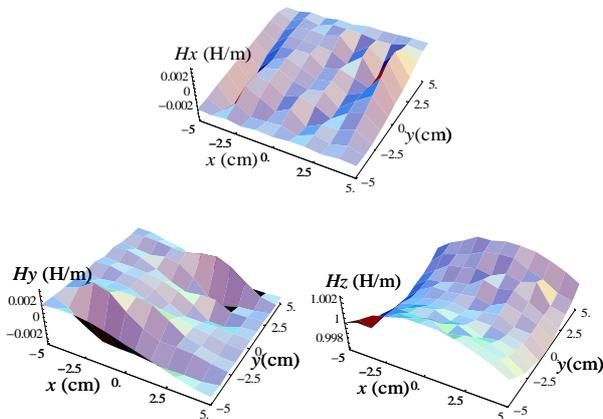


Fig.5 Evaluated current distributions. Left: Current intensity in ampere. Right: Current vector visualization.



(a) Vector arrow representation



(b) Field components

Fig.6 Reproduced magnetic field distributions.

4. 椀型コイルによる集中磁場コイル

励磁コイルで生成した磁場の強度は、原則としてコイル近傍が強い。より具体的に記述すれば、コイル近傍の磁場強度を抑え、コイルから離れた位置での磁場強度を高めることは極めて困難である。本節では、本研究の手法を用いて Fig.7 の矢印のように椀型コイルのから離れた位置に強度の高い磁場を生成する電流分布を推定する。

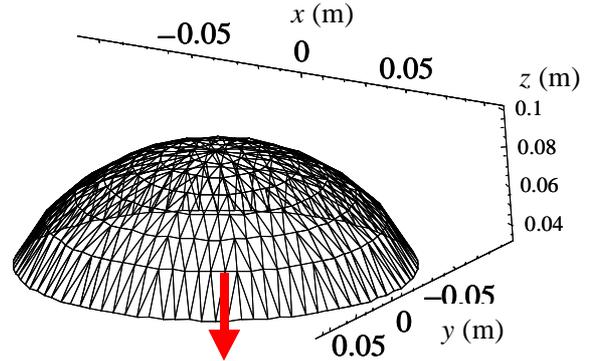


Fig.7 Bowl shape coil for magnetic field concentration.

式(1)の連立方程式を構成するために生成する磁場分布を設定しなければならない。コイル近傍の磁場強度を零、コイルのから離れた位置に磁場強度が零でない磁場ベクトルが存在するという設定が一つの究極であるが、そのような磁場は、磁束密度の発散が必ず零であることから物理的に存在しない。この物理的性質を考慮し、設定する磁場分布、すなわち式(1)の入力ベクトル $\{Y\}$ を得るのにもループ状コイルの組み合わせによる磁場分布を用いる。この場合、電流連続条件によって磁束密度の発散が零である物理的条件が満足されるから、物理的に存在しえる電流分布を与える。本例では、磁場を集中させたい位置に円形ループコイルを仮定し、この円形ループコイルが生成する磁場で式(1)の入力ベクトル $\{Y\}$ の要素を構成する。

Fig. 8 は、直径 0.02 m の円形ループコイルを座標 $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ m の位置に円が z 軸に面しているときに生成する磁場分布である。Fig.8 の各ベクトル表示地点における磁場ベクトルデータを入力ベクトル $\{Y\}$ として式(1)を構成する。磁場分布データ点数は、250 点で磁場ベクトル 3 方向成分を入力ベクトル $\{Y\}$ としたため、 $\{Y\}$ は、750 次のベクトルとなる。ループ電流要素数、すなわち解ベクトル $\{X\}$ の次数は、588 であるので、システム行列 $[C]$ は、750 行 588 列の要素数をもつ。

第3節と同様に GVSPM 法を用いて、式(1)を解き、可視化した電流ベクトル分布を Fig.9 に示す。椀上部で 4 方向に分布する支配的な電流ベクトルに加え、椀側面で集中磁場設定地点付近の余分な磁場ベクトルを相殺させるための強い電流ベクトル分布が z 軸方向に見られる。

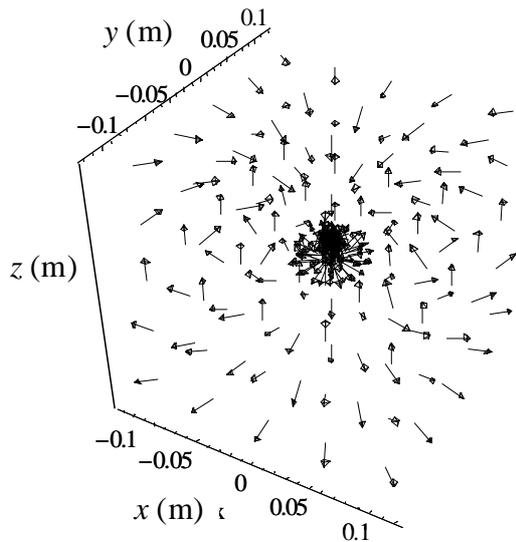


Fig.8 Desired magnetic field distribution.

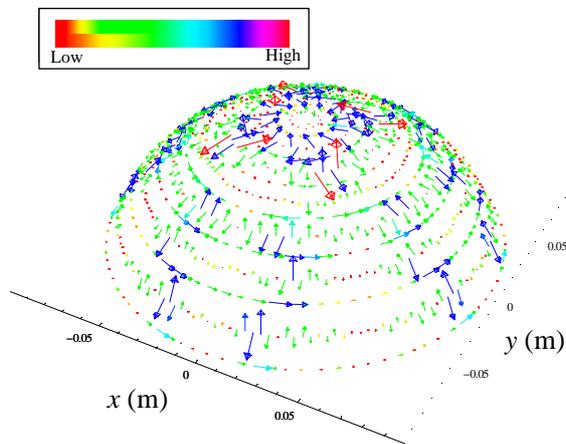


Fig.9 Evaluated current distribution concentrating magnetic field.

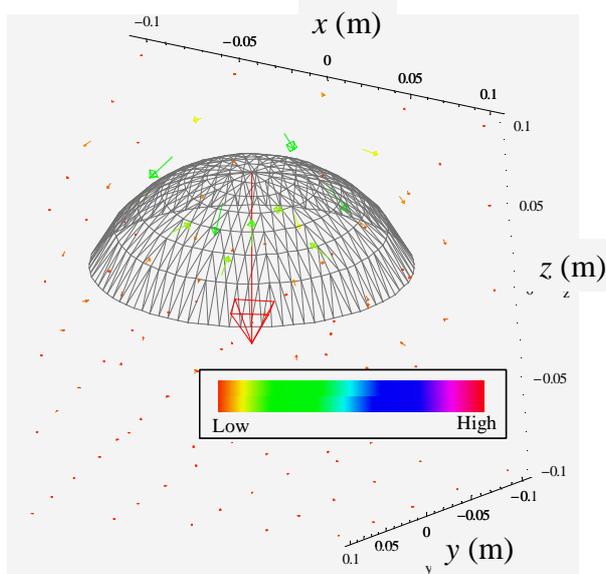


Fig.10 Reproduced magnetic field from the current distribution in Fig.9.

一方 Fig.10 は, Fig.9 に示す電流ベクトル分布より再現した磁場分布である. GVSPM 解の収束が振動的であり, Fig.8 に示した設定磁場とは誤差が大きかった本例であるが, コイル近傍の磁場強度を抑え, コイルから離れた位置での磁場強度を高められていることがわかる.

5. 結論

所望の磁場分布を生成する励磁コイルの逆問題的設計手法を提案した. ここで提案したループ電流モデルは, 要素自身で電流連続条件を必ず満足するため不適切な線形システムを伴っても比較的安定かつ精度よく解を導くことが可能である. この種の逆問題解析でよく用いられる電流ダイポールモデル⁵⁾は電流連続条件を満たさないモデルであり, 実現不可能な励磁コイル形状を導く可能性がある. さらにループ電流モデルは, 各種の分野で用いられる CAD データをそのまま用いることができ開発コストの面からも有利なモデルであると考えられる.

謝辞

本研究の一部は, 文部科学省科学研究補助金特別研究員奨励費(課題番号 16・2972) によって実施された. 集中磁場分布に関して御意見いただいた東北大学大学院医学系研究科・永富良一教授, 出江紳一教授に紙面を借りて厚く御礼申し上げます.

参考文献

- 1) 高木敏行, 遠藤 久: 厚肉構造物のための渦電流探傷技術, 非破壊検査, Vol.53, No.10 (2004), pp.602-607.
- 2) 増田則夫, 緑川洋一, 斎藤兆古, 遠矢和弘: 電子回路基板中の電流分布推定に関する研究, 電気学会論文誌, Vol.119-A, No.7 (1999), pp.997-1004.
- 3) Endo, H., Hayano, S., Saito, Y. and Miya, K.: Generalized Vector Sampled Pattern Matching Method, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 23 Electromagnetic Nondestructive Evaluation (VI) (Eds. Kojima, K. et al.), IOS Press, The Netherlands, 2002, pp.285-292.
- 4) Dong, G.Y., Endo, H., Hayano, S., Gao, S.K. and Saito Y.: GVSPM for Reconstruction in Electrical Impedance Tomography, IEEE Trans. Magn., Vol. 39, No. 3 (2003), pp. 1630-1633.
- 5) Mosher, J.C., Lewis, P.S., and Leahy R.M.: Multiple Dipole Modeling and Localization From Spatio-temporal MEG Data, IEEE Trans. Biomed. Eng., Vol. BME-39, No.6 (1992), pp.541-557.