

## 論文の内容の要旨

論文題目 水利用システムの多様な代替案設計のための多目的最適化を用いた枠組みの提案

氏 名 牧 誠也

水利用システムの存在する流域内には多様な選好を持つ利害関係者が内包されている。加えて、水利用システムでは上下水道システムが目的とする清浄な浄水の供給や汚染防止のための下水処理を適切に行うだけでなく、対象地域内外への環境影響、親水利用などアメニティーへの配慮、事業コストなど多面的な影響があり、多面的な評価及び多様な選好に配慮した流域一括での計画が必要になる。

そのため、多面的な選好に対応できる代替案を提示できる枠組みを作成することが必要になる。しかし、多面的な選好を評価する場合には、その評価項目間のトレードオフ関係が存在することがあり、ある人にとっては適切な代替案が存在しない場合がある。そこで、ある選好にとって最適である複数の代替案を提示し、合意形成によって代替案を決定してもらう枠組みが必要となる。

そこで、本研究では、水利用システムを対象に、多様かつ異なる選好を持つと考えられる利害関係者にとって適切な代替案が提示される合意形成を行えるよう、多目的最適化を用いることでいずれかの選好に対しては最適性を有するパレート最適解を複数作成し、得られたパレート最適解を合意形成における代替案として使用できる枠組みの開発を目的とした。

本研究の目的関数は流域外への環境影響を評価するための地球温暖化、酸性化、富栄養化の影響、ライフサイクルでの資源消費を評価するための化石資源消費、鉱物資源消費、水資源消費量、事業の経済性を判断するための事業コスト、流域内の環境影響を評価するための表流水取水量、水系汚濁物質量、水利用システムの質的な評価を行うための高度浄水量、地盤沈下のリスクを評価するための地下水利用量、親水利用によるアメニティーへの貢献の可能性を評価するための親水利用可能な再生水の余剰量とした。以上の目的関数で最適化を実行し、多様な選好に見合った代替案を作成した。

本研究では、浄水施設・再生水施設・下水処理施設の処理方式及び規模のほか、水源の違いを評価する表流水取水量、地下水取水量、再生水使用量、市区町間の水輸送を行うための管路ネットワークを設計変数として設定した。設計変数の整備には域外への影響を評価するためにライフサイクルアセスメントを用い、そのほか、コスト、放流水質、高度浄水、代替可能な水需要の範

囲についてのインベントリを整備した。

制約条件には、各都市の水需要量や下水発生量のほか施設規模の余裕など物理的・社会的な条件を用いた。また、水需要には再生水で代替可能な用途と不可能な用途が存在する。そのため、オゾン処理で代替可能な水需要、RO 膜処理で代替可能な水需要をそれぞれ整備した。

上記のように、制約条件となる水需要量や下水発生量などを各都市で整備し、その制約条件を満たすように、施設のある都市から必要な水需要のある都市まで輸送をする流量などの設計変数を変更して、各目的関数を評価する計算枠組みを作成した。本研究では多数の目体関数にランダムな重みづけを行い、複数回の最適化計算を行うことで多様な選好に適応した解を算出する方法を用い、パレート最適解を算出した。

上記の計算枠組みを用いて、流域規模での水利用システムを対象とし、対象地は荒川流域圏とし、荒川流域圏に含まれる埼玉県と東京特別区を対象としたモデルをもちいて最適化を実行した。最適化の実行に当たり、各目的関数のスケールが大きく異なるため、標準化数を求めることと共に、現状との比較を行う目的から現状システムにおける影響評価についても行った。現状システムの評価のうち、地球温暖化では、その影響のうち、最も大きいのは汚泥焼却に伴う  $\text{N}_2\text{O}$  で、下水処理では電力使用の影響が大きく、上水では影響の半分以上は配水管によるもので、建設部分と運用部分が同程度となった。現状の評価値を最適化時の標準化数に使用するものとしたが、再生水は現状の量が非常に少ないため、下水処理量と同値を使用し、最大値のスケールで標準化を行った。

本研究では、最適化を実行するための計算パラメータやモデル設定を確認するためのテストモデルで最適化を実行し、確認を行った。本研究では、最適化プログラム Gurobi optimizer を用い、分子カット法による整数制約のある変数を線形とみなした線形緩和式を解いたのち、ヒューリスティック法で厳密化する方法を採用した。設定する必要のある計算パラメータは線形緩和式と厳密式の差の許容値を表す Gap であり、計算規模や Gap 設置値を変えた複数の最適化を実行し確認を行った。また、計算方法としては重みづけのつけ方として乱数を用いることが適切かどうか、計算時間短縮を目的とした区分線形式の 1 区分化(直線式化)についても確認を行った。

上記の結果をもとに、Gap を 0.1%とし、各目的関数のみを対象とした 12 通りの単目的最適化と、各目的関数について 0 から 3 までの 4 つの整数のうち、いずれかを重みづけとしてランダムに選択し、最後に重みづけの総和が 1 になるよう作成した 1,000 通りの重みづけセットを対象とした多目的最適化、合計 1,012 回の最適化計算を行った。また、直線式化は計算規模に従い影響が異なり、その影響も目的関数ごとに異なるため、不適切な解を導出することになるため採用しなかった。さらに、多目的最適化では計算誤差によりパレート最適で無い多数の解が算出されるため、自身の重みづけで最適とならない解を除外するパレート最適性のチェックを実行した。

多目的最適化を実行し、パレート最適性のチェックを行った結果、71 個のパレート最適解を導出した。この中には、表流水取水量や水系汚濁物質量を削減することを重視する解、地球温暖化をはじめとする地域外への影響を重視する解、親水利用の可能性を高め、アメニティーへの貢

献を重視する解のほか、特定の目的関数において最適化はされていないが各目的関数がバランスよく改善されている解といった多様な解が存在した。得られた解の地球温暖化と他の目的関数との関係を確認したところ、酸性化や化石資源消費量などのライフサイクルでの影響を評価する目的関数間ではトレードオフ関係が見られないが、表流水取水量や水系汚濁物質量、再生水余剰量との間にはトレードオフ関係を確認できた。また、目的関数と設計変数の相関関係を調べたところ、浄水施設及び下水処理施設では施設数と目的関数との間の相関関係は明確ではないが、浄水施設のプロセスと高度浄水量及び下水処理施設のプロセスと水系汚濁物質量との間には相関関係が見られた。一方、再生水処理施設では施設数と域外への環境影響やコストと相関関係が見られた。これは、再生水処理施設の増設に伴うものである。また、再生水処理施設のプロセスでは再生水余剰の相関関係に違いがみられ、再生水余剰量を増やす解ではオゾンが採用され、上水代替ではオゾンと RO どちらも採用されるが水系汚濁物質量や表流水取水量を削減する場合には RO を採用した方が、効果が大きいことが確認された。

これらの解はある重みづけに対して最適化されており、ある利害関係者の選好に基づく実現可能かつ最適な代替案であるため、水利用システムの合意形成における適切な代替案となりうるものが導出できたと考えられる。

ただし、導出された上下水道・水利用の形態など多様な要素からなる解をそのまま合意形成に用いることは困難である。そのため、上記の多目的最適化で導出した 71 個の解を合意形成で使えるよう、提示方法についても検討を行った。71 個の解すべてを確認して合意形成を行うことは困難であるため、目的関数上の特徴から、好ましいグループを選んでもらう第 1 段階と選んだグループに対して設計変数の情報を追加し、設計変数上の特徴を踏まえて好ましい一つの代替案をけってしてもらう第 2 段階の 2 段階からなる合意形成方法を提案した。第 1 段階の合意形成が行えるよう目的関数の特徴で改をいくつかのグループに分類する必要がある。本件研究では、グループ分けにウォード法によるクラスター分析を用い、できる限り詳細であるが数が多くなりすぎないように、8 つのクラスターに分類をした。

第 1 段階の合意形成では各クラスターにおける目的関数の平均値を表す表、偏差値を表すレーダーチャート、偏差値のばらつきを表す各クラスターのレーダーチャート、表流水量のグラフと渇水等影響の関係を確認できる図をプロファイルとして提示し、好ましいクラスターを選択してもらえる合意形成法を提案した。

第 2 段階では、第 1 段階で選んだクラスターにおける各解の目的関数を確認するグラフ、各施設の施設数とプロセス数を表すグラフ、再生水の用途を表すグラフ、施設立地及び受け持ち・給水範囲を表す地図を確認できるプロファイルを作成し、好ましい代替案を好ましいクラスターを選択してもらえる合意形成法を提案した。

この 2 段階の合意形成法により、目的関数及び設計変数の情報を確認して合意形成が行えるとともに、各段階で比較する案を 10 数個に限定しているため、各代替案の中身を確認して比較することができる形にできたと考えられる。

本研究では多目的最適化を用い、多様な選好にあった代替案となる解を導出する枠組みを作成

した。さらに、導出された最適解を提示し、合意軽視絵を円滑に行うための代替案の提示方法までを検討した。本研究で作成した枠組みでは、水利用システムを対象に多様な影響を評価する目的関数について、複数のパレート最適解を得ることで、多様な選好を持つ利害関係者にとって適切な代替案を作成でき、提示方法についても検討することで、利害関係者の選好に見合った代替案を決定する合意形成を行える枠組みを作成することができたと考えられる。