

再生可能エネルギーミックス多目的最適化モデルと 共創的最適化プロセスによる 地域エネルギーシステムの共創的な設計支援手法の提案 ー滋賀県高島市のケーススタディー

堀 啓子¹・金 再奎²・木村 道德³・河瀬 玲奈⁴・松井 孝典⁵・町村 尚⁶

¹正会員 リサーチアシスタント 国際連合大学サステナビリティ高等研究所

(〒150-8925 東京都渋谷区神宮前5-53-70)

E-mail: keiko.hori@unu.edu

²正会員 専門研究員 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

³正会員 主任研究員 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

⁴正会員 研究員 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

⁵正会員 大阪大学助教 大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻

⁶正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻

持続可能な地域のエネルギーシステムは、地域の望ましい将来像に基づき、多様な主体の参画と科学的知見の活用を伴う共創的なバックキャスティング手法によって設計されることがふさわしい。よって本研究では、①市民による地域の将来像の形成、②それに基づく将来エネルギーの定量的な需要予測、③将来需要を満たす再生可能エネルギーミックスの多目的最適化、④市民の選好に基づく最適解の対話的抽出から成る、地域エネルギーシステムの共創的な設計支援手法の提案と試行を目的とした。滋賀県高島市において、市の事業と連携して提案手法を試行した結果、市民が描く将来像と定量的な将来エネルギー需要予測、多面的な影響評価と住民の選好に基づき、高島市に最適な再生可能エネルギーミックスを導出できた。提案手法は地域での再生可能エネルギー利用計画の共創的設計に資すると評価を受けた。

Key Words : local energy system, co-creative design, renewable energy mix, optimization, backcasting

1. はじめに

(1) 背景

持続可能な社会の実現に向け、大胆かつ変革的な行動計画¹⁾が模索される昨今、そのために有効な手法としてバックキャスティング手法が注目されている。バックキャスティング手法とは、望ましい将来像を描き、描いた将来像から翻ってその達成に必要な戦略や計画を創り出す手法である²⁾。2030-2050 年を対象期間とするパリ協定や SDGs (Sustainable Development Goals)の実現には、技術の進歩や社会的変革の長期的かつ大胆な推進が必要なため、現況にとらわれない“望ましい将来像”を起点とする規範性の高いバックキャスティング手法は持続可能な社会へのアプローチにふさわしい³⁾。

持続可能なエネルギーシステムのデザインにおいても、バックキャスティングの手法は有効である。元来バックキャスティング手法は、エネルギーの需給計画

のための手法として 1970 年代から 80 年代にかけて提案された⁴⁾。将来のエネルギー需要は現在の政策決定の結果であり、将来像を明確化することでその達成に向けたエネルギー産業の然るべき対策も決定が可能になることから、持続可能なエネルギーシステムのデザインに適した手法として提案されたのである²⁾。特に再生可能エネルギーの利用は、広域分散型のエネルギー資源を利用するため、地域に適合した形での導入が望ましい。今後日本各地で急速な人口減少⁵⁾や産業構造の変化が見込まれており、バックキャスティング手法によって産業や暮らしなど地域全体の将来像と親和性のある利用計画を策定することが適切と言える。

更に、多様な主体の参画により将来シナリオや計画を形成する「参加型バックキャスティング」の必要性も高まっている。望ましい将来像とそのための行動計画は、関係する多様なステークホルダーによる双方向的で継続的なフィードバックを含むプロセスによって

構築されるべきであり、1990年代から様々な参加型バックキャスティング手法の開発と実装が行われてきた²⁾。主には、企業、研究機関、行政、一般的な公益組織と一般市民から成る参加者が想定されており、将来シナリオの構築から詳細の練り上げまでを行うデザイン手法や、シナリオの評価や分析等のための分析手法などが必要と考えられている²⁾。日本での再生可能エネルギー利用においても近年、その導入による地域の自然環境への影響や地域住民との摩擦の問題⁶⁾が相次いでおり、地域の多様な主体の参画による科学的な影響評価を伴った利用計画の策定が求められる。

しかしながら課題として、必ずしも地域における再生可能エネルギーの利用計画が、地域全体の将来像を基に定量的・参加型バックキャスティング的に予測されたエネルギー需要に基づいて作成されていないことが挙げられる。国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が提示した「地域新エネルギー・省エネルギービジョン策定ガイドブック」⁷⁾でも、現在のエネルギー利用実態と再生可能エネルギーの利用可能性調査に基づいて地域の新エネルギービジョンを策定し、重点事業を絞り込むというフローが提案されている。しかしながら地域のエネルギー需要の将来予測については、自治体ビジョンを“留意”しながら現在の動向を基に予測するという記述に留まっている。実際の市区町村で策定されている新エネルギービジョンにも、国の目標値や地域の再生可能エネルギー利用可能量を基に策定されたものが散見され、地域全体の将来像を見据え、将来的に必要となるエネルギー需要を考慮して再生可能エネルギー利用を計画するアプローチを適用しなければならない。

(2) 先行研究のレビュー

再生可能エネルギーの導入に関して、科学的知見を用いながら地域のステークホルダーの主体的な参加によりシステムのデザインを動的に行うプロセスについて、様々な学術的試行が行われている。

オーストリアの Kowalski ら⁸⁾は、シナリオ構築と参加型多基準分析の併用によって民主的にエネルギーシステムを決定するプロセスを試行し分析を行った。①地域のエネルギー関係者によるエネルギー需給の将来予測を加味した2020年の持続可能なエネルギーシナリオの構築、②多種の評価モデルによる各シナリオの多面的評価、③重みづけ法によるステークホルダーの評価基準の選好の抽出、④多基準集成法によるシナリオのランク付けの4段階から構成される参加型決定プロセスが実施された。

Marinakos ら⁹⁾は、地域の持続可能なエネルギー行動計画策定を支援するための参加的な多基準決定手法を提案した。行動計画シナリオの統合や修正段階と評価基準の

選好決定に市民が参画し、極順位分析（Extreme Ranking Analysis）によって代替シナリオのランク付けを行うことで最適な行動計画を選択するプロセスを示した。行動計画シナリオは、エネルギー分野における代替行動とその適用範囲のリストを基に、2020年のCO₂排出削減目標を満たす組み合わせの作成によって構築された。

このように、将来のエネルギー需給や温室効果ガス削減を考慮したシナリオを作成し、多基準評価で最適なシナリオを選択するという参加型バックキャスティング手法自体は研究が進んでいる。しかしながらこれらの研究ではエネルギー需要自体の変化や代替行動の可能性に焦点を当ててその望ましいシナリオを作成するに留まっており、地域での暮らしや社会的な変化などを包括した将来ビジョンからエネルギー需要の変化を予測し、それを満足するエネルギーシステムをシナリオ化するまでには至っていない。

(3) 本研究の目的

本研究では、①市民による地域の将来像の形成と②それに基づく将来のエネルギーの定量的な需要予測、③これを満たすための再生可能エネルギーミックスの多目的最適化、④市民の選好に基づく最適解の対話的抽出という共創的最適化プロセスから成る、地域エネルギーシステムの共創的な設計支援手法を提案し、その試行と有用性評価を行うことを目的とする。なお本手法が掲げる“共創”とは、②の将来需要予測や③の多目的最適化などの科学的知見や手法を社会での意思決定に参画させる「科学と社会の共創¹⁰⁾」と、①の将来像の形成や④の対話的最適化抽出における住民や行政などの「関連するステークホルダーのボトムアップ的な意思決定による共創」という二つの側面を意図したものである。

2. 方法

(1) 対象地域の概要：滋賀県高島市

滋賀県高島市は、図-1¹¹⁾¹²⁾に示す湖西と呼ばれる琵琶湖の西部に位置し、2005年に高島郡のマキノ町、今津町、朽木村、安曇川町、高島町、新旭町の5町1村が合併し誕生した市である¹³⁾。総人口は約5万人であるが、人口減少と高齢化の深刻化が予測される地域である¹⁴⁾。総面積は約693[km²]のうち森林が53[%]、琵琶湖が26[%]、田畑が8[%]を占める。主要産業は、一級河川安曇川などの河川により形成された平野を中心に行われる農業や、琵琶湖や河川での漁業、広大な森林を活用した林業などである¹⁵⁾。水が豊富な高島市では、日本遺産や重要文化的景観に選定される水辺景観や、独自の発酵食文化を有し、地域の一つのシンボルとなっている。

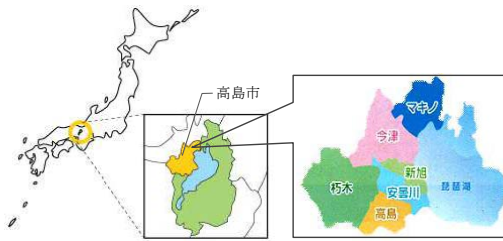


図-1 高崎市の位置と旧町村エリア¹³⁾

再生可能エネルギー関連の政策としては、2008年に新エネルギービジョン¹⁶⁾が策定されたものの、再生可能エネルギーの普及を大きく伸ばす状況には至っていない。2017年に策定された第2次高崎市総合計画¹⁴⁾においても、自然エネルギーの活用が2026年までに取り組む施策項目として挙げられているが、具体的な行動計画の策定はこれから着手するという状況である。

(2) ケーススタディの実施スキーム

本ケーススタディは、図-2に示す通り、高崎市役所市民協働課主催の下、公募された市民委員約30名と市職員約20名で構成される第2期高崎市まちづくり推進会議の協力を得て実施した。滋賀県高崎市では、地域課題の解決や地域振興策を市民の立場で検討し、市民協働による魅力あるまちづくりを推進するため、2015年より高崎市まちづくり推進会議を設置している¹⁷⁾。2017年度から18年度にかけて実施された第2期推進会議は、地域の課題の把握から地域の将来ビジョンの創造や、描いたビジョンを実現させるための市民主体の調査や事業計画作りが行われる会議である。

(a)の地域課題を共有し高崎市の望ましい将来像を描くワークショップを行い、将来像と現状の乖離を把握することで市民が着手するべき取り組みを発見するプロセスには、本稿の筆者を始めとする様々な研究機関の研究者が参画し、情報提供やファシリテーションを行った。人口動態や産業、暮らしの変化など、地域全体について望む将来社会の姿を描き、それに基づいて、後述するExSSモデルを用いて(b)の定量的な分析を行い、2040年における高崎市の各種活動量やエネルギー需要量を算出した。その後算出された将来のエネルギー需要を入力データとして(c)の多目的最適化モデルを適用

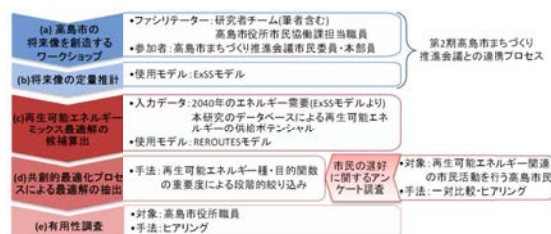


図-2 高崎市におけるケーススタディの実施スキーム

することで、地域の将来像にエネルギー需要を賄う再生可能エネルギーの組み合わせ最適候補の算出を行った。更に高崎市で再生可能エネルギー関連の市民活動を行う市民を対象に、(d)の再生可能エネルギーの種類と目的関数双方の選好および重要度を調査する一対比較アンケートを実施し、その結果を基に最適解の対話的抽出を行うプロセスを設計した。最後に(e)で、抽出した結果を基に高崎市役所職員にヒアリングを依頼し、本開発モデルおよびその適用の有用性評価を受けた。以下に、各プロセスの詳細を記述する。

a) 市民ワークショップによる将来像の共創

高崎市まちづくり推進会議の参加者が2040年の高崎市に“望む”事項を出し合い、その実現に“必要な”事項を考えていくというバックキャスティング的手法を用いた。ワークショップでは、2040年の高崎市で「どんな働き方をしたいか?」「オフをどうすごしたいか?」「高崎市で残したいものは何か?」「何にお金を使いたいか?」という4つのテーマが与えられた。その際、「個人商店が減少する」「空き家が増える」など、少子高齢化や人口減少、地球温暖化などが現状と同じトレンドで進行した場合に起こると予測される事象をあらかじめ Business As Usual (以下 BAU) シナリオとして示し、BAUのトレンドを踏まえた上で2040年の高崎に望む姿を議論した。

b) ExSSモデルによるエネルギー需要の将来予測

市民ワークショップによって定性的に示された高崎市の望む将来社会の姿から、2040年の高崎市内の経済活動やライフスタイルの変化を定量データに変換し、

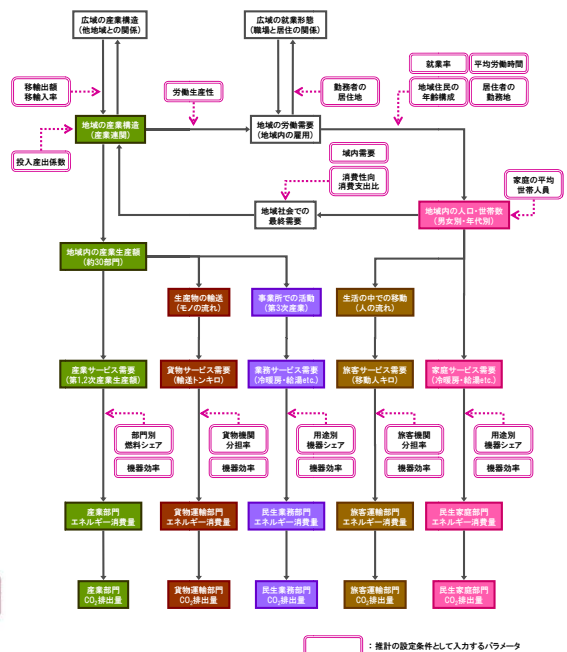


図-3 ExSSモデルの概要²²⁾

それらを基に ExSS モデルによって 2040 年の活動量やエネルギー需要、温室効果ガス排出量の予測を行った。ExSS モデルとは、島田ら¹⁸⁾や五味ら¹⁹⁾²⁰⁾、由良ら²¹⁾により開発および拡張されてきた、地域圏（都道府県を複数に分割した小地域）別に将来の活動量を推計し、それに伴うエネルギー消費量や CO₂排出量を定量的に表現するモデルである。ExSS モデルの入力パラメータは、将来時点の地域内の産業構造やライフスタイルに関係するパラメータ（年齢構成、就業率など）と、将来の機器のシェアや効率等である。必要となる労働力から地域人口が、地域の消費から必要な産業の規模等が、連立方程式の均衡解として定量的に導き出され、それを基に部門ごとの活動量や必要となるエネルギー消費量が算出される。

ExSS モデルでは、滋賀県内を 8 の地域圏に分割して推計することができ、その一つの地域圏が高島市のみで構成される。よって、市民ワークショップで得られた将来の高島市の産業構造やライフスタイルに関する定性的な記述を定量的なパラメータに変換し、将来の部門別エネルギー消費量を算出した。なお将来の機器のシェアやエネルギー効率等のデータは、地球温暖化対策計画²³⁾の目標値を参考に設定した。

c) 再生可能エネルギーの多目的最適化によるパレート最適解群の導出

ExSS で算出した将来エネルギー消費量を再生可能エネルギーの多目的最適化モデル REROUTES に入力することで、地域の住民により描かれた将来像を実現するための再生可能エネルギーの組み合わせ最適解を導出した。再生可能エネルギー利用の組み合わせ多目的最適化モデルである REROUTES (Renewable Energy Regional Optimization Utility Tool for Environmental Sustainability)²⁴⁾²⁵⁾は、市区町村別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と、再生可能エネルギーの組み合わせを評価する 6 関数により、多目的最適化を用いて再生可能エネルギーミックスのパレート解群を算出し、各指標間のトレードオフを可視化するモデルである（図-4）。最適化の対象となる再生可能エネルギーは、太陽エネルギー、風力、中小水力、地熱、バイオマス由来のエネルギーである。再生可能エネルギーミックスの評価指標は再生可能エネルギー自給率、経済収支、CO₂比削減量、廃棄物系バイオマス資源リサイクル率、生態系影響面積および再生可能エネルギー種多様性指標の 6 種である。再生可能エネルギー種の供給ポテンシャルの上限や地域のエネルギー需要による制約条件下で、進化計算により最大 6 関数を目的関数とした多目的最適化を行うことが本モデルの機能である。

ExSS モデルにより算出された将来のエネルギー需要を入力し、REROUTES モデルを用いた多目的最適化を

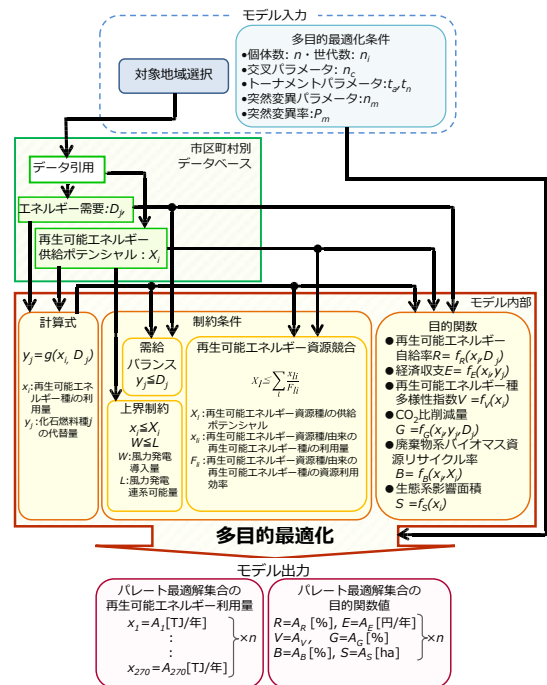


図-4 多目的最適化モデル REROUTES の概要

表-1 の条件で行い、6 次元空間でのパレート解集合を算出した。なお、対象とするバイオマスエネルギー種の細分化によるモデルの改良を行い²⁶⁾、決定変数は 267 の再生可能エネルギー種の利用量 [TJ] とした。得られた個体群を再生可能エネルギーの組み合わせ特性によってクラスタリングを行い、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に生じるトレードオフの関係を可視化した。

d) ヒアリングとアンケートによる最適解の共創的抽出

一対比較により、対象地域の意思決定者が考える目的関数の重要度と再生可能エネルギーの種類自体の優先度を定量化し、パレート最適解集合の中から最適な再生可能エネルギーの組み合わせ最適解を対話的に抽出するプロセスを設計した。具体的には、高島市内で再生可能エネルギー関連の実践活動を行う市民計 3 名を対象に、各種再生可能エネルギーの優先度と目的関数の相対的重要度の一対比較アンケートを実施した。加えてヒアリングにより、再生可能エネルギーの優先度や目的関数の重要度を考えた理由や要因についても調査した。

表-1 多目的最適化実装条件

パラメータ等	値等	パラメータ等	値等
説明変数	267	n_c	2
制約条件	174	t_a	10
目的関数	6	t_n	500
個体数	10000	n_m	3
世代数	1000	P_m	0.0001

一対比較アンケートの回答から、幾何平均法により回答者個人が考える再生可能エネルギーの優先度および目的関数の相対的重要度を算出し、その平均により対話的な最適解の抽出に用いる相対的優先度および相対的重要度を得た。次に、得られた選好に近い実現値

を有する個体が属するクラスタを選択し、その中から最適解の抽出を行うため、各クラスタの目的関数の重心およびエネルギー構成の重心を全パレート最適解集合における指数に変換し、相対的優先度および重要度と比較することで最適解の対話的抽出を行った。

表-2 望む将来社会の姿に関する意見から ExSS モデルへの反映 (一部抜粋)

項目	基準年 2000 年データ	ExSS への反映 (2040 年のパラメータまたは出力結果)
人口・世帯数	55,435 人 17,269 世帯 世帯あたり 3.2 人	⇒ 43,660 人 (高島市まち・ひと・しごと創生総合戦略より) 16,792 世帯 世帯あたり 2.6 人
年齢構成 (カッコは全国平均)	15 歳未満: 15.7% (14.6%) 15~64 歳: 62.0% (67.9%) 65 歳以上: 22.3% (17.3%)	⇒ 15 歳未満: 13.6% 15~64 歳: 50.5% 65 歳以上: 35.9%
就業率	15~64 歳男性: 80.8% 65 歳以上男性: 33.9% 15~64 歳女性: 55.5% 65 歳以上女性: 12.3%	⇒ 15~64 歳男性: 86.1% 65 歳以上男性: 52.4% 15~64 歳女性: 81.8% 65 歳以上女性: 41.3%
市内就労	約 85%	⇒ 約 90%
一日あたりの生活時間	男性 (40 歳 就業者の場合) 仕事: 7.4 時間 家事: 0.2 時間 交際・社会参加: 0.5 時間 女性 (40 歳 就業者の場合) 仕事: 4.6 時間 家事: 3.3 時間 交際・社会参加: 0.3 時間	⇒ 男性 仕事: 2 時間減(就業者のみ) 家事: 0.5 時間増(就業者のみ) 交際・社会参加: 1.5 時間増 女性 仕事: 0.5 時間増(就業者のみ) 家事: 0.2 時間減(就業者のみ) 交際・社会参加: 0.5 時間増
市内での働き方の割合	第 1 次産業: 7.3% 第 2 次産業: 43.9% 第 3 次産業: 48.8%	⇒ 第 1 次産業: 4.3% 第 2 次産業: 39.7% 第 3 次産業: 42.9% 自給のための農作業: 1.8% 第 6 次産業: 7.7% コミュニティのための仕事: 3.6% (バスの運行, 子育て, 教育, 介護福祉など)
仕事(労働生産性)	生産額 100 万円あたりの労働時間 第 1 次産業: 427 時間 第 2 次産業: 69 時間 第 3 次産業: 142 時間	⇒ 生産額 100 万円あたりの労働時間 第 1 次産業: 226 時間 第 2 次産業: 51 時間 第 3 次産業: 99 時間 農業: 平均して約 47%の向上(専業農家 81%向上, 6 次産業・こだわり農家 25%低下, 自給 50%低下) 製造業: 約 26%向上 サービス業: 約 30%向上
家庭の消費の内訳 (民間消費支出)	第 1 次産業: 1.3% 第 2 次産業: 21.8% 第 3 次産業: 76.9%	⇒ 第 1 次産業: 1.5% 第 2 次産業: 22.4% 第 3 次産業: 76.0% 農林水産品, 食料品, 木製品, 一般機械, 電気機械, 精密機械, 商業, 通信・放送, 教育・研究, 医療・保険・社会保障・介護, 対個人サービス: 20%増加
市内事業者の生産構造 (投入係数) ※市内の業者が何にお金を使うか	省略	⇒ 全産業: 廃棄物処理への支出割合が半減し, リサイクル(その他製造業)への割合が増える 農林業・食料品: 石油関連支出割合が 15%減, 同業間の支出が増える 建築業: 窯業(コンクリ)・金属製品の支出割合が半減し, 木製品への支出が増える 公務・教育: 石油関連への支出割合が半減し, 木製品への支出が増える, 電力関連への支出割合が半減し, 電気機械への支出が増える, 運輸への支出は現状レベル維持
県外との経済関係 輸出・移出	総額 2,741 億円 第 1 次産業: 県内移出 5 億円 県外輸出 64 億円 第 2 次産業: 県内移出 184 億円 県外輸出 2,268 億円 第 3 次産業: 県内移出 143 億円 県外輸出 78 億円	⇒ 総額 2,812 億円 第 1 次産業: 県内移出 7 億円, 県外輸出 59 億円 (県内向けの移出が増加, 県外向け輸出は減少) 第 2 次産業: 県内移出 257 億円, 県外輸出 2,189 億円 (電気機器, 精密機械の県外輸出は 30%増加) 第 3 次産業: 県内移出 222 億円, 県外輸出 77 億円 (商業は 10%増加, 対個人サービスの県外向け輸出は 30%増加)
輸入・移入	総額 2,712 億円 第 1 次産業: 県内移入 2 億円 県外輸入 60 億円 第 2 次産業: 県内移入 242 億円 県外輸入 1,648 億円 第 3 次産業: 県内移入 120 億円 県外輸入 640 億円	⇒ 総額 2,484 億円 第 1 次産業: 県内移入 2 億円, 県外輸入 42 億円 (県内からの移入は増え県外からは全量削減) 第 2 次産業: 県内移入 211 億円, 県外輸入 1,598 億円 (食料品の県内から移入は増え, 県外からはほぼ半減, 木製品は県内外あわせて約 70%削減) 第 3 次産業: 県内移入 97 億円, 県外輸入 533 億円 (県外からの商業・医療介護サービス約 80%減)
財政収支	省略	⇒ 公的支出(消費・固定資本)が 20%減 ただし運輸と医療介護への支出は現状維持

3. 結果と考察

(1) ケーススタディの各段階による結果

a) 将来像とエネルギー需要の将来予測

高島市まちづくり推進会議でのワークショップによって定性的に記述された望む将来社会の姿を基に、定量的に変換した ExSS モデルへ反映した 2040 年の入力パラメータまたは出力結果を表-2 に示す。

全体として、少子高齢化および人口減少は確実に進むものの、高島市内でのモノやサービスの循環を増やし、ローカルに存在するもので暮らしの充足度を高めていく将来像が描かれた。コミュニティのための仕事が見えたり、男女共に交際・社会参加にかかる時間が増加したりと、高島市民のための仕事に従事する住民や時間が増加することが望まれた。その達成のために、全ての産業において労働生産性は高まることが求められ、技術発展の恩恵を進んで受けることが想定された。再生可能エネルギーに関連する意見としては、伐採木材をチップなどのエネルギー源として用いて資金源とすることや、田畑へのソーラーパネルを制限することなどが挙げられた。

表-2 のデータにより ExSS モデルで算出した 2040 年の高島市のエネルギー需要を、REROUTES のデータベースに格納された高島市の再生可能エネルギーの供給ポテンシャルと並べて図-5 に示す。2040 年の高島市のエネルギー需要は全体の約 5 割が製造業を主とする産業部門におけるものであり、民生部門と運輸部門がそれぞれ約 3 割と 2 割を占める結果となった。図-5 の太陽光発電と太陽熱利用のみ、同じ未利用面を利用するため競合関係にあるが、再生可能エネルギー種の供給ポテンシャルはそれぞれ独立である。よって単純にエネルギー量を比較すると、再生可能エネルギーの供給ポテンシャルはエネルギー需要を上回っていた。

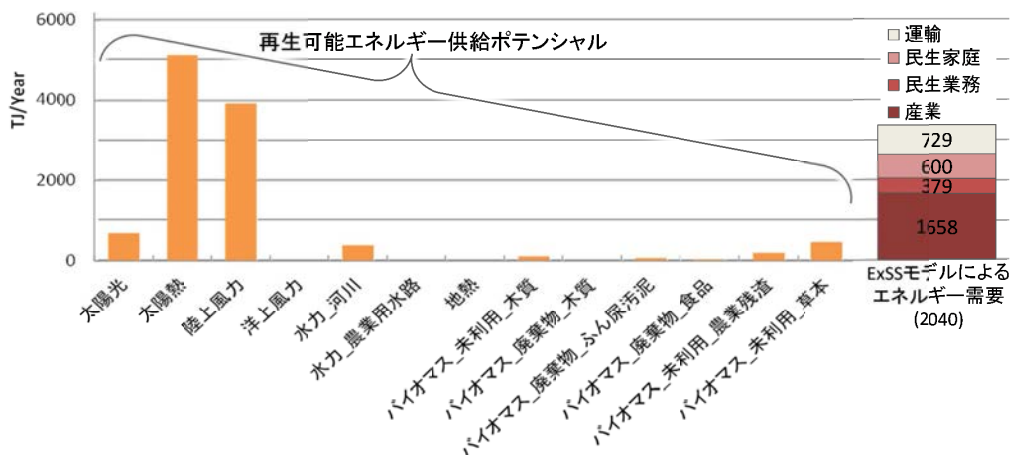


図-5 ExSSモデルによる将来のエネルギー需要と REROUTES のデータベースによる高島市の再生可能エネルギー供給ポテンシャル

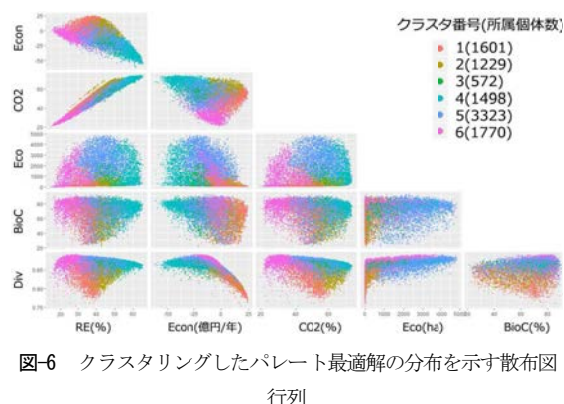


図-6 クラスタリングしたパレート最適解の分布を示す散布図
行列

※RE：再生可能エネルギー自給率，Econ：経済収支，CO2：CO₂比削減量，Eco：生態系影響，BioC：廃棄物系バイオマス資源リサイクル率，Div：多様性指数

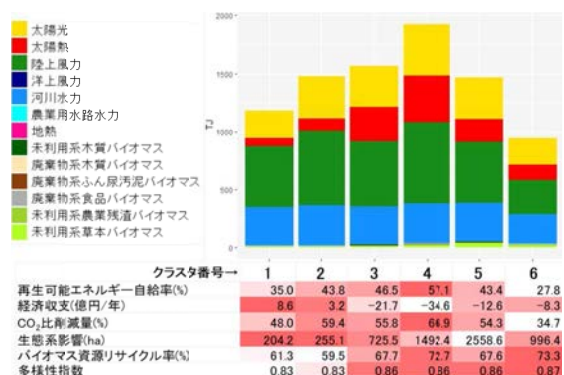


図-7 各クラスタの再生可能エネルギーミックスおよび目的関数の重心

※各目的関数ごとにより望ましい値をより濃く網掛けした。

b) 多目的最適化によるパレート最適解群の算出

ExSSモデルにより出力された 2040 年のエネルギー需要を基に REROUTES モデルを適用し、パレート最適解

群を算出した。最終世代の6次元のパレート最適解集合を6つのクラスタに分類し、クラスタ別の目的関数値の分布を図-6、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-7に示す。

これらの結果から、各クラスタにおけるパレート最適解を実現する再生可能エネルギーの構成がわかる。例えば図-6に赤色で示されるクラスタ1に属する最適解群は、風力発電、水力発電、太陽光発電を主に利用しながら、経済的インセンティブの低い太陽熱利用の利用は他の

のクラスタに比較して最も少ないことで、経済的優位性が平均的に最も高いクラスタを形成している。しかしながら風力発電と太陽熱利用などの他のエネルギーとの間では利用量に大きな差が生じ、多様性指数は最も小さなクラスタとなっている。またバイオマス由来の再生可能エネルギー資源は他のエネルギー資源に比較してポテンシャルが小さいため、多様性指数を高めるためにはバイオマス由来の再生可能エネルギー種の利用を増やすことが必要となる。紫色で色付けされたクラスタ6は、その条件を満たしたクラスタとなっており、バイオマス資源リサイクル率と多様性指数の双方が最も大きなクラスタとなっている。また、クラスタ4とクラスタ5において生態系影響が大きくなっているのは、ササヤススキなど低密度に分布する未利用系草本バイオマスを多く利用しているため、それらの資源を刈り取ることで資源循環が改変する面積が大きくなったと考えられる。このように、高島市における再生可能エネルギーの供給ポテンシャルと将来需要を基に、パレート最適な再生可能エネルギーの組み合わせ解を算出し、それらによる目的関

数の実現値とトレードオフを可視化した。

c) アンケート結果を用いた最適解の共創的抽出

高島市内で再生可能エネルギー関連の活動を行う市民計3名を対象に行った一対比較アンケートの結果から、利用する再生可能エネルギーの相対的優先度と目的関数の相対的重要度は表-3および表-4となった。

再生可能エネルギーでは、水力発電や木質バイオマス利用の相対的優先度が高い結果となった。その理由は、小水力発電による地域の活性化や、木質系のバイオマス利用による地域の山林資源の利用および温暖化の緩和を目的と考える回答者が多かったことである。数値としては水力発電の重要度が最も大きいですが、本来は木質バイオマスが最も活用したい資源であり、その資金面を補助する方策として水力の優先度を高く考える意見がヒアリングから得られた。なお優先度の解釈として、設備規模が大きく個人での導入が難しいなど、導入を“推進”する対象としての優先度という意味での回答も含まれていたことに注意が必要である。

目的関数では、多様性指数が最も重要度が高く、生態系影響とCO₂比削減量が続く結果となった。多様性指数の重要度が最も高い理由としては、例えば経済的優位性が低いバイオマス利用の資金面を水力発電で補うなど、複数の種類の再生可能エネルギーを利用することで、各エネルギーの短所を補完することが重要と考えられていたことが挙げられる。なお、多様性指数は他の関数に比べて“全く重要でない”という旨の回答をした回答者がおらず、平均的なスコアが上がったとも考えられる。生態系影響とCO₂比削減量が次いで重要度が高くなった理由は、高島市内でも台風や洪水被害の拡大として顕在化してきた気候変動が、対処すべき大きな脅威と考えられていたこと、しかし再生可能エネルギーが田畑を犠牲にするなど地域の自然を破壊しては本末転倒である、という意見に基づく考えられる。

これらのアンケートおよびヒアリングの結果と、算出したパレート最適解集合から、高島市民の選好と将来ビジョンを加味した高島市の再生可能エネルギーの組み合わせ最適解を抽出した。パレート最適解全体におけるクラスタ別の解の重心を標準化した指数と、調査した相対的優先度および重要度をレーダーチャートで示したものが図-8である。赤線で示された相対的重要度および相対的優先度（相対値なため全体を拡大して表示）とチャートの形状が相似するクラスタが、住民の選好に最も近い傾向の解群といえる。レーダーチャートの俯瞰から、中でも重要度が高い多様性指数、CO₂比削減量、優先度が高い水力発電、木質バイオマスの優位性が揃っているクラスタ4に着目した。しかし2番目に重要度が高い生態系影響は、他のクラスタの方が優位であり、トレードオフを生じていた。そのため、

表-3 再生可能エネルギーの相対的優先度

再生可能エネルギーの区分	相対的優先度
太陽光発電	0.08
太陽熱利用	0.09
陸上風力発電	0.07
水力発電	0.36
地熱発電	0.03
木質バイオマス	0.23
廃棄物系バイオマス	0.09
その他未利用バイオマス	0.05

表-4 目的関数の相対的重要度

目的関数	相対的重要度
再生可能エネルギー自給率	0.15
経済収支	0.07
CO ₂ 比削減量	0.20
生態系影響	0.21
廃棄物系バイオマス資源リサイクル率	0.13
多様性指数	0.23

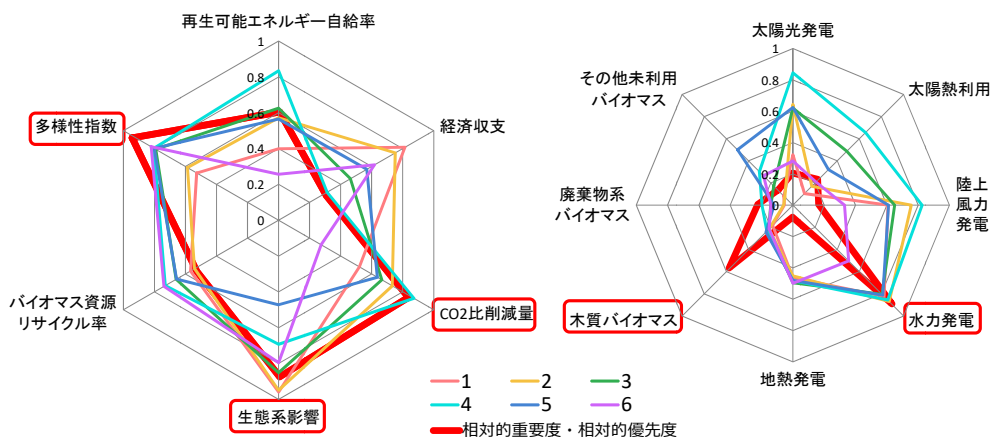


図-8 左)クラスタごとの目的関数値の指数と目的関数の相対的重要性度の比較, 右) クラスタごとの再生可能エネルギー利用量の指数と再生可能エネルギーの相対的優先度の比較

クラスタ 4 から生態系影響が最も小さい個体を抽出した。

クラスタ 4 の中から、生態系影響が最も小さい 5 個体を抽出した結果を図-9 に示す。生態系影響が最も小さい解が解 A であり、右の解ほど生態系影響は大きくなる。5 つの解を比較し、相対的重要性度と優先度の高い多様性指数、生態系影響、CO₂ 比削減量、優先度の高い水力発電、木質バイオマスの優位性が揃う解として、解 A を高島市における再生可能エネルギーの組み合わせ最適解として抽出した。

(2) 有用性評価結果

本ケーススタディで試行した、共創的なバックキャストリングによる将来像の形成とその将来像に向けた再生可能エネルギーミックスの最適化から成る、地域エネルギーシステム的设计支援手法の有用性評価を受けるため、高島市役所職員にヒアリングを 2017 年 12 月に実施した。調査対象は再生可能エネルギー事業や市民協働事業を取り扱う職員計 4 名であった。

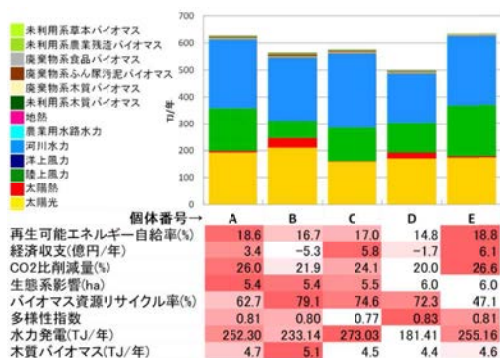


図-9 クラスタ 4 の中で生態系影響が最も小さい 5 個体
※各目的関数ごとにより望ましい値をより濃く網掛けした。

a) 総合的な有用性評価結果

総合的な評価結果として、本手法は地域での再生可能エネルギー利用にかかる意思決定に有用であると評価を得た。特に、行政調査では達成できない、専門的な知識や計算技術に基づいて最適な再生可能エネルギーミックスが提案されていたという信頼性が評価を受けた。加えて、最適化計算自体は「地域の意見に基づく意思決定」のための 1 段階として位置づけられ、あくまで市民による意思決定のために再生可能エネルギー供給ポテンシャルの数値化やトレードオフの可視化がなされる点が、市民の議論の基となり理解を深めるために有用であると評価された。実際の再生可能エネルギー利用の計画策定に反映するために本手法を活用し、今後環境行政で多様な市民から収集する再生可能エネルギーへの意見を基にした結果も知りたいとの要請を受けた。

b) 今後の発展可能性に関する指摘

実際の計画策定に向けて、本提案手法をより有用にするために、4 つの発展可能性の指摘を受けた。

1 点目は、集落単位での地域課題への波及効果の提示である。再生可能エネルギー利用が与えるメリットを市内の集落単位で示し、各集落で異なる様々な課題解決に寄与する可能性が明らかになれば、より住民の満足度の高い合意形成が可能となるとの意見が得られた。

再生可能エネルギーが地域課題に寄与する可能性として、例えば小水力発電を用いた地域づくり活動を展開した岐阜県郡上市石徹白地区がある²⁷⁾。石徹白地区では、農業用水を利用した小水力発電をシンボルとした地域づくり活動の発信により、地域外から見学者が多く訪れるようになり、石徹白地区のファンとなり移住に至る見学者も出てくるなど、人口減少の緩和につながったという。このように、再生可能エネルギーは

様々な地域課題の解決、言い換えればエネルギー利用以外の点からも望ましい将来像の実現に寄与する可能性を有しており、その効果は時に市区町村単位でなく集落単位で発揮されると考えられる。よって今後、集落単位での地域の課題解決への効果や将来像への寄与を含めた再生可能エネルギー導入の意思決定を支援するために、本手法のダウンスケールの検討が望まれる。

2点目は、再生可能エネルギーの選択肢や計算条件の共有に関する指摘である。再生可能エネルギーの供給ポテンシャル自体は数値として把握できるものの、一般住民になじみのないエネルギーも多く、各エネルギーを利用した際の生活の変化や、メリットやデメリットなどの把握が難しいという指摘を受けた。実際の計画策定時にはより多様な地域の主体から再生可能エネルギーの選好等の意見を収集することが想定されるため、再生可能エネルギーの選択肢や計算条件に関するより理解が容易な情報提供が必要と考えられる。

この対応として、住民への選好調査の前段階に、住民と再生可能エネルギーの特性や利点、利用条件等を共有するプロセスを加えることが挙げられる。様々なワークショップやメディアアートをを用いた可視化手法が、一般市民の参加における科学的な情報の共有や公共的な技術選択に必要なものとして研究開発されている²⁸⁾。それらを参考に、再生可能エネルギーの実装がもたらす社会像を住民の暮らしに翻訳可能なイメージとして共有する手法を追加的に設計する必要がある。

3点目は、最適解の抽出プロセスへの専門家の参画に関してである。市役所職員からは、最適解の抽出プロセスにおいて、市民の選好や意見のみならず専門家の意見も取り入れる必要があるとの提案を受けた。パレート最適解集合算出の際に科学的知見が利用されているとしても、その選択に専門家が全く介入しない場合、パレート最適解の中に含まれるリスクなどが認識されないまま選択される可能性がある。

例えば三上²⁹⁾などが論じるように、科学による決定が困難な問題に対し、その意思決定に市民が参加することは広く必要と考えられている。これは専門家の判断が社会的意思決定において役割を失うことではなく、参加型プロセスの中で市民が形成する意見と専門家の判断との関係や、それらの調整が重要ということを意味している。例えばコンセンサス会議³⁰⁾や市民陪審³¹⁾等のプロセスで用いられる、市民が意思決定を行う前段階で専門家と十分な討議や質疑を行うプロセスを本研究で提案手法に追加するなど、専門的知識や意見も反映できる枠組みを構築することが必要と考えられる。

4点目は、再生可能エネルギーの供給ポテンシャルの将来的な変動予測である。都市構造や気候の変化等により、再生可能エネルギーの供給ポテンシャルも変化

する可能性がある。例えば太陽光発電や太陽熱利用に関しては、設備を設置可能な建物の屋根などの未利用面の推移のシミュレーションにより、また木質系や草本系バイオマスについては、生物地球化学プロセスモデルを用いたバイオマス生産量の予測により、供給ポテンシャルの将来的な変化を予測したうえで最適化を行うことが必要と考えられる。

4. 今後の展望

今後は、有用性評価において得られた指摘を優先的に、より実用的な手法への拡張を行っていく予定である。具体的には、市区町村単位でなく集落単位での波及効果を提示するための、再生可能エネルギーミックスの影響評価の空間解像度等の向上、多様な可視化手法を用いた再生可能エネルギー種や計算条件の共有プロセスや、専門家の参画による最適解抽出方法の共創的最適化プロセスへの追加、再生可能エネルギー供給ポテンシャルの将来予測スキームの追加等に優先的に取り組む。

備考：原単位の見直し再計算により、有用性評価時の提示結果と本稿掲載結果の値自体は異なる。

謝辞：ご協力いただきました、高島市役所職員および高島市民の皆様に感謝申し上げます。なお本研究は、平成28年度日本学術振興会特別研究員奨励費 16J00845、日本学術振興会科学研究費助成事業基盤 C：T16K006510、基盤 C：17K00707 のご支援を受け実施致しました。

参考文献

- 1) 外務省：「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」仮訳，<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/files/000101402.pdf>, (2018.07.31 参照)。
- 2) Jaco Quist, Philip Vergragt: Past and future of backcasting: The shift to stakeholder participation and a proposal for a methodological framework, *Futures*, Vol 38, Issue 9, pp. 1027-1045, 2006.
- 3) Philip J. Vergragt, Jaco Quist : Backcasting for sustainability: Introduction to the special issue, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol 78, Issue 5, pp. 747-755, 2011.
- 4) A.B. Lovins: *Soft Energy Paths: Toward a Durable Peace*, Friends of the Earth/Ballinger Publishing Company, Cambridge, MA, 1977.
- 5) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の地域別将来推計人口，2018, http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson18/1kouhyo/gaiyo_spd.pdf, (2018.07.31 参照)。
- 6) 環境エネルギー政策研究所：自然エネルギー白書 2017, 2018, <http://www.iseip.or.jp/jsr/2017report>, (2018.07.31 参照)。
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構，新エネルギー・省エネルギービジョン策定ガイドブック，pp.13, 2003.
- 8) Katharina Kowalski, Sigrid Stagl, Reinhard Madlener, Ines Omann : Sustainable energy futures: Methodological challenges in combining scenarios and participatory multi-criteria analysis, *European Journal of Operation*

- al Research, Vol.197, pp.1063-1074, 2009.
- 9) Vangelis Marinakis, Haris Doukas, Panos Xidonas, Constantin Zopounidis : Multicriteria decision support in local energy planning: An evaluation of alternative scenarios for the Sustainable Energy Action Plan, Omega, Vol.69, pp.1-16, 2017.
 - 10) Future Earth : Future Earth Initial Design, International Council for Science, 2013, http://futureearth.org/sites/default/files/Future-Earth-Design-Report_web.pdf, (2017.12.09 参照).
 - 11) 高島地域雇用創造協議会 : 公式ホームページ「滋賀県高島市について」, <http://www.takashima-shigoto.jp/aboutus/takashima/>, (2017.11.30 参照).
 - 12) 認定NPO法人e ネットびわ湖高島 : 滋賀県高島市の情報ポータルサイトびわ湖源流の郷「高島市の特徴」, https://biwako-genryushiga.jp/?page_id=554, (2018.01.05 参照).
 - 13) 高島市役所 : 公式ホームページ「市政の情報」, <http://www.city.takashima.lg.jp/www/contents/1134432294572/index.html>, (2017.11.30 参照).
 - 14) 高島市 : 第2次高島市総合計画, 2017
 - 15) 高島市 : 第2次高島市環境基本計画, 2017.
 - 16) 高島市 : 高島市新エネルギービジョン, 2008.
 - 17) 高島市 : 高島市まちづくり推進会議設置要綱, 2015.
 - 18) 島田幸司, 田中吉隆, 五味馨, 松岡譲 : 低炭素社会に向けた長期的地域シナリオ形成手法の開発と滋賀県への先駆的適用, 環境システム研究論文集, Vol. 34, pp.143-154, 2006.
 - 19) 五味馨, 島田幸司, 松岡譲 : 地方自治体における統合環境負荷推計ツール開発と滋賀県への適用, 環境システム研究論文集, Vol. 35, pp.255-264, 2007.
 - 20) 五味馨, 金再奎, 松岡譲 : 地方自治体における費用負担を考慮した低炭素社会へのロードマップ構築手法の開発, 土木学会論文集 G(環境システム研究論文集第 39 巻), Vol.67, No.6, pp.II 225-234.
 - 21) 由良僚章, 五味馨, 島田幸司, 松岡譲 : 地域的特性を考慮した低炭素社会の構築手法に関する研究, 環境システム研究論文発表会講演集, Vol.36, pp.37-44, 2008.
 - 22) 内藤正明 : 研究開発プロジェクト「滋賀をモデルとする自然共生社会の将来像とその実現手法」研究開発実施修了報告書, 2012, http://ristex.jp/examin/env/program/pdf/20121004_07.pdf, (2017.11.30 参照).
 - 23) 環境省 : 地球温暖化対策計画, 2016, <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/taisaku.html>, (2018.07.06 参照)
 - 24) 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, Vol.93, pp.548-561, 2016.
 - 25) 堀啓子, 松井孝典, 小野智司, 福井健一, 蓮池隆, 町村尚 : 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, 人工知能学会論文誌, Vol.33, No.3, F-SGAI01_1-11, 2018.
 - 26) 西口舞, 堀啓子, 松井孝典, 町村尚 : 多様なバイオマスエネルギー利用オプションを加えた再生可能エネルギーミックスの最適化 : 第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2018.1.
 - 27) 査舘, 竹歳一紀 : 小水力発電が農山村地域の課題解決に果たす役割—岐阜県郡上市石徹白地区と奈良県吉野町を事例として—, 農林業問題研究, Vol.52, No.4, pp.247-252, 2016.
 - 28) 科学技術振興機構科学コミュニケーションセンター : 科学コミュニケーション案内, 2014, https://www.jst.go.jp/csc/mt-static/support/theme_static/csc/pdf/brochure_01.pdf, (2017.12.14 参照).
 - 29) 三上直之 : 市民参加の場における「市民専門家」の構成, 神戸法学雑誌, Vol.60, No.2, pp.430-452, 2010.
 - 30) 小林傳司 : 誰が科学技術について考えるのか—コンセンサス会議という実験, 名古屋大学出版会, 2004.
 - 31) 相良敬 : 環境政策決定過程における市民陪審, 水資源・環境研究, Vol.15, pp.31-39, 2002.

(2018.8.24 受付)

A PROPOSAL OF A CO-CREATIVE DESIGN SUPPORT METHOD FOR LOCAL ENERGY SYSTEM BY MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION MODEL OF RENEWABLE ENERGY MIX AND CO-CREATIVE OPTIMIZATION PROCESS

Keiko HORI, Jaegyung KIM, Reina KAWASE, Michinori KIMURA, Takanori MATSUI and Takashi MACHIMURA

To form a sustainable local energy system, it is necessary to select an appropriate renewable energy mix by the backcasting method based on evaluation of multiple impacts of the implementation, and the involvement of diverse stakeholders. From this backdrop, the purpose of this study is to propose a co-creative local energy system design support method consisting of participatory development of local future vision, multiobjective optimization of regional renewable energy mix consistent with the future vision, and co-creative optimization process coupling with the preference of local residents. A case study in Takashima City, Shiga prefecture in Japan, was conducted for a trial of the proposed method by collaboration with the second term of Community Promotion Council of Takashima City. As a result, the proposed method could successfully derive an optimum renewable energy mix for Takashima city by backcasting and the participation of stakeholders with mature co-creation.