

プローブ車両による軌道回路の短絡の状態監視に関する一検討

林 辰憲* 孫 佳 望月 寛 高橋 聖 中村 英夫(日本大学)

福田 光芳(鉄道総研)

山本 正宜(株 シグナルコンサルタント)

A Study of Monitoring Method on Track Circuits
by Pick up Coil on Probe Vehicle

Tatsunori Hayashi*, Ka Son, Hiroshi Mochiduki, Sei Takahashi, Hideo Nakamura (Nihon University)

Mitsuyoshi Fukuda, (RTRI)

Masonori Yamamoto, (Signal Consultant Co. LTD.)

Track circuits are commonly used to detect the trains. Meanwhile, there are some problems of shunt performance between rails, and in reduced received power by leakage conductance of the track circuit. In this paper, we propose a method of monitoring track circuits using on-board coils and validate it by result of the test.

キーワード：軌道回路，短絡不良，短絡抵抗，漏れコンダクタンス，状態監視

(Track Circuit, Malfunction of shunt performance, Shunting resistances, Leakage conductance, monitoring)

1. はじめに

列車検知の多くは軌道回路方式によって行われており、軌道回路の安全性・信頼性は鉄道輸送の安全性・安定性に影響を与える。筆者らは軌道回路の保全性向上を目的として、営業車に受電器を装備させて軌道回路の監視を行うプローブ車両による手法の有効性について検討を進めてきた^①。本報告では、機器故障以外の軌道回路障害の一要因である、「短絡不良」や「漏れコンダクタンス変動」に着目し、軌道回路送信部のレベル変動と軌道回路定数の変動を観測して保全の必要性を判断する手法について述べ、疑似軌道回路を用いた確認試験の結果を報告する。

2. 列車検知

〈2・1〉軌道回路の仕組み

軌道回路とは、左右のレールを電気回路の一部に用い、輪軸がレールを短絡することにより列車検知を行う装置である。列車検知の単位となる軌道回路の両端では、左右レールが絶縁継目により電氣的に絶縁されている。「列車なし」の状態では、「電源」→「レール」→「軌道リレー」と流れ、リレーが動作の状態(ONの状態)になっている。列車が軌道回路内に進入すると、送信端からのレールに流れている電流は、レール間が列車の輪軸で短絡され電流がリレーまで達しないため、リレーが復旧の状態(OFFの状態)になり「列車あり」と検知する。

〈2・2〉短絡不良と漏れコンダクタンス変動

短絡不良の場合、軌道リレーに入力される電圧(軌道リレー電圧)が十分に減衰しないために、列車が在線してもリレーが動作(ONの状態)し、列車在線を検知できなくなる。

一方、軌道構造やレール締結装置の電氣的性能は、降雨、漏水や汚損等の環境条件により大きく影響を受けて、漏れコンダクタンスが変動する。漏れコンダクタンスが大きくなると軌道回路の伝送損失が大きくなって軌道リレーに入力される電圧が低下するので、適切な調整などを行わないと軌道リレーが不正に復旧する可能性がある。

一般に、短絡不良及び漏れコンダクタンスの変動による受信レベル低下は、軌道リレー電圧を監視することにより、その状態を把握する。なお、列車が軌道回路に進入後にも軌道リレーに入力される電圧は、残留電圧と呼ぶ場合がある。

3. 提案手法

〈3・1〉受電器によるレール電流の計測

本研究では、営業列車の前方と後方に受電器を、また車上にデータ収集機器を設備している。走行中に計測したレール電流の数値をデータ収集機器で処理する設備を設けたプローブ車両で沿線設備等の状況を検測する。プローブ車両は様々な設備等の調査を対象としているが、ここでは、軌道回路を対象とした調査について述べる。走行中に測定・記録した信号電流等は、走行後に分析し、障害等の予

兆を判定する。測定・分析の精度が低い場合でも、高頻度の測定でデータ母数を増やすことにより、精度の低さを補完することが可能である。具体的には列車の前方と後方の 2 か所に受電器を設置し両方のレール電流を測定することで、漏れコンダクタンスや短絡抵抗、残留電圧の推定を行う。受電器により測定できる当該軌道回路のレール電流は、当該列車の輪軸短絡の位置により表 1 に示す状態に区分できる。測定点は、列車の在線位置に応じて軌道回路の受信端、中間、送信端の 3 つに分けられる。また、軌道回路の受信端、送信端の両端では輪軸により短絡していない場合の開放電流と短絡した場合の短絡電流の測定が可能である。例えば、列車が受信端を通過する際、図 1 の状態①のように、前方の受電器で受信端の短絡前の開放電流 I_{ro} を測定できる。

表 1 当該軌道回路で測定できるレール電流の状態

測定項目	受信端	中間	送信端
開放電流 I_o	状態① I_{ro} (前方受電器で測定)	—	状態⑤ I_{to} (後方受電器で測定)
短絡電流 I_s	状態② I_{rs} (前方受電器で測定)	状態③ I_{ms1} (前方受電器で測定) 状態③ I_{ms2} (後方受電器で測定)	状態④ I_{ts} (前方受電器で測定)

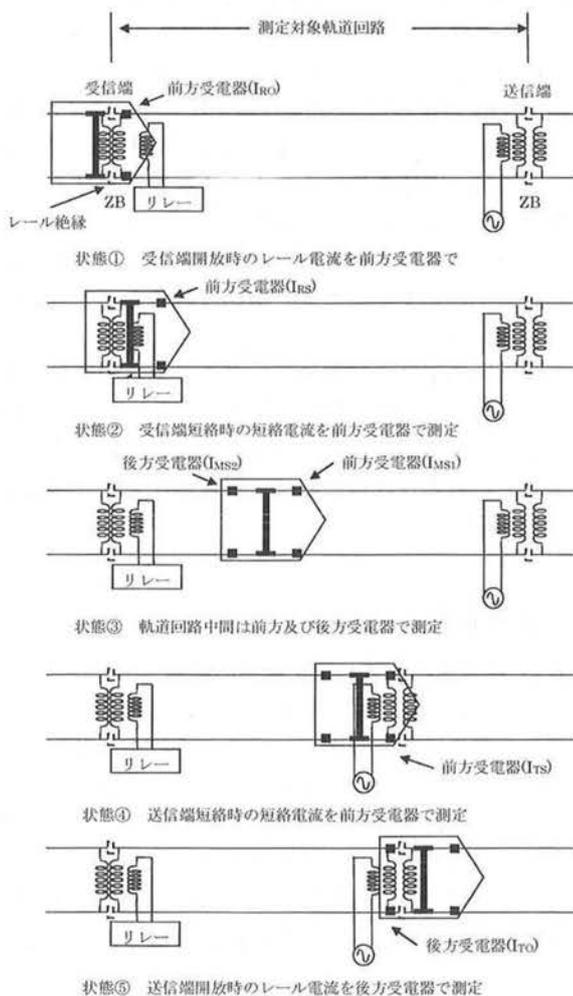


図 1 レール電流測定の概要

解析の流れとしては、事前に各軌道回路定数であるレール抵抗 $R[\Omega/\text{km}]$ 、レールインダクタンス $L[\text{mH}/\text{km}]$ 、静電容量 $C[\mu\text{F}/\text{km}]$ 、軌道回路長 $l[\text{km}]$ の値を調査しておく。また、調査が困難であれば、一般的な値を用いてもよい。そして、状態②の受信端短絡時のレール電流と状態⑤の送信端開放時のレール電流から漏れコンダクタンスの推定を行う。次に、その推定した漏れコンダクタンスと状態③で短絡点前後のレール電流を用いて短絡抵抗の推定を行う。さらに状態①及び③で得られるレール電流比から残留電圧の推定を行う。

送信端から送られた軌道回路電流は、輪軸で短絡されても短絡抵抗に応じた電流が軌道リレー側にも流れる (図 2 参照)。この電流をここでは残留電流と呼ぶ。一般に短絡不良や漏れコンダクタンスの変動は受信端のレール間電圧や軌道リレーに入力される電圧で評価するが、ここでは残留電流を用いて評価する方法について述べる。

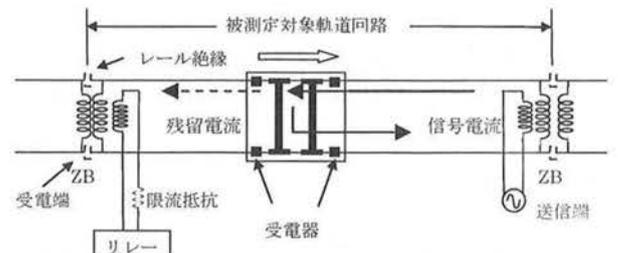


図 2 残留電流の概要

〈3・2〉 漏れコンダクタンスの推定

軌道回路の一部であるレール部分は、 R, L, G, C で示される分布定数回路でモデル化ができる。ここで図 3 のようなインピーダンス \dot{Z}_e で終端された四端子網を考える。 R, L, C は前述の軌道回路定数であり、 $G[\text{S}/\text{km}]$ は漏れコンダクタンスである。

送信端及び受信端の電圧・電流をそれぞれ $\dot{V}_1, \dot{I}_1, \dot{V}_2, \dot{I}_2$ とする。送信端電圧 \dot{V}_1 と送信端電流 \dot{I}_1 は (1), (2) 式のように表現できる⁽²⁾。

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 \cosh \dot{\gamma} l + \dot{Z}_K \dot{I}_2 \sinh \dot{\gamma} l \quad (1)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \cosh \dot{\gamma} l + \frac{1}{\dot{Z}_K} \dot{V}_2 \sinh \dot{\gamma} l \quad (2)$$

なお、 \dot{Z}_K は特性インピーダンス、 $\dot{\gamma}$ は伝搬定数、減衰定数 α 、位相定数 β を用いて算出できる。

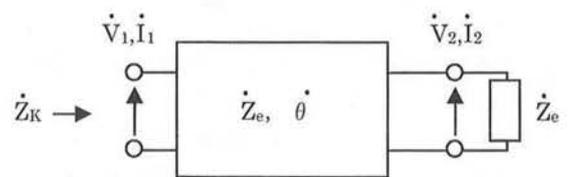


図 3 四端子網によるレール部のモデル化

ここで、(2)式について受信端電流 \dot{I}_2 で正規化すると(3)式のようなになる。なお \dot{Z}_e は、受信端の負荷インピーダンス

である。

$$\frac{i_1}{i_2} = \cosh \dot{\gamma} + \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_K} \frac{1}{\dot{Z}_K} \sinh \dot{\gamma} = \cosh \dot{\gamma} + \dot{Z}_e \frac{1}{\dot{Z}_K} \sinh \dot{\gamma} \quad (3)$$

終端を短絡した場合、 $\dot{Z}_e = 0$ で、短絡点の電流を i_{2S} とすると(3)式は、(4)式のように表現できる。

$$\frac{i_1}{i_{2S}} = \cosh \dot{\gamma} = \frac{1}{2} \left(e^{\dot{\gamma}} + \frac{1}{e^{\dot{\gamma}}} \right) \quad (4)$$

(4) 式の左辺は、状態⑤の送信側のレール電流及び状態②の受信端短絡時の受信側の電流から求められる。また、右辺について、 $\dot{\gamma}$ は R, L, G, C, 及び周波数に展開できるので、G 以外の数値を代入することにより、G を推定することが可能になる。

〈3.3〉短絡抵抗の推定

軌道回路の短絡状態は、通常、残留電圧によって判断しているが、短絡抵抗を直接測定、あるいは推定できる場合は、短絡抵抗によって短絡状態を判断することも可能である。図 4 に列車在線時の軌道回路を簡略化した回路を示す。軌道回路長を l [km] とし、短絡点から受信端までの距離を x [km] とする。輪軸のインピーダンスを \dot{Z}_S 、輪軸から受信端側、送信端側に見たインピーダンスをそれぞれ \dot{Z}_x 、 \dot{Z}_a とする。また、送信側及び受信側のレール電流、短絡電流、レール間電圧をそれぞれ i_{MS1} 、 i_{MS2} 、 i_{MS3} 、 v_{MS2} とすると、 \dot{Z}_S は(5)式で表現できる。

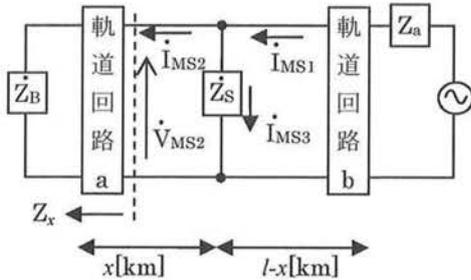


図 4 列車短絡の簡略化したモデル

$$\dot{Z}_S = \frac{\dot{Z}_x \cdot i_{MS1}}{i_{MS1} - i_{MS2}} \quad (5)$$

\dot{Z}_x は軌道回路 a(図 5 参照)への入力インピーダンスで軌道回路の一次定数及び先述した漏れコンダクタンス G の推定値と受信端側インピーダンスボンドのインピーダンス \dot{Z}_B 及び軌道回路長により計算が可能で(6)式で表現できる。

$$\dot{Z}_S = \dot{Z}_K \frac{\dot{Z}_B \cosh \dot{\gamma} x + \dot{Z}_K \sinh \dot{\gamma} x}{\dot{Z}_B \sinh \dot{\gamma} x + \dot{Z}_K \cosh \dot{\gamma} x} \cdot \frac{i_{MS1}}{i_{MS1} - i_{MS2}} \quad (6)$$

\dot{Z}_B は事前に調査可能であり、 \dot{Z}_K 及び $\dot{\gamma}$ は<3.2>節の手法により推定可能であるため、(6)式により短絡抵抗の推定が可能である。

〈3.4〉軌道リレー電圧を観点とした短絡減衰量の推定

残留電圧を車上から直接監視することはできないので、受信端解放時のレール電流 (以下、平常電流) と残留電流

の比から短絡減衰量を求め、短絡状態を監視する方法について述べる。受信側のレール電流がトランス等を介して軌道リレーに入力されるため、レール電流と軌道リレー電圧の間には比例関係があると推察される。図 2 の状態①で、受信側のレール電流 I_{RO} を前方受電器で測定する。この時の軌道リレー電圧(平常電圧)を V_{RO} とする。次に、図 2 の状態③で軌道回路中間での残留電流 I_{MS2} を後方受電器で測定する。しかし、レール電流は、軌道回路受信端までの距離に応じて減衰するので、ここで減衰率 d を定義する。 d は、短絡点から受信端までの距離 x 及び漏れコンダクタンスの値によって変化する電流の減衰比であり、図 3 の i_1 、 i_2 を用いて(7)式で表現できる。

$$d = \frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{\cosh \dot{\gamma} x + \frac{\dot{Z}_e}{\dot{Z}_K} \sinh \dot{\gamma} x} \quad (7)$$

この d を乗じた dI_2 が受信端での残留電流である。このときの軌道リレー電圧を V_{MS2} とする。 V_{RO} 、 V_{MS2} は比例定数 k を用いて(8)、(9)式で表現できる。

$$V_{RO} = kI_{RO} \quad (8)$$

$$V_{MS2} = kdI_{MS2} \quad (9)$$

一般的には、残留電圧 (V_{MS2}) の最大値は、安全率 2 倍を見込み、軌道リレーの落下電圧の 50%以下と保守基準で定められている場合が多い。ここで例として駅中間の商用軌道回路等で用いられる 2 元 3 位式軌道リレー (AC50/60-3) を取り上げる。その動作特性は、最大落下電圧が 0.225[V] 以上、最小動作電圧が 0.6[V]以下と定められている。この軌道リレーを用いた軌道回路の残留電圧の保守上の許容範囲は、 $V_{MS2} \leq 0.225/2$ [V]である。一方で、軌道リレーの平常電圧(非在線時の軌道リレー電圧) V_{RO} は、50[Hz]の場合 0.75[V]が定格である。一般には、漏れコンダクタンスの変動等の余裕を見込み、0.8~1.0[V]程度に調整されている場合が多い。

平常電圧が 1.0[V]に調整される場合、(8)、(9)式からレール電流比をとると(10)式のように表現できる。

$$\begin{aligned} \frac{I_{MS2}}{I_{RO}} &= \frac{1}{d} \cdot \frac{V_{MS2}}{V_{RO}} \\ &\leq \frac{1}{d} \cdot \frac{\text{最大落下電圧}}{\text{平常電圧}} = \frac{1}{d} \cdot \frac{0.225}{1.0} \end{aligned} \quad (10)$$

平常状態でのレール電流及び短絡時の残留電流比と (10) 式の不等号の右辺の値を比較することにより、残留電圧が保守基準に収まることの判定が可能である。

4. 疑似軌道回路による試験結果

〈4.1〉試験装置の構成

疑似軌道回路を用いて、〈3.3〉節で示した短絡抵抗の推定、図 6 で示したレール電流と軌道リレー電圧の関係、〈3.4〉節で示した残留電圧の推定について確認を行ったので、結果について報告する。疑似軌道回路を用いて商用軌道回路を

構成する。各定数は表 2 のように設定した。軌道リレー (AC50/60-3)型を使用した。

表 2 軌道回路定数と他の定数

軌道回路長 l	1.0 [km]
限流抵抗	0.3 [Ω]
R	0.4 [Ω /km]
L	2.0 [μ H/km]
C	3.0 [μ F/km]

〈4・2〉短絡抵抗の測定

漏れコンダクタンス G は、晴れ、雨のときをそれぞれ想定し、0.01[S/km], 0.3[S/km]とした。また、短絡点は送信端から①200[m], ②1000[m]の 2 か所である。短絡抵抗の設定値は、0.00[Ω], 0.06[Ω], 0.10[Ω], 0.20[Ω], 0.40[Ω], 0.60[Ω], 1.00[Ω]とした。この条件のもと、短絡前の送信側電流及び短絡後の受信側電流(残留電流), 短絡電流, レール間電圧を基準とした受信端側電流及び送信端側の電流との位相差を測定した。実際の短絡抵抗と(6)式より算出した短絡抵抗の比較を行った。ただし、(6)式の Z_x については、レール間電圧及びレール電流の実測値により算出を行った。表 3 に、実際の短絡抵抗と(6)式による短絡抵抗及び誤差率を示す。平均誤差率は、0.57[%]であった。

表 3 短絡抵抗の算出

短絡抵抗[Ω]	算出した短絡抵抗[Ω]	誤差率[%]
0.0022	0.0022	-0.834
0.0643	0.0636	1.024
0.1058	0.1063	-0.447
0.2075	0.2080	-0.241
0.4100	0.4085	0.388
0.6071	0.6071	0.015
1.0103	1.0137	-0.334

〈4・3〉残留電圧の推定

まず、〈3.4〉節で述べた、レール電流と軌道リレー電圧が比例関係になっていることの確認を行った。送信端から 200m の位置で短絡し、漏れが 0.01[S/km]での結果を図 5 に示す。図 5 より、軌道リレー電圧が受信端のレール電流に比例することが確認できた。次に、短絡抵抗の変化に伴う、軌道リレー電圧及び平常電流と残留電流の比の変化を図 6 に示す。この条件で(10)式により計算したレール電流比の保守上の許容範囲は 0.157 以下であった。レール電流比が 0.157 となる点をグラフから読み取ると、その時の短絡抵抗は 0.064[Ω]であった。この時の、軌道リレー電圧は 0.13[V]であり、最大落下電圧の概ね 1/2 に相当している。したがって、受電器で測定した電流値を(10)式に適用することにより、保守基準の判定が可能である。

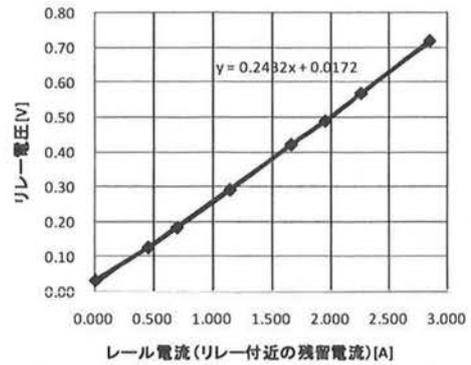


図 5 レール電流とリレー電圧の関係

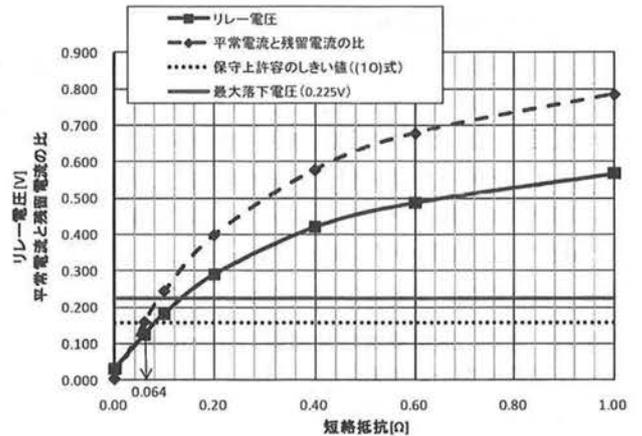


図 6 短絡抵抗と通常電流と残留電流の比及びリレー電圧の関係

6. おわりに

軌道回路について、安全性・保全性の向上を観点とした車上計測技術の手法を検討した。車両の前後に設備した受電器により、短絡抵抗、漏れコンダクタンスの変動、残留電圧を推定するための手法を提案し、疑似軌道回路による試験を行った。方法として、送信端のレール電流及び受信端短絡時の受信端の電流から漏れコンダクタンスを推定し、軌道回路中間での送信側及び受信側のレール電流から短絡抵抗を推定する手法、さらに送信端のレール電流及び残留電流比によって残留電圧を推定する手法を考えた。試験結果から短絡抵抗及び残留電圧の推定が可能との見通しを得た。

今後、今回の提案式の理論的な裏付けを検証するため四端子定数を用いた軌道回路シミュレーションによりその妥当性を検討していきたい。

文 献

(1) 中村英夫:「ブローブ車両用信号設備計測技術の開発」, JREA, Vol.50, No.9 pp.32734 (2007)
 (2) 板倉栄治:「軌道回路」, 信号技術シリーズ No.4, pp.278-303 (1982)