

鉄道電力シミュレーションの計算方式の改善と
計測データを用いた精度向上に関する研究

2021年 3月

宮内 努

鉄道電力シミュレーションの計算方式の改善と
計測データを用いた精度向上に関する研究

宮内 努

システム情報工学研究群

筑波大学

2021年 3月

目次

1.	はじめに	1
2.	電気鉄道システムを模擬した電気回路の計算方法	3
2.1	電気鉄道システムを模擬した電気回路	3
2.2	構成要素のモデル化方法	4
2.2.1	整流器	4
2.2.2	列車	6
2.3	電気回路の計算方法	14
2.4	計算方法の課題	20
2.4.1	ハンチング	22
2.4.2	状態バック	26
2.4.3	停滞	30
2.4.4	未到達	31
2.5	収束改善方法の提案	33
2.5.1	ハンチング検出方法とハンチング検出時の状態遷移による収束性能の改善	33
2.5.2	状態バック検出方法と状態バック検出時の状態遷移による収束性能の改善	36
2.5.3	停滞の検出と停滞検出時の状態遷移による収束性能改善	40
2.5.4	列車素子モデルの改良による収束加速方法	40
2.6	シミュレーションによる効果の確認	42
3.	鉄道電力シミュレーションの全体像	47
3.1	鉄道システムの全体像	47
3.2	鉄道電力シミュレーションの概要と計算フロー	47
4.	計測データとの比較によるシミュレーション精度検証	51
4.1	精度検証の対象データ	51
4.2	データ計測時の沖縄都市モノレールの概要と試験内容	53
4.3	シミュレーションの入力条件	54
4.4	シミュレーション結果と計測データの挙動比較	57
4.4.1	列車の挙動比較	57
4.4.2	変電所の挙動比較	59
4.5	シミュレーションの数値精度評価	61
4.5.1	計算誤差評価方法	62
4.5.2	計測データとシミュレーション結果の比較	63

4.6	計測データを用いた更なる精度向上に関する展望.....	67
4.7	一般的な電気鉄道への本シミュレータ適用の可能性について.....	68
5.	まとめ	70
5.1	結言.....	70
5.2	今後の課題.....	71
	参考文献	73

目次

図 1	電気鉄道システムを模擬したエネルギーフロー	4
図 2	電気鉄道システムを模擬した電気回路の例	4
図 3	整流器特性	5
図 4	列車の加速特性	8
図 5	低電圧リミッタ特性	8
図 6	電力供給特性における電圧と電流の関係	9
図 7	回生特性における電圧と電流の関係	9
図 8	回路素子のモデル化	11
図 9	力行特性の模擬方法	12
図 10	回生特性の模擬方法	12
図 11	列車の電気回路モデルで考慮すべき条件	13
図 12	計算フロー	16
図 13	計算例の回路	17
図 14	計算過程 1	17
図 15	計算過程 2	18
図 16	計算過程 3	18
図 17	計算過程 4	19
図 18	計算過程のまとめ	19
図 19	ハンチングの例	20
図 20	状態バックの例	21
図 21	停滞の例	21
図 22	未到達の例	22
図 23	ハンチングの発生メカニズム(過程 1)	24
図 24	ハンチングの発生メカニズム(過程 2)	24
図 25	ハンチングの発生メカニズム(過程 3)	25
図 26	ハンチングの発生	25
図 27	ハンチングの例	26
図 28	状態バックの発生メカニズム(過程 1)	28
図 29	状態バックの発生メカニズム(過程 2)	28
図 30	状態バックの発生メカニズム(過程 3)	29
図 31	状態バックの発生メカニズム(過程 4)	29
図 32	停滞の発生メカニズム	30
図 33	回生電力：小のケース(解更新幅が小さい)	32
図 34	回生電力：大のケース(解更新幅が大きい)	32

図 35	未到達の例 2	33
図 36	ハンチングの回避方法.....	34
図 37	ハンチングの検出と回避方法(回生).....	35
図 38	状態バックの回避方法.....	36
図 39	回生時における状態バック検出パターン.....	39
図 40	Irs の変更による模擬特性の変更	42
図 41	従来方法と提案方法における収束までの反復回数(Case2)	45
図 42	従来方法と提案方法における収束までの反復回数(Case4)	46
図 43	鉄道システムの全体像.....	47
図 44	シミュレータおよび入出力データの概要.....	49
図 45	シミュレーションの全体計算フロー.....	50
図 46	沖縄モノレール(2013 年当時)の駅および変電所位置	53
図 47	走行抵抗の算出.....	55
図 48	整流器特性.....	55
図 49	走行パターンの例(Case1)	56
図 50	シミュレーション結果と計測データの挙動比較その 1(走行パターン)	58
図 51	シミュレーション結果と計測データの挙動比較その 2(列車 1) ..	59
図 52	シミュレーション結果と計測データの挙動比較その 3(安次嶺変電 所)	60
図 53	シミュレーション結果と計測データの挙動比較その 4(末吉変電所)	61

表目次

表 1	列車の電気回路モデル	13
表 2	シミュレーション条件	44
表 3	シミュレーション結果	45
表 4	列車の計測項目	52
表 5	変電所の計測項目	52
表 6	データ計測区間	53
表 7	シミュレーションの入力条件	57
表 8	シミュレーションと計測データの電力量比較(列車 1 の力行電力量)	63
表 9	シミュレーションと計測データの電力量比較(列車 1 の回生電力量)	64
表 10	シミュレーションと計測データの比較(列車 1)	64
表 11	シミュレーションと計測データの比較(安次嶺変電所の供給電力量)	65
表 12	シミュレーションと計測データの比較(末吉変電所の供給電力量)	66
表 13	シミュレーションと計測データの比較(安次嶺変電所の電圧)	66
表 14	シミュレーションと計測データの比較(末吉変電所の電圧)	66
表 15	シミュレーションと計測データの比較(変電所の合計供給電力量)	68
表 16	モノレールと一般的な電気鉄道との比較	69

1. はじめに

2050年の脱炭素社会の実現に向け、様々な業種での省エネ化が図られている。鉄道システムは、他交通システムと比較して乗車人数1人当たりの消費エネルギーが少なく、省エネな交通システムとして知られているが^[1]、更なる省エネ化が進められている。鉄道システムを運営する鉄道会社では、軽量化や再生エネルギーの有効利用などにより、省エネに向けた活動を進めており、CSR (Corporate Social Responsibility)活動の一環として、省エネ性能を定量評価、発表している^{[2] [3]}。また、鉄道システムの製造を行うメーカーにおいても、システムや制御方式を提案する上で、省エネ性能を提示することが求められている。

鉄道システムの省エネ性能すなわち鉄道システムの電力量を定量評価するために、鉄道システムを模擬した電力シミュレーション(鉄道電力シミュレーション)技術は必要不可欠である。鉄道システムの電力に影響を与える要素は、電力を使用する列車、電力を供給する変電所、電力を運ぶ役割をする架線、レールである。鉄道電力シミュレーションは、これらを要素とした時々刻々の電気回路を計算することで行う。この要素の中で、変電所、架線、レールは常に同一の場所に存在するものである。一方、列車は運行ダイヤにより、時々刻々の在線本数が変動するとともに、前の列車との間隔や運転士の操作などにより、位置や走行状態も時々刻々と変化する。このため、鉄道システムの電力シミュレーションでは、電力を供給する変電所などのき電システム、運行ダイヤに基づき路線に在線している列車を管理する運行管理システム、前の列車との間隔を制御する信号システムといったシステムに加え、運転士の挙動や、定められた列車性能に基づき走行する列車の模擬が不可欠である。

このような鉄道電力シミュレーションは、鉄道システムを開発しているメーカーや鉄道システムを研究している研究機関が開発を行っている^{[4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21]}。近年は、ソフトウェア会社が様々な鉄道電力シミュレーションソフトの開発を進めている^{[22] [23] [24]}。一方で、その計算方法に関する具体的な方法に関する発表^{[4] [18] [19]}や、実路線における精度評価に関する発表は少ない^{[20] [21]}。

鉄道電力シミュレーションの目的は、既存鉄道システムに装置や制御を導入した場合の電力量を評価することに加え、列車本数の増減による変電所の電圧や瞬時電力への影響、変電所から地上蓄電システムへの変更による電圧変動、各列車の走行への影響を定量把握することなど多岐にわたる。また、海外では、鉄道システムを新設する需要もあるため、変電所やケーブルの容量などのシステム設計にも活用される。これらの目的を行うためには、高精度な計算が要求され

る。高精度な鉄道電力シミュレーションを開発するためには、実際の鉄道システムの挙動を再現するためのシミュレーションモデルや電力を高精度に計算可能な方法が必要である。また、開発したシミュレーションの妥当性を評価するために、実路線における計測データを基に、精度評価をすることが重要である。

我々は、高精度な鉄道電力シミュレーションを実現するために、前述したき電システム、運行管理システム、信号システム、列車それぞれに対して物理的な特性および論理的な特性を模擬し、それらを連成することで鉄道システム全体の電力を評価可能なシミュレーション技術を開発している。また、実路線での精度評価を実施している [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32]。

本研究では、開発している鉄道電力シミュレーション技術に関して、鉄道システムを模擬した電気回路を高精度に計算する方法の開発、電気回路の入力条件となる鉄道システムの高精度なモデルの開発、前述の計算方法およびモデルを用いたシミュレーションと計測データとの比較による精度評価、計測データを用いたシミュレーション精度向上に関する検討結果についてまとめた。2章で電気回路を高精度に計算する方法について提案する。3章で鉄道システムの高精度なシミュレーションモデルを提案する。4章で上記の計算方法とモデルを用いたシミュレーションと計測データとの比較による精度評価と、計測データを用いた更なるシミュレーション精度向上の可能性について述べる。最後に、それらをまとめる。

2. 電気鉄道システムを模擬した電気回路の計算方法

本章では、電気鉄道システムを模擬した電気回路を計算するための方法について説明する。2.1節では、電気鉄道システムを模擬した電気回路について、一般的な電気回路との違いについて説明する。2.2節では、2.1節で述べた電気回路を構成する要素である変電所と列車のモデル化方法について説明する。2.3節では、電気鉄道システムを模擬した電気回路の計算方法について、1変電所1列車における計算を用いて説明する。2.4節では、2.3節で述べた計算方法(2.5節で述べる方法と差別化するため従来方法とする)の問題点を説明する。2.5節では、2.4節で説明した問題点に対する解決方法を提案する。最後に2.6節において、2.5節で提案した方法の従来方法に対する数値的な優位性について、数値シミュレーションを基に説明する。

2.1 電気鉄道システムを模擬した電気回路

図1は、路線内に存在する列車と、列車に電力供給を行う変電所と、架線/レールで構成される電気鉄道システムにおいて、列車と変電所間あるいは列車間の電力の授受を行うエネルギーフローの例を示したものである。図2は、そのエネルギーフローを電気回路にしたものである。この電気回路を計算することで列車、変電所、蓄電装置それぞれの電圧、電流と、それらの積である電力、さらにはその積分である電力量を算出する。

電気鉄道システムを模擬した電気回路は、一般的な電気回路とは異なる特徴がある。その特徴は、電気回路の電力供給源である変電所と、電気回路の負荷に相当する列車によるものである。以下に示す。

(a)変電所の整流器は、電圧が所定値を下回ると出力し、電圧が所定値を上回る場合には出力しない。

(b)列車は、走行/停止を行いながら運行しているため、時々刻々と位置、速度が変化する。

(c)列車は、走行状態、電圧、速度により出力できる力(引張力、電気制動力)が変わる。

(d)列車は、他列車の挙動の影響を受ける。例えば、先行列車の影響を受けて予測しない制動がかかる。また、制動時に回生できるかは、周りの列車が回生電力を活用可能か、回生電力を吸収する媒体があるかに依存している。さらに、回生列車は電気回路として考えた場合には、負荷ではなく電力供給源になる。

(e)路線内の列車走行本数は、運行ダイヤによって決まる。

これらから、電気鉄道システムを模擬した電気回路は、電力供給源および負荷

の数や場所が、時々刻々と変動するものと考えられる。このため、電力供給源および負荷である変電所や列車を、シミュレーション周期毎に電圧源、電流源、抵抗にて模擬するとともに、変電所や列車の間にある架線やレールを抵抗で模擬することで電気回路を生成する。

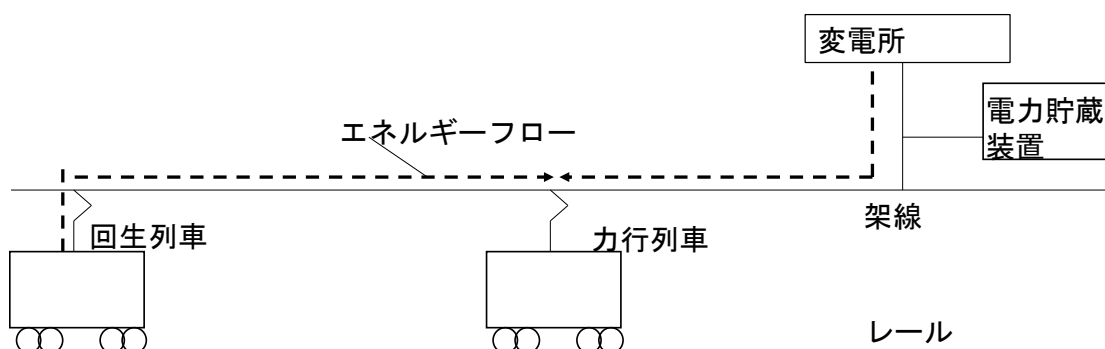


図 1 電気鉄道システムを模擬したエネルギーフロー

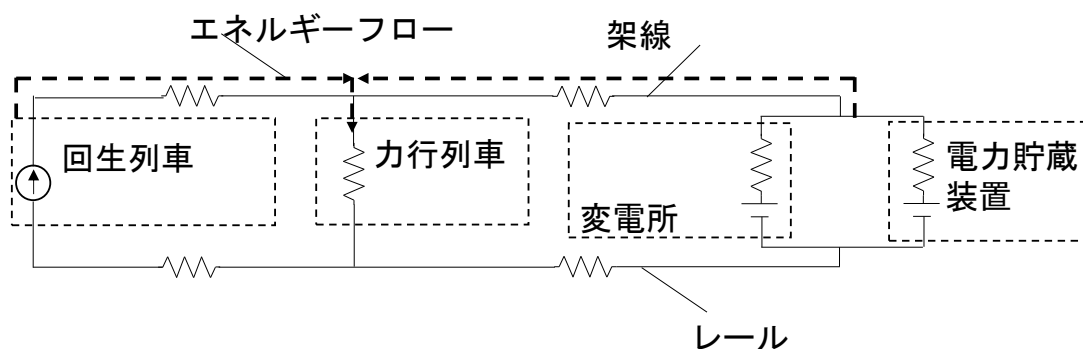


図 2 電気鉄道システムを模擬した電気回路の例

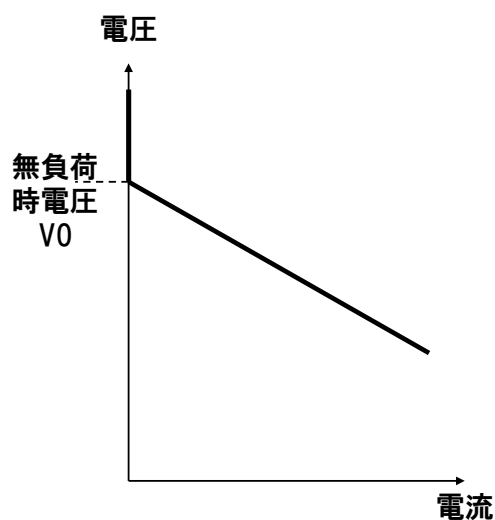
2.2 構成要素のモデル化方法

構成要素として代表的な要素である変電所(整流器)、列車について物理特性とモデル化方法についてそれぞれ示す。

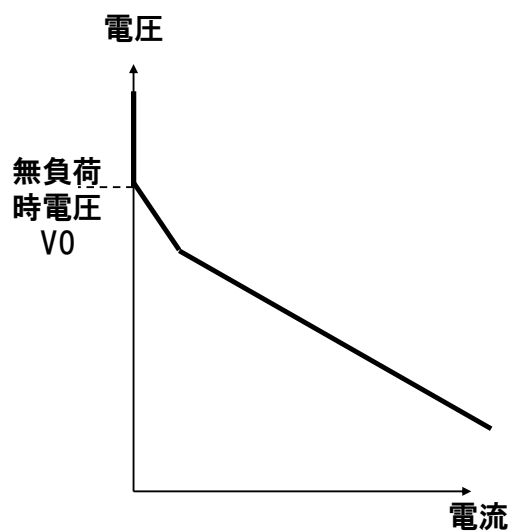
2.2.1 整流器

図 3 に整流器の物理特性を示す。整流器が接触している架線の電圧が無負荷時電圧 V_0 よりも高い場合は電流を流さないため電流は 0 であり、無負荷時電圧 V_0 よりも低い場合には、整流器の内部抵抗特性に依存して電流を流す。整流器は、整流器内部の一定抵抗を介することで電圧が変動すると考えられており、図 3(a) に示すように無負荷時電圧 V_0 を切片として、整流器電流に対して一定

の傾きで電圧が下がる。一方で、並列 12 パルスの整流器は、計測結果から 2 段階に分かれて減少する特性となることが確認されている^[33]。このため、図 3(b)に示すように、複数の内部抵抗特性によって模擬することも必要である。整流器の電圧が無負荷時電圧 V_0 よりも高い場合には 0A 電流源での模擬を行い、整流器の電圧が無負荷時電圧 V_0 以下の場合には、図 3(a)や図 3(b) どちらにも対応できるように、整流器内部の抵抗で電圧が変動する特性を用いて模擬を行うことにした。



(a) 単一内部抵抗特性



(b) 複数内部抵抗特性

図 3 整流器特性

2.2.2 列車

(1) 物理特性

電気にて走行する列車が電力供給を受ける場合について考える。列車は力行(加速のことを表す)する際に電力供給を受ける。また、列車の照明や空調に電力を供給する機器である補機(APS: Auxiliary Power Supply)は、走行状態に依らず電力の供給を受ける。このため、列車が電力供給を受ける場合には、力行による電力と補機への電力の両方を考える必要がある。まず、力行による電力について考える。

列車が力行する際の特性である引張力特性について図 4(a)に示す。横軸は速度、縦軸は引張力を表す。この特性は、列車の電圧によっても変化することがある。図 4(a)に示す特性では、基準電圧よりも電圧が $\beta\%$ 低下した場合には、引張力特性は左下側にスライドする。このスライド量は $\beta\%$ に依存する。また、基準電圧よりも電圧が $\alpha\%$ 上昇した場合には、引張力特性は右上側にスライドする。このスライド量は $\alpha\%$ に依存する。図 4(a)の縦軸を電力に変換したものを図 4(b)に示す。電圧によって、速度における電力が変動することがあることが確認される。図 4に示したように列車が力行する際の特性は速度、電圧などにより変動することがあるため、電力シミュレーションにおいては、これらのパラメータを考慮しながら計算する必要がある。また、図 5のように列車の電圧が所定の電圧 V_S を下回ると、電圧の低下を抑制するために電流を絞る制御(低電圧リミッタ制御)がある。具体的には、架線電圧が低電圧リミッタ制御の開始電圧 V_S よりも低い場合に電流を抑制する。さらに低電圧リミッタ制御の終了電圧 V_E よりも低くなった場合には、一定の電流 I_a となるように制御する。なお、 I_a は 0 以上かつ最大力行電流以下の範囲となるように制御される。

次に補機について考える。前述したように、補機には、走行状態に依らず電力が供給される。また、瞬時断面で考えると、列車が力行する場合とは異なり、電圧状態による変動がない一定の電力負荷となる。

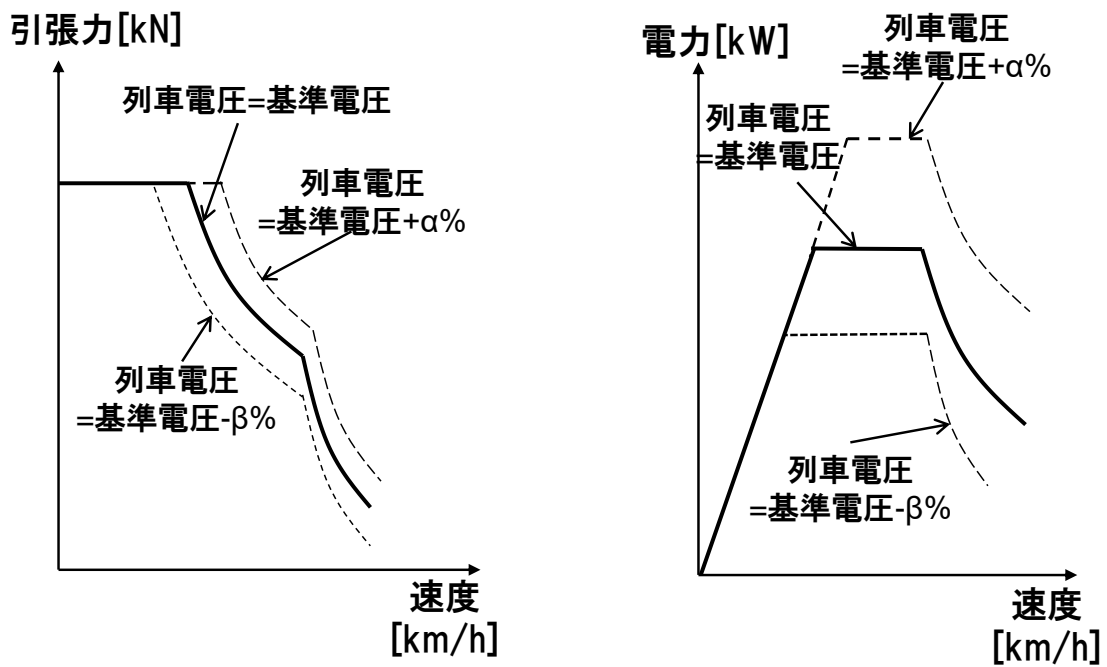
これらの特性を考慮すると、列車が電力供給を受ける際の電力供給特性は図 6 に示すように 3 つの特性で構成される。横軸は列車の架線点での電流(以降、架線電流)、縦軸は列車の架線点での電圧(以降、架線電圧)を表す。縦軸の V_S および V_E は、それぞれ低電圧リミッタ制御の開始電圧および終了電圧を表す。電力供給特性において、①力行特性(通常)は、架線電圧が低電圧リミッタ制御の開始電圧 V_S よりも大きく、低電圧リミッタ制御の影響を受けない時の特性を表している。②力行特性(低電圧リミッタ特性)は、架線電圧が低電圧リミッタ制御の開始電圧 V_S 以下となり、低電圧リミッタの影響を受けた場合の特性を表している。③力行特性(APS 供給特性)は、架線電圧が低電圧リミッタ制御の終了電圧 V_E

以下となった場合の特性を表しており、補機(APS)への電力供給だけを受ける特性を表している。鉄道システムの設計を行う上で、②力行特性(低電圧リミッタ特性)、③力行特性(APS 供給特性)のモデル化は重要なポイントである。なぜならば、②力行特性(低電圧リミッタ特性)、③力行特性(APS 供給特性)の領域に電圧があるということは、変電所など電力供給設備の容量が不足している可能性を示しているためである。このため、得られた電圧が、この領域にどのくらいの時間継続しているか、最小電圧がどのくらいまで下がるかを算出することは、電力供給設備の容量の検討をする上で非常に役立つ。なお、従来の論文においては、この点に言及している点はない。

次に、列車が架線に電力を戻す際の回生特性の一例を図 7 に示す。なお、供給電流を正、回生電流を負として表しているため、回生特性は主に第二象限に存在する特性となる。第一象限の場合には、架線から電力の供給を受ける。第二象限の場合には、回生により架線に電力を戻すと考えればよい。

図 7 の横軸は架線電流、縦軸は架線電圧を表す。縦軸の VBS、VBE はそれぞれ高電圧リミッタ制御の開始電圧/終了電圧を表す。高電圧リミッタ制御とは、電圧が所定の電圧 VBS より上昇した場合に、電圧の上昇を抑制するために電流を絞る制御である。具体的には、架線電圧が高電圧リミッタ制御の開始電圧 VBS よりも高い場合に電流を抑制していき、さらに高電圧リミッタ制御の終了電圧 VBE よりも高くなった場合には、回生電力が 0 となる。また、回生電力が補機電力よりも小さい場合には、補機への電力供給を受ける状態で制御する。このため、回生特性も 3 つの特性で構成される。④回生特性(通常)は、架線電圧が高電圧リミッタ制御の開始電圧 VBS より低く高電圧リミッタ制御の影響を受けない時の特性を表している。⑤回生特性(高電圧リミッタ特性)は、架線電圧が高電圧リミッタ制御の開始電圧 VBS 以上となり、高電圧リミッタ制御の影響を受けた場合の特性を表している。⑥回生特性(APS 供給特性)は、架線電圧が高電圧リミッタ制御の終了電圧 VBE 以上となった場合の特性を表しており、補機(APS)への電力供給だけを受ける状態を表している。

以上から、列車特性は非線形な特性で表されることが分かる。



(a) 速度-引張力

(b) 速度-電力

図 4 列車の加速特性

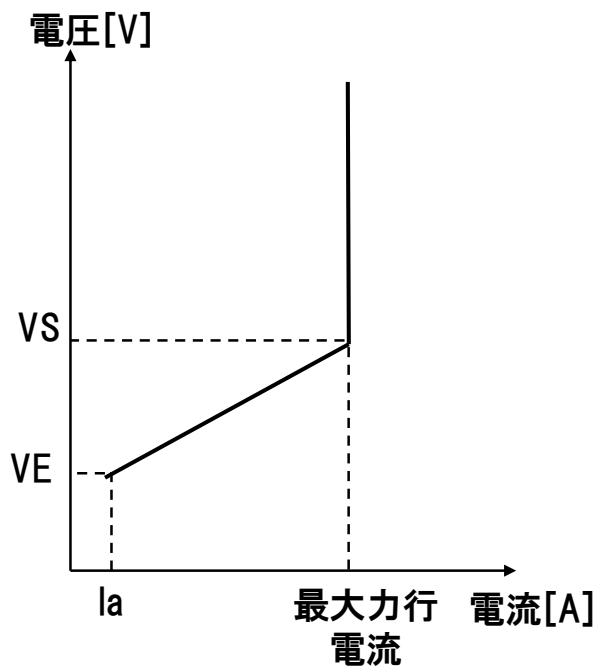


図 5 低電圧リミッタ特性

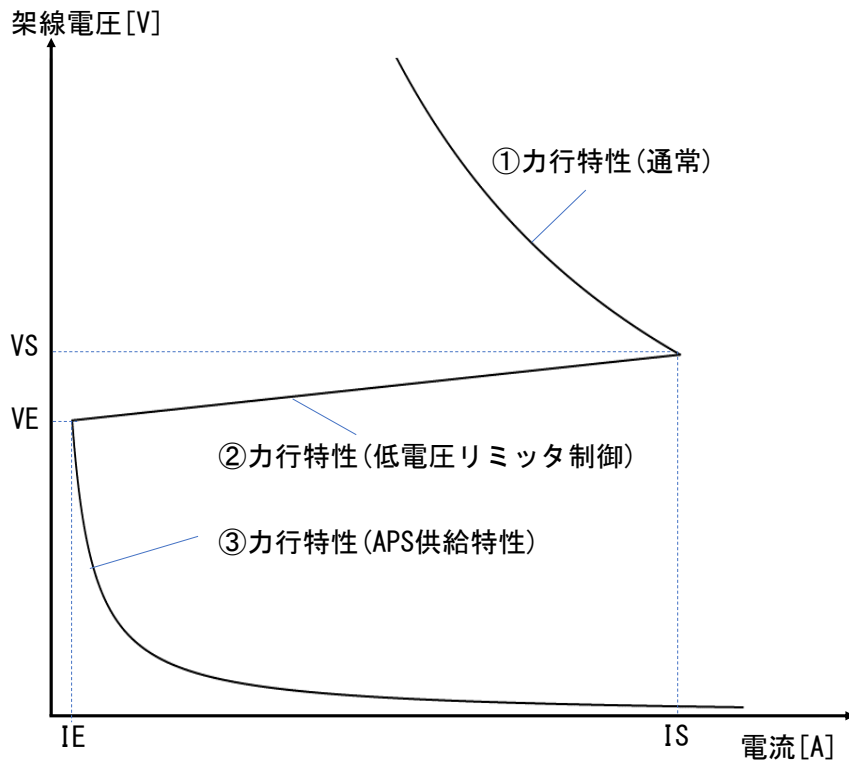


図 6 電力供給特性における電圧と電流の関係

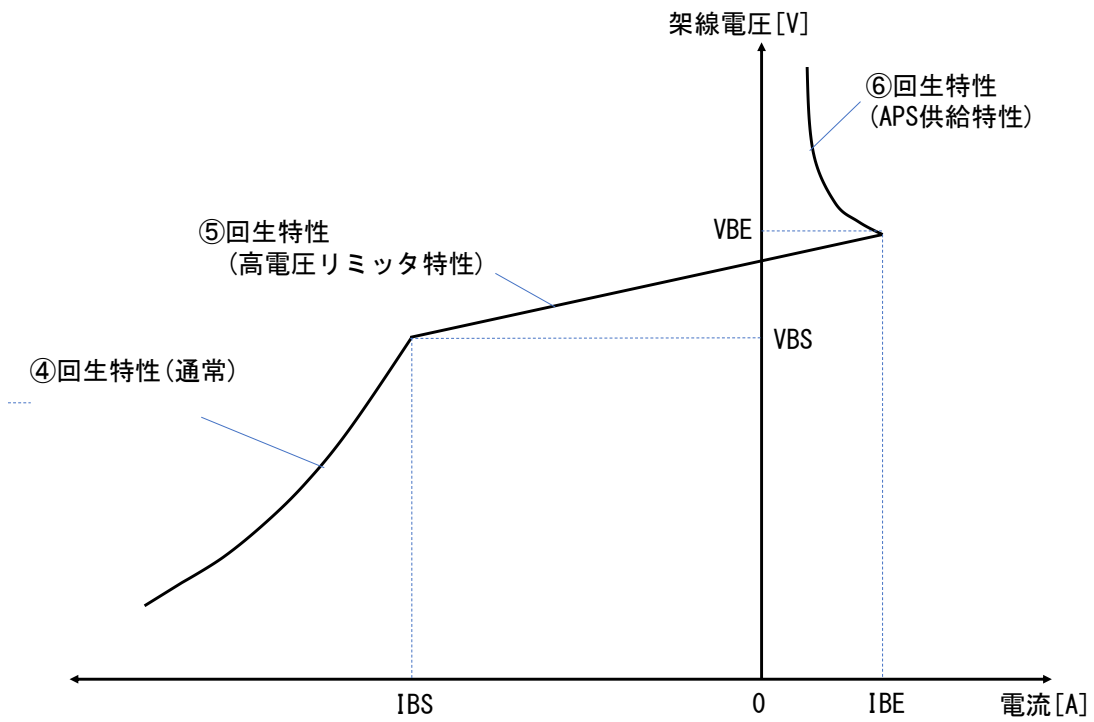


図 7 回生特性における電圧と電流の関係

(2) モデル化方法

図 6 および図 7 に示した特性を回路素子で模擬する上で重要となるのは解が求まるように設定することである。2.2.1 節で示した整流器の模擬方法は右下がりの特性であるため、交点(解)を求めようとするのならば、右上がりとなる特性で模擬することになる。図 6 で示した列車の電力供給特性の中で、②力行特性(低電圧リミッタ特性)は右上がりの特性であるため、②力行特性(低電圧リミッタ特性)はそのまま用いれば良い。具体的には (IS, VS) および (IE, VE) を通る直線で模擬する。すなわち、

$$V = (VS \cdot IE - VE \cdot IS) / (IE - IS) + (VE - VS) / (IE - IS) \cdot I \quad (\text{式 2-1})$$

で模擬する。回路素子は、図 8 に示すように $V = V_0 - R \cdot I$ で模擬される形である。 V_0 は電圧源、 R は抵抗である。このため、②力行特性(低電圧リミッタ特性)は、電圧源 $(VS \cdot IE - VE \cdot IS) / (IE - IS)$ と抵抗 $-(VE - VS) / (IE - IS)$ で列車特性を模擬していることになる。

一方、①力行特性(通常)および③力行特性(APS 供給特性)は第一象限にあり、原点に対して凸な二次曲線である。このため、図 9 に示すように原点から①力行特性(通常)あるいは③力行特性(APS 供給特性)上の点 (DP/VR, VR) を結ぶ直線で模擬する。すなわち、

$$V = (VR \cdot VR / DP) \cdot I \quad (\text{式 2-2})$$

で模擬する。これは、電圧源 0、抵抗 $(-VR \cdot VR / DP)$ で列車特性を模擬していることになる。なお、VR は列車の架線電圧、DP は架線電圧 VR の時の列車要求電力を表す。

次に回生列車の模擬方法について説明する。図 7 で示したように列車の回生特性の中で、⑤回生特性(高電圧リミッタ特性)は右上がりの特性であるため、⑤回生特性(高電圧リミッタ特性)は、そのまま用いれば良い。具体的には (IBS, VBS) および (IBE, VBE) を通る直線で模擬する。すなわち、

$$V = (VBS \cdot IBE - VBE \cdot IBS) / (IBE - IBS) + (VBE - VBS) / (IBE - IBS) \cdot I \quad (\text{式 2-3})$$

で模擬する。これは、電圧源 $(VBS \cdot IBE - VBE \cdot IBS) / (IBE - IBS)$ と抵抗 $-(VBE - VBS) / (IBE - IBS)$ で列車特性を模擬していることになる。

次に、⑥回生特性(APS 供給特性)は、第一象限にあり、原点に対して凸な二次曲線である。図 6 で示した①力行特性(通常)および③力行特性(APS 供給特性)と同じになるため、図 9 で示した方法で模擬する。なお、この条件の場合には、電圧に依らず①力行特性(通常)のみで模擬を行う。この理由は、列車回生時には低電圧リミッタ制御は行われなためである。

次に、④回生特性(通常)の模擬方法について説明する。④回生特性(通常)は第二象限にあり、原点に対して凸な二次曲線である。右上がりの特性を模擬するために、図 10 に示すように固定パラメータ I_{rs} を用いて、 $(I_{rs}, 0)$ および④回生

特性(通常)上の点(DP/VR, VR)を通る直線で模擬する。すなわち、

$$V = (-VR \cdot I_{rs}) / (DP/VR - I_{rs}) + VR / (DP/VR - I_{rs}) \cdot I \quad (\text{式 2-4})$$

で模擬する。これは、電圧源 $(-VR \cdot I_{rs}) / (DP/VR - I_{rs})$ と抵抗 $-VR / (DP/VR - I_{rs})$ で列車特性を模擬していることになる。なお、VR、DP は前述したものと同一であり、VR は列車架線電圧、DP は架線電圧 VR の時の列車要求電力(回生電力の場合は負の値)を表す。また、 I_{rs} は列車の特性を模擬する際に、右上がり特性を得られるようにするため、DP/VR に比べて小さい値(負の値として考えると大きな値)を用いる。

図 11 に列車の電気回路を決定する上で考慮すべき条件を示す。架線と列車それぞれにおける電流の向きから、前述の①力行特性(通常)から⑥回生特性(APS 供給特性)までの状態と、停車あるいは惰行時における架線から補機への電力供給状態と、列車走行状態に依らず架線からの電力供給がない状態を加えた 8 個の状態を考慮する必要がある。以上をまとめたものを表 1 に示す。

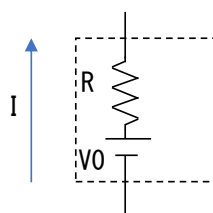


図 8 回路素子のモデル化

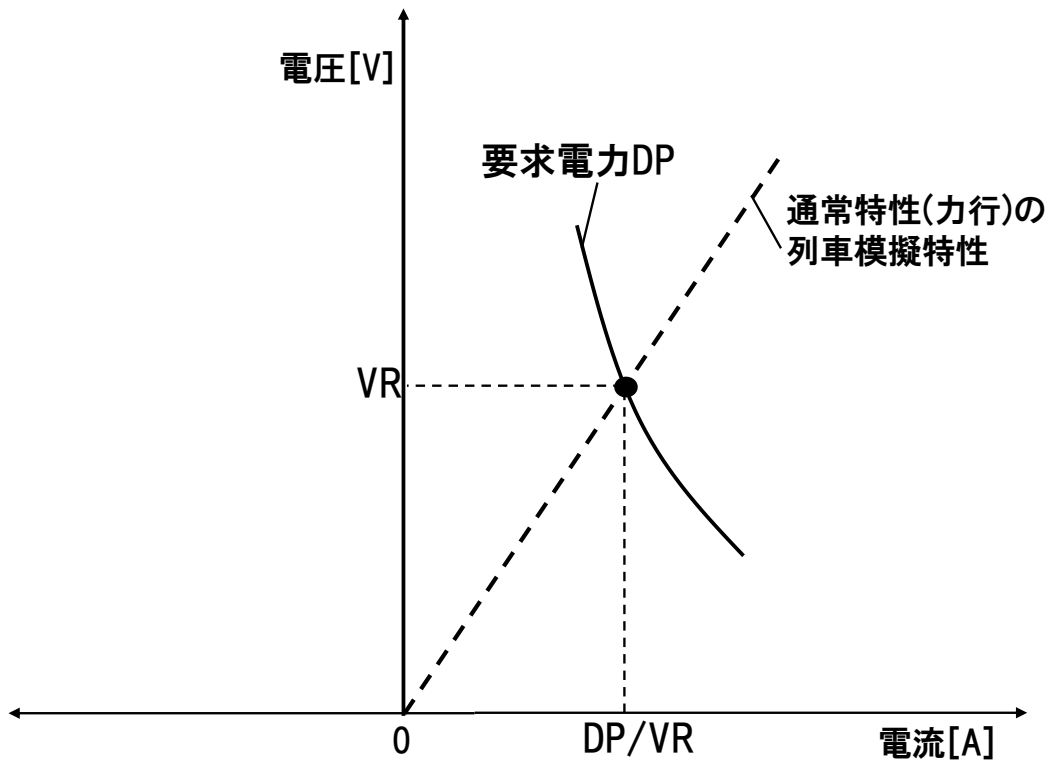


図 9 力行特性の模擬方法

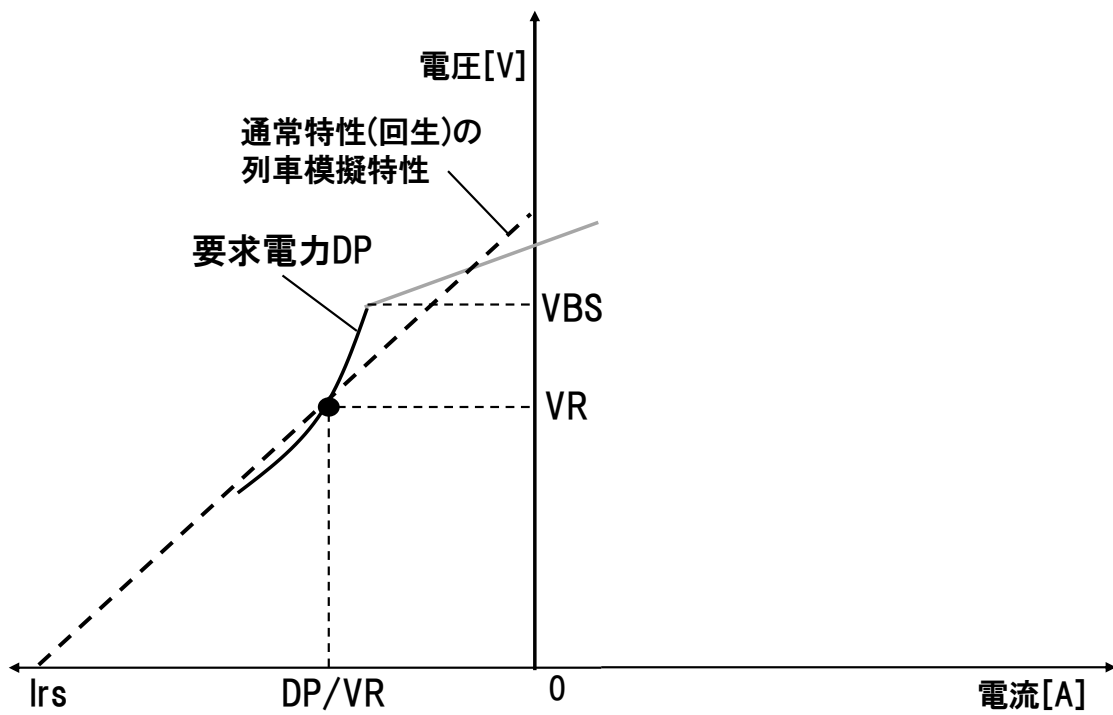


図 10 回生特性の模擬方法

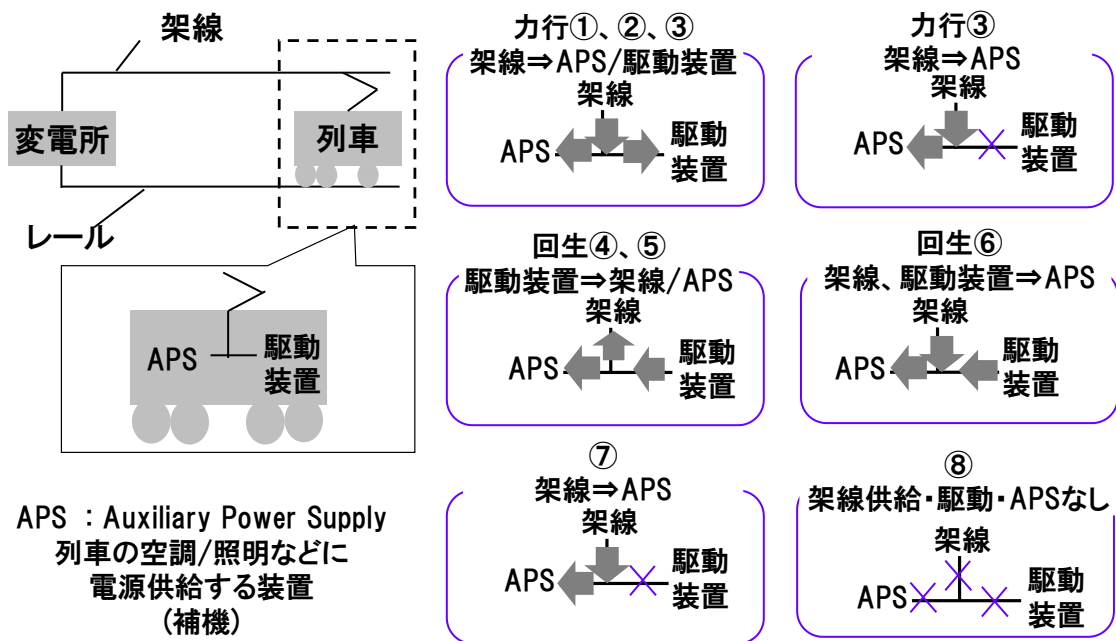


図 11 列車の電気回路モデルで考慮すべき条件

表 1 列車の電気回路モデル

走行状態	架線点状態	状態	電流源	電圧源	抵抗
力行	供給	①	—	—	$-VR \cdot VR/DP$
		②	—	$(VS \cdot IE - VE \cdot IS) / (IE - IS)$	$-(VE - VS) / (IE - IS)$
		③	—	—	$-VR \cdot VR/DP$
回生	回生	④	—	$(-VR \cdot Irs) / (DP/VR - Irs)$	$-VR / (DP/VR - Irs)$
		⑤	—	$(VBS \cdot IBE - VBE \cdot IBS) / (IBE - IBS)$	$-(VBE - VBS) / (IBE - IBS)$
	供給	⑥	—	—	$-VR \cdot VR/DP$
回生/停車/惰行	供給	⑦	—	—	$-VR \cdot VR/DP$
—	停止	⑧	0	—	—

2.3 電気回路の計算方法

電気鉄道システムの電気回路を構成する列車や変電所の特性は、2.2節で示したように非線形特性である。このような非線形特性を有する列車や変電所を基にした電気回路を計算するには、列車や変電所の非線形特性を数式化し、非線形方程式を解くことになる。しかし、特性によっては数式化に困難を要する。このため、非線形特性を線形特性で近似し、その線形特性を基に数式化した連立一次方程式を用いて解が十分妥当と判定されるまで反復計算する方法を用いた。具体的には、図 12 に示したフローに基づいて以下のように計算する。

(1) 列車や変電所など各構成要素の非線形特性を、図 3 や表 1 を用いて線形特性に近似する。列車については、走行状態と前回電圧および前回電流に基づく列車要求電力を用いて模擬する。変電所については、前回電圧を用いて模擬する。当該周期の最初の反復計算における前回電圧は、1 周期前のシミュレーションで得られた電圧を用い、前回電流は前回電圧と要求電力を用いて計算する。なお、走行状態は、運転指令によって決まるため、同一周期における反復計算中では変化しない。

(2) (1) で近似した線形特性と電気回路の抵抗を基に連立一次方程式 $Ax=b$ を構成し、この計算を行うことで、解 x である列車や変電所の電圧および電流を算出する。

(3) (2) で算出した解 x を基に、列車や変電所の電圧および電流が、それぞれの列車特性あるいは変電所特性を満たすと判断した場合に終了。満たさないと判断した場合には、前回電圧を、(2) で算出した電圧を用いて更新する。その後、(1) に戻る。

特性を満たすかどうかの判断方法について説明する。列車や変電所の特性は、電圧および電流によって変化することから、電圧および電流が前回とほぼ変わらない場合には、特性は変化していないと判断できる。このため(2)で得られた x について

$$\|X_o - X_{now}\| < \varepsilon \quad (\text{式 2-5})$$

を判断している。なお、 X_o は前回反復時の計算解、 X_{now} は今回反復時の計算解を表す。さらに、列車の特性においては、列車要求電力 DP と、計算解の電圧 V および計算解の電流 I の積は一致することから、

$$\|(DP - V \cdot I) / DP\| < \varepsilon_a \quad (\text{式 2-6})$$

の判断をしている。

上述した計算フローの具体的な計算例について、図 13 に示す内部抵抗 $R1$ と無負荷時電圧 $V0$ から構成された電力供給源(変電所)と、電圧および電流に応じて抵抗値が変動する負荷(列車)から構成された回路を解く場合を例に取り説明

する。なお、変電所は、無負荷時電圧 V_0 および内部抵抗 R_1 で模擬され、反復計算中において模擬方法は変わらないとする。列車の走行状態は力行とする。また、図 6 の①力行特性(通常)で模擬され、列車要求電力 DP_0 は電圧に応じて変動しない特性とする。

この時の収束演算の様子を図 14 から図 18 を用いて説明する。なお、上述の計算フローの(1)-(3)は繰り返し使用されるため、説明の都合上(1)-(3)の後に a、b、c を加える。

(1a) 図 14 に示したように前回電圧 V_{x0} と列車要求電力 DP_0 に基づいて列車模擬特性を、

$$V = R_x \cdot I = V_{x0} / (DP_0 / V_{x0}) \cdot I \quad (\text{式 2-7})$$

として近似する。また、前回電流 I_{x0} を前回電圧 V_{x0} と列車要求電力 DP_0 に基づいて(式 2-8)で計算する。

$$I_{x0} = DP_0 / V_{x0} \quad (\text{式 2-8})$$

(2a) (1a) で作成した列車模擬特性(式 2-7)と変電所の無負荷時電圧 V_0 、内部抵抗 R_1 、架線抵抗 R_2 およびレール抵抗 R_3 を基に、電気回路の抵抗特性を(式 2-9)で作成する。

$$V = V_0 - (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I \quad (\text{式 2-9})$$

次に、(式 2-7)および(式 2-9)で構成される連立一次方程式

$$\begin{bmatrix} 1 & -V_{x0}/I_{x0} \\ 1 & R_1+R_2+R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (\text{式 2-10})$$

を計算する。これは、図 15 に示したように、列車模擬特性と電気回路の抵抗特性の交点を求める問題と等価である。この計算により、計算解 V_{x1} および I_{x1} が得られる。この時、計算解 V_{x1} および I_{x1} は、前回電圧 V_{x0} および前回電流 I_{x0} とは異なる。

(3a) 計算解 V_{x1} および I_{x1} が、前回電圧 V_{x0} および前回電流 I_{x0} とは異なるため、(式 2-5)を満たしていない。このため、(1a)で作成した列車模擬特性では特性を満たしていないと判断し、前回電圧を V_{x1} で更新する。その後、(1b)に戻る。

(1b) 図 16 に示したように前回電圧 V_{x1} と列車要求電力 DP_0 を用いて、列車模擬特性を

$$V = R_x \cdot I = V_{x1} / (DP_0 / V_{x1}) \cdot I \quad (\text{式 2-11})$$

で近似する。

(2b) (1b) で作成した列車模擬特性(式 2-11)と前述の電気回路の抵抗特性である(式 2-9)から作成した連立一次方程式

$$\begin{bmatrix} 1 & -V_{x1}/(DP_0/V_{x1}) \\ 1 & R_1+R_2+R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (\text{式 2-12})$$

を計算する。これは、図 17 に示したように、列車模擬特性と電気回路の抵抗特性の交点を求める問題と等価である。この計算により、計算解 V_{x2} および I_{x2} が得られる。

(3b) 計算解 V_{x2} および I_{x2} が、前回電圧 V_{x1} および前回電流 I_{x1} と異なるかを(式 2-5)で比較し、計算解と前回値の差が十分小さくなったと判断した場合に、さらに要求電力 $DP0$ と計算解 V_{x2} および I_{x2} の電力の差を(式 2-6)で比較する。この差が十分小さくなったら終了とし、小さくなると判断されなければ、前回値を計算解で更新して、(1)に戻り繰り返す。これを繰り返すことで、図 18 に示すように計算解が遷移し、真解(I_t, V_t)が求まる。上記は 1 変電所 1 列車の例であるが、この方法を複数変電所が存在し、複数列車が走行する場合の計算にも適用することで、全ての列車、変電所といった構成要素の電圧、電流を算出することが可能である。

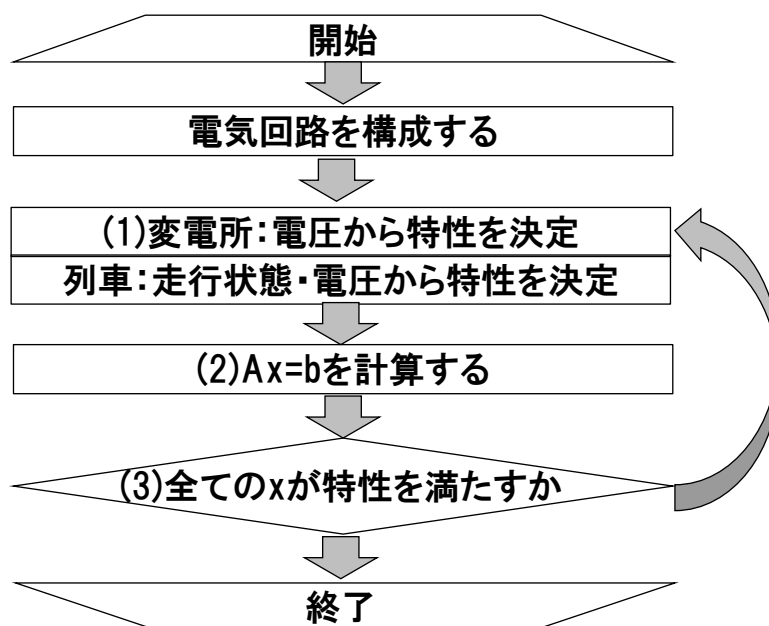


図 12 計算フロー

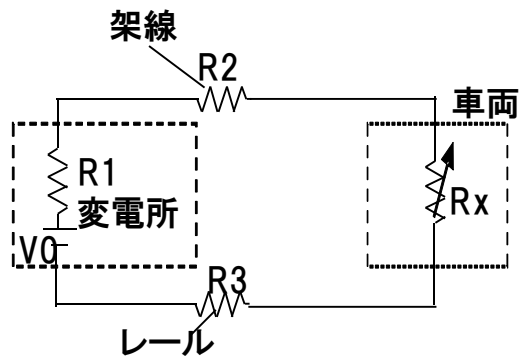


図 13 計算例の回路

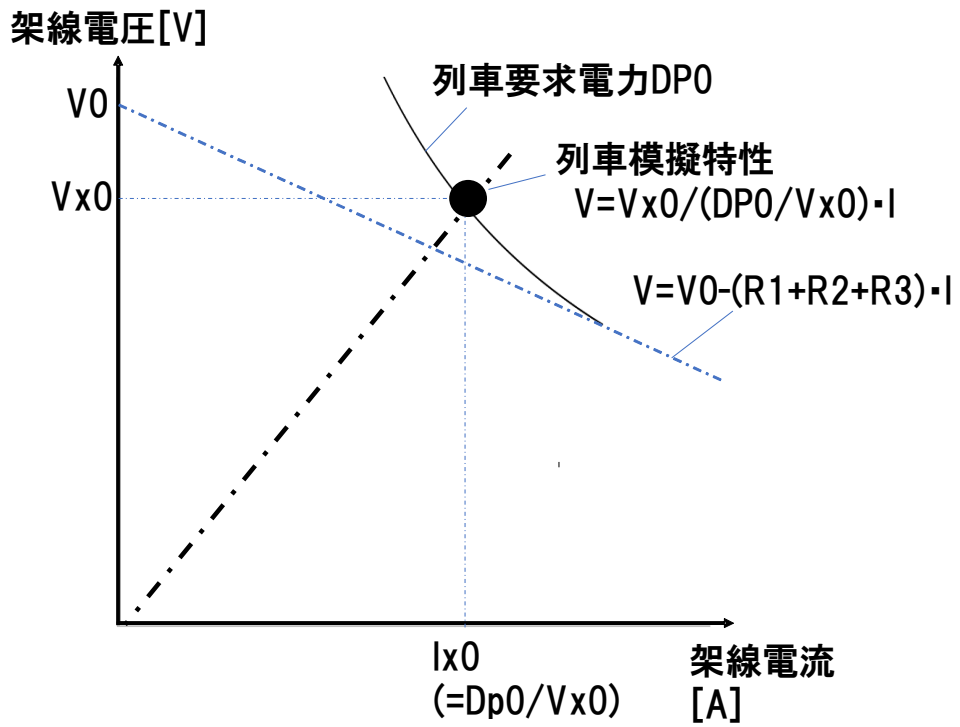


図 14 計算過程 1

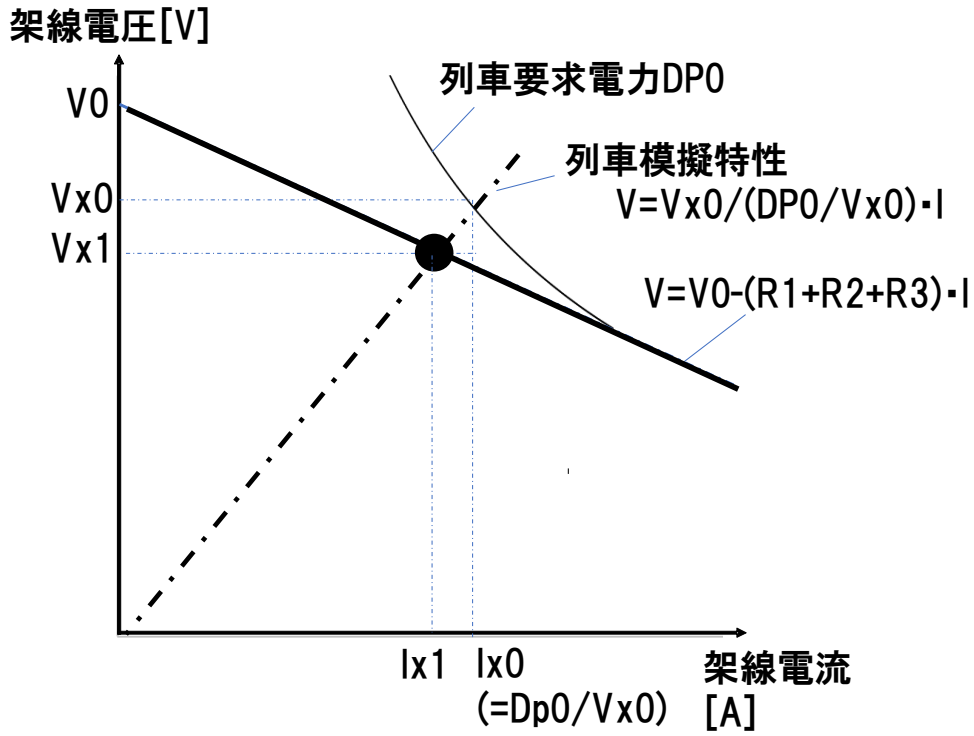


図 15 計算過程 2

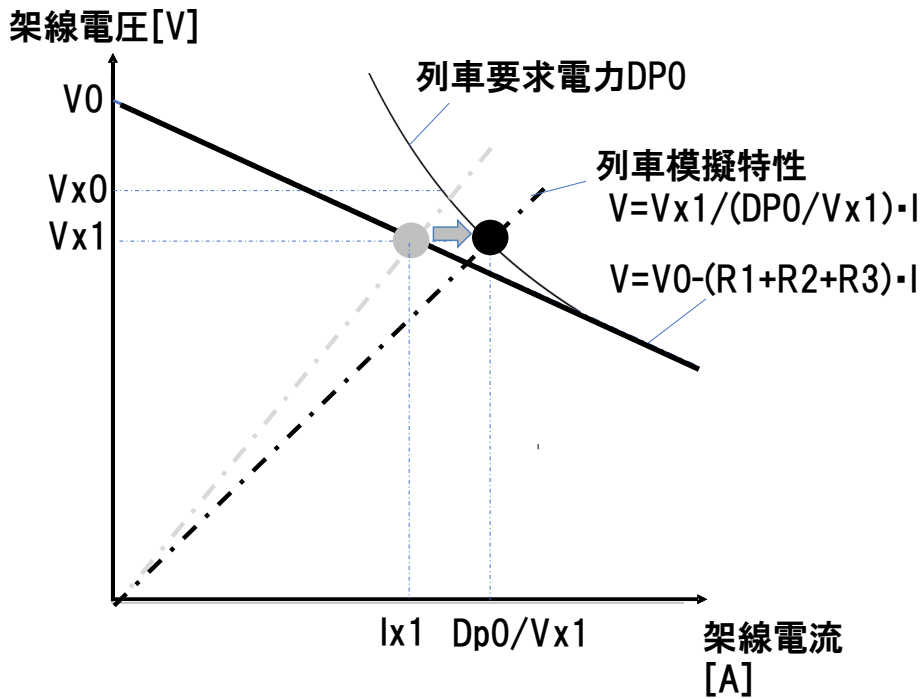


図 16 計算過程 3

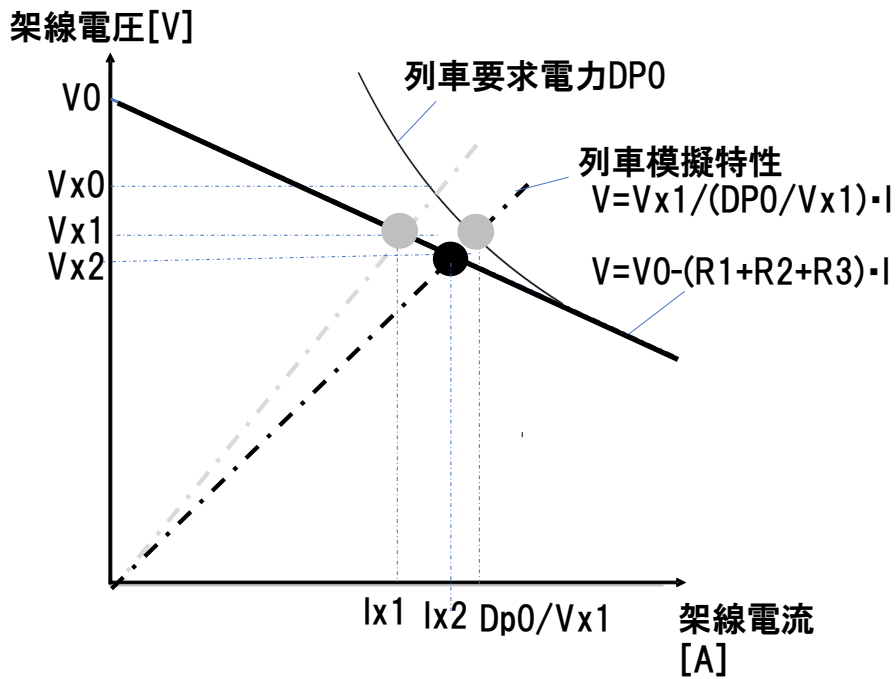


図 17 計算過程 4

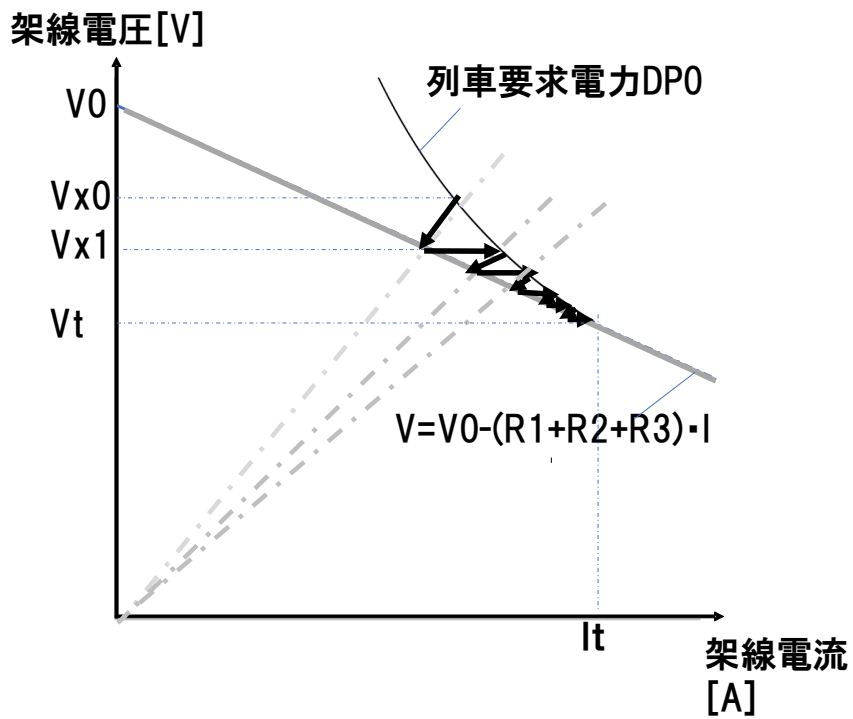


図 18 計算過程のまとめ

2.4 計算方法の課題

2.3 節で述べた計算方法は、解が求まるまで反復を繰り返す反復計算である。反復計算では、最大反復回数を与え、最大反復回数で収束しない場合には収束失敗としている。2.3 節で述べた計算方法を用いた場合でも、収束失敗が発生することがある。この収束失敗の事象を分析すると、以下の 4 つのいずれかに該当した。

(1) ハンチング: 反復計算途中で算出される途中解が振動を起し収束しない(図 19)。

(2) 状態バック: 一定周期後に状態が戻る(図 20)。

(3) 停滞 : 適切な解ではない解に停滞する(図 21)。

(4) 未到達 : 最大反復回数で本来あるべき解に未到達(図 22)。

これらの事象により収束失敗が発生した場合でも、最終計算解が本来得られるべき真解と近い場合には良いが、必ずしも本来あるべき真解の近くにはない場合も考えられる。また、収束失敗の頻度が多ければ多いほど、計算精度や計算速度に多大な影響を与える。このため、反復計算における収束性の改善は重要な課題である。これらの収束失敗の発生原因について分析した。

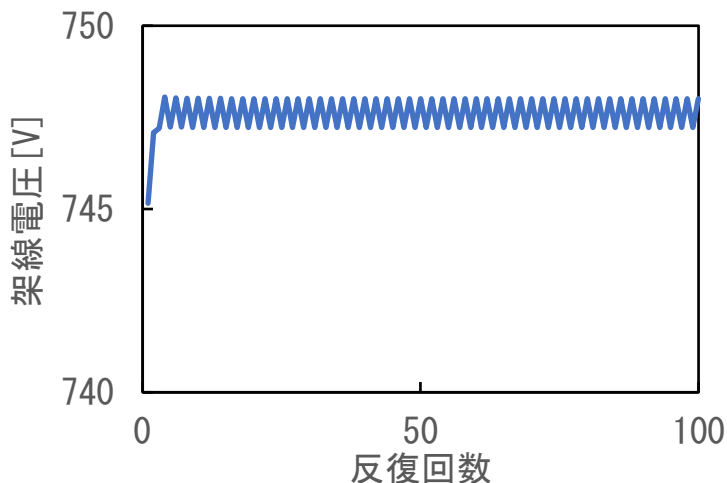


図 19 ハンチングの例

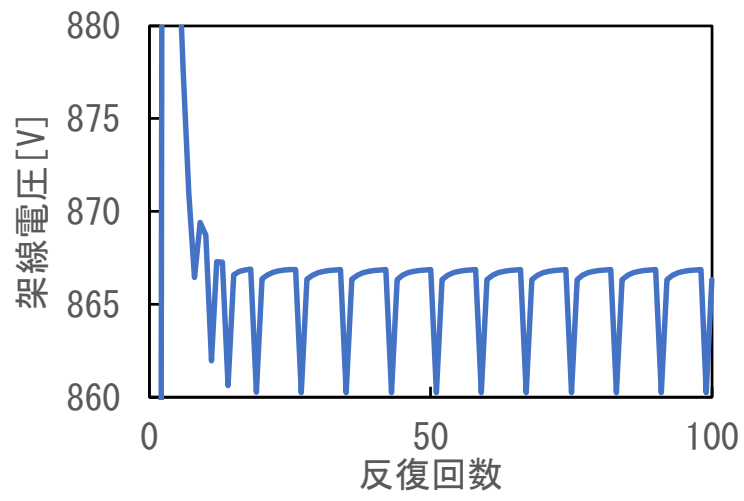


図 20 状態バックの例

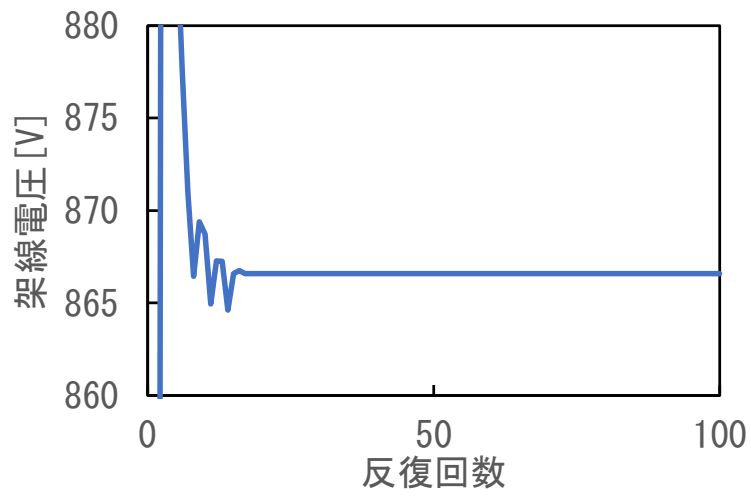


図 21 停滞の例

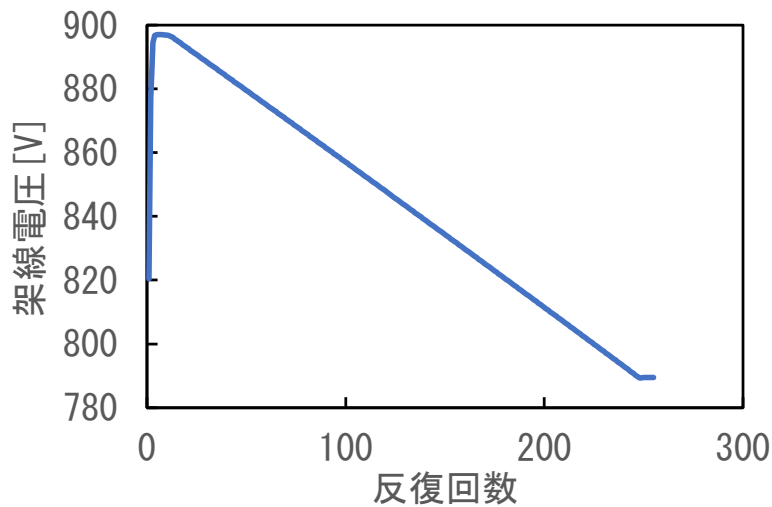


図 22 未到達の例

2.4.1 ハンチング

(1)のハンチングについて説明する。ハンチングは、真解近傍で状態の変化があるケースで発生しやすい。例えば、真解近傍に、力行時における低電圧リミッタ特性と通常力行特性の状態変化点がある場合や、回生時における高電圧リミッタ特性と通常回生特性との状態変化点がある場合に発生しやすい。

力行時における低電圧リミッタ特性と通常力行特性との間で発生するハンチングのメカニズムを、図 23 から図 26 を用いて示す。図 14 から図 18 の計算過程で説明したように、各列車の電圧および電流は列車模擬特性と電気回路の抵抗特性を基に交点を算出することで求められる。図 23 では、与えられた電圧 V_{R0} を基に要求電力 DP_0 が算出され、電圧 V_{R0} と要求電力 DP_0 を基にした列車模擬特性

$$V = V_{R0} \cdot V_{R0} / DP_0 \cdot I \quad (\text{式 2-13})$$

と、この列車を除いた電気回路の抵抗を表した特性

$$V = V_0 - R_0 \cdot I \quad (\text{式 2-14})$$

を示している。また、(式 2-13)および(式 2-14)から、計算解 (I_R, V_R) が算出され、電圧 V_R は、低電圧リミッタ開始電圧 V_S よりも小さいことを示している。

次に、図 24 では図 23 で得られた電圧 V_R を基に、要求電力 DP が計算される。但し、電圧 V_R は低電圧リミッタ開始電圧 V_S よりも小さいため、列車模擬特性は、2.2.2 節で説明したように、②力行特性(低電圧リミッタ特性)で模擬することとなる。このため、(式 2-1)で模擬される。列車模擬特性である(式 2-1)と、

この列車を除いた電気回路の抵抗特性を表した

$$V = V0 - R1 \cdot I \quad (\text{式 2-15})$$

とから計算解(IR0, VR0)を得る。図 23 と図 24 において、電気回路の抵抗が変化するのは、電気回路が複数の列車で構成されているため、他列車の模擬特性(抵抗)の変動が、自列車を除いた電気回路の抵抗に影響を与えるためである。図 23 と図 24 で述べた列車の模擬特性(抵抗)は、反復計算毎に(式 2-13)あるいは(式 2-1)と変動している。このような変動は、すべての列車で起こりうるため、反復計算毎に電気回路の抵抗が変化する。

次に、図 25 を用いて説明する。図 24 で得られた計算解の電圧 VR0 を基に要求電力 DP0 が計算される。その結果、図 23 と同一の式が算出される。これが繰り返されることで図 26 のように計算解(IR0, VR0)と(IR, VR)を繰り返すようになる。なお、本現象は、他列車の影響により電気回路の抵抗特性が変わることで発生している。すなわち、少なくとも 2 列車が相互に影響しあうことで発生するため、シミュレーション上においてハンチングが起こっている場合には、必ず 2 列車で電圧のハンチング挙動が繰り返される。図 27 にその例を示す。図 27(a) は列車 1 の架線電圧、図 27(b) は列車 2 の架線電圧を表す。このケースは(a)列車 1 と(b)列車 2 の電圧が、反復計算毎に変動している。その結果、(a)列車 1 と(b)列車 2 それぞれの模擬特性も反復計算毎に変動したことで、他方の電気回路の抵抗にそれぞれ影響を与え、その結果としてハンチングしている。なお、この現象では、真解近傍の電圧幅の小さい範囲で交互に状態変化を繰り返すため、この状態変化を検知し、状態を適切に変更することで回避可能と考える。

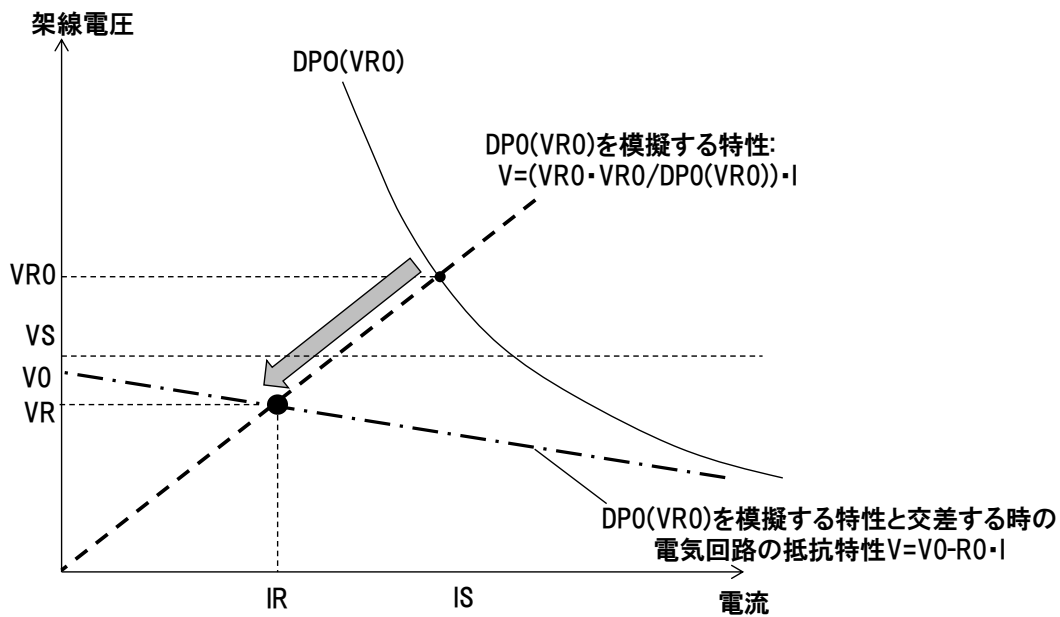


図 23 ハンチングの発生メカニズム(過程 1)

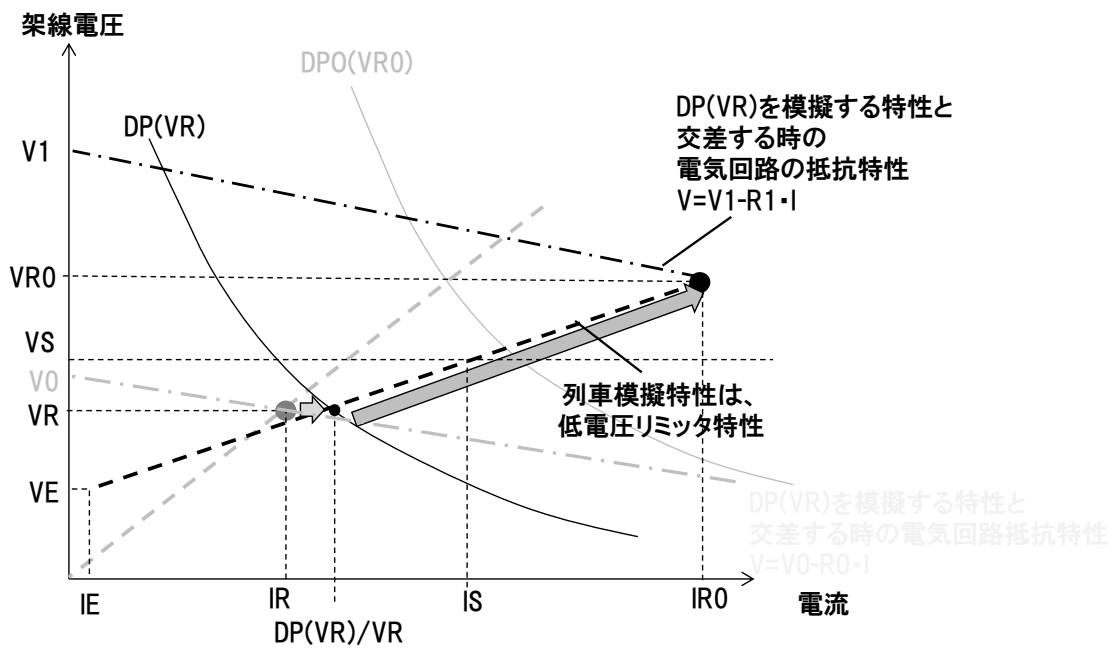


図 24 ハンチングの発生メカニズム(過程 2)

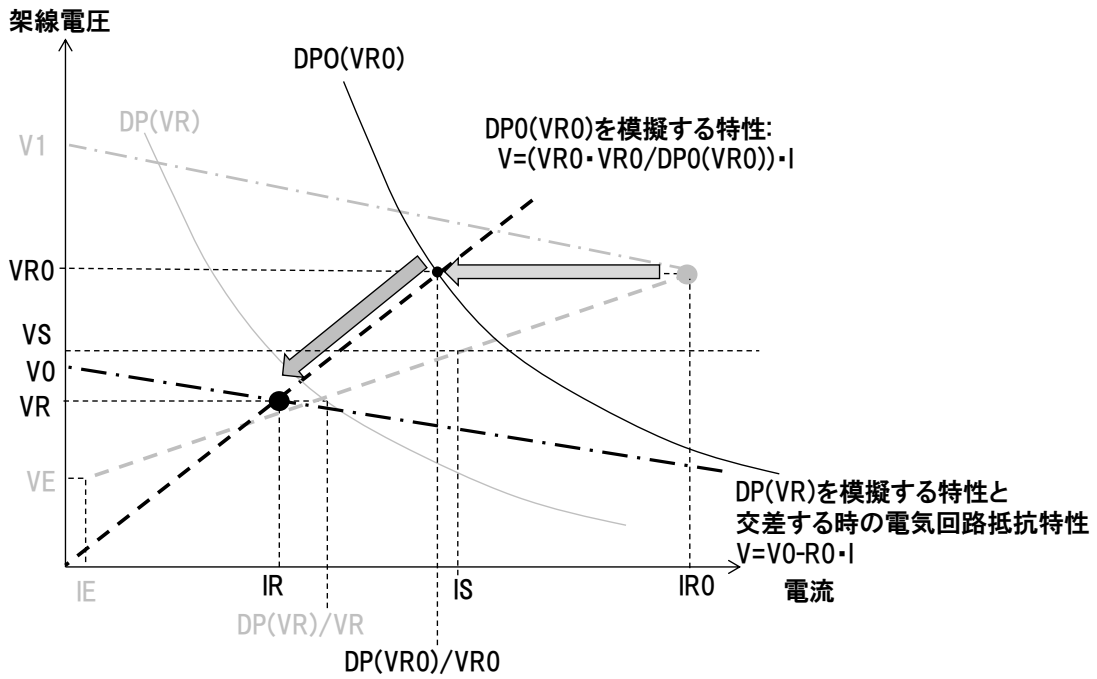


図 25 ハンチングの発生メカニズム (過程 3)

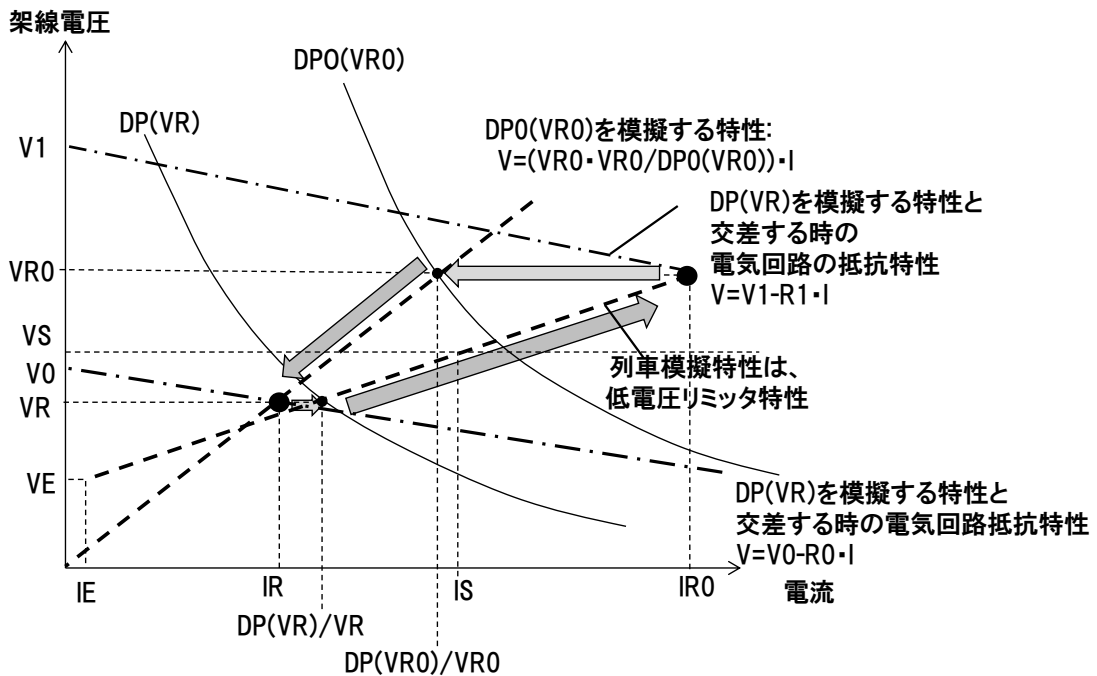
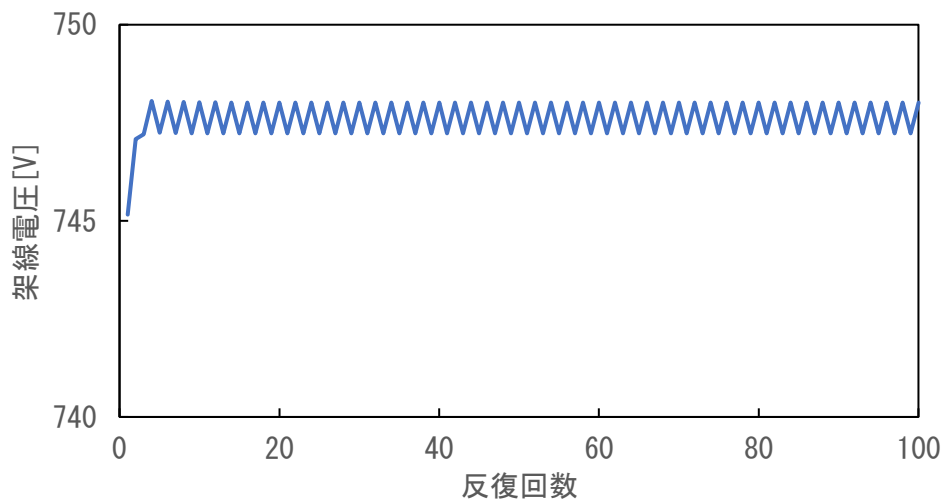
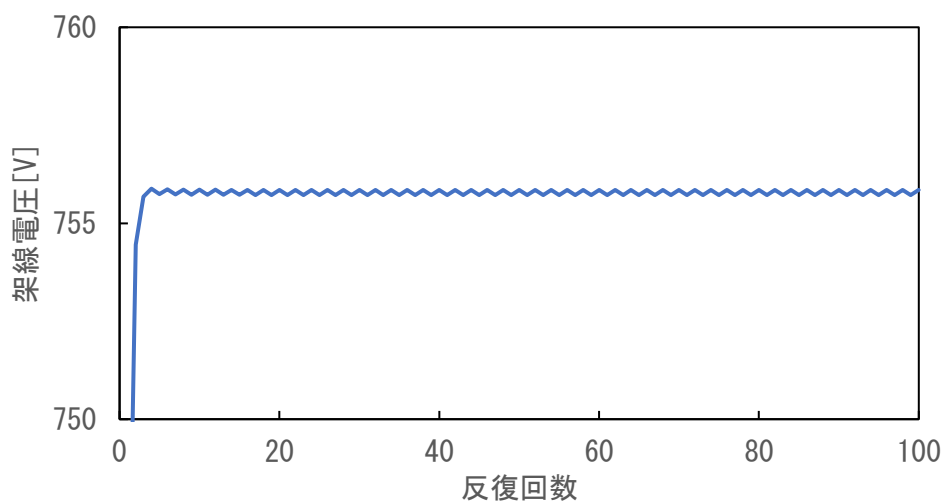


図 26 ハンチングの発生



(a) 列車 1 の電圧挙動



(b) 列車 2 の電圧挙動

図 27 ハンチングの例

2.4.2 状態バック

(2)の状態バックについて説明する。(1)のハンチングのように交互に状態が繰り返す現象とは異なり、ある特定の周期で状態が繰り返される現象が起こる。図 20 に示す結果では、反復回数の 20 回目から反復回数 8 回毎に状態が繰り返されている。データを分析したところ、複数の素子と素子それぞれが有する複数の状態が複雑に影響しあうことで起こったと考えられる。列車の回生時におけ

る通常回生特性と高電圧リミッタ特性を行き来する現象が特定の周期で繰り返されるメカニズムについて、図 28 から図 31 を用いて説明する。

図 28 は、列車が回生中における、ある反復回数 n 回目の列車模擬特性とその時の電気回路抵抗を表したものである。列車模擬特性は、2.2.2 節で示した④通常回生特性によって模擬されている。また、この列車模擬特性と電気回路抵抗から、その交点 (IR, VR) が計算されている。

図 29 は、この計算が繰り返されていく様子を示したものである。図 28 の反復回数 n から、 $n+1, n+2, n+3$ と 3 反復分進んだ状態を表している。 $VR, VR1, VR2, VR3$ は、反復回数 $n, n+1, n+2, n+3$ の計算解の電圧、 $IR, IR1, IR2, IR3$ は、反復回数 $n, n+1, n+2, n+3$ の計算解の電流を表す。なお、反復回数 $n, n+1, n+2, n+3$ の列車特性は、2.2.2 節で示した④通常回生特性によって模擬されている。一方、反復 $n+3$ 回目の計算を基に得られた計算解の電圧 $VR3$ では、これまでの④通常回生特性とは異なり高電圧リミッタ特性になる。このため、図 30 に示すように反復 $n+4$ 回目の列車模擬特性は、高電圧リミッタ特性で模擬される。この列車模擬特性と、反復周期 $n+4$ 回目の電気回路抵抗との交点から計算解 ($IR4, VR1$) が計算される。この計算解の電圧 $VR1$ は反復 $n+1$ 回目の計算解の電圧と同じである。このため、図 31 に示すように反復 $n+5$ 回目は、反復 $n+2$ 回目と同じ計算となる。以上のことから、ある反復回数毎に同一現象を繰り返すこととなる。これが状態バックである。この現象は、本来変更の必要のない素子モデルを変更したことで状態が不安定となったことが原因であるため、状態を変動させる素子を見極める必要がある。

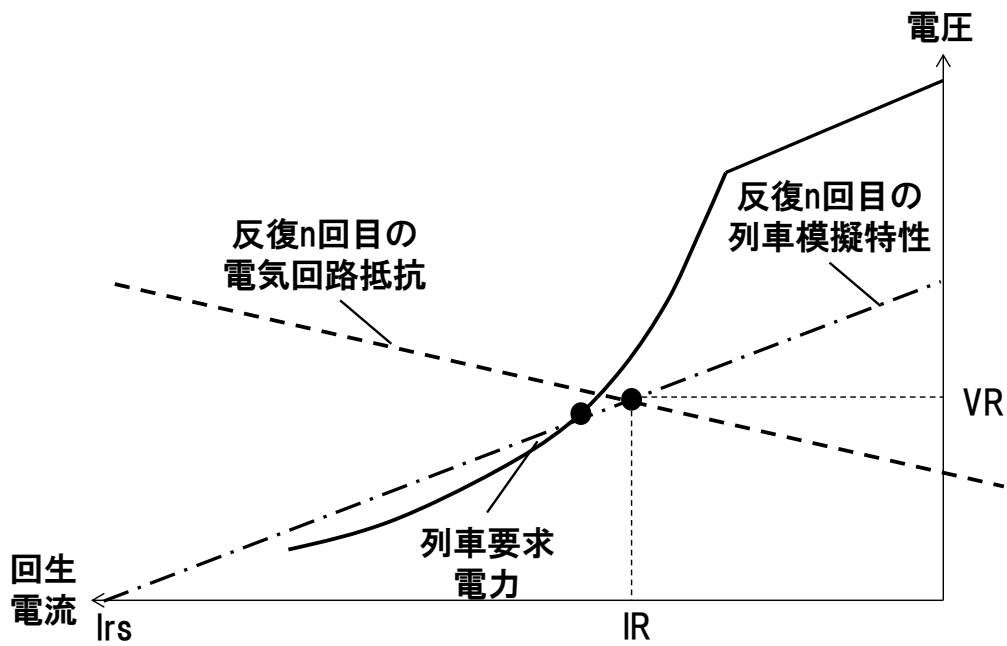


図 28 状態バックの発生メカニズム(過程 1)

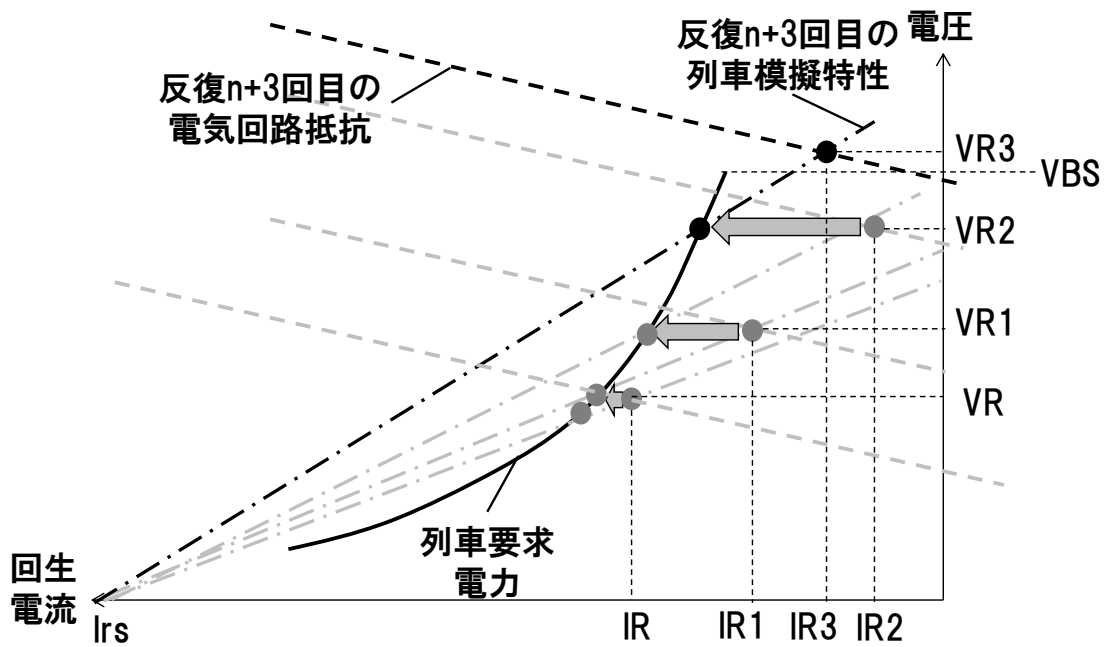


図 29 状態バックの発生メカニズム(過程 2)

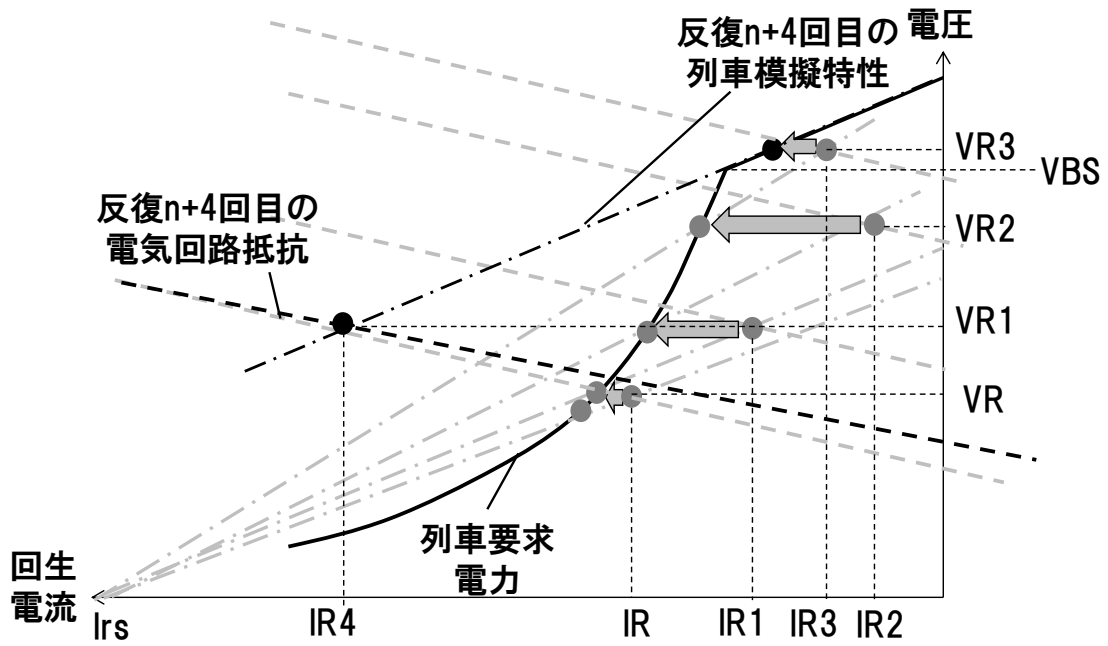


図 30 状態バックの発生メカニズム(過程 3)

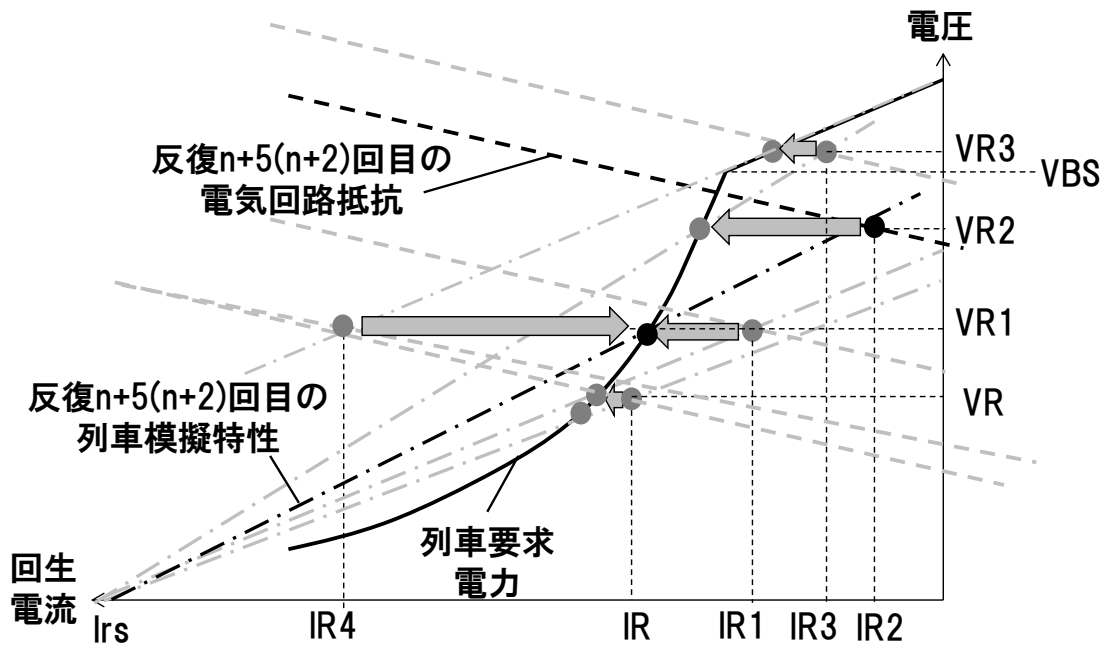


図 31 状態バックの発生メカニズム(過程 4)

2.4.3 停滞

(3)の停滞について説明する。停滞は、ハンチングや状態バックのように反復周期での計算解が変動せず、計算解が真解ではない同一解に留まる現象である。2.4.1節および2.4.2節で示したように、ハンチングや状態バックは電圧に応じて状態を切り替えることで発生するものと考えられる。このため、対策としては、電圧だけではなく他の状態遷移条件を加えることで、状態遷移の判断を行うことになる。しかしながら、その条件の選択が適正でない場合に、状態を遷移できず、停滞が発生すると考えられる。このメカニズムを図32に示す。

図32は、電圧 VR が高電圧リミッタ制御開始電圧 VBS よりも大きい場合であり、高電圧リミッタ特性に基づき列車模擬特性を作成し、電気回路の抵抗との交点から計算解 $(IR1, VR1)$ が得られたケースである。この時、計算解の電圧 $VR1$ は、通常回生特性の電圧であるが、状態遷移条件が適正でないことで、状態が遷移しないとす。この条件で計算した場合において、次の反復周期で得られた計算解も $(IR1, VR1)$ とする。この得られた計算解 $(IR1, VR1)$ では、状態遷移できないため、結果として計算解が $(IR1, VR1)$ に留まる。これが停滞である。

この現象は、計算解が特性を満たしていない条件のまま、計算し続けることで発生する現象である。

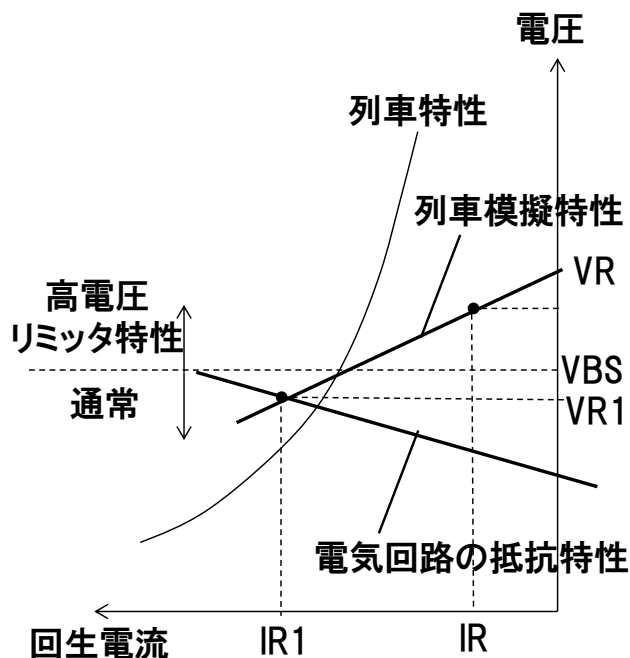


図32 停滞の発生メカニズム

2.4.4 未到達

(4)未到達は、与えられた最大反復回数までに本来あるべき解に到達しなかった現象である。この現象の場合、ある与えられた最大反復回数で収束していない場合でも、ハンチングも停滞もなく解に向かって近づいている状態であると考えられる。図 22 に示した例では、最大反復回数を 100 とした場合には、収束に向かって途中であり、収束と判断されないが、最大反復回数を 300 とした場合には、その途中の反復回数で収束している。このことから未到達の現象が発生した場合には、収束が遅いということが分かる。

未到達すなわち収束が遅い現象について分析したところ、列車の回生電力が小さく、かつ列車模擬特性が、④回生特性(通常)の時に発生していることが分かった。回生電力が小さい場合と大きい場合を例に、図 33 と図 34 を用いて説明する。

これまで述べてきたように、各列車に対する収束計算は、列車模擬特性と、該当列車を除いた電気回路の抵抗により計算される。図 33 では、列車模擬特性は④回生特性(通常)で模擬されている。該当列車を除いた電気回路の抵抗は架線やレールの抵抗に加え、該当列車を除いた別の列車も含めた抵抗によって定まるが、その抵抗の傾きの絶対値が小さいと、解の更新幅が小さくなる。図 33 の例では、反復 n 回目の計算解の電圧 $V(n)$ を基に得られた反復 n 回目の列車模擬特性と反復 n 回目の電気回路抵抗を基に、反復 $n+1$ 回目の計算解の電圧 $V(n+1)$ が得られるが、解の更新幅が小さいことが確認できる。

一方、回生電力が大きい図 34 では、該当列車を除いた電気回路の抵抗の傾きの絶対値が小さい場合でも、④回生特性(通常)で模擬されている列車模擬特性の傾きが大きいため、回生電力が小さい場合と比べて、解の更新幅が大きくなる。図 34 の例では、反復 n 回目の計算解の電圧 $V(n)$ を基に得られた反復 n 回目の列車模擬特性と反復 n 回目の電気回路抵抗を基に、反復 $n+1$ 回目の計算解の電圧 $V(n+1)$ が得られるが、その更新幅が、回生電力が小さい場合と比べて大きくなっていることが確認できる。

結果として、回生電力が小さい場合には、反復計算回数が多くなる。これを避けるためには、④回生特性(通常)で模擬されている列車模擬特性あるいは該当列車を除いた電気抵抗特性の傾きの絶対値を大きくするようにすることが必要である。しかし、該当列車を除いた電気抵抗特性の傾きを変化させることは難しい。一方、④回生特性(通常)は、パラメータ I_{rs} を基に傾きを算出しているため、 I_{rs} を変更することで傾きの変動が可能になる。

未到達の現象は、図 22 に示した例のように電圧が一度上昇してから、緩やかに電圧が下降するケースだけでなく、図 35 に示した例のように電圧が一度下降

してから、緩やかに電圧が上昇するケースもある。いずれのケースも、④回生特性(通常)での列車模擬特性による傾きを大きくすることで、解更新幅が大きくなることを期待でき、その結果、収束性能が改善できると考える。

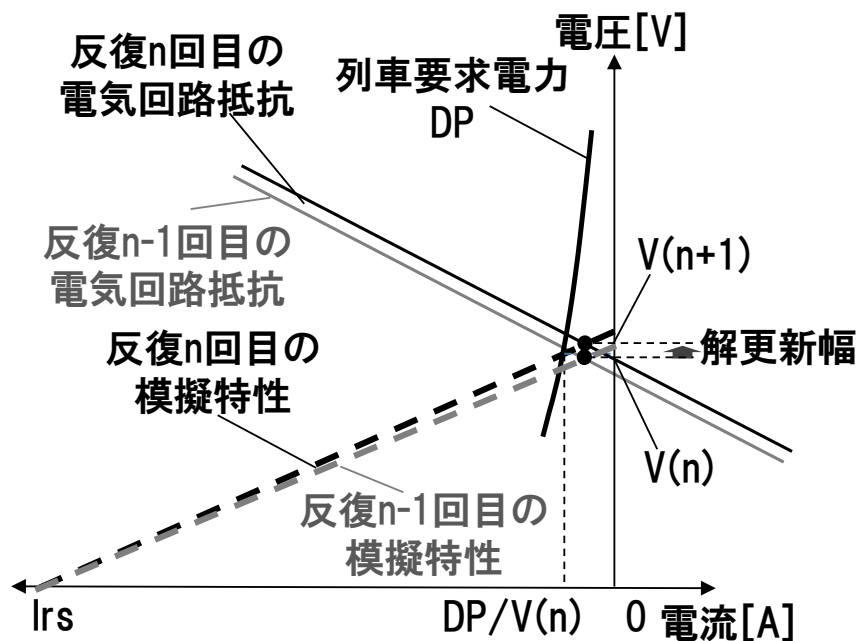


図 33 回生電力：小のケース(解更新幅が小さい)

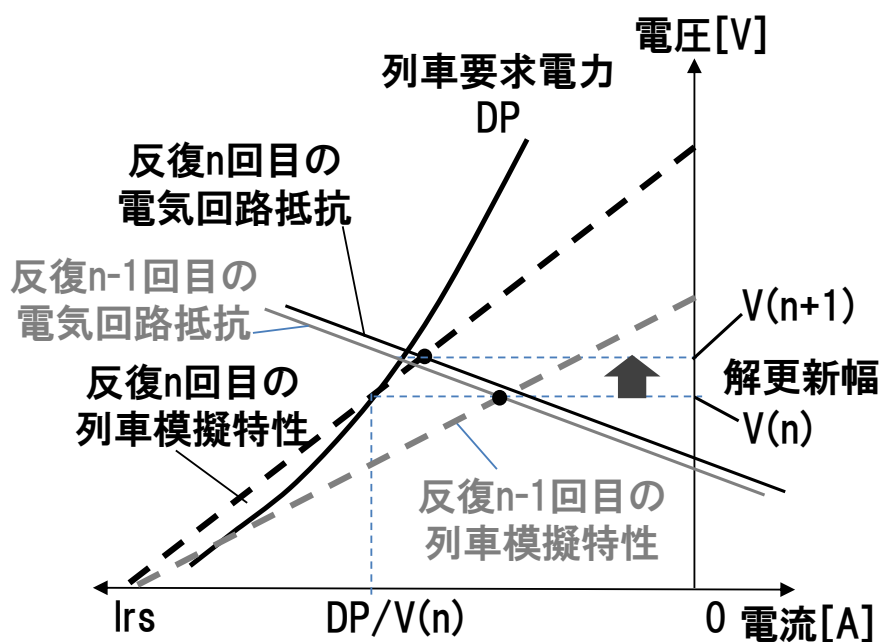


図 34 回生電力：大のケース(解更新幅が大きい)

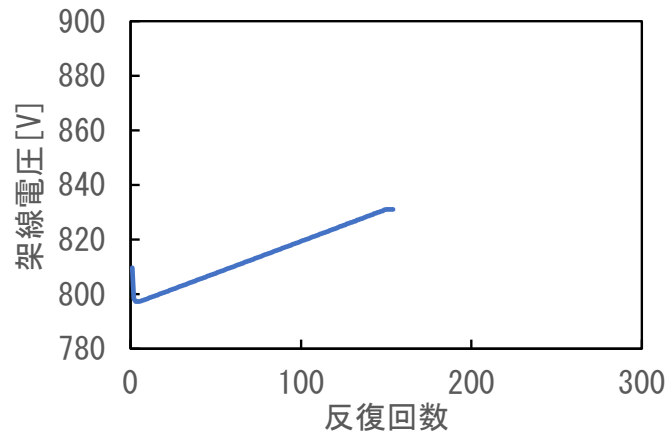


図 35 未到達の例 2

2.5 収束改善方法の提案

2.4 節で示した収束失敗を改善するために、収束履歴情報を用いた収束改善方法を開発した。また、収束の高速化を図るため、収束を遅くしている回生列車の素子モデルについて改良を図った。

2.5.1 ハンチング検出方法とハンチング検出時の状態遷移による

収束性能の改善

低電圧リミッタ特性と通常力行特性の間で発生するハンチングの検出方法を例に説明する。反復 n 回目における計算解の電圧 VR 、反復 $n-1$ 回目における計算解の電圧 $VR0$ 、低電圧リミッタ開始電圧 VS 、反復 n 回目における要求電力 DP 、反復 $n-1$ 回目における要求電力 $DP0$ 、反復 n 回目の計算解の電流 IR 、反復 $n-1$ 回目の計算解の電流 $IR0$ を用いて以下の式が成立するかどうかで検出を行う。

$$VR < VS \quad (式 2-16)$$

$$VR0 > VS \quad (式 2-17)$$

$$(VR + VR0) / 2 - VS \leq 1 \quad (式 2-18)$$

$$(VR \cdot IR - DP) \cdot (VR0 \cdot IR0 - DP0) < 0 \quad (式 2-19)$$

(式 2-16) (式 2-17) が成立することで、反復 n 回目の電圧は低電圧リミッタ特性、反復 $n-1$ 回目の電圧は通常力行特性に存在することになるため、反復毎に、列車模擬特性の違いが確認できる。(式 2-18) が成立することで極めて近い電圧範囲において発生していることが確認できる。(式 2-19) が成立することで特性の変化に伴い列車の要求電力と、算出される解である電流および電圧から計算し

た電力との大小関係が変わることになる。図 23 から図 26 では(式 2-16)～(式 2-18)が全て成立している。また、図 26 のケースでは、反復 n-1 回目では、

$$DP0 < VR0 \cdot IR0 \quad (\text{式 2-20})$$

であるが、反復 n 回目では、

$$DP > VR \cdot IR \quad (\text{式 2-21})$$

であることから(式 2-19)が成立している。このケースにおいて、本来あるべき要求電力は、DP と DP0 の間にあり、真解の電圧も VR と VR0 の間にあると考えられる。このため、図 36 に示したように、(DP/VR, VR) と (DP0/VR0, VR0) を結ぶ直線で列車特性を模擬することで計算を行うようにする。列車の模擬特性が変更されたことで、他列車から見た電気回路の抵抗も変化することになるため、ハンチングから脱出して、収束方向に計算が実施される。この考え方は、他の状態にも適用することが可能である。例えば、高電圧リミッタ特性と通常回生特性の間の判定の場合には、(式 2-16)～(式 2-18)に使用されている低電圧リミッタ開始電圧 VS を高電圧リミッタ開始電圧 VBS に置き換えればよい。この場合に(式 2-16)～(式 2-19)が成立する例を図 37(a)に示す。この場合は、図 37(b)に示した Func2 を用いて列車特性を模擬することで対応できる。

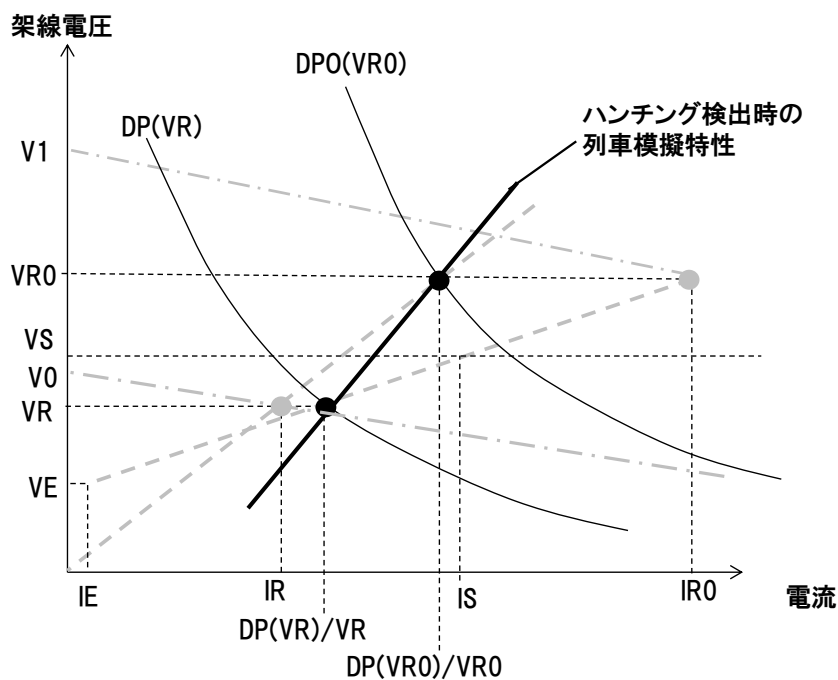
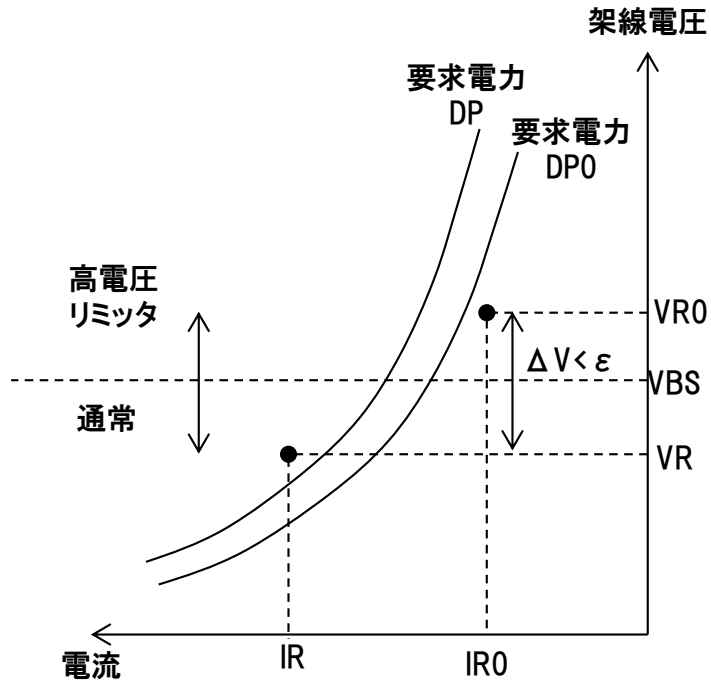
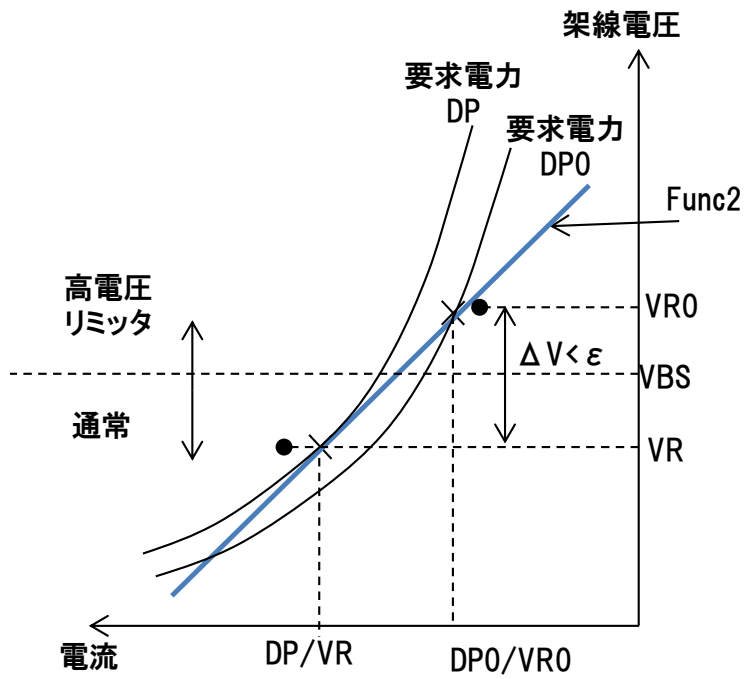


図 36 ハンチングの回避方法



(a) ハンチングの検出



(b) ハンチングの回避方法

図 37 ハンチングの検出と回避方法(回生)

2.5.2 状態バック検出方法と状態バック検出時の状態遷移による

収束性能の改善

2.4.2節で述べたように、状態バックを回避するためには、状態遷移をする素子を見極める必要がある。状態バックのメカニズムを示した図 30 および図 31 を基に説明する。図 30 の状態から電圧のみで状態遷移をすると、図 31 になる。これは、2.4.2節で示したように状態バックとなる。このため、高電圧リミッタ特性に一度遷移した後は、高電圧リミッタ特性には解がないと判断するまで他の特性には遷移しないことにする。高電圧リミッタ特性の場合には、電圧が小さくなるに従い回生電力が増大し、電圧が大きくなるに従い回生電力が減少するという特性がある。この特性を考慮して、解が高電圧リミッタ特性にあるか否かを判断する。図 38 は、図 30 の状態から電圧のみで状態遷移をさせずに高電圧リミッタ特性を保ったまま計算を行った場合を示している。図 31 と異なり反復 $n+5$ 回目の計算解として $(IR5, VR5)$ が得られるため、状態バックが起こらず、収束に向けた反復が行われる。

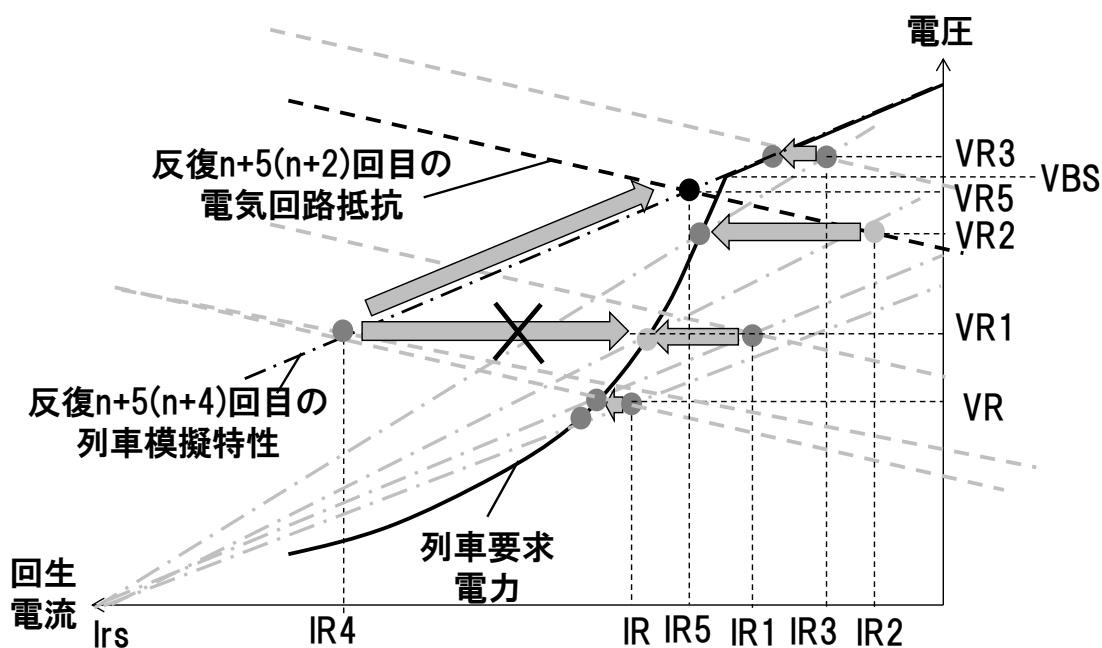


図 38 状態バックの回避方法

上述した方法を基に、アルゴリズムを考案した。以下に示す。なお、反復 n 回目の電圧 VR と反復 n-1 回目の電圧 VR0 の大小関係により検出方法が異なるため、それぞれに分けて説明する。

(1) 反復 n 回目の電圧 VR が反復 n-1 回目の電圧 VR0 よりも小さい場合

反復 n 回目の電圧 VR が反復 n-1 回目の電圧 VR0 よりも小さい場合、すなわち
$$VR < VR0 \quad (式 2-22)$$

が成立する場合には、以下の(式 2-23)(式 2-24)が成立するか否かで判断した。DP は反復 n 回目の要求電力、DP0 は反復 n-1 回目の要求電力、VBS は高電圧リミッタ制御開始電圧を表す。なお、DP および DP0 は列車に電力を供給する場合を正とし、列車から電力を回生する場合は負で表しているため、図 31 では DP および DP0 は負となる。

$$VR0 < VBS \quad (式 2-23)$$

$$DP \geq DP0 \quad (式 2-24)$$

(式 2-23)が成立するという事は、反復 n 回目の計算解の電圧 VR も高電圧リミッタ制御開始電圧 VBS よりも小さいことを示しているので、2 反復連続で算出された計算解の電圧が高電圧リミッタ特性には存在していないことになる。

また、(式 2-22)(式 2-23)(式 2-24)がすべて成立するという事は、電圧が小さくなったにもかかわらず、回生電力が変動しないあるいは小さくなっていることを示している(DP および DP0 は負であるため、電圧が小さくなったにもかかわらず DP が DP0 以上ということ、回生電力としては変動しないあるいは小さくなったということである)。前述したように高電圧リミッタ特性は、電圧が小さくなるに従い回生電力が増大する方向になるため、(式 2-22)(式 2-23)(式 2-24)がすべて成立しているということは高電圧リミッタ特性には解がないといえる。この条件が成立する例を図 39(a)に示す。

(2) 反復 n 回目の電圧 VR が反復 n-1 回目の電圧 VR0 よりも大きい場合

次に、反復 n 回目の電圧 VR が反復 n-1 回目の電圧 VR0 よりも大きい場合について検討する。解の探索方向が高電圧リミッタ特性に向かっていく方向であるため、前述の(1)での検討と同様に 2 反復連続で算出された解が高電圧リミッタ特性に存在していないおよび、電圧が小さくなるに従い回生電力が変動しないあるいは小さくなるだけで判定すると誤判定の可能性がある。この判定をした際には高電圧リミッタ特性外であるが、本当の解は、高電圧リミッタ特性にあり、反復を繰り返しながら近づいている場合があるためである。この場合は、高電圧リミッタ特性まで状態を遷移させてから、以下の(式 2-25)(式 2-26)(式 2-27)(式 2-28)がすべて成立するか否かで高電圧リミッタ特性には解がないということ

を判断する。

$$VR0 < VBS \quad (式 2-25)$$

$$VBS < VR \quad (式 2-26)$$

$$(DP-VR \cdot IR) \cdot (DP0-VR0 \cdot IR0) > 0 \quad (式 2-27)$$

$$|| (DP-VR \cdot IR) || > || (DP0-VR0 \cdot IR0) || \quad (式 2-28)$$

※DP: 反復 n 回目の要求電力値、

VR: 反復 n 回目の計算電圧、

IR: 反復 n 回目の計算電流

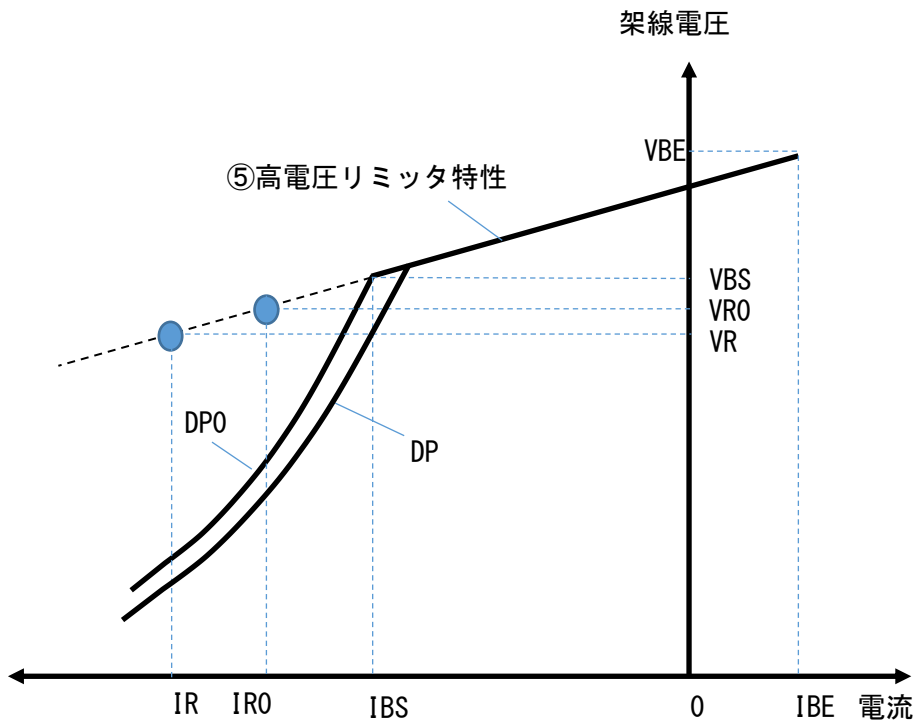
DP0: 反復 n-1 回目の要求電力値、

VR0: 反復 n-1 回目の周期の計算電圧、

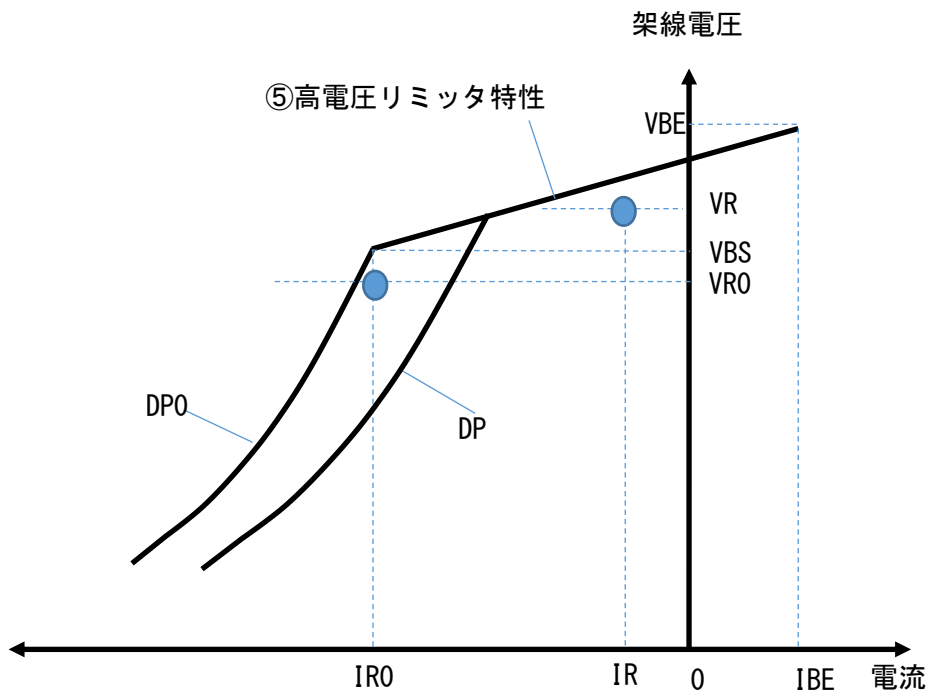
IR0: 反復 n-1 回目の周期の計算電流

(式 2-25)および(式 2-26)が成立するという事は、反復 n-1 回目では高電圧リミッタ特性には入っておらず反復 n 回目において高電圧リミッタ特性に到達したということを示している。(式 2-27)が成立するという事は、解の探索方向は反復 n-1 回目と反復 n 回目で同じであることを示しており、ハンチングはしていないということを示している。(式 2-28)が成立するという事は、反復 n 回目で算出された計算解の電力は、反復 n-1 回目で算出された計算解の電力に比べて、解から遠ざかっているということを示している。すなわち、高電圧リミッタ特性で解を探すと離れていくということを示している。従って、(式 2-25)(式 2-26)(式 2-27)(式 2-28)がすべて成立した場合には、高電圧リミッタ特性には解がない。この条件が成立する例を図 39(b)に示す。

上述したように、高電圧リミッタ特性に確実に解がないことを確認してから遷移させることでハンチングが起こる確率を低減させる。なお、この考え方は力行時における低電圧リミッタ特性と通常力行特性の間にも適用可能である。



(a) $VR < VR0$



(b) $VR > VR0$

図 39 回生時における状態バック検出パターン

2.5.3 停滞の検出と停滞検出時の状態遷移による収束性能改善

2.4.3節で示したように、停滞は、反復 n-1 回目の計算解の電圧 VR0 と反復 n 回目の計算解の電圧 VR が一致した場合で、収束と判断されていない場合である。これは状態遷移が必要な素子を遷移させなかったことで発生する。この検出方法について説明する。停滞の検出は、反復 n 回目の計算解の電圧 VR、反復 n-1 回目の計算解の電圧 VR0、反復 n 回目の計算解の電圧 VR で決定される要求電力 DP、反復 n 回目の計算解の電流 IR、反復 n-1 回目の計算解の電流 IR0 を用いて以下の(式 2-29) (式 2-30) (式 2-31) が全て成立するかどうかで検出を行う。

$$||VR0 - VR|| \leq \varepsilon_1 \quad (式 2-29)$$

$$||VR0 \cdot IR0 - VR \cdot IR|| / ||VR \cdot IR|| \leq \varepsilon_2 \quad (式 2-30)$$

$$||VR \cdot IR|| > ||DP|| \quad (式 2-31)$$

(式 2-29) (式 2-30) が成立していれば、算出されている解が極めて近いと判断できる。さらに(式 2-31) も成立している場合、電圧 VR で決定される要求電力 DP の絶対値よりも、計算解(IR, VR) で得られる電力の絶対値の方が大きいため、真解とは異なる計算解を算出していることになる。この場合、状態を遷移しないと計算解が停滞することになるため、停滞とみなして電圧 VR に応じて状態を遷移する。なお、 ε_1 、 ε_2 は十分小さな値で設定すればよく、例えば $\varepsilon_1=1[V]$ 、 $\varepsilon_2=0.01[\%]$ とすれば十分停滞していると判断できる。

2.5.4 列車素子モデルの改良による収束加速方法

2.4.4節で示したように収束が遅いケースは、列車の回生電力が小さく、かつ列車模擬特性が④回生特性(通常)の時に発生しており、その要因は、列車模擬特性の傾き H が小さいことである。2.2.2節に示したように列車の④回生特性(通常)は、あらかじめ与えられた(Irs, 0)と、④回生特性(通常)上に存在する(DP/VR, VR)を結んだ特性で模擬されており、その傾き H は、(式 2-4)から、

$$H = VR \cdot VR / (DP - Irs \cdot VR) \quad (式 2-32)$$

である。この傾き H を大きくするために、Irs を要求電力 DP を考慮して自動的に調整する方法を考案した。具体的には以下の(式 2-33) (式 2-34) (式 2-35) が成立した場合に、Irs を 1/2 とすることにした。なお、傾き H が極端に大きくなった場合には収束性が悪化するため、K を正値とした場合に、Irs は IR の K/2 倍未満の値となるようにする。

$$(DP - VR \cdot IR) \cdot (DP0 - VR0 \cdot IR0) > 0 \quad (式 2-33)$$

$$(VR \cdot IR - VR0 \cdot IR0) / (VR \cdot IR) < 0.01 \quad (式 2-34)$$

$$Irs < K \cdot IR \quad (式 2-35)$$

(式 2-33)が成立するという事は、解の探索方向は前回と今回とで同じであることを示しており、ハンチングはしていないということを示している。(式 2-34)が成立するという事は、解の更新幅が低下しており、収束が遅いということを示している。(式 2-35)が成立するという事は、Irs を 1/2 にしても IR の K/2 倍未満の値が確保されるということを示している。

(式 2-33)(式 2-34)(式 2-35)が成立して Irs を更新した場合の例を 2.4.4 節で示した図 33 と比較する形で図 40 に示す。図 40 では、判定条件により Irs を 1/2 にして得られた New_Irs を用いて列車模擬特性を作成したものである。Irs を用いて列車模擬特性を作成した図 33 に比べて、傾きが大きくなる事が確認できる。結果として、図 33 よりも解更新幅が増加し、収束を早める効果がある。

次に、(式 2-35)で用いられている K の選択方法について説明する。前述までの説明から、(式 2-35)が成立しないということは、Irs は変化させないということである。このため、(式 2-35)が成立しない時における Irs は、

$$Irs \geq K \cdot IR \quad (式 2-36)$$

である。なお、(式 2-36)の右辺である IR は、反復毎の電流計算値であり、計算が収束した場合、すなわち IR が真解の時に、次の(式 2-37)が成立する。

$$IR = DP/VR \quad (式 2-37)$$

④回生特性(通常)における列車模擬特性の傾き H は(式 2-32)によって得られるが、計算を収束させるためには、この傾き H を右上がりすなわち正になるように決定すべきである。また、計算が収束するケースでは、(式 2-32)、(式 2-36)および(式 2-37)から、次の(式 2-38)が成立する。

$$\begin{aligned} H &= VR \cdot VR / (DP - Irs \cdot VR) \\ &= VR \cdot VR / (IR \cdot VR - Irs \cdot VR) \\ &= VR / (IR - Irs) \\ &\geq 1 / (1-K) \cdot VR / IR \end{aligned} \quad (式 2-38)$$

(式 2-38)の H は通常回生時の列車模擬特性の傾きである。従って、(式 2-38)の右辺項において、

$$1 / (1-K) \cdot VR / IR > 0 \quad (式 2-39)$$

が成立するように K を設定すれば良いことになる。この時、電圧 VR は正だが、電流 IR は負である。従って、K>1 となるように K を決めるべきである。但し、K を小さい値にすると、(式 2-38)の傾きが大きくなるため、反復一回あたりの解更新幅が大きくなる。この結果、状態が頻繁に変動することでハンチングや状態バックを引き起こす可能性がある。一方で K を大きくすると、(式 2-38)の傾きが小さくなるため、解更新幅が小さくなる。これらを踏まえて、今回は、K=4 として設定した。電流 IR は負であることから、Irs の範囲は、4×IR と 2×IR の

範囲となる。すなわち通常回生特性を模擬する際の傾き H の範囲は、

$$\begin{aligned} 1/(1-4) \times VR/IR \leq H \leq 1/(1-2) \times VR/IR \\ -1/3 \times VR/IR \leq H \leq -VR/IR \end{aligned} \quad (\text{式 2-40})$$

となる。この H の範囲は、大きすぎる条件でも小さすぎる条件でもないリーズナブルな範囲と考えられる。なお、 K の理想的な選択方法は、今度の課題である。

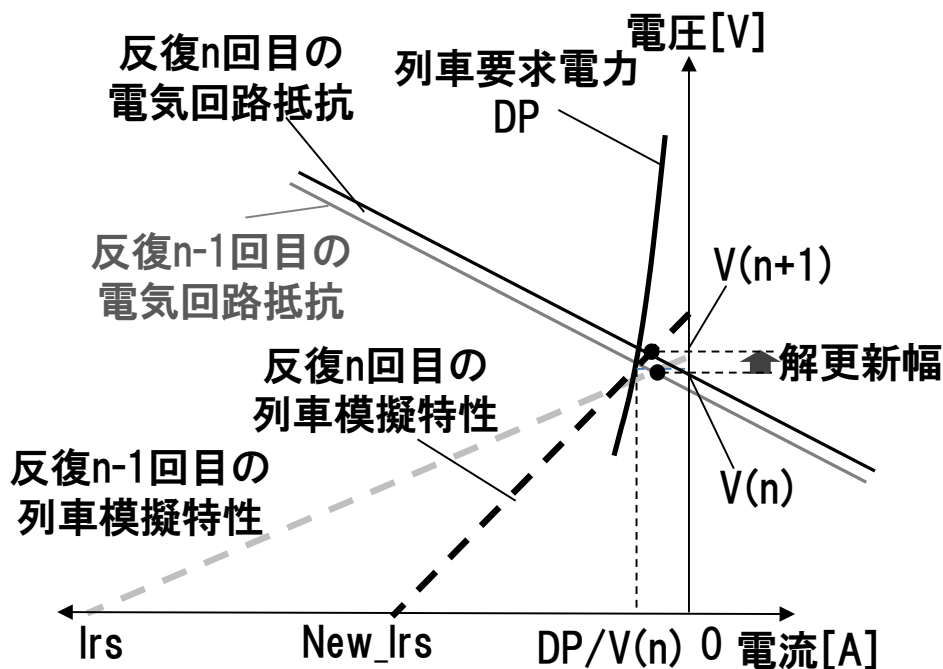


図 40 Irs の変更による模擬特性の変更

2.6 シミュレーションによる効果の確認

2.5 節で提案した方法の有効性について検証するため、2.3 節で示した計算方法(これを従来方法と呼ぶ)と提案方法それぞれに対して、シミュレーションを実施し、結果を比較した。

表 2 にシミュレーション条件として、路線長、変電所数、列車数および列車走行間隔を示す。これらのパラメータは、計算対象とする行列の規模に影響を与えるため、収束性にも影響を与える。なお、Case5 から 13 は同じ路線条件を用い、異なる走行区間、出発時刻の変更により、時々刻々の在線状況を変化させたものである。

シミュレーションは 1 秒周期で実施した。なお、反復回数の上限值を 100 回とし、各周期における反復回数が 100 回に達しても収束しないケースを失敗と

した。従来方法と提案方法において、それぞれのケースにおける全計算回数、収束失敗回数、収束失敗率、平均収束回数を表 3 に示す。全計算回数は、シミュレーション周期毎の計算を 1 回と数え、ケース毎に定められた時間範囲が終わるまで行われた計算回数のことである。収束失敗回数は、各条件における収束失敗の合計値である。収束失敗率は、収束失敗回数を全計算回数で割ったもの、平均反復回数は、反復回数の合計値を全計算回数で割ったものである。

従来方法は、14 ケースのうち 13 ケースは 1%未満の収束失敗率であったが、Case4 において全体 8217 回に対して約 16%の 1311 回が失敗した。一方、提案方法では、実施したすべてのケースにおいて、収束失敗は 0 となり、平均反復回数も従来方法と同等以下となることを確認した。効果が大きくみられる Case2 と Case4 について収束に要した反復回数とその頻度を図 41 および図 42 に示す。Case2 および Case4 において、従来方法では、収束に要した反復回数が 30 回のものも多く存在しているが、提案方法では、収束に要した反復回数のおよそ大半が 10 回前後となっている。このことから、収束計算の高速化にもつながっていると考えられる。

表 2 シミュレーション条件

Case	時間範囲	路線長 [km]	変電所数	総列車数	列車走行 間隔[s]
1	ラッシュアワーを再現した 約 1 時間 45 分間の シミュレーション	22.5	18	70	120
2	1 日のシミュレーション	78.3	11	335	300-600
3	ラッシュアワーを再現した 約 3 時間のシミュレーション	14.2	9	160	180
4	ラッシュアワーを再現した 約 2.5 時間のシミュレーション	18.5	18	198	120
5	2 列車シミュレーション	12.8	3	2	-
6	2 列車シミュレーション	12.8	3	2	-
7	2 列車シミュレーション	12.8	3	2	-
8	2 列車シミュレーション	12.8	3	2	-
9	2 列車シミュレーション	12.8	3	2	-
10	2 列車シミュレーション	12.8	3	2	-
11	2 列車シミュレーション	12.8	3	2	-
12	2 列車シミュレーション	12.8	3	2	-
13	2 列車シミュレーション	12.8	3	2	-
14	1 日のシミュレーション	21.0	12	1500	90-360

表 3 シミュレーション結果

Case	全計算回数	従来方法			提案方法		
		収束失敗回数	収束失敗率 [%]	平均収束回数	収束失敗回数	収束失敗率 [%]	平均収束回数
1	6301	9	0.1	13	0	0.0	13
2	74011	519	0.7	20	0	0.0	11
3	10279	54	0.5	6	0	0.0	6
4	8217	1311	16.0	30	0	0.0	11
5	431	0	0.0	10	0	0.0	8
6	404	0	0.0	10	0	0.0	10
7	378	0	0.0	12	0	0.0	10
8	252	0	0.0	9	0	0.0	9
9	279	0	0.0	10	0	0.0	10
10	265	0	0.0	9	0	0.0	9
11	454	0	0.0	10	0	0.0	10
12	639	0	0.0	12	0	0.0	10
13	278	0	0.0	10	0	0.0	10
14	79161	475	0.6	10	0	0.0	10

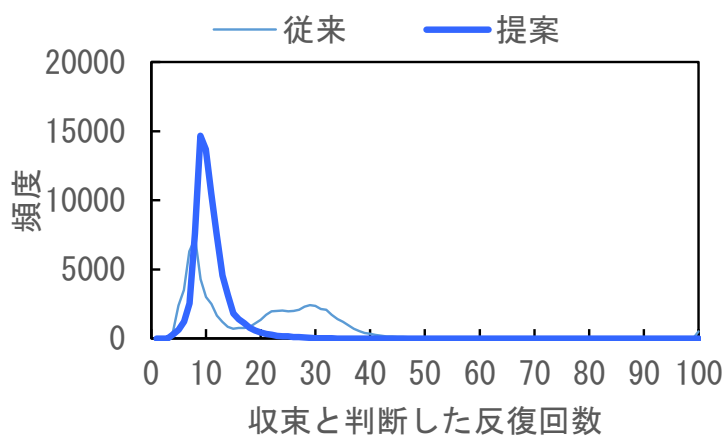


図 41 従来方法と提案方法における収束までの反復回数(Case2)

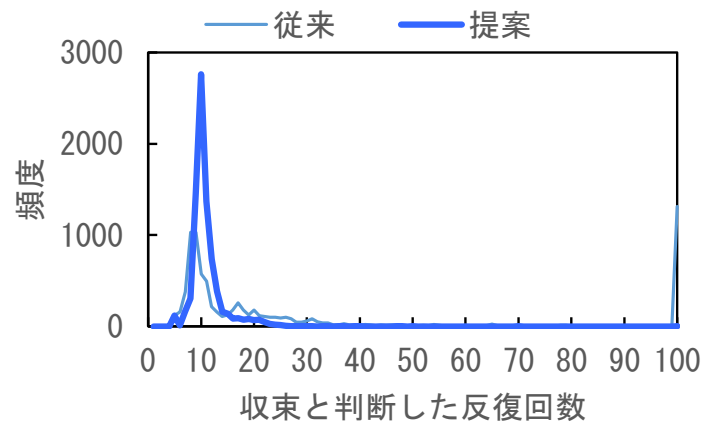


図 42 従来方法と提案方法における収束までの反復回数 (Case4)

3. 鉄道電力シミュレーションの全体像

3.1 鉄道システムの全体像

鉄道システムは、図 43 に示すように、路線を走行する列車、列車に電力を供給するき電システム、列車間の過剰な接近を防止する信号システム、列車の行先、時刻などの運行を管理する運行管理システムなどにより構成される公共社会インフラシステムである。

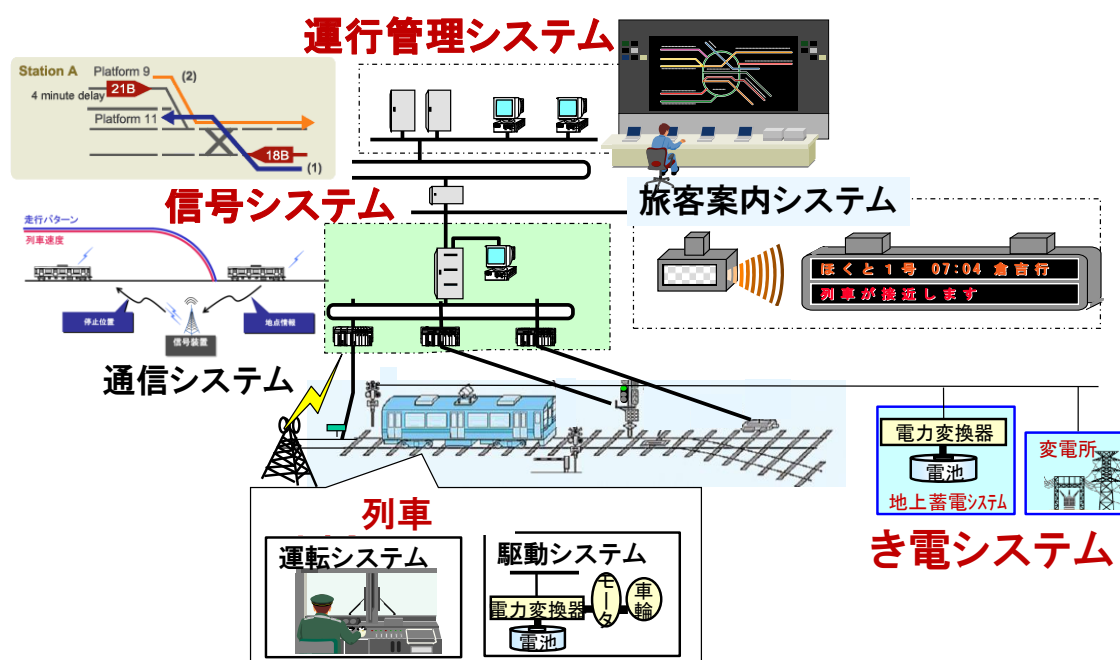


図 43 鉄道システムの全体像

3.2 鉄道電力シミュレーションの概要と計算フロー

鉄道システムの時々刻々の挙動を再現するためには、電力フローの再現に加えて、運行ダイヤに基づき路線に在線している列車を管理する運行管理システム、前の列車との間隔を制御する信号システム、運転士の挙動を模擬するとともに、定められた列車性能に基づき列車を走行させる模擬が不可欠である。それぞれのシステムについて、論理モデルおよび物理モデルにて構成し、それらを接続することで、鉄道システムの時々刻々の挙動を再現できるシミュレータを構築した。図 44 にシミュレータおよび入出力データの概要を示す。路線に存在する列車について発着駅、発着番線および発着時刻(通過も含む)を示した運行ダイ

ヤと、列車毎の重量や列車長、加減速特性、走行抵抗などを示した列車特性と、変電所の位置および容量、整流器の無負荷時電圧および電圧変動率、架線およびレールの抵抗などを示したき電システム特性と、該当路線の信号方式や、軌道回路、進路情報、転てつ器などで構成される信号条件と、該当路線の地形データである勾配、曲線、トンネル、制限速度、駅位置などを入力条件とする。この入力条件を基に、シミュレーションを行うことで、各列車の挙動、エネルギー消費量、変電所の電圧/電流分布など各種評価をするために必要なデータを出力する。

図 45 にシミュレーションの全体計算フローを示す。シミュレーション周期毎に、以下の順で計算を実施していく。

①運行管理システムモデルにおいて、1周期前のシミュレーション周期の計算で得られた各列車の位置情報と、入力条件である軌道回路情報および運行ダイヤ情報を基に、各列車の発着管理を実施する。また、運行ダイヤ情報を基に、進路状態を決定する。

②信号システムモデルにおいて、1周期前のシミュレーション周期の計算で得られた各列車の位置情報と、①運行管理システムモデルで決定した進路状態と、入力条件である軌道回路情報および信号システム信号条件を基に、各列車の進入限界位置を算出する。

③列車運転モデルにおいて、1周期前のシミュレーション周期の計算で得られた各列車の位置および速度と、②信号システムモデルで算出した各列車の進入限界位置と、入力条件である列車特性および運転方法を基に各列車の運転指令を決定する。

④列車駆動モデルにおいて、1周期前のシミュレーション周期の計算で得られた各列車の速度と、③列車運転モデルで決定した各列車の運転指令と、⑤き電システムモデルで算出される架線電圧と、入力条件である列車特性を基に、各列車の要求電力を求める。なお、各シミュレーション周期の最初の架線電圧は、1周期前のシミュレーションにおける反復計算で得られた架線電圧を用いる。

⑤き電システムモデルにおいて、④列車駆動モデルで算出した各列車の要求電力と、入力条件である電気ネットワーク構成と、き電システムパラメータを基に電気回路に基づく回路方程式を作成して計算し、各列車の架線電圧を得る。この計算は、図 12 で示した計算フローによって行われ、収束と判断されなかった場合には、④列車駆動モデルで、再度、要求電力計算を行う。収束と判断した場合には、④列車駆動モデルで引張力/ブレーキ力を求めて、⑥列車移動モデルに出力する。

⑥列車移動モデルでは、④列車駆動モデルにて算出した引張力/ブレーキ力と、入力条件である列車特性、地形データを基に運動方程式を解いて、加速度を算出し、速度、位置を計算する。

なお、③列車運転モデルで使用する運転方法は、いくつかの方法がある。与えた走行時間を満たすよう走行パターンを決定して走行させる方法や、ユーザーが走行パターンを設定することで、実車と同等の走行を再現することが可能である。走行パターンを設定する場合は、前述した入力条件である列車特性に、各列車の走行パターン情報を記述する。

以上述べた入力条件とシミュレーションの計算フローにより、鉄道電力シミュレーションが行われ、省エネ走行の提案や実車走行を考慮した提案、ダイヤ変更時の走行パターンや変電所への負荷変動の影響評価や、信号システム変更時の運転間隔評価を可能としている。

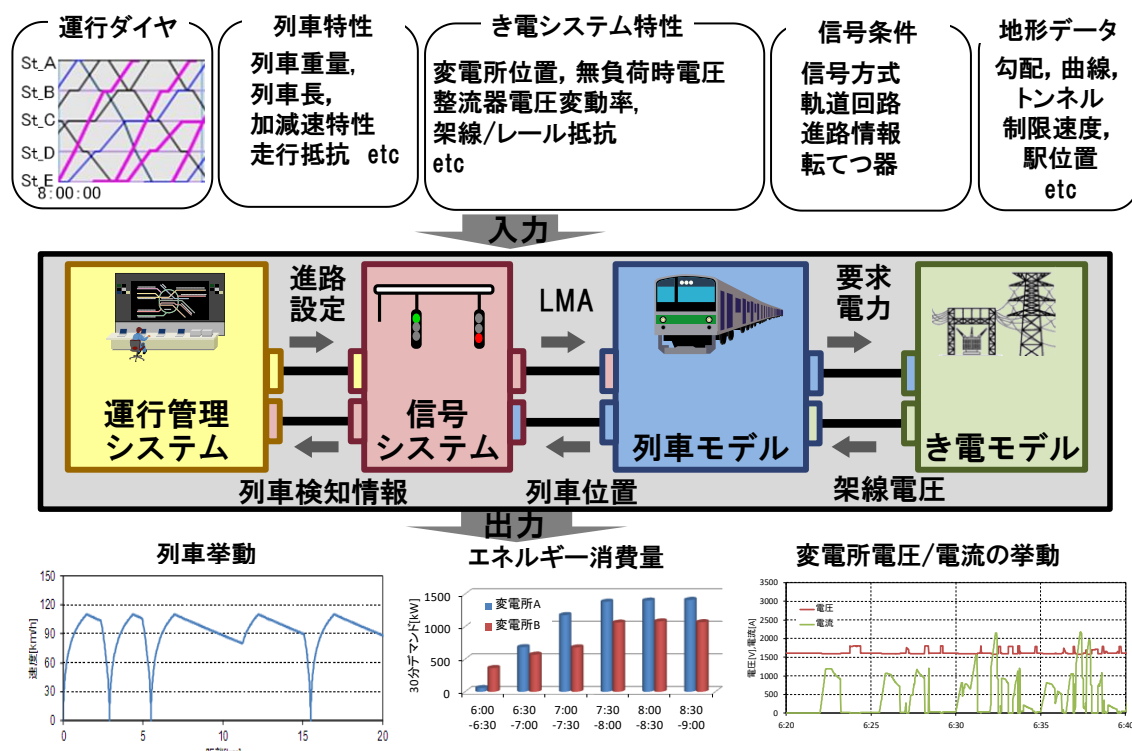


図 44 シミュレータおよび入出力データの概要

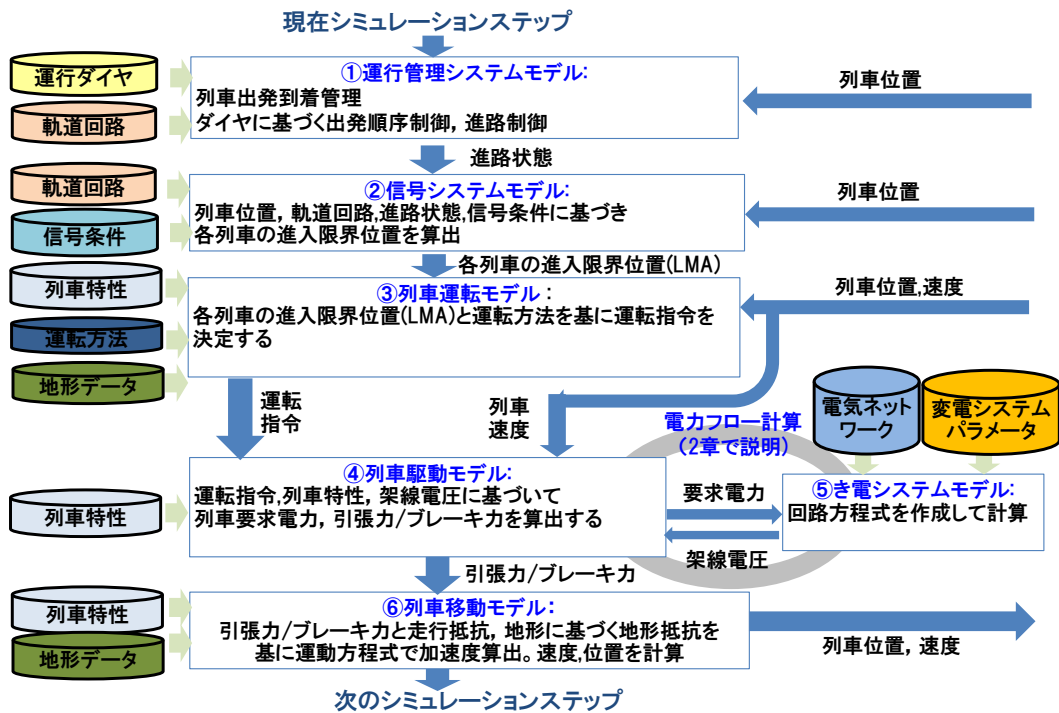


図 45 シミュレーションの全体計算フロー

4. 計測データとの比較によるシミュレーション精度検証

本章では、2章で説明した電気回路の計算方式と3章で説明したシミュレーションモデルを基に構築されたシミュレータを用いて計算したシミュレーション結果と、計測データを比較した結果について示す。

4.1節では、精度検証対象データとそれを得るために必要な計測項目について示す。4.2節では、2013年に計測を実施した沖縄モノレールの2013年当時の路線図と計測した際の試験内容について示す。4.3節では、精度検証を行うために必要な入力データに関する説明と、計測データを基にした入力データの作成方法について示す。4.4節ではシミュレーションモデルの妥当性について、定性的に確認することを目的に、入力データとして与えた走行パターンを列車挙動モデルにて再現できることを示すとともに、列車の架線電圧、電力が計測データと同等の挙動をしていることを示す。4.5節では、シミュレーションモデルの定量的な妥当性を評価するために、計測データとシミュレーション結果それぞれの電力量を基に精度評価を実施した結果について、評価方法も含めて示す。4.6節では、計測データを用いることによる更なる精度向上の可能性について示す。最後に、4.7節にて本シミュレータの他鉄道システムへの適用可能性について示す
[29] [31] [32]。

4.1 精度検証の対象データ

鉄道電力シミュレーションとして求められる要求性能は、

- 1) 時々刻々の列車・変電所の挙動が実機の動きを再現すること
- 2) 列車・変電所のそれぞれの電力量の誤差が要求精度を満たすこと

である。これらは、

- a) 列車の走行パターンの再現
- b) 列車の架線電圧の再現
- c) 列車の架線電力の再現
- d) 変電所の供給電圧の再現
- e) 変電所の供給電力の再現

と考えられる。a)-e)の再現を確認するために必要な項目を抽出した。

a) 列車の走行パターンの再現を確認するためには、列車位置、速度、運転指令、乗車率が必要となる。

b) 列車の架線電圧の再現を確認するためには、列車の架線電圧が必要となる。

c) 列車の架線電力の再現を確認するためには、列車の架線電圧と列車駆動に要する電流、列車内の補機に流れる電流が必要となる。

d)変電所の供給電圧の再現と、e)変電所の供給電力の再現を確認するためには、整流器の1次側の電圧および電流、2次側の電圧および電流が必要となる。以上をまとめたものを、表4および表5に示す。

なお、a)列車の走行パターンについては、精度評価をする上で、入力として与える条件とした。この理由について説明する。シミュレーション上の走行パターンが計測した走行パターンと異なるということは、シミュレーションにおいて、計測時の列車位置及び速度を模擬できていない。すなわち、時々刻々の電気回路の状態を模擬できないことになる。この模擬できていない電気回路を解いて算出した電圧および電流は、計測時の電気回路と異なる問題を解いて得られた電圧および電流になるため、計測した電圧および電流との比較を行っても、シミュレーションモデルの妥当性を評価することはできない。このため、シミュレーションの走行パターンを計測した走行パターンと一致させ、計測時の電気回路状態を模擬することが、シミュレーションモデルの妥当性を評価する上では重要である。

表4 列車の計測項目

No.	項目	概要
1	電車線電圧	列車の架線電圧
2	フィルタコンデンサ電圧	列車のフィルタコンデンサ電圧
3	ブレーキ力指令	ブレーキ力の指令値
4	ブレーキ力フィードバック	3.の指令に対して、実際に電制力として出力された値
5	速度	列車速度
6	応荷重指令	列車の乗車率
7	運転指令	列車のノッチ扱い
8	主回路電流	インバータに流れた電流
9	補助回路電流	補機に流れた電流

表5 変電所の計測項目

No.	項目	概要
1	受電電圧	系統から受電した時の電圧
2	受電電流	系統から受電した電流
3	直流き電電圧	変電所電圧
4	整流器二次電流	変電所から架線に供給する電流
5	回生電流(54R)	変電所 R-CHOP に流れる電流

4.2 データ計測時の沖縄都市モノレールの概要と試験内容

2013年に沖縄都市モノレールで計測を行った。2013年当時の沖縄モノレールは、那覇空港と首里の15駅を結ぶ12.9kmの路線である。最高速度は65km/hで、平均駅間距離は0.92kmである。3つの変電所で電力供給を行うとともに、列車の回生電力を他列車が使用できない場合には、各変電所に備えられた抵抗式回生吸収装置にて、回生電力の吸収を行い、列車の安定輸送を図ることが可能となっている。駅および変電所位置を図46に示す。

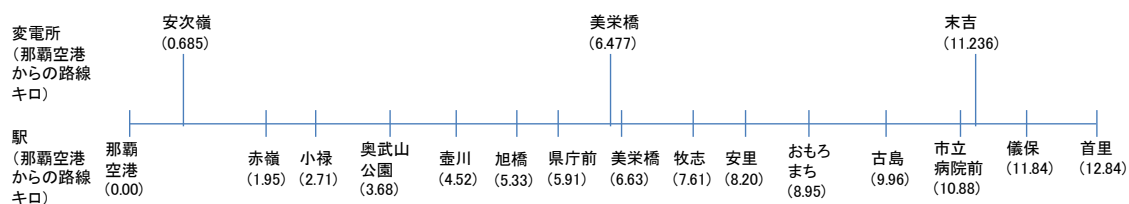


図 46 沖縄モノレール(2013年当時)の駅および変電所位置

図46に示した沖縄モノレールにおいて、美栄橋変電所を停止させた条件にて2列車を走行させた場合の計測を実施した。各Caseにおけるデータ計測区間を表6に示す。矢印の左側が発駅、右側が着駅を表す。列車1は、表4に示した項目を計測し、列車2はGPSにより速度情報のみを取得した。変電所は、安次嶺変電所と末吉変電所において、表5の項目を計測した。また、あらかじめ定められた走行パターンに基づいて運転を実施いただいた。

表 6 データ計測区間

Case	列車 1	列車 2 (GPS のみ)
1	赤嶺⇒小禄	奥武山公園⇒小禄
2	小禄⇒奥武山公園	小禄⇒赤嶺
3	赤嶺⇒小禄	小禄⇒赤嶺
4	赤嶺⇒小禄	奥武山公園⇒小禄
5	小禄⇒奥武山公園	小禄⇒赤嶺
6	赤嶺⇒小禄	小禄⇒赤嶺
7	小禄⇒奥武山公園	小禄⇒赤嶺
8	小禄⇒奥武山公園	赤嶺と那覇空港間⇒那覇空港
9	小禄⇒奥武山公園	赤嶺⇒小禄

4.3 シミュレーションの入力条件

計測データとシミュレーション結果を比較するために最初にすべきことは、シミュレーションの入力条件が計測時の条件と一致しているかどうかである。シミュレーションモデルが実機を精度良くモデル化していたとしても、入力条件がデータ計測時の条件と異なれば、得られる結果は計測データと異なるものとなる。このため、シミュレーションモデルの検証をするためには、与える入力条件を適正に定める必要がある。走行パターンの再現を確認するためには、入力条件として与える列車重量、引張力、電制力、走行抵抗が実機と同等であることを確認する必要がある。列車重量は、計測時の乗車率を基に設定した。列車の引張力、電制力特性は列車設計時の特性を用いた。この特性は、計測データとの比較から、妥当な特性であることを確認した。更に、計測データを基に、走行抵抗式を推定することで、入力条件の妥当性を担保することにした。事前試験及び表 6 で示す各 Case において平坦かつ直線走行時における惰行走行時の速度履歴の塊を複数抽出し、抽出した塊ごとに線形近似をすることで、速度[km/h]と走行抵抗[km/h/s]を算出した。算出した点をプロットしたものを図 47 に示す。横軸は速度、縦軸は走行抵抗を表す。走行抵抗式 R_r は、通常

$$R_r = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \quad (\text{式 4-1})$$

で記述されるように、速度の 2 次式で表される^[34]。図 47 でプロットした点を基に、最小二乗近似により実走行抵抗式 R_{r_y} [km/h/s]を算出し、以下の(式 4-2)を得た。

$$R_{r_y}[\text{km/h/s}] = 0.2636 + 0.009 \times V + 1.317 \times 10^{-6} \times V^2 \quad (\text{式 4-2})$$

この(式 4-2)を走行抵抗の入力条件とした。

次に、その他の入力条件について説明する。変電所の整流器特性については、計測されたデータに基づき設定した。図 48 に示す。列車 1 と列車 2 の走行パターンは、計測された走行パターンに基づき設定した。計測された走行パターンの一例を図 49 に示す。信号システムと地形条件については沖縄都市モノレール株式会社殿より、ご提供いただいた条件を設定した。信号システムの入力条件としては、軌道回路割、転てつ器の位置と各軌道回路の速度条件値を設定した。運転ダイヤは、計測されたデータに基づき発着時刻を設定した。これらをまとめたものを表 7 に示す。

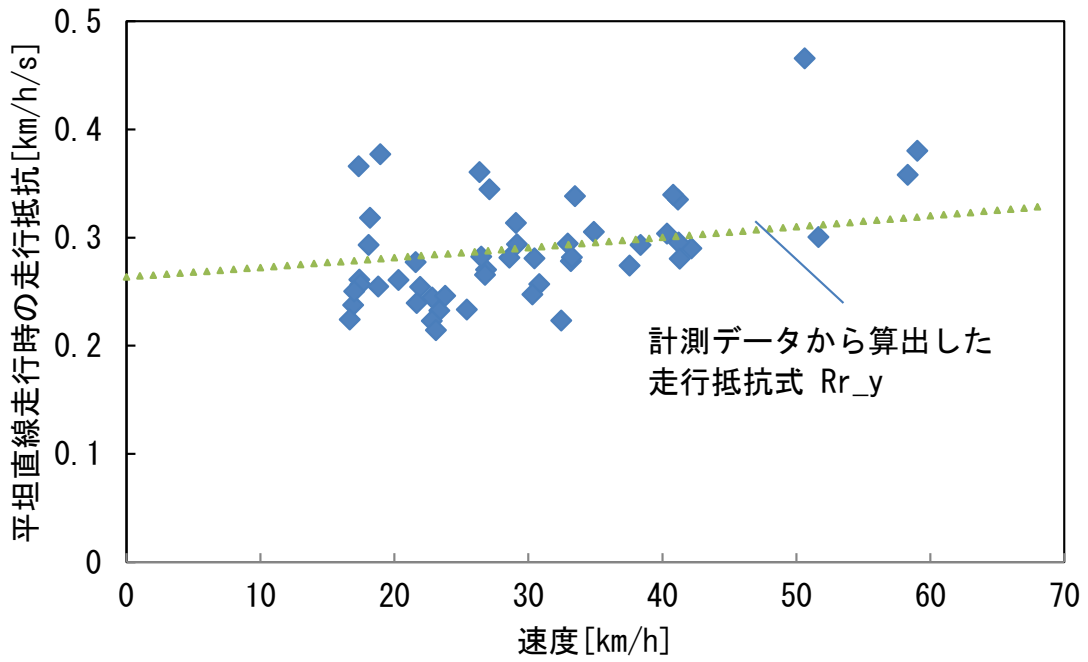


図 47 走行抵抗の算出

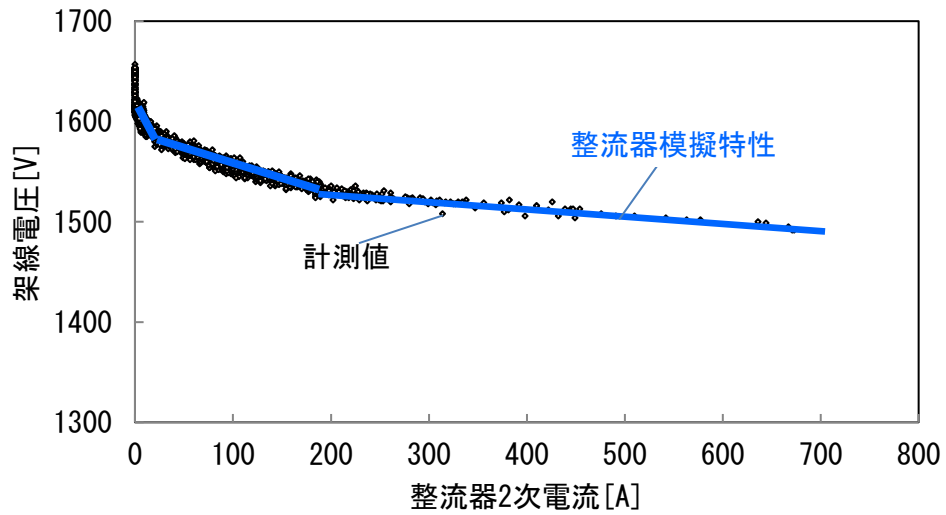
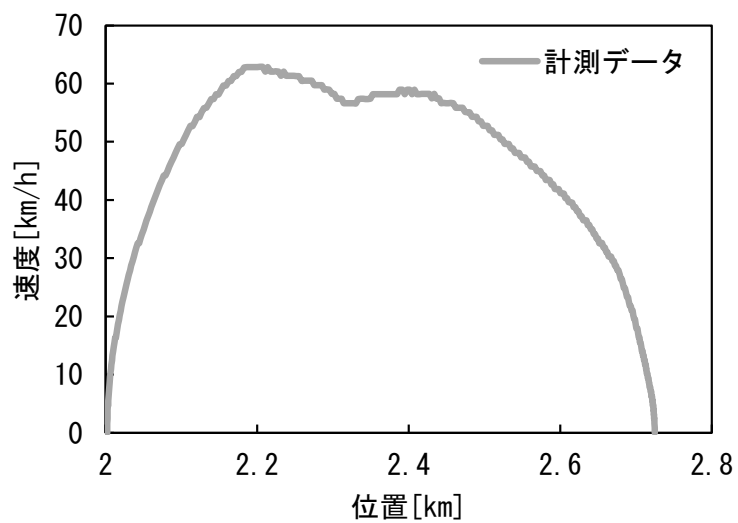
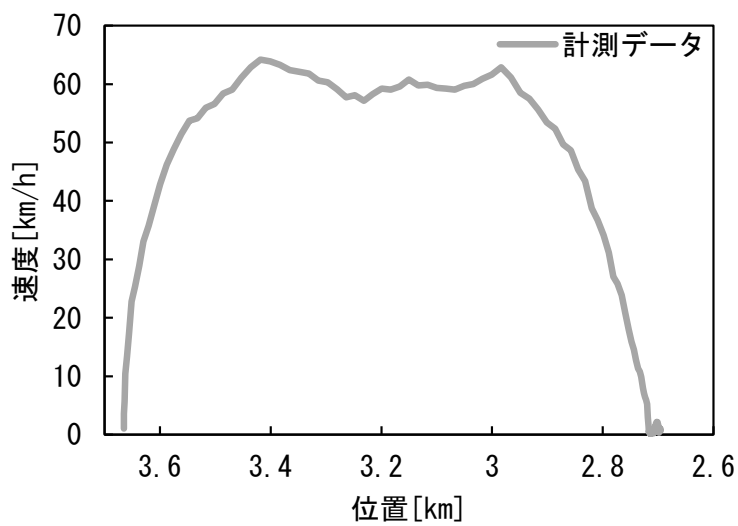


図 48 整流器特性



(a) 列車1の走行パターンの計測結果



(b) 列車2の走行パターンの計測結果

図 49 走行パターンの例 (Case1)

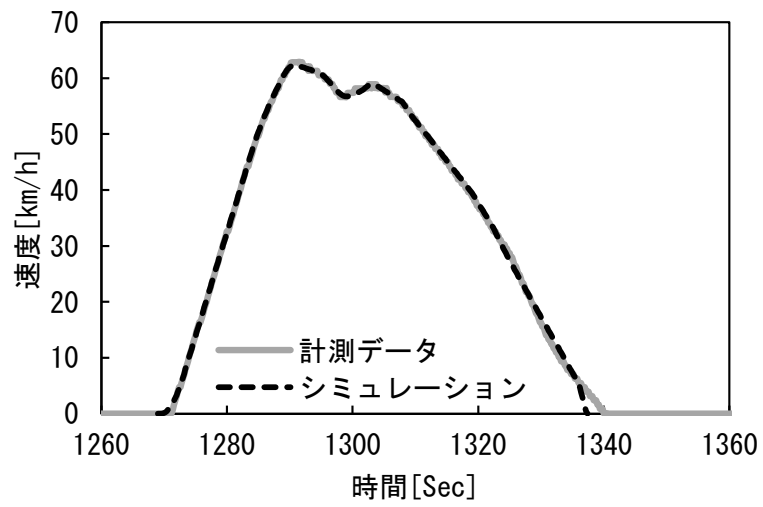
表 7 シミュレーションの入力条件

項目	内容
運転ダイヤ	計測データに基づき設定
列車特性（走行抵抗を除く）	顧客からの提示情報
走行抵抗	計測データに基づき設定
走行パターン	計測データに基づき設定
整流器特性	計測データに基づき設定
信号システム	顧客からの提示情報
地形データ	顧客からの提示情報

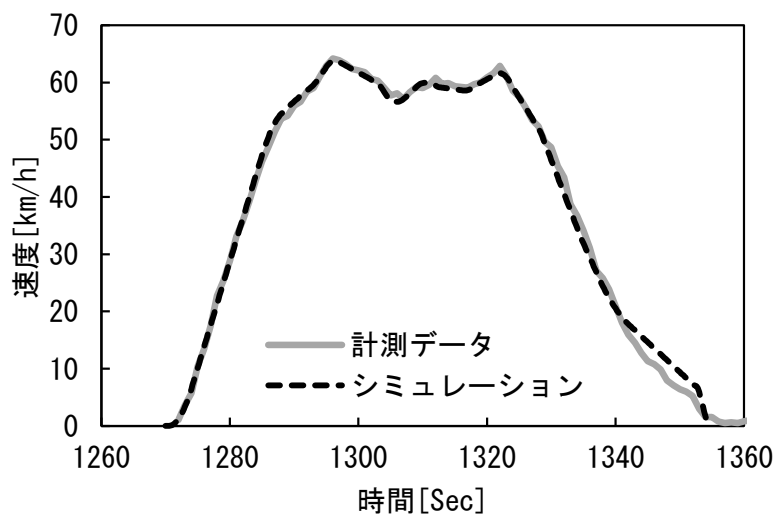
4.4 シミュレーション結果と計測データの挙動比較

4.4.1 列車の挙動比較

入力として与えた列車1、列車2それぞれの走行パターンについてシミュレーション上で適切に再現できているかどうかを確認するため、シミュレーションと計測データそれぞれの走行パターンを比較したものを図 50 に示す。また、列車1の消費電力、架線電圧の挙動について比較したものを図 51 に示す。シミュレーションと計測データの波形がよく一致していることから、4.1 節に示した a)、b)、c) について定性的な妥当性を確認した。

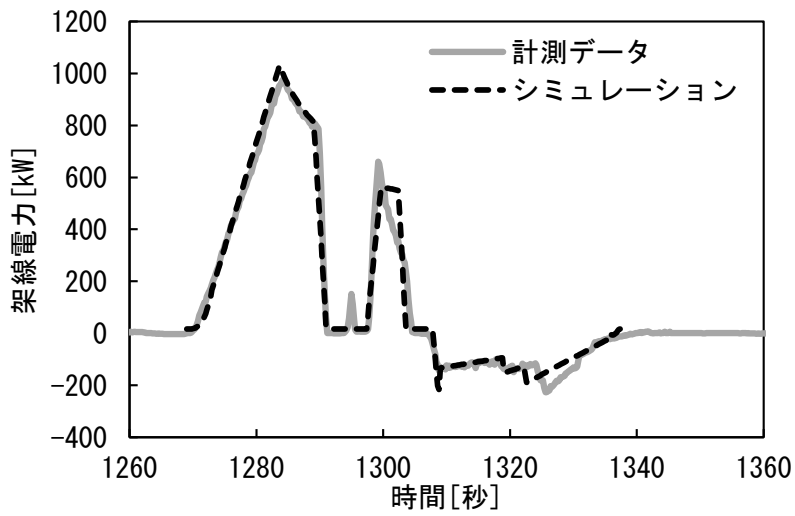


(a)列車1の走行パターン

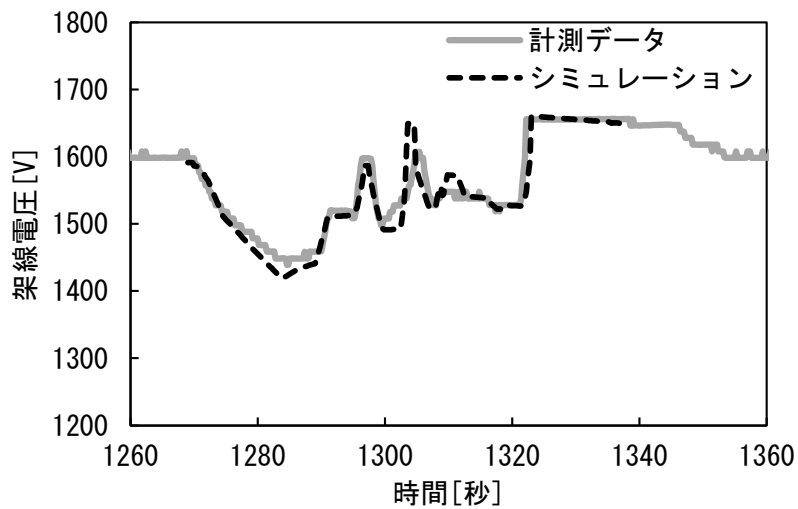


(b)列車2の走行パターン

図 50 シミュレーション結果と計測データの挙動比較その1(走行パターン)



(a) 列車1の消費電力

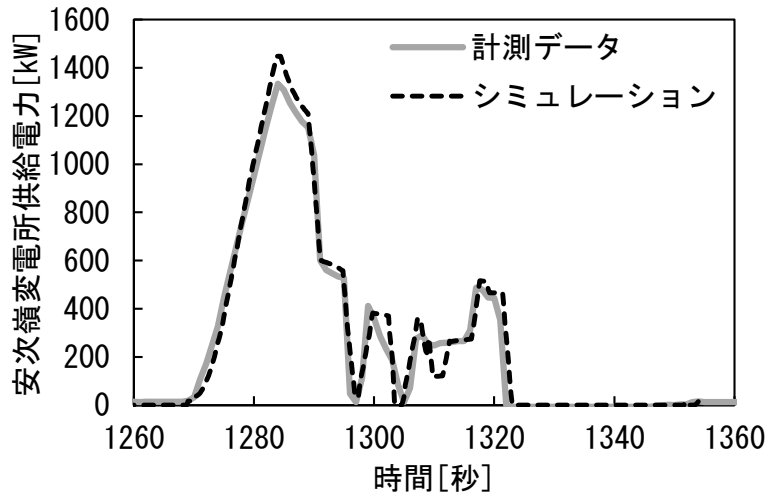


(b) 列車1の架線電圧

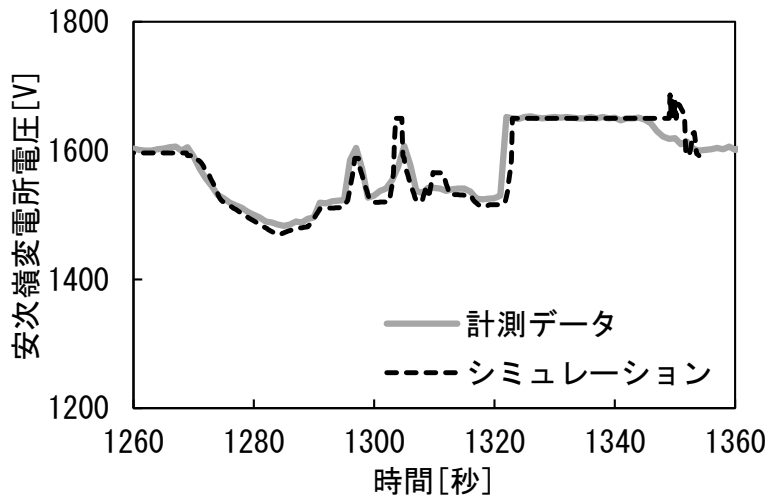
図 51 シミュレーション結果と計測データの挙動比較その2(列車1)

4.4.2 変電所の挙動比較

図 52 および図 53 に各変電所の供給電力および電圧について比較したものを示す。シミュレーションと計測データの波形がよく一致していることから、4.1 節に示した d)、e) について定性的な妥当性を確認した。

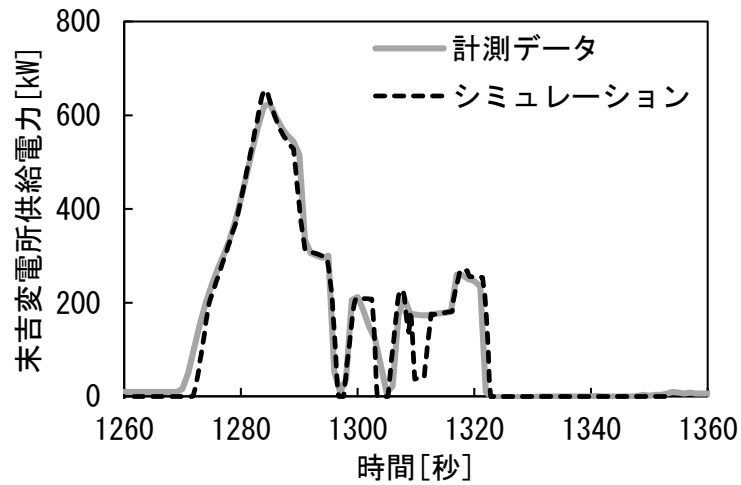


(a) 安次嶺変電所の供給電力

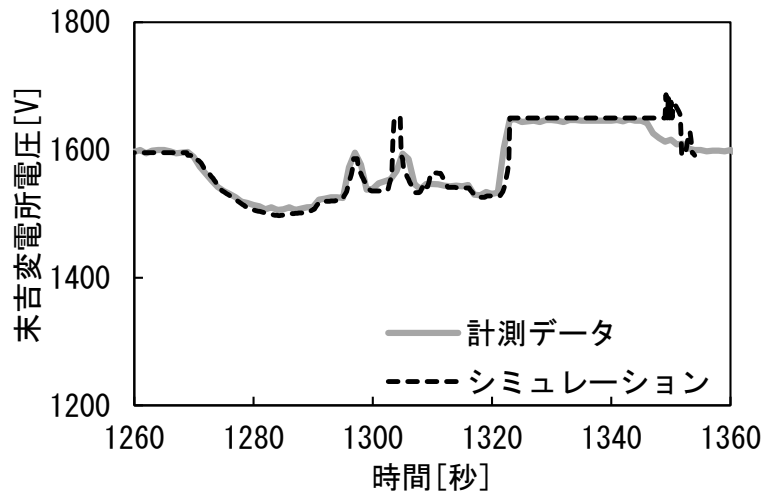


(b) 安次嶺変電所の電圧

図 52 シミュレーション結果と計測データの挙動比較その3(安次嶺変電所)



(c) 末吉変電所の供給電力



(d) 末吉変電所の電圧

図 53 シミュレーション結果と計測データの挙動比較その 4(末吉変電所)

4.5 シミュレーションの数値精度評価

表 6 に示したデータ計測区間における Case 毎の計測データと、その区間の走行を模擬したシミュレーション結果を基に、項目毎に定量化した値を導出し、計測データとシミュレーションの差分を Case 毎の誤差として算出した。また、試験全体における誤差量を基に平均誤差量を算出することとした。以下、(1)各電力量の算出方法と、(2)Case 毎の誤差算出、および平均誤差量の算出方法を示す。

4.5.1 計算誤差評価方法

(1) 電力量算出方法

各 Case における列車の力行電力量、回生電力量、および変電所の供給電力量を下記の(式 4-3)にて算出する。

$$\text{Energy}_i = \sum_{t=\text{test}_i\text{-start}}^{\text{test}_i\text{-end}} (\text{Power}_i(t) \times \text{mp} \div 3600) \quad (\text{式 4-3})$$

i: Case 番号

t: 時刻 (test_i-start・test_i-end は、それぞれ Case 番号 i の開始・終了時刻)

mp: 計測周期[sec] (シミュレーション出力データの場合、計算周期[sec])、

Energy_i: Case 番号 i における電力量[kWh]

Power_i: Case 番号 i における電力[kW]

なお、列車データの計測周期およびシミュレーション計算周期は 0.2 秒のため、(式 4-3)において mp=0.2 と設定して計算した。変電所での計測周期は 1 秒のため、(式 4-3)において mp=1 と設定して計算した。電力量の評価としては 1 秒周期の計測データで十分であるが、列車は走行パターンを模擬するためのデータとしても計測する必要があったことから、より詳細なデータが得られるように 0.2 秒で計測した。

(2) 誤差評価方法

Case 毎に計測データおよびシミュレーションの電力量を算出し、(式 4-4)により Case 番号 i の誤差 Difference(i) を評価する。また、Case 毎の誤差量を基に、平均誤差量 Difference を(式 4-5)より算出する。(式 4-5)において平均誤差量を算出する際の分子が、Case 毎の誤差の絶対値としている理由は、誤差は正負どちらにも算出されるため、絶対値としない場合には誤差が打ち消しあってしまうためである。

$$\text{Difference}(i) = \frac{\text{Energy}_m(i) - \text{Energy}_s(i)}{\text{Energy}_m(i)} \quad (\text{式 4-4})$$

$$\text{Difference} = \frac{\sum_{i=\{1\text{to}9\}} |\text{Energy}_m(i) - \text{Energy}_s(i)|}{\sum_{i=\{1\text{to}9\}} \text{Energy}_m(i)} \quad (\text{式 4-5})$$

Energy_m(i): Case 番号 i における計測電力量[kWh]

Energy_s(i): Case 番号 i におけるシミュレーション結果の電力量[kWh]

4.5.2 計測データとシミュレーション結果の比較

列車 1 と各変電所の電力量について計測データとシミュレーション結果の比較を実施した。

(1) 列車 1 について

列車 1 の電力量について、4.5.1 節(2)で示した方法により、Case 毎および平均の誤差量を評価した。力行電力量に関する結果を表 8 に、回生電力量に関する結果を表 9 にそれぞれ示す。表 8 から力行電力量に関する平均誤差量は 3.6%、表 9 から回生電力量に関する平均誤差量は 3.9%であることを確認した。

表 10 に、列車の加速度、減速度、最大瞬時電力、最大瞬時回生電力、最大電圧、最小電圧、平均電圧について全 Case の平均値と、それぞれの Case を基にした平均誤差量について示す。平均誤差量については、4.5.1 節(2)で示した方法と同様の方法により Case 毎の誤差により誤差が打消し合わないよう実施した。

表 10 から加速度の誤差は 2.7%、減速度の誤差は 6.4%、最大瞬時電力の誤差は 4.7%、最大瞬時回生電力の誤差は 4.0%、最大電圧の誤差は 2.1%、最小電圧の誤差は 2.2%、平均電圧の誤差は 0.4%である。

表 8 シミュレーションと計測データの電力量比較(列車 1 の力行電力量)

Case	計測値 [kWh]	シミュレーション [kWh]	誤差の絶対値 [kWh]	誤差 [%]
1	4.10	3.99	0.11	2.7
2	2.29	2.46	0.17	-7.5
3	3.78	3.68	0.09	2.5
4	3.11	3.15	0.04	-1.2
5	1.98	1.98	0.00	-0.1
6	3.02	3.10	0.08	-2.7
7	2.49	2.57	0.09	-3.5
8	2.41	2.57	0.16	-6.6
9	1.84	1.98	0.15	-8.1
Total	25.00	25.49	0.89	3.6

表 9 シミュレーションと計測データの電力量比較(列車1の回生電力量)

Case	計測値 [kWh]	シミュレーション [kWh]	誤差の絶対値 [kWh]	誤差 [%]
1	0.95	1.02	0.07	-7.7
2	3.19	3.34	0.15	-4.8
3	0.80	0.80	0.00	-0.2
4	0.95	0.98	0.03	-3.7
5	2.79	2.76	0.02	0.9
6	1.06	1.04	0.02	2.3
7	3.29	3.46	0.17	-5.3
8	3.34	3.49	0.15	-4.4
9	2.70	2.82	0.12	-4.3
Total	19.07	19.72	0.75	3.9

表 10 シミュレーションと計測データの比較(列車1)

項目	計測値	シミュレーション	誤差の絶対値合計 (平均誤差[%])
加速度	3.16 km/h/s	3.09 km/h/s	0.08 km/h/s (2.7%)
減速度	2.23 km/h/s	2.33 km/h/s	0.14 km/h/s (6.4%)
最大瞬時電力	959.20 kW	1003.47 kW	45.32 kW (4.7%)
最大瞬時回生電力	481.78 kW	475.82 kW	19.32 kW (4.0%)
最大電圧	1676.58 V	1710.82 V	34.71 V (2.1%)
最小電圧	1435.56 V	1403.48 V	32.07 V (2.2%)
平均電圧	1589.93 V	1583.91 V	6.02 V (0.4%)

(2) 変電所について

安次嶺変電所と末吉変電所の供給電力量について、4.5.1 節(2)で示した方法により、Case 毎および平均の誤差量を評価した。安次嶺変電所の供給電力量に関する結果を表 11 に、末吉変電所の供給電力量に関する結果を表 12 にそれぞれ示す。表 11 から安次嶺変電所の供給電力量に関するシミュレーションと計測データの誤差は平均 5.5%、表 12 から末吉変電所の供給電力量に関するシミュレーションと計測データの誤差は平均 2.9%であることを確認した。

また、それぞれの変電所についてシミュレーションと計測データの最大電圧、最小電圧、平均電圧についても比較を実施した。安次嶺変電所の比較結果を表 13 に示す。表 13 から最大電圧の誤差は 3.2%、最小電圧の誤差は 0.5%、平均電圧の誤差は 0.3%である。同様に末吉変電所の比較結果を表 14 に示す。表 14 から最大電圧の誤差は 3.6%、最小電圧の誤差は 0.3%、平均電圧の誤差は 0.3%である。以上のことから変電所の出力電圧としても精度の良い結果が得られることを確認した。

表 11 シミュレーションと計測データの比較(安次嶺変電所の供給電力量)

Case	計測値 [kWh]	シミュレーション [kWh]	誤差の絶対値 [kWh]	誤差 [%]
1	7.38	7.59	0.21	-2.9
2	3.88	4.18	0.30	-7.9
3	4.74	4.84	0.09	-1.9
4	5.01	5.21	0.20	-4.1
5	3.47	3.73	0.26	-7.4
6	4.31	4.64	0.33	-7.6
7	3.23	3.35	0.12	-3.8
8	3.75	4.13	0.38	-10.2
9	3.57	3.84	0.27	-7.5
Total	39.35	41.51	2.17	5.5

表 12 シミュレーションと計測データの比較(末吉変電所の供給電力量)

Case	計測値 [kWh]	シミュレーション [kWh]	誤差の絶対値 [kWh]	誤差 [%]
1	3.83	3.63	0.20	5.1
2	1.78	1.78	0.00	0.0
3	2.00	1.88	0.12	6.2
4	2.38	2.33	0.05	2.1
5	1.59	1.58	0.01	0.7
6	1.82	1.82	0.00	0.1
7	1.66	1.61	0.05	3.0
8	1.46	1.39	0.07	4.6
9	1.54	1.52	0.03	1.7
Total	18.05	17.53	0.52	2.9

表 13 シミュレーションと計測データの比較(安次嶺変電所の電圧)

項目	計測値 [kWh]	シミュレーション [kWh]	誤差 [kWh]	誤差 [%]
最大電圧	1657.11	1708.65	53.53	3.2
最小電圧	1480.56	1472.82	7.73	0.5
平均電圧	1594.24	1592.43	4.55	0.3

表 14 シミュレーションと計測データの比較(末吉変電所の電圧)

項目	計測値 [kWh]	シミュレーション [kWh]	誤差 [kWh]	誤差 [%]
最大電圧	1650.33	1709.34	59.01	3.6
最小電圧	1503.11	1500.91	4.67	0.3
平均電圧	1594.34	1597.41	5.11	0.3

(3)まとめ

Case1 の列車 1 と列車 2 の走行パターンについてシミュレーションと計測データを比較した。図 50 の結果から、両者は近い挙動を示していると考えられる。また、表 8 および表 9 の力行電力量および回生電力量の比較から、列車の力行電

力量の誤差は平均 3.6%、回生電力量の誤差は平均 3.9%であり、目標の 10%以内に収まっていることを確認した。さらに、表 10 に示した結果から、列車の加速度、減速度、最大瞬時電力、最大瞬時回生電力、最大電圧、最小電圧、平均電圧それぞれの項目におけるシミュレーションと計測データの誤差は 6.4%以内に収まっている。この数値は、列車 1 の電力量の精度と同等であることから、列車モデルについては、電力量だけではなく表 10 に示した各項目についても十分な精度で計算できていると考える。

Case1 の安次嶺変電所および末吉変電所の供給電力および電圧挙動についてシミュレーションと計測データを比較した。図 52 と図 53 から、両者は近い挙動を示していると考えられる。さらに、表 11 と表 12 に示した結果から、変電所の供給電力量の平均誤差は安次嶺変電所が 5.5%、末吉変電所が 2.9%であり、いずれも目標の 10%以内に収まっていることを確認した。また、表 13 および表 14 に示した最大電圧、最小電圧、平均電圧に関するシミュレーションと計測データの数値的な比較から、電圧の誤差は最大 3.6%であることを確認した。

以上の結果から、列車と変電所を考慮した電力量計算としては十分な精度で行えるものと考えられる。

4.6 計測データを用いた更なる精度向上に関する展望

鉄道システムのエネルギーに影響を与える要素として、列車の重量、機器の損失、走行抵抗がある。列車の重量はあらかじめ計測してある空車重量に空気ばねを用いた乗車率の計測結果を基に算出可能である。また、機器の損失もあらかじめ計測可能である。一方、走行抵抗は、経験式により速度の二次式で表現されているが、列車の表面に受ける走行風の影響や、車輪とレールの間で発生する抵抗などによって変化する。4.3 節において、走行抵抗は平坦かつ直線区間を惰行で走行させた際の平均減速度(走行抵抗減速度)を基に二次式を作成しているが、この作成した二次式と各計測データとの間には差分がある。これは、風の向きなどの考慮が不十分なことが原因と考えられる。シミュレーション精度を高めるためには、それらを推定しながら走行抵抗式を定めることで改善が期待できると考える。

また、変電所の電力量誤差に関しても改善の余地がある。4.5 節で示したように、変電所の電力量の最大誤差は 5.5%であるため、目標としていた誤差 10%以内は十分達成している。しかしながら、計測した 2 つの変電所の誤差を分析すると、安次嶺変電所における供給電力値の計測値はシミュレーションで得られた供給電力量よりも必ず低いが、末吉変電所における供給電力値の計測値はシミュレーションで得られた供給電力量よりも必ず高いということを確認した。

これは、計測データに対するシミュレーションの挙動が、2つの変電所において正反対ということである。このように、2つの変電所の傾向が逆転しているということは、電力分布の違いがあると考えられる。また、電力分布の偏りは、電圧降下の違いによって発生していると考えられる。この要因として、入力条件である電気回路を構成する架線やレールの抵抗が、計測時の架線やレール抵抗と不一致の可能性がある。架線やレールの抵抗はシミュレーションでは一定の値を用いているが、実際は温度やケーブルの劣化状態など環境条件によって変動している。このため、架線やレールの抵抗を計測データから得る、あるいは高精度で予測することができれば、より精度の良い計算ができると考えられる。なお、2つの変電所の合計電力量で計測データとシミュレーションを比較した結果を表 15 に示す。平均誤差は 3.0% となり、前述した 5.5% に比べて改善する結果となる。

表 15 シミュレーションと計測データの比較(変電所の合計供給電力量)

Case	計測値 [kWh]	シミュレーション [kWh]	誤差の絶対値 [kWh]	誤差 [%]
1	11.21	11.22	0.02	-0.1
2	5.66	5.97	0.30	-5.4
3	6.74	6.71	0.03	0.5
4	7.39	7.54	0.15	-2.1
5	5.07	5.31	0.25	-4.9
6	6.13	6.46	0.33	-5.3
7	4.88	4.95	0.07	-1.5
8	5.20	5.52	0.32	-6.1
9	5.11	5.35	0.24	-4.7
Total	57.40	59.04	1.71	3.0

4.7 一般的な電気鉄道への本シミュレータ適用の可能性について

本論文では、沖縄都市モノレールの計測データに基づきシミュレーション精度を評価した。この評価結果を一般的な電気鉄道にも適用可能かについて検討した。モノレールは、一般的な電気鉄道とは異なる特性を有している。表 16 に物理的な観点での違いを示す。モノレールではゴムタイヤを用いて単一の桁と呼ばれるコンクリート上を走行するシステムである。これに対して一般的な電

気鉄道では、2本のレールの上を鉄輪で走行する。これらの要素の違いは、主に列車特性の入力である走行抵抗の違いに表れる。また、電気を供給する架線についても、モノレールでは第3軌条と呼ばれる電力線により供給されているのに対して、一般的な電気鉄道では、空中に張られた架線から電力が供給される。これらは、架線やレールなどの抵抗の違いに表れる。これらのパラメータは、いずれもシミュレーションでは入力値であるため、適正な入力データを得ることができれば、一般的な電気鉄道においても、沖縄都市モノレールの計測データと比較した場合の精度と同等の精度が得られると考える。また、4.6節で述べたように、これらのパラメータをより精度よく計測し、シミュレーションの入力条件に反映させることで更なる精度向上につながると考える。

表 16 モノレールと一般的な電気鉄道との比較

	モノレール	一般的な電気鉄道
駆動方法	電力供給によるモータ駆動	電力供給によるモータ駆動
走行軌道	コンクリート桁	2本のレール
車輪	ゴムタイヤ	鉄輪
電力供給方式	第3軌条方式	架線あるいは第3軌条方式

5. まとめ

本研究の結論と、今後の課題について示す。

5.1 結言

本研究では、以下の結論を得た。

1. 電気鉄道システムを模擬した電気回路の計算方法について

- (1) 2.1 節および 2.2 節において、電気鉄道システムを模擬した電気回路について、一般的な電気回路との違いと、構成する要素である変電所と列車のモデル化方法についてまとめた。
- (2) 2.3 節において、電気鉄道システムを模擬した電気回路の計算方法をまとめた。2.4 節において、2.3 節で述べた計算方法(2.5 節との比較のため従来方法と定義する)で発生する収束失敗の問題点として、(a)ハンチング(b)状態バック(c)停滞(d)未到達の 4 つを挙げ、その問題が起こるメカニズムをまとめた。
- (3) 2.5 節において、2.4 節で示した (a)ハンチング(b)状態バック(c)停滞(d)未到達それぞれの現象に対して、収束失敗を解決する方法を提案した。
- (4) 2.6 節において、14 ケースの数値シミュレーションを実施し、2.3 節で述べた従来方法において収束失敗が多発するケースにおいても、2.5 節で提案した方法を使うことにより、収束失敗が 0 となることを確認した。さらに、平均反復回数も従来方法と同等以下となることを確認した。
- (5) 上述した成果により、鉄道システムを模擬した電気回路を高精度に計算する方法の確立ができたと考える。

2. 電気鉄道システムの挙動を再現するシミュレーションモデルについて

鉄道システムの時々刻々の挙動を再現するために、1. で述べた電気回路の計算方法に加え、運行ダイヤに基づき路線に在線している列車を管理する運行管理システム、前の列車との間隔を制御する信号システム、運転士の挙動を模擬するとともに、定められた列車性能に基づき列車を走行させるモデルを、論理モデルおよび物理モデルにて構成し、それらを接続するための計算フローを定義した。これにより、鉄道システムの時々刻々の挙動を再現できるシミュレータを構築した。

3. 電気鉄道シミュレーションの精度検証について

- (1) 2013 年に沖縄都市モノレールで計測したデータを基に、1. で述べた電気回路の計算方法と、2. で述べたシミュレーションモデルを用いたシミュレ

ータの電力計算の精度検証を行った。

- (2) 4.3 節において、精度検証を行うために必要な入力データと、計測データを基にした入力データの作成方法についてまとめた。
- (3) 4.4 節において、入力データとして与えた走行パターンを列車挙動モデルにて再現できていること、列車の架線電圧、電力が計測データと同等の挙動をしていることを示し、シミュレーションモデルの定性的な妥当性を確認した。
- (4) 4.5 節において、計測データとシミュレーション結果それぞれの電力量を基に実施した精度検証の評価方法を示した。
- (5) 4.5 節において、列車の電力量に関するシミュレーションと計測データの誤差は、列車の力行電力量は平均 3.6%、回生電力量は平均 3.9%である結果を得た。また、電力量以外の項目についても比較を実施し、加速度、減速度、最大瞬時電力、最大瞬時回生電力、最大電圧、最小電圧、平均電圧それぞれの項目においても、シミュレーションと計測データの誤差は 6.4%以内に収まっていることを確認した。このことから目標の 10%以内を達成していることを確認した。
- (6) 4.5 節において、変電所の供給電力量に関する精度検証結果として、シミュレーションと計測データの誤差は、最大 5.5%となることを確認した。さらに、変電所の最大電圧、最小電圧、平均電圧についても比較し、シミュレーションと計測データの誤差は 3.6%以内に収まっていることを確認した。このことから目標の 10%以内を達成していることを確認した。
- (7) 4.6 節において、計測データを用いることによる、更なる精度向上の可能性について、走行抵抗式の改善による可能性と、架線およびレール抵抗の取得による可能性について示した。
- (8) 4.7 節にて、モノレールと一般的な電気鉄道システムとの違いを示した。また、これらの違いは、シミュレーションの入力データに反映可能であり、シミュレーションモデルの差分にはならないことを示した。これにより、モノレールで得られた精度検証結果は、一般的な電気鉄道システムへ適用した場合にも同等な結果が得られることを示した。
- (9) 以上の成果から、実用上問題ない精度で鉄道システムの電力シミュレーションが可能であることを示した。

5.2 今後の課題

本論文にて述べた計算方法とシミュレーションの精度向上に関しては、いくつかの改善の可能性があると考えている。それらについて記す。

a) 計算方法に関する改善の可能性

本論文にて提示した方法により、収束失敗を防ぐことは可能となった。その一方で、収束が遅い現象については、パラメータである K の最適選択方法の考案が必要である。

b) 計算速度に関する検討

本論文にて提案した方法により、収束失敗を防ぐことが可能となり、計算の妥当性は確保した。また、平均反復回数についても従来方法と同等以下であることから、計算量の低減についても一定の成果を得た。一方で、鉄道システムの電気回路計算に適した連立一次方程式の高速解法の検討も必要と考える。

c) 一般的な電気鉄道システムに適用した場合の計算精度の数値的な評価

本論文では、モノレールでの計測結果とシミュレーション結果の比較により、電力量の計算精度を評価している。また、モノレールと一般的な電気鉄道システムとの違いは、シミュレーションの入力データに反映可能であり、シミュレーションモデルの差分にはならないことを示している。その結果、今回得られた精度検証結果は、一般的な電気鉄道システムへ適用した場合にも同等な結果が得られることを述べている。この考え方は、論理的であるが、数値的な評価をしていくことも必要と考える。

d) 精度向上を図るための方法

本論文で示した精度確認結果から、提案した計算方法およびシミュレーションモデルを適用することで、一定の精度が得られることを確認した。一方で、計測データの項目追加やリアルタイムなデータ取得により、さらにシミュレーション精度改善の可能性があることも示している。どの項目を追加することで精度改善の可能性があるのか、リアルタイムに計測したデータをどのように活用して、適正な入力条件とするのかについての検討が必要と考える。

参考文献

- [1] 交通エコロジー・モビリティ財団：“運輸・交通と環境”
- [2] JR 東日本グループレポート 2020
- [3] 東京メトロサステナビリティレポート 2020
- [4] 高木 亮, 曾根 悟, ” 駅間走行時分補正機能付直流き電シミュレーションプログラム” , 平成 2 年電気学会産業応用部門大会, pp. 65-68, 1990
- [5] 三吉 京, 上村 洋市, 金山 道王, 石橋 尚之, 関 義朗, ” 電力供給ダイナミックシミュレータの開発” , 第 34 回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム講演, pp461-pp464, 1997
- [6] Andrew Nash, Danie Huerlimann, “ Railroad Simulation Using OpenTrack” , Comprail2004, 2004
- [7] M. Turan Söylemez & S. Acıkbaz, “Multi-train simulation of DC rail traction power systems with regenerative braking” , International Conference on Computer Aided Design, Manufacture, and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems: Computers in railways IX, pp.941-950, 2004
- [8] 三吉 京, 平 政人, 長谷部 寿郎, “新しいエネルギー供給システムに対応した鉄道システム統合シミュレータ” 東芝レビューVol160, No. 9, pp. 38-pp. 41, 2005
- [9] Arnd Stephan, “OpenPowerNet - Simulation of Railway Power Supply Systems” , Comprail2008, 2008
- [10] 葛山 利幸, 高橋 邦明, 木内 浩司, 藤田 敬喜, “電力貯蔵導入による最適き電システム -軌道交通シミュレータ PETS-DC の開発” , 第 46 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号 617, 2009
- [11] 酒見 和生, 佐藤 公一, 村松 和彦, 平山 真明, 宇野 昌嘉, “鉄道システムシミュレータによる運行・電力等のパフォーマンス解析” , 第 46 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号 907, 2009
- [12] 鈴木 康之, 尾西 京太郎, 山下 博, 森田 克明, 柳井 法貴, 三竹 雅也, “省エネ検討を目的とした交通システムシミュレータの開発” , 三菱重工技報, vol. 47, no. 2” pp. 2-6, 2010.
- [13] Boris Desjouis, Ghislain Remy, Florence Ossart, Claude Marchand, Jean bigeon, Etienne Sourdille, “A new generic problem formulation dedicated to electrified railway systems” , 2015 International Conference on Electrical Systems for

- Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), 2015
- [14] Bombardier
<http://www.nowisthefuture.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BT/Bombardier-Transportation-ECO4-EnerGplan.pdf>
- [15] https://www.railps.com/fileadmin/wordpress/2017/09/RPS_EN_303_Systems-Design.pdf
- [16] 武内 陽子, 小川 知行, 森本 大観, “複数分野の協調による列車運行電力シミュレータの開発”, 運転協会誌, 2016年1月号, 2016
- [17] Mahdiyeh Khodaparastan, Ahmed Mohamed, “Modeling and Simulation of Regenerative Braking Energy in DC Electric Rail Systems”, 2018
- [18] 杉本 健, “直流き電システムのシミュレーション手法における運転時分の一定化及び反復収束計算法の改善”, 電気学会論文集 D, Vol. 119, No. 5, pp. 678-689. 1999
- [19] 森 慧志, 内田 直之, “直流電気鉄道向けき電シミュレータによるモード割り当て法によるき電回路計算の改善”, TER-10-003, 2010
- [20] 武内 陽子, 小川 知行, 森本 大観, 今村 洋一, 美濃部 晋吾, 宮口 浩一, 川村 淳也, 林田 健太郎, 島田 直人, 山野井 隆, 真鍋 慎一: “消費電力測定試験による列車運行電力シミュレータの追加検証,” 電気学会交通・電気鉄道／リニアドライブ合同研究会, TER-15-028/LD-15-019, 2015.
- [21] Tomoyuki Ogawa, Yoko Takeuchi, Hiroaki Morimoto, Tsurugi Yoshii, Yoichi Imamura and Masahisa Kageyama, “Verification of a Train Traction Power Simulator for DC Feeding System by a Commercial Operation Measurement”, Electrical Systems for Aircraft Railway Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC) International Conference on, pp. 1-6, 2016
- [22] FABEL: <https://www.enotrac.com/en/software-tools/fabel.php>
- [23] eTraX: <https://etap.com/ja/solutions/railways>
- [24] ELBAS: https://www.rail-ps.com/fileadmin/wordpress/2017/09/RPS_EN_303_Systems-Design.pdf
- [25] 鈴木 基也, 宮内 努, 中村 恭之, “鉄道統合評価システムの開発” 第48回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号 103, 2011

- [26] グローバルな鉄道インフラの最適化を支援する「鉄道統合評価システム」はいたつく 2012-1, pp. 15-pp. 16, 2012
- [27] Mikihiko Hata, Tsutomu Miyauchi, Atsushi Oda, Yutaka Sato “Evaluation technology for Energy Consumption and Traffic Volume on Railway Traffic Systems and Hitachi’ s Energy-saving Efforts” , Hitachi Review, Vol. 61, No. 7, pp. 319-324, 2012
- [28] Tsutomu Miyauchi, Motonari Suzuki, Tetsuya Kato, Hirotaka Takahashi, “Improvement of DC railway simulation using history of convergence calculation”, IEEJ Journal of Industry Applications Vol. 9, No. 5, pp. 486-pp. 496, 2020
- [29] Tsutomu Miyauchi, Kenji Imamoto, Keiko Teramura, Hirotaka Takahashi, “Evaluating the Accuracy of Railway Total Simulator Compared with Actual Measurement Data”, IEEJ Journal of Industry Applications Vol. 7, No. 5, pp. 416-pp. 424, 2018
- [30] 宮内 努, 鈴木 基也, 小田 篤史 : 鉄道統合評価システムの開発と鉄道システム省エネ技術への取り組み, 自動車技術 66(10), pp. 73-78, 2012-10-01
- [31] T. Miyauchi, K. Tokuyama, H. Takahashi, T. Kuroshima, “Preparations for Development of Energy Management System Integrating Wayside Devices and On-board Systems—Accuracy Testing of Railway Total Simulator based on Energy-use Analysis of Okinawa Urban Monorail Line”, Hitachi Review Vol. 63, No. 10, pp. 684-689, 2014
- [32] 宮内 努, 徳山 和男, 黒島 隆, “沖縄都市モノレールにおけるエネルギー使用実態分析と鉄道統合評価システムの精度検証” , Cybernetics : quarterly report, vol. 19(3), pp. 32-35, 2014
- [33] 吉井 剣, 森本 大観, “直流電鉄変電所用 12 パルスシリコン整流器の出力特性”, 平成 25 年電気学会全国大会, 5-104, pp. 180-pp. 181, 2013,
- [34] 運転理論研究会編著, “運転理論” , 1992

謝辞

博士論文執筆にあたり、筑波大学 櫻井鉄也教授には多大なるご指導を賜ったことを御礼申し上げます。また、主査を務めていただいたシステム情報系 高橋大介 教授、副査のシステム情報系 河辺徹 教授、額田彰 教授、二村保徳 助教、数理物質系 照井章 准教授には中間審査および予備審査などを通してアドバイスいただいたことに感謝申し上げます。

また、著者の本論文に関するすべての業績は、(株)日立製作所での研究開発による。関係者に対して、心よりの御礼を申し上げます。

特に、鉄道統合シミュレーションの開発においては、戸次圭介氏をはじめとして様々な方よりアドバイスいただいた。また、開発当初の構想から、一丸となって開発を進めてきた著者の同僚である鈴木基也氏にも改めて御礼を申し上げます。

沖縄都市モノレールでの計測においては、岩滝雅人氏、中澤慶光氏の強力なリーダーシップを基に計測に至った。計測活動では、高橋弘隆氏、徳山和男氏、渡邊大輔氏をはじめとした関係者の強力なご支援を賜ることで、データ計測が実施できた。改めて御礼を申し上げます。また、沖縄都市モノレール株式会社の方々には、夜間におけるフィールドの提供を始めとして様々な点についてご協力ご支援を賜ったことをここに記すとともに、感謝の言葉を述べたい。

その他、著者が所属する輸送システム制御研究部の皆様には、博士取得のため快くサポート頂いたことについて感謝を申し上げます。

最後に、私の 2 人の子どもには博士取得活動のため、家事など協力していただいた。ありがとうと伝えたい。両親には、再三自宅に来ていただき支援いただいた。感謝を申しあげたい。また、亡き妻にもこれまでの会社生活における多大なる支援をいただいたことを感謝したい。

研究業績

1. 査読付き論文

- [1]宮内 努, 伊藤 祥司, 張 紹良, 名取 亮 : Bi-CGSTAB(L)法におけるLの動的選択について, 日本応用数学会論文誌 11(2), pp. 49-62, 2001
- [2]加藤 学, 藤原 正康, 宮内 努 : 都市交通事業価値評価のための対話的可視化シミュレータの開発, 電子情報通信学会論文誌 D, 2017
- [3]Tsutomu Miyauchi, Kenji Imamoto, Keiko Teramura, Hirotaka Takahashi : Evaluating the Accuracy of Railway Total Simulator Compared with Actual Measurement Data, IEEJ Journal of Industry Applications, 2018 Volume7, No. 5, pp. 416-424, 2018
- [4]Tsutomu Miyauchi, Motonari Suzuki, Tetsuya Kato, Hirotaka Takahashi : Improvement of DC railway simulation using history of convergence calculation”, IEEJ Journal of Industry Applications, 2020 Volume9, No. 5, pp. 486-496, 2020

2. 発表

- [1]坂下 修, 天野 岳彦, 宮内 努 : 遅れを最小化する列車群制御方式の開発, 平成 12 年電気学会産業応用部門大会, pp. 843 - pp844 (2000)
- [2]宮内 努, 豊田 瑛一, 江守 昭彦, 大村 哲朗, 島宗 亮平, 野元 浩 : ハイブリッド動力システム評価用走行シミュレータの開発, 平成 16 年電気学会産業応用部門大会
- [3]大村 哲朗, 島宗 亮平, 野元 浩, 杉田 洋一, 宮内 努, 西野 尊善, 豊田 瑛一 : ハイブリッド鉄道列車システムの開発:試験列車 NE トレインにおける取り組み Development of Hybrid Railway Vehicle : An Approach on Performance Verification Train 'ne@train', 電子情報通信学会技術研究報告, 2008-12-12, 一般社団法人電子情報通信学会
- [4]鈴木 基也, 宮内 努, 中村 恭之 : 鉄道統合評価システムの開発, 第 48 回鉄道サイバネシンポジウム, 2011
- [5]藤原 正康, 宮内 努 : 鉄道導入効果評価システムの開発, 平成 26 年電気学会全国大会, 2014
- [6]横田 将堯, 宮内 努, 水口 芳樹, 藺田 秀樹 : 1616 運転エネルギー測定データを用いた省エネ運転パターン作成手法の検討 1616 A Study of Energy Saving Running Profile Based on Actual Driving Energy Data, 鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail)講演論文集 2015(22), "1616-1"-1616-4", 2015-12-08, 一般社団法人日本機械学会

- [7]鈴木 基也, 宮内 努, 小熊 賢司, 奈須 真吾 : 鉄道エネルギーマネジメント評価設備の開発, pp. V-265-V-268, 平成 28 年電気学会産業応用大会, 2016
- [8]加藤 学, 藤原 正康, 宮内 努 : 鉄道新設評価のための対話的可視化ツールの開発, 第 53 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 2016
- [9]寺村 佳子, 今本 健二, 宮内 努, 高橋 弘隆 : 鉄道における GPS 測定データを用いた供給電力予測, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, 2017
- [10]宮内 努, 鈴木 基也, 加藤 哲也, 北島 工, 小島 慶太, 柴田 直樹 : 交流 AT き電シミュレーションモデルの開発, 平成 30 年電気学会全国大会, 2018
- [11]山田 隆亮, 佐藤 達広, 小熊 賢司, 宮内 努 : 線形計画法を用いた省エネ鉄道ダイヤ実時間作成方法の評価 (情報システム研究会 知識抽出技術と情報システム, その他一般), 電気学会研究会資料 IS 2018(1-15・17-20), pp. 13-16, 2018-03-22
- [12]木村 祥太, 宮内 努, 小熊 賢司, 高橋 弘隆, 寺村 佳子 : 列車運行時のレール対地電圧を計算可能なレール対地電圧計算システムの開発, 令和元年電気学会全国大会, 2019
- [13]Shota Kimura, Tsutomu Miyauchi, Kenji Oguma, Hirotaka Takahashi, Keiko Teramura : Development of simulation model for calculating rail potential during train running, The ICEE2019(International Council on Electrical Engineering Conference 2019), 2019
- [14]木村 祥太, 宮内 努, 小熊 賢司, 高橋 弘隆, 寺村 佳子 : VLD に対応したレール対地電圧計算方法の開発, 2019 年電気学会産業応用部門大会, 2019
- [15]吉永 孝, 橋本 慎, 宮内 努, 加藤 哲也 : 列車位置情報を活用した電力貯蔵装置の制御方法, 令和 2 年電気学会全国大会, 2020
- [16]Shota Kimura, Tsutomu Miyauchi, Kenji Oguma, Hirotaka Takahashi, Keiko Teramura : Rail Potential Calculation Model for DC Railway Power Supply Equipped with Voltage Limiting Device, EPE2020(21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering), 2020
- [17]吉永 孝, 西 健太郎, 橋本 慎, 宮内 努 : 地上・車上間連携による省エネ制御の開発, 第 57 回鉄道サイバネシンポジウム論文集, 2020

3. その他諸報告

- [1]宮内 努, 鈴木 基也, 小田 篤史 : 鉄道統合評価システムの開発と鉄道

システム省エネ技術への取り組み, 自動車技術 66(10), pp. 73-78, 2012-10-01

[2]宮内 努, 徳山 和男, 黒島 隆 : 沖縄都市モノレールにおけるエネルギー使用実態分析と鉄道統合評価システムの精度検証, Cybernetics : quarterly report 19(3), pp. 32-35, 2014-07-01

[3]宮内 努, 徳山 和男, 高橋 弘隆, 黒島 隆 : 地上車上を連携したエネルギーマネジメントシステムの開発に向けた取り組み : 沖縄都市モノレールにおけるエネルギー使用実態分析と鉄道統合評価システムの精度評価 (特集 鉄道システム), 日立評論 96(9), pp. 594-597, 2014-09

4. 特許・発明

主筆 44 件出願 (27 件特許化), 共筆 82 件 (44 件特許化)

主筆特許化済み 27 件および近年の主筆出願特許 (公開済) 3 件を示す。

[1]宮内 努, 前川 景示, 永田 剛士, 関野 眞一 : 列車群制御システム, 列車群制御方法, 車上 AT0 装置及び地上制御装置, 特許 03854071, 特願 2001-000662

[2]宮内 努, 伊藤 智道, 長洲 正浩, 嶋田 基巳 : エネルギー送受制御システム及び鉄道車両駆動システム, 並びに鉄道車両, 特許 04156426, 特願 2003-098235

[3]宮内 努, 長洲 正浩, 北林 英朗, 石田 啓二, 佐藤 裕, 高橋 広考 : 列車制御システム, 車上通信ネットワークシステム, 及び列車制御装置, 特許 04225233, 特願 2004-110617

[4]宮内 努, 長洲 正浩, 前川 景示, 石田 啓二 : 列車制御システム及び地上システム, 特許 04225254, 特願 2004-228778

[5]宮内 努, 豊田 瑛一 : ハイブリッド鉄道車両 特許 04340614, 特願 2004-282936

[6]宮内 努, 嶋田 基巳, 豊田 瑛一 : 車両, 特許 04624202, 特願 2005-211493

[7]宮内 努, 嶋田 基巳, 豊田 瑛一 : 駆動システム, 特許 05043162, 特願 2010-173679

[8]宮内 努, 石田 誠司, 長洲 正浩, 仲田 清, 佐藤 裕, 前川 景示 : 編成車両の車上装置およびそれを搭載した編成車両を運行させる地上システム, 特許 04640087, 特願 2005-289501

[9]宮内 努, 嶋田 基巳 : 燃料補充システム, 特許 04779562, 特願 2005-299547

[10]宮内 努, 豊田 瑛一, 篠宮 健志 : 車両駆動システム,

特許 04830448, 特願 2005-313677

[11]宮内 努, 小熊 賢司, 永次 由英:車両制御システム, 特許 04961854, 特願 2006-170853

[12]宮内 努, 佐藤 裕, 石田 誠司, 豊田 瑛一, 嶋田 基巳:車両駆動システム, 特許 04236676, 特願 2006-242906

[13]宮内 努, 佐藤 裕, 石田 誠司, 豊田 瑛一, 嶋田 基巳:車両駆動システム, 特許 05064362, 特願 2008-301228

[14]宮内 努, 佐藤 裕, 石田 誠司, 豊田 瑛一, 嶋田 基巳:鉄道車両, 特許 05226479, 特願 2008-301229

[15]宮内 努, 嶋田 基巳, 石田 誠司, 豊田 瑛一:車両制御システム, 特許 04670827, 特願 2007-086334

[16]宮内 努, 石田 誠司, 豊田 瑛一, 嶋田 基巳, 金子 貴志:鉄道車両及び鉄道車両用駆動装置, 特許 05097687, 特願 2008-310372

[17]宮内 努, 石田 誠司, 豊田 瑛一, 嶋田 基巳:電池回路制御システム, 特許 05244554, 特願 2008-295039

[18]宮内 努, 出納 和也, 小熊 賢司, 杉田 洋一, 中西 紘一:列車制御システム, 地上車上連携制御システム, 特許 05292202, 特願 2009-153183

[19]宮内 努, 出納 和也, 鈴木 基也, 佐藤 裕:列車制御システムおよび鉄道制御システム, 特許 05023139, 特願 2009-278110

[20]宮内 努, 小熊 賢司, 佐藤 裕:列車制御システム, 特許 05635300, 特願 2010-108193

[21]宮内 努, 鈴木 基也, 菅原 俊晴, 有田 裕:車両制御システム, 特許 05537406, 特願 2010-289093

[22]宮内 努, 鈴木 基也, 中村 恭之:鉄道システム, 特許 06001350, 特願 2012-141832

[23]宮内 努, 鈴木 基也:移動体の電力管理システム, 特許 05952174, 特願 2012-257744

[24]宮内 努, 鈴木 基也, 綾田 昌高, 篠宮 健志, 寺村 佳子:駆動制御システムおよび駆動制御システムを備えた移動体, 特許 06228042, 特願 2014-044514

[25]宮内 努, 鈴木 基也, 綾田 昌高, 立原 周一:駆動システム及び電気車両, 特許 06382760, 特願 2015-066689

[26]宮内 努, 鈴木 基也, 佐藤 裕, 小熊 賢司:車両制御システム及びその制御方法, 特許 06740016, 特願 2016-116661

[27]宮内 努, 鈴木 基也, 小熊 賢司, 水津 宏志, 鈴木 一也:列車制御システム, 列車制御方法および列車の車上装置, 特許 6802091, 特願 2017-

042396

[28]宮内 努, 鈴木 基也, 小熊 賢司:き電計測システム, 特願 2016-145029, 特開 2019-188827

[29]宮内 努, 田端 宣克, 加藤 哲也, 小熊 賢司:鉄道システムの制御装置及び方法, 特願 2017-141783, 特開 2019-018824

[30]宮内 努, 安河内 大, 高橋 弘隆:電力供給システムおよび同システムの制御方法, 特願 2018-032626, 特開 2019-147447