

東北大学 長野 尚也*, 古林 敬顕, 中田 俊彦

持続可能で脱炭素な地域エネルギーシステムの構築に向けて、地域のエネルギー需給構造と再生可能エネルギー導入による効果を分析することが必要である。本研究の目的は、再生可能エネルギーの導入による地域エネルギーシステム内のエネルギー需給構造の変化を定量的に分析し、温室効果ガス排出量などのエネルギーシステムの性能を評価することである。対象地域エネルギーシステムは岩手県宮古市のスマートコミュニティである。宮古市スマートコミュニティでは市内 2 箇所に太陽光発電所を設置し、その電力を市内の公共施設他に供給している。本研究では、スマートコミュニティにおけるエネルギーフロー図を作成し、事業前後のエネルギーシステムの構造変化を分析した。事業の開始によって宮古市スマートコミュニティの一次エネルギー総供給量は 65.2 TJ/year から 53.5 TJ/year へ減少、エネルギー効率は 31.4 %から 38.3 %まで向上した。CO₂ の総排出量は 3593 t-CO₂/year から 2526 t-CO₂/year まで約 29.7 %削減された。また、需要家の中で最もエネルギーを消費している宮古市内の小・中学校を対象に、時系列の電力消費量データを活用し、用途別の電力消費量を推計するケーススタディを行った。その結果、最終エネルギー消費量の約 54 %が暖房用途に消費されており、そのうちの約 77 %は化石燃料であった。また、照明用途のエネルギー消費量は最終エネルギー消費量のうちの約 32 %であった。持続可能な地域エネルギーシステムを構築していくにあたり、再生可能エネルギー由来の電力を導入することに加えて、暖房用途の化石燃料の消費量を削減すること、高効率な照明器具の導入により照明用途のエネルギー消費量を削減することが必要である。

Analysis for energy supply-demand structure and system performance of smart community

Tohoku University Naoya Nagano*, Takaaki Furubayashi, Toshihiko Nakata

In order to design a sustainable and decarbonized energy system, it's necessary to analyze energy supply-demand structure and the effect of renewable energy introduction. The aim of this research is to quantitatively analyze changes in the energy supply-demand structure of the regional energy system by introducing renewable energy and evaluate the performance of an energy system. The target regional energy system is the smart community of Miyako city, Iwate Prefecture. They introduced solar power plants and distribute their electricity to public facility. It turned out that total primary energy supply decreased from 65.2 TJ/year to 53.5 TJ/year through drawing energy flows before and after the project started. In addition, the energy use efficiency improved from 31.4 % to 38.3 %. Total emission of CO₂ was reduced from 3,593 t-CO₂ to 2,526 t-CO₂. Furthermore, we classified the energy consumption of the elementary and junior high schools in Miyako city that consume the most electric power. As a result, 54 % of the total energy consumption was for space heating use and approximately 77 % of them were fossil fuels. And also, 32 % of the total energy consumption was for lighting use. In order to construct a sustainable regional energy system, in addition to introducing renewable energy power, it is necessary to reduce fossil fuels consumption for space heating and power consumption for lighting.

1. 緒言

2015年に国連サミットで採択された「持続可能な開発のための2030アジェンダ」にて、持続可能な世界の実現のための17の国際目標としてSDGsが設定された。SDGsの第11の目標「Sustainable cities and communities」に向けて、全国の自治体がスマートシティやスマートコミュニティ事業に取り組んでいる。スマートコミュニティに関する先行研究は、デマンドレスポンス、エネルギーマネジメントシステム(EMS: Energy management system)、エネルギー貯蔵のための要素技術に関する技術実証が多く、スマートコミュニティ事業の実装による地域のエネルギー需給構造の変化を定量的に分析した研究はみられない。そこで、本研究は、岩手県宮古市が取り組む宮古市スマートコミュニティにおけるエネルギー需給を分析し、温室効果ガス排出量の削減効果をエビデンスに基づいて評価することを目的とする。

宮古市は、2011年の東日本大震災におけるインフラへの甚大な被害を契機に「対災害性の向上」、「浸水地域の土地力の回復・向上」、「産業振興・雇用創出」を目的としたスマートコミュニティ事業に取り組んでいる。宮古合同発電会社が宮古市内の田老地区と津軽石地区の計2カ所にメガソーラー発電所を設置し、地域の宮古新電力(株)が市内の公共施設および電気自動車用の急速充電施設へ電力を供給している。また、PHV10台、EV4台によるカーシェアリングサービスを提供している。

2. 分析手法

岩手県宮古市のスマートコミュニティのエネルギーフロー図を作成し、現状のエネルギー需給を分析する。また、エネルギーフロー図からCO₂排出量やエネルギーシステム効率といったシステム性能を評価する。さらに、需要家施設の電力消費量およびエネルギー消費量を詳細に分析する。

本研究で分析するデータは、メガソーラー発電所の発電量(1時間値)、需要家施設の電力消費量(30分値)、需要家施設のエネルギー消費量とする。

2.1 電力需給バランス分析

ある地域エネルギーシステムにおいて発電所における発電実績データ $g(t)$ [kWh]と需要家施設の電力消費量データ $c(t)$ [kWh]から単位時間 t ごとの電力需給バランス $b(t)$ [kWh]を式(1)より算出する。ここで、発電所の電力が直接需要家へ送配電されるわけではない。

$$b(t) = g(t) - c(t) \quad (1)$$

$b(t) > 0$ のときはシステム内で余剰電力が生じ、系統電力へ売電する。また、 $b(t) < 0$ のときはシステム内では電力が不足し、系統電力から買電する。

2.2 エネルギーフロー図の作成

地域や施設内でのエネルギー需給を分析する手法としてエネルギーフロー図の作成が挙げられる。エネルギーフロー図は、資源から需要家までのエネルギーの流れを可視化したものであり、瀧田ら[1]によってエネルギーフロー図の作成方法が示されている。本研究では、需要家のエネルギー利用効率は産業部門の電力の利用効率86.7%、熱の利用効率58.3%[1]、業務部門は電力19.9%、熱89.6%[2]、家庭部門は電力34.5%、熱81.6%[2]、運輸部門は内燃機関自動車の効率を16.0%[3]とし、発電部門における各発電方法の発電効率は電力需給の統計[4]を参照する。

2.3 エネルギーシステムの環境性評価

エネルギーシステムのCO₂排出量をエネルギーフロー図作成により得られた一次エネルギー総供給量のうち化石燃料の消費量にそれぞれCO₂排出係数[5]を乗じることで算出する。

2.4 需要家の電力消費量の分析

本研究で扱う需要家施設の電力消費量データは30分ごとの時系列データである。この場合、1年間のデータの要素数は17,520個である。このデータから 48×365 の行列を形成するようなことを考える。このとき、行列の列ベクトルは d 日目の1日の変動を表す。また、行ベクトルは時刻 t の1年間の変動を表す。上述されるような行列を電力量の年間特性行列 \mathbf{E} と定義し、電力量データの行列 \mathbf{E} への行列化を定式化する。ある時間 T ($T=1,2,3,\dots,T_{\text{end}}$)における電力量 $e(T)$ [kWh]を考える。 $e(T)$ を行列 \mathbf{E} へ式(2)を用いて変換する。

$$\mathbf{E}=[e_{td}]=[e(t_{\text{end}} \cdot (d-1) + t)] \quad (t=1,2,3,\dots,t_{\text{end}}, d=1,2,3,\dots,d_{\text{end}}) \quad (2)$$

ここで、変換後の行列 \mathbf{E} は、 t_{end} 行 d_{end} 列の行列となる。この年間特性行列 \mathbf{E} を用いて、年間の電力消費量を分類し、用途ごとの電力消費量を推計することができる。電力量の年間データに影響を与える時間的要因は、時刻 t 、日にち d 、季節 s 、パターン p が考えられる。本分析では、ある季節 s 、日にち d 、パターン p の時刻 t における電力消費量はその時間特有の傾向を示すと仮定し、その時間の電力消費用途を特定する。行列 \mathbf{E} を季節 s 、パターン p により分類した行列 $\mathbf{E}^{(s)(p)}$ を考える。

$$\mathbf{E}^{(s)(p)}=[e^{(s)(p)}_{td^{(s)(p)}}] \quad (t=1,2,\dots,t_{\text{end}}, d^{(s)(p)}=1,2,\dots,d_{\text{end}}^{(s)(p)}, s=1,2,\dots,s_{\text{end}}, p=1,2,\dots,p_{\text{end}}) \quad (3)$$

季節 s 、パターン p の平均日負荷曲線 $f^{(s)(p)}(t)$ は式(4)で与えられる。

$$f^{(s)(p)}(t)=\frac{1}{d_{\text{end}}^{(s)(p)}} \cdot \sum_{d^{(s)(p)}} e^{(s)(p)}_{td^{(s)(p)}} \quad (4)$$

また、季節 s によって変動しない平均日負荷曲線を1年間にわたって積算した電力消費量を L_{base} [kWh]とすると、 L_{base} は式(5)より算出する。ここで、基準となる季節 s を $s=s_B$ とする。

$$L_{\text{base}}=\sum_p \sum_s \sum_t f^{(s_B)(p)}(t) \cdot d_{\text{end}}^{(s)(p)} \quad (5)$$

基準となる季節 s_B の平均日負荷曲線 $f^{(s_B)(p)}(t)$ を $f^{(s)(p)}(t)$ が上回る(下回る)季節 s の季節変動分のみを期間分だけ積算した電力消費量 L_{surplus_s} [kWh]は式(6)より算出する。

$$L_{\text{surplus}_s}=\sum_p \sum_t \{f^{(s)(p)}(t)-f^{(s_B)(p)}(t)\} \cdot d_{\text{end}}^{(s)(p)} \quad (6)$$

さらに、 L_{base} および L_{surplus_s} をそれぞれパターン p や時刻 t によって詳細に分類し、電力消費用途を特定する。

3. 分析結果

3.1 電力需給バランス分析

2016.12.01 – 2017.11.30の1年間における1時間ごとの発電量と全需要家施設の30分ごとの電

力消費量から算出した需給バランスを Fig.1 に示す。Fig.1 は需給バランス関数 $b(t)$ を降順に並び替えた図である。ここで、解析期間 (2016.12.01 – 2017.11.30) においても需要家が参入し、それに伴って電力消費量も増加していることに留意する必要がある。現在の宮古市スマートコミュニティにおいて、夜間や荒天時の電力消費量は系統からの買電に依存するため、電力を系統電力へ売電する時間より系統電力から買電する時間のほうが長くなった。また、電力消費量のうち系統からの買電量は約 53%であった。

3.2 宮古市スマートコミュニティのエネルギーフロー図とエネルギーシステム評価

宮古市スマートコミュニティのエネルギーフロー図を Fig.2 に示す。エネルギー消費量は「平成 28 年度燃料等使用調査票」に基づく。Fig.2 において、3.1 節の結果から、消費電力量のうち約 53% は東北電力(株)からの調達を想定し、電源構成比は実績値[6]を参照した。また、宮古市の市内の水力発電所、田老、津軽石を除く太陽光発電所、バイオマス発電所を考慮し、系統から購入する電力のうち約 28% は市内の発電所から供給されるとした。

需要家側は、DECC(非住宅建築物の環境関連データベース)の施設区分[7]により分類した。宮古市スマートコミュニティの全需要家の最終エネルギー消費量は 40.6 TJ/year であり、これは宮古市の業務部門全体の最終エネルギー消費量の約 4.5%を占める。最終エネルギー消費量のうち、電力を約 52%、化石燃料を約 48%消費している。化石燃料は灯油および重油が多く、そのほとんどが暖房用燃料として報告されている。需要家で最もエネルギーを消費しているのが「小・中学校」であり、エネルギー消費量は 16.0 TJ/year であった。次いで、「官公庁」と「スポーツ施設」の 6.85 TJ/year となった。また、運輸部門においては 2017.02 – 2017.09 まで 8 か月分の急速充電施設での充電量は 29.7×10^3 TJ/year であった。一般的に電気自動車の普及率はいまだ低い状況にあるが、今後、電気自動車の普及拡大により充電量も増大すると予想される。電気自動車の車両効率は内燃機関自動車の 16%と比較して高く、再生可能エネルギー由来の電力を供給することで、一次エネルギー供給量まで含めたエネルギーシステム効率の向上が期待される。

宮古市スマートコミュニティ事業開始前後のエネルギーシステムの性能評価値を Table1 に示す。TPES は 65.2 TJ/year から 53.5 TJ/year へ削減された。これは、田老発電所と津軽石発電所の稼働によって火力発電および木質バイオマス発電による損失分の一次エネルギー供給量が置き換えられたためである。事業開始前の損失エネルギーは 44.7 TJ/year、事業開始後の損失エネルギーは 33.0 TJ/year となり、エネルギーシステム効率は 31.4%から 38.3%へ向上した。また、事業開始前は 3,593t-CO₂/year あった CO₂ 排出量は、事業開始により 2,526 t-CO₂/year まで削減され、削減率は約

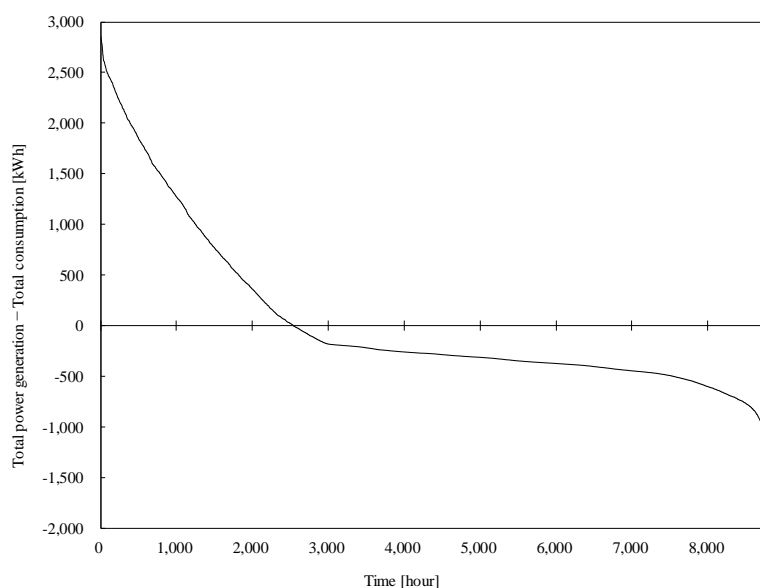
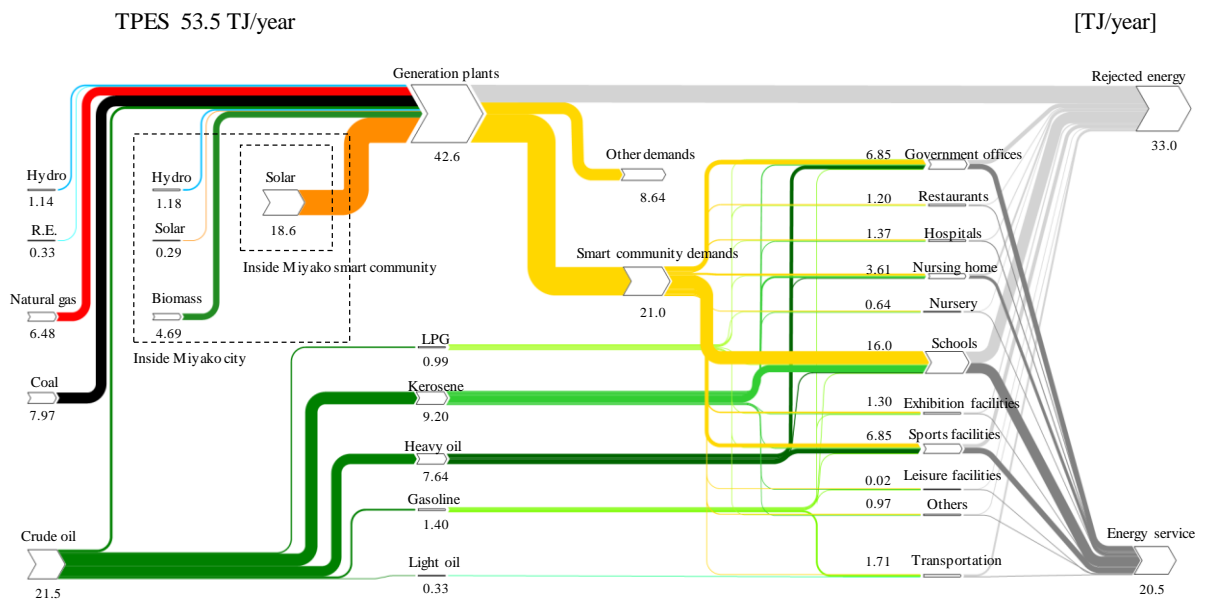


Fig.1 Electricity balances in Miyako smart community



Reference : 東北電力ファクトブック, <http://www.tohoku-epco.co.jp/ir/report/factbook/>, Accessed 2016/7/12
International Energy balances of OECD countries 2014, etc.

Aug.20.2018 N.Nagano@Nakata Lab.

Data : 宮古市,平成28年度燃料等使用調査票
宮古新電力(株),需要家施設の電力消費量(2016.12-2017.11)
宮古合同発電会社,津軽石および田老発電所発電量(2016.4-2017.3)

Fig.2 Energy flow of Miyako smart community

Table1. Evaluation of energy system before and after smart community project

	Before	After
TPES [TJ/year]	65.2	53.5
Energy loss [TJ/year]	44.7	33.0
Energy system efficiency [%]	31.4	38.3
CO ₂ emission [t-CO ₂ /year]	3593	2526

29.7 %となった。本分析では、CO₂ が削減される要因は、化石燃料由来の電力が再生可能エネルギー由来の電力に代替されることのみである。最終エネルギー消費量のうち約 48%は化石燃料であるため、需要家が直接消費している化石燃料は削減されない。また、電力消費量のうち約 53%は系統から購入しており、系統電力の発電構成の大部分を化石燃料が占める。

3.3 需要家施設のエネルギー消費傾向の分析

3.2 節において、宮古市スマートコミュニティの需要家の中で「小・中学校」が最もエネルギーを消費していた。そこで、「小・中学校」について、エネルギー消費量を詳細に分析し、脱炭素社会へ向けたエネルギー消費の在り方について考察する。

宮古市内すべての小・中学校を対象に電力消費用途を推測する。本分析では、季節を冬季($s=W$)、夏季($s=Su$)、それ以外($s_B=SpA$)の3つに分類し、電力消費パターン p は平日、休日の2つに分類する。冬季は 1/1-3/18, 11/26-12/31 とし、夏季は 6/25-9/9 とした。ここで、冬季の電力消費量は $s_B=SpA$ の電力消費量と冬季の超過電力消費量の和となっている。Fig.3(a)に分類した冬季の平日の平均日負荷曲線、Fig.3(b)に夏季の平日の平均日負荷曲線を示す。冬季は電力消費量が他の季節と比較して多く、どの時間帯においても2倍以上の電力を消費している。これは、宮古市現地にて実施したヒアリングの結果から、水道の凍結防止用のパネルヒーター等を設置する施設があり、冬季の施設管理に係る消費電力が多いためだと考えられる。また、夏季は深夜に消費される電力

が多い。これは、学校のプールの管理のために稼働している循環ポンプの影響であると考えられる。昼間の電力消費量は冬季に比べると小さいが、春や秋に比べると多いことがわかる。

Fig.3(c)に30分ごとの電力消費量データから推計した用途別の電力消費量を示す。Fig.3(c)において「Usual consumption」は季節に依存せずに消費している電力量であり、式(5)の「 L_{base} 」に相当する。そのうち、時間にも依存しない固定消費量(年間のうちの最小値)を、8,760時間積算した値が施設管理用途、それ以外を照明用途と考え、全体の電力消費量の約56%が照明用途、約18%が施設管理用途に消費されていると推計できる。また、冬季にのみ多い電力消費量の積算値「Surplus consumption in winter」は式(6)における $s=W$ に相当し、すべて暖房用途と考え、全体の電力消費量の約21%は暖房用途に消費されていると推計できる。同様に、冷房および循環ポンプ用途の電力消費量は全体の電力消費量の約5%だと推計できる。

また、Fig.3(d)に電力以外の燃料消費量も考慮した年間の用途別エネルギー消費量を表した図を示す。小・中学校の最終エネルギー消費量は14.9 TJ/yearとなった。ここで、3.2節の小・中学校の最終エネルギー消費量は「平成28年度燃料等使用調査票」を基にしたものであり、本分析では需要家の電力消費量の30分値から算出しているため、数値が一致しない。燃料消費も考慮した場合、暖房用途のエネルギー消費量が約54%、照明用途が約32%、施設管理用途が約10%、冷房および循環ポンプ用途が約3%、厨房用途が約1%となった。宮古市の小・中学校の場合、暖房用途のエネルギー消費量のうち、約77%が化石燃料であり、CO₂排出量を削減するためには、暖房用途の化石燃料を削減していく必要がある。

今後、EMS(Energy Management System)やスマートメータの普及により、電力の時系列データが

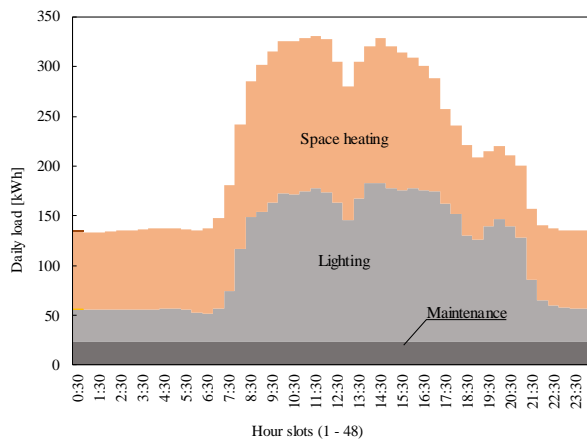


Fig.3(a) Daily load curve of schools (Winter)

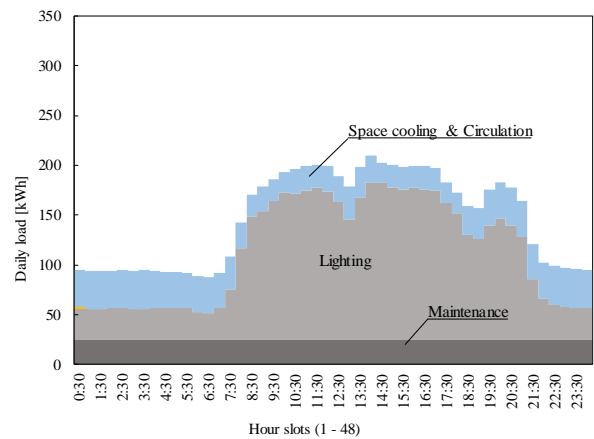


Fig.3(b) Daily load curve of schools (Summer)

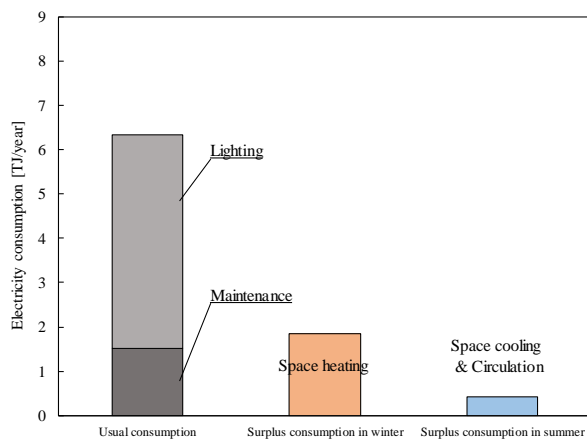


Fig.3(c) Annual electricity consumption of schools

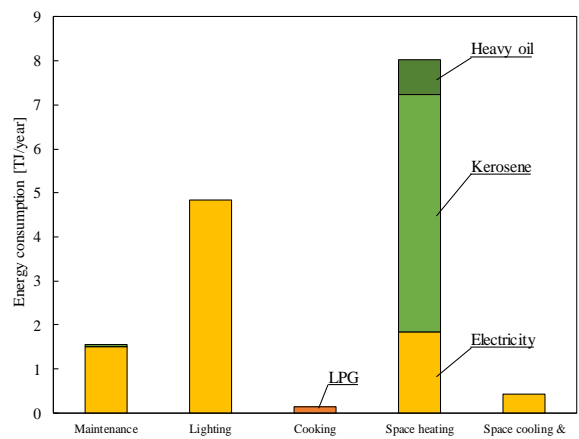


Fig.3(d) Annual energy consumption of schools

容易に入手できる需要家が増加することが予想される。電力消費量の視える化をはじめとする定性的な電力消費傾向の把握にとどまらず、定量的な用途別の電力消費量を推計することが、需要家のスマート化を推進する上で重要である。今回提案した電力消費用途の推計手法は、電力の30分値または1時間値が把握できる場合には、有効な推計手法になりうる。

4. 結言

本研究では、岩手県宮古市で取り組まれている宮古市スマートコミュニティ内のエネルギーシステムのデータ分析から、宮古市スマートコミュニティのエネルギーフローを作成し、地域エネルギーシステムを評価、考察した。その結果、今後の持続可能で脱炭素な地域エネルギーシステムのデザインに向けて、以下の知見を得た。

・宮古市スマートコミュニティ事業の開始により、TPESは65.2 TJ/yearから53.5 TJ/yearへ減少、エネルギー利用効率は31.4%から38.3%へ向上、CO₂排出量は3,593 t-CO₂/yearから2,526 t-CO₂/yearまで約29.7%削減された。さらなる脱炭素なシステムの構築には、さらなる再生可能エネルギー電力の導入および化石燃料消費量の削減が必要である。

・小・中学校の消費電力量の30分ごとの時系列データを年間の消費電力量の特性行列を用いて分析したところ、年間の電力消費量のうち照明用途が56%、暖房用途が21%、施設管理用途が18%と推計された。本研究で示した推計手法は、今後、普及拡大が見込まれるスマートメータやEMSのデータ活用に有効な推計手法となりうる。

・宮古市内の小・中学校の最終エネルギー消費量は14.9 TJ/yearであり、そのうち約54%（うち約77%が化石燃料）が暖房用途、約32%が照明用途であった。施設の低炭素化に向けて、暖房用の化石燃料を削減していく必要がある。また、建物の断熱性向上、照明機器の高効率化によって快適性を損ねることなくエネルギー消費量自体を減らしていくことが求められる。

持続可能な地域のエネルギーシステムのデザインのためには、現状の地域の定量的なエネルギーの需給構造分析が必要である。エネルギー需給構造は全国一律ではなく、地域によって特徴ある傾向を示すため、地域の特徴を反映したエネルギーシステムの設計が求められる。

〈謝辞〉

本研究の遂行にあたり、宮古市スマートコミュニティ推進協議会の皆様には、多大なるご協力を賜りました。特に、岩手県宮古市市民生活部環境課の三浦幸紀様、安倍麻里子様、阿部壮悟様をはじめ、(株)NTTデータの増田洋紀様、日本国土開発(株)の田代晃一様には、宮古市スマートコミュニティの貴重なデータをご提供いただきました。ここに、厚く御礼申し上げます。

〈References〉

- [1] 瀧田祐樹, 古林敬顕, 中田俊彦, 再生可能エネルギーのポテンシャルを考慮したエネルギーフローの作成と分析, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.827 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00164
- [2] Kondo, K., Energy and exergy utilization efficiencies in the Japanese residential/commercial sectors, Energy Policy, Vol.37, Issue 9 (2009), pp.3475-3438
- [3] Bandivadeker, A., Bodek, K., Cheah, L., Evans, C., Groode, T., Heywood, J., Kasseris, E., Kromer, M. and Weiss, M., On the road in 2035:reducing transportation's petroleum consumption and GHG emissions, MIT Laboratory for Energy and the Environment, Report No. LFEE 2008-05 RP (2008)
- [4] 経済産業省, 資源エネルギー庁, 電力・ガス事業部, 平成23年度電力需給の概要(2013)
- [5] 経済産業省, 資源エネルギー庁総務課, エネルギー源別標準発熱量当炭素排出係数一覧表, (2017), http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_016.pdf (Accessed: 26,Jul.2018)
- [6] 東北電力, IR資料室ファクトブック, 電力供給_発電設備容量構成比 <https://www.tohoku-epco.co.jp/ir/report/factbook/pdf/fact01.pdf> (Accessed: 26, Jul. 2018)
- [7] 日本サステナブル建築協会, DECC(非住宅建築物の環境関連データベース), http://www.jsbc.or.jp/decc_download/ (Accessed: 26, Jul.2018)