

耐ノイズ性を向上した中間軌道回路の開発

福田 光芳* 寺田 夏樹*
北野 公一** 遠山 喬*

Development of the Track Circuit with Excellent Noise Immunity Performance

Mitsuyoshi FUKUDA Natsuki TERADA
Koichi KITANO Takashi TOYAMA

Many kinds of track circuit have been developed and introduced to be suitable for each electromagnetic condition of various lines. In order to prevent fault of signalling equipment (e.g., track circuit), the allowable value for the currents in a rail generated by vehicle's electric equipments is set a very small level. To solve these problems, we developed a new track circuit which is applicable to any condition of lines especially in immunity to electrical noise. We describe a specification of the track circuit and results of field tests.

キーワード：軌道回路，帰線電流，妨害耐量，巡回符号，MSK 変調

1. はじめに

列車の在線を検知するための装置として軌道回路が広く使用されており，適用される線区の条件に対応するために，様々な軌道回路方式が開発されてきた。その結果，軌道回路方式が多数存在する状況になっている。軌道回路の保守・工事の細かい知識・技術は，その種別毎に異なる部分も多く，また，予備品の共通化ができないため，効率的な管理が難しくなる。個々の軌道回路方式について考えると当該線区の条件に適合した設備といえるが，全体を考えた場合，軌道回路方式が多いことは保守・工事の効率化の面で不利になる。

また，新型車両が開発された場合，車両からの帰線電流に含まれるノイズが既存軌道回路に影響を与えないことを，その都度，試験によって確認している。しかし，車両から発生する帰線電流のノイズの影響を受けやすい軌道回路方式があること，対象とすべき軌道回路方式が多いために的を絞った対策が施しにくいことなどから新型車両の開発の負担となっている。

駅構内用の軌道回路としては，耐ノイズ性が高く，かつ，比較的広い範囲で適用可能な方式が既に開発されているため¹⁾，耐ノイズ性が高く，かつ線区の条件に依らず導入することのできる駅中間用の軌道回路（中間軌道回路）の開発を行った。

本論文では，新しく開発を行った軌道回路の仕様の検討結果及び試作装置を用いた営業線における検証試験結

果について報告する。

2. 軌道回路の概要

軌道回路とは，ある区間のレールを電気回路の一部として利用し，列車の輪軸でレール間が短絡された場合に，列車在線を検知するものである。軌道回路は，電化／非電化，絶縁方式，周波数，使用する信号の変調方式等で様々な種類があり，それぞれ構成が異なる。図1に，広く使用されている商用周波数（50/60Hz）軌道回路の構成例を示す。

図1で，信号は電源から，限流抵抗を通り，インピーダンスボンド（ZB）を介して，レールに流れる。受信側も同様に，インピーダンスボンドを介して信号が軌道リレーに入力される。レール短絡時には，軌道リレーに入力される信号が減衰し，リレーが落下状態（復旧状態）となり，列車在線を検知する。

前述の通り，様々な条件に適応するために多種の軌道回路方式が開発されてきた。図1に例示した商用周波数軌道回路は，シンプルな構成であることから信頼性が高く，比較的低コストな方式であり，幅広く使用されてい

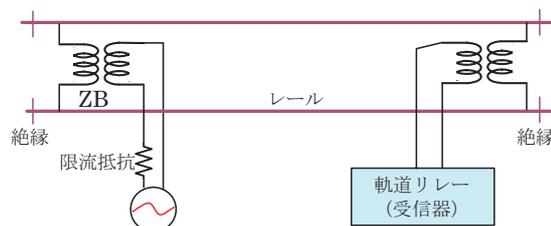


図1 商用周波数軌道回路の構成例

* 信号通信技術研究部（信号）

** 前 信号通信技術研究部（現 大阪市交通局）

特集：信号通信技術

る。一方で、商用周波数の電流をレールに流しているため、交流電化区間及び交流電化区間に並行する線区では使用できない。このような箇所で使用する目的で、分周軌道回路などの商用周波数を使用しない軌道回路方式が開発されてきた。また、列車密度が小さく駅間を1つの閉そく区間としてもよい線区などでは、導入コスト・保守コストの低減を目的として、駅間を1軌道回路で制御する長大軌道回路などが開発されてきた。

その他の条件として、現場設備の設置条件がある。2元式軌道リレーを制御するための信号高圧電源が不要なAF2周波数組み合わせ軌道回路、長大トンネルや橋梁で現場設備やレール絶縁などを減らすことのできる駅中間用の集中方式の軌道回路などが開発されている²⁾。さらに、ATCやATSのための情報伝送用としても各種の軌道回路方式が開発されている。

3. 仕様の検討

3.1 要件の整理

現行の他設備の改修や軌道回路境界の変更等を行わないことを前提とした場合、新しい軌道回路を線区条件に依存せずに適用可能とするためには、少なくとも①列車検知性能、②環境による特性変動、③制御可能な軌道回路長、④耐ノイズ性について、他の軌道回路と同等以上の性能が確保できることが必要となる。また、当然ではあるが、安全性、信頼性、コストも重要である。

在来線の地上信号機で制御される駅中間に適用することを対象とし、電化方式や近接設備（新幹線等）、列車密度などに関わらず適用可能な軌道回路の要件について、それぞれの面から検討した結果を表1に整理した。ただし、全ての線区条件を満足することは不可能であるので、長大軌道回路の区間、漏水や結露の激しいトンネル内など特殊な環境については、軌道回路長に制約を設けて分割するなどの対策が必要である。

列車検知性能について、半導体特性の影響によって短

表1 軌道回路要件の整理

項目	性能
短絡感度	他軌道回路と同等以上の短絡感度
	乾燥時 1V で列車検知
環境条件	漏れコンダクタンス 0.5S/km 以下
軌道回路長	1.5km ~ 2.0km
耐ノイズ性	50Hz 及び 60Hz の倍数を避ける インバータノイズに対しては S/N を確保 瞬時発生ノイズを時素等で許容
情報伝送	5 現示の制御に対応
レール絶縁不良	絶縁不良により不正扛上（動作）しない
電源設備の条件	同期電源（信号高圧）が不要

絡不良が発生することを防ぐため、受信端のレール間電圧が 1V の場合に列車在線と判定できるようにする³⁾。

また、1.5 ~ 2.0km 程度の軌道回路長で漏れコンダクタンス 0.5S/km まで対応できればほとんどの箇所でも適用可能となる。

耐ノイズ性としては、電源周波数に起因するノイズを避けるため、50Hz 及び 60Hz の倍数を避けた周波数を選定するとともに、周波数が変化するVVVF車のインバータノイズについては、十分な S/N を確保して対応する必要がある。また、ノッチの入り切りや外乱などで発生する過渡的なノイズは車両側での対策が困難であるので、瞬間的なノイズについては、時素等で許容できるようにする必要がある。

軌道回路の耐ノイズ性は帰線電流に対する許容値で表される。通常の状態では列車が在線していない時に誤って在線と判定しないための「安定動作確保の許容値」と、レール破断時に誤って非在線と判定しないための「危険側誤動作防止の許容値」の2種類の許容値が軌道回路方式毎に設定される。帰線電流のノイズ成分が軌道回路の受信器に流入する大きさは、帰線電流の不均衡率に比例する。通常の状態を不均衡率 10% 程度とすると、レール破断時は不均衡率 100% になるので、レール破断時は通常の 10 倍のノイズが流入することになる。通常、危険側誤動作防止の許容値は、不均衡率 100% の時に軌道回路の受信器に流入するノイズ成分の大きさが列車非在線のしきい値を超過しないように定める。しかし、しきい値を超過するノイズが流入しても、ノイズによって列車非在線と判定することを防止できる場合は、危険側誤動作防止のモードを考慮しなくて良いため、安定動作確保の許容値だけを設定すれば良くなり、結果として耐ノイズ性が上がることになる⁴⁾。

情報量について、商用周波数軌道回路などで用いられている 2元3位式の軌道リレーでは 3 情報しか確保できないが、5種類の情報を確保できれば、5現示の信号制御条件のためのケーブルを別途設けることなく、軌道回路の情報だけで制御できる。受信レベルによる在線判定も 1 情報であるので、4以上の情報種別を割当てられればよい。

電源設備の条件について、前述の2元3位式軌道リレーでは、送信機器と受信機器で同じ電源（同期電源）を用いているが、電源設備のトランス交換時に誤接続をした場合、錯誤現示に至る可能性がある。また、同期した電源設備（信号高圧）を沿線に確保する必要がある。そこで、施工性及び設備コストの低減の観点から、同期電源を不要とする方式、つまり、電源の位相や周波数による制御を行わない方式が望ましい。

3.2 軌道回路方式の検討

表1に示した要件を満足するための基本方針として、まず、1.5km～2.0km程度の距離で漏れコンダクタンスが乾燥状態の0.01S/km程度から0.5S/kmまで無調整で制御が必要であることなどから200Hz以下の低い周波数帯域を使用することとした。レール絶縁不良を検知可能とし、かつ、その影響を受けにくくするために、隣接する軌道回路では異なった周波数を使用する。そのために使用する周波数を3種類用意することとした。

耐ノイズ性を大きくするために、レールに流す軌道回路電流をデジタル符号化し、受信器で符号照合を行うことによって列車在線の判定を行う方式を適用することとした。これにより、100%不平衡の状態でも危険側誤動作するモードを無視できるので、安定動作確保のための許容値だけを設定すればよく、結果として耐ノイズ性が向上する。また、変調方式はデジタルATCなどで実績のあるMSK変調方式とする。

さらに、50Hz地域と60Hz地域で同じ仕様（同じ周波数）とすることとした。これは、共通化によってコスト低減が期待できることに加え、50Hz地域と60Hz地域の境界などで異電源が隣接する箇所においても、隣接線の妨害の影響を受けにくい利点を考えたためである。

電源高調波は、50Hz、60Hz、100Hz、120Hz、150Hz、180Hz、…となる。この他、直流電化区間では50Hz以

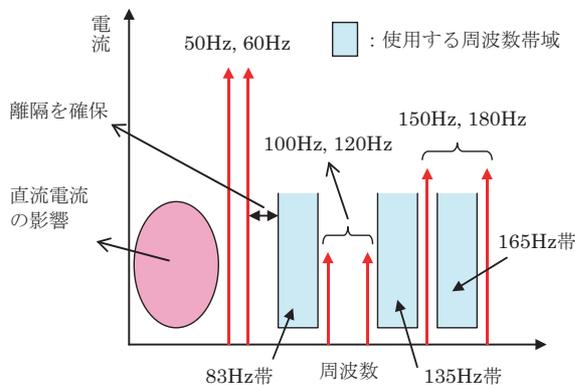


図2 電源高調波ノイズと使用帯域

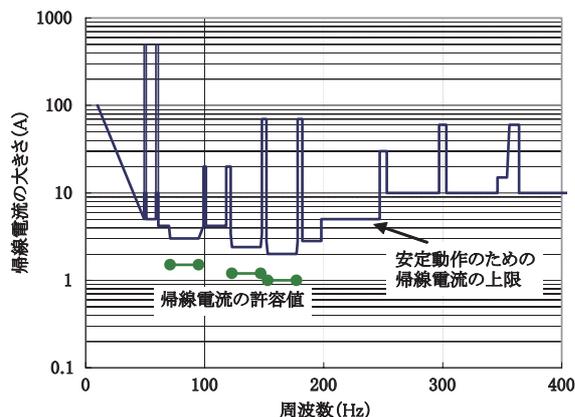


図3 安定動作のためのノイズの上限

下の帯域では直流電流の変動の影響を受けやすい。また、交流電化区間では50Hz/60Hzの電流が大きいいため周波数を避けるだけでなく、十分な周波数離隔を確保する必要がある。これらを考慮し、使用する帯域を83Hz帯、135Hz帯、165Hz帯とした(図2)。

帯域内の妨害耐量は、現在の車両や今後開発される車両のノイズに対して十分な余裕を考慮し、それぞれの帯域で1.5A、1.2A、1.0Aとした(この値が新型車両開発時の許容値となる)。実際には、2倍の安全率を考へ3.0A、2.4A、2.0Aのノイズが流入してもS/Nが確保できるようにする(図3)。

3.3 符号方式の検討

列車の在線・非在線の判定は、受信レベルの大きさと受信した符号の照合によって行う。判定に要する時間、ビット数などは次の要素を考慮して決める必要がある。

①不正落下の防止

平常時に列車非在線の状態、ノイズ等によるビットエラーで不正落下とならないこと。

②誤現示

平常時に列車非在線の状態、ノイズ等によるビットエラーで誤現示とならないこと。

③不正扛上

レール破断時等で列車在線と判定している状態で、ノイズ等により不正扛上しないこと。

上記①～③のためになるべく多くのビットを所定の時間内に受信・検定する必要があるが、今回検討している軌道回路方式では伝送速度が低いため、効率的に受信・検定するため「巡回符号方式」を採用した⁵⁾。

通常、レールを用いたデジタル符号伝送では、フレームの先頭位置を見つけるための「ヘッダ部」と必要なデータと誤り検定符号などからなる「データ部」からフレームが構成されている。中間軌道回路では、送信側と受信側が非同期で動作するので、「ヘッダ部」の2ビット目から受信した場合を考えると、1フレームの間、受信データを有効に活用できない。

巡回符号方式は、特定のビット列を符号語とした場合に、そのビット列を巡回(ローテート)させたビット列も同じ符号語として扱うものである(図4)。よって、どの位置から受信しても符号語を確定することが可能になる。

さらに、受信したビットを有効に利用して検定を行う方法として任意フレーム検定を考案した⁶⁾。これは、巡回符号方式を対象とした検定方式であり、フレーム長 f 、受信フレーム数 m とした場合、 $f \times m$ ビットの中で長さ f のビット列を重ねないように n 個抽出し、抽出したビット列に対して mCn の検定を行う(m フレーム中 n フレームが合格・一致すれば採用)。巡回符号では、符号語

特集：信号通信技術

の中のスタート位置が異なっても照合(同じ符号語であることの確認)は可能である。n個のビット列がそれぞれ同じ符号語に一致することを確認する場合に、受信した情報を正しい符号語として受理する。図5は"00110"という5ビットのフレームを4フレーム受信した場合の例を示している。ピンク色の部分でビットエラーが発生すると、最後のフレームは正しく受信できるが、他の3つのフレームはエラーとなるため、 ${}_4C_2$ の検定は不合格となる。一方、任意フレーム検定では、図5の緑色で示したビット列のようにエラー箇所を避けることにより、正しい符号語と一致するように2つのビット列を抽出することができる。4フレーム分のビット列から2フレーム相当の符号語の一致を確認できたので、 ${}_4C_2$ 相当の検定に合格したことになる。これより、ランダムなビットエラーによって検定不合格が発生し、動作時間の不要な延長を防ぐことができる。

搬送波を3種類設けて隣接軌道回路の信号を区別することに加え、軌道回路毎にIDを設定し、同じ搬送波を持つ別の軌道回路の信号も区別できるようにした。情報数は5現示を実現するための5情報に予備として1情報を

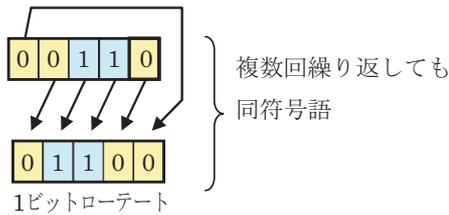


図4 巡回符号のイメージ

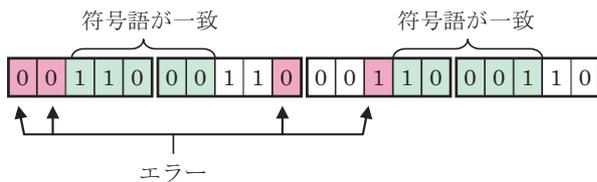


図5 任意フレーム検定の例

表2 符号語の例

ID	現示	符号語1										
1	①	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
	②	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1
	③	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1
	④	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1
	⑤	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1
ID2～ID7は省略												
8	①	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
	②	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1
	③	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1
	④	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
	⑤	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1

加え、6情報(符号語5種類と無信号による列車在線検知で6情報)とした。予備の1情報は、有信号による停止現示や車上への緊急停止情報の伝送などに応用できる。符号語長を11ビットとし、8種類のIDに対応した符号語の集合を選定した(表2)。なお、同じID内の異なる符号語は、誤現示を防ぐためハミング距離4以上を確保し、異なるIDの符号語では符号語の不一致が確認できれば良いのでハミング距離2以上を確保した。

4. 試作装置による検証

4.1 仕様の作成と装置試作

3章における仕様の検討結果をもとに、試作装置の仕様を作成した(表3)。送信器、受信器、整合変成器(MT)、50Hzの交流成分除去用のリジェクタ、及び受信状態記録用のモニタ装置の試作を行った。試作装置の構成を図6に示す。試作装置では送信出力を20VAとしてが、機能確認には支障なく、受電端で確保できるレール間電圧を評価する際には、試作装置でのレール間電圧を電力比の平方根を乗じて換算すれば良い。

表3 主な諸元

項目	性能
搬送波周波数	83Hz, 135Hz, 165Hz
変調方式	MSK 変調
S/N	15dB
偏移周波数	± 5Hz
伝送速度	20bps
送信出力	20VA (実用時は50VAとする)
制御長	1.5km～2.0km
漏れコンダクタンス	最大0.5S/km
短絡感度	0.3Ω以上 (DC-商用, AC-分倍のZB使用時)
符号方式	巡回符号(11bit/code)
情報数	5情報
ID数	8軌道回路
扛上判定	最小動作レベル以上、かつ、 ${}_4C_3$ 相当成立
落下判定	落下レベル以下、または、 ${}_4C_2$ 相当不成立
現示変化	${}_4C_3$ 相当成立
許容値	1.5A (83Hz帯) 1.2A (135Hz帯) 1.0A (165Hz帯)

4.2 擬似軌道回路による伝送特性確認

擬似軌道回路を用いて試作装置が所定の伝送特性を有することを確認した。インピーダンスボンドは直流電化区間で広く用いられているDC-商用のインピーダンスボンドと同じ1.6mHの励磁インダクタンスの擬似インピーダンスボンドを用いた。

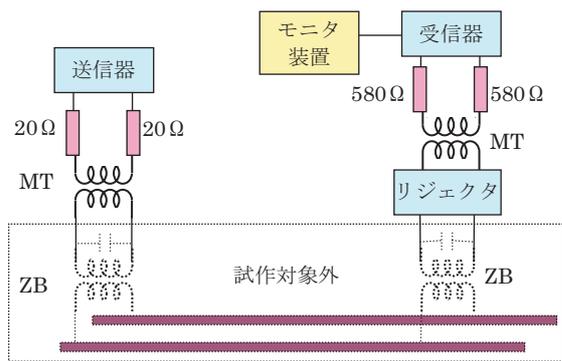


図6 試作装置の構成

表4 受信端レール間電圧

漏れ コンダクタンス	測定結果		
	88Hz	140Hz	170Hz
0.01S/km	2.3 V (0.0)	2.3 V (0.0)	2.2 V (0.0)
0.1S/km	2.0 V (1.2)	1.9 V (1.6)	1.8 V (1.6)
0.5S/km	1.1 V (6.1)	1.0 V (7.4)	0.9 V (7.7)

※括弧内は0.01S/kmのときの減衰量 (dB)

搬送波周波数に応じたコンデンサをインピーダンスポンド3次側に並列に取り付け、送信符号を"0" (搬送波周波数+5Hz) に固定し、測定を行った。送信側整合変成器のタップは機器側 50 Ω、軌道側 300 Ω を使用した。

擬似軌道回路はユニットを結合して軌道回路長2.0kmとし、漏れコンダクタンスを0.01S/km、0.1S/km、0.5S/kmの各々の条件で各部の電圧、電流を測定した。漏れコンダクタンス 0.01S/km、0.1S/km 及び 0.5S/km の場合のレール間電圧を表4に示す。

受信端のレール間電圧は2.2V以上確保できており、送信器の出力を仕様に従って50VAとすれば、乾燥時に3V以上のレール間電圧を確保できる。漏れコンダクタンスの条件による受信レベルの最大減衰量は7.7dBであった。例えば、0.01S/kmで列車非在線時の受信レベルを基準として、落下判定レベルを-10dB、扛上判定レベルを-9dBとすることにより、2kmの軌道回路で0.5S/kmまでの条件下で不正落下することなく制御可能である。ただし、送信出力の低下事象及びその検知レベルの誤差を考慮すると、さらに1~2dB程度の余裕が望ましい。その場合、受信レベル変動に対応して列車在線判定の基準とするレベルを3~4dB程度調整するレベル補正機能を追加することにより、余裕を確保できる。漏れコンダクタンスが大きくなった状態で、落下判定レベルに相当する受信端レール間電圧が1.0V以下になる可能性があるが、湿潤状態であるため短絡不良への影響は小さいと考える。

4.3 現地検証試験

実際の使用環境下において、試作装置の機能を検証するため、営業線を用いた検証試験を実施した。試作装置の軌道回路電流を既設の軌道回路に重畳し、列車検知が安定して行われること、MSK変調を用いたデジタル符号伝送が安定して行われることを確認した。

既設の軌道回路に重畳するために、2つの軌道回路電流を混合・分配するためのフィルタを内蔵した重畳器を試作した。重畳器の回路図を図7に示す。試作装置側と既設軌道回路装置側に、それぞれ直並列の共振回路を用いて他方への影響を抑えている。さらに、既設軌道回路装置側については、並列に共振回路を設け、試作装置からの回り込みの電流を短絡し、既設軌道回路への影響を防いでいる。

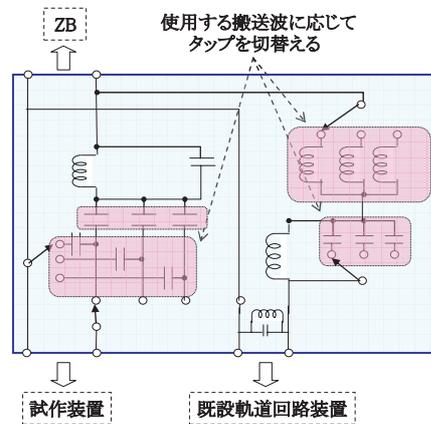


図7 重畳器の回路構成

検証試験は、AF3位2重系用ZBを用いた1.359kmの軌道回路を用い、約1ヶ月実施した。83Hz、135Hz、165Hzのそれぞれの搬送波に切替えて、既設軌道回路に影響がないことを確認し、試作装置の各部の電圧・電流を測定し、適切な伝送特性が得られていることを確認した上でモニタ装置を用いた無人測定を行った。

各部の電圧・電流を測定した結果から算出したレベルダイヤを図8、各部のインピーダンスを図9に示す。83Hzの送信側のZB1次については、測定ミスと思われる。また、83Hzのレベルダイヤでは、受信側のZB2次で損失が大きくなっているが(実効電力が小さくなっているが)、当該区間で使用されているAF3位2重系のZBの励磁インダクタンスが、一般的なZBに比べて1/10以下であるため、低い周波数でインピーダンスが小さくなり、ZB2次側に接続した重畳器での損失が大きくなっているためである。実際に軌道回路を使用する場合は、重畳器を使用せずに単独の構成となるため、この部分での損失は小さくなるため、実用上は問題ない。なお、図9では受信端のZB1次側から見た83Hz帯のインピーダンスは、0.2 Ω程度であるが、重畳器を用いずに単独で軌道回路

特集：信号通信技術

構成した場合のインピーダンスを別途測定したところ 0.49 Ω であり、一般的な商用軌道回路と同等以上のインピーダンスが確保できることがわかった。この時、受信端の短絡感度（列車検知のしきい値を -7.5dB とした場合）は、重畳器を用いた場合に 0.12 Ω であったが、単独の構成では 0.2 Ω 以上になっている。試作装置の構成では、AF3 位 2 重系用の ZB で 0.3 Ω 以上の短絡感度を得ることは難しかったが、レール端から見た送信器、受信器のインピーダンスを大きくすることにより、短絡感度を大きくできる。なお、一般的な ZB（DC-商用、AC-分倍など）では、送受信端で十分なインピーダンスが確保できるので、問題なく 0.3 Ω 以上の短絡感度を確保できる。

伝送品質の確認結果を表 5 に示す。83Hz と 165Hz でエラービットが 11 ビットとなっているが、いずれも軌道回路進入直後、または、進出時の過渡的に受信電圧が変化する状態で、1 フレームがエラーとなった事象であり、平常状態では伝送エラーは発生しなかった。ビットエラー率はいずれも 10⁻⁶ 未満であり、実際のノイズ環境下で十分な伝送品質が得られた。なお、135Hz については、ビットエラーが発生しなかったため、1 ビットのエラーが発生したと仮定してビットエラー率を算出した。

試験期間中の列車検知状態を集計した結果を表 6 に示

す。試作装置が検知した列車数は、既設軌道回路の検知結果を同じであった。また、期間中、列車通過以外で列車検知する事象や列車通過中に不正に列車非在線と判定する事象は発生せず、安定して列車検知が行われた。

表 5 伝送品質の確認結果

搬送波	総受信ビット	エラービット	ビットエラー率
83Hz	20,520,250	11	5.4 × 10 ⁻⁷
135Hz	4,964,053	0	2.0 × 10 ⁻⁷
165Hz	34,090,548	11	3.2 × 10 ⁻⁷

表 6 検知列車数の比較

搬送波	試作装置	既設軌道回路
83Hz	777	777
135Hz	187	187
165Hz	1260	1260

5. まとめ

耐ノイズ性が高く、電化方式など線区の条件に依らずに適用可能な中間軌道回路の仕様を作成した。また、仕様に基づいて装置を試作し、実際の営業線において、安定して動作することを確認した。これまでの検討及び試験によって、機能仕様の検討及び検証は完了したといえる。今後は、必要に応じて実用化の際の機器仕様の整理等の支援を行っていきたい。

最後に、本研究開発を進める上で多大な協力をいただいた東日本旅客鉄道株式会社の関係各位に感謝いたします。

文献

- 1) 播磨義憲, 内藤高通, 三枝秀隆: 軌道回路を革新する新しい方式による列車検知装置 (MTD 形), 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 J-RAIL, pp.51-54, 1998.11
- 2) 高重哲夫: 軌道回路のはなし (その4), 信号保安, Vol.39, No.2, pp.131-136, 1984
- 3) 福田光芳, 板垣朋範, 寺田夏樹: 軌道回路の短絡不良要因と改善手法, 鉄道総研報告, Vol.21, No.11, pp.5-10, 2007
- 4) 寺田夏樹, 福田光芳: 簡易な符号伝送による低周波軌道回路の耐ノイズ性能向上, 鉄道総研報告, Vol.24, No.3, pp.11-16, 2010
- 5) 新井英樹, 渡辺郁夫, 高重哲夫, 犀川潤, 奥谷民雄: 低周波デジタルコード式軌道回路の開発, 鉄道総研報告, Vol.13, No.8, pp.21-26, 1999
- 6) 福田光芳, 寺田夏樹, 北野公一: 軌道回路に適用する巡回符号の検定方法の検討, 交通・電気鉄道研究会資料 TER-09-46, 2009

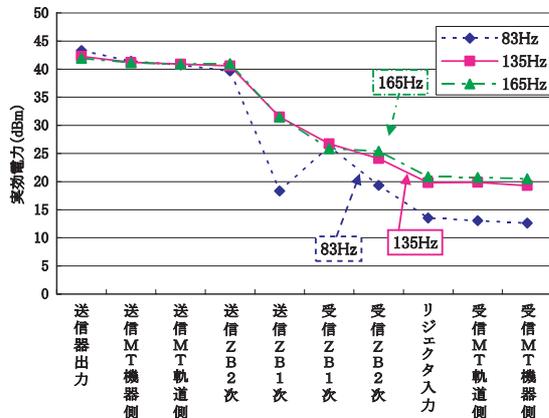


図 8 レベルダイヤ

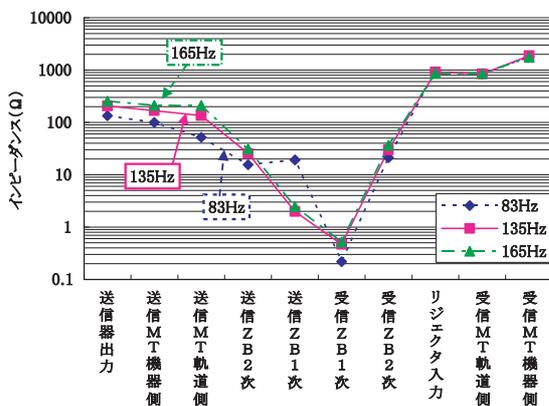


図 9 各部のインピーダンス