

脱炭素地域計画支援システムの開発

芦名 秀一¹

¹ 非会員 国立研究開発法人国立環境研究所社会システム領域地域計画研究室
(〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)
E-mail: ashina.shuichi@nies.go.jp

地域での脱炭素化推進には、エネルギーなど地域固有の条件を踏まえ、また地方自治体、市民、産業などのステークホルダーが関わった計画作りが重要となる。本研究では、市区町村などの地域での脱炭素計画作りを支援できるシステム（脱炭素地域計画支援システム）を開発し、具体的な地域を対象とした実装を試みた。システムはWeb及びExcel上で構築され、地域のエネルギーや人口・世帯数等の現状を把握する機能と、再生可能エネルギー導入も含む脱炭素化対策実施による温室効果ガス排出量等の変化を分析する機能を有している。開発したシステムを具体的な地域へ適用するとともに、試行的にわが国の脱炭素シナリオでの対策の効果を分析し、需給両面の対策を最大限想定すると2050年のCO₂排出量を基準年比で81~98%削減できるといった検討が可能であることを確認した。

Key Words: *Planning Supprt System, Decarbonization, Energy, Municipality, Interactive Tool*

1. はじめに

市区町村などの地域スケールで脱炭素化への取組を推進するためには、エネルギー需給や産業構造、気候条件など地域の特性を踏まえた計画作りが重要である。しかし、エネルギー需給に限っても、都道府県は資源エネルギー庁が都道府県別エネルギー消費統計として整備・公表しているものの、市区町村別の情報は公的には整備されておらず、環境省の「地方公共団体実行計画（区域施策編）策定・実施マニュアル（算定手法編）」の手法による推計などに依らざるを得ない。また、これら推計結果も含めて地域に関する情報を読解し、地域特性も踏まえて効果的な対策を同定して脱炭素対策計画作りを進めるにも、専門的な知見を必要とすることが多く、脱炭素計画作りのための部門を持たない自治体では、地域が独自で必要となる情報を収集・整備し、対策効果の定量分析等を行って計画を策定するには、多くの困難がある。

そこで本研究では、地域として基礎自治体（市区町村）を想定し、地域の主体的な脱炭素計画作りを支援できるよう、(1) 地域のエネルギー需給や産業構成、人口・世帯数などの現状を把握できる機能と、(2) 脱炭素対策の導入・実施量の想定を設定することで将来のエネルギー需給やCO₂排出量を定量的に分析できる機能の2つを有する支援システム（脱炭素地域計画支援システム）を開発し、具体的な地域を対象とした実装を試みるととも

に、全国大の脱炭素化シナリオに基づく試算を行い、開発したシステムの確認を行った。

2. 脱炭素地域計画システムのプラットフォーム

脱炭素地域計画支援システムでは、特に脱炭素対策の効果分析の機能について、地方自治体だけではなく市民、産業、NGO・NPOなど地域のステークホルダーの利用も想定してプラットフォームの選択を行った。

将来の温室効果ガス・CO₂削減シナリオの検討にあたっては、統合評価モデルが用いられることが多い。これらモデルの多くは、Python、C++等の汎用プログラミング言語やThe General Algebraic Modeling Language (GAMS)などのモデル構築のためのシステム・言語で記述され、結果を得るために費用最小化や効用最大化のもとでの最適化計算が行われる。しかし、これらシステム・言語は、計算プロセスの修正にソースコードを直接編集する必要があったり、一連の計算手続きの実行にコマンドライン操作が必要であったりなど、モデル分析者以外の利便性は必ずしも高くない。また、利用に際して費用が必要となるシステム・言語もあり、さまざまなステークホルダーが使用するプラットフォームとしては課題が多い。

本研究では、プラットフォームとしてWebとMicrosoft Excel（以降、単にExcelとする。）の2種類を選択し、

システム開発を行った。Webは、利用者がデータや計算プロセスを直接修正できないため、分析に関する自由度は制約されるものの、PCやスマートフォン等多様な機器からのアクセスが可能であること、操作方法等に対する認知度が高く、またグラフ等のデザイン・視覚表現の技術蓄積が豊富であることから、多くのステークホルダーの利用に適したプラットフォームであると判断した。

いっぽう Excel は、PCを保有していない世帯等では利用が難しく、またグラフ表現等には一定の限界を有しているものの、データの取り扱いや計算プロセスの構築・修正が比較的容易であるとともに、検討結果の報告書等の利用も見込めることから、プラットフォームの一つとして選択した。なお、Excel ではソルバを用いた最適化（目的関数の最小化・最大化）が可能であるが、実行には事前設定も含めて利用者の操作が必要となること、また計算プロセス修正により計算エラー等が生じた場合には、その原因の特定や修正には専門知識を必要とすることから、本研究で開発するシステムでは使用しないこととした。同様に、マクロ・VBA（Visual Basic for Applications）による計算プロセスの実装等も、修正にはプログラミング言語の知識を要することや、企業等ではセキュリティ設定によりマクロ等の実行が許可されていないケースがあることから、本研究では使用しない。

利用者は、それぞれの利用目的や情報通信環境に応じていずれかのプラットフォームを選択することとなるが、両プラットフォーム間でデータや計算プロセス・結果に齟齬が生じると、地域脱炭素計画の検討・立案や、ステークホルダー間の討議・合意形成において支障が生じる可能性がある。そこで、本研究で開発するシステムでは、データや計算プロセスは Excel で構築・実装し、Webでは Excel を処理したあとの動的リンクライブラリ（DLL）をシステムの一部として取り込むことで、両プラットフォームの一貫性を確保した。具体的には、図-1 に示すように Excel 上に構築したシステムを C 言語に変換し、それをコンパイルすることで DLL を作成する。Web 上のシステムから作成した DLL を呼び出すことで、Excel 上で構築したプロセスに沿った計算やデータ呼び出しを行うことができるようになる。なお、Excel から DLL 作成までの一連の処理は、シェルスクリプトを用いた自動化を行い、Web 上のシステムに対するデータの更新や計

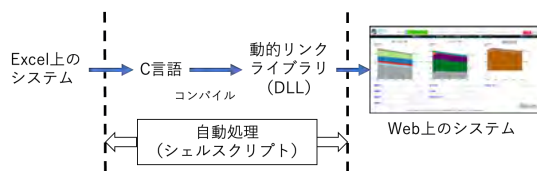


図-1 Excel から Web への変換プロセスの概要

算プロセスの修正の反映を容易とする工夫を行っている。

3. 脱炭素地域計画システムの機能開発

(1) 地域の現状把握機能とグラフ表示機能について

開発したシステムには、地域の脱炭素計画作りに関わるデータとして、人口（年齢階級別）、世帯数、事業所数、従業者数、製造品出荷額等、年間商品販売額、住宅数、自動車保有台数等を収集・搭載した。なお、人口など一部データについては、将来推計値も整備・搭載することで将来シナリオ検討の参考とできるようにした。

図-2 に、開発した Web 上のシステム（以下、単に Web システムとする。）での地域の現状データ表示の一例を示す。Web システムでは、作図機能として面グラフ・積み上げ面グラフ、折れ線グラフ・散布図、棒グラフ・積み上げ棒グラフ、円グラフ・ドーナツチャート、レーダーチャート、サンキー図（フロー図）を搭載している（ただし、これら以外のグラフも実装可能である）。また、一部のグラフでは、折れ線との組み合わせや y 軸に関して第 2 軸の設定も可能としているほか、小さな値を確認できるよう y 軸方向での拡大機能も有している。加えて、任意で設定できる割合や量の閾値を超える要素に限ってデータラベルを常時表示し、それ以外は要素にマウスオーバーしたときのみ表示することで、対象地域の特徴を把握しやすくする機能も搭載している。

Web システムでは、搭載されたデータや後述する分析結果それぞれに予め表示する際のグラフの種類が設定されており、グラフ表示はデータや結果の変更とともに自動的に更新される。なお、Excel 上のシステム（以下、単に Excel システムとする。）では、グラフ表示は Excel にあらかじめ搭載されている機能のみを用いることとし、サンキー図等の Excel での作図が困難なグラフはデータを一覧するにとどめた。

(2) 脱炭素対策の効果分析機能について

将来の脱炭素社会実現に向けた対策は、大きく需要削減、効率向上、燃料転換、炭素隔離・貯留・利用（CCUS）に分類することができる。うち CCUS は、実現可能性のある検討には貯留場所への輸送等も含めたシステム全体の設計・分析が求められるが、地域を単位とした分析では困難が多いことから、開発したシステムでは、CCUS を除いた対策について、以下に述べる手法により効果を定量的に分析することとした。

a) なりゆきシナリオでのエネルギー消費量

2050 年など将来の脱炭素対策の効果の評価にあたっては、前提となる人口・世帯数や産業活動の水準などの

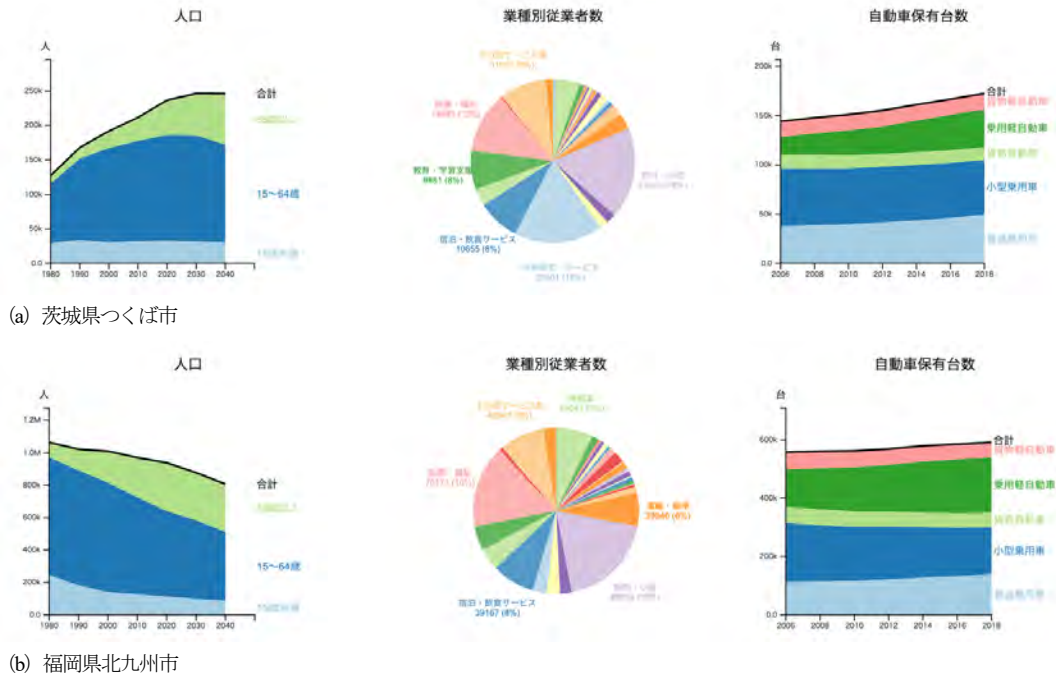


図-2 開発したシステムにおける地域データ表示（現状把握機能）の例

社会経済の姿が現在と比較して変化することを考慮することが重要となる。そこで本研究では、基準年のエネルギー消費量をもとに、将来の社会経済の見通しの効果のみを反映した将来のエネルギー消費をなりゆきシナリオとして設定し、そこからの変化として脱炭素対策の効果を定量評価することとした。

将来推計のもととする地域のエネルギー消費量は、それぞれの地域で調査・整備したデータを用いることが望ましいが、現時点で独自にエネルギー消費量データやエネルギーバランス表を整備している地域は多くない。そこで本研究では、前記環境省の手法を参考に、都道府県別エネルギー消費統計等をもとに部門別・業種別に設定した按分指標を用いて推計したエネルギーバランス表を、基準年のエネルギー消費量 (E_{i,f,t_0} , i =部門・業種（農林水産業, 化学工業, 卸売業・小売業, 家庭部門暖房, 運輸旅客自動車等）, f =燃料種（石炭, 灯油, 都市ガス, 電力等）)として用いることとした。

将来のエネルギー需要量や消費量の評価手法には、回帰式の利用や機械学習の応用などさまざま研究が進められているが、地域を対象とした場合、回帰式等を構築するに十分なデータが得られず、適用が困難な場合が多い。そこで将来のエネルギー消費量 ($E_{i,f,t}$, $t=2030, 2050$ 等)は、基準年のエネルギー消費量に対して部門・業種ごとに設定した指標 ($c_{i,t}$)の基準年からの変化率を乗じて求めることとした。エネルギー消費量推計に用いる指標はさまざま想定できるが、本研究では産業部門は

製品生産量等、業務部門は業務床面積等、家庭部門は世帯数、運輸部門は旅客・貨物輸送量を用いた。

$$E_{i,f,t} = \frac{c_{i,t}}{c_{i,t_0}} E_{i,f,t_0} \quad (1)$$

b) 需要削減対策の効果分析

需要削減対策には、住宅・建築物の断熱強化やエネルギー需要マネジメント導入などがあるが、その実施によるエネルギー消費量の変化 ($Er_{i,f,t}$)は基準となるエネルギー消費量 ($E_{i,f,t}$)に削減率 ($r_{i,f,a,t}$, a =需要削減対策)を乗じることで求めることとした。

エネルギー削減率の計算においては、個々の対策実施に伴う需要家ごとの削減率 ($r0_{i,f,a,t}$)と対策を実施する需要家の割合 ($sr_{i,a,t}$)を別々に考慮できるようにした。これは、後述する脱炭素対策の導入・実施量に基づく分析において、導入・実施量に関して幅を持った想定を可能とするためである。

$$Er_{i,f,t} = r_{i,f,a,t} \times E_{i,f,t} \quad (2)$$

$$r_{i,f,a,t} = sr_{i,a,t} \times r0_{i,f,a,t} \quad (3)$$

c) 効率向上対策の効果分析

省エネルギー機器への置き換えなど効率向上対策の効果 ($Eef_{i,f,t}$)は、効率 (η_f)に関して基準年 (η_{f0})からの変化を乗じて求めることとした。なお、技術によっては基準年の効率が明らかではないものがあるが、それら技術は、基準年の効率を1とした効率改善率によ

りエネルギー消費量の変化を分析する。

$$Eef_{i,f,t} = \frac{\eta_f}{\eta_{fo}} \times E_{i,f,t} \quad (4)$$

d) 燃料転換対策の効果分析

燃料転換は、需要側では化石燃料から電力への転換（電化）と、水素や合成燃料等への転換の2種類を想定し、供給側では再生可能エネルギーの導入と系統電力の脱炭素化の2種類を想定する。

電化率を引き上げるには、例えば家庭部門暖房では灯油ストーブからエアコン、都市ガスストーブからエアコンなど多様な選択肢があり、費用等も加味した燃料源ごと、技術ごとの検討が望ましいが、開発するシステムでは最適化計算やマクロによる計算を行わないこととしており、このような分析には困難が多い。

そこで本研究では、いずれの化石燃料・技術も同じ割合で電力利用機器への転換が起こると想定し、将来の電化率設定（ $el_{i,t}$ ）から、その達成に必要な化石燃料消費機器の転換率（ $ce_{i,t}$ ）を化石燃料利用技術と電力機器の効率の違いも考慮して求め、転換率を化石燃料や電力の消費量（ $Er_{i,f,t}$ ）へ乗じることで電化によるエネルギー消費量の変化（ $Eel_{i,f,t}$ ）を分析した。

$$Eel_{i,電t} = Er_{i,電t} + ce_{i,t} \times \sum^{k \in \text{化石燃料}} \left(\frac{\eta_k}{\eta_{電}} \times Er_{i,k,t} \right) \quad (5)$$

$$Eel_{i,化石燃料t} = ce_{i,t} \times Er_{i,化石燃料t} \quad (6)$$

$$ce_{i,t} = \frac{(el_{i,t} \times \sum_f Er_{i,f,t} - Er_{i,電t})}{(1 - el_{i,t}) \times \sum^{k \in \text{化石燃料}} \left(\frac{\eta_k}{\eta_{電}} \times Er_{i,k,t} \right) + el_{i,t} \times \sum^{k \in \text{化石燃料}} Er_{i,k,t}} \quad (7)$$

水素や合成燃料等の新燃料への転換は、対象とするエネルギー源に転換割合（ $cv_{i,f,t}$ ）を乗じることでエネルギー消費量の変化（ $Efs_{i,f,t}$ ）を求めた。

$$Efs_{i,f,t} = (1 - cv_{i,f,t}) \times Eel_{i,f,t} \quad f \notin \text{新燃料} \quad (8)$$

$$Efs_{i,f,t} = cv_{i,f,t} \times Eel_{i,f,t} \quad f \in \text{新燃料} \quad (9)$$

供給側での燃料転換対策のうち、再生可能エネルギーの導入は、設定した再生可能エネルギー導入量（ $ren_{b,t}$ 、 b = 再生可能エネルギー種（太陽光、陸上風力等））と全部門・業種を合計した電力消費量を比較し、再生可能エネルギー導入量が電力消費量を超過する場合には全量が再生可能エネルギーで供給されるものとし、下回る場合には両者の差分は系統電力で供給されるものとした。系統電力を利用する場合の再生可能エネルギーと系統電力の割合は、いずれの部門・業種でも一律と想定した。なお、再生可能エネルギー導入量は、環境省の再生可能エネルギー情報システム（REPOS）の導入ポテンシャル

量（ ren_{pot_b} ）を上限として設定する。

$$Eren_t = \begin{cases} \sum ren_{b,t} & \text{if } \sum ren_{b,t} \leq \sum Efs_{i,電t} \\ \sum Efs_{i,電t} & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

e) CO₂排出量の分析

対策実施前後のCO₂排出量の変化は、エネルギー消費量に化石燃料ごとのCO₂排出係数や、電力については系統電力のCO₂排出係数を乗じて求める。化石燃料のCO₂排出係数は時点を問わず一定とするが、系統電力のCO₂排出係数は、基準年はそれぞれの地域の電力会社の実績値を、将来については想定したCO₂排出係数の変化を用いることとする。

4. 将来の地域脱炭素対策検討に関する設計と具体地域での試算

(1) 地域脱炭素対策検討機能の設計

将来の脱炭素計画づくりには、部門・業種ごとに個別技術・エネルギー源に着目した対策の検討が望まれるものの、地域のステークホルダー全員が独自に技術個々の効率改善の見通しや電化率の目標を設定することには困難が多い。また、実現可能性の観点では、100%を超える燃焼効率やポテンシャル量を超える再生可能エネルギー導入量が想定されることを避けることも求められる。

本研究では、複数の対策をパッケージ化するとともに、パッケージごとに対策導入量や効果が異なる複数の選択肢（レベル）を設けることで、対策の実現可能性の維持とステークホルダーによる脱炭素計画検討の平易さを両立できるようなシステム開発を指向した。

対策パッケージは、類似した対策をまとめることで作成する。例えば、家庭部門の脱炭素対策には、エアコンの効率改善、暖房機器の効率改善、給湯器の効率改善、LEDへの転換などがあるが、これらはまとめて「住宅用機器の高効率化」としてまとめる。また、暖房機器の電化や給湯機器の電化も、あわせて「住宅用機器の電化の推進」とした。なお、ネット・ゼロ・エネルギーハウス（ZEH）の普及や住宅用エネルギー管理システム（HEMS）の普及、化石燃料から合成燃料への転換など、他との類似性がない対策は、単独でパッケージとした。また、再生可能エネルギーはまとめず、太陽光発電、陸上風力発電、洋上風力発電等個別にパッケージとした、これは、再生可能エネルギーは、どれだけ導入するかとともに何を導入するかも重要であり、脱炭素計画の検討においてこれらを考慮できるようにするためである。

レベルは、対策の導入量や効果の水準に応じてレベル1からレベル4までを設定する。レベル1は、将来まで

現状のままとするものであり、概ね対策導入量がゼロの場合に相当する。いっぽうレベル4は、各対策の導入量や効果を最大とした場合に相当するものであり、技術的限界や受容性、また再生可能エネルギーでは導入ポテンシャル量も考慮しながら設定される。レベル2とレベル3は、レベル1と4の間になるように設定する。

利用者は、対策パッケージごとにレベルを選択することで脱炭素計画の検討を行うこととなるが、例えばレベル4までは至らないがレベル3よりも高い水準での対策実施を想定したいなど、レベルの間に設定することが望まれるケースも生じうる。これに対応するため、開発したシステムでは、レベルは0.1単位で設定できるようにした。具体的には、Excelシステムではレベルの設定セルで1.1や3.8としての入力を可能とし、Webシステムではレベル設定ボタンを重ねてクリックすることでレベルが0.1ずつ減じられる機能を組み込んだ。レベルを小数とした場合の対策の導入量や効果は、設定レベルを挟む整数レベルの設定を線形補間して求めることとし、例えば効率改善率がレベル2で1.2、レベル3で1.3と設定された対策パッケージにおいてレベル2.7の選択は、効率を現状から1.27倍(=1.2+(1.3-1.2)×0.7)に改善するとの想定に相当する。

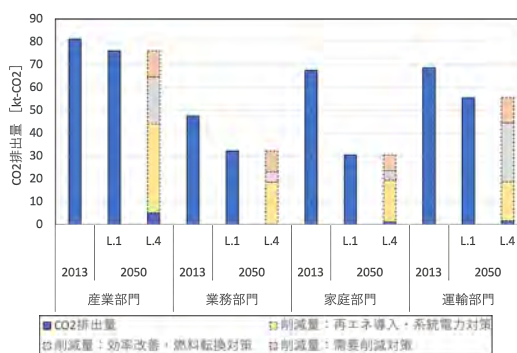
(2) システムを用いた地域での脱炭素可能性の試算

開発したシステムの確認として、複数の自治体で具体的に実装するとともに、国スケールでの脱炭素シナリオを参考として対策パッケージとレベルの設定を行い、対策実施による脱炭素社会実現可能性を試算した。

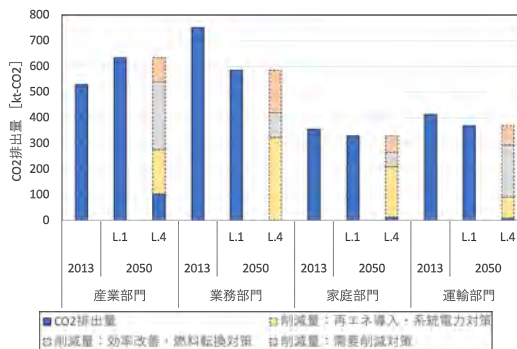
図-3に、Excelシステムを用いた試算から、北海道地方、関東地方、九州地方のある市における結果を示す(開発したシステムの確認用の試算であることから、対象地域の具体名は伏す)。図では、全ての対策パッケージについてレベル1とした場合とレベル4とした場合の2050年の部門別CO₂排出量に関する結果と、比較として基準年(2013年)のCO₂排出量を示す。レベル4の結果については、対策種別ごとの削減量を併せて示している。

試算結果を比較すると、CO₂排出量の変化は地域ごと・部門ごとに大きく異なることがわかる。全く対策を実施しない場合(レベル1)であっても、北海道地方や九州地方の対象地域ではほとんどの部門が2013年よりもCO₂排出量が減少し、関東地方の対象地域では削減幅は小さく、産業部門は増加することがわかる。

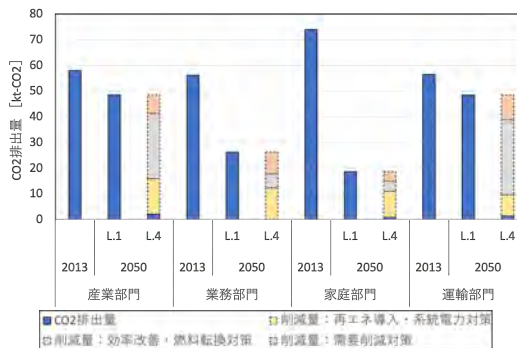
削減対策の実施を想定することで(レベル4)、いずれの地域・部門でもCO₂排出量は大幅に削減できるものが確認できる。産業部門について見ると、北海道地方の対象地域では再生可能エネルギー導入や系統電力脱炭素化の効果が最も大きい、関東地方や九州地方の対象地



(a) 北海道地方のある市



(b) 関東地方のある市



(c) 九州地方のある市

図-3 地域での脱炭素化試算結果の例

(L1, L4は全対策がレベル1・4の場合を示す)

域では、効率改善と燃料転換対策の効果が高い。業務部門は、いずれの地域でも需要削減対策と再生可能エネルギー導入・系統電力脱炭素化による削減量が大きな割合を占めるいっぽう、家庭部門は大部分が再生可能エネルギー導入や系統電力脱炭素化である。また運輸部門は、いずれでも効率改善・燃料転換対策の効果が最も大きい。

基準年と比較したCO₂削減率は、結果を示した対象地域では94%~98%と幅があり、また、他の地域での試算結果も含めると2050年CO₂削減量の幅は基準年比で81

～98%削減となり、本研究では地域を問わず同じ対策パッケージを想定して試算を行ったものの、結果は地域ごとに異なることが確認された。

5. 結論

本研究では、Web と Excel をプラットフォームとして、脱炭素計画検討に関わる地域の現状を把握する機能と脱炭素対策の導入量や効果の想定に応じて将来のエネルギー需給やCO₂排出量を定量的に分析できる機能を有する脱炭素地域計画支援システムの開発を行った。また、開発したシステムを用いて具体地域で脱炭素対策実施によるCO₂削減量の試算を行い、脱炭素対策の種類ごとの効果も含めて、それぞれの地域の状況を踏まえた分析ができることを確認した。

開発したシステムは、脱炭素対策の実施強度（レベル）を設定することで将来のエネルギー需給やCO₂排出量が分析できるため、地方自治体担当者や市民、産業、NGO・NPO など地域のステークホルダーそれぞれの視点からの脱炭素計画検討や、それら検討結果に基づく地域内での合意形成のためのツールのひとつとして活用することが期待される。

しかし、現在のシステムでは脱炭素対策の選択において費用の観点が考慮されていない点が課題として指摘できる。また、脱炭素対策の効果についても、本研究の試算では国スケールの想定を参考に設定・分析しており、

対策効果そのものについても地域ごとの状況を踏まえた設定としていくことが必要である。

本研究で構築した脱炭素地域計画支援システムは、改良点や開発要素がさまざま残されている。今後は、これら課題等への対応を継続するとともに、脱炭素計画検討にあたって困難を抱えている地域での試行的な利用などにより、利用者の利便性等の視点も組み入れるための取組についても進めていくことが望まれるものである。

謝辞：本研究は、（独）環境再生保全機構・環境省の環境研究総合推進費（1-2003/JPMEERF20201003）、国立環境研究所の持続可能地域共創研究プログラム、文部科学省の「大学の力を結集した、地域の脱炭素化加速のための基盤研究開発」により実施された。関係各位に感謝申し上げます。

REFERENCES

- 1) 国立環境研究所 AIM プロジェクトチーム：2050年脱炭素社会実現に向けたシナリオに関する一分析、https://www-iam.nies.go.jp/aim/projects_activities/prov/2021_2050Japan/20210630_NIES.pdf, 2021. [Asia-Pacific Integrated Model project team of National Institute for Environmental Studies: *An analysis of 2050 decarbonization scenario in Japan*, https://www-iam.nies.go.jp/aim/projects_activities/prov/2021_2050Japan/20210630_NIES.pdf, 2021.]

(Received March 28, 2022)

DEVELOPMENT OF A PLANNING SUPPORT SYSTEM FOR DECARBONIZATION OF MUNICIPALITIES

Shuichi ASHINA

In order to promote decarbonization on a local or municipality scale, it is important to involve local stakeholders into planning process of decarbonization actions. Since the stakeholders may face difficulties in collecting data and making quantitative analysis of future energy and greenhouse gas emissions, we developed a planning support system, and applied to the system to some municipalities.

Considering user-friendliness and system restriction of users, the system is available in Excel and Web. The system displays current socio-economic and energy situation in the area as well as future changes in energy consumption and greenhouse gas emissions by implementing decarbonization measures such as demand reduction, energy efficiency improvement, and installation of renewables. Calculation logics of future energy and gas emissions were built on Excel, then compiled and converted to the system library on the web system.

As a trial study, we applied the system to municipalities and analyzed impacts of decarbonization measures used in nationwide decarbonization scenario on energy and CO₂ emissions. The system showed that the measures lead to decrease municipalities' CO₂ emissions in 2050 by 81-98% compared to the base year, 2013.