

# 在来鉄道車両内の低周波磁界に関する 測定手法および予測手法

加藤 佳仁\* 長谷川 均\*\*

## Measurement and Prediction Method Related to the Low-frequency Magnetic Field on Railway Vehicles

Yoshihito KATO Hitoshi HASEGAWA

In Japan, regulations on low-frequency magnetic fields began taking effect. Initial regulations in 2011 have applied to electric facilities in general, but the scope of the regulatory control was expanded in 2012 so as to cover railway electric facilities on the ground. Although railway vehicles are not included in the scope of the regulation at the moment in Japan, we think that it is necessary to assess the magnetic fields in the space on railway vehicles. Thus, we are now beginning to study the measurement and prediction method related to the low-frequency magnetic field on railway vehicles.

キーワード：低周波磁界，電磁界解析，磁気シールド，国際規格，国内規格

### 1. はじめに

近年，低周波磁界に関する規制，および規格等に関する動きが活発になっている。2011年の一般電力設備における商用周波数磁界の規制<sup>1) 2)</sup>に続き，2012年には，鉄道の地上電力設備が発する商用周波数磁界に対しての規制が導入された。鉄道車両内の低周波磁界についても，その測定方法等についての整備が国内外で進んでおり，今後その把握が求められると考えられる。

本稿では，低周波磁界に関する国内外の動向を踏まえ，規格に基づいた低周波磁界の測定方法，および開発した磁界可視化装置，さらに，磁気シールドや車両構体構造を考慮して構築した鉄道車両磁界の解析モデル等について紹介する。

### 2. 低周波磁界に関する規格類の動向

低周波磁界とはどのような周波数の磁界かということであるが，これに対しては明確な定義はない。ただ，後述する国内外の鉄道における低周波磁界の測定に関する規格類が対象周波数を「直流～20kHz」と定めていることから，これがひとつの目安となると考えられる（図1）。

また，低周波磁界による影響を考える場合，大きく，電気機器への影響と生体への影響に分けられる。以下に

記す規格等は主に生体への影響を考慮して策定されたものである。

#### 2.1 国際ガイドライン

現在，電磁界の生体への影響に関するガイドラインとして国際的な標準となっているのが，ICNIRP（国際非電離放射線防護委員会）のガイドラインである<sup>3)</sup>。このICNIRPが定める生体防護指針は，科学的裏付けのある電磁界の短期的影響に着目して制定されたものである。100kHz以下の磁界に関しては，生体内の電界強度で表記される基本制限と，基本制限に適合しているかどうかを簡便に判定するための参考レベル（これは当該場所の電磁界の値で表される）の2段階に分かれている。まず簡便に測定できる空間の電磁界を測定し，参考レベルを満足するかどうかを判定する。参考レベルを満足しない場合にのみ，次の基本制限を満足するかどうかの判定を行う（図2）。

このICNIRPのガイドラインのうち，1Hz～100kHzの周波数範囲のガイドラインについては2010年に改定が行われた。基本制限については，従来，体内に誘導される電流密度で評価することになっていたが，電界強度

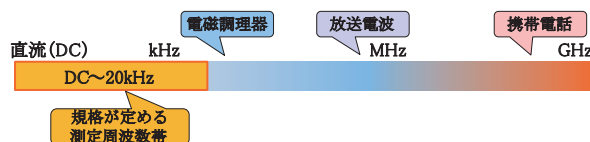


図1 電磁界の周波数イメージ

\* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

\*\* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

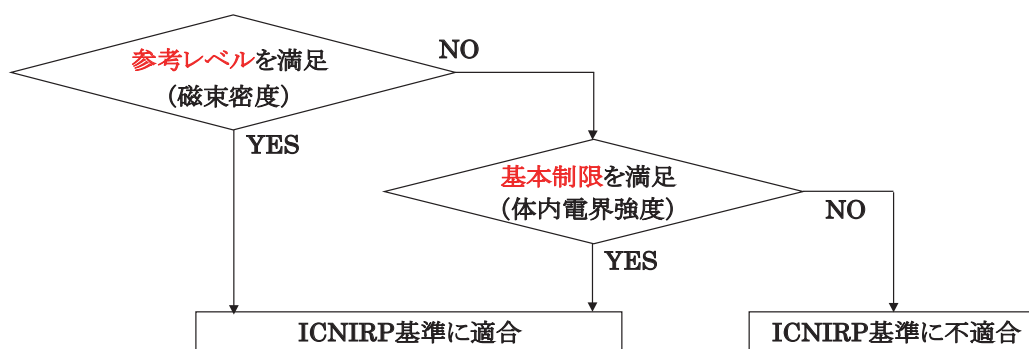


図2 ICNIRP 生体防護指針への適合・不適合判定 (1Hz ~ 100kHz)

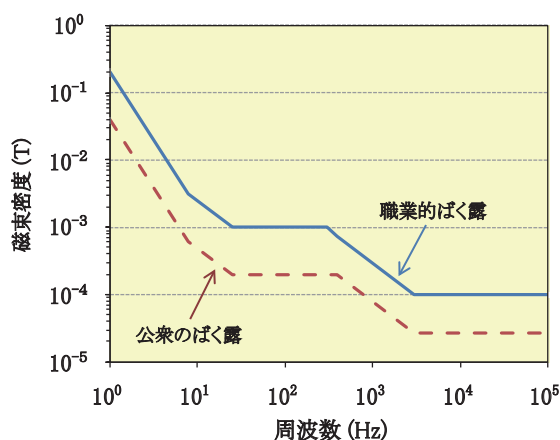


図3 ICNIRP ガイドライン参考レベル

での評価に改定された。また、参考レベルも改定されている (図3)。

## 2.2 鉄道車両内の測定規格

一般鉄道車内における低周波磁界の規制値は、現在、国内には存在しないが、測定方法に関する規格が近年、国内外で策定、改定されている。2008年に欧州にてEN 50500<sup>4) 5)</sup>という鉄道設備の測定に関する規格が策定されて以降、種々の理由から国際規格とはならなかったものの、2011年にはTS (技術仕様)としてIEC/TS 62597が発行された<sup>6)</sup>。

このIEC/TS 62597は、EN 50500および日本での磁界測定法に基づきまとめられた鉄道における磁界測定手

順である。対象が地上設備と車両に分かれている。車両に関する部分では、基本的に欧州の規格と日本でこれまで実績のある測定手順が併記されている。測定ポイントについては、「表面測定法」と「容積測定法」という2通りの方法が記載されている。前者では床面または磁界発生源から最も近い車両内の壁面等で、最大値1点を測定する手順となっている。例えば、床下の車載機器に由来する磁界を測定する際には、車載機器直上の床面1点を測定する手順となる。また、任意に空間分布を測定する際には、高さ0.5m, 1m, 1.5mを測定する。一方で、後者では、高さ0.3m, 0.9m, 1.5mの3点を測定し最大値を考慮する手順となっている。

さらに、2012年11月には国内における鉄道車両の磁界測定規格であるJIS E4018<sup>7)</sup>が改定された (表1)。このJIS E4018は元々、1995年に策定された規格であるが、その後のインバータ車両の普及、測定器類の発達や、前述したIEC/TS 62597の発行等を受け、改定に至ったものである。

この改定JIS E4018では、IEC/TS 62597の車両測定法を取り込む形で全面的な改定が行われ、従来、測定対象となる磁界が直流磁界だけだったものが、直流~20kHzと対象周波数帯が広げられた。この周波数の上限はインバータのスイッチング周波数を意識したものである。また、測定器の具体的な方式が明記され、さらに、測定ポイントについてはIEC/TS 62597と同様、「表面測定法」と「容積測定法」が併記されている。

表1 鉄道車両内の磁界測定方法に関する規格類

種類	規格番号	発行/改定	内容
欧州規格	EN 50500	2008年	鉄道設備の磁界の測定に関する規格
国際技術仕様	IEC/TS 62597	2011年	鉄道設備の磁界の測定に関する技術仕様
国内規格	JIS E4018	2012年改定 (1995年発行)	鉄道車両の磁界の測定方法に関する規格

### 3. 測定装置

#### 3.1 測定規格が定める測定装置

低周波磁界を測定するためのセンサには多種多様なものがある。それぞれ、測定可能な周波数帯や強度が異なり、その測定の目的に応じて使い分けることとなる。

鉄道車両から発生する磁界は、一般の電力設備等とは異なり、様々な周波数成分が存在すると考えられる。そのため、適切なセンサを選んで測定を行う必要がある。前述した国内の車両磁界測定規格であるJIS E4018では、この測定センサの方式もあらたに指定されることとなった。JIS E4018で指定された測定センサとその特徴を表2に示す。

鉄道車両の磁界は周波数範囲が一般的に広いと考えられるため、従来は1種類のセンサですべてをカバーすることは難しかった。そのため、フィルタリアクトル等から発生する直流磁界はホール素子型で測定を行い、インバータ等から発生する交流磁界はサーチコイル型を用いて測定するというように、複数の測定器を用いて測定を行うのが一般的であった。しかし、近年になって測定技術が進歩し、測定規格の周波数範囲を1台で満たすフラックスゲート方式の測定器が国内で開発された<sup>8)</sup>(図4)。鉄道総研ではこのような測定器を導入し、より迅速な測定が行える環境を整備している。

表2 磁界センサの種類

方式	特徴
フラックスゲート型	直流交流磁界とも測定可能
ホール素子型	大きな直流磁界の測定が可能
サーチコイル型	交流磁界の精密測定が可能



図4 フラックスゲート型測定器  
(羽野製作所製)

#### 3.2 磁界可視化装置

鉄道車両の精密な磁界測定を行う際には、このような測定器を用いることになるが、鉄道車両内のような広範な領域において複雑な磁界分布を有する対象を測定する場合、事前に車両内のおおまかな磁界分布を知ることにより、測定をスムーズに行うことができると考えられる。

そのため、鉄道総研では、精密な測定の前に行う予備測定のためのツールとして、空間のどの部分の磁界が強いのか、あるいはどのような分布となっているのかを直観的に把握することが可能な、小型、軽量タイプの磁界の可視化装置を開発した<sup>9)</sup>(図5)。多数のセンサを配置することにより、磁界分布の様子がわかり、S極、N極という極性を各点の色の違い(赤と緑)で示し、各点の明るさにより磁界の強さがわかるようになっている。例えば、永久磁石のN極を装置に近づけると、赤い光がだんだんと明るくなり、離すと暗くなるといったものである。また、フィールドでの活用を意識し、AC電源不要な乾電池駆動式とした。さらに、ハンディタイプであるにも関わらず、±0.01Tという比較的広い範囲の磁束密度が測定可能である。装置の主な仕様を表3に示す。

測定箇所の磁界分布から、装置各点の明るさ、あるいは極性の反転(赤と緑の境界点)といった情報により、磁界のおおまかな流れを把握することが可能となる。こういったツールを活用することにより、鉄道車両内の磁界測定がより効率よく実施できると思われる。



図5 開発した磁界可視化装置

表3 磁界可視化装置の主な仕様

磁界センサ	ホール素子
磁界測定範囲	±0.01T
周囲温度	0～40℃
使用電源	単三型電池8本または同等の充電式乾電池
装置外形	320mm×250mm×20mm
重量	1.2kg(乾電池含む)
分解能	N極側 赤256階調, S極側 緑256階調

#### 4. シミュレーション解析

##### 4.1 磁界解析

前述したように、鉄道車両内の磁界を正しく測定するためには、規格に指定された精密な測定器を使用する必要がある。また、広範な車両内のすべての場所の磁界を測定することは困難であるため、測定点の事前調査を行う等、測定前から大きな労力を要する。そのために、鉄道車両内の磁界分布を机上で推定する手法の検討を行っている。様々な磁性体や導体が存在する鉄道車両内の磁界を計算するには、簡単な計算式等では不可能で、磁界解析が必要となる。

そこで、磁気シールドや車両構体構造を考慮した車内磁界の解析モデルを作成し、有限要素法等により磁界を計算することを試みた。図6に解析モデルの例を示す。このモデルの架線、レールおよびフィルタリアクトル等に電流を与え、リアクトル直上の磁気シールドや車両構体の材質および厚さ等を計算に反映することによって、客室における磁界の大きさの計算をすることが可能となる。

図7にフィルタリアクトル周辺の解析例を示す。また、図8に車内床面における解析結果を磁気シールドがない場合の結果と併せて示す。この結果からは、リアクトル直上のシールド中心付近では、シールド効果により磁界が大きく低減し、シールド端部の外側付近で磁界が最大となることがわかる。

このような磁界解析の妥当性を検証するために、鉄道総研構内の試験線において、試験車両内で行った磁界測定結果との比較を行った。フィルタリアクトル付近上部の測定値と車内磁界解析による計算値をフィルタリアクトルに流れる電流値ごとと比較した結果を図9に示す。

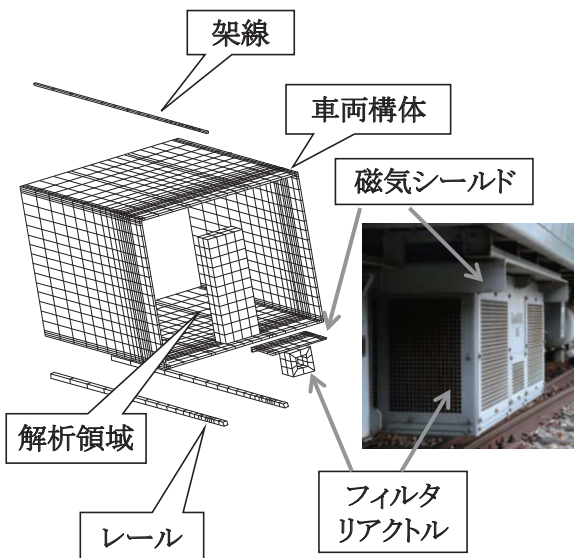


図6 車両内磁界解析モデル

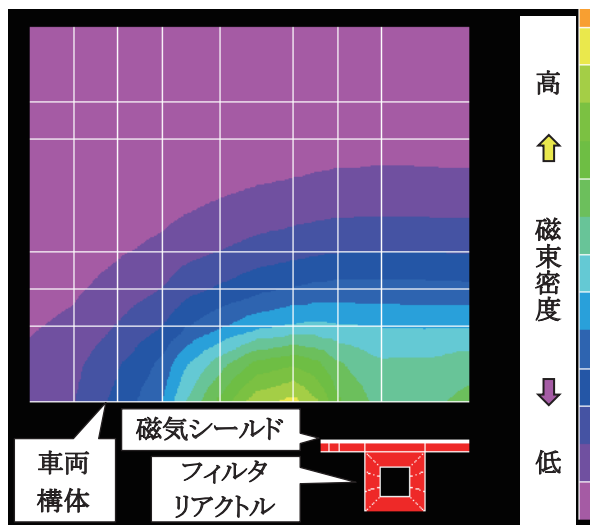


図7 車内磁界解析例

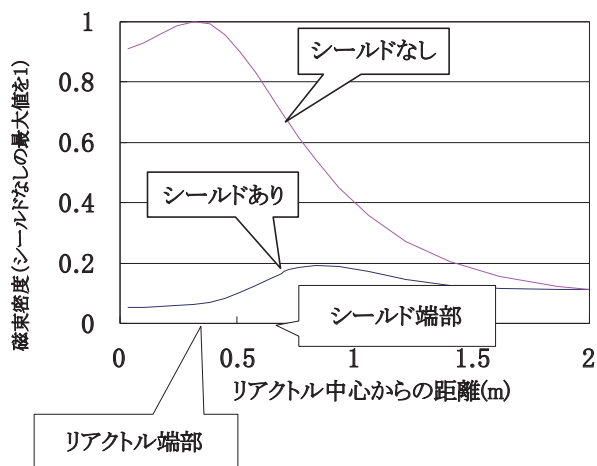


図8 フィルタリアクトル直上床面での解析結果例 (リアクトル中心から軸方向への距離特性)

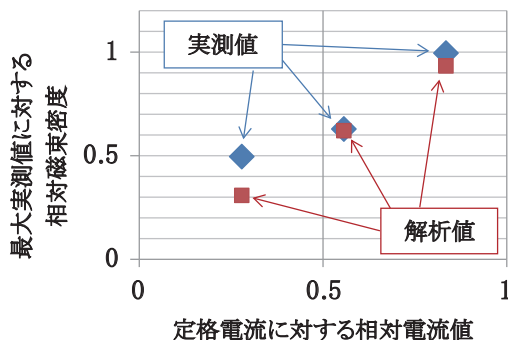


図9 車内磁界解析モデルによる計算値と測定値の比較 (フィルタリアクトル上部床面での結果)

概ね良好な結果が得られており、磁気シールドのような強磁性体の上部においても、このような磁界解析を行うことにより、鉄道車内の磁界を予測することが可能であることがわかった。

#### 4.2 ドシメトリ

電磁界に曝された生体に誘起される体内電界強度等の電気量を測定または計算によって求めることをドシメトリという。

ICNIRP のガイドラインの「基本制限」は、低周波磁界においては人体内の電界強度によって評価を行うことになっている。ただ、実際に体内の電界強度を測定することは困難であるため、数値人体モデルを使用して、鉄道車両内の人体の電界強度を計算によって求める開発を進めている。数値モデルには、(独)情報通信研究機構が北里大学、慶應義塾大学および東京都立大学(現・首都大学東京)と共同で開発した日本人モデル(成人男性モデル「TARO」、成人女性モデル「HANAKO」等)を採用した。これは、人体を一辺が2mmのボクセルと呼ばれる立方体で構成する数値モデルであり、成人男性モデルは、 $320 \times 160 \times 866$  個のボクセルで構成される。そして、体内の約50種の組織ごとにID番号が決められており、各ボクセルにこのID番号が割り当てられているというものである。

具体的な計算手法としては、人体を抵抗からなる立方体形状のセルと考え、モデル内の電磁界を回路網の電圧・電流に置き換えて、回路網方程式を解くインピーダンス法と呼ばれる手法で計算を行うこととした(図10)。そのためには、各IDに導電率等の電気定数を割り当てる必要がある。ここでは、生体に関する電気計算で用いられることが多いガブリエルの電気定数<sup>10)</sup>と呼ばれる導電率を採用した。

図11に、日本人男性モデルにICNIRPの参考レベルである磁界(200 $\mu$ T/50Hz)を一様磁界として与えた場

合の解析の一例を示す。この解析からは、人体内での最大誘導電界強度は、ICNIRPの商用周波数における基本制限値(頭部の中枢神経系組織:0.02V/m、頭部および身体的全組織:0.4V/m)を超過しないという結果が得られた。この結果より、仮に一様磁界であれば、参考レベルの磁界下に生体が存在する場合でも、すぐに基本制限を超過することはないことが示された。

このような計算手法をとることにより、実測に依らずとも、低周波磁界により体内に誘導される電界強度を計算することが可能となった。

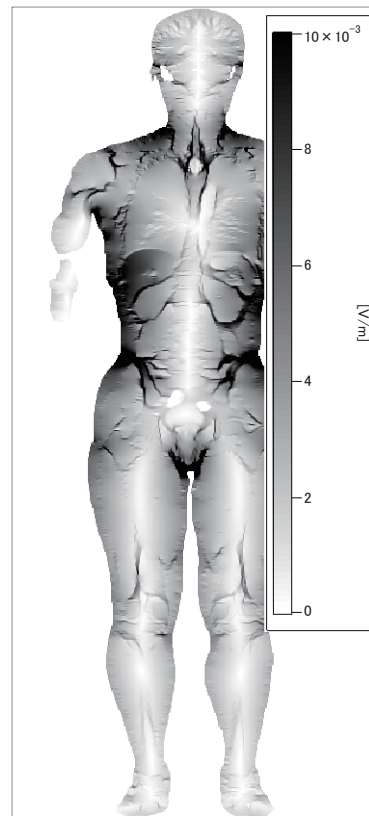


図11 数値人体モデルによる誘導電界強度の計算例

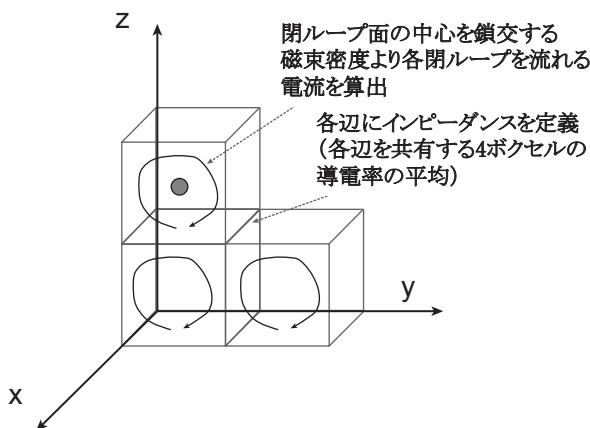


図10 体内誘導量の計算手法

#### 5. まとめ

低周波磁界に関する規格類の動きが国内外で活発である。電磁界の国際的なガイドラインであるICNIRPガイドラインの改定作業が進みつつある中で、国内でも電力設備における磁界の規制化が始まっている。鉄道車両内の低周波磁界についても、その測定方法等についてENやIECの仕様書が発行され、国内の規格も改定されている。

このような情勢の中で、鉄道総研では、低周波磁界に関する測定手法、予測手法に関する研究開発を行っている。

低周波磁界の測定に関しては、車両内の磁界分布を簡

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

易に知ることを目的として、鉄道総研では、ハンディタイプの磁界可視化装置を開発した。

また、低周波磁界の予測手法として、磁気シールド等の強磁性体や車両構体の導体等を考慮した車両内磁界解析モデルを作成し、有限要素法等による磁界解析を行う手法を構築した。そして、当手法の妥当性を検証するために、鉄道総研試験線の試験車両内にて磁界測定を行い、フィルタリアクトル等の磁気シールド上部の測定結果が計算値とおおむね一致することを確認した。さらに、低周波磁界により人体に誘導される電気量を定量的に評価する手法の一つとして、数値人体モデルを用いて電気量を計算する手法の構築を行った。

図12では、本稿における研究開発をICNIRPの判定フローに照らし合わせて示した。本図中の赤枠内の項目が今回紹介した内容となる。現時点ではICNIRPのガイドラインは国内で法的な強制力をもたないが、国際的なデファクトスタンダードとなっていることから、今後もこのガイドラインを意識していくこととなる。

このように鉄道総研では車内磁界の測定と評価を一貫して実施できる体制を整えており、今後も国内外の動向を注視しながら、低周波磁界に関する適切な評価が行えるよう、研究を進めていく所存である。

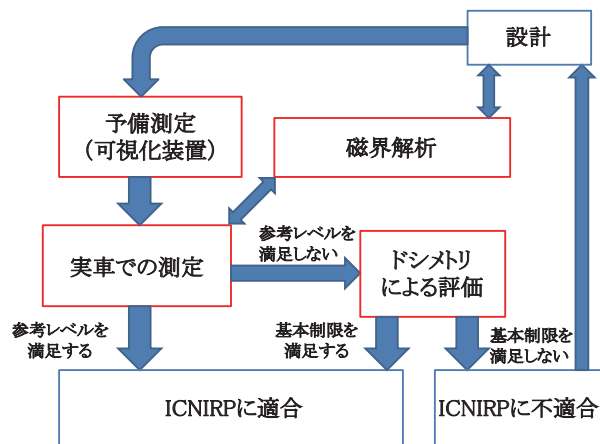


図12 研究開発の位置付け  
(ICNIRPの判定フローにおいて)

文献

- 1) 長谷川, 加藤, 池畑, 仲村, 中村, 重枝: 鉄道関連における電磁界規制の動向, 鉄道総研報告, Vol. 26, No.5, pp.53-56, 2012
- 2) 池畑政輝, 吉江幸子: 鉄道の電磁界と生体の関わりを探る, RRR, Vol.68, No.9, pp.26-29, 2011
- 3) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz), *Health Physics*, Vol. 99, pp.818-836 (2010).
- 4) EN 50500(2008):Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure, August 2008.
- 5) 笹川卓, 森田岳, 池畑政輝: 鉄道システムのEMF測定方法, JREA, Vol.52, No.10, 2009
- 6) IEC/TS 62597 ed1.0 :” Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure” (2011).
- 7) JIS E 4018(2012) : 鉄道車両—磁界測定方法, 2012.11
- 8) 水間毅: 国際規格を意識した鉄道の磁界測定, 電磁環境工学情報EMC, Vol.24, No.12, 2012年4月
- 9) 長谷川均: 鉄道車両周辺の低周波磁界と可視化装置, R&m, Vol.20, No.10, 2012
- 10) Gabriel, C: “Compilation of the dielectric properties of body tissue at RF and Microwave frequency”, *Technical Report of Brooks Air Force Base*, AL/OE-TR-1996-0037(1996).