

車輪とレールの電気的接触： 軌道回路で列車を確実に検知する



遠山 喬
Takashi Toyama
信号技術研究部
信号システム研究室
副主任研究員

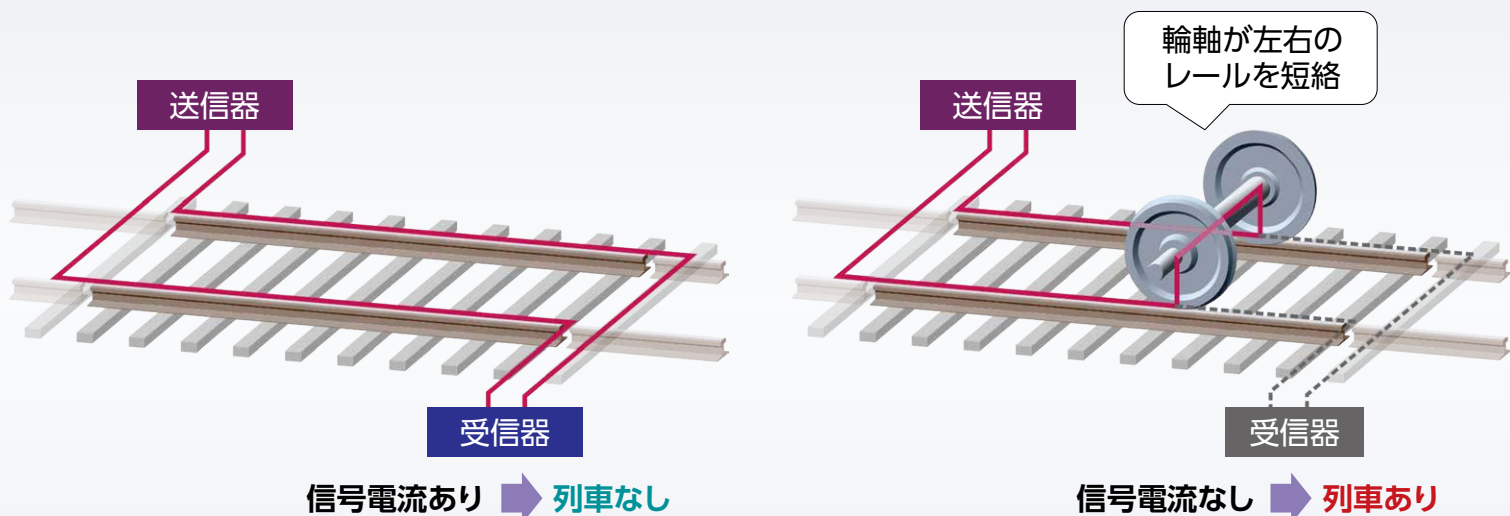
はじめに

鉄道車両は、レールの上を車輪が転がることで走行します。このため、車輪とレールの機械的な接触は、車両の加減速や走行安定性などに影響する重要な要素です。一方で、車輪とレールの電気的な接触も、次の二つの点で重要です。一つは、電車を動かす電流が変電所に戻っていく経路に、レールが利用されている点です。車輪とレールが電気的に接触していなければ、電気が流れず、電車は走行できません。もう一つは、列車がどの区間にいるかを検知する仕組みに利用されている点です。この仕組みは軌道回

路と呼ばれ、左右のレールに流した電流が、車輪と車軸（輪軸）によって電気的に短絡されることで、列車を検知します（図1）。列車の確実な検知は、安全上、極めて重要です。また、軌道回路は信号分野の設備ですが、車両や軌道など電気以外の分野との「境界」に位置する設備でもあります。

ここでは、車輪とレールの電気的な接触状態が列車検知に与える影響について紹介したのち、各分野の情報を融合することによる軌道回路の保全の将来像についても紹介します。

図1 軌道回路の基本原理



軌道回路の特長と課題

軌道回路の原理と特長

軌道回路は、レールに信号電流を流す送信器と、信号電流を検出する受信器で構成されます(図1)。列車が軌道回路の区間に存在しない場合、受信器には常時、信号電流が流れます。一方、列車が軌道回路の区間に入ると、輪軸によって左右のレールが短絡されて、受信器に流れる信号電流が減衰します。この信号電流の変化に基づき、受信器は「列車あり」と判定します。

軌道回路の最大の特長は、**フェールセーフ**性を持っていることです。軌道回路の送受信器やケーブルに故障が発生すると、受信器に信号電流が流れなくなり、「列車あり」と判定されます。この場合、後続の列車に対して赤信号を表示などの制御が行われ、安全性が確保されます。

また、軌道回路は、地上設備のみで列車の有無を検知できるので、車両側に列車検知用の装置が不要です。このため、旅客列車や貨物列車など、さまざまな列車に対応することが可能です。

さらに、軌道回路の信号電流に情報を乗せることで、地上から車上へ情報伝送を行うことも可能です。新幹線などで使われている自動列車

制御装置(ATC)は、軌道回路を利用して列車検知と情報伝送を行っています。

軌道回路の課題

軌道回路はフェールセーフ性を持っていますが、レール表面のさびなどで**列車短絡抵抗**が増加すると、列車がいるにもかかわらず「列車なし」と誤判定してしまう状態となる可能性があります。

また、軌道回路には、雨の影響を受けやすいという課題もあります。これは、左右のレールが完全には絶縁されておらず、まくらぎなどを介して信号電流の一部が漏れていることに起因します(図2)。雨が降ると、この漏れ電流は増加します。漏れ電流が想定以上に大きくなると、受信器に流れる信号電流が不足して、列車

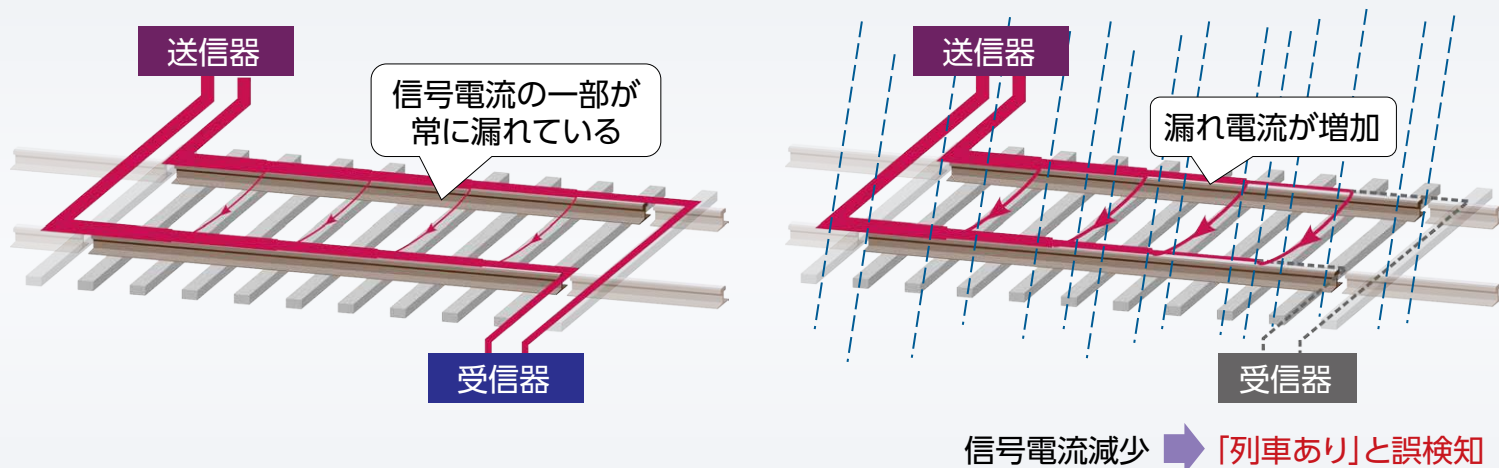
フェールセーフ

装置やシステムの構成部品に故障が発生した際に、安全側の状態となるようにする設計の考え方で。通常、鉄道では列車を止めることが安全側となります。

列車短絡抵抗

列車がレール間を短絡する抵抗値で、輪軸の抵抗と、車輪とレールの接触部の抵抗(接触抵抗)を合わせたものです。輪軸の抵抗は小さいため、列車検知では接触抵抗の大きさが重要になります。

図2 雨による漏れ電流の増加と誤検知



がないにもかかわらず、「列車あり」と誤検知してしまいます。一方で、雨はさびの発生原因でもあります¹⁾。誤検知を減らすために軌道回路を「鈍感」に調整すると、今度はさびで列車が検知できなくなるという難しさがあります。

そして、軌道回路は、障害発生時に異常箇所の特定に時間がかかるなど、原因究明・復旧が難しいことも課題です。

接触状態が列車検知に与える影響

典型的な要因と傾向

軌道回路で列車を確実に検知するためには、軌道回路の電圧を上げるなどして検知能力を高めるとともに、列車短絡抵抗を小さくする、つまり車輪とレールの電気的な接触を良くする必

表1 電気的な接触の良否に影響する要因と傾向

要因	接触の良否への影響の傾向	主な関係分野
さびや汚れの厚さ	薄いほど良い	—
車両の重量・輪重	大きいほど良い	車両
車輪の表面粗さ	粗いほど良い	車両
軌道回路の電流・電圧	大きいほど良い	信号
電車を動かす電流	大きいほど良い	車両・電力
列車の走行モード	力行・ブレーキの方が良く、だ行は悪い	車両・運輸
レールの摩耗状態	頭頂面が平坦なほど悪い	軌道
線形	曲線の方が良く、直線の方が悪い	軌道

要があります。

電気的な接触の良否は、さまざまな要因の影響を受けることが、経験的・実験的にわかっています。表1に、要因の例を示します。列車検知に問題が生じた事例では、多くの場合、これらの要因が複合的に関与しています。また、表1に示したように、接触の良否にはさまざまな分野が関係しています。

図3 さびの種類による接触抵抗の特性の違い

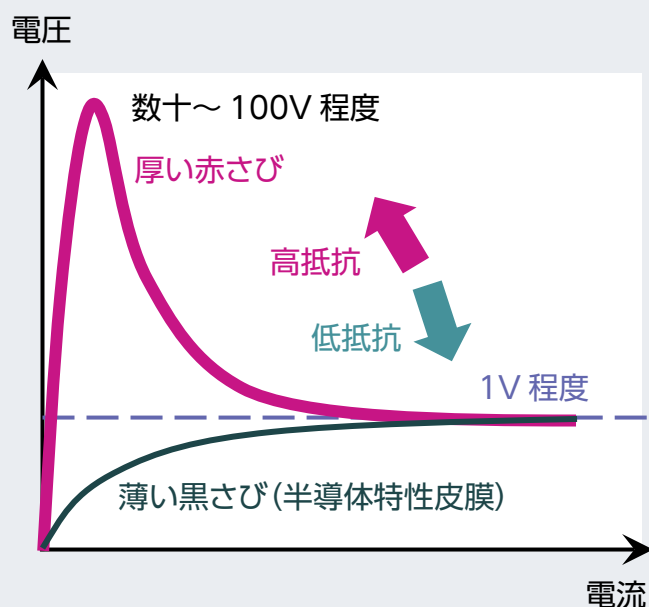


(a) 厚い赤さび



(b) 薄い黒さび

紙やすりで黒さびを除去した部分



(c) 電流を増加させた際の特性の違い

さびの影響

接触の良否は、接触抵抗の大きさ、つまり接触部の電流と電圧の比で評価できます。ところが、接触部にさびがあるとき、多くの場合、電流と電圧は比例関係になりません。

図3に厚い赤さびと薄い黒さびの典型的な接触抵抗の特性を示します。図3(c)では、電圧軸に近づくほど高抵抗、電流軸に近づくほど低抵抗を意味します。厚い赤さびは、基本的に高い抵抗値を示しますが、一度、電圧が数十～100V程度を超えると、急激に抵抗値が減少します。一方、薄い黒さびは、電流を大きくしても電圧が1V程度で一定となる、ダイオードに似た半導体特性を示します。

このような特性を踏まえ、厚い赤さびが発生しても列車検知が行えるように、高電圧を間欠的に発生させるパルス式の軌道回路が導入されている例があります。また、レール間の電圧を

1Vより十分大きくすることで、薄い黒さびへの対策としている例も多くあります。

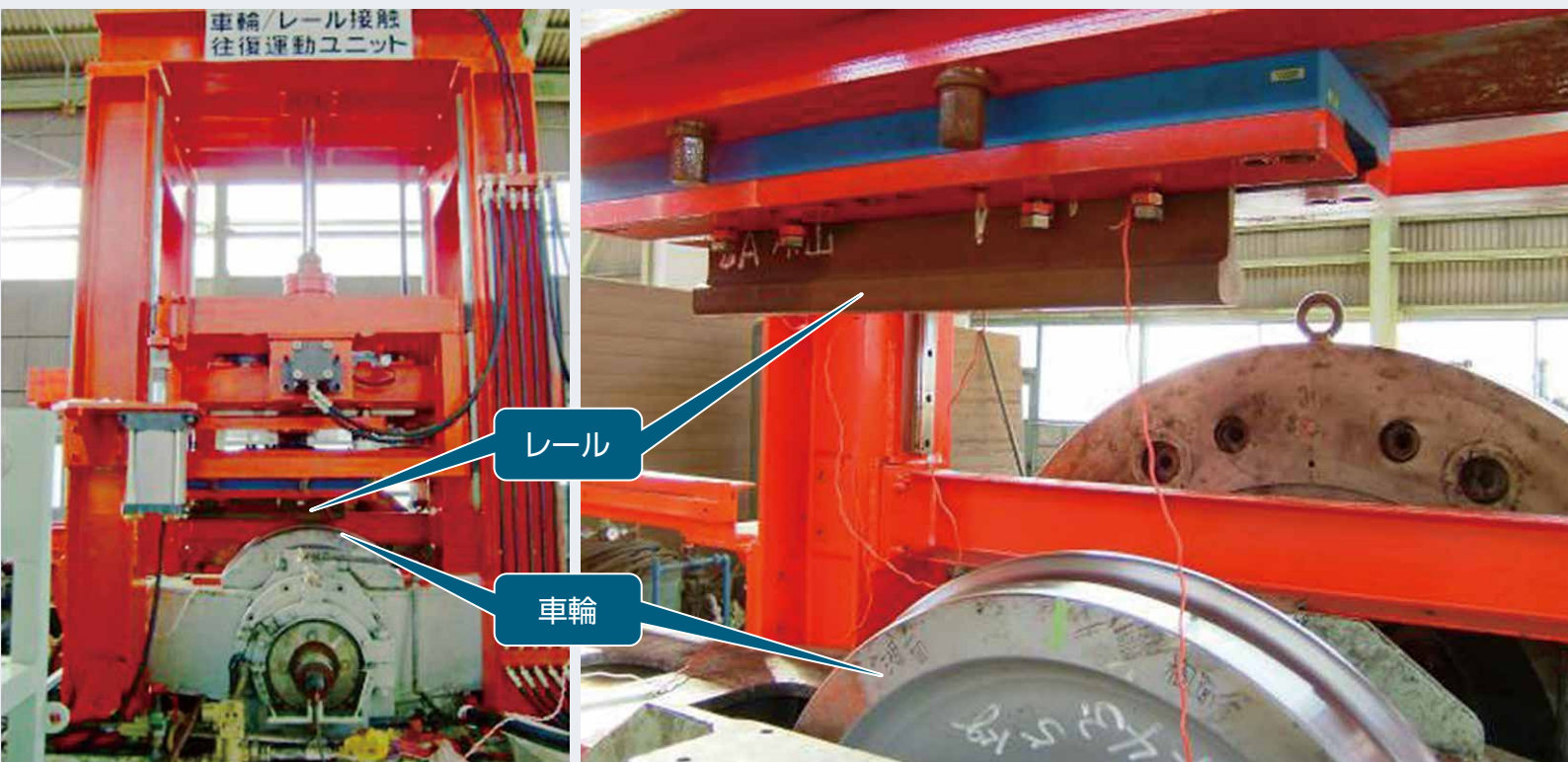
接触位置による特性の変動

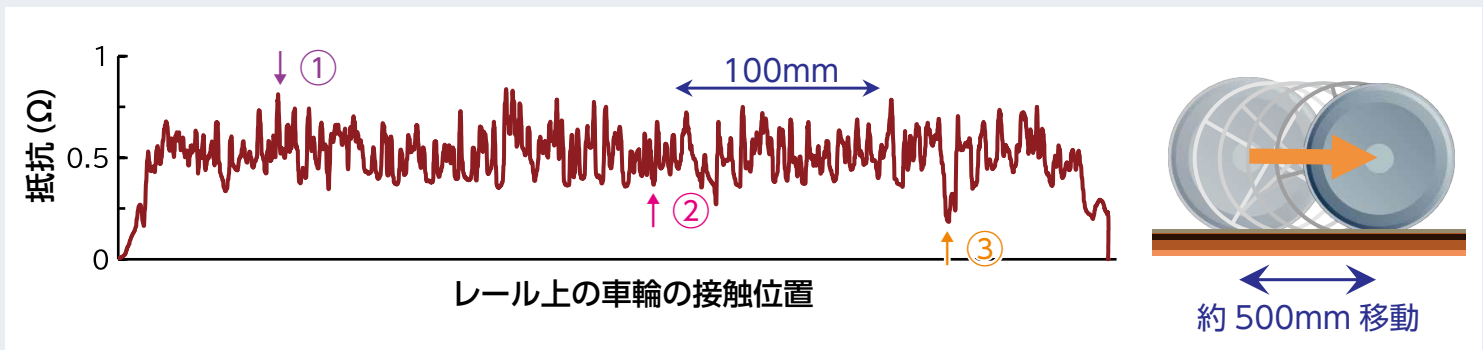
実際のレール表面のさびは一様でなく、時間の経過や列車の通過により変化していきます。そこで、実物のレールと車輪を用いる接触試験装置(図4)によって、さまざまな条件における接触抵抗を測定しました。

図5(a)に、接触抵抗の測定例を示します。また、同じ測定結果を、電圧が横軸、電流が縦軸の電圧電流特性として図5(b)に示します。この例では、接触抵抗は図5(b)の②のようなトランジスタに似た電圧電流特性を主に示しています。一方で、①のダイオードに近い特性や、③の純抵抗に近い特性のように、電圧電流特性は接触位置によりさまざまに変動することが図5(a)、(b)からわかります。

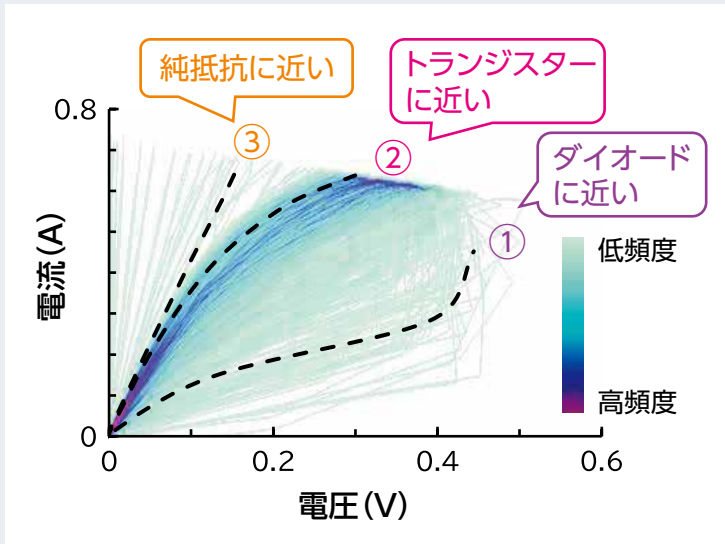
これらの測定結果を元に、複雑な電圧電流

図4 実車輪と実レールを用いる接触試験装置

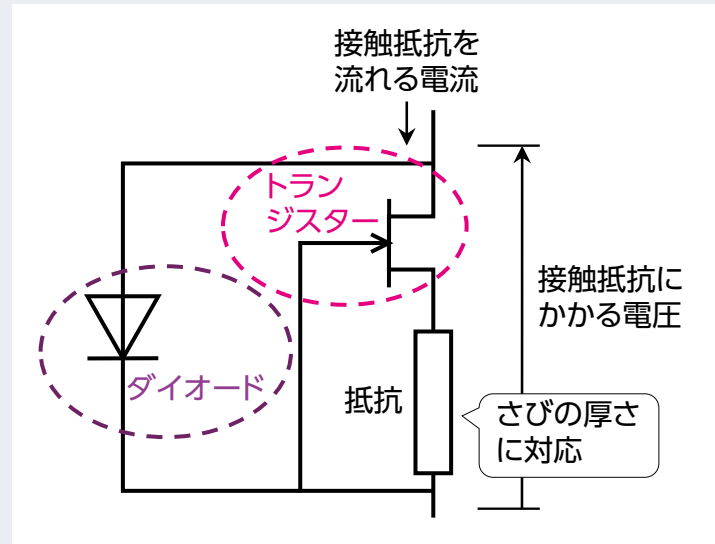




(a) 車輪の転がりに伴う接触抵抗の変動



(b) 車輪の転がりに伴う電流電圧特性の変動



(c) 接触抵抗の電気回路モデル

図5 車輪の転がりに伴う接触抵抗の変動とそのモデル化²⁾

特性を表現できる接触抵抗の電気回路モデル(図5(c))を提案しました。提案モデルを使うと、接触位置による特性の変動がシミュレーションできます³⁾。このシミュレーションと実測とを比較することで、実際の接触状態をより正確に把握できれば、列車検知に問題が生じたときの原因究明や早期復旧の支援に役立つと期待できます。

デジタルツインによる保全の高度化

車輪とレールの接触状態は、さまざまな分野が関係する要因によって変化します。このため、軌道回路のモニタリング情報だけでは、異常の予兆や原因を見つけることが困難です。そこで、

軌道回路の障害の予防や障害発生時の原因究明を支援し、保全の高度化を実現するため、**デジタルツイン**技術の活用に関する研究開発を進めています⁴⁾。

図6に軌道回路のデジタルツインの概念を示します。軌道回路のデジタルツインでは、物理空間の軌道回路の情報に加えて、車両・変電所・気象など、軌道回路に影響するさまざまな要因の情報を収集し、仮想空間上の各種モデルに入力します。そして、仮想空間上でシミュレーショ

デジタルツイン

現実の物理空間上で取得したさまざまなデータを利用し、コンピューターの仮想空間上に物理空間のシステムを「双子」のように再現する技術です。

物理空間

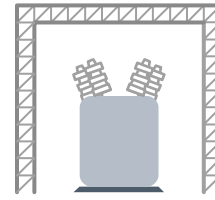
車両



軌道回路



変電所



気象

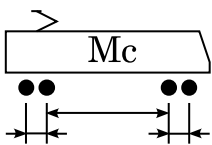


センシングデータ

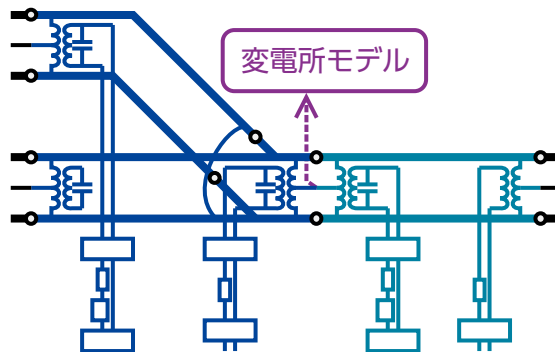
軌道回路の状態推定結果
+ 障害の予兆・原因と対策の提案

仮想空間

車両・移動モデル



軌道回路のシミュレーションモデル



さびのモデル

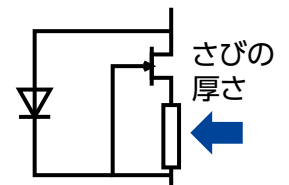


図6 軌道回路のデジタルツインのイメージ⁴⁾

ンを行い、軌道回路の状態を推定します。この推定結果は、障害の予兆や原因の特定に利用し、対策の提案という形で物理空間にフィードバックされます。

シミュレーション技術を核とするデジタルツインは、保全を高度化する強力なツールの一つと考えています。

おわりに

車輪とレールの電気的な接触を利用している軌道回路について紹介しました。

今後は、省力化・省人化の観点から、軌道回路に依存しないシステムへの移行が進むと考えられます。一方で、軌道回路は列車検知のため

の実績のある有効な仕組みであり、当面、保全を続けていく必要があります。分野横断で保全の省力化・高度化について継続的に研究開発を進めていきます。RRR

文献

- 1) 伴巧：車輪とレール間に介在する物質が起す現象，RRR，Vol.65，No.8，pp.10-13，2008
- 2) 遠山喬，福田光芳，大和田厚祐，藤田浩由：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
- 3) 遠山喬，福田光芳，大和田厚祐，寺田夏樹，原智昭，本多秀行：車輪・レール接触状態に基づく短絡抵抗推定手法，鉄道総研報告，Vol.28，No.4，pp.5-10，2014
- 4) 遠山喬，進藤卓朗：軌道回路のデジタルツイン実現に向けた軌道回路の階層的モデル化，第29回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集(J-RAIL2022)，S2-1-5，pp.33-36，2022