CRDS-FY2017-WR-02

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

未来エネルギーネットワークと需要科学

～2050年超の一般家庭でのエネルギー需給構造の変革時代到来に向けて～

平成29年1月17日（火）開催

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

エグゼクティブサマリー

本ワークショップ「未来エネルギーネットワークと需要科学」では、2050 年時点において一般家庭に太陽光発電（PV）等のエネルギー機器が大量導入されることで、電力システムの需給構造に大きな変化をもたらすことを前提としている。その上でその構造変化による課題を設定し､今後必要となる研究開発やその推進方法等についての議論を行った。この報告書では、①従前の計画的・集中的な系統運用は、複雑化する低圧配電系内の需給管理に必ずしも適していないのではないか、②需要家で消費と供給が混在し、エネルギー需要構造が複雑化し、このためエネルギー利用実態が不明になり、施策化が困難になるのではないか、の 2 点の課題を設定し、それに対応するための研究開発の内容や推進方法等を整理している。

上記の 2 点の課題の内、①については、低圧配電系ネットワーク～需要家において、より自由で自律的な電力融通、かつ系統側との連携協調などが容易となる、仕組みも含めた技術・システムの研究開発として、以下の項目に関する研究開発の提案があった。

- 電力の自律分散型システムと ICT による電力潮流制御技術
- 家庭内の電力制御システム
- ネットワークや家庭内のパワエレ機器や材料開発
- 低圧配電系内の市場メカニズム / 電子取引の仕組みや方法
- 電力市場の制度設計のための評価用モデル

また、②については、需要家のエネルギー需要構造の複雑化に対応した研究として、以下の項目に関する研究開発の提案があった。

- エネルギー需要のモデル化（ボトムアップ型)、そのための計測、分析
- エネルギー利用（供給・消費）に関わる行動経済学を用いた研究

全体を通して、推進方法やその他の主な意見は以下の通り。

- 新しい社会制度をつくる場合に、オープンデータやオープンモデルは重要。そのビジネスチャンスを生かすために次のステップの開発を見通せるデータとモデルがあると、それだけでも広がる可能性はある。
- 現在無いものを評価にするには、ミニチュアであっても実証実験が必要。
- 2050 年に向けては海外に我々のつくった技術を売り、それが我々に返ってくるという視点で考えるべき。
- アカデミアの先を見る想像力、発想力により、それをデモや実験でデータとして示していくべき。またシステムが本当に社会に対して有用かという警鐘を鳴らすのはアカデミアの役割であり、研究の必要性でもある。
- 社会的弱者への対応は課題。行政等が弱者を助ける仕組みが必要。

今回のワークショップで得られた結果を踏まえて、関連した研究開発領域・その研究体制など、国として推進すべき研究開発課題を整理し、戦略提言につなげる予定である。

目　次

エグゼクティブサマリー

1　ワークショップ開催概要 …… 1
2　趣旨説明 …… 2
3　未来エネルギーネットワークと需要科学に関する話題提供 …… 5
3.1 「将来のスマートエネルギー NW」…… 5
藤井 康正（東京大学）
3.2 「オンデマンド型電力ネットワークと電力のパケット化」…… 12
岡部 寿男（京都大学）
3.3 「パルス化送電方式に基づく低電圧配電系電力ネットワーク」…… 22
杉山 久佳（大阪市立大学）
3.4 「パワーエレクトロニクス技術～将来の電力システムに向けた研究～」…… 27
伊瀬 敏史（大阪大学）
3.5 「市場メカニズムに関する工学的研究」…… 34
和泉 潔（東京大学）
3.6 「エネルギーマネジメントにおける需要研究」…… 41
下田 吉之（大阪大学）
3.7 「スマートグリッドエコノミクス～フィールド実験行動経済学ビックデータが拓くエビデンス政策～」…… 49
依田 高典（京都大学）
4　コメンテータからのコメント / 話題提供 …… 58
4.1　大谷 謙仁（産総研）…… 58
4.2　斎藤 浩海（東北大学）…… 60
4.3　林 泰弘（早稲田大学）…… 63
4.4　矢加部 久孝（東京ガス）…… 65
5　総合討議 …… 68
6　まとめ …… 73

付録　ワークショッププログラム／ワークショップ参加者リスト

1. ワークショップ開催概要

はじめに

JST 研究開発戦略センター（CRDS）では、JST の研究開発戦略を立案するとともに、今後我が国が取り組むべき重要な研究開発領域、研究課題、研究開発システム等について広く提言を行っている。CRDS の提言は、JST 基礎研究事業における研究開発領域の設定などに活用されるとともに、政府の各種施策にも反映されている。

■ 背景

2050 年超においては電力への大幅な低炭素化の方策として、一般家庭においても太陽光発電（PV）の大量かつ膨大な数の導入が想定されている[注 1)]。このことは、電力システムの安定性など、系統運用上の課題対策の必要性を意味するとともに、長期的にはエネルギー消費者と生産者という二つの側面を持つ一般需要家（プロシューマ[注 2]）が分散的に、かつ多数存在するという、一般家庭でのエネルギー需給構造に変革が生まれることも意味している。この構造変化は、一般家庭におけるエネルギー需給構造、特に人の行動も含む需要の科学的アプローチの難しさも相まった複雑化という課題をもたらすとともに、計画的・集中的需給管理を行ってきた電力システムとの親和性の課題がますます顕在化することも考えられる。

情報通信ネットワークでは、かつて集中管理型のアナログ式電話が、インターネットのような自律分散型の情報通信方式に変化することで柔軟かつ自律性の高いネットワークへと飛躍的に進歩した。このように一般家庭をつなぐ低圧配電系ネットワークにおいても、従来のアナログで集中管理型の電力潮流制御から、ICT による自律分散型の電力潮流の仕組みを取り入れることで、瞬時瞬時に狙いとする相手先に決まった電力量を自律的に送ることが可能になることも考えられる。これにより、ロバスト性が高く、柔軟で自律的な低圧配電系ネットワークとして、さらには個々の需要家間の電力融通や、一般家庭からの系統運用上の調整力確保が容易になることが考えられる。加えてこのような一般家庭につながるネットワークは科学技術基本計画にある ICT 活用によるスマート社会に向けたプラットフォーム作りの一環としても有用と考えられ、他のネットワークとの重層的な連携により、新たな付加価値創造につながることも期待できる。

注 1：H26 年度「2050 年再生可能エネルギー等分散型エネルギー普及可能性検証検討」（環境省）など
注 2：プロシューマ（Prosumer）「Producer+Consumer」の造語。生産活動を行う消費者の意味

■ 趣旨・目的

一般家庭をつないでいる低圧配電系ネットワークおよび一般家庭における需給構造、特に需要変化に向けて、2050 年超の長期的な視点からの戦略的な研究開発の立案を行うために、今から準備すべき研究開発テーマ、研究推進方法などを議論する。

■ 概要

主催：JST-CRDS エネルギーネットワークチーム
日時：2017 年 1 月 17 日（火）13：30 ～ 18：00
場所：JST 東京本部別館　4 階会議室 F

2. 趣旨説明

「未来エネルギーネットワークと需要科学」ワークショップでは 2050 年超における社会を想定した低圧配電系の電力ネットワーク、および家庭内における人の行動も含めたエネルギー需要に係る科学技術についての提案内容を議論する。

2050 年超を考えると、多くの一般家庭で発電や蓄電等のエネルギー機器が存在している状況になり、消費のみであった一般家庭でのエネルギー需給構造が大きく変わる時代になっていると考えられる。（図 2）

これまでの電力システムの構造は、発電から消費、基本的に一方方向という構造の設計でつくられている。また全体のネットワークを見ると低圧需要家は電力量の全体から見ると、40% 程度であるが、数という点においては 7700 万件と大部分を占める。また、電力システムはアナログ系のネットワークで物理的な法則に従って、リアルタイムでつながっている。（図 3）

2050 年、GHG 排出 80%削減目標の中で、再生可能エネルギーが大幅に増え、その中で比較的導入しやすい太陽光発電（PV）が大量に導入されることが想定される。環境省の調査報告書では見通しの設備容量が 24,844 万 kW である。これは 2030 年想定量の 3.8 倍で、値がどうかは別にしても、大量の PV が導入されることは間違いない。その中で、家庭用 PV に着目すると、1 件当たり PV 容量を 3.8kW と仮定すると、3890 万件となり、7700 万件の低圧需要家の半分数近くに PV が入ってくることも考えられる。また PV 以外にも、例えば燃料電池が 2030 年目標で 530 万台。EV/PHV の 2020 年目標が 100 万台であり、2050 年を考えると、このような機器が家庭に多く導入されることが想定される。（図 4）

そうすると、一般家庭の低圧需要家にプロシューマ（プロデューサとコンシューマの造語）という電力生産可能な需要家が登場し、家庭内の電力で発電、蓄電等、調整ポテンシャルが高くなってくる可能性がある。その場合の課題としては、従前の計画的、集中的な調整が非常に難しくなるのではないか、さらには生産と消費が同時に起こるため、エネルギー需給構造が良く分からなくなり、対策が困難になるのでないかということが考えられる。（図 5）

そのような 2050 年に想定される状況に向けておいて考えるべきことは、1 つは、低圧配電系で、自由かつ系統外とも協調連携が容易となるような仕組みが何かないのか。もう 1 つは、需要家のエネルギー構造変化に対してどういうふうに取り組んでいくのかという、2 つがあると思う。1 つはネットワークの問題であり、数が多いので、市場メカニズム、値段の取り決め方に市場を使う可能性が出てくる。その時に、例えば市場取引の制度設計や情報技術をどのように考えていくかが大きな課題になる。あとは、電力潮流の制御技術。狙いとする相手に決まった電気量を自律的に送れるような仕組みづくりにより自律的に立ち回るのではないかという 2 つの仮説を考えている。

もう 1 つは、家庭内の電力制御システム、さらに消費行動にフォーカスしたときにどういうことがあるかを考えてみたい。（図 6）

図 7 はこれまでの話のイメージ図である。本日は図 8 に示す我々の仮説である提案内

容に関連して 7 名の方に発表してもらう。さらに 4 名のコメンテータの方に、幅広い視点からコメントを個別に話してもらい、最後の総合討論につなげ、提案に肉付けをしたい。

海外動向として、スマートグリッドの検討は、日欧米とも実施されているが、今回の趣旨に関係するものとして、米国では Transactive Energy と呼ばれる、配電系に市場経済メカニズムを入れる取り組みがある。これは電力価格を電子商取引でやることを考え、DOE が実証試験もやっている。また消費者行動に係る研究も行われている。（図 9）

図 1-10 はエネルギーネットワークに関する研究の俯瞰図であり、これに現在の既に進められている研究開発プロジェクトを載せた。NEDO を中心に供給側の視点から多くの研究が行われている。また JST － CREST として EMS 領域も行われている。多岐にわたった研究開発でアカデミアの裾野の拡大に効果があると考えるが、現状の電力システムを前提とした研究開発なので、先をにらんだような研究開発については今後の課題と考えている。（図 10）

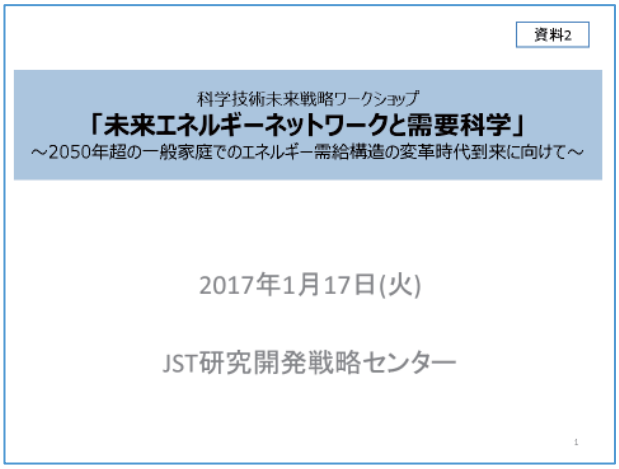

図 1

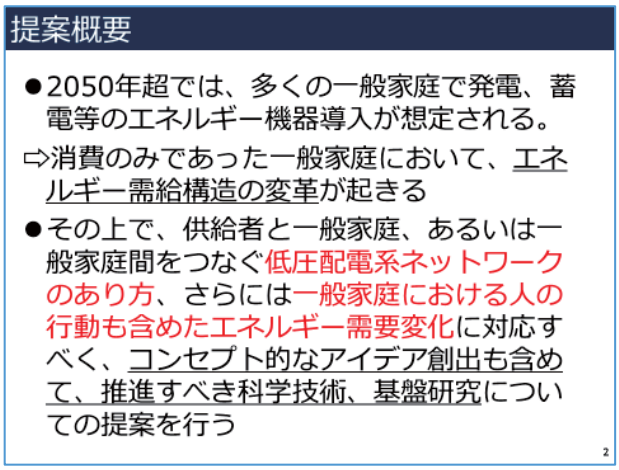

図 2

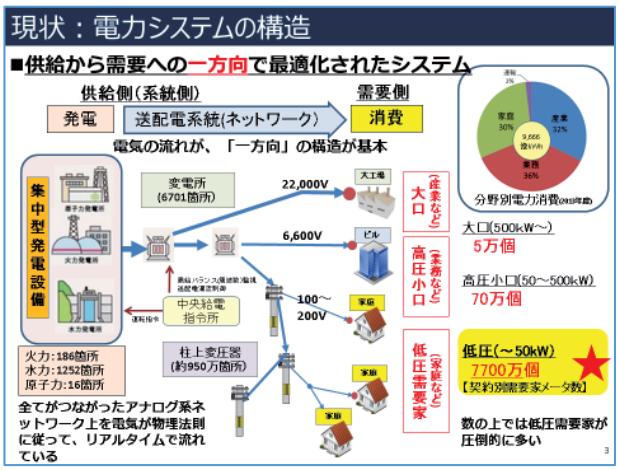

図 3

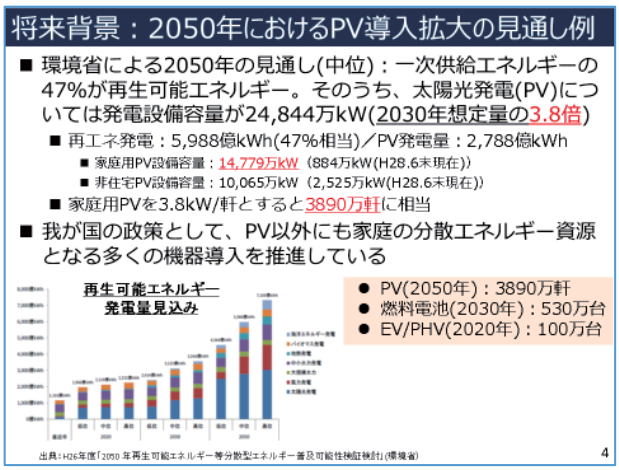

図 4

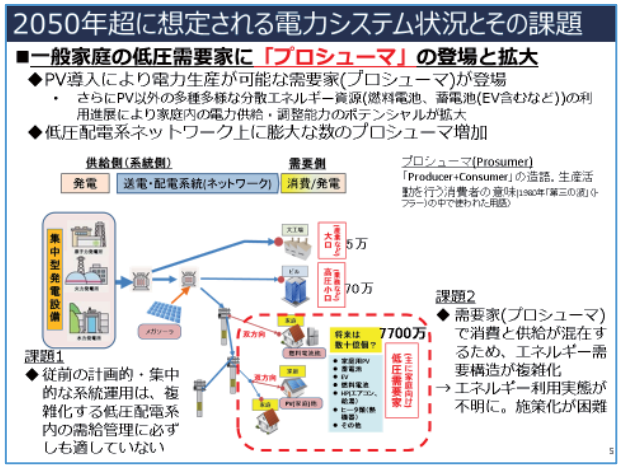

図 5

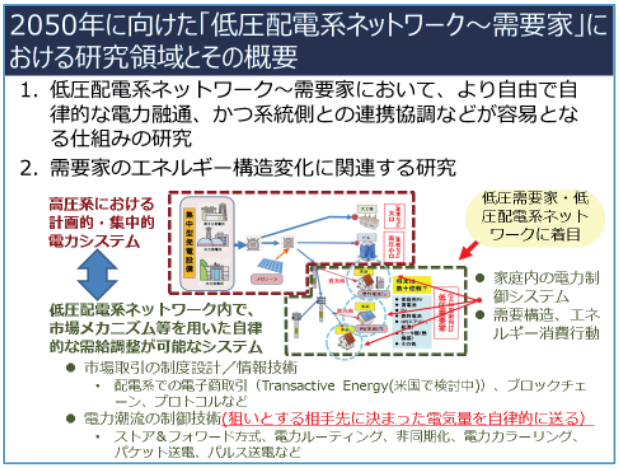

図 6

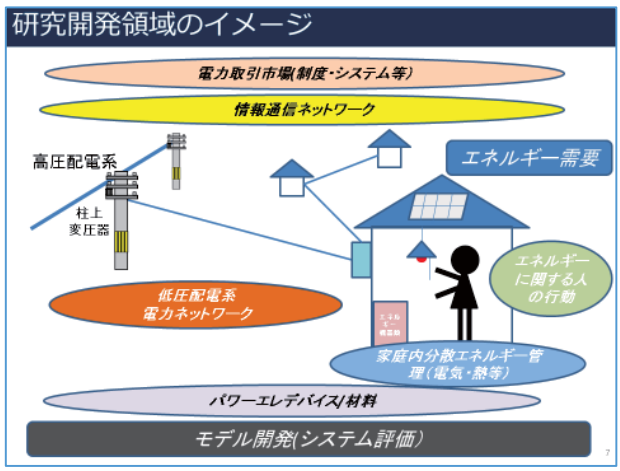

図 7

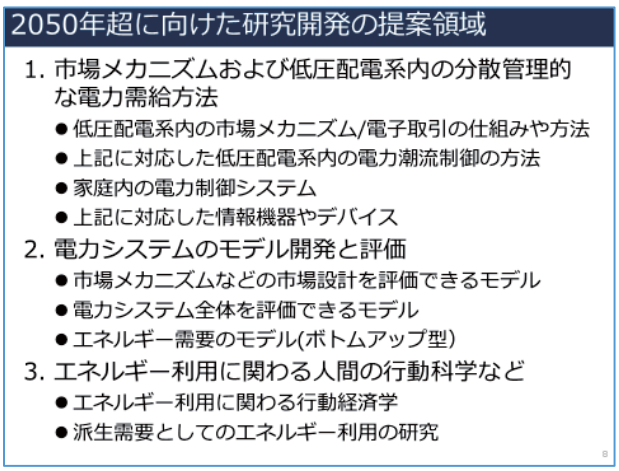

図 8

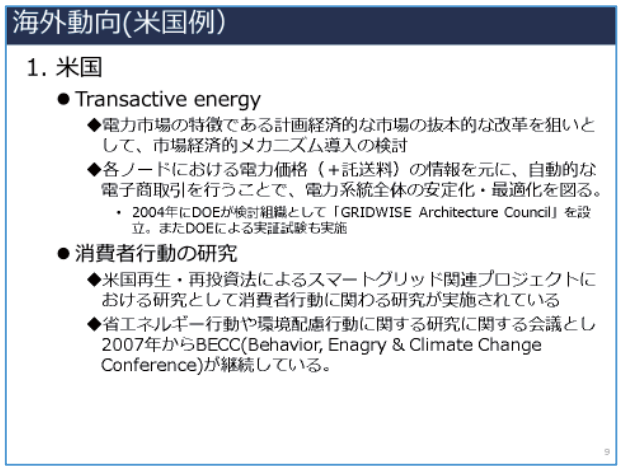

図 9

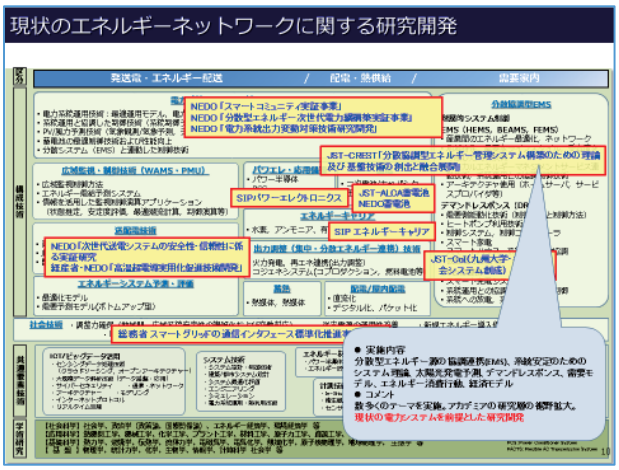

図 10

3. 未来エネルギーネットワークと需要科学に関する話題提供

3.1 「将来のスマートエネルギー NW」

藤井 康正　東京大学　大学院工学系研究科　原子力国際専攻　教授

将来の配電系のスマートエネルギーネットワークを考える上でのたたき台を紹介する。

背景として、1 つは電力自由化等が経済的な全体最適化を目指していること、もう 1 つはそれを進める中で、同時に送配電系の供給信頼度、レジリエンスの向上が必要になることである。（図 1-2）

私が電力システムの進むべき方向の一つとして考えているのは、競争原理の導入を徹底することである。完全競争市場を実現できれば、社会厚生の最大化ができる。冒頭の課題は中途半端な自由化政策によるものであり、完全競争を徹底すれば問題が解消していくのではないか。特に課題は、小口需要家中心とした最終需要端にあり、ほとんど手付かずである。あらかじめ購入した電力しか利用できない仕組みになっておらず、コンセントつなげば自由に使える状況である。また電力料金の支払意志額の表明が社会全体を最適化する上で重要になる。誰が何円払って、どれぐらいの電気を使いたいかということがわからない状況では、誰の電気を使うのを遠慮してくれとかなどの判断ができない。しかし、これは技術的な困難さがあり、今までできなかった。（図 1-3）

市場原理導入を徹底する上で､問題点の 1 つは時間解像度とインバランスへの対応である。今の電力市場は数十分単位での同時同量で取引される一方で、物理的な需給に関しては秒単位の高い時間解像度で調整を行っている。このため、市場の取引と物理系とが乖離している。もう 1 つの問題点は空間解像度であり、市場の空間の解像度と送電料金が非常に関係している。現状の送電料金は総括原価方式のどんぶり勘定であるが、もう 1 つの方法としてノーダルプライス、地点ごとの市場の価格があり、その差で決まることがある。（図 1-4）

今後、PV 等、分散電源が末端の配電系に多量に入ると、配電系の拡張が大きな問題になると考えられ、そうしたときに配電系もやはり距離に応じて課金する仕組みになっていくと考える。しかし、そうなっても市場の空間的解像度が十分ではないので、送電料金の計算ができない。やはり、どんぶり勘定になってしまう状況である。理想的、経済学的に考えられることをシステムで実現しようとすると、工学的には時間解像度を秒単位での市場取引が必要と考える。空間解像度の関しても 100 万のオーダーで市場を全国につくることをやらないと、配電系までの送電料金を合理的に決められない。そうなると、数百万個の分散型の市場でミリ秒単位､1 秒以下で取引をしていくシステムが究極的には要るのではないか。またこれができればいろいろな問題が解決するのではないかということである。（図 1-5）

これはパラダイムシフトになると思うが、実際に大規模な発電所の秒単位での物理的な電力取引は大電力では難しい。また三相交流による送電､変電は物理的に一番効率の良く、あまりいじることができない。上位系統の部分は技術的にいじる余地がないが、柱上変圧器を境として下流側はまだいろいろやれることがあるのではないか。（図 1-6）

分散型の高速取引市場を低圧配電網のノードごとに設置し、これが電柱にあるイメージとなる。ザラバ仕法で価格優先、時間優先で非同期的に、株の取引のイメージで、連続的に

価格が決まっていく。1 つの市場の数軒の家が入札して買ったり、あるいは太陽光発電の電気を売ったりする。また、市場間をつなぐ業者もいる。系統インターフェース、上流の三相交流の部分とも何かつなぎ目があり、上位系統とつながる。各家庭も取引した後、アダプタがあり、家庭中の家電製品をどう制御するかは、また別の問題として存在する。（図 1-7）

こうしたことをやろうとした時に、1 つの案として規格化された電流、電圧によるパルス状の電力取引が考えられる。パルス単位にすると、高速な取引ができ、1 秒間に 100 回ぐらいの取引も可能になる。パルスにすると、断続的な送電になるために、連続的な供給のためには一時的にエネルギーを貯めるバッファー機能が必要となる。バッファーの導入にはシステム上の大きな意義があり、電気回路中の諸量を同時決定する必要がなくなる。そうなると、ネットワーク各部の電流、電圧とは無関係に特定の送電線の送電電力を他とは非干渉的に決めることができる。同時同量の呪縛を解けることがバッファー導入により可能になる。そうすると、ローカルな電力価格情報だけを見て、あちらで高く売れるから、あちらで売る、安いから買うということをローカルな意志決定でできる。それで全体もきちんと動く。（図 1-8）

パルスの取引と従来の連続交流送電での取引のイメージで、小電力しか使わないときは、パルスの数が単純に減る形での電力の取引となる。（図 1-8）

また 100V、200V の低圧の小容量送電であれば、現状の技術でもとりあえずできる状況にあると考える。共振回路を使い、家庭側にアダプタをつけ、電柱側とパルスでお互いやりとりする。パルスであれば、通信のプロトコルでやりとりしながら時間進行し、確認しながら電気をパルスごとに送っていくことができる。こうすると、アプリケーション層、中間層、ハードウェア層で分業でき、特定の分野に専念して技術開発ができ、技術進歩の促進が期待できる。（図 1-9 ～ 11）

市場でパルス、ある意味デジタル的に電気を送ることで、市場で約定された電力しか送電できない。物理現象による自然な電力の潮流は発生しない。オームの法則に従って負荷がつながっているところに向かって電力が自然に流れることが起きない。

このため、すべて人為的に決める必要がある。そのとき価格情報を使えば、あたかも直流回路の電位のように、ノーダルプライスが安価な接点から高価な接点へ電力をどんどんパケットを渡していけば良いことになる。インターネットの IP アドレスに相当するのがここではノーダルプライス、地点ごと、ハブごとの電気の値段になる。値段が高いほうに向かって送っていくことになる。パケット、このときは荷札ではなく、値札が重要。電気の場合、宛先は要らない。同じ電気であり、違いがあるとしたら値段である。値段が安いところから高いところに送ることをやればいい。あと、パルス側と三相交流側で、回路を使ってつなげば良い。（図 1-12 ～ 13）

家庭側では分散市場があって、アダプタを介して家庭があり、HEMS となる。強調できる点として、上り情報、家から外に出ていくのは入札情報しかない。何円で買いたいという情報しかなく、どの機器が使われているかという情報は外には出さないし、出ていかない。外から入ってくる情報も、落札できたか、あるいは、今の落札価格がどうなっているかという情報だけで、外から命令も受けない。エアコンをとめろとか、電灯を消せとか、そういうふうなことも他者から言われなくて済む。ただ、家庭の中での家電は制御しなければいけないので、需要家が自分自身でどう動くかを予測するというところは、研究に依

存してアルゴリズムも決まってくる。（図 1-14）

入札は、将来自分がどれだけ電気を使って、将来、ここの市場の価格がどうなるかを先読みして入札しなければいけないので、多分人工知能を使った入札になっていく。（図 1-15）現存の電力システムで高圧配電線より上位系は何も変わらずに、下の低圧の部分だけが変わる。低圧自律分散型ネットワークの特徴は、完全な分散型のシステムであり、ローカルの給電司令所が要らない。（図 1-16 ～ 19）

（質疑応答）

C：20 世紀の電力システムは効率性の観点から規模が大きく、完全競争は不可能である。また公平性の観点からは、需要家に必需性があるので、競争に委ねられない。このため垂直統合型の公益事業というネットワークをとってきた。しかし、電力のスマート化が進んでいくと、技術的に分散高速取引市場も可能になっていくかもしれない。ただ、明らかにエンドユーザー、低圧の一般需要家がこれに対応して意志決定を行うのはほぼ不可能であるので、このような市場取引ができるようになったときに、どうやってそのエンドユーザーを巻き込んでサポートするかが必要になる。確かに人工知能的な自動化のシステムにより、末端ユーザー等をこの市場に参加させることが必要になっていく。20 世紀は統合型、21 世紀は分散型の電力仕様としたら、究極的に 21 世紀型の分散型のほうが 20 世紀の統合型よりも社会厚生がすぐれて、エンドユーザーとしてベネフィットがあることをどうやって説得するかが課題になると感じた。

Q：学識者がこういう世界観を描いてやっていくことは非常に重要と考える。電柱単位での取引市場などのシステムをつくって進めることでいろいろな技術が入ってくると思った。まず技術でやってみるということが大事であり、例えば現状の技術で実現可能なものもあると思う。2050 年の先を見据えて、基礎研究的なものをやるところは、何かあるか。【藤井】1 つはスイッチがたくさん入ってくるので、エネルギーの損失が非常に大きくなるという問題がある。あとは、入札のところ。AI でどれぐらいできるのかがまたよくわからない。

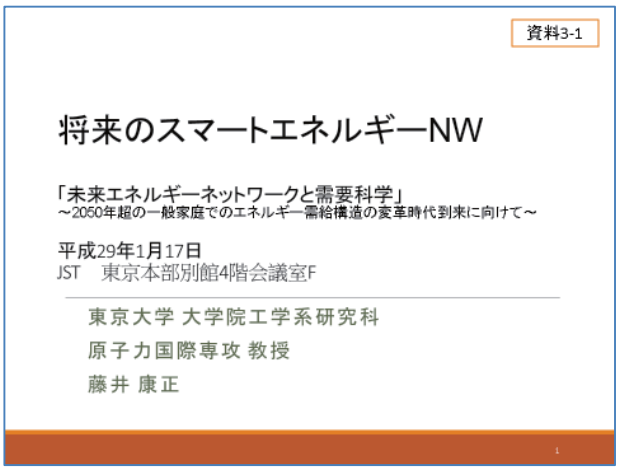

図 1-1

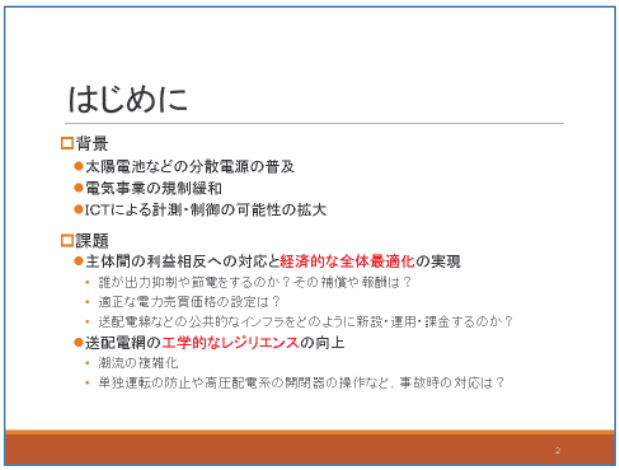

図 1-2

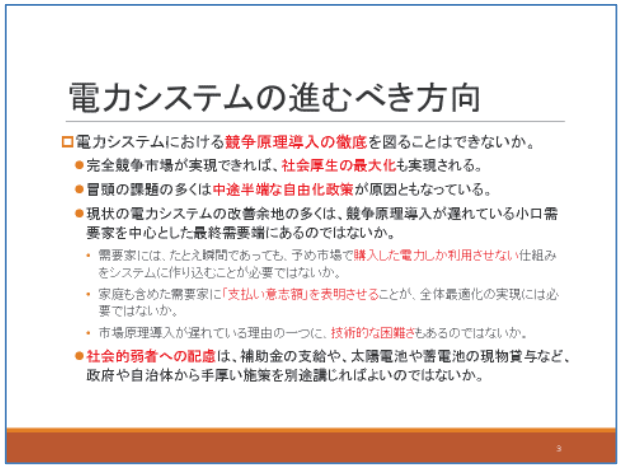

図 1-3

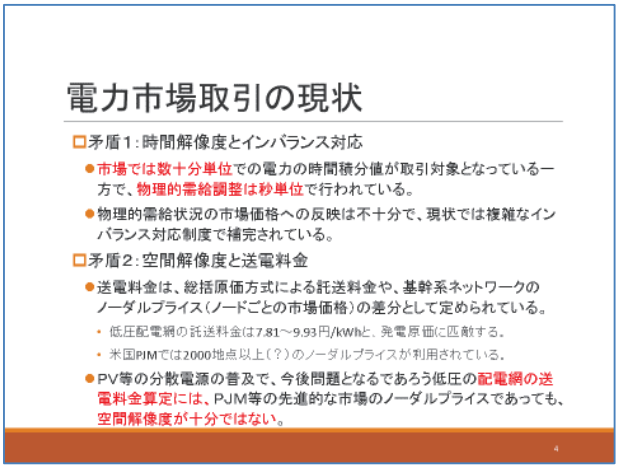

図 1-4

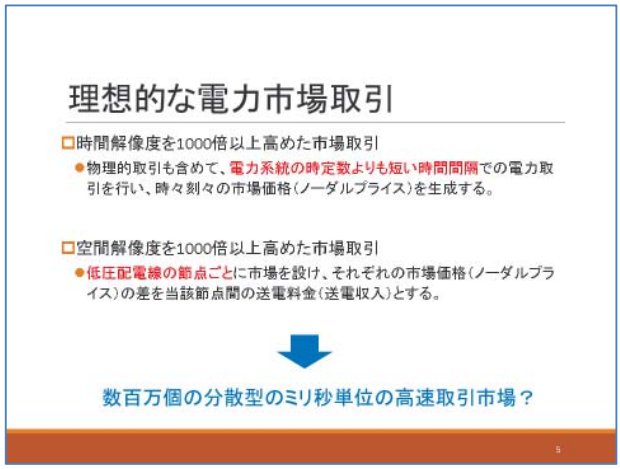

図 1-5

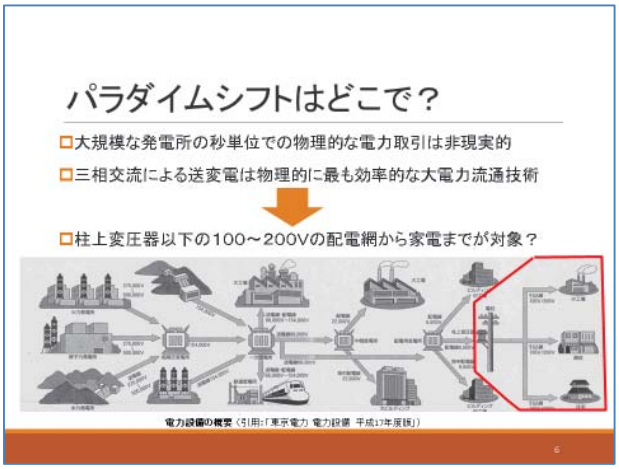

図 1-6

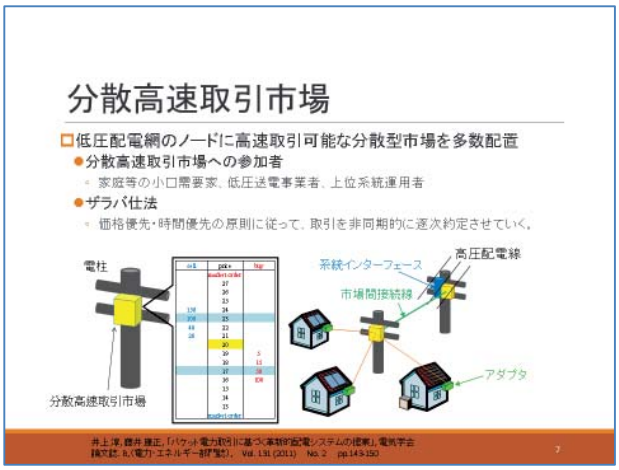

図 1-7

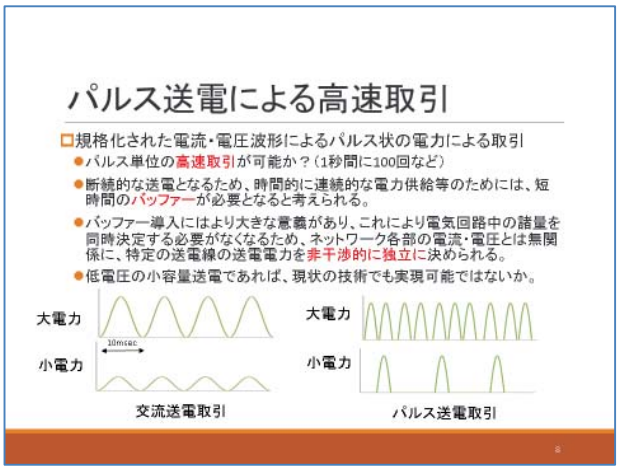

図 1-8

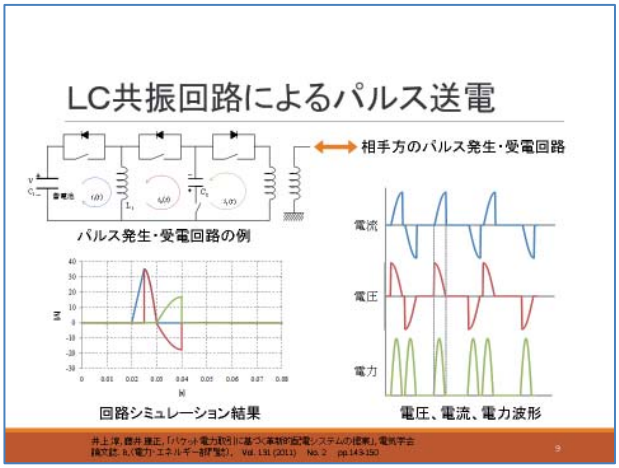

図 1-9

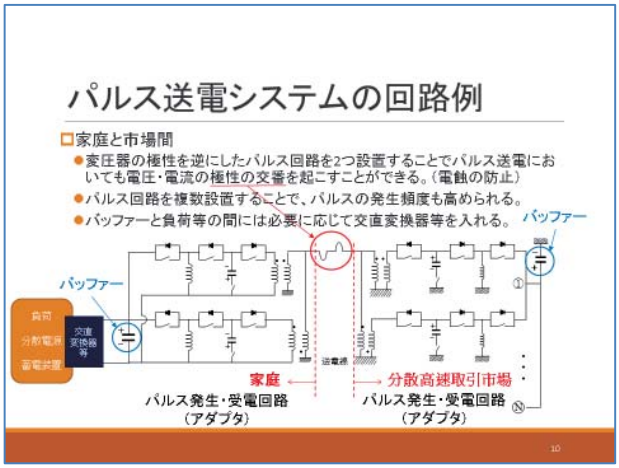

図 1-10

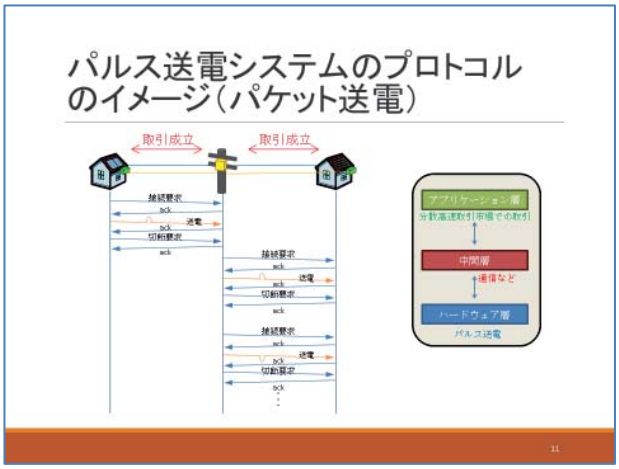

図 1-11

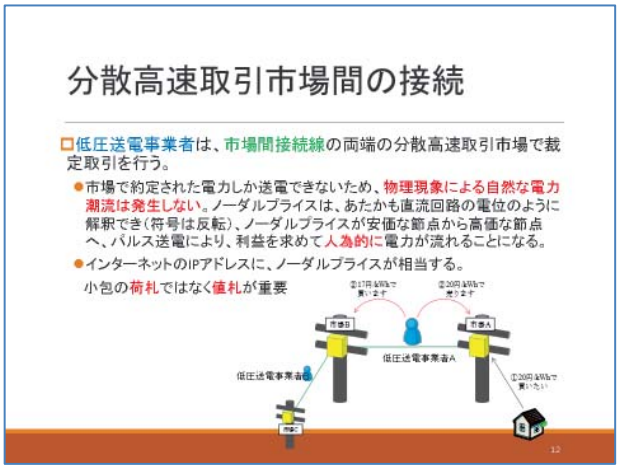

図 1-12

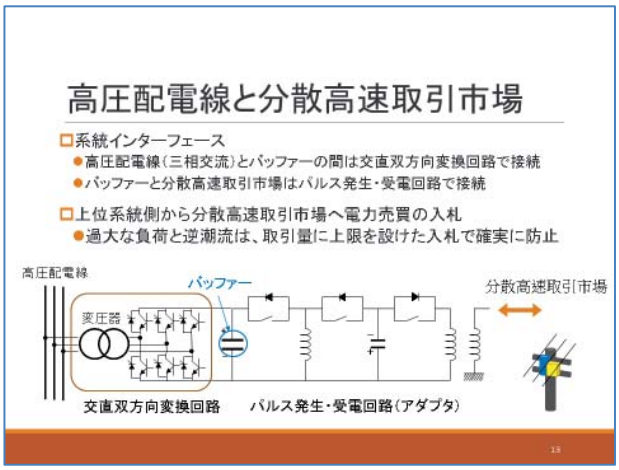

図 1-13

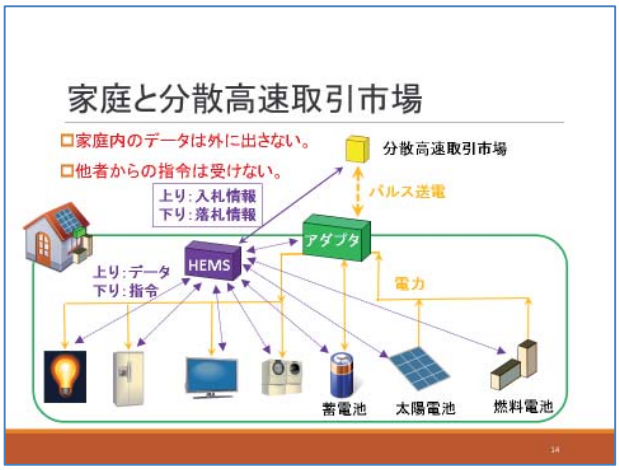

図 1-14

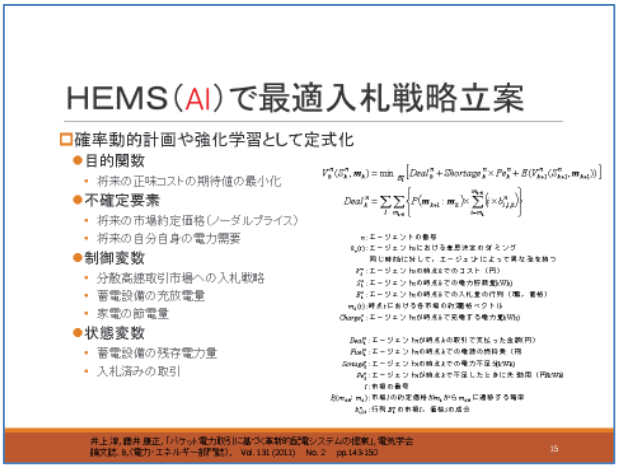

図 1-15

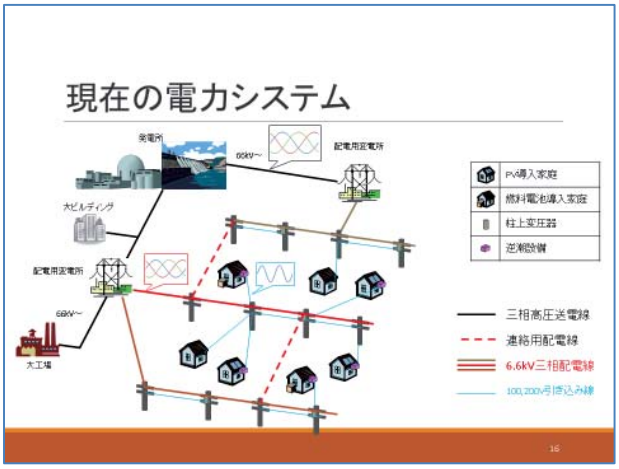

図 1-16

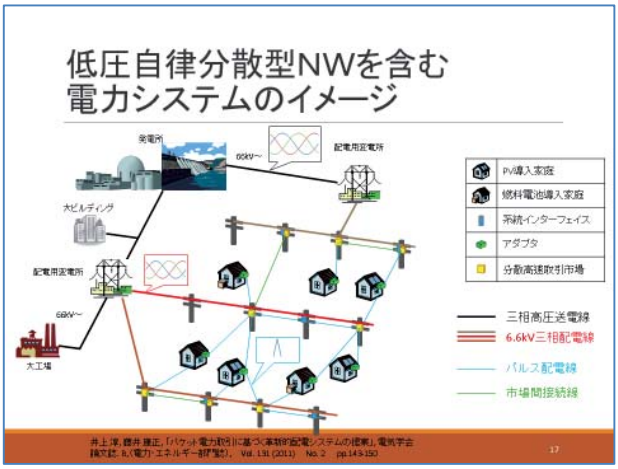

図 1-17

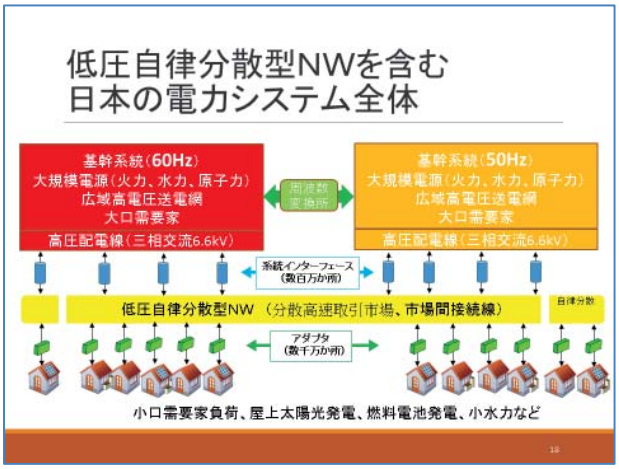

図 1-18

図 1-19

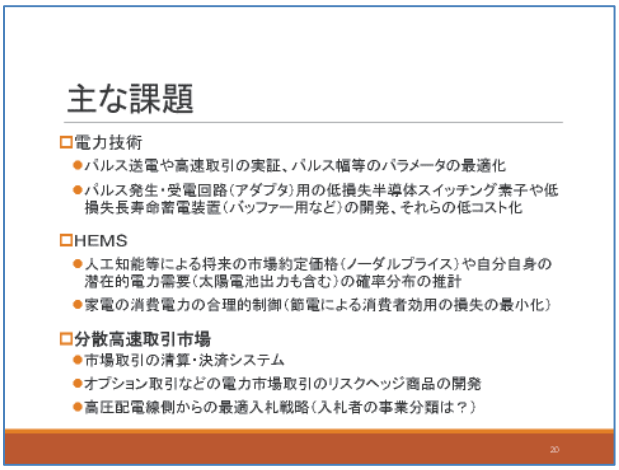

図 1-20

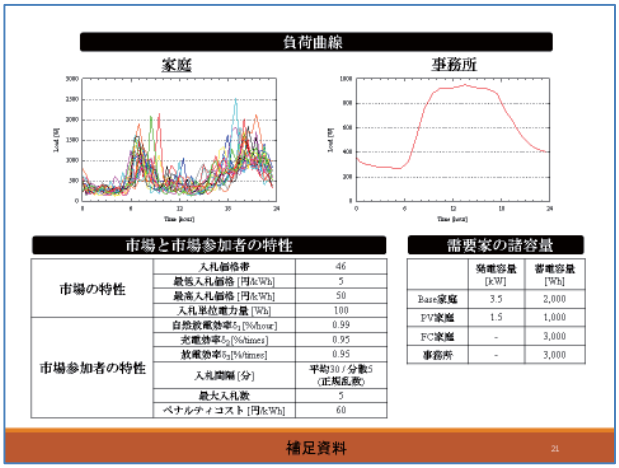

図 1-21

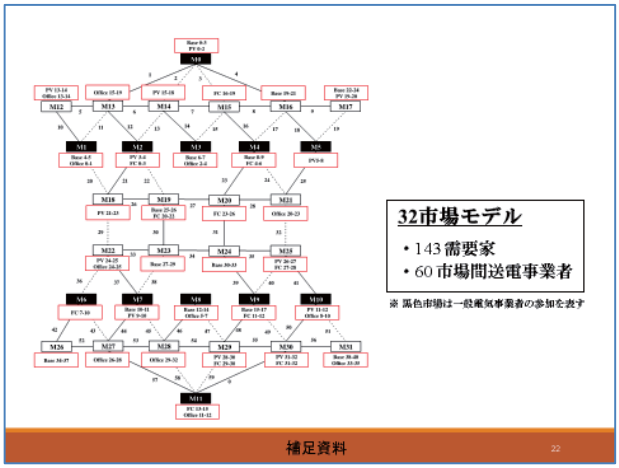

図 1-22

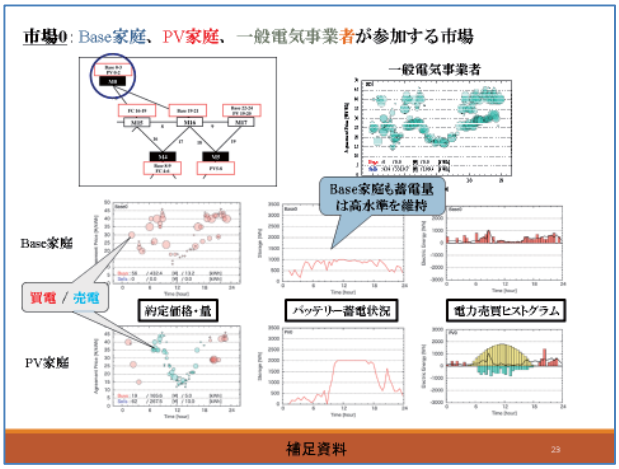

図 1-23

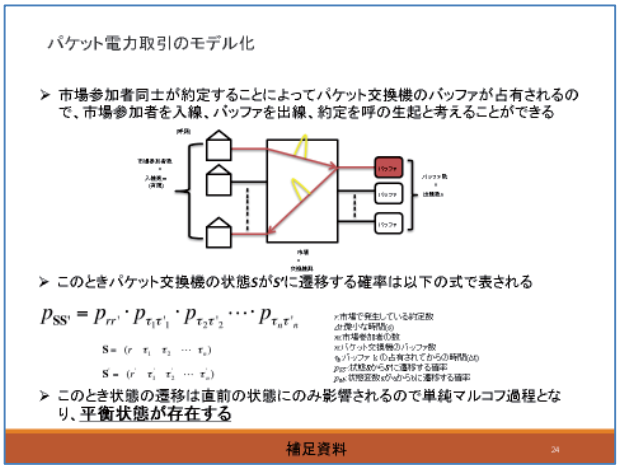

図 1-24

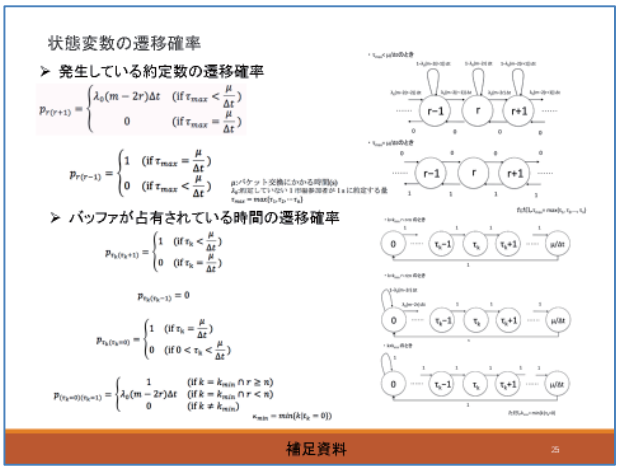

図 1-25

3.2 「オンデマンド型電力ネットワークと電力のパケット化」

岡部 寿男　京都大学　学術情報メディアセンター　教授

私の専門はコンピューターネットワーク、インターネットである。ただ10年ほど前から、情報通信技術を使ったエネルギーマネジメントの研究を始めている。電力のほうは本質的には素人であるが、ある意味、素人から見ると、電気のネットワークというのは、つなぎ過ぎると、ブレーカーが落ちるといった 19 世紀からの技術が今もそのまま使われている感覚である。（図 2-2）

震災後、電力の需給がバランスしないため計画停電があった。ただ、供給は需要に対して 80%、90% ぐらいあるが、地域でまとまって停電させる必要がある。技術的には理解しているが、何かおかしいという根本的な問いかけがある。なぜ節電ができないかというと、電気はつなぐと使えてしまう。一生懸命節電している人がいる中で、何もしない人が平気で使えてしまう。ブレーカーが落ちない限り、使えば使えてしまうので、計画的な節電は不可能である。（図 2-3、図 2-4）

それに対して、エネルギーの情報化の概念は、電気を機器側が事前申告した以上の電力を使えないようにすることである。その上でどれを使えるかは機器とネットワークが調停する。その際、生活者の質、Quality of Life の低下が小さくなるようにする。さらに単なる節電だけではなく、CO_2 排出削減も考えられるようにする。（図 2-5）

今の地区や家庭内は単純なツリー状で、下から電気をつなげて使えてしまう。（図 2-6）これに対して、ネットワークの方を網目状のネットワークにして電気を使えるようにする。その際、例えばノートパソコンは別にバッテリーがあるので、不安定な太陽電池でも良い。デスクトップのパソコンは電源が落ちると困るから、高品質の電気を使うようなことができるようにする。（図 2-7）

そういうコンセプトがオンデマンド型の電力供給「Energy on Demand」である。機器側が電気の量と、どれぐらいそれが生活の質にかかわるかという優先度をネットワークに申告して、それに応じて電気が供給されたり、されなかったり、あるいは、申告の 100% ではない電気が流れていったりする。そういう仕組みをつくることを提案している。（図 2-8）どの機器がどれぐらい電気を使いたいかという状況に応じる。例えば冷蔵庫は 1 分ぐらいの停止は大丈夫だが、それ以上だと冷凍食品に影響があるとか、電子レンジは動いている途中で電気をとめられたら困るとか。ポットは一瞬ぐらい止まってもいいだろう。こういうことも考慮してやる。このように生活者の行動を予測し、IoT の技術でセンシングして、それをパラメータ化することである。そんなことができるのかということであるが、例えば電気ポットで言うと、T 社の電気ポットは過去 14 日分の使用パターンを記憶し、予測に合わせて沸し上げる技術が入っている。Z 社のほうは光省エネモードといって、部屋が暗くなったら省エネになる。（図 2-10）ただ、これは機器単体であり、情報で他の機器と調停することがないところが未熟である。今の話をまず家庭でできるようになれば、さらに家庭内で調停できるのは限りがあるとしたら、それを地域間の家庭の何軒で調停する。それをまた大きなところで調停する。これを階層的に広げていく。（図 2-11）そういうコンセプトを主張して、平成 21 ～ 25 年度の間、NICT 情報通信研究機構の情報通信・

エネルギー統合技術の研究開発予算により、京都大学の私のところと、電気の引原教授、神戸大学の塚本教授（ウェアラブル）、大和ハウス、エネゲート（関西電力系の電力メーターメーカー）、トランス・ニュー・テクノロジー（ソフトウェア）で研究をした。（図 2-12 ～ 15）

オンデマンド型電力ネットワークで、インターネットと同じように、自律分散型のルーティングにすることを考えた。インターネットの中でも QoS ルーティング、すなわち品質保証型のルーティングの技術があり、資源予約型でここからここまで何メガ bps の待機を確実に確保する技術であり、それを電力に持ってきた。実際、電力での送電経路や電源は、コンピューターで言うと、データとかパスとかサーバークライアントに相当し、この類似性を考えた。通信の世界だと、OSI セブンレイヤという電力の階層モデルがあるが、一番下の物理層に相当するところ、電力の経路を制御する経路層、そして、エンドエンドの機器で電力を送り合うアプリケーション層に相当する階層モデルを立て、さらに、通信の世界で使える GMPLS（Generalized Multi-Protocol Label Switching）という技術、RSVP（Resource reservation protocol）や OSPF という経路制御など、このようなプロトコルを使って、電力ルーティングができるかということを研究開発した。（図 2-16 ～ 19）

どのような流れになるかというと、消費機器から電力ネットワークに対して、自分はこれぐらいの電気が欲しいことをアナウンスする。それに対して、ネットワークに複数の電源がつながっており、この条件でこれだけの電気を組まれるようということを機器側に教える。それを受け取ったほうは、一番良いオファーを選んで、実際にどの経路・電線を使って電気をとれるかというのを下から順番に挙げていく。これが RSVP の仕組みで、実際に設計した。（図 2-20）

その際に必要なことは、ネットワークで品質毎に電気を分けて送れることと、機器が最初に申告した電気量を超えて使えないようにすることである。そのために 1 つは、100V ネットワーク上で仮想的に実現するために、スマートタップという電力タップにスイッチを入れたものを実装した。もう 1 つが、回線交換であり、物理的な線を途中の電気的な半導体スイッチでつないだ。それと、最後に話しするパケットで考えている。

このルーティングスイッチのところは、Power over Ethernet という、通信の世界で、有線 LAN に使われるイーサネットに電気を供給する技術を改良することで考えてみた。その際、考えたのは直流である。昔は電圧変換に直流は使いにくいため交流になったが、今は半導体技術の進化によりその常識は変わっている。

実際、直流は鉄道に用いられ、また電話では -48V 給電である。また家庭用機器の圧倒的多数が AC アダプタを介して直流で動いている。あるいは大きな機器も一旦直流にして、インバータで周波数を変えて交流で動いていることから、50Hz、60Hz の交流にこだわる必要がなくなっている。また、AC、DC の電圧変換の効率は良くなってきている。それらのことを考えて、家庭内を直流化できるのではとのコンセプトのもとに、Power over Ethernet、PoE を使うことをやってみた。PoE は、例えば無線 LAN のアクセスポイントやウェブカメラなどにイーサネットの線で電気も一緒に供給するところに使われており、そういう技術を Energy on Demand に使うことを考えてみた。（図 2-22）

実際には、PoE はエンドのスイッチから直接配るところまでしかないが、それを多段で送れるようにするとか、先ほどの Energy on Demand の要求を出すことを考えて設計した。ただ、基本的に PoE も含めて線でつなぐことは、電話で言うと回線交換であり、

インターネットの技術とはレベルが違う。やはりパケットにして初めて、今のインターネットみたいなことができるということで、次のステップとして、電気をパケットで送ることを考えた。通信の世界でも最初はシェア型、占有、時分割多重、時分割多重で各スロットにタグをつけたもの、さらに非同期のパケット多重と進化していった。（図 2-23 ～ 26）

もう 1 つは、アナログからデジタルへの変革がある。ハイビジョン放送でも、今はデジタルが当たり前であるが、NHK はかなりアナログで頑張ったが、結局、デジタルになり、さらにパケットになり、そして電話会社が言っていた B-ISDN とか ATM の系列ではなく、ある意味不安定な方式である、TCP/IP が世の中に使われている。それは半導体技術あるいはコンピューター技術が 40 年前に考えていたのと桁違いに、想像を超えて進化したためである。（図 2-27）

そのようなインターネットの変革を見てきた立場からすると、今の電力ネットワークに対しても、アナログからデジタル、パケットへと進化し、それを半導体技術が支えてきたということを、電力でも 2050 年を見据えるとできるのではないか。現在そのようなことから、JST のスーパークラスタプログラムで、SiC、シリコンカーバイドの半導体の応用としてパワーデバイスを使った電力ルータをつくることをやっている。（図 2-28 ～ 30）

図 2-31 のスライドが今日、一番言いたいことである。インターネットがなぜ進んできたかというと、1 つは、パケット交換で、連続、アナログではなくてデジタルにした。そして、ストア・アンド・フォワード。一旦貯めて次に送ることで回路を局所化する。物理的につながっている回路は局所化して一旦切るところがみそとなる。さらにプロトコルの階層設計と物理層の局所化によって自律分散というのが実現した。

一番シンプルなキャパシタからキャパシタに LC 伝送するという回路を考えており、これを多段にしてルーティングする。シリコンカーバイドはシリコンに比べていろいろな特性が 1 桁ぐらい良いので、ロスの問題も 1 桁ぐらい良くなっている。今年度物理的な回路ができ上がる予定である。（図 2-32 ～ 35）

最後のまとめとして、ホームネットワークからスケールアップしていくことを通信の技術で進めていくことである。（図 2-36）

（質疑応答）

Q：ベストエフォートのネットワークに電力を乗せるのはいかがなものか。特に無線は非常に不安定で、今のスマホなどでデータを受け取ると、5% 程度欠損している。そこを IC 機能がどれだけ今後スマート化できるかも重要かと思うが。

【岡部】昔からインターネットは当てにならないと言われてきて、電話に置きかえられないと言っていたが、今は Voice over IP を使っている。そのようにインフラのほうも変えていく必要があると思っている。今、我々は 100V の電気をつなぐと、確実に電気が流れてくると信じているが、開発途上国などに行くと、各家庭に電源のバックアップとかある。末端の機器に電力のバックアップを入れることで、ネットワークの方が楽になる。それによって変革ができると考えている。

Q：他者との調整・調停は、どんなメカニズムか。普通、電力取引では、お金でやることが一番シンプルではないか。

【岡部】お金であれ、何であれ、何かマッチングの条件を決めて、最適化してやるということで、それがお金ということもあるし、別の価値尺度ということもあると思う。一応プロトコルはつくったが、そこの価値のところは入っていない。

Q：情報と電力とで対比しているが、やはり電力の場合はエネルギーというところが、情報とは大きな違いと思う。それで､そのエネルギーを本当に情報と同じように扱えるのか。もう１つは、電力貯蔵がキーポイントになるが、情報の貯蔵では、昔はハードディスクであったものが、今はポケットに USB メモリで、さらにその何倍も入る。電力がそのように貯蔵できるのかはまだ技術的に難しいのではないか。
【岡部】現時点は電力ルータをつくっているが、キャパシタの扱いがやっかいで、今の技術のままではまだ使いものにならない点は指摘どおり。情報と電気の扱いは違っており、例えば情報だと、パケットが衝突したら捨てればいいが、電気は捨てるわけにいかないし、衝突しないようにつくらないといけない。同じようにやろうとしても、実際は物理層として全く違っている｡ただそこがこれから新しく研究しなければいけない要素になると思う。

図 2-1

図 2-2

図 2-3

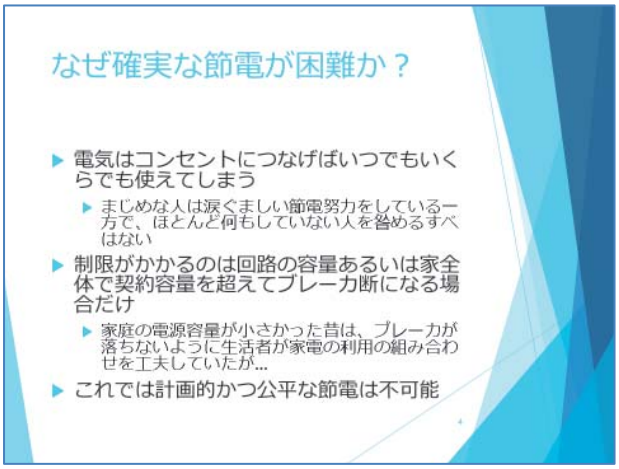

図 2-4

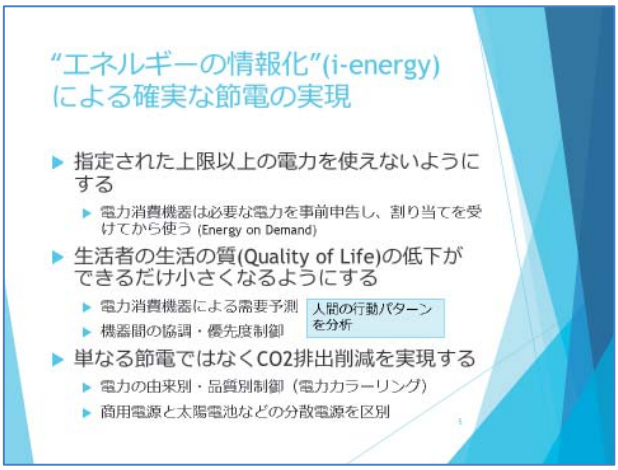

図 2-5

図 2-6

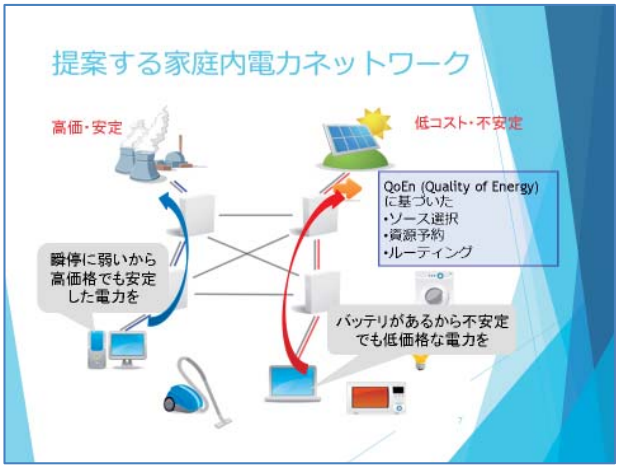

図 2-7

図 2-8

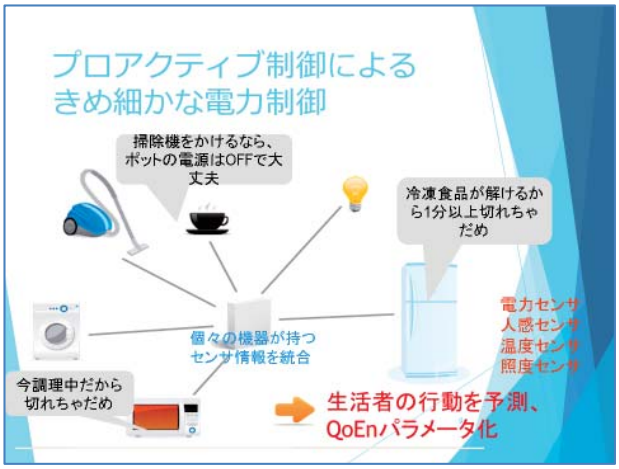

図 2-9

図 2-10

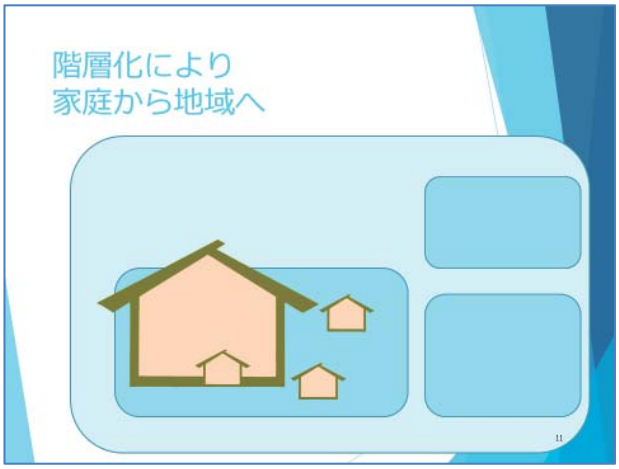

図 2-11

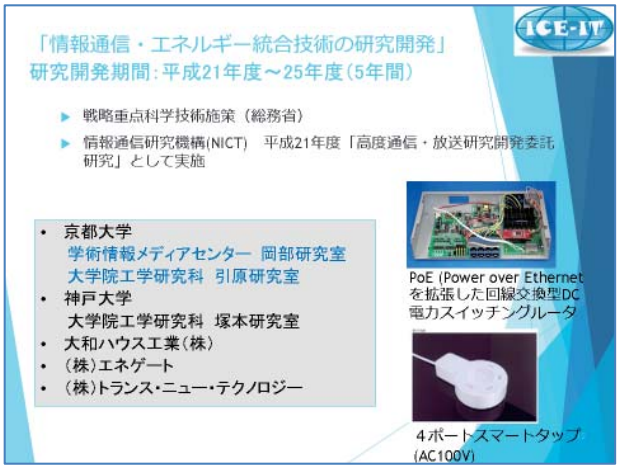

図 2-12

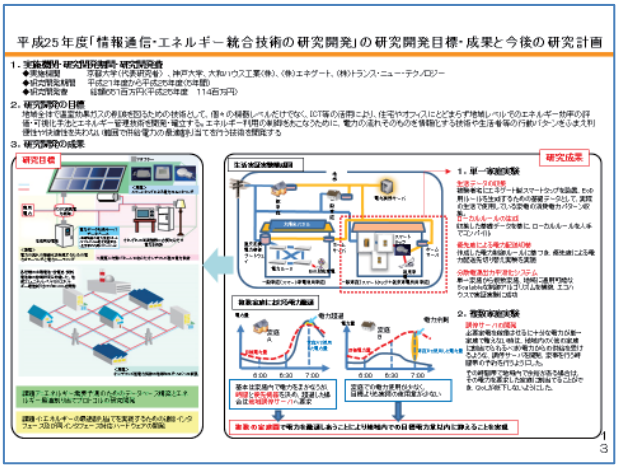

図 2-13

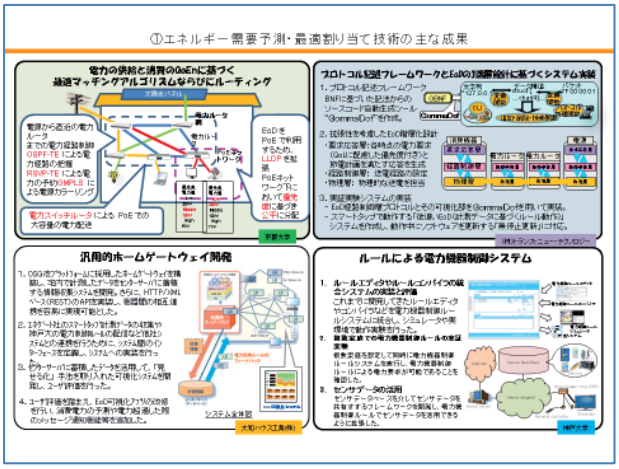

図 2-14

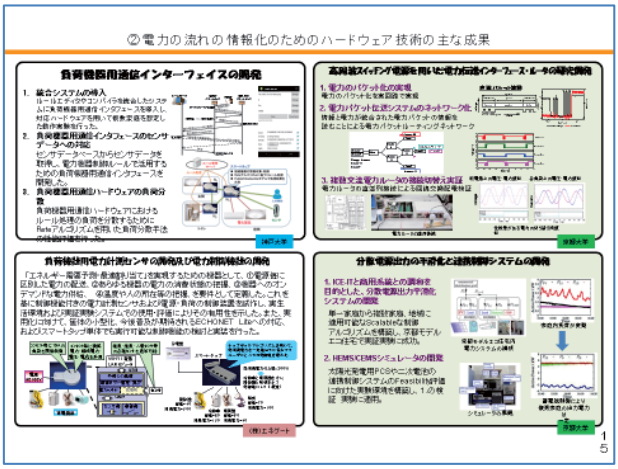

図 2-15

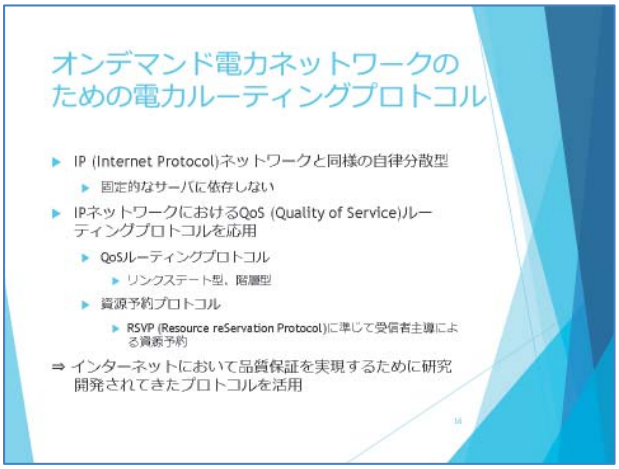

図 2-16

図 2-17

図 2-18

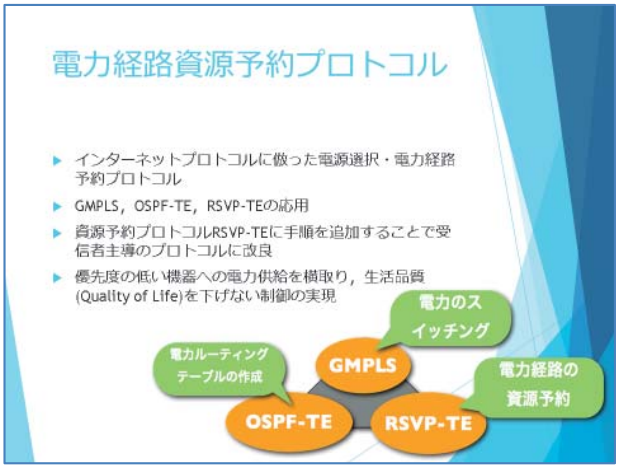

図 2-19

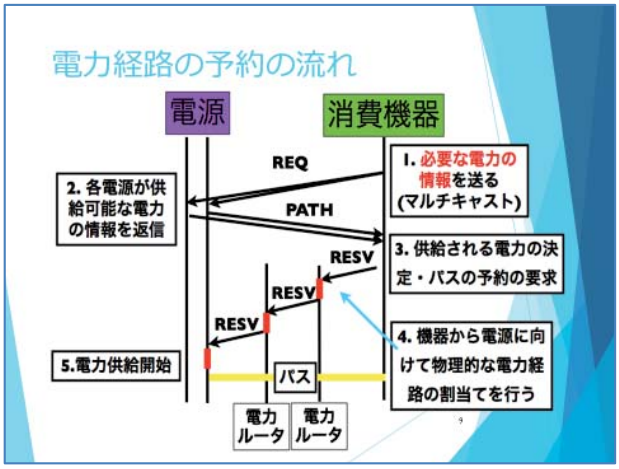

図 2-20

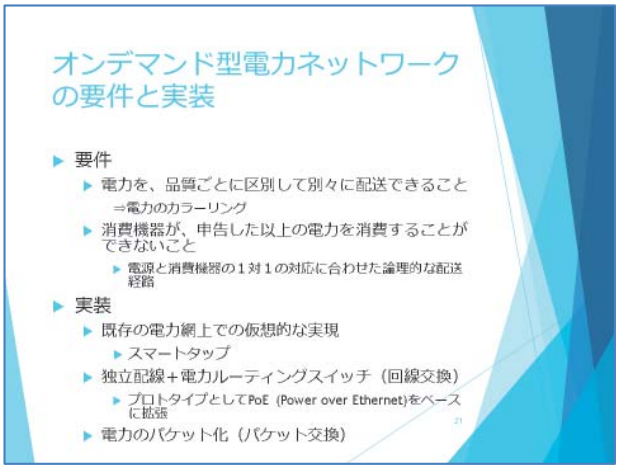

図 2-21

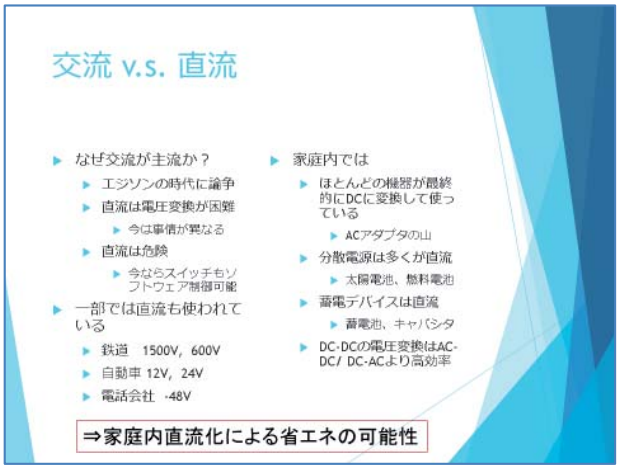

図 2-22

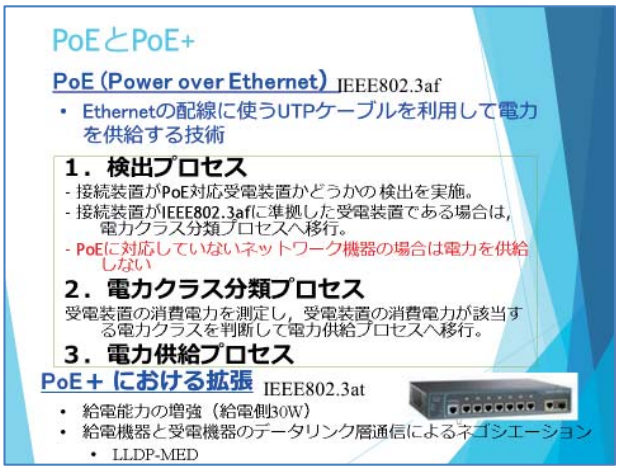

図 2-23

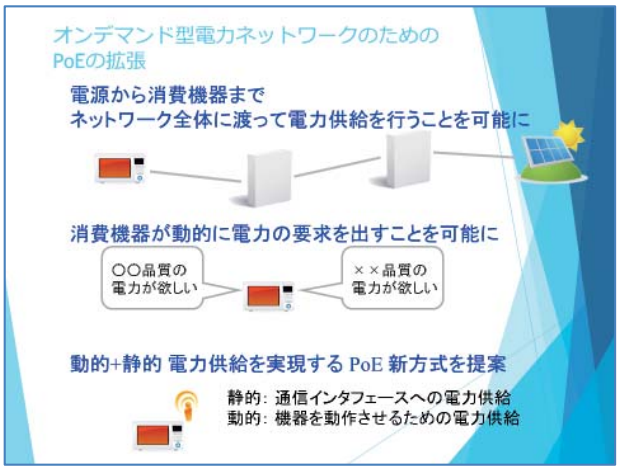

図 2-24

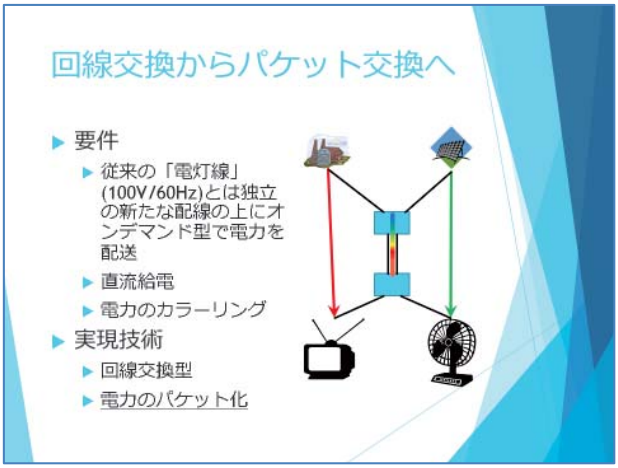

図 2-25

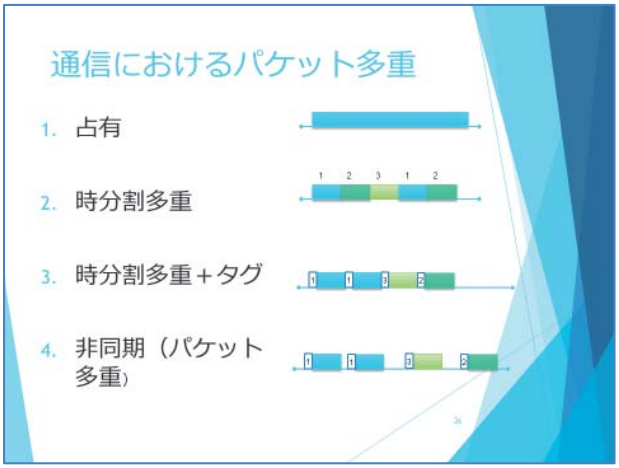

図 2-26

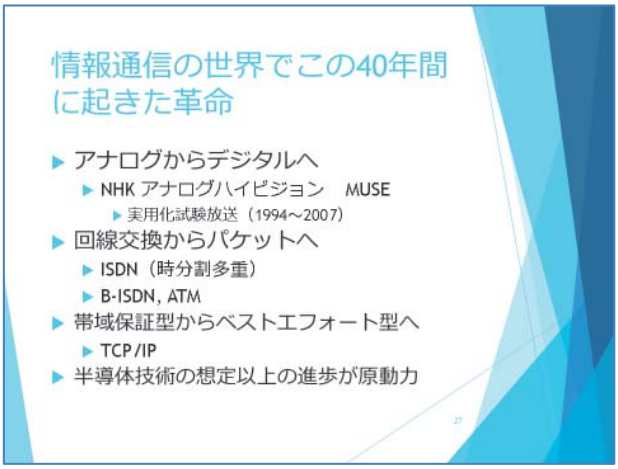

図 2-27

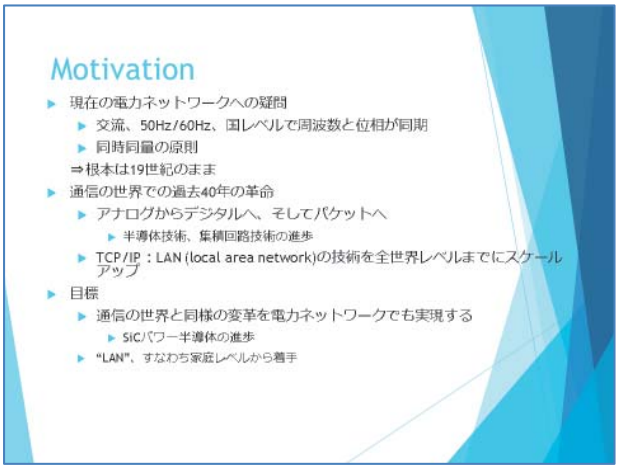

図 2-28

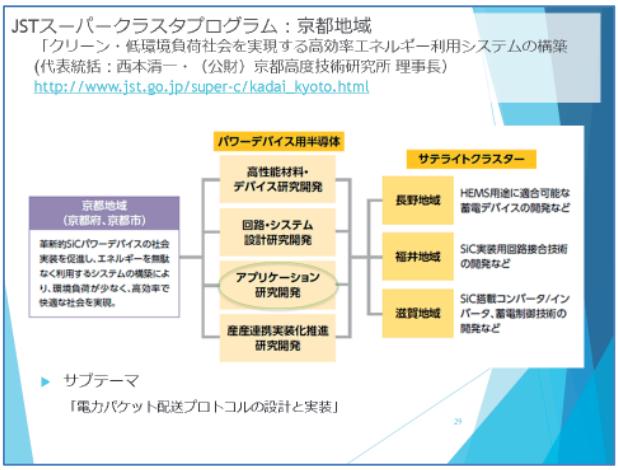

図 2-29

図 2-30

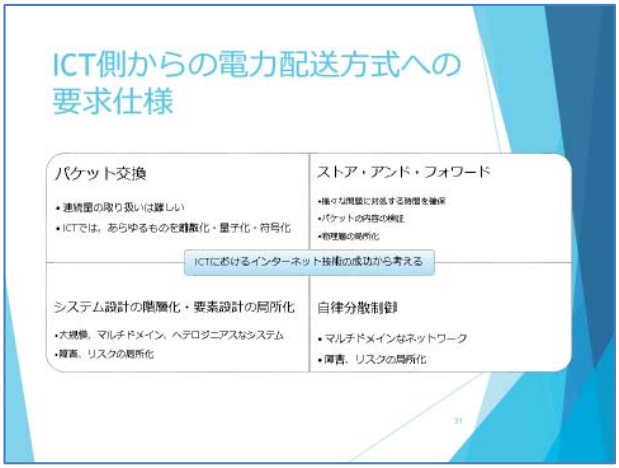

図 2-31

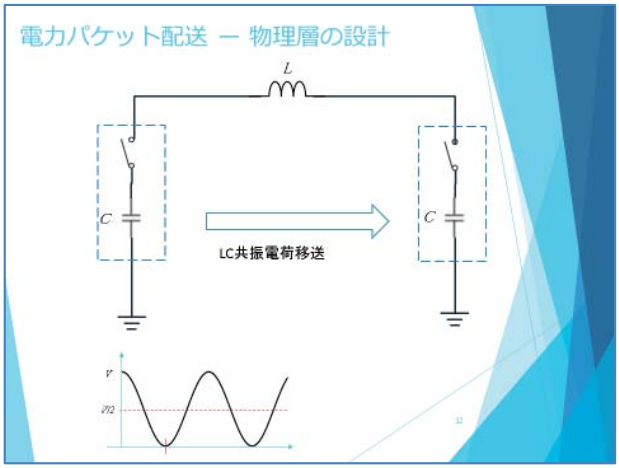

図 2-32

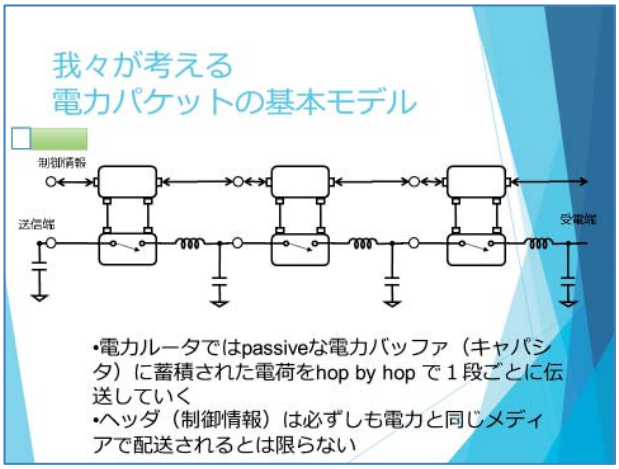

図 2-33

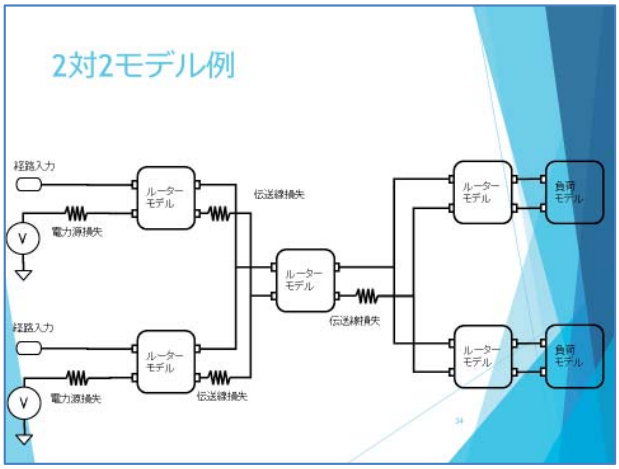

図 2-34

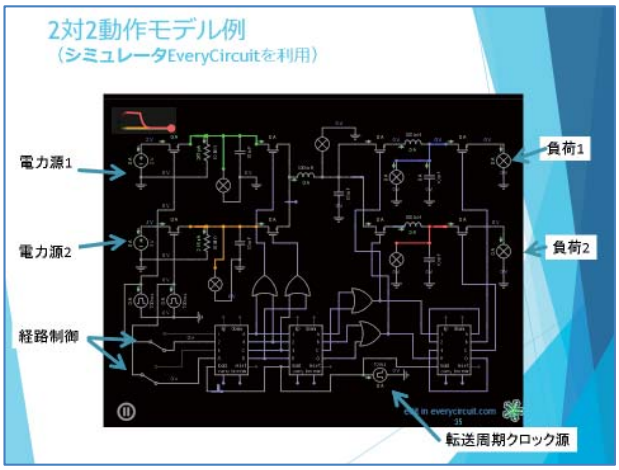

図 2-35

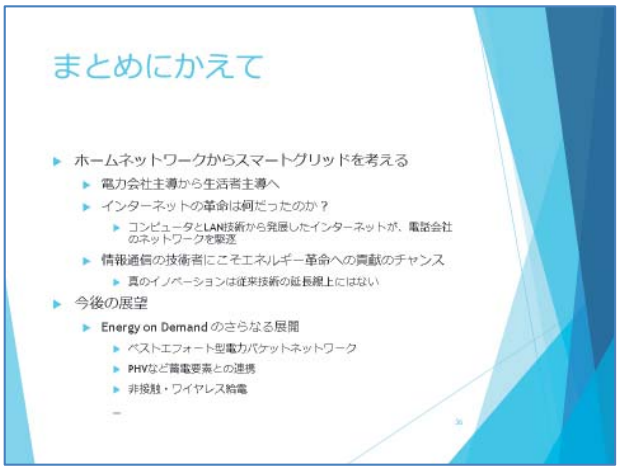

図 2-36

3.3 「パルス化送電方式に基づく低電圧配電系電力ネットワーク」

杉山 久佳　大阪市立大学　工学研究科　電子情報系専攻　准教授

発表タイトルはパルス化送電方式に基づく低電圧配電系電力ネットワーク。ネットワーク階層モデルに照らし合わせるとネットワーク層の話である。

現在の送電方式は、連続波形を使って、単純なジャンクションによって多対応、いろいろな消費者に分配する方式である。私の考えるパルス化送電は、パルスに電力を分解して送る。その前提として、時間軸を同期フレームに分割する。さらにこの同期フレームを電力スロットに分割し、あらかじめ決められた電力スロットにおいて電力パルスを必要な数だけ送る。そうすると、単純なジャンクションが、電力ルータに置きかえられる。これは単純な半導体スイッチで構成されており、例えば、B が今、300W とすると、B はこの 1 番目と 2 番目の電力パルスだけを受信できるように電力ルータがスイッチをつなぐ。また、C は 4 番目の電力スロットが受信できるように電力ルータがスイッチをつなぐ。このようにして所定の電力を送る。ポイントは、パケット伝送はおおむね蓄積交換を前提としているが、私が考えているのは単純なスイッチによる直接中継であり、蓄積はないため低損失性が期待できる。(図 3-2)

もう少し複雑なネットワークの場合にこのパルス化送電はどうなるか。これはまさにネットワークの話である。図 3-3 はパルス化配電ネットワークの例で、S は power source、つまり送電者。C は consumer、受電者で、4 つある。R は power router で電力ルータ。この例では同期フレームを 5 つの電力スロットに分割すると考える。そうすると、このネットワークにおける送電路は送電パス、送電者から受電者に至るパスに加え、どの電力スロットを使うかの組み合わせで表現できる。例えばこの P1 という送電路は S1 から C2 に供給されるという送電パスに加えて、この 1 番目の電力スロットを使っている。これが P1 という送電路。もう 1 つ、この P2 という送電路を考える。これは S1 がつくって C2 に供給するが、電力スロットは 4 番目を使っている。ここでポイントは、特定の送電者から消費者への送電は複数の送電路があり、P1 と P2 は若干送電路が違っている。これを同時に使用できることは、直接中継による伝送遅延がゼロなので可能になる。P3 という送電路を考える。これは S2 という送電者が C1 に対して電力を送る。そのパスに加えて電力スロットは 3 番目を使っている。ここでのポイントは、この R1、R2、R8 の間では同じ送電線を複数の送電路が供用している。そういうわけで、この方式のポイントとして、同一の送電線を異なる送電路が同時に使用することができる。なぜならば、このスロットが別々で、送電路同士の干渉を得ないので可能になる。それから、P4 の送電路は S2 からつくった電力を C4 に送るという送電路である。このポイントは、S2 が C1 と C4 の両方に同時に供給している。つまり、ある送電者が複数の消費者に対して同時にかつ異なる送電路で送電することができるという利点がある。言いかえれば、ある消費者への複数送電者からの同時送電も可能になる。また、もう 1 つポイントは、P2 と P4 は全く同じ電力スロットを使っている。しかし、P2 と P4 は送電路が違っているので、その両者に干渉が生じない。つまり、送電パスに重複がなければ、同じ電力スロットの使用が可能で、これは単純な時分割多重とは違う点である。単純な TDM は静的にスロットのア

ロケーションをするが、ここではダイナミックにアロケーションしているので、送電路が違っても、スロットに重複があっても自由にスロットを使える。（図 3-3）

パルス化送電の利点をまとめると、まず、分散型電源との親和性。これは既存の送電路との干渉なしに逆潮流あるいは売電が可能である。それから、個々の送電路の識別が可能になる。送電者と受電者、及び、送電量、送電路数が明確になる。そういうわけで、市場原理のプラットフォームの１つの方式として提案できないかというわけである。それから、低損失性。直接中継を行うので、中継損失はなく、送電路の先行予約により、電力パルスの廃棄は発生しない。また高い信頼性。中央局を必要としない分散制御方式なので、一部の障害が全体に波及しない。また、単純な構成を持つ電力ルータを使うので、信頼性や低コスト性も期待できる。（図 3-4）

パルス化送電の基盤技術の１つは直接中継方式とその送電路の先行予約、もう１つは分散制御方式と単純な構成を持つ電力ルータである。これらについて説明する。

まず、送電路先行予約で重要な点は、全てのノードは個別に送電容量テーブルを持っていることである。図 3-5 に示した簡単なネットワークでは、ノード A が持っている送電容量テーブルの例を示す。dst は送電の宛先ノード、nxt はその送電先ノードに至る送電経路地の地ノード。それから、available slots は、その時点でその宛先まで使用可能な空き送電スロットである。こういった送電容量テーブルをつくり、定期的に更新するためにはさらにいろいろな情報が必要であるが、その点は省略している。ノード A が C に対して 3 スロット分の送電を計画したとすると、このときの送電パス決定と予約のプロセスは、A と送電先 C が適宜情報をやりとりして送電経路を予約する。送電経路が足りなければ、別々の送電路を使って必要とする 3 ストッロ分の送電経路を予約する。この送電経路予約は、パルス化送電では重要であり、これは分散制御の方法により繰り返し更新する。この更新方法は重要であるが、ここでは時間の関係上省略する。これは無線のモバイルネットワークにおいて、1999 年に提案されたシンクロナイズド QoS ルーティングと呼ばれるものがあり、これを電力送電としてモディファイしたものである。（図 3-5）

次は、パルス化送電の検討課題で、送電容量の増大で、2 つある。1 つは、双方向キャンセルで、図 3-7 の単純なネットワークの例では、C から F と E を経由して D に向かうパルス流があるとする。同じスロットを使って A から B に向かうパルス流を流すと、同じスロットをバッティングするので、単純にはできない。このときに双方向キャンセルの方法を使えば、E、F 間は空白に変わり、A、E、D と、あるいは C、F、B と 2 つの流れに変化することによって、通せなかったパスが通せるようになる。ただし、双方向キャンセルを実現する分散制御アルゴリズムが難しく、おおむね設計は終わったものの難しい。（図 3-7）

次の課題は局所的ネットワーク。これは元来分散型電源と親和性が高いため、分散型電源だけからなる局所的なネットワークをつくることを考えている。これは、ある送電者が全ての受電者の情報を、ネットワークを通じて共用し、どこの充電者に送るのが一番良いかをある評価式で決定する話である。（図 3-8）

次の検討課題は検証システムの作成。基本的なパルス化送電の検証システムはできており、2 年前のイノベーションジャパンに出展した。これが日経エレクトロニクスに掲載された。同じ年の 10 月に国際会議にも出展し、Outstanding Demo Award! を受賞した。

現在、さらに発展させた局所的ネットワークの検証システムをつくっている。

（質疑応答）
Q：パルスで送る時に、何か同期が必要か。
【杉山】同期が前提である。

Q：パルスの送電パスはどこが決めているのか。全体のマップがあって、それで同時に決めることになると考えるが。
【杉山】タイミングに関しては、例えば GSP で同期をとることが前提で、どこからフレームを始めるかはあらかじめ最初に決める。どのタイミングでどういうスイッチをするかはそれぞれのルータが自分自身のアルゴリズムで、隣接ノードとの情報交換に基づいて決めている。

Q：エネルギーの総量を決めているのはパルスの数なのか。それとも振幅か。
【杉山】パルスの数が良い。送電線の設計をするときの絶縁部分は最大振幅で決定するので、振幅を自由にすると想定されるピーク振幅で全てのネットワークを絶縁しなければならなくなり、むだが多くなる。

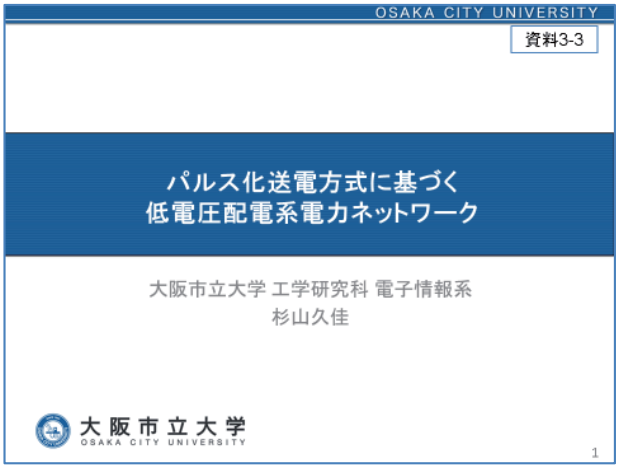

図 3-1

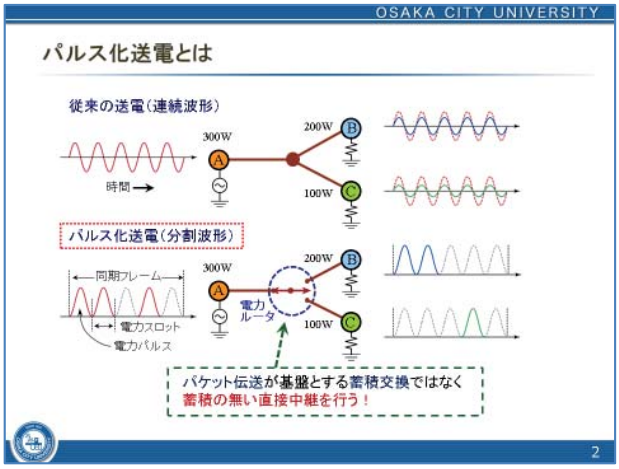

図 3-2

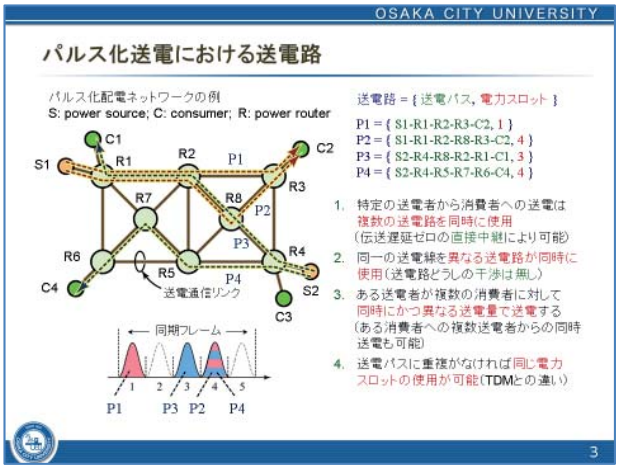

図 3-3

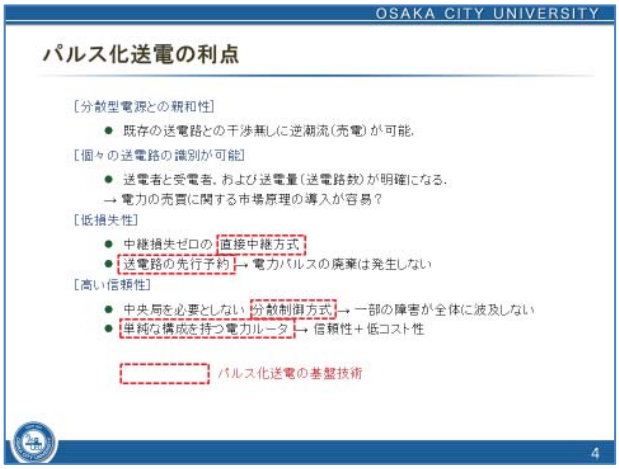

図 3-4

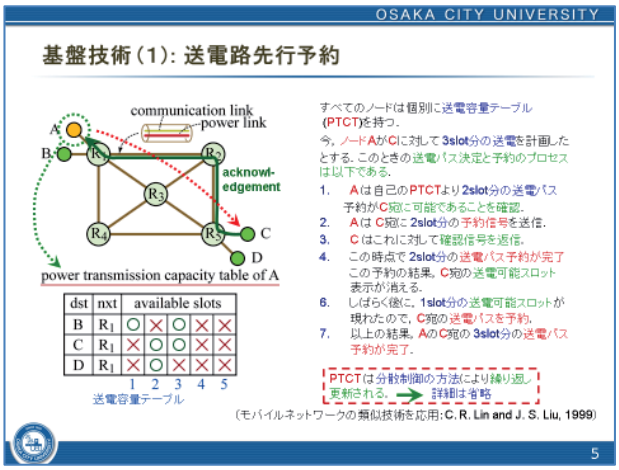

図 3-5

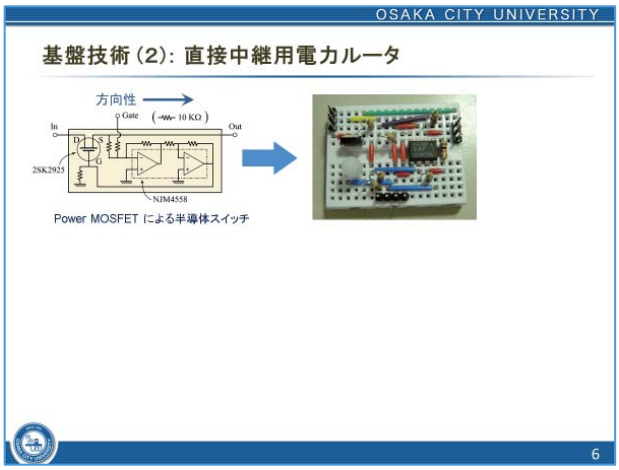

図 3-6

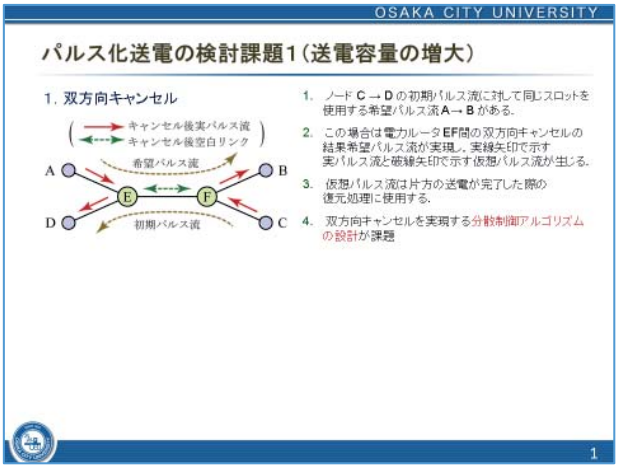

図 3-7

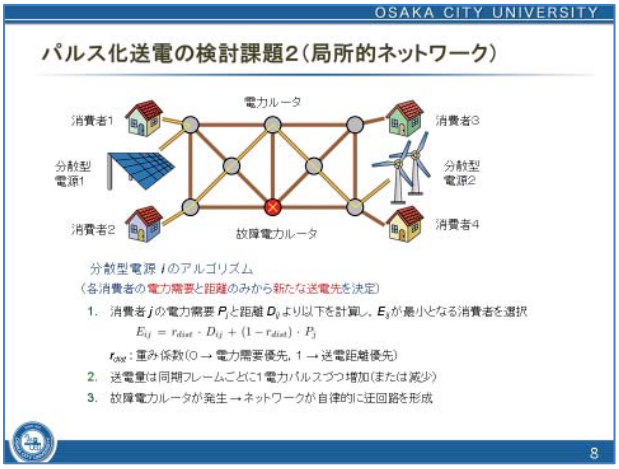

図 3-8

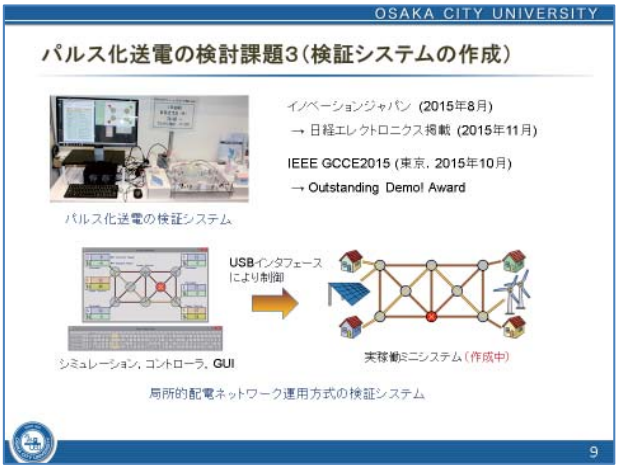

図 3-9

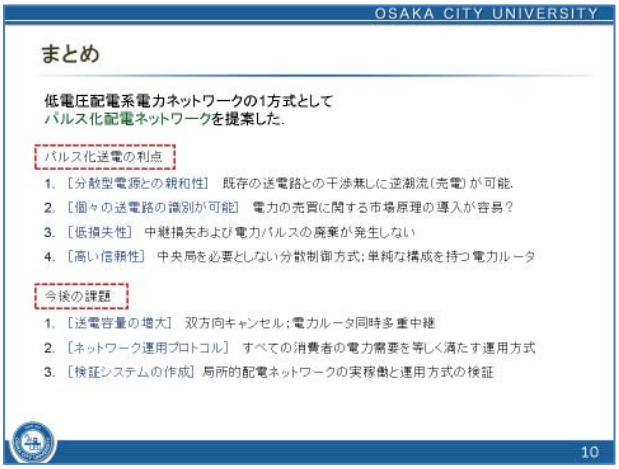

図 3-10

3.4 「パワーエレクトロニクス技術～将来の電力システムに向けた研究～」

伊瀬 敏史　大阪大学　大学院工学研究科　電気電子情報工学専攻　教授

本日は、未来エネルギーネットワークの中で、パワーエレクトロニクス技術はどのような研究をしていけば良いかという点から話をする。

パワーエレクトロニクスは、60 年前の 1957 年に SCR Thyristor（Silicon Controlled Rectifier）というサイリスタが出てきたのが出発点である。それ以降、SCR をもとにして、GTO とか、光トリガサイリスタ、あるいは GCT。トランジスタ系では、パワートランジスタ、最近よく使われている IGBT、IPM とデバイスが進歩してきた。

電力系統においては、1965 年に東日本と西日本の間の周波数変換所が水銀整流器で実用化され、1977 年には、新信濃周波数変換所でサイリスタを使った周波数変換所が運用開始された。1970 年代の終わりから、GTO とか、パワートランジスタによる自励式の電力変換器が発達し、電力アクティブフィルタ（高調波の補償のための高調波フィルタ）が実用化された。1991 年には世界に先駆けて、犬山で自励式の無効電力発生装置が実用化され、電力系統に入れられた。2000 年には、光トリガサイリスタを使った直流送電が開始された。（図 4-2）

これまで弱電と強電の違いとして、強電は周波数が自由に変えられないことがあったが、パワーエレクトロニクスは、強電の世界に周波数の自由度をもたらした画期的な技術である。現在、電力系統において、パワーエレクトロニクスが使われている場所は、発電所の起動装置とか、可変速揚水発電がある。ここでは可変速にするためのコンバータ、周波数変換装置に使われている。あと、直流送電。北海道、本州の間の直流送電や紀伊水道の直流送電。それから、自励式の無効電力補償装置。バック・ツー・バックの連系での周波数変換所。潮流の制御、高調波補償のアクティブフィルタなどといったところにパワーエレクトロニクスがある。パワーエレクトロニクスは電力系統でよく使われていると思われるが、実は一部でしかまだ使われていない。（図 4-3）

電力システムで同期発電機と変圧器を中心とする現状のシステムは銅・鉄機械である。したがって、非常に高い信頼性と頑強性を持っている。コストも安く、効率も高く、発電機で 96% 以上、変圧器で 98% 以上であるが、欠点として制御性が低い。重量、体積が大である。パワーエレクトロニクスを中心とする電力システムが仮に到来したとすると、半導体スイッチング素子とマイクロプロセッサを基本とする電力システムである。非常に高い制御性と柔軟性がある。機器も小型、軽量になるが、欠点としては過電流、過電圧に対して弱い。また、スイッチングによる電磁ノイズの発生があり、コストがまだまだ高い。（図 4-4）

しかし、実証研究として、2005 年の愛・地球博における NEDO パビリオンの近くでの燃料電池、太陽電池、電力貯蔵（燃料電池 200kW4 台、NaS 電池）が集中的に配置されたシステムの例がある。これは半導体ばかりの回転機を持たない電力システムとして、自立運転の実験を実施した。（図 4-5）

自立運転時は複数のインバータによる系統周波数を決めつつ、負荷の変化に応じて需給調整を行うことが大きな課題であるが、本システムでは、自立運転時には PAFC の燃料

電池で電圧制御モードでの負荷追従運転し、ここで電圧、周波数を決める。それから、系統連系時は残りのインバータで、電力指令値に従って電力制御を行う。（図 4-6）

昨今、分散型電源が急速に入ってきているが、その系統連系インバータの同期方式で、現在、Phase Locked Loop（PLL）による系統周波数への追従運転であるが、自立運転には定周波運転によりどこかで周波数を決めることになり、運転モードに応じて制御の切りかえが必要である。このようなインバータ連系の分散型電源が回転機に比べて多くなると、慣性力の不足から系統不安定性が生じるため、最近、インバータに同期発電機と同様な制御方式の特性を持たせる制御方式として仮想同期発電機が提案されている。（図 4-7）

Virtual Synchronous Generator（VSG：仮想同期発電機）には、分散電源である太陽電池とインバータとの間に小さい電力貯蔵がある。ここで、いわゆる回転機の回転エネルギーに相当する部分のエネルギー貯蔵をする。一方、VSG 制御により、発電機の動揺方程式を解いて、慣性を持たせることにより、同期発電機と同程度以上になっても系統安定化することができる。（図 4-8）

制御ブロックでは、電圧型の電力変換器に対して、従来この位相の指令を PLL でつくっていたが、それを VSG 制御では、動揺方程式を解きながら、そこから出てくる角速度を積分することで位相指令を出すことになる。さらに発電機に近くするためにガバナの制御と AVR（電圧の制御）を加えて、発電機と同じような制御系に持っていくことである。（図 4-9 ～ 10）

さらに、それを発展させて、仮想同期発電機においては、慣性モーメントを自由に設定できるので、系統において何か擾乱が発生して、新しい平衡点に移るときに動揺が発生するが、その動揺をこの慣性モーメントを可変にすることで早く収めることができる。

加速をするときは大きな慣性モーメントの値を使い加速を抑える。減速するときは小さな慣性モーメントの値を用いて減速を促進することで、動揺を自由にコントロールすることもできる。（図 4-11 ～ 12）

以上が発電の部分の話であるが、次に、もう 1 つの構成要素である変圧器である。現在は銅・鉄の変圧器であるが、半導体式変圧器として、Solid State Transformer がある。これの利点は、高周波変圧器を使うことにより全体の体積が小型、軽量化になることである。さらに、出力電圧の制御による電圧安定化ができる。入出力電流の制限ができる。系統に対する無効電力の供給も可能である。エネルギー貯蔵素子を中に持たすこともできる。入力と出力の周波数を独立にすることもできるという利点がある。欠点は、多段の変換による効率の低下である。（図 4-13）

これについての実現方式は多数あるが、1 つは、普通の交流から高周波の交流にダイレクトに変換して、変圧器で絶縁する。また、普通の周波数の交流に直すという直流の部分がない構成。それから、直流の部分が低圧だけにある場合、高圧だけにある場合、さらに高圧、低圧両方に直流の部分がある、こういった構成が考えられる。（図 4-14）

例えば直流の部分がない構成では交流から交流にダイレクトの変換である。これは高周波のトランスで絶縁する。これはマトリクスコンバータという方式であるが、交流から交流へのダイレクトの変換である。（図 4-15）これを大容量にする場合、高圧部を直列に接続し、低圧の部分は並列に接続することになる。（図 4-16）低圧直流リンクの構成では、高圧部分は交流から交流への直接変換である。高周波変圧器で絶縁、電圧変換をして、直

流変換後、低圧の直流リンクがある。そこから交流に直す。この構成では制御性がよくなる。直流キャパシタがあるので、電力の貯蔵ができる。制御方式の違いで、マトリクスコンバータを用いる方式とデュアルアクティブリッジを用いる方式がある。これも大容量に対しては高圧部分で直列接続、低圧部分で並列接続となる。（図 4-17 ～ 18）

それから、高圧、低圧両方に直流リンクがある場合はさらに制御の自由度が増すので、特性としては良くなる。高圧部の直流リンクと低圧部の直流リンクの中間にある高周波変圧器で電圧変換と絶縁をすることになる。図の下の部分はマルチレベルコンバータを使った方式である。（図 4-19 ～ 20）大容量向けはやはり高圧部分で直列接続、低圧部分で並列接続になる。この中でキーとなる DC-DC コンバータは、既に 100kW で絶縁共振形のものがつくられており、効率 95% 以上のものが出来ている。（図 4-21）

応用では、直流のところに PV をつないだり、電力貯蔵をつないだり、あるいは、高周波絶縁変圧器を通して PV をつないだりする。（図 4-22）

今後の研究テーマの 1 つは、インバータの過電流対応耐量の向上が大きな課題である。系統事故時の運転継続、すなわち Fault Ride Through も課題である。系統事故時の事故電流の供給も課題であり、遮断器をオフするために必要になる。また半導体変圧器に関しては高効率化、大容量化のために各部の電力変換の高効率化、モジュール構成による大容量化が必要になってくる。このように既存の電力システム中で平常時及び事故時の銅・鉄機械との制御・保護の協調などが重要になってくる。（図 4-23）

現在、SiC を使った GTO インバータの過負荷動作の実験をしたケースがあるが、定格の 100% に対して、3 倍の 300% で 3 秒過負荷動作がでるところまでできているが、新しい素子の出現により、さらに耐量が増すのではないかと考えている。（図 4-24）

（質疑応答）

Q：今回の話も 2050 年をターゲットと考えて良いか。アカデミアがやる研究としてどういうところがターゲットになるか。

【伊瀬】半導体式変圧器は、2050 年ぐらいだと思う。現状では実験ではできても、まだまだ効率も低い。またパワーエレクトロニクスは大学とメーカーと協力してやらないとできない。大学といえども、過電流耐量の向上などもやっていかなければいけないと思う。現状の技術では基本的に多段変換になると、全体としての効率は低くなる。

Q：太陽光が大量に入ってきた場合は課題になるか。

【伊瀬】太陽光が全体の同期発電機の容量に対して同程度になったときに全く違う世界になるので、そこはこれからの検討課題である。仮想同期発電機をもっと普及させる必要がある。

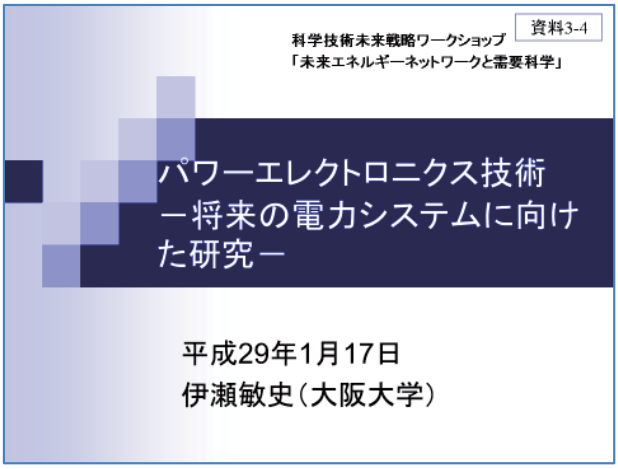

図 4-1

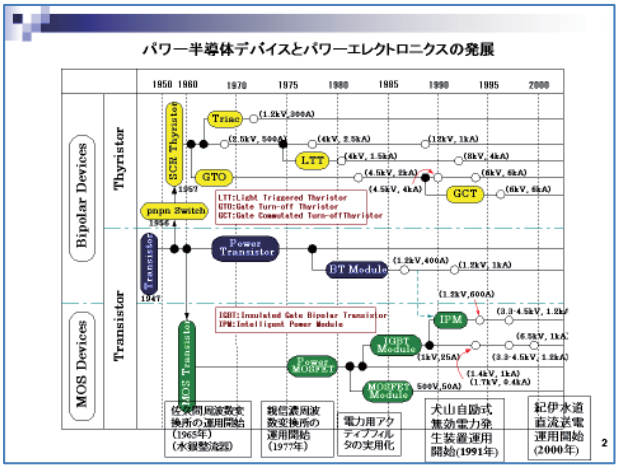

図 4-2

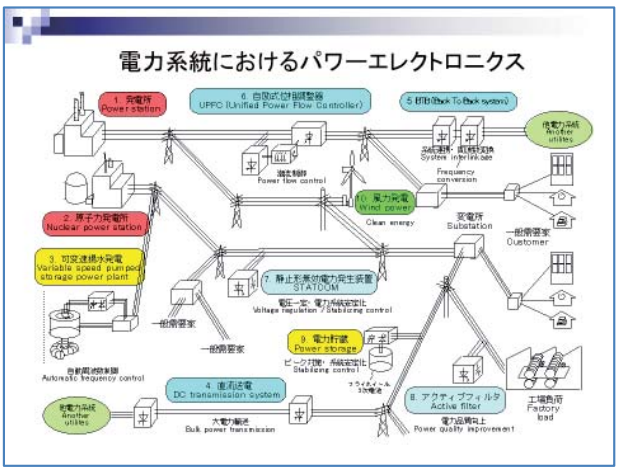

図 4-3

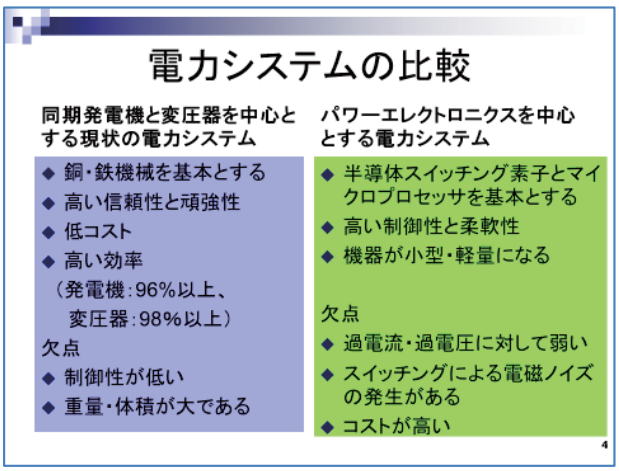

図 4-4

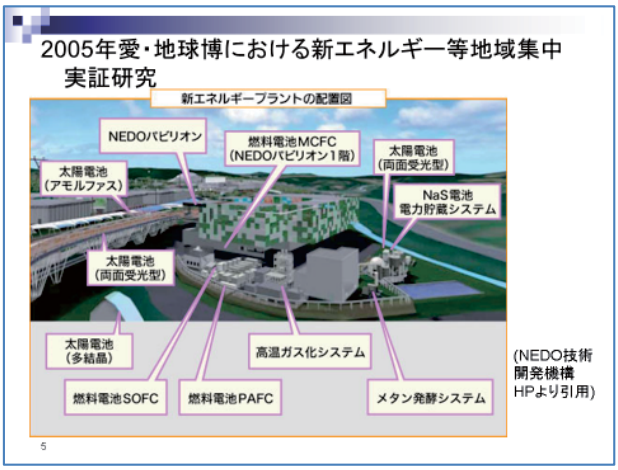

図 4-5

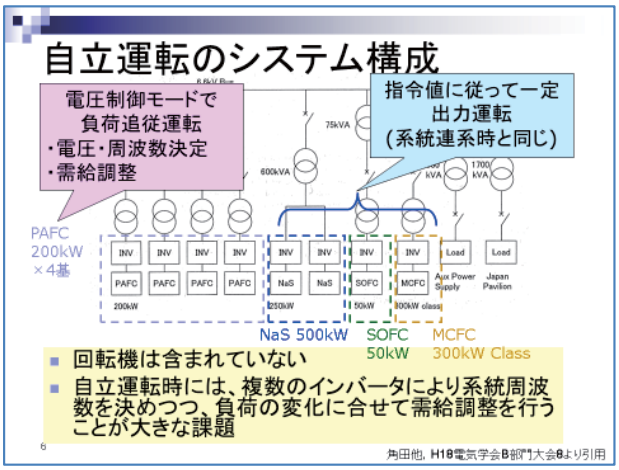

図 4-6

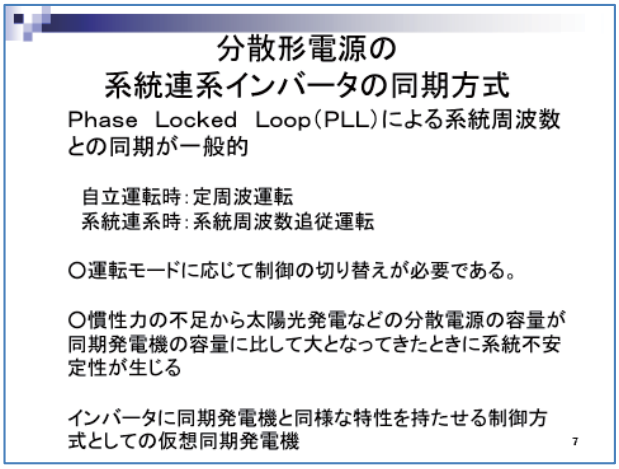

図 4-7

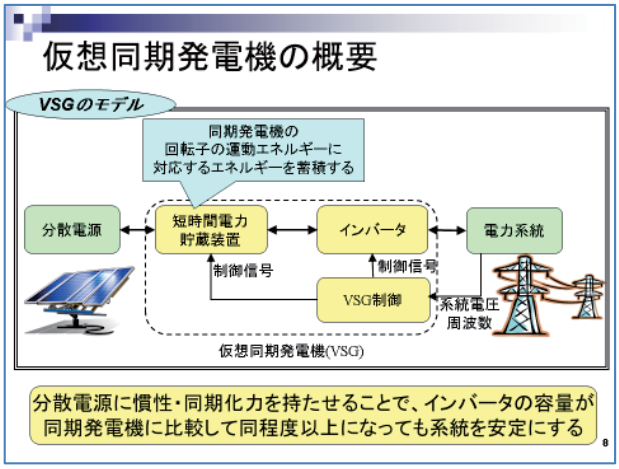

図 4-8

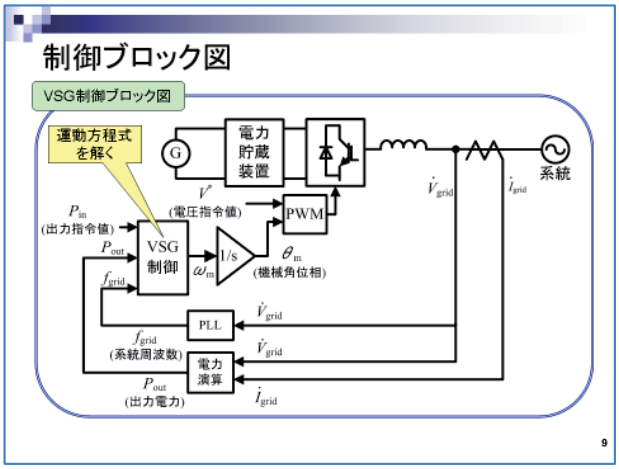

図 4-9

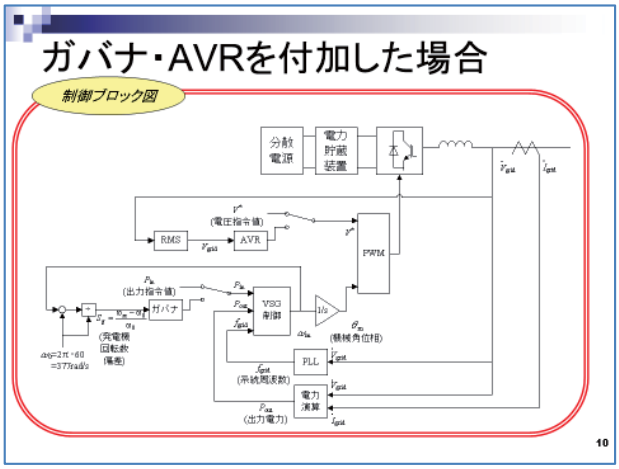

図 4-10

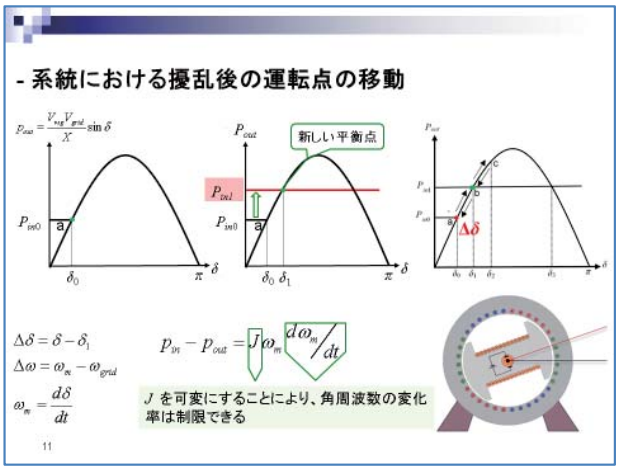

図 4-11

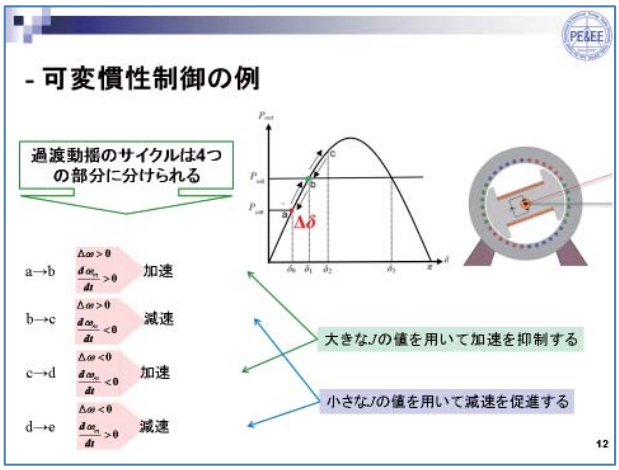

図 4-12

図 4-13

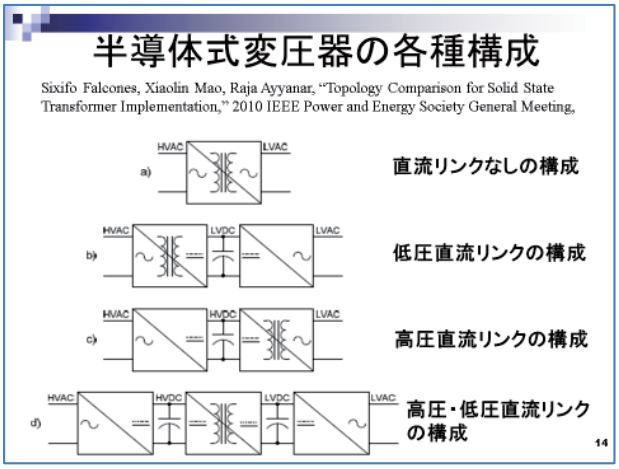

図 4-14

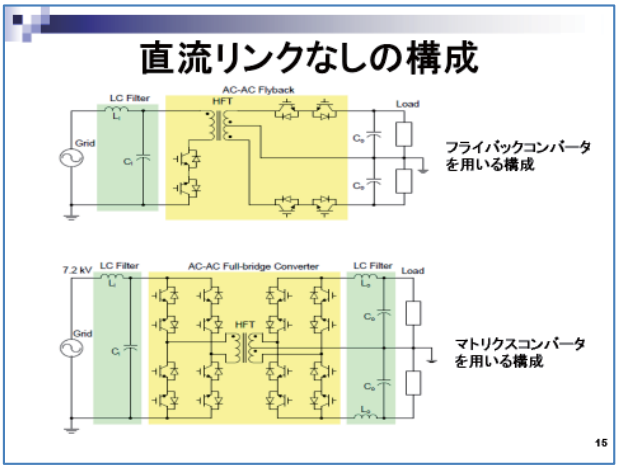

図 4-15

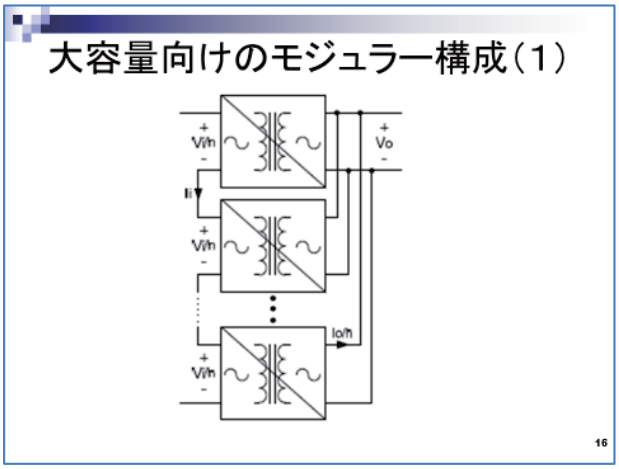

図 4-16

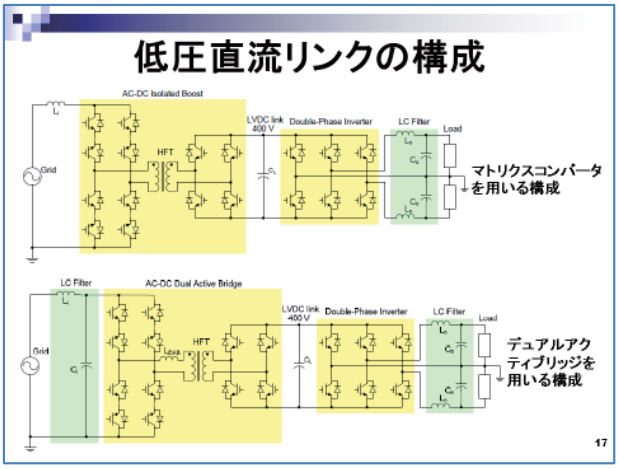

図 4-17

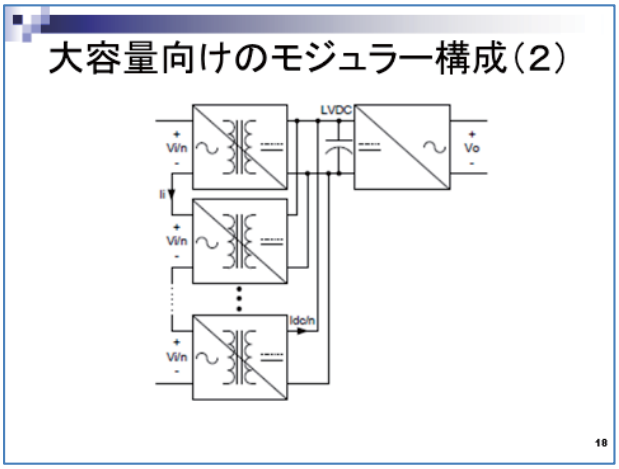

図 4-18

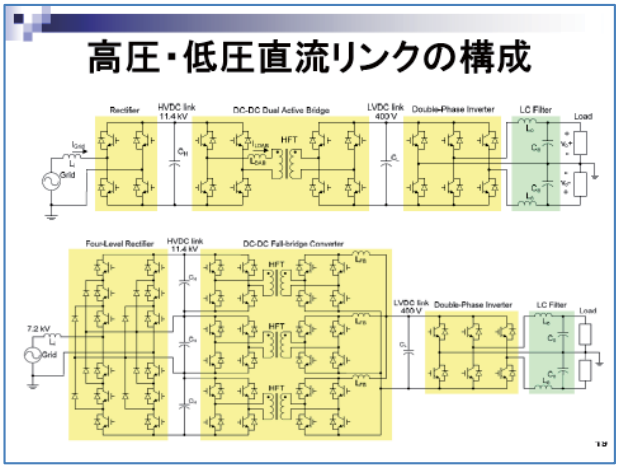

図 4-19

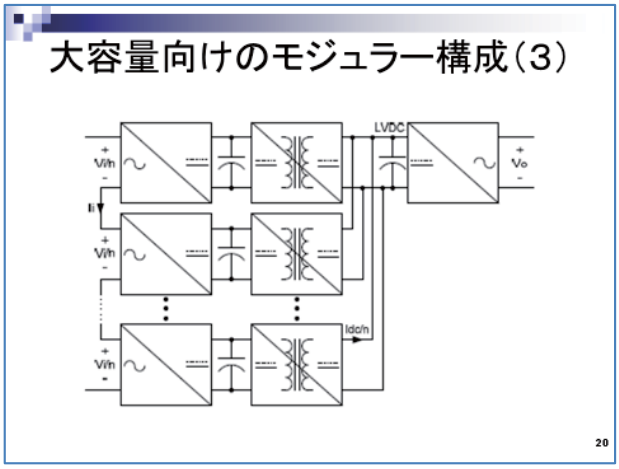

図 4-20

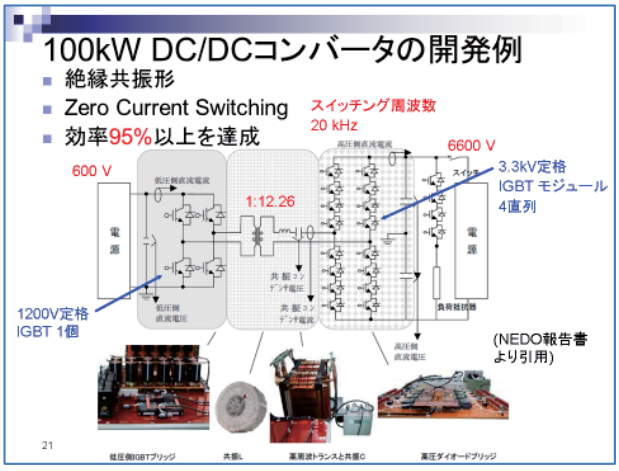

図 4-21

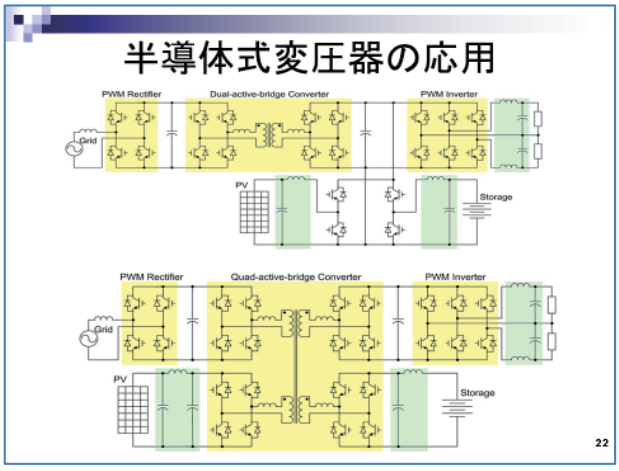

図 4-22

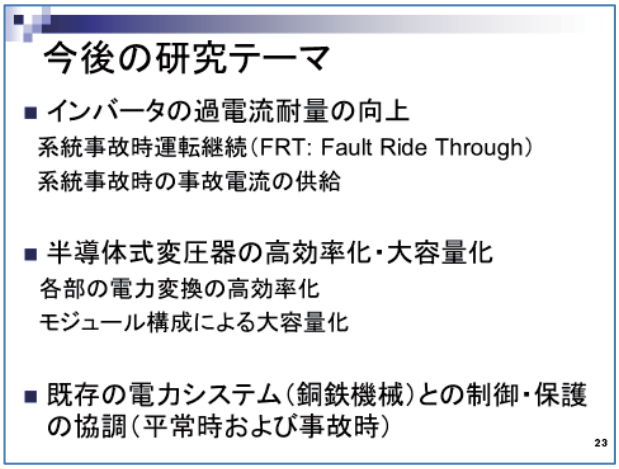

図 4-23

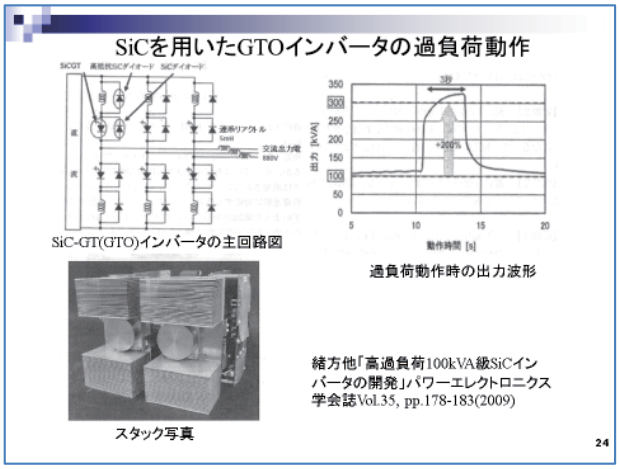

図 4-24

3.5 「市場メカニズムに関する工学的研究」

和泉 潔　東京大学　大学院工学系研究科　システム創成学専攻　教授

私は、株式市場などの金融市場の社会シミュレーションを研究テーマにしている。したがって、幾つか関係のありそうな市場メカニズムの研究を紹介したい。

電力市場、株式市場でも同様に、市場メカニズムの設計の目標は、余っているところから足りないところに供給して、需要のあるところで、効率的にものの価値が決まりながら平準化していくことである。これは電力市場でも変わらないと思う。(図 4-2 ～ 3)

分散高速取引市場では、市場間取引者が、例えば 4 丁目の電力が余り、5 丁目が足りないから価格によってそれをうまく平準化する。金融市場で言うブローカーもしくは金融業者になる。それを高速化することで、うまく標準化され、ゆがみがなくなる。ただし、株式市場では、制度の裏をかくような社会があり、理想通りにはいかない。例えば、Latency Arbitrage、タイムラグにより、電力市場で言うと、ここが安くなったから、電力の取引を最適化する AI で、遅いものと速いものがあることにより遅いものが食い物にされ、価格が不安定化することもある。もしくは、意図的ではなくても、最適化により、一種の輻輳が起き、安いほうに多くの買いが入り、値段がオーバーシュートして上がり、今度は別の方に輻輳が起きるような集中輻輳が起き、思わぬところで不安定化が出ることがある。2050 年の将来のエネルギーネットワークに向けて、社会を変えるような研究を行うのであれば、幾つか工学的な研究で、事前に最低この程度の安定性は保証できる、または、不安定性があるとしてもレジリエントに復活できるシナリオがあるなど、最低保証ができる研究、ソフトウェア的なレギュレーションや、制度設計も必要である。関係のある工学的な研究として、インフラ、レギュレーションに関わるような工学的な研究を 2 つ紹介する。ただし、大規模データを使って、機械学習でやるものは除いている。(図 5-4)

まず、ゲーム理論もしくはオークション理論に関連した研究を紹介する。オークションという新しいメカニズムを入れる場合、社会余剰的な価値が出た場合、どういうルール、プロトコルで配分するかのメカニズムの設計が必要となる。理想的な定常状態はこうなる、もしくは上界と下界がこの範囲で収まるなどのスタティックな解析での設計をまず紹介する。このスライドは首都大学東京の渡辺隆裕教授のゲーム理論、オークション理論のスライドから作成した。メカニズムデザインの分野は、オークションだけではなくて、課税や、公共料金などのレギュレーションなどで、経済的な合理性を持つ参加者の中で安定性を保証する制度を設計する。要するに悪いことをしても誰も儲からない設計のルールにするにはどうすればいいかというような理論である。(図 5-5 ～ 6)

特に市場のオークションでは幾つか実績がある。例えば、通信の周波数オークションで、何メガヘルツ、何ギガヘルツを幾らで買うかをオークションで行う場合に、どのような値段のつけ方をするかについて、経済学者がこういったルールにすると安定性があるということを実験でも示した。それが実際の周波数オークションに導入されることによって、効率的で無駄にならないように、周波数の公共財に価値をつけることができたという実績もある。周波数オークション以外にも、排出権取引や、変わったところでは、例えば医学研修生がどの病院に行くかと、病院がどんな医学研修生を受け入れたいかというマッチング

問題にも使われ、その安定性のためのメカニズムデザインの研究もあり、これは日本にも導入されている。（図 5-7）

オークションの分野でどこをコントロールし、ルールをデザインするかというと、幾つかある。基本的には単一財という、いわゆる通常のオークションがある。美術品などは、例えば値段をどのようにつけていくか。最終的にどのような人が勝ちになって、それに対して幾らつけるかということに関して幾つかルールがある。

これにより、インチキしても絶対に儲からないような制度設計、ルールは何かということを理論的に導くことがオークション理論の目的になる。そのような、インチキができない評価額のルールが幾つかある。時間がないので省くが、みなが合理的にいけば、正直に自分が思った通り、本当は幾らの需要があって、幾らぐらいの価値があるから、これぐらいの値段で買いたい、という、最良の選択ができるルールの設計が可能である。（図 5-8 ～ 9）

ただし、理論的に解けるのはあくまでもスタティックである。先ほどの分散高速取引市場や株式市場は、Continuous Double Auction、要するに連続したザラバの市場である。美術品のオークションも 1 回ではなく、値段が動いたのを見て、自分の価値も変わり、また売り手と買い手が両方とも値段を入れていくことが続いている。市場価格のトレンドはダイナミックなものになる。このため場合によっては、思いもよらない不安定性、輻輳が起きるなど、ダイナミクスに起因するような安定性、不安定性という問題が生じる。そういったダイナミックな問題に対応するための工学的研究が、私の専門である。コンピューターの中に取引戦略や、需要のルールなどのバーチャルな需要や、バーチャルな供給というプログラムを、1000 体、1 万体、または 10 万体入れ、その相互作用によって、どんなルールを入れると最終的な定常状態はここであるが、そこに行くまでに素直に行くのか、しばらく変動があるのか、場合によってはしばらく落ち着いた後に、たまにスパイクが起きるような制度があるのかわかる。もしくは、このようなスパイクがあるときに、株式市場で言えば、サーキットブレーカーといわれる、価格変動が大きいときに売買を停止する制度を入れたほうがいいのか、悪いのかを分析している。

例えば海外の株式市場で、サーキットブレーカーが去年発動したが、それによって、取引停止の後に逆に変動が激しくなった例もある。このため、制度がどんな副作用をもたらすかということを、ルールを持ったプログラム同士の相互作用の中で見ていく、事前にどういうケースがあり得るかということを予測するのが、エージェントシミュレーションによる市場設計の話である。（図 5-10）

そもそも社会シミュレーション、エージェントシミュレーションは何かという話をする。幾つかの社会的な分野の中で、過去にあった制度であれば、大規模データにより、傾向が分析できる。ところが、制度設計の場合、データはないので、実際にミクロなルールはどういうものがあるかをデータなり、実験なりで見て、それが集まると、例えば社会現象の中で、どういうマクロな動きが、安定性、不安定性が起こり得るかを見ていくのが社会シミュレーションの研究になる。例えば渋滞やマーケティング、もしくは、SNS、ツイッターなどの社会ネットワーク、さまざまな分野で制度設計、もしくは、予測に使われている。（図 5-11）

2014 年に日本の株式市場でティックサイズといわれる、初めて 0.1 円刻みに、値段の

刻みが小さくなった。東京証券取引所との共同研究として、シミュレーションで刻みを小さくすることで、かえって不都合なことが起きないかの研究を行った。研究の背景には取引所間競争がある。この図（図 5-13）はニューヨーク証券取引所が 2 年間で 80% の株式取引を占めていたのが、2 年間で 30% まで支配的地位が一気に落ちたときのものである。そのときの取引所間競争の 1 つの大きな要素が、ティックサイズの違いと言われている。トレーダーにとっては、ティックサイズが小さい方が、ちょっと安いときに買って、高いときに儲けるチャンスが増えるので、ティックサイズが小さい取引所の方が良い。では、全て小さくすればいいかどうかを調べるために、1000 体の取引ルールを持った、プログラムが集まったコンピューターシミュレーションの中で、ティックサイズが大きなマーケットと、ティックサイズの小さなマーケットで、同時に取引できる場所がある場合に、どちらを選ぶかを求め、ティックサイズの差によってどれぐらい取引のシェアが奪われる可能性があるかを調べた。結果として、ある一定以上、平均株価より十分小さい値幅、ティックサイズであれば、それ以上細かくする必要がないというティックサイズの閾値を見つけることができた。これを参考に、東証では 2014 年にティックサイズを変える場合に、閾値以上の銘柄は小さくするが、他は 1 円刻み、5 円刻みのままの形で、銘柄選択にシミュレーションによる閾値の結果を反映した。（図 5-12 ～ 14）

また、幾つか大規模シミュレーションを行っており、市場の不安定性、例えば高速取引（HFT : High Frequency Trading）に入ることにより、アービトラージが入ると、不安定性が増えることがあるかについて、シミュレーションを行っている。それを行う場合、3000 銘柄プラスオプションを入れる大規模なシミュレーションを行い、その 3000 銘柄の中で理論的に一方が安くて、他方が高い場合、ミリ秒単位で割り込むようなものが入った場合に、その不安定性が伝播しないかどうかを調べている。社会シミュレーションではさまざまなパラメータ設定があり、網羅してシミュレーションするために、複数のプロジェクトで大規模な社会シミュレーションを行っている。（図 5-15 ～ 18）

今回念頭に置いたのは、先の藤井先生の分散高速取引市場であり、2050 年の新しいエネルギーネットワークを研究するために、やはり実際のデータのセンシングに加え、将来の一歩先、半歩先にどういうことが起こり得るかを見ていくシミュレーションやゲーム理論的な研究の 2 つにより、制度設計をあらかじめある程度やっておくことが、社会的なレギュレーション・制度を決めることで必要と考えている。

（質疑応答）

Q：メカニズムデザイン・オークション理論と、エージェントシミュレーション・人工市場の対比はわかりやすい。ただし、その 2 つは世界観が全く違っており、ゲーム理論は完全合理的な人間を考えた上で均衡を探るのに対して、マルチエージェントベースのシミュレーションはヘテロジーニアスで、限定合理的で複雑なものとなる。マルチエージェントベースでのエージェントの合理性、パラメータ設計の前に何を関数に置くかということにルールがない。エージェントをどう設定するか。

【和泉】2 つある。1 つは基本的にはミクロのデータからであり、個人個人のこういうパターンのときに人間はこのようなバイアスがあるなどの実データからである。もう 1 つは、ミクロな合理性を仮定するとしたら、こういうことが起こりうるという理論的な帰結をより

どころとする。その両方を使いながら少しずつ条件を外していき、現実に近づけることで、実際に定常からはどういうふうに外れるかというのを見ていく形で行う。

社会シミュレーションは基本方程式がないが、モデルをゼロから構築することは難しいので、理論もしくは実データのミクロのところから立脚するというアプローチである。

Q:エネルギーシステム改革において、あるべき制度設計をするときに、人工市場のシミュレーションをつくるのにどれくらいの時間が掛かるのか。
【和泉】ミクロで、例えばトレーダーとか、消費者がこういうルールを持っているという仮説を持っていれば、それほど大変ではないと思う。ただ、限界があり、マクロに、例えば１カ月後とか半年後にプラスマイナス誤差で予測するというのは、時間をかけて精密なモデルを構築しても難しい。なので、ある程度の精密さのモデルを構築して、ワーストケースとかベストケースを見て、最悪な場合、ミクロではどの辺りから破綻していくかとか、そういうことを分析することが有用である。
C：エネルギーはライフラインでもあるので、このような破綻の話などの検討は重要と考える。

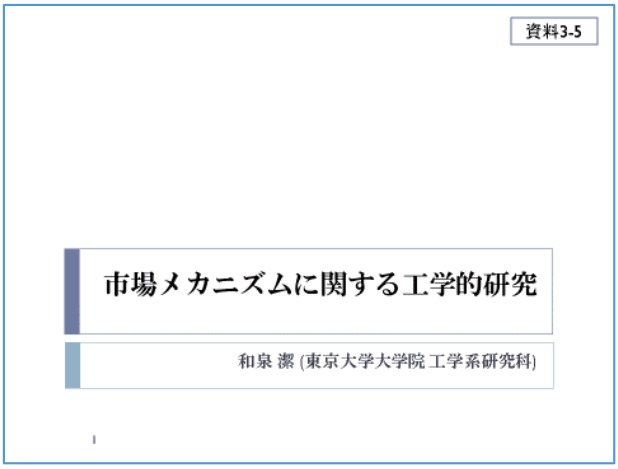

図 5-1

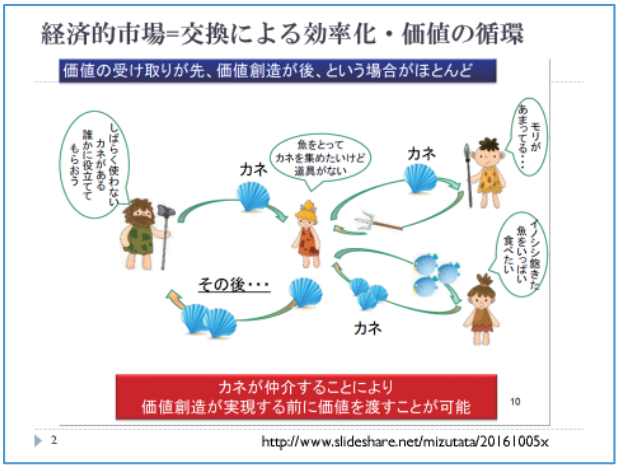

図 5-2

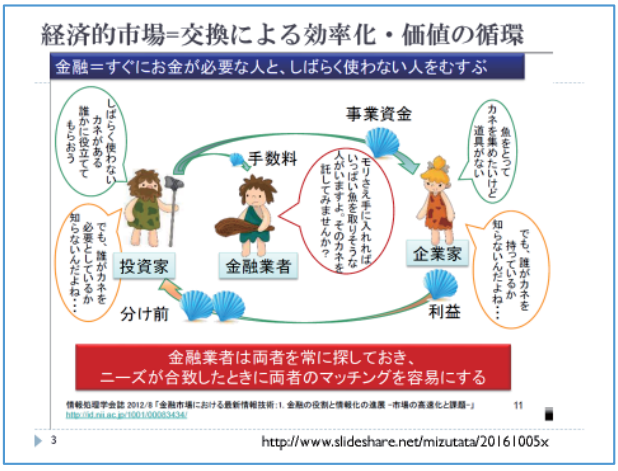

図 5-3

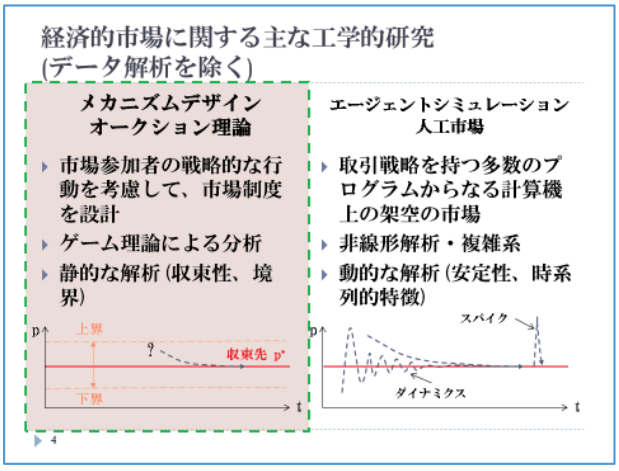

図 5-4

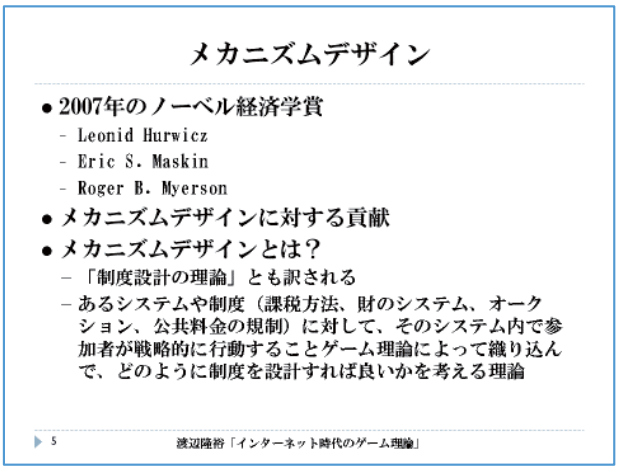

図 5-5

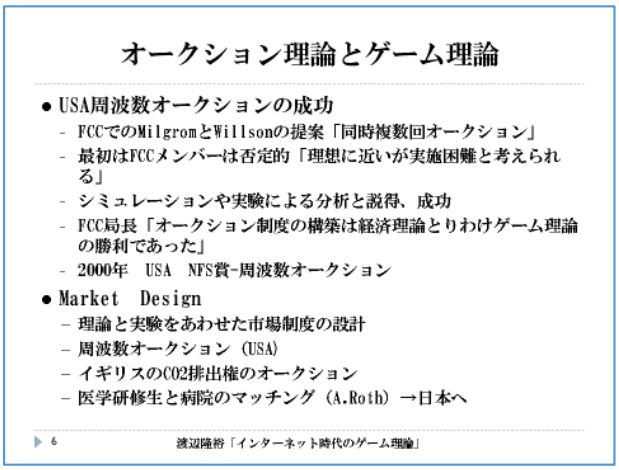

図 5-6

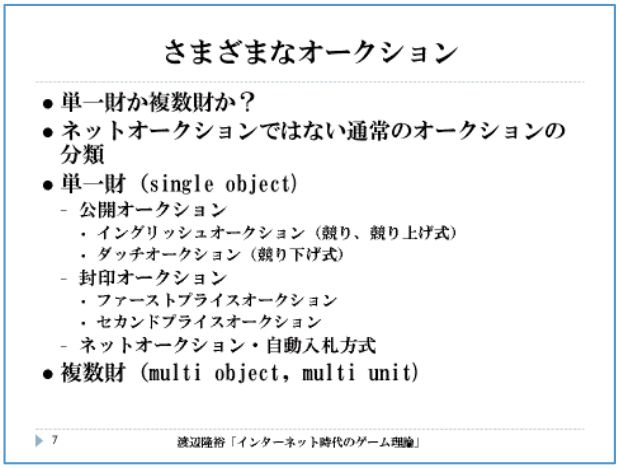

図 5-7

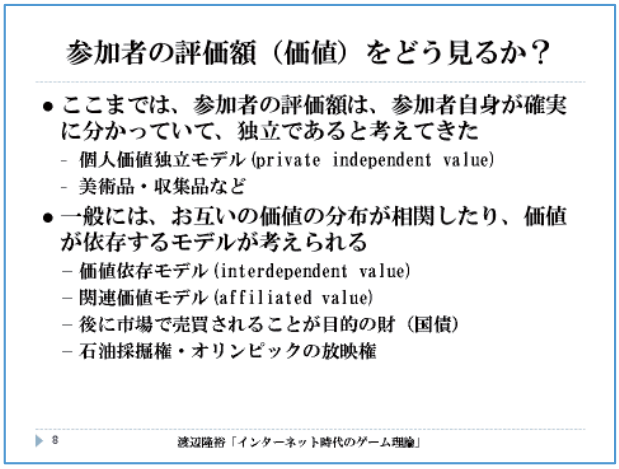

図 5-8

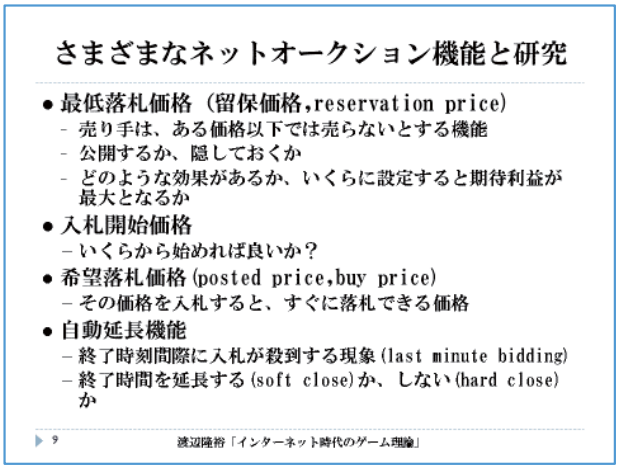

図 5-9

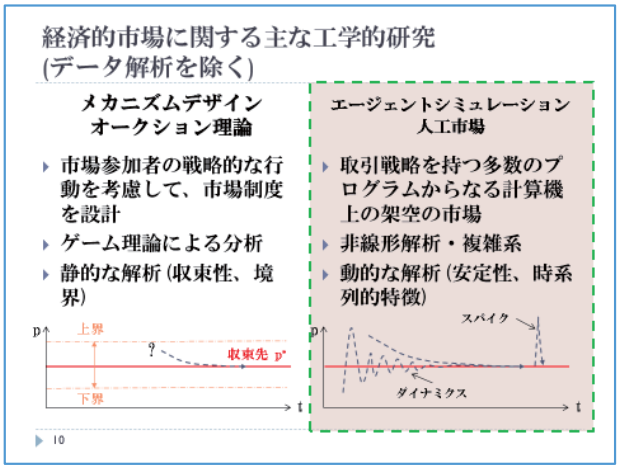

図 5-10

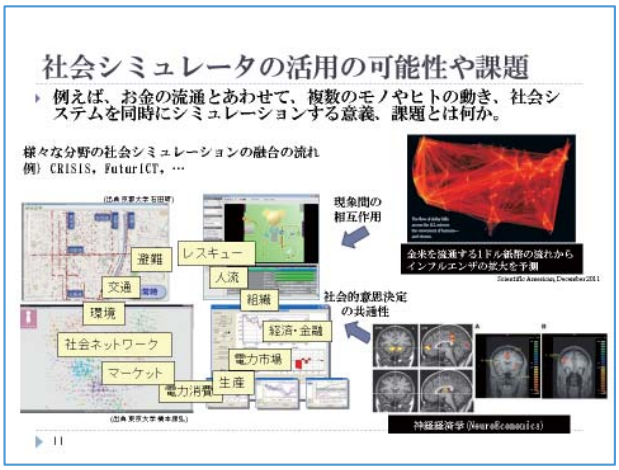

図 5-11

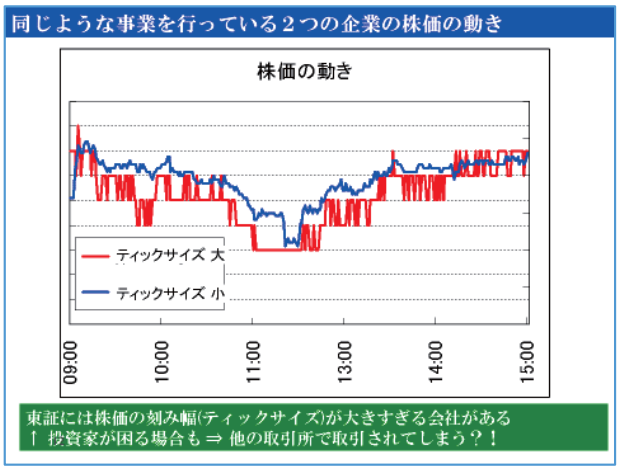

図 5-12

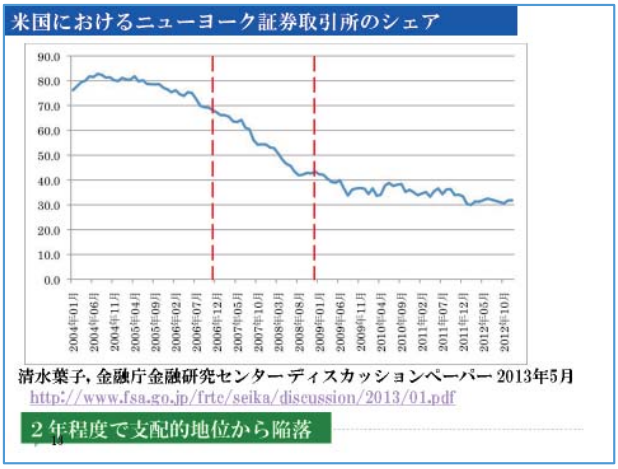

図 5-13

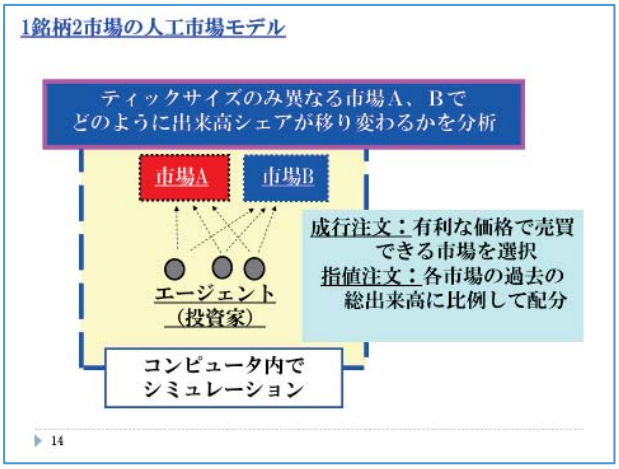

図 5-14

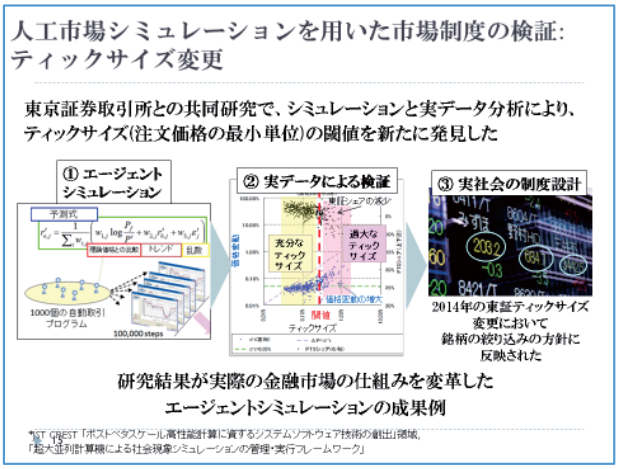

図 5-15

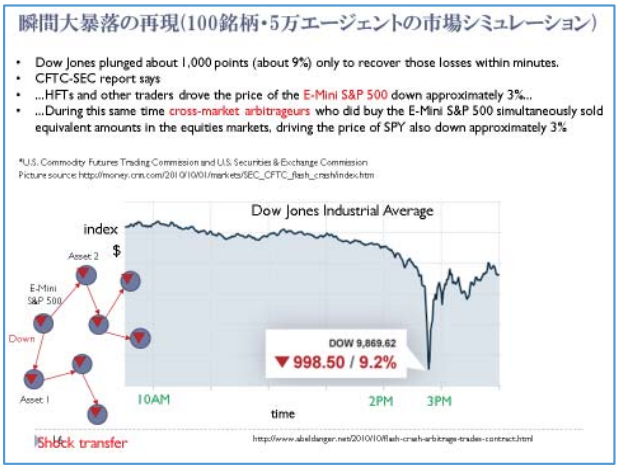

図 5-16

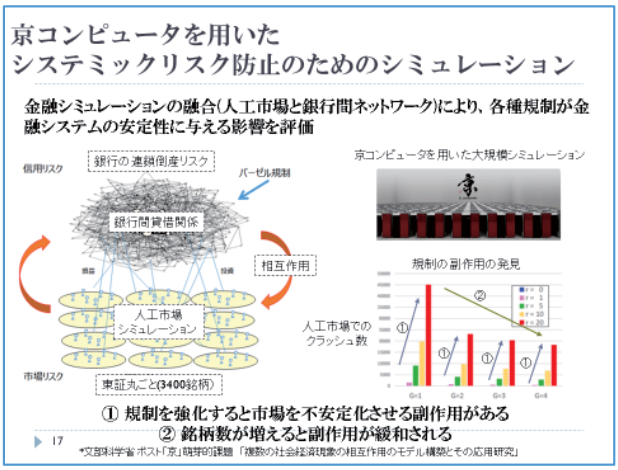

図 5-17

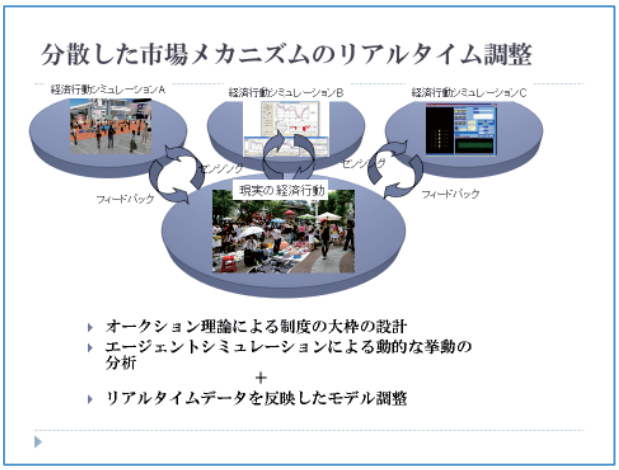

図 5-18

3.6 「エネルギーマネジメントにおける需要研究」

下田 吉之　大阪大学　大学院工学研究科　環境・エネルギー工学専攻　教授

私はJST-CREST（分散協調型エネルギーマネジメント（EMS）領域）の中島チームに所属している。このEMS領域の5つのチームの内、中島チームは、EMSを直接扱うのではなく、気象・地球科学の分野とエネルギー需要の分野を扱っており、EMSの基盤になる分野を研究している。エネルギー需要科学の分野は、研究の作法がないため、2年近く、東京大学岩船先生、東京工業大学日高先生の研究室と合同でディスカッションした。その後、シンポジウム（補注：第26回東大CEE主催「エネルギー需要を科学する（H28.11.21)））を行ったので、その内容を紹介する。（図6-2）

エネルギー需要を科学することは、省エネルギーやエネルギーマネジメントのように、工学的な計画、設計、操作を対象とするため、その構成、ふるまいを解明することである。国土レベルのエネルギー需要では、昔からエネルギー需要予測があったが、GDPや人口などが何年後にどれぐらいになっているという非常にマクロな予測でしかない。例えば東日本大震災の後に需要が大きく変わっているが、その成り立ちすらはっきりと解明されているわけではない。一方で、短期予測では時系列予測のようなやり方があるが、いわゆる説明指標は気温程度が出てくるだけで、中身がわからない状況である。最近になって、温暖化対策計画の中で大幅な省エネルギーが必要となり、そのためにはエネルギー消費構造を要素に分割し、その機器やサービスごとにその消費量と、それによって需要家が受けているサービス、経済性、快適性というようなものを見ながら、どれぐらい調整可能かを議論する必要がある。（図6-3～4）

温暖化対策計画で家庭の省エネルギー想定では、いろいろなメニューが挙がっている。それぞれのメニューでどれだけエネルギーが減るかが推定できているということは、どの用途でどれだけエネルギーを使っているかがわかっていることになる。エネルギー消費量の削減の可能性を探るために、エネルギー需要は年間や月別など、時間粒度が粗いところで捉えられてきた。（図6-5）

一番大事なのは、エネルギー需要は派生需要であるところである。食料のように直接消費される財ではなくて、1kWhであっても、それが明るさになったり、温かさになったり、情報になったりというところで消費されている。このためその裏側を見にいこうとすれば、心理学だったり、医学だったり、あるいは経済学、いろいろな学問分野に波及していくところが大事なポイントになる。

これまでは、効率が上がるとどれぐらい減るかを見ていたが、これが限界になってきたため、これからいわゆる調整、コントロールをやっていく必要がある。（図6-6）

分散協調型EMSが今のCRESTでのテーマであるが、再生可能エネルギーの拡大のために、コントロールできない電源と、需要のミスマッチを解消する手段が必要になってくる。それをやるためには貯めるとか、あるいはグリッドのマネジメント、もう1つは、需要の調整である。需要の調整を計画するためには小規模スケールでのロードカーブ予測が必要になってくる。小さいスケールのため、ばらつき、確定的な数字は出てこない。

大規模電力系統のつながった分散された小さいエリアの中で、再生可能エネルギーと、

それから、大規模電力系統の事情とエネルギー需要の 3 つのバランスをグリッドでとる、あるいは、需要でコントロールすることになるが、明らかに前の 2 つの要素研究に比べて、エネルギー需要は不確かなものであり、それを扱う学術分野もしっかりできていない。（図 6-7）

エネルギー管理のためのエネルギー需要科学は、エネルギー消費構造を要素分解すること、それから、エネルギー需要を電力ロードカーブが推計できる時間粒度でエネルギー消費機器レベルに分解して、その機器の稼働とサービス、快適性の関係を明らかにした上で、制御可能な負荷とそれ以外に分解して、この制御可能な負荷については、その制御による負荷の変化とそのサービスの低下の関係というのを明らかにし、それができるかできないかということを判断していくということになる。（図 6-8 ～ 9）

このため大事なのは需要の分解と可制御負荷の分離という 2 つのテーマが大事になる。結局、誰がどのぐらいの量のどのような種類のエネルギーをどのような目的のためにどのぐらいの期間必要とするのかということがわかれば良い。しかし、これは 40 年前にハーマン・デイリーが言ってから、まだきちんと手がつけられていなかったテーマである。

またロードカーブでは、EMS が対象になるので、時間解像度として分単位、秒単位のエネルギー需要の変化を見ていく必要がある。そうすると、家庭では、居住者の行動が需要の発生と密接な関係を持つため、家の中で人がどう動いているかのモデル化の研究が大事である。この分野は世界的に着目を浴びているが、居住者の行動、デマンドレスポンスに対する受容性など、人を中心とするアプローチがこれから大事になってくると考えている。（図 6-10）

この需要研究のやり方として 2 つあるだろう。要素分解型は、エネルギー需要をエネルギー消費機器毎に分けて、それを操作する人間の行動とか、制御装置などの要素から構成されるシステムとして表現し、気象条件とか機器の普及とか人間の慣習の変化とかデマンドレスポンスの信号とか、そういう働きに対してこのシステムがどう変化するかというのを明らかにするアプローチである。具体的には、エネルギー機器を動かして、エネルギー消費が発生するその前段のメカニズムは多くの要素がある。

この要素全部を関数化して、システムとしてモデルが組めるか。モデルが組めれば、例えば DR 信号が来たら、どういうふうにエネルギー消費が変わるとか、あるいは、政策をかけると、それでエネルギー消費がどう変わるか。あるいは、気象が変わるとどう変わるかということが全部見えてくるわけであるが、これが本当にできるのかどうかは 1 つの課題である。こういうモデルを組んで、エネルギー消費と、それから、出てくるサービスというのを見ていくのが要素分解型の大きな考え方になる。

それに対して全体挙動型は、細かく見ることはせずに、全体が複雑なシステムであるため、相対的な挙動をまず見ていくアプローチと思っている。

要素分解型は、機器ごとに見るので、オートデマンドレスポンスをやるためには必要になる。また IoT、サイバーフィジカルシステムなど、最近の情報学が目指しているのは、要素をすべて計測制御体制に置く考え方であり要素分解型のアプローチに近い。

それに対して全体挙動型は、エネルギー需要は非常に複雑で、要素分解型で再現することは難しく、もっと全体的な挙動を見たほうが良いとの考え方と思う。要素を分解しすぎると、かえって予測精度が下がることがあるので、両方の考え方をうまく組み合わせてい

くことが大事だ。（図 6-11 ～ 12）

エネルギー管理のための需要科学の研究分野として、測るということである。さらに、エネルギー需要モデルを開発することと、そのエネルギー需要に対してデマンドレスポンスのような介入をかけたときに、どういうふうに影響が広がっていくのかというのを見ていく分野であろう。（図 6-13）

要素分解型と全体挙動型をデマンドレスポンスに適用したときの見方は、デマンドレスポンスの要素分解型はオートデマンドレスポンス（ADR）である。ADR のときにはベースラインの需要を需要モデルで要素に分解した後で、それぞれの機器の中で可制御需要が料金に対するモデルによってどういうふうに操作されるか。それによって一つ一つのサービスがどう変わるかというのを見ていくことになる。一方で、マニュアルデマンドレスポンスの場合は、ベースラインに対して、料金モデルによりどのように需要が動いた、あるいは、行動が変わったかというところから入っていく。その一番トップのところを押さえるところで、やり方が違う。（図 6-14 ～ 15）

エネルギー需要モデルでは、家の需要を国土レベル、あるいは、電力系統レベルで見ていくモデルをつくろうとしており、これができれば、エネルギー消費の形成構造を正しく理解できたことと等価と思っている。しかしなかなか難しいので、まず、人間の生活行動を出していく。家の中に 4 人住んでいると、その人たちがいつ起きて、どんな生活をして、いつ帰ってきて、どうくつろいで。実は、この生活時間モデルをいろいろな統計から、スムーズなロードカーブをどう生成するかだけでも大きなテーマになっており、国際的にも共同研究をやっている。これが出てきたら、次に、それによって機器がどう動くか。この中に、例えば同じ温度でもエアコンをつける人がいて、つけない人がいるというところで、ここにもやはり人間の行動という要素がもう 1 つ入ってくる。それから、エアコンに関して言えば、気象条件、建築物の話が入り、どれだけの熱が部屋の中に入り、どれだけ冷房しないといけないかという別の話が入ってくる。その結果、1 軒のエネルギー需要が出てきて、これを地域で合計すると需要が出てくる。（図 6-16 ～ 17）

1 つ例であるが、ある街の特徴的な 4 つの街区でこの積み上げ計算をやった。全部の戸建て住宅の屋根に PV がある事例であり、2020 年、2030 年の省エネレベルを設定して、それによってロードカーブがどう変わるかを見た。その結果、2010 年に対して、戸建て住宅ばかりだと、余剰が大量に出てくるロードカーブになる。（図 6-18 ～ 19）

このように省エネが進展していくことで、ロードカーブが変わる。そうすると、地域でやるべき EMS 内容自体が変わるため、2030 年とか 2050 年の需要をつくり、EMS のモデルの境界条件につくることが我々の 1 つのミッションになっている。ただ、実態と比べると、平均値ではそこそこ合うが、エネルギー多消費世帯は、非合理な行動をしているので、まだ追いかけられないことが課題である。（図 6-20）

2030 年は、温対計画のように政府のメニューも出てきたので、再現しやすくなった。この精度検証をやることも私の研究になっている。しかし 2050 年に対しては違っており、いろいろなパラメータの決め方とか、不確実性の扱い方だとか、モデルの構造を決め直さないと使えないので、これも今後のテーマになってくると思う。

分散協調型エネルギーマネジメントシステム研究やこれからの将来のエネルギー研究は需要研究を高度化することなしでは成立し得ないと思う。ただ、需要の分解という方法だ

けではなく、いろいろな方法を混ぜていくということが大事になってくるだろう。特に、需要研究はいろいろな方向に行ってしまうので、まずはエネルギーマネジメントの開発のニーズを聞き、それに合わせたことをやっていくのが 1 つのテーマと思っている。

それから、需要研究ということで言うと、エネルギー以外のいろいろな物質にも展開するので、環境研究全体に広がる分野と思っている。

（質疑応答）

Q：モデルの使い方であるが、例えばあるグリッドを想定したときに、何か施策をする。機器、例えばスマートメータの購入に対して補助金をつけるとか、時間帯別料金導入するとする。何かそういった施策を入れたときに、その施策により、負荷やパターンがどのように変わるかを予見することは可能か。

【下田】それをやりたい。大事なのは、機器が変わった場合、建物が変わった場合、それから、外から信号が来た場合で、これまでは違うモデルを立てて、それで表現することをやっていたが、汎用的なモデルを 1 つつくることで、いろいろなレベルの信号に対する応答が見れるモデルをつくっていきたい。

C：再エネがたくさん入っていて、小さい系統、例えばハワイとかでは、電力会社が 1 年ごとに需要家に対してメニューを変えている。それぐらいでないと、どうなっているのか測れない。このようなモデルを使うチャンスはあると思う。

【下田】今、使っているのは、震災後の節電のときのロードカーブを再現するようなシミュレーションをしながら、何で節電したのかを見ていくことである。今の段階では逆問題的に使っていくことになる。

図 6-1

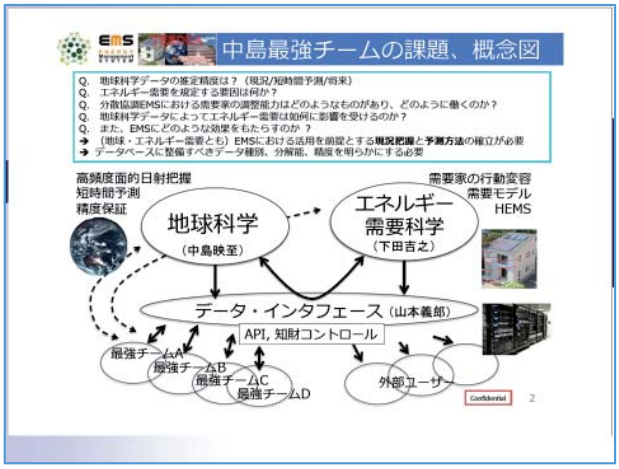

図 6-2

「エネルギー需要を科学する」とは？

- エネルギー需要を省エネルギーやエネルギーマネジメント等のように工学的な計画・設計・操作の対象とするために、その構成・振る舞いを解明すること。
- つい最近まで、需要に関する研究は実測でデータを取り、それを分析することしかなかった。
- 従来、国土レベルのエネルギー需要については、GDPなどの経済指標、床面積、人口、世帯数などの人口学的指標をベースにマクロな予測がおこなわれてきた。ただし、これまで予測精度はあまり良くない。東日本大震災後の大きな需要変動の要因も十分には解明されていない。
- 一方、エネルギー需要の短期予測では、時系列予測手法等を用い、直接的要因に関する説明指標を気温など最小限にして需要を予測する手法がとられてきた。これでは特別なイベントに対する変化が予測できない。

3

図 6-3

近年のエネルギー需要学

- 現在のエネルギーミックス・温暖化対策計画のように、大幅な省エネルギーが要求される状況下では、エネルギー消費構造を詳細な要素に分解し、機器・サービス毎に消費量と需要家のサービス・快適性・経済性などを勘案してエネルギー需要の調整可能性が精査される。
- 主にエネルギー消費量の削減の可能性を探ることを主眼として研究がおこなわれている。
- 通常、年間・月別のエネルギー需要総量を対象とする。
- エネルギー需要は派生需要：サービスの調整の評価のためには心理学、医学、経済学など学際的視点が重要。
- 住宅・建物、エネルギー消費機器の性能向上による削減が主たる関心事。近年居住者行動が加わる。

4

図 6-4

家庭の省エネルギー想定(温対計画)

対策	電力	燃料
・新築住宅における省ｴﾈ基準適合の推進（6%→30%に）	78.6	235.6
・既築住宅の断熱改修の推進（同上）	11	31.5
・高効率給湯器の導入（CO2 冷媒HP 給湯器1400万台、潜熱回収型給湯器2700万台、燃料電池530万台、太陽熱温水器）	-26.3	294.9
・高効率照明の導入（9%→ほぼ100%に）	201.1	
・ﾄｯﾌﾟﾗﾝﾅｰ制度等による機器の省ｴﾈ性能向上	104.8	28.7
・HEMS・ｽﾏｰﾄﾒｰﾀｰを利用した家庭部門における徹底的なｴﾈﾙｷﾞｰ管理の実施（0.2%→ほぼ100%に）	178.3	
・国民運動の推進（ｸｰﾙﾋﾞｽﾞ・ｳｫｰﾑﾋﾞｽﾞの実施徹底の促進、機器の買換え促進、家庭エコ診断、自治体庁舎改修）	10.7	11.7
・低炭素ｲﾝﾌﾗﾛｰﾄﾞﾏｯﾌﾟ（省ｴﾈ基準適合義務化、ZEB/ZEH）		
・浄化槽の省ｴﾈﾙｷﾞｰ化		
合計(万kL)	558.2	602.4

図 6-5

分散協調型EMSにおいてエネルギー需要を研究する目的

- 従来の需要研究では、系統大・国土大でのエネルギー消費予測が主眼。
- 再生可能エネルギーを拡大していくためには、太陽光や風力などのコントロールできない電源と需要のミスマッチを解消する手段が必要→蓄電池、需要の調整。→小規模スケールでのロードカーブ予測
- 小規模ゆえエネルギー需要のばらつき（分散）が無視できず。
- EMSによる需要調整ポテンシャル推計のためにも粒度の高い需要情報が必要。

6

図 6-6

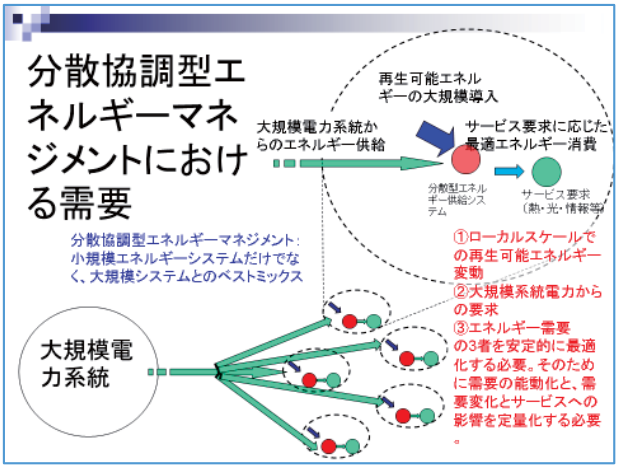

図 6-7

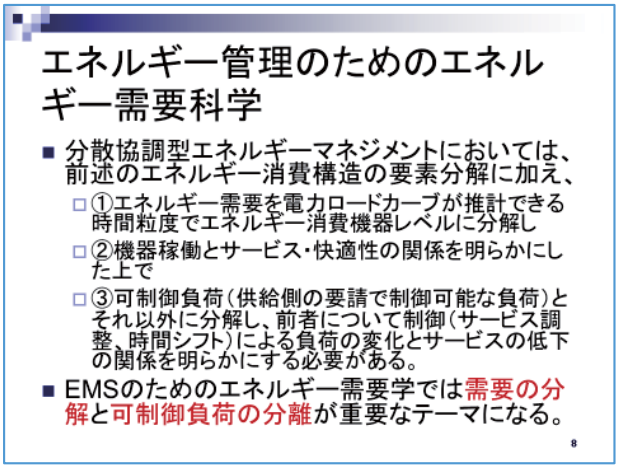

図 6-8

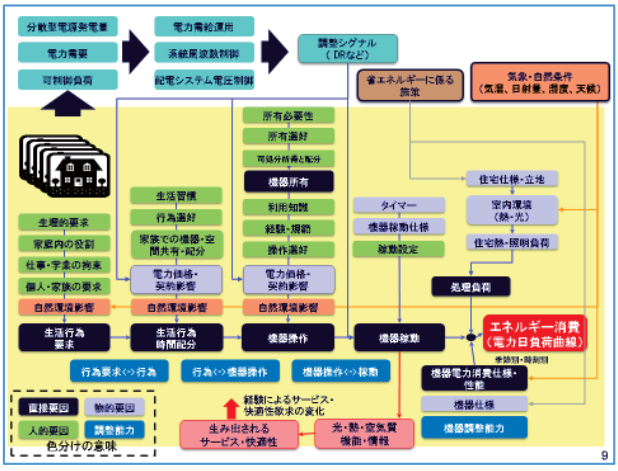

図 6-9

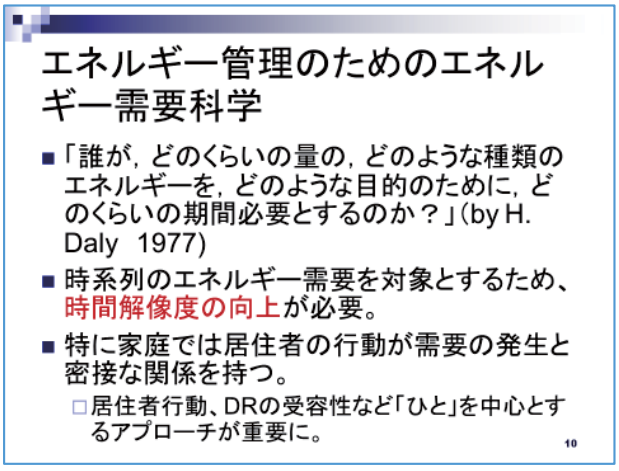

図 6-10

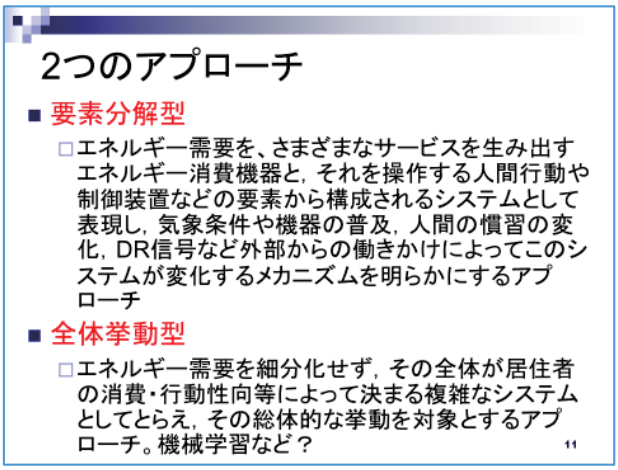

図 6-11

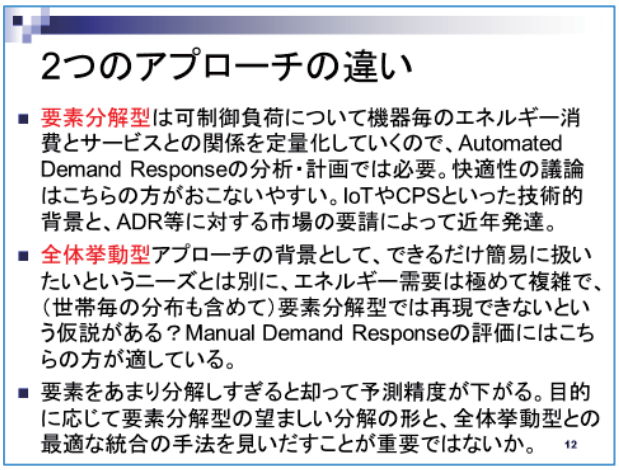

図 6-12

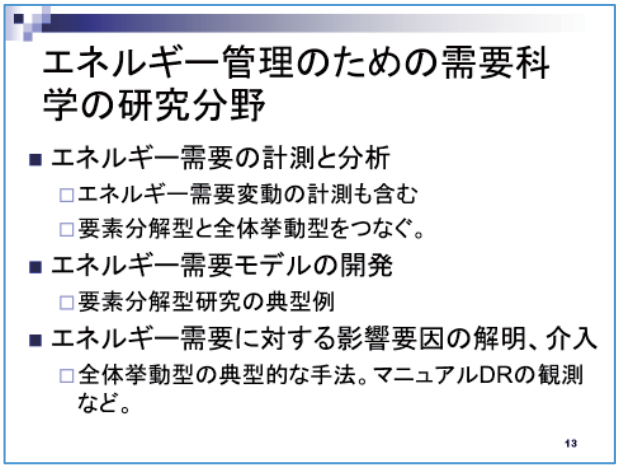

図 6-13

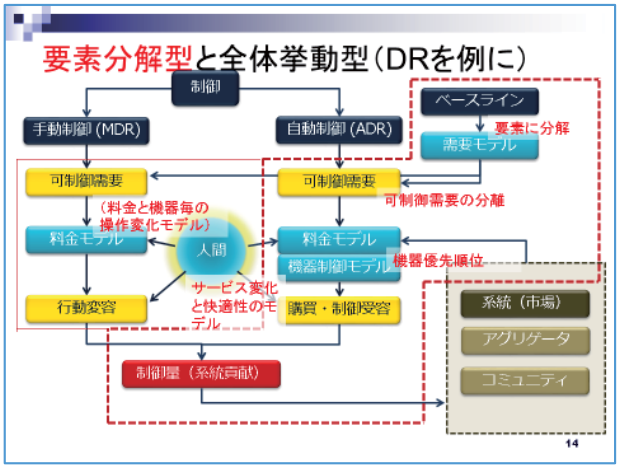

図 6-14

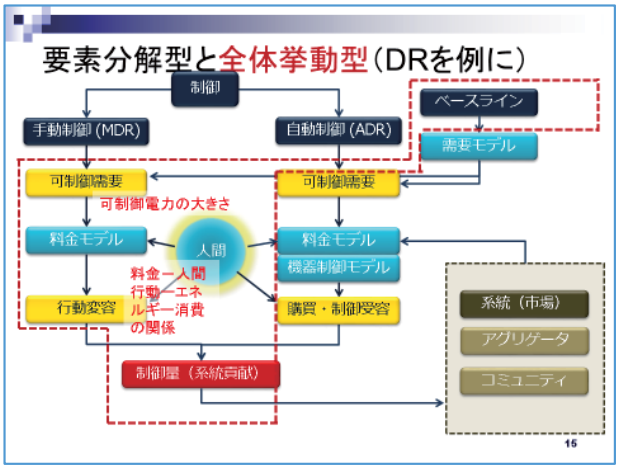

図 6-15

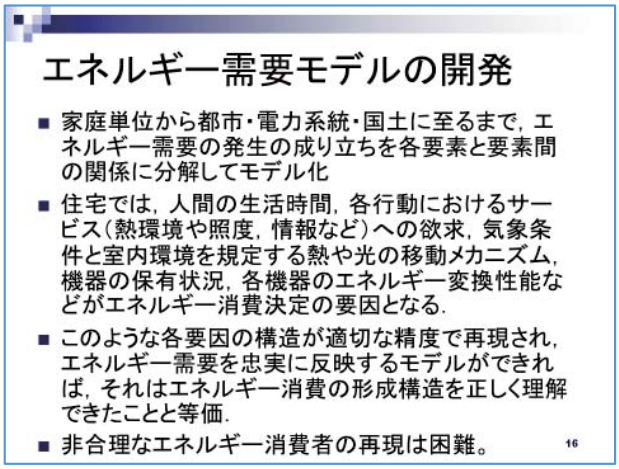

図 6-16

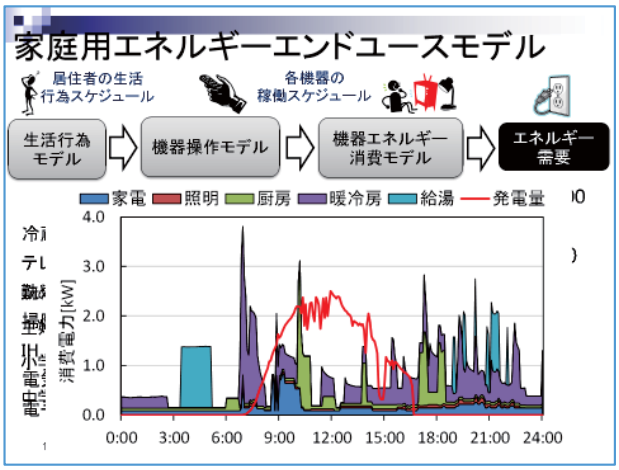

図 6-17

図 6-18

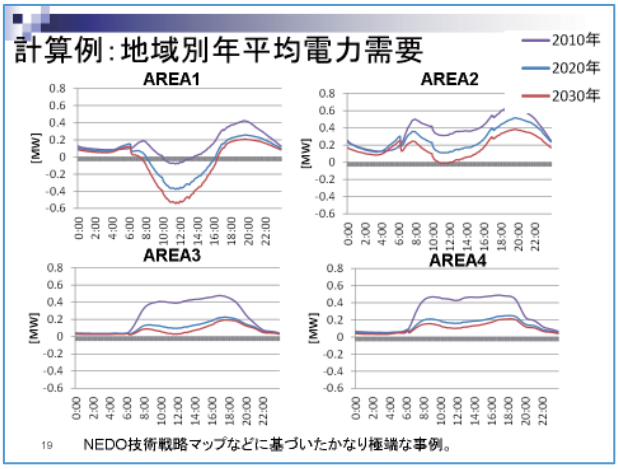

図 6-19

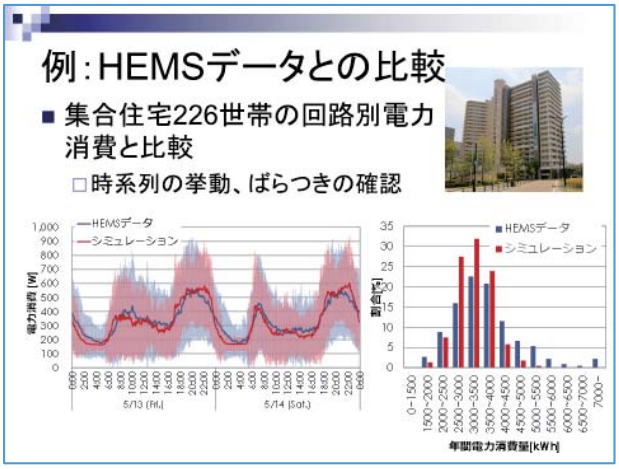

図 6-20

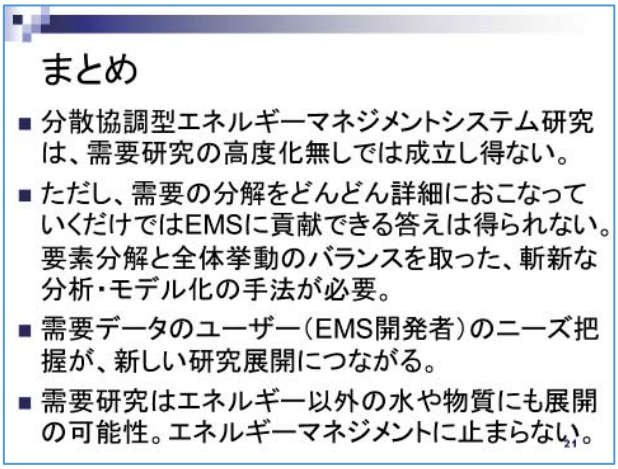

図 6-21

3.7 「スマートグリッド・エコノミクス～フィールド実験・行動経済学・ビックデータが拓くエビデンス政策～」

依田 高典　京都大学　大学院経済学研究科　教授

私は経済学者であるが、デマンドレスポンスの行動経済学的な研究について説明する。

今まで電力のフィールド実験と、経済産業省のスマートコミュニティ、横浜、豊田、けいはんな、北九州の経済チームの総括を 5,6 年やってきた。

フィールド実験で実際にコントロール、トリートメントをランダムにしてグループでいろいろなデマンドレスポンスを介入して、どう人間が行動変容するかというのを一つ一つリサーチクエスチョンを立ててやった。

日本では最初の大規模社会実験であったが､アメリカではカリフォルニア電力危機から、良い研究、悪い研究があるものの、100 を超える実証があり、特にオバマ政権で 11 の実験が行われた。私も 2011 年の震災直後の夏から 2012 年の夏まで 1 年間、Lawrence Berkeley National laboratory にいて、デマンドレスポンスリサーチチームですり合わせ等をやりながら、その間、日本で何をリサーチクエスチョンで入れていくかを、横浜、豊田、けいはんな、北九州と毎夜国際電話やスカイプ会議で議論した。

デマンドレスポンスにはマニュアルとオートメーションと両方あるが、EMS を入れて、人間の行動仮説に対してどう人間が振る舞っているかの理解を、行動経済学的な研究として実施した。その後もその知見をもとにして､JST-CREST（EMS 領域）で実施している。（図 7-2 ～ 6）

北九州では、2012 年の夏、冬、2013 年の夏に Valuable Critical Peak Pricing（ピーク時料金制）といって、アメリカでも例がないぐらい大胆に 48 日最大イベントを発生させて、50 円、75 円、100 円、150 円と本当にデマンドレスポンスで価格弾力性がどう変化するかを見ることを実施した。その結果、大体 10% から 20% のピークカットがあることを確認できた。日本でもアメリカでも、価格弾力性は 0.1~0.2 の間の効果があることもわかった。最初のうちは価格が上がれば、ピークカットも伸びるが、2 年目になると、デマンドレスポンスでは反応するが、価格差には反応しないことがわかった。これはほかの地域でも確認されて、かなりロバストな結果であった。

20% ピークカットすると、10% ほどの家計の電気代が節約できることもわかり、これも他の地域でも大体適用できることが経験則でわかった。ピークカットで節電するけれども、オフピークにピークシフトで電気を使うかというと、クーラーはそんな使い方しないという大体の相場感がわかった。（図 7-7 ～ 10）

けいはんなでは、価格を使ったダイナミックプライシングと、モラルに訴えるお願い、モラルスエージョンの節電要請をやった。これは経済心理的な刺激に対して馴化、慣れるか、さらに慣れてしまった後、リセットしてもう 1 回やり直すともう 1 回効果が復元、再現されるか（脱馴化）。また、トリートメントをとった後に、その効果が習慣として残るか。そういう 3 つのリサーチクエスチョンを立てて、同じタイミングで同じ形でランダムに分割されたグループに対して、モラルスエージョン節電要請と、さっきほどの Valuable Critical Peak Pricing を行った。結果は、節電要請グループで、最初は 8% ぐ

らいの効果があるが、すぐに節電要請は統計的非有意でなくなり、馴化が見られる。ダイナミックプライシングは 15 ～ 20% ぐらいの効果。大体夏も冬も維持されており、価格はデマンドレスポンスを維持することがわかった。

興味深いことは、モラルスエージョンではすぐになくなるが、冬にもう 1 回復活する。しかも、また同じパターンでなくなる。つまり、脱馴化が起きて、それはまた再び馴化することもわかった。

トリートメントを外した後にどれだけピークカットが残るかについては、ダイナミッククライシングは半分の 8%、夏の後は秋、冬の後は春、その基本的な電気消費の節電が習慣化していることもわかった。モラルスエージョンでは夏も冬も全然残らない。

理由として、家電の買いかえ行動の差なのか、それとも、その家電の効率的利用なのかという仮説検証をした。家電の買いかえ率は差がなく、アンケート調査に基づくいろいろな家電製品の行動パターンの変化があったので、行動変容であることもわかった。

デマンドレスポンスで夏、冬で短期的な燃料費の節約としての効果は、日本全体で 100 億～ 200 億円程度、これがもしデマンドレスポンスが定常化、20% ピークカットができたときに、日本の一般電気事業者が発電所、容量市場で削減できるかの金額は、年 1000 億円程度になる。（図 7-11 ～ 15）

現状維持バイアスが人間の一番大きな行動経済学的な、行動の心のくせ、バイアスであり、オプトイン、好きな人だけ入れていいというと、大体 1 割～ 2 割となる。それは臓器移植、401k でも、ダイナミックプライシングでも同じである。

嫌なら抜けることをデフォルトとすると、社会的に望ましいオプションの場合、8 割～ 9 割残る。このギャップは合理的に説明できない。経済学的に現状維持バイアスをいろいろな形で説明は可能であるが、これが一番大きく、これが一番大きな社会経済問題だと思う。わかっていても変えられない人間。これはどうするか。

横浜の実験は、オプトインで、単純にダイナミックプライシングに入ってというときに何 % 入るか。それで、どのぐらい節電してくれるか、ピークカットしてくれるか。また、第 2 トリートメントとしては、情報提供としてシャドービル情報を提供する。電気はいつ何時にどれだけ電気を使って幾ら払ったかわかっていない財なので、消費者にダイナミックプライシングが得か損かわからない。レベニューニュートラル（収支中立）を組み、全体の料金はプラマイゼロにするため、50% は得し、50% は損する。でも、自分が幾らかとわからない。第 2 トリートメントのシャドービル情報は、前年度のデータをとり、あなたがこうだったら、行動変容なしでこのぐらい儲かるという情報を与えるものである。第 3 トリートメントはさらに入ったら、6000 円あげるというキャッシュインセンティブを与える。シャドービルは正規分布しており、両端が、最大 80000 円ぐらいなので、6000 円であれば、構造的に損する人（ストラクチャールーザ）も大体 95% 以上は得になる。予想すれば、インフォメーションでシャドービルを与えて、あなたは幾ら得だ、損だというのをやれば､得になる 50% は入ると言うはず。さらにこのキャッシュインセンティブをつければ、95%、100% 近い人が入るはずである。しかし、実際にはデフォルトバイアスがあるので、そこまでは高まらない。

あともう 1 つの問題は、オプトインでやる気満々で入る人はやはりピークカットを頑張る。場合によっては 30% ピークカットする。ところが、ストラクチャーウィナーで何

もしなくても儲かるというと、頑張らない人ばかり入り、そこにトレードオフがあり、ピークカットは下がる。加入率は上げると、頑張りのエフォートが落ちるというモラルハザードがある。こういうのを ITT 効果というが、トータルのピークカット効果は変わらない。

結果は、オプトイン勧誘だと、16% 加入し、ピークカット効果が、相場の倍以上の 32% あり、オプトイン勧誘のみでトータルの節電効果は 5% になる。

情報提供では 50% に届かないが、倍にはなって 31% 加入するが、ピークカット効果もちょうど半分になり、掛けると 5% と、前者とで差がなくなる結果になる。

キャッシュインセンティブをつける場合は、48% が加入するが、ネットピークカットも思ったより減らないので、トータルでは、9% となる。これが一番良いが、6000 円を支払うことから、コストエフェクトネスに関しては慎重な計算が必要になる。（図 7-16 ～ 20）

一番大事な資料が図 7-23 で、今、主にやったのはマニュアルである。マニュアルは入口であって、オートメーション化をやることが重要となる。

これを 2011 年にやったときは、ビッグデータ、IoT で、オートメーションは ADR と呼んでいたが、今風に言えば人工知能といってよい。

私の研究の立ち位置は、行動経済学者で人間の合理性の限界や心のくせを考えながら、望ましい生活習慣というのを考えていくことであり、フィールド実験で生身の人間の中で実験をやることが一番の方法である。ランダム化方式が科学的に最強の因果性を特定するツールであるが、それを用いて調べると、人間はゲーム理論が予想するような合理的な振る舞いをしないので、必ず行動経済学が必要になる。

ビッグデータ経済学は 30 分毎のスマートメータ値をとり、大規模なデータを使うので、IoT、ビッグデータを人工知能で解析し、行動のアドバイス、リコメンドをフィードバックすることになるが、まだできていない。この 3 つが柱となる私の研究そのものになる。（図 7-27）

私がやっているのはこの社会実証、フィールド実験であるが、研究開発は大学が基礎をやり、企業が応用をやる。技術実証も企業や大学がやっているが、ここから先を悩んでいる。私がやったのは社会実証で、まずやはり技術実証からいいものができて、使えるとわかったら、ある程度の実証としてフィールド実験で使って効果を検証する。これを第 1 の死の谷と呼んでいる。これは実証であり、マーケットでサポートされた技術ではない。社会実装というのは、マーケット普及率で 5% 程度であるが、ここでやっとマーケットで支持される形になる。最後、社会普及。これでみんなが使うようになる。私の研究は、ヘルスケアもエネルギーでも大体あと 5 年～ 10 年で技術が完成するものを選ぶ。スマートグリッドもそんな感じである。家の建てかえに伴って大体普及するのでしていくので、実装から普及までいくと、やはり 30 年かかる。スマートメータは 5 年で終わっても、オートメーション化した HEMS が入って、家電の買い替えや家も買うことと考えると 30 年掛かる。今、これから目の前で完成するものが世の中で普及するのが 2050 年ぐらいになるので、技術実証と社会実装を結ぶことが学問的には非常に重要になる

（質疑応答）

Q：バイアスや人の行動を数理モデルで表すことはやられているか。

【依田】経済学者が最も得意とするところで、経済学者は数学で表現しないものは信じない。ただ、それが本当の人間に合わせていくのは難しい。ただ、一つ一つのモデルはかなりある。
Q：それはデータがないという意味か。
【依田】データはあり、一人一人の行動のモデルは組めるが、それがヘテロジーニアスでマルチにボトムアップになった社会の振る舞いがどうなるかは、均衡論的に解けない。社会シミュレーションの方が、相性が良いので、それでやれば良い。

Q：横浜の実証で、金銭付与で 6000 円を各家庭に配れば、加入率は 100% になると思ったが、48% の理由は？
【依田】それはデフォルトバイアスのため。人間の抱えているデフォルトバイアス、スイッチングコストは 6000 よりも大きい場合が多いということになる。
Q：まるまる 6000 円もらえるという話で何かオブリゲーションがあったのか。
【依田】デマンドレスポンスを受けることがオブリゲーションで、ダイナミックプライシングを受けることが面倒だったのだろう。
Q：ネット節電効果が若干、高かったのは。金もらった効果も入っているか。
【依田】情報提供だけだと、儲かる人が偏って入り、あまり頑張らないためピークカットは著しく落ちるが、1 回キャッシュインセンティブをやると、頑張ろうという人も広く均一に入ってくる。

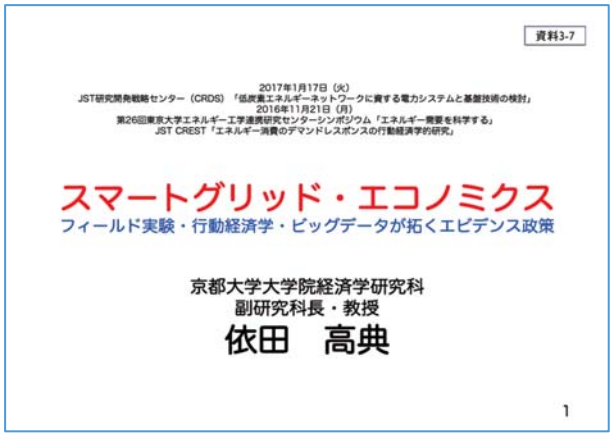

図 7-1

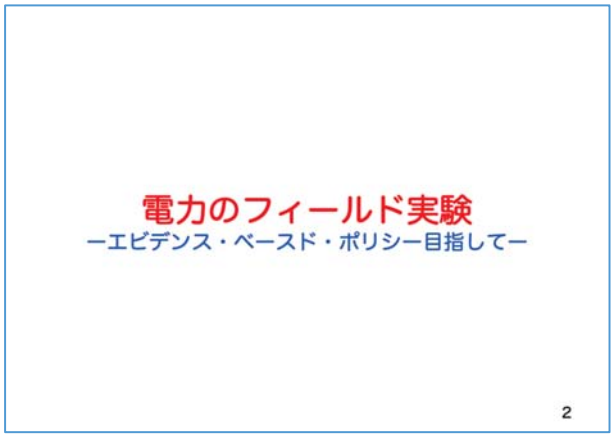

図 7-2

図 7-3

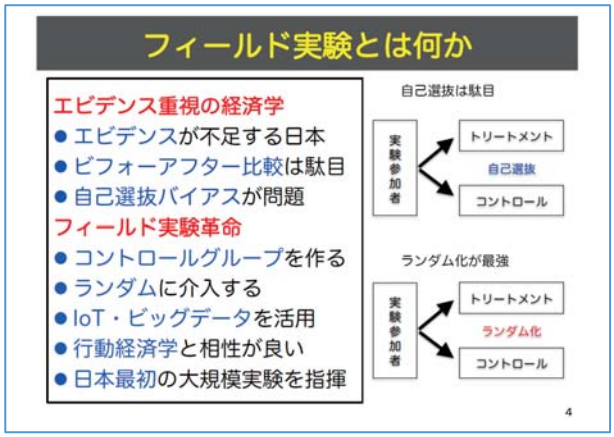

図 7-4

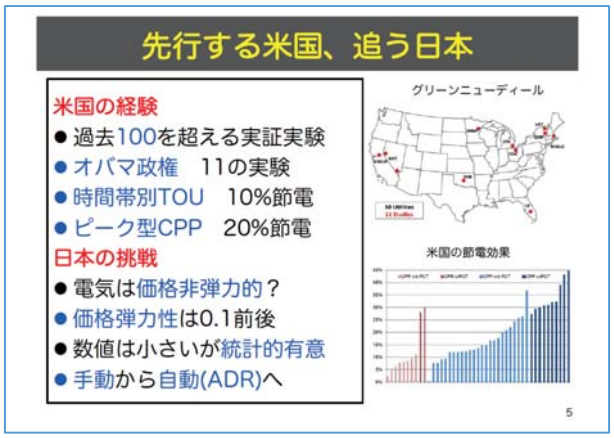

図 7-5

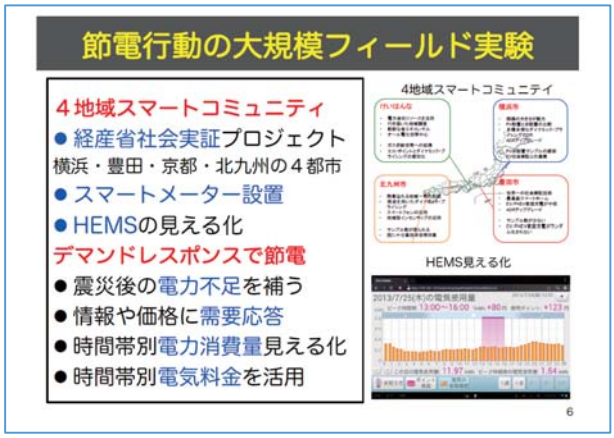

図 7-6

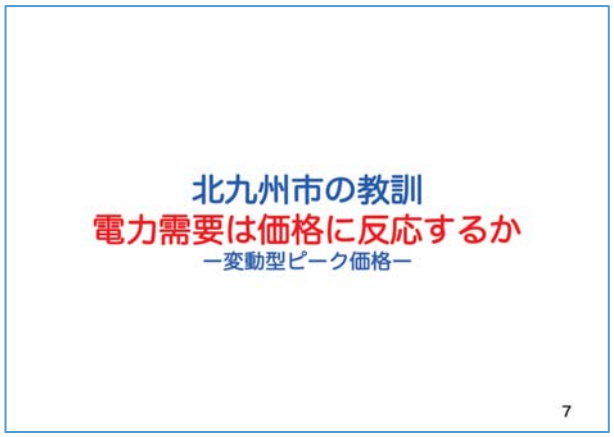

図 7-7

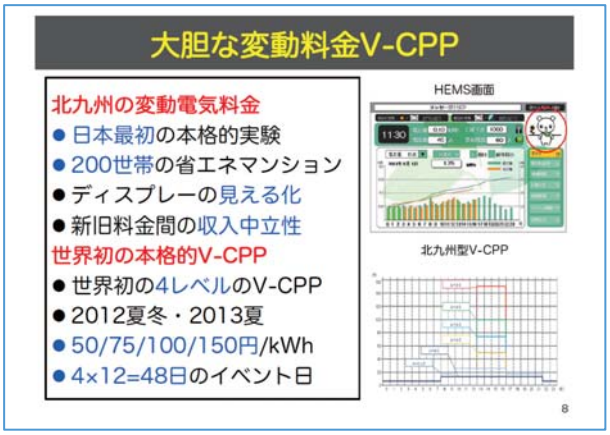

図 7-8

図 7-9

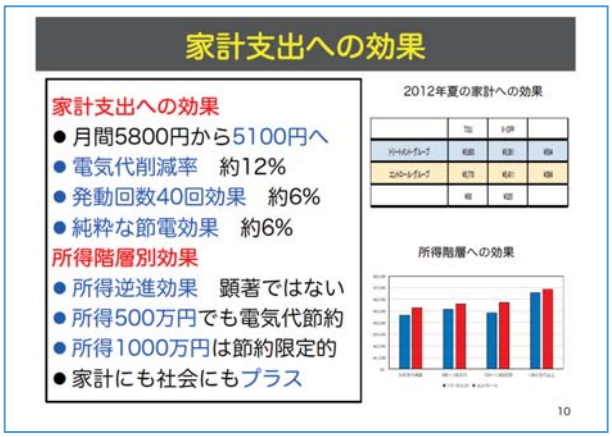

図 7-10

図 7-11

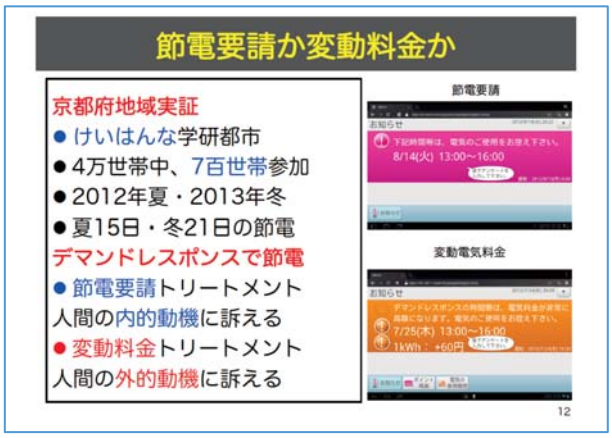

図 7-12

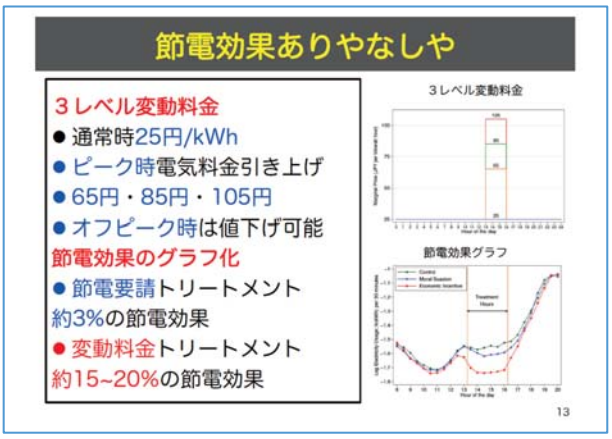

図 7-13

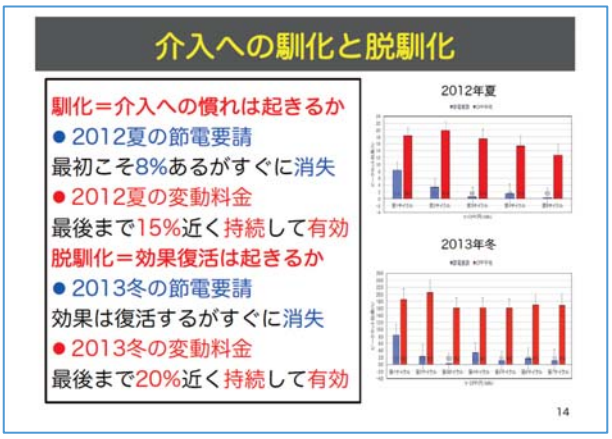

図 7-14

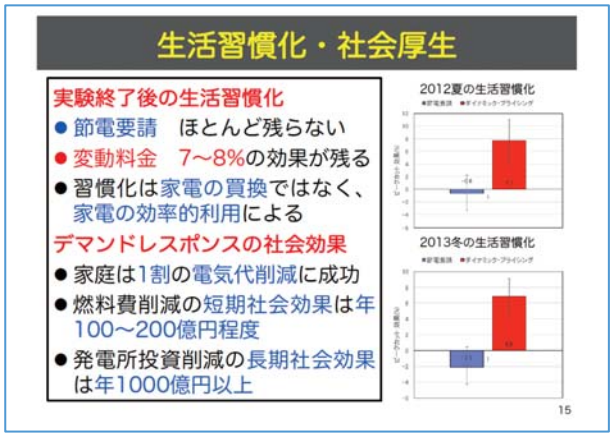

図 7-15

図 7-16

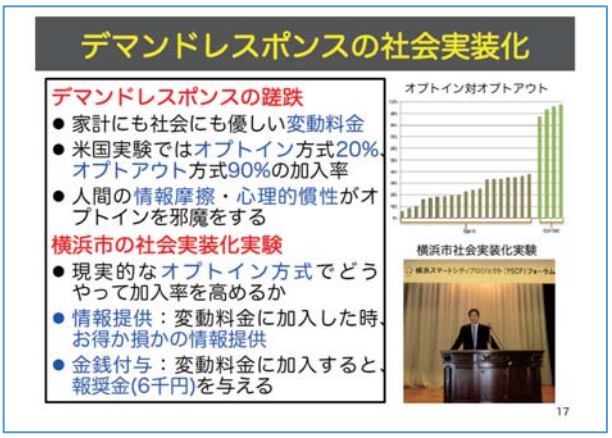

図 7-17

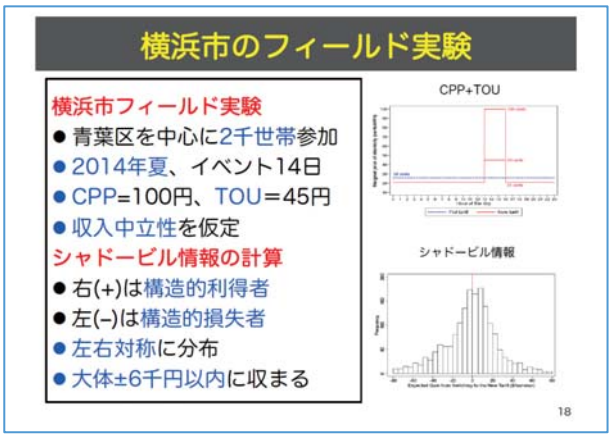

図 7-18

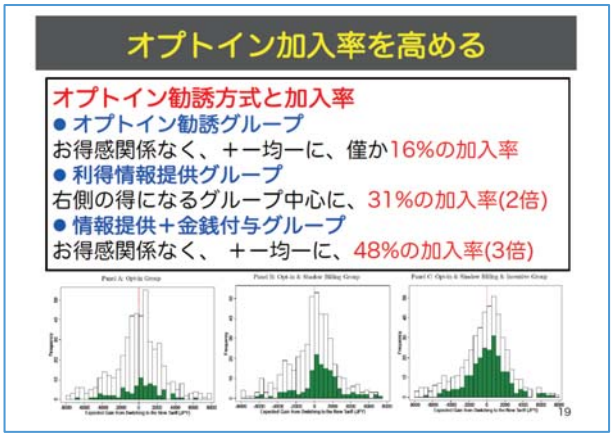

図 7-19

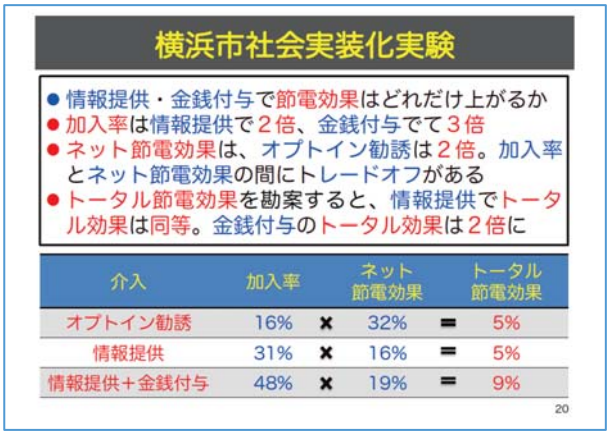

図 7-20

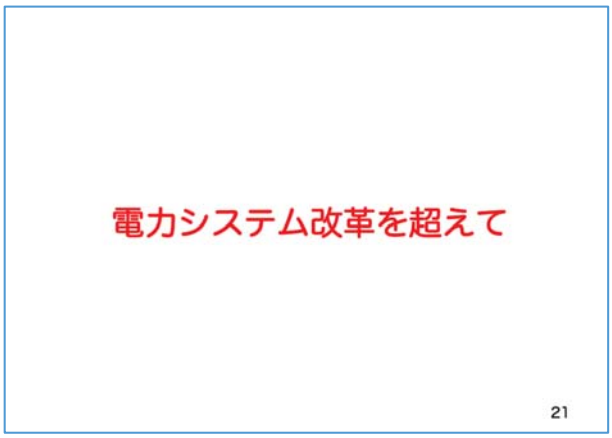

図 7-21

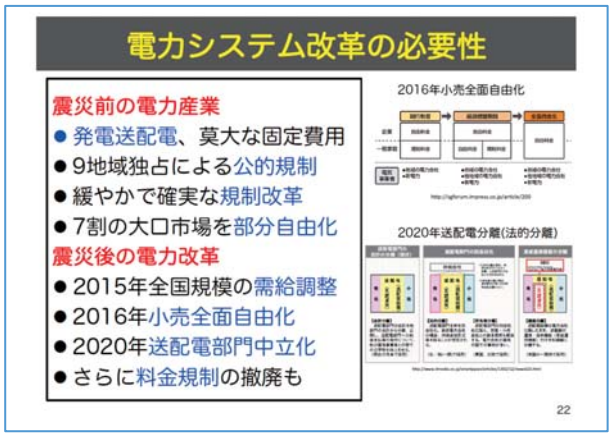

図 7-22

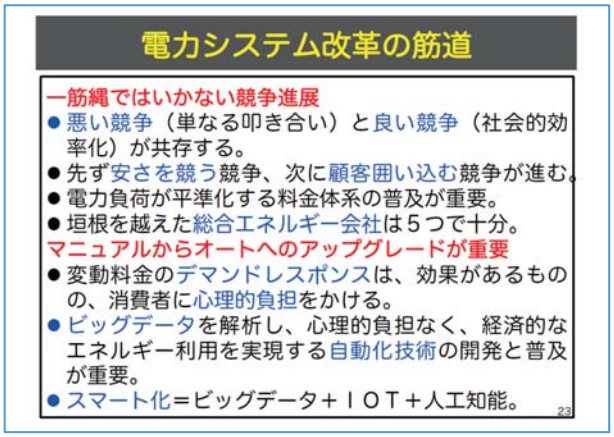

図 7-23

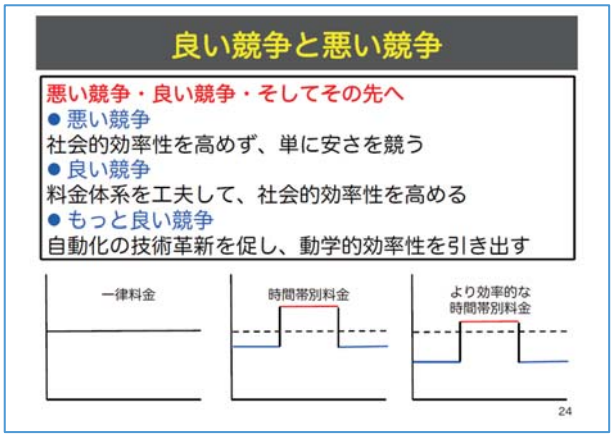

図 7-24

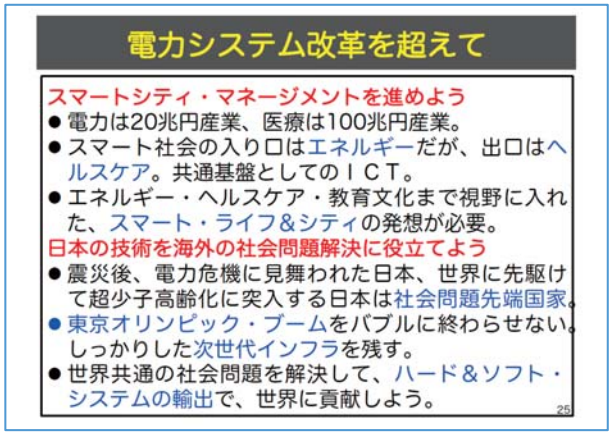

図 7-25

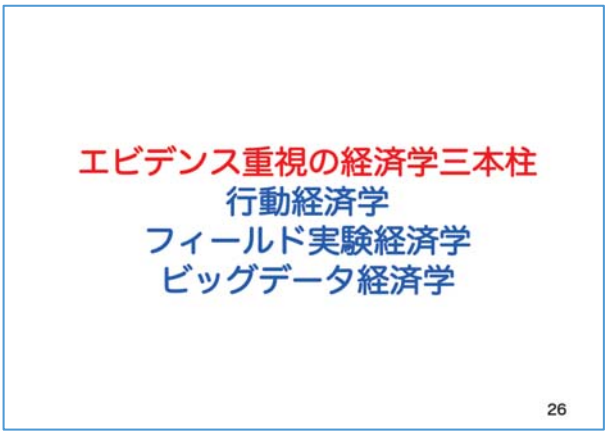

図 7-26

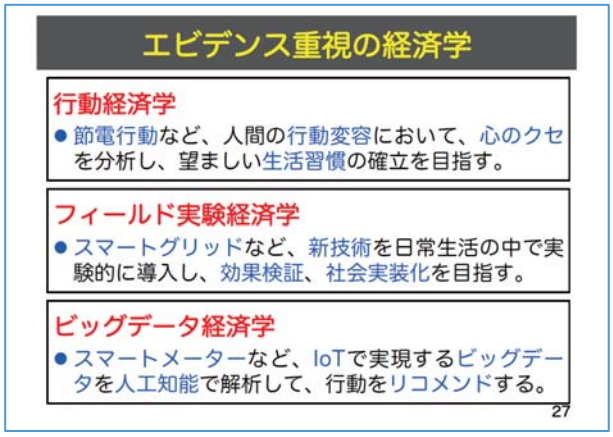

図 7-27

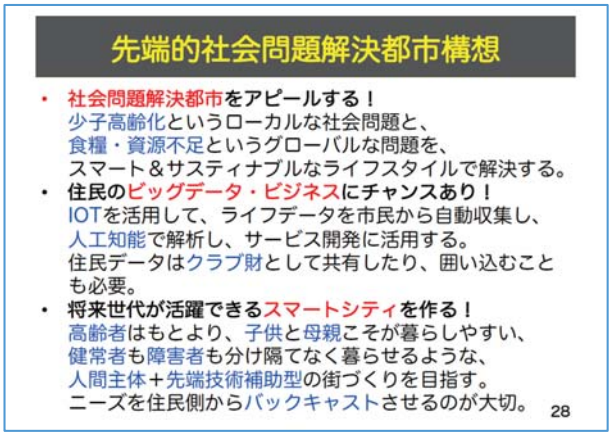

図 7-28

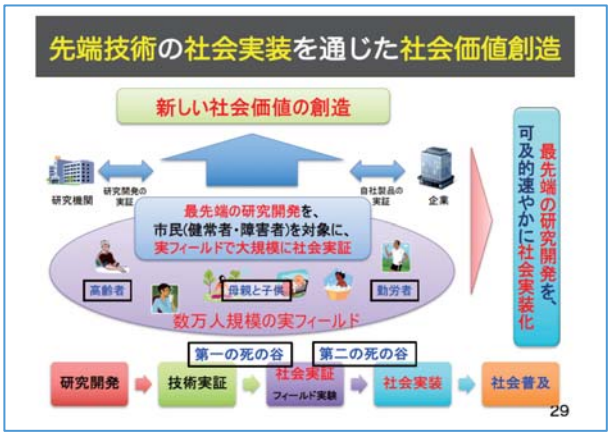

図 7-29

4. コメンテータからのコメント / 話題提供

4.1 大谷 謙仁（産業技術総合研究所　福島再生可能エネルギー研究所　再生可能エネルギー研究センターエネルギーネットワークチーム　研究チーム長）

産総研の福島再生可能エネルギー研究所では、産業界、例えばメーカー、電力事業者と連携をして、再生可能エネルギー、分散電源を普及拡大する技術開発に取り組んでいる。

2050 年に向けた、アカデミアが長期戦略を描いていく新しい先端技術を考えていくときは、メーカーがものをつくるので産業界の力が必要になる。その部分に対して支援するための新しいプラットフォームを紹介する。

福島再生可能エネルギー研究所は、2014 年 4 月に開所した。2 年後の昨年 4 月には分散電源の試験･研究施設を開所した。これは 3MW までの太陽光発電用パワーコンディショナの試験ができる電力系統模擬電源、太陽電池模擬電源があり、世界最大規模の設備になり、系統連系試験、安全性試験、あと、EMC（電磁環境）試験が可能となる。（図 8-1）

設備をつくった理由は､メーカーの競争力を強化したいためである｡太陽光発電用パワーコンディショナのメーカーは国内だけでも 10 社以上あるが、世界的に競争が激しい。コスト削減のためには大型化というアプローチがあり、私たちが最初に取り組んでいるのはこの大型化の支援である。そのために大型化、高電圧化に対応する設備を用意した。

価格競争の次にあるのは、今日の議題にも関係すると思うが、先進的な機能を組み込んでいくことであり、高効率、高機能なスマート化された製品開発を支援することを考えている。こうしたものが世界中で使われるようにするには認証を通じた相互運用性が重要なので、認証事業者と組んで認証できるような体制を整えている。さらにそれらを国際標準化するといったこと、これら 3 つを柱としている。（図 8-2）

私たちのプラットフォームの特徴は、3MW までの試験と、1500V までの直流電圧に対する試験が可能である。電波暗室も国内最大であり、スイッチング電源から出るノイズの測定なども可能である。

初年度の 10 ヶ月で達成したものとして、大型パワーコンディショナに関しては 2MW を超える機体の認証試験を国内で行うことができた。海外の認証も、タイ向けの認証が取れるようになっている。これは電気安全環境研究所（JET）がオフィスを構える様な協力体制になっている。JET は、産業用の 20kW 未満機の国内向け認証も行っている。太陽光のパワーコンディショナだけではなく、高圧配電線に入るような配電設備についても試験が可能である。（図 8-3）

大型機対応についてはこの 1 年で無事達成できた。次はスマート化に向けた試験体制を整えようとしており、IEA ISGAN の枠組みでスマートグリッド研究施設ネットワーク（SIRFN）に参画し、4 機関で蓄電池システム向けの試験用のプロトコルをつくっている。これを達成すると、今度は自動試験を考えている。スマートインバータの試験は長いものを全部やると、例えば数カ月かかるものがあるが、これを自動試験でこなしていく。自動試験は結局、スマートグリッドのミニモデルであり、外部から制御する部分を事前に検証していることにほかならないので、こうものを各国の研究員とスタンダードをつくってい

くという取り組みをしている。（図 8-4）

図 8-1

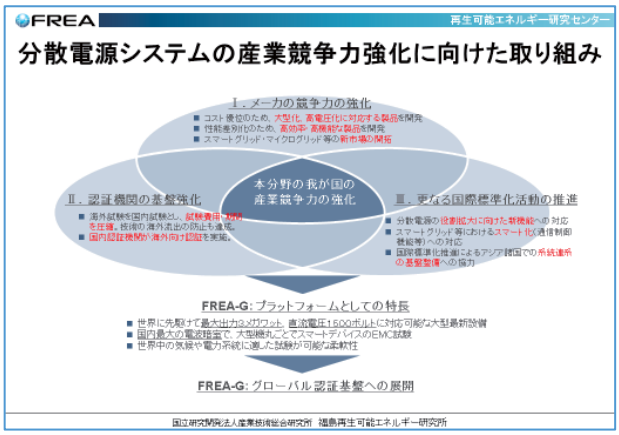

図 8-2

図 8-3

図 8-4

4.2 斎藤 浩海(東北大学　大学院工学研究科　電気エネルギーシステム専攻　教授)

20 年以上前に、分散型電源の微小発生電力を効果的に輸送する将来の新しい電力ネットワークとして、開放型電力ネットワークというものを考えた。その背景は、電力システムの安定性の研究をずっとやる中で、少し新しい研究をしたいという気持ちと、当時は分散型電源とかコジェネが少し注目され、かつ、計算機のほうでは大型計算機の TSS からワークステーションへのダウンサイジングという話がちょうど出ている時代であり、そういう計算機の世界から類推して考えたときに、何か新しい電力の輸送方法はあるのではないかということを考えた。いろいろな分散型電源が入ってきて大規模電源と共存できる場として、開放された電力ネットワークの名前をつけた。(図 9-2)

基本は分散型電源の余剰電力を発電元の電力品質と価格の情報を付帯させて自律的に特定の需要に流通させようという技術的な視点で考えており、当時はあまり社会経済的なことは考えていなかった。(図 9-3)

現在の交流系の電力ネットワークを前提にした考え方なので、情報通信系の技術的な方策を直接的に適用しようと考えたわけではなく、現在の交流系で特定の電源から特定の需要家に違う発電と需要のパターンに対して貯蔵装置を使って整形しながら送ることを考えた。この際に個々にいろいろやるとデータ処理が大変なので、自律分散が良いと考えた。

また、電気に色はつけられないが、再エネの電気と原子力の電気とで、もしかするとそれぞれを使いたいという人は違うかもしれない。そうだとしたら、それを識別するには情報を使わざるを得ない。そのときに､需要家のほうでも特定の電気を買うと言った以上は、それ以外の電気を受け取らないようにしなければいけないので負荷制御も必要ということを考えた。ハード的には電力貯蔵装置や情報通信ネットワークの活用、負荷制御を考えていた。(図 9-4 ～ 5)

そういう中で、小包的に電力を塊として送るので、パケットという名前をつけて、その情報としてどういう経路を流通させるか、それから、それぞれの電気の品質は違うだろう、当然それに伴って価格も違うだろうということで、それら情報を 1 つのガイドとして特定の電源から特定の需要へ送ることをコンセプトとして打ち出した。少し実験的なこともやったが、ロスが大き過ぎ、その後、本格的な研究は中断している。(図 9-6)

将来のエネルギーネットワークを開発していくときに考えなければいけない点が幾つかあると思う。1 つは、プロシューマ、要するにプロデューサとコンシューマが一体になった消費者、その間で電力流通を行うという場合に、やはりネットワークは誰かが所有していて、あるいは、誰かが運営管理していて、長期的に設備をきちんと維持管理しなければいけない。それをどういうふうにするべきなのかという点は重要なことと思う。

またプロシューマになれないコンシューマがいるのではないか。社会的弱者と考えられるコンシューマが従来どおり電力ネットワークから電気を調達できるのか。なぜならプロシューマが主体になった世界では、ネットワークの使用料が高くなるとか、あるいは、送電容量が不足するとか、さらに保守点検をあまりやらない結果、配電ネットワークの安定性も良くない可能性がある。

3 つ目としては、プロシューマがデジタルな電力、塊的にある方向に送るという世界の

人だとすれば、もう１つは、コンシューマとプロデューサ、要するに、通常の一般需要家と電力会社の電源。これをアナログな電力すると、デジタルとアナログの電力が共存可能な物理的な電気回路網がありえるのかを考えなければならない。イメージとしては、現在の交流系の電力ネットワーク上で、色はついていない伝統的な電力の流れと、その上に乗っかった形で分散型電源とか需要家の間で電力のやりとりをする。そういう二重構造というか階層構造の回路網とその制御技術というものの構築が必要になる。

またプロシューマ向け電力ネットワークはお金持ち向けネットワークにならないか。高信頼度のパワエレが必要、蓄電池も必要、情報通信機器も必要。これら設備を持てる需要家はそんなに多くはないのではないか。そうすると、エネルギー的な格差、調達できる人とできない人がいることが起きると思う。未来のエネルギーネットワーク、技術的にはおもしろいことが考えられるが、それを現実問題として今後、社会の中に入ってきたときにどんな影響が出るかは少し考える余地があると思っている。（図 9-7）

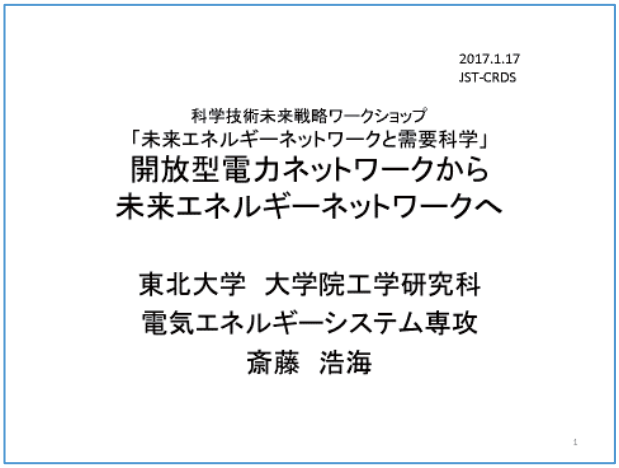

図 9-1

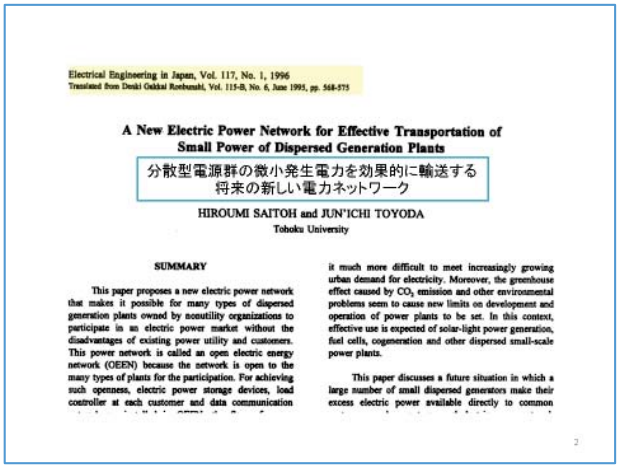

図 9-2

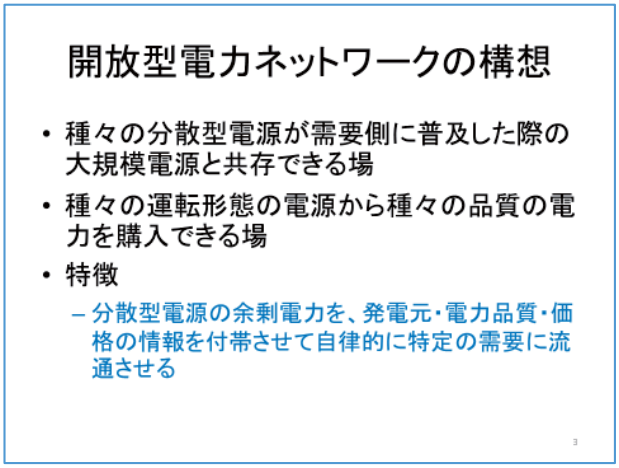

図 9-3

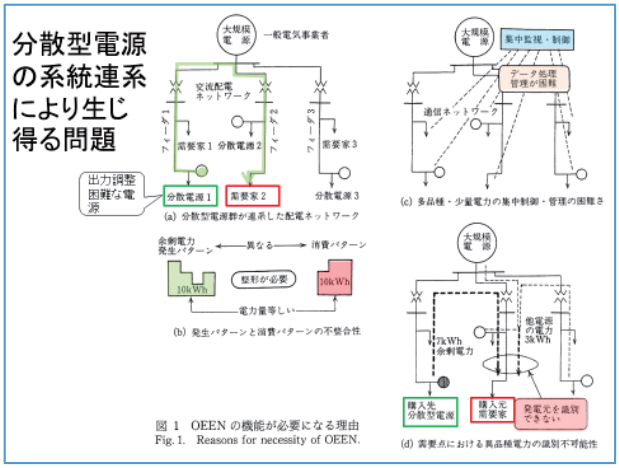

図 9-4

開放型電力ネットワークの機能と構成設備

- 機能1：DG出力パターンを需要家消費パターンに変換
  →電力貯蔵装置
- 機能2：品質別電力の自律的流通
  →情報通信の活用
- 機能3：需要点にける品質別電力の選択的受電
  →負荷制御

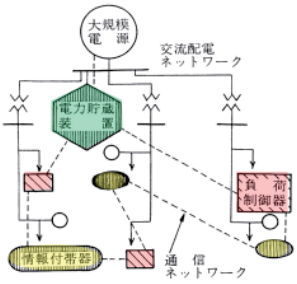

図 2　OEEN の基本構成
Fig. 2.　Basic structure of OEEN.

図 9-5

パケット電力輸送のコンセプト

- 輸送する電力をパケットのような「かたまり」と見る
- その「かたまり」に流通制御と品質価格の情報を付けたもの＝パケット電力
- 流通制御情報により電力貯蔵と負荷を制御
- 電気料金は品質価格情報に基づいて計算

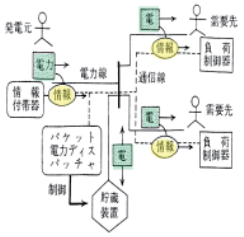

図 3　パケット電力輸送の考え方
Fig. 3.　Concept of packet electric power trasportation.

図 9-6

未来電気エネルギーネットワークで考えるべき点

- プロシューマ間電力流通に伴う電力ネットワーク使用料や維持管理をどうするか
- プロシューマになれないコンシューマは従来通り電力ネットワークから電力を調達できるのか（ネットワーク使用料が高くなる？送電容量不足？）
- プロシューマ（パケット電力）と“コンシューマ＋プロデューサ（アナログ電力）”が共存できる物理的電気回路網と制御技術は構築可能か
- プロシューマ向け電力ネットワークはお金持ち向けネットワークにならないか（高信頼度のパワエレ、蓄電池、情報通信機器が必要）

図 9-7

4.3 林 泰弘（早稲田大学　大学院　電気・情報生命専攻　教授）

新しいイノベーション的な研究開発の場をつくっていくことは大事と思っており、そういう立ち位置でコメントしたい。

超スマート社会とか 2050 年の社会を考えて、エネルギーをベースにいろいろ考える中に、リソースもシェアリングエコノミー、みんなで共有する話がある。スマートシティも 2050 年版のスマートシティ、シティ OS の話もある。一方、プロシューマが増えていく中で、2050 年型のプロシューマがあり、それらとともにネットワークがあるという考えが必要である。（図 10-1）

このような話において、CO_2 排出を考えたときに、大規模で遠くから送ることはむだも多いし、火力のエネルギーも使う。どうしても限界があるといったときに、超分散プロシューマの話がある。再エネとか蓄エネとか消費機器を入れるような人たちが増えていけば、需要側が減ることにより、供給側の分が減る。しかも、IoT の連動、センサの進展で測ることが安くできるとか、価値あるセンサを最適に置くことで、今までは調整力とか予備力とかだった部分が、将来は供給力として上位系に負けないぐらいの供給力を持つ話について、中立公平で、ゼロからできるアカデミアが引っ張ってデザインする必要がでてくる。これはアカデミアが産業界を引っ張っていくことが大事だと個人的に思う。（図 10-2）

そうしたときに、今は上位系の発電電力で予備力、調整力があるが、それがだんだんと上側が少なくなり、下側のリソースを入れていく形になっていく。この部分の発電の分を下側の需要家がみんなで持つ。しかもその中にアグリゲーションする人もいれば、IoT を使う人もいる、市場取引するなど、そこは今後の展開で良いと思う。あと、今、話題になっている zero-energy ハウス、ZEH や ZEB から先の zero-energy ということの技術を入れていくために、システムを考えていく必要があると思う。（図 10-3）

図 10-4 はサイバーフィジカルシステムの絵で、上側がリアルな物理世界で、下がサイバーの世界であるが、センシング、プロセシング、アクチュエーションという振る舞いの中で、ネットワークではパワエレなどのいろいろなものが入るし、大きな上位系との連携、物理量の連携もある中ではいろいろな課題もある。エネルギーにおいて、特に需要家側は人間の行動、人を中心とした、人の暮らしに密着した社会をつくるのが大事だと思う。

ミュンヘン工科大学の先生は、これからはエネルギーインフォマティクスだと言っており、需要データをとり、そこから新しい学問領域とか学問を科学して、そこから価値を生むという話がある。また価値の取引市場があると思う。CO_2 取引もあれば、エネルギーの kW の価値、kWh、住環境の価値など、さまざまな価値が今後、取引される可能性がある。このようなときに人工市場のシミュレーションをしながら、あるべき社会をデザインするということが大事と考えている。ただポイントは 1 点である。新しい学問領域をつくって誰がうれしいかと言う話であり、何が良いのかという点、どんな価値が生まれるのかというのを常に考えておく必要がある。そのためにはできるだけ大きなシミュレーションプラットフォームをつくり、施策の効果を出せるようなツールをアカデミアがつくっていくことを牽引するのが JST、CRDS、我々がやらなければならないと考える。今こそタイミングだと思う。

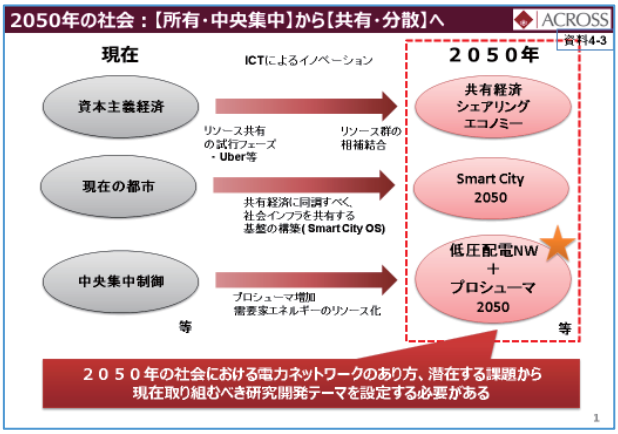

図 10-1

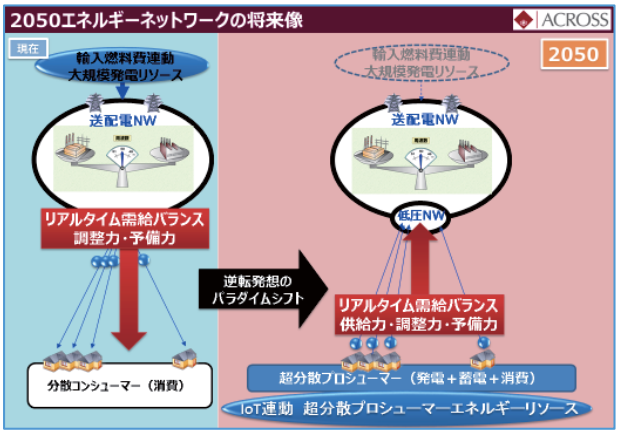

図 10-2

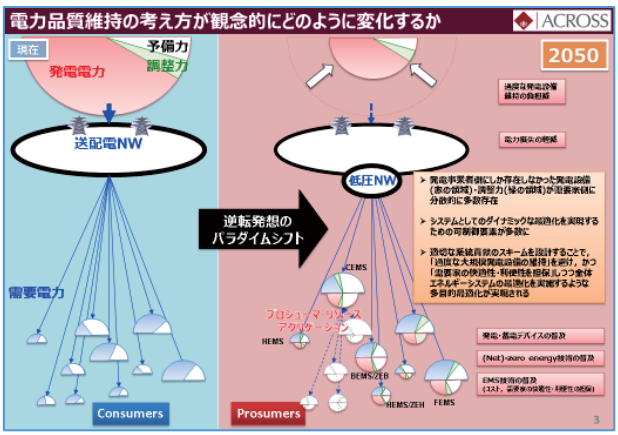

図 10-3

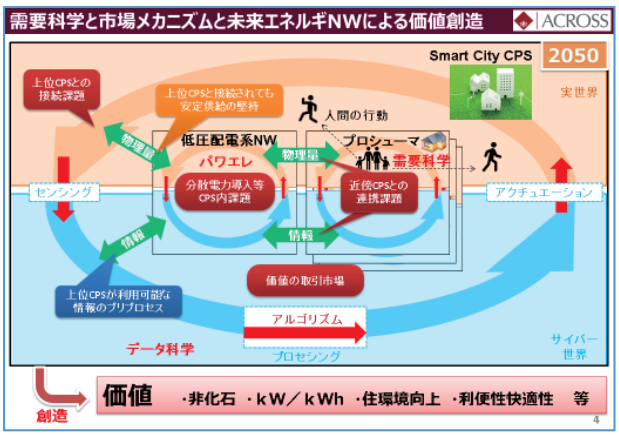

図 10-4

4.4 矢加部 久孝（東京ガス株式会社　リビング本部　燃料電池事業推進部　燃料電池開発グループ　グループマネージャー）

私は燃料電池開発のマネージャーをやっており、我々が今、やっている仕事の中でどういうふうに統合制御できるか、使えるのかという観点から話をする。

私自身は、この仕事の前には水素の研究をやっていた。2050 年時点では再生可能エネルギーを使いながら、何らかの形で水素を作り、それをある限定した地域において活用する、あるいは、作った水素で再度発電することもあると思う。発売されている家庭用燃料電池の種類は、現在、固体高分子形の燃料電池と、固体酸化物形の燃料電池がある。日本では、主なシステムメーカーとしては 3 つの会社が開発を進めており、用途としては都市ガス用、LP 用がある。出力は大体 700W ぐらいであり、固体高分子形で発電効率は大体 40%LHV 弱ぐらい。一方、固体酸化物形は発電効率が高く、52%LHV 程度あり、今後さらに高くなることが期待されている。一方で、熱回収の効率を比較すると、固体高分子形の方がより高い熱回収効率であり、総合効率は 95%LHV に達する。固体酸化物形の方が熱回収量は少なくなる。

この特徴を反映して、貯湯タンクのサイズが全く異なっており、固体酸化物形の場合には貯湯の容量が非常に小さくなっている。一方で、固体高分子形の場合には、商品規格の違いでもあるが、貯湯量は 200L ぐらい。これは浴槽をほぼ満タンにできる程度の容量構成になっている。（図 11-1）

METI のロードマップの中での普及目標は、国内累計総販売台数で、2020 年に 240 万台、2030 年には 530 万台で、これに向かって各社頑張っている。530 万台普及すれば、単体の発電量は 1kW 弱ではあるものの、総発電容量は約 380 万 kW 相当になる。何らかの形で、スタンドアローンではなく、統合制御で活用する方が効率は良いことが想像できる（図 11-2）。

実際に、いろいろな燃料電池をどう使うかの検討は少しずつ出ている。METI のエネルギー調査アグリゲーションビジネスの検討会の例を紹介するが、燃料電池に限らず分散型電源をうまく統合制御して、ネガワットやポジワットに使う検討例がある（図 11-3）。

実際に燃料電池をこのような形で使うときの大きな制約条件、課題について説明する。

まず、固体高分子形では、発電効率はたかだか 40%LHV で、系統の末端送電端効率と大して変わらないため、電力利用だけだと経済的にも省エネの面でもあまりメリットはない。しかし、熱をうまく使うことで全体として 95%LHV の総合効率、それを活用した CO_2 削減ができる。また、固体高分子形は起動停止が容易である点にも特徴がある。一方で、制約条件であるが、経済性、省エネ性を確保するためには、お湯を使うことが前提になるため、お湯が満タンになると、止めざるを得ない。貯湯を効率的に使うために、運転パターンを理解して、運転パターンに応じて最適に運転する“学習制御”を行いながら、消費者にメリットを出している。

固体酸化物形の場合には、発電効率が高く、現在、52%LHV、さらに 60%LHV ぐらいまでは向上すると考えている。一方、高温で発電しているため、容易に止めたり、再稼働したりできず、基本的には連続運転になる。また、部分負荷、電気需要が小さいときには

発電効率が低下するので、部分負荷で運転するとデメリットになる（図 11-4）。

一例として、横軸 700W 定格出力に対して、部分負荷で運転する例を紹介する。定格発電効率 50 数 %LHV のものが 200W ぐらいでは 30%LHV を切る効率になる（図 11-5）。負荷の低い夜間はこのような運転をせざるを得ないが、これでは経済的にも省エネの面でも課題がある。このため SOFC の場合には部分負荷運転をせずに、定格運転、一定負荷で運転したほうが、効率は良い。このような条件の中で、JEMA（日本電機工業会）の検討会の一例として、どういう使い方ができるかの検討がされている。

SOFC の例では、定格で運転することを前提に、小売電気事業者と送配電事業者との間にリソースアグリゲータが入り、SOFC は定格で運転しながら、発電した電気を売電する。ただし、出力抑制がかかるので、たまに出力制御をしなければいけなくなる。

もう 1 つの例は小売電気事業者、電力取引市場等々と相対で契約して、間には同じくリソースアグリゲータが入るケースだが、定格運転で高効率の発電を行いながら、発電電力を両者に売り分ける。また、系統とのつながりはないが、幾つかのシステムをまとめて、小売事業者のほうがこれをうまく統合制御しながら発電してユーザーに供給し、仮に系統電気のほうが安ければ、システムを停止させて系統電力を供給するというようなサービスもある。

もう 1 つの制約条件として熱が入ることになるが、固体高分子形の場合は熱を融通しながらデマンドレスポンスを実施し、ポジ、ネガの発電供給を制御していくという内容である。

集合住宅では、一定負荷運転制御をしながら、電力融通、熱融通をして、お客様メリットを出していくというのが今後の我々の希望である。

使える燃料電池システムが 530 万台もあれば、ボリュームの効果が見えるのでこういう統合制御を行いたくなるが、一方で、逆にこのような工夫をしないと、なかなか 530 万台の数字が見えないことが現状であり、今後、こういった統合制御を視野に入れていく、というのが我々の意見である。

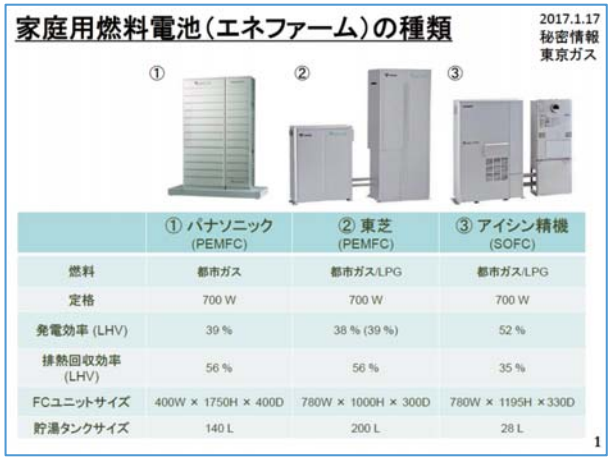

図 11-1

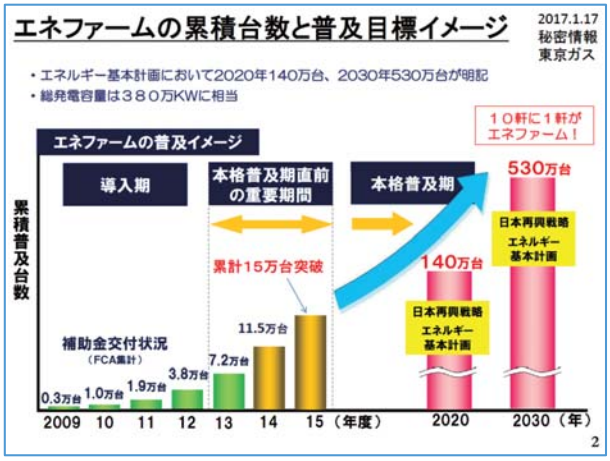

図 11-2

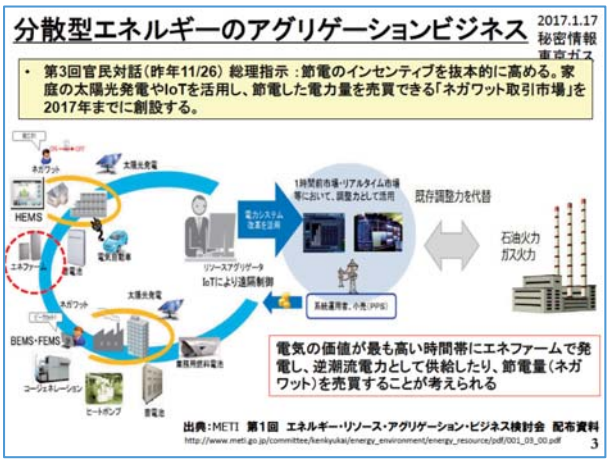

図 11-3

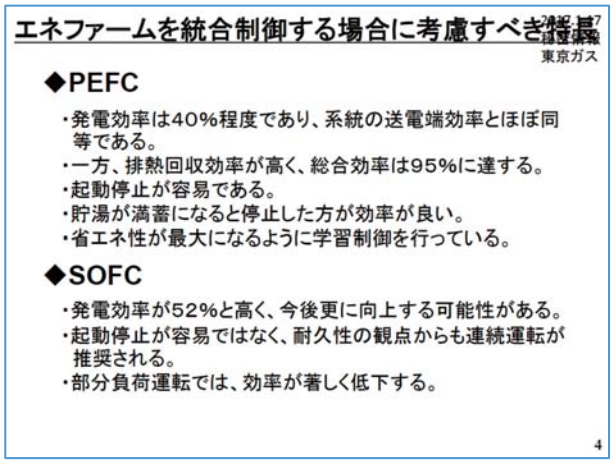

図 11-4

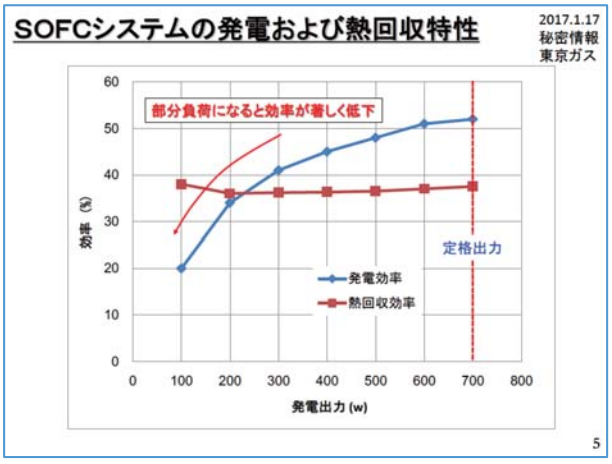

図 11-5

5. 総合討議

総合討議は、追加すべき研究開発課題、研究開発の推進方法や体制、研究開発の時間軸等について、議論を行った。以下に項目毎に分類した発言内容を示す。

◆研究開発の意義・目的

◇ 現状の PV 導入のレベルであれば、総括原価方式でもそれほど悪くなく、ICT による効率化で、対応可能である。しかし、PV が通常の電気代より安くなり各家庭に大量に入り、需要家側からの突き上げが出てきて、現状の電力の供給体制では対応できなくなったときにどうしたらいいのか、というのが課題。

◇ PV の電気が余剰になるので、仮に PV の電気が半分ぐらい損失することになっても、使っている人たちの間で納得した形で取引ができるのであれば、問題なく、また環境にも悪くない。

◇ 需要家行動や需要家を束ねるサービサーなど、学術界があるべき姿を、市場シミュレーション等を通じて検討していく必要があると考える。

◇ 電力会社任せの仕組みだけではない将来において、学がやるというきっかけが必要になる。やらなければわからないところが多いが、学が初めの一歩を踏み出してみることで、そこから広がるのではないか。

◇ アカデミアの先を見る想像力、発想力により、それをデモや実験でデータとして示していくべき。日本も細分化してしまい、今までアカデミアができていなかった部分である。

◇ システムが本当に社会に対して有用かという警鐘を鳴らすのはアカデミアの役割であり、研究をやらなければいけないという理由でもある。

◆研究開発課題

【評価モデル・ツール】

◇ 現在無いものを評価にするには実証実験が必要だが、ミニチュアでやることもあり得る。モデルは、エネルギーモデル、経済モデル、一般均衡モデルなどがある。アプローチ方法は目的に応じて、ボトムアップか、トップダウンでいくかなどがあるが、結局はいいところを合わせてやっていくことになる。

◇ 余剰電力をネットワークに流せないのなら、需要家側でコミュニティをつくってやりとりする、自家消費型の方法論やマネジメントシステムのアプローチが必要である。そういうものをつくるためには、シミュレーションをやる一方で、実証サイトをつくって、見せていく必要がある。そのためのツールは、それぞれの専門家が持ち寄った 2050 年を想定した実際の人間行動にあわせたツールであり、今まで誰もつくっていないモデルであるべき。

◇ 需要科学においては、意思決定のサイエンスなどが入ってくると思われるが、今の需要にモデル化がどう貢献しているかが重要である。AI が導入されれば、小さいモデルを積み上げなくてもよくなるかもしれない。どういったデータをとるのかも課題に

なる。

◇ 家庭の需要データがとれるようになったら需要モデルは一層大事になる。需要量の推定を機器の動きなどからモデリングして推定するといった、物理的なものが動いてエネルギーが動くところを踏み込んで推定できるモデルになってきている。こうしたシミュレーションツールは非常に価値があり、市場の動きや人の行動にも関係してくる。

◇ 需要モデルに関して、社会全体あるいは街のエネルギー需要推計と HEMS とがあって、それらが AI と連動するためには、各家庭、個別の家庭で何時ごろにどういう需要が発生したかを先読みしながら入札していく機能が必要。また、ある特定の家庭を対象にした需要モデルと、社会全体でどうなるかのモデルが必要。ただし社会全体のエネルギー需要は、太陽光発電が大量に普及し始めたら、意味がなくなるのではないか。市場原理で自動調整されていくので、全体を見る必要がないのでは。

◇ 2050 年モデルを先につくってしまってはならない。何でも扱えるモデルはなく、モデルをつくった時点で 2050 年のある側面を規定してしまう。

【その他】

◇ 集合住宅、業務施設など、いろいろな需要家を都市計画的にうまく配置することで、配電ネットワークとは違う技術で需給調整する方法もある。長期的には大事な課題である。需要家や配電線系統の空間分布など密接に関連し合う技術を組み合わせることも重要。

◇ EV のような動く蓄電池もシェアリングし、ICT で活用するといった仕組みを 2050 年に向けて描く必要がある。このような仕組みをシミュレーションすることはアカデミアの仕事。また規模は小さくても物理量とか情報量を実際に検討するミニ実験は大切。

◇ パワエレが増えてくると、半導体装置や SiC などのハードが必要になる。数が多く、信頼性も大事なので、限定的な機能で安いものが必要。計算機の信号を扱う半導体の精度と、実際のパワエレでエネルギーをコントロールする精度は違う。エネルギーでは波形をきれいに出さなければいけない。2050 年の新しいネットワークを考えるキーではないか。

◇ パワエレのコストダウンとしては、モジュール化である。小さいモジュールをたくさん直列、並列につなげていって大容量化していくことになる。

◆研究開発推進方法や体制

◇ 太陽光と蓄電池が安くなり、ハウスメーカーが対応すると、電力事業者の家庭への供給が必要なくなり、工場への供給だけになることも考えられる。ただし実際は自家消費の家となることは簡単ではないので、何軒かでコミュニティつくって融通することから始める。今なら ICT でつなげて、家電機器を通信させれば金額的にも比較的安くできる時代である。

◇ エネルギーバッファがあって電気を貯められるようになると、捨てるよりは損失があってもコントロールしながら使うことになる。ただし家庭の単品デバイスの効率化の研究開発にはプロがすぐ集まるが、いろいろな機器や蓄電池を標準でつなげて ICT で取引を全部できる世の中を作ることに対しては研究者を集めるのが難しいかもしれ

ない。

◇ 蓄電池メーカーは、電力事業者が電池仕様を決めてくれないからできないと言う。一方、電力事業者は未来を想定できないためと言う。結局、制度設計ができていないため前に進まない状況である。

◇ ミュンヘン工科大学では、エネルギーインフォマティクスとして自分たちで一般に入手できる情報を取り、設備や電力需要を予測している。これまでは電力会社しかデータを持っていなかったが、今は SNS で新しいボトムアップ的なイノベーションを起こそうとしており、これがエネルギーインフォマティクスである。ビッグデータや IoT が需要想定に使われるのはまさにこれに相当する。電気の利用方法がわからないと、蓄電池の容量が決まらないし、どう動かすかも決まっていかないという連動型になっている。いろいろなところから、ありとあらゆるデータをとってきて、大学主導で考えている。アジアは清華大、ヨーロッパはミュンヘン工科大学というように、GE が拠点を立て、戦略的に何億もの投資をしている。今、時代はそうなっていることを痛感した。

◇ ミュンヘン工科大学では、エネルギーに関する収集データをオープンデータにするという動きがある。

◇ 研究開発テーマの課題として、最初は自分の家で明日太陽光によりどれだけ発電し、自分は電気をどれだけ使うかということで、次に、どんな地区でどう制御するかになる。太陽光などの設備を持っていない人がいたら、市場取引でその分の価値を譲りたい。あるいは市場はさらに次の段階にするとか、いろいろな段階での導入を考えれば良い。まずそういうのを検討するための場、聞く場が必要。実施は一度に全部無理でも、ステップ・バイ・ステップでも良い。

◇ 新しい社会制度をつくる場合に、オープンデータとかオープンモデルは非常に重要。風洞実験のようにこういう技術があると、こう変わったときに、余剰電力がこれぐらいになって、貯蓄の効率がこれぐらい変わるということが見える。では、どのようなネットワークが最適かという点で、どういうビジネスチャンスがあるか。次に、そのビジネスチャンスをうまく生かすために次のステップの開発は何かということを見通せるようなデータとモデルがあると、それだけでも広がる可能性はある。

◆ 2050 年に向けた時間軸の整理

◇ 省庁などの技術ロードマップや将来予測では、シーズを残さないといけないから、いろいろなものが載っている。その中から何かを選び出して、システムを想定し、2050 年に目指すべき CO_2 や電力の安定性を達成できるかを検討していくという話になる。そうすると、その前提の設定をどう持っていくかというのが大事になる。

◇ 2050 年のモデルが一つというのはもともと難しい。例えば複数考えられるときに、日本のエネルギー政策で CO_2 排出量の 2050 年値が決まっていれば、それに関係するコンテンツを散りばめて、市場の新しいアイデアを入れていくというアプローチが良い。責任も負うので、複数のシナリオなどを軸にした切り口があったほうがいい。

◇ 2050 年は、コンシューマが発電するようになり、分散電源がメインになっている。そうすると電気が常に余る状態が出現して、余った電気は捨てるしかないので、無料

の電気が生まれる。その無料の電気を弱者に渡すなどの制度設計が出てくる。シェアリングエコノミーの考え方である。

◇ 2050 年には、4 分の 1 が 75 歳以上で、世帯の 4 割が単身世帯という世界なので当然グリッドも変わり、それが影響を与えないわけはない。こうした社会に今回の話は、ダイレクトに響くような感じがする。

◇ 標準化（モジュール化）を時間軸の話ですると、今のスマートインバータ、スマート化では、2050 年に向けて今から用意することは考えていない。アメリカ的な発想で、ソフト的なものは更新可能なので、あっという間に更新される。スマートインバータなどレガシーなものをすぐに更新できる仕組みになっている。では、何が標準化されているかというと、プラットフォーム、基盤である。基盤を先につくり、そこで標準化したものは全部つながる世界をあらかじめつくる。そこに対して膨大な投資をしている。ただ、時間がかかる研究はたくさんある。やはり 20 年前から始めるべきか、30 年前から始めるべきかというのはある。設備という意味では時間制約はないので、ここの議論は、そのアカデミックな時間軸である。

◇ パワエレ材料という観点であれば、シリコンカーバイド、ガリウム・ナイトライドについては、1990 年代ぐらいからの長い間の研究開発の成果である。

◇ 2050 年では送配電ネットワークが弱体化している可能性があるし、アメリカでも気にしていると聞いている。ネットワークの価値や意義は、電気エネルギーの単なる供給だけではない。分断されてしまうと、社会的一体感が失われるのが気になっている。そういう意味で、送配電ネットワークをどのくらい維持して、新しい電力をやりとりしたらいいかを考える余地がある。

◇ 2050 年に向けては世界の動きを見るべき。日本は確実に人口減で縮小し、国内インフラが疲弊していく一方で、アジア、アフリカ諸国は投資が増え、新しい技術がどんどん入っていく。海外に我々のつくった技術を売り、それが我々に返ってくるという視点で考えるべき。世界の需要から考えると、電力会社が決めないから蓄電池が動かないという時代は続かない。

◇ 2050 年で変わらないのは、今の遺伝子的にコントロールされている人間のあほらしいとも言える特性。2050 年に解決すべきエネルギー問題は二つ。一つは、太陽光割合が 20 ～ 30% にすることが前提なら、アンシラシーの問題は起こるのでバッテリーを入れる以外ない。バッテリーを個別に持つのはむだなので、託送配電料金に乗せて、クラウド的に共有、シェアリングするのがよい。もう一つは、システムとして負荷曲線のフラット化である。蓄電池ができればかなり実現するが、その際各家庭をどのくらいスマート化しなくてはならないか。人工知能的なものでアクチュアリゼーションするのか、やはり社会のシステム、端的に言えば、配電会社が託送料金をとってやるかの両方がある。人工知能で一人一人をどの程度サポートするかは、ヘルスケアなど電力に限らない問題になってくる。イデオロギー的あるいは好みの問題になってくるので研究は両方で展開すればいい。

◇ 太陽光の余剰吸収を蓄電池に依存するのは難しいので、ロードカーブをマニュアルかオートで制御にするしかないが、まさにそこがボトルネック。次世代電池の技術開発はできていないので、2050 年には間に合わない。蓄電システムが太陽光発電を足し

てグリッドパリティになるかは疑わしい。

◆倫理的・法的・社会的課題（ELSI）

◇ 社会的弱者の問題は気になる。今は電力会社のユニバーサルサービスがある。ただしそもそも民間企業が何でこれをやるのかという問題もあるので、行政が税金により弱者を助ける仕組みにしていくしかない。

◇ 太陽光を入れられる家と入れられない家の不公平がない問題解決のために、ハワイ電力では「フェアネス」概念を導入し、制度の変更も検討している。

◇ 将来的な余剰太陽光の出力抑制の決め方は経済原理で決めるのが良い。電力貯蔵は、装置の持ち主の利益になるように進められる。各家庭に電池が入るとしたら、安いから買って、高いから売るといったメカニズムでないとうまく運用されない。家庭が買ったバッテリーを外部から制御するというのはあり得ない。分散型のバッテリーを本当に効率よく入れようとしたら、各家庭が自分の利益を考えて、意志決定するしかない。

◇ 需要家にとってメリットがきちんと見える形のデータのオープンは難しい。電力では幸い、スマートメータから ABC ルートがあり、BC ルートは需要家のものになっているので、オープンデータ化できる。電力データ、ICT は、米国系が強いので、日本でできるのはパブリックヘルスデータくらい。企業はオープン化しない。ただ、技術実証、社会実証でデータを共有する場を設けるのは大事。

◇ 社会システムの制度としてどうかと言う点が必要。さもないと格差社会を増長してしまうことがある。

6　まとめ

6-1．本ワークショップの前提と仮説

本ワークショップ「未来エネルギーネットワークと需要科学」では、2050 年時点において一般家庭に家庭用 PV 等のエネルギー機器が大量導入されることで、電力システムの需給構造に大きな変化が起きていることを前提とした。その上でその構造変化による課題を設定し、今後必要となる研究開発やその推進方法等についての議論を行った。この前提となる課題および研究開発の方向性として、以下の仮説を提示した。

（1）従前の計画的・集中的な系統運用は、複雑化する低圧配電系内の需給管理に必ずしも適していないのではないか

⇨　低圧配電系ネットワーク～需要家において、より自由で自律的な電力融通、かつ系統側との連携協調などが容易となる仕組みの研究の必要性とその具体的内容

（2）需要家（プロシューマ[注 1)]）で消費と供給が混在し､エネルギー需要構造が複雑化する。このためエネルギー利用実態が不明になり、施策化が困難になるのではないか

⇨　需要家のエネルギー構造変化に関連する研究の必要性とその具体的内容

注 1：プロシューマ（Prosumer：Producer+Comsumer の造語）

6-2．発表の主な論点

発表者 7 名からの発表により、今後必要になると考えられる研究内容を上記（1）（2）毎に、以下の通り整理した。（敬称略）

（1）自律分散型低圧配電系ネットワークの研究開発（藤井、岡部、杉山、伊瀬、和泉）

- 電力の自律分散型システムと ICT による電力潮流制御技術
- 家庭内の電力制御システム
- ネットワークや家庭内のパワエレ機器や材料開発
- 低圧配電系内の市場メカニズム / 電子取引の仕組みや方法
- 電力市場の制度設計ための評価用モデル

（2）エネルギー需要科学に係る研究開発（下田、依田）

- エネルギー需要のモデル化（ボトムアップ型)、そのための計測、分析
- エネルギー利用（供給・消費）に関わる行動経済学を用いた研究

またコメンテータ 4 名からの発表の論点は以下の通り。

- 産総研では再エネ、分散電源普及のためにパワーコンディショナなどの分散電源の評価が可能な研究施設を設置し、産業界の競争力強化を支援している。現在はコスト競争力が重要であるが、その先に本ワークショップにも関連する先進的な機能を今後組み込んでいくことが重要であり、高効率、高機能なスマート化された製品開発を支援することが必要。（大谷）
- 本ワークショップに関連する研究開発については社会経済的な視点も考えておく

ことが重要。例えばネットワークの維持管理の問題、社会的弱者への対応など社会に導入された場合、どんな影響があるかを考えておく必要がある。（斎藤）

- 2050 年に向けた超スマート社会を考えると上位系に負けない程度の電力供給力をプロシューマが保有する時代が想定できる。この時代を考えて、新しいイノベーションを興すための研究開発はアカデミアが牽引する必要がある。またそのためにはシミュレーションプラットフォームなどの施策効果を出せるようなツールの開発が重要。（林）
- 2030 年時点での家庭用燃料電池の導入目標は 530 万台であり、この場合、スタンダアローンで用いるよりも、これらを統合制御で活用することが効率的となる。現在このような統合制御の視点からの検討が始まっている。（矢加部）

6-3. 総合討議

討議における主な意見は以下の通り

- 現状の PV 導入のレベルであれば、ICT による効率化で、対応可能である。しかし、PV が各家庭に大量に入り、現状の電力の供給体制では対応できなくなったときにどうしたらいいのか、というのが今回の課題。
- システムが本当に社会に対して有用かという警鐘を鳴らすのはアカデミアの役割であり、研究をやらなければいけないという理由でもある。
- 現在無いものを評価にするには実証実験が必要だが、ミニチュアでやることもあり得る。
- アカデミアの先を見る想像力、発想力により、それをデモや実験でデータとして示していくべき。日本も細分化してしまい、今までアカデミアができていなかった部分である。
- エネルギーバッファがあって電気を貯められるようになると、捨てるよりは損失があってもコントロールしながら使うことになる。
- 新しい社会制度をつくる場合に、オープンデータとかオープンモデルは非常に重要。こういう技術があると、余剰電力がこれぐらいになって、蓄電の効率がこれぐらい変わるということが見える。では、どのようなネットワークが最適かという点で、どういうビジネスチャンスがあるか。次に、そのビジネスチャンスをうまく生かすために次のステップの開発は何かということを見通せるようなデータとモデルがあると、それだけでも広がる可能性はある。
- 2050 年では送配電ネットワークが弱体化している可能性がある。送配電ネットワークをどのくらい維持して、新しい電力をやりとりしたらいいかを考える余地がある。
- 2050 年に向けては海外に我々のつくった技術を売り、それが我々に返ってくるという視点で考えるべき。
- 需要科学においては、今の需要にモデル化がどう貢献しているかが重要である。AI が導入されれば、小さいモデルを積み上げなくてもよくなるかもしれない。

どういったデータをとるのかも課題になる。

- 家庭の需要データがとれるようになったら需要モデルは一層大事になる。需要量の推定を機器の動きなどからモデリングして推定するといった、物理的なものが動いてエネルギーが動くところを踏み込んで推定できるモデルになってきている。こうしたシミュレーションツールは非常に価値があり、市場の動きや人の行動にも関係してくる。
- 需要モデルに関して、ある特定の家庭を対象にした需要モデルと、社会全体でどうなるかのモデルが必要。
- 社会的弱者の問題は気になる。ただしそもそも民間企業が何でこれをやるのかという問題もあるので､行政が税金により弱者を助ける仕組みにしていくしかない。

付録　ワークショップ参加者リスト（事前登録分、敬称略）

氏名	所属	役職
講演者・コメンテータ　（五十音順）		
和泉　潔	東京大学　大学院工学系研究科　システム創成学専攻	教授
伊瀬　敏史	大阪大学　大学院工学研究科　電気電子情報工学専攻	教授
依田　高典	京都大学　大学院経済学研究科	教授
大谷　謙仁	産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所 再生可能エネルギー研究センターエネルギーネットワークチーム	研究チーム長
岡部　寿男	京都大学　学術情報メディアセンター	教授
斎藤　浩海	東北大学　大学院工学研究科　電気エネルギーシステム専攻	教授
下田　吉之	大阪大学　大学院工学研究科　環境・エネルギー工学専攻	教授
杉山　久佳	大阪市立大学　工学研究科 電子情報系専攻	准教授
林　泰弘	早稲田大学　大学院　電気・情報生命専攻	教授
藤井　康正	東京大学　大学院工学系研究科　原子力国際専攻	教授
矢加部　久孝	東京ガス株式会社 リビング本部 燃料電池事業推進部 燃料電池開発グループ	グループマネージャー
JST		
佐藤　順一	CRDS 環境・エネルギーユニット	上席フェロー
大平　竜也	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
尾山　宏次	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
島津　博基	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
末村　耕二	CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット	フェロー
髙橋　玲子	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
高島　洋典	CRDS システム・情報科学技術ユニット	フェロー
田中　加奈子	低炭素社会戦略センター	主任研究員
原田　裕明	CRDS 科学技術イノベーション政策ユニット	フェロー
福島　俊一	CRDS システム・情報科学技術ユニット	フェロー
鈴木　康史	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
関根　泰	CRDS 環境・エネルギーユニット／早稲田大学　理工学術院	フェロー／教授
松田　一夫	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
松本　麻奈美	CRDS 環境・エネルギーユニット	フェロー
阿部　宜之	戦略研究推進部 研究評価グループ	主任調査員
磐田　朋子	低炭素社会戦略センター	研究員
三枝　邦夫	低炭素社会戦略センター	主任研究員
南　裕一	低炭素社会戦略センター企画運営室	副調査役

関係府省機関		
西島　元	文部科学省研究開発局環境エネルギー課	行政調査員
原田　千夏子	文部科学省研究開発局環境エネルギー課	行政調査員
鷹觜　利公	内閣府 CSTI 事務局　エネルギー・環境担当	ディレクター
三宅　葵	内閣府 CSTI 事務局　エネルギー・環境担当	政策調査員
小笠原　有香	NEDO 技術戦略研究センター　エネルギーシステム・水素ユニット	研究員
西　順也	NEDO 技術戦略研究センター　エネルギーシステム・水素ユニット	研究員
出脇　将行	NEDO スマートコミュニティ部	主任

■ワークショップ企画メンバー■

佐藤　順一	上席フェロー・総括責任者	（環境・エネルギーユニット）
尾山　宏次	フェロー・リーダー	（環境・エネルギーユニット）
大平　竜也	フェロー	（環境・エネルギーユニット）
島津　博基	フェロー	（環境・エネルギーユニット）
末村　耕二	フェロー	（ナノテクノロジー・材料ユニット）（H29.3 まで）
髙橋　玲子	フェロー	（環境・エネルギーユニット）
高島　洋典	フェロー	（システム・情報科学技術ユニット）
田中　加奈子	主任研究員	（低炭素社会戦略センター）
原田　裕明	フェロー	（科学技術イノベーション政策ユニット）
福島　俊一	フェロー	（システム・情報科学技術ユニット）

※お問い合せ等は下記ユニットまでお願いいたします。

CRDS-FY2017-WR-02

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

未来エネルギーネットワークと需要科学

～ 2050年超の一般家庭でのエネルギー需給構造の変革時代到来に向けて～

平成 29 年 6 月　June 2017

ISBN 978-4-88890-564-0

国立研究開発法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター
環境・エネルギーユニット
Environment and Energy Unit, Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076　東京都千代田区五番町 7　K's 五番町
電　　話　03-5214-7481（代表）
ファックス　03-5214-7385
http://crds.jst.go.jp

©2017　JST/CRDS

許可なく複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ISBN 978-4-88890-564-0