

# エネルギー管理システム構築に向けた学理融合展開

## — 学界の境界を越えて —

片山正昭 (名古屋大学) 阪口啓 (大阪大学) 植田譲 (東京工業大学)  
竹中栄晶 (東京大学) 武田朗子 (慶応義塾大学) 西宏章 (慶応義塾大学)  
永原正章 (京都大学) 畑中健志 (東京工業大学) ○滑川徹 (慶応義塾大学)

### Multi-Disciplinary Fusion toward Creation of Smart Energy Management Systems

M. Katayama (Nagoya Univ.), K. Sakaguchi (Osaka Univ.), Y. Ueda (Tokyo Inst. Tech.)  
H. Takenaka (Univ. of Tokyo), A. Takeda (Keio Univ.), H. Nishi (Keio Univ.)  
M. Nagahara (Kyoto Univ.) T. Hatanaka (Tokyo Inst. Tech.) and \*T. Namerikawa (Keio Univ.)

**Abstract**— This paper describes smart energy management systems and electrical power network systems including renewable energy generators. The authors in this paper are very active researchers in the field of energy networks but they have different academic backgrounds. Our goal here is to discuss a multi-disciplinary fusion toward creation of smart energy management systems from the viewpoint of several academic societies and academic fields.

**Key Words:** Smart Energy Management Systems, Electrical Power Network, Multi-Disciplinary Fusion

#### 1 本企画セッションの概要

東日本大震災以降の状況変化により、風力・太陽光に代表される再生可能エネルギーの本格的な系統導入はより緊急を要する課題となっており、その解決に向けては、多様なエネルギー源を、利用形態等に応じて連動させ、エネルギーの需給を全体として最適に制御するスマートなエネルギー管理システムの構築が必須である。

本課題の解決には、その対象が広範に渡るため、エネルギー分野に加えて多様な学理を融合させた分野横断的な取り組みが求められる。

そこで本セッションでは、関連する課題を研究しつつも活動母体を異にする研究者を一同に会して学理融合展開を促進する場を提供することを目的とする。

具体的には電気・システム・制御・情報・通信・気象を専門とする研究者に、一研究成果ではなく、これまでの取り組みを総合的に講演して頂き、議論する。

以下にそれぞれの講演者の講演概要を記載する。

#### 2 スマートエネルギーネットワークにおける情報通信技術の役割

片山正昭 (名古屋大学)

枯渇しつつあるエネルギー資源温存の意味でも、また地球規模のエネルギー収支の観点からも、再生可能エネルギー源の活用は重要である。ほとんどの再生可能エネルギー源は、比較的多数小規模で地域に分散している。これらからのエネルギーを輸送し利用する

ためには、電気エネルギーネットワーク（電力網）が適している。しかし、従来の電力網は、再生可能エネルギー源のような、地域的に分散する多数小規模の電源を想定していない。多くの再生エネルギー源は、予測困難な変動を伴う。これも需要に応じて発電を調整する従来の電力網では、対処が困難である。再生エネルギーの活用のためには、新たな考え方に基づく電力網が必要となっている。これがスマートグリッド (smart grid) である。

スマートグリッドでは、多数の発電量が変動する小規模電源や、電気自動車に代表される多数のエネルギー蓄積型装置等の監視・制御が不可欠である。このような、分散配置された（しかも自動車のように移動する場合もある）装置の監視・制御情報のためには、情報通信、特に両端がともに機械である装置間通信 (Machine to Machine, M2M) が不可欠である。このような通信では、交換される情報は少量であるが、それが一定の時間内に正しく受信されないと正確な制御は実現出来なくなる。

制御における通信の活用、即ち遠隔制御は、古くて新しい課題である。従来は、比較的少数の機器に対する十分安定した通信回線を用いての制御が考えられてきた。これに対してスマートグリッドでは、地域的にも分散した多数の機器を対象としたセンシングと制御が必要となる。そこで用いられる通信回線も、無線回線や複数の通信ネットワークの中継といった、遅延やデータ欠落への考慮が不可欠なものである。このような状況での制御は、新しい研究分野である。

スマートグリッドという単語は電力網の立場からシステムを見ている。しかし求められているものは、再

生可能エネルギー源による安定したエネルギーシステムである。また電力のみではなく、ガス（特にバイオマス由来）や、熱・冷熱の運搬もエネルギーネットワークの構成要素である。スマートグリッドが、スマートエネルギーネットワークと呼べるものに進化するためには、複雑大規模なシステムの神経として、全体をきめ細やかに制御できる、情報通信技術、特に制御通信技術が不可欠である。

### 3 安定したデマンドレスポンスを実現する分散型電力制御ネットワークとその試作

阪口啓（大阪大学）

スマートグリッドの主たる目的は、ICT (Information and Communication Technologies) 技術を活用して電力の需供バランスを保つことである。特に原子力発電所の事故に起因する電力供給量不足に見舞われている日本においてその早期導入が望まれている。スマートグリッドでは、各家庭や工場およびその内部の電気機器の需要(消費)電力、および再生可能エネルギーや分散型電源の供給可能電力をスマートメーターを用いて計測し、その値に応じて分散型電源やスマートタップのスイッチを制御するデマンドレスポンスによりリアルタイムな需供バランスの調整が可能となる。しかしながらスマートグリッドの様な大規模なシステムにおいて安定したデマンドレスポンスを実現する制御ネットワークの在り方は未だ不明であり、スマートグリッドの実用化を阻む一つの要因となっている。

筆者らは、大規模なシステムにおいて安定したデマンドレスポンスを実現する方法として分散型電力制御ネットワークを提案している。本方法では、はじめに対象とするシステム、例えばある電力会社の電力システムを、階層型のレイヤーに分割する。例えば最下位レイヤーは各家庭やオフィスに相当し、最上位レイヤーは電力会社に相当する。最上位レイヤーの電力会社が最下位レイヤーの家庭内の電気機器を直接制御することは、通信のトラヒックや制御遅延などからほぼ不可能である。しかし、各レイヤーにサブコントローラを導入し、最下位レイヤーでは遅延が重要となるリアルタイムなフィードバック制御を担当し、上位レイヤーは下位レイヤーのサブコントローラに制御の方針を命令することで、きめ細やかな制御と全体最適化を両立させることが可能となる。

本稿では、この分散型電力制御ネットワークを用いて試作したマイクログリッドを紹介する。この試作システムは、東京工業大学の南3号館に節電と計画停電対策として導入されたものであり、主には太陽光発電システムと、スマートメーターネットワークとスマートタップネットワークから構成されている。スマート

メーターを用いて各部屋や各研究室の消費電力を5秒毎に10Wのステップで計測収集し、その値に応じてスマートタップのスイッチをオンオフ制御するデマンドレスポンスシステムである。各研究室に設置されたサブコントローラと、建物に設置されたメインコントローラに分散型電力制御ネットワークを導入することで、ビル全体の総消費電力を所望の値に安定して制御可能であることを示す。

### 4 太陽光発電システムの屋外発電特性と大量導入に向けた課題

植田 譲（東京工業大学）

持続可能な電力エネルギーシステムの構築に向け、太陽光発電 (Photovoltaics, PV) の大量導入が進んでいる。日本政府は2008年7月の「低炭素社会づくり行動計画」において2030年に2005年の約40倍となる53GWの導入を目標としており、その実現に向けて様々な支援施策を実施している。また、NEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）による太陽光発電ロードマップPV2030+では、2025年頃の導入目標量を102GWとし、年間の総電力需要、約1兆kWhの1割程度をまかなうというシナリオを策定しており、この102GWのうちの約半数を戸建て住宅の屋根に設置するものとしている。しかし、このような大量導入を実現するためには、電力系統への統合においていくつかの解決すべき課題が残されている。特に、低圧配電系統に連系される戸建住宅屋根に設置するPVシステムでは、晴れた日の日中、各システムからの系統への逆潮流電力により電圧上昇が発生するため、適切な電圧管理が困難になるほか、PV側においても電圧上昇時には電圧管理範囲逸脱を回避するために、太陽電池アレイが十分な日射を受けている場合においても出力を抑制する必要性が生じてしまうなど、PVシステムの効率的な運用に支障をきたす事が懸念される。また、大量導入されたPVが、系統全体で見た場合の需給バランスに与える影響においては、負荷が少なく全国的に快晴となった場合には日中に余剰電力が発生するが、PVの発電量が期待できない夕刻には依然として需要ピークが発生するため、電力システム全体の効率的な運用には大容量の蓄電設備や時間的に移動可能な需要を動かす事、またこれらを可能にする情報・通信ネットワークの有効利用など、PVシステムに加えて様々な技術を導入する必要がある。

本報告では、はじめに太陽光発電システムの屋外発電特性について概説する。太陽光発電システムの定格値は標準試験条件(日射強度:1kW/m<sup>2</sup>, AM1.5G, 太陽電池温度:25°C)において定義されているが、屋外では日射強度や温度などが一定では無いため、発電量も常

に変化する。そこで、日射のエネルギーを電力エネルギーに変換する過程において生じると考えられる様々な損失(または利得)要因に対して、その影響を定量的に評価することで、運転特性の詳細な解析や精度の良い発電量推定が可能となる。次に、NEDO「集中連系型太陽光発電実証研究」の成果の中から、住宅地域へのPV大量導入時の電圧問題に関して、出力抑制の発生状況や蓄電池導入効果の評価結果について報告する。また、系統全体における需給バランス評価については、東京電力管内における太陽光発電大量導入時のkW価値の試算結果を例に、今後の課題について概説する。

## 5 衛星観測データに基づく太陽放射量の推定と太陽光発電電力の把握

### 竹中栄晶 (東京大学)

地球は太陽放射をうけて温まる一方で、その温度に伴う地球放射(赤外放射)によってエネルギーを宇宙に射出している。これら加熱と冷却の作用によって地球は生物が生存可能な環境に保たれている。地球表面の環境を現在の状態に保っているのは大気であるが、大気を持っているであろう地球のエネルギー収支に対する効果は未だ解明されていない。雲は太陽放射を反射し地球を冷却する効果と、地球放射を吸収再放射することで地球を保温する効果を併せ持つが、地球大気系の水循環など他要素との複雑なフィードバック結合によって関係づけられるため、定量的な評価は難しいものとなっている[Wetherald and Manabe, 1988]。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)においても雲の効果は一次の冷却効果のみの評価となっており、二次的なフィードバック効果の評価は見送られている。これは雲による気候フィードバック効果の評価が非常に難しいものであることを示している。IPCCをはじめとする温暖化の議論において様々な気候モデルの予測結果が用いられているが、雲のフィードバック効果について、モデルと観測に基づくフィードバック感度評価の比較が重要な要素となる。対馬らは雲のフィードバック効果が全球平均地表面温度に対してどの程度の感度を持つかを調査し、気候モデルと観測におけるその差異について議論した[Tsushima and Manabe, 2001]。この差異は雲の気候に対する効果の理解そのものが未だ低い状態であることを表しているが、これらの問題へ取り組むためには、雲による地球のエネルギー収支に対する効果を観測に基づいて精度よく評価することが重要である。太陽放射量の収支(短波放射収支)、特に日射量の推定に関して雲は最も大きな不確実性となるが、これに関しても同様の理由で観測に基づく解析が重要な要素となる。

日射量の推定は古くから様々なアプローチが試みら

れているが、大きく三つの手法に分類される。

(1) 実観測値に基づく回帰分析モデル。地上に設置した日射計によって観測した日射量と気象場のパラメータを結びつけ、統計的に大気の透過率を表現することで日射量を計算する。高速に作動する点に優位性があるが、明確な物理モデルを持たないため対応条件には限界があり、回帰分析として常に統計を取り続ける必要がある。

(2) 太陽エネルギーの分配を記述したエネルギーフローモデル。太陽から降り注ぐエネルギーが大気の各要素に減衰され地上に到達するまでのエネルギーフローを1次元、もしくは0次元で記述した式を用いて日射量を計算する。エネルギーフローのみを取り扱うため大気の各要素における波長特性を考慮することはできない。

(3) 大気要素の波長特性を考慮した放射伝達モデル。太陽から地球大気上端に到達した太陽放射は水蒸気やオゾンなどの吸収ガスや雲粒子など大気中の微粒子によって吸収・散乱され地表面に到達する。これを電磁波の放射伝達理論に基づいて各波長ごと、大気層ごとに計算する。放射量の厳密解が得られるが、他の手法と比較すると非常に長い計算時間が必要となる。

本研究では気候学的アプローチとして放射伝達モデルによる放射量の推定手法を用いている[Nakajima and Tanaka, 1986; 1988]。日射量に対する最大不確定要素である雲粒子の光学特性は静止衛星観測データから逆解析によって得る[Nakajima and Nakajima, 1995; Kawamoto et al., 2001]。さらに、吸収ガスのデータと雲粒子のデータを統合することで大気全体の光学的厚さを高精度に得る。また、放射伝達計算による計算時間の問題は高速に作動するソルバーを開発することで解決した[Takenaka et al., 2011]。推定された放射量はSKYNET及びBSRN(Baseline Surface Radiation Network)によって検証された。SKYNETはエアロゾル、雲、放射の相互作用をよりよく理解するために設置された地上観測ネットワークであり[Takamura et al., 2009]、BSRNはWCRP(World Climate Research Programme)の一部であるGEWEX(Global Energy and Water Cycle Experiment)による放射観測ネットワークである。このアルゴリズムは高速に作動することから、静止衛星の観測にあわせた準リアルタイム解析システムとして試験稼働を行なっている。

太陽光発電は地球に降り注ぐ太陽放射を電力に変換する発電手法である。発電時に温室効果ガスを排出することがなく、同様に発電時に廃棄物も発生しない。再生可能エネルギーの定義は複数存在するが、IPCCの定義による再生可能エネルギー[IPCC SRREN full report, 2011]としては、気候変動の緩和策の一つとしても期待されている。日本の太陽光発電累積導入量は2008年において2.17GW程度であるが、長期的な温暖

化対策として2050年において173GW程度の導入が必要と試算されており、太陽光発電ロードマップPV2030+では2025年における導入目標を102GWと定めるなど基幹電力の一部を担うことを期待されている。特に夏季日中に電力需要のピークが重なることから、ピーク時の電力供給に効果を持つと考えられている。また、火力・水力等の発電設備と異なり設置に際して長期に渡る工事を必要とせず小型化も容易なことから、東日本大震災直後に一部地域において夜間の懐中電灯や携帯機器の緊急の電力源としての役割も担った。

本発表では準リアルタイム解析による衛星観測データに基づく日射量の推定から、実在する太陽光発電システムの発電量把握までを概説する。PVシステムの発電量データは千葉県市川市にて運用されているPVシステム(10.0kW)の発電量データの提供をうけた。太陽光パネルは温度に依存して発電効率が変化することから、風速・気温そして衛星推定日射量を併用することでモジュール温度を算出した。さらにモジュール温度から太陽光パネルの効率減衰を見積り、パワーコンディショナ(PC)の変換効率と掛けあわせてシステムの発電効率を計算し、衛星推定日射量から発電量を見積もる。衛星データに基づく日射量から見積もられた発電量は、実際のPVシステムに記録されていた発電量との比較によって検証された。

## 6 住宅用太陽光発電システム導入に対するロバスト最適化の適用

武田朗子(慶應義塾大学)

近年、CO<sub>2</sub>排出量およびエネルギー消費量の削減が求められているものの、家庭部門におけるCO<sub>2</sub>排出量およびエネルギー消費量は増大傾向にある。この問題を対策するため、太陽光発電システムの住宅への導入が推進されている。H.Renらは、3種類の入力データ(地域の日射量・家庭の電力需要・電力価格)に基づいて、年間電力コストを最小にするためにどれくらいの規模の太陽光発電システムを導入すればいいかを決定するための数理モデル(線形計画問題)を提案した[H.Ren et al., 2009]。このモデルは当時の余剰電力買取制度に基づくものであり、現在の買取制度(小規模な住宅用設備からの余剰電力を買電単価の約2倍の価格で売電できる制度)下で用いると、「電力会社からの購入した電力を2倍の価格で売電する」という非現実的な解が得られてしまう。

本研究では、現在の買取制度に合うように修正を加え、さらに、太陽光発電を推進する側の立場に立ったモデルになるように、CO<sub>2</sub>排出量の削減目標を制約式として加えたモデルを提案する。提案モデルでは、CO<sub>2</sub>削減目標の制約を加えることで、CO<sub>2</sub>削減目標を満た

しつつ最小費用で電力調達を行うために最適なシステム規模が算出されるだけでなく、CO<sub>2</sub>削減目標の達成にかかる費用を評価することができる。

実際にこのようなモデル化を行なう際には、日射量の不確実性を無視することはできない。太陽光発電量に関わる日射量は、天候の影響を大きく受ける不確実なデータである。例えば、年間日射量の高かった年度のデータに基づいてモデルを構築し、得られた最適解に基づいてシステムを導入すると、将来、CO<sub>2</sub>削減目標を満たさなくなるケースや電力コストが想定以上に高くなるケースが生じてしまうだろう。こういったケースをなるべく起こらなくするためには、将来の日射量の不確実性を考慮する必要がある。

そこで、Ben-TalとNemirovskiによって提案された不確実性下の意思決定法:ロバスト最適化法[Ben-Tal and Nemirovski,1998]を適用して、日射量の(許容範囲内の)変化に対して大きくコストやCO<sub>2</sub>削減量が影響を受けることのないよう、モデルの改良を行なった。一般的に、ロバスト最適化を適用したモデルは無限本の制約式を含んでいて、解くのが難しくなってしまう。しかし「余剰電力の買取」というモデルの特徴を利用することで、ロバスト最適化モデルを1変数の凹関数最小化問題に帰着できるため、簡単に解くことができる。

数値実験では、現状の買取制度に基づいた提案モデルについて、その有効性を検証するとともに、ロバスト最適化モデルを用いることにより、テストデータの日射量すべてに対してCO<sub>2</sub>削減目標を満たすような頑健な意思決定ができたことを確認した。

## 7 Green by IT とその将来

西 宏章(慶應義塾大学)

電力の自由化や送電分離、将来のエネルギーバランスなどの議論が震災後湧き上がり、マイクログリッド・スマートグリッドといったキーワードに示されるように、新しい社会の在り方について模索する動きが活発化している。中でも注目されるのは、CEMS(Cluster/Community Energy Management System)と呼ばれる、個別ではなく、包括的に取り組む地域エネルギー管理手法である。従来のような、電力変換や安定化といった議論に加えて、IT技術、特に通信技術やセンシング技術、さらには可視化技術との融合による同時同量を中心とした新しいエネルギー管理システムの検討が急速に進んでいる。

我々は、センサネットワークにより集めた各種データを利用することで、快適性や、需要供給のバランス、エネルギー配分を考慮しつつ、従来よりも最適化した電気消費機器制御を行うエネルギー管理システムを構

築している。このシステムを実際に長崎県五島市福江港ターミナル周辺、宮城県栗原市の中心部、大学キャンパス、一般家庭環境などに設置し、省エネ実験を紹介する。具体的には、V2G(Vehicle to Grid)や空調インバータ制御、冷温水発生器制御、行動・タスク管理等、多角的に行われた実験のシステム構成、内容と結果について述べる。

特に空調制御においては、PMV (Predicted Mean Vote) と呼ばれる快適性指標により解析性を数値化し、CO2 センサによる換気制御および人数推定による需要予測等を通して、なるべく居住者に不快を感じさせることなく制御し、ピークシフトやピークカットを行う。結果、およそ15%から20%のエネルギー消費量削減ならびにCO2排出量削減を達成した。また、固定電池やEV (Electrical Vehicle, 電気自動車) 電池を用いたピークシフトについて、必要な電池量推定実験を行った。さらに、スマートグリッドの発展としてのスマートシティ、スマートコミュニティという観点から、ビッグデータ、クラウドといった技術の意義についてまとめる。(Fig.1 参照)



Fig.1 : Field Validation for Energy Management

## 8 スマートなエネルギー管理システムの分散予測制御

滑川 徹 (慶應義塾大学)

再生可能エネルギーを含む分散型電源の既存の電力網への導入は、系統の周波数変動や電圧変動を引き起こす要因となり、それらをシステム技術とIT技術、制御技術で解決する枠組みとしてエネルギー管理システムやスマートグリッドに関する研究が進んでいるが、その実現のためには分散・協調・最適制御技術が必要不可欠である。大規模システムでは、サブシステムごとに収集する情報とエネルギーが時間的・空間的に異なり、従来型の集中制御方式だけでは不十分となる。一方、分散制御方式では各プラントが個々にコントローラを有しており、エネルギー・情報結合構造によって、情報とエネルギーを融通しあう構成となる。各プラントでの制御目的が隣接しているプラントと異なる場合に、各コントローラの最適化が全体の最適化と矛

盾するという問題が生じるため、その解決が求められている。

本発表では、再生可能エネルギーを含む分散型エネルギーネットワークの分散制御問題に関して、制御理論によるアプローチとして、まず電力需要と自然エネルギーの発電予測問題を取り上げる。次に大規模分散システムに対する幾つかの分散型制御方策と予測型制御方策を紹介する。具体的には多くのサブシステムを持つ階層型の大規模システムに対する分散制御問題に対して、情報結合構造を共分散拘束として表現するアプローチや、反復勾配法などの最適化手法、モデル予測制御について議論する。

更には電力需要のピーク電力を抑えるための方策として、動的かつ柔軟に電力価格を変更する「リアルタイムプライシング」が制御理論分野でもホットに研究され始めており、この課題に対する制御理論からのアプローチに関する世界の動向についても説明する。

(Fig.2 参照)

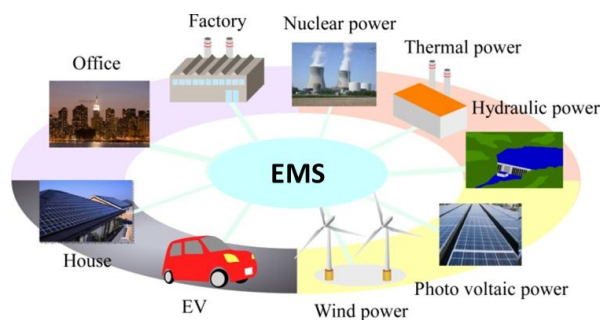


Fig.2 : Smart Energy Management Systems

## 9 セッション構成

本企画セッションでは、まず上記の7名の講演者より、それぞれの御専門と学界を背景として、エネルギー管理システム構築に関して話題提供を頂く。

最後に、将来的な学界の境界を越えた学理融合展開を目指して、講演者だけではなく、フロア参加者を交えて、パネル討論を行う。