

## 論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 中村 英夫

（副査） 教授 泉 隆 専任講師 望月 寛

鉄道の安全は、信号保安装置によって守られてきた。中でも ATC (Automatic Train Control) は、新幹線の安全制御の要として 50 年間の無事故を支えてきた。新幹線に当初導入された ATC は、軌道回路に流す数百 Hz から数 kHz の帯域内の搬送波を AM 変調し、その変調波を ATC 信号として利用するもので、地上主体制御方式の ATC であった。当時の ATC 信号は、限界走行速度値を示すものであり、列車の速度が ATC の示す速度値を超えていると自動的にブレーキをかけ速度値まで減速させることで安全を確保してきた。したがって、この地上主体制御方式 ATC は、「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ブレーキ制御が行われるために運転間隔や到達時間が長くなる。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ために地上装置や車上装置の改修が必要となる。」といった課題があった。提出者は従来の地上主体制御方式 ATC が有するこれら課題を検討するとともに、その課題を解決する新しい ATC システムの研究・開発に取組み、その成果をデジタル ATC として実現させた。

提出者が開発したデジタル ATC においては、「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、それぞれの車両に応じ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個々の車両に対しても、それぞれを最適なブレーキパターンに基づき制御することを可能とさせる。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に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 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を不要とする。」などの優れた特徴を有している。提出者の研究成果を基に、JR 東日本などの鉄道事業者は、デジタル ATC を開発導入し、これまでの、地上主体制御方式 ATC の課題を克服すると共に、速度向上などへの柔軟性を確保している。

提出者の申請論文は、このデジタル ATC の研究・開発の成果を論じたものである。このように、本研究は、社会に与える影響も、また、技術領域での水準も高いものであるが、以下、論文の章立てに沿って審査の内容を報告する。

論文は、第 1 章 序論から第 7 章のまとめに至る全 7 章から構成されている。

第 1 章は、序論であり、本研究の背景や位置づけ、及び研究の概要を分かりやすく説明するとともに、提出者の研究が、既に新幹線、通勤線等で実用化されているデジタル ATC の中に組み込まれ、今日の幹線の安全・安定輸送に貢献していることを論じている。

第 2 章は、デジタル ATC の構成法について述べている。論文では、東海道新幹線開業時に保安設備として導入され、優れた実績を上げた既存の地上主体制御方式 ATC の制御原理を明らかにするとともに、そのシステムが有する 4 つの課題について説明している。この部分は、提出者の研究の意義を理解する上では重要な位置を占めるが、わかりやすく説明しており、その内容も妥当である。

さらに、本章では、その課題を克服するために提出者が開発した「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軌道回路境界までの距離情報等を軌道回路によって伝え、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在線軌道回路までの情報と、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ようにした」デジタル ATC の特徴を論じている。提出者が開発したデジタル ATC の制御方式は、欧州にはない我が国独自のもので、個々の車両性能がそのまま発揮できるほか、車上主体の列車制御に道を切り開くものとしても高く評価できる。

また、本章の 2 項以降では、列車位置検知、制御情報の伝送、ブレーキ制御といった 3 章以降の内容について簡単に説明しているが、2. 6 項のデジタル ATC の制御性能では、提案するデジタル ATC を、運転間隔、到達時間という観点から、移動閉塞方式等と比較して評価しており、デジタル ATC が他の先端列車制御システムと比較しても遜色ないことを主張している。提出者のオリジナルな研究成果として評価できる。

第 3 章では、列車位置検知機能について、デジタル ATC で採用した考え方を詳述している。デジタル ATC における列車位置検知の基本は軌道回路であるが、軌道回路には短絡感度や漏れコンダクタンスの変動対策など固有の問題がある。デジタル ATC を実現する上でもこれら課題に対する対応が重要になるが、提出者は長年軌道回路についての研究を行ってきており、その技術的知見をもとに、デジタル ATC における方法論を論じている。論文で述べられている内容は、専門的かつ有益な知見として、その後の研究やシステム開発に寄与しており、高く評価できる。

また、車上位置検知で用いられる「車輪の回転パルス積算による走行距離算出」は、先端的列車制御システムで多用される技術であるが、誤差の蓄積対策として絶対位置の補正が必要になる。一般的には、地上に固有のマーカを設置し、通過時に誤差をキャンセルする方式が採られるが、提出者は、軌道回路境界で発生する信号電流の搬送周波数の変化を読み取ることで、地上のマーカ設置を不要とするアイデアを披露している。このほか、地上における軌道回路の在線検知は、従来より列車検知信号の有無で行っていたが、提出者は、信号電文中に組み込まれた軌道回路 ID を利用することで、確実な列車検知ができるといったアイデアも披露している。これらのアイデアは、本研究の成否を決定づけるほどのものとはいえないまでも、研究者としての柔軟な思考力の証として評価できる。

第 4 章は、デジタル ATC の設計上重要な制御情報の伝送について論じている。提出者は、交流電化区間の新幹線と在来線、および直流電化区間へのデジタル ATC 導入を念頭に検討を進めている。交流電化区間と直流電化区間では、電車電流によるノイズの発生傾向が全く異なるため、個別的な検討が要求される。新幹線においては、ATC で利用する 600Hz~1600Hz の周波数帯域に含まれる電源の高調波成分を奇数次高調波電流が最大 20A、偶数次高調波成分を 1 A 以下として設計要件を導出している。提出者は、利用帯域を「奇数次高調波と偶数次高調波の間に設定する方法 a」と「隣接する奇数次高調波の間に設定する方法 b」、さらに、「方法 b において、信号電流と電車電流の電源を同期させる方法 c」を評価対象として設定し、軌道回路の漏れコンダクタンスの変動を加味したシミュレーションにより軌道回路長に対応した周波数範囲を導出している。その結果として、軌道回路長を 1200m から 1000m まで変化させた場合、周波数を 700Hz から 300Hz の範囲で利用することにより、方法 a と方法 c で安定した ATC 信号の受信が可能なることを導き、さらに、電源周波数が 1% 変動した場合においても安定してノイズが克服できる方法 c が適していることを主張している。これらの検討結果は、新幹線のデジタル ATC の設計要件として広く参照されるなど、貴重な意味を持っている。同様な検討を、基本的な定数条件の異なる在来線の交流電化区間を対象にも実施し、軌道回路長に応じた利用可能周波数帯域を導いている。

一方、インバータ制御車が主流となった直流電化区間では、速度に比例して変化する周波数成分を持つノイズが多いなど交流電化区間とは異なる様相を呈している。この条件下での検討においても、ATC 信号の送信機出力が 10W の場合、周波数を 1800Hz 以上とすることで安定したシステムが構築できる等の貴重な知見を導出している。

第 5 章は、ブレーキ制御について、「地上から受信した ATC 情報に、ブレーキ性能や速度制限情報などの車上のデータを加味し、先行列車が在線する軌道回路始端までの速度照査用のブレーキパターンを生成して、必要に応じブレーキを制御する」方法について具体的に述べている。さらに、提出者は、7 段のブレーキノッチをパターン速度と走行速度の速度差に応じて選択的にブレーキノッチを制御する方法を考案し、試験により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。単なるブレーキの ON/OFF 制御にとどまらず、保安制御装置においてブレーキノッチの最適制御まで

踏み込んだことは、システムのコスト低減や乗り心地向上の面からも評価できる。

第6章は、ハードウェアの高信頼化について論じているが、これまで信号技術界に蓄積された多くの安全性技術をサーベイして、それらが有効に利用できることを述べている。

第7章は、論文のまとめであり、提出者の行った研究の先駆性や成果を述べている。

提出者の開発したデジタル ATC は、車両性能や線路条件等の個別的データを車上に記憶させるもので、速度向上時にも地上設備の改修を不要とするなどの利点がある。提出者の開発した制御手法は欧米のシステムにはない独自のもので、その先駆性は高く評価できる。また、提出者が研究によって明らかにした多くの知見は、その後鉄道事業者で採用したデジタル ATC の開発に活かされており、提出者の研究水準の高さを物語っている。また研究成果が、わが国の幹線線区の安全・安定輸送に大きく貢献している点も見逃せない。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成 27 年 5 月 21 日