12.エネルギー費用を考慮した脱炭素社会シナリオ構築手法の開発と京都市への適用

佐竹　良介[1]・越智　雄輝[2]・長谷川　知子[3]・大城　賢[4]

[1]非会員　立命館大学理工学部　環境都市工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1丁目1-1）

[2]非会員　株式会社E-konzal（〒530-0001 大阪市北区梅田2丁目4-9 ブリーゼタワー1階 SYNTH）
E-mail:yuki.ochi@e-konzal.co.jp

[3]正会員　立命館大学理工学部　環境都市工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1丁目1-1）

[4]正会員　京都大学大学院工学研究科　都市環境工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-3）

世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて1.5℃に抑えるには，2050年代初頭に全世界の二酸化炭素排出量を正味ゼロにする必要がある．京都市は2050年までに二酸化炭素排出量実質ゼロを目指すことを目標に掲げている．本研究では，地方自治体において二酸化炭素排出量実質ゼロの実現に係るエネルギー費用について，系統電力や水素の価格変化，太陽光発電の導入費用の変化を踏まえて推計する手法を構築した．そして同手法を京都市に適用し，対策の異なる複数のシナリオにおける二酸化炭素排出量とエネルギー費用を推計した．その結果，2050年に脱炭素を実現するいずれのシナリオにおいても，現状維持のシナリオと比べてエネルギー費用が減少した．エネルギーの将来的な価格の変化を踏まえると，京都市における太陽光発電の導入は，脱炭素化においても地域経済においても望ましいことが示された．

Key Words: *Decarbonization, Carbon Neutral, Energy Cost, Modeling, Local Policy*

1. はじめに

(1) 背景

2015年国連気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)においてパリ協定が採択され，2016年に発効された[注1)]．パリ協定では，世界共通の長期目標として2℃目標の設定，1.5℃に抑える努力を追求することが含まれている．世界各国の温室効果ガス排出削減への取り組みが進んでいる．

日本では2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにすると宣言された[注2)]．京都市も2019年，2050年までに二酸化炭素排出量実質ゼロを目指すことを目標に掲げた[注3)]．

1.5℃目標の実現のためには，世界の温室効果ガス排出量を2030年までに2019年比4割削減し，2050年代初頭に二酸化炭素排出量を正味ゼロにする必要がある[注4)]．しかし，地域によって，気候，地理，制度，生活様式，産業などの条件が異なるため，脱炭素の実現に向けた具体的な対策の実施においては，自治体独自の削減目標の設定やその達成に向けた計画が必要になる．

(2) 既存研究

a) 地域の低炭素社会シナリオの研究

京都市は2030年までの削減目標を定めていたが，東日本大震災の原発事故によりエネルギー政策の見直しが必要になった．そこで，京都持続可能社会研究会は国全体のエネルギーミックスや低炭素社会対策などをベースに複数のシナリオを設定し，定量的な分析を行った[注5)]．

奥田ら[1)]は，京都市を対象として，2050年二酸化炭素排出実質ゼロの姿を定量化した．同研究による推計では，二酸化炭素の排出量が吸収量を下回り，二酸化炭素排出量実質ゼロを達成可能であることが示された．しかしながら，その実現に必要な費用は明らかにされていない．

b) 対策費用を算出した研究

五味ら[2)]は，バックキャスティングのアプローチを採用して，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を開発した．そしてその手法を滋賀県に適用し，2030年の温室効果ガス排出量を1990年比50%削減するために必要な費用が，2010年から2030年の20年間で累積7.3兆円と推計された。

(2) 目的

本稿では，エネルギー費用を考慮した脱炭素社会シナリオ構築手法を開発することを目的とする．さらに，同手法を京都市に適用して将来の対策シナリオを提供し，2050年脱炭素社会の実現に必要な対策とそのエネルギー費用を示す.

2. 方法

(1) 全体像

五味ら [3]を参考にした脱炭素社会シナリオ構築手法の全体像を以下に示す.

a) 枠組みの設定

対象地域や基準年，目標年，対象活動，シナリオの数などを設定する.

b) データ・関連情報の収集

推計の基礎となる基準年のデータや，シナリオ想定の参考とする将来計画などの情報，脱炭素対策に関する情報を収集する.

c) シナリオの設定

収集した将来に関する地域の情報をもとに，基準年から目標年にかけての生活様式や産業，都市構造などの変化，低炭素対策の導入の程度を想定し，定量推計ツールExSS (Extend Snapshot Tool)へ入力する指標の値を設定する.

d) ExSSによる計算

設定した入力値をもとに，ExSS を用いて各シナリオにおける将来の社会経済指標やエネルギー消費量，二酸化炭素排出量，エネルギー費用を算出する.

さらに本研究では，燃料種別の単価などのデータを入力として，ExSS から出力されるエネルギー需要をもとにエネルギー費用を算出するプログラムを作成する．本研究では，対象地域内の住民や事業者がエネルギーを購入する際の費用および再生可能エネルギーによる自家発電に伴う費用をエネルギー費用とする．自家発電に伴う費用には，導入費用と維持管理費用を含む.

e) 推計結果をもとにシナリオの再検討

推計結果を目標と照らし合わせ，必要に応じて入力値を修正し，再推計を行う.

(2) ExSSの概要

ExSSは，都市あるいは地域の目標像としての低炭素社会像を定量的に描写するツールである[8]．同ツールは，人口やGDP，交通需要量，エネルギー需要量，エネルギー供給量，エネルギー利用技術などから二酸化炭素排出量を出力し，地域の削減目標を達成するためのシナリオを同定する．ExSSでは，式(1)～(4)によりエネルギー起源二酸化炭素排出量が推計される.

$$ESD_{eds,esv} = AC_{eds,esv} \times EDG_{eds,esv} \quad (1)$$

$$EE_{eds,esv,e} = \sum_{et}\left(EET_{et,eds,esv,e} \times SET_{et,eds,esv,e}\right) \quad (2)$$

$$ED_{eds.e} = \sum_{esv}\left(ESD_{eds.esc} \times ES_{eds.esv.e} \times EE_{eds.esv.e}\right) \quad (3)$$

$$CO2 = \sum_{eds}\sum_{e}\left(ED_{eds,e} \times EF_e\right) \quad (4)$$

$ESD_{eds,esc}$：エネルギーサービス需要量
$AC_{eds,esc}$：活動量
$EDG_{eds,esc}$：エネルギーサービス需要原単位
$EET_{et,eds,esc,e}$：エネルギー利用技術の効率
$SET_{et,eds,esc,e}$：エネルギー利用技術のシェア
$ED_{eds,e}$：エネルギー需要量
$ES_{eds,esc,e}$：燃料シェア
$EE_{eds,esc,e}$：エネルギー効率
$CO2$：二酸化炭素排出量
EF_e：二酸化炭素排出係数
eds：エネルギー需要部門
esv：エネルギーサービス種
et：エネルギー利用技術
e：燃料種

(4) エネルギー費用の推計方法

ExSS により推計されるエネルギー需要や想定される太陽光発電の発電量をもとに，エネルギー費用を算出する．エネルギー費用の推計式を式(5)～(7)に示す.

$$EC_{eds,esv,e} = ED_{eds,esv,e} \times EC'_e \quad (5)$$

$$EC'_e = BEC_e \times ROC_e \quad (6)$$

$$SWC_{eds,esv,e} = SWC'_{eds,esv,e} \times EGC \quad (7)$$

$EC_{eds,esv,e}$：エネルギー購入費用
EC'_e：1ktoe あたりのエネルギー購入単価
BEC_e：基準年のエネルギー消費にかかる費用
ROC_e：基準年から目標年の価格変化率
$SWC_{eds,esv,e}$：再生可能エネルギーによる自家発電費用
$SWC'_{eds,esv,e}$：自家発電 1ktoe あたりの費用
EGC：再生可能エネルギーによる自家発電量

まず，基準年のエネルギー購入単価に，基準年から目標年の単価の変化率を掛けることにより，目標年のエネルギー購入単価を求める．次にExSSによって推計されたエネルギー需要にエネルギー購入単価を掛けることによって，エネルギー購入費用を算出する.

再生可能エネルギーによる自家発電についても，基準年の発電単価に，単価の変化率を掛けることにより，目標年の発電単価を算出する．そして，発電量に発電単価を掛けることにより，自家発電に伴う費用を算出する.

3. 京都市への適用

(1) 枠組み

基準年を2015年，目標年を2050年とする．対象とする温室効果ガスは，家庭，業務，産業および運輸部門から排出されるエネルギー起源の二酸化炭素とする．

(2) シナリオの設定

再エネの導入量によるエネルギー費用の違いを考察するため，現状維持シナリオと再エネ低位シナリオ，再エネ中位シナリオ，再エネ高位シナリオの4種類のシナリオを設定する．各シナリオの主な想定を**表-1**に示す．

現状維持シナリオと再エネ中位シナリオについては，奥田ら[6]を参考に設定する．現状維持シナリオは，現在実施されている対策は継続して行われる状況を想定し，追加の対策を行わないシナリオである．再エネ中位シナリオは，目標年である2050年に二酸化炭素排出量ゼロを達成するための対策を導入するシナリオであり，対策の導入強度や系統電力，水素の排出係数について，国立環境研究所AIMプロジェクトチーム[注6)]の対策高位ケースや京都市[注7)]を参考にした．排出係数の設定値を**表-2**に示す．電力，水素の間接排出については各需要部門に配分した．2050年には電力および水素はすべて再エネ等により生産されるものと想定し，排出係数をゼロと設定した．

再エネ低位シナリオでは，再エネの導入量を現状維持シナリオと同じと想定した．再エネ高位シナリオでは，再エネ中位シナリオに比べて太陽光発電の導入量を2倍に拡大した．再エネ以外の省エネ等の対策については，どちらも再エネ中位シナリオと同等とした。2050年における太陽光による自家発電の導入量は現状維持シナリオおよび再エネ低位シナリオで31 ktoe，再エネ中位シナリオで64 ktoe，再エネ高位シナリオで127 ktoeとした．再エネ高位シナリオの導入量は，京都市のポテンシャル[注8)]の1/3に相当する．

人口など社会経済の変化については，すべてのシナリオで共通の想定を置いた．また，自家発電に伴う費用として，2050年の京都市の再生可能エネルギー導入量の大部分を占めると想定される太陽光のみを考慮した．

(3) 使用したデータ

2015年のエネルギー単価のうち，石油については資源エネルギー庁[注9)]，天然ガス・電力については新電力ネット[注10)]を参考にした（**表-3**）．太陽光発電については，パネルの寿命を20年，点検を4年に一度として，初期費用と維持管理費用の総額を求めて1年あたりの費用に換算し，年間発電量で除することにより，発電単価を算出した．割引率はゼロとした．また，各燃料の単価の変化率については，日本を対象としたエネルギーシステムモデル（AIM/Technology-Japan）[4),5)]により推計された2050年にエネルギー・工業プロセス起源CO_2排出量がゼロとするシナリオにおける各エネルギーの生産に関わる平均費用を用いた．石油と天然ガスについては一次エネルギー，水素と電力については二次エネルギーの変化率を用いた．各シナリオにおけるエネルギー単価を**表-4**に示す．

表-1 各シナリオの主な想定

	現状維持	再エネ低位	再エネ中位	再エネ高位
人口 経済	140 万人 GDP 成長率 1.2 %/年			
家庭・業務	再エネが導入拡大するが，化石燃料は残る	エネルギーの 100%が再エネ由来		
産業	基準年と変わらず化石燃料を中心に使用	第一次産業:エネルギーの 100%が再エネ由来 第二次産業:石油・天然ガス 40%，電力 60%		
運輸	再エネが導入拡大するが，化石燃料は残る	エネルギーの 100%が再エネ由来		
太陽光導入	30 ktoe	30 ktoe	64 ktoe	127 ktoe

表-2 各シナリオにおける燃料種別二酸化炭素排出係数

（単位：tCO_2/toe）

	2015 年	現状維持	再エネ低位	再エネ中位	再エネ高位
石油	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81
天然ガス	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09
水素	-	3.01	0.00	0.00	0.00
電力	5.79	4.73	0.00	0.00	0.00

表-3 基準年のエネルギー単価の出典

	出典	提供元
石油	石油製品価格調査	資源エネルギー庁
天然ガス	通関統計	新電力ネット
電力	通関統計	新電力ネット
太陽光発電	令和 4 年度以降の調達価格等に関する意見	経済産業省

表-4 各シナリオにおけるエネルギー単価

（単位：百万円/ktoe）

	2015 年	現状維持	再エネ低位	再エネ中位	再エネ高位
石油	103	134	134	134	134
天然ガス	76	65	65	65	65
水素	-	297	297	297	297
電力（系統）	262	149	136	136	136
太陽光発電	180	44	44	44	44

4. 結果

(1) 二酸化炭素排出量

各シナリオにおける部門別二酸化炭素排出量の推計結果を**表-5**に示す．再エネ低位シナリオ，再エネ中位シナリオおよび再エネ高位シナリオでは排出量の合計が129 kt-CO_2となった．これは2020年度の京都市の二酸化炭素吸収量231 kt-CO_2[注11)]を下回っているため，京都市が現状程度の吸収量を維持できれば，二酸化炭素排出量実質ゼロが可能といえる．

表-5 部門別二酸化炭素排出量の推計結果

（単位：ktCO_2）

	2015年	現状維持	再エネ低位	再エネ中位	再エネ高位
家庭	1,868	1,031	0	0	0
業務	2,507	1,583	0	0	0
産業	970	836	129	129	129
旅客輸送	1,080	567	0	0	0
貨物輸送	484	393	0	0	0
合計	6,910	4,410	129	129	129

(2) 最終エネルギー消費量

各シナリオにおける燃料種別最終エネルギー消費量の推計結果を**表-6**に，最終エネルギー消費に占める電力の内訳を**図-1**に示す．2050年の最終エネルギー消費量は2015年に比べて，現状維持シナリオで30%減少，再エネ低位・中位・高位シナリオで53%減少となった．2050年の最終エネルギー消費に占める電力（自家発電を含む）の比率は，2015年の39%から，現状維持シナリオにおいて50%に，再エネ低位・中位・高位シナリオにおいて84%に拡大した．また，電力消費に占める再エネ自家発電の比率は，2015年の1%から，現状維持シナリオで6%，再エネ低位シナリオで5%，再エネ中位シナリオで10%，再エネ高位シナリオで19%となった．

表-6 燃料種別最終エネルギー消費量の推計結果

（単位：ktoe）

	2015年	現状維持	再エネ低位	再エネ中位	再エネ高位
石油	602	314	23	23	23
天然ガス	510	296	31	31	31
水素	0	5	37	37	37
再エネ	3	25	45	45	45
バイオマス	3	4	4	4	4
電力（系統）	717	611	671	637	574
再エネ自家発電	8	37	37	71	134
太陽光	2	30	30	64	127
バイオマス	6	7	7	7	7
合計	1,843	1,293	848	848	848

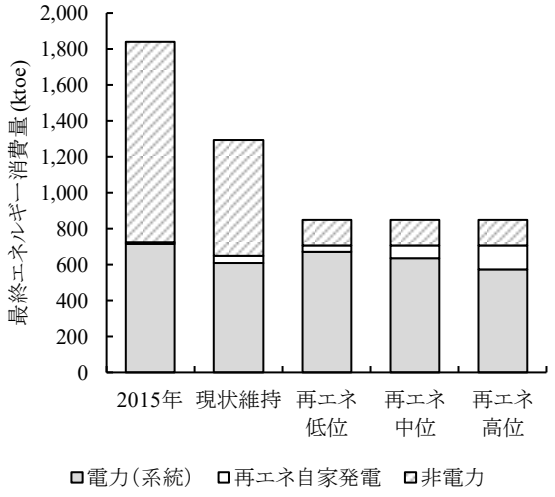


図-1 最終エネルギー消費における電力の内訳

(3) エネルギー費用

各シナリオにおけるエネルギー費用の推計結果を**表-7**に示す．2050年のエネルギー費用は，2015年に比べて，現状維持シナリオで46%減少，再エネ低位シナリオで62%減少，再エネ中位シナリオで63%，再エネ高位シナリオで65%減少となった．電化が進むことで化石燃料の消費が減少し，再エネ高位シナリオにおいて化石燃料への支出は2015年比95%減少した．

表-7 燃料種別エネルギー費用の推計結果

（単位：ktoe）

	2015年	現状維持	再エネ低位	再エネ中位	再エネ高位
石油	62,114	42,156	3,070	3,070	3,070
天然ガス	38,655	19,365	2,034	2,034	2,034
水素	-	1,617	10,924	10,924	10,924
電力（系統）	187,949	91,297	91,297	86,786	78,123
太陽光発電	427	1,350	1,350	2,817	5,634
合計	289,145	155,785	108,675	105,631	99,785

各シナリオにおける京都市のGDPとエネルギー費用の関係を**表-8**に示す．2015年のエネルギー費用はGDPの4.7%であるが，現状維持シナリオ，再エネ低位シナリオ，再エネ中位シナリオ，再エネ高位シナリオにおける2050年のエネルギー費用は，それぞれGDPの1.7%，1.2%，1.1%，1.1%にあたり，いずれも2015年と比べてエネルギー費用の割合が小さくなっている．

また，京都市の世帯数と家庭部門のエネルギー消費およびエネルギー費用の関係を**表-9**に示す．2015年の世帯当たりのエネルギー費用は年間約12万円であるが，2050年に掛けて，省エネによるエネルギー需要の減少，電化の進展と電力及び太陽光発電の単価の減少により，世帯当たりのエネルギー費用は大きく減少した．特に再エネ高位シナリオにおいては，2050年の世帯当たりエネ

ルギー費用は，2015年の約1/4にあたる年間約2.6万円となった．

表-8 各シナリオにおけるGDPとエネルギー費用

	2015年	現状維持	再エネ低位	再エネ中位	再エネ高位
GDP(十億円)	6,184	9,279	9,279	9,279	9,279
エネルギー費用(百万円)	289	156	109	106	100
GDPに対するエネルギー費用の割合(%)	4.7%	1.7%	1.2%	1.1%	1.1%

表-9 家庭部門のエネルギー消費とエネルギー費用

	2015年	現状維持	再エネ低位	再エネ中位	再エネ高位
世帯数(世帯)	705,874	710,660	710,660	710,660	710,660
家庭部門のエネルギー消費量(ktoe)	487	289	206	206	206
世帯当たりエネルギー消費量(toe/世帯)	0.69	0.41	0.29	0.29	0.29
家庭部門のエネルギー費用(百万円)	79,714	27,555	21,576	20,574	18,799
世帯当たりエネルギー費用(円/世帯)	112,929	38,773	30,361	28,950	26,453

5. おわりに

(1) 結論

本研究では，二酸化炭素排出量実質ゼロの実現に係るエネルギー費用について，系統電力や水素の価格変化，太陽光発電の導入費用の変化を踏まえて推計する手法を構築した．そして同手法を京都市に適用し，脱炭素に向けた対策の異なる4種類のシナリオにおける二酸化炭素排出量とエネルギー費用を推計した．その結果，2050年に脱炭素を実現するいずれのシナリオにおいても，現状維持シナリオと比べてエネルギー費用が減少した．さらに，太陽光発電の導入量が多いほどエネルギー費用は小さくなった．各種エネルギーの将来的な価格の変化を踏まえると，京都市における太陽光発電の導入は，脱炭素化においても地域経済においても望ましいといえる．

(2) 今後の課題

本研究の課題は以下の通りである．

① 本研究では，地域の社会経済活動に要する各燃料の費用を，将来のシナリオの想定に基づき推計する手法を開発し，京都市に適用したが，バイオマスや太陽熱に係る費用は含まれていない．これらのエネルギーについても，必要な情報を調査し，費用を算出する必要がある．

② 本給で分析対象とした費用は，エネルギーの購入と自家発電のみである．省エネ機器，設備，インフラなどの費用も脱炭素の実現を検討するうえで重要である．

③ 変動の大きい太陽光発電による電力を無駄なく消費するには蓄電池の導入が欠かせない．太陽光による発電量に応じた蓄電池の導入量およびその費用の分析が求められる．

5. 謝辞

本研究の実施において長谷川は(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20212004)と立命館グローバル・イノベーション研究機構(R-GIRO)による支援を受けた．ここに記し感謝の意を表す．

NOTES

注1) UNFCCC: Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President, 2015.

注2) 環境省：地方公共団体における2050年二酸化炭素排出実質ゼロ表明の状況，2020.

注3) 京都市：「1.5℃を目指す京都アピール」について，2019.

注4) IPCC: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Miti-gation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cam-bridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022.

注5) 京都持続可能社会研究会：京都市低炭素社会シナリオ 削減目標の持続可能性検討 詳細報告書，2016.

注6) AIM プロジェクトチーム：対策導入量等の根拠資料，2012.

注7) 京都市：京都市エネルギー政策推進のための戦略，2013.

注8) 環境省：再生可能エネルギー情報提供システム[REPOS(リーポス)]，2022.

注9) 経済産業省：石油製品価格調査.

注10) 新電力ネット：統計情報.

注11) 京都市：2020（令和 2）年度の温室効果ガス排出量及び総エネルギー消費量について，2020.

REFERENCES

1) 奥田啓太，越智雄輝，長谷川知子，五味馨：京都市を対象とした2050年二酸化炭素排出実質ゼロの姿の定量化.，土木学会論文集G（環境），77巻5号,pp.I_285-I_292，2021.

2) 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），67巻6号，II_225-II_234，2011.

3) 五味 馨，仲座方伯，松岡譲：地域経済の開放性を考慮し

た低炭素社会シナリオ構築手法の開発と京都市への適用，環境システム研究論文集，36巻，pp. 1-9，2008.
4) Ken Oshiro, Shinichiro Fujimori,Yuki Ochi,Tomoki Ehara: Enabling energy system transition toward decarbonization in Japan through energy service demand reduction, *Energy*, Vol. 227, No. 15, 2021.
5) 大城 賢，藤森真一郎：日本の2050年ネットゼロ排出目標における残存排出量削減方策のシナリオ分析，土木学会論文集G（環境），78巻5号，pp. I_429-I_439，2022.