

1609 電鉄変電所用の低周波磁界計算ソフトウェアの開発

[電] ○森田 岳 [電] 笹川 卓 [電] 小西 武史 (鉄道総研)

金子 利美 鶴田 浩典 (鉄道・運輸機構)

Evaluation of Simulation Software for Low-Frequency Magnetic Fields

Emitted from Railway Substations

Gaku MORITA, Takashi SASAKAWA, Takeshi KONISHI, Railway Technical Research Institute

Toshimi KANEKO, Hironori TSURUTA, Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency

Recently, low-frequency electromagnetic environment in relation to electric power equipments, particularly on magnetic fields, have become a very important issue. The Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry decided to establish a regulation against magnetic fields emitted from electric apparatuses in 2008. The authors have reported physical studies and analysis methods of magnetic fields generated by railway substations, comparing between the calculation results and measurement results on an operating installation. We developed an all-in-one simulation software that can create a input data using graphical user interface (GUI) and can draw a two-dimensional map of magnetic fields as a simulation result, evaluating calculation results by comparison with measurement results in a Shinkansen substation.

Keywords: low-frequency magnetic field, electromagnetic environment, simulation, measurement, railway substation

1. はじめに

近年、電力設備が発生する電力周波数成分を主体とする低周波電磁界、特に低周波磁界に関する社会的な関心が高まっており、鉄道設備に対する測定方法を規定する国際規格も検討が進められている。日本においても、平成 19 年度に経済産業省において電磁界対策ワーキンググループが開催され、今後の規制を含めた対応のあり方が示されている¹⁾²⁾。

このような現状を受け、鉄道用変電所においても発生磁界に関して検討が必要となっている。すでに我々は、これら変電所の発生する磁界の計算手法の開発と検証を行っており、直流変電所において測定値との比較検証から、その有効性を確認している³⁾。

今回、上記の計算手法を元として変電所の磁界計算を簡易に実施可能なソフトウェアを開発したので報告する。

2. 計算原理

2.1 計算の前提条件

変電所の磁界環境の評価は通常の場合、変電所の構内や周辺部における磁界の空間分布を求めることで実施される。低周波磁界の空間分布の計算手法については工学的には既に確立された分野であり、有限要素法や FDTD 法に代表される実績のある汎用的手法が存在する。

一方、変電所の磁界環境解析については通常以下のような前提条件が成立するため、より簡易な手法によりデータ入力の手数や計算時間を削減することができる。

- (1) 空間媒質は真空(空気)である。
- (2) 解析対象は、直流と低周波交流の周波数領域で、定常現象のみを対象とする。
- (3) 解析領域は、集中定数近似が成立する範囲(波長に対して十分小さい領域)である。

- (4) 解析領域に対して電流の横方向分布は無視できるほど小さい(線要素と近似できる)。

- (5) 大地への漏れ電流・零相電流は無視できるほど小さい。

- (6) 架空地線(PWを含む)、大地中の誘導電流は無視できる。

- (7) 主たる発生源は電線(架空線、ブスバー、ケーブルなど)であり、機器からの影響は無視できる³⁾。

従って以上の条件が成立しない、例えば過渡現象や電波領域の解析、外部金属などによる磁界擾乱の解析には本ソフトウェアは適用できない。

なお、本報告では磁界の表現として磁束密度を用い、両者を特に区別無く使用する。

2.2 数値表現

前項の仮定を置くことで線形解析が可能となる。すなわち、個々の発生源の発生する磁界を計算し、これらの線形和(ベクトル和)を求めることで、変電所全体の発生量を計算することが出来る。本ソフトウェアでは、電流や磁界を次の形式の周波数領域でのベクトルとして取り扱っている。この表現を採用することで、直流と交流の同時計算(並列計算)が可能となる。

$$\vec{I} = (I_{DC}, I_{AC,RE} + jI_{AC,IM})$$

上記は電流の表現であり、 I_{DC} は直流成分、 $I_{AC,RE}$ は交流の実数部、 $I_{AC,IM}$ は交流の虚数部である。交流成分は位相差を考慮するため複素数として扱っており、その絶対値が実効値となる。交流成分の周波数は電源周波数(50Hz/60Hz)とすることを基本としているが、他の周波数を対象とすることも出来る。

なお、磁界(磁束密度)については空間領域において

x, y, z 成分を持つ空間ベクトルでもあることから、この表現は次の行列表現となる。

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{x,DC} & B_{x,AC,RE} + jB_{x,AC,IM} \\ B_{y,DC} & B_{y,AC,RE} + jB_{y,AC,IM} \\ B_{z,DC} & B_{z,AC,RE} + jB_{z,AC,IM} \end{pmatrix}$$

磁界レベルの評価において重要な 3 軸合成値 (Resultant value) ⁴⁾は、直流成分と交流成分についてそれぞれ、

$$B_{DC} = \sqrt{B_{x,DC}^2 + B_{y,DC}^2 + B_{z,DC}^2}$$

$$B_{AC} = \sqrt{B_{x,AC,RE}^2 + B_{y,AC,RE}^2 + B_{z,AC,RE}^2 + B_{x,AC,IM}^2 + B_{y,AC,IM}^2 + B_{z,AC,IM}^2}$$

本ソフトウェアは計算結果として、磁界の 3 軸合成値に加え各座標軸成分の実効値をそれぞれ出力する。

2.3 解析可能な発生源

本ソフトウェアでは以下の発生源を取り扱うことが可能である。

- (1) 直線電線路 (架空線、ブスバー、ケーブルなど)
- (2) 矩形バスダクト (整流器用変圧器と整流器の間のバスダクトなどで使用される)
- (3) 管路 (GIS 変電所の母線などに使用される)
- (4) 撚り線 (トリプレックスケーブルなど)

2.4 磁界計算法

すでに報告したように、鉄道用変電所における主たる磁界発生源は電線 (架空線、ブスバー、ケーブルなど) である ³⁾。本ソフトウェアは全ての磁界発生源を直線電線として扱うことで計算量の低減を図っている。バスダクトや管路など、磁気遮へい効果を考慮すべき発生源に対しては、磁気遮へい率を内部導体の通電電流値に乗ずることで等価な直線電線路を算出する (遮へい材内部の磁界分布は問題としていないため)。

- (1) 直線電線については後述の手法で発生量を計算する。
- (2) 矩形バスダクトについては、既報の通り磁気回路近似 (強磁性効果の解析) と等価な円断面管路 (渦電流効果の解析) を用いて、磁気シールド係数を計算し ⁶⁾、等価な直線電線路に換算する。
- (3) 管路については、山崎らの提案する簡易解析式 (強磁性効果と渦電流効果を考慮) ⁵⁾を用いて、等価な直線電線路に換算する。
- (4) 撚り線については、ツイストピッチの 1/4 の長さにおいて離散化を行い、各格子点における電線座標を直線電線で接続することで、近似的ではあるが等価な直線電線の集合に置き換えている。

図 1 に示すような有限長の直線電線 (通電電流 I) が発生する磁界は、よく知られた Biot-Savart の法則を用いて計算することが出来る。本ソフトウェアでは外積の計算回数を減らすため、以下の同値表現を用いている。

直線電線の始点座標を $x_1 = (x_1, y_1, z_1)$ 、終点座標 $x_2 = (x_2, y_2, z_2)$ としたとき、この電線が点 $x_0 = (x_0, y_0, z_0)$ に発生させる磁界を考える。また、計算に必要な補助ベクトルとパラメータを以下のように定める。

$$\begin{aligned} n_l &= (x_2 - x_1) / \|x_2 - x_1\| \\ r_1 &= x_1 - x_0, \quad r_2 = x_2 - x_0, \quad r_1 = \|r_1\|, \quad r_2 = \|r_2\| \\ \xi_1 &= r_1 \cdot n_l, \quad \xi_2 = r_2 \cdot n_l \end{aligned}$$

この時、 x_0 におけるベクトルポテンシャル $\vec{A}$ の Coulomb ゲージにおける特解は、

$$\vec{A}(x_0) = n_l \frac{\mu_0 I}{4\pi} \ln \left(\frac{r_2 + \xi_2}{r_1 + \xi_1} \right)$$

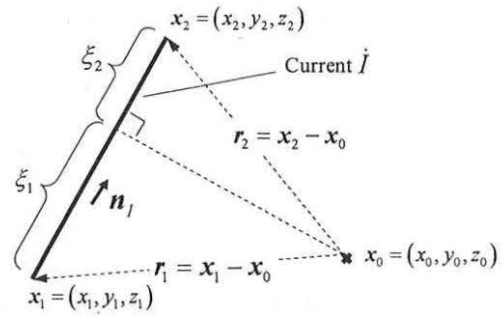


Fig. 1 The coordinate setting of a linear conductor

で与えられる。ただし、 μ_0 は真空の透磁率である。磁界 (磁束密度) はこれの回転 (rot) であり、

$$\vec{B}(x_0) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left\{ n_l \times \left[\frac{r_2}{r_2(r_2 + \xi_2)} - \frac{r_1}{r_1(r_1 + \xi_1)} \right] \right\}$$

で与えられる。これを全ての発生源 (直線電線) について線形和 (ベクトル和) をとることで、全体の発生量を計算することが出来る。

3. ソフトウェア設計

3.1 開発環境と動作環境

動作環境については Microsoft Windows 上で動作することを最低条件とし、将来の Windows のバージョンアップ、Microsoft の言語開発計画、異なるプラットフォーム間での相互運用性等から、Microsoft .NET Framework 3.5 上で動作するアプリケーションプログラム (以下、MSIL) として開発を行った。従って、現在メーカーサポートが継続されているデスクトップ用の Windows XP/Vista/7 の各 OS 上で動作し、ハードウェアには依存しない。

開発は Microsoft 標準の Visual Studio 2008 SP1 上で行い、全てのコードが C# で記述されている。

3.2 設計の基本原則

本ソフトウェアは以下の原則において設計された。

- (1) マルチユーザー・マルチタスクを前提とした設計を行っている。インストールを除く全ての操作は一般ユーザー権限で実行されることを前提に設計されているため、Windows Vista や 7 のような高セキュリティの OS 上でも正常に動作する。また、ファイルロックなどマルチタスク OS で起こりうるエラーについても対応を行っている。
- (2) オブジェクト指向のコーディングにより、ソフトウェアの可読性、保守性、拡張性を確保している。
- (3) 数値計算に適した高速環境で実行されるよう設計されている。MSIL は中間言語であるが、実行時に実行環境に最も適した機械語バイナリにコンパイルされる (JIT) ため、C 言語やアセンブラ等の低水準言語を用いた場合と遜色のない実行速度が得られる。また、ベクトルの各要素を計算する際のループ構文を極力排除し、LINQ 構文に置き換えることで並列計算環境に対する準備を行っている。
- (4) 計算に必要な全パラメータを入力データファイルとして与える仕様である (ハードコードの定数が無い)。
- (5) 演算によるオーバーフローなどではエラー停止しないよう設計されている。.NET Framework の実数は、磁界計算では頻繁に起こりうる零除算によるオーバーフローを無限大数値として扱うことが可能である

ため、エラーを起こすことなく処理が継続される。

3.3 磁界計算手順

本ソフトウェアによる磁界計算の手順は以下である。

- (1) 変電所の平面図を元に電線の座標データを作成する。
平面図は BMP, JPEG, PNG など一般的な画像形式に加え、PDF 形式からの読み込みにも対応している。入力された座標データは平面図に重ねて表示されるため、簡易に入力データを作成できる (図 2)。計算メッシュ間隔や周波数など、計算に必要なパラメータについても入力データとして与える。
- (2) 作成した入力データを元に磁界計算を実行する。
- (3) 計算結果は二次元のマップとして出力される。平面図に重ねて表示することも可能であり、磁界が大きくなる箇所が容易に判別できる (図 3)。マップはベクトルポテンシャルと磁束密度のそれぞれについて、直流成分と交流成分を独立して作成され、切り替えて表示することができる。

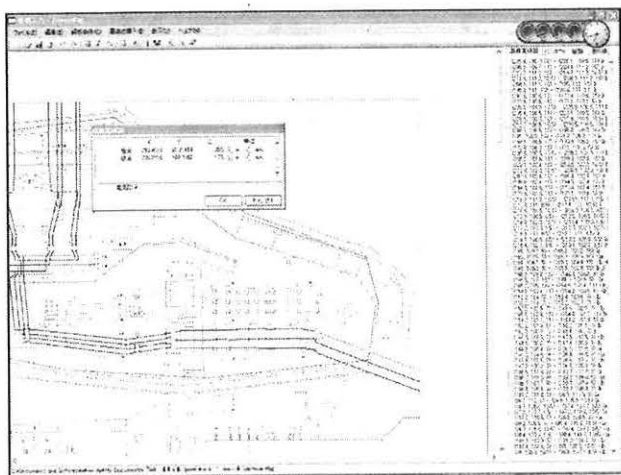


Fig. 2 A screen-shot of a data input process

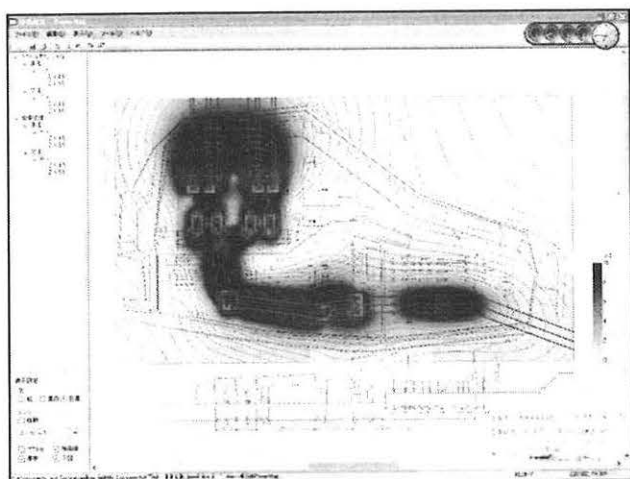


Fig. 3 A screen-shot of a calculation result window

4. 新幹線変電所における検証

直流電気鉄道用の変電所について計算結果と実測結果の比較は既に報告した³⁾通りであり、今回は AT き電方

式の新幹線変電所について検証を行った。

対象は電力会社より三相超高圧にて受電し、き電用変圧器である変形ウッドブリッジ結線変圧器により二相交流を得る一般的な新幹線変電所である。単線結線図 (略図) を図 4 に、平面図を図 5 にそれぞれ示す。A 座き電区間は約 30km, B 座き電区間は約 20km である。

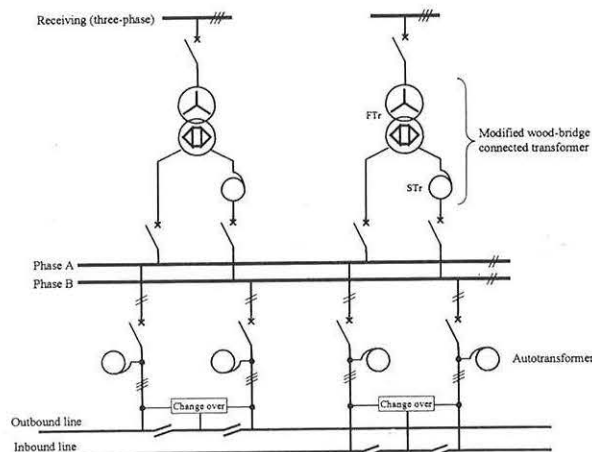


Fig. 4 A schematic diagram of the object substation

図 6 に商用周波数磁界の分布 (計算値) と、測定を行った箇所については計算値と実測値を示した。表示した磁界レベルはき電用変圧器の定格出力時において、地表から 1m の高さにおける値である。なお、本変電所は敷地内で高低差が存在していた (複数高さの整地面が存在、図 3 の下部を参照) ため、それぞれ場所における高さ 1m の磁界を示した。

単巻変圧器 (AT) の二次側である 30kV のき電引き出し部において磁界レベルが大となる特性が見られるが、これは交流き電用変電所の一般的特性である³⁾。計算値と測定値は誤差 20%~30% 程度 (図面と実設備の電線位置や測定位置の誤差などによると考えられる) であり、本ソフトウェアの妥当性が確認できた (図 6)。

5. まとめ

鉄道用変電所の発生する低周波磁界を計算可能な汎用のソフトウェアの開発を行った。本ソフトウェアを用いることで、設備の設計段階において、あるいは現地での測定を行うことなく磁界分布を計算することが可能であり、設備管理や低減対策の検討において有効である。

また、変電所の磁界環境に対する定常計算に特化したことにより、汎用的手法よりも入力が簡易であり、高速に計算可能であることも特長である。今後も引き続き機能ならびに精度の向上を行う予定である。

参考文献

- 1) 経済産業省 原子力安全・保安部会 電力安全小委員会：電力設備電磁界対策ワーキンググループ (報告書), 2008
- 2) 森田, 笹川：鉄道の低周波電磁界に関する国際的基準と国内の動向, 電気学会研究会, TER-08-40, 2008
- 3) 森田, 兎束, 笹川, 管井：電鉄用変電所が発生する電磁界の解析と低減対策, 鉄道総研報告, Vol. 22, No. 12, 2008

- 4) IEC 61786, "Measurement of low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings – Special requirements for instruments and guidance for measurements", 1998
- 5) 山崎, 河本, 藤波 : 円筒型シールド材による 3 相交

流電流路の磁界遮へい効果, 電学論 B, Vol. 119, No. 2, 1999

- 6) 森田, 笹川, 兎東 : 矩形シールド材による往復電流路の磁気遮へい効果に対する簡易計算手法, 平成 21 年電気学会全国大会, 5-168, 2009

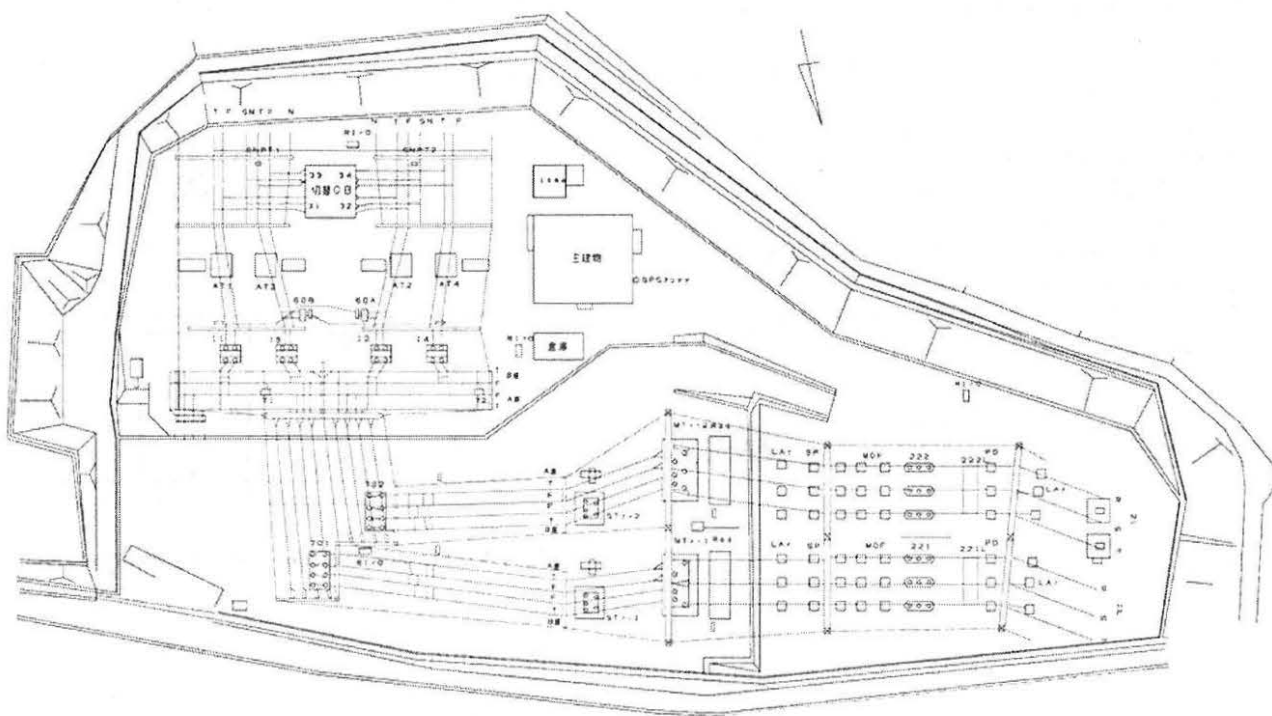


Fig. 5 A ground plan of the object substation

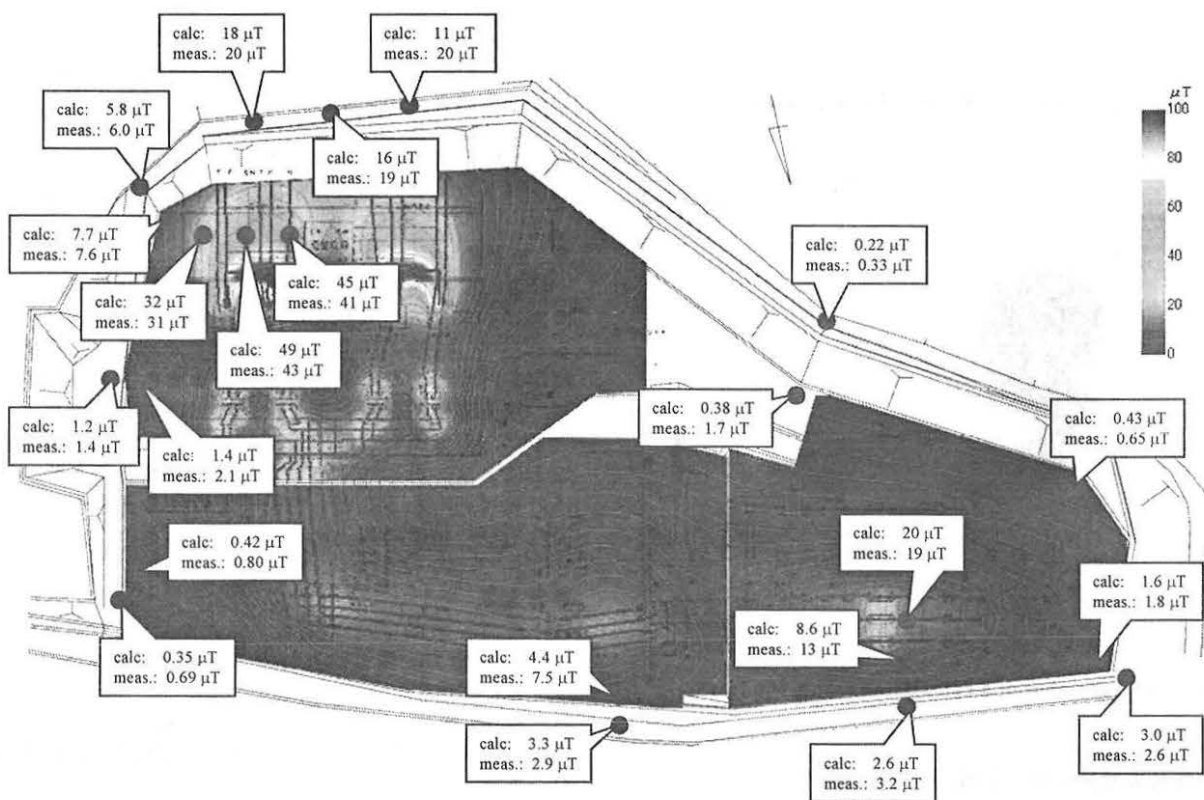


Fig. 6 Simulation and measurement results of power frequency magnetic fields at a height of 1 m at rated load