

地域エネルギーマネジメントの有効性評価のための シミュレーションソフトウェア

吉田信明^{†1} 神原弘之^{†1}

現在、太陽光発電や小水力発電といった再生可能エネルギーの、効果的な活用に向けた様々なレベルでの取り組みが進められている。その一方で、再生可能エネルギーには、特有の不安定さがあるなど、その一層の普及への課題も存在している。

このような背景の下、著者らは、一定の地域内に存在する公共施設や一般家庭の間でエネルギー融通を行う「地域エネルギーマネジメントシステム (CEMS)」について、その有効性を検証するためのシミュレータの開発を進めている。

本稿では、我々が想定している CEMS の将来像について考察し、それらの振る舞いを模擬する本シミュレータの概要を説明する。ここで想定する CEMS では、太陽光や小水力などの発電設備を利用し、多様なセンサーを配備したインテリジェントな空間が検出する温湿度や施設利用状況等のリアルタイムな情報に基づき、エネルギー配分の最適化を行う。

Simulation Software for Effectiveness Evaluation of Community Energy Management

NOBUAKI YOSHIDA^{†1} HIROYUKI KANBARA^{†1}

Currently, a wide variety of efforts are promoted to achieve effective utilization of green energies, such as photovoltaic generation and small hydroelectric generation. On the other hand, green energies have problems for further diffusion, including their own volatility.

For such a background, the authors are developing a simulator of “community energy management systems (CEMS)”. With this simulator, we aim to evaluate effectiveness of CEMS in which energy, electricity in many cases, is exchanged between facilities and residential houses locating in a certain area.

In this paper, we discuss about our future vision of CEMS, and outline the simulator, which we are developing based on the vision. In our vision, a CEMS optimally allocates energy to facilities based on real-time information. Such information includes temperature and facility occupancy, and we expect these information will be available from variable sensors located in facility space in future.

1. はじめに

環境への負荷を低減することにより、地域社会がその継続／発展性を確保し、かつ住民は安心かつ安全にして、質の高い快適な生活を送ることが可能な「スマート・コミュニティ (シティ)」の実現に、ICT 技術がどのように貢献できるか、社会から課題が提起されるようになって久しい。特に東日本大震災以降、エネルギーの有効利用を実現するための「スマートグリッド」の在り方とその実現方法について、議論が活発化している[1]。

電気エネルギー貯蔵システムをシステムの視点で扱う国際電気標準会議 (IEC) の TC120 は、スマートグリッドの社会的なミッションを「『再生可能エネルギーのさらなる活用を実現する技術』として、自然エネルギー電源の出力の安定化や電力需給バランス確保に貢献すること」とし、その上で、スマートグリッドの定義を、

- 電力システムに含まれるユーザ等の利害関係者のふるまい (エネルギーの利用) の統合的な管理
- 効率的に持続可能で、経済的で安全な電力の提供

を目的とした、「情報連携、制御テクノロジー、分散コンピュータ、関連センサー、アクチュエータで構成される電力システム」と定義している[2]。

このようなスマートグリッドを構成するシステム技術として、ホームエネルギーマネジメントシステム (HEMS) やビルエネルギーマネジメントシステム (BEMS) の導入が進みつつある。HEMS や BEMS の導入により、エネルギー消費量のリアルタイムの監視が進み、より一層の省エネルギー化が進展していると考えられる。

一方、導入が進みつつある太陽光や風力に代表される再生可能エネルギーは、天候により発電／発熱量は大きく変動する。再生可能エネルギーによる発電設備が設置された施設の消費電力よりも、生み出された電力量が上回ることで発生する逆潮流が、系統側の電圧変動の要因として問題化している。さらなる再生可能エネルギーの導入とその有効利用には、ビルや家庭よりも大きな「地域」単位で再生可能エネルギーの変動を吸収し、電力ネットワーク全体の安定性確保に貢献することが必要であると考えられる。

このような地域単位での効率的・安定的なエネルギー利用を実現する「地域エネルギーマネジメントシステム」

^{†1} 公益財団法人京都高度技術研究所
ASTEM RI / Kyoto

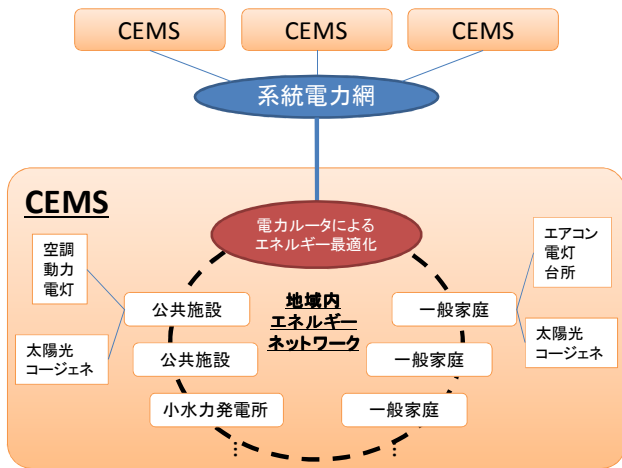


図 1 地域エネルギーマネジメントシステム (CEMS)
 Figure 1 Community Energy Management System

(CEMS, 図 1) が実現すべき目標とその実現方法を、我々は以下のように考えている：

(目標)

- 地域の再生可能エネルギー源を最大限に利用可能とし、地域の環境負荷を低減する
- 地域で発生した「再生可能エネルギーの変動」を系統電力に波及させない
- 大規模災害発生等により、系統からの電力供給が停止しても、地域の再生可能エネルギーにより（規模は限定されるが）稼働できる

(実現方法)

- 使用されていない施設／家庭の再生可能エネルギーを、エネルギーの不足している施設に融通したり、地域の蓄電池や EV の充電に用いたりする
- 地域のエネルギー消費量を制御することで、再生可能エネルギーの変動による影響を地域の外のエネルギーネットワークに及ぼさないようにし、さらには系統側とは独立して稼働する

このような地域エネルギーマネジメントシステムでは、情報通信技術が重要な役割を果たすが、その中核的な概念として、米国を中心に提案されているサイバー・フィジカル・システム (CPS) がある。CPS は、物理世界のプロセスを、計算機とネットワークとの統合により高度化することを目的としている。スマートグリッドは、エネルギーの供給と消費というプロセスを、計算機とネットワークによる仮想世界から制御しようとする試みの一つである、と考えられる[3]。このような試みは、我が国においても行われており、家庭内などスマートグリッドより細かい粒度での電力ネットワークの制御を対象とした研究[4]もある。

2. シミュレーションの必要性

2.1 想定する CEMS

我々が想定する CEMS は、主として電力を対象としてお

り、CEMS に参加している施設や家庭間での電力需給を調整し、実際に送受電を制御する「電力ルータ」により、以下の各機能を実現するものである。

- 独立したエネルギーネットワークの制御
 系統電力網の一部を制御するのではなく、地域で独立して構築されたエネルギーネットワークを制御する。
- シミュレーションに基づくエネルギー分配
 地域のエネルギー需要家の需要をシミュレーションにより予測し、地域で入手可能な再生可能エネルギーを最大限用いて、この需要を満たすようにエネルギーを分配する。この中で、特定の施設あるいは一般家庭で使用できなかったエネルギーは、別の施設／一般家庭に供給を行う。
- エネルギー消費の制御
 各施設や家庭内の機器のエネルギー消費についても、一定の制御を行う。
- 需給調整によるエネルギーの自給自足の実現
 予測した需要と実際の需要の相違については、地域エネルギーネットワーク内の蓄電池や EV への充電、その逆の蓄電池や EV からの地域エネルギーネットワークへの給電を行うことも通じて、調整を行う。再生可能エネルギーの発電（熱）量の大幅な変動が発生した際には、空調を中心とした地域の各施設のエネルギー消費を制御することで、エネルギーネットワーク内でできる限りの自給自足を実現する。
- 系統電力網との連携
 再生可能エネルギーだけで自給自足ができない場合には、需要家側の要望に答えるように、系統電力網からエネルギーの調達を行う。
- 他地域の CEMS との連携
 別の地域の CEMS と連携して、地域内で使用できなかったエネルギーを CEMS 間で融通する。
- 大規模災害時のライフライン
 系統電力網が使用できなくなるような大規模災害発生時には、地域に存在する避難所に対し、避難者の生活に必要なエネルギーを供給することを優先的に行う。

2.2 「同時同量」原則の下での電力需給制御

このような電力の需給制御を行う際の最大の制約要因は、電力ネットワークでは、供給量と消費量が一致する「同時同量」が必要とされることにある。独立したエネルギーネットワークで同時同量の原則を達成するためには、再生可能エネルギー側の発電（熱）量の変動を、蓄電池やエネルギー消費の制御で吸収することが必要とされる。

蓄電池の容量が限られているような状況で、電力ネットワークの同時同量を実現するためには、需要家側の消費を正確に予測することが必要になるが、現状では、需要家側のエネルギー消費（動向）が明らかでない。特に、これま

では、事業所、施設、家庭などの需要家側は、1ヶ月単位で使用したエネルギー（キロワット時）の把握に留まることが大半であった。

今後、一般家庭を中心にスマートメーターが導入されることで、1時間や30分といった周期でのエネルギー使用の変動を把握することが急速に進むと予測されるが、地域レベルでのきめの細かい電力制御のためには、空調、照明、動力といった用途別のエネルギー消費変動の把握が求められる。しかしながら、このような情報を把握した上で、エネルギー消費のピークをどのようにして低減するか、あるいはピークの時間をシフトできるか、といった判断が可能な需要家は、現状では限られている。

2.3 CEMS 実現のためのシミュレーション

このように、ここで考える CEMS を実現するには、必要十分な情報を収集した上で、その情報に基づいた適切な判断が欠かせない。即ち、CEMS は、以下を達成し、「同時同量」を実現しなければならない。

- 予め各施設や家庭で必要とされる電力消費量を正確に予測する。
- 再生可能エネルギーの変動を吸収するため、予測した消費量の内訳から、外部から使用量を制御しても、サービスの品質低下を極力抑えられるよう、詳細に状況を把握し、個別の設備を制御する。

このような CEMS における制御システムでは、入力として、以下のような情報に基づいて、地域エネルギーネットワークの振舞い（エネルギーの融通）やその効率を、事前に推定することとなると考えられる。

- 入手可能な再生可能エネルギーの量とその安定性
- 各施設／家庭毎に、用途毎でのエネルギー使用量とその時間変動
- 地域で使用できる蓄電池や EV の容量

これらのことから、我々が現在開発しているシミュレーションソフトウェアは、CEMS の実現に向けて、CEMS の設計・構築、及び、実際の運用の段階で、以下のような用途を想定できると考えている。

（設計・構築）

- 地域の再生可能エネルギーについて、その変動特性を含む発電（熱）能力と、地域の需要家の時間変動を含む需要動向を加味して、環境負荷の低いエネルギー融通の方式（ネットワーク）を求める
- 構築しようとしている CEMS によるエネルギー制御に有効な情報や制御方式を検討する

（運用）

- 前日（あるいは数時間前に）エネルギー需要を予測し、限られたエネルギーをどのように分配するか、もしくは足りないエネルギーはどのようにして調達するかを決定する。
- CEMS のエネルギー供給側あるいは需要家側の構

成が変更された場合、どのようにエネルギー融通を再構築すべきかを求める。

- 需要家側で省エネルギー化を進めた際、それがどのように CEMS の構成員全体にとっての利得となるか、その仕組みを明らかにし、省エネルギー化の動機付けとする。

3. シミュレータの概要

以上のような CEMS の考え方、また、その中でのシミュレーションの役割を踏まえ、著者らが現在開発を進めているエネルギーネットワークシミュレータの概要を述べる。

3.1 前提

このシミュレータでは、一定の地域内で、公共施設や一般家庭を相互に接続して構成される CEMS を前提としている。このネットワークに参加している各公共施設・一般家庭は、それぞれの施設・家庭の特徴を反映したエネルギー利用を行っている。その一方で、太陽光発電や小水力発電といった再生可能エネルギーやガス・コージェネレーションなどの設備も持っていることを仮定している。

このような地域において、CEMS の役割は、各設備で産出されるエネルギーを地域内で利用し、地域のエネルギー利用の全体最適化を実現することである。そのため、CEMS は、施設・家庭間でエネルギー融通の調整を行う。地域内の設備で生成されたエネルギー（主に電力）は、一定の指標と各施設の需要に基づき、最適な配分がなされる。地域内で必要とされる電力が、発電設備から供給される電力よりも多い場合は、必要に応じて系統電力網など外部から補充することになるが、その場合でも、各施設が個別に購入する代わりに、CEMS で一括して購入して配分する。

施設・一般家庭が CEMS に通知するエネルギー需要は、様々な「空間情報」に基づいて算出される。例えば、空調が必要とする電力は、ある時点での外気温と室内の気温に基づき、設定温度を維持するのに必要とされる熱量から算出可能である。このような環境データに加え、施設の稼働状況（来館者数等）や利用状況（イベント内容等）、家庭ごとの生活パターンなど、より施設等の特性に即した情報がある。これらの情報は、施設に配備されたセンサーや、そのような空間に配備された機器やクラウドサーバを統合した情報システムから得られる。

3.2 目的

以上の前提の下で、本シミュレータは、以下の各項目の検討・検証を行うことを目的としている。

- エネルギーネットワークのアーキテクチャ
CEMS 内でエネルギー融通を行うために必要なエネルギーネットワークの構成を検討する。
- エネルギー配分の最適化方式
ネットワークを構成する各施設・家庭の需要を満たし、何らかの指標について全体最適化されたエネルギー

配分を行う方式を検討する。

- 空間情報の最適化に対する必要性・有効性
CEMS を構成する施設に関する様々な情報（温湿度や施設の稼働率など）の、エネルギー最適化に対する必要性や有効性の評価・検証を行う。

3.3 要件

これらの目的を実現するため、シミュレータは以下の各要件が実現されてなければならない。

- CEMS の構成を変更可能
施設・設備や、施設の空間など、CEMS を構成する要素のモデルはすべて変更可能でなければならない。
- 時系列によるシミュレーション
時間帯によりエネルギーの利用状況は変化する。また、蓄電池や揚水発電などを活用したピークシフトもエネルギー利用において重要となっている。これらを踏まえた検証のため、時系列でのシミュレーションができなければならない。
- 最適化の指標・最適化方式が交換可能
エネルギー配分の最適化に当たっては、そのための指標や最適化方式は様々であり、それによって得られる効果も異なる。そこで、これらの方式を比較できなければならない。
- 実測・モデルに基づく環境情報の利用
CEMS を構成する各設備の発電やエネルギー消費は、気象条件や施設の稼働状況など、環境の影響を大きく受ける。そのため、シミュレーションにあたっては、実測データだけではなく、気温・日照や施設の混雑度などに基づいて、シミュレーション可能でなければならない。

3.4 構成

以上の要件に基づき設計した本シミュレータの全体構成を図 2 に示す。なお、一般に、エネルギーマネジメントシステムでは熱やガスなども管理対象となるが、ここで考える CEMS の管理対象とするエネルギーは、主として電力である。但し、シミュレータの構成は電力のみに限定したのではなく、熱なども含んだり、複数のエネルギーを組み合わせても対応できる構造となっている。

このシミュレータでは、CEMS は、複数の「施設モデル」（ここでは一般家庭も施設に含む）と、それらの間で電力交換を行い、全体最適化を実現する 1 つの「電力交換モデル」から構成される。更に、施設モデルは、実際に電力を発電・使用する「電力システムモデル」と、その電力利用に影響を与える「物理空間モデル」から大きく構成される。

シミュレーションは、設定された単位時間ごとに、各施設の発電量と電力需要を算出し、それに基づいた電力交換を行って、その結果をログとして出力すること進行する。本節では、以上の各構成要素の詳細を述べる。

3.4.1 施設モデル・電力システムモデル

施設モデルは、一定規模以上の施設（ホールやビル等）の一般的な電力設備を踏まえ、複数の独立した電力システムモデルの集合として構成される。電力システムには、受電系統と送電系統があり、それぞれ、電力を消費する系統、生成する系統である。

通常、大規模な施設の場合には、動力（エレベータ等）や空調、弱電（電灯等）等の設備があり、それに対応する受電系統を持っている。一方、送電系統は、太陽光発電や小水力発電の設備に対応するものであり、付加的に蓄電池を持つ場合がある。送電/受電システムモデルは、その配下に、これらの設備に対応するモデルを持つ。

電力システムは、通常、CEMS の間で電力をやりとりするための単一の送受電設備を持っている。一般に、大規模な施設では、受電設備において、高圧（6,600V）から 100V や 200V などの低圧への変圧を行う。このような変電設備では一定の電力ロスが生じるが、現在実用化が進められている SiC や GaN のパワーデバイスを用いることでこの電力ロスを低減できることが期待されている。本シミュレータの構成により、このような新しいパワーデバイスの効果を見積もることも可能となる。

3.4.2 物理空間モデル

エネルギーを生成・消費する設備の振る舞いは、環境や施設の状態によって大きく変化し、逆に、環境や施設に影響も与える。例えば、太陽光発電の場合は、日照・天候により発電量は変化する。また、空調の場合では、施設に多くの人が訪れていたり、外気温との差が著しかったりする場合には空調の稼働率は上昇し、その結果、環境の温度は変化する。よって、このような施設内の部屋やエレベータといった「物理空間」の振る舞いと、各系統との相互作用も含めたモデリングを行うことで、より精密なシミュレーションが可能となることが期待できる。

そのため、このシミュレータでは、各施設の物理空間をシミュレートする「物理空間モデル」を持つ。物理空間モデルは、各系統モデルからのリクエストに従い、物理空間の温度などの状態を「環境パラメータ」として提供する。また、各系統に電力が供給された結果、環境に供給されるエネルギー量を「物理作用データ」として各系統から入力として受け付け、その状態を変化させる。

なお、物理空間モデルは、特定の電力系統や設備に付随せず、独立したモデルとなっている。これは、エネルギーでは、空間を介した設備間の相互作用が発生するためである。例えば、室温が変化すると、空調の振る舞いだけでなく、湯沸かしなど他の設備の振る舞いも変化する。また、このような独立した構造とすることで、物理空間モデルとして、既存の物理シミュレータ（Modelica[5]等）と連携した動作も容易となると考えられる。

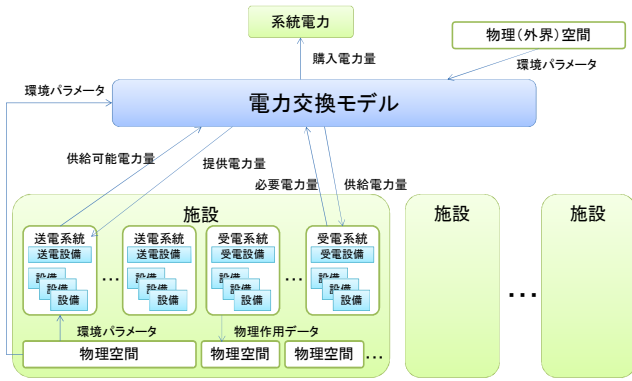


図 2 シミュレータの全体構成

Figure 2 Architecture of the simulator.

3.4.3 電力交換モデル

以上のように、各電力システムモデルから得られた情報を元に、シミュレータは、各送電システムから得られる電力の受電システムへの配分を「電力交換モデル」が決定する。各システムは、電力交換モデルに供給可能電力量（予測される発電量）・必要電力量を通知し、モデルは、別途与える配分アルゴリズムに従って、実際に各受電システムに配分する電力量を決定する。具体的なモデルの振る舞いは3.6でさらに説明する。

3.5 シミュレーションの流れ

設備の電力利用量は、設備の種類と、時間帯によって大きく変化する。そこで、本シミュレータは、時間を一定の単位時間で区切って1サイクルとし、それを繰り返すことで時系列のシミュレーションを行う。シミュレーションの全体の流れを、図3に示す。

シミュレータは、まず、初期設定を行う。初期設定では、CEMSの施設や設備の構成、各モデルの初期状態を、設定ファイル等に従ってセットアップする。

初期設定完了後、実際のシミュレーションが行われる。シミュレーションは、上述のように単位時間に相当する1サイクルを繰り返すことによって進行する。

サイクルの中では、まず、施設を構成する物理空間の環境パラメータが算出される。このパラメータに基づいて、各送電システムではそのサイクルで生成可能な電力量、受電システムではそのサイクルで必要とする電力量が算出される。この値は、各システムを構成する設備モデルが算出した数値の総和に、受電/送電設備の影響を加味した値である。

これらの電力量は、電力交換モデルに通知される。電力交換モデルは、この電力量に基づき、受電システムへの最適な配分を算出する。算出された電力配分は、各受電システムに通知され、また、送電システムにも、それぞれのシステムから使用された電力量が通知される。受電システムは、この結果に基づき、物理空間の状態を更新する。送電システムに蓄電池があり、発電される電力よりも実際に使われる電力が少ない場合には、送電システム側の判断により蓄電されることとなる。これらの算出結果は、ログとして出力される。以上で1サイクルが終了し、時刻が進められた上で、サイクルの最初に戻る。

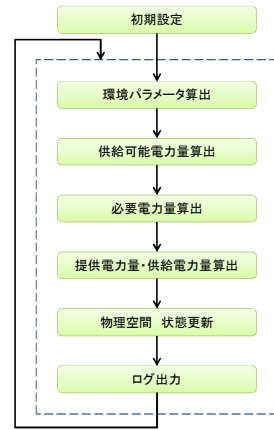


図 3 シミュレーションの流れ

Figure 3 Flow of simulation.

3.6 電力交換モデルにおける最適化アルゴリズム

電力交換モデルは、入力として送電システムの発電量と受電システムの必要電力量を受け取り、最適な配分を行う最適化アルゴリズムを適用した上で、各受電システムに実際に配分する電力量を出力する。

この最適化アルゴリズムとしては、様々な観点から選択可能である。そのため、このシミュレータでは、電力交換モデルを独立して変更可能な構成としている。

アルゴリズム選択の観点として、まず、最適化に用いる指標がある。CEMS内での全体最適化を行うため、この指標は、全ての施設で統一されていなければならない。このような指標には、エネルギー種別（太陽光、小水力、商用電力、ガス等）によるCO₂排出量、コスト、エネルギー種別の選好度などがある。このような指標に対し、CEMSが一括して評価し配分を決める場合もある一方、各施設が個別に行った評価結果をCEMSが組み合わせ、全体としての評価値を最大化させて配分を決める場合もある。

また、どの期間を対象として最適化するかも検討しなければならない。単位時間内、即ちシミュレーションの各1サイクルで最適化できればよい場合と、複数のサイクルからなる一定期間（1日や1週間等）全体で、評価を最大化する必要がある場合などが考えられる。例えば、空調の場合、氷蓄熱式の空調などでは夜間に製氷するためにエネルギー消費が増大する。このような場合、エネルギー利用の最適化は、1時間のサイクルではなく、1日を通した最適化により実現されると考えられる。

4. まとめ

著者らは、現在進みつつある再生可能エネルギーの効果的な活用に向けた取り組みとその課題を踏まえ、特に、一定の地域内に存在する公共施設や一般家庭の間でエネルギー融通を行う、地域エネルギーマネジメントシステム（CEMS）について、その有効性検証のためのシミュレータの開発を進めている。本稿では、著者らが想定するCEMSの姿を概観し、本シミュレータについて概要を説明した。

このシミュレータでは、CEMS内の太陽光発電などの発電施設による電力を、各電力消費設備に対し、CEMS全体で共通の基準に基づいて最適配分を行う。将来のエネルギーネットワークのあり方の検討を行うため、CEMSの構成や評価基準、配分アルゴリズムなどは交換可能な設計としている。また、各施設における発電量や電力需要の算出は、温湿度や施設稼働状況など、対象となる施設・設備が置かれている物理空間の状態に基づいて行える構成となっており、単に実測値に基づくのみでなく、物理シミュレータなどの他のシミュレータと連携したシミュレーションも可能な設計となっている。

著者らは、今後、本シミュレータを使用し、公共施設を含むCEMSのあり方・有効性について、検証することとしている。この中では、CEMSに参加する施設や家庭の構成・組み合わせや、最適なエネルギー配分方式などの検討、SiC/GaNによるパワーデバイスの効果の予測などを行う。また、最適なエネルギー配分に有効な物理空間の情報とはどのようなものか、また、そのためにどのようなデバイスを設置し、インテリジェントな空間にすべきかなど、現在進みつつあるIoT (Internet of Things) やビッグデータ活用も踏まえた検証を行う予定である。

謝辞 本稿の執筆およびシミュレータの開発にあたっては、本事業のアプリケーション研究開発グループリーダーである阿草清滋京都高度技術研究所所長、また、南山大学蜂巣吉成准教授から重要な示唆をいただいた。なお、本研究は、独立行政法人科学技術振興機構 スーパークラスタープログラム 京都地域「クリーン・低環境負荷社会を実現する高効率エネルギー利用システムの構築」によりなされたものである。

参考文献

- 1) 富田泰志, 犬塚達基, 河村勉, 中野道樹: 社会インフラの最適化を支えるエネルギーシミュレーション技術, 日立評論 (2013).
- 2) 林秀樹, 豊田充, 和知功: 電気エネルギー貯蔵システムに関わる国際標準化への取組, 電気評論 (2014).
- 3) 福本恭, 寺野隆雄: 電力地域エネルギーマネジメントの取組みとスマートシティを想定したシミュレーション技術の課題, 第4回横幹連合コンファレンス (2011).
- 4) 岡部寿男: 情報通信・エネルギー統合技術の研究開発, システム/制御/情報, Vol. 55, No. 6 (2011).
- 5) Modelica Association, <https://www.modelica.org/>.