

総論

## Chapter 1

# エネルギーの情報化とは

—背景, 目的, 基本アイデア, 実現手法—

i - Energy - Background, Objective, Ideas, and Realization Methods -

松山隆司 (京都大学大学院情報学研究科)

### 実世界と情報ネットワーク社会の統合による 21世紀社会基盤の構築

#### ■ 意義と目的

20世紀までの社会では、実世界 (Physical Real World) での活動が中心であったが、20世紀末以降、情報通信技術の発展により情報ネットワーク社会 (Cyber Network Society) が構築され、新たな社会的、個人的活動の場が生まれた(図-1)。

実世界における活動は、地球の重力や人間の身体的・生理的特性など物理化学の法則に従ってどのようなことが可能であるかという考え方に基づいて、その環境が作られてきた。一方、情報ネットワーク社会では、標準、規則、法律等のルールに基づいて活動が展開されるため、ルールをどのように定め、守っていくかが重要となる。

このように、21世紀の社会では、実世界と情報ネットワーク社会という2つの活動の場があり、両者をいかに関係付け、統合化するかを考えることは、21世紀の社会基盤構築のための基本的指針を与えるものと考えられる。

また、実世界と情報ネットワーク社会の統合は、学術的にも大きな意義があると考えられる。すなわち、実世界における法則の解明とその技術化の基礎理論としては、Newton や Maxwell 方程式などの微分方程式系に代表される物理化学モデルが作られ、大きな成功を収めてきた。一方、情報ネットワーク社会を支える理論的基礎としては、Turing 機械などの計算理論や Shannon の通信理論などがあり、それらに基づいて多種多様な情報システムが開発さ

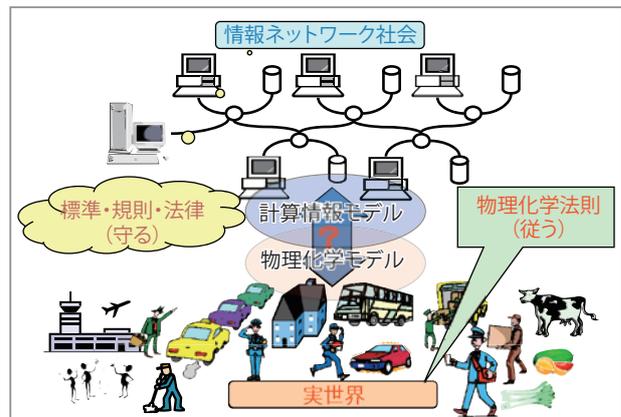


図-1 実世界と情報ネットワーク社会の統合

れ日常生活を支えている。

では、物理化学モデルと計算情報モデルは、どのような関係にあり、両者の統一理論といった新たな理論モデルは考えられないのであろうか？ こうした理論的基礎が構築されてはじめて、実世界と情報ネットワーク社会の統合の指針が示され、健全な21世紀社会が実現されると考えられる。

図-2は、19世紀後半からの計算科学、情報通信分野における学術・技術の進展を模式的に描いたイメージ図で、1930年代に考案された Turing の計算理論、Shannon の通信理論が20世紀末のデジタル技術によって統合され、情報ネットワーク社会を生み出したと言える。一方、同じ時代に提唱された Wiener のサイバネティクスに源を発する制御理論は、実世界で機能する多種多様な自動機械を生み出し、現代社会・生活の基盤を担っている。

すなわち、実世界と情報ネットワーク社会の統合を実現するには、Turing の計算理論、Shannon

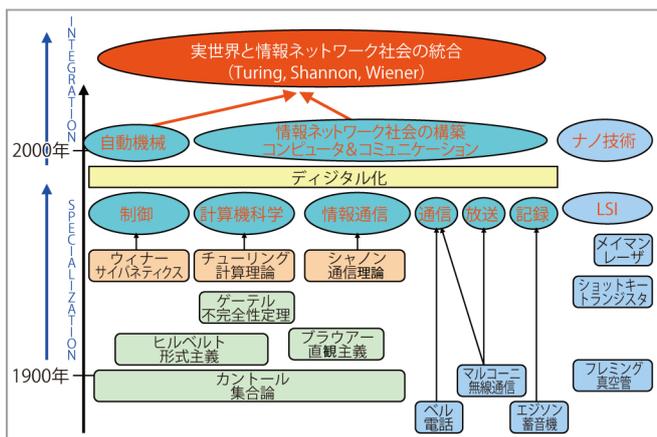


図-2 計算, 通信, 制御分野の発展過程のイメージ図

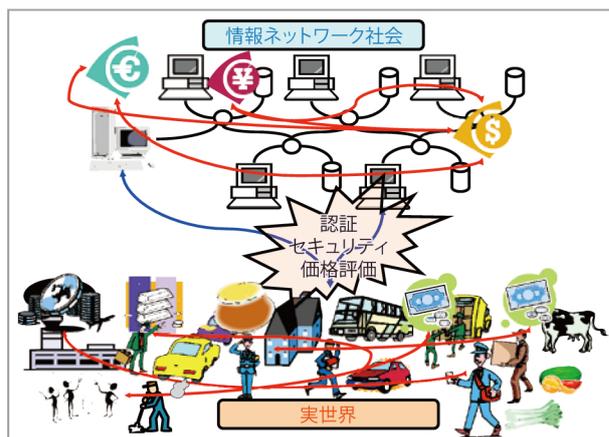


図-3 貨幣・証券の情報化

の通信理論, Wiener らによる制御理論を統一化した新たな理論を生み出すことが必要であると言え, それに向けた試みとして米国 NSF による Cyber Physical Systems に関する研究プロジェクト<sup>1)</sup> や Hybrid Dynamical Systems<sup>2)</sup> に関する研究があると言える。

### ■ 実例

実世界と情報ネットワーク社会を統合した社会基盤の構築はすでに始まっており, その代表例が, 貨幣・証券等の情報(電子)化である。実世界では貴金属・貨幣・証券などモノの流れとして価値が流通していたが, 情報ネットワーク社会では, 数字や記号として価値が流通しており, その価値を保証するのが, 個人(権限)認証や情報セキュリティであり, それらが情報ネットワーク社会における情報の流れを意味付けるための重要なルールとなっている(図-3)。

また, 実世界のさまざまなモノにバーコードや IC タグ, RF タグを付け, その位置・種別・製造履歴などを情報ネットワーク社会の中の情報として蓄積, 管理することによって, 食材のトレーサビリティ, ETC, カーナビ, 携帯電話など物流・交通・人流の情報化が実現されている(図-4)。さらに最近では, 情報化の対象がモノからヒトへと広がっていき, 腕時計型の生理・運動状態記録装置などを使った個人の健康・活動状態の情報化実験が行われている。

このように, 実世界と情報ネットワーク社会の統

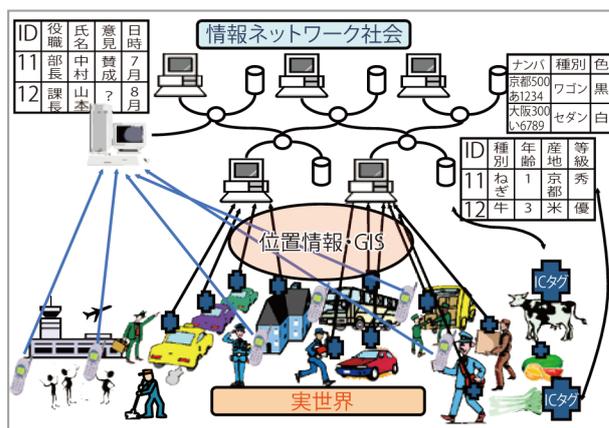


図-4 物流・交通・人流の情報化

合はいろいろな分野で着実に進められており, 新たな社会基盤が形成されてきている。

### 電力ネットワークと 情報通信ネットワークの統合

初期のコンピュータシステムや通信ネットワークは, 大型計算機・交換機→端末といったスター型構造であったが, ワークステーションや PC の発展に伴い次第に分散化・双方向化・個人化が進み, 現在の超分散型ネットワーク(インターネット)へと移行した。この革命的とも言える変化は, 情報通信技術の進歩・発展(実世界)とともに, 電電公社の分割民営化, 各種の規制緩和という社会的ルールの変更・改革(情報ネットワーク社会)が並行して行われたことによって, わずか 30 年ほどで実現された。

# 特集 エネルギーの情報化

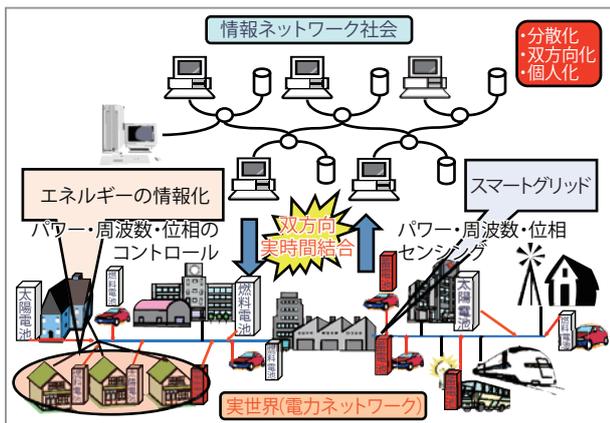


図-5 電力ネットワークと情報ネットワークの統合

こうした視点で実世界における重要な社会基盤システムである電力ネットワークの今後を展望してみると、現在は大型発電所→工場・オフィス・家庭といったスター型構造をしているが、風力発電、太陽電池、燃料電池、蓄電池の進歩・発展(実世界)、それらの普及を後押しする地球温暖化防止に向けた政策(情報ネットワーク社会)によって、急速に分散化、双方向化、個人化が進むことが予想される。

そこで我々は数年前から、電力ネットワークと情報ネットワークの統合による新たな超分散型エネルギー社会基盤の構築を目指して「エネルギーの情報化」というアイデアを提唱し、研究開発を進めている(図-5)。

情報通信技術を用いた電力ネットワークの高度化という考え方は、昨年来米国オバマ大統領が推進しているグリーンニューディール政策によって注目を集めている「スマートグリッド」と同じであるが、「エネルギーの情報化」と「スマートグリッド」は以下の点で大きく異なっている。

**スマートグリッド**：電力事業者が管理・運営する全国的・公的な電力ネットワークを対象とし、米国では不安定な電力ネットワークの安定化(電力消費ピークの抑制など)を図ることを大きな目的としている。

**エネルギーの情報化**：個人や一般企業が管理・運営する家庭、施設、地域内における自営線を対象としており、まったく新たな発想による高度なエネルギー・マネジメントシステムの実現を目指している。

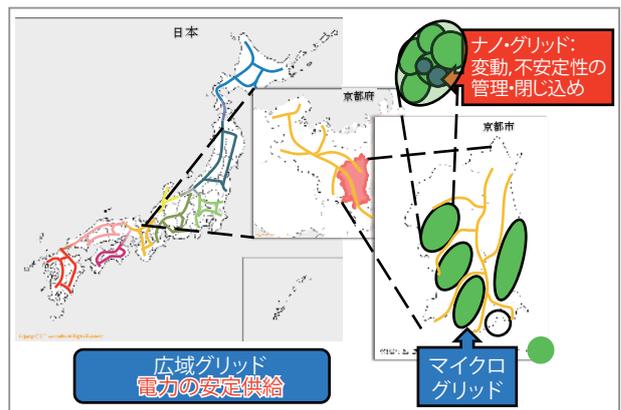


図-6 広域グリッドと地域ナノ・グリッド

特に、日本のCO<sub>2</sub>排出量の年次変化を見ると、産業界における削減余地は限られ、家庭やオフィスにおける排出量の削減が重要な課題として挙げられており、その解決を目指しているのがエネルギーの情報化であるとも言える。

米国に比べ我が国では電力ネットワークがうまく管理されており、その安定性には定評があることから、米国流のスマートグリッドは不要であるという意見がある。一方、太陽電池や電気自動車といった、小型ではあるが膨大な数の発電装置や移動蓄電装置が社会に広がった場合、電力生産・消費のパターンが大きく変化し、現在の電力ネットワーク制御法では安定性が保てないのではないかといった問題が提起されている。

エネルギーの情報化が実現できれば、家庭、事業所を含む近隣地域内で電力エネルギーの制御、蓄積が行われ、電力会社から見た場合には、エネルギー消費パターンが非常に安定した負荷に見える。つまり、自然エネルギーを利用する発電装置の出力不安定性、季節や天候、時間に依存した人間活動の変化によるエネルギー消費の変動、さらには電気自動車の普及による電力消費パターンの変化は、家庭内や地域内で吸収し、電力会社は定常的な量の電気エネルギーを地域に安定供給するといった、基幹系+地域系(エネルギーの情報化機能を備えた地域系電力ネットワークを「ナノ・グリッド」と呼んでいる)から構成される新たな電力ネットワーク(図-6)が形

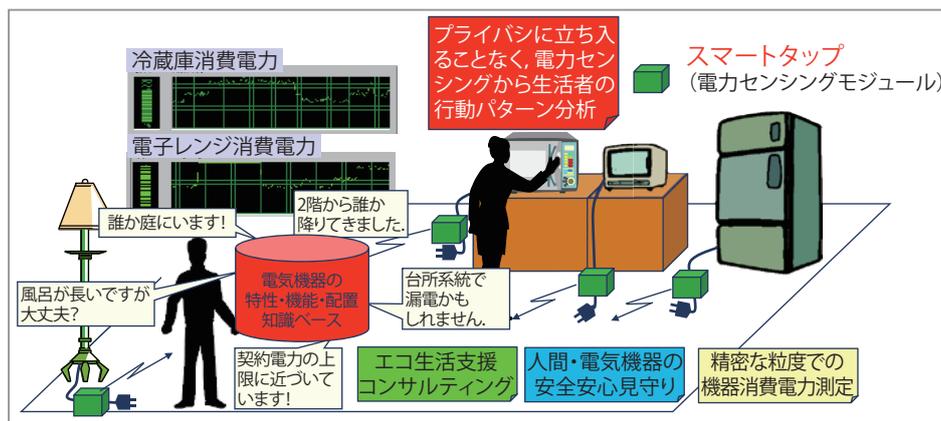


図-7 スマートタップを用いた家庭内電力センサネットワーク

成され、現在の電力ネットワークの安定性を保ちつつ、社会全体としてエネルギーコストやCO<sub>2</sub>の削減が実現できると考えられる。これが我が国に適した21世紀型電力ネットワークの姿ではないだろうか。事実、本年4月に実証地域選定がなされた経済産業省の「次世代エネルギー・社会システム実証」においても、「個々の需要地点および地域レベルでのエネルギーマネジメントシステムの確立」および「地域エネルギーマネジメントと大規模ネットワークとの相互補完関係の構築」が大きな目的として挙げられている。

以下では、エネルギーの情報化に基づいた家庭内、地域内ナノ・グリッドの実現に向けた4段階の研究開発プロセスについて、その概要を紹介する。なお、技術的な詳細については、本特集の関連記事を参照していただきたい。

## エネルギーの情報化の実現プロセス

### ■ 電力センサネットワークによるエネルギー消費の見える化と人間行動の学習・見守り

エネルギーの情報化に向けた第1段階として、家庭・オフィス内のあらゆる電気機器に、電力センサと通信モジュールからなる「スマートタップ」を取り付け、詳細な電力消費パターンをモニタリングするセンサネットワークを構築する(図-7)。これによ



図-8 家電ごとの電力消費量の見える化(情報通信研究機構との共同研究)

り各電気機器の電力消費状況をリアルタイムに計測・分析・表示すること(図-8)が可能となり節電・エコ意識の向上が図れるだけでなく、直接的なプライバシー侵害を引き起こすことなく、電気機器を操作する生活者の行動パターンの学習、モニタリングができ、安全・安心のための見守り、さらには電気機器の不具合の早期発見にも役立つ。

図-9はスマートタップの外観(上段)と内部構造(下段)、図-10は計測されたウォッシュレットの電力消費パターンを示している。一般に家電の使い方は個人によって異なるため、その電力消費パターンを分析すれば使用者を推定することができる。また、これまでの研究で、1交流周期における電流波形を分析することによって、16種類の家電を99%の精度で識別できることが分かっており、家電をコンセ

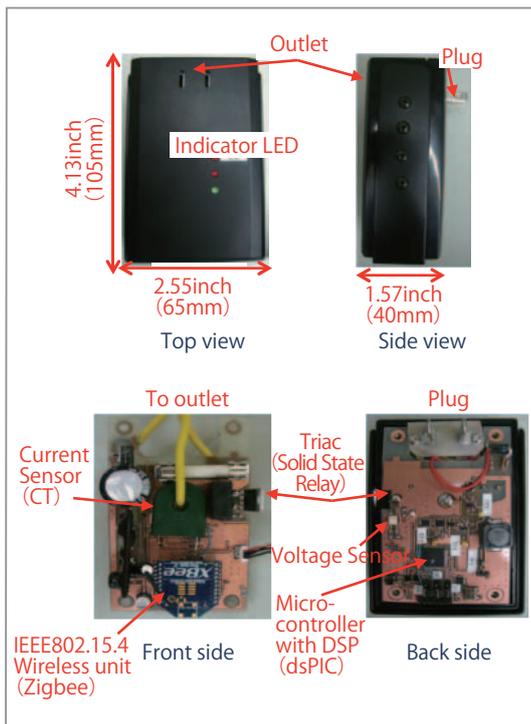


図-9 スマートタップ

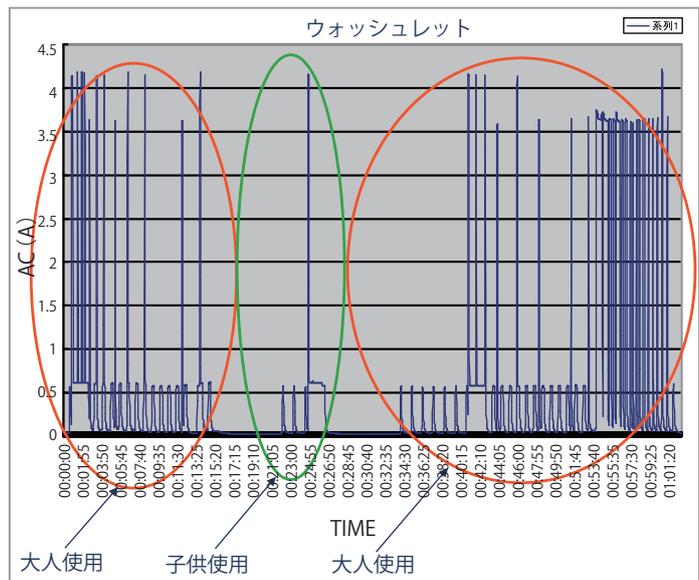


図-10 ウォッシュレットの電力消費パターン(情報通信研究機構との共同研究)

ントに接続するだけで、その家電が何であるかが判別できる<sup>3)</sup>。

## ■ オンデマンド型電力ネットワークによる高度電力マネジメント

前述の電力消費の見える化による節電意識の向上では、人間が無駄と気付いた電力が削減されるだけで、その効果は限られている。そこでエネルギーの情報化の第2段階として、スマートタップに電力制御機能を付加するとともに(図-9のスマートタップには電子的に電力制御ができる Triac が内蔵されている)、蓄電池をエネルギー・バッファとして活用して家庭内の電力消費を知的に管理し、大幅な省エネを実現する電力マネジメントシステムを構築する(図-11)。蓄電池としては、図に描かれているように電気自動車を利用することによって、家庭内での生活と屋外での交通に要する電力エネルギーの管理を統一的行うことが可能となる。

我々は、エネルギーの知的制御方式として、以下のような「EoD: Energy on Demand (オンデマンド型電力ネットワーク)」を提案している。

1. 電気機器のスイッチを入れると電力要求量・機器特性・重要度などを記した情報パッケージ(QoEn: Quality of Energy)が電力マネージャに送信される(スイッチを入れても直接電気機器がONになるわけではない。なお、電力マネージャは、家庭内のホームサーバの機能として実現してもよいし、エネルギーマネジメント・サービスを提供するプロバイダがその機能を提供してもよい)。
2. 電力マネージャは、現在、今後の電力需給状態および、前述のセンサネットワークを使って学習された人間の活動パターンを考慮して、当該機器に利用可能な電力使用量、通電時間を割り当てる(「ベストエフォート」で電力供給を行うため、すべての要求が100%満たされるわけではない。つまり、100Wの要求に対して80Wしか給電されないこともあり得る)。
3. 給電開始許可のパッケージを受けると初めて、電気機器へ電気が通じる。その際、機器に付けられたスマートタップは、許可された電力量の範囲内でしか電気機器に給電しない。
4. 電力マネージャは、他の電気機器の利用状況、要

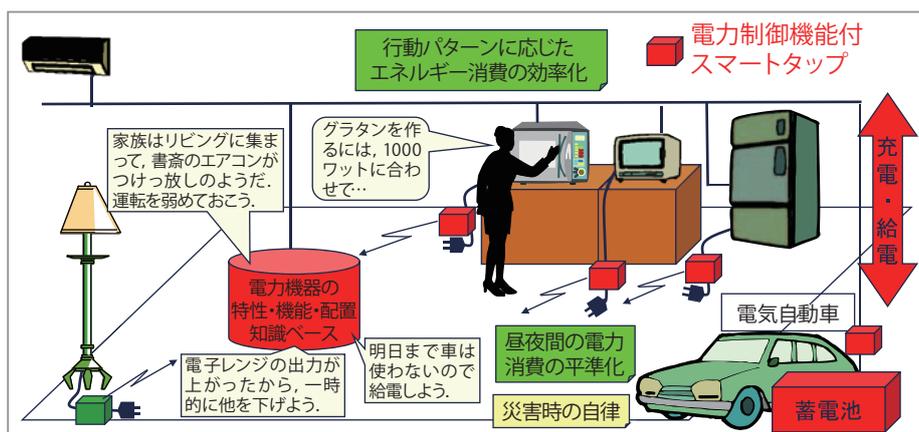


図-11 オンデマンド型電力ネットワーク

求の重要度に応じて電力供給を継続的にオンライン制御する（利用者があらかじめ設定した総電力使用量の制限値以下でマネジメントを行う「Cap 制」による制御が行われるため、重要度の高い電力要求が発生することによって電気機器への給電が削減、中断されることがあり得る）。

EoD 方式では、ベストエフォート、Cap 制という現在の電力ネットワーク制御では考えられなかった方式を導入することによって、大幅な省エネを 100% 確実に実現することができる。EoD 方式では、電力消費を 100% カットする（つまり、いかなる電力要求も無視する）ことも可能であるが、それでは生活の質 (QoL : Quality of Life) が損なわれてしまう。すなわち、QoL を保ちつつ電力消費をどこまで削減できるかが重要で、そのためには生活パターンの正確な学習とそれに基づいた電力制御方式の開発が不可欠となる。

ここで注意していただきたいのは、米国のスマートグリッドでは、電力会社からの要請に応じて需要家が電力制御を行うデマンドレスポンス（つまり、供給側からの要求に対する需要家側応答）の実現が主な電力制御方式とされているが、我々が提唱している EoD は、需要家側からの要求に基づくエネルギー供給であり、両者では、要求元、要求の向きがまったく逆となっている。このように、米国のスマートグリッドとエネルギーの情報化は、図-9 で示したようにエネルギー・マネジメントの対象が異なるだけで

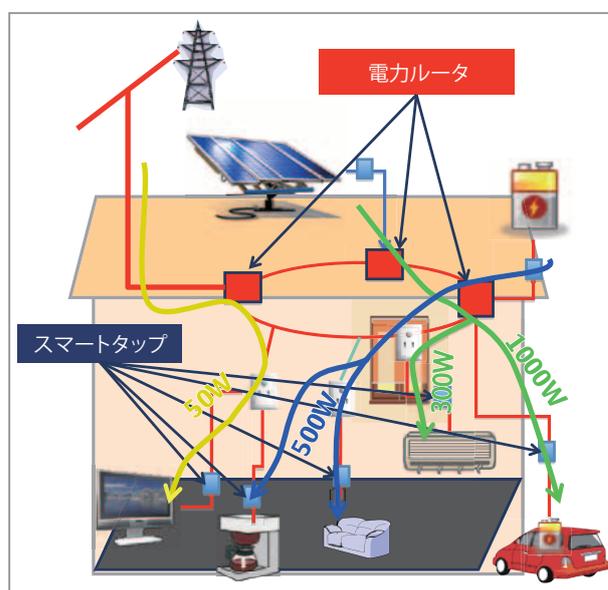


図-12 家庭内ナノ・グリッドと電力カラーリング

なく、エネルギー制御方式に根本的な違いがある。

### ■ 家庭内ナノ・グリッドによる電力ルーティング

第3段階としては、個々の家庭に設置される発電装置および蓄電装置をネットワーク結合し、家庭内のトータルな電力マネジメントシステムを構築する。すなわち、現在の家庭内電力ネットワークは木構造であるが、複数電源や蓄電池の導入によってループを持ったグラフ構造へと拡張されることが考えられ、多様な電力ルーティング機能を備えた「ナノ・グリッド」が形成される(図-12)

家庭内に複数の電力源が設置された場合、各電源

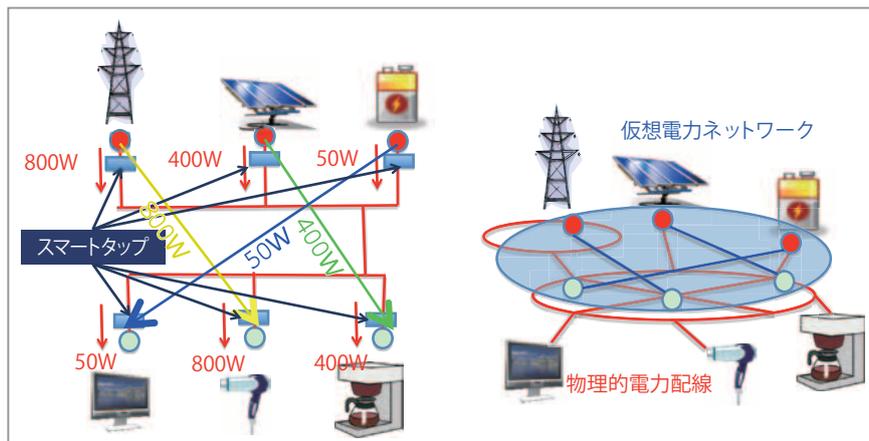


図-13 スマートタップ群の分散協調制御による仮想電力ネットワークの実現

からの電力を区別し（電力カラーリング）、量的な省エネだけでなく、CO<sub>2</sub>発生量の低減を考慮したエネルギー・マネジメント（たとえば、太陽電池からのエネルギーが利用できるのであれば、室温は〇〇°、そうでなければ△△°にする）を行うことが考えられる。

電力カラーリングは物理的には不可能であるが、我々のグループでは、図-13左のように、電気機器だけでなく電源にもスマートタップを付け、電源と電気機器の間に流れる電力をリアルタイムで同時同量制御することによって、仮想的に電力カラーリングを行う方式を開発し、実験室レベルではあるが、電力カラーリングが実現できることを実証した。これは、同図右に示したように、物理的な電力ネットワークの上に仮想化された電力ネットワークをソフトウェアによって設定するオーバーレイ・ネットワーク方式であるといえる。

## ■ 地域ナノ・グリッドによるエネルギー売買市場の創成

1軒の家庭だけではCO<sub>2</sub>の削減効果は限られるが、エネルギーの情報化の対象を、さまざまな生活パターンを持った多数の家庭が含まれる地域に広げることによって、さらなる削減が可能となる。これが第4段階で、家庭内ナノ・グリッドをネットワークで結び、世帯間での電力売買を可能とする地域ナノ・グリッドを構築する（図-14）。すなわち、地域ナノ・グリ

ッドは、電力会社と地域をつなぐインターフェース、地域内でのエネルギー需給バランスを保つための需給調整、蓄放電制御を行うだけでなく、エネルギー経済ネットワークを含んでおり、それによって各世帯に省エネ、CO<sub>2</sub>削減に向けた大きなインセンティブを与えることが可能となる。たとえば、少々不便であってもエネルギー消費を減らし（Capの値を低く設定し）、余ったエネルギーを売ることや、エネルギー価格の変動に合わせて蓄放電制御を行うことによって経済的利益を求めるといった行動が誘発され、技術的にはむずかしいレベルまで省エネ、省CO<sub>2</sub>が可能となる。もちろん、世帯間での電力売買を可能とするには、新たな法制度の制定が必要であるが、地域ナノ・グリッドの実現こそ正に新たな社会基盤、生活スタイルの創成といえるのではないだろうか。

## 今後の展開

エネルギーの情報化は提唱以来数年が経ち、昨年からスマートグリッドブームとともに総務省や経済産業省において関連する研究開発プロジェクトが立ち上がっている。

エネルギーの情報化を実現するには、計算情報モデルに基づく情報通信と物理化学モデルに基づく電力制御といった相異なる学理に則った学術研究分野

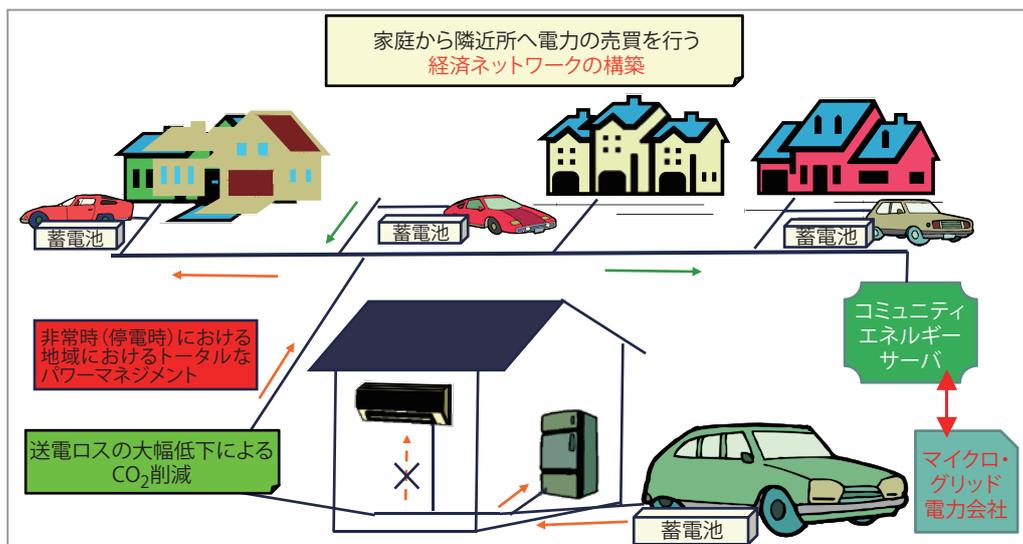


図-14 地域内ナノ・グリッドによるエネルギー売買市場の創成

を統合する統一理論の構築に加え, 家電, 蓄電池, 電気自動車, 住宅といった広範な産業分野における協業, さらにはネットオークションのように個人が自由に参加できるエネルギー市場の形成のための法制度改革といった多種多様な活動を系統的に進める必要がある. 我々は, 昨年エネルギーの情報化WG (<http://www.i-energy.jp>) を立ち上げ, 産学官の連携および国際展開を目指して活動を進めている. 本年4月には, WGが中心となって提案した, 京都府けいはんな地域における実証実験が, 経済産業省の「次世代エネルギー・社会システム実証」のための4地域(他の地域としては, 横浜市, 豊田市, 北九州市)の1つに選ばれ, 今後5年間に渡り集中的な技術開発, 実証実験を行うことになっている.

参考文献

- 1) [http://www.nsf.gov/funding/pgm\\_summ.jsp?pims\\_id=503286](http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286)
- 2) Savkin, A. V. and Evans, R. J. : Hybrid Dynamical Systems: Controller and Sensor Switching Problems, Birkhaeuser, Boston (2002).
- 3) 加藤丈和, Cho, H., Lee, D., 豊村鉄男, 山崎達也: 情報・エネルギー統合ネットワークのための電力センシング情報からの家電認識とその応用信学技報, USN2008-85, Vol.108, No.399, pp.133-138 (2009).

(平成 22 年 6 月 5 日 受付)

松山隆司 (正会員) [tm@i.kyoto-u.ac.jp](mailto:tm@i.kyoto-u.ac.jp)

1976年京大大学院修士課程修了。同大助手, 東北大助教授, 岡山大学教授を経て1995年より京大大学院電子通信工学専攻教授。現在同大学院情報学研究所知能情報学専攻教授。2002年学術情報メディアセンター長, 京都大学評議員, 2005年情報環境機構長。2008年京都大学副理事。工博。画像理解, 分散協調視覚, 3次元ビデオの研究に従事。最近は「人間と共生する情報システム」, 「エネルギーの情報化」の実現に興味を持っている。1980年本会創立20周年記念論文賞, 1990年人工知能学会論文賞, 1993年本会論文賞, 1994年電子情報通信学会論文賞, 1995年第5回国際コンピュータビジョン会議 Marr Prize, 1999年電子情報通信学会論文賞, 2000年画像センシングシンポジウム優秀論文賞。2004, 05年FIT優秀論文賞, 2009年ヒューマンインタフェース学会論文賞, 文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)。国際パターン認識連合, 本会フェロー, 電子情報通信学会フェロー。日本学術会議連携会員。

