

スマートグリッドと 蓄電技術

福井 正博
有馬 理仁 共著

コロナ社



持続可能な地球環境の観点から、再生可能エネルギーの有効活用や二酸化炭素排出抑制などの要求が高まり、スマートグリッドやスマートハウス、電気自動車などを含む社会規模でのエネルギー活用の最適化ニーズが高まっている。

本書はスマートグリッドと蓄電技術の概要を述べたもので、多くの紙面をリチウムイオン蓄電池のモデル化と最適制御および管理、活用技術の説明に割くことにより、安全かつ長寿命な蓄電システムの構築に必要な技術を初めて学ぼうとする人たちが蓄電システムを中心としたエネルギー活用技術の全体像を把握できるように配慮した。

1章と2章では、社会規模でのエネルギーシステムの全体像と課題、その中の蓄電システムの位置づけと役割について説明した。1章で持続可能、脱炭素化などの社会課題に言及し、本書の課題提起の起点を示した。2章では電力ネットワークに焦点を当て、さまざまな発電方法における再生可能エネルギーの特徴として発電と需要の調整技術が課題であり、それが大きな価値を生むことを示した。調整のための社会実装としてキーとなるのが蓄電システムであることを示し、導入とした。3章では蓄電デバイスとしてのリチウムイオン蓄電池の動作原理を示し、従来から長期にわたり活用されている鉛蓄電池や将来高い安全性かつ高効率な蓄電デバイスの主流として期待されている固体電池との比較も行い、現在および今後主流の一翼として期待されるリチウムイオン蓄電池の動作原理や実装、特徴について解説した。4章と5章ではBMS (battery management system) の観点から、電気化学的なデバイスをコンピュータ制御するために必要な技術を解説した。おもな内容としては、まず、4章で等価回路を用いたリチウムイオン蓄電池の電気的特性と温度特性のモデル化およびシミュレーション技術について解説し、電流に対する電圧応答から内部インピー

ダンスの特徴を理解し、その後、内部インピーダンスの温度特性や充放電動作に伴う温度分布の変化を解析するための手法を示した。また、単一セルの特性だけではなく、組電池にした場合のモデル化方法や特性ばらつきの扱い方に関する解説を行った。5章では蓄電池の内部状態を推定するための技術として制御工学で用いられるカルマンフィルタや逐次最小二乗法などの最適化技術を、数式などを用いて丁寧に解説した。マイコンなどを用いてプログラミング実装する場合にも理解が容易となるように配慮した。蓄電池の劣化現象は放電曲線および内部インピーダンスの変化として観測されるが、代表的な劣化現象と等価回路モデルでの変化から劣化モードや劣化割合を認識する方法を解説した。将来的には蓄電池セルに搭載されたBMSが高機能化し、内部抵抗のリアルタイム測定や機械学習による劣化現象の把握、さらには、残寿命、残価値の推定が可能となることが予想されるので、それらの高度な状態把握に向けた技術の紹介も行った。

最後に6章では、BMSシステムへの要求や機能についていくつかの使用シーンを想定して、全体のまとめを行った。

本書では、説明した内容の理解を深めるために各章末に演習問題を配した。通読するだけでなく、深い理解を確認するために丁寧に解答の努力をしてもらいたい。

2021年12月

著 者



目次

1 序論

1.1 スマートグリッド	1
1.2 地球環境とエネルギー事情	2
章末問題	8

2 エネルギー環境の変化

2.1 発電・送電・蓄電の役割	9
2.2 再生可能エネルギー活用による変化とマネジメント	15
2.3 VPP, アグリゲーション	19
2.4 蓄電池の役割	20
章末問題	22

3 リチウムイオン蓄電池

3.1 蓄電池の進化と役割の変化	23
3.2 各種蓄電池の特徴と使い分け	25
3.3 鉛蓄電池の動作原理	26
3.4 リチウムイオン蓄電池の動作原理	29
3.5 リチウムイオン蓄電池の構造的特徴	34
3.6 リチウムイオン蓄電池の材料と組み立て	37

3.7 固体電池の動作原理	40
章 末 問 題	42

4 蓄電池のモデル化とシミュレーション

4.1 等価回路モデルと抽出方法	43
4.2 温度特性とその表現, 抽出方法	53
4.3 温度管理 (発熱, 伝熱の理論)	56
4.4 開回路電圧, 充電率, 満充電容量	59
4.5 組電池のモデル化とばらつきの考慮	66
章 末 問 題	70

5 蓄電池の状態推定

5.1 充電状態の推定方法 (カルマンフィルタの基礎と電池への応用)	71
5.1.1 充電状態のSOC 推定方法	72
5.1.2 電 流 積 算 法	73
5.1.3 カルマンフィルタの導入	74
5.1.4 電池モデルの生成	75
5.1.5 カルマンフィルタの適用	78
5.1.6 システムノイズと観測ノイズの推定	83
5.2 内部インピーダンスの推定方法 (逐次最小二乗法)	85
5.2.1 逐次最小二乗法の導入	86
5.2.2 逐次最小二乗法で用いる電池モデルの生成	88
5.2.3 逐次最小二乗法の適用	90
5.3 劣化現象と劣化診断方法	95
5.3.1 交流内部抵抗法	101
5.3.2 交流インピーダンス法	101
5.3.3 矩形波インピーダンス法	102
5.3.4 過渡応答変換法	102

5.3.5 放電曲線微分法	103
5.3.6 充電曲線解析法	104
5.3.7 適応フィルタ	104
5.3.8 差電圧法	105
5.3.9 機械学習	105
5.4 劣化診断システムの例	106
5.5 寿命推定	109
5.6 動的状態推定	111
章末問題	115

6 蓄電池管理システム (BMS)

6.1 BMS の機能	116
6.2 大規模蓄電池システムのBMS	120
6.3 安全性を高める工夫	120
6.3.1 BMS 装置	122
6.3.2 使用シーンとBMS	123
章末問題	124
引用・参考文献	125
章末問題解答	128
索引	134

1

序 論



1.1 スマートグリッド



スマートグリッド (smart grid) とは次世代電力網のことであり、電力の流れを需要・供給の両側から双方向的に最適化するものである。この最適化は、分散された電源（発電機や蓄電デバイスなど）や先進的のセンサデバイスなどの新規技術を用い、供給安定化や電力ロス低減を進めることによって確立されると考えられていたが、具体的な定義はやや曖昧である。スマートグリッドは2009年に当時の米国が推進するグリーンニューディール政策の柱となったことにより注目された。その目的は甚大な経済損失を生じた2003年の米国北東部大停電への対策、および2008年のリーマンショックの後の景気刺激政策であったとされる。その後スマートグリッドの流行が世界に広がり、これまで各国で継続的に投資が行われてきた。現在は気候変動抑制のための二酸化炭素排出量削減（脱炭素社会）を目指し、再生可能エネルギーを大量導入するための基盤技術を支える技術として認知が進んでいる。また、スマートグリッドでは図1.1に示す構成要素をいくつかの階層に分けて統合する**エネルギーマネジメントシステム** (energy management system : EMS) を構成し、xEMS (CEMS, FEMS, BEMS, HEMS など) として扱う。次項では現在のスマートグリッドの目的である脱炭素社会について説明する。

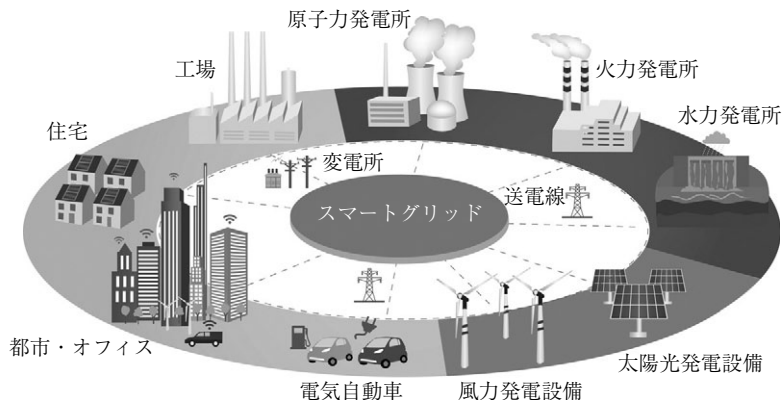


図 1.1 スマートグリッドが統合最適化する構成要素

1.2 地球環境とエネルギー事情



エネルギー (energy) は、熱・光・動力・波動などを発生させるための仕事をする能力のことであり、国際単位系では J (ジュール) が用いられている。また、単位時間当りのエネルギーである J/s (ジュール毎秒) は仕事率と呼ばれ、国際単位系では電気工学でおなじみの W (ワット) が用いられている。仕事率は馬力と同じ次元の単位であり、パワーと言い換えることができる。1 ワットのパワーを 1 時間継続して出力したときの総エネルギー量が 1 W・h (ワット時) であり、ジュールに換算すると 3600 J である。

図 1.2 に示すように、全世界のエネルギー消費 (energy consumption) の内訳は、化石燃料 (fossil fuel) が約 85%、再生可能エネルギー (renewable energy) が約 10%、原子力が約 5% である。このエネルギーの最終消費は、産業 (鉄鋼・機械・化学など)、民生 (家庭・業務など)、輸送 (陸・海・空運など) の 3 分野でそれぞれ約 3 割ずつを占めている。

世界の消費エネルギーのほとんどは化石燃料と再生可能エネルギーに由来し、したがって、地球上のエネルギーの起源は太陽と考えることができる。太

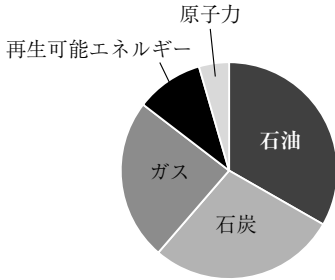


図 1.2 世界のエネルギー消費の内訳 (2016年)

陽では陽子がヘリウム核に変換される核融合反応で膨大なエネルギーが発生し、その一部が熱や光として地球上に降り注ぐ。太陽から地球に直接入射するエネルギーは、1時間で世界のエネルギーの1年分を賄えるほどの量である。

太陽の光エネルギーは、植物の葉緑体で**光合成** (photosynthesis) に使われ、エネルギーに変換される (図 1.3)。このとき葉緑体では**アデノシン三リン酸** (adenosine triphosphate : ATP) と呼ばれる物質が生合成される。ATP は分子内のリン酸結合にエネルギーが蓄えられた、生体内のエネルギーの基本単位である。葉緑体はこの ATP のエネルギーを利用して、二酸化炭素と水からグルコースと酸素を生合成する。植物はこのグルコースをエネルギー源として活用する。また、植物は糖質・タンパク質・脂質の形態で自らの体内にエネルギー

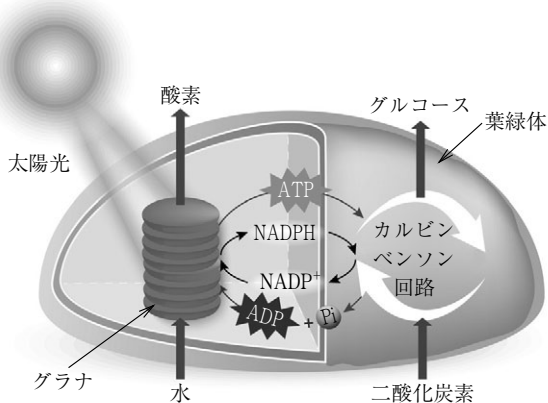


図 1.3 光合成のメカニズム

を貯蔵する。これらの貯蔵エネルギーは、食物連鎖のネットワークを介してさまざまな生物の間を移動し、新たな生合成のエネルギーとなる。

生物が生合成した物質を一般に**天然物**（natural product）と呼び、一般に炭素を含む物質である。動植物の死骸とともに天然物の一部は地中深く堆積し、地中の熱や圧力が長期間加わることで**ケロジェン**（Kerogen）と呼ばれる構造不定の有機物となり、さらにその一部が石炭・石油・天然ガスなどの化石燃料へと変化する。

また、再生可能エネルギーの60%程度が木材などのバイオマス由来エネルギー、約20%が水力エネルギー、5%程度が風力エネルギーや太陽光エネルギーである。バイオマスは光合成由来であり、また水力・風力・太陽光エネルギーは太陽が起こす気象現象に由来する。化石燃料と再生可能エネルギーで世界のエネルギーのほぼすべてを占めていることから、われわれが利用しているエネルギーは太陽由来のエネルギーと考えて差し支えない。

現在の世界では、大量の化石燃料を消費してエネルギーを生産・供給している。化石燃料は図1.4に示すように、地球が何億年も前の太陽から受け取った

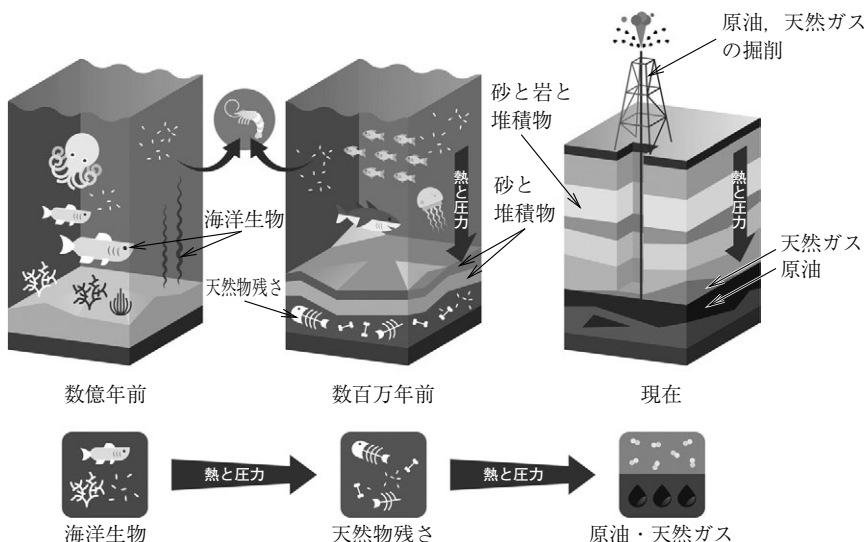


図1.4 化石燃料の成り立ち

エネルギーで生成した物質であり、また、その生成の過程で大気中の二酸化炭素を炭水化物として固定している。現状ではこのようにして長い時間をかけて作られた化石燃料を、産業革命後のたった数百年で燃焼し、消費している。確認された事実として、地球の大気中の二酸化炭素濃度と平均気温とが徐々に上昇していることが挙げられる。二酸化炭素は**温室効果ガス** (greenhouse gas) と呼ばれる。太陽からの熱を大気中に閉じ込める作用をする気体である (図 1.5)。これが前述の二つの事実を結びつける因果関係にある。そして平均気温の上昇は**地球温暖化** (global warming) と呼ばれ、干ばつや水害などの異常気象につながる気候変動要因として認識されている。

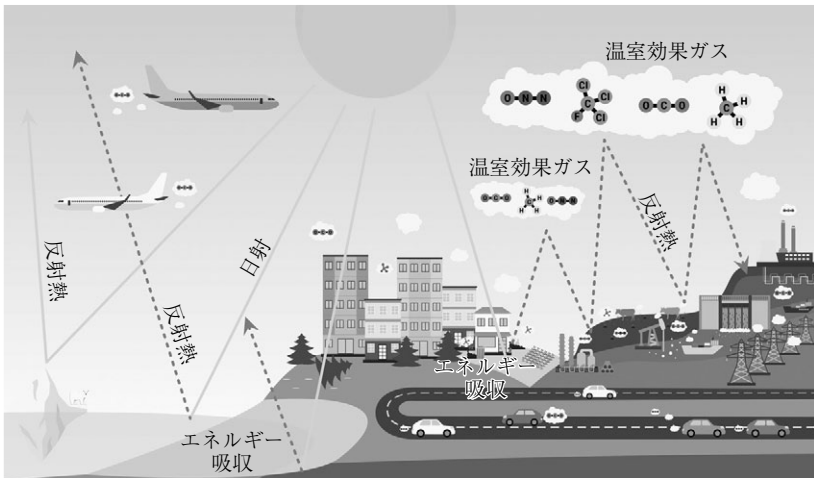


図 1.5 温室効果

このような状況を踏まえて、1992年に**気候変動に関する国際連合枠組条約** (United Nations Framework Convention on Climate Change : UNFCCC) が採択され、継続的に**国連気候変動枠組条約締結国会議** (Conference of the Parties : COP) が開催されてきた。現在は 2015 年に採択された**パリ協定** (Paris Agreement) を踏まえたうえで、2050年の脱炭素化を目指して、各国が



索引



【あ】		【く】		【す】	
アグリゲーター	20	矩形波インピーダンス法	102	水力発電	13
【い】		クーロン	61	ステージ構造	33
イオン伝導性	29	【け】		スピネルマンガン	33
インターカレーション	36	原子力発電	14	スマートグリッド	1
【え】		【こ】		【せ】	
エネルギーマネジメント		交流インピーダンス法	101	制御弁式鉛蓄電池	28
システム	1	交流内部抵抗法	101	セパレータ	35
エネルギーリソース		固体電解質	39	全固体リチウムイオン蓄電池	40
アグリゲーション	20	【さ】		【た】	
円筒型	37	再生可能エネルギー	1	太陽光発電	15
【お】		鎖状炭酸エステル	31	ダックカーブ現象	16
オリビン	33	下げ調整力	17	脱挿入	36
温室効果ガス	5	差電圧法	105	脱炭素社会	1
【か】		サルフェーション	28	タブ	35
開回路電圧	26, 43	酸化還元電位	59	【ち】	
解体分析	99	【し】		地球温暖化	5
化学電池	21	ジェリーロール	39	チタン酸リチウム	33
角型	37	時間帯偏在性	15	【て】	
仮想発電所	19	時間領域	100	定電流充放電試験	99
カットオフ周波数	48	時定数	47	定電流定電圧	27
活物質粒子の膨張収縮	97	充電曲線解析法	104	定電流定電圧充電	62
過電圧	26	集電体	36	定電流放電	63
過渡応答	52	充電率	25	ディーブラーニング	105
過渡応答変換法	102	周波数領域	100	適応フィルタ	104
火力発電	14	充放電運用領域	96	テーブルルックアップ	66
環状炭酸エステル	31	充放電曲線	95	電荷移動抵抗	45
完全放電状態	63	需給バランス	11	電極表面粗さ	51
【き】		出力制御	18	電池容量	61
機械学習	105	需要創出	19	デンドライト	39
起電力	59	上限電圧	27	電流レート	61
		触媒栓式鉛蓄電池	28		

電力エネルギーネット ワーク	9	【は】	満充電容量	61
【と】		バインダ	【ゆ】	
等価回路	52	発電抑制	有機電解液	34
同時同量	10	【ひ】	輪 率	31
導電補助剤	36	比誘電率	【ら】	
トリクル充電	27	【ふ】	ラミネート型	37
【な】		風力発電	【り】	
ナイキストプロット	45	分 極	リチウムイオン蓄電池	29
内部インピーダンス	43	【へ】	リチウムインサージョン 材料	32
内部抵抗	44	平衡状態	リン酸鉄リチウム	33
鉛蓄電池	26	平坦領域	【れ】	
【に】		ペント型鉛蓄電池	劣 化	95
ニューラルネットワーク	105	【ほ】	劣化診断	95, 99
【ね】		ポイケルトプロット	【わ】	
ネガワット	19	放電曲線微分法	ワールブルグインピー ダンス	45
熱回路網法	58	ポジワット	【ま】	
粘性率	31	満充電状態		
【英字】				
BMS	67	CPE	SEI	98
		dQ/dV 法		
		dV/dQ 法		

— 著者略歴 —

福井 正博 (ふくい まさひろ)

1981年 大阪大学工学部電子工学科卒業
1983年 大阪大学大学院工学研究科修士課程
修了(電子工学専攻)
1983年 松下電器産業株式会社勤務
1989年 カリフォルニア大学パークレー校客
~90年 員研究員
1999年 博士(工学)(大阪大学)
2003年 立命館大学教授
現在に至る

有馬 理仁 (ありま まさひと)

2004年 東京工業大学生命理工学部生命科学
科卒業
2006年 東京工業大学大学院生命理工学研究
科修士課程修了(分子生命科学専
攻)
2006年 大和製罐株式会社勤務
現在に至る
2019年 東京工業大学非常勤講師
~20年
2021年 立命館大学大学院理工学研究科博士
後期課程修了(電子システム専攻)
博士(工学)
2021年 立命館大学授業担当講師

スマートグリッドと蓄電技術

Smart Grid and Battery Management Technology

© Masahiro Fukui, Masahito Arima 2022

2022年2月18日 初版第1刷発行



検印省略

著者 福井 正博
有馬 理仁
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 978-4-339-00978-1 C3054 Printed in Japan

(谷口)



<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。