

車載マイクロコンピュータによる列車制御

長谷川 豊 中村 英夫

(財) 鉄道総合技術研究所

列車制御における車載マイクロコンピュータの応用例として、列車の速度超過や信号冒進の防止を主目的としたATS-SPシステムと、列車制御全体の革新を目指した無線による運転制御システムを紹介する。システムの基本的な考え方は、信号機の位置や制限速度と列車の加減速性能などに関するデータを車上に持ち、列車自らが走行位置を検出することによって個々の列車と場所に依存した制御を車上で処理しようというものである。これによってスピードアップや高密度運転等に関して従来にない効率的な制御が可能となるだけでなく、工事と保守に手間の掛かる地上設備の改良や新設が不要となるなど多くの利点が生まれる。

Train Control by on-board Microcomputers

Yutaka Hasegawa Hideo Nakamura
Railway Technical Research Institute

A new automatic train stopping system named ATS-SP and an innovative train control system by radio are presented. The new aspects of these two systems are that the on-board system has track and vehicle data such as signal positions and braking performance, and continuously detects the train position by itself. These systems have high efficiency at high density operation and speed-up of trains and decrease the cost required at maintenance and installation of wayside facilities.

1. はじめに

鉄道では自動運転や無人運転と言った列車制御の高度化が進みつつある。しかし、制御の仕組みの大部分は地上にあり車上の役割はきわめて小さいのが現状である。これには新しい制御システムのベースとなる安全を司るシステムが地上主体の制御形態であることが大きく関係している。安全を司る部分は保安制御と呼ばれているが、数十年以上にわたる使用経験に裏付けされた方式であり、その大幅な変革には現状設備の全面更新と長期に渡る入念な試験を必要とする。また、地上主体の制御方式は鉄道が得意としてきた定型大量輸送を行う上での問題が少なく、変革を促すニーズが少なかったことも従来方式を踏襲してきた大きな原因と考えられる。しかしながら、近年の輸送環境の変化から鉄道は高速化や高密度化といった性能向上を個別的、部分的に達成しつつ、一方で経済性の低減と保守性向上を図っていくことが求められている。このためには、地上が主体となる制御形態から、保安制御を含めた車上主体の制御方式への転換が今後の列車制御の重要な方向として認識されつつある。その技術的背景にはマイクロコンピュータの性能と信頼性向上、そして地上-車上間の情報伝送技術の発展がある。列車という振動や電磁雑音等の厳しい環境条件と制約された設置スペースの中で高度な処理を行わせるにはマイクロコンピュータの導入が必須であり、それを活用するには地上との情報伝送手段を欠くことが出来ないからである。

ここでは、車載マイクロコンピュータによる列車制御として、実用化の近いATS-SPシステムについて述べ、その発展として研究開発中の次世代運転制御システムを紹介する

2. 列車制御とATS

列車制御とは列車を安全かつ効率的に運転するための制御を意味する。安全性と効率性という必ずしも両立しない要求を混乱なく実行するために、現状のシステムは図1のように安全を司る部分を保安制御として独立させている。そして列車進路

の設定や自動運転等のサブシステムは保安制御の許可と監視のもとで機能する構成をとっている。保安制御はさらに構内保安制御、列車間隔制御、および踏切制御と呼ぶ機能に分かれており、構内保安制御が駅におけるポイントの転換と進路の構成を行う。列車間隔制御では列車衝突の防止のため列車に走行許可区間を指示し、未許可区間への列車進入を規制する。この規制の仕方には2種類あり、進入防止のためのブレーキ制御を常時自動的に行う方式をATC (Automatic Train Control) と呼ぶ。一方、通常のブレーキ操作は運転士が行い、運転士が操作を誤ったときに機械がバックアップしてブレーキを掛ける方式をATS (Automatic Train Stopping) という。ATCは安全性の点でATSより厳しい性能を要求され、高価となるため、新幹線と一部の在来鉄道にのみ導入されている。ATSは既存の信号設備に追加する形で構成できる利点があり、大部分の鉄道はこの方式を採用している。

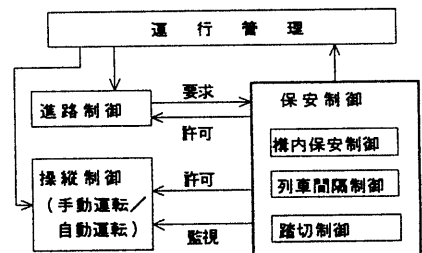


図1 列車制御システムにおける保安制御

3. 現状のATS方式

列車間隔制御では列車進入許可を区間の入り口に設置した信号機で列車に指示する。信号機の指示の基本は「停止」と「進行」の2種類であるが、列車の高速化と高密度化にともない中間段階の速度まで指示する必要が生じ、現在は3~5種類の表示が行われている。図2は4種類の場合の例であり、運転士は太線で示す速度のように中間段階の信号機を規定速度以下で通過し停止信号手前に停止することとなっている。

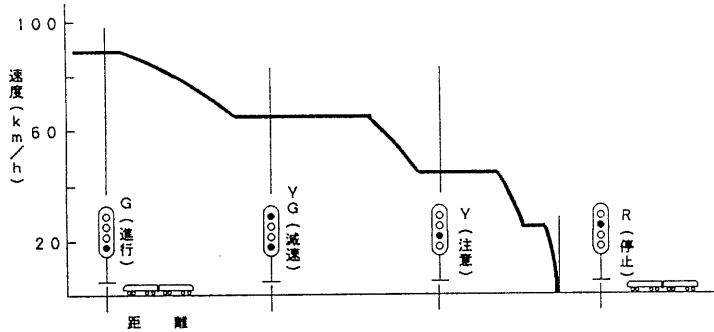


図2 信号機の規制速度と正常運転の速度-距離パターン

A T Sは運転士が規定速度に従わないときブレーキを掛け、最悪の場合にも列車が停止信号機内方に進入することを防止するシステムである。このためには列車が信号機の指示速度を検出し、指示速度に応じて速度を監視する機能が必要になる。これら機能の実現方法は、列車の密度や速度といった条件の違いから極めて多様な方式が実用されている。ここでは上記機能別に見た主要な方式とその特長を述べる。

(1) 指示速度の検出

(a) 地点方式

前方信号機が指示する速度を信号機手前に設置した地上子通過時に検出する方式である。この方式の欠点は、地上子通過後に指示速度が上位に変化しても列車は次の地上子を通るまで低い速度のまま走行しなければならないことである。すなわち信号変化に対する追従性が低い。この欠点を解消するには、最初の地上子と信号機の間地上子を追加する方法があり、その間の距離が長い一部のシステムで採用している。

地上子としては共振コイルの周波数を変化させる変周式と呼ぶタイプが一般的である。列車は車上発振回路の周波数が地上子通過時に変位することで信号機状態を検出する。変位周波数は複数とれ現状では最大6状態程度を列車で識別できる。より多くの情報を識別する場合にはトランスポンダと呼ぶ地点情報伝送装置が使用されている。トランスポンダの使用はA T S - P形と呼ぶシステムで数年前から実用になっており、そこでは48

ビットの制御情報を伝送している。

(b) 連続方式

指示速度を連続的に検出する方式である。信号変化に即座に追従できることが地点方式より優れている。保安制御では列車の存在を検知するためレールを使った電気回路が車輪で短絡されることを利用

している。この信号電流の周波数あるいは変調周波数を複数用意し、指示速度に応じて地上で切り換える。列車は信号電流を常時受信しており、その周波数から指示速度を識別する方式である。従来は5～7種類程度を識別していたが、20種類の速度を指示できるシステムが最近実用化されている。

(2) 速度監視

地上から指示された情報に基づいて列車速度を監視する方法には大きく分けると2方式がある。

(a) 監視のない方式

速度の監視を行わない最も簡易な方式であるがJ Rの大部分で使われているA T S - S形と呼ぶシステムはこの方式をとっている。このシステムでは、信号機が停止であることを地上子により検出し、停止であれば警報ベルを鳴動する。そして運転士がブレーキを5秒以内に操作しなければ非常ブレーキを動作させて列車を停止させる。高速列車やブレーキ性能の低い貨物列車が混在する鉄道での経済的で運転効率の良いシステムである。

(b) 速度段階式

指示速度を検出した後は次の指示があるまで、その速度を越えないよう監視する方式である。列車が停止信号機に接近するとき、監視速度は図3のように運転士の正常運転速度に抵触しない形で段階的に低下させることとなる。列車は指示速度検出後ただちに速度監視を開始するので、速度規制位置は地上の速度指示点である地上子や信号電流変更位置によって決まる。指示速度の検出は地

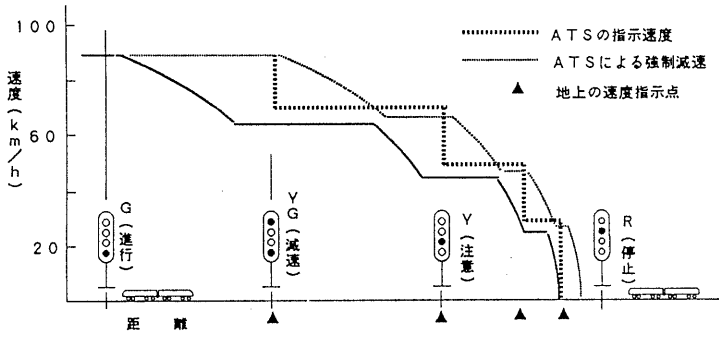


図3 速度段階式の監視速度と速度指示点

点式，連続式のいずれでもよいが，速度段階が多くなると多数の速度指示点を列車の減速性能を考慮して地上に配置しなければならない。

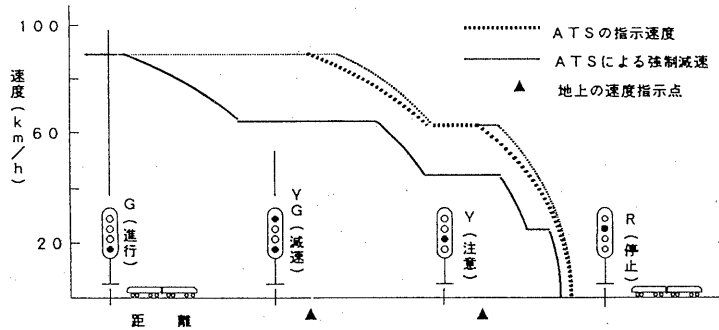
(c) 速度パターン式

指示速度を検出したとき，信号機手前で指示速度に減速できる速度-距離曲線（速度パターン）を列車が設定し，その速度を越えないよう監視す

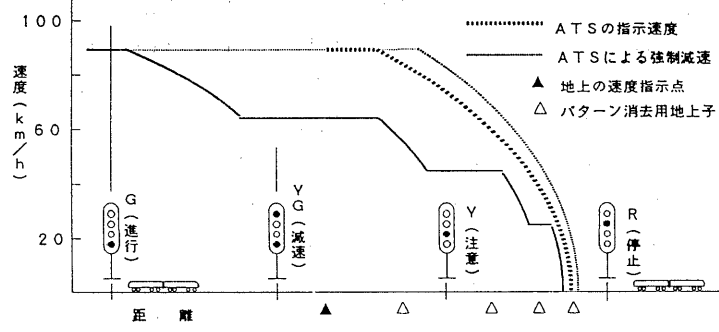
者の場合には情報量が多くなるため制御情報の伝送にはトランスポンダを使用し図4の1段式を採用している。

速度段階式では最も減速性能の低い列車に合わせた速度規制となるのに対し，速度パターン式は車上システムの処理が増えるが列車の減速性能に応じた速度規制を行え，減速性能の異なる列車が

混在する場合に効率よく対処できることが大きな長所である。また，図3と図4の比較から分かるように，パターン式は段階式より安全上必要な最終時機までシステムのブレーキ介入を遅らすことができ，運転士の裁量範囲の広いことも特長である。



(a) 2段パターン（固定）式



(b) 1段パターン式

図4 速度パターン式の監視速度と速度指示点

以上，現状の各種方式を概観したが，柔軟性が高く，システムのブレーキ介入が必要最小限の時点まで発生しないことから，図4の1段パターン式が最も優れている。ただし現在のこの方式は指示速度の検出がトランスポンダを用いる地点式である。信号変化への追従性を高めるには，速度パターンを消去する地上子が複数必要となり，地上設備が大がかりになることが問題といえよう。

4. ATS-SPシステム

(1) 概要

このシステムは前章で述べた1段速度パターン制御をJRのATS-S形相当の簡易な地上設備で実現することを主たる目的としている。指示速度の検出は信号機の停止か停止でないかを地上子から識別するだけでよく、信号機までの距離情報を受信する必要はない。車上のシステムには、地上子位置とそれに対応する信号機までの距離を対にした線路データと、列車の走行位置を常時検知する機構を備える。地上子を通過した列車はその走行位置から線路データを検索して距離情報を読みだし、速度パターンを発生する。図5にシステム概念を示した。

(2) 列車の位置検出

列車の走行位置検出は従来のシステムにない重要な機能である。車上で列車の走行位置を連続的に知るには、絶対位置を直接検出する方法と基準点からの走行距離を基に算出する方法がある。このシステムでは後者に属する車軸の回転数を積算する方式を採用している。絶対位置を検出する方法としてはGPS (Global Positioning System) やジオスターなど人工衛星を使う方式が主流であるが、トンネルの多いわが国では問題があるし、高密度運転に適用するには精度も十分でない。また、走行距離を検出する他の方法としては、ドップラー速度計や加速度センサを使用する方式も

あるが、それ単独では確実性が低いとみている。

車軸の回転数を利用する方式の最大の問題は車輪の滑走や空転により大きな誤差を生じることである。この対策として、回転数から求めた速度や加速度を監視し、滑りを検出して距離補正するソフトウェアを組み込んでいる。空転滑走の発生し易い通勤電車で試験した結果でも実用的な精度が得られる見通しである。

(3) 絶対位置の検出と修正

走行距離を検出する方式では基準となる絶対位置が必要となる。このシステムでは基準地点に複数の地上子を設置し、その間隔の組み合わせから絶対位置を判定している。基準地点の地上子は5個からなり合計9,139の組み合わせを表すことができる。位置が一度確定した後は、地上子を検出するたびに線路データの該当地上子を検索し、該当するものがあれば列車位置をそのデータ位置におきかえる。すなわち、滑りや車輪径誤差による走行距離の誤差は地上子検出毎にクリアされる。地上子間隔は高々1km程度であり、このあいだに大きな誤差が発生しない限り位置精度は十分高いものになる。基準地点は列車の始発駅などの主要駅(数10km単位)に設置する程度で済む。

(4) 指示速度の検出と地上子

1段速度パターン方式をとるこのシステムでは信号機が停止であるか否かの2状態を地上子から

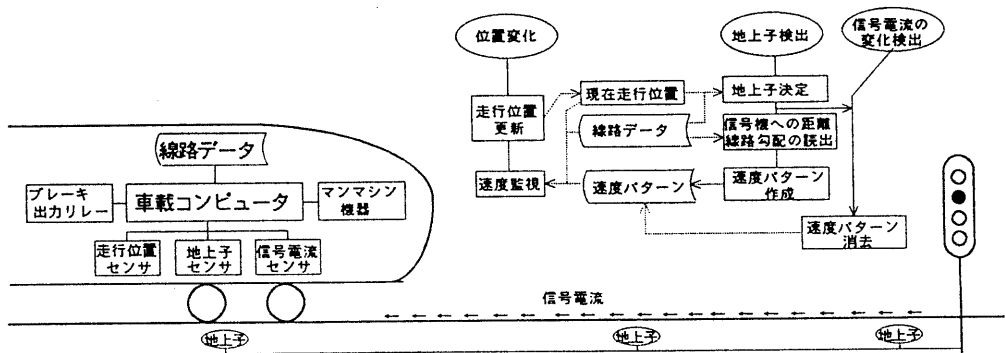


図5 ATS-SPシステムの概念

判別できれば良い。このため、ATS-S形線区では既存の地上子をそのまま使用できる。ただし、基準地点用の地上子は処理を単純にするため信号用とは種類を変えることとしている。また、列車の分岐方向によっては通過速度制限を必要とする箇所には分岐速度制限専用の地上子を設ける。信号機用と同じ地上子でも車上システムは検出位置から地上子の属性を判別できるが、このシステムを搭載しないATS-S形専用の列車運転も支障なく行えるよう別種別としている。

(5) 信号機の変化検出

地上子通過後に信号機が変化したことを列車が検知する手段として、このシステムでは二つの方法を用意している。一つは、トランスポンダ式の1段速度パターン制御システムと同様に、最初の地上子と信号機の間にパターン消去用地上子を複数の設置する。これらは全て同一状態を示し、列車はこれらの消去用地上子を通じた際に進行状態に変化しておれば速度監視のパターンを消去する。信号変化の検出遅れは消去用地上子の間隔によって決まるから高密度運転線区ではある程度多くの地上子が必要になる。もう一つの方法はレールに流れる列車検知用の信号電流の変化を車上で検出する方式である。ただし、これを適用できるのは図6のような信号制御方式をとる線区である。信号機が「停止」から「注意」に変化したとき、信号電流の位相が変位し、手前の信号機がそれを検知して「注意」から「進行」に変化する方式である。この方式はJRの大部分の線区で使用されており、車上システムは列車床下部に設置したアン

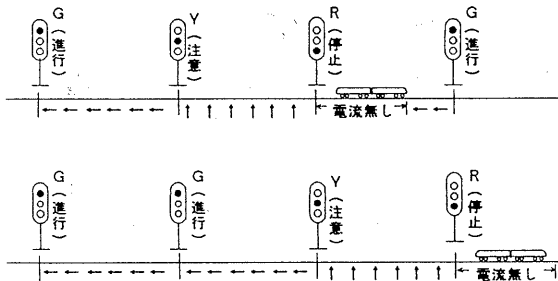


図6 信号電流の位相識別による信号機制御

テナで電流の位相変位を検出して信号変化を識別する。これによって1段速度パターン式の弱点である信号変化への追従性の問題が解消し、消去用地上子も不要となるため経済的で高能率なシステムとなる。

(6) 車上システムの構成

車上のシステムの構成を図7に示した。速度発電機は運転士の速度計にも使用されているもので車輪の回転数に応じた周波数の電圧を発生する。車上子は地上子を検出するアンテナであり、それと接続した発振処理ユニットが発振周波数の変位を識別する。受電器はレールの信号電流を受信するアンテナであり、電流の位相変化を送受信ユニットにて検出する。車上システムの中心となる処理装置はこれらの機器から信号を読み取って走行位置の計算、速度パターンの発生消去、および速度監視を行い速度超過の際にI/Oユニットを介してブレーキ機構に制動指令を出力する。また、表示器には制限速度や各種警報、システムの動作状態を表示する。線路データはROMに格納するのが基本であるが、車上情報設定器からICカードを使って時刻表データとともに読み込む方式も選択できる。システムには高い安全性が要求されるため処理装置には鉄道で実績のあるバス同期2重系の8ビットプロセッサを使用している。

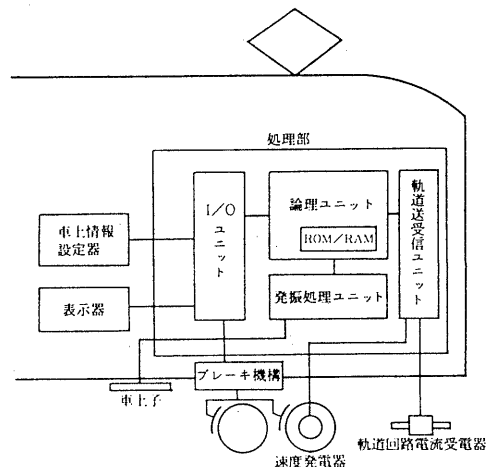


図7 ATS-SPの車上システム構成

(7) オプション機能と将来の発展性

列車の速度監視を中心にシステムの仕組みを述べたが、車載コンピュータが列車位置を把握していることを利用した各種機能を追加できる。代表的なものとしては「停車駅の誤通過防止」と「踏切警報時間の調整」である。いずれの場合も列車の時刻表（駅の通過停車）データをシステムへ入力する必要がある。

列車ダイヤの複雑化とともに運転士が停車駅を誤って通過するミスが見られるようになり、これを未然に防ぐための機能が誤通過防止である。システムは停車駅に接近すると停車用の速度パターンを発生し通過を防止し、列車が所定位置に停車したときパターンを解除する。

踏切では列車が踏切手前に接近すると駅の通過／停車に関わらず警報を開始する単純な制御方式が多く残っている。駅近傍のこのような踏切に対し停車する旨の情報を列車から地上へ送信して警報開始時期を遅らせるのが警報時間の調整機能である。情報の送信には信号電流検出用の受電器を利用し、地上側の受信はレールに沿わせて敷設したループコイルで行う。このループコイルは列車への情報伝送にも使用できるので地上からは絶対位置情報を伝送し、位置検知における基準地点の役割を持たせている。

将来の発展としては次章で述べる次世代運転制御の車上システムへの拡張と、曲線での車体傾斜やトンネル出入口での換気孔開閉など列車位置情報を利用する車両制御機能の統合化を考えている。

(8) 開発段階

JRの西日本、九州および東日本の各社の協力を得て実車走行試験を行い、各種条件のもとで性能を確認した。寒冷地での高速走行と耐雪耐寒試験を残しているが、次年度には実用化線区の登場を期待できる段階にある。

5. 次世代運転制御システム

ATS-SPシステムでは車上のコンピュータが列車位置を検出している。この位置情報を無線伝送路を介して地上に送信し、地上からは指示速度に関する情報を列車に送信することにより、列車間隔制御を行おうとするのが次世代運転制御システムの基本的考え方である。地上システムは各列車から受信した情報に基づいて列車を追跡し、指示速度を決定する。また、列車位置を把握している地上システムはポイントの転換や踏切の警報遮断に関する制御機能を持ち、従来の保安制御全体がこのシステムにより地上を含めて再構築される。図8にシステムの概念を示した。無線としては、在来線では空間波を使用し新幹線では現状の漏洩同軸無線を利用することを考えている。このシステムでは、列車検知用の電気回路や信号機、速度指示のための地上子など線路沿線の機器の多くは不要となり、経済性と保守性の大幅な向上が図れる。さらに、列車位置の把握が従来の区間単

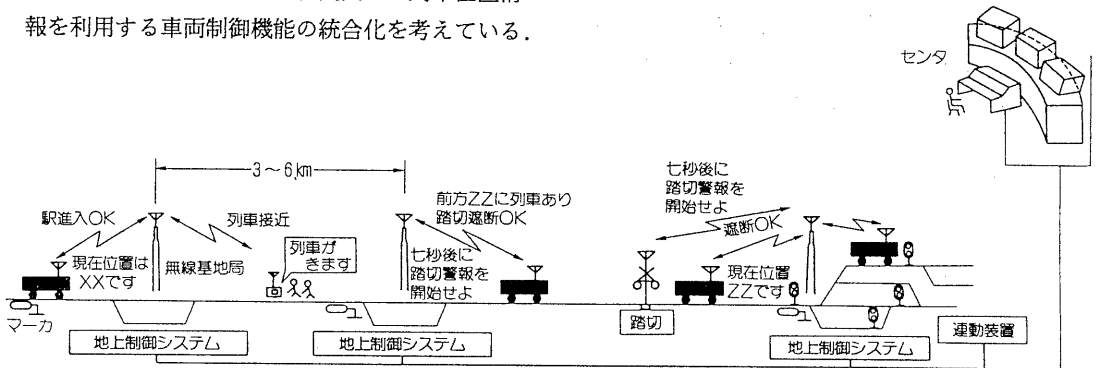


図8 次世代運転制御システムの概念

位の検知から連続検知に変わり、車上の速度監視が1段速度パターンをとることと相俟って、列車間隔をブレーキ性能の限界近くまで短縮できることが大きな特長である。

地上と車上の機能分担からみると、走行速度と位置から踏切警報要求を発したり、地上からの進路の取消要求に应答するなど間隔制御以外の役割が車上のシステムに加わり、車上主体の制御形態となる。また、先行列車の位置と速度を考慮した省エネ運転や時隔短縮走行などの機能を車上システムに付加することもできる。

システムの研究開発は一部に運輸省の補助金を受けて研究グループで進めており、これまでに無線や位置検出の基礎的性能把握と制御ソフトウェアの室内試験を終了し、平成三年度はJ R西日本の御協力のもとに山陽新幹線での現地試験を実施している。そして、次年度よりJ R東日本と共同で規模を拡大した試験を上越新幹線にて行う計画となっている。

8. おわりに

車載コンピュータによる列車制御として研究開発中の二つのシステムを紹介した。これ以外にも車載コンピュータの利用として車両機器の制御や動作モニタリング、サスペンションのアクティブ制御あるいは旅客情報案内などが考えられており、列車のインテリジェント化は今後ますます拡大する方向にあり、その発展を期待したい。最後に、紹介システムの開発や試験に御支援と御協力を頂いている運輸省をはじめJ R各社と関係各社の方々に厚く謝意を表する次第である。

文 献

- 1) 中村, 佐々木: "ATS-SPシステムの開発", 鉄道総研報告 Vol. 5 No. 4(1991. 4).
- 2) 長谷川: "無線式列車制御システム", 鉄道総研報告 Vol. 2, No. 10 (1988. 10).
- 3) 熊谷, 平尾, 長谷川: "次世代踏切制御方式", 鉄道総研報告 Vol. 4, No. 11(1990. 11).
- 4) 稲毛, 山本, 平尾, 長谷川: "次世代運転制御システムの室内実験", 鉄道総研報告 Vol. 5, No. 1(1991. 1).
- 5) 池田, 長谷川: "車輪回転による列車位置検出特性", 鉄道総研報告 Vol. 5, No. 4(1991. 4).
- 6) 中村, 佐々木, 他: "32ビット制御用計算機システムのフォールトトレランス設計と評価", 電子情報通信学会 第25回FTC研究会 (1991. 7).