

電力市場に分散型電力と柔軟性を供給する VPP（バーチャル発電所）

中山琢夫

3.1 はじめに

VPP（Virtual Power Plant: バーチャル発電所）とは、自ら物理的な実際の発電所を所有することなく、比較的小規模分散型の発電所と契約し、これらが発電する電力をまとめて、電力卸売取引市場や需給調整市場で直接取引する主体のことをいう。VPPには様々な事業形態があり、既存の屋根上の太陽光発電パネル用の蓄電池を販売して顧客コミュニティを形成するものもあれば、事業用の太陽光発電所・風力発電所・バイオガス発電所・非常用電源などを顧客に持つものなどが見受けられる。

ドイツにおいてVPPと呼ばれる主体が顕著に見られるようになった背景には、再生可能エネルギーの固定価格買取制度における調達価格が安くなり、グリッドパリティが言われるようになったと同時に、2012年の再生可能エネルギー法改定により、再生可能エネルギー発電による電力も、直接市場取引することが推奨されたことがある。比較的小規模な再生可能エネルギー発電所は、単体では電力卸売取引市場や需給調整市場には参画できない。そこで、それらをまとめて直接市場取引する、直接市場家とも呼ばれるVPPが必要になった。

日本においても、2009年11月に開始された住宅用太陽光発電の余剰電力買取制度から10年間が経つ。この制度のもとでは、10年間は固定価格（48円/kWh）で電力を購入してもらうことができたが、その期間を満了することで、新たな販売方法を探ることが必要となる。これは、2019年問題と呼ばれる。このような固定価格買取制度を卒業した電源は、小売事業者と直接相対取引するか、卸売電力市場に販売しなければならないが、単体の発電所だけではこうした取り組みを行う

ことはその規模から考えると困難である。そこで、こうした電力をまとめて取引する VPP のような事業者が必要となってくる。

こうした VPP による新しい電力の市場参入によって、これまでとは異なった系統運用が必要とされる。伝統的に、系統運用者は、いわゆるメリットオーダーに基づいて、可能な限り最も安い費用で系統の需要に合わせるように、様々な発電所に給電指令を送っていた。このパラダイムでは、負荷は一定であると仮定され、供給は時間・日・季節ごとに継続的に追跡されるようになっていた。通常大きな原子力や石炭・褐炭火力発電によって賄われるベースロード発電は、ユニットあたりのコストが最も安かったため、年間を通した最低限の負荷をカバーするように、一定出力で運転されていた。

ベースロードとピークロードの中間のミッドレンジの発電所は、時間・日・季節毎の様々な需要に適合させるように給電指令されていた。ピーク時の発電ユニットは、夏の暑い日、暑い場所でエアコンの負荷が高くなる時や、冬の寒い時期、寒い場所で電気の暖房負荷が高くなる時のピーク需要をカバーするために、限られた期間だけ限定的に給電指令されていた。伝統的なメリットオーダーでは、安い順に原子力、水力、褐炭・石炭火力、ガス火力の順に発電ユニットが並んでいた。

これまで、多くの系統には、水力を除く再生可能エネルギー発電は接続されていなかった。水力発電は、利用可能な水の量に基づいて利用されるが、その貯水能力は、火力発電所の出力を補完するようになっていた。揚水発電は、利用可能な時には需要の変動を管理し、余剰発電量を蓄えるためにも利用されていた。

2017年末、ドイツ、デンマーク、カリフォルニア、テキサスや南オーストラリアでは、多くの時間・日において、全発電量の半分以上が再生可能エネルギーによって占められるようになってきた。こうした場所では時折、再生可能エネルギー発電量が、系統の全需要量を超えることもある。たとえばドイツでは、再生可能エネルギーの割合は継続的に上昇しており、現在では電源構成を支配する日も多くなっている。

ドイツでは、約11 GW の設備容量を有する原子力発電が2022年までに段階的に廃止され、さらに近年導入された炭素削減政策によって、7 GW 以上の設備容量を有する褐炭・石炭発電所が市場を離れることで、この傾向はさらに顕著になっていくと予想される。ドイツのピークロードが約80 GW であることを考える

と、この数値は重要である。

このように、再生可能エネルギーがエネルギー市場において支配的になると、もはや、かつての発想に基づいたメリットオーダーによる給電指令は適応できない。変動性の太陽光や風力といった再生可能エネルギー発電は、利用できる時に利用する必要がある。もしくは出力抑制することになるが、これは、安価で二酸化炭素を排出しない電力を無駄にすることを意味している。もし、系統運用者がこのような資源を利用可能な時に利用しないならば、それは社会的に見て不経済である。

伝統的な給電指令パラダイムとのもう一つの大きな違いは、「変動性」の再生可能エネルギー資源が多いということである。流込式水力発電もこのカテゴリーに分類される。柔軟性を持った地熱、大規模貯水池式水力、バイオマス、バイオガス発電とは異なり、変動性の再生可能エネルギー資源は、給電指令が困難である。

変動性の再生可能エネルギーは、入手できる時には使えるが、入手できないときに、系統運用者が発電するように指令することはできない。このことは、将来の発電の大部分が、再生可能エネルギーに移行している国において需要と供給をバランスし、系統の安定性と信頼性を維持するための代替的なスキームが必要になってきていることを示唆している。

このチャレンジの考え方の一つの方法は、これまでと根本的に異なる運用と給電指令パラダイムを考えることである。所与の負荷によって時間毎に発電量を調整するという具合に、片方が片方を追うのを強制するのではなく、需要と供給の双方を柔軟的にすることで、双方がダンスを舞うように調整することができる。

これは、まさに電力市場とネットワークの将来を、柔軟な負荷と変動する発電の振り付けとして見る、革新的な多くの企業によって開発されたアプローチである。そのいくつかは、分散型や集中型の蓄電池である。これらは、系統の安全性と信頼性を保ちながら、変動性発電源の使用を最大限に高めるものである¹⁾。

このアプローチでは、しばしば価格に応答した需要を行うデマンドレスポンス (DR) や、デマンドサイドマネジメント (DSM) が用いられる。ここではバー

1) 例えば、オーストラリアにおける AGL 社によって開発されている大規模 VPP プロジェクトがあげられる (Orton et al.)。

チャル発電所（VPP）が電力卸売取引市場価格に基づいて、知的に需要をシフトする。産業界では、系統から購入する電力料金を抑えるために、すでに長きにわたって電力需要を管理している。最近の VPP では、変動性の需要と変動性の発電をバランスすることで、ほとんどの電力市場において有望視される、優れた代替案を提案している。蓄電池をそのアセットに取り入れることは、VPP にとって一つの重要な選択肢になる。

本章では、Steiniger（2017）をもとに、ドイツの Next Kraftwerke 社ビジネスモデルに注目することで、有望なアプローチの原則を描写する。同社は、過去数年間で実質的に成長したドイツにおけるデジタルユーティリティ²⁾であり、VPP オペレーターである。2016年後半までに、彼らは4,000以上の発電所と需要家をアグリゲートし、その結合容量は2,700 MW である。これは、おおよそ大規模石炭火力発電所2基分に相当する。本章では、電力システムの将来における給電指令の形態について、柔軟性を持たない需要に合わせる火力発電所への給電指令を送るよりも、むしろ、柔軟な需要側の負荷制御と変動性の再生可能エネルギー発電をアグリゲートする方が効果的であることを議論する。

3.2 変動性再生可能エネルギー発電と柔軟性

すでに上述したとおり、世界中の多くの電力市場において、現実的に変動性の再生可能エネルギーの支配力が高まってきている。それは、ドイツでは、政策誘導要因であったり、一般的に意図されるような発電源からの二酸化炭素排出削減の試みの結果である。概ね2016年のドイツでは、3分の1が再生可能エネルギー発電が占めており、その大部分は、風力と太陽光発電である。これらはともに本質的に変動性電源である。

とりわけ、風力発電をはじめとする変動性の再生可能エネルギーの問題として、火力発電の再給電指令と再生可能エネルギーの出力抑制のための費用の増加が挙げられる。これらの措置は、系統運用者によってしばしば取り上げられる。つまり、風況のよいドイツ北部の陸上・洋上風力発電が多くの電力を発電し、それを南部の産業地域向けに送電しようとする時、系統に混雑が発生する。

2) コンピューター等の情報通信技術を積極的に利用して電力取引を行う公益事業体。

第3章 電力市場に分散型電力と柔軟性を供給する VPP（バーチャル発電所）

この問題は、ドイツ北部と東部の火力発電所が、ネガティブプライス³⁾になったときでも完全に止められないことによって、さらに大きくなっている。このような場合、系統運用者は混雑エリアの火力発電所や再生可能エネルギー発電所にお金を払って解列する。同時に、南部の火力発電所にお金を払って発電量を増加させる。

この現象は、最近数年間でドイツ国内における共通の認識と捉えられてきており、今後さらに悪化することが予想される。例えば、ドイツの4つの高圧系統運用者（TSO）は、2014年に330日の再給電指令を実施しており、その費用は1億8700万ユーロにおよぶ。2013年は232日の再給電指令を実施しており、その費用は1億3200万ユーロである（BNetzA, 2015）

一方、再生可能エネルギー発電所の出力抑制や解列に伴う保証コストは、2013年には4370万ユーロだったのに対し、2014年には8270万ユーロに上昇している。このコストの増加には注目しなければならない。

もちろん、ドイツだけがこのチャレンジに直面しているわけではない。例えば、カリフォルニアやニューヨークでは、2030年までに再生可能エネルギー50%目標を掲げている。ハワイでは、2045年までに100%再生可能エネルギー目標の達成に向けて努力している。

南オーストラリアやデンマーク、テキサスでは、風況のよい期間には送電線が再生可能エネルギーによって日常的に圧倒されている。ノルウェーやアイスランドを含むいくつかの国は、仮想的に100%再生可能エネルギーである。これらの多くは、必ずしも系統に負荷をかけない水力発電である。なぜならば、発電のための水は必要に応じて貯水池に貯めておけるからである。

変動性電源の割合が高いということは、必ずしも系統の信頼性を低くするということはない。ドイツやデンマークは、ともに大きく成長した再生可能エネルギー供給国であるが、決してそのようなことはない。

2013年、デンマークの年間平均停電時間は12分、ドイツは15分であった。2014年は12分を少し超えていた。対照的に、原子力が支配的なフランスでは、2013年の停電時間は68分である。アメリカやその他の多くの国における年間平均停電時間は、1時間を超えている（Steiniger, 2017）。

3) 負の価格。具体的には、電力卸売スポット市場価格がマイナス価格になる状況を指す。

ネットワークにおいて、もっとも顕著に変動性再生可能エネルギーによってもたらされるインパクトは、以下2点である。

第1に、卸売取引市場の全体価格を引き下げる。なぜならば、風力や太陽光、流込み式水力発電は、限界費用がほぼゼロなので、火力発電を置き換える。また、通常火力発電容量は、再生可能エネルギー発電容量の新設よりも遅い速度で停止されるため、市場における過剰容量をもたらす。

第2に、変動性の再生可能エネルギー発電は、卸売取引市場価格の変動をもたらす。なぜならば、風力発電や太陽光発電の大きな出力変動は、全体の市場価格のスプレッド（価格差）にインパクトを与えるからである。

3.2.1 変動性再生可能エネルギーの問題

第1のインパクトについては、再生可能エネルギー発電量が増加しているドイツの電力卸売取引市場において容易に観察される。近年、卸売価格が下落しており、従来型電源を多く持つドイツの4大電力会社に大きな影響を与えている。

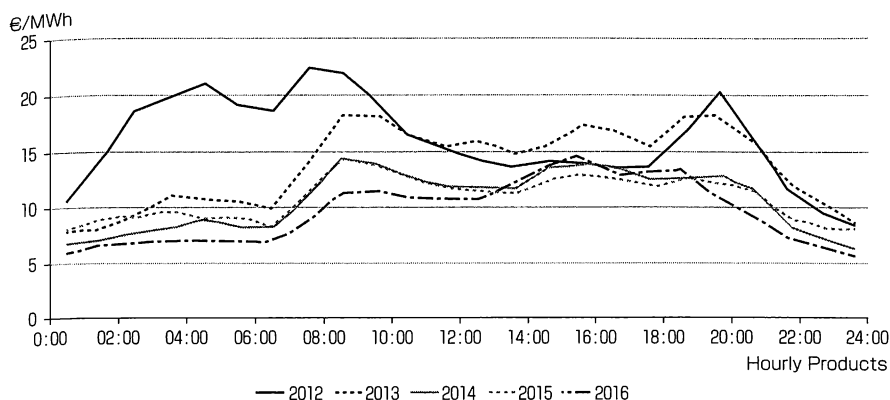
再生可能エネルギー発電の増加は、全体の卸売市場価格に影響を与えるだけでなく、発電所のメリットオーダー曲線にも変化を与える。太陽光と風力発電は、限界費用がゼロである。これらは、限界費用がより高価なベースロード発電所を置換する。ベースロード発電所には、原子力、褐炭・石炭火力、ガス火力が含まれる。

このことは、火力発電所に給電指令がいく頻度が低くなり、稼働時間が少なくなること示している。多くの火力発電所は、出力をゼロまで下げることができないため、最低負荷運転がしばしば起こる。その結果、さらに価格が落ち込む。給電指令を受けた時としても、平均的に低い価格を受け取ることになる。これが、ドイツにおける火力発電所が近年難しい状況にある原因である。

この傾向はさらに悪化している。McKinsey（2014）では、ヨーロッパにおける230 GWの化石燃料発電容量は、2020年までに収益を生まなくなると見積もっている。火力発電の大幅な過剰容量によって、市場価格は投資回収の不足の状況を十分に反映できない。そこで、フレキシブルなピークロード資産の価値がとても低くなり、分散型の環境親和型の柔軟性への投資インセンティブが低くなっているという。

多くの原子力発電所や石炭・褐炭発電容量は、直接的、間接的補助金によって、

第3章 電力市場に分散型電力と柔軟性を供給する VPP（バーチャル発電所）



(出所) Steiniger (2017) p.342, European Power Exchange (EPEX SPOT 2016) を基に Next Kraftwerke 社作成。

図3-1 EPEX SPOT における前日市場の価格変動（標準偏差）

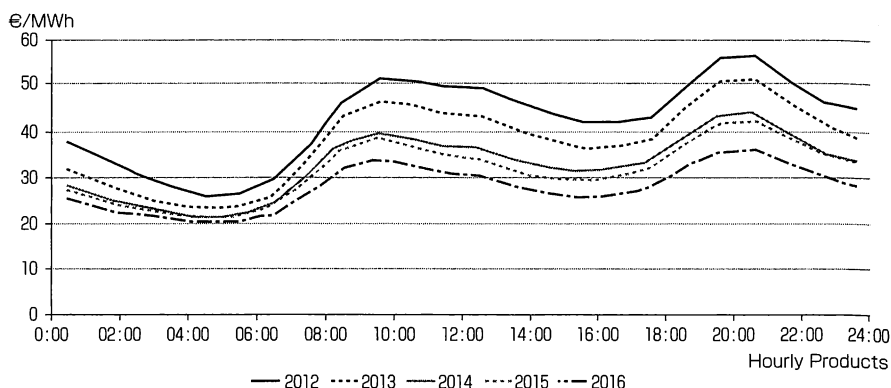
未だ市場に留まっている。これは、2050年までにエネルギー部門を脱炭素化するという EU の目標と矛盾する、逆説的な結果となっている (EC, 2012)。EU の目標を達成するためには、数十年に渡って風力と太陽光の変動性発電をバランスするための、環境親和型発電オプションへの投資が直ちに必要である。

3.2.2 電力卸売市場の価格推移

卸売価格がより変動的になるという、第2に予測されるインパクトは、変動性の再生可能エネルギーのシェアが増加するにつれて、直感的に卸売価格の変動も高まると想定されるものである。しかしながら、ドイツの場合、少なくとも風力と太陽光発電の大部分が取引される前日市場の平均価格の変化を見る限り、そのような傾向は観察されない。むしろ、前日市場における価格変動の標準偏差は、2012年以来減少している傾向が見られる（図3-1）。

この発展の理由の一つは、前日市場の流動性が明らかに高まったからであるといえる。それは、2012年に始まった再生可能エネルギーの市場プレミアムモデルの導入以来、顕著になっている。以後、再生可能エネルギー電力は、通常前日市場もしくは当日市場で取引される。ここでは、天気予報精度の向上により、実供給時間前の短期間で、予想誤差が補正される。

結果として、少なくともドイツでは、電力スポット市場が風力や太陽光の変動



(出所) Steiniger (2017) p.3423, European Power Exchange (EPEX SPOT 2016) を基に Next Kraftwerke 社作成。

図 3-2 EPEX SPOT における前日市場の平均価格

性の性質に効率的に対処できており、必ずしも、変動性の再生可能エネルギーが価格変動を大きくしているとはいえない。一方で、再生可能エネルギーは、卸売取引市場の価格構造を大きく変えた。たとえば、太陽光発電が最も著しい日中の時間帯の価格の崩壊は、古い時代の電力業界の、ピーク、オフピークのパラダイムが、実質的に排除されたことを示している。

図 3-2 が示すように、ドイツにおいて丸一日を通しての平均的な前日価格は、5 年間で減少している。現在のピークは、通常、朝と夕方の時間に発生し、日中の価格は深夜の価格に近くなっている。同様のケースとして、カリフォルニアにおける、ダックカーブの現象がよく知られている。

これは、屋根上の太陽光発電の増加によって日中の電力需要が減少し、一方で夕刻の急激な電力需要の増加によって、アヒルが右側を向いているような形状の需要曲線を描くことを示している。需要量に応じて電力スポット市場価格も同様の形状になる。

カリフォルニアのダックカーブの現象は、現在では日常的に世界中で経験されている。例えば、日射量の多いオーストラリアや、風の強いテキサス、デンマークなどが含まれる。こうした地域では、太陽光発電や風力発電が過剰になる期間において、しばしばネガティブプライスが発生している。

以上、これらの 2 つのインパクト、つまり卸売取引価格の急落と、ピーク、オ

フピークの変化によるネットの影響をまとめると、以下2点になる。第1に、火力発電、とりわけ柔軟性のない運用特性を持つものは、収益性が低くなる。そして、第2に、需要と供給のバランスを常時維持するという課題は、新しい思考、新しいツール、そして新しいアプローチを必要とするため、これまでよりも複雑となり、系統運用者の仕事をよりチャレンジングにする。

次節では、まず、ドイツのように変動性の再生可能エネルギーが系統上に増えていく状況で、変動性発電と変動性の需要をどのようにバランスさせるのか、というソリューションを提案することで、第2の効果を検討する。

3.3 VPP とアグリゲーターの役割

これまで議論してきたように、変動性発電が圧倒し始めている市場において、系統運用者の伝統的なツールボックスやソリューションによってこれまで日常的に用いられてきたビジネスが、持続可能で実用的かつ費用効率的ではなくなってきているように明らかに示されている。

太陽光発電や風力発電の変動によって引き起こされる大きな問題は、火力発電がほとんど毎日のように、最低限の動作レベルまで出力を下げなければならない、一方で、夕方のピーク需要に合わせるために、午後の遅い時間に全開で発電を再開しなければならないことである。

カリフォルニアにおけるダックカーブの場合、その上昇と下降の出力変動量は13-14 GW に達し、これを3時間の間に実行されなければならない。そのことは、火力発電所の設備に多くの摩擦や断裂をもたらすだけでなく、大変非効率で費用が高く、また大気汚染をもたらす。

カリフォルニアやドイツが直面している、いわゆる最低負荷（minimum load）問題のような問題に加え、涼しくて晴れた日中や風の強い夜間には、系統運用者が単純に火力発電所を止めてしまう、という状況をもたらしている（EEnergy Informer, 2016）。

多くの火力発電所は、様々な理由から、合理的な制限を超えて出力を落とすことができないため、必要のない日中でも、最低負荷で運転しなければならない。この問題は、カリフォルニアやドイツをはじめとする地域において、時間とともに深刻になってきている。

そのために、専門家は、系統運用者の伝統的なツールボックスを超えて、変動性発電と負荷をバランスする、実用的かつ費用効率的で、大気汚染をもたらさない代替案を模索しているのである。

明確な解決策は、以下3点である。第1に、可能な限り変動性の発電をより適切に管理すること、第2に、変動性の再生可能エネルギーと同時に柔軟な再生可能エネルギー発電を育てること、そして第3に、需要側において、より柔軟的に価格応答性を高めることである。

3.3.1 変動性電源の管理

Next Kraftwerke社は、ドイツのデジタルユーティリティであり、これらの解決策をすべて実践しようとしている革新的な会社である。そして、系統運用者、柔軟性をもった需要家、出力を調整できる発電事業者にとって、Win-Win-Winの方法を提供している。

この会社の基本的なビジネスモデルは、VPP内において、喜んで価格シグナルに対応することができる多くの参加者を集約することによって、柔軟性をもった発電と負荷のポートフォリオを形成している。

同社は、発電事業者、需要家、卸売取引市場、そして系統運用者に対し、Next Boxと呼ばれる遠隔管理ユニットを使用することによって、収益性の高いビジネスを開発した。このビジネスモデルは、リアルタイムで当事者間が相互に取引することを可能にする。2016年後半までに、4,000の発電所と需要家を結んでおり、その結合容量は2,700 MWを超えている。

Next Boxは、当時者間を高度に自動化されたMachine to Machine (M to M) 通信で結びつける。これによって、需要と供給が価格シグナルに対応できるようになる。

とくに、アンシラリーサービス⁴⁾やコンロールリザーブ⁵⁾の供給に大きく関連している。欧州では、49.8ヘルツから50.2ヘルツの間で系統を安定させるように、送電事業者(TSO)によって調整力が入札される。一般的に、発電事業者

4) 周波数制御や瞬動予備力などによって電力の品質を維持するために行う補助的な運用サービス。

5) TSOによって募集される需給調整力。

と需要家は、正と負の容量を入札することができる。入札で選ばれた時には、その容量は他の場所で販売してはならず、TSO は系統にインバランスが生じた時に、給電・出力抑制の指令をすることができる。

電力市場が、少数の大規模火力発電によって支配されていた時代には、このバランシング機能の役割は些細なものであった。何百万もの分散型発電所がある今日のシステムでは、はるかに多くの変動性の電源が含まれており、複雑な最適化問題への解が必要とされている。

この問題を解決するために、Next Box は、VPP 内の各分散型発電所と需要家の運用データを収集する。たとえば、入手可能性、最近の容量レベル、そして柔軟な容量に関するデータである。これらのデータは暗号化され、Next Kraftwerke 社の制御システムに送られる。ここで復号化され、処理される。

この制御システムは、すべての Next Box から送信されたデータを検証することで、プール内で使用可能な MW 数を把握している。気象データや価格シグナルとともに、Next Box からの検証データは、各発電所の最適な出力を決定する、最適化スキームにフィードバックされる。その後、この制御システムは各 Next Box に信号を送り返し、それに応じて分散型ユニットは出力を適合させる。

3.3.2 変動性電源と柔軟性電源

Next Kraftwerke 社は、フレキシブルなポートフォリオによって構成されており、その価値は顧客の多様性にある。このポートフォリオには、バイオマス、バイオガス、といった柔軟な発電事業者や、柔軟に負荷を変動することができる大規模需要家（DSM 顧客）が含まれている。同時に、変動性の太陽光や風力発電を集約し、発電量を予測し、電力取引所で販売する。市場の状況が義務づけるならば、出力を抑制する。

これまで、同社は電力取引、ユーティリティや変動性発電所のバランシングサービス、大口産業需要家向けの柔軟な電力の供給を含むサービスの提供を拡大してきた。同社のビジネスモデルの背景にある基本的なアイデアは単純である。つまり、電力が足りないときに発電し、豊富なときには消費する、ということである。

欧州では、電力システムにおける太陽光や風力発電のシェアの増加によって、電力の過不足が決まる状況になっている。天気予報が、価格変動予測にとって、

非常に重要な要素となっていることを示している。

同社では、自身で解析した天気予報に基づいて、実供給の1日前にVPP内の発電事業者と需要家のための時間毎のスケジュールを提案する。その後、欧州の電力取引所の前日市場で、時間毎に対応する電力量を取引する。予測エラーや予期しない発電量低下によるフィードイン予測からの偏差は、風力や太陽光発電の変化量とともに、その日の当日市場において15分ごとに市場取引される。

前日市場と当日市場の価格シグナルは、その順番に、柔軟な発電所と需要家に、15分ごとに最適な価格によって、発電と電力消費する時間をシフトさせるインセンティブを与える。発電事業者に対しては電力が不足し価格が高い時に、需要家に対しては供給過剰となり価格が低い時間帯にシフトするようになる。

同社が、様々な参加者間の相互作用の微妙な違いを、どのように管理しているかについては実に複雑であるが、基本は単純である。需要と価格が高いときには、CHPプラントやバイオマス、といった柔軟な発電事業者は、できるだけ多く発電することが推奨される。柔軟性をもった需要家は、逆のことが推奨される。つまり、最低限まで消費を減らす。

一方で、価格と需要が低い時には、逆のインセンティブが働く。つまり、柔軟な発電事業者は、実現可能な限り発電量を減らすことが推奨される。柔軟な需要家には、実用的にできるだけ電力消費を増やすことが推奨される。

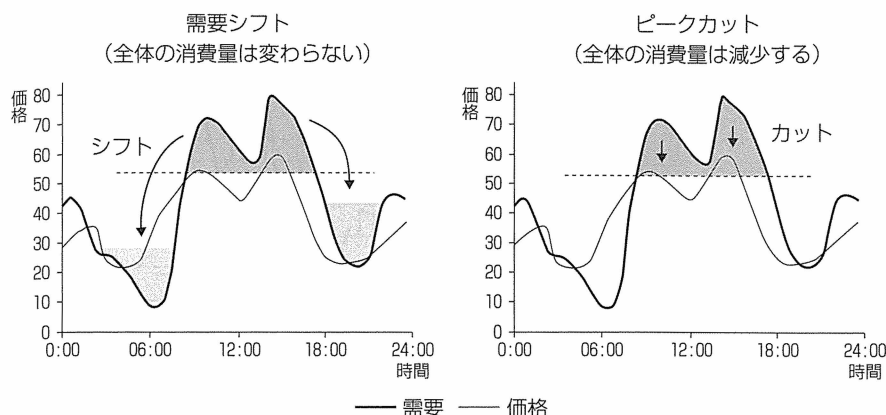
これは、同社が提供している価格シグナルに顧客が対応できるように、M to M コミュニケーションをとおして自動的に実施される。同社は、卸売市場における需要と供給の状況を常にモニタリングしており、価格やその他の重要な変数も、同時にリアルタイムで予測している。

3.3.3 よりフレキシブルな柔軟性と価格対応

多くの需要家は、電気を使用する時間帯に、十分な柔軟性をもっている。とりわけ揚水（ポンピング）⁶⁾や加熱、溶融、粉碎、処理・加工などのプロセスを伴う顧客である。これらの顧客は、電力を多く消費する時間帯を調整することで、操業に影響を与えることなく、電力価格が低い時間帯にシフトすることができる。これが、需要家側で具体的に募集している顧客のタイプである。

6) ポンプによる水のくみ上げ。

第3章 電力市場に分散型電力と柔軟性を供給する VPP（バーチャル発電所）



(出所) Steiniger (2017) p.351より作成。

図3-3 DSMの原則（需要シフトとピークカット）

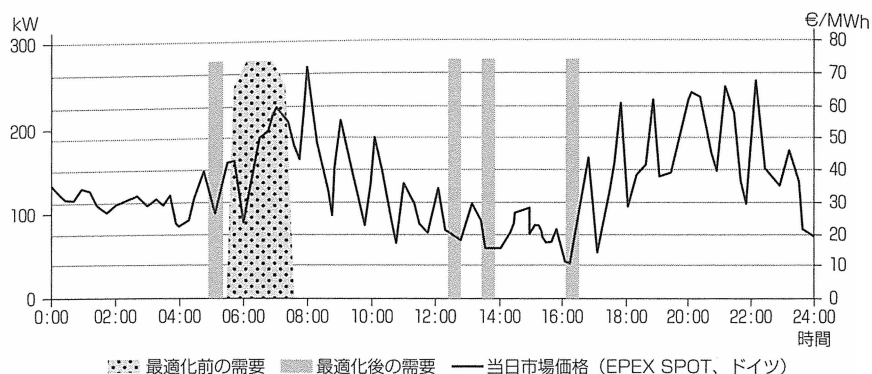
これらの顧客は、時間の経過とともに、価格シグナルにうまく対応する方法を自ら学ぶ。彼ら自身、次第に管理がうまくなり、多くの電力を節約すると同時に不便さを少なくしてゆく。

同社にとってのDSMとは、その伝統的なアプローチのように、高価格時間の需要ピークを削減するだけでなく、継続的な最適化プロセスによって需要を高価格帯から低価格帯にシフトさせることを意味する。その結果、顧客は電気の総使用量を削減することは減多にないが、電気を使用する時間については活発かつダイナミックに最適化させる（図3-3）。

例として、同社の顧客の一つとして、ドイツの低地沿岸地域における、沿岸管理協会があげられる。ここでは、堤防の水位を維持するために揚水の大きな電力需要がある。彼らは、雨水を海にくみ上げて、水位を維持している限り、絶えずポンプを動かす必要はない。これは、貴重な柔軟性を示している。

この最適化スキームでは、同社は、洪水を避けるため水位を一定の限度内に維持する必要があるなど、事前に決められた一連の制限を踏まえた上で、最も電力価格の安い15分間を、毎日決めていく。顧客が、安い電気を利用するために、ポンプ稼働時間スケジュールを変更することに同意すれば、水量の管理に悪影響を及ぼすことなくポンプの負荷時間が調整され、その結果、電力料金が削減される。

この商品は、Best of 96と呼ばれている。一日は、96個の15分で構成され、同



(出所) Steiniger (2017) p.352より作成。

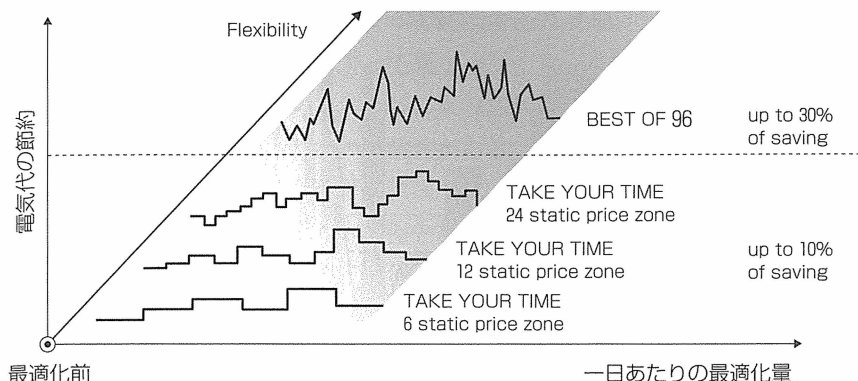
図 3-4 価格変動と需要管理

社が、需要家にとって最も安い15分間を選び出すからである。図 3-4 は、顧客が低価格を利用して、電力消費時間帯をスケジュールするためのスキームを示している。この例では、最適化前では、午前 5 時30分から午前 7 時30分まで 2 時間ポンプが稼働していた。しかしながら、同社による最適化分析では、午前 5 時から30分間、午後 0 時30分から30分間、午後 1 時30分から30分間、午後 4 時から30分間ポンプを稼働することが提案された。このプロセスによって、この顧客は 2015年に電力料金を30%節約することができた。

ポンピングによる電力負荷については、ほとんどの場合、同じ原理を適用することができる。こうした顧客は、通常、大量の電力を消費する大型工場用ポンプを使用している。電力使用料は最低ラインまで削減したとしても、通常の操業には影響を与えることはない。これは、分かり易いスキームであるが、電力が消費される時間が正確には要求されない多くの産業や商業にも当てはまる。

15分ごとの需要をシフトできる柔軟性を、さほど持っていない電力需要に対して、同社はあらかじめ 1 年間全体を通した価格ゾーン設定を提供している。Take Your Time と呼ばれる商品である。図 3-5 は、Take Your Time の様々なオプションによって、柔軟性がどのように向上し、Best of 96でピークに達するかを示している。

同様の原則が、バイオマスなどの、柔軟性を持つ発電事業者にも適用される。発電側の顧客の一つは、オペレーターが柔軟性に関して設計を最適化したバイオ



(出所) Steiniger (2017) p.353より作成。

図3-5 Next Kraftwerke 社の DSM 商品（柔軟性が高いほど、電気代が節約できる）

ガス発電所である。これは、近年のドイツの再生可能エネルギー法の改定によってインセンティブが与えられている。

発電所の所有者は、TSO への柔軟性の供給にともなうプレミアムを受け取る。一方で、全開運転のためのフィードインプレミアムは、半年間分だけ受け取ることができる。結果として、プラントのオペレーターは、1日につき、12時間（48ユニット×15分）のうち、最も価格の高い時間に発電機を作動させることになる。

図3-6は、同社の顧客であるバイオガス発電に対して行っている運転方法を示している。前日スポット市場価格に比べて、当日スポット市場価格は変動が大きい、その価格が最も高い時間帯を狙って、できるだけ多く発電するように運用していることが分かる。

もちろん、すべての需要家が電力消費プロセスを15分ベースで変更することができないように、すべての発電所がこのことを実施できるわけではない。いくつかのバイオガス発電所は、最小の発電と関連させながら熱供給のための契約を有しているか、あるいはバイオガス貯蔵タンクが比較的小さい。発電所の柔軟性の範囲を決定するために、プラントの運転に関わるすべてのプロセスを分析する必要がある。

ボトルネックや制約が特定されれば、より大きなタンクや発電機の継ぎ目のない運転に投資することで、これらの問題を克服することができる。プラントのオ

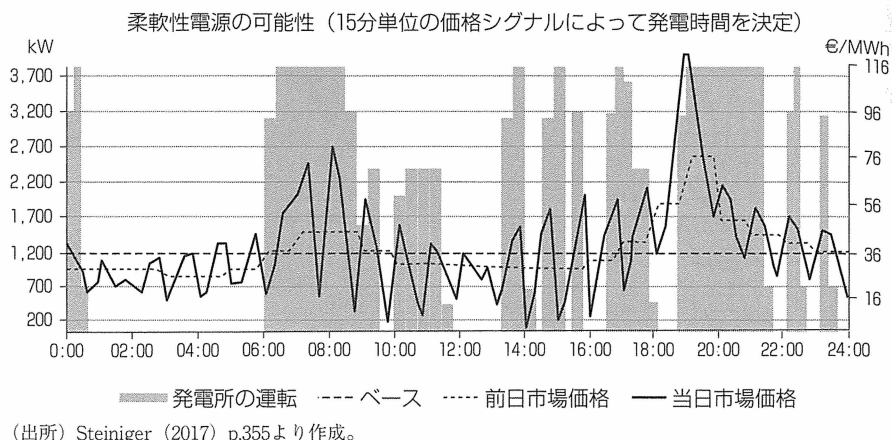


図3-6 価格シグナルによる発電

ペレーターにとっては、これらの投資は早急に償還する必要がある。変動の大きな市場では、一般的に投資回収期間を見積もるのが難しくなる。

一方で、従来型の原子力と石炭・褐炭発電容量は、ドイツだけでも2025年までに、18 GW が市場を去る。このことから、今後数年の間、しばしば価格スパイクが起こることは明らかである。なぜならば、風力や太陽光発電の設置が増えたとしても、風が吹かず、太陽も照らない時期があるからである。

このような時代になると、柔軟性を持ったランプアップできる再生可能エネルギーと、柔軟な需要家への要求が高まってくるだろう。言い換えると、同社のようなビジネスモデルは今日確固とした物になってきており、将来的により価値が高まる可能性が高い。

3.4 変動性電力の将来

現在では、電力セクターの将来は、変動性の再生可能エネルギー資源の増加から、より分散型の発電にシフトしていくと一般的に受け入れられており、おそらく、顧客レベルでのエネルギー管理や制御システムが增強される可能性が高い。それは、系統からの電力依存度を減らし、柔軟性と自立性を提供する、分散型の蓄電池のようなものである (Shioshansi ed., 2016)。

第3章 電力市場に分散型電力と柔軟性を供給する VPP（バーチャル発電所）

そのような未来に向かってどのように進化するのは、どこにいるのか、どの種類の規制に属しているのかによって異なってくる。現在ドイツ、ニューヨーク、カリフォルニアで起こっていることは、次の10年間のインドネシア、サウジアラビア、マリなどには適用されない可能性がある。

しかし、これらの現実は、すでにニューヨーク、カリフォルニア、オーストラリアの一部の規制当局が取り組むべき優先事項の最前線にあり、中心事項である。近い将来、世界の他の地域でも、同様の問題に直面する可能性が高い。

ドイツやデンマークのような地域での再生可能エネルギーの急速な増加は、すでに系統運用者の仕事を過去よりもチャレンジングなものにしている（Probert, 2014）。VPP やその関連産業が登場したことが示唆するように、このチャレンジは、発電事業者、需要家、系統運用者によって求められる新しいサービスを提供する機会を作り出した。

問題は、このような新しいビジネスモデルが、どのように出現し、進化し、どのくらいの速さで成長するのか、ということである。同時に、発電事業者、配電事業者、その他の理解が関係者のいずれであっても、現在の電力会社がどのような役割を果たすのかも重要になってくる。

今後明らかに、分散型の発電容量と需要をアグリゲートして VPP を形成し、アンシラリーサービスを含む無数の製品やサービスを TSO に供給する会社が増えてくる。Next Kraftwerke の経験が示唆するように、このような企業は指数関数的に成長する可能性がある。さらにサービスを強化し、他の市場にも拡大する可能性もある（Steinger, 2017）。

2009年に設立された同社は、爆発的な成長を遂げているという。2013年には2400の施設から1 GW の容量をアグリゲートし、主にバイオガス、バイオマス、CHP プラントから2.5 TWh を取引している。わずか1年前、400の施設から1 TWh 取引していたのと比べると、大きな成長である。最近では、同社4,000の分散型施設を管理しており、9 TWh を取引しているという。

同社の急速な成長と商業的な成功要因は、再生可能エネルギーへの高い洞察による将来の市場で要求される2つのサービスに遡ることができる。第1に、発電された電力をアグリゲートして、EPEX-SPOT⁷⁾をはじめとする様々な卸売市場で販売することと、第2に、発電側と需要家側の両方の柔軟な容量を、様々なバランシング市場（需給調整市場）とスポット市場で最適化することである。

同社の自動化された集中管理室はドイツのケルンにある。ここでは、独自の Next Box システムを使用して、市場価格、系統混雑、天気予報データに基づいて集計された発電量と負荷を調整している。発電事業者、需要家はいずれも、同社のスキームに参加することで便益を受けることができる。もっとも典型的な節約は、柔軟性と価格シグナルに、どれだけうまく対応できるかにかかっている。

需給調整市場のために、同社は二次調整力と三次調整力に積極的である。これは実際の供給力だけでなく、入手可能性についても支払われる。最近では、ベルギーとドイツにおいて、一次調整力の供給も始めた。こうした料金は、最終的には需要家負担であるが、供給コストはインバランスを引き起こした市場参加者が支払うことになる。同社の顧客は、通常柔軟性に応じてバランシング契約の価値を共有することになる。

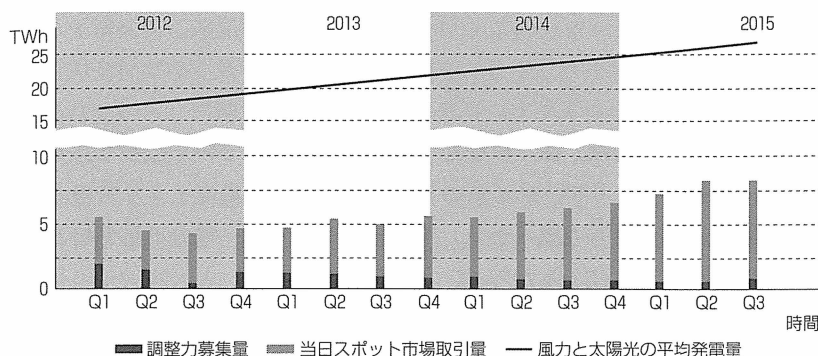
同社が2009年に設立されたとき、変動性の再生可能エネルギーの供給が急速に増加したため、TSO によって要求されるアンシラリーサービス、とりわけコントロールリザーブ（調整力）の要求量が増加すると予想していた。その後7年たった2016年、彼らは、2009年には存在しなかった当日市場の重要性の爆発的な増加を過小評価していたことに驚いた。実際に、TSO によって要求される調整力の量は減少している。一方で、EPEX-SPOT をはじめとする当日のスポット市場で取引される電力は増加している（図 3-7）。

風力や太陽光発電によって電力市場にもたらされる変動性は、現在では当日市場でバランスされ、系統全体のインバランスを減少させたことで、TSO による需給調整市場の要求が減少しているといえる。同社は、ドイツのエネルギー安全保障の高水準を確保する一方で、変動性の再生可能エネルギーの発展に最も効率的に対応できるのは、スポット市場のシグナルだと解釈している。

こうした VPP にとって、期待される成長はいったい何なのだろうか。同社の共同設立者であるヘンドリック・ザミッシュ氏は、同社のビジネスモデルに自信を持っている。彼は、VPP によって、ドイツが100%再生可能エネルギーという究極の目標に、合理的な価格で達成することを可能にすると考えている。

7) フランスに本部を置く2008年設立の電力スポット市場。ドイツ、フランス、イギリス、オランダ、ベルギー、オーストリア、スイス、ルクセンブルグなどを対象にしている。(http://www.epexspot.com/en/)

第3章 電力市場に分散型電力と柔軟性を供給する VPP（バーチャル発電所）



（出所）Steiniger（2017）p.360より作成。

図3-7 柔軟性要求量の変化

同社は、原子力や石炭・褐炭発電所が徐々に閉鎖され、市場価格が自由に動くようになったとき、分散型の再生可能エネルギーの柔軟性のオプションを設立する市場インセンティブが十分になり、系統の過不足状況が、より柔軟な需要と、短期間の相互間の柔軟な発電によって吸収されると信じている。

時間や場所を越えた、風力や太陽光発電の変動性を考慮すると、特定の技術が、どのくらいの頻度で必要になるかについては、実に高い不確実性がある。ただし、従来型発電所の固定費用の高い資産は、少なくとも政府の支援なしには、償却期間にわたって十分な安全性を確保できない可能性が高い。

その代わりに、固定費が低く、変動費が低い資産は、将来の大部分の柔軟性を供給するために、最も効率的である。それらは、すでに設置されており、償却が終わったものである。もしくは、エネルギー市場以外の主要な利用用途があるプラントである。

これらのアセットには、CHP やバイオガスプラント、電気自動車の蓄電池、家庭用・産業用・商業用設備、そしてもちろん、一般的に DSM も含まれる。同社によれば、将来のエネルギー市場の柔軟性の原則は、まずシフトし、次に蓄えることになる。

3.5 まとめ

欧州の電力取引市場は、徐々にひとつの市場に収束していくだろう。そこには、ノルウェーやオーストリア、スイスの水力、イベリア半島やイタリアの太陽光発電が含まれるが、これらの国々から、風力発電が少なく、電力不足を起こす中欧に電力を供給することになるだろう。

同時に、欧州の電力需要家による柔軟な容量は、長年にわたって活性化されるが、ピーク需要という考え方が、時間の経過とともに消滅する。発電は、固定化された需要を追いかけることはもはやないが、発電と需要はダンスのように、常に完璧なバランスを見つけることができるようになるだろう。

何百万もの分散型ユニット間の、複雑かつ繊細なダンスは、需要と供給のバランスを確保しながら系統の信頼を維持しなければならない。その中央で、デジタルユーティリティによって振り付けされる必要がある。

本章では、欧州の VPP を代表する Next Kraftwerke 社のビジネスモデルを中心に、価格シグナルをもとに、需要家側の DSM や DR、発電側の柔軟性を活用した系統安定に貢献しうる取り組みと、今後の展開について議論してきた。

同社のビジネスモデルが示唆することは、とりわけ多くの変動性再生可能エネルギーが大量導入され、系統を圧倒するような状況下で、卸売取引市場の価格シグナルを基準にしながら、需要家側と発電側の柔軟性を積極的に活用することで、社会経済的にも安価なシステムを構築していることである。

一方、日本における VPP の議論では、卸売取引市場の価格シグナルをもとに、需要家側や発電事業者にインセンティブを与えるような展開が未だみられない。それは、現在の日本における VPP プロジェクトが、大手電力会社によって主導されることが一因として考えられる。日本の VPP によってまとめられた（アグリゲートされた）分散型の電力は、主として、需給バランスの調整サービスとして提供されることが想定されている。この調整力は、VPP のアグリゲーターと同じ電力会社に供給されることになるから、電力卸売取引市場を介さない。日本では、需給調整市場の整備もまだ議論の段階である。

ドイツの VPP は、バーチャルな発電所として、TSO による需給調整市場に柔軟性を供給するだけでなく、分散型発電所や需要家からの電力を集めて、直接市

第3章 電力市場に分散型電力と柔軟性を供給する VPP（バーチャル発電所）

場家として積極的に卸売取引市場で取引を行うプレーヤーである。彼らは、既存の大手電力会社でなく新規参入者であるから、こうした市場において激しい競争にさらされている。同時にそこで得られる価格シグナルをもとに、ビジネスを展開している。

日本においても、発送電分離によって、発電事業者と、TSO の役割を担う送配電事業者が別主体となれば、電力卸売取引市場に参入する発電事業者が増え、競争が激化するだろう。また、TSO 部門によって募集される調整力もまた、参入者が増え競争的になる。ドイツの経験では、火力発電において、需給調整市場における二次調整力・三次調整力の募集量も落札価格も低下する。

こういう時代になると、変動性の再生可能エネルギーの導入費用も安くなり、導入量も同時に増えていることが想定されるから、こうした電力をいかにして直接電力卸売スポット市場で取引するかが重要になる。そこで活躍が期待されるのが VPP である。VPP は、分散型の再生可能エネルギーを集め、直接市場家として、いかにして発電事業者の利潤を最大化させるかによって、競争的な市場において戦っていくことになる。一方で、分散型の需要家や発電所もまた、どの VPP と契約するかを選ばなければならない。

このように、VPP は市場のプレーヤーとしての役割が期待される側面を持っている。彼らは電力卸売市場の価格シグナルを活用し、透明性をもって彼らのアセット（需要家や発電所）に経済的インセンティブを与えるデジタルプラットフォームとして活躍している。

【謝辞】

本研究は、JSPS 科研費15H01756の助成、および、公益財団法人旭硝子財団2018年度研究助成人文・社会科学系研究奨励を受けたものです。記して謝意を表します。

参考文献

- Appunn, K. (2016) "Re-dispatch cost in the German power grid," *CLEAN ENERGY WIER*, Berlin
- <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/re-dispatch-costs-german-power-grid>
- BNetzA (2015) *Monitoring Report* Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt, Bonn, ht

- [tps://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/EN/BNetzA/PressSection/ReportsPublications/2015/Monitoring_Report_2015_Korr.pdf?__blob=publicationFile&v=4](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/EN/BNetzA/PressSection/ReportsPublications/2015/Monitoring_Report_2015_Korr.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- BNetzA (2014) *Monitoring Report* Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt, Bonn, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/EN/BNetzA/PressSection/ReportsPublications/2014/MonitoringReport_2014.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- EEnergy Informer -The International Energy Newsletter (2016) "What Does CAISO Crave The Most? Flexibility," *EEnergy Informer*, August 2016 Vol.26, No.8, <http://www.menloenergy.com/wp-content/uploads/eei/EEIAug16.pdf>
- European Commission (2012) *Energy roadmap 2050*, doi:10.2833/10759
- Loßner M., Böttger D., Bruckner T. (2017) "Economic assesment of virtual power plant in German energy market," *Energy Economics*, 62 pp.125–128,
- McKinsey (2014) *Beyond the storm-value growth in the EU power sector*, https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/global%20themes/europe/beyond%20the%20storm%20value%20growth%20in%20the%20eu%20power%20sector/beyond_the_storm_value_growth_in_the_eu_power_sector.ashx
- Sioshansi F. P. ed. (2016) *Future of Utilities – Utilities if the Future- How Technological Innovations in Distributed Energy Resources Will Reshape the Electric Power Sector*, Academic Press
- Steiniger, H. (2017) "Virtual Power Plants: Bringing the Flexibility of Decentralized Load and Generation to Power Market," *Innovation and Disruption at the Grid's Edge- How distributed energy resources are disrupting the utility business model*- ed. by Frereidoon P. S., Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811758-3.00017-6>
- Probert T. (2014) "Are virtual power plant the future of European utilities?" *Energy Central*, <https://www.energycentral.com/c/iu/are-virtual-power-plants-future-european-utilities>
- Wille-Haussmann B., Erge T., Wittwer C., (2010) "Decentralised optimisation of cogeneration in virtual power plants," *Solar Energy*, 84, pp.604–611.