

多数目的最適化の応用研究の現場から —再生可能エネルギーベストミックスの探索事例—

松井 孝典, 堀 啓子

現在, 地球温暖化を緩和するべく, 世界各国で化石燃料エネルギーシステムから再生可能エネルギーシステムへの転換が進められている。しかしながら, 再生可能エネルギーは, 地域固有の自然システムに強く関連したエネルギーであるため, 地域社会や自然環境との親和性を十分に考慮した計画の立案を支援する必要がある。本稿では, われわれが進めてきた再生可能エネルギーがもつ多様な特性を考慮して, 多数目的下でエネルギーミックスを最適化できる意思決定支援システム REROUTES の開発事例を紹介する。また特に多数目的最適化の応用研究の現場から, 実装・運用段階での経験と課題を共有する。

キーワード: 多数目的最適化, 再生可能エネルギー, ベストミックス

1. はじめに

持続可能科学では, 再生可能エネルギーシステムへの転換や地球温暖化への対応, 生物多様性保全や資源の循環利用といった「環境的側面」, 産業・経済の活性化や技術制度開発などの「社会的側面」, 人々を安全・安寧させる健やかなライフスタイルを営む「人間的側面」をバランスした持続可能システムの設計が求められている [1]。この素養の性質上, 設計対象となるシステムは必然的に, システムを構成する利害関係実体ごとに異なる目的をもった多数目的な複雑システムとなる。本稿では, まず, この観点に基づいて地域スケールで再生可能エネルギーミックスを導入するための多数目的最適化支援システムの開発事例を紹介し, この事例を通じて得られた応用現場での課題を議論したい。

2. 再生可能エネルギー実装のための多数目的最適化支援システム: REROUTES

2.1 再生可能エネルギーミックスの実装

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, 日本でも 2012 年に開始された固定価格買取制度 (Feed-in Tariff: FIT) に後押しされて, 急速に導入が拡大した [2]。しかしながら, 現在のように, 特に低炭素化と経済への正の影響が重視される情勢では, (1) 大規模資本がメガソーラの導入によって資源と利

益を独占する, (2) 補助金に大きく依存した農林水産主体が小規模なバイオマスエネルギー生産を展開する, (3) まちづくりや雇用を重視する非営利主体が地域コミュニティの互助といった社会資本を頼りに奉仕的に活動するなど, 地域の文脈の多様性を考慮しない定型の開発に帰着しがちである。本来, 地域ごとの再生可能エネルギーのポートフォリオの多様性を考慮したうえで, 地域社会固有の強み・弱み・機会・脅威に応じて, どこまでの再生可能エネルギー導入レベルを目指すか, 経済性は許容できる範囲か, 変動性のあるエネルギーの導入により不安定供給が生じないか, 国際的な炭素排出削減の要求に対応しうるか, バイオマス利用の健康な物質循環が担保されるか, 地域固有の自然生態系と共生しうるかなど, 持続可能要件を統合的に熟慮した将来ビジョンを共創する必要がある。

この背景から, われわれのチームでは, 地域別再生可能エネルギーミックス最適化支援システム REROUTES (Renewable Energy Regional Optimization Utility Tool for Environmental Sustainability) の開発を進めている [3]。この名称には化石依存社会からの転換に向けたわれわれの“再出発”への願いを込めている。このシステムは基礎自治体を空間解像度として, 地域ごとの太陽, 風力, 中小水力, 地熱, バイオマスを大区分とするエネルギー賦存量と地域エネルギー需要を比較し, 導入時の炭素収支と市場経済性, 自然生態系や物質循環への影響など, 再生可能エネルギーシステムの持続可能性にかかわる評価指標を数理モデルとして表現している。地域社会の再生可能エネルギーシステムの将来ビジョンを可視化し, 意思決定を支援するシステムである (図 1)。モデルの詳細は先行文献をご

まつい たかのり, ほり けいこ
大阪大学大学院工学研究科
〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
matsui@see.eng.osaka-u.ac.jp
keiko.hori@see.eng.osaka-u.ac.jp

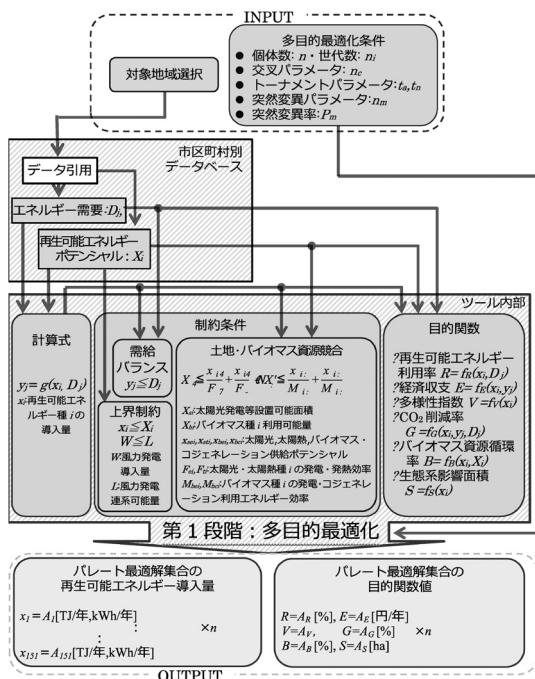


図1 REROUTES のモデル構造の概要

参照いただき [4], 本稿では以下にモデル構造と挙動の概要を示す。

2.2 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ベース

データベースは、日本全国の1,742の基礎自治体を最小単位として県・地方を階層的に表現できる。最適化の対象となる再生可能エネルギーは、環境省の「再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書」[5]および新エネルギー・産業技術総合開発機構の「バイオマス賦存量・有効利用可能量の推計」[6]を基盤情報として活用している。これにより、データベース内に太陽光発電、太陽熱利用、陸上・洋上風力発電、河川・農業用水路での中小水力発電、地熱発電、木質・草本系、農業系、畜産系、廃棄物系バイオマスを原料とした発電とコジェネレーションが、利用形態や資源の種類、風速や温度帯などのエネルギーの規模によって小区分125種に格納している。また、各基礎自治体のエネルギー需要は、経済産業省の「都道府県別エネルギー消費統計」[7]に基づき、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、石油ガスの消費量と地域熱供給量を当該地域のエネルギー需要情報として保持している。

2.3 持続可能性の評価指標の設計

再生可能エネルギーミックスの良し悪しを評価する指標には、①再生可能エネルギー利用率 (RE: %), ②

経済収支 (Econ: 億円), ③ CO₂ 削減率 (CO₂: %), ④ バイオマス資源循環率 (BioC: %), ⑤ 潜在的生態系影響面積 (Eco: ha), ⑥ 多様性指標 (Div: -) の6種類を設計している。いずれも RE の導入量の組合せと、RE で代替された電力量および化石燃料の消費量に依存する関数である。

①再生可能エネルギー利用率 (RE) と② CO₂ 削減率 (CO₂) は正であるほど低炭素・持続可能エネルギーシステムの構築に資する指標である。③経済収支 (Econ) は再生可能エネルギーを導入することで地域にもたらす費用便益を評価するものである。④バイオマス資源循環率 (BioC) は未利用あるいは廃棄される運命の資源を地域で有効活用する割合を表した資源循環システムの形成に寄与する指標であり、⑤潜在的生態系影響面積 (Eco) は小さいほど地域の自然生態系と調和していることを意味する。共に自然共生型エネルギーシステムの構築に資する指標である。⑥多様性指標 (Div) は地域の再生可能エネルギーシステムの不純度を表現し、レジリエンスを代理する指標として設計している。

2.4 制約条件の設定

実行可能解の制約条件には、(1) 再生可能エネルギーの供給ポテンシャル、(2) 太陽光パネルと太陽熱パネルの設置といった土地利用の競合、(3) 電気・熱利用技術の選択時のバイオマス資源利用可能量の競合、(4) 熱源のオンサイトでの熱需要量、(5) 風力発電の連系許容量についての制約条件を課している。

2.5 再生可能エネルギーミックスを導出するための多数目的最適化ソルバーの実装

ソルバーには、パレートフロントを特定して複数の最適解候補を導出できる機能が求められるため、現在では Deb et al. [8] が開発したパレート概念に基づく多数目的進化計算アルゴリズム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) で実装している。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めの交叉および突然変異の方法は、擬似二進交叉 (Simulated binary crossover: SBX) と多項式突然変異法 (Polynomial mutation: PM) を用いている。

3. 多数目的最適化と可視化の事例

3.1 ケース：東広島市

本稿の評価対象のケースの東広島市は、民生部門でのエネルギー需要が9割以上を占める市街地型都市であり、熱需要と電力需要がほぼ同程度である。主とし

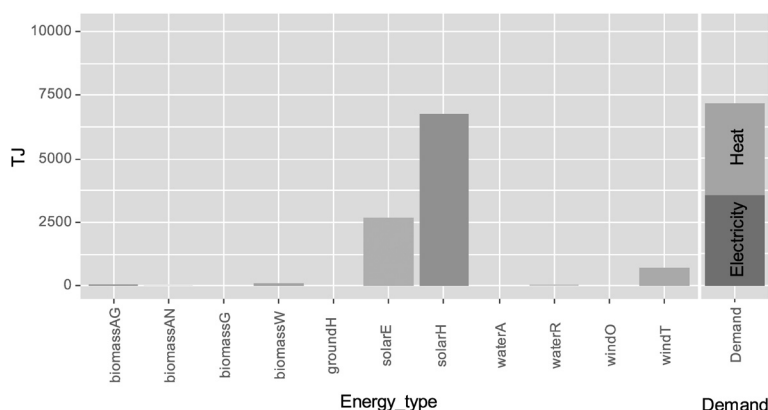


図2 東広島市の再生可能エネルギー供給ポテンシャル

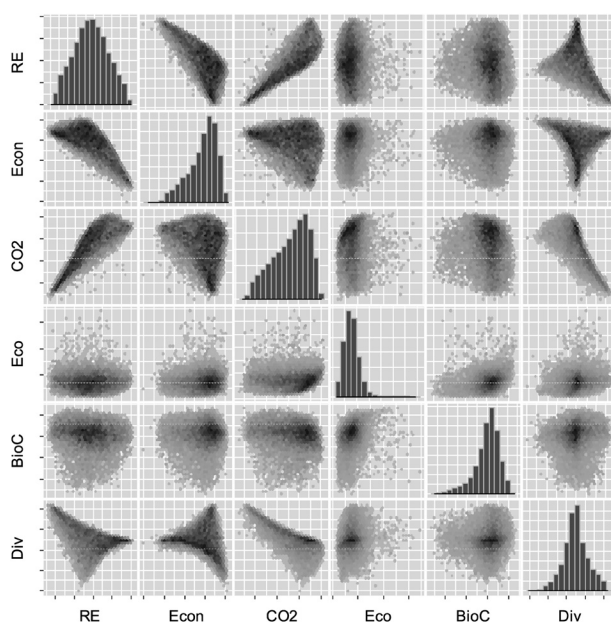


図3 エネルギー個体群密度の可視化によるパレートフロントの抽出

て太陽エネルギーを保有し、陸上風力が少量賦存する (図2)。なお、図2および図6のc (solarE, solarH, windT, windO, waterR, waterA, groundH, biomassG, biomassAG, biomassAN, biomassW) はc (太陽光、太陽熱、陸上風力、洋上風力、河川水力、農業用水路水力、地熱、木質・草本バイオマス、農業系バイオマス、畜産系バイオマス、廃棄物系バイオマス) を表し、125種類の小分類のエネルギー種を11種類の中分類に集計したものである。

3.2 評価指標間のパレートフロントの抽出機能

図3のように、REROUTESモデルでは、六つの評価指標間の散布図行列を示すことができる。非対角要素の散布図の濃淡はhexplotによって可視化した個

群の密度の大小を表し、対角要素は各評価指標のヒストグラムを表す。この事例では、進化計算は100世代10,000エネルギー個体群で実行し、エネルギー個体群のパレートランクならび混雑度は10世代目付近、六つの評価指標の個体群ベクトルが張るhypervolumeは50世代目付近で収束を示した。

図3で確認できるように、東広島市ではREとEcon、CO₂間でシナジー・トレードオフ関係が顕著に可視化されている。LC-CO₂で炭素収支に問題がないREを導入すればCO₂の削減に寄与するが、ある水準以上のREおよびCO₂を期待する場合には経済性が急激に悪化するというトレードオフが示されている。これはエネルギー効率はよいが経済性が高くない再生可能

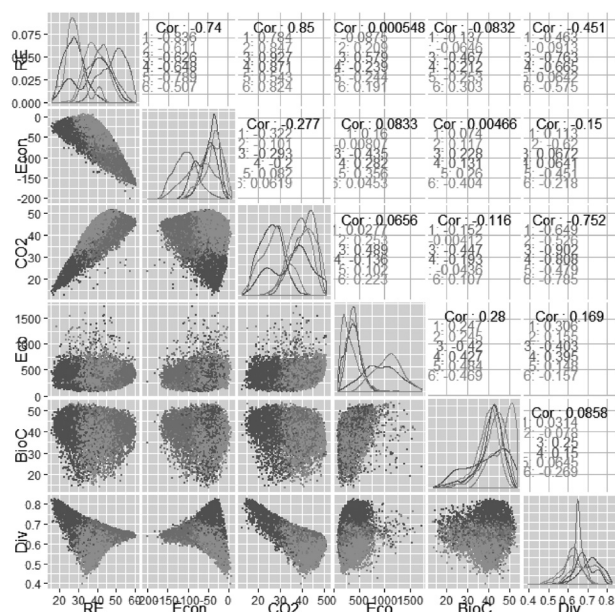


図4 エネルギー個体群のクラスタリングによる解候補集合の抽出

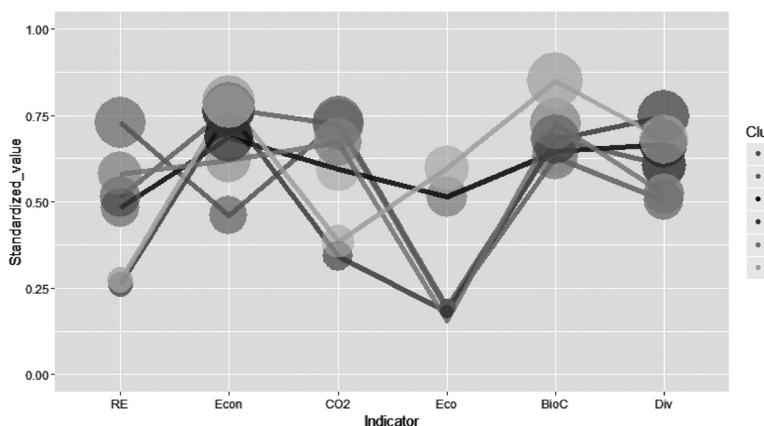


図5 クラスタ別の評価指標値の平行座標プロット

熱の利用にどこまで着手するか熟慮が必要であるという知見を与える。Eco と BioC は端点に収束する傾向を見せており、東広島市ではあまり未利用資源の循環や生態系への影響を懸念する必要がないという情報が得られる。また Div では、太陽エネルギーが賦存量の大半を占めるため、RE および CO₂ を向上させた場合には太陽エネルギーで画一化することで Div が下がるトレードオフ関係にある。しかし散布図行列の要素 (6, 1) の第 1 象限にみられるように、Econ との両立を目指す場合にはトレードオフをデカップリングできる解候補が存在することが可視化されている。

3.3 特徴的な再生可能エネルギーミックスの解候補集合の抽出と評価指標値の優位性の可視化

図 4 に、多数目的最適化の実現値を入力として、自己組織化マップと k -means 法によりエネルギー個体群をクラスタリングした例を示す。ここでは、各評価指標に特徴をもつ解群に分割される可能性を考慮してクラスタ数を 6 とし、各クラスタの個体数はそれぞれ $N = c(2453, 2330, 58, 1219, 2626, 1314)$ を得ている。

次に、平行座標プロットを使用してクラスタ別のエネルギー個体群が実現する評価指標値のシナジー・トレードオフ関係を可視化したものが図 5 である。横軸は評価指標の種類、縦軸は正規化した評価指標値、各

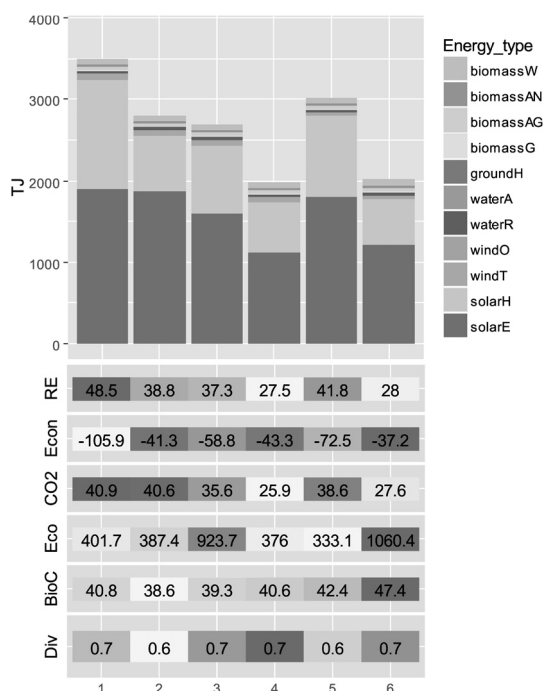


図6 クラスタ別の再生可能エネルギーミックスの候補補と評価指標の重心値

プロットのサイズはその評価指標のクラスタ内分散に比例させている。東広島市の再生可能エネルギーシステムは、おおむね再生可能エネルギー利用率 (RE) と経済収支 (Econ), CO₂ 削減率 (CO₂) と潜在的生態系影響面積 (Eco) の四つの評価指標で特徴づけられるといえる。再生可能エネルギー利用率 (RE) とシナジー関係をもつ評価指標は CO₂ 削減率 (CO₂) であり、トレードオフ関係をもつものは経済収支 (Econ) と潜在的生態系影響面積 (Eco) であることが示されており、評価指標間の連環関係の大まかな傾向が得られる。

3.4 再生可能エネルギーミックスの候補補と評価指標値の提案

最終的なサマリーとして、REROUTES モデルでは、図6に示すようなクラスタ別の再生可能エネルギーミックスの候補補の重心値とその評価指標の実現値の重心値をヒートマップにしたものを可視化する。東広島市のケースでは、中分類レベルの11種類のエネルギー種では、一見、主として太陽エネルギーの電気・熱利用の資源分配のみで再生可能エネルギーミックスの特徴が決まっているように見える。しかしながら、11種類の中分類レベルを125種類の小分類に分割した場合には、太陽光電力と太陽熱が土地利用競合をもつ中で、エネルギー種別の場所・規模に応じたパラメータによって、どのエネルギーを優先的に導入するかが異なっ

おり、可視化の粒度を小さくすることで、より詳細な空間・規模での再生可能エネルギーの実装のための支援情報も提供することができる。

4. 応用現場から

ここからは、上記の多数目的最適化モデルを汲み上げていく中で経験してきた課題を以下に述べたい。この中には環境・エネルギー科学固有のものや、多数目的最適化に直接には関係しないものも記述した。これらも多数目的最適化研究がさまざまな分野で発展するためには重要な論点であると考えたためであり、どうかご容赦いただきたい。

4.1 データの不確実性と入手容易性

工学系の最適設計とは異なり、本研究は、現在進行形で進んでいる再生可能エネルギーの開発を社会・経済・技術的側面をクロスオーバーして取り扱う多数目的最適化問題である。そのため、実は多数目的最適化モデルを実装する前処理の再生可能エネルギー種別の詳細なデータを収集する段階で多くの困難を伴っている。

現在のREROUTESモデルでは、2.2節の125種類の再生可能エネルギー種を取り扱うが、これらすべてのエネルギー種について2.3節で示した多数目的指標を算出するための膨大な諸元情報を欠損値なしに収集しなければならない。このため、各省庁の統計情報やプロジェクト報告書などをweb上からしらみつぶしに探索することになるが、この過程では、極めて大きい分散をもった相互に矛盾する情報群と出会うことになる。しかもこれらの諸元データは社会の変遷に応じて変化するものである。これまでさまざまな研究者と議論を繰り返す中で、不確実性の取り扱い是最適解の信頼性に関わる本質的な課題であり、NSGA-IIベースのような決定論的なパレートフロント明示型のソルバーを“多数目的ロバスト最適化”へ拡張することは不可欠である。

一方で、統計情報や報告書などは一般に.xlsxや.pdfで公開されるが、これが厄介な問題を生じさせる。一般に.csvは社会ではなじみはなく、情報提供は.xlsxのインターフェースでデータを公開することが大半である。そしてそのデータには複数の変数が複数の結合されたセル内に入力されたり、複数桁のnumericが単一のcharに分解されて別セルに入力されたりするという、いわゆる「ネ申Excel問題」[9]と格闘することになる。加えて表が画像として.pdf化されることによって、検索対象から除外されてしまうこともあり、最後は人力に頼ることになる。多数目的最適化という人間に

はなしえない高次元空間の最適化や可視化をするために、人海戦術に頼った作業プロセスが発生するというのは悲劇である。多数目的最適化とは直接関係ないが、この問題は Big Data や Linked Open Data を利用する機械学習分野にも共通する課題であり、情報科学分野全体で情報教育のあり方の改善やルール・制度の設計といった根本的な取り組みを提案していくことが重要である。先般、文部科学省で表計算ソフトのワークブックの使用が政策的に禁止されるなど改善の兆しが見えていることに期待したい。

4.2 社会の興味の無限定性と記述可能性

REROUTES モデルは“地域社会の将来の再生可能エネルギーシステムの設計”という問題を取り扱うため、開発過程では科学者・技術者コミュニティのみならず、行政、産業界、地域住民など多様な主体と対話をしてきた。この際、シナジー・トレードオフ関係を可視化できるという多数目的最適化がもつ魅力的な機能そのものが新たな問題を生じさせる。つまり、各主体がそれぞれにもつ問題意識に基づき「この目的変数を入れてほしい、でないと得られた最適解に意味がない」という議論になることである。

REROUTES モデルの場合でいうと、地域生活の基盤である民生・農林水産業での電気・熱エネルギー需要に対して、太陽光、太陽熱、陸上風力、洋上風力、河川水力、農業用水路水力、地熱、木質・草本バイオマス、農業系バイオマス、畜産系バイオマス、廃棄物系バイオマスの導入量を設計変数、①再生可能エネルギー利用率、②経済収支、③CO₂削減率、④バイオマス資源循環率、⑤潜在的生態系影響面積、⑥多様性指標を目的変数とした多数目的最適化を行う。そしてたとえば、島嶼地域で意見交換した際には「渡り鳥の飛翔経路と安全性を考慮しなければ地域の合意は得られない」、ある内陸域の地域では「水力発電は、水利権の交渉でのキーパーソンの役割をモデル化しないとイケない」、ある工学系研究者と議論した際には「交通部門での液体燃料利用や産業部門の上質な電力の大規模需要が変数化される必要がある」、経済系研究者と議論した場合には「地域間の産業連関波及効果と雇用創出を評価すべし」となるわけである。

この問題はつまりは、コンテキストの共有問題に帰着する。スケーラビリティはあるとはいえ、数理モデルで世界の森羅万象を記述することはできないし、そもそも“モデル”とは現象の挙動の本質部分だけを抽出して現象を理解するものである。しかしながら“多数目的”という点に期待が大きいゆえに、目的変数が

逐次的に増大していくことになりやすい。至極当たり前の話ではあるが、経験上、特に多数目的最適化でこそ、初期段階で無限定な対象システムのシステム境界をどこに設定し、その中の要素がどこまで記述できるのかというフレームワークのデザインが重視されるべき視点であると感じている。

4.3 万人に対する結果の可読性の担保

REROUTES モデルが目指すのは、地域社会が将来のエネルギービジョンを立案するときに、地域のさまざまな主体による円卓会議にて、基盤となる科学情報を提供できる意思決定支援システムである。しかし、現段階では現段階の結果を現場にもち込むにはモデルの出力が硬派過ぎるという課題がある。現場で「図6のように、この地域には六つの異なる特性をもった再生可能エネルギーミックスのビジョンがあります。この理由は図3、図4のようなエネルギーミックスを記憶した解個体群の分布があつて、図5のように個々の目的のシナジー・トレードオフ関係があるからなんです」と説明しても、大抵の場合、非常に困惑される。円卓会議に参加するのは、地域エネルギーシステムの持続可能性に関連する公約を掲げる市長や実務を担う行政担当官であり、その普及の実際を担う民生の経済人であり、わが子の将来の安全を願う保護者、将来世代のプレイヤーである若者である。彼らが共通して理解できるように解候補の可視化をすることは、われわれのチームが現在取り組むべき重点的な課題の一つでもあると認識している。

これは何も再生可能エネルギー問題に限らない。そのシステム設計に関与する人々が多数目的最適解の意味を理解し、議論を深めていくことは重要である。その意味では、多数目的最適化研究のスコープには得られる高次元情報の可視化も含まれており、可読性の向上は非常に優先度の高い研究課題であるといえよう。最近でもパレート解分析技術の開発課題が体系的に議論されている[10]。さまざまな応用課題で、どのように可視化され、どの点で意思決定を支援したかという優良事例が蓄積されることを期待したい。

4.4 複雑な実問題の制約条件の実装の知恵のアーカイブ

最後は実装の話である。REROUTES モデルの例で、たとえば風力エネルギーは風況に応じて出力に変動があるため、電力会社は一定の系統電源への接続制限を設けている。そのため、風力の規模別のエネルギー利用可能ポテンシャル量を組み合わせて、この風力発電の総量が接続制限制約を満たすように個別の規模の風

力発電の導入量が決定される。しかしながら、この導入量はバイオマスなどほかのエネルギーと加算されうえて地域の電力需要量と比較される。また太陽光発電などの利用可能な土地資源制約をもちながら、変動性があるため系統電源へ接続制限制約がかかっているエネルギーとも競合している。進化計算では自由度自体が高い中で複雑な階層的な実行可能制約をもった組合せ最適化問題を解くことになるため、特に進化の後半になると計算が過酷になる。

たとえば、REROUTES モデルが採用している NSGA-II のようなパレートランク型の最適化エンジンでの多数目的の場合、全個体がパレートランクが早い世代の段階で 1 に収束してしまい選択圧が弱くなることが指摘されている [11]。それでも世代が進むと、ほぼ全個体が限界値に近い目的変数を達成するエネルギー組合せ解を保持した個体群となり、パレートフロント付近に集中する。実はその段階から、2.5 節で記述したような確率的な交叉と突然変異オペレータを制御して、全制約条件を同時に達成するのは大変難しい。エリート解同士の各設計変数の交叉で、制約条件を満たす確率が仮に交叉の候補の 0.5 であっても、125 変数が同時に制約をクリアできる確率は 0.5^{125} となる。REROUTES モデルでは試行錯誤の結果、階層構造をもった制約条件を段階的にクリアして計算を高速化するためのロジックを実装したが、この種のトリックは問題に固有のテクニックとなる。そうすると、たとえば Python や R などの進化計算ライブラリを使って簡単に実装というわけにはいかず、フルスクラッチすることになる。このときに感じたのは、多数目的最適化の実装のためのプログラミングテクニックに関する情報が少ないということである。最適化研究全般ともいえるかもしれない。たとえば機械学習分野ではノウハウを記載した書籍が多く出版されており、特に実践現場での実装と運用にこだわった書籍 [12] がベストセラーになっている。多数目的最適化分野でも、理論書に加えて、そうした実装と運用のテクニックを集めた実践型の情報源が増えることによって、理論・アルゴリズム開発・実践利用で知恵が循環する流れが形成されることを期待したい。

謝辞 モデル開発では、多数目的最適化について小野智司准教授（鹿児島大学）、数理モデルの設計については蓮池隆准教授（早稲田大学）、一連の機械学習では福井健一准教授（大阪大学）に多大なるご支援をいただいた。ここに心からの感謝の意を表す。また本研究は科研費基盤研究 (C) (16K00651) ならびに特別研究員奨励費 16J00845 の支援を受けて実施した。

参考文献

- [1] H. Komiyama, K. Takeuchi, H. Shiroyama and T. Mino, *Sustainability Science: A Multidisciplinary Approach*, United Nations University Press, 2011.
- [2] 環境エネルギー政策研究所, 「自然エネルギー白書 2015」, <http://www.isep.or.jp/wpdm-package/jsr2015all-2/> (2016 年 1 月 29 日閲覧)
- [3] K. Hori, T. Matsui, T. Hasuike, K. Fukui and T. Machimura, “Development and application of the renewable energy regional optimization utility tool for environmental sustainability: REROUTES,” *Renewable Energy*, **93**, pp. 548–561, 2016.
- [4] 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), **70**, pp. 195–206, 2014.
- [5] 環境省, 「平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書」, <http://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/> (2016 年 3 月 22 日閲覧)
- [6] 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「バイオマス賦存量・有効利用可能量の推計」, <http://app1.infoc.nedo.go.jp/biomass/> (2016 年 3 月 22 日閲覧)
- [7] 経済産業省資源エネルギー庁, 都道府県別エネルギー消費統計, 「バイオマス賦存量・有効利用可能量の推計」, http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec002/ (2016 年 3 月 22 日閲覧)
- [8] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**, pp. 182–197, 2002.
- [9] 奥村晴彦, “「ネ申 Excel」問題,” 情報教育シンポジウム 2013 論文集, **2**, pp. 93–98, 2013.
- [10] 渡邊真也, “パレート解析のための技術動向,” システム／制御／情報, **60**, pp. 272–277, 2016.
- [11] 佐藤寛之, “進化計算による多数目的最適化,” システム／制御／情報, **60**, pp. 265–271, 2016.
- [12] R. Sebastian (福島真太郎監訳), 『Python 機械学習プログラミング—達人データサイエンティストによる理論と実践—』インプレス, 2016.