

車輪・レール接触状態に基づく短絡抵抗推定手法

遠山 喬* 福田 光芳** 大和田 厚祐***
 寺田 夏樹* 原 智昭* 本多 秀行*

**Methods for Estimation of Train Shunt Resistances
 Based on the Condition of Wheel-Rail Contact**

Takashi TOYAMA Mitsuyoshi FUKUDA Kosuke OWADA
 Natsuki TERADA Tomoaki HARA Hideyuki HONDA

Track circuits based on an electrical shunting principle are widely used to detect the presence of a train within a particular track section. Therefore, it is important to quantitatively estimate the train shunt resistances in order to detect trains exactly. It has been revealed that the resistances can change under the various conditions of wheel-rail contact. In this paper, we propose two methods for their estimation. The one is based on the voltage saturation characteristics which reflect the condition of wheel-rail contact. The other uses an equivalent electric circuit which represents the contact resistances.

キーワード：軌道回路，短絡不良，車輪・レール接触，接触抵抗，短絡抵抗

1. はじめに

確実な列車検知は，運転保安の確保に必須の技術である。現状では，列車検知技術として，実績のある軌道回路が広く利用されている。しかし，軌道回路には，レール表面に生じたさび等の影響により，短絡不良が発生するという問題が存在する。確実な列車検知のためには，短絡抵抗を定量的に推定できることが重要である。短絡抵抗は，車輪やレールの表面状態等，車輪・レール接触の条件によって様々に変化することが知られており，各条件の影響の定量化を試みてきた¹⁾。しかし，これまで，複数の条件が同時に変化する場合，短絡抵抗の変化を定量的に評価することができなかった。

この課題に対処するため，まず，軌道短絡現象の理解の深度化を図った。そして，得られた知見を活用し，短絡抵抗の定量的な評価を実現する，短絡抵抗推定手法について検討を行った。本報告では，短絡抵抗推定手法を2つ紹介する。

2. 軌道短絡現象の概要

2.1 軌道回路と短絡不良

軌道回路とは，ある区間のレールを電気回路の一部と

* 信号・情報技術研究部 信号システム研究室
 ** 信号・情報技術研究部 列車制御研究室
 *** 信号・情報技術研究部 信号システム研究室
 (現 株式会社京三製作所)

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。図1に軌道回路の概念図を示す。

軌道回路は，その原理から短絡不良の問題が存在する。短絡不良の抜本的対策の例としては，軌道回路を用いない列車制御システムが挙げられる。特に，車上位置検知技術と無線通信技術を組み合わせた列車制御システムは，今後，導入が進むと予想される。しかし，軌道回路は，その実績や機器構成の簡素さ等に優位性を持つことから，当面利用が継続されるものと考えられる。ゆえに，短絡不良は目下の課題となっている。

2.2 車輪・レール接触状態

車輪とレールの接触状態は，様々な要因によって変化する。それら要因は，車輪やレールの表面状態といった静的な材料・幾何的な条件と，レール上を車輪がどのように転動するかという力学的条件，そして軌道回路の信

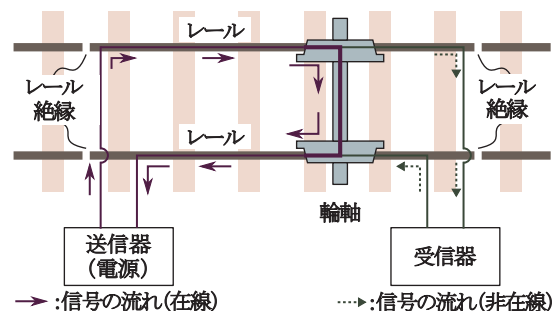


図1 軌道回路の概念図

特集：信号通信・運輸

号電流の大きさや周波数および帰線電流の大きさといった電氣的条件に分類することができる。

各条件が車輪とレール間の接触抵抗に与える影響として、これまでの研究¹⁾ から以下のことがわかっている。

- (1) さびが薄いほど接触抵抗が小さい
- (2) 車輪踏面の表面粗さが粗いほど接触抵抗が小さい
- (3) 電流が大きいほど接触抵抗が小さい
- (4) 輪重が大きいほど接触抵抗が小さい
- (5) 電流の周波数の影響は顕著には見られない

3. 現象理解の深度化

3.1 接触状態測定技術の拡充

軌道短絡現象の理解を深めるため、測定技術の拡充を行った^{2) 3)}。これまでは、営業路線のレールの表面状態は、膜厚、表面粗さ、外観しか観測が行えず、現象理解の障害となっていた。そこで、可搬式のレール表面状態測定装置を開発した。図2に外観を、図3に構成を示す。

レール表面状態測定装置は、車輪を転がり接触させながら、車輪・レール間に交流電流を流し、接触部の電圧

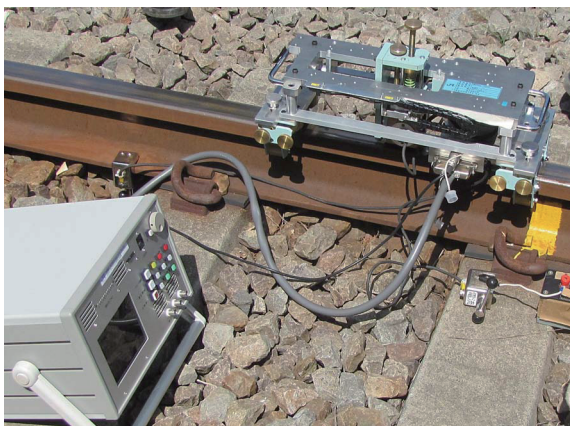


図2 レール表面状態測定装置の外観

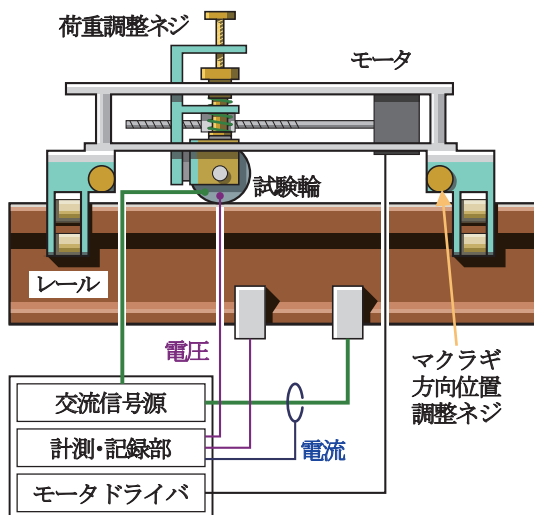


図3 レール表面状態測定装置の構成

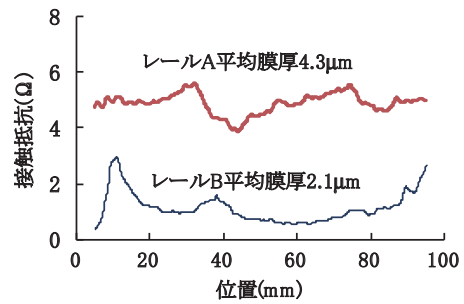


図4 レール表面状態測定装置による測定例

と電流を測定することができる。図4に、さびの膜厚が異なる2本のレールについて、レール表面状態測定装置により接触抵抗を測定した例を示す。図4では、膜厚の大きいレールAの方が、接触抵抗が大きかった。もともと、レール表面状態測定装置は、その可搬性ゆえに、車輪形状や荷重が実車と異なり、測定される接触抵抗の値は実車と一致しない。しかし、図4が示すように、接触抵抗の相対評価には利用可能である。また、レール表面状態測定装置の測定データには、接触抵抗以外にも現象理解や短絡抵抗推定に有用な情報が含まれる。

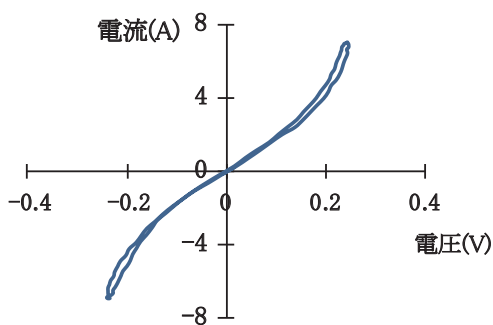
3.2 飽和電圧に関する知見

車輪・レール間に、絶縁性の高い酸化皮膜が介在する場合を除き、一般に、接触抵抗は、電流を大きくすると電圧が飽和する半導体皮膜特性を有することが知られている⁴⁾。飽和した際の電圧の大きさは、多くの模型実験において、実効値で0.23 V程度、瞬時値では0.3～0.4 V程度となっている^{1) 5) 6)}。レール表面状態測定装置による測定では、より高い電圧となる傾向があるものの、瞬時値で0.4～0.5 Vである。車両による接触は左右の車輪で生じるため、左右レール間の電圧に相当する軌道回路の残留電圧としては、この値は2倍の1 V弱に換算される。これは、実設備における知見⁷⁾ と合致する。

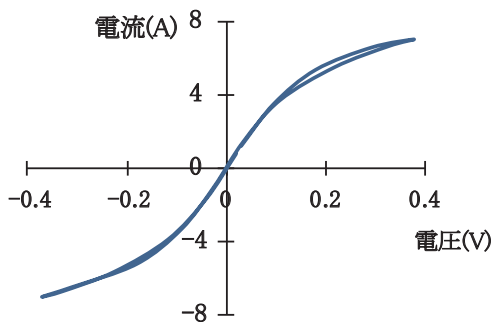
飽和電圧の大きさは、さびの膜厚等の条件を変化させてもほぼ一定の値をとる。ゆえに、皮膜や車輪・レール材料の物性が飽和電圧の大きさの決定要因である可能性がある。原理の解明には至っていないが、飽和電圧の大きさが一定値となる理由について、金属-半導体接触でのフェルミ準位ピンニングによる説明を試みている⁸⁾。また、文献6) では、ブランリー効果との関係性、および、多くの場合に飽和電圧が軟化電圧に一致する事実について言及している。これら飽和電圧の大きさの物理的意味の追求が、軌道短絡現象の解明に貢献すると考えている。

3.3 トランジスタ特性の確認

これまで、半導体皮膜の特性は、電流を大きくしても電圧が変わらない、一般的な接合ダイオードに類似した



(a) ダイオード特性の例



(b) トランジスタ特性の例

図5 接触抵抗のI-V曲線

特性であると考えられてきた。しかし、電圧・電流の瞬時値波形を精緻に観察した結果、電圧を大きくしても電流が変わらない、トランジスタに類似した特性を示す波形も確認された。これら特性は、電圧の瞬時値を横軸、電流の瞬時値を縦軸にプロットした曲線(以下、I-V曲線)により、その特徴が確認できる。図5にダイオード特性とトランジスタ特性の代表的なI-V曲線を示す。

ダイオード特性とトランジスタ特性のどちらが強く現れるかについては、レール上の接触位置との相関が確認された。これは、少なくともレールの表面状態がI-V曲線の形状に影響を与えていることを意味する。

この車輪・レール接触抵抗の特徴的なI-V曲線は、レール表面状態測定装置によっても観測可能である。

3.4 不可逆的变化の確認

車輪を静止させた状態で、車輪・レール間に流す電流の大きさを変化させたところ、接触抵抗が不可逆的に低下する現象を確認した⁹⁾。図6に観測例を示す。不可逆的变化は必ず観測されるものではない。レールの表面が化学的あるいは機械的に不安定な場合に観測されると推測する。接触抵抗が低下する理由としては、通電によるさびの電気化学的变化、ジュール熱によるさびの変化が考えられる。

また、同一のレールに対し、車輪の転がり接触を繰り返した場合、電流が小さい領域で接触抵抗が不可逆的に大きくなる例を観測した⁹⁾。図7に観測例を示す。これ

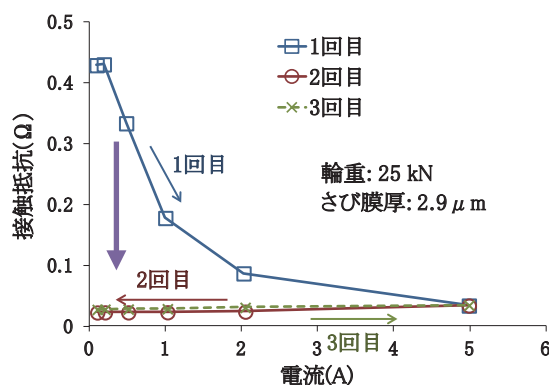


図6 静的接触での接触抵抗の不可逆的減少

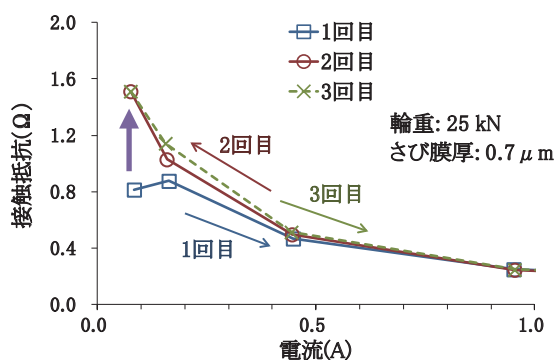


図7 転がり接触での接触抵抗の不可逆的増加

は通電の影響だけでなく、レールと車輪間の機械的・力学的な影響も受けた結果と考えられる。

これら接触抵抗の不可逆的变化は、力学的な条件が同一であっても、列車の先頭軸とそれ以外の車軸で、接触状態が異なる場合が存在することを示唆している。これは軌道回路への列車進入時に問題となりうる。逆に、複数の車軸が通過すれば、不可逆変化は収束する可能性もある。これらは短絡抵抗の推定で留意が必要である。

4. 短絡抵抗推定手法の提案

4.1 飽和特性に基づく推定手法

4.1.1 基本方針

軌道回路において短絡状態の良否は、短絡抵抗や残留電圧といった指標で評価される。しかし、短絡抵抗や残留電圧の値は、接触状態に影響を与える様々な要因により変化する。特に複数の条件が同時に変化する場合、短絡抵抗の変化を定量的に評価することが困難であった。そこで、様々な条件において適用可能な、接触状態を特徴づける共通の指標を導入することとした。指標の導入にあたっては、電流を大きくすると電圧が飽和する半導体皮膜特性に着目し、飽和の程度を飽和定数として定義した。飽和定数で接触状態の良否を扱い、軌道回路計算と組み合わせることで列車短絡抵抗を推定する。

4.1.2 飽和定数

多くの場合に車輪・レール接触部が有する電圧飽和特性を、電圧 v 、電流 i を用いて次式で表現する。

$$v = V_{\text{sat}} \{1 - \exp(-i/I_{\text{sat}})\} \quad (1)$$

ここで、 V_{sat} は飽和電圧であり、 I_{sat} が指標として導入する飽和定数である。いずれの物理量も実効値を適用する。 V_{sat} の値は、3.2 節で述べた知見から、0.23 V とする。

式 (1) の物理的意味については追究しておらず、実際には、式 (1) では十分に説明できない実測値も存在する。しかし、統一かつ機械的に適用可能な近似式は、工学的観点において有益と考える。

実測値から I_{sat} を抽出するには、実測値に対し、最小二乗法等を用いて式 (1) のフィッティングを行えばよい。また、実測値が式 (1) に従うならば、 I_{sat} は、電圧が V_{sat} の約 63% (= 0.14 V) となるときの電流として簡易に概算可能である。

図 8 に、さびの膜厚と輪重の両方が異なる条件の実測値から、 I_{sat} を抽出した結果を示す。点のプロットが実測値、実線および破線がフィッティングによって得られた式 (1) の曲線である。図 8 では、さび膜厚 0.7 μm 、輪重 25 kN の条件の実測データの方が、低い電流値で電圧が飽和している。その特徴が I_{sat} の小ささによって表現されていることが確認できる。

表 1 に、レール表面のさびの厚さと輪重を変化させた場合の I_{sat} の変化の例を示す。表 1 では、さびが薄いほど、また、輪重が大きいほど、 I_{sat} が大きくなっている。表 2 は、車輪表面粗さと輪重を変化させた場合の I_{sat} の変化の例を示したものである。表 2 では、車輪表面が粗いほど、また、輪重が大きいほど、 I_{sat} が大きくなっている。

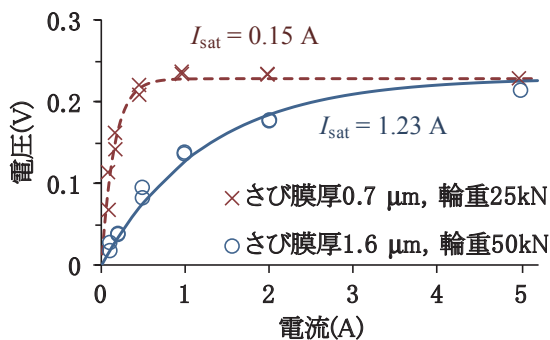


図 8 飽和定数 I_{sat} の抽出例

表 1 さび膜厚と輪重に対する飽和定数 I_{sat} の変化

さび膜厚	輪重	
	25 kN	50 kN
2.9 μm	0.0 A	0.1 A
1.6 μm	0.2 A	1.2 A
0.7 μm	0.2 A	1.5 A

表 2 表面粗さと輪重に対する飽和定数 I_{sat} の変化

表面粗さ	輪重		
	15 kN	25 kN	50 kN
Ra = 0.29 μm	3.1 A	10 A	40 A
Ra = 1.1 μm	6.5 A	19 A	63 A
Ra = 3.7 μm	20 A	49 A	85 A

この結果は、 I_{sat} が大きいほど「接触状態が良好である」と見なすと、過去の知見と合致する。

このように、飽和定数 I_{sat} は「接触状態の良さ」を示す、順序尺度として用いることができる。

4.1.3 短絡抵抗推定の手順

列車短絡抵抗の推定を行うには、まず、飽和定数 I_{sat} を実測から算出、あるいは過去の模型実験等のデータから推定を行う。ここで、 I_{sat} が示すのは「接触状態の良さ」であり、短絡抵抗の大小は、車輪・レール接触部の印加電圧・電流との関係によって決定される。

接触部の電圧・電流は、軌道回路の計算により求められる。軌道回路の計算は、4 端子回路 (2 端子対回路) によるシミュレーションで実現できる^{10) 11)}。これを用いて、列車短絡抵抗を変化させたときの、短絡位置のレール間電圧の対応を求める。

次に、式 (1) に基づき、列車短絡抵抗と電圧の関係を求める。列車には複数の車軸があり、各車軸には 2 つの車輪がある。低周波軌道回路を前提に、車輪・車軸、および車軸間のレールのインピーダンスが無視できるとし、すべての車輪が同一の接触抵抗であると仮定した場合、列車短絡抵抗 r_{train} とレール間電圧 v_{track} の関係は、1 つの車軸に流れる電流を媒介変数として、次式で示される。

$$\begin{cases} r_{\text{train}} = \frac{2V_{\text{sat}}}{n_{\text{axle}} \cdot i} \{1 - \exp(-i/I_{\text{sat}})\} \\ v_{\text{track}} = 2V_{\text{sat}} \{1 - \exp(-i/I_{\text{sat}})\} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 n_{axle} は列車の車軸数である。

軌道回路計算の結果と式 (2) の曲線をプロットしたとき、両者の交点が列車短絡抵抗の推定値となる。

図 9 に推定の例を示す。図 9 の点線は、例示用に定数や構成を仮定した商用周波数軌道回路の計算結果である。図 9 の実線は式 (2) の曲線である。ここでは、 $n_{\text{axle}} = 8$ とし、 I_{sat} は 0.1 ~ 10 A の範囲から 9 つ選択している。図 9 より、例えば、接触状態が $I_{\text{sat}} = 2\text{A}$ で表される条件における列車短絡抵抗は、約 24 m Ω であると推定できる。また、図 9 から、列車短絡抵抗を 0.06 Ω 以下にするためには、 I_{sat} はおおよそ 1 A 以上なければならないことも読み取れる。

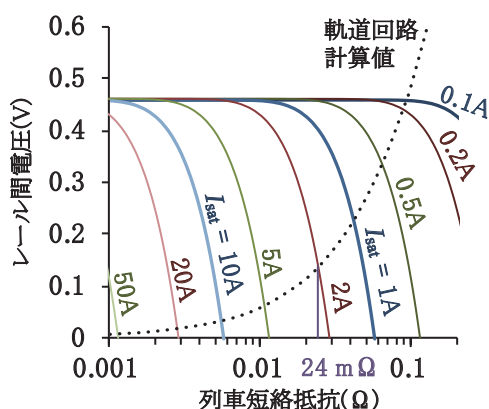


図9 飽和定数による短絡抵抗の推定例

4.2 電気回路モデルに基づく推定手法

4.2.1 基本方針

接触抵抗のI-V曲線は、接触条件に応じて、ダイオード特性、トランジスタ特性といった、特徴的な形状となることがわかった。そこで、I-V曲線を電気回路でモデル化し、モデルのパラメータによって接触状態の定量化を行う。抽出されたパラメータをモデルに適用し、電気回路シミュレーションにより列車短絡抵抗を求める。

4.2.2 接触抵抗のモデル化

接触抵抗のI-V曲線が、原点について対称となる特徴に着目し、電圧・電流が共に正の領域について、電気回路によるモデル化を行った⁵⁾。図10に等価回路を示す。

図10の回路構成より、

$$i = i_{\text{diode}} + i_{DS} \quad (3)$$

$$v = v_{DS} - v_{GS} = v_{DS} + i_{DS} \cdot r_s \quad (4)$$

である。

ダイオードを流れる電流と電圧の関係には、以下のShockleyのダイオード方程式¹²⁾を適用する。

$$i_{\text{diode}} = I_s \{ \exp(v/nV_T) - 1 \} \quad (5)$$

一方、線形領域におけるFETに流れる電流と電圧の関係には、以下の経験式¹²⁾を適用する。

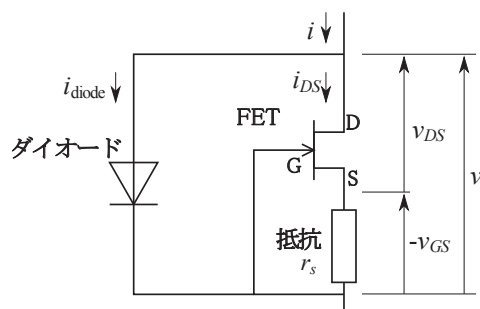


図10 接触抵抗の等価回路

$$i_{DS} = \frac{I_{DSS}}{V_p^2} \{ 2(v_{GS} - V_p) v_{DS} - v_{DS}^2 \} \quad (6)$$

なお、飽和領域における電流は、以下となる。

$$i_{DS} = \frac{I_{DSS}}{V_p^2} (v_{GS} - V_p)^2 \quad (7)$$

式(3)～(7)の方程式系を、 $r_s, I_s, nV_T, I_{DSS}, V_p$ を定数(モデルパラメータ)として解くことで、接触抵抗の電圧と電流の関係が導ける。

4.2.3 短絡抵抗推定の手順

電気回路モデルに基づく短絡抵抗の推定手法においては、モデルパラメータの選定が要となる。しかし、接触状態とモデルパラメータとの関係は、解明途上である。以下に、現状の知見⁵⁾をまとめる。

- (1) r_s は、レール上の接触位置で変化する
- (2) r_s 以外は、接触状態が大きく変化しなければ一定である
- (3) V_p は、接触状態によらず $-0.4 \sim -0.3$ Vである
- (4) I_{DSS} は、接触部を流れる電流の振幅と正の相関がある

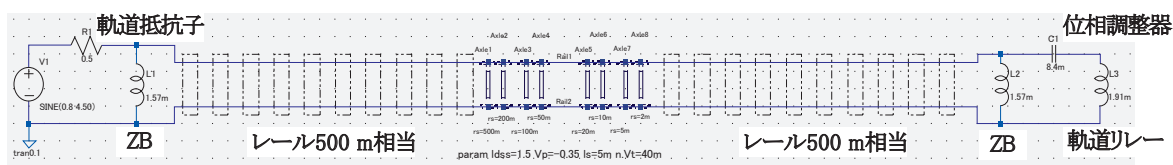
これら知見を活用することで、パラメータの値の範囲を限定することができる。最終的には、過去の実測I-V曲線とのフィッティングによりパラメータを抽出する。これは、類似する接触条件であれば、パラメータの値も類似するという仮定に基づく。パラメータの抽出においては、レール表面状態測定装置で測定されたI-V曲線の情報も、部分的に活用可能である。一例として、 r_s がどのような分布に従って変動するかは、レール表面状態測定装置の測定データから知ることが可能である。また、パラメータの値を限定せずとも、モンテカルロシミュレーションを実施することで、短絡抵抗の変動範囲を評価する、あるいは最尤推定を行うことが可能である。

モデルパラメータが定まれば、列車短絡抵抗は電気回路シミュレーションにより求められる。ただし、提案電気回路モデルは、非線形素子を用いている。このため、線形回路を前提とした4端子回路による軌道回路の計算は、そのままでは適用できない。計算を行う実際的な手段として、SPICE等の汎用電気回路シミュレータの過渡解析機能を利用する方法が挙げられる。

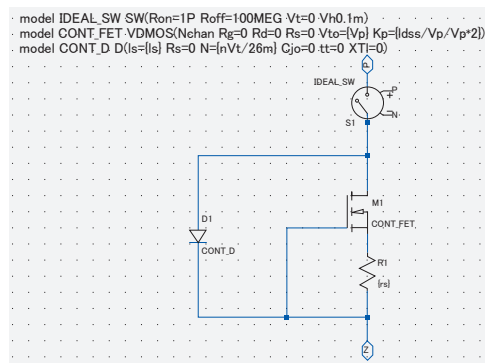
図11に汎用電気回路シミュレータLTspice¹³⁾によるシミュレーションの例を示す。図11(c)は、異なる r_s を設定した8つの車軸のI-V曲線を、過渡解析によって求めたものである。I-V曲線がダイオード特性を再現していることが確認できる。列車短絡抵抗は、短絡箇所のレール間電圧を、各車軸の電流の総和で除することで求まる。図11の例では、列車短絡抵抗は約40 mΩであった。

4.3 提案推定手法の比較

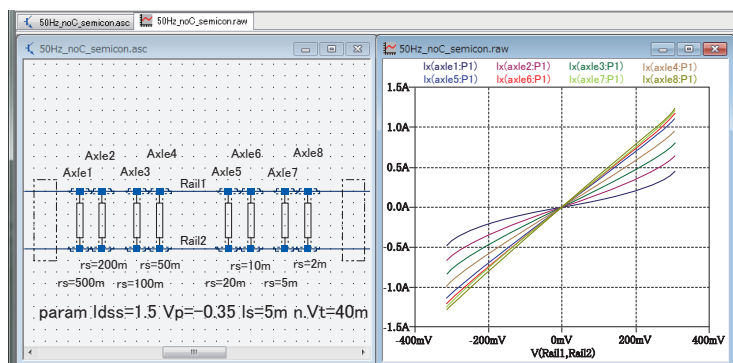
提案した2つの推定手法は、車輪・レール接触の複雑



(a) 軌道回路の回路図



(b) 接触抵抗の回路図



(c) 各軸のI-V曲線の表示画面

図 11 LTspice によるシミュレーション例

な状態を扱うために、飽和定数やモデルパラメータという中間表現を導入しているという点が共通している。これにより、複数の条件が変化する場合の定量評価に対応している。

飽和特性に基づく推定手法では、式(1)にて大胆な近似を行っているため、推定値の精度は高くない。その反面、飽和定数の選定は比較的容易であり、様々な接触状態を統一的に扱える柔軟性を持つ。

電気回路モデルに基づく推定手法では、より精緻な検討を行うことが可能である。その反面、パラメータの抽出に労力と技術を要すること、接触状態が大きく変動する場合に追従できない(信憑性が低下する)ことが課題として挙げられる。

2つの手法の特徴には、相補的な関係が存在する。目的に合わせて手法を使い分けることが有益である。

5. おわりに

車輪・レール接触状態を考慮した短絡抵抗推定手法について検討を行った。そして、飽和特性に基づく推定手法、および電気回路モデルに基づく推定手法を提案した。これら手法を用いることで、接触状態に影響する複数の条件が変化する場合においても、短絡抵抗の定量的な評価が可能である。ただし、それぞれに実用上の課題は残っている。また、短絡抵抗の定量評価技術は重要な道具であるが、短絡不良を解消するものではない。評価技術の効果的な活用方法について検討を進め、短絡不良問題の解決に努めたい。

文献

- 1) 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
- 2) 福田光芳ほか: 軌道短絡現象解明のためのレール表面状態の評価方法の検討, J-Rail 2011 講演論文集, pp.203-206, 2011
- 3) 福田光芳ほか: レールと車輪の電気的接触抵抗に関する研究, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.111, No.438, pp.31-36, 2012
- 4) 高重哲夫: 軌道回路のはなし(その13), 信号保安, Vol.39, No.12, pp.663-666, 1984
- 5) 遠山喬ほか: レールと車輪間の電気的接触抵抗が有する半導体特性のモデル化, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.112, No.184, pp.157-162, 2012
- 6) F. Houzé et al., "Electrical Behaviour of the Wheel-rail Contact," presented at the ICEC-ICREPEC2012, Beijing, China, May 14-17, 2012, No.4.1.
- 7) 高重哲夫: 軌道回路のはなし(その14), 信号保安, Vol.40, No.1, pp.25-27, 1985
- 8) 遠山喬: 2次元デバイスシミュレータを用いた車輪・レール接触部の微細構造の推定, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.113, No.96, pp.49-54, 2013
- 9) 大和田厚祐ほか: 車輪通過の繰り返しや通電によるレールと車輪間の接触抵抗への影響, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料, TER-12-031, 2012
- 10) 板倉栄治: パソコンによる軌道回路のシミュレーション, 日本鉄道電気技術協会, 2000
- 11) 高重哲夫: 軌道回路(9), 鉄道と電気技術, Vol.10, No.12, pp.54-57, 1999
- 12) R.C. Jaeger, T.N. Blalock, *Microelectronic Circuit Design (fourth ed.)*, McGraw-Hill, 2010.
- 13) Linear Technology, "LTspice IV Getting Started Guide," <http://cds.linear.com/docs/en/ltspice/LTspiceGettingStarted-Guide.pdf> (2014年1月6日閲覧)