

差動コイル型磁気センサーによる電流測定

儘田 保弘 早野 誠治 齋藤 兆古
法政大学大学院工学研究科電気工学専攻

従来、我々は電流が流れるコイルに平行に配置した二個のサーチコイルの差動出力から電流が流れるコイル位置を探索する方法を提案した¹⁾²⁾。本報告では、この差動コイル型磁気センサーの位置分解能を向上することと、電流の大きさや周波数、波形までを測定可能とする機能向上を試みている。第一段階として、検出感度の高い比較的高周波電流を前提として実験を行った。その結果、原理的には、家庭内天井や床下の電力線配置の可視化が可能である事が判明したのでここに報告する。

1. はじめに

原油で代表される化石燃料が人類の主要エネルギー源として採用され、広範な化石燃料の普及が人類の生存する地球そのものの環境を汚染する懸念が真面目に検討される時代となった。人類が文明生活を営む限り何らかのエネルギーは文明の利器の糧として消費される。

エネルギーは種々の形態を取るが、フレキシブルな形状を取り得る電線を付設することで任意の場所へ搬送できる電力エネルギー形態は、情報通信機器のような小型軽量の機器から工場の大型工作機器まで、小電力から大電力まで広範に利用されている。この意味で電力エネルギー形態は近代文明社会に必然的なエネルギー形態であり、電気エネルギー無しに現代文明社会基盤構築は考えられない。換言すれば、産業革命の成果が現代の究極的な文明社会を構築可能としたのは電気エネルギーの活用に他ならないと言える。

電気エネルギーは電気導電率の高い導線を通じて伝送され、伝送中に生ずる損失は電気抵抗損失のみであり、結果として電力伝送は多少の発熱を周辺へ与える程度の影響と考えられてきた。現実には高電圧電送に伴う大地間の高電界エネルギー、電流の流れに伴う磁気エネルギーが電力線の周辺には分布している。高電界の影響は高圧送電線下の植物相が変化することから環境へ何らかの影響が考えられていたが、具体的な研究が始まったのは比較的近年であり、未だ一定の結論は得られず、環境に対する影響も明言されていない。高電界の影響は実験的に知られていたが、公共性が大きくその社会的影響から殆ど公表されて無い。冷戦崩壊後、旧共産圏における政治犯を使った実験の結果が表面化し、高電界の影響は即効的でなく、環境ホルモンのようにゆっくり遺伝的に人類を犯す可能性が示唆され、欧米先進国では国家レベルで高電界の及ぼす生態系への影響の実態調査と対策が検討された。我が国に於いても電力中央研究所が中心となって研究が継続されている。

米国電気電子学会(IEEE)誌に公表されたデータに拠れば、家族が長時間を過ごす居間の地下や天井に多くの電力線が配置された住宅とそうでない住宅の住民について世代を遡って調査した結果、奇形児発生率と癌の発生率に統計的に有意な差が存在することが知られている。

本稿は、以上のような社会的背景に基づき、家庭内の

天井や床下の電力用配電線、すなわち、電力線を床や天井を剥がすことなく可視化する方法に関する報告である。

2. 差動コイル法による電流測定

2.1 原理

Fig.1 に示すように、左端の導線に電流 i が流れているとする。このコイルから r_1 と r_2 離れた位置に 2 個のサーチコイルが図中に示すように設けられている。一方のサーチコイルの半径と巻数はそれぞれ a_1 と n_1 であり、他方の半径と巻数はそれぞれ a_2 と n_2 である。両方のサーチコイル共に同方向へ巻かれているとすれば、電流 i の作る磁界に起因するそれぞれの誘起電圧は以下の式で与えられる。

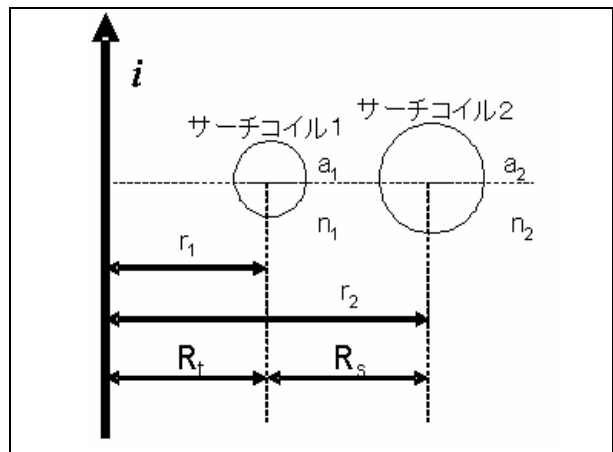


Fig.1 Schematic diagram of the tested magnetic sensor searching for the current position

$$v_1 = -n_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = -\frac{\mu \frac{n_1}{a_1} \sum_{a_1=1}^{a_1} a_1}{2\pi r_1} \frac{di}{dt} \quad (1)$$

$$v_2 = -n_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = -\frac{\mu \frac{n_2}{a_2} \sum_{a_2=1}^{a_2} a_2}{2\pi r_2} \frac{di}{dt} \quad (2)$$

サーチコイル1を固定し、サーチコイル2を右方へ移動し、両者の誘起電圧が等しくなるサーチコイル間の距離を求める。すなわち、導線とサーチコイル1と導線間の距離 R_t を固定し、サーチコイル2を右方へ移動させ、両サーチコイルの差動電圧が零になるサーチコイル間の距離 R_s を求めると以下ようになる。

$$r_1 = \frac{\frac{n_1}{a_1} \sum_{a_1=1}^{a_1} a_1}{\frac{n_2}{a_2} \sum_{a_2=1}^{a_2} a_2} r_2 \quad (3)$$

ここで、 $r_1 = R_t$ 、 $r_2 - r_1 = R_s$ とすると、上式は以下のように変形される。

$$R_s = \frac{\left| \frac{n_2}{a_2} \sum_{a_2=1}^{a_2} a_2 - \frac{n_1}{a_1} \sum_{a_1=1}^{a_1} a_1 \right|}{\frac{n_1}{a_1} \sum_{a_1=1}^{a_1} a_1} R_t \quad (4)$$

式(4)はサーチコイル1と導線間の距離 R_t とサーチコイル1、2間の距離 R_s が比例関係にあり、サーチコイル1、2間の距離 R_s が分かればサーチコイル1と電流の流れる導線との間の距離 R_t がわかり、結果として電流の位置が求まることを意味する。

2.2 コイル位置の検証実験

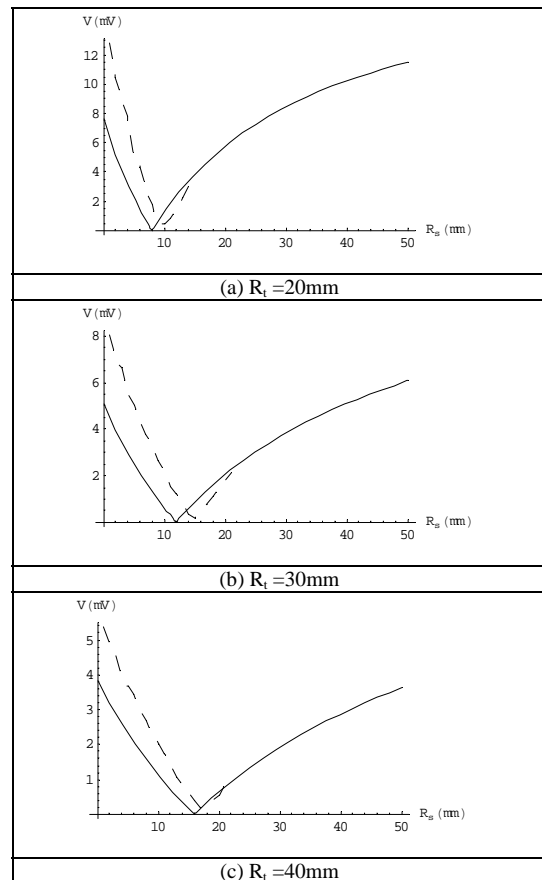
差動コイル法によれば、差動電圧がゼロとなる差動コイル間の距離を測定すれば電流が流れる導線と差動コイル間の距離が式(1)によって与えられる。

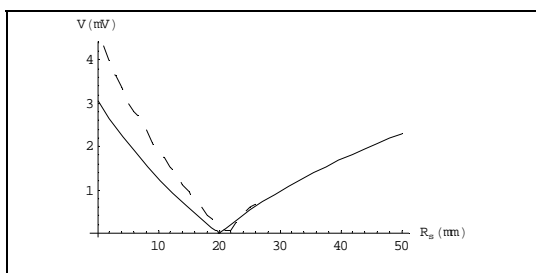
ここでは式(1)の妥当性を実験的に検証する。50[kHz]、0.5[A]の正弦波電流を通电している導線とサーチコイル

1間の距離 R_t を固定し、導線をサーチコイル1の中心線上にFig.1のように配置する。差動コイル間の距離 R_s を変化させた時の差動電圧を測定した結果と式(1)(2)による差動コイルの誘起電圧の理論値をFig.2(a)-(d)に示す。また、式(4)によるコイル1と導線間の距離 R_t と差動コイル間の距離 R_s の理論値と測定した結果をFig.3に示す。

Figs.2,3から、通电中の電線と差動コイル間の距離が近づくほど計算値と実測値の差が大きくなる傾向が分かる。これは、差動コイルで導線近くに位置する一方のセンサの誘起電圧が、電流が流れている導線へ接近するほどコイルに誘起する電圧の振幅は増加するが、導線を取り囲む磁界の空間変化が大きくなり、式(1)、(2)では正確に鎖交磁束が計算出来ないことに起因する。すなわち、導線近傍の磁界に起因する電圧は式(1)、(2)の計算式をより精密な数値積分で行わなければならないことを意味する。

この結論を確認するために、通电電流の波形を変えて実験を行った。三角波と方形波の電流を導線に通电した。方形波の電流は時間微分するとパルスになるため、式(1)、(2)の計算が不可能であった。他方、三角波電流の時間微分は方形波となるので、式(1)、(2)の計算は正弦波と同様に計算可能であった。Fig.4に三角波電流通電時における式(4)によるコイル1と導線間の距離 R_t と差動コイル間の距離 R_s の理論値と測定した結果を示す。Fig.4はFig.3と同様な結果である。





(d) $R_t = 50\text{mm}$

Fig.2 Coil position versus sensor output voltages. Solid: Computed, Dotted: Experimented

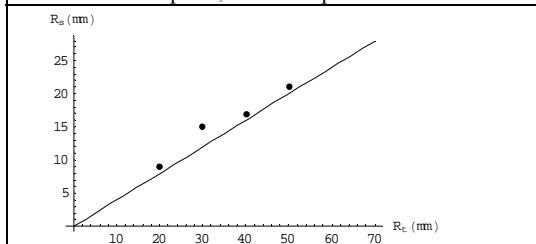


Fig.3 A relationship between the distances R_t and R_s . Solid: Computed, Dotted: Experimented

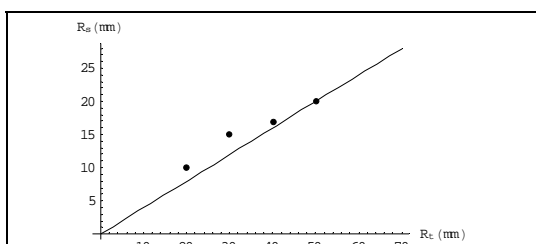
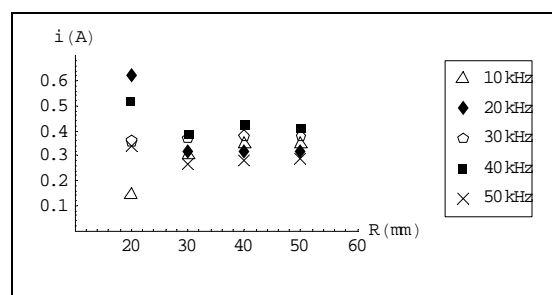


Fig.4 A relationship between the distances R_t and R_s under the exciting currents having triangular waveform. Solid: Computed, Dotted: Experimented

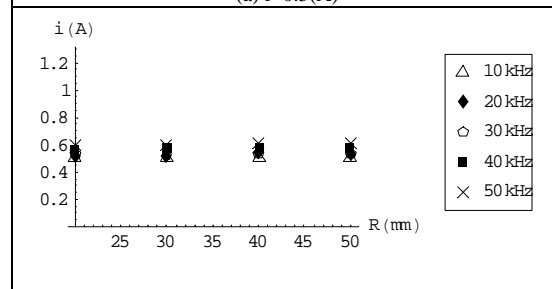
2.3 電流振幅

Fig.1 に示すサーチコイル1に誘起する電圧を測定し、式(5)より推定電流値(実効値)を示す。f は電線に流れている電流の周波数である。

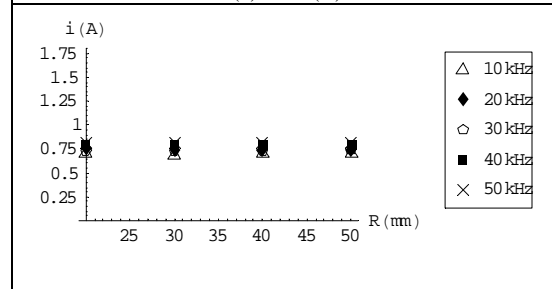
$$i = \frac{R_t}{\mu n_1 a_1 f} V_1 \quad (5)$$



(a) $i=0.5(\text{A})$



(b) $i=0.7(\text{A})$



(c) $i=1.0(\text{A})$

Fig.5 Currents computed by Eq. (5)

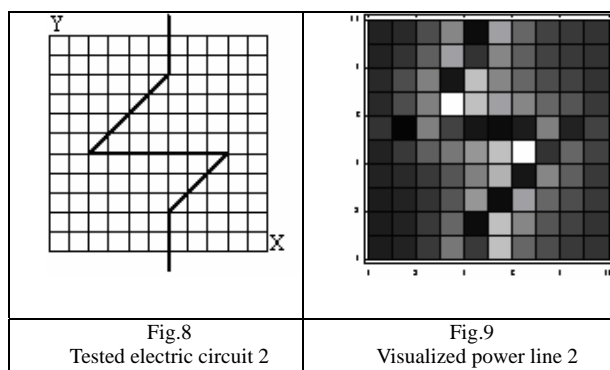
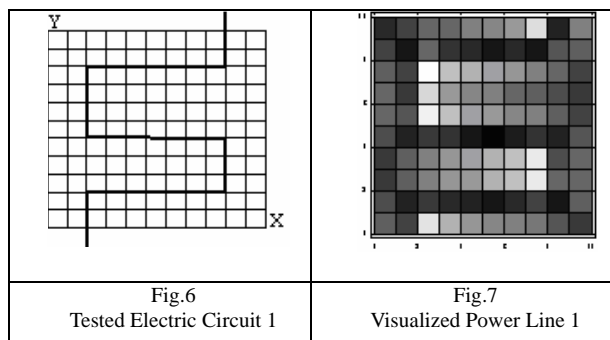
サーチコイル1と電線間の距離 R_t を20、30、40、50[mm]の各点で測定した。また、電線に流れている電流振幅を0.5、0.7、1.0[A]、それぞれに対して周波数を10、20、30、40、50[kHz]に変化させて測定した。これは距離の増加による出力電圧の低下を電流振幅と周波数で補うためである。測定結果と(5)式から求めた電流値をFig.5(a)-(c)に示す。0.5[A]では周波数によって結果が大きく変わるが、電流振幅が大きい0.7、1.0[A]では比較的良く実験と計算値が一致した。これは、電流振幅が小さいとセンサー出力電圧が小さく、S/N比が悪いことに起因すると考えられる。

3.電流分布推定

3.1 電流分布の可視化

Figs.6、8のような供試電気回路を構成し、50[kHz]、0.5[A]の電流を通電し、縦・横共に11[cm]の正方形平面上を等間隔にX、Y方向、それぞれ10点測定し、合計100点で出力を観測した。測定点は図の方眼の交点にコイルの中心を配置し測定したものである。本実験においては、差動ではコイルに誘起される電圧が低くなり、出力の差が小さくなってしまい、電線が可視化しにくい状態にな

るため、和動型にコイルを接続した。各点における X、Y 方向の電圧をベクトル和として得られた電圧分布を Figs. 7、9 に示す。Figs. 7、9 の結果は、電流が流れる経路、すなわち、供試電気回路と可視化している。また、電線の変曲点で出力電圧の変化が大きく、コントラストが大きな部分として可視化される。



4. まとめ

本論文では、電流が流れるコイルに平行に配置した二個のサーチコイルの差動出力から電流が流れるコイル位置を探查する方法を提案し、この差動コイル型磁気センサーの位置分解能を向上することと、電流の大きさや周波数、波形までを測定可能とする機能向上を試みた。

その結果、以下の事が明らかになった。電線に近い位置では、位置、電流値の測定において誤差が大きくなり、ある程度の距離を離すと結果が良好となり、本研究で使用したセンサーでは、20mm 以上の距離が必要である。これは、電線に近いほど、磁束密度の空間変化が大きく、センサーとセンサーコイルの物理的寸法などが理想化したモデルで表現できないことに起因すると考えられる。また、周波数、波形については、オシロスコープにより測定する事ができました。

以上の実験を踏まえて、我々は家庭内天井や床下の電力線配置の可視化が可能であることの初期検証を行った。

参考文献

- [1] 廣田章博、“変形ロゴスキーコイルの応用に関する研究”、2003 年度法政大学大学院工学研究科修士論文、2004 年。
- [2] 松村仁、“磁界源推定法とその応用に関する研究”、1996 年度法政大学大学院工学研究科修士論文、1997 年。
- [3] 儘田保弘、早野誠治、斉藤兆古、堀井清之、“電力線の可視化”、可視化情報学会誌、Vol.25、No.1、pp173-176、2005 年。

キーワード.

電流の可視化、差動コイル法、非接触領域

Summary.

The Electric Current Measurement with a Differential coil method

Yasuhiro Mamada Seiji Hayano Yoshifuru Saito
Graduate School of Engineering, Hosei University

Previously, we have proposed a method of current carrying coil position searching by means of a pair of differential search coils. By means of this new method, it has been clarified that the electric power lines in the inaccessible area such as in the wall and under the ground could be principally identified. In the present paper, we have developed a new theoretical approach to this differential coil method. This new theoretical approach makes it possible to evaluate the current carrying coil position as well as magnitude of the flowing currents. Thus, we have succeeded in visualizing the electric power lines embedded into the wall and ceiling by measuring the magnetic fields at the accessible space in the rooms.

Keywords.

Electric current visualization, Differential coil method, Inaccessible domains