

# 鉄道車両の直達ノイズ事前確認試験の開発

甘日出 悟\*

Development of Pre-test for Electromagnetic Emission from Traction Inverters on Railway Vehicles

Satoru HATSUKADE

EMC compliance tests for confirming no interference to railway signaling systems are becoming more important in manufacturing railway vehicles. This paper describes a pre-test for verifying radiative emission from traction systems on railway vehicles. First, the paper derives a simple calculation model of interference between traction systems and beacons used in railway signals. Next, the paper shows the experimental validations performed at combined-tests and with completed vehicles, which indicate the usefulness of the derived model. Lastly, the paper shows the result of applying the proposed pre-test to an actual DC railcar.

キーワード：直達ノイズ，組み合わせ試験，EMC

## 1. はじめに

鉄道車両における完成検査の一つとして、直達ノイズが鉄道信号装置へ影響を与えないことを確認する試験（直達ノイズ試験）がある。直達ノイズとは鉄道車両業界における用語であり、電磁気理論における放射電磁界と同じ意味である。直達ノイズ試験の対象となる鉄道信号機器はATS（自動列車停止装置）などである。これらは地上子と呼ばれる数十 cm～数 m の大きさの空芯コイルを軌道内に敷設し、列車の検知や情報伝送を行っている。日本では地上子が使用する中心周波数は数 kHz～数 MHz である。

直達ノイズはインバータが発生するコモンモード電流が主な原因であることが知られており、過去の鉄道総研報告でも対策<sup>1)</sup>がまとめられている。しかし、直達ノイズ試験は鉄道システム内部のEMC（電磁環境両立性）を確認する試験であるため、試験方法や合否基準は鉄道システム毎に異なる。

これまでも安全性向上等の目的で様々な信号装置が開発されるたびに直達ノイズ試験の対象周波数や合否基準（許容値）が追加されてきた。また、鉄道車両の種々の編成形態に対応するため、インバータ装置の内部構成も多様になっている。例えば各主電動機を1:1で駆動するインバータを4台搭載した装置や、駆動用インバータと補助電源用インバータを搭載した装置などである。以上の状況は、信号装置とインバータ装置の組み合わせが多数に及ぶことを意味し、結果として過去のインバータ装置における対策が、別の信号装置あるいは別構成のインバータ装置に対して悪影響を及ぼす可能性を生じる。このような多様性が直達ノイズ試験の結果を予測しにく

くしている理由であり、現時点では万能の対策は存在しないと考えられる。

そこで、本報告では、鉄道車両完成前の段階である、インバータとモータを組み合わせる試験（組み合わせ試験と呼び、インバータ製作時に必須の試験）において、完成車両に対する直達ノイズ試験に合格できるかどうかを事前に確認する手法（事前確認試験）について報告する。

なお、本報告は既発表論文<sup>2)</sup>を要約したものである。

## 2. 直達ノイズ事前確認手法の考察

### 2.1 直達ノイズの性質

直達ノイズの妨害源である鉄道車両用インバータ、配線、モータと被害機器である地上子の位置関係の概略を図1に示す。

鉄道車両は進行方向に細長い形状をしていることから、配線は進行方向にそって配置される。車間渡り線だけでなく、モータ口出線もほぼ、車両の進行方向に沿う。地上子は車両との結合時間を確保するため、角形で、車両の進行方向に長い長方形のコイルで構成され、左右

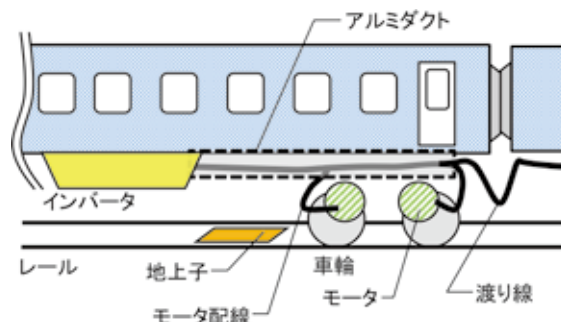


図1 インバータと地上子の位置関係

\* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

レールの間に配置される。

図1のように妨害源である配線と被害先の地上子との間隔が信号装置で使用する電波の波長（最も短い3MHzでも100m）に比べて極端に短いことから、直達ノイズの主要因は近傍磁界であると考えられる。また、地上子の大きさは最大でもレール方向に4.5mであり、その他は50cm程度のものであるから、地上子から見た車両の立体角は充分に大きく、電磁界として磁界のみが確定する<sup>3)</sup>。また、地上子はアンテナコイルによって誘起電圧を得ることや、民生品などに適用されるEMC規格であるCISPRでも30MHz未満は電界ではなく磁界測定であることから、直達ノイズの評価は磁界のみを考慮すれば充分であるといえる。

## 2.2 直達ノイズと漏れ電流との定量的関係

前節の考察により直達ノイズは磁界によることが示された。この磁界は1章で述べたコモンモード電流により形成される。コモンモード電流は配線を通るが、鉄道車両の配線経路は複雑であり、かつ、車両完成まで配線経路が確定しない。そこで、直達ノイズが発生する配線を簡略化する。図2(a)に現在の鉄道車両におけるコモンモード電流の経路を示した。インバータからモータにコモンモード電流が流れるが、コモンモード電流の大部分はフレーム接地線（モータのきょう体とインバータの負極を結ぶ線）を經由してインバータに戻る。コモンモード電流からフレーム接地線を通る電流の差分を本報告では漏れ電流と呼ぶことにする。漏れ電流は台車枠を流れた後にレールまたは車体を經由してインバータに戻る。フレーム接地線を通る電流はコモンモード電流と逆向きのためコモンモード電流が作る磁界を相殺する。したがって、直達ノイズとなる磁界を漏れ電流が生成すると言える。

さらに簡略化するために、レールや車体を無視し、漏れ電流のみが無限長のモータ配線を通ると仮定する（図2(b)）。図2(a)を見てもわかるように、レールや車体を流れる漏れ電流はモータ配線を通る電流と逆向きである。これらの電流を無視した図2(b)のモデルは実際よりも発生磁界の推定値が大きいモデルとなるが、本報告で提案するのは事前確認試験であるため、磁界が大きくなる方向での予想は問題ない。なお、周囲の車体、レールを除く金属物（モータ筐体、インバータ筐体など）の影響も考えられるが、ここでは無視し、後述する3章の実車両を用いた試験で検証する。

図2(b)のモデルは漏れ電流と地上子のアンテナコイルとが磁気結合することから、直達モデルに関する等価回路は図3で表される。図3のうち、漏れ電流は組み合わせ試験で測定可能である。図3において、漏れ電流が誘起する地上子アンテナコイルの誘起電圧 $E_{coil}$ は

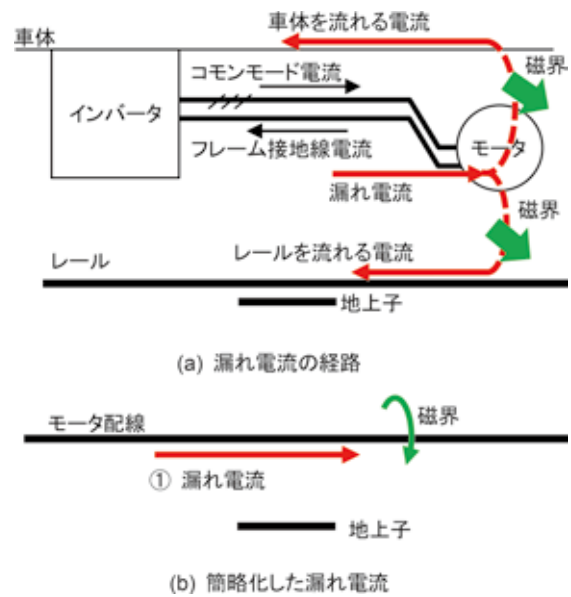


図2 漏れ電流による直達ノイズ発生モデル

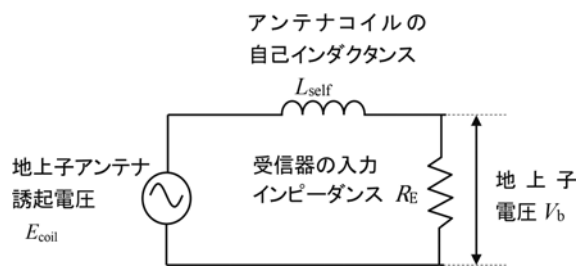


図3 直達ノイズの等価回路

式(1)で表される。

$$E_{coil} = j\omega MI_{leak} \quad (1)$$

ここで、 $j$ ：虚数単位、 $\omega$ ：角周波数である。式(1)中の相互インダクタンス $M$ は二次元で解析的に計算することが可能である。車両断面と平行な平面上における、地上子アンテナと漏れ電流の位置関係を示したものが図4である。

図4では、地上子アンテナコイルを $x$ 軸、漏れ電流の経路を $y$ 軸に配置して、漏れ電流経路の高さを $y_1$ 、地上子コイルの巻線の左右位置 $x_1$ 、 $x_2$ として、巻線の左右位置と漏れ電流経路との距離を $d_{12}$ 、 $d_{13}$ とした。漏れ電流が $I_{leak}$ のとき地上子コイルが鎖交する磁束 $\phi$ は式(2)であるから、 $M$ は式(3)により求められる。式(3)中 $n$ はコイル巻数、 $l$ はコイルのレール方向長さ、 $\mu_0$ は真空透磁率である。 $M$ は車両の設計により変化するが、各信号装置に対し、図4における漏れ電流座標 $(x, y_1)$ において $y_1$ をぎ装限界に固定し $x$ をパラメータとした場合における $M$ の最大値を採用する。

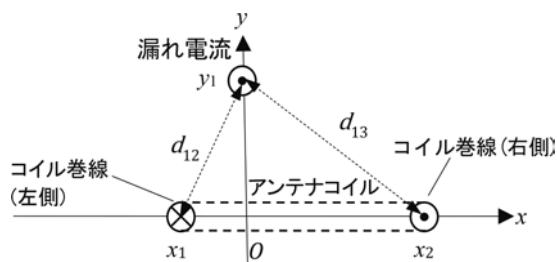


図4 モータ配線と地上子との位置関係

$$\phi = \frac{\mu_0 \ell I_{\text{leak}}}{2\pi} \ln \frac{d_{13}}{d_{12}} \quad (2)$$

$$M = \frac{\mu_0 n \ell}{4\pi} \left| \ln \frac{x_2^2 + y_1^2}{x_1^2 + y_1^2} \right| \quad (3)$$

直達ノイズ試験では地上子電圧を評価するので、式(3)を元に図3から地上子電圧  $V_b$  を計算すると式(4)となる。 $L_{\text{self}}$  はメーカの内部仕様となっており不明な場合があるが、その場合は、より地上子電圧が大きくなる簡略式である式(5)で算定できる。

$$V_b = \frac{j\omega MR_E}{R_E + j\omega L_{\text{self}}} I_{\text{leak}} \quad (4)$$

$$V_b = E_{\text{coil}} = j\omega M I_{\text{leak}} \quad (5)$$

### 2.3 直達ノイズ事前確認試験

前節までの考察により、漏れ電流から地上子電圧を算出可能となった。逆に、直達ノイズ試験の許容値から、許容値に相当する漏れ電流を計算することもできる。

この許容値に相当する漏れ電流（本報告では漏れ電流上限値と呼ぶ）を用いることで直達ノイズの事前確認が可能である。確認方法は次のとおりである。組み合わせ試験の段階で、漏れ電流を測定し、漏れ電流上限値と比較する。測定値が漏れ電流上限値を下回れば、車両完成後の誘導障害試験に合格できる可能性が高いと判断することができる。実際には組み合わせ試験と完成車両では配線長、配線経路などの違いによって漏れ電流が変化する可能性が高いが、前節までの考察では、考察過程で実際よりも直達ノイズが大きくなる仮定をいくつか選択していることから、漏れ電流上限値をある程度信頼性が高い目安として用いることができると考えられる。

## 3. 直達ノイズ事前確認手法の妥当性検証

前章の考察により事前確認試験が導けたことから、本章ではその妥当性を検証する。検証はまず、組み合わせ試験において、地上子と配線との距離が変化した場合、

フレーム接地線がある場合と無い場合の両方において、図2(b)のモデルが広い周波数範囲で定量的に成立することを確認する。次に実車両において、組み合わせ試験では確認できない、モータ配線が直線でない場合、周囲にレールや車体、台車枠といった金属物があるような場合でも、図2(b)のモデルが妥当であることを確認する。なお、漏れ電流はレールや地上、車体を流れることから、車種やレールの対地漏れコンダクタンスといった周囲環境に依存しないことを確認するために、各試験は複数車種、複数地点で実施した。

### 3.1 組み合わせ試験による検証

組み合わせ試験における機器配置を図5に示す。供試インバータは架台等で支えられ、モータ配線は木製の枠により、地面に対し平行かつ直線状に支えられている。

検証における測定器の構成を図6に示す。組み合わせ試験では図6のようにモータ2個分の漏れ電流を測定した。漏れ電流測定では38mm<sup>2</sup>程度の電線を4~8本束ねて測定する必要から、大口径の分割型電流センサであるピアソン7805を用いた。さらに、モータ配線と地上子との間隔が大きい条件では地上子電圧が小さくなることから、電流測定、電圧測定ともにプリアンプを配置した。

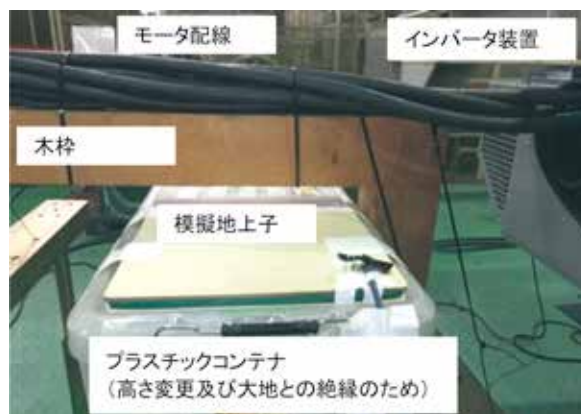


図5 機器配置（組み合わせ試験による検証）

試験条件を表1に示す。地上子には電気定数把握の容易さから、木製芯による1辺30cmの正方形コイル（巻数は23回）を模擬地上子として用いた。また、地上子電圧の計算の容易さからコイルの1辺とモータ配線とが平行（図4において  $x_1=0$ ）になるように配置した。

測定は数秒間インバータの起動試験（車両を停止した状態で1ノッチを投入）を行いノイズを発生させた。

測定した漏れ電流を元に式(3)と式(4)によって地上子コイル電圧  $V_b$  を計算し、地上子コイル電圧実測値とを比較する。なお、鉄道の信号装置は多数の周波数を使

表1 試験条件（組み合わせ試験による検証）

条件	試験番号	図4における $y_1$ (cm)	相互インダクタンス $M$ ( $\mu$ H)
フレーム接地線なし	I-1	17	0.9760
	I-2	49	0.2197
	I-3	86	0.0792
フレーム接地線あり	II-1	39.5	0.3142
	II-2	80	0.0908

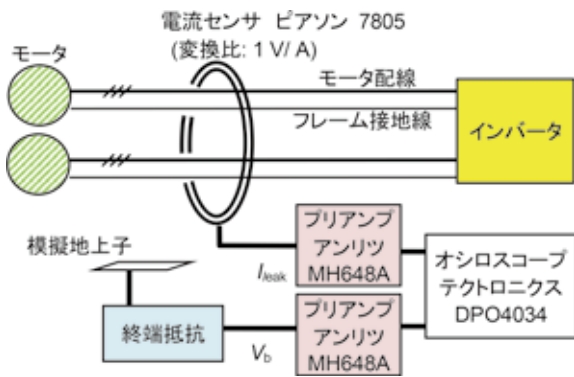


図6 測定器構成

用することから、広帯域で本手法の有効性を確認する必要がある。そのため、計算及び比較はFFT処理をした後の周波数領域における値で実施した。

検証結果の例として試験 I-1 及び試験 I-3 の結果を図7に示す。周波数領域において10kHzから10MHzまで、計算結果と実測結果がよく一致している。地上子電圧のピーク値について計算と実測を比較した結果、誤差は10dB以内であった（表2）。誤差が大きい試番はピーク電圧が小さいため、オシロスコープの分解能などの影響を受けたと考えられる。

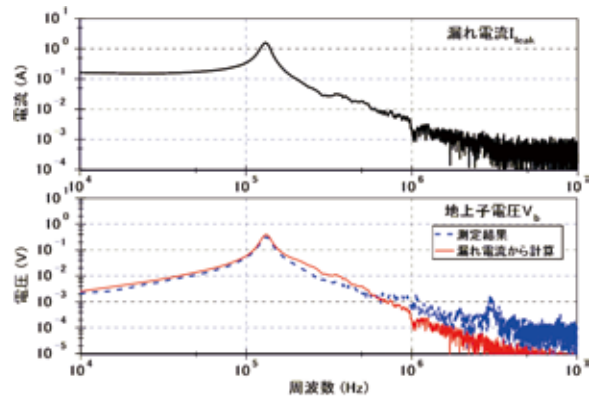
表2 試験結果（組み合わせ試験による検証）

試験番号	地上子電圧 $V_b$ ピーク値(V)		誤差(dB)
	測定	モデル	
I-1	1.19	1.55	2.30
I-2	0.312	0.342	0.797
I-3	0.135	0.138	0.190
II-1	0.0656	0.0237	8.84
II-2	0.0474	0.0270	4.89

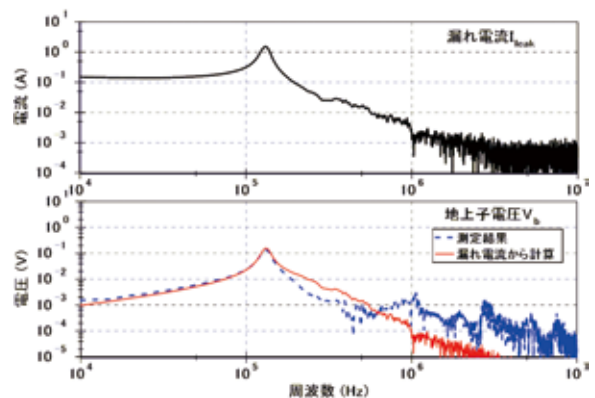
### 3.2 現車による検証

現車における検証を行った。機器配置を図8、試験条件を表3に示す。地上子には3.1節と同じ模擬地上子を用いて、コイルの1辺とモータ配線とができるだけ平行になるように配置した。表3における  $y_1$  は、図8に示すように、モータ配線と地上子との最小間隔を用いた。測定及び解析は3.1節と同様である。ただし、現車における測定では、1モータ分の電流を測定している。

検証結果の例として試験 III-1 及び試験 III-2 の結果を



(a) 試験 I-1



(b) 試験 I-3

図7 検証結果例（組み合わせ試験）

表3 試験条件（現車による検証）

条件	試験番号	図4における $y_1$ (cm)	相互インダクタンス $M$ ( $\mu$ H)
特急形交流電車	III-1	61 cm	0.1495
近郊形交直電車	III-2	55 cm	0.1797
特急形直流電車	III-3	58 cm	0.1636
近郊形直流電車	III-4	63 cm	0.1410

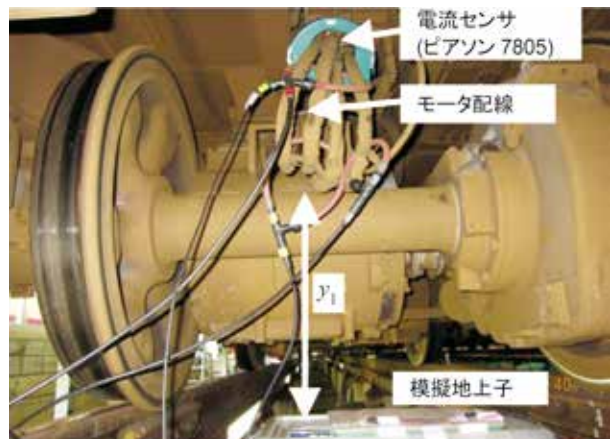
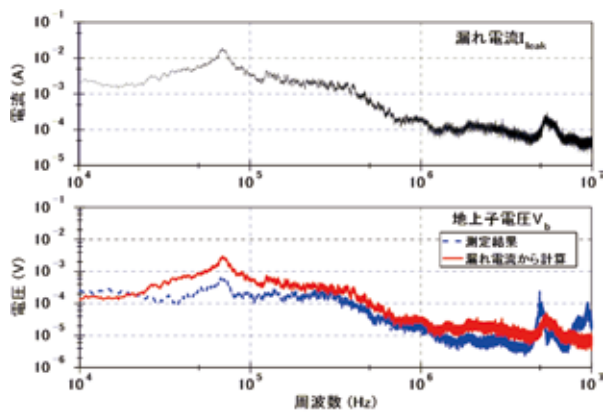
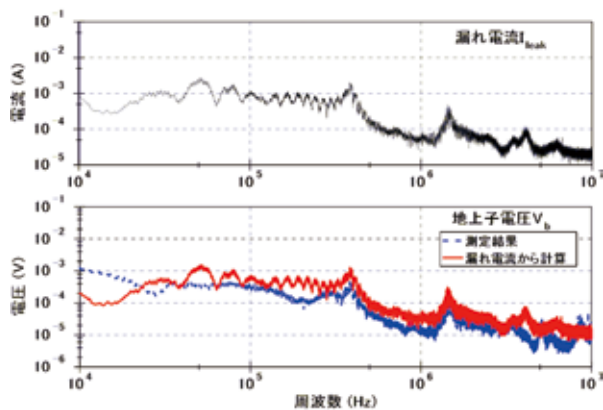


図8 機器配置（現車による検証）



(a) 試験 III-1



(b) 試験 III-2

図9 検証結果例（現車）

図9に示す。現車ではモータ配線が直線ではないこと、 $y_1$ に最小間隔を用いていることから、検証は測定値が計算値を上回らなければ妥当であると言える。この意味において、図9の結果は、モデルが5MHz未満の周波数において妥当であることを示している。なお、5MHz以上において測定値が計算値を上回っているのは模擬地上子の共振と考えられる。

#### 4. 直達ノイズ事前確認試験の適用例

この章では、実際の鉄道車両用インバータ製作時に事前確認試験を適用した事例を示す。対象車両は4両編成の直流電車である。

##### 4.1 漏れ電流上限値の算定

ここでは、2.2節に示した、直達ノイズ試験の限度値に対応する漏れ電流上限値を、実際の信号装置の諸元を用いて計算した例を示す。計算に際し、図4におけるモータ配線の高さ $y_1$ を、ぎ装限界を考慮してモータ配線がレール上面から30cmの高さにあると仮定して計算した。この条件においてモータ配線を水平方向に変化さ

せながら式(3)で相互インダクタンス $M$ を計算し、その最大値 $M_{max}$ と直達ノイズ試験の許容値を $V_b$ として式(4)を変形した式(6)を用いて漏れ電流 $I_{leak}$ の上限値を算出した。なお、コイルの自己インダクタンス $L_{self}$ には誘導障害試験に用いた地上子での実測値を用いている。

$$I_{leak} = \frac{V_b \sqrt{R_E^2 + \omega^2 L_{self}^2}}{\omega M_{max} R_E} \quad (6)$$

JRで使用している主な地上子について漏れ電流上限値を算出した結果を表4に示す。

表4 信号装置に対する漏れ電流上限値

形式	周波数 (kHz)	限度値 (mV)	漏れ電流 上限値(mA)
ATS ループコイル	105±5	4	12.0
	ATS-SD	105±5	12.5
ATS-P	67±2	12.5	66.3
	1676±15	281	373
	1740±15	12	15.9
踏切制御子 (在来型)	2968±15	4	8.54
	3032±15	4	6.02

#### 4.2 適用結果

事前確認試験は3.1節に示した方法とほぼ同じであり、インバータとモータを接続した状態（組み合わせ試験）において漏れ電流を測定した。ただし、FFTによる解析では帯域評価が困難なため、本節ではスペクトラムアナライザで測定した（図10）。本測定ではスペクトラムアナライザをゼロスパンモードに設定するため、1回の測定で1周波数しか測定できない。そのため、本例では少ない測定回数で広い周波数帯をカバーすることを優先し、過去の車両で不合格実績の多いATSループコイルやATS-Pを中心とした装置に限定して事前確認試験を実施した。

事前確認試験の結果を表5中央列に示す。これらの値

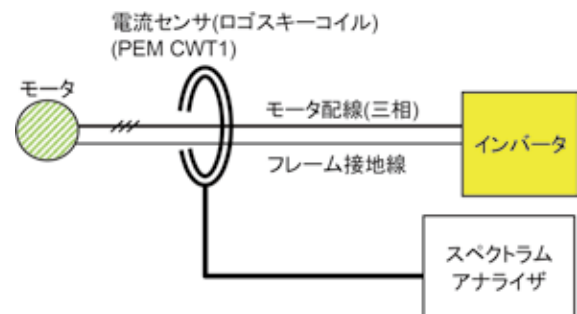


図10 事前確認試験における測定構成

は表4最右列に示す漏れ電流上限値を下回っていることがわかる。本例ではインバータに対して追加のノイズ対策（コモンモードコアの数を増やすなど）は不要であったが、仮に事前確認試験で上限値を上回った場合は、この段階でノイズ対策を行って再測定することで、ノイズ対策の効果を検証することができる。

表5中央列の結果から、供試インバータをぎ装可能と判断し、鉄道車両に組み上げた後に直達ノイズ試験を行った。直達ノイズ試験は、鉄道事業者の車両基地において、信号設備の地上子を線路内に仮設し、力行／回生ブレーキで地上子の上を通過する試験を実施した。試験では1信号装置・1周波数に対し、①力行で地上子を通り、②回生ブレーキで地上子を通り、③インバータ装置が地上子の直上にある状態から力行発車、④インバータ装置が地上子よりも1m程度進行方向手前にある状態から力行発車の合計4つの走行モードの測定を行い、限度値と照合している。

試験の結果、表5に示す周波数を含め、対象車両が走行する線区に設備されている全ての信号装置・周波数について一回目の直達ノイズ試験で合格した。

本例から本論文で開発した事前確認試験が実際の鉄道車両製作においても有効であることがわかった。なお、組み合わせ試験の場所によってはぎ装後に漏れ電流が大きく変化する可能性もあることから、これらに注意して事前確認試験を適用すべきである。さらに、複数モータを駆動するインバータや、複数のインバータを内蔵するインバータ装置の測定においては、モータ間でコモンモード電流が循環するような現象が見られるため、1つのモータだけでなく、インバータ装置に接続される全てのモータについて測定することでより確度の高い事前確認を実施できる。

また、完成車両において漏れ電流を測定すれば、より合格可能性を確度高く判断することが可能である。

表5 車両製作時における事前確認試験適用結果

形式 (周波数)	組み合わせ試験における漏れ電流(mA)	直達ノイズ試験 結果(1回目)
ATS ループコイル, ATS-SD (105±5 kHz)	3.8	合格
ATS-P (1740±15 kHz)	7.4	合格
ATS-P (3032±15 kHz)	11.4	合格
踏切制御子 (14±1kHz)	2.6	合格

## 5. まとめ

鉄道車両の直達ノイズ（放射妨害）が信号装置へ与える影響について定量的なモデル化を行い、組み合わせ試験（工場においてインバータとモータを組み合わせ動作確認を行う試験）及び現車においてモデルの妥当性を確認した。さらに、本モデルを用いて、誘導障害試験の許容値から、誘導障害試験合格に相当する漏れ電流の上限値を算定した。算定した漏れ電流上限値を、組み合わせ試験において測定・比較することで直達ノイズ試験の事前確認が可能となった。本事前確認試験を実際の車両におけるインバータ装置更新時の確認に適用した結果、有効性が確認された。

これまで直達ノイズ対策は経験と勘に頼っていたが、本手法により、組み合わせ試験時におけるノイズ対策効果の確認や出荷時判断が可能になり、さらには誘導障害試験への合格見通しが立てやすくなった。

本手法の弱点は、組み合わせ試験と完成車両とで特にモータ配線長さが異なることに起因して組み合わせ試験での漏れ電流と完成車両での漏れ電流とが等値でない点にある。しかしながら両者の相関はメーカ試験設備や車種に依存すると考えられる。よって、多数の車種で測定すれば定量的な相関が判明すると考えられ、その知見を組み合わせ試験での漏れ電流上限値へフィードバックすることで対処可能である。

本論文における漏れ電流上限値はJRの信号装置のみを対象として提示しているが、地上子コイル形状と受信器入力端インピーダンス、許容値がわかれば、どの地上子に対しても漏れ電流上限値が算出可能である。

## 謝 辞

本研究における測定においては、西日本旅客鉄道株式会社の山中章広氏をはじめ関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

## 文 献

- 1) 塩谷昌弘：インバータ制御電気車の直達ノイズ対策，鉄道総研報告，Vol.12，No.5，pp.11-16，1998
- 2) 廿日出悟，山中章広：鉄道車両用インバータの直達ノイズ事前確認試験の構築，電気学会論文誌D，Vol.138，No.10，pp.766-776，2018
- 3) Michel Mardiguian：EMC設計の実際—放射妨害波の制御—，丸善，p.46，2000