

# 鉄道車両内における低周波磁界の 可視化・評価システムの開発

加藤 佳仁\* 笹川 卓\*\*

**Development of Visualization and Evaluation Systems  
of the Low-frequency Magnetic Fields inside Railway Vehicles**

Yoshihito KATO Takashi SASAKAWA

In recent years, the movement toward the regulation and the standardization of low-frequency magnetic fields has accelerated. Initial regulations established in 2012 were applied to railway power equipment by the track wayside. Concurrently, methods to measure low-frequency magnetic fields on railway vehicles are being developed both in Japan and other countries. Thus, we studied the evaluation method of the low-frequency magnetic field inside railway vehicles, and developed the systems to evaluate the low-frequency magnetic field inside railway vehicles. In particular, we developed the visualization systems and evaluation systems of the low-frequency magnetic fields inside railway vehicles.

キーワード：低周波磁界，可視化，評価システム，測定規格，磁気シールド

## 1. はじめに

低周波磁界に関する規制，および規格等に関しては，2012年に鉄道の地上電力設備から発する商用周波数の磁界に対しての規制が導入される等，動きが活発になっている<sup>1) 2)</sup>。その中で，鉄道車両内の磁界に関しては，測定方法等について国内外で整備が進んでいる。

そこで，鉄道車両内に発生する低周波磁界を評価する方法を検討し，この検討結果に基づき，評価に必要なシステム等を構築することとした。具体的には，車両内磁界の測定から解析および評価までを国内外の測定規格に適合する手法で行う評価システムと，車両内の交流磁界の分布の把握や強磁界箇所の特定，磁界源の探索等のために，交流磁界を可視化する装置を開発した。

## 2. 低周波磁界の評価方法について

### 2.1 低周波磁界の影響評価

低周波磁界という言葉の明確な定義はないが，後述する国内外の鉄道における磁界の測定規格類では，対象周波数を「直流～20kHz」と定めていることから，本論文ではこの周波数帯の磁界を指すものとする。

低周波磁界による影響を考える時，まず機器への影響と生体への影響に大別され，さらに生体への影響につい

て，短期影響と長期影響に分けて考える必要がある。

電磁界に関する生体への影響についてはWHO（世界保健機関）が様々な健康影響に関する知見をとりまとめ，健康リスク評価書の編纂を行ってファクトシート（WHOの公式見解を簡潔にまとめた文書）を発表した<sup>3) 4)</sup>。この中でWHOは，100kHz未満の周波数帯では神経への刺激作用，100kHz以上の周波数帯では，熱作用が発生することを科学的根拠として認めており，これらの作用を引き起こす短期的な高強度の電磁界へのばく露については，適切な防護プログラムの制定を勧告した。その一方で，長期的な低強度のばく露による影響に関しては，その科学的根拠が認められないとして，積極的な対策を採ることによるリスク低減効果は不明であると評価している。

ICNIRP（国際非電離放射線防護委員会）は，1992年にIRPA（国際放射線防護学会）から独立した国際NGOであり，WHOとも密接な関係を持ち，電磁界等による健康影響から人体を防護するための知見の集約とガイドラインの設定を行っている組織である。このICNIRPが作成したガイドラインは，WHOの方針である強い磁界にばく露している間のみ生じる短期・急性影響からの人体防護を目的としており，科学的根拠が弱い長期・慢性影響は対象としていない。

ICNIRPのガイドラインでは，電磁界へのばく露の指標として，100kHz以下では体内に誘導される電界強度，100kHz以上では比エネルギー吸収率（SAR）に対して

\* 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

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

科学的な研究が示した閾値に安全係数を考慮した値が、ばく露が許容される基本制限として決められている<sup>5)</sup>。ただし、体内の誘導電界、比エネルギー吸収率を簡易に測定する技術は確立していないため、基本制限に相当する一様な電界あるいは磁界の値を算出し、周波数の関数の形で「参考レベル」として定めている（図1）。

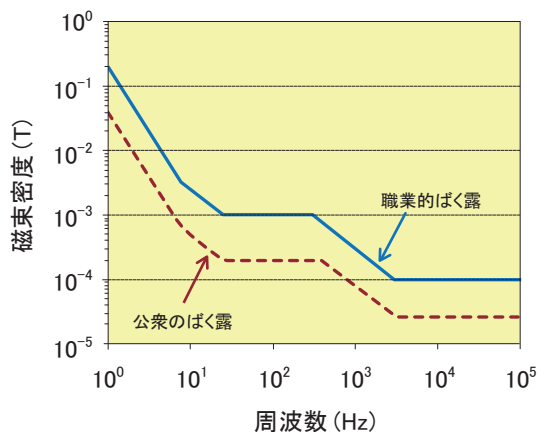


図1 ICNIRP ガイドライン参考レベル

2.2 鉄道車両内磁界に関する測定規格類について

鉄道に関する低周波磁界の測定方法の規格等の整備は、国際的に電力関連等に比べて遅れていたが、2008年に欧州において、鉄道設備の磁界測定方法である EN 50500 が成立した<sup>6) 7)</sup>。そして、本 EN は成立と同時に国際規格として IEC に提案された。その後、種々の理由から国際規格とはならなかったものの、2011年に技術仕様書 (TS) として IEC/TS 62597 が発行された<sup>8)</sup>。

このような動きを受けて、国内においても鉄道車両の磁界測定方法に関する JIS 規格である JIS E 4018 が 2012 年に改定された<sup>9)</sup>。元々は 1995 年に制定された規格であるが、以下のような理由により改定に至った。

- ・インバータを搭載した車両の普及 (→交流磁界測定の必要性)
- ・磁界測定器の発達
- ・IEC/TS 62597 の発行

JIS E4018 は IEC/TS 62597 の内容を大きく反映している。主なところでは、両者には以下のような事柄が記されている。

- ・測定周波数：直流～20kHz
- ・測定方法：表面測定法と容積測定法（図2）
- ・測定器：フラックスゲート方式、ホール素子方式、サーチコイル方式等の推奨

両者には、測定した結果に対する評価基準も示されており、直流磁界、交流磁界に分けられ、それぞれ以下のように記されている。

- ・直流磁界：3軸の合成磁束密度の大きさを評価
- ・交流磁界：ICNIRP ガイドラインに規定の基本的な方法、

あるいは IEEE 規格で規定されている時間領域で評価を行う方法による

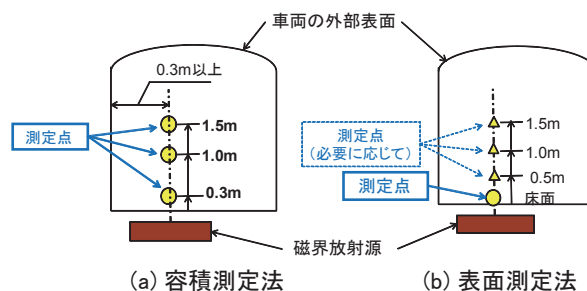


図2 JIS E4018 と IEC/TS 62597 に示される測定箇所

2.3 交流磁界の評価について

交流磁界については前述の通り、JIS E4018、IEC/TS 62597 に評価方法が記載されているが、一般的には IC-NIRP ガイドラインによる方法で評価されることが多いため、以下にこの評価方法を記す。

ICNIRP ガイドラインによると、複数の周波数の磁界による評価は式 (1) によることになっている。

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{20\text{kHz}} \frac{B_i}{B_{L,i}} \leq 1 \quad (1)$$

ここで、 $B_i$  は周波数  $i$  での磁束密度、 $B_{L,i}$  は周波数  $i$  での磁束密度の ICNIRP 参考レベルである。各周波数における参考レベルに対する比を全周波数帯で加算して、参考レベルを超えることがないか (式 (1) で 1 を超えないか) を評価するというものである。

評価手順としては、まず、3軸の測定結果それぞれに対して周波数解析を実施する。車両内磁界は周波数も強度も時々刻々と変化するのが特徴であるが、特に強度は運転状況等によって大きく変化するため、測定した全時間帯で周波数解析を実施することは、全体の結果を平均化してしまうため、過小評価となる。そこで、ある時間帯に分けて周波数解析を行うことになるが、JIS E4018 および IEC/TS 62597 では、この推奨値を 0.5 秒としていることから、この時間単位でデータを区切って周波数解析を行う。さらに、3軸それぞれの結果を周波数ごとに合成して合成磁束密度を求める。そして、式 (1) のように周波数  $i$  での合成磁束密度  $B_i$  を  $B_{L,i}$  で除したものを 20kHz まで加算して評価を行う。これを測定した全時間帯で実施することとなる。なお、JIS E4018、IEC/TS 62597 の推奨事項として、「スペクトル成分の加算：限界値の 10% の閾値を下回るスペクトルは考慮しない。」とされていることから、各周波数における比が 0.1 未満の値は加算しないこととする。

以上の計算結果が 1 以下であれば、基準を満たすというものである。この交流磁界の評価の流れを図3に示す。

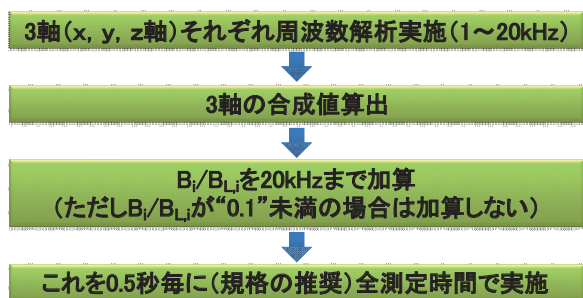


図3 交流磁界の解析・評価フロー

### 3. 車内磁界解析評価システムの開発

#### 3.1 車内磁界解析評価システム

前章に記したように、交流磁界の評価については、多くの手順を踏む必要があり、そのためのデータ処理量も膨大となることから、効率的に車両内磁界を解析・評価するシステムを開発することとした。

図4に車両内磁界の評価フローを示す。測定周波数帯が直流～20kHzまでであることから、本測定の際には、40kHz以上でのサンプリングが必要となる。さらに、通常の測定では、力行から惰行、制動といった一連の流れでデータを取得することが求められているので、駅間が長い線区や列車の走行の仕方によっては、長時間の記録が必要となる。このため、当評価システムを測定データの記録から、解析および評価まで行うものとし、車内磁界解析評価システムとして構築することとした。

図5に構築した車内磁界解析評価システムの外観を示す。当システムに各種の磁界測定器を接続することにより、基本的にPC上で記録、解析、評価を行うことができる。装置の主な特徴を以下に示す。

- ・ 直流磁界については、必要な処理を行った上で機器類等への影響を考慮した目安値に対する評価結果を出力する。
- ・ 交流磁界については、測定規格類に示される ICNIRP ガイドラインによる評価方法によって解析した結果および評価した結果を出力する。
- ・ 多点測定を考慮して複数台の磁界測定器が接続可能である（欧州が主張する「容積測定法」にも対応可能）。
- ・ 複数の種類の磁界測定器に対応可能（現時点において測定規格の周波数範囲と車内磁界の磁界強度範囲を1台で満たす測定器はない）。

磁界測定器とPCの組み合わせでデータ解析を行うシステムは試用<sup>10)</sup>、さらには市販もされているが、直流磁界も含め、国内外の車内磁界測定規格に適合した評価結果をソフトのコマンドによって迅速に出力できるようなシステムは皆無である。

また、市販品では特定の磁界測定器に特化したシステムがほとんどであるが、鉄道車両内の磁界は、周波数、強度の両面でレンジが広いので、通常は複数の磁界測定

器を用いて測定を行っている。そこで、多種類の磁界測定器に対応可能とし、複数台の接続も可能な仕様とした。また、前述した、限界値の10%未満のスペクトル成分を考慮しないといった計算条件にも対応している。

このような特色をもつ当システムについて、次節では詳細な仕様等を記す。

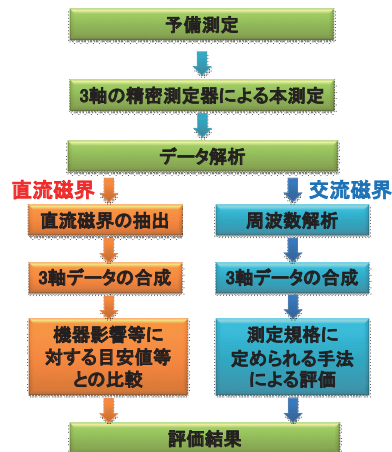


図4 車内磁界の解析・評価フロー

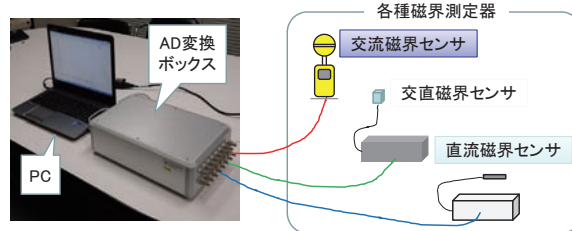


図5 車内磁界解析評価システム

#### 3.2 システムの仕様等

当システムはノートPCとA/D変換ボックスから構成される。磁界測定器からのアナログ出力をA/D変換ボックスでデジタル変換してPCに入力する。記録、解析、評価等はすべてノートPCで行う。A/D変換ボックスを介したデータの流れを図6に示す。

車内磁界解析評価システムのデータ記録時におけるPC上の画面例を図7に示す。接続した磁界測定器が計測する3軸のデータの推移を表示し、それらをPCに記録する。記録開始、停止等の操作はすべてPC上で制御し、長時間のデータ保存も可能である。交流磁界の評価結果の算出例を図8に示す。前述した手順により解析を行い、式(1)による評価を全時間帯に適用し、その結果を時系列に示している。これにより、測定した全時間帯における交流磁界の評価を容易に行うことが可能となった。

当システムを実際の車両内測定試験に供し、その動作確認を行った。その結果、車両内の環境でも測定データの記録が問題なく行うことができ、さらに解析、評価を迅速に行えることを確認した。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

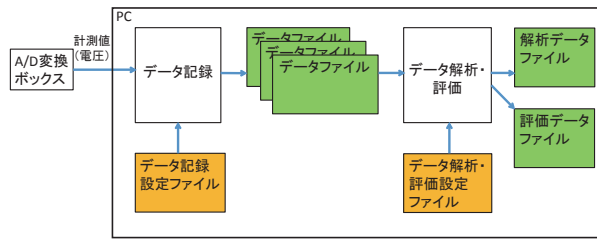


図6 システムにおけるデータの流れ



図7 車内磁界解析評価システム・記録画面例

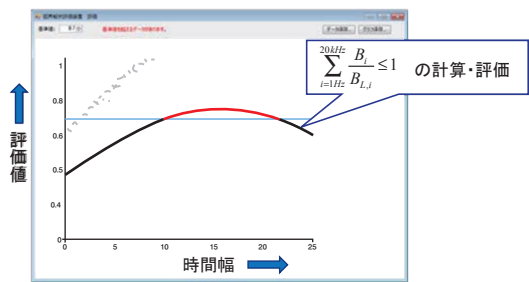


図8 車内磁界解析評価システム・交流磁界評価画面例

3.3 車内磁界の解析例

当システムでは、記録したデータの評価の前段として、解析結果の出力も可能となっている。本節では所内試験線における試験電車の測定解析例を示す。

(1) 交流磁界

図9にVVVFインバータと主電動機間のケーブルの直上床面における測定結果例を示す。発車から力行中の結果であり、変動する直流磁界にVVVFインバータに起因すると考えられる交流磁界が重なっている様子が分かる。ケーブルの敷設方向が車両進行方向（長手方向）であるため、発生する磁界の主方向は線路方向と高さ方向となっている。

この交流磁界を解析した結果例を図10に示す。同図では、各時間、周波数における磁界の強さを色の濃淡で示している。これより、時間と共に周波数が上昇する磁界が発生していることが分かる。同図には、各時間で切り出した周波数解析結果を併記したが、ピークとなる周波数が時間ごとに変化している様子が分かり、これ

がVVVFインバータの制御周波数であると考えられる。さらに、この周波数の高調波成分も解析結果より確認できる。

このように、測定した全時間帯における交流磁界の磁界解析が可能となり、さらに、それを分かりやすく表示することもできるようになった。

(2) 直流磁界

図11にフィルタリアクトルのシールド端部付近の床面での測定結果例を示す。発車から力行終了までの結果

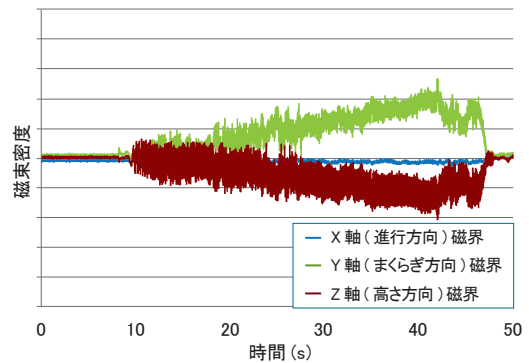


図9 車内磁界解析評価システムによる磁界測定例 (VVVFインバータ主電動機間ケーブル直上床面)

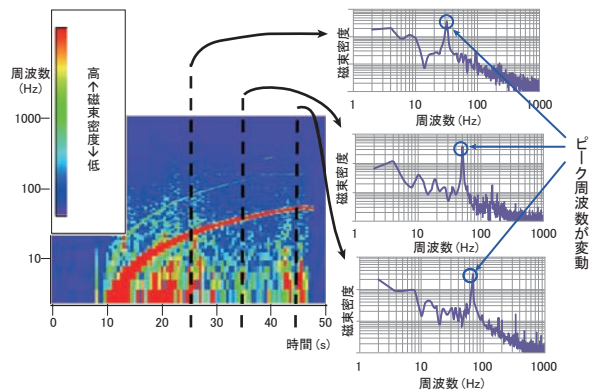


図10 車内磁界解析評価システムによる交流磁界解析例

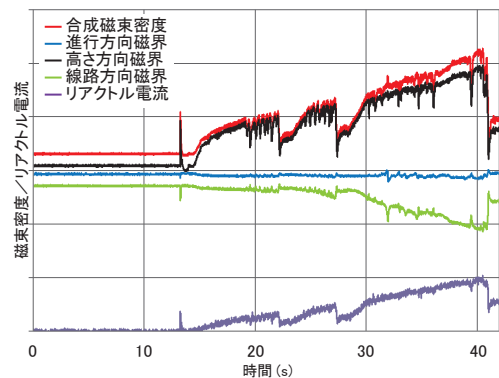


図11 車内磁界解析評価システムによる磁界解析例 (フィルタリアクトルシールド端部直上床面)

である。リアクトル電流の上昇とともに、特に高さ方向の磁束密度が上昇していることが分かる。

直流磁界については、測定した3軸の合成磁束密度で評価することになるため、これを同図中に示す。

#### 4. 交流磁界可視化装置の開発

##### 4.1 構成と特徴

車両内の磁界測定を行う際には、事前に測定箇所を絞り込んでおくことが効率的な測定につながる。そのため、以前に直流磁界用可視化装置を作成し<sup>11)</sup>、現地試験の際、磁界発生源の特定等に有用であることが確認されたため、交流磁界についても同等の装置を製作することとした。

今回製作した交流磁界可視化装置の仕様では、次の2項目が大きな柱となる。

- ① 磁界分布を把握するために多点を同時に測定する
- ② 周波数特性を合わせて把握する

①について、近年では環境電磁界把握の要望の高まり等を受け、可視化装置が一般メーカーでも製作されるようになってきている。ただ、その大半が、「1つの磁界センサーで電磁界分布を把握したい空間をスイープする」という仕様である。鉄道車両内の磁界を考えると、その周波数と強度が常時変動するという特徴がある。従って、1つの磁界センサーをスイープする方法により、車両内の磁界分布を正確に把握することは困難であると考えられる。そこで、複数の磁界センサーを配置し、所定の空間の磁界を同時に測定できるものとした。

②について、図12に示す通り、鉄道車両内には様々な磁界源が存在し、それらが発する磁界の周波数も様々と考えられるため、観測される交流磁界の周波数特性を把握することも重要な要素となる。

これらを勘案して開発した交流磁界可視化装置の外観を図13に示す。前記①に対応する「磁界強度分布表示部」と、②に対応する「周波数特性表示部」を1台に集約している。

「磁界強度分布表示部」では磁界センサー（ホール素子）1個に1つの発光表示素子を水平方向の同じ位置に配置し、その場所の交流磁界の大きさ（実効値）を色調で（青：弱→赤：強）表示する。このセットをマトリクス状に配列した。

「周波数特性表示部」ではマトリクス状に配列されたセンサーのうちの中心の1点について、データ処理をリアルタイムで行い、周波数特性を表示させた。これにより、磁界強度分布表示部が示している磁界の周波数帯も概ね把握できるようになった。

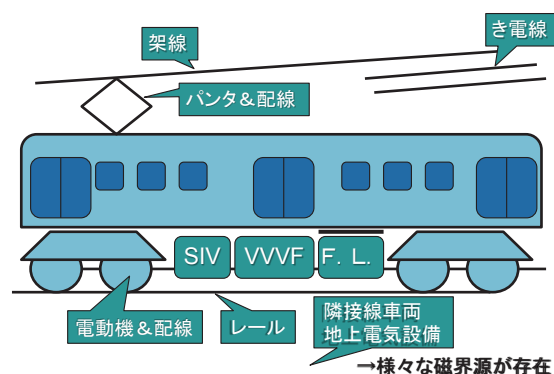


図12 車両内磁界の主な発生源

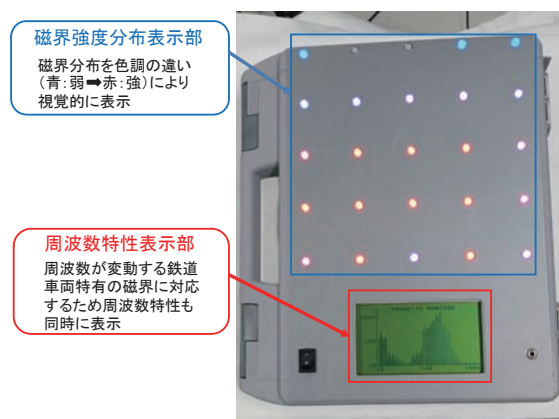


図13 交流磁界可視化装置

##### 4.2 装置の仕様

交流磁界可視化装置は、現地試験の予備測定時の使用を主要な目的としている。従って、使い勝手のよさを重視し、乾電池で動作できるものとした。主な仕様を以下に示す。

- ・使用電源：単三型電池 8本
- ・磁界測定範囲：最大 1mT
- ・周波数範囲：5～1kHz
- ・磁界センサー：ホール素子
- ・装置外形：310mm（幅）× 350mm（高）× 60mm（厚）
- ・重量：約 1.5kg
- ・動作：本装置を測定部位にかざすことで、測定部位周辺の磁束密度を磁界センサーにて測定し、対応した色調で発光素子を発光させる（青：弱→赤：強）。
- ・消費電力：単三型乾電池にて 2時間以上駆動
- ・外部出力：BNC 端子よりアナログ出力可

周波数範囲は主たる磁界が発生すると考えられる帯域をカバーしている。また、装置はハンディタイプで持ち運びが容易なものとし、フィールドでの単体での使用を主と考えているが、BNC 端子を設置しており、ここからアナログでのデータ出力が可能となっている。

## 5. まとめ

鉄道車両内低周波磁界の測定規格の整備が国内外で進んでいることを受け、この評価に関する取り組みを行った。

鉄道車両内に発生する低周波磁界を評価する方法を検討し、直流磁界と交流磁界のそれぞれの評価方法をまとめた。そして、この検討結果に基づき、評価に必要なシステム等を構築した。具体的には、「車両内磁界の測定から解析および評価までを国内外の測定規格に適合する手法で行う車内磁界解析評価システム」と、「車両内の交流磁界の分布の把握や強磁界箇所の特長、磁界源の探索等を目的として、交流磁界を可視化する装置」を開発した。解析評価システムについては、車両内での測定試験でも問題なく動作し、車両内磁界の評価を迅速に行えることが確認できた。

## 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, 2012
- 2) 国土交通省通達: 鉄道の電気設備からの電磁誘導作用による公衆の健康影響防止に関する規定, 鉄道に関する技術上の基準を定める省令(平成十三年十二月二十五日国土交通省令第百五十一号)の一部改正 第五十一条の二, 2012
- 3) WHO: Environmental Health Criteria 238: Extremely Low Frequency Fields, 2007.
- 4) 池畑政輝: 磁界による健康影響とその防護指針の現状, 鉄道総研報告, Vol.30, No.9, pp.47-52, 2016
- 5) 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, 818-836, 2010.
- 6) EN 50500(2008):Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure, 2008.
- 7) 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
- 8) 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.
- 9) JIS E 4018 (2012): 鉄道車両—磁界測定方法, 2012
- 10) Bellan, D., Gaggelli, A., Mariscotti, A., and Pignari, S., "Time-Domain Measurement and Spectral Analysis of Non-stationary Low-Frequency Magnetic-Field Emissions on Board of Rolling Stock," *IEEE transaction on Electromagnetic Compatibility*, Vol.46, No.1, pp.12-23, 2004.
- 11) 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