

## 無線による列車制御システム ATACSプロトタイプ試験結果



立石 幸也\* 武子 淳\* 黒岩 篤\*\* 森 健司\*\*\* 青柳 繁晴\*\*\*\* 齋藤 信哉\*\*\*\* 鈴木 康明\*\*\*\* 渡邊 貴志\*

これまで鉄道において安全を確保するための様々な仕組みが開発され、鉄道の安全と効率的な輸送に貢献している。しかし、従来の仕組みでは地上設備による制御のため、コストの低減、より一層の安全性の向上、新たなサービスの提供などの面で課題が残されている。そこで、鉄道制御システムのフルモデルチェンジを目的に、これまでの地上設備主体の制御方式に替えて、情報技術をベースに地上・車上の制御分担を機能面から見直し、再配置した安全・シンプルな列車制御システムATACS(Advanced Train Administration and Communications System)の開発を行なってきた。

本稿では、このATACSの実用化に向けたプロトタイプ試験を仙石線で実施した際の試験結果の概要について報告する。

●キーワード：列車制御、デジタル無線、間隔制御、車上位置検知

### 1 はじめに

1830年のイギリスでの鉄道の開業以来、列車の安全を確保するために様々な手法・装置が開発され、導入されてきた。現在使用されている保安装置はこれらの開発・改良の上に成り立っている。しかし、これまでの装置は地上設備による制御ため、コストの低減、より一層の安全性の向上、新たなサービスの提供などの面で課題が残されている。そこで、現在および将来の技術水準を展望の上、鉄道制御システムを機能面から見直し、新しく構築する場合のあるべき姿を検討した上で、21世紀にふさわしい新しい列車制御システムATACSの開発を行なった。

近年、移動体通信やコンピュータ等による情報通信技術は著しい発展を遂げている。ATACSは、この情報通信技術を地上を移動する鉄道システムに組み入れ、これまでの地上設備主体であった制御方式に替わり、地上・車上装置の制御分担を機能面から見直し、再配置した安全・シンプルな鉄道制御システムである。

本システムでは、地上制御装置はネットワークで結合されており、車上装置と地上装置は別のネットワークとして構成されている。そして、地上・車上間も無線伝送路により有機的に結合された自律分散型のネットワーク

として構築されている。

### 2 情報通信技術による列車制御

列車制御における要素として、以下の3点が挙げられる。

- (1) 検知：列車等の位置を検知する
- (2) 伝達：検知した位置を他の列車、地上装置、地上作業員等への伝達・受信する。
- (3) 制御：受信した位置情報に基づき制御を行う。

これらの3要素は列車が軌道上を走行するという、鉄道の本質に変化がない限り、将来においても変わらないと考えられる。以下に、従来の3要素とATACSにおける3要素をまとめる。

#### 2.1 検知（列車位置検知）

従来の列車位置検知は、最も多く用いられており、確実な手段である「軌道回路」を基本としてきた。しかし、課題として、

- ・車両軽量化による検知性能
  - ・軌道回路の区間長の変更に時間とコストを要する
  - ・軌道回路のメンテナンスコストが大きい
- などの問題点を抱えている。

ATACSでは上記の課題を考慮し、列車の位置検知は地上装置ではなく、車上側で行なう車上位置検知として

いる。

## 2.2 伝達

従来の方式では、運転に必要な情報は信号機や標識等を運転士が目視で確認し、情報を得ている。

しかし、課題として以下のものが挙げられる。

- ・速度向上や運転時隔の短縮を行なう際、信号機の表示変更や信号機の移設などを伴う場合があり、時間やコストを要する。
- ・信号機等の地上設備の保守費が大きい。
- ・周辺環境により、信号機等の視認性確保対策が必要となる。

ATACSでは、現行の地上信号機に替えて地上と車上間との情報伝送（伝達）を無線通信により行い、信号を車上へ表示する方式である。

## 2.3 制御

制御における課題は、

- ・建設コスト、保守コストが高い。
- ・線路の配線変更に伴う切替工事に人手と時間を要する。
- ・踏切ごとに配線が異なり、管理が複雑となる。
- ・踏切の警報開始地点を一定にしているため、列車の速度により警報時間にばらつきが生じる。
- ・制御のための膨大な量のケーブルの管理が必要。

などが挙げられる。

この点に関してATACSでは、現在の軌道回路をベースとする膨大な地上設備とリレーロジックによる制御に替えて、コンピュータと簡単な論理による制御を実現している。

## 3 プロトタイプ試験の経緯と目的

ATACSの開発は、第1期として1997年9月～1998年2月に基本機能の試験を行い、第2期として2000年10月～2001年2月に応用機能の試験を実施し、無線による列車制御システム実現の技術的な可能性を得た。<sup>1)</sup> これらの成果を受け実用化を目指し、プロトタイプ試験を実施した。1期からプロトタイプ試験までの関係を図1に示す。

試験の主な目的は、

- ・長期耐久試験による安全性・信頼性の検証

- ・実用化に向けた各種機能の試験、運転取扱いの検証
- ・システム故障時の制御と復旧時の運転取り扱いの3点である。

### (1) 長期耐久試験による安全性・信頼性の検証

長期間にわたり多くのデータ収集を行うことで車上位置検知、進路制御、踏切などの機能の安全性確認を行うとともに、地上および車上の各装置の信頼性を検証する。

### (2) 実用化に向けた各種機能の試験、運転取扱いの検証

実用化に必要な各種機能および2期までの結果をふまえて改良した機能、異常処理などの妥当性確認を運転取扱いの検討と併せて検証する。

### (3) システム故障時の制御

システムダウン後の復旧処理など、システムのメンテナンスやシステム故障を考慮した機能を検証する。

## 4 プロトタイプ試験の概要および機器構成

### 4.1 試験概要

プロトタイプの開発は、2001年より仕様の検討を開始し、地上・車上設備の設置および搭載工事を行い、2003年10月より仙石線において約1年半に渡る試験を実施した。

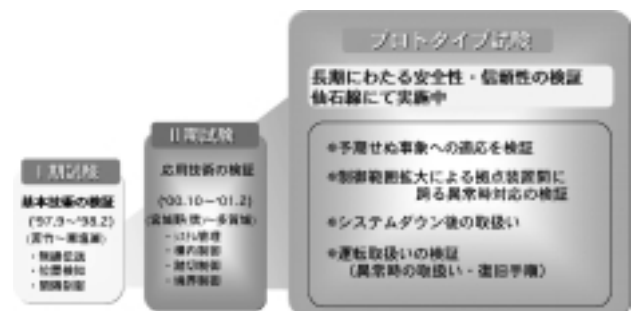


図1 プロトタイプ試験の位置付け

### 4.2 試験機器構成

線区を複数の制御範囲に分割し、拠点装置、無線基地局、在線管理装置、システム管理装置を設置した。また車上には、車上制御装置と車上無線局を設置した。プロトタイプシステムの全体構成を図2、車上システム構成を図3に示す。

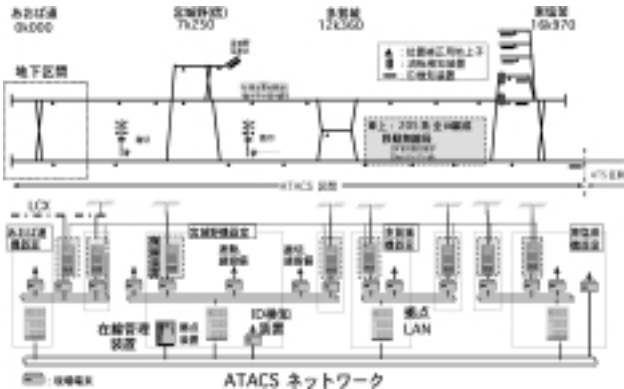


図2 プロトタイプシステム全体構成概要

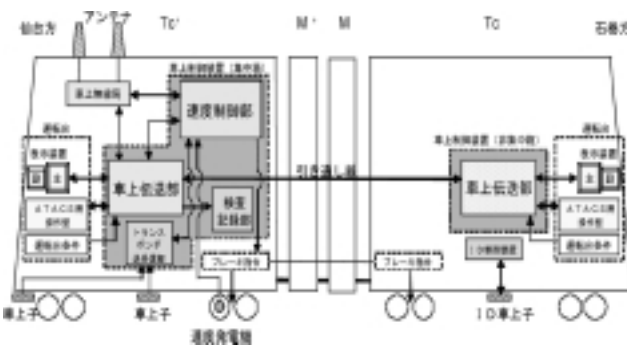


図3 プロトタイプ車上システム構成

(1) 拠点装置

車上からの位置情報に基づく列車追跡、列車追跡情報に基づき連動並びに転てつ器の転換制御を行なう。また、列車追跡情報と進路情報に基づき停止限界の作成を行う。また、列車追跡情報に従い無線のチャネルの管理や滞泊(駅構内で列車の電源が切れている状態で留置)している列車の管理なども行う。

(2) 在線管理装置

ATACS制御エリア全体の制御情報を把握する装置であり、制御エリア内の在線列車情報の記憶、拠点情報のバックアップなどを行う。

(3) システム管理装置

システム全体の管理を行う装置であり、列車の運行表示、臨時速度制限の設定、線路閉鎖の設定、各装置の構成制御などを行う。

(4) 無線基地局

拠点装置と接続し、車上無線局を介して車上制御装置との情報伝送を行う。1つの無線基地局で12列車との通信を行なう。

(5) 車上制御装置

列車の走行を制御する装置であり、自列車位置の算出、

地上からの停止限界に基づく速度照査パターンの作成、作成したパターンと列車速度を照査することによるブレーキ制御等の機能を有する。また、運転台の運転表示画面への情報出力も行う。

(6) 車上無線局

車上制御装置と接続し、地上側の無線基地局を介して車上制御装置と地上拠点装置との間の情報伝送を行う。



図4 車上機器搭載状況および地上アンテナ

5 プロトタイプシステム機能仕様

5.1 列車間隔制御

ATACS車上制御装置は、地上(拠点装置)から伝送された停止限界位置や、車上データベースに記憶している各種速度制限や線路勾配などの情報から、速度照査パターンを作成し、列車の速度制御(ブレーキ制御)を行うことにより列車間隔を制御する。

停車場やき電区分装置の箇所など、停止限界が作成されない特殊区間を設ける箇所も一部あるが、その他の部分では、先行列車の後端が後続列車にとっての停止限界となる。停止限界が後退するのを防ぐため、原則として列車の退行は認めない。(但し、退行可能区間を設けた停車場においては、停止位置を直すためなどの一定範囲内の退行運転は可能としている)

5.1.1 位置検知

車上での位置検知は、列車に設置した車上子を用いて地上子を検知し、取得した地上子IDにより車上の線路データベースから対応する地上子の設置位置を検索して絶

対的な位置を取得する。そして、車上でその後の走行距離を積算することにより連続的に位置検知を行う。

列車の走行に際しては、設定された進路を地上から経路情報として車上に伝送し、車上制御装置はこの経路に対し車上の線路データベースを参照して位置を検知する。これにより駅構内において複数の進路がある場合でも車上で位置の算出ができる仕組みとなっている。

線路常数の変更を容易にするためこのデータベースを複数持つとともに、常にこのバージョンをチェックしてデータベースの正常性を保障している。



図5 車上位置検知

速度発電機による走行距離算出においては、車輪の滑走・空転が発生する可能性がある。滑走・空転が発生した場合には位置検知に誤差が生じ、その規模によっては危険側事象に発展する恐れがある。そこで、これらを未然に防止するために、速度発電機を非駆動軸のATC軸に取付けることを基本とするが、もし滑走・空転が発生した場合においても位置検知誤差を少なくするよう補正論理により対策を行っている(図5)。

5.1.2 列車位置情報等の無線伝送

ATACSにおける無線伝送では、伝送品質向上のためダイバーシチ受信方式および、リードソロモン符号による誤り訂正を行い、フレーム受信率99.9%を確保できるシステム構成とした(図6)。

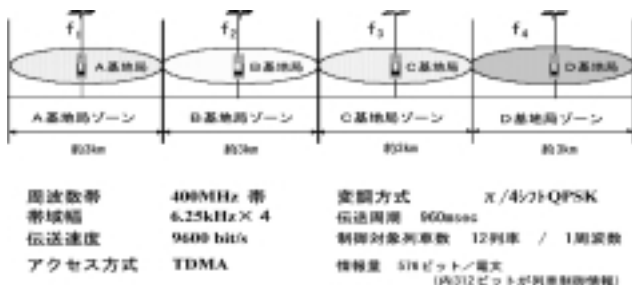


図6 ATACS無線システム概要

情報のセキュリティ対策として、伝送する情報に通番を付与するとともに暗号化を行なう。また、無線基地局間を跨いで列車が走行する際に伝送を継続するために無線周波数を切り替えるハンドオーバ機能を有する。

5.1.3 列車追跡

ATACSでは全列車の在線位置を従来の軌道回路ではなく、各列車の車上制御装置から約1秒周期で伝送される列車位置を逐次更新し把握する。これらの情報に基づいて拠点装置で列車追跡を行う。

列車位置は列車の最前部が在線する線路ブロックとブロック内位置、列車長と列車長補正值、運転方向などにより構成される。走行に伴う誤差に応じて一定の割合にて列車長補正を行う。



進路	経路	データ上の仮想のブロック列
1RC	1-1	152-153-154-156-158
1RB	1-2	152-153-154-155-157

図7 列車追跡のしくみ

5.1.4 停止限界作成

列車の走行許可位置である停止限界は、当該列車の進行方向に対して下記の支障条件、並びに支障条件に応じた安全余裕距離を加えて、拠点装置にて作成する。

- (1) 先行列車支障 (先行列車の最後部位置)
- (2) ホームブロック、固定閉そく
- (3) 経路端支障 (開通進路の終端)
- (4) ハンドオーバ点支障 (無線チャンネルの未確保区間)
- (5) システム境界
- (6) 線路閉鎖支障 (線路閉鎖区間端)
- (7) 前方列車未確認支障(追跡異常となった列車の後尾位置)
- (8) 線路端

5.1.5 ブレーキ制御

- (1) ブレーキ制御の速度照査パターン作成

ブレーキ制御の速度照査パターンの作成は、拠点装置から受信した停止限界にもとづき、車上制御装置に所有する車両性能や線路データベースにより、列車の減速度、

線路の勾配・速度制限区間等を考慮して、常用ブレーキの照査パターンと非常ブレーキの照査パターンをそれぞれ毎周期演算して作成する。

なお、速度制限については、列車後部が制限区間を進出するまで適用することから、列車長分も考慮して作成する。

## (2) 速度照査とブレーキ制御

車上制御装置は、ブレーキ制御の速度照査パターンと現在の列車速度を照査し、列車速度が照査パターンの速度を上回っているときにはブレーキ制御により列車を減速させる。

### 5.1.6 列車在線管理

列車在線管理機能は、ATACS区間内の全列車の車上制御装置IDと位置を常時把握することにより、拠点装置のメンテナンスや故障後の復旧時にシステム内の列車の再把握を行うための機能である。

### 5.1.7 列車・車両の初期位置確定

列車・車両の初期位置を取得する必要がある事象としては、以下に列挙するとおりである。

#### (1) 滞泊

駅、車両基地にて車両滞泊を行う場合は、あらかじめ定めた滞泊箇所、車上制御装置を停止することにより滞泊とする。この時、拠点装置は、滞泊移行時の列車位置や車両入換後の車両位置を記憶し、車上制御装置を再度立ち上げる際、車上制御装置に対して記憶した位置を仮位置として送信し、車上制御装置に初期位置を与える。

なお、滞泊箇所には列車・車両の移動を検知できる装置を設置し、留置している車両の流転について検知できる仕組みとする。

#### (2) ATACS区間への列車進入

ATACS区間進入箇所に設置した地上子を照合することにより、ATACS区間への列車進入時の位置の確定を行う。ATACS非搭載車、ATACS車上制御装置故障車等が、ATACS区間内へ進入しようとする場合は、非搭載車を検知する仕組みにより検知し、拠点装置が他列車への安全側制御を行う。

## 5.2 駅構内の連動制御

連動制御の論理は、従来の軌道回路条件を用いた連動

装置と同じ連動論理とする。

ただし、ATACSの連動制御においては、軌道回路による列車検知ではないことから、列車追跡機能により各列車の最前部及び最後部位置を認識し、仮想的なブロック(軌道回路相当)内の列車の有無を判定し制御する。

## 5.3 踏切制御

踏切の警報開始制御は、現行の踏切制御子による警報制御に代わって、車上制御装置が踏切までの到達予測時間を算出し、設計警報時間との比較により車上制御装置が拠点装置に対して警報制御の要求を行う。

警報停止制御は、車上制御装置が列車位置情報により、列車後部が踏切道を通じたことを認識し警報要求を停止することにより行う。

踏切へ接近する列車では、車上制御装置で踏切道を終端とするブレーキパターンを作成し、拠点装置からのしゃ断完了(警報完了)によりそのパターンをクリアすることで、無しゃ断・無警報踏切の列車通過を防止する。図8に踏切制御の仕組みを示す。

## 5.4 システム管理

臨時速度制限の設定、線路閉鎖区間の設定、列車の運行表示、システム全体監視及び構成制御などを行う機能である。



図8 踏切制御の仕組み

### (1) 臨時速度制限の設定

ATACSでは徐行運転のための臨時速度制限を、システム管理装置で入力し車上へ伝送することにより、車上制御装置の速度照査パターンに反映することができる。その区間と制限速度の設定は、徐行運転区間のキロ程で行えることから、速度制限を必要とする最小区間に限定することができる。

臨時速度制限情報は、システム管理装置からの設定を確実に車上に伝達するため、システム管理装置と拠点装

置間では設定情報の確認をとることとし、拠点装置と車  
上制御装置間においては毎周期伝送する。

(2) 線路閉鎖区間の設定

ATACSでは、線路閉鎖区間の設定をシステム管理装置  
で入力し、車上制御装置の線路閉鎖区間の始端防護パタ  
ーンとして反映することができる。その線路閉鎖区間の  
設定は、作業区間のキロ程、若しくはブロック単位で行  
えることから、線路閉鎖の工事・作業で必要とする最小  
区間に限定することができる。

5.5 速度照査パターン

5.5.1 基本的なパターン形状

速度照査パターンは、常用パターンと非常パターンを  
常時独立に演算し、現在速度との照査を行う。通常は常  
用パターンによりブレーキ制御を行うが、乗り心地を考  
慮してブレーキ開始時には緩和ブレーキを出力する。停  
止限界に対するパターン形状を図9に示す。

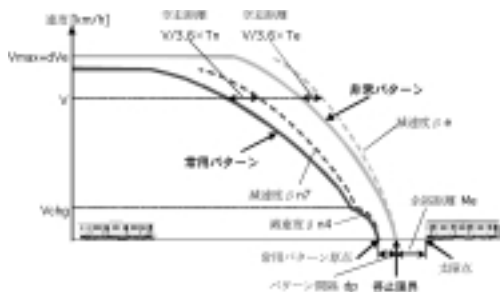


図9 停止パターン

非常パターンは停止限界を原点として、非常パターン  
減速度  $\beta e$  により、空走を加味して作成する。万が一列車  
速度が非常パターンを超えた場合には、直ちに非常ブレ  
ーキが出力される。このとき実車の非常ブレーキ減速度  
は  $\beta e$  以上であるため、列車は停止限界までに停止する。  
非常ブレーキは、列車停止後ブレーキハンドルを「非常」  
位置とし、復帰スイッチを扱うまで緩解しない。

常用パターンは停止限界から一定距離外方の位置を原  
点として、常用パターン減速度  $\beta n7$  により、空走を加味  
して作成する。列車速度が常用パターンを超えると、常  
用ブレーキ7Nが出力される。常用パターンの一定秒手前  
で、緩和ブレーキとして4N,5N,6Nを順次出力し、4N~7N  
(ブレーキ出力の種類)をフィードバック制御すること  
により、ほぼ常用パターンに沿った減速を実現する。  
ATACSによる常用ブレーキは常用パターンの一定秒手前

で緩解する。また、乗務員への情報として、常用パター  
ンの一定秒手前で「パターン接近」を表示する。

6 安全性・信頼性解析

ATACSは、車上で位置検知、地上・車上間の伝送に  
無線を使用した制御であり、現在の軌道回路に依存しな  
い点を特徴とする。従って本システムが従来と同等以上  
の安全性を確保できることを示すため、システム評価に  
関して国際規格の動向も考慮し、安全性・信頼性解析を  
実施した。特に、無線伝送においては、安全性解析と定  
量的な安全性評価を行った。

6.1 国際規格への対応

システムの評価については、国際規格が制定されつつ  
あり、今後はそれに則った評価が重要になると思われる。  
コンピュータ制御を対象とした包括的な安全性規格とし  
てIEC 61508<sup>2)</sup>があり、既にJIS化(JIS C 0508)もされてい  
る。鉄道分野における安全性・信頼性についても国際規  
格を定める動きが活発化しており、インターオペラビリ  
ティの確立の視点から欧州を中心に鉄道技術の標準化が  
推進されている。今後日本国内の鉄道システムにおいて  
も、これらの規格への対応を進めていくことが必要とな  
ると思われる。

ATACSのソフトウェアは、JIS C 0508-3<sup>3)</sup>に準拠して  
開発を行い、更に十分な事前検査(工場内試験、模擬走  
行、モニタラン走行等)により、ソフトウェアの高信頼  
化を図って開発している。IEC 62279<sup>4)</sup>規格はJIS C 0508-3  
とほとんど同じ内容のものであるため、この国際規格に  
対して対応は可能と考える。

無線伝送に関する評価では、ATACSで実施している伝  
送制御についてIEC 62280-1<sup>5)</sup>で要求されている18の項目  
について評価を行い、要求項目をすべて満足しているこ  
とを確認した。また、IEC 62280-2<sup>6)</sup>で規定しているオー  
プンな伝送路では、「偽装・なりすまし」に対する対策が  
必要とされている。ATACSの伝送は専用の伝送路及び専  
用の無線を使用しているが、空間波無線を用いているこ  
とから特に無線区間の妨害を考慮し、暗号を用いてこの  
IEC 62280-2にも対応していることを確認した。

## 6.2 システムの安全性解析

安全性解析については、システムに内在する衝突・脱線の原因となる事象（起因事象）を抽出し、対策が抜けていないことを確認することにより、安全性が確保できることを示すこととした。

この解析においては、ATACSに内在する起因事象を漏れなく抽出することが不可欠であり、「FT (Fault Tree)解析」とFMEA：「起因事象による発生事象とその対策の記述」を併用し、トップダウン及びボトムアップ的な観点から網羅した。FT解析の代表例を図10に示す。



図10 FT解析例（車制御装置）

## 6.3 無線伝送に関する安全性解析

無線による列車制御システムATACSの安全性解析として、最初に無線部分において発生し得る故障モードの抽出を行い、これらが無線を利用するシステムに及ぼす影響との関連を考慮してFT解析を行った。

無線部分に対する解析により、無線伝送路を構成する各階層に応じて発生し得る故障モードと、これらを原因としてアプリケーション側へ影響を及ぼすに至るまでの関連が明らかになった。

また、無線を利用するアプリケーション側から見た場合、無線部分での故障モードが原因となって現れる事象を、受信機からの出力なし、電文のビット誤り、電文異常(正規側への誤り)の3つとすることが、解析を進める上で適切であると判断されたことから、無線部分のFT解析においては、この3事象を頂上事象とした。

この結果、システム全体として無線部分の故障が、危険な事象に至る可能性があるのは、基本的に「なりすまし」が継続的に発生した場合に限られることが分った。

「なりすまし」は、伝送電文が解読されて改ざんされることで起るため、無線伝送の通信に暗号を採用し、かつ暗号計算の初期値を毎周期変更して、暗号化電文の強度を増すという「なりすまし」対策を採っており、危険な事象に至る可能性は極めて低いと判断した。

## 6.4 無線伝送の定量的な安全性評価

### 6.4.1 無線伝送の安全性対策

地上基地局と車上移動局の間の無線回線の安全性の確保と品質を高めるために、ATACS無線装置においては以下のような対策を採用している。

- ・ 誤り検出符号の付加 (FCS/CRC : Flame Check Sequence/Cyclic Redundancy Check)
- ・ 誤り訂正符号 (FEC : Forward Error Correction)  
リードソロモン符号(66,50,17) GF(2)  
訂正能力 8バイト以下のランダム誤り
- ・ 伝送データの暗号化

### 6.4.2 フレーム構成

ATACSでの伝送データフォーマットを図6.2に示す。

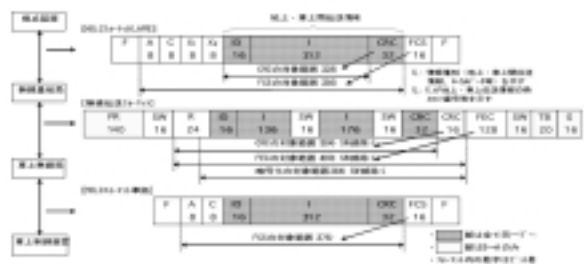


図11 伝送データフォーマット

図11において無線基地局と車上無線局間伝送では、外部装置から受信したデータに対してFCSとして誤り検出符号(CRC)を付加する。

### 6.4.3 リードソロモン符号の見逃し誤り率

リードソロモン符号は、誤りが訂正能力を超えている事をほぼ全て検出することが可能であり、今回のATACSプロトタイプにおいては、そのデータを確実に破棄するように処理を行っているため、リードソロモンの見逃し誤り率は訂正能力を超える誤りを検出できずに誤って訂

正する確率となり、重み分布を使って求めると以下のようになる。<sup>7) 8)</sup>

表1 誤って訂正する確率

ビット誤り率	誤って訂正する確率
$10^{-3}$	$3.1 \times 10^{-19}$
$10^{-4}$	$4.4 \times 10^{-28}$

### 6.3.4 CRC複合時の見逃し誤り率

16bitCRC(FCS)の見逃し誤り率は一般的に $10^{-16}$ となる。よって、リードソロモンとCRCを複合した時の見逃し誤り率はそれぞれの積となり表2に示す。

表2 総合の見逃し誤り

ビット誤り率	見逃し誤り率
$10^{-3}$	$4.7 \times 10^{-24}$
$10^{-4}$	$6.7 \times 10^{-33}$

よって、1時間あたりの無線区間での見逃し誤りは  $6.7 \times 10^{-33} \times 9600(\text{bit/s}) \times 3600(\text{s}) = 6.7 \times 10^{-28}(\text{h})$  となる。

これは、従来の運転保安制御システムで許容される危険側故障率の目安が、 $10^{-9} \sim 10^{-10}(\text{h})$ 程度であることと比較して、十分に低い値といえる。<sup>9)</sup>

### 6.5 システムの信頼性解析

ATACSは地上システム、車上システム及び地上・車上間無線伝送系システムが一体で機能が完結するため、ATACSシステム全体の信頼性解析を行うには、システム全体で評価する必要がある。しかし、地上と車上及び無線伝送系では使用環境、保守体系、連続稼働時間の条件が異なるので、個々のシステムについて分けて評価を行った。

解析に当たっては各サブシステムの信頼性モデルを作成し、各装置の故障率に制御システムにおける統計的経験値やシステム毎に採用している電子部品の故障率を適用した。評価を行なった結果、各システムにおいて装置毎のMTBF計算値は既存装置と比較して遜色ないことが確認できた。

## 7 検証試験

昼間の営業列車でブレーキ出力を行わないモニタラン試験、営業列車運転終了後の深夜に線路閉鎖に準じた

安全確保の手続きをとった上で試験列車に対するブレーキ出力を伴うコントロールラン試験、及び無線の品質を評価するための無線伝送試験を実施した。

これらの試験により、システム性能の評価を行うとともに、事前の安全性解析に対する実地検証としての裏付け結果を得た。

### 7.1 モニタラン試験概要

2003年9月から順次ATACS車上装置の搭載を始め、2004年7月までに仙石線営業車の全編成である18編成に搭載を完了した。試験期間はモニタラン設置完了時期に合わせた2003年10月14日からモニタランを実施している。仙石線は朝・夕の通勤通学時間帯では5分前後の列車間隔で運行されている。ATACS区間での全編成の累積走行距離は、1ヶ月当たり10万kmを超える走行となり、2005年5月末時点での累積走行距離は150万kmを上回っている。

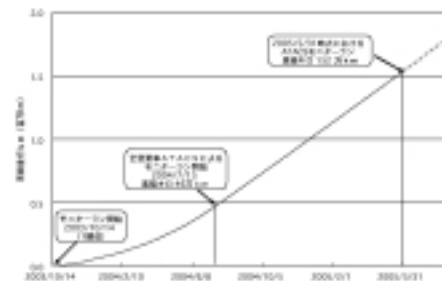


図12 ATACSモニタラン試験走行キロ

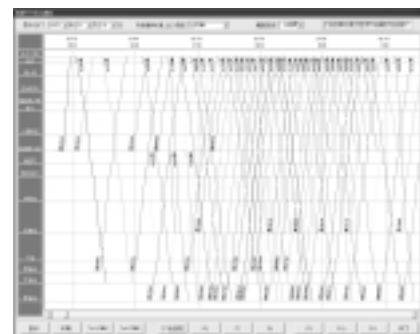


図13 モニタラン実績ダイヤ例

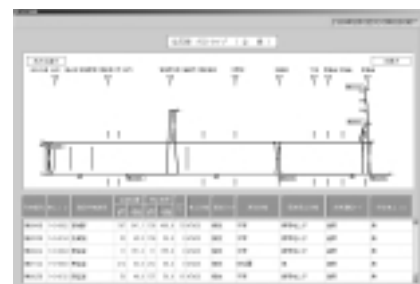


図14 モニタラン時のシステム管理装置運行表示画面



図12にモニタラン試験の走行距離、図13に始発の5時ごろから10時ごろまでの実績ダイヤを示す。図14にモニタラン時のシステム管理装置運行表示画面を示す。

### 7.2 コントロールラン試験概要

2003年度から2004年度にかけて、営業列車終了後の深夜帯に、コントロールラン（実車両によりブレーキ出力を行なう）試験を実施した。コントロールラン試験は、2003年度内に11回、2004年度に17回の計28回にわたり、実車両での機能確認及び機器故障などの異常時試験のために実施した。

各走行試験における主な試験項目は次のとおりである。

### 7.3 機能評価

コントロールラン、モニタランにおいてATACSの機能に関する試験を、システムの仕様書にもとづき作成した試験要項書を用いて実施し、機能がシステムの仕様書を満足しており問題ないことを確認した。

### 7.4 性能評価

性能評価は、ATACSの制御に関係する項目について、評価基準をもとに試験結果をまとめた。車上システムにおける評価項目は、位置検知精度についてシステムの設計上の誤差、走行による位置検知の誤差、システム上で認識している位置と絶対位置とのずれ、現行の軌道回路による列車検知のタイミングとATACSの位置情報とのずれなどである。走行に伴う空転・滑走としては、ATC軸（ブレーキ力30%弱め）の評価、滑走・空転検知及び補正の評価を行った。

表3 性能評価結果一覧

評価項目	結果	
位置検知	設計上の誤差との評価	システムの許容する誤差の範囲内は0.4%以下
	位置検知誤差	許容範囲内 軌上子間距離200m以上：0.5%以下 200m未満：1m以内
	ゲージ-2の誤差	許容範囲内 安全演算距離の範囲内
空転・滑走	軌道回路との比較	運行電子検知と同程度
	ATC軸の評価	ATC軸での停止検知率を互し(ATC軸の有効性を確認)
踏切制御	滑走補正	滑走論理が仕様通り動作 (検知誤差の抑制に効果あり)
	留置時間の評価	設計留置時間を下回る動作はなかった。 現行と比較し留置時間の改善が認められている。 停止時間を考慮することにより、留置時間が厳密に設定された。
子方式の時間	制御遅延の評価	最大遅延3秒で、システム構成上検知される範囲となっている。
	基本性能	基本性能を満足していることを確認。
無線伝送	ビット誤り率と電界強度	入力電界-105dBm以上で、ビット誤り率0%以下を確認
	電波干渉特性	妨害に対して同一周波数に対して18dB以下、隣接周波数の干渉に対して0dB以下、隣接のチャンネルでは26dB以下となると品質が劣化する。
	フレーム受信率	設計値99.9%以上を確認
無線雑音	自然雑音・パンタグラフ雑音の評価	自然雑音や走行に伴う車両からの雑音に対してATACSの感度に影響なし。

地上システムでは、主に踏切制御とターンアラウンド時間を評価した。無線伝送性能に関しては、フレーム受信率について評価を行った。

上記結果より、列車位置検知、ブレーキパターン算出処理、無線伝送品質、踏切制御の機能が、実用化の目標レベルに達していることを確認できた。

以下にそれぞれの項目について詳細な評価を示す。

#### 7.4.1 位置検知精度

##### (1) 位置検知の誤差に関する評価

位置検知誤差は、地上子間距離200m以上では0.5%以下に収まっており、200m未満の区間では安全余裕距離として設定している1m以内に収まっており、ATACSプロトタイプシステムとして目標としていた基準を満たしていることが確認できた。図15に補正量と地上子間の走行距離の関係を示す。

##### (2) 絶対位置とデータベースとのずれ

システムの認識している位置と地上の構造物（絶対位置）とのずれは、実測により0.9m以内であることが確認できた。この値はATACSで前提としている安全余裕距離の範囲内であることが確認できた。

#### 7.4.2 空転・滑走

プロトタイプ試験における速度発電機を用いた列車位置検知（移動距離測定）において、空転・滑走による検知誤差を抑えるために空転・滑走補正機能をソフトウェアとして組み込んでいる。また仙石線18編成のうち、7編成にATC軸を搭載し滑走による位置検知誤差の軽減対策を実施した。

その結果、ATC軸なしの編成とATC軸採用の編成との滑走検知の発生回数を比較したところ、滑走検知の発生状況（回数）から滑走に対するATC軸の有効性が確認できた。

また滑走補正論理について、滑走時における速度発電機の速度変化、および滑走補正後の速度変化、移動距離補正の評価を行なった結果、滑走時における補正論理は仕様通り動作していることが確認できた。滑走時の速度の補正のほか、ATACSにおいて重要な移動距離の補正においても滑走補正論理により検知誤差を少なく抑えることができた。

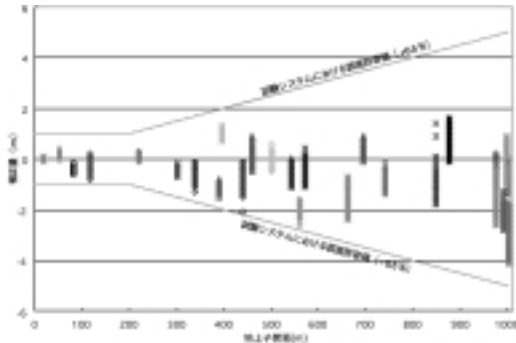


図15 補正量と地上子間の走行距離の関係

### 7.4.3 踏切制御

#### (1) 踏切制御および警報時間

- ①ATACSにおける踏切制御で設計警報時間を下回る制御は無かった。
- ②現行の踏切制御では、快速列車（通過列車）、各駅停車列車について一律の制御を行っているため、踏切警報時間の頻度の分布が2つ現れている。一方、ATACSでは、列車種別（快速、各停）に合わせた制御を行っているため、警報時間の分布が集中し、45～74（秒）の間に9割以上取まっており、列車の走行状態に関係なく警報時間がほぼ一定の制御が実現できている。
- ③ATACS制御のピーク値が、設計警報時間や一部の現行制御時間と比較してやや長いことは、車上で踏切の動作確認がとれるまで踏切警報時間を確保するブレーキパターン防護（保証）を行い、このパターンによる不要なブレーキ出力をしないような踏切制御の要求タイミングとしていることによる。（これは、列車が高速度で接近する駅間の踏切や快速列車のデータから判断できる。）

- ④停車列車に対する警報時間については、停車時間を考慮した設定を行うことで警報時間の短縮効果がより顕著に現れることを確認した。

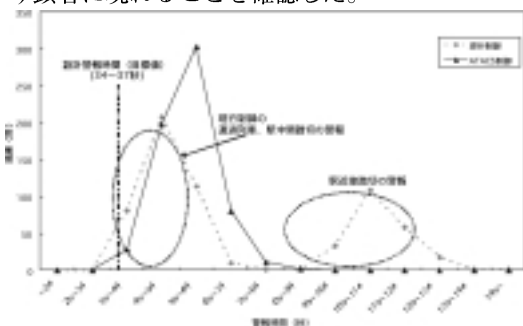


図16 現行方式とATACS制御での比較

### 7.4.4 ターンアラウンド時間

ATACSの伝送には拠点からの制御電文には毎周期1ずつ増加する制御情報通番と受信リターン情報として最新の位置情報通番を付加して車上へ伝送する。同様に車上からは位置情報通番と最後に受信した拠点からの制御情報通番を伝送する。

拠点において、この自装置から送信した制御情報通番が戻ってくるまでの時間を計測して、全体のターンアラウンド時間の評価を行った。図17にターンアラウンド時間、図18にターンアラウンド時間実績値を示す。

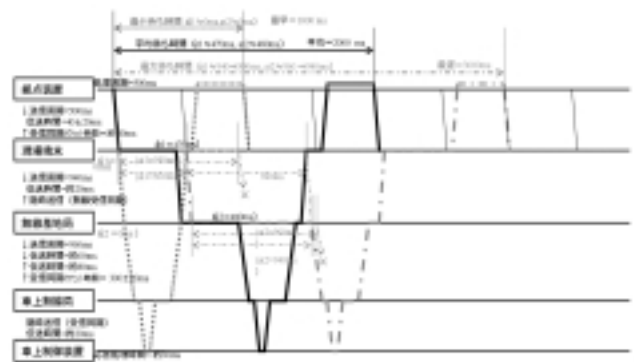


図17 ターンアラウンド時間

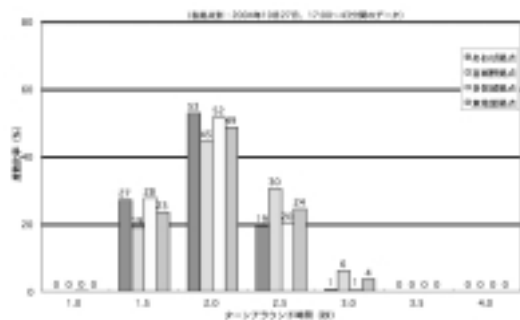


図18 ターンアラウンド時間実績値

プロトタイプシステムにおけるネットワーク構成は拠点装置(500msec)、現場端末(940msec)、無線基地局(960msec)のそれぞれが独自の周期で伝送をしている。それぞれの周期と内部処理時間で想定される最大遅延3秒を超えるものはなく、無線伝送を含む伝送においてターンアラウンド時間は、システム構成上想定される範囲であることを確認した。

### 7.4.5 無線伝送性能

#### (1) デジタル無線基本性能

##### ① 誤り訂正特性

ダイバーシチだけではフローア特性（受信レベル

を上げても、誤り率一定値となる特性)により $10^4$ 以下を確保できないが、誤り訂正を行うことにより受信レベルが-106dBm以上でエラーフリーとなり、回線設計上の要求品質 $10^4$ 以下を確保することができることを確認した。また、誤り訂正のみの場合でもフロア特性が改善され-90dBm以上でエラーフリーとなっている。

② ダイバーシチ特性

フェージング周波数40Hzにおいて、ダイバーシチを行うことにより誤り訂正でエラーフリーとなる $1 \times 10^6$ の条件を確保することができることを確認した。

③ フレーム受信率

フェージング周波数 0Hz,20Hz,40Hzにおける無線基地局のフレーム受信率は、入力電界が-105dBm以上であれば100%となり、フレーム受信率99.9%を確保できることを確認した。

(2) ビット誤り率と電界強度

フレーム受信率99.9%以上を確保するためには、入力電界が-105dBm以上必要であると(1)のデジタル無線基本性能で評価した。基地局ごとのサービスエリアでは、入力電界が-105dBm以上確保できており、ビット誤り率は $10^6$ 以下を確保していることを確認した。

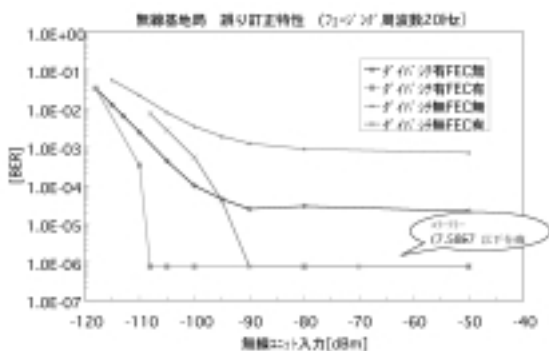


図19 デジタル無線基本性能

7.4.6 フレーム受信率

フレーム受信率(送信した電文と受信した電文の比)は99.9%以上であった。コントロールランにおいても地上受信、及び車上受信において99.9%以上であり、コントロールランにおける機能評価への影響は見られなかった。図20列車編成ごとのフレーム受信率を示す。

モニタランの長期試験において全無線基地局(8箇所)、

全車上無線局(18編成)総合のフレーム受信率は総送受信フレーム数約43,410,000に対しても99.9%以上を確保した。

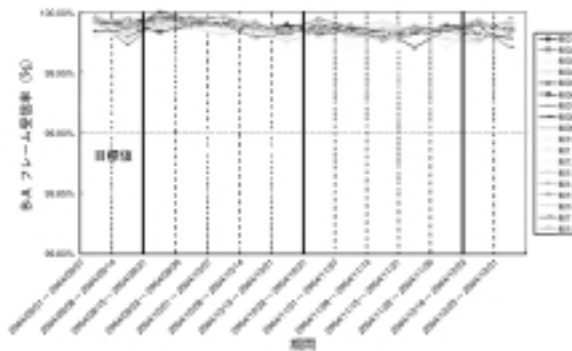


図20 列車編成ごとのフレーム受信率

7.4.7 速度制御

図21にコントロールランにおける速度制御の一例を示す。速度制限区間に近づくと、車上制御装置が自動的に常用ブレーキを出力し、列車が制限速度を超えないように制御している。また、常用ブレーキ出力時には、衝撃を和らげるため、先に緩和ブレーキが出力される。

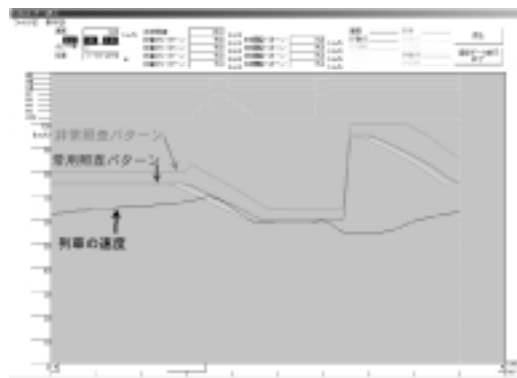


図21 コントロールランでの速度制御

7.4.8 続行運転

図22は、実列車2編成による間隔制御試験の様子である。一定の速度で走行する先行列車に対し、後続列車は力行フルノッチを入れたままの状態としたが、ATACSのプレ



図22 実列車2編成による間隔制御試験

一キ制御により一定距離以上は先行列車に近づかないことを確認した。今回は、安全を考慮し先行列車を約20km/hの速度で走らせたが、後続列車は80m～100m程度の間隔を保ちながら概ね20km/hで追跡走行する結果となった。(速度照査パターンにより、速度が高くなれば列車間隔はより長くなる。)

### 7.5 検証試験のまとめ

現地試験として、現場環境及び実列車による長期的な検証としてのモニタラン試験、及び現地での実ブレーキ制御によるコントロールラン試験にて機能試験を行った。現地試験は、仙石線の全編成である18編成に車上装置を搭載して実施し、システムの基本機能、異常時の機能を対象として実列車を使用して実施した。各種設計書にもとづいて作成した現地試験要項書によって試験を行い、良好な結果を得た。

現地試験で得られたデータに対して位置精度、踏切制御、ターンアラウンド時間、無線伝送性能などの性能評価を行い、その結果、ATACSプロトタイプシステムの機能、安全性は実用化レベルに達していることを確認した。

## 8 おわりに

無線を利用した列車制御システムの高機能化と低コスト化は、世界の鉄道に見られる取り組みである。欧州ではERTMS (European Rail Traffic Management System) のETCS (European Train Control System) レベル3として開発が進められているが、ごく一部の地下鉄での無線による列車制御の導入例が見られるものの普通鉄道での実用化には至っていない。

ATACSは新しい列車制御の時代の嚆矢となるなど世界的にもその意義は大きく、優れた鉄道技術を改めて実証することにもなると考える。

これまで、現地試験および安全性・信頼性の解析結果により、機能が仕様通りに作成されていることを確認している。さらに、部外有識者によるシステム評価委員会(委員長 東京理科大学 正田英介教授、副委員長 日本大学中村英夫教授)により、信号保安装置に要求される技術的要件を満たしていると評価されたことから、今後、

実用化に向けた取り組みを進めていく。

### 参考文献

- 1) JR EAST Technical Review No.5 Autumn 2003 “無線による列車制御システム (ATACS)” 馬場裕一 他
- 2) IEC 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems
- 3) JIS C 0508-3: 電気・電子・プログラマブル電子安全関連系の機能安全 第3部: ソフトウェア要求事項
- 4) IEC 62279: Railway applications - Communications, signaling and processing systems - Software for railway control and protection systems
- 5) IEC 62280-1: Railway Applications- Communication, signaling and processing systems Part1 Safety-related communication in closed transmission systems
- 6) IEC 62280-2: Railway Applications- Communication, signaling and processing systems Part2 Safety-related communication in open transmission systems
- 7) 中村 隆彦, 吉田 英夫 “RS符号における復号ビットエラー特性に関する考察” 第17回情報理論とその応用、シンポジウム, 1994
- 8) R.E. Blahut “Theory and Practice of Error Control Codes”, Addison-Wesley, 1983
- 9) (財)鉄道総合技術研究所 “列車制御システムの安全性技術指針” PP25, 1996年