鉄 道 総 研 報 告

特集：車両技術

編成貨車の電磁ブレーキ引通し線断線箇所特定装置の開発

山下　道寛*　　近江　昭穂**　　矢野　健児***

Development of Fault Locators of the Train Command Line used in Automatic Electromagnetic Air Brake Systems for Freight Trains

Michihiro YAMASHITA　　Akio OHMI　　Kenji YANO

The inspections after making up a freight train includes checking the normal connection status of the train line used for applying automatic electromagnetic air brake. In case any disconnection is detected, it takes several hours to find the location of the breakage point. Therefore, we developed an algorithm using circuit analysis to make it possible to detect and locate the fault in the line from one end of the train, and fabricated a portable type device and a on-locomotive type one incorporating the algorithm. In actual tests using the new system on a freight train, train line faults were detected up to the 20th wagon. This system was capable of locating a failure in approximately 30 seconds.

キーワード：編成貨車，電磁自動空気ブレーキ，引通し線，断線，断線箇所特定

1．はじめに

電磁自動空気ブレーキ[1)]を用いた貨物列車の営業走行直前には，ブレーキ引通し指令線（以下「指令線」という）の導通確認検査が行われている。もし指令線に断線が発見された場合には，断線箇所の特定に数時間を要する場合があり，ダイヤ遅延や最悪の場合には運休となる。

本開発では，編成貨車の指令線に断線が無いか，あるいはどこが断線しているかを見つけて迅速な復旧支援を行うため，まず，編成貨車の端から指令線の断線箇所を特定する方法を提案した。具体的には，編成貨車の指令線回路網モデルを構築し，指令線―グランド線の間の理論合成抵抗値を求め，測定値と比較することで断線の有無の判定と断線が有ればその箇所を特定する。次に，このアルゴリズムを組み込んだ断線箇所特定装置を開発した。装置は可搬型と機関車搭載型の2タイプを開発した。そして，実貨車を用いた断線模擬試験を行った結果，理論値と測定値はほぼ一致し，20両目までの断線箇所が特定できることを確認した。

2．編成貨車の引通し線回路構成

電磁ブレーキを有する貨車には，ジャンパ栓受のコネクタ（図1）に接続された数本のケーブルが引通されている。機関車のブレーキノッチ扱いには「緩め」，「常用ブレーキ」，「非常ブレーキ」があり，各ノッチに応じて電磁弁が動作する。電磁弁を動作させるための指令線（電源線）として，引通し線を利用している。引通し線のケーブルは各ブレーキ指令用に3本，共通グランド線として1本（貨車によっては2本の場合もある）用いられている。電磁弁は機関車のブレーキ指令器から指令線にDC100Vが印加されて動作する。

編成貨車の端側からみた回路構成を図2に示す。各指令線に対するグランド線は共通であり，各指令線とグランド線の間に，電磁弁とヒューズが挿入された回路構成となっている。

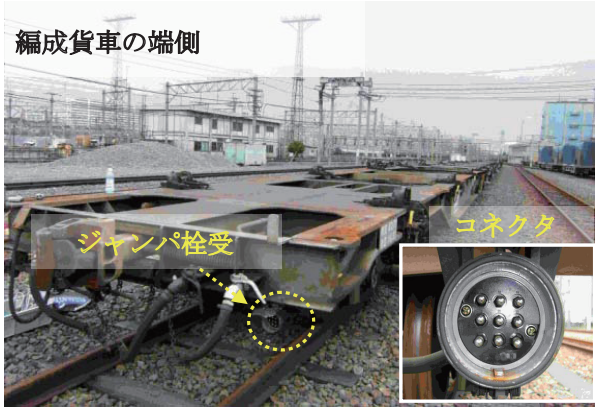

図1　編成貨車の端側のジャンパ栓受とコネクタ

＊　　車両制御技術研究部　駆動制御研究室
＊＊　　日本貨物鉄道株式会社（技術開発部）
＊＊＊　株式会社テス（実験開発部）

貨車の中央付近に設置されている引通し線を中継するヒューズ箱内の様子を図3に示す。引通し線端部には，圧着端子がそれぞれ取り付けられ，端子台を介して接続されている。引通し線の断線故障としては，端子台に接続されている引通し線の圧着端子折損によるものや，ジャンパ栓コネクタの腐食や損傷によって導通不良になる場合がある。断線箇所の例を図2の指令線上に×印で示す。

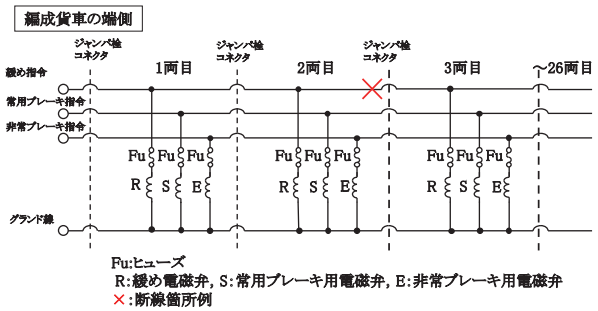

図2　編成貨車の引通し線回路構成

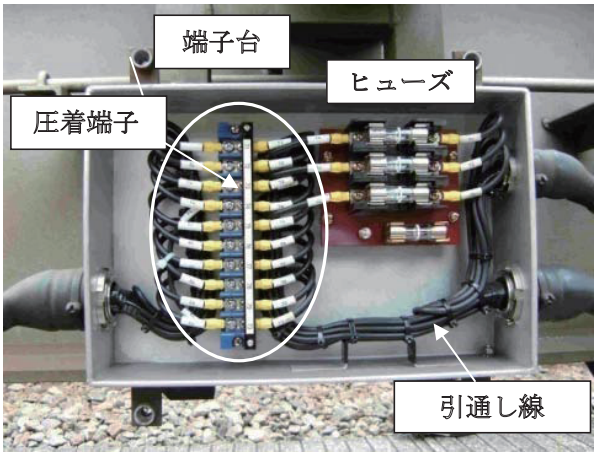

図3　車体に搭載されているヒューズ箱内の様子

3．ブレーキ指令線の断線箇所特定方法[3)]

3.1　現在のブレーキ指令線の検査方法

通常の営業走行前には，指令線導通点検として機関車が編成貨車に連結された直後にブレーキ試験を行っている。ブレーキノッチを扱った際に，貨車端側（最後尾）のジャンパ栓コネクタの指令線端子で指令電圧（DC100V）が検出できるかどうかで，断線の有無を確認している。ブレーキ試験に使用している断線検知装置を図4に示す。図1中に示したジャンパ栓受に，図4右側の写真に示すコネクタ面を挿入して検査を行う。図4左側の写真に示した3個のランプが，「緩め」，「常用ブレーキ」，「非常ブレーキ」のノッチ指令に対応して，それぞれ点灯（指令線に電圧が印加）するかどうかで断線判別している。

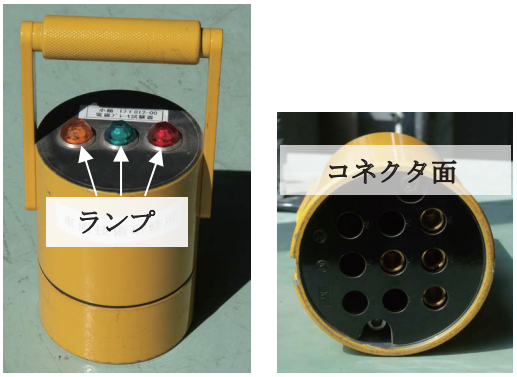

図4　現在のブレーキ試験用断線検査装置

3.2　ブレーキ指令線の回路網モデル

編成貨車内の各ブレーキ指令に対応する電磁弁の数は貨車数に比例する（コキ100系等のユニット貨車は除く）。図2より，電磁弁コイルを抵抗としたとき，貨車端側からみた指令線とグランド線の間の電磁弁コイルの合成抵抗値は，電磁弁コイル抵抗の並列回路に相当する値と考えられる。

そこで，貨車数が異なる場合の指令線とグランド線間の理論抵抗値を求めることができれば，断線箇所を特定できることになる。つまり，貨車数毎に異なる断線があった際の理論抵抗値を予め計算し，測定抵抗値と近い理論抵抗値の車両付近で指令線の断線が発生したと推測できる。

図2の引通し線回路に基づき，指令線抵抗を考慮した実態に即した電気回路網モデルを図5に示す。一例としてその一部の貨車2両分を示す。ここで，交流回路では電磁弁コイル素子の非線形性が強いことを考慮し，直流抵抗成分のみを扱う回路網解析を実施する。

各車両の指令線回路素子は，貨車1両の車体長分の指令線抵抗 r と電磁弁コイル抵抗 R である。貨車の端側（図5中の左側）には，抵抗測定用の電圧 E と，電圧 E によって流れるコネクタ間の電流 I が示される。

指令線とグランド線間の理論合成抵抗値は，回路網図形学[2)]（グラフ理論）に基づく回路網解析を行うこで電流 I が算出でき，印加電圧 E と比をとることで求めることができる。回路の接続点と接続点の間にある回路素子を含む部分を枝と呼び，枝に流れる電流は枝電流，枝電流によって生じる接続点間の電位差を枝電圧と呼ぶ。図6に各枝電流を示した回路網モデルを示す。このモデルから回路網解析を行うため，グラフ理論に基づいて閉回路を構成する。その例として図7中に破線①～⑥で示した貨車2両分の6回路を示す。営業編成列車での最大貨車数は26両であり最大閉回路方程式の数は78となる。

図5では緩め指令線とグランド線間の理論合成抵抗値を算出する場合について示しているが，切り換えスイッチで，電圧 E を印加する指令線を変えることで，常用ブレーキ指令線とグランド線間の理論合成抵抗値や，非常

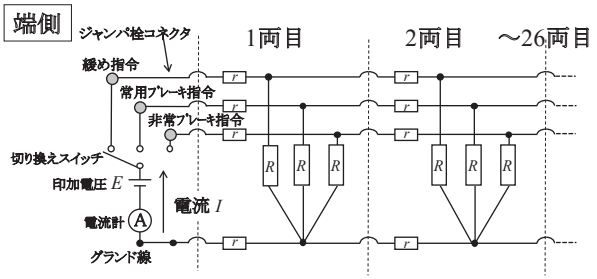

図５　指令線の電気回路網モデル（貨車２両分）

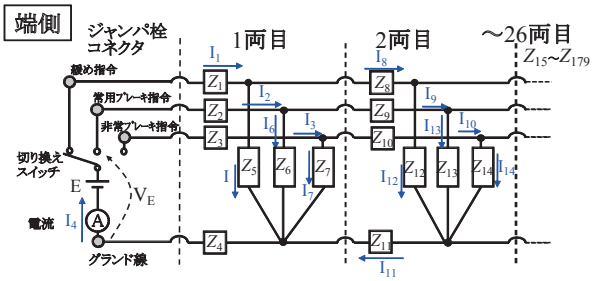

図６　解析用回路網モデル

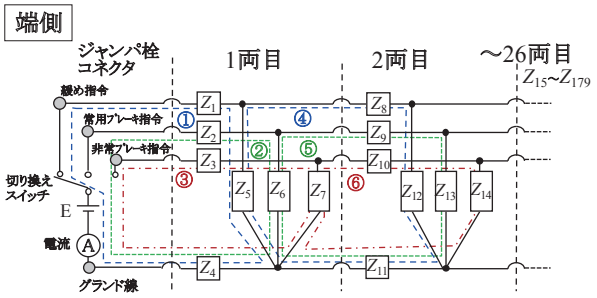

図７　解析用回路網モデルの閉回路例

ブレーキ指令線とグランド線間の理論合成抵抗値も求めることができる。

解析に用いた数式を (1) ～ (4) 式に示す。枝電圧式は (1) 式で示される。(2) 式はグラフ理論に基づいて構成した独立な閉回路電圧式である。

(1) 式を (2) 式に代入し，(3) 式で表される枝電流行列と閉路電流行列の関係を用いて，閉路電流行列について整理すると (4) 式が得られる。さらに，得られた閉路電流行列 $\boldsymbol{I}_l$ を (3) 式に代入すると枝電流行列 $\boldsymbol{I}_b$ が求められる。

$$\boldsymbol{V}_b = \boldsymbol{Z}_b \boldsymbol{I}_b - \boldsymbol{E}_b \tag{1}$$

$$\boldsymbol{B}_b \boldsymbol{V}_b = \boldsymbol{0} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{I}_b = \boldsymbol{B}_b^{\mathrm{T}} \boldsymbol{I}_l \qquad {}^{\mathrm{T}}: \text{転置} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{I}_l = \left(\boldsymbol{B}_b \boldsymbol{Z}_b \boldsymbol{B}_b^{\mathrm{T}}\right)^{-1} \boldsymbol{B}_b \boldsymbol{E}_b \tag{4}$$

ここで，$\boldsymbol{V}_b$: 枝電圧行列　　[179 × 1],
$\boldsymbol{Z}_b$: 抵抗行列　　[179 × 179]
$\boldsymbol{I}_b$: 枝電流行列　　[179 × 1]
$\boldsymbol{I}_l$: 閉路電流行列　　[78 × 1]
$\boldsymbol{E}_b$: 起電力行列　　[179 × 1]
$\boldsymbol{B}_b$: 閉路行列　　[78 × 179]

$$\boldsymbol{V}_b = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{179} \end{bmatrix} \boldsymbol{Z}_b = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Z_{179} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{I}_b = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{179} \end{bmatrix} \boldsymbol{I}_l = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{78} \end{bmatrix} \boldsymbol{E}_b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ E \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

(3) 式で求められた枝電流行列 $\boldsymbol{I}_b$ の要素を用いて，理論合成抵抗値 R_c が (5) 式で求められる。他の指令線とグランド線の間の合成抵抗値算出についても同様である。

$$R_c = E / I_4 \tag{5}$$

3.3　断線箇所特定方法

断線箇所特定の具体的方法を以下に述べる。

各指令線の断線箇所を特定するために，予め車両毎に指令線の断線が発生した場合を想定して，(5) 式で表される各指令線とグランド線の間の理論合成抵抗値を算出する。ここで，26 両編成として計算した理論合成抵抗値の一部を図 8 に示す。車両 19 両目と車両 20 両目の間の指令線に断線が発生した場合の指令線とグランド線間の理論合成抵抗値を R_{19} とする。その前後隣り合う車両で断線が発生した時の理論合成抵抗値は R_{18} と R_{20} である。R_{19} との差は $\Delta R_1 = R_{18}\text{-}R_{19}$，$\Delta R_2 = R_{19}\text{-}R_{20}$ となる。そして，抵抗測定値 R_m が (6) 式の関係を満足する時，19 両目と 20 両目の間に断線有りと判定する。これは，断線箇所毎の理論合成抵抗値に対し，前後隣り合う車両で断線が発生した時の理論合成抵抗値との差（ΔR_1 と ΔR_2）をそれぞれ二分して抵抗値の範囲を設け，測定抵抗値 R_m がどの範囲に入っているかで断線箇所を特定する方法である。後方車両での断線箇所ほどその範囲が狭く，抵抗値計算誤差や測定誤差等の影響を受けやすくなる。

他の車両間で断線が生じた場合も同様に判定する。

$$R_{19} - 0.5 \cdot \Delta R_2 \le R_m < R_{19} + 0.5 \cdot \Delta R_1 \tag{6}$$

ここで，提案した断線特定方法のフロー図を図 9 に示す。

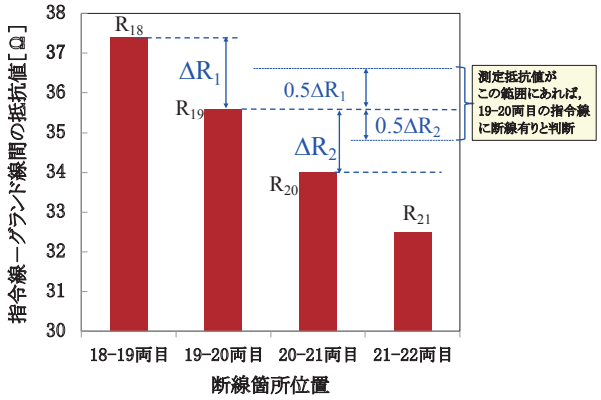

図８　緩め指令線とグランド線間の理論合成抵抗値例

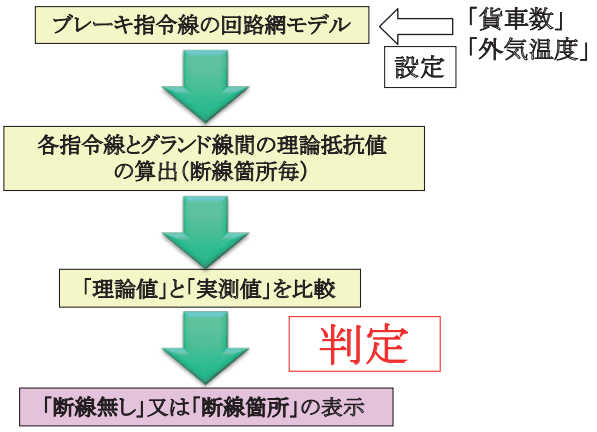

図９　断線箇所特定のフロー

3.4　電磁弁コイル抵抗の温度特性

電磁弁コイル抵抗の設計値は約 615Ω（20℃）である。実際の電磁弁コイル抵抗の個体差を調査するため，51 個の電磁弁を用いてコイル抵抗測定を実施した。その結果を表 1 に示す。標準偏差は平均値に対して 1% 程度であることが確認され，個体差が小さいことが分かった。また，恒温槽を用いて電磁弁抵抗の温度特性を調べた結果，図 10 に示す特性が得られた。この特性から電磁弁コイルに約 25℃の温度差が生じると電磁弁コイル抵抗値が 10% 程度変化することが分かった。これは，電磁弁コイル抵抗値 R が実際の抵抗値に対して 10% 誤差があると，指令線とグランド線間の理論合成抵抗値 R_c にも 10% 誤差が生じることになる。例えば，図 8 の理論合成抵抗値 R_{20} の真値は計算値に対して +10% の値とすると，算出した理論合成抵抗値は R_{20}=34Ω であるが，真値はそれよりも 10% 大きく 37.4Ω である。 これは 2 両分手前の車両の合成合成抵抗値 R_{18} とほぼ同じになる。よって，2 両分の断線箇所誤判定となる。

国内の月別平均気温は，おおよそ -10℃～ 30℃の範囲である[4)]。断線箇所特定を正確に行うためには，理論合成抵抗値を計算する前に，図 5 に示す電磁弁コイル抵抗値 R の温度補正を行うことが重要である。

表１　電磁弁コイル抵抗の調査結果

平均値 [Ω]	621.7
標準偏差 [Ω]	5.8
最大値 [Ω]	632.5
最小値 [Ω]	602.0

（抵抗測定時の外気温度 24℃，調査した電磁弁数 51）

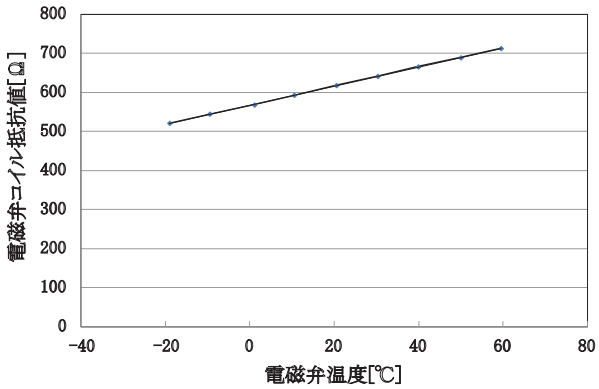

図 10　電磁弁コイル抵抗の温度特性試験結果

4．断線模擬試験結果

26 両編成貨車を用いて，定置にて指令線の断線模擬試験を実施した。緩め指令線の模擬断線試験結果を図 11 に示す。図中の横軸は緩め指令線の模擬断線箇所であり，縦軸は貨車端側から見た緩め指令線とグランド線の間の合成抵抗値である。試験中の外気温度は 27 ～ 31℃であった。試験開始時において，電磁弁コイル温度に近いと考えられる電磁弁外筒の上部の温度は 31℃であった。そこで，緩め指令線とグランド線間の理論合成抵抗値は，図 10 の特性に基づいて温度 31℃の電磁弁抵抗値を用いて算出した。

図 11 の結果から，回路網モデルにより算出した理論合成値と測定値はほぼ一致することが確認できた。これにより，指令線とグランド線間の合成抵抗値を測定し，理論値と比較することで，断線の有無の判定と断線箇所を特定できることが分かった。また，他の指令線の場合も同様の結果が得られた。

数回の実編成貨車を用いた断線模擬試験では，20 両目までの断線箇所を特定することができた。21 両目以降では，電流センサや電圧センサ，電磁弁コイル抵抗設定値等の確度の影響で，断線箇所位置の誤特定が生じやすくなった。これは，3.3 節で述べたように，断線箇所位置が後方車両ほど，正確に断線箇所を特定することが難しくなるためである。この対策として，編成の逆端からも測定することで，現行営業列車で最も長い 26 両編成全体の断線箇所が特定できる。

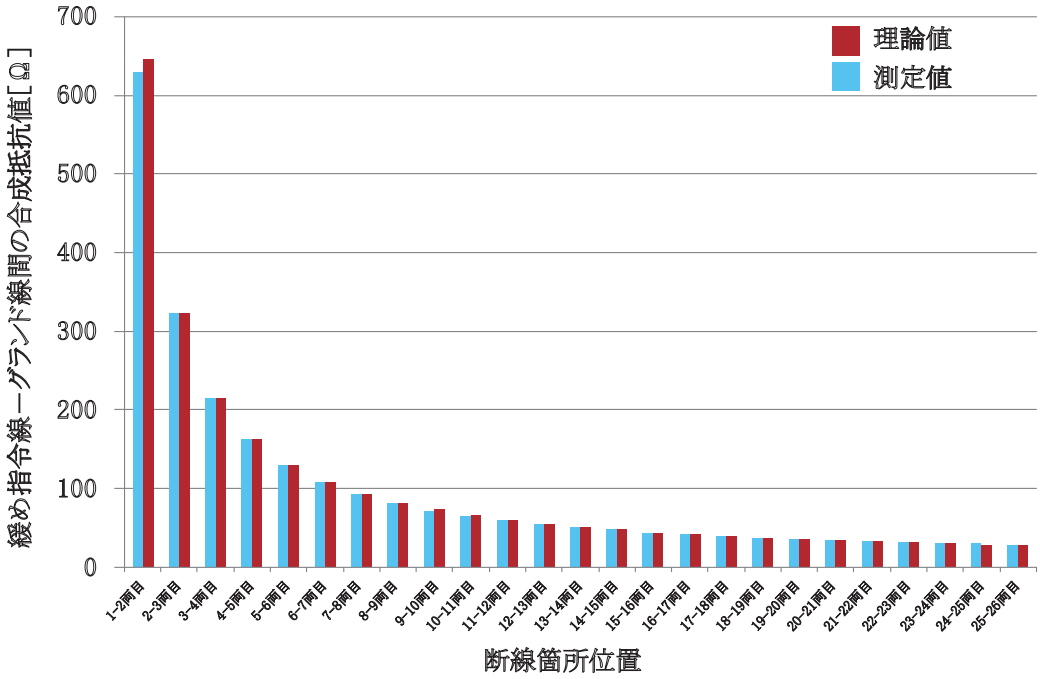

図 11　緩め指令線の断線模擬試験結果（理論値と測定値の比較）

5．ブレーキ指令線の断線箇所特定装置

3.3 節で述べた引通し線の断線箇所を特定する方法を組み込んだ断線箇所特定装置を開発した。具体的には，現在の検査業務にも対応可能な可搬型と，営業走行中の使用を想定した機関車搭載型である。

5.1　可搬型装置[5)]

3.3 節で述べた引通し線の断線箇所を特定する方法を組み込んだ可搬型装置について表 2 と図 12 に示す。図 1 の編成貨車端側のジャンパ栓受に，図 4 に示した現行の検査装置と同様に，図 12 中に示したジャンパ栓コネクタを接続して使用する。

可搬型の操作手順は，図 9 で示される。まず，編成貨車数と外気温度をタッチパネル画面上で設定し，スタートボタンを押す。次に，本装置は自動的に理論合成抵抗値を演算し測定値と比較する。その結果，「断線無し」か「断線箇所」が表示され，一連の動作が終了する。

可搬装置を用いた断線模擬試験の結果，断線箇所の判定に要する時間は約 30 秒と，素早く特定できることを確認した。

表 2　可搬型装置の主要緒元

寸法	W220mm × H97mm × D330mm
質量	5kg
電源	バッテリー（連続 30 分）
判定時間	約 30 秒
その他	温度自動補正機能あり

図 12　可搬型の断線箇所特定装置

5.2　機関車搭載型装置

試作した機関車搭載型装置について表 3 と図 13 に示す。断線箇所特定に関する基本機能は可搬型と同様とした。ただし，走行中における運転士のブレーキノッチ扱いにより，指令線に DC100V が印加される。ノッチオフした瞬間には，電磁弁コイルに逆起電圧が生じ，指令線にサージ的な高電圧（1,000 ～ 2,000V）が発生する。装置保護の観点から 600V 以下にするため，装置側ジャンパ栓の指令線コネクタ端子とグランド線端子の間にサージ吸収素子を挿入した。その結果，電圧最大は 200

～ 350V 程度となり，装置の耐電圧限度内に納まることを確認した。また，機関車搭載型装置の動作とノッチ扱いが輻輳した場合に，編成貨車内の電磁弁が正常に動作しないことを防ぐため，ノッチ状態に応じて断線検知動作を中断する機能を追加した。

JR 貨物東京ターミナル駅構内において，26 両編成の試験用貨物列車を用いて走行中の模擬断線試験を実施した（図 14）。無線リレー回路を用いて 25 両目と 26 両目の各指令線を開放し断線を模擬した。試験の結果，運転士のノッチ扱いによる電磁弁動作に影響を与えることなく，ブレーキ指令線の断線箇所を特定できることが確認できた。今回の走行試験では，編成後尾の 25 両目と 26 両目の断線位置を特定できたが，営業列車での使用環境を考慮すると，3.3 節で述べたように，外気温度等により断線位置の特定に影響を与える場合があると考えられる。今後，本線にて試験走行を行い，営業運行環境が及ぼす断線検知精度への影響を調査する予定である。

表 3　機関車載搭載型装置の主要緒元

寸法	W300mm × H300mm × D300mm
質量	12kg
電源	AC100V 50Hz/60Hz
判定時間	約 30 秒
耐電圧	600V
その他	温度自動補正機能 ノッチ動作検知機能

図 13　機関車搭載型の断線箇所特定装置

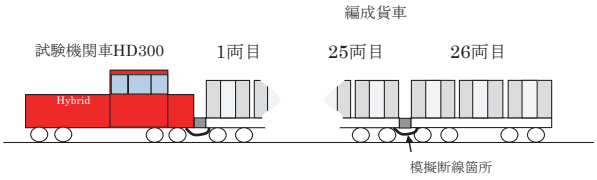

図 14　機関車搭載型装置による指令線断線箇所特定試験（入替機関車 HD300 とコキ 100 形式貨車 26 両（空車））

6．まとめ

電磁自動ブレーキを使用する貨物列車の組成時のブレーキ指令線の導通確認検査時に，もし断線が発見された場合には，断線箇所の特定に数時間を要する場合があり，ダイヤ遅延や最悪の場合には運休となる。

本開発では，断線時の迅速な復旧支援を行うため，編成貨車の端から指令線の断線箇所を特定できる電気回路網理論に基づいた断線箇所特定アルゴリズムを提案した。具体的には，指令線の理論合成抵抗値と測定値を比較することで断線箇所を判別する。次に，このアルゴリズムを組み込んだ可搬型と機関車搭載型の断線箇所特定装置を開発した。実貨車を用いた断線模擬試験を行った結果，理論合成抵抗値と測定値はほぼ一致した。また，測定と断線判定に要する時間は約 30 秒と短く，20 両目までの断線箇所が特定できることを確認した。本装置を用いることで断線復旧時間の大幅な短縮が期待できる。

謝　辞

現車試験に際し，多大なるご協力いただきました JR 貨物大井機関区，川崎車両所の関係各位に感謝申し上げます。

文　献

1）鉄道総合技術研究所他：わかりやすい鉄道技術［鉄道概論・車両編・運転編］，鉄道総合技術研究所，2005
2）大坪：「電気回路」，電気書院，1977
3）山下，近江，矢野：編成貨車の引通し指令線の断線箇所特定方法，平成 23 年電気学会産業応用部門大会，3-74，Ⅲ-355，2013
4）（財）矢野恒太記念会編：「日本国勢図会 2002/2003 年版」，（財）矢野恒太記念会，2002
5）山下，近江，矢野：編成貨車の引通し指令線断線箇所特定装置の開発，R&M，日本鉄道車両機械技術協会，pp.31-34，Vol.20，No.2，2012