

数理最適化手法を用いた分散型エネルギーシステムの 設計支援システム

戸川 卓哉^{†1} 藤井 実^{†1} 大場 真^{†1}
藤田 壮^{†1} Dou Yi^{†1}

概要：エネルギー効率の向上や耐災害性の観点から、地域資源を活用した分散型エネルギーシステムが注目を集めている。しかしながら、地区条件に応じたシステムのカスタマイズが必要であるため導入可能性の判定が複雑となり、ポテンシャル評価や今後の普及状況の見通しは十分でない。本研究では、エネルギー需要密度等の様々な地区特性を境界条件として、適正な分散型エネルギーシステムを選定できるモデルを構築し、地区条件と分散型システムとの関係を解析する。それにより、地域特性・技術特性を考慮した分散型エネルギーシステム導入基準を提案に向けた基礎的な考察を行う。

キーワード：混合整数計画問題、自律・分散型システム、再生可能エネルギー、地域エネルギー

1. はじめに

東日本大震災を契機として、大規模集中型のエネルギーシステムへ大きく依存してきた状況を見直し、地域資源を活用した自律・分散型のシステムを導入する取り組みがより活発になっている。自律・分散型のエネルギーシステムは低炭素・省エネルギー、災害耐性、エネルギー地産地消を通じた地域活性化等の観点から有効性が指摘されている¹⁾。そのため、導入適地の特定や今後の普及状況の予測等のポテンシャルの把握および、その社会・環境・経済への影響の評価は急務である。しかしながら、自律・分散型システムのデザインには、エネルギー需要密度や地域特有の再生可能エネルギー・未利用エネルギーのポテンシャル等の地域条件を考慮して多様なエネルギー変換機器の中から適切なものを選択しきみ上げることが必要不可欠であるため、その導入ポテンシャルは見通しづらい状況にある。

これまで国のマニュアル等²⁾において、自律・分散型のエネルギーシステムの基盤であるエネルギーの面的利用が可能となる地域条件として、4.2 (TJ/ha) 以上の熱負荷密度という一律の基準が紹介されてきた。しかしながら、このような導入基準は、例えば未利用熱の賦損量のような地域のエネルギー供給条件や季節別の電熱需要バランスなど様々な要因により影響を受けると考えられる。さらに、今後の分散型エネルギー関連機器の性能向上やエネルギー市場の自由化等を通じた制度環境の変化も考慮した条件に応じた基準選定が必要である。本研究では、エネルギー需要密度等の様々な地区特性を境界条件として、適正な分散型エネルギーシステムを選定できるモデルを構築し、地区条件と分散型システムとの関係を解析する。それにより、地域特性・技術特性を考慮した分散型エネルギーシステム導入基準を提案に向けた基礎的な考察を行う。

2. 計画支援システム

筆者らは、地区のエネルギー需給特性に応じた地域エネルギーシステムの計画支援モデルを数理最適化手法の枠組の下で開発してきた³⁾。その概要を図-1に示す。設計と運用の階層的関係を考慮しており、運用計画においては、季節・時間別の解像度で検討する。ある時間に一度でも運用する必要のある機器は、設計段階で、選定されている必要がある。既往研究^{4,5)}のフレームを踏襲して、エネルギーシステムを構成する候補として考えられる全ての機器から構成されるスーパーストラクチャを考え、季節・時間別のエネルギー需要を充足するために必要となる機器構成とその運転計画の組み合わせをコスト最小化等の規範に基づいて特定する構造となっている。

2.1 目的関数

分散型エネルギーシステムの導入において、環境性等の多様な視点からの検討が重要であるが、経済性が最も重要な要件であると考えられるため、基準となる目的関数は式(1)に示すように、年間の総費用を最小化するものとする。ここでは、夏期、冬期、中間期の各代表日について、時間単位での評価を行ったうえで、年間の集計値を最小化する。

$$\min \mathbf{c}_F \sum_{s,t} \mathbf{S}(s,t) + \sum_{ij} c_j^b \eta_{ij} + \sum_{ij} c_j^c \lambda_{ij} \quad (1)$$

ここで、季節を s ，時刻を t とし、 $\mathbf{S}$ は電力やガス等のシステムに投入されるエネルギーを表すベクトル、 $\mathbf{c}_F$ は単位エネルギーあたりの価格を表すベクトル、 η_{ij} は設置可能地点 i に機器 j を設置した場合は 1，設置しない場合は 0 となる整数変数、 c_j^b は機器 j の設置コストを表す。 λ_{ij} は設置可能地点 i に設置された設備容量を任意に選択できる機器 j の設備容量を表す変数、 c_j^c は機器 j の設備容量あたりの設置コストを表す。なお、設置コストはライフタイムを考慮した年価に換算して評価に用いる。また、第

^{†1} 国立研究環境法人 国立環境研究所
National Institute for Environmental Studies

1 項は燃料等のエネルギー購入費用、第2項は原動機等のエネルギー転換機器への投資費用、第3項はガスボイラー等の補助機器への投資費用を表す。

2.2 制約条件

a) エネルギーフロー

対象地区における、季節・時間ごとの電力需要と冷熱需要、およびの温熱需要を充足する必要がある。さらに、対象地区に投入されるエネルギーは外部より供給される必要がある。

$$\mathbf{Y}(s, t) \geq \mathbf{D}(s, t) \quad (2)$$

$$\mathbf{X}(s, t) = \mathbf{S}(s, t) \quad (3)$$

また、スーパーストラクチャ上のエネルギーフローの分岐点においてもその入出力は整合する必要がある。

$$\mathbf{x}_{i,0}(s, t) + \mathbf{x}_{i,1}(s, t) + \dots \leq \mathbf{y}_{i-1,0}(s, t) + \mathbf{y}_{i-1,1}(s, t) + \dots \quad (4)$$

b) エネルギー変換機器

ガスエンジン、ガスタービン、熱交換器、吸収冷凍機等はそれぞれの機能に応じたエネルギー形態の変換を行う。例えば、ガスエンジンはガスが入力され、電力と排熱（温水）を出力する。入力エネルギーに対して、機器特性に基づいた形態と量の変換を行うエネルギー変換機器をモデル上では以下のように表現する。入力エネルギーを $\mathbf{x}_{ij}$ 、出力エネルギーを $\mathbf{y}_{ij}$ として、式(5)(6) に示すように機器の効率を表す行列 $\mathbf{A}_{ij}$ と固定的に係るエネルギー消費量ベクトル α_i を用いた転換式として表現する。

$$\mathbf{y}_{ij}(s, t) \geq \mathbf{A}_{ij}\mathbf{x}_{ij}(s, t) + \alpha_i\mathbf{z}_{ij}(s, t) \quad (5)$$

$$\mathbf{x}_i\mathbf{z}_{ij}(s, t) \leq \mathbf{x}_{ij}(s, t) \leq \overline{\mathbf{x}_i}\mathbf{z}_{ij}(s, t) \quad (6)$$

$$\mathbf{z}_{ij}(s, t) \leq \eta_{ij} \quad (7)$$

$$\mathbf{z}_{ij}(s, t), \eta_{ij} \in \{0, 1\} \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{z}_{ij}$ は機器が運用状況にあるときは 1、ないときは 0 となる変数、 η_{ij} は機器が設置されているときに 1、されていないときに 0 となる整数変数を表す。従って、運用状況にあるためには、必ず設置されている必要があるの、式(8)を満たす必要がある。また、 $\mathbf{x}_i$ $\overline{\mathbf{x}_i}$ はそれぞれ、入力エネルギーの下限と上限を表しており、式(6) は機器が運転されているときは、入力エネルギーがこの範囲にある必要があり、運転されていないときは 0 となる必要があることを示している。

また、機器については、連続的な容量設定ができるものとし、機器効率を表す行列 $\mathbf{B}_{ij}$ として、式(9)(10) のように

入出力エネルギーの関係を表現する。

$$\mathbf{y}_{ij}(s, t) \geq \mathbf{B}_{ij}\mathbf{x}_{ij}(s, t) \quad (9)$$

$$\mathbf{y}_{ij}(s, t) \leq \lambda_{ij} \quad (10)$$

ここで、 λ_{ij} は機器ごとに規定される出力エネルギー形態の年間最大出力 λ_{ij} を要素として持ち、それ以外は 0 を要素とするベクトルを表し、毎時の出力 $\mathbf{y}_{ij}(t)$ がこの値以下に収まるものとする。

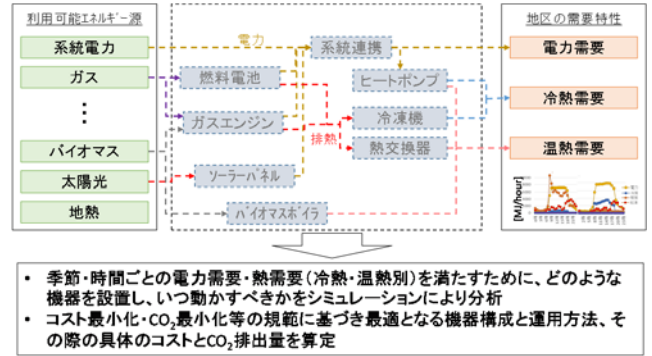


図-1 計画支援モデルの基本構造

3. ケーススタディへの適用

ケーススタディ地区では、エネルギーシステムと土地利用・インフラを含めた都市計画が一体となった検討が実施されている。そのため、施設農業、温浴施設等の熱需要密度の高い主体の立地が計画されている。しかしながら、基準計画における熱需要密度は 1.0 (TJ/ha) 程度であり、前述した地域エネルギーシステム導入の従来基準を下回っている状況である。当日は、同プロジェクトを対象とした実際の実現可能性調査の結果と計画支援モデルによる出力結果の比較にもとづきモデルの妥当性等を検証した結果を紹介する。

参考文献

- 1) 中田俊彦, 被災地域における自律・分散型エネルギーシステムの構築: 地域社会をデザインするには (特集 東日本大震災と原発事故(シリーズ 15) 被災地域コミュニティの復興と再生). 環境と公害, 2015. 44(3): p. 34-40.
- 2) 資源エネルギー庁, 未利用エネルギー面的活用熱供給導入促進ガイド. 2007.
- 3) 戸川卓哉, 藤田壮, 芦名秀一, 藤井実, Dong Liang, 地域特性に応じた分散型エネルギーシステムの設計支援フレームワーク. 土木学会論文集 G(環境), 2015. 71(6): p. II_139-II_149.
- 4) 横山良平, 分散型エネルギーシステムの最適設計 - 設計と運用の階層的関係を考慮したアプローチを中心として -. Proceedings of the Twenty-Sixth RAMP Symposium, 2014: p. 85-98.
- 5) 田中洋一, 福島雅夫, 数理計画法によるコージェネレーションシステムの最適設計. システム制御情報学会論文誌, 2008. 21(7): p. 201-210.