

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

令和4年9月

寺田 貴行

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

目 次

第1章 序論	1
1.1 本論文の背景	1
1.2 本論文の目的	1
1.3 本論文の構成	2
第2章 列車保安制御と軌道回路	4
2.1 まえがき	4
2.2 軌道回路の目的と現状	4
2.2.1 軌道回路とは	4
2.2.2 軌道回路の目的と歴史	4
2.2.3 軌道回路の種別	9
2.3 軌道回路の課題	21
2.3.1 軌道回路と制御性能	21
2.3.2 軌道回路と環境	24
2.3.3 軌道回路と保全	26
2.3.4 軌道回路と消費エネルギー	30
2.4 まとめ	30
第3章 孤立波軌道回路の提案	32
3.1 まえがき	32
3.2 提案する孤立波軌道回路	32
3.2.1 孤立波と波源	33
3.2.2 WS と情報量	33
3.3 孤立波軌道回路の情報と機能	37
3.3.1 フレームの採用と機能	37
3.3.2 フレーム構造	38
3.4 まとめ	38
第4章 孤立波軌道回路の実現性検討	40
4.1 まえがき	40
4.2 構成	40
4.3 送信処理	41

4.4	受信処理	42
4.5	シミュレーションと試作機による検証	43
4.6	課題とその対応	45
4.7	まとめ	46
第5章 孤立波軌道回路が実現する機能		48
5.1	まえがき	48
5.2	列車保安制御への応用	48
5.2.1	駅中間の信号制御	49
5.2.2	デジタル ATC の実現	49
5.3	単線自動閉そく処理の改善	51
5.3.1	現行単線自動閉そく回路	51
5.3.2	孤立波軌道回路による運転方向切替処理	52
5.3.3	軌道回路転極処理	52
5.3.4	踏切制御への利用	54
5.4	安全性向上に関する検討	55
5.4.1	軌道回路信号レベル低下対策	55
5.4.2	レール絶縁劣化への対策	55
5.4.3	軌道回路の故障予兆情報の出力	57
5.5	まとめ	57
第6章 孤立波軌道回路の RAMS 性能の評価		60
6.1	まえがき	60
6.2	ケーブルレス (Reliability の向上)	60
6.3	耐雑音性能の向上 (Availability および Safety の向上)	60
6.4	軌道回路の予防保全 (Maintainability の向上)	61
6.5	軌道絶縁部劣化の診断 (Maintainability の向上)	61
6.6	軌道回路の調整の容易化 (Maintainability の向上)	61
6.7	省エネルギー化	62
6.8	まとめ	64
第7章 結論		66
7.1	開発の主な成果	66
7.2	総合的考察	68
謝辞		69
参考文献		70
申請者の発表論文		72

第 1 章 序論

1.1 本論文の背景

鉄道信号において列車検知方法には種々のものがあるが、安全確実な方法は軌道回路以外にはない[1]。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、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[2-5]。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 Sending Micro Electronics Track circuits (SMET) などの実用化が行われた[6-8]。SMET は、省エネルギーであるほか、信頼性や保守性に優れている。しかし、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、鉄道信号では、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。

1.2 本論文の目的

背景で述べた課題に対して、本論文は、既存の軌道回路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、離散的な波形（以下孤立波 (Solitary Wave: SW) と呼ぶ）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軌道回路を活用した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) を提案した。SW-TC は、既存の軌道回路の延長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) として、その WS を一定周期のサイクル内に孤立的に定められた数のみ送ることにして、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、既設の軌道回路では、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制御を実現していたものが、ケーブルレスで実現できる。

また SW-TC は、信号中に、フレームの開始を意味するスタートエレメント (Starting Element: SE) を設けることにより、情報量の大幅な拡大が可能である。さらに、フレーム中の一部を固定ビット列と定義してフィールドを設定し、情報と対応させることにより機能拡張が図れ、単線区間における運転方向切替に対し軌道回路に望まれる機能が実現できることや、デジタル ATC 相当の列車保安制御機能が、簡易

な軌道回路でより廉価に実現でき、その導入効果も高い[9-17]。

その他の特徴として、SW-TC は、シンプルな構成でありながら、軌道回路境界部分の絶縁劣化診断などを行うことで、軌道回路の予防保全を実現できるなど、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）の英語の頭文字）が向上できる。

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。しかし、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。この新しい軌道回路方式は、様々な鉄道事業者にメリットのあるシステムだが、特に中小規模の鉄道事業者にとって安価で管理しやすいシステムであると考えており、本研究を進めることで、軌道回路の再生が図れるものと期待している。

1.3 本論文の構成

第 1 章 序論

本論文の背景、目的および構成について述べる。

第 2 章 列車保安制御と軌道回路

軌道回路の目的、歴史、種類および機能について述べる。また既存の軌道回路の課題について、環境面、保全面、省エネルギーなどの観点から説明する。

第 3 章 孤立波軌道回路の提案

提案する SW-TC の基本原理および SW-TC 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することで、SW-TC は多情報化が図れ、列車の在線位置の把握だけでなく、様々な機能拡張が図れることを説明する。

第 4 章 孤立波軌道回路の実現性検討

SW-TC 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する。

第 5 章 孤立波軌道回路が実現する機能

Information Field を活用した SW-TC が実現できる列車保安制御機能や予防保全などの各種機能について説明する。

第 6 章 孤立波軌道回路の RAMS 性能の評価

SW-TC が既存の軌道回路に比べて、RAMS 性能 (Reliability (信頼性)、Availability (可用性)、Maintainability (保守性)、Safety (安全性) の英語の頭文字) が向上すること、またエネルギー消費を大幅に削減できることを説明する。

第 7 章 結論

本論文の成果をまとめる。

第 2 章 列車保安制御と軌道回路

2.1 まえがき

本章では、軌道回路の目的、歴史、種類および機能について説明する。また既存の軌道回路の課題を、環境面、保全面、省エネルギーなどの観点から述べる。

2.2 軌道回路の目的と現状

2.2.1 軌道回路とは

軌道回路とは、JIS E 3013 の鉄道信号保安用語では、列車または車両を検知するために、レールを用いる電気回路と定義されている。また鉄道技術用語辞典(財)鉄道総合技術研究所編では、レールを電気回路の一部として利用し、列車の有無を検知し、制御のための情報を伝送する装置と定義されている。本論文では、2 つの良いところを採用して、軌道回路とは、レールを電気回路の一部として利用し、列車や車両の有無を検知し、制御するための情報を伝送する装置と定義している。

列車は電気を通す鉄でできている 2 本のレール上を走行しており、左右の車輪も車輪をつなぐ車軸も鉄でできているため、車輪間には電気を通すことができる。また列車は、レール上以外は絶対に走行しないことも、軌道回路の特筆すべき前提条件である。レールは鉄道にとって不可欠のものであり、レール無くして列車は走行できない。このレールを電気回路の一部として利用することに軌道回路の最大の特徴がある。

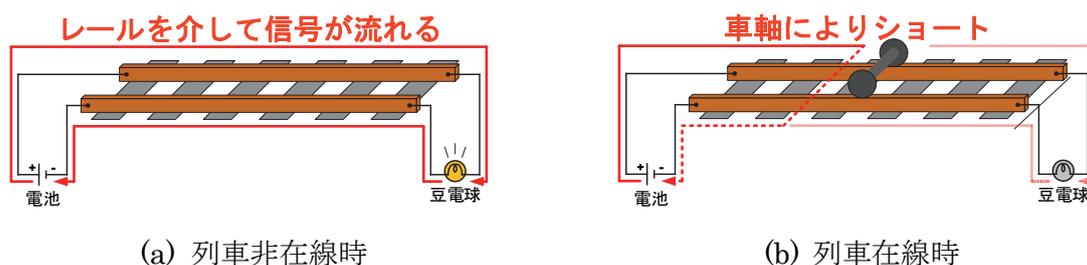


図 2.1 軌道回路の動作原理

2.2.2 軌道回路の目的と歴史

鉄道は 1825 年にイギリスのステューブソンによる蒸気機関車として産声をあげ、人の注意力によって安全を確保していた。しかし、列車は自動車と違って、ブレーキをかけてから停止するまでのブレーキ距離が長いため、人の注意力だけでは限界

があった。そのため、安全を保つための方式として、一定の区間に1本の列車の在線しか許さない空間間隔式が提唱され、これを実現するための設備として、自動的に列車を検知する方法が研究された。

その後、1872年にアメリカのウィリアム・ロビンソンがレールを回路として用いて列車検知を行う軌道回路を発明した。軌道回路の出現は、自動信号システムを可能として列車制御の近代化に貢献し、現在でも世界中の鉄道に広く使われている。なお、軌道回路が発明された1872年は、奇しくもわが国において、品川~横浜間で鉄道が初めて開通した年である。

わが国には、1904年に直流軌道回路が初めて設備され、100年以上の長きに亘り、信号の連動制御や自動閉そく制御の安全確保に寄与してきた。軌道回路は電気回路の一部としてレールを用いるため、直流電化区間には交流電流を用いた商用周波軌道回路が導入され、また交流電化区間では、商用周波数を1/2に分周して軌道に流し、受信側で倍周化して商用周波用軌道リレーを動作させる分倍周軌道回路なども導入されている。

1990年代の後半以降になると、信号設備の省エネルギー化やハードウェアの削減、メンテナンス性能向上を目指して、駅構内の軌道回路にマイクロコンピュータを使用したデジタル式の軌道リレーも開発され、SMET (Sending Micro Electronics Track circuits) などの実用化が行われた。SMETは、1台で駅構内の12軌道回路に時分割送信し処理するため、省エネルギーであるほか、ハードウェアが少なくなり信頼性や保守性に優れている。しかし、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、軌道回路が線路に沿って直列に配置され、機器間の距離が長く駅構内のように1台の装置で処理を行うとケーブル敷設量が膨大になるため、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。軌道回路の処理結果は信号機の制御に用いられ、駅中間ではひとつの軌道回路で3値の情報を提供し、R(赤), Y(黄), G(青)三つの色灯式信号現示の制御を可能とする二元三位式軌道回路が用いられている。しかし、列車密度向上に伴い信号現示の多現示化が進んだため、既存の在来線ではケーブルを敷設して、前方軌道回路の情報を取り込み、警戒信号YYや減速信号YGなどを含んだ多現示式信号機の制御を実現しているが、省エネルギー化やケーブルの削減などの課題がある。

(1) 閉そく区間

列車は高速で大量の旅客を輸送するため、列車運行の安全確保は必要である。列車の正面衝突や追突は大惨事を招くため、対向列車同士、先行列車と続行列車との間で物理的な制御が必要である[18]。このような目的で行われる制

御を列車間隔制御と呼び、最も主流な方式が空間間隔法である。

空間間隔法とは、必ず一定の空間距離を置いて運行する方式で、線路を一定区間に区切り、1区間に1本の列車のみが在線できるように占有させ、列車がその区間を完全に通過し終わるまでは続行列車または対向列車をその区間に進入させない方式である。この区間を閉そく区間と呼び、閉そく区間により空間間隔を確保して列車を運行する方式を閉そく方式と呼ぶ。この閉そく方式を実施するために閉そく区間毎に軌道回路や閉そく信号機を設け、それに分岐器などを連動させて、列車運行の安全を確保している。

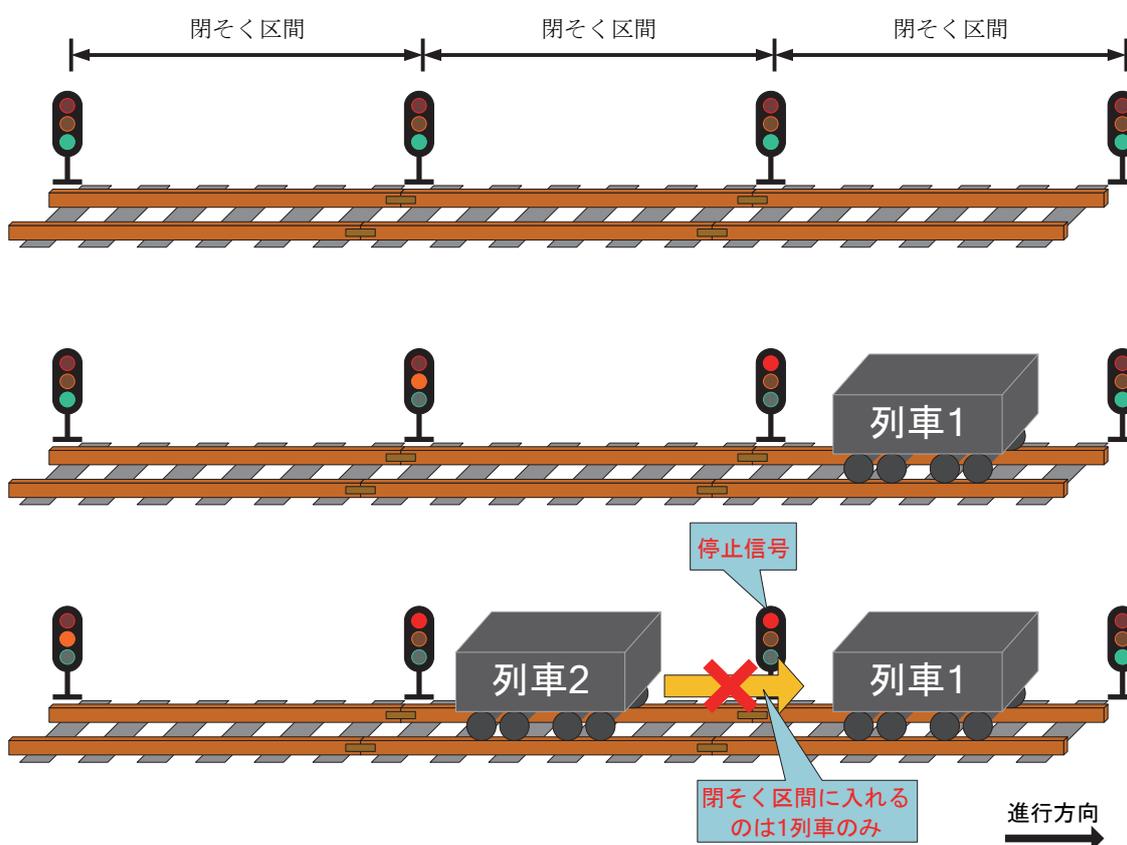


図 2.2 閉そく区間

(2) 駅構内

転てつ器が設置され、列車の番線入れ替えが出来る駅を駅構内（連動駅）と呼ぶ。乗客が乗り降りする駅の構内には、分岐器があり、複雑な形態になっていることが多いため、このような線路を運行する列車の安全を確保するための仕組みが必要である[19]。駅構内では、分岐器の転換方向と列車の進行方向を連動させる必要があり、列車同士の衝突防止も図る必要がある。このため、駅構内には列車の位置を検知する列車検知装置と、運転手に安全な状態や危険を知らせるための信号機、分岐

器を転換させる転てつ器があり、これらの状態を総合的に管理して安全な列車の進路を確保する連動装置が設備されている。さらに信号機が危険を知らせている場合、自動的に列車を停止させる **Automatic Train Stop (ATS)**（自動列車停止装置）も設置され、列車の安全を確保している。これらの装置を総称して、信号保安設備と呼んでいる。

(3) 駅中間

転てつ器が未設置で、列車の番線入れ替えが出来ない駅を駅中間（棒線駅）と呼ぶ。乗客の移動を実現し、列車を駅構内から次の駅構内へ走行させるためには、駅中間における列車の安全運行を確保する必要がある。特に駅中間では、列車同士の進行方向を揃え、列車間隔を保って衝突防止を図る必要がある。このため、駅中間では、列車の位置を検知する列車検知装置と、運転手に安全な状態や危険を知らせるための信号機、列車の進行方向を揃え、適切な列車間隔を確保するための閉そく装置、信号機が危険を知らせている場合、自動的に列車を停止させる **ATS** が設置されている。

(4) 二元三位式軌道回路

二元三位式軌道回路を用いた駅中間閉そく信号機 の概念と構成を図 2.3 に示す。二元三位式軌道回路の軌道リレーは、軌道回路電流と基準となる局部電流（**Local current**：信号用高圧配線(**Signal high voltage line**)から得られる電流）との位相により次に示す 3 値の情報を提供する。

- ① 自軌道に列車あり（受信軌道電流なし(**no current**))
- ② 自軌道に列車なし、前方軌道に列車あり（受信軌道電流が局部電流と逆位相(**anti-phase**))
- ③ 自軌道に列車なし、前方軌道に列車なし（受信軌道電流が局部電流と同位相(**in-phase**))

この軌道回路を用いれば、前述したように **R,Y,G** の 3 現示の色灯式信号機を制御できるが、それ以上の閉そく信号機の多現示化（警戒信号 **YY**、減速信号 **YG**）が必要な場合は、ケーブルを敷設して、前方の駅中間閉そく信号機の現示情報などを得ることで実現している。

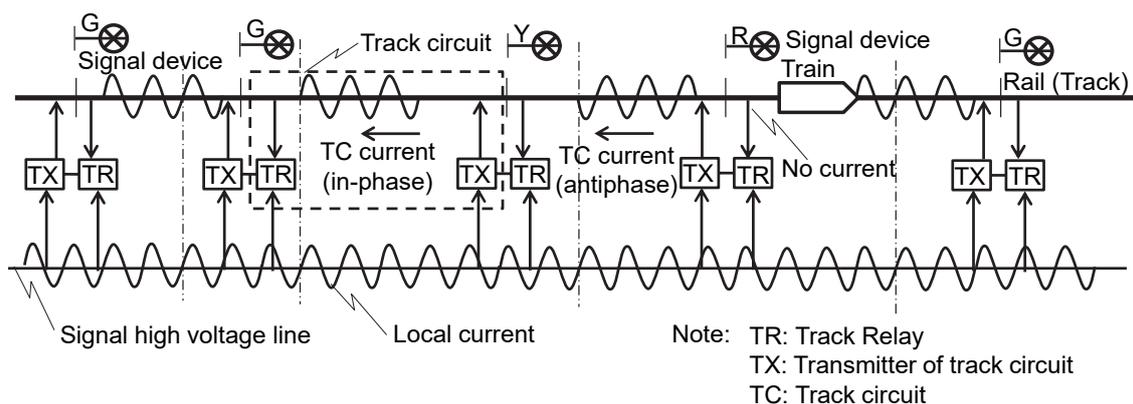


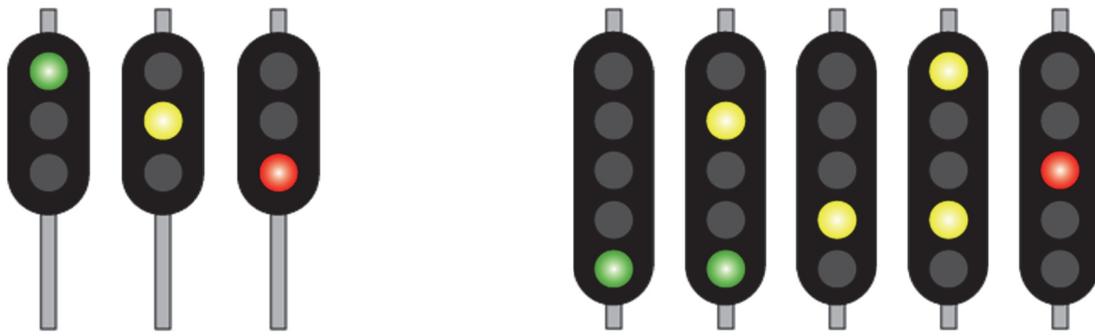
図 2.3 二元三位式軌道回路の構成と概念

(5) 閉そく信号機

閉そく信号機は、閉そく区間の入口に設置され、列車の制限速度に対応した色灯を現示する信号機である。閉そく信号機に用いられる色灯式の信号現示と制限速度との関係は、表 2.1 に示すとおりである。また、閉そく信号機の外観を図 2.4 に示す。

表 2.1 5 現示の閉そく信号機の信号現示と速度制限の例

Aspect	Lighting pattern	Speed Limit
Proceed signal (G)	One green light	No limit
Reduced speed signal (YG)	Green and orange-yellow lights	50km/h～95km/h
Caution signal (Y)	One orange-yellow light	40km/h～65km/h
Caution signal (YY)	Two orange-yellow lights	25km/h
Stop signal (R)	One red light	0km/h



(a) 3 現示の閉そく信号機

(b) 5 現示（多現示）の閉そく信号機

図 2.4 閉そく信号機

2.2.3 軌道回路の種別

軌道回路が提供する列車検知情報は、信号機や転てつ器などの列車運行に直接影響がある機器の制御条件に用いられることから、高い安全性が求められている。そのため、周囲の電磁環境の影響や干渉を避ける必要があり、現場の環境に応じた適切な信号周波数選定への配慮などにより安全性を確保してきた。

軌道回路の種別は以下に示す通りであるが、軌道回路の構成や、用いられる信号周波数によって識別される。このほか現場では、隣接軌道回路との橋絡（隣接する軌道回路間はレール絶縁で分離しているが、異物などで意図せずレール絶縁が短絡される事象）などによる誤検出を避けるため、隣接軌道と極性を変えたり、異なる周波数を採用したりしている。

(1) 直流軌道回路

直流軌道回路とは、レールに直流電源と直流リレーを接続して、常時リレーを動作させておき、列車の車輪でレールを短絡するとリレーが復旧する方式である。多くの鉄道で採用され、国内でも、1904年に鉄道開業時に、甲武鉄道 飯田橋～中野間で用いられた。その後も多くの鉄道で採用され、現在でも非電化区間の一部で用いられている。

なお、国内では、開業時に鉛蓄電池の直流電流をレールに流していたが、電力会社からの商用電源（AC100V）が整備されたことで、商用電源から直流（DC）へ変換できるシリコン整流器が設置され、鉛蓄電池は商用電源が停電した際のバックアップ的な役割として残された。近年では直流電化方式が主となり、レールへ直流軌道回路電流を流せない状況になったなどの理由で、多くの軌道回路が商用周波数軌道回路に置き代わっている。

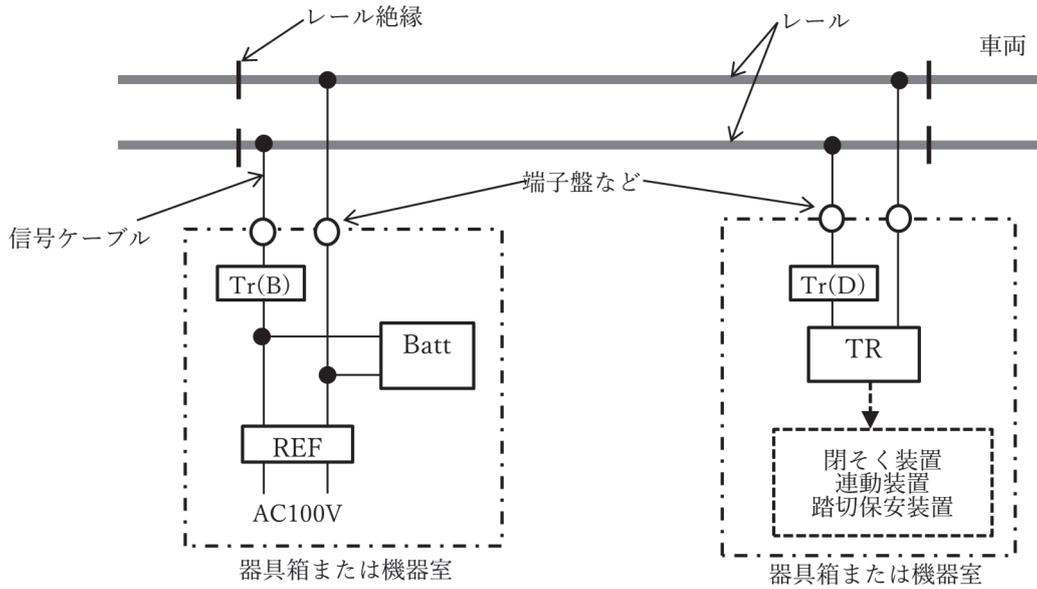


図 2.5 直流軌道回路の構成

表 2.2 直流軌道回路の構成用品

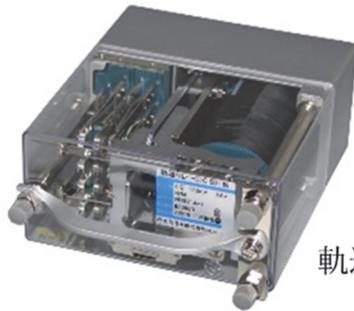
記号	名称
REF	シリコン整流器
Batt	鉛蓄電池
Tr (B)	軌道抵抗子 B 形
Tr (D)	軌道抵抗子 D 形
TR	軌道リレー



軌道抵抗子(B形)



軌道抵抗子(D形)



軌道リレー

図 2.6 直流軌道回路の主な構成用品の外観

(2) 交流軌道回路

1950年代に商用電源による交流電化が検討されるようになった。交流電化では交流 50Hz または交流 60Hz の電気車電流がレールに流れるため、同じ周波数を信号電源として用いる商用周波数軌道回路は使えなくなる。そのため、分倍周軌道回路、83/100Hz 軌道回路、分周軌道回路など、50Hz や 60Hz 以外の色々な周波数の電源を用いた各種軌道回路が考案され、現在も広く使われている。

軌道リレーは局部電源と軌道電源の 2 つの電源で動作する交流二元形リレーであり、駅中間の自動閉そく装置用に用いる二元三位形と、駅構内の連動装置用に用いる二元二位形がある。商用周波数軌道回路では、軌道回路の送電に用いる交流電源と軌道リレーの局部電源に用いる交流電源は、同一のものでなければならない。そのため、信号高圧と称する AC6,600V の専用電源を商用周波数軌道回路設備区間の全線に亘って敷設し、線条トランスと呼ばれるトランスで AC110V に降圧して使用している。

電気車電流の帰線回路の構成方法によって、複軌条軌道回路と単軌条軌道回路がある。また、トランス・軌道抵抗子・交流軌道リレーを現場の信号器具箱などに設置する機器分散方式と、これらの機器を現場には置かずに全て信号機器室に設置する機器集中方式とがある。

なお、一般のリレーはコイルが 1 つだけであり、コイルに一定以上の電流が流

れると動作し、コイルの電流を断にすると復旧する。これに対して、交流軌道リレーは局部コイルと軌道コイルの2つのコイルを有している。局部コイルには軌道回路に送電している局部電源を、軌道コイルには軌道回路から受電した軌道電源を接続する。局部電源と軌道電源の大きさが所定値以上で、かつ2つの電源の位相差が一定の範囲内のときにリレーが動作する。このように、2つの電源を使用することから、交流軌道リレーを二元形と称している。

また交流軌道リレーには、局部電源と軌道電源が同相のときと逆相のときとで動作状態が異なるものもある。軌道電源の大きさが所定値以上でかつ局部電源と同相のときはN接点(90度接点)閉成・R接点(45度接点)解放・D接点解放、逆相のときはN接点解放・R接点閉成・D接点解放、軌道電源の大きさが所定値未満のときはN接点解放・R接点解放・D接点閉成と三つの状態を有している。このようなリレーを二元三位形の交流軌道リレーと称し、駅間の閉そく装置用の軌道回路に使用している。二元三位形の交流軌道リレーを用いることにより、閉そく信号機に進行・注意・停止の3つの信号現示を制御することができる(二元三位式軌道回路の詳細は、2.2.2項の(4)の解説を参照)。局部電源と軌道電源が同相のときのみ動作する交流軌道リレーを二元二位形の交流軌道リレーと称し、駅構内の連動装置用の軌道回路に使用している。

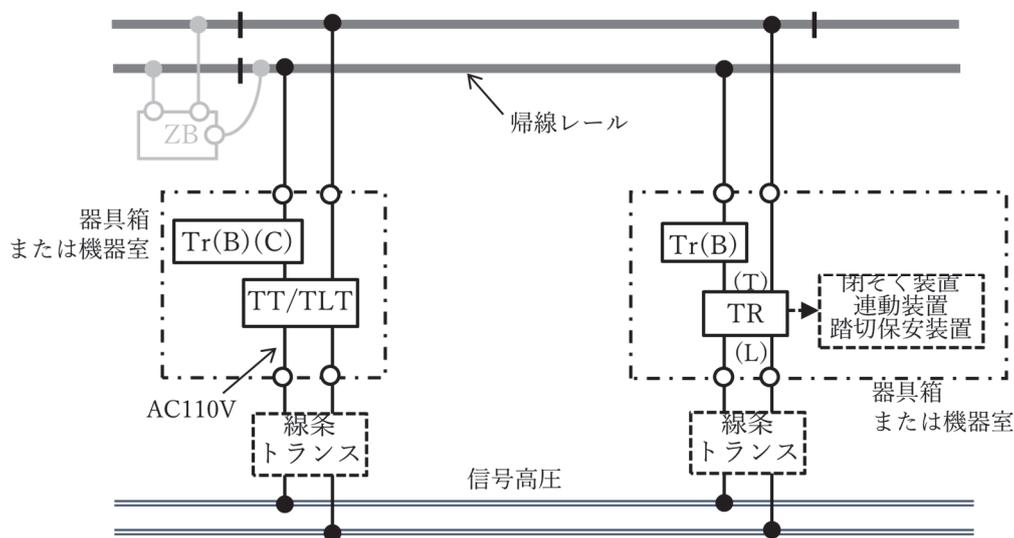
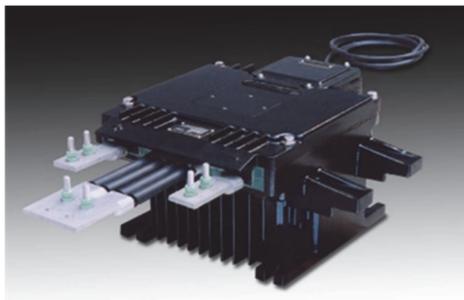


図 2.7 交流軌道回路の構成 (直流電化区間・単軌条・機器室分散)

表 2.3 交流軌道回路の構成用品

記号	名称
TT/TLT	軌道トランスまたは 軌道信号灯トランスを使用
Tr(B)(C)	軌道抵抗子 B 形×2 または 軌道抵抗子 C 形×1 を使用
Tr (B)	軌道抵抗子 B 形
TR	軌道リレー



インピーダンスボンド
乾式DC商用1000A



軌道信号灯トランス



軌道抵抗子 (B形)



軌道リレー

図 2.8 交流軌道回路の主な構成用品

(3) AF 軌道回路

交流軌道回路の内、可聴周波を使用するもので、Audio Frequency を略して AF 軌道回路と呼ばれている。AF 軌道回路には、機器室集中方式と機器分散方

式があり、機器室集中方式は、その構成上、列車検知機能のみの機能を有しており、二位式軌道回路である。機器分散方式は閉そく信号機に使用され、前方の閉そく信号機の現示情報を受けて、閉そく信号機の信号現示を制御する三位式である。どちらの方式も、AF 軌道回路の現場機器（インピーダンスボンドなど）を使用できるように搬送周波数は 600Hz 帯と 900Hz 帯を用いている。また、信号波を 2 波受信することで列車検知を行い、情報の安全と信頼度を確保しており、機器の冗長構成は、送信系が待機予備で、受信系が並列二重になっている。

図 2.9 に機器室集中方式の構成図を示す。機器室集中方式では、信号の安全性と信頼性はメカニカルフィルタで実現しており、二位式軌道回路であることから、機器分散式に比べてフィルタの種類は少ない。またケーブル混触対策として、スキヤニング式混触検知装置を設備している。

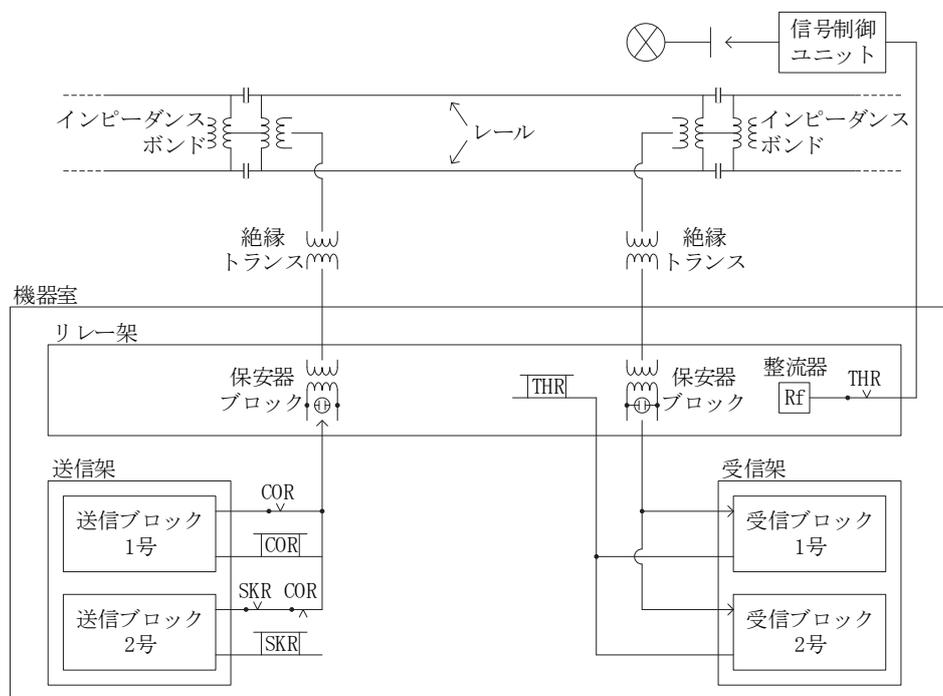


図 2.9 AF 軌道回路の構成（機器室集中方式）

図 2.10 に機器分散方式の構成図を示す。送信器は待機二重系構成であり、受信器は並列二重系構成として冗長性を持たせることで稼働率を確保している。

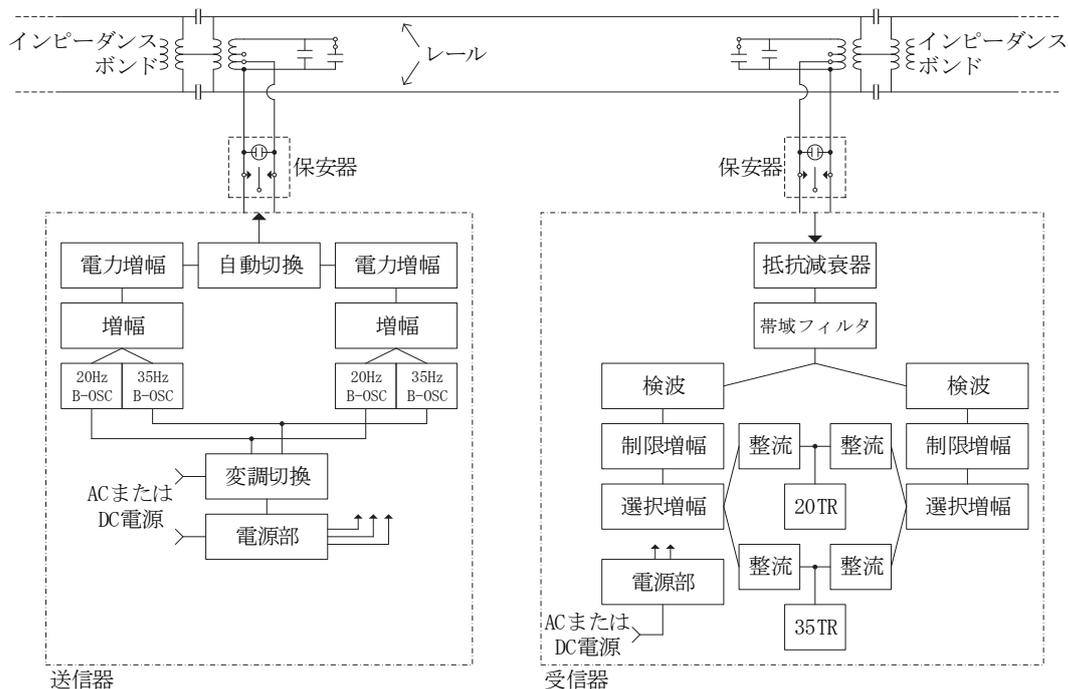


図 2.10 AF 軌道回路の構成 (機器室分散方式)

(4) 構内軌道回路 (SMET)

従来の駅構内などで使用される軌道回路装置は、二元二位の軌道リレーを用い、商用周波数あるいはその分周周波数を信号として列車を検知している。この軌道回路は、軌道回路毎に電源トランス・中継トランス・軌道抵抗子・位相調整器・パワーアップコンデンサなどの周辺機器により構成されており、周辺機器の定数を変更することで、軌道電圧と局部電圧の位相差を調整している。

さらに、軌道回路は天候などの軌道環境の影響を受けやすく、季節の変わり目には軌道回路毎の再調整を必要とする場面も少なくなかった。これらの調整作業の容易化やレベル変動への対応や保守作業の軽減に加え、軌道リレーの集約化を図る目的から、マイクロエレクトロニクス化したプログラム制御式の軌道リレー **Micro Electronics Track Relay (METR)** が実用化された。

METR はフェールセーフなマイクロプロセッサを使用し、1 台で 8 軌道回路を一括制御可能であり、軌道環境の変化の影響を自動補正するレベル学習機能を有している。そのため、軌道調整作業は、送電側の電圧調整のみというメリットがある。しかし、送電側は従来の構成であるため、送電電圧などの調整はトランスのタップを変更する必要があるため、この調整作業は、軌道回路毎に行う必要があるため、時間と人手を要していた。

課題の改善および信号設備のメンテナンスフリー化を目指し、**METR** の技術

をベースに、列車検知信号の送受電を一括で処理できる SMET が開発された。SMET は 120Hz の 5 サイクル毎 (144Hz では 6 サイクル毎) に軌道回路 (送信点) を順次切り替えて送信し、250ms で 6 軌道回路を一巡する切替器を 2 組実装して、合計 12 軌道回路に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している。SMET の主な特徴を、以下に示す。

- ① 1 台で最大 12 軌道回路まで処理可能
- ② 軌道回路へ時分割送信することで省エネルギー化を実現
- ③ LF 帯の信号周波数 (50Hz 区間用 : 120Hz、60Hz 区間用 : 144Hz) を使用しているため、漏れアドミタンスに強い
- ④ 天候などによる軌道回路の受信レベルの変動に対応する自動学習機能を有する
- ⑤ 複軌条軌道回路で 800m、単軌条軌道回路で 500m まで制御可能
- ⑥ 従来の軌道回路で使用しているインピーダンスボンドや中継トランスがそのまま使用可能
- ⑦ 従来の軌道回路に比べて、調整時間を大幅に短縮可能

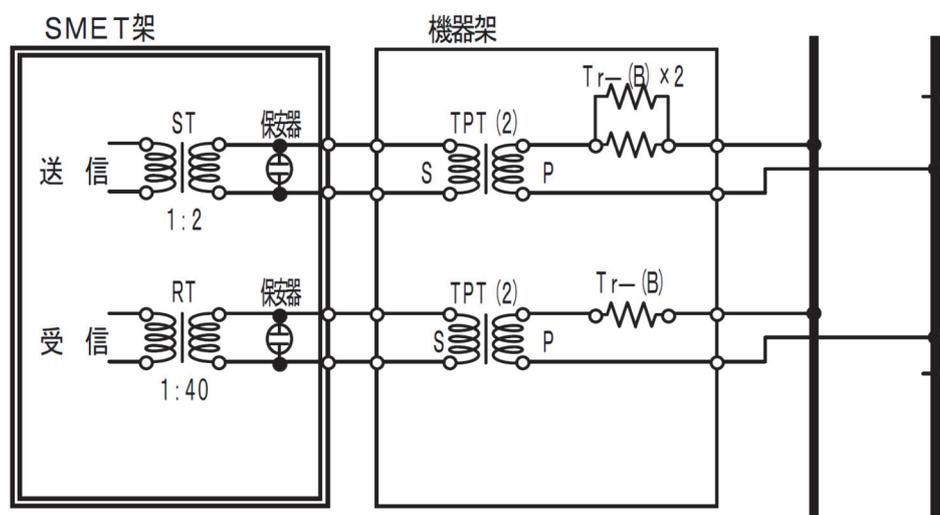


図 2.11 SMET の機器構成例 (単軌条軌道回路)

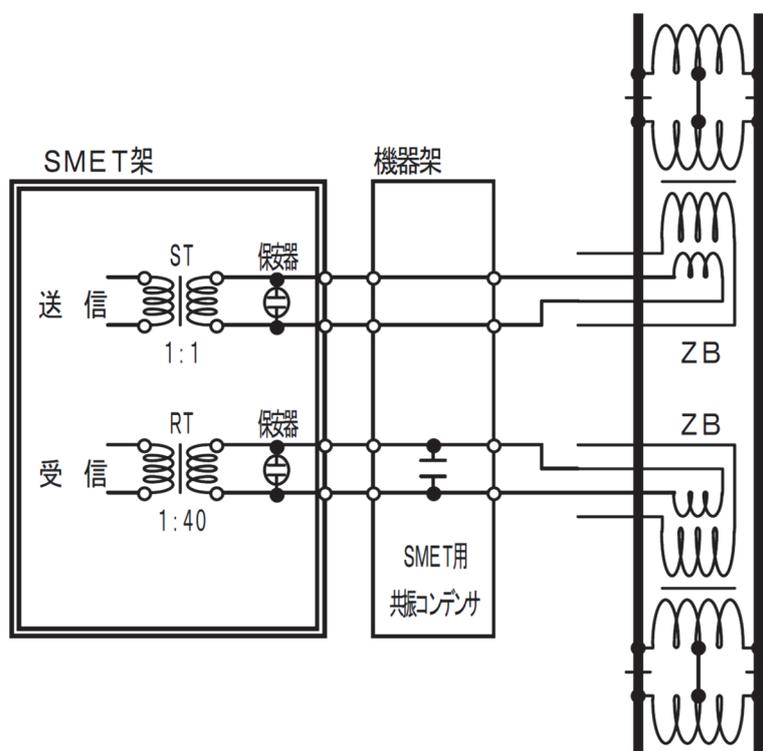


図 2.12 SMET の機器構成例（複軌条軌道回路）



図 2.13 SMET 外観

図 2.14 に、ダイナミックスキヤニング方式の概要を示すが、この方式は、各軌道回路へ時分割で送信する順番を 250ms 毎に変化させており、SMET は 4 種類の時分割送信パターンを持ち、この 4 種類の組み合わせにより、大駅の複雑な構内でも列車検知を可能としている。

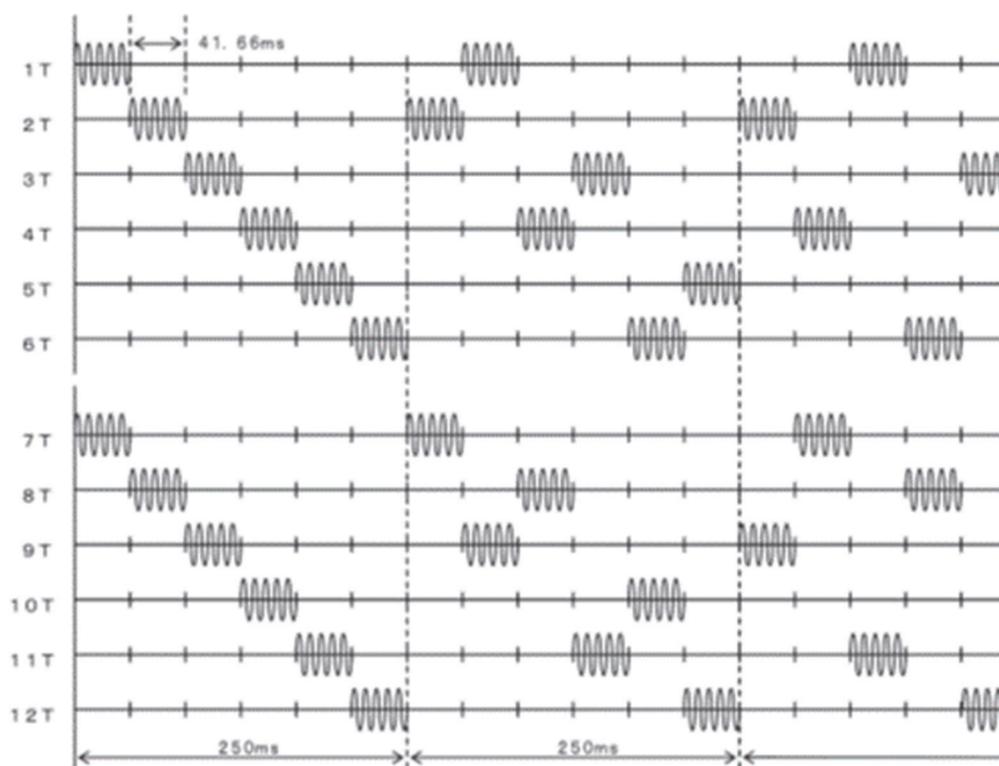


図 2.14 ダイナミックスキヤニング方式

(5) ATC

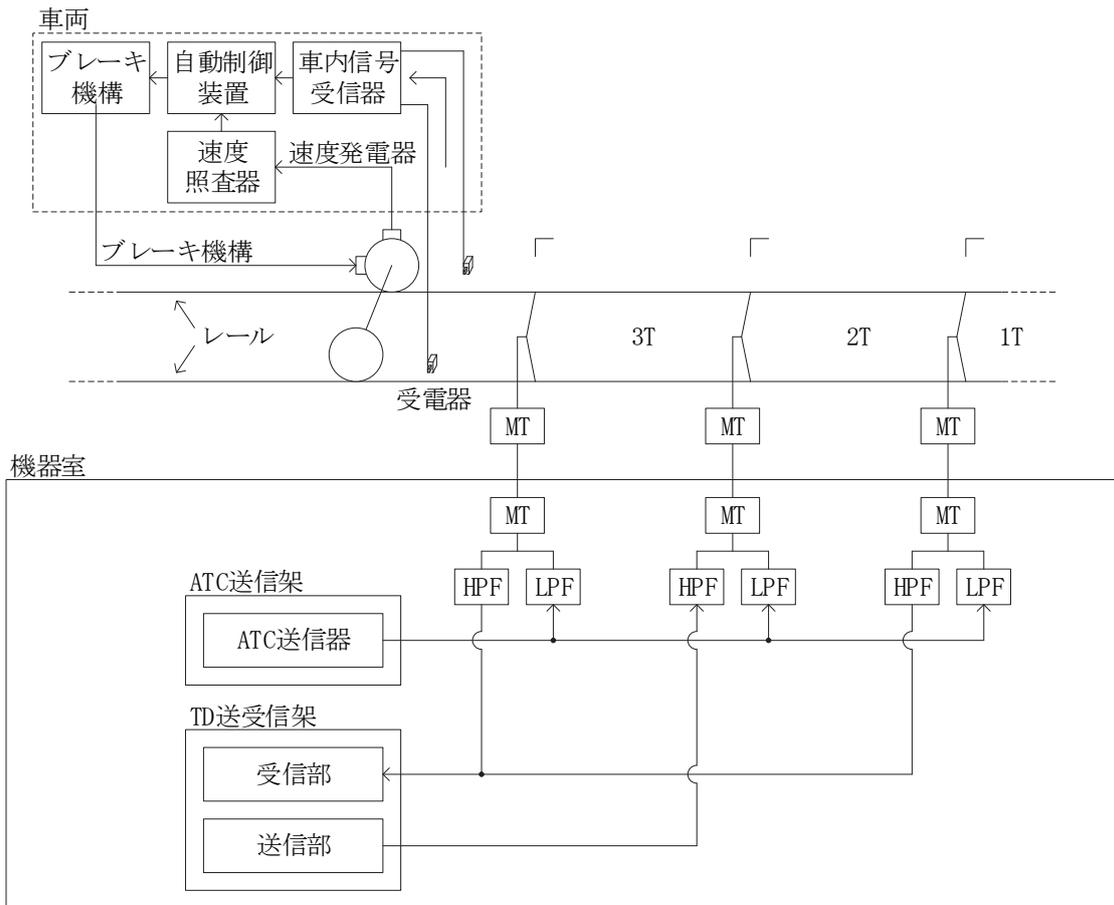
Automatic Train Control (ATC：自動列車制御装置) とは、先行列車との間隔ならびに進路の開通状況に応じて、許容運転速度情報を地上から車上に伝送すると共に、車上において列車の速度を連続的に照査し、許容速度以下になるように列車操縦制御における減速制御を機械主体で自動的に行われるシステムである。

1961 年、帝都高速度交通営団(現東京メトロ)の日比谷線 南千住～仲御徒町間に、国内で初めての ATC が設備された。ATC は、当時急速に発達したエレクトロニクス技術を全面的に取り入れたものである。2,300～3,500Hz の 4 波を搬送波として用い、G,YG,Y,YY,R の 5 現示と切替用の計 6 情報に対応した 10～85Hz の信号波を FSK 変調し、ATC 信号として軌道回路に送信する。この ATC 信号を軌道回路の他端で受信し、列車検知として使用する。列車に ATC 信号を受信・解析する車上装置

を搭載し、軌道回路から受信した信号現示と列車速度とを比較し、列車速度が許容値を超えていれば自動的にブレーキを作動させるものであった。

1964年に開業した東海道新幹線では、信号保安装置としてATCが全面的に採用された。基本的な構成や動作は前述のものと同様であるが、交流電化で電気車電流も非常に大きいことから、電源同期SSB方式が採用された。その後、新幹線ではATC信号に主と副の2波を用いた2周波ATCが開発され、さらに許容速度そのものをデジタル符号として軌道回路に送信する方式が開発された。

現在、新幹線をはじめ列車密度の高い在来線や地下鉄などに、ATCが数多く設備されており、ATC信号を列車検知と地上・車上間の情報伝送に供用する方式の他に、列車検知機能とATC信号送信機能を分離した方式など、様々なATCが開発・実用化されている。ATCのシステム構成図と外観を図2.15および図2.16に示すが、ATCは、ATC地上装置、ATC車上装置、軌道回路、信号伝送路（電線路）、電源装置などにより構成される。



※MT : Matching Trans、HPF : High Pass Filter、LPF : Low Pass Filter

図 2.15 ATC のシステム構成図



図 2.16 ATC/TD 送受信架外観

ATC の種類は、多段制御方式と 1 段制御方式があり、前者をアナログ伝送方式、後者をデジタル伝送方式(D-ATC または DS-ATC)に分けられる。図 2.17 にアナログ伝送方式の ATC の動作原理を示すが、図に示すように、閉そく区間を設け、軌道回路による列車検知情報と連動装置からの進路情報により、地上側から閉そく毎に許容速度を設定し、それに応じた ATC 信号をレールに送信することで車上へ速度情報を伝送している。車両のブレーキ性能に関係なく階段状のブレーキ制御を行うため運転時隔の短縮が困難である。加えて階段状のブレーキ制御により、ATC 常用ブレーキがかかったときの乗り心地が悪いなどの課題がある。

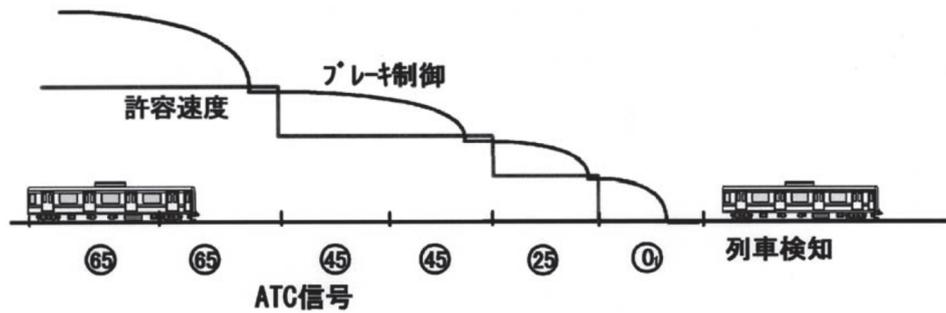


図 2.17 ATC (アナログ伝送方式)

図 2.18 にデジタル伝送方式の ATC の動作原理を示すが、図に示すように、車上装置が現在の列車位置から停止位置までのブレーキパターンを生成し、そのパターンに追従する形で速度制御されることで階段状のブレーキ制御ではなく、停止点まで連続的にブレーキをかけて停止する。車上装置は、走行速度とブレーキパターン速度を比較して、ブレーキパターン内に収まるようにブレーキを制御する。これにより、運転時隔の短縮、乗り心地の向上、異なるブレーキ性能をもつ車両に対しても適切なブレーキパターンを生成できる。

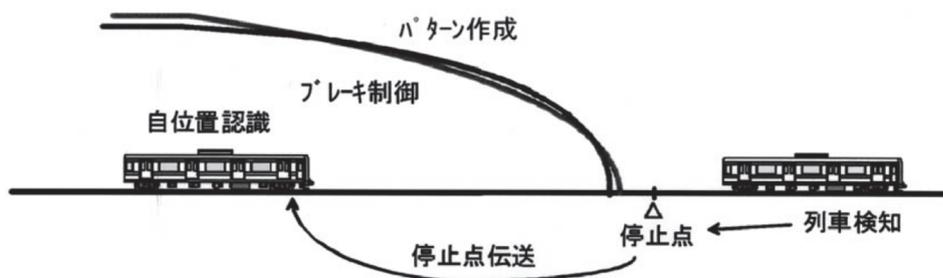


図 2.18 ATC (デジタル伝送方式)

2.3 軌道回路の課題

2.3.1 軌道回路と制御性能

軌道回路は、(1)列車検知機能、(2)情報伝達機能、(3)レール破断検知機能の 3 つの機能を有している。

(1) 列車検知機能

軌道回路は、レールを電気回路の一部として利用し、列車や車両の有無を検知する。列車は、電気を通す鉄でできている 2 本のレール上を走行しており、左右の車輪も左右の車輪をつなぐ車軸も鉄でできているため、車輪間には電気を通すことができる。軌道回路は、鉄でできたレール、レール上を走行する列車の車輪と車軸は鉄でできていることを巧妙に利用した設備である。また列車は、レール上以外は絶対に走行しないことも、軌道回路の特筆すべき前提条件と言える。

軌道回路の原理を以下に示す。軌道回路は、2 本のレールと送信器および受信器で構成される。送信器から列車検知信号が送出され、2 本のレールを流れて受信器に達する。受信器は列車検知信号が受信できれば「列車なし」、受信できなければ「列車あり」とする。図 2.19 は列車がない状態であり、受信器で列車検知信号を受信しているため「列車なし」となる。

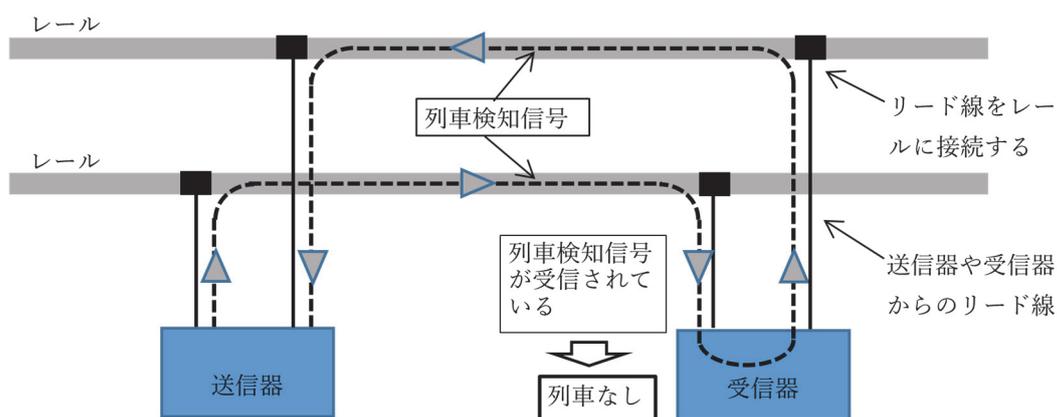


図 2.19 軌道回路の原理（「列車なし」のとき）

図 2.20 は、送信器と受信器の間に列車が在線している状態である。列車の車輪と車軸は鉄でできているため、送信器から送出された列車検知信号は、一方の車輪→車軸→他方の車輪を通ることになり、受信器側には流れなくなる。このため、受信器には列車検知信号が届かず「列車あり」となる。

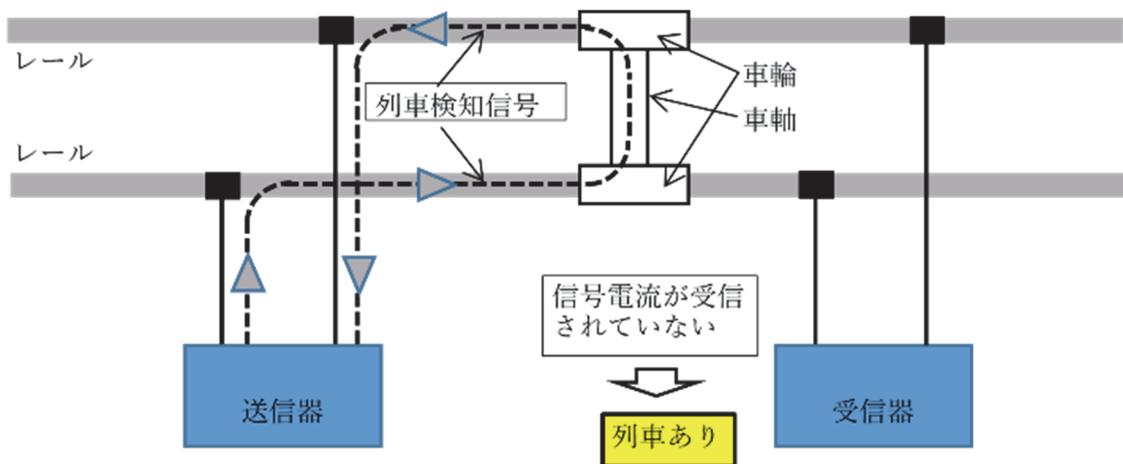


図 2.20 軌道回路の原理（「列車あり」のとき）

鉄道信号において、列車検知は要の機能であり、フェールセーフを中心とした高い安全が求められる。構成機器の何れかが故障した場合でも、確実に列車ありと判定し、安全を確保する必要がある。例えば、自動車の位置情報を表示するために利用されている Global Positioning System (GPS) は、衛星の位置、周囲環境によっては測位精度に差が生じることから信頼性に課題が残っており、単独で列車位置検知には用いられていない。

一方で軌道回路は、構成部位の何れかで故障が発生しても受信器で信号電流が受信できず、確実に列車ありと判定できるため、列車検知におけるフェールセーフ技術のモデルとして、現在でも国内だけでなく世界中で広く使われている。

(2) 情報伝達機能

自動閉そく区間では、軌道回路に送り出す信号電流の性質を変えることにより、閉そく信号機の信号現示を変えることができる。自動閉そく区間には、商用周波数軌道回路や分倍周軌道回路などが用いられ、電源の位相をそのまま送電して軌道リレーが定位側に動作すると進行信号を現示し、電源位相を転局送電して軌道リレーが定位側に動作すると注意信号を現示し、途中で輪軸があつて軌道リレーが定位側にも反位側にも動作できないときには停止信号を現示する。このように閉そく信号機間にケーブルを敷設することなく、軌道回路は、進行信号と注意信号の情報を伝送することができる。また ATC 区間においては、軌道回路の電流を利用して列車の運転台に車内信号を現示することができる。以上のように、軌道回路は離れたところに情報を伝送する機能を有している。

(3) レール破断検知機能

列車が走行するレールは、過大な応力を受けて亀裂・破断・折損などの障害が発生することがあり、これらの障害は列車運転に重大な影響を与える可能性がある。軌道回路はフェールセーフ性を確保しているため、これらの障害が発生した場合でも、確実に列車ありと判定し、安全性を確保することができる。

しかし、軌道回路は、使用する自然環境、軌道の設備環境、鉄道の電気方式、き電方式、電気車からの雑音などの環境条件が多様で、複合した条件が軌道回路の機能に影響をもたらす課題がある。2.3.2 節では、環境条件が軌道回路に及ぼす影響について説明する。

また、その他の軌道回路の課題として、2.3.3 節で軌道回路が故障した際に原因の特定と復旧に時間を要しているなどの保全面の課題を、2.3.4 節で省エネルギー化に関する課題を説明する。

2.3.2 軌道回路と環境

本節では、環境条件が軌道回路に及ぼす影響について説明する。

(1) 雑音に対する検討

軌道回路装置では、レールを電気的な回路として列車の有無を判断しているが、レールは汚損や湿気などの自然環境、変電所の影響や車両技術の進歩に伴う電流特性の変化など、様々な外部要因による雑音の影響を受ける。図 2.21 にレールの敷設状態を示すが、左右のレールは、一定間隔で設置されたまくらぎで固定され、バラストなどの道床に設置されている。バラストなどの道床は、盛り土・切り通し・高架橋・トンネルなどの土木構造物上に設置される。



図 2.21 レールの敷設状態

軌道回路においては、電気を流す導体はレールやレールボンドなどであり、電気を流さない絶縁体はまくらぎ・パッド・バラストなどとなる。軌道回路の絶縁は、理想的な状態であれば特に問題とはならないが、まくらぎ・パッド・バラストなどは、常に野ざらし・雨ざらしであり、雨に濡れたり、パッドの周りに汚れが付着したり、バラストに土砂などが混じると、左右のレール間やレールと大地との間に漏れ電流が流れてしまう。この漏れ電流は、列車検知信号の周波数によって大きく変わるため、軌道回路種別ごとに標準的な条件下での最大軌道回路長が定められている。しかし、漏れ電流は周波数だけでなく、軌道回路の設置環境（盛土／高架／トンネル、バラスト軌道／スラブ軌道）に左右されるほか、季節（梅雨／降雪）や天候（晴れ／雨／雪解け）によっても変動するため、軌道回路は、これらの外部要因の雑音の影響を対策した上で、安全性を確保する必要がある。

(2) 受信レベルの変動

実際の鉄道信号における現場環境では、軌道回路に流れる電気車電流などの影響により、軌道回路信号の受信レベルが変動する。また降雨などの天候要因で軌道回路の漏れコンダクタンスが増大し、許容している漏れ変動幅の想定値を超えると、レベルが低下して、軌道回路の不正落下が発生する。そのため、駅構内の既存のデジタル式軌道回路である SMET では、しきい値レベルの自動追従などにより環境条件の変化に追従する高信頼化策が採用され効果をあげているが、駅

中間の軌道回路では特に対策が進められていない。

なお、レベルの自動追従や補正（学習機能）を行う際、列車によるレベル変動と外乱によるレベル変動を区別して行わないと危険側の制御になる可能性がある。具体的には列車の短絡不良による微小なレベル低下に対して、外乱による変動として補償量を自動的に上げてしまうと危険側の制御となるため、当該軌道回路に列車在線している際は、レベルの追従や補正を行わないことで安全性を確保している。

2.3.3 軌道回路と保全

本節では、軌道回路の保全面に関する課題について説明する。

(1) 検査車による点検

軌道回路は、列車の安全運行を確保するため、列車検出する上で重要な役割を果たしている。そのため、鉄道事業者は軌道検査車を使って、定期的に線路の状態を点検している[20]。しかし、点検をしているにも関わらず、レールの破損など、線路の損傷は依然として多く見られ、悪条件が重なると脱線などの重大事故につながる可能性もある。なお、専用の軌道検査車による点検は、費用がかかるため、中小規模の鉄道事業者ではコスト面の問題から、十分な軌道検査車による点検が出来ないケースが多い。



図 2.22 検測車によるレールの点検

(2) 監視システムによる状態監視

既存の軌道回路では、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。図 2.23 に、SMET 用の軌道回路モニタ (SMET モニタ) の画面例を示す。SMET モニタは、過去に蓄積された各軌道回路の受信レベルや隣接する軌道回路の漏れ電圧などを表示することができ、軌道回路の故障原因の特定に役立つ。しかし、送受信レベルの変動は、天候や軌道回路ごとに異なるため、レベル変動の傾向から軌道回路の故障の兆候を検出する技術は完全には確立されていないのが実情である。

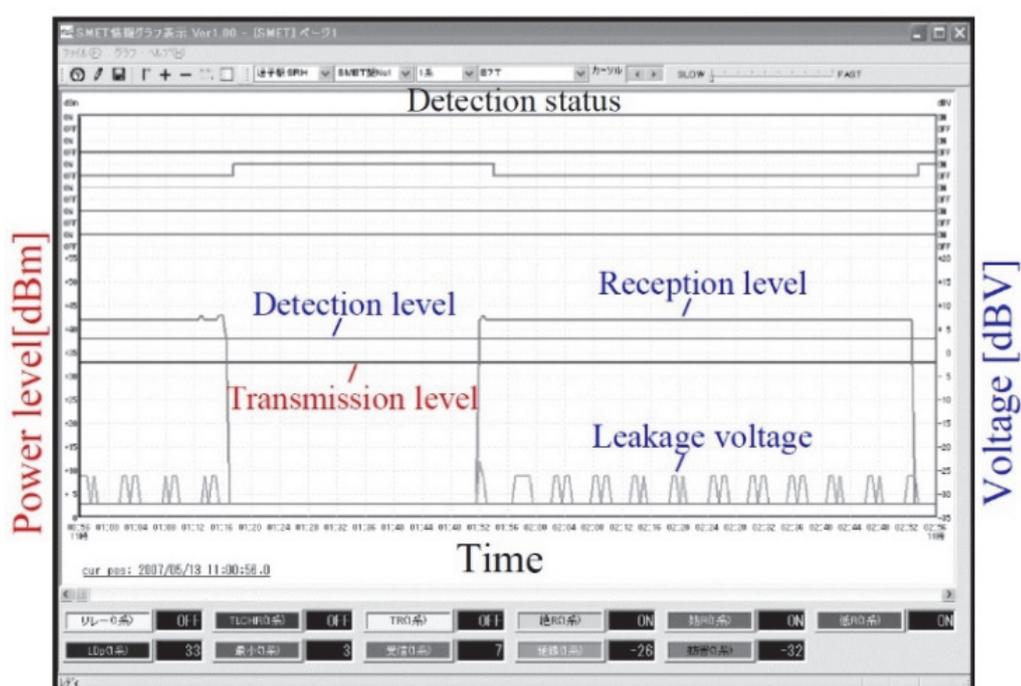


図 2.23 SMET モニタの画面例

(3) 専用測定器によるレールの調査

現状、レール故障により、軌道回路が予期せず遮断された場合、レールを歩いて、電圧の測定に加えて、サーチコイルなどの専用測定器を使用した信号電流を測定している。電流が変化している場所付近で何らかの故障が発生している可能性が高いため、電流分布を把握しながら調査を行っているが、原因究明および復旧にはかなりの時間を要している。



図 2.24 専用測定器によるレールの調査

(4) 軌道回路が不平衡時の調査

軌道回路には信号電流と帰線電流が流れるが、左右のレールに大きな帰線電流が流れると、信号電流に影響を与え、軌道回路が不平衡になる。軌道回路が不平衡になると、鉄道事業者は、帰線電流測定器などの専用測定器を使用して原因を調査する。この装置は、図 2.25 に示すように、クランプコイル式の電流センサと測定装置を使用して、レールを流れる帰線電流を測定する。

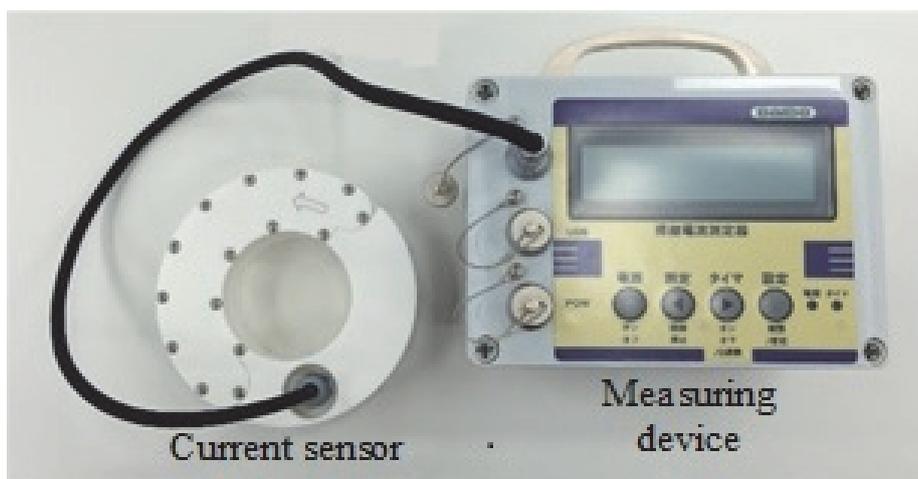


図 2.25 帰線電流測定器の外観

現場での測定方法を図 2.26 に示す。現場に電流センサと測定器を設置し、左右のレールに流れる電流を測定する。測定データは複数の測定器に保存されており、必要な測定データを無線で解析装置に送信し、データ分析することで故障原因を特定する。しかし、軌道回路故障発生後の現場への測定器の設置、長時間のデータ測定、測定終了後の現場からの測定器の取り外しなど、調査には時間と労力がかかっている。

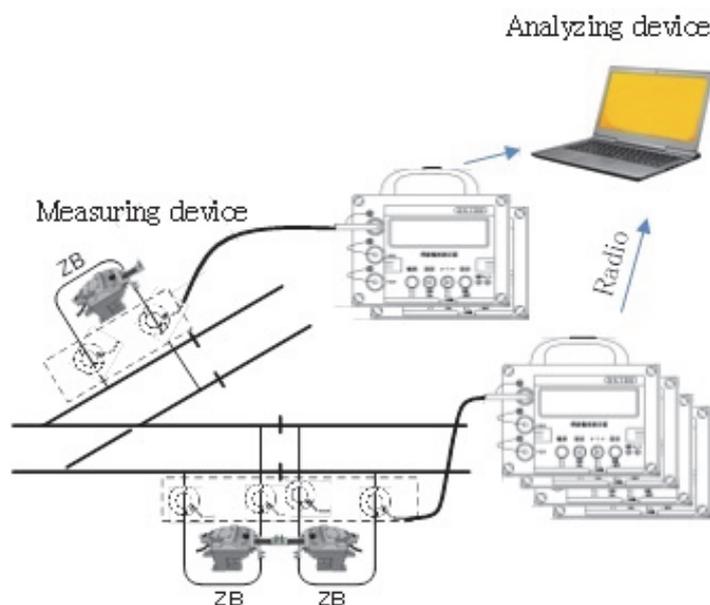


図 2.26 現場での測定方法

2.3.4 軌道回路と消費エネルギー

1904年に直流軌道回路が国内で初めて設備された以降、色々な種類の軌道回路が設置されてきたが、現行の軌道回路は、軌道回路信号として交流電流信号（AC）を連続して送信しており、消費エネルギーが高いため、省エネルギー化の課題があった。

駅構内の軌道回路については、ハードウェアの削減や設備の省エネルギー化が図られてきた。具体例をあげると、1990年代の後半に開発されたマイクロコンピュータを使用したデジタル式の軌道回路であるSMETは、1台で駅構内の12軌道回路に時分割送信し処理するため、ハードウェアが少なくなり信頼性や保守性に優れており、省エネルギーである。

一方、駅中間に関しては、軌道回路が線路に沿って直列に配置され、機器間の距離が長く駅構内のように1台の装置で処理を行うとケーブル敷設量が膨大になるため、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。その結果、ケーブルの削減や省エネルギー化の課題が改善されず、現在に至っている。

2.4 まとめ

軌道回路は、鉄道信号において、最も安全確実にフェールセーフを確保した列車検知方式であり、わが国にて100年以上の長きに亘り、現在でも使われている。軌道回路は、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が、環境面、保全面、省エネルギー観点から、以下の課題があることを明らかにした。

(1) 環境面

レールは自然環境や変電所の影響など、様々な外部要因の雑音の影響を受ける。レールが雨に濡れ、バラストに土砂などが混じると、軌道回路に漏れ電流が流れてしまうが、漏れ電流は周波数や設置環境、季節や天候によっても左右されるため、軌道回路はこれらの影響を対策して、安全性を確保する必要がある。

さらに、軌道回路に流れる電気車電流や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、不正落下の発生にいたる。そのため、しきい値レベルの自動追従や補正などの高信頼性対策を行う必要があるが、列車と外乱によるレベル変動を区別しないと危険側故障にいたる可能性がある。

(2) 保全面

軌道検査車による定期点検は予算がかかるため、中小の鉄道事業者では十分な検査が行えていない。また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。さ

らに、監視装置にて軌道回路の送受信レベルを測定して予防保全を目指しているが、送受信レベルは天候や軌道回路ごとに異なるため、故障予兆の把握は十分にできておらず、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。

(3) 省エネルギーの観点

駅構内については省エネルギー化の対策が進んでいる。しかし、駅中間については、ケーブル敷設量が膨大になるため、駅構内と同等の対策を行うことができず、既存の軌道回路を長く用いてきた結果、省エネルギーの課題が改善されず、現在に至っている。

第3章 孤立波軌道回路の提案

3.1 まえがき

本章では、本論文で提案する SW-TC の基本原理を説明し、SW-TC がケーブルレスで省エネルギー化を実現できる理由について述べる。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を設定することで、SW-TC の多情報化が図れ、さらに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、SW-TC は列車の在線位置の把握だけでなく、様々な機能拡張が図れることを説明する。

3.2 提案する孤立波軌道回路

駅構内の軌道回路では、SMETによる時分割送信など、省エネルギー化の対策が進んでいるのに対し、駅中間の軌道回路では、従来からの軌道回路が長く用いられており、ケーブル削減や省エネルギー化が進んでいない。これらの課題を改善するため、本論文では、既存の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、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を図る新しい信号制御方式であるSW-TCの研究・開発を進めることにした。SW-TCは、駅中間の軌道回路として使用することが可能であり、複数の孤立した波形を送信サイクル中の一部分に送り、個々のWSの位置関係から、多くの情報を識別し、省エネルギー化が可能である。新しい信号制御方式であるSW-TCは、世界でも例がなく、現行の方式とは異なり、ケーブルレスで前方軌道回路の情報を取得して多現示式信号機制御を実現できる。その他にも、SW-TCの特徴として、耐雑音性能の向上や二元三位軌道回路と比して軌道回路の調整容易化が実現できることがあげられる。

本論文では、さらにSW-TCが送信する軌道回路信号に、フレームの開始を意味するSEを設け、また、フレーム中の一部を固定ビット列としてフィールドを定義して情報と対応させることにより、情報量の大幅な拡大および機能拡張が図れることを明らかにした。

なお、機能拡張により、SW-TCは、単線区間における運転方向切替えに関する機能や、デジタルATC 相当の列車保安制御機能の実現可能だが、これらの機能については第5章で説明する。さらに、第6章で、SW-TCによるRAMS性能 (Reliability (信頼性)、Availability (可用性)、Maintainability (保守性)、Safety (安全性) の英語の頭文字) の向上効果と、SW-TCにおける省エネルギー化の向上効果について説明する[21]。

3.2.1 孤立波と波源

SW（孤立波）とは、既存の軌道回路のような連続波ではなく、連続した信号波の一部分を切り出した離散的な波形である。さらに、ある周波数の1波長のみのSWをWS（波源）とする。図3.1における実線の波形がWSの例である。破線部分はWSの間隔を説明するために示したものであり、実際には無電流を意味する。図3.1より、1周期内のWSの数やWS間の間隔によって情報を付与できる。また、1周期中で軌道回路電流が流れるのはWSのときだけであるため、省エネルギー化も図れる。

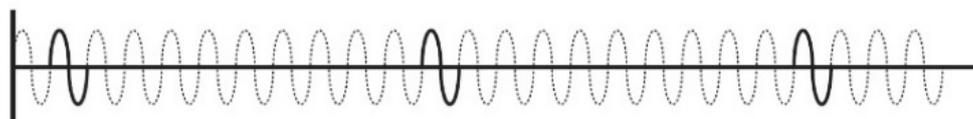


図 3.1 WS の例

3.2.2 WS と情報量

(1) WS の周波数と情報量

WS の組み合わせを多値情報に割り当てる一例を図3.2に示す。本例では、基本となるWSを25HzのSin波形1波形分としている。また、WSを2つ用意し、そのWS間の配置関係に情報を割り当てる。図3.2では、25Hzの周期をベースに2つのWSの間隔を情報として11通りの情報を得る事例を示しており、情報量は、25HzのうちWSの2波を除く無電流の23波分の空間をどのように配分するかによって決定される。

図3.2の最上段の波形例を使って具体的に説明すると、本例では、1つ目のWSと2つ目のWSの間に無電流区間を1波分、2つ目のWSと次周期の1つ目のWSの間に無電流区間を22波分割り当てており、この状態を(1:22)と定義している。同様に図3.2の2段目の波形例では、1つ目のWSと2つ目のWSの間に無電流区間を2波分、2つ目のWSと次周期の1つ目のWSの間に無電流区間を21波分割り当てており、この状態を(2:21)と定義している。すなわち無電流の空間の配分は(1:22),(2:21)・・・(21:2),(22:1)まで22通り取れるが、(1:22)と(22:1)は、孤立波信号の開始位置の違いであり、同一配分として考えることができるので、この事例では11通りの情報が取得でき、前述した二元三位式軌道回路の3情報から、情報量は大幅に増加する。

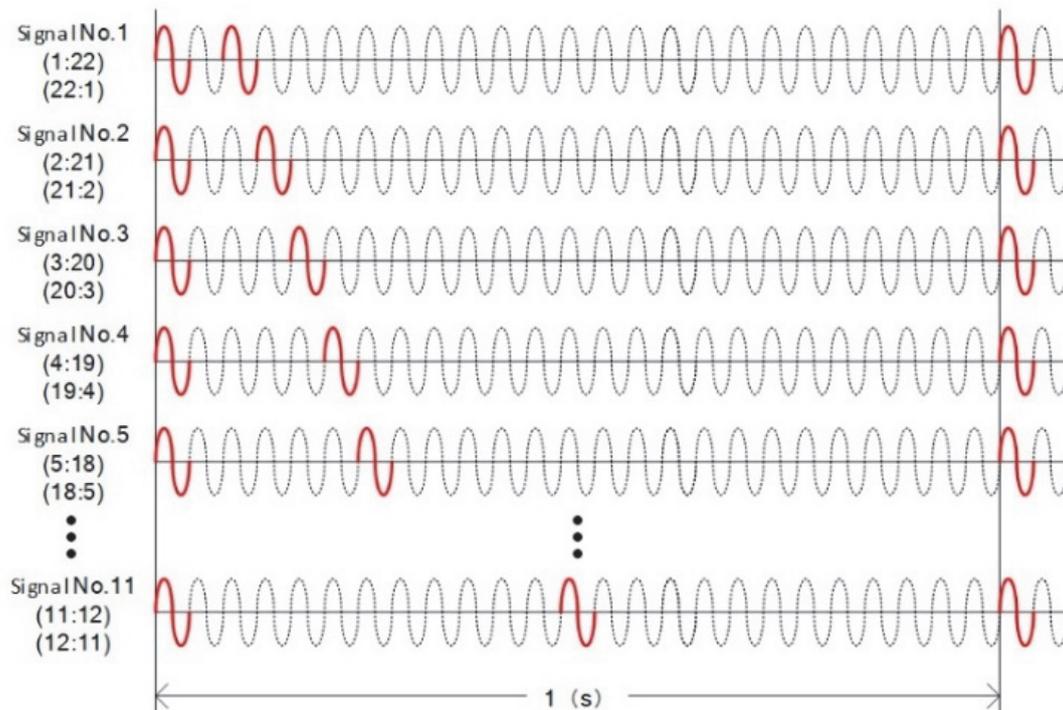


図 3.2 WS の間隔の組み合わせ例

(2) WS 数の増加による情報量の拡大

SW-TC の機能拡張には情報量拡大が必要である。1 周期 (SW フレーム) が 25Hz とした場合、情報量は 11 種ということを前述した。さらに WS を図 3.2 で示した 2 波からもう 1 波追加して 3 波とすることにより、情報量を拡大させることができる。

例えば 3 波の場合、WS を除く無電流の空間の配分は、(1,1,20), ..., (20,1,1) までの 210 種類が取得できる。ただし、(1,1,20) と (1,20,1), (20,1,1) は、孤立波の先頭をどこで把握するかとの差であり、基本的には同一である。したがって全体の情報量は 70 種ということになるが、WS が 2 波の場合の総情報量 11 種類から、大幅に増加する。このように、WS の数によって情報量を拡大できる。

なお、この事例では説明を分かりやすくするために WS として 25Hz の 1 波長を利用したが、2 波長であっても矩形波であっても同様に成立することは明らかであり、WS の形態に制限はない。また、周波数を 25Hz から 30Hz または 40Hz に上げることで、情報量を拡大できることは明らかである。

(3) WS の組み合わせと情報の割り当て

図 3.2 に示す 2 波の WS を利用した軌道回路の事例と信号制御との関係を説明する。WS を Solitary Wave No. に割り付けるにあたり、駅中間の列車の在線位置に依

存した Solitary Wave No. (信号番号) を以下のように定義する。

【第 0 信号】：列車が在線し、信号を受信できない場合

【第 1 信号】：前方軌道に列車が在線し、自軌道に列車が在線しない場合

【第 2 信号】：前方軌道の信号が第 1 信号の場合

|

【第 n 信号】：前方軌道の信号が第 n-1 信号の場合 (n ≤ 9)

また上記で定義した Solitary Wave No. (信号番号) に、図 3.2 で定義し WS の組み合わせを割り当てた一例を表 3.1 に示す。

表 3.1 WS と信号番号の組み合わせ例

Solitary Wave No. (Signal No.)	State	Solitary waveform
ID0(No.0)	A train is on the detection track	no wave
ID1(No.1)	A train exists one track ahead	
ID2(No.2)	A train exists two tracks ahead	
ID3(No.3)	A train exists three tracks ahead	
⋮	⋮	⋮
ID9(No.9)	A train exists eleven tracks ahead	Omitted

図 3.3 に閉そく区間に 1 列車が在線している例を示すが、この例に示すように、前方の在線位置により列車後方に第 1～9 信号の Solitary Wave No. (信号番号) を送信する。なお、9 軌道以上離れた場合には、第 9 信号の Solitary Wave No. (信号番号) が同様に割り当てられる。

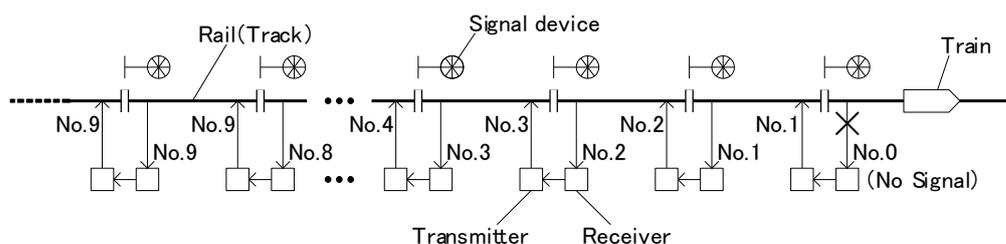


図 3.3 閉そく区間に 1 列車が在線している場合の信号番号送信例

図 3.4 に後続に列車が在線している例を示すが、後続の列車在線により Solitary Wave No. (信号番号) はクリアされて、後方の軌道には、再び第 1 信号からの Solitary Wave No. (信号番号) を送信する。

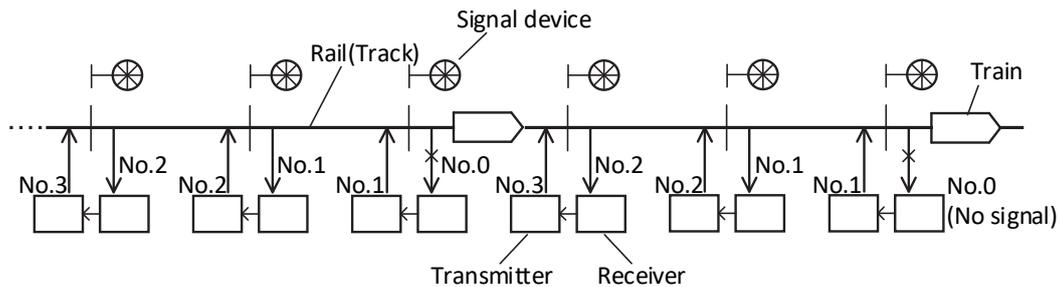


図 3.4 閉そく区間に 2 列車が在線している場合の信号番号送信例

これらの例のように SW-TC を使用することで、25Hz であれば 9 軌道前方までの在線情報を、ケーブルレスで、受信する Solitary Wave No. (信号番号) で判別することが可能となる。

(4) フレームの定義と情報量

情報量を拡大する方法として、SW フレームを WS 間の間隔で規定するのではなく、スタートエレメント(Starting Element: SE)を定義し SW フレームの区切りを定める方法を研究・開発した。図 3.5 に、SE を配置した SW フレームの例を示す。

まず、各 WS に対し、SE の先頭を 1 番としたフレーム上の位置をポジションと呼ぶ。仮に、1 つの SW フレームが 25 ポジションから成るものとし、連続 2 波からなる SE を SW フレームの先頭に配置する。残りのポジションに 1 波の WS を存在させる方式では、SE の前後にはスペースを空ける制約が生じるものの、前述した図 3.2 の例で示した 11 情報から、21 種に情報量が増える。さらに WS を 2 波に増加させると、情報量は 190 種類に増え、SE の効果が認められる。

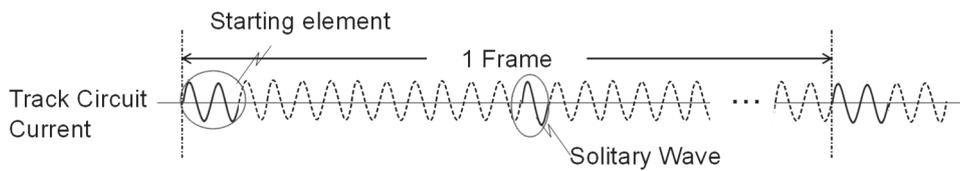


図 3.5 SE を配置した SW フレームの例

SE 付加の効果は、単に情報量の増加だけではない。SW フレームが定まることにより、フレーム内の WS のポジションに情報を割り当てることができ、SW-TC による機能拡張の道が開かれる。

3.3 孤立波軌道回路の情報と機能

3.3.1 フレームの採用と機能

増加した情報量を単なる列車在線位置の伝達のみには利用するのではなく、機能拡張に活用する方法について検討する。なお、以下の検討も 1 つの SW フレームが 25 波のポジションからなるものとするが、これに限るものではない。

(1) 情報フィールドと機能

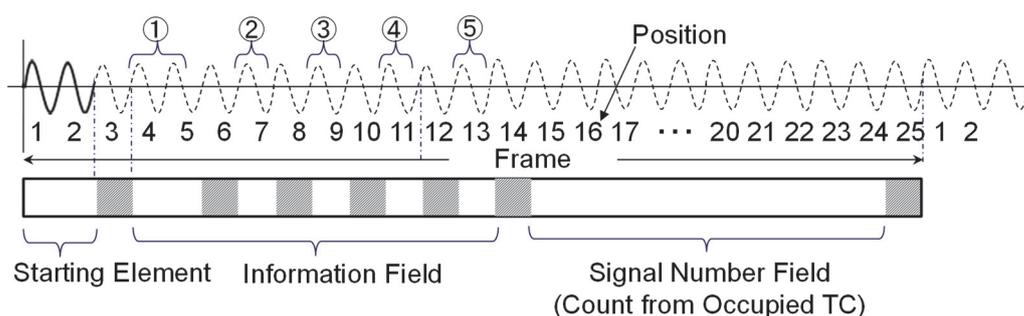
機能拡張の方法として、SW フレームの開始から数えて 4~13 ポジションまでを情報フィールド (Information Field) として確保する。Information Field の各ポジションに機能を割り当てることで、SW-TC は機能の拡張を図ることができるが、詳細については 5 章以降で説明する。

(2) 信号番号フィールドと機能

SW フレームの 15~24 ポジションまでを信号番号フィールド (Signal Number Field) として、列車在線位置の伝達に用いる。軌道回路に列車が存在する場合、Signal Number Field の全てのポジションに 0 が割り当てられる。後方の軌道回路には、Signal Number (Signal No.) が 1 から 9 まで順番にインクリメントされ、Signal Number Field の先頭 (15 ポジション) に WS が 1 波存在する場合を、1 軌道前方に列車が在線している状態 (Signal No.1) として定義する。同様に、SW フレームの 23 ポジションに WS が 1 波存在する場合を、9 軌道前方に列車が在線している状態 (Signal No.9) と定義するが、さらに離れた軌道回路に対しては Signal No.9 が繰り返される。駅構内の軌道回路に列車が在線せず、関連する SW-TC に進路が設定されていない場合、Signal No.10 が割り当てられる。

3.3.2 フレーム構造

前述の Information Field、Signal Number Field を定義した新たな SW フレーム (Solitary Wave Frame) を SWF と称することにし、その構造を図 3.6 で示す。なお、SWF では、SE との区別を容易にするため、利用できる情報は少なくなるものの、Information Field、Signal Number Field では WS が 2 波連続することは避けるという制約を持たせる。



(Note)

- : Empty ①: Driving Direction ②: Insulator Broken ③: Abnormal Current Flow
- ④: Train Existence between the station ⑤: Switching State of Point Machine

(An Example)



図 3.6 SWF のフレーム構成例

なお、今回の提案方式は、1 シンボルを 1 波長（あるいは複数波長）とした ASK (振幅変移変調) とみなせるため、提案方式そのものが新たな伝送方式を示すものではないが、既存の商用周波数レベルの軌道回路では用いられてない伝送方式である。

3.4 まとめ

本論文で提案した新しい軌道回路方式である SW-TC は、既存の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、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 SW-TC は、既存の軌道回路とは異なり、ケーブルレスで前方軌道回路の情報を取得して多現示式信号機制御を実現でき、耐雑音性能の向上や二元三位軌道回路と比して軌道回路の調整が容易である。

本章では、孤立波および孤立波の間隔に情報を割り当てる具体例を説明し、これにより SW-TC は多情報化が図れ、各軌道回路が列車の在線位置をケーブル

レスで把握できる基本原理を明らかにした。さらに軌道回路信号を送信するための SWF を定義し、情報の開始位置を示す SE、機能拡張を可能とするための Information Field、列車在線情報を割り当てるための Signal Number Field を設定した。これにより、SW-TC は、9 軌道前方までの列車在線位置を把握できることの他に、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た。

第 4 章 孤立波軌道回路の実現性検討

4.1 まえがき

本章では、SW-TC 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する。以後、WS の 1 波形を生成するデジタルデータを波源データ(Wave Digital Data: WDD)と呼ぶ。また、SWF のどのポジションで WS を生成するかという情報を記したデータを SWF プロファイルデータと呼ぶ。

なお、SW-TC は、A/D 変換によって得られるデジタルサンプリングデータをもとに受信の判断をするため、設置時に調整した後の受信波形を 4.4 節で後述する「バイアス補正」を行い、雛形の基準波形として記録しておくことにする。

4.2 構成

提案する SW-TC の送受信部の構成を図 4.1 に示す。前方軌道回路の受信部と自軌道回路の送信部は一对で、軌道回路装置(Track circuit device)を構成し、以下に示す機能を有している。

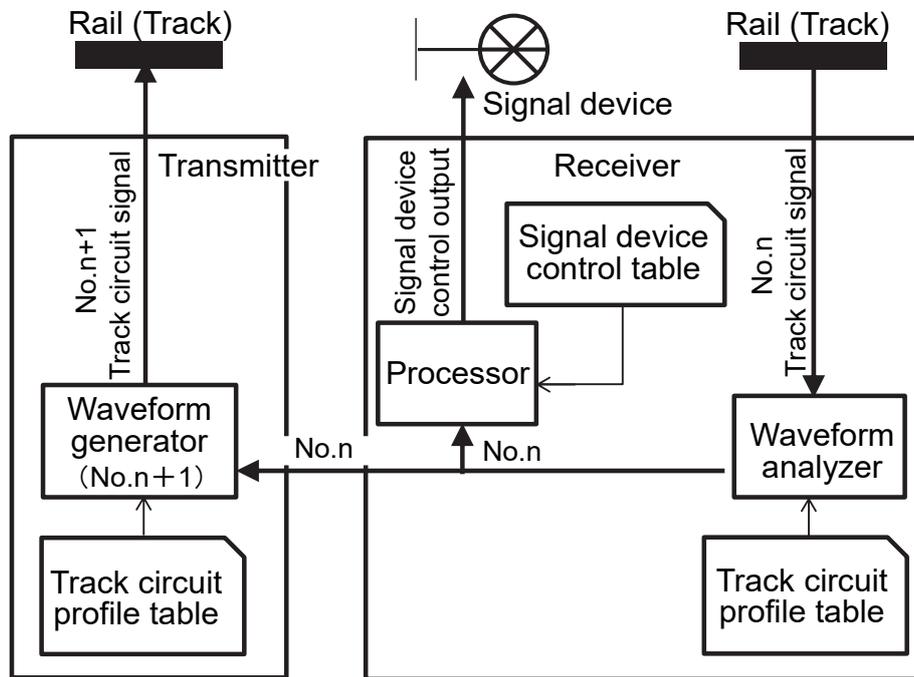


図 4.1 SW-TC の送受信部の構成図

(1) 各種テーブル

軌道回路プロファイルテーブル (Track circuit profile table) は、送信部 (Transmitter) および受信部 (Receiver) に搭載されており、SWF に割付けられた孤立波の情報を格納している。一方、灯器制御テーブル (Signal device control table) は、受信部に搭載されており、当該閉そく信号に対し、受信される Signal Number Field の Signal No. (信号番号) と色灯式信号機の現示との対応関係を示している。なお、閉そく区間長などにより信号現示は異なるため、この灯器制御テーブルは閉そく毎に設計される。

(2) 受信部

波形分析部 (Waveform analyzer) は、軌道回路電流を入力し、A/D 変換後、軌道回路プロファイルテーブルと照合して、Signal No. (信号番号) を特定する。その後、処理部 (Processor) および送信部の波形生成部 (Waveform generator) に、特定した Signal No. (信号番号) を伝達する。処理部 (Processor) は、伝達された Signal No. (信号番号) をもとに灯器制御テーブルを検索して信号現示を決定し、駅中間閉そく信号機の現示制御を行う。

(3) 送信部

波形生成部 (Waveform generator) は、受信部から伝達された Signal No. (信号番号) をインクリメントした Signal No. (信号番号 $n+1$) をもとに、軌道回路プロファイルテーブルから送信する孤立波軌道回路信号データを抽出し、後方軌道へ送信する。なお、波形はあらかじめデジタルデータとして用意され、規定クロックにより抽出され順次 D/A 変換後増幅されて軌道に送信される。

このように SW-TC は、受信部から伝達された SWF の Signal No. (信号番号) にて列車の在線位置情報を特定し、さらに後方軌道へ情報を生成して Signal No. (信号番号) を送信することで、省電力かつケーブルレスで最大 9 軌道前方 (図 3.6 の SWF の場合) 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。

4.3 送信処理

図 4.2 に 1 つの SWF の軌道回路信号生成方法を示す。仮に 1SWF の長さが 25 ポジション相当であり、サンプリング周期が 1kHz であるとする、1 WS の WDD は 40 語のデジタルデータからなる。

SW-TC の送信処理は、SWF プロファイルテーブルから生成しようとする SWF データ (SWF Data) を抽出し、40 ミリ秒周期で SWF Data の下位側からビット値を抽出し、「そのビット値が 1 の時には、WDD による 1 波形送出処理を行う。一方、

読み出したビット値が 0 のときには、40 ミリ秒カウント後に再び SWF Data の次ビット値の抽出に戻る」処理を行う。この処理が 25 回行われると軌道回路には 1 秒分の軌道回路信号（1SWF の軌道回路信号）が送出される。なお、WS の 1 波形送出処理は WDD から 40 語のデジタルデータを 1 ミリ秒ごとに読み出し、それぞれ D/A 変換後、軌道回路に送出する処理を意味する。

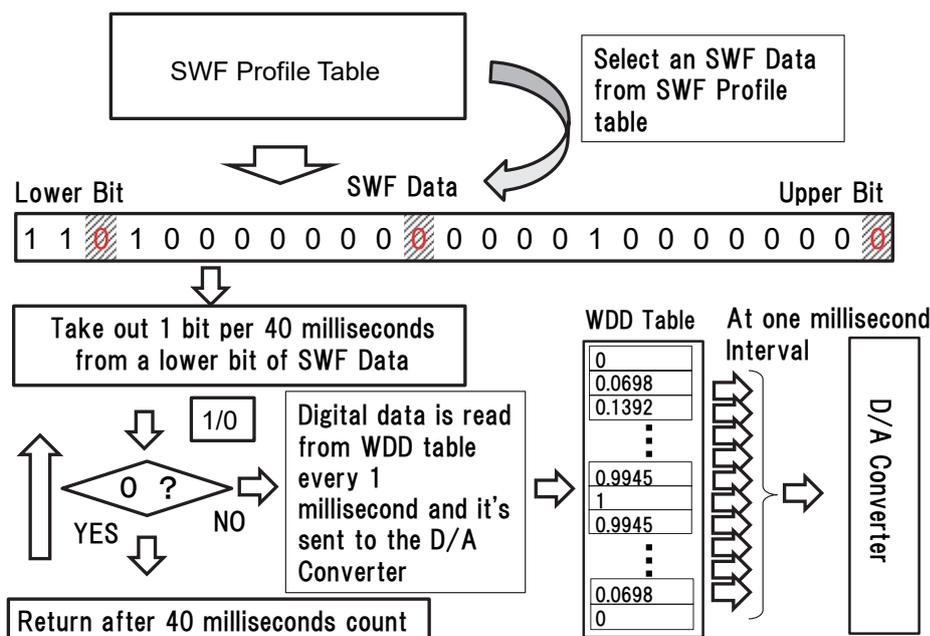


図 4.2 SWF の生成方法

4.4 受信処理

SW-TC の受信処理は、軌道回路電流を 1kHz でサンプリングしたデータをバッファリングする。バッファリングデータの総和をサンプル数で除算することでバイアス値の導出を行う。バイアス補正処理は、導出したバイアス値を計測値に減算することを意味する。なお、バイアス補正処理については、構内の既存の ME 軌道回路などで実績のある方式の中から選定する方針である。

SW-TC を設置する際は、受信波形が安定して捉えられることを確認し、雛形の基準波形として記録する。このようにして得られた設置時に記録した基準波形と通常時の受信波形の相関をとり、一定の相関値が得られたものをビット ON とし、得られなかったものをビット OFF としてプッシュダウンレジスタに登録していく。このプッシュダウンレジスタ中から SE を抽出し、その後の 23 ビット列とともに取り出したものが受信した SWF となる。なお、軌道回路は外来からのノイズにさらされやすい環境であるため、過大なピーク性ノイズなどが混入される可能性があるが、基準波形

との相関をとり、さらに、例えば SWF の Signal Number Field では前方列車が在線する軌道回路からの数に応じた番号のビットのみを ON とするため、Signal Number Field 中の WS の数をチェックし、WS が 2 波以上存在した場合は異常電文と判定するなど、情報の正当性を判定することでリジェクトできる。また、SE 間隔が不正なものは、軌道回路の絶縁破壊発生の可能性ありと判定して詳細分析に委ねる。

SMET などの既存の ME 化軌道回路には、受信レベルの低下を学習してレベル追従するものも存在するが、SW-TC ではレベル追従を行っていない。すなわち、実稼働時の SW-TC は、レベル変動に応じた正規化は排除して、軌道回路のレベル診断を常時行っている。ただし、レベル低下を検知した場合でも、基準波形との相関がとれ、SWF の WS が判別でき、情報の正当性が確認できたときは、処理を継続しながら軌道回路の予防保全情報として保守を要請することになっている。なお、SW-TC による予防保全の実現および保守性の向上効果については、第 5 章で詳細を説明する。

4.5 シミュレーションと試作機による検証

軌道回路のレール部は、図 4.3 の回路の一例に示すとおり、微小な四端子回路が連続的に縦続接続された分布定数回路として考えられる。

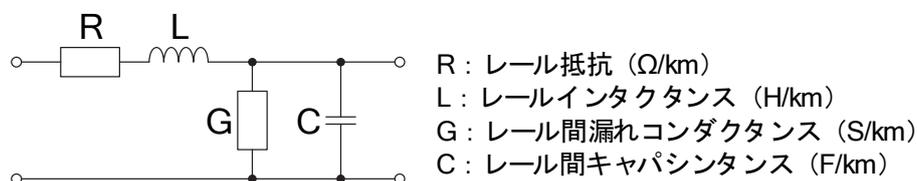


図 4.3 軌道回路のレール部の等価回路

図 3.2 の WS による多値情報の割付例では、本方式を分かりやすく解説するために、25Hz の Sin 波をベースにして、1 周期内に 2 つの波形（孤立波）が得られること、2 つの波形（孤立波）の間隔を番号 n に対応させた。しかし、前述したように、Sin 波に限らず波形の形態については特に制限はない。

本方式の実現可能性を確認するために、最適な孤立波の形態を選定するための確認試験として、最初に軌道回路シミュレーションによる評価を行った。本検討では、特に既存の軌道回路構成の下での可能性を検証するために、図 4.4 に示す構成でシミュレーションを実施した。図 4.4 において、WG は孤立波を生成する波形生成器 (waveform generator) であり、今回は任意の孤立波形が生成できるものを試作して用いた。波形生成器で作出した信号を増幅器 (AMP) を介してレール (Rail) に送信する。出力端子とレールまでの間には、電力を最大限送り出すための整合変整器 (MT) 、

さらに電圧レベルを調整する中継トランス (TPT)、そして、レールの軌道回路境界に配置され電気車電流と信号電流を区分するインピーダンスボンド(ZB)が配置される。

また、レールと受信部(Receiver)の間にも、同様に ZB や TPT が図に示すように配置される。なお、実際の二元三位式軌道回路には、このほか、過電流を防止する抵抗子や位相を調整する位相調整器も配置されるが、今回の検証では省略している。レールに対しては、シミュレーション時には、分布乗数回路(Distributed constant circuit)で置換することにし、試作装置による実証試験ではレールの伝送特性を模擬する擬似軌道回路を用いた。

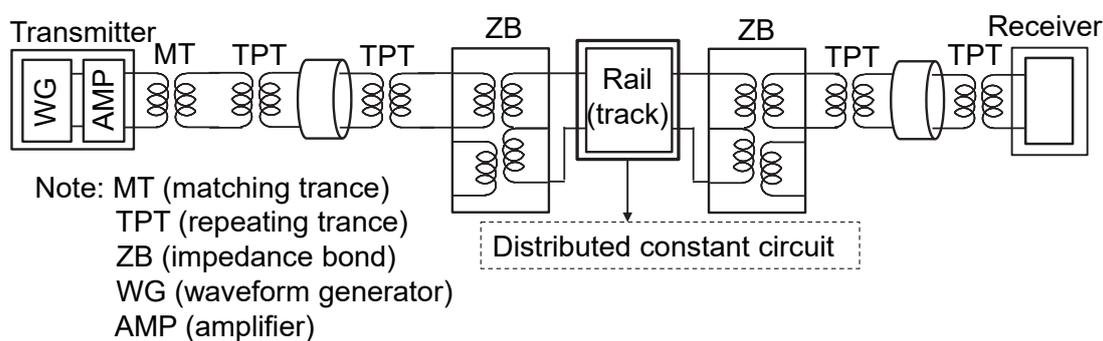
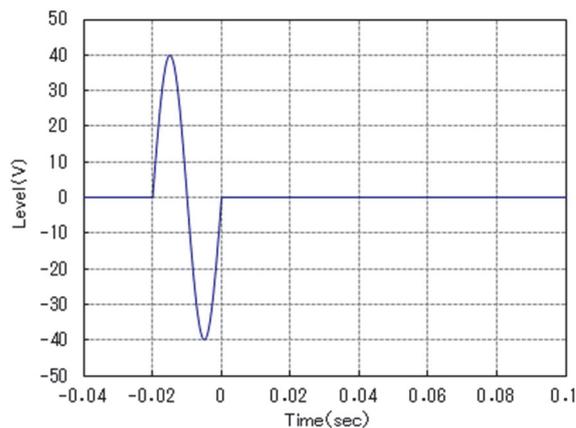
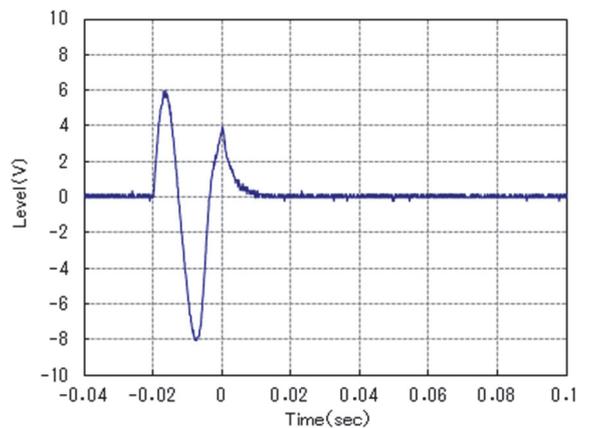


図 4.4 孤立波の形態選定のための確認試験構成

図 4.5 に、試作機と擬似軌道回路を用いた実証試験時に受信部 (Receiver) で測定した入出力波形を示す。入力波形と同じサイクル数の孤立波が出力波形として確認できた。しかし、シミュレーションと同様に、逆起電力の影響によるスパイク状の波形が確認された。この原因は軌道回路を構成する機器の多くがインダクタンス成分であり、抵抗成分やキャパシタンス成分が少なく、インダクタンス成分が支配的であることによるものと考えられる。



(a) Transmitted signal



(b) Received signal

*50Hz/cycle

図 4.5 送受信波形の確認試験結果

4.6 課題とその対応

シミュレーション試験および試作機と擬似軌道回路による実証試験で判明した課題を以下に示すとともに、これらの課題に対する対応策について検討した。

(1) インダクタンス成分による影響対策

シミュレーションと試作機による実証試験で、インダクタンス成分に起因する逆起電力波形とバイアスの影響が確認されたが、孤立波という離散的信号を正確に受信する必要がある。ただ、既存の軌道回路は軌道回路電流のレベルや、軌道回路電流と局部電流との位相関係から定まるトルクというエネルギー成分を受信の判断の拠り所としていた。

しかし、今回の SW-TC では、A/D 変換によって得られるデジタルサンプリングデータをもとに受信の判断をするため、設置時に調整した際の受信波形を雛形として記録しておき、通常時に受信した波形と雛形の波形との相関から孤立波を判別し、さらに 1 周期内の孤立波の数（今回は 2 波）をもとにノイズなどと切り分けることが可能になる。このことにより、今回の実証試験で確認された逆起電力によるスパイク状の波形乱れそのものも定常的に同様な波形になるなら、問題なく対応できる。

(2) 現場環境への追従と実証試験

今回は、シミュレーションおよび試作機による評価を行ったが、実際の現場環境では、共存する電気車電流の影響や降雨などの漏れ変動によるレベル変動も発生する。

既存のデジタル式軌道回路である SMET では、しきい値レベルの自動追従などの

環境条件の変化に追従する高信頼化策が採用され効果をあげている。

SW-TC は、波形そのものの相関で判別するため、レベル変動などについては、受信した波形の波高値で割ることにより、波形のピークを+1、ボトムを-1 となるように一旦正規化した上で、雛形となる波形との相関を取れば問題ない。さらに、その正規化に使われる拡大率・縮小率を軌道回路の診断情報とすることにより軌道回路の状態が連続的に取得でき、予防保全に利用できる。これらを確認するにはフィールドでの長期試験が必要である。

(3) 安全性に対する課題

提案する孤立波軌道回路では、列車検知および閉そく信号機の制御など、列車運行に直接影響がある機器の制御条件に用いられることから、高い安全性が必要である。提案する SW-TC では、SMET など用いられてい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るため、稼働実績のある従来装置の安全性技術を踏襲するならば、安全性も確保できると考えている。

4.7 まとめ

SW-TC 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構成されており、軌道回路プロファイルテーブルには、SWF に対応した孤立波情報を格納しており、灯器制御テーブルには、受信した Signal Number に対応した閉そく信号機の現示制御情報を格納していることを説明した。

送信処理では、受信部から伝達された Signal Number をインクリメントし、軌道回路プロファイルテーブルから送信するべきデータを抽出し、後方軌道回路へ軌道回路信号を送信することを説明した。受信処理では、軌道回路電流を入力し、A/D 変換後、軌道回路プロファイルテーブルと照合して、Signal Number を特定し、列車の在線位置を把握している。なお、軌道回路は外来からのノイズにさらされやすい環境であるため、SW-TC を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基準波形と受信した軌道回路信号との相関をとり、情報の正当性を判定していることを説明した。

SW-TC 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を実施した結果、受信部にて、送信部の出力波形と同じサイクル数の孤立波が確認できた一方で、逆起電力の影響によるスパイク状の波形が確認された。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。ただし、スパイク状の波形が定常的に発生しているのであれば、SW-TC は設置時に雛形の基準波形を記録しており、受信波形と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。

また実際の軌道回路の現場環境では、電気車電流の影響や降雨などの漏れ変動によるレベル変動も発生するが、SW-TCは、波形そのものの相関で判別するため、レベル変動などについては、雛形となる波形との相関を取れば問題ない。さらにSW-TCには、電子連動装置やSMETと同等の高い安全性が必要になるが、SMETなどで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

5.1 まえがき

3 章で SE を定義し、SWF の明確化と Information Field を設定した結果、SW-TC の情報量が拡大し、機能拡張を図ることが可能となった。本章では、Information Field を活用した SW-TC が実現できる列車保安制御機能や予防保全などの各種機能について説明する。

5.2 列車保安制御への応用

本節では、SW-TC が列車の在線位置情報の把握の他、デジタル ATC 相当の列車保安制御機能が実現できることを説明する。

軌道回路に流れる SWF から成る電流は、列車の先頭に装着した図 5.1 に示すような軌道回路信号受電器(TC Current Receiving Antenna)によって車上装置に取り込むことができる。この受電方式に関しては、SW-TC の周波数を商用周波数近傍と考えると、過去に ATS-B 形として実用化されており、実績がある[22]。

車上装置は、位置検知機能を持つほか、走行する線区の線路データおよびブレーキ性能や列車長などの車両情報を記憶している。線路データには、軌道回路の境界位置情報と線路勾配情報、速度制限情報、分岐器位置と対応した速度制限情報などを含んだ駅構内の配線情報、番線毎の停車位置などが記憶されている。

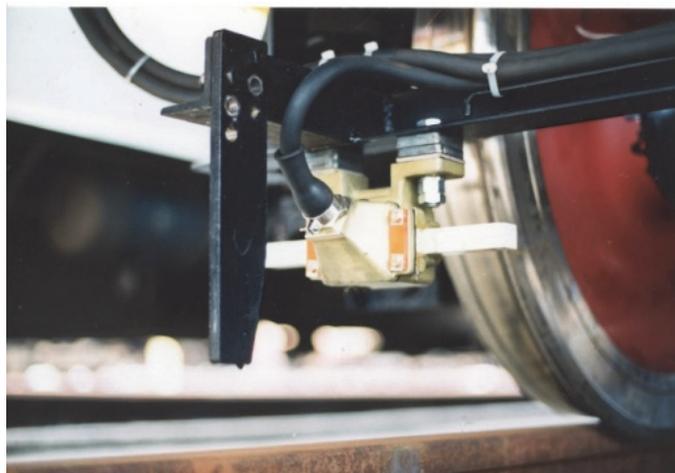


図 5.1 軌道回路信号受電器

5.2.1 駅中間の信号制御

車上装置が SWF を受信し、そのフレーム中の Signal Number Field (図 3.6 における SWF の 15~24 ポジション) から Signal Number を抽出すると、先行列車が現在の軌道回路から幾つ先の軌道回路に在線しているかの情報が取得できる。取得した前方列車の在線軌道回路の手前の軌道回路の始端から余裕距離を減算した地点が、列車速度照査パターンの終端地点(TSP)となる。車上装置はその TSP までの勾配情報などを加味した速度照査パターン(VCP-V)を生成するとともに、現在の走行地点から TSP までの間の速度制限情報を線路データから抽出し、速度制限用の速度照査パターン(VCP-G)を生成する。

5.2.2 デジタル ATC の実現

図 5.2 を用いて駅構内の列車保安制御について説明する。

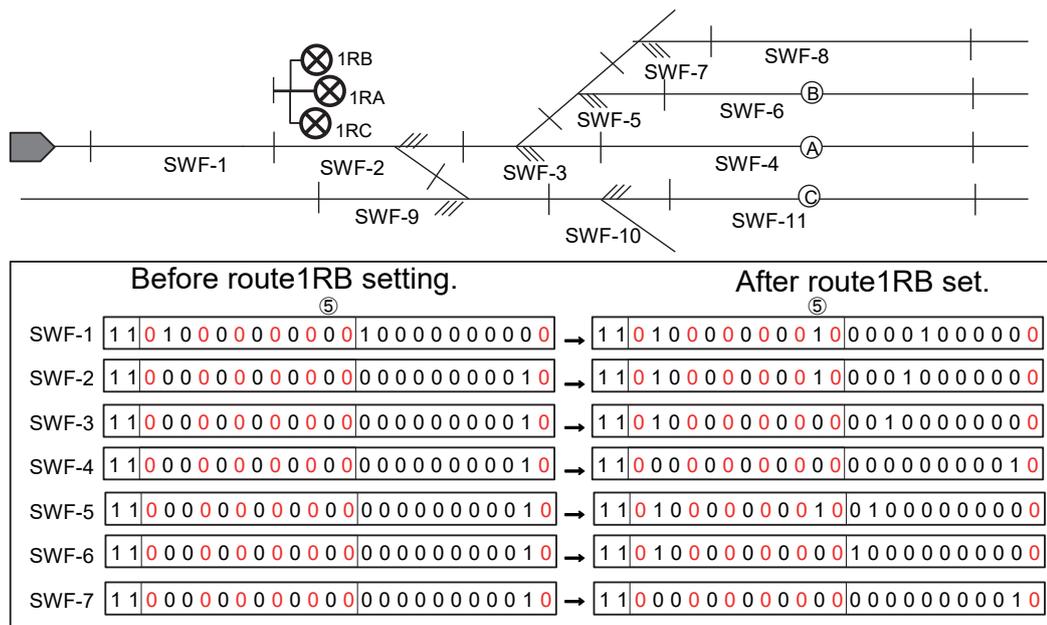


図 5.2 駅構内の列車制御プロセスと SWF の関係

(1) 駅間閉そくにおけるデジタルATC電文生成

デジタルATCでは、1フレーム当たりの有効ビット長は20~75となっている。情報の内容は、現在走行している軌道回路固有の軌道回路番号、前方列車との間の軌道回路数を示す開通区間数（もしくは先行列車在線軌道回路固有の軌道回路番号）駅の到着番線、臨時の制限速度などである[23]。

これらの情報を用いて、列車在線軌道回路の外方の地点を目指した単一の速度照査パターンを生成して、走行速度と比較し、速度オーバー時には自動的にブレーキを作動させている。ただし、パターンとの速度照査には、軌道回路内のどの位置を走行しているかの情報が必要であり、自列車の在線軌道回路番号単位では粗すぎる。このため、実際には速度発電機のパルス積算と位置補正用の地上子の組合せで、車上において詳細な位置検知を行っている。

SW-TCのSWF中のSignal Number FieldのSignal Numberは、在線軌道回路からの番号であり、デジタルATCの情報フレームにおける「前方列車との間の軌道回路数」と同一である。したがって、SW-TCにおいて、車上に軌道回路境界地点情報や、購買・曲線情報、速度制限区間情報などを線路データとして記憶させておく他、車上での位置検知機能を持たせれば、デジタルATCと同様の列車間隔制御が可能となる。ただし、臨時の速度制限に関しては、既存の線区と同様指令からの伝達や、速度制限標識に依ることになる。

なお、ブレーキ扱いを人間が行い、走行速度を単一速度照査パターンと比較して、速度超過時にのみ自動的にブレーキを作動させるなら、ATS-P形と同様の機能となる。一方、駅構内において場内信号内方から出発信号外方区間内の構内軌道回路においては、設定進路を加味した電文の生成が要求され、構内軌道回路とは異なる。(2)以降で、その処理について説明する。

(2) 場内信号から進路着点軌道回路までの構内の ATC 電文生成

場内信号から進路着点までの駅構内区間の軌道回路 SW-TC において、関係する進路が設定されていない状態では、SWF 中の Signal Number Field の Signal Number を 10 (24 ポジションが 1) とする。Signal Number.10 は禁止ビットであり、禁止ビットがセットされた軌道回路に対しては、列車の侵入が容認されない (現行の 03 信号と同様で非常ブレーキが作動する)。

構内の進路が設定されるとその進路の着点に位置する軌道回路の SWF 中の Signal Number には 1 が与えられ、順次進路の発点側に向け Signal Number に 1 が加算されていく (図 5.2 の After route 1RB set 参照)。この処理は、着点側軌道回路から順次発点側の軌道回路に向けて行われる。また、一度、SWF の Information Field 中の Switching State of Point machine(SSP) (図 3.6 における SWF の Information Field の⑤ (13 ポジション) : 転てつ器状態に分岐器速度制限あり) がセットされると、その前 (発点側) の軌道回路の SWF 中の⑤にもセットされる。この処置は進路の発点軌道回路を越えて、列車が在線する軌道回路の SWF まで引き継がれる。なお、構内の軌道回路では、設定された進路情報に応じて運転方向を判断し、送信部/受信部の切替えを行う。

(3) 分岐器速度制限に対する処理方法する課題

駅構内の進路が設定された場合の速度照査パターン(VCP)の生成は駅中間と同様に行われるが、着点の軌道回路における照査パターンの終端地点(TSP)は、線路データによって与えられた地点になる。

また、場内信号から内方への侵入進路が設定されると、進路終端の SW-TC の Signal Number を 1 として列車在線 SW-TC まで SWF の Signal Number がインクリメントされて与えられることは前述の通りである。同時に、SWF 中の Information Field 中の⑤に位置する SSP ビットによって、分岐器速度制限の有無が取得できる。この情報を用い分岐器速度制限制御に必要な情報を線路情報から索引して、分岐器速度制限制御パターン(VCP-P)を生成する。この方式では、個々の分岐器に応じた分岐器速度制限パターンを生成するのではなく、進入時もしくは出発時に必要な分岐器速度制限制御が行われることになるが、本軌道回路を利用するような線区では、この簡易な処理で十分と考える。

実際の速度照査は、生成されている VCP-V、VCP-G、VCP-P がそれぞれ示す、現在位置での制限速度の中の最も低位の速度と走行速度の比較となる。なお、VCP-G のパターン終端には、制限速度区間に列車長を加算した地点が与えられ、列車の先頭部が制限速度区間を抜けても、列車後尾がその区間を抜けきるまでは速度制限が継続される。

5.3 単線自動閉そく処理の改善

本節では、Information Field を活用した機能拡張例として、単線区間で必要になる運転方向切替に伴う現場機器の制御処理が可能になることを説明する。

また単線自動閉そく A 方式での運転方向切替に伴い、軌道回路に要求される機能は、「駅間に列車が非在線であることの情報提供機能」と、運転方向切替に伴う「駅間軌道回路の送電/受電の切替機能」である。これら 2 つの機能に対し、提案する SW-TC における処理について説明する。

5.3.1 現行単線自動閉そく回路

現行の自動閉そく回路は、構内と駅中間にある軌道回路と閉そく信号機を組み合わせた閉そく装置により、閉そく区間のどこに列車が在線していてもこれを知り、自動的に後方の閉そく信号機を停止している。なお、単線自動閉そく回路では、列車の運転方向を定める必要があり、JRを含めた多くの線区では、閉そく区間の両端駅に一方の方向でこれを設けており、両駅の駅長による閉そくの設定が行われる。さらに単線自動閉そく A では、駅間に複数の列車の運行を可能とするため、軌道回路を複数設備し、運転方向の切替えに応じて軌道回路の送電端

と受電端も切り替えている。

このような線区にSW-TCを設置する場合は、SW-TCの送受信部においても同様に送信部と受信部の切替を行わねばならない。現行の単線自動閉そくの方向回線は、軌道回路の送受電切替も自動で行うため3本の配線を擁しているが、軌道回路側で自動的に送信と受信の切替が行われるなら、複雑な単線自動回路結線は不要となり、両駅の間でこの閉そく設定に単純化できる。駅間に軌道回路を持たない電子閉そくにおいては2本の配線により閉そくの設定を実現している。

5.3.2 孤立波軌道回路による運転方向切替処理

単線区間の運転方向の切替には、駅間に列車が非在線という条件が必要である。このため、列車在線が検知された軌道回路送受信部(TC-Transmission/Reception Equipment: TC-TRE)は、SWFのInformation Field中のTrain Existence between the stations(TE)(図3.6におけるSWFのInformation Fieldの④(11ポジション): 駅間列車在線)をONにして次段のSW-TCに送信する。受信したSWFのTEがONになっている場合には、次段へのSWFのTEもONにする。この結果、出発信号機内方のTC-TREで受信したSWFによって駅間の列車の在線の有無情報が把握でき、知得した情報を用いて、両駅間で行われる運転方向切替処理を行うことができる。

5.3.3 軌道回路転極処理

単線自動閉そく区間においては、運転方向回線を利用して、駅中間の軌道回路の送電/受電の切替と上り/下り中間信号機の切替制御を行っている。SW-TCにおいては、別途設定される運転方向でこの条件を用いて、中間軌道回路の送電/受電の切替と上り/下り中間信号機に対する現示制御を行う。この機能について、SW-TCを用いた実現方法を図5.3と図5.4を用いて説明する。

単線自動閉そく区間において、運転方向が切替えられたときには、場内信号軌道回路のTC-TREが、外部条件として運転方向制御部の処理部から、運転方向でこの条件を取り込み、SWFのInformation FieldのDriving Direction(DD)(図3.6におけるSWFのInformation Fieldの①(4,5ポジション))を次段の軌道回路に送信する。なお、DDは4ポジションを運転方向下りに、また5ポジションを運転方向上りに割り当てている。両者間には空きポジションを設定していないが、DDは同時にONになることは無いので問題ない。図5.3にDDを設定したSWFの例を示すが、本例では、DDに運転方向下りを割り当てている。

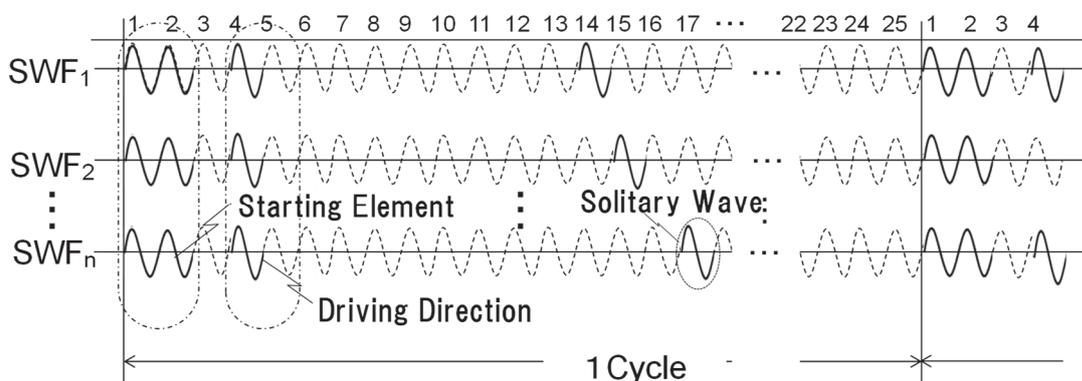


図 5.3 DD を設定した SWF の例

図 5.4 に TC-TRE のブロック構成を示すが、DD に状態変化があった場合、場内信号軌道回路の TC-TRE は、DD に応じて切替リレー TFR を制御して、送信部と受信部の結線を切替える。

一方、駅中間の TC-TRE においても、現状と異なる DD を前段の SW-TC から受信した場合、DD を切替えた SWF を次段の SW-TC に送信するとともに、送信部と受信部の結線を切替える。この処理を隣接駅の出発信号内方の SW-TC まで次々で行う。隣接駅の出発信号内方軌道回路の TC-TRE においては、Information Field の TE により得られる「駅間に列車が非在線」という条件を、外部の単線自動閉そく装置の処理部に伝達する。

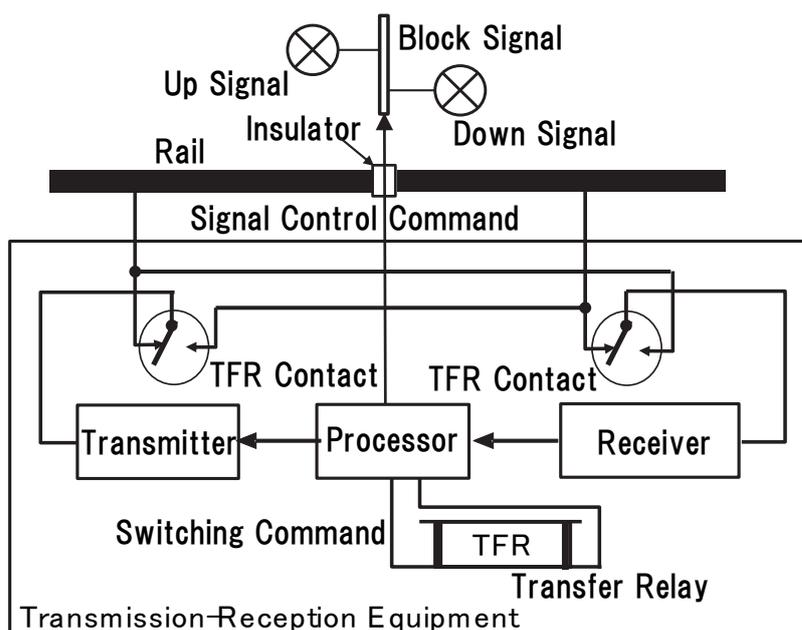


図 5.4 SW-TC における運転方向変更時の送受信回路の切替方法

このように SW-TC は、駅間に列車が非在線という条件を運転方向制御部に伝え、運転方向の切替の可否を知らせるとともに、外部条件として運転方向制御部の処理部から運転方向でこの条件を取り込み、各 SW-TC 間で Information Field の DD を情報伝達し、運転方向の状態に応じて、各 TC-TRE の送信部と受信部の結線を全て切替えることで、送電/受電の切替および中間信号機の現示制御が可能になる。なお、運転方向の切替を必要とする単線区間では、上り下りの閉そくの切替が瞬時に行われねばならないという制約は特にない。そのため、今回提案する方式では、運転方向が切替わった場合、その情報を下流の軌道回路に伝達し、関連する全ての下流軌道回路が情報取得できる時間を経て、送信部/受信部の切替えを行い、また下流の軌道回路は上流の軌道回路から信号が絶たれることを踏まえつつ、自軌道回路の送信部/受信部の切替を準備する。

5.3.4 踏切制御への利用

単線区間で踏切制御子を用いて制御する踏切においては、列車が上り・下り両方向から来るため、上りの列車が踏切道を通ると、やがて下り用の踏切制御子の区間に到達する。この時には、下り用の踏切制御子の機能を無視する必要がある、これをマスク処理と呼んで、タイマーなどによってマスクしたり、運転方向でこの条件を入力してマスクしている。タイマー利用方式は、簡易であるものの、列車が踏切道を過ぎて、下り用踏切制御子に到達するのに時間がかかると、マスク機能が働かず、不要

に踏切警報を作動させる問題がある。運転方向テコの条件を入力する方法は、マスク処理を確実に行うことができるが、コスト増を招く。

これに対し SW-TC は、SWF 中の Information Field に 2 ビットの運転方向情報 (DD) を持っているため、軌道回路信号を踏切が取り込むことにより、正確なマスク処理が行える。

5.4 安全性向上に関する検討

この節では、SW-TC 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す。その結果、鉄道事業者が SW-TC を採用することで、軌道回路の故障の兆候を把握し、安全性が向上できることを説明する。

5.4.1 軌道回路信号レベル低下対策

従来の軌道回路では、軌道回路モニタや状態監視システムなどを導入して、常に軌道回路の送受信レベルを計測することなどで予防保全を目指してきた。しかし、実際の現場環境における送受信レベルの変動は軌道回路ごとに多様であり、軌道回路故障の予兆を察知することは困難である。

提案する SW-TC では、WS の間隔をもとに Signal Number (信号番号) を得るため、受信レベルが低下した場合でも、必要とする WS が検出できていれば処理を継続することができる。また、受信レベルの低下は、いずれ WS そのものも検出できない状態に遷移することが予期できるため、受信レベルが低下したことを予防保全情報として出力することで、故障にいたる前の早い段階でのメンテナンスを要請することも可能である。

以上により、提案する SW-TC では、受信レベルが低下した場合でも、機能を維持しながら、軌道回路の予防保全が可能である。また、既存軌道回路では、鉄道事業者が定期的に軌道回路の受信信号レベルの計測などが必要であった。これに対して、SW-TC は、軌道回路ごとに自動的に保全計測を行い、メンテナンスを要請できるため、保守性を大幅に向上させることができる。

5.4.2 レール絶縁劣化への対策

通常、無絶縁軌道回路以外の軌道回路には、境界を分離するために軌道絶縁が挿入されている[24]。線路の絶縁が壊れている場合、列車が接近して軌道回路電流が短絡すると、後部軌道回路の電流が回り込み、軌道リレーが作動して列車の検出ができなくなる場合がある。対策として、逆相の軌道電流を後部軌道回路に流し、列車の状態に関係なく絶縁破壊が発生した場合は、軌道リレーを落として信号を停止している。しかし、軌道回路故障には、絶縁破壊、受信装置の故障、レールの破損、軌道回路伝

送装置の故障など、さまざまな要因があり、現場で故障箇所を特定することは容易ではない。

図 5.5 に軌道回路境界と軌道回路送受信装置 (TC-TRE) を示す。通常、インピーダンスボンドがレール絶縁体の両端に接続され、電流が流れない結合点の間に死区間がある。絶縁破壊が発生した場合、線路絶縁破壊箇所の死区間に漏れ電流が流れ、専用測定器を用いて現場測定を行うことで故障箇所を検出することができる。ただし、その間は列車が運行できず、整備員が現場に向かう必要がある。

SW-TC は SE を SWF の先頭に割り当てるため、軌道回路の絶縁が破壊すると、後部の軌道回路電流が回り込んで重畳される。その結果、軌道回路の受信機器で SE 生成間隔が乱れる。このとき、後部 SW-TC への送信装置の現在の送信を停止すると、SWF の回り込みと SE 間隔の乱れがなくなる。このメカニズムを使用することにより、SW-TC は動作中でも軌道回路の絶縁破壊を明確に検出できる。

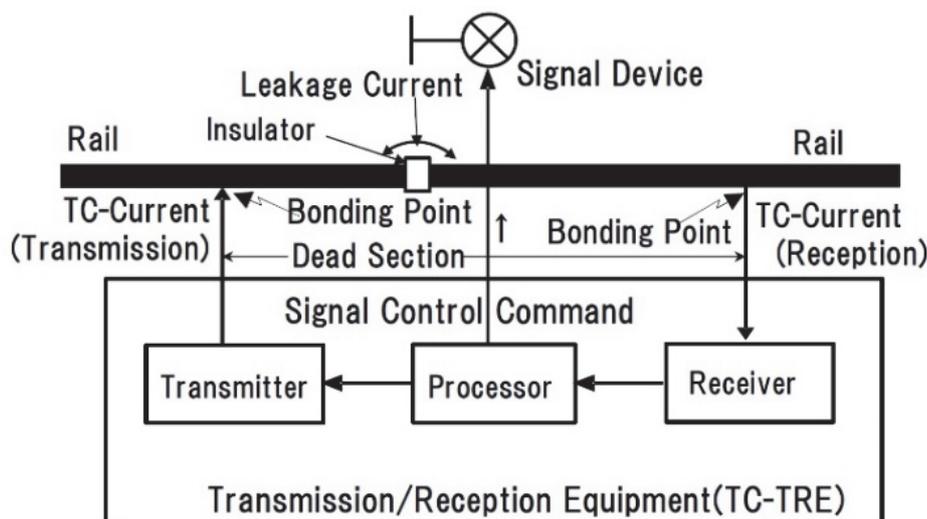


図 5.5 SW-TC と軌道回路の境界部分

図 5.6 に軌道回路境界絶縁破壊検出原理を用いた SW-TC の軌道絶縁劣化診断方法を示す。通常、SW-TC の TC-TRE に入力される受信電流は、図 5.6 の [Line No.1] の波形になる。後方軌道回路へ伝送する信号は、[Line No.2] の波形になり、信号番号フィールドの WS が 1 桁シフトしている。実際、SW-TC は、[Line No.3] のように、一定のオフセット時間の後、さまざまなタイミングで SWF を送信する。

この状態で軌道回路の境界で絶縁破壊が発生すると、SW-TC は、SWF には 2 つの SE が存在する [Line No.1] と [Line No.3] が混在した信号を受信する。この信号は [Line No.4] と同様の波形であり、3.3 節で説明したように、SWF には SE のみが 2 つの連続した WS を許されるため、TC-TRE は絶縁破壊を検出できる。このと

き、後方軌道回路への伝送を一時的に停止すると、軌道回路電流波形は[Line No.1]と同じ[Line No.5]となり、SW-TCは波形の乱れは、絶縁破壊によるものであることが診断できる。その結果、SW-TCは、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。

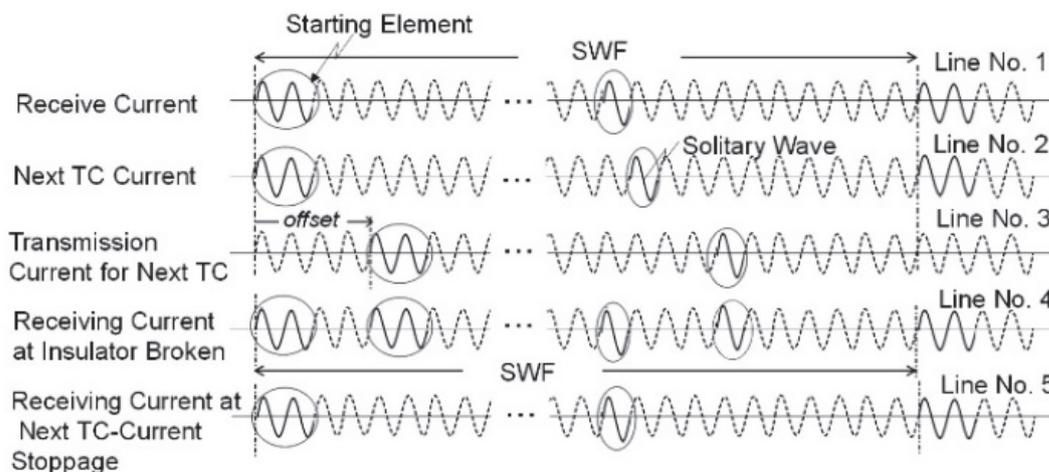


図 5.6 SW-TC の軌道絶縁劣化診断方法

5.4.3 軌道回路の故障予兆情報の出力

SW-TCは、絶縁破壊や受信レベル低下などの軌道回路故障の予兆を検出した場合、SWFのInformation Field中のInsulation BrokenまたはAbnormal Current Flow(図3.6におけるSWFのInformation Fieldの②(7ポジション)または③(9ポジション))が設定される。この情報が設定された場合、閉そく信号機の現示を点滅させるなどして、乗務員を介して予防保守情報を送信することができる。

車載機器が列車に搭載されている場合、受信したSWFのInformation Fieldの故障ビットをデコードすることにより、絶縁破壊や軌道回路の受信レベルの低下を検出することができる。この情報を使用して、例えば、車載装置のLEDをオンにしてメンテナンスを要求することができる。

5.5 まとめ

SW-TCは、既存の軌道回路と異なり、列車在線位置情報の把握の他に、様々な機能を搭載することができ、以下の3つの機能拡張が図れることを明らかにした。

(1) デジタル ATC 相当の列車保安制御機能の実現

列車の先頭に軌道回路送受電器を装着し、SW-TC からの軌道回路信号を車上装置に取り込むことで、SW-TC は、デジタル ATC 相当の列車保安制御機能を実現することができる。

具体的には、場内信号から進路着点までの駅構内区間の軌道回路 SW-TC において、関係する進路が設定されていない状態では、SWF 中の Signal Number を 10 にセットし、列車の侵入を容認しない。構内の進路が設定されるとその進路の着点に位置する軌道回路の SWF 中の Signal Number には 1 が与えられ、順次進路の発点側に向け Signal Number に 1 を加算する。また転てつ器が存在する場合、転てつ器の転換状態を SWF の Information Field 中の Switching State of Point machine(SSP)にセットし、発点軌道回路を越えて、列車が在線する軌道回路の SWF まで引き継がれる。

これらの情報などにより、列車は自列車の速度制限を計算できるため、SW-TC によりデジタル ATC 相当の列車保安制御機能を実現できる。

(2) 運転方向切替処理に伴う送受信部の自動切替

単線自動閉そく区間においては、運転方向回線を利用して、駅中間の軌道回路の送電/受電の切替と上り/下り中間信号機の切替制御を行っている。SW-TC においては、運転方向制御部の処理部から、運転方向でこの条件を取り込み、SWF の Information Field 中の Driving Direction の 2 ビットに運転方向の向きをセットして、次段の軌道回路に送信する。これにより、運転方向の状態に応じて、SW-TC の送信部と受信部の結線を全て切替えることで、送電/受電の切替および中間信号機の現示制御が可能になる。

また単線区間で踏切制御子を用いて制御する踏切においては、列車が上り・下り両方向から来るため、上りの列車が踏切道を通ると、やがて下り用の踏切制御子の区間に到達する。この時には、下り用の踏切制御子の機能を無視する必要があるが、SW-TC の SWF 中の Information Field に 2 ビットの運転方向情報 (DD) を踏切が取り込むことにより、正確なマスク処理を行うことも可能である。

(3) 故障予兆の把握および安全性の向上

既存の軌道回路では、軌道回路の受信レベルが低下した場合、専用の測定器を使って現場のレール電流を調査して原因の特定をしているが、復旧までに多大な時間を要している。一方、SW-TC は、必要とする WS が検出できていれば処理を継続することができ、さらに受信レベルが低下したことを予防保全情報として出力することが可能である。

また SW-TC は、軌道回路の絶縁破壊部位を検出することが可能である。軌道回路

の境界部分の絶縁が破壊すると、後部の軌道回路電流が回り込んで重畳される。その結果、軌道回路の受信機器で SE 生成間隔が乱れ、当該 SW-TC の送信部の送信を停止すると、SWF の回り込みと SE 間隔の乱れがなくなるため、故障部位を特定することができる。このメカニズムを使用することにより、SW-TC は動作中でも軌道回路の絶縁破壊を明確に検出できる。

これらの機能により、SW-TC は軌道回路の故障予兆や故障部位を把握でき、SWF の Information Field 中の Insulation Broken または Abnormal Current Flow をセットして故障を出力することで、故障部位の特定に要する時間を短縮することができ、既存の軌道回路より保全性を大幅に向上することができる。

第 6 章 孤立波軌道回路の RAMS 性能の評価

6.1 まえがき

本章では、SW-TC は、既存の軌道回路より、RAMS 性能（Reliability（信頼性）、Availability（可用性）、Maintainability（保守性）、Safety（安全性）の英語の頭文字）が向上し、さらにエネルギー消費が削減できることを説明する。

6.2 ケーブルレス（Reliability の向上）

従来の軌道回路では、多現示式信号機制御を実現するために、別途ケーブルを敷設して前方の閉そく信号機の現示情報などを得る必要があった。提案する SW-TC では、従来の軌道回路の種類によっては必要であるトランスや抵抗子、位相調整器などを削減・不要とする簡易な軌道回路構成である（図 4.1）。また、ケーブルレスで必要な列車の在線位置情報を得ることが可能であり、多現示式信号機制御を実現することができる。

さらに、現行のデジタルATCでは、デジタル電文の生成や列車検知を行うため大規模な地上装置を機器室に設置する必要があるが、SW-TCは、地上装置およびケーブル敷設が不要となり、大幅なコスト削減も期待できる。

以上により、SW-TC 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 相当の列車保安制御を実現できることで、Reliability（信頼性）が向上する。

6.3 耐雑音性能の向上（Availability および Safety の向上）

実際の鉄道信号における現場環境では、軌道回路に流れる電気車電流や降雨などの影響により、軌道回路信号の受信レベルが変動する。そのため、既存のデジタル式軌道回路である SMET では、しきい値レベルの自動追従などにより環境条件の変化に追従する高信頼化策が採用され効果をあげている。

提案する SW-TC では、4.4 節で説明したように、A/D 変換によって得られるデジタルサンプリングデータをもとに受信の判断をするため、設置時に調整した際の受信波形を雛形として記録しておき、受信した波形と雛形の波形との相関から孤立波を判別し、さらに 1 周期内の WS の数をもとにノイズなどと切り分けることが可能である。

このように単なるレベルではなく、A/D 変換を経て得られた入力波形そのものを基本に軌道回路情報を判断し、また孤立波としての形状チェックや孤立波相互の時間間隔、サイクル中の孤立波の検出数などをもとに、雑音をフィルタリングすることで、

従来の軌道回路と比較して耐雑音性能を向上させることができ、妨害波による危険側の誤制御の影響も軽減できる。

結果的に、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は低下し、Availability（可用性）が向上する。また、危険側の誤制御を軽減できることで、Safety（安全性）も向上する。

6.4 軌道回路の予防保全（Maintainabilityの向上）

従来の軌道回路では、軌道回路モニタや状態監視システムなどを導入して、常に軌道回路の送受信レベルを計測することなどで予防保全を目指してきた。しかし、実際の現場環境における送受信レベルの変動は軌道回路ごとに多様であり、軌道回路故障の予兆を察知することは困難である。

提案する SW-TC では、WS の間隔をもとに Signal Number（信号番号）を得るため、5.4.1 節で説明したように、受信レベルが低下した場合でも、必要とする WS が検出できていれば処理を継続することができる。また、受信レベルの低下は、いずれ WS そのものも検出できない状態に遷移することが予期できるため、受信レベルが低下したことを予防保全情報として出力することで、故障にいたる前の早い段階でのメンテナンスを要請することも可能である。

以上により、提案する SW-TC では、受信レベルが低下した場合でも、機能を維持しながら、軌道回路の予防保全が可能であり、故障にいたる前の保守を実現することで、Maintainability（保守性）が向上する。

6.5 軌道絶縁部劣化の診断（Maintainabilityの向上）

従来の軌道回路では、軌道回路故障が発生した際に、専用の測定器を使って、現地のレールの電流を調査することで原因の特定をしているが、復旧までに多大な時間を要している。

提案する SW-TC では、5.4.2 節で説明したように、波形の乱れが絶縁破壊によるものであることが診断でき、その結果、軌道回路の絶縁破壊箇所の特정에必要な時間を大幅に短縮できることで、Maintainability（保守性）が向上する。

6.6 軌道回路の調整の容易化（Maintainabilityの向上）

従来の軌道回路は、改修や新設時において、受信レベルが適切な範囲にあるかなどの軌道回路の調整が必要であった。軌道回路の種類によっては、受信レベルの他に周波数の位相も調整する必要があり、抵抗や位相調整器を用いた現場調整が必要であった。

提案する SW-TC では、4.4 節で説明したように、設置時に孤立波が認識され、

一定の受信レベルが確保されていれば、それ以上の調整は不要である。

以上により、SW-TC は、従来の軌道回路と比較して、現場での調整が容易になることで、Maintainability（保守性）が向上する。

6.7 省エネルギー化

従来の連続波による軌道回路信号と異なり、提案する SW-TC では、レールに送り出す信号波が離散的であるため、大幅な省エネルギー化が期待できる。具体的な省エネルギー化の効果を示すため、SW-TC が消費するエネルギーを既存の軌道回路およびデジタル ATC と比較した。なお、D-ATC では列車検知用 TD 信号電流、ATC 信号電流が軌道回路に流れている。

前提条件として、各軌道回路に伝送される電力は等しく 10 W として計算した。送信信号はアンプ回路で増幅され、軌道回路に送られる。また、B 級増幅器は低周波孤立波軌道回路、既存の商用軌道回路、TD 波で使用され、D 級増幅器は ATC 信号波を使用することで想定している。さらに、過去の実績から、クラス D 増幅器の効率とクラス B 増幅器の効率は、それぞれ 80%と 78.5%として計算している。

SW-TC の送信電力は、孤立波フレーム(SWF)内の波源(WS)の数によって変化するが、SE の 2 波および WS の 3 波の合計 5 波がフレーム (SWF) 内にあることで計算している。なお、WS が軌道回路で伝送されていない場合でも、このときの消費電流は通常伝送時の 10%程度は流れると仮定すると、B 級増幅器に電流が流れる。この仮定では、B 級アンプを使用する他の機器の実績値 8%を基準にマージンを加算する。このような仮定の下で、各軌道回路の消費電力を計算した結果は、以下のとおりである。

(1) 既存の商用軌道回路

$$10/0.785=12.73\text{W}$$

(2) SW-TC

$$((5+20\times 0.1)/25)\times 12.73=3.56\text{W}$$

(3) デジタル ATC

$$10/0.8+12.73=25.23\text{W}$$

さらに、デジタル ATC の地上処理部は、ATC 信号の送受信と TD 波の送受信を行う送受信架以外にと共通処理の論理架と伝送制御架から構成される。標準的な機器室内機器の消費電力によると、論理架及び伝送制御架の消費電力の消費電力は、送受信架の消費電力の約 13%という実績実測値がある。実際には、実装される送受信器架の数によりその割合は変動するし、ATC 信号の送信方式を常時送信方式か、列車が侵入してくるときに限り送信するかによっても異なるが、ここではおおよその傾向を

得ることが目的なため、詳細検討は省略する。以上により、地上論理装置も加味したデジタル ATC の軌道回路消費電力は、 $25.23 \times 1.13 = 28.5\text{W}$ となる。得られた結果を表 6.1、表 6.2 および図 6.1 に示す。

表 6.1 孤立波軌道回路の省エネ効果の比較 (その 1)

No.	種類	アンプの出力電力	アンプの出力電力の比	レール送信波形
1	D-ATC (商用と ATC を重畳)	28.5W	224%	<p>ATC波 10kHz MSK変調</p> <p>TD波 50Hz 無変調</p> <p>+</p>
2	商用軌道回路 (2元3位、機器分散)	12.73W	100%	<p>TD波 50Hz 無変調</p> <p>または</p> <p>TD波 50Hz 無変調 (逆位相)</p>
3	SW-TC (孤立波軌道回路)	3.56W	28%	<p>TD波 25Hz 孤立波</p> <p>スタートエレメント</p> <p>列車在線情報</p>

表 6.2 孤立波軌道回路の省エネ効果の比較 (その 2)

Item	Commercial frequency track circuit	SW-TC	D-ATC
Power consumption / track circuit	12.73 W	3.56 W	28.5 W
Percentage	1	0.28	2.24

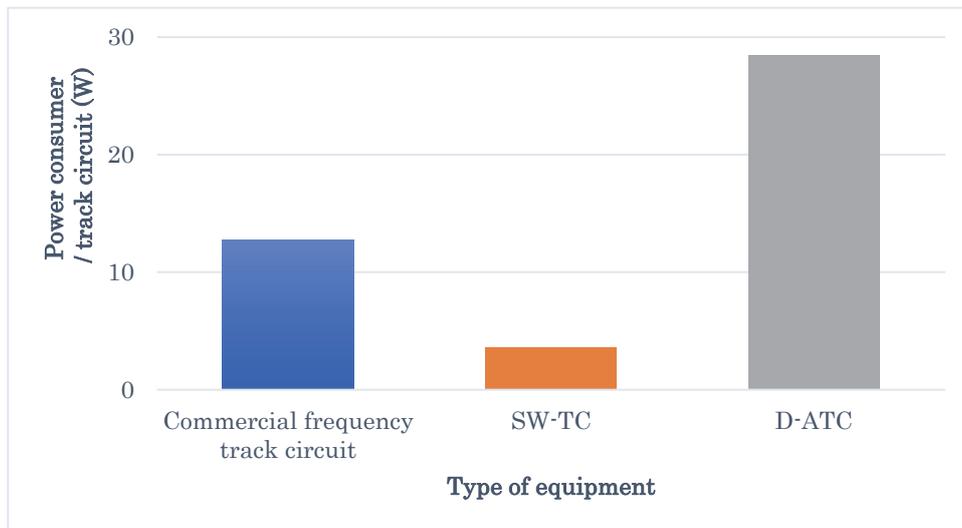


図 6.1 孤立波軌道回路の省エネルギーの効果の比較

表 6.2 および図 6.1 の計算結果から、SW-TC 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。さらに SW-TC は、デジタル ATC 相当の列車保安制御機能を実現できながら、デジタル ATC よりエネルギー消費を約 87%削減できる。

6.8 まとめ

SW-TC は、以下の内容で、既存の軌道回路より、RAMS 性能 (Reliability (信頼性)、Availability (可用性)、Maintainability (保守性)、Safety (安全性) の英語の頭文字) が向上すること、またエネルギー消費を大幅に削減できることを明らかにした。

(1) Reliability (信頼性)

SW-TC は、従来の軌道回路の種類によっては必要であるトランスや抵抗子、位相調整器などを削減・不要とする簡易な軌道回路構成であり、ケーブルレスで、多現示式信号機制御を実現できる。

さらに、SW-TCは、現行のデジタルATCに必要な地上装置およびケーブル敷設が不要で、列車保安制御機能の実現可能である。

以上により、SW-TC 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 相当の列車保安制御を実現できるため、Reliability(信頼性)が向上する。

(2) Availability（可用性）と Safety（安全性）

SW-TC は、A/D 変換によって得られるデジタルサンプリングデータをもとに受信の判断をするため、設置時に調整した際の受信波形を雛形として記録しておき、受信した波形と雛形の波形との相関から孤立波を判別し、さらに 1 周期内の WS の数をもとにノイズなどと切り分けることが可能である。

また孤立波としての形状チェックや孤立波相互の時間間隔、サイクル中の孤立波の検出数などをもとに、雑音をフィルタリングすることで、従来の軌道回路と比較して耐雑音性能を向上させることができ、妨害波による危険側の誤制御の影響も軽減できる。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は低下できるため、Availability（可用性）が向上する。さらに、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。

(3) Maintainability（保守性）

SW-TC は、WS の間隔をもとに Signal Number（信号番号）を得るため、受信レベルが低下した場合でも、必要とする WS が検出できていれば処理を継続することができ、受信レベルの低下は、いずれ WS そのものも検出できない状態に遷移することが予期できるため、受信レベルが低下したことを予防保全情報として出力することができる。

また SW-TC は、軌道回路境界部分で絶縁破壊が発生した場合、箇所波形の乱れが絶縁破壊によるものであることが診断でき、軌道回路の絶縁破壊箇所の特定に必要な時間を大幅に短縮できる。さらに SW-TC は、設置時に孤立波が認識され、一定の受信レベルが確保されていれば、それ以上の調整は不要である。

以上により、SW-TC では、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）が大幅に向上する。

(4) 省エネルギー化

SW-TC は、従来の連続波による軌道回路信号と異なり、レールに送り出す軌道回路信号波が離散的であるため、大幅な省エネルギー化が期待できる。

具体的な効果を説明すると、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。さらに、デジタル ATC よりエネルギー消費を約 87%削減できる。

第7章 結論

7.1 開発の主な成果

(1) 省エネルギー化

従来の軌道回路では、連続波による軌道回路信号を送信して、周波数や位相から信号を確定しているが、SW-TCでは、レールに送り出す軌道回路信号に複数の孤立波を送信し、これは離散的に電流を流す方式であるため、大幅な省エネルギー化が期待できることを示した。

さらに、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、デジタルATCよりエネルギー消費を約87%削減できることを示した。

(2) ケーブルレス・コスト削減

従来の駅中間の軌道回路では、ケーブルを敷設し、前方の閉そく信号機の現示情報を取得して多現示式信号機制御を実現していたが、SW-TCは最大9軌道前方の軌道回路情報をケーブルレスで受信でき、多現示式信号機制御を実現することが可能であることを示した。

また、現行のデジタルATCでは、デジタル電文の生成や列車検知を行うために大規模な地上装置を機器室に設置する必要があるが、SW-TCはシンプルな構成で、地上装置およびケーブル敷設が不要でありながら、デジタルATC相当の列車保安制御機能を実現でき、コスト削減が図れることを示した。

(3) D-ATC相当の列車保安制御の実現

SW-TCは、孤立波の間隔を情報とし、SWフレームを定義し、フレームの開始を意味するSEを設定することで多情報化が図れ、情報量の大幅な拡大が可能である。

またSWF中の一部を固定ビット列と定義して、Information Fieldを設定することにより機能拡張が図れ、デジタルATC相当の列車保安制御機能を実現できることを示した。

(4) 運転方向切替処理に伴う送受信部の自動切替

単線自動閉そく区間では、列車の運転方向を定める必要があり、多くの線区では、閉そく区間の両端駅に一方の方向を設けている。現行の単線自動閉そく方向回線は、軌道回路の送受電切替も自動で行うため3本の配線を擁しているが、SW-TCは、運転方向制御部の処理部から、運転方向をこの条件を取り込み、SWF中のInformation Fieldを設定することで、自動的に送受信部の切替

が行えるため、複雑な単線自動回路結線は不要となり、両駅の方向でこによる閉そく設定が単純化できることを示した。

(5) 軌道回路境界の絶縁破壊診断

従来の軌道回路では、レール故障が発生した場合、現場に赴き、サーチコイルなどの専用の測定器を持ってレールを歩いて電流を測定することで、故障部位の特定を行っていた。現場の測定は、電流部分を把握しながら調査を進める必要があるため、原因究明にはかなりの時間を要していたが、SW-TCは軌道回路ごとに定期的に軌道回路境界絶縁破壊診断を行い、故障予兆把握を行うことができる。

また、絶縁破壊を検出した場合、SWF中のInformation Fieldを設定することで、速やかにメンテナンスを要請できるため、故障部位の原因特定に要する時間を大幅に短縮することができ、保守性を大幅に向上できることを示した。

(6) RAMS性能の向上

SW-TCは、従来の軌道回路と比べて、RAMS性能（Reliability（信頼性）、Availability（可用性）、Maintainability（保守性）、Safety（安全性）の英語の頭文字）を向上できることを示した。

具体的には、SW-TCは簡易な構成でありながら、ケーブルレスで従来の軌道回路と同等の機能やデジタルATC相当の列車保安制御を実現できることで、Reliability（信頼性）が向上することを示した。

またSW-TCは受信した波形と雛形の波形との相関から孤立波を判別することなどにより、ノイズをフィルタリングすることができ、耐雑音性能が向上しており、ノイズ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減できることでAvailability（可用性）が向上することを示した。さら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）も向上することを示した。

さらに、SW-TCは、受信レベルが低下したことを予防保全情報として出力できること、軌道回路ごとに定期的な軌道回路境界絶縁破壊診断を行うことで、軌道回路の絶縁故障箇所の特정에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）が向上することを示した。

(7) 鉄道事業者の経営に資する信号システム

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いるが、導入費用などの点で中小の鉄道事業者が無線システムを採用することは難しい状況である。しかし、SW-TCは簡易な構成でありながら、従来の軌道回路と同等の機能だけでなく、廉価でデジタルATC相当の列車保安制御機能や故障予兆把握機能

などを実現することもできる。

SW-TC は、長年の実績がある軌道回路の延長にありながら、ケーブルレスや大幅なコスト削減や省エネルギー化も達成でき、RAMS 性能も向上しているなど、その導入効果も高いため、様々な鉄道事業者にメリットのあるシステムであるが、特に中小の鉄道事業者の経営に資する信号システムであることを示した。

7.2 総合的考察

今回提案する SW-TC を用いれば、従来の軌道回路に比べて、ケーブルレスや大幅な省電力化が図れる。また、SW フレームに SE を追加して情報量の増大および機能を拡張することで、予防保全の向上や軌道回路の調整の容易化などが図れ、従来の軌道回路と比べて RAMS 性能が向上できる。

軌道回路は、長年に亘る実績のある安全性が確保された枯れた技術であるが、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。しかし、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、提案する SW-TC 方式は、既存の軌道回路の延長にありながら、駅中間、駅構内を含めて、先端の列車保安制御装置であるデジタル ATC と同様な単一パターンによる速度照査制御が、機器室に設置されている論理架や搬送波生成架、符号生成架といったハードウェアを用いずに実現できる。その結果、大幅なコスト削減と省エネルギー化が達成できる。そのほか、単線区間における運転方向に応じた信号機や軌道回路の送信・受信の切替え制御も実演するなど、その導入効果も高い。

鉄道信号において、高性能な制御には情報量の増加が必要であり、可聴周波数軌道回路をベースに MSK 変調などの技術を駆使してデジタル ATC が開発され、新幹線や高密度線区に導入されてきたが、本論文では、商用周波数程度の軌道回路でも多情報化が可能であり、列車保安制御が実現できるということを明らかにした。軌道回路は、今後もその機能を発展できる可能性を秘めており、本方式を用いることで、より廉価で経営に資する信号システムが実現でき、軌道回路の再生が図れるものと期待している。

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、多大な御助言、御指導および御鞭撻を賜りました日本大学の中村英夫名誉教授と日本大学工学部応用情報工学科の高橋聖教授に篤く御礼申し上げます。また、本研究を進めるにあたり、有益なご助言を頂きました日本大学工学部応用情報工学科の吉川浩教授と望月寛准教授に心からの感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり、また本論文をまとめるにあたり、多大なご協力を賜った松脇康之、布施卓也、中野浩明の各氏をはじめ、大同信号株式会社の方々に感謝いたします。

最後に、永きにわたり多方面での私の生活を支えてくれた妻・朝子に心から御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 信号保安協会：鉄道信号発達史(1980-4)
- [2] 板倉栄治：軌道回路：信号保安協会，信号技術シリーズNo.4(1971)
- [3] 江草茂：信号におけるシステム開発：鉄道と電気技術，Vol27，No.3，pp. 5-12(2016-2)
- [4] 川野卓，福田光芳：新しい統合型軌道回路の開発：日本鉄道技術協会，Vol 55，No.12，pp. 19-22. (2012-12)
- [5] 平尾裕司：鉄道信号における安全技術と機能安全：電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ，Vol7，No.2，pp. 124-132(2013)
- [6] 升谷悟，内海博文，南亮吉：スキャニング式軌道回路について：鉄道と電気技術，Vol22，No.7(2011)
- [7] 南亮吉，須賀利昭，陽田芳博：列車検知装置（SMET形）「KC1158-1・他」：DAIDO誌，No.104，pp.16-21 (2003)
- [8] 水野健，山本武史：信号機器の省エネルギー化の取組み：鉄道と電気技術，Vol27，No.1，pp. 31-34(2016-1)
- [9] 寺田夏樹：デジタルATC：鉄道と電気技術，Vol9，No.7，pp. 16-17(1998-7)
- [10] 五十嵐徳郎，田代維史：デジタルATCシステムにおけるRAMS規格への対応：鉄道と電気技術，Vol15，No.2，pp. 45-49(2004-2)
- [11] 高重哲夫：軌道回路と列車検知：鉄道と電気技術，Vol4，No.10，pp. 3-7(1993-10)
- [12] 中村英夫：保安設備の姿と展望：鉄道と電気技術，Vol23，No.7，pp. 5-10(2012-7)

- [13] 松本雅行, 北村知, 渡部悌: 保安設備の姿と展望: 鉄道と電気技術, Vol12, No.12, pp. 39-44(2001-12)
- [14] 福田光芳, 新井英樹: 列車の安全運行を支える情報伝送: Railway Technical Research Institute of Research Review, Vol67, No.2, pp. 10-13(2010-2)
- [15] 福田光芳: 来し方行く末: Railway Technical Research Institute of Research Review, Vol69, No.7, pp. 28-31(2012-7)
- [16] 新井英樹, 寺田夏樹: 信号・列車制御技術の変遷と動向: Railway Technical Research Institute of Research Review, Vol72, No.2, pp. 24-27(2015-2)
- [17] 中村英夫: 鉄道の運行システムにおける情報処理技術の動向: 情報処理, Vol55, No.3, pp. 268-276(2014-2)
- [18] 日本鉄道電気技術協会: わかりやすい鉄道技術 (鉄道概論・電気編) (2004-5)
- [19] 中村英夫: 鉄道安全解体新書: オーム社, pp. 92-94(2021-11)
- [20] 松本雅行: 鉄道運転におけるセンサ技術の動向: 日本信頼性学会誌, Vol127, No.11, pp. 461-466(2007-11)
- [21] 寺田貴行, 中村英夫: 列車検知センサー(軌道回路)の再生とRAMS性能の改善: 日本信頼性学会誌, Vol43, No.2, pp. 87-92(2021-3)
- [22] 信号保安協会: ATS-B形装置: 鉄道信号ハンドブック, pp. 896-902(1969)
- [23] 日本電気技術協会: 鉄道信号(2015-1)
- [24] 田口明夫: 無絶縁軌道回路の境界特性の改良: 電気学会論文誌D, Vol118, No.2, pp. 243-252(1998)

申請者の発表論文

審査付き論文（3件）

[1] 寺田貴行、松脇康之、布施卓也、南亮吉、望月寛、中村英夫：軌道回路の再生と新しい信号制御方式の提案：電気学会論文誌D 141(3) p206-211(2021-3)

[2] 寺田貴行、松脇康之、布施卓也、村永祐介、望月寛、中村英夫：孤立波軌道回路による信号制御の再構築：電気学会論文誌D 142(6) p447-453(2022-6)

[3] Takayuki Terada, Hiroshi Mochizuki, Hideo Nakamura : Maintainability Improving Effects such as Insulation Deterioration Diagnosis in Solitary Wave Track Circuit : Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal 7(4) p9-14 (2022-7)

国外発表（1件）

[1] Takayuki Terada, Hiroshi Mochizuki, Hideo Nakamura : Development of New Track Circuits for Energy Conservation and Signal Control Innovation : 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME) (2021-10)

国内発表（3件）

[1] 寺田貴行、松脇康之、布施卓也、南亮吉、望月寛、中村英夫：軌道回路の再生と新列車制御システムの構築：第26回鉄道技術連合シンポジウム S-2-8-3 (2019-12)

[2] 寺田貴行、松脇康之、布施卓也、村永祐介、望月寛、中村英夫：孤立波軌道回路による信号制御の再構築：第27回鉄道技術連合シンポジウム S-2-5-5 (2020-12)

[3] 寺田貴行、松脇康之、布施卓也、村永祐介、望月寛、中村英夫：孤立波軌道回路による故障診断と予防保全：第28回鉄道技術連合シンポジウム SS2-3-2 (2021-12)