

博士論文

IoT を活用した能動的電力需要創出に関する開発研究

馬場 博幸

内容梗概

世界各国と同様、わが国に於いても再生可能エネルギー（以下、再エネ）の導入が盛んである。特に、わが国の再エネ導入の特徴として、太陽光発電（以下、PV）が飛びぬけて多いことが挙げられる。

PVは、環境負荷低減効果や、資源に乏しいわが国に於ける水力発電と並ぶ純国産エネルギーとしての長所がある一方、人為的な出力の増減が困難であるため、常に供給＝需要を維持しなければならない電力システムには、ネガティブな影響を及ぼす場合もある。その影響は、配電線といった局所的なものから、電力系統全体に及ぶ巨視的なものまで複数あるが、本論文では、その中の「PVの発電量が多く、供給＝需要が維持できなくなり、周波数が維持できない状況」を取り上げる。このような課題に対しては、蓄電池などを使って余剰電力を貯める、ということが一般的に検討されているが、本論文では、それ以外の方法として、余剰電力をその時に能動的に消費する、という需要創出型デマンドレスポンスを取り扱う。

デマンドレスポンス（以下、DR）の概念は、2005年の米国エネルギーポリシー法に始まったとされる。既往のDR研究や実証を俯瞰すると、これらは、需要を抑制するものが殆どであり、また、需要創出を目指すものであっても、電気自動車の充電のように、一台当たりの消費電力は大きいものの、普及そのものは今後の動向次第といった需要機器を対象としたものが多く、既に幅広く普及した家電機器を対象としたものは殆どない。

一方、家電機器に限らず、住宅設備機器を含む様々な機器をインターネットに繋ぐというIoT実現の取り組みが進んでいる。このようなICT環境を前提とすると、エネルギー領域の事業者は、IoT化された家電機器を自身のアプリケーションで操作することにより、先に述べたPV余剰発電を消費する仕組みを比較的容易に実現できる可能性がある。

そこで、本論文では、PV余剰発電をIoT化された家電機器によって消費し、本稿執筆中に実際に実施されたPVの出力抑制を緩和することを提案する。以下に本論文の構成を述べる。

本論文では、まず、電力システムの概要を整理する。これは、長らく地域独占が続いた電力システムは、一般に公表されている情報がさほど多くないことを補うためである。続いて、PV余剰発電の電力システムに対する弊害を分類し、本論文が扱う対象範囲を明確化する。次に、本論文がPV余剰発電の対策として研究するDRの既往研究や実証を整理し、家電機器によるExplicit型の需要創出型DRは、DR研究の空白域であることを明示する。並行して、家電機器等に対するIoTの動向を整理し、それをどのようにDRに活用するかを述べる。

以上の準備的整理を踏まえ、本論文で進める開発研究の目的を「アグリゲーターが需要創出し、PV連携する仕組みの実現可能性の確認」と設定する。

目的に適うDRを実現するには、①DR資源としての家電機器による電力消費の有意性の確認、②家電機器をアグリゲーターと言われる事業者が起動／停止する技術的方法、③その家電機器の起動／停止とPV出力抑制の緩和との連携動作方法、④家電機器によるExplicit型の需要創出型DRに対するユーザー受容性の確認、が必要である。

①については、計算機シミュレーションによりその有意性を確認する。まず、大掴みなシミュレーションを実施し、電力消費ポテンシャルを確認する。その後、シミュレーションのためのDRのモデル化を行うとともに、制約条件等を織り込んで、再度シミュレーションを行い、その有意性を確認する。

②に関しては、次のようなアプローチをとる。家電機器は、例えば炊飯器であれば、米と水を入れて蓋をするなどのユーザー側の準備作業が必要なものがある。そして、家電機

器を **Explicit** 型の **DR** の資源とするには、アグリゲーターにその起動権限を渡すというユーザーの意思表示も必要となる。これを実現するための仕組みについて検討する。

続いて、実際に家電機器を起動／停止する **ICT** 的な仕組みの所要仕様を検討し、実験によってそれが期待どおり機能することを確認するとともに、構造的に有する創出需要の誤差について検討する。

上記の仕組みを基盤として、③を開発研究するため、**PV** システムとの連携運転を実験して動作を確認するとともに、既存の **PCS(Power Conditioning System)** の動特性との不一致部分を見出し、その修正方法について検討する。

④の家電機器による **Explicit** 型の需要創出型 **DR** に対するユーザー受容性の確認については、簡易なインタビュー調査を実施し、その受容性を確認する。

以上に加えて、**IoT** の動向と本論文で開発研究した仕組みの **ICT** としてのアーキテクチャ的考察により、本論文で検討する **IoT** 活用の妥当性を確認する。

これらの一連の開発研究により、「アグリゲーターが需要創出し、**PV** 連携する仕組みの実現可能性の確認」という本研究の目的は達せられたことを述べるとともに、今後の課題についても整理する。

以上

目 次

第1章 序論	8
1.1 なぜ「能動的電力需要創出」なのか	8
1.2 電力システムの概要	9
1.2.1 電力システムの構造	9
1.2.2 火力発電所の概要	11
1.2.3 揚水発電所の概要	12
1.2.4 電力系統同士の連系	12
1.2.5 中央給電指令所の役割	13
1.2.6 事業者間の電力取引（同時同量の原則）	14
1.3 わが国の PV の大量導入	16
1.4 PV 余剰発電の発生	17
1.5 PV 余剰発電の影響と対策	18
第 1 章 参考文献・資料・出典	22
第2章 DR のレビューと本研究の目的	24
2.1 DR の概要	24
2.1.1 DR の登場と「DR=抑制」という一般認識の広がり	24
2.1.2 DR のワークフローと分類整理法	25
2.1.3 DR による需要創出	26
2.2 DR の既往研究や実証のレビュー	28
2.2.1 需要抑制型 DR／需要創出型 DR 《When、並びに、Why》	28
2.2.2 同一建物内 DR／広域 DR 《Where》	30
2.2.3 アグリゲーターの関与 《Who》	30
2.2.4 対象とする低圧需要機器 《What》	31
2.2.5 Implicit 型 DR／Explicit 型 DR 《How》	32
2.2.6 自動 DR（ADR）《How-2》	34
2.2.7 2018 年 9 月 6 日発生北海道胆振東部地震による系統全停 （ブラックアウト）	34
2.3 今後の電力需給調整運用の在り方	37
2.4 本研究の目標と既往手法の問題点	37
2.5 IoT の進展	38
2.6 ここまでの議論のまとめ	40
2.7 本研究の目的	41
2.7.1 開発・研究すべき課題	42
2.7.2 本研究によって構築可能となる DR システム	44
2.8 本論文の構成	45
第 2 章 参考文献・資料・出典	47

第3章	DR リソースとしての電力消費量の確認	50
3.1	IoT化する家電機器による需要創出	51
3.2	家電機器の特性-1	52
3.3	家電機器の特性-2	54
3.4	iDR のポテンシャル試算方法	55
3.4.1	ポテンシャル試算条件-1	55
3.4.2	ポテンシャル試算条件-2	55
3.4.3	ポテンシャル試算フロー -1	57
3.5	ポテンシャル試算結果と PV 出力抑制緩和効果-1	58
3.6	iDR のモデル化と制約条件	60
3.6.1	家電機器の特性-3	60
3.6.2	iDR による需要創出の基本モデル	61
3.7	制約条件を考慮した iDR ポテンシャル試算方法	63
3.7.1	ユーザー受容性による制約条件など	63
3.7.2	ポテンシャル試算条件-3	64
3.7.3	ポテンシャル試算フロー -2	66
3.8	ポテンシャル試算結果と PV 出力抑制緩和効果-2	68
3.9	考察	71
3.9.1	創出需要の有意性と経済価値	71
3.9.2	再エネ積極利用運用とネット需要純増運用	71
3.10	本章のまとめ	72
3.10.1	シミュレーションによる課題解決	72
3.10.2	今後の課題	72
参考 3-1	iDR 家電機器応答想定台数	73
参考 3-2	iDR 家電機器導入ポテンシャル	74
第 3 章	参考文献・資料・出典	75
第4章	家電機器の起動/停止手段	78
4.1	実験機に必要な機能と制約条件	79
4.2	iDR ボタンの提案	80
4.3	IoT 家電機器の状態遷移	81
4.4	実験機の機能	83
4.5	起動/停止方法に関する考察	84
4.6	家電機器のディスパッチ	84
4.7	家電機器の消費電力の種類	87
4.8	デマンドディスパッチシステム (DDS)	87
4.9	[W]か[Wh]か	88
4.10	DDS の所要仕様	89

4.11	DDS の誤差等に関する検討	90
4.12	実験による所要仕様の確認	94
4.12.1	実験条件	94
4.12.2	タイプ C 需要 (バッテリー充電器) 単体動作実験	97
4.12.3	タイプ D 需要 (炊飯器) 単体動作実験	98
4.12.4	タイプ C 需要とタイプ D 需要の複合動作実験	98
4.13	ディスパッチ量の決定方法に関する考察	99
4.13.1	コマ幅の縮小による方法	99
4.13.2	ディスパッチのタイミングをずらす方法	99
4.13.3	予測値生成による方法	100
4.14	中給とのコミュニケーションに関する考察	101
4.15	スケールの為の技術	102
4.16	本章のまとめ	102
4.16.1	iDR ボタンによる課題解決	102
4.16.2	DDS による課題解決	102
4.16.3	今後の課題	103
	参考 4-1 実験シナリオ例	104
第5章	PV との連携実現方法	108
5.1	PV 出力抑制の制度	109
5.2	PV 出力抑制の技術的概要	110
5.3	PV 出力抑制と需要創出のスタイルの差異	112
5.4	DDS と PV の連携シーケンス	113
5.5	DDS と PV の連携運転実験システム	113
5.6	DDS と PV の連携運転実験結果	117
5.7	需要創出と PV システムの動特性に関する考察	119
5.8	需要創出の立ち上がりに関する考察	121
5.9	本章のまとめ	122
5.9.1	DDS と PV の連携運転実験による課題解決	122
5.9.2	今後の課題	122
	参考 5-1 実験シナリオ例	123
	第 5 章 参考文献・資料・出典	126
第6章	ユーザー受容性調査	128
6.1	ユーザー受容性調査の必要性	129
6.2	調査方法	129
6.3	調査結果	130
6.4	家電機器性能に関する考察	132

6.5	コミュニケーションに関する考察	132
6.6	本章のまとめ	133
6.6.1	インタビュー調査による課題解決	133
6.6.2	今後の課題	133
参考 6-1	インタビューの流れと質問項目	133
第7章	家電機器のIoT化の活用	134
7.1	家電機器のIoT化	135
7.2	iDRへの適応方法	137
7.3	相互接続/相互運用性の確保	139
7.3.1	煩雑な相互接続	139
7.3.2	IoT-HUBの必要性	139
7.4	IoT-HUBの要件	141
7.5	プリンタードライバーモデルの応用に関する考察	142
7.6	IoT家電機器の安全に関する考察	143
7.7	本章のまとめ	144
7.7.1	IoT化の活用による課題解決	144
7.7.2	今後の課題	144
第8章	結論	146
8.1	各課題に対する結論（社会に対する新しい貢献）	148
8.2	今後の課題	150
8.2.1	第3章で整理した項目	150
8.2.2	第4章で整理した項目	150
8.2.3	第5章で整理した項目	151
8.2.4	第6章で整理した項目	151
	発表文献一覧	152
	付録：オープンキャンパスにおけるiDRに対する見学者の反応	154
	謝辞	156

第1章 序論

本章では、生活や産業活動に不可欠である電力を発電し流通させ、需要がその電力を消費する仕組み（以下、電力システム）を説明する。そして、その電力システムに於いて、再生可能エネルギー電源（以下、再エネ）、中でも、太陽光発電設備（以下、PV）の導入が急速に進む現状と課題を整理する。

本章の章構成について説明する。

- 1.1 節「なぜ「能動的電力需要創出」なのか」では、PV によって電力が余る事態の発生と、解決方法の選択肢について極簡単に説明する。
- 1.2 節「電力システムの概要」では、本論文に於ける議論を進めるために必要な電力システムの基本的情報を整理認識する。
- 1.3 節「わが国の PV の大量導入」では、風力など他の再エネも含めた国内の導入状況とともに、他国の PV 導入状況とも比較して、如何にわが国の PV が大量に導入されているかを概観する。
- 1.4 節「PV 余剰発電の発生」では、PV が大量導入された九州電力株式会社エリアに於ける実際の状況について概説し、PV 余剰発電の概況を理解する。
- 1.5 節「PV 余剰発電の影響と対策」では、PV 余剰発電によって、電力システムにどのような影響が発生するかを整理し、PV 出力抑制など現在実施・検討されている対策を概観し、主に本研究が対象とする需要創出の位置づけを明確にする。

1.1 なぜ「能動的電力需要創出」なのか

東日本大震災に端を発する原発事故、計画停電などで、わが国の電力需給が揺らいだ 2011 年の翌年、太陽光発電などの再エネを、電力会社が決められた価格で購入する「固定価格買取制度」が導入された。この制度は、風力発電やバイオマス発電など広く再エネを活用した発電に適用されるものであるが、実際には PV が急増し、昼間帯では、周波数の維持を担う火力発電などの存在を脅かすまでになった。別な言い方すれば、これは少し前では考えられなかった「電力が余る」という事態の発生である（図 1-1）。

解決策は、余らないように抑制（これを PV 出力抑制と言う）するか、または、余った電力を「貯める」か「使う」か、若しくはそれらの「混合策」か、である。貯めるための入れ物となるバッテリーの研究開発も進んではいるが、バッテリー自体はまだ高額である。では、「使う」技術はどうか。電力需要（以下、需要）を変化させる仕組みを一般にデマンドレスポンス（以下、DR）というが、DR は後述するように「使用を抑制する」ための研究開発は盛んに行われてきたが、「積極的に使う」研究開発は進んでいない。

本論文は、この「積極的に使う」研究の報告である。

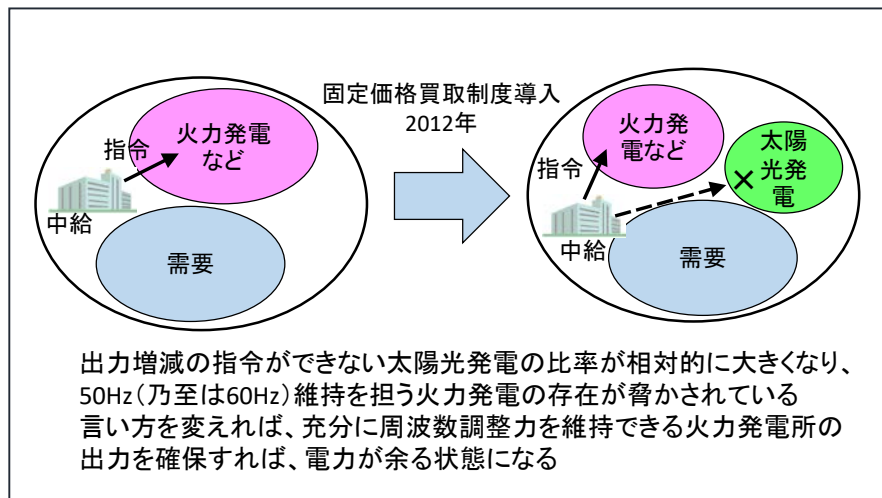


図 1-1 太陽光発電急増の影響

1.2 電力システムの概要

わが国の電気事業は、1886年(明治19年)に現在の東京都中央区で、現・東京電力ホールディングス(株)の前身である東京電燈会社が開業[1]したのが最初である。それ以来オイルショックなどの一時期を除く130余年に亘って、わが国の経済成長に伴って増加する電力需要に、電気事業は発電能力を追従させるための設備増強と運用を続けてきた。第二次世界大戦以降長らく地域独占が続いた電力システムは、保安等の理由により公開されている基本的情報の蓄積が少なく、Common Senseとして本論の展開に必要な技術情報が不足している。このため、本節で本論文に關係する電力システムの基礎的部分をレビューし、本論を効率的に論ずることとしたい。

1.2.1 電力系統の構造

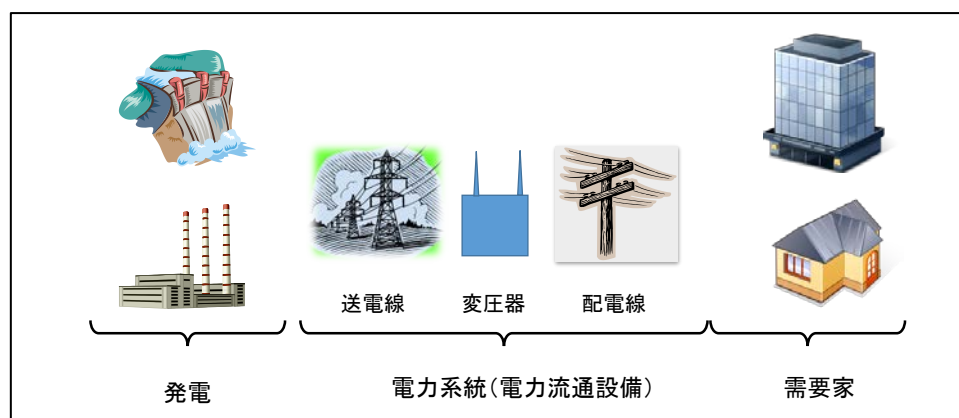


図 1-2 電力システムのマクロ構造

図 1-2 に電力システムのマクロ構造を示す。日々使用する電力(“電気”と呼ばれることが多い)は、電圧は100Vで、電柱の電線を経由して家庭に送られており、電気そのものは発電所と呼ぶ施設で作られている、というのが一般的な消費者の理解ではなかろうか。東日本/西日本で周波数と呼ぶ電気の指標の一つが異なることになると、正確に理解している消

費者は減るであろう。

この節では、まず、電力系統の構造を説明する。電力系統は、電力流通設備とも呼ばれ、発電所と、需要、若しくは、負荷と呼ぶ顧客が有する設備を仲立ちしている。地域独占時代の旧・電力会社（本論文では、2016年4月の電気事業法に基づくライセンス制導入前の10電力会社をこう呼ぶ）のエリア内（一部は、エリア外）に離散して立地した火力発電所や原子力発電所、または水力発電所は、「送電線」と呼ぶ大容量の電線に接続され、これにより集められた電気は需要機器に送られる。

この送電線～メーターまでの、各種発電所から、家庭や工場などの電気の需要箇所に電気を届ける設備を電力系統と言い、その構成要素は、大きく分けると、「送電線」「変電所」「配電線」「(スマート)メーター」である。

電力系統が使用している電圧には、種類がある。首都圏を例にとると、大規模な発電設備、例えば、水力発電所は長野県北部（高瀬川水系／梓川水系）、大出力の火力発電所は福島県（広野町）に所在するなど、最大需要地の東京都から遠く離れている。送電線は銅やアルミでできているので、電流を流せば当然ジュール熱を発生し、それは送電ロスとなってしまふ。これを少しでも少なくするために、高い電圧（＝少ない電流値）で送ることが合理的であるため、大容量の設備ほど高電圧となっている。わが国の最高送電電圧は500kVである。送電線の設備形状は、よく知られている「鉄塔」スタイルである。これが、都心部では地下に設備したトンネル「洞道（どうどう）」に設置する地中線形式となる。

家庭で使用する電気の電圧が100Vであることはよく知られているが、一部の家庭用エアコンなどは200V、新幹線の架線電圧は25,000Vなど、消費する電力の大きさの関係上、使用する機器によって適合する電圧は異なる。このため、発電所から出た電気は、電圧（500kVや275kV、発電所の規模によっては154kV、66kV）の関係上、そのままでは需要機器には接続できない。このため、変電所と呼ぶ設備を多数設け、発電所からの電気が需要に近づくにつれて、徐々にステップダウンするようになっている。東京電力パワーグリッド社を例にとれば、遠方からの電力は需要家に近づくにつれ、500kV→275kV→154kV→66kV→22kVのように電圧を下げてくる。これらを電圧階級と呼ぶ。電圧階級の構成は、旧・電力会社によって若干異なっている。大きな工場や大規模オフィスビルなどは、先に記した電圧階級のうち、主に66kVや22kV（稀に154kV）によって供給されていることが多い（図1-3）。

上記に示した電圧でも、家庭で使用するには余りにも高い電圧である。万一、感電すれば生命に関わることは必至である。66kVや22kVまで下げられた電気は、最終的な変電所（これを配電用変電所と呼ぶ）で、さらに6.6kV（6600V）に下げられ、き線と呼ぶ電線により変電所を出る。き線は、電柱に架けられている電線、配電線に接続され、これにより電気は街中を巡ることとなる。今述べたように、配電線の一般的な設備形態は「電柱」である。景観などの要請により、一部の地域では電柱は無く、配電線は地下に埋設されている。

街中の電柱を見上げると、時折一抱えくらいありそうな円筒形をした機器が設置されているのを見かける。これを柱上トランスと呼び、最後のステップダウン装置である。ここで、電気は、6.6kVから100Vか200Vに降圧されて「引き込み線」と呼ぶ電線により家庭に繋がれる。ここに電力の使用量を計るメーターがある。

メーターは、各旧・電力会社とも、2020年までにスマートメーターに取り換えることが計画されている。今までは、月に一回の検針により一ヶ月の電力使用量によって課金されていたが、スマートメーターにより30分毎の電力使用量を把握することができ、新規参入した電力会社（以下、新電力）と契約したユーザーであっても、このデータが新電力に提供される仕組みとなっているため、多様な料金メニューによる競争が期待されている。

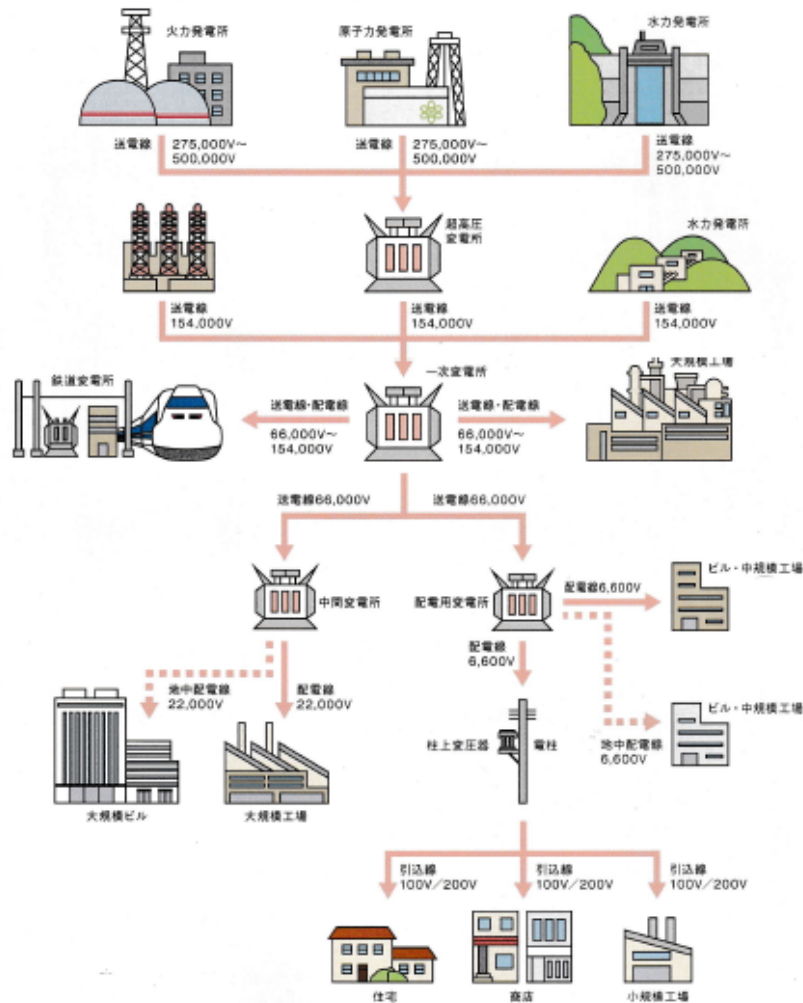


図 1-3 電力システムの概要[2]

1.2.2 火力発電所の概要

火力発電所は、石炭や LNG といった化石燃料の燃焼エネルギーを電気に変換する設備である。旧来型のボイラーのみのタイプと、新鋭のコンバインドサイクルタイプでは、燃料の燃焼方式が異なるが、本論文に關係する出力増減に限界があることには変わらない。

火力発電所の出力（単位は[W]）の上限は、ボイラー、タービン、発電機的能力で決まる認可出力であるが、クルマのエンジンにアイドリングがあるように、火力発電所の出力にも下限値が存在する。そして、それは、比較的短い時間（例：数分～20分）の需要変化に追従できる範囲内（LFC 帯、Load Frequency Control）であるか否かでも異なる。現在の運転出力からどれだけ出力を増加させられるかを「上げ代」、下げられるかを「下げ代」と呼ぶ（図 1-4）。

なお、火力発電には、大量の燃料と空気（酸素）が必要なため、補機と呼ぶポンプや送風機を 1 ユニットあたり複数台使用している。出力の増加に際しても、この補機の運転台数切替が必要となる場合があり、上げ代が常に認可出力に達するまでの値となるわけではない。

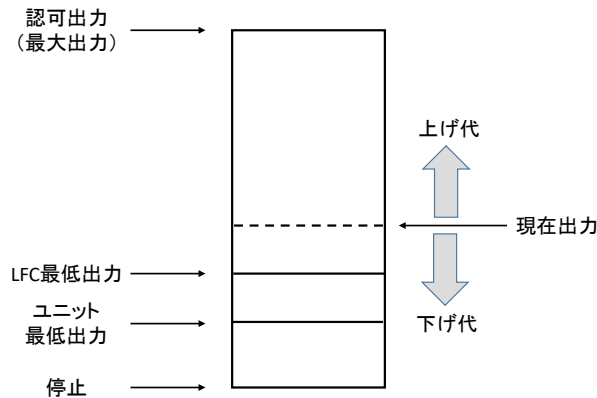


図 1-4 火力発電所の運転イメージ

1.2.3 揚水発電所の概要

揚水発電所は、水力発電所の一種であるが、ダム湖（調整池、慣習的に単に池とも呼ぶ）を上下二つ持ち、この上下間で水を行き来させることで、一種の蓄電設備として機能する。

図 1-5 にあるように、電力に余剰があるときは、本来の発電機をモーターとして機能させ、水車を逆回転させて水を下池から上池にポンプアップする。この時は、系統からみると揚水発電所は電力を消費する需要に見える。発電の際は、上池から下池に水を落とし発電する。ポンプアップに使用した電力量の 7 割程度は発電可能と言われている。

従来は、夜間に余剰となる原子力発電所（原発は 24 時間 100%出力運転が一般的）の電力を蓄え、昼間に水を落としてピーク需要に応える運転をしていた。しかし、現在は、本論に示すように太陽光発電の余剰を消費するため、昼間にポンプアップ運転（動力運転）していることがあり、従来の運転パターンを示す図とは昼夜逆転が起きている。

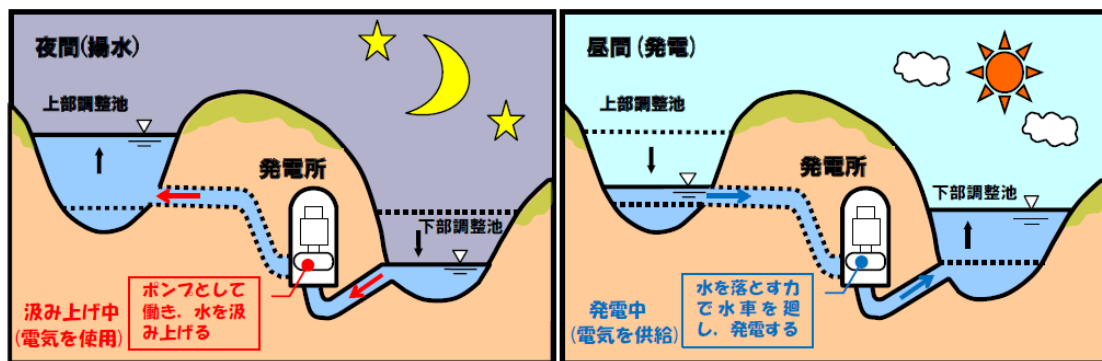


図 1-5 揚水発電所の原理と、従来の運転パターン[3]

1.2.4 電力系統同士の連系

東日本大震災によって、原子力発電所や大規模火力発電所が被災した東京電力株式会社（当時）の計画停電に対し、他の旧・電力会社からの電力融通が受けられればそれを回避できたのではないか、という議論の高まりにより、現在、旧・電力会社の電力系統同士の相互接続（これを連系という）に関心が高まっている。

実際には、東日本大震災前から、電源開発株式会社、並びに旧・電力会社 9 社（沖縄電力

を除く)の電力系統は相互接続されおり、大雪などで需要が急増したり、雪解け水による安価な水力発電の電力が豊富にある場合などに広域運営と呼ぶ運用により会社間で電力のやりとりは行われていた。

電力系統同士を相互接続する送電線を「連系線」と呼ぶ。津軽海峡を海底ケーブルで渡る北本連系線などは、技術的理由から直流による連系となっている。また、東京(50Hz)ー中部(60Hz)では、直流を介して周波数を変換する施設のため、「線」ではなく変電所のような「点」的施設であることから、連系線を含めて「連系設備」と呼ぶ(図1-6)。

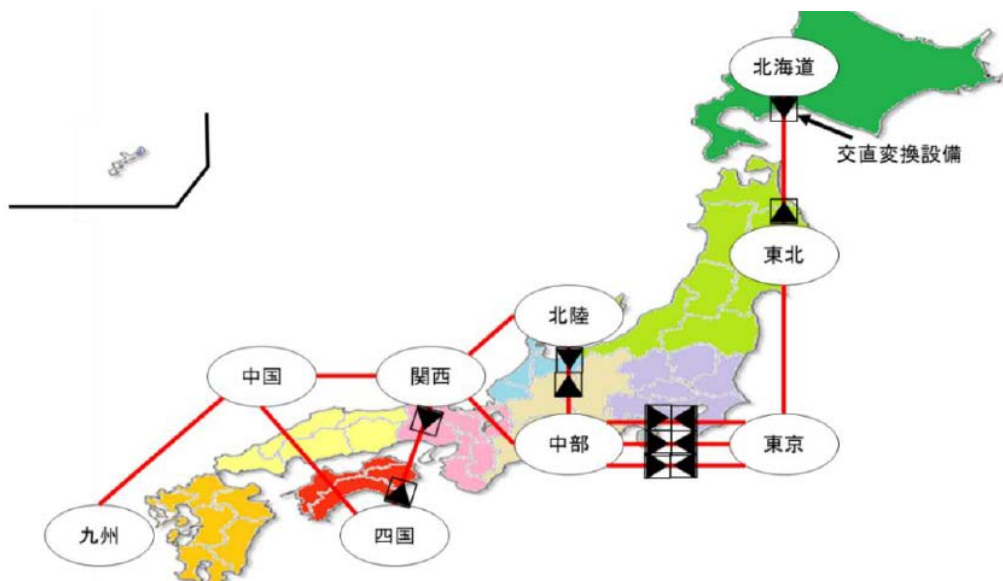


図 1-6 各地域の電力系統の連系状態[4]

1.2.5 中央給電指令所の役割

旧・電力会社(と電源開発株式会社)には、それぞれ中央給電指令所(以下、中給)があり、それぞれの会社の電力システムの運用全体を取り仕切っている。中給が行っている運用は、大きく分けると2つあり、一つは、「需給調整運用」と言い、自社の標準周波数(東京電力パワーグリッド社であれば50Hz)を維持するよう、火力発電所や水力発電所の出力を加減するものである。もう一つは、「系統運用」と呼び、網の目のようになっている送電線網内の電力の流れ(これを、電力潮流と呼ぶ)の分布を制御して、電力システム全体が安定的に稼働するよう調整している。交流を基本とする電力系統は、周波数はどこで測定しても同一の数値が観測されるが、位相は互いにずれているという電気工学的特性を持つ。この位相のずれの大きさが、実はそのシステムの安定性(工学的には安定度という)を決めるファクターとなっており、これを指標としながら変電所に設置された「開閉器」(ごく簡単に言えば“スイッチ”であるが、短絡電流をOFFするため規模の大きな装置である)の操作により、電力潮流の制御を行っている。

本論文では、主にこの需給調整運用に関わる内容を主に扱う。需給調整とは、文字通り、需要と供給を一致させる業務である。これにより、周波数が50Hzや60Hzに維持される。周波数の安定は、電力の品質を表す指標の一つである。電力システムで膨大な数が使われている変圧器には「鉄損」と呼ばれる損失があり、これは周波数に依存する。全ての変圧器は、鉄損と銅損により発熱しているのであるが、周波数がずれれば、この鉄損による発熱量が変わり機器に悪影響を与える可能性がある。また、鉄の圧延や紡績など多くの産業で使用され

ている交流モーター、特に同期電動機は、周波数に同期して回転するため、周波数の変動は交流モーターを使用した製造機器による製品品質に影響を及ぼす。さらに、50Hz を例にとると、48.5Hz や 51Hz まで周波数がずれると、火力発電所のタービンが共振にも似た振動を起し、ブレード同士が擦れてタービンが故障する危険性がある。(ちなみに、2018年8月に筆者が中給所長経験者にヒアリングしたところ、タービンを停止状態から起動し、50Hz (タービンの回転数でいうと 3000 回転/分)に至るまでには、当然 48.5Hz を通過するが、タービンに負荷がかかっていない状態では、上記のような振動は起きないとのことである。)

このように、需要と供給を一致させることにより 50Hz という平衡を維持することから、需給調整運用は、しばしば上皿天秤に例えられる (図 1-7)。

周波数を一定に保つという視点では、①発電 > 需要であれば、発電出力を下げればよい。また、②発電 < 需要であれば、発電出力を上げればよい。しかし、ここで判るように、①発電 > 需要であれば、需要を増加させても周波数維持が可能である。逆に、②発電 < 需要なら、需要を抑制することでも、同じ効果を得られる。このことが、本論では大変重要な考えの基本になっている。

図 1-8 に、中給の様子を示す。

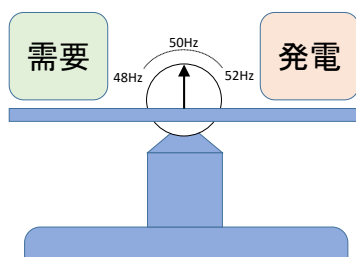


図 1-7 需給バランス



図 1-8 中央給電指令所[5]

1.2.6 事業者間の電力取引 (同時同量の原則)

現在の電気事業法が施行されたのは、第二次世界大戦後の 1951 年 (昭和 26 年) 5 月 1 日であり、この日を起点として、旧・電力会社の地域独占体制を基盤とする電力システムが出来上がった。既に地域独占体制は終わり、送配電ネットワークの総括原価方式による地域独占だけを残して、完全自由化体制に移行しつつある。地域独占体制が全く変化なしに来て、今日急変しているわけではなく、東日本大震災より随分以前から、数次にわたり徐々に電力自由化は進展して来ている。その歴史をひも解くことは本論文の主旨ではないので他に譲るが、2000 年以降の自由化では、事業者間取引に 30 分同時同量という概念が導入された。これは、需要創出にも相当程度影響する基本的考え方であり、以下に紹介する。

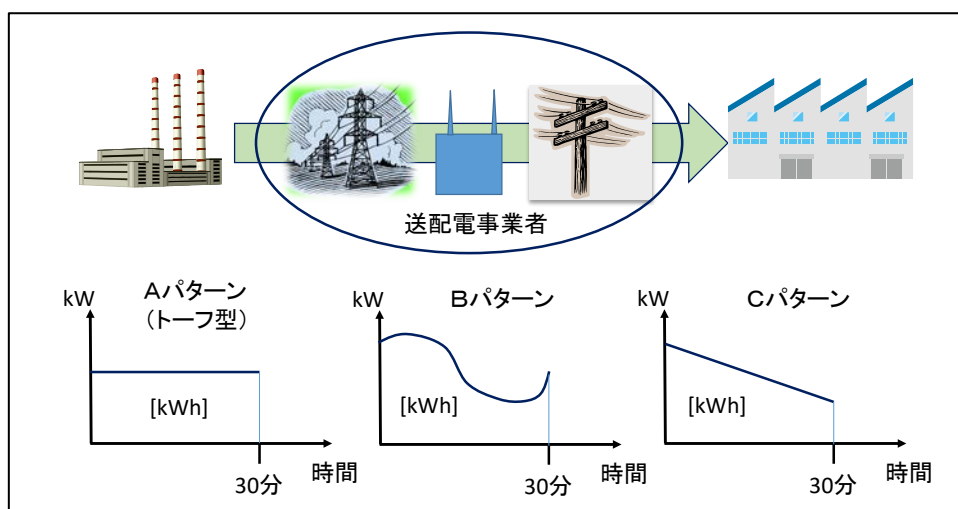


図 1-9 30 分同時同量の概念図

図 1-9 に示すように、ある新電力が、自社の発電所から送配電事業者のネットワークを使用して、自社の顧客（図では工場）に電力を送電したとする。工場の操業状態によって、電力の使用状態は時々刻々変化することになるが、このパターンがどのようなものであろうと、30 分間の電力量[Wh]が同じであれば全て同じと見なす、というもので、これを 30 分同時同量と呼び、電力システムにおける事業者間取引の大原則となっている。

図 1-9 では、電力の消費パターンを A,B,C の 3 種類例示したが、この電力量[Wh]が同じであれば、この取引に関わる系統使用料金、すなわち、託送料は同じである。

送配電事業者のネットワークを使用して、遠方の自社の顧客に自社の電力を送ることは、一見、自社の電力が送配電ネットワークによって、あたかも、トラックで荷物を輸送するが如く運ばれていくように思えるが、実際は、電気の工学的な物理特性によって、そのようにはなっていない。図の新電力の発電所の電力は、おそらくその近傍に位置する需要によって消費されてしまい、図に描かれた顧客である工場は、おそらくその近傍に立地する他の発電所（1箇所とは限らない）からの電力を消費していることとなる。このため、この図の新電力の発電パターンと顧客の消費パターンは必ずしも一致はしておらず、いわば収支尻とも言える 30 分間の電力量[Wh]を一致させるという運転をしているわけである。

仮に、図 1-9 の発電側が A パターン（このような矩形のパターンを食品の豆腐になぞらえて「トーフ型」という）の運転をし、工場側が C パターンの消費をしたとする。30 分間の電力量は同じでも、例えば、10 分時点頃には発電量は不足し、逆に 20 分時点頃には発電過剰になっている。電力システムの周波数は、どの地点で計測しても同じであり、また、事業者によって異なる周波数を使用しているということはあるので、仮に 50Hz が維持されているとすれば、10 分時点頃では新電力以外の発電所が増力しており、また、20 分時点頃ではその逆が起きていることとなる。

このように、周波数を指標として、発電所は相互に補完する仕掛けが組み込まれており、応答する時間によって、異なる仕組みが機能する。

- ① ～数分程度 : ガバナーフリー (GF) 機能…発電機に組み込まれた调速機能
- ② 数分～数十分 : LFC (Load Frequency Control)機能…中給のコンピュータによる出力増減機能
- ③ 数十分～ : EDC (Economic Dispatch Control)機能…人間系も含めた発電コストの安い発電機を選択運転

1.3 わが国の PV の大量導入

世界的に再エネの導入が盛ん[6]である。わが国でも、2012年の固定価格買取制度導入以来、再エネ、特に、その大部分を占める PV は、驚異的なペースで導入が進んだ。図 1-10 に、国内の他の再エネ導入量との比較を示す。PV は、2017年3月末現在で、3,847万 kW が導入されている[7]。我が国の年間を通した電力最大需要が、15,000万 kW 強[8]であることを考えると、実に多くの PV が導入されていることが判る。

図 1-11、1-12 に、世界に於ける PV 導入量と、国別の PV 導入量を示す。近年、世界的に PV 導入量が増えていることとともに、後述するように、わが国の約 5 倍の電力需要がある米国と比べても、ほぼ同量の PV が導入されていることが判る。このように、わが国では、PV が突出した比率で導入されており、中国は別として、わが国は PV 大国と呼んでも良いような状態である。

PV は、環境負荷低減などのメリットがある一方、火力発電所等の集中電源とは異なり、人為的な出力の増減が困難であることから、従来の電力システムのコントロール方法では、対処しきれない影響を発生させている。

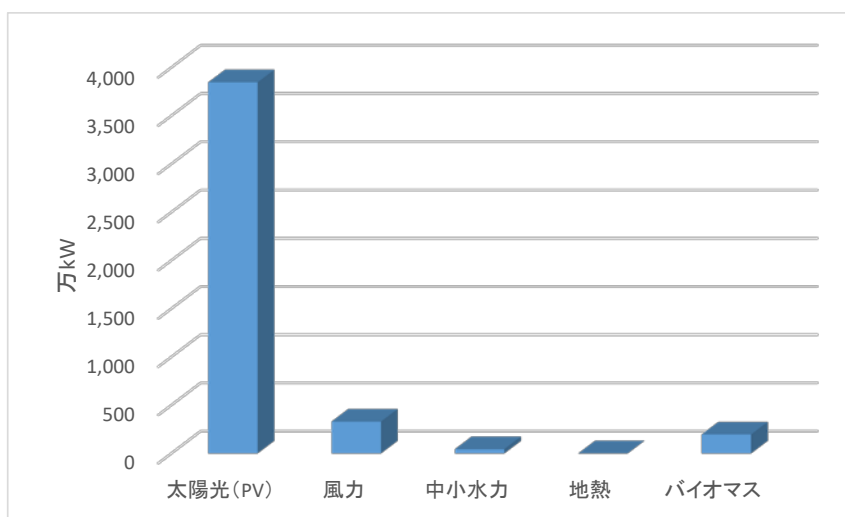


図 1-10 国内の再エネ導入量 (2017年3月現在) [7]

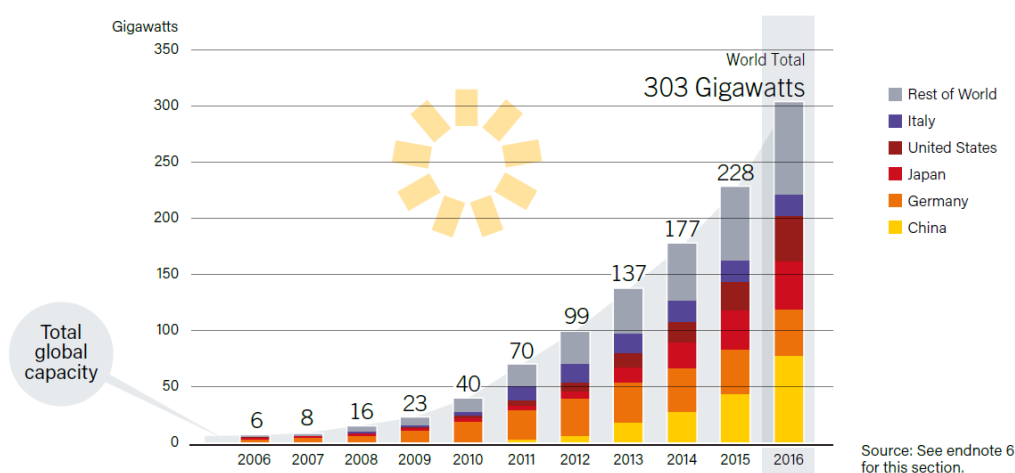


図 1-11 世界に於ける PV 導入量 [9]

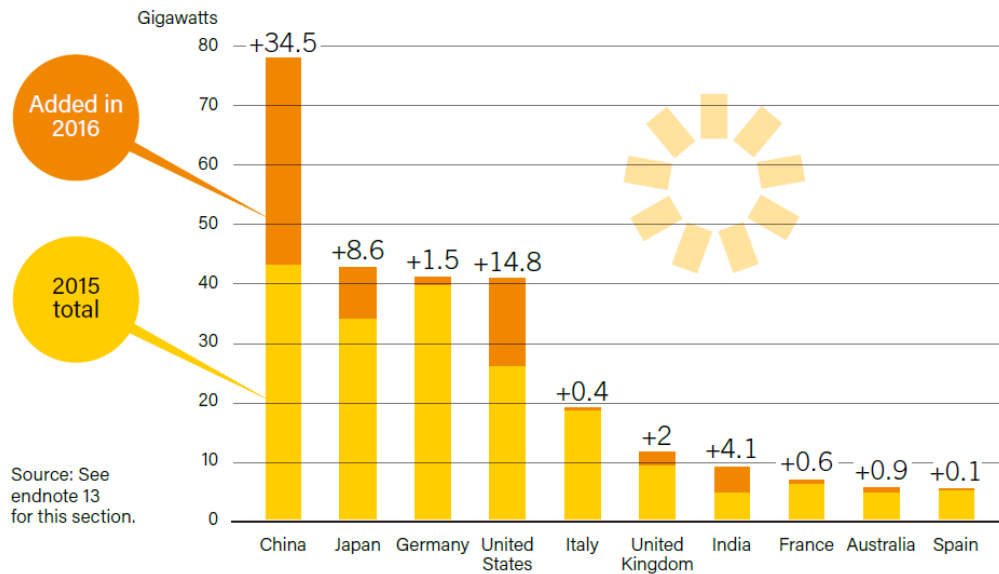


図 1-12 国別の PV 導入量[9]

1.4 PV 余剰発電の発生

我が国の電気事業は、自由化が進んだ現在、旧・電力会社の電力系統を所有し、系統運用を行う部門（地域によっては、既に別会社）は、一般送配電事業者と呼ぶ種別の事業者となり、その中給が需給調整運用を行っている。火力発電所などの集中電源の出力を増減するとともに、PV 出力や連系設備潮流なども考慮して、電力需要と供給を一致させている。

近年の PV の急増により、初夏や初秋などの冷暖房需要が殆ど無い低電力需要期は、電力が余剰傾向にあり、今後さらに PV が増えると、火力発電所などの集中電源の出力を下げても総発電量が需要を上回り、周波数が維持できない、いわゆる「下げ代不足」の発生が現実の問題となりつつある。

図 1-13 に、九州電力株式会社発表の資料[10]を基に、PV 余剰による下げ代不足の様子を模式的に示す。図 1-13（上段）では、正午前後には、大量の PV 出力と原子力発電により、需要はほぼ賄われてしまっており、周波数調整を担う火力発電の稼働余地が極めて小さいため、火力発電所は出力を下げて運転していることが伺える。このタイミングで、PV 出力がさらに増えたり、需要が減少しても、もはや火力発電所は、出力の下げようがない、若しくは、乏しい状態にあり、まさに「下げ代不足」発生懸念状況が判る。

周波数は、主に火力発電による調整力により維持されていることから、実際の需給運用では、同一時間帯に図 1-13（下段）の b) Demand creation に示すように、揚水発電所（PHS, Pumped Hydro Storage）の動力運転を火力発電による電力によって稼働させ、その火力発電によって周波数調整力を確保したことが報告されている[10]。

PV の余剰発電による需給調整運用の大変さは、北海道、東京、関西などどの地域でも本質的には同一であるが、このような状況は、特に九州地方で顕著[11]に表れている。これは、同地方が比較的 PV 設置に適した土地に余裕があったことに加え、降雪が少ないため設置工事の容易さなどが関係しているといわれている。2018 年 10 月 13 日に出力抑制が実施された、九州電力株式会社発表[12]の需給バランスを図 1-14 に示す。

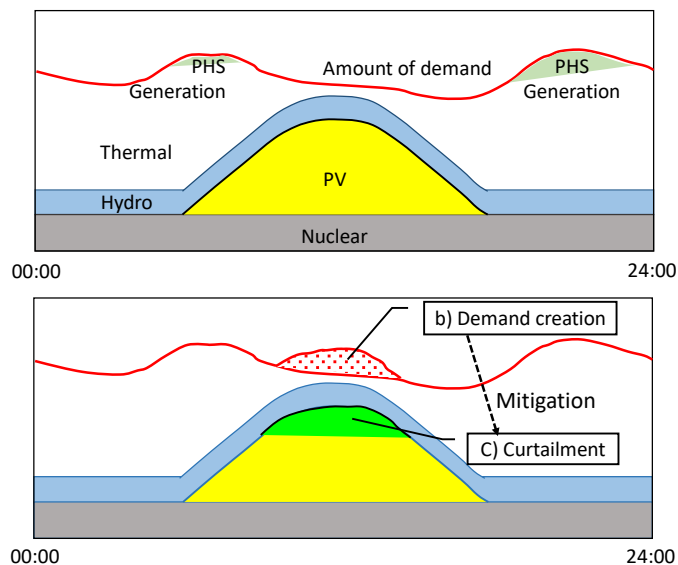


図 1-13 「下げ代不足」発生懸念の模式図[10]

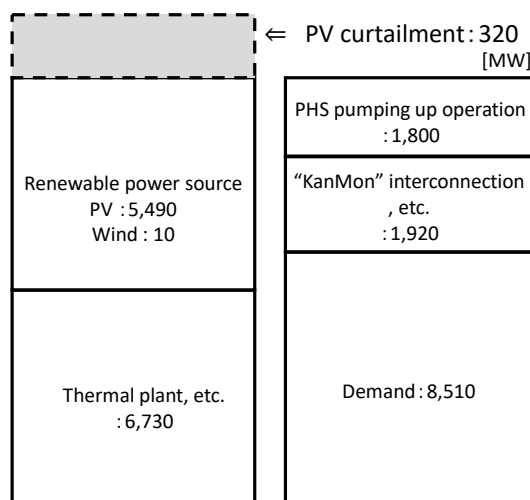


図 1-14 九州電力需給バランス図 (2018年10月13日) [12]

1.5 PV 余剰発電の影響と対策

PVの余剰発電の影響は、当該一般送配電事業者の制御エリア（東京電力パワーグリッド社（以下、東電PG））であれば、旧東京電力株式会社の管轄エリア（一都五県と富士川以東の静岡県）全体に影響が及ぶようなマクロ的なものと、配電線の一部などにその影響が現れるミクロ（局所）的なものに大別される。

マクロな影響の筆頭は、系統周波数の問題である。電圧とは異なり周波数は、その瞬時々々で系統のどこで計測しても同一という工学的特性がある。このため、例えば、関東地域の東電PGの電力系統の接続場所の如何に関わらず多量のPVが接続され、1.1節に述べたようなPV余剰発電の状態が発生すると、周波数は、東電PGの電力系統全ての場所で同社標準周波数[13]の50Hzより高い状態となり、電力の品質が維持できないこととなる。上皿天秤スタイルのイメージ図を図1-15に示す。

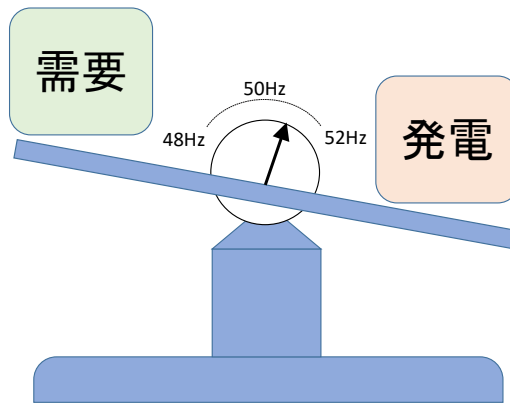


図 1-15 PV 余剰発電による周波数の上昇

この他、周波数問題ほどではないが、マクロ的な問題としては、特定の地域に PV が集中的に設置されるような場合に、俗に「送配電線混雑」といわれる問題が時折生ずる（図 1-16）。PV を電力系統に接続することを「連系」というが、特定の送配電線に流れ込む PV からの電力が多すぎると、送電線の熱容量や安定度の問題から、一定量以上の PV を連系できなくなる。この場合は、送電線の増強や空き容量に関する運用高度化などで問題解決をしている。

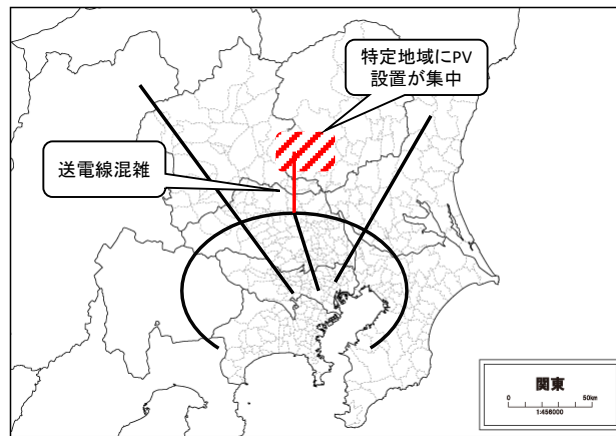


図 1-16 送電線混雑のイメージ図

（地図出典：<http://www.freemap.jp/itemFreeDIPage.php?b=region&s=kantou>）

ミクロな問題は、配電線に現れる。特定の配電線に多量に PV を連系すると、当該配電線に接続されている需要の量によっては、PV から配電線に流入（これを「逆潮流」という）する電力が増加する。その結果、家庭に届けられる電力の電圧が上昇し、標準電圧 100V や 200V それぞれに対する維持すべき値[14]（100V にあっては $101 \pm 5V$ 、200V にあっては $202 \pm 20V$ ）を満たすことができず、供給に支障が出る可能性がある。これは、PV が連系されている配電線各々に個別に発生する問題である（図 1-17）。

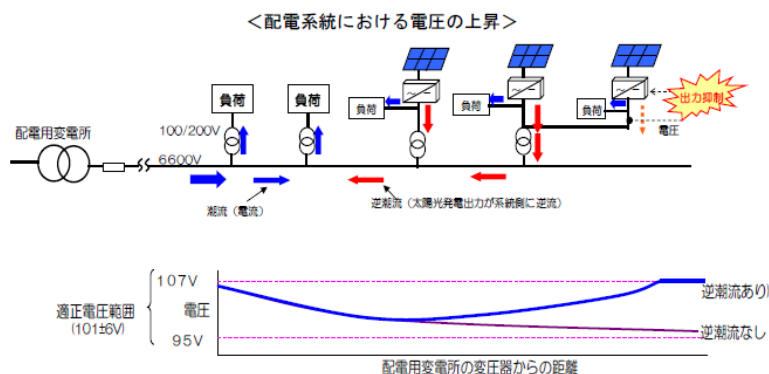


図 1-17 逆潮流による配電線電圧上昇のイメージ図[15]

表 1-1 PV 余剰発電の症状と対策

分類	具体的症状	対策	長所	問題点
マクロ問題	周波数上昇	火力発電設備や揚水発電設備の改造や運用高度化	供給側だけで対策ができる	大規模であり、コストがかかる
		需要創出による余剰発電の消費	再エネ積極利用社会実現に前進できる	確実に需要創出できるデマンドレスポンス(DR)手法は確立されていない
		PV出力抑制	確実にシステムを安定化できる	固定価格買取による収益が減少するため、投資にネガティブに働く
	送電線混雑	送電線増強	ネットワーク側だけで対策ができる	用地取得などに時間とコストがかかる
ミクロ問題	配電線電圧上昇	配電線の分割や無効電力補償装置の設置など	ネットワーク側だけで対策ができる	コストがかかる

先に述べた、ミクロな配電線の電圧問題は、配電線を分割して、配電用変電所への接続状態を変更するなどにより対策可能である。一方、マクロな問題である周波数については、1.4節の九州電力の需給調整運用の例で見たように、揚水発電所を動力運転して需要を創り、これによって、火力発電の稼働余地を能動的に作って周波数安定を維持するといったシステム全体の需給バランスの問題であり、需要創出の手立てが大変重要な鍵となる。

その他の PV 余剰発電の対策としては(表 1-1)、火力発電所では、ボイラーに使用する水の水質を管理して、停止している時間を延ばせるようにしたり、揚水発電所の需要としての特性(消費電力)を可変できるように設備改造するなどがある。また、旧来は夜間に動力運転して、日中に水を落として発電するという運転パターンを、前述の如く昼夜逆転させるなどの運用方法の高度化による対策がある。

更に、PV 出力を制御信号によって発電上限値を設け、各時点で受け入れ可能な量に出力を抑制する仕組みも有効である。近年、その具体的な検討[16]が進んでおり、これを PV 出力抑制(若しくは、PV 出力制御)と呼んでいる。

これらは、どれか一つがあればいいというものではない。例えば、揚水発電所を動力運転しようとしても、上部調整池が満水であれば、くみ上げ運転はできない。このように、PV 余剰発電に対する対策は、多様な打ち手を用意しておき、地域、季節、時間帯で異なる個別事情に応じて、最適なものを活用することが重要である。

PV 出力抑制は、システム安定のためには必要欠くべからざる手段ではあるが、太陽光発電事

業者の投資効率 (Return on Investment、RoI)を低下させる副作用があり[17]、再エネを今後の主力電源と位置付ける[18]わが国としても、投資意欲を低下させない仕組みが必要である。このため、PV 出力抑制を実施する場合でも、図 1-13 (下段) に示すように、需要創出を DR の一種として組み合わせることができれば、新たに創出する需要によって、その分に相当する PV 出力抑制を緩和できるため、系統安定と再エネ積極利用を同時に推進でき理想的と考えられる。必要な需要は、具体的には DR によって創出するが、DR は後述するように需要抑制型にその研究・実証が偏っており、確実に需要創出できる DR 手法は確立されていないことが問題である。

第1章 参考文献・資料・出典

- [1] 一般社団法人日本電気協会 関東電気協会資料 (2009)
<https://www.kandenkyo.jp/member/pdf/yukari%20vol4.pdf>
- [2] 東京電力株式会社パンフレット (2010)
- [3] 電気学会シンポジウム資料 (2016、北海道電力)
- [4] 電力広域的運営推進機関(OCCTO)報告書 (2016)
- [5] 東京電力株式会社パンフレット (2010)
- [6] IEA: “RENEWABLES 2017 EXECUTIVE SUMMARY”
<https://www.iaea.org/publications/freepublications/publication/Renewables2017ExecutiveSummaryJapanese.pdf>
- [7] 資源エネルギー庁：固定価格買取制度情報公表用サイト
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/statistics/index.html
- [8] 電力広域的運営推進機関(OCCTO)ホームページ
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2017/files/chousei_jukyu_22_02_01.pdf
- [9] RENEWABLES GLOBAL STATUS REPORT 2017
- [10] 九州電力株式会社ホームページ
<http://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0055/4201/2ntja6f6cpd.pdf>
- [11] 日経 BP 社 Web サイト
<https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atcl/news/16/042711055/?ST=msb&P=1>
- [12] 九州電力株式会社ホームページ
http://www.kyuden.co.jp/notice_181013.html
- [13] 電気事業法施行規則第 38 条第 2 項
https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=407M50000400077#424
- [14] 電気事業法施行規則第 38 条
https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=407M50000400077#424
- [15] 経済産業省：低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて～次世代送配電ネットワーク研究会 報告書～ (2010.4)
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20111108/sankou2.pdf>
- [16] 資源エネルギー庁：「平成 26 年度補正予算経済産業省資源エネルギー庁次世代双方向通信出力制御緊急実証」
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/shoujo/smart_house/pdf/008_s10_00.pdf

[17] 日本経済新聞（2015年3月5日）

<https://www.nikkei.com/article/DGXLZO83957310U5A300C1L41000/>

[18] 第5次エネルギー基本計画：

<http://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001-1.pdf>

各 Web サイトへのアクセスは、2019年10月13日に確認した。

第2章 DRのレビューと本研究の目的

本章では、第1章で述べたPVが大量に導入されたことによる余剰発電問題に関し、その解決手段の一つであるDRによる能動的需要創出について説明する。そして、これを活用した、今後の電力需給調整運用の在り方を目標として設定する。

さらに、既往の研究・実証の手法の問題点を認識し、あらゆるモノがインターネットに繋がるというInternet of Things (以下、IoT) が、その問題の解決策となる可能性について述べる。これらを纏めて、IoT化された需要機器による需要創出型DRを前提とした本研究の目的を述べる。

以下に本章の構成を述べる。

- 2.1 節「DRの概要」では、需要創出の具体的手法となるDRの成り立ちの経緯や、数多あるDRの分類整理について説明する。
- 2.2 節「DRの既往研究や実証のレビュー」で、その分類整理に沿った形でその現状を把握し、需要創出型DRが殆ど研究されていない空白域であることを明確化する。
- 2.3 節「今後の電力需給調整運用の在り方」では、需要創出型DRによってPV余剰発電を消費し、PVの出力抑制を緩和するとともに、周波数安定を維持する今後の電力需給調整運用の在り方を整理し、これを目標として設定する。
- 2.4 節「本研究の目標と既往手法の問題点」では、DRによる需要創出に際して、既往DR研究・実証に適用されていた手法の問題点を再認識し、それに代わる方法への期待を整理する。
- 2.5 節「IoTの進展」では、前節で認識した問題点に対して、需要機器がインターネットに繋がりがつつあるIoTの進展状況を概観し、IoTのDRへの応用可能性を理解する。
- 2.6 節「ここまでの議論のまとめ」で、IoT化が進む家電機器を対象としたDRによって能動的に需要を創出し、PV余剰発電の抑制を緩和するとともに、周波数安定を維持することを提案する。
- 2.7 節「本研究の目的」で、2.3 節の目標を踏まえた、本研究の目的（大項目と具体的5項目）を説明する。
- 2.8 節「本論文の構成」は、2.7 節を受けて、どのように開発研究を進めるかについて説明する。

2.1 DRの概要

2.1.1 DRの登場と「DR=抑制」という一般認識の広がり

需要を能動的に変化させることをDRといい、これについては、国内外に於いて数知れないほどの既往研究・実証がある。しかし、そもそもDRは、いつ頃世の中に登場したのだろうか。

DRが一般に紹介されたのは、米国の Energy Policy Act 2005 (sec.1252)[1] (以下、EPA2005) が最初と理解されている。この法律は、当時のブッシュ政権が、エネルギー効率の向上や再エネ導入政策の一環として制定したものである。この法律よりDRに対する調査等が規定されたため、これを受けて、連邦エネルギー規制委員会 (Federal Energy Regulation Committee、以下、FERC) が、2006年8月に「Assessment of Demand Response & Advanced Metering」[2] と題する報告書を発表し、その中でDRは下記のよ

うに明確化された。

「系統信頼性の低下時または卸市場価格の高騰時において、電気料金価格の設定またはインセンティブ（対価）の支払いに応じて、需要家側が電力の使用を抑制するよう電力消費パターンを変化させること」

(Changes in electric usage by end-use customers from their normal consumption patterns in response to changes in the price of electricity over time, or to incentive payments designed to induce lower electricity use at times of high wholesale market prices or when system reliability is jeopardized.)

ここでのキーワードは、「価格」「インセンティブ」「電力の使用を抑制」であろう。この定義によって、電気料金やリベートと呼ばれる対価によって、電力使用を“抑制”することが DR であると世界的に理解されるようになったと考えられる。

これには、次のような事情がある。米国は、東部地域を中心に早くから電力自由化[3]が進み、コスト削減の結果として電力の流通設備である送配電網が脆弱であるという弱点を抱えるようになった。米国の電力需要は、全体で 4.3 兆 kWh[3]の規模であり、日本の 0.8 兆 kWh[4]の約 5 倍、家庭需要は月平均約 800kWh[5]であって、日本の 250kWh[6]の約 3 倍強の大きさがある。このように大きな需要を脆弱な送配電網で流通させるため、電力需要のピークを抑制する必要にかられることとなり、DR は需要を抑制するものとして定義されるに至ったと考えられる。

2.1.2 DR のワークフローと分類整理法

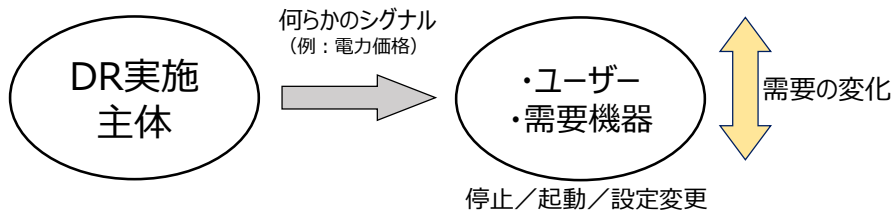


図 2-1 DR システム図

一般的な DR をシステム図化すると図 2-1 のようになる。DR の定義自体が、先に記したような程度であるため、図にしても極めて単純なものにしかならない。後述する「電力小売り会社が、電力の価格シグナルでユーザーの需要抑制行動を誘発する」という最もポピュラーな DR を例示すると、構成要素は下記のようなになる。

- 1) DR 実施主体：電力小売り会社
- 2) 何らかのシグナル：電気料金メニュー
- 3) 需要機器：エアコン、照明、その他

実際に上記を実験しようとするれば、実験用の電気料金メニューを作って実験用の Web サイトに掲示し、必要な時間分解能での電力使用状態を把握する CT (Current Transformer、変流器) や HEMS などを用意しモニターに配る。そして、期間を決めて実験して結果を集計する、といった手順になる。

このように、DR は、アプリケーションやテクノロジーの単体ではなく、それを機能させる土台とでもいうべきプラットフォームからアプリケーションまでの総体を指す場合もあり、研究開発の際も、多くの場合一から十まで用意しなければならないのが実情である。

しかし、これでは、既往の研究や実証を整理して、空白域などを見つけるなどが困難にな

る。そこで、筆者は、DR を 5W1H で分類整理することとした。一般的な 5W1H の使い方とは少々解釈を変え、また、DR には、一般的に主体として二人（例：電力小売り会社とユーザー）が登場するため、5W1H 整理法は完全ではないものの、ある程度の見通しを得る整理手法として活用できる。表 2-1 に、米国 EPA2005 の DR 定義や、わが国の四地域実証をベースとした DR 等の 5W1H 整理例を示す。

表 2-1 5W1H による DR の分類

いつ (When)	どこで (Where)	だれが (Who)	なにを (What)	なぜ (Why)	どのように (How)	備考
卸売り価格高騰時等	決まっていない	需要家	決まっていない	電力の使用を抑制	インセンティブの支払い等に応じて	米国EPA2005
需給ひっ迫時	制御エリア内	事前契約した工場など大口需要家	工場の設備など大型機器	電力の使用を抑制	中給からの要請に応じて	
需給ひっ迫時	制御エリア内	アグリゲーター	工場の設備など大型機器	電力の使用を抑制	中給からの要請に応じて	
需給ひっ迫時	制御エリア内	業務用/産業用需要家	自家発電設備を運転	系統からの電力消費を低減	インセンティブの支払い等に応じて	
需給ひっ迫時	制御エリア内	業務用/産業用需要家	蓄電池の放電	系統からの電力消費を低減	インセンティブの支払い等に応じて	
需給ひっ迫時	制御エリア内	業務用/産業用需要家	エアコン、照明、生産ラインなど	電力の使用を抑制	インセンティブの支払い等に応じて	
常時	一定地域内 (市程度)	一般家庭 (一部自動制御)	エアコンなど	節電	TOU (Time of Use)	
常時	一定地域内 (市程度)	一般家庭 (一部自動制御)	エアコン、照明など	節電	CPP (Critical Peak Pricing)	
常時	一定地域内 (市程度)	一般家庭 (一部自動制御)	蓄電池、PHVなど	節電	RTP (Real Time Pricing)	
ピーク時	建物内	需要家	蓄電池	電気料金増大防止 (ピーク抑制)	インセンティブの支払い等に応じて	
ピーク時	広域	電力会社 (ダイレクトコントロール)	エアコン、プールの浄水ポンプ	ピーク抑制	インセンティブの支払い等に応じて	米国事例
ピーク時	建物内	ユーザー所有のBEMS等	建物内の照明やエアコン	ピーク抑制	アグリゲーターとの電気代削減契約	日本、ADR

TOU、CPP、RTP の概要は、図 2-7 参照

2.1.3 DR による需要創出

先にも述べたが、米国に限らず、電力の世界では、発電は需要に追従するものという考えがあり、長い間、ユーザーの需要を賄うに足る発電能力を用意することが電力会社の責務として捉えられてきた。世界の電力業界には、「予備力」(reserve) という専門用語があり、これは、分や時間という比較的短い期間の需要増に対応する能力を指すものであるが、十分な発電能力を用意することこそ電気事業という考えが、この予備力という言葉に象徴されている。

この予備力の概念を図 2-2 に示す。先にも述べた通り、旧・電力会社は、経済成長に伴う電力需要の増加に追い付くことが仕事の主力で、かつ、発電側には PV のように中給が制御できない構成要素がなかったため、長らくの間、予備力の正負を逆にした概念はなかったと言っても良い。夜間など発電が需要を上回まわれれば、火力発電の出力を低下させ、一部を解列（停止）し、それでも余る電力は揚水発電所の動力運転のエネルギーとなって、昼間の大需要を賄う水力発電の原資となったからである。

しかしながら、節電／省エネが進んで総需要が微減となると共に、PV が大量に導入され、火力発電所の出力を限界まで下げてもなお、電力が余るという事態が起っている現在、従来とは全く異なる様々な打ち手を総合する必要がある。DR もその一つとして捉えれば、それは今までのような需要抑制一辺倒の手段としてではなく、需要を創出する手段としての役割も担わせるべきである。

近年、周波数の低下（発電<需要）に対応する集中電源の出力増加を表している予備力だけでなく、何らかの方法で発電>需要にも対応できる能力を電力システムに組み込むことが適切との考えは電力の世界で相当程度一般化されている。序論で説明したように、発電減少と需要増加は等価であるので、図 2-2 に示すように、予備力が正の領域のみを表していたことに対し、正負両方の領域を表現した「調整力」の概念を表す図 2-3 も当然のこととして理解されるようになって来ている。

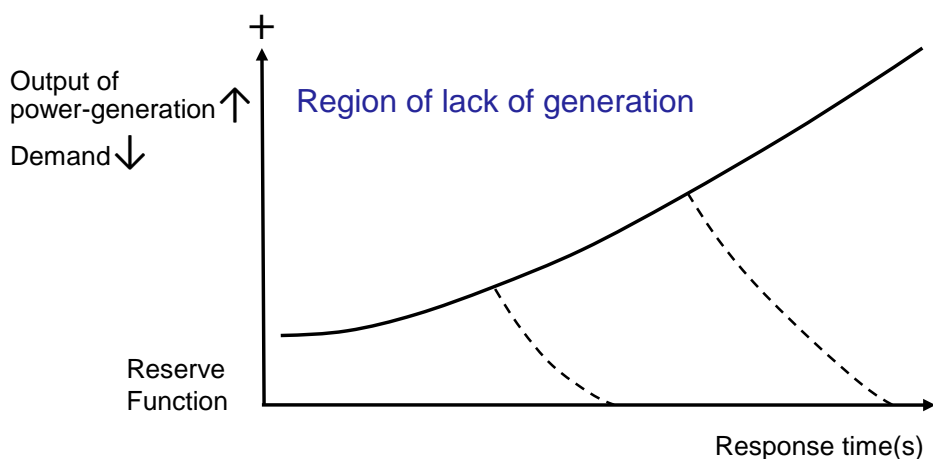


図 2-2 予備力の概念図

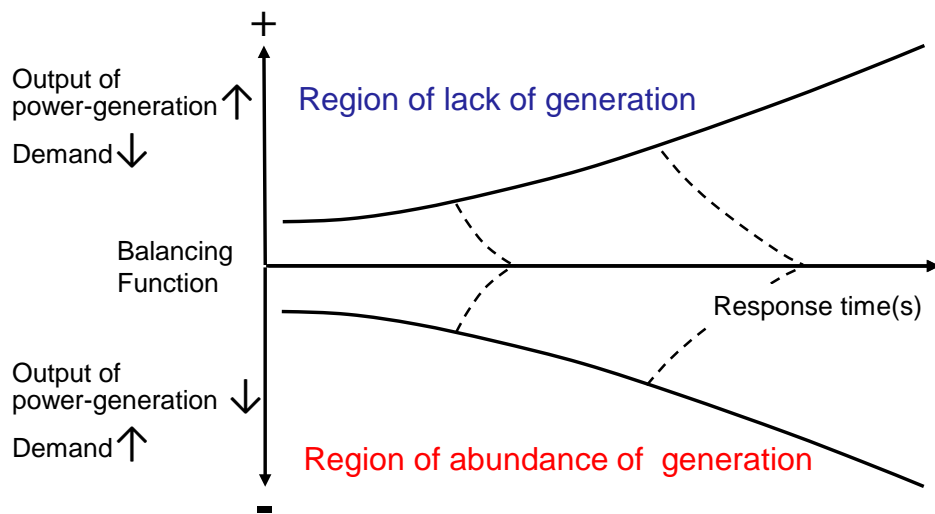


図 2-3 調整力の概念図

2.2 DR の既往研究や実証のレビュー

ここでは、DR に関する既往の研究や実証をレビューするが、2.1.2 節で提案した 5W1H 整理によることを試みる。本節のまとめを表 2-4 に示す。

2.2.1 需要抑制型 DR／需要創出型 DR《When、並びに、Why》

まず、既往の研究開発や各種実証事業の DR が、需要抑制型か需要創出型かを概観する。前述の通り、2005～6 年頃に DR 概念が一般化し、その凡そ 10 年後に発表された DR に関する国内の広範な調査報告「電力システム運用に関する需要側資源の活用」（浅野、2015）[7]によると、実際に行われた実証が全て需要抑制型であることが判る。この報告の後半では、需要創出型 DR と需要抑制型 DR を統合して調整力として論じてはいるが、これについては対象機器を限定した定性的な机上評価に留めている。

2 年後の 2017 年には、電気学会論文誌の「未来の電気エネルギーシステムに向けて電気学会の果たす役割」（横山、2017）[8]が、エネルギーシステムを取り巻く環境の変化を幅広く展望し、前述の九州電力の状況や、米国カリフォルニア州で発生しているダックカーブ（図 2-4）[9]と呼ばれる PV の大量導入に伴う需要の大幅な変化を紹介している。そして、これらの系統問題に対する需要家側の機器制御に期待を寄せているものの、それらがまだ研究・開発実証段階と述べ、未だ社会実装できるレベルにはないことを解説している。同時に、IoT や AI (Artificial Intelligence) といった新しい技術トレンドが系統問題に対する今までの検討を超える可能性にも言及しており、この点は興味深い。

筆者が調べた電気学会全国大会（図 2-5）[10～12]の DR に対する講演数にも、その様子が現れている。2016 年には、DR の専門セッション 6 講演のうち、需要創出に関するものが 1 件であったのに対して、2018 年には 6 講演中 3 件に増えており、徐々にこの分野の重要性は認識されつつある模様である。（なお、上記数値には、筆者自身の講演は含んでいない。）

このように、需要抑制型一辺倒であった DR が、需要創出型も必要との認識が広がりつつあるものの、ユーザーがその支配権を有している需要機器について、それらを起動／停止す

ることによる能動的な需要創出手法の確立は未だ明確ではなく、今後の研究開発のためにも、その開発例の例示は大変重要な意味を持つ。

2011年に米国 DoE が「Demand Dispatch」という概念を発表[13]しており、発電機を起動／停止するのと同様に、需要も起動／停止することで、洗練された電力システム運用の可能性を提言しているが、残念ながらその実現方法までは明らかにしていない。

以上のように、DR の既往研究や実証は、需要抑制型 DR が殆どであり、また、能動的 DR の可能性もコンセプトとしては僅かに紹介されてはいるが、その具体的方法は明らかではない。

需要抑制型 DR の《When》は、EPA2005 に記されたような、系統信頼性の低下時または卸市場価格の高騰時、すなわち、一般的な言い方をすれば、需給ひっ迫時を前提としている。

表 2-1 に、典型的な DR を例示したが、全て需要抑制型であることが判る。

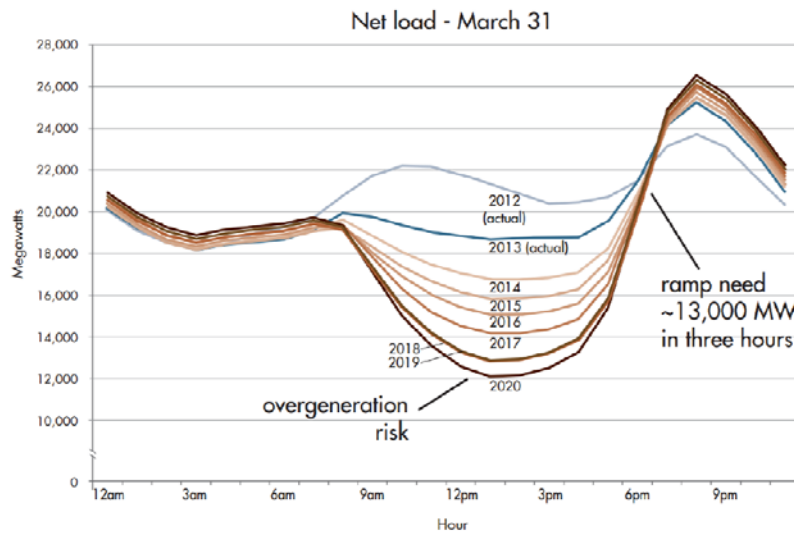


Figure 1. The CAISO duck chart
Source: CAISO 2013

図 2-4 「ダックカーブ」 [9]

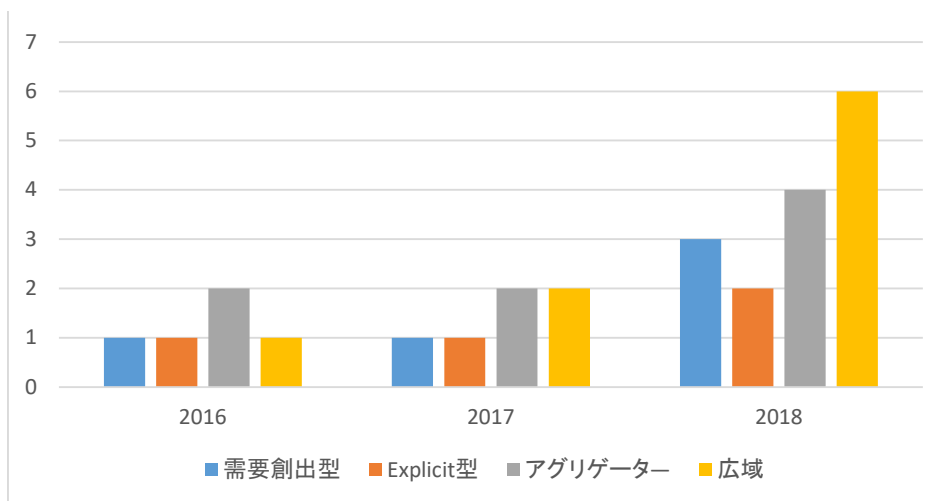


図 2-5 電気学会全国大会に於ける DR 研究内容

2.2.2 同一建物内 DR／広域 DR《Where》

DR が上げ DR（需要創出）であろうが、下げ DR（需要抑制）であろうが、需要を能動的に変化させることのメリットは、ユーザーとしては電力料金総支払額の低減であったり、また、一社の旧・電力会社エリア全体（本論文では、これを広域と呼ぶ）としては、系統の安定運用や供給コストの削減である。また、国全体というマクロ視点では、本研究が志向しているような再生可能エネルギーの積極的利用などがある。

これらは、見方によっては、前者は部分最適志向であり、また、後者 2 つは全体最適志向と捉えられる。以前は、同一建物内で DR を実施し、当該建物の電気料金を低減するという既往研究[14]も見られたが、徐々に DR に関する既往研究は系統全体に関わるものに主軸が移ってきているようである。しかしながら、それとしても、ネガワットによる需給ひっ迫改善という視点が主流で、PV 設置者でない広域に散在するユーザーが、PV 余剰発電を無理なく消費することで、再エネ積極利用社会の構築に参加するという視点での研究は見かけない。表 2-1 に、典型的な DR を例示したが、想定エリアは、広域乃至は市などの自治体サイズが多いことが判る。

2.2.3 アグリゲーターの関与《Who》

電力システムの改革（再エネの活用と発送電分離、及び、小売り自由化を基軸とした産業構造改革）に伴い、研究や実証、制度設計等の議論に於いてアグリゲーターと呼ばれる主体がしばしば登場する。aggregate とは、集めるとか、総計いくらになる、という意味であり、電力の世界では、多くの場合、個々の小さなネガワット（節電）を集約して、それを電力会社等売る事業者を指すことが多い。

しかしながら、このアグリゲーターという事業者の実像は、その時々でまちまちであり、はっきりしない。ある参考文献[15]では、ネガワットの集約者であるが、電力小売り会社等の電気事業法が規定する主体とは異なる者とされていたり、別な資料[16]では、ネガワットのみならずポジワット（需要創出）送出の主体とされていたりし、かなりその都度の都合に合わせた仮想的事業者となっている。IEC60050 / 617-02-18 では、aggregator を "party who contracts with a number of other network users (e.g. energy consumers) in order to combine the effect of smaller loads or distributed energy resources for actions such as demand response or for ancillary services" とかなりシンプルに規定しており、具体的業態についての言及はない。

ネガワットの取り纏め主体と仮定しても、ネガワットの単価は、原理的には電力の kWh の価格と同等かそれ以下であると想定され、また、削減量が「使用電力量の○%」のように一定程度に限られることや、毎日毎時に節電が必要であるわけではないことから、個々の顧客からの売上は相当薄い事業者であると想像される。実在するアグリゲーター専門事業者である米国 EnerNOC 社[17]は、比較的大きな需要を取りまとめることで、事業継続を果たしている。一方、同じくアグリゲーター専門である Comverge 社は、低圧需要まで扱う珍しい存在であったが、電力メーター製造業大手のイトロン社に買収された[18]。このように、アグリゲーター専門で生き残ることの困難さは容易に想像できる。

我が国では、バーチャルパワープラント（以下、VPP）と呼ぶ実証事業[19]が行われており、一部には需要創出型も含まれているが、参加している企業名を見ると既に本業があって、アグリゲーターはその基盤を活用した副業的活動ということが現実解であることが判る。

このように、DR 資源を取りまとめるアグリゲーターは、専門よりは兼業事業者が現実的であるが、電力小売り会社自身がアグリゲーター業を自社のサービスに織り込んで事業推

進する試行例はまだ稀である。表 2-1 にあるように、インセンティブの支払いに応じてネガワットを提供するスタイルは存在するが、果たして永続性がある事業かについては、現時点では不明である。

本研究でも、アグリゲーターと呼ぶ事業者の存在を前提とするが、その要件としては、

- 多数の低圧需要のユーザーと直接契約できる
- 本研究で論ずる DR を自身のサービスの一部として組み入れられる

ことである。

上記が可能な典型的事業者として「電力小売り事業者」（電気事業法上の正式名称は「小売電気事業者」）を念頭に議論を進める。

2.2.4 対象とする低圧需要機器《What》

大量に電力を消費する大型機器は、ジュール熱損失を小さくするため高い電圧で動作させることが理に適っており、実際にそのようになっている。このため、電力会社では、需要を「低圧 (100V/200V)」、「高圧(6,600V)」、「特別高圧(22,000V 以上)」（かっこ内は東京電力 EP 社の例）に分けて約款を作成し、供給している。

DR 資源としても、水道事業に供するポンプのように大型の機器もあれば、家庭のエアコンのような小さな需要もあり、それぞれに対して様々な研究[20]が行われている。このうち、家庭で使用される低圧需要を DR 資源と見なした研究も活発[21]であるが、それらの対象は、俗に重点 8 機器（表 2-2）[22]と呼ばれるエアコンやヒートポンプ式給湯機、家庭用定置型バッテリー、電気自動車（バッテリー）などに偏っており、他の家電機器については報告が少ないのが現状である。また、エアコンや照明器具（特に、LED 化される前の蛍光灯や白熱電球の時代）は、家庭内での電力消費という点では、相当部分を消費するトップ 2 といっても良い要素であるが、適時性が強く、その効能（冷暖房や明かり）を必要とするその時に使用するものであって、需要シフトや使用の抑制が難しいことが理由と考えられる。もちろん、昼間の出勤による留守の際は、ペット用の定常的な需要を除いて使用する必要がなく、DR の対象とはならない。また、スマートメーターは計測器であって、そもそも DR の対象とはなり得ない存在である。

他の重点 8 機器を見ると、DR 資源としての低圧需要としては、消費電力[W]や電力量[Wh]が多く研究対象としては合理的であるが、ヒートポンプ式給湯機の普及率[23]ですら 5%程度であり、また、家庭用定置型バッテリーなどについては街中で見かけることが殆ど無いなど、DR 資源として頼りになる存在になるには、まだ相当な時間がかかりそうである。

今後、電気自動車（以下、EV）が増えてくれば、これは重要な DR リソースと考えられるが、充電インフラの問題が大きく、普及に対して今一決定打に欠く状態である。改めて、家電機器に注意を払うと、表 2-1 に示す DR も、そのリソースは最小でもヒートポンプ式給湯機程度であって、家電機器を対象としたものは見当たらない。

一方、低圧需要には、炊飯器など家電機器と呼ばれる既に大量に普及した需要機器がある。これらは、個々の消費電力量は重点 8 機器に比べると一桁小さいが、実際に普及しており、また、ICT により大量に束ねることができれば、DR 資源として活用することも可能と考えられる。

重点 8 機器にせよ、炊飯器などの家電機器にせよ、これを DR 資源と扱うには、電力系統の大きさ[kW]に比べて、これらの機器を DR として有意な量にアグリゲートすることは容易ではなく[24]、低圧需要による DR の妨げとなっている。

さらに、炊飯器などの家電機器は、米や水を入れる、といったユーザー側の準備が必要であり、この完了を知ることなしには起動/停止の対象とはなり得ないことも障害となって

いる。

表 2-2 重点 8 機器

重点8機器			
PV	蓄電池	燃料電池	EV/PHV
エアコン	照明器具	給湯器	スマートメーター
水色のハッチングした機器は、適時性が強く、昼間の出勤による留守などの場合、本研究のDRの対象となり得ない			
スマートメーターは計測器であって、沢山の電力を消費するものではない			
本論文では、ヒートポンプ式給湯「機」と表記するが、本表の給湯器は参考文献[22]の通り「器」を用いる			

2.2.5 Implicit 型 DR/Explicit 型 DR《How》

前節でも述べたが、DR は、電力の価格やインセンティブによって、電力の使用状況を変化させる（抑制する）ものとして扱われてきた。しかし、多くの実証[25]などを通じて、電力の価格やインセンティブの支払いでは、期待するほどの大きな需要の変化（需要抑制）は起こらないことが明らかになっている。

DR には、大きく分けて次の二つの種類がある[26]。一つは、間接的デマンドレスポンス（Implicit 型 DR）と呼ばれるもので、時間帯別電力料金や、時間帯別送配電網利用料を設けることにより、需要家のインセンティブに基づく需要削減行動をデマンドレスポンス資源として活用する。もう一つは、直接的デマンドレスポンス（Explicit 型 DR、若しくは、Incentive 型 DR）と呼ばれ、電力会社が遠隔操作でエアコンを停止するなどの需要制御に基づくデマンドレスポンスである。

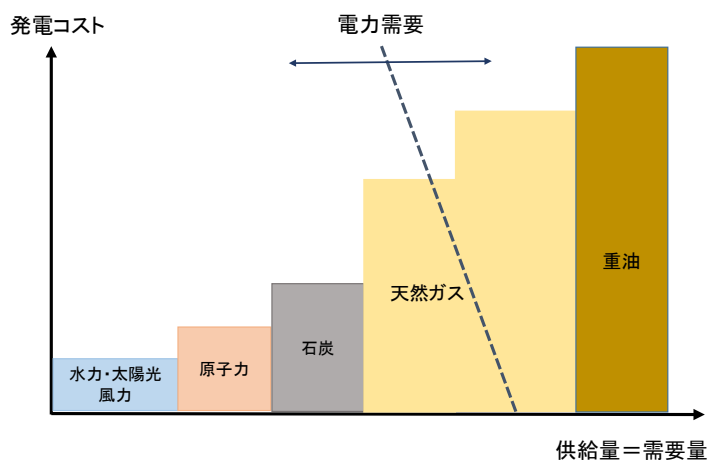


図 2-6 電力のメリットオーダー

図 2-6 に示すように、燃料の違いを主因として電源毎に単価の異なる電力を、メリットオーダーと呼ばれる価格順(¥/kWh)順にならべ、需要と交わる点で卸価格が決まるという構造は、大変判り易く、実際の卸電力取引でも活用されている概念である。この延長線上にある考えとして、小売価格を上下させれば、需要もそれに追従してコントロールできるという考えに立つものが、Implicit 型 DR である。実際に、日本政府主導の大規模な実証事業[25]を始め多くの試行が行われたりしたが、思ったほどの需要の減少傾向はみられなかったことが報告されている。その後、実証事業に対する複数の研究者による分析[27]などが進み、表 2-3 のように電力の（短期）価格弾力性は小さく、0.5 程度というのが定説となっている。同様に価格弾力性が小さいものには、小麦粉や水道代などがある。

表 2-3 電力の価格弾力性値の分析例[27]

分析例	短期弾力性値	長期弾力性値
①谷下 中央大学准教授(2009)	▲0.5~0.9	▲1.0~▲2.7
②大和総研 経済調査部(2011)	▲0.47(全国平均) (▲0.28~0.96)	▲1.48(全国平均) (▲0.95~▲2.30)
③電力中央研究所(星野研究員)(2011)	(情報なし)	▲0.328

Implicit 型 DR 推進の背景には、電力は水やトイレトペーパーなどの生活消耗品と同様、コモディティー商品の典型例であり、また、国内のどこでもその品質はほぼ変わらないことから、消費者は「安ければいい」という志向が強いという錯覚によって、価格弾力性に富むという考えがあったのではないと思われる。しかしながら、例えば、エアコンや照明などは、暑い寒い、暗い、という状況に応じて、リアルタイムでその問題を解決する便益を提供するものであり、本質的には価格弾力性は小さいことが理解できる。すなわち、電力はその小売り価格が少々変動したところで、全く使用しないわけにはいかない性質のものである。

Implicit 型 DR には、図 2-7 に示すように、電力小売り価格の変化のさせ方によっていくつかの種類がある。電力会社や政府など、マクロな視点では、なるほどと思えるこのグラフを、消費者としての目線では少し変わった見え方となる。例えば、CPP (Critical Peak Pricing) であるが、一日の中で、電力小売り価格が大きく変動する。言い方を変えれば、電気料金が乱高下することになり、これに対してユーザーは、

- ・オフピーク時間帯の薄く受ける割引メリットよりもピーク時間帯に電気料金が大幅に割高となるデメリットを重視する
- ・需要の大きい時間帯に電気料金を引き上げるのはフェアではないと考える

ことが報告[25]されており、消費者の反発はやはり強いようである。

生鮮食品など卸価格が大きく変動する商品は他にもあるが、その場合でも、小売業は価格に対してはスタビライザー的役割を担うのが通常である。電力の CPP は小売り会社にその逆の振る舞いを要求する考え方であって、かなり稀なケースと言えよう。

さらに、日中は勤務で留守など、一日中電力小売り価格を見ながら生活できる者は殆どいないと推定できることから、価格シグナルで需要の増減を誘導することは、あまり現実味がないと考えられている。

米国では、「ダイレクトコントロール」と呼ぶ、一般消費者のエアコンやプールの浄水ポンプを電力会社が一時的に停止する手法があるが、米国の住宅は壁のサーモスタットが標準化されており、技術的にもそのような方法が取り易い環境を背景としている。

表 2-1 の整理例では、Explicit 型としてはこの一例程度である。DR の殆どが需要抑制型であり、これはエアコンの一時停止など原理的にユーザーに不便を強いるものであるから、事業者側が直接需要機器を操作する Explicit 型と需要抑制型 DR は相性がよろしくないと思われる。

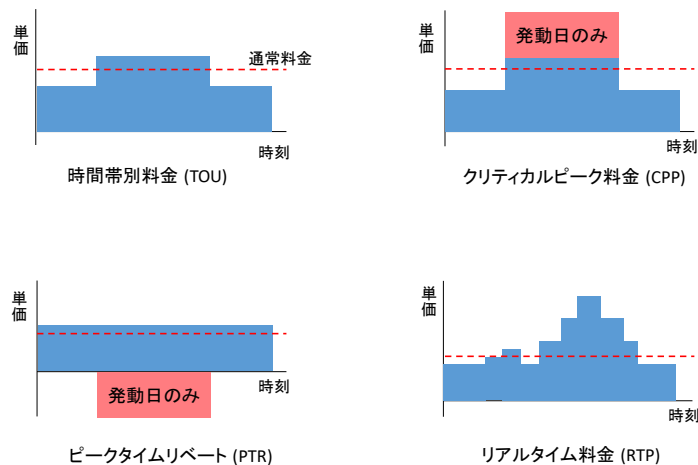


図 2-7 時間帯別電力小売り料金の例

2.2.6 自動 DR(ADR)《How-2》

従来から、自動 DR と呼ばれる DR の種類がある。これと対比される用語は手動 DR である。自動 DR の定義自体は判然としないが、既往研究の論文[28]によると、建物内にある需要機器を既存の BEMS などを介して機器を自動的に制御し、DR を成り立たせることと理解できる。しかし、どのような機器が存在し、それらをどのように動作変更させるのかは、建物毎に異なるため、自動 DR はどちらかというとも BEMS 等をコントローラーとした同一建物内のローカルな Explicit 型制御システムであり、事業者—需要機器を一気通貫する完全な Explicit 型 DR とは異なるものと推定される。

表 2-1 にも、一例を記載しているが、東日本大震災直後に経済産業省主導の BEMS アグリゲーター事業という名で実施された経緯がある。しかし、2016 年省エネコンサル企業関係者への筆者のヒアリングでは、アグリゲーターとの契約で、約束された節電量が達成できないなどの問題があったようであり、その後広く社会実装されてはいない。

2.2.7 2018 年 9 月 6 日発生北海道胆振東部地震による系統全停（ブラックアウト）

本稿執筆中に、北海道胆振東部地震が発生し、北海道全体が停電する、俗に言うブラックアウトが発生した（図 2-8）。主力火力発電所が被災して停止したことが主原因と考えられているが、その後、復電と共に法人を含む道内ユーザーには節電が呼びかけられた。

しかし、報道を見ている限り、HEMS の採用や、電気料金を操作しての DR については、全く話題にならなかった。東日本大震災の後は、節電・省エネのためにこれらの必要性が声高に言われたが、本章で見えてきた通り、料金の操作による DR や、電力使用の見える化をアピールする HEMS は、期待通りの効果を現さなかった。このため、今般の北海道事案では選択肢にならなかったといわれている。

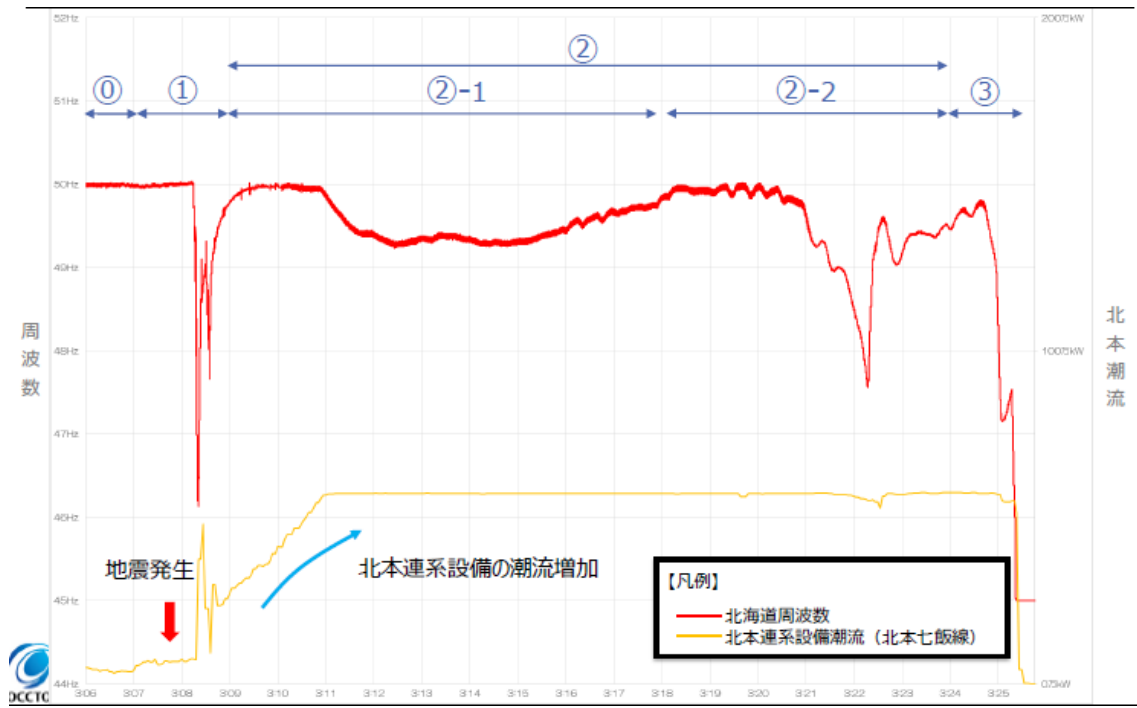


図 2-8 地震発生から系統全停までの周波数変化と北本連系線（本州⇒北海道）潮流[29]

表 2-4 DR 既往研究・実証の現状

DR既往研究の分類視点			既往研究・実証の現状
1	When Why	需要抑制型／需要創出型	実証事業は、需要抑制型が殆ど
			需要創出型DR手法は確立されていない
			電気学会全国大会件数では、創出型が徐々に増えつつある
2	Where	建物内DR／広域	電気学会全国大会件数では、広域型が徐々に増えつつある
3	Who	アグリゲーターの関与	電力小売り会社から、他業種まで幅広い業種が副業として実施することを企図
4	What	低圧需要の何を対象としているか ・重点8機器 ・その他（例：家電機器）	DR資源として家電機器を対象とした例はない
			低圧需要は、HP（ヒートポンプ式給湯器）、EV（未普及）に研究が集中
			多数の小規模需要をアグリゲートする手法は確立されていない
			系統容量と低圧需要の桁の違いが大きすぎる
5	How	Implicit型DR／Explicit型DR	価格誘導型DR（Implicit型）は、価格弾力性が小さく（0.5程度）効果が薄い
			ユーザーは、割安電気料金部分にあまり関心がない
			ピーク時の大幅高料金に対する抵抗感が強い
6	How-2	ADR（Automatic DR）	ADRは、BEMSなどを介したローカルExplicit型DRと理解でき、事業者－需要機器直結Explicit型DRとは異なる
7	How-3	IoTの活用	首相の官民対話で話題にはなっているが、まだ殆ど実例はない

2.3 今後の電力需給調整運用の在り方

従来の、特に東日本大震災（以下、震災）以前のわが国の需給調整運用は、旧・電力会社の中給が自らの管轄エリアの調整をほぼ一手に担い、需給調整契約と称する契約により大規模工場などの大口需要家の一部に、電力供給が極めて厳しくなった際に電力消費を抑制してもらえる程度であった。しかし、震災直後の計画停電や、2012年の固定価格買取制度導入以降、需給調整運用にもアグリゲーターを介在させた DR によってユーザー側需要の変化を取り込む取り組みが進められており、監督官庁の経済産業省も実施のためのガイドライン[30]の策定や、ハンドブック[31]を製作するなどしている。ただ、それらは、今まで本章で見えてきたように、比較的消費電力の大きな機器が対象であり、また、需要抑制型が主な対象であることに変わりはない[31]。

しかし、需給調整運用に需要側を組み込むことは、旧・電力会社を含めて一般的に合意されており、具体的手法はまだ試行錯誤の段階ではあるものの、震災前のようないわば中央集権的な仕組みではなく、図 2-9 のように中給がハブとなって、能力があるものが複数参加する協調型需給調整運用の仕組みに進むことはほぼ間違いなさそうである。

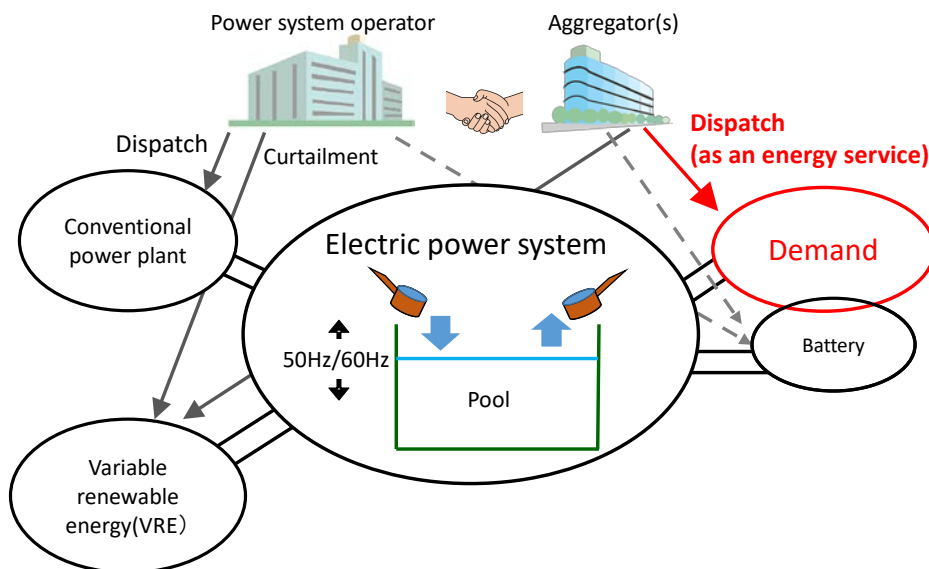


図 2-9 協調型需給調整運用の仕組み

2.4 本研究の目標と既往手法の問題点

前節までの、PV 大量導入に伴う課題や需要側を需給調整運用に組み込むという方向性を踏まえ、本研究の「目標」として、図 2-9 に示すような需要側を組み込んだ協調型需給調整運用の仕組みを提案したい。現在は、電力需要がピークとなつ際に、需給ひっ迫時に緊急避難的にネガワットの利用が行われているが、本目標は、PV 余剰を消費する需要創出の仕組みをも含む構造を指す。また、既往研究・実証が、重点 8 機器と呼んで未だ普及に至らない EV や家庭用定置型バッテリーを対象としているが、本研究は、既に普及している家電機器のような需要機器をその担い手として捉える。

PV 問題の対策としての需要創出は、それが昼間帯に発生することが大きな特徴である。この時間帯は、一般家庭はほぼ留守であることが多く、多くの DR 実証研究が行ったようなユーザーにその操作を期待することが難しい。また、電力消費量はある程度見込めるものの、

エアコンのような効能のリアルタイム性が強い機器は、留守宅を想定すれば非対象物である。

留守宅にある家電機器を起動し、PVの余剰発電を消費するには、タイマーのような機構に頼るか、何らかのICT的な仕掛けによってそれを為すしかないが、PV発電の余剰は時々刻々変化することを考えるとタイマーは現実的ではない。

筆者が2016年1月に意見交換の機会を得た米国ハワイ州マウイ島における日米スマートグリッド実証[32]（以下、ハワイ実証）を担当した大学の技術者からは、実証事業を開始するにあたり、需要機器をIT的に制御できるようにするために、大変な労力を要したという話を聞くことができた。そもそもエネルギーに関係する機器は、スタンドアロンで動作することを前提としており、IT的に遠隔制御されることは想定していない。例としては、わが国には、エコーネット Lite という白物家電機器を遠隔制御する通信プロトコル規格があるものの、実際にそれに対応した家電機器は、エアコンのハイエンド商品程度で、すぐに使えるほど普及していない。

多くのDRが需要抑制を目的にしたものであることは既に述べたが、もう一つの問題は、IT的に遠隔制御する環境を如何に手軽に入手するか、である。これについては、次節に述べるようにIoTという概念が急速に進みつつあり、それはそのままDRの上記問題への解決策となる潜在力がある。

2.5 IoTの進展

前節までは、PV大量導入に関わる問題点や、その解決手段の一つであるDRについて概観し、低圧需要機器による需要創出型DRがまだ実用化できる段階にはないことを見てきた。本節では、IoTという新たな技術の潮流により、上記DRの実現性が高まることを見ていく。

あらゆるものがインターネットにつながるというIoTの進展は、既に流行り言葉の段階を脱し、実現のための具体策の検討段階に入ったようである。IoTについては、多くのデータがクラウドに集まることから、ビッグデータとしての経済的価値に関心が集まっているが、同時に、これは、家電機器が接続されたクラウドのAPIを経由して、アプリケーションによってこれらの機器を操作できる環境が実現することでもある。このことは、エネルギー領域を始め、建築、介護など社会的課題を抱える多くの領域について、大変重要な意味を持つ。

2.1.2項でDRの試験実施には、アプリケーションのみならず、プラットフォームから用意しなければならないことを述べたが、このようなケースでも、予定のエネルギーの需要機器は、そもそもネットワークに繋がる（以下、Connected）ようには出来ていないものが多く、それをConnectedにするには、ゲートウェイなどの開発が必要である。前出のハワイ実証の技術者が言うには、複数のメーカーの需要機器を使用する実証事業であったため、実験の為のIT的なインターフェース仕様を統一するだけでも、大変な作業量であったという。

この話は、とても示唆に富んでいると筆者は考えている。上記のハワイ実証は、当然、エネルギーをテーマにしたものであった。しかし、その中の技術者は、需要機器をConnectedにするというエネルギーとは直接関係のないことに多くの労力を割かざるを得なかった。

ICTは、人間と人間（若しくは、人間と機械）という情報のやり取りというバーチャル空間利用に加え、エネルギーや医療といったリアル社会へ広がっていくであろう。しかし、その度に、本来その使い方を検討する側が、一々機器のConnected化に携わっていたのでは、速やかな事の進展は望めない。

今後、多くの機器がConnectedになったなら、その環境を活用して、エネルギーなどの

特定領域の価値を創出する検討を効率良く進めるべきであり、まさしく、それが可能となりつつあるのが現在の IoT 化の潮流である。

我が国では、平成 27 年 11 月 26 日の第 3 回「未来投資に向けた官民対話」[33]で、安部総理大臣が、「家庭の太陽光発電や IoT を活用し、節電した電力量を売買できる『ネガワット取引市場』を、2017 年までに創設」と発言した。(ポジワットがなく)ネガワットという片側だけの領域についての発言であることには少々寂しさを感じるが、前出の文献[33]にもあるように、エネルギー分野における IoT の活用はまだ社会実装には至っていない。

現在、具体的には、図 2-10 に示すように多くの機器が、それを製造したメーカーがインターネット上に用意するクラウド（以下、Private Cloud）に接続されようとしている。そして、このクラウドと機器の総体で便益を創出し、また、安全などの機能を維持しようとしているところである。

また、エアコンに限ったことではあるが、電気用品安全法が要求する安全基準[34]に関し、スマートフォンで操作できる機種については、必要とされた安全機能の一部を Private Cloud で実現しており、今後、他の家電機器もこの方向で Connected になっていくと想定される。

エネルギー領域と IoT 家電機器との関係例としては、図 2-11 のアーキテクチャーに示すように、アグリゲーターが DR アプリケーションを製作し、家電機器が接続されている Private Cloud の API (Application Program Interface) に対して、当該アプリケーションを接続することで、家電機器に対して必要な動作をさせることが可能になる。なお、このようなアーキテクチャー図では、図が煩雑になることをさけるため、図 2-10 に示すスタイルの図の場合は、雲の絵を省略する。なお、アグリゲーターの業務運行には、人間が判断し関与するものもあり得るため、本図にはオペレーターを描いてある。

また、IoT の本質的価値の一つに、ネット経由で当該機器の状態を知る、ということがある。アグリゲーターが家電機器を起動できる状態であるか否かも、原理的には IoT のこの構造によって実現の道筋はできているのである。そして、これらのことは、前述のハワイ実証の技術者が苦勞したような、“本業でない”部分に多くの時間と労力を取られることからの解放を意味する。

もちろん、Private Cloud の API を第三者に開放するかどうかは、当該のメーカーの経営判断による。住宅を例に言えば、大手電機メーカーや大手住宅設備機器メーカーといえども、一社で全ての住宅関連の機器をラインナップすることはほぼ不可能である。このため、多様な機器の連携動作による付加価値を提供するには、他社の Private Cloud との連携は不可避であり、2018 年 1 月～3 月に総務省からの委託によって実施した大手総合電機メーカーや大手住設機器メーカーに対する筆者のヒアリング[35]でも異口同音にその必要性を認めている。

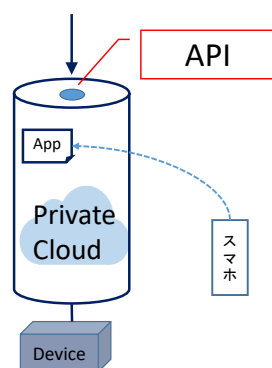


図 2-10 モノが Connected 化される概念

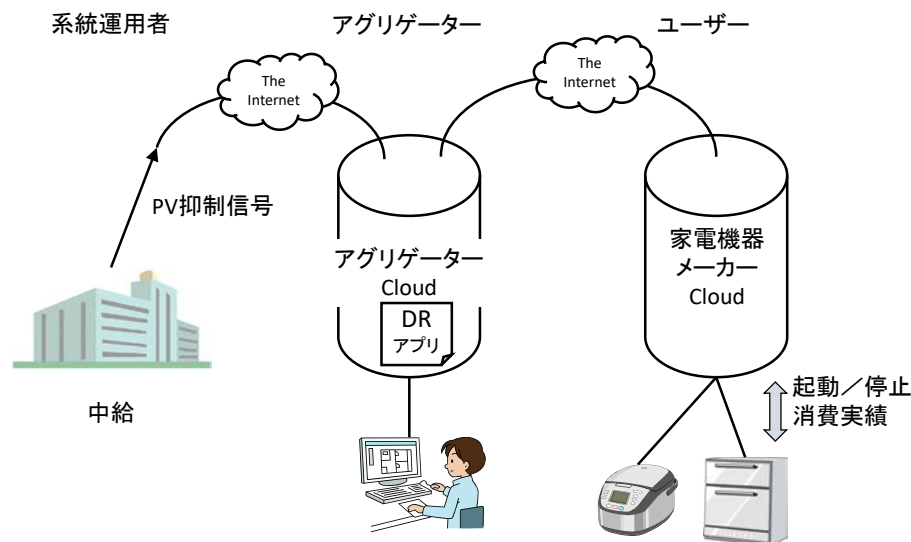


図 2-11 IoT 化を踏まえた需要創出 DR アーキテクチャー
(煩雑さ回避のためこのスタイルの図では雲の絵は省略、以下同様)

2.6 ここまでの議論のまとめ

以上を基に、ここまでの議論を一旦まとめる。本研究のそもそもの問題意識は、①PVの余剰発電が発生しており、②出力抑制実施の前に、可能な限りそれを消費すべきであり、③DRによる能動的な需要創出はその有力な方法の一つであって、④需要創出の担い手としてIoT化が進む家電機器を活用できないか、であった。

この問題意識の許に、DRの既往研究や実証を眺めたところ、表2-4のような現状であり、多くの未着手乃至は手薄な領域があることが判明した。

特に

《When / Why》需要創出型 DR に於ける需要創出手法

《What》家電機器を対象とした DR

《How》事業者－需要機器直結 Explicit 型 DR

を組み合わせた DR は空白域と呼んでもよいと考えられる状態であり、PV 余剰発電が問題視される現在では、その社会的意義も大きいことから、今後大いに研究の価値がある領域である。

《What》の家電機器を対象とすることは、すなわち、一般住宅を対象とすることである。需要機器には、業務用ビルなどに設置されたものもあるが、家電機器を DR 資源として扱うには、以下の課題を解決することが必要である。

- 粒(W)が小さい
- 消費電力変動が大きい
- 準備完了を知る術がない (Explicit 型)
- 起動権限をアグリゲーターに引き渡す術がない (Explicit 型)

これらは、一つひとつが難しい課題である。逆に言えば、これらに対する解決方法を見いだしておけば、他のカテゴリーの需要機器に同様な課題が見つかった場合の対応円滑化の可能性があり、それは DR 資源の拡大に繋がる。このような理由により一般住宅を研究対象として選択した。

そこで、本研究では、IoT化が進展する家電機器を活用して、エネルギーサービスの一部として組み入れた需要創出型 DR によって PV の余剰発電を消費し、その出力抑制を緩和す

ることを提案する。

この仕組みは、集合住宅居住者など PV を所有しない者や、ヒートポンプ式給湯機や家庭用定置型蓄電池など高価な需要機器を有しない個々の一般ユーザーでも、契約に基づくごく一般的な家電機器の使用によって、再エネ積極利用社会構築に参加できるという他にない特徴を有する

提案する DR を 5W1H 整理法で記述すると、表 2-5 のようになる。

表 2-5 本研究の 5W1H

DRモデル	いつ (When)	どこで (Where)	だれが (Who)	なにを (What)	なぜ (Why)	どのように (How)
本研究 (iDR)	PV余剰発電発生 時	旧・電力会社エリア全体 (広域)	電力小売会社 (アグリゲーター)	IoT化された家電 機器	需要を創出してPV 抑制を緩和	アグリゲーターからの 起動信号によっ て

2.7 本研究の目的

前節で提案したとおり、集合住宅居住者など PV を所有できなかつたり、ヒートポンプ式給湯機や家庭用定置型蓄電池など高価な需要機器を有しない個々の一般ユーザーでも、契約に基づく一般的な家電機器の自動的な稼働によって、再エネ積極利用社会構築に参加できる仕組みの構築が本研究の大義である。その具体的な目標が、2.3 節で設定した「需要側を組み込んだ協調型需給調整運用の仕組み」である。

本研究は、この目標を実現するための初期的な研究と位置付ける。それを踏まえ、本研究のテーマ(仮説)として「アグリゲーターが需要創出し、PV 連携する仕組みは実現可能か」を設定する。すなわち、本研究の目的は、「アグリゲーターが需要創出し、PV 連携する仕組みの実現可能性の確認」である。

2.7.1 項に、この目的実現のための開発・研究すべき課題を整理する。その結果として、具体的には、2.7.2 項に示す DR システムの初期的な実現可能性が確認できることとなる。これにより、上記大義実現に向けた初期的なソリューションパッケージを例示することを目指す。

2.7.1 開発・研究すべき課題

本研究で開発・研究すべき課題を下記の通り整理する。

表 2-6 開発・研究すべき課題

DR既往研究の分類視点			既往研究・実証の現状	本研究の目的／ポジション	解決すべき課題
1	When Why	需要抑制型／需要創出型	実証事業は、需要抑制型が殆ど	需要創出手法の確立	・アグリゲーターが家電機器を直接 起動停止する技術的方法(4)
			需要創出型DR手法は確立されていない		
			電気学会全国大会件数では、創出型が徐々に増えつつある		・PVとの連携運転方法(5)
2	Where	建物内DR／広域	電気学会全国大会件数では、広域型が徐々に増えつつある	広域を対象とする	-
3	Who	アグリゲーターの関与	電力小売り会社から、他業種まで幅広い業種が副業として実施することを企図	電力小売り会社をアグリゲーターを兼ねる主体として扱う	-
4	What	低圧需要の何を対象としているか ・重点8機器 ・その他(例：家電機器)	DR資源として家電機器を対象とした例はない	充分普及している家電機器を対象とする	DR資源としての家電機器の有意性確認(3)
			低圧需要は、HP(ヒートポンプ式給湯器)、EV(未普及)に研究が集中		家電機器の準備完了状態をアグリゲーターが知る方法(4)
			多数の小規模需要をアグリゲートする手法は確立されていない		アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法(4)
			系統容量と低圧需要の桁の違いが大きすぎる		個々の振る舞いのモデル化(3)と大量にアグリゲートする方法(4)
5	How	Implicit型DR／Explicit型DR	価格誘導型DR(Implicit型)は、価格弾力性が小さく(0.5程度)効果が薄い	Explicit型DRの手法の確立	家電機器に対するExplicit型DRのユーザー受容性の確認(6)
			ユーザーは、割安電気料金部分にあまり関心がない		
			ピーク時の大幅高料金に対する抵抗感が強い		
6	How-2	ADR(Automatic DR)	ADRは、BEMSなどを介したローカルExplicit型DRと理解でき、事業者-需要機器直結Explicit型DRとは異なる	事業者-需要機器直結Explicit型DR	-
7	How-3	IoTの活用	首相の官民対話で話題にはなっているが、まだ殆ど実例はない	IoTを活用する	IoT家電機器を模した実験機の開発(4,7)

カッコ内の数字は章番号

表 2-6 に整理した開発・研究すべき課題は、以下の 4 分野に大別できる。色は表 2-6 の課題項目欄の着色を表す。

- 1) 家電機器の DR 資源としての量の問題 (DR リソースとして有意な量があるか)
- 2) 家電機器をアグリゲーターが起動／停止するなどの技術の問題
- 3) 家電機器による DR のユーザー受容性の問題 (サービスとしての質の問題)
- 4) 世の中の IoT のトレンドの確認と本研究の整合性の確認

上記の 2) は、かなり広範な技術テーマであるため、これをさらに 3 分野に細分化して、1) ~3) の本研究の課題を以下の(1)~(5)に整理し、また、IoT のトレンドと本研究の

方向性の確認を(6)として下記にリストする。

(1) DR 資源としての家電機器の有意性

炊飯器などの家電機器は、消費電力が高々数百 W 程度、稼働時間も数十分～2,3 時間以内のものが多く、DR 資源として有意なのか、という疑問がまずある。そこで、家電機器の普及状態など織り込んだ DR 資源としてのポテンシャルを確認する必要がある。

さらに、それらを PV 余剰発電に割り付け (Dispatch) した場合にどの程度の PV 余剰発電を消費できるかの確認も行う。

家電機器は種類も多く、また、それぞれに膨大な数があるため、確認は計算機シミュレーションにて行う。また、この DR での個々の家電機器の振る舞いを整理し、この見積もり試算の精度を向上させるため、家電機器による DR のモデル化を行い、それに制約条件を盛り込むことにより、見積もり試算を精緻化する方法も検討する。

(2) 家電機器の準備完了状態をアグリゲーターが知る方法

家電機器は、例えば炊飯器であれば[米と水を家電機器に入れ、蓋を閉める]、洗濯機なら[洗濯物と洗剤を家電機器に入れ、蓋を閉める]といった、ユーザー側の手動準備作業が多い。このような「ユーザー側の作業が必要で、その完了をどうやって知るのか」は、家庭用定置型バッテリーなどとの大きな違いで、家電機器が DR 資源として目を向けられてこなかった要因の一つである可能性がある。

本研究では、後述する「iDR ボタン」と呼ぶスイッチを一つ設けることによって、アグリゲーターがユーザー側準備作業完了を知る仕組みについて検討する。

(3) アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法

家電機器が IoT 化されるといっても、どのようなアーキテクチャーを前提として、アグリゲーターと家電機器がどのようなやり取りをする必要があるのか、その仕様を明確にしなければ実際のアプリケーションは製作できない。そのため、アプリケーション、IoT 家電機器が満たすべき所要仕様を検討し、それらの総体をデマンドディスパッチシステム (以下、DDS) と名付けて実際にそれを試験実装して、動作実験を行う。

(4) PV 出力抑制との協調運転方法

本研究の目標が、PV 余剰発電を需要創出型 DR によって消費し、出力抑制を緩和することであるから、前述の DDS も当然 PV システムとの連携運転が必要となる。具体的には、PV に余剰発電が発生した際に、連動して DDS による需要創出が作動する必要がある。PV の出力抑制の実運用と、需要創出の想定される運用には、使用単位が異なることや、現行の PV システムの動特性と需要創出の動特性にも差異があることから、これらの整合を取る方法について検討する。

(5) 家電機器に対する Explicit 型 DR のユーザー受容性の確認

家電機器による DR 案を学会等で紹介すると、「DR 資源として有意か」と同時に、

「そもそもユーザーは受け入れないのではないか」といった意見をほぼ間違いなく頂く。家電機器を電力小売り会社がダイレクトにコントロールすることなど、本邦では全く事例がないのであるから無理からぬことであるが、これについても、ある程度の調査は必要である。このため、本研究では、簡易なインタビューを実施し、家電機器による DR のユーザー受容性について調査する。

(6) 世の中の IoT のトレンドと本研究の整合性の確認

現在、様々な機器が IoT 化されようとしている。この流れの方向性を確認するとともに、本研究の方向性がそれと整合性が取れていて、IoT 環境を活用できる可能性があるのかを確認する。

2.7.2 本研究によって構築可能となる DR システム

以上の既往研究・実証の空白域や、先進的な IoT 化の動向を総合すると、2.6 節に述べた「IoT 化が進展する家電機器をエネルギーサービスの一部として組み入れた需要創出型 DR によって、PV の余剰発電を消費し、その出力抑制を緩和すること」が可能になる。この DR の骨格は概ね以下のようなものである。

(1) Explicit 型 DR

PV 余剰は昼間帯に発生することから、出勤などにより居宅が無人の場合も多い。また、価格誘導型の Implicit 型は期待するほどの効果が出ないことが判明しており、アグリゲーターが直接需要機器を起動／停止する Explicit 型である。

(2) 需要創出型 DR である。

(3) IoT 化された家電機器を対象としている

IoT 化により、ICT 技術で大量の機器を纏めることが可能となるため、今まで DR の対象となり得なかった家電機器がその対象となる可能性が高い。その場合には、従来の家電機器側には無かった機能が必要となる可能性もある。

(4) アグリゲーターとして電力小売り会社が機能する

DR 事業専門業者が低圧ユーザーを対象としてアグリゲートする成功例はまだない。一方、電力小売り会社は、低圧ユーザーを纏めている確固たる存在である。本研究では、Explicit 型 DR のアグリゲーターとして、電力小売り会社を想定する。

(5) 広域での DR である

本 DR は、電力使用料金低減期待というマイクロなメリットの可能性に加え、再エネ積極利用社会構築への参加という“クールな”側面を有することが特徴である。このため、期待される参加の効果対象を広域（一般送配電事業者の制御エリア）とする。

(6) アグリゲーター—需要機器の直結 DR である（ADR ではない）

ADR の既往研究にあるような BEMS やホームコントローラーといったローカルマネージャー的な存在を低圧ユーザーは所有していない。そのため、Explicit 型 DR の主体であるアグリゲーターが IoT 環境を活用して個別の家電機器を直接起動／停止する制御方法を提案する

2.8 本論文の構成

図 2-12 で、前節で整理したテーマと課題に対する、本研究のアプローチを概説する。なお、(6)は確認が主なため下記フロー図からは省略してある。

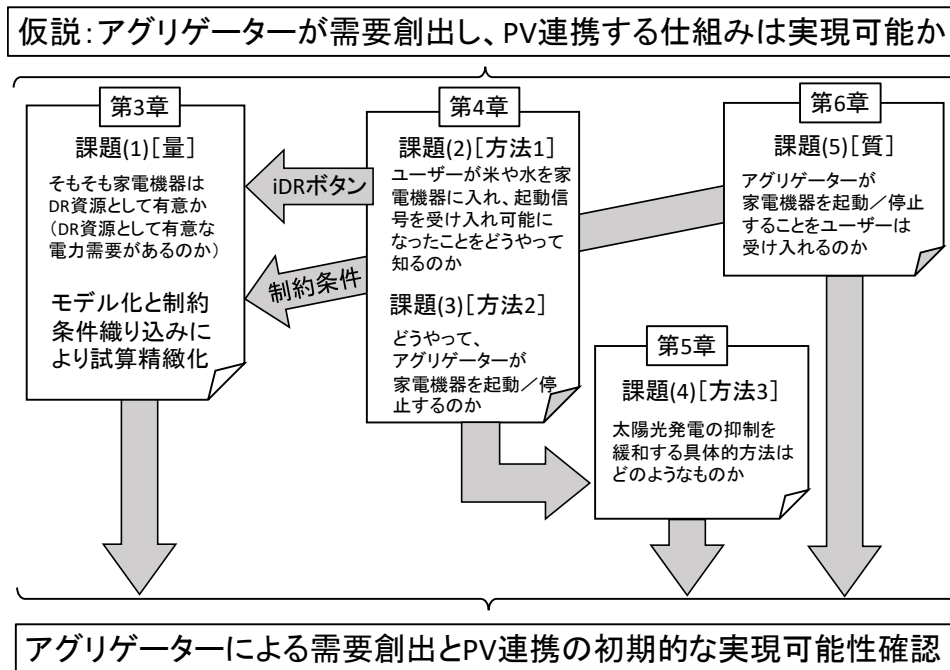


図 2-12 本研究のアプローチ

課題(1)は、いわば量の問題である。一方、ユーザーにこのような仕組みが受け入れられるかという課題(5)は、質の問題と捉えられる。これらは、並立的な位置関係であり、また、どちらも仮説の検証には必須のものである。

まず、第3章では、課題(1)を計算機シミュレーションにより試算するが、初期の大掴みな試算に加え、課題(2)の検討結果を織り込んだモデル化によりその振る舞いが明確化できるため、それによる試算の改善(精緻化)を行う。

一方、課題(2)～課題(4)は、技術/方法の問題である。第4章では、まず課題(2)に示す本仮説を成り立たせるためにIoT化される家電機器に具備すべき機能を検討する。これにより、家電機器がDR資源として活用できるようになるが、それを受けて、課題(3)のDDS全体の所要仕様を検討整理し、実際に試験実装して実験による動作確認を行う。

課題(2)と課題(3)がDDSの骨格を成す検討課題であるが、この開発研究を踏まえ、第5章で、これとPVシステムの連携運転について検討し、実運用に必要な運用単位の変換の仕組みを整理する。更にこの章では、実際のPVシステムとの連携実験を行って、将来アグリゲーターが運用可能な基本的データを取得提示する。また、既存のPVシステムの動特性とDDSの動特性の整合性についても検討し、本研究の目標に合致するように既存PVシステムの動特性仕様の変更について提言する。

第6章では、質の問題である課題(5)についてユーザーに対する簡易なインタビューを行い、本研究が目標としている仕組みに対するユーザーの受容性を明らかにする。

第7章は、本研究のバックグラウンドとしているIoTの動向について、現在のIoTの動向を整理し、本研究との整合性をチェックする。

以上の研究によって、仮説の初期的な実現可能性を明確にする。
 本論文の各章が、2.2 節で提案した DR のどの項目と関係するかを表 2-7 に示す。

表 2-7 本論文の提案 DR と各章の関係

DRモデル	いつ (When)	どこで (Where)	だれが (Who)	なにを (What)	なぜ (Why)	どのように (How)
本研究 (iDR)	PV余剰発電発生 時	旧・電力会社工 場全体 (広域)	電力小売り会社 (アグリゲーター)	IoT化された家電 機器	需要を創出してPV 抑制を緩和	アグリゲーターから の起動信号によっ て
関係する章	2章	3章	3章	3/4/7章	2/3/4/5章	4/6章

第 2 章 参考文献・資料・出典

- [1] 米国 Energy Policy Act of 2005
<https://www.ferc.gov/enforcement/enforce-res/EPAct2005.pdf>
- [2] FERC: Assessment of Demand Response & Advanced Metering (2006.8)
<https://www.ferc.gov/legal/staff-reports/2010-dr-report.pdf>
- [3] 三井物産戦略研究所レポート(2014.11.28)
https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2016/10/20/141128t_date.pdf
- [4] 電気事業連合会 電力需要実績 (確報) (2015)
http://www.fepc.or.jp/library/data/demand/_icsFiles/afieldfile/2016/04/28/juyou_k_fy2015.pdf
- [5] 電気事業連合会 Web サイト
https://www.fepc.or.jp/library/kaigai/kaigai_topics/1256816_4115.html
- [6] 電気事業連合会データ
<http://www.ene100.jp/www/wp-content/uploads/zumen/1-2-13.jpg>
- [7] 浅野浩志：電力システム運用に於ける需要側資源の活用、電気学会論文誌 Vol.135、No.11、2015、pp766-771
- [8] 横山明彦：未来の電気エネルギーシステムに向けて電気学会の果たす役割、電気学会論文誌 Vol.137、No.7、2017、pp404-409
- [9] NREL: Overgeneration from Solar Energy in California: A Field Guide to the Duck Chart(2015.11)
<https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65023.pdf>
- [10] 平成 28 年電気学会全国大会プログラム
- [11] 平成 29 年電気学会全国大会プログラム
- [12] 平成 30 年電気学会全国大会プログラム
- [13] U.S. Department of Energy : Demand Dispatch—Intelligent Demand for a More Efficient Grid (2011.8.10)
- [14] 恒藤祐輔ら：需要家の既設蓄電池を用いたデマンドレスポンス供出可能量の概算とその評価、2017 年電気学会全国大会 2-268
- [15] 資源エネルギー庁 Web サイト：リソースアグリゲーターの要件
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/energy_resource/pdf/004_09_03.pdf
- [16] 新電力ネット Web サイト：アグリゲーターとは
<https://pps-net.org/glossary/43326>
- [17] ENERNOC 社 Web サイト
https://www.enernoc.com/sites/default/files/media/pdf/brochures/P15158_br_utility_eis_sme_solution.pdf

- [18] ITRON 社プレスリリース : ITRI_News_2017_5_8_General_Releases.
- [19] 資源エネルギー庁：需要家側エネルギーリソースを活用したバーチャルパワープラン
ト構築実証事業費補助金の進捗報告(2017.9.29)
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/energy_resource/pdf/006_04_01.pdf
- [20] Masaki Imanaka、 Hideki Sasamoto、 Jumpei Baba、 Naoto Higa、 Masanori Shimabuku、 and Ryota Kamizato: “ Compensation for Photovoltaic Generation Fluctuation by Use of Pump System with Consideration for Water Demand ”、
Journal of Electrical Engineering and Technology (Chapter.7、 Section 3 of this thesis)
- [21] Yumiko Iwafune、 Junichiro Kanamori and Hisayoshi Sakakibara “A Comparison of the Effects of Energy Management Using Heat Pump Water Heaters and Batteries in Photovoltaic -installed houses”、 Energy Conversion and Management、 148、 146-160(2017)doi: 10.1016/j.enconman.2017.05.060
- [22] 商務情報政策局／資源エネルギー庁 Web サイト：スマートハウス・ビル標準・事業促進検討会について
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/shoujo/smart_house/pdf/001_s01_00.pdf
- [23] <http://www.stat.go.jp/data/zensho/2009/energy/yoyaku.html>
- [24] 資源エネルギー庁 Web サイト：ダイヤモンドリスポンスについて
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/005/pdf/005_09.pdf
- [25] 資源エネルギー庁：次世代エネルギー・社会システム実証事業～ 総括と今後について～ (2016.6.7)
http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004633/pdf/018_04_00.pdf
- [26] 環境省 Web サイト
http://www.env.go.jp/earth/report/h29-03/h28_chapt03_2.pdf
- [27] 資源エネルギー庁：エネルギー価格の需要変動量について (2012年3月)
- [28] 高橋雅仁ら：オフィスビルを対象にしたデマンドレスポンス制御の実証実験、電力中央研究所報告、2013年
- [29] 電力広域的運営推進機関(OCCTO)Web サイト
- [30] 資源エネルギー庁：ネガワット WG からの報告等(2107.3.8)
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/energy_resource/pdf/005_06_01.pdf
- [31] 経済産業省：ダイヤモンドリスポンスハンドブック
<http://www.meti.go.jp/press/2016/12/20161228004/20161228004-1.pdf>
- [32] NEDO：ハワイ州マウイ島における日米スマートグリッド実証
<http://www.nedo.go.jp/content/100864935.pdf>
- [33] 首相官邸ホームページ：未来投資に向けた官民対話(2015.11.26)
https://www.kantei.go.jp/jp/97_abe/actions/201511/26kanmin_taiwa.html

- [34] 電気製品認証協議会：電気用品安全法技術基準の解釈別表第八に係る遠隔操作機構に関する S マーク認証の運用基準 (2015.7.1)
- [35] Hiroyuki Baba et al. : Study Report on a Framework for Cloud Inter-connection toward the Realization of IoT (2018)
<https://datatracker.ietf.org/doc/draft-baba-iot-interconnection/>

各 Web サイトへのアクセスは、2019年10月13日に確認した。

第3章 DR リソースとしての電力消費量の確認

本章では、表 2-6（再掲）に示す 2.7.1 項(1)で述べた炊飯器など広く普及している家電機器の DR リソースとしての有意性を確認する。

表 2-6 開発・研究すべき課題（再掲）

DR既往研究の分類視点		既往研究・実証の現状	本研究の目的／ポジション	解決すべき課題	
1	When Why	需要抑制型／需要創出型	実証事業は、需要抑制型が殆ど	需要創出手法の確立	・アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法(4) ・PVとの連携運転方法(5)
			需要創出型DR手法は確立されていない		
			電気学会全国大会件数では、創出型が徐々に増えつつある		
2	Where	建物内DR／広域	電気学会全国大会件数では、広域型が徐々に増えつつある	広域を対象とする	-
3	Who	アグリゲーターの関与	電力小売り会社から、他業種まで幅広い業種が副業として実施することを企図	電力小売り会社をアグリゲーターを兼ねる主体として扱う	-
4	What	低圧需要の何を対象としているか ・重点8機器 ・その他（例：家電機器）	DR資源として家電機器を対象とした例はない	充分普及している家電機器を対象とする	DR資源としての家電機器の有意性確認(3)
			低圧需要は、HP（ヒートポンプ式給湯器）、EV（未普及）に研究が集中		家電機器の準備完了状態をアグリゲーターが知る方法(4)
			多数の小規模需要をアグリゲートする手法は確立されていない		アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法(4)
			系統容量と低圧需要の桁の違いが大きすぎる		個々の振る舞いのモデル化(3)と大量にアグリゲートする方法(4)
5	How	Implicit型DR／Explicit型DR	価格誘導型DR（Implicit型）は、価格弾力性が小さく（0.5程度）効果が薄い	Explicit型DRの手法の確立	家電機器に対するExplicit型DRのユーザー受容性の確認(6)
			ユーザーは、割安電気料金部分にあまり関心がない		
			ピーク時の大幅高料金に対する抵抗感が強い		
6	How-2	ADR（Automatic DR）	ADRは、BEMSなどを介したローカルExplicit型DRと理解でき、事業者－需要機器直結Explicit型DRとは異なる	事業者－需要機器直結Explicit型DR	-
7	How-3	IoTの活用	首相の官民対話で話題にはなっているが、まだ殆ど実例はない	IoTを活用する	IoT家電機器を模した実験機の開発(4,7)

カッコ内の数字は章番号

本検討は大きく分けて二段の構成となっている。

まず、

3.1 節「IoT 化する家電機器による需要創出」で、本研究が想定する IoT 化する家電機器による DR を iDR と仮称することとし、その基本構造を説明する。

3.2 節「家電機器の特性－1」では、エアコンのように動作しているその時に当該家電機器の便益を欲するものと、炊飯器などのように、必ずしも動作している際に、その便益をユーザーが受け取るわけではないものがあることを整理し、本研究の対象となるものを明確化する。

3.3 節「家電機器の特性－2」では、消費電力の変化特性例などを概観し、多様な変化特性を有する家電機器をシミュレーションにどのように盛り込むかを検討する。

3.4 節「iDR のポテンシャル試算方法」では、3.2 節で述べた条件に合致し、広く普及している家電機器が有する電力の消費ポテンシャルを計算機シミュレーションにより試算する。

3.5 節「ポテンシャル試算結果と PV 出力抑制緩和効果－1」では、前節の方法による試算結果と、それが PV の余剰発電の抑制をどの程度緩和できるかを示す。

ここまでの、二段構成の第一段であって、DR リソースとしての有意性について目途を付けるための大掴みな基礎的検討である。続く 3.6 節から第二段となる。

3.6 節「iDR のモデル化と制約条件」では、3.1 節で定義した iDR をより精密に再定義し、基本モデルを提案するとともに、ユーザー受容性などの制約条件を整理する。

3.7 節「制約条件を考慮した iDR ポテンシャル試算方法」では、それらのモデルや制約条件を検討する。

3.8 節「ポテンシャル試算結果と PV 出力抑制緩和効果－2」では、前節の条件で試算した結果やそれによる PV 余剰発電緩和効果を述べる。

3.9 節「考察」では、創出需要の経済的価値や、需給調整運用上の扱いなどについて考察する。

3.10 節「本章のまとめ」では、前節の計算機シミュレーションの試算について考察するとともに、このように能動的に創出した需要の需給調整運用上の扱いについて検討した結果を述べる。

3.1 IoT 化する家電機器による需要創出

2.5 節に示したように、家電機器が IoT 化されそのプライベートクラウドの API が開放されれば、多様なアプリケーションで家電機器を操作できる環境が整う。当然、アグリゲーターが DR アプリケーションを用意すれば、それによって、需要創出が可能となる。

このようなアーキテクチャーによる DR を、IoT による DR という意味を込めて、本研究では iDR と呼ぶ。iDR は、PV 余剰発電が発生した際に、PV 出力抑制措置に代えて、需要が発生させ、その需要で PV 余剰発電（の一部）を消費し、PV 出力抑制を緩和するものである。

iDR が機能するには、PV 余剰発電の発生を知る必要がある。現在、PV の出力抑制を目的として、旧・電力会社の中給がメガソーラーや PV 設置家庭などに、出力を最大出力の〇%までに制限するという信号（以下、抑制信号という）を送る制度が検討され、技術が実装されつつある。

iDR は、図 3-1 に示すように、このアプリケーションの入力を PV 抑制信号として、多数

の家電機器等を動作させ、PVの余剰発電を消費し、結果としてPVの出力抑制を緩和する概念である。本研究では、このアプリケーションをiDRアプリケーションと呼ぶ。

PV抑制信号は、中給単位で送出されることから、iDRの対象となる家電機器の設置範囲は、本研究では、個々の旧・電力会社の制御エリア全体を対象とする。この場合、図3-2に示すようにPV設置の需要家における余剰発電消費に限定せず、地理的に分散した、PVを設置していない需要家も取り纏める。

このように、広範に家電機器を取りまとめて需要を創出し余剰電力を消費することで、より大きな周波数を維持する効果、ひいては、PV抑制緩和効果が得られる。

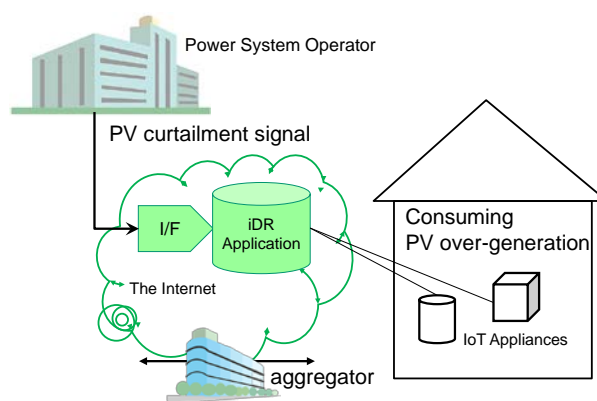


図 3-1 iDR の概念

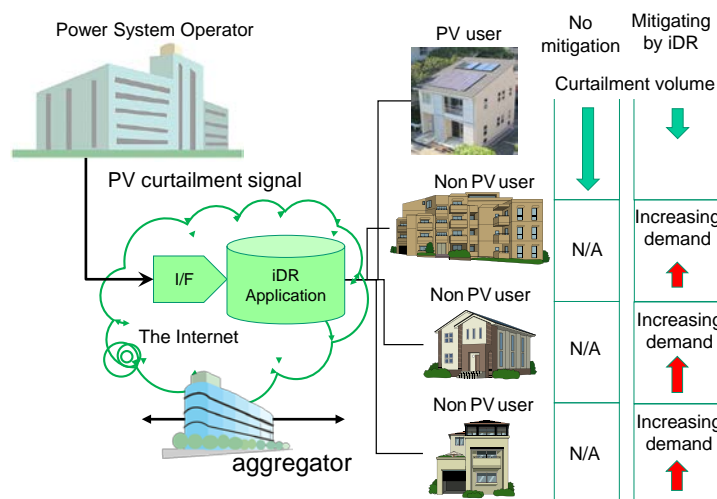


図 3-2 PV 有／無の需要家を取りまとめて PV 出力抑制を緩和

3.2 家電機器の特性 - 1

家庭内には様々な家電機器があるが、本節では iDR に適した家電機器はどのようなタイプかを検討する。

まず、家電機器には、使用しているまさにその時に、ユーザーが当該家電機器から便益を享受しているタイプがある。代表例としては、エアコン、照明など、とても身近なものである。これらは、ユーザーが使用するタイミングと電力を消費しているタイミングが一致していることから、「適時性がある」とか「適時性が高い」などと表現される。

次に、使用した結果がユーザーにとっての便益であって、その家電機器が動作している時は、ユーザーはまだ便益を受けていないタイプがある。代表例としては、炊飯器、洗濯機などである。すなわち、炊飯器の便益は、炊いた白飯であって、照明などとは異なりそれが動作している時には、ユーザーはまだ便益を手に入れていない（白飯は炊けてない）タイプの家電機器である。好みの問題はあるが、白飯が炊けてしまえば、その便益を実際に受ける、すなわち、炊飯器の稼働タイミングと白飯を食すタイミングとは、相当程度ズレてしまってもよいので、このタイプは「適時性がない」若しくは「適時性が低い」と分類される。この「好みの問題」は本研究の第6章で検討する。

それ以外には、蓄電池（以下、バッテリー）を搭載しているタイプの家電機器がある。例としては、ロボット掃除機、電動自転車などである。これらは、当該機器を使用する際にはその機器はAC100Vのコンセントには繋がっていないことが特徴である。これも一種の「適時性の低さ」と考えられよう。

もう一つのタイプは、電力という形式以外でエネルギーを貯められるものである。典型例は、熱、すなわち、湯として貯めるタイプのもので、ヒートポンプ式給湯機が挙げられる。これは、湯を沸かしている時（例：深夜）と、湯を使用する時（例：夕餉時間帯）は当然ズレているわけであるから、「適時性が低い」ものに分類できる。

以上の分類を、横軸にエネルギー貯蔵の可否、縦軸に適時性、若しくは、コンセントの必要性をとって整理したものが表3-1である。

さて、本研究の目的である「PV余剰発電を、その発生時に家電機器を動作させて、余剰発電を消費し、PV発電抑制を緩和する」ためには、上記のうち、どのタイプが適切であろうか。表3-1のうち、エアコンなどのタイプBは、例えば、蒸し暑い夜間（夜間はPV出力はゼロである）や、PV余剰発電が発生していても、出勤して留守なのでエアコンは不要など、その使用とPV余剰発電と結びつけることが困難であるので対象外とする。

表3-1のタイプCは、基本的には充電や貯湯に向けた湯沸かしであるので、PV余剰発電発生時と同調させることが可能である。但し、例えば電動自転車のバッテリーなら、PV余剰発電発生時に、バッテリーが充電器にセットしてあることが必要であるため、これについては第4章で検討する。

バッテリー駆動タイプの家電機器は、社会の高齢化が進むにつれ、既にある電動カートやロボット掃除機のような家事支援機器、若しくは、聊かSF的ではあるが介護用のパワースーツのようなギアが出現すると考えられ、今後対象が増えると想定される。

表3-1のタイプDも、昼間の留守時に白飯を炊いておくとか、洗濯乾燥を済ませておくという従来のタイマー動作にも似た機器稼働とPV余剰発電の同調が可能である。このタイプの家電機器も、米と水を炊飯器に入れた状態を把握する必要があるなどの工夫を要する。これについても第4章で検討する。

以上を総合すると、iDRの対象として扱える家電機器は、タイプC、及び、同Dであることが判る。

なお、家庭に数kWhの蓄電池（「家庭用定置型バッテリー」という）を置けば、適時性問題は解消するという考えももちろんある。しかし、現在のところ、このようなバッテリーを家庭に設置する機運はほぼ無いといってもよからう。太陽光発電の買取が最初に始まった2009年から9年が経過し、2019年に買取期間10年が完了して、これらの発電事業者の電力の引き取り手が無くなる（電氣的には、電力系統に流れ込むので問題は起きない）グループが発生する。これがいわゆる2019年問題で、家庭用定置型バッテリーの需要が高まるといいう見方もできなくはないが、本件研究ではこれは織り込まないこととする。

さらに、現在はまだ殆ど普及していないが、今後最も普及が期待されるものとして EV がある。EV も V2H (Vehicle to Home) という技術により、家庭用定置型バッテリーと同等の役割を期待されている。重点 8 機器である EV は対象から除外したが、V2H 用の充放電器は、家庭用機器としてかなり高価（2018 年 1 月の完成車メーカー技術者へのヒアリングでは 150 万円程度）であって、EV そのものの普及論とは別に、V2H 普及の見込みはあまりないと考えている。

表 3-1 家電機器の分類

	エネルギーを蓄えられる	エネルギーを蓄えられない
	タイプ - A	タイプ - B
適時性が高い		[例] エアコン
		[例] 照明
適時性が低い	タイプ - C	タイプ - D
若しくは	[例] 電動自転車の バッテリー充電器	[例] 洗濯乾燥機
機器使用時に	[例] ヒートポンプ式給湯機	[例] 食洗器
コンセントを要しない	[例] 電気自動車の充電	[例] 炊飯器

水色のハッチング部分が、iDRの対象となり得る家電機器

3.3 家電機器の特性 - 2

本節では、家電機器の電力消費パターンについて確認する。図 3-3 が、本研究（第 4 章、第 5 章）で使用した実際の炊飯器や電動自転車のバッテリー充電の電力消費特性である。

炊飯器は、昔から始めちよろちよろ中ぱっぱ、などと言われるように、炊きあがるまでに加熱状態が大きく変わり、それに応じて消費電力量も急峻に変化している。しかも、入れた米（＝負荷）の量によって、その変化自体が変わる。当然のことながら、メーカーや〇〇炊きなどのような動作モードによっても消費パターンは変化していると想定される。

一方、電動自転車のバッテリー充電は、安定した充電電流（＝消費電力）が続くが、電池残量によって、その消費電力の低下状態が相当変わる。

このように、大きく異なる消費電力特性を有する家電機器が家庭内には混在しており、これらを総合した電力消費ポテンシャルの見積もり試算の際には、かなりの単純化などが必要になることが判る。

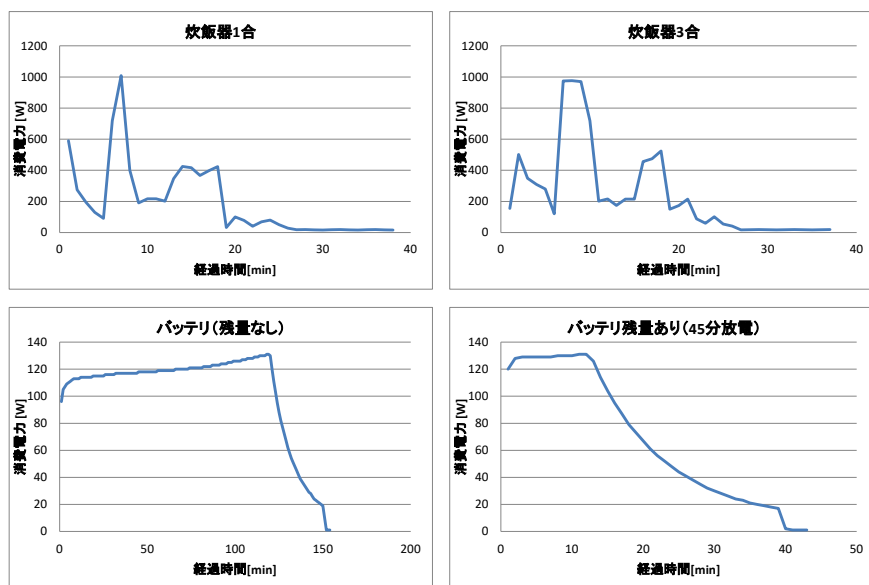


図 3-3 家電機器の消費電力パターン例

3.4 iDR のポテンシャル試算方法

3.4.1 ポテンシャル試算条件－1

本研究では、iDR の効果を評価するため、ポテンシャル量を計算するシミュレーションを行った。本項では、想定する PV の導入量や PV 余剰発電量などの条件を整理する。

分析対象としては、将来的に PV が大量導入される一方で、風力発電の導入量は比較的小さいと考えられる東京電力パワーグリッド（以下、東京電力 PG、表に於いては TEPCO）エリアとする。東京電力 PG エリアにおける将来の PV の導入量として 33.1GW、24.8GW、17.5GW を仮定した。これらの値を全国規模に換算すると、それぞれ、100GW、75GW、53GW 導入された場合となるが、これは、2010 年のエネルギー基本計画[1]を参考にした 2030 年頃を想定しており、最大ケース、中間ケース、最小ケースとして設定した[2]。

次に、iDR の消費の対象となる PV 余剰発電の見積もりについて説明する。本効果シミュレーションでは、宇田川ほかにより開発された火力・揚水発電機起動停止計画モデルによる需給解析により算出される年間を通じた必要 PV 出力抑制量を使用した。これは、上記各ケースにおいて火力発電所の燃料費を最小化する発電機運用を前提としたものであり、参考文献[3]を基に設定した。

3.4.2 ポテンシャル試算条件－2

本項では、需要を発生させる iDR 用の家電機器のシミュレーション上の特性について述べる。

先にも述べたとおり、家電機器は、その種類の違いによって消費電力パターンが大きく異なり、また、米の量など扱っている負荷によっても、消費電力パターンが異なる。これらのバラつきをどのように表現するかは、シミュレーションに要する計算時間などを大きく左右することになる。

本シミュレーションが土台として考える電力システムの容量は、旧・電力会社で最大の東京電

力 PG がピーク時 5,000 万 kW 程度、最小規模に近く、2018 年 9 月 6 日に北海道胆振東部地震によって系統全停（ブラックアウト）を引き起こした北海道電力の同容量は、同 500 万 kW 程度である。

一方、家電機器は、ヒートポンプ式給湯機や炊飯器などが 1kW 程度である。本シミュレーションは、系統容量に比べ、6~7 桁小さい家電機器を ICT によって大量に取りまとめた場合の DR リソースとしての有意性を確認するためであるから、家電機器の消費電力変化パターンの精密さを追求しても、あり意味はないと考えられる。PV の余剰発電は、1 日当たり〇[kWh]、年間〇[kWh]などのように、電力量[Wh]で表現されるため、このシミュレーションでも、対象となる家電機器の種類毎に、一台あたり〇[Wh]、標準偏差[Wh]という、いわば「粒」として扱い、課題に対する大掴みな目途を付けることとした。

なお、メーカーの違い、〇〇炊きなどの動作モード、米の量などの負荷の量による消費電力変化パターンは、標準偏差という一つのパラメーターで代表させている。

さらに、仮説評価のための iDR の潜在的な可能性の把握を目的としていることに鑑み、簡単のため、各家電機器の出力応答確率分布や、応答世帯数分の分布として、それぞれ対数正規分布、ベータ分布を仮定した。東京電力 PG エリアの低圧需要数は、28,000 千軒超[4]であり、現在 80%を超えているインターネット普及率[5]も、IoT の進展と共にさらに増加すると想定し、2030 年頃を想定したシミュレーション対象を約 27,000 千軒とした。ポテンシャル把握のためのシミュレーションに使用した家電機器は、表 3-2 に示すように、多くの研究の需要シフトの対象とされるヒートポンプ式給湯機等に加え、炊飯器、ロボット掃除機の充電器など市販されている 14 種類である。各家電機器の現時点の普及率は、業界団体などが発表[6~17]している数値を使用した。標準偏差データは東京大学生産技術研究所の手許に無いものについては、平均値の 1/10 と仮定した。また、洗濯機、食器洗濯機、浴室乾燥機、ヒートポンプ式給湯機、電気温水器など消費電力が大きく、継続時間が長いものは、他の家電機器よりも大きい標準偏差値を仮定した。

表 3-2 シミュレーションで使用した家電機器

Appliances	Average Wh [Wh/once]	Standard Deviation [Wh/once]	Duration [h]
Washing machine [6]	100	30	1
Dish washer[7]	500	200	1.5
Bathroom dryer[8]	1200	400	3
Heat pump water heater[9]	1500	600	3
Water heater[10]	2500	500	5
Blanket dryer[11]	150	15	1
Trouser presser[12]	31.3	3.1	1
Heated toilet seat[13] ¹	12.5	1.2	1
Rice cooker[14]	85	8.5	1
Room air cleaner[14]	11.3	1.1	1
Electric thermos pot[15]	125	12.5	1
Garbage disposal[16]	555	55.5	2
Vacuum cleaner[14]	125	12.5	1
Robot vacuum cleaner[17]	45	4.5	3

3.4.3 ポテンシャル試算フロー – 1

以上のような前提を置いて、PV 余剰発電に対する、iDR による需要創出による緩和ポテンシャル（以下、iDR ポテンシャル）を計算した。

iDR ポテンシャル分析フローを図 3-4 に示す。iDR に応答する可能性のある家電機器に対して定義される確率分布を基に、家電機器 n の DR シグナルへの応答電力量 x_n の確率分布 $p_n(x_n)$ とそのシグナルへの応答世帯数 y_n の確率分布 $q_n(y_n)$ 同士の重ね合わせ演算を行うことで対象家電機器 n に関する iDR 応答電力量 (Wh) の確率分布を計算し、その上で、各家電機器の iDR 応答電力量確率分布の足し合わせを行うことで、iDR として需要をシフト、もしくは新規創出可能な需要量 P のポテンシャル評価を行った (図 3-5)。((1)式)

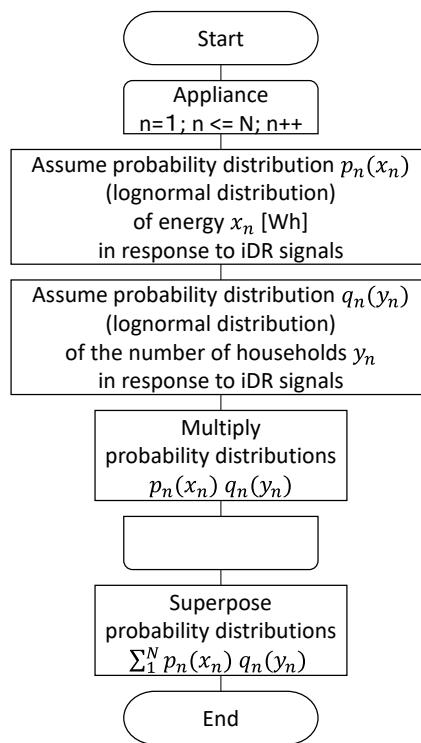


図 3-4 iDR のシミュレーションフロー

$$P = \sum_1^N p_n(x_n)q_n(y_n) \dots\dots\dots (1)$$

本シミュレーション対象時刻は PV 余剰発電が発生しやすく、iDR による応答が期待される時刻、即ち、PV 出力抑制発生時刻として日中 (10:00~14:00) を想定した。簡単のため、応答速度は非考慮とし、また、本シミュレーションで考慮する各家電機器は自動的に iDR アプリケーションから起動されるものと想定している。

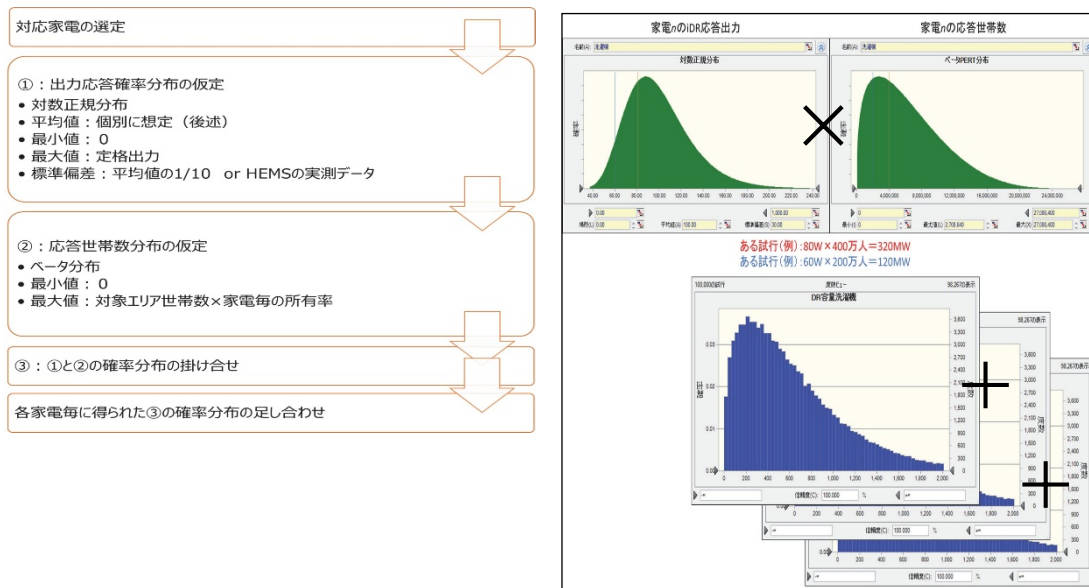


図 3-5 試算プロセスのイメージ

3.5 ポテンシャル試算結果と PV 出力抑制緩和効果 – 1

シミュレーションで得た iDR の電力量ポテンシャルの確率分布を図 3-6 に示す。横軸はポテンシャル[MWh]、縦軸は確率密度である。分析対象である東京電力 PG エリア内にある全ての家電機器が全ての世帯において定格消費電力で動作すれば、横軸の右端の電力量を消費できることになる。図 3-6 は、PV の出力が大きく、抑制が発生する可能性が高い日中 4 時間内でのポテンシャルを示している。結果として、1 日 4 時間あたりの iDR 応答可能電力量は、平均値で 4.42GWh を得た。また 10 (90) パーセンタイル値で 2.61GWh (6.65GWh) を得た。低いリスクをとって家電の iDR 応答を期待する場合でも 4 時間で約 2.6GWh 程度、平均 650MW の需要のシフトや創出が期待でき、これは最新鋭のコンバインドサイクル発電機の 1 軸分に相当する大きなポテンシャルである。

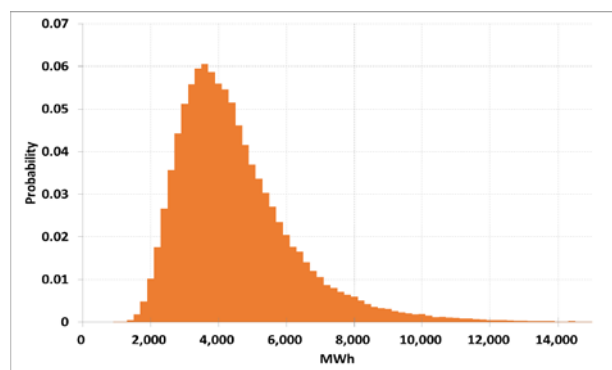


図 3-6 iDR の確率密度分布

前節で求めたポテンシャル量を、3.4.1 に述べた PV 出力抑制量[3] (=余剰量) から、上記 iDR のポテンシャル量を差し引いて、年間の PV 抑制の緩和量を試算した。家電機器の IoT 化を前提とした iDR は、今後の技術の進展に依存するため、本シミュレーションで対

象とした家電機器の大多数が、殆どの家庭で iDR シグナルに応答する確率はまだ低いと想定し、ポテンシャル量は、控えめな見積り例として、10 パーセント値を採用した。

シミュレーションの結果を、表 3-3、表 3-4、表 3-5 に示す。PV の導入量が東京電力 PG エリアで 33.1GW (全国 100GW 相当) 導入の場合、年間の出力抑制率は、表 3-3 に示すように Wh ベースで 4.8% 必要であるが、表 3-5 に示すとおり、iDR の効果により、3.9% まで低下した。これは、表 3-3 と比較して PV 設置事業者が PV 出力 (制御) 抑制によって失う FiT 収益を、iDR により 2 割程度回復できる可能性があることを示している。

以下、参考までに、PV24.8GW (東京電力 PG エリア) の場合は、1.1% (iDR 無) が 0.5% (iDR 有) に緩和され、PV17.5GW (同) の場合は、0.34% (iDR 無) が 0.01% (iDR 有) に緩和されることを確認した。

計算を各日で実施し、1 年間での iDR による PV 出力抑制の緩和状況を図 3-7 に示す。ここでは、各日における必要出力抑制量と、そこから iDR による需要創出量を差し引いた残余必要出力抑制量のそれぞれを示している。PV 出力抑制が多く発生するのは、4、5 月と想定されているが、その時期でもかなりの緩和効果があることが確認できる。具体的には、4 月と 5 月の総和で、出力抑制必要量は 1,203GWh、iDR による出力抑制緩和量は 126GWh (10 パーセント値) となった。これは出力制御必要量に対する緩和率で 10.4%、PV 出力量に対する緩和率で 2.8% に相当する。必要出力抑制量は、宇田川ほか[18]による電力システムにおける需給運用を行うために必要な各種の制約条件を満たしつつ、各日における発電コスト (燃料費と起動費の和) を最小にするように最適化計算を行った結果得られた値を使用している。

表 3-3 PV 出力抑制率 (33.1GW (TEPCO エリア))

Necessary curtailment volume (per year)	PV output (per year)	Necessary curtailment rate before applied iDR
1.86 TWh	38.4 TWh	4.8%/year

表 3-4 iDR による PV 出力抑制緩和の可能性 (33.1GW (TEPCO エリア))

	10 percentile	Median	Average	90 percentile
iDR Wh [GWh/day]	2.61	4.06	4.42	6.65
Necessary curtailment volume after applied iDR [TWh/year]	1.51	1.40	1.37	1.20
Effect of mitigation by iDR [TWh/year]	0.34	0.46	0.49	0.65
Effect of mitigation compared with curtailment volume of Table.3-3 [%]	18.4	24.8	26.3	35.2

表 3-5 iDR による緩和後の PV 出力抑制率 (33.1GW(TEPCO area))

	10 percentile	Median	Average	90 percentile
Necessary curtailment rate after applied iDR [% / year]	3.9	3.6	3.6	3.1

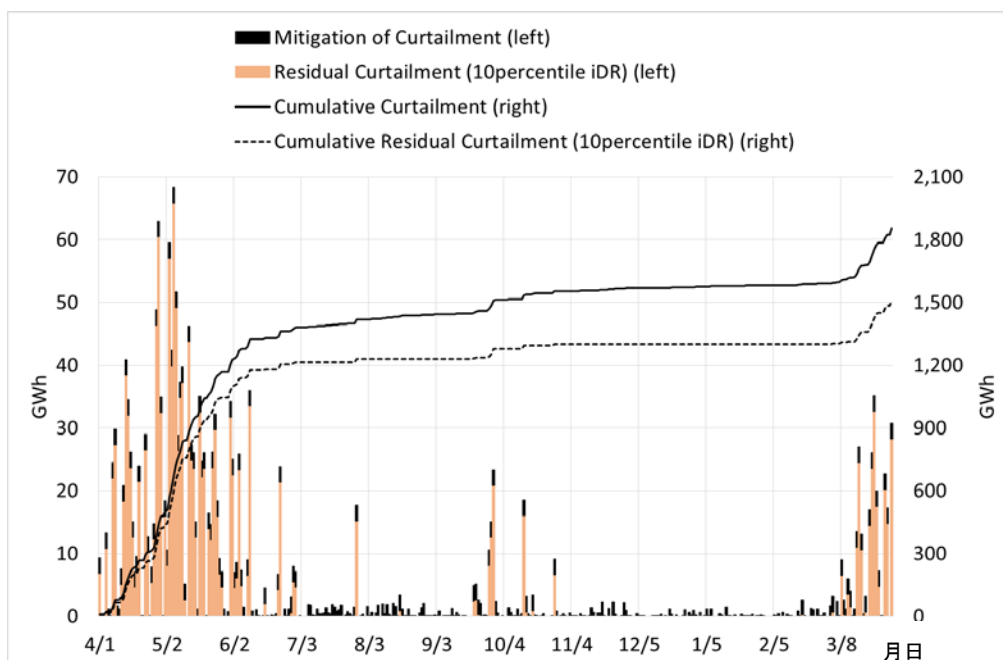


図 3-7 iDR による一年間の PV 出力抑制緩和状態

3.6 iDR のモデル化と制約条件

3.6.1 家電機器の特性 - 3

iDR に適合する需要は、3.2 節の表 3-1 で示した通り、タイプ C のように電力を他の形態も含めて蓄えることができるか、当該機器使用時に系統電力を必要としないもの、もしくは、タイプ D のように特定の時間に稼働する必要のない（低適時性）ものが適している。

さらに、iDR が対象とするこの需要は、次の特性で分類できる。

- a) 一度起動すると、一連の仕事が完了するまで停止できないタイプ（例：炊飯器）
- b) 起動／停止が相当程度自由にできるタイプ
 - イ) SoC (State of Charge) などの一定の条件を満たせばよいもの
（例：電動 自転車のバッテリー充電器）
 - ロ) 最終的には決められた量の仕事をこなす必要があるもの
（例：翌日までに一定量の湯を沸かす必要があるヒートポンプ式給湯機）

ここで、ポテンシャル試算の精緻化等のために、改めて iDR のメカニズムを明確にする。上記で整理したような特性を有する家電機器を、アグリゲーターのサービスを受ける端末機器として契約し、さらに、米と水を炊飯器に入れふたを閉める、バッテリー本体を充電器

にセットする、といったユーザー側の準備作業の完了をアグリゲーターに知らせて、起動信号を受けて（ディスパッチされて）PV 余剰発電を消費するのが、iDR の基本動作である。

家電機器をディスパッチして、PV 余剰発電を消費するイメージを図 3-8 に示す。家電機器の消費電力は極小さいものであるが、この模式図では、大きく誇張して書いてある。ここで、注目すべきは、二瘤の山形のくぼみ部分である。ここは、天候の変化により PV 余剰発電が減少し、再び増加する様子を描いてある。PV 余剰発電が減少する前から需要が割り当てられていたが、くぼみでは需要過多になり、また、PV 余剰発電を適正に消費できる状態に戻っている。

このような状況では、くぼみの部分で家電機器を一時停止し、再び起動することが望ましいが、炊飯器のような特性の家電機器では、一たび起動すると一時停止できないため対応できない。このような状況には、バッテリーの充電器のような、一時停止可能な需要をディスパッチすることが適切である。

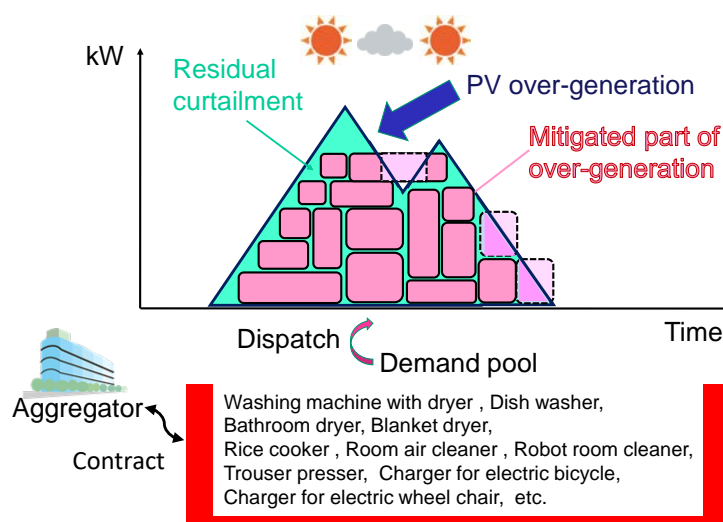


図 3-8 デマンドディスパッチのイメージ

3.6.2 iDR による需要創出の基本モデル

iDR は、ユーザー側の準備が必要な家電機器を対象とし、また、一時停止などの状態遷移があることから、単に起動/停止だけのシステムよりの複雑な構造をしている。精緻なシミュレーションや、適切な実験機の開発のためには、この構造を明確にすることが重要である。本項では、その構造のモデル化する。

まず、①iDR ボタンが押されて Ready 状態になり、ユーザー側の準備作業の完了をアグリゲーターに知らせる、②起動信号を受けて家電機器が動作を開始する、の二段階の様子を図 3-9 に模式的に示す。同図下段の「at Contracted status」は、家電機器がアグリゲーターのサービスを受ける契約状態にあることを示す。

図の中段は、下段の状態の家電機器が、ユーザー側の準備作業を経て、その完了をアグリゲーターに知らせる iDR ボタンが押下され、Ready 状態に移った状態を表す。この iDR ボタン (Ready 通知機能) については、第 4 章に詳述する。

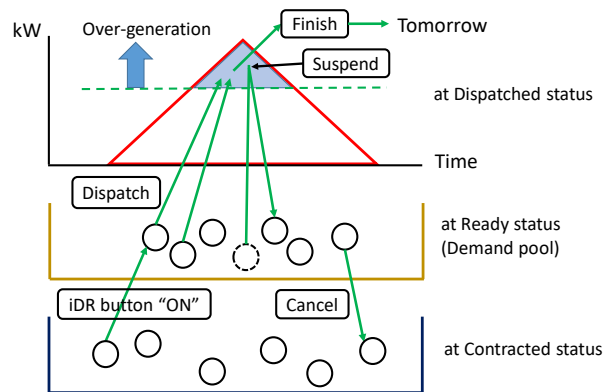


図 3-9 iDR 動作イメージ

アグリゲーターから見ると、これは起動信号待ちの需要のプールのように見えるため、本研究では、デマンドプールと呼ぶ。

そして、アグリゲーターからの起動 (Dispatch) 信号によって、家電機器は、上段の状態となって PV 余剰発電に割り付けられ、その電力を消費することとなる。

Dispatch された多くの家電機器は、炊飯など所定の仕事を終わると、Finish となって、この図からは一旦離脱し、翌日以降再び下段の要素となる。しかし、先に述べたように、図 3-8 の晴→曇→晴のような天候の変化や他のマクロな需要の変化などで、アグリゲーターが一旦起動した家電機器を停止したい場合があり得る。この場合、電動自転車のバッテリー充電などは、一時停止が比較的的自由であるから、起動中ステータスから、一時停止して Ready 状態に回帰し、デマンドプールに戻るといったパターンがあり得、これが Suspend である。

図 3-9 の家電機器の振る舞いを、図 3-10 に示すモデルとして構築した。これは、振る舞いを規定する構造が異なる 2 つのプロセスからなっており、以下に詳述する。

【Process 1 : Contracted status <-> Demand pool】

このプロセスは、ユーザーが主導するプロセスである。ユーザーが準備を済ませ iDR ボタンを押下して家電機器をデマンドプールへ移行させることは、生活上の様々なタイミングで発生する。直感的には、出勤前が典型であるが、多様な生活パターンに起因して、ある程度のランダム性を有しながら一日中継続的に発生すると想定できる。

家電機器が Ready 状態に移行し、アグリゲーターに起動/停止権限を一旦渡したとしても、生活上のなんらかの理由により、ユーザーがこれを取り消す場合もあり得る。これは、Ready 状態への移行と、Cancel によるそれからの離脱という遷移で示される。これらのことから、このプロセスは、確率密度関数で表現する Birth-Death プロセスとして扱うことが可能と考えられる。

【Process 2 : Demand pool<->Dispatched Status】

Process 1 と異なり、このプロセスは、アグリゲーターの使用する iDR アプリケーションのアルゴリズムが主導する振る舞いとなる。これは「詰込み問題」と呼ばれる最適化問題の一種に相当し、これには、様々な厳密解法や近似解法が提案されている[19]。本研究では、一例として BL 法 (Bottom left algorithm)を参考にした近似解法を用いた。基本的には、起動と一時停止からなるプロセスではあるが、いつ、どの程度の数量の家電機器を起動するのか、などアルゴリズムの違いにより、PV 余剰発電の消費能力が左右されることに加え、後述するユーザー受容性との兼ね合いから、アグリゲーターのサービス品質を規定する重

要な要素となる。

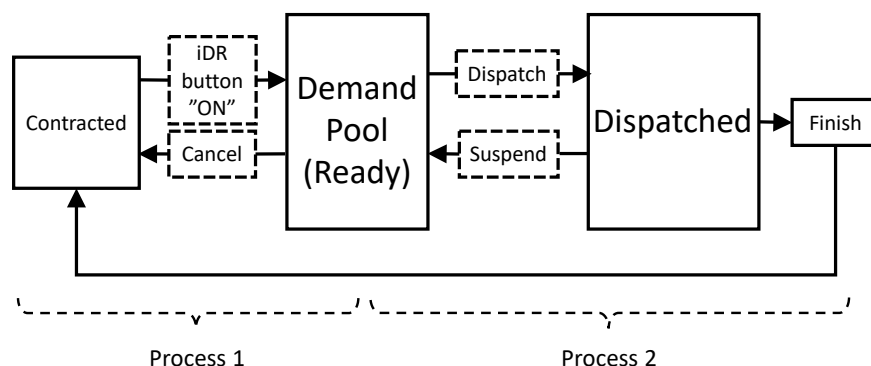


図 3-10 iDR のモデル化

3.7 制約条件を考慮した iDR ポテンシャル試算方法

3.7.1 ユーザー受容性による制約条件など

再エネ積極利用のためには、なるべく多くの PV 余剰発電を消費できるよう、家電機器の特性を勘案して、家電機器を起動/停止することが必要である。一方、家電機器の動作は、ユーザーの生活や好みと密接な関係があるので、PV 余剰発電など電力系統側の事情のみで起動/停止することはできない。この両者のバランスをとることが、アグリゲーターには求められ、これがサービス品質に大きく関わる。

上記を構成する項目は様々なものがあり、また、PV 余剰発電の消費能力を増やすタイプのもので、減らすタイプものがあると想定される。以下にその例を示す。

a) 家電機器の一時停止と再起動

3.6.1 項の通り、家電機器には一時停止が可能と想定されるものがある。一時停止できない炊飯器のような需要によって PV 余剰発電の基本部分を消費し、天候等の変化等による PV 余剰発電の比較的細かい増減は一時停止可能な需要で消費することにより、図 3-8 の二瘤の山形をなるべく緻密に埋めることが可能となる。このような家電機器の特性を活用するアルゴリズムの採用によって、なるべく多くの余剰発電を消費することができる。これは、消費可能量を増やすタイプの条件となる。

b) ユーザー受容性による制約

家電機器の便益の種類によっては、その得られる時間帯に対してユーザーの受容性が異なる場合も想定される。筆者は、第 6 章にて説明する研究において、このユーザー受容性に関し、簡易なインタビューによる調査を実施した。それによると、例えば炊飯器の稼働時間帯には、比較的強い制約特性が現れた。これは、このような制約を考慮しない場合に比べて、消費可能量を減らすタイプの条件となる。次節以降に示す試算では、この調査結果を適用している。

3.7.2 ポテンシャル試算条件-3

3.6 節で述べた通り、本研究が扱っているシステムは、2つの異なるプロセスの連なりとなっている。また、一時停止の可否や、ユーザー受容性に基づく起動/停止の時間帯別可否特性のような、制約条件も存在する。これらをシミュレーションに組み込むことにより、より精緻な創出需要量の分析が可能となる。

本研究では、3.4 節での大掴みなポテンシャル試算を踏まえ、対象とする家電機器を改めて選定するなど、シミュレーションの条件を再整備し、さらに、ユーザー受容性など起動停止可否等の制約条件を織り込んで、より精密な創出量を試算した。また、3.4 節では、需要を「粒」として捉えたが、以下の試算では、時間的長さを持った「30分のn倍の長さをもった長方形」として捉え、一時停止の可否を適用して、図 3-8 のような PV 余剰発電の日変化に対し、なるべく多く割り当てるようなシミュレーションとした。PV 余剰電力具体的な条件は、以下である。

【家電機器の選定】

本研究では、表 3-1 のタイプ C、D の中から表 3-6 に示す家電機器を改めて対象とした。多様な需要に関する検討を得るために、低圧需要であっても、研究例[20]の多い重点 8 機器（具体的にはヒートポンプ式給湯機）と呼ばれるものは除外した。

3.4 節の試算では、単純な消費電力量[Wh]と標準偏差の組み合わせで、家電機器の多様な消費電力変化パターンを表現した。標準偏差を使用する表現は、実際の家電機器の変化パターンが一定範囲に広がっているという想定であるが、もう一つの考え方としては、いくつかの代表パターンで表現するという手段もあり得る。前者がいわば連続的な広がりを持つという想定に対し、後者は離散的な広がりを有する、という想定でもある。

どちらが適切であるかは、今後の課題であるが、試算方法との整合性も重要なファクターである。

なお、家電機器の諸元については、参考 3-1 に整理する。

3.7.3 項で詳説するが、先に述べた process-1 と同-2 のうち、process-2 は、詰込み問題という問題ととらえることができ、これは iDR の社会実装に関してディスパッチアルゴリズムの実現方法を考える上で大変重要な視点である。この場合、家電機器を消費電力の連続的な広がりを有する需要ととらえると、詰込み問題としては構成が複雑になりすぎる。このため、本試算では、代表パターンをいくつか用意して、家電機器の消費パターンの多様性を表現することとした。

なお、トーフ型と呼ぶ矩形消費電力パターンで単純化していることは、先の試算と同様である。

表 3-6 シミュレーションで再選定した家電機器

Home appliance	Brand	Quantity (current)	Compensating rate (2030)	Brand share	frequency of use [times/day]	Contracted rate	Power Consumption [W]	Duration [min.]	Reference #
Parameter at fomula (2)		①×②×③	④	⑤	⑥	⑧			
Washing machine with dryer	A	27,720,000	1	0.08	0.60	0.5	666	90	(21)
	B			0.08			177	180	
	C			0.08			240	180	
	D			0.08			240	150	
Rice cooker	E	24,920,000	1	0.25	0.80	0.5	160	60	(22)
	F			0.25			130	60	
	G			0.25			150	60	
	H			0.25			150	60	
Battery charger for electric bicycle	I	112,000	3	0.33	0.05	1	70	360	(23)
	J			0.33	0.07		66.6	270	
	K			0.33	0.14		40	240	
Dish Washer (desk top)		7,840,000	1	-	0.90	0.5	520	90	(24)
Dish Washer (built in)		12,600,000	1	-	0.73	0.5	180	150	(24)
Bathroom dryer		7,560,000	1	-	0.06	0.5	360	120	(25)
Blanket dryer	L	10,640,000	1	0.33	0.07	0.5	450	360	(26)
	M			0.33			680	180	
	N			0.33			500	90	
Trousser presser		280,000	1	-	0.20	1	140	30	(27)
Room air cleaner	O	11,760,000	1	0.5	0.60	1	15	30	(22)
	P			0.5			6	30	
Garbage diposer		560,000	5	-	0.50	1	500	180	(28)
Cordless cleaner	Q	14,000,000	1	0.5	0.40	1	13	300	(21)
	R			0.5			40	90	
Robot room cleaner	S	280,000	1	0.5	0.57	1	33	180	(29)
	T			0.5			33	180	
Battery charger for electric wheel chair		28,000	3	-	0.33	1	80	120	(30)
Battry charger for electric cart		28,000	3	-	0.33	1	550	300	(31)

【家電機器の台数等】

試算に用いる家電機器の台数は、下記の考え方によって想定した。試算の対象となる時期を 3.2 節と同様に 2030 年頃とし、その時点で全国に 100GW の PV が導入されると仮定した。試算は、東京電力 PG 社エリア内を対象として、PV は 33.1GW、家電機器台数は下記(2)式により想定した。

$$\begin{aligned} & \text{[ある時間帯 (30 分間) における家電機器台数]} \quad - \quad (2) \\ & = \text{[世帯数]} \cdots \text{①} \\ & \times \text{[インターネット普及率]} \cdots \text{②} \\ & \times \text{[家電機器普及率 (現在)]} \cdots \text{③} \\ & \times \text{[2030 年に対する普及想定補正係数]} \cdots \text{④} \\ & \times \text{[ブランド別シェア率]} \cdots \text{⑤} \\ & \times \text{[使用頻度]} \cdots \text{⑥} \\ & \times \text{[家電機器の IoT 化率 (iDR 率)]} \cdots \text{⑦} \\ & \times \text{[Contracted 率]} \cdots \text{⑧} \\ & \times \text{[当該時間帯の数量補正值(X)]} \cdots \text{⑨} \end{aligned}$$

[世帯数]①は、東京電力 PG 社のスマートメーター計画数を基に 2,800 万軒、[インターネット普及率]②は、2030 年頃を考慮して 100%と仮定した。[家電機器普及率 (現在)]③は、それぞれ参考文献等を基にしており、①～③を総合した試算に使用した値は表 3-6 のとおりである。

今後、我が国の高齢化がさらに進むと、高齢者を対象とした家電機器の普及が進む可能性があるため、その乗数を[2030 年に対する普及想定補正係数]④で仮定して織り込んだ。家電機器は、メーカーや機種、動作モードによって消費電力が変化するが、これを[ブランド別シェア率]⑤として総合的に纏めた。iDR 化できる洗濯機は乾燥機付きに限るという研究結果(第 6 章にて説明)により、洗濯乾燥機のシェアは合計しても 1 に満たない小さな値となっている。[使用頻度]⑥は、参考文献等を基に想定した。

[家電機器の IoT 化率 (iDR 率)]⑦は、今後家電機器が IoT 化され iDR に対応できる比率として規定したものである。また、iDR 家電機器を購入しても、アグリゲーターと当該家電を必ずしも契約するとは限らないことを考慮し、本研究には[Contracted 率]⑧を設け、契約率を織り込み、例としてこれを 0.5～1 に仮定した。[当該時間帯の数量補正值]⑨は、時間帯毎の対象家電機器数量を増減するファクターであり、第 6 章で説明するユーザー受容性に伴う制約条件を織り込んだ。

3.7.3 ポテンシャル試算フロー - 2

各プロセスについても、試算の為の条件設定が必要である。それらについては、下記のように設定した。

【Process 1 の諸条件の設定】

iDR ボタンを押下されたことによるデマンドプールへの移行は、一例としてポアソン分布に従うものとした。移行できるものは 2 種類あり、一つは、直前までに稼働完了していない Contracted 状態にあるもの、もう一つは、Dispatched 状態であっても、次の時間断面では、Suspend 可能なものとした。本試算では、時間単位を 30 分とした。

稼働を完了して Finish 状態に到達したものや、 Dispatched 状態で、 Suspend 不可能なものは対象外である。 Suspend 可能な家電機器以外は、一日のうちで、最大一回稼働する前提である。

このプロセスでは、 Contracted の状態から、どの程度の比率で、デマンドプールに入ってくるかを表すパラメーター p を規定した。

【Process 2 の諸条件の設定】

各 IoT 家電機器による需要を PV 出力制御量の時系列データへ割り当てていくアルゴリズムとして、事前に設定した IoT 家電機器の優先度が高いものから優先して割り当てるものとした。その上で、できる限り多くの IoT 家電機器が起動できるように、制約の厳しいものから優先的に割り当てるアルゴリズムとした。ここで、「制約の厳しいもの」とは、割り当てようとした際に、Wh を単位とするスペースが足りず割り当てできない状況が発生しやすいものを意味し、それは電力消費量[Wh]が大きなものと同義である。このイメージを図 3-11 に示す。

iDR が社会実装された場合を想定すると、アグリゲーターは、家電機器を一台々々起動/停止するとは考えづらく、ある程度纏まった台数を同時に起動/停止すると考える方が現実的である。本試算では、同一種の家電機器を消費電力[W]の合計値が一定になるよう纏めた制御単位（以下、制御単位）を想定し、それを 500kW とした。

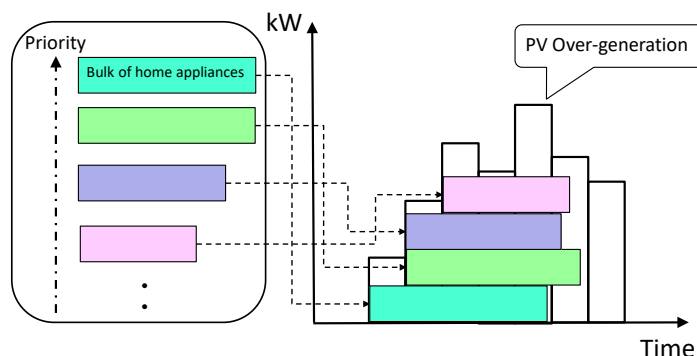


図 3-11 シミュレーションで使用したディスパッチアルゴリズム

電力消費量[Wh]が大きい制御単位は、稼働継続時間が長いものとなる。また、割り当て方法は、割り当てられない無駄なスペースが発生しにくいよう、割当てスペースの端から埋めていく。本試算では、図 3-11 に示すように、稼働継続時間が長い制御単位を優先に、早い時刻から割り当てるアルゴリズムを適用する。ただし、バッテリーのように一時停止可能な IoT 家電機器については、継続時間を最小時間単位（30 分間）として扱うものとした。アルゴリズムの詳細は、以下の通りである。

- 1) 各制御単位データに対し、事前に設定した優先度値および継続時間により、割り当て優先順位を決定する
 - ・ 事前に設定した優先度値が同じ場合は、継続時間の長いものを優先する
 - ・ 継続時間が同じ場合は、制御単位データの並び順が早いデータを優先する
- 2) 未割当の制御単位の内、割り当て優先順位の最も高いものから、割り当て可能な時刻の中で最も早い時刻に対して割り当てる
- 3) 2)において、割り当てできなければ、次に優先順の高い制御単位に対して 2)と同様の

処理を実施する

- 4) 2)、3)で制御単位を割り当てることができたら、2)へ戻る
- 5) 4)で、どの制御単位も割り当てることができなければ、処理を完了する

3.8 ポテンシャル試算結果と PV 出力抑制緩和効果－2

p を 10%、30%、50%、iDR 化率を 30%、50%、70%、90%と変化させた場合の試算結果を図 3-12、表 3-7 に示す。iDR による PV 余剰発電の消費は、一日の余剰発電量を全て消費できる DR ポテンシャルが用意できれば、余剰発電全てを消費し、それが用意できなければ、当該日の余剰発電量の一部を消費することが、原理的な最大値となる。これを表現しているのが、図 3-12 の $\min(\text{PV Over-generation, iDR Potential})$ である。

本研究で考慮した 2 つの制約条件を課さなくとも、家電機器の稼働時間を満たさない PV 余剰発電時には家電機器を割り当てられないため、図 3-12 の制約条件無し (No limiting condition) は $\min(\text{PV Over-generation, iDR Potential})$ を下回る。

2 条件を織り込んだ試算結果、制約条件無しの試算結果とも、効果は iDR 化の度合いとパラメーター p によって当然変化するが、2 条件を織り込んだ試算結果では、年間約 1,855GWh の余剰発電[32]に対して、167GWh～722GWh 程度、率にして 9%～39%程度の消費能力があることが判る。

2 条件のうち、稼働時間帯制約は、稼働可能機器台数として織り込んだが、一時停止可能機器の扱いについては、図 3-13 にその様子を示す。連続的な稼働しか許さなかった下段に比べ、上段では、一時停止可能な需要が一部に割り当てられている様子が見て取れる。

P の変化に対する消費量の変化を見ると、p の増加に対して飽和的である。p は、Ready 状態に移行する率に係るパラメーターであるが、余剰発電の量や詰込みできる余剰発電の形状が変わらなければ、いくら Ready を増やしても消費できる量は直線的には増えないことを意味する。

なお、試算した家電機器毎の DR ポテンシャルを図 3-14、参考 3-2 に示す。DR ポテンシャル量で目立つのは、洗濯乾燥機、炊飯器、食洗機、生ごみ処理機である。シミュレーションは 2030 年頃を想定しており、表 3-6 に示すように、高齢化社会に関する想定される一部の機器については倍数を乗じてある。高齢化については、2025 年問題[33]と呼ばれる高齢者人口の増加、独居老人の増加、介護人手不足などの大きな課題がある。近年、既にごく近所のごみ集積場まで自宅のごみを運ぶことができない高齢者が発生しており、今後、自立・要支援・要介護の全てのカテゴリーの高齢者に対して機械によるアシストが必要となると見込まれる。生ごみ処理機は、倍数を 5 倍に設定したため目立つ試算結果となっているが、これは、上記の不可避な社会的課題を象徴するものとして設定した。

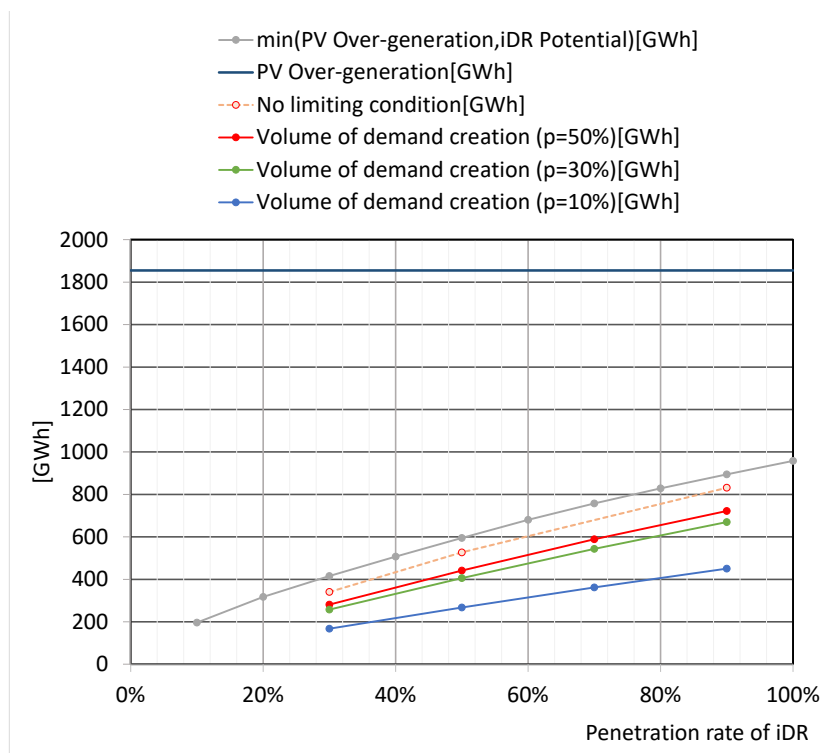
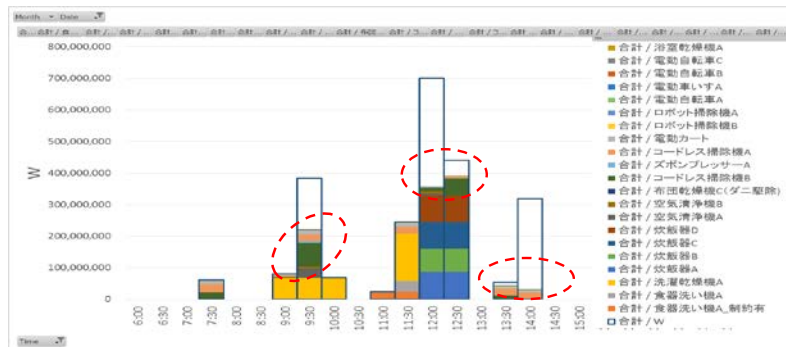


図 3-12 PV 余剰発電と需要創出

表 3-7 需要創出量

Penetration rate of iDR	p=10%	p=30%	p=50%	No limiting conditions
30%	167.1	257.3	280.7	340.6
50%	267.2	405.6	441.0	526.9
70%	361.8	543.5	589.0	-
90%	450.6	670.0	722.2	831.2
				[GWh]

断続的な稼働を考慮



連続的な稼働のみ

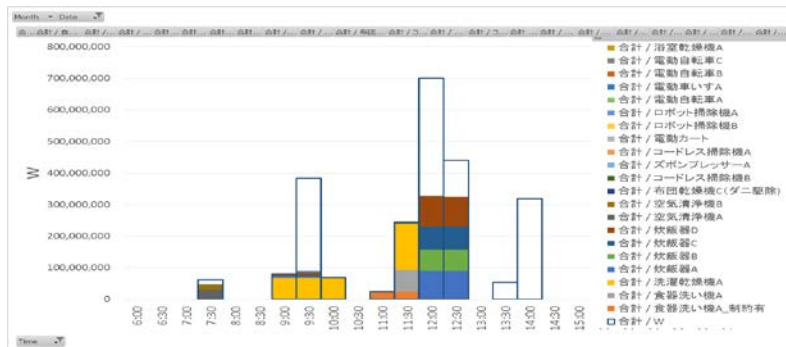


図 3-13 断続的な稼働（一時停止可能）を考慮した割当て結果例

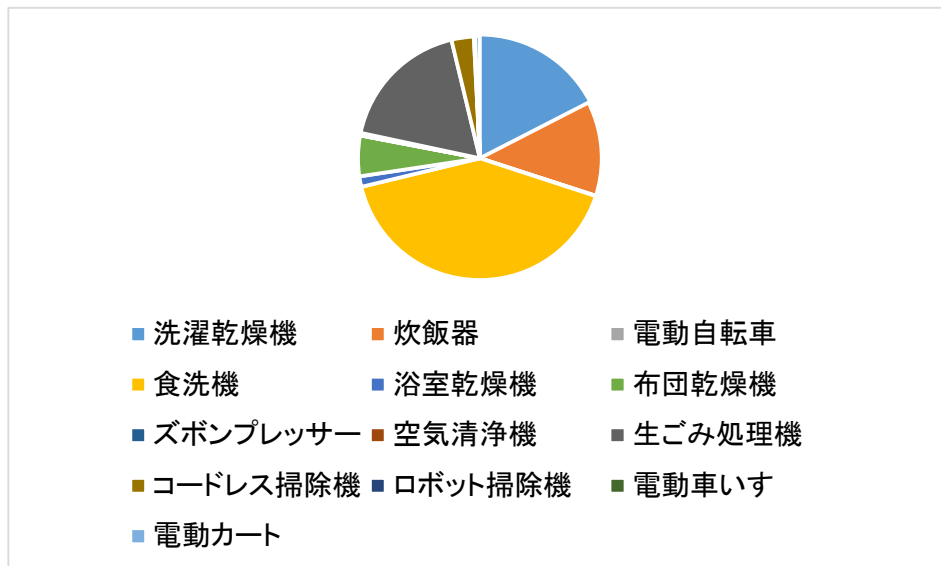


図 3-14 家電機器別ポテンシャル

3.9 考察

3.9.1 創出需要の有意性と経済的価値

3.6 節に述べた二つの異なるプロセスから iDR が成り立っていることを明確化し、それに制約条件等を織り込んで、IoT 化が進む家電機器による需要創出の試算を、先行研究を精緻化することでその結果を得た。その結果、2030 年頃の東京電力 PG エリア内で、PV 余剰発電に対し、その 9%~39%程度を消費可能であることを確認し、家電機器による需要創出 DR が PV 余剰発電に対して有意であることを確認した。以下に、その経済的価値を考察する。

国全体というマクロな視点での経済的評価は、発電コストへの効果である。1kWh の電気を得るのに、250ml の原油を必要[34]と仮定すると、この余剰電力の消費は、41,750k リットル~180,500k リットルの原油に相当する。仮に原油が 30 円/リットルとすれば、この余剰電力消費は燃料費相当だけで年間 12 億円~54 億円の価値である。

一般的に PV 設置は投資を伴うことから、出力抑制は投資効率 (RoI、Return on Investment、投資収益率) を低下させる懸念がある。本研究をこの視点で考えると、関係する PV の FIT 平均価格を 30 円/kWh と仮定すれば、iDR により、太陽光発電事業者にとって、年間およそ 50 億円~217 億円の RoI 低下抑止効果が得られることとなる。これは、PV への投資セクターというミクロな視点での経済的評価である。

DR の有効性評価は、発電機の起動コストなども含めた詳細な発電コストに対する効果など様々な指標があり得るが、筆者は投資行動、若しくは投資マインドに対する影響などを含めた多面的な評価が重要と考える。

3.9.2 再エネ積極利用運用とネット需要純増運用

1.4 節で紹介したとおり、九州電力管内の需給運用では、火力発電所の稼働領域が極めて少なくなった際に、PHS を動力運転して需要を創り、火力発電所の稼働による周波数調整力を確保した。このように能動的な需要創出ができれば、それを PV 出力抑制の緩和に充てることが可能である。さらに、これを火力発電の負荷とすることで周波数調整力の積み増しとしても適用可能である。

前者は、再エネの積極利用を推進し、経済的には主に太陽光発電事業者にその恩恵があることから、筆者はこのタイプの運用を「再エネ積極利用運用」と呼ぶ。また、後者を、中給からみて正味 (ネット) 需要が増え、周波数調整力を担う火力発電所の稼働を増やせることから、「ネット需要純増運用」と呼ぶ。一例としては、午後に需要が極めて小さくなり、そこから日没と夕方の需要増により急峻な勾配でネット需要が増えるダックカーブ現象に対して、ネット需要が小さくなる時間帯に iDR による需要を積み増すことで、その勾配を緩やかにする効果も期待できる。

調整力や PV 余剰の様子は、季節、時間帯、地域 (一般送配電事業者エリア) などによってまちまちであるので、個別事情に合わせて、創出需要を「再エネ積極利用運用」と「ネット需要純増運用」に配賦することも可能である。本研究は、図 2-9 に示した需給調整システムを想定しているので、このようにアグリゲーターの需要創出に関する運用タイプ分けは、ビジネス面、系統安定技術面の両方で有用であると考えられる。

3.10 本章のまとめ

3.10.1 シミュレーションによる課題解決

本研究では、表 2-6（再掲）に掲げた「DR 資源としての家電機器の有意性確認」に対して、計算機シミュレーションを実施し、その効果が PV 余剰発電に対して 9%～39%程度見込めることを確認した。

また、シミュレーションを適切に行うため iDR のモデル化を行い、互いに異なるプロセスが 2 つ連なるシステムであることを明示した。

さらに創出した需要の経済面での価値や、需給調整運用上の扱い方などについても考察し、その有用性を確認した。

以上の検討から、DR 資源としての家電機器の有意性確認という課題は解決したと結論する。

3.10.2 今後の課題

本章では、1 段目の Birth-Death プロセスには、例としてポアソン分布を適用したが、今後、生活パターンなどに的確にフィットする分布を探すなどが必要と考える。また、process2 には、様々なアルゴリズムが適用可能であることから、本研究とは異なるアルゴリズムによる試算も今後の課題としたい。

また、一部の家電機器は、バッテリー駆動のため、この充電は LFC 調整力として利用できる可能性があり、それは、発電コストに影響する。これについても検討を進めたい。

参考3-1 iDR家電機器応答想定台数

	家電普及率 (現在)	家電普及台数 (現在)	2030年に 対する補 正係数 (家電普 及)	家電普及台数 (2030年度)	製品 シェア率	使用頻度 [回/日] (現在)	2030年度 に対する 補正係数 (使用頻 度)	応答率	応答可能性の ある家電の想 定台数	iDR導入率		
										30%	50%	90%
										DR応答家電 の想定台数	DR応答家電 の想定台数	DR応答家電 の想定台数
洗濯乾燥機A	0.990	27,720,000	1	27,720,000	0.0750	0.60	1	0.5	623,700	187,000	311,500	561,000
洗濯乾燥機B					0.0750	0.60	1	0.5	623,700	187,000	311,500	561,000
洗濯乾燥機C					0.0750	0.60	1	0.5	623,700	187,000	311,500	561,000
洗濯乾燥機D					0.0750	0.60	1	0.5	623,700	187,000	311,500	561,000
炊飯器E	0.890	24,920,000	1	24,920,000	0.2500	0.80	1	0.5	2,492,000	747,500	1,246,000	2,242,500
炊飯器F	0.890	24,920,000		24,920,000	0.2500	0.80		0.5	2,492,000	747,500	1,246,000	2,242,500
炊飯器G	0.890	24,920,000		24,920,000	0.2500	0.80		0.5	2,492,000	747,500	1,246,000	2,242,500
炊飯器H	0.890	24,920,000		24,920,000	0.2500	0.80		0.5	2,492,000	747,500	1,246,000	2,242,500
電動自転車I	0.004	112,000	3	336,000	0.3330	0.05	1	1.0	5,280	1,500	2,500	4,500
電動自転車J	0.004	112,000		336,000	0.3330	0.07		1.0	7,920	2,000	3,500	7,000
電動自転車K	0.004	112,000		336,000	0.3330	0.14		1.0	15,840	4,500	7,500	14,000
食洗機	0.280	7,840,000	1	7,840,000	1.0000	0.90	1	0.5	3,528,000	1,058,000	1,764,000	3,175,000
食洗機	0.450	12,600,000		12,600,000	1.0000	0.73	1	0.5	4,620,000	1,386,000	2,310,000	4,158,000
浴室乾燥機	0.270	7,560,000	1	7,560,000	1.0000	0.06	1	0.5	226,800	68,000	113,000	204,000
布団乾燥機L (ダニ駆除)	0.380	10,640,000	1	10,640,000	0.3330	0.07	1	0.5	116,204	34,500	58,000	104,500
布団乾燥機M (ダニ駆除)	0.380	10,640,000	1	10,640,000	0.3330	0.07	1	0.5	116,204	34,500	58,000	104,500
布団乾燥機N (ダニ駆除)	0.380	10,640,000	1	10,640,000	0.3330	0.07	1	0.5	116,204	34,500	58,000	104,500
ズボンプレスー	0.010	280,000	1	280,000	1.0000	0.20	1	1.0	56,000	16,500	28,000	50,000
空気清浄機O	0.420	11,760,000	1	11,760,000	0.5000	0.60	1	1.0	3,528,000	1,058,000	1,764,000	3,175,000
空気清浄機P	0.420	11,760,000	1	11,760,000	0.5000	0.60	1	1.0	3,528,000	1,058,000	1,764,000	3,175,000
生ごみ処理機	0.020	560,000	5	2,800,000	1.0000	0.50	1	1.0	1,400,000	420,000	700,000	1,260,000
コードレス掃除機Q	0.500	14,000,000	1	14,000,000	0.5000	0.40	1	1.0	2,765,000	829,500	1,382,500	2,488,500
コードレス掃除機R	0.500	14,000,000	1	14,000,000	0.5000	0.40	1	1.0	2,765,000	829,500	1,382,500	2,488,500
ロボット掃除機S	0.010	280,000	1	280,000	0.5000	0.57	1	1.0	80,000	24,000	40,000	72,000
ロボット掃除機T	0.010	280,000	1	280,000	0.5000	0.57	1	1.0	80,000	24,000	40,000	72,000
電動車いす	0.001	28,000	3	84,000	1.0000	0.33	1	1.0	28,000	8,000	14,000	25,000
電動カート	0.001	28,000	3	84,000	1.0000	0.33	1	1.0	28,000	8,000	14,000	25,000

参考3-2 iDR家電機器導入ポテンシャル

	消費電力 [W]	継続時間 [min]	消費電力量 [Wh]	iDR導入率			iDR導入率		
				30%	50%	90%	30%	50%	90%
				DR応答家電の 想定台数	DR応答家電の 想定台数	DR応答家電の 想定台数	想定消費電力量 [Wh]	想定消費電力量 [Wh]	想定消費電力量 [Wh]
洗濯乾燥機A	666	90	999	187,000	311,500	561,000	186,813,000	311,188,500	560,439,000
洗濯乾燥機B	177	180	531	187,000	311,500	561,000	99,297,000	165,406,500	297,891,000
洗濯乾燥機C	240	180	720	187,000	311,500	561,000	134,640,000	224,280,000	403,920,000
洗濯乾燥機D	240	150	600	187,000	311,500	561,000	112,200,000	186,900,000	336,600,000
炊飯器E	160	60	160	747,500	1,246,000	2,242,500	119,600,000	199,360,000	358,800,000
炊飯器F	130	60	130	747,500	1,246,000	2,242,500	97,175,000	161,980,000	291,525,000
炊飯器G	150	60	150	747,500	1,246,000	2,242,500	112,125,000	186,900,000	336,375,000
炊飯器H	150	60	150	747,500	1,246,000	2,242,500	112,125,000	186,900,000	336,375,000
電動自転車I	70	360	420	1,500	2,500	4,500	630,000	1,050,000	1,890,000
電動自転車J	66.6	270	300	2,000	3,500	7,000	599,400	1,048,950	2,097,900
電動自転車K	40	240	160	4,500	7,500	14,000	720,000	1,200,000	2,240,000
食洗機	520	90	780	1,058,000	1,764,000	3,175,000	825,240,000	1,375,920,000	2,476,500,000
食洗機	180	150	450	1,386,000	2,310,000	4,158,000	623,700,000	1,039,500,000	1,871,100,000
浴室乾燥機	360	120	720	68,000	113,000	204,000	48,960,000	81,360,000	146,880,000
布団乾燥機L (ダニ駆除)	450	360	2,700	34,500	58,000	104,500	93,150,000	156,600,000	282,150,000
布団乾燥機M (ダニ駆除)	680	180	2,040	34,500	58,000	104,500	70,380,000	118,320,000	213,180,000
布団乾燥機N (ダニ駆除)	500	90	750	34,500	58,000	104,500	25,875,000	43,500,000	78,375,000
ズボンプレスサー	140	30	70	16,500	28,000	50,000	1,155,000	1,960,000	3,500,000
空気清浄機O	15	30	8	1,058,000	1,764,000	3,175,000	7,935,000	13,230,000	23,812,500
空気清浄機P	6	30	3	1,058,000	1,764,000	3,175,000	3,174,000	5,292,000	9,525,000
生ごみ処理機	500	180	1,500	420,000	700,000	1,260,000	630,000,000	1,050,000,000	1,890,000,000
コードレス掃除機Q	13	300	65	829,500	1,382,500	2,488,500	53,917,500	89,862,500	161,752,500
コードレス掃除機R	40	90	60	829,500	1,382,500	2,488,500	49,770,000	82,950,000	149,310,000
ロボット掃除機S	33	180	99	24,000	40,000	72,000	2,376,000	3,960,000	7,128,000
ロボット掃除機T	33	180	99	24,000	40,000	72,000	2,376,000	3,960,000	7,128,000
電動車いす	80	120	160	8,000	14,000	25,000	1,280,000	2,240,000	4,000,000
電動カート	550	300	2,750	8,000	14,000	25,000	22,000,000	38,500,000	68,750,000

第3章 参考文献・資料・出典

- [1] 資源エネルギー庁：「エネルギー基本計画」(2010)
- [2] 太陽光発電協会：「JPEA PV OUTLOOK 2030—10 兆円産業，より確かな 2030 年の実現へ—」(2012-8) (2016/1/14 アクセス確認)
<http://www.jpea.gr.jp/pdf/t120925.pdf>
- [3] Y. Udagawa, K. Ogimoto, T. Oozeki, H. Ohtake, T. Ikegami, and S. Fukutome： “Development of Unit Commitment Model Considering Confidence Intervals of Photovoltaics Forecast and Analysis of a Large Scale Power System”, IEEJ Trans. EIS, Vol. 136, No.5, pp.484-496 (2016)(in Japanese)
宇田川佑介・荻本和彦・大関崇・大竹秀明・池上貴志・福留潔：「太陽光発電出力予測に基づく起動停止計画モデルの開発と実規模システムの解析」，電学論 B, Vol.136, No.5, pp.484-496 (2016)
- [4] 経済産業省 第15回スマートメーター制度検討会：「スマートメーターの導入促進に伴う課題と対応について」(2014). (2016/9/24 アクセス確認)
http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004668/pdf/015_03_00.pdf
- [5] 総務省 平成27年版情報通信白書：
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h27/html/nc372110.html>
- [6] 総務省統計局 web サイト：(2016/9/18 アクセス確認)
<http://www.stat.go.jp/data/zensho/2004/taikyu/gaiyo1.htm>
- [7] 共同通信社 web サイト：(2016/9/18 アクセス確認) (扱いについては注参照)
http://www.kyodo.co.jp/mamegaku/2015-07-09_1497723/
- [8] 東京ガス web サイト：(2016/9/18 アクセス確認)
<http://home.tokyo-gas.co.jp/living/bathroom/hotdry/hotdry/merit02.html>
- [9] 日本冷凍空調工業会 web サイト：(2016/9/18 アクセス確認)
http://jraia.or.jp/product/heatpump/i_broke.html
- [10] 経済産業省平成23年度エネルギー環境総合戦略調査：(2016/9/18 アクセス確認)
(扱いについては注参照)
http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2012fy/E002759.pdf
- [11] 内閣府 web サイト：(2016/9/18 アクセス確認)
<http://www.esri.cao.go.jp/jp/stat/shouhi/shouhi.html#taikyuu>
- [12] AllAbout web サイト：(2016/9/18 アクセス確認)
<http://allabout.co.jp/gm/gc/185020/3/>
- [13] TOTO web サイト：(2016/9/18 アクセス確認)
<http://www.toto.co.jp/company/press/2015/09/01.htm>
- [14] 総務省 web サイト：(2016/9/18 アクセス確認)
<http://www.stat.go.jp/data/zensho/2014/pdf/youyaku.pdf>
- [15] ZOJIRUSHI web サイト：(2016/9/18 アクセス確認)
https://www.zojirushi.co.jp/topics/kitchen_kaden.html
- [16] Panasonic web サイト：(2016/9/18 アクセス確認)
<http://news.panasonic.com/jp/press/data/jn070404-1/jn070404-1.html>

- [17] マーシュ web サイト: (2016/9/18 アクセス確認) (扱いについては注参照)
http://www.marsh-research.co.jp/mini_research/mr201205cleaner.html
- [18] Y. Udagawa, Y. Nishitsuji, K. Ogimoto, J. Fonseca, H. Ohtake, T. Oozeki, T. Ikegami, and S. Fukutome: “Analysis of Photovoltaic Power Yield Curtailment in Day-ahead Unit Commitment”, The Papers of Joint Technical Meeting on Frontier Technology and Engineering and Metabolism Society and Environmental Systems, IEEE of Japan, FTE-16-004, MES-16-004, 23-29(2015) (in Japanese)
 宇田川佑介・西辻裕紀・荻本和彦・ジョアン ガリ ダ シルバ フォンセカ ジュニア・大竹秀明・大関崇・池上貴志・福留潔:「出力予測を考慮したユニットコミットメントによる太陽光発電出力制御必要量の分析」, 電気学会 新エネルギー・環境メタボリズム社会・環境システム合同研究会, FTE-16-4, MES-16-4, 23-29(2015)
- [19] 今堀慎治・梅谷俊治:「切り出し・詰込み問題とその応用 —(2)長方形詰込み問題—」, オペレーションズ・リサーチ, Vol.50, No.5, pp.335-340(2005)
- [20] Yumiko Iwafune, Junichiro Kanamori and Hisayoshi Sakakibara “A Comparison of the Effects of Energy Management Using Heat Pump Water Heaters and Batteries in Photovoltaic - installed houses”, Energy Conversion and Management, 148, 146-160(2017)doi: 10.1016/j.enconman.2017.05.060
- [21] 総務省統計局ホームページ(2018/6/16 アクセス確認)
<http://www.stat.go.jp/data/zensho/2004/taikyu/gaiyo1.htm>
- [22] 総務省統計局ホームページ(2018/6/16 アクセス確認)
<http://www.stat.go.jp/data/zensho/2014/pdf/youyaku.pdf>
- [23] 政府統計ポータルサイト (扱いについては注参照)
<https://www.e-stat.go.jp/dbview?sid=0003108720>
- [24] 政府統計ポータルサイト (扱いについては注参照)
<https://www.e-stat.go.jp/dbview?sid=0003108720> (2018/6/23 アクセス確認)
- [25] 東京ガスホームページ(2018/6/16 アクセス確認)
<http://home.tokyo-gas.co.jp/living/bathroom/hotdry/hotdry/merit02.html>
- [26] 内閣府ホームページ(2018/6/16 アクセス確認)
<http://www.esri.cao.go.jp/jp/stat/shouhi/shouhi.html#taikyuu>
- [27] Allabout Web site(2018/7/7 アクセス確認)
<https://allabout.co.jp/gm/gc/185020/3/>
- [28] パナソニックホームページ(2018/6/16 アクセス確認)
<http://news.panasonic.com/jp/press/data/jn070404-1/jn070404-1.html>
- [29] シードプランニングホームページ
<https://www.seedplanning.co.jp/press/2015/2015031201.html>(2018/6/16 アクセス確認)
- [30] 電動車いす安全普及協会ホームページ
<http://www.den-ankyo.org/society/transition.html>(2018/6/16 アクセス確認)
- [31] シードプランニングホームページ
<https://www.seedplanning.co.jp/press/2009/2009071001.html> (2018/6/16 アクセス確認)

- [32] Y. Udagawa, Y. Nishitsuji, K. Ogimoto, J. G. S. Fonseca Jr., H. Ohtake, T. Oozeki, T. Ikegami, and S. Fukutome: “Analysis of Photovoltaic Power Yield Curtailment in Day-ahead Unit Commitment”, IEEJ Trans. PE, 137, 7, pp. 520-529 (2017) (in Japanese)
宇田川佑介, 西辻裕紀, 荻本和彦, J. G. S. Fonseca Jr., 大竹秀明, 大関崇, 池上貴志, 福留潔: 「太陽光出力予測を考慮した発電機起動停止計画モデルによる太陽光発電出力制御必要量の分析」, 電学論 B, 137, 7, pp. 520-529 (2017)
- [33] 日経 XTECH ホームページ: (2018/6/16 アクセス確認)
<http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/article/WORD/20121105/249418/?ST=health>
- [34] 厚生労働省資料「2025年の超高齢化社会像」(2018/12/9 アクセス確認)
<https://www.mhlw.go.jp/shingi/2006/09/dl/s0927-8e.pdf>

《注》参考文献について

本論文は、2018年～2019年に執筆したものであるが、参考文献が掲載されている政府機関や民間団体の Web サイトが、セキュリティ向上等の観点から、常時 SSL 化 (http から https への変更) などを進めており、研究実施時点では参照可能であった参考文献が削除されるなどが進んでいる。このような状況を踏まえ、参考文献の記載は下記方針とした。なお、常時 SSL 化は現在も進展しているため、今後 URL が大幅に変わるなどして、本論文の参照先は記載どおりの状況ではなくなるが大いにあり得る。

[7][10][17]について

3.2 節～3.4 節は、主に 2015 年度に行った研究活動を纏めたものであるが、本論文執筆時点で [7][10][17] がインターネット上から削除されている。3.2 節～3.4 節は、電気学会 C 部門論文誌 2017 年 2 月に「IoT 化する家電機器を活用したデマンドレスポンスによる自然変動電源の余剰発電抑制緩和策」(Vol.137 No.2 pp326-332)として掲載されており、これは [7][10][17] を参考文献とする論文として査読を経ているため、それとの整合性の観点から、あえて当時のままの記載とした。

[23][24]について

3.6 節～3.8 節は主に 2017 年度、2018 年度に行った研究活動を纏めたものであるが、研究を纏めている間に、試算に使用した本来の 2 文献 [23] と [24] がインターネット上から削除された。この部分は、学会には未発表であるため、参考となる最近の代替文献を巻末の [23] と [24] に列記 (結果的に代替文献は同一) した。これらから得られるポテンシャル値は本試算とほぼ同じであることを確認している。本論文に記載した参考文献が使用したものと異なることを申し添える。

第4章 家電機器の起動／停止手段

本章は、大きく分けて2段構成となっている。

まず、「ユーザー準備完了検知方法」について述べる。iDRが機能するには、2.7.1項(2)に述べたとおり、例えば、炊飯器は米と水を入れなくて起動するわけにはいかない、洗濯機は洗剤と衣類が入っていないと起動しない等、家電機器の準備作業が完了し、起動／停止信号を受け取ることが可能になった状態をアグリゲーターが知る必要がある。4.1節から4.5節で、その具体的方法（以下、Ready通知機能）を検討する。

4.5節までの検討を前提に、続く4.6節以降で、アグリゲーターが家電機器を直接起動／停止する手段を課題として検討する。本章で取り扱う課題の位置づけは、特に、アグリゲーターがIoT家電機器を直接起動／停止し、また、使用電力量実績などを集計する、筆者がデマンドディスパッチシステム（以下、DDS）と呼ぶ仕組みの動作について説明する。再掲する表2-6に明示する。

表2-6 開発・研究すべき課題（再掲）

DR既往研究の分類視点			既往研究・実証の現状	本研究の目的／ポジション	解決すべき課題
1	When Why	需要抑制型／需要創出型	実証事業は、需要抑制型が殆ど	需要創出手法の確立	・アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法(4)
			需要創出型DR手法は確立されていない		
			電気学会全国大会件数では、創出型が徐々に増えつつある		
2	Where	建物内DR／広域	電気学会全国大会件数では、広域型が徐々に増えつつある	広域を対象とする	-
3	Who	アグリゲーターの関与	電力小売り会社から、他業種まで幅広い業種が副業として実施することを企図	電力小売り会社をアグリゲーターを兼ねる主体として扱う	-
4	What	低圧需要の何を対象としているか ・重点8機器 ・その他（例：家電機器）	DR資源として家電機器を対象とした例はない	充分普及している家電機器を対象とする	DR資源としての家電機器の有意性確認(3)
			低圧需要は、HP（ヒートポンプ式給湯器）、EV（未普及）に研究が集中		家電機器の準備完了状態をアグリゲーターが知る方法(4)
			多数の小規模需要をアグリゲートする手法は確立されていない		アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法(4)
			系統容量と低圧需要の桁の違いが大きすぎる		個々の振る舞いのモデル化(3)と大量にアグリゲートする方法(4)
5	How	Implicit型DR／Explicit型DR	価格誘導型DR（Implicit型）は、価格弾力性が小さく（0.5程度）効果が薄い	Explicit型DRの手法の確立	家電機器に対するExplicit型DRのユーザー受容性の確認(6)
			ユーザーは、割安電気料金部分にあまり関心がない		
			ピーク時の大幅高料金に対する抵抗感が強い		
6	How-2	ADR（Automatic DR）	ADRは、BEMSなどを介したローカルExplicit型DRと理解でき、事業者－需要機器直結Explicit型DRとは異なる	事業者－需要機器直結Explicit型DR	-
7	How-3	IoTの活用	首相の官民対話で話題にはなっているが、まだ殆ど実例はない	IoTを活用する	IoT家電機器を模した実験機の開発(4,7)

以下に、本章の構成を述べる。

- 4.1 節「実験機に必要な機能と制約条件」では、本研究を進める上で必要となる実験機に備えるべき機能や、市販品の改造等に関する制約条件を整理する。
- 4.2 節「iDR ボタンの提案」では、前節の条件を満たす Ready 通知機能として、iDR ボタンと名付けた機能を提案する。
- 4.3 節「IoT 家電機器の状態遷移」では、前節で提案した iDR ボタンによる Ready 通知機能を基盤として、家電機器の動作状態が遷移する様子を整理する。
- 4.4 節「実験機の機能」では、Ready 通知機能を中心として備えたアダプターの開発により、市販の家電機器と同アダプターを組み合わせることによって、IoT 化された家電機器を模擬できる実験機の機能について説明する。
- 4.5 節「起動/停止方法に関する考察」では、本研究で考案した方法の限界について考察し、その解決策を述べる。
- 4.6 節「家電機器のディスパッチ」では、家電機器をディスパッチが内包する問題を整理して理解する。
- 4.7 節「家電機器の消費電力の種類」では、定格値や、実績値などの種類について整理し、どのような特徴があるかを理解する。
- 4.8 節「デマンドディスパッチシステム (DDS)」では、その基本的な機能を整理する。
- 4.9 節「[W]か[Wh]か」では、消費電力を電力値によって扱うか、電力量によって扱うかについて検討し、現実解を得る。
- 4.10 節「DDS の所要仕様」では、それまでの議論を総合して、DDS に備えるべき機能を整理する。
- 4.11 節「DDS の誤差等に関する検討」では、前節で検討した DDS の動作メカニズムを整理し、ディスパッチ量に関して生ずる誤差について検討する。
- 4.12 節「実験による所要仕様の確認」では、前節までで検討した DDS を実際に試験実装して実験し、所要仕様が期待どおり機能していることを確認する。
- 4.13 節「ディスパッチ量の決定方法に関する考察」では、実績値を使用しているが故に生ずる誤差の低減方策や、予測値の生成方法について考察する。
- 4.14 節「中給とのコミュニケーションに関する考察」では、DDS が創出した需要実績や、Ready 状態の家電機器による調整力を中給に報告するフォーマットやシーケンスについて検討する。
- 4.15 節「スケールの為の技術」では、家電機器を大量に取りまとめるために適応可能な技術の動向について整理する。
- 4.16 節「本章のまとめ」では、iDR ボタンについての総括と、家電メーカーからの評価を纏める。さらに、DDS によって、課題解決の初期的な確認ができたことを纏めるとともに、今後の課題について整理する。

4.1 実験機に必要な機能と制約条件

本研究の目的は、2.7 節に述べたとおり、「アグリゲーターが需要創出し、PV 連携する仕組みは実現可能か」という仮説を検証することである。詳細は、本章、並びに、第 5 章で議論するが、アグリゲーターを含めた全体の所要仕様のうち、家電機器側には、最低限次の機能が必要となる。

- ① Ready 通知機能
- ② インターバル (コマ幅) 受信機能
- ③ ②のインターバルにおける消費電力測定通知機能

①の「Ready 通知機能」は、冒頭に述べたとおり、炊飯器であれば、米と水を入れた状態となり、アグリゲーターからの起動を受けられる状態になったことを通知するものである。この機能は、様々なセンサー、重量計や水位計などにより自動化することも技術的には想定できるが、同時にこの機能は、“ユーザーがアグリゲーターに当該家電機器の本日の起動権

限を渡す”、という意思表示を媒介する機能でもあるので、人間が介在する方式の方が適切と考える。

すなわち、想定している DR は、事前の契約はあるものの、“今日は、炊飯器の起動はアグリゲーターに任せる”であるとか、“今日は来客予定があるから、ユーザーが家電機器を直接操作する”などのように、その日々々々で、家電機器の動作をユーザー自身が選ぶことができるというものである。

②の「インターバル（コマ幅）受信機能」は、アグリゲーターが起動／停止信号を送ってくる繰り返し周期（分）値を受信する機能である。この機能は、③「インターバルにおける消費電力測定通知機能」に於いて、消費電力量（Wh）を測る時間というパラメーターを受け取る機能である。

研究のアプローチは、本章、第 5 章で研究目的を満足するシステムの仕様を検討し、試験実装して実験しその実現可能性を確認することを想定している。そこで、本章で議論する Ready 通知機能は、まず、その実験に使用することを優先的に検討する。

iDR が対象としている家電機器は、炊飯器など市販されている家電機器に、何らかの方法で Ready 通知機能を追加して実験機とすることが適当である。

一方、既存の家電機器は、昔のような目で見てわかる簡単な電気回路で構成されてはならず、マイクロプロセッサで制御されているものが多い。このため、家電機器に直接改造を加えることは、メーカーから仕様の開示等を受けない限り、ほぼ不可能と考えられる。また、仮にそれが出来ても、電流計測用のセンサーが装備されていないなどの関係から、例えば③の消費電力測定通知機能など、他の機能の追加組込は期待できない。更に、加熱機器では、改造によって放熱特性などに影響を与える懸念があり、実験時の機器そのもの安全も保証されない場合もある。

このため、本研究の実験機は、市販の家電機器に手を加えず、アダプター的な機器を別途製作し、それと既存家電機器とを組み合わせることで、所要の IoT 家電機器を模ることができるものとした。

4.2 iDR ボタンの提案

前節に示した検討により、本研究における IoT 家電機器による DR の鍵とも言える Ready 通知機能は、「iDR ボタン」というハードウェア的機能を定義し、これが押下されることで、ユーザー側の準備が整い、起動信号を受けられる状態となったことをアグリゲーターに通知することとした（図 4-1）。

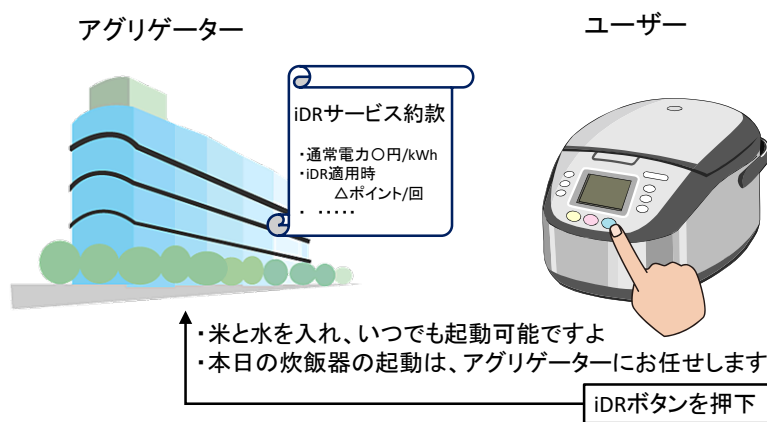


図 4-1 iDR ボタンの役割

前述のとおり、この機能は、アグリゲーターに対するユーザーの意思表示という機能とい

う重要な役割も担っている。音声認識などのテクノロジーにより、このヒューマンインターフェイスの高度化を研究テーマに加えるという選択肢もあり得る。しかし、本研究の目的は、「アグリゲーターが需要創出し、PV 連携する仕組みは実現可能か」であって、IoT 家電機器そのものの開発ではないことから、簡単ではあるが研究目的に合うこの方法を選択した。図 4-2 にアダプターの外観を示す。



図 4-2 アダプター外観

4.3 IoT 家電機器の状態遷移

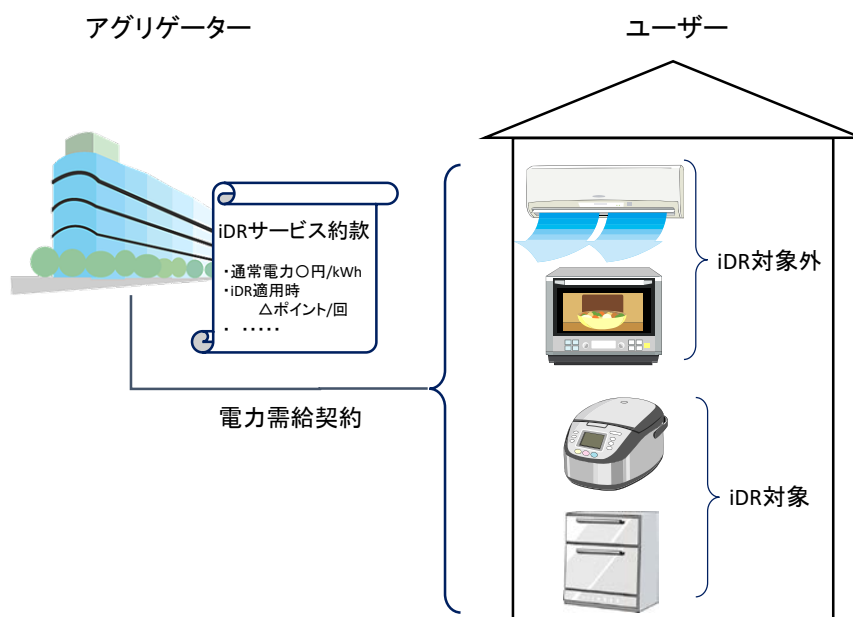


図 4-3 iDR 対象家電機器のイメージ

3.2 節で述べた通り、iDR は、適時性が低いなどの特性を有する家電機器が対象となる。逆に言えば、一軒の家（一需要家）の中でも、iDR の対象となる家電機器と、そうでない家電機器が混在する想定である（図 4-3）。このような前提の上で、対象となっている家電機器の状態遷移について以下に検討した。

iDR 家電機器は、大まかに言って、①アグリゲーターと何ら関係がない状態、②アグリゲーターとの契約配下にはいり、DR への参加を呼び掛けられることを待っている状態、③アグリゲーターから DR への参加を呼びかけられ、ユーザー側準備作業も完了して、起動／停止信号を受けられる状態、④iDR としての仕事が完了し②に戻っている状態、がある。

前節で述べたとおり、この中で、③の状態をアグリゲーターに知らせることを中心とした機能を担う家電機器側の機構として、iDR ボタンを定義した。実際に製作した機器は、前述のとおりであるが、このボタンの機械的な構成には特に制限はなく、準備完了状態を知らせる信号を送出できれば良い。

このボタンを具備した家電機器を iDR 家電機器と仮称し、iDR システムでのその家電機器の状態遷移を図 4-4 に整理した。その概要を以下に説明する。

同図中、「Contracted」は、購入した IoT 家電を iDR 対象家電機器として、アグリゲーター配下に入れ、いわば契約が完了した状態を表す。これは、前述の②アグリゲーターとの契約配下にはいり、DR への参加を呼び掛けられることを待っている状態を表す。

ユーザーは、前述の準備作業を終えた段階で、家電機器にある iDR ボタンを押下し、インターネットを介して、iDR アプリケーションに起動/停止信号を受け付ける準備が整ったことを知らせる。この状態は、前述の③アグリゲーターから DR への参加を呼びかけられ、ユーザー側準備作業も完了して、起動/停止信号を受けられる状態であり、これを「Ready」と呼ぶ。PV 余剰発電を消費する必要に応じて、アグリゲーターの iDR アプリケーションから起動信号が送出され、当該の家電機器が起動する。この状態が「Dispatched」である。PV 余剰発電が減少するなどに合わせて、需要創出量を減らす必要がある場合には、3.6 節の分類によって一部の家電機器は一時停止させることもできる。この状態が「Suspend」であり、これを再起動すると再び「Dispatched」に戻る。

一旦「Ready」にしても、何らかの理由でその状態を解除したい場合、ユーザーはキャンセルすることも可能である。

IoT 家電機器は、炊飯が終了したり、充電完了など仕事が完了すると、前述の④iDR とし、その仕事が完了し②に戻っている状態となり、「Completed」状態に移行し、それを iDR アプリケーションに知らせる。

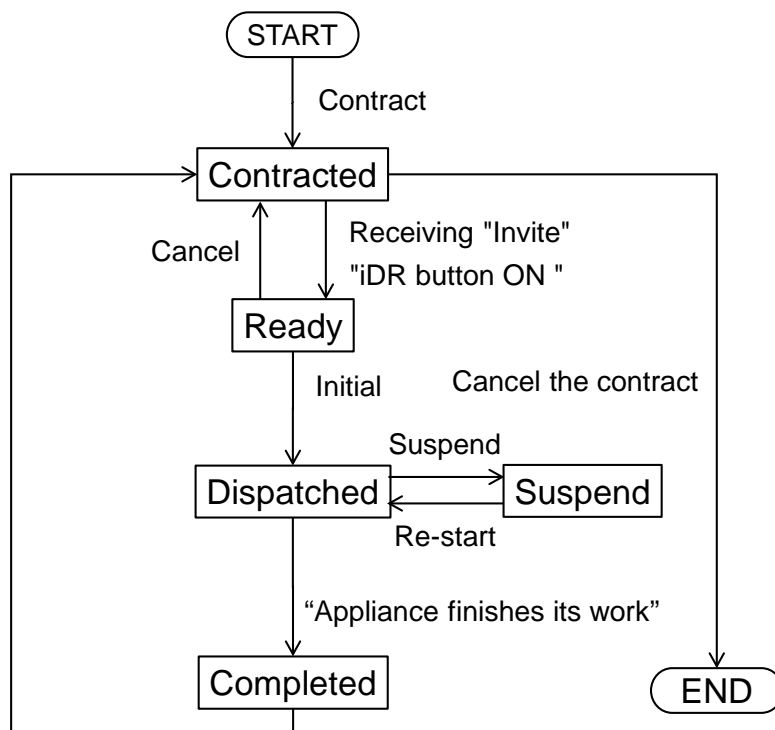


図 4-4 iDR 家電機器の状態遷移図

4.4 実験機の機能

アダプターと既存家電機器を組み合わせた実験用 iDR 家電機器の外観を図 4-5 に示す。また、アダプターの主要機能を表 4-1 に示す。

このアダプターは、AC100V の ON / OFF を起動 / 停止信号として使用している。家電機器には、AC100V を失うと、動作モードなども消失してしまうものと、記憶しているものがあり、実験機としては記憶しているタイプを使用している。

アダプターは、iDR アプリケーションから通知されたディスパッチ繰り返し単位時間（以下、コマ幅、Interval）毎に、実績把握のため実際の消費電力量を iDR アプリケーションに知らせる機能も搭載している。また、観察のため、1 分毎の消費電力量も iDR アプリケーションに知らせている。



図 4-5 iDR 実験機外観

表 4-1 アダプターの主要機能

iDRボタン機能 (Ready通知機能)	タッチパネルのボタンを押下することにより、クラウド上のiDRアプリケーションに起動信号受付可能状態であることを通知する機能を有する
起動 / 停止機能	iDRアプリケーションからの命令により、アダプターのコンセントのAC100VのON / OFFができる
計測機能	①指定期間における有効電力量[W・min]、平均有効電力[W]を測定・算出し、iDRアプリケーションに通知する機能を有する。 ②1分間における有効電力量[W・min]、平均有効電力[W]・平均皮相電力[VA]、を測定・算出し、iDRアプリケーションに通知する機能を有する。

4.5 起動／停止方法に関する考察

本章における検討では、安全なども考慮した結果、既存家電機器に直接改造を加える方法ではなく、アダプターを製作し、AC100VのON/OFFによって、家電機器を起動／停止する方法を取った。

しかしながら、AC100VのON/OFFだけでは、制御できる機器も限られてしまい、実験の広がりも限定的なものになってしまう。これを解決する手段として、学習型赤外線リモコンを活用する手立てが考えられる。iDRの対象となりうる家電機器の中には、赤外線リモコンで動作可能なものがあり、市販の学習型赤外線リモコンをアダプターの先に接続して実験システムを組むことが考えられる(図4-6)。

なお、学習型赤外線リモコンをアダプターを介して接続する理由は、本章で検討したとおり、起動／停止タイミングと、消費電力計測タイミングはディスパッチ量を決めるのに密接な関係があり、学習型赤外線リモコンを別ルートとしてしまうと、通信による遅延がアダプターと異なって、測定に影響を与える可能性があるためである。

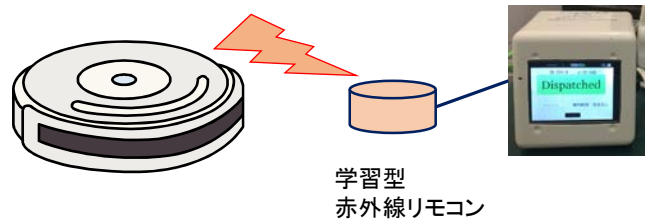


図4-6 学習型赤外線リモコンによる実験対象家電機器の拡大方策

4.6 家電機器のディスパッチ

まず、家電機器のディスパッチの概念と、その中に存在する問題を図4-7、図4-8、図4-9、図3-3(再掲)によって整理する。ディスパッチ(Dispatch)とは、英語で「送り出す、発送する、急送する」といったような意味である。本研究では、需給調整運用に需要側を組込むこと、具体的には、PV余剰発電に対して家電機器による需要(英語でDemandという)を“ディスパッチ”し、PV余剰発電を消費して、PV出力抑制の緩和を図ることが目標である。

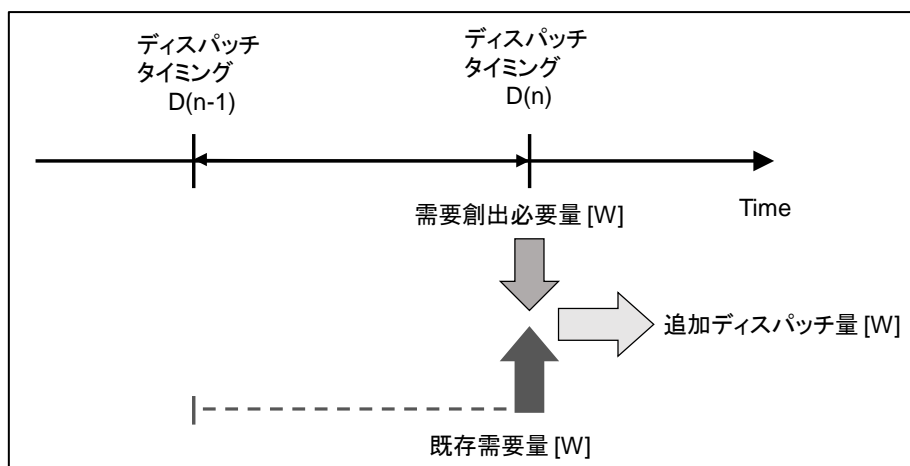


図4-7 デマンド・ディスパッチの基本図

図4-7がデマンド・ディスパッチの基本図である。ディスパッチタイミングにおける需要創出必要量と既存需要量の差分を、追加ディスパッチすることがその基本原理である。

$$\text{追加ディスパッチ量} = \text{需要創出必要量} - \text{既存需要量} \quad \dots \dots (3)$$

原理は極めて単純であるが、デマンド・ディスパッチには、以下に示すような問題が内包されており、これらをどのように扱っていくかは、大きなテーマである。

【マクロ問題 1（静的問題）】

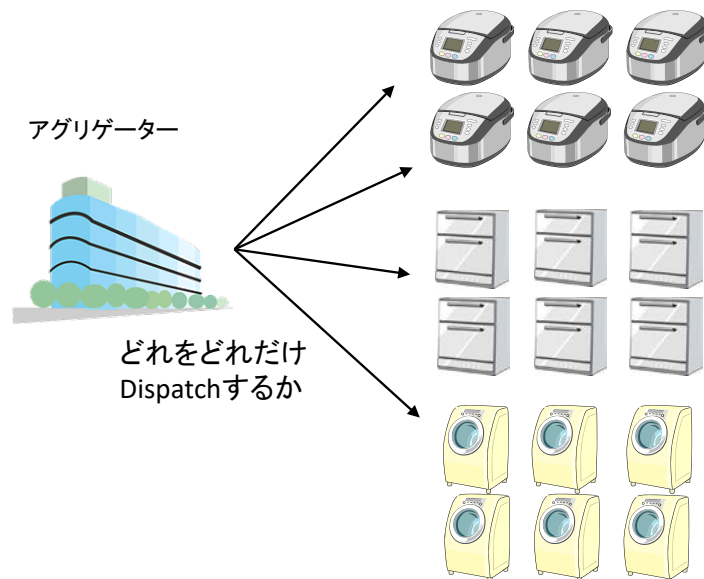


図 4-8 多数の家電機器を起動／停止し、必要量の需要を創出する

図 4-8 に示すように、数多ある家電機器を適宜起動／停止し、必要な量の需要を創出するのが、本システムの最も基本的な動作である。家電機器は、その機種や洗濯物などの負荷の量にもよるが、稼働中に消費電力量や稼働時間が変化することが想定される。必要な量の需要を創出するといっても、どの家電機器をどれだけ稼働（起動も停止もありうるので、あえて稼働という文言を使用する）させるか、がまず問題である。いわば、デマンド・ディスパッチの静的な問題がこれである。

【マクロ問題 2（動的問題）】

次に、時間軸上の問題を説明する（図 4-9）。仮に一定量の需要を創出し続けるとしても、iDR 対象となる家電機器は第 3 章に挙げたように、数十分程度から、長くても 2,3 時間の稼働時間のものが多いため、稼働していた家電機器は、次々にその仕事を完了して、需要創出という仕事から外れていく。このため、その不足分を、先に検討した遷移状態の中で Ready 状態にある家電機器から適切な対象機器と数量を選んで、追加ディスパッチする必要があり、これを一定時間毎に繰り返す必要がある。このディスパッチ繰り返し単位時間を、本研究ではコマ幅、若しくは、Interval と呼んでいる。

本研究の目的である「アグリゲーターが需要創出し、PV 連携する仕組みの実現可能性の確認」の為には、前述の静的な問題に加え、このように動的に適切なディスパッチ量を次々に計算して、その分を逐次追加ディスパッチする機能の構築可能性を確認する必要がある。

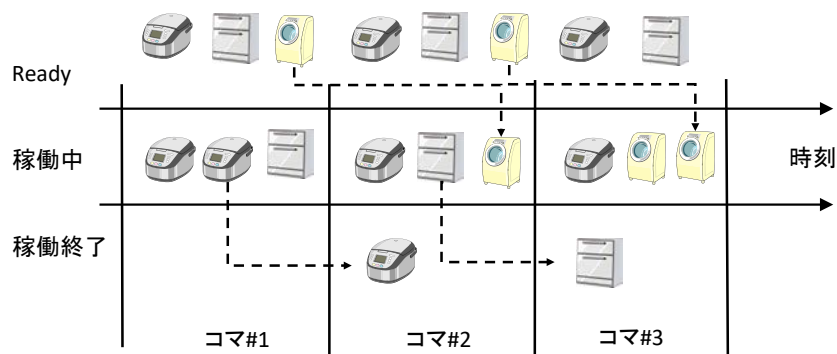


図 4-9 稼働完了した家電機器を次々に入れ替えていく

【ミクロ問題（家電機器の電力消費パターン問題）】

さらに、事を複雑にしているのが、家電機器の電力消費パターンである。前述のようにある程度の短時間（例：5分、10分）でコマ幅を規定しても、家電機器によっては、図 3-3（再掲）のように、その期間の中で、電力消費が大きく変化するものがある。必要量の需要を創出といっても、このように変化する需要をどのように扱うかは、かなり難しい問題であるが、次節以降で議論するように、IoT 環境を活用した予測値による方法などによって解決することが想定できる。

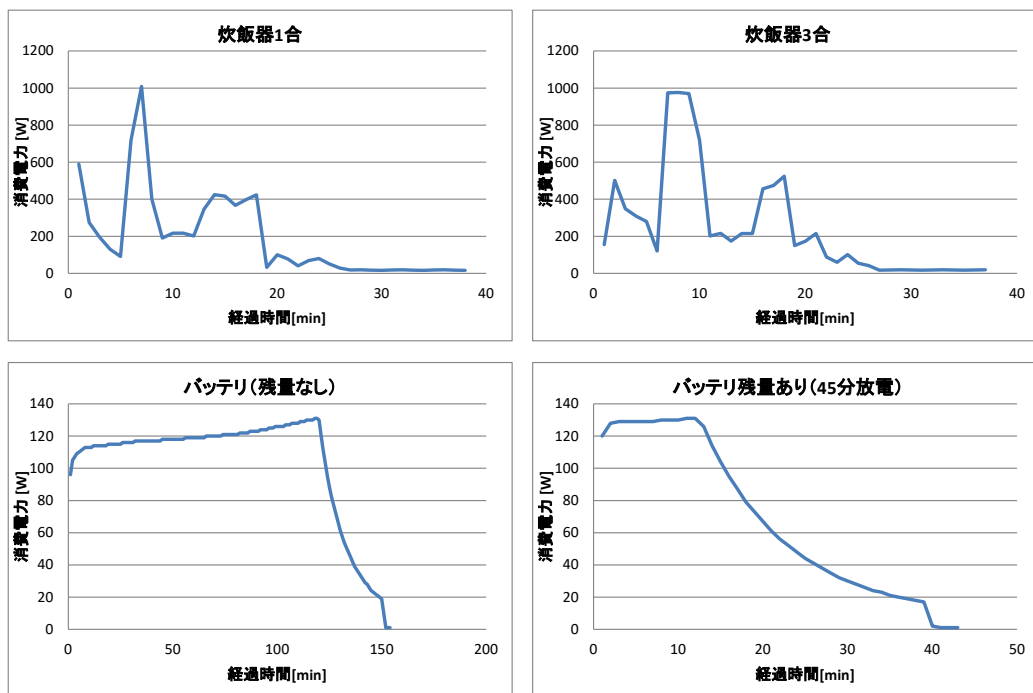


図 3-3 家電機器の消費電力パターン（再掲）

4.7 家電機器の消費電力の種類

家電機器に限らず、電力を消費する需要機器の消費電力[W]（乃至は、消費電力量[Wh]）を表す方法には、原理的に次の3つがある。

- ① 定格値：いわゆるカタログに載っている数字である。しかし、この数字は、家電機器をある条件の下で使用した場合の数字であって、いつもこの数字になるとは限らない。
- ② (直前までの) 実績値：同一条件で動作している限りは、①の定格値よりは信頼できる値を期待できることが多い。しかしながら、停止している状態から起動する場合や、動作中に運転状態が急変（強加熱から弱加熱への移行など）する場合は、大きく外れることとなる。
- ③ 予測値：本稿では、現在（ $t=0$ ）以降の消費電力値やパターンを指す。現在のところ入手できる環境にないが、多数の家電機器の過去の動作実績から算出されるものであり、不可能ではない。特に今後、家電機器がIoT化され、メーカーのプライベートクラウドに接続されるようになると、大量の動作実績が集まるため、予測値の計算が可能になると想定される。

4.8 デマンドディスパッチシステム(DDS)

前節まで、家電機器をディスパッチする際の、それらの消費電力に関する諸問題について説明した。また、それに先立つ4.5節までで、家電機器が起動できる状態にあるか否かを知る方法について検討した。

本研究では、需要を創出するICTシステムをデマンドディスパッチシステム（DDS）と呼ぶこととし、本節ではその基本的な機能を整理する（図4-10）。

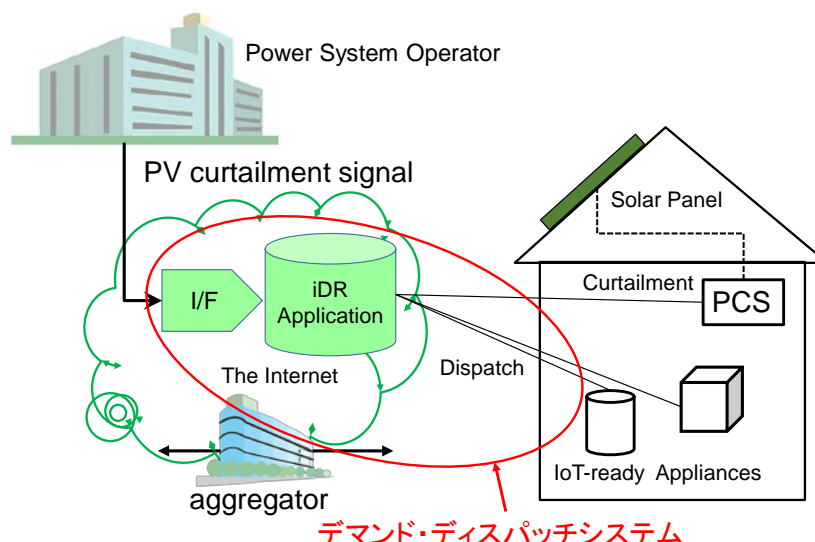


図4-10 デマンドディスパッチシステム

DDSの原理的な機能は、以下である。

- ① 次のコマの中で、家電機器が消費する電力[W]（乃至は、電力量[Wh]）を知る
- ② どの家電機器が起動できる（Ready）のかを知る
- ③ 前二号を基に、必要需要創出量相当の家電機器を起動する

①の「次のコマの中で、家電機器が消費する電力[W]（乃至は、電力量[Wh]）を知る」は、

数多ある家電機器のどれが、どの程度の電力を消費するのかを知ることである。全てが停止から起動するわけではなく、稼働中のものもあるため、このような場合は、稼働途中の消費電力を知る必要が生ずる。

根拠として使用できる値は、4.7 節に述べた「定格値」「実績値」「予測値」のどれか、若しくは、その組み合わせである。これがディスパッチを実施するための材料の一つである。

②の「どの家電機器が起動できる (Ready) なのかを知る」は、4.5 節までで検討したように、どの家電機器が起動信号を受け付け可能な状態かを知ることである。これが、材料の二つ目である。

DDS は、以上の①と②を手許の材料として、中給などから受け取る必要需要創出量に対して、前出のマクロ問題 1+マクロ問題 2+ミクロ問題に対する現実解をベースに、対象とできる家電機器を ICT 技術によって起動、場合によっては、一時停止することを繰り返す。

4.9 [W]か[Wh]か

前節までで、DDS を構築する際に直面する諸問題を分類整理して論じた。本節では、DDS が動作するための単位として、電力[W]をベースとするのか、電力量[Wh]をベースとするのかを検討する。

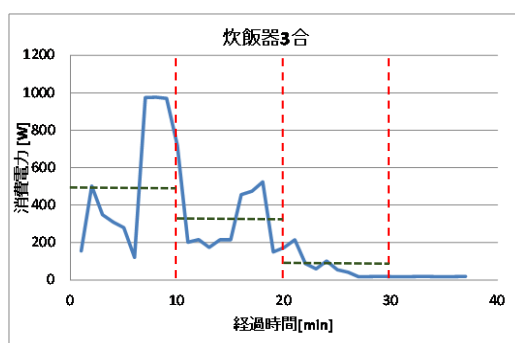


図 4-11 家電機器の電力消費パターン例

図 4-11 は、炊飯器の電力消費パターンの一例である。このように、大きく変動する需要をどう扱うかは、DDS の大きなテーマである。

1.2.6 項では、現在の電力システムが 30 分間の電力量[Wh]を一致させることが、諸取引の原則であることを述べた。この原則を踏襲するのであれば、DDS も電力量[Wh]をベースとした動作が適切と考えられる。

しかしながら、図 4-11 の 10 分時点でのディスパッチを例に考えると、この時点で、次の 10 分間 (10 分時点~20 分時点) で、この家電機器が消費する電力量[Wh] (これは言うまでもなく予測値である) を知ることは不可能である。また、DDS は、1.2.6 項に示したような発電と需要が一对になった系ではなく、需要という片側だけの系であり、かつ、コマ幅内の創出需要量は、家電機器の動作に任せるしかないの、目論んだ電力量[Wh]に合わせていく手立てがない。すなわち、予測値が手に入らない限り、コマ内での電力量[Wh]での DDS 運転は、原理的に不可能である。但し、30 分同時同量の原則の中では、30 分を複数のコマで構成すれば、30 分単位の Wh の精度を比較的容易に向上できる可能性があり、これはエネルギー市場向けとしての現実解として活用できる。

一方、電力値[W]は、家電機器の動作が連続であるので、コマの切れ目 (例えば、10 分時点) での電力値は実績値の一種であり、明確に得られる。しかし、消費電力の変動があり得ることを踏まえると、偶々のコマの切れ目の電力値[W] (瞬時値) を、次のコマ内で連続する電力値[W]として、そのまま使用することはあまり合理的ではない。

そこで、本研究における DDS の試験実装には、使用する単位は、電力値[W]であるものの、直前のコマの電力量[Wh]から計算した電力値[W] (直前のコマの平均電力値[W]となる

ため、これも「実績値」の一種である)を使用することとした。もちろん、ディスパッチ直前のコマと、ディスパッチ直後のコマでの消費電力変動パターンは異なることが多いと考えられ、これが誤差を産む原因となりうるが、本研究ではまずはこれを現実解として DDS の検討を開始することとした。

これによる誤差の発生については、後節で検討するが、この実績値を使用する方法の誤差縮小方法や、それ以外の方法については、4.13 節で考察する。

なお、誤差の発生は、いわゆるインバランス問題の一部であるが、現行制度下ではアグリゲーターが供給側である PV 抑制を実施できないことを踏まえると、社会実装に向けては、現行制度の需要側だけの議論に偏らず、供給側と需要側のバランスの取れた検討が必要である。

4.10 DDS の所要仕様

本節では、図 4-10 などに示した iDR を機能させる DDS の所要仕様を検討する。使用する値は、前節で検討したように電力値[W]である。DDS は、各社中給との信号方式 I/F、iDR アプリケーション、インターネットなど通信ネットワークなどの総体を指すが、本仕様は、iDR アプリケーション側の立場での表現にしてある。

なお、システムの仕様を纏める際に、一般的には「要件定義」という言葉が用いられる。この要件定義という文言は、業務が既に規定されていて、それを基にした仕様を議論する場合に用いられるものようである。本研究で論じている iDR は、まだこの世には無く、業務の太宗を占める商業的な活動内容も未検討の段階であるため、本検討では、要件定義とは呼ばず、所要仕様と呼ぶこととする。

iDR アプリケーションの所在を明確化したイメージ図を図 4-12 に示す。

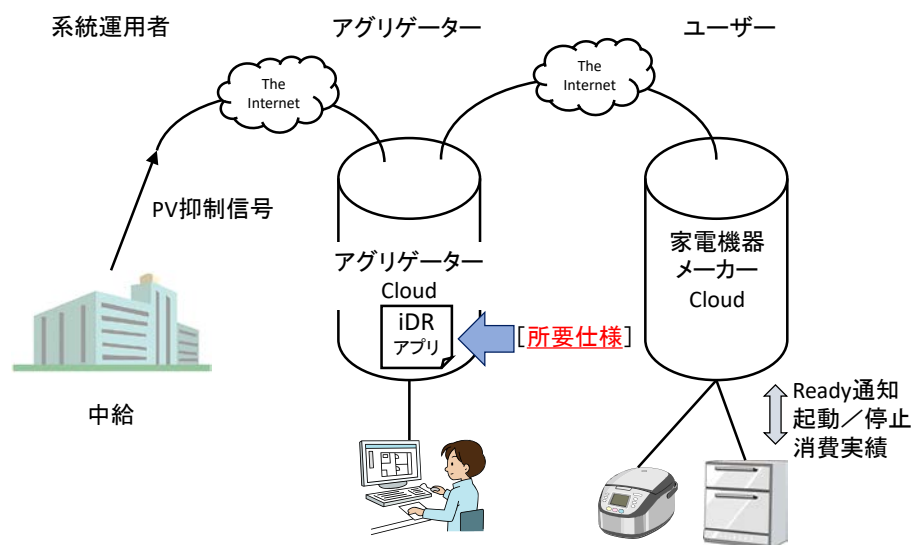


図 4-12 iDR アプリケーションの所在

前章までの iDR の構造や、本章での iDR ボタンの具備などの諸検討を踏まえ、iDR アプリケーションに必要な機能として以下の所要仕様を考案した。

アグリゲーターが有する iDR アプリケーションは、一定時間、例えば 10 分などを繰り返し単位時間 (前出のとおり、これをコマ幅と呼ぶ) として、PV 余剰発電の抑制緩和に役立つ需要を創出させる。原理的に必要な機能は、既に 4.8 節に述べたところであるが、iDR アプリケーションの機能として以下に改めて纏める。

【①換算機能】

中給⇒アグリゲーター / 個別の PV の抑制信号を受信して、当該アグリゲーターがそれに相当する所要創出電力に換算する機能である。第 5 章に詳述するように PV 抑制信号は、パーセンテージを単位として送信されてくる。これを、アグリゲーターが自社配下の PV 容量を勘案して、必要な需要創出量に換算する機能である。

【②状態把握機能】

ユーザー⇒アグリゲーター / インターネットを経由して上がってくる個々の家電機器の種類、定格消費電力、準備作業完了(Ready)を受信する機能である。家電機器の種類は、一時停止の可否判断などに使用する。

【③コマ幅機能】

アグリゲーター⇒ユーザー / コマ幅を家電機器に対して通知する機能である。家電機器は、このコマ幅で消費した電力量[Wh]をアグリゲーターに知らせることとなる。

【④起動機能】

アグリゲーター⇒ユーザー / ①で算出した電力相当の家電機器をユーザーの受容性などに応じた順位に従って起動/停止する機能である。

【⑤停止機能】

アグリゲーター⇒ユーザー / PV 余剰出力の変動により、運転中の家電機器を減らす必要がある場合、3.2 節の特性に応じて停止信号を送出する機能である。(例：バッテリー充電は停止させるが、炊飯器は停止させない)

【⑥差分ディスパッチ機能】

アグリゲーター⇒ユーザー / 家電機器からコマ幅毎に上がってくる消費電力量を基に、上記①で算出した電力との差分を起動/停止する機能である。具体的には、直前のコマの消費電力量をコマ幅(時間)で除して平均電力[W]を求め、次節に説明する計算によって、ディスパッチ量を決定する。

【⑦管理機能】

ユーザー⇒アグリゲーター / 個々の家電機器の電力消費実績を管理する機能である。消費実績は、⑥の機能に使用するほか、ユーザーへの課金等に使用されることを想定している。

4.11 DDS の誤差等に関する検討

DDS の動作で、最も大切なのは、ディスパッチ量、すなわち、創出需要量の決定とその誤差の抑制である。4.7 節に述べたように家電機器に限らず、需要機器の消費電力を表す指標には、①定格値、②消費実績値、③予測値の 3 種類がある。

4.9 節では、電力値[W]、電力量[Wh]の適用可否について検討し、電力値[W]を使用することとしたが、以下の検討では、電力値[W]のうち、①定格値と②消費実績値を使用して、ディスパッチ量を決定する方法について、その動作メカニズムと、特性、特にその誤差について検討する。これは、今後 DDS を改善する際に、現状のシステムに於いて、定格値と消費実績値を使用したことによる誤差の発生や、システムの処理時間や通信時間による誤差がどのように発生するというメカニズムを理解することは、大変役立つという視点に立つものである。

そのうえで、正確な予測値の入手方法なども検討し、誤差の抑制を検討することが必要である。4.13 節では、その予測値の生成方法などについての机上検討結果を示す。

まず、図 4-13 に、デマンド・ディスパッチの基本的タイムチャートを示す。ディスパッチにより、コマ幅を基本単位として家電機器が起動/停止する。あるディスパッチタイミング $D(n)$ では、iDR アプリケーションが、それまでに得られていた需要（以下、既存需要） $W_R(n-1)[W]$ と、その時点で必要な PV 余剰発電抑制緩和量など、所要創出電力 $W_B(n)$ （以下、計画値） $[W]$ の差分 $W_D(n)[W]$ （以下、ディスパッチ量）を追加したり、削減するように家電機器を起動/停止する。

システムの実装においては、図 4-14 に示すように、インターネットの伝送遅延時間や、iDR アプリケーションの処理時間等を考えると、 $W_R(n-1)$ は、 $D(n)$ では入手できず、必ず何らかの時間④だけ前の消費電力 $W_{RA}(n-1)[W]$ しか入手できない。本研究では、この④をディスパッチリードタイムと呼ぶ。ここに $W_D(n)$ が誤差を生ずる原因の一つがある。すなわち、 $W_D(n)$ に対する時間④による誤差 ΔW_{DA} は、次となる。

$$\Delta W_{DA} = W_R(n-1) \cdot W_{RA}(n-1)$$

さらに、本システムでは、図 4-15 に示すように、 $W_{RA}(n-1)$ の代わりとして、コマ幅時間⑤ $= T[h]$ である直前のコマでの消費電力量 $Q(n-1)[Wh]$ をコマ幅時間⑤ $= T[h]$ で除した平均電力 $W_{RB}(n-1) = Q(n-1)/T[W]$ を使用した。先にも述べた通り、本研究でのデマンド・ディスパッチは、エネルギーサービスの一部として想定しているため、課金等のために使用電力量を測ることは必須である。本システムでは $W_{RB}(n-1)$ として、この量を活用することとした。

第 3 章に実例を示したように、家電機器によっては、この時間⑤の間に消費電力が大きく変化するものがある。このため、 $W_D(n)$ は、コマ幅時間⑤に起因する誤差も発生し、その誤差 ΔW_{DB} は、次式で表せる。

$$\Delta W_{DB} = W_{RA}(n-1) \cdot W_{RB}(n-1)$$

総合すると、ディスパッチ量 $W_D(n)$ は、次式で表すように、時間④と⑤に起因する誤差を有することとなる。

$$\begin{aligned} \Delta W_{D<TOTAL>} &= \Delta W_{DA} + \Delta W_{DB} \\ &= W_R(n-1) \cdot W_{RB}(n-1) = W_R(n-1) \cdot Q(n-1)/T \end{aligned}$$

本システムは、図 4-16 に示すように、コマ幅時間毎に上記の処理を繰り返して所要の需要を創出する。

デマンドディスパッチシステムにおける起動/停止には、いくつかの種類がある。基本的には、a) 家電機器を停止状態から起動する(Initial)場合、b) 動作中の機器の運転をそのまま継続する(Continue)場合、c) 動作中の機器を一時停止させる(Suspend)場合、d) 一時停止させていた機器を再スタートさせる(Re-start)の 4 種類である。Re-start は、基本的には Initial と同じであるが、以下が異なる。

停止中の家電機器を起動する場合、当該機器は動作していないため、直前の消費電力すら判らない。このため起動するときに想定するのは、当該機器の定格消費電力である。先にも述べたとおり、家電機器の消費電力は、負荷の量や運転モードで大きく変わることから、ここにも誤差を生ずる構造がある。

一時停止させた家電機器を再起動する場合も同様のことが起こり得るが、本研究の iDR アプリケーションでは、一時停止させる直前の消費電力を基にすることで、精度向上を図る工夫を施してある。これは【⑤停止機能】の工夫である。

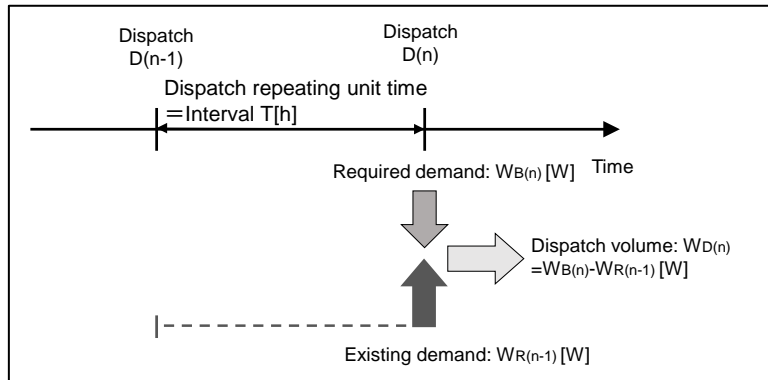


図 4-13 ディスパッチ量の決定方法

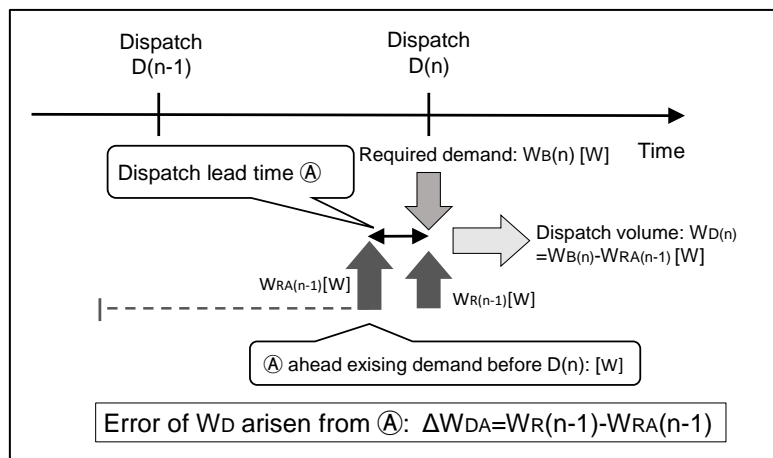


図 4-14 ディスパッチリードタイムに起因する誤差

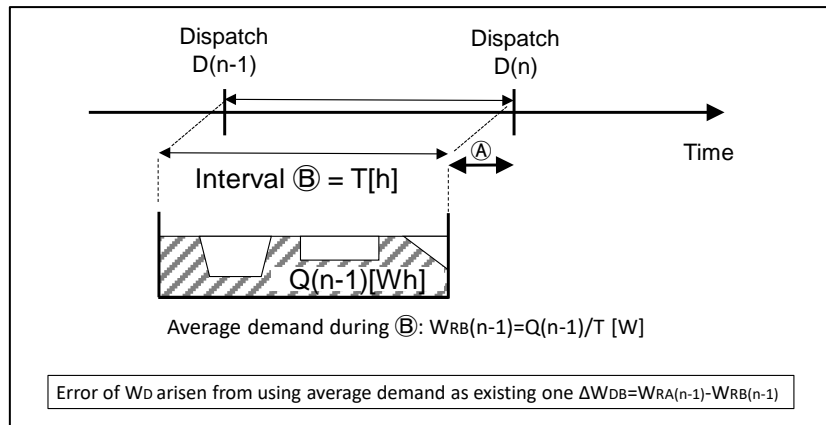


図 4-15 既存需要の捉え方に起因する誤差

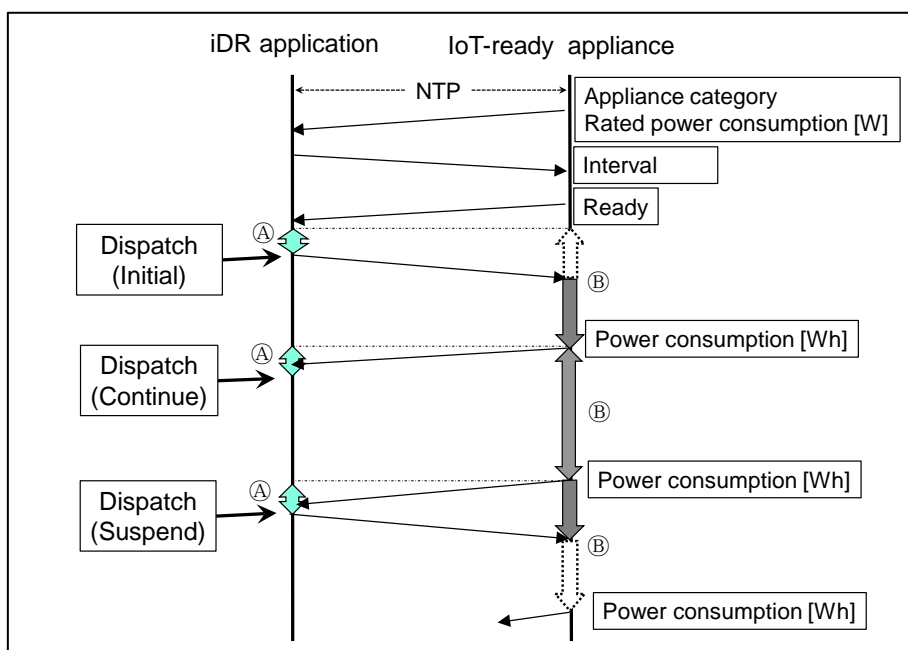


図 4-16 iDR アプリケーションと IoT 家電機器間のシーケンスチャート

本研究の単位システムでは、起動の際にも、誤差を生ずる構造があることが判っている。停止状態からの起動の場合、iDR アプリケーションと IoT 家電機器それぞれの時計により、消費電力量 $Q(n-1)[Wh]$ 計測は、実際の起動タイミングより、ディスパッチリードタイムと伝送遅延時間を合わせた分だけ前から開始されている。このため、この部分は電力を消費していないにもかかわらず、次のタイミングでのディスパッチ量を決めるための平均電力計算は、コマ幅内の電力量を時間 $T[h]$ で除して計算するため、結果が少なく計算されてしまうこととなる。

一時停止の際も、誤差の元となる現象が起こる。すなわち、一時停止は、iDR アプリケーションが期待する時刻より、伝送遅延時間分だけ遅れて到着する。アグリゲーターとしては、この時間分の需要は消滅して欲しいのであるが、実際には僅かながら需要が発生することになる。これらは、前述の ΔW_{DA} とともに ④ に起因する誤差である。

④ は、複数回の実測で数百ミリ秒であった。この値は、4.15 節で述べる大規模化の際に適用する技術により、システム規模の増大に伴う増加を抑制することは可能である。一方、4.12 節の実験で述べるとおり、コマ幅は 10 分程度の長さで想定できることから、④ に起因する誤差は、将来の大規模システム全体の中では無視できる程のものになると考えられる。

一方、⑤ に起因する誤差は、コマ幅の中で既存需要が変動し、また、次のコマでも、これらの消費電力がどのように変動するか、さらに、追加ディスパッチした家電機器も、ディスパッチ後どのようにその消費電力を変動させるか、など極めて複雑な問題であり、本システムの誤差の本質である。

これについては、IoT の特長を活かした解決法がある。家電機器がメーカーの PrivateCloud に接続されている状態を考えると、この PrivateCloud には、ネットワーク経由で家電機器の消費電力や動作モードに関する情報が大量に集まってくる。これを基に、予測値を計算し、アグリゲーターに伝えることにより、需要の創出誤差は相当程度少なくできる可能性があり、後に考察する。

4.12 実験による所要仕様の確認

4.12.1 実験条件

試験実装したシステムを図 4-17 に示す。この実験システムは、既製品や特注品のハードウェア、ソフトウェアから成っているため、同図を表 4-2 に示すような「物理層」「プロトコル層」「アプリケーション層」「サービス層」に分けて以降に示す。概観図では、iDR アプリケーションは一つの要素に描いてあるが、実験を円滑に進めるため、実験シナリオとして条件を外部から入力する構成にしてあるため、詳述図ではその形式で説明する。

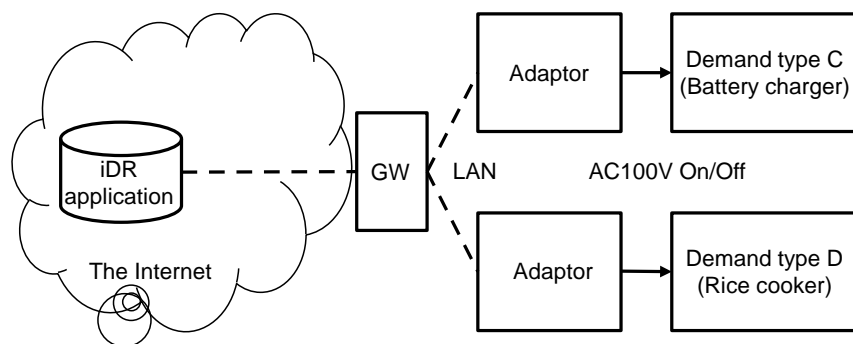


図 4-17 試験実装システム概観図

表 4-2 実験システムのレイヤー構成

層	役割	例
サービス層	PV余剰発生やDR発動など、システム全体の運用を記述する。	実験シナリオとして整理。 参考4-1参照
アプリケーション層	サービス層で求められた運用を、アグリゲーターが有するiDRアプリによって、起動/停止する対象を決定し、ディスパッチする。また、実験機から上がってくる消費電力量を管理する。	・ディスパッチ機能 ・状況の報告機能
プロトコル層	実験システムで使用する通信プロトコルを規定する。	SNMP (Simple Network Management Protocol)
物理層	使用する物理的な機器や汎用サービスを規定する。	炊飯器、イーサネット、AWS (Amazon Web Service)

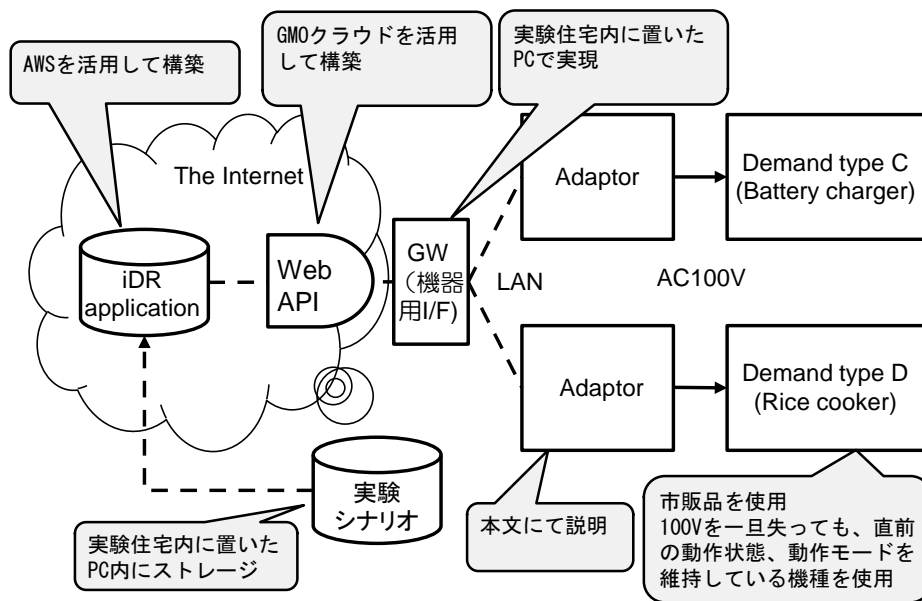


図 4-18 実験システム（物理層）

図 4-18 に実験システムの物理層を示す。実験シナリオは、iDR に対して、どのようなコマ幅で、どのタイミングで何 W 需要創出するかを記載したもので、いわばアグリゲーターのオペレーションセンターの業務を想起させるものである。

同図の中で、特徴的なものが、WebAPI であり、2.5 節に述べたように家電機器が IoT 化された場合、外部からの操作を受け取るインターフェースを模擬している。

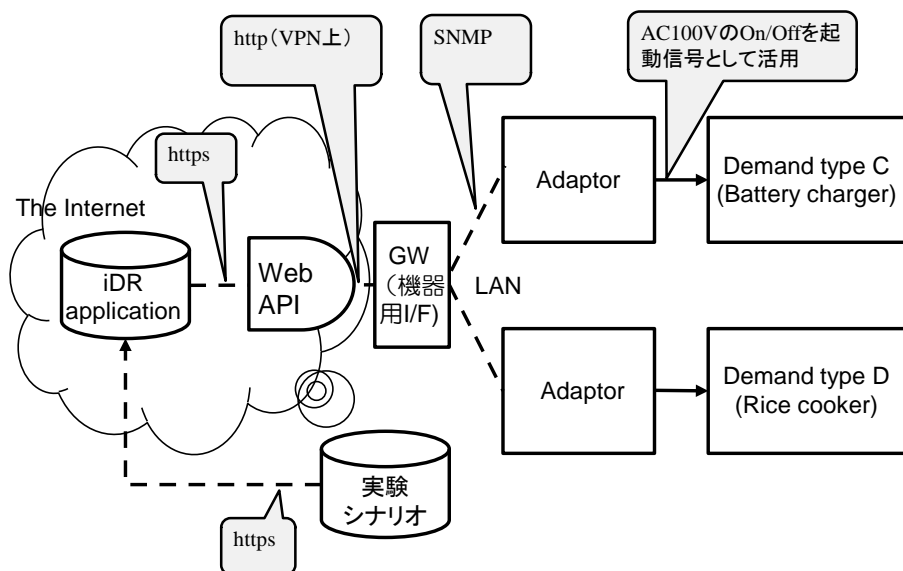


図 4-19 実験システム（プロトコル層）

図 4-19 は、実験システムのプロトコル層である。基本的には、http や SNMP (Simple Network Management Protocol) など、極一般的に使用されているプロトコルを使用して構築している。

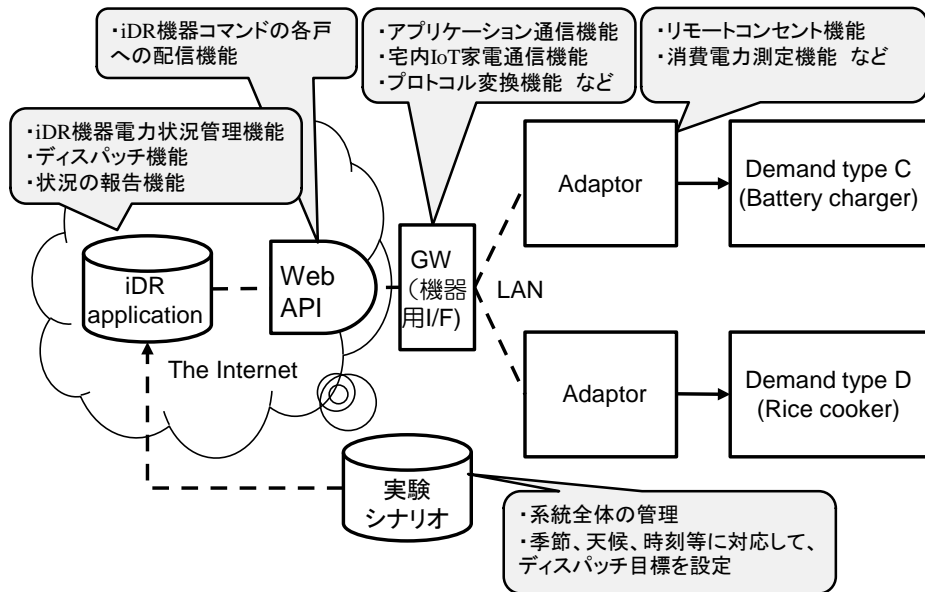


図 4-20 実験システム図 (アプリケーション層)

図 4-20 は、実験システム図のアプリケーション層を表す。iDR アプリケーションは、後述するようにディスパッチする機器を決定し、起動/停止信号を送り、また、実績値を把握する。このアルゴリズムは、アグリゲーターのサービス品質を決めるため、自由化が進む競争領域である電力ビジネス的には心臓部となる。

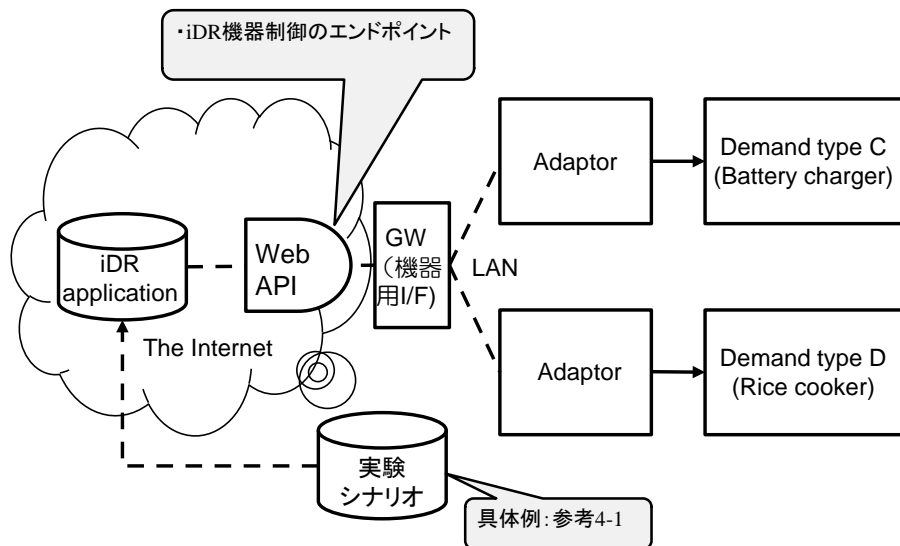


図 4-21 実験システム (サービス層)

図 4-21 は、実験システムのサービス層である。ここに、実験のシナリオを置く。例を参考 4-1 に示す。

以降は、実験によって、所要仕様を確認した内容を記す。本章の文中に示す【○○】は、4.10 節記述の実装に関する実験によって確認した機能を示す。本章前段で述べたとおり、本研究で試作したアダプターは、家電機器起動停止手段として、AC100V の ON / OFF を採用している。【④起動機能】【⑤停止機能】4.1 節で述べた「Ready」状態は、アダプターのタッチパネルに表示されるボタンを押下することで、当該信号が送出され、iDR アプリケーションはそれを把握【②状態把握機能】する。

本システムは、先に述べたコマ幅を変えられ、その間の電力量を収集する【⑦管理機能】が、それとは別に、実験としての機器動作状況観察のため、1分間の使用電力量を測り、iDRアプリケーションに知らせている。

なお、本システムでは、IoT家電機器の定格消費電力や一時停止の可否などの機器特性は、iDRアプリケーションが有するデータベースに置き、アダプターからの通知機能は省略した。この実験におけるディスパッチリードタイムは、コマ幅時間より充分短い15秒程度である。

4.12.2 タイプC 需要（バッテリー充電器）単体動作実験

図4-22にタイプCの需要として、電動自転車のバッテリー（以下、BATT）を本システムの対象とした際の動作を示す。破線は計画値を表しており、コマ幅は10分である。iDRが社会実装された場合は、数百～数万kWの需要創出の必要が発生する可能性があるが、これは単位システムの実験であるので、例として300Wを設定した。

電動自転車のバッテリーは、300Wh程度の容量があり、100台集めると電気自動車並みの容量となる。また、大規模流通事業者の利用計画[1]などもあり、今後需要創出の新たな担い手になる可能性がある。

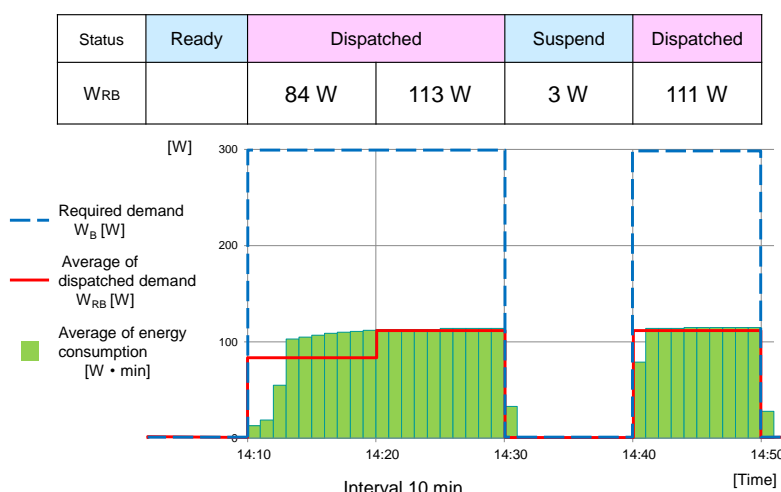


図 4-22 タイプ C 需要の実験結果

図4-22のとおり、14:30～14:40のSuspend期間【⑤停止機能】【④起動機能】でも、ディスパッチリードタイムに起因して、需要がわずかに発生しているように見える。これに対して、iDRアプリケーションはSuspend期間中の需要を0Wと扱うことで、W_{RB}の誤差を減らす工夫をしている。

BATTは、ある一定の管理レベル、すなわち、SoC (State of Charge)を満足すれば、起動停止は自由にできる、という特徴がある。調整力は、必要な継続時間を過不足なく自由に設定できることが望ましい。このように起動停止がある程度自由にできる需要をデマンドデイスパッチシステムに取り込むことは、その方策の一つとなる。

BATTの充電に要する電力値を見ると判る通り、充電がスタートしても、すぐには定格消費電力に至らず、徐々に電流が増える特性を示している。また、取り扱い説明書[2]には、使用直後などBATT内部が熱い場合は、すぐに充電はスタートしない、とある。調整力としては、応答時間も重要なファクターであり、BATT充電という応答時間が極めて短いと想定される需要でも、かなり複雑な特性を有していることが判った。このため、BATTを使用して調整力を得る場合、機器使用状態等を考慮した確率分布的な捉え方など用いて応答時間特性を想定することが必要である。

4.12.3 タイプD 需要（炊飯器）単体動作実験

図 4-23 は、タイプ D の需要として、炊飯器を単体で起動停止した時の実験結果である。炊飯器は、動作時間中に消費電力が大幅に変化する特性の需要である。

実験ではコマ幅 10 分で計画値を変化させた。図 4-23 では、例として 10:20～10:30 に 4.12.2 同様、300W の計画値【①換算機能】があると仮定し、iDR アプリケーションは、コマ幅内の平均でその計画値を満たす需要として、炊飯器をディスパッチしている。次のコマの 10 分間では、計画値がゼロになり、需要は不要なのであるが、炊飯器を途中で停止することは、炊飯というユーザーが当該家電機器から得られる便益を損なうこととなるため、iDR アプリケーションは、停止信号を送らず炊飯器の運転をそのまま続けている。これは、起動した需要のタイプによっては、調整力として上振れする原因となる事例であり、ディスパッチ量の決定では、このようなケースにも対応できる必要がある。

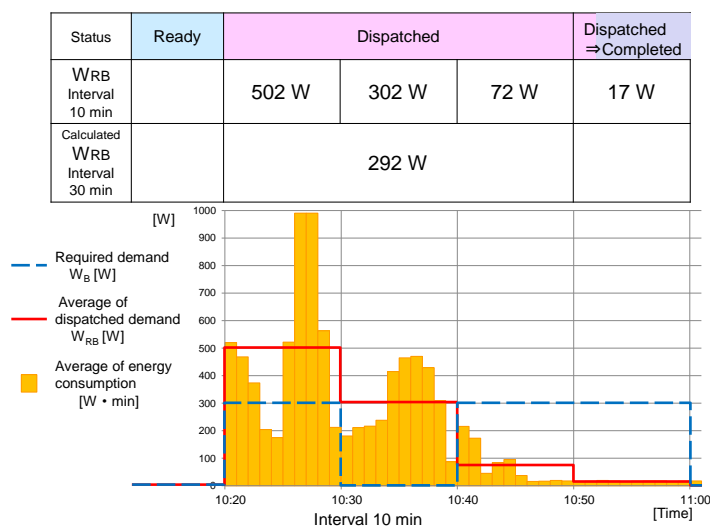


図 4-23 タイプ D の実験結果

さらに次のコマでは、計画値が元に戻っているが、炊飯器は仕事をほぼ終え、消費電力が減ってきている。

以下に、コマ幅について考察する。仮に炊飯器をコマ幅 30 分で動作させることを想定すると、10:20～10:50 の電力量の総和から算出される平均電力は 292W となる。10:50 には、炊飯器の消費電力はほぼ零となっているのであるが、コマ幅 30 分では、10:50 のディスパッチは、この 292W を既存需要として行ってしまう。これに対して、コマ幅 10 分の場合では、72W を既存需要とするため、コマ幅 10 分と同 30 分では、次のディスパッチ量に大きな差を生んでしまうことが判る【③コマ幅機能】。

このようにコマ幅の選定は、ディスパッチ量に大きく関係するが、その選定においては、電力取引が 30 分間を一単位とすることが慣例となっているため、30 分の 1/n などが適当と考えられる。

4.12.4 タイプ C 需要とタイプ D 需要の複合動作実験

図 4-24 にタイプ C とタイプ D の需要を複合的に動作させた場合を示す。計画値は途中で増加させるパターンとしてある。15:20～15:30 のコマでは、その前のコマに比べ需要を増やすことが求められている。そこで、iDR アプリケーションは炊飯器に加え、BATT を追加ディスパッチして、需要創出している【⑥差分ディスパッチ機能】。次の 15:30～15:40 は、計画値がゼロになったが、図 4-23 と同様、炊飯器の運転は続け、BATT を一時停止させている。15:40～16:00 のコマについては、炊飯器はほぼ仕事を終え、BATT だけの需要が残っている。このように本システムは、ディスパッチタイミング毎に需要の追加／削除を繰り返して、系統側が必要とする量、応答時間、継続時間の調整力を創出する。

Demand type C status	Ready	Ready	Dispatched	Suspend	Dispatched	
Demand type D status	Ready	Dispatched			Dispatched ⇒ Completed	Completed
WRB		415 W	359 W	49 W	125 W	114 W

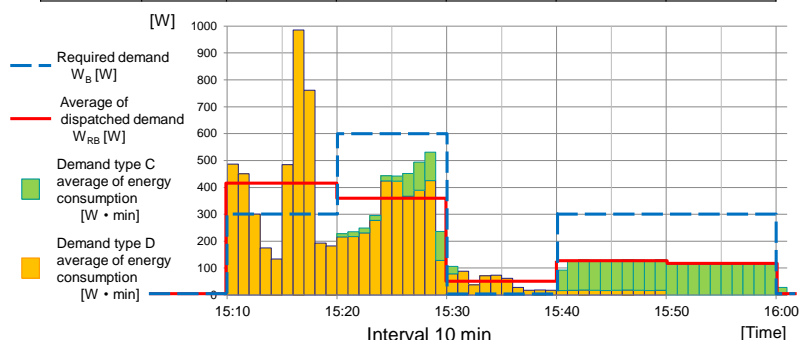


図 4-24 需要タイプ C とタイプ D の複合動作実験結果

4.13 ディスパッチ量の決定方法に関する考察

先にも述べたとおり、適正に PV 余剰発電を消費し、抑制を緩和するには、極力正確な需要創出ができるようディスパッチ量を決定することが必要である。前節の実験結果でも判る通り、炊飯器のようにその稼働時間内に大幅に消費電力が変化するような家電機器では、過去実績を使用している限り、前述のメカニズムによる誤差は発生してしまう。以下にそれを低減する方法について考察する。

4.13.1 コマ幅の縮小による方法

4.12.3 項に示したように、コマ幅の長さによって、次のコマのディスパッチ量が変わる。コマ幅を長くしすぎると、その間に需要は大きく変わってしまう可能性がある。これらを考えると、コマ幅を短くすれば、消費電力が変動しても、その影響を限定的にできる可能性が高い。前節の実験では、コマ幅を 10 分に設定したが、例えばこれを 5 分にすれば、相当程度影響は限定化できそうである。

どの程度のコマ幅を設定すれば、この誤差を小さくできるかについては、正しくは家電機器の電力消費パターンの自己相関分析によることが合理的である。当然、家電機器の種別によっても、それは異なるため、万能なコマ幅を見つけるのは難しい可能性もある。

また、この方法には副作用も伴う。それは、コマ幅をあまりに短くしてしまうと、ディスパッチ回数が増えてしまうことによる、通信ネットワークへの負担増である。第 3 章のべたように iDR は、大量の家電機器を ICT によりアグリゲートするものである。スケールについては別節に述べるが、もしこの方法をとるのであれば、十分な検討が必要と考える。

4.13.2 ディスパッチのタイミングをずらす方法

同じ炊飯器であっても、ディスパッチを一コマずらして合成することで、かなりのならし効果が期待できる。図 4-25 にコマ幅 5 分を想定して、同じ炊飯器を一コマずらしてディスパッチした場合の合成消費電力（緑色の線）を示す。

このグラフから判るように、増えたり減ったりして、ある意味で大暴れであった消費パターンが単調に減少するようなパターンに変わっており、その分誤差も減ることが理解できる。

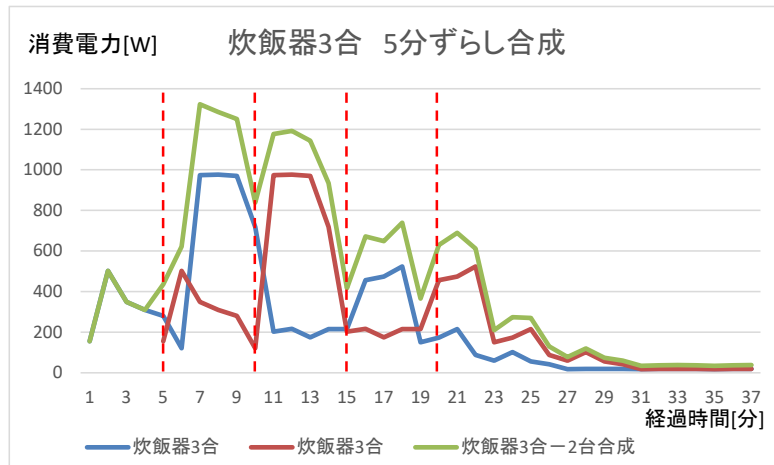


図 4-25 同じ炊飯器を 5 分ずらした場合の合成消費電力

4.13.3 予測値生成による方法

前 2 方法は、実績値を使う方法における誤差の低減方法であるが、過去の実績値に代えて、未来の予測値を使用することができれば、この問題は根本的に解決する。

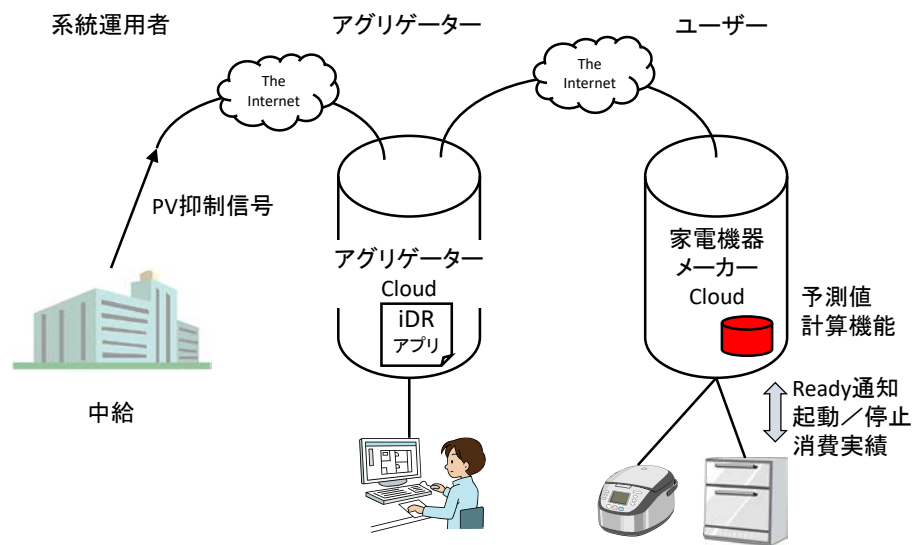


図 4-26 予測値計算機能の追加

本研究では、家電機器が Connected 化され、API 連携によってアグリゲーターから起動／停止ができるアーキテクチャーを想定している。予測値を使用して誤差を低減する方策についても、この仕組みを活用した、いわば、IoT 家電機器ならではの、といってもよい予測値計算機能を家電機器メーカー側の PrivateCloud に置く案を図 4-26 に示す。この PrivateCloud には、大量の家電機器動作データが集まるため、そのビッグデータをベースとした予測値は、比較的容易に生成可能と考えられる。

まだ Connected 化された家電機器も少ない现阶段で、家電機器メーカー側にこのような機能を設けるインセンティブがあるかは疑問ではあるが、家電機器メーカーが従前から取り組んでいる HEMS や HA(Home Automation)の一部を成すものとして、電力セクター側からも要請して行くべき機能と考える。

図 4-27 に、予測値として有用と考えられるデータフォーマット案を示す。家電機器によって稼働する時間はまちまちであるので、このフォーマットは可変長が原則である。また、

炊飯→保温のように、いつ終わるか判らない動作パターンもあるため、ある程度のルールを設け、例えば、炊飯器：60分以下、などのように規定することが現実的と考えられる。

Model:	Pamasony Dx66KT-3WS				
Interval:	1st 10min.	2nd 10min.	3rd 10min.	...	Nth 10min.
Wmin	2,060Wmin	3,205Wmin	1,055Wmin	...	End of Running

図 4-27 予測値フォーマット案

4.14 中給とのコミュニケーションに関する考察

3.9.2 節でも述べたとおり、DDS が発生させた需要は、PV 余剰発電を消費して抑制を緩和するという使い方だけではなく、火力発電の負荷として使用し、調整力を積み増すためにも活用できる。このような使い方のためには、待機している需要 (=Ready 状態) がどの程度あるかを、中給に知らせることで有効な使い方ができる可能性が高い。また、前節で述べた通り、IoT を活用して予測値を生成することができれば、創出需要のブレ幅も抑制できるため、有用性の高い需要となる。

また、本研究の DDS は、相当程度の準リアルタイム性を有するため、数分以内での所要需要をディスパッチできることが期待できる。

このように、実績のみならず、予測値と継続時をアグリゲーター-中給間でやりとりすることは、図 2-9 の実現に大いに寄与するものと考えられる。図 4-28 のデータフォーマット案に加え、図 4-29、図 4-30 にこのようなアグリゲーター-中給間のコミュニケーションのイメージ図、やり取りのシーケンス案を示す。

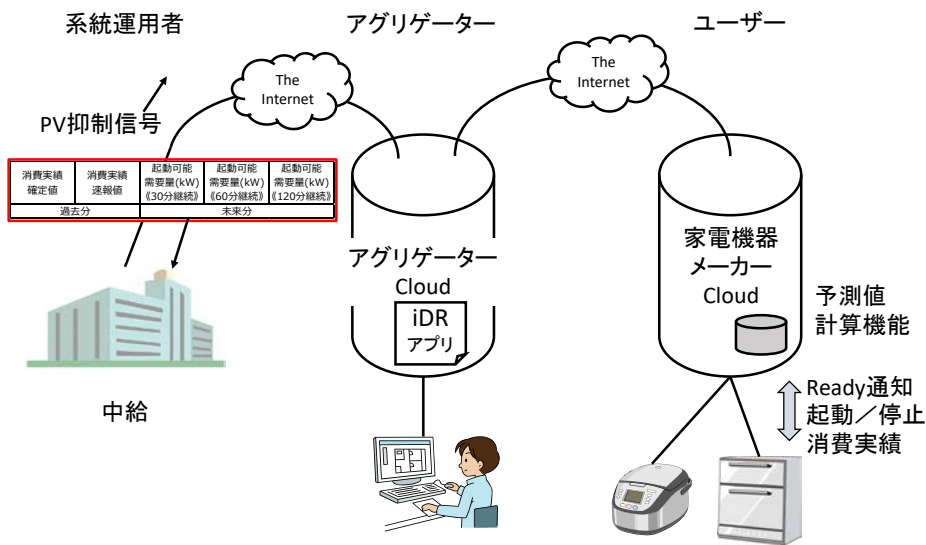


図 4-28 アグリゲーター-中給コミュニケーション

消費実績 確定値	消費実績 速報値	起動可能 需要量(kW) 《30分継続》	起動可能 需要量(kW) 《60分継続》	起動可能 需要量(kW) 《120分継続》
過去分		未来分		

図 4-29 データフォーマット案

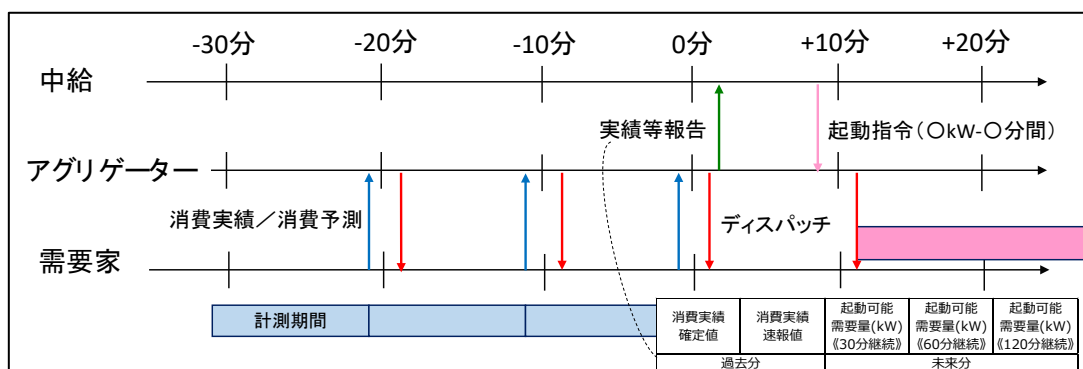


図 4-30 シーケンス案

4.15 スケールの為の技術

本章で試験的に実装したシステムは、単位システムと呼ぶ対象家電機器が 1 台ないし 2 台の最小規模のシステムである。本システムの社会実装には、これを大規模にスケールさせる必要がある。このための技術については、データを直接受け付けるサーバ（エンドポイント）の動的分散化[3]、数千～100 万単位ものデータソースから継続的に生成されるストリーミングデータ処理基盤[4]、ディスパッチ処理を行うサーバを分散するサーバクラスタリング技術[5]、これらのサーバのバックエンドで動作し、データの厳密な整合性をトレードオフすることで高速化を図った NoSQL データベース[6]等の既存 ICT 技術を適切に応用することにより可能であると考えている。

今後の課題としては、上記の考えの妥当性の検証が必要である。

4.16 本章のまとめ

4.16.1 iDR ボタンによる課題解決

本章では、表 2-6 に整理した「家電機器の準備完了状態をアグリゲーターが知る方法」を課題として検討した。

実験における安全などにも鑑み、iDR ボタンを定義し、アグリゲーターによる Explicit 型 DR を成立させる構造を考案した。これにより、表 2-6 に示したように今まで DR リソースとして扱えなかった家電機器をその対象とすることが可能となった。

また、実験に向けて、市販の家電機器のアダプターとして使用することで、IoT 家電機器として機能する実験機を開発・試作した。これによる実験により、iDR アプリケーションの要求仕様確認など様々な事項が確認できる環境が整った。

家電機器は、大変複雑な動作を、とても安価に実現しており、簡単に改造できるようにはなっていない。このため、制御方法として、電源の入/切に加えて、学習型赤外線リモコンなど、複数の手立てを揃えることにより、実験実施の広がりにも目途がついた。

4.16.2 DDS による課題解決

本章のメインの課題「アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する方法」(表 2-6 (再掲))については、DDS の要求仕様を考案し、試験実装による実験により、その有用性を確かめることができた。現時点では、iDR の対象となる家電機器が Connected になっていないため、実験機による実験であったが、今後、家電機器の Connected 化の進展とともに適用できるアーキテクチャーも提案しており、家電機器メーカー等の意見交換に有用である。

DDS の有する誤差についても検討し、定格値や実績値を使用する場合の誤差についてそのメカニズムを明らかにし、また、改善方法を考察した。さらに、その誤差を IoT という新たな環境を活用して予測値を生成する方法を提案した。これらにより、大まかには、課題解決の初期的な目途は付いたと結論する。

一方、誤差については、定格値や実績値に頼っている限りは、本章で述べた構造的誤差か

らは脱却できないため、開発研究の方向性としては、IoT 環境を活用した予測値活用型 DDS にすべきと考える。

4.16.3 今後の課題

技術的課題として、DDS のスケール問題を、4.15 節で机上検討したが、家電機器を対象とした DDS が社会実装できるか否かは、家電機器メーカーのプライベートクラウド内にとのような技術が実装され、機動的な家電機器動作を可能とするかにかかっている。このため、上記の机上検討などをベースとして、エネルギー分野での IoT 家電機器の応用についてメーカーと意見交換すべきと考える。

iDR が社会実装されるための課題としては、関係者とのより広範な認識共有も重要である。iDR ボタンについては、2017 年 8 月に東京大学生産技術研究所の実験スマートハウス「COMMA ハウス」(以下、COMMA ハウス)に来所された家電機器メーカーの管理職の方と意見交換する機会があり、肯定的な反応を頂いた。その方によると、電気事業法の解釈などの点で、広域で電力を使用すること自体が、いわゆるスマートグリッド的なテーマとして成り立ち得るのかメーカーサイドでは判断しかねており、iDR は参考になる、とのことであった。

家電機器に、DR リソースとしての役割を期待するのであれば、このような実際の実験機を見てもらい、今後の家電機器開発の参考として頂くことが必要である。今後も広く電機メーカー等の関係者と意見交換し、共通認識を醸成することが重要である。

一方、中給とのやりとりでは、このようなデータが中給にとって有用であるかなどを、実際の事業者に対してヒアリングしての確認が必要である。

参考 4-1 実験シナリオ例

```
#####
# 開発テスト用 シナリオ
#####

#####
# コマンドリスト
#####
#
#####
# 環境初期化 (drID)
#####
# 想定 PV 出力相対設定 (ディスパッチ間隔分、PV 出力ファイル名)
#####
# 想定 PV 出力時刻設定 (ディスパッチ間隔分、開始時刻 YYYYMMDDHHMM 0 の場合は現在時刻から、PV 出力ファイル名)
#####
# iDR 機器値域設定 (家番号、機器番号、設定文字列)
#####
# iDR 機器全値域取得 (家番号、機器番号)
#####
# PV 抑制指示 (drID、今から何分後、継続時間分、抑制%)
#####
# PV 抑制相対指示 (drID、今から何分後、ディスパッチ間隔分、継続時間分、抑制%)
#####
# PV 抑制時刻指示 (drID、開始時刻 YYYYMMDDHHMM、継続時間分、抑制%)
#####
# iDR 機器イベント通知 (家番号、機器番号)
#####
# サーバパラメータ設定 (ディスパッチ間隔分、base 割合、pead 割合、スマート機器接続サーバタイムアウト秒、ディスパッチプロセス停止)
#####
# 仮想機器相対起動 (家番号、機器番号、ディスパッチ間隔分、今から何分後登録、今から何分後キャンセル、今から何分後自律動作開始、電力ログファイル名、時刻ばらつき秒、電力ばらつきパーセント)
#####
# 仮想機器時刻起動 (家番号、機器番号、ディスパッチ間隔分、登録時刻 YYYYMMDDHHMM、キャンセル時刻 YYYYMMDDHHMM、自律動作開始時刻 YYYYMMDDHHMM、電力ログファイル名、時刻ばらつき秒、電力ばらつきパーセント)
#####
# 相対待機 (待機分)
#####
# 時刻待機 (時刻 YYYYMMDDHHMM)
#####

# 仮想機器エミュレータ全機器 30 秒乱数登録、電力 10%乱数変動
```

サーバパラメータ設定,10,0.3,0.3,5,true

環境初期化,500

想定 PV 出力時刻設定,10,201701181510,PVoutput5min.txt

サーバパラメータ設定,10,0.3,0.3,5,false

PV 抑制時刻指示,500,201701181510,50,20

第4章 参考文献・資料・出典

- [1] 本田技研工業株式会社ホームページ (2017/6/5 アクセス確認)
<http://www.honda.co.jp/news/2017/c170323.html>
- [2] ヤマハ発動機株式会社 Web サイト (2017/6/5 アクセス確認)
<https://www.ysgear.co.jp/support/download/pas/pdf/X92-82110-20.pdf>
- [3] amazon Web サイト (2018/12/9 アクセス確認)
<https://aws.amazon.com/jp/elasticloadbalancing/>
- [4] TALEND 社 Web サイト (2018/12/9 アクセス確認)
<https://jp.talend.com/solutions/information-technology/internet-of-things-real-time/>
- [5] amazon Web サイト (2018/12/9 アクセス確認)
<https://aws.amazon.com/jp/ec2/autoscaling/>
- [6] amazon Web サイト (2018/12/9 アクセス確認)
<https://aws.amazon.com/jp/dynamodb/>

第5章 PVとの連携実現方法

本章では、表 2-6（再掲）に掲げた「PV との連携運転方法」の実現可能性を連携シーケンスの考案などの机上検討と、前章で試験実装した DDS に当該機能を組み込んだでの実験により確認する。

表 2-6 開発・研究すべき課題（再掲）

DR既往研究の分類視点		既往研究・実証の現状	本研究の目的／ポジション	解決すべき課題	
1	When Why	需要抑制型／需要創出型	需要創出手法の確立	・アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法(4) ・PVとの連携運転方法(5)	
		実証事業は、需要抑制型が殆ど			
		需要創出型DR手法は確立されていない 電気学会全国大会件数では、創出型が徐々に増えつつある			
2	Where	建物内DR／広域	広域を対象とする	-	
3	Who	アグリゲーターの関与	電力小売り会社から、他業種まで幅広い業種が副業として実施することを企図	電力小売り会社をアグリゲーターを兼ねる主体として扱う	-
4	What	低圧需要の何を対象としているか ・重点8機器 ・その他（例：家電機器）	DR資源として家電機器を対象とした例はない	充分普及している家電機器を対象とする	DR資源としての家電機器の有意性確認(3)
			低圧需要は、HP（ヒートポンプ式給湯器）、EV（未普及）に研究が集中		家電機器の準備完了状態をアグリゲーターが知る方法(4)
			多数の小規模需要をアグリゲートする手法は確立されていない		アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法(4)
			系統容量と低圧需要の桁の違いが大きすぎる		個々の振る舞いのモデル化(3)と大量にアグリゲートする方法(4)
5	How	Implicit型DR／Explicit型DR	価格誘導型DR（Implicit型）は、価格弾力性が小さく（0.5程度）効果が薄い	Explicit型DRの手法の確立	家電機器に対するExplicit型DRのユーザー受容性の確認(6)
			ユーザーは、割安電気料金部分にあまり関心がない		
			ピーク時の大幅高料金に対する抵抗感が強い		
6	How-2	ADR（Automatic DR）	ADRは、BEMSなどを介したローカルExplicit型DRと理解でき、事業者－需要機器直結Explicit型DRとは異なる	事業者－需要機器直結Explicit型DR	-
7	How-3	IoTの活用	首相の官民対話で話題にはなっているが、まだ殆ど実例はない	IoTを活用する	IoT家電機器を模した実験機の開発(4,7)

カッコ内の数字は章番号

本章の構成を説明する。

- 5.1 節「PV 出力抑制の制度」では、PV 出力抑制の制度の経緯や内容を概説する。
- 5.2 節「PV 出力抑制の技術的概要」では、必要な PV 抑制量をどのように多数の PV に公平に配分するかという問題に主軸を置いて述べる。
- 5.3 節「PV 出力抑制と需要創出スタイルの差異」では、DDS が[W]を単位として動作するのに対して、PV は[パーセント]を単位として動作する差異を埋める方策について検討する。
- 5.4 節「DDS と PV の連携シーケンス」では、需要創出を司る DDS と PV の連携シーケンスを検討する。
- 5.5 節「DDS と PV の連携運転実験システム」では、前節の検討結果を実際の DDS に組み込んで PV と連携する実験システム概要について報告する。
- 5.6 節「DDS と PV の連携運転実験結果」では、前節のシステムを使用した実験の結果について報告する。
- 5.7 節「需要創出と PV システムの動特性に関する考察」では、実験の結果明らかになった需要創出のパターンと、PV の動作特性の差異について考察し、新たな PV(PCS) 動特性を提案する。
- 5.8 節「需要創出の立ち上がりに関する考察」では、創出需要の立ち上がり特性や、通信回線等の障害による不具合への対応について考察する。
- 5.9 節「本章のまとめ」では、本章での検討により表 2-6 に掲げた課題に対して解決の見通しを得たことを報告する。

5.1 PV 出力抑制の制度[1]

PV が急増した結果、電力が余る状態が発生しつつあることは、第 1 章で述べた通りである。このような事態は、東日本大震災の直後の 2012 年に再エネの固定価格買取制度が始まった時から想定はされており、当時から「30 日ルール」というものが定められている。これは、太陽光や風力の発電事業者には、年間 30 日を上限として、無補償で出力制御に応じてもらうというルールである。

しかしながら、再エネ発電の急増に伴い、平成 27 年（2015 年）1 月に経済産業省令が改正され、それまで 30 日までと制限のあった出力抑制（法令上の表現は「出力制御」）の日数制限が撤廃され、九州電力株式会社など、そのような措置が必要と政府から認められた事業者（指定事業者という）は、日数制限なく PV などの出力抑制ができることとなった。これを俗に指定ルールとも呼ぶ（表 5-1）。

表 5-1 PV 出力抑制「指定ルール」[2]

対象	太陽光発電の出力制御ルール
省令改正前の接続済み、連系承諾済み分（注）	500kW以上… 年間30日まで無償で出力制御 500kW未満… 制御なし
省令改正(平成27年1月)以降の連系承諾分	500kW以上… 日数の制限なく無償で出力制御 500kW未満… 日数の制限なく無償で出力制御

注 平成26年9月24日までに申込み済みの低圧分（敷地分割を除く）、平成27年3月31日までに申込みされる低圧10kW未満（余剰買取）分を含む。

5.2 PV 出力抑制の技術的概要[3]

中給は、当日の PV の出力の予想や、需要、火力発電所の状態等を勘案して、もし PV 出力の抑制が必要であれば、それを発動することとなる。PV の出力抑制指令は、PV の定格出力に対する割合[パーセント]で表示されるのが特徴である。

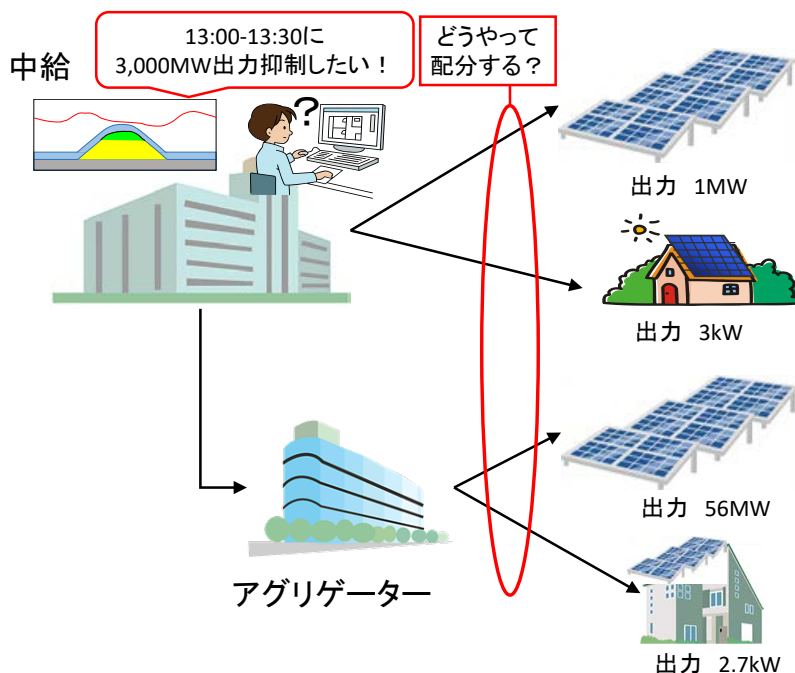


図 5-1 PV 出力抑制指令値の配分に関する問題

PV は、メガソーラーと呼ばれる大規模な設備や、一般家屋の屋根の上にある小規模なものまで、様々なサイズの施設がある。また、本研究が想定しているように、いずれはアグリゲーターの配下に入ると想定されるものもある。

一方、中給が行いたいのは、自社の制御エリア内にある PV 全体に対するマクロな抑制であり、また、その量は当然であるが[kW]の単位で計算されるものである。このため、図 5-1 に示すように PV 出力抑制では、様々な規模の施設が混在している対象に対して、どのようにすれば公平に抑制が実施できるか、という問題が発生する。

この問題に対する解決策として、PV の抑制指令は、PV の定格値に対するパーセントで表現される。ここで、注意すべきは、例えば指令値が 30%となっている場合、定格出力 (= 最大出力) の 30%をカットするのではなく、定格出力の 30%まで出力することが許容される、という意味であることである (図 5-2)。

図 5-3 は、30 分刻みで指令が出される様子の例である。また、図 5-4 は、抑制指令値を中給から各 PV に伝送する通信システムなどの構成を示す。メガソーラーなどは光ファイバーなどの堅牢な通信路が想定されているが、家庭用など小規模で大量に存在する設備には、携帯電話ネットワークやインターネットなど安価なシステムが想定されている。配信のタイミングなどについては細かな規定があるが、ここでは省略する。

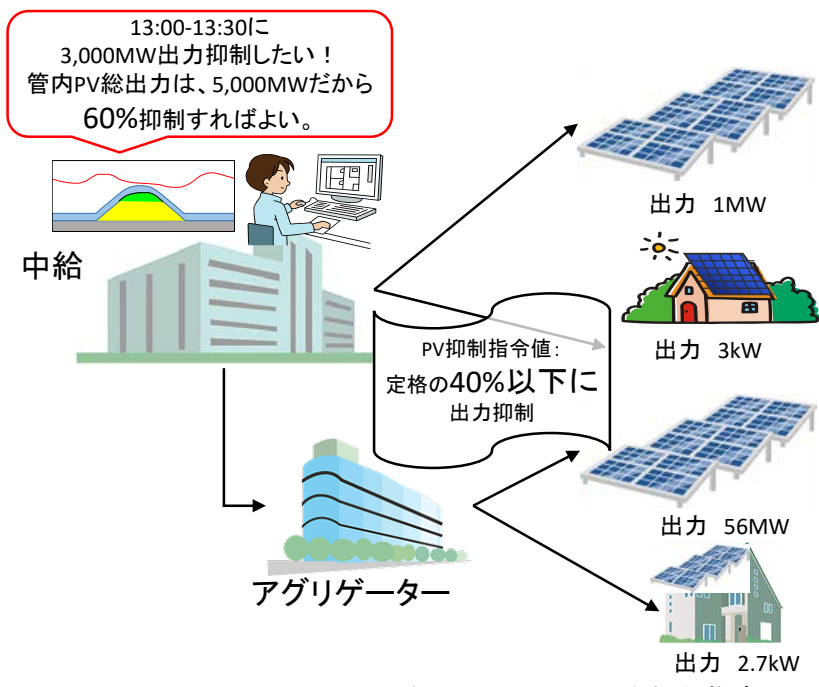
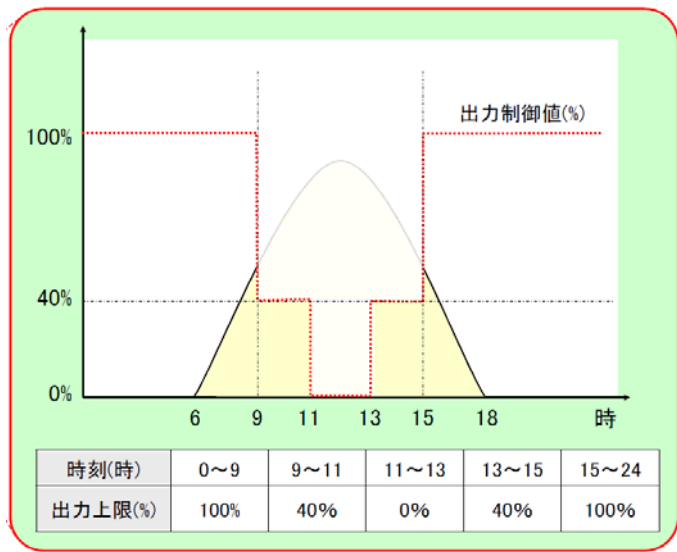


図 5-2 パーセント表示による PV 出力抑制指令



※出力制御スケジュールは30分単位、1%単位で設定が可能

図 5-3 出力抑制の例

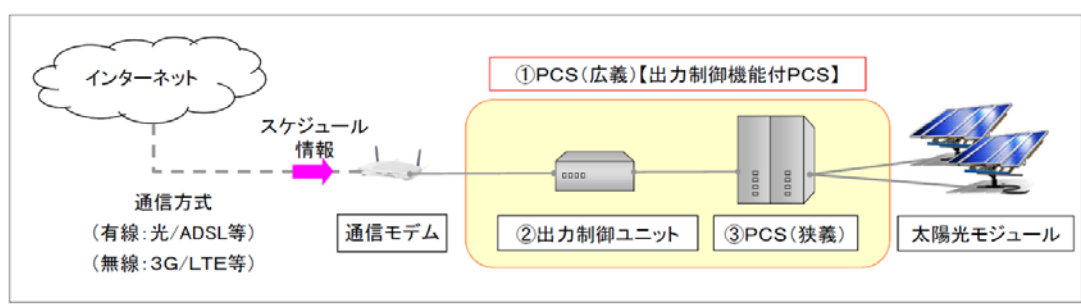


図 5-4 PV 出力抑制の仕組み

5.3 PV 出力抑制と需要創出のスタイルの差異

前節で説明したとおり、PV の出力抑制は、例えば、最大出力の 40[%]までの出力を許容する、といったように%値で指定される。前章で要求仕様を決め、試験実装した DDS による需要創出は、kW や MW など、ワットで取り纏められる。このため、需要創出と PV 抑制緩和の円滑な連携運転には、この%値とワットを繋ぐ運用上の工夫が必要である（図 5-5）。

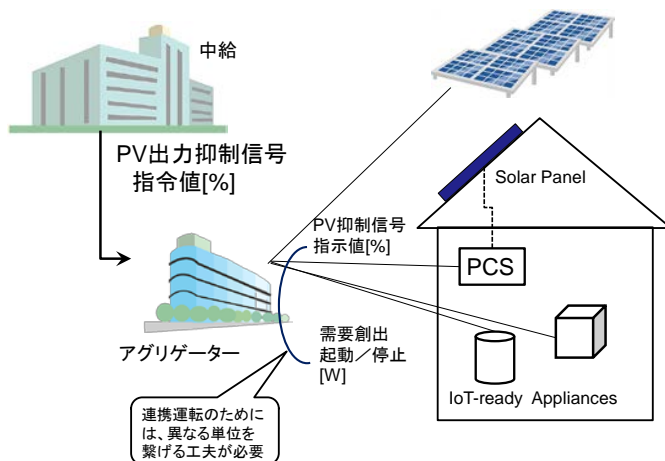


図 5-5 PV 出力抑制と需要創出の単位の差異

これに対しては、筆者は、%pv という単位を考案した。概要を図 5-6 に示す。あるアグリゲーターが、最大出力総和量 A [kW] の PV を顧客として擁していたとする。中給からは、この A [kW] の X [%] までの出力を許容する、として抑制値が送られる。このアグリゲーターが、iDR により追加的に B [kW] の需要を発生させたとする、この B [kW] に相当する分は、PV の抑制を緩和できる。この B [kW] を A [kW] の百分率 Y [%] として表現すれば、 Y を X に直接加えることにより、緩和後の抑制値を直接求めることができる。そこで、この Y [%] を %pv 表現と呼ぶこととし、抑制緩和のパラメーターとして使用することとした。

$$\%pv : \text{対象電力値}[W] / \text{PV の最大出力総和量}[W] \times 100 \quad \dots (4)$$

図 5-6 では、%pv の運用例を示す。12:00 前後に、アグリゲーターが iDR によって、20[%pv] の需要を創出し、もともとは 40[%] の抑制値であったものが、 $40+20=60$ [%] に緩和する場合などを示してある。[%pv] と [%] の相互変換には、変換係数 1 を乗ずればよい。

なお、中給からの抑制値は、慣例的に「抑制指令値」と呼ばれている。アグリゲーターは、これに自らの需要創出などを加味した数値を送出することとなるため、混乱を避けるために「抑制指示値」という文言を筆者は使用して実験した。

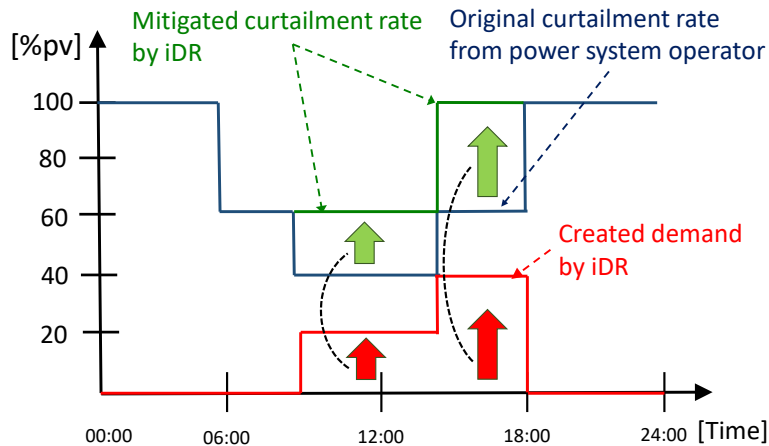


図 5-6 PV 抑制緩和の概念図

5.4 DDSとPVの連携シーケンス

中給、アグリゲーター (iDR アプリケーション)、家電機器、PV の各要素間の信号のやり取りを示すシーケンスチャートを図 5-7 に示す。本図は、第 4 章で試験実装したデマンドディスパッチシステム(DDS)に PV への信号送出機能を加えたものである。

本図では、例として、中給からの抑制指令値は、30 分に一回発出されることを想定したが、アグリゲーターは家電機器の組み合わせ方などで、より細かい時間間隔での調整が可能であるため、図 5-7 では、3 倍の頻度で家電機器や PV に対して信号を送出する様子を描いてある。このような連携シーケンスを DDS に組み込むことにより、需要創出と PV の連携が可能となる。

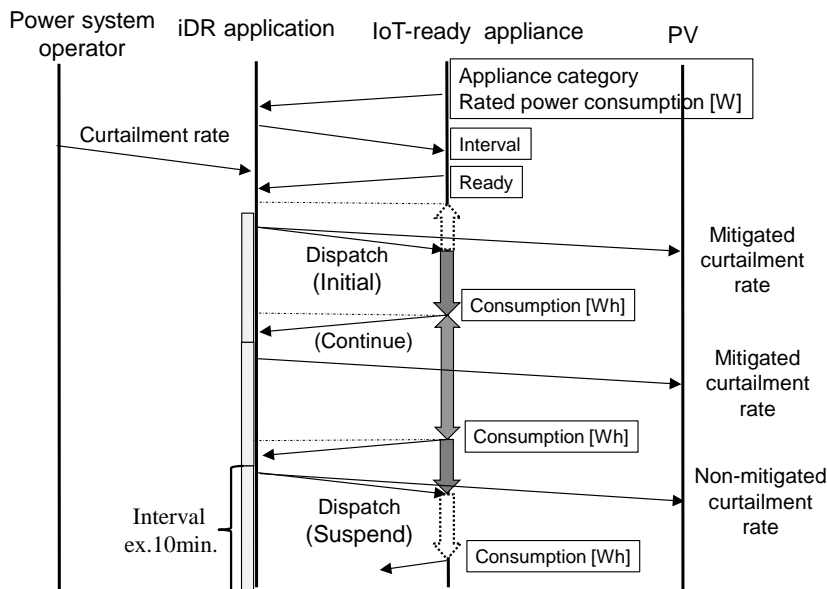


図 5-7 PV 抑制緩和機能を盛り込んだシーケンスチャート

5.5 DDSとPVの連携運転実験システム

筆者は、第 4 章で、家電機器をインターネット経由で起動/停止する DDS を試験的に実装し、その動作特性を検討した。本節では、この DDS に創出需要に応じた緩和後の PV 抑制信号を送出する機能を付加し、実際の PV と接続して行った連携動作実験を報告する。

COMMA ハウスの PV システムを使用して行った実験の構成概要を図 5-8 に示す。システムは、その概要を図 5-8 に示したように iDR アプリケーションが全体を司る構成となっ

ている。実際の需要として、炊飯器、布団乾燥機、電動自転車のバッテリー充電器を用意した。PV に対する抑制は、前述の通り広域での需要創出に応じて行う前提のため、前出の家電機器 3 台では少なすぎるため、仮想的な家電機器による需要のデータベース（以下、DB）を用意して需要を創出した。

なお、図 5-8 は、ゲートウェイ（以下、GW）が 2 台用意されているが、第 3 章に述べたとおり iDR は、多数の需要家における創出需要を取り纏めるものであるため、実験も複数の実験ハウスで行えるようにしており、それぞれの GW 以下を分離移動しても実験できる仕様にしてある。

今般の実験では、中給からの抑制指令値は、iDR アプリケーションにパラメーターとして与える形態を取り、実験のシンプル化を図っている。

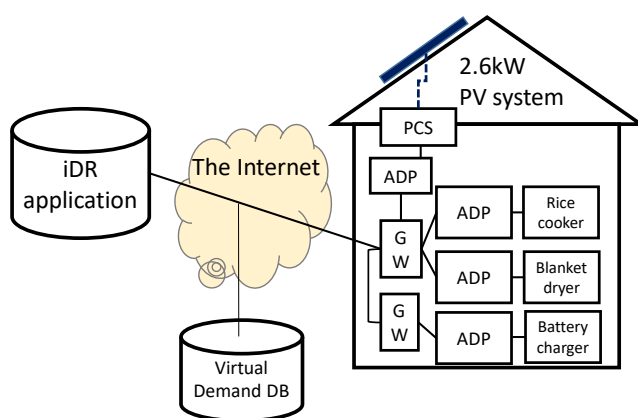


図 5-8 実験システムの概要

以降に、第 4 章に示したものの以外の実験要素について、第 4 章と同様にレイヤ分けして記載する。

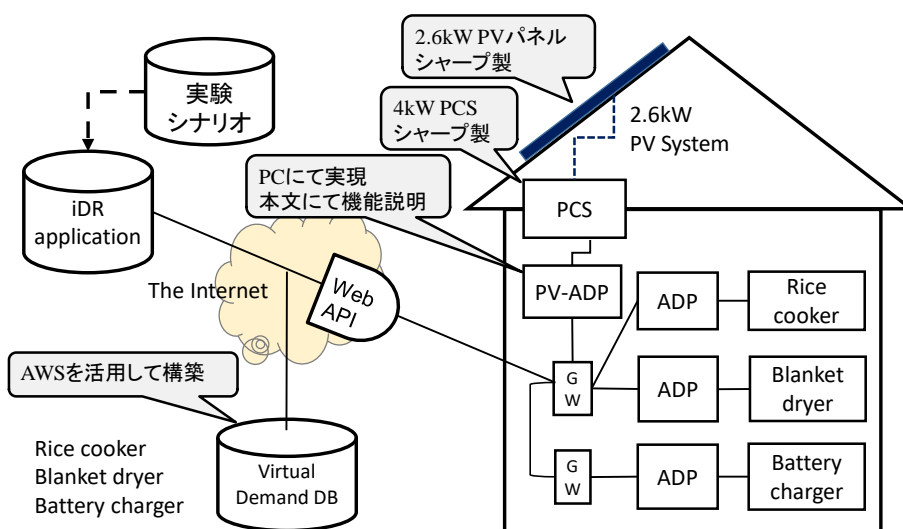


図 5-9 実験システム（物理層）

図 5-9 に示すように、ハードウェアで特徴的なのは、太陽光発電パネルが 2.6kW、PCS 容量は 4kW であり、全体として 2.6kW の PV システムということである。抑制指示値が仮に 60% であるとする、このシステムは 1.56kW を出力してしまい、本来の抑制レベルにならない。このため、PV システムの通信を司る PV-ADP で、受け取った指示値に対して $65\% (= 2.6 \div 4)$ を乗じて正しい抑制値で動作する変換を行っている。

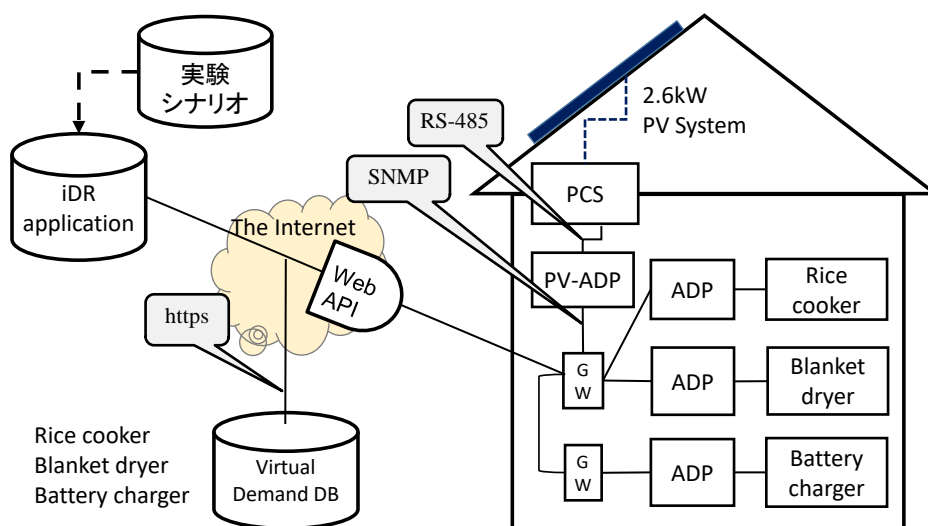


図 5-10 実験システム (プロトコル層)

図 5-10 は、実験システムのプロトコル層を表す。プロトコルについては、市販品と同一のものを使用している。

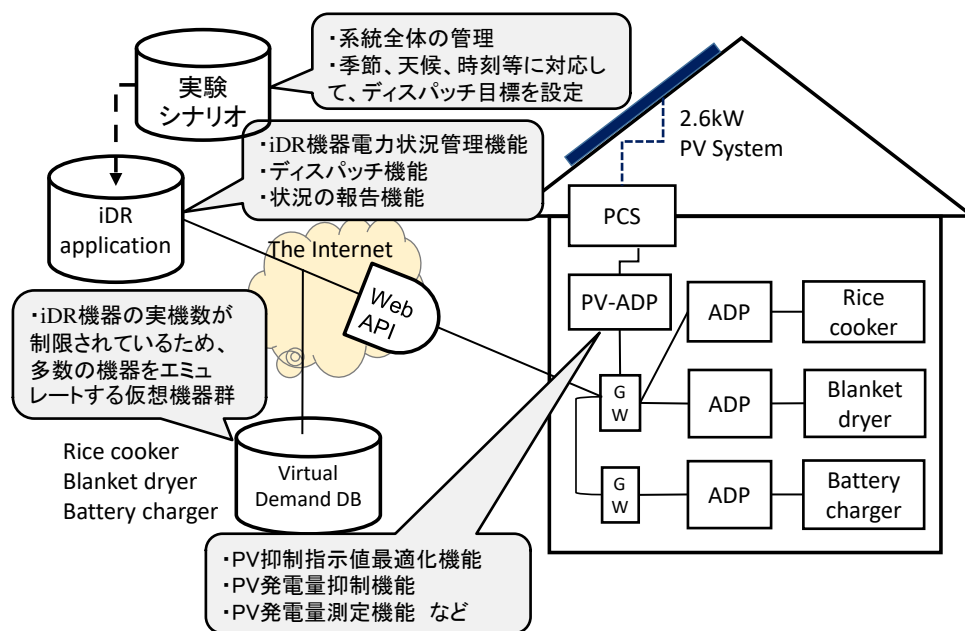


図 5-11 実験システム (アプリケーション層)

図 5-11 は、実験システムのアプリケーション層である。PV-ADP では、先に述べた物理層の 2.6kW と 4kW の違いを吸収する最適化はここで行っている。

iDR アプリケーションは、第 4 章で述べた機能に加え、創出需要を勘案した抑制指示値を作成し、PV システムに送る機能を有する。

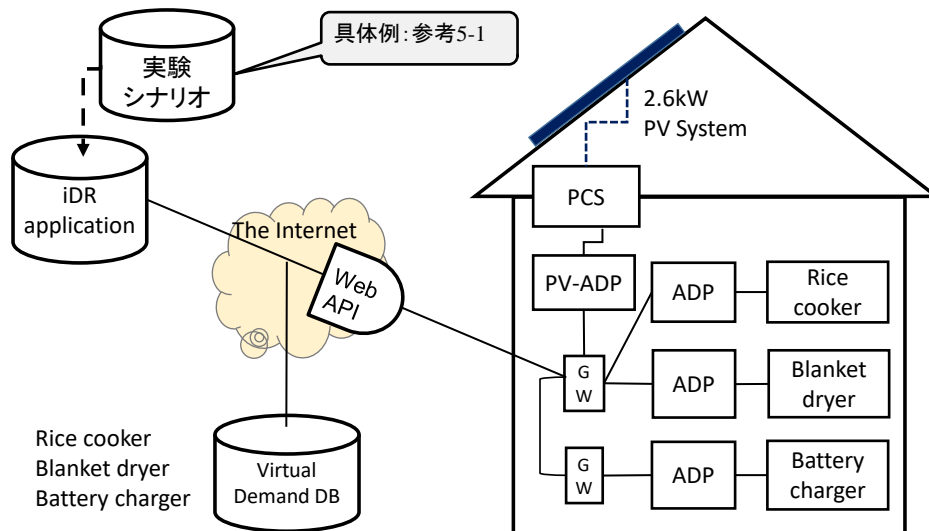


図 5-12 実験システム (サービス層)

図 5-12 は、実験システムのサービス層である。次節に示す実験シナリオが iDR アプリケーションに与えられ、一連の動作が始まる。実験そのものの進み具合については、次節に述べる。

5.6 DDSとPVの連携運転実験結果

実験結果を、表 5-2、図 5-13、5-14、5-15 に示す。

表 5-2 実験諸元 (実験シナリオ)

Index	Dispatch interval (Time)	From	10:00	10:10	10:20	10:30	10:40	10:50
		To	10:10	10:20	10:30	10:40	10:50	11:00
a	Assumed PV output (100% : 302.6kW)	kW	257	242	242	227	212	197
b		%pv	85%	80%	80%	75%	70%	65%
c	Original curtailment rate (Power System Operator ⇒ Aggregator)	%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
d	Target dispatch volume (Determined by aggregator)	kW	61	61	182	166	151	136
e		%pv	20%	20%	60%	55%	50%	45%
f	Actual dispatch volume	kW	73	51	192	162	177	128
g		%pv	23%	16%	63%	53%	58%	42%
h (=c+g)	Mitigated curtailment rate (Aggregator ⇒ PV)	%	43%	36%	83%	73%	78%	62%
		%PV: Percentage based on 302.6kW						

表 5-2 は、実験の際の各パラメーターや、実際の時刻などを記録した、いわば実験シナリオである。想定値は、実験のための例であって、それ以外の特別な意味はない。一連の動作は、10分を一単位（以下、コマ）として、需要の創出や、それに伴う抑制値を変化させ、6コマ 60分で完了する。

この実験シナリオでは、アグリゲーターは、302.6kWのPVを擁していると仮定している。そして、過去の実績などから、各コマでは、a行に示す出力が想定できるとしている。表 5-2では、正午に向かって出力が下がる傾向が見えるが、これは実際の実験を行った時刻であって、シナリオが想定した午後遅くではないため、このような不自然さが発生している。b行は、a行を%pv表記にしたものである。

c行は、中給からの抑制指令値の例である。そして、d行は、アグリゲーターが自社の顧客の状況等を勘案して決定した創出需要の目標量であり、それを%pv表示にしたのがe行である。

アグリゲーターは、家電機器をディスパッチして、需要を創出するが、実際には待ち受け状態になっている家電機器の数量や、一度に起動する機器数の纏め方などにより、目標値とはズレが生ずる。実際に取りまとめられた需要量を表しているのが、f行(kW表示)、g行(%pv表示)である。

最終的に、アグリゲーターは、c行の中給からの抑制指令値に、自らの創出需要に応じた緩和量を上乘せしたc+g行の抑制値を指示値として、自社の顧客のPCSに送出する。

図 5-13 は、iDRアプリケーションが、ディスパッチした家電機器の内訳を示している。

図 5-13 に示すように、この実験のiDRアプリケーションは、布団乾燥機や炊飯器など家電機器の中では比較的電力消費量が多いものをベースの需要としてまず起動し、バッテリー充電器のような起動/停止が比較的自由に、調整的に活用できるものをピーク部分を担うものとして扱うロジックのため、このような積み上げになっている。

これら創出需要の量を時系列的に並べ、また、コマ毎の抑制指令値と抑制指示値を表示したのが、図 5-14 である。これにより、抑制指令値に%pvで表した需要量が上乘せされ、抑制指示値となっていることが判る。図 5-14 の抑制指示値は、iDRから送出された値を示している。

上記の抑制指示値が PCS にて受信された場合、PCS は、その値に従って、出力の上限値を規定することとなる。その様子を示したのが図 5-15 である。このグラフで判る通り、実際の PCS の出力上限値は、受信した抑制指示値に遅れて応答している。これは、現行の市販 PCS の仕様[3]として規定されているものである。これは、大量の PCS がその出力を急変させた場合、電力システムに対しては擾乱として作用してしまうため、それを回避するために設けられた仕様である。

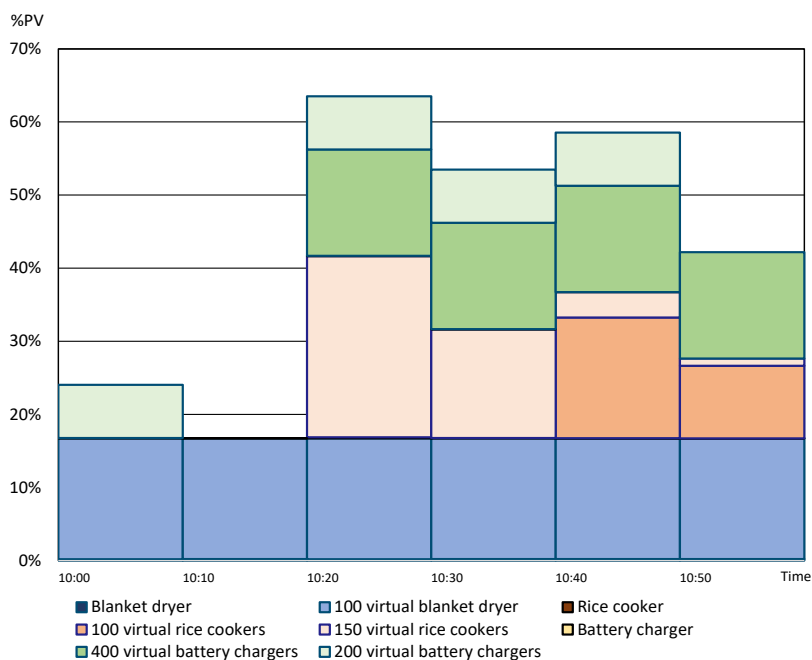


図 5-13 需要創出状況

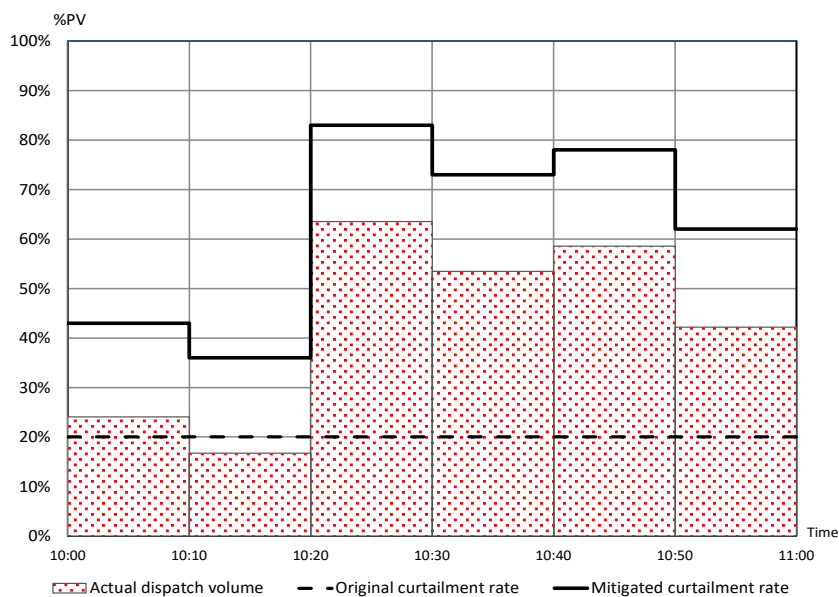


図 5-14 ディスパッチ量と抑制緩和の状況

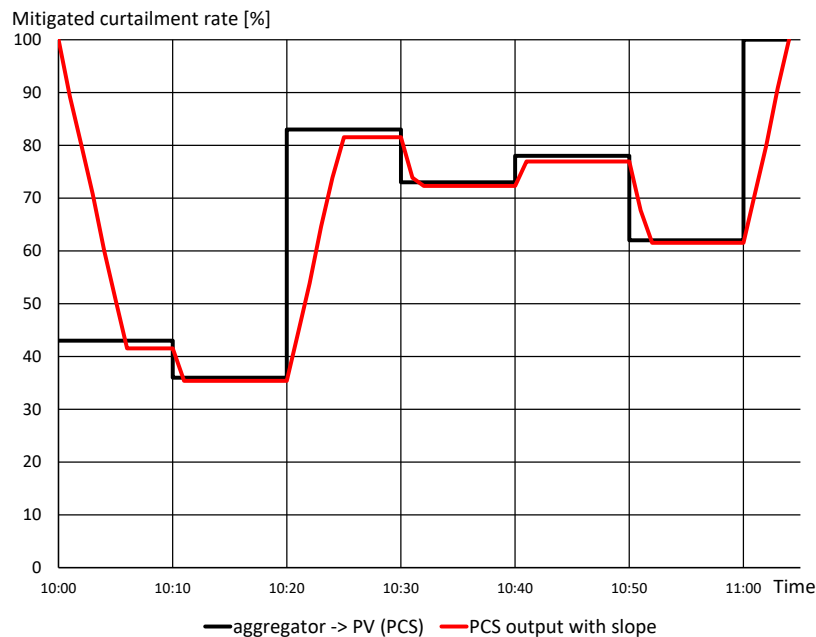


図 5-15 抑制指示値と PCS 動作の状況

5.7 需要創出と PV システムの動特性に関する考察

前節で現行 PCS の抑制応答特性 (以下、スロープ特性) についての実験結果を示したが、需要創出を伴う場合、この特性はいわば副作用的な影響を発生させる。すなわち、DDS により需要は矩形的に発生させることができるが、それに対応する電力を発生させる PV はそれと一致した動作ができないということである。この差分は、規模にもよるが、集中電源の運用にしわを寄せることとなるため、回避できることが望ましい。

このことを図 5-16 に再整理した。図中④で表した差分は、需要過多になり、⑤は発電過多になる。この差分をゼロにする方法は二種類あり、需要の形をスロープに合わせるか、PCS の出力特性を需要の形に合わせるかである。

この技術の目的は、PV の出力抑制緩和であるから、本来、抑制を緩和する方向、すなわち④のケースで使用されるものである。このことに鑑みると、需要の形をスロープに合わせてしまうと、せっかく需要を創出できるにも関わらず、それをせず、かつ、PV に出力を許可しないということになる。これは、図 5-16 の網掛けした部分相当だけ緩和量が小さくなることを意味する。逆に、矩形的な需要の形に、PCS のスロープ特性を合わせることであれば、再エネ使用が増えることとなり、本来の目的に適う。このため、今後の仕様の方向性としては、需要創出を伴う際は、このスロープ特性を停止することが適切と考える。

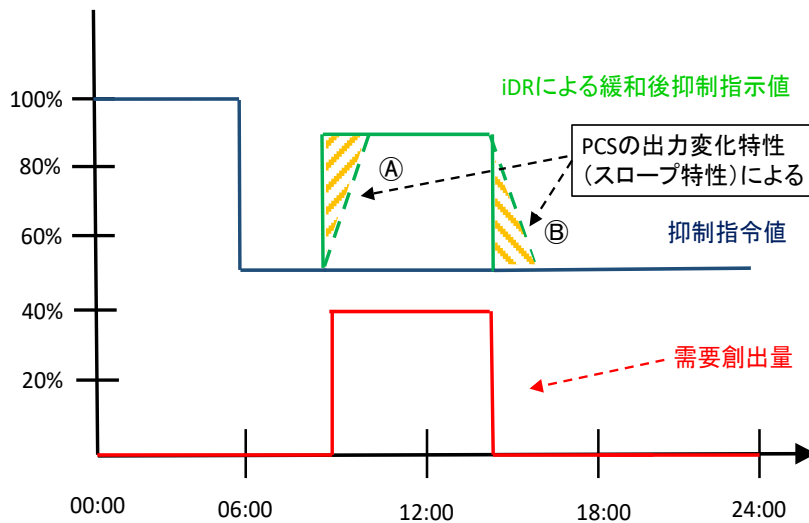


図 5-16 特性の差異による需要の過不足

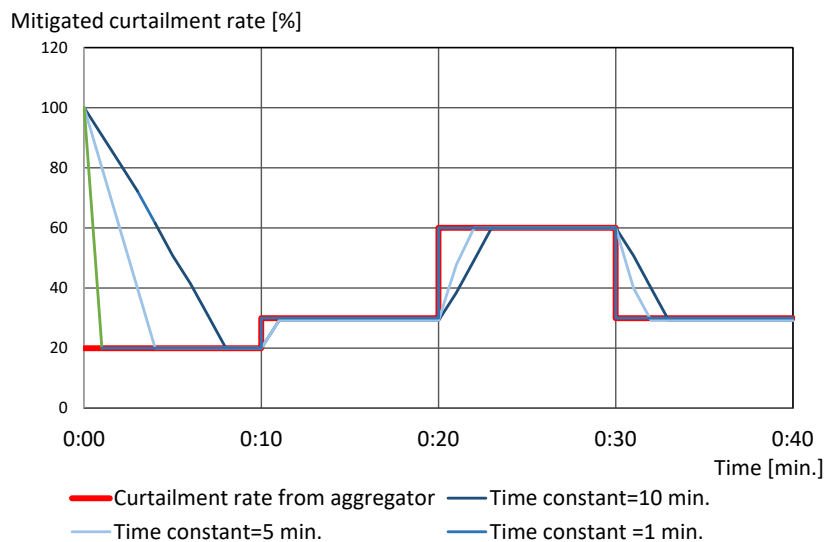


図 5-17 PCS のスロープ時定数変化実験結果

このような考えに立ち、現行の PCS が、どのような潜在的特性を有しているのか、実験に使用した PCS (以下、PCS 実機) を例として調査した。スロープ特性は、抑制値が 100% 変化するのに要する時間 (以下、時定数) によって規定される。PCS 実機は、設置工事の際に、この実定数を 5 分~10 分までデフォルト値として設定できる仕様であった。また、実験のために使用した制御用ソフトウェアからは、時定数 0 分の設定も可能である。実際に、時定数を 1 分、5 分、10 分と変えて抑制値の応答を観察した結果を図 5-17 に示す。

以上のことから、全ての PCS で可能かどうかは不明ではあるが、既存 PCS には時定数を変化させる潜在能力があることが判った。

PV の抑制値を変化させる際、需要創出を伴う場合は、抑制緩和によって増加した発電電力は創出需要によって消費されてしまうため、理論的には電力系統に擾乱を与えない。しかし、需要創出を伴わない場合は、前述のとおりこれは擾乱となり得る。現行仕様は、この後者に対して有効に機能していると考えられることから、PCS の時定数は、需要創出を伴うか否かで、アグリゲーターが適応的にその値を変化させることができる仕様にするのが望ましい。

筆者は、この PCS の動特性を適応的スロープ制御 (Adaptive Slope Control) と仮称し

て検討している。図 5-18 にその動作の概念図を示す。アグリゲーターから PCS に対し時定数を適宜送信できるようにし、需要創出を伴うか否かで、その時定数を適応的に変えるものである。本仕様案は、有用性が高いものと考えられるため、次世代の PCS 動特性仕様の議論の際には、ぜひ検討されることを期待する。

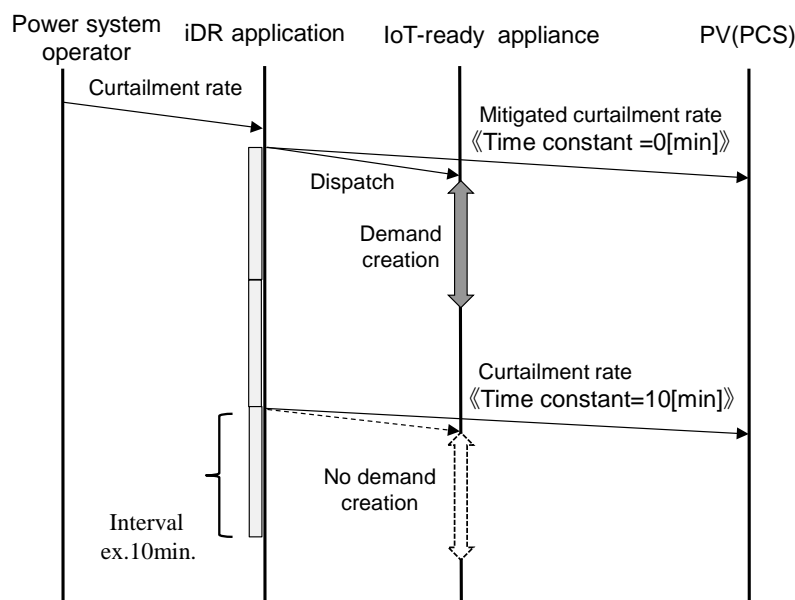


図 5-18 PCS へのスロープ時定数送信チャート

5.8 需要創出の立ち上がりに関する考察

本章では、需要は矩形的に立ち上がるという前提で議論しているが、4.12.2 に示したように、需要としては徐々に立ち上がるものや、食洗器の例に見るように、起動暫くはミストを噴射していて本格的な電力消費が発生しない、など様々な特性がある。これらに適切に対応するためには、4.13.3 に述べたようなビッグデータ活用による予測値を使用することが、最も合理的と考えられる。

一方、通信回線の不調や、家電機器そのものの故障などによって、起動/停止ができない場合や、実際には起動/停止したものの、通信回線の不調によってアグリゲーターがそれを把握できないこともあり得る。

本研究で試験実装した実験システムは、10 分などのコマ幅毎に実績値を把握できる仕組みになっている。通信回線に由来する問題については、アグリゲーターは長期に亘って、自身がディスパッチした量と、実際に創出できた量を常に比較し、いわゆる歩留まりを管理することによって、創出需要量やその立ち上がり特性などを把握し、サービス品質の向上が図れると考えられる。

5.9 本章のまとめ

5.9.1 DDSとPVの連携運転実験による課題解決

本章では、前章で試験実装した DDS をベースとして、PCS との連携運転を実験し、%pv と仮称する単位の変換により、円滑に連携運転が可能である見通しを得るとともに、この仕組みの実現可能性を確認した。これにより、表 2-6 に掲げた「PV との連携運転方法」という課題はこの方法により解決できることが確認された。

さらに、現行 PCS のスロープ特性が需要創出特性とマッチしない部分があることを見出し、PCS の動特性として、時定数を適応的に変える機能の追加を提案した。

5.9.2 今後の課題

PCS の時定数を切り替えられる機能については、COMMA ハウスに設置されたあるメーカーの製品については確認できたが、外国製を含む他のメーカーのものについては、不明である。他のメーカー製についても、潜在的能力としてこの機能についても調べる必要がある。

参考 5-1 実験シナリオ例

```
#####
# 開発テスト用 シナリオ
#####

#####
# コマンドリスト
#####

#####
#####
# 環境初期化は最初にコールすること
#
#####
#####
# ○環境初期化 (drID、ディスパッチ間隔分)
#                               基準時刻は現在時刻の次の分の 00 秒となる
#####
#####
# ○環境初期化時刻指定 (drID、ディスパッチ間隔分、基準時刻 YYYYMMDDHHMM)
#####
#####

#####
#####
# ○想定 PV 出力相対設定 (基準時刻から何分後開始、PV 出力ファイル名)
#                               開始は次のディスパッチ時刻となる、ディスパッチ間
#                               隔分が 15 分であれば、0,15,30,45 分に起動する
#####
#####
# ○想定 PV 出力時刻設定 (開始時刻 YYYYMMDDHHMM 開始時刻
#                               YYYYMMDDHHMM、PV 出力ファイル名)
#####
#####

#####
#####
# ○iDR 機器値域設定 (家番号、機器番号、設定文字列)
#####
#####
# ○iDR 機器全値域取得 (家番号、機器番号)
#####
#####
# ○iDR 機器イベント通知 (家番号、機器番号)
#####
#####

#####
#####
# ○PV 抑制相対指示 (基準時刻から何分後開始、継続コマ数、抑制%、抑制緩和制限%、
#                               強制需要創出%)
```

```

#                               開始は次のディスパッチ時刻となる、ディスパッチ間
隔分が 15 分であれば、0,15,30,45 分に起動する
#                               「抑制緩和制限%」 と「抑制%」と比較して大きい方（抑制量
が小さい方）が目標となる
#####
#####
# ○PV 抑制時刻指示（開始時刻 YYYYMMDDHHMM、継続コマ数、抑制%、抑制緩和制
限%、強制需要創出%）
#####
#####

#####
#####
# ○サーバパラメータ設定（base 割合、pead 割合、スマート機器接続サーバタイムアウト
秒、ディスパッチプロセス停止、サスペンド時想定残量%）
#####
#####

#####
#####
# ○仮想機器相対起動（家番号、機器番号、何分後登録、何分後キャンセル、何分後自律動
作開始、電力ログファイル名、時刻ばらつき秒、電力ばらつきパーセント、予想電力通知フ
ラグ）
#                               各時刻は基準時刻からの遅延、ディスパッチ時刻に関
係なく設定される
#####
#####
# ○仮想機器時刻起動（家番号、機器番号、登録時刻 YYYYMMDDHHMM、キャンセル時
刻 YYYYMMDDHHMM、自律動作開始時刻 YYYYMMDDHHMM、電力ログファイル名、
時刻ばらつき秒、電力ばらつきパーセント、予想電力通知フラグ）
#####
#####

#####
#####
# ○仮想 PCS 相対起動（家番号、機器番号、今から何分後開始、PV 出力ファイル名、100%
出力、電力ばらつきパーセント）
#                               開始は次のディスパッチ時刻となる、ディスパッチ間
隔分が 15 分であれば、0,15,30,45 分に起動する
#####
#####
# ○仮想 PCS 時刻起動（家番号、機器番号、開始時刻 YYYYMMDDHHMM、PV 出力フ
ァイル名、100%出力、電力ばらつきパーセント）
#####
#####

#####
#####
# ○仮想ランプ PCS 相対起動（家番号、機器番号、今から何分後開始、PV 出力ファイ
ル名、100%出力、電力ばらつきパーセント、ランプパーセント/分）
#                               開始は次のディスパッチ時刻となる、ディスパッチ間
隔分が 15 分であれば、0,15,30,45 分に起動する

```

```

#                      ランプパーセントが0の場合はランプ無し
#####
#####
# ○仮想ランプ PCS 時刻起動 (家番号、機器番号、開始時刻 YYYYMMDDHHMM、PV 出
カファイル名、100%出力、電力ばらつきパーセント、ランプパーセント/分)
#####
#####

#####
# ○相対待機 (待機分)
#####
# ○時刻待機 (時刻 YYYYMMDDHHMM)
#####

#環境初期化 (最初に行う)、DRid、ディスパッチ間隔設定、基準時刻現在の次の分
環境初期化,100,10

#ディスパッチプロセス停止、base 割合、pead 割合、スマート機器接続サーバタイムアウ
ト秒、ディスパッチプロセス停止、サスペンド時想定残量%)
サーバパラメータ設定,0.5,1,5,true,50

#開始遅延分、発電電力リスト
想定 PV 出力相対設定,2,PVoutput_1430.txt

#家番号、機器番号、今から何分後開始、PV 出力ファイル名、100%出力、電力ばらつきパ
ーセント、ランプパーセント/分
iDR 機器値域設定,503,15,E00100
仮想ランプ PCS 相対起動,503,15,2,PVoutput_1430.txt,300000,0,10

#ディスパッチプロセス開始、base 割合、pead 割合、スマート機器接続サーバタイムアウ
ト秒、ディスパッチプロセス開始、サスペンド時想定残量%)
サーバパラメータ設定,0.5,1,5,false,50

#基準時刻から何分後開始、継続コマ数、抑制%、抑制緩和制限%、強制需要創出%)
PV 抑制相対指示,2,6,20,100,0
PV 抑制相対指示,2,2,20,20,0

#家番号、機器番号、開始遅延分、キャンセル遅延分、自動起動遅延分、電力ログ、開始ば
らつき秒、電力ばらつき%、予想電力有無
仮想機器相対起動,508,1,0,90,150,Power_futon100.txt,0,0,true
仮想機器相対起動,508,3,0,90,150,Power_cooker100.txt,0,0,true
仮想機器相対起動,508,4,0,90,150,Power_cooker150.txt,0,0,true
仮想機器相対起動,508,6,0,90,150,Power_cyclebatt200.txt,0,0,true
仮想機器相対起動,508,7,0,90,150,Power_cyclebatt400.txt,0,0,true

```

第 5 章 参考文献・資料・出典

- [1] 資源エネルギー庁 Web サイト
http://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/qa_syutoryokuseigyo.html
- [2] 九州電力株式会社ホームページ
http://www.kyuden.co.jp/functions_inquire_faq_recyclable-energy_part_resume_03.html
- [3] 一般社団法人日本電機工業会ホームページ（2018/6/1 アクセス確認）
<https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/dispersed/data/pcs.pdf>

第6章 ユーザー受容性調査

本章では、表 2-6 (再掲) に掲げる「家電機器に対する Explicit 型 DR のユーザー受容性の確認」について検討する。

表 2-6 開発・研究すべき課題 (再掲)

DR 既往研究の分類視点			既往研究・実証の現状	本研究の目的/ポジション	解決すべき課題
1	When Why	需要抑制型/需要創出型	実証事業は、需要抑制型が殆ど	需要創出手法の確立	・アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法(4) ・PVとの連携運転方法(5)
			需要創出型 DR 手法は確立されていない		
			電気学会全国大会件数では、創出型が徐々に増えつつある		
2	Where	建物内 DR / 広域	電気学会全国大会件数では、広域型が徐々に増えつつある	広域を対象とする	-
3	Who	アグリゲーターの関与	電力小売り会社から、他業種まで幅広い業種が副業として実施することを企図	電力小売り会社をアグリゲーターを兼ねる主体として扱う	-
4	What	低圧需要の何を対象としているか ・重点8機器 ・その他 (例: 家電機器)	DR 資源として家電機器を対象とした例はない	充分普及している家電機器を対象とする	DR 資源としての家電機器の有意性確認(3)
			低圧需要は、HP (ヒートポンプ式給湯器) , EV (未普及) に研究が集中		家電機器の準備完了状態をアグリゲーターが知る方法(4)
			多数の小規模需要をアグリゲートする手法は確立されていない		アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法(4)
			系統容量と低圧需要の桁の違いが大きすぎる		個々の振る舞いのモデル化(3)と大量にアグリゲートする方法(4)
5	How	Implicit 型 DR / Explicit 型 DR	価格誘導型 DR (Implicit 型) は、価格弾力性が小さく (0.5 程度) 効果が薄い	Explicit 型 DR の手法の確立	家電機器に対する Explicit 型 DR のユーザー受容性の確認(6)
			ユーザーは、割安電気料金部分にあまり関心がない		
			ピーク時の大幅高料金に対する抵抗感が強い		
6	How-2	ADR (Automatic DR)	ADR は、BEMS などを介したローカル Explicit 型 DR と理解でき、事業者-需要機器直結 Explicit 型 DR とは異なる	事業者-需要機器直結 Explicit 型 DR	-
7	How-3	IoT の活用	首相の官民対話で話題にはなっているが、まだ殆ど実例はない	IoT を活用する	IoT 家電機器を模した実験機の開発(4,7)

カッコ内の数字は章番号

第 2 章にも述べた通り、DR は、電力需給の状況など供給側の都合だけでなく、ユーザー側が受け入れなければ成り立たない。すなわち、供給側、需要側それぞれからの制約条件の板挟みになっているのが、DR である (図 6-1)。当然、本研究が想定しているアグリゲーターによる Explicit 型需要創出 DR のユーザー受容性についても確認が必要である。

そこで、本章では、ユーザーに簡易なインタビューを試み、受容性について基礎的な調査をした。以下に本章の構成を説明する。

6.1 節「ユーザー受容性調査の必要性」で、実施の動機を説明する。

- 6.2 節「調査方法」では、なぜこの調査方法を選んだのかを説明する。特に、PV 余剰発電などほとんど一般消費者に知られていない実態を背景とした研究であるため、それにふさわしい調査方法の必要性を説明する。
- 6.3 節「調査結果」では、インタビューの結果を報告する。
- 6.4 節「家電機器性能に関する考察」では、家庭内の家電機器の動作時間帯に関して考察する。
- 6.4 節「コミュニケーションに関する考察」では、本章でのインタビューなどの際に、相手方に具体的イメージを伝える方法について考察する。
- 6.5 節「本章のまとめ」では、前節までの研究活動を総括する。

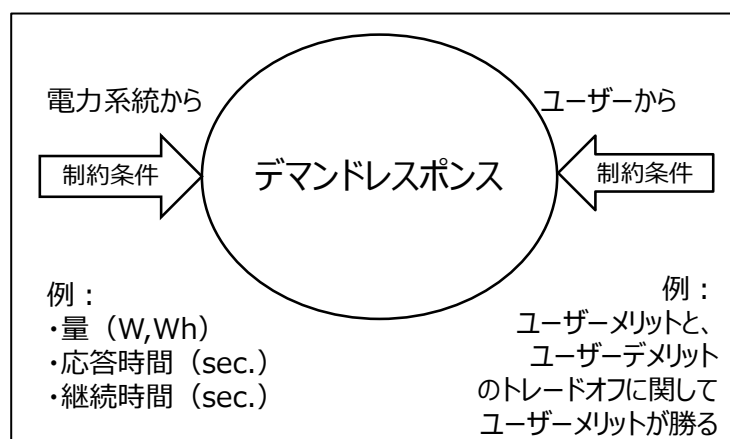


図 6-1 DR に対する両側からの制約条件

6.1 ユーザー受容性調査の必要性

我が国は、いうまでもなく資源小国であり、一次エネルギー源にも乏しく、エネルギーに関する議論は、省エネ／節電を旨とする供給側の論理が強いように感ずる。しかし、エネルギーは、俗に“使ってなんぼ”と言われるように、使って初めて便益に繋がるものであることは間違いない。従って、省エネ／節電や、再エネ積極利用に繋がる仕組みや製品であっても、ユーザーが受け入れて、使わなければそれは社会的意味がない。

本研究に関しては、学会などでの意見交換で、「家電機器をアグリゲーターが操作することなど、ユーザーが受け入れるとは思えない」という声を聴くことが多い。しかし、炊飯器や洗濯機などは、ユーザーがそれそのものを操作することが目的ではなく、炊飯や洗濯という便益を得るために使用しているものである。このため、iDR についても、ユーザー受容性の有無について調べることが必要との認識に立ち、一般の方々を対象にインタビューを行った。

6.2 調査方法

筆者は、このような仕組みの実現可能性を検討するために、ユーザー自身が使用する家電機器を、アグリゲーターが起動／停止することを想定した場合、その受容可否に関する、簡易なインタビュー調査を実施した。

対象とする家電機器については、PV の余剰発電が発生するタイミングで起動／停止できる必要があることから、第 3 章で検討した結果を踏まえて設定した。調査にあたっては、多量の PV により電力が極めて潤沢になる時期や時間帯の存在や、なぜ、アグリゲーターが家電機器を起動／停止するのか等、この考えの背景を十分に説明する必要がある。このため、調査方法は、一般的な Web アンケートの手法は採らず、対象数は少なくなるものの、十分な意思疎通が可能なインタビュー方式（参考 6-1）とした。

インタビュー対象者（以下、被検者）は19人である（表6-1）。①専業主婦（主に20、30歳代/5名）、②専業主婦（主に40歳代/3名）、③共働きの女性（5名）、④単独世帯の男性（3名）、⑤単独世帯の女性（3名）の5グループとし、5回に分けてインタビューした。インタビューに際しては、iDRを推すような発言にならないよう注意した。

調査に際しては、全て書面による目的等の説明を行い、書面による同意を得ている。

表6-1 被検者属性

カテゴリ	ID	性別	年代	家族構成
専業主婦	ID01	女性	20代	3人家族
	ID02	女性	20代	3人家族
	ID03	女性	30代	3人家族
	ID04	女性	30代	3人家族
	ID05	女性	30代	3人家族
	ID06	女性	40代	4人家族
	ID07	女性	40代	5人家族
	ID08	女性	40代	4人家族
共働き	ID09	女性	30代	3人家族
	ID10	女性	30代	4人家族
	ID11	女性	30代	2人家族
	ID12	女性	40代	3人家族
	ID13	女性	40代	2人家族
単独世帯	ID14	男性	20代	1人暮らし
	ID15	男性	30代	1人暮らし
	ID16	男性	30代	1人暮らし
	ID17	女性	20代	1人暮らし
	ID18	女性	30代	1人暮らし
	ID19	女性	40代	1人暮らし

6.3 調査結果

結果を表6-2に示す。在宅率の相違なども想定し、平休日別、時間帯別の受容性を聞いた。

結果として、このようなアグリゲーターからの家電機器の起動/停止に対して、かなりの受容性が示された。これは、安価な電力への期待や、環境貢献の機会獲得がその背景にあると思慮される。

一方、他の家電機器に比べて、かなりの拒否反応が確認されたのが炊飯器である。インタビューでも炊きたてに対する要望が多く聴かれた。また、洗濯機については、iDR化の受容性があるのは、乾燥機付きのものに限られ、洗濯機能のみで濡れたままの洗濯物が放置されることは全く受容性がなかった。

インタビュー調査を通じ、そもそも、家庭に届いている電力にPV由来のものが含まれているということは、殆ど認識されていない、という実態が判った。PVについては、固定価格買取制度についての関心が聴かれただけであり、PVにより電力に余剰があるタイミングが存在することは殆ど知られていなかった。

また、ある子持ちの被検者から、家電機器の電源コードが子供の安全に対する脅威になるとの懸念と、その回避のために、多様な家電機器のバッテリー駆動化を期待する意見があり、当該グループの他の被検者から強い同意があった。バッテリー駆動化は、iDR対象家電機器の増加にも繋がることから、興味深い意見である。

表 6-2 インタビュー結果

家電機器	【上段】平日／【下段】土日					
	常時OK	応答時間帯に制約あり				常時NG
	10～18時	10～12時	12～14時	14～16時	16～18時	10～18時
洗濯乾燥機	84%	0%	0%	0%	0%	16%
	84%	0%	0%	0%	0%	16%
炊飯器	37%	0%	0%	0%	10%	53%
	53%	0%	0%	0%	10%	37%
電動自転車	100%	0%	0%	0%	0%	0%
	100%	0%	0%	0%	0%	0%
卓上食洗機	89%	11%	0%	0%	0%	0%
	89%	11%	0%	0%	0%	0%
ビルトイン食洗機	89%	11%	0%	0%	0%	0%
	89%	11%	0%	0%	0%	0%
浴室乾燥機	95%	0%	0%	0%	0%	5%
	95%	0%	0%	0%	0%	5%
布団乾燥機	89%	0%	0%	0%	0%	11%
	89%	0%	0%	0%	0%	11%
ズボンプレッサー	89%	0%	0%	0%	0%	11%
	89%	0%	0%	0%	0%	11%
空気清浄機	89%	0%	0%	0%	0%	11%
	89%	0%	0%	0%	0%	11%
生ごみ処理機	100%	0%	0%	0%	0%	0%
	100%	0%	0%	0%	0%	0%
コードレス掃除機	100%	0%	0%	0%	0%	0%
	100%	0%	0%	0%	0%	0%
ロボット掃除機	100%	0%	0%	0%	0%	0%
	100%	0%	0%	0%	0%	0%
電動車椅子	100%	0%	0%	0%	0%	0%
	100%	0%	0%	0%	0%	0%
電動カート	100%	0%	0%	0%	0%	0%
	100%	0%	0%	0%	0%	0%

6.4 家電機器性能に関する考察

調査結果を見ると炊飯器の動作時間帯には、かなりのこだわりがあるこそこでとが判る。炊飯器のTV-CMなどでも、“炊き立て”や、“かまど炊き”など炊き方に訴求する広告が多いことから、多くの日本人の白飯に対する思い入れが強いことが判る。家庭用の炊飯器は、炊き立てじゃないと旨くない、という性能の現れと解することもできる。

一方、我々がレストランや鮨屋に行く場合、このシャリはいつ炊いたか、などと気にする者はいない。旨いか、不味いかだけである。クリーニング屋も同じで、いつ洗ったかなど気にする客はいない。

家電機器は、本来、炊飯や洗濯といった日常労働を軽減する目的で作られたが、性能の限界もあって、家庭の中でいつ頃動作させなければならない、というユーザー側の制約が現れてきたと推測される。

炊飯器を例にとれば、炊きあがって5時間以内は、常に同じ食感を維持できるモデル、などの高付加価値家電機器開発があれば、上記のような制約条件は緩められると想定される。

6.5 コミュニケーションに関する考察

前々節に示したように、iDRについては、一定の受容性はあると推定される結果を得た。しかしながら、これが電力小売り会社からのサービスの一環として提供される、というはっきりとしたイメージを持っていただくことは難しいようである。

本件に限定されたことではないが、意見交換相手に、こちらが思い描いていることを明確に判って頂くことは大変難しい。具体的な材料があれば、それはかなりの助けになることは確かである。そこで、試みに約款案を作ってみた。

《約款例》

当社は、午前9時から午後4時の間に、お客様の需要機器が稼働可能である場合に、インターネットを通じて、当該機器を起動、停止することがあります。

上記の場合には、インターネット経由で当社に通知される当該需要機器自体の動作に応じて、当社はお客様に、環境貢献ポイントとして、別表1に基づき、ポイントを付与します。

電気料金(従量制部分)は、別表2の通りとします。

お客様に付与されたポイントは、当該ポイントが付与された月の翌月に、別表3に基づき、電気料金から差し引きます。なお、差し引いた結果の電気料金がマイナスとなる場合には、引き当てるポイントは電気料金が零円となるまでとし、未使用部分については、翌々月に持ち越し(キャリーオーバー)するものとします。

別表1

	Ready状態にする	Dispatchされる	Suspendされる
炊飯器	1ポイント	1ポイント	—
洗濯乾燥機	3ポイント	3ポイント	—
電動自転車充電器	1ポイント	1ポイント	1ポイント

別表2

1キロワット時につき	25円38銭
------------	--------

別表3

1ポイントにつき	翌月のポイント単価は前月末に公表
----------	------------------

6.6 本章のまとめ

6.6.1 インタビュー調査による課題解決

本章では、表 2-6（再掲）にて整理した「家電機器に対する Explicit 型 DR のユーザー受容性の確認」について、インタビュー調査により、比較的高い受容性があることを確認した。これにより、本課題は解決の目途が着いたと結論する。

但し、被検者が 19 人と少人数であることから、今後は、より多くのユーザーから聴取する必要がある。電動車椅子のように、被検者に使用経験が殆どない機器については、積極的に拒否する理由がないために、iDR 化を受け入れ可能という回答になった可能性がある。これらに関する回答の信頼度は、炊飯器のように、殆どの被検者に使用経験があるものとは異なると考えられる。

6.6.2 今後の課題

前項でも述べたように、調査対象数を増やす必要がある。この際、インタビューでは、PV 発電の余剰問題や、電力小売り会社がユーザーの家電機器を直接起動／停止することなどは、一般の生活者にはあまり理解されていないといっても過言ではないため、それらを充分理解してもらえらる調査方法を選ぶ必要がある。

2018 年 10 月 13 日の九州電力の出力抑制実施の報道や、試みに作成した約款案は、このような具体的なイメージ与える材料として使用してできる可能性があり、ユーザー受容性の調査の際は考慮したい。

参考 6-1 インタビューの流れと質問項目

1. まず、被検者の年齢層などの属性情報や表 6-2 の家電機器の保有状況、普段から電気の利用に関して工夫している点があるか、などの生活一般についても聞く。家電機器の種類は、属性情報等を記入して頂く用紙に記載してある。
2. 次に「適時性」についての説明や、「太陽光による電力が潤沢になる」ことについて説明する。
3. iDR の受容性等について聞く。
 - ① 太陽光への興味関心と理由
 - ② 太陽光電力利用の可能性
 - ③ 2030 年頃の表 6-2 の家電機器保有状況の予想
 - ④ 2030 年頃のそれらの適時性に関する考え
 - ⑤ iDR になり得るもの、なり得ないもの
 - ⑥ 日中コントロールされて問題の無い家電機器の種類
 - ⑦ 午前中（時間帯を区切る）にコントロールされて問題の無い家電機器の種類
 - ⑧ 午後（時間帯を区切る）にコントロールされて問題の無い家電機器の種類
 - ⑨ 絶対にコントロールされることがあり得ないと考える家電機器の種類

第7章 家電機器のIoT化の活用

本章では、進展が進む家電機器のIoT化の現状と、今後の展望について整理する。第1章に述べたように、今までDRなどエネルギー関係の実証実施などの際、使用機器をネットワークに繋ぐことに多くの労力が割かれてきた。しかし、そもそもネットワークに繋がれているのであれば、その環境を活用してエネルギー領域のアプリケーションを開発すればよい。そのため、高品質で多様なアプリケーションの登場が期待できる。表2-6（再掲）では、課題としてIoT家電機器を模した実験機の開発を上げ、既に第4章～第5章でその実現をしてきたところであるが、この章では、家電機器のIoT化の方向性と、本研究の整合性を確認し、PV余剰発電を家電機器による需要創出でその余剰発電を消費するというIoT活用型DRシステム実現に向けた必要事項等の確認に資することを念頭に置く。

表2-6 開発・研究すべき課題（再掲）

DR既往研究の分類視点			既往研究・実証の現状	本研究の目的/ポジション	解決すべき課題
1	When Why	需要抑制型/需要創出型	実証事業は、需要抑制型が殆ど	需要創出手法の確立	・アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法(4)
			需要創出型DR手法は確立されていない		
			電気学会全国大会件数では、創出型が徐々に増えつつある		
2	Where	建物内DR/広域	電気学会全国大会件数では、広域型が徐々に増えつつある	広域を対象とする	-
3	Who	アグリゲーターの関与	電力小売り会社から、他業種まで幅広い業種が副業として実施することを企図	電力小売り会社をアグリゲーターを兼ねる主体として扱う	-
4	What	低圧需要の何を対象としているか ・重点8機器 ・その他（例：家電機器）	DR資源として家電機器を対象とした例はない	充分普及している家電機器を対象とする	DR資源としての家電機器の有意性確認(3)
			低圧需要は、HP（ヒートポンプ式給湯器）、EV（未普及）に研究が集中		家電機器の準備完了状態をアグリゲーターが知る方法(4)
			多数の小規模需要をアグリゲートする手法は確立されていない		アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法(4)
			系統容量と低圧需要の桁の違いが大きすぎる		個々の振る舞いのモデル化(3)と大量にアグリゲートする方法(4)
5	How	Implicit型DR/Explicit型DR	価格誘導型DR（Implicit型）は、価格弾力性が小さく（0.5程度）効果が薄い	Explicit型DRの手法の確立	家電機器に対するExplicit型DRのユーザー受容性の確認(6)
			ユーザーは、割安電気料金部分にあまり関心がない		
			ピーク時の大幅高料金に対する抵抗感が強い		
6	How-2	ADR（Automatic DR）	ADRは、BEMSなどを介したローカルExplicit型DRと理解でき、事業者-需要機器直結Explicit型DRとは異なる	事業者-需要機器直結Explicit型DR	-
7	How-3	IoTの活用	首相の官民対話で話題にはなっているが、まだ殆ど実例はない	IoTを活用する	IoT家電機器を模した実験機の開発(4,7)

カッコ内の数字は章番号

本章の構成について、説明する。

7.1 節「家電機器の IoT 化」では、家電機器や住設機器の IoT 化がどのようなスタイルで何を目指しているのかを説明する。

7.2 節「iDR への適用方法」では、家電機器の IoT 化を iDR にどのように取り込むべきかを検討する。

7.3 節「相互接続性／相互運用性の確保」では、相互接続の煩雑さと、それを軽減する方策について説明する。

7.4 節「IoT-HUB の要件」では、前節でその必要性を述べた IoT-HUB が備えるべき機能について論ずる。

7.5 節「プリンタードライバーモデルの応用に関する考察」では、既に本研究で使用している Web API が採用しているプリンタードライバーモデルの更なる応用について考察する。

7.6 節「IoT 家電機器の安全に関する考察」では、IoT 化による安全レベル低下の問題と iDR の安全問題の着眼点を考察する。

7.7 節「本章のまとめ」では、本章全体をレビューし結論する。

7.1 家電機器の IoT 化

現在、家電機器メーカーや住宅設備機器（以下、住設機器）メーカーなどが、自社の製品を IoT 化する動きを見せている。技術的には、図 2-10（再掲）に示すように、自社の機器（以下、IoT Device、若しくは、単に Device）を、自社用のクラウド（Private Cloud）に接続し、自社製のアプリケーションを同 Private Cloud に収容するスタイルが主流であり、これを Connected 化という。操作はスマートフォン（以下、スマホ）で行うことが一般的である。これを進める理由はいくつかあるが、次の二つが目立っている。

- ・ 外出先などからの家電機器の操作環境の提供
- ・ モノの売り切りから、月額利用料（サービス化）も頂けるビジネスモデルの構築

これらの Private Cloud には、API（Application Programming Interface）が設けられている場合があり、他のアプリケーションからの操作、設定などが可能な場合がある。

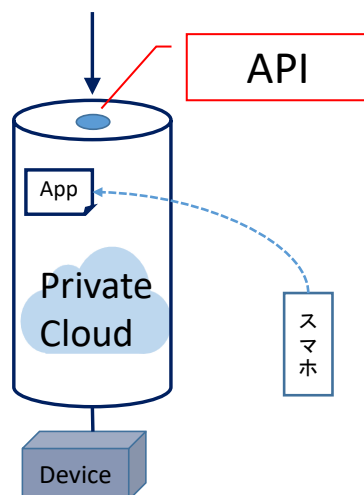


図 2-10 モノが Connected 化される概念（再掲）

図 2-10 で、Device をエアコンとすれば、外出先から自分のスマホで、自宅のエアコンが操作できるようになることは容易にイメージできる。

サービス化については、家電機器ではないが、スマートロックと呼ばれるドア鍵の例を示

す。今まで、ドアの鍵は売ってしまえば、それでビジネスは完了であり、それ以降のキャッシュを生み出すものではなかった。しかし、民泊など不特定多数の者に適応的に鍵を使わせたいなどの需要が見込めるようになってきたため、モノの売り切りだけでなく、サービス部分を設け月額利用料を得るビジネスモデルを志向するメーカーが増えている。

スマートロックの例で言えば、ロックを解除する「鍵」は、スマートロックが収容されている Private Cloud にその機能が在り、民泊ユーザーなどには、その時その時に設定した暗証番号を渡すことによって、適応的に動作するドア鍵を構築できる。

この場合、ドア鍵を購入・設置した事業者は、モノ代を支払うと共に、上記の適応的な鍵の発行機能サービスを受けるため、月額利用料も支払うこととなる（図 7-1）。Device がジェットエンジンなど大型で高価なモノの場合、もっと高度なサービス化事例があるが、ここでは省略する。

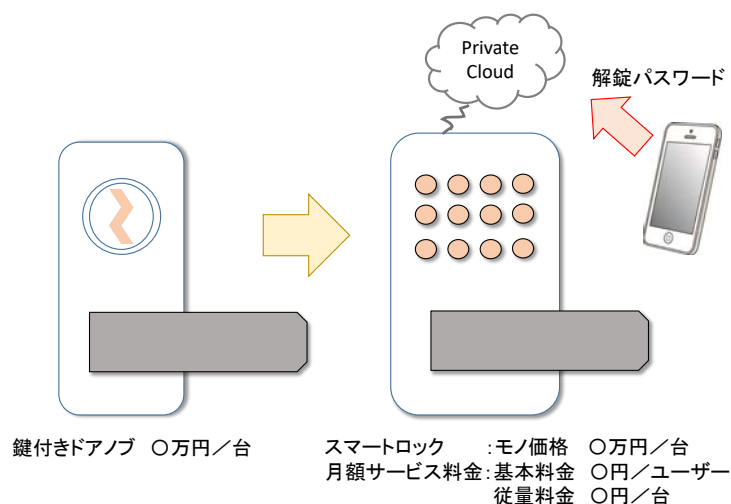


図 7-1 モノのサービス化

このような家電機器や住設機器の IoT 化は、今後一定程度進展すると考えられる。一定程度と限定する理由は、家電機器、住設機器とも、アパートなど比較的安価な住宅への設備をターゲットとした普及版と呼ばれる製品レベルがあり、これらについては、製造コスト等の点で、ここまでの高機能化は施さない可能性があるためである。

2018 年 1 月～3 月に総務省からの委託によって筆者が行った、住宅関係家電機器メーカーに対するヒアリングによると、Private Cloud に製品を収容する方法をとる利点は以下である。

- ・ 家電機器には、機種毎にいろいろな差がある。エアコンの例でいえば、温度設定がある機種は 1 度刻み、別な機種は 0.5 度刻み、などである。このような仕様の違いを吸収するには、クラウドで処理の方が容易である。
- ・ また、毎年いろいろな新機種が発売されるが、それへの対応もクラウドの方が適切である。HGW (Home Gate Way、ホームコントローラーと呼ぶ場合もあり、アプリケーションはこれに置かれるとされている) の場合は、ダウンロードしてファームをアップデートする必要がある。
- ・ 電気用品安全法令 (正確には、省令の解釈) が規定しているエアコンの安全規制 9 項目のうち、一項目はクラウドによって実現している。

7.2 iDR への適応方法

本節では、前節で示した家電機器の IoT 化を、本研究が進めている iDR にどのように取り込めばよいかを検討する。

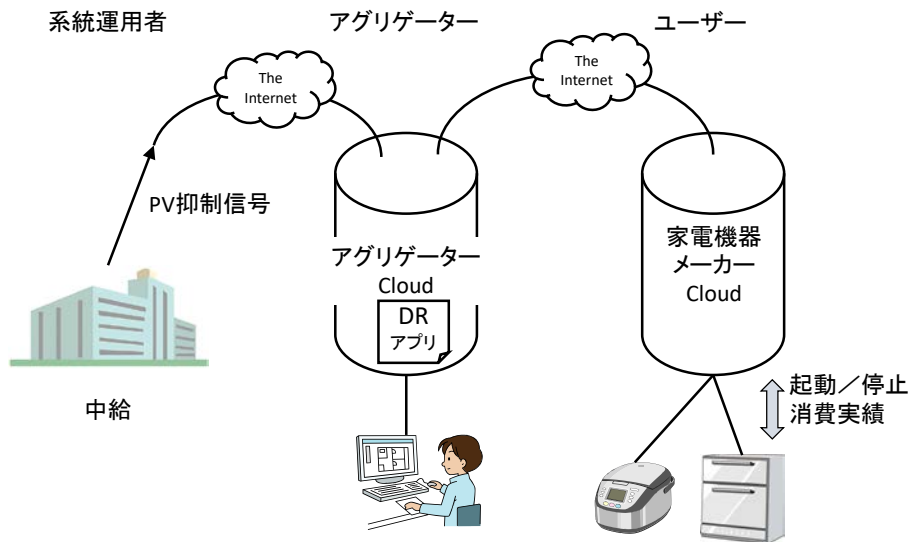


図 2-11 IoT 化を踏まえた需要創出 DR アーキテクチャー (再掲)

図 2-11 (再掲) したように、家電機器が、当該機器のメーカーの Private Cloud に收容されるとすると、iDR を運用するアグリゲーターは、自身のアプリケーションが收容されている Private Cloud と、家電機器メーカーの Private Cloud を API 経由で相互接続すればよい。

もちろん、家電機器メーカーの Private Cloud が API を開放するとは限らないし、また、第 4 章で検討した機能を具備しているかも、それ自体が存在していない現段階では不明である。第 4 章のまとめで家電機器メーカーとの意見交換の必要性を提言しているが、まずは、本研究のような要求が潜在的にあることを家電機器メーカーに知ってもらうことが重要と考える。

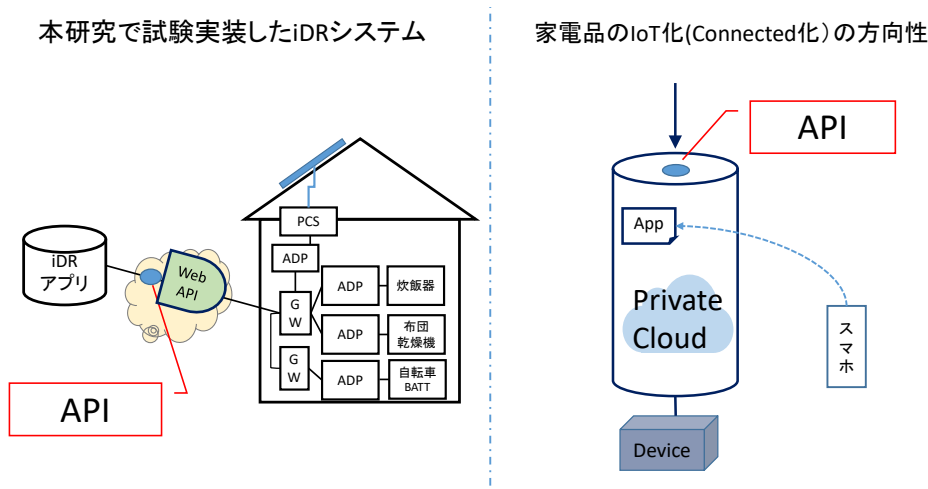


図 7-2 本研究で試験実装したシステムと IoT 化の類似性

図 7-2 に本研究で試験実装した iDR のシステムと、家電機器の IoT 化の比較図を示す。第 5 章までの iDR システムでは、図の簡単化のため省略したが、COMMA ハウスの住設機器等は、インターネット上に設置した Web API に接続されている。個別のメーカーの Private Cloud に收容されているわけではないが、API 経由で機器を動作させる、というコンセプトは既に実現しており、既存の IoT 化のトレンドと整合している。

以上見てきたように、Private Cloud による家電機器等の Connected 化は、IoT サービス提供の第一段階ではあるが、副作用も心配されている。

- ・ Private Cloud は、その名が示す通り自社製の IoT Device を接続するようになっており、他社製の IoT Device を接続するようにはなっていない
- ・ アプリケーションも、Private Cloud に收容しており、このため、他の Private Cloud に接続されている IoT Device を操作できない

IT の領域では、このような状態を牧草などを保存する施設であるサイロが林立し、相互には無関係であることを皮肉って「サイロ化」と呼ぶが、IoT の世界では、早くもその影の部分に対する危惧が出ている（図 7-3）。

IoT は、“あらゆるモノがネットに繋がり、多種多様な便益を提供する”と理解されている。もちろん、ネットに繋がったエアコン単体や同電動窓単体でも、それなりの便益は提供可能であろう。しかし、一般的には、例えば「外気が爽やかなら、エアコンを止めて、電動窓を開ける」といった、IoT Device の連携した動作が期待されているものの、エアコンと電動窓はおそらく異なるメーカーの製品であり、前述のサイロ化の副作用によりそのような連携動作はそのままでは実現できない。

一般的に異なるメーカーのプライベートクラウド同士は繋がっていない

牧場のサイロの風景に似ている・・・
(左図のような状態をIT用語でサイロ化と呼ぶ)

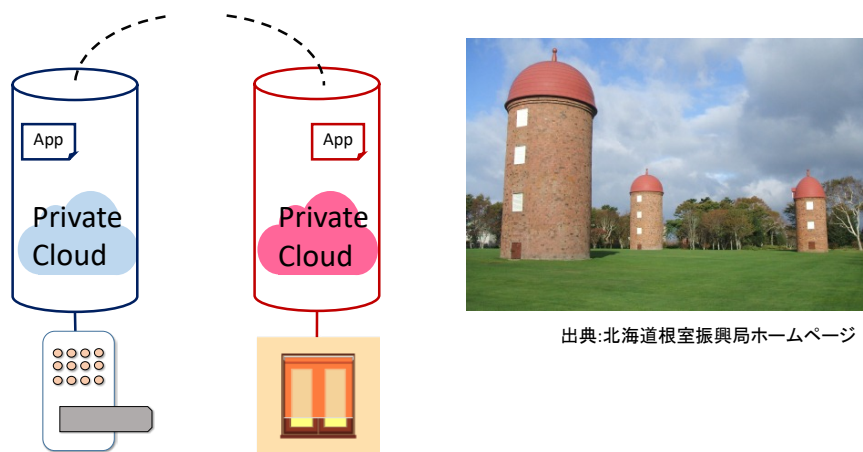


図 7-3 サイロ化の概念

当然のことながら、Private Cloud により IoT サービスを実現しているメーカーも、そのことには気づいており、2018 年 1 月～3 月に総務省からの委託によって実施したヒアリングした総合電機メーカーでは、自社が製造していない機器のいくつかは、他のメーカーと協定して、不足する機器との連携動作を実現している。その際、必要となる手続きとしては、①会社間での申し合わせ、②相接試験の実施、③アフターサービスの取り決め、とのことであった。

この会社は、かなり大きな企業であり、また、HEMS 時代からこのようなサービス提供に取り組んできたため、他社との連携が可能となったようであるが、少々小さい企業で、ICT による機器コントロールに不慣れな事業者は、会社間の申し合わせ一つとってもどうしてよいか判らず、戸惑っている状態も調査の過程で遭遇した。

このように、多様なサービスを提供するには、サイロの壁を破って、他社との連携は必

須である。2018年1月～3月に総務省からの委託によって筆者が行った11社へのヒアリングでは、8社が何らかのIoTサービスを提供中、1社が提供準備中、2社が様子見という状態であったが、相互連携を否定する企業はゼロであった。

7.3 相互接続性／相互運用性の確保

7.3.1 煩雑な相互接続

前節で紹介した相互連携を実現している企業は、相手先企業の Private Cloud と自社の Private Cloud を相互接続して、自社の Private Cloud 内にあるアプリケーションから、相手先企業の IoT Device を操作している。これはこれで実現方法としては、適正ではあるが、そのようなことを企図する企業が増えてきた場合、nC₂で計算される相互接続が必要となり、極めて複雑／煩雑な事業環境となってしまう。

本研究で想定しているアグリゲーターは、家電機器を製造しているメーカーに限るものではなく、電力小売り会社や他種のサービス提供専門事業者なども含まれる。このような企業が、iDR を構築しようとするれば、図 7-4 に示すように、家電機器を製造している多くの企業の Private Cloud と、自社の iDR アプリケーションを一つひとつ個別協定を結びながら接続する必要がある。これは、やはり煩雑な作業であって、できれば、相互接続に関する手続きや技術的作業がパッケージになっていて、そのガイドに従って相手方と進めれば、一連の手続きが完了するとなっていることが望ましい。

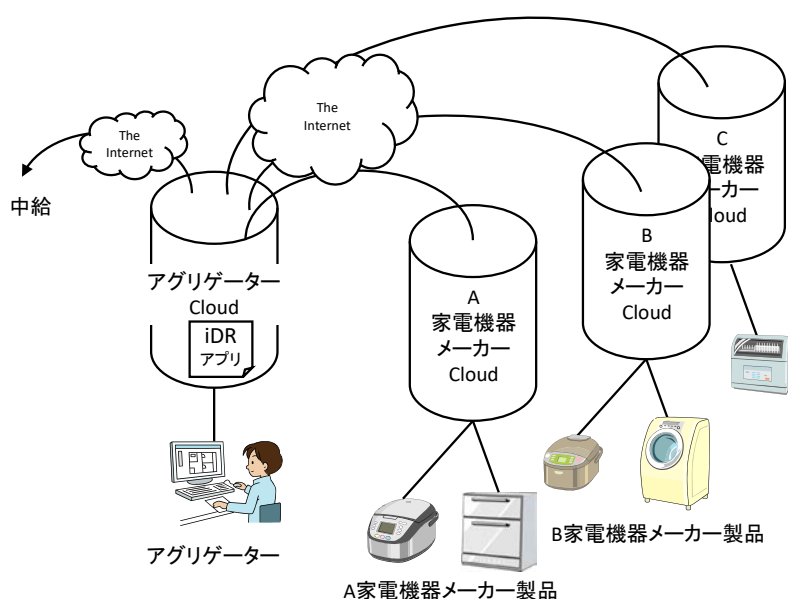
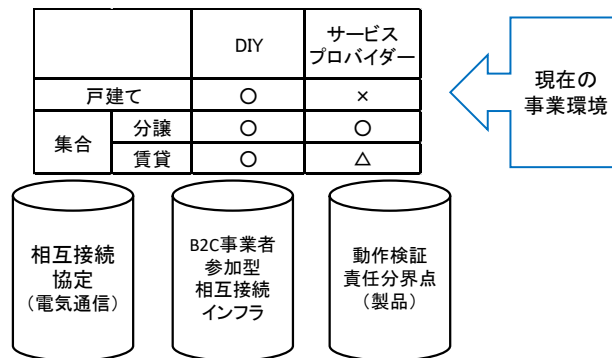


図 7-4 煩雑な相互接続

7.3.2 IoT-HUB の必要性

このような、複数の相手方と相互接続するという構造は、IoT が初めてではない。古くは、アナログ電話や、この 20 年で急発達したインターネットアクセスサービス（いわゆる、インターネットサービスプロバイダー事業、ISP）などはその典型である。これらは、“ネットワークの外部性”という言葉で説明されるように、多数の相手と繋がること自体が、自分自身を含む当該領域の価値を増加させる、という特徴がある。

このため、電話の世界では、よく知られた電話交換機で加入者を相互に接続し、また、ISP は、図 7-5 のように、IXP (Internet eXchange Point) という業界共同利用型のインフラにより、同様の目的を達している。



- ・相互接続協定: 相互接続する事業者同士が、接続に関する技術、料金、責任分界点、障害時の顧客対応方法などを取り決め
- ・B2C参加型相互接続インフラ: エンドユーザーオリエントドなサービス開発を進める事業者も参加でき、また、事業者間の責任分界点を跨ぐコマンドの疎通などの検証が可能な接続点インフラ
- ・動作検証/責任分界点: サービス開始前に、A事業者が発するコマンドがB事業者に正しく伝送され、B事業者のDevice等が正しく動作することを検証する仕組み

図 7-7 相互接続フレームワーク

7.4 IoT-HUBの要件

前節で述べた「IoT 相互接続フレームワーク」の技術的中核インフラを成すのが、IoT-HUBである。先にも述べたように、第4章、第5章で紹介した実験ハウスを基盤としたテストベッドには、内外の様々なメーカーの機器や Private Cloud に接続できるよう Web API と呼ぶ相互接続用のシステムがインターフェースとして用意しており、iDR アプリケーションや、iDR 家電機器用の GW も、この Web API に接続することで、相互接続が成り立つようになっており、本研究の実験もこれを活用している。

本研究で使用した Web API は、一般化した表現を用いれば、IoT-HUB と呼ぶべきものである。インターネットの世界では、商業用インターネットが出現した時期から、IX (Internet Exchange) と呼ばれる相互接続用のインフラがあることは先に紹介した。これによって、ISP (Internet Service Provider) 間には、標準化された接続プロトコルや、それを使用するビジネス上の協定が円滑に進んだ。IoT-HUB もそれに近いインフラであるが、以下の点が異なると想定している (図 7-8)。

- ・ あらゆるモノがネットに繋がるのが IoT であるので、その IoT Device デバイスも多種多様、価額の幅も広いと想定される。使用する通信プロトコルを一つに決めてしまうと、価額の低いモノは、そのプロトコルに対応するための増分コストに対応できないことも危惧されるため、IoT-HUB は、複数のプロトコルに対応できる必要がある
- ・ 複数のプロトコルに対応するには、複数のインターフェースが必要になるが、これを IoT-HUB を運営する主体が予め全て用意することは現実的ではない。必要な時に必要なインターフェースを用意できれば良いので、このインターフェースは、IoT-HUB へ接続する IoT Device や Private Cloud を有する主体が用意すればよい。これは、あたかも、PC にインストールするプリンタードライバーのように見えるため、筆者は、この方式をプリンタードライバーモデルと呼んでいる。IoT-HUB 側は、このドライバーに相当するモジュールの IoT-HUB 側の条件だけ決めておけばよい。
- ・ 相互接続のパターンについては、以下に示す組み合わせの相互接続を提供する必要がある。
 - クラウド間連携
 - アプリケーションクラウド間連携
 - クラウドローカル連携
 - その他の組み合わせ

- ・ IoT-HUB に接続されているクラウドの中などは、相互接続している事業者からは見えないため、機器動作等に必要情報は、IoT-HUB 上のデータベースに格納され、当該事業者に提供される必要がある。これが、Things Description と Directory である。

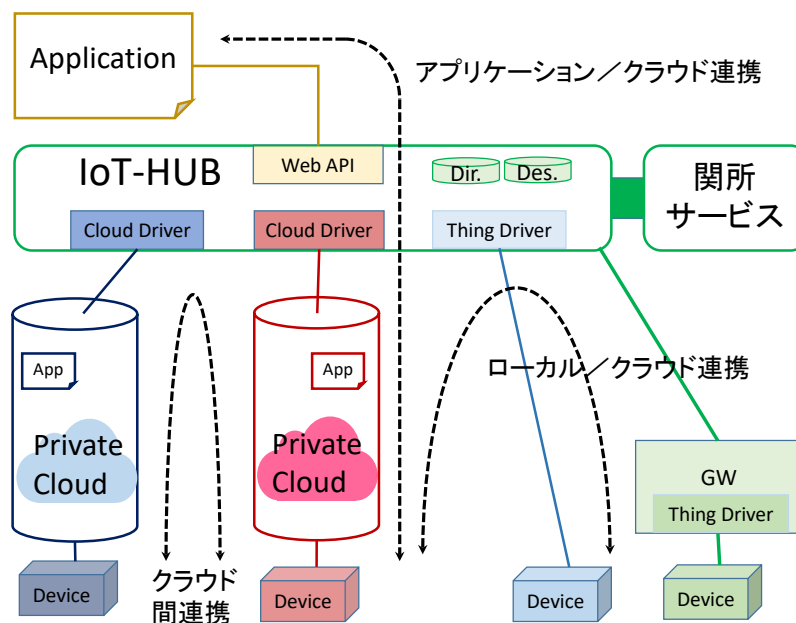


図 7-8 相互接続用 IoT-HUB の案

7.5 プリンタードライバーモデルの応用に関する考察

前述の 7.2 節で紹介したヒアリングを通じて、また、本学の実験ハウスをテストベッドとしてスタートアップ企業などと多数の協業を実施した結果、IoT サービスが事業者によって円滑に提供されるには、次の機能が必要であることが判った。

- IoT サービスの運用監視機能
- 障害切り分け能力
- 現地駆けつけによる現地作業能力
- サービス開発を自社ラボ内で行える環境

前節では、プリンタードライバー的なインターフェース用ソフトウェアを IoT Device メーカーが提供すれば、通信プロトコルの統一などをせずに円滑に IoT 社会の実現可能性があることを述べたが、これを応用すると、上記の機能構築も比較的円滑に進むことが期待できる。

すなわち、IoT サービスの運用監視機能/障害切り分け能力には、IoT Device メーカーから、監視すべき項目、機能などのパラメーターファイルが提供され、これを収容可能な NMS (Network Management System) を使用すれば、個々の IoT Device を NMS に一々登録する手間が省ける。IoT 時代は、ネットに接続される IoT Device の数が天文学的になるとの報告もあるため、これは相当重要なことと考える。

サービス開発を自社ラボ内で行える環境も重要である。IoT サービス開発では、もちろん最終的には実機による動作確認試験が不可欠ではあるが、それは、他社のモノである場合も多く、その機会は毎日自由になるわけではない。そこで、サービス開発用の仮想機器 (Virtual Machine) ファイルがこれまた IoT Device メーカーから提供され、それを中立的な主体がライブラリー化しておくことで、この開発環境は大変充実したものとなる。

本研究の対象である iDR についても、上記の機能はサービス開発の上で大変重要な鍵となる。数百万台とも考えられる家電機器を対象とする iDR では、通信回線や機器そのもの

の故障などで、起動できない家電機器も多数発生すると想定される。これには、運用・監視機能は必須である。

また、毎年新しい IoT 家電機器が発売（モデル更新）されるとすると、それが既存 iDR アプリケーションから正しく起動／停止できるか、などをまずはアグリゲーターが自社ラボで検証できる必要もあり、これには仮想デバイス機能の提供も重要である。

7.6 IoT 家電機器の安全に関する考察

家電機器は、その単体については、電気用品安全法に代表される規制によって、その安全は確保されている。しかし、サードパーティ製のアプリケーションで操作されるなど、一貫して安全を司る主体がなくなる IoT の世界では、それを担保する仕組みが必要になる。筆者は、関所と名付けたインターネット上の仕組み（図 7-9）によって、このような不都合なトラブルを回避する構造を研究し、総務省に提言している。

この関所は、IoT Device に対する相反する複数の条件が与えられた際に、それによるトラブルを防止する機能を持つ。例を挙げると、「緊急地震速報を受信したら、ドアの鍵を解錠する」と「留守」という条件をチェックし、安全サイドに動作させる（この場合は、解錠の不動作）機能を有する。IoT-HUB には、この関所の機能との連携が期待される。

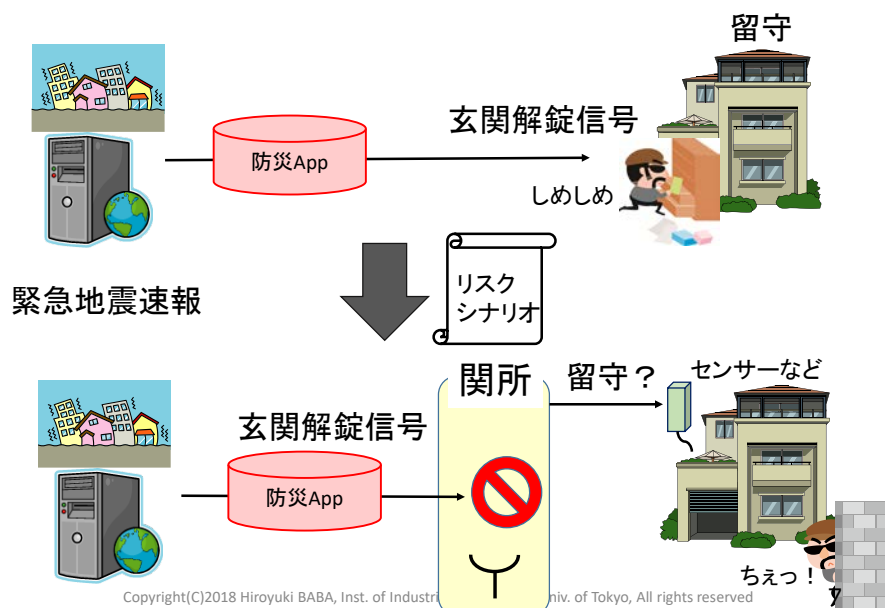
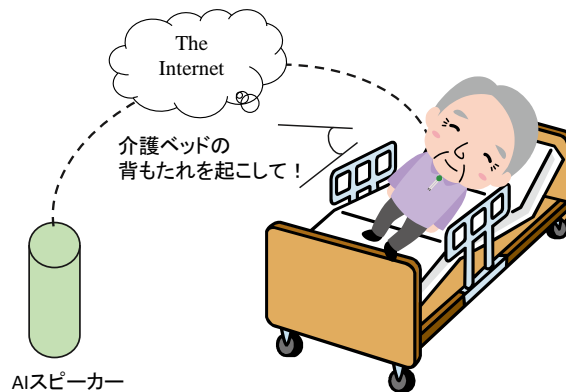


図 7-9 「関所」による IoT 由来の脅威の回避策

一方、素早い反応速度が求められる安全対策もある。例としては、介護用ベッドの動作停止機能である。筆者が実験した AI スピーカーと介護ベッドの連携では、当然ながら停止機能は失われ、事故が想定されるシステムであった。先の関所では、処理速度の関係から、この手の安全対策には不十分と考えられ、エッジ側（モノ側）に組み込む必要（図 7-10）が明確である。



どこに、どんな安全機能を配置するか

図 7-10 安全機能の配置問題

iDR の対象となる家電機器は、炊飯器、食洗器、洗濯乾燥機、布団乾燥機、様々なバッテリー駆動型機器の充電器などが想定される。熱を発生するものが多いが、多くは住宅に固定されていたり、炊飯器のように既に留守の際にタイマー動作させているものであるため、さほどの安全上の問題は発生しない可能性が高い。

しかしながら、例えば、布団乾燥機を iDR 対象として仕掛けて出かけた（留守）のち、地震動か何かでホースが布団から抜け落ち、その後布団乾燥機が起動されて、熱風を家具などに吹き付け続けて変形・変色させる程度のことは容易に起こりそうである。このような不都合をどのように防ぐか、それは、関所的な対処策で可能なのか、エッジ側で対応する必要があるのかは、よく検討する必要がある。

7.7 本章のまとめ

7.7.1 IoT 化の活用による課題解決

iDR の実現には、家電機器の IoT 化の潮流を捉えて、需要機器のネットワークへの接続にあまり労力をかけず実現する方策を探ることが重要である。本章では、7.2 節で API 同士を接続することによって、IoT Device を他の Private Cloud に属するアプリケーションから操作できることを説明し、本研究で試験実装した実験システムもそのアーキテクチャーに整合していることを確認した。

また、iDR の社会実装のためには、多くの家電メーカーの Private Cloud との相互接続が必要となることを確認し、そのためのインフラである IoT-HUB を提案するとともに、その要件を纏めた。

さらに、プリンタードライバーモデルの応用による運用監視システムの高度化や、サービス開発環境の高度化を考察するとともに、安全の問題も存在し得ることを考察して、それらに対する研究の必要性も確認した。

以上のような研究活動により、表 2-6（再掲）に掲げた本章が扱う課題は、解決乃至は研究の方向性に目途が着いたと結論する。

7.7.2 今後の課題

IoT 全体のシステムとして、相互接続の結果として、相互運用性が高まるが、それは必ずしも安全ではない場合もあり得ることは既に述べた。iDR は熱を発生する機器を対象とすることが多いため、これによる火災、火傷、高熱による家財の変形・変色などに焦点を当てた研究の深掘りが重要と考える。

第8章 結論

表 2-6（再掲）に今までの議論を加筆したものを、取り纏め表として表 8-1 に纏める。

表 8-1 本研究で研究開発した結果と今後の課題

DR既往研究の分類視点			既往研究・実証の現状	本研究の目的／ポジション	解決すべき課題	開発研究できたこと (社会に対する新しい貢献)	今後の課題 (本研究の対象外のものも含む)
1	When Why	需要抑制型／需要創出型	実証事業は、需要抑制型が殆ど	需要創出手法の確立	・アグリゲーターが家電機器を直接 起動停止する技術的方法(4)	・Demand Dispatch System(DDS) の所要仕様の整理、試験実装 ・需要創出とPCS連携に関する新技術 開発 ・%pvと呼ぶ新たな単位の提案	・DDSをスケールさせる具体的方策の検討 (本研究の範囲外) ・国内外の複数のPCSの特性評価
			需要創出型DR手法は確立されていない				
2	Where	建物内DR／広域	電気学会全国大会件数では、広域型が徐々に増えつつある	広域を対象とする	-	PV(太陽光発電)を有していない需要家も、需要創出に協力することで、再エネ積極利用社会に貢献できることを明示	・DDSをスケールさせる具体的方策の検討 (本研究の範囲外) ・一般消費者に対する情報発信 (一部はオープンキャンパスで実施)
3	Who	アグリゲーターの関与	電力小売り会社から、他業種まで幅広い業種が副業として実施することを企図	電力小売り会社をアグリゲーターを兼ねる主体として扱う	-	約款案の例示	電力小売り会社との直接的な意見交換
4	What	低圧需要の何を対象としているか ・重点8機器 ・その他(例:家電機器)	DR資源として家電機器を対象とした例はない	充分普及している家電機器を対象とする	DR資源としての家電機器の有意性確認(3)	シミュレーションにより有意性を確認	発電コストへの寄与量の確認
			低圧需要は、HP(ヒートポンプ式給湯器)、EV(未普及)に研究が集中		家電機器の準備完了状態をアグリゲーターが知る方法(4)	家電機器を有効なDR資源にできる、家電機器の仕様(iDRボタン)を提案	電機メーカーとの直接的な意見交換 (一部のメーカーとしては実施済み)
			多数の小規模需要をアグリゲートする手法は確立されていない		アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法(4)	Demand Dispatch System(DDS)の所要仕様の整理、試験実装	送配電事業者(中給)との意見交換
			系統容量と低圧需要の桁の違いが大きすぎる		個々の振る舞いのモデル化(3)と大量にアグリゲートする方法(4)	・ユーザー主導プロセスとアグリゲーター主導プロセスの2段からなるモデルを構築 ・再エネ積極利用運用とネット需要純増運用の提案	多様なディスパッチアルゴリズムの適用
5	How	Implicit型DR／Explicit型DR	価格誘導型DR(Implicit型)は、価格弾力性が小さく(0.5程度)効果が薄い	Explicit型DRの手法の確立	家電機器に対するExplicit型DRのユーザー受容性の確認(6)	iDRのユーザー受容性の調査	より多数のユーザーからの意見聴取
			ユーザーは、割安電気料金部分にあまり関心がない			約款案の例示	ユーザーや電力小売り会社との意見交換
			ピーク時の大幅高料金に対する抵抗感が強い				
6	How-2	ADR(Automatic DR)	ADRIは、BEMSなどを介したローカルExplicit型DRと理解でき、事業者-需要機器直結Explicit型DRとは異なる	事業者-需要機器直結Explicit型DR	-	IoT技術トレンドの活用を提唱／ローカルコントローラーを使用しないクラウド活用型広域DRを提唱	エネルギー領域からみたIoT家電の仕様の取り纏め
7	How-3	IoTの活用	首相の官民対話で話題にはなっているが、まだ殆ど実例はない	IoTを活用する	IoT家電機器を模した実験機の開発(4,7)	現在のIoTのトレンドと、本研究の方向性が整合していることを確認	情報発信 (一部はオープンキャンパスで実施)
					カッコ内の数字は章番号		事業者らとの意見交換は、課題解決の有用性確認に有効

8.1 各課題に対する結論（社会に対する新しい貢献）

以下に、第2章で整理した上記(1)～(5)の個別の結論と、各課題解決に伴って得た新しい知見や社会に対する新しい貢献を纏める。

(1) DR 資源としての家電機器の有意性

第3章に記した研究活動では、表2-6（再掲）に掲げた「DR 資源としての家電機器の有意性確認」に対して、計算機シミュレーションを実施し、その効果が PV 余剰発電に対して 9%～39%程度見込めることを確認した。

この研究では、シミュレーションを適切に行うため iDR のモデル化を行い、互いに異なるプロセスが 2 つ連なるシステムであることを明示し、さらに創出した需要の経済面での価値や、需給調整運用上の扱い方などについても考察し、その有用性を確認した。

(2) 家電機器の準備完了状態をアグリゲーターが知る方法

第4章前段に述べた研究活動により、実験における安全などにも鑑み、iDR ボタンを定義し、アグリゲーターによる Explicit 型 DR を成立させる構造を考案した。これにより、表2-6（再掲）に示したように今まで DR リソースとして扱えなかった家電機器をその対象とすることが可能となった。

また、実験に向けて、市販の家電機器のアダプターとして使用することで、IoT 家電機器として機能する実験機を開発・試作した。これによる実験により、iDR アプリケーションの要求仕様確認など様々な事項が確認できる環境が整った。

家電機器は、大変複雑な動作を、とても安価に実現しており、簡単に改造できるようにはなっていない。このため、制御方法として、電源の入/切に加えて、学習型赤外線リモコンなど、複数の手立てを揃えることを考察し、実験実施の広がりにも目途がついた。

(3) アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する技術的方法

第4章後段記載の研究活動によって、「アグリゲーターが家電機器を直接起動停止する方法」（表2-6（再掲））については、DDS の要求仕様を考案し、試験実装による実験により、その有用性を確かめることができた。現時点では、iDR の対象となる家電機器が Connected になっていないため、第4章前段で製作した実験機による実験であったが、今後、家電機器の Connected 化の進展とともに適用できるアーキテクチャーも提案しており、これは家電機器メーカー等の意見交換に有用である。

DDS の有する誤差についても検討し、定格値や実績値を使用する場合の誤差についてそのメカニズムを明らかにし、また、改善方法を考察した。さらに、その誤差を IoT という新たな環境を活用して予測値を生成する方法を提案した。これらにより、大まかには、課題解決の初期的な目途は付いたと結論する。

一方、誤差については、定格値や実績値に頼っている限りは、本章で述べた構造的誤差からは脱却できないため、開発研究の方向性としては、IoT 環境を活用した予測値活用型 DDS にすべきと考える。

(4) PV 出力抑制との協調運転方法

第5章に記した研究活動によって、試験実装した DDS をベースとして、PCS との連携運転を実験し、%pv と仮称する単位の変換により、円滑に連携運転が可能である見通しを得るとともに、この仕組みの実現可能性を確認した。これにより、表2-6（再掲）に掲げた「PV との連携運転方法」という課題はこの方法により解決できることが確認された。

現行 PCS のスロープ特性が需要創出特性とマッチしない部分があることを見出し、PCS の動特性として、時定数を適応的に変える機能の追加を考案し、特許出願した。

(5) 家電機器に対する Explicit 型 DR のユーザー受容性の確認

第6章に述べた研究活動により、表2-6（再掲）にて整理した「家電機器に対する Explicit

型 DR のユーザー受容性の確認」について、インタビュー調査により、比較的高い受容性があることを確認した。これにより、本課題は解決の目途が着いたと結論する。

電動車椅子のように、被検者に使用経験が殆どない機器については、積極的に拒否する理由がないために、iDR 化を受け入れ可能という回答になった可能性がある。これらに関する回答の信頼度は、炊飯器のように、殆どの被検者に使用経験があるものとは異なると考えられる。

(6) 世の中の IoT のトレンドと本研究の整合性の確認

iDR の実現には、家電機器の IoT 化の潮流を捉えて、需要機器のネットワークへの接続にあまり労力をかけず実現する方策を探ることが重要である。第 7 章では、7.2 節で API 同士を接続することによって、IoT Device を他の Private Cloud に属するアプリケーションから操作できることを説明し、本研究で試験実装した実験システムもそのアーキテクチャーに整合していることを確認した。これは、今まで多くがイメージしていたローカルコントローラ（ホームコントローラ）に依存しない方法でもある。

iDR の社会実装のためには、多くの家電メーカーの Private Cloud との相互接続が必要となることを確認し、そのためのインフラである IoT-HUB を提案するとともに、その要件を纏めた。

さらに、プリンタードライバーモデルの応用による運用監視システムの高度化や、サービス開発環境の高度化を考察するとともに、安全の問題も存在し得ることを考察して、それらに対する研究の必要性も確認した。

以上を総覧すると、①家電機器の DR リソースとしての量的有意性が確認され(課題(1))、②家電機器を Explicit 型 DR の対象としてアグリゲーターが起動/停止する技術実装にも目途がつき(課題(2)(3)(4))、③そのような DR がアグリゲーターからのサービスの一環として提供されることに対するユーザーの受容性が確認された(課題(5)) ことにより、本論文の第 2 章で設定した「アグリゲーターが需要創出し、PV 連携する仕組みは実現可能か」という仮説は、実現可能であると結論する。

また、2.7.1 項(6)で世の中の IoT トレンドと本研究の方向性には十分な整合性があると確認できたため、今後も、この方向で開発研究を進めることが適切と結論する。

改めて整理すると、本研究で検討した DR は、①家電機器を対象とすること、②Explicit 型であること、③ユーザー受容性が確認されていること、の三点が他の既往研究と異なる独自視点に基づく特徴である。類似の研究・実証には、バーチャルパワープラント(VPP、第 2 章[19])があるが、家電機器は対象となっておらず、この部分は決定的に異なる。

2.7 節で、「集合住宅居住者など PV を所有できなかつたり、ヒートポンプ式給湯機や家庭用定置型蓄電池など高価な需要機器を有しない個々の一般ユーザーでも、契約に基づく一般的な家電機器の自動的な稼働によって、再エネ積極利用社会構築に参加できる仕組みの構築」が本研究の大義と紹介したが、上記結論により、本論文による方法もこの大義を実現する方法の一つであることも確認された。

8.2 今後の課題

政府の議論[3]でも、再エネの主力電源化と DR の活用が示されるなど、今後ますます再エネ積極利用の技術の重要性は増してこよう。ここでは、各章に記し今後の課題をもう一度レビューし、本研究の範囲を超えるものを再整理する。

本研究の目的は、先にも述べたように「アグリゲーターが需要創出し、PV 連携する仕組みは実現可能か」である。これに直接的な項目は<積み残し>とし、間接的な項目は<本研究の範囲外>とし以下に再整理した。

8.2.1 第3章で整理した項目

<積み残し分>

同章では、1 段目の Birth-Death プロセスには、例としてポアソン分布を適用したが、今後、生活パターンなどに的確にフィットする分布を探すなどが必要と考える。また、process2 には、様々なアルゴリズムが適用可能であることから、本研究とは異なるアルゴリズムによる試算も今後の課題としたい。

<本研究の範囲外>

一部の家電機器は、バッテリー駆動のため、この充電は LFC 調整力として利用できる可能性があり、それは、発電コストに影響する。これについても検討を進めたい。なお、筆者の 2018 年 8 月の中給所長経験者へのヒアリングによれば、LFC 調整力は、現在の中給は「hour0」と呼ぶ、LFC の動作で出力した電力量[Wh]と、削減した電力量[Wh]のトータルが零になるものを LFC と規定している。バッテリーは、充電の停止はできるがエネルギーを宅内に再放出することができない (Vehicle to Home、若しくは、Vehicle to Grid を除く) ので、これを LFC と呼ぶかどうかについても、検討する必要がある。

8.2.2 第4章で整理した項目

<本研究の範囲外>

技術的課題としての DDS のスケールについては、4.15 節で机上検討したが、家電機器を対象とした DDS が社会実装できるか否かは、家電機器メーカーのプライベートクラウド内にどのような技術が実装され、機動的な家電機器動作を可能とするかにかかっている。このため、上記の机上検討などをベースとして、エネルギー分野での IoT 家電機器の応用についてメーカーと意見交換すべきと考える。iDR ボタンについては、2017 年 8 月に COMMA ハウスに来所された家電メーカーの管理職の方と意見交換する機会があり、肯定的な反応を頂いた。その方によると、電気事業法の解釈などの点で、広域で電力を使用すること自体が、いわゆるスマートグリッド的なテーマとして成り立ち得るのかメーカーサイドでは判断しかねており、iDR は参考になる、とのことであった。

家電機器に、DR リソースとしての役割を期待するのであれば、このような実際の実験機を見てもらい、今後の家電機器開発の参考として頂くことが必要である。今後も広く電機メーカー等の関係者と意見交換し、共通認識を醸成することが重要である。

理由は、エネルギー領域側の要望を認識してもらい、例えば予測値の提供など、クラウドを含めた機能の実現に繋げるためである。

一方、中給とのやりとりでは、このようなデータが中給にとって有用であるかなどを、実際の事業者に対してヒアリングしての確認が必要である。

本研究が IoT 環境を活用するとしたのは、需要機器を Connected にするというエネルギー利用とは本質的に異なる部分に多大な労力を払うことを回避するためである。一方、それは他者に依存することと表裏一体であるため、関係者との定常的な意見交換は必須である。

8.2.3 第5章で整理した項目

<本研究の範囲外>

PCSの時定数を切り替えられる機能については、COMMAハウスに設置されたあるメーカーの製品については確認できたが、外国製を含む他のメーカーのものについては、不明である。他のメーカー製についても、潜在的能力としてこの機能についても調べる必要がある。

もちろん、この潜在能力がなくとも、新たな設計によって本研究考案の仕様は実現できるため、本件は実現の容易さを確認するものであって、本研究の本質の一部を成すものではない。

8.2.4 第6章で整理した項目

<積み残し分>

調査対象数を増やす必要がある。この際、インタビューでは、PV発電の余剰問題や、電力小売りがユーザーの家電機器を直接起動/停止することなどは、一般の生活者にはあまり理解されていないといっても過言ではないため、それらを充分理解してもらえる調査方法を選ぶ必要がある。

2018年10月13日の九州電力の出力抑制実施の報道や、試みに作成した約款案は、このような具体的イメージ与える材料として使用してできる可能性があり、ユーザー受容性の調査の際は考慮したい。

インタビューなどの調査手法は、披検者にバイアスがかかっていないかなど、実施に際しては相当な専門的設計とインタビュー技法への習熟度が必要と言われている。このようなスキルを筆者は現在も持ち合わせておらず、積み残しとなっている。

以上

発表文献一覧

1. 査読付学術論文
 - (1) 「IoT 化する家電機器を活用したデマンドレスポンスによる自然変動電源の余剰発電抑制緩和策」電気学会 C 部門論文誌 2017.2 掲載
 - (2) 「IoT 化する家電機器を対象としたデマンドディスパッチシステムの提案と試験的実装」電気学会 C 部門論文誌 2018.6 掲載
 - (3) 「IoT 化する家電機器による能動的需要創出と太陽光発電の連携実験における PCS 動作特性評価」電気学会 C 部門論文誌 2019.5 掲載

2. 学会講演
 - (1) 「IoT を活用した VRE 出力抑制緩和策の考察」電気学会全国大会 2016.3
 - (2) 「IoT を活用したデマンドレスポンスによる自然変動電源の余剰発電抑制緩和策」電気学会 C 部門大会 2016.9
 - (3) 「IoT の進展を踏まえた需要ディスパッチ検討」電気学会全国大会 2017.3
 - (4) 「IoT 化する家電機器を対象としたデマンドディスパッチシステムの提案と試験的実装」電気学会 C 部門大会 2017.8
 - (5) 「IoT 化する家電機器による電力需要創出に関するユーザー受容性調査結果」電気学会全国大会 2108.3
 - (6) 「IoT 化する家電機器による能動的需要創出と太陽光発電の連携実験における PCS 動作特性評価」電気学会 C 部門大会 2018.9

3. 国際会議等投稿・国内外講演
 - (1) 《投稿》「Problems in and among industries for the prompt realization of IoT and safety considerations」IETF 2015.10
 - (2) 《講演》「スマートハウス研究を踏まえた IoT 実現への方策」：国立研究開発法人情報通信研究機構主催スマート IoT 推進フォーラム 2016.3 東京
 - (3) 《講演》「Demand Response by Utilizing IoT for Huge Renewable Energy Era」：タイ地方電力公社／ファーウェイ主催 Intelligent Power Grid Summit 2016 2016.7 バンコク
 - (4) 《投稿》「Report on Problem Solving Experiment for Realization of Web-API-based IoT」IETF 2016.10
 - (5) 《ポスター展示》「Experiment of Deman Dispatch System for IoT ready Home Appliances」：SEIA&SEPA 主催 Solar Power International 2017 2017.9 米ネバダ州
 - (6) 《講演》「Problems in and among industries for the prompt realization of IoT and safety considerations」IETF100 2017.11 シンガポール
 - (7) 《投稿》「Study Report on a Framework for Cloud Inter-connection toward the Realization of IoT」IETF 2018.7
 - (8) 《ポスター展示》「Experiment of Deman Dispatch System co-operating with Solar Generation System」：SEIA&SEPA 主催 Solar Power International 2018 2018.9 米カリフォルニア州

IETF: Internet Engineering Task Force／インターネットプロトコル(IP)技術標準規格制定団体

4. 新聞・雑誌等

(1) 「IoT の光と影」電気新聞 2018.8.20~9.10/4回連載

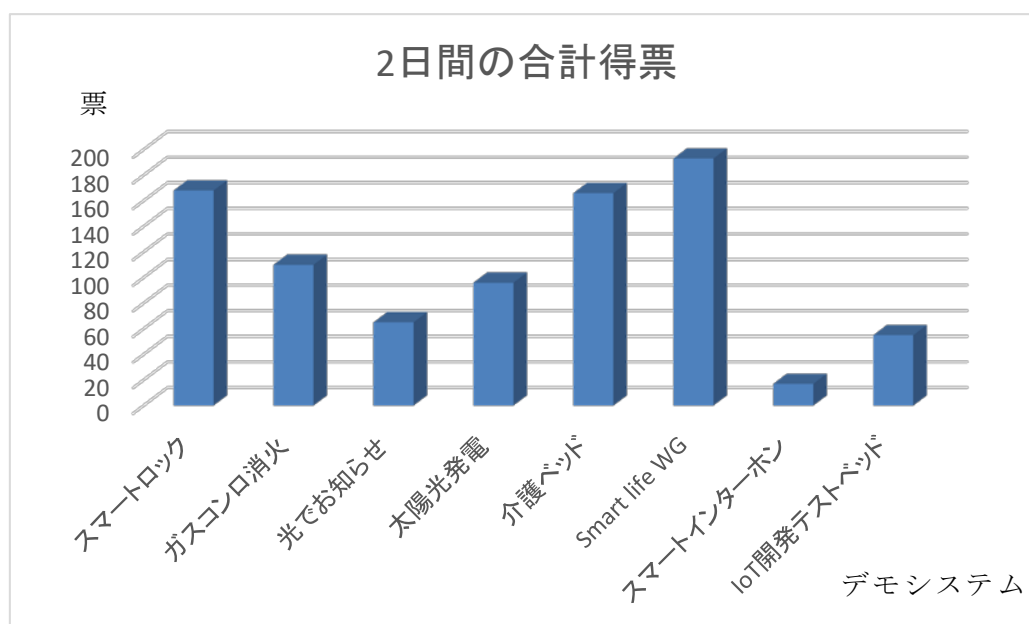
5. 書籍

(1) 「生活用 IoT がわかる本」(野城智也氏共著、2017.3 インプレス R&D)

付録：オープンキャンパスにおける iDR に対する見学者の反応

2018年6月のオープンキャンパスでは、本論文でテーマにした iDR について、①パネルで PV 余剰発電の存在を説明し、②実際にインターネット経由で、IoT 炊飯器等を起動/停止するデモンストレーションを行った。同時にアンケート調査も実施したところ、iDR に興味を示した方は、424人中96名となった。展示物がごく一般的な炊飯器などで派手さがなにも関わらずこれだけの関心を頂くことは、再エネや IoT に対する関心の高さの現れと言えよう。

- ・生産技術研究所一般公開にて COMMA ハウス内に他の IoT デモシステムとともに展示
- ・時期：2018年6月8日（金）、9日（土）
- ・見学者数：424名/2日間
- ・見学者の約 1/4（96名）が関心を示し、スマートロックや介護関係等に続く関心を集めた。「電力が余る」という事態は一般には殆ど知られておらず、これに対する驚きの反応が多い。
- ・アンケートによる具体的な意見例
 - iDR の話は、非常に興味深いのですが、一般の方には、基礎知識が必要なもので、もっとくわしく書いた方が良いかもしれません。（IoT 関係者 40代男性）
 - 建物の造りが若い人向けでした。老いて行くと非常に使いづらく難しく思います。スマートグリッドについては家庭に必要なと思います。（一般の方 40代男性）
 - 夢のある実現も間近そうな、興味深いお話を伺えて楽しかったです。1Fの太陽光の話もとても楽しかったです。ありがとうございました。（東大関係者 60代以上女性）
 - 新しい問題を知っておどろきました。（再生エネルギーと今までのエネルギーのかねあい）（一般の方 60代女性）
 - エネルギーを効率よく利用できるようになることで、環境保全に役立てられることを期待します。（一般の方 50代男性）





2018年6月一般公開の様子（COMMAハウス内）

謝 辞

本論文は、2015年7月から2018年10月までの凡そ3年間の研究活動を取り纏めたものである。デマンドレスポンスについては、エネルギーの専門家の立場から、荻本和彦特任教授、岩船由美子特任教授にご指導、ご助言頂いた。また、名古屋大学の特任助教となって転出された今中政輝博士にも、論文の執筆方法など基礎的なことを含め、数多くのご指導を頂いた。そして、機動的にお力添えを頂いた片岡和人氏など荻本研究室のスタッフの皆さまにも感謝申し上げます。

また、IoTの研究では、野城智也教授に特に多くのお時間を頂き、COMMAハウスでの実験などのご指導を頂いた。もちろん、野城研究室のスタッフの皆さまにも事務手続きなどの支援を頂き、感謝申し上げます。

学外の方々としては、共同研究者としての東京電力ホールディングス株式会社の天津孝之課長、増田浩副長、鈴木友矩副長に、実験の実施などに関して並々ならぬお力添えを頂いた。また、シミュレーションについては、株式会社構造計画研究所の宇田川佑介博士、請川克之博士、伊野慎二氏に多くの時間を割いて頂いた。そして、iDRアプリケーションの試作では、株式会社テクノ三紫社長の小野雅司博士に、また、実験機の試作では、大井電気株式会社の小原木敬祐氏をはじめとする同社技術陣に大変お世話になった。さらに、ユーザー受容性調査では、株式会社ヒットコンテンツ研究所の日高美英子氏のお力添えを頂いた。

本論文の開発研究は、東京電力ホールディングス株式会社との共同研究、並びに、NEDOの電力系統出力変動対応技術研究開発事業／再生可能エネルギー連系拡大対策高度化プロジェクトの一部として進めた内容が多い。

先にお名前を挙げさせて頂いた方々に加え、生産技術研究所の事務部門の方々、上記機関の方々など、関係者に改めて謝意を表したい。

以上