

デジタル ATC の開発と高信頼化に関する研究

平成 26 年 11 月

渡 辺 郁 夫

目次

第1章 序論	1
1. 1 本研究の背景	1
1. 2 本研究の概要	2
1. 3 参考文献	4
第2章 デジタル ATC の構成法	5
2. 1 機能概要とシステム構成	5
2. 2 列車位置検知	9
2. 3 制御情報の伝送	9
2. 4 ブレーキ制御	10
2. 5 車上のデータベース	10
2. 6 デジタル ATC の制御性能	12
2. 7 まとめ	16
2. 8 参考文献	17
第3章 デジタル ATC と列車位置検知	18
3. 1 軌道回路による列車位置検知	18
3. 1. 1 短絡感度	18
3. 1. 2 短絡抵抗の増大防止	19
3. 1. 3 軌道回路の漏れコンダクタンスの変動の対策	25
3. 1. 4 無絶縁軌道回路の境界特性	28
3. 2 符号による列車検知の信頼性向上	31
3. 3 車輪回転の積算による位置検知	32
3. 3. 1 初期位置の確定	32
3. 3. 2 車輪径の管理	32
3. 3. 3 滑走, 空転対策	32
3. 3. 4 絶対位置補正	33
3. 4 まとめ	35
3. 5 参考文献	35
第4章 制御情報伝送の高信頼化	36
4. 1 電車電流のノイズに対する対策	36
4. 1. 1 交流電化区間	36

4. 1. 2	直流電化区間	-----	57
4. 1. 3	列車による電車電流の影響確認試験	-----	70
4. 2	車上機器からのノイズに対する対策	-----	75
4. 3	符号による情報伝送の信頼性向上	-----	75
4. 4	まとめ	-----	77
4. 5	参考文献	-----	77
第5章 デジタル ATC におけるブレーキ制御			79
5. 1	ブレーキパターンの作成	-----	79
5. 2	速度照査及びブレーキ制御出力	-----	81
5. 3	ブレーキ制御の現車試験	-----	83
5. 4	まとめ	-----	86
5. 5	参考文献	-----	86
第6章 デジタル ATC の機器構成と安全性・信頼性技術			87
6. 1	機器構成	-----	87
6. 2	データベースの安全性	-----	90
6. 3	まとめ	-----	91
6. 4	参考文献	-----	91
第7章 結論			92
7. 1	本研究の成果	-----	92
謝 辞			94
著者発表論文等の一覧			95
付録1 : Advanced Automatic Train Protection System, IEEE 44th Vehicular Technology Conference Proceedings, 1994.6			----- 101
付録2 : Development of Digital ATC System, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 1999.3			----- 106
付録3 : 山陽新幹線におけるデジタル ATC 性能試験, 鉄道総研報告, 2000年2月			----- 112

第1章 序論

1.1 本研究の背景

日本における ATC (Automatic Train Control) は、新幹線や通勤線などに導入され、列車制御の安全確保に大いに役立ってきた。デジタル ATC が導入される以前のいわゆる地上主体制御方式 ATC では、地上で先行列車との間隔や線路条件から決定される許容速度を ATC 信号として作成し、これを連続的に車上に伝え、車上では ATC 信号が指示する速度を列車速度が超過しているときには自動的にブレーキ制御し、指示速度以下になるとブレーキを緩解させるものであった^(1.1)。この方式では基本的に走行する車両のブレーキ性能が同一であることを前提に ATC 速度信号の段数や軌道回路長を決定して、これらの単位で多段のブレーキ制御を行うため、①ブレーキ性能が異なる列車が走行する場合には制御効率が低下する、②停止までに軌道回路をベースとした多段のブレーキ制御が行われるために、列車運転間隔や到達時間の短縮が難しい、③停止までに何度もブレーキの動作、緩解が繰り返されるため乗り心地が悪い、④速度向上時には新しい速度信号を割り当てる必要があるために地上装置や車上装置の改修が必要、などの課題があった。

そこで筆者は、地上主体制御方式 ATC が有する課題を解決する車上主体制御方式のデジタル ATC を提案し^{(1.2)~(1.5)}、その主要な機能である列車位置検知、ATC 制御情報の地上から車上への伝送、ブレーキ制御等に関して、信頼性を向上させるための手法について検討してきた。

デジタル ATC は、「先行列車の位置を軌道回路で検知し、後続列車に先行列車の在線する位置までの距離情報等を軌道回路を利用して MSK (Minimum Shift Keying) 変調波を使って伝え、後続列車は自列車の先頭位置を連続的に検知し、地上から送られてきた先行列車までの距離情報と、車上でデータベースとして記憶している自列車のブレーキ性能、線路条件などを組み合わせてブレーキパターンを発生させ、一段ブレーキ制御を行う」こと特徴とする。

デジタル ATC は新幹線区間や通勤線において既に実用化されており^{(1.6)~(1.8)}、ATC 信号の伝送内容やブレーキパターンの作成方法の詳細に関しては、導入される線区により様々である。しかし、地上装置と車上装置とで分担するそれぞれの機能、ATC 信号を伝送するためのフレームの基本的な構成、距離情報を MSK 変調波により軌道回路を利用して伝送すること、勾配や曲線を考慮した一段ブレーキパターンを車上で発生させることなどは共通であり、本論文で述べるデジタル ATC の知見をベースとした技術が使用されている。

一方、海外における高速線において導入されている代表的な一段ブレーキ制御の信号システムとしては、ドイツで開発された LZB と、フランスで開発された TGV 用の信号システム TVM430 などがあげられる^(1.9)。

LZB では、軌間に敷設した交差誘導線を介して地上のセンターと双方向通信を行う。列車からセンターへは、列車位置、速度、ブレーキ性能などのデータを連続的に送信し、センターが全列車のブレーキ開始点、速度制限箇所までの距離と目標速度などを計算し、列車に送信して間隔を制御する。また、TVM430 では、軌道回路の始端および終端での許容速度などの情報を軌道回路を利用して車上装置に送信し、これらの情報から連続的な停止パターンの発生と速度照査を行う。

これらのシステムは、デジタル ATC と比較して地上装置が担う機能が多く、車上で最適なブレーキパターンを発生させる車上主体制御方式のデジタル ATC とは異なる考え方の構成となっている。

以下、筆者が行ったデジタル ATC の開発とその高信頼化に関する研究を報告する。

1. 2 本研究の概要

論文の構成と各章の目的は以下の通りである。

第1章 序論

本論文の背景及び目的を述べ、筆者の研究の位置づけを明確にする。

第2章 デジタル ATC の構成法

従来の地上主体制御方式 ATC の課題と、それを解決するために筆者が開発に関わったデジタル ATC の構成と主な機能である列車検知、制御情報の伝送、ブレーキ制御について述べる。また、車上のデータベースを説明する。そして、開発したデジタル ATC の制御性能として、運転間隔については理想的な列車間隔制御である移動閉そくや地上主体制御方式の 1 段ブレーキ ATC と比較する。また、到達時間については地上主体制御方式の多段 ATC と比較する。

第3章 デジタル ATC と列車位置検知

デジタル ATC の実現に重要な意味を持つ列車位置検知に関して論じる。具体的には、列車在線検知は地上主体で行うこととし、実績のある軌道回路を用いるが、短絡感度、短絡抵抗の増大防止対策、軌道回路の漏れコンダクタンス変動の対策等デジタル電文の送信に必要な要件について検討成果を述べる。また、

今後、保全性向上の観点から主流となると考えられる無絶縁軌道回路の境界特性について検討する。

また、車上主体の保安制御で重要となる車上での詳細な位置検知については、初期位置の確定、車輪径の管理、滑走・空転対策などについて論じ、併せて車輪回転の積算による位置検知の信頼性向上について検討する。絶対位置補正については、絶対位置補正用のマーカを用いず軌道回路の境界を検知して行う方法を提案する。

第4章 制御情報伝送の高信頼化

交流電化及び直流電化区間の電車電流の分析を行い、それぞれのノイズ環境の下で安定して ATC 信号を伝送するための ATC 信号帯域の設定方法、周波数選定方法、送信電力と短絡電流の設定についての検討結果を述べる。また、符号による情報伝送の信頼性向上について述べる。

実用化においては、フィールドの電磁環境に対する耐性が重要となる。この視点から、新幹線及び在来線で実施したノイズ試験及び伝送性能確認試験の結果を述べる。併せて要求される車上の機器からの直達ノイズへの対策として、有用な手法を列挙し、デジタル ATC としての立場から取り得る方式を明らかにする。また、試験で得られた伝送品質をもとに、ATC システムの信頼性への影響を検討する。

第5章 デジタル ATC におけるブレーキ制御

車上主体での保安機能の実現には、ブレーキ制御方式の確立が求められる。このため、デジタル ATC におけるブレーキ制御の高信頼化を基本要件としたブレーキパターンの作成方法、作成したブレーキパターンによる速度照査、ブレーキ制御、及びその機能を実現するブレーキ機器構成という一連の要素技術について検討成果を述べる。

第6章 デジタル ATC の機器構成と安全性・信頼性技術

新幹線の保安システムとして実用化するには、高い信頼性を保障する必要がある。このために行った、デジタル ATC における主要構成要素である処理部、送信部、地上及び車上の受信部の機器構成の高信頼化、車上に有するデータベースの信頼性向上のための手法を述べる。

第7章 結論

本研究の成果として以下の内容について述べる。

(1) 車上主体制御を特徴として開発したデジタル ATC のシステム構成法

- (2) デジタル ATC の運転能率面からの検討成果
- (3) 軌道回路による地上からの列車在線検知，及び車上での詳細な列車位置検知手法と検知誤差に対する対策
- (4) 新幹線区間のデジタル ATC としての変復調方式と周波数帯域選択及び電文伝送品質からの研究成果
- (5) 交流電化区間及び直流電化区間のそれぞれの環境下で安定した ATC 信号としてのデジタル電文の伝送を可能とする信号周波数と信号帯域，軌道回路長，送信電力の設定方法
- (6) 10km 以上先まで精度よく効率的にブレーキパターンを計算するブレーキ制御についての研究成果と，作成したブレーキパターンに追従できるブレーキ制御手法
- (7) 機器の高信頼化として，処理部，ATC 送信部，受信部などに対する検討成果，及び，車上のデータベースの高信頼化手法

1. 3 参考文献

- (1.1)新版新幹線，日本鉄道運転協会，pp116-118，1984年10月
- (1.2)Ikuo Watanabe, Tetsuo Takashige : “Advanced ATP System for Improving Train Traffic Density and Control Efficiency”,
Transportation Research Record 1314, pp140-146 , 1991.6
- (1.3)渡辺郁夫，高重哲夫，直江正直，デジタル軌道回路を利用した統合列車制御，鉄道サイバネ論文集，pp156-159，1991年8月
- (1.4)Ikuo Watanabe, Tetsuo Takashige, Advanced Automatic Train Protection System, IEEE 44th Vehicular Technology Conference Proceedings, Vol.2, pp1126-1129, 1994.6
- (1.5)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, pp49-54, 1995年1月
- (1.6)村上一雄，島立良晴，西尾学，幼方龍太郎，網谷憲晴，嶋田郁男，東北・上越新幹線用デジタルATCシステム，鉄道サイバネ論文集，pp437-440, 2001年
- (1.7)鈴木剛史，デジタルATCの開発と導入，JR EAST Technical Review No.20, pp38-42
- (1.8)渡邊禎也，一段ブレーキ制御ATCの開発，JR東海技報，Vol.13, pp13-16, 平成27年3月
- (1.9)European Railway Signalling, Institution of Railway Signal Engineers, 1995

第2章 デジタル ATC の構成法

2. 1 機能概要とシステム構成

デジタル ATC が導入される以前のいわゆる地上主体制御方式 ATC では，地上で先行列車との間隔や線路条件から決定される許容速度を ATC 信号として作成し，これを連続的に車上に伝え，車上では ATC 信号が指示する速度を列車速度が超過しているときには自動的にその速度以下になるまでブレーキ制御し，指示速度以下になるとブレーキを緩解させるものであった(図 2. 1).

地上主体制御方式 ATC では，ブレーキ制御のための様々な条件が ATC 信号である許容速度に集約され，列車に送られる (図 2. 2).

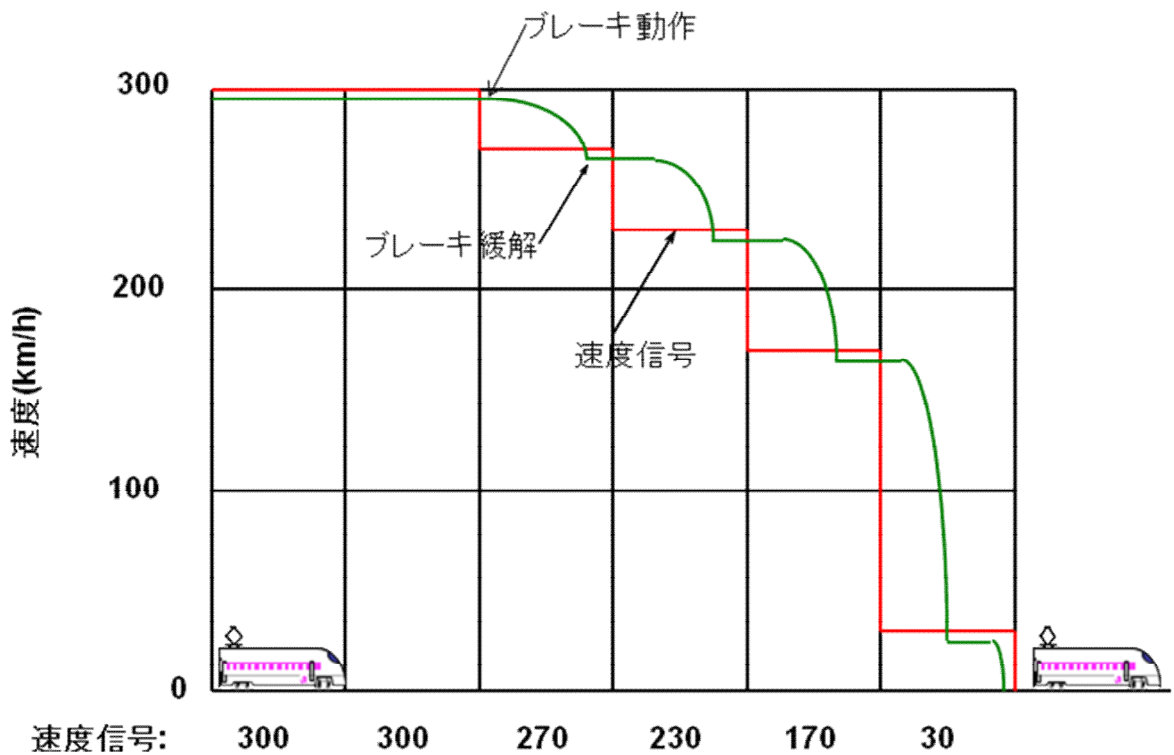


図 2. 1 地上主体制御方式 ATC の制御概要

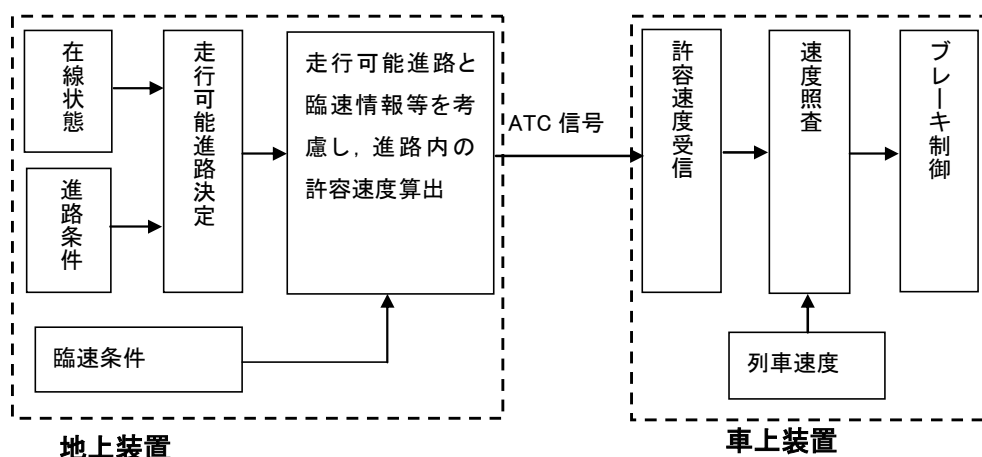


図 2. 2 地上主体制御方式 ATC の機能ブロック部

この方式では基本的に走行する車両のブレーキ性能が同一であることを前提に ATC 速度信号の段数や軌道回路長を決定して、これらの単位で多段のブレーキ制御を行うため、

- ① ブレーキ性能が異なる列車が走行する場合には制御効率が低下する
- ② 停止までに軌道回路をベースとした多段のブレーキ制御が行われるために、列車運転間隔を大きくとらなければならないので到達時間も無駄が生じ長くなる
- ③ 停止までに何度もブレーキの動作、緩解が繰り返されるため乗り心地が悪い
- ④ 速度向上時には新しい速度信号を割り当てる必要があるために地上装置や車上装置の改修が必要

等の課題があった。

そこで筆者は地上装置と車上装置に適切に機能分担し、車上で許容速度を算出し、地上ではその判断材料となる先行列車までの距離、線路条件などのデータを ATC 信号として送る、車上主体制御方式のデジタル ATC を提案した(2.1)~(2.6)。

提案したデジタル ATC では、先行列車の位置を軌道回路で検知し、後続列車に軌道回路を利用して先行列車の在線する位置までの距離情報等を伝え、後続列車は自列車の先頭位置を検知し、地上から送られてきた先行列車までの距離情報と、車上でデータベースとして記憶している自列車のブレーキ性能、線路条件などを組み合わせてブレーキパターンを発生させ、適切な間隔制御を行う(図 2. 3)。

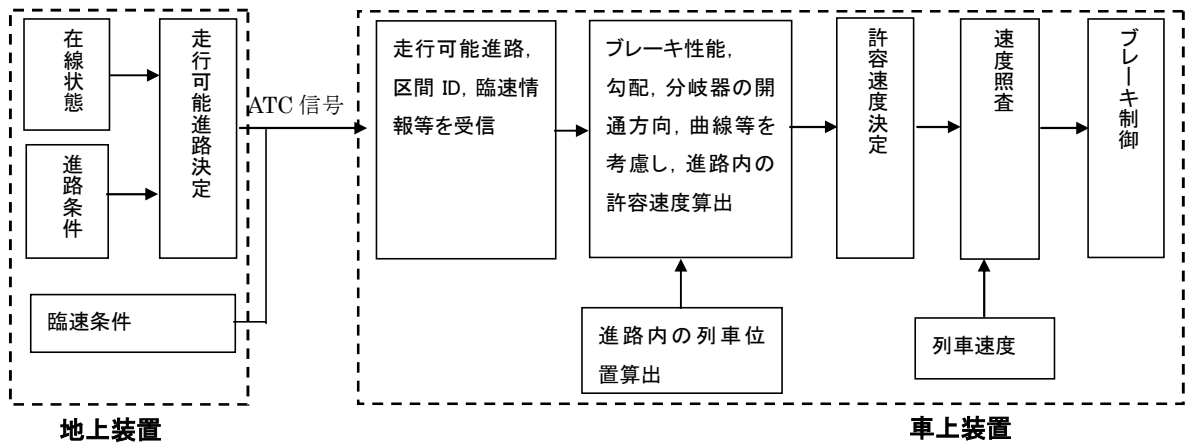


図 2. 3 デジタル ATC の機能ブロック部

デジタル ATC システムは地上装置と車上装置とで構成する。地上装置には列車位置検知，車上への ATC 制御情報の伝送機能を持たせる (図 2. 4)。車上装置は，地上からの ATC 制御情報の受信，安全なブレーキパターンの発生，発生させたブレーキパターンと列車速度を比較照査，ブレーキ制御出力などの機能を持たせる (図 2. 5)。

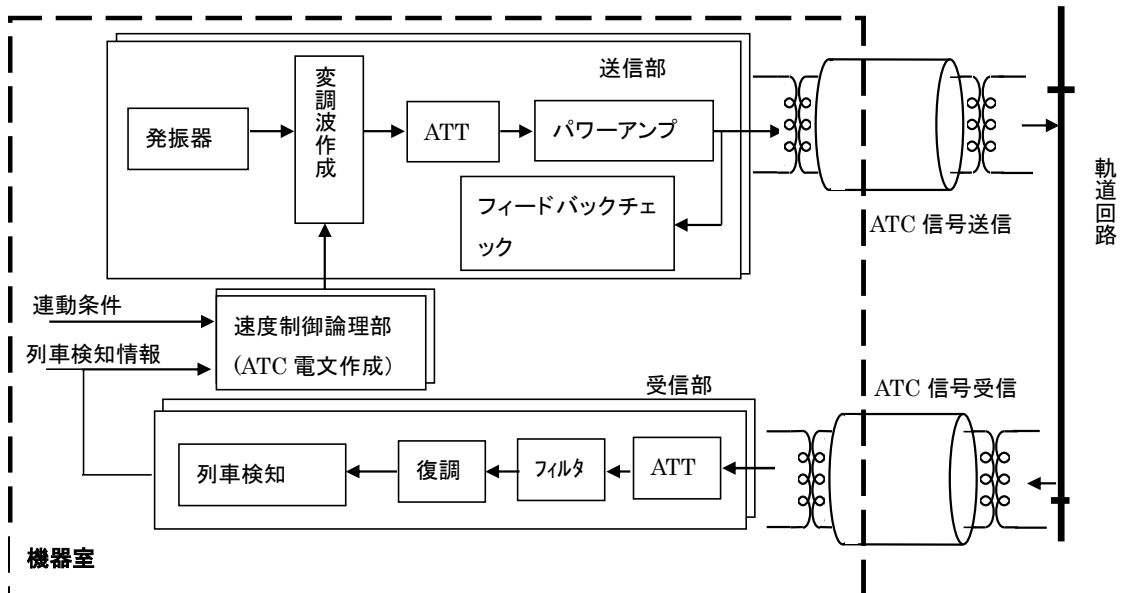


図 2. 4 デジタル ATC の地上装置機器構成

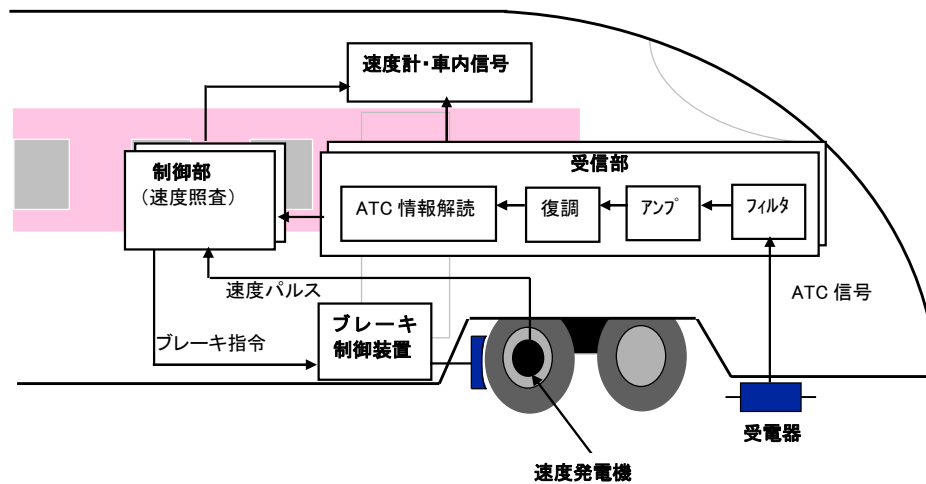


図 2. 5 デジタル ATC の車上装置機器構成

デジタル ATC は、前述の地上主体制御方式 ATC の課題を以下の考え方で解決する。

- ① ブレーキ性能や勾配などの線路条件を車上のデータベースに記憶し、それぞれの車両のブレーキ性能を考慮したブレーキ制御パターンを車上で発生させる方式とすることで、ブレーキ性能が異なる列車それぞれを最適なブレーキパターンに基づき制御する
- ② 先行列車が在線する軌道回路の進入端までに一段ブレーキで停止するブレーキパターンを発生させ、列車運転間隔や到達時間短縮時の無駄となる速度段ごとの空走距離や余裕距離を省く（図 2. 6）
- ③ 1 段ブレーキとすることでブレーキの動作、緩解の繰り返しからくる乗り心地の悪化を防止する
- ④ ブレーキパターンを車上で作成するため、速度向上が行われても、地上設備や車上設備の変更が必要ない

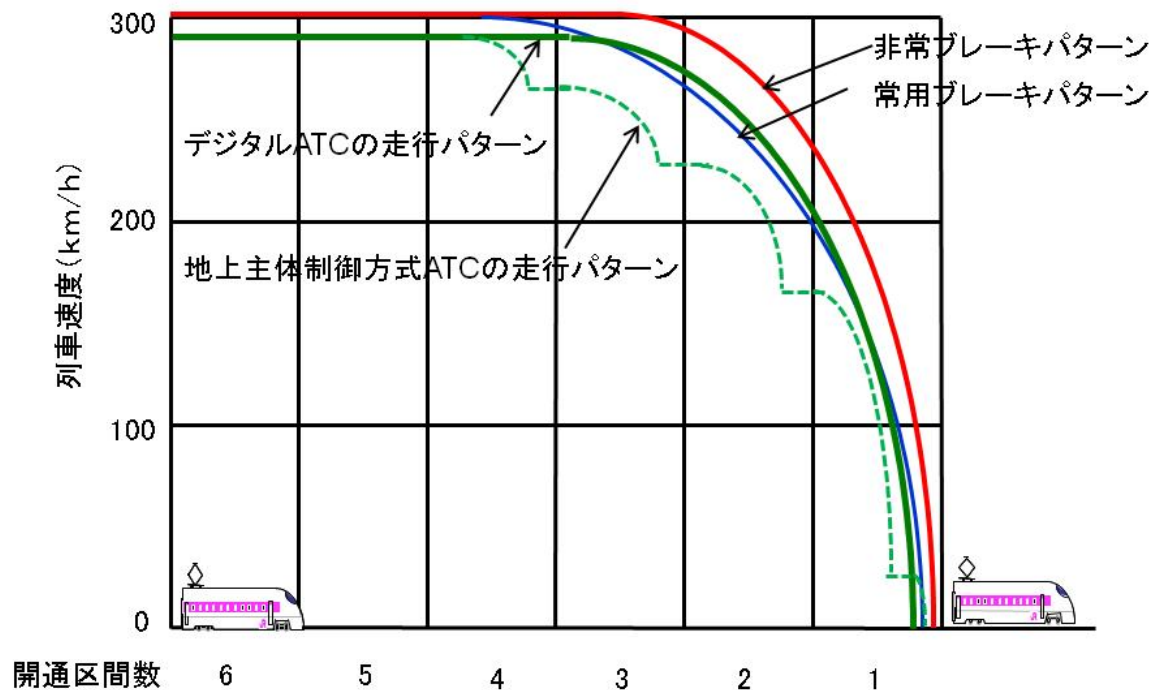


図 2. 6 デジタル ATC のブレーキ制御の概要

2. 2 列車位置検知

高性能な列車制御のためには、きめ細かい列車位置検知が必要である。地上主体制御方式 ATC では軌道回路単位的位置検知であったため、列車の運転間隔をさらに短縮するためには軌道回路を分割するなどの対策が必須であった。

デジタル ATC では、地上主体制御方式 ATC と同様に地上装置は軌道回路単位に列車検知するものの、車上装置による位置検知に関しては車輪の回転の積算で連続的に先頭位置を検知するようにし、軌道回路境界に拘わらず列車のブレーキ制御開始点をできるだけ先行列車の在線する軌道回路に接近して設定できるようにし、運転間隔の短縮を可能とした。

2. 3 制御情報の伝送

デジタル ATC では、地上から車上に、軌道回路識別番号や先行列車が在線する軌道回路進入端までの距離に相当する情報などの制御用データ、データの健全性を検定する CRC(Cyclic Redundancy Check)符号、データフレームの先頭に付加するフラグなど合計数十ビットのデータを送る必要がある。しかし、従来の搬送波を速度信号に対応する周波数で変調する AM 変調方式では、高々数

ビットの情報しか送れない。そこで、デジタル ATC ではデータ 0, 1 にそれぞれ対応する周波数 f_1 , f_2 を割り当て、それを 1 秒間に数十～数百回変化させてデータを作成して、ビット系列として送る方式とした。伝送速度を高くするためには、多くの周波数帯域を必要とする。一方、広い帯域を使用する場合には、その帯域内に電車電流の中で主要なノイズ成分である電源高調波が混入して伝送に悪影響を及ぼす可能性がある。したがって、同じ伝送速度でもできるだけ使用帯域が少ない方式を採用する必要がある。そのためデータ変化時に位相が連続になるように変調し、使用帯域の狭い MSK を採用した。

2. 4 ブレーキ制御

地上主体制御方式 ATC では、ブレーキ制御のための様々な条件が許容速度に集約され、この情報のみが ATC 信号として地上から車上に送られる。そのため、例えば先行列車に接近して停止する場合などにおいては、停止まで何段階かの速度が示される。この場合、ブレーキ開始点が車上ではわからないため、低い速度信号が送られている軌道回路に進入すると予告なしに常用最大ブレーキが作動し、乗り心地が良くないという課題があった。

そこでデジタル ATC では、先行列車に接近したとき、車上に記憶しているブレーキ性能（ブレーキが動作するまでの空走時間、減速度）、ブレーキ区間の勾配、停止すべき位置の余裕を考慮して、車上において安全に停車するようなブレーキパターンを発生させるようにした。このようにすることで、予めブレーキを動作させる位置が予測できるようになり、ブレーキ開始時に緩和ブレーキなど乗り心地を考慮したブレーキ制御も可能とした。

2. 5 車上のデータベース

デジタル ATC では、先行列車の位置に相当する軌道回路の開通区間数、進路の開通方向、臨時速度制限などの変化する情報を地上装置から ATC 信号として送る。一方、勾配、曲線などの線路条件に関する情報、車両のブレーキ性能、車輪径などの固定情報は車上のデータベースに記憶する^(2.7)。

(1) 線路条件に関する情報

車上で記憶する線路条件に関するデータベースを表 2. 1 に示す。

軌道回路に関するデータは、地上から ATC 情報として受信する先行列車が在線している軌道回路までの区間数を距離に換算するために使用する。また、ATC 信号周波数、隣接軌道回路に関するデータは、受信した ATC 情報の健全性チェ

ックに使用する。

曲線や分岐に関するデータは、それらを安全に通過するための制限速度に対するブレーキパターンを作成するために使用する。

き電区分に関するデータはその区間には停止しないようなブレーキパターンを作成するために使用する。

表 2. 1 線路条件に関する車上データベース

①軌道回路：	軌道回路名称 始端キロ程 終端キロ程 長さ ATC 信号周波数 列車検知信号周波数 終端の有絶縁／無絶縁の区別 絶対信号／許容信号の区別 始端の隣接軌道回路 終端の隣接軌道回路
②曲線：	始端キロ程 終端キロ程 曲線半径（速度制限）
③分岐：	始端キロ程 終端キロ程 番数（制限速度）
④き電区分：	始端キロ程 終端キロ程

(2) 車両に関する車上データベース

車両に関するデータベースを表 2. 2 に示す。

列車長は、分岐器や曲線を通過する際の速度制限の解除のタイミングを検知するために使用する。

常用ブレーキ及び非常ブレーキに関するデータは、それぞれのブレーキパタ

ーンを作成するために使用する。常用ブレーキの弱めブレーキに関するデータは乗り心地悪化防止のためのブレーキ動作開始時の緩和ブレーキのために使用する。

表 2. 2 車両に関する車上データベース

①列車長
②常用ブレーキ
線区最高速度
制動遅れ時間
弱め：減速度，動作時間
強め：減速度
停止余裕距離
緩解速度差
手動緩解速度
警報予鈴時間
③非常ブレーキ
制動遅れ時間
常用ブレーキとの速度差 （最高速度，分岐，曲線毎）
減速度
停止余裕距離
④その他
車輪径
車輪一回転あたりのパルス数
曲線半径と速度制限

2. 6 デジタル ATC の制御性能

(1) 運転間隔

デジタル ATC では、第 2 章 2. 1 節で述べたように、先行列車の在線する軌道回路の進入端までに一段ブレーキで停止するブレーキパターンで制御するため、地上主体制御の多段ブレーキ制御 ATC に比較して列車の運転間隔の短縮が可能となる。

具体的にデジタル ATC の運転間隔の短縮効果を調べるために、デジタル ATC

と理想的な列車の間隔制御が可能な移動閉そくにおいて、通勤線区の1線着発駅近傍での運転間隔を比較した。計算の前提条件を表2.3に示す。なお、信号変化時間、ブレーキ遅れ時間は無視している。

表2.3 運転間隔計算の前提条件

最高速度	100km/h
減速度	3km/h/s
加速度	2km/h/s
列車長	200m
駅停車時間	30秒
停止余裕距離	20m
信号変化時間	0秒(無視)
ブレーキ遅れ時間	0秒(無視)

計算結果を図2.7に示す。図2.7は、駅近傍のそれぞれの位置において、先行列車が通過した後、後続列車が同じ位置に到達するまでの最小時間をシミュレーションにより求めた結果である。列車の最後尾の位置を基準としている。

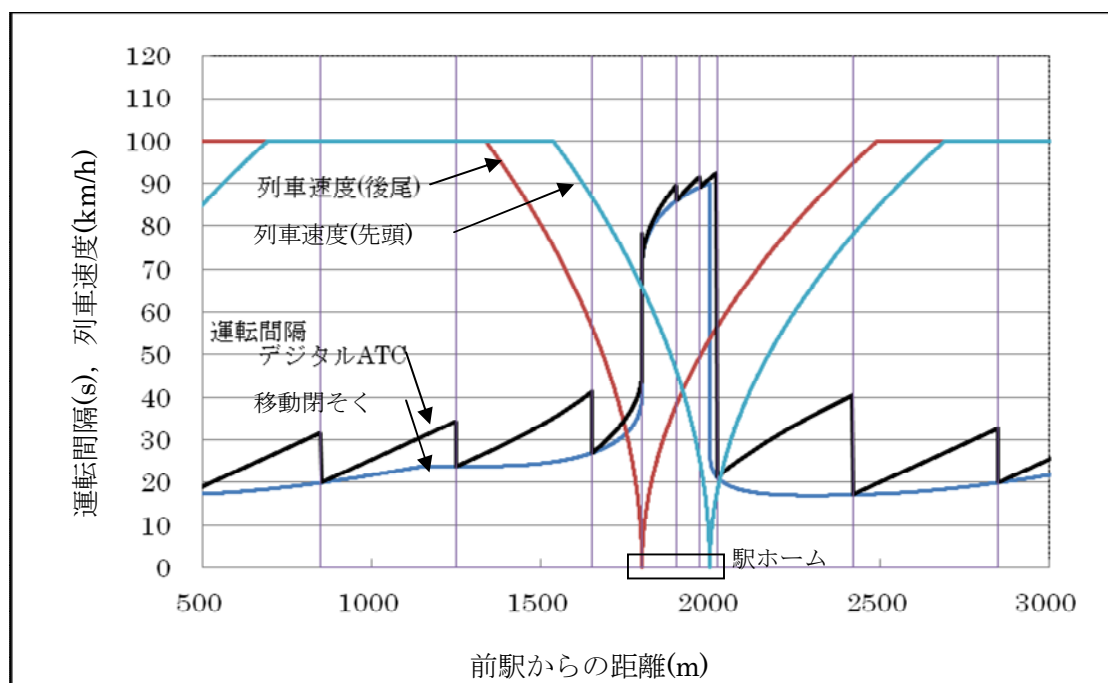


図2.7 デジタルATCと移動閉そくの運転間隔の比較

デジタル ATC において、列車が停止あるいは低速で走行するホームトラックの軌道回路のみを短くすれば運転間隔を短縮でき、理想的な間隔制御である移動閉そくと 2 秒程度の差の運転間隔を実現できる。

次に、地上主体制御方式の 1 段ブレーキ ATC とデジタル ATC との運転間隔の比較を行う。計算の前提条件を表 2. 4 に示す。駅間を 2km とし、軌道回路長は 200m を基本に、駅の停止位置まで 500m に近づいたところで 100m に、

表 2. 4 運転間隔計算の前提条件

最高速度	80km/h
駅進入速度	55km/h
減速度	2.5km/h/s
加速度	2.4km/h/s
列車長	160m
駅停車時間	50 秒
停止余裕距離	25m
車上装置による位置検知の誤差	10m
信号変化時間	1 秒
ブレーキ遅れ時間	2 秒

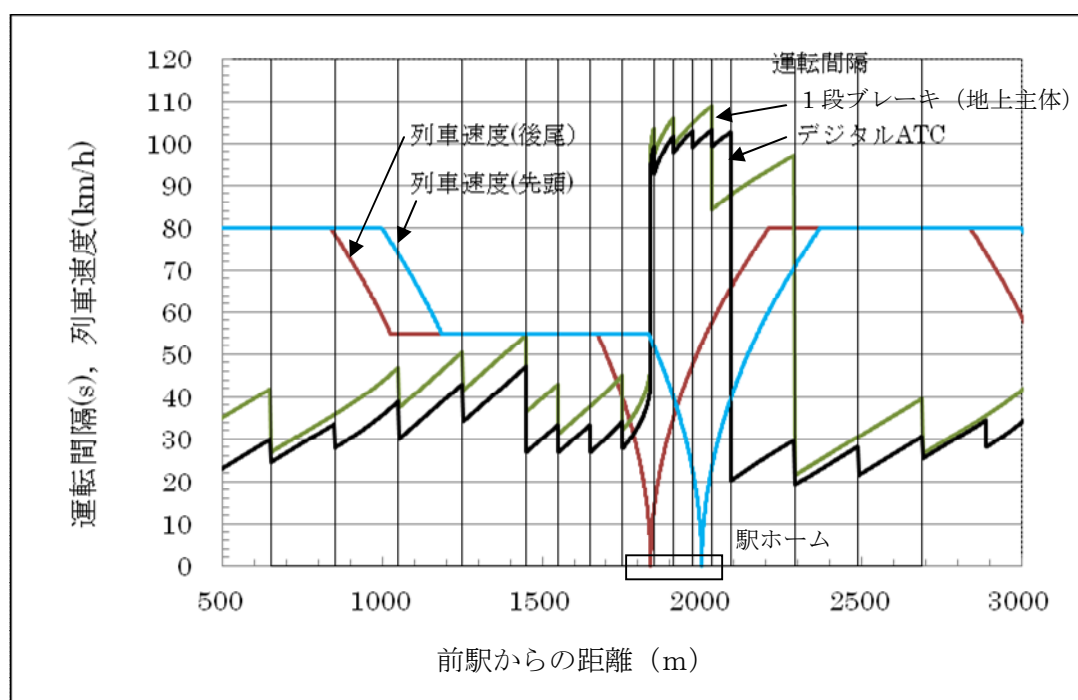


図 2. 8 地上制御主体方式 1 段ブレーキ ATC とデジタル ATC との運転間隔の比較

ホームトラックを 60m に設定した場合である。なお、地上主体制御方式の 1 段ブレーキ ATC の現示は 5km/h 刻みに設定した。計算結果を図 2. 8 に示す。計算から地上主体制御方式の 1 段ブレーキ ATC の場合の運転間隔約 109 秒に対して、デジタル ATC では約 103 秒となり、設定した条件では、デジタル ATC の方が 6 秒程度短縮できる結果が得られた。

(2) 到達時間の短縮効果

地上主体制御方式 ATC では、駅進入・停止のための減速制御が段階的に行われる。これに対して、デジタル ATC では停止目標に対して 1 段の減速制御が行われるために低速度での走行時間が短くなり、駅間走行時間の短縮が可能となる。

図 2. 9 に、山陽新幹線で実施したブレーキ制御試験時の最高速度 230km/h から停止までの走行時間を、また、図 2. 10 にブレーキ制御を開始してから停止するまでの走行距離を、地上主体制御方式 ATC の場合のシミュレーション値と比較して示す^{(2.8) (2.9)}。試験に使用した新幹線の常用ブレーキは、最も弱い B1N から最も強い B7N までの 7 段階あるが、B7N、B6N、B5N のそれぞれの減速度のブレーキパターンを基準として制御した場合の計算結果である。

図より最高速度が 230km/h の条件で、デジタル ATC の場合には地上主体制御方式 ATC に比較して、B5N の制動で 45 秒、B7N 制動では 1 分 8 秒短縮できる。ブレーキ制御を開始してから停止するまでの走行距離としては、B5N の制動で 1318m、B7N 制動で 2012m 短縮できる。この短縮した分の距離を、より高速で走行できるため、駅間走行時間の短縮が見込める。最高速度が 300km/h になると、これらの効果はさらに大きくなる。

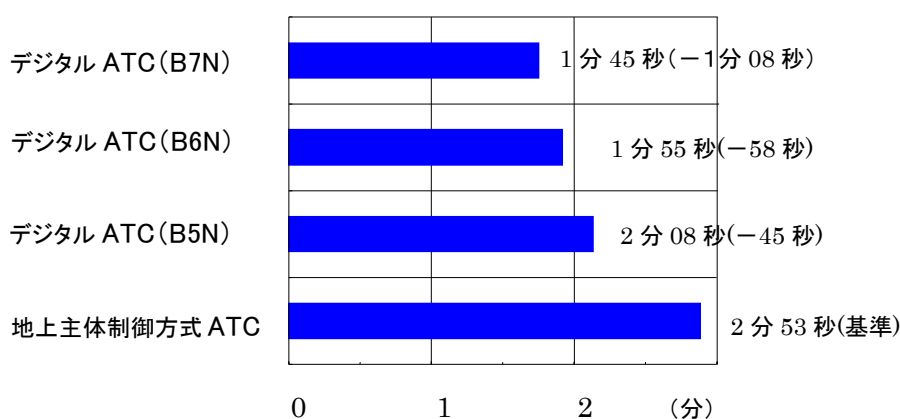


図 2. 9 ブレーキ制御時間の比較 (230km/h → 停止)

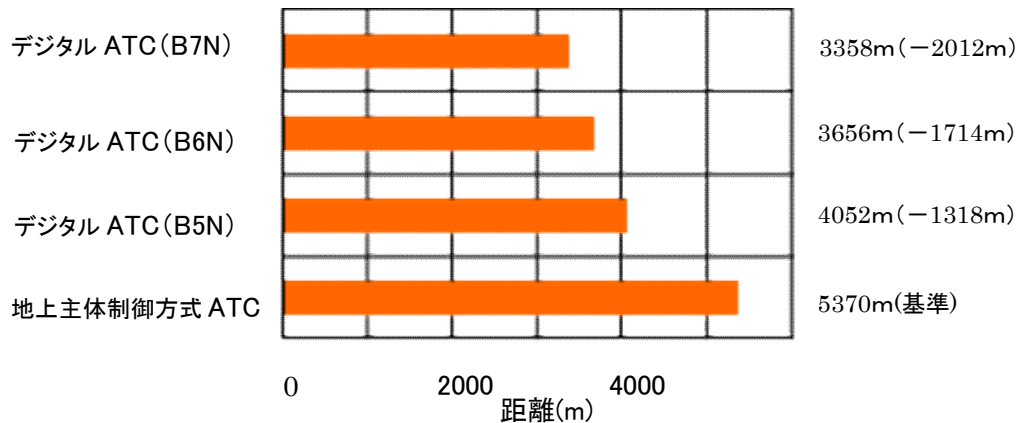


図 2. 10 ブレーキ制御開始から停止までの走行距離(230km/h→停止)

2. 7 まとめ

本章では、筆者が提案した車上主体制御方式のデジタル ATC の機器構成と主な機能である列車位置検知，制御情報の伝送，ブレーキ制御を説明し，地上主体制御方式 ATC の諸課題を以下のように解決できることを示した。

- デジタル ATC は，車上データベースの自列車のブレーキ性能に応じて発生させるブレーキパターンに基づきブレーキ制御できるので，ブレーキ性能が異なる列車それぞれを最適なブレーキ制御することを可能とする。
- 一段ブレーキ制御とすることで，停止する際のブレーキの動作，緩解の繰り返しからくる乗り心地の悪化を防止できる。
- ATC 信号に含まれる停止目標に対して，車上でブレーキパターンを作成することで，速度向上が行われても地上から送る ATC 信号の情報内容の変更が不要である。
- 運転間隔に関しては，列車が停止あるいは低速で走行するホームトラックの軌道回路のみを短くすれば，理想的な間隔制御である移動閉そくとほぼ同等の運転間隔（2 秒増）が実現できること，地上主体制御方式の 1 段ブレーキ ATC と比べて一定条件下で約 6 秒程度運転間隔を短縮できることを示した。
- 到達時間については，速度 230 km/h から停止するまでのブレーキ制御時間を地上主体制御方式の多段 ATC に比較して 45 秒から 1 分 8 秒短縮できることを示した。

2. 8 参考文献

- (2.1) Ikuo Watanabe, Tetsuo Takashige : “Advanced ATP System for Improving Train Traffic Density and Control Efficiency”,
Transportation Research Record 1314, pp140-146 , 1991.6
- (2.2) 渡辺郁夫, 高重哲夫, 直江正直, デジタル軌道回路を利用した統合列車制御, 鉄道サイバネ論文集, pp156-159, 1991年8月
- (2.3) Ikuo Watanabe, Tetsuo Takashige, Advanced Automatic Train Protection System, IEEE 44th Vehicular Technology Conference Proceedings, Vol.2, pp1126-1129, 1994.6
- (2.4) 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, pp49-54, 1995年1月
- (2.5) Tetsuo Takashige, Ikuo Watanabe, Mitsuyoshi Fukuda, Natsuki Terada, Development of New Automatic Train Control System for Shinkansen, International Conference on Inter-city Transportation, pp282-289, 2002.11
- (2.6) 渡辺郁夫, 高重哲夫, 箭本芳人, 列車間隔制御方法, 1996.12,
特許第 2593958 号
- (2.7) 福田光芳, 渡辺郁夫, 平尾裕司, 鉄道分野での高信頼性データベースの設計に関する一考察, 電子情報通信学会技術研究報告 FTS97-22, pp41-48, 1997年6月
- (2.8) 渡辺郁夫, 高重哲夫, 志田洋, 小林巧, 内田清五, 音無隆, 犀川潤, 山陽新幹線におけるデジタルATC性能試験, 鉄道総研報告, Vol.14, No.2, pp41-46, 2000年2月
- (2.9) 志田 洋, 渡辺 郁夫, 高重 哲夫, 音無 隆, 新幹線対応デジタルATC性能試験-山陽新幹線における本線走行試験結果-, 鉄道サイバネ論文集, pp190-193, 1999年11月

第3章 デジタル ATC と列車位置検知

ATC で列車の間隔を安全に制御するうえで、基本情報となる列車位置検知の高信頼化は不可欠である。本章では、軌道回路による地上からの位置検知、車輪回転の積算による車上からの位置検知の高信頼化について論じる。

3. 1 軌道回路による列車位置検知

デジタル ATC における地上側からの列車位置検知には、実績のある軌道回路を利用する。軌道回路における列車検知性能は、短絡感度、レール表面の状態、車両重量や編成長（短絡する輪軸数）、車輪の踏面形状や踏面表面の荒さなどで変動する短絡抵抗、軌道回路の漏れコンダクタンスの変化など様々な要因で変化する。したがって軌道回路の列車検知性能に影響を及ぼす様々なパラメータを考慮した対策が必要となる。

本章では従来から使用されている軌道回路の信頼性向上対策を列挙し、デジタル ATC に適用する場合の効果と課題を検討する。

3. 1. 1 短絡感度

軌道回路の左右のレールを抵抗で短絡し、在線検知できる短絡抵抗の最大値を短絡感度という。短絡感度が大きいほど、列車検知性能は高くなる。短絡感度は機器構成のほかに軌道回路の調整で設定される補償量（軌道回路の受信機の列車在線と判定するレベルに対する列車未在線時の受信レベルの余裕）によってもその値は異なる。

デジタル ATC で使用する AF 帯の軌道回路のように大きな非線形特性をもつ素子がない軌道回路については、送受信端の機器のインピーダンスを大きくする程、短絡感度は大きくなる。また、補償量を小さくするほど短絡感度は大きくなる。

図 3. 1 の代表的な機器構成で短絡感度を計算した結果を表 3. 1 に示す。軌道回路の送信点から受信点まで各地点において列車検知可能な短絡抵抗の最大値を計算し、それらの中で最小となる箇所の短絡抵抗を算出したものである。補償量は 9dB に設定した。表 3. 1 より周波数が高くなるほど軌道回路を構成する機器のインピーダンスが高くなり、短絡感度も高くなる。周波数 1 k Hz で 1.9 Ω、500 Hz でも 0.9 Ω 確保できている。一般には、0.1 Ω あればよいとされているので、デジタル ATC において特に短絡感度を上げるための対策は必要ないと判断する。

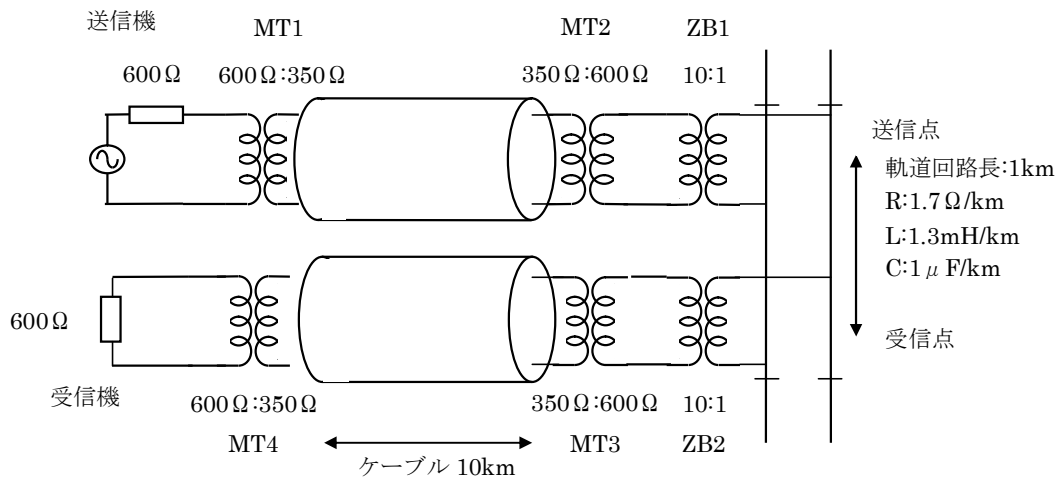


図 3. 1 ATC の地上機器構成

表 3. 1 短絡感度の計算結果

周波数 (Hz)	500	1000	2000
レール側から機器側をみたインピーダンス(Ω)	2.9	5.7	6.2
短絡感度(Ω)	0.9	1.9	2.8

3. 1. 2 短絡抵抗の増大防止

軌道回路は左右のレールを車両の輪軸が電氣的に短絡することで列車の在線を検知する。輪軸の短絡抵抗は図 3. 2 に示すように、輪軸自体のインピーダンス Z_A と車輪・レール間の接触抵抗 $2Z_K$ の和となる。列車の編成としての列車短絡抵抗はそれぞれの輪軸の並列抵抗となる。

1 軸分の車輪自体のインピーダンス Z_A の測定結果を図 3. 3 に示す^(3.1)。図 3. 3 は在来線の車輪のデータである。図からわかるように周波数が 50Hz で 0.6mΩ, 1kHz で 6.5 mΩ, 5kHz で 28mΩ, 40kHz で 160mΩ 程度の値となる。これらの輪軸が (両数×4) 本並列に軌道回路を短絡することになる。

表 3. 1 に示したように軌道回路の短絡感度は 500Hz でも 0.9Ω 以上はあるので、ATC の列車検知で使用する周波数では輪軸自体の短絡抵抗は無視してよいレベルとなる。

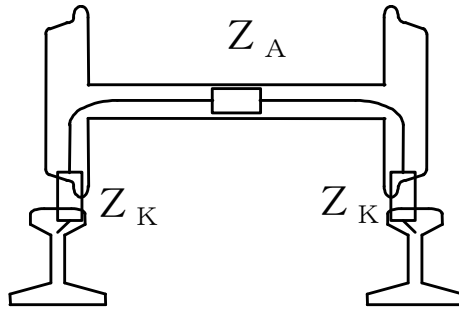


図 3. 2 車輪の短絡抵抗

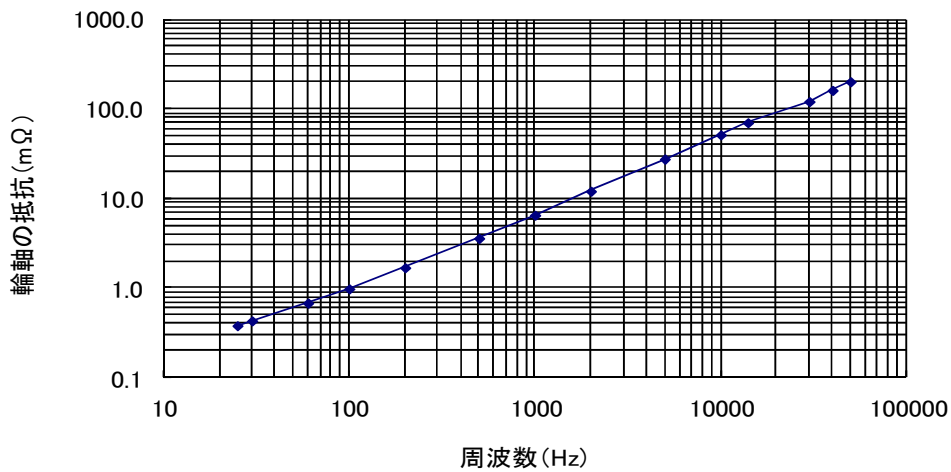


図 3. 3 輪軸（1 軸分）のインピーダンス測定結果

一方、車輪－レール間の接触抵抗 Z_K は、接触部が小さいために電流が狭められることにより生じる集中抵抗と、接触面に介在する皮膜の電気抵抗で生じる皮膜抵抗の和となる。集中抵抗は、レールと車輪の形状、車両の荷重、走行時の車輪の状態などで異なるが、皮膜抵抗に比較して極めて小さな値であり、無視できる。皮膜抵抗は大きな抵抗値になることがある。したがって、短絡抵抗を大きくする要因としては皮膜抵抗を考えればよい^(3.1)。

レール踏頂面の皮膜はいろいろな要因で発生する。レール錆、砂、ごみ、煤煙、油、制輪子粉、落ち葉などが原因で発生する。高抵抗の物質でレール踏頂面が覆われると、非常に高い抵抗になり、軌道短絡ができなくなる。しかし、薄い皮膜の状態では、ある値以上の電圧をレール間に加えると皮膜が破壊して抵抗が小さくなる。図 3. 4 に示すように皮膜の電気的特性としては、酸化皮膜と半導体皮膜の 2 種類が代表的である。酸化皮膜はレール錆が原因で、新品

のレールや列車がほとんど通過しない個所で発生する。しかし、電圧を加えていない時に絶縁状態に近い場合でも、数 10V～200V 加圧すると皮膜は破壊して抵抗が小さくなる。

半導体皮膜は列車が毎日通過するような区間でも多く発生する。半導体皮膜が発生すると、図 3. 5 に示すようにレール間電圧を一定値以上に加圧すると接触電圧（残留電圧）は一定になる性質がある。

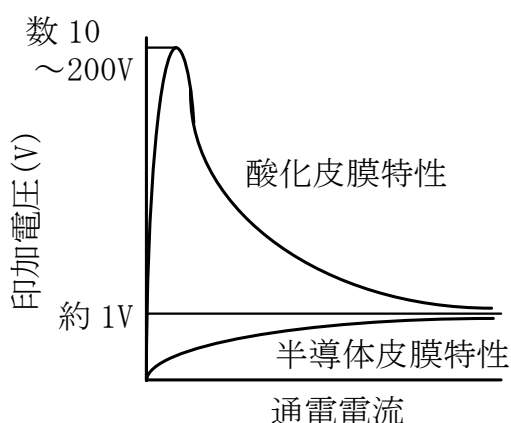


図 3. 4 皮膜の電圧電流特性

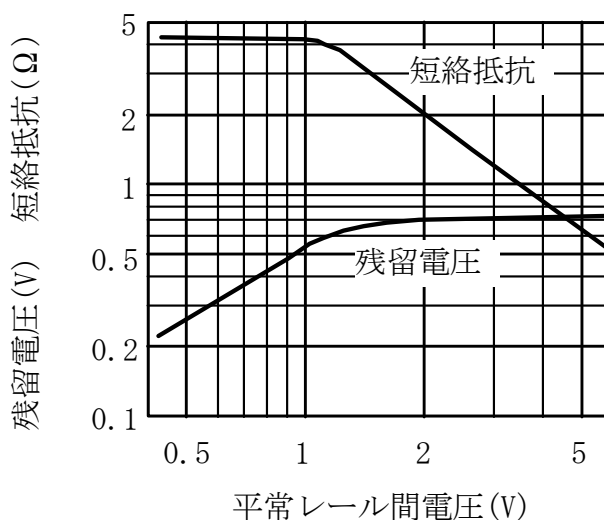


図 3. 5 半導体皮膜における平常レール間電圧と短絡抵抗・残留電圧の関係

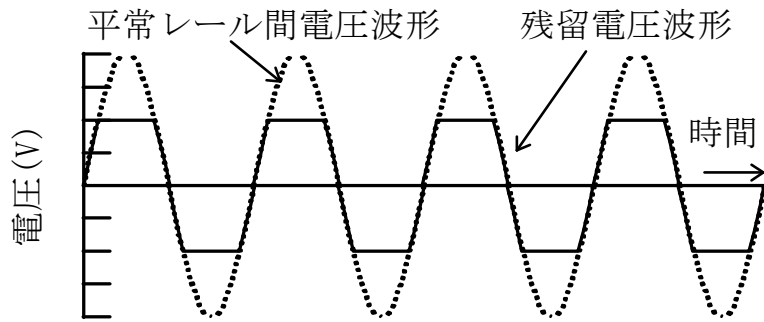


図3. 6 半導体皮膜における平常レール間電圧波形と残留電圧波形の例

また、図3. 5に示すように、残留電圧が一定になる領域では、加圧する電圧に反比例して接触抵抗は小さくなる。この時の残留電圧の波形は図3. 6のようにクリップした波形となる。レール—車輪間の接触が半導体皮膜特性を示す線区では、列車短絡時のレール間電圧（残留電圧）は図3. 5のように最大でも高々1Vである。短絡不良を防止する対策としては、残留電圧が1V あっても確実に列車検知ができればよいので、

- ① 平常時の軌道回路電圧を上げる
- ② 軌道回路の信号以外の周波数の電圧を加えて、信号を抑圧させる

の2通りの方法が考えられる。対策①が基本であるが、送信アンプのパワー不足などで①の対策が困難な場合には対策②を採用する。

以下に短絡抵抗の増大防止の対策を述べる。

(1) 電源周波数等の他の電圧電流の重畳

軌道回路の信号以外の周波数の電圧を加えて信号を抑圧させ、短絡抵抗の増大を防止する手法が提案されている^{(3.1)(3.2)}。

図3. 7は、軌道回路に電源周波数の電流を重畳する対策をしたとき、対策前後の軌道回路の残留電圧を比較したものである^(3.1)。電源周波数の電流を重畳する対策により列車通過時の残留電圧を低くすることができ、軌道短絡性能を向上できることがわかる。

また、図3. 8は車両に搭載した通電装置からレール—車輪間に軌道短絡改善のための電圧を印加して軌道短絡の性能向上を図った場合である^(3.2)。図3. 9に、電圧印加前後の軌道回路の受信レベルを示す。図3. 9に示すように、軌道短絡改善用の電圧を印加することで、軌道回路の列車検知性能を改善できることがわかる。デジタルATCを導入する区間において、軌道回路の短絡状態がよくない場所において、レール間電圧をさらに上げることが困難な場合には、

これらの対策を適用する。

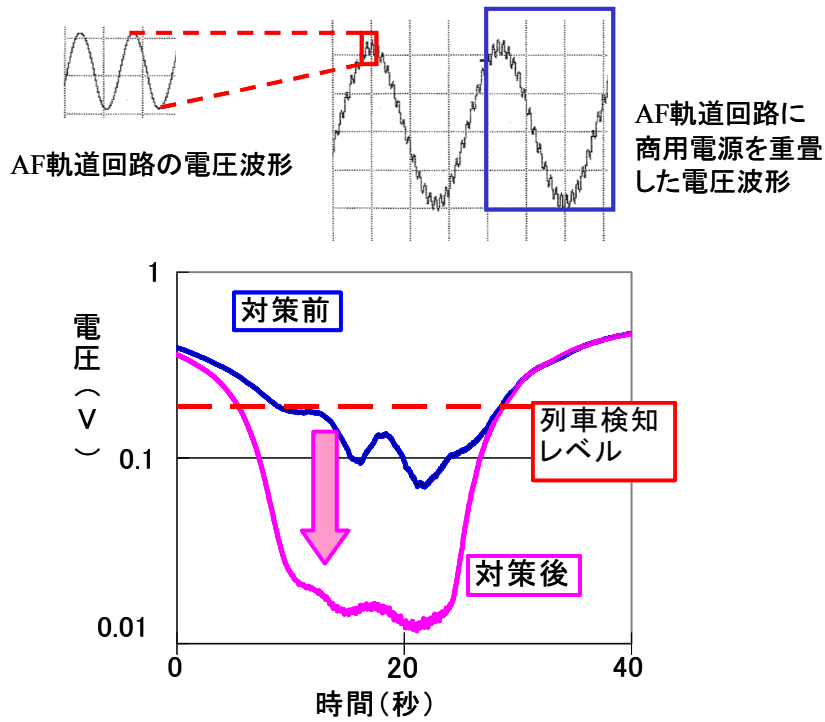


図3.7 電源重畳時の軌道回路の列車検知性能向上

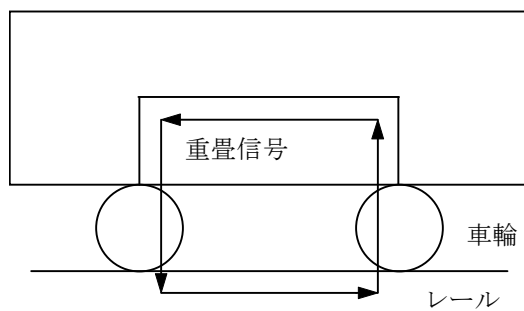


図3.8 前後車輪間電圧印加方式による軌道短絡の改善

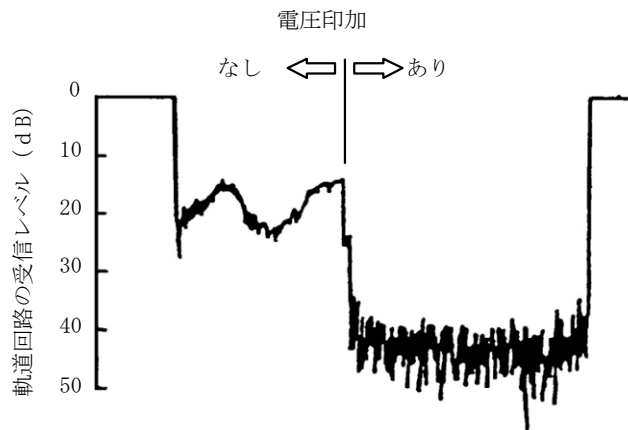


図3. 9 電圧印加前後の軌道短絡時の軌道回路受信レベル

(2) 車輪踏面粗さの確保

車輪踏面が粗いほど接触抵抗が小さくなるのが福田らにより報告されている^(3.3)。図3. 10は、軸重 25 kN、レール表面の錆の状態を一定 ($3\mu\text{m}$) の条件で、車輪踏面粗さ R_a をパラメータとして電流と接触抵抗の関係を示したものである。図より車輪踏面の粗さが粗いほど、接触抵抗は小さくなる。

したがって、デジタル ATC においても、車両の車輪踏面の粗さを適度に保つことは短絡不良の防止には有効であり、そのために踏面制輪子を採用するなどの対策を採る。

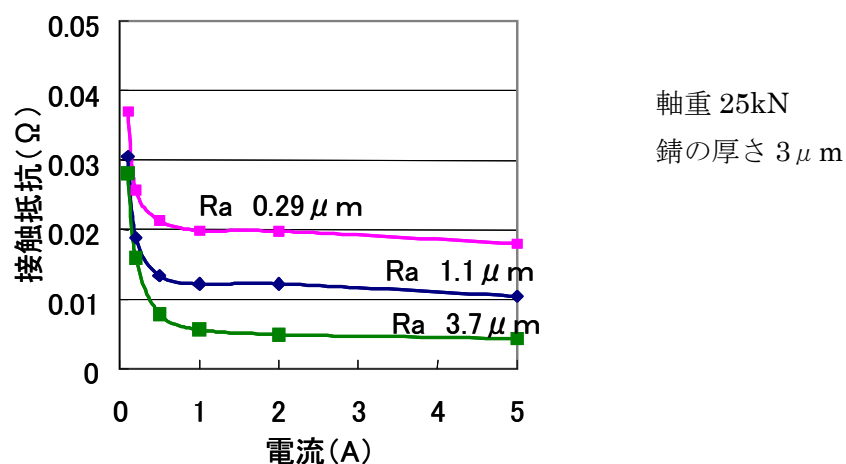


図3. 10 レールの表面粗さを変化させた場合の接触抵抗 (周波数 60Hz)

3. 1. 3 軌道回路の漏れコンダクタンスの変動の対策

レールを電気回路の一部に使用する軌道回路の電気的特性は、降雨などの環境の影響を受けて変動する。降雨・降雪、締結装置に付着した土砂などでレール間の電気抵抗が下がり、レール間の電気抵抗の逆数である漏れコンダクタンスは大きくなる。漏れコンダクタンスが大きくなると軌道回路の受信レベルが低下し、場合によっては不正に列車検知し、列車運行に支障を及ぼす場合がある。そして、軌道回路の受信レベルの低下が続くと、安定に列車検知するためのレベル調整が必要となる。一方、レベル低下時に調整した後に、レベルが回復した時には、そのままでは短絡感度が悪くなるので再調整が必要となる。以下にレベル変動の対策として一般に行われる対策を述べる(3.4)。

(1) 機器のインピーダンスを下げる

機器側のインピーダンスを下げ、軌道回路のインピーダンスを全体的に低くして、漏れコンダクタンスの増加に対してレベル低下を抑制する方法がある。図3. 11, に図3. 1におけるMT2及びMT3のレール側のインピーダンスを600Ωから200Ω, 100Ωに変化させたとき、軌道回路の漏れコンダクタンスを0.01S/kmから0.5S/kmまで大きくしたときの受信レベルの変化の計算結果を示す。

図3. 11より、インピーダンスを600Ωから100Ωまで下げることで、レベル低下を9.5dBから5.1dBに抑制できる。一方、MT2及びMT3のレール側インピーダンスを下げることで、軌道回路のレール間のインピーダンスが低下するので短絡感度は低下する。漏れコンダクタンスを0.3S/km一定で、送受信

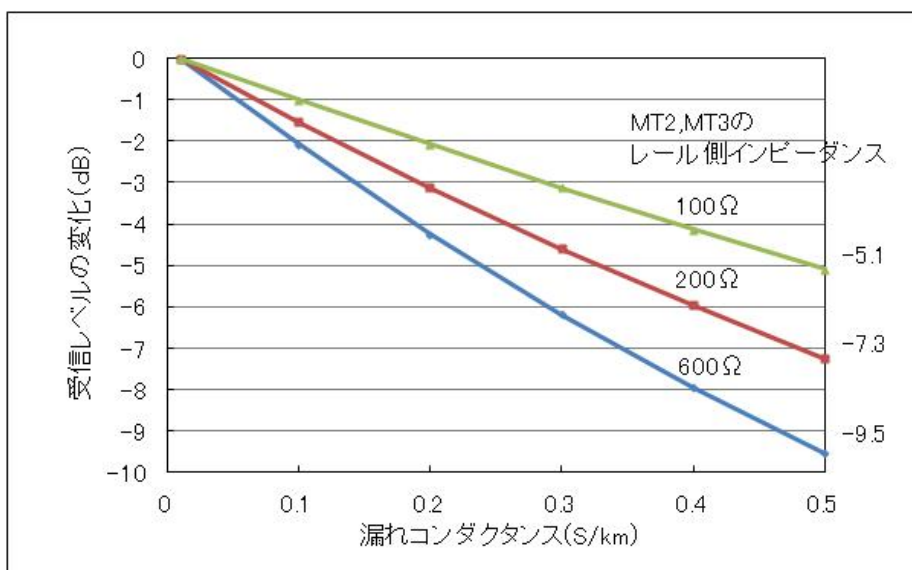


図3. 11 漏れコンダクタンス増加時の軌道回路受信電圧のレベル低下 (MT2 及び MT3 のレール側インピーダンス変化)

MT のレール側インピーダンスを変化させたときの軌道回路の受信電圧のレベル低下と、同じ機器構成で漏れコンダクタンスが $0.01\text{S}/\text{km}$ の時の短絡感度を図 3. 1 2 に示す. 図より, インピーダンスを 600Ω から 100Ω に下げることでレベル低下を 6dB から 3dB に抑えられる一方, 短絡感度が 1.9Ω から 0.8Ω に低下している. したがって, 必要な短絡感度を確保する範囲で限定して送受信のインピーダンスを下げる必要がある.

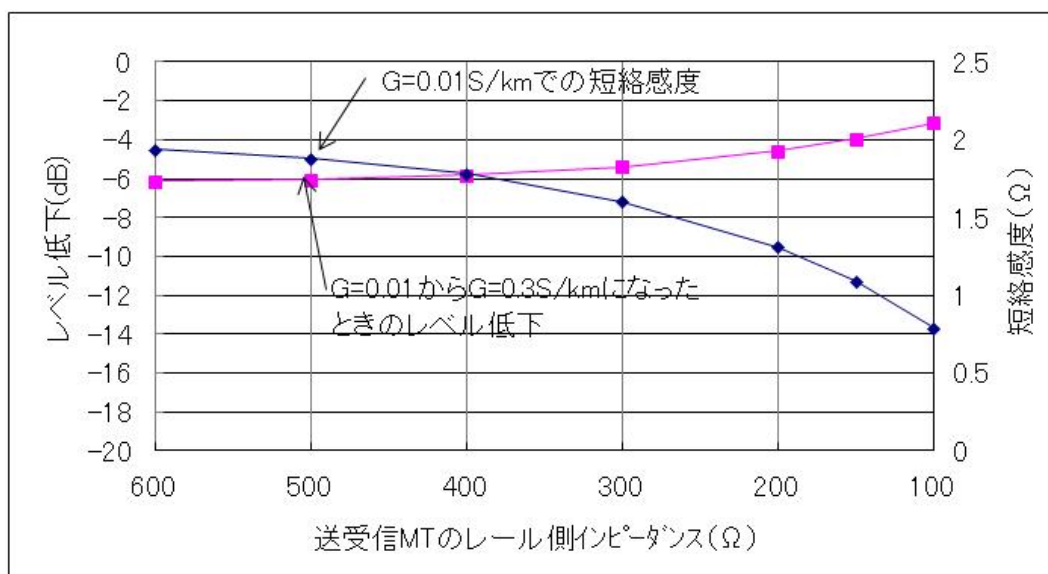


図 3. 1 2 MT 2, MT 3 のインピーダンス変化時のレベル低下と短絡感度

(2) 並列コンデンサの付加

軌道回路の一次定数 R , L , G , C において,

$$R/L = G/C \quad (3.1)$$

の関係が成立するとき, 信号の伝送効率がよくなる. 天候等で変動するのは漏れコンダクタンス G のみである. したがって, 想定される最大漏れコンダクタンスの時に (3.1) 式が成り立つように, 軌道回路に一定間隔で並列コンデンサ付加する方法がある.

(3) 軌道回路の分割

あらかじめ想定される最大漏れコンダクタンスを考慮して, 信号周波数, 送信電力, 軌道回路長などを決定する. しかし, 想定した以上に漏れコンダクタンスが大きくなる場合には, 受信レベル確保のために軌道回路を分割する.

図3. 13は、軌道回路長が500m, 1km, 1.5kmのときに、漏れコンダクタンスを0.01S/kmから1S/km(非常に軌道状態が悪い状態)まで変化させたときの軌道回路の受信電圧レベルを比較したものである。図より軌道回路長1.5kmの場合には漏れコンダクタンスが0.01S/kmから1S/kmに変化した時に軌道回路の受信電圧が24dBのレベル低下であったものが、500mでは8dB程度に抑えられる。

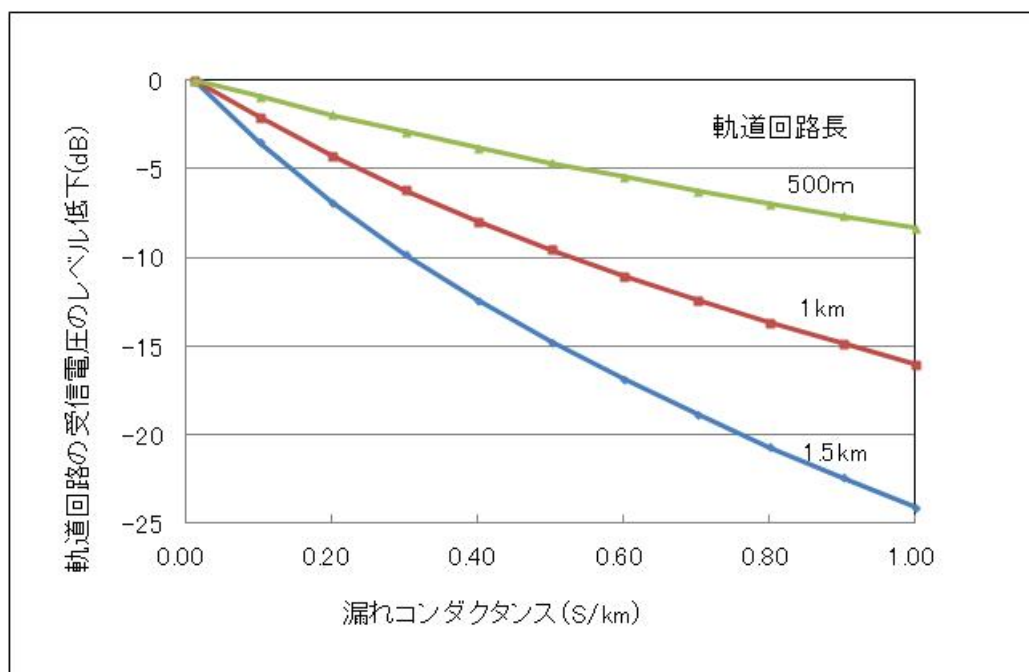


図3. 13 軌道回路分割時の受信レベルの変化

(4) 受信機の列車検知レベルの自動補正

雨や漏水による漏れコンダクタンスの変動に起因する軌道回路の受信レベルの変化は1時間あたり1dB程度であるに対し、列車が軌道回路に進入した時の受信レベル変動は急激で大きな変動を伴う。この変動の違いに着目して、軌道回路の受信レベルがゆっくり変化した時には列車検知レベルも変化させて補正する方法が採用できる(図3. 14)。

自動補正機能がない場合には、平常時に受信の最小動作レベルに対して余裕のレベル(補償量)は、漏れコンダクタンスの変動を考慮して大きめに確保しなければならない。AF軌道回路では通常9~10dB程度に調整する。これに対して自動補正機能がある場合には、6dB程度の補償量ですみ、短絡感度も向上する。ただし、電車電流の妨害に対しても安定に動作するために、補正範囲は最小動作レベルを確保できる程度に限定される。

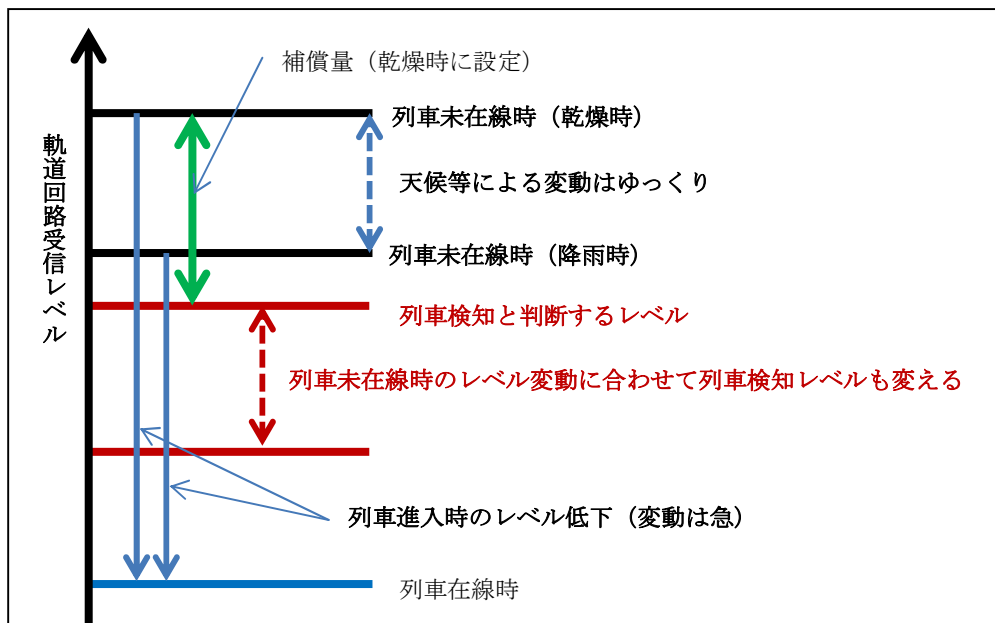


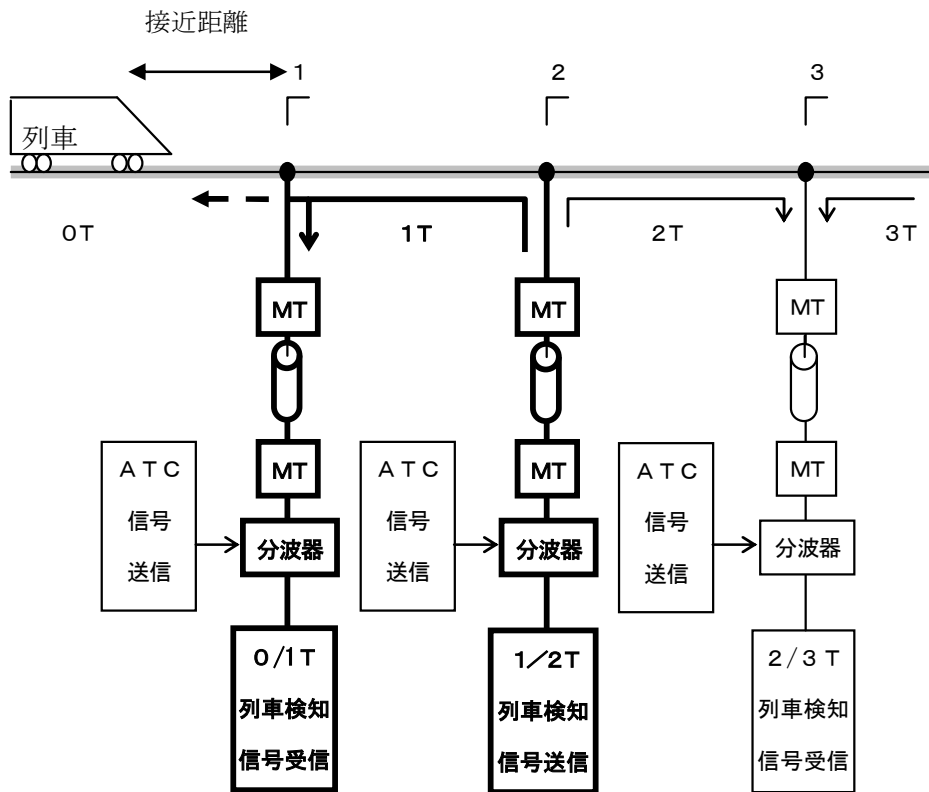
図3. 1 4 軌道回路の列車検知の自動レベル補正

3. 1. 4 無絶縁軌道回路の境界特性

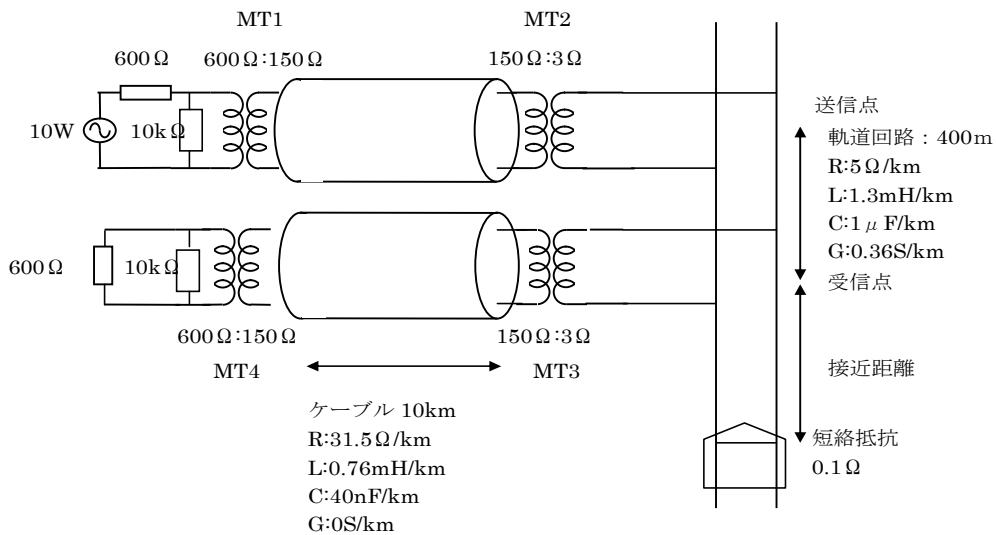
軌道回路境界に電氣的絶縁を設けない無絶縁軌道回路では、列車検知用の信号を ATC 信号とは別に使用するのが一般的である。図3. 1 5 の機器構成について列車検知の境界特性について検討する。図3. 1 5 (a) の機器構成において、軌道回路 1 T に着目したものを図3. 1 5 (b) に示す。

無絶縁軌道回路においては、有絶縁軌道回路とは異なり列車が軌道回路に進入する前から列車の軌道短絡の影響を受け、軌道回路の受信レベルは徐々に低下する。このことは列車が軌道回路を進出した後も同様である。

図3. 1 6 に、 $G=0.01S/km$ の時の列車未在線時の受信レベルを基準として、列車が軌道回路進入端に接近したときの軌道回路の受信レベルについてのシミュレーション結果を示す。列車検知信号の周波数は $3k Hz$ 、 $5k Hz$ 及び $10k Hz$ である。図3. 1 6 には降雨時を想定した $G=0.36S/km$ の条件での受信レベルも合わせて示す。また、図3. 1 6 において補償量を $9dB$ としたときの各周波数での列車検知する軌道回路境界までの接近位置を表3. 2 に示す。周波数 $3k Hz$ では軌道回路への進入検知が $48m\sim 78m$ 変化し、 $30m$ 程度の変動を考慮する必要がある。周波数 $5k Hz$ では軌道回路への進入検知が $24m\sim 37m$ 変化し、 $13m$ 程度の変動を、周波数 $10k Hz$ では $13m\sim 22m$ 変化し、 $9m$ の変動を考慮する必要がある。

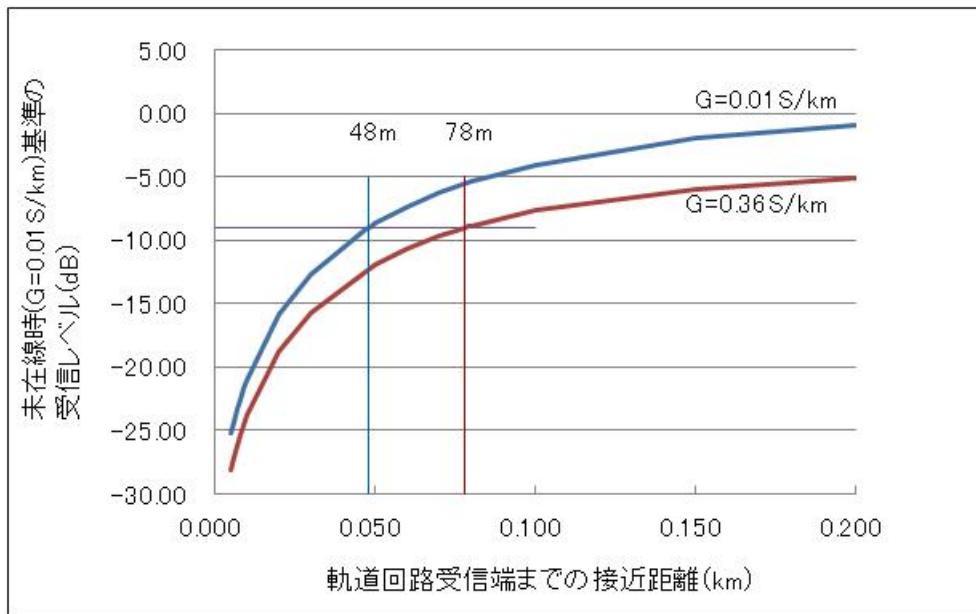


(a) 全体の機器構成

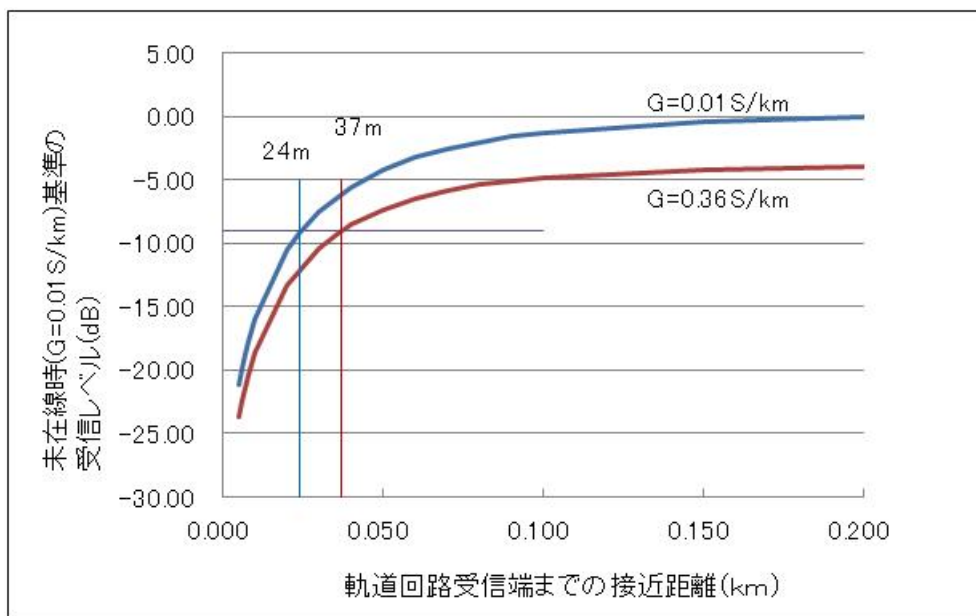


(b) 軌道回路 1T に着目

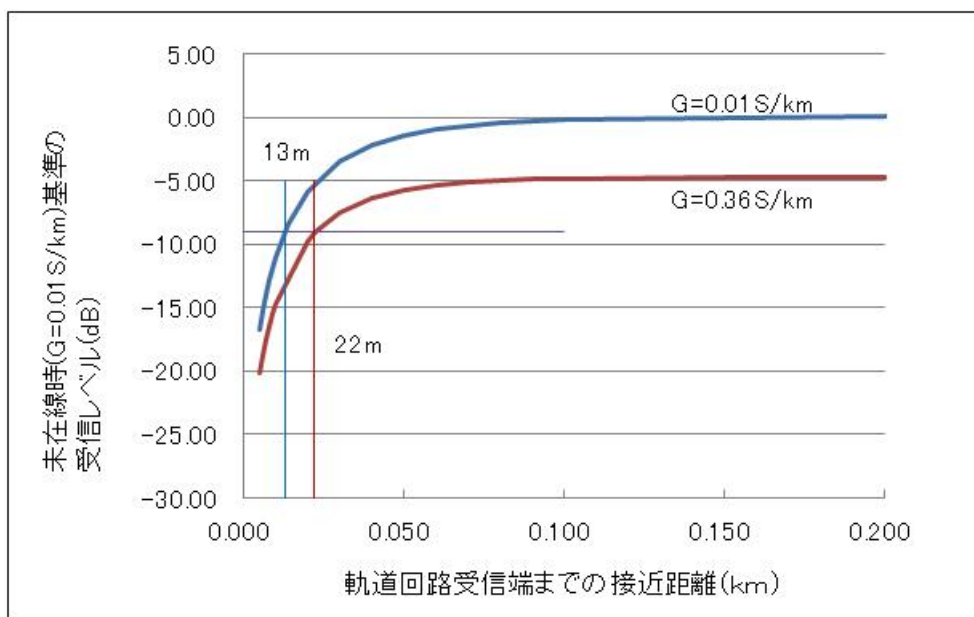
図 3. 15 無絶縁軌道回路の機器構成



(a) 周波数 3kHz の場合



(b) 周波数 5kHz の場合



(c) 周波数 10kHz

図 3. 16 未在線時 ($G=0.01 \text{ S/km}$ の条件での軌道回路受信レベル) を基準としたときの列車進入時の受信レベル

表 3. 2 無絶縁軌道回路の進入検知位置

軌道回路の 漏れコンダクタンス (S/km)	列車検知位置 (m)		
	周波数	周波数	周波数
	3 k Hz	5 k Hz	10 k Hz
0.01	48	24	13
0.36	78	37	22

3. 2 符号による列車検知の信頼性向上

軌道回路による列車検知は、列車検知信号の有無のみでなされてきた。この場合、レールを流れる電車電流、隣接する軌道回路からの漏れ電流、近接する線路からの誘導電流等で列車検知に使用する信号と同じ周波数成分のノイズの影響を受ける可能性がある。そこで、当該軌道回路固有の軌道回路識別情報を使って列車検知することは信頼性向上に有効である。デジタル ATC の ATC 信号の中には、軌道回路の識別固有の情報も含まれるため、単なる信号レベルだ

けでなく、この情報の有無も利用して受信側で列車検知の有無を判定する方式を採用し、列車検知の信頼性の向上を図る。

3. 3 車輪回転の積算による位置検知

3. 3. 1 初期位置の確定

車上での位置検知に車輪回転の積算を使う場合、車上装置の電源立ち上げ時においては、列車在線位置の初期設定が必要となる。電源立ち上げ時においては、軌道回路に流れている ATC 信号に含まれる軌道回路識別情報により、ゾーンとして大まかな位置検知を行い、その後、列車が走行し絶対位置を示すマーカ、あるいは軌道回路境界を通過して詳細な位置を確定させる。位置未確定時は徐行のみが許容される走行パターンを発生させて安全を確保する措置をとる。

3. 3. 2 車輪径の管理

車輪回転の積算による位置検知には、車輪径の管理が重要となる。車輪径は車上データとして車上装置に記憶されるが、車輪のメンテナンス等により車輪を研削したり、交換した時には、車上装置に記憶している車輪径を修正する必要がある。基本的には人手によるデータ修正入力となるが、修正した車輪径データの誤り防止の対策が必要となる。

このため、絶対位置補正用マーカを設置して、マーカ通過時にはデータベース上のマーカ間の距離と車上で積算した距離を比較し、一定の距離を超える誤差が複数回続くとときには、車輪径の設定異常と判断して安全措置をとる方法を採用する。

3. 3. 3 滑走、空転対策

加速時や減速時に車輪が空転や滑走すると、車輪の回転数をもとに積算する方法では、列車位置検知に誤差が生じる。この対策として以下があげられる。

(1)積算する車輪の空転や滑走を抑制する対策

- ・ 距離積算に使う車輪に駆動軸を割り当てないようにする
- ・ 滑走を防止するためブレーキ軸にセンサーをつけない
- ・ 動作させるブレーキ力を他の一般の車輪より弱める措置をとる

(2)空転滑走の誤差を修正する手法

- ・ 複数軸からデータを取得し、異常なデータを示す軸のデータを破棄する
- ・ 速度や加減速を監視し、通常に加減速を超える値を滑走や空転と判定し、積算値を安全側に補正する

これらの方法は地上主体制御方式 ATC ですでに開発されている。デジタル

ATC においても、これらの方法を組み合わせて利用し、距離積算の信頼性を向上させる。

3. 3. 4 絶対位置補正

適当な間隔で絶対位置補正用のマーカ（地上子）を設け、列車がその地点を列車位置を補正する方法が広く使われている。マーカの間隔は、空転や滑走による距離積算の誤差が、制御上問題ない範囲内に抑えることを考慮して決定する。

なお、筆者らは、軌道回路の位置データも車上に記憶していることから、デジタル ATC の信号が軌道回路境界で変化することを利用して、位置補正用地上子を用いずに補正する方法を提案した^(3.1)。その仕組みは以下のとおりである（図 3. 17）。

- ① 列車が軌道回路 Ta と軌道回路 Tb の境界を通過する際に、車上でそれまで受信していた軌道回路 Ta の ATC 信号の搬送波が受信できなくなった地点を軌道回路境界と判断する。
- ② その時点から走行距離を積算する。
- ③ 軌道回路 Tb 進入後 ATC の電文を受信し、データを解読、軌道回路 ID が Ta から Tb に変化したことを確認し、その時点での軌道回路境界からの走行距離を加算した位置を絶対位置として補正する。

この方法によると、データが確定するまでの距離を積算して絶対距離を補正するため、たとえ図 3. 17 における軌道回路 Tb におけるデータ 1 が受信エラー等で解読できなくても、データ 2 が解読できれば絶対位置の補正が可能である。

この手法の検証を山陽新幹線で実施した。試験区間内を約 500m ごとに停車して予め地上で実測した位置と比較した。試験の結果、誤差は 1 m ～ -8 m の範囲であり、有用な方法であることがわかった^(3.6)。

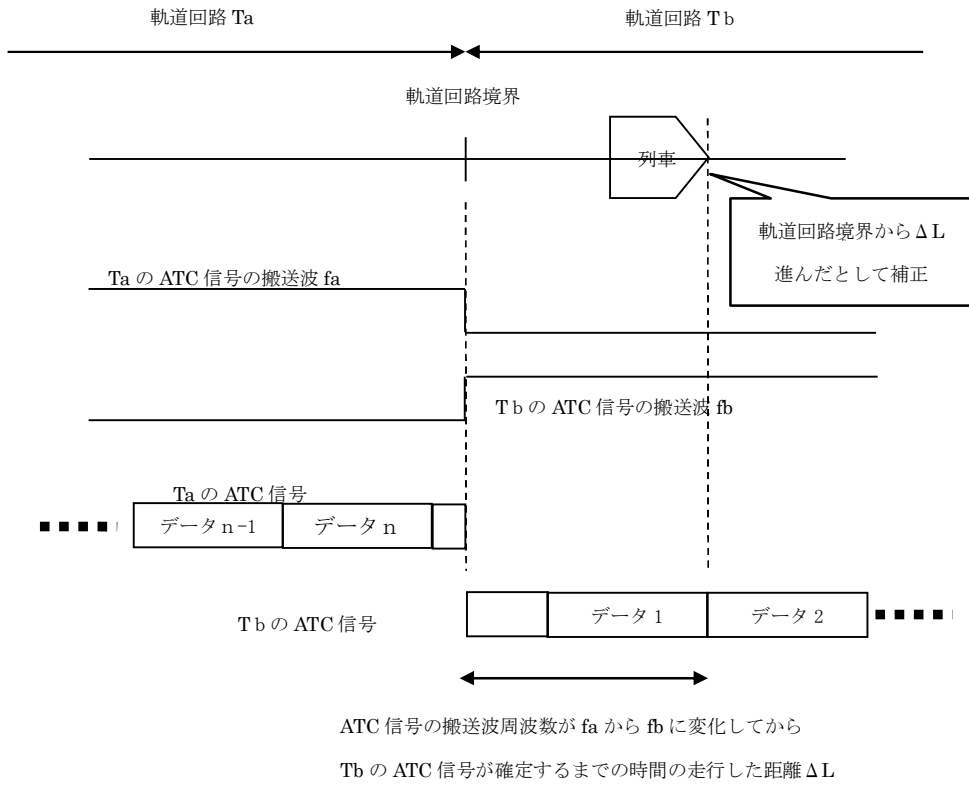


図 3. 1 7 軌道回路境界での絶対位置補正

また、筆者は無絶縁軌道回路区間においても有絶縁軌道回路の場合と同様に軌道回路境界で位置補正する方法を提案している(3.7)。列車検知信号を車上で受信検知できるように設備し、それまで受信していた列車検知信号が受信できなくなった地点を軌道回路境界と判断し、有絶縁軌道回路の場合と同様の方法で列車の絶対位置を補正する方法である(図 3. 1 8)。

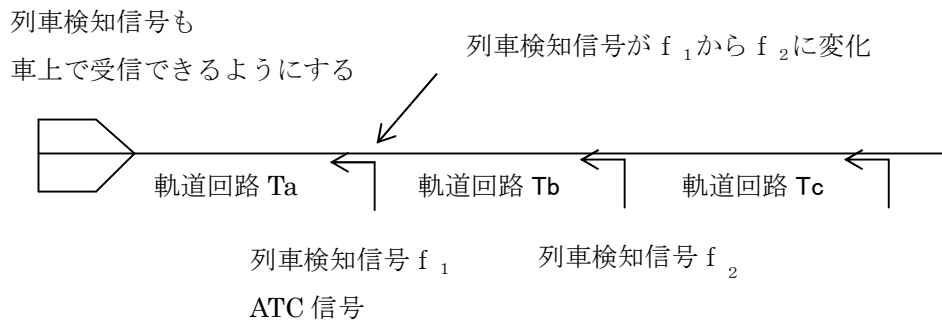


図 3. 1 8 無絶縁軌道回路境界での絶対位置補正

3. 4 まとめ

デジタル ATC における位置検知の高信頼化について検討した。

地上からの位置検知には実績のある軌道回路を用いる。短絡抵抗の増大防止、漏れコンダクタンスの変動対策には従来の手法で対応できることを示した。無絶縁軌道回路については、漏れコンダクタンスの影響で軌道回路への進入位置が変動することを考慮する必要がある。そして、列車検知信号の有無だけでなく、信号を符号化し、符号に軌道回路の固有の情報を含めることで列車検知の信頼性向上させる。

車上からの位置検知については、初期位置の確定、車輪径の管理、滑走・空転対策などによる車輪回転の積算による位置検知の信頼性向上について検討した。絶対位置の補正については新たに位置補正用のマーカを設けずに軌道回路境界を利用した方法を提案し、現地試験により位置検知誤差を 1m～8m に抑えることができることを確認した。

3. 5 参考文献

- (3.1) 渡辺郁夫, 高重哲夫, 軌道回路(12), 鉄道と電気技術, Vol.11, No.3, pp63-67, 2000年3月
- (3.2) 三田, 泰: 「本四架橋の軌道回路における短絡状態の改善」, 鉄道と電気技術, 第18巻, 3号, pp30-34, 2007
- (3.3) 福田, 板垣, 寺田: 「軌道回路の短絡不良要因と改善手法」, 鉄道総研報告, 第21巻, 第11号, pp5-10, 2007
- (3.4) 渡辺郁夫, 高重哲夫, 軌道回路(11), 鉄道と電気技術, Vol.11, No.2, pp66-70, 2000年2月
- (3.5) 渡辺郁夫, 高重哲夫, 直江正直, デジタル軌道回路を利用した統合列車制御, 鉄道サイバネ論文集, pp156-159, 1991年8月
- (3.6) 渡辺郁夫, 高重哲夫, 志田洋, 小林巧, 内田清五, 音無隆, 犀川潤, 山陽新幹線におけるデジタル ATC 性能試験, 鉄道総研報告, Vol.14, No.2, pp41-46, 2000年2月
- (3.7) 渡辺郁夫, 高重哲夫: “列車位置検知装置”, 特許第 3639386 号

第4章 制御情報伝送の高信頼化

4.1 電車電流のノイズに対する対策

デジタル ATC では軌道回路を使って制御情報を車上に伝える。ATC が導入される対象となる新幹線をはじめとする交流電化区間と、大都市通勤線区をはじめとする直流電化区間では、必要な軌道回路長、機器室間隔、軌道回路に流れるノイズの状況も異なる。したがって、交流電化区間と直流電化区間とに分けて、MSK 変復調方式による制御情報伝送の高信頼化について検討する。

4.1.1 交流電化区間

(1) 新幹線区間(4.1)-(4.3)

新幹線の ATC で使用する周波数帯 (600Hz~1600Hz) では、電源の高調波電流が大きく発生する。電源高調波のうち、奇数次高調波は 20A、偶数次高調波は 1A 含まれる前提で設計されてきた。デジタル ATC においても、このような条件下で確実に制御情報を伝送できる方法を検討する。

電車電流における高調波電流を I_N 、軌道回路の左右レールに流れる電流の不均衡率を U_b とすると、ATC 信号の妨害となる等価電流 I_n は次式で与えられる。

$$I_n = 0.5 U_b I_N \quad \text{-----(4.1)}$$

(4.1) 式は、左右のレールを流れる電流が等しい $U_b = 0$ の時は電車電流がどんなに大きくても影響受けないことを示している。ところが、通常は最大 $U_b = 0.1$ の不均衡が見込まれる。したがって、電車電流の電源の奇数次高調波の ATC へのノイズとなる等価電流 $I_{n, \text{odd}}$ は、(4.1) 式において、 $U_b = 0.1$ 、 $I_N = 20A$ を代入して

$$I_{n, \text{odd}} = 1 A \quad \text{-----(4.2)}$$

となる。偶数次では $I_N = 1A$ を代入して

$$I_{n, \text{even}} = 50 \text{mA} \quad \text{-----(4.3)}$$

となる。すなわち、このレベルのノイズが ATC 信号に加わるとして設計する必要がある。

図4. 1は、MSKにおける平衡復調方式及び遅延検波方式による二つの復調方式について、復調回路を試作し、安定して復調可能となる信号レベルに対するノイズレベルを測定した結果である^(4.1)。信号レベルを一定とし、帯域内に単一周波数の妨害波を加えた時に安定して受信できるノイズレベルをプロットしたものである。平衡復調は二つの共振回路を差動に接続した構成で、遅延検波は1ビット前のデータと排他的和をとって低域通過フィルタをとおして波形を整形する構成である。帯域外の信号は、搬送波フィルタにより40dB減衰させている。

図4. 1において、遅延検波方式と平衡復調方式を比較すると、平衡復調方式の方がノイズに対して耐力がある特性を示している。以後、平衡復調方式における耐ノイズ特性について検討する。

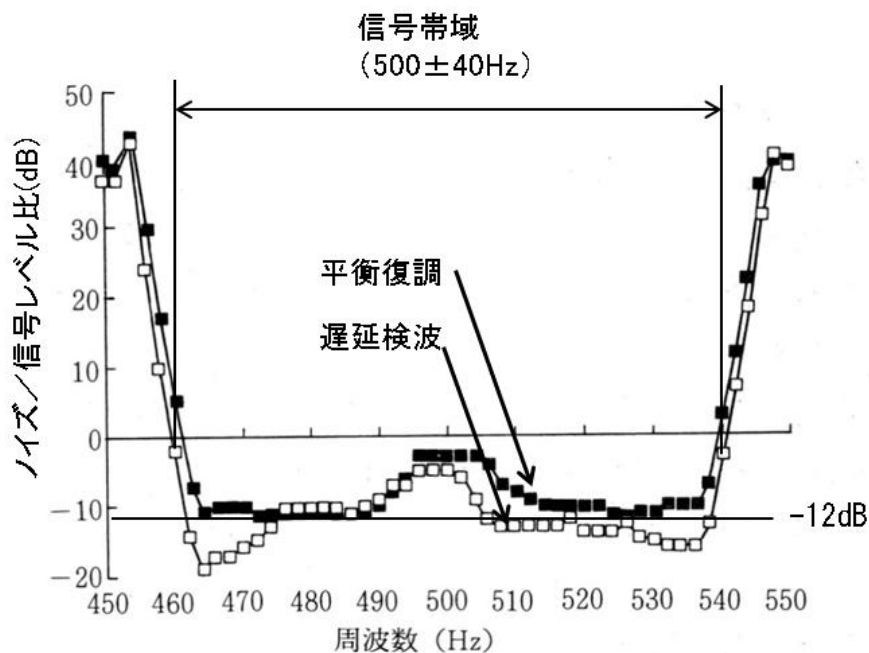


図4. 1 MSKにおける安定復調可能な信号に対するノイズレベル

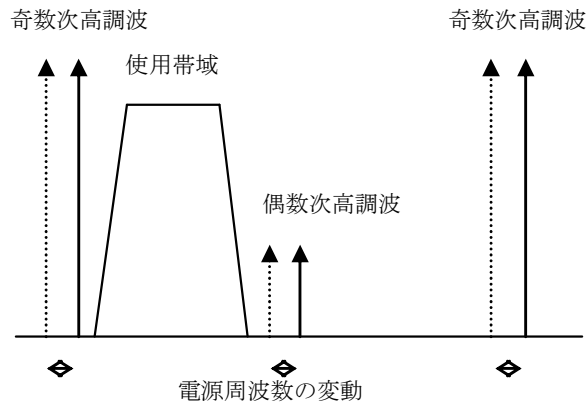
この復調方式が安定して動作するために、図4. 1より信号帯域内のS/Nを12dB（電流比で約4倍）確保する必要がある。また、信号帯域のちょうど中心周波数（搬送波周波数）ではS/Nを6dB（電流比で約2倍）確保すれば十分である。実際のノイズは単一周波数の妨害波1波のみではないが、帯域内の最大ノイズのエネルギーがノイズ全体の大部分を占める場合が多いことから、S/N

を上記のさらに2倍の余裕をみて確保すれば十分と判断する。したがって、必要なATC短絡電流は、信号帯域内の最大妨害電流の約8倍、信号帯域の中心周波数付近では最大妨害電流の約4倍を確保する。

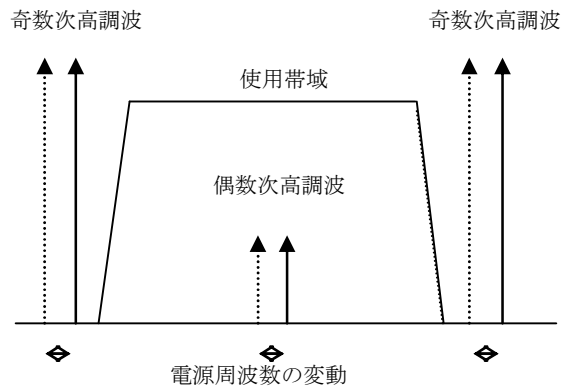
前述のように電源の奇数次高調波がATC信号に1A加わることを考慮すると信号帯域内に奇数次高調波が入った場合にも、安定して復調するためには8A以上の短絡電流を確保しなければならない。これを実現のためには極めて大きな出力の送信機や、その信号を伝送するための機器が必要となり、コスト面からも現実的ではない。したがって、ATCの信号帯域は奇数次高調波を避けて設定する。

信号帯域の設定方法は、図4.2に示すように以下の3方法が考えられる。方法aは電源の奇数次及び偶数次両方の高調波を避けて信号を設定する方法である。方法bは奇数次より小さな偶数次高調波は信号帯域内に入ることを許容するが、奇数次高調波は避けて帯域設定する方法である。方法cは奇数次高調波のみを避けて設定し、さらに偶数次高調波が搬送波周波数と一致させる帯域設定である。方法cは、帯域内のノイズに対してはS/Nが8必要であるが、搬送波周波数のノイズに対してはS/Nが4確保できればよいとする図4.1の特性を利用するものである。なお、方法cを電源同期MSKと呼ぶ。

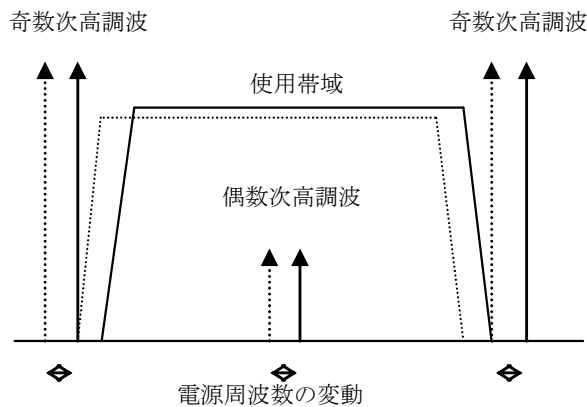
電源同期MSKの場合には信号帯域が広く設定できるため、伝送速度も高く設定できるメリットがある。電源周波数の変動を最大1%とすると、電源が50Hz及び60Hz区間において、電源の奇数次高調波のみを避けた場合の設定可能な信号帯域を表4.1に示す。奇数次高調波間隔の0.8倍の帯域を確保できるとする。電源同期では、使用周波数にかかわらず、電源周波数が50Hz区間では80Hzの信号帯域が、電源周波数が60Hz区間では96Hzの信号帯域が確保できる。一方、電源同期でない場合は、電源周波数50Hz区間では、500Hzで72Hz、1kHzで64Hz、2kHzで48Hzの信号帯域しか確保できない。周波数が高くなれば設定可能な信号帯域は狭くなるので、電源高調波を避けて信号帯域を設定する場合は、電源同期としないときは低い周波数を使用する方が有利となる。



(a) 奇数次及び偶数次高調波を避けた信号帯域設定：方法 a



(b) 奇数次高調波を避けた信号帯域設定：方法 b



(c) 奇数次高調波を避け、偶数次高調波に搬送波周波数を一致：方法 c

図 4. 2 MSK 変復調における ATC 信号帯域の設定方法

表 4. 1 電源周波数が 1%変動したときに
奇数次高調波を避けて設定可能な信号帯域

周波数 (Hz)	設定可能な信号帯域 (Hz)			
	電源周波数 50Hz		電源周波数 60Hz	
	方法c	方法b	方法c	方法b
300	80	75	96	91
400	80	74	96	90
500	80	72	96	88
600	80	70	96	86
700	80	69	96	85
800	80	67	96	83
900	80	66	96	82
1000	80	64	96	80
1100	80	62	96	78
1200	80	61	96	77
1300	80	59	96	75
1400	80	58	96	74
1500	80	56	96	72
1600	80	54	96	70
1700	80	53	96	69
1800	80	51	96	67
1900	80	50	96	66
2000	80	48	96	64

各方法に関して、安定して復調できる短絡電流 I_s は、方法 a に関しては S/N が 8 確保できればよいことから電源高調波以外のノイズの等価電流を $I_{n,other}$ とすると

$$I_{s1} = 8 I_{n,other} \quad \text{-----}(4.4)$$

方法 b に関しては、偶数次高調波のノイズの等価電流を $I_{n,even}$ として

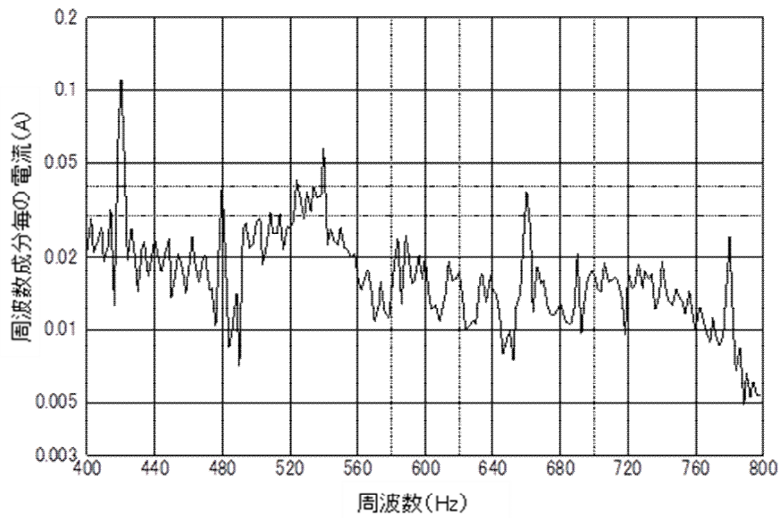
$$\begin{aligned} I_{s2} &= 8 I_{n,even} && \text{-----}(4.5) \\ &= 8 \cdot 50\text{mA} \\ &= 400\text{mA} \end{aligned}$$

方法 c に関しては,

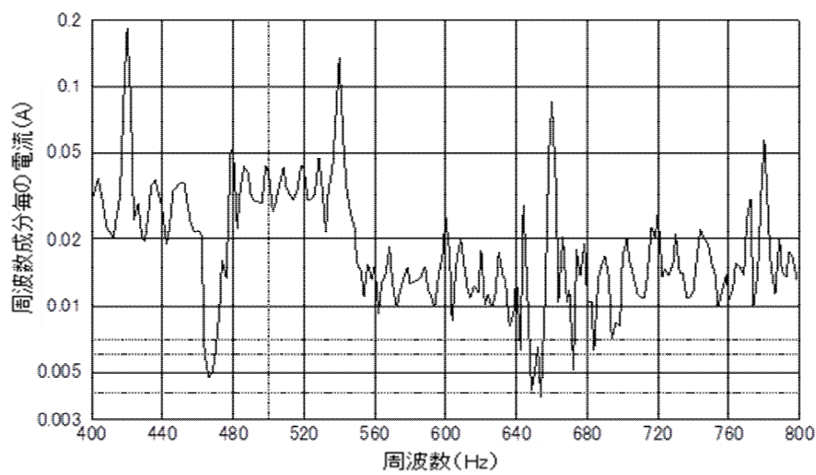
$$\begin{aligned}
 I_{s3} &= \max (4I_{n\text{even}}, 8I_{n\text{other}}) \text{ -----(4.6)} \\
 &= \max (200, 8I_{n\text{other}})
 \end{aligned}$$

で見積もることができる.

以下では, 山陽新幹線で測定したノイズ環境を前提に, デジタル ATC の信号帯域の設定方法について検討する.



(a) 力行時



(b) 回生ブレーキ時

図 4. 3 新幹線での軌道回路に流れる電車電流の周波数成分

図 4.3 に山陽新幹線で停止から高速までの加速中、及び高速から停止までの減速中の 400Hz～800Hz の軌道回路に流れるノイズの測定結果を示す^(4.3)。図 4.3 はコンバータ／インバータ制御新幹線の力行時及び回生ブレーキ時に受電器で受信されるノイズを一定時間ピークホールドして得られたものをレール電流に換算したものである。

デジタル ATC の信号帯域の搬送波の設定としては、方法 a では 450Hz, 510Hz, 570Hz, 630Hz, 690Hz, 750Hz, 方法 b, 方法 c に関しては 480Hz, 600Hz, 720Hz が考えられるが、方法 a に関しては、中でも最も大きなノイズがみられる回生ブレーキ時の 510Hz の帯域のノイズを、方法 b, 方法 c に関しては回生ブレーキ時の 480Hz の帯域のノイズを前提に、安定した ATC 信号の送受信に必要な条件を検討する。

図 4.3 (b) より $I_{n\text{even}}$ が 50mA, $I_{n\text{other}}$ は 40mA 程度であるので、必要な ATC 短絡電流 I_s は式(4.4)～式(4.6)より表 4.2 となる。

表 4.2 信号帯域の設定方法と安定して復調可能な短絡電流

信号帯域の設定方法	$I_{n\text{even}}(\text{mA})$	$I_{n\text{other}}(\text{mA})$	$I_s(\text{mA})$
方法 a	50	40	320
方法 b	50	40	400
方法 c	50	40	320

この短絡電流を確保する周波数と軌道回路長について検討する。地上の機器構成は図 4.4 とする。機器室間隔は 40 km としてケーブル長は 20km, 送信電力 20W, 軌道回路長 1.2km とする。代表的な周波数として 500Hz 及び 1 kHz について検討する。

図 4.5 は周波数 500Hz 及び 1kHz における軌道回路の漏れコンダクタンスが 0.01S/km (軌道状態が良い状態) 及び 0.36S/km (新幹線区間において軌道状態が悪い状態) の条件での列車未在線時のレベルダイヤグラムの計算結果である。

500Hz では 20 km のケーブルで 10dB～13dB 減衰する。また、1.2 km の軌道回路では $G=0.01\text{S/km}$ で 4.6dB, $G=0.36\text{S/km}$ で 13.5dB 程度減衰する。1kHz ではケーブルで 9dB 減衰する。また、軌道回路では $G=0.01\text{S/km}$ で 2dB, $G=0.36\text{S/km}$ で 13.5dB 程度減衰する。

列車が軌道回路の受信端に在線する時のレベルダイヤグラムを図 4.6 に、また列車が軌道回路の送信端から受信端まで移動したときの短絡電流の減衰の

様子を図 4. 7 に示す.

図 4. 6 より, 周波数 500Hz ではケーブルで 11dB~13dB 減衰し, 軌道回路で $G=0.01\text{S/km}$ の条件では 14dB 程度, $G=0.36\text{S/km}$ の条件では 19dB 程度減衰する. 周波数 1kHz では, ケーブルで 9~11dB, 軌道回路で $G=0.01\text{S/km}$ で 14dB 程度, $G=0.36\text{S/km}$ で 24dB 程度減衰する.

また, 短絡電流に関しては, 図 4. 7 より $G=0.36\text{S/km}$ の条件で, 周波数 500Hz で軌道回路受信端の短絡電流は 340mA で, 方法 a 及び方法 c において安定して受信できる 320mA (表 4. 1) は確保できるが, 方法 b の 400mA は確保できない. また, 周波数 1kHz では軌道回路の受信端では 270mA の短絡電流を確保できるに留まり, 方法 a 及び方法 c の安定して受信できるレベル 320mA の短絡電流を確保できないことになる.

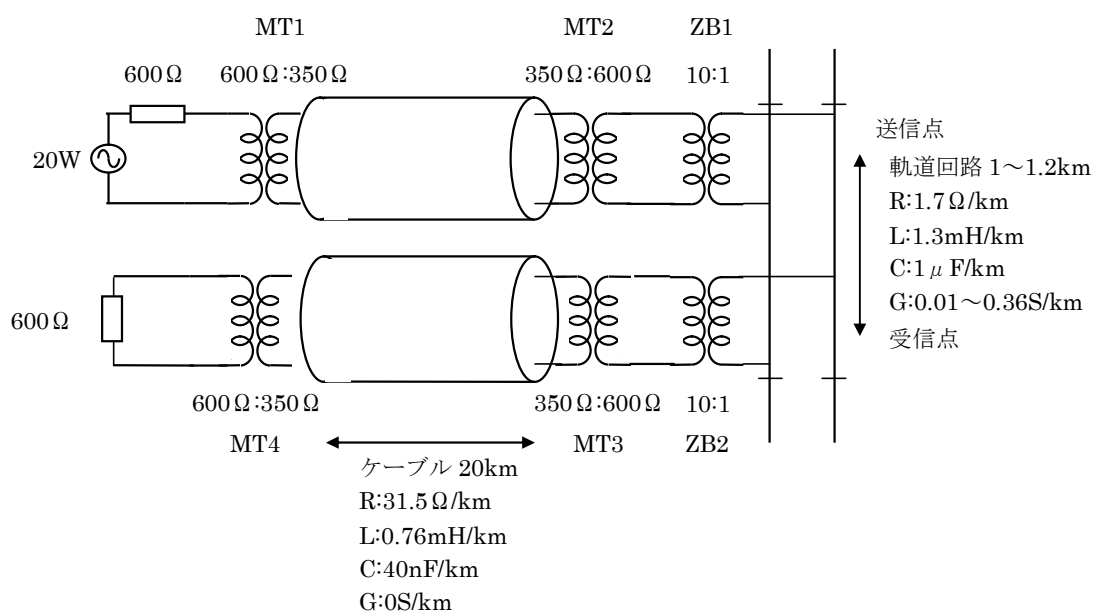
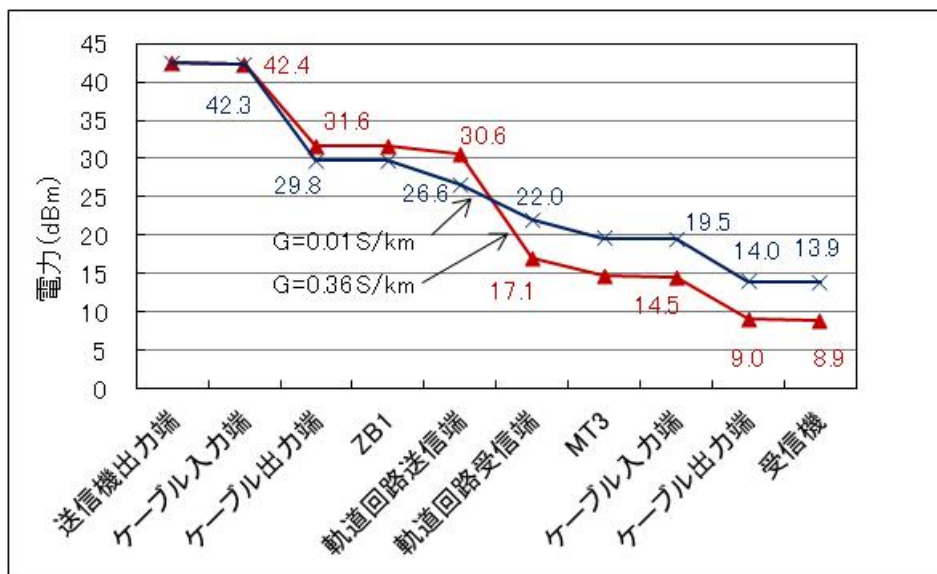
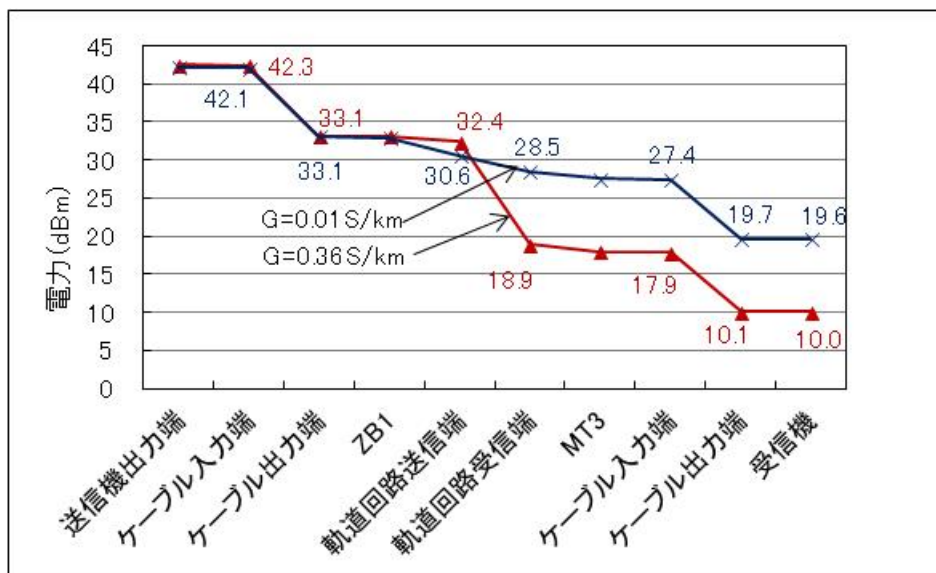


図 4. 4 ATC 地上機器構成

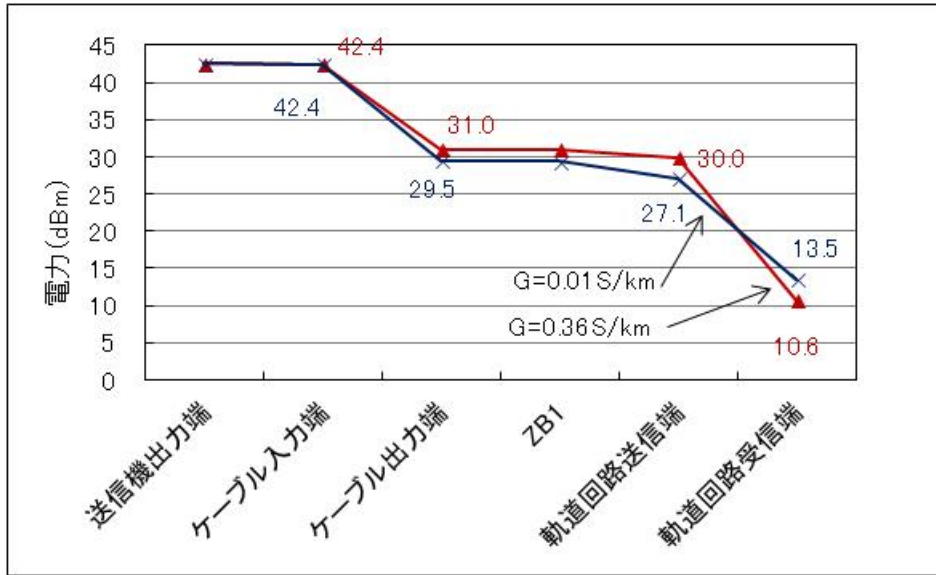


(a) 周波数 500Hz, 軌道回路長 1.2km の場合

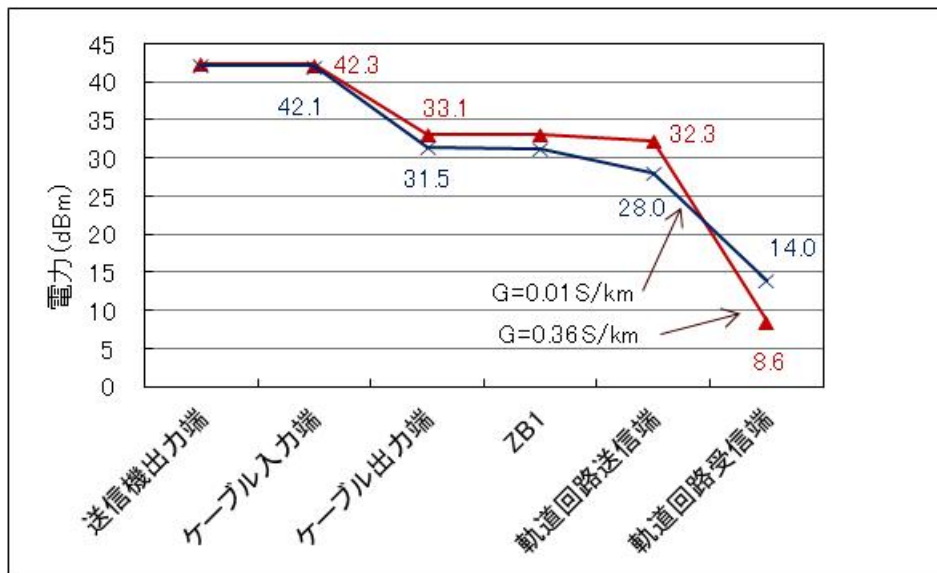


(b) 周波数 1kHz, 軌道回路長 1.2km の場合

図 4. 5 列車未在線時のレベルダイヤグラム

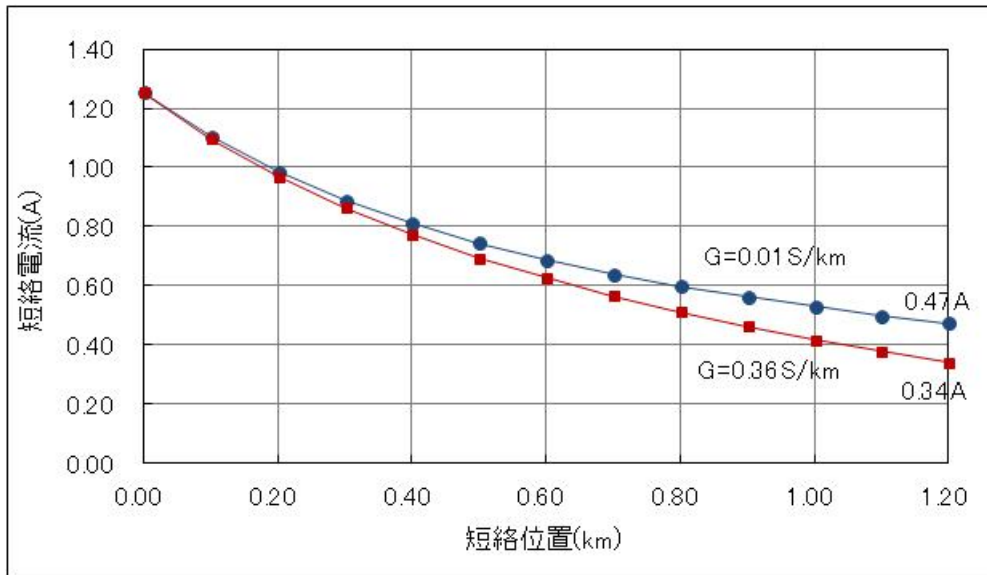


(a) 周波数 500Hz, 軌道回路長 1.2km の場合

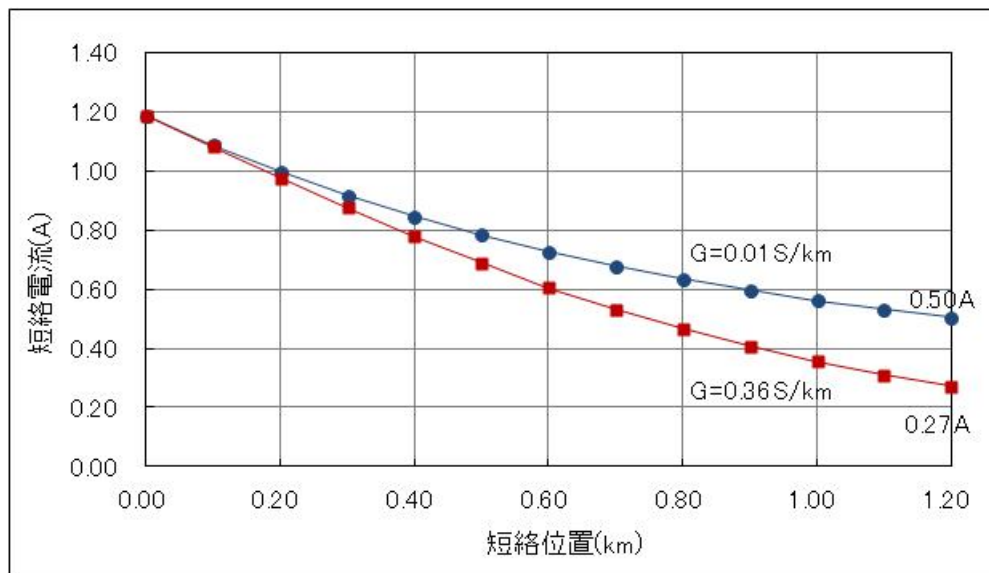


(b) 周波数 1kHz, 軌道回路長 1.2km の場合

図 4. 6 短絡時のレベルダイヤグラム



(a) 周波数 500Hz, 軌道回路長 1.2km の場合



(b) 周波数 1kHz, 軌道回路長 1.2km の場合

図 4. 7 短絡電流の変化

次に軌道回路の漏れコンダクタンスを 0.36S/km とし，軌道回路長を $1000\text{m}\sim 1200\text{m}$ ，周波数を $300\text{Hz}\sim 1300\text{Hz}$ まで変化させた時に軌道回路受信端の短絡電流を計算による求めた結果を図4. 8に示す。

図4. 8より，方法a，方法cでは 700Hz 以下の信号帯域を使用することで短絡電流は 320mA を超え，安定したATC信号の受信が可能となる。

軌道回路長 1000m とすると，方法bでも 700Hz 以下の周波数で 400mA を超え，十分な短絡電流の確保が可能となる。

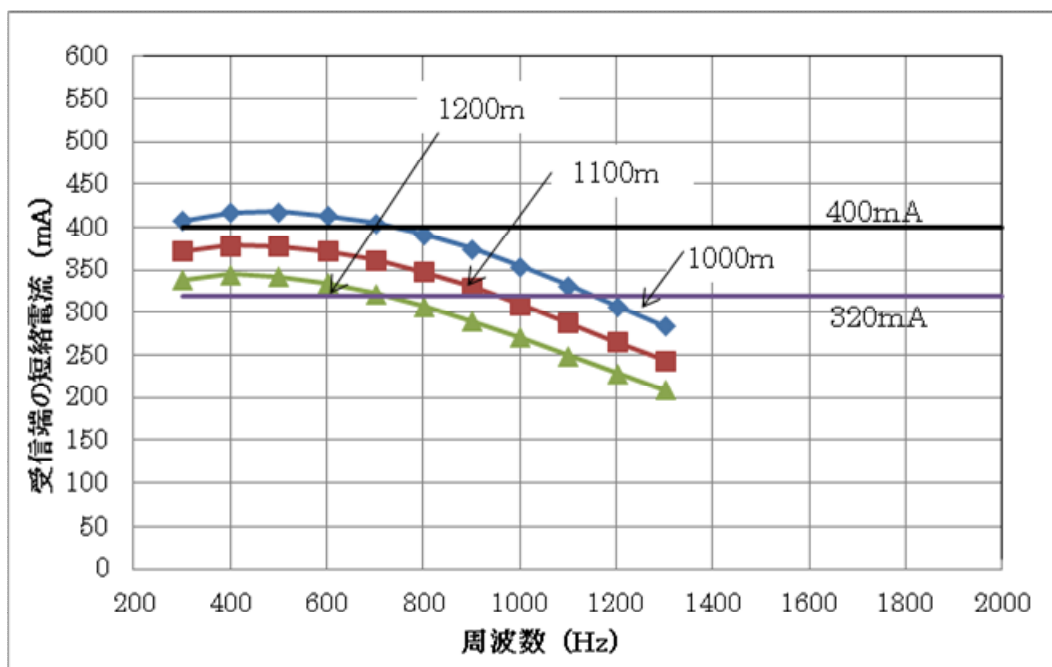


図4. 8 軌道回路受信端の短絡電流 ($G=0.36\text{S/km}$)

(2) 在来線交流電化区間

デジタル ATC を交流電化区間の都市間輸送区間に適用する場合でも，基本的に新幹線区間と同様の考え方が成り立つ．図 4. 9 に在来線交流電化区間（電源周波数 50Hz）における測定した電車電流の周波数分析結果を示す^(4.4)．

図 4. 9 は 1 ユニット分の電流である．電源周波数の基本波（50Hz）に対して周波数のマイナス 1.66 乗の奇数次高調波が発生している．基本波（50Hz）が 1 ユニットで 100A 発生しているが，編成として 5 倍の 500A 発生すると仮定すると，図 4. 9 の破線で示すような電源の奇数次高調波が発生することになり，周波数 f Hz の奇数次電源高調波 I_N は (4.7) 式で与えられる．

$$I_N = 500 / (f/50)^{1.66} \quad \text{-----}(4.7)$$

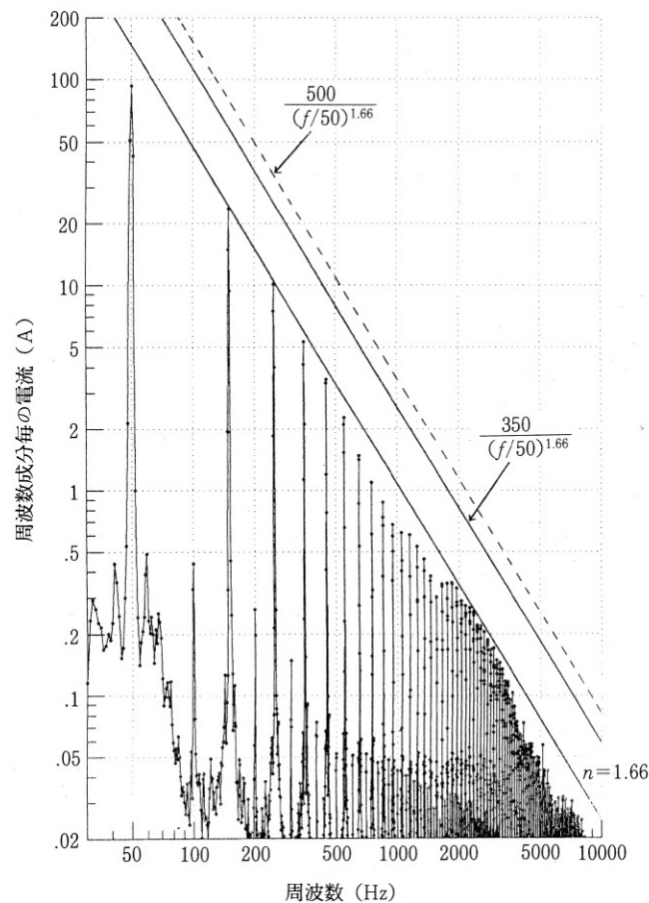


図 4. 9 在来交流電化区間の電車電流の周波数分析

一方、偶数次高調波に関しては、5ユニット分に換算すると100Hzで0.5A、200Hzで0.25A、300Hzで0.15A、400Hz以上では50mA程度発生することになる。

これらのノイズ環境のもとで、安定してATC信号を車上に伝送する手法を検討する。

電源の奇数次高調波がATC信号帯域内にある場合を想定すると、安定してATC信号を復調できる短絡電流は等価妨害電流の約8倍確保する必要があるから、確保すべき短絡電流は表4.3なる。表より1050Hzで1.3A、2050Hzで420mA必要となり、実現するためには大きな送信電力が必要となる。したがって、新幹線の区間と同様に電源の奇数次高調波を避けて信号帯域を設定する

表4.3 想定される奇数次高調波の等価妨害電流と安定して復調するために必要な短絡電流

周波数(Hz)	電車電流に含まれる高調波(A)	等価妨害電流(mA)	安定復調に必要な短絡電流(mA)
50	500.00	25000	200,000
150	80.71	4036	32,286
250	34.57	1728	13,827
350	19.77	989	7,910
450	13.03	651	5,212
550	9.34	467	3,735
650	7.08	354	2,831
750	5.58	279	2,232
850	4.53	227	1,813
950	3.77	188	1,508
1050	3.19	160	1,277
1150	2.74	137	1,098
1250	2.39	119	956
1350	2.10	105	841
1450	1.87	93	747
1550	1.67	84	669
1650	1.51	75	603
1750	1.37	68	547
1850	1.25	62	499
1950	1.14	57	457
2050	1.05	53	421

ことを提案する。

次に電源の偶数次高調波が ATC 帯域内にある場合を想定する。安定して ATC 信号を復調できる短絡電流は奇数次高調波の場合と同様に表 4. 4 のように求めることができる。表 4. 4 より 200Hz では 500mA の大きな短絡電流が必要となり、300Hz では 300mA の短絡電流が必要となる。

表 4. 4 想定される偶数次高調波の等価妨害電流と安定して復調するために必要な短絡電流

周波数(Hz)	電車電流に含まれる高調波(A)	等価妨害電流(mA)	安定復調に必要な短絡電流(mA)
100	0.5	125	1000
200	0.25	63	500
300	0.15	38	300
400	0.08	20	160
500 以上	0.05	13	100

在来線の条件を考慮して、図 4. 1 0 の機器構成で検討する。機器室間隔を 30 k m (ケーブル長 15 k m)、送信機出力 10W、軌道回路長 1.5km とする。軌道回路の漏れコンダクタンスは 0.01S/k m (軌道状態が良い状態) から 0.5S/km (交流電化区間の在来線において軌道状態が悪い状態) まで変化するものとする。周波数は 500Hz, 1kHz, 2kHz を検討する。

送信点からの短絡電流の変化を図 4. 1 1 に示す。ATC 信号の周波数はそれぞれ図 4. 1 1 (a) が 500Hz, 図 4. 1 1 (b) が 1kHz, 図 4. 1 1 (c) が 2kHz である。

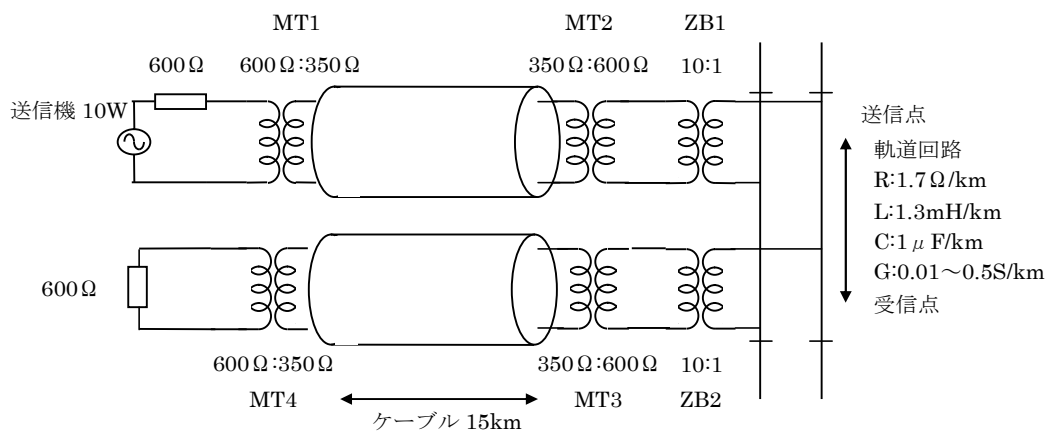
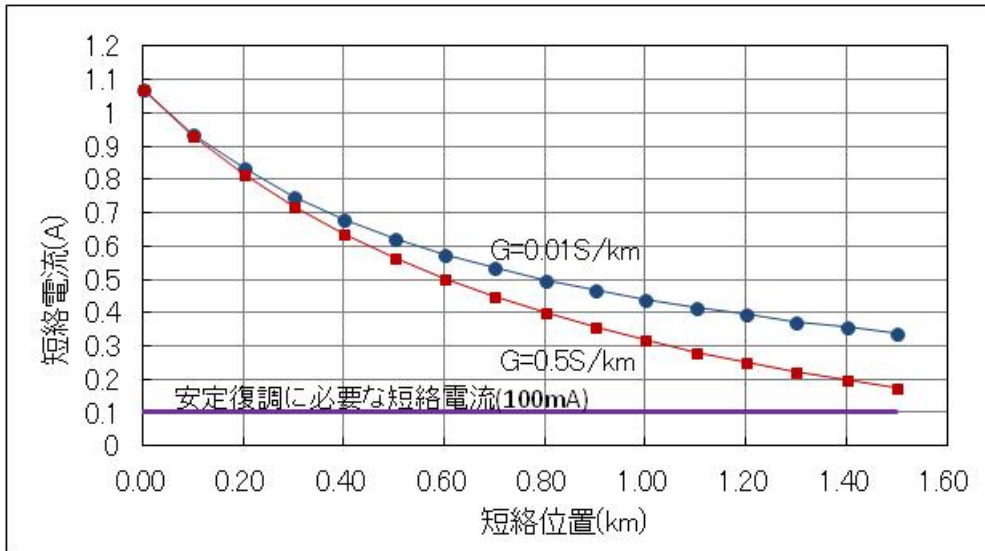
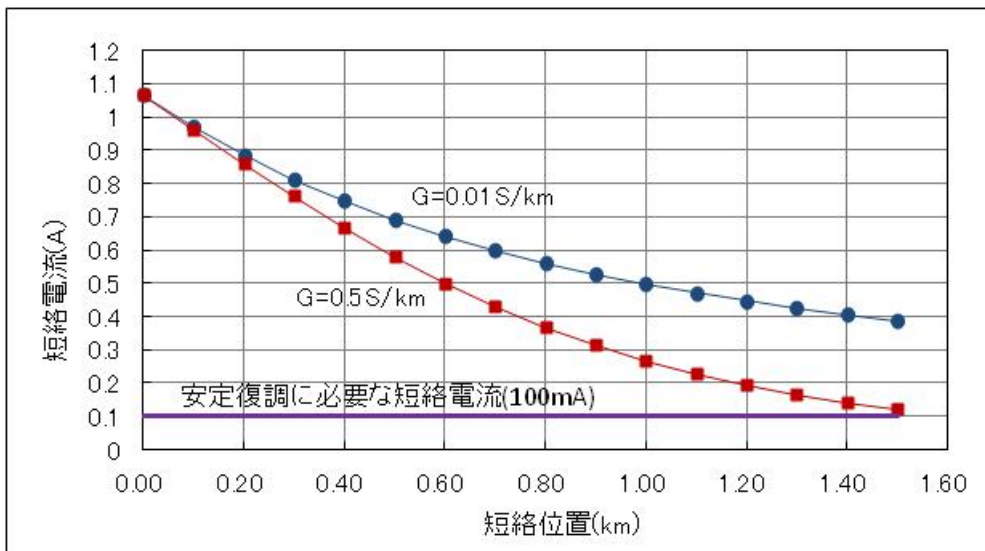


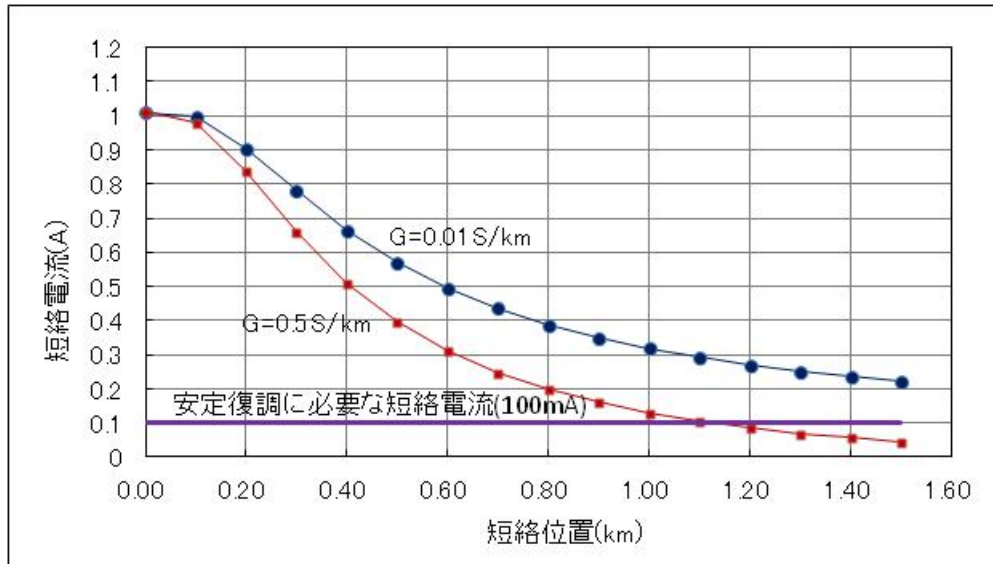
図 4. 1 0 在来線交流電化区間の ATC 地上機器構成



(a) 周波数 500Hz, 軌道回路長 1.5km



(b) 周波数 1kHz, 軌道回路長 1.5km



(c) 周波数 2kHz, 軌道回路長 1.5km

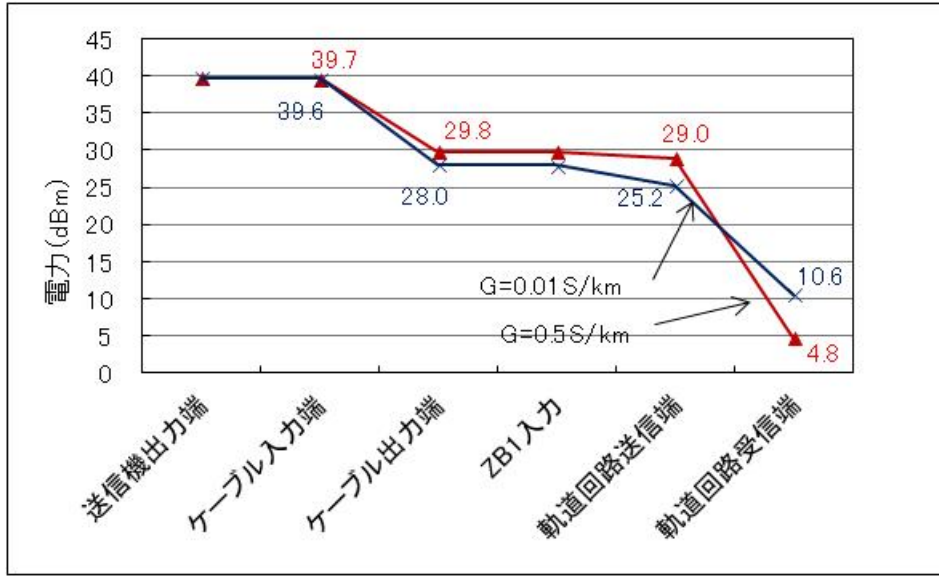
図4. 1 1 短絡電流の変化

信号周波数 500Hz では, 軌道回路の送信端では 1.1A の短絡電流が, 軌道回路での減衰により受信端では $G=0.01\text{S/km}$ で 0.34A, 軌道状態が悪い $G=0.5\text{S/km}$ では 0.17A に減衰するが, 安定した ATC 信号の伝送は可能である.

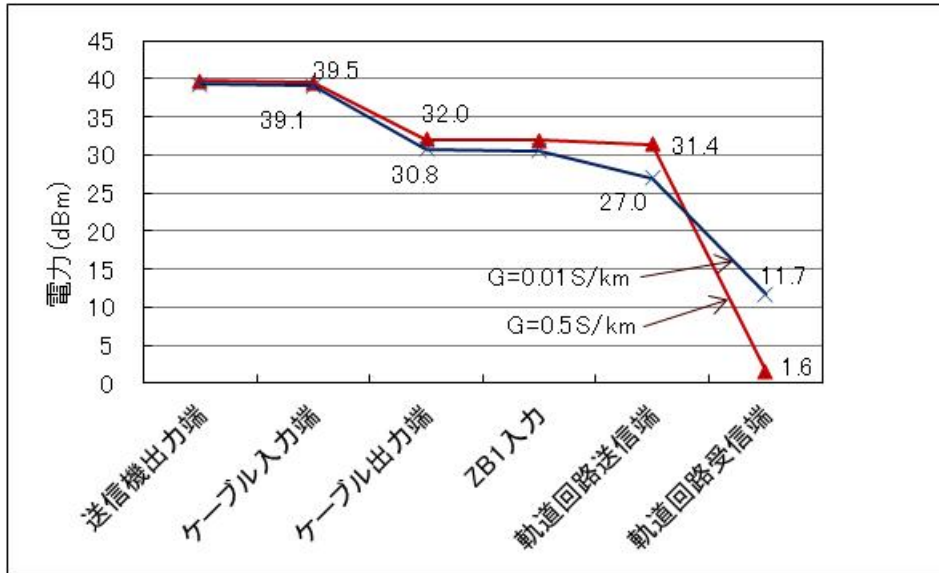
信号周波数 1kHz では, 送信端では 1.1A の短絡電流が, 軌道回路での減衰により受信端では $G=0.01\text{S/km}$ で 0.39A, $G=0.5\text{S/km}$ では 0.12A に減衰するがいずれも安定した ATC 信号の伝送は可能である.

信号周波数 2kHz では, 送信端では 1A の短絡電流が, 軌道回路での減衰により受信端では $G=0.01\text{S/km}$ で 0.22A で安定した ATC 信号の伝送は可能であるが, $G=0.5\text{S/km}$ では 0.045A に減衰し, 安定した ATC 信号の復調が困難となる.

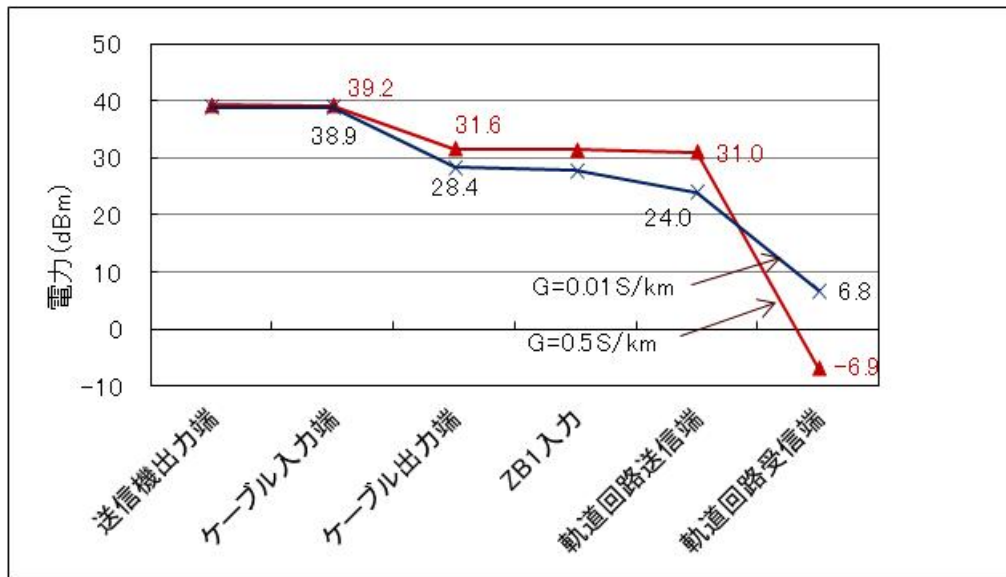
なお, 図4. 1 2 に列車在線時のレベルダイヤグラムを, 図4. 1 3 に列車未在線時のレベルダイヤグラムを示す.



(a) 周波数 500Hz, 軌道回路長 1.5km の場合

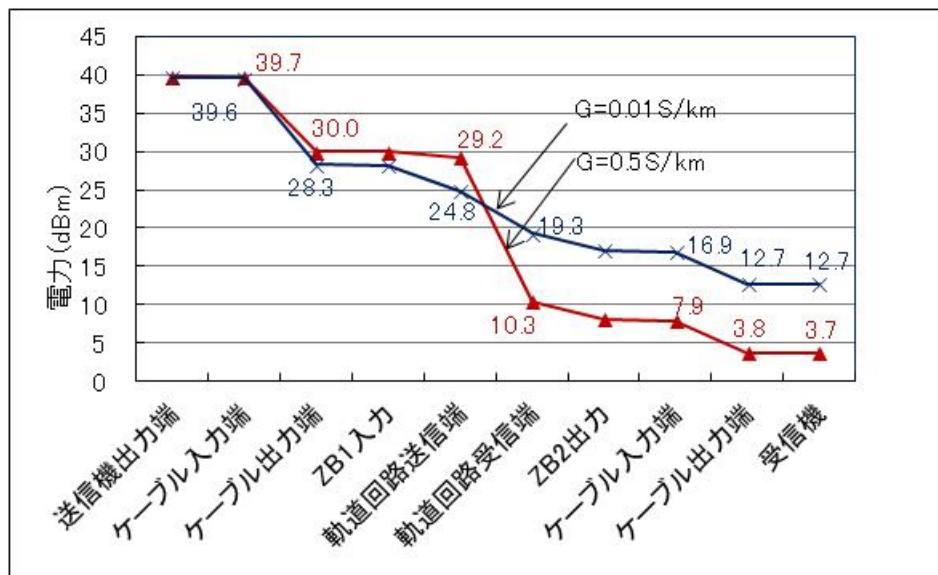


(b) 周波数 1kHz, 軌道回路長 1.5km の場合

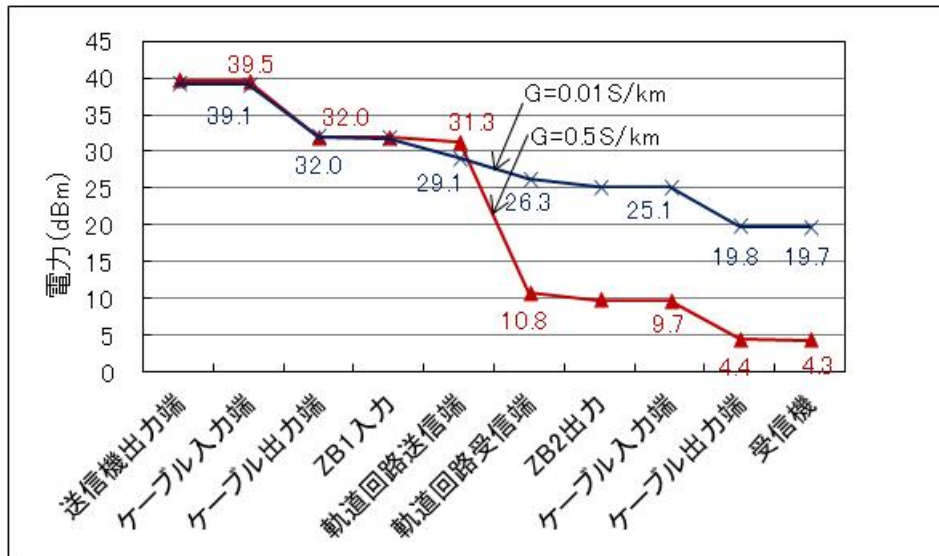


(c) 周波数 2kHz, 軌道回路長 1.5km の場合

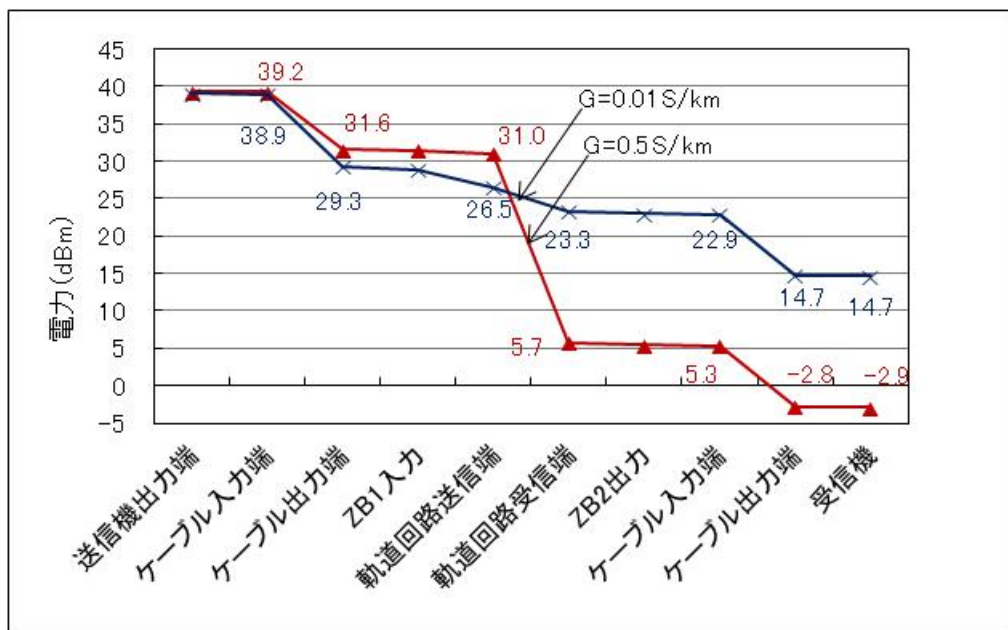
図 4. 1 2 短絡時のレベルダイヤグラム



(a) 周波数 500Hz, 軌道回路長 1.5km の場合



(b) 周波数 1kHz, 軌道回路長 1.5km の場合



(c) 周波数 2kHz, 軌道回路長 1.5km の場合

図4. 13 列車未在線時のレベルダイヤグラム

次に軌道回路の漏れコンダクタンスを 0.5S/km とし、軌道回路長を 1km 、 1.2km 、 1.5km 、周波数を 300Hz ～ 2000Hz まで変化させたときに軌道回路受信端の短絡電流を求める。結果を図4. 14に示す。

図より軌道回路長 1.5km では周波数を 400Hz から 1200Hz の範囲に設定すれば安定した ATC 信号の伝送が可能となる。軌道回路長を 1km に制限すれば、 300Hz から 2kHz の周波数において、安定した ATC 制御情報の伝送が可能となる。

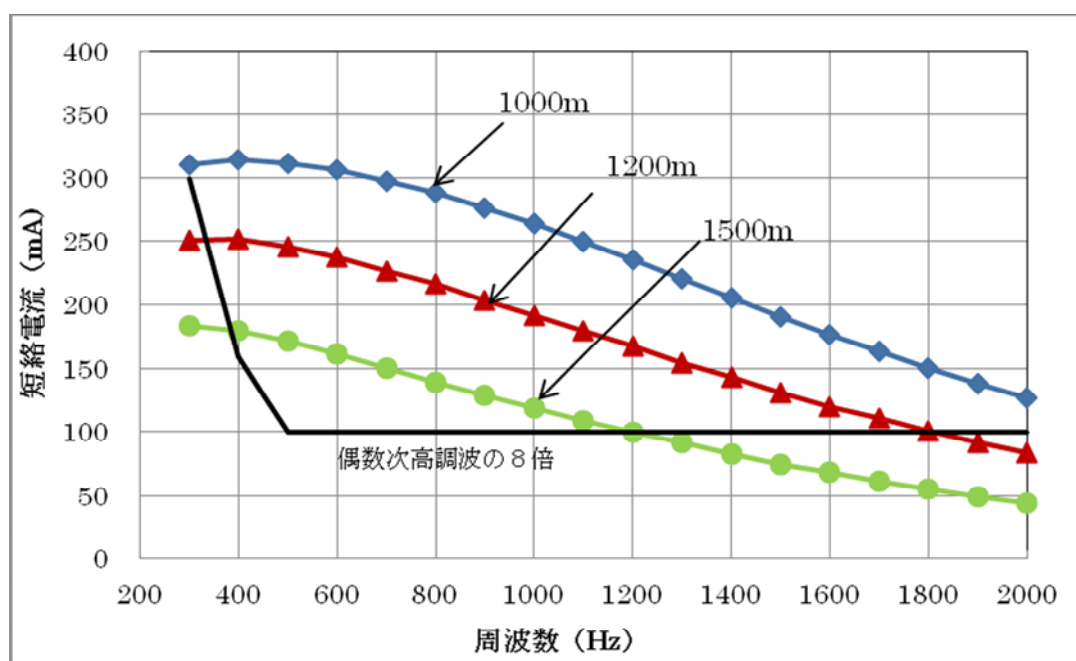


図4. 14 短絡電流と周波数との関係

なお、ディーゼル車は地上と車上の周波数の基準となる電源信号が車上で得られず、電源同期 MSK が採用できない場合がある。この場合、電源周波数の変動を 1% とすると、 1kHz では避けるべき奇数次高調波の周波数が 10Hz 変動することになり、その分を考慮して信号帯域を狭く設定する必要がある。したがって、信号帯域を広く確保するためには周波数は低い方が有利である。

電源周波数 50Hz の在来線で、 500Hz 及び 600Hz の周波数を使用し、 60bps の MSK 伝送について試験を実施し、地上-車上の安定した伝送が可能であることを確認した^(4.4)。

4. 1. 2 直流電化区間

直流電化区間において、かつ変電所で6パルス整流器を使用している区間では、電源周波数の6次の高調波（電源周波数が50Hzでは300Hz、電源周波数が60Hz区間では360Hz）が大きく発生する。図4. 15は、直流電化区間で測定したき線電流の高調波分析結果例である^(4.5)。300Hzが50A程度含まれており、さらにその高調波(300Hzの高調波)は次数のマイナス二乗に比例して発生している。

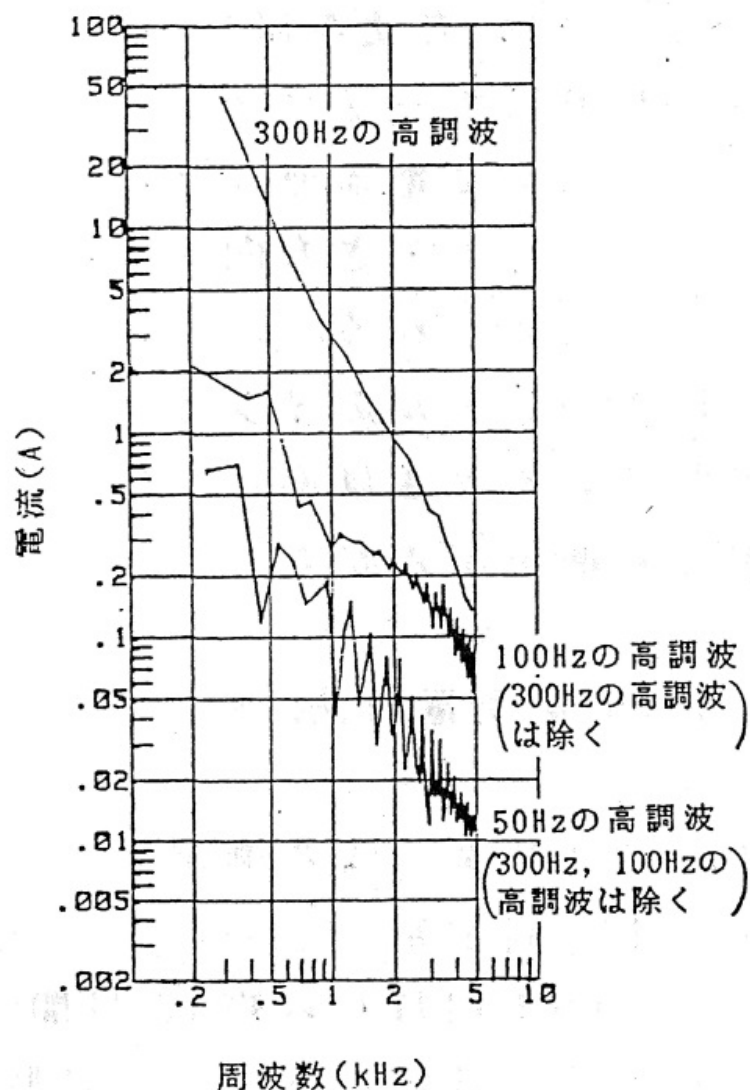


図4. 15 直流電化区間の電源高調波ノイズ測定例

一方、通勤線区では、時間当たりの列車本数を増やすため、軌道回路を比較的短く設定する（最大 400m 程度）。また、ATC 信号の送信頻度を高める必要があり伝送速度も高くする必要がある。そのためには広い信号帯域が必要となる。

そこで、電源の奇数次高調波も帯域内に入ることを許容し、それらのノイズに打ち勝つ十分な ATC 信号の短絡電流が確保できる周波数、軌道回路長、送信電力を検討する。

現在はインバータ制御車が主流である。図 4. 16 に示すように、インバータ制御車は速度に依存したノイズなど、様々な周波数のノイズを発生させる^(4.6)。したがって、まず電源高調波の次数のマイナス二乗で発生する高調波ノイズを考慮し、これらが発生するもとで安定した ATC 信号を送信可能な軌道回路構成を検討する。インバータ車の制御に固有の大きく発生するノイズについては、その発生する周波数を避けて ATC 信号を設定するか、あるいは ATC 信号が使う周波数帯のノイズが車両から発生しないように対策を検討する。

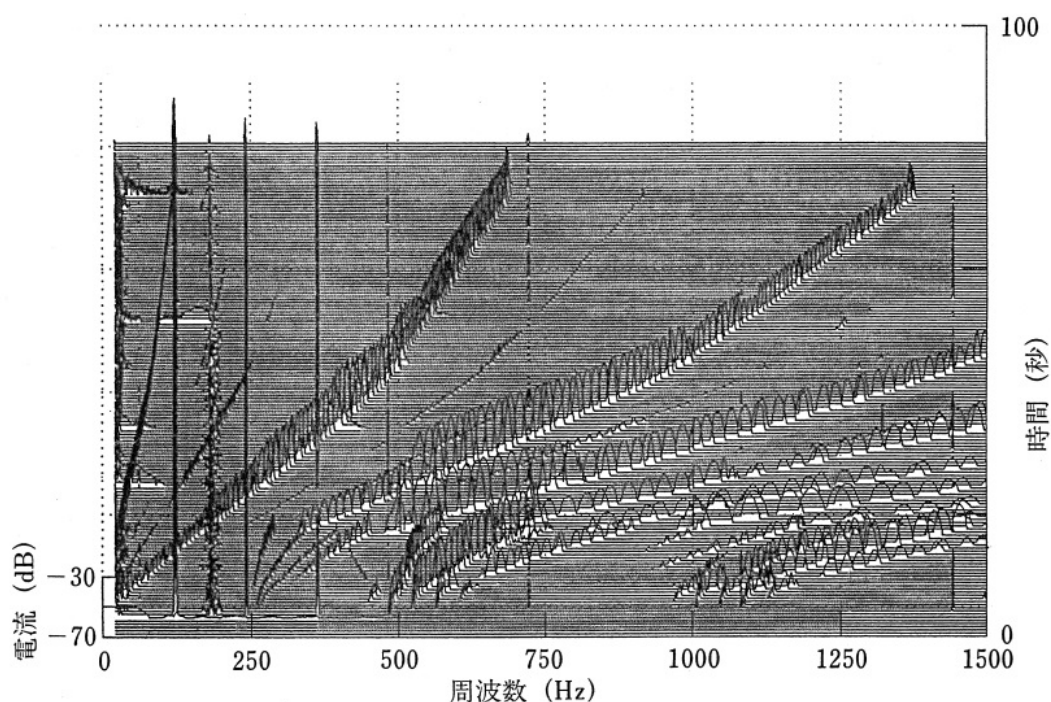


図 4. 16 直流電気車（インバータ制御）の加速時のノイズ測定例

(1) 有絶縁軌道回路区間

図4. 17の機器構成で、有絶縁軌道回路の受信端において安定してATC信号が受信できる短絡電流（6次高調波電流の8倍）について検討する。

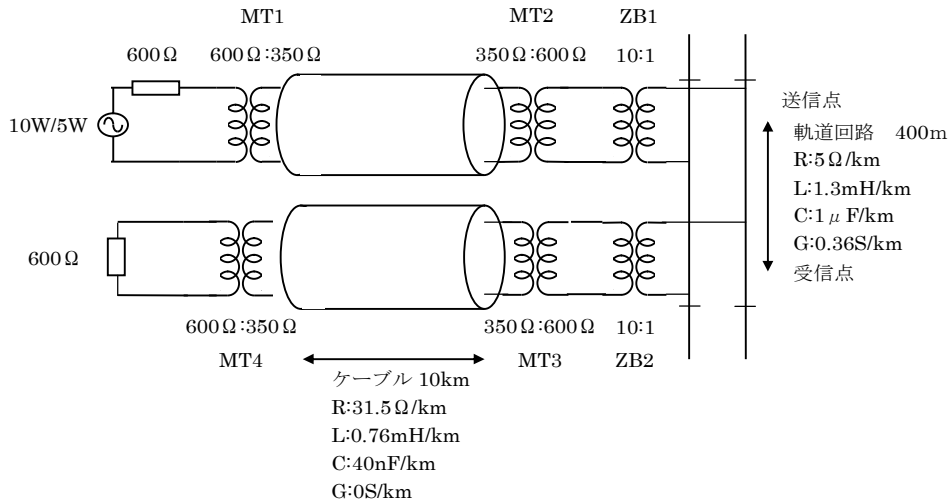


図4. 17 直流電化区間のATC地上機器構成

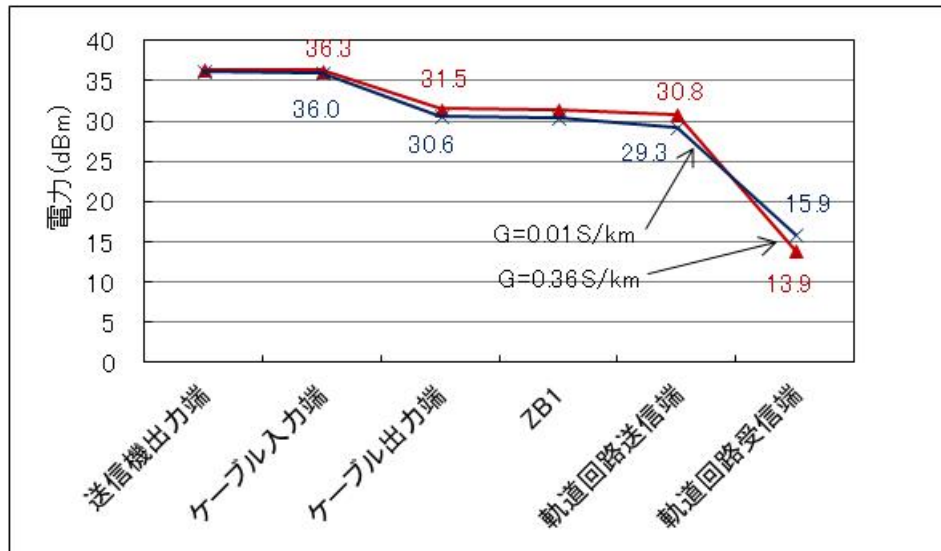
図4. 18に、送信電力5W、軌道回路の受信端短絡時のレベルダイヤグラムを示す。また、図4. 19に、軌道回路の漏れコンダクタンス0.01S/km及び0.36S/kmの場合について、軌道回路の送信端から受信端までの短絡電流の変化を示す。

図4. 18より周波数2kHzでは10kmのケーブルで5dB減衰し、軌道回路では $G=0.01\text{S/km}$ で13dB、 $G=0.36\text{S/km}$ で17dB減衰する。

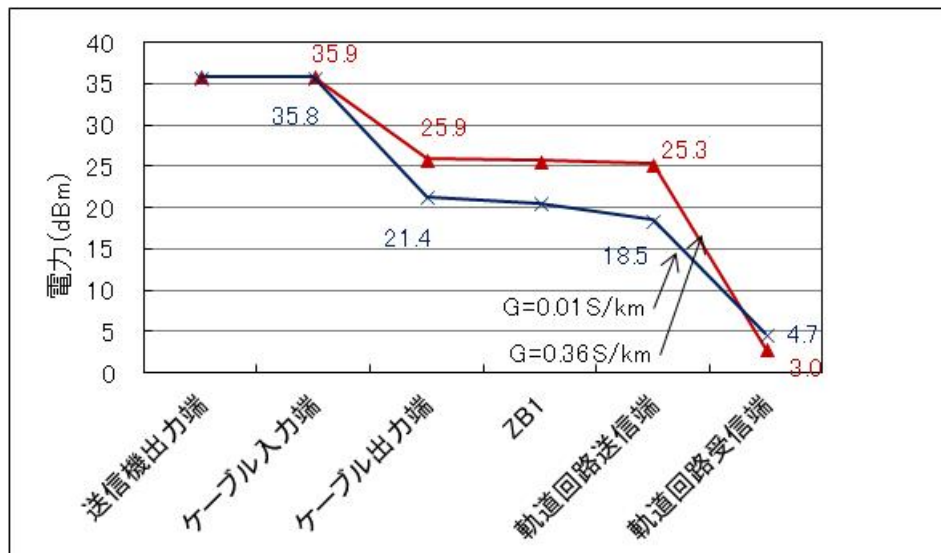
周波数5kHzでは、軌道回路の $G=0.01\text{S/km}$ のときケーブルで14dB、軌道回路で14dB減衰し、 $G=0.36\text{S/km}$ ではケーブルで10dB、軌道回路で22dB減衰する。

周波数10kHzでは、軌道回路の $G=0.01\text{S/km}$ のときケーブルで19dB、軌道回路で15dB減衰し、 $G=0.36\text{S/km}$ ではケーブルで13dB、軌道回路で28dB減衰する。

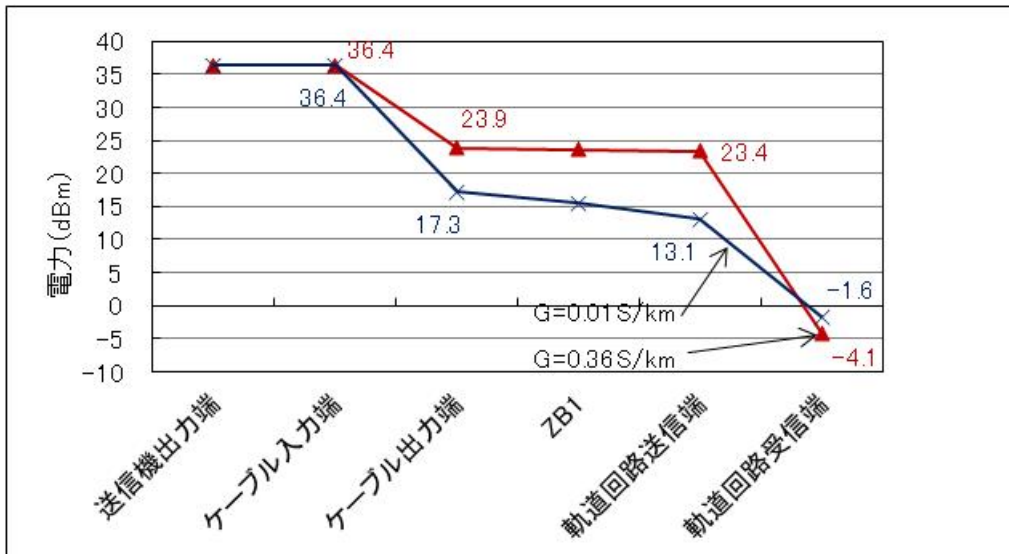
図4. 19より、いずれの周波数においても、軌道回路の受信端で安定してATC信号が受信できる短絡電流が得られることがわかる。



(a) 周波数 2kHz の場合

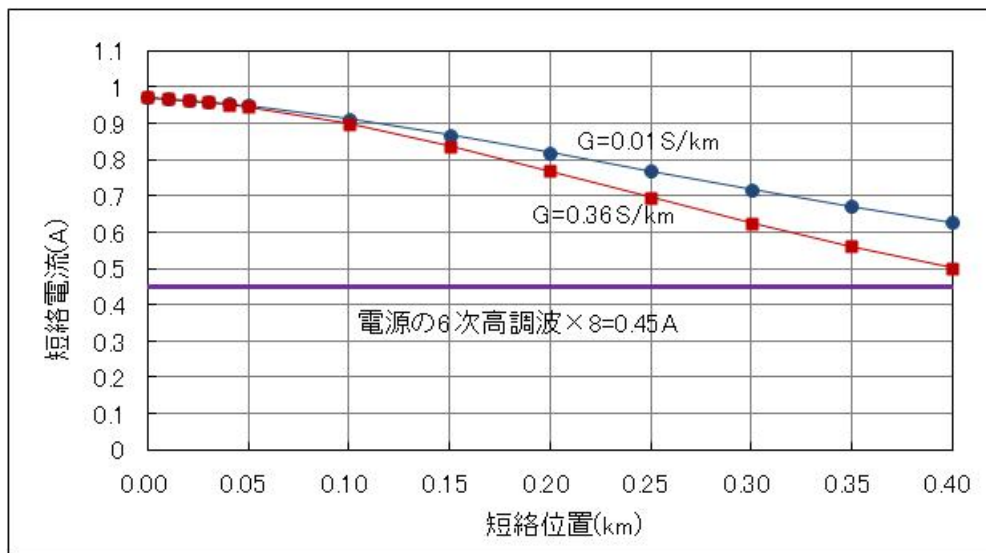


(b) 周波数 5kHz の場合

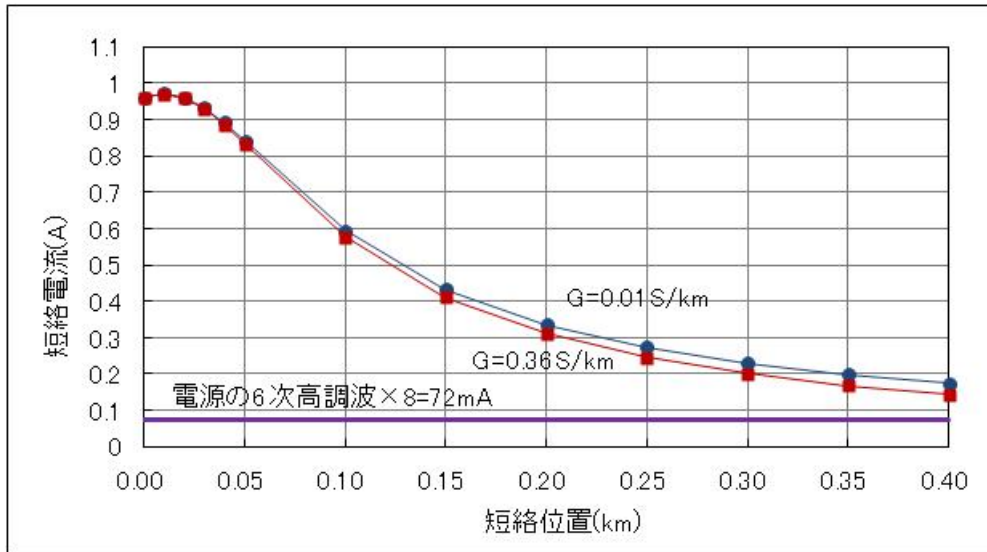


(c) 周波数 10kHz の場合

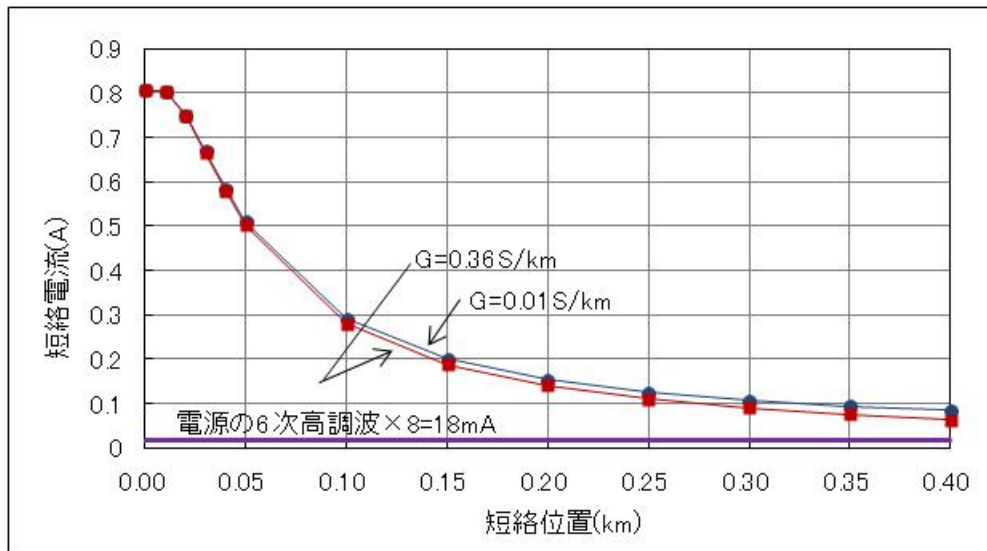
図 4. 18 列車在線時のレベルダイヤグラム



(a) 周波数 2kHz の場合



(b) 周波数 5kHz の場合



(c) 周波数 10kHz の場合

図4. 19 短絡電流の変化

次に、周波数を 300Hz から 10kHz までの変化させたときの、送信機出力 10W 及び 5W の時の、軌道回路受信端における短絡電流のシミュレーション結果を図 4. 20 に示す。ATC 信号の安定した受信が可能となる電源の 6 次高調波の 8 倍の値も合わせて示す。図より、送信機出力 10W では 1800Hz 以上の周波数で、5W では 2kHz 以上の周波数を使用することで、安定した受信が可能となる短絡電流を確保できる。

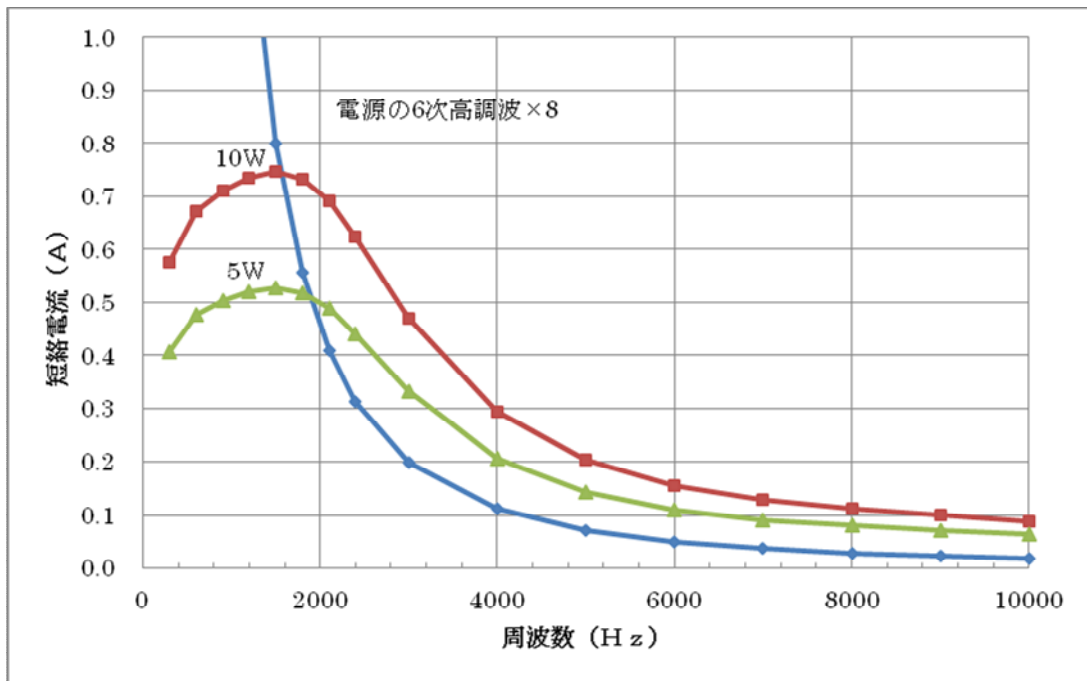
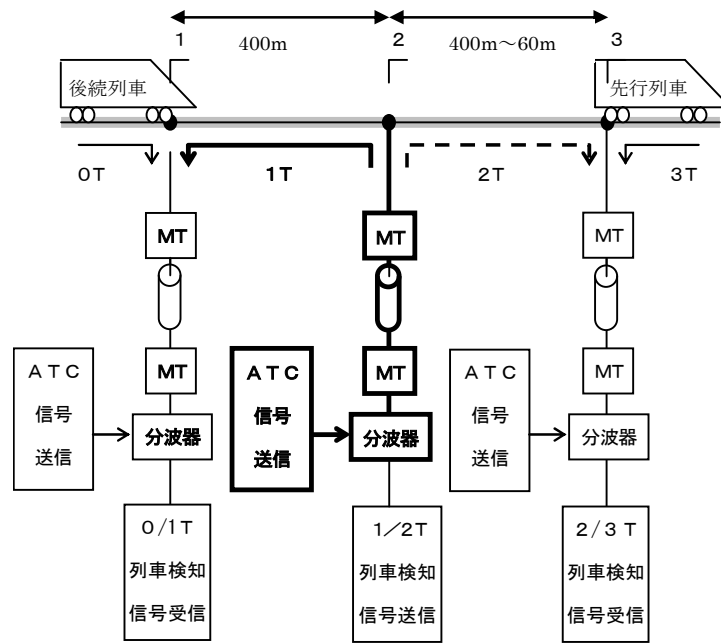


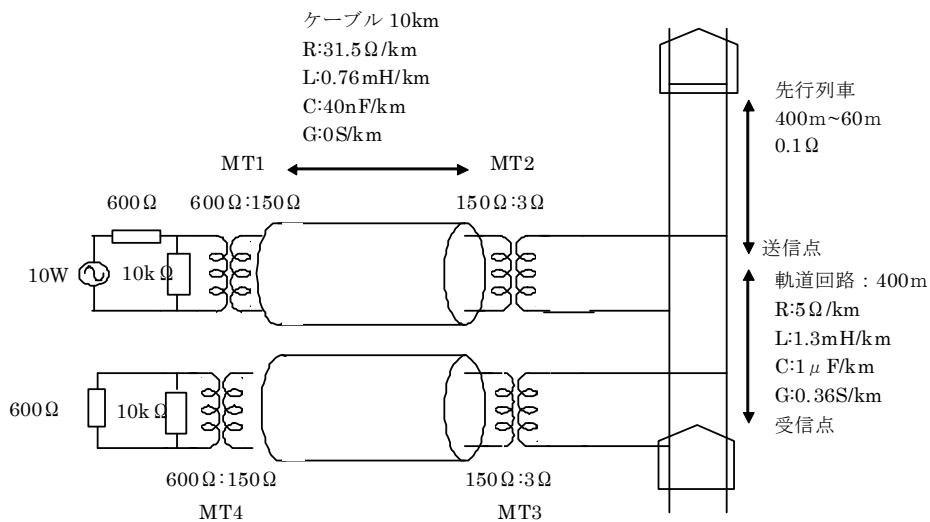
図 4. 20 直流電化区間における安定して受信可能な短絡電流

(2) 無絶縁軌道回路区間

通勤線区では、軌道回路境界に絶縁を設けない無絶縁軌道回路が使用される場合もある。無絶縁軌道回路区間の ATC 信号について検討する。機器構成は図 4. 2 1 となる。図 4. 2 1 (a) で一つの軌道回路 (1T) に着目し図 4. 2 2 (b) の構成で検討する。



(a) 全体の機器構成



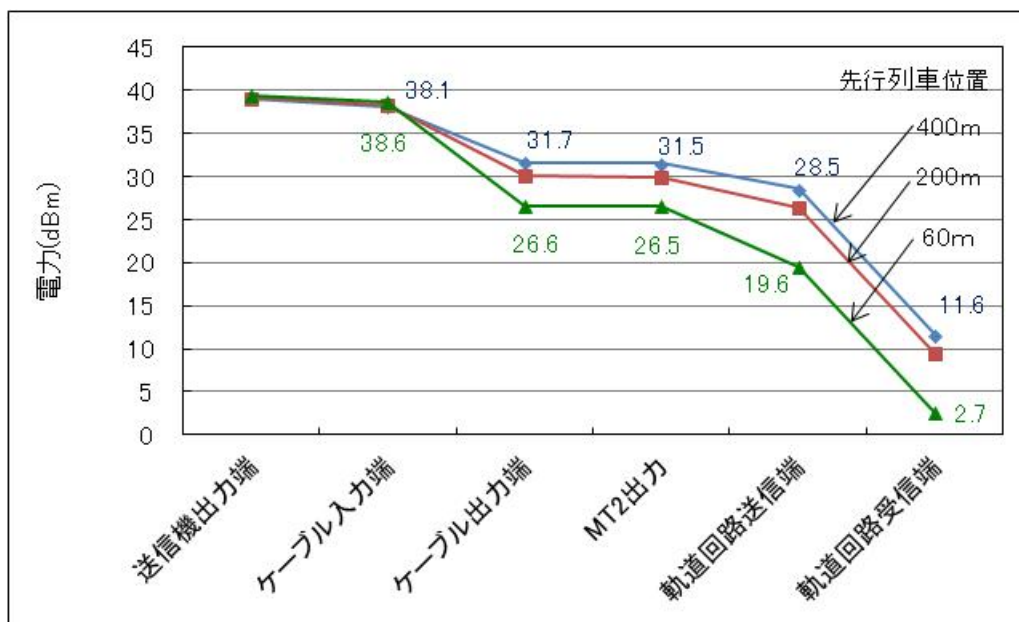
(b) 軌道回路 1T に着目

図 4. 2 1 無絶縁軌道回路区間の ATC 機器構成

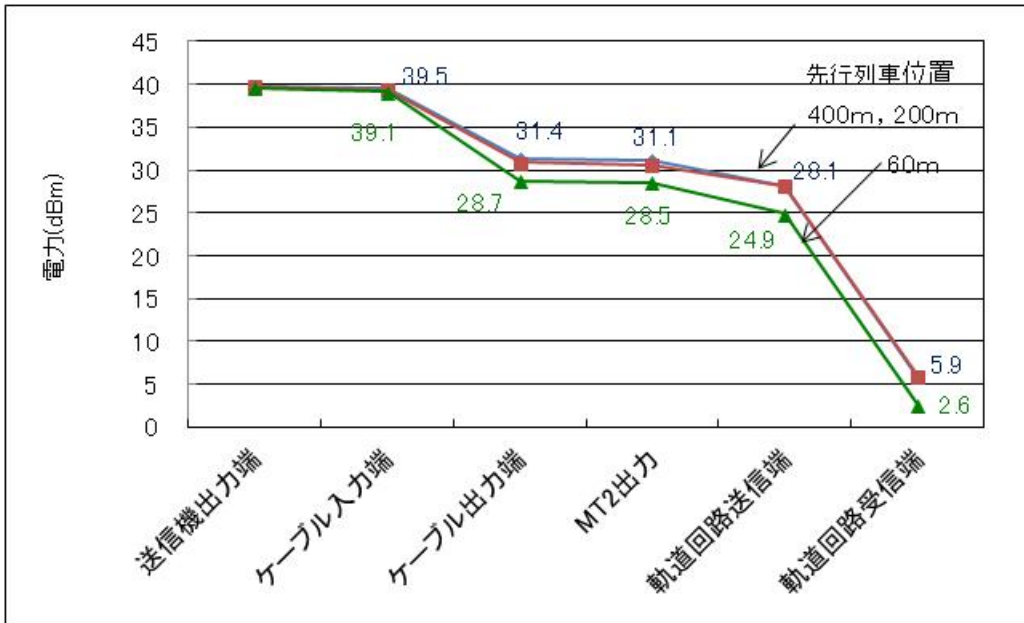
無絶縁軌道回路においては、後続列車が先行列車に接近するとき、後続列車に送るべき ATC 信号が先行列車側にも流れてしまうので、オーバラップ（先行列車に接近するとき余裕であける軌道回路）を 1 区間設定する。先行列車の位置を送信点より前方 400m, 200m, 60m に変化させたとき、周波数 2kHz, 5kHz, 10kHz における送信点から 400m 地点に後続列車が在線するときのレベルダイヤグラムを図 4. 22 に示す。

図 4. 22 に示すように、周波数 2kHz では先行列車が 60m と接近しているときはケーブルでの損失が最大 12dB となるほか、軌道回路送信後も先行列車の短絡による短絡電流による損失が 7dB 程度あるため、後続列車に届く信号は約 3dBm 程度に減衰する。先行列車が 200m, 400m と離れるにしたがい、先行列車の方に流れる電流は減少し、周波数 5kHz~10kHz では 2dB 程度しか減少しなくなる。したがって、周波数が高い方が先行列車在線時の影響は少ない。一方、軌道回路での減衰に関しては、周波数 2kHz で 17dB, 周波数 5kHz で 22dB, 周波数 10kHz で 28dB 程度の減衰となる。周波数が高いほど減衰は大きくなる。

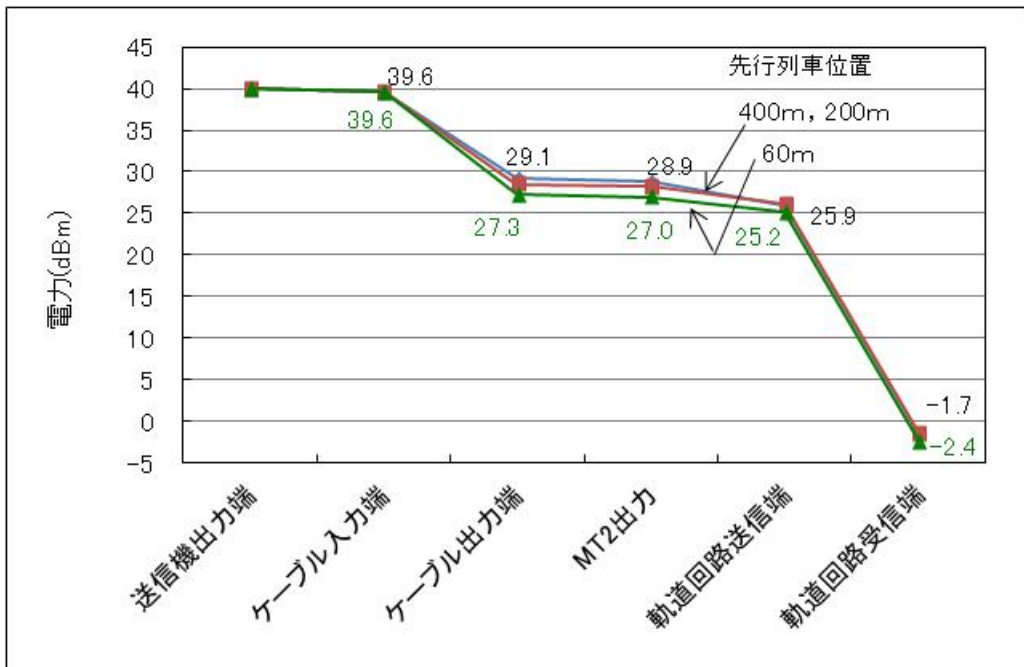
次に、図 4. 23 に周波数を 2kHz, 5kHz 及び 10kHz に変化させたときの、短絡電流の変化を示す。周波数 2kHz では先行列車が 400m 先にいるときは、送信点から 300m までは十分な短絡電流が得られるが、60m 先にいるときには送信点から 80m 程度までしか十分な短絡電流は確保できない。周波数が 5kHz, 10kHz では先行列車が 60m 以上先にいるときにも十分な短絡電流が確保できる。



(a) 周波数 2kHz の場合

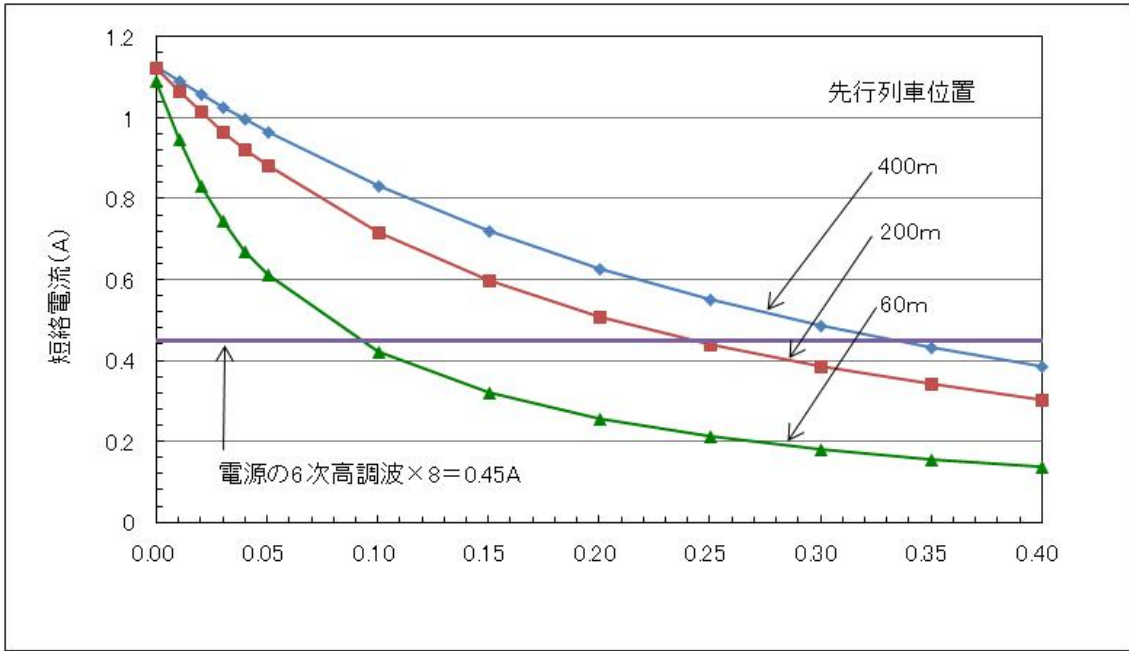


(b) 周波数 5kHz の場合

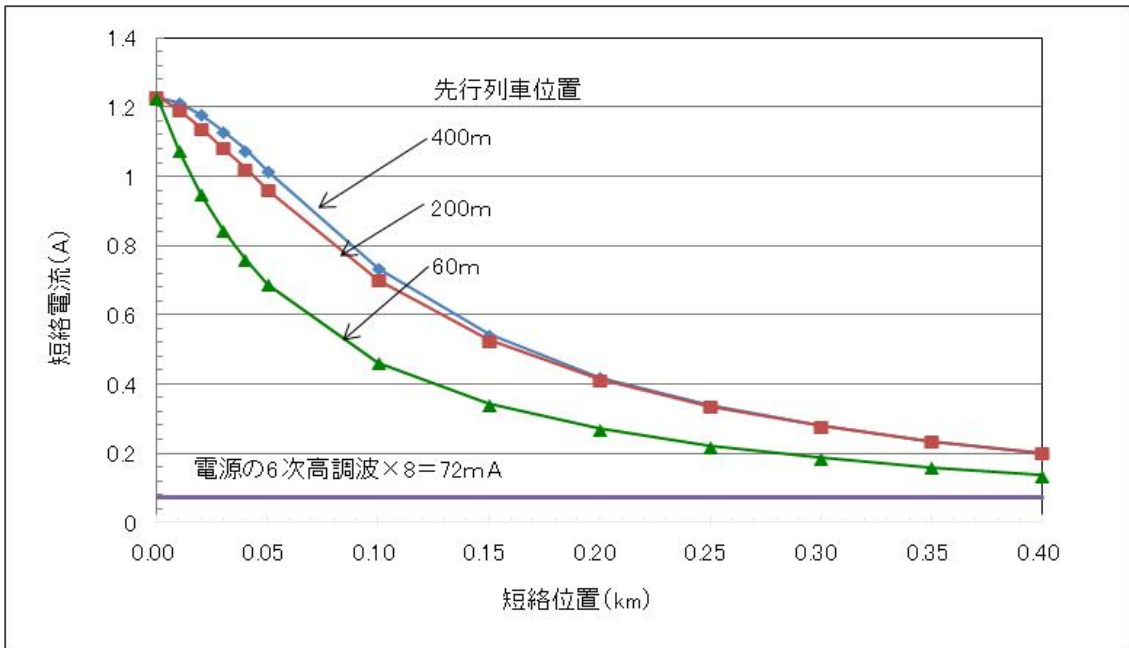


(c) 周波数 10kHz の場合

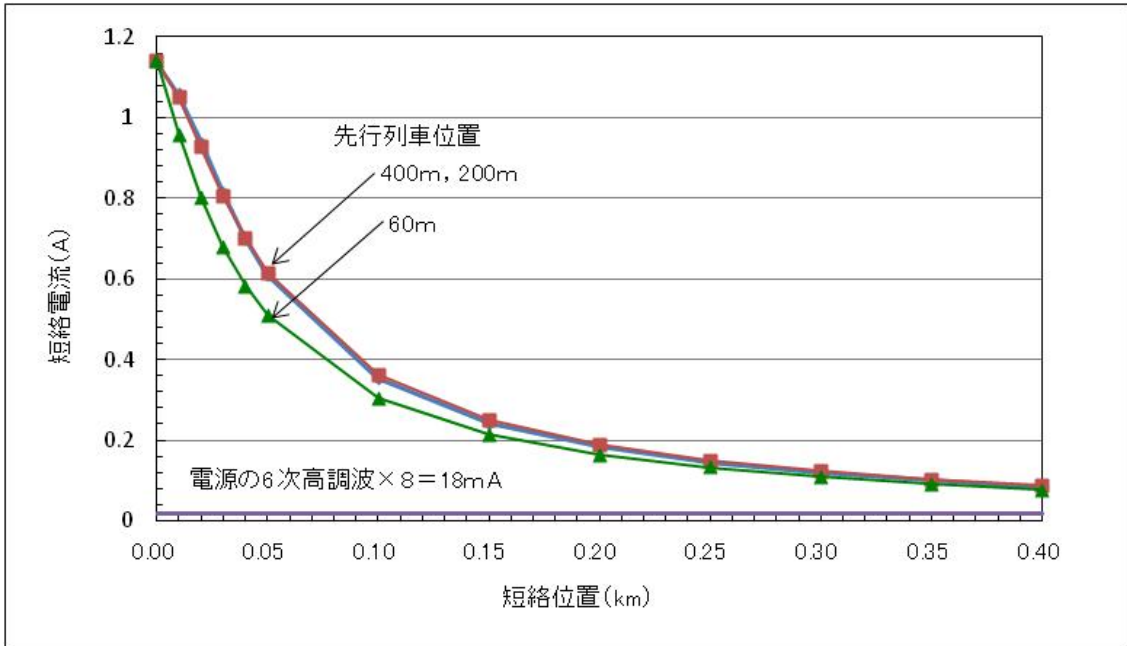
図4. 22 列車在線時のレベルダイヤ



(a) 周波数 2kHz の場合



(b) 周波数 5kHz の場合



(c) 周波数 10kHz の場合

図 4. 2 3 短絡電流の変化

図 4. 2 4 に周波数を 300Hz から 10kHz に変化させたとき、400m の軌道回路において受信端で得られる短絡電流を示す。また、電源の 6 次高調波の 8 倍の短絡電流（安定して ATC が受信できる電流レベル）を合わせて示す。

図より、先行列車が在線する位置が軌道回路の送信点から 60m 前方に在線する時は 3600Hz 以上の周波数を、200m 前方の場合は 2700Hz 以上の周波数を使用することで十分な短絡電流を確保できる。このように列車間隔が短い線区では周波数が高い方が有利となる。

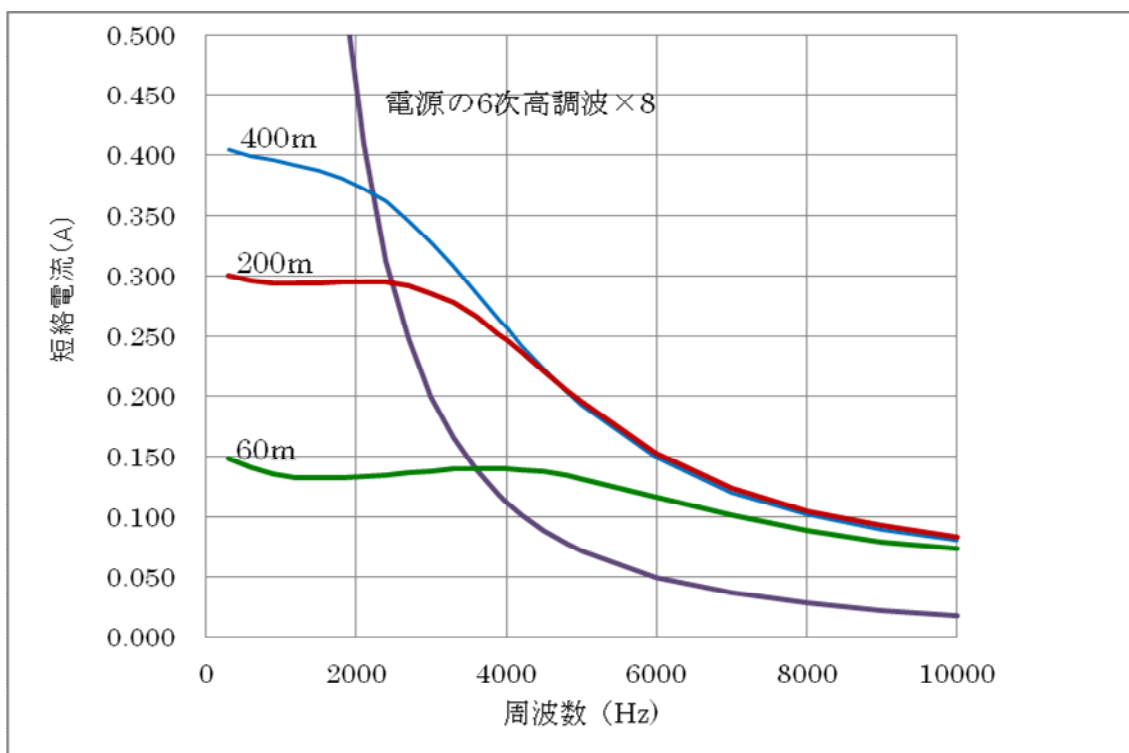


図4. 24 列車の短絡位置と実現できる短絡電流

4. 1. 3 列車による電車電流の影響確認試験

実際の電車電流が流れる環境下でデジタル ATC の情報伝送について、鉄道事業者の協力を得て性能確認試験を実施した。

(1) 新幹線区間

山陽新幹線でデジタル ATC 信号を実際の軌道回路に重畳し、デジタル ATC 装置を仮設した試験車両が試験区間を走行する際に受信するデジタル ATC 信号のフレーム誤りを測定した(4.2)(4.3)。試験の地上機器構成を図 4. 25、車上機器構成を図 4. 26 に示す。また、主な電気性能を表 4. 5 に示す。

地上の試験区間は、JR 西日本山陽新幹線小倉ー博多間の下り線の 10 軌道回路で、軌道回路長は 450m~1187m である。最大ケーブル長は約 6km、送信電力は 10W である。

図 4. 25 に示すように、地上では実際に使用している ATC とデジタル ATC の相互干渉をなくすために、現用の ATC の送信側にハイパスフィルタ (HPF)、デジタル ATC 側にはローパスフィルタ (LPF) を挿入した。これらのフィルタの挿入による損失は 1~3 dB 程度である。なお、この構成で ATC 信号を送信するために必要な短絡電流 320mA は確保している。

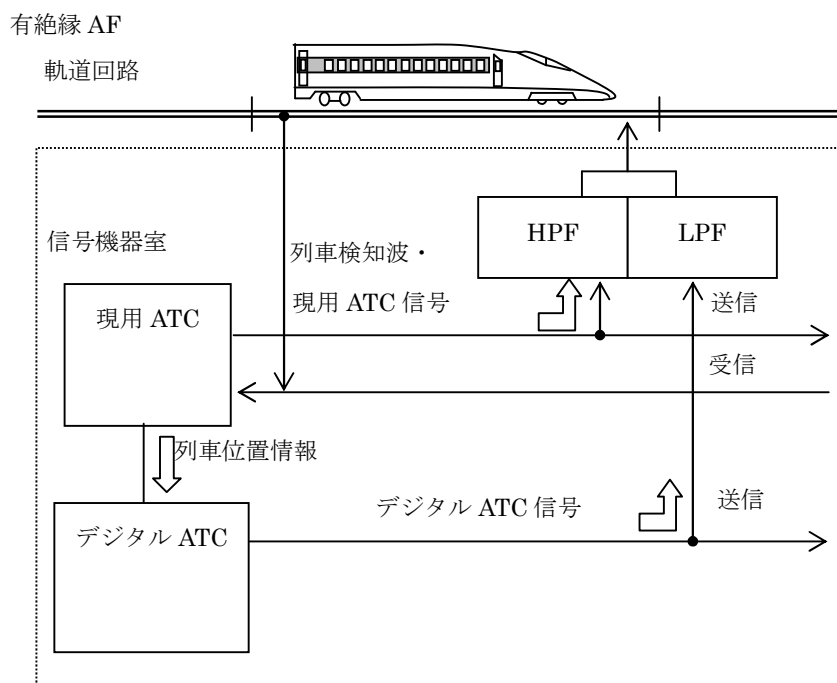


図 4. 25 デジタル ATC 性能試験の地上機器構成

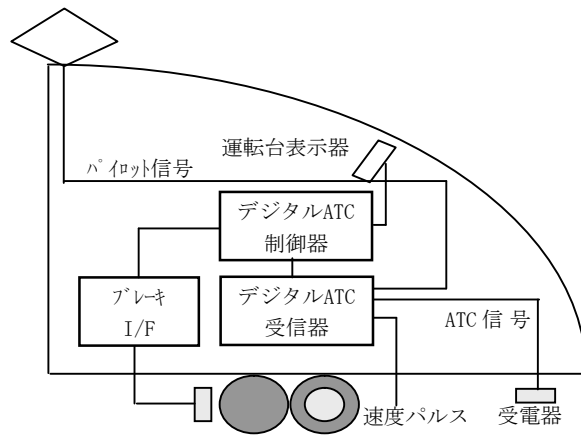


図 4. 26 デジタル ATC 性能試験の車上機器構成

表 4. 5 試験時のデジタル ATC の基本的な電気性能

(a) 通信方式	電源同期 MSK
(b) 搬送波/変調周波数	480Hz ± 21Hz
(c) 伝送速度	84bps
(d) フレーム構成 フレーム長(48bit) 但し先頭フラグは除いた CRC を含むデータに連続 4 個の"1"毎に"0"を挿入	
<ul style="list-style-type: none"> ・フラグ(6bit) : "111110" ・データ(34bit) : 線区番号(2bit), 駅番号(5bit), 軌道回路 ID(7bit), 構内/中間(1bit), A 線/B 線(1bit), 開通区間数(5bit), 到着番線(3bit), 制限速度(2bit), 制限までの開通区間数(5bit), 予備(2bit), 非常停止(1bit) ・CRC(8bit) : 多項式 $x^8 + x^6 + x^3 + x^2 + x + 1$ 	
(e) 軌道回路方式	有絶縁 AF 軌道回路

試験車両は 100 系を使用し、受電器からの ATC 信号は、検査用のコネクタから高抵抗、絶縁アンプを介して受信器に入力した。

4 つの期間に分けて試験を実施した。試験区間を合計約 40 走行し、地上ー車上のデジタル符号伝送のほか、車上の連続位置検知、ブレーキパターンの発

生・ブレーキ制御などの試験を実施した。

図4. 27にフレーム誤り率の測定結果を示す。1フレームが48ビットで構成されており、すべてのビットを完全に受信しなければそのフレームが無効になるため、軌道回路境界では必然的にエラーが発生する。図4. 27は軌道回路境界で発生したエラーを除いた数値である。

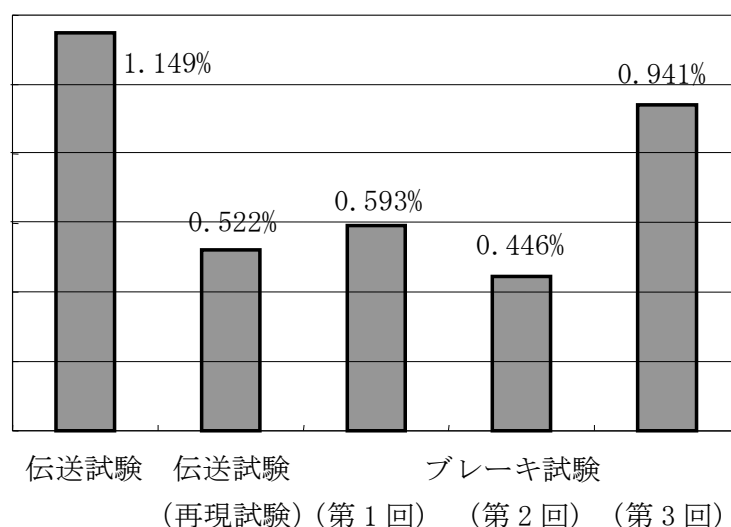


図4. 27 フレーム誤り率の測定結果

伝送試験ではフレーム誤り率は1.15%であった。しかし、この時の車上試験機器の設置場所がモータの直上であり、その直達ノイズの影響があったと予想されたため、収集した受信データを使って室内で再度同様な試験を実施した。その結果0.52%とフレーム誤り率は減少した。受信機のゲイン調整が不相当であった第3回ブレーキ試験を除いて、その後の試験でも0.6%以下の誤り率が確保できた。第3回ブレーキ試験についても、ゲインを再調整し、収集したデータを使った再試験では同様の0.5%程度の値が得られた。

試験では、受電器からのATC信号を現行ATC受電器から高抵抗、絶縁アンプを介して受信器に入力したこと、機器の配置、機器間の配線、電源などの設置環境があまりよくなかったことなどを考慮すると、この数値はさらに改善できると考える。なお、エラーの最大継続時間は1.9秒であった。これはフレームの連続エラーが最大2回であったことを示す。また、他の情報と間違えるような見逃し誤りは無かった。

試験で得られたフレーム誤り率0.6%は、48ビットのフレーム構成であるから

ビット誤り率 p に換算すると次式で試算できる。

$$p \doteq e_f/48=1.25 \times 10^{-4} \quad (4.8)$$

(2) 在来線区間

直流電化区間の電源周波数が 50Hz 及び 60Hz の区間で、デジタル ATC 信号のノイズ特性試験を実施した(4.4)。試験の機器構成を図 4. 28 示す。短絡電流 100mA 相当の信号を試作した受信機に入力するとともに、実際の電車電流のノイズを車両の先頭に取り付けた左右それぞれの受電器から取り込み、それらの不平衡率が 10% となるように左右の受電器出力のゲインを調整して信号に加えた。受信結果を長期にわたりデータロガーに蓄積した。

周波数を 2kHz~5.2kHz まで変化させたときのフレームエラー率及び最大エラー継続時間をそれぞれ図 4. 29 及び図 4. 30 示す。図 4. 29 より周波数が 3.4kHz 以上を使用することで、伝送速度 320bps でもフレームエラー率が 10^{-4} のオーダーとなり、また図 4. 30 よりエラー継続時間も 1 秒以下とすることができ、安定した ATC 信号の伝送が可能とすることを確認できた。

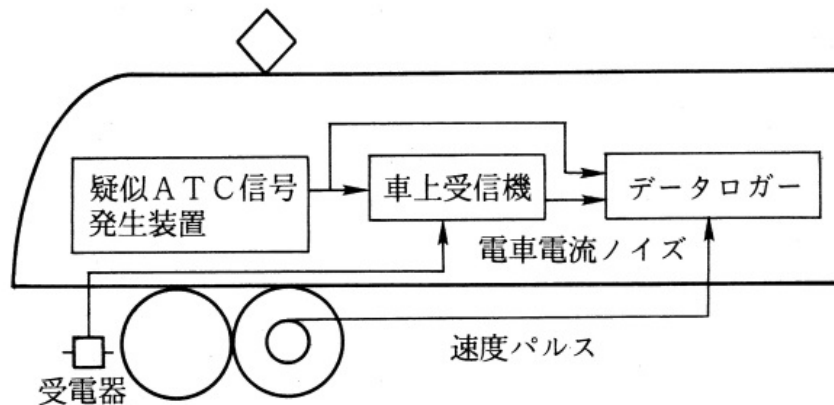


図 4. 28 デジタル ATC ノイズ試験機器構成

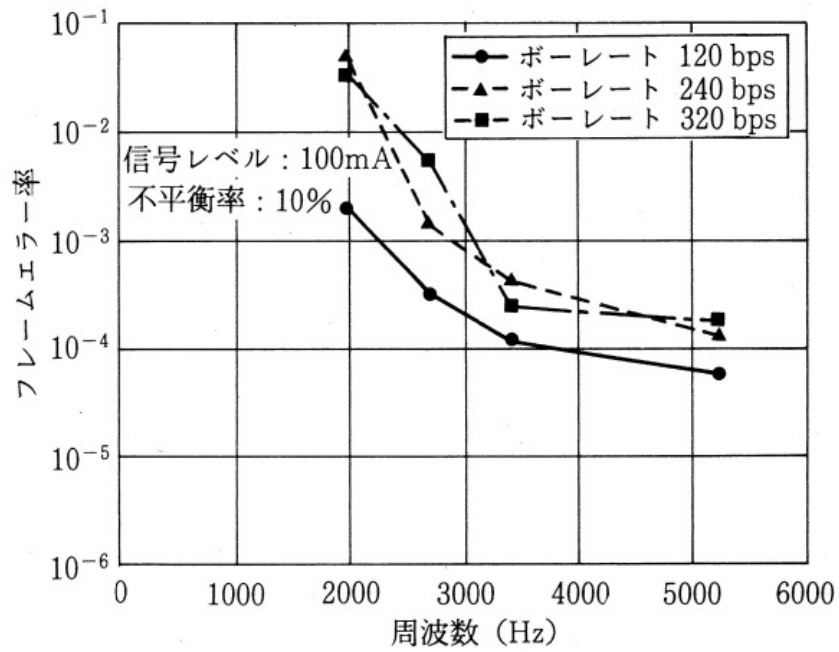


図4. 29 デジタル ATC 信号周波数とフレームエラー率

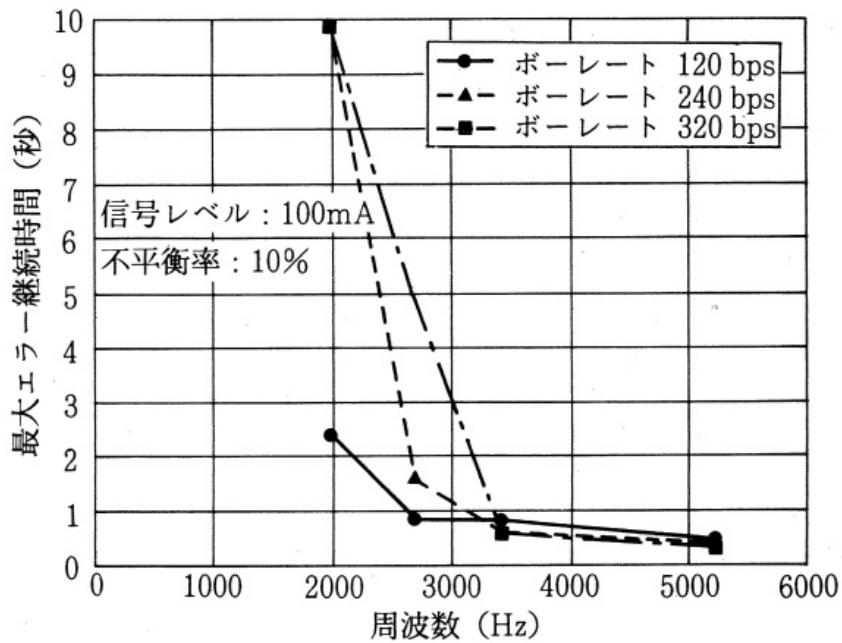


図4. 30 デジタル ATC 信号周波数と最大エラー継続時間

4. 2 車上機器からのノイズに対する対策

ATC では先頭車両の先頭軸前方に取り付けた受電器でレールに流れる信号をピックアップする。先頭車が M 車の場合には、レールに流れる電車電流の影響のほか床下の主電動機や配線からの直達ノイズの影響に対する対策も必要となる。以下の対策が有効との報告がなされており^(4.7)、これらの方法を組み合わせで利用する。

- ・インバータのスイッチングの高調波を信号で使用する周波数と一致させないようにする
- ・主電動機の 3 相線や主変圧器の 2 次巻線にコアを挿入したり、バイパスコンデンサを付加し、発生源のノイズを低減する
- ・機器・配線を遮断したり、配線のツイスト、シールド化などの艱装とする

4. 3 符号による情報伝送の信頼性向上

地上から車上へ伝送する項目とフォーマットは図 4. 3 1 を基本とする。伝送するフレームは、符号の最初を示すフラグ、軌道回路 ID、開通区間数などのデータ及び、CRC(Cyclic Redundancy Check)符号で構成する。情報 50 ビット、フラグ、CRC がそれぞれ 8 ビットとすると、伝送するフレーム長は 66 ビットである。

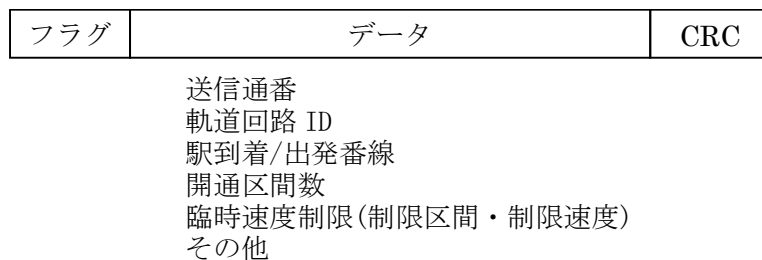


図 4. 3 1 地上から車上への伝送内容

8 ビットのフラグは”11111110”で構成し、そのあとに続く情報ビットに”1”が 6 回連続するとき”0”を挿入し、先頭フラグ以外には”1”が連続 7 回続かないようにする。このようなフラグを付加することで、地上から繰り返し送信されるデータフレームの先頭を車上装置が容易に検知できるようにする。

情報 50 ビットに対して、CRC を 8 ビット付加することで符号のハミング距離 4 以上を確保する。また、同一データを 2 回受信し、それらのデータが一致した

とき正常と判定する。車上では一旦ブレーキパターンを発生させるとそのブレーキパターンにより安全は確保されるので、その後データが更新されなくても緊急停止などの要求がない限り安全上問題ない。したがって通常の制御においては、ある程度の時間（数秒～10秒）連続してATC信号が受信できなくても危険な状態は発生しない。ただし、緊急停止ボタン扱い等の対応については別途信号を割り当てるなどして、その扱いが直ちに検知できる対策が必要である。

4. 1. 3項で述べたように、新幹線区間で実施して得られた軌道回路による符号伝送のビット誤りについては、ビット誤り率 $p \doteq 1.25 \times 10^{-4}$ が得られたので、この値をベースにデジタルATCの情報伝送の信頼性について検討する^(4.2)。

1フレームあたりの見逃し誤り率 e_c は、8ビットはフレーム先頭フラグであり、符号のハミング距離は4確保できるので1フレームあたりの見逃し誤り率 e_c は、次式で試算できる。

$$e_c \doteq_{(66-8)} C_4 \cdot p^4 =_{58} C_4 \cdot (1.25 \times 10^{-4})^4 = 1.04 \times 10^{-10} \quad (4.9)$$

他の情報と間違え1時間あたりの見逃し誤り率 E_c は、データの2回一致で正常と判定するので(4.10)式で表され、伝送速度 $v_f = 84\text{bps}$ を入力すると

$$\begin{aligned} E_c &= (v_f/66) \times 3600 \times (e_c)^2 \\ &= 4.91 \times 10^{-17} (/h) \end{aligned} \quad (4.10)$$

となり、十分小さな値となる。

次に、車上で正常なデータ受信ができない場合を考える。9フレーム連続受信異常（軌道回路境界で2フレーム壊れ、その後7フレーム連続受信異常を想定、約7秒間に相当）のとき受信断と判定する場合について検討する。これは図4.32に示すように、新しい軌道回路境界通過時に2フレームは受信できず、さらに7フレーム受信できない場合に相当する。7フレーム連続受信できない場合を想定すると、伝送速度を $v_f = 84\text{bps}$ とし、1時間あたりの受信断になる確率 E_f は、

$$\begin{aligned} E_f &= (v_f/66) \times 3600 \times (66p)^7 \\ &= 1.19 \times 10^{-11} (/h) \end{aligned} \quad (4.11)$$

となる。これは1日500本の新幹線が18時間走行すると仮定して1000年以上発生しない確率であり、実用上問題ない伝送品質である。

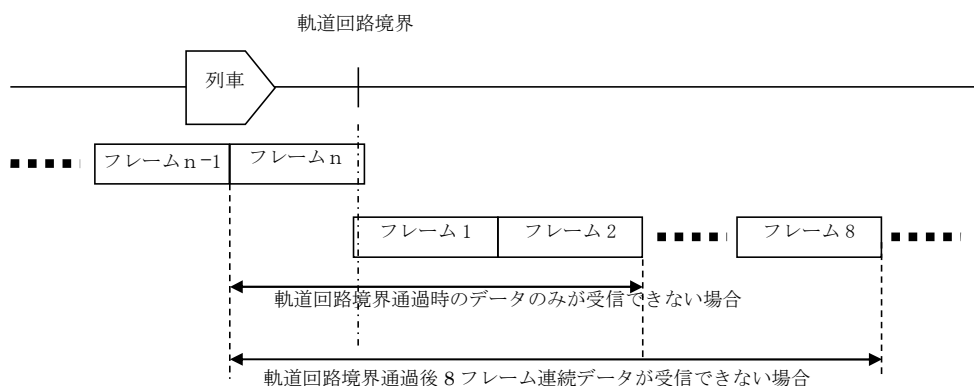


図 4. 3 2 軌道回路境界で ATC 電文の不受信

4. 4 まとめ

デジタル ATC の制御情報の MSK 変調による伝送の高信頼化について検討した。新幹線区間では電源周波数が 1% 変動しても、大きく発生する電源の奇数次高調波を常に避けて、かつ比較的小さな偶数次高調波が帯域の中心となるように信号設定を行う電源同期 MSK 変復調方式を提案した。本方式を使用した伝送速度 84bps の伝送を実現する試作装置を用いて新幹線区間で試験を行い、 1.25×10^{-4} のビット誤り率の伝送品質が得られることを確認した。この伝送品質で ATC システムとして高い信頼性を確保できることを示した。

また、交流電化区間及び直流電化区間のそれぞれの環境下で安定した ATC 信号の伝送を可能とする信号周波数と信号帯域、軌道回路長、送信電力の設定方法を示した。

4. 5 参考文献

- (4.1) 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, pp49-54, 1995 年 1 月
- (4.2) 渡辺郁夫, 高重哲夫, 志田洋, 小林巧, 内田清五, 音無隆, 犀川潤, 山陽新幹線におけるデジタル ATC 性能試験, 鉄道総研報告, Vol.14, No.2, pp41-46, 2000 年 2 月
- (4.3) 志田 洋, 渡辺 郁夫, 高重 哲夫, 音無 隆, 新幹線対応デジタル ATC

性能試験-山陽新幹線における本線走行試験結果-, 鉄道サイバネ論文集,
p190-193, 1999年11月

(4.4) 渡辺郁夫, 福田光芳, 高重哲夫, 機器分散型デジタル ATC の性能試験,
鉄道総研報告, Vol.9, No.11, pp7-12, 1995年11月

(4.5) 高重哲夫, 渡辺郁夫, 軌道回路を利用した移動閉そく, 鉄道総研報告, Vol.2,
No.8, pp39-46, 1988年8月

(4.6) 渡辺郁夫, 市川和男, VVVF 制御車の高潮波が信号設備へ与える影響, 鉄
道と電気技術, Vol.6, No.12, pp29-37, 1995年12月

(4.7) 電気学会・電気鉄道の電磁環境に関する共同委員会:「鉄道と EMC」, オ
ム社, 2008

第5章 デジタル ATC におけるブレーキ制御

5.1 ブレーキパターンの作成

デジタル ATC では、自列車の位置を車輪回転の積算により連続的に検知し、同時に地上から ATC 情報として送られてくる先行列車の在線軌道回路情報を受信し、それらの情報から先行列車が在線する軌道回路境界までの距離を正確に算出して、その距離に余裕を持たせて安全に停止できるブレーキパターンを発生させる。

図 5. 1 に示すように停止目標までの間に曲線速度制限や分岐器速度制限があれば、それらに関するブレーキパターンをすべて作成し、走行速度が最も低いパターンを優先する。なお、曲線や分岐の速度制限の解除のタイミングは列車長を考慮する。

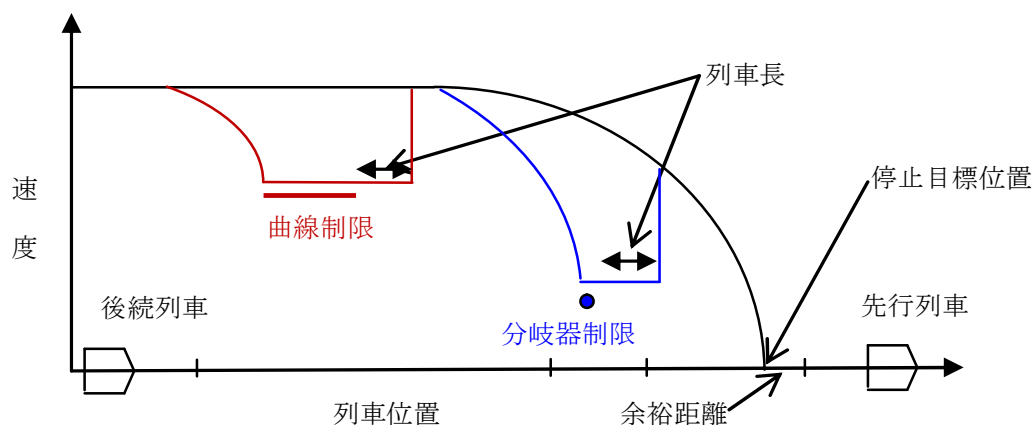


図 5. 1 曲線制限や分岐器速度制限に対するブレーキパターン

ブレーキパターンを発生させる区間に勾配が存在する場合にはブレーキ性能に影響を与える。勾配情報は車上のデータベースに記憶されており、この情報を考慮してブレーキ性能を補正してブレーキパターンを作成する。図 5. 2 は下り勾配があるときのブレーキパターンの作成である。下り勾配の区間のブレーキパターンに使用する減速度は、平坦区間の減速度より勾配によるブレーキ力の低下を考慮して小さ目に補正する。

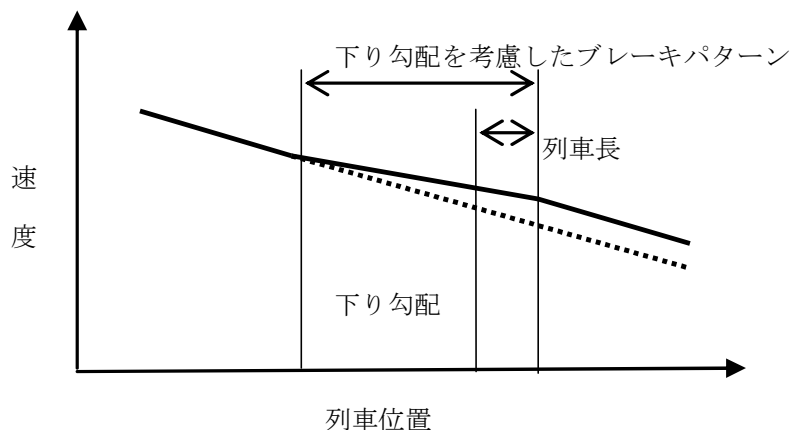


図5. 2 ブレーキパターンの勾配補正

ブレーキパターンの計算は、停止目標位置から離散的に列車の在線する位置まで行う。新幹線ではブレーキ距離が長いので 10km 程度前方からブレーキパターンを計算する必要があるため、計算量と計算精度を考慮し、ブレーキパターンの計算間隔（距離）を段階的に設定する。例えば列車からの位置が 250m 以下では 1m, 1km 以下では 10m, それより遠方では 100m 刻みにブレーキパターンを計算する^(5.1)。この計算方法では、10 ビットあれば 19 km までの距離を計算できる。離散的に計算することによる誤差は図5. 3に示すように直線的に補完されるため、実際の制御は全て安全側になる、

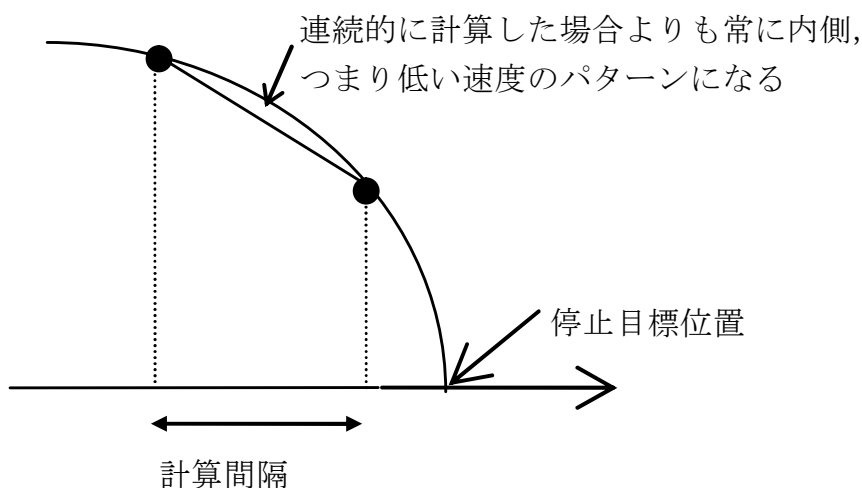


図5. 3 デジタル ATC のブレーキパターンの計算

ブレーキ性能の設定に関しては速度域毎に減速度を設定できるようにする。これにより、速度域が広がって、減速度が大きく変化する場合にも、精度良くブレーキパターンを生成できる。

実際のブレーキの減速度は、車輪径、摩擦係数、BC 圧（ブレーキシリンダーの圧力）、機械効率等のばらつきにより、仕様の値より小さくなることがある。したがって、ブレーキパターンの計算で用いる減速度は、これらを考慮して小さ目の値で、速度域毎に段階的に設定する。

5. 2 速度照査及びブレーキ制御出力

デジタル ATC では、作成したブレーキパターンによりブレーキ制御を行うが、列車間隔を必要以上に広げないため、列車の実速度がある程度ブレーキパターンに追従するようにブレーキ力を制御することが必要な場合がある。このような制御の実現方法として、ブレーキパターンと列車の実速度をリアルタイムで比較し、それらの間の差を利用してブレーキ力を決める方法を検討した^{(5.2) (5.3)}。

列車速度がブレーキパターンを下回るときはブレーキ力を弱め、その逆の場合はブレーキ力を強めるようにすると（図 5. 4）、最終的にはブレーキパターンと列車速度との差である速度偏差をある一定の範囲内に保ったまま減速させることが出来る。このように実速度を制御演算にフィードバックする制御を行うことで、安定で減速パターンに追従性のよい 1 段ブレーキ制御を実現する手法を提案した。

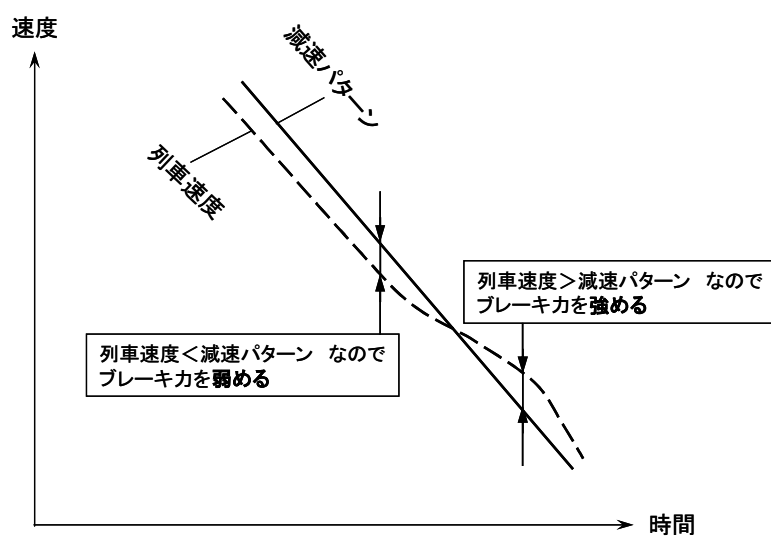


図 5. 4 ブレーキパターンへの追従制御の動作

ブレーキパターン追従制御を行うためには、速度偏差に応じてブレーキ力の増減を行うしくみが必要となる。速度偏差は減速状態により常に変化するので、速度偏差に比例して連続的にブレーキ力を増減できれば理想的である。この場合は、速度偏差に対して適当な比例係数を乗じたものをブレーキ力指令として、BC 圧若しくは電気ブレーキ力に変換するシステムを各車に搭載する必要がある（図 5. 5）。

従来のブレーキ制御システムを大きな変更なしに利用する方法の 1 つとして、速度偏差の値をある閾値に区切り、それぞれを各ブレーキノッチに割付け、速度偏差の変化に応じてブレーキノッチを切替える方法が考えられる（図 5. 6）。この方法では、車両に既存のブレーキ指令回路やブレーキ制御装置をそのまま使用することができる。この場合、各閾値の範囲内ではブレーキノッチが一定となり、ノイズ等による速度偏差の不用意な変動に対して応答が鈍くなる利点もある。

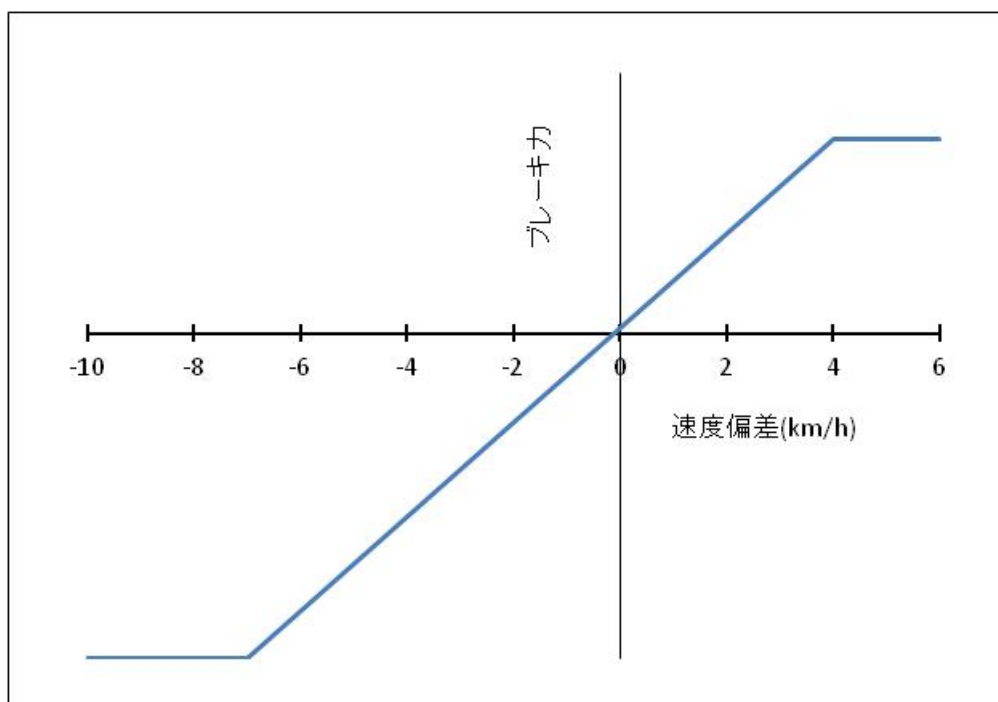


図 5. 5 ブレーキ力制御方法（連続制御）

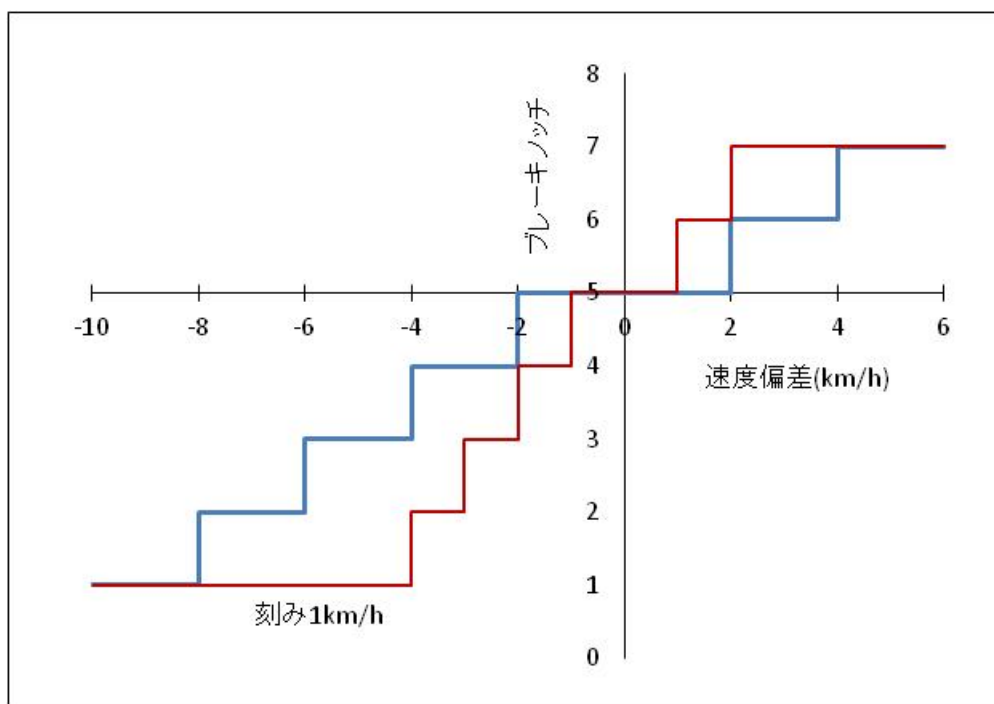


図5. 6 ブレーキ力制御方法（ノッチ切換制御）

5. 3 ブレーキ制御の現車試験

図5. 6のノッチ切換制御によるブレーキ制御に関する試験を山陽新幹線で実施した(5.2),(5.3)。車上のブレーキパターン作成用の減速度は 0～70～100～150～200～230km/h の5つの速度段毎に設定した。最終的には走行抵抗を加味した減速度を採用した。余裕距離は閉そく境界から 50m 確保した。

主なブレーキ制御試験の条件を表5. 1に示す。また、常用ブレーキの4Nのブレーキ性能をベースに制御を行うときのデジタルATCのブレーキパターン作成に用いた減速度を図5. 7に示す。

表5. 1 主な試験条件

試験区間	: 山陽新幹線 小倉ー博多
試験車両	: 100N系
線路状態	: 乾燥
荷重条件	: 空車
基準ノッチ	: 4N, 5N, 6N
ノッチ割り付け刻み	: 2km/h, 1km/h
制御周期	: 1秒
電気ブレーキ	: 入り/切り

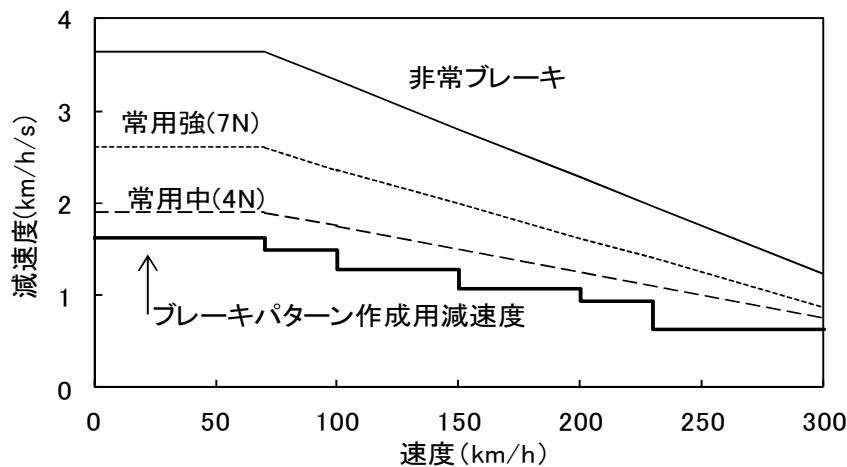


図5. 7 デジタル ATC のブレーキパターン作成に使用した減速度
(基準ノッチ 4 の場合)

なお、低速度域でのブレーキ動作と緩解の繰り返しを防止するため、30km/h 以下で減速中には停止までブレーキ出力ノッチを変化させない制御とした。ブレーキ制御出力として7段階のブレーキ全てを使用し、パターンにできるだけ追従する制御とした。

12 回の試験を実施し、設定したブレーキパターンにほぼ沿ってブレーキが緩むことなく停止まで制御できることが確認できた。平均速度偏差は最大で 4.64km/h、最小は 1.29km/h であった。

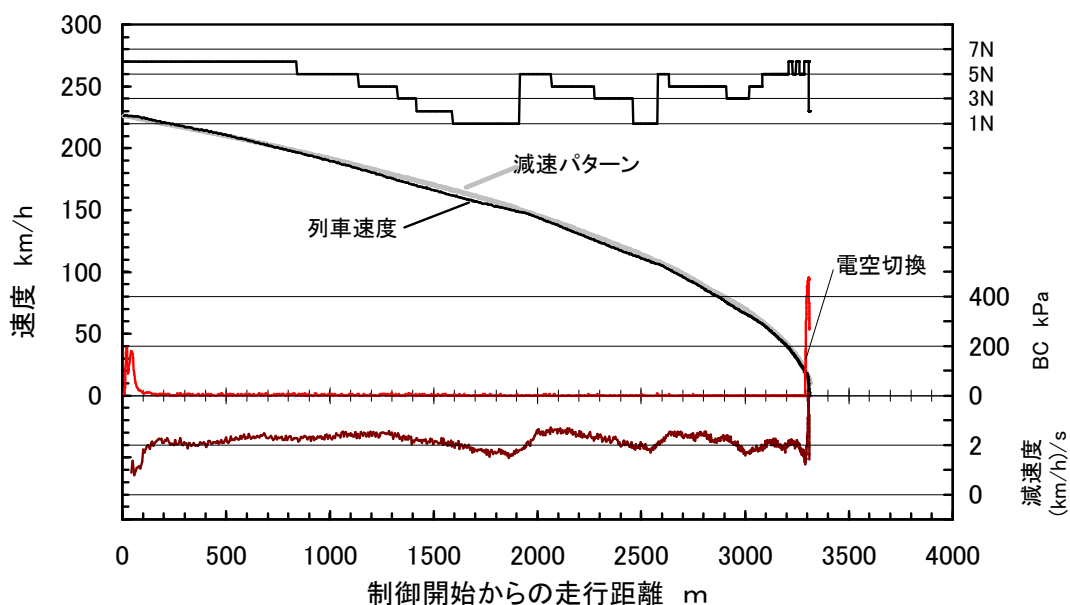
基準ノッチ 5N、電気ブレーキ切りの条件で、平均速度偏差は、電気ブレーキ切りの条件では、ノッチ割り付けの刻みが 2km/h では 4.6km/h であったのに対し、ノッチ割り付けの刻みが 1km/h では 1.36km/h となり、追従性が向上した。

次に、基準ノッチを 6 N、ノッチ割り付けの刻みを 1km/h としたとき、電気ブレーキを入り/切りの条件で試験した結果を図 5. 8 に示す。図 5. 8 (a) は「電気ブレーキ入り」、図 5. 8 (b) は「電気ブレーキ切り」の条件での結果である。

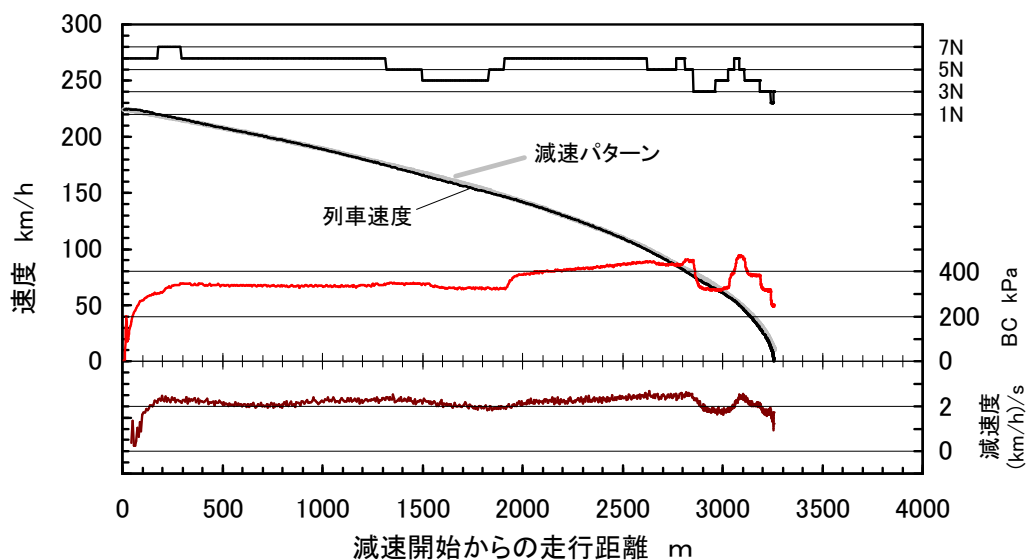
「電気ブレーキ入り」の条件では、「電気ブレーキ切り」の条件と比較して速度偏差は 1.29km/h から 2.28km/h に増加した。これは試験車両の電気ブレーキが抵抗制御方式であったため、ノッチ変化の回路構成に時間がかかり、ブレーキ力変化の追従が遅れることによると推定した。最近のインバータ制御車ではこの問題も解決できると判断する。

30km/h 以下ではノッチ出力を一定に保つ制御を行ったため、停止直前の減速

度が大きくなり、停止位置は目標位置の手前約 25m～30m に停止した。実際に動作したノッチはブレーキパターンを作成したノッチ数より 3 ノッチ程度低い値で制御することが多かった。



(a) 電気ブレーキ入り条件



(b) 電気ブレーキ切り条件

図 5. 8 ブレーキパターンへの追従制御の試験結果

なお、速度が常用ブレーキパターンを越えてブレーキ制御出力を出力しても減速が十分に得られない異常時の場合の試験も実施したが、その時は非常ブレーキパターンによりブレーキが動作するような仕様とした。この関連の試験も実施し、目標位置の手前で停止することを確認できた。

5. 4 まとめ

デジタル ATC ブレーキ制御のための 10 km 以上先まで精度よくブレーキパターンを作成する方法を提案した。また、作成したブレーキパターンに追従するブレーキ制御方法を提案した。性能試験により提案手法が有効に機能し、作成したブレーキパターンに追従して制御できることを示した。

5. 5 参考文献

- (5.1) 福田光芳，渡辺郁夫，牛島康博，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，pp5-10，1998 年 2 月
- (5.2) 渡辺郁夫，高重哲夫，志田洋，小林巧，内田清五，音無隆，犀川潤，山陽新幹線におけるデジタル ATC 性能試験，鉄道総研報告，Vol.14，No.2，pp41-46，2000 年 2 月
- (5.3) 南京政信，内田清五，渡辺郁夫，山下高賢，森俊弘，新幹線 1 段ブレーキパターン追従制御の現車試験結果，J-Rail 99，1999 年 12 月

第6章 デジタル ATC の機器構成と安全性・信頼性技術

6.1 機器構成

機器の故障診断は基本的には従来の ATC 装置と同様の考え方を行うことで安全性を確保する。主要な機器である処理部，ATC 信号送信部，ATC 信号受信部及び外部条件接点の入力に対する安全性確保の考え方は，以下のとおりである(6.1)。

(1) 処理部

処理部の基本構成を図 6.1 に示す。A/B 系の 2 組の CPU を定周期で同期動作させ，定周期内の全外部出力と各種診断結果を比較する。以下の診断がなされる。

①照合回路での出力比較

A/B 系それぞれの系で定周期割り込み処理により行われた制御出力および各種診断結果を照合回路で比較する。

②ROM 診断

プログラム部については 32 バイト単位に，データが記録されている外部 ROM に関しては 2 バイト単位にデータを読み込み A/B 系で比較する。

③RAM 診断

外部 RAM については 4 バイト単位に，内部 RAM については 2 バイト単位に照査データを write/read チェックする。

④レジスタ診断

診断可能なレジスタに関して，照査データを write/read チェックする。

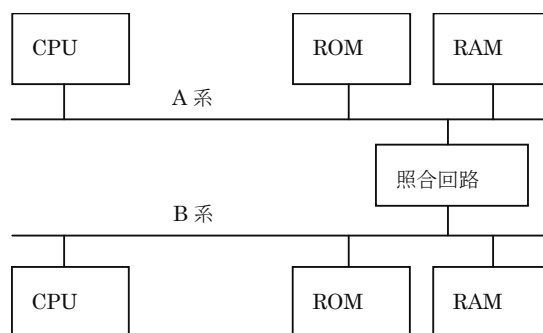


図 6.1 処理部の基本構成

⑤割り込み診断

一定時間内に割り込みが行われることをチェックする。
また、使用しない割り込み先を異常処理とする。

⑥クロックチェック

CPU のクロックを別の発振器のクロックと比較する。

(2)ATC 信号送信部

ATC 装置の信号送信部の基本構成を図 6. 2 に示す。パワーアンプからの最終出力をフィードバックチェックすることで正常な信号が送信されていることを診断する。この方式は、発振器や分周器故障による周波数のずれによる擬似信号の発生などの悪性故障を検出できる。

故障時には待機系に出力を切替える制御を行う。

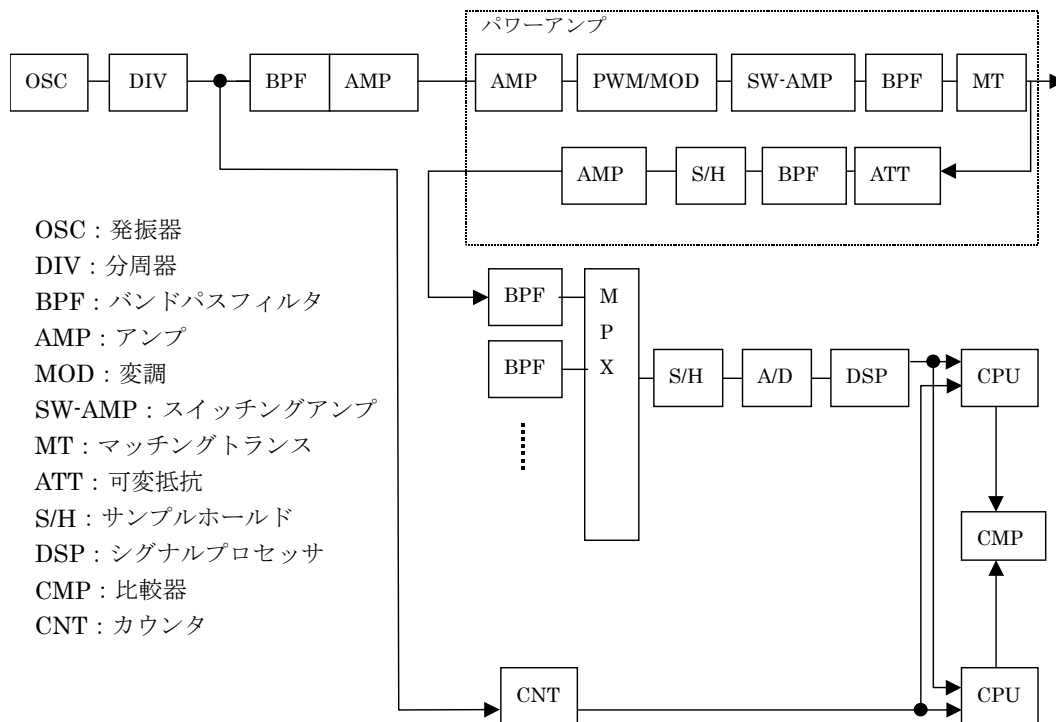


図 6. 2 ATC 信号送信部の機器構成

(3) ATC 信号受信部

ATC の地上受信部，及び車上の受信部の基本構成図を図 6. 3 に示す．図に示すように，LPF 以降は 2 重化され各処理結果は A/B 両系の CPU で比較照合される．シングル部分の ATT や BPF については，それらの故障が悪性とならないように様々な安全性技術が使われる．

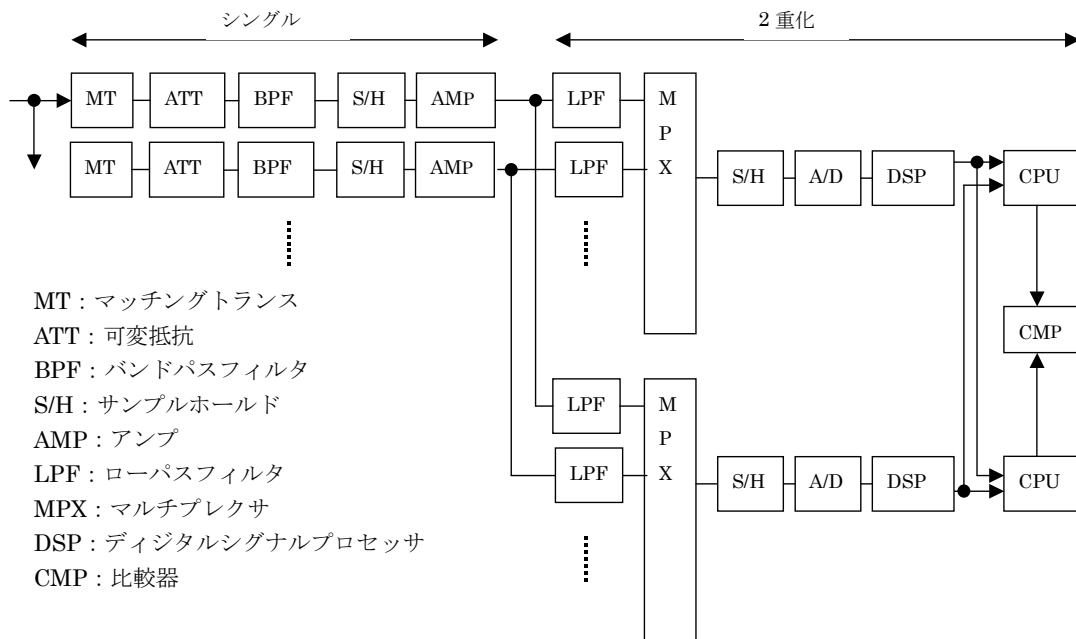


図 6. 3 ATC 信号受信部の機器構成

(4) 外部条件接点の入力

ATC 制御装置がたの装置からの各種条件を入力する接点入力部の基本構成を図 6. 4 に示す．外部条件接点の入力は，制御部のプロセッサ A/B それぞれの系で入力し，結果を比較することで正当性をチェックする．復旧接点を安全側に，動作接点を危険側に割り当て，基本的に動作接点を入力する．入力が”0”となるようにコモンラインを制御し，入力が”1”固定でないことチェックする．また，動作/復旧両接点を入力し，その相反性により安全性をチェックする使用方法も利用できる．

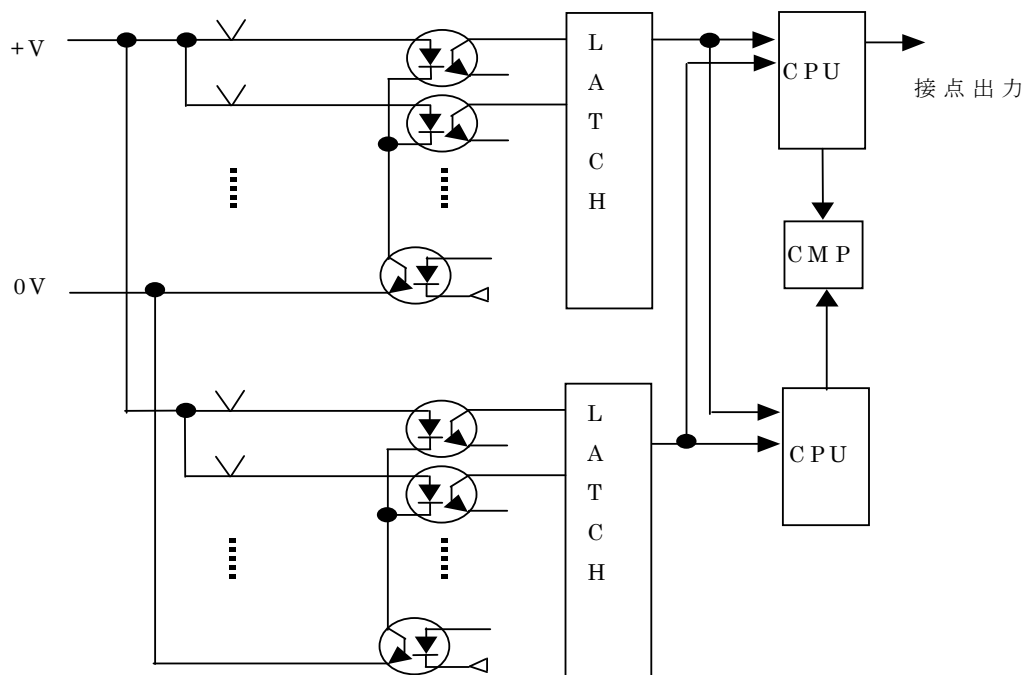


図 6. 4 ATC 信号受信部の機器構成

6. 2 データベースの安全性

デジタル ATC では、線路条件や車両の性能に関するデータを車上で記憶し、地上から送られてくる進路条件、先行列車の位置などの変化情報と組み合わせで安全なブレーキパターンを作成する。したがって、車上データベースのデータ設定と更新が誤りなく行われることは、システムの安全を保証するうえで極めて重要である。

データが安全でない状況としては、以下の場合が想定できる。

- (1) 現実と異なるデータが入力された
- (2) データが一貫性に欠ける
- (3) データが破壊された
- (4) データベースを扱うソフトウェアに誤りがある

上記の課題を解決するために、データに高い冗長性を持たせ、一つのデータを複数の側面からデータ化して、それらのデータ間で合理性チェックを行うことでデータの誤りを検知する方法、データベースを扱うソフトウェアをフォーマルメソッドによって開発することなどを提案した^{(21)・(22)}。具体的には、軌道回路のデータベースに関しては、軌道回路 ID、始端キロ程、終端キロ程のほか

に、軌道回路長やその軌道回路に接続している前後の軌道回路の ID も付加し、それらの相互の関係からデータ入力などの誤りをチェックする方法。また、データのブロック毎にチェックコードを付加し、データ内容の変化や障害を検出する方法などを提案した。また、フォーマルメソッドを使用することで、仕様のあいまいさを排除するとともに、仕様からプログラムコード作成までの作業の一部を自動化でき、信頼性の高いデータベースやソフトウェアの作成が期待できる。

6. 3 まとめ

機器の高信頼化については、処理部、ATC 送信部、受信部などに関して、従来の地上主体制御方式の ATC で使用されてきた安全性技術を採用し、高信頼な機器構成を実現する。

また、車上のデータベースの信頼性に関しては、データに高い冗長性を持たせて一つのデータを複数の側面からデータ化したりするなどしてデータベース上に誤り検出能力を持たせる方法などを提案した。

6. 4 参考文献

- (6.1) 渡辺郁夫, 平尾裕司, 岩田浩司, 信号システムの安全性の定量的評価方法の検討, 鉄道総研報告, Vol.16, No.7, pp27-32, 2002 年 7 月
- (6.2) 福田光芳, 渡辺郁夫, 平尾裕司, 鉄道分野での高信頼性データベースの設計に関する一考察, 電子情報通信学会技術研究報告 FTS97-22, pp41-48, 1997 年 6 月

第7章 結論

7. 1 本研究の成果

本論文は、筆者が実施したデジタル ATC の開発とその高信頼化に関する研究成果をまとめたものである。

主な成果は以下のとおりである。

- (1) 車上主体制御を特徴とするデジタル ATC のシステム構成法を提案し、その構成で従来の地上主体制御方式の ATC の課題を解決できることを示した。
- (2) デジタル ATC を導入することで、列車が停止したり低速で走行する駅ホーム近傍のみ軌道回路を分割したりすることで、理想的な間隔制御である移動閉そくとほぼ同等の運転間隔を実現できることを示した。また、地上主体制御方式の 1 段ブレーキ ATC と比較しても一定条件下で約 6 秒運転間隔を短縮できることを示した。
- (3) 地上からの列車位置検知、及び車上から列車位置検知について、基本的に従来の列車制御で利用されてきた方式が利用できること、絶対位置補正については新たに位置補正用のマーカを設けずに軌道回路境界を利用した方法を提案した。
- (4) 新幹線区間のデジタル ATC 制御情報の伝送に関して、たとえ電源周波数が 1% 変動しても、大きく発生する奇数次高調波を常に避けて、かつ、比較的小さな偶数次高調波が帯域の中心となるように信号帯域設定を行う電源同期 MSK 変復調方式を提案した。また、本方式を使用した伝送速度 84bps の伝送を実現する試作装置を用いて新幹線区間で試験を行い、 1.25×10^{-4} のビット誤り率の伝送品質が得られることを確認した。この伝送品質で ATC システムとして高い安全性、信頼性を確保できることを示した。
- (5) 交流電化区間及び直流電化区間のそれぞれの環境下で安定した ATC 信号の伝送を可能とする信号周波数と信号帯域、軌道回路長、送信電力の設定方法を示した。
- (6) ブレーキ制御については、10km 以上先まで精度よく効率的にブレーキパターンを計算する方法を提案した。また、ブレーキ制御出力については、作成したブレーキパターンに追従できる手法を提案した。現車試験により、提案した制御方法が有効に機能することを確認した。
- (7) 機器の高信頼化については、処理部、ATC 送信部、受信部などに関しては、従来からの地上主体制御方式 ATC で使用してきた安全性技術と同様な構成方法で高信頼な機器構成を実現できることを示し、さらに車上のデータペー

スについては、データベースに冗長性を持たせることで高信頼化を図る手法を示した。

なお、これらの研究成果の多くは、新幹線のデジタル ATC や通勤線のデジタル ATC の基本技術として利用され、今日の鉄道の安全安定輸送を支えている。また、デジタル ATC は、柔軟な列車運行への道を切り開いたものでもあり、更なる鉄道の発展に貢献できると考えている。

なお、今日、鉄道は CBTC (Communication Based Train Control system) などの無線を使った列車制御システムの導入が着目されている。しかし、CBTC の制御原理は、筆者の開発したデジタル ATC と共通するものがあり、これらの先端的列車制御システム全体を包括した概念の構築が可能と考えている。この面での研究も推進したい。

謝辞

本研究は、筆者が長年携わったデジタル ATC の開発と、その主な機能の高信頼化を目的とした研究開発の成果を、日本大学 中村英夫教授のご指導のもとにまとめたものです。ご指導を賜った中村英夫教授に深く感謝いたします。

論文をとりまとめる上で日本大学 泉隆教授に熱心なご指導をいただきました。また、望月寛専任講師からは専門的立場から論文校閲を賜りました。心より感謝申し上げます。

デジタル ATC の開発段階では、鉄道総研電気システム株式会社社長 高重哲夫氏には、共に研究開発に参加いただくと同時に、多くのご指導をいただきました。心より厚く感謝申し上げます。

また、デジタル ATC の研究開発には、公益財団法人鉄道総合技術研究所 福田光芳研究室長をはじめとして多くの研究者に携わっていただきました。参画いただき様々な貢献をしていただいた皆様に、心より感謝申し上げます。

デジタル ATC の試作装置の製作には信号メーカーの関係者に多大なご協力をいただきました。また、性能試験を実施するにあたり JR 各社の関係各位に大いなるご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

論文作成にあたっては、公益財団法人鉄道総合技術研究所 曾我部正道主任研究員にご協力いただいた。心より感謝申し上げます。

公益財団法人鉄道総合技術研究所 理事長 熊谷則道氏には、本論文の執筆の動機づけをいただくとともに、適切な研究環境を整えていただきました。また、公益財団法人鉄道総合技術研究所フェロー 秋田雄志氏（元理事長）には、筆者の長年の研究開発業務において、常に温かくご指導をいただきました。両氏に、心より感謝申し上げます。

著者発表論文等の一覧

1 査読付論文

- ① * Ikuo Watanabe, Tetsuo Takashige, Advanced Automatic Train Protection System, IEEE 44th Vehicular Technology Conference Proceedings, Vol.2, pp1126-1129, 1994.6
- ② 福田光芳, 渡辺郁夫, 寺田夏樹, 嶋添敏之, 奥谷民雄, 要求分析と統合的ライフサイクルコスト評価に基づいた鉄道信号システム構築手法の検討, 電気学会論文誌 D, 125 巻, 7 号, pp681-690, 2005 年 7 月
- ③ * Tetsuo Takashige, Ikuo Watanabe, Mitsuyoshi Fukuda, Natsuki Terada, Development of New Automatic Train Control System for Shinkansen, International Conference on Inter-city Transportation, pp282-289, 2002.11
- ④ * Mitsuyoshi Fukuda, Ikuo Watanabe, Yuji Hirao, Tetsuo Takashige, Norio Tomii, Hiroshi Ikeda, INTEGRATED TRAIN CONTROL SYSTEM BASED ON DIGITAL ATP, World Congress on Railway Research WCRR97, 1997.11
- ⑤ * Ikuo Watanabe, Tetsuo Takashige, Advanced ATP System for Improving Train Traffic Density and Control Efficiency, Transportation Research Record 1314, pp140-146, 1991.6

2 その他発表論文

- ① 高重哲夫, 渡辺郁夫, 軌道回路を利用した移動閉そく, 鉄道総研報告, Vol.2, No.8, pp39-46, 1988年8月
- ② Ikuo Watanabe, Tetsuo Takashige, Moving Block System with Continuous Train Detection Utilizing Train Shunting Impedance of Track Circuit, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Vol.30, No.4, pp190-197, 1989.11
- ③ 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, pp49-54, 1995年1月
- ④ 渡辺郁夫, 福田光芳, 高重哲夫, 機器分散型デジタル ATC の性能試験, 鉄道総研報告, Vol.9, No.11, pp7-12, 1995年11月
- ⑤ 福田光芳, 渡辺郁夫, 牛島康博, 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, pp5-10, 1998年2月
- ⑥ 小澤吉樹, 渡辺郁夫, 奥谷民雄, 犀川潤, 北陸新幹線異周波電源突合せ区間の誘導障害試験, 鉄道総研報告, Vol.12, No.2, pp17-22, 1998年2月
- ⑦ 新井英樹, 渡辺郁夫, 高重哲夫, 犀川潤, 奥谷民雄, 低周波デジタルコード式軌道回路の開発, 鉄道総研報告, Vol.13, No.8, pp21-26, 1999年8月
- ⑧ 高重哲夫, 渡辺郁夫, 福田光芳, 中国高速鉄道用デジタル ATC の開発, 鉄道総研報告, Vol.13, No.8, pp13-20, 1999年8月
- ⑨ 渡辺郁夫, 平尾裕司, 岩田浩司, 信号システムの安全性の定量的評価方法の検討, 鉄道総研報告, Vol.16, No.7, pp27-32, 2002年7月

3 口頭発表

- ① 渡辺郁夫, 高重哲夫, 川久保和雄, 佐々木敏明, 軌道回路の短絡インピーダンス変化による連続列車位置検知, 電気学会電気鉄道研究会 RAT-86-17, pp51-60, 1986年10月
- ② 渡辺郁夫, 高重哲夫, 佐々木敏明, 軌道回路を利用した移動閉そく, 電気学会交通・電気鉄道研究会 TER-88-10, pp31-37, 1988年7月
- ③ 渡辺郁夫, 高重哲夫, 福田光芳, 軌道回路を用いたデジタル伝送に関する一考察, 電気学会交通・電気鉄道研究会 TER-94-26, pp1-7, 1994年9月
- ④ 渡辺郁夫, 高重哲夫, 奥谷民雄, 山本勝巳, 整備新幹線用デジタル ATC の開発, J-Rail 96, 土木学会, pp235-238, 1996年5月
- ⑤ 福田光芳, 渡辺郁夫, 平尾裕司, 鉄道分野での高信頼性データベースの設計に関する一考察, 電子情報通信学会技術研究報告 FTS97-22, pp41-48, 1997年6月
- ⑥ 平尾裕司, 渡辺郁夫, 鉄道信号における安全性技術の展開, 電子情報通信学会技術研究報告 FTS99-71, Vol.99, No.490, pp43-50, 1999年12月
- ⑦ 南京政信, 内田清五, 渡辺郁夫, 山下高賢, 森俊弘, 新幹線1段ブレーキパターン追従制御の現車試験結果, J-Rail 99, 1999年12月
- ⑧ 渡辺郁夫, 平尾裕司, 中村英夫, 鉄道信号システムの安全性技術評価方法に関する考察, 電子情報通信学会 FTS 研究会, Vol.100, No.512, pp61-66, 2000年12月
- ⑨ 真部健一, 渡辺郁夫, 福田光芳, 寺田夏樹, 島添敏之, 奥谷民雄, 電子情報通信学会技術研究報告 DC2004-84, pp5-10, 2004年12月
- ⑩ 渡辺郁夫, 平尾裕司, 鉄道信号の安全性技術動向, 電子情報通信学会総合大会, 2005年3月
- ⑪ 渡辺郁夫, 平尾裕司, 鉄道信号の安全性, 電子情報通信学会安全性研究会, 電子情報通信学会, 2005年6月
- ⑫ 寺田夏樹, 福田光芳, 渡辺郁夫, 奥谷民雄, 整備新幹線向け信号設備の機能仕様の分析, 電気学会交通鉄道研究会 TER-05-41, pp1-4, 005年
- ⑬ 和田貴志, 渡辺郁夫, 瀬戸通夫, 陽田芳博, 信号設備側からみた車両との EMC, 電気学会産業応用部門大会, 2005年6月

- ⑭ 渡辺郁夫, 山本春生, 電気鉄道の” Change “ : 信号技術, 平成 21 年電気学会産業応用部門大会 3-O3-3, ppⅢ125-Ⅲ130, 2009 年 9 月
- ⑮ 渡辺郁夫, 高重哲夫, 直江正直, デジタル軌道回路を利用した統合列車制御, 鉄道サイバネ論文集, pp156-159, 1991 年 8 月

4 その他発表文献等

- ① 渡辺郁夫, 高速化における信号通信の課題, RRR, 第 66 巻, 5 号, pp21-24, 2009 年 5 月
- ② 渡辺郁夫, 高重哲夫, デジタル ATC の情報伝送, 鉄道と電気技術, Vol.6, No.2, pp10-14, 1995 年 2 月
- ③ 渡辺郁夫, 市川和男, VVVF 制御車の高潮波が信号設備へ与える影響, 鉄道と電気技術, Vol.6, No.12, pp29-37, 1995 年 12 月
- ④ 渡辺郁夫, 平尾裕司, 列車制御のフォールトトレランス, 日本信頼性学会誌, Vol.20, No.5, pp318-325, 1998 年 6 月
- ⑤ 渡辺郁夫, 犀川潤, 整備新幹線に適合するデジタル ATC の開発, JREA, Vol.41, No.8, pp25577-25580
- ⑥ 平尾裕司, 渡辺郁夫, 自動運転を可能とする列車制御技術, 自動車技術, 第 52 巻, 第 10 号, pp46-51, 1998 年 10 月
- ⑦ 高重哲夫, 渡辺郁夫, 軌道回路(7), 鉄道と電気技術, Vol.10, No.10, pp63-67, 1999 年 10 月
- ⑧ 渡辺郁夫, 高重哲夫, 軌道回路(11), 鉄道と電気技術, Vol.11, No.2, pp66-70, 2000 年 2 月
- ⑨ 渡辺郁夫, 高重哲夫, 軌道回路(12), 鉄道と電気技術, Vol.11, No.3, pp63-67, 2000 年 3 月
- ⑩ 渡辺郁夫, 高重哲夫, 軌道回路(14), 鉄道と電気技術, Vol.11, No.5, pp60-64, 2000 年 5 月
- ⑪ 渡辺郁夫, ATC (6), 鉄道と電気技術, Vol.16, No.11, p p 74-77, 2005 年 11 月
- ⑫ 渡辺郁夫, ATC (7), 鉄道と電気技術, Vol.16, No.12, p p 87-89, 2005 年 12 月
- ⑬ 渡辺郁夫, 平栗滋人, 岩田浩司, RAMS に基づき信号システムを設計する, RRR, 67 巻, 6 号, pp18-21, 2010 年 6 月

- ⑭ 渡辺郁夫, 平尾裕司, 列車制御システムにおける安全性技術の動向, 電子情報通信学会誌, 86 巻, 4 号, 2003 年
- ⑮ 鉄道と EMC, 電気学会・電気鉄道の電磁環境に関する共同研究委員会編 (4 章 pp155-216 の一部を執筆), オーム社, 2008 年 7 月

付録 1

Advanced Automatic Train Protection System

Ikuo Watanabe, Tetsuo Takashige, Railway Technical Research Institute, Japan

Vehicular Technology Conference, 1994 IEEE 44th

Advanced Automatic Train Protection System

Ikuo Watanabe, Tetsuo Takashige
Railway Technical Research Institute, Japan

Abstract: We present a new automatic train protection system. Such messages as the distance to the preceding train or the speed restriction on switches are transmitted to each train instead of the limit speed set for the train. This is done through the rails using digital codes. An on-board processor generates a braking pattern using these messages and the braking performance. And if the speed exceeds the calculated value, the brake is applied. As this system controls the train speed in one step from full speed to stop, it can shorten the train headway. And it can effectively cope with a mixture of trains with different braking performances.

I. INTRODUCTION

The existing automatic train protection (ATP) system was introduced when the Tokaido shinkansen opened in 1964. Afterward it has been introduced on Yamanote line, Keihin-tohoku line, Saikyo line in Japan railways groups (JR). No serious collisions, and no passenger casualties happened, proving it is a highly safe system.

In the existing ATP, only a speed signal which specifies the maximum speed on each block section is transmitted to an on-board processor through the track circuits. The speed signal is generated by modulating a track circuit carrier frequency at one signal frequency or combination of two signal frequencies corresponding to the limit speed. The on-board processor compares this signal with the train speed. When the former is larger than the latter, the brake is applied automatically. And when the train speed becomes lower than the indicated speed, the brake is released (shown in the upper graph in Fig.1).

The existing ATP has some drawbacks as follows:

- (1) When a train is to be stopped, it must be slowed down below the speed indicated in each block. The driver must repeat applying and releasing the brakes to stop. It gives the riding passengers a discomfort.
- (2) Each block length is appropriately selected with a margin distance and an idle running distance for brakes. These distances are stored. Consequently commercial speed becomes low and train operation density cannot be reduced further.
- (3) When trains with different braking performances are operating on the same track, the block section length is determined by the train with worst performance. This results in trains with superior braking having to slow down earlier than is really necessary. This again reduces line

capacity.

(4) Recently high-speed Shinkansen operation at more than 350km/h is scheduled. However all frequencies of existing ATP signals to be used have already been allocated. This makes it necessary to improve the related equipment so that a new frequency of ATP signal can be allocated to transmit a higher speed signal.

Advanced ATP would correct these drawbacks.

II. ADVANCED ATP SYSTEM

Advanced ATP system is outlined in the lower graph in Fig.1. This figure mainly shows the operation sequence of a succeeding train when it approaches the preceding one. The ground processor detects train positions through track circuits in the normal way. And it transmits to each train a message consisting of the distance to the preceding train, or the start point of a speed restriction such as the platform loop turnout, and a block identification number through track circuits.

The distance signals to the preceding train are transmitted as the number of unblocked sections to minimize the data capacity. The rear limit of a block section occupied by a train is represented in the message as zero unblocked section. The next block section in the rear is No.1, followed by 2, 3 and so on. Each track circuit has its identification number so that the track circuits actually occupied by a train may be identified in the message transmitted to the succeeding train.

The on-board equipment stores the following information as track data: absolute locations (kilometerages from the terminus) of track circuits; sequence of track circuit number; absolute locations of curves and gradients; and sizes and locations of turnouts. The on-board processor detects its own position in the unit of the block section by the transmitted identification number of the track circuit. And it also detects its own position continuously by calculating the covered distance within the block section by a pair of axle rotation detectors. Using a pair of axle rotation detectors can avoid errors due to wheel spin or slide. The calculated position is corrected by comparing the value with one stored in data about the track when the train advances into a track circuit and the carrier frequency for ATP signal changes. The on-board processor generates the braking pattern by combining the transmitted message with its own braking performance and stored data about the track. This is compared with the actual speed. As the two

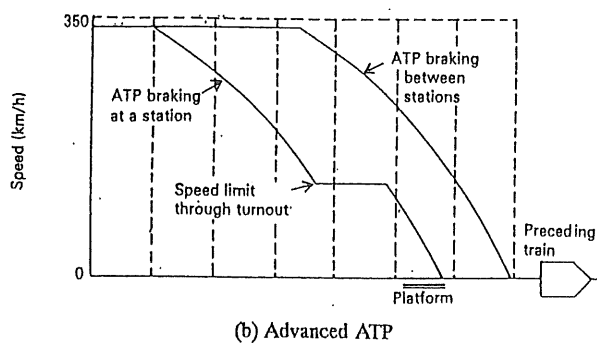
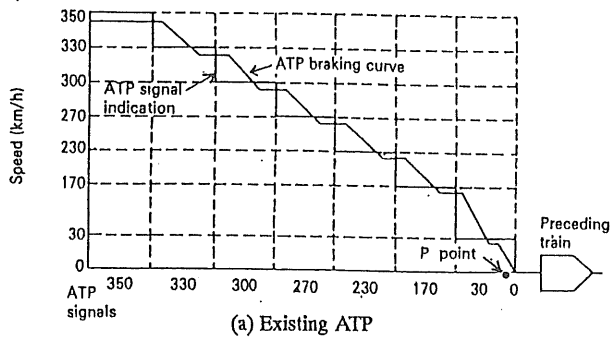


Fig.1 TRAIN OPERATION CURVE FOR ATP

speeds converge, an alarm sounds to alert the driver. When the train speed surpasses the limit speed, the brakes are applied automatically. Present speed, limit speed, distance to the preceding train, and braking curve are all displayed in the cab.

As this system braking controls train speeds in one step from a maximum speed to stopping, it can shorten the train headway and an energy saving operation can be attained by eliminating wasteful braking and acceleration. Other advantages of this system are that the driver gets advance notice of need to brake, the maximum speed can easily be increased, and the on-board processor can perform to suit trains with different braking performances.

III. DATA TRANSMISSION

This is a reliable method using track circuits for transmitting data from wayside to train equipment for controlling the train speed. The transmission lines are very robust because they are constituted of rails. However the traction current may interrupt a normal transmission of data and a large leakage conductance may force track circuit length to be shortened. As track circuits are used to transmit the digital coded message, they must be immune to electromagnetic interference from traction current. The polarities of two pick-up coils for ATP signal are set such that each voltage induced by the signal current is added together and each voltage induced by the traction current is canceled out

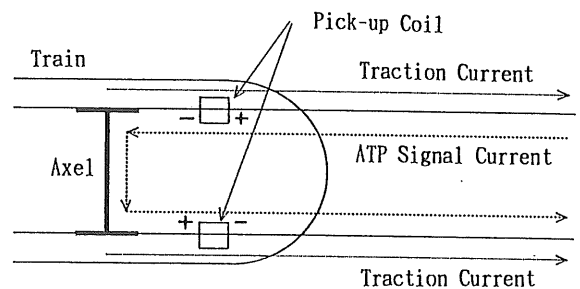


Fig.2 POLARITIES OF PICK-UP COILS

as shown in Fig.2. But when the traction currents flowing on the right and the left rail are unbalanced, an interference of harmonics occurs. The maximum unbalance percentage is about 10%. So the ATP signal bands are selected such that the signal current resists the interference due to the 10% of the harmonics of traction current. On Shinkansen lines, the maximum traction current is about 1000A. The large interference frequencies of traction current are odd harmonics on AC electrified section. In the case of 50Hz, the principal harmonics emerge at intervals of 100Hz - that is, 150, 250, 350 and so on as shown

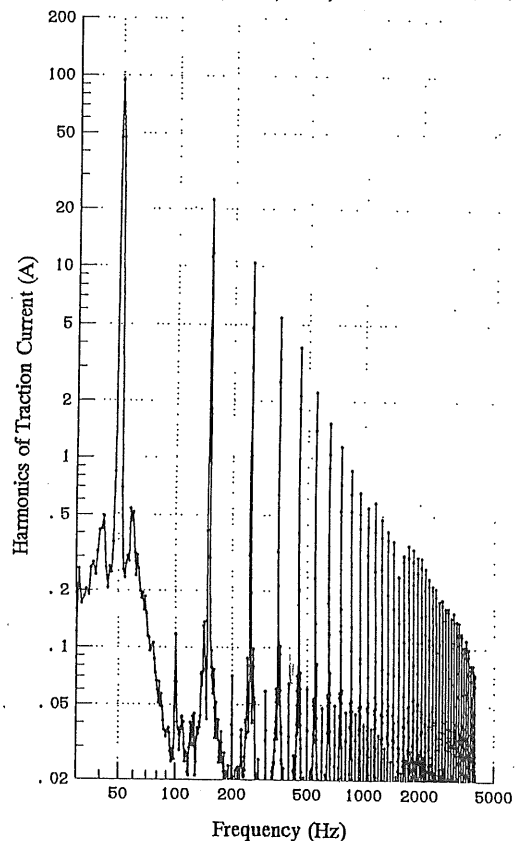


Fig.3 HARMONICS OF TRACTION CURRENT ON AC ELECTRIFIED SECTION

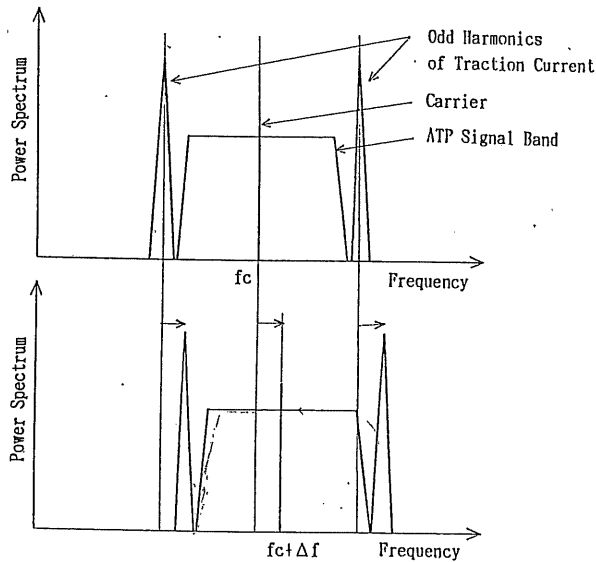


Fig.4 GENERATED CARRIER WAVE

in Fig.3. This figure shows the example of harmonics generated by one of motor units in a train on AC electrified section. It is advantageous to use as high a carrier frequency as possible to transmit data because the harmonics becomes small in higher frequency. On the other hand, data cannot be transmitted to a train over a long distance with a high frequency. So the carrier frequency should have the same band as the existing ATP(700Hz-1200Hz). A minimum shift keying (MSK) system is preferable for this system. MSK achieves a transmission speed which is numerically almost the same as the bandwidth of a receiving filter. Transmission speed is 80bits/s in this case.

The frequency of the traction current changes slightly. Then the frequency of the odd harmonics changes. So the carrier waves for data transmission of wayside processors are generated synchronizing with the wave of the traction current to make it free from the interference due to these

harmonics of traction current (Fig.4).

Transmission items include the track circuit identification number, the number of unblocked sections, and arrival/departure track. For these items, 24 bits are allotted. 8 bits are available for future. 8 bits of cyclic redundancy check (CRC) code are added to this. This means that 40 bits are required in all, but the total is raised to 46 bits when codes for frame transmission are added. These codes are repeatedly transmitted through the track circuits. Transmission can take place 1.7 times/sec.

On the departure tracks of depots, and in station platforms, a large amount of data about the track are transmitted to standing trains. The on-board processor receives and stores the data. Transmission speed through MSK with a carrier frequency of 25 kHz is 4800 bits/s. This frequency to transmit data through track circuits is high. So the transmission range from a transmitting point is about 100m.

Furthermore train-to-wayside transmission through track circuit can be added to realize an effective train control system[1]. Using this function, the wayside processor can get the information as follows; train identification number, train speed, the request by the driver for setting a departure route of a train. Transmission speed through MSK with a carrier frequency of 35 kHz is 4800 bits/s.

IV. ARCHITECTURE

A. Wayside Equipment

When the new ATP is to be superimposed on existing lines to enhance the speed or capacity, the track circuits will continue to be used in their present form for train detection.

On newly constructed lines, a non-insulated track circuits will be adopted. This is a multi-frequency track circuit with the power supplied centrally. Train detection and ATP transmission use their respective frequencies as shown in Fig.5, and ATP signal is transmitted only to the

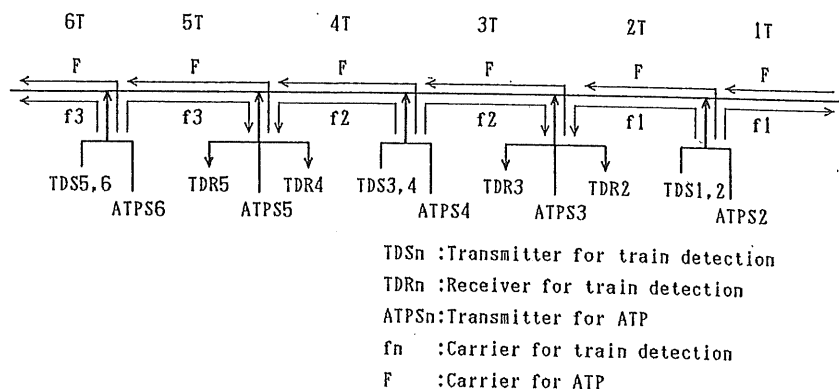


Fig.5 STRUCTURE OF NON-INSULATED TRACK CIRCUIT

TABLE I
SPECIFICATION FOR WAYSIDE

Carrier Frequencies;	
-Train Detection	1000 to 1100Hz
-ATP Signal	1300 to 1500Hz
Modulation Frequencies;	
-Train Detection	12,16.5,21,27,32 and 38.5Hz
-ATP Signal	80 and 120Hz
Receiving Shunt Current	Minimum 100mA
Rail Leakage Conductance	Maximum 0.2S/km
Length of Controlled Section	Maximum 1.5km
Equipment Concentration Range	30 to 40km (Maximum Cable Length 20km)

block section occupied by a train. The carrier for train detection leaks into the adjacent track circuits. It would be unsafe to judge that there is no train in a block section even when a train occupies the block section because of this overreaching. So track circuits with the same frequencies should be separated from each other with an interval of more than 10 track circuits. The specifications for the wayside equipment are given in Table I.

The safety of microcomputers at wayside equipment is assured by a clock synchronous system[2]. It has been extensively adopted for conventional ATP and solid state interlockings. The microcomputer systems will be duplex to ensure reliability.

B. On-board Equipment

The microcomputer will be used for the on-board processor. The approach to safety is the same as the wayside equipment, and the on-board equipment will also be made duplex to ensure reliability.

A block diagram of the on-board equipment is shown in Fig. 6. ATP signals and track data are picked up by the two coils at the front end of a train. Using a braking pattern generator, braking curves are calculated from output data

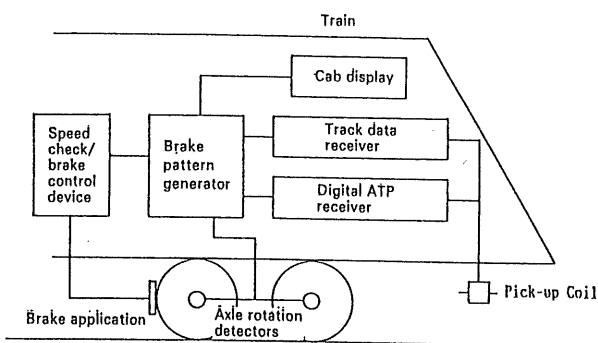


Fig.6 BLOCK DIAGRAM OF ON-BOARD PROCESSOR

of the receiver, present train location and stored data about track. Through the speed check/brake control device, the present train speed and limit speed are compared to control the brake. These speeds are displayed in the cab for the driver.

V. TESTING

We are developing this new ATP system as an ATP for Shinkansen which will replace the existing ATP. Furthermore, with minor modifications, this new ATP system can be adopted for inter-city and busy commuter lines. In this system, the key technology is the wayside-to-train transmission using digital codes through track circuit. For these reasons, field tests for grasping the properties of the transmission have been implemented in cooperation with JR East and JR Hokkaido on various lines; Shinkansen lines, commuter line on a DC electrified section, and inter-city lines on AC electrified sections. The field tests confirmed that the basic functions work stably.

The prototype wayside and on-board equipment were manufactured in 1993. In 1994 the performance of this ATP will be confirmed on an inter-city line on AC electrified section in cooperation with JR Hokkaido.

VI. CONCLUDING REMARKS

We present a new ATP system which would correct the drawbacks of the existing ATP. This system will improve the intelligence of train equipment by giving it a large amount of data for controlling the train. And it can be adapted to any lines at reasonable cost because it makes effective use of the existing track circuits.

VII. REFERENCES

- [1] M.Naoe,K.Kimizuka, "Bidirectional transmission using track circuits for controlling trains", *Railway Technical Research Institute Report*, Vol.2, No.8, Aug 1988.
- [2] K.Akita,T.Watanabe,H.Nakamura,I.Okumura, "Computerized interlocking system for railway signaling control : SMILE", *IEEE Trans. on IA*, Vol.IA-32, No.4, May/June 1985.

付録 2

Development of Digital ATC System

Ikuo Watanabe, Mitsuyoshi FUKUDA, Yasuhiro USHIJIMA, Tetsuo TAKASHIGE,
Signalling Systems G., Transport Systems Development Div.,
Technical Development Dept.

QR of RTRI, Vol.40, No.1, Mar.'99

Development of Digital ATC System

Ikuo WATANABE
Senior Engineer

Mitsuyoshi FUKUDA
Engineer

Yasuhiro USHIJIMA
Engineer

Tetsuo TAKASHIGE
Chief Engineer

Signalling Systems G.,
Transport Systems Development Div.,
Technological Development Dept.

We are developing a Digital ATC system, in which the ground equipment detects train location by using track circuits and transmits digital coded data through track circuits. Transmission items include the track circuit identification number, the number of unblocked sections, and other data required for train operation. The on-board equipment generates a one-step braking profile using an on-board database, the data received through track circuits, and its own position detected by the integration of axle rotation. We have carried out field tests on the Kagoshima line of JR Kyushu. We verified that the Digital ATC system functions as originally designed.

Keywords : ATC, track circuit, brake control

1. Introduction

The existing system of automatic train control (ATC) was introduced when the Tokaido Shinkansen was opened in 1964. There have been no serious accidents which proves the effectiveness of the high-level safety features of the system. But there are some matters to be improved in order to increase the train traffic volume, and reduce traveling time to destinations. We proposed the Digital ATC system for the next generation ATC, and have been studying its performance and safety features in order to improve these matters^{1), 2)}. The on-board equipment of the Digital ATC system is intelligent to effectively cope with various requirements. We present the operating principle of the system, performance test results of prototype equipment and evaluation of system safety.

2. Digital ATC system

2.1 Operating principle of system

The Digital ATC system is outlined in Fig.1. The ground equipment detects the train position using the track circuits in the normal way, and transmits digital coded data to each train through track circuits. The transmission items include the track circuit identification number, the distance to the preceding train, the arrival or departure track, temporary speed restrictions and other data. The distance to the preceding train is expressed as the number of unblocked track circuits in order to minimize the required data capacity. The rear adjacent section of the track circuit occupied by a train is represented in the data as zero unblocked sections. The next track circuit in the rear is 1, followed by 2, 3 and so on.

The on-board equipment detects its own position in the unit of the track circuit length by the received data. It

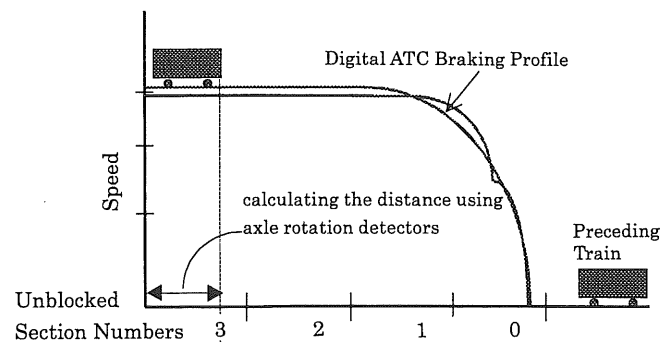


Fig. 1 Outline of Digital ATC

detects its own position continuously by calculating the running distance within each track section using axle rotation. The calculated position is adjusted after being compared with that stored in the database when the train advances into a track circuit and the carrier frequency of ATC signal changes.

The on-board equipment has a braking performance database. It also has a track database concerning track circuits, gradients, curves and turnouts. It receives the data transmitted from ground equipment through a pair of pickup coils at the front end of the train and generates braking profiles using received data and stored data. The three kinds of braking profiles (the emergency braking profile, service braking profile, braking profile for display) are generated. When the train speed exceeds the service braking profile, a lenient brake is applied for several seconds and then the maximum service brake. The service braking profile is generated by using the deceleration, margin distance for braking, response time of braking, gradient and so on. The emergency braking profile is generated using the other values for the same parameters. As the larger deceleration and the smaller margin distance for braking are used in order to generate the emergency braking profile, the

emergency brake is not normally applied. The braking profile for display is generated at a speed of about 5 km/h lower than that for the service brake. It is displayed on a panel in the cab. The brake is not applied while the driver controls the train speed according to the displayed braking profile. As the train speed approaches the service braking profile, an alarm sounds to alert the driver.

2.2 Features of system

The features of Digital ATC are as follows:

- (1) A highly safe and reliable system is realized by using track circuits for detecting train location and transmitting control data.
- (2) Safe data transmission is secured by checking the track circuit identification number and CRC code.
- (3) The on-board equipment can cope with trains with different braking performance.
- (4) The maximum train speed can easily be increased.
- (5) The driver can get an advance notice for braking.
- (6) The system can increase the train traffic volume without dividing the track circuit and shorten the train operation time to the destination because it controls the train speed to the target speed by a one-step braking profile.

2.3 Data transmission

In the existing ATC system, the ground transmitters modulate the track circuit carrier frequency by the signal frequency corresponding to the limited speed. If the traction current includes harmonic noises corresponding to another speed signal, the on-board ATC signal receiver may mistake in deciphering the speed signal. However, the system adopts a priority logic to take lower speeds over higher ones to secure safety.

In Digital ATC, dozens of coded data added with 8-bit CRC codes are used. The check codes can detect 3-bit errors, all odd bits errors and all burst errors less than 8 bits. In addition, the validity of the track circuit identification number is checked. So it is improbable that the on-board receiver mistakes noise for a speed signal.

2.4 Train locating

In Digital ATC, the on-board equipment detects its own position in the unit of the track circuit lengths by the received data. It detects its own position continuously by calculating the running distance within each track section using axle rotation. The calculated position is corrected after compared with that stored in the database when the train advances into a track circuit and the ATC carrier frequency changes in insulated track circuits. In non-insulated track circuits, the on-board equipment can detect the boundaries between track circuits by the following steps.

- (1) In Fig. 2, the track circuit No.2 detects the approaching train before it arrives at the point A.
- (2) The transmitter No.2 transmits the ATC signal and the transmitter No.1 transmits the TD (train detection) signal. The on-board equipment receives these two signals.
- (3) When the train passes the transmitting point A, the on-

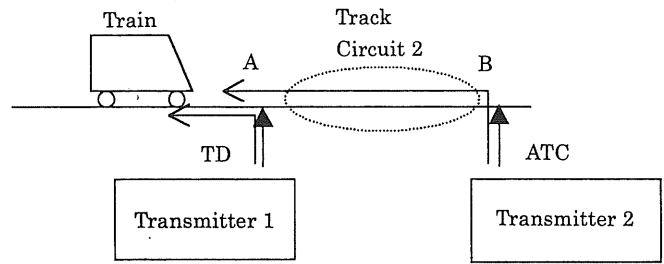


Fig. 2 Correction of train locating

board receiver does not receive the TD signal and it can detect the point A.

3. Performance test

3.1 Outline of test

We tested the Digital ATC system using prototype equipment on the Kagoshima Line of JR Kyushu. Digital ATC signals are overlaid with the three existing divided/multiple frequency track circuits on the down track between Hainuzuka and Setaka stations as shown in Fig.3. The band-pass-filters, called bypass-bonds, were attached at the ends of track circuits in order to pass only the Digital ATC signal to the neighboring track circuit. So the track circuit condition was similar to that of non-insulated track cir-

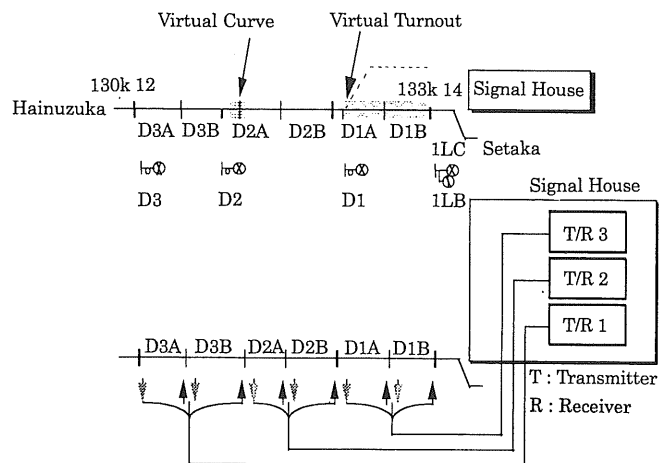


Fig. 3 Digital ATC ground equipment

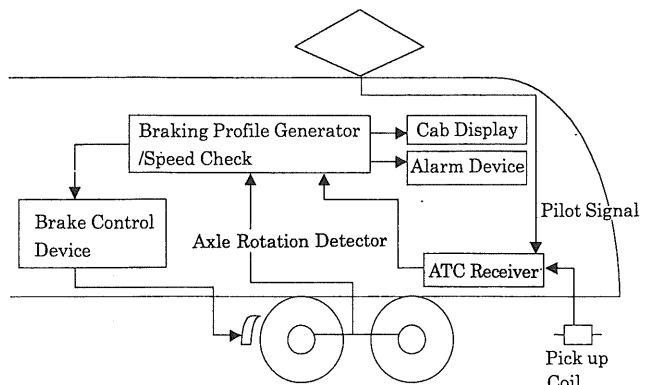


Fig. 4 On-board equipment

Table 1 Test phase

Test Phase	Running Time	Car Type	Position of On-board Equipment
1	107	783	Under Floor
2	72	813	On Floor
3	35	783	On Floor

cuits. The six Digital ATC track circuits were overlaid on the test section.

The on-board equipment is shown in Fig. 4. The receiver inputs the ATC signal through the pickup coils and inputs the pilot signal from the train main control line. It outputs braking commands through the brake interface control unit.

The tests were implemented from 1995 to 1996. The test phases were divided into the three as shown in Table 1. The test trains ran on the test section more than 200 times. We verified the performance with respect to the digital coded data transmission, train location detection, braking control, the response when the equipment was purposely broken down and other functions.

3.2 Data transmission characteristics

We measured the digital coded data transmission characteristics using track circuits when the test trains ran on the test section. The frame error rates are shown in Fig. 5. The errors necessarily occur at the ends of track circuits, bypass-bonds and sectioning devices. The error rates except these necessary errors are indicated in Fig.5. The error rate in the phase one is larger than that in the phase three while the same train was used for both tests with a different space between receivers. This result means that, in addition to the traction current, noises reached directly from various equipment affects the error rate. Smaller error rates ($10^{-4} \sim 10^{-5}$) were gained by other similar tests. So, if the interconnection between the pickup coils and the receiver is completely shielded, and the receiver is set in a less noise circumstance, a smaller error rate (1.0×10^{-3}) can be realized.

The longest error time is 1.7 sec. In the Digital ATC system, the on-board equipment receives in advance the information concerning the distance to the target point where the train shall stop or decrease its speed, so stable train speed control can be maintained irrespective of momentary disconnection of the control data. When it can not continuously detect the carrier wave for more than a second, or it can not continuously receive the data for more than six frames, it judges that it can not receive the ATC signal and applies the brake. During the test, cases of missing a signal did not occur.

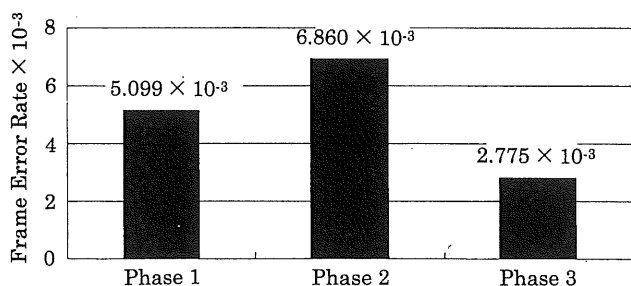


Fig. 5 Frame error rate

We consider the rate of unsuccessful data reception. If it is assumed that the frame error rate is 2.78×10^{-3} which is the value in the phase three ; the number of track circuits to pass are 2000 ; the number of trains are 500, the rate of unsuccessful data reception is 8.23×10^{-7} /day and the mean time before failure is 3330 years at the end of the track circuits. It is 1.15×10^{-8} /day at places other than track circuit boundaries. This result indicates that stable digital data transmission through the track circuits can be realized.

3.3 Train locating performance

The characteristics of train location detection were examined by comparing the detected location with the measured value when the test train stopped in the test section. The result is presented in Fig. 6: The error in Fig. 6 indicates the value subtracting the measured value from the one detected by the on-board equipment. The calculating position is corrected every time the train advances into the next track circuit. The error corrected once is between -10m and +5m. The target point is set at dozens of meters before the end of the track circuit. So the result indicates that these errors are small enough for securing the safety train control.

3.4 Brake control performance

The brake control performance was tested. The Digital ATC activated the brake when the train speed exceeded the allowable speed of the braking profiles generated by the

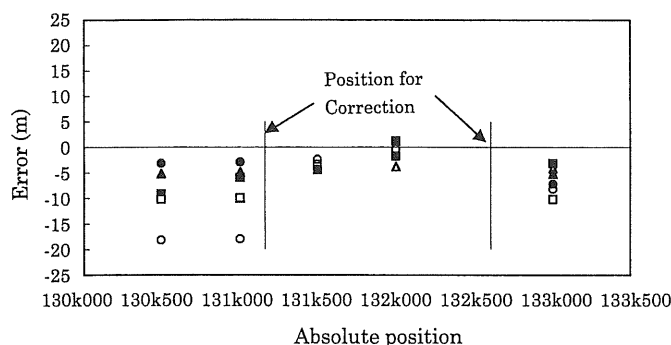


Fig. 6 Error in train locating

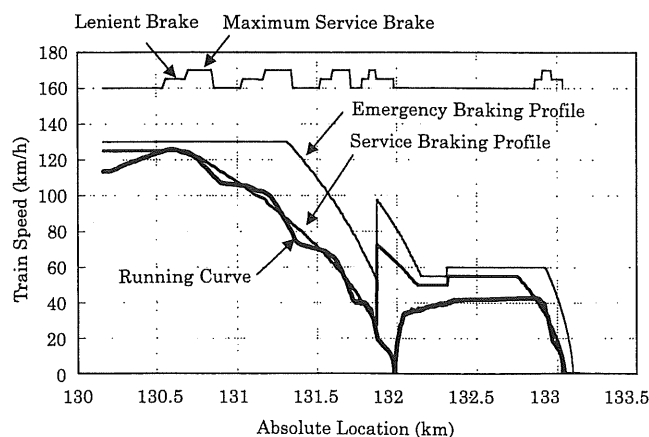


Fig. 7 Sample of generated braking profile and running curve

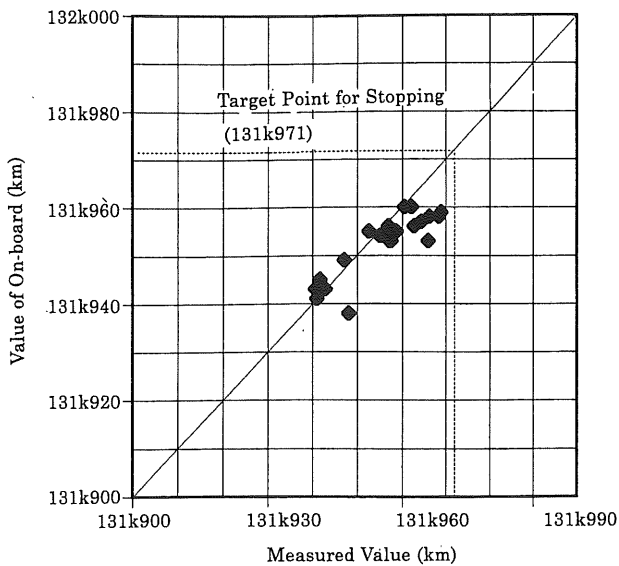


Fig. 8 Distribution of train stopping points

Table 2 Test results when equipment break down

Ground Equipment		On-board Equipment	
Test Item	Result	Test Item	Result
Power Supply Off	Stop by Service Brake	Power Supply Off	Stop by Emergency Brake
Pilot Signal Off	Stop by Service Brake	Out of order Brake of Service	Stop by Emergency Brake

virtual proceeding train. The margin distance was set at 90m for service brake, and at 40m for emergency brake considering the boundary train detecting characteristics of the non-insulated track circuits. It constitutes a stable speed control, if the Digital ATC controls the train speed without applying the emergency brake.

Samples of generated braking profiles and running curve are shown in Fig. 7. The distribution of train stopping points in the braking test is shown in Fig.8. Train speeds over the braking profiles were set at various values (30km/h-125km/h). Every train was steadily controlled without emergency brake application. Train stopping positions distribute from 0m to 30m before the stopping target point. The tests were also implemented so that the train speed was controlled by the virtual speed restrictions on turnouts or curves. We could gain satisfactory results.

3.5 Performance when equipment break down

We verified the control performance of the system when the ground or the on-board equipment break down. The test items and its results are shown in Table 2. The Digital ATC could satisfactory control the brake in all cases.

4. Safety of Digital ATC

4.1 Safety of system

It was confirmed that the Digital ATC system could function as a train control and protection system in more

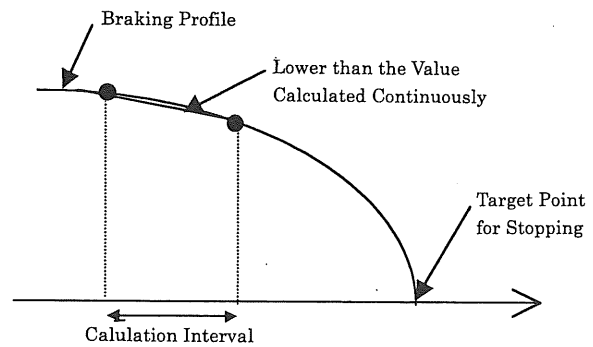


Fig. 9 Errors in calculation of braking profile

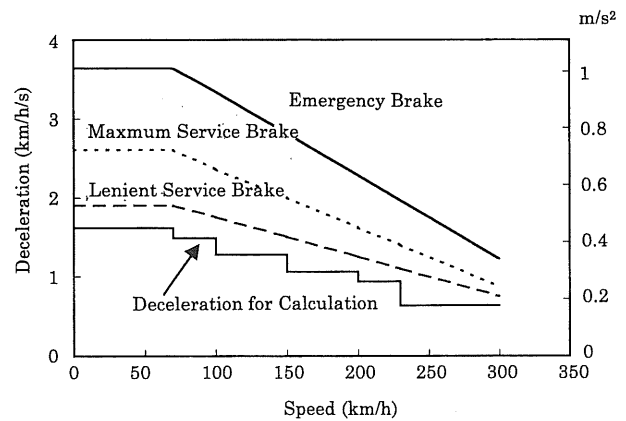


Fig. 10 Deceleration used in simulation

than 200 train running tests. Now we are testing the performance at higher speed on the Sanyo Shinkansen line.

Now, we verify the safety of the Digital ATC system.

With regard to data transmission, it is improbable in the Digital ATC system that on-board receiver deciphers data for others caused by noises, as shown in Section 2.3. With regard to hardware, key safety measures used for train control and protection systems are redundant configurations, control of input and output methods, and error detection and consequent actions. These measures are also adopted for the Digital ATC system.

The calculation results of braking profiles, the value of deceleration set and the train location detection include errors. We verify the effects of these errors on safety.

(1) Errors in the braking profiles

The braking profile is discretely calculated between the stopping target point and the train location. Errors in the calculation result are always lower (on the safe side) as shown in Fig.10.

(2) Errors in the value of deceleration set

The actual deceleration fluctuates caused by changes in the adhesion coefficient between rail and wheel, brake cylinder pressure, response time of the equipment and other factors. So, the deceleration for calculating a braking profile is set smaller than that of the braking performance specification. Discrete values are allotted to each speed stage.

The train response was simulated in the case where the actual deceleration is smaller than that used for calculating braking profiles. The deceleration used in this simulation is shown in Fig. 10. The initial speeds were set to 100km/h, 200km/h and 300km/h. The actual deceleration was

Table 3 Train stopping location when deceleration is smaller

Rate of Deceleration to Specification	Distance over Target Point for Stopping		
	100 km/h	200 km/h	300 km/h
85%	—	—	—
80%	9m	—	—
75%	11m	11m	—
70%	18m	17m	17m
65%	42m	41m	42m
60%	51m *	51m *	42m *

— : stop before target point for stopping
 * : stop by emergency brake

changed from 85% to 60% of the specification values. The result is shown in Table 3. The distances over the target point are indicated in the Table. The symbol “-” indicates that the train stops before the target point. The symbol “*” indicates that the train stops by the emergency brake. It was assumed that the actual emergency braking deceleration is 85% of the specification. The margin distance for stopping is 50m.

The result indicates that the trains can be safely controlled by the service brake while the actual braking deceleration is larger than 65% of the specification.

(3) Errors in the train location detection

Error in the train location detection caused by the error of wheel diameter set, wheel spins, wheel slips, errors in correcting the train position at the boundary of track circuit and so on. Errors can be smaller to detect the train position using plural axle rotation detectors, or combining it with other sensors.

4.2 Safety of software

In the Digital ATC system, various processes are executed by software. So we must adopt some reliable methods for calculating the braking profiles. It is under review that some formal methods are applied to developing software³⁾.

With regard to the databases of on-board equipment, it is under review that false data and mistaken operations are excluded by checking various validation conditions. With regard to programs, it is now being reviewed that specifications and algorithms are noted in the formal specification language in order to prevent mistakes. Now we are studying to note the braking profiles in the formal language and verify the specification.

5. Concluding remarks

We have verified digital coded transmission through track circuits, train location detection, brake control performance of Digital ATC using prototype equipment. It was confirmed that the basic functions added with the function corresponding to non-insulated track circuits could be realized. We are now implementing a test on a higher speed line and are verifying safety to realize a practical system of Digital ATC.

Lastly, we thank the members of JR Kyushyu, JR West, and Japan Railway Construction Public Co. who have kindly provided their cooperation for these tests.

References

- 1) Takashige, T., Watanabe, I.: “Development of Digital ATC for High Speed and High Density Lines”, RTRI REPORT(in Japanese), Vol.9, No.1, pp.49-54, 1995.1
- 2) Watanabe, I., Fukuda, M., Takashige, T.: “Field Test of Distributed Digital ATC for Its Performance”, RTRI REPORT(in Japanese), Vol.9, No.11, pp.7-12, 1995.11
- 3) Fukuda, M., Watanabe, I., Hirao, Y.: “The Design of the High Reliability Database in the Railway”, IEICE Technical Rep. FTS97-22(in Japanese), Vol.97, No.98, pp.41-48, 1997.6

付録 3

山陽新幹線におけるデジタル ATC 性能試験

渡辺 郁夫 高重 哲夫 志田 洋

小林 巧 内田 清五 音無 隆 屑川 潤

鉄道総研報告 Vol.14, No.2, 2000.2

山陽新幹線におけるデジタルATC性能試験

渡辺 郁夫* 高重 哲夫* 志田 洋*
 小林 巧* 内田 清五**
 音無 隆+ 犀川 潤++

Performance Tests of Digital ATC on Sanyo Shinkansen

Ikuo WATANABE Tetsuo TAKASHIGE Hiroshi SHIDA
 Takumi KOBAYASHI Seigo UCHIDA
 Takashi OTONASHI Jun SAIKAWA

We are developing a Digital ATC system, in which the ground equipment detects train location by using track circuits and transmits digital coded data through track circuits. Transmission items include the track circuit identification number, the number of unblocked sections, and other data required for train operation. The on-board equipment generates a one-step braking profile using an on-board database, the data received through track circuits, and its own position detected by the integration of axle rotation. We have carried out field tests on the Sanyo Shinkansen line of JR West. We verified that the Digital ATC system functions as originally designed.

キーワード：デジタルATC，軌道回路，電源同期MSK，1段ブレーキ制御

1 はじめに

現在の新幹線ATCは基本的に1964年の東海道新幹線開業時に開発されたものである。これまで列車追突等の重大事故はなく、また、ダイヤどおりの正確な列車運行の実績などから、極めて安全性、信頼性の高いシステムといえる。しかしながら、現在のATCで今以上の運転時隔や到達時間の短縮を実現することは、軌道回路の分割や車両の性能向上などが必要となり、容易には実現できない状況にある。また、地上側で予め定めた閉そくやATC現示で列車を制御するため、同一性能の列車が走行するのに適したシステムであり、いろいろな性能の列車が走行する場合には効率よい制御が難しいことも指摘されている。

このような背景から、筆者らは地上装置と車上装置に適切に機能分担し、1段ブレーキで制御するデジタル

ATCを提案、検討してきた^{1)~5)}。デジタルATCは、地上から車上へのATC信号として先行列車の在線する軌道回路境界までの距離を符号で伝送し、車上では列車のブレーキ性能や線路データを加味して、1段ブレーキ制御するシステムである。適当な信号周波数を選択すれば新幹線から通勤線まで広く適用可能なシステムである。

本報告では、新幹線に適用できるデジタルATCの性能を確認するため、山陽新幹線において性能試験を実施したので、その結果を報告する。

2 デジタルATCシステム概要

2.1 基本仕様

2.1.1 動作概要

デジタルATCの動作原理を図1に示す。地上装置では列車の位置検知は軌道回路単位に行う。車上でもATCデータの中に含まれる軌道回路の固有番号（軌道回路ID）で自列車の位置を軌道回路単位に検知し、さらに軌道回路内方の進入距離を車輪回転等から積算し、線区全体で連続位置検知を行う。

地上から車上へは、軌道回路ID、先行列車がいる区間までの区間数（開通区間数）、駅の到着または出発番線、臨時速度制限に関するデータ等を伝送する。これらATC

* 技術開発事業本部 輸送システム開発推進部（信号）
 (Tel: NTT 042-573-7325 JR 053-7325)
 ** 技術開発事業本部 車両技術開発事業部（ブレーキ制御）
 (Tel: NTT 042-573-7286 JR 053-7286)
 + 西日本旅客鉄道株式会社 技術開発推進部
 (Tel: NTT 06-6375-8924 JR 071-5096)
 ++ 日本鉄道建設公団 電気部 信号通信課
 (Tel: NTT 03-3560-1858 JR 057-3732)

データにチェックビットおよびフレーム先頭フラグを付加し、1フレームは約50ビットで構成する。

前方軌道回路に列車在線を検知したとき、あるいは進路が設定されていないときは開通区間数を“0”とし、その後方軌道回路には前方軌道回路の開通区間数に“+1”したATC情報を送信する。車上装置は軌道回路毎の始点、終点キロ程、曲線制限、勾配データ等の線路データを記憶しておき、ATC信号で送られてきた軌道回路IDと開通区間数から停止すべき位置あるいは速度制限すべき位置までの距離を求め、さらに勾配、ブレーキ性能を加味してブレーキパターンを発生するとともに、車内に表示する。

ブレーキパターンは非常ブレーキパターン、常用ブレーキパターン、表示ブレーキパターンの3種類が用意されている。列車速度が常用ブレーキパターンを超過したとき常用ブレーキが動作する。はじめの数秒は弱めのブレーキが動作し、その後強めのブレーキが作動する。常用ブレーキパターンは、この強弱の減速度、停止余裕距離、ブレーキ制御遅れ時間、勾配等を考慮して作成する。非常ブレーキパターンも、常用ブレーキパターンとは別に設定された減速度、停止余裕距離、ブレーキ制御遅れ時間を用いて作成する。非常ブレーキパターンは、常用ブレーキパターンより大きな減速度と小さな余裕距離で作成するので、平常の運転ではこのブレーキパターンを列車速度が超えることはない。何らかの理由でこのパターンを列車速度が超過し、一旦非常ブレーキが動作すると、停止するまでブレーキは緩解しない。表示ブレーキパターンは、常用ブレーキパターンより一定速度低く作成する。運転台にはこの速度のみが表示される。このため、表示ブレーキパターンにしたがって運転している間はブレーキが作動しない。

列車速度がブレーキパターンに接近すると、警報音が鳴動する。現在の速度、加速度から常用ブレーキパターンとクロスする数秒前を予測して警報を出力するように設定する。

2.1.2 電気的性能

山陽新幹線で試験を実施したデジタルATCの主な

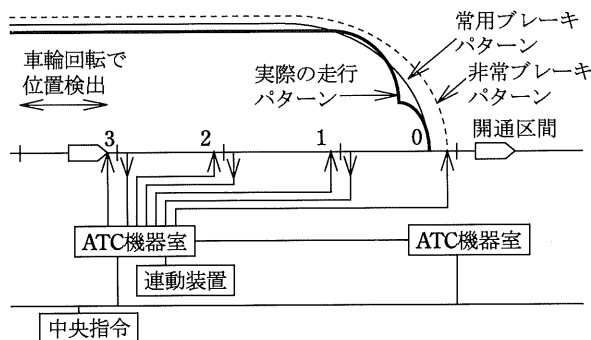


図1 デジタルATCの動作原理

表1 主な電気性能

(a) 通信方法	電源同期MSK
(b) 搬送波/変調周波数	480Hz±21Hz
(c) 伝送速度	84bps
(d) フレーム構成 フレーム長(48bit)	但し先頭フラグは除いたCRCを含むデータに連続4個の“1”毎に“0”を挿入 ・フラグ(6bit): “111110” ・データ(34bit): 線区番号(2bit), 駅番号(5bit), 軌道回路ID(7bit), 構内/中間(1bit), A線/B線(1bit), 開通区間数(5bit), 到着番線(3bit), 制限速度(2bit), 制限までの開通区間数(5bit), 予備(2bit), 非常停止(1bit) ・CRC(8bit): 多項式 $x^8+x^6+x^3+x^2+x+1$
(e) 軌道回路方式	有絶縁AF軌道回路
(f) 軌道回路長	1200m
(g) 漏れコンダクタンス	0.35S/km
(h) 機器室間距離	40km

電気性能を表1に示す。列車検知に関しては従来と同様の機能なので、試験機器構成の制約から現行ATCからその情報を入力する方式とした。ATC信号周波数、送信電力の決定には、最大軌道回路長、機器室間隔(ケーブル長)、最大漏れコンダクタンス等の条件を考慮しなければならない。また、現行ATCとの混在使用や、現行ATCからの移行を考慮すると、現在使用している周波数700Hz~1200Hz帯は使用できない。そこで現行ATCの周波数より低く、電車電流に大きく含まれる電源の奇数次高調波420Hz, 540Hzを避けた480Hzの搬送波を使用することとした。この条件で新幹線が走行する際に発生する電車電流等の高調波ノイズ環境のもとで安定した動作を保証する必要がある。デジタルATCで採用する変復調方式MSKにおいて安定した変復調を行うためには、使用帯域内で12dB程度のS/Nが必要とされる。図2に山陽新幹線のこの周波数帯におけるノイズ発生量の測定結果を示す。この測定はコンバータ/インバータ制御新幹線の力行時の受電器で受信されるノイズをレール電流換算したものである。図2より420Hz, 540Hzの奇数次高調波でそれぞれ110mA, 60mA, 使用帯域内では約40mAであった。帯域内のノイズに対して12dBのS/Nを確保するためには、2倍の余裕を考慮して、

$$40(\text{mA}) \times 12\text{dB} \times 2 = 320(\text{mA}) \dots (1)$$

のATC短絡電流が必要となる。そこで、軌道回路長1.2km, 漏れコンダクタンス0.3S/kmの条件で、短絡電流をどの程度確保できるかのシミュレーションを実施した。結果を図3に示す。図3よりケーブル長20kmで軌道回路長1.2kmまで十分な短絡電流を確保するためには送信電力が20Wあれば十分であることがわかる。また、ケーブル長10kmでは現行のATCの送信電力10Wで十

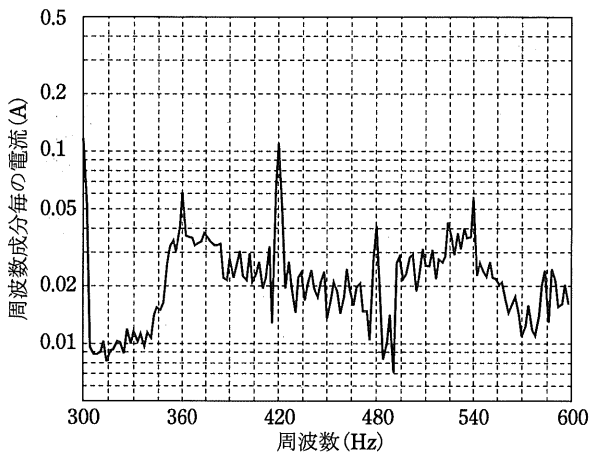


図2 使用周波数帯のノイズ

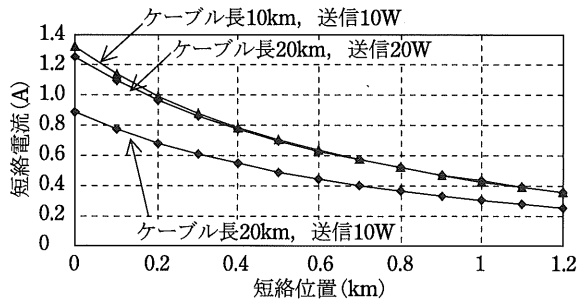


図3 短絡電流の計算結果

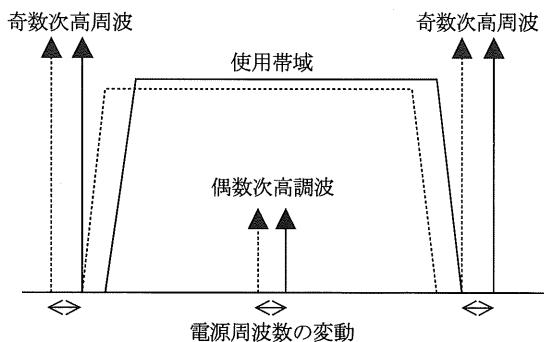


図4 電源同期MSKの使用周波数の設定

分な短絡電流の確保が可能である。

MSK変復調で安定した伝送を行うためには、S/Nの確保とともに必要な帯域の確保が重要である。しかし420Hzや540Hzの奇数次高調波は避けなければならない。そこで図4に示すように、電源周波数が変動しても使用帯域を必ず偶数次高調波である480Hzが中心にくるように、また奇数次高調波は避ける電源同期MSKを採用する。この方式を採用することで、一般にいわれている周波数変動1%の条件では約10Hzほど帯域を広く確保できる。

2.2 本方式の特徴

デジタルATCの特徴を以下に示す。

①従来どおり軌道回路を用いて列車検知，地上一車上传送を行うため，現行ATCと同様の高い安全性，信頼性が得られる。

②車上へは軌道回路ID，CRCが付加されたコードによる信号が伝送されるので，従来のATCのような信号波の有無のみによる方式より安全性が向上する。

③先行列車までの距離等多くの情報が車上に伝送され，また，線路データや車両性能データを車上で管理して，車上のインテリジェント化が図られることにより，

- ・ブレーキ性能の異なる列車が走行する場合にも効率よい列車制御が可能である。

- ・連続するブレーキにより乗り心地が改善される。

- ・速度向上に対して信号設備の変更が少ない。

- ・ATCブレーキ作動開始点等の運転に有効な予告情報が運転士に表示できる。

- ・ナビゲーション機能が付加できる。

④一段ブレーキ制御により，運転時隔，到達時間が短縮される。

⑤短い運転時隔を確保するために，軌道回路を細分化する必要がない。したがって，ATC受信器数やケーブル敷設量も従来のATCに比較して少なく，経済性にすぐれている。

3 性能試験

3.1 試験概要および試験機器仮設

地上の試験区間は，JR西日本山陽新幹線小倉～博多間の下り線の10軌道回路で，軌道回路長は450m～1187mである。最大ケーブル長は約6km，送信電力は10Wである。

試験の地上機器構成を図5，車上機器構成を図6に示す。図5に示すように，地上では現行ATCとデジタルATCの相互干渉をなくすために，現行ATCの送信側にハイパスフィルタ（HPF），デジタルATC側にはローパスフィルタ（LPF）を挿入した。これらのフィルタの挿入による損失は1～3dB程度であった。この構成でATC信号を安定に送信するために必要な短絡電流320mAは確保できている。試験車両は100系を使用した。受電器からのATC信号は，検査用のコネクタから高抵抗，絶縁アンプを介して入力した。ブレーキ制御は，1，ノッチから7ノッチまでであるブレーキ制御指令線を現行ATCとデジタルATCの強いブレーキを優先して制御する構成とした。したがってブレーキ制御試験のときは，現行ATCの現示は試験区間全域で最高現示230km/hとなっている。

4つのフェーズに分けて試験を実施した。地上一車上のデジタル符号伝送のみの伝送試験，仮想の先行列車

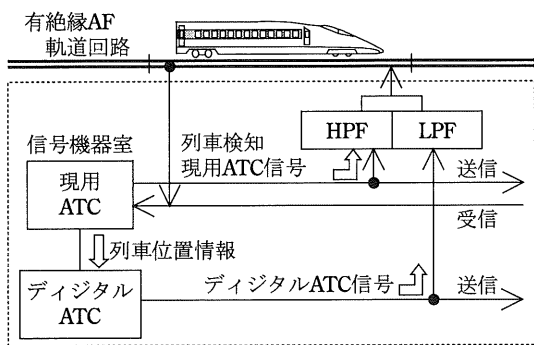


図5 デジタルATC性能試験地上機器構成

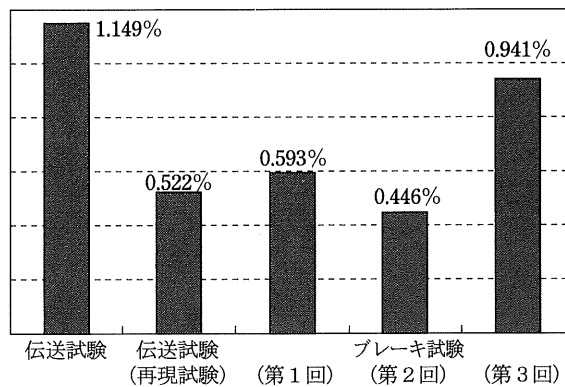


図7 フレーム誤り率の測定結果

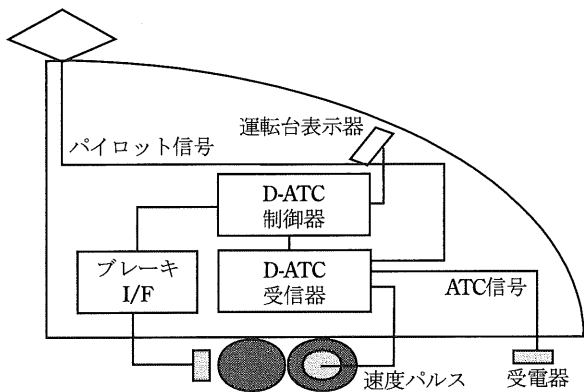


図6 デジタルATC性能試験車上機器構成

を発生させ、ブレーキパターンで実際にブレーキ制御するブレーキ試験（第1回～第3回）を実施した。試験区間を合計約40走行し、地上-車上のデジタル符号伝送、車上の連続位置検知、ブレーキパターンの発生・ブレーキ制御、マンマシン系などの性能を確認した。

3.2 地上-車上のデジタル符号伝送

地上から伝送されたデジタル符号を車上で正確に受信できることは重要である。試験区間を走行する際に受信されるデジタルATC信号を車上で受信し、そのフレーム誤りを測定した。図7にフレーム誤り率の測定結果を示す。1フレームが48ビットで構成されており、すべてのビットを完全に受信しなければそのフレームが無効になるため、軌道回路境界では必然的にエラーが発生する。図7は軌道回路境界で発生したエラーを除いた数値である。

伝送試験ではフレーム誤り率は1.15%であった。しかし、この時の車上試験機器の設置場所がモータの直上であり、その直達ノイズの影響があったと予想されたため、収集したデータを使って室内で再度同様な試験を実施した結果、0.52%とフレーム誤り率は減少した。受信器のゲイン調整が不相当であった第3回ブレーキ試験を除いて、その後の試験でも0.6%以下の誤り率が確保できた。第3回ブレーキ試験についても、ゲインを再調整し、収集したデータを使った再試験では同様の0.5%程

度の値が得られた。今回の仮設では、受電器からのATC信号を現行ATC受電器から高抵抗、絶縁アンプを介して入力したこと、機器の配置、機器間の配線、電源などの設置環境があまりよくなかったことなどを考慮すると、実用時にはこの数値はさらに改善できると考えられる。なお、エラーの最大継続時間は1.9秒であった。これはフレームの連続エラーが最大2回であったことを示す。また、他の情報と間違えるような見逃し誤りは無かった。

試験で得られたフレーム誤り率0.6%について評価する。この48ビットのフレーム構成では、CRCが8ビット含まれており、3ビット以下の全ての奇数個のランダム誤りと、8ビット以下のバースト誤りが検出できる。また、データの2回一致で正常と判定、5フレーム連続受信できなくても受信異常としない処理がなされるものとする。

1フレームのフレーム誤り率を e_f とすると、 $p \ll 1$ の条件ではビット誤り率 p は次式で試算できる。

$$p \doteq e_f/48 = 1.25 \times 10^{-4} \dots \dots \dots (2)$$

また、6ビットはフレーム先頭フラグであるから、1フレームあたりの見逃し誤り率 e_c は次式で試算できる。

$$e_c \doteq {}_{42}C_4 \cdot p^4 = 2.73 \times 10^{-11} \dots \dots \dots (3)$$

1時間あたり、6フレーム連続受信異常で、受信断になる確率 E_f は伝送速度が $v_f = 84\text{bps}$ であるから

$$\begin{aligned} E_f &= (v_f/48) \times 3600 \times (e_f)^6 \\ &= 2.94 \times 10^{-10}(/h) \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

となる。これは一日500本の新幹線が18時間走行するとして、1000年に1回発生する程度の確率である。一方1時間当たり、他の情報と間違える見逃し誤り率 E_c は

$$\begin{aligned} E_c &= (v_f/48) \times 3600 \times (e_c)^2 \\ &= 4.70 \times 10^{-18}(/h) \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

となり、十分小さな値である。したがって、伝送品質と

しては実用上問題ないと判断できる。

3.3 車上の連続位置検知

デジタルATCでは車上で連続的に位置検知を行う。また、今回の試験では現行ATCの搬送波周波数の変化で軌道回路境界を検知し、これを車上のデータベースと比較することで、空転や滑走などで生じた誤差を補正する。これらの機能確認を行うために、試験列車がブレーキパターンにより停止した時の車上の検知位置と、地上での実測値とを比較した。また、軌道回路境界でどの程度補正されたか確認した。

列車停止時の地上実測値と車上測定値の誤差は-8m～1mの範囲であった。また、軌道回路境界での位置補正量も図8に示すように±10mの範囲であった。試験区間ではブレーキパターンにより停止するため、滑走や空転の機会があるが、位置検知誤差と軌道回路境界での位置補正がともに±10mの範囲におさまったことは、適正な車上での位置検知、位置補正がなされていることを示している。

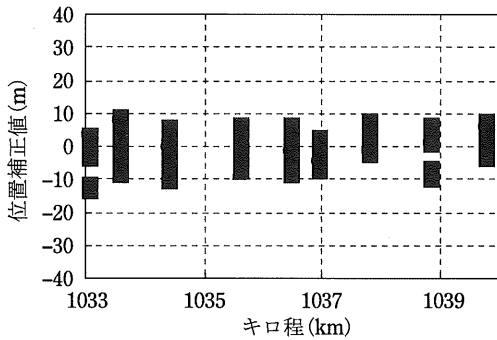


図8 軌道回路境界での位置補正量

3.4 ブレーキパターンの発生およびブレーキ制御

ブレーキに関する試験は3回に分けて実施した。車上のブレーキパターン作成用の減速度は0～70～100～150～200～230km/hの5つの速度段毎に設定した。第1回と第2回の試験では走行抵抗を考慮しない減速度を採用したが、第3回では走行抵抗を加味した減速度を採用した。現行ATCでは常用最大減速度7ノッチでの減速性能から決まる設定減速度に軽減率を乗じた値で閉そく距離を設定する。この考え方を踏襲し、常用ブレーキパターンは7ノッチの減速度に軽減率を乗じて得られる値に近い5ノッチの減速度を用いた。余裕距離は閉そく境界から50m確保した。第1回と第2回はブレーキ出力を強、中、弱の3段階制御、第3回は7段階のブレーキノッチを全て使った制御を行った。なお、30km/h以下で減速中には停止までブレーキ出力ノッチを変化させない制御とした。図9に第1回および第2回のブレーキ試験における、同一の目標位置で停止した試験列車が実際に停

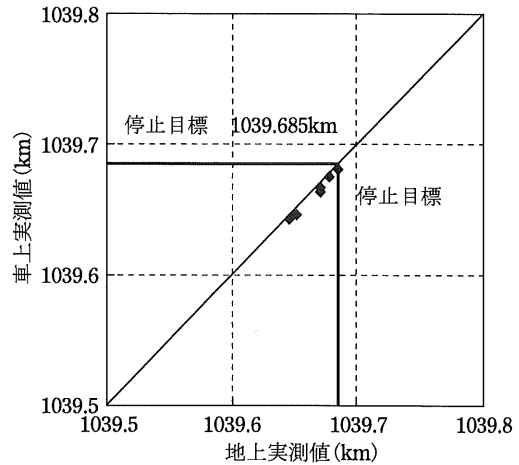


図9 ブレーキ制御による停止位置の分布

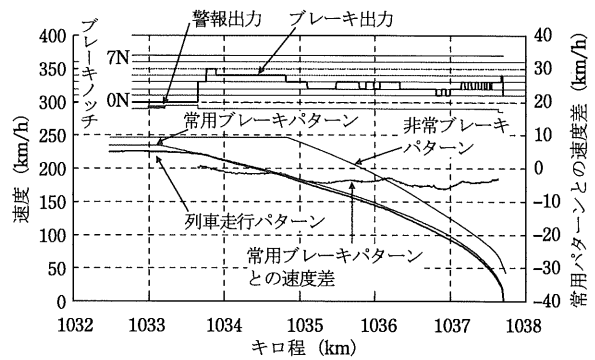


図10 7段階ブレーキ制御試験結果例

止した位置の分布を示す。いずれも停止目標位置の手前に停止した。ただし、実際のATCブレーキが設定した減速度よりかなり大きかったため、ブレーキが一旦緩んで乗り心地が良くない、停止位置がかなりばらつくなどの問題が生じた。そこで第3回ではブレーキ制御出力として7段階のブレーキ全てを使用し、パターンにできるだけ追従する制御を追加した。測定結果例を図10に示す。図10からわかるように、設定したブレーキパターンにほぼ沿ってブレーキが緩むことなく停止まで制御できることが確認できた。パターンとの速度差は最大で5 km/hに抑えることができた。ただ、この時も30km/h以下ではノッチ出力を一定に保つ制御を行ったため、停止直前の減速度が大きくなり、停止位置は目標位置の手前約25m～30mに停止した。ATOではないのでこの程度の制御で十分と考える。

この5ノッチのブレーキパターンによる制御では実際に動作したブレーキノッチ数は、3ノッチが40%、2ノッチが38%であり、ブレーキ力にはかなり余裕がある。6ノッチ、7ノッチで作成したブレーキパターンによる制御試験も実施したが、いずれも実際に動作したノッチはブレーキパターンを作成したノッチ数より3ノッチ程度低い値で制御することが多かった。

なお、速度が常用ブレーキパターンを越えてブレーキ制御出力を出力しても減速が十分に得られない異常時の場合の試験も実施したが、その時は非常ブレーキパターンによりブレーキが動作し、目標位置の手前で停止することを確認できた。

3.5 運転台表示

運転台には図 11 の内容を示す液晶ディスプレイを設置した。また、列車速度が常用ブレーキパターンの速度を超えると予想される 5 秒前には接近警報のブザーを鳴動させた。試験終了後、表示やパターン接近時の警報について運転士にアンケートを実施した。運転士によりいろいろな意見があったが、許容速度と現在速度の表示は大きいほうがよい、機器の状態を示すような表示はこの画面には不要である、接近警報などの音による状態提示は有効であるなどの意見が出された。運転に不可欠な情報と、ナビゲーションに関する情報を分離して表示することも検討していく必要がある。

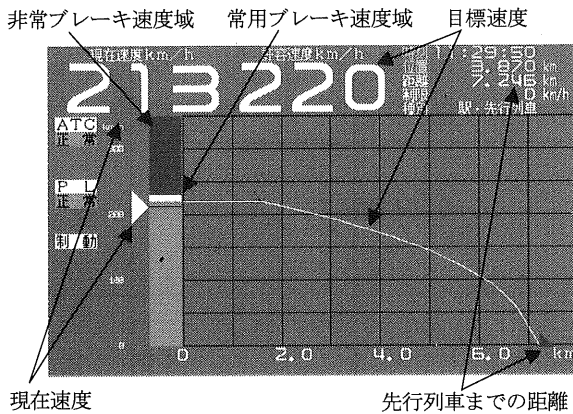


図 11 運転台表示画面

4 運転時隔と到達時間短縮効果

今回の試験結果より、到達時間と運転時隔の短縮効果について検討する。図 12 に 230km/h から停止まで要する時間に関して、今回のデジタルATCの試験結果と現行ATCのシミュレーション値との比較を示す。図 12 より、5N で作成したブレーキパターンの制御においても、230km/h から停車まで 45 秒程度短縮されることがわかる。ブレーキ力については余裕があるので 6N、7N の試験も実施したが、7N では 1 分以上の短縮効果が得られる。なお、300km/h 運転時には更なる短縮効果が得られる。

(ブレーキパターン)

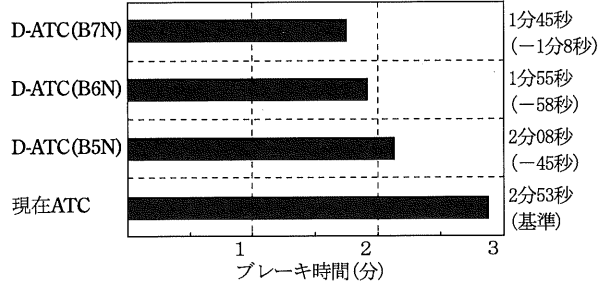


図 12 ブレーキ制御時間の比較 (230km/h → 停止)

5 おわりに

デジタルATCの性能を山陽新幹線において試験を実施した。地上-車上のデジタル符号伝送、車上の連続位置検知、車上で発生させたブレーキパターンによる1段ブレーキ制御など、基本的な性能に関しては安全上問題なく実用できる見通しが得られた。また、本方式の採用により、運転時隔や到達時間が短縮できることも確認できた。

今後この種のATCが各線区に導入されていくことが期待されるが、総研としても実用化のため各社に協力していきたいと考える。

謝辞

今回、試験を実施するにあたり多大なご指導、ご協力をいただいたJR西日本、本システムの基礎となった整備新幹線用デジタルATCの開発にあたりご指導、ご協力をいただいた日本鉄道建設公団、試験機器の製作にご協力いただいた大同信号(株)の関係者に感謝する。

文献

- 1) 渡辺, 高重, 直江: デジタル軌道回路を利用した統合列車制御, 第28回鉄道サイバネ, pp.156~159, 1991
- 2) 高重, 渡辺: 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) 渡辺, 福田, 高重: 機器分散形デジタルATCの性能試験, 鉄道総研報告, Vol.9, No.1, pp.49~54, 1995
- 4) 福田, 渡辺, 牛島, 佐藤, 川野, 高重: 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
- 5) 高重, 渡辺, 福田, 寺田: 中国高速鉄道用デジタルATCの開発, 鉄道総研報告, Vol.13, No.8, pp.13~20, 1999