

車体地絡時の編成内電位・電流分布計算モデルの構築

三木 真幸* 廿日出 悟*

Development of Potential and Current Distribution in Train Set due to Vehicle Ground Fault

Masaki MIKI Satoru HATSUKADE

When vehicle ground fault occurs, where vehicle short-circuited with power line, distribution of electric potential and return current within the trainset become abnormal, such as unusual rise of car body potential or current distribution. These may cause vehicle malfunction. On the other hand, if the potential and current distribution in a trainset caused by vehicle ground fault is predictable, it will be useful for development of ground fault detection method for a train itself, which cannot be realized for existing vehicle. For these reasons, we have developed the calculation model of potential and current distribution in a trainset at a time of vehicle ground fault.

キーワード：車体地絡，地絡電流，接地装置，接地抵抗，車体抵抗，車間抵抗

1. はじめに

鉄道車両において何らかの理由で高電圧部と接地電位部間に短絡（以下，車体地絡）が発生すると，短絡箇所を通じて地絡電流が流れる。車体地絡の典型的な例として，パンタグラフなど屋根上高圧機器と車体との間で地絡が発生した場合の地絡電流経路の模式図を図1に示す。地絡電流は編成内を流れ，編成内の複数の接地軸を分流してレールへ至る。地絡電流の大きさや編成内の電流経路はレールや車両各部の電気抵抗に加え，編成内の地絡位置や地上電力設備と車両との位置関係により定まる帰線電流方向にも依存する。このとき，大電流や車体電位上昇により車載機器に不具合が生じる場合があり，大規模な輸送障害に至った事例もある¹⁾。

地上電力設備（変電所）にて地絡電流が検知されると，自動的にき電が停止される。その後，地絡原因の特定・地絡状態の解消の後架線加圧が再開されるが，その間影響範囲内の全列車の運転は中断される。すなわち，地絡地点の特定に時間を要すると運転再開までの時間が長引くこととなる。変電所は地絡地点を特定する機能を持つ²⁾

が，車庫など多数の車両が在線する場所で車体地絡が発生した場合，地絡車両の特定に時間を要し，運転再開の遅れにつながる恐れがある。筆者らは現在，既存車両では不可能な車載検知器による自列車の地絡検知手法の開発を目的とする研究を行っている。この車載検知器の監視箇所，閾値の検討にあたり，地絡発生時の編成内の地絡電流分布や各部の電流値の推定が必要となる。

以上の背景から，車体地絡発生時の車両不具合の事象解明や自列車地絡検知手法の開発への適用を目的とし，車体地絡発生時の編成内各部の電位・電流分布を推定する計算モデルを構築したので，本稿で紹介する。

2. 計算モデルの概要

2.1 車体地絡時の地絡電流

車体地絡発生時，地絡電流は編成内の複数の接地軸に分流しレールへと流れる（図1内赤矢印）。この時の編成内地絡電流分布に影響しうると考えられる様々な因子を図2に整理した。すなわち，編成内の電位・電流分布に直接影響する因子として「車両の電気特性」「車両在

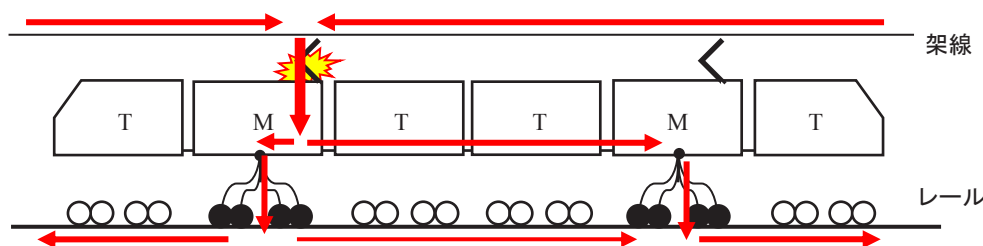


図1 車体地絡時の地絡電流経路の模式図

* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

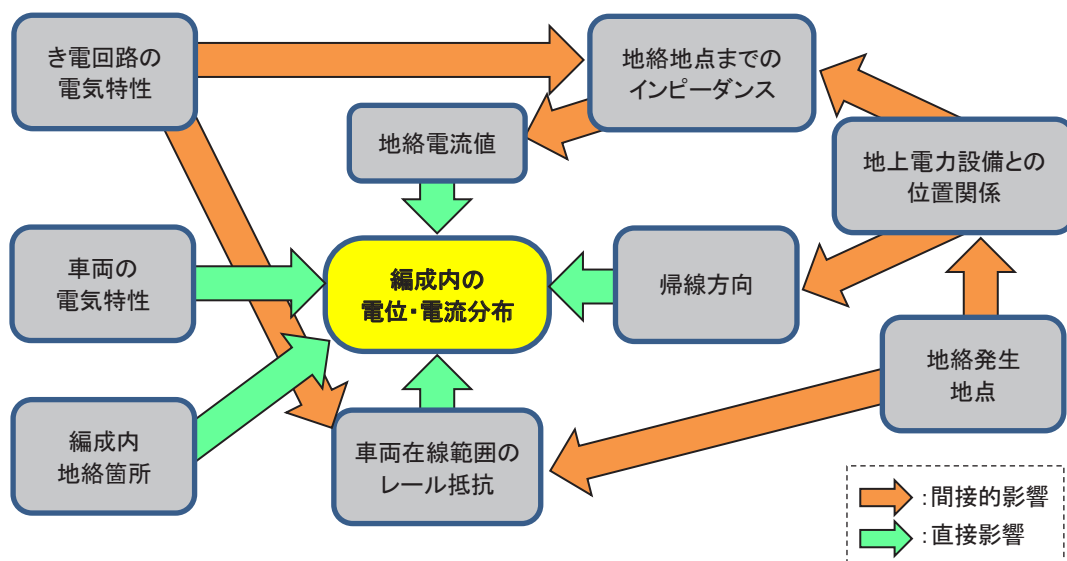


図2 編成内の電位・電流分布に影響する因子

線範囲のレール抵抗」「編成内地絡箇所」「地絡電流値」「帰線方向」の5つを取り上げ、これらの因子を含む計算モデルを作成することとした（図3）。

2.2 編成回路モデル

図4(a)で表される編成を例として、作成した回路モデルを図4(b)に示す。このモデルは車両および車両が在線する範囲のレールについて、大別して車両1両ごとの【車体】部および【接地線・レール】部、これらの間を接続する車間ワタリ抵抗や接地線抵抗、車両間レール抵抗で構成されている。回路は全て抵抗成分のみで表現

した。ただし、レールについては表皮効果により直流抵抗と商用周波数帯におけるインピーダンスが1桁程度異なるため、交流き電の場合は複素インピーダンスの絶対値を用いた。図4(b)中の各抵抗成分の詳細は4.1節および表2にて後述する。なお、回路構成およびパラメータの部分的な変更により編成長や接地回路構成が異なる車両形式への対応も可能である。

2.3 地絡条件

車体地絡における地絡電流の大きさは、き電回路（電車線、レール、変電所）および地絡箇所である車両のインピーダンスに依存する。一方、車両のインピーダンスはき電回路のインピーダンスと比較し十分小さいと仮定すると、地絡電流値はき電回路インピーダンスのみで定まり車両条件に依存しないと見なせる。そのため、本モデルでは簡素化のため変電所～車両間のインピーダンスは回路モデルに含めず、地絡電流は任意の電流値を設定可能な電流源として表現し編成内地絡箇所～帰線レール間に直接接続する形とした。実際の車体地絡事象の発生箇所は、パンタグラフを含む屋根上特高圧機器の場合が多いため、車体地絡箇所はパンタグラフがある車両の端部を基本としたが、他の任意の箇所への変更も可能である。また、直流並列き電や交流ATき電区間では車両への電流は在線位置の両側から変電所やATとの距離に応じそれぞれ供給される（例：編成前方から1000A、後方から1500A）ため、帰線電流方向も編成の前後2方向となる。以上を踏まえ、編成モデルへの地絡電流源の接続は図5の形となる。

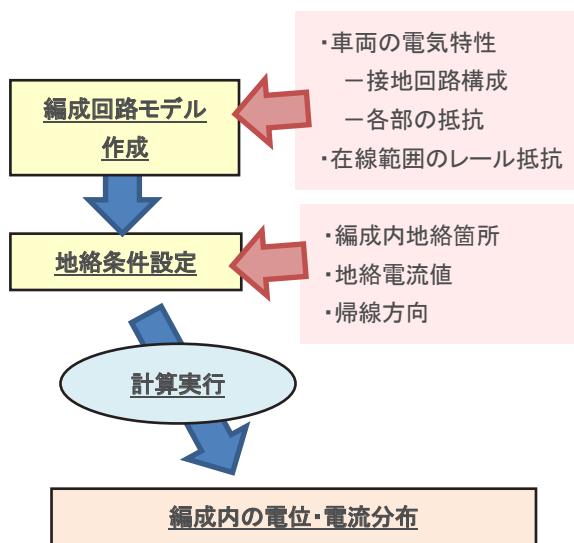
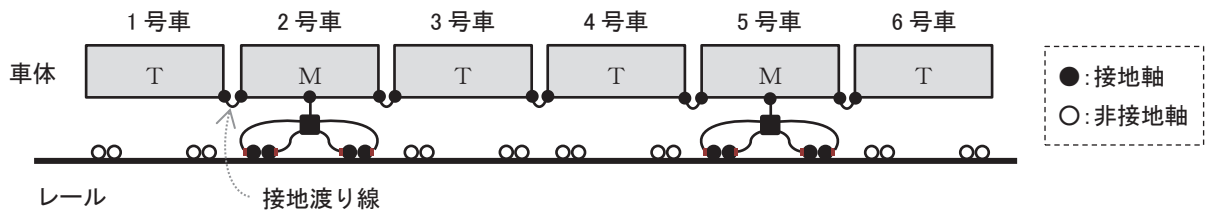
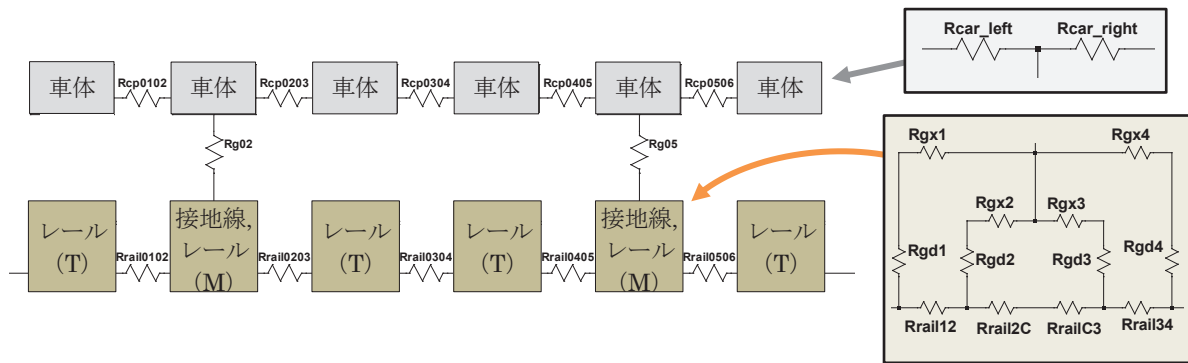


図3 計算モデルの概要



(a) 編成車両の接地回路模式図 (2M4T, M車の各軸接地の例)



(b) 編成車両の回路モデル化 (2M4T 2, 5号車の各軸接地の例)

図4 編成回路モデル

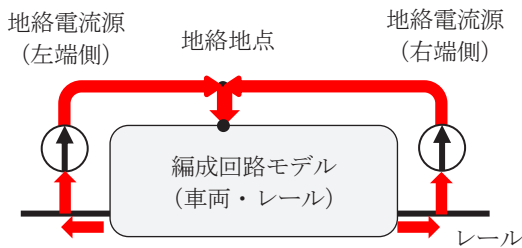


図5 地絡電流源の接続模式図

3. 実車両の電気抵抗測定

3.1 測定目的

編成回路モデル作成にあたり、車両各部の電気抵抗をパラメーターとして設定する必要がある。レール抵抗については様々な理論式や実験式が報告³⁾⁴⁾されている。一方、車両については普通鋼車体の構体抵抗について $1\mu\Omega$ との測定事例が報告されている⁵⁾⁶⁾ものの、具体的な値に関する報告は従来あまりなされていない。図面等には接地配線長や接続箇所などの艤装情報が記されていない場合もあり、また明示されていない電流経路が影響を与える可能性もある。そこで、在来線通勤形交流電車(6両編成, ステンレス構体, 図4(a))を対象とし現車測定試験を行った⁷⁾。

3.2 測定方法

測定項目は図6に示す通り接地抵抗、車体抵抗および車間抵抗とした。抵抗測定は四端子法で行い、一部測定では抵抗計による測定も行った。四端子法の概要を図7

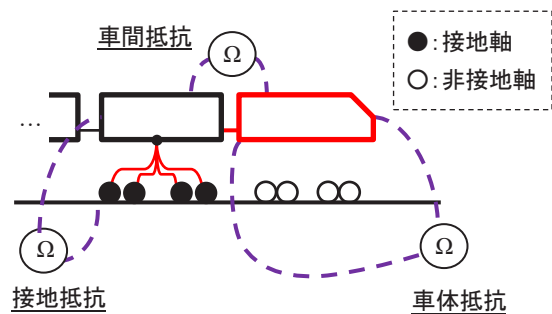


図6 実車両抵抗測定項目

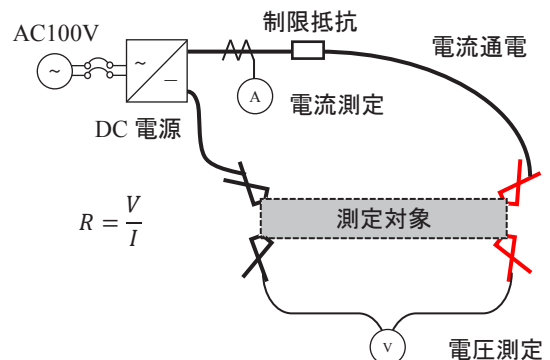


図7 抵抗測定(四端子法)模式図

特集：車両技術

に示す。測定対象に電流を通電し、電流通電系と独立した電圧測定系により測定された電圧降下 [V] と通電電流値 [A] からオームの法則に基づき抵抗値を得る手法であり、電圧測定系に通電電流が流入しないため測定系の電圧降下による測定誤差が非常に小さい手法である。なお、測定電流は直流電流 20A ～ 27A (制限抵抗で調整) とした。車両の構体や配線の主要部材であるステンレス鋼や銅は透磁率が小さく、強磁性体である鉄と異なり直流抵抗と交流抵抗は同等であると考えられる。図 8 に接続端子である大型ワニ口クリップ (電流通電用・電圧測定用とも同形状) の車体およびレールへの接続の様子を示す。図 8(a) に示す通り、試験実施時の制約上、電流通電端子や電圧測定端子と車体との接続箇所は構体ではなく車載機器枠など構体付属の金属部材とした。そのため、金属部材と構体間の接続抵抗 (接触面積や固定ボルト数に依存し、箇所ごとに異なりうる) が測定結果に含まれていた可能性がある。



(a) 車両側 (b) レール側 (銅板使用)

図 8 測定端子接続例

とに端子取り付け箇所の抵抗の影響が含まれていたためと考えられる。これらを考慮すると最小値 0.29mΩ が真値に近いと思われる。

車両図面にに基づき構体寸法および板厚、ステンレス鋼の抵抗率を用いて構体のレール方向の抵抗を概算すると約 1.7mΩ であった。一方、構体に付属するアルミ床材のレール方向抵抗の概算値は約 0.1mΩ であった。床材は絶縁素材のライナーを介して多数の皿ネジで構体と固定されているため、実際の車体抵抗は【構体抵抗】と【床材抵抗+構体・床材間抵抗】の並列抵抗とみなせる。実測値 0.29mΩ を踏まえると、測定車種の車体抵抗において支配的な要素は構体ではなく床材であると推定される。

3.3.3 車間抵抗

測定結果を表 1(c) に示す。測定値の差異については、車体抵抗同様端子取り付け箇所の抵抗の影響が含まれていたためと考えられ、測定最小値 0.71mΩ が真値に近いと思われる。

車間抵抗に影響しうる要素としては、電気的接続を意図した要素として車体接地渡り線 (500 線) およびジャンパ連結器内 100 線引き通し、電気的接続を意図しない要素として密着連結器、貫通ホロ、渡り板、空気配管、車間ダンパ類 (測定車種にはなし) 等が挙げられる。このうち車体接地渡り線の抵抗値は図面から約 0.4mΩ 程度と推定され、車間抵抗において支配的な要素と考えられる。

3.3 測定結果

3.3.1 接地抵抗

編成内の測定車両以外の接地線を予め全て外し、測定車両 (4 軸接地) の接地線を順次外しながら接地抵抗 (車体-4 軸近傍レール間抵抗) を逐次測定した。測定結果を表 1(a) に示す。全軸の接地装置配線を外した状態以外の測定値は、配線抵抗や接地ブラシ接触抵抗の文献値⁵⁾、レール直流抵抗値などから概算した値と同程度のオーダーであり妥当な値と考えられる。

また、全軸の接地装置配線を外した状態でも接地抵抗値が低い結果であり、接地装置を経由しない電流経路の存在が示唆された。この電流経路として【車体→主電動機枠→台車枠→ユニットブレーキ→合金鋳鉄制輪子→車輪】の経路が考えられる。

3.3.2 車体抵抗

測定は編成内の接地線を全て外した状態で行った。測定結果を表 1(b) に示す。車両構造は各車両で大きな差異はないと考えられるにもかかわらず測定値に差異が見られた。この原因としては、3.2 節で記した測定部位ご

表 1 抵抗測定結果

(a) 接地抵抗 [mΩ]

測定対象 ※特記ない限り、測定範囲は 車体～レール間	測定対象抵抗 [mΩ]	
	大電流 四端子法	抵抗計 HIOKI 3541
全軸の接地線繋ぎ (第 1～4 軸接続)	3.33	-
第 1 軸の接地線外し (第 2～4 軸接続)	3.50	-
第 1, 2 軸の接地線外し (第 3, 4 軸接続)	4.14	-
第 1～3 軸の接地線外し (第 4 軸のみ接続)	5.00	7.3
電圧：第 4 軸接地装置 ～レール間で測定	1.84	-
全軸の接地線外し	-	13.0

(b) 車体抵抗 [mΩ]

1 号車	1.29
2 号車	0.29
3 号車	0.36
4 号車	3.33
5 号車	0.35
6 号車	0.78

(c) 車間抵抗 [mΩ]

1-2 号車間	1.90
2-3 号車間	0.71
3-4 号車間	3.98
4-5 号車間	0.84
5-6 号車間	0.76

4. 編成内地絡電流分布の計算例

4.1 計算条件

本章では、作成したモデルを用いた地絡時の電位・電流分布の試算例を示す。計算対象の車両は、図4(a)で示した2M4T (T-M-T-T-M-T)、各M車4軸接地の在来線交流電車を想定した図4(b)の通りである。編成モデル内の各パラメーターの設定値を表2に示す。接地抵抗、車体抵抗、車間抵抗の値は第3章で示した測定結果および図面等による推定値による。車輪-レール間接触抵抗は接触状態に依存し0~25mΩとの測定例⁵⁾⁶⁾があるが、今回は0Ωとした。レール抵抗については、2本分の内部および外部インピーダンスを文献3、4に基づいて計算し、レール一本あたりに換算した値の絶対値を抵抗とした。地絡電流の値は1000Aとし、地絡条件として下記の3条件について計算した結果を比較した。

- 条件(a)…地絡号車：5号車，帰線方向：1号車側
- 条件(b)…地絡号車：2号車，帰線方向：1号車側
- 条件(c)…地絡号車：5号車，帰線方向：両側均等

表2 パラメーター一覧

抵抗要素	変数名	抵抗値 [mΩ]
半車体抵抗	Rcar_left, right	0.15
車間抵抗	Rcp _{nm}	0.8
接地回路		
車体-接地端子台間	Rg _n	0.8
接地端子台-各軸端子台	Rgx _n	3.1
各軸端子台-接地装置	Rgd _n	1.7
レール抵抗 (インピーダンス絶対値)		
レール1m当たり抵抗	Rrail	0.5
車体中心~2(3)軸間	Rrail2C, C3	Rrail×6.15
台車内軸間	Rrail12, 34	Rrail×2.1
車間 (4軸~次号車1軸間)	Rrail _{nm}	Rrail×5

4.2 計算結果

各条件における電流経路模式図、ならびに各車両の車体電位、レール電位およびM車(2, 5号車)の接地電流の計算結果を図9に示す。ここで、電流経路模式図における赤矢印の太さは、経路ごとの電流値の大きさに対応する。また、車体電位は各車両の車体中央部の電位、レール電位は各車両在線位置の中央地点(すなわち、第2-3軸の中間地点)、接地電流は各車両の4軸分の接地電流の合計値を意味する。条件(a)においては、5号車から編成に流入した地絡電流の約13%は5号車の接地軸から、約87%は編成内を流れ、2号車の接地軸からレールへ戻ることが分かる。この結果は、車体および車間抵抗がレール抵抗と比較して小さいことによる。また、地絡電流の大部分が編成内を流れることにより、2~5号

車間に車体電位差が生じている。条件(b)では2号車への接地電流の集中はさらに極端(2号車約96%)となった一方、2号車より後方の編成内およびレールに電流がほぼ流れないため、車体およびレールに生じた電位差は条件(a)と比較しわずかであった。一方、帰線方向が編成の両側となる条件(c)では、接地電流は2, 5号車にほぼ均等となった。以上の結果から、編成内の電位および電流分布は、地絡電流値が同じであっても地絡車両や帰線方向に依存して異なることが分かる。

表2に示した通り、計算モデルを構成する抵抗要素の値はいずれも概ね数mΩと同程度のオーダーである。従って、一部の抵抗値の変化が全体の計算結果に大きく影響しうる。また、車輪-レール間の接触抵抗など、値を厳密に定めることが難しいパラメーターも存在する。このため、計算モデルを使用する際は、不確定なパラメーターについては取りうる値の最大・最小値をそれぞれ計算し、安全側となるよう結果を採用するといった手順が必要となる。

5. おわりに

車体地絡発生時の車両不具合の事象説明や自列車地絡検知手法の開発への適用を目的とし、車体地絡発生時の編成内各部の電位・電流分布を推定する計算モデルを構築した。本報告の結果は以下の通りである。

- (1) 車体地絡時の編成内の電位および電流分布は、車両パラメーター(各部の電気抵抗)に加え、編成内地絡位置や帰線電流方向にも依存すると想定されるため、構築した計算モデルでは車両接地回路の電気特性、編成内地絡箇所、地絡電流値および帰線方向を任意に設定可能とした。
- (2) 計算モデルのパラメーター設定のため、在来線交流形通勤電車(ステンレス鋼車体、6両編成)を対象とし、接地抵抗(車体-レール間抵抗)、車体抵抗、車両間抵抗を四端子法により実測した。接地抵抗についてはM車1両(4軸接地)あたり約3.3mΩ、車体抵抗および車両間抵抗については、それぞれ0.3mΩ~3.3mΩ、0.7mΩ~4.0mΩの測定値を得た。測定結果には測定時の接触抵抗が含まれている可能性があるものの、図面等に基づく推定値と比較しおおむね妥当な値であった。
- (3) 構築した計算モデルにより、編成内地絡位置や帰線電流方向(地上電力設備との位置関係に依存)の各地絡条件における編成内の電位・電流分布を試算した。編成内の電位および電流分布は、地絡電流値が同じであっても地絡車両や帰線方向に依存し異なることを示した。
- (4) 構築した計算モデルにより、現在取り組んでいる自

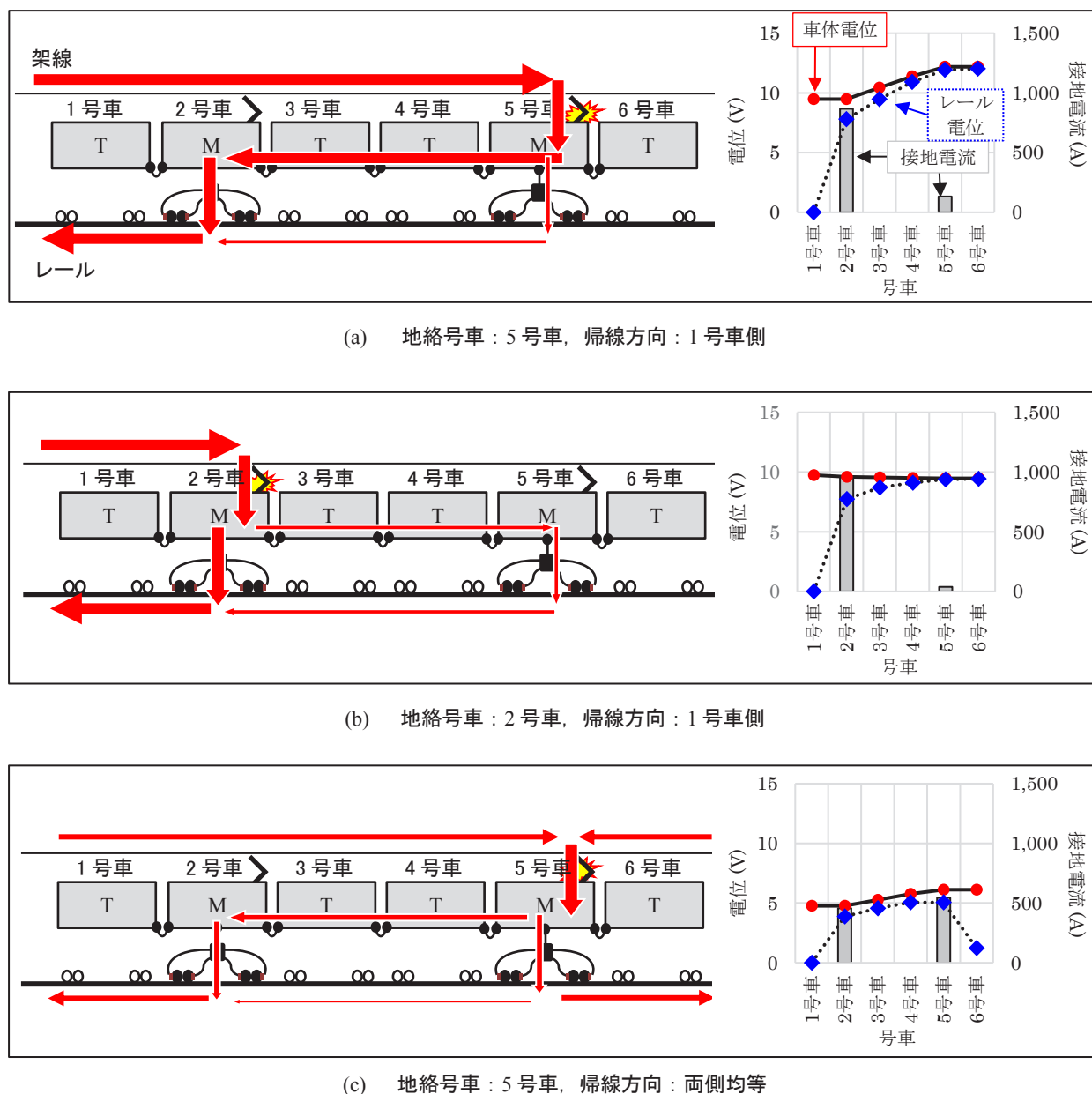


図9 地絡条件ごとの地絡電流経路模式図，編成内電位分布および接地電流の計算結果

列車の地絡検知手法の開発において必要となる，編成内の地絡電流分布が推定可能となった。

今後は，構築した計算モデルを活用し地絡検知手法の開発を進めるとともに，他車種の測定による基礎データの蓄積や実車による地絡模擬試験結果との比較等を通じ精度向上を図る予定である。

文献

- 1) 東日本旅客鉄道株式会社 地絡（ショート）による新幹線車両故障対策について：
<https://www.jreast.co.jp/press/2018/20190325.pdf>
(参照日：2019年8月4日)
- 2) 電気学会 電気鉄道における教育調査専門委員会：最新電気鉄道工学，p.180，2000
- 3) 森本大観：き電回路定数の周波数特性を考慮した故障電流解析，鉄道総研報告，Vol.25，No.4，pp.11-16，2011
- 4) 電気学会 電気鉄道における教育調査専門委員会：最新電気鉄道工学，p.168，2000
- 5) Michael Dirauf, Johann-Wolfgang Hinterleitner: Betriebs- und Schutzerdung von Schienenfahrzeugen, Elektrische Bahnen, No.100, 5, pp.159-171, 2002.
- 6) 渡邊朝紀：鉄道車両の接地問題，鉄道車両と技術，Vol.9，No.8，pp.34-38，2003
- 7) 三木真幸，廿日出悟：鉄道車両の接地抵抗および車体・車間抵抗の実測結果，電気学会全国大会，p.426，2019