

無絶縁軌道回路に対応した 新幹線用デジタルATCの開発

福田 光芳* 古川 信幸** 寺田 夏樹* 須貝 孝博***

Development of Digital ATC for Shinkansen using Non-insulated Track Circuit

Mitsuyoshi FUKUDA Nobuyuki FURUKAWA Natsuki TERADA Takahiro SUGAI

We have been developing digital ATC for Shinkansen using non-insulated track circuit. To adapt this system to the northern snowy area of Japan, we calculated characteristic of track circuit by computer simulations. We made the ground equipment of this system experimentally according to the results of the simulations, and tested the equipment on the commercial line. In this paper, we introduce the outline of this system and report the result of the tests.

キーワード：ATC，デジタルATC，無絶縁軌道回路

1. はじめに

(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構からの委託により、東北新幹線(八戸～新青森間)、北陸新幹線(長野～金沢間)の散水消雪区間にも適合可能なデジタルATCの開発を行った。開発にあたっては、東北新幹線で使用されているDS-ATCと互換性を保つことを前提とし、コストダウンを目的として無絶縁軌道回路方式を採用した。

まず、軌道回路シミュレーションを行い、十分なATC短絡電流が確保できることや、適切な列車検知特性が得られることの検討を行った¹⁾。そのうえで装置を試作し、実際の軌道を用いて軌道回路特性の検証試験及び実車走行試験を実施した。本論文では、試作装置を用いた現地試験結果について報告する。

2. デジタルATC

近年、様々な線区で導入が始まったデジタルATCは、軌道回路を用いて停止目標の情報等を車上へ伝送し、車上で停止目標の手前で停止できるような1段ブレーキパターンを作成し、それに従ってブレーキ制御を行う方式である^{2), 3)}。この方式の主な特徴は、以下の通りである。

- ① 1段ブレーキ制御により運転時隔の短縮や到達時分の短縮が図れる。

- ② 速度段ではなく、停止目標の情報を車上へ伝送することにより前方状況が把握可能となり、ナビゲーション情報の提供などが可能となる。
- ③ 車両性能に応じたブレーキパターンを列車毎に適用するため、最高速度やブレーキ性能が異なる車両が混在する線区でも、効率的な制御が可能となる。

なお、東北新幹線では2002年12月よりDS-ATCと呼ばれるデジタルATCが導入されている⁴⁾。

3. 地上装置の試作

3.1 前提条件とこれまでの検討

開発にあたっては、東北新幹線DS-ATCと互換性を保つほかに、散水消雪区間で漏れコンダクタンスが大きくなる場合にも十分な軌道回路長が確保できること、コストダウンのために無絶縁軌道回路に対応することなども前提条件となる。

漏れコンダクタンスは、軌道回路定数⁵⁾と呼ばれる軌道回路の電気的特性を示すパラメータの1つで、この数値が大きいほどレール間の漏れ電流が大きくなり、軌道回路電流が減衰する。漏れコンダクタンスの最大値は散水消雪区間で1.0S/km、一般区間で0.3S/kmを設計値としている。

無絶縁軌道回路の方式は、機器構成が比較的単純でありコストダウン効果が期待できる非共振式の電圧送電・電圧受電方式となっている。また、ATC波の送信は、列車検知を列車検知専用波(TD波)で行い、列車在線の

* 信号通信技術研究部(信号)

** (株)日立製作所 水戸交通システム本部
元、信号通信技術研究部(信号)

*** (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 信号通信課

特集：信号通信技術

先頭区間にだけ ATC 波を送信する踏込み送信方式となっている。

これらの前提条件を表1に示す。

表1 前提条件

項目	条件
地上から車上へのATC伝送方式	DS-ATCと互換性を有すること
軌道回路方式	無絶縁軌道回路 (非共振式、電圧送電・電圧受電方式)
ATC送信方式	踏込み送信方式
列車検知波(TD波)	MSK変調方式
軌道回路長	散水消雪区間：500m (1.0S/km) 一般区間：1000m (0.3S/km)
ケーブル長	14km
軌道回路境界ズレ	100m以内
ATC短絡電流	300mA以上

表2 主なシミュレーション条件

項目	条件
搬送波周波数	ATC：1500Hz, 1600Hz TD：2000Hz～2800Hz
短絡抵抗値	0.1Ω
軌道短絡位置	ATC：進入端外方50m TD：受信端、送信端、及び軌道回路中間
送信出力	ATC：45.5dBm (35W) TD：37dBm (5W)

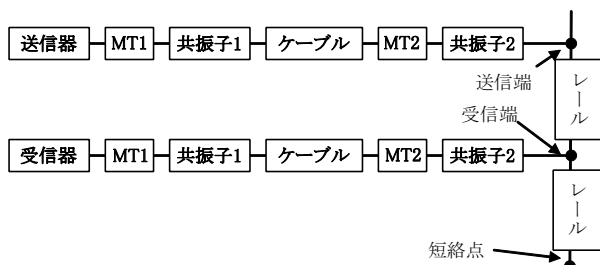


図1 シミュレーションに用いた軌道回路モデル

図1の軌道回路モデルを用いて表2の条件でシミュレーションを行った。シミュレーションでは、大きな漏れコンダクタンスの条件下で十分なATC電流を確保するために、送信の損失が小さくなること等に注目して共振子や整合変成器の特性の検討を行った。その結果、十分なATC短絡電流が得られること、及び天候変動等を考慮してもTD波による適切な列車検知が可能である見込みを得た¹⁾。なお、図1のMT1, MT2は整合変成器であり、共振子1はケーブル等の容量分と共振させて無効電力を低減することを目的として並列に挿入するインダクタである。また、共振子2はレールから50Hzの帰線電

流が流入するのを阻止することを目的とした直列共振のLC回路である。

3.2 地上装置の試作

シミュレーションの結果をもとに地上装置の試作を行った。試作装置の主な諸元を表3に示す。ATC波は前提条件に従い、DS-ATCと同じ搬送波周波数とした。また、TD波は、2025Hz, 2075Hz, 2125Hz, 2375Hzとした。図2に試作装置の構成を示す。機器室MT部は、図1のMT1と共振子1を含むユニットであり、現場MT部は図1のMT2と共振子2を含むユニットである。軌道回路と機器室の距離に応じてケーブル長は変わってくるが、軌道回路毎の特性を均一にするために擬似ケーブルを設け、送受信器から見たケーブル長が各軌道回路で同等となるようにした。

表3 試作装置の諸元

項目	内容	
ATC波	搬送波周波数	1500Hz, 1600Hz
	送信出力	45.5dBm (35W)
TD波	搬送波周波数	2025Hz, 2075Hz, 2125Hz, 2375Hz
	送信出力	37dBm (5W)
軌道回路数	7軌道回路 (レールへの接続は8箇所)	

1台の送受信器は2箇所のレール接続点について制御を行うことができる。一方はTD波の送信を行い、もう一方はTD波の受信を行う。TD波の受信に関しては、逆側の送信点からの信号も受信できるので、1台の送受信器で2つのTD波の信号を処理する。図1の右側の点線の矢印は、このようなTD波の送信と受信の対応を示している。また、ATC波については、任意の1箇所から送信が行われる。

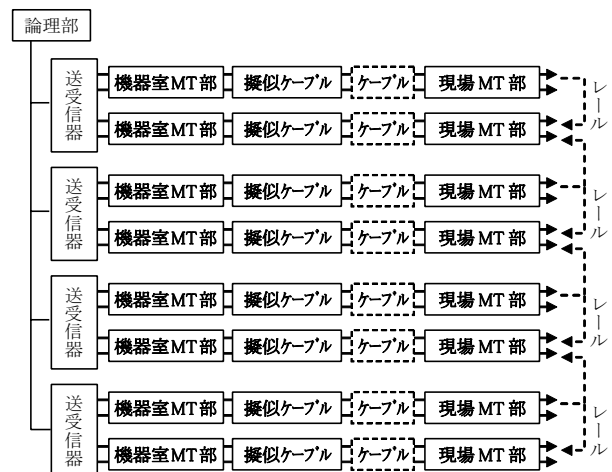


図2 試作装置の構成

4. 軌道回路特性の検証試験

4.1 試験設備の概要

試作した地上装置によって、シミュレーションで検討した軌道回路特性が得られることを確認するために、実際の軌道を用いて検証試験を実施した。試験は既設の有絶縁軌道回路の線区において、図3のような軌道回路境界を無絶縁化するための配線を追加して行った。図3(a)は既設設備の状態であり、レール絶縁の両側をインピーダンスボンド (ZB) で接続した構成である。検証試験においては、図3(b)に示すようにZBを介さずに絶縁をバイパスする配線を行った。また、後述する走行試験においては、作業間合いの時間等の理由から簡易的に作業す

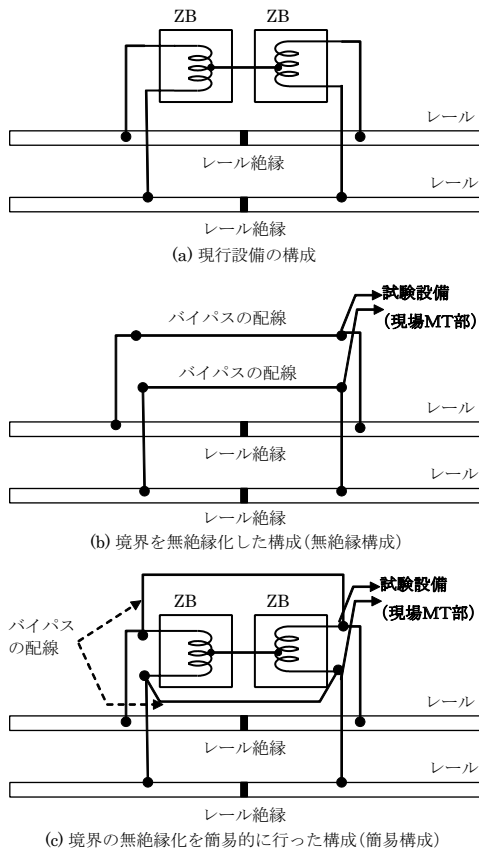


図3 無絶縁軌道回路の模擬方法

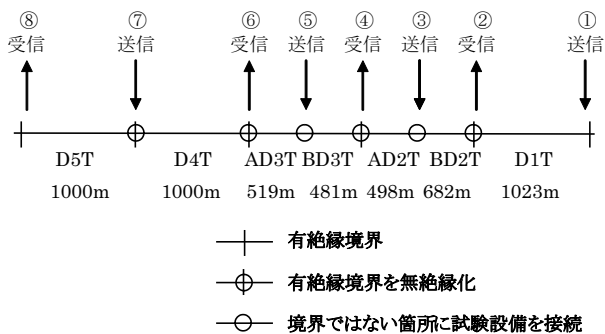


図4 試験区間の概要

る必要があったため、図3(c)に示すようにZBを接続したまま、簡易的に無絶縁化を行う構成で試験を行った。

試験区間の概要を図4に示す。図4の①～⑧の各箇所にて試験設備(試作装置の現場MT部)を接続した。図4の②, ④, ⑥, ⑦の箇所は、試験時に図3(b)のような配線を行ってから測定を行った。図4の③及び⑤については、レール絶縁等が無い箇所なので、レールへ試験用の導線を接続した。

一般区間(1000m, 0.3S/km)と散水消雪区間(500m, 1.0S/km)の両方の条件について検証する必要があることから、測定は主に図4に示すD4TとAD3Tを用いて行った。

4.2 列車検知特性の検証

TD波について、軌道回路の各部の電圧・電流を測定した。図5は測定した電圧・電流から算出した実効電力を示したものである。現場MT部の前後で測定値とシミュレーションの誤差がやや大きい箇所でも2dB程度であり、概ね一致しているといえる。

無絶縁軌道回路は車両を進入方の接続点(当該軌道回路の進入方起点)より外方で検知する「境界ズレ」の特性があるため、車両が低速で当該軌道回路区間へ接近すると、接続点に到達する前にATC波が送信される。例えば、D4TからAD3Tの方向に列車が進行している場合、列車が図4の⑥の点に到達する前にAD3Tで列車検知が

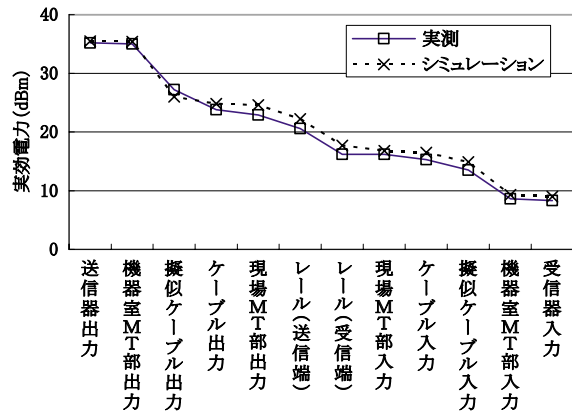


図5 TD波の各部の測定結果(D4T)

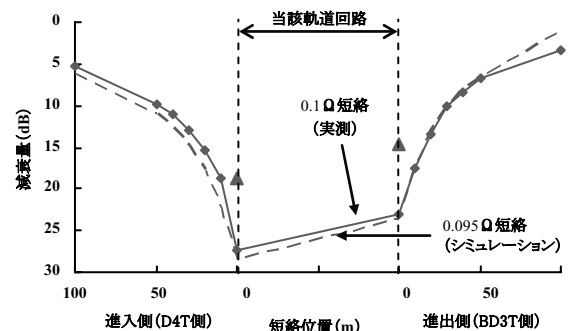


図6 進入・進出特性の測定結果(AD3T)

特集：信号通信技術

表4 列車検知位置の境界ズレ

軌道回路 名称	進入側		進出側	
	シミュレーション 結果 (m)	測定値 (m)	シミュレーション 結果 (m)	測定値 (m)
D5T	-	-	45	(27)
D4T	35	(20)	70	(50)
AD3T	58	(35)	38	33
BD3T	30	25	65	(33)
AD2T	45	(25)	35	35
BD2T	27	25	75	(50)
D1T	23	(8)	-	-

() は軌道回路境界を簡易構成とした箇所を示す。

行われ、⑤の点からATC波が送信される。この特性を調査した結果を図6に示す。横軸が短絡位置を示し、0mの位置がそれぞれレールへの接続点を示している。縦軸は短絡時の減衰量(短絡していない状態と短絡時の受信レベルの比)を示している。進入・進出特性についても事前の検討と同等の特性が得られることがわかった。

次に、仮想的にレール間を短絡した場合と列車走行時の軌道回路ズレの違いを確認するために、各軌道回路の境界ズレの測定を行った。測定結果とシミュレーション結果を表4に示す。走行試験時と条件を合わせるため、図4の②④⑥⑦の箇所では、図3(c)の簡易構成の配線を行った。表4の括弧の表記は、簡易構成の箇所であることを示している。シミュレーションは図3(b)の無絶縁構成で行っているため、簡易構成の箇所ではシミュレーションと測定結果の差が大きいが、その他の箇所では概ね一致している。

4.3 ATC 短絡電流の検証

ATC波についての各部の測定結果を図7に示す。図7はD4Tの各部の電流及び電圧を測定して算出した実効電力を示している。図7の「受信端外方」は前述の境界ズレを考慮したものであり、受信側のレール接続点から外側に50mの地点での測定結果である。測定結果とシミュレーションの結果は、概ね一致しており、シミュレーションによる検討が妥当であったことがわかる。

また、D4T及びAD3Tの短絡電流の測定結果をまとめたものを表5に示す。走行試験時に短絡電流が十分に得られることを確認するため、図3(b)の無絶縁構成に加えて、図3(c)の簡易構成でも測定を行った。測定時の条件は、散水等が行われていない通常の状態であり、最悪条件ではないが、前提条件に示された300mAに対して十分な短絡電流が得られている。

表5 ATC 短絡電流測定結果

	無絶縁構成	簡易構成
D4T	732mA	506mA
AD3T	916mA	967mA

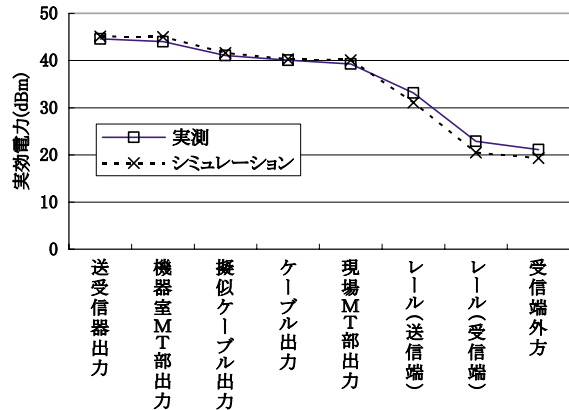


図7 ATC 波の測定結果 (D4T)

4.4 同一周波数信号の回り込みに関する検証

TD波の搬送波周波数は、TD波送信点毎に周波数を順々に変えて配置することになる。同じ周波数が割り当てられた箇所までにTD波が十分に減衰しない場合は、軌道回路間で干渉する恐れがある。シミュレーションの結果、3種類の周波数を繰り返し配置することで、十分な減衰が得られることが確認されている。シミュレーションの結果を検証する目的で検証試験を実施した。レールへの接続点を外れた場合に、TD波は減衰しにくくなるため、検証試験では、通常の状態だけでなく、中間の接続点を開放した条件でも測定を行った。図4の①を送信点、⑥を受信点、②を接続点の開放箇所とした。②の接続点を健全な状態とし、①以外の送信を止めた条件での受信レベルは暗ノイズと同等であった。また、②の接続点を開放した場合の受信レベル変化は1dB以下であった。これより、同一周波数回り込みの影響はないといえる。

5. 走行試験

5.1 走行試験の概要

走行条件は、ATCシステムとしての基本機能確認を目的とし、次の3項目を確認項目として実施した。

- (1) 列車検知及びATC情報の伝送が正常に行われることの確認
- (2) 軌道回路の境界ズレの検証
- (3) 列車検知及びATC信号送信のタイミングの検証

走行条件は、低速走行(約20km/h)と高速走行(約260km/h)の2種類とした。低速走行は境界ズレの長さについて4.2節の測定結果と照合すること、高速走行は列車検知及びATC信号送信のタイミングの検証をそれぞれ目的として設定した。

図8に走行試験を実施した区間のTD波の搬送波周波

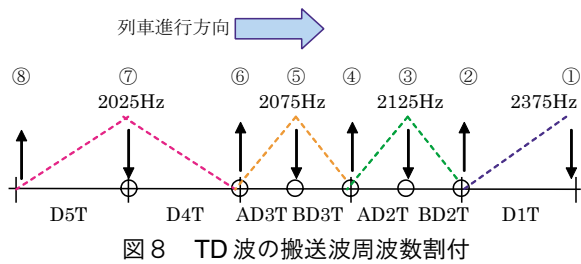


図8 TD波の搬送波周波数割付

数の割付けを示す。図8の①③⑤⑦がそれぞれ送信点であり、その両側の接続点を受信点である。1日あたりの走行は、低速走行1回、高速走行1回であり、4日間で8回の走行を行った。

5.2 列車検知及びATC情報の伝送

列車検知及びATC情報の伝送が正常に行われることの確認は、地上装置の監視及び車上受信状況により行った。合計8回の走行において、正しい順序で確実に列車検知が行われることを確認した。また、車上で誤った制御や表示が行われることがないことを確認した。

5.3 軌道回路の境界ズレ

軌道回路の境界ズレは、地上装置で列車有り／無し of 判定をした時の列車位置であり、進入側では列車の先頭位置、進出側では最後尾の位置が相当する。車上のデータと地上のデータを照合して境界ズレの長さを推定した。データの照合は2日目～4日目の低速走行について行った。

地上では、受信レベルを監視し、列車在線の判定に用いるしきい値と比較して、列車の進入・進出のタイミングを知ることができる。

車上では、ATC受電器（レールに流れる電流を検知するアンテナ）に受信されるATC波やTD波の大きさを分析することにより、地上装置とレールの接続点を通過したタイミングがわかる。図8の②④⑥⑦の箇所では、図3(c)の配線となっており、擬似的にレール絶縁が無い状態を作っているが、実際には絶縁を挟んだ両側の数mの区間には電流が流れないため、車上から見るとATC波が一瞬途切れたように見える。また、図8の③⑤の箇所は、TD波の送信点となっているが、列車の先頭車軸が接続点を通過するとTD波の電流がATC受電器に届かなくなるため、接続点を通過したタイミングを検知することができる。なお、図8の②④⑥⑦の箇所ではATC波が一瞬途切れたように見える現象は、本来の無絶縁軌道回路では発生しないもので、試験走行の条件に起因するものである。

地上で列車在線の判定レベルに達した時刻から接続点を通過するまでに走行した距離を速度発電機のパルスをもとに計算することにより、軌道回路境界ズレの長さを

計算することができる。各走行における計算結果を表6、表7に示す。表中の「事前測定」の欄は、表4の測定値を再掲したものである。若干の差はあるが、概ね一致しており、事前の測定が妥当であったこと、列車走行時に異常がないことがわかる。なお、事前測定との差は、レール間の短絡状況（短絡抵抗）の違い、及び走行試験時の測定誤差に起因すると考える。

表6 進入側の軌道回路境界ズレ

軌道回路名称	事前測定	走行試験結果		
		2日目	3日目	4日目
D4T	20m	18m～21m	20m～22m	8m～9m
AD3T	35m	21m～31m	30m～35m	4m～29m
BD3T	25m	11m～24m	27m～41m	21m～21m
AD2T	25m	13m～16m	18m～20m	9m～14m
BD2T	25m	20m～23m	21m～23m	19m～23m
D1T	8m	4m～6m	8m～16m	5m～8m

表7 進出側の軌道回路境界ズレ

軌道回路名称	事前測定	走行試験結果		
		2日目	3日目	4日目
D5T	27m	50m	30m	35m
D4T	50m	60m	55m	65m
AD3T	33m	35m	30m	50m
BD3T	33m	30m	45m	55m
AD2T	35m	35m	15m	40m
BD2T	50m	35m	40m	45m

5.4 列車検知及びATC信号送信タイミング

一般に、有絶縁軌道回路のATCでは各軌道回路にATC波が常時送信され、無絶縁軌道回路のATCでは列車の先頭位置の軌道回路のみATC波が送信される。無絶縁軌道回路では、列車の走行にともないATC波の送信点が次々と切替えられることになる。車上装置は、ATC波が一定時間以上受信できない場合は、異常と判断してブレーキ制御等を行うため、ATC波の切替えの時間が十分に短いことを確認することが必要である。

表8に送信切替え時に車上で信号が受信できない時間の測定結果を示す。表8は、4日目の結果を示しているが、これは、地上装置のATC波送信切替のソフトウェア不具合の改修を行ったためである。無信号となる時間について、このシステムにおける許容値は1200msであり、許容値を満足している。ATC波の送信切替えは、列車検知した後、手前の軌道回路のATC波の送信を止めてから、次の軌道回路のATC波を送信する。高速走行では、手前の軌道回路のATC波の送信が止まる前に次の軌道回路の接続点を通過してしまうため、無信号となる時間が長くなる。今回の試作装置では、無信号となる時間が許容値内に収まっているが、無信号となる時間は、軌道回路境界ズレや列車速度の他に、TD波受信のフィルタ

特集：信号通信技術

遅延、列車在線判定の処理時間、ATC波送信停止の制御時間、ATC波送信開始の制御時間などが影響する。これらはハードウェアの構成や制御方法等に依存するため、実用に際しては、これらの処理時間等に注意し、十分な余裕を持つ構成とする必要がある。

表8 送信切替え時に無信号となる時間

走行条件	軌道回路境界	無信号時間 (ms)
低速走行	D5T ⇒ D4T	160
	D4T ⇒ AD3T	140
	AD3T ⇒ BD3T	140
	BD3T ⇒ ADA2T	160
	AD2T ⇒ BD2T	140
	BD2T ⇒ D1T	140
高速走行	D5T ⇒ D4T	460
	D4T ⇒ AD3T	380
	AD3T ⇒ BD3T	480
	BD3T ⇒ ADA2T	520
	AD2T ⇒ BD2T	500
	BD2T ⇒ D1T	760

6. おわりに

軌道回路シミュレーションによる検討に基づいて、無絶縁軌道回路に対応したATC地上装置の試作を行い、検証試験を実施した。

検証試験は、列車なしの状態での軌道回路特性の検証を行う試験、ATCシステムとしての基本機能確認を行う走行試験に分けて実施した。

軌道回路特性の検証試験では、実軌道を用いた状態でも、シミュレーションによる検討と同等の特性が得られ、一般区間の条件で1000m、散水消雪を想定した条件で500mの軌道回路により列車検知及びATC波の伝送が可能であることの見込みを得た。

また、走行試験では、列車走行時に列車検知及びATC伝送の基本機能について、安定して動作することを確認した。

最後に、本研究開発を進める上で多大な協力をいただいた東日本旅客鉄道株式会社の関係各位に感謝いたします。

文献

- 1) 奥谷民雄, 中村信幸, 五十嵐得郎, 松木孝仁, 福田光芳, 渡辺郁夫, 網谷憲晴, 大沼晴彦: 新幹線用無絶縁ATC軌道回路の開発, 電気学会研究会資料 交通・電気鉄道/ITS 合同研究会 TER-06-89 / ITS-06-46, (2005)
- 2) 高重哲夫, 渡辺郁夫: 高速高密度区間用デジタルATCの開発, 鉄道総研報告, Vol.9, No.1, pp.49-54, 1995
- 3) 福田光芳, 渡辺郁夫, 牛島康弘, 佐藤佳彦, 川野 卓, 高重哲夫: 整備新幹線に適合するデジタルATCの開発, 鉄道総研報告, Vol.12, No.2, pp.5-10, 1998
- 4) 小林秀次, 横山啓之, 嶋田育男, 有馬雅紀, 網谷憲晴: 新幹線DS-ATCシステム～新幹線用デジタルATCの開発～, 鉄道における国際サイバネティクス利用国内シンポジウム 論文集, 2003.11
- 5) 高重哲夫, 渡辺郁夫: 軌道回路 (7), 鉄道と電気技術, Vol.10, No.10, pp.63-67, 1999.10