

論文の内容の要旨

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

鉄道信号では、高い安全性が要求されるため、長年に亘り、フェールセーフな列車検知装置として実績のある軌道回路が利用されてきた。軌道回路は、長年の実績があるものの、エネルギー消費が高い、多現示信号機を制御するためにはケーブルを多く敷設する必要があり、故障発生時の原因究明および復旧に多大な時間を要するなどの課題がある。また、近年は無線式の列車制御システムが台頭して脱軌道回路の傾向にあるが、コスト面の問題により、中小の鉄道事業者では採用が進んでいない。そこで、これらの課題を改善するために、新しい軌道回路装置として孤立波軌道回路 (Solitary Wave Track Circuit: SW-TC) の研究・開発を進めた。本論文は、孤立波軌道回路の研究・開発の成果について述べる。本研究によって、孤立波軌道回路は、既存軌道回路の課題が改善でき、さらに既存軌道回路にはない様々な機能を搭載可能であり、鉄道事業者にとって導入メリットがあり、管理しやすい廉価なシステムであることを明らかにすることができた。

本論文は第 1 章から第 7 章からなる。以下、各章についてその要旨を述べる。

第 1 章

「序論」では本研究の背景と目的および論文の構成について述べている。鉄道信号における列車検知装置には、種々のものがあるが、軌道回路は、1872 年にアメリカで誕生した後、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センサとして用いられ、鉄道信号の安全確保に寄与してきた。1990 年代の後半以降、駅構内用の軌道回路として、マイクロコンピュータを使用した列車検知装置 (SMET 形) (Sending Micro Electronics Track circuit: SMET) などの実用化が行われて省エネルギー化が図れたが、駅中間に関しては、既存の軌道回路方式が長く用いられており、省エネルギー化やケーブル削減などの課題があった。この状況を背景に、本研究は、孤立波を利用した新しい信号制御方式である孤立波軌道回路 (SW-TC) の開発を行った。

また、序論では、各章の内容について簡単に説明している。

第 2 章

「列車保安制御と軌道回路」では、軌道回路の目的と歴史、軌道回路の基本用語および軌道回路の種別を説明し、さらに軌道回路が有する 3 つの機能と原理について解説している。また、既存の軌道回路には、環境面、保全面、省エネルギーなどの観点で課題があるとして、それぞれの課題について詳細を述べている。

たとえば、環境面の課題では、レールは、変電所など、様々な外部要因の雑音の影響を受けるため、これらの影響を対策して安全を確保する必要がある。また、降雨などの天候の影響により、軌道回路の受信レベルが変動して不正落下が発生することがあり、列車運行に影響を与える可能性があるため、レベル変動に応じた保全が必要であることを説明した。

また、保全面の課題では、現状、軌道回路故障が発生した際には、専用の測定器を使って現場の調査を行っているが、原因究明と復旧に多大な時間を要していること、軌道回路監視装置や状態監視システムなどを導入し、軌道回路の送受信レベルを常時測定することで予防保全を目指しているが、故障予兆を把握して予防保全を行う技術は完成の域に達していないことを明らかにした。

さらに、省エネルギーの課題では、駅構内については、マイクロコンピュータを使った SMET などの開発により、軌道回路信号を時分割で送信するダイナミックスキューミング方式を採用するなど、省エネルギー化の対策が進んでいるが、駅中間については、各軌道回路が直列に配置されるため SMET を設置することができず、省エネルギーの課題が改善されず現在に至っていることを明らかにした。

第 3 章

「孤立波軌道回路の提案」では、申請者が提案する孤立波軌道回路の基本原理を述べている。

孤立波軌道回路は、既存軌道回路のように軌道回路電流を連続して送信するのではなく、ある周波数の1波長のみの孤立波を波源(WS)とし、このWSを離散的に送信するため省エネルギー化が図れる。またWSを送信しない空間の配分を情報とすることで多情報化が図れ、これにより、たとえば9軌道前方までの列車在線位置を把握して、多現示式信号機制御をケーブルレスで実現できる。

さらに、軌道回路信号を送信するための孤立波フレーム(SWF)を定義し、情報の開始位置を示すスタートエレメント(SE)、機能拡張を可能とするための情報フィールド、列車在線情報のための信号番号フィールドを設定した。これにより、孤立波軌道回路は情報量が増大し、列車の在線位置の把握機能の他に、様々な機能拡張が図れることを明らかにした。

第4章

「孤立波軌道回路の実現性検討」では、孤立波軌道回路の構成説明と、基本原理の実現性に関するシミュレーションおよび試作装置による実証試験結果について述べている。

まず、構成説明では、前方軌道回路の受信部と自軌道回路の送信部が一对で軌道回路送受信部が構成され、孤立波情報を格納した軌道回路プロファイルテーブルと、現示制御情報を格納した灯器制御テーブルを格納していることなどを説明した。なお、軌道回路は外来からのノイズの影響を受けやすい環境であるため、孤立波軌道回路は、現場に設置した際の基準波形を雛形として記録しておき、受信処理ではこの雛形の波形と受信した軌道回路信号との相関をとり、WSの有無を判定している。

実現性検討では、WSに対する送受信の波形を比較した結果、受信波形においては逆起電力の影響によるスパイク状の波形成分が確認された。この原因は、軌道回路を構成する機器の多くはインダクタンス成分が支配的であることによるものであるが、このスパイク状の波形が定常的に同様の波形になるなら、孤立波軌道回路は雛形の基準波形と受信波形で相関処理を行うため、問題なく対応できることを明らかにした。

さらに孤立波軌道回路には、高い安全性が必要になるが、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できることを明らかにした。

第5章

「孤立波軌道回路が実現する機能」では、孤立波軌道回路が列車在線位置情報の把握の他に、様々な機能を搭載できることを述べている。

1つ目の機能として、孤立波軌道回路としてSWFの情報フィールドと信号番号フィールドに必要なビットを設定し、列車の先頭に軌道回路信号受電器を装着し、車上装置が孤立波軌道回路のSWFを取り込むことで、デジタルATC相当の高度な列車保安制御機能を実現できることを説明した。

2つ目の機能として、単線自動閉そく区間において、孤立波軌道回路は、外部から「運転方向でこ」の条件を取り込み、SWFの情報フィールド中に必要なビットをセットすることにより、運転方向の状態に応じた軌道回路の送信部／受信部の切替が実現できることを説明した。このことにより続行列車が走行できる単線自動Aの閉そく装置として利用できる。

3つ目の機能として、孤立波軌道回路は、受信レベル低下を予防保全情報として出力できるほか、軌道回路の絶縁破壊時に故障部位を自動的に特定できるため、従来の方式より保守性を大幅に改善できることを明らかにした。

第6章

「孤立波軌道回路のRAMS性能の評価」では、孤立波軌道回路は、RAMS性能(信頼性(Reliability)、可用性(Availability)、保守性(Maintainability)、安全性(Safety))が従来の方式より向上すること、さらにエネルギー消費が従来の方式より大幅に削減できることを述べている。

信頼性(Reliability)に関しては、孤立波軌道回路は、簡易な構成であり、ケーブルレスであること、デジタルATCのように大規模な地上装置を機器室に設置することなく、列車保安制御機能を実現するため、従来の方式より信頼性が向上することを説明した。

可用性(Availability)に関しては、孤立波軌道回路は、受信波形と雛形の波形との相関から情報の正当性を判定するため、従来の方式より耐雑音性能が向上するほか、信頼性向上により可用性向上が期待できることを説明した。

保守性(Maintainability)に関しては、孤立波軌道回路は、予防保全が可能であること、軌道回路の境界箇所絶縁破壊が発生した場合、自動的に検知でき、原因特定に必要な時間を大幅に短縮できることから、

従来の方式より性能が向上できることを説明した。

安全性(Safety)に関しては、耐雑音性能が向上することで、妨害波による危険側の誤制御の影響を軽減できるため、性能が向上できることを説明した。

さらに、省エネルギー化の観点では、孤立波軌道回路は、既存の商用軌道回路と比較して、エネルギー消費を約 72%低減できること、デジタル ATC よりエネルギー消費を約 87%削減できることを説明し、大幅な省エネルギー化が実現できることを明らかにした。

第 7 章

「結論」として、各章で得られた研究内容を整理し、研究の成果を示した。

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、鉄道信号のシステムは、脱軌道回路の傾向にあるが、中小鉄道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が難しい状況である。これに対して、孤立波軌道回路は、既存の軌道回路の延長にありながら、大幅なコスト削減と省エネルギー化が実現でき、さらにデジタル ATC 相当の高度な列車保安制御機能が実現できること、軌道回路の境界箇所での絶縁破壊が発生した際の原因特定や復旧に要する時間を大幅に短縮できるなど、鉄道事業者にとって、その導入効果が高いシステムであることを明らかにした。

以上、各章にわたり本論文の内容を解説した。本論文で示した孤立波軌道回路は、既存軌道回路の限界を打破し、省エネルギーかつ高機能の軌道回路を低コストで実現するもので、鉄道信号システムの近代化に大きく貢献するものと確信している。