

電鉄用変電所が発生する電磁界の解析と低減対策

森田 岳* 兎束 哲夫*
 笹川 卓** 管井 俊一***

Analysis Method and Abatement Measure of Electric Magnetic Fields Emitted from Electrified Railway Substations

Gaku MORITA Tetsuo UZUKA
 Takashi SASAKAWA Syun-ichi SUGAI

Recently, electromagnetic environment and electromagnetic compatibility (EMC) around electric equipments have become important issues. The major frequency components of the electric magnetic fields emitted from those electric equipments are low frequencies, by which we mean DC and commercial power frequencies in this paper. Many theoretical studies and test measurements for power system emitting electromagnetic fields were carried out by the power supply companies. However, there have not been enough studies on railway fixed installations, particularly on railway substations. This paper describes the physical characteristics and analytical methods of low frequency electromagnetic fields generated in railway substations. And also, this paper proposes abatement measures and model substation designs based on the above results.

キーワード：変電所，低周波電磁界，電磁環境，電磁界解析，電磁界低減対策

1. はじめに

近年の環境問題への社会的関心の高まりや，生活環境の変化に伴い，電力設備の周辺における低周波電磁界環境や電磁両立性 (EMC) が重要な課題となっている^{1), 2), 3)}。国内では今後，新規設備について電磁界発生量や曝露量の検討，また低減対策が求められる可能性がある³⁾。

これまで，電気鉄道用に設備される変電所（以下，変電所）の発生する電磁界については，特性・計算手法，低減対策といった基本的事柄についても十分に検討がなされてこなかった。本論文では，変電所の電磁界について特性と計算手法を述べ，電磁界の発生量の低減が可能な変電所設計法について述べる。

2. 変電所における電磁界の定式化

2.1 用語の定義と対象

電力設備に関連するような低周波領域では，電磁界は電界と磁界という二つの場が独立して存在すると見なし差し支えない。本論文では，このような取扱いが可能な低周波（直流と商用周波数）の電磁界を取り扱う。

* 電力技術研究部（き電）

** 浮上式鉄道技術研究部（電磁力応用）

*** 元 電力技術研究部（き電）

一般に，電界の表現として電界の強さ E (V/m) と電束密度 D (C/m²) が用いられ，磁界の表現として磁界の強さ H (A/m) と磁束密度 B (T) が用いられている。今回対象とするような空間中（真空中）の電磁現象では，これらは単純な比例の関係にあり，本質的差異はない。よって本論文では，電界の表現として電界の強さ E を，磁界の表現として磁束密度 B を用いる。

2.2 離隔に対する特性の分類

変電所の発生する電界 E と磁界 B の発生源からの離隔 r に対する特性は，次の Laurent 級数で表現できる。

$$E(r) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[E_k(\theta, \phi) \frac{\eta_k^k}{r^k} \right] = E_0 + E_1 \frac{\eta_1}{r} + E_2 \frac{\eta_2^2}{r^2} + \dots \quad (1)$$

$$B(r) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[B_k(\theta, \phi) \frac{\eta_k^k}{r^k} \right] = B_0 + B_1 \frac{\eta_1}{r} + B_2 \frac{\eta_2^2}{r^2} + \dots \quad (2)$$

ただし， η_k は長さの次元を持つ規格化定数， E_k と B_k は発生源を原点とする極座標における偏角 θ, ϕ のみ依存し，離隔 r に依存しない関数である。

式(1)と式(2)において最右辺の第1項は対象領域で一定と見なせる電磁界であり，気象現象（雷雲など）や天体現象（地磁気など）による電磁界などがこれに相当する。第2項以降が発生源による電磁界であり，離隔に対する特性に対応して逆 k 乗項（逆1乗項，逆2乗項，...）あるいは逆 k 乗特性と呼ぶことにする。

特集：電力技術

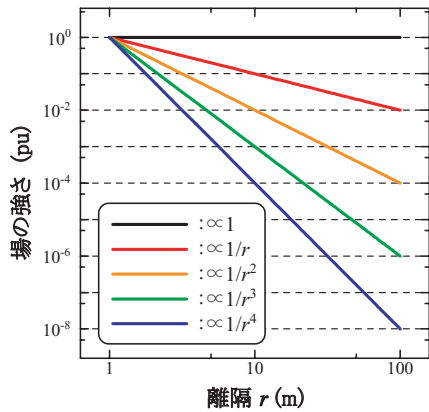


図1 Laurent 展開による場の減衰特性の分類

逆 k 乗項は距離 r の k 乗に反比例して減衰し、次数が高いほど距離に対して急激に減衰する（図1）。一般に、磁界の距離に対する特性には前述の Laurent 級数に示した通り、複数の逆 k 乗特性が含まれている。しかし、上記の理由により、発生源のごく近傍を除けば最も次数の小さな項で代表しても、特性の良好な近似となる。

2.3 電界

低周波では電界は電位（電圧）の空間傾斜であるため、加圧部に静電シールドがされていない箇所（電線など）では、接地面（大地や構造物など）との間に電界が発生する。対して、ケーブル、バスダクトや機器、キュービクル（主回路盤、制御盤）など、接地された金属外箱に覆われた物では、接地面との間に電位差が存在しないため、電界は発生しない。

2.3.1 架空電線路による電界

変電所における電界は電線路からの発生が大半を占める。この電界は理想的な場合について、電位係数の計算と Coulomb の法則により解析的に求めることができる。しかし、実際の場合、電界は構造物や支持物、水蒸気や人体の影響などの環境要因で容易に擾乱を受ける性質があり、精密かつ再現性のある解析は一般に困難である。

図2に示すような、理想大地上（完全に接地電位であり一様と仮定）に張られた無限長の電線路の発生する単純化モデルの電界については、近似解析式を具体的に導出できる。同図に示す導体半径 ρ 、電線高さ h 、導体間距離 a の3導体電線路（導体電圧 V_1, V_2, V_3 ）において、図示のように $x-y$ 座標を定める。このとき、地表面での電界は鉛直成分 E_y のみであり、この値は、

$$E_y(x) \simeq -2 \left[\frac{1}{\ln(2^{7/3} h^3 / \rho a^2)} \frac{h}{x^2 + h^2} (V_1 + V_2 + V_3) + \frac{1}{\ln(2^{1/3} a / \rho)} \frac{2ahx}{(x^2 + h^2)^2} (V_1 - V_3) \right] \quad (3)$$

ただし $\rho \ll a, \rho \ll h, a \ll h$ (近似成立条件) となり、 x に対する逆2乗特性（右辺第1項）と逆3乗

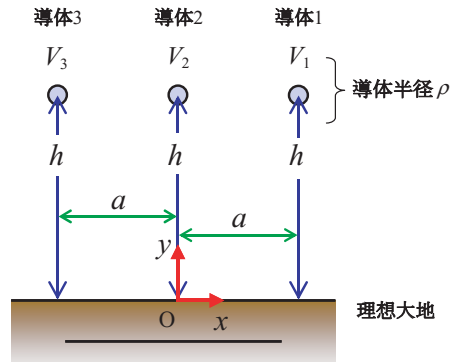


図2 電界計算における3導体電線路モデル

特性（右辺第2項）の和として解析的に表現される。

式(3)は理想的な条件における解析式であるが、実設備においてオーダーおよび傾向の把握は可能である。

2.4 磁界

2.4.1 機器による磁界

変圧器や整流器など変電機器が周囲の磁界に与える影響は機器の近傍に限定され、変電所全体への影響を考慮際には無視することが可能である。これは複数の実設備における測定結果から得られた結論であり、以下に述べる定性的な理論的裏付けが与えられる。

変圧器を例にとれば、これの各脚からの漏れ磁界は磁気双極子（逆3乗特性）としてモデル化できる。変圧器全体では脚の起磁力の総和は0となるため、機器全体の漏れ磁界は磁界の打ち消し効果（3.2.1参照）により逆4乗～（条件により）逆5乗特性を呈する。

さらに、変電機器は鋳鉄製の外箱に覆われており、これの磁気シールド効果により漏れ磁界はさらに小さなものとなる。また、後述するように電線路の発生磁界は逆2乗～逆3乗特性であり、機器に比べ影響範囲が広い。

2.4.2 電線路による磁界

変電所の発生磁界の主要発生源は電線路であり、発生磁界の定式化を以下に行なう。三相交流の電線路の発生する磁界の定式は複数が提案されており^{4), 5)}、これを電鉄変電所に適用できる形式（一般形式）に拡張することができる。これら近似式は、Ampere の法則による厳密解の良好な近似を与える。

図3に示す $n \times m$ 導体二次元配置の電線路モデルが、この中心から距離 r 離れた測定点 P に発生する磁界は、次の逆2乗特性の近似式で与えられる。

$$B(r) \simeq \frac{\mu_0}{2\pi r^2} \sqrt{a_x^2 \left[\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m (l-1) I_{k,l} \right]^2 + a_y^2 \left[\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m (k-1) I_{k,l} \right]^2} \quad (4)$$

ただし $\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m I_{k,l} = 0, a_x, a_y \ll r$ (近似成立条件)

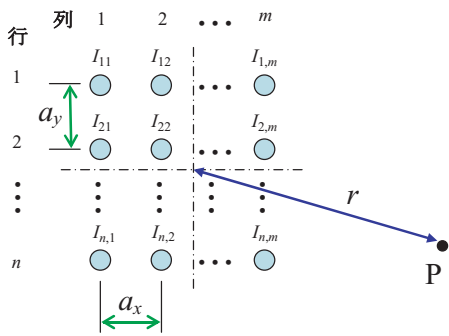


図3 磁界計算における $n \times m$ 導体電線路モデル

ここで μ_0 は真空の透磁率, $I_{k,l}$ は k 行 l 列の電線の通電電流, a_x は横方向の, a_y は縦方向の電線間隔離である。なお, 式(4)の条件より明らかなように, ここで言う電線路とは電流の往路と復路を全て含めた集合体であり, 電流の総和が常に零となる組み合わせである。

より単純なモデルである図4の n 導体一次元配置の電線路(電線間隔 a)が, 測定点 P に発生する磁界は,

$$B(r) = \frac{\mu_0 a}{2\pi r^2} \left| \sum_{k=1}^n (k-1) I_k \right| \quad (5)$$

ただし $\sum_{k=1}^n I_k = 0, a \ll r$ (近似成立条件)

なお, 以上は無限長の電線路に関する理論式である。電線路からの隔離が, 電線路の長さ λ よりも長い場合, 磁界は上記近似式に λ/r を乗じた形式となり, 減衰特性は逆3乗特性となる。

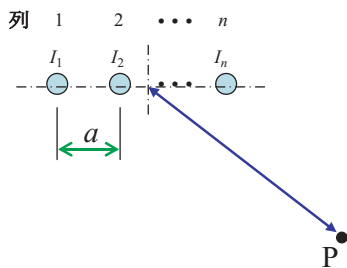


図4 磁界計算における n 導体電線路モデル

3. 電磁界低減の方法論

電磁界の低減対策には二つの方法がある。一つは発生量の低減によるものであり, もう一つは対象への曝露量の低減を検討するものである。曝露量低減対策としては, 発生源と曝露対象の隔離を確保すること, 曝露対象を金属板や鋼板で覆うことによるシールドなどがある。本論文では前者の発生量の低減によるものを取り扱う。

2章で明らかとしたように, 変電所における主たる電磁界の発生源は電線路であり, 電線路の電磁界低減を検討することにより, 変電所の電磁界低減が可能となる。なお, 磁界低減については平均値よりも最大値の低減に

注力する方が国際ガイドラインに適った方法である⁶⁾。

3.1 電界の低減手法

電界は接地された金属で充電部を覆う静電シールドにより, 容易に遮へいすることができる。超高压設備など静電シールドが困難な場合についても, 電線高さを確保することにより容易に低減することができる。通常, 電力設備の電界が問題になることは少ないとされている³⁾。

3.2 磁界の低減手法

3.2.1 磁界の打ち消し

一つの磁界発生源に対し, それに対して同じ大きさで逆位相(逆方向)の発生源を近接させることで, 発生量を低減させる磁界の打ち消し効果が定性的に知られている。この効果は磁界低減の理論検討に重要であり, 定量的評価を行うため定式化を行った。

モデルとして図5に示す逆 k 乗特性を有する発生源を逆位相で近接させたモデルを考える。両発生源間の相対ベクトルを a とし, 観測点 P から両発生源の中心へのベクトルを r とする。このとき, 観測点における磁界は,

$$B(r) \simeq \frac{\eta_k^k}{r^{k+1}} \left\{ \left(\frac{a \cdot r}{r} \right) - \left[\left(a - \frac{r}{r} \left(\frac{a \cdot r}{r} \right) \right) \cdot \nabla_\theta \right] \right\} B_k \quad (6)$$

ここで $r = \|r\|, \|a\| \ll r$

で与えられる。ただし, ∇_θ は動径を1に規格化したナブラ演算子である。

式(6)より, それぞれの発生源が逆 k 乗特性であるのに対し全体の特性は逆 $k+1$ 乗特性となり, 1乗分だけ減衰が急となることが分かる。なお, 近接させる発生源が3つ以上の場合でも, それぞれの発生強度 B_k の総和が零となれば同様の効果が得られる。

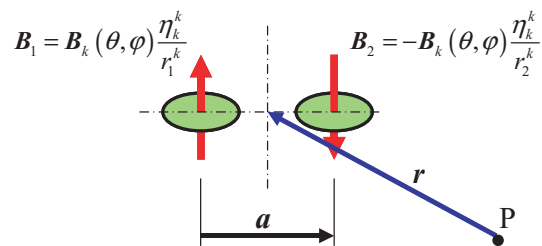


図5 逆位相による磁界の打ち消し

3.2.2 電線路の磁界低減法

電線路の磁界低減対策については, 電力会社において既に実施されている³⁾。具体的には以下である。

- (1) 通電電流を低減させる。
- (2) 電線路の配置を工夫する(電線間の隔離の低減, 2回線の逆相配置, ツイストケーブルの採用等)。
- (3) 電線路を強磁性体で覆い, 磁気シールドを行う。

電鉄用変電所においては, 電圧や負荷は固定的であるため(1)の手法は採用できない。また, (3)の強磁性体

特集：電力技術

による磁気シールドは、バスダクトや GIS の採用によって行うが、設備改良として実施する場合には大規模の工事を要し、相応の費用やスペースが必要となる。

以上のことから電鉄用変電所では、電線路の配置を工夫することによる磁界低減対策が最も採用しやすいと考えられる。本対策は 2.4.2 で述べた磁界の近似式（式(4)、式(5)）を最小化する非線形計画問題として一般化される。目的関数は図 3 の電線路について、

$$a_x^2 \left[\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m (l-1) I_{k,l} \right]^2 + a_y^2 \left[\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m (k-1) I_{k,l} \right]^2 \quad (7)$$

図 4 の電線路について、

$$a \left| \sum_{k=1}^n (k-1) I_k \right| \quad (8)$$

磁界低減にあたって、第一のファクターは電線間の離隔 a_x, a_y, a であり、これが小さいほど発生磁界も小さくなる。ただし、絶縁のための離隔や電磁力に対する機械的保持の問題などにより、電線間離隔は一定の間隔以下には狭められないため、これらとのトレードオフを考慮して最適な間隔を検討する必要がある。

第二のファクターが電線の配置（順序）である。同一の通電条件においても、これによって発生磁界は異なるため、磁界低減における最適な配置が存在する。この最適化問題における変数は電線の配置であるため、解くべき問題は組み合わせ最適化である。

上記の組み合わせ最適化問題を解くにあたっては、電気鉄道特有の負荷条件を全て考慮する必要がある。具体的には、単回線負荷、複数回線負荷、回生・横流の負荷条件で最大の目的関数を計算し、これが最小となる配置として最適解が得られる。AT き電用変電所においては、さらに負荷モードとしてトロリ (T) - レール (R) 通電と T- フィーダ (F) 通電、切替セクション通過時を考慮する必要があり、最適化はさらに煩雑となる。

3.2.3 電線路の最良配置

電線路条件や負荷条件によっては、実行可能解の中に磁界低減の目的関数（式(7)、式(8)）が 0 となる最良解が含まれることがある。この場合、電線路からの発生磁界は逆 3 乗特性となり、大きな磁界低減効果が得られる。

上記の最良配置は目的関数を 0 とする方程式を解くことで得られるが、この解の個数は無数であり、電線数が多数となると方程式も簡単に解くことはできない。

しかし、前述の磁界の打ち消し効果（3.2.1 参照）を用いれば、特解を得ることは比較的簡単である。特解は、電線路をより単純な往復電線路の集合（例えば三相交流や直流、単相交流など）に分解し、それぞれを逆位相で足し合わせるよう配置することで得られる。この手法では、例え最良解が存在しない場合でも、磁界低減可能な配置を発見できる利点がある。

図 6 (a) に 3 導体電線路における逆 3 乗特性が得られ

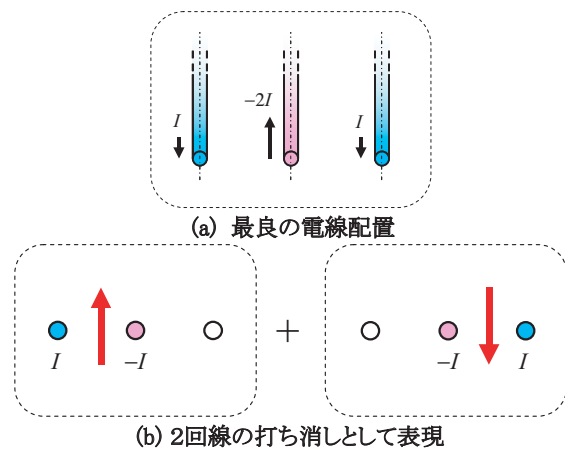


図 6 3 導体電線路の最良配置

る最良の配置を示す。この例については解の個数は 1 つであり、目的関数を 0 とする方程式が容易に解ける場合であるが、同図 (b) に示すように 2 回線の往復電流の逆位相配置としても表現（導出）できる。

4. 変電所における電磁界の低減法

4.1 変電所の電磁界の一般的特性と設計の注意事項

4.1.1 直流き電用変電所

(1) 整流器

整流器用変圧器と整流器を接続する交流低圧母線（1200V あるいは 600V）には、直流負荷電流と同じオーダーの商用周波交流電流が流れるため、比較的大きな交流磁界が発生する。整流器を用地境界付近に設置することは避けることが望ましい。

(2) 直流フィルタ

直流主回路に接続される共振型の直流フィルタには高調波電流が流れるため、高調波の磁界が発生する。直流フィルタとそれに接続される電線路は用地境界から離して設置することが望ましい。高調波磁界に対するガイドライン⁶⁾は基本波よりも厳しいため、十分な注意が必要である。

(3) 直流母線

正 (P) 側と負 (N) 側で構成される往復電線路であり、P-N 間の離隔が大きくなると発生磁界も大きくなるため注意が必要である。

(4) 直流しゃ断器盤

P-N 間の離隔が大きくなり易い箇所である。P 側と N 側の電線路を全箇所随伴させる方法などで低減を行うことが可能である。

(5) き電送り出し部

P 側と N 側が離れて施設される構成となり易く、直流発生磁界が比較的大きくなる。敷地境界を横断する部分であるため、特に注意が必要である。

4.1.2 交流き電用変電所

(1) 受電部

超高圧にて受電する場合など、交流変電所においては受電電圧が高くなるため、電線路の高さを確保するなど電界を3kV/m以下に制限する必要がある(電気設備技術基準)。き電用変圧器の二次側電線路についても、電線高さが低くなる箇所では電界が大きくなるため、注意が必要である。

(2) 受電電線路と交流母線

往復電線路を構成するT-F(ATき電)あるいはT-負き電線(NF)(BTき電)は随伴する構成が通常であり、直流変電所ほどの注意は必要ない。発生電磁界の低減対策の手法としては、直流変電所の場合と全く同様である。

(3) 並列コンデンサ

負荷電流のオーダーに近い進相電流が常時通電されており、電線路の高さも低くなる傾向がある。敷地境界付近への施設は避けた方が良いと言える。

(4) き電送り出し部

直流変電所の場合と同様の理由により、注意が必要となる。特にATき電用変電所においては、T-F電線路とN電線路の離隔が離れる構成となりやすく、注意が必要である。

4.2 磁界低減可能な変電所の設計例

4.2.1 直流変電所の設計例

直流き電用変電所の直流母線と、き電送り出し部について、磁界低減可能な電線路の配置例(設計例)を検討した(図7)。直流母線については前章で述べた逆3乗特

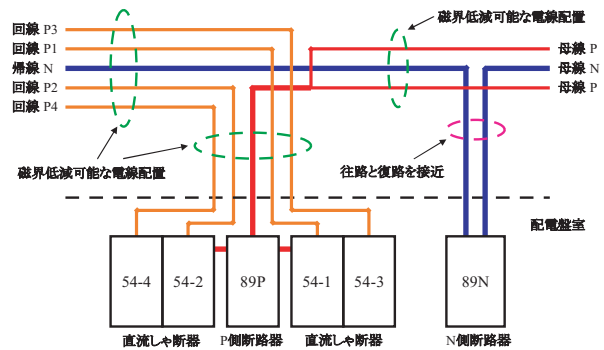


図8 配電盤における磁界低減可能な配線例

性が得られる最良配置である。き電送り出し部には3パターンを示した。これらは他の部分への適用も可能であり、図8に配電盤配線への適用例を示す。

4.2.2 磁界低減効果の検証

磁界低減効果を検証するため、変電所全体の三次元磁界解析を行うプログラムを用いた。本プログラムは電線路の磁界をBiot-Savartの法則による厳密式を用いて計算している。また、バスダクト(磁気シールドを考慮)、ツイストケーブルを発生源として考慮することができる。

本プログラムの計算精度を、実際の変電所において実測値との比較によって確認した(図9)。同図は直流磁界に関する計算値と実測値の比較であり、変電機器(整流器、直流フィルタ)の直近を除けば両者は最大誤差20%程度で一致していることが分かる。

本プログラムを用いて、直流母線部の磁界低減対策(図7の左)について低減効果を検証した。図10は直流母線の発生する磁界(測定高さ1m)を相対値で示したも

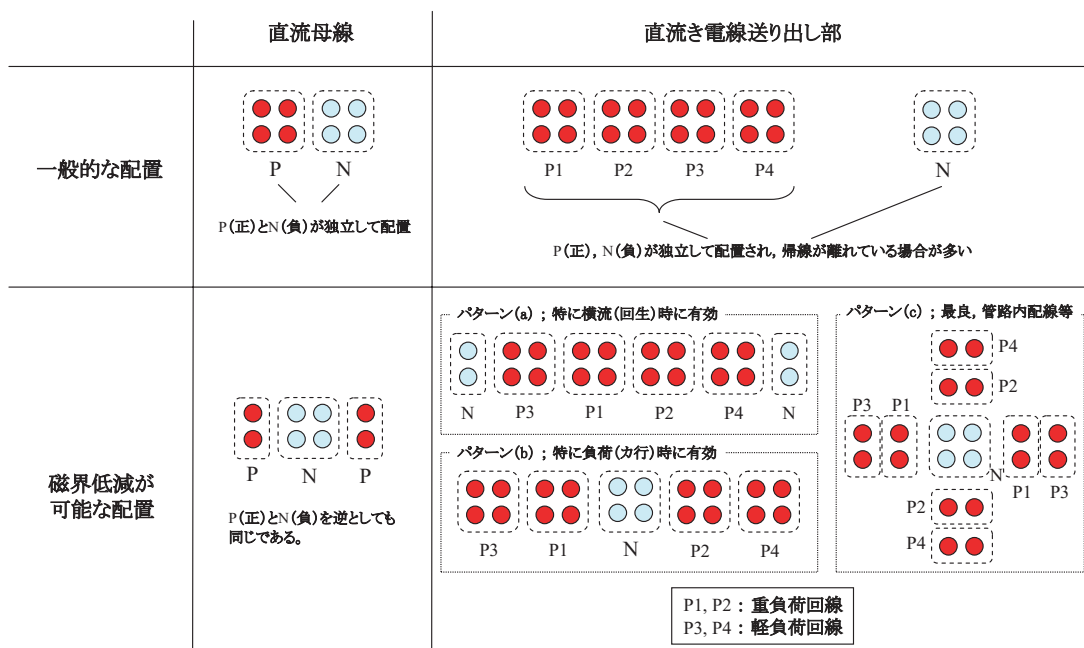


図7 磁界低減可能な直流変電所主回路の配線例

特集：電力技術

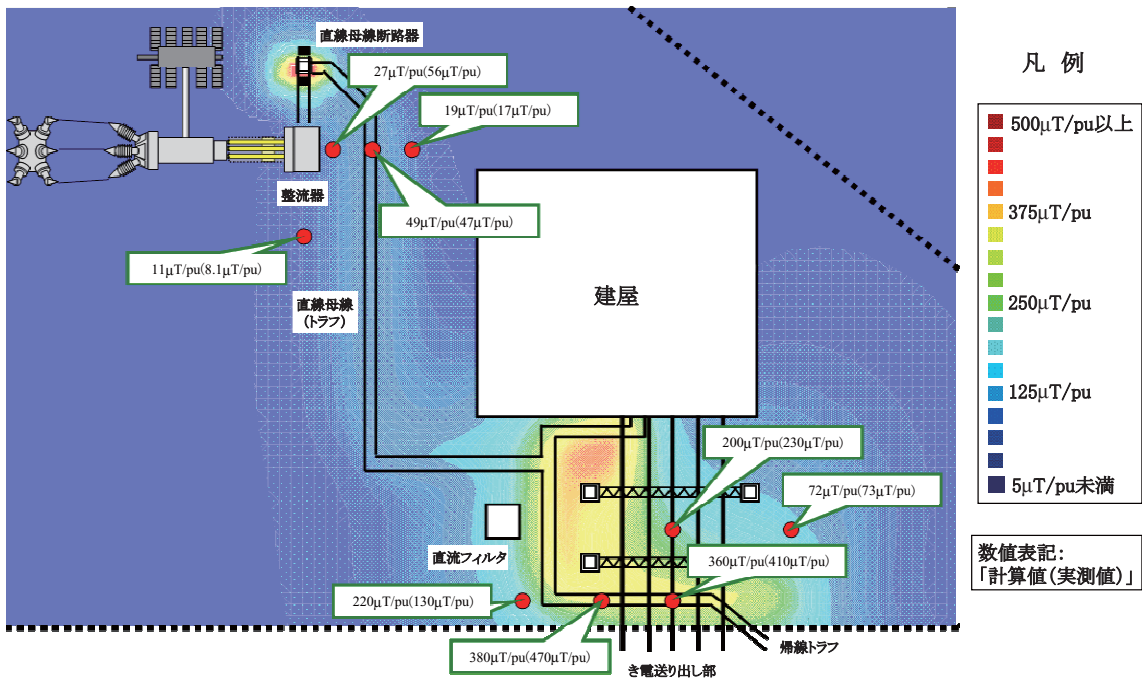


図9 直流き電用変電所における直流磁界の計算結果と実測値との比較 (1pu= 定格出力；測定高さ 1m)

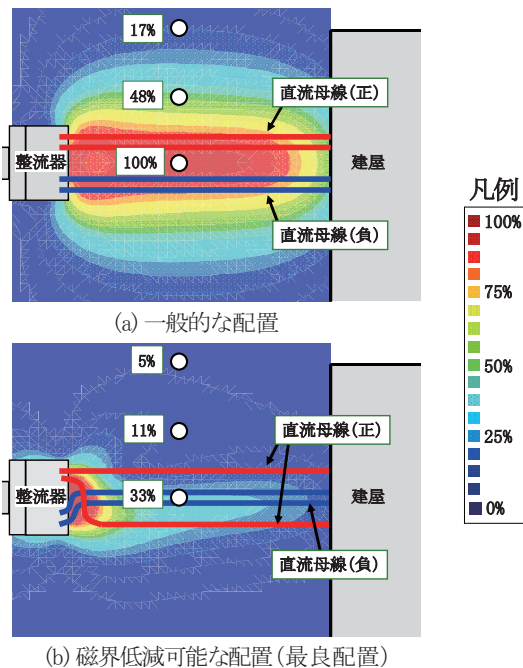


図10 直流変電所の直流母線における磁界低減効果

のである。対策により母線周辺部の磁界は概ね 1/4～1/3 程度に低減できていることが分かる。なお、低減効果は元の電線配置や測定点など条件により異なる。

5. まとめ

本論文において、電鉄用変電所における低周波電磁界の特性と計算手法、低減対策について論じた。以下に得

られた結論を要約する。

- (1) 変電所の電磁界発生源と特性・計算方法を明らかにし、実設備の測定により妥当性を確認した。変電所の電磁界は殆ど電線路によって決定される。
- (2) 電線路の配線変更による、発生電磁界低減の一般的手法を構築した。特に磁界の打ち消し効果と、それによる逆3乗特性の実現は重要である。
- (3) 変電所の電磁界の一般的特性と設計にあたっての注意事項を整理した。磁界低減可能な変電所の設計例を提案し、低減効果を計算により確認した。

文献

- 1) 電気学会：電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題 第Ⅱ期報告書，日経印刷，2003
- 2) 笹川卓：鉄道における低周波電磁界環境に対するガイドラインと取り組み，鉄道総研報告，Vol. 20, No. 8, 2006
- 3) 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
- 4) 石塚和夫，戸田幸生，河本博，水間毅：電力線からの磁界の簡易計算法（第一報），平成8年電気学会全国大会，1996
- 5) 岸本保夫：電力線周辺における低周波電磁界の解析と電磁障害対策，NTT 建設総合研究所報告，2006
- 6) ICNIRP, “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300GHz)”, Health Physics, Vol. 74, No. 4, 1998.