

制御方式入門 2

本書は電気車の各種制御方式の基本的な原理から実際の主回路までに関し可能な限り楽しく、そして解り易く解説した本です。本書を通して電気車の制御方式に少しでも興味を持っていただければ幸いです。

御注意

本書の内容は個人的に調査したものであり、本書に登場する関係各機関等はこの内容に関し一切関知しておりません。本書の内容に関し電気品メーカー、鉄道会社等現業機関への問い合わせ等は厳にお控え下さいますようお願いするとともに、著者はその結果に関して一切の責任を負わない旨予めご了承ください。

はじめに

本書は電気車の各種制御方式の基本的な原理に関し可能な限り楽しく、そして解り易く解説した本です。楽しく読んでいただくという事に主眼を置いて書かれていますので内容的にはやや厳密さを欠く箇所があるという事をご了承下さい。この本を通して制御方式に少しでも興味を持っていただければ幸いです。

説明に際しては極力実際の車両の主回路を例示し、具体的に説明するようにしています。また、国内で用いられている制御方式を中心に解説しているため、海外では普及しているものの国内では用いられない制御方式に関しては基本的に説明しておりません。本書では正常動作時の主回路の動作を中心に説明しており、制御回路及び異常発生時の保護回路・切り離し回路に関する説明は少な目となっておりますのでご了承ください。

尚、筆者の浅学無知により事実誤認、誤り、解り難い箇所等ございましたら指摘して頂ければ幸いです。

本書の構成と読み方

本書は十章から構成されています。

これらのうち第一章から第四章までは基礎的な事柄に関し説明しています。第一章は「電気車の基礎」として電気車及び電気鉄道に関し極めて基本的な事柄を説明しています。第二章では制御方式の進歩、歴史を具体的な車両・系列を挙げつつ紹介しています。第三章では制御方式の理解に当たって必要な基礎的な物理及び数学の法則を説明しています。第四章では制御方式を理解するのに必要な基礎的な電気の理論・法則を説明しています。これらの章に関しては必要に応じ適宜御覧になる事をお勧めします。

第五章から第七章までは直流機の制御方式に関し説明します。第五章では直流機の原理及び特性を説明します。第六章では直流機の制御方式のうち抵抗制御及びその発展型に関し説明します。第七章では直流機の制御方式のうち主回路チョップ制御に関し説明します。

第八章と第九章では近年主流となっているVVVFインバータ制御に関し説明します。第八章ではVVVFインバータ制御で用いられる誘導電動機に関しその原理及び特性を説明します。第九章ではインバータ制御に関し説明します。本章ではインバータ制御の最近の動向も紹介しています。

最終第十章では交流電気車及び交直流電気車に関し説明します。

巻末には参考文献リスト及び索引を設けています。当然ではありますが本書は存在する制御方式の全てを説明しているという訳ではありません。制御方式に関し更なる理解を深めるためにはこれらの参考文献を紐解いてみる事をお勧めします。また、索引を充実させておりますので必要に応じて御利用ください。

それではお楽しみ下さい。

目次

第一章	電気車の基礎	7
1.1	電気鉄道の基礎	8
1.2	電気方式	8
1.3	制御方式の分類	9
1.4	編成組成	10
1.5	補機類	11
1.6	ブレーキ	12
1.7	電気車の運転	13
1.8	フェイル・セイフ	13
第二章	電気車の制御方式の歴史	15
2.1	車両技術の方向性	16
2.1.1	車体の軽量化	16
2.1.2	制御方式の省エネルギー	16
2.1.3	省保守	16
2.2	旧性能車の時代	17
2.3	新性能車	18
2.4	回生車	18
2.5	交流電気車	18
2.6	チョップ制御	19
2.7	VVVF インバータ制御	19
2.8	PWM コンバータ	20
2.9	制御方式の将来	20
第三章	基礎数学・物理	21
3.1	数学	22
3.1.1	微分・積分	22
3.1.2	三角関数	22
3.1.3	フーリエ展開	23
3.1.4	ベクトル	24
3.2	力学	24
3.3	電子材料	25
3.3.1	導体・絶縁体	25
3.3.2	半導体	25
3.4	電磁気学	26
3.4.1	フレミングの法則	26
3.4.2	右ねじの法則	26
3.4.3	電磁誘導の法則	26
第四章	電気電子の基礎	29

4.1	電圧・電流	30
4.2	抵抗	30
4.2.1	オームの法則	30
4.2.2	抵抗の接続	30
4.2.3	電力	31
4.3	回路の基本法則	31
4.4	直流と交流	32
4.5	受動素子	32
4.5.1	コンデンサ	33
4.5.2	コイル	33
4.5.3	受動素子と電力	33
4.6	変圧器	34
4.6.1	変圧器	34
4.6.2	直流変流器	34
4.7	半導体素子	35
4.7.1	ダイオード	35
4.7.2	トランジスタ	36
4.7.3	集積回路	36
4.8	パワーエレクトロニクス	36
4.9	電気車の電気機器	37
4.10	回路図記号	37
第五章	直流機	39
5.1	直流機の基本原理	40
5.2	直流機の構造	40
5.2.1	電機子鉄心	40
5.2.2	電機子巻線	41
5.2.3	電機子巻線の種類	43
5.2.4	整流	43
5.2.5	固定子	44
5.3	直流機の特長	46
5.4	発電制動	48
5.5	回生制動	49
5.6	複巻電動機	50
第六章	抵抗制御	51
6.1	抵抗制御の基本	52
6.1.1	抵抗制御	52
6.1.2	直並列制御	52
6.1.3	弱め界磁制御	53
6.1.4	直接制御と間接制御	54
6.1.5	手動進段と自動進段	54
6.1.6	減流遮断	55
6.1.7	主制御器	55
6.1.8	バーニア制御	55
6.1.9	発電制動	56
6.1.10	主抵抗器	56

6.1.11 抑速制動	57
6.2 抵抗制御車の実際	57
6.3 複巻電動機の制御	60
6.4 界磁添加励磁制御	63
6.5 抵抗制御のこれから	64
第七章 チョップ制御	65
7.1 抵抗制御の問題点	66
7.2 チョップ	66
7.2.1 降圧チョップ	66
7.2.2 昇圧チョップ	67
7.2.3 スイッチング	68
7.3 サイリスタ	68
7.3.1 転流回路	69
7.3.2 GTO サイリスタ	70
7.3.3 素子の損失と冷却	70
7.3.4 スイッチング周波数と通流率	71
7.4 電機子チョップ制御	72
7.4.1 多相多重チョップ	72
7.4.2 フィルタ回路	73
7.4.3 電機子チョップ制御の実例	74
7.4.4 回生領域の拡大	75
7.5 AVF チョップ	76
7.6 AFE チョップ	77
7.7 4象現チョップ	81
7.8 チョップ制御の将来	84
第八章 誘導電動機	85
8.1 三相交流	86
8.2 誘導機の原理	87
8.2.1 アラゴの円盤	87
8.2.2 回転磁界	88
8.3 誘導機の構造	89
8.4 誘導電動機の特徴	90
8.5 リニアモータ	92
8.6 ベクトル制御	93
第九章 VVVF インバータ	95
9.1 インバータ	96
9.1.1 インバータの基本	96
9.1.2 パルス幅変調	96
9.1.3 スイッチング素子	98
9.1.4 装置の冷却	99
9.2 インバータ制御	100
9.2.1 主回路	100
9.2.2 制御単位	100
9.2.3 3レベルインバータ	102

9.3	インバータ制御の動向	103
9.3.1	低騒音化	103
9.3.2	純電気ブレーキ	103
9.3.3	補助電源装置との共用化	103
9.3.4	IPMの採用	104
9.3.5	装置のインテリジェント化	104
9.4	インバータ制御の今後	104
第十章	交流・交直流電気車	105
10.1	交流電気車の基礎	106
10.1.1	交流電気車の構成	106
10.1.2	主変圧器	106
10.1.3	整流器	107
10.1.4	整流回路	108
10.1.5	位相制御	108
10.1.6	脈流	109
10.2	交流電気車の制御方式	109
10.2.1	タップ切換制御	110
10.2.2	タップ間連続制御	110
10.2.3	全電圧無接点制御	111
10.2.4	位相制御による回生制動	113
10.2.5	VVVF インバータ制御	114
10.2.6	PWM コンバータ	115
10.2.7	新交通システム	119
10.3	交直流電気車	120
10.4	未来の交流電気車	120
	参考文献	121
	索引	123

第一章

電気車の基礎

本章では「電気車とは何か」から始まって電気車及び電気鉄道に関し極めて基本的な事柄に関し説明します。いずれもこの後の各章の基礎となるような事柄です。

この章の登場人物

ホシノルリ	文中ル
イネスフレサンジュ	文中イ
ミスマルユリカ	文中ユ

なぜなに電気車

ユ: おーい、みんな。集まれ〜。電気車の秘密の時間だよ¹。

ル: 集まれ。

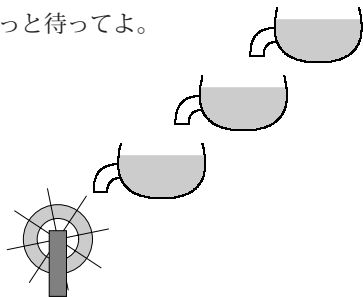
1.1 電気鉄道の基礎

ル: みんなは電気車がどやって動いているか知ってるかい。

ユ: えっ？おねーさん、僕、知らないや。ねえねえ、どうやって動いているのかなあ。

ル: まあそれはいいけれどね。じゃ電気車の走る仕組みについて説明してあげましょう。さあこっち。ほら早く。

ユ: ちょっと待ってよ。



ル: この中で、最も位置エネルギーが高いのはどれ分かる？

ユ: えっ？どれだかわかんないや。僕、なにしろうさぎだしい☆

ル: 一番高い所にある水槽はね、丁度この水槽はパンタグラフにおける電位。これが下の水車に落ちるとこのエネルギーが電車を走らせるわけね²。

ユ: ねえねえお姉さん、下に落ちた水は、どこにいつてしまうのかなあ？

ル: これはあくまで喩え。電気には+と-があるという事は知ってるわよね。

ユ: うん。

ル: 直流の電気鉄道においては電車の上に張られている架線³が+、レールが-となっているわけ。

ユ: ええっ？レールに電気が流れているの？踏切を渡る時とかに危なくないのかなあ。

¹この前は省略(笑)。

²嘘ではありません。一応。

³なぜか業界では「がせん」と濁って読みます。明示的に示す場合には架空線(かくうせん)と呼ぶ場合もあります。ここでは架空線の他、営団地下鉄銀座線などのような第三軌条も含まれます。架空線と第三軌条とを総称して電車線といえます。

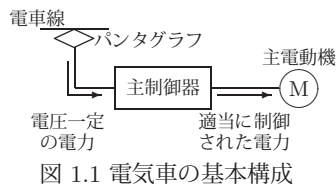


図 1.1 電気車の基本構成

イ: それは大丈夫なのよ。人や車がレールの上に乗っても人の方に電流が流れる事は無いから。架線に鳥が止まっても大丈夫でしょう？

ユ: へえ、そうなんだ。安心したよ。

ル: 電気車の主回路、つまり走るための回路の基本的な構成は図 1.1 の通りです。

イ: パンタグラフから入った電気は主制御器により制御されて、車両を走らせるためのモータである主電動機を駆動するのよ。主制御器により主電動機の回転数や回転力を制御しているのね。

ユ: ねえねえ、僕、電車とか電気機関車だったら分かるのだけれども、電気車という言葉初めて聞いたなあ。何のことなの？

ル: それは、電気を動力とした鉄道車両の事。基本的には外部から電気を取り入れてそのエネルギーでモーターを駆動して走行する鉄道車両の事ですね⁴。

1.2 電気方式

ユ: 電気車っていうのは電気で走っているんでしょ？コンセントや電池でも動くのかなあ？

ル: それは無理ね。コンセントは交流 100V だし、乾電池は直流の 1.5V しかありませんから⁵。

ユ: じゃあ、電車の電気は何 V なの？

ル: 直流であれば 1500V。交流は 20000V。新幹線は 25000V です。

ユ: すごい大きな電圧なんだね。

イ: JR ではそうね。私鉄や地下鉄、路面電車などでは直流 600V や 750V の所もあるわ⁶。

ユ: ねえ、直流と交流の違いは何なの？

ル: 直流では+と-が決まっていて常に+から-に向かう一方方向のみに電気が流れるのに対し、交流は+と-が決まっておらず、電気の流れる向きが常にくると反転している⁷。このくらいは知ってるよね。

ユ: 電池の向きを間違えると壊れちゃうけれど、コンセントはどっちに差しても動くもんね。

⁴外部から電気を取り入れない電気車として電気式ディーゼル動車やバッテリーロコなどがありますが、本書では説明しません。しかし制御方式に関してはこれらも基本的に同様の物です。

⁵では電池を 1000 個直列にすれば電車が走るかということ、そのようなことはなく、電流容量が不足するため走りません。以前「鉄腕 DASH」なるテレビ番組の企画で乾電池を数千個用いて銚子電鉄の車両(電車線電圧 600V)を走らせたという話を聞いたことがあります。

⁶直流 600V 区間としては多くの路面電車や営団銀座線、丸の内線などが、750V 区間としては大阪市営地下鉄の第三軌条各線や横浜市営地下鉄などがあります。

⁷詳細は第 4.4 節参照

表 1.1 電気方式の比較

	長所	短所	主な用途
直流	車載機器が簡素	地上設備が複雑で、数も多く必要	運転本数の多い路線
交流	地上設備が簡素なもので済み、設置箇所も少ない	車載機器が複雑	運転本数の少ない路線

ル：その通りですね。

イ：一般に電気車の電気機器は直流で動作するため、交流電気車ではパンタグラフから取り入れる交流を直流に変換する必要があります。従って車両にはそのための機器が増えるという事になります⁸。

ユ：機械が増えると、電車が重くなっちゃうね。

ル：そうですね。その代わり、**交流電化**においては電圧が高いため発電所からの電力を電車線に供給する変電所の数が少なくて済みますし、変電所の設備も簡素な物で済みます。従って車両は複雑で高価になりますが地上設備のコストは抑えられます。

イ：**直流電化**は全く逆の特徴を持っているの。つまり、車両には機器が少なくなる代わりに地上設備が面倒になるの。だから運転本数の多い路線では直流電化が、少ない線区では交流電化が用いられるのね。これらの特徴をまとめると表 1.1 のようになるわ。

ユ：でも、同じ JR でも直流の所と交流の所があるんだよね。この切れ目ではどうするのかなあ。電車を取り換えないといけないのかな？

ル：そんなことはありません。もちろん、乗り換える場合もありますが、直流区間も交流区間も走れる電車があるので問題ありません。

ユ：それなら乗り換えないで済むから便利だね。

ル：直流区間のみを走行できる電気車を**直流電気車**、交流区間のみを走行できる物を**交流電気車**、両方で使える物を**交直流電気車**と呼びます。

イ：機関車で牽引する客車列車や貨物列車の場合には機関車を交換する事で直流区間と交流区間を直通出来るけど、電車の場合にはそうは行かないわよね。だから交直流電車が用いられるわ。勿論交直流の機関車もあるわ。

1.3 制御方式の分類

ユ：ねえねえお姉さん、電気車の制御方式にはどんな種類があるのかなあ。いろいろあるの？

ル：それは少々厄介な問題で、一口に分類する事は不可能です。まずは駆動力を生み出す源となるモーターである主電動機の種類で分類することが可能です。主電動機の種類は大きく**直流電動機**と**交流電動機**とに分類できます。

ユ：これらは主電動機に入れる電気が直流か交流かっていう違いなんだよね。

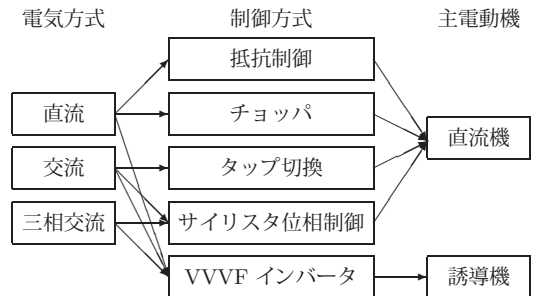


図 1.2 制御方式の分類

ル：その通りです。でも、電気車の運転に適した特性を持っている電動機は直流機、中でも特に直流直巻¹⁰電動機であったという事から、電気車の誕生以来その主電動機としては長い間に渡って直流機が主流でした。

ユ：じゃあ、交流電動機は使われないの？

ル：でも、1982年に直流機に比べ保守上遙かに有利な**交流誘導電動機**による制御方式が登場して、現在はこちらが主流になっています。

イ：直流機の制御方式は大きく**抵抗制御**と**主回路チョップパ制御**とに分類可能。この他に電気方式が交流である場合のみに使用される**タップ切換制御**や**位相制御**などもあるわ。

ユ：ふーん。

イ：一口に抵抗制御、チョップパ制御と言ってもこれらを更に細分化する事が可能。抵抗制御にはこれを基本に改良を加えた**界磁チョップパ制御**¹¹や**界磁添加励磁制御**などもあるし、チョップパ制御にも基本である**電機子チョップパ制御**の他、その改良型である**AVF チョップパ**、**AFE チョップパ**、**4象限チョップパ**があるの。

ユ：ふ〜ん。なんか難しいけどたくさんあるんだね。じゃあ、交流電動機の制御方式にはどのような物があるのかなあ。

ル：交流電動機にもまた幾つかの方式がありますが、鉄道の主回路において用いられるのは**誘導電動機**を**VVVF インバータ**により駆動する方式のみです。

イ：この他の交流電動機には**同期電動機**や**整流子電動機**があるけれど、国内で鉄道用に実用化されたのは**誘導機のインバータ制御**だけ¹²。

通過する間に車両側で電気方式を切替える車上切換が一般的です。過去には北陸本線米原-田村間のように一駅の無電区間を設け蒸気機関車又はディーゼル機関車で牽引で間を繋ぐ接続も行われていました。本書は車両に関し説明することを目的としているため交直接続に関する詳細は割愛します。

¹⁰「ちよくまき」と読む流儀もあります。

¹¹界磁チョップパ制御は分類としてはチョップパ制御ではなく抵抗制御に含まれるという事に注意して下さい。

¹²海外では主電動機が整流子電動機や同期電動機の電気車が実用化されています。代表的な例としてはフランスの TGV-A は同期電動機・電流型インバータ駆動です。

⁸図 10.1(106 ページ) 参照。

⁹交直接続には地上切換と車上切換がありますが地上切換は現在では東北本線黒磯駅で行われているのみであり、無電区間を設けこを惜性で

表 1.2 電動車比率の例

M車比	MT比	主な系列
100%	1:0	新幹線 0系, 500系、近鉄 21000系
80%	4:1	営団 5000系 (東西線)、東急 8500系
75%	3:1	新幹線 700系, E2系、京急 2000系
66.7%	2:1	JR東日本 E751系、阪神 9300系
62.5%	5:3	新幹線 300系、京王 6000系地上線用 8 連
60%	3:2	東急 2000系、営団 8000系、西武 6000系
57.1%	4:3	JR東日本 E653系基本編成
55.5%	5:4	JR東日本 E257系基本編成
50%	1:1	新幹線 E1系、JR221系、東武 8000系
44.4%	4:5	JR東日本 255系
40%	2:3	JR東日本 E231系、営団 06系, 07系
36.4%	4:7	JR東日本 E217系基本編成
33.3%	1:2	JR東海 373系、JR西日本 683系
28.6%	2:5	JR西日本 285系

ユ: インバータって、なんかエアコンみたいだね。

イ: エアコンのインバータも電気車のインバータも実は同じ物。直流を交流に変換する装置の事ね。このような装置は近年の半導体技術、パワーエレクトロニクス技術の進歩により実現可能となったの。VVVF インバータ制御は省エネルギー、省保守で大きなメリットがあるから、最近の新系列としてはこの方式以外はほとんど見られないと言っても良い程ね。

ユ: そういう制御方式って、直流でも交流でも同じなの？

ル: 一般に交流電気車や交直流電気車には直流電気車に交流用の機器を追加したものが多いです。交流電気車においてはタップ切替制御やサイリスタ位相制御など交流電気車でしか使えない制御方式もあります。

イ: 電気方式と制御方式、そして主電動機の種類との関係をまとめると図 1.2 のようになるわ。

1.4 編成組成

ユ: 電気機関車っていうのは一台だけとか一と大きな機関車があって、ほかの客車や貨車はそれに引っ張られるんだよね。

ル: その通りです。

ユ: 電車はたくさん繋がっているけれど、これは全部の車両にモーターがついているのかなあ？

ル: 機関車と客車・貨車による編成などのように一両、ないしは少数の動力車と多数の動力の無い車両という構成を**動力集中方式**と言います。これに対し電車のように編成中に多数の動力車が存在する構成を**動力分散方式**と呼びます。この時、編成中の全ての車両が動力車である必要性はありません。

イ: 性能、特に加減速性能では動力分散方式の方が有利ね。ただ、動力集中方式では機関車だけを交換することが可能だから多数の電気方式に対応できるとい

JR 西日本 223 系 1000 番台 (1M 方式)

営団 06 系 (1M 方式)

JR 東日本京浜東北線 209 系 (2 両ユニット)

JR 東日本山手線 205 系 (2 両ユニット)

営団 05 系チョッパ車 (1M, 2 両ユニット混成)

京浜急行 2000 系 (3 両ユニット)

新幹線 300 系 (3 両ユニット)

新幹線 500 系 (4 両ユニット)

図 1.3 編成 (ユニット) 組成

うメリットがあるわ。欧州では国際直通列車などがあり、国毎に電気方式が違っていたりするから動力集中方式の方が一般的ね。

ユ: モーターって、どこに付いているの？

ル: 車輪の付いている台車に乗せてあります。

ユ: でも、外からは見えないよね。

ル: それは、台車枠の内側に収められているからです。

ユ: 電車には一両に 4 つ軸があるよね。動力車であればこの全部にモーターが付いているの？

ル: ほとんどの場合にはそうです。稀に 4 軸中 2 軸や 3 軸にしかモーターが無い車両もあります¹³。路面電車では 2 軸しか駆動されない車両もよくあります¹⁴。

ユ: じゃあ、動力分散では編成の中のどのくらいの車が動力車なの？

ル: それは電車の車種や用途によって大きく異なります。一般的には編成中の半分をやや超える程度の車両が動力車なのですが、全部の車両が動力車の場合もありますし、逆に 1/3 かそれ以下しか電動車が無い系列もあります。

ユ: いろいろあるんだね。

ル: モーターの付いている車両を**動力車**・**電動車**若しくは**M 車**、モーターが付いていない車両は**付随車**若しくは**T 車**と呼びます¹⁵。

イ: 動力車の比率を高めると性能その他の面で有利だけど、電気品は高価な物だから動力車の比率を高めるとそれだけ電車全体の値段が高くなってしまいうわよね。従来は地下鉄のように頻繁に加減速を繰り返す

¹³ 2 軸のみにモーターが装架されている車両としては営団 02 系 02180 形などが、3 軸装架の車両としては西鉄 7000 系などがあります。

¹⁴ 路面電車では台車に一台のモーターを装架し、これにより二軸を駆動するモノモーター方式が時々見受けられます。この方式は国内の高速鉄道では国鉄 EF80 や東急 6000 系などがありましたが、近年はこの方式の新製車はありません。

¹⁵ M は Motor の頭文字。しかしなぜか気動車でも動力車のことを M 車と呼びます。T は Trailer の頭文字です。



モハ 204 形：MG、コンプレッサなどを搭載



モハ 205 形：パンタグラフ、主制御器などを搭載

図 1.4 JR205 系電車 電動車ユニット

車両では電動車比率が高い傾向にあったのだけれども、最近は低い電動車比率でも比較的高い性能が出せるようになってきたから、以前に比べ電動車比率は下がる傾向にあるわ。でも、新幹線のような特殊用途では今でも全電動車もあるわね。

ル：電車の編成中における動力車の占める割合を **M 車比** と言い、M 車と T 車の割合を **MT 比** と言います¹⁶。例えば M 車比が半分であれば MT 比は 1:1 ですわ¹⁷。

ユ：へえ。そうなんだ。ところで、電車っていうのはパンタグラフから電気を取り入れて走っているんだよね。じゃあ、山手線では、編成に一、二、三つパンタグラフがあるから、この三両が動力車なの？

ル：それは違います。パンタグラフが搭載されていないからって付随車であるとは限りませんし、パンタグラフがあるからといって動力車とは限りません。

ユ：なあんだ。つまんない。

ル：多くの電車の場合には 2 両の電動車を組にして、パンタグラフや制御装置、補機類などといった走行に必要な機器を分散させて搭載しています。このような構成を **ユニット方式** と呼びます。

ユ：なんでそうするの？

ル：ユニット方式とする事により電気品の数が半減しますよね。このため製造コスト的に有利となります。また、直流機の電気車においては発電制動の効く速度範囲が広がるという利点もあります。

イ：ほとんどの電車では 2 両ユニットだけれども、図 1.3 に示すように稀に 3 両ユニットや 4 両ユニットもあるし、1 両の電動車に走行に必要な機器を集約した 1M 方式ももちろんあるわ。単一の系列で異なるユニット両数の車両が混在している系列もあるし、交流電車ではユニット中に付随車を含む系列もあるわ。

ユ：山手線の電車も 2 両ユニットなのかなあ。

ル：はい。山手線で使用されている 205 系電車では図 1.4 のようにモハ 205 形とモハ 204 形との 2 両ユニットになっています。これらのうちパンタグラフが付いているのはモハ 205 形だけです。

ユ：じゃあ、山手線では 2 両ユニットが三つで 6 両の動力車があるんだね。

イ：そういうことね。

ユ：どのくらいの馬力なのかなあ。きっと、凄い馬力なんだろうね。

ル：凄いついていうと、どのくらい？

ユ：100 馬力とか 200 馬力とか、あ、もしかしたら一万馬力ぐらいかな？¹⁸

イ：205 系で用いられている MT61 形主電動機一台の一時定格出力は 120kW。1 馬力は 0.75kW ですから、これは 160 馬力という事になります。一両の動力車に 4 台の主電動機が搭載されていて、編成当たりの動力車は 6 両ですから合計で 24 台。従って編成全体では 2880kW、3840 馬力という事になります。

ユ：ふーん。よく解らないけれど、凄いね。

イ：ここでいう出力は自動車のエンジンの出力とは全く意味が違うから気を付けてね。

ユ：そうなの？

イ：自動車のエンジンの百何十馬力などといった出力は最大出力だけど、電気車の主電動機において表されている出力は一般に一時定格出力といって一時間の間その出力を出し続けても壊れないという意味。だから、最大出力はこれよりも大きいのね。新幹線などのように長時間連続して力行する運転を行う車両では連続定格、つまりある出力で連続して運転しても大丈夫という出力で表現されるわ¹⁹。

1.5 補機類

ユ：その 2 両とかのユニットに分散されている機械には、どんな物があるの？

ル：まずは主電動機とこれを制御するための主制御装置。これらは走るために絶対に必要ですわ。

ユ：うん。

ル：他にはパンタグラフや補助電源装置、それから圧縮空気を作るためのコンプレッサなども必要です。

¹⁶最近では動力車の全軸に主電動機を装架しない系列も少なくないため、「駆動軸比」などといった語を用いた方が厳密かもしれません。

¹⁷MT 比 = M 車比 : (1 - M 車比) で表されます。

¹⁸この時想像している値が主電動機一台当たりの出力であるのか編成全体での出力であるのかは不明です。

¹⁹この他に 30 分定格出力を用いる例もあります。

ユ: 補助電源装置っていうのは何なのかな? 電源っていうのはパンタグラフから取っているんじゃないのかなあ。

イ: パンタグラフから入ってくるのは 1500V などといった高い電圧よね。でも、電車では走らせる他にも照明や空調、信号保安装置などの電源も必要よね。

ユ: 確かに電車の中が真っ暗だったり暑かったり寒かったりしたら困るよね。

イ: これらの電源は 100V や 200V などといった低い電圧なの。だからパンタグラフからの電気をこういった電圧の電気に変えてやらなければならないの。そのために必要なのが補助電源装置。これには電動発電機 (MG) や静止型インバータ (SIV²⁰)、DC/DC コンバータが用いられるわね。

ユ: 電動発電機っていうのは電気力で発電機を回す機械なのかな?

ル: そうですけど。何か?

ユ: なんかも聞けだなぁ。

イ: でも、直流の場合には変圧器、トランスで電圧を変えることが出来ないから、モーターで発電機を回して電圧を変えたり交流を作ったりするというのが一番簡単だったのよ。今は半導体スイッチング素子を使って機械的な可動部分を無くした SIV や DC/DC コンバータが一般的ね。

ユ: じゃあ、圧縮空気っていうのは何に使うの?

ル: 最も重要な部分としてはブレーキに使われています。この他には乗降扉を開閉するのにも圧縮空気を使うのが一般的です。

ユ: ふーん。扉って、空気で開け閉めしているんだ。電動じゃないんだね。

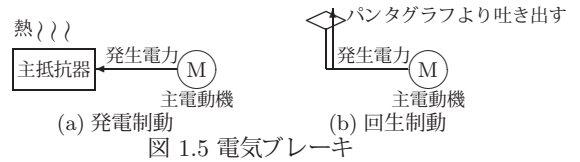
イ: ほとんどの車両では空気で開閉しているけれど、最近は電動もあるわよ²¹。この他の機器としては停電した時のバックアップのためのバッテリーもあるわ。

ル: この他、交流や交直流の車両では変圧器や整流回路などが搭載されます。

1.6 ブレーキ

ユ: 走る方の仕組みは何となく解ったような気がするのだけど、止まる仕組みはどうなっているのかなあ。

ル: 電気車においては大きく分けて二種類のブレーキを用います。一つは機械的に制輪子、ブレーキシューで車輪やブレーキディスクを押さえつけることにより制動をかける**基礎ブレーキ**、もう一つは主電動機を発電機として作用させることにより制動力を得る**電気ブレーキ**です²²。



ユ: ええっ? モーターが発電機になるの?

ル: 一般に電動機と発電機とは**相対性**を持っており、電動機は発電機として、あるいは発電機は電動機として作用させることが可能です²³。

イ: 電気ブレーキは更に図 1.5 のように**発電ブレーキ**と**回生ブレーキ**とに分類可能。これらはいずれも主電動機を発電機として作用させることにより電力を発生しているという点は共通。発電ブレーキではここで発生した電気エネルギーを主抵抗器で熱エネルギーに変えているわ。

ユ: 熱エネルギーに変えるっていうのは?

イ: 要するに捨てているのよ。

ユ: ゴミ箱ポイポイのポイってこと?

イ: そうよ。

ユ: もったいないね。分別すればリサイクルできるのに。

ル: そこで主電動機により発生した電気エネルギーをパンタグラフ等から電車線に吐き出し、他の車両に使うことにより有効利用するのが**回生ブレーキ**。現在ではこちらが一般的になっています。

ユ: ええっ? エネルギーを吐き出して、それを他の電車に使うって貰うことも出来るんだ。凄い仕組みだね。そういうことって、ナデシコには出来ないのかなあ。

イ: 残念ながらそれは出来ないわ²⁴。こんな事は**内燃機関**²⁵の鉄道車両や自動車にも出来ないし、これは電気車だけの特徴ね²⁶。

ユ: その回生ブレーキのメリットっていうのは、省エネルギーになるという事なの?

イ: それだけじゃないわ。ブレーキシューの摩擦が抑えられるというメリット²⁷があるから、結果として省保守、メンテナンスフリーに繋がるわ。それから、車両からの発熱量が少なくなるから、特に加減速が頻繁な上に熱の籠もり易い地下鉄ではトンネル内の温度上昇を抑制できるという利点もあるわ。

²²電気ブレーキはある意味自動車のエンジンブレーキに近い物ですが、大きく異なる点としてはモーターでは回生制動が可能ですがエンジンブレーキでは燃料が戻ってくる事は有り得ないという事があります。尚、ハイブリッド自動車では一般に回生制動を行っており、モーターにより生じた電力を電車線に吐き出す代わりにバッテリーに充電しています。

²³発光ダイオード (LED) と太陽電池も相対性を持っており、LED に光を当てると起電力を発生します。

²⁴宇宙空間を飛行するロケットの場合には減速するためには進行方向逆向きに運動量保存則に基づいた運動量を与えてやらなければなりません。相転移エンジンの場合には知りません (笑)。

²⁵ディーゼル機関、ガソリンエンジンなど。

²⁶電気自動車やガソリン・電気ハイブリッド車では制動時のエネルギーをバッテリーに蓄積して自車で用いることは可能です。路線バスではガスの圧力に運動エネルギーを蓄える蓄圧式回生制動も存在します。

²⁷これは発電制動にも共通するメリットです。

²⁰Static Inverter の略

²¹JR209 系電車では初期の編成を除き電動です。E231 系ではリニアモーター駆動となっています。

- ル**：一旦使ったエネルギーをまた吐き出すなんて凄い発明、誰がしたの？あなた？
- イ**：まさか。誰もそんな発明しちやいないわ。見つけたのよ。
- ル**：見つけた？制御方式を？
- イ**：電気を作ったら折角だからそれを有効活用しようと考えてるのは当然の成り行きでしょう。
- ル**：確かにその通りですね。
- イ**：電気ブレーキは速度が低下して主電動機の起電力が小さくなってきたら失効、つまり効かなくなってしまうから、こうなったら基礎ブレーキで止めるわ。
- ル**：失効速度はどのくらい？
- イ**：界磁チョップ制御や界磁添加励磁制御などの抵抗制御回生車では 25km/h 程度、発電制御やチョップ制御、VVVF 制御では 5km/h 程度よ。

1.7 電気車の運転

- ユ**：僕、電車の運転はしたこと無いんだけど、面白そうだなあ。どうやって走らせるのかな？
- ル**：実はナデシコ、すなわち宇宙船に少し似ています。
- ユ**：ええっ？ そうなの？
- イ**：ほんの少しだけだけね。
- ル**：これは電気鉄道に限らず鉄道一般に言える事なのですが、走行抵抗が非常に小さいため一旦加速すると動力を切ってもそのままではなかなか速度が落ちません。従って走っている状態から積極的に速度を落とすためにはブレーキをかけなければなりません。
- ユ**：どこが宇宙船と似てるの？
- ル**：宇宙では抵抗がありませんから一旦加速したら動力をカットしても速度は下がりませんよね。
- ユ**：そうだけ？²⁸
- ル**：宇宙船では速度を落とすためには進行方向に対し逆向きの推力を与える必要がありますが、鉄道の場合には線路と車輪との間の摩擦がありますから、これを使って速度を落とし、止めることが可能です。
- ユ**：宇宙船に似ている、って言っても、進路はどうやって決めるんだっけ？操舵輪とかハンドルとかあるんだっけ？
- ル**：鉄道では進路はレールによって決められますから、運転台から決めることは出来ません。
- ユ**：あ、そうだったね。
- イ**：鉄道では進路を設定する必要はないにしても、宇宙船と鉄道との間にこのような共通点があるという事は非常に興味深いことね。
- ユ**：ふ～ん。
- イ**：一般に加速するための操作をノッチを入れる、ノッチオンと言い、これにより推進力が加わっている状態のことを力行^{力行}と言うわ。ある程度の速度になって力行状態から推進力を遮断することをノッチオフするといい、これにより車両は惰行状態になる。惰行状態ではエネルギーを消費しないけど、走行抵抗が非常に小さいからほとんど速度は下がらない。宇宙船と同じね²⁹。
- ル**：これが鉄道が自動車や航空機などといった他の交通機関に比べエネルギー消費量が少ない理由です。
- イ**：惰行からブレーキをかけることにより速度は下がり、最終的には停止する。
- ユ**：じゃあ、電気車では加速させることとブレーキを掛けることしか出来ないの？
- ル**：その通りです。それで十分ではないでしょうか。
- ユ**：じゃあ、運転台も簡単なのかなあ。
- ル**：電気車の運転台には幾つかのスタイルがありますが、電車の運転台として最も代表的であるのはツーハンドルタイプと呼ばれるタイプです。
- ユ**：ツーハンドルということは、操作するハンドルが二つしかないの？
- ル**：そうです。一つは加速させるためのマスターコントロール、略してマスコン。これは自動車のアクセルに相当します。もう一つが減速させるためのブレーキハンドルです。
- イ**：メータには速度計の他電圧計や電流計、空気圧計などがあるわ。
- ル**：最近は一つのハンドルでマスコンとブレーキを兼ねるワンハンドル方式も増えてきています。
- ユ**：たった一つのハンドルであの大きな電車が動くの？
- ル**：その通りです。
- イ**：電車のツーハンドル方式では左手がマスコン、右手がブレーキだけど、機関車や新幹線では逆に右手がマスコンで左手がブレーキになっているわ³⁰。
- ル**：国内のワンハンドルマスコン車ではハンドルを手前に引くと力行、奥に押し込むと制動となるよう統一されています。海外では逆に押しと力行・引くと制動、若しくは縦軸式が一般的です。

1.8 フェイル・セイフ

- ル**：最後に鉄道の機器における基本的な考え方であるフェイル・セイフについて説明します。
- ユ**：ヘル・政府？ 恐怖政治のことかな？
- イ**：Fail Safe. 万が一機器が故障した時には安全な方向に機器が作用するような仕組みの事よ。

²⁹宇宙空間では抵抗が無いため一旦加速したら速度は変化しません。
³⁰この理由に関しては諸説あるのですが、操作の頻度が高くきめ細かい操作を要する方が右側に来ているとされています。

²⁸こんな艦長の下で乗務したくないという感じはしますが。

- ル**：安全な方向というのは、一般的には停止するということの意味です。
- ユ**：もし機械が壊れても、列車が止まっちゃえば大事故にはならないから安心だね。
- イ**：これは車両の制御装置や制動装置に限らず、信号保安装置など鉄道のハードウェアの様々な機器がこのような考え方で作られているわ。
- ユ**：やっぱり鉄道は安全第一じゃないとね。
- ル・ユ**：またね～!!³¹

作品紹介

機動戦艦ナデシコ

本章は TV 放映第7話「いつかお前が『歌う詩』」内「なぜなにナデシコ」を元にしています。

C.V.

ホシノ ルリ	南 央美
イネス フレサンジュ	松井菜桜子
ミスマル コリカ	桑島法子

主制御装置形式の付け方 三菱電機

※このコラムの内容は筆者の個人的な調査に基づいており、とりわけ無責任、無保証です。各種現業機関等への問い合わせは厳にお控え下さい。また、紹介している系列の全車が同型の主制御器であるとは限りません。ロット、改造等により紹介した形式とは異なっている事も多々ありますので御了承願います。

三菱電機の主制御器形式は当初は技術協力関係にあった米国ウェスチングハウス社に習った物とされています。

例1：A B F M - 10 8 - 15 M D H(営団地下鉄 3000 系:抵抗制御)

A : 自動進段 (Automatic)
 B : 制御電源が低電圧 (Battery)
 F : 界磁制御付き (Field)
 M : 多段式 (Multi Notch)
 10 : 主電動機出力 [10 馬力=7.5kw]
 8 : 主電動機台数
 15 : 電車線電圧 1500V
 M :
 D : 発電制動付き (Dinamic Break)
 H : 高速度遮断器付き (High Speed Breaker)

例2：F C M - 11 8 - 15 M R H(小田急 9000 系:界磁チョップ)

F C : 界磁チョップ (Field Chopper)
 M : 多段式
 11 : 主電動機出力 [10kW]
 8 : 主電動機台数
 15 : 電車線電圧 1500V
 M :
 R : 回生制動付き (Regenerative Break)
 H : 高速度遮断器付き

例3：M A P - 14 8 - 15 V 37(新京成 8900 系:VVVF インバータ)

M A P : 不明 VVVF を表す?
 14 : 制御容量 [10kw]
 8 : 主電動機台数
 15 : 電車線電圧
 V : VVVF を表す?
 37 : 通し番号

³¹以下略(笑)。

第二章

電気車の制御方式の歴史

本章では電気車の制御方式の歴史を具体的な車両・系列を挙げながら述べていきます。各制御方式に関する詳細は第五章以降をご覧ください。なお、参照先の章・節は省略しております。ご了承下さい。

この章の登場人物

ラビ・アン・ローズ 文中 う
 デ・ジ・キャラット 文中 で
 プチ・キャラット 文中 ぷ

2.1 車両技術の方向性

で：「電気車の制御方式の歴史」って、一体どんな歴史があるのかによー？

う：車両、更には地上設備なども含めた鉄道の歴史は、省エネルギーと省保守、この二つが大きな流れだったわ。もちろん、安全性の向上などもあるわね。

ぷ：電気を大切ににゅ。

う：省エネルギー化の目的には環境問題というのも勿論あるけれど、電気車の場合には他の理由もあるのよ。

で：どんな理由によ？

う：線路上を走っている列車全体の消費電力が少なければ電車線に電力を供給する変電所の容量も少なくて済むわ。そうなればこれらの地上設備への投資が軽減されるわよね。

で：結局お金の話かによ。これだから貧乏人は困るによ。

う：車両も地上設備も全て鉄道会社にとっては利益を上げるための投資であるという事は決して忘れてはいけない事ね。

で：鉄ヲタはそこらへんを勘違いしてる奴が多いから困るによ。お前らが写真撮ろうと同人誌書こうと鉄道会社にとっては一文の得にもならんわ。ふっふっふっ。

ぷ：切符を買って乗ってあげないとにゅ。

う：次は省保守ね。保守、メンテナンスの手間が少なければ、それだけ人件費の削減に繋がるわよね。それに、保守に要する時間が少なければそれだけ車両の稼働率も上げられるし、そのための工場設備も少なくて済むわよね。

ぷ：その省エネルギーや省保守のための技術はどう進歩してきたにゅ？

2.1.1 車体の軽量化

う：まず、省エネルギーに関しては車体の軽量化ね。

ぷ：お前その邪魔で重そうなうさみみ取ったら？

で：うさだも軽量化するによ。

う：きい〜!! あんたこそその邪魔で重そうな耳と鈴をなんとかしたら？車体の軽量化のためには邪魔で重い物を外すのではなくて、軽い材料で作るといのが一般的ね。つまり、鋼鉄の代わりにアルミやステンレスで車体を作るのよ。

ぷ：一円玉にゅ。

で：一円で電車が作れるのかによ？

う：そんな訳ないでしょ。車体を比重の軽いアルミニウムで作れば鋼製車体に比べ大幅に軽く出来るのよ。

で：ステンレスといえばスプーンやフォークによ。

ぷ：お腹減ったにゅ。

で：ホカホカご飯によ〜。

う：またあんたは食い意地張ってる。ステンレスの比重は鋼鉄と大して変わらないけれども、ステンレスは錆びないから軽量化出来るのよ¹。

で：錆びないとなんで軽量化できるのかによ？

う：普通鋼の場合には経年により腐食して薄くなってしまふから必ず腐食代を見込んで厚い材料で作らなければならないわ。でも、ステンレス車体はこの腐食代が要らないぶん薄い材料で作れるのね。

ぷ：秋葉原駅を走る電車も銀色のステンレスやアルミの電車が増えてるにゅ。

で：ゲーマーズの前の駅²を走る電車は全部アルミによ。

う：それでも普通鋼は安いし加工性が高いから優れたデザインを使えるというメリットがあるわ。

で：お前のその服ももーちょっとマシなデザインにしたらどうかによ。

う：あんたなんかそんな事言われる筋合いは無いわよ。最近では有限要素法などといった構造解析技術を駆使して最適化した設計をするから、普通鋼でもある程度の軽量化がなされているわね³。

2.1.2 制御方式の省エネルギー

う：続いては本題である制御方式の省エネルギーね。

ぷ：じゃあ今までののは前置きだったのかによ。

で：前置きが長い奴によ。

う：うるさいわね。制御方式での省エネ化のポイントは二つあるわ。一つは力行時の損失の減少。もう一つは回生ブレーキね。

で：また二つあるのかによ。

う：そうね。まずは最初の力行時の損失から説明するわ。抵抗制御の電車では定格速度以下では消費される電力の半分、もしくは1/3が主抵抗器で損失になっていたわけ。

で：損失という事は無駄になっていたっていう事によ。

ぷ：電気を大切ににゅ。

う：ところがチョップ制御やインバータ制御では主抵抗器が無いからこの損失が無くなるの。そして、回生ブレーキがあれば、ブレーキ時に吐き出された電気は他の電車により使われるわけだから、これによっても省エネルギーが図れるという事は明らかよ。

¹ ステンレスは鉄にクロムを混ぜる事により錆びにくくした合金です。

² 営団地下鉄銀座線末広町駅

³ 筆者には機械系の出身者はいませんのでこういった解析技術に関し説明することは出来ません。

2.1.3 省保守

- う:** 車両技術の方向性のもう一つが省保守。これは車両に限らないけれど、メンテナンスにかかる手間が少なければ、その分人件費を削減できるわよね。特に最近『きつい、汚い、危険』のいわゆる3K労働が嫌われる傾向にあるしね。
- で:** そーゆー面倒臭い仕事はお前がやれによ。
- う:** あーら、そーゆー仕事にはでじこの方がお似合いよ。さて、車両に関しての省保守のための工夫としてはこれまた車体のアルミ化、ステンレス化が代表的ね。
- ぶ:** それさっき聞いたにゆ。
- う:** そうよ。これらには軽量化という利点もあるのだけれども、これらの材料は腐食しないから、塗装しなくても良いというメリットもあるわ。
- で:** なんで腐食しないと塗装しなくても良いのかによ？
- う:** 普通鋼の車体を塗装するのは、腐食から保護するためだからよ。塗装する必要が無ければ手間が減るうえ、塗装のための設備も要らなくなるわ。その上塗料や有機溶媒を使わないから環境にも優しいし。
- ぶ:** でも銀色の電車ばかりだとつまらないにゆ。
- う:** だからまだ車両を塗装している会社があるのね。特に関西に多いかしら。南海電鉄のように以前は無塗装車だったのに、また塗装車に戻した会社もあるわ。
- ぶ:** 逆戻りにゆ。
- う:** じゃあ続いては電気品の省保守について話すわね。電気品で保守に手間がかかるのはまずは何と言っても主電動機の中のブラシと整流子。しかも、この部分は直流機の心臓部とも言える所よね。
- で:** 主電動機は台車の間にあるによ。
- ぶ:** 狭くて手入れをするのも大変そうにゆ。
- う:** その通り大変なのよ。だからこの保守上の難点であるブラシと整流子が存在しない誘導電動機を主電動機として用いたのがVVVFインバータ制御。
- で:** 最近の新形式はほとんど全てVVVFによ。
- ぶ:** VVVFじゃない新形式なんてあるのか。
- う:** そしてこの他に電気品において手入れしてやらなければならないのが様々な機械的スイッチの接点。取扱う電流が大きいから開閉する時に火花が飛んで汚れてくるの。だから、これらは少ないに越したことはないわ。抵抗制御では主回路を切換えるための機械的な接点が抵抗や直並列、界磁などに沢山あるの。これらの手入れもまた抵抗制御の厄介な所の一つよ。
- で:** お前も厄介者によ。
- う:** 界磁チョップ制御や界磁添加励磁制御では多少接点が減るし、電機子チョップ制御では更に接点が減るわ。そしてVVVFインバータ制御では断流器や高速遮断器を除いてほとんど無接点化出来るのよ。



図 2.1 熊本電鉄 5000 系 (もと 東急 5000 系)

2.2 旧性能車の時代

- う:** 旧性能車というのは、新性能車に対する対義語で、つまり、駆動方式は釣掛^{つりかけ}駆動、そして発電制動を使わないというのが主な特徴よ。
- で:** 発電制動を使わないという事は、基礎ブレーキ装置だけで車両を止めるによ。
- う:** そうよ。仕掛けとしては単純だけど、ブレーキ周りの保守の手間が増えるわ。しかも、車輪をロックさせて滑走させてしまうとフラット^{つりかけ}が出来てしまうから止めるのが難しいわよね。
- ぶ:** 止まる時のあの焦げ臭いニオイもイヤにゆ。
- う:** 釣掛駆動というのは主電動機と車軸との相対的な位置が固定されている構造。この方式は軌道に与える衝撃が大きいし、乗り心地も良くないわ。
- で:** 乗り心地が悪いのはイヤによ。
- う:** 主電動機の回転数を上げ難いという欠点もあるわ。
- ぶ:** 悪いところばかりにゆ。
- う:** これらの欠点を改善したのが主電動機を台車に固定する台車装架式駆動よ。これにはクイル式やカルダン式があるけど、ほとんどはカルダン駆動。
- で:** ふ〜ん。
- う:** カルダン式には車軸と主電動機の軸との位置関係から平行カルダンと直角カルダンがあるわ。直角カルダンは東急5000系などといった初期の新性能車ではよく使われたけど、今でも新製車として作られているのは相模鉄道だけ。主流は平行カルダンよ⁵。
- ぶ:** 制御方式に関しては、発電制動を使わないというのが旧性能車の特徴なのかにゆ。
- う:** その他には高速性能を稼ぐための弱め界磁制御を多用しなかったという事もあるわ。新性能車では数段階の弱め界磁制御があるけど、旧性能車ではこれが無かったり、あっても一段程度だったわ。

⁴車輪踏面の擦傷のこと。これが生じると走行中不快な音を発生し、車両や軌道に悪影響を与えます。

⁵平行カルダンは更に中空軸平行カルダンとWNカルダン、可撓継手式平行カルダンとに分類出来ます。