



スマートコミュニティシミュレーションのための エネルギーフローモデル

所 健一*・福山 良和**

Energy Flow Models for Smart Community Simulations

Ken-ichi Tokoro* and Yoshikazu Fukuyama**

Key words: Smart Community, Simulation, Energy Flow

1. はじめに

低炭素化による持続可能な社会の実現は、世界的な潮流となっており、先の COP21 で改めて各国の CO₂ 削減目標も設定されている。地域全体の低炭素化・エネルギー消費の最小化を狙うスマートコミュニティは、この世界的な潮流に乗り、我が国および、特に新興国の低炭素型持続可能な社会の実現のみならず、東日本大震災後の東北復興を検討する際の前提となる新しい地域社会の考え方である。日本政府においても、COP21 等の海外情勢を受け、新しいエネルギー革新戦略がまとまりつつあり、この中で産業・家庭・運輸など様々な分野を対象とした新しい省エネ対策が検討されている¹⁾。

社会システム全体を対象とするスマートコミュニティは、様々な分野の集合体と考えることができる。従来、電力システム、ガスシステムなどのエネルギー供給側と、各種産業システム、ビル・家庭などの民生システム、交通システムなどのエネルギー消費側の各分野では、分野毎また対象とする問題毎に、静的・動的な様々なモデルが考えられてきている。しかし、スマートコミュニティ全体の低炭素化・エネルギー消費最小化には、エネルギー供給側及び消費側の各分野をエネルギーの観点で同じレベルでモデリングを行い、これらの分野が連携されたスマートコミュニティ全体のエネルギーモデル化が必要であり、これまで十分な検討がされてきていない。

電気学会では、2012年4月～2015年3月の期間で「スマートコミュニティ実現検討特別研究グループ」を設置し、スマートコミュニティ全体のエネルギー評価が可能なモデルの構築を行ってきた²⁻⁶⁾。本稿では、Step.1として開発したスマートコミュニティモデルおよびその活用、今後の展開について解説する。

2. スマートコミュニティモデルの考え方と意義

スマートコミュニティのモデルは、スマートコミュニティが何であるかという定義に当てはまったものでなければならない。しかし、残念ながら、まだ、スマートコミュニティの定義は明確になっているものがなく、今回の特別研究グループでは、Step.1のモデルを作成する上での前提として、スマートコミュニティとは、「再生可能エネルギーの大量導入、コジェネ、エネルギーマネージメントにより、省エネ・節電とエネルギーの安定供給を同時に実現する未来型コミュニティ」とした。これに基づき、以下の前提条件を考えた。

- ①スマートコミュニティ全体を通して、エネルギー収支のみをモデル化する。
- ②各分野間の相互作用についても、エネルギーフローの上での相互作用のみをモデル化する。
- ③各分野のモデルに関しては、様々な設備を考えるのではなく、基本的には、各分野で最も代表的な設備構成のみを最小限で作成する。モデルの追加については、モデルの利用者が追加するか別途、調査専門委員会などを設置することを検討する。なお、どのような設備構成とするかは様々な分野の考えを取り入れ議論によって決めていく。
- ④各分野のモデルの機器特性・負荷などのパラメー

* 一般財団法人電力中央研究所システム技術研究所
System Engineering Research Industry, Central Research Institute
of Electric Power Industry.

** 明治大学総合数理学部
School of Interdisciplinary, Mathematical Sciences, Meiji
University

タ値は代表的な値を提供するか、代表的な値がある情報源を提供する。

- ⑤本委員会はスマートコミュニティ全体のエネルギー収支が計算できるモデルのみを提供する。従って、運用方法は、基本的に利用者が入力する。運用方法は、最適化やその他の意思決定方法で決めることも可能であるが、これらの付加的な仕組みは、モデルの利用者の開発にゆだねる
- ⑥モデルは、専門家だけで利用するのではなく、一般の技術者も利用しやすいように Excel シートで構築する。

図1にモデル全体のExcelシートのイメージを示す。一般にモデルを考える場合、設備計画用、運用計画用、運用制御用のモデルが考えられるが、ここでは、運用計画用のモデルを考えている。また、モデル依存にならないように考えており、モデルはあくまでも器であり、パラメータを変えることによって様々なケースに対応可能である。さらに、各分野モデルは、その使用・不使用により、様々なスマートコミュニティの規模に対応できると考えている。例えば、工業団地のような規模では、鉄道や水処理設備まではいらないのでモデルとしては不使用とするなどである。

このような分野毎のモデルを統合したスマートコミュニティ全体のモデル化を行う意義は、分野毎の個別最適化ではなく、分野間の相互作用により、コミュニティ全体の全体最適化が有効になるかどうか評価することである。この分野間の相互作用としては、例えば、以下のようなことが考えられる。

- ①ピーク時の電力削減を目的とするデマンドレスポンス(Demand Response: 以下、DR)の要求量を分野毎にどのように配分すれば有効か検討する。
- ②分野の負荷を他分野とピークが異なるように調整することにより、コミュニティ全体のピークシフトを実現する。例えば、水処理分野において、水質が保たれる範囲で、下水管に貯留させ下水処理を行う時間をずらすことによりピークをシフトす

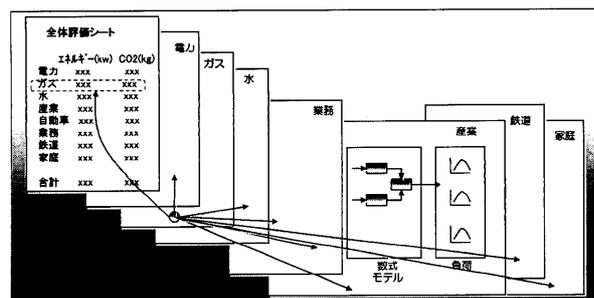


図1 Excelシート全体像

るとか、浄水場の配水池を有効に利用することにより、他分野とピークをずらした送水運用を行う。また、鉄道分野において、混雑度を考慮しながら、ピーク時の鉄道本数を調整するなどである。

- ③電気自動車(Electric Vehicle: 以下、EV)を移動するエネルギーと考え、例えば、家庭分野で夜間充電したEVを業務分野や産業分野に移動させ、昼のピーク時に放電させる。

これ以外に電力市場の導入の有効性検討やコミュニティ全体での省エネを実現するためのスマートコミュニティ全体最適化を大規模最適化問題として考えた研究⁷⁾など、様々な研究・技術検討に利用することが考えられる。

3. スマートコミュニティモデル

スマートコミュニティモデル全体のモデル構成は図2のようになっている。電力・ガス・水処理分野というエネルギー供給側と、産業・業務・家庭・鉄道分野というエネルギー需要側に分かれており、各分野間でエネルギーフローがあり、スマートコミュニティ全体としてエネルギーが供給され消費されるというモデルとなっている。この際、エネルギーの供給と需要に伴い、CO₂が排出されコストのやり取りがある。これにより、スマートコミュニティ全体で、どのようなエネルギーの流れになり、CO₂がどの分野でどの程度排出されるか、また、全体でどのくらいのエネルギーが供給消費され、CO₂が排出されるかなどの定量的な評価が可能となる。また、従来の運用方法と、省エネ対策等をした運用を比較することにより、省エネ対策の効果等を定量的に評価できる。

3.1 全体モデル

全体モデルでは、スマートコミュニティ全体に対するエネルギーの供給と消費、およびコスト評価を行うことが可能である。このため、スマートコミュニティ

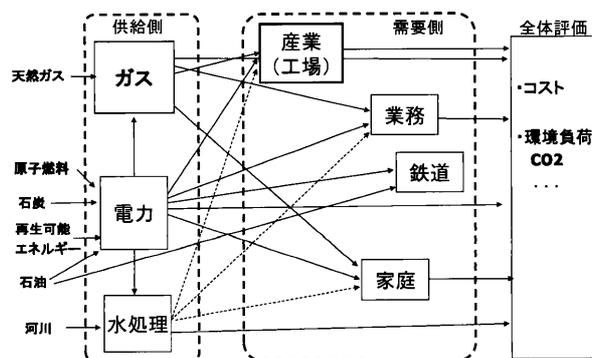


図2 スマートコミュニティモデル全体のモデル構成

の各分野への電力とガスの供給および各分野での消費を集計し総和を求める。電力に関しては、各分野でのDRによる消費削減量を明示する。各分野のCO₂排出量は、エネルギー消費にCO₂原単位を乗じて算出する。モデル全体の評価は、エネルギー使用量やCO₂排出量であり、以下に示す供給側・需要側モデル双方よりも高い概念に位置付けられる全体モデルにて集計される。この全体モデルの集計値がスマートコミュニティ全体のコスト及びCO₂排出量となる。以下の各モデルで変更できるパラメータが説明されているが、このパラメータを変更することにより、そのパラメータの変更が、スマートコミュニティ全体にどう影響してくるかがExcelシート上で自動計算され、その結果としてスマートコミュニティ全体のコスト及びCO₂排出量に変更される。

3.2 エネルギー供給モデル³⁾

エネルギー供給側のガス・電力・水処理の各分野は、ガスモデル、電力モデル、水処理モデル(水処理も広くエネルギーを供給していると考え)として、個々にモデル化される。個々にモデル化されたエネルギー供給側のモデルは、需要側の各モデルにそれぞれのエネルギーを供給する。エネルギー供給モデルの各エネルギー出力と各需要側モデルの各エネルギー入力の値は、本スマートコミュニティモデルの中では整合している。

(1) ガスモデル

ガスの供給形態には、おもに海外から輸入されるLNG(液化天然ガス)を発熱量調整しガス導管を利用して需要家に供給する都市ガス事業と、プロパンガスボンベを用いてLPG(液化石油ガス)をオンサイトで需要家に供給するLPガス事業があるが、ここでは、都市ガス事業のみを対象としている。送出するガスの持つエネルギーと比較してガス製造に必要なエネルギーは非常に小さく、都市ガスの製造効率は99.5%とも言われている。また、輸送においては、電力のようなロスが発生せず、輸送効率は100%とみなすことができる。以上より、ガス分野は、ガスエネルギーのソースとしてのみモデル化した。つまり、各分野に必要なガス量をそのまま供給する。

(2) 電力モデル

電力分野は、発電・送配電などにわけてモデル化することができるが、Step.1においては、送配電のネットワーク部分はモデル化せず、エネルギー源となる原子力・火力・水力・再生可能エネルギーなどの各種発電設備のベストミックスを評価できるモデルとしている。原子力・石油火力・石炭火力などの従来型発電

は、燃料が入力された際の電気エネルギー出力及びCO₂排出量を特性として記述し、1時間毎の発電量が計算できるモデルとした。従って、スマートコミュニティ全体から見ると石油・石炭などの発電原料を外部から購入するモデルとなっている。また、水力及び再生可能エネルギーに関しては、1時間毎の発電量を数値として入力できるようにしている。他分野で必要となる全体の電気エネルギーに対し、各発電種別の発電比率を、全体を1.0になるように入力し、この比率に基づいて、各発電種別の発電量が決定するような計算式となっている。この際、各発電種別の単価、発電量、および比率により、平均の発電単価が計算できる。

(3) 水処理モデル

水処理分野は、生活用水を主体に供給する上水道と、家庭・工業排水を処理する下水道に分けられる。各々設備が異なるため、別々なモデルを設けている。上下水道施設では、扱う水量がエネルギー消費に大きく関連しており、扱う水量を時間的にシフトすることで、エネルギーピークをシフトすることができる。そこで、Step.1では、水処理設備および水処理プロセス自体はモデル化せず、上下水道施設で扱う水量をエネルギー量に換算して、施設で必要となるエネルギー量を求め、外部および施設内のエネルギー供給機器で必要なエネルギーを供給することで、エネルギー収支が計算でき、かつ環境負荷としてCO₂排出量が計算できるモデルとした。

①上水モデル

上水モデルは、生活用水をつくる「浄水場」と浄水場でつくられた水を一旦貯留する「配水池」から成る構成とし、扱う水量を時間的にシフトするために、浄水場、配水池をバッファとして浄水量および配水池への送水量を調整できる仕組みとしている。施設で必要なエネルギーは外部から調達する電力・ガスに加え、浄水場内の再生可能エネルギー、コジェネ、蓄電池、ボイラ等から供給する。

上水モデルでは、再生可能エネルギー発電量、DR要求量、水需要を固定値として与え、浄水量、配水池への送水量、コジェネのガス使用量、蓄電池の充放電量を決定変数とし、コストおよびCO₂排出量が計算可能である。この際、配水池上下限值、各機器の出力上下限值、購入電力の上下限値が設備制約となる。なお、水需要は各分野の水道使用量の合計ではなく、水道モデル側で固定値として与え、上水道設備で単位水量当たり必要とする電力量・熱量(原単位)から電力負荷と熱負荷に換算する。図3に上水モデルを示す。

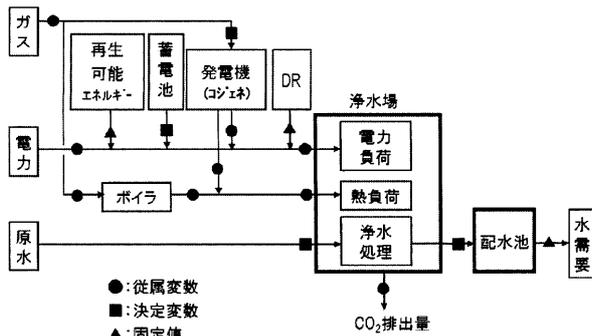


図3 上水モデルの構成図

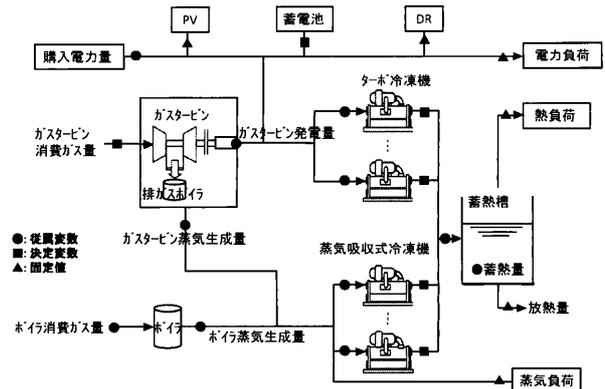


図5 産業モデルの構成図

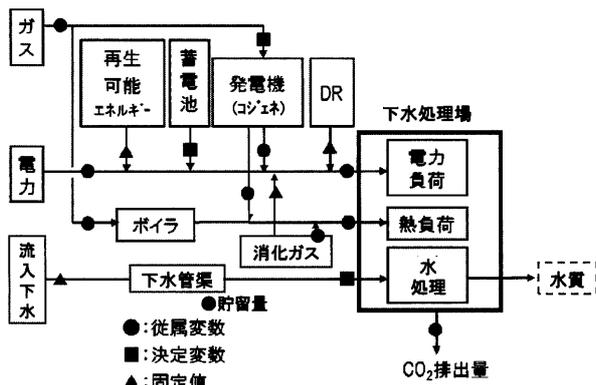


図4 下水モデルの構成図

②下水モデル

下水モデルは、家庭・工場排水を集める「下水管渠」と下水を浄化して放流する「下水処理場」からなる構成とし、下水管渠をバッファとすることで、下水処理場の処理水量を調整できる仕組みとしている。エネルギー供給は上水モデルと同様とした。

下水モデルでは、流入下水量、DR 要求量、再生可能エネルギー発電量を固定値として与え、揚水量、コジェネのガス使用量、蓄電池の充放電量を決定変数とし、コストおよびCO₂排出量が計算可能である。この際、下水管渠の上下限值、各機器の出力上下限值、購入電力の上下限值等が設備制約となる。揚水量に対し、下水道設備で単位水量あたりに要する電力量・熱量(原単位)から電力負荷と熱負荷に換算する。図4に下水モデルを示す。

3.3 エネルギー需要モデル⁴⁾

エネルギー需要側の産業・業務・家庭・鉄道の各分野は、産業モデル、業務モデル、家庭モデル、鉄道モデルとして、個々にモデル化される。産業・業務・家庭については、電力・ガス等から1次エネルギーが供給され、各分野のユーティリティ設備で2次エネルギーに変換され、各分野の2次エネルギー需要分に合う量が供給されるというモデルとなっている。従って、1時間毎の各分野の2次エネルギー需要の1日分

が与えられると、必要な1次エネルギーが明確になり、この量がエネルギー供給側から供給されるというモデルとなっている。鉄道に関しては、都市部での電車のみを対象とし、時間毎の本数を入力することにより、時間毎の電力消費量が計算されるモデルとなっている。

(1)産業モデル

産業分野は、業種毎に工場のユーティリティ設備および生産設備も異なっており、これを全て扱う事は困難である。従って、組立加工分野を一例として扱い、このユーティリティ設備をモデル化し、生産設備側を負荷としてブラックボックス化し、生産設備側の様々なエネルギーの1時間毎の負荷値を扱い、DRも扱う。図5に産業モデルの構成図を示す。図5の産業モデルは、電気学会産業応用部門「情報知能システムの新展開とその産業応用調査専門委員会」がまとめた「産業応用のための最適化ベンチマーク問題集」にある「エネルギープラント運用計画のための最適化ベンチマーク問題」で提案された産業向けエネルギーユーティリティモデル⁸⁾に太陽光(以下、PV)・蓄電池・DR要求量を追加したモデルである。図5の構成により、再生可能エネルギーおよびDRを利用したピークカットおよびピークシフトが検討可能である。

産業モデルでは、1時間毎の電力・蒸気・熱の各エネルギー負荷量、PV出力値、DR要求量、各設備特性を固定値として入力し、ガスタービンのガス消費量、ターボ冷凍機の起動停止と熱出力、蒸気吸収式冷凍機の起動停止と熱出力、および蓄電池の充放電量を決定変数として、エネルギーコスト及びCO₂排出量が計算可能となっている。

業務分野は、ショッピングセンターや大型ビルなど、大規模な施設を対象としており、今回、産業分野と同様とした。

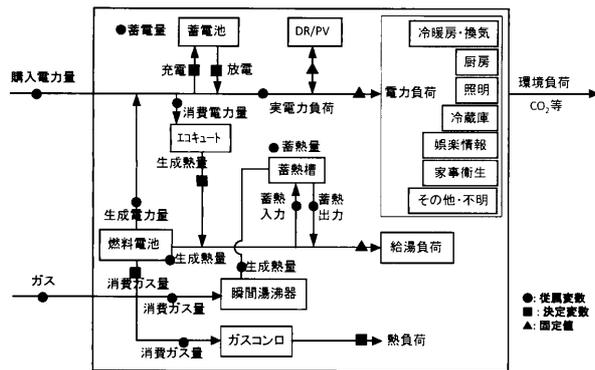


図6 家庭モデルの構成図

(2) 家庭モデル

家庭分野は、集合住宅、一戸建ての違いがあり、それぞれで特性が大きく異なる。しかし、今回のモデルにおいては、基本的に代表的な住宅モデルを作成している。集合住宅・一戸建ての違いは、入力データにより表現することとしている。宅内のエネルギー供給設備は、蓄電池、エコキュート、蓄熱槽、燃料電池、瞬間湯沸器、ガスコンロとし、電力負荷、給湯負荷、熱負荷を賄う。電力負荷は、冷暖房換気、厨房、照明など、最終電力需要機器をすべてひとつにまとめたものである。給湯負荷は風呂と台所、熱負荷はガスコンロを対象とする。これらにより、再生可能エネルギー・蓄電池およびDRを利用したピークカットおよびピークシフトが検討可能である。固定値および決定変数などの考え方は、産業モデルと同様である。図6に家庭モデルを示す。

(3) 鉄道モデル

鉄道分野は、鉄道運行をはじめ、駅、車両基地、オフィス、発電設備等の様々な設備からなる。ただし、駅やオフィスは業務分野で取り扱うビルとみなし、鉄道モデルでは鉄道運行のみを取り扱う。鉄道運行において、主要なエネルギー源は電力とディーゼルであるが、電力を使用する電車のみを取り扱う。消費エネルギーは車両運行を変化させることにより、変化させることができる。しかし、それにより車両が混雑する、目的地への到着が遅くなる、乗車時間や待ち時間が長くなるなど、乗客への影響が出る。本モデルでは、鉄道運行を変化させることで一般化費用の考え方を導入し、消費エネルギーを変化させると共に、一般化費用がどのようにかわるかを見ることができるモデルとしている。

4. スマートコミュニティモデルの活用方法

分野毎のモデルを統合したスマートコミュニティ全体のモデル化を行う意義は、2つ考えられる。1つ目

の意義は、分野毎の個別最適化ではなく、分野間の相互作用により、コミュニティ全体の全体最適化が有効になるかどうか評価することである。もう1つの意義は、エネルギー価格の変更・新しい市場モデル導入により新しいコスト負担の考え方の確認および再生可能エネルギーの大量導入の評価ができることである。この2つの意義をもとに、文献⁵⁾では、スマートコミュニティモデルの活用シナリオとして6つのシナリオを考えている。このシナリオに基づき、富山市規模の都市を対象としたスマートコミュニティ全体のシミュレーションを実施することにより、CO₂排出量削減率、電力コスト削減率などの定量的評価を行っている。

5. 今後の展開

現在、電気学会では、電子・情報・システム部門において、スマートコミュニティ実現検討特別研究グループの後継委員会として、「スマートコミュニティモデルの活用・拡張調査専門委員会」を設置し、スマートコミュニティモデルの活用方法およびモデル拡張を検討している。以下にモデル拡張に関する検討内容例を示す。

- ①現状のモデルは、運用計画での利用を想定しており、設備計画にも利用可能となるように、各分野の設備の導入コストまでを考慮したモデル化が考えられる。
- ②現状は、簡単のため、負荷パターンを1パターンのみ入力可能となっているが、夏季・冬季・中間期の季節変動を考慮した負荷パターンの利用を検討することが考えられる。
- ③EVを夜間に家庭で充電して、職場である業務・産業分野で昼のピーク時に放電するなど、EVを移動するエネルギー源としてとらえ、モデルに導入することが考えられる。
- ④東北の震災復興、東南アジアの工業団地など、対象地域を決めた場合のスマートコミュニティモデルのパラメータの設定方法の確立が考えられる。
- ⑤各エネルギー負荷、PV発電量、DR要求量に対する実際のDR値などは、実際には不確定性を有しており、これをモデルに組み込むことが考えられる。
- ⑥現在は、エネルギーコスト及びCO₂排出量の削減のみを評価指標としているが、スマートコミュニティを人々が生活する場と考えれば、幸福度、快適性など他の指標の導入が考えられる。

6. まとめ

本稿では、電気学会のスマートコミュニティ実現検討特別研究グループで開発してきたスマートコミュニティ全体のエネルギー評価が可能なスマートコミュニティモデルの概要、活用方法、および今後の展開について解説した。スマートコミュニティは、輸出立国である日本の次なるインフラ輸出の柱となるべき技術と考えられる。今回開発したスマートコミュニティモデルが、日本シミュレーション学会に所属する様々なレベルの技術者が活用および研究に利用することにより、我が国のスマートコミュニティ技術が発展することを祈念している。

参 考 文 献

- 1) 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会：「エネルギー革新戦略中間とりまとめ」平成28年2月
- 2) 安田：「スマートコミュニティの定義とモデルの構築」平成27年電気学会全国大会 スマートコミュニティのモデリングと将来展望シンポジウム 1-H1-2(2015)
- 3) 山口・他：「スマートコミュニティにおけるエネルギー供給モデル」平成27年電気学会全国大会 スマートコミュニティのモデリングと将来展望シンポジウム 1-H1-3(2015)
- 4) 松井・福山・他：「スマートコミュニティにおけるエネルギー需要モデル」平成27年電気学会全国大会 スマートコミュニティのモデリングと将来展望シンポジウム 1-H1-4(2015)
- 5) 菅野・福山・他：「スマートコミュニティモデルの活用」平成27年電気学会全国大会 スマートコミュニティのモデリングと将来展望シンポジウム 1-H1-5(2015)
- 6) 所・福山：「スマートコミュニティモデルの課題と発展」平成27年電気学会全国大会 スマートコミュニティのモデリングと将来展望シンポジウム 1-H1-6(2015)
- 7) 佐藤・福山：「PSOを用いたスマートコミュニティの全体最適化」電気学会システム研究会 ST-16-011(2016)
- 8) 鈴木・岡本：「エネルギープラント運用計画のための最適化ベンチマーク問題」平成24年電気学会電子・情報・システム部門大会(2014)