

地域別再生可能エネルギーミックスの 多目的最適化ツールの開発と応用

大阪大学大学院工学研究科
環境・エネルギー工学専攻

町村研究室 博士前期課程二年

堀

啓子

1. はじめに

(1) 背景

2011年の東日本大震災後、日本ではエネルギー基本計画が見直され、2014年4月に第4次エネルギー基本計画¹⁾が閣議決定された。再生可能エネルギーは「有望かつ多様な国産エネルギー源」と位置付けられ、「2013年から3年程度、導入を最大限加速していき、その後も積極的に推進する」という姿勢が示された。2015年7月に経済産業省が決定した「長期エネルギー需給見通し」²⁾では、再生可能エネルギーの2030年の導入目標は一次エネルギー供給のうち13～14%、電源構成のうち22～24%であり、2014年度の電源構成のうち水力発電を含む再生可能エネルギーの割合が12.6%であるため、約2倍に引き上げることが求められている。

2004年からの10年間で世界の再生可能エネルギーは目覚ましい成長を見せており³⁾、日本でも2012年に開始された固定価格買取制度（Feed-in Tariff: FIT）に後押しされ、再生可能エネルギーの導入は急速に拡大している。しかし急速な再生可能エネルギーの普及に伴い、導入する再生可能エネルギー種の違いによる電源系統への接続や、地域の自然環境の破壊や地域社会との摩擦等が問題となってきた³⁾。電源系統への接続の問題とは、太陽光発電などの出力変動が大きな再生可能エネルギーが多量に導入されることにより電源系統全体の電圧が変化するリスクを回避するため、電源系統への接続に制限がかけられる問題である³⁾。また再生可能エネルギーは小規模分散型のエネルギーであるため、導入された地域に様々な影響をもたらし、場合によっては自然環境の破壊や住民との摩擦などの負の影響を生み出してしまう可能性がある。

こういった問題を防ぐためには、電源系統や自然環境への影響などの多面的な評価を行った上で導入計画を策定し、地域社会との合意を形成しながら事

業を進めていくことが必要不可欠である。環境省の平成26年度2050年再生可能エネルギー等分散型エネルギー普及可能性検証検討委託業務報告書⁴⁾においても、再生可能エネルギーの普及基盤を確立するための支援ロードマップとして「再生可能エネルギー導入アドバイザーの養成及びツール開発」による「再生可能エネルギー機器・省エネ機器の最適組合せなどの情報提供」や「地域社会に受け入れられるデザインや意匠」を有した「自然環境、地域環境・社会等に適した技術の開発」が挙げられている。

(2) 本研究の目的

類似の先行研究では、地域スケールでのエネルギーシステム最適化モデル開発も数例存在するが、その機能は技術的な制約条件下でのコストやCO₂の最小化等の単目的最適化に限定されていた。しかし、地域の環境や社会に影響する再生可能エネルギーの導入を検討する際には、多面的な影響評価やそこに生じるトレードオフを同時に考慮した多目的最適解を導出するモデルが必要である。

よって本研究では、経済や電源系統への影響に加え複合的な環境影響を評価関数として再生可能エネルギーミックスの多目的最適化を行い、トレードオフを持つ組合せ最適解を出力することで、地域における合意形成やエネルギー計画策定を支援するツールの開発を目的とする。

2. 多目的最適化ツールの構築

本研究では、筆者らが開発したREROUTESという最適化モデルを基礎に多目的最適化機能を拡張した。

(1) これまでに開発したREROUTESの概要

2014年に筆者らが開発したREROUTES (Renewable Energy Regional Optimization Utility Tool for Environmental Sustainability)^{5,6)}は、日本の市区町村を対象に、

地域の再生可能エネルギー供給ポテンシャルとエネルギー需要データを基に、再生可能エネルギーの組合せ最適化を行う。

データベースは1742の全市区町村別に作成されている。最適化の対象となる再生可能エネルギーは、太陽光発電、太陽熱利用、陸上および洋上風力発電、河川および農業用水路における中小水力発電、地熱発電、木質・草本系、農業系、畜産系、廃棄物系バイオマスによるバイオマス発電とコジェネレーションである。エネルギー需要は、農林水産業と民生部門の石炭、石炭製品、軽質油、重質油、都市ガス、石油ガスの消費量、地域熱供給量が当該地域のエネルギー需要として推計されている。

設計変数は各再生可能エネルギーの導入量である。目的関数は再生可能エネルギー利用率、経済収支、風力発電導入率、CO₂削減率、バイオマス資源循環率、生態系影響面積指標の6種である。いずれも再生可能エネルギーの導入量と、再生可能エネルギーで代替された電力量と化石燃料の消費量に応答する関数である。

ツールの使用者が対象地域を選択することで、データベースから需要や供給ポテンシャルデータを引用できる。使用者は、目的関数として最適化する指標を一つ選択し、他の指標には必要に応じた条件を制約条件として課すことにより、ツールが単目的の最適化計算を行い、解となる各再生可能エネルギーの導入量が算出される。使用者は最適化の結果として、再生可能エネルギーの組合せ最適解とその解における指標の評価値を得る。

(2) REROUTESモデルの課題

REROUTESは再生可能エネルギーミックスを多面的に評価するが、最適化機能は単目的最適化に限定されていた。よって最大化もしくは最小化したい関数が複数存在しても、一つの関数以外は制約条件として条件値を任意に設定する必要があった。そのためある条件で実行可能解がなかった場合、どの条件が実行不可能な領域にあり、どの条件なら解が得られるのかがわからず、試行錯誤で最適解を探索しなければならない点が問題だった。よって、REROUTESの最適化機能を多目的最適化に拡張することで、制約条件の値を設定せずとも全ての関数を目的関数として多目的最適化を行い、解の実行可能解の存在領域や関数間のトレードオフの可視化を通して最適解の探索を支援する機能を開発する必要がある。

またREROUTESではエネルギー供給の安定性の指標として風力発電導入率有するが、東日本大震災以降重視されるエネルギーのレジリエンス力の代理指標も追加することが必要である。特にエネルギーのレジリエンス力向上のための小規模分散型エネルギー利用は、国土強靱化基本法案⁷⁾でも言及されており、再生可能エネルギーの多様性を評価する指標を追加することの必要性は高い。

(3) 拡張機能の実装

a) 多様性指数の追加

再生可能エネルギーの多様性を示す多様性指数 V には、シン普森の多様度指数⁸⁾を用い、式(1)で算出した。なお指数を算出する際には125の再生可能エネルギー種を21の中分類に集計し、エネルギー種と設置場所や規模が等しいものは同じ再生可能エネルギーの中分類種 l としてマージし、エネルギー種 l の多様度を評価する指標とした。 x_{li} はエネルギー種 l を構成する細分類の再生可能エネルギー種 i の導入量を示す。

$$V = 1 - \sum_l \left(\frac{\sum_i x_{li}}{\sum_i^{125} x_i} \right)^2 \quad (1)$$

b) 多目的最適化機能の拡張

単位が異なり競合関係にある目的関数群での多目的最適化では、全目的関数を同時に最小化もしくは最大化することは不可能である。よって本研究では、多目的最適化の第1段階として、これ以上全ての目的関数を同時に改善できない境界上に存在する「パレート最適解」の集合⁹⁾を最適解の候補として導出し、第2段階としてその中からの地域の選好に応じて最適解を抽出する多段階の多目的最適化プロセスを設計した。パレート最適解集合はこれ以上全体を改善することができない非優劣な最適解の候補群であるため、第1段階では単一の最適解を導出することはできない。そのため第2段階として、意思決定者がパレート最適解のトレードオフ構造を俯瞰し、重視するエネルギー種や指標等の選好を入力することで最終的な最適解を抽出する機能を実装した。

第1段階のパレート最適フロントの特定では、多目的最適化のアルゴリズムとして、Debら¹⁰⁾が開発した多目的進化計算アルゴリズムの一種である非優越ソート遺伝アルゴリズムⅡ(Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II: NSGA-II)を選定した。子個体を生成するために交叉に使用される親個体はトーナメント方式、親個体から子個体を生成するた

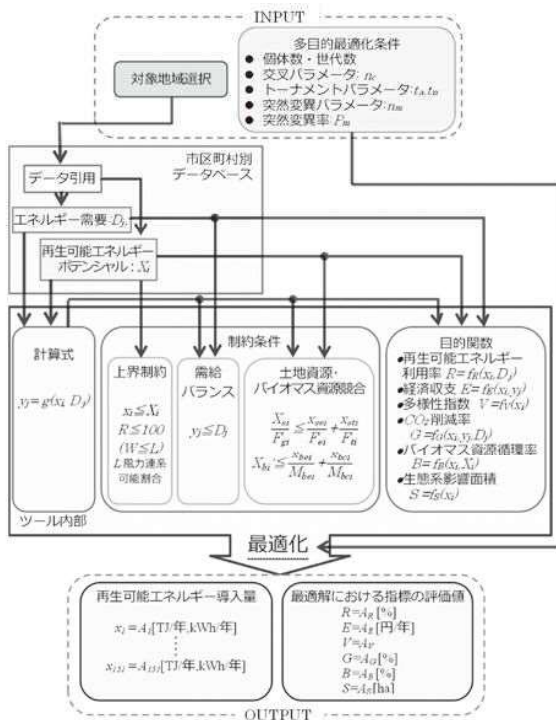


図-1 開発したツールの概要

めの交叉および突然変異の方法は、疑似二進交叉¹¹⁾ (Simulated binary crossover: SBX) と多項式突然変異法¹²⁾ (Polynomial mutation: PM) を用いた。また本研究で取り扱う問題は目的の数が多いために、多くの個体が非劣解となり選択圧が低下することや、パレート解の総数が指数関数的に増大することが懸念されるため¹³⁾、本研究の問題構造に適合するようにアルゴリズムを改良した。具体的には個体間の混雑度距離計算について、各指標の単目的最適化で得られる最高値を希求点とし、そこからの距離が大きくなる程ペナルティが生じるように混雑度の計算式を改良した¹⁴⁾。REROUTESモデルを改良して構築した多目的最適化ツールの構造を図-1に示す。

3. 多目的最適化ツールの適用と評価

本ツールの挙動を評価するため、新潟県佐渡市と東京都千代田区という特性の異なる二地域を対象に多目的最適化を行い、パレート最適解を導出することで、地域別に異なるトレードオフ構造が表現できるかを評価した。更に佐渡市を対象に、地域関係者の要求に基づいた最適解の抽出を試行し、その効果検証と有用性評価を行った。

(1) 対象地域の概要

a) 新潟県佐渡市

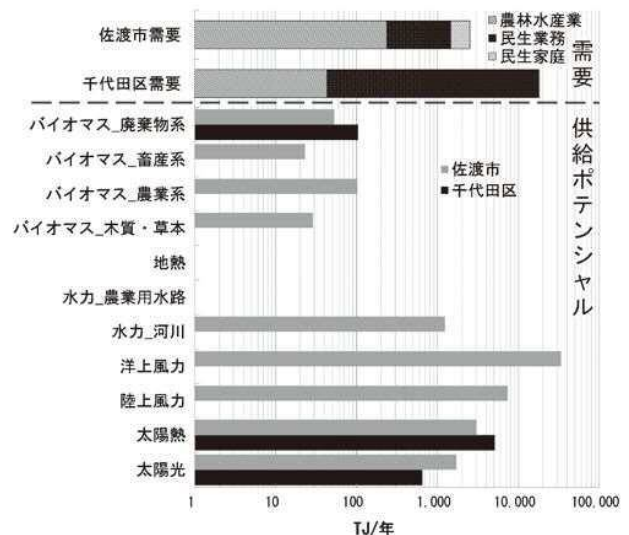


図-2 対象地域のエネルギー需要と再生可能エネルギー供給ポテンシャル(横軸は対数値)

新潟県佐渡市は、新潟県西部の島嶼地域で、人口は約5万8千人であり、面積855.61[km²]のうち田畑は15%、山林は33%、雑種地その他が47%を占める¹⁵⁾。レッドデータブック¹⁶⁾で野生絶滅とされるトキの繁殖と野生復帰に取り組んでおり、トキは佐渡市のシンボルである。

佐渡市では2012年に佐渡市地域新エネルギー導入促進計画¹⁷⁾を策定し、新エネルギー利用の基本方針として、地域特性に適合し、地産地消や地域振興につながることを目指す。重点的に取り組む再生可能エネルギー事業は、太陽光発電、木質バイオマス、バイオディーゼル利用、中小水力発電、クリーンエネルギー自動車の導入である。

図-2に佐渡市の再生可能エネルギー供給ポテンシャルとエネルギー需要を示す。島嶼地域である佐渡市では洋上風力発電のポテンシャルが大きい。戸地川等の河川の水力発電、農地が多いことから農業系のバイオマスの供給ポテンシャルも大きい。佐渡市が重点的に取り組む太陽光発電のポテンシャルも多く存在するが、太陽光発電のみでは対象の需要を満たすことができないとわかる。

b) 東京都千代田区

都心部にある東京都千代田区は、面積11.66[km²]のうち12%を皇居が占め、昼間人口約82万に対し、住民登録している人口は約4万8千人である¹⁸⁾。

千代田区は2015年に、新エネルギービジョンや温暖化配慮行動指針等を総括した千代田区地球温暖化対策地域推進計画¹⁹⁾を策定した。太陽光や風力などに加え、下水熱やビル排熱、地中熱等の未利用エネ

ルギーの活用を検討し、「エネルギー利用によるCO₂排出ゼロ」を推進している。また事務所ビルの低炭素化を促進するため、太陽光等のエネルギー利用と省エネによって建物のエネルギー収支をゼロに近づける「ネット・ゼロ・エネルギー・ビル (ZEB)」のモデル施設の設置を行うとしている。

図-2、千代田区の再生可能エネルギー供給ポテンシャルとエネルギー需要を示す。千代田区は昼間人口が夜間人口の15倍以上になるオフィス街であるため、民生業務部門がエネルギー需要の大半を占めている。利用できる再生可能エネルギー資源も、ビル等の屋根を使用した太陽光エネルギーにはほぼ限定されており、供給ポテンシャルにも地域特性が表れている。本ツールが対象とする再生可能エネルギーの全ポテンシャルを利用しても、千代田区のエネルギー需要の3分の1未満であるとわかる。

(2) ツール適用の条件と手順

佐渡市と千代田区を対象に、開発したツールによる多目的最適化を**表-1**の条件で行い、6次元のパレート最適解集合を算出した。得られたパレート最適解群を再生可能エネルギーの組合せ特性によって**表-2**の条件でクラスタリングした。パレート最適解集合は6次元解空間上で多様体を形成するため、自己組織化マップ (Self-Organizing Map : SOM)²⁰⁾ により

表-1 多目的最適化実装条件

パラメータ等	値等
設計変数	125: 細分類再生可能エネルギー種
制約条件	7: 実行可能条件
目的関数	6
個体数	10000
世代数	100
SBX パラメータ: n_c	2
トーナメント候補者数: t_a	10
トーナメント回数: t_n	150
PM パラメータ: n_m	2
突然変異率: P_m	0.0003
実装言語	VBA

表-2 クラスタリングの実装条件

パラメータ等	値等
手法	SOM 投影後に階層クラスタリングを行う
入力データ	中分類に集計したパレート解群の各再生可能エネルギーの導用量
データ次元数	11
入力データ数	10000
学習回数	600
マップサイズ	15×15(ヘキサゴン)
実装ソフト	R_ver3.2.2
クラスタ数	5

多様体を捉えた上で、階層型クラスタリングにより解の分布に沿ったクラスタを得た。これにより解候補となる再生可能エネルギーミックスの特性と目的関数間のトレードオフ関係を可視化した。

更に佐渡市では、再生可能エネルギー施策関係者にアンケート調査し、階層分析法 (Analytic Hierarchy Process : AHP)²¹⁾ で6指標の相対的重要度を数値化し、その結果に基づきパレート最適解集合から最適解を抽出した。

(3) パレート最適解集合の算出結果と考察

佐渡市と千代田区における多目的最適化の結果として、6次元のパレート最適解集合の分布を2次元で表現したものと、各クラスタの再生可能エネルギーミックスおよび目的関数値の重心を**図-3**から**図-6**に示す。**図-3**と**図-5**では、REは再生可能エネルギー利用率、Econは経済収支、CO₂はCO₂削減率、Ecoは生態系影響面積、BioCはバイオマス資源循環率、Divは多様性指数を示し、クラスタごとに個体は色分けされている。**図-4**と**図-6**では、指標値は望ましいものほど濃い赤で網掛けされており、バー上の数値は各クラスタに所属する個体数を示す。

佐渡市を対象とした最適化計算では、初期世代のパレートランクと混雑度距離は3.3および0.25であったが、10世代目以降パレートランクは1、混雑度距離は0.04前後に収束した。千代田区では、初期世代のパレートランクと混雑度距離は3.5および0.39であり、8世代目以降パレートランクは1、混雑度距離は0.05前後に収束した。

図-3と**図-5**の個体の密度が高い部分がパレート最適フロントであり、佐渡市及び千代田区における実行可能解の存在空間とトレードオフの関係にある目的関数を俯瞰できる。佐渡市では、再生可能エネルギー利用率と経済収支の間や、生態系影響面積や多様性指標と再生可能エネルギー利用率や経済収支及びCO₂削減率との間にトレードオフが存在する。一方、千代田区では佐渡市と比較してパレート最適フロントが明瞭に表れているが、これは千代田区は再生可能エネルギーの種類が少なく、多様な組合せが発生しないため、注目する目的関数によって優位な解が異なる事態が生じにくいことが要因である。

更に再生可能エネルギー利用率に着目すると、佐渡市では約150%まで実行可能解が存在するが千代田区は約15%までしか実行可能解がない。これは地域のエネルギー需要量と再生可能エネルギーの供給ポ

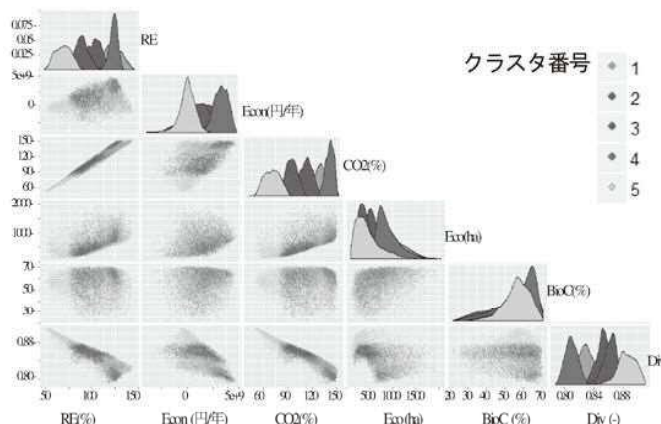


図-3 佐渡市のパレート最適解集合

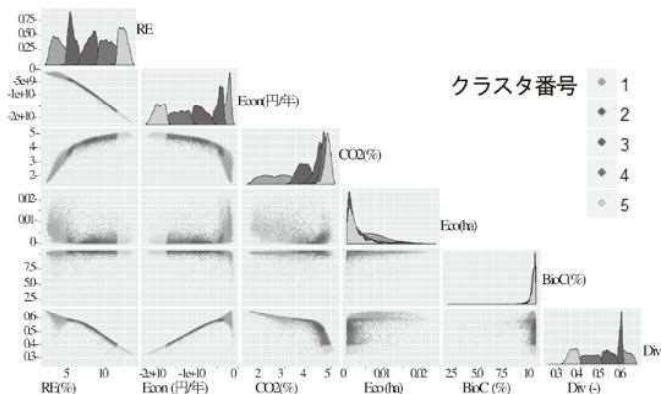


図-5 千代田区のパレート最適解集合

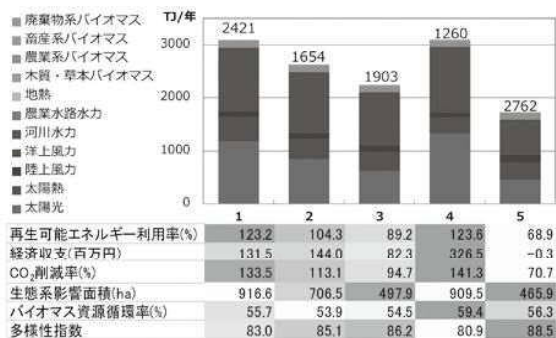


図-4 クラスタ別再生可能エネルギー導入量と関数値の重心

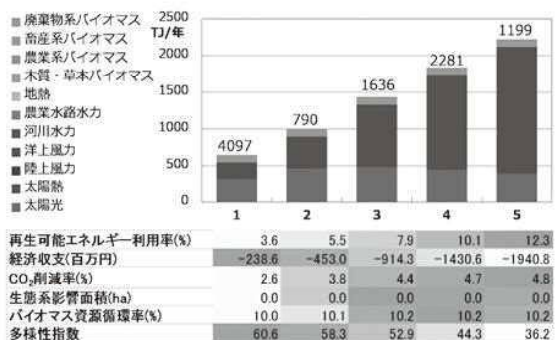


図-6 クラスタ別再生可能エネルギー導入量と関数値の重心

テンシャルのバランスの相違から生じる。千代田区は再生可能エネルギーの供給ポテンシャルに対して需要が大きいためこの結果となっており、区の政策として建物の効率的なエネルギー利用を促進し省エネを図る事実とも整合する。よって本ツールは、地域のエネルギー政策に科学的裏付けを与えるツールとしても活用できる可能性がある。

このように本研究は、地域の地理特性に応じて賦存する再生可能エネルギー供給ポテンシャルや需要構造の違いによって、再生可能エネルギーの組合せ解がもつ異なるトレードオフ構造と、目的関数値の実行可能解の存在領域を可視化するツールを構築できた。

更にクラスタリングにより、個体群が有する各目的関数値やトレードオフ、また再生可能エネルギーミックスの特性を類型化でき、対象地域が選択しうる複数の再生可能エネルギーミックスのオプションを提示できた。例えば図-3に示す佐渡市のクラス4（水色）は、再生可能エネルギー利用率と経済収支の2次元で有意な解が所属するクラスであるが、多様性指数が最も小さく生態系影響面積が最も大きな個体群となっている。これは、太陽光発電と水力発電の導入量を増やすことで再生可能エネルギー利用率や経済収支において優位なものの、これらのエ

ネルギー種に導入が偏ったため多様性指数が低下し、また水力発電設備建設等により生態系に大きな影響を与えるためである。それに対し、クラス5（紫色）は多様な再生可能エネルギー種がバランスよく導入され、生態系に影響を与える水力発電も多く用いない個体群であるため、生態系影響面積や多様性指標では優位であるが、再生可能エネルギー利用率や経済収支、CO₂削減率等で最も劣っている。このように、佐渡市の再生可能エネルギーミックスを設計する上で有用な選択肢を示せた。

また千代田区では、再生可能エネルギーの供給ポテンシャルの大部分を太陽光発電と太陽熱利用が占めるため、その2種類のバランスのみが各クラスの差異を生じさせた。太陽熱利用を多く導入することで、再生可能エネルギー利用率やCO₂削減率を高められるが、太陽熱利用は他の発電とは異なりエネルギーの買い取り制度が存在しないため、経済的優位性が下がるというトレードオフが生じている。この結果は、例えば千代田区を熱版FIT制度である再生可能エネルギー熱インセンティブ制度²²⁾等の導入を行う特区に選定することで、再生可能エネルギー利用と経済性が両立する可能性があるといった政策的示唆も与える。

(4) 佐渡市における最適解の抽出

佐渡市の再生可能エネルギー施策関係者の協力により、AHPによって指標の相対的重要度を数値化した結果が表-3である（N=2, 平均値を利用）。この結果から、佐渡市の再生可能エネルギーの組合せ最適解の抽出を試みた。

まず他の指標と比較して最も重視される指標は経済収支であったため、経済収支が平均的に最も大きなクラスタ4（水色）に着目した。次に重要視される指標は多様性指数、次いで再生可能エネルギー利用率であった。クラスタ4は再生可能エネルギー利用率の値は優位な個体が所属しているが、多様性指数の重心は最も小さい。しかし図-3を見ると、クラスタ内でもばらつきがあるため、クラスタ4の中で多様性指数が最も高い5個体を抽出してその特性を比較した。抽出した5個体を図-7に示す。

図-7から、クラスタ4の中で最も多様性指数の大きい個体1は、他の4個体と比較して経済収支が最も優位であり、他の関数も相対的に優位な値を有する。よって今回は、図-7に示す個体1を佐渡市の最適な再生可能エネルギーの組合せ解として抽出した。このように本ケーススタディでは、対象地域の特性を反映したパレート最適解集合を算出する本ツールの機能を示し、地域の選好に基づきテーラード的に最適な再生可能エネルギーミックスを抽出する一連のプロセスを示せたといえる。

(5) 佐渡市における有用性評価

本ツールの機能を佐渡市の再生可能エネルギー施策関係者6名に示し、ヒアリングにより有用性評価を行った。

総合的な有用性としては、トレードオフを有する解候補を可視化する本ツールの基本的な機能は、地域の選好に合わせた対話的な再生可能エネルギー利用計画策定の意思決定に資する、有用なものであると評価された。

本ツールの再現性に関しては、日照時間や地域固有の生物の存在など、数理モデルに表現されない地

表-3 指標間の相対的重要度

指標	相対的重要度
再生可能エネルギー利用率: RE	0.17
経済収支: Econ	0.38
CO ₂ 削減率: CO2	0.02
生態系影響面積: Eco	0.10
バイオマス資源循環率: BioC	0.13
多様性指数: Div	0.19

域の事情を考慮した上で、再生可能エネルギー導入量の上限を算出する機能が必要であると評価された。更に本ツールを、佐渡市のように独立した電源系統を有する地域にも適用できるよう、導入の上限値の算出方法の改良や、蓄電技術利用オプションの追加が必要である。加えて佐渡市でのペレットストーブ導入促進の例のように、小規模な熱利用から始めることが多いバイオマス資源のエネルギー利用を正確にモデル化するため、バイオマスを熱利用するオプションの拡張も重要であると指摘された。

本ツールの機能性については、地域特有の事情を考慮した最適化を行う機能の必要性が指摘された。現段階の本ツールでは全ての地域に対して同じ仕組みで多目的最適化を行う機能しかないが、佐渡市が求めているバイオマス資源利用の包括的価値の評価などの地域固有の要求を、最適化の段階で加味する機能を付加することも検討すべきである。また、佐渡市ではこれまでの再生可能エネルギーの導入可能性調査を通じて、エネルギー供給が不安定であること等の様々な弱点や限界を認識していた。そのため、エネルギーの供給方法だけでなくエネルギーの需要端の利用方法も同時に変化させ、エネルギーシステム全体の問題を解決するモデルへの拡張が求められた。

5. まとめと今後の課題

本研究では、再生可能エネルギーの導入に起因する環境影響を含め多面的な影響や効果の評価に基づき、地域における持続可能な再生可能エネルギー利用計画の策定を支援することを目的として、これまでに開発を進めてきたREROUTESモデルを基に、再生可能エネルギーミックスの多目的最適化ツールを開発した。開発したツールを新潟県佐渡市と東京都千代田区に適用したケーススタディを実施し、6目的

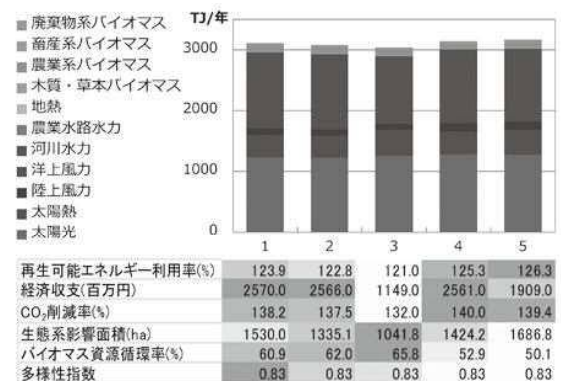


図-7 クラスタ4の中で多様性指数が最も大きい5個体

関数での最適化を行いパレート最適解集合を導出した。その結果、地域のエネルギー需給特性を反映し、トレードオフの関係にある目的関数や実行可能解の存在領域を可視化できることを確認した。また佐渡市を対象に、パレート最適解集合から最適な再生可能エネルギーの組合せ解を抽出する事例を示し、本ツールの有用性と今後の開発課題を議論した。

今後は、①バイオマス資源利用の熱・燃料利用オプションの追加、②独立電源系統での制約条件の取り扱い、③地域が重視する目的関数や再生可能エネルギー種の多目的最適化の計算段階での重み付け、④エネルギー需要端のモデル化、⑤生物多様性の保全や生態系サービスの持続的利用と再生可能エネルギーミックスの設計の相互作用を表現できるモジュールを中心に改良を進める。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：第4次エネルギー基本計画，2014，<http://www.meti.go.jp/press/2014/04/20140411001/20140411001-1.pdf>，(2016.01.29参照)。
- 2) 経済産業省：長期エネルギー需給見通し，2015，http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf，(2016.01.29参照)。
- 3) 環境エネルギー政策研究所：自然エネルギー白書2015，2016，<http://www.isep.or.jp/wpdm-package/jsr2015-all-2/>，(2016.01.29参照)。
- 4) 株式会社三菱総合研究所環境・エネルギー研究本部：平成26年度2050年再生可能エネルギー等分散型エネルギー普及可能性検証検討委託業務報告書，2014，<https://www.env.go.jp/earth/report/h27-01/index.html>，(2016.02.06参照)。
- 5) 堀啓子，松井孝典，町村尚：多面的な環境指標を加えた再生可能エネルギーミックスの地域別最適化及び評価ツールの開発，土木学会論文集G（環境），土木学会環境システム委員会，Vol. 70，No. 6，pp. II_195-206，2014。
- 6) K. Hori, T. Matsui, T. Hasuike, K. Fukui, T. Machimura : Development and application of the renewable energy regional optimization utility tool for environmental sustainability: REROUTES, Renewable Energy, Volume 93, pp.548-561, 2016.
- 7) 国土強靱化推進室：国土強靱化基本法，2012，<http://www.sangiin.go.jp/japanese/joho1/kousei/gian/181/gian.htm>，(2014.03.07参照)。
- 8) E. H. SIMPSON: Measurement of Diversity, Nature 163, 688-688, 1949.
- 9) 穴井宏和：数値最適化の実践ガイド，KS理工学専門書，2013。
- 10) K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan : A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, Evolutionary Computation, IEEE Transactions on 6 (2), 182-197, 2002.
- 11) K. Deb, R. B. Agrawal : Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space, Complex Systems, Volume 9, Issue 2, 115-148, 1995.
- 12) K. Deb, S. Tiwari : Omni-optimizer: A generic evolutionary algorithm for single and multi-objective optimization, European Journal of Operational Research, vol. 185, issue 3, 1062-1087, 2008.
- 13) H. Ishibuchi, N. Tsukamoto, Y. Nojima : Evolutionary many-objective optimization: A short review, Evolutionary Computation 2008, 2419 - 2426, 2008.
- 14) 堀 啓子，松井 孝典，小野 智司，福井 健一，蓮池 隆，町村 尚：進化計算による再生可能エネルギーミックスの多目的最適化，第30回人工知能学会全国大会，2K5-OS-25b-3，2016。
- 15) 佐渡市：佐渡市公式ホームページ，<https://www.city.sado.niigata.jp/admin/profile/history/index.shtml>，(2016.02.07参照)。
- 16) 環境省：第4次レッドリスト，2012，http://ikilog.biodic.go.jp/rdb/rl2012/redList2012_tyorui.csv，(2016.02.07参照)。
- 17) 佐渡市：佐渡市地域新エネルギー導入促進計画，2012，https://www.city.sado.niigata.jp/admin/vision/pdf/n_ene12/n_ene12_2.pdf，(2016.02.07参照)。
- 18) 千代田市役所：千代田区公式ホームページ，<https://www.city.chiyoda.lg.jp/koho/kuse/gaiyo/yokoso/index.html>，(2016.02.07参照)。
- 19) 千代田区：千代田区地球温暖化対策地域推進計画，2015，<https://www.city.chiyoda.lg.jp/koho/machizukuri/kankyo/ondanka/documents/2015-keikakusho-2704.pdf>，(2016.02.07参照)。
- 20) T. Kohonen: The self-organizing map. Proceedings of the IEEE 1990; 78: 1464-1480.
- 21) T. L. Saaty, The Analytic Hierarchy Process, McGraw Hill, 1980. Reprinted as Vol. 1 of the AHP Series by RWS Publications, 1992.
- 22) Department of Energy & Climate Change of United Kingdom: Renewable Heat Incentive (RHI), <https://www.gov.uk/government/policies/increasing-the-use-of-low-carbon-technologies/supporting-pages/renewable-heat-incentive-rhi>，(2015.02.19 参照)。



大阪大学大学院工学研究科
環境・エネルギー工学専攻
博士後期課程一年
日本学術振興会特別研究員(DC1)

今回受賞した研究を発展させ地域社会に実装していくために、スキル習得や研究活動に日々努めています。