

論文審査の結果の要旨

氏名：寺 田 貴 行

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：孤立波軌道回路による列車保安制御の改善に関する研究

審査委員：（主査） 教授 高 橋 聖

（副査） 教授 吉 川 浩 名誉教授 中 村 英 夫

申請論文の研究領域は、列車制御に関するものである。列車制御の中でも特に列車の安全な運転制御に関わる列車保安制御には、鉄道信号システムが重要である。列車制御には、列車が軌道のどの位置に存在するかを把握する必要があり、種々の列車検知方法が用いられる。それらの中で最も安全確実な方法は、軌道回路による方法である。軌道回路は、送受信部およびそれらを結ぶレールから構成されており、わが国では1904年に初めて設備され、それ以降長きに亘りフェールセーフな列車検知方法として用いられ、鉄道信号の安全確保に寄与してきた。1990年代の後半以降になると、駅構内用の軌道回路にマイクロコンピュータを使用した列車検知装置の実用化が行われたが、その後はデジタルATCの基礎技術として無絶縁軌道回路などに技術開発が見られるものの、抜本的な進展はない。一方、駅中間に関しては、受信部に軌道リレーを用いる既存の軌道回路が長く用いられてきたため、省エネルギー化やケーブルの削減などの課題があった。また近年、無線を活用した新しい列車制御信号システムが増加しており、脱軌道回路の傾向にある。しかし、中小鉄道者では、導入費用などの点で無線式列車制御システムの採用には敷居が高いという課題もある。

申請論文では、以上のような課題を踏まえ、既存の方式のように連続した軌道回路電流の周波数や位相から信号を確定するのではなく、離散的な孤立波（Solitary Wave: SW）の間隔を情報とすることで多情報化を図り、前方列車在線位置を伝達できる新しい信号制御方式の孤立波軌道回路（Solitary Wave Track Circuit: SW-TC）を提案している。孤立波軌道回路は、既存の軌道回路の延長上にありながら孤立波の概念を用いることで、信号波の1波長分を波源（Wave Source: WS）とし、これを一定周期のサイクル内に孤立的に必要な数のみ送ることにより、省エネルギー化を図っている。この方法は世界でも例がなく、これまでケーブルによって前方軌道回路の情報を取得して多現示式信号機を制御していたものが、ケーブルレスで実現できる。また孤立波軌道回路は、情報量の大幅な拡大による機能拡張が図れ、デジタルATC相当の高度な列車保安制御機能が廉価に実現でき、特に中小規模の鉄道事業者にとって、その導入効果も高い。その他の特徴として、孤立波軌道回路はシンプルな構成でありながら、既存の軌道回路と比較してRAMS性能（Reliability: 信頼性, Availability: 可用性, Maintainability: 保守性, Safety: 安全性）が改善できることを示している。

以上のように、申請論文は、社会に与える影響も大きく、また技術領域での水準も高いものである。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章の序論から第7章の結論に至る全7章から構成されている。

「第1章 序論」では、本研究の背景や位置づけ、目的および概要がわかりやすく説明されている。安全な列車制御に使われる鉄道信号システムでは、列車が軌道のどの位置に存在するかを把握するために列車検知が必要であり、それらの中で最も安全確実な方法は軌道回路による方法であること、そして従来の軌道回路について、駅構内用では長きに亘り抜本的な進展はなく、駅中間用では省エネルギー化やケーブルの削減などの課題等について述べることで、申請論文の解決すべき課題を明確に浮き上がらせており、申請論文の重要性が明確にされている点で評価できる。

「第2章 列車保安制御と軌道回路」では、申請論文のテーマである「軌道回路」について、その目的、歴史、種類および機能について説明するとともに、既存の軌道回路の課題を、環境面、保全面、省エネルギーの観点から述べている。本章では、軌道回路が列車検知機能、情報伝送機能、レール破断検知機能の3つの機能を有していることをわかりやすく説明し、環境面、保全面、省エネルギーの観点のそれぞれに課題があることを明らかにすることで、申請論文で提案する「孤立波軌道回路」の意義を具

体的に示している点で評価できる。

「第3章 孤立波軌道回路の提案」では、第2章で述べられた既存軌道回路の課題を解決すべく、新しく提案した孤立波軌道回路の基本原理を説明し、孤立波軌道回路がケーブルレスで省エネルギー化を図れる理由について述べている。孤立波軌道回路では、既存の方式のように連続した軌道回路電流を送信するのではなく、離散的な信号を送信し、これらの信号の間隔を情報とすることで多情報化が図れ、省エネルギー化が可能である。また軌道回路信号を送信するための情報フレームの構造を定義し、フレーム内に情報の開始位置を示すスタートエレメントや、情報フィールドと信号番号フィールドを設定することで、9軌道前方までの列車在線位置を把握できるだけでなく、高度な列車保安制御や故障の予兆把握などの機能拡張が図れることも明らかにしており、本章で述べられている「孤立波軌道回路」の概念は、その独創性ととも高く評価できる。

「第4章 孤立波軌道回路の実現性検討」では、第3章で提案した「孤立波軌道回路」の概念の実現性を検討するために、具体的な孤立波軌道回路の構成、送受信処理、シミュレーションと試作による検証結果および課題とその対応について説明している。孤立波軌道回路は、孤立波の情報を格納した軌道回路プロファイルテーブルと、受信部および送信部により構成されており、省電力かつケーブルレスで最大9軌道前方までの列車の在線位置を後方軌道に伝達することが可能である。また本章では、孤立波軌道回路の実現性を評価するために、シミュレーションおよび模擬軌道回路による評価について述べている。その結果、実際の軌道回路の現場環境では、電気車電流や降雨などの漏れ変動の影響によるレベル変動も発生すること等の課題を提示した上で、それらに対する対応を検討しており、提案した孤立波軌道回路では問題なく対応できることを明らかにしている。さらに孤立波軌道回路には高い安全性が必要になるが、従来から実績のあるフェールセーフな処理部によるデジタル処理技術がそのまま利用でき、稼働実績のある従来装置の安全性技術も踏襲できることから、安全性も問題なく確保することができることを明らかにしている。本章で検討し明らかにしたこれらのことは、列車の保安制御上重要な事柄であり、それらについて対応策を明確にした点で高く評価できるとともに、申請論文の成果を実用化の上で重要な知見を得たことについても評価できる。

「第5章 孤立波軌道回路が実現する機能」では、3章で述べられたように、情報フレーム内にスタートエレメントや情報フィールド等を設定することで、孤立波軌道回路の情報量が拡大し、機能拡張を図ることが可能となったことを踏まえ、情報フィールドを活用した高度な列車保安制御機能や予防保全に関する各種機能について説明している。列車保安制御への応用としては、孤立波軌道回路が駅中間の閉塞信号機の制御の他、デジタルATC相当の高度な列車保安制御機能が実現できることを示すとともに、単線区間で必要になる運転方向切り替えに伴う現場機器の制御処理が可能になることを説明している。保全性向上に関する検討としては、孤立波軌道回路が軌道回路の受信レベルの低下検出および軌道回路境界の絶縁劣化を診断できることを示しており、その結果、鉄道事業者が孤立波軌道回路を採用することで、軌道回路の故障の兆候を把握し、保全性が大幅に改善できることを明らかにしている。これらの成果は、申請者の提案する孤立波軌道回路を導入することで高度な列車保安制御機能が廉価に実現でき、特に中小規模の鉄道事業者にとって、その導入効果を高める可能性を持っており、非常に高く評価できる。

「第6章 孤立波軌道回路のRAMS性能の評価」では、孤立波軌道回路が既存の軌道回路より、RAMS性能が改善されることおよびエネルギー消費が削減できることを説明している。孤立波軌道回路では、簡易な構成で従来の軌道回路と同等の機能やデジタルATC相当の高度な列車保安制御を実現できるため、Reliability（信頼性）が向上する。また、孤立波軌道回路は、雑音による軌道回路障害により列車が運行停止する確率を低下できるため、Availability（可用性）が向上するとともに、妨害波による危険側の誤制御の影響も軽減できるため、Safety（安全性）も向上することが示されている。さらに、孤立波軌道回路は軌道回路の予防保全が可能であること、軌道回路の絶縁故障箇所の特定に必要な時間を大幅に短縮できること、現場での調整が容易になることから、Maintainability（保守性）も大幅に向上することを述べている。以上のことは、提案している孤立波軌道回路は、鉄道システムの重要な評価指標であるRAMS性能が高いことを明らかにしている点で、本章の内容は高く評価できる。

「第7章 結論」では、申請者の行った研究の成果や今後の課題を述べている。本研究で取り上げたこれまでの列車検知方法である軌道回路では、省エネルギー化やケーブルの削減など様々な課題があったが、「孤立波軌道回路」という概念を導入し新たな方法を提案した本研究によって、これら課題に対して十分な成果が得られたことを明確に結論づけている。

申請者の研究は、既存の方式のように連続した軌道回路電流の周波数や位相から信号を確定するのではなく、離散的な孤立波の間隔を情報とすることで多情報化および大幅な機能拡張を図った「孤立波軌道回路」を提案したものである。本研究の成果は、広く世界の鉄道産業の発展にも貢献する可能性を持っているものとして非常に高く評価できる。

以上のことは、本論文の申請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

令和5年2月16日