

大学の研究・動向

エネルギーの情報化 — 電力ネットワークと情報ネットワークの統合 —

情報学研究科 知能情報学専攻
教授 松山 隆 司

電気電子工学科の理念は、「21世紀のエネルギーと情報社会をハードとソフトで支えることにある。」とホームページに記載されている。本稿では、この理念実現に向けた1つのアプローチとして、筆者が数年前から提唱している「エネルギーの情報化」の基本的考え方を紹介する。

1. 「実世界」と「情報ネットワーク社会」の統合

1.1 背景と目的

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)」が構築されてきた (図1)。「実世界」における活動は、地球の重力や人間の生理特性など物理化学の法則に従ってどのようなことができるかという発想で世界の仕組みが作られてきた。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世紀の社会には、「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、「実世界」には物流、人の流れ、あるいはエネルギーの流れ、「情報ネットワーク社会」には情報の流れがある。我々の研究グループでは、これらの流れを相互に関連付け、統合することによって、新たな社会基盤を構築することを目指して研究活動を展開している。

「実世界」と「情報ネットワーク社会」の統合は、21世紀の社会基盤構築という側面だけでなく、学術的にも大きな意義があると考えている。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、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」を支える学術的基礎としては、Turing 機械などの計算理論、Shannon の情報理論などがあり、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。(我々の研究室では、統一理論構築を目指した1つの試みとして Hybrid Dynamical System の研究 [1][2] を進め

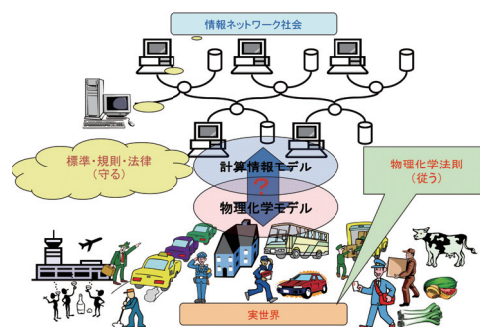


図1 「実世界」と「情報ネットワーク社会」

ているが、それについては、別の機会に述べることにしたい。)

1. 2 実例

「実世界」と「情報ネットワーク社会」の統合は既に始まっており、その代表例が、貨幣・証券等の情報化である。「実世界」では貨幣・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、情報化された数字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2）。

また、「実世界」の様々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（「ユビキタス社会」）が実現されている（図3）。さらに最近では、情報化の対象がモノから人へと広がっていき、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」とが統合され、新たな社会基盤が着実に形成されてきている。言い方を換えると、今後の情報通信の研究開発は、便利さ、快適さの追求ではなく、21世紀社会の基盤設計、構築を目指して行われるべきであると言える。

2. エネルギーの情報化

初期の計算機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（中央集中型）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。

こうした視点で「実世界」における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4）。

情報通信技術による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提唱している Green New Deal 政策によって注目を集めている「Smart Grid」と同じであるが、「エネルギーの

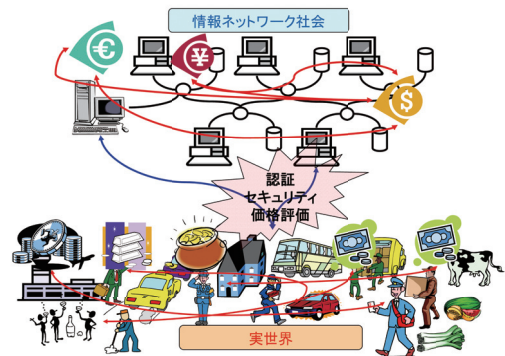


図2 貨幣・証券の情報化

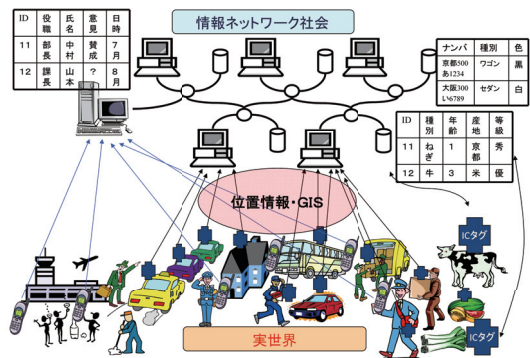


図3 物流・交通・人流の情報化（ユビキタス社会の実現）

情報化」と「Smart Grid」は以下の点で大きく異なっている。

「Smart Grid」:電力事業者が管理・運営する全国的・公的な送電網を対象とし、国内では電気事業法の制約を受け、個人や一般企業が自由にエネルギー・マネージメントを行うことはできない。

「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、全く新たな発想で高度なエネルギー・マネージメントシステムが実現できる。

一方、日本の二酸化炭素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。

現在我々は、以下で述べる4段階で「エネルギーの情報化」による新たな生活環境、社会基盤の構築を目指した研究開発、実証実験を進めている [3]。

2. 1 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5)。これにより家庭における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6)が可能となり節電意識の向上が図れるだけでなく、プライバシーを損なうことなく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7は情報通信研究機構と共同で開発したスマートタップ、図8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 [4]。

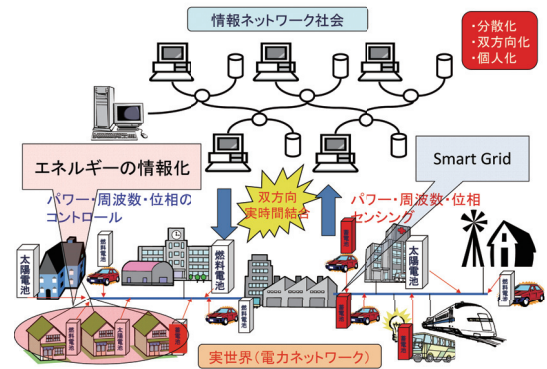


図4 電力ネットワークと情報ネットワークの統合

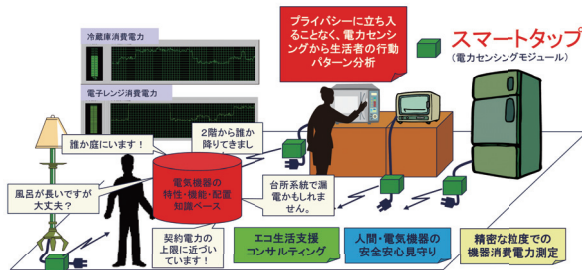


図5 スマートタップを用いた家庭内電力センサネットワーク



図6 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)

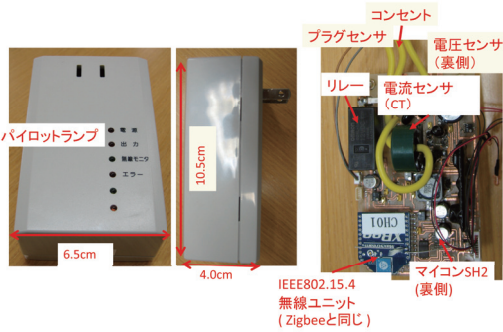


図7 スマートタップ (情報通信研究機構との共同開発)

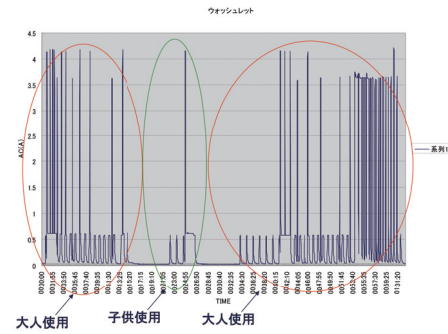


図8 ウォッシュレットの電力消費パターン (情報通信研究機構との共同研究)

2.2 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、無駄な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7のスマートタップにはON/OFFリレーが組み込まれている)、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9)。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。

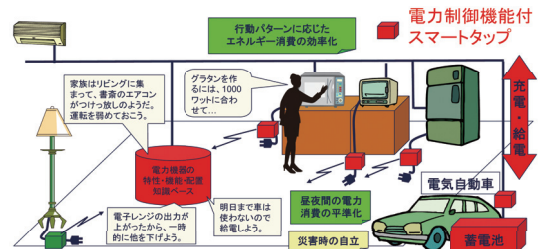


図9 オンデマンド型電力ネットワーク

我々は、エネルギーの知的管理方式として、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機器の電力要求・機器特性を記した情報パッケージ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。)
2. 電力マネージャは、現在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家庭での生活パターンを考慮して、当該機器に利用可能な電力使用量、時間を割り当てる。(「Best Effort」で電力供給を行うため、全ての要求が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うる。)
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、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。(利用者が予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うる。)

EoD方式では、Best Effort、Cap制という現在の送電網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。

2. 3 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及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することが考えられ、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10は、家庭内ナノグリッドを構築するためのスマートタップ群を示したもので、先に示した個々の電気機器に付けるタイプに加え、グリッド制御のための「スマートブレーカ」といった新たな機能を備えたものが必要となる。

家庭内に複数の電力源が設置された場合、各電源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、二酸化炭素発生量の低減を考慮したエネルギー・マネジメント（自然由来エネルギーを優先的に利用、十分確保できない場合は給電しない、あるいは自家消費せず電力会社へ積極的に販売するなど）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、スマートタップやスマートブレーカで計測・制御された各電気機器での電力消費量や発電機、蓄電池における電力流量を基にグリッド全体における電力エネルギー流を推定し、情報通信分野で培われて来た仮想化技術を利用すれば実現可能ではないかと考えている。

2. 4 地域ナノグリッドによるエネルギー売買市場の創成

一軒の家庭だけでは二酸化炭素の削減効果は限られるが、それを地域に拡げることで、更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11）。すなわち、地域ナノグリッドは、単なるエネルギーを授受するネットワークだけでなく、その売買を行う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、二酸化炭素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によって経済的利益を求めるなど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、省二酸化炭素が可能となる。これこそ正に新たな社会基盤、生活スタイルの創成といえることができる。

3. 今後の展開

「エネルギーの情報化」は提唱以来数年が経ち、昨年からの「Smart Grid」ブームにも支えられ、経務省や経済産業省で幾つもの研究開発プロジェクトが立ち上がっている。ただ、「エネルギーの情報化」

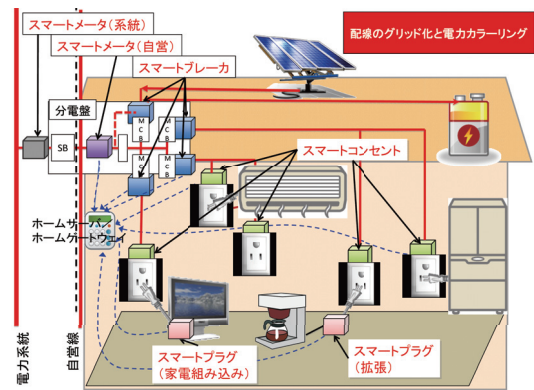


図10 家庭内ナノグリッド構築のためのスマートタップ群



図11 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な個人が自由に参加できるエネルギー市場の形成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、そのための場として「エネルギーの情報化 WG (URL: <http://www.i-energy.jp>)」を立ち上げ、産学官の連携活動を展開している。特に、我が国は、太陽光発電、蓄電池、電気自動車、家電メーカーなど「エネルギーの情報化」を実現するために必要な要素技術をもつ企業が数多くあり、国際的にも大きな強みを有している。WGでは、各大学、企業が個別に活動するのではなく、その強みを集結し、新しい学問、産業の創出に向けて努力を続けており、皆様の積極的な参加を期待しています。

参考文献

- [1] 川嶋宏彰, 堤公孝, 松山隆司: 動的イベントの分節化・学習・認識のための Hybrid Dynamical System, 第3回情報科学技術フォーラム (FIT2004) 情報科学技術レターズ, pp.175-178, 2004
- [2] H. Kawashima and T. Matsuyama: Multiphase Learning for an Interval-based Hybrid Dynamical System, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E88-A, No.11, pp.3022-3035, 2005
- [3] 山崎達也, J. Jung, Y. Kim, M. Hahn, 豊村鉄男, R. Teng, 丹康雄, 松山隆司: 家庭における電力センシングネットワークによるエネルギーマネジメント, 信学技報, EE2007-56, 2008
- [4] 加藤丈和, H. Cho, D. Lee, 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, vol. 108, no. 399, USN2008-85, pp. 133-138, 2009