

軌道回路の短絡不良要因と改善手法

福田 光芳* 板垣 朋範** 寺田 夏樹*

A Study of Quantifying and Reducing Electric Resistances between Rail and Wheel

Mitsuyoshi FUKUDA Tomonori ITAGAKI Natsuki TERADA

When rails become rusty, the shunt resistance becomes higher making it difficult for the track circuit to detect a train exactly. This is a problem of the rail-wheel contact system. Generally speaking, the electric resistance varies according to a load of a car, a state of wheel surfaces, a thickness of rust and a magnitude of track circuit currents. However, the relations between these factors and the resistance have not been analyzed. Therefore, we measured and analyzed the state of the electric resistance between rail and wheel for various conditions. In this paper, we describe the result of the test and a concept of new track circuits to prevent shunting malfunction.

キーワード：軌道回路，列車検知性能，残留電圧

1. はじめに

確実な列車検知は運転保安の確保には必須の項目であり、実績のある軌道回路方式が主流となっている。しかし、軌道回路はレールを車輪で短絡させる構成とすることから、錆等による短絡不良が発生しやすいという問題がある。車両の輪重、車輪踏面の表面状態の違い、錆などのレール表面状態などの各種条件が軌道回路の短絡不良に影響を与えることが定性的には知られている^{1)・2)}。しかし、それぞれの要因がどのように関連し、車輪とレール間の接触抵抗に対してどの程度影響を及ぼすかなど、定量的な観点での解明は十分に進んでいない。

そこで、車両の重量、車輪踏面の状態が変化したときのレールと車輪の接触抵抗の変化を調査した。この結果、レール頭頂面の錆の厚さをある値に一定にし、車両の重量、車輪踏面の状態を変化させた場合には、車両の重量が重いほど、また車輪踏面が粗いほど接触抵抗が小さくなるという知見が得られている^{3)・4)}。

これまでの研究では、経験的に得られた各要因の状態をパラメータとして調査を進めていたが、改めて現場環境の調査を実施することとし、異なる線区条件の現場において、実際のレール表面の錆の状況の調査を行った。次に、現場環境の調査で得られた結果をもとに錆の厚さを変化させ、車輪とレール間の接触抵抗の変化を調べるための調査を深度化させた⁵⁾。本論文では、現場環境の

調査結果及び車輪とレール間の接触抵抗の調査結果を報告するとともに、短絡不良対策に関する考え方について述べる。

2. 短絡不良の現状

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。図1に、電化区間の複軌条式商用軌道回路の代表的な構成例を示す。複軌条式とは、左右レールにそれぞれレール絶縁を挿入して区間を分ける方式である。図1で、軌道回路電流は電源から、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、リレーが復旧状態(スイッチOFFの状態)となり、列車在線を検知する。

軌道回路の種類は多岐にわたるが、共通の問題の一つに、レールと車輪の接触問題による短絡不良がある。短

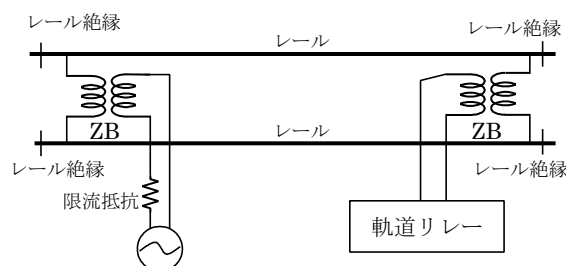


図1 複軌条式商用軌道回路の構成例

* 信号通信技術研究部 (信号)

** (株)京三製作所 開発技術部

元, 信号通信技術研究部 (信号)

特集：信号通信技術

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

前述したとおり、列車によるレール間の短絡状態が良好でない場合は、軌道リレーに入力される信号が十分に減衰しない。そこで、軌道リレーに入力される信号の大きさを監視することにより、短絡の良否を判断できる。この場合の軌道リレーに入力される電圧、または、受信端でのレール間電圧を残留電圧と呼んでいる。

残留電圧の測定例を図2、図3に示す。図2は短絡が良好な状態の測定例である。横軸の5秒のあたりで列車が軌道回路に進入すると同時に残留電圧が小さくなっている。図3は短絡が悪い状態の測定例である。列車は横軸の1秒のあたりで軌道回路に進入しており、一旦は、残留電圧が小さくなるが、12秒のあたりから残留電圧が大きな値を示している。図3の測定時には、軌道リレーは不正に動作することはないが、列車検知に問題はなかったが、残留電圧の大きさがある一定値以上大きくなると、列車が在線するにも関わらず、「列車なし」と誤った判定をしてしまう場合がある。

このような短絡不良の問題を解決するために、これま

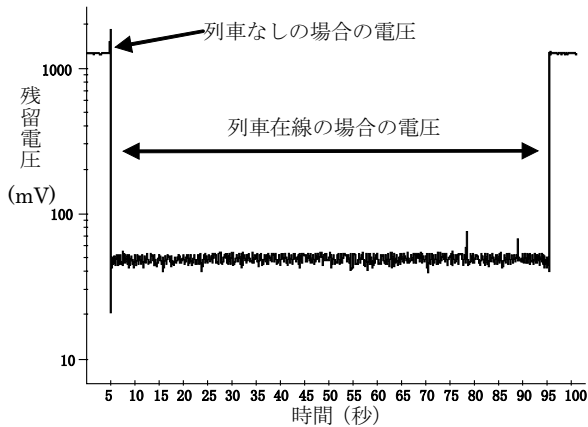


図2 短絡が良好な状態の残留電圧測定例

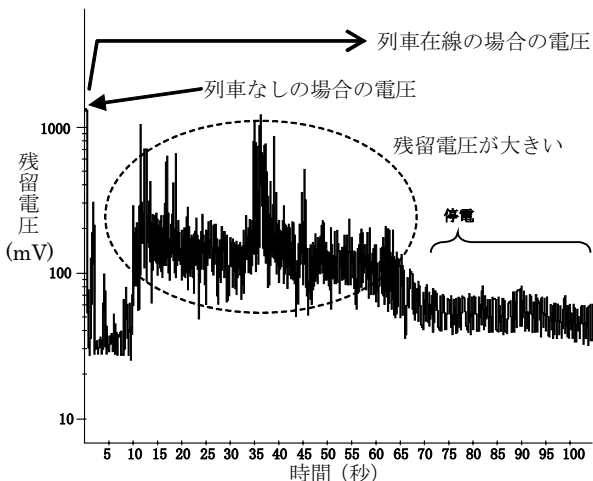


図3 短絡が悪い状態の残留電圧測定例

でも対策が提案されてきており、効果をあげてきているが、それらの対策が有効な条件や範囲は明確となっていない。そこで、短絡不良対策の評価や考案を行うための知見を得ることを目的として、レールと車輪間の短絡抵抗について調査を行った。

3. 実態調査

レールと車輪の接触抵抗に影響を与える主な要因として、レール頭頂面の錆の厚さ、車両踏面の表面粗さ、輪重、軌道回路電流の大きさがあげられる。輪重と軌道回路電流の大きさは、形式等によって定まるので、錆の厚さ及び車輪踏面の表面粗さについて、実際の状態がどの程度であるかを把握するために、複数の線区において調査を行った。

錆の厚さについては、線区の地域（環境）の影響を受けると考え、線区の環境を工業地帯、海岸地帯、田園地帯、山岳地帯に分類して調査を行った。また、線区の列車本数の影響も考慮し、列車本数を2段階に分類して調査を行った。都市部などで列車本数の多い箇所は錆の問題が少ないと考え、列車本数少（1時間あたり2本以下）、中（1時間あたり2～5本程度）の線区を選定した。測定

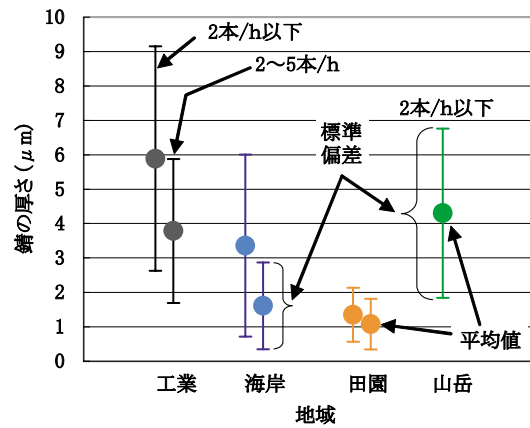


図4 錆の厚さの調査結果

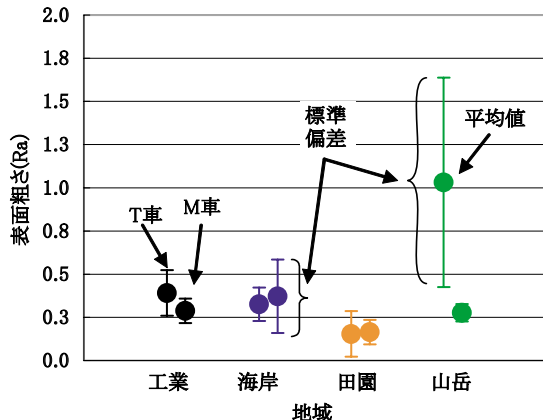


図5 車輪踏面の表面粗さの調査結果

は、それぞれの条件に応じて選定した線区の中で測定箇所を1～2箇所決め、左右のレールについて測定した。1つの測定点について、20回以上の測定（膜厚の読取り）を実施し、最大値と最小値を除いて平均した。測定結果を図4に示す。図4の縦軸は錆の膜の厚さを示している。グラフの丸いマーカーは、各条件の測定値の平均値を示し、縦線は標準偏差を示している。図4より、錆の厚さの平均値は線区により大きく異なり $1\mu\text{m}$ ～ $9\mu\text{m}$ と幅があることがわかった。工業地帯の錆が厚く、田園地帯の錆が薄かった。海岸地帯と山岳地帯は工業地帯に近い結果であった。また、錆の厚い工業地帯では列車本数が少と中の箇所での差が大きいが、錆の薄い田園地帯では列車本数の影響はほとんど見られなかった。また、錆の厚い箇所では錆の厚さのばらつきが大きく、薄い箇所ではばらつきが小さい傾向が見られた。

また、車輪踏面の表面粗さについても、錆の厚さの測定と同じ線区において測定を実施した。測定は車両基地のピット線において、動力車（M車）及び付随車（T車）に分け、JISで規定されたRaについて測定した。Raは算術平均粗さと呼ばれるものである。これは、表面の凹凸の各測定点から平均の高さを求めて平均線とし、この平均線から各測定点までの偏差の絶対値を合計し、平均したものである。Raの測定結果を図5に示す。図5の縦軸は表面粗さのRaの値を示している。グラフの丸いマーカーは、各条件の測定値の平均値を示し、縦線は標準偏差を示している。グラフで山岳地帯のT車の値だけ大きな値を示しているが、地域差によるものではなく、車両種別等のその他の要因に依存していると考えられる。

4. 接触抵抗の定量的評価

4.1 測定方法及び条件

複数の線区における環境調査により、車輪とレールの電気的な接触抵抗に影響する要因の実態の把握を行ったが、実際にこのような状況下において、接触抵抗がどのような値を示すかについて、実験設備を用いて調査を行った。実車と同様の車輪とレールの接触状態を模擬するために「車輪／レール接触往復運動ユニット（以下、試験運動ユニットと呼ぶ）」を用いた。試験運動ユニットは、1つの車輪と1本のレールを任意の荷重をかけながら接触させ、車輪を転がしながら片道50cmの往復運動ができる。試験運動ユニットの概観を図6、車輪とレールの様子を図7に示す。図7を見てわかるとおり、車輪が下側に設置され、上からレールを押し付ける構造になっている。

測定に用いた回路を図8に示す。車輪及びレールにそれぞれ電極を接続し、アンプで増幅した測定用信号を車輪とレールの間に流す。電圧測定は、別の電極を用いて

車輪とレールに接続し、パソコン（PC）でA/D変換して記録する。電圧測定用の電極を別にする事により、電極の接触抵抗の影響を除外した。また、電極をレールの複数箇所に並列に接続することにより、レールのインピーダンスによる誤差を軽減した。

測定は、荷重、電流の大きさ、車輪踏面の表面粗さの条件をその都度変え、車輪とレール間に電流を流しながら



図6 試験運動ユニットの概観



図7 試験運動ユニットのレール及び車輪

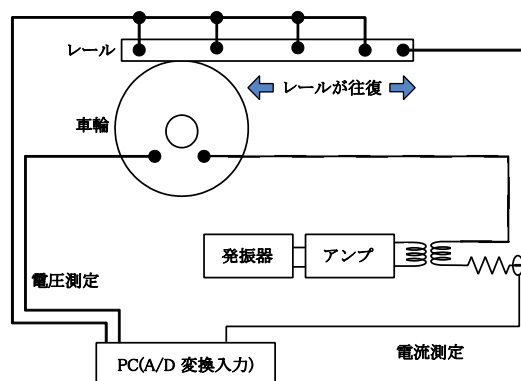


図8 接触抵抗測定回路

特集：信号通信技術

ら往復運動をさせた。その時の電流、車輪とレール間の電圧をデータレコーダに記録し、後に、電流・電圧値を実効値計算して接触抵抗を算出した。

試験条件を表1に示す。表1の値は環境調査の結果を考慮して次のように設定した。

表1 試験条件

要因	状態
鍍の厚さ	1 μm, 3 μm, 7 μm
車輪踏面の表面粗さ	Ra:0.29, 1.1, 3.7
輪重	15kN, 25kN, 50kN
電流の大きさ	0.1A, 0.2A, 0.5A, 1A, 2A, 5A
電流の周波数	60Hz, 1.5kHz

車輪踏面は、レジン制輪子などで滑らかな状態(Ra=0.29)、鋳鉄制輪子などで比較的粗くなった面(Ra=1.1)、削正直後を想定した粗い面(Ra=3.7)について測定した。表面状態の設定は、グラインダ及び紙やすりによって研磨し、表面粗さ計を用いて状態を確認することによって行った。

荷重(輪重)については、比較的重い車両を想定した輪重50kN(4軸の車両の場合は車両重量で約40t)、軽い電車等を想定した25kN(約20t)、保守用車等を想定した15kN(約12t)について測定した。

電流は軌道回路や踏切制御子の信号電流を考慮して0.1A～5Aの範囲で測定を行った。

鍍は厚みや種類の制御が困難であるが、厚さの目標を定め、次に示す方法で鍍を生成し、試験時に鍍の厚さを測定することとした。7 μmの厚い鍍については、風雨にさらされる環境下でレール表面に水がたまらないように傾斜をつけて数日間置くことにより生成させた。また、1 μm及び3 μmの比較的薄い鍍については、室内で霧吹き等を用い、湿潤と乾燥を繰り返すことにより生

成した。

周波数については、低周波軌道回路とAF軌道回路を考慮し、それぞれ代表値として60Hzと1.5kHzの2条件を実施した。

4.2 測定結果及び考察

試験結果の例を図9、図10に示す。図9及び図10は、車輪踏面の表面が滑らかな状態(Ra=0.29)で電流の周波数が60Hzの条件の試験結果である。

図9の点線は高電圧化などの対策を施していない一般的な低周波軌道回路における短絡不良を防止するための片輪の接触抵抗の目安を示している。この点線よりも接触抵抗が大きい場合は、1軸だけでは十分な短絡ができず、短絡不良となる可能性がある。通常は複数の軸で短絡するので、点線より大きい条件でも必ず短絡不良となるわけではない。いずれの条件においても電流を大きくすると接触抵抗は小さくなり、鍍は厚いほど接触抵抗が大きくなる。また、鍍の厚さが1 μmと3 μmの条件では輪重を大きくすると接触抵抗が小さくなるが、7 μmの条件では接触抵抗がほとんど変わらないことがわかる。

また、図10は図9の試験結果について、レールと車輪の間の電圧(電圧降下)を縦軸としてグラフ化したものである。鍍の厚さ7 μmの条件では、電流が1A以上であれば電流を大きくしても電圧が一定となっていることがわかる。これは、従来から言われている車輪とレール間の接触抵抗の半導体特性である。

車輪踏面の表面粗さ及び周波数と接触抵抗の関係の例を図11に示す。図11は、鍍の厚さ3 μmで輪重25kNの条件の試験結果である。これらのグラフより、表面粗さが大きいほど接触抵抗が小さくなることがわかる。

一方で、図11(a)と図11(b)を比較すると、周波数を変えても接触抵抗の大きさは、ほとんど変化しないことがわかる。ただし、60Hzと1500Hzの2条件しか試験して

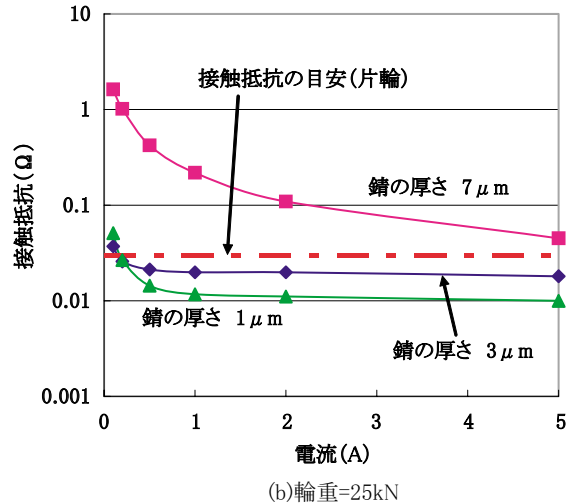
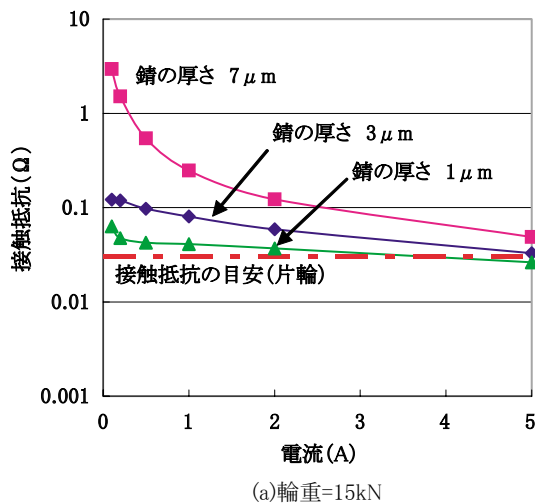


図9 鍍の厚さと接触抵抗の関係の例(表面粗さRa=0.29、周波数60Hz)

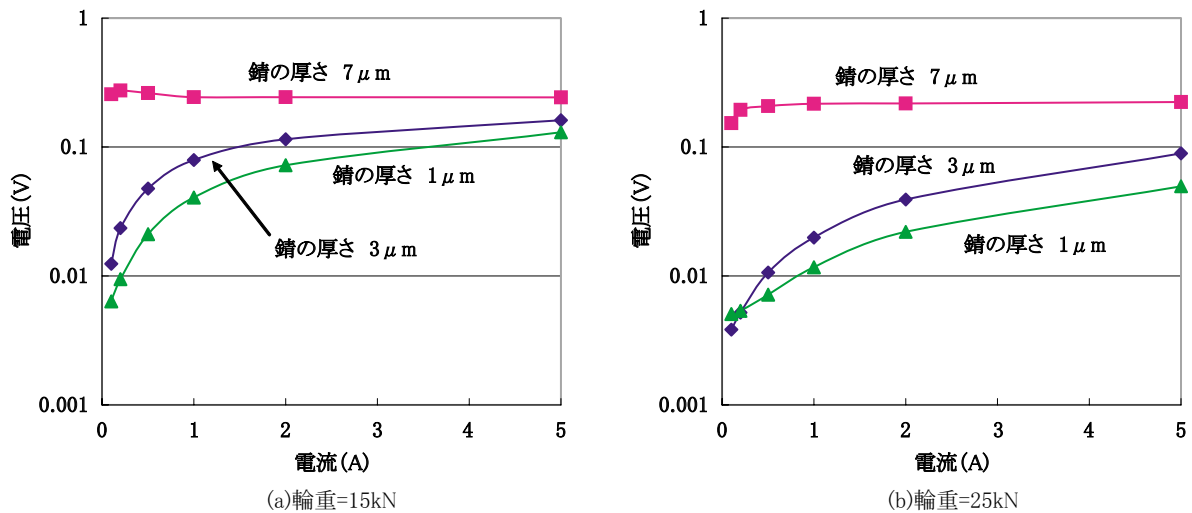


図 10 鍍の厚さと接触部の電圧の関係の例（表面粗さ Ra=0.29、周波数 60Hz）

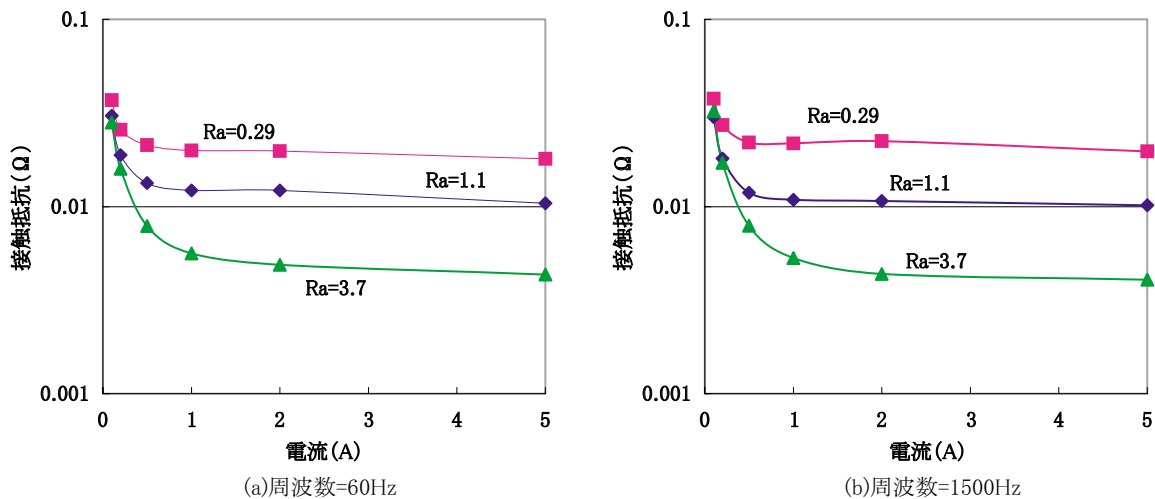


図 11 表面粗さと接触抵抗の関係の例

いないこと、若干の差異があることから、周波数が接触抵抗の大きさに影響を与えないと断定することはできない。今後、周波数の範囲を広げて試験をする必要がある。

これらの結果より、接触抵抗や電圧の傾向として、次のことがいえる。

- ・ 鍍は厚いほど接触抵抗が大きい
- ・ 電流は大きいほど接触抵抗が小さい
- ・ 輪重は大きいほど接触抵抗が小さい
- ・ 車輪踏面の表面粗さは粗いほど接触抵抗が小さい
- ・ 電流を大きくしていても電圧が一定となる領域がある
- ・ 60Hz と 1.5kHz では接触抵抗に大きな差異はない

次に、一般の低周波軌道回路における短絡の状態について考える。図10(a)のように輪重15kNで車輪踏面の表面粗さが滑らかな条件では、比較的薄い鍍の厚さでも、軸数が少なかったり、短絡電流が小さい場合には短絡不良になる可能性がある。ただし、短絡不良防止のための高電圧化の対策を施した場合、約1Vの残留電圧の状態

でも列車検知できる。試験条件の範囲では片輪あたり約0.2V（レール間の残留電圧で約0.4V相当）であったことから、通常的环境下であれば、高電圧化の対策によって、短絡不良が防止できることがわかる。

一方で、半導体特性などについて、わからないことも多い。前述したとおり、図10の鍍の厚さが7 μmの条件において、電流が変化しても電圧が変化しない状態となっており、半導体特性が示されている。グラフの形状だけを見ると、鍍の厚さが1 μmと3 μmのグラフについても、電流を大きくしていくと5A以上の領域で電圧が一定になるように見える。しかし、次のように変化率を比較すると、必ずしもある電圧で一定になるとは断定できない。例えば、2Aから5Aに変化した時の電圧及びインピーダンスの変化率（5Aの条件の値と2Aの条件の値の比）を表2に示す。まず、半導体特性が現れている鍍の厚さ7 μmの条件では、15kNと25kNの両方の条件で電圧が一定でインピーダンスが電流変化と同じ2.5倍

特集：信号通信技術

変化している。

1 μ m の条件では、電圧が 2.2 倍変化して電流と比例関係に近づき、インピーダンスがほとんど変化しなくなっていることから、半導体特性ではなく、通常の導体の特性に近づいているといえる。

表2 2A から 5A に変化した時の比

輪重	錆の厚さ	電圧の比	インピーダンスの比
15kN	1 μ m	1.8	0.7 (1.4)
	7 μ m	1.0	0.4 (2.5)
25kN	1 μ m	2.2	0.9 (1.1)
	7 μ m	1.0	0.4 (2.5)

※インピーダンス比の括弧内は比の逆数

5. 今後の軌道回路の考え方

錆の厚さや車輪踏面の表面粗さ、輪重を決めると、図9のようなグラフが1枚抽出できるので、その条件における電流の大きさと接触抵抗の関係は推定できる。よって特定の線区で、これらの条件がある程度決まっている場合は、短絡不良防止に必要な電流の大きさがわかる。ここでの試験結果より、個々の線区に対して、電流を調整することによる短絡不良対策を講じることが可能となる。

一方、錆が極端に厚い箇所では電流を大きくするだけでは十分な短絡不良防止の効果が得られない。また、既設の設備に対策する場合、大電流を供給する電源を用意することが困難な場合も考えられる。上記の電流を調整する考え方はこれまでの短絡不良防止対策の延長であるが、様々な条件下での短絡不良を防止するためには、電圧や電流などを調整するのではなく、別の観点からの対策が必要と考える。その意味で、今後は、単純な受信レベルの大小だけでなく受信波形を分析したり、軌道回路の受信信号だけでなく他の情報を活用したりして列車検

知の判定を行うような、インテリジェントな方式が必要と考える。

6. まとめ

短絡不良の問題を解決できる軌道回路方式の開発や既設軌道回路の短絡不良対策の評価や考案を行うための知見を得ることを目的として、短絡状態と各要因の関係について調査を行った。軌道回路の短絡状態に影響する要因として、錆の厚さ、車輪踏面の表面粗さ、輪重、信号電流の大きさなどをあげ、各要因が定まった時のレールと車輪の接触抵抗を推定できるようにした。今後は、新しい考え方の軌道回路方式について検討を進めていく予定である。

文献

- 1) 板倉栄治：「軌道回路」, pp.304–pp.316 (社) 信号保安協会 (1971-10)
- 2) 福田光芳, 寺田夏樹, 中島一步, 渡辺郁夫：軌道回路の列車検知性能向上に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.16, No.7, pp.15-20, 2002
- 3) 高橋聖, 原陽一郎, 福田光芳, 寺田夏樹, 渡辺郁夫：「鉄道におけるレールと車輪間の接触抵抗測定実験の効率化に対する検討」, 第17回秋季信頼性シンポジウム発表報文集 (2004-11)
- 4) 福田光芳, 渡辺郁夫, 伴巧, 原陽一郎, 高橋聖：「レールと車輪の電氣的接触抵抗の定量化に関する研究」, 第19回電気学会産業応用部門大会 (2005-8)
- 5) 三田仁士, 板垣朋範, 福田光芳, 伴巧：「レール表面状態の違いによるレール-車輪間の接触抵抗の考察」, 第13回鉄道技術総合シンポジウム J-Rail2006 (2006-12)