

論文の内容の要旨

氏名：渡辺 郁夫

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：デジタル ATC の開発と高信頼化に関する研究

1. 序論

列車の間隔を制御する ATC (Automatic Train Control) は、新幹線や通勤線などに導入され、鉄道の安全確保に大いに役立ってきた。当初導入された ATC は、①先行する列車の位置を軌道回路により検知し、②その情報と勾配などの線路条件から後続列車の許容速度を決定し、③許容速度に対応した ATC 信号を軌道回路に流し、④後続列車はこの信号を先頭車両のアンテナで受信し、⑤ATC 信号が示す許容速度と列車速度を比較（速度照査）して列車速度を制御する、しくみであった。ブレーキ制御のための様々な条件が地上で作成する ATC 信号に集約されるので、このタイプの ATC を地上主体制御方式 ATC とも呼ぶこととする。

筆者は地上主体制御方式 ATC の有する課題を解決するデジタル ATC の研究開発を行ってきた。研究開発では、車上主体制御を特徴とするシステム構成を提案するとともに、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研究開発を行った。以下、デジタル ATC 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述べる。

2. デジタル ATC の構成法

地上主体制御方式 ATC では、基本的に同一のブレーキ性能の列車が走行する前提で ATC の速度信号の段数や軌道回路長を決定して、軌道回路の単位でブレーキ制御を行う。そのため

- (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。

これらの課題を解決するため、デジタル ATC では、①先行列車の位置は軌道回路で検知し、②地上装置では、先行列車が在線する軌道回路の進入端までの距離情報と後続列車の在線する軌道回路の識別番号などを ATC 信号として軌道回路に流し、③後続列車はこの信号を受信し、また、自列車の在線軌道回路進入後の走行距離を積算して先行列車までの距離を求め、⑤この距離情報と、車上に記憶している列車のブレーキ性能、線路条件などを組み合わせて最適なブレーキパターンを発生させ、⑥ブレーキパターンに基づき速度照査を行いブレーキ制御を行うシステム構成とした。この構成は、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に応じたブレーキパターンを車上で発生させることで、ブレーキ性能が異なる列車それぞれを最適なブレーキ制御することを可能とする
- (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ることで、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
- (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 ATC 信号に含まれる停止目標に対して車上で作成するようにすることで、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をなくす

3. デジタル ATC と列車位置検知

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。軌道回路の課題である、短絡抵抗の増大、軌道回路の漏れコンダクタンスの変動による信号の受信レベルの変動等に関しては従来から利用されてきた信頼性向上策を利用する。また、車上の位置検知についても従来の列車制

御で利用されてきた方式を採用する。

4. 制御情報伝送の高信頼化

デジタル ATC では、地上から車上に、先行列車が在線する軌道回路進入端までの距離情報や軌道回路の識別番号などの制御データ、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。従来の ATC で使われていた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、せいぜい数ビットの情報しか送れず、このような大量のデータを一定時間内に送信するのは不可能であった。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、ビット系列としてデータを送る方式を検討した。伝送速度を高くするためには、広い周波数帯域を必要とする。一方、広い帯域を使用すると、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高くなる。したがって、使用する信号帯域が比較的少ない MSK(Minimum Shift Keying)方式を採用する。

4. 1 交流電化区間

(1)新幹線区間

軌道回路には、ATC 信号の他に、地上と車両の電力機器が発生させる電源高調波ノイズ等が流れている。特に大きなノイズが流れる新幹線区間については、電源周波数が 1%変動しても、常に大きく発生する奇数次高調波を避けて、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を設定する電源同期 MSK 変復調方式を提案した。この方式では電源が 50Hz 区間で 80Hz, 60Hz 区間で 95Hz の信号帯域を確保できる。電源同期 MSK を使用した伝送速度 84b/s 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。これらの成果をもとに、300Hz ~ 1300Hz の周波数帯において送信電力 20W の条件で、軌道回路長 1200m では 300Hz ~ 700Hz の周波数を使用すれば安定した ATC 伝送を可能とする短絡電流 320mA を確保できることを明らかにした。

(2)在来線区間

在来線の交流電化区間では、奇数次の電源高調波を避けた信号帯域設定で、周波数 400Hz ~ 1200Hz を使えば軌道回路長 1.5 km でも安定した ATC 制御情報の伝送が可能であることを示した。

4. 2 直流電化区間

直流電化区間の通勤線では、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、直流電化区間において変電所で 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(50Hz 区間では 300Hz)の高調波が大きく発生し、その高調波は次数のマイナス二乗に比例して発生する。

そこで、電源周波数の 6 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、送信電力を検討した。周波数 10kHz までの範囲では、送信機出力が 10W では 1800Hz 以上の周波数を、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との結論を得た。

また、通勤線区では軌道回路境界に電気的な絶縁を設けない無絶縁軌道回路で構成する場合もある。この時はオーバーラップ(先行列車に接近するとき余裕で列車を進入させない区間)を 1 区間設定する。無絶縁軌道回路では先行列車が軌道回路の送信点の近くに在線する時が ATC の短絡電流を確保するうえで厳しい条件となる。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、100m 前方の場合は 3000kHz 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とを明らかにした。

4. 3 符号による情報伝送の信頼性向上

新幹線区間で実施した軌道回路による符号伝送で、ビット誤り率 $p \approx 1.25 \times 10^{-4}$ が得られた。この値をベースにデジタル ATC の符号伝送の安全性、信頼性について検討した。8 ビットのフラグ、情報 50 ビット、CRC8 ビット、トータルのフレーム長を 66 ビットとし、CRC 検定正常、およびデータ 2 回一致でデータ確定とする方式を提案した。適切な CRC を選び、符号間のハミング距離を 4 確保する。

ビット誤り率から 1 フレームあたりの見逃し誤り率 e_c を求めると、 $e_c \doteq (66 \cdot 8) C_4 \cdot p^4 = 58 C_4 \cdot (1.25 \times 10^{-4})^4 = 1.04 \times 10^{-10}$ となる。さらに 2 回一致をとるため、最終的な見逃し誤り率 E_c は、 $4.91 \times 10^{-17}(h)$ となり、十分小さい値が得られた。また、伝送速度を $v_f = 84 \text{bps}$ として、1 時間あたりの受信断(軌道回路境界で 2 フレーム、その後 7 フレーム連続受信異常の場合)の確率 E_f を求めると、 $E_f = (84/66) \times 3600 \times (66p)^7 = 1.19 \times 10^{-11}(h)$ となった。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が確保できることが分かった。

5. デジタル ATC におけるブレーキ制御

デジタル ATC のブレーキ制御のため, 10km 先までのブレーキパターン作成方法, 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。新幹線での性能試験で, 発生させたブレーキパターンに沿ってスムーズな減速が行えることを示した。

6. デジタル ATC の機器構成と安全性・信頼性技術

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で行う。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一つのデータを複数の側面からデータ化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で, データベースの信頼性向上策を提案した。

7. まとめ

以上, 本論文においては, 軌道回路を用いて符号電文を車上に伝送し, 車上のインテリジェンスを利用して効率よい制御を行う先端的なデジタル ATC の開発とその列車制御に求められる高信頼化について申請者が行った研究の概要を述べた。