

モビリティイノベーションシリーズ ④

# 車両の電動化と スマートグリッド

鈴木 達也・稲垣 伸吉

編著

コロナ社

# モビリティイノベーションシリーズ

## 編集委員会

編集委員長

森川 高行 (名古屋大学)

編集副委員長

鈴木 達也 (名古屋大学)

編集委員

- 1 巻：森川 高行 (名古屋大学), 山本 俊行 (名古屋大学)  
2 巻：青木 宏文 (名古屋大学), 赤松 幹之 (産業技術総合研究所)  
上出 寛子 (名古屋大学)  
3 巻：河口 信夫 (名古屋大学), 高田 広章 (名古屋大学)  
佐藤 健哉 (同志社大学)  
4 巻：鈴木 達也 (名古屋大学), 稲垣 伸吉 (南山大学)  
5 巻：二宮 芳樹 (名古屋大学), 武田 一哉 (名古屋大学)

(2020 年 4 月現在)

シリーズ構成

- 1 巻：「モビリティサービス」 2 巻：「高齢社会における人と自動車」  
3 巻：「つながるクルマ」 4 巻：「車両の電動化とスマートグリッド」  
5 巻：「自動運転」

## 4 巻執筆者一覧 (執筆担当箇所)

編著者	鈴木 達也 (名古屋大学, II 編 4 章)
	稲垣 伸吉 (南山大学, II 編 5 章, 8 章)
執筆者	清水 修 (東京大学, I 編 1~3 章, II 編 8 章)
	藤本 博志 (東京大学, I 編 2 章)
	道木 慎二 (名古屋大学, I 編 3 章)
	伊藤 章 (株式会社デンソー, II 編 5 章)
	太田 豊 (大阪大学, II 編 6 章)
	川島 明彦 (ヤマトホールディングス株式会社, 元 名古屋大学, II 編 7 章)
	薄 良彦 (大阪府立大学, II 編 7 章)

(2020 年 11 月現在)

# 刊行のことば

人は新たな機会を得るために移動する。新たな食糧や繁殖相手を探すような動物的本能による移動から始まり、交易によって富を得たり、人と会って情報を交換したり、異なる文化や風土を経験したりと、人間社会が豊かになるほど、移動の量も多様性も増してきた。しかし、移動にはリスクが伴う。現在でも自動車事故死者数は世界で年間130万人もいるが、古代、中世、近世における移動に伴うリスクは想像を絶するものであったであろう。自分の意志による移動を英語でtravelというが、これはフランス語のtravailler（働く）から転じており、その語源は中世ラテン語のtre paliare（3本の杭に縛り付けて拷問する）にさかのぼる。昔は、それほど働くことと旅することは苦難の連続であったのであろう。裏返していえば、そのようなリスクを取ってまでも、移動ということに価値を見出していたのである。

大きな便益をもたらす一方、大きな苦難を伴う移動の方法にはさまざまな工夫がなされてきた。ずっと徒歩に頼ってきた古代でも、帆を張った舟や家畜化した動物の利用という手段を得て、長距離の移動や荷物を運ぶ移動は格段に便利になった。しかし、何といても最大の移動イノベーションは、産業革命期に発明された原動機の利用である。蒸気鉄道、蒸気船、蒸気自動車、そして19世紀末にはガソリンエンジンを積んだ自動車が生じた。そして、20世紀初頭に米国でガソリン自動車が大規模生産されるようになって、一般市民が格段に便利で自由なモビリティをもたらす自家用車を得たのである。自動車の普及により、ライフスタイルも街も大きく変化した。物流もトラック利用が大半になり、複雑なサプライチェーンを可能にして、経済は大きく発展した。ただ、同時に交通事故、渋滞、環境破壊という負の側面も顕在化してきた。

いつでもどこにでも、簡単な操作で運転して行ける自動車の魅力には抗しがたい。ただし、免許を取ったとはいえ素人の運転手が、車線、信号、標識という物理的拘束力のない空間とルールの中を相当な速度で走るからには、必ずや事故は起きる。そのために、余裕を持った車線幅と車間距離が必要で、走行時には1台につき100平方メートル近い面積を占有する。このため、人が集まる、つまり車が集まる場所ではどうしても渋滞が起きる。自動車の平均稼働時間は5%程度であるが、残りの時間に駐車しておくスペースもいる。ガソリンや軽油は石油から作られ、やがては枯渇する資源であるし、その燃焼後には必ず二酸化炭素が発生する。世界の石油消費の約半分が自動車燃料に使われ、二酸化炭素排出量の約15%が自動車起源である。

このような自動車の負の側面を大きく削減し、その利便性をも増すと期待される道路交通革命がCASE化である。CはConnected（インターネットなどへの常時接続化）、AはAutonomous（またはAutomated、自動運転化）、SはServicized（またはShare & Service、個人保有ではなく共有によるサービス化）、EはElectric（パワートレインの電動化）を意味し、自動車の大衆化が始まった20世紀初頭から100年ぶりの変革期といわれる。CASE化がもたらすであろう都市交通の典型的な変化を下図に示した。本シリーズ全5巻の「モビリティイノベーション」は、四つの巻をCASEのそれぞれの解説にあてていることが特徴である。さらに、CASE化された車を使う人や社会の観点から取り上げた第2巻では、社会科学的な切り口にも重点を置いている。

このような、移動のイノベーションに関する研究が2013～2021年度にわたり、文部科学省および科学技術振興機構の支援により、名古屋大学COI（Center of Innovation）事業として実施されており、本シリーズはその研究活動を通して生まれた「移動学」ともいべき統合的な学理形成の成果を取りまとめたものである。この学理が、人類最大の発明の一つである自動車の革命期における知のマイルストーンになることを願っている。

2020年3月

編集委員長 森川 高行



（イラスト作成：関口 愛）

# まえがき

自動車が出た当初、電気で動くいわゆる電気自動車がガソリン自動車よりも先に普及していました。しかし、電気自動車はまもなく市場から姿を消します。当時の電気自動車は蓄電池の容量が小さく走行距離が短く、モータの出力も非力で、ガソリン自動車に比べて性能の優位性がなく、電気自動車自体は構造が簡単で扱いやすかったものの、技術発展により、ガソリン自動車が進軍になり、また操作性の優位性もなくなってしまったのでした（詳しくは、モビリティイノベーションシリーズ第1巻「モビリティサービス」をご覧ください）。

現在では、電気自動車や内燃機関と電気モータのハイブリッド車など（合わせて電動車両）が市場で復権しています。上記した技術的課題に大きな発展があり、また当時にはなかった化石燃料に伴う社会的問題が大きくなってきたためです。本書の前半（I編）では、電動車両を復活に至らしめた最新の技術について解説します。1章では、車両の電動化が社会にもたらす影響を内燃機関と比較しながら明らかにするとともに、電動車両のシステム構成とその設計要求を説明します。2章と3章では、電動車両を構成するのに必要となる電子・電気工学の技術（エレクトロニクス）について、2章では電池や充電器、電力変換装置を、3章ではモータを、その原理から最新技術までを紹介します。

じつは、電動車両は移動手段としての自動車本来の用途を超えた利益をもたらすものとして注目されています。電動車両はエネルギー源として電力を使うため、まかり間違えば電力系統に悪い影響を与えかねません。逆に、うまく使えば電力品質の安定化や電力の有効利用につながるということです。本書の後半（II編）では、電動車両をエネルギーマネジメントに活用することを目的とした最新の研究について紹介します。4章では電動車両とエネルギーマネジメントの関係についてさらに深掘りします。5章では住宅やビルへの、6章では電力系統への電動車両の活用を紹介します。7章では、電動車両の新たな普及形態としてのシェアリングに着目し、その運用とエネルギーマネジメントの連携について解説します。8章では、電動車両をエネルギーマネジメントに活用する上で不可欠な、利用者による使用形態の予測問題を扱います。

本書は電動車両自体とそれを建物や社会につなげる最新技術をまとめた珍しい内容となっています。読者とともに電動車両と社会の発展の道を歩めることを願ってやみません。

2020年10月

4巻編集委員 稲垣 伸吉

本書において記載されている会社名、商品名、製品名などは、一般に各社の登録商標、商標、または商品名などです。本文中では、TM、©、®マークは省略しています。

# 目 次

## 【I編 車両の電動化】

### 1. 車両の電動化と電気動力システム

1.1 電動化のインパクト .....	1
1.2 電動車両のシステム構成 .....	5
1.2.1 電動車両と内燃機関自動車のシステム構成比較 .....	5
1.2.2 電動車両のシステム構成比較 .....	7
1.2.3 電動車両のシステム設計 .....	12
引用・参考文献 .....	26

### 2. 電動車両のエレクトロニクス

2.1 電池と充電器 .....	27
2.1.1 蓄電池の原理と変遷 .....	28
2.1.2 各種充電方式 .....	40
2.2 パワーエレクトロニクス .....	51
2.2.1 DC-DC コンバータ .....	53
2.2.2 インバータ .....	56
2.2.3 マトリクスコンバータ .....	58
2.2.4 整流器 .....	59
引用・参考文献 .....	61

### 3. 電動車両のモータとその制御

3.1 永久磁石同期モータ .....	62
3.1.1 構造 .....	62
3.1.2 磁石材料 .....	65

3.1.3 永久磁石同期モータの損失モデル	66
3.2 誘導モータ	67
3.2.1 誘導モータの原理	67
3.2.2 誘導モータの損失モデル	69
3.3 モータ制御系	71
3.3.1 ベクトル制御系	71
3.3.2 効率改善を目的としたトルク制御器—MTPA 制御—	75
3.3.3 駆動範囲の拡大を目的としたトルク制御器—弱め磁束制御—	76
3.3.4 トルク制御器	78
引用・参考文献	78

## 【Ⅱ編 スマートグリッドと電動車両】

### 4. 電動車両がもたらすインパクト

4.1 エネルギー貯蔵デバイスとしての電動車両	79
4.2 電動車両を活用した EMS の技術課題とⅡ編の構成	80
4.3 今後の展望	82

### 5. Vehicle to Home, Vehicle to Building

5.1 モデル予測制御	83
5.2 Vehicle to Home	85
5.2.1 システム概要	85
5.2.2 最適化問題への定式化	87
5.2.3 制御効果の検証	91
5.3 Vehicle to Building	96
5.3.1 システム概要	96
5.3.2 最適化問題への定式化	96
5.3.3 制御効果の検証	97
5.4 家屋内の電力消費の予測	100
5.4.1 予測とエネルギーマネジメント	100
5.4.2 家庭での消費電力のデータ	101
5.4.3 自己回帰モデルによる予測モデル	102
引用・参考文献	107

## 6. Vehicle to Grid とアンシラリーサービス

6.1 電気自動車と電力システムの協調	108
6.2 Vehicle to Grid の実証・研究開発事例	109
6.2.1 米国での最初の V2G 実証	109
6.2.2 欧州への展開	110
6.2.3 技術開発が進む日本	111
6.2.4 その他の研究開発動向	113
6.3 Vehicle to Grid の制御設計と実装	114
6.3.1 電気自動車によるスマートインバータ制御	114
6.3.2 HILS の構成と電気自動車の制御手法	114
6.3.3 試験結果	117
6.4 モビリティ×エネルギーの総合実証：Charge and Share	117
引用・参考文献	120

## 7. EV シェアリングとスマートグリッド

7.1 EV シェアリングの動向	122
7.2 EV シェアリングの利用形態	124
7.3 再生可能エネルギーを活用した EV シェアリング	125
7.3.1 システム要件と問題設定	125
7.3.2 車両運用計画の最適化	127
7.3.3 計算量の削減と最適化の例	131
7.4 配電ネットワークの電圧変動への EV シェアリングの影響評価	133
7.5 EV シェアリングと配電ネットワークの連携管理システム	137
引用・参考文献	139

## 8. 車の使用履歴とマルコフモデルを用いた車の使用予測

8.1 単一拠点（家）における車 1 台の使用予測	141
8.1.1 車の駐車と不在のパターンを表すグラフ：PDDT	142
8.1.2 車の駐車と不在の時間変化を表すマルコフモデル	143
8.1.3 確率の算出に使う情報：車の使用履歴と観測情報	145
8.1.4 車 1 台のモデルにおける状態遷移確率と初期状態確率の計算	146
8.1.5 動的計画法を用いた PDDT の最尤推定	148
8.1.6 計算結果の例	149



8.2 車群の移動と駐車の前測 .....	150
8.2.1 問題設定とパーソントリップデータ .....	152
8.2.2 状態の定義とマルコフモデル .....	153
8.2.3 車群のモデルにおける状態遷移確率と初期状態確率の計算 .....	155
8.2.4 マルコフモデルの各状態における存在確率と期待台数の計算 .....	156
8.2.5 パーソントリップデータを用いたシミュレーション結果 .....	156
引用・参考文献 .....	158
<b>索 引</b> .....	159

# 車両の電動化と電気動力システム

本章では、電気動力システムとその背景にある車両の電動化について紹介する。本章が対象とするのは、おもに電気動力システムを構成するコンポーネントである電池、電力変換装置、動力のハードウェア、ソフトウェアの研究、開発に関わる研究者、開発者である。

電動化というキーワードを見るといわゆる電気系の知識が必須であることは容易に想像できるが、内燃機関自動車でも必要とされてきた4力（材料力学、流体力学、熱力学、機械力学）の知識も欠かすことはできない。電動化によりモビリティの構造は簡素化され、部品も減る可能性があるが、電動モビリティの研究開発に携わる研究者、開発者に求められる知識の幅は広くなると考えてよいだろう。また、内燃機関と比べ、電気機器はモデル化が進んでいるため、モデルベース開発（model based development, MBD）をしやすい開発のスピードも自然と向上していく。その開発のスピードに追いつくためには素早く、正確な判断が必要であり、その基盤となるのは先にも述べた4力を含めた基礎知識である。また、ハードウェアだけではなくソフトウェアの知識も必要になる。そのため、モビリティの簡素化とは対照的に、研究・開発者にはより多くの知識が必要になり、それらを総合的に駆使できるようになることが重要である。

モデルベース開発においては正確なモデルが必要になり、FEM (finite element method) を用いた解析モデルを使用することが精緻なシミュレーションには重要であるが、精緻であるがゆえに人間の頭で理解することは困難である。自らの専門分野でなければほぼ理解できないものとなっているだろう。そこで、簡易なモデルを用いておおよその電動車両のもつ性質を捉えることで、得られた解の妥当性を素早く判断することが可能になる。おおよその電動車両のもつ性質を理解することで、自らの担当するコンポーネントが他者に与える影響を考慮できる、もしくは他のコンポーネントが自らの担当するコンポーネントに与える影響を考慮できるようになり、システムとしての最適解に近づけることができる。

本章では、電気動力システムを俯瞰できる視点を養うことを第一の目的として、まず電動化によるさまざまな変革について述べ、その後電動化のシステムを紹介し、電動車両への要求、それを実現するためのシステム設計法、各コンポーネントを設計するために必要な要求について紹介する。

## 1.1 電動化のインパクト

車両の電動化によってもたらされる変革は大きく三つある。エネルギーの変革、駆動システムの変革、人々の生活の変革である。本編で扱う電動車両は電動機（モータ）によって走行する車両である。内燃機関を搭載していても走行に使用しない場合には電動車両として扱う。

内燃機関自動車は1800年代の終わりに発明され、産業構造も含めその後の人々の生活に大

大きく変革を及ぼした。電動車両も歴史としては長く、一時は内燃機関自動車を超える勢いで普及が進むかと思われたが内燃機関自動車に市場を奪われ、発明から今日まで大規模な市場化には至っていない<sup>†1</sup>。当初は馬車からの置換えという用途で注目され、自動車であることが最も大きなインパクトであり、電動化のインパクトは内燃機関自動車と比較しても大きくなかった。なぜなら、現在国際的に大きな環境問題とされる温室効果ガスによる地球温暖化や資源・エネルギーリスクなどの、内燃機関自動車が大量普及した際に起こる問題を予測することができなかつたためである。そして、現在の電動化によってもたらされる、最も期待されるインパクトはエネルギーの変革である。

エネルギーの変革により、二酸化炭素の排出量削減ができる。2016年度の日本における二酸化炭素排出量は運輸部門が17.4% (2億1300万トン) を占めており<sup>2)</sup>、そのうち、自動車が占める割合は86.1% (1億8300万トン) である<sup>†2</sup>。つまり、自動車によって排出される二酸化炭素の量は日本における二酸化炭素排出量全体の15%ということになる。これを減らすためには既存の内燃機関自動車の燃料消費率の改善では限界があり、ブレイクスルーするためには車両の電動化が必須となる。車両の電動化による二酸化炭素排出量の削減率は式(1.1)～(1.3)を使用して算定する。ここでは、電動車として電気自動車を代表して使用する。燃料消費率は $C_f$  [l/km]、ガソリンの燃焼にかかる二酸化炭素排出量率は $E_{gas}$  [g-CO<sub>2</sub>/l]、ガソリンの精製にかかる二酸化炭素排出率は $E_{rif}$  [g-CO<sub>2</sub>/l] である。また、電力消費率は $C_e$  [Wh/km]、発電にかかる二酸化炭素排出率は $E_{gen}$  [g-CO<sub>2</sub>/Wh] である。

内燃機関自動車による二酸化炭素排出率： $E_{int}$  [g-CO<sub>2</sub>/km]

$$E_{int} = \frac{C_f(E_{gas} + E_{rif})}{C_f} \quad (1.1)$$

電気自動車による二酸化炭素排出率： $E_{ele}$  [g-CO<sub>2</sub>/km]

$$E_{ele} = C_e E_{gen} \quad (1.2)$$

電気自動車化による二酸化炭素排出量削減率： $R_{red}$

$$R_{red} = \frac{(E_{int} - E_{ele})}{E_{int}} \quad (1.3)$$

ここで、表1.1に示した値を用いて削減率 $R_{red}$ を算出すると、電動化によって実現できる二酸化炭素排出量の削減率は内燃機関自動車と比較して70%を超えることがわかる。

内燃機関自動車ではエネルギー源はほぼすべてが原油(ガソリン、軽油)であったが、車両の電動化によりエネルギー源を多様にすることができるため、火力発電から太陽光や風力等の再生可能エネルギーによる発電への転換により、さらなる二酸化炭素の削減が期待できる。裏を返せば、車両を電動化すると発電の再生可能エネルギーへの転換が運輸部門の二酸化炭素排

†1 肩付き数字は章末の引用・参考文献を示す。

†2 環境省が温室効果ガスインベントリオフィスで公開している温室効果ガス排出量のデータおよび国土交通省の交通関係統計等資料で公開している「自動車輸送統計調査」、「内航船舶輸送統計調査」、「航空輸送統計調査」、「鉄道輸送統計調査」のデータを基に作成した値。

表 1.1 各パラメータ値

パラメータ	値
$C_f$	15.6 [l/km]
$E_{gas}$	2322 [g-CO <sub>2</sub> /l]
$E_{rif}$	541 [g-CO <sub>2</sub> /l]
$C_e$	114 [Wh/km]
$E_{gen}$	0.474 [g-CO <sub>2</sub> /Wh]

出量削減に直接つながるようになるということである。2020年時点では再生可能エネルギーによる発電率が高い北欧諸国では電動車両の普及率は順調に伸びており、特に水力発電の割合の高いノルウェーでは新車販売台数の半数以上が電動車両となっている。電動車の購入に対して補助金を提供するなどの施策も後押しをしている側面もあるが、すでに内燃機関から電動化への転換が始まっており、市場にも受け入れられる可能性があるということを示している。

また、原油は採掘地が限られているため、採掘できない地域ではつねにエネルギーの供給リスクが存在することになる。しかし、電力は火力だけでなく、太陽光、風力、水力等、さまざまなエネルギー源を選択可能である。得られるエネルギーは小さいが、再生可能エネルギーは地球上のどの場所でも利用可能なため、エネルギーリスクという点でも電動車両は内燃機関自動車に対して優位である。

蓄電池を搭載している電動車両は車両に搭載している蓄電池を用いて、蓄電池への充放電を制御することによって電力需要のピークカットによるエネルギーの効率的利用や、電力系統の安定化をすることにも利用できる。その観点でのエネルギーの変革についてはⅡ編にて詳しく解説する。

駆動システムの変革については1.2節で詳細を述べるが、まずここで概要を紹介する。電動車両は用途によってさまざまなシステム構成を選ぶことができる。駆動源として蓄電池や燃料電池、内燃機関による発電を選択できる。しかし、いずれの電動車両の最も大きな技術的課題の一つが一充電当りの航続距離である。蓄電池のみで走行する電動車両（電気自動車）を例にとると、現在市販されている電気自動車のほとんどが内燃機関自動車と比べて1/2～1/3程度の航続距離である。その理由は2020年時点のリチウムイオン電池の体積エネルギー密度（約300～600 Wh/l）とガソリンの体積エネルギー密度（約9300 Wh/l）を比較すると歴然である。そのため、必然的に燃料タンクと比べて大容量の電池を積載することが必要である。また、単純に電池を倍積みすれば倍の距離を走る車ができるわけではない。電池容量を大きくすると電池の重量増による車体重量の増加、および、それらを支える構造材の強化による重量増が起こる。そして車体が重くなることによって、駆動力がより多く必要になりモータやインバータ、ドライブシャフトといった駆動系の部品も重くなる。すると、走行に必要なエネルギーが増え、航続距離がますます縮まり、さらに多くの蓄電池を搭載することが必要になるという悪循環が起こる。逆を返すと、電池の重量当り、体積当りの容量を大きくすることにより、電池

容量を変えずとも航続距離を延ばすことができる。リチウムイオン電池はその部品としての寿命や安全性の観点から下限電圧や上限電圧を超えないように制御しているため、制御をより精緻に正確にすることにより、ソフトウェアを変えることで航続距離を延ばすことができる。車両のマイナーチェンジ時に駆動性能や車体重量が変わっていないのに航続距離が延びるというのは上記の理由も大きな割合を占めているため、ソフトウェアの開発は今後ますます重要視されるだろう。

駆動システムの変革は車両の作り方にも大きく影響する。内燃機関自動車では内燃機関が車両で最も重い部品であったためフロントの重量が重くなっていた。それに対して電気自動車では床下や後部座席の後ろなどに重量物である電池を積載できるため、低重心かつ前後重量配分のバランスのよい車両を容易に設計することができるようになる。さらに、内燃機関では燃料供給や冷却システム、排気等の問題から、駆動用の内燃機関を1台の車両に複数台使用することはできず、一つの内燃機関の駆動力を配分する方法をとっていたが、モータは分割して配置することができる。このことによっても大きな恩恵を得ることができる。詳細については1.2節にまとめている。

そして、最後に人々の生活への変革である。馬車から自動車への変革ほど大きな変革ではないものの、排気音による騒音に悩まされることもなくなり、幹線道路の近くでも排気ガスがなくなる。地球規模の問題ではないが、2020年時点で北京やムンバイなどの交通が過密状態にある都市では、内燃機関自動車の排気ガスによる大気汚染は人々の健康被害を及ぼす大きな問題となっている。電動車は自動車の排気ガスによる大気汚染を根本的に解決できる手段として期待されている。

身近な変革としては、給油という作業から解放されるということが挙げられる。2020年現在の自動車の蓄電池への充電は大部分が接触式であり、内燃機関自動車と手順は大きく変わらないが、ガソリンスタンドに行かなくなるというだけでも大きな変革である。給油に要する時間が減ることになるため、電動車の大きな魅力の一つとってよいだろう。今後、非接触式の充電器が主流になるとエネルギーを充填するという作業すべてが不要になる。さらに、給油が不要になるとガソリンスタンドも不要になる。ガソリンスタンドは平均して1件当たり約250坪(約830m<sup>2</sup>)の面積を使用<sup>3)</sup>している。例えば、4人家族の誘導居住面積水準が125m<sup>2</sup>であること<sup>†</sup>を考えるとガソリンスタンド1件当たり、6件×4人=24人の住宅用の土地を提供できることになる。

ここに挙げた電動化のインパクトは一部であり、現在想定していないような変革をもたらす可能性もある。しかし、100年前の馬車から自動車への転換よりも大きなインパクトを個人への恩恵としてすぐに与えることは難しいため、電気自動車に対してはより高い開発の目標を掲

† 国土交通省が定めた、豊かな生活を実現するために必要として考えられる水準。2013年の調査では40.8%の人口がこれに満たない水準で生活をしている。

げられることは容易に想像でき、開発者や研究者はその高い目標を実現できる力を身に付けなければならない。また、電動化によって生まれてくる新たなサービスや新たな価値を考え、生み出すためにもまずは電動化の基礎となる知識を身に付けることが重要である。

## 1.2 電動車両のシステム構成

本編で扱う電動車両はモータで駆動して走行する車両と定義する。内燃機関の動力を発電に使う、もしくは電池残量が少なくなった場合のみに内燃機関を一時的に走行に使用するものも電動車両として扱うこととする。ここではまず電動車両のシステムの紹介をした後に、電気自動車为例にとってシステム設計の手法を紹介する。

### 1.2.1 電動車両と内燃機関自動車のシステム構成比較

電動車両の動力源は電力であり、動力はモータである。英語の motor という言葉には内燃機関という意味が含まれることもあるが、日本語で表記するモータは電動機のことを表し、電気を動力源として動くものすべてをモータという。車載用のモータはモータのなかでも電力を回転運動に変換する回転機である。電動車両と内燃機関自動車のシステムの違いはまず動力源の違い、そして動力の違い、さらにそれらの変化によって周辺部品にも違いができてくる。ここではまず内燃機関の駆動形式を紹介した後に、電動化による違いを紹介する。

内燃機関自動車の駆動形式は下記のように分類される。

- ① FF (フロントエンジン・フロントドライブ)
- ② FR (フロントエンジン・リアドライブ)
- ③ MR (ミッドシップエンジン・リアドライブ)
- ④ RR (リアエンジン・リアドライブ)
- ⑤ 4WD, AWD (四駆, 全輪駆動)

特殊な用途のレース車両などでは一つの車体に2機のエンジンを搭載することがあるが、一般的にはどのシステムも一つのエンジンで駆動し、力を車輪に配分するという方式をとっている。多数のエンジンを搭載するよりも一つの大きなエンジンを使って動力配分をしたほうが費用・効率等が優れるということが理由になる。その最も大きな技術的要因は、エンジンには排熱のためには大きな熱交換器や排気系部品、変速機が必要になるため、二つに分けることで部品点数が非常に多くなることである。

FF や RR ではエンジンの搭載位置と車輪が近いいため、エンジンからの軸出力はトランスミッションを介してドライブシャフトで行い、車輪に動力を伝える。一方、FR や MR, 4WD ではプロペラシャフトという動力伝達用のシャフトを車体前後に通して、動力を各車輪に配分している。2020年現在では一般的にはFFの車両が最も多く、他のシステムは一部の高級車やスポーツカー等、嗜好や用途によって採用をされている。FFの車両が多い理由は軽量化と室

# 索

# 引

## 【あ】

赤池情報量規準 103  
アンシラリーサービス 109

## 【い】

1日の電気料金最小化 87  
一致率 149  
移動手段 86  
陰極 28  
インセンティブ 100  
インバータ 19, 56, 110

## 【う】

渦電流損 66  
運用コスト 129

## 【え】

永久磁石同期モータ 62  
エネルギーマネジメント 82, 113  
エネルギーマネジメントシステム 85

## 【か】

カーシェアリング 122  
貸出ステーション 126  
家庭内電力需要模擬装置 92  
家庭用EMS 86  
ガバナフリー 115

## 【き】

擬似慣性 114  
期待台数 156  
逆潮流 88, 117  
キャンパス実証 117

## 【く】

空気抵抗係数 14  
組合せ最適化問題 84  
グリッドフォーミング 114  
車が駐車中 141  
車が不在 141  
車の使用 141  
車の使用履歴と観測情報 145  
車の駐車・不在 143

## 【け】

経済負荷配分制御 115  
計算量の削減 131  
経路 154

## 【こ】

高圧系統 134  
高圧契約 97  
高速周波数応答 114  
交通マネジメント 82  
転がり抵抗係数 14  
混合整数計画問題 84, 90  
混合論理的システム 89

## 【さ】

最小二乗法 103  
再生可能エネルギー 125  
再生可能エネルギー充電料金 108  
最適化ソルバ 91  
最尤推定問題 148  
サステナブルマイレージ 119  
サマリウムコバルト 65

## 【し】

シェアリングエコノミー 122  
磁界共振結合 43  
自己帰帰モデル 89, 102  
——の次数 103  
事故時運転継続 113  
システム最大電圧 19  
自動車・エネルギー融合社会 109  
車群 150  
——の移動と駐車 150  
車載蓄電池容量 88, 89  
車両運用計画 127  
車両運用計画問題 127  
車両充放電計画問題 127  
車両の運用計画 126  
車両の充電器接続有無 89  
車両の利用予測 89  
車両割当問題 127  
集合住宅 96  
集中巻 64  
充電インフラ整備 109

充電器付きマンション 96  
充電状態 110  
充電タイムシフト 109  
充電料金設計 109  
周波数調整 111  
周波数調整参加の収入 110  
周波数変動 110, 114  
充放電ダイナミクス 88  
充放電要求値 139  
重量エネルギー密度 29  
瞬時電力の上下限 88  
状態 145  
状態系列 148  
状態遷移確率 145, 147  
消費電力のデータ 101  
消費電力の予測手法 101  
消費電力量 129  
初期状態確率 145, 147  
職場での昼間充電 108  
真陽性率 149

## 【す】

スイッチング損 51  
ステーション返却型 124  
スマートインバータ制御 112, 114  
スマート充電 110, 111  
スマートメータ 101

## 【せ】

正極 28  
積算電力量 88  
セグメント 12  
接触式急速充電 40  
接触式大電力充電 42  
接触式普通充電 42  
ゼロ頻度問題 158  
全個体電池 39

## 【そ】

走行可能距離延伸 108  
走行中給電 49  
走行抵抗 14  
ソフト制約 89  
存在確率 154

<b>【た】</b>	
体積エネルギー密度	29
太陽光発電	122, 129
太陽光発電電力	88
——の予測	89
太陽光発電電力予測	88
太陽光発電用インバータ	92
太陽光パネル模擬装置	91, 92
多次元割当問題	127, 131
ダックカーブ	109
単独運転検出	113
単独系統運転	113
<b>【ち】</b>	
蓄電	85
蓄電残量値	123
駐車	86
超小型EV	122
直流-交流変換器	111
<b>【て】</b>	
定置型蓄電池	85
定置型電力貯蔵	110
鉄損	66
デマンドレスポンス	109
電圧振幅勾配	133
電気自動車	86, 108, 114, 122
電気代の削減効果	100
電気料金低減効果	92
電池	19
電力系統	108
電力小売り自由化	80
電力需給密度関数	134
電力需給予測	88
電力需要の予測	89
電力調整能力	109
電力品質維持のための調整	
サービス	109
電力融通	100
<b>【と】</b>	
同時同量制御	85
銅損	66
導通損	51
動的計画法	148
度数分布表	145
<b>【な】</b>	
内燃機関車両	86
鉛電池	29
<b>【に】</b>	
24時間先までの消費電力の予測	106

ニッケルカドミウム電池	29
ニッケル水素電池	29
<b>【ね】</b>	
ネオジウム	65
<b>【は】</b>	
配車	126
買電	85, 87
売電	85, 87
配電系統フィーダ	113
配電システム運用者	137
配電ネットワークの電圧分布	
評価モデル	133
配電ネットワークの電圧変動	133
配電フィーダ	114
配電フィーダモデル	115
配電用変電所	133
柱上変圧器	116
パーソントリップデータ	152, 156
バーチャルパワープラント	
	109, 113
バリガー性能指数	53
パワーデバイス	51
バンク	133
——の送り出し電圧	134
——の定格容量	134
<b>【ひ】</b>	
ヒステリシス損	66
非接触式充電	43
ビルトインガレージ	110
<b>【ふ】</b>	
フィーダ	133
——の抵抗およびリアクタンス	134
フェライト	65
負荷周波数制御	115
負極	28
複雑性のオーダー	132
プライバシーの問題	101
プラグインハイブリッド車	86
フリーフロート（乗捨て）	
返却型	125
ブロックチェーン技術	113
分散型電力貯蔵	110
分散台帳管理	113
分布巻	64
<b>【へ】</b>	
ペナルティ	87, 97
返却ステーション	126

<b>【ま】</b>	
マイクログリッド実証	110
マグネットトルク	63
マトリクスコンバータ	41, 58
マルコフモデル	143
<b>【む】</b>	
無効電流	116
無効電力	134
<b>【め】</b>	
メタ社会システム	82
<b>【も】</b>	
モータ	19
モデル	101
モデル化誤差	94
——に対するロバスト性	94
モデル化の精度	104
モデル予測型のHEMS	141
モデル予測制御	83, 100
モード走行	20
<b>【ゆ】</b>	
有効電流	116
有効電力	134
<b>【よ】</b>	
陽極	28
余剰電力	108
予測	100
予測精度	104
<b>【ら】</b>	
ラウンドトリップ型	124
<b>【り】</b>	
リチウムイオン電池	29
利用登録	126
リラクタンストルク	63
<b>【れ】</b>	
連続変形法	84
<b>【わ】</b>	
ワークプレースチャージング	108
ワンウェイ型EVシェアリング	
	123
ワンウェイトリップ型	124



**[A]**  
 accuracy 149  
 AC-DC インバータ 92  
 ACR 116  
 AI 113  
 AIC 103  
 Akaike information criterion 103  
 API 111  
 application interface 111  
 APR 116  
 AQR 116  
 AR model 89  
 AR パラメータ 103  
 AR モデル 102  
 automatic current regulator 116  
 automatic power regulator 116  
 automatic reactive power regulator 116  
 autoregressive model 89, 102

**[B]**  
 Baliga's figure-of-merits 53  
 BCP 108  
 BEMS 96  
 BEV 7  
 BFOM 53  
 Building Energy Management System 96  
 business continuity plan 108

**[C]**  
 C/GMRES 法 84  
 CHAdeMO 40  
 Charge and Share 117  
 Charge Forward プロジェクト 109  
 CO<sub>2</sub> 削減効果 123  
 combinatorial optimization 84  
 Combo 40  
 continuation method 84

**[D]**  
 DC-AC コンバータ 111  
 DC-DC コンバータ 19, 53, 88, 92  
 distribution network operator 111  
 distribution system operator 137  
 DNO 111  
 DSO 137

**[E]**  
 economic load dispatching control 115  
 EDC 115  
 electricityMap 111  
 electric vehicle 86  
 EMS 85  
 energy management system 85  
 EV 86, 141  
 —の運行データ 134  
 EV100 108  
 EV シェアリング 122, 124  
 —と配電ネットワークの連携 137  
 —の影響 133  
 EV シェアリングサービスの  
 実証試験 122  
 EV 車載蓄電池 92  
 EV 走行模擬装置 92  
 Explicit MPC 84

**[F]**  
 fast frequency response 112, 114  
 fault ride through 113  
 FCR 111  
 FCV 10  
 FFR 112  
 frequency containment reserve 111  
 FRT 113

**[G]**  
 GB/T 40  
 generalized minimum residual  
 method 84  
 GF 115  
 GIV 110  
 GMRES 法 84  
 governor free 115  
 GPS ロガー 149  
 grid 108  
 grid forming 114  
 grid integration vehicle 110  
 Grid on Wheels プロジェクト 110  
 GridShare Platform 113

**[H]**  
 Hardware-In-the-Loop Simulation 114  
 HEMS 86, 141  
 HEMS 模擬装置 91  
 HILS 114

home energy management system 86

**[I]**  
 independent system operator 110  
 intentional islanding operation 114  
 Internet of Things 101  
 IoT 101  
 islanding detection 113  
 ISO 110

**[K]**  
 $k$ -fold cross validation 104  
 $k$ -分割交差検証 104

**[L]**  
 LCP 108  
 least-mean-squares 103  
 left-to-right マルコフモデル 145  
 LFC 115  
 life continuity plan 108  
 load frequency control 115

**[M]**  
 MAP 127, 131  
 Markov model 143  
 MILP 84, 90  
 mixed integer linear programming 84, 90  
 mixed logical dynamical systems 89  
 MLDS 89, 97  
 model predictive control 83  
 most likelihood problem 148  
 moving inverter 110  
 MPC 83  
 multidimensional assignment problem 127

**[P]**  
 Parker/ACES プロジェクト 110  
 path 154  
 PDTT 143  
 permanent magnet synchronous  
 motor 62  
 PHEV 8  
 photovoltaics 122  
 PHV 86, 141  
 plug-in hybrid vehicle 86  
 PMSM 62

profile of departure and travel time 143  
PV 122

**【R】**

RE100 108  
recall 149  
receding horizon 制御 83  
REV 9  
rolling resistance coefficient 14  
RRC 14

**【S】**

SCADA 101  
SOC 110, 123  
state of charge 110, 123  
supervisory control and data acquisition 101  
synthetic inertia 114

**【T】**

transmission system operator 111  
true positive rate 149  
TSO 111

**【V】**

V2B 96, 109, 110, 113  
V2G 108, 109, 110, 113  
V2GB 111  
V2G 試験装置 111  
V2G 実証事業 111  
V2H 109, 110, 113  
V2X 86  
vehicle fleet 150  
Vehicle to Building 96, 109  
Vehicle to Grid 108, 109  
Vehicle to Grid Britain 111  
Vehicle to Home 109

Vehicle to X 86, 123  
Virtual Power Plant 124, 137  
VPP 124, 137

**【W】**

Well-to-Wheel Zero Emission 108  
WLTC 20  
worldwide-harmonized light vehicles test cycle 20

**【Y】**

Yule-Walker 法 103

**【数字】**

0-1 MILP 128  
0-1 mixed integer linear programming 128  
0-1 混合整数線形計画問題 128

— 編著者略歴 —

<b>鈴木 達也</b> (すずき たつや)	<b>稲垣 伸吉</b> (いながき しんきち)
1986年 名古屋大学工学部電子機械工学科卒業	1998年 名古屋大学工学部電子機械工学科卒業
1988年 名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了(電子機械工学専攻)	2000年 名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了(電子機械工学専攻)
1991年 名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了(電子機械工学専攻), 工学博士	2003年 東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了(精密機械工学専攻), 博士(工学)
1991年 名古屋大学助手	2003年 名古屋大学大学院助手
1998年 カリフォルニア大学バークレー校客員研究員	2007年 名古屋大学大学院助教
2000年 名古屋大学大学院助教授	2008年 名古屋大学大学院講師
2006年 名古屋大学大学院教授	2015年 名古屋大学大学院准教授
現在に至る	2020年 南山大学教授
2013年 JST CREST EMS 領域 研究代表者	現在に至る
2019年 名古屋大学未来社会創造機構・モビリティ社会研究所長(兼務)	

## 車両の電動化とスマートグリッド

Electrification of Vehicles and Smart Grid

© Tatsuya Suzuki, Shinkichi Inagaki et al. 2020

2020年12月11日 初版第1刷発行



検印省略

編著者 鈴木 達也  
稲垣 伸吉  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来 真也  
印刷所 壮光舎印刷株式会社  
製本所 株式会社 グリーン

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-02774-7 C3354 Printed in Japan

(齋藤)



＜出版者著作権管理機構 委託出版物＞

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。