直流電気鉄道車両における漏洩磁界とその遮蔽対策 論文

正 員 水 間 毅 (交通安全公害研究所)

正 員 天 野 武 一 (交通安全公害研究所)

非会員 戸 田 幸 生 (株式会社 リケン)

非会員 河 本 博 (株式会社 リケン)

The Leakage Flux and The Shielding Measures on DC Electric Vehicle

Takeshi Mizuma, Member (Traffic Safety and Nuisance Research Institute)

Takekazu Amano, Member (Traffic Safety and Nuisance Research Institute)

Yukio Toda, Non-Member (Riken Corporation)

Hiroshi Kawamoto, Non-Member (Riken Corporation)

Recently, the leakage flux in the railway vehicles have been increasing. Therefore, on every kind of driven controlled vehicle(rheostatic control vehicle, field chopper vehicle, VVVF inverter control vehicle), the leakage flux was measured under the same conditions on the same railway line. And it was found that DC leakage flux above the reactor in the VVVF inverter control vehicle was biggest.

Then, the light shield materials and its suitable configuration were proposed for the sake of keeping down below 1mT of DC magnetic field that is the commendable value of ministry of transport. Besides, the shield structure(materials and configuration) we proposed was taken in the practical vehicle and was tested in the actual line.

Through the actual tests and the computer simulations, the effectiveness of this shield structure was confirmed. And it was found that the total weight was about half of the iron shield assured the equal effectiveness.

Moreover, we proposed the estimation index that the operation waveform of pace-maker was normal or not for the effectiveness of shield, and tried to show the example of its operation waveform.

キーワード：漏洩磁界、シールド、直流電気鉄道、リアクトル

1. まえがき

鉄道の分野において、近年のパワーエレクトロニクス技術、マイクロエレクトロニクス技術の発展は高性能な車両の誕生、高速化の実現、省エネルギー化の実現等社会生活の向上に少なからず寄与してきた。しかしその反面、鉄道車両に搭載される、これらの技術を利用した電気機器から発生する電磁界に人体及び磁気機器等がさらされる機会が増えてきている。

現在、鉄道から発生する電磁界による障害等は報告されていないものの、今後世界的に電磁界の規制が検討されていく状況にある。従って環境面からも鉄道が適合していくためには鉄道から発生する電磁界の大きさを把握し、場合によってはその電磁界を遮蔽するための方策等を検討して

いく必要がある。

本論文では電磁界のうち磁気機器への影響があり得ると言われている⁽¹⁾⁽²⁾ 直流電気鉄道から発生する磁界を対象として、大きさ等を測定した結果を示す。その上で遮蔽対策について検討を行い、鉄道車両に搭載する遮蔽材として適した材料、形状を開発する。そして実車両による走行実験、シミュレーションを通してその効果を確認し、実用に至った結果を示す。

2. 直流電気鉄道から発生する磁界⁽³⁾

2.1> 磁界の種類 直流電気鉄道車両から発生する磁界については以下のものがある。

(1) 電車線からレールへという直流電流の流れが周囲に大きな磁界を発生させ、それが電車走行により複雑な磁界

変動を起こす一種の変動磁界

(2) VVVF インバータ等車載機器のスイッチングや機器等の基配線から発生する交流磁界

(3) 電車線からの直流電流を平滑化するためのリアクトルから発生する直流磁界

このうち (1) については電車通過時の瞬間のみに発生し、大きさは 0.1 mT 程度⁽⁴⁾ である。(2) については磁界の大きさそのものは小さく、また電界として放出するものがアンテナ等により磁界として現れるものであるから電界遮蔽で対処が可能である。(3) については数 mH 程度のインダクタンスを有するコイルから構成されるリアクトルが、 1000 A 程度の電流を平滑する事により生ずる磁界であるので数 mT 程度の漏洩磁界を発生する場合がある。またこうした磁界は高速化、電動機の容量、車両編成数等の増加による電車線電流の増加に伴います増加する傾向にある。

図 1 に直流電気鉄道における磁界発生概念を示す。これらの磁界は車両内において複合されて影響を及ぼすことになる。

＜2＞ 磁界の測定例 直流電気鉄道車両というのは変電所から電線を通して送電される直流 $1,500 \text{ V}$ 又は 750 V をトロリ線を介してパンタグラフ等の車両の集電装置で受電し、直流又は交流電動機を駆動して走行する車両のことである。また、電動機の駆動を制御する方式には抵抗制御方式、チョップ制御方式、VVVF インバータ制御方式等があるが、ここでは通勤電車線区の代表的な直流電気鉄道車両として (1) 抵抗制御 (電動機回路の抵抗値を変化させ電動機制御を行う方式) 車両 (2) 界磁チョップ制御 (電動機回路の界磁回路の電流値をチョップにより変化させ電動機制御を行う方式) 車両 (3) VVVF インバータ制御 (駆動電動機に交流電動機を使用しインバータで制御を行う方式) 車両の 3 種類を選択し、同一線区、同一走行条件における力行、だ行、制動時の車内床面上での漏洩磁界を測定することとした。

図 1 直流電気鉄道車両から発生する磁界
Fig.1 Magnetic field radiated by DC electric vehicle

表 1 測定に用いた直流電気鉄道車両の概要

Table1 The outline of measured DC electric vehicle

種 類	編 成	搭載電動機
抵抗制御車	3M3T*	直流直巻電動機 (定格容量 120kW , $\text{DC}675\text{V}$, 200A) 12 台
界磁チョップ制御車	4M2T	直流複巻電動機 (定格容量 120kW , $\text{DC}675\text{V}$, 200A) 16 台
VVVF インバータ制御車	4M4T	誘導電動機 (定格容量 135kW , $\text{AC}1100\text{V}$, 90A) 16 台

* : 3M3T とは、3 両の車両が電動機を搭載している電動車 (3M) で、残り 3 両の車両は電動機を搭載していない付随車 (3T) の 6 両編成であることを示す。

表 1 に測定に用いた車両の編成、電動機の台数、容量を示す。

測定はホール素子を用いた磁束密度計により行い、3 次元のベクトル和 (単位: mT 、電車進行方向を x 、鉛直方向を z 、その両方に直角の方向を y としそれぞれの方向での磁束密度を B_x 、 B_y 、 B_z とすると、 $B = \sqrt{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}$) で表現した。

(1) 制御方式別の漏洩磁界

図 2 に制御方式別の車両内における力行時の漏洩磁界の大きさを、床面からの距離で測定した結果を示す。測定位置は抵抗制御車両では制御器の直上、界磁チョップ制御車両ではチョップ制御装置の直上、VVVF インバータ制御車両ではリアクトル直上とした。いずれも各制御方式車両において最大の磁束密度を示した位置で測定を行った。また、磁束密度は測定器の直流レンジで測定した。

これによると VVVF インバータ制御車両の漏洩磁界が大きいことがわかる。界磁チョップ制御車両で車内床面から 150 cm の高さでの漏洩磁界が 100 cm の高さでの値よりも大きいのは、測定誤差あるいは車両を構成する材料や車両の形状等による影響が現れたものと考えられる。また抵抗制御車両において床面からの距離による影響が少ないのは、車両上の空調機器や車両下の発電機等からの漏洩磁界が複雑に錯綜していることによるものと思われる。

なお図 2～図 7 の測定において、車両が走行していない状態での磁束密度の大きさはいずれも地磁気レベルの 0.05 mT 程度であった。

(2) 車両の走行モード別の漏洩磁界⁽⁵⁾

図 3 に VVVF インバータ制御車両における力行時と制動時の漏洩磁界を車内床面からの高さで測定した結果を示す。測定位置はリアクトル、VVVF インバータ制御装置の直上の車両内である。インバータもリアクトルも車両床下 10 cm 程度の位置に実装されており、インバータはア

ルミニウムの箱内に、リアクトルは鉄の箱内に収納されている。

図2 直流電気鉄道車両制御方式別の車内漏洩磁界
Fig.2 Leakage flux in the passenger room of DC electric vehicle classified by drive control method

図3 VVVFインバータ制御車両の走行モード別の漏洩磁界
Fig.3 Leakage flux on VVVF inverter controlled vehicle by running modes

これによると力行時の方が制動時よりも大きな漏洩磁界を生じることが確認された。これは、リアクトルも VVVF インバータも力行時よりも制動時の方が流れる電流が大きいことによると考えられる。

(3) VVVF インバータ制御車からの漏洩磁界

(1),(2) の結果より今回の場合、VVVF インバータ制御車から発生する力行時の漏洩磁界が大きいことがわかった。従って、次に VVVF インバータ制御車両の各床下搭載機器直上の車両内漏洩磁界を測定し、どの部位からの漏洩磁界が最大となり、またどのように分布するかを確認することとした。

図4に VVVF インバータ制御車両内の漏洩磁界を床面からの距離により測定した結果を示す。

これによるとリアクトル直上の漏洩磁界が最大であり、制御機器である VVVF インバータ直上や電動機を搭載していない付随車 (T 車) 内の漏洩磁界は小さいことが確認され、距離による減衰も大きいことが確認された。

また、図5に力行時のリアクトル直上の車内床面における漏洩磁界波形とその時の架線電流波形を示す。

これによると漏洩磁界は架線電流と相似形のほぼ直流磁界となっていることがわかる。

図4 VVVFインバータ制御車両内の漏洩磁界
Fig.4 Leakage flux in VVVF inverter controlled vehicle

図5 リアクトル直上の車内床面における漏洩磁界と架線電流

Fig.5 Leakage flux in the passenger room above reactor and trolley currents

3. 直流磁界の遮蔽対策

以上の結果より、今回の測定では直流電気鉄道車両において最大の漏洩磁界はVVVFインバータ制御車両のリアクトルから放出される直流磁界であることが確認された。これに対してVVVFインバータ等の制御装置から発生する磁界は、直流としては小さいもののインバータ周波数に同期した交流成分も含まれている。従って交流磁界についての検討も必要ではあるが、鉄道から発生する交流磁界は議論すべき点が多いので本論文では言及しないこととする。すなわち鉄道から発生する交流磁界は直流磁界に重畳された形で発生し、時間により周波数、レベルが変化するという特色を有しているためどの時点での値を読めばよいかわけにくい。従って交流磁界については測定方法の標準化がなされた後に検討することとする。

3-1> 直流磁界の限度値 現在、直流磁界については国際的な規制や限度値は定められていない。また、直流磁界の人体への影響についてはWHO（世界保健機関）の環境保健基準 69（Environmental Health Criteria 69）において述べられているが、そこでは2 T（テスラ）を超える磁界に対しても危険性については確定的な説明はできないと報告されている。従って鉄道から発生する程度の直流磁界では人体に影響を及ぼす危険性は少ないと言えるかもしれない。しかし鉄道は公共輸送機関であり、ペースメーカを装着している人々も乗車することも考えると、ペースメーカが磁界や電界の影響で誤動作する可能性を指摘されている現状では直流磁界もある程度のレベル以下に抑えることが望ましい。一方、直流磁界が外部に漏洩する可能性のあるMRI（Magnetic Resonance Image: 核磁気共鳴装置）が設置されている病院内においては、一般の人々が通行する場所で0.5 mT以内⁽⁷⁾⁽⁸⁾に遮蔽する対策が採られている例がある。従って鉄道車両内においてもある程度の遮蔽対策を行うことが望ましいと考える。その場合、鉄道から発生する磁界源は床下機器が中心であるので床面上での減衰があることを考慮して、床面で1～2 mT程度まで遮蔽すれば十分であると考えられる。

3-2> 遮蔽材の検討⁽⁹⁾ 一般に磁界を遮蔽する場合は材料、形状の検討が必要である。

(1) 材料の検討

磁界を遮蔽する材料としては透磁率が高く保持力が低いものが望ましいとされており、鉄を利用することが一般的である。しかし、鉄道車両においては車両重量の増加は走行時の消費エネルギー増加につながるため、極力軽量化された材料を使用することが望ましい。そうした観点からコバルトアモルファス合金と珪素鋼板を張り合わせたアモリックGシート（以後「Gシート」と記述する）に難燃処理を施した材料を開発し、鉄の約1/2の重量で同程度の遮蔽効果を得ることを可能にした。

鉄とGシートの材料を比較したものを表2に示す。

表2 遮蔽材料の概要

Table 2 Outline of shield materials

名称	主成分	透磁率 (H/m)	保磁力 (A/m)	比重 (kg/m ³)
鉄		4×10^{-4}	61	7.85×10^3
Gシート	コバルト系アモリック合金 + 珪素鋼板	2×10^{-2}	4	3.2×10^3

(2) 形状の検討

従来、鉄道で遮蔽するという場合は、鉄の平板を対象機器の上に床面に平行に敷設する例が多かった。その場合、平板の厚さによっては磁気飽和を生じ平板の端部に磁束密度が集中する現象も考えられる。また、Gシートの場合保磁力が鉄よりも小さいため磁界集中現象が顕著になることも考えられる。

従って平板の端部を床面に垂直に曲げた箱形状の遮蔽を考案した。これにより磁界が端部に集中してもその方向は車両内方向ではなくレール方向となり、車内に磁界集中を起こさずに遮蔽が可能となる。

3-3> 実験的検討⁽¹⁰⁾ 表1のVVVFインバータ制御車両におけるリアクトル上の車内床面での漏洩磁界を測定し、その床面に平板形状の遮蔽材を敷設した場合の遮蔽の程度を測定した。遮蔽材は厚さがともに約3 mmの鉄とGシートとした。その重量は鉄が約10 kg、Gシートが約4.7 kgとなっている。

図6に各測定点における磁界測定結果を示すが、各材料において平板中心部では遮蔽効果がみられるものの端部においては磁界集中があることが確認された。なお平板は床面から10 cmの高さに設置した。これは箱形状で測定する場合と測定位置の高さをそろえるためである。

次に鉄及びGシートの垂直に曲げた量を10 cmとした箱形状の遮蔽材を床面に設置して磁界を測定した結果を図7に示す。

これによると箱形状の遮蔽材を用いることにより、遮蔽材中心部のA点、端部のC点とも遮蔽しない場合よりも磁束密度が低減されていることが確認された。また重量は鉄が約12.9 kg、Gシートが約6.0 kgであり、Gシートが鉄の約47%の重量で同程度の遮蔽が可能なのも確認された。B点で遮蔽効果が見られないのは、車内の構造によりリアクトルを覆い尽くすように遮蔽材を設置できなかったためである。

図6 平板遮蔽材の有無による車内リアクトル上の漏洩磁界

Fig.6 Leakage flux in the passenger room above reactor with or without flat shield material

図7 箱形遮蔽材の有無による車内リアクトル上の漏洩磁界

Fig.7 Leakage flux in the passenger room above reactor with or without box-shaped shield material

<3・4> 実用車両への応用 これまでの実験結果により箱形状のGシートで遮蔽を行うと磁界を集中させることなく車内の磁界低減が可能となることが確認された。

従ってこの箱形状を基本に、図8のような遮蔽構造をリアクトル上にぎ装した新京成電鉄8900系車両が開発された。

空車状態、架線電流約960Aの力行時における車内での漏洩磁界の測定結果を図9に示す。

これによると遮蔽材中央である測定点③と端部である測定点④とも1mT以下に磁束密度が収まっていることが確認された。なお遮蔽板の厚さはGシートで構成されている

①部分で8.5mm、鉄で構成されている②部分で4.5mmであり、重量は約174kgである。一方、床材による影響であるが、通常の車両はリノリウム等の非金属の合成樹脂を使用しているため、磁界に対する遮蔽効果はほとんどない。

①Gシート (φ800×φ1900×φ15 立ち下げ100)
②鉄 (φ800×φ1200×φ4.5)

図8 実用車両における遮蔽構造

Fig.8 Shield structure on practical vehicle

図9 実用車両による漏洩磁界の遮蔽

Fig.9 Shielding of leakage flux on practical vehicle

<3・5> シミュレーションによる検討

<3・4> で述べた実用車両で用いた遮蔽構造において、有限要素法と積分方程式を組み合わせたコンピュータシミュレーションを実施し、実測定との比較を行った。

この際、材料の磁気特性は磁気飽和現象を考慮して非線形で入力した。また平板構造において、磁界集中がシミュレーション上でも起こるのかについても確認することとした。

図10に実用車両にぎ装した遮蔽構造における車両内磁界分布の計算結果を示す。

①Gシート (*800×'1900×'15 立ち下げ100)
②鉄 (*800×'1200×'4.5)
ただし、○は実用車両における測定点④での値を、
△は測定点③での値を記す。

図10 実用車両の遮蔽構造における車内磁界分布の計算結果

Fig.10 Magnetic field in passenger room of practical vehicle by computer simulation

①Gシート (*1000×'1900×'15)
②鉄 (*800×'1200×'4.5)

図11 平板遮蔽構造における車内磁界分布の計算結果
Fig.11 Magnetic field in passenger room of practical vehicle with flat shielding by computer simulation

図11に図10の遮蔽材と同じ厚さ・幅の平板による遮蔽効果について計算した結果を示す。

これらのシミュレーション結果により、①実用車両での測定結果とシミュレーション結果は車内床面においてほぼ一致していること、②平板構造では端部に1mTを超える磁界の集中が見られること、等が確認され、シミュレーション結果と実験結果が傾向的には一致することが確認された。

ン結果と実験結果が傾向的には一致することが確認された。

4. 直流磁界の遮蔽効果⁽¹¹⁾

鉄道車両内の直流磁界は、遮蔽材料・形状の適切な選択により磁界集中を起こすことなく遮蔽できることが確認された。

本章では、磁界を遮蔽することがどのような効果につながるかについて実験を行った結果を示す。

ここではリアクトルからの直流磁界が遮蔽されない場合とされた場合について、ペースメーカーの電圧波形がどのようなかを確認することとした。遮蔽材としてはGシートを用い、リアクトル上部の車内床面に敷設した。ペースメーカーはリアクトルの中心上に、遮蔽しない場合は床面に直接置き、遮蔽する場合は車内床面に敷設したGシートの上に置いた。図12に遮蔽なしの場合の車内床面上漏洩磁界の大きさとペースメーカー出力電圧波形を示し、図13に遮蔽した場合のGシート上漏洩磁界の大きさと出力電圧波形を示す。

図12 遮蔽しない場合の漏洩磁界とペースメーカー出力電圧

Fig.12 Leakage flux on the floor and operation of pace-maker without shielding

図13 遮蔽した場合の漏洩磁界とペースメーカー出力電圧

Fig.13 Leakage flux on the G-sheet and operation of pace-maker with shielding

ペースメーカは市販の双極電極・プログラム可変形で、1秒間に1拍動作させるモードを設定した。車両は停止から70 km/hになるまで運転台のノッチを引いて力行させ、その後ノッチをオフさせてだ行運転をさせた。測定時間は停止からノッチをオフしてだ行運転に入るまでの約20秒で、5回繰り返し走行を行った。図12、図13ともそのうちの1例であるが、他のデータも同様の結果が得られた。

これらの結果より、遮蔽なしの場合の最大漏洩磁界は1.5 mTで測定時間内に拍動が2回跳んだのに対し、遮蔽を行うと最大漏洩磁界は0.9 mTで拍動の跳びが1回に減少したことが確認された。しかし必ずしも磁界が最大のところで拍動の跳びが見られているわけではない。これは、磁界の大きさだけでなく磁界の時間的変化も拍動の跳びに影響を与えているからではないかと考えられるが、磁界とペースメーカ動作の関係についてはより詳細な検討が必要である。

また、これはあくまで測定例でかつ特定のペースメーカでの結果である。また、ペースメーカも人体負荷相当の1,200Ωを接続しただけで実装状態とは異なっている。従ってこの結果より直ちに、磁界を抑えるとペースメーカの動作異常が減少するとの結論は導けないものの、こうした実験を積み重ねることにより磁界遮蔽とその効果が導かれると考える。

5. むすび

以上、直流電気鉄道車両から発生する磁界を測定し、直流磁界を遮蔽する材料・形状の検討を行って実車両による遮蔽効果の確認を示すとともにシミュレーションによる検討結果を示した。また、直流磁界を遮蔽することによる効果の一例をペースメーカの動作により示した。その結果、直流電気鉄道車両においては、VVVFインバータ制御車両内のリアクトル上における直流漏洩磁界が最大であることが示された。また、遮蔽材の形状は平板では端部に磁界集中が見られるため、箱形状にすることによって車内に磁界集中をおこすことなく遮蔽が可能となることを実験とシミュレーションにより示した。さらにGシートを用いることにより鉄の約半分の重量で同程度の遮蔽効果が得られることを確認した。その上で直流磁界を遮蔽することによりペースメーカの出力電圧波形異常が減少する例を示し、ペースメーカの動作と磁界の関連が磁気遮蔽を行うことによる効果の指針となり得ることを提案した。

最後に、本実験に協力いただいた新成電鉄(株)の関係各位に謝意を表します。

(平成7年10月4日受付、平成8年4月8日再受付)

- (1) 豊島：「心臓ペースメーカーの電磁障害」,1988 心臓ペースング Vol.4,No.3
- (2) 柿本：「大阪地下鉄リニアモーターカーのペースメーカーに及ぼす電磁障害」,1990 人工臓器 19(1) p410-413
- (3) 天野、水間：「電気鉄道から発生する漏洩磁界について」,1990 電学産応大全, No.4
- (4) 日経技術図書：「電磁波の吸収と遮蔽」 p394
- (5) 水間・天野他：「鉄道から発生する電磁波とその影響について(第一報)」,1990 交通安全公害研究所発表会 講演概要, No.5
- (6) National Radiological Protection Board (NRPB: 英国国立放射線防護協会): 「NRPB-GS11 Guidance on Standards: Guidance as to Restrictions on Exposures to Time Varying Electromagnetic Fields and the 1988 Recommendations of the International Non-Ionizing Radiation Committee」, 1989
- (7) Bore, et al. 「The Installation of High-field NMR Equipment in a Hospital Environment」, Magn. Reson. Med., 1 p387-395
- (8) 志賀：「磁場の人体影響」,1995 日本医事新報 第3732号
- (9) 水間・天野・戸田：「鉄道から発生する電磁波の遮蔽効果について」,1992 電学研資 TER-92-48
- (10) 水間・天野他：「直流電気鉄道車両内漏洩磁界の遮蔽対策の効果について」,1994 電学大全, No.1082
- (11) 田中・野島他：「積分方程式を伴った有限要素法と磁位を用いた静磁界解析」,1986 電学研資, RM-86-37, SA-86-30

付 録

コンピュータシミュレーション⁽¹²⁾は以下の手順で実施した。

リアクトルから発生する磁界を磁石要素に置き換え静磁界として取り扱う。

電流を含まない単連結な領域（ここでは、リアクトルの外部）の中で、磁位 Ω を定義し、磁界 H を次式で表す。

$$H = -\nabla \Omega \quad \dots\dots\dots (1)$$

磁束密度 B と磁界 H との関係は、以下の物質構成式で表現される。

$$B = \mu_0 (H + M) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$B = \mu H = \mu_0 \mu^* H \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$M = (\mu^* - 1) H \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 μ_0 ：真空の透磁率、 M ：磁気モーメント、 μ ：透磁率、 $\mu^* = \mu / \mu_0$ ：比透磁率である。

また、

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

であるから、(1)、(2)、(5)より

$$-\Delta \Omega = -\nabla \cdot M \quad \dots\dots\dots (6)$$

(1)、(3)、(5)より

$$-\nabla \cdot (\mu^* \nabla \Omega) = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

となり、一般に以下のように表現する。

$$-\nabla \cdot (\mu^* \nabla \Omega) = -\nabla \cdot M \quad \dots\dots\dots (8)$$

この(8)式を有限要素法で解く。

重み関数を W として次式を満たすように磁位 Ω を決定する。

$$\int_V W \{-\nabla \cdot (\mu^* \nabla \Omega) + \nabla \cdot M\} dv = 0 \quad \dots (9)$$

部分積分法を利用して以下の式を得る。

$$\int_V \mu \nabla W \nabla \Omega dv - \int_S W \frac{\partial \Omega}{\partial n} ds = \int_V \nabla W \cdot M dv \quad \dots\dots (10)$$

有限要素法により、(10)を離散化してマトリクスを組み立てる。ここで、一般には、境界面上の磁界 H の法線成分 $(-\Omega / n)$ が未知であるため、積分方程式(ビオ・サバールの法則、クローンの法則)を併用して境界条件を与える。

磁性体中の磁気モーメント M と外部磁界(磁石要素に置き換えた) H_0 が既知であるので、任意の空間点の磁界 H は、以下の積分方程式で表現できる。

$$H = H_0 - \nabla \cdot \int_V \frac{-\nabla \cdot M}{4\pi r} dv \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$= H_0 - \int_V \frac{M}{4\pi r^3} - 3 \frac{(r \cdot M)r}{4\pi r^5} dv \quad \dots (12)$$

さらに、

$$\frac{\partial \Omega}{\partial n} = -H_0 \cdot n + \int_V \left[\frac{n \cdot M}{4\pi r^3} - 3 \frac{(r \cdot M)(r \cdot n)}{4\pi r^5} \right] dv \quad \dots (13)$$

ここで、 r_0 を境界上の点、 r' を積分領域内の点とすれば、 $r = r_0 - r'$ である。

よって、(13)を用いることにより、境界条件 $\partial \Omega / \partial n$ が、外部磁界 H_0 と、有限要素内の磁位 Ω から計算できることになる。

このことにより、繰り返し計算を行い、境界条件を計算しつつ、解を求める。

水間 毅 (正員) 1955年5月30日生まれ。84年3月

東京大学大学院工学系研究科電気工学専門課程博士課程修了。同年4月運輸交通安全公害研究所入所。主としてリニアモータ地下鉄、常電導磁気浮上式鉄道の技術評価の研究を経てリニアモータの開発、技術評価及び鉄道車両の電磁波障害対策の研究に従事。現在、交通安全部主任研究官。工博。

天野武一 (正員) 1961年2月16日生まれ。79年3月

機山工業高等学校卒業。同年4月日本国有鉄道入社。87年11月運輸省交通安全公害研究所入所。主として出改札の自動化、鉄道車両からの電磁波の研究を経て鉄道車両の電磁波の遮蔽対策の研究に従事。現在、自動車技術評価部研究官。

戸田幸生 (非会員) 1952年12月13日生まれ。77年3月

早稲田大学理工学部金属工学科卒業。同年4月(株)リケン入社。主として電気炉溶解技術の研究を経てアモルファス金属の開発と磁気シールド、電磁波シールドの研究に従事。現在、環境システム部技術開発部部長。

河本 博 (非会員) 1960年10月21日生まれ。84年3月

九州工業大学金属加工学科卒業。同年4月(株)リケン入社。主としてアモルファス材料の開発を経て磁気シールドと電磁波シールドの測定技術の開発及び設計に従事。現在、環境システム部EMCエンジニアリング課係長。