

軌道回路のデジタルツイン実現に向けた軌道回路の階層的モデル化

遠山 喬* 進藤 卓朗 (鉄道総合技術研究所)

A Hierarchical Modeling of Track Circuits for Digital Twin of Track Circuits

Takashi Toyama*, Takuro Shindo (Railway Technical Research Institute)

In track circuits, there is a need for earlier detection of faults and earlier recovery from failures. To meet these needs, the use of a Digital Twin based on sensing and simulation technologies could be effective. However, building models for track circuit simulation is labor-intensive, and it is not feasible to have a complete set of ledgers and sensing information of the track circuits. Therefore, we propose a hierarchical modeling of track circuits, which combines and complements information at different levels of abstraction. This paper reports on the concept of the modeling methodology.

キーワード：鉄道信号，軌道回路，デジタルツイン，階層的モデリング，回路シミュレーション

(Keywords, railway signalling, track circuit, Digital Twin, hierarchical modeling, circuit simulation)

1. はじめに

鉄道において軌道回路は実績のある列車位置検知装置として広く利用されている。軌道回路は、障害発生時に列車運行に与える影響が大きく、保守コストの大きな設備の一つとなっている。このため、軌道回路の状態監視を実施する例⁽¹⁾⁽²⁾が増えているが、軌道回路の障害の多くは予兆検知が容易ではない。特に、長期的トレンドから将来の状態を推定することは困難と考えられる⁽³⁾。異常検知の早期化や、障害原因箇所等の復旧支援の実現のためには、状態監視だけではなく、状態監視とシミュレーションを組み合わせたデジタルツインの活用が有効と考えられる。

デジタルツインとは、物理空間のシステムを、あたかも「双子」であるかのように、計算機（仮想）空間上に再現する技術である。デジタルツインを用いることで、物理空間で発生している事象を多角的な視点で可視化したり、システム変更を仮想空間上で事前検証したりすることが可能となる。鉄道の電気分野では、例えば、き電システムにデジタルツインを適用する研究が行われている⁽⁴⁾。そのような先行研究を参考に、軌道回路にデジタルツインを適用した場合の実現例を、図1に模式的に示す。

軌道回路のデジタルツインの仮想空間上で実行される軌道回路の電氣的シミュレーションに関しては、個別手法は技術的に成熟している。ただし、軌道回路信号の減衰計算⁽⁵⁾や帰線電流分布の計算⁽⁶⁾等、解決したい課題毎に使用するモデルが異なっており、個別設備のモデル構築やパラメータ設定には労力を要するという問題がある。また、軌道回路の状態監視データは、通常、送受信箇所の限られた点の電圧・

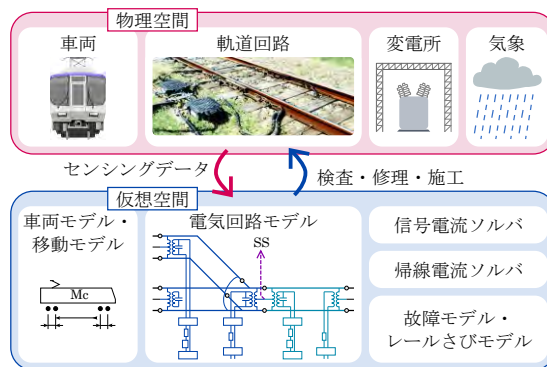


図1 軌道回路のデジタルツインの実現例

電流のみであり、台帳とセンシング情報が完備されていることは期待できない。そこで、抽象度の異なる情報を結合し、補完を行うための軌道回路の階層的モデル化について検討を行った。本稿では、階層的モデル化の考え方について述べる。

2. 軌道回路のデジタルツイン実現の課題

〈2-1〉 軌道回路の台帳・設備情報の課題 軌道回路のデジタルツインを実現する上での大きな課題の一つとして、軌道回路が信号系統で完結しておらず、複数の業務系統に跨る設備であることが挙げられる。一般的に、軌道回路の管理は信号系統の担当であるが、レール等の軌道設備は保線系統が担当である。また、走行する車両（形式や両数）やダイヤは、車両・輸送系統が管理する情報である。帰線電流

の軌道回路影響に関しては、車両・電力系統の情報も必要となる。このため、軌道回路のモデル構築やパラメータ設定に必要な情報の入手は容易ではない。

潮見ら¹⁾は、鉄道信号の設備管理においては、設備の状態・諸元の変化に対する相互影響を評価できることが重要であるとし、機器間の関連等を一元的にデータ化し、相互利用できるプラットフォームを提案している。これは軌道回路のモデル構築でも有効と考えられるが、他系統のデータ表現や管理方法が、必ずしも軌道回路のシミュレーションに適しているとは限らない。例えば、1本のレールであっても、電気回路としては送着電施設やジャンパ線の接続箇所等で区分しなければならない。このように、情報を一元管理し、他系統情報を容易に参照できるようになったとしても、軌道回路用に一次情報を再解釈する仕組みが必要である。

〈2・2〉 軌道回路のセンシングの課題 軌道回路の状態監視は、通常、送受信箇所である機器室や器具箱内の限られた点の電圧・電流を対象に行われている。一方で、例えば軌道回路の中間部に新たにセンサを設置することは、保守対象設備が増えることから費用対効果が十分に期待できず、現実的でない。したがって、センシング箇所以外の電圧・電流については推測する必要がある。また、軌道回路の本質的な問題として、車両が進入しない限り運行時間帯に短絡状態を観測できないことが挙げられる。したがって、短絡状態については、過去の情報や周辺の軌道回路の情報等から推測する必要がある。

さらに、軌道回路信号の時間波形を常時記録・伝送することはデータサイズの問題から容易ではない。このため、軌道回路の状態監視では、実効値や平均値等の要約量への変換や、時間的間引きが行われることが多い。軌道回路に障害が発生した際、この過程で失われる情報が重要である場合が考えられるが、元の時間波形を完全に復元することは不可能であり、推測する必要がある。

〈2・3〉 軌道回路のシミュレーションの課題 四端子回路モデルは、軌道回路信号のシミュレーションで広く用いられている。しかし、四端子回路モデルは複数軌道回路のネットワークのシミュレーションや、帰線電流分布の計算には適していない。また、既存の軌道回路のモデルは、様々な故障を想定したモデルになっていない。現状では、対象領域や故障毎にモデルを用意するため、労力が大きいという問題がある。

車両による軌道短絡の特性をシミュレーションする場合、電気回路としては車軸による短絡箇所ではレールを分割する必要がある。複数車両の連続的な移動を模擬するためには動的にレールを分割できる仕組みが必要である。

また、状態監視の拡張としてデジタルツインを位置づけると、モデル化の対象は少なくとも状態監視を行っている軌道回路全体となる。線区全体の軌道回路の精緻なモデルを作成しようとする、モデルが大規模となり、計算時間等のリソースに問題が生じる可能性がある。また、電気回路シミュレータのソルバの実装によっては、数値的安定性が低

下しやすいという問題もある。したがって、適当な単位でモデルを分割し、それらを連成できる仕組みが必要である。

〈2・4〉 実設備へのフィードバック・可視化の課題 電気回路シミュレーションで得られる結果は、各箇所の電圧・電流である。このため、検査・修理・施工といった物理空間へのフィードバックを行うためには、電圧・電流の結果からそれらの判断・提案を行う仕組みが必要である。判断をユーザが行う場合でも、判断を補助するための可視化について実現する必要がある。

3. 軌道回路の階層的モデルの提案

〈3・1〉 基本方針 軌道回路のデジタルツイン実現の課題の多くは、入手できるデータやユーザが扱えるデータの少なさと、障害模擬に必要な電気回路モデルの複雑さの乖離の問題として集約できると考える。そこで、乖離の大きさを小さくするため、扱う問題やデータの抽象度に合わせてモデルを複数の階層に分ける階層的モデルを提案する。一貫性を維持しつつ階層を分けることで、抽象度の異なる情報を結合し、補完することが容易になると期待できる。

〈3・2〉 軌道回路モデルの階層構造 表 1 に提案する軌道回路モデルの階層構造を示す。ここでは、階層を順序付ける指標として詳細度 (LOD: Level of Detail)を用いる。LOD0 を最も抽象度が高い階層、LOD3 を最も抽象度が低い階層として、4階層を設けた。図 2 に、LOD0~2 の模式図を示す。

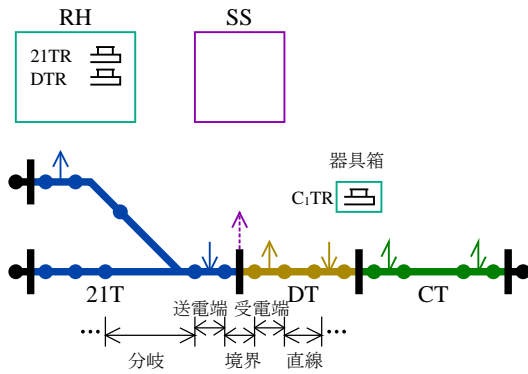
LOD0 は、軌道回路を利用する上で最も本質的な概念である軌道回路単位の在線・非在線を表現できる階層として設定した。この階層は、線路の配線略図に相当する抽象度を持っている。この抽象度は、車両の移動 (列車位置・速度) を表現するのに十分であり、また、連動装置や運行管理装置との連携に適している。さらに、可視化を行う際に複数の軌道回路を俯瞰するのに適している。

LOD1 は、左右レールの区別を行うことで、軌道回路の電気回路としての基本的性質を表現する階層として設定した。この階層は、一般的な軌道回路設備台帳の図に相当する抽象度を持っている。軌道回路の状態監視システムでは、送受信箇所の電圧・電流をセンシングしていることが多いため、後述の LOD2 と合わせ、状態監視システムとの連携を行う際に適している。

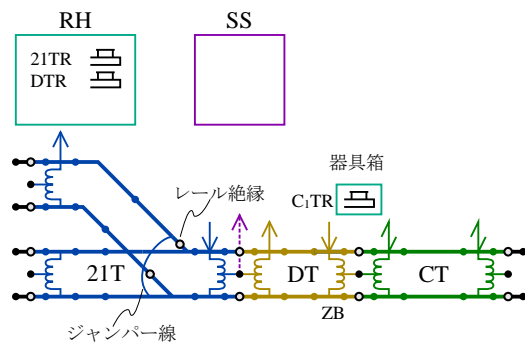
LOD2 は、LOD1 に対し、送信器 (電源) からレールま

表 1 軌道回路モデルの階層

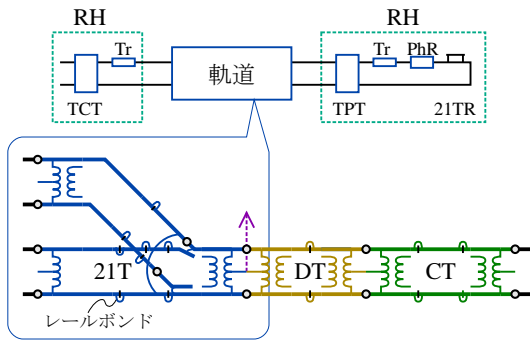
LOD	名称	要素の例
0	軌道回路単位	直線・曲線、分岐、軌道回路境界、死区間境界、送電端、受電端、受信器 (軌道リレー)
1	レール単位	左右レール、レール絶縁、ZB、ジャンパ線、クロスボンド
2	機器単位	送受信機器 (抵抗子等)、レールボンド、踏切制御子
3	実配線単位	ケーブル、端子台、軌間絶縁、転てつ付属品、ケーブル横断



(a) LOD0: 軌道回路単位



(b) LOD1: レール単位



(c) LOD2: 機器単位

図 2 軌道回路モデルの LOD0~2 の模式図

で、レールから受信器（軌道リレー）までの機器の接続を具現化した階層である。正常時の軌道回路の挙動を十分に表現できる階層として設定した。もっとも、ケーブル断線やレールボンドの脱落、帰線電流の不均衡といった典型的な障害は模擬できる抽象度である。

LOD3 は、物理空間と密接に対応する階層として設定した。LOD0~2 は、電気回路としてのトポロジーがモデル化されていることが重要であるのに対し、LOD3 は、地理空間

的な位置・形状も意味を持つ。これは、転てつ付属品やケーブル横断部等を介した不正短絡、端子緩みによる不正落下等の障害を模擬するために必要な性質である。換言すると、理論上は詳細度を際限なく上げることが可能であるが、詳細度の上限は、軌道回路で想定される障害が十分に模擬できる水準が目安となる。LOD3 のモデルは、十分に具体的であるため、SPICE 等の汎用電気回路シミュレータの回路（ネットリスト）に直接対応付けることが可能である。

なお、図 2 は階層に含まれる要素の例を示すものであって、可視化方法を制限するものではない。実際の可視化方法は階層とは独立した設計要素である。例えば、図 2(c)のように送信器から受信器までの機器を軌道回路単位でグルーピングを行う表示や、器具箱等の設備箇所単位でグルーピングを行う表示等が、いずれの階層においても考えられる。

〈3・3〉 抽象的な軌道モデルの採用

軌道回路はレール上の任意の位置で短絡される。そこで提案モデルでは、軌道部分を、レールやマクラギといった具体的な設備単位ではなく、道床等を包含した抽象的・連続的な構造物としてモデル化する。図 3 に抽象的な軌道モデルの例を示す。抽象的な軌道モデルでは、レール絶縁やレール種別（レールのインピーダンスの情報に対応）、バラストやスラブといった道床（漏れコンダクタンスの情報に対応）の属性を、距離軸上の点や区間として割り付ける。また、気象条件によって変化するレール表面状態等の属性を動的に割り付ける。抽象的な軌道モデルは各階層で共用しており、シミュレーションや可視化の際に、各階層に応じたモデルとして実体化される。

抽象的な軌道モデルは、軌道中心線と対応付ける形で地理空間上の位置・形状を定める。これにより、台帳に記録の無いケーブル長の概算や、他系統設備と関連付けての可視化が容易になる。軌道中心線の位置・形状の用意については、既に軌道中心線が GIS (Geographic Information System) で管理されている場合には、そのデータを参照する。データが存在しない場合でも、GNSS (Global Navigation Satellite System) の車上計測データや航空写真のトレースにより、軌道回路のシミュレーション用途では十分な精度のデータが作成できる。

〈3・4〉 詳細化の実現方法とモデルの検証

提案した軌道回路の階層的モデルは、LOD0 から LOD3 に向けて詳細

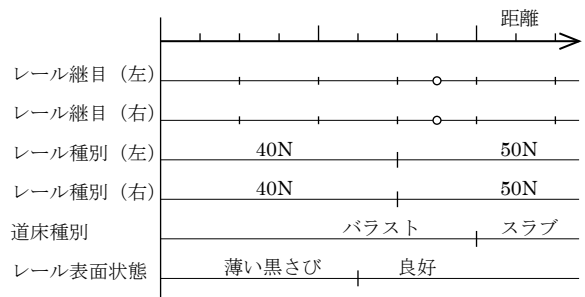


図 3 抽象的な軌道モデルの例

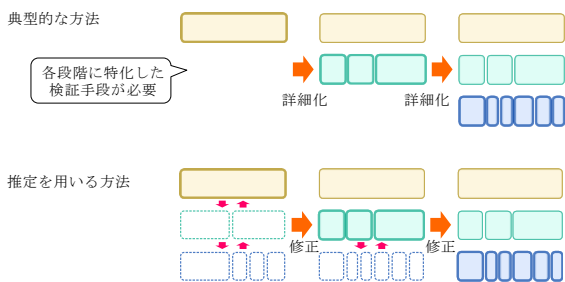


図4 詳細化の実現方法

化しながら具体的なモデル構築・パラメータ設定を進めるという流れで構築するのが基本である。これはソフトウェア開発における段階的詳細化の手法と同じ考え方である。

抽象的な階層のモデルの完成を以って、次の階層のモデル構築に着手する典型的な流れでは、構築中のモデルの妥当性を検証することが困難という問題がある。極端な例として、LOD0では、左右レールを区別しないため、電気回路として軌道回路が構成されているか検証する手段が無い。したがって、モデルの検証のために、各階層に特化した検証ロジックやソルバを用意する必要がある。それらの一部は、回帰検査等の用途において詳細化完了後も有用であるが、大部分は完了後に役目を終えるため、検証システムの複雑化や拡張性の制約といった不利益に対し、効果が小さい。

そこで、推定により LOD3 までのモデルを仮構築する詳細化手法を提案する。この手法では、予め設定した標準的な構成(テンプレート)を参照し、不足している情報を自動的に補完しながら再帰的に詳細化を進める。ユーザはその時点で持っている情報に従って補間されたモデルを修正することで、モデルの詳細化を行っていく。モデルの修正が行われると、再帰的に修正箇所の下層のモデルが再推定される。図4に典型的な手法と推定を用いる手法の流れを模式的に示す。

推定を用いる手法では、LOD3 階層のモデルが初期段階から利用できる。LOD3 階層のモデルは電気回路モデルと対応付けられるため、電気回路シミュレーションにより各点の電圧・電流が得られる。また、その結果を要約することにより、抽象的な上位の階層の結果が得られる。このため、ユーザは任意の階層の具体的結果を確認しながら、モデルの挙動を検証することが可能となる。また、ソルバは LOD3 のみに対応していれば十分であり、各階層に特化したソルバの用意が不要となる。なお、下層の結果を要約し、上層の結果を得る仕組みは、詳細化の手法に関係なく、階層的モデルで必要となる機能である。

4. まとめ

軌道回路のデジタルツインを実現するため、軌道回路の階層的モデル化について検討を行った。提案する階層的モデルは詳細度に応じた4階層から構成され、抽象度の異なる情報の結合・補完を容易にすることが期待できる。また、

モデル構築の初期段階から、任意の階層におけるモデルの挙動を検証可能な、推定を用いる詳細化手法を提案した。

現状では、非形式なモデルの定義に留まっており、電気回路シミュレータとの連携にまでは至っていない。また、実効性のある軌道回路のデジタルツインを実現するためには、軌道回路のモデルに加え、現実世界のセンシングデータをモデルに反映する部分、シミュレーション結果に基づき判断・提案を行う部分についても検討が必要である。それらの検討を進め、異常検出や障害復旧の早期化の実現を目指す。

文 献

- (1) 羽田野ほか:「軌道回路装置のCBM化に向けた状態監視システムの拡充」, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, Vol.57, 論文番号 609 (2020)
- (2) 小山ほか:「軌道回路受信レベルの変動分析による故障予測」, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, Vol.55, 論文番号 605 (2018)
- (3) 遠山ほか:「遠隔監視データを用いた電気転てつ機と軌道回路の状態推定手法」, 鉄道総研報告, Vol.34, No.7, pp.5-10 (2020)
- (4) M. Ahmadi, et al.: "Adapting Digital Twin Technology in Electric Railway Power Systems", *12th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*, pp. 1-6 (2021)
- (5) 板倉:「パソコンによる軌道回路のシミュレーション」, 日本鉄道電気技術協会 (2000)
- (6) 寺田ほか:「駅構内における帰線電流分布の解析手法」, 鉄道総研報告, Vol.30, No.1, pp.5-10 (2016)
- (7) 潮見・小野:「鉄道の信号設備管理のためのデジタルツインに関する検討」, 電気学会産業応用部門大会, 5-28 (2022)