

# 孤立波軌道回路の導入効果に関する一検討

黒川 竜生\* (日本大学)

松脇 康之 寺田 貴行 布施 卓也 (大同信号)

望月 寛 (日本大学)

## A Study on Introduction Effects of Solitary Wave Track Circuit

Ryuki Kurokawa (Nihon University)

Yasuyuki Matsuwaki, Takayuki Terada, Takuya Fuse (Daido Signal Co., Ltd)

Hiroshi Mochizuki (Nihon University)

Solitary wave track circuit (SW-TC) explained that it is possible to greatly expand the amount of information by providing a starting element (SE), which signifies the start of the SW frame, in the SW signal. Further, by defining a part of the SW frame as a fixed bit string and adding information, the function can be expanded. In addition, by distributing the equipment on site, train detection and signal control can be achieved without cables. Advanced train security control functions equivalent to digital ATC can be realized with a simple track circuit at a lower cost, such as realization of cableless operation direction switching in a single track section. In this paper, we discussed introduction effects of SW-TC by calculating power consumption and so on.

キーワード：孤立波, レール伝送電力, D-ATC, 商用軌道回路

(Solitary wave, Power consumption, Digital-Automatic Train Control, Commercial track circuit)

## 1. まえがき

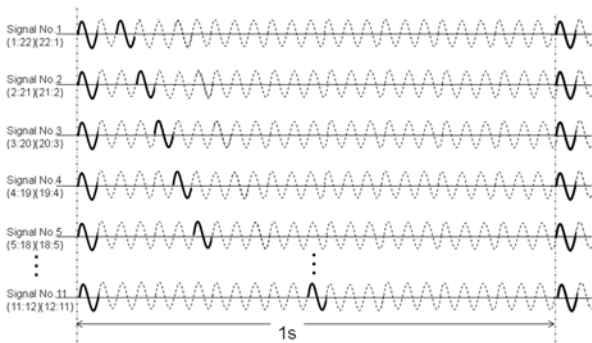
現在、列車検知方式の一つである軌道回路は様々な線区に導入されている<sup>(1)</sup>。2000年代の初めには省エネルギー化を目的として駅構内用の軌道回路としてSMETが開発され、省エネルギーや高信頼性、保守性向上の効果が認められた<sup>(2)(3)</sup>。しかし、駅中間では長距離にわたり軌道回路が直列に接続されているため、コスト面の制約から、SMETのように多くの軌道回路を時分割で一括制御することは困難である。他方、列車制御の高度化についてはデジタルATC(D-ATC)が開発された。D-ATCは地上の制御装置で生成した列車制御電文を車上のATC装置に伝送して高度な列車保安制御を実現するが、省エネルギーではない。

以上を踏まえて、筆者らは駅中間軌道回路に交流信号を常時流すのではなく、信号波の1波長分を波源(Wave Source: WS)としてその波源WSを孤立的に必要とされる数のみ送る新しい軌道回路方式の研究を進め、これを孤立波軌道回路(Solitary Wave Track Circuit: SW-TC)と呼んでいる<sup>(4)(5)</sup>。本研究では、SW-TCを実際の鉄道信号システムに導入した際の効果について検討する。特に既存の軌道回路方式とのレール伝送電力などを比較することで、SW-TCの省エネルギー化の実現に対して検討を行ったので報告する。

## 2. SW-TCの概要と基本的な性能評価

**〈2・1〉SW-TCの概要と機能拡張** SW-TCは、一定周期のサイクル内に連続して信号波を送るのではなく、信号波の1波長分をWSとしてそのWSを孤立的に必要とされる数のみ送信し、WS相互の間隔を情報として利用する軌道回路装置である。図1では、基本となるWSを25Hzの正弦波1波分としている。また、WSを2つ用意し、その孤立波間隔に情報を割り当てる。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で定まる。この事例では11通りの情報が取得できる。さらにWSをもう1波追加し3波とすることにより、210通りまで情報量を拡大させることができる。

図1に示す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間隔のうち小さい間隔を軌道信号のSignal Number(Signal No.)と定義する。ここで、Signal No.1は、一つ前の軌道回路に列車が在線することと定義する。また、Signal No.1は、軌道回路に列車が在線し、軌道回路信号が受信できない状態と定義する。このようにしたとき、ある軌道回路に1列車が在線しているときの後続軌道回路の軌道信号(Signal No.)の様子を図2に示す。この図に示すように、前方列車の在線位置により列車後方にSignal



\*The broken dot line indicates the no-current state, and the solid line indicates the waves source.

図 1 孤立波の一例

Fig. 1. An example of solitary waves

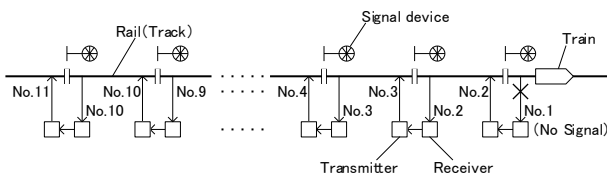


図 2 SW-TC での軌道信号の一例

Fig. 2. An example of signal No. transmission at SW-TC

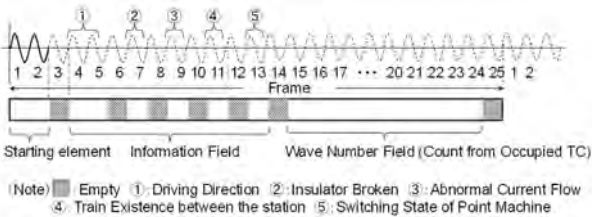


図 3 SWF のフレーム構成

Fig. 3. A frame architecture of an SWF

No.1～Signal No.11 の軌道信号 (Signal No.) が送信されるが、前方列車から 11 軌道以上離れた場合には、Signal No.11 の軌道信号を割り当てるものとしている。なお、図 1 の例では、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と考える<sup>(6)</sup>。

ここで、SW-TC の機能拡大には情報量拡大が望まれるため、先行研究では SW-TC の 25 波の位置を情報と定めることによる情報量の拡大について検討を行っている。具体的には、図 3 のように SW フレーム (Solitary Wave Frame : SWF) を定義することとし、その中では連続した 2 つの WS をスタートエレメント (Starting Element: SE) と定義し SW フレームの区切りを定めている。次に機能拡張の方法として、SW フレームの開始から数えて 4 ポジションから 13 ポジションまでを情報フィールド (Information Field) として確保し、残りの 15 ポジションから 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。また、SWF から成る信号電流は列車の先頭に搭載した受電器を介して車上側に信号を取り込むことができ

る。車上装置は列車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データを記憶している。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、番線毎の停車位置等が記憶されている。以上のことより、地上設備の大幅な削減をした上で現行のデジタル ATC と同じ原理で停止パターンによる保安制御が実現可能になる<sup>(7)(8)</sup>。

## 〈2・2〉 DSP によるハードウェア開発と基本性能評価

前節を踏まえて、実際に組み込みデバイスの一つである DSP (Digital Signal Processor) を用いたハードウェア開発を行っている。今回、TI 社の OMAP-L137 が搭載された DSP を 2 台用いて送受信器をそれぞれ開発した後、それらを接続した基本性能評価を行った。ここで、孤立波の送受信部の設計について、特に受信部でのデータ復調の信号処理については、以下の 2 つの手法について検討した。

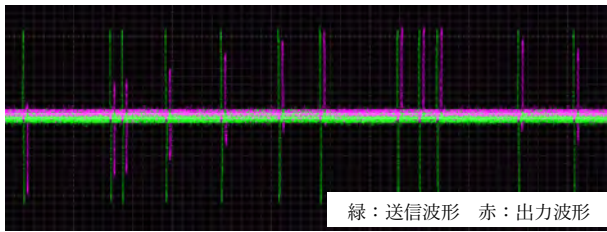
- 受信部でローカルのキャリアを用いて取り込まれた送信波との相関処理を行い、孤立波の有無を判定する。
- 受信部で送信波を二乗した後、移動平均フィルタをかけることで直流成分のみを抽出し、その大きさから孤立波の有無を検出する。

これらの特徴として、前者の方が耐雑音性の点で有利であり、後者の方が送受信部の同期ずれによる影響を受けにくいという点がそれぞれ挙げられる。図 4 にはキャリアとの相関処理、二乗検波をそれぞれ行った時の出力特性を示すが、これらの図より、キャリアを用いた相関処理では前述の通り送受信間の同期ずれの影響を受けた出力波形が得られるのに対して、二乗検波では送受信器間の同期ずれの影響を受けず、時間によらず安定した出力が得られることを確認した。さらに、実際のレール伝送特性の影響を考慮して疑似軌道回路を用いた評価も合わせて行った結果、軌道回路長や漏れコンダクタンスの変動に対しても、孤立波の検出が可能であることを確認した<sup>(9)</sup>。

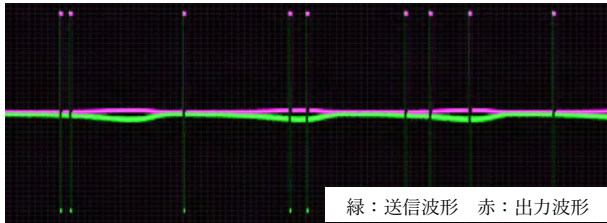
## 3. SW-TC の導入効果に関する検討

〈3・1〉 従来軌道回路方式との構成の比較 前章での検討を踏まえて本章では、従来軌道回路方式との比較を行うことで SW-TC の導入効果を評価する。今回、商用軌道回路及びデジタル ATC (D-ATC) を比較対象とするが、D-ATC に関しては、ATC 信号波と列車検知用の TD 波 (商用) を組み合わせて使用するものとする。

図 5(a)に示した商用周波数軌道回路はレール絶縁境界部に電気車電流と信号電流を区別するインピーダンスボンドが取り付けられており、隣接軌道回路とは電氣的に絶縁されている。送電側機器は商用周波数電源、受電側機器は軌道リレーから構成されている。機器類は閉そく境界点の器具



(a) 相関処理波形



(b) 二乗検波波形

図 4 受信器での出力特性

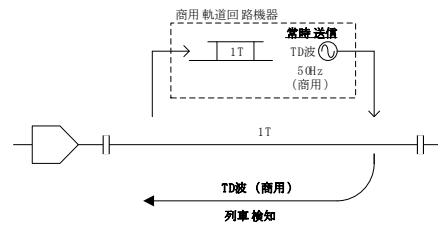
Fig. 4. Output characteristics at the receiver

箱に收容される機器分散方式である。列車検知信号に商用電源 (50Hz/60Hz) を用いる点で機器構成がシンプルである。加えてレールに送出する信号の位相を 180° 変化させることで 3 値の情報 (G、Y、R) を伝送することができる。

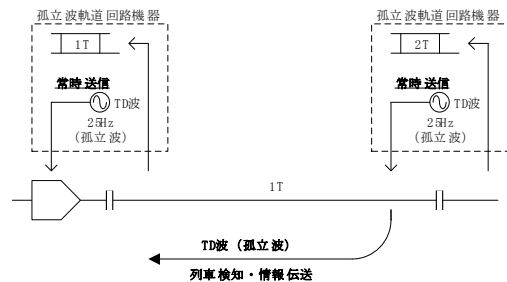
図 5(b)に示した SW-TC は有絶縁軌道回路であり、機器類は閉そく境界点の器具箱に收容される機器分散方式である。列車検知信号に加えて、列車在線情報・故障情報等を車上側に伝送する。車上装置は線形データや車両データ等をデータベースとして持っており、自列車の位置に基づいて最適なブレーキパターンを生成することができる。既存の D-ATC は、機器集中方式でケーブルの敷設が必須であった。SW-TC の情報を増やすことで D-ATC 相当の高度な列車保安制御を現場分散でかつケーブルレスで構成し、さらに列車検知機能と情報伝送機能を 1 波の信号波で実現できることから、機器の小型化と省エネルギー化を両立できる。

図 5(c)に示した D-ATC は機器集中方式で主要機器は機器室に集約され、レール周りには整合変成器やケーブルが敷設される。レール絶縁は有絶縁方式と無絶縁方式とがある。レールを介して地上から車上に対して開通情報等が伝送される。車上装置は線形データや車両データ等をデータベースとして持っており、自列車の位置に基づいて 1 段制御ブレーキパターンを生成することができる。列車検知信号と ATC 信号は別々の信号波が割り当てられるため、機器構成が複雑であり、商用軌道回路や SW-TC と比べて機器の消費電力が大きい傾向にある。

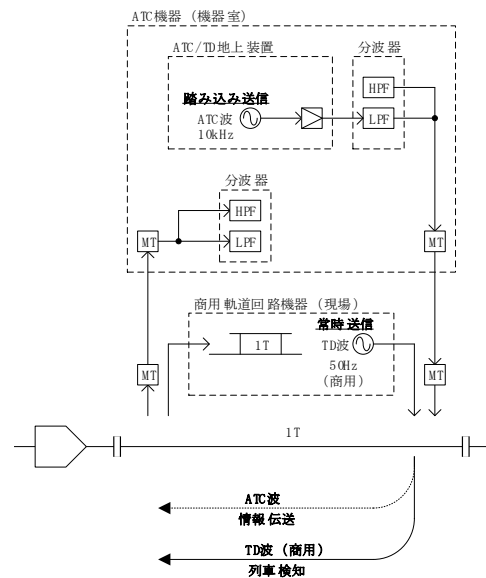
〈3・2〉機器設置スペースの比較 図 6 に各種軌道回路方式の筐体の比較を行った。既存商用軌道回路機器および SW-TC 機器は、駅中間の閉そく器具箱への收容を想定したため、機器收容器具箱のサイズを基準として算出した。表 1 に機器設置スペースの比較を行ったものを示すが、この表



(a) 商用軌道回路



(b) SW-TC



(c) D-ATC

図 5 各種軌道回路方式の構成例

Fig. 5. Configuration example of track circuit methods

より D-ATC 機器と比較した場合、機器設置スペースが約 67%削減できるとの試算が得られ、D-ATC に対する SW-TC の優位性を確認した。

〈3・3〉レール伝送電力の比較 次にレール伝送電力について比較した。ここで、軌道回路方式は異なるがレールに伝送する電力は等しく 10W として計算する。軌道回路へは送信信号が増幅器 (アンプ) により増幅されて軌道回路に送られる。周波数の低い SW-TC と既存軌道回路及び TD 波に

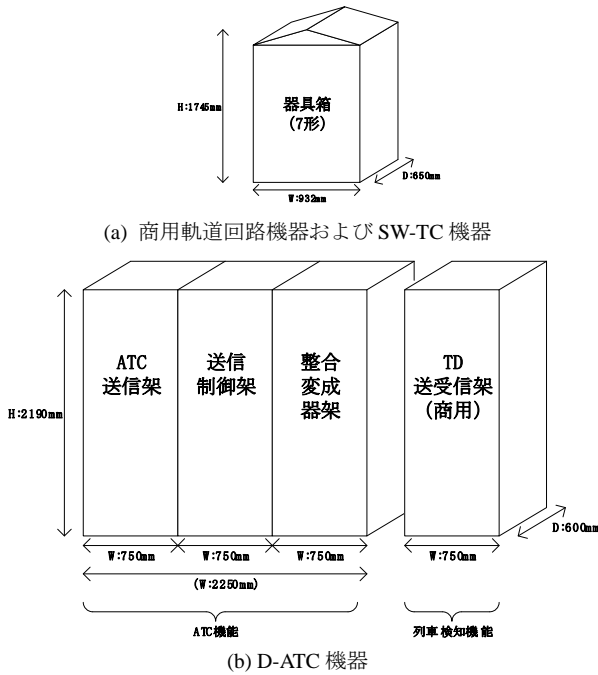


図 6 各種軌道回路方式の筐体の比較

Fig. 6. Comparison of enclosure of track circuit methods

対しては B 級アンプ (効率 78.5%) を用い、ATC 信号波に対しては D 級アンプ (効率 80%) を用いるものとする。SW-TC の場合、SWF 中の WS の数によってレールへの伝送電力が変化するが、今回は 3 波の WS とし、SE 含めて 5 波が存在すると仮定した。なお、SW-TC において波源 WS が送信されないときにも、B 級アンプには無信号電流が流れるが、この時の電流消費は波源送信時の約 10% とする。この仮定は、B 級アンプを用いた他装置での実績値 8% を参考にマージンを加味している。一方、D-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共通処理の論理部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レール伝送電力によると、論理部架及び伝送制御架のレール伝送電力のレール伝送電力は、送受信架のレール伝送電力の約 13% という実績値があるが、実際には、実装される送受信架の数によりその割合は変動する。以上を踏まえて表 2 に比較結果を示すが、SW-TC は従来の軌道回路と比べてレール伝送電力を約 72% 削減できるとの結果になった。さらに、列車保安制御の観点では、D-ATC 相当の機能が実現できるが、そのレール伝送電力は、D-ATC の約 87% 削減できるとの試算が得られた。

4. まとめ

本研究では、筆者らが現在検討を進めている SW-TC の実用化を目指すために、他の軌道回路方式と比較することで導入効果を検討した。今回、比較対象として商用軌道回路お

表 1 機器設置スペースの比較

Table 1. Comparison of installation space of equipments

項目	商用軌道回路	SW-TC	D-ATC (TD)	
機器収容場所	線路横	線路横	機器室	機器室
筐体	7形器具箱 (リレー)	7形器具箱 (送受信器)	ATC送信架 送信制御架 整合変成器架	TD送受信架 (商用)
機能	列車検知	列車検知および 信号灯器制御	ATC	列車検知
機器設置 スペース (床面積)	W932mm × D650mm	W932mm × D650mm	W2250mm × D600mm	W650mm × D600mm
割合	1	1	2.97	

※電源装置等は含まない

表 2 レール伝送電力の比較

Table 2. Comparison of rail transmission power

項目	商用軌道回路	SW-TC	D-ATC
レール伝送電力	12.74W	3.56W	28.5W
割合	1	0.28	2.24

※1 軌道回路あたり

よび D-ATC を取り上げ、まず、省スペース化について、SW-TC は従来の商用軌道回路と同じスペースでの設置が可能であることから D-ATC に対して優位性があることを確認した。一方、レール伝送電力について、SW-TC は常時、信号を流していない特徴によって、他の軌道回路方式に比べて電力を大幅に削減でき省エネルギーを実電できる可能性を示した。今後は、実環境を想定した SW-TC の評価試験を行い、今回試算した電力などが同一傾向の振る舞いになるかなどを評価することでさらなる研究の深度化を図りたいと考えている。

文 献

- (1) 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)
- (2) 升谷他:「スキヤニング式軌道回路について」, 鉄道と電気技術, Vol.22 No.7 (2011)
- (3) 南他:「列車検知装置(SMET 形)[KC1158-1・他]」, DAIDO, No.104, pp.16-21 (2003)
- (4) 寺田他:「軌道回路の再生と新列車制御システムの提案」, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム, S-2-8-3 (2019)
- (5) 寺田他:「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, S2-5-5 (2020)
- (6) 寺田他:「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, Vol. 141, No.3, pp.206-211 (2021)
- (7) 松脇他:「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)
- (8) 寺田他:「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, Vol. 142, No.6, pp.447-453 (2022)
- (9) 黒川他:「DSP を用いた孤立波を用いた鉄道信号システム用伝送装置の開発」, 2022 年電気学会 C 部門大会, PS3-8 (2022)