

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

資源・エネルギーの統合利用による  
「低炭素型地域再構築」の計画分析モデル開発と実証  
(2-1711)

平成29年度～令和元年度

Development of Analytical Models for Low Carbon Re-development Planning  
coupling with Resources and Energy Use, and their Application to Municipalities

<研究代表機関>

国立研究開発法人国立環境研究所

<研究分担機関>

名古屋大学

東北大学

令和2年5月

## 目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 資源・エネルギー利用を統合化した都市・地域レベルでの低炭素 施策評価モデル及び都市・自治体向け簡易評価モデルの開発 （国立研究開発法人国立環境研究所）	18
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 低炭素な都市空間構築に向けた運輸旅客・民生家庭部門二酸化炭 素排出量推計手法の開発 （国立研究開発法人国立環境研究所）	61
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-3 低炭素でレジリエントな都市空間構築に向けた建設ストック更新 評価システムの開発 （名古屋大学）	79
要旨	

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

II-4 持続可能な資源・エネルギー利用に向けた地域拠点設計手法の開発  
発と実証 . . . . . 105  
(東北大学)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

III. 英文Abstract . . . . . 133

## I. 成果の概要

課題名 2-1711 資源・エネルギーの統合利用による「低炭素型地域再構築」の計画分析モデル開発と実証

課題代表者名 芦名 秀一 (国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター 広域影響・対策モデル研究室 主任研究員)

研究実施期間 平成29～令和元年度

研究経費(累計額) 141,010千円

(平成29年度：47,800千円、平成30年度45,410千円、令和元年度：47,800千円)

本研究のキーワード 都市・地域、低炭素シナリオ、統合評価モデル、地理情報、都市構造、人口分布、建設ストック、ストック型都市、地域エネルギーシステム、簡易ツール

### 研究体制

- (1) 資源・エネルギー利用を統合化した都市・地域レベルでの低炭素施策評価モデル及び都市・自治体向け簡易評価モデルの開発(国立研究開発法人国立環境研究所)
- (2) 低炭素な都市空間構築に向けた運輸旅客・民生家庭部門二酸化炭素排出量推計手法の開発(国立研究開発法人国立環境研究所)
- (3) 低炭素でレジリエントな都市空間構築に向けた建設ストック更新評価システムの開発(名古屋大学)
- (4) 持続可能な資源・エネルギー利用に向けた地域拠点設計手法の開発と実証(東北大学)

### 1. はじめに(研究背景等)

パリ協定で合意された長期目標である低炭素社会やゼロ排出社会の実現には、国全体と同様に都市等でも将来像・目標とそれを実現する道筋を、技術と制度・政策を組み合わせることで具体的に設計し、実行していくことが肝要である。これまで、研究参画者らなどが滋賀県等で地域低炭素シナリオ構築を実施してきたが、検討では現状の都市構造が維持されることを前提とするとともに、対策も国の温室効果ガス削減検討で挙げられた省エネルギー方策や再生可能エネルギー導入が中心であり、地域の社会・経済・エネルギーの特性を踏まえた効果的な対策の同定とその実施や地域のエネルギー資源の積極的活用を打ち出したシナリオは多くない。そのため、地域特性を踏まえて低炭素シナリオを描く一連の手法を開発し、国全体の低炭素社会・ゼロ排出社会実現に向けた方向性と整合し、かつそれぞれの地域特性を踏まえた低炭素シナリオを全国の都市や地域において描くとともに、その実現に向けた制度・政策の立案・実施が必要とされている。

また、都市や地域で効率的に温室効果ガス削減を促していくためには、土地利用や都市構造を含めた社会システム全体を大きく再構築し、炭素効率やエネルギー効率といった低炭素の観点だけでなく資源利用等の観点でも効率的な都市に移行するための方策の検討とその実施が不可欠である。加えて、近年顕在化しつつある気候変動影響も踏まえると、社会システム変革に際しては気候変動影響等も含めた自然災害等へのレジリエンス強化の視点も組み込むことが求められる。

しかし、具体的に変革を促して地域や都市を低炭素かつレジリエントに再構築していくには、人口・産業等の経済社会構造や、エネルギー需給システム・交通システムといった都市基盤、建設ストックの更新を含むインフラ更新とそこから生じる廃棄物・マテリアル等の循環型資源利用まで多様かつ複合的な要素を総合的に検討することが必要となる。このために、これまで個別分野で構築されてきた方法論を統合し、抜本的に都市・地域の低炭素化・脱炭素化とレジリエント化を実現できる地域再構築の理論と手法を開発することが喫緊の課題となっている。

### 2. 研究開発目的

本研究では、上記背景のもと、以下の3つの到達目標を置く。



- ① 特に資源・エネルギー利用を中心として、わが国の都市や地域を低炭素でレジリエントな低炭素型地域へ再構築する計画検討の理論およびモデル等分析手法の確立。
- ② 国内の複数都市を対象とする実証を通じた、計画理論・手法の一般性確保と有効性を高めるための検討。
- ③ 広くわが国の地方自治体が低炭素型地域再構築計画を立案できるような簡易手法の開発と、地方公共団体温暖化対策実行計画等への反映などによる低炭素かつレジリエントな地域再構築に向けた政策支援等による研究成果の社会実装。

これら到達目標を踏まえた研究開発目的を複数置き、それぞれに研究開発を進める。具体的には、サブテーマ2と3において、空間情報も活用し、人口減少や高齢化などの社会的な課題も含めて将来の土地利用や都市構造を定量的に評価する「低炭素型都市空間分析モデル」と、建設ストックの持続的な更新に着目した「建設ストック更新評価システム」を開発し、都市構造と資源利用の両方の視点から低炭素でレジリエントとなる都市空間像の分析手法を確立する。運輸旅客及び民生家庭部門では、サブテーマ2において「エネルギー需要及び二酸化炭素排出量推計手法」を、サブテーマ4において自治体や複合街区を対象に熱電供給網などのエネルギー基盤も含めて持続可能かつ最適なエネルギー需給システムを検討できる「地域拠点設計手法」を開発し、エネルギーインフラも含めて民生・運輸部門の将来像を定量分析する手法を確立する。また、サブテーマ1では、都市・地域全域で技術及び制度・政策を対象に低炭素化のためのシナリオと実現の道筋を検討できる「低炭素施策評価モデル」を開発するとともに、これらの手法を統合化して都市・地域を低炭素でレジリエントに再構築するための計画分析モデルとしてとりまとめる。

また、開発した手法・モデルは、それぞれのサブテーマで学術誌や国際学会等で発表して学術性を高めるとともに、連携研究体制を構築済みである地方自治体を中心に適用し、自治体等との協議も通じて手法の有効性の実証と改良を進める。

これらに加え、広くわが国の自治体が独自に地域再構築計画を立案できるよう、サブテーマ1にて開発した計画分析モデル等をもとにExcelやWebで検討可能な簡易評価モデルも開発し、課題全体として地方公共団体温暖化対策実行計画等への情報出力及び政策支援等による研究成果の社会実装を目指す。

### 3. 研究開発の方法

本研究課題では、空間解像度や対象とする部門ごとに中心となる分析手法を位置づけ、それらの連携により研究開発目的を達成するものとした。図3.0.1に、研究課題構成の全体像を示す。

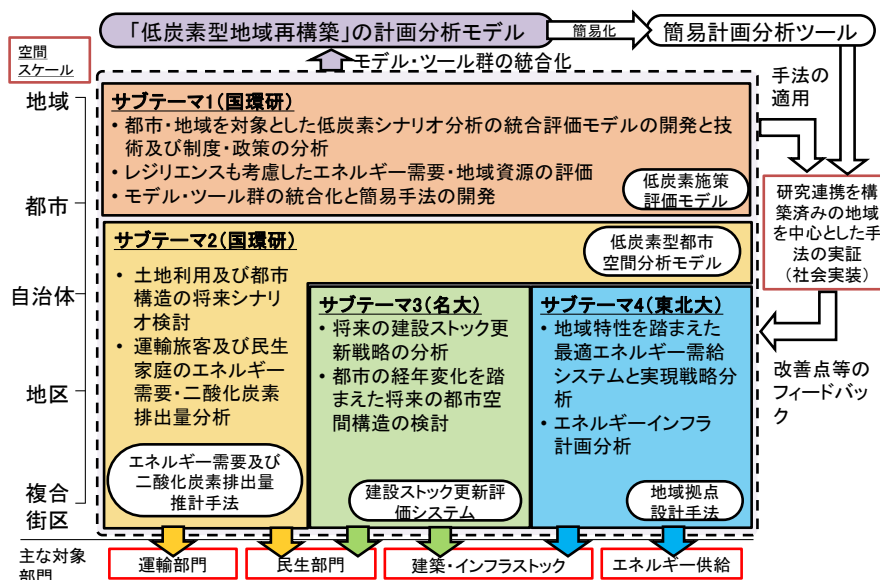


図3.0.1 研究開発目的達成に向けた本研究課題の構成

### (1) 資源・エネルギー利用を統合化した都市・地域レベルでの低炭素施策評価モデル及び都市・自治体向け簡易評価モデルの開発

本サブテーマでは、都市・地域での低炭素シナリオ分析と施策評価のための低炭素施策評価モデルとして、日本全体での低炭素シナリオ分析に用いられている技術選択モデル（AIM/Enduse [Japan]）をもとに、対象とする都市・地域全体の社会・経済条件とサービス需要を所与として低炭素方策や技術導入の効果を評価することができるマクロ型都市・地域の低炭素施策評価モデルと、サービス需要や地域資源ポテンシャルを三次メッシュ（約1km×1km）単位や都市計画等で定める中核拠点単位などで設定して地域資源の輸送等の観点も含めて低炭素方策や技術導入の効果を評価できる空間考慮型低炭素施策評価モデルの二種類のモデルを開発した。いずれのモデルでも、サービス需要は大きく産業部門、家庭部門、業務部門、及び運輸部門ごとに設定し、地域資源として太陽光発電や太陽熱発電、風力発電、バイオマスといった再生可能エネルギーのほか、産業排熱や未利用熱などの地域に賦存するエネルギー資源を対象とでき、これらに基づいてサービス需要を満たすための技術の組み合わせと導入量を求め、その結果に基づいて二次エネルギー消費量と一次エネルギー消費量、CO<sub>2</sub>排出量を算出する。

また産業部門については、産業排熱等を利用した分散型エネルギーシステムの設計と導入による産業部門のCO<sub>2</sub>排出量やエネルギーコストへの効果を評価できるモデルを開発した。モデルでは、サブテーマ3の開発する4d-GISを活用することで、個々の工場の立地をもとにしたエネルギー消費量や産業排熱などの地域エネルギー資源の賦存量の分析と、産業団地周辺へのエネルギー輸送も考慮したシステムを設計することができる。

これに加え、低炭素型地域再構築の計画分析モデルとしてとりまとめるに際して、気候変動に対するレジリエンスも考慮した都市・地域の低炭素化の検討もできるよう、需要側に着目して都市・地域の特性を考慮できる需要分析手法を、エネルギー供給側に着目して将来の気候変動も考慮した再生可能エネルギーポテンシャルの評価手法を開発するとともに、多地域電源計画モデルを活用した地域別の系統電力の排出係数分析を行えるようにした。需要分析手法については、建築物の建て替えや断熱化等の効果や気候変動によって生じる気象条件の変化の影響、ダイヤモンドレスポンス（DR）等のICT技術を活用した需要制御技術の導入による効果を考慮できるような手法開発を行うとともに、特に将来のサービス需要について詳細な用途別分析を可能とすることを目的に、人口・従業者数から床面積を算出する推計式の検討を行った。供給側の分析のうち将来の再生可能エネルギーポテンシャルについては、7つの気候モデルの予測データから得られる日射量や気温、風速の将来変化をもとに、太陽光発電と風力発電のポテンシャル変化を評価した。地域別の系統電力の排出係数は、多地域電源計画モデルに、再生可能エネルギーへの支払い意思額を考慮できるよう改良を加え、複数の将来シナリオを想定して再生可能エネルギー導入量や系統電力の排出係数への影響を評価した。

以上に加え、本研究では低炭素施策評価モデルをもとに、ExcelやWebの操作で将来の都市・地域のエネルギー需給やCO<sub>2</sub>排出量の見通しを分析できる簡易低炭素効果評価ツールを開発し、ワークショップ形式で将来のエネルギーシナリオを検討する場での実証や、地域の温暖化対策の研究や実践を担うステークホルダーとの議論を通じた改良点の抽出を行った。

### (2) 低炭素な都市空間構築に向けた運輸旅客・民生家庭部門二酸化炭素排出量推計手法の開発

本サブテーマでは、空間統計情報を活用し、人口減少・高齢化等の低炭素以外の地域固有の課題の解決も視野に入れて将来の土地利用と都市構造を定量的に評価する「低炭素型都市空間分析モデル」と、運輸旅客及び民生家庭部門を対象とする「エネルギー需要及び二酸化炭素排出量推計手法」を開発し、これらを連携させることで低炭素な都市空間構築に向けた分析を行った。

低炭素型都市空間分析モデルは、都市構造と自動車及び民生家庭のCO<sub>2</sub>排出量との関係性を分析することができ、施設立地と関連性の深い圏域人口に着目した都市構造類型化（地域タイプ分類）と、自動車CO<sub>2</sub>排出量と民生家庭CO<sub>2</sub>排出量それぞれに、将来の土地利用や都市構造の変化を考慮した将来推計を行うことができる。エネルギー需要及び二酸化炭素排出量推計手法は、都市構造や断熱性能別の住宅数等に基づきメッシュ別で地域別自動車CO<sub>2</sub>排出量や民生家庭の排出量を推計するものである。

地域別自動車CO<sub>2</sub>排出量の推計については、道路交通センサスデータのサンプル数の観点から求める

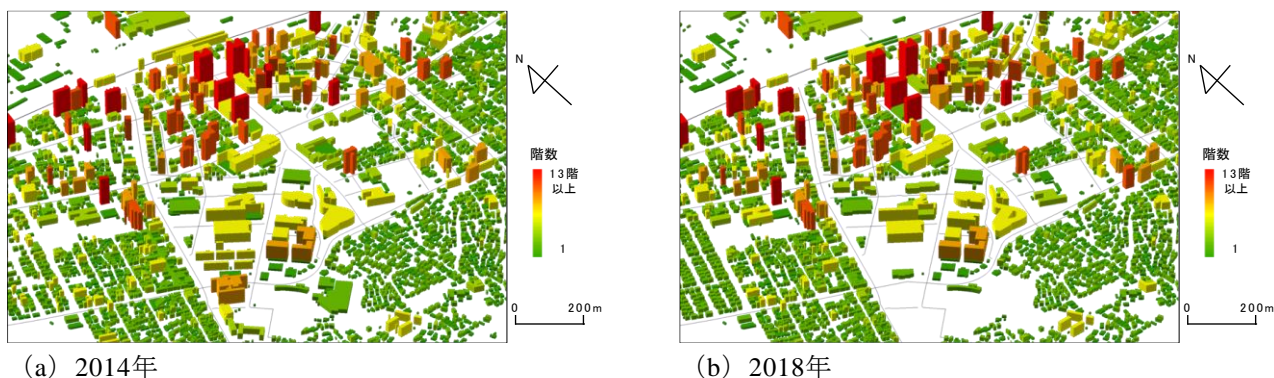


図3.0.2 構築した北九州市八幡駅周辺の4d-GISデータの例（サブテーマ3）

推計値の信頼性を考慮して評価する手法を開発し、2010年データに基づくメッシュ規模別自動車CO<sub>2</sub>排出量の推計を行った。これに加えて、将来のCO<sub>2</sub>排出量へ影響する要因として年齢別免許保有率・運転率の推移を把握し、将来走行量推計への適用可能性を検討した。

民生家庭の二酸化炭素排出量推計については、環境省による家庭部門のCO<sub>2</sub>排出実態統計調査の全国試験調査（2014-2015年）の個票データを用いて、調査市町村の暖房デグリーデーを推計・追加し、建て方および世帯規模等との重回帰モデルを構築するとともに、市町村別の世帯あたり排出量を求めた。また、地域別自動車CO<sub>2</sub>排出量や民生家庭のCO<sub>2</sub>排出量の推計結果をもとに、全国市町村別に家庭からのCO<sub>2</sub>排出量の推計と比較考察を行った。

これら分析に加えて、地域固有の課題解決と低炭素化を両立するための方策を検討するために、住宅の建替と改修による民生部門エネルギー消費量の削減効果を評価した。具体的には、地域固有の課題として空き家を取り上げ、空き家対策が低炭素化方策としての住宅の高断熱化に及ぼす影響を評価することとして、空き家率の変化も加味した新設住宅の着工数推計と、断熱性能向上による世帯あたりエネルギー消費の削減量推計を行った。

### （3）低炭素でレジリエントな都市空間構築に向けた建設ストック更新評価システムの開発

本サブテーマでは、低炭素とレジリエントの視点を組み込んだ「建設ストック更新評価システム」を用いて様々な都市空間構築シナリオに対して将来の建設ストック更新計画を分析し、将来の都市構造実現のための建設ストック更新戦略及びその実現方策を検討することとした。将来の建設ストック更新計画の分析にあたっては、2次元の地理情報に建築物の階数を高さ情報として加えた3次元のデータ（3d-GIS）を複数の年代で作成して経年で比較できるようにしたデータベース（4d-GIS）を開発して用いる。4d-GISデータの一例を図3.0.2に示す。なお、対象地域は、福岡県北九州市とした。

各建築物のマテリアルストックは、北九州市全域の建築物を対象に、建築物の延床面積（建築物面積に階数を乗じた面積）へ建築年別、構造種別資材投入原単位を乗ずる原単位法により推計した。使用される資材の量や質は、建設された年代による構造変化や建築基準法や耐震基準等の改正により建設時期によって変化し、原単位も変わる。そこで本研究では、既往研究を参照して建築年別に資材投入原単位を設定してマテリアルストックを算出した。また、マテリアルフローは、各建築物の建設に伴う資材投入量及び解体に伴う資材排出量から推計した。推計にあたっては、ある2つの年代間を見比べ、新しい年代のみに存在する建築物を着工建築物、古い年代のみに存在する建築物を解体建築物として定義し、着工建築物・解体建築物について、マテリアルストックの推計方法と同様に原単位法を用いて行った。

これに加えて建築物の滞留年数の推計を行い、将来の建設副産物発生量を明らかにした。具体的には、GISデータの各年代について、年代間が最も近い2つのGISデータを同一座標上で比較し、解体建築物のみを位置と形、建築年、建築物名、階数等をもとに抽出し、構造別・用途別分類と建築年別の解体棟数を算出し、区間残存率推計法により残存率を推計した。また、将来の解体確率の推計にあたっては、奥岡らによる最尤法を用いることとした。

### （4）持続可能な資源・エネルギー利用に向けた地域拠点設計手法の開発と実証

本サブテーマでは、エネルギーインフラも含めて広域街区を対象にエネルギーシステムを検討できる

「地域拠点設計手法」を開発し、エネルギーシステムシナリオを複数想定して具体地域で最適なエネルギー需給システム検討を実施して手法の有効性を検証するとともに、持続可能なエネルギー利用の実現に向けた方策を検討する。

開発した地域拠点設計手法では、まず対象地域のエネルギー需要量及び再生可能エネルギー導入ポテンシャルとそれらの空間分布を算出し、人口動態等に基づいて将来の部門別エネルギー需要量を設定する。つぎに、エネルギーインフラの違いなどの観点から複数の部分均衡型エネルギー・経済モデルを構築し、技術導入など複数のシナリオを想定して需要を満たすために必要となるエネルギー源、供給量及びその経時変化を定量分析するとともに、対象地域内のエネルギーの流れを示すフロー図（エネルギーフロー図）を描く。

最終エネルギー消費量は推計により算定することとし、全国や都道府県といった上位地域の統計データをエネルギー消費量と相関のある指標（活動指標）を用いて市区町村ごとに比例配分する按分法を用いる。再生可能エネルギー導入ポテンシャルは、陸上風力・洋上風力、木質バイオマス、太陽光、地熱、中小水力発電を対象とし、太陽光発電や風力発電は毎時の日射量や風速をもとに、木質バイオマス賦存量は、未利用間伐材の材積に基づく手法と、森林成長量に基づく手法を組み合わせ推計した。なお、地熱、中小水力は、環境省が公開している再生可能エネルギー導入ポテンシャルマップ・ゾーニング基礎情報（平成28年度更新版）の市区町村別集計表の導入ポテンシャルをもとに求める。

地域エネルギーシステムの最適設計は部分均衡型エネルギー・経済モデルを用いる。このモデルでは、価格競争に基づいて資源や技術を選択するものであり、シミュレーションにより市場均衡にもとづく均衡解が算出され、エネルギー供給量や供給価格が決定される。シミュレーションを行うエネルギーシステムのモデルとして、エネルギーインフラの違いに着目して、現行のエネルギーシステムを模擬する基本モデルと、対象地域内で建設される発電設備と系統発電設備を区別して取り扱う地域エネルギーモデルの2つを構築した。

これら分析も踏まえ、地域内のエネルギー自給率向上と地域経済活性化の観点で、複数の地域が連携して広域圏を構築した場合の再生可能エネルギー資源導入推進や経済への効果の評価を試みた。試設計においては、地域の組み合わせとして、供給主体地域の余剰エネルギーを需要主体地域に供給する関係とする場合（余剰融通）と、提携を結んだ地域内でエネルギーの過不足を均等化する場合（併合）の2種類を想定し、地域間で融通されるエネルギーの均等化発電コスト（LCOE）で測定する経済合理性と、財政を統合した場合の財政力指数により計測する財政安定性、需要主体地域における不足エネルギー量と供給主体地域における余剰エネルギー量により計測される相互補完性をもとに提携先を検討する。なお検討にあたっては、提携は隣接する地域間でのみ成立するという隣接制約と、組み合わせによって成立する範囲は、地域間での意思決定や資源輸送等を円滑に実施できる範囲を上限とする上限制約を課した。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 資源・エネルギー利用を統合化した都市・地域レベルでの低炭素施策評価モデル及び都市・自治体向け簡易評価モデルの開発

開発した空間考慮型低炭素施策評価モデル（空間考慮型モデル）を東北地域に適用し、将来の低炭素シナリオ検討を行った。分析では、都市・地域で低炭素方策を考える際に都市構造変化が及ぼす影響を見るために、都市構造が変わらないBAUシナリオと都市計画等に示された市街化区域へ人口等の集約が進む集約化シナリオの2つを想定した。総エネルギー需要量推計の結果では、BAUシナリオ及び拠点集約化シナリオともに人口及び経済成長の想定は同一であるが、総エネルギー需要は明確に異なる推計結果となるとともに、集約先として想定した市街化区域でのエネルギー需要は拠点集約化シナリオのほうが増加することが明らかとなった。また、拠点集約化シナリオでエネルギー需要が集中することにより、病院や大規模商業施設等が集中している地区では地域エネルギー事業の事業採算性が確保され、導入が進むと評価された（図4.0.1 (a)）。図4.0.1 (b) に示すCO<sub>2</sub>削減効果についても、拠点集約化シナリオに低炭素対策を組み合わせることで対象地域のCO<sub>2</sub>排出量を削減でき、特に集約化によるエネルギー需要及び供給の効率化による貢献が41.2%と、都市・地域で低炭素化対策を効果的に推進するためには、土地



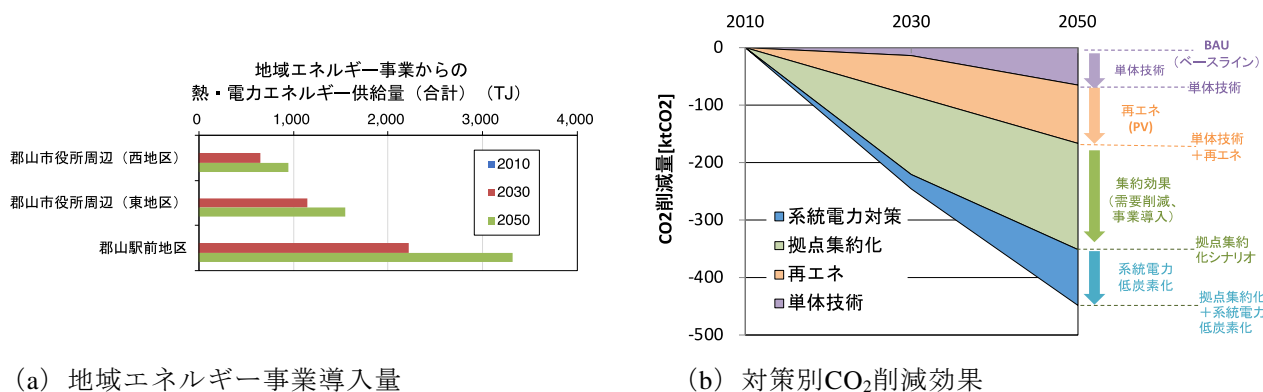


図4.0.1 空間考慮型モデルの分析結果

利用の誘導等による都市の集約化効果（コンパクトシティ化）を検討していくことが重要であることが示唆された。

マクロ型都市・地域の低炭素施策モデル（マクロ型モデル）では、エネルギー消費と産業構造の地域差を表す尺度としての温室効果ガス排出量の部門別割合とエネルギー消費の地域差を表す尺度としての次世代省エネルギー基準に着目して行った地域分類に基づき、14都市の低炭素シナリオ分析を行った。その結果、いずれの自治体でも、CO<sub>2</sub>削減には省エネルギー機器導入などの需要側対策の効果が大きいことが明らかとなった。また、各地域で実施する対策の効果と同程度、あるいはそれ以上に系統電力の排出係数改善の効果が大きく、使用する電力の低炭素化も重要であることが結果から示唆された。

産業部門を対象としたモデルでは、福島県浜通り北部に立地する工業団地を対象に、産業排熱を工場間や周辺地域で利用することを想定した分析を行った。その結果、現状の産業がそのまま将来も維持するとしたBAUシナリオと比較して、飲料や食品産業といった熱需要の大きな産業を新たに誘致する場合には、産業排熱の利用も拡大し工業団地全体としてのCO<sub>2</sub>削減が進むものの、2050年まで出荷額や雇用はほとんど現状のまま推移する。いっぽう、情報産業や電気機械産業、電子部品・デバイス製造業などの雇用集約型産業を誘致した場合には、出荷額や雇用は2050年には現状の約2倍に増加するが、火力発電所からの排熱利用は十分進まず、CO<sub>2</sub>削減量はBAUよりも減少する。このことから、低炭素を優先して工業団地内のみでの産業排熱利用を拡大する方策は経済・雇用とはトレードオフの関係にあり、空間考慮型モデルで分析したように、産業排熱を近傍の街区に供給するなど、都市・地域全体で活用することが重要であることが示唆される。

低炭素型地域再構築の計画分析モデルとして取りまとめるにあたって新たに開発した需要分析手法のうち、建物の建て替えの影響については、住宅更新を促進してコンパクトシティ化が進むと想定した分析から、短期的な建築物の建て替えは断熱水準向上等とエネルギー需要抑制の観点では有効であったとしても、建設副産物発生量の増加を引き起こし、資源の効率的な利用においては適切とはいえず、既設建築物の更新量増加は数年かけて行うとともに、新設建築物については更新量増加の対象外とするなど、資源利用も考慮した形で実施することが肝要であることがわかった。また、気候変動によって生じる気象条件の変化が電力需要に及ぼす影響の推定については、電力需要の決定要因として、地域特性に関わらない共通要因として3つの気象関連要因（気温、湿度、日射）と4つの人間活動（働いている人の割合、眠っている人の割合、在宅し起きている人の割合、平日休日の別）が、地域固有の要因（地域要因）として3つの気象関連要因（風速、降雨、積雪）があることを特定するとともに、特に共通要因の影響が大きいことが明らかになった。また、分析結果を都市・地域の需要分析に用いることができるよう、区分線形関数で近似した気温感応度関数を作成した。需要制御技術導入の効果評価については、エネルギーマネジメントシミュレータを開発し、需要制御としてDRとピークシフト、ピークカットの効果を評価した結果、需要制御によるエネルギー需要の削減効果は日中実施の方が大きいですが、需要平滑化効果は夜間に実施する方が効果的であるとともに、再生可能エネルギー発電（太陽光発電）の発電パターンと組み合わせることで、日中のピーク時間帯の需要削減がさらに進めることが可能であることが可能とわかつ

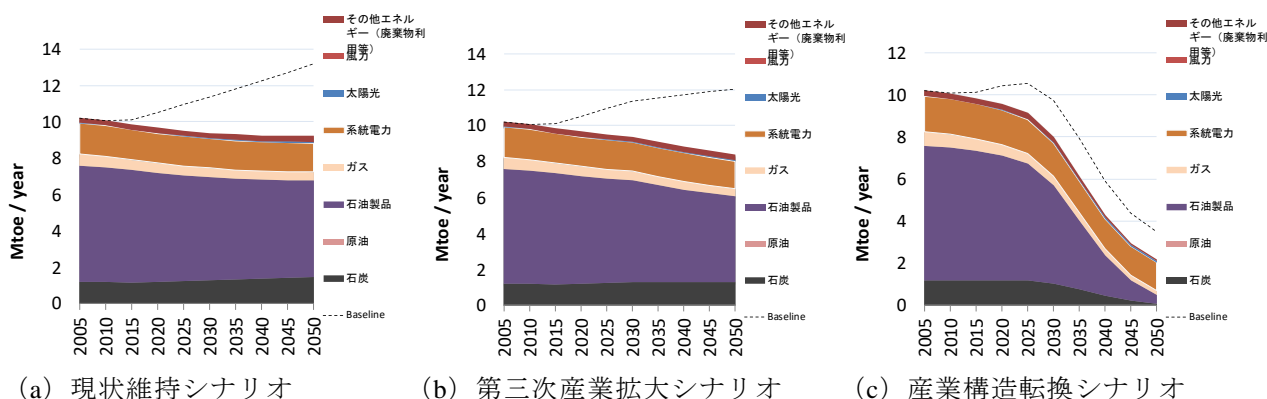


図4.0.2 地域版低炭素ナビによる将来の一次エネルギー消費量の分析結果  
(破線が無対策ケース、面が最大努力ケース)

た。また、人口・従業員数から床面積を算出する推計式の検討では、世帯人口から住宅床面積を算出する推計式と、第一次産業・第二次産業・第三次産業それぞれに、従業員数から工場を除く非住宅建物の延床面積を算出する推計式を明らかにした。

供給側については、気候変動を考慮した地域の再生可能エネルギーポテンシャルの評価より、太陽光発電はいずれの気候モデルもどの代表的濃度経路（RCP）であっても将来の増加傾向を示すいっぽう、風力発電は、気候モデルにより違いはあるものの、年間で見た場合には総じて発電量の減少傾向が見られることがわかった。これらより、将来の気候変動により太陽光発電は増加する方向にあり、将来の効率向上も勘案するとさらに発電量は大きくなりうる可能性が高く、将来においても重要な再生可能エネルギー源であるいっぽう、風力発電は気候変動が発電量へのリスクとなる可能性が示唆された。

多地域電源計画モデルを用いた地域別の系統電力の排出係数の分析については、まずメタアナリシスを用いて都道府県別に現在及び将来の再生可能エネルギーに対する支払い意思額（WTP）の中間値を推定し、東京や愛知等の一人当たりの収入が高い地域では、費用負担許容額も高くなる傾向が見られることを明らかにした。さらに、このWTPの推定結果を踏まえ、多地域電源計画モデルを用いて将来の再生可能エネルギー導入量と電力会社の費用負担の分析を行ったところ、WTPの分析結果をモデルに組み込むことでCO<sub>2</sub>排出量に制約を課さずとも太陽光発電と風力発電の導入量が増加することがわかった。また、地域別に見ると、一人あたり収入の水準が他地域と比較して高く、人口が集中している東京地域での導入量増加が最も高いことが明らかとなった。その結果、排出係数も東京や中部では2015年と比較して大きく低下するが、再生可能エネルギー導入が進まない東北や四国、沖縄はそれほど変化しないことがわかった。

本研究で開発した簡易低炭素効果評価ツール（地域版低炭素ナビ）では、2050年まで現状のまま維持されると想定した場合の温室効果ガス排出量削減水準や、立地する産業が外部へ移転すること等の社会経済変化に伴う温室効果ガス排出量の変化など、都市・地域が低炭素化を目指す際に、社会構造や経済活動の変化がどのように影響するかを分析することが可能である。一例として、関東地方の地方自治体を対象に現在の産業構造及び活動量が将来も一定と想定した現状維持シナリオと、鉄鋼業及び石油化学産業が徐々に減少して第三次産業へ転換する第三次産業拡大シナリオ、産業活動から教育や研究開発等へ完全に移行する産業構造転換シナリオの3つを設け、排出削減や気候変動対策を全く取らなかった場合（無対策ケース）と需給両面で低炭素社会への対策を強化したケース（最大努力ケース）で分析した結果を示す（図4.0.2）。開発したツールをもとに、ステークホルダーによる将来の低炭素シナリオ検討における有効性を確認するために、エネルギーワークショップにて低炭素施策簡易分析ツールを用いてもらい、参加者からのフィードバックを得ることや、地域の低炭素シナリオ研究を行う大学・研究機関の研究者やJNCCA等の地域の温暖化対策を担うステークホルダーとの議論を行い、都市・地域それぞれの低炭素シナリオ検討やステークホルダーの関与した議論を進めるに役立つことを確認した。

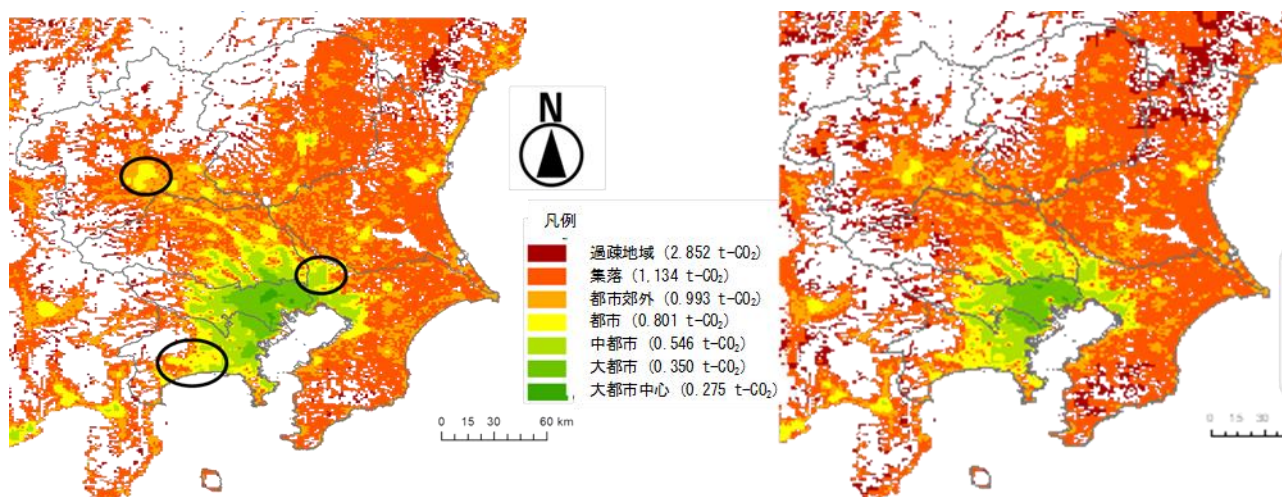


図4.0.3 地域タイプの分類と自動車CO<sub>2</sub>排出量（左・2010年、右・2050年）

## （2）低炭素な都市空間構築に向けた運輸旅客・民生家庭部門二酸化炭素排出量推計手法の開発

低炭素型都市空間分析モデルを用いた分析では、都市構造と家庭CO<sub>2</sub>排出量の関係性についてメッシュ別の人口等の属性と家庭CO<sub>2</sub>統計調査データとの連関分析を実施した。連関分析から明らかになった家庭排出量モデルの回帰式は、平均年齢、電力排出係数、年平均気温、世帯規模、延床面積、年合計日照時間、人口集中地区ダミー、平均標高、年間降水量の9説明変数で構成され、自動車排出量モデルの回帰式は、世帯規模、人口密度、平均年齢、延床面積、最寄り駅距離、賃貸住宅ダミー、離島ダミー、日照時間、土地傾斜角度、居住期間の10変数で構成される。これらの回帰式をエネルギー関連統計から算出できる都道府県別の排出量を比較することで検証すると、家庭CO<sub>2</sub>排出量については、本研究で開発した手法で統計値に近い値が推計できることが確認できたが、自動車CO<sub>2</sub>排出量については、家庭CO<sub>2</sub>統計調査よりもサンプル規模が大きい道路交通センサスODデータを用いた排出量やそれに基づく分析結果を用いることが望ましいことが示唆された。

都市構造と自動車CO<sub>2</sub>排出量の関係性を明らかにするために、人口密度によって分類される地域タイプと道路交通センサスODデータに基づく自動車CO<sub>2</sub>排出量との連関分析を実施した。関東地域を例に地域タイプに分類した結果（図4.0.3）を見ると、メッシュごとの人口規模で都市構造を把握する場合と異なり、たとえば図中の黒丸で示す境界地域で周辺圏域を含む人口集積の違いをより明確に把握できるようになった。想定した都市空間シナリオから得られた2050年の結果について見ると、茨城県北部、千葉県南部および関東の山間部において過疎地域タイプが増えることや、北関東での都市タイプの数が減少することがわかる。また、地域タイプに基づく分析は、気候変動の影響（レジリエンス）も考慮した低炭素型都市の検討にも役立てることが可能であり、例えば都市空間分析と浸水、津波、土砂災害などの被害想定区域を重ね合わせた検討を行うことで、既存の都市を低炭素型に転換する場合でも、どこで浸水を想定した対策を同時に考慮、実施していくことが重要かを検討することができるようになる。

運輸旅客・民生家庭のエネルギー需要及び二酸化炭素排出量推計手法については、運輸旅客のCO<sub>2</sub>排出量推計として、全国市町村別乗用車CO<sub>2</sub>排出量及び貨物車CO<sub>2</sub>排出量について、「2010年道路交通センサスデータに基づく全国市町村別自動車CO<sub>2</sub>排出量推計結果」から信頼性を考慮して市町村の排出量と対応する人口で除した一人あたり排出量を求めた。推計の元データとしてきた全国道路・街路交通情勢調査（道路交通センサス）の方法が変更となり、2010年以降はサンプル数が従来の約6分の1に減少したために従来の手法による排出量推計が困難となっていたが、今回の推計手法を用いることにより、一部の市町村については信頼性を有し、かつ地域の特徴を反映した値が提供可能とできた。これに加えて、高齢化が将来走行量に与える影響を年齢別の免許保有者数や年齢別免許保有率・運転率の推移をもとに分析し、世代と年代による運転文化の違いや変化を明らかにした。

民生家庭部門でのCO<sub>2</sub>排出量推計として、環境省が実施する家庭CO<sub>2</sub>統計調査（家庭部門のCO<sub>2</sub>排出実態統計調査）のデータを活用して、各市町村の気候や居住形態の違いを反映した世帯あたり排出量を求



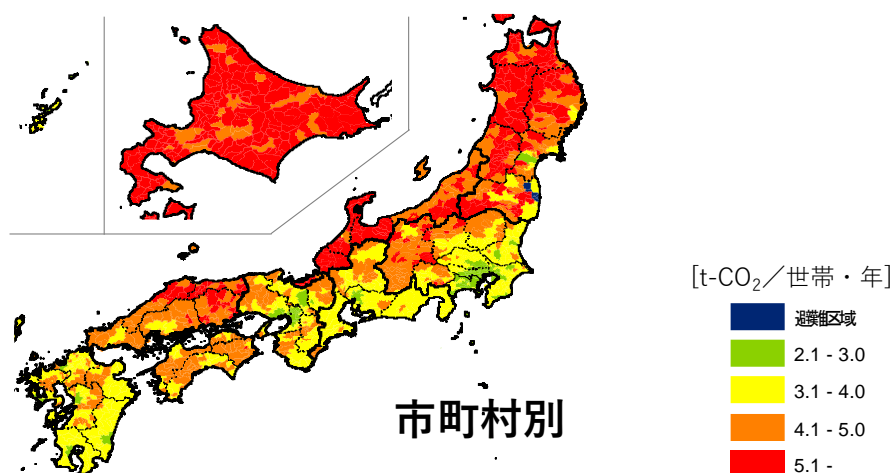


図4.0.4 本研究で開発した回帰モデルによる家庭CO<sub>2</sub>排出量の推計値

める回帰モデルを構築し、全国市町村別の家庭部門CO<sub>2</sub>排出量を推計した。本研究の結果（図4.0.4）を見ると、それぞれの地方の中でもさらに地域詳細に家庭CO<sub>2</sub>排出量を求めることができていることがわかる。特に、関東甲信や近畿、九州などの地方区分において、各市町村の排出量の違いを捉えることができていることがわかる。

さらに、家庭CO<sub>2</sub>と乗用車CO<sub>2</sub>との関係性を分析したところ、全般に家庭CO<sub>2</sub>排出量が多い市区町村は乗用車CO<sub>2</sub>排出量が多い傾向にあり、一方のみ大きい市区町村の割合は小さいことが分かった。これまで大都市圏都市部において、公共交通機関の利便性が高いことから乗用車CO<sub>2</sub>排出量が少ないことは知られていたが、本研究より家庭CO<sub>2</sub>排出量についても、大都市圏においては集合住宅割合が高いことから排出量が少ないということが確認された。

最後に、地域固有の課題解決と低炭素化を両立するための方策の検討として、住宅の建替と改修による民生部門エネルギー消費量削減を分析したところ、多くの市町村において世帯数が減少に転じることを考慮し、空き家の発生抑制を積極的に行う場合には、新設着工数は累積でストックの10%程度にとどまる必要があることとなり、断熱性の高い住宅の新設によるエネルギー消費量の削減の効果が2030年にはほとんど得られない可能性があることが分かった。そのため、住宅の断熱性能の向上と空き家対策を同時に行うと、地球温暖化対策計画が目標とする2030年に新設住宅着工数の全数ならびに既存住宅数の30%を改正省エネ基準に適合させるだけでは不十分であり、2030年には追加的に20%の断熱改修が、2050年には追加的に60%のストックへの断熱改修が必要となる可能性があることが明らかになった。

### （3）低炭素でレジリエントな都市空間構築に向けた建設ストック更新評価システムの開発

北九州市全域における資材別、構造別、上部・下部構造別のマテリアルストックを推計した結果（図4.0.5）、木造建築物と鉄骨造建築物のストック量は、年毎に多少の増減はあるものの大きな変化は見られないが、RC造建築物については、1986年には3,769万トンであったが2018年には8,251万トンと2倍以上に増加し、年々増加傾向にあるとともに、全構造の建築物ストック量も全体的に増加傾向にあることがわかった。これは、少子高齢化や人口減少が特に顕著に現れている北九州市においては、まばらに存在する居住地を集約させるための都市計画が進められており、建築物の高層化によるRC造建築物の増加が要因として考えられる。資材別では、コンクリートが建築物合計ストック量の約74%を占め、特にRC造建築物の増加がコンクリートのストック量の増加に直結したことがわかった。マテリアルストックの分布についてみると、鉄道付近は交通利便性が高いため、居住用建築物だけでなく商業用建築物等さまざまな建築物が集積し、また、沿岸部の工業地帯でも、工場が多数立地するため、大部分が鉄道付近及び沿岸部に集まっていることがわかった。また、マテリアルストックの経時的な増減について見ると、近年の工業衰退とともに沿岸部の工場が減少し、建築物ストックの減少は沿岸部で多く見られた。また、居住地の新規開拓もあり、建築物ストックの増加は都心部以外でも多く見られることがわかった。

つぎに、区間残存率推計法を用いて用途3種別（戸建住宅、集合住宅、業務施設）、構造3種別（木造、



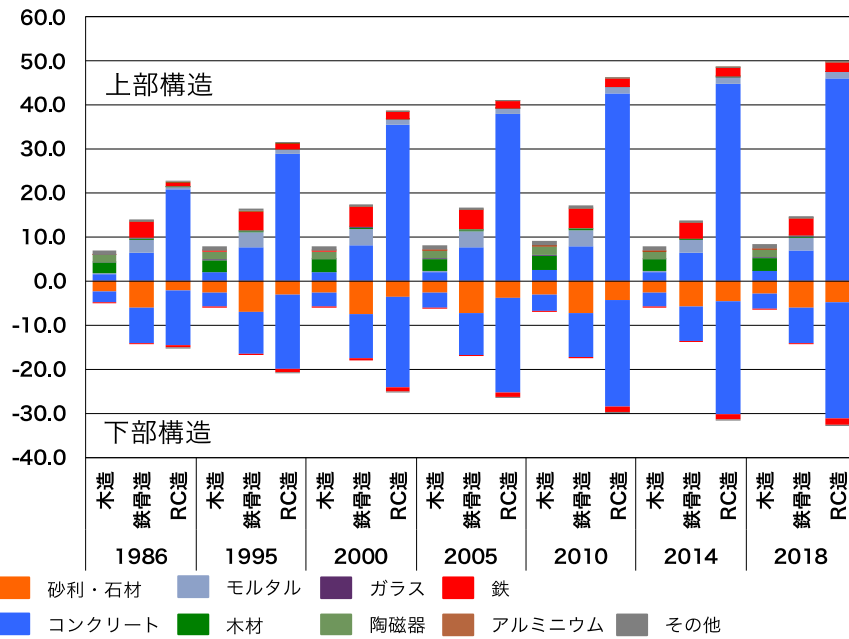


図4.0.5 北九州市における資材別マテリアルストック（上部・下部構造別）推計結果  
（単位・百万トン）

鉄骨造、RC造）の計9種別で残存率曲線を推計すると、戸建住宅の残存率曲線が他用途の残存率曲線と比較して傾きが緩やかであり、滞留年数についても木造、鉄骨造、RC造がそれぞれ、75.1年、64.3年、58.7年と他用途よりも大きくなることがわかった。集合住宅については、木造、鉄骨造、RC造の滞留年数がそれぞれ62.3年、50.3年、54.6年、業務施設の残存率曲線は他用途と比較すると最も傾きが急であり、滞留年数も木造、鉄骨造、RC造がそれぞれ29.3年、32.1年、46.0年と最も小さくなった。これは、集合住宅や業務施設は企業や資産家等が建設・管理していて建設・解体が容易であったり建築物の寿命だけではなく企業の収益性でも行われることに対し、戸建住宅は初期費用さえあれば誰でも建設・管理できるため、一般的に建て替えをする経済的余裕がないことが多く、結果長期間使用されるためと考えられる。

残存率曲線を用いて、用途3種、構造3種の計9種別に建設副産物発生量を将来推計すると、戸建住宅の建設副産物発生量は、いずれの期間でも木造が最も大きく、集合住宅については全期間においてRC造が、

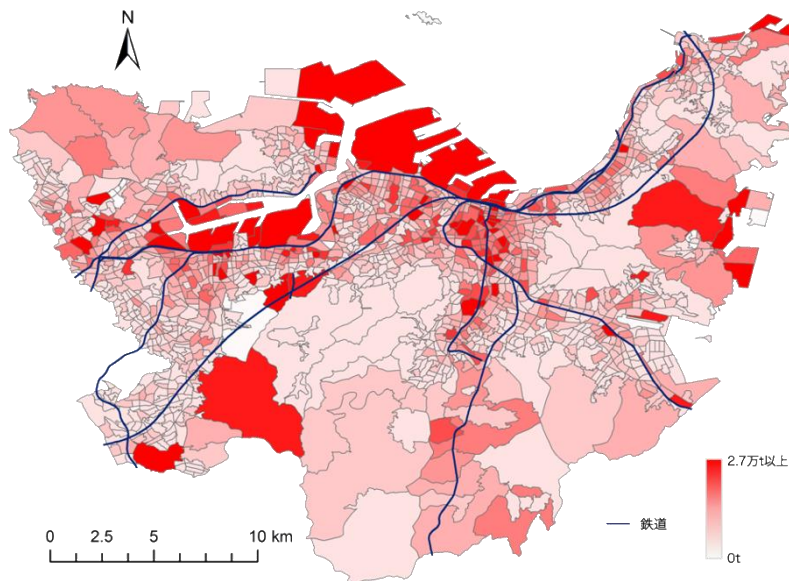


図4.0.6 建設副産物の町丁目別分布（2026-2030年）

業務施設については、工業等を含む鉄骨造の値が最も大きいことがわかった。建設副産物発生量の合計では、2006-2010年の921.2万トンから2026-2030年には1,147.0万トンと、増加傾向を示すことがわかった。これは、約8-10%の建築物が毎期間解体されることに相当する。建設副産物発生量の町丁目別分布について2026-2030年の結果を見ると（図4.0.6）、沿岸部は鉄骨造業務施設である工場が多く存在するなど沿岸部や鉄道沿線において建設副産物発生量が大きく分布しているほか、北九州市南西部及び東部や小倉駅付近等の都市部でも建設副産物発生量が大きくなると推計された。

建築物の解体確率に影響する要因を分析した結果、何も考慮しないシナリオについては建物階数や駅/バス停からの距離等を含む6項目が選択され、立地適正化計画を考慮するシナリオについてはRC造ダミー変数や傾斜角度等を含む5項目が選択されることがわかった。これら要因の変化による滞留年数についても検討し、傾斜角度変化（+1度）については滞留年数はマイナス、高齢化率変化（+1%）は滞留年数にプラスとなるほか、立地適正化計画を考慮したシナリオでは、都市機能誘導区域及び居住誘導区域の場合、区域内では生活快適性や利便性が向上するために、区域外と比較し滞留年数が4.88年大きくなることがわかった。

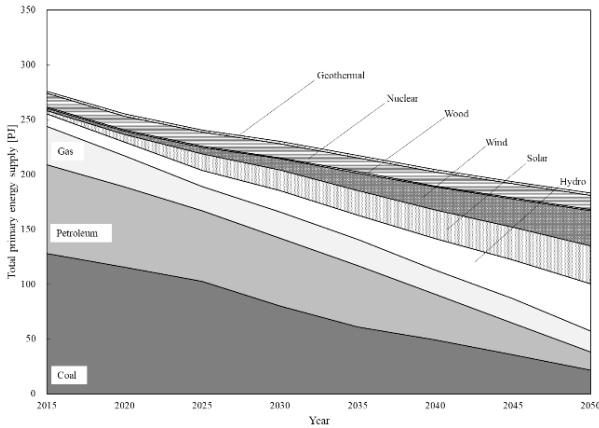
これに基づき、解体確率を考慮した場合の建設副産物発生量を分析した結果、2017年度の北九州市における建設副産物発生量44.5万トンと比較し、2030-2034年の1年あたりの発生量は50.64万トンと推計され、この差分である6.14万トンの建設副産物を適切に処理できるような計画が必要であることが示唆されるとともに、資材別にはコンクリートが74%と大部分を占め、膨大なコンクリートを適切に処理できる体制の整備が急務になることが示唆された。

#### （4）持続可能な資源・エネルギー利用に向けた地域拠点設計手法の開発と実証

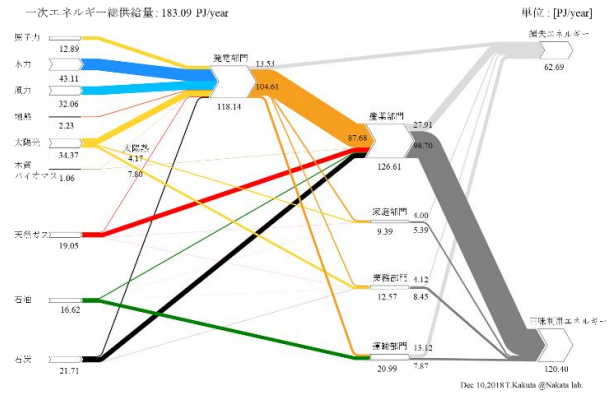
本サブテーマでは、対象都市を北九州市と仙台市、横浜市としてシステム設計を行った。これらの地域の再生可能エネルギーポテンシャルを分析したところ、太陽光発電がもっとも大きく、北九州市全体では72.5 PJ/year、仙台市全体では53.78 PJ/year、横浜市全体で93.44 PJ/yearと、いずれも対象地域内の電力需要の1.2倍～2倍程度と推計された。風力発電は、北九州全体では1.23 PJ/year、仙台市では2.24 PJ/yearであるが、横浜市ではほとんど量が確保できないことがわかった。分布については、いずれの都市も太陽光発電のポテンシャルは沿岸部に集中し、風力発電のポテンシャルは山間部に集中することがわかった。このことから、これら地域で太陽光発電を活用するためには、沿岸部の事業所や工場等での利用が重要であることが示唆された。

部分均衡型エネルギー・経済モデルを用いて、最終エネルギー消費量の推計結果も含めて将来の地域エネルギーシステムを設計した。基本モデルのReferenceケースでは、いずれの都市も共通に、一次エネルギー総供給量は2050年には2015年から減少し、CO<sub>2</sub>排出量も同様に減少するものの、一次エネルギー供給構成では2050年まで大きく変わらず、化石燃料が供給の中心を担うことがわかった。図4.0.7に北九州市の結果を例として示す基本モデルのCO<sub>2</sub>マイナス80%ケースでは、いずれの都市でも一次エネルギー消費量が減少するとともに、内訳として再生可能エネルギーからの供給量が増加することで、2050年に向けてCO<sub>2</sub>排出量が大幅に減少することがわかった。また、2050年のエネルギーフローでも石炭・石油・天然ガスといった化石燃料は大幅に減少し、代わって再生可能エネルギーなどのCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源に転換されていることが確認された。なお、地域エネルギーモデルを用いてCO<sub>2</sub>マイナス80%の場合の地域内電力の活用の度合いを確認すると、いずれの都市でも依然として系統電力が多く利用されることが確認された。また、産業部門では、例えば鉄鋼業での電気炉の導入など、化石燃料から電力への代替が重要であり、家庭部門と業務部門では、太陽熱利用が有効であることがわかった。運輸部門については、旅客部門が電動化される結果が得られたが、さらなる脱炭素化には貨物運輸での輸送用燃料のバイオ燃料への移行や電動化などの取り組み強化が必要であることが示唆された。

広域圏の検討に先立って、各市町村のエネルギー需給特性の分析を行った。部門別エネルギー消費構成に着目して各市区町村の特徴を比較すると、市区町村は産業特化型、産業主体型、民生主体型、運輸主体型、運輸特化型の5つに分類できることがわかった。産業特化型地域には工業都市などが含まれ、エネルギー消費量も多い。民生主体型はエネルギー消費量の大小の差が大きい。運輸特化型の地域はエネルギー消費量が少ない傾向があるが、この分類には中山間地域等が多く分布し、林道や山道が多いこと



(a) 一次エネルギー供給

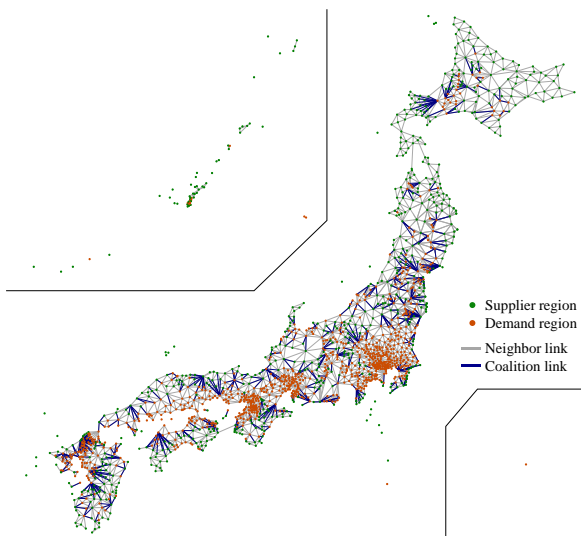


(b) 2050年のエネルギーフロー

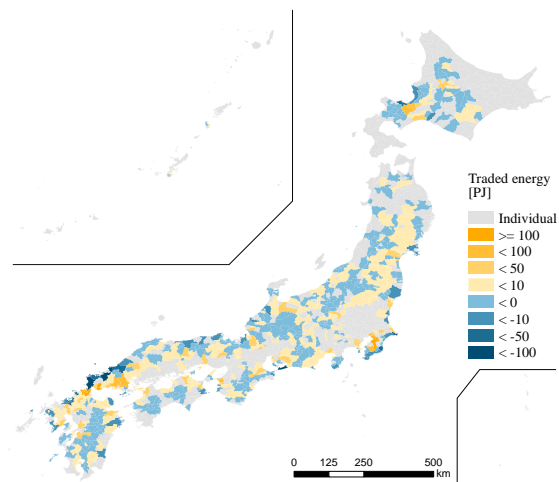
図4.0.7 北九州市の地域エネルギーシステム設計結果 (基本モデル・CO<sub>2</sub>マイナス80%ケース)

や自動車による遠距離移動が主体であることが理由として考えられた。つぎに、市区町村別の最終エネルギー消費と再生可能エネルギーポテンシャルの分布に着目すると、最終エネルギー消費量は首都圏や太平洋ベルトをはじめ、札幌市、仙台市、富山市といった地方都市において高く、各資源のポテンシャルを足し合わせた再生可能エネルギー発電ポテンシャルについては、太陽光は都市部、陸上風力は北海道から東北にかけて、中小水力および地熱は飛騨・高山地方などでポテンシャルが高い傾向が明らかとなった。また、需要と供給の差分で定義する市区町村別の地域エネルギー収支では、北海道や東北、中国、九州地方の沿岸部などでは需要を超える再生可能エネルギー供給ポテンシャルを有している（供給主体地域）が、首都圏や太平洋ベルト、地方都市などでは需要未滿の供給ポテンシャルしか得られず（需要主体地域）、エネルギー収支には地域差があることが明確に表れた。

最後に、提携価値の指標や提携関係などの違いに着目して8ケース設定し、広域圏を設計した。図4.0.8に、提携価値として経済合理性・財政力指数を考慮し、事業性指標として加重平均LCOEを、圏域直径の上限を70kmとしたケース8での結果を示す。これら広域圏の設計結果からいくつかの共通した傾向を確認することができた。具体的には、広域圏は、洋上風力をはじめとした資源が豊富な沿岸地域や財政基盤の安定した地方の県庁所在地などを中心として形成されること、需要主体地域が密集して分布している首都圏や太平洋ベルト、ならびに供給主体地域が密集する北海道東部では、広域圏はほとんど形成さ



(a) 提携構造ネットワーク図



(b) エネルギー融通量

図4.0.8 広域圏の設計結果 (ケース8)

れないこと、西部では東部と比較して発電コストの水準が高いため、広域圏が形成される地域が限定的であることである。また、エネルギー需給の変化に着目すると、広域圏の形成により需要主体地域のエネルギー不足量の5～18%が解消されることがわかった。特に、形成された広域圏の中で最も提携の価値が高かった那須塩原広域圏の特徴を見ると、2015年には、これら4市町村のエネルギー消費は石炭・石油・天然ガスといった化石燃料に依存しているが、広域圏を形成することで需要主体地域である那須塩原市に供給主体地域から再生可能エネルギーを融通する構図が確認でき、特に風力資源が豊富な地域からのエネルギー供給量が増加し、CO<sub>2</sub>排出量の観点でも大幅な削減が期待できることが明らかとなった。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

本研究の科学的意義は、大きく以下の5つである。

- ① 対象地域全域のシナリオ検討から、運輸旅客・民生家庭、建築物やインフラ、エネルギーシステムの詳細分析まで重層的な手法を開発した。これら手法を連携させ、あるいは特に詳細な分析を要する分野については個別に各部門等へ適用して分析することにより、都道府県や市町村等の地方自治体や都市・地域を対象に土地利用や建築物、エネルギーなどの地域特性を勘案して独自の低炭素シナリオを分析できる。
- ② 人口密度が家庭CO<sub>2</sub>排出量と相関することを示すとともに、都市の集約化効果(コンパクトシティ化)によりエネルギー需要及び供給の効率化と追加的なCO<sub>2</sub>削減が期待できることを明らかにした。また、立地適正化を進めることで建築物の滞留年数が延び、建設副産物発生量の低減が図れることも示し、都市・地域において低炭素化対策を効果的に推進するためには、土地利用の誘導等によるコンパクト化など、土地利用や都市構造変化も含めて検討することが重要であることを明らかにした。
- ③ 都市・地域が単独で低炭素化を推進するには系統電力などの地域外の主体の低炭素化も重要となるが、エネルギー需給の補完関係を考慮した広域圏を構築することで、地域間の再生可能エネルギー資源の融通による地域資源の活用と低炭素化が進むことを示し、地域内だけではなく特に近隣の地域との広域的な連携も含めて低炭素方策を考えることの重要性を示した。
- ④ 住宅の空き家を抑制することで低炭素に必要な断熱改修量が増加するなどのトレードオフがあるいっぽう、過疎地域での立地適正化は乗用車CO<sub>2</sub>削減にも効果があることを明らかにした。また、高齢化により建築物の滞留年数は増加するなども示し、検討した低炭素シナリオを着実に進めるためには、検討段階で社会的な課題の解決も考慮することが重要であることを示した。
- ⑤ 気候変動による気温や湿度の上昇により電力消費が増加することや日射量や風速などの自然条件変化により太陽光発電ポテンシャルは増加するが風力発電ポテンシャルは減少する可能性が高いことを示したほか、低炭素の観点のみで現在の都市域に集約化することは浸水被害の増加が見込まれるなどを示した。このことから、都市・地域の低炭素施策の検討には、都市構造を含め、低炭素と気候変動へのレジリエンスとを考慮することの重要性を示した。

これら成果は、国内外の雑誌での論文発表や学会等での報告を行い、複数の学術集会にて論文賞や優秀発表賞等を受賞している。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

行政が活用することが見込まれる本研究の成果は、科学的意義に示した成果に加え、大きく以下の4つである。

- ① 本研究で明らかにした家庭部門CO<sub>2</sub>排出原単位や乗用車のCO<sub>2</sub>排出量、部門別最終エネルギー消費量データベース、再生可能エネルギーポテンシャルマップ、エネルギーフロー図等の市区町村単位の情報や、建築物データベースや人口・従業者数からの床面積推計式、気候も考慮した電力需要推計

式等の成果を活用することで、全国一律の係数を乗じるなどの手法と比較して、より都市・地域の特性を反映した現況把握や将来シナリオの検討を行うことができる。

- ② 区域施策編では、対象とする区域の特性を踏まえて望ましい地域の将来像を構想し、提示することが推奨されているが、①の成果や、圏域人口に基づく地域タイプ分類、エネルギー消費・CO<sub>2</sub>排出量の部門別構成に基づく地域の類型化を活用することで、他と比較した地域の特徴を検討したり、方策や取組の検討にあたっての参考を類似地域から得るなどが可能となる。また、これらの情報は地方自治体だけではなく住民等にとっても地域特性を把握することに役立ち、地方自治体にて幅広いステークホルダーが関与しての温暖化対策策定及び実施の助けとなりうる。
- ③ わが国全体が低炭素社会に移行するためには、それぞれの地方自治体や都市・地域での取組が重要となるが、具体的に低炭素施策を講じていくためには、国・地方自治体ともに人的・財政的なキャパシティ等の制約があるなかで進める必要がある。本研究成果より、実行計画策定義務のある特例市の人口要件20万人に満たないが排出量が多い市区町村（467市区町村1210万人）や建設ストックの情報に基づく地区の建築物の年数等を活用することで、国や都道府県の支援も含め、低炭素方策立案や地域再構築を優先的に進める市区町村や都市・地域の検討等に役立つことが期待される。
- ④ モデル等をもとにExcelやWebの操作により簡易に自治体の長期の低炭素シナリオ分析を行うことができるツールとして開発した簡易低炭素効果評価ツール（地域版低炭素ナビ）では、地域の人口推移や経済成長等の見通しをもとに、需要側、供給側それぞれに想定した対策の導入量を選択することで、エネルギー需給やCO<sub>2</sub>排出量を評価、可視化できる。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』とともに、地方自治体のニーズや政策立案キャパシティに合わせた適切な手法を提供することにより、地方自治体自らによる地域特性を考慮した低炭素シナリオの策定や実施の後押しをすることができるものと考えられる。

また、これら成果は、複数の自治体の計画検討等の場へ提供することで低炭素社会に向けた自治体の計画作りや実施の後押しを行ったほか、IPCCの地域の気候情報分析に関する専門家会合（IPCC Expert Meeting on Assessing Climate Change Information for the Regions）での本研究課題の成果を含めた地域の低炭素シナリオについてのモデル分析の成果報告や、参画者それぞれが環境省や内閣府等の政府審議会等において委員として活動し、本研究を通じて得た知見をもとに議論へ貢献することなどを通じて、我が国及び国際的な環境政策への貢献を行っている。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### （1）主な誌上発表（サブテーマ順、代表的な論文を各4件掲載）

<査読付き論文>

- 1) K. OKA, W. MIZUTANI and S. ASHINA: Renewable Energy, 153, 249-260 (2020)  
“Climate change impacts on potential solar energy production: A study case in Fukushima, Japan”
- 2) 蛭田有希, L. GAO, 芦名秀一: 土木学会論文集G（環境）, 75, 17-27 (2019)  
「気温と湿度に対する消費電力の感応度 —一般送配電事業者ごとの毎時電力消費量に着目して—」
- 3) Y. DOU, T. TOGAWA, L. DONG, M. FUJII, S. OHNISHI, H. TANIKAWA and T. FUJITA: Resources, Conservation and Recycling, 128, 406-416 (2018)  
“Innovative planning and evaluation system for district heating using waste heat considering spatial configuration: A case in Fukushima, Japan”
- 4) S. ASHINA: Global Environmental Research, 21 (1&2), 11-21 (2017)  
“Transitions of Energy Systems and Technologies toward Achieving the Paris Agreement in Japan”
- 5) 石河正寛, 松橋啓介, 金森有子, 有賀敏典: 土木学会論文集G, 75(5), I\_89-I\_98 (2019)  
「市町村別家庭部門CO<sub>2</sub>排出量推計モデルの改良-欠測データ処理と非線形回帰の適用-」
- 6) 陳鶴, 有賀敏典, 松橋啓介: 土木学会論文集D3, 74(5), I\_101-I\_107 (2018)  
「メッシュ周辺人口集積度に基づいた乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計」

- 7) 松橋啓介, 石河正寛: 都市計画論文集, 53(3), 913-918 (2018)  
「家庭と乗用車から生じる市区町村別CO<sub>2</sub>排出量に関する考察」
  - 8) 石河正寛, 松橋啓介, 金森有子, 有賀敏典: 土木学会論文集G, 74(6), II\_193-II\_201 (2018)  
「家庭CO<sub>2</sub>統計に基づく全国10地方別の排出要因分析と市町村別世帯あたり排出量の推計」
  - 9) J. GUOI, A. MIATTO, F. SHI and H. TANIKAWA: Resources, Conservation&Recycling, 146, 45-54 (2019)  
“Spatially explicit material stock analysis of buildings in Eastern China metropolises”
  - 10) A. MIATTO, H. SCHANDL and H. TANIKAWA: Conservation and Recycling, 142, 245-256 (2019)  
“A spatial analysis of material stock accumulation and demolition waste potential of buildings: A case study of Padua”
  - 11) 朝隈友哉, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 環境情報科学, 32, 13-18 (2018)  
「建築物の年代間での同一性判定を用いた東京都市圏における更新量の推計」
  - 12) Y. DOU, M. FUJII, T. FUJITA, K. GOMI, S. MAKI and H. TANIKAWA: Journal of Japan Society of Civil Engineers, 73, 6, II\_353-II\_363 (2017)  
“Potential of Waste Heat Exchange Considering Industrial Location Changes: A Case of Shinchi-Soma Region in Fukushima, Japan”
  - 13) S. FUJII, T. FURUBAYASHI and T. NAKATA: Energies, 12(7), 1–14 (2019)  
“Design and analysis of district heating systems utilizing excess heat in Japan”
  - 14) F.E.K. SATO, T. FURUBAYASHI and T. NAKATA: Applied Energy, 237, 779-794 (2019)  
“Application of energy and CO<sub>2</sub> reduction assessments for end-of-life vehicles recycling in Japan”
  - 15) T. FURUBAYASHI and T. NAKATA: Journal of Cleaner Production, 174, 1044–1053 (2018)  
“Cost and CO<sub>2</sub> reduction of biomass co-firing using waste wood biomass in Tohoku region, Japan”
  - 16) 古林敬頭, 佐藤雄治, 中田俊彦, 河西英一: 日本機械学会論文集, 84(860), 17-00565 (2018)  
「施設配置問題を考慮した持続可能な木質バイオマスサプライチェーンの設計」
- <査読付論文に準ずる成果発表>
- 1) F.E.K. SATO and T. NAKATA: Proceedings of EcoDesign 2019 International Symposium (C3-3) 505–512 (2019)  
“Analysis of electric vehicle batteries recoverability through a dynamic fleet based approach”
- (2) 主な口頭発表 (学会等) (サブテーマ順、代表的な口頭発表を各5件掲載)
- 1) L. GAO, Y. HIRUTA and S. ASHINA: The 12th IAMC Annual Meeting (Integrated Assessment Modeling Consortium), Tsukuba, Japan (2019)  
“Willingness to pay promoted renewable energy penetration in power sector to a low carbon society in Japan”
  - 2) Y. HIRUTA, L. GAO and S. ASHINA: The 12th IAMC Annual Meeting (Integrated Assessment Modeling Consortium), Tsukuba, Japan (2019)  
“A method to assess the impact of the spatial concentration of households on hourly electricity consumption”
  - 3) Y. DOU, M. FUJII, K. OKUOKA, H. TANIKAWA, T. FUJITA and S. MAKI: The 13th SDEWES Conference Palermo 2018, Palermo, Italy (2018)  
“Strategic Urban Renewal for Long-term Energy Saving in Cities: Case of Kitakyushu, Japan”
  - 4) S. ASHINA: IPCC Expert Meeting on Assessing Climate Information for the Regions, Trieste, Italy (2018)  
“Regional CC Responses Strategies (A+M) and Sustainable Development in Japan and Asia: Past Experience and Way Forward”
  - 5) 芦名秀一, 佐藤哲二: 日本エネルギー学会第26回大会, 名古屋 (2017)  
「エネルギー需要マネジメントシミュレーションツールの開発と実測データでの効果検証」
  - 6) 松橋啓介: 東京モーターショーシンポジウム2019, 東京 (2019)

「乗用車起因CO<sub>2</sub>排出量の地域別動向およびそのメッシュ人口との関係」

- 7) 松橋啓介：第2回電動車両研究会，東京（2019）  
「持続可能社会に向けた交通・まちづくりの現状と課題」
- 8) 陳鶴，有賀敏典，松橋啓介：土木計画学研究発表会，東京（2017）  
「人口分布からみた乗用車CO<sub>2</sub>排出量の分析—メッシュと周辺人口集積度に基づいて—」
- 9) 有賀敏典，金森有子，松橋啓介：環境科学会2017年会，北九州（2017）  
「都市の集約化による生活時間・交通行動の変化と自動車CO<sub>2</sub>排出量の推計」
- 10) 石河正寛，松橋啓介，金森有子，有賀敏典：環境科学会2017年会，北九州（2017）  
「統計データを用いた空き家の詳細地域分布の推計方法」
- 11) 森田大登，正木晃平，深堀秀敏，東修，白川博章，谷川寛樹：2019年度環境情報科学研究発表大会，東京（2019）  
「地理的・社会的要因を考慮した空き家分布のモデルに関する研究—福岡県北九州市を対象としたケーススタディー—」
- 12) 正木晃平，奥岡桂次郎，谷川寛樹：第30回廃棄物循環学会研究会，仙台（2019）  
「4d-GISによる最尤法を用いた建築副産物発生量の将来推計 - 名古屋市中心部のケーススタディー—」
- 13) 正木晃平，奥岡桂次郎，谷川寛樹：公益社団法人環境科学会2019年会，名古屋（2019）  
「区間残存率法を用いた将来の建設副産物発生量の推計-4d-GISによる北九州市のケーススタディー—」
- 14) 森田大登，正木晃平，奥岡桂次郎，谷川寛樹，深堀秀俊：公益社団法人環境科学会2019年会，名古屋（2019）  
「北九州市における立地適正化計画が物質ストックに与える影響の定量化」
- 15) 正木晃平，谷川寛樹，奥岡桂次郎，深堀秀敏：公益社団法人環境科学会2018年会，東京（2018）  
「建築物実態調査に基づく空き家の空間分布の推計～北九州市の建築物詳細情報を用いたケーススタディー～」
- 16) 小野寺弘晃，中田俊彦：第36回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，東京（2020）  
「市区町村の地域特性を考慮した 広域エネルギーシステムの統合設計」
- 17) 小野寺弘晃，中田俊彦：第38回エネルギー・資源学会研究発表会，東京（2019）  
「エネルギー需給特性を考慮した市区町村のクラスター分析」
- 18) 高橋遼，古林敬顕，中田俊彦：第35回エネルギーシステム・環境・経済コンファレンス，東京（2019）  
「部分均衡エネルギー・経済モデルによる2050年脱炭素社会に向けた持続可能エネルギーシステムの統合デザイン」
- 19) 角田友明，古林敬顕，中田俊彦：第35回エネルギーシステム・環境・経済コンファレンス，東京（2019）  
「地域資源・エネルギー需給の分析に基づく脱炭素社会に向けたエネルギーシステムの最適設計」
- 20) 清野若菜，古林敬顕，中田俊彦：日本機械学会東北支部第53期講演会，仙台（2018）  
「地域エネルギー需給の空間情報分析と福島県のエネルギーシステム設計への応用」

## 7. 研究者略歴

研究代表者

芦名 秀一

東北大学大学院工学研究科修了、博士（工学）。現在、国立研究開発法人国立環境研究所社会環境システム研究センター広域影響・対策モデル研究室主任研究員。

## 研究分担者

## 1) 松橋 啓介

東京大学工学部卒業、同修士課程修了、博士（工学）。現在、国立研究開発法人国立環境研究所社会環境システム研究センター環境政策研究室長。

## 2) 谷川 寛樹

九州大学工学部卒業、九州大学大学院工学研究科博士課程退学、博士（工学）。現在、名古屋大学大学院環境学研究科教授。

## 3) 中田 俊彦

東北大学工学部卒業、工学博士。現在、東北大学大学院工学研究科教授。



## II. 成果の詳細

### II-1 資源・エネルギー利用を統合化した都市・地域レベルでの低炭素施策評価モデル及び都市・自治体向け簡易評価モデルの開発

国立研究開発法人国立環境研究所

社会環境システム研究センター	広域影響・対策モデル研究室	芦名 秀一
	センター長	藤田 壮
	環境社会イノベーション研究室	藤井 実
福島支部 地域環境創生研究室		五味 馨

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所

社会環境システム研究センター	広域影響・対策モデル研究室	Gao Lu (平成30年度～令和元年度)・ 蛭田 有希 (平成30年度～令和元年度)
	環境社会イノベーション研究室	牧 誠也・Sun Lu・ Dou Yi (平成29年度～平成30年度)

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：94,678千円（研究経費は間接経費を含む）  
（平成29年度：32,356千円、平成30年度：29,966千円、令和元年度：32,356千円）

#### [要旨]

わが国が長期的に低炭素社会を目指していくためには、都市・地域での低炭素に向かうためのシナリオ検討がますます重要となっている。本研究では、このような都市・地域において、人口等の社会経済条件や再生可能エネルギーポテンシャルなど地域の特性を考慮して低炭素社会シナリオを統合的に検討できるモデルを開発した。具体的な地域を対象にモデルを適用した将来の低炭素シナリオ分析を行ったところ、都市・地域で低炭素対策を効果的に推進していくためには、高効率機器への置き換え等の省エネルギー対策や再生可能エネルギーの導入等に加え、土地利用の誘導等による都市の集約化効果（コンパクトシティ化）を考慮することが肝要であり、都市集約化は低炭素化においても効果があることを示すとともに、系統電力の低炭素化の影響は地域・都市の低炭素シナリオ検討において重要であることを明らかにした。また、地域のエネルギー需要についてサブテーマ3の成果を活用した建築物の建て替えや断熱強化の評価と、社会経済条件と気候条件を考慮した電力需要の評価、需要制御の効果シミュレータなどの分析手法を開発するとともに、地域の再生可能エネルギーについては将来の気候変動を考慮した賦存量変化を分析するなど、エネルギー需給両面について、都市・地域それぞれの人口・産業等の社会経済条件や気温変化などの気候条件を考慮して分析できる手法を構築した。加えて、系統電力の低炭素化の可能性を検討するために、多地域電源計画モデルを拡張して再生可能エネルギーへの支払い意思額を考慮した分析を行い、太陽光発電・風力発電の導入加速効果等を明らかにした。これらに加えて、低炭素施策モデルをもとに、ExcelやWeb操作で将来の都市・地域のエネルギー需給やCO<sub>2</sub>排出量の見通しを分析できる簡易低炭素効果評価ツールを開発するとともに、将来のエネルギーをワークショップ形式で考える場での利用を通じた実証や、JNCCAやNGO、大学等の地域の温暖化対策推進に関わるステークホルダーと開発したツールの活用に向けた議論をおこなった。また、これら研究と平行して、地方自治体との研究連携体制を構築・活用して、都市・地方を低炭素化するための制度・政策作りへの他サブテーマも含めた本研究課題全体としての成果の提供を進めてきた。

#### [キーワード]

都市・地域、低炭素シナリオ、低炭素施策評価モデル、統合評価、簡易ツール

## 1. はじめに

パリ協定で合意された長期目標である低炭素社会やゼロ排出社会の実現には、国全体と同様に都市等でも将来像・目標と、それを実現する道筋を、技術と制度・政策を組み合わせることで具体的に設計し、実行していくことが肝要である。これまでの地域低炭素シナリオは、国の温室効果ガス削減検討で挙げられた省エネルギー方策や再生可能エネルギー導入を中心としたものが多く、地域の社会・経済・エネルギーの特性を踏まえた効果的な対策の同定とその実施や地域のエネルギー資源の積極的活用を打ち出したシナリオは多くない。そのため、地域特性を踏まえて低炭素シナリオを描く一連の手法を開発し、それぞれの地域特性を踏まえた低炭素シナリオを全国の都市や地域において描くことが必要とされている。

シナリオを描く際には、土地利用や都市構造の変化や、人口や産業等の経済社会構造、エネルギー需給システムといった多様な要素を考慮できる必要がある。このために、低炭素シナリオを描く手法開発においては、これまで個別分野で構築されてきた方法論を統合していくことが重要となっている。

## 2. 研究開発目的

本サブテーマでは、わが国の都市や地域を低炭素型地域へ再構築する計画検討の理論およびモデル等の分析手法と、広くわが国の地方自治体が低炭素型地域再構築計画を立案できるような簡易手法の確立とともに、これら開発した手法の国内の複数都市を対象とした実証による有効性検証や得られた知見等を踏まえた研究成果の社会実装を進めることを目的とする。

この目的を達成するために、世界や国レベルでの低炭素シナリオ検討に用いられている既存の統合評価モデルを都市・地域レベルに拡張した「低炭素施策評価モデル」を開発するとともに、産業部門については、産業排熱等を利用した分散型エネルギーシステムの設計と、その導入による産業部門のCO<sub>2</sub>排出量やエネルギー費用への効果を評価できるモデルを開発した。さらに、他のサブテーマにて実施する都市構造、人口、家庭・運輸、建築ストック、エネルギーシステムの成果を組み入れ、エネルギー及び技術を中心に国シナリオと整合した都市・地域低炭素シナリオを検討できる枠組みとしての「低炭素型地域再構築」の計画分析モデルを開発した。なお、低炭素型地域再構築の計画分析モデルとしてとりまとめるに際して、気候変動に対するレジリエンスも考慮した都市・地域の低炭素化の検討ができるよう、需要側に着目して都市・地域の特性を考慮できる需要分析手法を、エネルギー供給側に着目して将来の気候変動も考慮した再生可能エネルギーポテンシャルの評価手法を開発するとともに、多地域電源計画モデルを活用した地域別の系統電力の排出係数分析を行えるようにした。これらモデル・分析手法は、国内の複数都市を対象とした実証を通じた手法の有効性検証を行った。また、開発した計画分析モデル等をもとにExcelやWebの操作で検討可能な簡易評価モデルを開発し、地方自治体等が独自に都市・地域での低炭素シナリオ検討を行うことができるよう、手法の有効性の実証と改良を進めた。

## 3. 研究開発方法

本サブテーマでは、日本全体の低炭素シナリオ分析のための技術選択モデル（AIM/Enduse [Japan]）を拡張・改良して都市・地域低炭素シナリオ検討のための低炭素施策評価モデルを開発するとともに、その低炭素施策評価モデルを核として他のサブテーマの成果も組み合わせ、低炭素型地域再構築の計画分析モデルとして全体を一連の手法としてとりまとめた。また、これらモデルをもとに、ExcelやWebの操作により、簡易に自治体の長期の低炭素シナリオを分析できるツール（地域版低炭素ナビ）を開発し、Excel及びWebベースのシステムを構築した。加えて、これら開発したモデル・ツールを具体の地域へ適用して手法の有効性検証を進めるとともに、モデル的に自治体と連携した研究成果を活用した事例の構築やステークホルダーと連携した低炭素シナリオ開発手法を検討・実施するとともに、それらの経験に基づく一連の研究成果の政策立案等への活用プロセスの検討を行った。これらサブテーマ1の実施内容を図3.1.1にまとめる。



図 3.1.1 サブテーマ 1 の実施内容の全体像（図中の 3.X は、本章の節番号を指す）  
（研究成果の政策立案等への活用プロセスの成果は、第 4 章の各節に含めて述べる。）

### 3. 1. 低炭素施策評価モデルの開発

#### (1) マクロ型都市・地域の低炭素施策評価モデルと空間考慮型低炭素施策評価モデル

わが国の都市・地域で効率的に温室効果ガス削減を促し、低炭素型都市・地域に移行していくためには、省エネルギー型機器の導入や再生可能エネルギー源の活用などの技術的対策やそれらを支援する制度・政策の実施とともに、都市のコンパクト化など都市・地域の土地利用や都市構造を低炭素型に移行させていくことも重要な方策である。そのため、本研究で開発する低炭素施策評価モデルにおいても、対象とする都市・地域の土地利用や都市構造を考慮できる手法であることが求められる。いっぽう、これまで低炭素型の土地利用や都市構造への転換を計画したことのない都市・地域では、都市構造等の変化も考慮した分析を行うには、それに先立って広域的な都市計画も考慮した都市・地域の将来像検討や市町村マスタープランの策定など実施すべき事項が多く、検討まで時間を要することが想定されるため、このような都市・地域では技術や制度・政策を中心としたシナリオ作りを可能とする手法が適している。

そこで、本研究では、都市・地域での低炭素シナリオ分析と施策評価のための低炭素施策評価モデルとして、日本全体での低炭素シナリオ分析に用いられている技術選択モデル（AIM/Enduse [Japan]）をもとにマクロ型都市・地域の低炭素施策評価モデルと空間考慮型低炭素施策評価モデルの二種類のモデルを開発した。

元としたAIM/Enduse [Japan]は、将来までの日本全体のGDPや人口等の社会・経済条件と暖房や給湯等のサービス需要の推移を所与とし、年間のサービス需要を満たすための技術やエネルギー源の組み合わせと、それによって生じる温室効果ガスの排出量を求めることができるモデルである。マクロ型都市・地域の低炭素施策評価モデル（以下「マクロ型モデル」という。）は、AIM/Enduse [Japan]と同様に対象

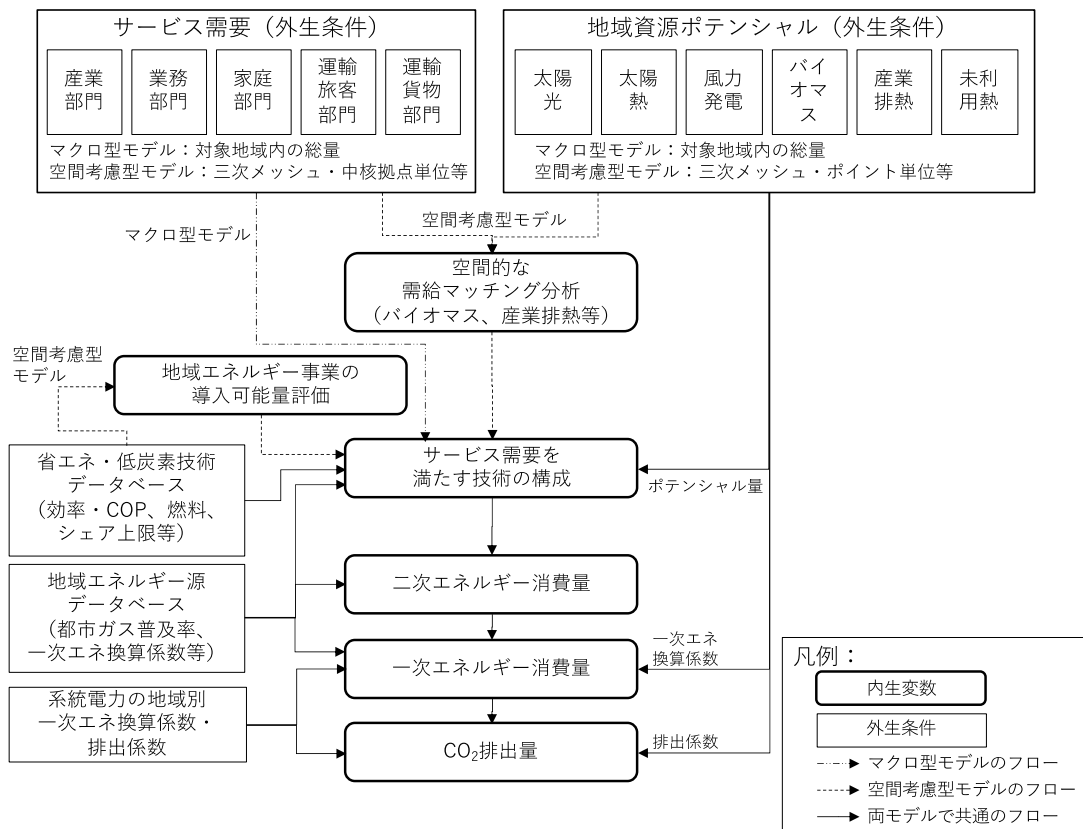


図 3.1.2 低炭素施策モデルの計算フロー

とする都市・地域全体の社会・経済条件とサービス需要を所与として低炭素方策や技術導入の効果を評価することができ、空間考慮型低炭素施策評価モデル（以下「空間考慮型モデル」という。）では、AIM/Enduse [Japan]よりも空間解像度を高め、サービス需要や地域資源ポテンシャルを三次メッシュ（約1km×1km）単位や都市計画等で定める中核拠点単位などで設定して地域資源の輸送等の観点も含めて低炭素方策や技術導入の効果を評価できる。

開発した低炭素施策評価モデルの計算フローを図3.1.2に示す。モデルでは、部門別サービス需要や地域資源のポテンシャルは所与であり、マクロ型モデルでは対象地域内の総量を設定する。空間考慮型モデルでは、サービス需要と太陽光などの地域資源は三次メッシュ等のメッシュ単位又は中核拠点単位で設定し、産業排熱や未利用熱などの供給源が工場など特定の場所である地域資源は、緯度経度で指定するポイントごとに設定する。

いずれのモデルでも、サービス需要は大きく産業部門、家庭部門、業務部門、運輸部門ごとに設定する。必要に応じてサブセクターを設けることも可能としており、例えば、鉄鋼業が主たる産業となる地方自治体を対象とする場合には、産業部門は鉄鋼とその他産業部門に分解することが可能である。また、家庭部門では、全自治体共通に暖房、冷房、給湯、その他動力を設定しているが、詳細調査が利用可能な自治体ではその他動力をさらに厨房、照明、冷蔵庫、あるいはTV等に分解することも可能である。これらサービス需要は、サブテーマ4の成果や、3.2節に示す推計手法を用いて設定する。

また、モデルで考慮可能な地域資源には、太陽光発電や太陽熱発電、風力発電、バイオマスといった再生可能エネルギーのほか、産業排熱や未利用熱などの地域に賦存する熱エネルギーも含むとともに、データが利用可能な都市・地域では、中小水力や地熱の利用を対象とすることも可能である。本研究では、地域資源ポテンシャルは、サブテーマ4における再生可能エネルギーポテンシャル分析の成果や環境省の再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報とともに、特に太陽光発電と風力発電の将来ポテンシャルについては、3.3節にて述べる将来の気候変動に伴うポテンシャルの変化も考慮した分析結果も反映して設定した。

空間考慮型モデルでは、サービス需要を満たす技術の構成を求める前に、空間的な需給マッチング分

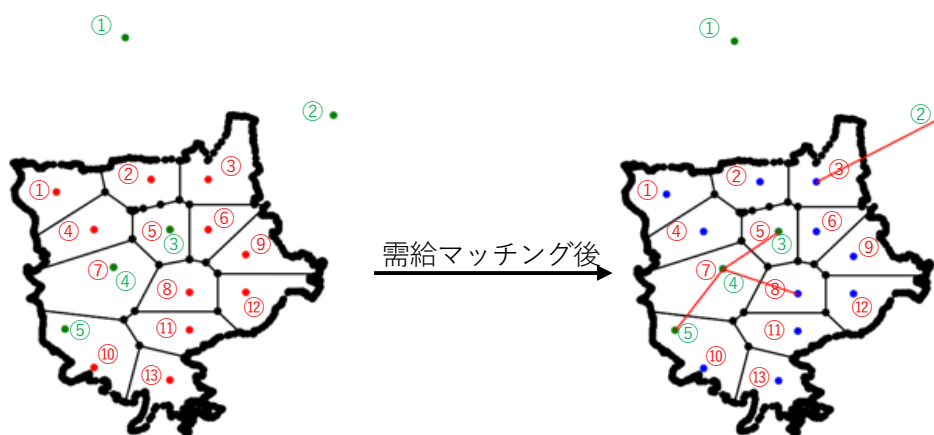


図3.1.3 空間的な需給マッチングの分析結果（福島県郡山市・市街化区域）

析と地域エネルギー事業の導入可能性評価を行う。

地域資源の中でも産業排熱や未利用熱はその利用に際し、5kmあたり10%減など距離に比例する導管による熱損失や熱交換による熱損失が生じるため、その供給源と需要地が大きく離れている場合には、需要を満たすに十分なポテンシャルを有していても、実際には利用が困難な場合がある。また、バイオマス資源のように、需要地までトラック等での輸送が必要となる資源では、利用量に見合った輸送容量の確保が困難であったり、輸送コストが高額になるなどの場合には、ポテンシャルを十分活用することができない。そこで空間考慮型モデルには、サービス需要と地域資源それぞれの空間情報（緯度経度）を用いて距離を算出し、熱損失や輸送コストと需要量を考慮して供給可能な需要地を特定（マッチング）するとともに、ポテンシャルのうち利用可能な量を求めることとした。

一例として、図3.1.3に福島県郡山市（市街化区域）を対象とした需給マッチングの分析結果を示す。対象地域内には、赤いポイント・丸数字で示される13カ所の中核拠点（需要地）と、緑のポイント・丸数字で示される5カ所の木質バイオマス又は産業排熱の供給源が存在している（ただし、2カ所は需要地と隣接し、2カ所は対象区域外から輸送することを想定している）。需給マッチング分析により、供給源②のエネルギーは需要地③に輸送し、供給源③・④・⑤は需要地⑤・⑦・⑧とネットワークを構成してエネルギー供給することが有効であるいっぽう、供給源①のエネルギーはいずれの需要地でも利用されないことが示されている。なお、マクロ型モデルでは対象地域内のポテンシャル量をそのまま利用上限として取り扱うため、同じ都市・地域を対象とした場合であっても、分析結果として示される地域資源の利用量は空間考慮型モデルとは必ずしも一致しない。

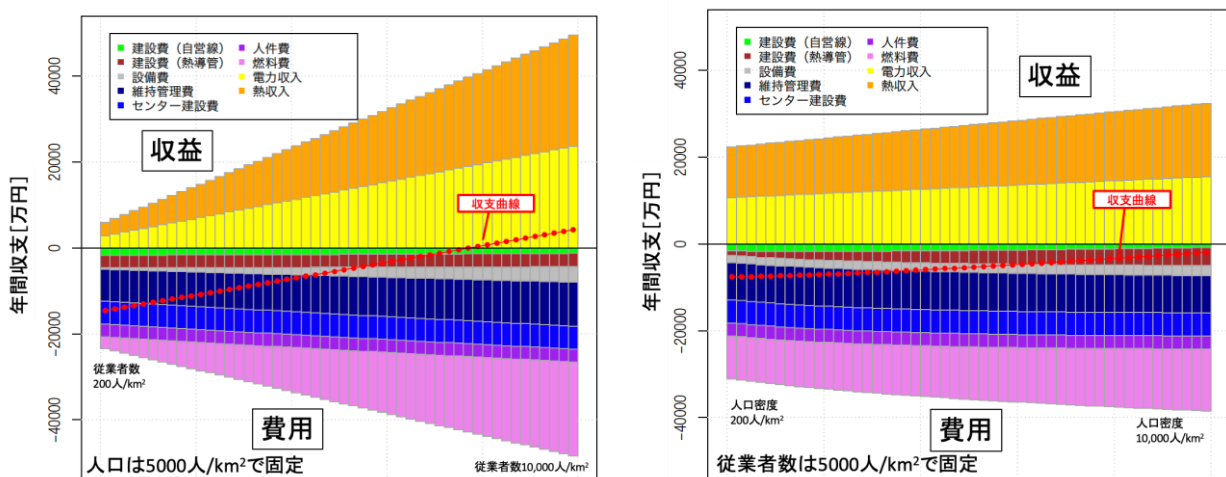
地域熱供給システムなどの地域エネルギー事業は、エネルギー需要密度が低い地域では適切な採算が確保できないため導入しても短中期で事業廃止される可能性が高く、長期的に低炭素効果を期待することは困難である。そこで空間考慮型モデルでは、分析にあたって想定した地域エネルギーシステムがどのような人口密度・従業者密度の条件であれば事業として成立するかを事業収支に基づいてあらかじめ評価し、対象地域内の各メッシュまたは拠点が条件を満たす場合には地域エネルギー事業を導入可能と設定して、具体的な規模はサービス需要を満たす技術の構成の評価の段階で決定することとした。

事業収支の評価は、耐用年数期間全体にわたる総収益と総費用をもとに行う。収益は、電力及び熱の販売量から算出し、費用には設備費用、自営線・熱導管の敷設費用、エネルギーセンター建設費、人件費と燃料費が含まれるものと想定した。なお、収益を算出する基礎とする販売量は、電力については対象地域全体の総電力需要を、熱については対象地域の家庭部門の集合住宅と業務部門の大規模需要家の冷暖房・給湯需要を用いる。一例として、表3.1.1の費用及び収入の想定に基づいて地域エネルギー事業の成立可能性を評価すると、人口密度7,000人/km<sup>2</sup>かつ従業者密度7,000人/km<sup>2</sup>以上、または同等の条件となる従業者密度・人口密度の組合せがある地域では、地域エネルギー事業が成立することがわかった。また、図3.1.4に示すように人口密度と従業者密度の一方を固定し、もう一方を200人/km<sup>2</sup>から10,000人/km<sup>2</sup>まで変化させて収支の変化を確認すると、従業者数の変化により収支は大きく変化するが、人口密



表3.1.1 地域エネルギー事業の想定

項目	想定
<b>設備費</b>	
ガスエンジンコジェネレーション	25万円/kW
自営線 (6.6kV)	2,400万円/km
熱導管	20,000万円/km
エネルギーセンター建屋	8,000万円
<b>運用費</b>	
人件費	1,000万円/人
維持管理要員	3人/km <sup>2</sup>
維持管理費	初期費用コスト÷投資回収年数と同一と想定
燃料費 (従量料金)	57.67円/m <sup>3</sup>
燃料費 (基本料金)	従量料金の1/6と想定
燃料発熱量 (都市ガス)	41.1MJ/Nm <sup>3</sup>
<b>販売価格</b>	
電力販売	17.5円/kWh
熱販売	5円/MJ
投資回収年数	15年
<b>設備要件</b>	
設備稼働率	35%
発電効率	45%
熱回収効率	43%
熱ロス	0.1 (熱供給量に対する割合)
搬送ロス	0.1 (電力供給量に対する割合)
補機等自家消費	0.05 (電力供給量に対する割合)



(a) 従業者数変化と収支の関係

(b) 人口密度変化と収支の関係

図3.1.4 表3.1.1の地域エネルギー事業の場合の導入可能性評価結果 (収支計算結果)  
(従業者数又は人口密度を200人/km<sup>2</sup>から10,000人/km<sup>2</sup>まで変化させた場合)

度については大きくは影響しないことがわかる。このことから地域エネルギー事業が成立するためには、人口の集約化よりも業務部門・事業所の集約化が重要であることが示唆される。

低炭素施策評価モデルでは、サービス需要量や地域資源ポテンシャルと、空間考慮型モデルでは空間的な需給マッチング分析と地域エネルギー事業の導入可能性評価結果も踏まえ、サービス需要を満たすための技術の組み合わせを求め、組み合わせに基づいて二次エネルギー消費量と一次エネルギー消費量を算出する。モデルで考慮可能な技術的対策には、地域エネルギー事業のほか、高効率エアコンやヒートポンプ式給湯器、電気自動車等の高効率機器の導入や、灯油暖房機のガス暖房機やエアコンへの転換 (電化) などの燃料転換対策、太陽光発電などの再生可能エネルギー活用がある。なお、エネルギーインフラの状況は都市・地域によって異なり、例えば市区町村ごとの都市ガスの供給区域内世帯比率は0%から100%を超えるまで幅があり、地域エネルギー源データベースとして整理して、分析においてもこれ

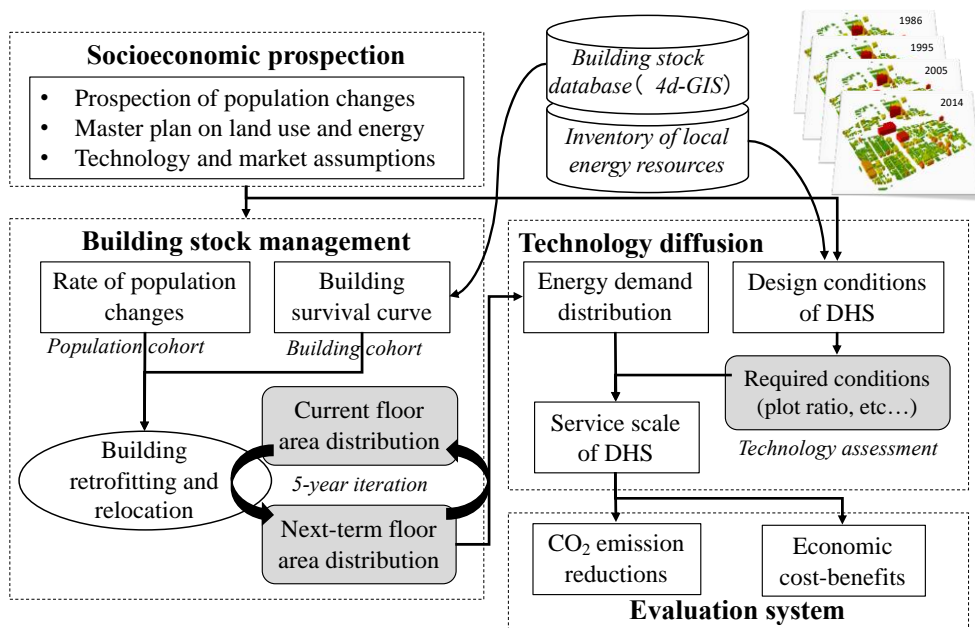


図3.1.5 産業部門の低炭素施策評価モデルのフロー

ら地域の差異を反映させることができるようになっている。

CO<sub>2</sub>排出量は、エネルギー消費量に排出係数を乗じることによって求める。地方自治体にてCO<sub>2</sub>排出量を算定するにあたっては、その算定範囲を明確にすることが重要である。国際的には、温室効果ガス排出量算定・報告基準として、対象範囲で直接排出されたGHG排出量を対象とするScope 1、直接排出に加えて対象範囲内で消費された電力や熱などの二次エネルギーに起因する排出量を対象とするScope 2、エネルギー以外のサプライチェーンでのGHG排出量も対象とするScope 3があるが、本研究では原則としてScope 2を採用することとし、産業部門、民生部門及び運輸部門からの直接排出量及び電力等二次エネルギーの間接排出量を対象とする。ただし、地域エネルギー事業として設置されたコージェネレーション設備からの電力及び熱など、地域資源由来の二次エネルギーは直接排出の一部として含む。また、電力消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量は、その全量が系統電力から供給されるものと想定し、電力会社ごとのCO<sub>2</sub>排出係数を乗じて求める。

## (2) 産業部門を対象とした低炭素施策評価モデルの開発

本節の(1)にて述べたように、地域資源の中でも産業排熱はその利用に際して供給源と需要地の位置関係は重要である。そこで、本研究では産業排熱を対象に、産業排熱等を利用した分散型エネルギーシステムの設計と導入による産業部門のCO<sub>2</sub>排出量の変化やエネルギーコストも含めた経済的な便益を評価できるモデルを開発し、具体地域を対象としたシステム設計とその効果評価を行った。モデルは、サブテーマ3の開発する4d-GIS（詳細は後述）を活用し、個々の工場の立地をもとにエネルギー消費量や産業排熱などの地域エネルギー資源の賦存量の分析と、産業団地周辺へのエネルギー輸送も考慮したシステム設計をすることができる。

図3.1.5に、産業部門の低炭素施策評価モデルのフローを示す。モデルでは、工場等の立地や周辺地域の住宅等を格納した4d-GISから建築物ストックや滞留年数の情報を得、人口の見通しや土地利用基本計画等の情報も組み合わせて、対象地域の工場・住宅の立地や床面積の変化を求める。これに、地域エネルギー資源のインベントリも組み合わせることで、規模も含めて分散型エネルギーシステムを設計し、その導入によるCO<sub>2</sub>排出量の変化や経済的な便益を求めることができる。

## 3. 2. 都市・地域のエネルギー需要分析手法の開発

本研究では、現在のエネルギー需要は、サブテーマ4に示すように環境省の「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 Ver.1.0」を参考に、全国や都道府県の統計量を活動

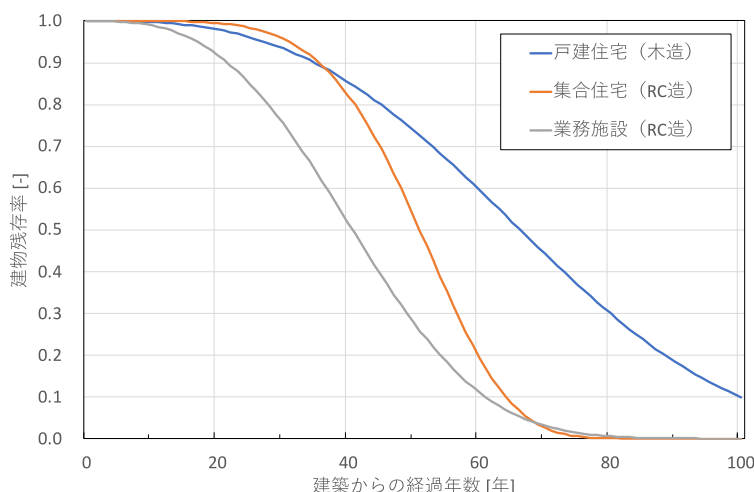


図3.1.6 戸建住宅・集合住宅・業務施設の残存率曲線

量で按分することで求めることとし、製造業は製造品出荷額、非製造業は従業者数、家庭部門は世帯数、業務部門は従業者数を活動量として求めた。用途別のエネルギー需要は、気候等の違いも考慮して都道府県別又は北海道・東北・関東等の地方ごとに原単位を整備・設定した。家庭部門の用途別原単位は、家庭用エネルギー統計年報（住環境計画研究所）の都道府県別原単位を参考に設定し、例えば宮城県では暖房需要を20,496 MJ/世帯、冷房需要を363 MJ/世帯、給湯需要を16,037 MJ/世帯、神奈川県では暖房需要を6,697 MJ/世帯、冷房需要を1,165 MJ/世帯、給湯需要を15,507 MJ/世帯とした。業務部門については、床面積あたりの用途別原単位に対象地域内の床面積を乗じて求めることとし、例えば福島県では暖房需要を140.42 MJ/m<sup>2</sup>、冷房需要を472.31 MJ/m<sup>2</sup>、給湯需要を56.35 MJ/m<sup>2</sup>と設定した。

将来のエネルギー需要は、家庭部門及び業務部門については人口・世帯数や従業員数等の見通しに、(1) 建物滞留年数を考慮した建築物の建て替えや断熱化等の効果、(2) 気候変動によって生じる気象条件の変化の影響、(3) デマンドレスポンス (DR) 等のICT技術を活用した需要制御技術の導入による効果、を勘案して設定した。なお、用途別エネルギー需要等の設定に用いる床面積については、都市・地域での将来見通しが得られなかったことから、(4) 人口・従業者数に基づく床面積推計式を検討し、将来の人口・従業者数の見通しをもとに設定した。また、産業部門は、地域に立地する業種・業態により大きく異なること、及び特に製造業は国内・国際分業のもとで一部の製造プロセスを担当する場合もあることから、わが国全体の経済成長の見通しなども踏まえたシナリオにより外生的に設定する。

#### (1) 建物滞留年数を考慮した建築物の建て替え促進及び断熱強化による効果の評価

将来の家庭部門及び業務部門のエネルギー需要を検討するうえでは、建築物の断熱性能の向上の効果を考慮することが重要である。サブテーマ2では、住宅の建替と改修による民生部門のエネルギー消費量の削減効果推計を行っているが、この成果を反映した分析には、対象地域での建築物の更新状況を明らかにする必要がある。これについて、サブテーマ3での滞留年数に関する成果を踏まえ、小見ら<sup>1)</sup>による残存率曲線を用いた将来の建築物の更新状況の評価を行うこととした。

将来の建物残存率 $R(t)$ は、式3.1.1に示すワイブル分布の累積密度関数に従うものとし、建築からの経過年数（築年数） $t$ 、滞留年数 $\eta$ と形状パラメータ $m$ により規定される。

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{\eta} \right)^m \right] \quad \text{式3.1.1}$$

図3.1.6に、サブテーマ3の分析結果に基づく残存率曲線を示す。なお、サブテーマ3の分析では、戸建住宅、集合住宅、業務施設それぞれの滞留年数を木造、鉄骨造、RC造別に求めているが、ここでは典型として戸建住宅は木造の、集合住宅および業務建物はRC造の残存率曲線を示す。

建築物の断熱性能の強化は、建物更新時（新築時）と既存建物の改修の2種類が想定され、いずれの場



表3.1.2 本研究で想定した建物の断熱改修

対象	対策実施の対象	想定する対策
既存建物の断熱改修	残存している既存の建物に対して実施	部分的な断熱改修とし、窓等の開口部のみを想定（壁面の断熱改修は考慮しない）。それ以外の断熱水準は、建築時の最新の省エネ基準相当が導入されているものと想定。
新築建物での断熱強化	建物更新時（新築時）に実施	壁面及び開口部の高断熱化を想定。（無対策時には最新の省エネ基準相当の断熱が導入されるとし、対策実施によりHEAT20のG1又はG2相当の断熱が導入される）

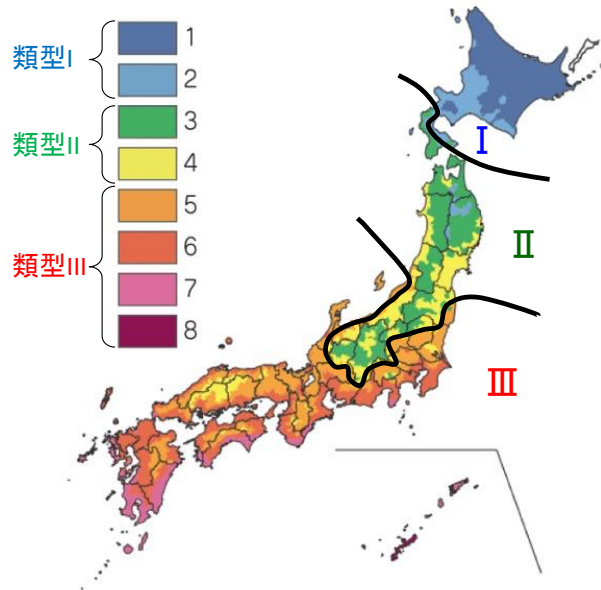


図3.1.7 次世代省エネルギー基準の地域区分と本研究で想定した類型の関係  
 （（一社）建築環境・省エネルギー機構の資料をもとに加筆）

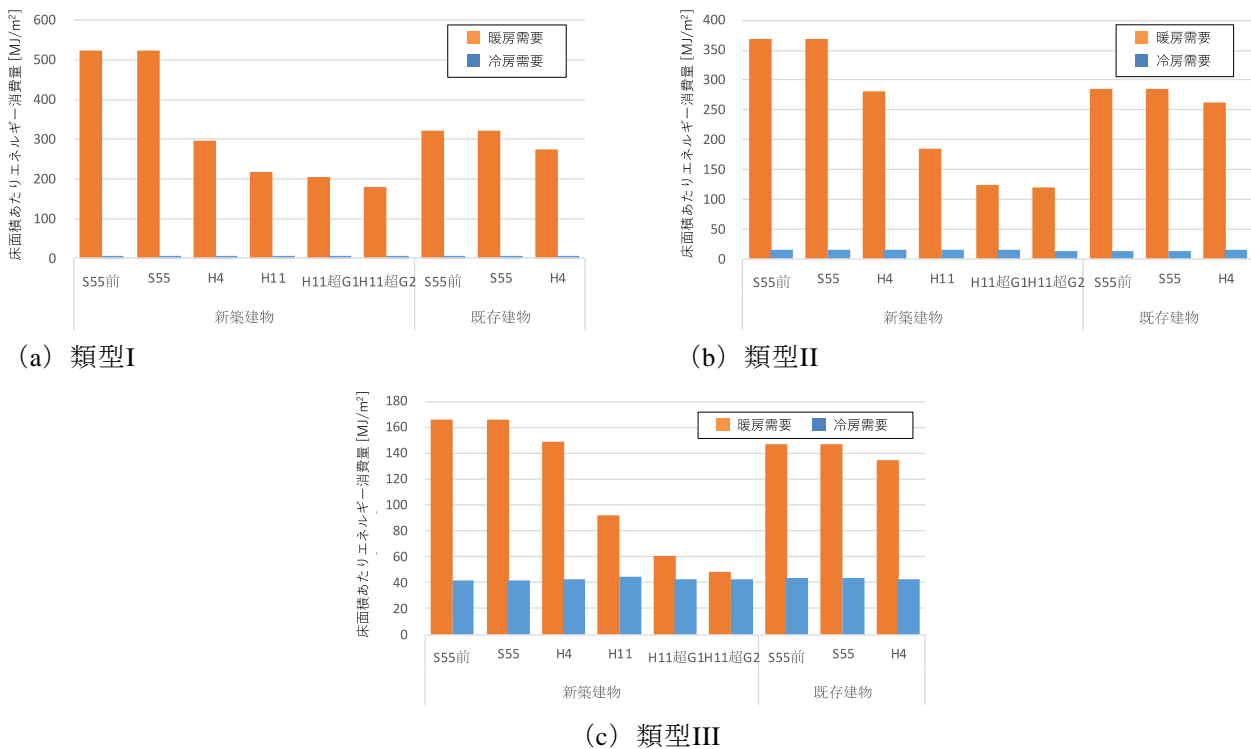


図3.1.8 類型ごとの省エネルギー基準別冷暖房エネルギー消費量の想定（戸建住宅）

合でも冷暖房需要が変わりうる。本研究では、建築物の断熱対策として、表3.1.2に示すものを想定した。これら断熱の効果は、次世代省エネルギー区分をもとに類型I（次世代省エネルギー区分1地域及び2地域）、類型II（同・3地域及び4地域）、類型III（同・5地域～8地域）ごとに想定した（図3.1.7）。図3.1.8に、一例として戸建住宅の断熱水準別の床面積あたりの冷暖房エネルギー消費量の想定を示す。図では、昭和55年の省エネルギー基準制定前（S55前）、省エネルギー基準（S55）、新省エネルギー基準（H4）、次世代省エネルギー基準（H11）に加え、HEAT20のG1（H11超G1）、G2（H11超G2）を示している。これら断熱の導入量はシナリオで与えるものとし、本研究では新築建物については全てが次世代省エネルギー基準（H11）相当の断熱とするケースをなりゆき（BAU）とし、全てがH11基準超G1となるケースと全てがH11基準超G2となるケースの合計3つを想定した。既存建物の改修については、建築物リフォーム・リニューアル調査報告を参考に、BAUを年0.2%の建物が断熱改修するとし、改修率を年0.5%と年1%と想定したケースを加えた合計3つを想定した。

## （2）気候変動による気象条件変化を考慮した電力需要の推定手法の開発

エネルギー需要は、人口や世帯数、製造品出荷額といった社会経済要因や、建物の構造、断熱や導入される冷暖房システムなどの技術的要因に加え、人間の生理的反応や行動などの要因など、さまざまな要因が複雑に絡み合って決定されるが、それらの関係性は十分明らかになっているとはいえない。特に電力需要については、地球温暖化により冬季の電力需要が低減し、夏季の電力需要が増加すると言われている<sup>2,4)</sup>ほか、今後極端現象の頻発により電力需要が増加（又は減少）する可能性も考えられる。IPCCの1.5℃特別報告書でも示されているように、世界全体での温室効果ガス排出量の削減強化を進めてもなお気候変動の影響は避けられないなかで、地域の気候条件や刻々と変化する気象条件によりエネルギー需要がどのように変化していくかを理解しておくことは、都市・地域において気候変動に対するレジリエンスを考慮した将来の低炭素シナリオを描くには重要となる。

本研究では、エネルギー需要の中でも気温など気象条件の影響を受け、かつ時間詳細なデータが利用できる電力需要を対象に、様々な気象条件が電力需要に与える影響を示す定量モデルを構築し、気候変動による気象条件変化を考慮できる電力需要の推定手法を開発した。

多様な気象観測データのうち電力需要を最も説明しやすい指標は気温であるため、気象条件と電力需要との関係は気温感応度として示されることが多い。気温感応度とは気温上昇1℃に対して変化する電力需要の応答であり、気温を変数とした関数（気温感応度関数）として表される。気温感応度関数は、気候変動に伴う気温の変化が電力需要に与える影響の評価のほか、暖房度日（HDD）・冷房度日（CDD）算出のための基準温度の特定等に用いられ、電力需要に関わる多くの応用研究の基礎ともなる。そこで、一般送配電事業者（以降、電力会社と呼ぶ）ごとに、様々な気象観測データや人々の活動の状況に基づいて消費電力を推定する回帰モデルを構築し、構築したモデルを用いたシミュレーションにより、気温感応度を把握することとした。

シミュレーションにあたってはまず、2016年度から2018年度までの1時間ごとの電力需要データと、それと対応した気象データ（湿度、日射量、風速、降雨量、積雪量など）や人間活動に関するデータ（眠っている人の割合、働いている人の割合等）を整備した。表3.1.3に、使用したデータと変数を一覧する。次に、電力会社ごとの回帰モデルを、多変量適応型回帰スプライン（MARS: multivariate adaptive regression splines）により構築した。用いるアルゴリズムの特定に当たっては、他のアルゴリズム（SVR: Support Vector Regression、RandomForest等）も適用し、文献調査による検討も行ったうえで、より気温感応度関数の特定に適したMARSを選択した。また、MARSのハイパーパラメータの設定にあたっては、より現象に即した気温感応度関数を得るために、グリッドサーチにより十分な汎化性を確保できることを確認したうえで、柔軟なモデルとなることを許容する設定とした。

MARSは、GCVという情報量を用いて過剰適合を防止する仕組みを備えたアルゴリズムであるが、モデル構築過程で、実際にk-foldクロスバリデーションを行うわけではない。また、2016年度から2018年度まで3年間の観測値を用いたモデルを構築するにあたり、構築されたモデルが各年の気象に強く依存しすぎないことも確認しておく必要がある。そのため、モデル構築に先立って、各年度の観測値を用いたモデル構築を行い、使用していない他の2年度の観測値を用いた汎化性を確認するテストを行った。

表3.1.3 気象条件変化を考慮した電力需要の推定手法における使用データと変数

	変数名 (略称)	単位	説明	出典	
目的変数	Historical electricity demand (EC)	MWh	Hourly electricity demand in each electric power companies jurisdictional area.	電力広域的運営推進機関・広域機関システム <sup>5)</sup>	
説明変数	気象データ	気温 (TEMP)	°C	気温の1時間平均値	気象庁・過去の気象データ <sup>6)</sup>
		湿度 (HUM)	%	相対湿度の1時間平均値	
		日射量 (SUN)	MJ/m <sup>2</sup>	1時間あたりの全天日射量	
		風速 (WIND)	m/s	正時の10分前から正時までの平均風速	
		降雨量 (RAIN)	mm	1時間あたりの降雨量	
		降雪量 (SNOW1)	cm	1時間あたりの降雪量	
		積雪量 (SNOW2)	cm	その時間の積雪量	
温熱指標	不快指数 Discomfort index (DI)		$DI = 0.81 (TEMP) + 0.01 (HUM) (0.99 (TEMP) - 14.3) + 46.3$	気象データより算出	
	風冷指数 Windchill index (WCI)		$WCI = (33 - TEMP) (10.45 + 10(WIND^{0.5}) - WIND)$		
人間活動指標	休日ダミー (NWD)		土曜日、日曜日、祝日、正月、お盆などを1、それ以外の日を0とするダミー変数	カレンダーを用いて整備	
	働いている人の割合 (WORK%)	%	その時間に働いている人の割合	日本放送協会放送文化研究所・データブック・国民生活時間調査 <sup>7)</sup>	
	在宅し起きている人の割合 (WAKE%)	%	その時間に在宅しかつ起きている人の割合		
	眠っている人の割合 (SLEEP%)	%	その時間に眠っている人の割合		

このように構築した回帰モデルを用いたシミュレーションにより、着目する要因以外の要因の影響をコントロールしたうえで、気温感応度関数を示し、気温感応度関数の地域的な差異や時間的な差異について分析するとともに、湿度など気温以外の気象条件が気温感応度に及ぼす影響も示した。また、非線形で複雑な関数となりやすい気温感応度関数を区分線形関数で近似し、シンプルな関数として提供する方法を示した。

### (3) ディマンドレスポンス (DR) 等のICT技術を活用した需要制御技術の効果評価手法の開発

近年、AIやIoTなどの情報通信技術 (ICT技術) の発展に伴い、AI・機械学習を用いたエネルギー消費に関するビッグデータの分析や、ディマンドレスポンス等の需要制御・エネルギーマネジメント技術の導入が進んでいる。需要制御には、機器の稼働を停止するなどエネルギー需要のピークを抑えるピークカットや、稼働時間帯を変化させるピークシフトなどがあり、これらの需要制御により冷暖房需要は10-15%程度、動力・照明需要は10-20%抑制できるという報告がある<sup>8)</sup>。また、太陽光・風力発電のような時間により変動する再生可能エネルギーを活用する社会においても、需要制御技術は重要な役割を期待されている。

このような需要制御技術がエネルギー需要に及ぼす影響は、これまで個別の建物や住宅での実証と効果評価が行われ、その有効性は確認されてきた。しかし、需要制御の効果は技術を適用する需要パターンによっても異なるため、都市・地域で需要制御技術を導入した場合の効果を定量的に把握するためには、さまざまな需要パターンに対して需要制御による省エネルギー効果等を予め検討できるようにしておくことが重要となる。そこで、本研究ではエネルギー需要パターンと、ピークカットやピークシフト等のエネルギーマネジメント (EMS) やディマンドレスポンス (DR) 等の需要制御技術の詳細 (内容、実施時間帯等) を設定することで、DRやEMSの実施による需要パターンの変化や省エネルギー効果を分析できるエネルギーマネジメントシミュレータを開発した。

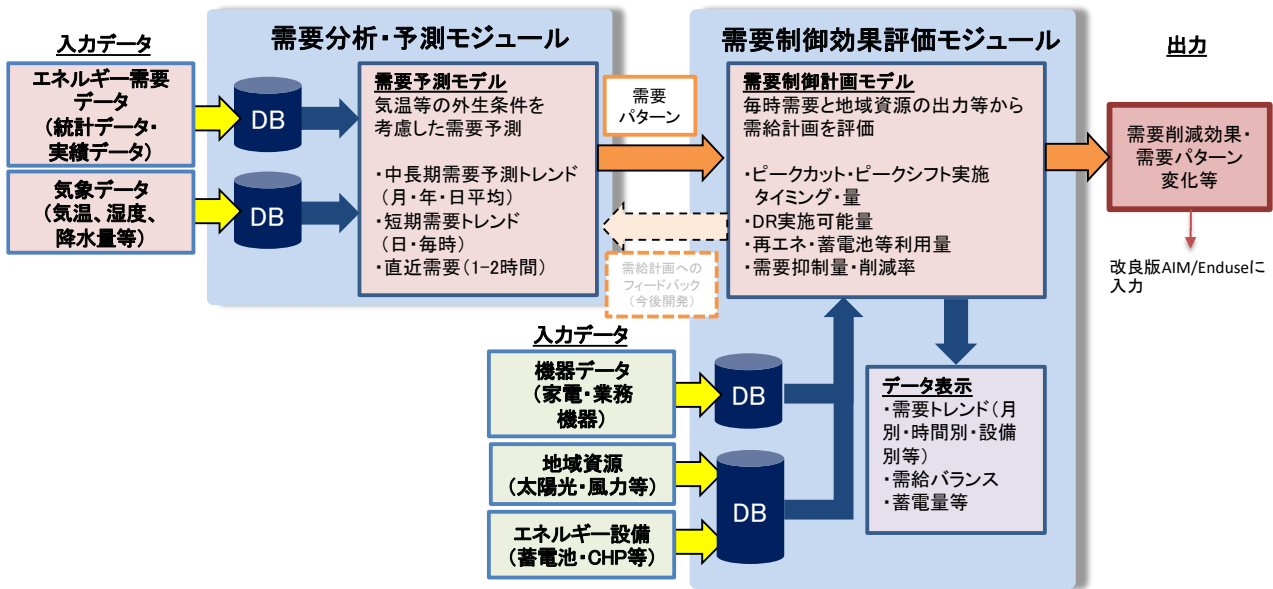


図3.1.9 需要制御評価手法のフロー

開発した需要制御評価手法のフローを図3.1.9に示す。エネルギーマネジメントシミュレータでは、毎時の対象地域内の機器・用途別需要と地域資源（再生可能エネルギー出力）の情報をもとに家電や業務機器の稼働変更等の需要制御計画を検討し、それによる需要削減効果や毎時パターン変化を検討することができる。また、対象地域内の過去のエネルギー需要データが利用可能な場合には、気象条件等も加味した短中長期の需要予測を行うことができるような機能も有している。なお、第五次環境基本計画（平成30年4月17日閣議決定）にて『AI、IoT等のICTの活用』が謳われていることを踏まえ、本手法のみでも完結するようデータ出力機能等も設けている。

#### (4) 人口・従業者数に基づく床面積推計式の検討

家庭部門や業務部門のエネルギー消費は、後述するサブテーマ2の分析でも示されているように、住宅や事務所の広さによっても異なる。また特に業務部門においては、用途別原単位はもっぱら床面積あたりで提供されており、将来の都市・地域のエネルギー需要を検討するうえで住宅や事務所等の床面積の将来見通しが利用できることが望ましいが、都市・地域単位での将来の床面積の情報は利用できない場合が多い。そこで本研究では、人口・従業者数の見通しから将来の床面積を推計することができるよう、「住宅土地統計調査」、「法人土地・建物基本調査」等の統計情報を用いて人口、世帯数及び従業者数から住宅と非住宅の床面積を算出する推計式を検討することとした。

家庭部門の住宅床面積は、人口から推計することとし、住宅土地統計調査に基づいてデータ集計を行い、人口と住宅床面積の相関関係を検討した。なお、住宅床面積には専用住宅の床面積のみを含むものとし、店舗やその他併用住宅の床面積は除外した。また、就業者数・事業所床面積の推計式検討における集計対象との重複を避けるために、人口は専用住宅の戸建・集合住宅・長屋建における世帯人数の和を用いる。

事務所等の床面積は従業者数から推計することとし、法人土地・建物基本調査と経済センサスに基づき、都道府県及び政令指定都市（東京特別区を除く）における産業別の従業者数と、事業所が所有する非住宅建物（工場を除く）の延べ床面積を集計した。なお、集計及び推計式は、第一次産業、第二次産業、第三次産業それぞれに検討を行った。

### 3. 3. 気候変動の影響も考慮した地域の再生可能エネルギーポテンシャルの評価

本研究では、対象地域の太陽光や風力、バイオマス等の再生可能エネルギーポテンシャルは、サブテーマ4の分析結果も踏まえて外生条件として設定しているところであるが、将来の気候変動により気温や、日射量、風速・風況など太陽光発電や風力発電のポテンシャルに影響する気象要素が変化していく

表3.1.4 本研究で結果を利用した気候モデルの一覧

気候モデル	開発機関
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) , USA
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) , USA
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) , France
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre (MOHC) , UK
MIROC-ESM-CHEM	東京大学・国立環境研究所・海洋研究開発機構
MIROC5	東京大学・国立環境研究所・海洋研究開発機構
MRI-CGCM3.0	気象庁気象研究所

ことが見込まれている。そこで、気候変動に対するレジリエンスも踏まえて都市・地域での再生可能エネルギー等を活用した低炭素シナリオを描くために、気候モデルの予測結果を利用して、地域の気候変化が太陽光発電及び風力発電のポテンシャルに与える影響を評価した。

再生可能エネルギーのポテンシャル量は、一般的に用いられている計算手法を用いることとし、太陽光発電の出力は、時間帯別の日射量、気温及び風速をもとに推計し、風力発電の毎時発電量は時間帯別の風速及び風向をもとに推計した。気候変動を考慮した季節・時間帯別の発電量を推定するに際しては、世界のさまざまな機関等において提供されている気候予測データの地域別の予測精度の検証等の結果を踏まえて、日本で開発された気候モデルであるMIROC5及びMRI-CGCM3.0を含む、7つの気候予測データを利用することとした(表3.1.4)。将来の温室効果ガス排出経路は、IPCC等の評価で用いられている代表的濃度経路(Representative Concentration Pathways、RCPs)のうち、パリ協定等を踏まえて長期的に気温上昇を2℃以下に抑える目標に近い経路としてRCP2.6と、比較として中位安定化シナリオであるRCP4.5及び最大排出量に相当する高位参照シナリオのRCP8.5を対象とすることとした。なお、対象年次は現在(2010年)と2030年、2050年及び2070年とし、出力評価は3次メッシュベースで行なった。

気候モデルを用いた現在予測は一般に、アメダス(AMeDAS)等により提供される現在の気候観測データと比較すると差異があり、バイアス補正を行う必要がある。そこで、本研究では気温については現在の時間帯別気温の観測値に、気候モデルから得られる将来の月別気温上昇量を加えることで補正する。日射量と風速については、観測値に気候モデルから得られる変化率を乗じることで補正する。なお、気温上昇量や日射量・風速の変化率の算出にあたっては、バイアス補正において一般的に採用されている手法を参考に、対象年次の予測値が他の年と比較して偶然に高い・低いといった場合の状況を避けるために対象年次の前後10年間の平均を利用することとし、例えば2030年の分析では2021年から2040年の年平均を用いた。

### 3. 4. 多地域電源計画モデルを用いた系統電力の排出係数の評価

都市・地域の低炭素化には、家庭部門や業務部門、運輸部門での電化の促進は重要な対策とされており、系統電力を利用するか地域に賦存する再生可能エネルギーなどの地域資源を活用するかや、系統電力の場合には電力を購入する電力会社がどのようなエネルギー源で発電し(発電構成)、電力消費量あたりのCO<sub>2</sub>排出量がどうなるか(排出係数)は重要となる。そこで本研究では、系統電力から電力を購入して利用する場合の排出係数を、多地域電源計画モデルを用いて評価することとした。

多地域電源計画モデルは、将来の発電設備の容量及び各発電方式の発電量などを推計するボトムアップ型最適化モデルである。図3.1.10に示すように、全国を60地域に分割して各地域に電力需要ノード、発電ノードを設定し、地域間には実際の地域間連系線ネットワークの情報に基づいた仮想的な連系線を設けている。モデルでは、期間全体の費用最小化の最適化計算により電力需要を満足させるための長期的な電源構成の変化を分析する。電力需要は、電力需要の年間値及び日負荷曲線の情報を元に1時間毎に設定することとし、日負荷曲線は1年を7期(夏季最大需要日、夏季平日、夏季休日、冬季平日、冬季休日、中間期平日、中間期休日)に分類して設定する。なお、太陽光発電及び風力発電については、各期の平均的な出力曲線を地域ごとに予め設定しておくが、導入される設備容量は最適化計算により内生的に決定される。また、建設費用や運転維持費、寿命については、将来の技術開発により費用低減等が期待で

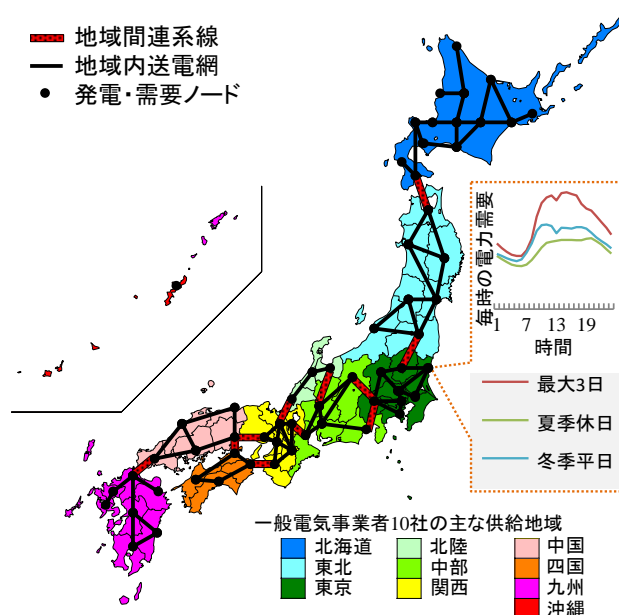


図3.1.10 多地域電源計画モデルの構成

表3.1.5 発電方式別の費用及び寿命の想定

発電方式	建設費	運転維持費		寿命
	(万円/kW)	(固定分) (円/kW)	(変動分) (円/kWh)	
原子力	26.1	3.4	0.05	60
石炭	26.0	2.8	0.4	40
石炭ボイラー	26.0	2.8	0.4	40
石炭ガス化複合	32.0	4.2	0.31	40
石炭+CCS	42.4	3.3	0.61	40
石炭ガス化複合+CCS	38.7	5.0	0.48	40
石油	20.0	1.6	0.06	40
ガスボイラー	19.0	1.7	0.06	40
ガスコンパインド	12.0	1.8	0.06	40
ガスコンパインド+CCS	24.5	2.2	0.32	40
一般水力	30.0	1.0		200
揚水水力	60.0	3.0		200
太陽光	39.0			20
風力	20.0	1500.0		20
蓄電池	24.0			10

きるものの、不確実性があることから、本研究では解析期間中は一定として、表3.1.5に示すように設定した。

発電設備ごとの設備容量は、既設および建設中ないしは計画中の設備については外生的に与えた。将来の設備容量追加は、費用最小化を目的関数とした最適化計算により内生的に算出されるが、太陽光発電および風力発電については、都道府県ごとに設定した発電ノードそれぞれでポテンシャル評価等の結果に基づいた導入可能設備量上限を設け、過剰な設備導入が起らないようにするとともに、電力の安定供給の観点から、風力発電については、設置容量の9割が最大発電量から発電量0への変動を吸収可能な下げ代の最小値を超えないこととした。

将来の系統電力の排出係数を検討するにあたり、本研究では特に再生可能エネルギーの導入可能性に着目した評価を行った。再生可能エネルギーは、導入にあたっての費用が高額であることが障壁の一つとなっている。これについて、わが国では2012年に固定価格買い取り制度（FIT）が導入され、再生可能エネルギーの導入が年々増加しているいっぽう、消費者の金銭的負担も増加傾向にある。そこで、本研



究では再生可能エネルギーへの支払い意思額を評価し、その影響を考慮した将来の再生可能エネルギー導入量や排出係数への分析を行うこととした。

再生可能エネルギーへの支払い意思額（WTP）は、都道府県別に推定することとし、メタアナリシス手法を用いて支払い意思額関数を構築した。メタアナリシスの対象論文は、文献検索システムWeb of Science、Google ScholarとCiNii Articlesを使用し、キーワードを「Japan」、「willingness to pay」、「contingent valuation method」と複数の再生可能エネルギー（「renewable energy」、「green」、「electricity」、「power」、「wind」、「solar」、「photovoltaic」、「hydro」）の組み合わせとして抽出した和英論文17件の研究を対象とした。これに、年齢、人口、収入、教育レベル、再生可能エネルギー導入の割合などの社会・経済データを組み合わせ、回帰式（式3.1.2）を構築するとともに、ワイブル分布を想定した賛成率曲線（式3.1.3）を求めた。回帰式の推定では、多重共線性の観点からの確認も踏まえ、説明変数として年齢、性別、収入、教育レベル、再エネ導入割合、調査年を選択した。なお、限られたサンプル数から、よりロバストな結果を得るために、ブートストラップ法を用い、母集団から復元抽出を100回繰り返して新しい標本を生成し、メタ回帰モデルのパラメータを推定することとした。

$$WTP_{med} = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_k x_k \quad k = 6 \quad \text{式3.1.2}$$

$$F_{base}(X) = Y = \exp\left(-\exp\left(\frac{\ln X - a}{b}\right)\right) \quad \text{式3.1.3}$$

なお、式3.1.3において、 $F_{base}(X)$ は基本的な許容率関数、 $Y$ は賛成率、 $X$ は支払い意思額（円/（世帯・月））であり、支払い意思額の間値は賛成率が0.5となるときの金額である。

これら支払い意思額の分析結果を多地域電源計画モデルに組み込み、将来の再生可能エネルギー導入量を評価した。モデルでは、賛成率も考慮して都道府県別に支払い意思額の合計を求め、その合計額までは再生可能エネルギーの導入費用は需要者が負担する、すなわち、電力会社にとっては再生可能エネルギーの導入費用が軽減されるものと想定して分析を行った。

### 3. 5. 都市・地域の低炭素施策簡易分析ツールの開発

本研究で開発した低炭素施策評価モデルや「低炭素型地域再構築」の計画分析モデルは、分析にあたって人口や産業活動などの社会・経済に関する将来見通しや技術の効率変化、再生可能エネルギー導入可能性などさまざまな要素を予め検討・設定しなければならず、モデル分析の専門家の関与が必要となる。いっぽう、さまざまな都市・地域での低炭素シナリオ検討を促進させていくには、地方自治体の担当者や住民、産業、NPOなどのステークホルダーそれぞれが、必ずしも専門家の関与を得ずとも将来シナリオを検討できるモデル・ツールが必要となる。

本研究では、低炭素施策評価モデルをもとに、簡易化してリアルタイム性を有した地方自治体の低炭素施策簡易分析ツール（地域版低炭素ナビ）を開発した。地域版低炭素ナビは、課題代表者が中心となり開発した、英国エネルギー・気候変動省（Department of Energy & Climate Change : DECC、現在はビジ

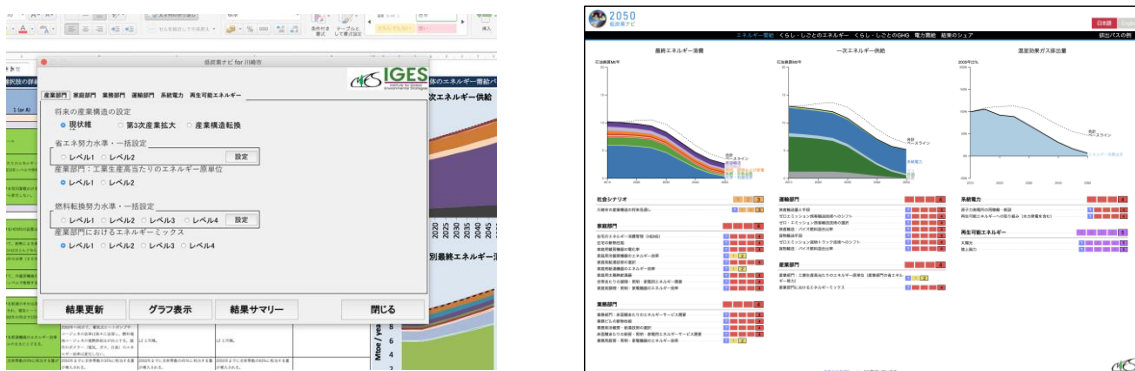


図3.1.11 開発した地域版低炭素ナビの操作インターフェース（左：Excel版、右：Web版）

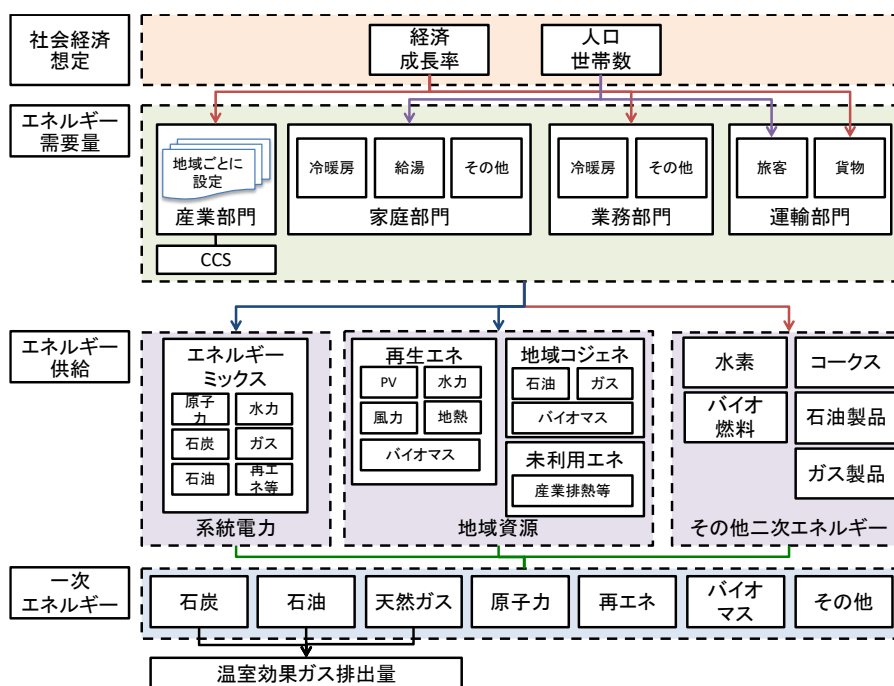


図3.1.12 地域版低炭素ナビのモデル構造

ネス・エネルギー・産業戦略省（Department for Business, Energy & Industrial Strategy）の2050カリキュレータへ日本独自のデータや要素を加えて開発した日本版2050カリキュレータ（日本版低炭素ナビ）をもとに、わが国地方自治体向けとして新たに開発したものである。地域版低炭素ナビは、マウスのクリック操作で選択肢を設定していくことにより、2050年に向けた長期的な視点から低炭素社会構築を目的としたエネルギー需給シナリオ及び温室効果ガス排出量の変化を2050年までの5年ごとに分析し、可視化できるものであり、ExcelとWebの形式で提供される（図3.1.11）。なお、Web版については、ネットワーク環境の整備状況や各機関の情報セキュリティによる制限などでインターネットを通じた利用が困難である場合も想定されることから、オフラインでも利用できるようなシステムも開発した。

図3.1.12に、地域版低炭素ナビの構造を示す。経済成長率や人口・世帯数の社会経済的な想定を出発点に、エネルギー需要量や一次・二次エネルギー消費量、温室効果ガス排出量が分析できる構造となっている。地域版低炭素ナビを用いた分析は、低炭素社会に向けて導入が期待される技術や制度をグループ化して設定した選択肢それぞれに、技術等の将来導入量の想定をレベルとして設定することで行う。例えば、エネルギー需要については、省エネ型暖房器具や給湯機器などの低炭素技術や電化率の向上などの対策に関して、ほとんどあるいは全く削減努力をしない場合をレベル1、不可能ではないが実施には相当の努力が必要とされる場合をレベル4、レベル2、3をそれらの中間とする形で選択肢が設けられており、利用者はそれぞれの技術や対策を将来どれだけ実施すべきと考えるか、レベルを選択することで設定していく。選択肢は、地域の産業構造や人口の将来見通しについては3から5程度、エネルギー供給については、太陽光発電や風力発電などの地域資源の活用度合いで設定されている。なお、系統電力については、対象とする都市・地域が属する電力会社（東京都内は東京電力、など）を想定し、将来のエネルギー源別発電量構成（エネルギーミックス）の選択肢を設定している。

開発した低炭素施策簡易分析ツールは、（一社）環境政策対話研究所が実施する次世代エネルギーワークショップや次世代都市作りエネルギーワークショップにて、将来の低炭素シナリオ検討における有効性の検討を行うとともに、（一社）地球温暖化防止全国ネット（JNCCA）の協力を得て、JNCCA担当者や地域の地球温暖化防止活動推進センター、環境NGO、地域の低炭素シナリオ研究を行う大学・研究機関の研究者による議論を行い、改良点の抽出を行った。



## 4. 結果及び考察

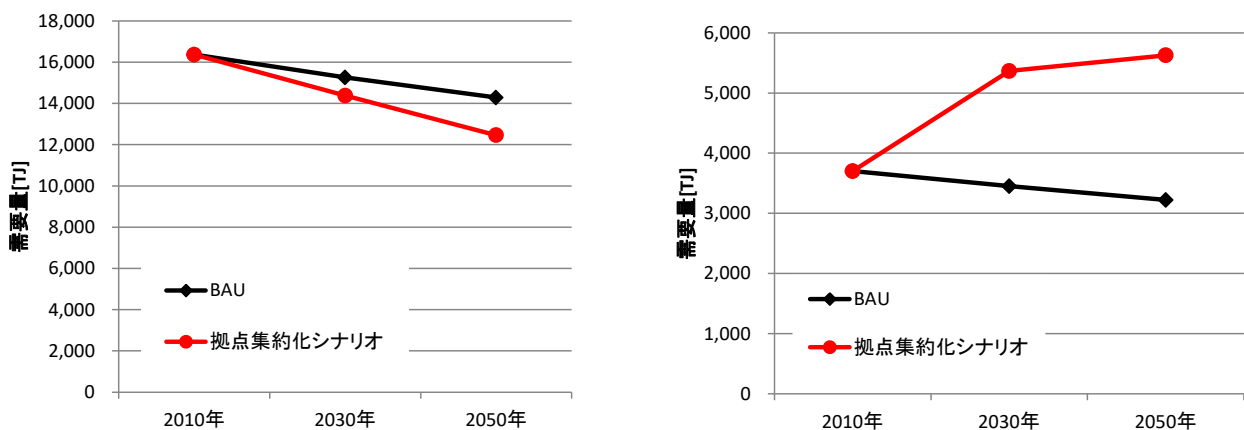
本章では、4.1節～4.5節にて前章の3.1節～3.5節に対応した結果及び考察を示す。

### 4. 1. 低炭素施策評価モデルの開発

#### (1) 空間考慮型低炭素施策モデルによる地域低炭素シナリオの分析

開発した空間考慮型低炭素施策評価モデル（空間考慮型モデル）を東北地域に適用し、将来の低炭素シナリオ検討を行った。分析では、都市・地域で低炭素方策を考える際に都市構造変化が及ぼす影響を見るために、サブテーマ2及び3の検討も踏まえ、都市構造が変わらないBAUシナリオと都市計画等に示された市街化区域へ人口等の集約が進む集約化シナリオの2つを想定した。地域内の床面積変化は、住宅・土地統計調査と法人建物調査等による建築年代別床面積を用い、3.2節（1）にて述べた建物残存率を踏まえ、解体された住宅が同じ形式で新築されるものがBAUシナリオ、集約により戸建住宅の一部が新築集合住宅へ変更される等と想定したものが拠点集約化シナリオとなる。このシナリオに加え、CO<sub>2</sub>削減対策の実施有無に着目した無対策ケースと低炭素対策ケースを設けて対策実施の影響を評価した。

図4.1.1に、福島県郡山市を対象とした分析での総エネルギー需要量推計の結果を示す。BAUシナリオ及び拠点集約化シナリオともに人口及び経済成長の想定は同一であり、例えば人口は2010年の338.7千人から2050年には288.2千人に減少するとしているが、総エネルギー需要は明確に異なる推計結果となった。これは、拠点集約化シナリオでは戸建から集合住宅への住み替えが起こったことの影響であり、図4.1.2



(a) 対象地域全体

(b) 市街化区域内のみ

図4.1.1 将来エネルギー需要の推計結果

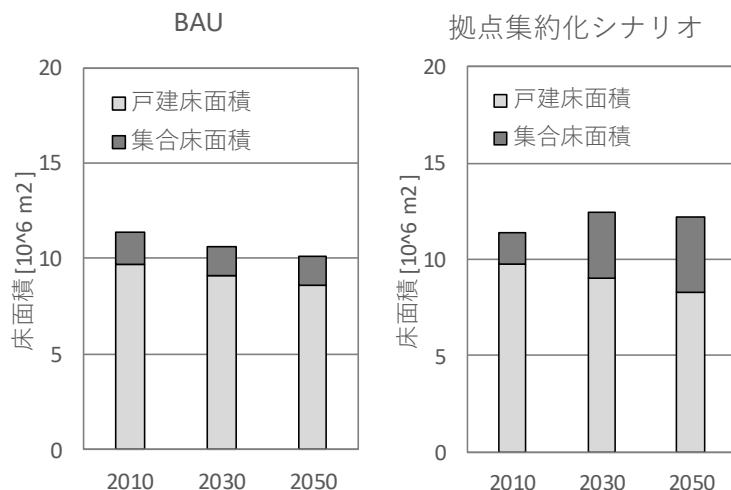


図4.1.2 市街化区域内におけるシナリオごとの床面積の比較

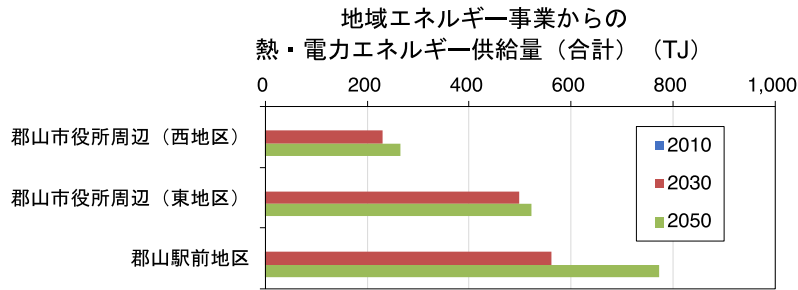


図4.1.3 地域エネルギー事業の導入量評価結果（拠点集約化シナリオ）

に示す床面積で比較してもBAUでは人口減少に伴って戸建住宅も集合住宅も床面積が減少するが、拠点集約化シナリオでは集合住宅の割合が高まる結果となるとともに、市街化区域内を切り出したエネルギー需要も拠点集約化シナリオのほうが増加する。

地域エネルギー事業導入量の評価結果を、図4.1.3に示す。3.1節（1）に示したように、本研究で想定した条件（表3.1.1）では、人口密度7,000人/km<sup>2</sup>かつ従業者密度7,000人/km<sup>2</sup>以上、または同等の条件となる従業者密度・人口密度の組合せがある地域では、地域エネルギー事業が成立することがわかった。この条件を満たす地域（区域）はBAUシナリオでは存在せず、地域エネルギー事業は導入されない。他方、拠点集約化シナリオでは、エネルギー需要が集中することにより、病院や大規模商業施設等が集中している郡山市役所周辺（西地区）・郡山市役所周辺（東地区）と、業務施設等が集中する郡山駅前地区の3つの地区で地域エネルギー事業の事業採算性が確保できると評価された。これら地区の地域エネルギー事業の導入量は図4.1.3に示す規模であり、2050年にはこれら3つの地区合計で電力及び熱の総計で1,560TJが地域エネルギー事業により供給されることになる。

つぎに、CO<sub>2</sub>削減効果の評価した結果を図4.1.4に示す。分析では、CO<sub>2</sub>削減対策の実施有無で無対策ケースと低炭素対策ケースを設けているが、図ではCO<sub>2</sub>排出量が最大となるBAUシナリオ+無対策ケースの組み合わせと最小となる拠点集約化シナリオ+低炭素対策ケースの組み合わせで示す。

BAUシナリオ+無対策ケースと比較すると、拠点集約化シナリオ+低炭素対策ケースでは、対象地域のCO<sub>2</sub>排出量を2050年には45万tCO<sub>2</sub>削減できることがわかる。これは、対象地域の2007年のCO<sub>2</sub>排出量の37.8%に相当する。削減量の内訳では、高効率機器への置き換え等が削減量全体の14.6%、再生可能エネルギー（太陽光発電（PV））の導入が22.5%、集約化によるエネルギー需要及び供給の効率化により41.2%、系統電力の低炭素化による削減量が21.7%となる（系統電力の低炭素化効果を除くと、高効率機器置き換えが18.6%、再生可能エネルギーが28.7%、集約化の効果が52.6%となる）。これらのことから、都市・地域において低炭素化対策を効果的に推進するためには、土地利用の誘導等による都市の集約化効果（コンパクトシティ化）を検討していくことが重要であることがわかる。第5次環境基本計画では、重点戦略

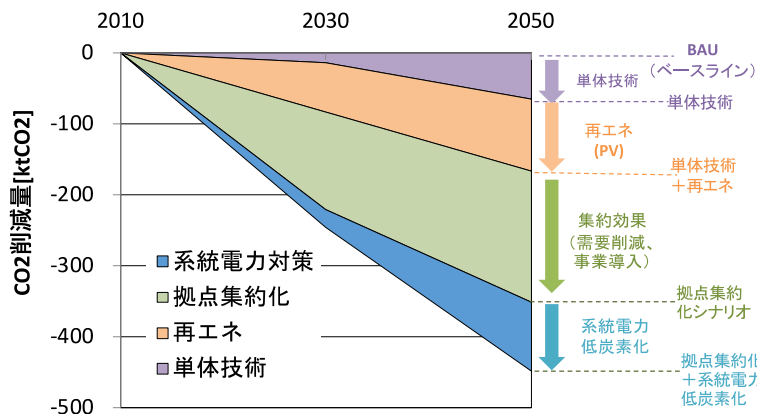


図4.1.4 対策別CO<sub>2</sub>削減効果（拠点集約化シナリオ+低炭素対策ケースとBAUシナリオの差分）

として『国土のストックとしての価値の向上』（重点戦略②）と『地域資源を活用した持続可能な地域づくり』（重点戦略③）を掲げているが、本研究からこれらの戦略を進めることは都市や地域の低炭素化をより加速させることに大きく寄与しうることが示唆される。

## (2) マクロ型都市・地域の低炭素施策モデルによる地域低炭素シナリオの分析

マクロ型都市・地域の低炭素施策モデル（マクロ型モデル）を用いた地域低炭素シナリオの分析に先立ち、対象とする地方自治体を系統的に選定するために、エネルギー消費と産業構造の地域差を表す尺度としての温室効果ガス排出量の部門別割合とエネルギー消費の地域差を表す尺度としての次世代省エネルギー基準（図3.1.6を参照）に着目し、全市区町村の分類を行った。

図4.1.5に、グループ別の平均的なCO<sub>2</sub>排出量の部門別割合を、表4.1.1に各分類に含まれる地域の例を示す。CO<sub>2</sub>排出量の部門別割合の類似性に着目すると、全市区町村は6グループに分類される。グループごとの特徴に着目すると、グループ1は産業部門、家庭部門、業務部門、旅客運輸部門及び貨物運輸部門が同程度の割合であり、グループ6は産業部門がやや少ないものの、それ以外の部門はおおよそ同程度である。グループ2とグループ4は、他のグループと比較して産業部門の割合が高く、特にグループ4は平均

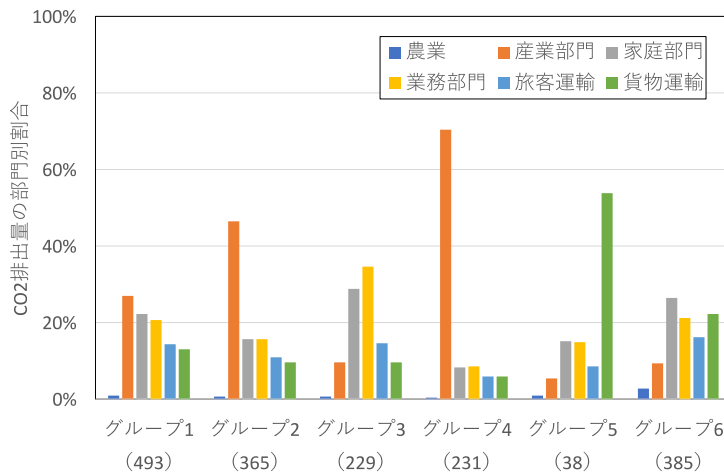


図4.1.5 グループ別の平均的なCO<sub>2</sub>排出量の部門別割合  
(括弧内はグループに含まれる市区町村数)

表4.1.1 CO<sub>2</sub>排出量の部門別割合及び次世代省エネルギー基準に基づく分類と  
各分類に含まれる地域の例 (括弧は各分類に含まれる市区町村数)

		グループ1	グループ2	グループ3	グループ4	グループ5	グループ6
次世代省エネルギー基準	1地域	釧路市 (25)	根室市 (21)	旭川市 (16)	別海町 (7)	-	真狩村 (26)
	2地域	小樽市 (22)	石狩市 (19)	札幌市 (13)	室蘭市 (3)	厚真町 (3)	浦河町 (19)
	3地域	日光市 (78)	八戸市 (14)	盛岡市 (13)	六ヶ所村 (5)	川上村 (3)	嬬恋村 (77)
	4地域	郡山市 (75)	石岡市 (40)	長野市 (13)	真庭市 (16)	葛尾村 (1)	男鹿市 (47)
	5地域	富山市 (119)	彦根市 (118)	奈良市 (55)	豊田市 (66)	-	十津川村 (87)
	6地域	静岡市 (148)	川崎市 (139)	千代田区 (91)	四日市 (128)	鳥羽市 (7)	雲仙市 (68)
	7地域	高知市 (24)	南国市 (13)	長崎市 (11)	下関市 (6)	徳之島町 (18)	鹿児島市 (46)
	8地域	糸満市 (2)	西原町 (1)	名護市 (17)	-	本部町 (6)	宮古島市 (15)

表4.1.2 低炭素シナリオ分析の対象自治体  
(グループは図4.1.5/表4.1.1のグループを指す)

グループ		人口密度 [人/km <sup>2</sup> ]	人口密度 区分	次世代省エネ 基準の地域区分
1	釧路市	565	低密度	1地域
1	桐生市	1,469	中密度	5地域
1	つくば市	933	低密度	5地域
2	八戸市	1,137	中密度	3地域
3	旭川市	965	低密度	1地域
3	札幌市	4,447	高密度	2地域
3	熱海市	1,596	中密度	7地域
3	那覇市	8,138	高密度	8地域
4	室蘭市	2,047	中密度	2地域
4	四日市市	1,749	中密度	6地域
5	仙台市	3,167	高密度	4地域
6	嬭恋村	105	低密度	3地域
6	熊本県小国町	53	低密度	6地域
6	南大隅町	178	低密度	7地域

で7割近くが産業部門由来となっている。グループ3は、家庭部門及び業務部門の割合が高く、千代田区などの業務が中心の地域が分類されている。グループ5は、貨物運輸部門の割合が高いが、分類される地域数はそれほど多くない。

本研究では、この地域分類と人口密度も踏まえ、表4.1.2に示す自治体を対象として低炭素シナリオの分析を行った。分析は、2015年、2020年、2030年、2050年を対象に行う。各自自治体の将来人口は、国立社会保障・人口問題研究所の「日本の地域別将来推計人口」に基づいて設定した。なお、この推計は2045年までであるため、2050年の将来人口は2040年から2045年の変化を外挿して設定した。

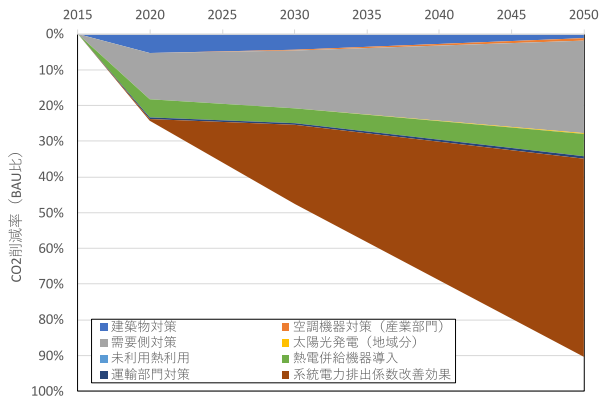
図4.1.6に、対象自治体の対策別CO<sub>2</sub>削減率の分析結果の一部を示す。分析では、CO<sub>2</sub>削減対策の実施有無で無対策ケースと低炭素対策ケースを設けているが、図では無対策ケースと低炭素対策ケースの差分で示す。

いずれの自治体でも、CO<sub>2</sub>削減には省エネルギー機器導入などの需要側対策の効果が大きく22%～43%を占める。自治体の特徴別に比較すると、札幌市や四日市市などの業務部門（サービス業）や産業部門の割合の大きい自治体において需要側対策の効果が高く、嬭恋村や熊本県小国町のような家庭部門のエネルギー消費が相対的に大きい自治体ではそれほど効果がよくない。断熱強化などの建築物対策は、釧路市や旭川市などの北海道の自治体では効果が高いが、それ以外の地域ではそれほど大きくない。また、比較的規模の大きな自治体では熱電併給機器導入による削減効果も5%前後が期待できる。

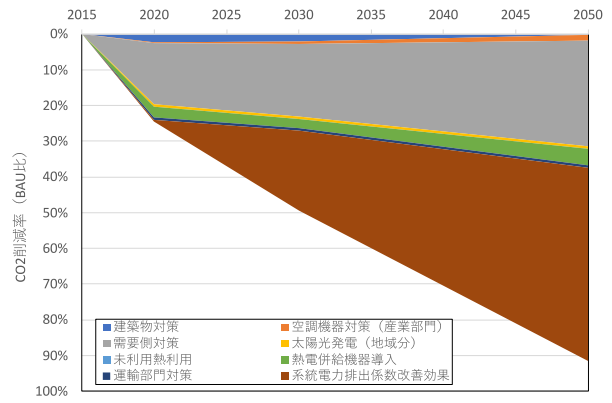
これら対策と同程度、あるいはそれ以上に系統電力の排出係数改善の影響は大きい。分析では、2050年の系統電力の排出係数は、AIM/CGE [Japan]を用いた分析によるわが国のCO<sub>2</sub>排出量80%削減達成ケースの結果（11 gCO<sub>2</sub>/kWh）を用いているが、これが達成されない場合の2050年のCO<sub>2</sub>排出削減率は大幅に低下し、南大隅町や嬭恋村のような家庭部門のエネルギー消費が相対的に大きい自治体では30%以下の削減率に留まり、四日市市や札幌市、仙台市などでも40%～50%程度である。この傾向は空間考慮型モデルでも同様であり、地方自治体において低炭素化を進めるためには、自治体内での技術的な対策とともに、使用する電力の低炭素化が重要であることがわかる。

### (3) 産業部門を対象とした低炭素施策評価モデルを用いた産業排熱利用に関する分析

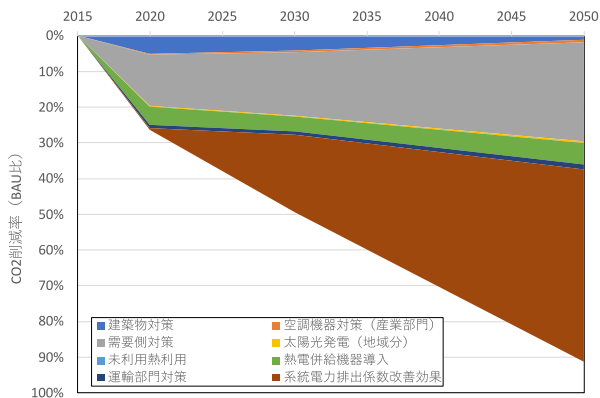
開発した産業部門を対象とした低炭素施策評価モデルは、福島県浜通り北部地域へ適用した。福島県新地町には、合計200万kWの石炭火力発電所が立地するほか、LNG基地が立地しており、周辺での天然ガス火力発電も建設が進められている。また、これらに隣接する相馬中核工業団地東地区には、化学工業や非鉄産業など高温熱を利用する産業が立地しており、これらの産業排熱を民生部門において活用することで地域全体としてのCO<sub>2</sub>排出量削減が期待される。



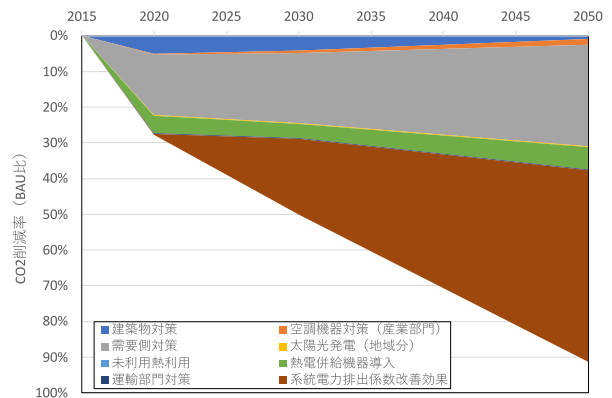
(a) 釧路市



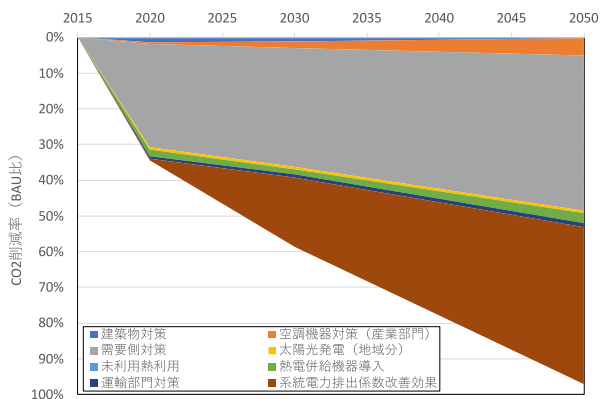
(b) 八戸市



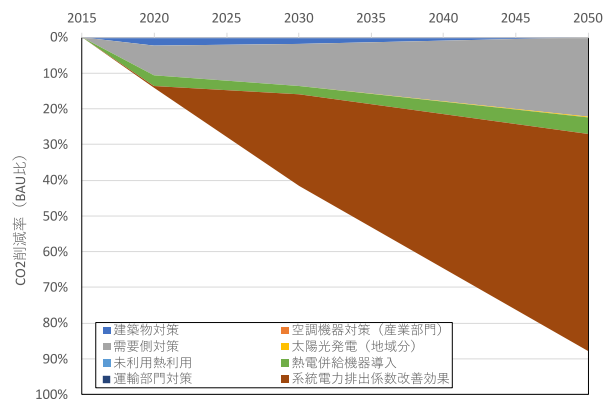
(c) 旭川市



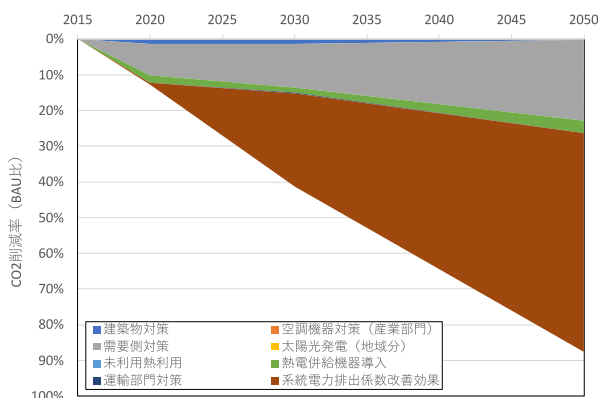
(d) 室蘭市



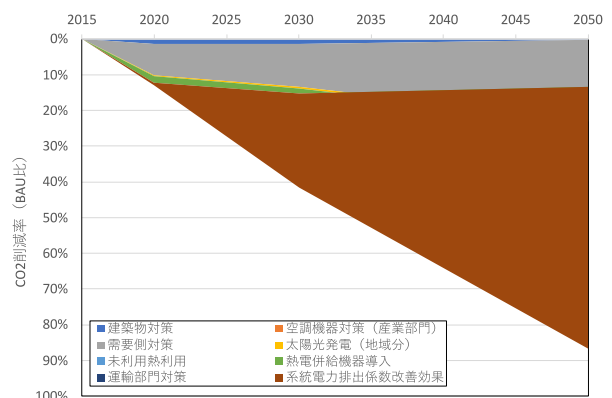
(e) 四日市市



(f) 嬬恋村



(g) 熊本県小国町



(h) 南大隅町

図4.1.6 対策別CO<sub>2</sub>削減効果の分析結果 (低炭素対策ケースと無対策ケースの差分)

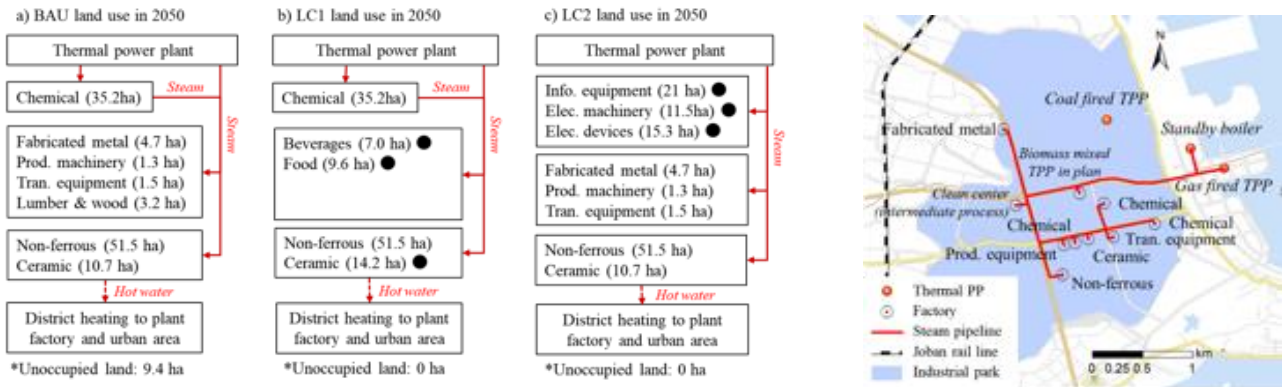
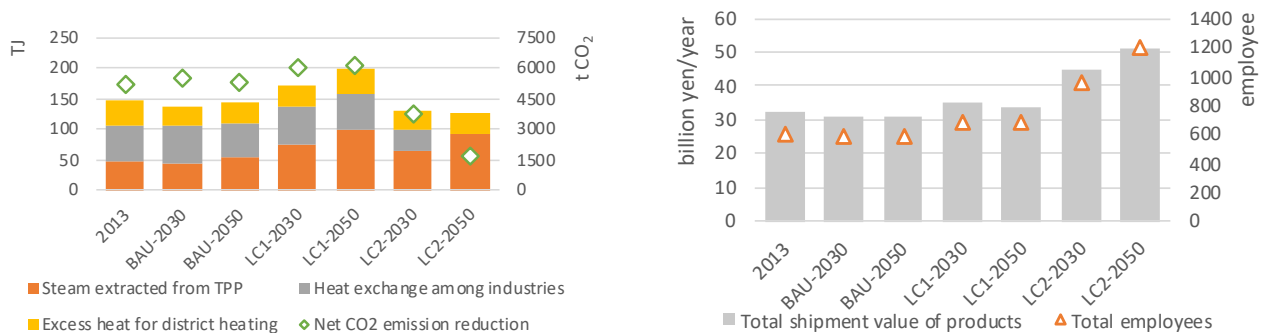


図4.1.7 シナリオ別の産業構成と産業排熱の供給フロー（熱供給ネットワーク）



(a) 産業排熱供給量とCO<sub>2</sub>削減量

(b) 出荷額と雇用者数の変化（工業団地全体）

図4.1.8 シナリオ別のCO<sub>2</sub>削減効果と経済・雇用への効果

分析では、将来も現状の産業が維持されるBAUシナリオに加えて、工業団地に新たな産業を誘致すると想定したシナリオを2つ置いた。LC1シナリオでは、新たな産業として熱需要の高い飲料と食品製造業を誘致すると想定し、LC2シナリオでは雇用効果の高い情報産業や電気機械産業、電子部品・デバイス製造業などの雇用集約型産業を誘致すると想定した。図4.1.7に、シナリオ別の2050年の産業構成と産業排熱供給フローを示す。LC1シナリオでは、化学工業や非鉄金属、窯業といった熱需要の大きな産業は維持されるが、金属製品工業や機械産業などが飲料や食品作業に置き換わる。LC2シナリオでは、化学産業が情報産業や電気機械産業、電子部品・デバイス製造業に置き換わる。なお、BAUシナリオでは9.4haの空地が存在するが、これは現在東日本大震災の廃棄物処理等のための仮施設が使用している部分であり、新規の産業立地がないと想定しているため2050年には空地となっているものである。

熱供給ネットワークは、火力発電所と化学工業を端点とする形で構成され、BAUシナリオとLC1シナリオでは、産業排熱は火力発電所と化学工業から他産業に供給される。LC2シナリオでは、化学工業が他産業に置き換わるため、産業排熱の供給源は火力発電所のみとなる。BAUシナリオや熱需要の大きな産業を新たに誘致するLC1シナリオでは、産業排熱の利用も拡大し工業団地全体としてのCO<sub>2</sub>削減が進むものの、2050年まで出荷額や雇用はほとんど現状のまま推移する。いっぽう、情報産業や電気機械産業、電子部品・デバイス製造業などの雇用集約型産業を誘致した場合には、出荷額や雇用は2050年には現状の約2倍に増加するが、火力発電所からの排熱利用は十分進まず、CO<sub>2</sub>削減量はBAUよりも減少する。このことから、低炭素を優先して工業団地内のみでの産業排熱利用を拡大する方策は経済・雇用とはトレードオフの関係にあり、空間考慮型モデルで分析したように、産業排熱を近隣の街区に供給するなど、都市・地域全体で活用することが重要であることが示唆される。

#### (4) 研究成果の政策立案等への活用プロセス検討

これら分析と平行して、地方自治体との研究連携体制を構築・活用して、都市・地方を低炭素化するための制度・政策作りへの他サブテーマも含めた本研究課題全体としての成果の提供を進めてきた。福



岡山北九州市については、サブテーマ3・4にて示す成果も含め、立地適正化計画や温暖化対策地方実行計画を踏まえたコンパクト化空間構造への誘導など将来の土地利用変化に伴う低炭素効果を資源とストックの活用も含めた観点から評価し、技術導入の加速化とともに、現行の北九州市の立地適正化計画よりも踏み込んだ集約化を促すことで一層の低炭素効果を期待できることを示し、温暖化対策担当部局等の政策決定者への成果提供を行ってきた。また、福島県新地町については、天然ガス（LNG）などの地域エネルギーを活用したスマートコミュニティの計画や長期的な将来像を検討する新地町未来ビジョン検討会に対して本研究の成果や得られた知見を提供し、地方自治体における定量的な分析に基づく将来計画作りへの貢献を進めてきた。

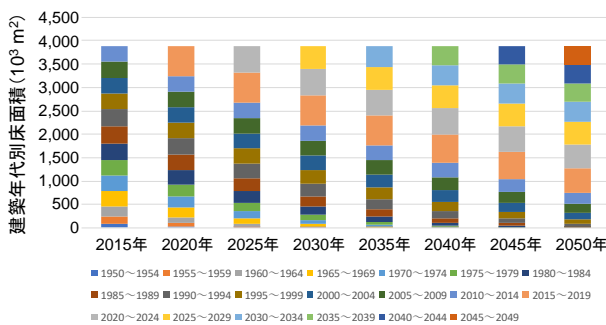
また、富山県の環境審議会地球温暖化対策小委員会委員等の地方自治体での温暖化計画作りへの参画やIPCCの地域の気候情報分析に関する専門家会合（IPCC Expert Meeting on Assessing Climate Change Information for the Regions）での地域の低炭素シナリオについてのモデル分析の成果報告などを行うなど、国内外において都市・地域での低炭素化に向けた政策作りへの貢献も継続的に行ってきた。

#### 4. 2. 都市・地域のエネルギー需要分析手法の開発

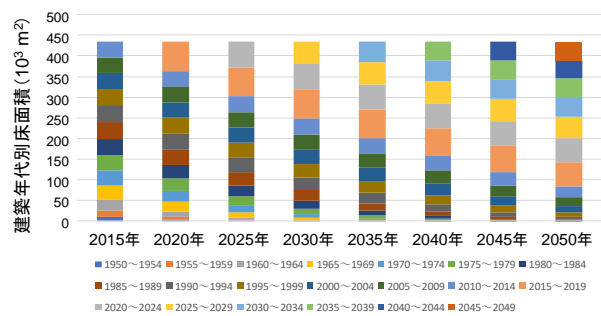
##### (1) 建物滞留年数を考慮した建築物の建て替え促進及び断熱強化による効果の評価

本研究では、将来の建築物の建て替えや断熱強化を考慮した低炭素シナリオの分析を行い、その結果は4.1節にて述べた。本節では、残存率を考慮した将来の建物床面積の分析の一例として、住宅を対象に、建物更新の促進やコンパクトシティ化に伴う戸建住宅から集合住宅への移転による床面積変化を評価した結果について述べる。

図4.1.9及び図4.1.10に、残存率を考慮した将来の床面積の推移を建築年代別に示す。取り壊された住宅の床面積相当分がそのまま新築される場合（単純建替ケース、図4.1.9）では、建築年代の古い住宅の床面積が徐々に減少しつつ新築住宅に移り変わる。しかし、2050年においても2015年以前に建築された住宅が約2割残存することになる。これに対して、住宅更新量を2倍、かつコンパクトシティ化が進むことを想定して戸建住宅床面積の1%相当分が集合住宅へ移転すると想定した場合（建替加速・コンパクト化

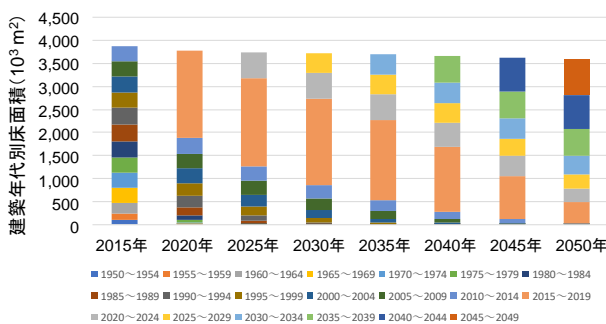


(a) 戸建住宅

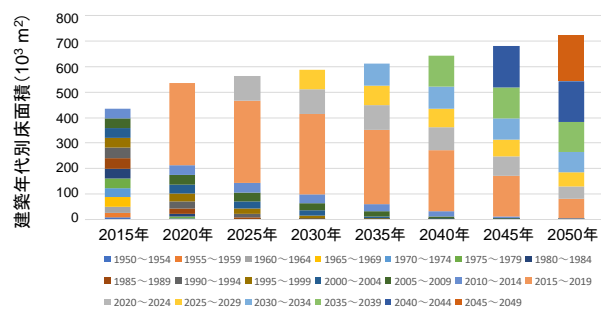


(b) 集合住宅

図4.1.9 建築年代別の床面積の推移（単純建替ケース）



(a) 戸建住宅



(b) 集合住宅

図4.1.10 建築年代別の床面積の推移（建替加速・コンパクト化ケース）

ケース、図4.1.10)には、2050年には戸建住宅と集合住宅のいずれでも2015年以前に建築された住宅はほぼ存在しない。しかし、住宅更新量を2倍にすることで、初期においては多くの新築住宅が必要となること、また、断熱性能の高い新築住宅においても残存率で求められる寿命以前に廃棄することとなり、このような短期的な建築物の建て替えはエネルギー需要抑制の観点では有効であったとしても、サブテーマ3で検討する建設副産物発生量の増加をもたらし、資源の効率的な利用においては適切とはいえない。そのため、都市・地域で低炭素化の方策として建築物の建て替え促進を検討する場合には、既設建築物の更新量増加は数年かけて行うとともに、新設建築物については更新量増加の対象外とするなど、資源利用も考慮した形で実施することが肝要である。

## (2) 気候変動による気象条件変化を考慮した電力需要の推定手法の開発

本研究を通じて開発した手法は、図4.1.11に示すように観測値によくあてはまるだけでなく、モデル構築に用いていないテストデータによる評価において高い汎化性を示すことが確認された。このような良好な結果が得られた理由としては、多様な気象項目と人間活動の時間変動に関する指標とを考慮してモデル構築を行ったこと、MARSを用いた回帰を行うことで変数間の非線形関係や交互作用をモデルに組み込むことができたことがある。

電力需要の決定要因には、地域特性に関わらない共通要因と地域固有の要因(地域要因)の2種類があるが、本研究では共通要因として3つの気象関連要因(気温、湿度、日射)と4つの人間活動(働いている人の割合、眠っている人の割合、在宅し起きている人の割合、平日休日の別)が、地域固有の要因(地域要因)として3つの気象関連要因(風速、降雨、積雪)が特定されるとともに、地域要因と比較すると共通要因の影響が大きいことが明らかになった。

つぎに、このモデルを用いて気温感応度の分析を行った結果、気温感応度は地域や時間帯によって異なっていることが明らかとなった。時間的な差異に着目すると、1日24時間における気温感応度の時間的な変化の中で、異なる二つの気温感応度が特定されることが示された(図4.1.12・左図)。空間的な差異については、北海道、本州、沖縄で明確な違いが確認され、年平均気温の高い地域ほど電力需要が下降から上昇に転ずる気温であるBPT(Balance Point Temperature)が高くなる傾向が示された(図4.1.12・右図)。

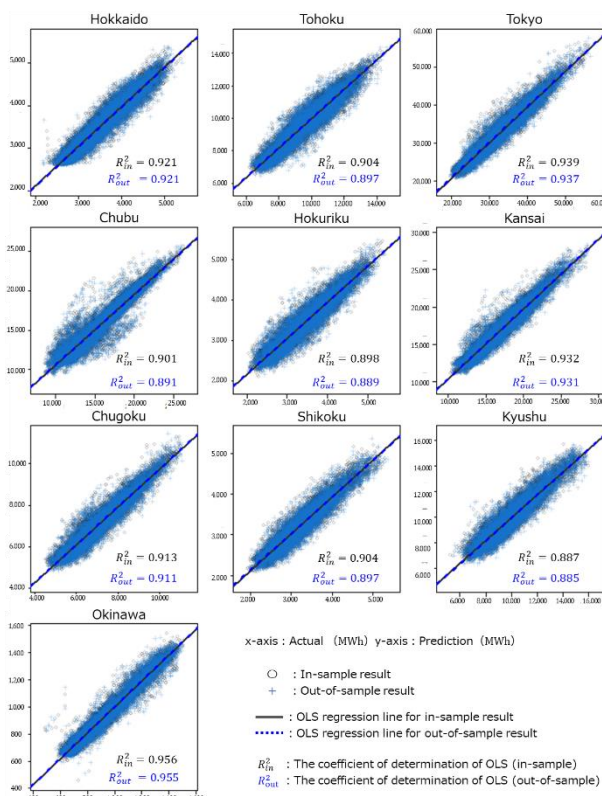


図4.1.11 構築したモデルの評価結果



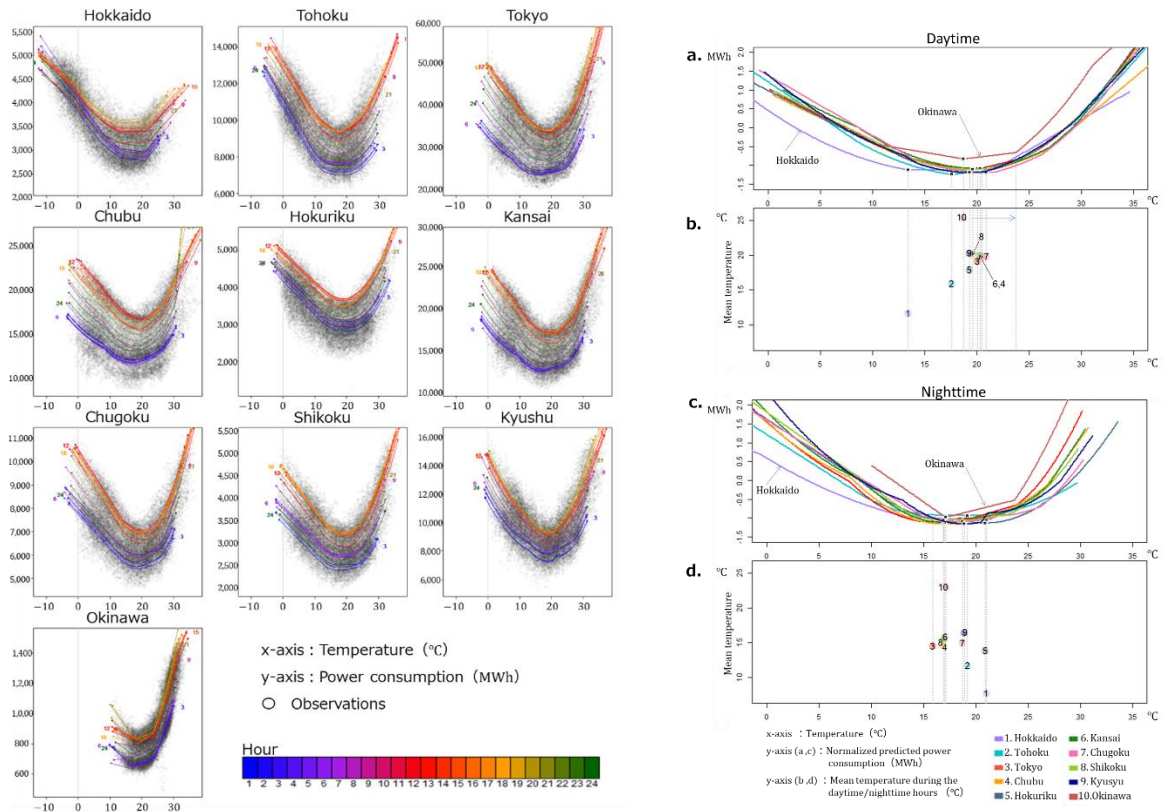


図4.1.12 気温感応度の分析結果

(左：毎時の気温感応度関数の変化、右：気温感応度関数の地域間比較)

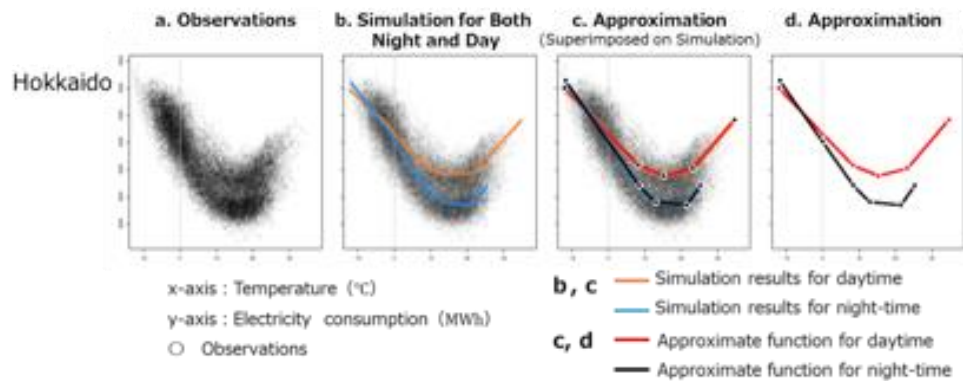


図4.1.13 気温感応度関数の区分線形関数による近似プロセス（北海道）

なお、この傾向は日中に顕著で夜間には不明瞭であったが、これは日中の気温感応度関数がV字型を呈しBPTが特定されやすいのに対して、夜間の気温感応度関数はU字型になりやすくBPTが定まりにくいためだと考えられる。

このようにして得られた気温感応度関数を都市・地域の電力需要分析に活用するために、本研究では図4.1.13に示すようなプロセスでMARSを用いて区分線形関数で近似し、複雑な関数を区分点間を結ぶ回帰直線で表すためのパラメータを表4.1.3のように整理した。この成果を用いることで、地域の気象条件を考慮した電力需要推定をよりよく行えるようになるほか、今後見込まれる気候変動による気象条件変化に伴って見込まれる電力需要の変化の程度も踏まえた都市・地域での低炭素シナリオを検討することができると思われる。

### (3) デイマンドレスポンス (DR) 等のICT技術を活用した需要制御技術の効果評価手法の開発

開発したエネルギーマネジメントシミュレータを用いたシミュレーションでは、対象を東北地域の地

表4.1.3 気温感応度関数の区分線形関数のパラメータ

EPC	Breaking points No.	Day time			Night time		
		Coordinate of the breaking points			Coordinate of the breaking points		
		TEMP(°C)	y Electricity consumption	Coefficient	TEMP(°C)	y Electricity consumption	Coefficient
1 Hokkaido	1	-12.10	5,007.15	-70.07	-11.80	5,136.69	-95.29
	2	8.30	3,577.75	-27.27	8.50	3,202.28	-66.33
	3	15.30	3,386.83	16.80	13.00	2,903.78	-7.07
	4	23.30	3,521.20	78.69	21.50	2,843.65	94.33
	5	34.70	4,418.25		25.40	3,211.53	
2 Tohoku	1	-3.70	14,321.78	-291.69	-6.30	12,512.31	-297.44
	2	10.50	10,179.82	-131.32	9.90	7,693.83	-173.27
	3	18.50	9,129.26	191.83	13.90	7,000.76	18.67
	4	28.50	11,047.59	466.50	24.40	7,196.79	237.75
	5	36.20	14,639.63		29.70	8,456.88	
3 Tokyo	1	0.10	49,683.73	-1,092.74	0.00	33,003.80	-742.50
	2	12.80	35,805.89	-258.44	11.40	24,539.34	-241.22
	3	22.30	33,350.70	1,290.99	16.90	23,212.62	341.31
	4	29.30	42,387.61	2,677.85	25.90	26,284.45	1,776.39
	5	37.10	63,274.86		30.20	33,922.91	
4 Chubu	1	0.40	23,140.11	-417.12	0.00	15,772.30	-287.49
	2	14.30	17,342.19	-119.44	12.00	12,322.40	-140.08
	3	21.30	16,506.14	405.67	17.00	11,621.98	147.41
	4	27.80	19,142.97	749.50	26.50	13,022.35	602.83
	5	40.20	28,436.72		30.80	15,614.54	
5 Hokuriku	1	-2.20	5,150.81	-81.52	-2.90	4,577.67	-92.18
	2	14.70	3,773.11	-23.55	13.30	3,084.36	-33.02
	3	21.20	3,620.06	108.30	19.80	2,869.75	50.98
	4	30.70	4,648.93	236.25	28.30	3,303.09	181.62
	5	36.60	6,042.82		33.60	4,265.70	
6 Kansai	1	1.40	24,506.83	-525.12	0.00	17,651.91	-361.85
	2	13.70	18,047.89	-124.81	12.20	13,237.34	-164.66
	3	22.70	16,924.64	532.39	17.20	12,414.03	148.66
	4	28.20	19,852.79	1,142.12	26.20	13,752.01	742.94
	5	37.50	30,474.48		30.50	16,946.66	
7 Chugoku	1	-0.90	10,653.21	-213.77	-3.50	8,592.72	-147.13
	2	14.80	7,296.99	-67.40	14.40	5,959.18	-70.59
	3	21.80	6,825.17	226.31	17.90	5,712.11	42.27
	4	30.30	8,748.83	518.95	26.40	6,071.42	275.90
	5	36.60	12,018.24	0.00	30.30	7,147.45	0.00
8 Shikoku	1	0.40	4,605.73	-92.51	0.00	3,486.38	-71.47
	2	14.30	3,319.79	-26.34	13.50	2,521.58	-25.83
	3	21.80	3,122.21	129.00	17.50	2,418.26	22.25
	4	31.30	4,347.71	256.33	25.50	2,596.23	123.68
	5	37.20	5,860.09		29.80	3,128.07	
9 Kyushu	1	-0.40	14,582.14	-368.27	-0.80	11,850.57	-358.32
	2	10.90	10,420.64	-158.26	5.90	9,449.86	-173.17
	3	20.40	8,917.14	337.11	17.90	7,371.76	114.23
	4	29.40	11,951.13	641.51	26.90	8,399.85	417.89
	5	37.20	16,954.88		31.20	10,196.76	
10 Okinawa	1	10.70	921.68	-11.46	10.00	796.21	-21.85
	2	17.80	840.30	4.02	16.40	656.35	4.19
	3	23.40	862.79	48.89	22.40	681.49	16.77
	4	25.80	980.14	72.73	24.40	715.03	58.72
	5	34.10	1,583.81		30.10	1,049.74	

方自治体とし、日本コージェネレーションセンターのコージェネレーション総合マニュアルの典型的な月別・時刻別パターンをもとに、研究参画者らが別途実施しているエネルギーモニタリングのデータで補正したのち、地域内の世帯数や床面積等に乗じて合計して作成した。

このように設定した需要パターンをもとに、需要制御を日中（12時～17時）のみ実施する場合と夜間（18時～21時）に実施する場合の2ケースを想定し、需要パターンの変化を分析した。

図4.1.14に、家庭部門を対象に需要制御の効果を分析した結果を示す。図では、棒グラフがもともとの需要パターンを示し、折れ線は需要制御実施後の需要量を示す。また、マイナスはいずれも太陽光発電の発電量を示し、対象地域内の2カ所の異なる施設での実測値に需要家数を乗じたものを例として示す。

シミュレーションでは、需要制御を実施するかどうかは各家庭が選択でき、その実施割合（参加率）は、時間的にどの程度事前に連絡があるかで異なると設定している。本研究では、3時間前に需要制御の連絡がある場合がもっとも参加率が高く、10分前に連絡がある場合がもっとも参加率が低いとした。そ

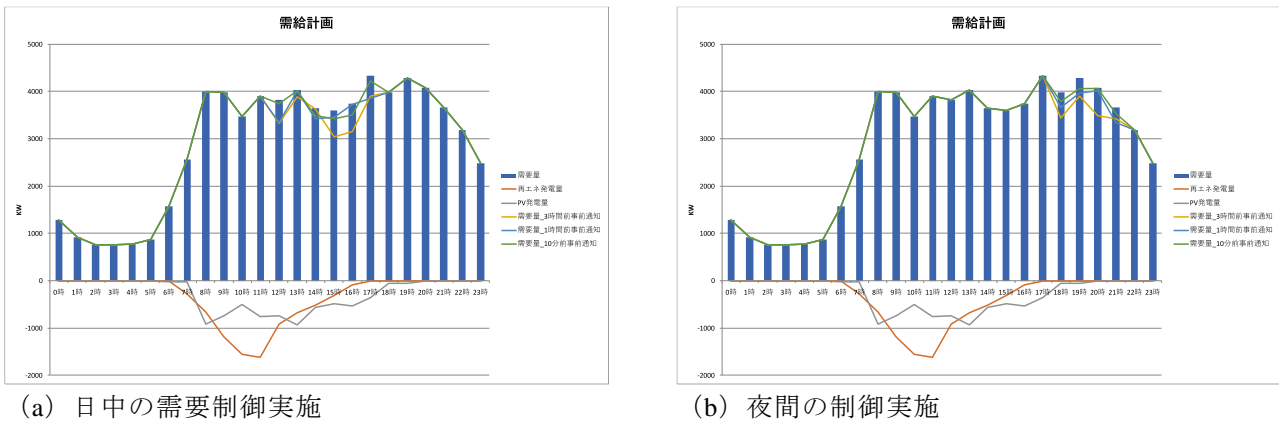


図4.1.14 需要マネジメントによる需要削減効果シミュレーション結果（家庭部門）

のため、3時間前に事前通知を行ったと想定した場合の需要削減率が最も高く、10分前に通知をした場合にはもとの需要パターンから大きく変化しない。

シミュレータを用いた分析より、需要制御によって需要全体と特にピークカットにより実施時間帯の需要削減を進めることが可能とわかった。需要制御によるエネルギー需要の削減効果は日中実施の方が大きいですが、需要平滑化効果は夜間に実施する方が効果的である。このほか、再生可能エネルギー発電（太陽光発電）の発電パターンと組み合わせることで、日中のピーク時間帯の需要削減がさらに進めることが可能であり、予測される発電量を頭わに供給計画に組み入れることにより、効果的な需給調整が可能であることが明らかとなった。

#### (4) 人口・従業者数に基づく床面積推計式の検討

図4.1.15に、住宅土地統計調査に基づいた全国の市区町村ごとの総世帯人員と住宅床面積の関係を示す。世帯人口が増加するに伴い住宅床面積は増加し、住宅床面積は世帯人口の一次関数で表現されると想定して最小二乗法により関係式を求めたところ、世帯人口1人増加ごとに住宅床面積は33.9 m<sup>2</sup>増加すると推計された。

市区町村ごとの世帯人員と住宅床面積には大きな幅があり、最大の横浜市が世帯人口3,585千人で住宅床面積116,118 km<sup>2</sup>に対して、最小の歌志内市は世帯人口3,620人で住宅床面積168.3 km<sup>2</sup>である。そこで、世帯人口が15万人以下、15万人～50万人、50万人以上の3区分で世帯人口と住宅床面積の関係を確認した（図4.1.16）。それぞれの区分で最小二乗法により関係式を求めたところ、世帯人口1人増加ごとの住宅床面積の増加分は32.7～37.2 m<sup>2</sup>と推計され、全市区町村を対象とした増加率の推計値と近似していることが確認された。

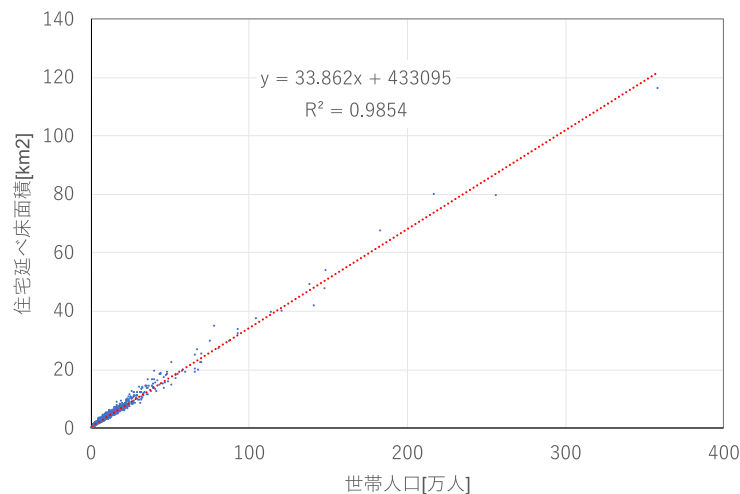
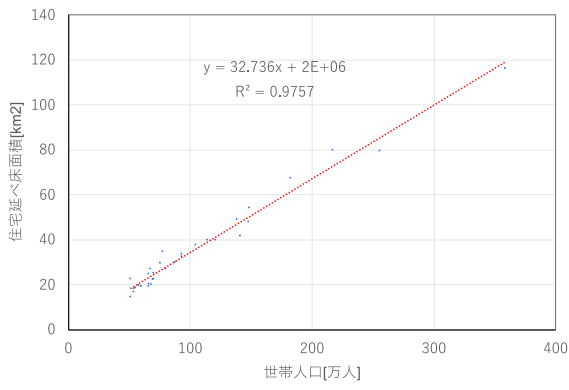
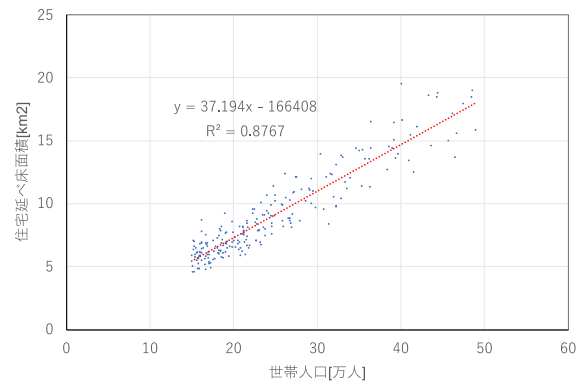


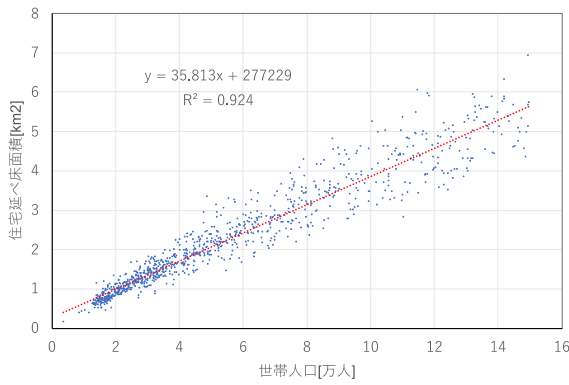
図4.1.15 世帯人口と住宅床面積の関係（全市区町村）



(a) 50万人以上

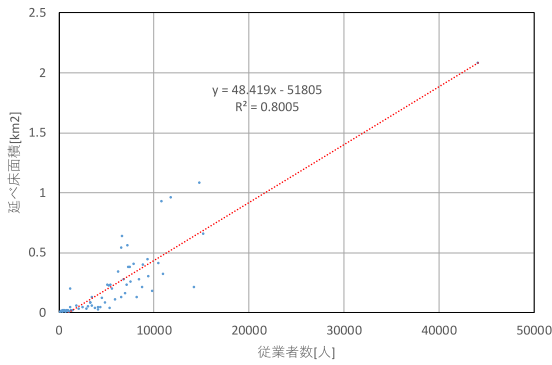


(b) 15万人～50万人

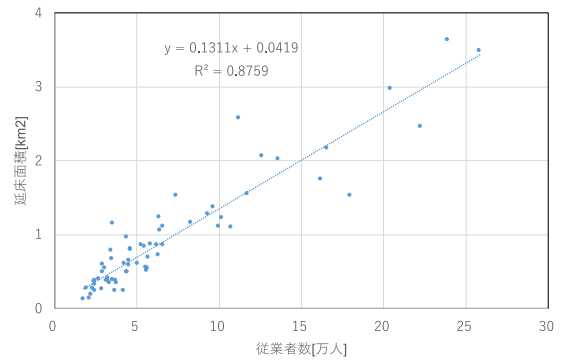


(c) 15万人以下

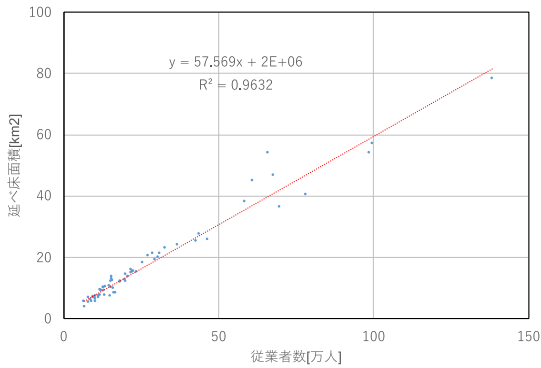
図4.1.16 世帯人口と住宅床面積の関係（世帯人口による層別）



(a) 第一次産業



(b) 第二次産業（製造業を除く）



(c) 第三次産業（運輸業を除く）

図4.1.17 従業者数と非住宅建物床面積の関係

表4.1.4 人口・従業者数に基づく床面積推計式 ( $y=ax+b$ )

	傾き a[m <sup>2</sup> /人]	切片 b[m <sup>2</sup> ]
住宅床面積	33.9	433095.0
非住宅床面積	19.4	-4105.8
第一次産業		
4千人未満	46.7	-105315.7
4千人以上	13.1	41945.9
第二次産業（製造業を除く）	37.5	-265364.5
第三次産業（運輸業を除く）	54.6	2242418.3

つぎに、図4.1.17に、第一次産業・第二次産業・第三次産業それぞれに従業者数と工場を除く非住宅建物の延床面積の関係を示す。いずれの産業でも従業者数が増加するに伴い非住宅建物床面積は増加する関係が観察されることから、従業者数の一次関数で表現されると想定して最小二乗法により関係式を求めたところ、従業者数1万人あたりの床面積増分は、第一次産業では0.48 km<sup>2</sup>、製造業を除く第二次産業では0.13 km<sup>2</sup>、運輸業を除く第三次産業では0.57 km<sup>2</sup>と推計された。しかし、世帯人口と住宅床面積との関係とは異なり、強い直線関係が得られない産業もある。そこで、世帯人口と住宅床面積の分析と同様に、従業者数をもとに複数の区分に層別してそれぞれの関係式を検討した。

第一次産業については、農業算出額のうち畜産の占める割合が高い、もしくは極端に低い都道府県が直線から大きく外れる傾向を示しており、具体的には従業者数の多い順に北海道、鹿児島県、長野県、宮崎県、岩手県、群馬県、栃木県、富山県、奈良県が該当する。これらを除いたうえで、従業者数4千人を境界値として層別分類し、それぞれの集団に対して関係式を求めることとした。第二次産業については、従業者数3万5千人以下と3万5千人～10万人、10万人以上に区分して関係式を検討したが、いずれも産業全体の傾向と大きくは異なっていないことがわかった。第三次産業については、人口分布の偏りが大きい東京都、北海道、千葉県、兵庫県、福岡県が外れ値となっており、これらを外れ値としたうえで、従業者数15万人以下と15万人～50万人、50万人以上に区分して関係式を検討したところ、いずれも全体の傾向と近似していることが確認できた。

このように求めた世帯人口・従業者数に基づく床面積の推計式を表4.1.4にまとめる。

#### 4. 3. 気候変動の影響も考慮した地域の再生可能エネルギーポテンシャルの評価

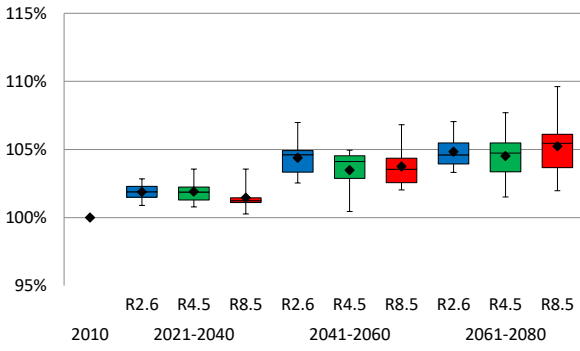
気候変動を考慮した地域の再生可能エネルギーポテンシャルの評価について、本研究ではまず福島県を対象に分析を行った。図4.1.18に、福島県全体での太陽光発電及び風力発電の評価結果を示す。

図中の分布は、対象とした気候モデルのRCP別の結果分布のパーセンタイル及び平均である。分析に当たっては、近年の太陽光発電設備の効率向上が進んでいることを踏まえ、気候変動のみの寄与を分析するために発電効率を現在の水準（18.5%）に固定した場合（効率固定ケース）と、2050年に向けて発電効率が40%まで増加していく場合（効率向上ケース）の2ケースで検討を行った。

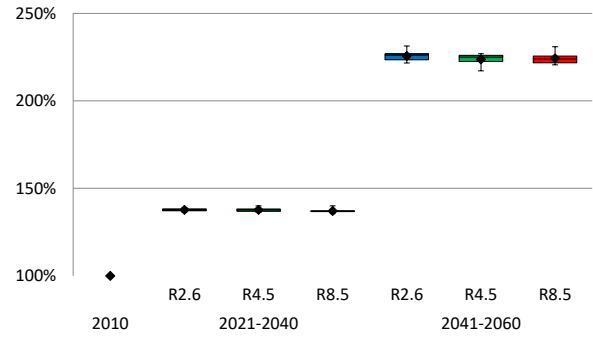
太陽光発電に着目すると、固定ケースではいずれのRCP・気候モデルも将来の増加傾向を示していることがわかる。季節別に見た場合には、夏季や冬季の増加率が比較的高くなる。効率向上ケースでは、固定ケースと比較して気候変動の影響に加えて効率向上の効果が加わり、太陽光発電量は大幅に増加する。これらより、将来の気候変動により太陽光発電は増加する方向に向かうとともに、効率向上によりさらに発電量が大きくなりうる可能性が高く、将来においても太陽光発電は重要な再生可能エネルギー源であるとともに、システム更新のタイミングで随時最新の太陽光発電設備を導入していくことが肝要であることが示された。

風力発電は、気候モデルにより違いはあるが、年間で見た場合には総じて発電量の減少傾向が見られることがわかる。季節別に見た場合には、冬季における現象が顕著である。RCP間の違いを見ると、気候モデルによっては増加を予測するものもあるが、全体としてRCP2.6とRCP8.5の結果がやや低くなるもののその差はそれほど大きくない。

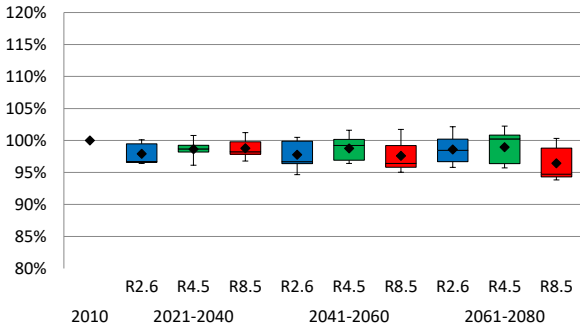
つぎに、同様の分析を日本全体を対象に行った結果を図4.1.19に示す。なお、長期的な傾向の把握のために2081年-2100年の平均の結果を示すとともに、太陽光発電については気候変動のみの寄与を分析する



(a) 太陽光発電（効率固定ケース）

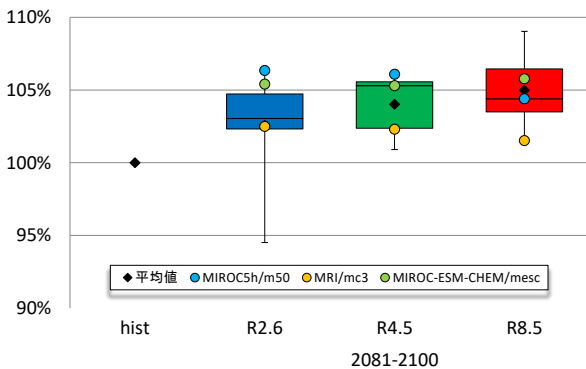


(b) 太陽光発電（効率向上ケース）

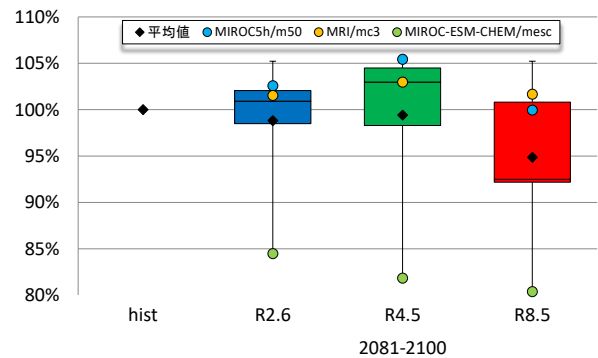


(c) 風力発電

図4.1.18 気候変動に伴う再生可能エネルギーの年間出力の変化（福島県全域）



(a) 太陽光発電（効率固定ケース）



(b) 風力発電

図4.1.19 気候変動に伴う再生可能エネルギーの年間出力の変化（日本全体）

観点から効率固定ケースのみとする。

太陽光発電については、将来の発電量は全体的に増加傾向を示すとともに、季節別には冬季の増加率が高いことがわかる。いっぽう風力発電量は総じて減少傾向にあり、気候モデルによって増加を示す場合もあるものの、MIROC-ESM-CHEMにおいては他のGCMと比較して発電量の減少が顕著に表れるなど、気候モデル間のばらつきが大きい結果となった。なお、太陽光発電と風力発電のいずれでも、RCPごとには一般的な傾向は見られない。

これらの結果より、将来の気候変動により太陽光発電は増加する方向にあり、将来の効率向上も勘案するとさらに発電量は大きくなりうる可能性が高く、将来においても重要な再生可能エネルギー源である。いっぽう、風力発電は気候変動が発電量へのリスクとなる可能性が示唆された。

#### 4. 4. 多地域電源計画モデルを用いた系統電力の排出係数の評価

メタアナリシスに基づく再生可能エネルギーへの支払い意思額（WTP）の推定にあたり、本研究では

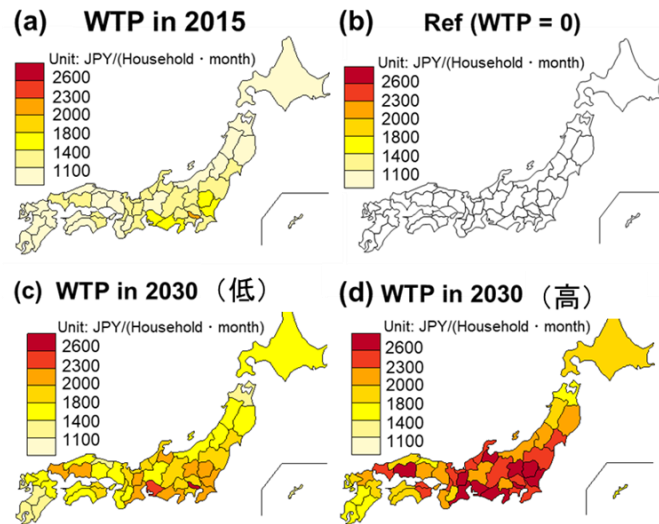


図4.1.20 都道府県別の再生可能エネルギーへの支払い意思額（WTP）中央値の推定結果

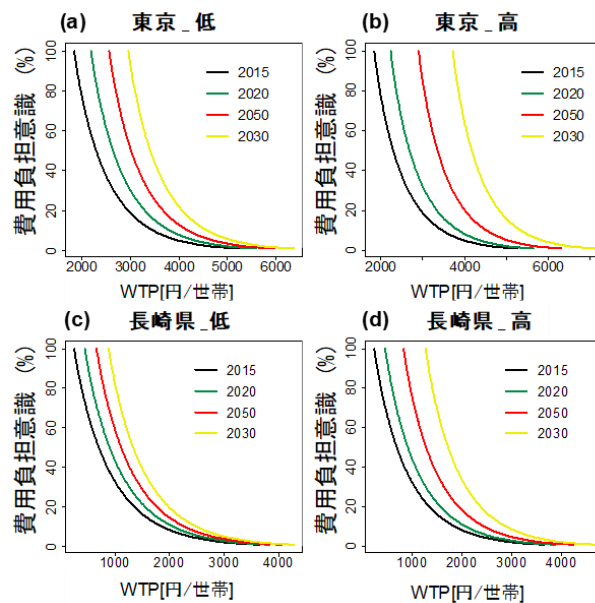


図4.1.21 賛成率曲線の推定結果（東京都及び長崎県）

将来の経済の見通しについて、現在の潜在成長率が将来も継続するとした低成長ケースとアベノミクスなどにより経済再生が進む高成長ケースの2ケースを設定した。

都道府県別に現在及び将来のWTPの中間値を推定した結果を図4.1.20に示す。都道府県別のWTPの中間値は、2015年には479～2,288円/（月・世帯）と推定された。また、WTPの中央値は経済状況に影響され、東京や愛知等の一人当たりの収入が高い地域では、費用負担許容額も高い傾向が見られる。2030年のWTPは、想定した経済の見通しにより異なり、低成長ケースでは1,106-3,604円/（月・世帯）であるが、高成長ケースでは1,521-4,482円/（月・世帯）まで増加することがわかった。

つぎに、都道府県別の賛成率曲線の推定結果について、図4.1.21に東京都と長崎県を例として示す。全体的には、金額が増加するにつれて、支払い意思を示す割合（費用負担意識、賛成率）は低下する。また、同じ賛成率でも収入の水準によってWTPは異なり、平均収入では長崎県と比較して東京都が高いことを反映して、同じ賛成率でも支払い意志額は長崎県よりも東京都のほうが高額となるほか、将来の経済成長によって、賛成率曲線は2030年にかけて徐々に右側（よりWTPが高額となる方向）に移動することがわかる。

これらWTPの推定結果を踏まえ、多地域電源計画モデルを用いて将来の再生可能エネルギー導入量と



電力会社の費用負担の分析を行った。将来の電力需要を想定するにあたっては、共通社会経済経路（Shared Socioeconomic Pathways、SSPs）を用いることとした。SSPsでは社会経済の多様な発展の可能性を緩和と適応の困難度で5種類に区分しているが、本研究では、持続可能な経済発展を目指すSSP1と緩和策と適応策の困難度が高い地域分断的なシナリオであるSSP3に、それらの中間である中庸的なシナリオであるSSP2を加えた3シナリオに、WTPの影響を考慮せずに将来の電源構成を検討する参照シナリオ（Refシナリオ）を加えた4つの分析を行った。なお、将来の原子力発電については、2030年までは日本の約束草案に示されたエネルギーミックスに沿うこととし、以降2050年までは特定の上限は課さず、モデルにより内生的に求めることとしている。

図4.1.22に、CO<sub>2</sub>排出量に制約を課さず、WTPの影響のみを考慮した場合のシナリオ別2050年の電源構成を示す。参照シナリオでは、原子力発電と石炭火力がベースロードを、ミドルロードとピークロードは石炭火力と天然ガス火力、揚水式水力がそれぞれ供給し、太陽光発電と風力発電は導入されない。いっぽう、WTPの分析結果をモデルに組み込んで分析すると、CO<sub>2</sub>排出量に制約を課さずとも太陽光発電と風力発電の導入量が増加し、原子力発電や火力発電（石炭火力、石油火力、天然ガス火力）の発電量

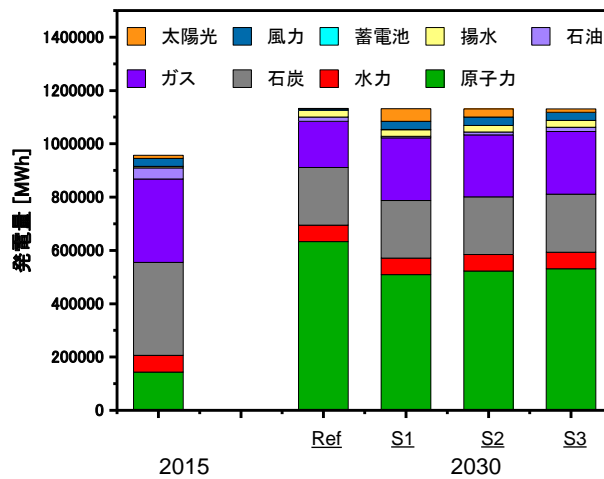


図4.1.22 シナリオ別2050年の電源構成（全国大）

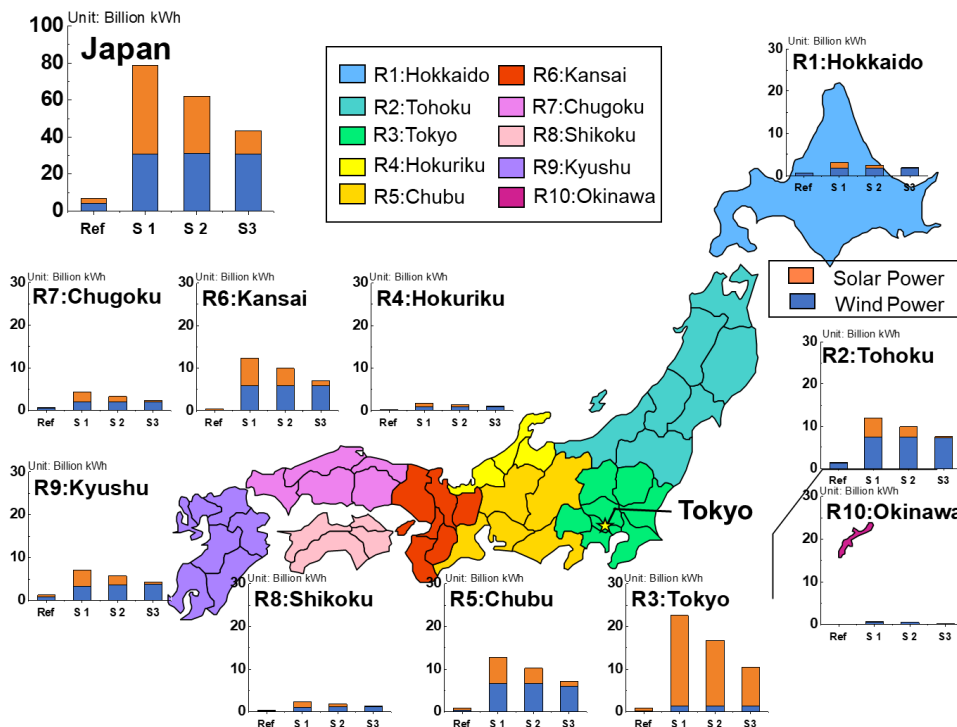


図4.1.23 地域別・シナリオ別の再生可能エネルギー導入量



は減少する。再生可能エネルギーの導入量をシナリオ別に比較すると、WTPを考慮することによって日本全体の再生可能エネルギー導入量はSS3では43 GW、SSP1では78 GWと、それぞれ参照シナリオの6倍と11倍に増加する。地域別の違いに着目すると、図4.1.23に示すように東京地域での導入量増加が最も高い。これは、東京地域での一人あたり収入の水準が他地域と比較して高いことに加え、人口が集中していることもあり、再生可能エネルギー導入費用に対する需要者の負担額が大きいためである。

このように再生可能エネルギーの導入が進むことにより電力部門でのCO<sub>2</sub>排出量も減少し、SSP1では2013年比23%減、SSP2では21%減、SSP3でも19%減となるが、いずれのシナリオでもわが国の掲げる2050年の削減目標である80%とは大きな乖離がある。これは、教育や普及啓発などの需要者の再生可能エネルギーに対する価値付けを高める政策は、一定程度の導入加速効果や導入に伴う電力価格上昇の抑制効果が期待されるが、電力部門での低炭素化を進めるためには、再生可能エネルギー技術のコスト低減や炭素税等の賦課などの他の政策手段と併せて実施することが不可欠であることを示唆している。

最後に、系統電力の排出係数に着目すると、地域ごとに再生可能エネルギー導入量が異なることを反映し、東京や中部では2015年と比較して大きく低下するが、東北や四国、沖縄はそれほど変化しないことがわかった。例えば、東京地域の2050年の系統電力排出係数は、2050年には0.033～0.034 g-C/MWh (SSPシナリオにより幅がある)と2015年(0.136 g-C/MWh)の75%まで低下するが、四国電力は2050年でも0.142～0.146 g-C/MWhであり、2015年(0.178 g-C/MWh)と比較しても約2割程度減に留まる。また、沖縄のように火力発電への依存度が高く、再生可能エネルギーポテンシャルが多地域と比較しても相対的に大きくない地域では、2015年の0.219 g-C/MWhから2050年には0.214～0.231 g-C/MWhと、現状と同程度、あるいはSSPシナリオによっては2050年の排出係数が増加することが明らかとなった。

#### 4. 5. 都市・地域の低炭素施策簡易分析ツールの開発

本研究で開発した簡易低炭素効果評価ツール（地域版低炭素ナビ）の分析結果について示す。地域版低炭素ナビを用いることで、2050年まで現状のまま維持されると想定した場合の温室効果ガス排出量削減水準や、立地する産業が外部へ移転すること等の社会経済変化に伴う温室効果ガス排出量の変化など、都市・地域が低炭素化を目指す際に、社会構造や経済活動の変化がどのように影響するかを分析することが可能である。地域版低炭素ナビを用いた分析の一例として、関東地方の地方自治体へ適用した結果について述べる。

将来のエネルギー消費等の推計では、社会構造や経済活動の想定が大きく影響する。対象とする自治体は、鉄鋼業及び石油化学産業の占める割合が大きいことから、現在の産業構造及び活動量が将来も一定と想定した現状維持シナリオと、鉄鋼業及び石油化学産業が徐々に減少して第三次産業へ転換する第三次産業拡大シナリオ、産業活動から教育や研究開発等へ完全に移行する産業構造転換シナリオの3つを設けた。

開発したツールでは、産業構造の見通しも含めて約 $4.2 \times 10^{16}$ 通りの組み合わせでのシミュレーション

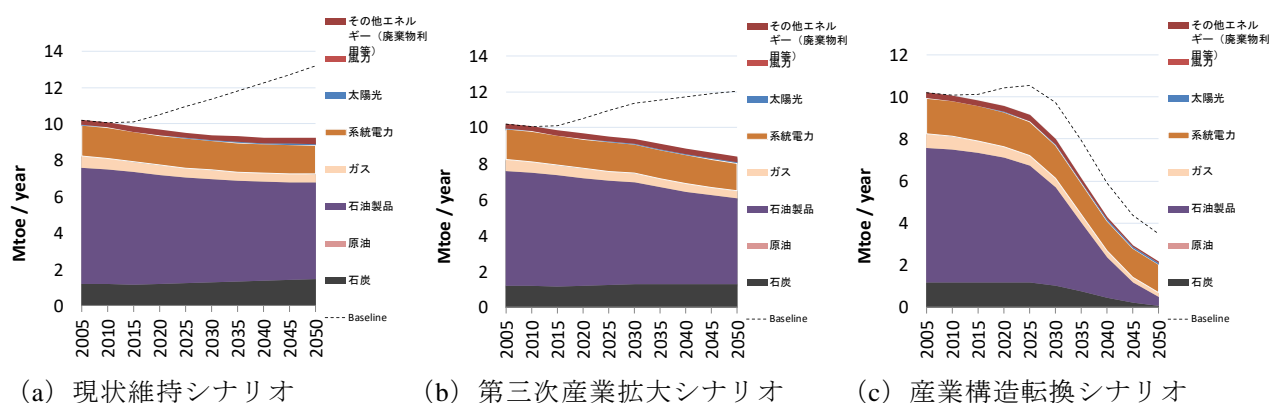


図4.1.24 地域版低炭素ナビによる将来の一次エネルギー消費量の分析結果  
(破線が無対策ケース、面が最大努力ケース)

が可能であるが、ここでは排出削減や気候変動対策を全く取らなかった場合（無対策ケース）と需給両面で低炭素社会への対策を強化したケース（最大努力ケース）の結果を示す。

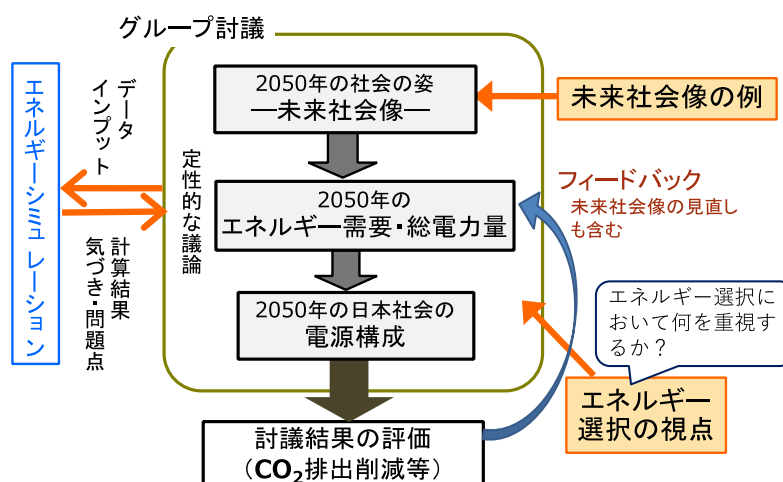
図4.1.24に、産業シナリオそれぞれの一次エネルギー消費量を比較して示す。産業を維持するシナリオはいずれでも、無対策ケースの一次エネルギー消費量は増加するが、産業構造転換を行う場合には大幅に減少し、温暖化対策を取らない場合でも2015年の10.3 Mtoeから2050年には3.5 Mtoeと1/3まで減少する。温暖化対策を講じて省エネルギー等が進むことで、いずれのシナリオでも一次エネルギー消費量は減少し、現状維持シナリオでも2015年水準よりも減少する。この傾向は温室効果ガス排出量も同様であり、無対策ケースでは現状維持シナリオと第三次産業拡大シナリオでCO<sub>2</sub>排出量は増加し、現状維持シナリオでは2015年比140%となる。温暖化対策を講じることで排出量は減少するが、産業が一定程度維持される場合には最大でも2005年比で30%減程度にとどまる。他方、産業構造転換シナリオでは同93.6%減と大幅削減が可能である。

ステークホルダーによる将来の低炭素シナリオ検討における開発したツールの有効性を確認するために、本研究では（一社）環境政策対話研究所が中心となって実施するエネルギーワークショップでエネルギーシミュレーションとして低炭素施策簡易分析ツールを用いてもらい、その参加者からのフィードバックを得ることとした。

エネルギーワークショップは、「30年後のエネルギー選択を考える」をテーマとし、目指すべき未来社会像、その未来社会におけるエネルギーの需要と供給の姿を参加者間で議論し、選択していくプログラムである。エネルギーシミュレーションは、定性的な議論で描かれた将来社会やエネルギー需給の姿を定量的に確認・俯瞰する手段として用いられる（図4.1.25）。本課題では、川崎市地球温暖化防止活動推進センターが主催し、（一社）環境政策対話研究所が共催する『低炭素都市づくり・エネルギーワークショップ in 川崎～30年後のカワサキをデザインする～』や次世代エネルギーワークショップ in 埼玉実行委員会が主催する『埼玉脱炭素社会作りエネルギーワークショップ』など、実施期間中に延べ9回のエネルギーワークショップに関わり、低炭素施策簡易分析ツールを用いたエネルギーシミュレーションを実施した（学生対象5回、若手社会人対象2回、都市作りワークショップ2回）。

低炭素施策簡易分析ツールに対してワークショップの参加者からは、定量的な分析を組み合わせることで議論に客観性を持たせることができるという意見があったいっぽう、選択肢それぞれの設定・前提条件がユーザも確認できる形になっているために設定された数値の妥当性について議論が行われてしまうという状況も観察された。また、ツールでは現状の知見や技術の見通しを元に将来の選択肢を設定しているために、議論そのものが現状のエネルギーシステムや発電構成、コストの考え方に基づいてしまうほか、将来の不確実性や技術的イノベーション、社会の大胆な変革の可能性を考慮できないなど、将来の低炭素シナリオの検討をツールが制約してしまうといった意見も得られた。

また、JNCCA担当者や地域の地球温暖化防止活動推進センター、環境NGO、地域の低炭素シナリオ研



究を行う大学・研究機関の研究者（合計15名）による議論においては、都市・地域を対象とする場合であっても原子力発電や石炭火力発電など将来の電源構成の検討や、電気自動車（EV）と再生可能エネルギーを組み合わせたシステムを導入した場合の効果など『都市・地域ならでは』の低炭素方策の組み入れなど、低炭素作成簡易分析ツールのモデル構造そのものへの指摘のほか、市民対話のツールとして活用するためには、温室効果ガスの観点だけではなく、地域のエネルギー自給率や地域経済への効果なども必要であるという指摘があった。加えて、さまざまな都市・地域で利用されていくためには、マニュアル整備や、ツールを用いた低炭素シナリオ検討を行う専門家集団の育成の重要性も指摘された。

これら有効性検証や議論を通じ、本研究で開発した低炭素施策簡易分析ツールは、都市・地域それぞれの低炭素シナリオ検討やステークホルダーの関与した議論を進めるに役立つことが確認できたが、広く利用されるための改善点もいくつか指摘され、今後の課題も明らかとなった。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究では、都市・地域全体の社会・経済条件とサービス需要を所与として低炭素方策や技術導入の効果を評価することができるマクロ型都市・地域の低炭素施策評価モデルと、サービス需要や地域資源ポテンシャルを三次メッシュ（約1km×1km）単位や都市計画等で定める中核拠点単位などで設定して地域資源の輸送等の観点も含めて低炭素方策や技術導入の効果を評価できる空間考慮型低炭素施策評価モデルを開発した。これらを活用することで、対象の都市・地域全体としての低炭素に向けた方向性の検討と都市構造も考慮した分析のいずれも実施することができるようになり、都道府県や市町村等の地方自治体や都市・地域において、国全体のシナリオとの整合性も含め、地域全体を俯瞰しながらも、地方自治体の政策や目指したい将来像・都市構造像などを考慮した分析を可能とできるようになった。

空間考慮型低炭素施策評価モデルを用いた分析の成果から、都市の集約化効果（コンパクトシティ化）によりエネルギー需要及び供給の効率化と追加的なCO<sub>2</sub>削減が期待できることを定量的に示し、都市・地域において低炭素化対策を効果的に推進するためには、土地利用の誘導等によるコンパクト化など、土地利用や都市構造変化も含めて検討することが重要であることを明らかにした。また、マクロ型都市・地域の低炭素施策評価モデルの分析結果と合わせて、都市・地域が単独で低炭素化を推進するには系統電力などの地域外の主体の低炭素化も重要となることを示し、多地域電源計画モデルを用いた分析により、わが国の電力部門から供給される電力の排出係数改善のための再生可能エネルギー導入シナリオの検討を行った。これらの分析から、都市・地域が効率的に低炭素化を進めるためには、地域内の資源のみを活用するのではなく、地域外の資源活用を視野に入れることが不可欠であることが明らかとなった。なお、サブテーマ4ではエネルギー需給の補完関係を考慮した広域圏を構築することで地域間の再生可能エネルギー資源の融通による地域内資源の活用と低炭素化が進むことを示し、地域内だけではなく特に近隣の地域との広域的な連携も含めて低炭素方策を考えることの重要性が示されたといえる。

気候変動による気温、湿度の上昇や日射量や風速などの自然条件変化により、エネルギー需要や供給源としての再生可能エネルギーポテンシャルが変化することを定量的に明らかにした。例えば電力需要については、本研究で地域や時間帯による差異など、多様な要因を考慮することで、わが国における気温感応度の地域的差異、時間的差異、および気温以外の影響要因の影響程度を把握することに成功し、得られた気温感応度関数をシンプルで活用しやすい関数として提供することができた。これを用いることで、地域特性に応じた気候変動も考慮した将来の需要評価が可能となった。また、再生可能エネルギーについては、将来の気候変動を考慮して分析した結果、太陽光発電については将来の発電量は全体的に増加傾向を示し、将来においても重要な再生可能エネルギー源であるいっぽう、風力発電は減少する可能性が高く、気候変動が発電量へのリスクとなる可能性があることを明らかにした。これらのことから、低炭素化とレジリエンス化を実現するためのシナリオ構築には、エネルギー需要と供給両面で気候変動を考慮しておくことが重要であることが示唆されている。

このほか、本研究で明らかにした人口・従業者数からの床面積推計式、気候も考慮した電力需要推計式等の成果は、今後都市・地域を対象に地域特性を反映した低炭素・脱炭素シナリオを検討するに際し

ての基礎的な情報源として活用されることも期待されるものである。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

低炭素施策評価モデルを用いた分析では、都市・地域において低炭素化対策を効果的に推進するために土地利用の誘導等による都市の集約化効果（コンパクトシティ化）を考慮することが重要であることを定量的に示したが、これは第5次環境基本計画（平成30年4月17日閣議決定）の重点戦略である『地域資源を活用した持続可能な地域づくり』（重点戦略③）と『国土のストックとしての価値の向上』（重点戦略②）を進めることが都市や地域の低炭素化もより加速させることに大きく寄与しうることを示したものであり、環境政策の方向性を支持する根拠となりうるほか、今後さまざまな自治体を対象とした分析を積み上げていくことにより、証拠に基づく政策立案（Evidence Based Policy Making、EBPM）の観点も含めて環境政策へ貢献することが期待されるものである。

区域施策編では、対象とする区域の特性を踏まえて望ましい地域の将来像を構想し、提示することが推奨されているが、本研究で検討したCO<sub>2</sub>排出量の部門別構成に基づく地域の類型化を活用することで、他と比較した地域の特徴を検討したり、方策や取組の検討にあたっての参考を類似地域から得るなどが可能となる。また、これらの情報は地方自治体だけではなく住民等にとっても地域特性を把握することに役立ち、地方自治体にて幅広いステークホルダーが関与しての温暖化対策策定及び実施の助けとなりうる。

また、本研究ではエネルギー需要の面からディマンドレスポンスなどのICT技術の効果をシミュレーション的に分析する手法を開発した。スペインのバルセロナは、持続可能な都市作りに向けて都市内のデータを一元的に管理する情報プラットフォームの活用を試みており、同様の取組をわが国ではSociety 5.0として進めている。これらで収集されるデータと本研究で開発した手法を組み合わせることで、データに基づく需要制御とその効果を、より広範な都市・地域で検討し、政策へ反映させるための知見を積み重ねることが可能となると期待される。

また、モデル等をもとにExcelやWebの操作により簡易に自治体の長期の低炭素シナリオ分析を行うことができるツールとして開発した簡易低炭素効果評価ツール（地域版低炭素ナビ）では、地域の人口推移や経済成長等の見通しをもとに、需要側、供給側それぞれに想定した対策の導入量を選択することで、エネルギー需給やCO<sub>2</sub>排出量を評価、可視化できる。これは、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』とともに、地方自治体のニーズや政策立案キャパシティに合わせた適切な手法を提供することにより、地方自治体自らによる地域特性を考慮した低炭素シナリオの策定や実施の後押しすることができるものと考えられる。

以上に加え、これら成果は、複数の自治体の計画検討等の場へ提供することで低炭素社会に向けた自治体の計画作りや実施の後押しを行ったほか、IPCCの地域の気候情報分析に関する専門家会合（IPCC Expert Meeting on Assessing Climate Change Information for the Regions）での本研究課題の成果を含めた地域の低炭素シナリオについてのモデル分析の成果報告や、参画者それぞれが環境省や内閣府等の政府審議会等において委員として活動し、本研究を通じて得た知見をもとに議論へ貢献することなどを通じて、我が国及び国際的な環境政策への貢献を行っている。

## 6. 国際共同研究等の状況

低炭素施策評価モデルの開発と具体都市での適用については、アジア諸国のアジア太平洋統合評価モデル（AIM）モデルチームとともに、アジア地域の都市の低炭素シナリオ分析を実施しており、インドネシアのボゴール（Bogor）等での分析に本研究成果の一部を活用しているほか、AIM国際ワークショップ等での本研究の成果発表と議論を行い、特にアジアでの本研究成果を活用した都市・地域の低炭素シナリオ作りに向けた活動を進めている。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) K. OKA, W. MIZUTANI and S. ASHINA: Renewable Energy, 153, 249-260 (2020)  
“Climate change impacts on potential solar energy production: A study case in Fukushima, Japan”
- 2) S. MAKI, R. CHANDRAN, M. FUJII, T. FUJITA, Y. SHIRAIISHI, S. ASHINA and N. YABE: Journal of Cleaner Production, 233(1), 1425-1436. (2019)  
“Innovative information and communication technology (ICT) system for energy management of public utilities in a post-disaster region: Case study of a wastewater treatment plant in Fukushima”
- 3) 蛭田有希, L. GAO, 芦名秀一: 土木学会論文集G（環境）, 75, 17-27 (2019)  
「気温と湿度に対する消費電力の感応度— 一般送配電事業者ごとの毎時電力消費量に着目して—」
- 4) Y. DOU, T. TOGAWA, L. DONG, M. FUJII, S. OHNISHI, H. TANIKAWA and T. FUJITA: Resources, Conservation and Recycling, 128, 406-416 (2018)  
“Innovative planning and evaluation system for district heating using waste heat considering spatial configuration: A case in Fukushima, Japan”
- 5) Y. DOU, S. OHNISHI, M. FUJII, T. FUJITA, H. TANIKAWA and L. DONG: Journal of Cleaner Production, 170, 548-558 (2018)  
“Feasibility of developing heat exchange network between incineration facilities and industries in cities: Case of Tokyo Metropolitan Area”
- 6) Y. GENG, T. FUJITA, A. CHIU, H. DAI and H. HAO: Frontiers in Energy, 12, 3, 333-337 (2018)  
“Responding to the Paris Climate Agreement: global climate change mitigation efforts”
- 7) S. MAKI, S. ASHINA, M. FUJII, T. FUJITA, N. YABE, K. UCHIDA, G. GINTANG, R. BOER and R. CHANDRAN: Frontier in Energy, 12 (3), 426-439 (2018)  
“Employing electricity-consumption monitoring systems and integrative time-series analysis models: A case study in Bogor, Indonesia”
- 8) Y. DOU, K. OKUOKA, M. FUJII, H. TANIKAWA, T. FUJITA, T. TOGAWA and L. DONG: Frontiers in Energy, 12(3), 411-425 (2018)  
“Proliferation of district heating using local energy resources through strategic building-stock management: A case study in Fukushima, Japan”
- 9) S. ASHINA: Global Environmental Research, 21 (1&2), 11-21 (2017)  
“Transitions of Energy Systems and Technologies toward Achieving the Paris Agreement in Japan”
- 10) 芦名秀一, 井上剛, 中村智志, 石島清宏: 環境システム研究論文集, 45(6), II\_333-II\_341 (2017)  
「都市の集約化効果を加味した分散型エネルギーの低炭素効果分析手法開発と地方都市への適用」

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 芦名秀一: 計画行政, 42 (4), 15-20 (2019)  
「地域における炭素中立社会へのシナリオ作り」
- 2) 藤田壮: 季刊誌「AES News」2018冬号, 12, 2-3 (2018)  
「気候変動に備えるスマート社会システム・イノベーションへの期待」
- 3) S. ASHINA: Wuppertal Spezial, Realising long-term transitions towards low carbon societies : impulses from the 8th annual meeting of the International Research Network for Low Carbon Societies, 23-26 (2017)

“Energy Transitions in Japan – a historical perspective”

- 4) Y. DOU, K. OKUOKA, M. FUJII, H. TANIKAWA, T. FUJITA and T. TOGAWA: International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017 (ICMaSS 2017) (2017)  
“Diffusion of Low-carbon District Heating Systems Considering Urban Renewal Strategies: Case of Shinchi-Soma Region in Fukushima, Japan”
- 5) 藤田壮: 粉体技術, 9(12), 1009-1015 (2017)  
「これからのエネルギー技術 持続可能な未来に向けての新しい技術社会イノベーション」
- 6) T. FUJITA, H. DONG, M. KANADA: Revealing co-benefits of energy from environmental policies, Taylor & Francis, 149-153 (2017)  
“Urbanization and Climate Co-Benefits: Implementation of Win-win Interventions in Cities: Kawasaki Japan”

## (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) L. GAO, Y. HIRUTA and S. ASHINA: 43rd Annual IAEE International Conference, Paris, France (2021)  
“Impact assessment of willingness to pay on the installed and transmission capacities of renewable energy resources in Japan”  
(2020年開催予定として受理されたが、新型コロナウイルスの影響により1年延期となるもの)
- 2) Y. HIRUTA, L. GAO and S. ASHINA: 43rd Annual IAEE International Conference, Paris, France (2021)  
“Modeling the response of hourly electricity demand to climate conditions in Japan”  
(2020年開催予定として受理されたが、新型コロナウイルスの影響により1年延期となるもの)
- 3) T. FUJITA, S. ASHINA and K. GOMI: 5th NIES International Forum/5th International Forum on Sustainable Future in Asia, Yangon, Myanmar (2020)  
“Integrative Research for SDGs Future Cities and Regions”
- 4) L. GAO, Y. HIRUTA and S. ASHINA: 5th NIES International Forum/5th International Forum on Sustainable Future in Asia, Yangon, Myanmar (2020)  
“Toward a Low Carbon Society in Japan: Analysis of the Effects of the Willingness to Pay on Renewable Energy Penetration in Power Sector”
- 5) Y. HIRUTA, L. GAO and S. ASHINA: 5th NIES International Forum/5th International Forum on Sustainable Future in Asia, Yangon, Myanmar (2019)  
“How to Measure the Effectiveness of Compact City Policy on Electricity Consumption? -A Method to Assess the Impact of the Spatial Concentration of Households on Hourly Electricity Consumption-“
- 6) S. ASHINA: The 25th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan (2019)  
“Toward Building and Demonstrating a Regional Circular and Ecological Sphere”
- 7) L. GAO, Y. HIRUTA and S. ASHINA: The 12th IAMC Annual Meeting (Integrated Assessment Modeling Consortium), Tsukuba, Japan (2019)  
“Willingness to pay promoted renewable energy penetration in power sector to a low carbon society in Japan”
- 8) Y. HIRUTA, L. GAO and S. ASHINA: The 12th IAMC Annual Meeting (Integrated Assessment Modeling Consortium), Tsukuba, Japan (2019)  
“A method to assess the impact of the spatial concentration of households on hourly electricity consumption”
- 9) 藤田壮: 北海道大学第27回衛生工学シンポジウム, 札幌 (2019)  
「SDGsと地域循環共生の実現への産官学連携研究の展開」
- 10) S. ASHINA: International Research Network for Low Carbon Societies (LCS-RNet) 9th Meeting, Rome, Italy (2019)  
“Circular economy and GHG mitigation strategies from Japan: Building a Regional Circular and Ecological



Sphere to achieve a sustainable society”

- 11) 岡和孝, 芦名秀一, 水谷亘: d4PDFユーザ研究会合「d4PDFの現在と未来を考える」, つくば (2019)  
「気候変動が再生可能エネルギー発電ポテンシャルに及ぼす影響」
- 12) S. MAKI, K. GOMI, S. ASHINA, M. FUJII, T. FUJITA, S.B. NUGROHO, R. NAKANO, G. GINTANG, R. BOER and N. YABE: 14th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Dubrovnik, Croatia (2019)  
“Development Energy demand prediction model from questionnaire survey and smart monitoring by using Deep learning; Case study in Bogor city, Indonesia”
- 13) L. SUN, M. FUJII, S. MAKI, S. OHNISHI and Y. DOU: 14th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Dubrovnik, Croatia (2019)  
“Energy saving and environmental benefit of waste-to-energy transition in China”
- 14) 蛭田有希, L. GAO, 芦名秀一: 第46回環境システム研究論文発表会, 名古屋 (2018)  
「地域の気候特性が民生部門の電力消費に与える影響のマクロ的分析」
- 15) L. GAO, Y. HIRUTA and S. ASHINA: 第46回環境システム研究論文発表会, 名古屋, (2019)  
“Analysis of impacts of the willingness to pay on renewable energy penetration in power sector in Japan”
- 16) L. SUN, M. FUJII, Y. DOU, S. MAKI and T. FUJITA: ISIE 2019 Beijing - International Society for Industrial Ecology, Beijing, China (2019)  
“CO<sub>2</sub> emission characteristics and spatial distribution in mega cities-comparative study in China, Japan and South Korea”
- 17) L. SUN, M. FUJII and T. FUJITA: 2019 International Conference on Resource Sustainability-Cities (icRS Cities 2019), Adelaide, Australia (2019)  
“Circular economy practices of Tokyo Metropolis and its energy saving & environmental benefit effect”
- 18) Y. HIRUTA, L. GAO and S. ASHINA: The 42nd IAEE International Conference, Montréal, Canada (2019)  
“A regression model estimating the impact of natural, socio-economic regional characteristics on hourly electricity consumption in Japan”
- 19) L. GAO, Y. Hiruta and S. ASHINA: 42nd Annual IAEE International Conference, Montreal, Canada (2019)  
“Assessment of the impacts of willingness to pay on diffusion of renewable energy resources in Japan”
- 20) S. ASHINA: International Symposium on Eco City Bogor, Bogor, Indonesia (2019)  
“Role of Integrated Assessment Models for Designing Eco City”
- 21) 藤田壮: 第64回環境システムシンポジウム, 東京 (2019)  
「SDGsや地域循環共生の新たな命題に応える環境システム学研究への期待」
- 22) T. FUJITA: 4th International Forum on Sustainable Future in Asia/4th NIES International Forum, Hanoi, Vietnam (2019)  
“Integrative Research for Strategic Project Design toward Sustainable Development Goals in Asian Cities”
- 23) L. GAO, Y. HIRUTA and S. ASHINA: 2018 AGU Fall meeting, Washington D.C., U.S.A. (2018)  
“Towards a low carbon and sustainable society in Japan: Impacts of willingness to pay on renewable energy policy planning”
- 24) Y. Hiruta, L. GAO and S. ASHINA: 2018 AGU Fall meeting, Washington D.C., U.S.A. (2018)  
“Modeling the impact of regional climate on electricity demand in Japan”
- 25) S. ASHINA: The 24th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan (2018)  
“Research Activities toward Low Carbon City in Japan”
- 26) L. GAO, Y. HIRUTA and S. ASHINA: The 24th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan (2018)  
“Impacts of Public Acceptance and Willingness to Pay on Achieving Target of Renewable Energy Resources in Japan”
- 27) Y. HIRUTA, L. GAO and S. ASHINA: The 24th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan (2018)  
“The Impact of Regional Climate and Socio-economic Factors on the Variation of Hourly Electricity

- Demand in Japan: A Regression Analysis Using Multivariate Adaptive Regression Splines”
- 28) T. FUJITA: IIASA-UNU-NIES SDGs Research Workshop, Tsukuba, Japan (2018)  
“Research Project for Integrative Implementation Theories and Methodologies toward the Achievement of SDGs in Japan”
  - 29) T. FUJITA: Thailand-Japan Collaboration Seminar: Towards ASEAN Smart City Network Development, Bangkok, Thailand (2018)  
“Japan’s activity on Eco-Model Cities, Smart Community Projects and SDGs Future Cities”
  - 30) T. FUJITA: Thailand-Japan Collaboration Seminar: Towards ASEAN Smart City Network Development, Bangkok, Thailand (2018)  
“Japan’s activity on SDGs and smart city development”
  - 31) T. FUJITA: Environmental Management Center 25th Anniversary Symposium, Bangkok, Thailand (2018)  
“Integrative Environmental Research Challenge under Social Transition”
  - 32) T. FUJITA: Universitas 21 Early Career Researcher Workshop of Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China (2018)  
“Strategic Research Challenge under Climate Change Transition”
  - 33) T. FUJITA: 7th Low Carbon Asia Research Network (LoCARNet) Annual Meeting, Jakarta, Indonesia (2018)  
“SDGs and National Policies in Japan -Scientific models and Tools for SDGs Cities-“
  - 34) L. GAO, Y. HIRUTA and S. ASHINA: 第46回環境システム研究論文発表会, 名古屋 (2018)  
“Impacts of public acceptance and willingness to pay on achieving target of renewable energy resources in Japan”
  - 35) 蛭田有希, L. GAO, 芦名秀一: 第46回環境システム研究論文発表会, 名古屋 (2018)  
「地域の気候特性が民生部門の電力消費に与える影響のマクロ的分析」
  - 36) S. MAKI, R. CHANDRAN, M. FUJII, T. FUJITA, Y. SHIRAIISHI, S. ASHINA and N. YABE: The 13th SDEWES Conference Palermo 2018, Palermo, Italy (2018)  
“ICT Time-series Monitoring data Modeling to Estimate Electricity Consumption by Markov Switching model for Connecting Treatment Process Operation; Case Study of a Wastewater Treatment Plant in Fukushima”
  - 37) Y. DOU, M. FUJII, K. OKUOKA, H. TANIKAWA, T. FUJITA and S. MAKI: The 13th SDEWES Conference Palermo 2018, Palermo, Italy (2018)  
“Strategic Urban Renewal for Long-term Energy Saving in Cities: Case of Kitakyushu, Japan”
  - 38) T. FUJITA: The International Society for Industrial Ecology (ISIE) 6th Asia-Pacific conference, Qingdao, China (2018)  
“Research Challenge for the Urban and Industrial Symbiosis”
  - 39) Y. DOU, H. TANIKAWA, M. FUJII, K. OKUOKA and T. FUJITA: The International Society for Industrial Ecology 6th Asia-Pacific Conference, Qingdao, China (2018)  
“Strategic Built Environment Management Toward Stock-based Low Energy Cities: Case of Kitakyushu, Japan”
  - 40) S. ASHINA: IPCC Expert Meeting on Assessing Climate Information for the Regions, Trieste, Italy (2018)  
“Regional CC Responses Strategies (A+M) and Sustainable Development in Japan and Asia: Past Experience and Way Forward”
  - 41) S. ASHINA: The Training Programme on Climate Change for Bhutanese Policy Makers, Tsukuba, Japan (2018)  
“Sector Level Policies: Research on Designing Smart Cities towards Low Carbon Society”
  - 42) S. ASHINA: The 23rd AIM International Workshop, Tsukuba, Japan (2018)  
“Development and Application of Analytical Models for Designing Local LCS”

- 43) T. FUJITA, S. ASHINA, M. FUJII and K. GOMI: 3rd International Forum on Sustainable Future in Asia/3rd NIES International Forum, Kuala Lumpur, Malaysia (2018)  
“Integrative Monitoring and Modelling Research Challenge toward Social Transition under Climate Change”
- 44) S. MAKI, S. ASHINA, M. FUJII, T. FUJITA, N. YABE, K. UCHIDA, G. GINTANG and R. BOER: 3rd International Forum on Sustainable in Asia/3rd NIES International Forum, Kuala Lumpur, Malaysia (2018)  
“Energy-consumption monitoring system and integrative time-series analysis models - case study of green city demonstration project in Bogor, Indonesia –“
- 45) S. ASHINA and T. FUJITA: Low Carbon Asia Research Network (LoCARNet) 6th Annual Meeting, Bangkok, Thailand (2017)  
“Integration of Local Actions into National Development towards SDGs in Asia and the Role of Science and Technology”
- 46) Y. DOU, K. OKUOKA, M. FUJII, H. TANIKAWA, T. FUJITA and T. TOGAWA: International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017, Nagoya, Japan (2017)  
“Diffusion of Low-carbon District Heating Systems Considering Urban Renewal Strategies: Case of Shinchi-Soma Region in Fukushima, Japan”
- 47) S. ASHINA: International Research Network for Low Carbon Societies 9th Meeting, Coventry, UK. (2017)  
“Progress towards the energy access Sustainable Development Goal”
- 48) 芦名秀一, 佐藤哲二: 日本エネルギー学会第26回大会, 名古屋 (2017)  
「エネルギー需要マネジメントシミュレーションツールの開発と実測データでの効果検証」

### (3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) T. FUJITA: 環境システムイブニングセミナー (Environmental Systems Research Evening Seminar (ESRES)) “System Approach to Design Sustainable Future for the Society and Environment” (主催: 土木学会環境システム委員会, 2017年6月3日, 聴講者約30名)
- 2) 国立研究開発法人国立環境研究所夏の大公開 (2017年7月22日, 参加者約5,000名) にて成果紹介
- 3) 芦名秀一: Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2017 「Society 5.0実現による日本の脱炭素化」 (主催: 筑波大学, 2017年9月27日, つくば市)
- 4) 芦名秀一: 柏市の環境施策と2050低炭素ナビ「2050低炭素ナビ開発の経緯」 (主催: NPOかしわ環境ステーション, 2017年10月7日, 柏市, 聴講者約30名)
- 5) 藤田壮: 地球環境関西フォーラム都市環境部会シンポジウム「環境都市から、サステナブルシティへ ~健康と減災を含む新しいコ・ベネフィットの都市づくり~」 (主催: 地球環境関西フォーラム, 2017年11月29日, 聴講者約140名)
- 6) T. FUJITA and M. FUJII: 14thアジア・太平洋エコビジネスフォーラム “SDGs Future City Initiatives Toward Sustainable Revitalization” (主催: 川崎市, 2018年2月1日, 聴講者約100名)
- 7) 芦名秀一: 豊田市環境の保全を推進する協定協議会「脱炭素社会に向けた社会的・技術的対策のパラダイムシフト」 (主催: 豊田市, 2018年3月14日, 豊田市, 聴講者約40名)
- 8) 国立研究開発法人国立環境研究所夏の大公開 (2018年7月21日, 参加者約5,000名) にて成果紹介
- 9) 藤田壮: 第1回OECC橋本道夫記念シンポジウム「国立環境研究所におけるアジアの環境インフラ展開に関連する研究の取組」 (主催: 海外環境協力センター, 2018年5月18日, 東京, 聴講者約100名)
- 10) 芦名秀一: 平成30年度川崎市地域環境リーダー育成講座 (第21期) 「低炭素社会・脱炭素社会に向けた最新動向」 (主催: 川崎市, 2018年7月22日, 川崎市, 聴講者約20名)

- 11) 藤田壮: 第16回環境研究シンポジウム「福島での環境創生のスマート復興まちづくり研究」(主催: 環境研究機関連絡会, 2018年11月13日, 東京, 聴講者約120名)
- 12) 芦名秀一: 2050年の八幡東区の描き方を考えるフォーラム「都市の変容を考慮した脱炭素シナリオの描き方」(主催: 次世代システム研究会, 2018年11月10日, 北九州市, 聴講者約100名)
- 13) T. FUJITA: Tokyo University Fukushima Shinchi Workshop “Science Challenge through the Innovative Rebuilding in Shinchi, Fukushima” (主催: 福島県新地町・東京大学, 2018年11月19日, 聴講者約50名)
- 14) 藤田壮: 小国町おぐにの自然・暮らし・お財布(SDGs)のことを考えるフォーラム「地域の恵みを束ねる小国のSDGs未来まちづくり」(主催: 熊本県小国町, 2019年1月19日, 聴講者約40名)
- 15) 藤田壮: シンポジウム「資源循環から考える地域でのSDGsの実現-エコタウンから地域循環共生圏へ-」「エコタウンから地域循環共生圏、SDGsの未来にむけて」(主催: 環境省, 2019年2月13日, 聴講者約100名)
- 16) T. FUJITA: 15th Kawasaki Eco-Business Forum “Circular Economy and Green City Innovation” (主催: 川崎市, 2019年2月7日, 聴講者約100名)
- 17) 芦名秀一: 埼玉脱炭素社会作りエネルギーワークショップ「エネルギー・気候変動問題と地域との関わり合いについて」(主催: 次世代エネルギーワークショップ in 埼玉実行委員会, 2019年2月9日, さいたま市, 聴講者約40名)
- 18) 藤田壮: 福島再生・未来プロジェクトシンポジウム-福島への復興と未来に向けて-「スマート都市からの復興を通じた地方創生のまちづくりへ」(主催: 環境省・国立研究開発法人国立環境研究所, 2019年6月21日, 聴講者約200名)
- 19) 芦名秀一: 令和元年度川崎市地域環境リーダー育成講座(第22期)「脱炭素社会の最新動向」(主催: 川崎市, 2019年7月13日, 川崎市, 聴講者約20名)
- 20) 国立研究開発法人国立環境研究所夏の公開(2019年7月20日, 参加者約6,000名)にて成果紹介
- 21) 藤田壮: 熊本県小国町未来会議「小国スタイルのSDGsまちづくりから地域循環共生へ」(主催: 熊本県小国町, 2019年7月22日, 聴講者約30名)
- 22) 藤田壮: 岐阜県広域合同研修管理者職員研修「SDGs未来都市と地域循環共生からの地方創生に向けて」(主催: 岐阜県, 2019年9月26日, 聴講者約40名)
- 23) 藤田壮: 越谷市市職員対象SDGs勉強会「SDGsと循環共生へのとりくみ」(主催: 越谷市, 2019年10月11日, 聴講者約40名)
- 24) 藤田壮: 第8回ふくしま再生可能エネルギー産業フェアREIFリーフふくしま「福島への再生・未来に向けたスマート地域循環共生事業の展開に向けて」(主催: 福島県・公益財団法人福島県産業振興センター, 2019年10月30日, 聴講者約120名)
- 25) T. FUJITA: UNU SDGs Symposium “Research Challenge for Localization of SDGs into Cities and Regions: Pilot Study for Localities in Japan” (主催: 国連大学(UNU), 2019年11月1日, 聴講者約50名)
- 26) 藤田壮: 日本海沿岸地帯振興促進議員連・日本海沿岸地帯振興連盟特別講演会「日本海沿岸地帯におけるSDGs未来都市と地域循環共生からの発展の可能性」(主催: 日本海沿岸地帯振興促進議員連・日本海沿岸地帯振興連盟, 2019年11月12日, 聴講者約30名)
- 27) T. FUJITA: 16th Kawasaki Eco-Business Forum “Integrative Actions toward Sustainable Circular Ecological Cities and Regions” (主催: 川崎市, 2019年11月13日, 川崎市, 聴講者約100名)
- 28) 藤田壮: JSTサイエンスアゴラ国研協による科学技術の連携で目指すSDGs「SDGsがつくる未来都市-科学から社会への発信にむけて-」(主催: 国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)・国立研究開発法人協議会(国研協), 2019年11月15日, 聴講者約100名)
- 29) 藤田壮: 2019年度環境情報科学研究発表大会一般公開シンポジウム「地域資源と地域循環共生圏ー「地域循環共生学」の形成をめざしてー」(主催: 環境情報科学センター, 2019年11月27日, 聴講者約70名)

**(5) マスコミ等への公表・報道等**

特に記載すべき事項はない。

**(6) その他**

特に記載すべき事項はない。

**8. 引用文献**

- 1) 小見 康夫, 栗田 紀之: 日本建築学会計画系論文集, 75, 656,2459-2465 (2010)  
「長寿命化トレンドを考慮した建物残存率のシミュレーション」
- 2) M. AUFFHAMMER and E.T. MANSUR: Energy Economics, 46, 522–530 (2014)  
“Measuring climatic impacts on energy consumption: A review of the empirical literature”
- 3) M. AUFFHAMMER, P. BAYLIS, and C.H. HAUSMAN: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 114, 8, 1886–1891 (2017)  
“Climate change is projected to have severe impacts on the frequency and intensity of peak electricity demand across the United States”
- 4) L. WENZ, A. LEVERMANN, and M. AUFFHAMMER: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 201704339 (2017)  
“North–south polarization of European electricity consumption under future warming”
- 5) 電力広域的運営推進機関: 広域機関システム,  
[http://occtonet.occto.or.jp/public/dfw/RP11/OCCTO/SD/LOGIN\\_login#](http://occtonet.occto.or.jp/public/dfw/RP11/OCCTO/SD/LOGIN_login#) (2018)
- 6) 気象庁: 過去の気象データ, <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (2018)
- 7) 日本放送協会放送文化研究所: データブック・国民生活時間調査 (2015)
- 8) 東京都環境局, 三菱地所株式会社: 地域エネルギーマネジメントシステムの構築に係る実現可能性調査事業 調査報告書 (2012)

## II-2 低炭素な都市空間構築に向けた運輸旅客・民生家庭部門二酸化炭素排出量推計手法の開発

国立研究開発法人国立環境研究所

社会環境システム研究センター 環境政策研究室 松橋 啓介  
 地域環境影響評価研究室 有賀 敏典

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所

社会環境システム研究センター 環境政策研究室 石河 正寛・Chen He

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：21,060千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成29年度：7,020千円、平成30年度：7,020千円、令和元年度：7,020千円）

### [要旨]

パリ協定による脱炭素目標の実現のためには、都市や地域における土地利用や都市構造の再構築を含めた抜本的な対応を行うことが重要となる。本サブテーマでは、低炭素型地域構築に向けて、空間統計情報を活用し、人口減少・高齢化等の低炭素以外の地域固有の課題の解決も視野に入れて将来の土地利用と都市構造を定量的に評価する「低炭素型都市空間分析モデル」と、運輸旅客及び民生家庭部門を対象とする「エネルギー需要及び二酸化炭素排出量推計手法」を開発した。開発した手法を用いて、市町村別の自動車のCO<sub>2</sub>排出量について信頼性のある数値の整理と、家庭CO<sub>2</sub>調査データを用いた市町村別の民生家庭部門のCO<sub>2</sub>排出量推計手法の開発、全国市町村別の家庭からのCO<sub>2</sub>排出量の比較を行った。また、圏域人口に基づく地域類型手法の提案と自動車CO<sub>2</sub>排出原単位の算定および将来の人口減少を考慮した排出量の推計、メッシュ別の家庭CO<sub>2</sub>排出原単位の算定と将来排出量の推計を行うことで、メッシュ人口分布や建て方、世帯規模等の変化による排出量への影響を評価した。さらに、空き家を考慮した場合に、新設住宅の断熱性能向上施策の効果が限られること等を指摘した。

### [キーワード]

低炭素、都市構造、運輸、家庭、人口分布

### 1. はじめに

COP21で採択されたパリ協定にある「今世紀中に温室効果ガス的人為的排出と吸収をバランスさせる」という長期目標の実現には、制度・政策も含めたさらなる取り組みの強化が必要となっている。このような状況のもと、長期的に低炭素やそれを越えたゼロ排出量社会を実現させていくためには、国全体の取り組みとともに、都市や地域においても、地域特性に基づいて有効な温室効果ガス削減対策を同定し、それらを着実に実施していくことが肝要である。都市や地域における温室効果ガス削減においては、土地利用や都市構造そのものも含めた社会システムの変革も重要となる。

土地利用や都市構造を検討するうえでは、低炭素の観点だけではなく、人口減少や高齢化などの地域固有の課題も考慮することが肝要である。また、土地利用や都市構造の変化が影響する運輸旅客部門と民生家庭部門については、空間の変化を考慮したCO<sub>2</sub>排出量の評価を行う方法論が必要となる。

### 2. 研究開発目的

本サブテーマでは、空間統計情報を活用し、人口減少・高齢化等の課題も勘案して将来の土地利用と都市構造を定量的に評価する「低炭素型都市空間分析モデル」を開発する。また、運輸旅客及び民生家庭部門を対象にした「エネルギー需要及び二酸化炭素排出量推計手法」を開発する。これらを用いて、都市内の人口分布と、民生部門及び運輸部門を対象に将来像及び低炭素方策を検討し、提案することを研究開発の目的とする。



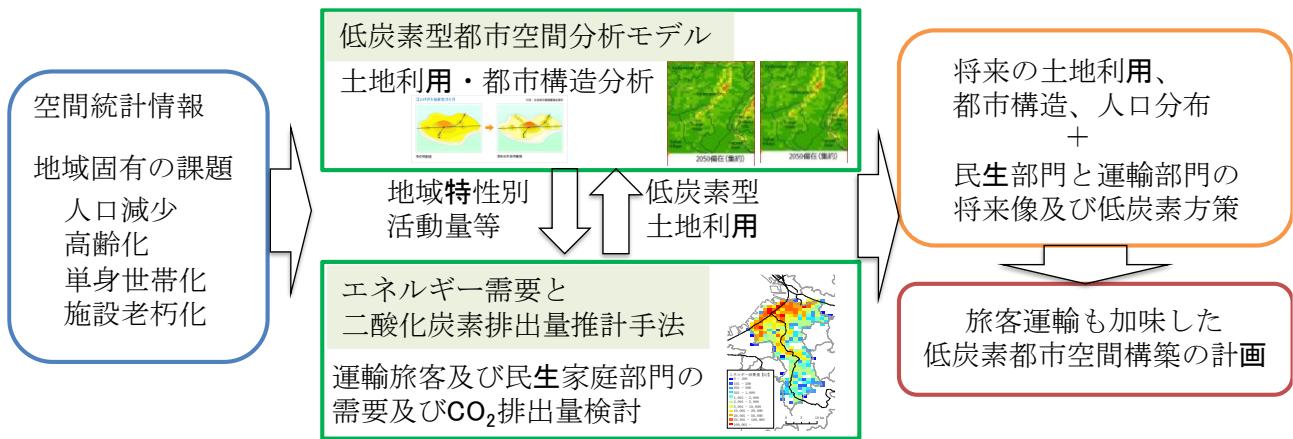


図3.2.1 低炭素な都市空間構築に向けた分析枠組みの概要

### 3. 研究開発方法

図3.2.1に、本サブテーマで取り組む低炭素な都市空間構築に向けた分析の全体像を示す。手法としては、空間統計情報を活用し、人口減少・高齢化等の低炭素以外の地域固有の課題の解決も視野に入れて将来の土地利用と都市構造を定量的に評価する「低炭素型都市空間分析モデル」と、運輸旅客及び民生家庭部門を対象とする「エネルギー需要及び二酸化炭素排出量推計手法」を開発し、それらを連携させることで低炭素な都市空間構築に向けた分析を行うものである。地域の課題には、人口減少、少子高齢化、世帯の単身化、施設の老朽化等が挙げられるが、本研究では全国の地域メッシュ人口と市町村別人口・世帯数推計を組み合わせて、さらに建物単位のデータと重ね合わせて整備した空間統計情報を用いることで、これら課題の現況把握と将来展望を考慮した分析を行うこととした。

#### (1) 低炭素型都市空間分析モデル

低炭素型都市空間分析モデルは、都市構造と自動車及び民生家庭のCO<sub>2</sub>排出量との関係性を分析することができ、圏域人口を用いた地域タイプ分類と、自動車CO<sub>2</sub>排出量と民生家庭CO<sub>2</sub>排出量それぞれに、将来の土地利用や都市構造の変化を考慮した将来推計を行うことができる。具体的には、自動車CO<sub>2</sub>排出量については、自動車CO<sub>2</sub>排出量との連関分析を踏まえた地域タイプ別の自動車CO<sub>2</sub>排出量と将来の圏域構造変化を考慮した将来の排出量推計を行うことができ、民生家庭のCO<sub>2</sub>排出量については、世帯構成や建て方等を考慮した人口分布シナリオを元にしたCO<sub>2</sub>排出量推計と、地域詳細な建物と人口の比較により現在から将来までの空き家の変化とそのCO<sub>2</sub>排出量への影響を評価することができる。

地域タイプは、施設立地と関連性の深い圏域人口に着目して設定し、それに基づいた都市構造類型化を行う。圏域人口は、図3.2.2に示すように中心の3次メッシュから3km四方や5km四方、7km四方とさまざまに設定した対象範囲に含まれる人口を指す。この圏域人口に基づいた都市構造の類型化フローを図3.2.3に示す。具体的には、まず中心のメッシュ人口が小売店・郵便局・一般診療所など基礎的なサービスが集まる人口規模とされる500人を満たすか否かで分類し、自転車圏である5km四方内でも圏域人口500人を満たさないものを過疎地域、徒歩圏から自転車圏である3～5km四方内で満たすものを集落と分

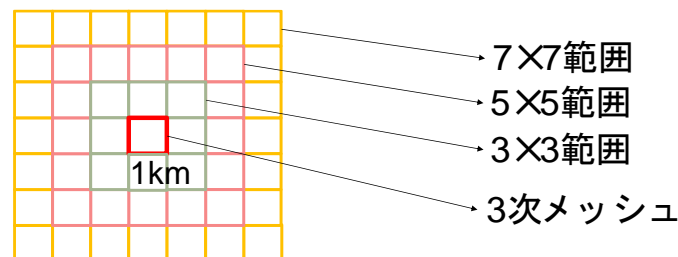


図3.2.2 圏域人口の範囲のイメージ

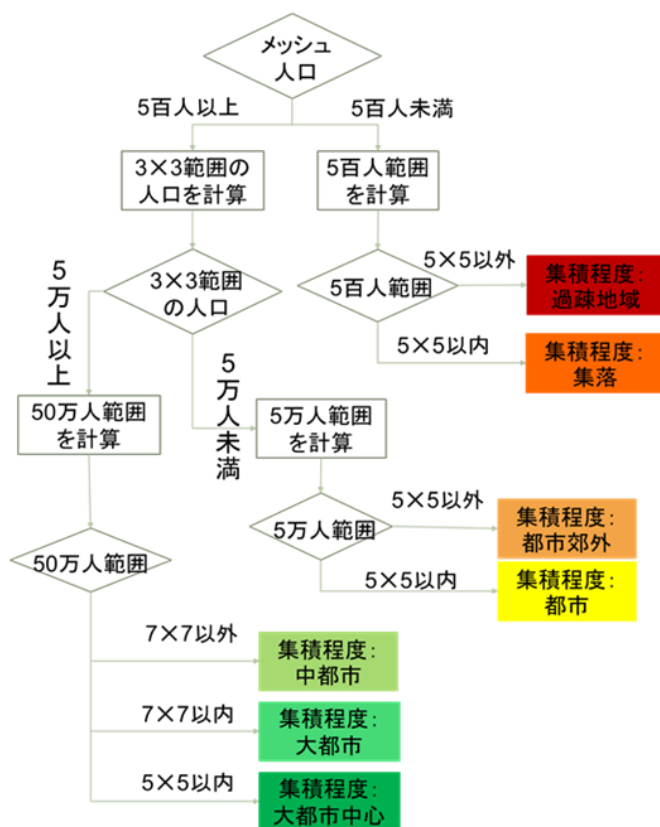


図3.2.3 地域タイプ類型化のフロー

類した。3km四方内で500人を超えるものは市の要件とされる5万人を満たすまでの距離で分類し、5km四方内で満たさないものを都市郊外、満たすものを都市とした。3km四方内で5万人を超えるものは、大都市と考えられる50万人を満たす距離で分類し、5km四方内で満たすものを大都市中心、5～7km四方内で満たすものを大都市、それ以外を中都市とした。

## (2) エネルギー需要及び二酸化炭素排出量推計手法

エネルギー需要及び二酸化炭素排出量推計手法は、都市構造や断熱性能別の住宅数等に基づきメッシュ別で地域別自動車CO<sub>2</sub>排出量や民生家庭の排出量を推計するものである。

地域別自動車CO<sub>2</sub>排出量の推計については、道路交通センサデータのサンプル数の観点から求める推計値の信頼性を考慮して評価する手法を開発し、2010年データに基づくメッシュ規模別自動車CO<sub>2</sub>排出量の推計を行った。本研究で開発した自動車CO<sub>2</sub>排出量推計のフローを図3.2.4に示す。

推計では、信頼性を保有車両数に対するサンプル台数が母比率検定で信頼度95%を満たすか否かで判定し、信頼性の低い市町村等では都道府県別推計値を適用することで全国の推計を行うこととした。具体的には、全国市町村別乗用車CO<sub>2</sub>排出量及び貨物車CO<sub>2</sub>排出量について、「2010年道路交通センサデータに基づく全国市町村別自動車CO<sub>2</sub>排出量推計結果」からそれぞれ信頼性ありのフラグのある市町村の排出量の値を採用し、対応する人口で除して一人あたり排出量を求めた。ただし、政令指定都市の区および東京特別区については、市全体・都区部全体の平均値を各区に適用した。信頼性なしと判定されたフラグのある市町村については、所属する都道府県の排出量から信頼性ありと判定された市町村の排出量の合計を減じた残りの値を排出量とし、これに信頼性なし市町村の人口の都道府県合計で除した値を各一人あたり排出量とした。つまり、信頼性なし市町村の一人あたり排出量は、同一都道府県内の市町村であれば同一の値を取るようになる。

これに加えて、将来のCO<sub>2</sub>排出量へ影響する要因として年齢別免許保有率・運転率の推移を把握し、将来走行量推計への適用可能性を検討した。

民生家庭の二酸化炭素排出量推計については、図3.2.5に示すフローの通り、環境省による家庭部門の

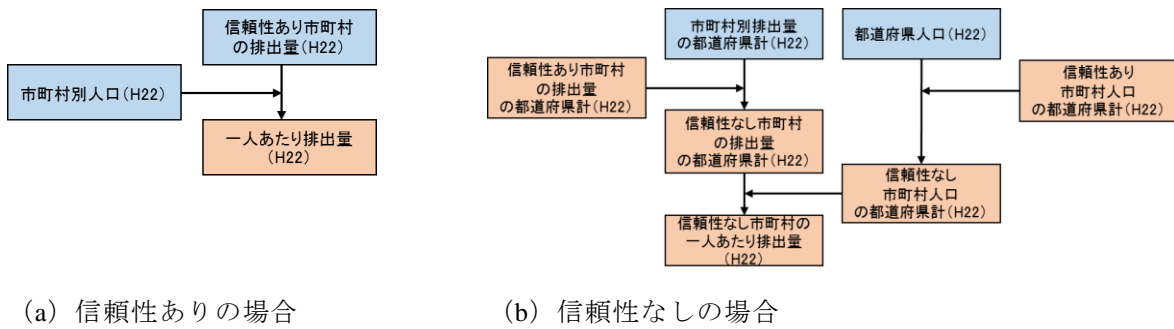


図3.2.4 自動車CO<sub>2</sub>排出量の推計フロー

CO<sub>2</sub>排出実態統計調査の全国試験調査（2014-2015年）の個票データを用いて、調査市町村の暖房デグリーデーを推計・追加し、建て方および世帯規模等との重回帰モデルを構築するとともに、市町村別の世帯あたり排出量を求めた。

また、地域別自動車CO<sub>2</sub>排出量や民生家庭のCO<sub>2</sub>排出量の推計結果をもとに、全国市町村別に家庭から

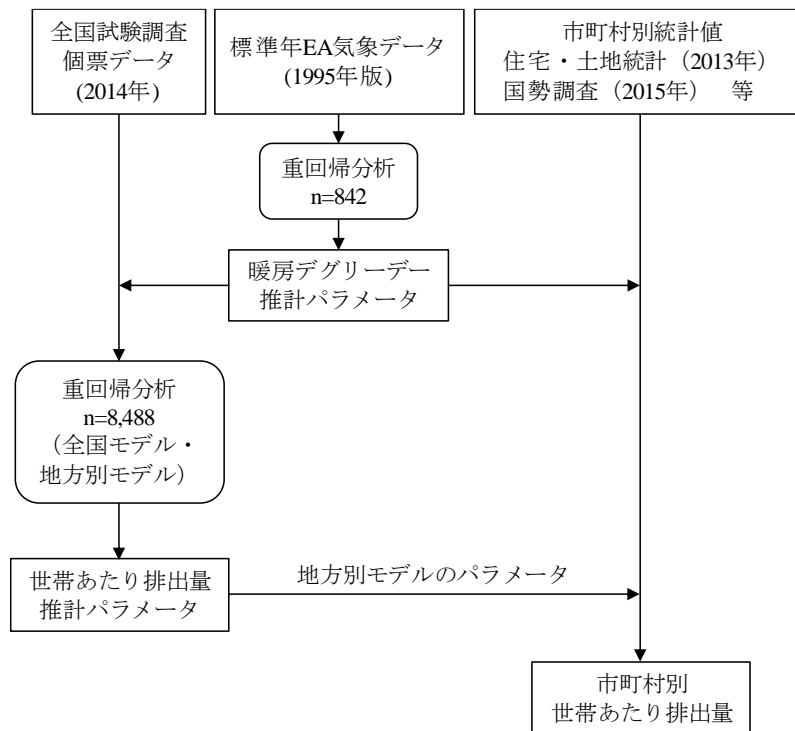


図3.2.5 市町村別家庭CO<sub>2</sub>排出量推計フロー

表3.2.1 10地方別家庭CO<sub>2</sub>排出量原単位

[t-CO <sub>2</sub> /世帯・年]	北海道	東北	関東甲信	北陸	東海	近畿	中国	四国	九州	沖縄
戸建 単身	5.17	3.14	2.29	3.56	2.29	2.39	3.15	2.83	2.71	2.47
戸建 2人以上	7.34	5.93	4.07	6.63	4.11	4.20	5.92	5.32	4.64	4.92
集合 単身	2.42	1.59	1.39	1.89	1.58	1.49	1.88	1.83	1.48	1.72
集合 2人以上	4.33	3.30	2.85	3.58	2.88	3.00	3.89	3.23	3.06	3.19

※e-stat[家庭からの二酸化炭素排出量の推計に係る実態調査 全国試験調査]  
各地域の表5-4-1からエネルギー種合計(電気、都市ガス、LPガス、灯油)

のCO<sub>2</sub>排出量の推計と比較考察を行った。具体的には、表3.2.1に示す建て方と世帯人員を考慮した10地方別排出原単位を用いた市町村別家庭CO<sub>2</sub>排出量と道路交通センサスの走行距離等とその信頼性を考慮した市町村別乗用車CO<sub>2</sub>排出量を組み合わせて全国の市区町村別の傾向を把握するとともに、都市構造の違い等の地域間の差異を踏まえた地域ごとの自動車CO<sub>2</sub>と民生家庭部門CO<sub>2</sub>の違いを考察した。

これら分析に加えて、地域固有の課題解決と低炭素化を両立するための方策を検討するために、住宅の建替と改修による民生部門エネルギー消費量の削減効果を評価した。具体的には、地域固有の課題として空き家を取り上げ、空き家対策が低炭素化方策としての住宅の高断熱化に及ぼす影響を評価することとして、空き家率の変化も加味した新設住宅の着工数推計と、断熱性能向上による世帯あたりエネルギー消費の削減量推計を行った。推計では、図3.2.6に示す建て方別地域別の断熱性能基準別のエネルギー消費量と、図3.2.7に示す地域別の新設住宅の基準適合率より求めた建て方別地域別の新設住宅のエネルギー消費原単位を用いた。分析では、新設住宅着工数に着目して、新設住宅着工数を近年と同様として余剰住宅は空き家あるいは滅失されるとした新設一定ケースと、住宅滅失数を近年と同様として空き家が増加しない範囲で不足する住宅を新設するとした新設抑制ケースを想定して将来の断熱改修需要等

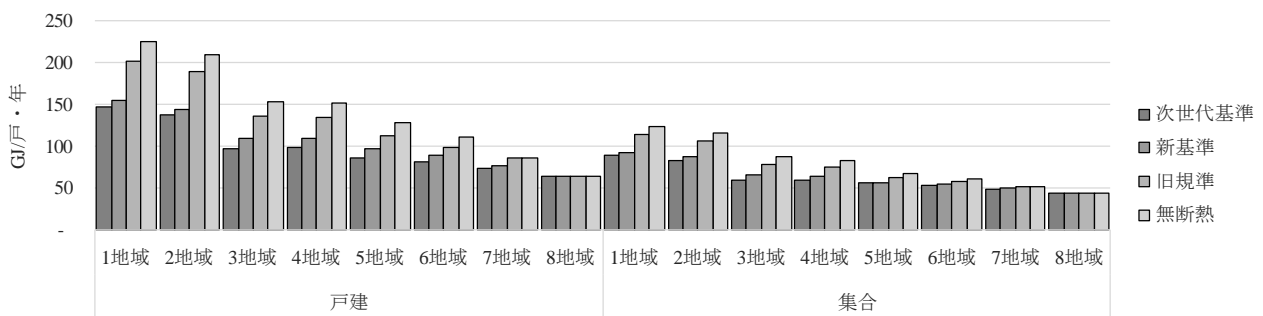


図3.2.6 断熱性能別エネルギー消費量の基準値

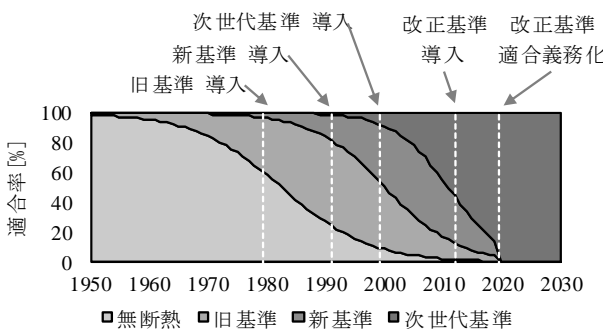


図3.2.7 断熱基準適合率の想定（全国戸建）

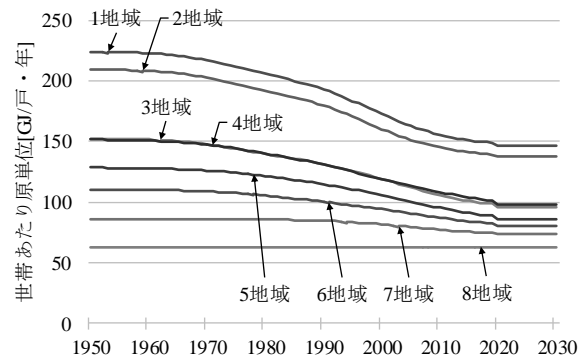


図3.2.8 新設エネルギー消費原単位（戸建）

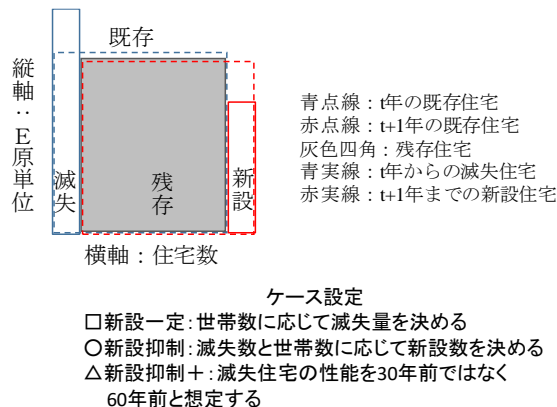


図3.2.9 既存、滅失、新設の住宅数と性能の設定

を推計するとともに、追加的に新設抑制ケースを基本に滅失住宅を30年前ではなく60年前の性能と想定した新設抑制+ケースも分析した。これら分析のケース設定の考え方を図3.2.9に示す。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 低炭素型都市空間分析モデルを用いた分析結果及び考察

低炭素型都市空間分析モデルを用いた分析では、都市構造と家庭CO<sub>2</sub>排出量および自動車CO<sub>2</sub>との関係性を明らかにすることを目的に、人口密度あるいは圏域人口を用いた地域タイプとそれぞれのCO<sub>2</sub>排出量との連関分析を実施し、将来の都市構造の変化によって生じると見込まれるCO<sub>2</sub>排出量変化の推計を試みた。

都市構造と家庭CO<sub>2</sub>排出量の関係性については、メッシュ別の人口等の属性と家庭CO<sub>2</sub>統計調査データとの連関分析を実施し、現況と将来の排出量を求めた。図4.2.1に、推計された説明変数の限界効果を示す。青が家庭、赤は家庭CO<sub>2</sub>調査に含まれるデータから用いた自動車に関する排出量であり、幅は、95%信頼区間を示す。

分析結果より、家庭CO<sub>2</sub>排出量へは世帯規模、平均年齢、延べ床面積が共通して影響していることがわかる。連関分析から明らかになった家庭排出量モデルの回帰式は、平均年齢、電力排出係数、年平均気温、世帯規模、延べ床面積、年合計日照時間、人口集中地区ダミー、平均標高、年間降水量の9説明変数で構成される。分析から得られた疑似決定係数 (pseudo R<sup>2</sup>) の数値から判断すると、これらの9変数で個別世帯の排出量の差異を5割ほど説明することができる。なお、世帯属性に係る平均年齢、世帯規模、延べ床面積の3変数は、一人あたり排出量に対していずれもべき関数的な影響を持ち、電力排出係数もべき関数的に影響すると判断された。回帰係数の符号は既存研究と概ね整合する結果となっており、年齢・電力排出係数・延べ床面積が高いあるいは大きいほど、気温・世帯規模・人口密度が低いあるいは小さいほど排出量が多くなる傾向となっている。日照時間が一人あたり排出量にマイナスの影響となるのは、日照時間が長い地域に居住している世帯は太陽光発電を導入している割合が多く、発電された電力を自家

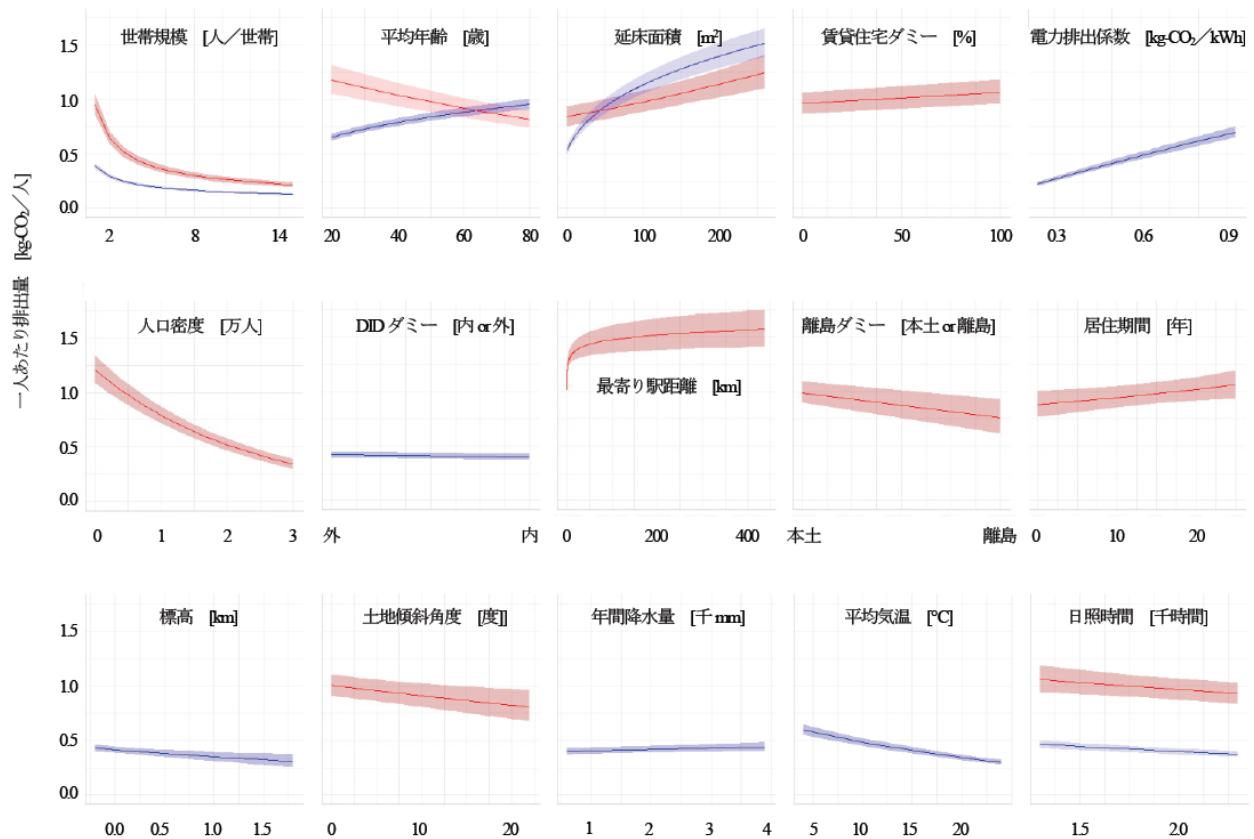


図4.2.1 説明変数に対する目的変数の応答量（青：家庭、赤：自動車。幅は95%信頼区間）



消費することで購入電力量が少ない傾向にあることを反映していると解釈できる。

自動車排出量モデルの回帰式は、世帯規模、人口密度、平均年齢、延床面積、最寄り駅距離、賃貸住宅ダミー、離島ダミー、日照時間、土地傾斜角度、居住期間の10変数で構成される。疑似決定係数の数値から判断すると、この10変数では個別世帯の排出量の差異を2割弱しか説明することができず、回帰式のさらなる精度向上には、走行距離や自動車保有率などのメッシュ統計データと組み合わせることが必要と考えられる。

構築したこれらの回帰式については、回帰式を用いて推計したメッシュ別の排出量の都道府県別集計値と、エネルギー関連統計から算出できる都道府県別の排出量を比較することで検証した。家庭排出量モデルについては、既往のモデルや家庭CO<sub>2</sub>統計調査の地方別集計結果を用いた推計よりも、本研究で開発した手法を用いることによって統計値に近い値が推計できることが確認できた。一方、自動車排出量モデルについては、家庭CO<sub>2</sub>統計調査の地方別集計結果を用いた推計よりは統計値に近いものの、道路交通センサスODデータを用いたメッシュ別推計モデルより説明力が劣る結果となった。これらの結果より、自動車CO<sub>2</sub>排出量については、家庭CO<sub>2</sub>統計調査よりもサンプル規模が大きい道路交通センサスODデータを用いた排出量やそれに基づく分析結果を用いることが望ましいことが示唆された。

将来の都市構造変化によって生じるCO<sub>2</sub>排出量の変化は、家庭排出量モデルと自動車排出量モデルにおける人口密度、世帯規模、DIDダミー、平均年齢の4変数を2050年の将来値に置換し、将来の3次メッシュ別の一人あたり排出量を推計することによって得られる。また、このような分析を通じて詳細な地域ごとの排出量の傾向を把握することで、重点的な対策が必要な地域を明らかにしたり、同様の地域特性を持つ地域を整理することで、地域特性に応じた対策の検討結果も活用して、全国大で対策を導入・実施した場合の効果を把握することができるようになると考えられる。

次に、都市構造と自動車CO<sub>2</sub>排出量の関係性を明らかにするために、人口密度によって分類される地域タイプと道路交通センサスODデータに基づく自動車CO<sub>2</sub>排出量との連関分析を実施し、将来の都市構造の変化によって生じると見込まれる自動車CO<sub>2</sub>排出量変化を推計した。関東地域を例に地域タイプに分類した結果を図4.2.2に、地域タイプ別の自動車CO<sub>2</sub>排出量の違いを図4.2.3に示す。

圏域人口に着目することにより、メッシュごとの人口規模で都市構造を把握する場合と異なり、たとえば図4.2.2中の黒丸で示す境界地域で周辺圏域を含む人口集積の違いをより明確に把握できるようになった。これにより、特に将来の人口減少による利便地域の縮小といった圏域構造の変化を明確に反映した将来の乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計が可能となったとともに、たとえば茨城県北や千葉県南のような過疎地域の顕著な増加が見込まれる地域において広域的な立地適正化を進める必要性が高いことなどを示すことができる。

将来の乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計として、想定した都市空間構築シナリオから得られた2050年のメッシュ人口推計結果をもとに将来の地域タイプを求めたものを図4.2.2の右側に示す。この結果より、茨城県

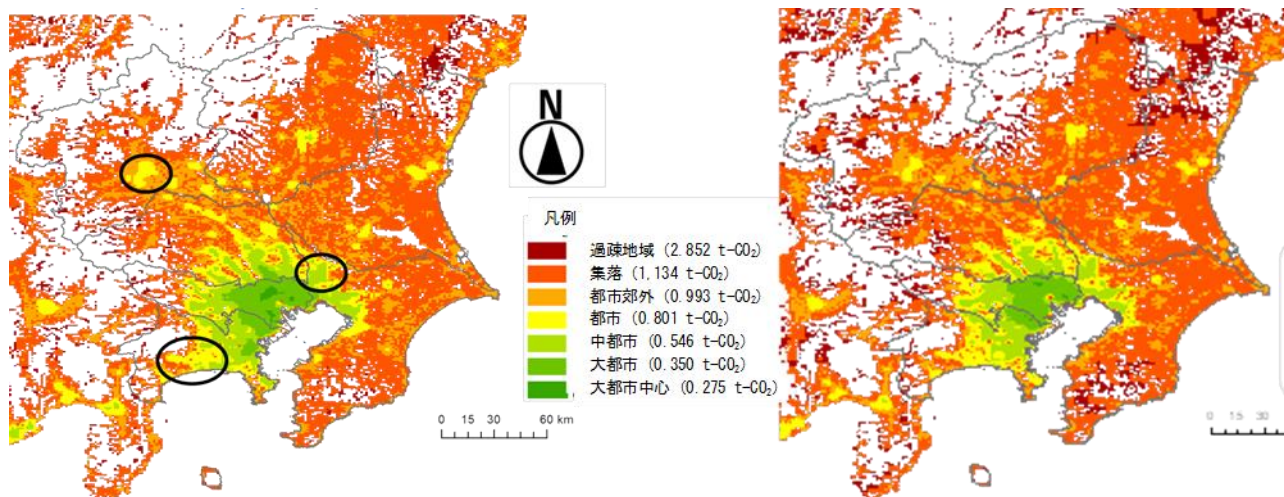


図4.2.2 地域タイプの分類と自動車CO<sub>2</sub>排出量 (左・2010年、右・2050年)

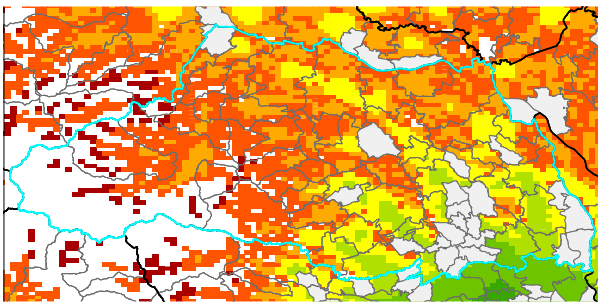


周辺人口集積度	過疎地域	集落	都市郊外	都市	中都市	大都市	大都市中心
	2.852	1.134	0.993	0.801	0.546	0.350	0.275
年間一人当たり 乗用車CO <sub>2</sub> 排出量 (t-CO <sub>2</sub> )	1.2 0.8 0.4 0.0 2.852						
集積程度別メッシュ数シェア	10.4%	60.0%	18.0%	7.4%	3.1%	1.0%	0.1%
集積程度別人口シェア	0.2%	7.7%	25.5%	25.7%	25.9%	13.7%	1.3%
平均人口密度 (人/km <sub>2</sub> )	20	20~5百	5百~2千	2千~5.5千	5.5千~1万	1万~2万	2万

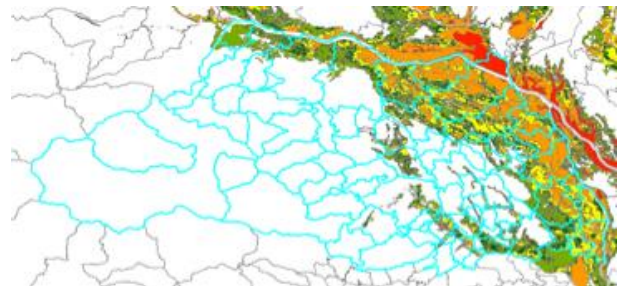
図4.2.3 地域タイプ別の自動車CO<sub>2</sub>排出量の推計結果

北部、千葉県南部および関東の山間部において過疎地域タイプが増えることや、北関東での都市タイプの数が減少することが明らかになった。また、これらの変化に伴って都市サービスも変化することなどが推察されるが、これもメッシュごとでなく地域タイプで捉えることの利点である。

このような地域タイプに基づく分析とその成果は、低炭素な都市空間の検討に役立つのみならず、気候変動の影響も考慮した低炭素型都市を検討する際にも役立てることが可能である。レジリエントな都市を構築していくうえでは、浸水、津波、土砂災害などの考慮が不可欠であり、低炭素に加え、気候変動影響も含めた災害回避も考慮した土地利用及び都市構造の将来シナリオの検討が重要である。これについて、本研究で開発した手法を活用して、都市空間分析と浸水、津波、土砂災害などの被害想定区域を重ね合わせた検討を行うことができるようになる。一例として、図4.2.4に、埼玉県を例に、同じ対象範囲での圏域人口と浸水想定を示す。浸水想定範囲と大都市や中都市、都市が重複しており、仮に浸水被害が生じた場合にはリスクとなることが示唆される。これについて、図4.2.5に、両者を重ね合わせて浸水想定人口を推計した結果を示す。埼玉県内の浸水想定は、面積ではそれほど大きくないが、人口で見ると半数以上が浸水被害を受ける可能性を有しており、将来の都市構造を検討するうえでは、浸水が

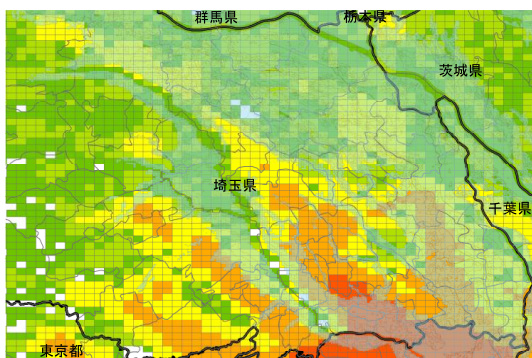


(a) 圏域人口の分析結果



(b) 浸水想定

図4.2.4 同じ地域での圏域人口と浸水想定



■ 浸水想定区域  
 ■ 大都市中心  
 ■ 大都市  
 ■ 中都市  
 ■ 都市  
 ■ 都市郊外  
 ■ 集落  
 ■ 過疎地域

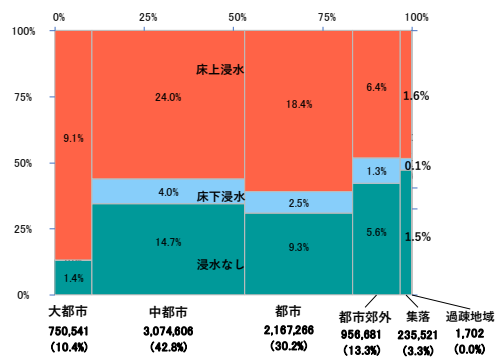


図4.2.5 圏域人口と浸水想定を重ね合わせによる浸水想定人口の推計

想定されていない地域への都市機能の移転や、既存の都市を低炭素型に転換する場合でも、浸水を想定した対策を同時に考慮、実施していくことが重要であることが示唆される。なお、1kmメッシュに浸水想定区域の一部がかかっている場合も全域を浸水想定区域としたため、実際より浸水人口がやや多く見積もられていることには留意が必要である。

## (2) エネルギー需要及び二酸化炭素排出量推計手法を用いた分析結果と考察

本節では、運輸旅客・民生家庭のエネルギー需要及び二酸化炭素排出量推計手法を用いた研究成果について述べる。

運輸旅客のCO<sub>2</sub>排出量推計では、全国市町村別乗用車CO<sub>2</sub>排出量及び貨物車CO<sub>2</sub>排出量について、「2010年道路交通センサスデータに基づく全国市町村別自動車CO<sub>2</sub>排出量推計結果」から信頼性を考慮して市町村の排出量と対応する人口で除した一人あたり排出量を求めた。これらにより得られた市区町村別自動車CO<sub>2</sub>排出量の結果を図4.2.6に示す。本サブテーマ研究チームを中心に、1980年から2005年までの6時点について市町村別自動車CO<sub>2</sub>排出量の推計を行ってきたが、推計の元データとしてきた全国道路・街路交通情勢調査（道路交通センサス）の方法が変更となり、2010年以降はサンプル数が従来の約6分の1に減少したために、従来の手法による排出量推計が困難となっていた。これに対して、今回の推計手法を用いることにより、都道府県別のCO<sub>2</sub>排出量を前提に、一部の市町村については信頼性を有し、かつ地域の特徴を反映した値が提供可能となった。

将来の乗用車CO<sub>2</sub>排出量の検討に向け、高齢化が将来走行量に与える影響を検討するために、道路交通センサスの個票を用いて平日の年齢別の運転者数を求め、年齢別の免許保有者数や人口と比較することにより年齢別免許保有率・運転率の推移を把握し、さらにその特徴を抽出した。

免許保有率と平日運転率の結果を図4.2.7に示す。免許保有率については、5歳階級別の最大値に着目すると男性は30～49歳で100%近いことに対して、女性は90%程度と10%ほどが免許を保有していないことが分かる。年齢が高くなるにつれて免許保有率は減少していくが、減少の程度は性別による違いが見られる。保有率が50%を切るのは、男性では調査年に関わらず80～84歳であるのに対し、女性は2005年の調査では60～64歳、2010年の調査では65～69歳と大きな差があることがわかる。このような性別の差がある理由としては、もともと免許を保有していない世代であったことや、75歳以上では免許返納が進められていることが考えられる。

人口あたりの平日運転率に着目すると、免許保有率とは異なる傾向が見られる。運転率が高いのは50

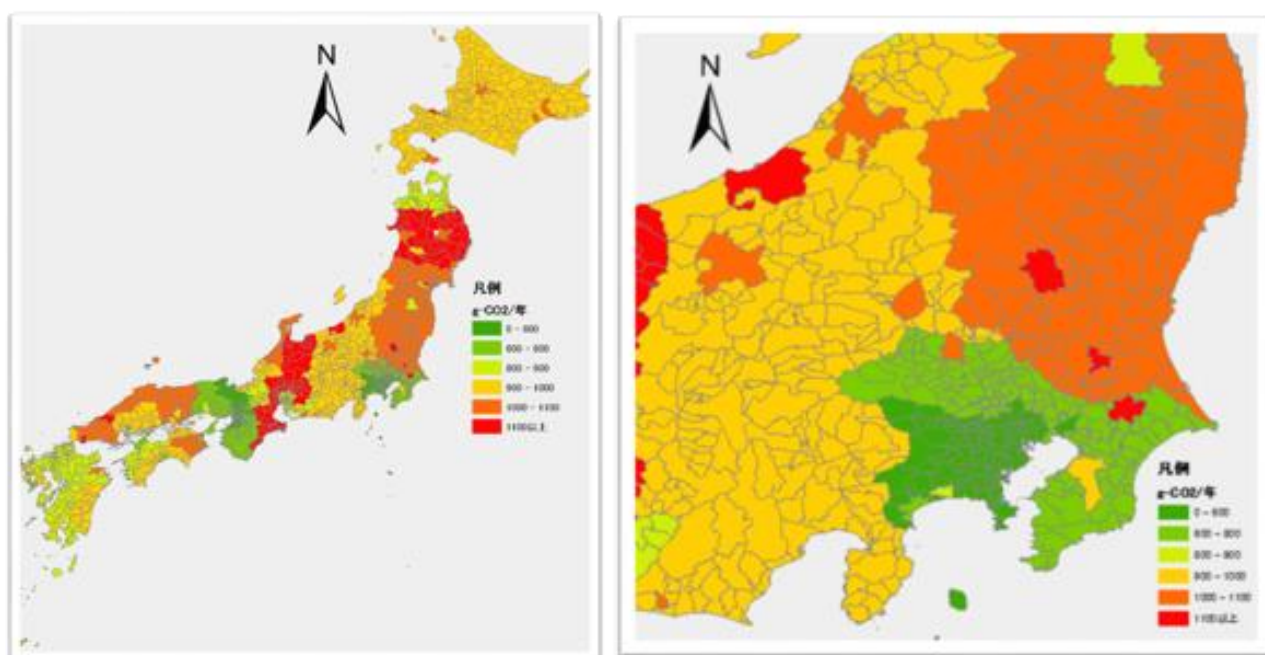


図4.2.6 市区町村別の年間一人あたり乗用車CO<sub>2</sub>排出量 (t-CO<sub>2</sub>/年)

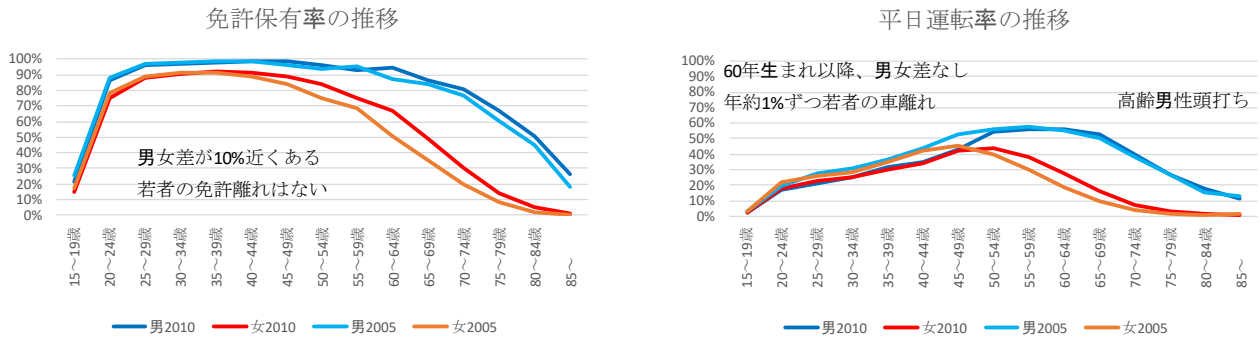


図4.2.7 性別年齢五歳階級別免許保有率と平日運転率の推移及びそれらの特徴

歳代、60歳代の男性であり、60%近くに達する。また、調査年の違いの影響については、男女ともに2005年調査と2010年調査との間で5歳分の高齢化が見られるいっぽう、65歳以上の男性の運転率はいずれも変わらない頭打ち傾向が観察されることがわかる。また、1960年生まれを境に若い世代では運転率に男女差がないが、それより上の世代では女性の運転率が男性と比較して40ポイント近く小さいことなど、世代と年代による運転文化の違いや変化が明らかとなった。

民生家庭部門でのCO<sub>2</sub>排出量推計については、環境省が実施する家庭CO<sub>2</sub>統計調査（家庭部門のCO<sub>2</sub>排出実態統計調査）のデータを活用して、各市町村の気候や居住形態の違いを反映した世帯あたり排出量を求める回帰モデルを構築し、全国市町村別の家庭部門CO<sub>2</sub>排出量を推計した。家庭CO<sub>2</sub>統計は、全国約1万3千世帯を対象にして、各世帯の燃料種別・用途別のエネルギー消費量・CO<sub>2</sub>排出量に加え、世帯や住宅の属性、各種エネルギー機器の保有・利用状況などの情報を併せて調査するものである。

本研究で開発した手法と他の手法によるCO<sub>2</sub>排出量推計との違いを確認するために、地球温暖化対策実行計画の策定マニュアルに基づく手法により求めたCO<sub>2</sub>排出量と家庭CO<sub>2</sub>統計調査の集計値との比較を行った。

図4.2.8は、地方公共団体の地球温暖化対策実行計画の策定マニュアルに基づく手法により求めたCO<sub>2</sub>排出量であり、地域レベルの家庭CO<sub>2</sub>排出量を推計する標準的な手法としている総務省統計局による「家計調査」を用いて求めた都道府県別排出量を世帯数に応じて市町村に按分するものである。なお、都道府県全体の排出量を世帯数で按分しているため、世帯数あたりの排出量で見た場合には都道府県単位で同じ値となる。図4.2.9は、家庭CO<sub>2</sub>統計調査の集計結果として公表されている10地方別3都市階級別の世帯あたり排出量である。この結果を参照することで、各地方の中での市町村間の違いを知ることができるが、10地方別の違いによる部分が大きいことがわかる。

本研究で開発した回帰モデルを用いて推計した市町村別世帯あたり年間CO<sub>2</sub>排出量を図4.2.10に示す。

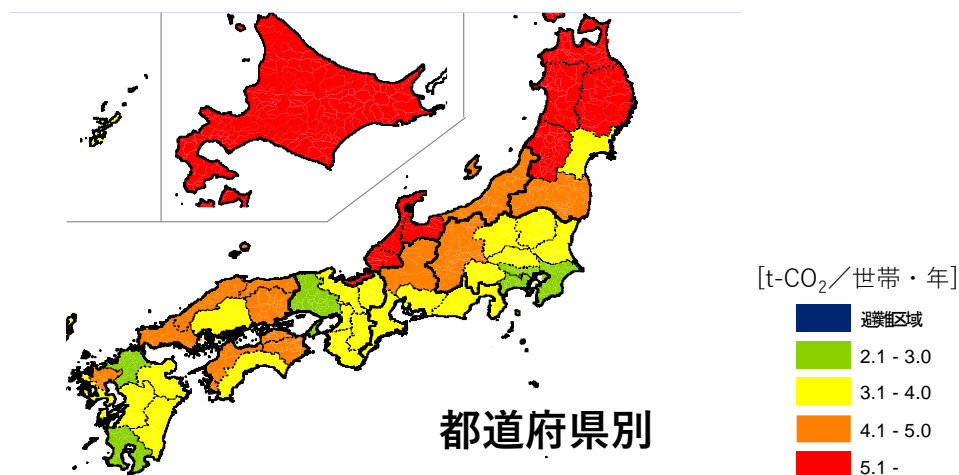


図4.2.8 策定マニュアルの標準的手法による家庭CO<sub>2</sub>排出量の推計値



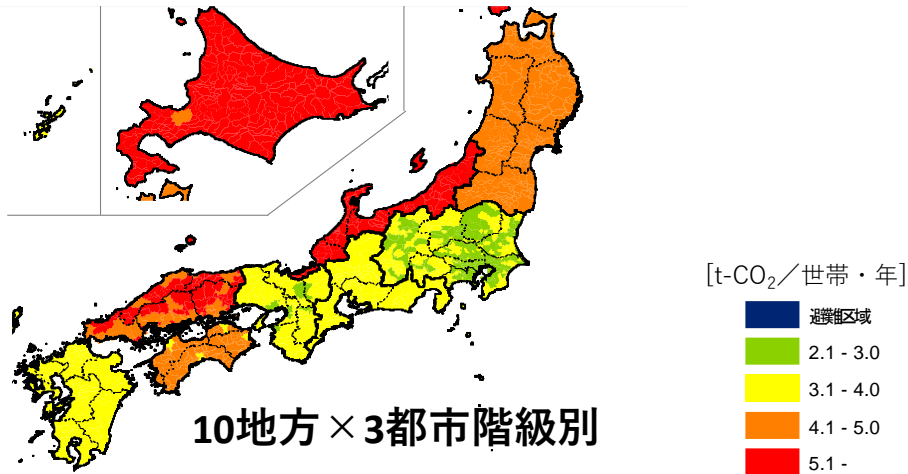


図4.2.9 家庭CO<sub>2</sub>統計における排出量の公表値

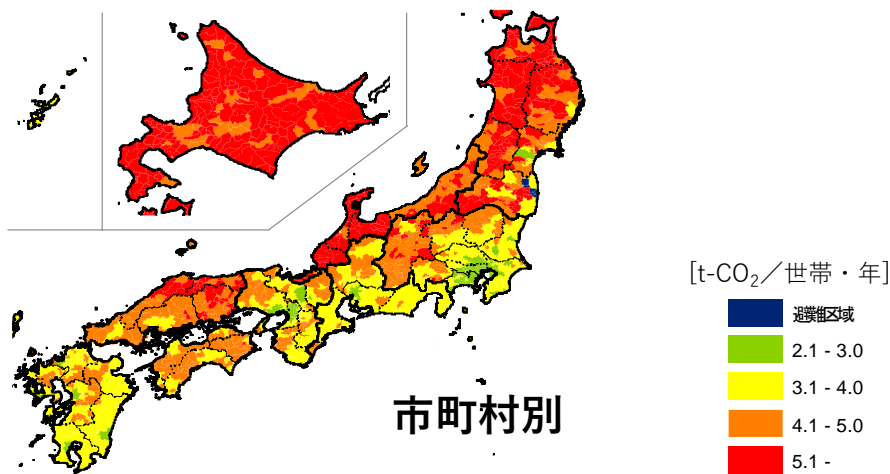


図4.2.10 本研究で開発した回帰モデルによる家庭CO<sub>2</sub>排出量の推計値

表4.2.1 家庭CO<sub>2</sub>排出量分析の回帰モデルの結果（全国モデル及び地方別モデル）

	全国	地方別モデル									
	モデル	北海道	東北	関東甲信	北陸	東海	近畿	中国	四国	九州	沖縄
サンプル数	8,306	756	819	1,470	725	920	987	716	657	763	493
自由度修正済み決定係数	0.539	0.468	0.531	0.475	0.511	0.480	0.504	0.508	0.448	0.481	0.519
世帯人数[人]	0.374 **	0.22 **	0.44 **	0.431 **	0.396 **	0.407 **	0.48 **	0.47 **	0.453 **	0.437 **	0.471 **
延床面積[百平米]	0.168 **	0.081 *	0.165 **	0.184 **	0.187 **	0.277 **	0.219 **	0.155 **	0.134 **	0.096 **	0.133 **
世帯主年齢[十歳]	0.131 **	0.091 **	0.146 **	0.153 **		0.155 **	0.169 **	0.143 **	0.197 **	0.154 **	0.158 **
世帯年収[百万円]	0.107 **	0.2 **	0.086 **	0.145 **	0.09 **	0.177 **	0.083 **	0.161 **	0.113 **	0.059 *	0.091 **
築年数[十年]		-0.06 +		0.061 **		0.065 *		0.141 **			
建て方ダミー[戸建=1]	0.099 **	0.3 **	0.085 **	0.154 **	0.1 *	0.062 *	0.089 **		0.13 **		0.186 **
所有関係ダミー[持家=1]	0.03 **				0.077 +					0.164 **	
窓断熱ダミー[有=1]	-0.02 +				0.049 +		-0.05 *	0.086 **			
太陽熱利用ダミー[有=1]	-0.02 *		-0.07 **	-0.04 +							
太陽光発電ダミー[有=1]	-0.09 **			-0.08 **		-0.11 **	-0.05 *	-0.13 **	-0.15 **	-0.11 **	
オール電化ダミー[有=1]	0.194 **	0.26 **	0.227 **	0.09 **	0.196 **		0.072 *	0.27 **	0.135 **	0.255 **	0.233 **
ガス種別ダミー[都ガス=1]	-0.02 *					-0.07 **	-0.16 **		-0.07 *	-0.08 **	
大都市ダミー[該当=1]								-0.06 *			
中都市ダミー[該当=1]										0.047 +	
電力排出係数[kg-CO <sub>2</sub> /kWh]	0.263 **				0.104 **						
暖房デグリーデー[千度日]	0.264 **	0.058 *	0.188 **	0.103 **						0.055 *	

有意水準：\*\* < .01, \* < .05, + < .10  
各地方の標準化係数上位3つに網掛け

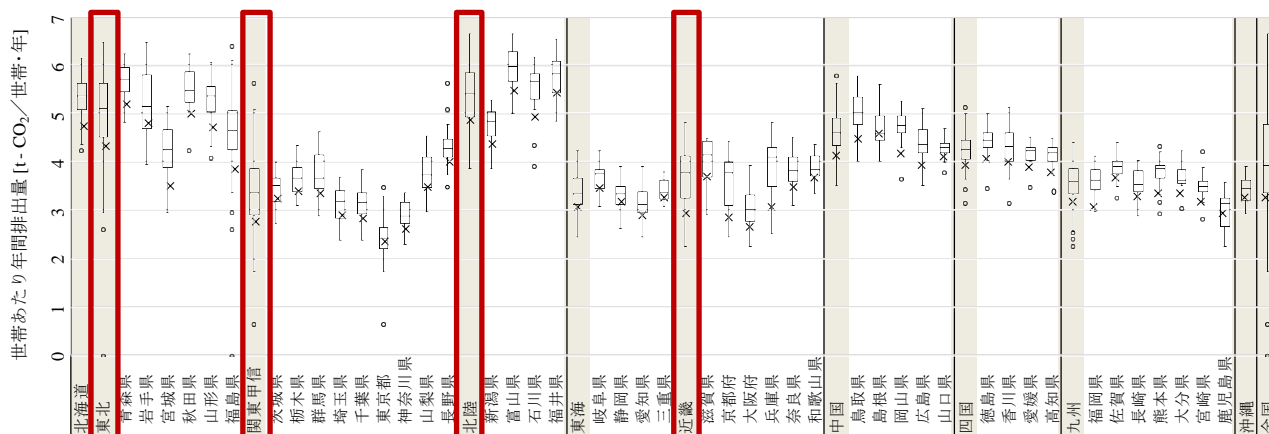


図4.2.11 市町村別世帯あたり年間排出量推計結果と都道府県別・地域別のばらつき

他の手法と比較すると、本研究で得られた推計値では、それぞれの地方の中でもさらに地域詳細に家庭CO<sub>2</sub>排出量を求めることができていることがわかる。特に、関東甲信や近畿、九州などの地方区分において、各市町村の排出量の違いを捉えることができていることがわかる。これについて、表4.2.1に、地方別回帰モデルの結果を示す。回帰モデルを地方別に検討することにより、北海道、東北、関東甲信、九州では暖房デグリーデーが説明力を持ち、同じ地方内の市町村において気温差の影響が無視できないことが明らかとなったことがわかる。また、全国モデルよりも地方別モデルの方が重相関係数で1-3ポイント程度精度が向上しており、回帰モデルの結果からも地方別に検討することが重要であることが示唆されていることがわかる。

また、世帯あたり年間排出量の市町村別の違いについて、図4.2.11に市町村別世帯あたり年間排出量推計結果と都道府県別・地域別のばらつきを示す。10地方区分別のうち、東北、関東、北陸、近畿の4地方（図中赤枠）において、排出原単位のばらつき（市町村別の差異）が大きい（四分位偏差>0.3）ことがわかる。すなわち、家庭CO<sub>2</sub>を算出するにあたって全国平均や地方平均の排出原単位を用いることは、市区町村によっては過大または過小に推計されてしまう可能性を有していることが示唆されている。このことから、特にこれらの地方では、公表されている全国試験調査の地方区分別排出原単位を用いる代わりに本推計による市町村別排出原単位を用いることで、地域特性をより反映した排出量を求めることができると考えられる。

このように、本研究では10地方別に平均世帯規模、戸建世帯の割合、緯度や標高から算出した暖房度日等による回帰モデルを構築することによって、市町村ごとにこれらの属性の違いを反映した世帯あたり排出量を求めることができることが確認された。この回帰モデルを用いることによって、将来の地域特性や世帯属性の変化あるいは気温上昇が排出量に与える影響を感度分析的に知ることができ、将来の家庭CO<sub>2</sub>排出量を削減するための方策検討に役立つものと考えられる。なお、電力会社やガス会社が保有する市町村の電力消費データやガス消費データなどの実測値を利用することができれば、推計値の検証や回帰モデルの改良を行うことができるが、今後の課題である。

これらの成果も踏まえ、本研究では家庭CO<sub>2</sub>と乗用車CO<sub>2</sub>との関係性分析も行った。具体的には、家庭におけるCO<sub>2</sub>排出量として民生家庭部門と運輸旅客部門に着目し、2017年版の策定マニュアルに示される標準的な手法よりも詳しく、建て方と世帯人員を考慮した家庭CO<sub>2</sub>排出量と道路交通センサスの走行距離等とその信頼性を考慮した乗用車CO<sub>2</sub>排出量を全国市区町村別に推計し、それぞれの特徴を比較考察することとした。

図4.2.12と表4.2.2に、全国市区町村別の年間一人当たり家庭CO<sub>2</sub>排出量および乗用車CO<sub>2</sub>排出量の関係性を分析した結果を示す。乗用車CO<sub>2</sub>排出量の値がまとまって直線上に並ぶ傾向があるのは、十分なデータサンプル数が得られなかった市区町村については、都道府県ごとに同一の値が与えられているためである。家庭CO<sub>2</sub>排出量の値も都道府県別のまとまりに一定の幅が与えられているようにも見える。これも、単身世帯の割合と集合住宅の割合によってばらつきを与えたためと考えられる。

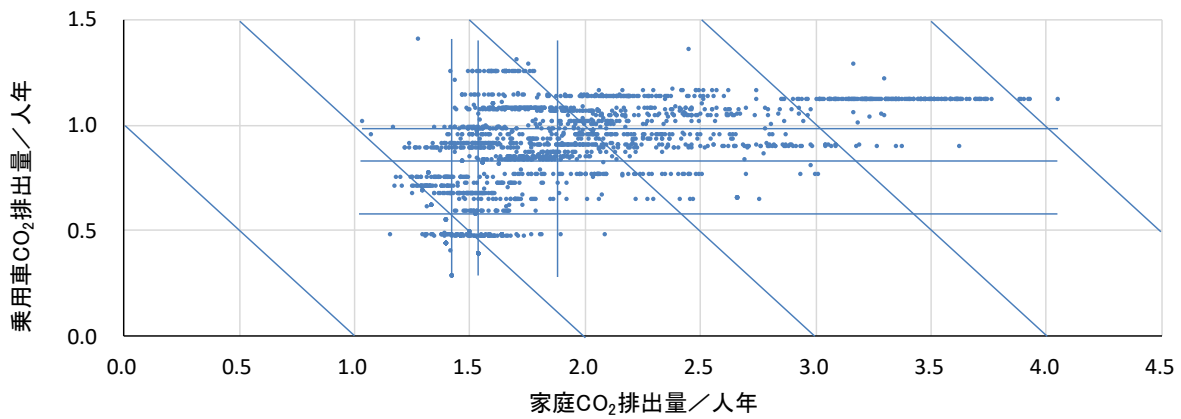


図4.2.12 全国市区町村別の年間一人当たり家庭CO<sub>2</sub>排出量および乗用車CO<sub>2</sub>排出量 (t-CO<sub>2</sub>/人年)  
(図中の縦横軸に平行の直線は、表4.2.2に示す四分位別に区分した境界線である)

表4.2.2 一人当たり家庭および乗用車CO<sub>2</sub>排出量の四分位別の市区町村数と人口 (1890市区町村)

		家庭CO <sub>2</sub>			
		下位25%	25-50%	50-75%	上位25%
乗用車CO <sub>2</sub>	上位25%	7市町村45万人 (檜葉町, 吉岡町, 川場村, 昭和村, 成田市, 市原市, 輪之内町)	51市町村 320万人	174市区町村 1199万人	480市町村1623万人 (北海道178市町村, 八戸市, 岩手県30市町村, 宮城県4市町, 秋田県23市町村, 山形県26市町村, 福島県47市町村, 大子町, 利根町, 群馬県3町村, 長岡市, 上越市, 富山県15市町, 福井県19市町, 長野市, 三重県7市町, 鳥取県全19市町村, 島根県全19市町村, 岡山県25市町村, 広島県18市町, 山口県18市町, 徳島県23市町村)
	50-75%	36市町村 252万人	102市区町村 802万人	208市区町村 1070万人	280市区町村 1055万人
	25-50%	106市区町 1234万人	101市区町村 892万人	86市区町村 546万人	78市区町村 506万人
	下位25%	66市区町村1673万人 (さいたま市各区, 川口市, 船橋市, 東京都区部, 八王子市, 立川市, 武蔵野市, 三鷹市, 青梅市, 府中市, 昭島市, 調布市, 小金井市, 小平市, 日野市, 福生市, 東大和市, 清瀬市, 武蔵村山市, 多摩市, 稲城市, 西東京市, 瑞穂町, 日の出町, 小笠原村, 川崎市各区, 吹田市, 島本町, 田尻町)	78市区町村 1108万人	35市区町村 384万人	2町村1万人 (八丈町, 三宅村)



家庭CO<sub>2</sub>排出量と乗用車CO<sub>2</sub>排出量を合わせた排出量は、グラフに記載した右下がり45°の等値線と比較参照されたい。2.0t-CO<sub>2</sub>を下回る市区町村や4.0t-CO<sub>2</sub>を上回る市区町村は多くなく、約3.0t-CO<sub>2</sub>を中心に多くの市区町村が分布していることが分かる。横軸に示した家庭CO<sub>2</sub>排出量は1.0～4.0 t-CO<sub>2</sub>程度の分布であり、縦軸に示した乗用車CO<sub>2</sub>排出量が0.4～1.2t程度に分布しているのと比較すると、やや分布の幅が大きい。これは、北海道地方の世帯当たり排出量が多いことが影響している。決定係数では、0.24と非常に緩やかな相関関係があり、家庭CO<sub>2</sub>排出量が多い市区町村に乗用車CO<sub>2</sub>排出量が多い市区町村が多く含まれることがわかる。特に、乗用車CO<sub>2</sub>が多い市区町村の中に家庭CO<sub>2</sub>排出量が極めて多い市区町村が含まれていることが影響していると考えられる。また、家庭CO<sub>2</sub>と乗用車CO<sub>2</sub>の合計値に乗用車CO<sub>2</sub>が占める割合は、17～53%と幅が生じた。これは、市区町村別の地域特性が反映した結果と考えられる。なお、乗用車CO<sub>2</sub>には、家計寄与分以外の企業所有の自家用乗用車や営業用乗用車を含むため、家庭におけるCO<sub>2</sub>排出量に占める自家用乗用車排出量の割合約22%と比較すると、全体に10%ほど高い割合となっている。

表4.2.2には、全国の市区町村別の傾向を考察するため、四分位別に市区町村数と人口を求めた結果を示した。具体的には、値を得られなかった福島県内5町村を除く1,890の市区町村について、年間一人当たり家庭CO<sub>2</sub>排出量を少ない順に並べ、累積人口で第一四分位から第四四分位までに分類した。乗用車CO<sub>2</sub>排出量についても同様に第一四分位から第四四分位まで分類した。これら四分位別に区分した境界線は、図4.2.12にも記載している。本結果より、鳥取県、島根県、香川県を除いては、同一の区分にすべての市区町村が含まれる都道府県はなく、市区町村間の差が生じていることが分かる。なお、ここでは小規模市町村が多く含まれる分類に該当する居住人口が過少になってしまうことを避けるために、市区町村数でなく累積人口を用いていること、値が同一の市区町村が複数存在したために、人口の小さいものから機械的に下位の区分としたことには留意されたい。

つぎに、この四分位別の結果に基づいて傾向を考察する。まず、家庭CO<sub>2</sub>排出量と乗用車CO<sub>2</sub>排出量がいずれも多い方の上位25%に属する市区町村は、480市区町村1,623万人に上った。家庭CO<sub>2</sub>排出量が非常に多い北海道・東北地方の市区町村が多く含まれるが、青森県や宮城県では多くないことが分かる。関東から中部地方はあまり含まれず、富山県、福井県、鳥取県、島根県といった北陸から山陰地方と、岡山県、広島県、山口県、徳島県といった瀬戸内の一部の市区町村が多く含まれる傾向がみられた。

これらの市区町村において乗用車CO<sub>2</sub>排出量が多い理由は、大都市からの距離があり、総走行距離が長いことや公共交通の整備が不十分であることが考えられる。家庭CO<sub>2</sub>排出量が多い理由は、寒冷地であること、単身世帯割合が小さいこと、集合住宅割合が小さいことが反映していると考えられる。西日本にも家庭CO<sub>2</sub>排出量が多い市区町村が多い理由は、表3.2.1に示した環境省による家庭CO<sub>2</sub>統計調査の原単位や都道府県別エネルギー消費量の統計値において、中国地方や四国地方の世帯当たり排出量が東北地方に並ぶほど大きいためであることが考えられるが、世帯規模や気候区分、電力CO<sub>2</sub>排出係数も影響していると推察できる。

他地域と比較すると、こうした地域での低炭素化への対応の必要性は相対的に高いといえる。わが国においては、経済対策としての地域創生による活性化と気候変動対応としての低炭素化を両立させることがますます重要となっているが、このためには、たとえば北海道・東北地方や中国地方の郊外部を対象として、排出量の大幅削減や再生可能エネルギーの活用モデル的に取り組み、実効性ある施策を明らかにすることが重要になると考えられる。

ここまでの考察とは対称に、家庭CO<sub>2</sub>と乗用車CO<sub>2</sub>排出量がいずれも小さい方の25%に含まれる市区町村について考察する。この分類に含まれるのは、66市区町村1,673万人に上った。人口規模は先の分類と近いものの、市区町村数が大幅に少ない。この理由は、人口規模が大きい都市において、排出量が小さい傾向があることを反映したものと考えられる。具体的には、関東地方の都市部、東京都区部と多摩地域を中心に、さいたま市、川口市、船橋市、川崎市などが含まれており、その他には、吹田市、島本町、田尻町が含まれるのみである。なお、多摩地域の26市のうち18市がこれに含まれるが、8市は該当しておらず、同じ多摩地域であってもそれぞれの地域特性の違いが結果に反映していると考えられる。この分類に含まれる市区町村で乗用車CO<sub>2</sub>排出量が少ない理由は、大都市圏内に立地する公共交通の利便性が

良いことが主に挙げられる。家庭CO<sub>2</sub>排出量が小さい理由は、集合住宅に居住する世帯の割合が高いことが考えられる。

これらのほか、他の分類についても考察する。乗用車CO<sub>2</sub>排出量のみが特に大きい分類には、7市町村45万人が含まれる。例えば成田市は、自家用バスの登録台数が多いこと等から、送迎用の企業保有あるいは営業用の乗用車の寄与が大きい市町村であることが伺われるが、これは本研究において、家庭寄与分の自家用乗用車のみを抽出することができていないことが影響してしまったものと考えられる。他方、家庭CO<sub>2</sub>排出量のみが特に大きい分類は、2町村1万人と極めて少なく、これらでは戸建の2人以上世帯の割合が高いことその理由として考えられる。

以上のような考察も踏まえると、本研究より、全般に家庭CO<sub>2</sub>排出量大きい市区町村は乗用車CO<sub>2</sub>排出量大きい傾向にあり、一方のみ大きい市区町村の割合は小さいことが分かった。これまで大都市圏都市部において、公共交通機関の利便性が高いことから乗用車CO<sub>2</sub>排出量が小さいことは知られていたが、本研究より家庭CO<sub>2</sub>排出量についても、大都市圏においては集合住宅割合が高いことから排出量が小さいということが確認された。排出量が多い市町村のうち、実行計画策定義務のある特例市の人口要件20万人に満たないのは467市区町村1210万人である。これらについては、国や都道府県による削減策の支援が重要になると考えられる。また、回帰モデル等の分析の結果も踏まえると、都道府県別の排出量を世帯数で按分するだけでなく、建て方別世帯人員別の世帯当たり排出量の違いを考慮した重み付きの按分を行うことなどにより、都市機能集約化を促進する施策の推進や効果評価を容易とできることが考えられる。

なお、これら分析においては、いくつかバイアスがあることに留意する必要がある。特に乗用車CO<sub>2</sub>排出量では、都道府県別の平均値に影響され、たとえば、東京の多摩地域と島嶼部では、八王子市を除いた市町村ですべて同じ値であり、大阪府でも、大阪市、堺市、池田市を除いた市町村ではすべて同じ値となっていることなど、必ずしもそれぞれの地域の特性が反映されていないケースが確認されている。

最後に、地域固有の課題解決と低炭素化を両立するための方策の検討として、住宅の建替と改修による民生部門エネルギー消費量削減に関する分析結果について述べる。図4.2.13に、民生家庭部門での住宅の建替と改修によるエネルギー消費量の削減効果の推計結果を示す。

これまでの国や地域の低炭素シナリオの多くでは、新設住宅の断熱基準適合義務化によるCO<sub>2</sub>排出量削減効果は、新設住宅数が現状の水準で推移し、居住に活用される前提で考えられている。しかし、多くの市町村において世帯数が減少に転じることを考慮し、空き家の発生抑制を積極的に行う場合には、新設着工数は累積でストックの10%程度にとどまる必要があることとなり、断熱性の高い住宅の新設によるエネルギー消費量の削減の効果が2030年にはほとんど得られない可能性があることが分かった。滅失する住宅の性能が古いと仮定した場合（新設抑制+ケース）でも、新設の絶対量が少ないことから、大きな削減は見込まれない。

このことから、住宅の断熱性能の向上と空き家対策を同時に行うと、地球温暖化対策計画が目標とする2030年に新設住宅着工数の全数ならびに既存住宅数の30%を改正省エネ基準に適合させるだけでは不

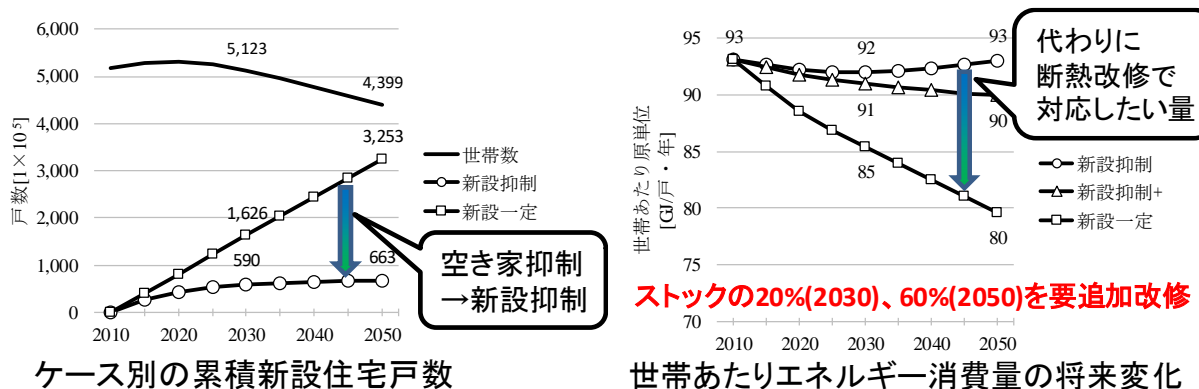


図4.2.13 空き家対策と住宅の高断熱化を両立させる場合に必要となる住宅改修量

十分であり、2030年には追加的に20%の断熱改修が、2050年には追加的に60%のストックへの断熱改修が必要となる可能性があることが明らかになった。なお、本分析では平均世帯人員の減少によるエネルギー消費減や、建て方割合の変化、冷暖房以外の機器効率向上や、再生可能エネルギー導入等、建替えによらない低炭素化方策は考慮していないことは留意する必要がある。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究では、人口減少・高齢化等の低炭素以外の地域固有の課題の解決も視野に入れて将来の土地利用と都市構造を定量的に評価する低炭素型都市空間分析モデルと運輸旅客及び民生家庭部門を対象とするエネルギー需要及び二酸化炭素排出量推計手法を開発し、空間構造も考慮して家庭CO<sub>2</sub>排出量と乗用車CO<sub>2</sub>排出量を評価した。これにより、運輸旅客・民生家庭について、都道府県や市町村等の地方自治体や都市・地域を対象に土地利用や都市構造を勘案してCO<sub>2</sub>排出量を分析できる手法を確立した。

メッシュ別の事項等と家庭CO<sub>2</sub>統計調査データとの連関分析から家庭CO<sub>2</sub>排出量と都市構造の関係性を分析することで、家庭CO<sub>2</sub>排出量、自動車CO<sub>2</sub>排出量それぞれの要因を明らかにすることができた。これにより、人口密度や世帯規模などの将来予測も用いて将来の都市構造変化によって生じるCO<sub>2</sub>排出量の変化を推計することが可能となった。また、詳細な地域ごとの排出量の傾向を把握することで、重点的な対策が必要な地域を明らかにしたり、同様の地域特性を持つ地域を整理することで、地域特性に応じた対策の検討結果も活用して、全国大で対策を導入・実施した場合の効果を把握することができるようになることも期待される。

地域固有の課題解決と低炭素化を両立するための方策検討から、住宅の空き家を抑制することで低炭素に必要な断熱改修量が増加するなどのトレードオフがあるいっぽう、過疎地域での立地適正化は乗用車CO<sub>2</sub>削減にも効果があることを明らかにした。これら成果より、検討した低炭素シナリオを着実に進めるためには、検討段階で社会的な課題の解決も考慮することが重要であることを示した。

また、地域タイプに基づく分析を活用することで、気候変動の影響も考慮した低炭素型都市を検討する際にも役立てることが可能であることを示し、低炭素かつレジリエントな都市を構築していくうえで、浸水、津波、土砂災害などの考慮も不可欠であることも示した。

これら、住宅の空き家抑制と断熱性能向上を両立させるために必要な断熱改修量を推計した成果、家庭部門CO<sub>2</sub>排出実態統計調査から地域特性格別のパラメータを得た成果、その回帰モデルを改良した成果、メッシュ周辺圏域の人口集積を考慮した乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計については、土木学会論文集に掲載された。運輸旅客および民生家庭部門のCO<sub>2</sub>排出量を全国市区町村別に推計した成果は、都市計画論文集に掲載され、2018年年間優秀論文賞を受賞するなどの評価を得た。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で明らかにした家庭部門CO<sub>2</sub>排出原単位や乗用車のCO<sub>2</sub>排出量の成果を活用することで、全国一律の係数を乗じるなどの手法と比較して、より都市・地域の特性を反映した現況把握や将来シナリオの検討を行うことができる。また、メッシュの地域特性格別世帯属性別の家庭CO<sub>2</sub>排出量と乗用車CO<sub>2</sub>排出量の分布を用いることで、現況値と将来推計値の把握とともに、人口密度や建て方に影響する土地利用誘導等の政策等が実施された場合の効果を推計することが可能となる。

また、住宅の空き家を抑制と住宅の断熱性能向上を両立させるために必要な量の分析からは、既存住宅の断熱改修を実施する制度の設計と導入における効果を推計できると期待される。

わが国全体が低炭素社会に移行するためには、それぞれの地方自治体や都市・地域での取組が重要となるが、具体的に低炭素施策を講じていくためには、国・地方自治体ともに人的・財政的なキャパシティ等の制約があるなかで進める必要がある。本研究成果より、実行計画策定義務のある特例市の人口要

件20万人に満たないが排出量が多い市区町村（467市区町村1210万人）を明らかにしたが、この成果を活用することで国や都道府県の支援も含め、低炭素方策立案や地域再構築を優先的に進める市区町村や都市・地域の検討等に役立つことが期待される。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) 石河正寛, 松橋啓介, 金森有子, 有賀敏典: 土木学会論文集G, 75(5), I\_89-I\_98 (2019)  
「市町村別家庭部門CO<sub>2</sub>排出量推計モデルの改良-欠測データ処理と非線形回帰の適用-」
- 2) 陳鶴, 有賀敏典, 松橋啓介: 土木学会論文集D3, 74(5), I\_101-I\_107 (2018)  
「メッシュ周辺人口集積度に基づいた乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計」
- 3) 松橋啓介, 石河正寛: 都市計画論文集, 53(3), 913-918 (2018)  
「家庭と乗用車から生じる市区町村別CO<sub>2</sub>排出量に関する考察」
- 4) 石河正寛, 松橋啓介, 金森有子, 有賀敏典: 土木学会論文集G, 74(6), II\_193-II\_201 (2018)  
「家庭CO<sub>2</sub>統計に基づく全国10地方別の排出要因分析と市町村別世帯あたり排出量の推計」
- 5) 平野勇二郎, 五味馨, 戸川卓哉, 有賀敏典, 松橋啓介, 藤田壮: 土木学会論文集G, 74(6), II\_183-II\_191 (2018)  
「都市域の交通によるCO<sub>2</sub>排出量と市街地密度の関係の分析」
- 6) 石河正寛, 松橋啓介, 金森有子, 有賀敏典: 都市計画論文集, 52(3), 689-695 (2017)  
「住戸数と世帯数に基づく空き家の詳細地域分布の把握手法」
- 7) 石河正寛, 松橋啓介, 堀星至, 有賀敏典: 土木学会論文集G, 73(6), II\_45-II\_52 (2017)  
「高断熱住宅への建替えによる民生家庭部門世帯あたり一次エネルギー消費量の削減見通し」

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 松橋啓介, 中島直人, 村山顕人, 福山祥代, 森本章倫: 都市計画, 335, 26-33 (2018)  
「スマートシティの潮流とこれから」
- 2) 松橋啓介: Evaluation, 66, 38-45 (2018)  
「コンパクトシティと環境」
- 3) 松橋啓介: 公共研究, 14(1), 47-53 (2018)  
「未来の地図を作成する」

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 松橋啓介: 東京モーターショーシンポジウム2019, 東京 (2019)  
「乗用車起因CO<sub>2</sub>排出量の地域別動向およびそのメッシュ人口との関係」
- 2) 松橋啓介: 第2回電動車両研究会, 東京 (2019)  
「持続可能社会に向けた交通・まちづくりの現状と課題」
- 3) 陳鶴, 有賀敏典, 松橋啓介: 土木計画学研究発表会, 東京 (2017)  
「人口分布からみた乗用車CO<sub>2</sub>排出量の分析—メッシュと周辺人口集積度に基づいて—」
- 4) 有賀敏典, 金森有子, 松橋啓介: 環境科学会2017年会, 北九州 (2017)  
「都市の集約化による生活時間・交通行動の変化と自動車CO<sub>2</sub>排出量の推計」

- 5) 石河正寛, 松橋啓介, 金森有子, 有賀敏典: 環境科学会2017年会, 北九州 (2017)  
「統計データを用いた空き家の詳細地域分布の推計方法」
- 6) 松橋啓介, 石河正寛, 有賀敏典: 環境科学会2017年会, 北九州 (2017)  
「人口減少下における小地域の未来地図の作成と活用」

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 国立研究開発法人国立環境研究所夏の大公開 (2017年7月22日, 参加者約5,000名) にて成果紹介
- 2) 国立研究開発法人国立環境研究所夏の大公開 (2018年7月21日, 参加者約5,000名) にて成果紹介
- 3) 国立研究開発法人国立環境研究所夏の大公開 (2019年7月20日, 参加者約6,000名) にて成果紹介

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞デジタル (2019年12月11日, 今さら聞けない世界「地球温暖化、フライトは恥? 立ちほかかる「4時間の壁」」)

### (6) その他

- 1) 日本都市計画学会2018年年間優秀論文賞: 松橋啓介・石河正寛「家庭と乗用車から生じる市区町村別CO<sub>2</sub>排出量に関する考察」 (2019.5.31)

## 8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

## II-3 低炭素でレジリエントな都市空間構築に向けた建設ストック更新評価システムの開発

名古屋大学大学院環境学研究科  
都市環境学専攻

谷川 寛樹  
奥岡 桂次郎  
(平成29年度～令和元年度9月)

<研究協力者>

名古屋大学大学院環境学研究科  
都市環境学専攻

山下 奈穂

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：12,636千円（研究経費は間接経費を含む）  
(平成29年度：4,212千円、平成30年度：4,212千円、令和元年度：4,212千円)

### [要旨]

都市・地域において資源及びエネルギーを有効活用した低炭素シナリオを検討するためには、現在都市に蓄積されているマテリアルストックとともに、それが将来廃棄される時期、量、及び廃棄物の発生する場所等を把握することが必要であり、特に建築物が平均どの程度で建て変わっていくかの情報（平均滞留年数）は、将来の都市の作り替えの観点でも重要な情報となる。

建築物が解体される要因には、老朽化等の物理的要因、家主の意向による建て替え、自治体の都市計画や開発等の社会的要因、地震や津波、土砂崩れ等の自然的要因がある。そこで、本研究では、建築物の3次元情報を経年的に格納して構成したデータベース（4d-GIS）を拡張・整備し、その情報を用いた平均滞留年数の算出を行った。その結果、集合住宅や業務施設は企業や資産家等が建築・管理していることに対し、戸建住宅は初期費用さえあれば誰でも建築・管理でき、建て替えのための経済的余裕がないことが多いことなどもあって長期間使用される傾向があるため、戸建住宅の平均滞留年数は集合住宅や業務施設と比較して大きくなる傾向があることなどを明らかにすることができた。

これらの情報を活用することにより、それぞれの建築物がいつ頃廃棄されうるかが把握でき、都市・地域を低炭素型に再構築するタイミングの検討等に役立てることが可能である。

### [キーワード]

建設ストック、四次元型地理情報システム4d-GIS、建築物滞留年数、建設リサイクル、ストック型都市

#### 1. はじめに

都市は一から造られるのではなく、既存の都市が将来へ繋がるものである。そのため、低炭素でレジリエントな都市空間構築には、対象地域の過去・現在の変遷を踏まえた将来像を定量的に示すことが肝要である。そこで、本サブテーマでは、図1.3.1に示すように、建設ストックの移り変わりが都市空間の変遷を表現すると考えて過去の建設ストックの情報整備とともに、社会活動等の多様な要素を含めて将来シナリオを検討するための「建設ストック更新評価システム」の開発を行って持続可能な建設ストックの更新に着目した将来シナリオを検討するとともに、将来の都市構造実現のための建設ストック更新戦略及びその実現方策を検討することとした。

#### 2. 研究開発目的

本サブテーマでは、低炭素の観点からの土地利用及び都市構造のシナリオに沿った将来の建設ストック更新計画を分析し、なりゆきシナリオとの比較を通じて低炭素な都市空間構築に向けた建設ストック更新戦略を明らかにすることを目的とする。このために、低炭素とレジリエントの視点を組み込んだ「建設ストック更新評価システム」を用いて様々な都市空間構築シナリオに対して将来の建設ストック更新



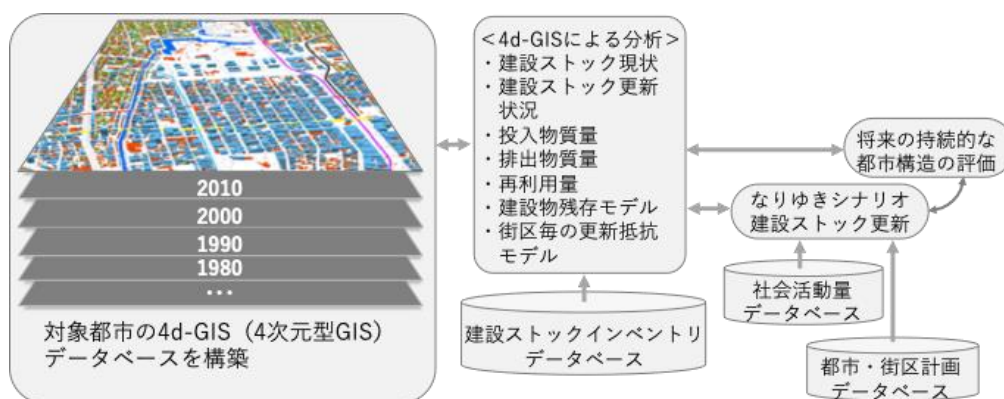


図1.3.1 将来シナリオ検討に向けた建設ストック更新評価システムの概要

計画を分析し、将来の都市構造実現のための建設ストック更新戦略及びその実現方策を検討することとした。

### 3. 研究開発方法

本研究では、建設ストックを評価するにあたって、GIS（Geographic Information System/地理情報システム）を活用した手法を開発し、分析を実施した。本研究ではGISソフトウェアとして、ESRI（Environmental System Research, Inc.）の提供するArcGISを用いる。これは、ArcGISは汎用性が高く、地理空間情報を活用するための機能を豊富に有しているためである。

#### 3. 1. 四次元型地理情報システムの整備

本研究では、2次元の地理情報に建築物の階数を高さ情報として加えた3次元のデータ（3d-GIS）とすることで、空間的なストック分布の傾向を可視化し、地理的特徴を考慮した詳細なストックの分析を行うこととした。他方、3d-GISではデータ作成時の情報のみが含まれるため、都市構造物の時系列変化に伴う物質フローや都市の成長傾向を把握することが困難である。そこで、3次元のGISデータである3d-GISを複数の年代で作成し、経年で比較できるようにしたデータベース（4d-GIS）を開発し、時系列での分析を可能とした。これまでのGISデータを用いた研究では、利用できるデータの制約などから単年の空間情報のみを利用したものが多く、本研究で開発・拡張する4d-GISを用いることにより、経年で都市の変化を詳細に捉えることが可能になるとともに、年代間での物質フローの分布の比較や、全体の物質フローの集計が可能になり、都市構造物がこういったサイクルで蓄積され、後に廃棄されるか、といった物質の一連の流れを定量化できるようになる。ただし、4d-GISの構築に必要な詳細な各都市構造物の地図データは、古い年代ほどデータの入手が困難でありデータ精度も低いものが多いため、データ構築、更新作業に多大な時間を要し、国や都道府県域のような広範囲でのマテリアルストック・フロー分析が困難であり、推計可能な地域が限定されるという点には留意が必要である。

本サブテーマで開発・拡張して構築した4d-GIS（Four dimensional Geographic Information System /四次元型地理情報システム）データベースは、2Dの建築物ポリゴンデータに高さ情報として階数データを用いて平面空間座標に鉛直座標を追加して3DのGIS（3d-GIS）に変換して利用するとともに、各年代の3d-GISデータを同一座標上において時間軸を加えた4d-GISとしたものである。なお、道路及び鉄道についてはラインデータとして利用した。各建築物ポリゴンデータには、建築物名、建築年、階数、建築面積、延床面積等を属性データとして付加し、都市を可視化して性質や空間的分布の分析を行った。なお、4d-GISには他の統計情報を組み合わせることも可能であり、例えば北九州市を対象として構築した4d-GISでは、建築物ポリゴンデータに国勢調査と固定資産の統計データを結合し、構造物それぞれに建築年代・構造種・利用世帯種などの属性情報を追加して、より具体的な将来シナリオ検討を可能としている。この4d-GISのデータを活用することで、後述する建設ストック更新評価システムで物質ストックフローの推計及び分析を行うことができる。



図3.3.1 ケーススタディ対象地域：北九州市

本研究で拡張・整備する4d-GISに格納される経年的な構造物の3次元情報は、(株)ゼンリンによるZ-map TOWN IIを基盤として構築されている。Z-mapでは、建築物をポリゴンとして格納し、建築種・用途・階数・建築面積の属性情報を有しており、例えば階数と建築面積を乗じることで延床面積を推計することができるなど、情報を組み合わせることで構造物の立体的な情報を得ることが可能である。なお、Z-mapの情報は事務所、株式会社、酒店、大学、歯科等の詳細な建築名称が付与されているのみであることから、建築名称から建物用途を判別する手法に用途区分コード情報を組み合わせ、建築物それぞれに23種の用途区分（戸建住宅、業務施設、商業施設、宿泊施設、共同住宅、官公庁施設等）を付与した。

建物構造は、建築物種別と階数の情報に、住宅・土地統計調査及び建築物ストック統計を加味して設定する。具体的には、2階建て以下のビル・アパート・マンションは、住宅・土地統計調査の2階建て以下の共同住宅を対象に木造と鉄骨造の割合を求め、建築面積の小さなものを木造と想定して設定する。2階建て以下の戸建住宅は、統計では約9割が木造であることから、本研究では全て木造と仮定した。また、3階建ての建物は全て鉄骨造、4階建て以上の建築物は全て鉄筋コンクリート造と仮定した。

本サブテーマでは、図3.3.1に示す福岡県北九州市をケーススタディ対象地域とした。北九州市は、現在人口約94万人、面積約492km<sup>2</sup>であり、1901年の八幡製鉄所の創業とともに発展した北九州工業地域の中心であるとともに、戦後の国の経済復興政策及び高度経済成長期に大きく発達した。1963年の市町村合併により人口が100万人を超え、最大約107万人まで増加したが、近年の少子高齢化の進展により減少傾向にあり、北九州市の高齢化率は全国1位となっている。さらに、工業についても、多数の工場等は廃業、撤退を余儀なくされ、市内の工業は衰退したものの、近年は工場跡地の再開発が進んでいる。このような社会的な動きは、今後日本の他の大都市でも同様の道筋をたどることが見込まれることから、本研究では先駆的な事例として北九州市を選択した。なお、北九州市は循環型社会の実践的構築を目指した国のエコタウン事業を実施しており、1997年に「北九州エコタウンプラン」を策定し、続いて2008年に環境モデル都市に、2011年に環境未来都市に、2018年にSDGs未来都市に選定され、2018年には「地域エネルギー次世代モデル事業」が自治体SDGsモデル事業にも選定されているなど、循環政策を中心とする環境行政から対象範囲を持続可能社会の幅広い側面に展開していることも理由とした。

本研究で整備した、1986年、1995年、2000年、2005年、2010年、2014年、2018年の全7年代の八幡駅周辺におけるデータを図3.3.2 (a) ～ (g) に示す。



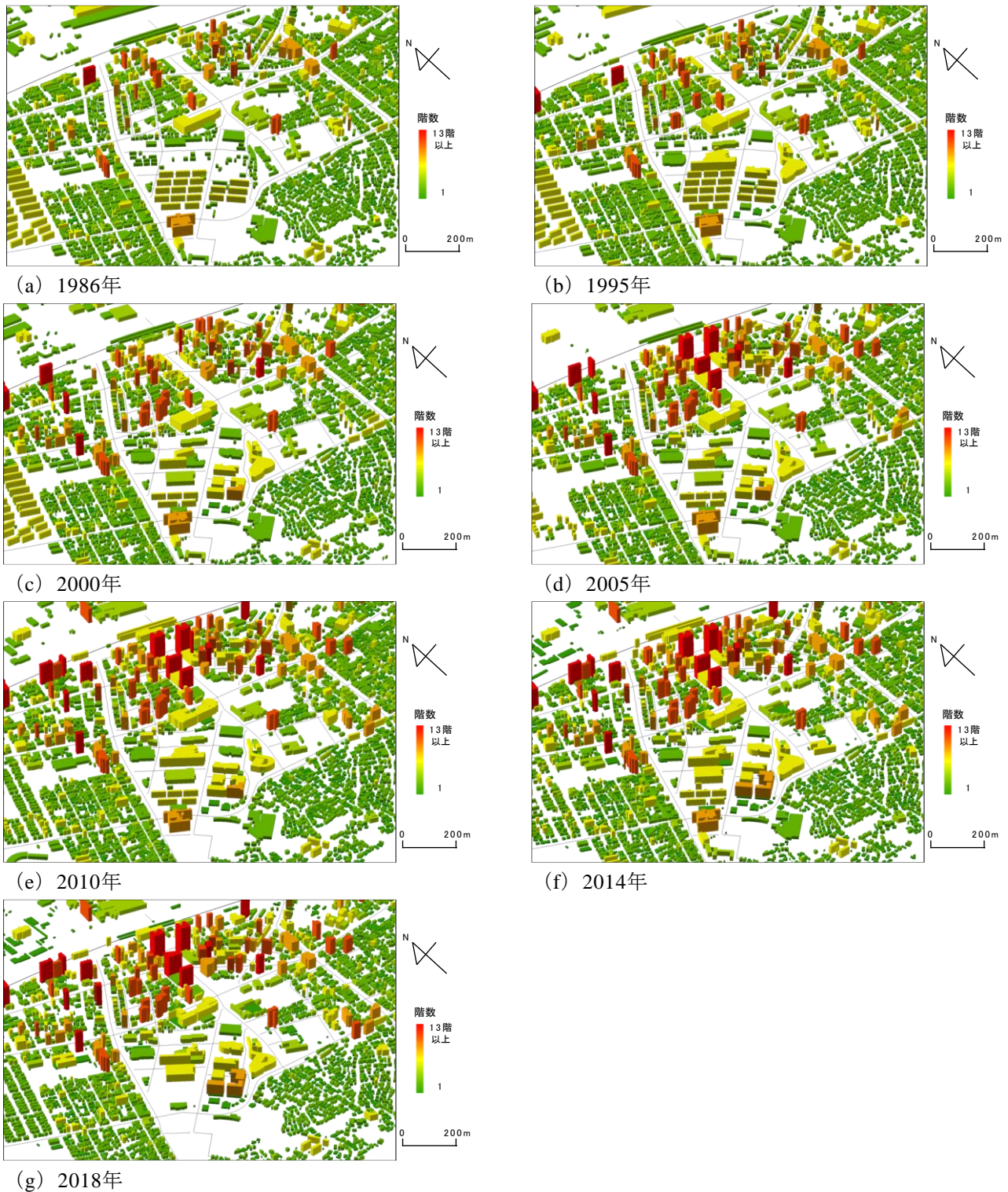


図3.3.2 北九州市八幡駅周辺の4d-GISデータ

### 3. 2. 建設ストック更新評価システムを用いた建設ストックの分析

#### (1) 既往研究のレビュー

マテリアルストック・フロー分析及び滞留年数推計、建設副産物発生量の将来予測は、これまでも様々な研究が行われている。Hashimoto *et al.*<sup>1)</sup> は、統計情報を用いて、日本全国を対象に都市構造物（建築物、社会基盤）のマテリアルストック及び建設副産物発生量を2030年まで推計し、長岡ら<sup>2)</sup> も統計情報に基づき、日本全国における建築物、道路、下水道のマテリアルストックを地上部分、地下部分に分けて推計している。田中ら<sup>3)</sup> は、統計情報に加えて地理情報（GIS）を用い、日本全国における建築物及び社会基盤構造物のマテリアルストックを経年的に推計し、杉本ら<sup>4)</sup> は、GISを用いて名古屋市中区錦二丁

目を対象に、建築物ストック・フロー量を時系列に分析している。青柳ら<sup>5)</sup>もGISを用い、名古屋市中心部を対象に約40年間の4d-GISを構築することで、建築物ストックの経年変化についての分析を行っている。

建築物の滞留年数についても、同様に様々な既往研究が行われている。小松ら<sup>6)</sup>は、統計情報に基づき、区間残存率推計法や累計ハザード法を用いて、那覇市を除く46県庁所在地と川崎市、北九州市を対称に、ある時間区間から各建築物の滞留年数を推計している。小見ら<sup>7)</sup>は、小松ら<sup>6)</sup>の結果をもとに、ワイブル分布を用いて長寿命化トレンドを考慮した将来残存率のシミュレーションを行った。Tanikawa *et al.*<sup>8)</sup>では、3d-GISに時系列を加えた4d-GISを用いて和歌山市中心部とマンチェスター市中心部を対象にストックの変遷と滞留年数、建設副産物発生量の推計を行っている。東岸ら<sup>9)</sup>は、和歌山市中心部を対象に長期の4d-GISを構築し、建築物の着工から解体までを追跡することで滞留年数を推計している。また、寺南ら<sup>10)</sup>も同様の手法を用いて北九州市八幡西区黒崎駅周辺における滞留年数を推計した。

建設副産物発生量の将来予測に関する既往研究は統計情報に基づいた研究がほとんどであり、橋本ら<sup>11)</sup>は木造・非木造建築物について、小松ら<sup>6)</sup>による区間残存率推計法を用いて日本全国を対象に2030年までの建設副産物発生量を推計している。萩島ら<sup>12)</sup>は、福岡県、東京都、島根県、鳥取県を対象に小松ら<sup>6)</sup>の手法のうち対数正規分布を用いた滞留年数推計を行い、2050年までの建設副産物発生量を推計した。藤川ら<sup>13)</sup>は、山口県における建築物（木造、非木造）、公共土木工事、民間土木工事より排出されるコンクリート塊、アスファルトコンクリート塊を対象に、2020年までの排出量及び再生利用量を推計した。杉浦ら<sup>14)</sup>は仙台市を対象に、木造建築物から排出される木材排出量について区間残存率推計法を用いて2100年まで予測した。

これら既往研究のうち統計情報に基づく分析は、都道府県全域など広範囲を対象とし、対象範囲全域の傾向の把握に有効であるが、詳細地域ごとに地理的条件・社会的条件による構造物分布の偏りや、発展進度の差異がある地域と構造物についての関係を把握することは困難である。他方、GISを用いた研究では、詳細地域の各構造物に着目するため、詳細地域と各構造物の関係把握に有効とされてきた。しかし、詳細地域であってもGISより得られる情報は非常に膨大であり、広範囲における分析は困難であり、これまでの4d-GISを用いた分析でもその地域は限られてきた。また、建設副産物発生量の将来予測に関して、GISを用いた既往研究は非常に少ない。そのため、都市の状況を地理的に把握し、年代間での建築物同一性判定を用いて物質ストックフロー分析（Material Stock Flow Analysis : MSFA）を行い、建設資材の偏在性及び物質代謝、エネルギー代謝を明らかにすることは重要である。

本サブテーマで開発する手法は、同一性判定システムによりMSFAを建築物一棟単位で推計するため、任意の時点、時点間、集計単位でのデータ作成が可能であるという特徴を持つ。このことにより日本全土の都市の時系列変化を詳細な空間単位で把握でき、国土政策、都市計画、資源管理の観点などから有用であるといえる。

## (2) 都市域での4d-GISを用いたマテリアルストック・フロー分析手法

各建築物のマテリアルストックは、北九州市全域の建築物を対象に建築物の延床面積（建築物面積に階数を乗じた面積）に建築年別、構造種別資材投入原単位を乗ずる原単位法により推計した。ここで、マテリアルストックとは都市における資源の蓄積量を表す。コンクリートや木材、鉄、砂利・石材、モルタル、ガラス、陶磁器、アルミニウム等のマテリアルは、木造、鉄骨造、鉄筋コンクリート造（RC造）によりその投入量と都市への蓄積量は異なる。また、使用される資材の量や質は、建設された年代による構造変化や建築基準法や耐震基準等の改正により建設時期によって変化し、原単位も変わる。そこで本研究では、既往研究（Tanikawa and Hashimoto<sup>8)</sup>）を参照して建築年別に資材投入原単位を設定してマテリアルストックを算出した。

本研究では、マテリアルストックとともに、各建築物の建設に伴う資材投入量及び解体に伴う資材排出量であるマテリアルフローも推計した。推計にあたっては、ある2つの年代間を見比べ、新しい年代のみに存在する建築物（その期間内に建設された建築物）を着工建築物として、古い年代のみに存在する建築物（その期間内に解体された建築物）を解体建築物として定義し、それぞれ抽出した（図3.3.3）。マテリアルフローの推計は、抽出した着工建築物・解体建築物について、マテリアルストックの推計方



図3.3.3 着工建築物・解体建築物抽出の例

青：ある年代間で建設された建築物（着工建築物）

赤：ある年代間で解体された建築物（解体建築物）

法と同様に原単位法を用いて行った。蓄積純増は、着工建築物の資材投入量から解体建築物の資材排出量を減じることで推計する。このように、マテリアルストック合計の増減だけでなく、マテリアルフローの様子も分析することで、物質代謝の活発さを明らかにすることが可能であるとともに、各構造物単位のGISデータベースを用いてボトムアップ式に推計を行うことで、統計情報等のデータ分析では不可能な物質動態を分析が可能となるという特徴を持つ。

資材投入原単位は、木造、鉄骨造、鉄筋コンクリート造（RC造）の3種類の構造種別に単位面積あたりの資材投入量として設定した。対象とする資材は、コンクリートや木材、鉄、砂利・石材、モルタル、ガラス、陶磁器、アルミニウム等とした。また、建築物の上部構造、下部構造について、それぞれ原単位を整備した。建築物は建設された年代により構造が変化しており、使用される資材の量や質も変化しているとともに、建築基準法・同施行令（1950-2007）に基づく耐震基準の改正により資材投入量が増加傾向にある。そこで本研究では、Tanikawa *et al.*<sup>8)</sup>において時系列に整備された表3.3.1の値を使用した。この資材投入原単位は、建築基準法・同施行令を考慮し、構造種別の一般的な建築物の設計図面を用いて、各資材の使用量を計算し、延床面積で除することで推計された値である。なお、合計にはコンクリート、鉄、木材の他に、砂利・石材、モルタル、ガラス、陶磁器、アルミニウム、その他を含んでいる。

### (3) 区間残存率推計法による建設副産物発生量の将来推計手法

本研究では、小松ら<sup>6)</sup>による区間残存率推計法を用いて滞留年数を推計し、将来の建設副産物発生量を推計した。建築物が解体される要因として、建築物の老朽化等の物理的要因と家主の意向による建て替えや自治体による都市計画、開発等の社会的要因、地震や津波、土砂崩れ等の自然的要因がある。建築物の滞留年数は、建築物が同位置に留まり存在し続ける年数を意味し、建築物の使用の有無やリフォーム、空き家等の本来の機能を果たしていない建築物の考慮はしないこととする。

現在都市に存在する建築物が将来建設副産物として排出される時期及び量、場所等を把握する上で重要となる滞留年数の推計方法は、以下の通りである。

まず、GISデータの各年代について、年代間が最も近い2つのGISデータを同一座標上で比較し、解体建築物のみを位置と形、建築年、建築物名、階数等をもとに抽出した。ただし、全ポリゴンに全ての情報が格納されていないため、格納されている情報のみで解体建築物かどうかを判断した。つぎに、抽出した解体建築物を構造別に木造、鉄骨造、RC造の3種類、用途別に戸建住宅、集合住宅、業務施設の3種類の計9種類に分類した。また、建築年別の解体棟数を算出し、式3.3.1の区間残存率推計法より残存率を推計した。



表3.3.1 建設資材投入原単位表 (kg/m<sup>2</sup>)

			1920	1924	1950	1959	1971	1974	1981	2000
木造	上部構造	砂利・石材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		コンクリート	5.27	5.27	45.75	45.75	72.74	72.74	72.74	86.23
		モルタル	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53
		木材	72.84	72.84	72.84	81.17	81.17	81.17	88.40	88.40
		ガラス	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90
		陶磁器	52.14	52.14	52.14	52.14	52.14	52.14	52.14	52.14
		鉄	0.56	0.56	1.22	1.22	1.67	1.67	1.67	1.89
		アルミニウム	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
		その他	31.56	31.56	31.56	31.56	31.56	31.56	31.56	31.56
	合計	171.77	171.77	212.91	221.25	248.68	248.68	255.90	269.62	
	下部構造	砂利・石材	78.40	78.40	78.40	78.40	78.40	78.40	78.40	78.40
		コンクリート	0.00	0.00	67.15	67.15	111.91	111.91	111.91	134.29
		モルタル	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		木材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		ガラス	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		陶磁器	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		鉄	0.00	0.00	2.60	2.60	4.34	4.34	4.34	5.20
		アルミニウム	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
その他		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
合計	78.40	78.40	148.15	148.15	194.65	194.65	194.65	217.90		
合計	250.17	250.17	361.06	369.40	443.33	443.33	450.55	487.52		
鉄骨造	上部構造	砂利・石材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		コンクリート	232.08	232.08	232.08	232.59	232.59	232.59	233.05	233.05
		モルタル	90.75	90.75	90.75	98.95	98.95	98.95	106.24	106.24
		木材	10.72	10.72	10.72	10.72	10.72	10.72	10.72	10.72
		ガラス	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
		陶磁器	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
		鉄	133.57	133.57	133.57	133.57	133.57	133.57	133.57	133.57
		アルミニウム	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
		その他	15.47	15.47	15.47	15.47	15.47	15.47	15.47	15.47
	合計	486.09	486.09	486.09	494.80	494.80	494.80	502.55	502.55	
	下部構造	砂利・石材	172.49	172.49	189.16	189.16	200.28	200.28	200.28	217.72
		コンクリート	179.52	179.52	229.85	229.85	263.41	263.41	263.41	295.97
		モルタル	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		木材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		ガラス	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		陶磁器	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		鉄	6.19	6.19	8.42	8.42	9.90	9.90	9.90	11.27
		アルミニウム	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
その他		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
合計	358.20	358.20	427.44	427.44	473.60	473.60	473.60	524.96		
合計	844.29	844.29	913.53	922.24	968.40	968.40	976.15	1027.51		
RC造	上部構造	砂利・石材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		コンクリート	763.17	763.17	763.17	1144.54	1144.54	1144.54	1450.84	1450.84
		モルタル	43.77	43.77	43.77	43.77	43.77	43.77	43.77	43.77
		木材	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
		ガラス	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
		陶磁器	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45
		鉄	51.71	51.71	51.71	56.34	56.34	56.34	60.05	60.05
		アルミニウム	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
		その他	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65	7.65
	合計	872.28	872.28	872.28	1258.28	1258.28	1258.28	1568.30	1568.30	
	下部構造	砂利・石材	103.64	103.64	103.64	138.19	138.19	138.19	138.19	138.19
		コンクリート	613.20	613.20	613.20	776.06	776.06	776.06	776.06	776.06
		モルタル	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		木材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		ガラス	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		陶磁器	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		鉄	29.55	29.55	29.55	36.74	36.74	36.74	36.74	36.74
		アルミニウム	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
その他		0.51	0.51	0.51	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	
合計	746.90	746.90	746.90	951.67	951.67	951.67	951.67	951.67		
合計	1619.18	1619.18	1619.18	2209.95	2209.95	2209.95	2519.96	2519.96		



$$y(t) = \prod_{x=1}^t \frac{N_x - d_x}{N_x} \quad \text{式3.3.1}$$

ここで、 $y$ ：残存率、 $t$ ：経過年数(年)、 $N$ ：現存棟数、 $d$ ：解体棟数である。

残存率の推移を近似曲線に当てはめて推計するために、式3.3.2に示す一般的な成長率曲線（ロジスティック曲線）を用いた。

$$y(t) = \frac{K}{1 + \exp(ax + b)} \quad \text{式3.3.2}$$

ここで、 $K$ ：飽和定数、 $a$ 、 $b$ ：パラメータである。ただし、ロジスティック曲線は、そのまま変数変換しても線形化できないため、収束値（ $K=1$ ）を設定し、最小2乗法によりパラメータ $a$ 、 $b$ を求めることで特定した。なお、本研究では残存率が0.5時点の経過年数を滞留年数とした。

将来における建設副産物発生量は、原単位法により推計することとし、建築物を構造3種、用途3種の計9種別に分類し、式3.3.2より求めた9種の残存率曲線をそれぞれの建築物ストックに乘じ、さらに乗じた建築物ストックを元の建築物ストックから減じることで建設副産物発生量を推計した（式3.3.3）。

$$D(t) = B(t)\{1 - y(t)\} \quad \text{式3.3.3}$$

ここで、 $D$ ：建築副産物発生量、 $B$ ：建築物ストック量である。建築年が格納されていない建築物ポリゴンも存在したが、建築年が格納されている建築物ポリゴンに基づいて按分することで建築年を付加した。推計した期間は2006-2010年、2011-2015年、2016-2020年、2021-2025年、2026-2030年の5期間である

#### (4) 最尤法による解体確率及び将来の建設副産物発生量の推計手法

本研究では、将来の解体確率と建設副産物発生量の推計にあたって奥岡ら<sup>15)</sup>による最尤法を用いることとした。具体的には、式3.3.4に示す建築物の解体確率関数より、対象地域全域の工場を除く全建築物について1棟毎の解体確率を推計した。工場を除いた理由については、工場は企業が有する建築物であり、他の建築物とは大きく異なる挙動を示すと考えたためである。

$$p(t) = \frac{1}{1 + \exp\{-(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \beta_7)\}} \quad \text{式3.3.4}$$

ここで、 $p(t)$ ：建物年齢 $x_1$ (年)における解体確率、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 、 $x_6$ ：各変数因子、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$ 、 $\beta_6$ ：各偏回帰係数、 $\beta_7$ ：定数項である。これらパラメータは最尤法により決定することとし、具体的には、各変数因子について、建築物の特性や地理的因子、社会的因子のいずれかを代入し、精度の最も高い組み合わせを採用した。建築物の特性として建物階数（階）、構造ダミーRC造（RC造=1、その他の構造=0）、構造ダミー木造（木造=1、その他の構造=0）を、地理的因子として駅又はバス停からの距離（m）、傾斜角度（度）、標高（m）を、社会的因子として人口密度（人/km<sup>2</sup>）、人口増減率（%）、高齢化率（%）を代入した。また、シナリオとして、立地適正化計画（都市機能誘導区域及び居住誘導区域）の考慮の有無で2つ設定する。立地適正化計画を考慮した解体確率では、立地適正化計画をダミー変数（都市機能誘導区域・居住誘導区域=1、区域外=0）として代入した。本研究で対象とした北九州市における立地適正化計画を図3.3.4に示す。

解体確率の推計に使用したデータは、北九州市における経年の解体建築物のデータベース、国勢調査、国土数値情報の駅・バス停・傾斜・標高データ、北九州市都市計画データである。推計された解体確率が0.5以上の建築物を解体されるとして建設副産物発生量を推計した。推計した期間は2015-2019年、2020-2024年、2025-2029年、2030-2034年の4期間である。さらに、推計された解体確率を1から減じることで建築物残存確率を求め、残存確率が0.5時点の建物年齢を滞留年数とした。



図3.3.4 北九州市における都市機能誘導区域と居住誘導区域（立地適正化計画）

#### (5) 同一性判定システムによる建設資材フロー及び物質代謝の推計

本サブテーマでは、各年代間で同一の建築物かどうかを判定する同一性判定システムを構築し、建設資材のストックとフローを推計、物質代謝についての分析を行う。具体的には、図3.3.5、図3.3.6に示すように、各年代間で同一の建築物を認識し、それ以外の建築物を着工・解体建築物とするものであり、GISの機能である空間検索、属性検索を用いて年代間で同一建築物を認識するアルゴリズムをプログラムして構築した。本研究での同一性判定システムは、GIS上で独立した機能を一連のアルゴリズムとして処理することで空間情報、属性情報を同時に考慮することを可能としている。

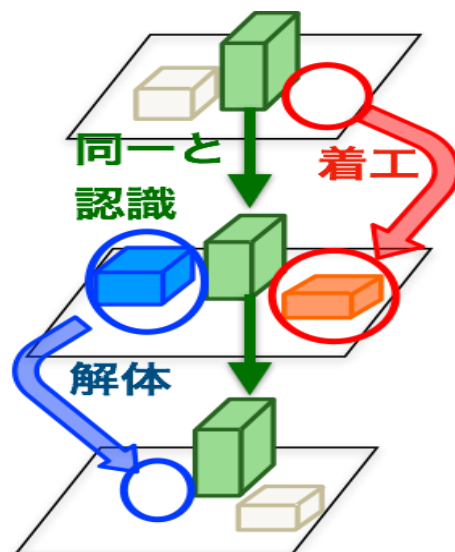


図3.3.5 建築物同一性判定システム概要

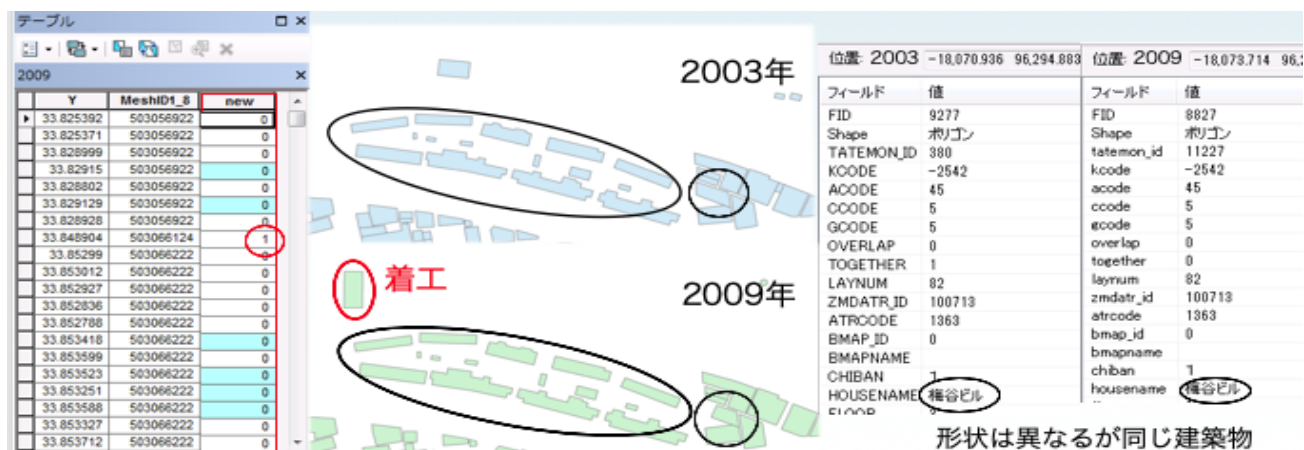


図3.3.6 同一性判定システムのGIS上でのイメージ

以下が、年代間での建築物同一性判定システムの分析フローである。

- ① 異なる2年代間の建築物ポリゴンの属性を位置情報に基づいて結合し、時系列データを構築する。
- ② 各建築物について、残存・着工（解体）を示す属性を付与することとし、全ての建築物に着工（解体）を示す”1”を定義する。
- ③ GISの空間検索機能を用いて、年代間で建物面積の誤差が10%以下である建築物を抽出し、該当した建築物の属性を、残存を示す”0”に変更する。
- ④ GISの属性検索機能を用いて、年代間で階数が同一であり、かつ建物名称において同一の文字列を含む建築物の属性を、残存を示す”0”へ変更する。
- ⑤ 残存、着工（解体）を示す属性が”1”である建築物が着工（解体）された建築物（フロー）であり、任意の集計単位で集計する。

同一性判定の推計精度は、使用するデータのポリゴン形状の正確性に依存する。ポリゴン形状の正確性が極めて高い場合には、年代間で建物形状が完全に一致する場合のみを同一と認識することが可能である。しかし、都心部から離れるほど、また時点が古くなるほど、ポリゴン形状の正確性は低くなる。年代間で建物形状が完全一致する場合のみを同一性判定基準に用いると、フローが過剰に推計される原因となる。そこで、分析フローの③については、青柳ら<sup>5)</sup>の手法を参考にし、年代間で建物面積の誤差が10%以下の場合にはデータ精度による建築物ポリゴンの形状変化であり同一と見なすこととした。また、年代間建築物の同一性判定基準に空間情報のみを利用する場合には、同一の建築物を認識しきれず、着工、解体建築物数が過剰に推計される。そこで、④において属性情報も利用することでデータ精度が低い場合においても名称から同一性の判断を可能とすることとしたが、名称が同一の文字列を含んでいる場合であっても階数が同一であるという条件が含まれているため、階数が異なる場合の増築や、建替えされた建築物は同一と認識されないよう工夫した。

物質代謝の推計方法は、建築物同一性判定システムを用い、着工（解体）建築物と判断された建築物について原単位法を用いて資材重量に変換し、ストックとフローを求める。本研究では、建設資材蓄積量（ストック）に対する建設資材更新量（フロー）を物質代謝とし、建設資材投入量及び廃棄量をそれぞれ蓄積量で除した年代間の代謝率（FRS：Flow Rate per Stock）を経過年数でさらに除したものを単年あたりの物質代謝率とする。

## 4. 結果及び考察

### 4. 1. ケーススタディ対象都市のマテリアルストック・フロー分析結果

北九州市全域における資材別、構造別、上部・下部構造別のマテリアルストック推計結果を図4.3.1、表4.3.1に示す。図4.3.1の縦軸の正の値は上部構造の、負の値は下部構造のマテリアルストック量を示している。

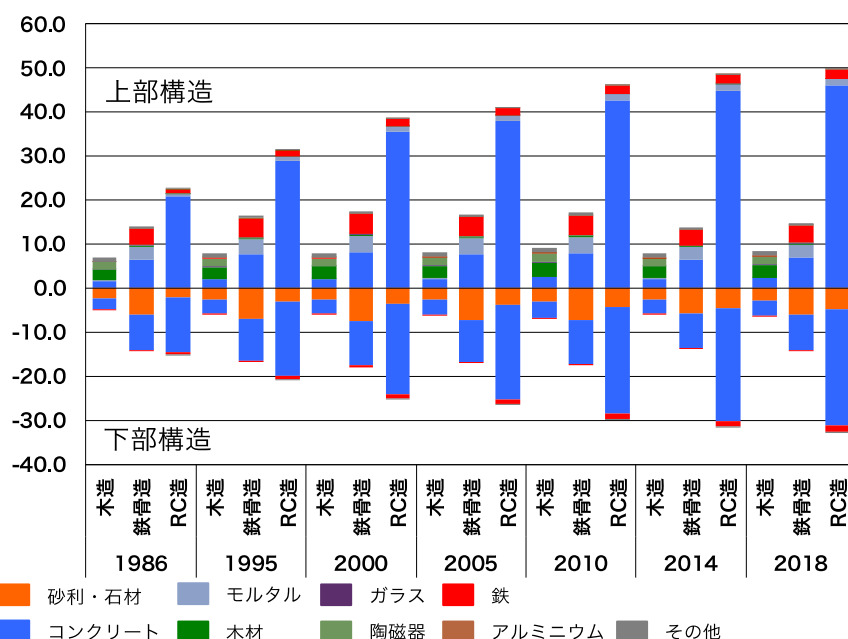


図4.3.1 北九州市における資材別マテリアルストック（上部・下部構造別）推計結果  
（単位・百万トン）

表4.3.1 北九州市におけるマテリアルストック推計結果（百万トン）

	1986	1995	2000	2005	2010	2014	2018
木造	11.86	13.78	13.87	14.21	16.23	13.81	14.74
鉄骨造	28.31	33.17	35.47	33.85	34.66	27.68	29.08
RC造	37.69	52.07	63.61	67.60	76.06	80.30	82.51
合計	77.86	99.03	112.95	115.66	126.95	121.79	126.34

木造建築物と鉄骨造建築物のストック量は、1986年がそれぞれ1,186万トン、2,831万トン、2018年がそれぞれ1,474万トン、2,908万トンであり、年毎に多少の増減はあるものの大きな変化は見られない。RC造建築物については、1986年には3,769万トンであったが2018年には8,251万トンと2倍以上に増加し、年々増加傾向にあることがわかる。資材投入原単位については、2000年には木造が487.52 kg/m<sup>2</sup>、鉄骨造が1,027.51 kg/m<sup>2</sup>、RC造が2,519.96 kg/m<sup>2</sup>であり、RC造は木造の5倍以上、鉄骨造と比較しても2倍以上大きい。そのため、木造建築物や鉄骨造建築物の棟数の増減よりもRC造建築物の棟数の増減によるストック量への影響は大きく、この点は建築物棟数とストック量の関係を理解するうえで注意が必要である。

全構造の建築物ストック量は、合計では2014年に少量減少したものの全体的に増加傾向にあり、1986年の7,786万トンから2018年には1億2,634万トンと約2倍に増加する。構造別に見ると、木造建築物及び鉄骨造建築物のストック量には大きな変化が見られないため、合計ストック量の増加はRC造建築物ストック量の大幅な増加によるものと考えられる。RC造建築物ストックが大きく増加した要因としては、建築物の高層化によるRC造建築物の増加が考えられる。少子高齢化や人口減少が特に顕著に現れている北九州市においては、まばらに存在する居住地を集約させるための都市計画が進められており、建築物の高層化による都市の立体化は必要不可欠なものとなっている。建築物の高層化には木造や鉄骨造よりも丈夫な構造であるRC造が適していることからRC造建築物の新規着工が増加したと同時に、1棟当たりのRC造建築物延床面積も増加し、結果としてストック量の大きな増加に繋がったと考えられる。また、マテリアルストックの推計に使用した資材投入原単位の増加も大きく影響したと考えられる。日本では地震



が頻繁に発生するため、建築基準法改正による耐震基準の引き上げが多数行われ、資材投入原単位は年々大きくなっている。例えばRC造の原単位は、1920年に1,619.18 kg/m<sup>2</sup>であったが2000年には2,519.96 kg/m<sup>2</sup>と約1,000kg/m<sup>2</sup>増加している。

資材別のストック量に着目すると、建築物ストック量の合計におけるコンクリートのストック量は、1986年の5,184万トンから2018年には9,303万トンと約2倍に増加し、建築物合計ストック量の約74%を占めることがわかる。これは、資材投入原単位にコンクリートが占める割合が最も大きいことによるものであり、RC造では2000年には約88%をコンクリートが占め、RC造建築物の増加がコンクリートのストック量の増加に直結した。立地適正化計画等の都市計画による都市の集約化・立体化を進める北九州市においては、今後もRC造建築物は増加し、コンクリートのストック量はますます増加すると見込まれることから、増加するコンクリートの効率的且つ計画的な利用が重要であることが示唆される。

対象とした北九州市におけるマテリアルストックの分布を図4.3.2に示す。推計は全年代に対して行ったが、ここでは代表として2018年を示す。

分布を見ると、建築物ストックの大部分が鉄道付近及び沿岸部に集まっていることがわかる。これは、鉄道付近は交通利便性が高いため、居住用建築物だけでなく商業用建築物等さまざまな建築物が集積し、建築物ストック量が大きくなったものと考えられる。特に北九州市の都市機能を有する小倉北区には、小倉駅を中心に大量の建築物ストックが蓄積している。また、沿岸部の工業地帯でも、工場が多数立地するため沿岸部の建築物ストック量が大きくなっている。なお、建築物ストックが集中する地域から少し離れた地域にも建築物ストックが点在するが、多くが傾斜の急な山裾に存在する建築物である。急勾配地域に新しく居住しようとする人々は少なく、現在居住している人が居住しなくなった場合、空き家となるケースが多い。そのため、現在でも空き家が多く存在し、今後も空き家が増加する可能性のある地域であるため、北九州市において問題となっているとともに、サブテーマ2で検討したように、これらの空き家をどのように利活用するかは、家庭部門のCO<sub>2</sub>排出量削減方策を検討するうえでも重要な観点となっている。

マテリアルストックの経時的な増減について、1986年に対する2018年の増減率を図4.3.3に示す。なお、1986年におけるマテリアルストックが0のメッシュについては、2018年におけるマテリアルストックが0

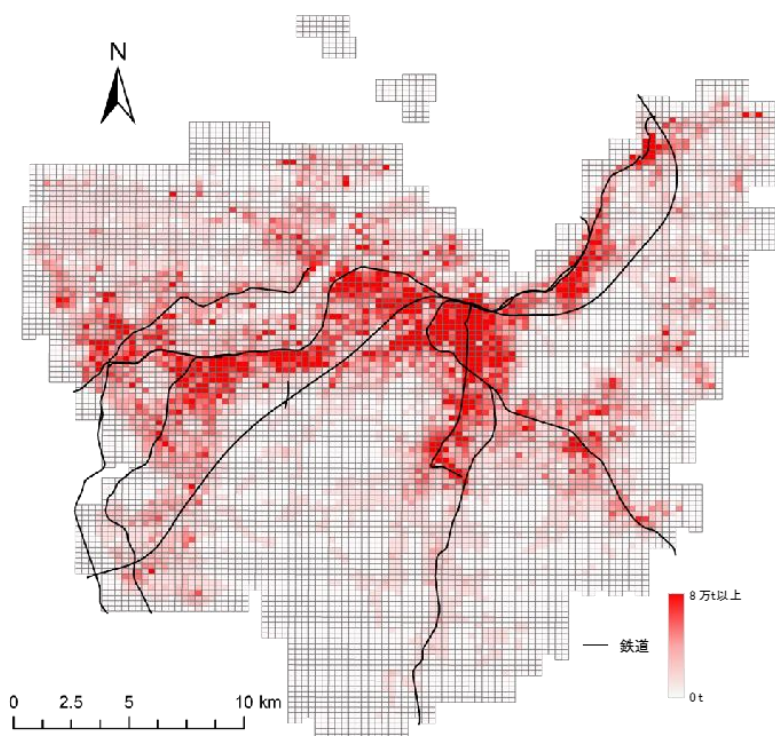


図4.3.2 北九州市におけるマテリアルストックの空間分布（2018年）

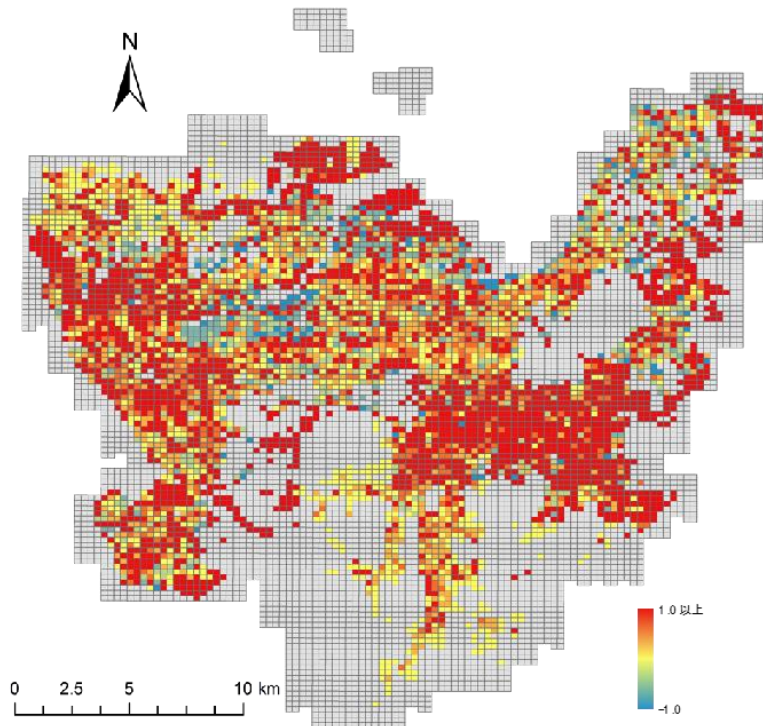


図4.3.3 マテリアルストックの増減率（1986年-2018年）

より大きい場合には増加したものとして取り扱った。

地域ごとの増減に着目すると、建築物ストックの減少は沿岸部で多く見られた。これは、近年の工業衰退とともに沿岸部の工場が減少していることが影響したと考えられる。また、建築物ストックの増加が都心部以外でも多く見られるが、これは居住地の新規開拓によるものと考えられる。

北九州市全域におけるマテリアルフローの推計結果を、表4.3.2に示す。投入量は1986-1995年の2,096万トンから2010-2014年には484万トンに減少しており、2000-2005年のみ他と比較し小さな値となっているものの、全体的に減少傾向にある。構造別内訳を見ると、全構造とも減少しているが、特にRC造は約7割も減少しており、投入量合計の減少に大きく影響していることがわかる。

排出量は、1986-1995年に227万トン、1995-2000年に705万トン、2000-2005年に649万トン、2005-2010

表4.3.2 マテリアルフロー推計結果（百万トン）

		1986-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2014
投入量	木造	2.22	1.08	0.46	0.91	0.38
	鉄骨造	7.06	5.19	2.26	5.55	1.56
	RC造	11.67	9.41	5.19	5.10	2.90
	合計	20.96	15.68	7.91	11.55	4.84
排出量	木造	0.25	0.66	0.52	0.56	0.23
	鉄骨造	1.69	3.59	3.55	2.47	1.66
	RC造	0.33	2.80	2.43	3.41	0.55
	合計	2.27	7.05	6.49	6.43	2.44
蓄積純増	木造	1.97	0.43	-0.06	0.35	0.15
	鉄骨造	5.37	1.60	-1.29	3.08	-0.11
	RC造	11.35	6.61	2.76	1.69	2.35
	合計	18.69	8.64	1.41	5.12	2.40



年に643万トン、2010-2014年に244万トンと推計された。1986-1995年のみ非常に小さい値となったが、1995-2000年からは減少傾向にあることが示された。構造別内訳では、2005-2010年を除く全ての年代間で鉄骨造の排出量が最も大きく、北九州市の工業衰退に伴う工場の解体が顕著に表れたと考えられる。特に、資材投入原単位表では鉄骨造の原単位がRC造と比較し1/2以下であるにもかかわらず、鉄骨造の排出量が最も大きくなっていることから、鉄骨造建築物が非常に大量に解体されていることが判明した。これについて、鉄骨造の排出量が1986-1995年の169万トンから1995-2000年には3.59万トンに増加し、1995-2000年以降は減少傾向にあることから、北九州市の工業衰退に伴う工場解体は1995年頃から特に激化したものと推察される。

蓄積純増については、投入量と同様の变化を示し、1986-1995年の1,869万トンから2010-2014年には240万トンに減少しており、2000-2005年のみ他と比較し小さな値となっているが、全体的に減少傾向にあることが示された。

#### 4. 2. 区間残存率推計法による建設副産物発生量の将来推計結果

区間残存率推計法を用いて推計された用途3種別（戸建住宅、集合住宅、業務施設）、構造3種別（木造、鉄骨造、RC造）の計9種別の残存率曲線を図4.3.4 (a)～(c)に、残存率が0.5時点の建物年齢である滞留年数を表4.3.3にまとめる。残存率曲線の推計は全年代に対して行ったが、ここでは代表として2000-2005年の結果を示す。

戸建住宅の残存率曲線は、他用途の残存率曲線と比較して傾きが緩やかであり、滞留年数についても木造、鉄骨造、RC造がそれぞれ、75.1年、64.3年、58.7年と他用途よりも大きく推計された。集合住宅や業務施設は企業や資産家等が建設・管理していることに対し、戸建住宅は初期費用さえあれば誰でも建設・管理できるため、一般的に建て替えをする経済的余裕がないことが多く、結果長期間使用されるため、戸建住宅の滞留年数は大きく、更新サイクルが長く推計された。集合住宅については、木造、鉄骨造、RC造の滞留年数がそれぞれ62.3年、50.3年、54.6年と推計された。RC造は耐震性や耐久性等が他構

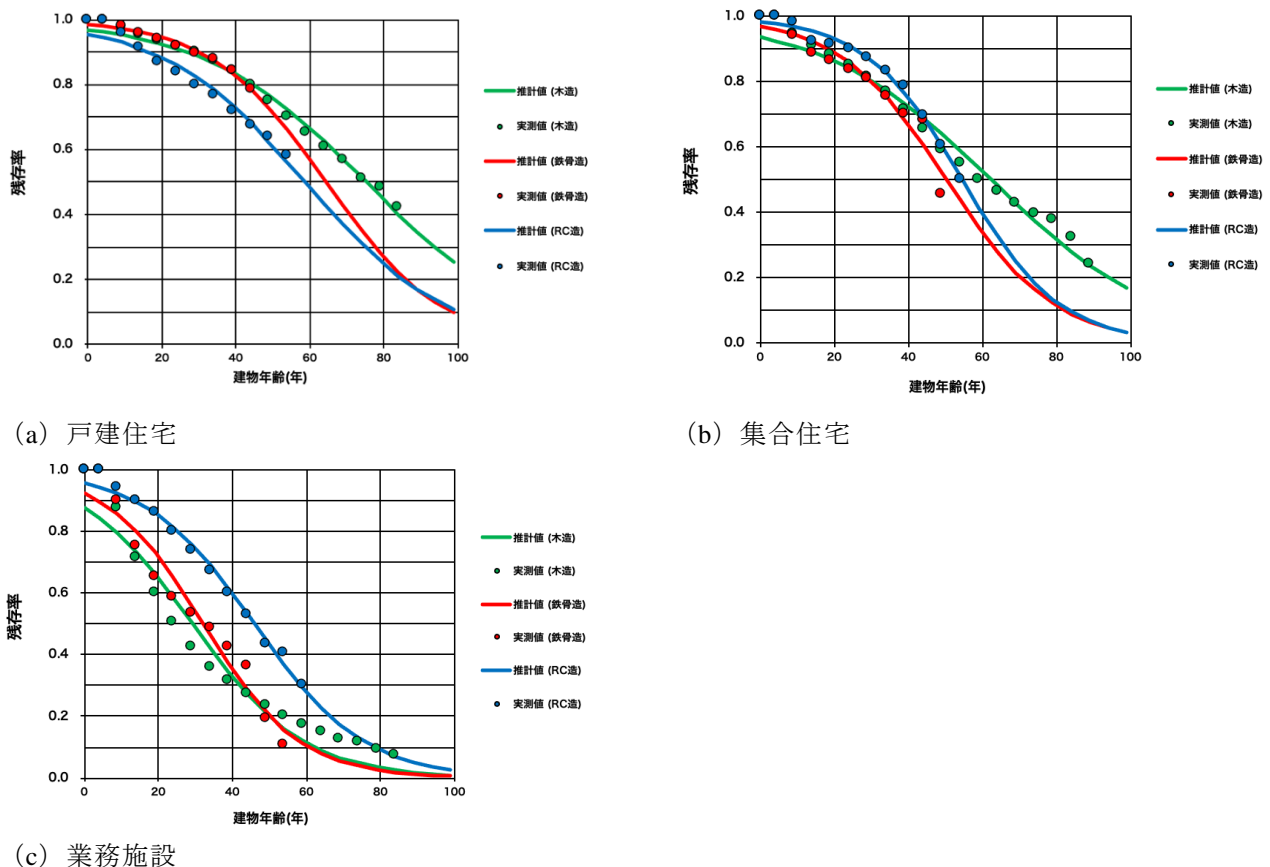


図4.3.4 残存率曲線の推計結果（2000-2005年）

表4.3.3 滞留年数推計結果（年）（2000-2005年）

		用途		
		戸建住宅	集合住宅	業務施設
構造	木造	75.1	62.3	29.3
	鉄骨造	64.3	50.3	32.1
	RC造	58.7	54.6	46

造よりも強く丈夫な構造であるが、滞留年数が比較的小さく推計された。これは、北九州市における工業からの産業転換や再開発のために工業系企業所有の社宅マンション等の集合住宅が戸建住宅や大学等の業務施設へ建て替えが盛んに行われていることが影響したと考えられる。業務施設の残存率曲線は他用途と比較すると最も傾きが急であり、推計された滞留年数も木造、鉄骨造、RC造がそれぞれ29.3年、32.1年、46.0年と他用途と比較して最も小さくなった。これは、大部分の業務施設の建築物所有者が企業であり資金が多くあって建設・解体が容易に可能である点や建築物の解体を建築物の寿命では無く企業への収益性により行える点が、業務施設の滞留年数の小ささに影響したと考えられる。また、スーパーやコンビニ等の商業・業務施設は長期的な営業を考えていない経営方針や建設コスト等の理由から、費用が安価で撤去が容易な鉄骨造が採用されることが多いことは、特に鉄骨造の滞留年数の小ささに影響したと考えられる。

区間残存率推計法により求めた残存率曲線を用いて、用途3種、構造3種の計9種別に建設副産物発生量の将来推計を行った結果を表4.3.4に示す。区間残存率推計法は何十年という長いスパンで建築物の変遷を見る手法とは異なり、短期の建築物の変遷に基づいて推計する手法であり、そのため対象期間の傾向が強く推計結果に表れる。そのため、異なる時点から得られた残存率曲線を用いて将来の推計を行うことで、さまざまな将来の都市構造変化を考慮した分析を行うことが可能である。前述したように、北九州市は、工業都市としての発展ののち、工業衰退と工場跡地の再開発という社会的な動きをたどっているが、これと平行して、地理的優位性を活かした「ひびきコンテナターミナル」の国際物流拠点港としての整備、アジア太平洋インポートマート（Asia-pacific Import Mart、AIM）や北九州国際会議場、大型シティホテルや百貨店等の商業系地域としての発展や、工業地帯や都心への通勤者のためのベットタウンとしての発展、北九州学術研究都市等の最先端科学技術の教育・研究機関と連携した知的の基盤などが進んでおり、想定する都市構造シナリオに応じた残存率曲線を選択することで、これらの社会的な動きによる将来の建設副産物発生量を推計できる。

本分析では、産業転換と工業から業務施設や住宅への建て替わりを想定して、2000-2005年の残存率曲線（図4.3.4・表4.3.3）の分析結果を用いて将来の建設副産物発生量を推計した。戸建住宅の建設副産物発生量は、いずれの期間でも木造が最も大きく、2006-2010年の41.6万トンから2026-2030年には65.0万トンと増加傾向にあることがわかる。これは、戸建住宅は木造の割合が大部分を占め、昔ながらの木造戸建住宅が現在においても多く建ち並ぶことから、老朽化による解体によって建設副産物発生量が大きくなったと考えられる。

集合住宅については、全期間においてRC造が最も大きな値を示し、2006-2010年の167.7万トンから2026-2030年には326.6万トンと約2倍に増加した。他用途、他構造の建設副産物発生量と比較してもRC造集合住宅の建設副産物発生量の増加率が最も大きく、年々大きな増加傾向にあるが、これは北九州市の工業衰退に伴うRC造社宅マンションの建て替り等が大きく影響したと考えられる。

業務施設については、工業等を含む鉄骨造の値が最も大きいのが、2006-2010年の403.7万トンから2026-2030年の367.0万トンに減少する。木造についても、2006-2010年の13.1万トンから2026-2030年の9.9万トンに減少し、これらのみが建設副産物発生量の減少傾向を示している。

建設副産物発生量の合計では、2006-2010年の921.2万トンから2026-2030年には1,147.0万トンに増加し、増加傾向を示すことがわかった。2005年における建築物ストック量は1億1,566万トンであるため、約8-10%の建築物が毎期間解体されることに相当する。表4.3.2に示す排出量の合計値では1995-2000年の705万トンから2010-2014年の244万トンに減少し全体として減少傾向を示しているが、前述した通り推計に

表4.3.4 将来における建設副産物の推計結果（千トン）

		2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2025	2026-2030
戸建住宅	木造	416	473	532	592	650
	鉄骨造	88	113	142	174	207
	RC造	138	158	177	194	209
集合住宅	木造	44	47	50	52	53
	鉄骨造	233	261	287	310	326
	RC造	1,677	2,082	2,507	2,915	3,266
業務施設	木造	131	121	111	104	99
	鉄骨造	4,037	4,001	3,903	3,781	3,670
	RC造	2,448	2,675	2,846	2,950	2,990
合計		9,212	9,932	10,556	11,072	11,470

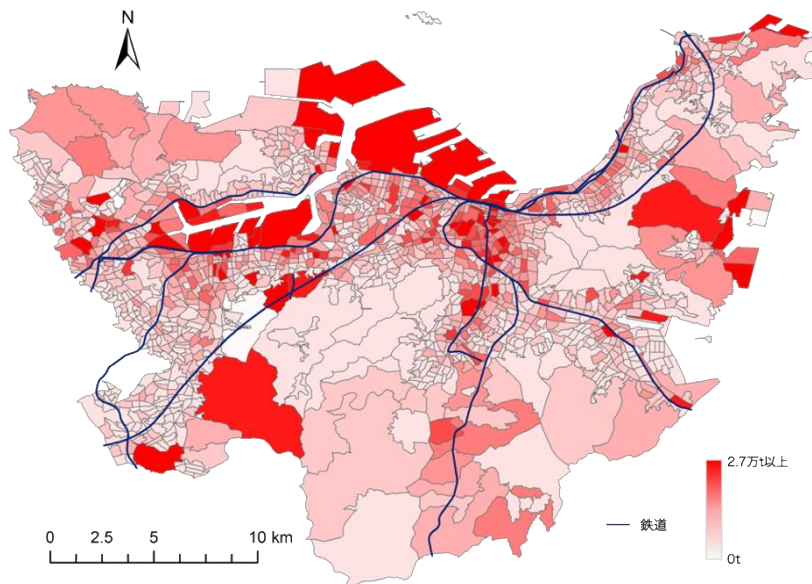


図4.3.5 建設副産物の町丁目別分布（2026-2030年）

あたって区間残存率推計法を用いているため、用いた残存率曲線の対象期間の傾向が表れたものと考えられる。ただし、2006-2010年における建設副産物発生量の推計値921.2万トンに対して、表4.3.2における2005-2010年の排出量合計値は643万トンであり、2000-2005年の社会的な動きと類似する傾向を示す年代においては4d-GISを用いた推計値に近い推計が可能であることがわかる。

建設副産物発生量の町丁目別分布について、2026-2030年の結果を図4.3.5に示す。地区ごとの発生量に着目すると、沿岸部や鉄道沿線において建設副産物発生量が大きく分布していることがわかる。これは、沿岸部は鉄骨造業務施設である工場が多く存在するため、それらが建設副産物として排出されたためと考えられる。北九州市南西部及び東部においても同様に、他地域と比較して鉄骨造業務施設の建設副産物が大きく推計されている。また、小倉駅付近等の都市部では、大量にRC造業務施設及び集合住宅が建設されているため、それらが建設副産物として排出されると推計された。

#### 4. 3. 最尤法による滞留年数及び将来の建設副産物発生量の推計結果

奥岡ら<sup>15)</sup>による最尤法を用いて解体確率を推計した結果のパラメータを表4.3.5に示す。分析では、変数因子として表4.3.5の12項目を対象としたが、優位とされたパラメータの数値のみ示している。具体的には、何も考慮しないシナリオについては、建物階数や駅/バス停からの距離等を含む6項目が選択され、

表4.3.5 解体確率のパラメータ推計結果

	考慮無し		立地適正化計画	
	偏回帰係数	P値	偏回帰係数	P値
定数項	2.238 ***		1.869 ***	
建物年齢(年)	0.03992 ***		0.04266 ***	
構造ダミー(RC=1, その他=0)	0.3208 ***		0.2036 ***	
構造ダミー(W=1, その他=0)				
建物階数(階)	-0.1111 ***			
駅orバス停からの距離(m)	-0.001601 ***			
傾斜角度(度)	0.1074 ***		0.09028 ***	
標高(m)				
人口密度(人/km2)				
人口増減率(%)				
高齢化率(%)	-0.2298 ***		-0.2313 ***	
立地適正化計画 (都市機能誘導区域・居住誘導区域=1, 区域外=0)			-0.2083 ***	

P値&lt;0.001 \*\*\*

表4.3.6 パラメータに対する滞留年数変化率

	考慮無し		立地適正化計画	
	変化	滞留年数(年)	変化	滞留年数(年)
構造ダミー(RC=1, その他=0)	0 → 1	-8.04	0 → 1	-4.77
建物階数(階)	+1	+2.78		
駅orバス停からの距離(m)	+100	+4.01		
傾斜角度(度)	+1	-2.69	+1	-2.12
高齢化率(%)	+1	+5.76	+1	+5.42
立地適正化計画 (都市機能誘導区域・居住誘導区域=1, 区域外=0)			0 → 1	+4.88

低炭素都市に向けて立地適正化計画に沿った集約化が進むと想定したシナリオについてはRC造ダミー変数や傾斜角度等を含む5項目が選択された。

このように選択された変数因子に対して、その変化の滞留年数の応答を表4.3.6にまとめる。RC造ダミー変数の変化(0→1)については、いずれのシナリオでも滞留年数はマイナス変化を示し、RC造建築物は木造建築物及び鉄骨造建築物と比較して、考慮無しシナリオ、立地適正化計画考慮シナリオそれぞれで8.04年、4.77年小さくなることわかる。これは、RC造は他構造と比較し丈夫な構造であるものの、滞留年数が長い木造戸建住宅の棟数が非常に多いために、その影響を受けたものと考えられる。

傾斜角度変化(+1度)については、いずれも滞留年数はマイナスに変化し、考慮なしシナリオでは2.69年、立地適正化計画考慮シナリオでは2.12年小さくなった。地震が多発する日本において、傾斜角度が大きい地域では土砂災害等の危険性が高く、災害により、建築物の寿命よりも早くに倒壊してしまった場合や危険性を危惧し、移転や老朽化が激しい建築物については早期解体等が行われることもあることを反映し、傾斜が大きい地域ほど建築物滞留年数が小さく推計された。

高齢化率変化(+1%)については、2つのシナリオ共に滞留年数はプラスの変化を示し、それぞれ5.76年、5.42年大きくなった。これは、高齢者は若者と比較し移住する可能性は低いことを反映した結果と考えられる。

立地適正化計画を考慮したシナリオについては、都市機能誘導区域及び居住誘導区域内の場合、区域

表4.3.7 建設副産物発生量の将来推計結果（千トン）

		2015-2019	2020-2024	2025-2029	2030-2034
考慮無し	木造	380	88	209	270
	鉄骨造	732	467	599	657
	RC造	1,509	570	1,190	1,033
	合計	2,620	1,125	1,998	1,960
立地適正化計画	木造	371	88	226	248
	鉄骨造	721	510	649	654
	RC造	1,954	621	1,114	1,630
	合計	3,045	1,219	1,989	2,532

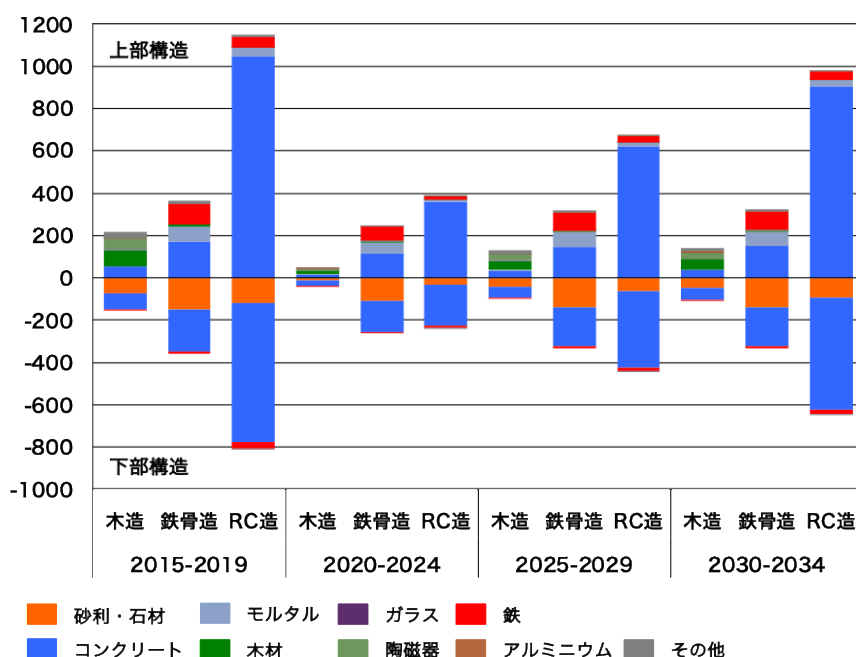


図4.3.6 資料別建設副産物発生量の将来推計結果（立地適正化計画考慮シナリオ）（千トン）

外と比較し滞留年数が4.88年大きくなることからわかる。立地適正化計画の施策には、都市機能誘導区域で街なか活性化に寄与する都市機能の誘導・集約及び選択と集中の観点からの公共施設の再構築が挙げられており、居住誘導区域では街なかに住みたいと思う転入者を応援する仕組みづくりや街なかにおける住宅市街地の整備、中古住宅・空き家などの流通促進、交流人口増の取り組みが挙げられている。これらの施策により区域内では生活快適性や利便性が向上したことで、結果建築物滞留年数の増加が推計されたものと考えられる。

最尤法を用いて推計された解体確率を用いて、各建築物について解体判定（解体確率0.5以上を解体と判定）を行い、将来における建設副産物発生量の推計を行った。図4.3.6に、立地適正化計画を考慮したシナリオについて建設副産物発生量を資料別に示し、表4.3.7に2つのシナリオについて構造別に建設副産物発生量をまとめる。なお図では、縦軸の正の値は上部構造より、負の値は下部構造より発生する建設副産物の量を示している。

建設副産物発生量の合計値は、考慮無しシナリオと立地適正化計画を考慮したシナリオのいずれでも2015-2019年にはそれぞれ262.0万トン、304.5万トンと他期間と比較して非常に大きく推計された。それ以降の2020-2024年にはそれぞれ112.5万トン、121.9万トンであるが、2030-2034年は196.0万トン、253.2万トンと増加傾向にある。2015-2019年における建設副産物発生量が大きく推計された要因としては、2015-2019年が最尤法による建築物解体判定を行った最初の年代であるため、2015時点で滞留年数を大きく超えて激しい老朽化状態にある建築物が多数存在していると見なされ、それらの建築物が一斉に解体と判

定されたことが挙げられる。

北九州市産業廃棄物対策課<sup>16)</sup>によると、2017年度の北九州市における建設副産物発生量は44.5万トンであった。本研究の推計は5年単位で行っているため、1年あたりの発生量として見た場合には立地適正化計画を考慮したシナリオでの発生量は2015-2019年には毎年60.9万トンと推計され、実績値と比較するとやや大きく推計されていることがわかる。将来を見た場合に、2030-2034年の1年あたりの発生量は50.64万トンと推計されており、実績値（44.5万トン）よりも大きいことから、この差分である6.14万トンの建設副産物を適切に処理できるような計画が必要であることが示唆される。

資材別に見ると、2030-2034年の建設副産物発生量に占めるコンクリートの割合は74%であり、大部分を占めていることがわかる。また、建設副産物発生量は増加傾向にあり、今後もコンクリート発生量は増加することが予測されるため、膨大なコンクリートを適切に処理できる体制の整備が急務になることが示唆された。さらに、建設副産物発生量の約4割は建築物の下部構造、つまり大部分が地面に埋まっている部分から発生する建設副産物である。下部構造より発生する建設副産物は建築物の上部構造より発生する建設副産物とは異なり、土等不純物が多く混ざっているため再利用が上部構造と比較し困難である。このことから、量だけではなく、建設副産物の質についても考慮して適切な処理・再利用を行うことが必要であることが示唆された。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究で拡張・整備した建築物の3次元情報を経年的に格納して構成したデータベース（4d-GIS）を用いることで、経年で都市の変化を詳細に捉えることが可能になった。これにより、年代間での物質フローの分布の比較や、全体の物質フローの集計が可能になり、都市構造物がどういったサイクルで蓄積され、後に廃棄されるか、といった物質の一連の流れを定量化できる。また、マテリアルストックが都市・地域のどこに蓄積されているかも把握することができ、これを用いることで、対象地域の建築物の経年的な推移や資源の活用の観点も踏まえながら、都道府県や市町村等の地方自治体や都市・地域を対象に低炭素な土地利用や都市構造を検討することを可能とした。

4d-GISを用いた解析により、構造別・用途別に建築物の滞留年数を明らかにできたほか、立地適正化を進めることで建築物の滞留年数が延び、建設副産物発生量の低減が図れるが、高齢化により建築物の滞留年数は増加することを明らかにした。これら成果は、都市・地域において低炭素化対策を効果的に推進するためには、土地利用の誘導等によるコンパクト化など、土地利用や都市構造変化も含めた検討と、高齢化など地域特有の課題も考慮した検討が重要であることが示唆されるものである。

マテリアルストックとフローの分析からは、対象とした北九州市においては現在のストックの多くはRC造の建築物によるものであり、少子高齢化や人口減少が特に顕著に現れている北九州市においては、まばらに存在する居住地を集約させるための都市計画が進められていることを勘案すると、将来はストックと建設副産物のいずれでもRC造、特に資材としてはコンクリートの増加が見込まれ、ストックについてはコンクリートの効率的かつ計画的な利用を、実績値よりも増加すると推計された建設副産物についても適切に処理できるような計画が必要であることが示唆された。

これら成果は、国内外の雑誌での論文発表や学会等での報告を行い、複数の学術集会にて論文賞や優秀発表賞等を受賞している。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

低炭素型の地域へ再構築するには、建築物などの建設ストックの状況と、将来的な建替・更新に関する情報を整備・把握していくことが重要である。また、建築物には多量の建設資材が投入・蓄積されて



おり、効率的な資源・エネルギー消費を検討するうえでもこれらの情報が不可欠である。本研究で整備した4d-GISは、建物詳細でこれらの情報整備と可視化を行うことができ、本研究で明らかにした建物の着工から解体までの平均年数（平均滞留年数）とあわせて、地域を再構築していくための政策決定や議論において、再構築を進める地区の優先順位の検討等に役立つことが期待される。

また、政府審議会等において委員として活動し、本研究を通じて得た知見をもとに議論へ貢献することなどを通じて、我が国及び国際的な環境政策への貢献を行っている。

## 6. 国際共同研究等の状況

国際的な機関との連携・協働として、国連環境計画（UNEP）の資源パネルにおいて、CSIRO（ドイツ）のDr. Hainz Schandlとともに、各国の資源利用状況を定量評価した調査・分析により、世界全体の資源戦略の検討を行ってきた。

## 7. 研究成果の発表状況

### （1）誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) K. YOSHIDA, K. OKUOKA, A. MIATTO, L. SCHEBEK and H. TANIKAWA: Resources 2019, 8(3):126, (2019)  
“Estimation of Mining and Landfilling Activities with Associated Overburden through Satellite Data: Germany 2000–2010”
- 2) T.C. NGUYEN, T. FISHMAN, A. MIATTO and H. TANIKAWA: Journal of Industrial Ecology, 23, 3, 663-673 (2019)  
“Estimating the Material Stock of Roads: The Vietnamese Case Study”
- 3) J. GUOI, A. MIATTO, F. SHI and H. TANIKAWA: Resources, Conservation&Recycling, 146, 45-54 (2019)  
“Spatially explicit material stock analysis of buildings in Eastern China metropolises”
- 4) A. MIATTO, H. SCHANDL and H. TANIKAWA: Conservation and Recycling, 142, 245-256 (2019)  
“A spatial analysis of material stock accumulation and demolition waste potential of buildings: A case study of Padua”
- 5) 朝隈友哉, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 環境情報科学, 32, 13-18 (2018)  
「建築物の年代間での同一性判定を用いた東京都市圏における更新量の推計」
- 6) M.F.G. MARTINICO-PEREZ, H. SCHANDL and H. TANIKAWA: Resources, Conservation and Recycling, 138, 74-86 (2018)  
“Sustainability indicators from resources flow trends in the Philippines”
- 7) M.F.G. MARTINICO-PEREZ, H. SCHANDL, T. FISHMAN and H. TANIKAWA: Ecological Economics, 147, 155-166 (2017)  
“The Socio-Economic Metabolism of an Emerging Economy: Monitoring Progress of Decoupling of Economic Growth and Environmental Pressures in the Philippines”
- 8) Y. DOU, S. OHNISHI, M. FUJII, T. TOGAWA, T. FUJITA, H. TANIKAWA and L. DONG: Journal of Cleaner Production, 170, 548-558 (2017)  
“Feasibility of Developing Heat Exchange Network between Incineration Facilities and Industries in Cities: Case of Tokyo Metropolitan Area”
- 9) Y. DOU, M. FUJII, T. FUJITA, K. GOMI, S. MAKI and H. TANIKAWA: Journal of Japan Society of Civil Engineers, 73, 6, II\_353-II\_363 (2017)  
“Potential of Waste Heat Exchange Considering Industrial Location Changes: A Case of Shinchi-Soma Region in Fukushima, Japan”

### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

### （2）口頭発表（学会等）

- 1) 齋藤隆成, 平井千津子, 谷川寛樹: 2019年度環境情報科学研究発表大会, 東京 (2019)  
「深層学習を用いた建築物ストック推計に向けた研究—東京都市圏におけるケーススタディ」
- 2) 森田大登, 正木晃平, 深堀秀敏, 東修, 白川博章, 谷川寛樹: 2019年度環境情報科学研究発表大会, 東京 (2019)  
「地理的・社会的要因を考慮した空き家分布のモデルに関する研究—福岡県北九州市を対象としたケーススタディー」
- 3) 吉田英立, 朝隈友哉, 谷川寛樹: 2019年度環境情報科学研究発表大会, 東京 (2019)  
「GISを用いた東京都市圏における建設ストックの時空間分析」
- 4) 朝隈友哉, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第30回廃棄物循環学会研究会, 仙台 (2019)  
「同一性判定システムを用いた東京都市圏における建設資材の偏在性及び動態に関する研究」
- 5) 正木晃平, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第30回廃棄物循環学会研究会, 仙台 (2019)  
「4d-GISによる最尤法を用いた建築副産物発生量の将来推計 - 名古屋市中心部のケーススタディー」
- 6) 山下奈穂, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第30回廃棄物循環学会研究会, 仙台 (2019)  
「廃棄物産業関連表及び森林・都市動態モデルによる木質資源量の評価」
- 7) 朝隈友哉, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 公益社団法人環境科学会2019年会, 名古屋 (2019)  
「年代間の同一性判定システムを用いた東京都市圏における物質代謝の推計」
- 8) 正木晃平, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 公益社団法人環境科学会2019年会, 名古屋 (2019)  
「区間残存率法を用いた将来の建設副産物発生量の推計-4d-GISによる北九州市のケーススタディー」
- 9) 山本大陸, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 公益社団法人環境科学会2019年会, 名古屋 (2019)  
「利用区分に応じた物質ストックデータベースの構築～現代・退蔵を考慮した住宅のケーススタディー～」
- 10) 山下奈穂, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 公益社団法人環境科学会2019年会, 名古屋 (2019)  
「都市・森林間の最適な輸送経路による木質資源循環圏の時空間分析 - 木曽川流域における搬出優先度を考慮したケーススタディー」
- 11) 松尾佑磨, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 公益社団法人環境科学会2019年会, 名古屋 (2019)  
「名古屋市における道路更新に伴う物質ストック・フローの定量化」
- 12) 大澤啓裕, 正木晃平, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 公益社団法人環境科学会2019年会, 名古屋 (2019)  
「名古屋市中心部における建築物ストックと空き家の詳細分布の把握」
- 13) 齋藤隆成, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 公益社団法人環境科学会2019年会, 名古屋 (2019)  
「衛星画像を用いた建設物及び道路ストック推計に向けた深層学習によるピクセル分類手法の提案」
- 14) 森田大登, 正木晃平, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹, 深堀秀俊: 公益社団法人環境科学会2019年会, 名古屋 (2019)  
「北九州市における立地適正化計画が物質ストックに与える影響の定量化」
- 15) 吉田英立, 朝隈友哉, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 公益社団法人環境科学会2019年会, 名古屋 (2019)  
「二次資源量推計に向けたGISによる東京都市圏の建設ストックデータベースの構築」

- 16) J. GUO, Y. WANG, H. WANG and H. TANIKAWA: 10th International Conference on Industrial Ecology 2019, Beijing, China (2019)  
 “Understanding and Managing residential buildings in Japan's transition toward a stock type society”
- 17) W. WUYTS, A. MIATTO and H. TANIKAWA: 10th International Conference on Industrial Ecology 2019 2019, Beijing, China (2019)  
 “ Understanding and Managing residential buildings in Japan's transition toward a stock type society”
- 18) N. YAMASHITA, K. OKUOKA and H. TANIKAWA: 10th International Conference on Industrial Ecology 2019, Beijing, China (2019)  
 “Spatial Estimation of Potential Wood Resources in Japan's Man-made Forests”
- 19) 齋藤隆成, 西尾文吾, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会, 大阪 (2019)  
 「深層学習を用いた衛星夜間光データによる物質ストックの推計に関する基礎的検討」
- 20) 森田大登, 正木晃平, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会, 大阪 (2019)  
 「4d-GISを用いた北九州市の建築物の物質ストック・フロー推計と地域情報との関係分析」
- 21) 吉田英立, 朝隈友哉, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会, 大阪 (2019)  
 「地理情報システムを用いた九州全域の建築物に関する物質ストックデータベースの構築」
- 22) 奥岡桂次郎, 山下奈穂, 谷川寛樹: 第15回GISコミュニティフォーラム, 東京 (2019)  
 「木材資源はどこにある?—森林, 製材, 傾斜, 及び都市—」
- 23) 松尾佑磨, 藤田恭介, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 平成30年度土木学会中部支部研究発表会, 名古屋 (2019)  
 「空港・港湾を対象とした輸送インフラ毎の旅客数及び貨物量と物質ストックの比較」
- 24) M. SIMON, H. TANIKAWA, W. STEFFI and S. LISELOTTE: 平成30年度土木学会中部支部研究発表会, 名古屋 (2019)  
 “Sea level rise and the impact on the material stock in small developing island states a case study in the Republic of Fiji”
- 25) S. DIMA, B. NISHIO, T. ASAKUMA, K. OKUOKA and H. TANIKAWA: 平成30年度土木学会中部支部研究発表会, 名古屋 (2019)  
 “ Comparison of New York and Tokyo’s material stock of buildings estimation model using nighttime light data”
- 26) 藤田恭介, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 平成30年度土木学会中部支部研究発表会, 名古屋 (2019)  
 「道路面データを用いた名古屋市中心部における道路4d-GISデータベースの構築」
- 27) 朝隈智哉, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第32回環境情報科学 学術研究論文発表会, 東京 (2018)  
 「4d-GISのデータを自動分析を目指した同一性判定システムによる主要都市での建築物更新量の推計精度の検証」
- 28) 大澤啓裕, 谷川寛樹, 奥岡桂次郎, 野中一鴻, 正木晃平: 第32回環境情報科学学術研究論文発表会, 東京 (2018)  
 「モンテカルロシミュレーションによる建築物滞留年数の推計-名古屋市中心部及び北九州市小倉の4d-GISを用いて-」
- 29) 松尾佑磨, 谷川寛樹, 奥岡桂次郎, 藤田恭介, 山本大陸: 第32回環境情報科学学術研究論文発表会, 東京 (2018)  
 「空港・港湾を対象とした輸送インフラ毎のストック利用効率の推計-旅客数及び貨物量と物質ストックの比較-」
- 30) S. DIMA, 西尾文吾, 朝隈友哉, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第32回環境情報科学学術研究論文発表会, 東京 (2018)

“Comparison of New York and Tokyo's material stock of building estimation model using nighttime light data”

- 31) 藤田恭介, 谷川寛樹, 奥岡桂次郎: 第46回環境システム研究発表会, 名古屋 (2018)  
「建設系物質ストックの利用度に応じた定量化手法の構築に関する研究」
- 32) 西尾文吾, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第46回環境システム研究発表会, 名古屋 (2018)  
「東京都市圏を対象とした衛星夜間光データを用いた建築ストックの推計モデルの開発」
- 33) 正木晃平, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹, 深堀秀俊: 第46回環境システム研究発表会, 名古屋 (2018)  
「重回帰モデルによる空き家の空間分布に対する影響因子の分析～建築物詳細情報を用いた北九州市のケーススタディー～」
- 34) 山本大陸, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第46回環境システム研究発表会, 名古屋 (2018)  
「退蔵ストック定量化に向けた建築物の動的廃棄率の推計」
- 35) 山下奈穂, 谷川寛樹, 奥岡桂次郎: 第46回環境システム研究発表会, 名古屋 (2018)  
「地理空間情報を用いた林地残材を含む齢級別木材資源量の推計 -木曾川流域におけるケーススタディー-」
- 36) 朝隈智哉, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第46回環境システム研究発表会, 名古屋 (2018)  
「4d-GISのデータを自動分析を目指した同一性判定システムによる主要都市での建築物更新量の推計精度の検証」
- 37) A. MIATTO and H. TANIKAWA: The International Society for Industrial Ecology 6th Asia-Pacific Conference 2018, Qingdao, China (2018)  
“Material flow and stock analysis of long lived buildings: the case study of Padua (Italy)”
- 38) J. GUO, K. OKUOKA and H. TANIKAWA: The International Society for Industrial Ecology 6th Asia-Pacific Conference 2018, Qingdao, China (2018)  
“GIS-based analysis of building material stock in Eastern cities of China”
- 39) M.F.G. MARTINICO-PEREZ, K. OKUOKA and H. TANIKAWA: The International Society for Industrial Ecology 6th Asia-Pacific Conference 2018, Qingdao, China (2018)  
“Total Material and Energy Flow and Resource Productivity of the Philippines”
- 40) 藤田恭介, 谷川寛樹, 奥岡桂次郎: 公益社団法人環境科学会2018年会, 東京 (2018)  
「時系列道路ネットワークデータベースを用いた, 道路インフラにおける物質ストックの退蔵・退役量の推計」
- 41) 正木晃平, 谷川寛樹, 奥岡桂次郎, 深堀秀敏: 公益社団法人環境科学会2018年会, 東京 (2018)  
「建築物実態調査に基づく空き家の空間分布の推計～北九州市の建築物詳細情報を用いたケーススタディー～」
- 42) 山本大陸, 谷川寛樹, 奥岡桂次郎, 藤田恭介: 公益社団法人環境科学会2018年会, 東京 (2018)  
「建築物滞留モデルを用いた住宅利用料及び空き家に関わる退蔵ストックの推計」
- 43) 山下奈穂, 谷川寛樹, 奥岡桂次郎: 公益社団法人環境科学会2018年会, 東京 (2018)  
「都市・森林間における木材需要バランスを考慮した最適な輸送システムの検討-木曾川流域におけるケーススタディー-」
- 44) 朝隈智哉, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 公益社団法人環境科学会2018年会, 東京 (2018)  
「建築物の構造・用途ごとの建設資材蓄積量及び更新量の推計-東京都及び周辺都市を対象とした同一性判定のケーススタディー-」
- 45) 大澤啓裕, 谷川寛樹, 奥岡桂次郎, 野中一鴻, 正木晃平: 平成30年度土木学会関西支部年次学術講演会, 神戸 (2018)  
「1994年から2014年における4d-GISによる都市構造物を対象とした名古屋市中心部における物質ストック・フロー分析」
- 46) 松尾佑磨, 谷川寛樹, 奥岡桂次郎, 藤田恭介, 山本大陸: 平成30年度土木学会関西支部年次学術講演会, 神戸 (2018)

「空港における物質ストックの量とストック価値の推計」

- 47) S. DIMA, 西尾文吾, 朝隈友哉, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 平成30年度土木学会関西支部年次学術講演会, 神戸 (2018)  
「Assessment of Estimation Model of Material Stock of Buildings with S-NPP VIIRS Nighttime Light Data」
- 48) 西尾文吾, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第14回GISコミュニティフォーラム, 東京 (2018),  
「宇宙からみる夜景～世界の都市はどう変化する?～」
- 49) A. MIATTO and H. TANIKAWA: Industrial Ecology Gordon Research Conferences, Les Diablerets, Switzerland (2018)  
“Revisiting thr Weight of Nations”
- 50) 朝隈友哉, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 平成29年度土木学会中部支部研究発表会, 名古屋 (2018)  
「年代間での建築物一致自動判定を用いた東京都市圏における物質ストック・フロー分析」
- 51) 正木晃平, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 平成29年度土木学会中部支部研究発表会, 名古屋 (2018)  
「北九州市4d-GISを用いた年都市物質代謝の推計」
- 52) 山本大陸, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 平成29年度土木学会中部支部研究発表会, 名古屋 (2018)  
「退蔵ストックの推計に向けたボトム型アプローチによる物質ストックの推計」
- 53) 小野聡, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 平成29年度土木学会中部支部研究発表会, 名古屋 (2018)  
「木曾川流域を対象とした木材利用の促進による都市と森林の炭素ストックフローの推計」
- 54) 野中一鴻, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 平成29年度土木学会中部支部研究発表会, 名古屋 (2018)  
「4d-GISを用いた建築物滞留年推計モデルの構築と物質ストック・フロー分析」
- 55) 小野聡, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第31回環境情報科学学術研究論文発表会・第14回環境情報科学ポスターセッション, 東京 (2017)  
「木材利用の促進が都市と森林の炭素固定に与える影響-地理情報を用いた東海三県でのケーススタディ-」
- 56) 朝隈友哉, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第31回環境情報科学学術研究論文発表会・第14回環境情報科学ポスターセッション, 東京 (2017)  
「建物形状及び建物属性情報を用いた建物一致自動判定による物質ストックの推計」
- 57) 正木晃平, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第31回環境情報科学学術研究論文発表会・第14回環境情報科学ポスターセッション, 東京 (2017)  
「建物解体時の築年数に基づく物質停留年数の要因分析-北九州市4d-GISを用いて」
- 58) 山本大陸, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第31回環境情報科学学術研究論文発表会・第14回環境情報科学ポスターセッション, 東京 (2017)  
「退蔵ストックの推計へ向けたボトムアップ型アプローチにより物質ストックの推計」
- 59) Y. DOU, M. FUJII, T. FUJITA, K. GOMI, S. MAKI and H. TANIKAWA: 第45回環境システム研究発表会, 大阪 (2017)  
“Potential of Waste Heat Exchange Considering Industrial Location Changes: A Case of Shinchi-Soma Region in Fukushima, Japan”
- 60) 野中一鴻, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第45回環境システム研究発表会, 大阪 (2017)  
「長期間の都市構造物データベース構築に基づく物質ストック分析 一名古屋市中心部におけるケーススタディー」
- 61) 小野聡, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 公益社団法人環境科学会2017年会, 北九州 (2017)  
「建築物への木材利用促進による炭素固定効果の評価-木曾川流域における都市と森林の炭素循環-」
- 62) 藤田恭介, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 公益社団法人環境科学会2017年会, 北九州 (2017)  
「建設資材における蓄積と投入・排出をつなぐ物質ストックデータベースの構築」
- 63) 藤田恭介, 吉田圭介, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 第13回GISコミュニティフォーラムマップギャラリー,

東京 (2017)

「日本のインフラ・建築物ストックにみる地域別検討の可視化」

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

### (6) その他

- 1) International Symposium on Remote Sensing 2017 Certificate of Merit ISRS 2017 Student Paper Award, International Society of Remote Sensing, 2017年5月, Bungo Nishio, Kenji Sugimoto, Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa 「Inter calibration of Radiance Calibrated Nighttime Lights and Quantification of urban dynamics in Southeast Asia」
- 2) 平成29年度 土木学会関西支部年次学術講演会 優秀発表賞 第VII部門, 日本土木学会, 2017年5月, 朝隈友哉, 山下剛弥, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹 「GISを用いた東京都市圏における500mメッシュ毎のマテリアルストック分析」
- 3) 公益社団法人環境科学会2017年会 優秀発表賞 修士課程学生の部, 環境科学会, 2017年9月, 小野聡, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹 「建築物への木材利用促進による炭素固定効果の評価-木曽川流域における都市と森林の炭素循環-」
- 4) 公益社団法人環境科学会2017年会 優秀発表賞 修士課程学生の部, 環境科学会, 2017年9月, 藤田恭介, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹 「建設資材における蓄積と投入・排出をつなぐ物質ストックデータベースの構築」
- 5) Outstanding Presentation Award, Organizing Committee of International Conference on Materials and Systems for Sustainability, 2017年10月1日, Dou Yi・奥岡桂次郎・藤井実・谷川寛樹・藤田壮・戸川卓哉 「Diffusion of Low-carbon District Heating Systems Considering Urban Renewal Strategies: Case of Shinchi-Soma Region in Fukushima, Japan」
- 6) 第31回環境情報科学 学術研究論文発表会 第14回環境情報科学ポスターセッション 環境情報科学ポスターセッション 学生の部 学術委員長賞, 環境情報科学センター, 2017年12月, 正木晃平, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹 「建物解体時の築年数に基づく物質停留年数の要因分析-北九州市 4d-GISを用いて」
- 7) 2017 Graduate Student Forum on Sustainable Use of Natural Resources Best Creative Research, 2017年12月, Yi Dou, Hiroki Tanikawa, Tsuyoshi Fujita 「Integrated planning and assessment for low-carbon eco-city development through strategic urban renewal and energy symbiosis」

## 8. 引用文献

- 1) S. HASHIMOTO, H. TANIKAWA and Y. MORIGUCHI: Waste Management, 27, 12, 1725-1738 (2007) “Where will large amounts of materials accumulated within the economy go?- A material flow analysis of construction minerals for Japan”
- 2) 長岡耕平, 稲津亮, 東岸芳浩, 谷川寛樹, 橋本征二: 土木学会環境システム研究論文集, 37, 303-308 (2009) 「全国の都道府県における地下と地上のマテリアルストックに関する研究」
- 3) 田中健介, 早川容平, 奥岡桂次郎, 杉本賢二, 谷川寛樹: 土木学会論文集G(環境), 69, 6, II\_25-



## II\_34 (2013)

「都道府県における建築物・社会基盤施設の経年マテリアルストック推計に関する研究」

- 4) 杉本賢二, 森田紘圭, 加藤博和, 谷川寛樹: 日本環境共生学会第16回(2013年度)学術大会発表論文集, 99-104 (2013)  
「4d-GISによる建築物ストック・フロー量の時系列分析-名古屋市中区錦二丁目を対象として-」
- 5) 青柳淳之介, 杉本賢二, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹: 土木学会論文集G(環境), 71, 6, II\_467-II\_474 (2015)  
「名古屋市中心部における4d-GISを用いた都市の経年変化によるMSFAに関する研究」
- 6) 小松幸夫, 加藤裕久, 吉田倬郎, 野城知也: 日本建築学会計画系論文報告集, 439, 101-110 (1992)  
「わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告」
- 7) 小見康夫, 栗田紀之: 日本建築学会計画系論文報告集, 656, 2459-2465 (2010)  
「長寿命化トレンドを考慮した建物残存率のシミュレーション」
- 8) H. TANIKAWA and S. HASHIMOTO: Building Research&Information, 37 (5), 483-502 (2009)  
“Urban stock over time : spatial material stock analysis using 4d-GIS”
- 9) 東岸芳浩, 谷川寛樹, 橋本征二: 環境情報科学論文集, 21, 37-42 (2007)  
「複数年の空間情報を用いた建築物の耐用年数の推計手法の提案」
- 10) 寺南智弘, 谷川寛樹, 深堀秀敏: 土木学会環境システム研究論文集, 37, 221-226 (2009)  
「4d-GISによる用途地域変更を考慮した建築物耐用年数の推計」
- 11) 橋本征二, 寺島泰: 廃棄物学会論文誌, 11, 5, 271-279 (2000)  
「建築物解体廃棄物の発生予測」
- 12) 萩島理, 谷本潤, 片山忠久, 熊本健: 日本建築学会計画系論文集, 562, 75-82 (2002)  
「地域特性を考慮した建築解体廃棄物の発生量の将来予測に関する研究」
- 13) 藤川洋平, 樋口隆哉, 浮田正夫, 関根雅彦, 今井剛: 土木学会論文集G, 62, 1, 53-60 (2006)  
「建設廃棄物の排出量および再生利用量の予測に関する研究」
- 14) 杉浦哲平, 野村希晶, 三橋博三: 日本建築学会技術報告集, 14, 27, 27-30 (2008)  
「仙台市における木質系解体材発生量予測と地域の特性に関する研究」
- 15) 奥岡桂次郎, 野中一鴻, 谷川寛樹: 土木学会論文集G, 74, 6, II\_267-II\_273 (2018)  
「名古屋市中心部における4d-GISを用いた建築物滞留年数推計モデルの構築と物質ストック分析」
- 16) 北九州市産業廃棄物対策課: 平成29年度北九州市における産業廃棄物の発生量及び処理状況(推計結果), <https://www.city.kitakyushu.lg.jp/files/000843021.pdf> (2019)

## Ⅱ－４ 持続可能な資源・エネルギー利用に向けた地域拠点設計手法の開発と実証

東北大学大学院工学研究科

技術社会システム専攻 先端社会工学講座

中田俊彦

古林敬顕（平成29年度～平成30年度）

ドラージュ・レミ（令和元年度）

<研究協力者>

東北大学大学院工学研究科

技術社会システム専攻 先端社会工学講座

北村駿太郎・藤井伸・川島彩貴・岡野航介・ヤダフ・アンキット・角田友明・村形夏生・  
高橋遼・佐藤高士・長野尚也・小野寺弘晃・横井祐香・千田遙斗・佐藤フェルナンド

平成29年度～令和元年度研究経費（累計額）：12,636千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成29年度：4,212千円、平成30年度：4,212千円、令和元年度：4,212千円）

### 【要旨】

本研究では、再生可能エネルギーなどを活用した低炭素な地域エネルギーシステムを実現させていくために、その設計手段として地域拠点設計手法を開発した。はじめに、対象地域のエネルギー需要および再生可能エネルギー導入ポテンシャルを統計データと地理情報に基づいて推計した。つぎに、地域内外の再生可能エネルギー資源の市場均衡を考慮した地域エネルギー・経済モデルを構築し、動的シミュレーションにより地域内のエネルギー供給構造の推移を予測した。その結果、地域内外のエネルギー資源を適切な割合で導入することが、経済合理性の観点からも望ましい姿であることが明らかとなったとともに、地域エネルギーシステムの設計において、地域内外の資源を俯瞰的に考慮することが重要であるとの示唆が得られた。加えて、全国の1,741市区町村のエネルギー需給特性を分析し、地域間で再生可能エネルギーを融通する広域圏を試設計した。設計した広域圏を対象としてエネルギーシステムを分析した結果、東北地方を中心として全国的に広域圏を形成し得ることが確認された。また、広域圏を形成することで、エネルギー需給の不一致や財源の不足といった地域エネルギー政策上の課題解決に一定の効果が期待できることがわかった。

### 【キーワード】

地域エネルギーシステム、エネルギー・経済モデル、地域循環共生圏、広域圏、地理情報

### 1. はじめに

第五次環境基本計画や第五次エネルギー基本計画にも示されているように、再生可能エネルギーの導入は脱炭素社会の実現に向けて重要な手段であると同時に、地域の持続可能性の向上にも寄与するとしてさらなる導入が期待されている。しかし、再生可能エネルギー資源やエネルギー需要は地理的に分散・偏在しており<sup>1)</sup>、適切なエネルギーシステムが構築されない場合には再生可能エネルギーの導入が一部地域での導入に留まる可能性があるなどの懸念が指摘されている<sup>2)</sup>。一方で、この地理的な分散を利用することで、再生可能エネルギーの時間変動によるエネルギーシステムへの影響を緩和し、システムコスト削減が可能であるという指摘もある<sup>3)</sup>。

地域で再生可能エネルギーを導入することによって、エネルギーシステムの低炭素化のみならず、エネルギー事業の創出による地域内経済循環の活性化や税収増加などの効果も期待される。その実現にあたっては、区域の特性を考慮した規制緩和や補助政策といった地域エネルギー政策の実施が重要であり、例えば、日本政府は地方公共団体に対して地球温暖化対策計画および地方公共団体実行計画の策定と実施を義務または努力義務化することでこれを推進している。しかし、実行計画のうち区域の特性に合わ

せた施策を定める区域施策編の策定状況は2020年2月時点で30%未満にとどまっている<sup>4)</sup>。その原因として、財源の不足や需給の不一致や事業性の評価が困難といった課題が複数のアンケート調査から指摘されている<sup>5,6)</sup>。

こうした課題を解決する手段には、複数地域が連携して実施する広域化がある。従来、広域化は廃棄物処理分野などで実施されてきたが、近年では第五次環境基本計画において提唱された「地域循環共生圏」や総務省が提唱する「中枢連携都市圏」といった枠組みに示されるように、地域課題を多面的に解決する手段として注目されている。また、実行計画に関しては、複数の地方公共団体による共同策定が認められており広域化との親和性が高い。

## 2. 研究開発目的

本サブテーマでは、エネルギーインフラも含めて広域街区を対象にエネルギーシステムを検討できる「地域拠点設計手法」を開発し、エネルギーシステムシナリオを複数想定して具体地域で最適なエネルギー需給システム検討を実施して手法の有効性を検証するとともに、持続可能なエネルギー利用の実現に向けた方策を検討する。具体的には、既存のエネルギーシステム分析モデルを拡張し、幅広くエネルギー需要や再生可能エネルギー資源を考慮できるようにエネルギーシステムを検討できるよう、エネルギー需要や再生可能エネルギーポテンシャルの推計手法を開発し、建物や技術、資源配置、エネルギーインフラ等の空間情報と統計情報も組み合わせ、エネルギーの需給バランス評価結果等をもとにシステム全体の最適設計やエネルギーフロー分析を行う地域拠点設計手法を開発し、具体の地域へ適用して低炭素型地域エネルギーシステムの設計を行った。さらに、全国の1,741市区町村のエネルギー需給特性を体系的に比較分析し、地域間で再生可能エネルギーを融通する広域圏を試設計するとともに、設計した広域圏を対象としてエネルギーシステムを分析し、広域圏の形成が期待される地域や広域化の効果を明らかにする。

## 3. 研究開発の方法

### 3. 1. 地域拠点設計手法を用いたエネルギー需給システムの設計手法

本研究で開発した地域拠点設計手法を図3.4.1に示す。この手法では、まず対象地域のエネルギー需要量及び再生可能エネルギー導入ポテンシャルとそれらの空間分布を算出し、人口動態や技術導入等のシナリオを設定して将来の部門別エネルギー需要量を設定する。つぎに、エネルギーシステムモデルを適用して、需要を満たすために必要となるエネルギー源、供給量及びその経時変化を定量分析するとともに、エネルギー需給を示すフロー図（エネルギーフロー図）を描く。なお、エネルギーフロー図は、エネルギーシステムの俯瞰的な把握と地方自治体の政策担当者等の政策検討にも資する情報が提供できるものである。

地域エネルギーシステムの最適設計には部分均衡型エネルギー・経済モデルを用いる。このモデルでは、価格競争に基づいて資源や技術を選択するものであり、エネルギー需要量やCO<sub>2</sub>排出制約などの外生的に設定する条件は、資源や技術の潜在価格（shadow price）として価格競争に反映される。

部分均衡型エネルギー・経済モデルは、資源、エネルギー変換技術、市場、最終需要家の4種類のノードをもち、それらの組み合わせで対象とするエネルギーシステムを表現する。シミュレーションにより市場均衡にもとづく均衡解が算出され、エネルギー供給量や供給価格が決定される。均衡解の算出は、図3.4.2に示すTwo-Passアルゴリズムと図3.4.3に示すCobwebアルゴリズムの組み合わせによって行われる。具体的には、最終需要家ノードを起点としてエネルギー需要量を下流のノードに伝達し（ダウンパス）、最下流の資源ノードからその需要量を満たすために必要な供給価格を算出し、最終需要家ノードに送り返す（アップパス）プロセスを反復する。

最終需要家ノードは、需要家の電力、熱、輸送用燃料の需要を表す。最終エネルギー需要量は、式3.4.1に示すように、エネルギー供給価格の変化に応じて価格弾力性も考慮して決定される。

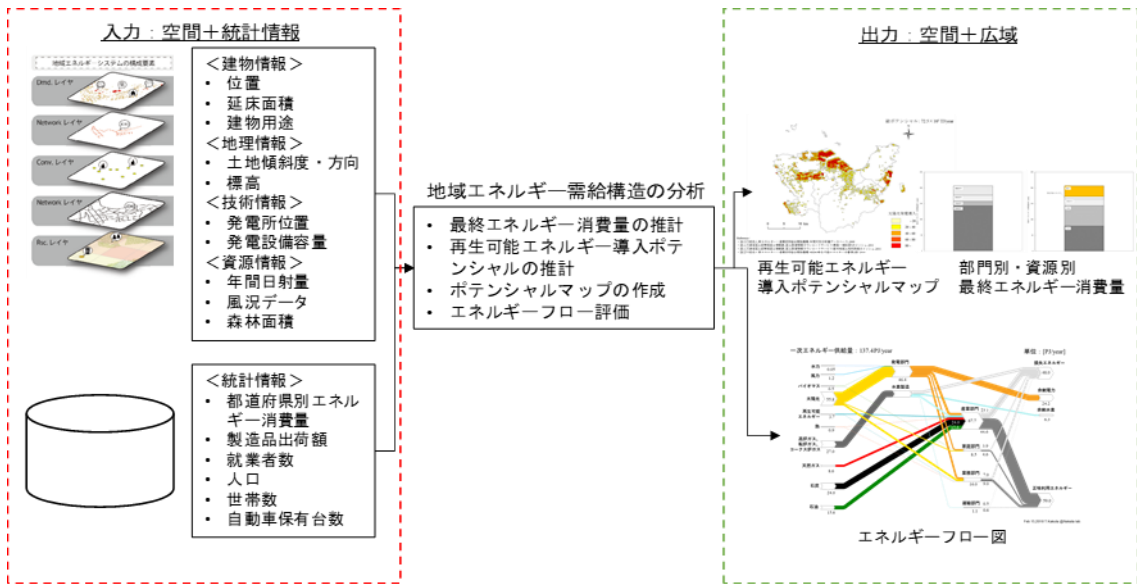


図3.4.1 地域拠点設計手法の概要

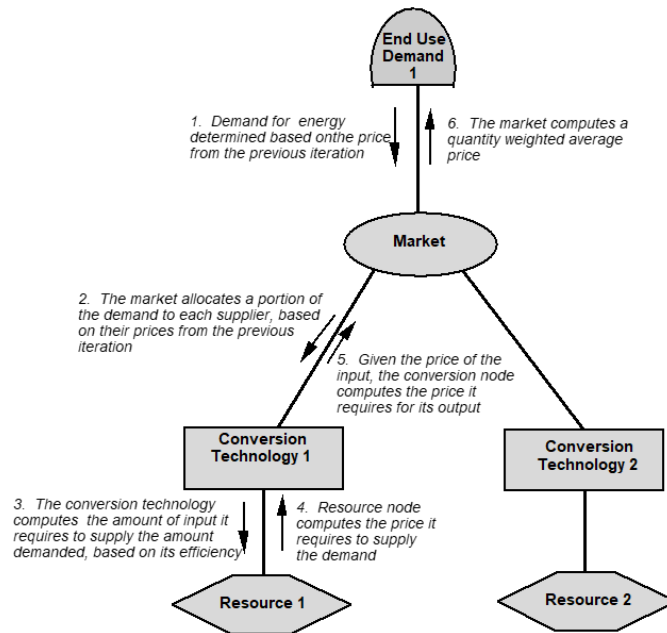


図3.4.2 Two-Passアルゴリズムのプロセス

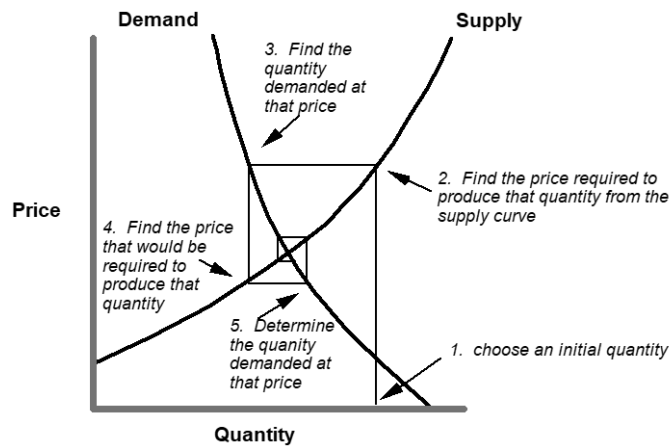


図3.4.3 Cobwebアルゴリズムにおける市場均衡解算プロセス

$$Q_t = Q \left( \frac{P_t}{P} \right)^\xi \quad \text{式3.4.1}$$

ここで、 $Q$ は任意のエネルギー価格における第 $t$ 期のエネルギー需要量（mmBtu）、 $Q_t$ は第 $t$ 期の最終エネルギー需要量（mmBtu）、 $P_t$ は第 $t$ 期のエネルギー価格（JPY/mmBtu）、 $P$ は第 $t$ 期の最終エネルギー需要量が $Q$ となるエネルギー価格（JPY/mmBtu）、 $\xi$ は価格弾力性である。

市場ノードは、財の取引市場を表しており、市場占有関数に基づいて各資源・技術のエネルギー供給シェアと取引価格を算出する（式3.4.2、式3.4.3）。線形計画法に基づく最適化型モデルとは異なり、本モデルでは価格感応性を考慮して、必ずしも価格が安いものだけが選択されない。これは、現実の市場における消費者の振る舞いを取り込んだものである。

$$Share_i = \frac{P_i^{-\gamma}}{\sum_{j=1}^n P_j^{-\gamma}} \quad \text{式3.4.2}$$

$$P_t = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{i,t} Q_{i,t})}{\sum_{i=1}^n Q_{i,t}} \quad \text{式3.4.3}$$

ここで、 $Share_i$ は $i$ 番目のエネルギー供給者のシェア、 $P_{i,t}$ は第 $t$ 期の $i$ 番目の供給者のエネルギー価格（JPY/mmBtu）、 $\gamma$ は価格感応度、 $P_t$ は市場における第 $t$ 期のエネルギー価格（JPY/mmBtu）、 $Q_{i,t}$ は第 $t$ 期の $i$ 番目の供給者のエネルギー供給量（mmBtu）である。

エネルギー変換技術ノードは、資源を電力、熱などに変換する発電所、給湯・暖房機器や自動車を表し、需要量を満たすために必要となる設備容量、燃料量を算出し、燃料費や比建設費、運転維持費などを考慮した将来のキャッシュフローに基づいてエネルギー供給価格を算出する。

資源ノードは、エネルギー資源の採掘・供給を表し、資源の供給価格は価格上昇率を考慮した式3.4.4に基づいて算出される。

$$P_t = P_1 \left( 1 + g_p^{t-yearp} \right) \quad \text{式3.4.4}$$

ここで、 $P_t$ は第 $t$ 期の資源価格（JPY/mmBtu）、 $P_1$ は第1期の資源価格（JPY/mmBtu）、 $g_p$ は資源価格の上昇率である。

本研究では、シミュレーションを行うエネルギーシステムのモデルとして、基本モデルと地域エネルギーモデルの2つを構築した。基本モデルは、現行のエネルギーシステムを模擬するもので、発電設備において対象地域内外を区別せず、系統電力も地域内電力も価格は同じとなる。他方、地域エネルギーモデルは対象地域内で建設される発電設備と系統発電設備を区別したモデルであり、地域内電力は系統電力とは異なるインフラを建設することとし、系統電力と対象地域内の発電設備で供給される地域内電力との間での価格競争が行われる構造とした。基本モデルと地域エネルギーモデルのシステム図をそれぞれ図3.4.4、図3.4.5に示す。

いずれのモデルでも、最終需要家として産業部門、家庭部門、業務部門の電力、熱需要と運輸部門の旅客、貨物需要を想定する。エネルギー変換技術として、電力については石炭火力発電、石油火力発電、天然ガス火力発電、木質バイオマス専焼発電、原子力発電、水力発電、太陽光発電、地熱発電、風力発電を想定し、運輸部門では旅客及び貨物の内燃機関自動車、ハイブリット自動車、電気自動車とする。熱に関する技術については、実際のエネルギーシステムでは多様な技術が用いられているものの、モデル構造を簡易とするために、本研究では同一の資源を用いた技術は一つにまとめることとした。例えば、エアコンと電気ストーブは、電力をもとに熱を発生させる技術と整理し、同一の技術として取り扱うこととした。エネルギー資源としては、石炭、石油、天然ガス、木質バイオマス、原子力、水力、太陽光、風力、地熱とした。



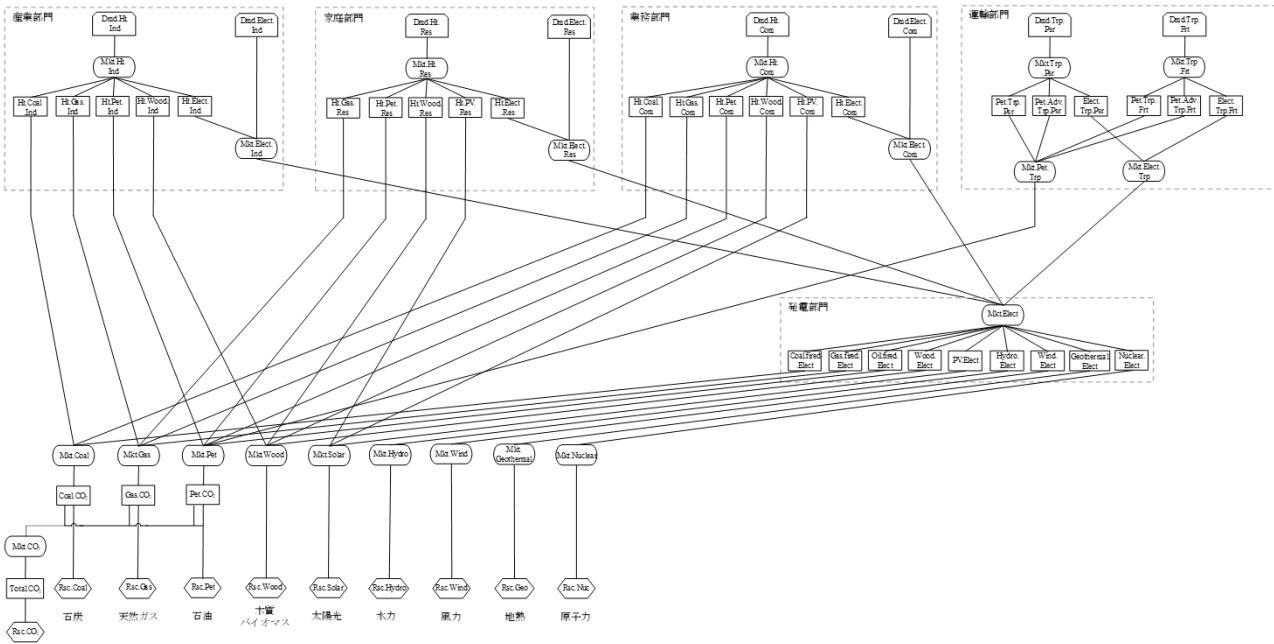


図3.4.4 基本モデルのエネルギーシステム図

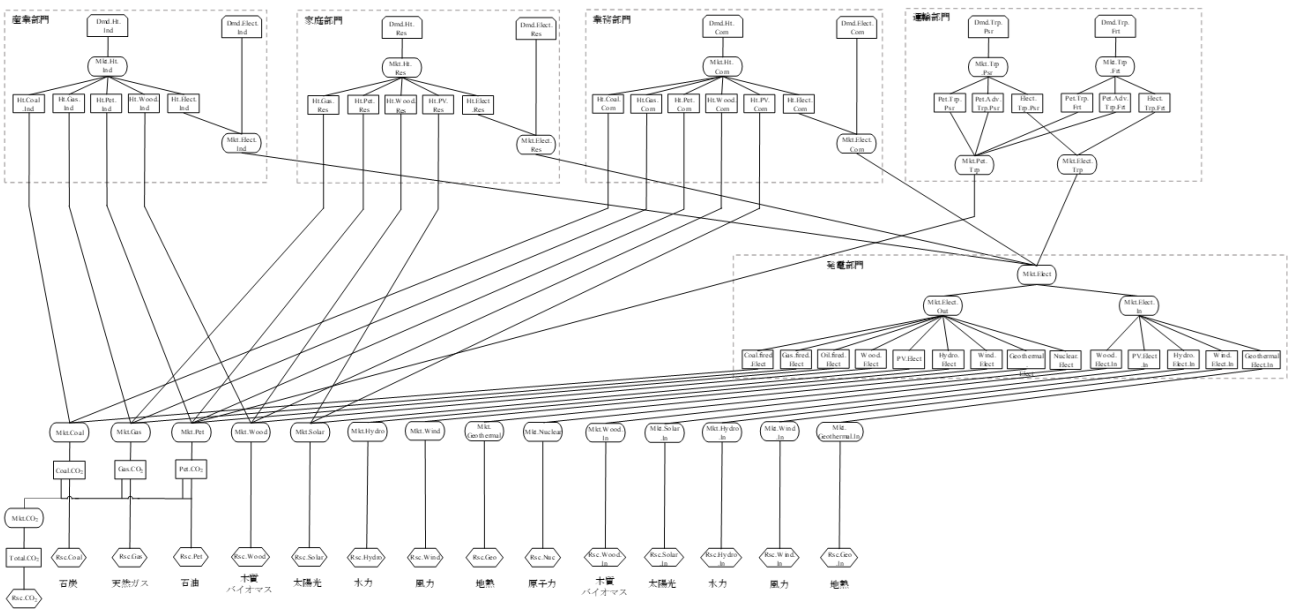


図3.4.5 地域エネルギーモデルのエネルギーシステム図

エネルギー変換技術と資源については、それぞれ価格や寿命、将来の価格上昇率を設定する。一例として、発電技術に関する価格等の想定を表3.4.4に、資源価格の想定を表3.4.5に示す。

分析は、1期5年として2015年から2050年までとし、Referenceと、2050年までにCO<sub>2</sub>排出量を80%削減する制約を課したCO<sub>2</sub>マイナス80%の2ケースを設定した。

### 3. 2. 最終エネルギー消費量と再生可能エネルギー発電ポテンシャルの推計手法

本節では、地域拠点設計手法を適用して分析を行う際の前提となる最終エネルギー消費量と再生可能エネルギー発電ポテンシャルの推計手法について述べる。

#### (1) 最終エネルギー消費量

わが国では市区町村を対象としたエネルギー消費量の統計が整備されていないため、最終エネルギー消費量は推計により算定することとする。本研究では、全国や都道府県といった上位地域の統計データ

表3.4.1 最終エネルギー消費量の推計に用いるデータ

需要部門	エネルギー消費量の基礎データ	活動指標
産業（製造業）部門	都道府県別エネルギー消費統計	業種別製造品出荷額
産業（非製造業）部門	都道府県別エネルギー消費統計	業種別就業者数
業務部門	都道府県別エネルギー消費統計	業種別就業者数
家庭部門	都道府県別エネルギー消費統計	世帯数
運輸（自動車）部門	自動車燃料消費量統計	自動車保有台数

表3.4.2 想定する風力発電機の性能<sup>7-10)</sup>

項目	単位	洋上	陸上
発電機定格出力	MW	12	5
回転翼直径	m	220	125
カットイン風速	m/s	4	4
カットオフ風速	m/s	25	25
パワー係数	%	30	30
経済的耐用年数	年	25	25

をエネルギー消費量と関連のある指標（活動指標）を用いて市区町村ごとに比例配分する按分法を用いることし、式3.4.5にて推計する。

$$FEC_{city} = \sum_i^{(sectors)} FEC_{pref,i} \cdot \frac{x_{city,i}}{x_{pref,i}} \quad \text{式3.4.5}$$

ここで、 $FEC$ は最終エネルギー消費量（TJ）、 $x$ は活動指標であり、添え字の $city$ は対象市区町村、 $pref$ は対象市区町村が所属する都道府県、 $i$ は需要部門を表す。

本研究では、基礎データおよび活動指標として表3.4.1のデータを用いる。需要部門およびエネルギー資源・キャリアの分類は都道府県別エネルギー消費統計に準じる。ただし、運輸部門は貨物、旅客部門に分け、自動車のみを考慮する。

## (2) 再生可能エネルギーポテンシャル

本研究では、再生可能エネルギーとして陸上風力・洋上風力、木質バイオマス、太陽光、地熱、中小水力発電を対象とする。

風力発電ポテンシャルは、任意風速の発電機出力にその風速の出現時間を乗じることで年間の総発電量を求めることとする。風力発電機は、表3.4.2に示す増速機付き誘導発電機を搭載したプロペラ式風車を想定する。風速の出現確率はレイリー分布に従うと仮定し、市区町村別の平均風速は環境省の風況変動データベースの500mメッシュデータを用いて算定する。なお、本研究では陸上風力と洋上風力それぞれに風力発電ポテンシャルを求めるが、洋上では市区町村の明確な境界が存在しないため、洋上の各メッシュはその地点から最も近い海岸線を持つ市区町村に帰属すると仮定し、地理情報システム（ArcGIS 10.6）を用いて集計することとした。

木質バイオマス賦存量の推計は、未利用間伐材の材積に基づく手法と、森林成長量に基づく手法を組み合わせて用いることとした。林地残材と未利用間伐材の材積に基づく手法では、林地残材の賦存量を対象地域の主要樹種別素材生産量をもとに求めた主要樹種別の立木重量に林地残材率を乗じて算出し、未利用間伐材については、対象とする森林の主要樹種構成割合をもとに主要樹種別の未利用間伐丸太材積を森林全体の面積で合計し、林道延長から算出した集材範囲の割合を乗じて算出する。森林成長量に基づく手法では、木質バイオマス資源の持続可能な利用可能量の最大値として年間森林成長量を推計することとし、森林成長量は、林野庁の森林資源現況調査をもとに都道府県別の人工林（5条森林）蓄積量の

一年あたりの増分を求め、私有林人工林面積により市区町村別に比例配分することで算定する。

太陽光発電ポテンシャルは、日射量と設置可能面積に基づいて算定する手法と環境省による公開データを用いる手法を組み合わせて用いることとした。日射量と設置可能面積に基づいて算定する手法では、太陽光発電及び太陽熱の賦存量を日射量に利用可能面積と発電効率又は集熱効率を乗じて推計する。日射量は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の年間月別日射量データベースより算出し、発電効率は現在普及している多結晶シリコン太陽電池の15%を、集熱効率は平成25年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書を参考に40%と仮定する。なお、技術開発により将来の効率向上が見込まれるが、本研究では効率は将来も一定とした。利用可能面積は、GISを用いて土地の用途とその傾斜角を考慮して求めることとし、林野地、道路・鉄道、河川敷、空港、空き地、病院施設、宿泊施設、公共施設、学校施設、又は工業団地で、土地の傾斜角が0°から1.5°までは向きに関わらず設置可能、1.5°-8.5°の場合には南向きの傾斜の場合のみ設置可能とした。環境省による公開データを用いる手法では、環境省が公開している再生可能エネルギー導入ポテンシャルマップ・ゾーニング基礎情報（平成28年度更新版）の市区町村別集計表の導入ポテンシャルに、資源別の設備利用率（Capacity factor : CF）に年間の総時間数（24時間×365日=8,760時間）を乗じることで発電ポテンシャルを求める。なお、設備利用率は2015年から2017年の電力統計調査表の地方別設備容量の平均値を用いることとした。

地熱、中小水力による発電量は、環境省が公開している再生可能エネルギー導入ポテンシャルマップ・ゾーニング基礎情報（平成28年度更新版）の市区町村別集計表の導入ポテンシャルに資源別の設備利用率に年間の総時間数を乗じることで求める。なお、地熱および中小水力の設備利用率は文献<sup>11)</sup>を参照し、それぞれ80%、60%とした。

### (3) 再生可能エネルギー発電コストの設定

本研究の分析では、地域エネルギーシステムの設計において発電コストも重要な要素としているが、再生可能エネルギー発電のコストは気象条件などの影響を受けるため地域性がある。そこで、特に地域差の大きい洋上風力発電と陸上風力発電については市区町村ごとに、太陽光発電については10地方（電力会社区分）ごとに発電コストを設定することとし、その他の資源の発電コストは各地域で一律と想定した。

資源別発電コストは、1年あたりに均等化された発電コスト（Levelized cost of electricity : LCOE）を用いることとし、式3.4.6にて求める。なお、木材ガス化CHPのLCOEは文献<sup>12)</sup>を、地熱発電と中小水力発電のLCOEは文献<sup>11)</sup>を参考に設定する。

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^T C_t \cdot (1+r)^{-t}}{\sum_{t=1}^T E \cdot (1+r)^{-t}} \quad \text{式3.4.6}$$

表 3.4.3 再生可能エネルギー発電単価の想定値

費用		
洋上風力発電		
資本費	495,000	JPY/kW
送電設備費	55,000	JPY/kW
管理・運用費（年間）	6,600	JPY/kW
陸上風力発電		
資本費・送電設備費	222,200	JPY/kW
管理・運用費（年間）	3,300	JPY/kW
太陽光発電	231,110	JPY/kW
木質バイオマスCHP	32.0	JPY/kWh
中小水力発電	23.6	JPY/kWh
地熱発電	10.9	JPY/kWh

表3.4.4 発電技術の設定データ（発電設備）

	比建設費	運転維持費	寿命	設備利用率	入出力効率* (効率%の逆数)
	[USD/(mmBtu/year)]	[USD/mmBtu]	[-]	[-]	[-]
石炭火力	90.10	2.97	40	0.85	2.38
石油火力	72.08	1.95	40	0.3	2.56
ガス火力	43.25	0.99	40	0.85	1.92
水力発電	230.67	2.31	40	0.45	1.00
太陽光発電	105.96	1.33	25	0.12	1.00
風力発電	102.36	2.16	20	0.2	1.00
木質バイオマス	143.45	9.73	20	0.85	5.00
地熱発電	284.73	11.89	30	0.7	10.00
原子力発電	133.35	7.47	40	0.85	2.88

\*効率20%の設備の入出力効率は1/20%=5となる。

表3.4.5 エネルギー資源価格の設定データ

	価格 [USD/mmBtu]	価格成長率		
		2015-2020	2020-2030	2030-
石炭	3.25	0.043	0.038	0.043
石油	9.01	0.098	0.05	0.043
天然ガス	10.40	0.027	0.038	0.03
水力	0.00	N/A	N/A	N/A
太陽光	0.00	N/A	N/A	N/A
風力	0.00	N/A	N/A	N/A
木質バイオマス	0.00	N/A	N/A	N/A
原子力	5.21	0.00	0.00	0.00
地熱	0.00	N/A	N/A	N/A

ここで、 $LCOE$ は均等化発電コスト（JPY/kWh）、 $C$ は年間発電コスト（JPY/year）、 $T$ は経済的耐用年数（year）、 $r$ は割引率である。

### 3. 3. エネルギー需給の地域特性を考慮した広域圏の設計手法

広域圏の設計手法の開発に先立ち、地域エネルギー収支と地域経済のポテンシャルを軸として地域を図3.4.6のように4象限に分類する。第1象限に分布する地域は、地域内のエネルギー需要を満たすために十分な再生可能エネルギー資源とその導入を推進する経済基盤があるが、その他の象限にはエネルギー需給と経済基盤のいずれかもしくは両方が不十分であり地域エネルギー政策の実施に限界がある地域が分類できる。既往調査では、多くの地域が第2、3、4象限に分布していることが示唆されているが、複数の地域が提携し、一つの圏域として第1象限にシフトすることで、実効的な地域エネルギー政策の実施が可能になり、地域社会の持続可能性を高めることにつながると考えられる。

本研究ではそうした圏域を広域圏（Cross-border regions）と定義し、数値実験により試設計することで広域圏の形成による効果を検証することとした。なお、以降において各象限に分布する地域を象限の順にI型（第1象限）、II型（第2象限）、III型（第3象限）、IV型（第4象限）とよぶ。

本研究では、地域エネルギー収支が正となる地域を供給主体地域、負となる地域を需要主体地域と定義する。広域圏の設計においては、例えばある需要主体地域に対してどの地域からどれだけエネルギー

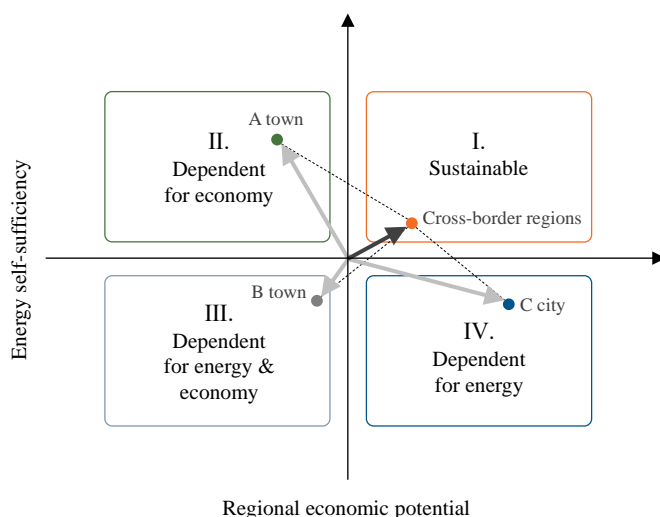


図3.4.6 地域エネルギー政策の推進に向けた広域圏の考え方

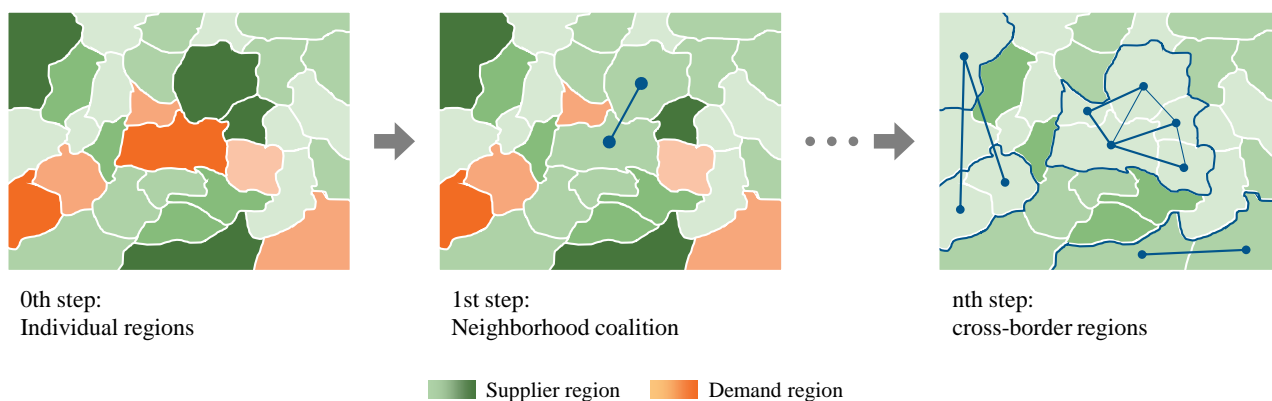


図3.4.7 ヒューリスティクス型手法に基づく広域圏の形成過程

を供給すべきかといったように、特定の地域を対象とした問題設定は局所最適である。全体最適化のためには、各地で広域圏を形成することによる効果の総和が最大となるように設計する必要がある。

本研究では、全体最適の解を得る手法として、ヒューリスティクス型手法を用いることとした。この手法の概要を以下に示す。

- 1st step : 隣接するすべての地域の組み合わせに対して、提携した場合の価値（インセンティブ）を評価する。
- 2nd step : 提携の価値が最も高い組み合わせを併合して一つの地域ノードとする。提携可能な組み合わせが存在しない場合は終了する。
- 3rd step : 併合した地域ノードと周辺地域ノードとの隣接関係と提携の価値を更新し、2nd stepへ戻る。

この2nd stepと3rd stepを提携可能な組み合わせがなくなるまで繰り返すことで広域圏を設計する（広域圏の形成過程は図3.4.7も参照）。地域の組み合わせには、供給主体地域の余剰エネルギーを需要主体地域に供給する関係とする場合（余剰融通）と、提携を結んだ地域内でエネルギーの過不足を均等化する場合（併合）の2種類が考えられるが、組み合わせの検討においていずれを採用するかは分析ケースの設定で予め決めておくものとした。なお、組み合わせの検討にあたっては、提携は隣接する地域間でのみ成立するという隣接制約と、組み合わせによって成立する範囲は、地域間での意思決定や資源輸送等を円滑に実施できる範囲を上限とする上限制約を課した。

本研究では、提携の価値として経済合理性、財政安定性、相互補完性の3つの指標を用いることとする。

経済合理性は、地域間で融通されるエネルギーの均等化発電コスト (LCOE) を尺度として計測し、LCOE がより低いほど望ましいとした。財政安定性は、両地域の財政を統合した場合の財政力指数により計測し、より高いほど公的財源に余裕があり、地域エネルギー政策の推進力があると見なした。相互補完性は、需要主体地域における不足エネルギー量と供給主体地域における余剰エネルギー量により計測し、これらエネルギー量が大きいほど、また、その量が近いほど相互のエネルギー需給を補完する度合いが高く、提携による価値があるものと見なした。

財政力の評価にあたっては、再生可能エネルギー発電の導入による地方財政の効果についても考慮する。再生可能エネルギー発電が導入されると、発電設備に係る固定資産税および再生可能電力の小売事業を営む地域エネルギー企業の法人住民税の増収が期待される。そこで、本研究では以下により固定資産税と法人住民税の増収効果を評価した。

固定資産税の税収額は、発電設備が基本的に償却資産であることを考慮し、耐用年数だけ設備を利用した場合の年平均額により評価する。税率は、評価額に対して1.4%と想定した。なお、本研究では風力発電設備からの税収のみを考慮することとした。これは、太陽光発電に関しては設備容量や発電の目的によって課税内容が異なるためであり、地熱発電や中小水力発電、バイオマス発電についても個別の導入規模の推定が困難であるためである。加えて、政府による軽減税率等の措置は考慮しないこととした。

法人住民税の税収額については、所得に応じて負担する法人税割のみを考慮することとして、販売した電力の収入額からLCOE分を除いたものを所得と見なし、法人税率等を乗じて評価する。

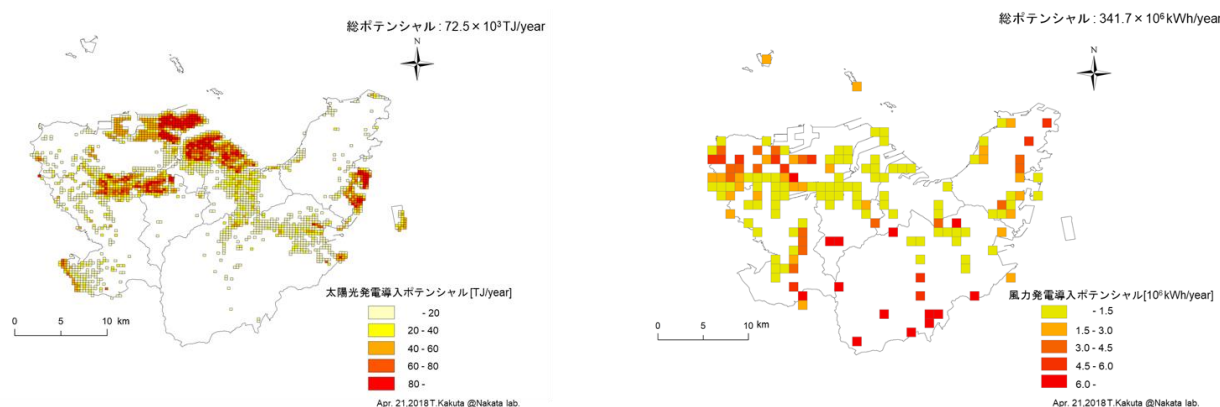
## 4. 結果及び考察

### 4. 1. 地域の再生可能エネルギー発電ポテンシャルと現状のエネルギーフローの推計結果

まず、再生可能エネルギー導入ポテンシャルの推計結果について述べる。本研究では、北九州市と仙台市、横浜市を対象にポテンシャル分析を行った。

北九州市の再生可能エネルギーポテンシャルの分析結果を図4.4.1に示す。太陽光発電導入ポテンシャルは、北九州市全体では72.5 PJ/yearであり、市内全体の電力需要の2.8倍に相当することが明らかとなった。特に響灘地区のポテンシャルが大きく、実際に(株)北拓とジャパン・リニューアブル・エナジー(株)の合弁で2017年から3,046 kWの事業を行うなどの発電事業を行っている事例が複数ある。また、門司区東側にもポテンシャルが多い。風力発電については、北九州全体では1.23 PJ/yearと、八幡西区の電力需要の21%に相当する量が確保できることがわかった。

太陽光発電と風力発電の立地の違いに着目すると、太陽光発電は響灘地区や門司区東側などに集中するのに対し、風力発電は北九州市全域に分散していることがわかる。区別に見ると、小倉南区では太陽光が少ないが風力発電は多く存在することから風力を中心とした地域エネルギーシステムを構築することが有効であると考えられるのに対し、若松区は西側に風力発電導入ポテンシャルが多く存在し、響灘地区を含む東側の太陽光も含めると、太陽光と風力を両方活用したシステム構成とすることが適当と考



(a) 太陽光

(b) 風力

図4.4.1 北九州市の再生可能エネルギー導入ポテンシャル



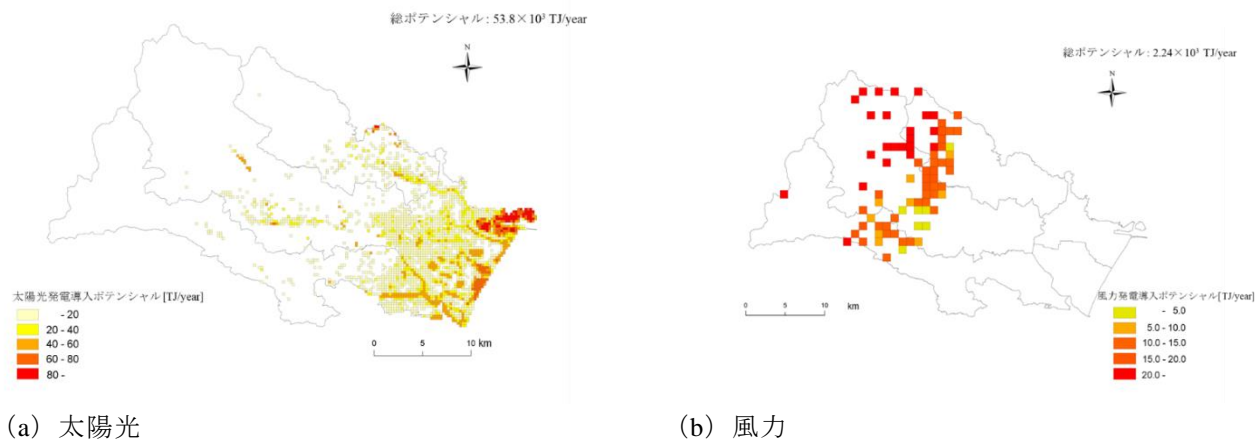


図4.4.2 仙台市の再生可能エネルギー導入ポテンシャル

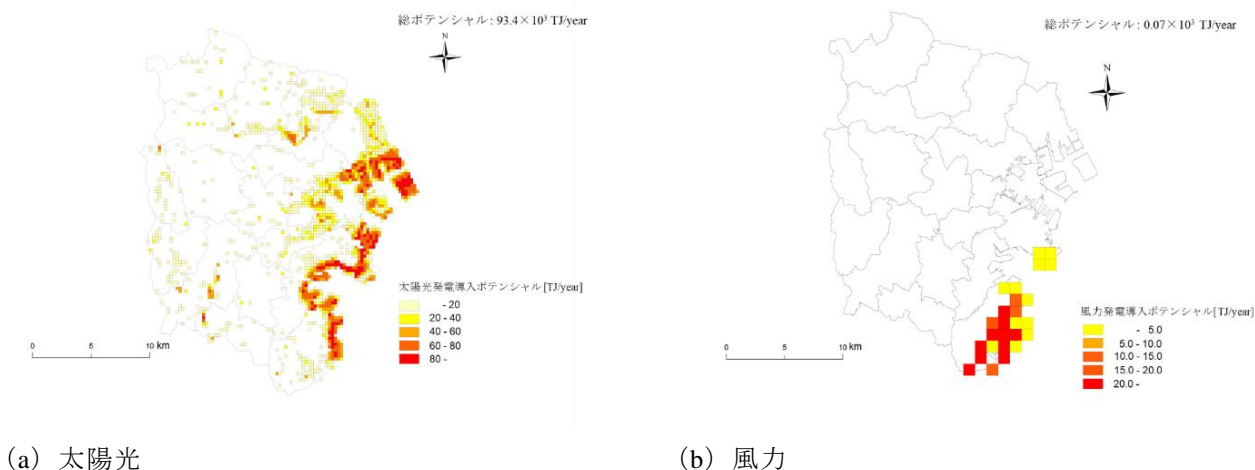


図4.4.3 横浜市の再生可能エネルギー導入ポテンシャル

えられる。

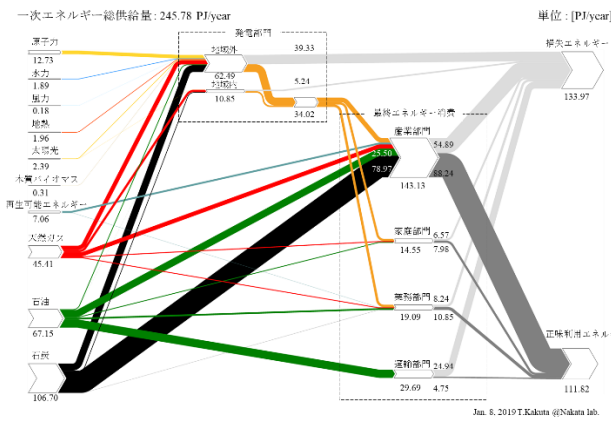
仙台市における分析結果を図4.4.2に示す。太陽光発電は、仙台市全体では53.78 PJ/yearと仙台市の電力需要のおよそ2.4倍のエネルギー量に相当し、風力発電については、全体では2.24 PJ/yearと、仙台市の電力需要のおよそ10%に相当する量が確保可能であることが明らかとなった。これらのポテンシャルの分布に着目すると、太陽光発電は宮城野区や若林区など沿岸部や仙台港周辺に集中しているのに対して、風力発電は泉区、青葉区と太白区にまたがる山地に多く存在する。このことから、太陽光は仙台港周辺に立地する大型業務施設や工場施設での利用が有効であるのに対して、風力によるエネルギー供給は内陸部で有効であると考えられる。

図4.4.3に示す横浜市のパテンシャルの分析結果について見ると、太陽光発電は横浜市全体で93.44 PJ/yearと横浜市の電力需要のおよそ1.3倍に相当することがわかった。いっぽう、風力発電導入ポテンシャルは、建設可能な土地条件を満たすメッシュが少ないことにより、横浜市全体で見ても0.07 PJ/yearであり、ほかの2地域と比較しても大幅に小さい。

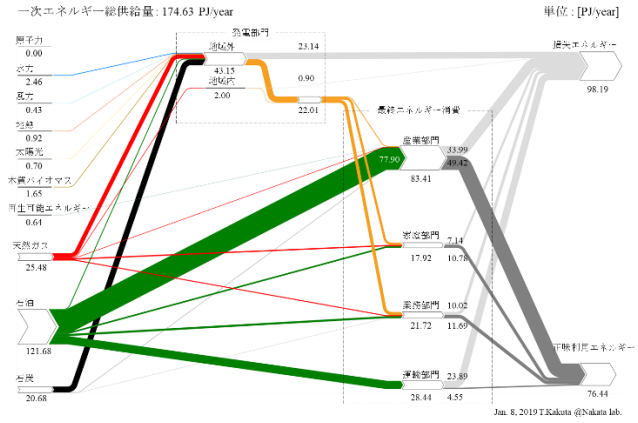
仙台市と同様に、横浜市でも太陽光発電のポテンシャルは扇島を含む鶴見区や中区、磯子区の沿岸部に多く分布している。このことから、鶴見区など京浜工業地帯の事業所での活用が有効と考えられる。

なお、これら3都市を対象に、木質バイオマスのポテンシャルも分析したが、北九州市で0.087 PJ/year、仙台市で0.04 PJ/year、横浜市では0.00085 PJ/yearといずれも太陽光や風力と比較して大幅に小さいポテンシャル量しか確保できないことがわかった。

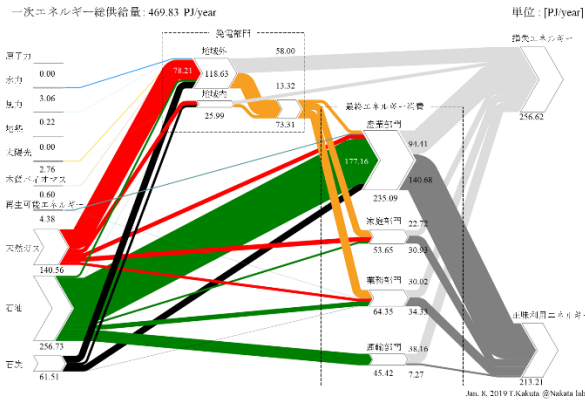
つぎに、最終エネルギー消費量の推計結果も含めて作成した、これら3地域の2015年のエネルギーフロ



(a) 北九州市



(b) 仙台市



(c) 横浜市

図4.4.4 対象地域のエネルギーフロー (2015年)

一図を図4.4.4に示す。なお、発電部門の電源構成については、対象地域が属する電力会社が公表する「でんき予報」のエリア需給データから算出した。

北九州市のエネルギーフロー図を見ると、北九州市の一次エネルギー総供給量245.78 PJ/yearのうち89%が化石燃料で供給されていることがわかる。特に石炭は一次エネルギー総供給量の43%を占めている。発電部門について見ると、市内に新小倉をはじめとする天然ガス火力が立地していることもあり、石炭と天然ガスを中心とした火力発電で合計34.02 PJ/yearの電力を供給している。

仙台市について見ると、一次エネルギー総供給量174.63 PJ/yearのうち96%が化石燃料で占められており、特に石油は総供給量の70%と最も多い。発電部門では、市内に天然ガスを利用する新仙台火力が立地していることもあり、石炭火力と天然ガスを中心とした火力発電で22.01 PJ/yearの電力を供給している。

横浜市では、仙台市と同様に一次エネルギー総供給量469.83 PJ/yearの98%が化石燃料で供給され、特に石油は総供給量の55%を占める。発電部門では、南横浜、横浜をはじめとする天然ガス火力発電が立地していることもあり、天然ガスを中心とした火力発電によって73.31 PJ/yearの電力を供給している。

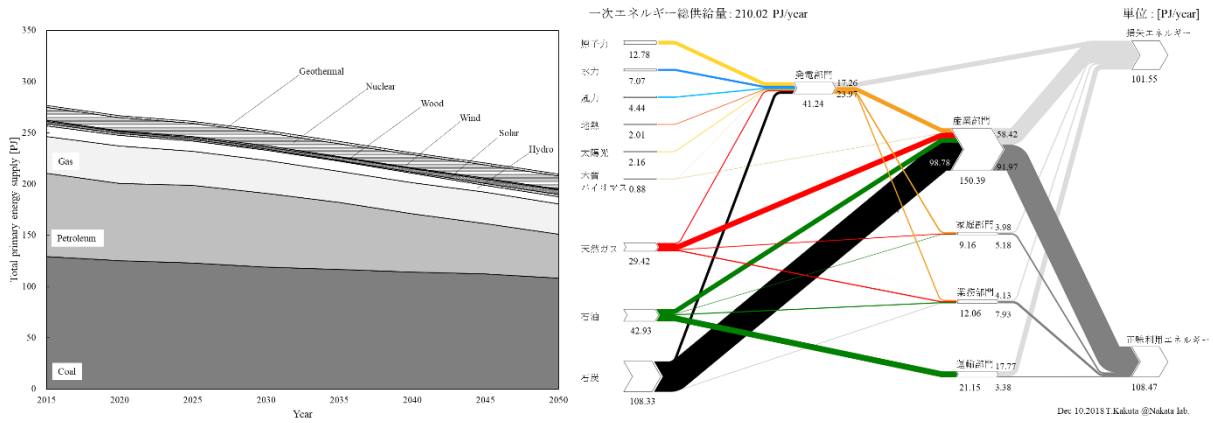
以上の成果に加え、日本全体や青森、長野、福島等のエネルギーシステムの分析結果として作成したエネルギーフロー図やカーボンフロー図、キャッシュフロー図をWebサイトを通じて公開している。

(<http://www.eff.most.tohoku.ac.jp/charts/>) (2020年3月19日現在、41件のフロー図を掲載)。

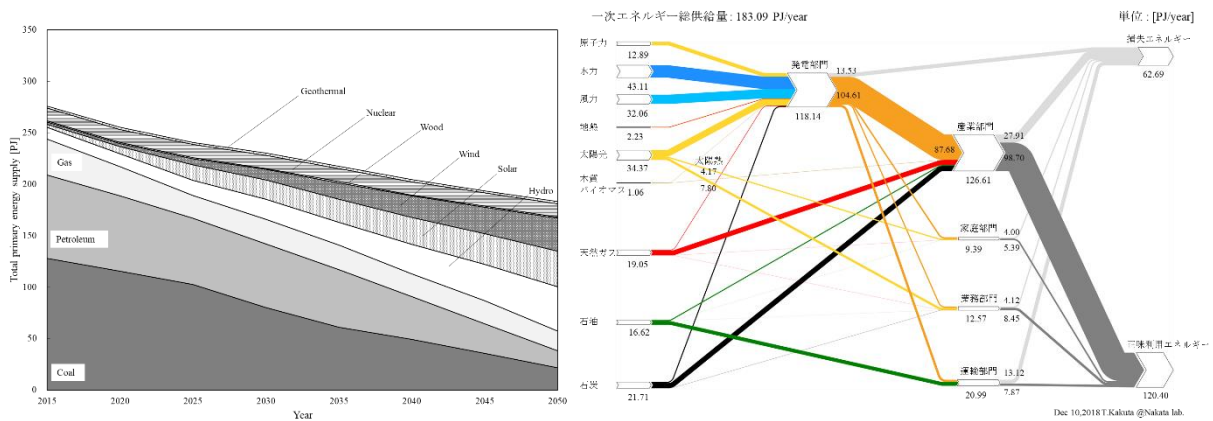
#### 4. 2. 地域拠点設計手法を用いた将来の地域エネルギーシステムの設計結果

本章では、地域拠点設計手法のうち、部分均衡型エネルギー・経済モデルを用いた将来の地域エネルギーシステム設計の結果について述べる。

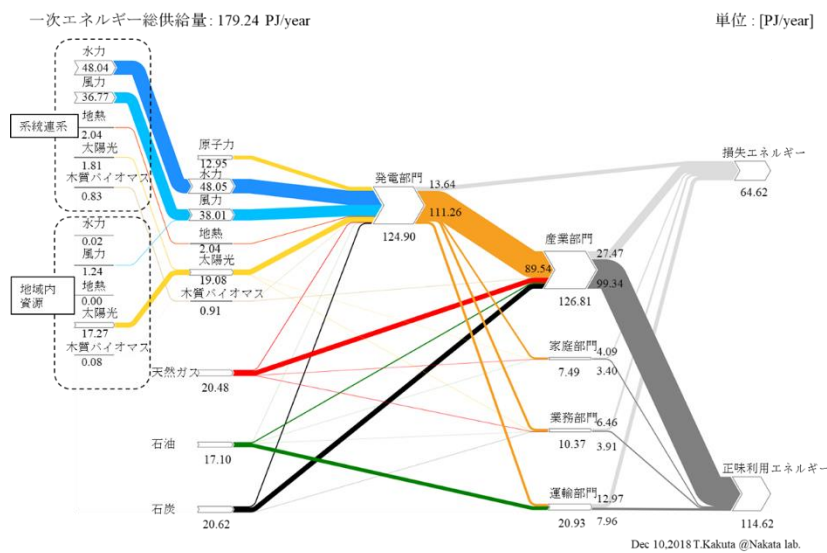
北九州市を対象とした分析の結果を図4.4.5にまとめる。基本モデルのReferenceケースでは、一次エネ



(a) 基本モデル・Referenceケース（一次エネルギー供給・2050年のエネルギーフロー）



(b) 基本モデル・CO<sub>2</sub>マイナス80%ケース（一次エネルギー供給・2050年のエネルギーフロー）



(c) 地域エネルギーモデル・CO<sub>2</sub>マイナス80%ケース（2050年のエネルギーフロー）

図4.4.5 北九州市の地域エネルギーシステム設計結果まとめ

ルギー総供給量は2050年には210.0 PJ/yearとなり、2015年から66.77 PJ減少した。CO<sub>2</sub>排出量も同様に、2050年には14.2 Mt-CO<sub>2</sub>/yearと2015年から26%削減されることがわかる。一次エネルギー供給構成の変化をみると、2050年まで供給構成は大きく変わらず、石炭と石油が大部分を占めたままとなる。なお、石油の供給量は2035年あたりから減少するが、これは石油の供給価格が他の資源に比べて高いため、選択されなくなったためと考えられる。運輸部門の輸送用燃料は、供給される燃料は石油のみであるが2020

年から内燃機関自動車からハイブリット自動車の代替が進むことにより、2050年には21.15 PJ/yearと2015年から8.62 PJ減少した。発電部門について見ると、一次エネルギー供給量は2050年には41.24 PJ/yearとなり、2015年から35.39 PJ減少した。本分析では、原子力はベース電源として稼働すると仮定したため、2015年から2050年まで供給量は変化しない。また、2050年まで石炭火力の供給割合は大きいままである。2050年のエネルギーシステムの姿についてエネルギーフローで見ると、人口減少などの影響によって最終需要家のエネルギー需要量が減少するためにそれぞれのエネルギー消費量は変化するが、大きな構成は図4.4.4 (a) の2015年の姿からは変わらないことがわかる。

基本モデルのCO<sub>2</sub>マイナス80%ケースでは、一次エネルギー総供給量は2050年には183.1 PJ/yearとなり、2015年から93.05 PJ減少した。一次エネルギー供給構成の変化をみてみると、2025年から水力、太陽光、風力の供給量が増加し、2050年には一次エネルギー総供給量の62%を再生可能エネルギーが占める結果となった。その結果CO<sub>2</sub>排出量も大幅に削減され、2050年には4.1 Mt-CO<sub>2</sub>/yearとなり2015年から78%削減された。エネルギー最終需要では、2025年から化石燃料消費が減少し、電力の消費量が増加した。これは、CO<sub>2</sub>排出量を80%削減するためには、需要部門でも再生可能エネルギー由来の電力利用を進めなければならないことを示している。運輸部門の輸送用燃料は、2050年には20.99 PJ/yearとなり、2015年から8.77 PJ減少した。うち、旅客運輸については2020年までは内燃機関自動車からハイブリット自動車の代替が進み2025年から電気自動車が導入されるが、貨物運輸については技術開発の動向から電気自動車の導入が困難であると仮定したこともあり、技術の移行はみられなかった。発電部門についてみると、一次エネルギー消費量は2050年には118.2 PJ/yearと2015年から42.36 PJ増加し、内訳では2025年から水力、太陽光、風力の供給量増加が進み、2035年から石油火力が減少することがわかった。特に石油火力については、2050年には0.02 PJ/yearと大幅に小さくなる。2050年のエネルギーシステムの姿をエネルギーフローで見ると、Referenceケースとは異なり、石炭・石油・天然ガスといった化石燃料は大幅に減少し、代わって再生可能エネルギーなどのCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源に転換されていることがわかる。

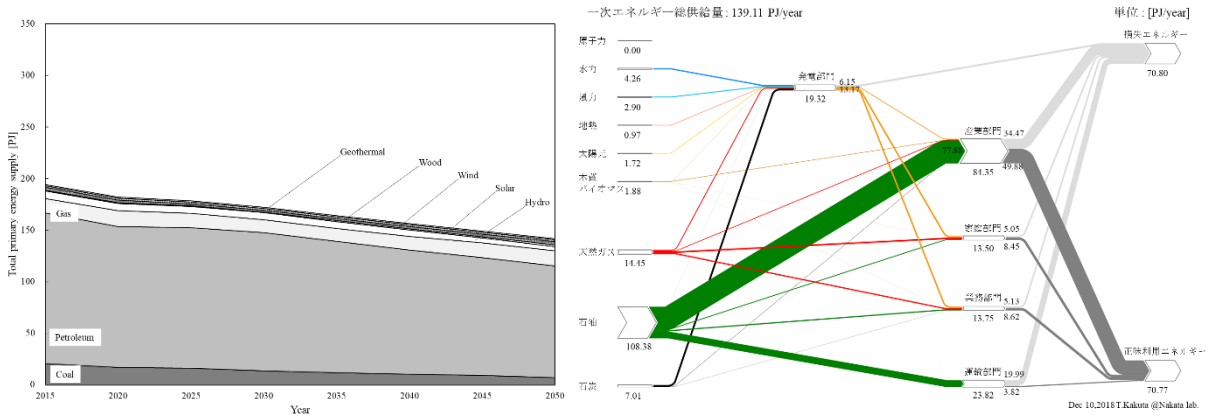
なお、分析においてCO<sub>2</sub>排出量が80%減に達しないのは、3.2節にて述べたように本モデルではCO<sub>2</sub>排出量制約を潜在価格に変換して取り扱っているためであり、市場均衡の条件下では再生可能エネルギー等のゼロカーボン型エネルギーを利用する技術よりも、非常に高額ではあるがCO<sub>2</sub>を排出するエネルギー源を利用する技術が量としてはわずかであるが、依然として選択されていることを示す。この点は、仙台市と横浜市の分析でも同様である。

最後に、地域エネルギーモデルのCO<sub>2</sub>マイナス80%ケースの結果について、エネルギーフローを用いた2050年のエネルギーシステムの姿に着目して述べる。発電部門の一次エネルギー供給量は、2050年には124.9 PJ/yearとなり、2015年から48.53 PJ増加した。系統電力と地域内電力の供給割合では、系統電力が83%を占め、地域内電力は2020年から太陽光の供給量が増加して2050年には17.27 PJ供給されるものの、全体に対する割合としては大きくない。このことから、北九州市においては、系統電力との価格競争を考慮しても太陽光発電を中心とした地域内電力が価格優位性を持つが、そのみでエネルギー供給は完結せず、系統電力においても低炭素化を進めることが重要であることが示唆される。

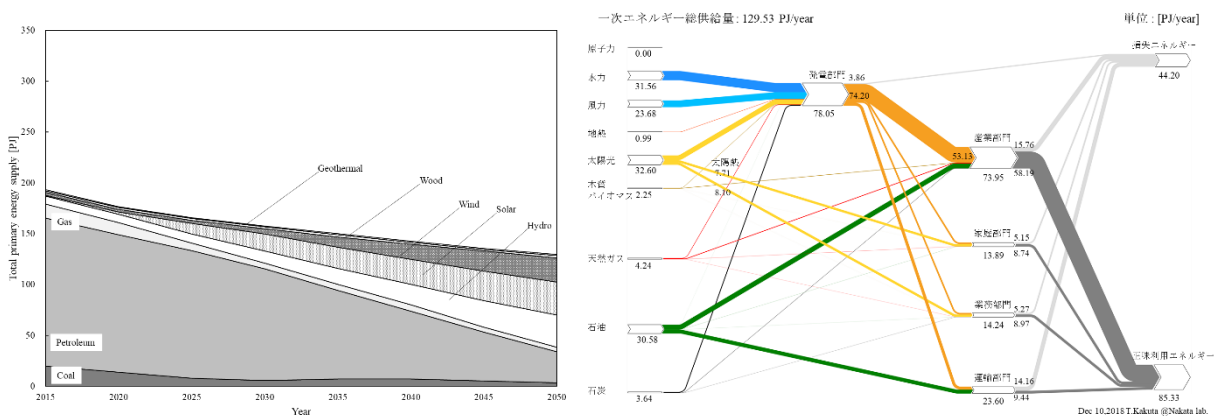
つぎに、同様の分析を仙台市を対象に行った結果を図4.4.6に示す。基本モデルのReferenceケースでは、北九州市と同様に人口減少などの影響によって最終需要家のエネルギー需要量が減少するため、一次エネルギー総供給量は2050年には141.6 PJ/yearとなり、2015年から52.49 PJ減少した。CO<sub>2</sub>排出量も2050年には9.0 Mt-CO<sub>2</sub>/yearと2015年から30%削減される。一次エネルギー供給構成の変化に着目すると、2050年まで供給構成は大きく変わらず、石油が大部分を占めたままであった。運輸部門については、輸送用燃料は2050年には23.82 PJ/yearと2015年から4.58 PJ減少する。利用される燃料源は石油で変化しないが、2020年から内燃機関自動車からハイブリット自動車の代替が進むことがわかった。発電部門については、2050年まで石炭火力と水力の供給割合が大きいままで推移し、一次エネルギー消費量は2050年には19.32 PJ/yearと2015年から24.69 PJだけ減少する。2050年のエネルギーシステムの姿についてエネルギーフローで見ると、エネルギー需要の減少による変化を除いては、図4.4.4 (b) の2015年の姿から大きくは変化しない。

基本モデルのCO<sub>2</sub>マイナス80%ケースについて見ると、一次エネルギー総供給量は、2050年には129.5

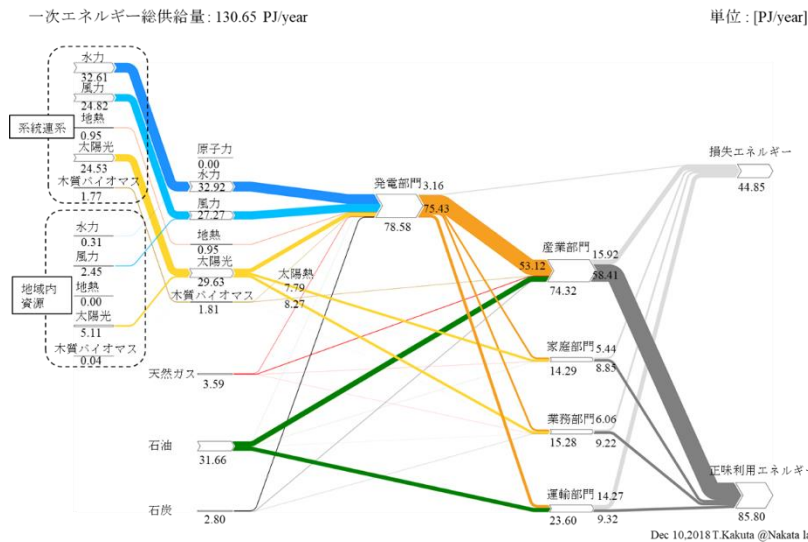




(a) 基本モデル・Referenceケース (一次エネルギー供給・2050年のエネルギーフロー)



(b) 基本モデル・CO<sub>2</sub>マイナス80%ケース (一次エネルギー供給・2050年のエネルギーフロー)



(c) 地域エネルギーモデル・CO<sub>2</sub>マイナス80%ケース (2050年のエネルギーフロー)

図4.4.6 仙台市の地域エネルギーシステム設計結果まとめ

PJ/yearと2015年から63.77 PJ減少するとともに、2020年から水力、太陽光の供給量が、2030年から風力の供給量が増加し、2050年には再生可能エネルギーが一次エネルギー総供給量の70%を占める。これに伴い、CO<sub>2</sub>排出量も2050年には2.7 Mt-CO<sub>2</sub>/yearと2015年から79%削減されることがわかる。最終需要部門においては、2025年から化石燃料の供給量が減少し、電力と太陽熱の供給量が増加した。運輸部門の輸送用燃料については、2050年には23.60 PJ/yearと2015年から4.81 PJ減少した。旅客運輸では2025年まではハイブリット自動車、2030年からは電気自動車の導入が進むが、貨物運輸では内燃機関自動車とハイブリ

ット自動車の代替は大きく進まず、エネルギー消費量で見ても変化は少ない。発電部門の一次エネルギー供給量は、2050年には78.05 PJ/yearとなり、2015年から34.70 PJ増加した。2025年から水力、太陽光、風力の供給量が増加した。また石炭火力の供給量は、2015年から2030年まで減少し、2035年までわずかに供給量が増加したあと、2050年には2.78 PJ/yearであった。2050年のエネルギーフローは、Referenceケースと比較して化石燃料が大幅に減少して再生可能エネルギーに転換されていることがわかる。なお、石炭と天然ガスが残る北九州市の分析結果とは異なり、仙台市ではCO<sub>2</sub>排出量80%削減の条件下では石油が残される結果となり、CO<sub>2</sub>排出量の大幅削減のためにどのような化石燃料を優先して削減していくか（どのような化石燃料消費は2050年でも残っているか）は、地域ごとに異なることがわかる。

地域エネルギーモデルのCO<sub>2</sub>マイナス80%ケースにおける2050年のエネルギーフローに着目すると、発電部門の一次エネルギー供給量は2050年には78.58 PJ/yearとなり、2015年から37.05 PJ増加することがわかる。系統電力と地域内電力の供給割合では、系統電力が90%を占める。地域内電力は、2020年からわずかに太陽光の供給量が増加するが大きな変化はみられない。このことから、仙台市では系統電力との価格競争を想定すると地域内電力はそれほど価格優位性を確保できないことが示唆される。

最後に、横浜市における分析の結果を図4.4.7にまとめる。基本モデルのReferenceケースでは、一次エネルギー総供給量は2050年には417.9 PJ/yearと2015年から92.59 PJ減少し、CO<sub>2</sub>排出量も2050年には26.8 Mt-CO<sub>2</sub>/yearと2015年から18%減少する。一次エネルギー供給構成については、他の都市での分析結果と同様に2050年まで供給構成は大きく変わらない。発電部門についても、一次エネルギー消費量は、2050年には101.1 PJ/yearと2015年から31.14 PJ減少し、また、2050年まで火力発電の供給割合が大きいままとなる。いっぽう、他とは異なり横浜市では運輸部門の輸送用燃料は2050年には45.48 PJ/yearと2015年から0.08 PJ増加する。これは、世帯数増加の影響により、運輸部門のエネルギー需要量が増加したことが要因として考えられる。しかし、エネルギーフローについては、他の都市と同様に2050年でも図4.4.4 (c)に示す2015年の姿と大きく変化はしない。

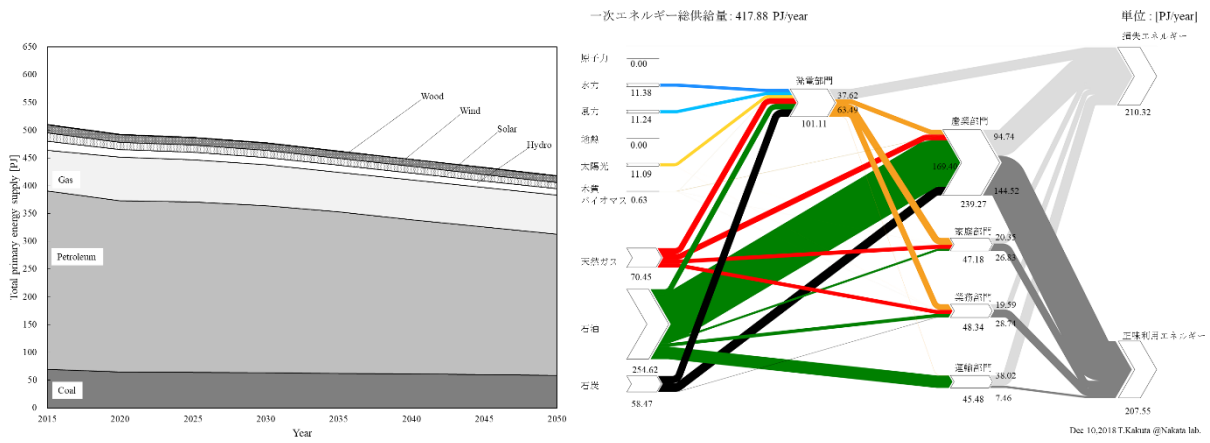
基本モデルのCO<sub>2</sub>マイナス80%ケースの結果についてみると、一次エネルギー総供給量は2050年には385.1 PJ/yearとなり、2015年から126.1 PJ減少する。一次エネルギー供給構成について見ると、2020年から太陽光が、2025年から風力の供給量が増加し、2050年には一次エネルギー総供給量の61%を再生可能エネルギーが占める。エネルギー需要部門では、2025年から電力と太陽熱の供給量が増加し、2030年から化石燃料の供給量が減少した。運輸部門の輸送用燃料については、2050年には45.10 PJ/yearと2015年から0.26 PJ減少し、技術については旅客運輸でのハイブリット自動車や電気自動車の導入や貨物運輸での内燃機関自動車からハイブリット自動車の代替が確認された。発電部門の一次エネルギー供給量は、2050年には190.1 PJ/yearとなり、2015年から58.07 PJ増加した。内訳では、2025年から水力、太陽光の供給量が増加し、化石燃料の供給量が2035年から2045年にかけて大幅に減少した。なお、原子力については新規設備を建設しないとの制約条件を課していたものの、CO<sub>2</sub>排出量制約の影響で2035年からわずかに導入される。

横浜市の基本モデルのCO<sub>2</sub>マイナス80%ケース分析では、他都市の分析とは異なり、2050年のCO<sub>2</sub>排出量は10.4 Mt-CO<sub>2</sub>/yearと2015年比68%減と制約条件に12%不足する。これは、前述の通りCO<sub>2</sub>排出量制約を潜在価格として取り扱う本モデルの特徴に加えて、横浜市においては本研究で想定したエネルギー需要の将来想定が再生可能エネルギーのみでCO<sub>2</sub>排出量80%減を達成するには大きすぎたことによるものと考えられる。エネルギーフローを見ても、他の都市の分析結果とは異なり、2050年でも特に石油の消費量が一定程度残っていることがわかる。

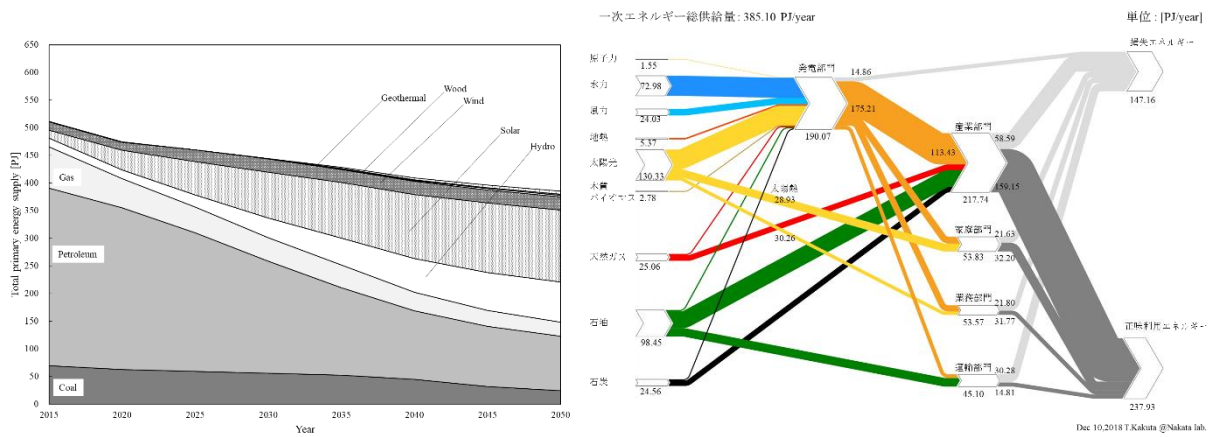
このような傾向は地域エネルギーモデルのCO<sub>2</sub>マイナス80%ケースの分析結果でも同様であり、発電部門の一次エネルギー供給量は2050年には204.93 PJ/yearと2015年から77.52 PJ増加し、地域内電力の太陽光発電の供給量も2050年には94.69 PJまで増加するが、石油を中心に依然として化石燃料による供給が行われ、CO<sub>2</sub>排出量も80%削減目標に達しない。このことから、都市・地域において低炭素化を進めるためには、国全体のシナリオと同様にエネルギー需要の大幅削減が不可欠であることが示唆される。

これら3都市での分析結果より得られた2015年から2050年までの再生可能エネルギー供給量の変化を表4.4.1にまとめる。CO<sub>2</sub>マイナス80%ケースでは、北九州市は系統電力に供給される風力と水力が増加

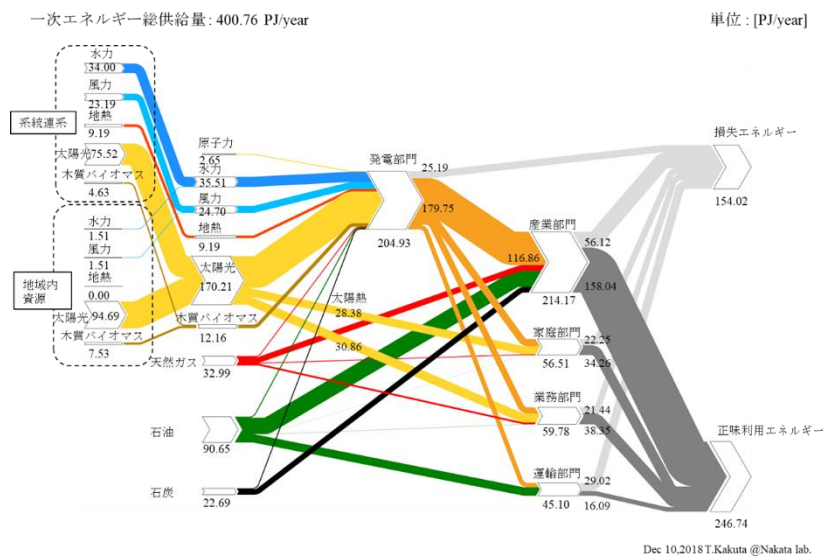




(a) 基本モデル・Referenceケース（一次エネルギー供給・2050年のエネルギーフロー）



(b) 基本モデル・CO<sub>2</sub>マイナス80%ケース（一次エネルギー供給・2050年のエネルギーフロー）



(c) 地域エネルギーモデル・CO<sub>2</sub>マイナス80%ケース（2050年のエネルギーフロー）

図4.4.7 横浜市の地域エネルギーシステム設計結果まとめ

し、地域内では太陽光が増加する結果となった。仙台市は、系統電力に供給される風力、水力、太陽光が増加し、地域内では太陽光がわずかに増加した。横浜市は、系統電力に供給される水力が増加し、地域内では太陽光が増加した。これらの結果より、再生可能エネルギー導入を拡大させていくためには、対象地域内のみの検討だけではなく、広域的な電力融通も考慮して進めていくことが重要であることがわかる。

表4.4.1 資源別再生可能エネルギー供給量の変化 (2015-2050)

対象地域	ケース	[PJ]									
		太陽光		風力		木質バイオマス		水力		地熱	
		系統	地域内	系統	地域内	系統	地域内	系統	地域内	系統	地域内
北九州市	reference	0.06	-0.22	2.47	0.21	0.12	0.00	-3.41	0.00	0.06	0.00
	CO <sub>2</sub> -80%	-0.43	16.79	34.92	0.82	0.15	0.01	37.39	0.00	-0.03	0.00
仙台市	reference	0.71	-0.02	-0.04	-0.12	0.13	0.00	-2.89	-0.01	-0.02	0.00
	CO <sub>2</sub> -80%	7.72	4.30	22.23	0.11	0.53	-0.01	25.57	0.03	0.13	0.00
横浜市	reference	-3.87	4.49	-3.85	0.01	-0.82	0.04	-4.66	0.00	0.25	0.00
	CO <sub>2</sub> -80%	1.59	94.33	8.24	1.37	4.41	7.53	17.98	1.47	9.18	0.00

また、いずれの地域でも、産業部門では、例えば鉄鋼業での電気炉の導入など、化石燃料から電力への代替が重要であることがわかった。家庭部門と業務部門では、太陽熱利用が有効であることがわかったが、実際に設備を導入するに際しては、その優先順位は各地方公共団体のCO<sub>2</sub>排出特性を考慮した上で決定していくことが重要であり、太陽熱のポテンシャルが少ない地域では建物の電化率向上や断熱性能の向上を進めるなど、必ずしも再生可能エネルギーの導入を優先するのではなく、地域のエネルギーシステムの特徴や気候も含めた地域特性に適した対策を広く俯瞰し、検討していく必要がある。運輸部門については、基本モデル、地域エネルギーモデルともにCO<sub>2</sub>マイナス80%ケースの場合では旅客部門が電動化される結果が得られた。さらに運輸部門を脱炭素化するためには、貨物運輸での取り組み強化が必要であり、輸送用燃料のバイオ燃料への移行や旅客運輸と同様の電動化を進める必要がある。

4. 3. エネルギー需給の地域特性を考慮した広域圏の設計結果

(1) エネルギー需給の地域特性に関する比較分析

本研究で広域圏を検討するに先立ち、各市町村のエネルギー需給特性の分析を行った。まず、部門別エネルギー消費構成に着目して、各市区町村の特徴を比較する。図4.4.8に、産業、業務・家庭、運輸（自動車）の3部門の比率を軸とした三角グラフ（Ternary plot）と熱、電力、輸送用燃料の3種類のエネルギー源の比率を軸とした三角グラフを並べて示す。図では、円の大きさによりエネルギー消費量表現し、クラスター分析手法の一つであるWard法により市区町村を類型化した結果を色分けで示している。

類型化の結果から、市区町村は産業特化型、産業主体型、民生主体型、運輸主体型、運輸特化型の5分類に分けられることがわかった。産業特化型地域には工業都市などが含まれ、エネルギー消費量が多い

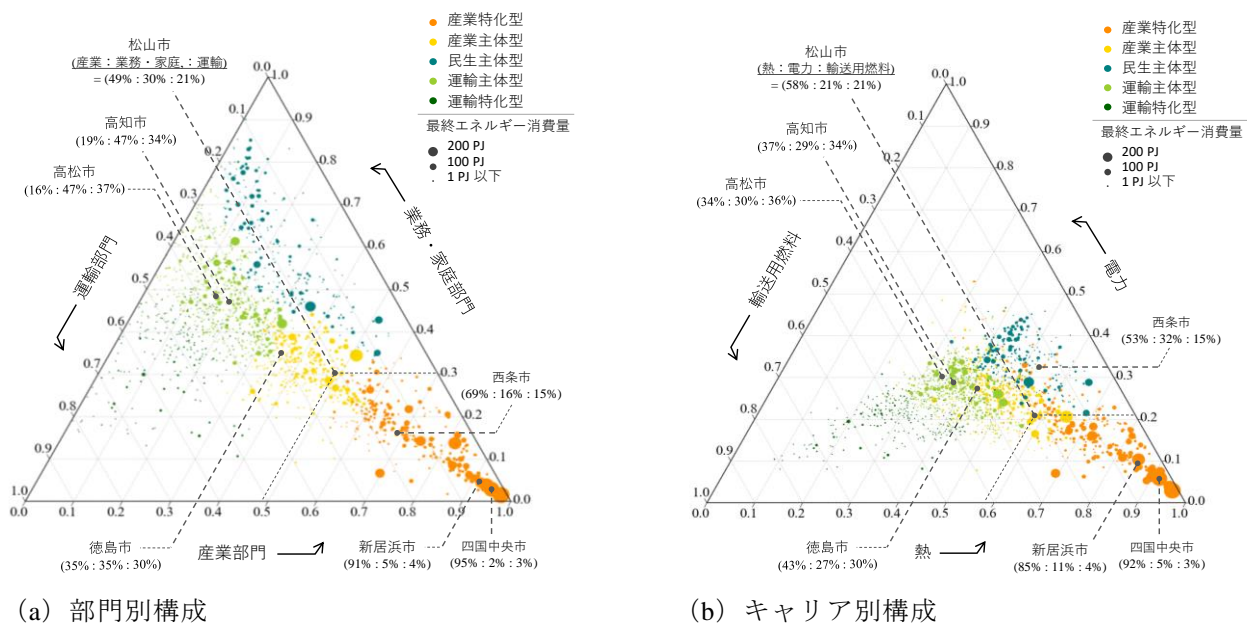
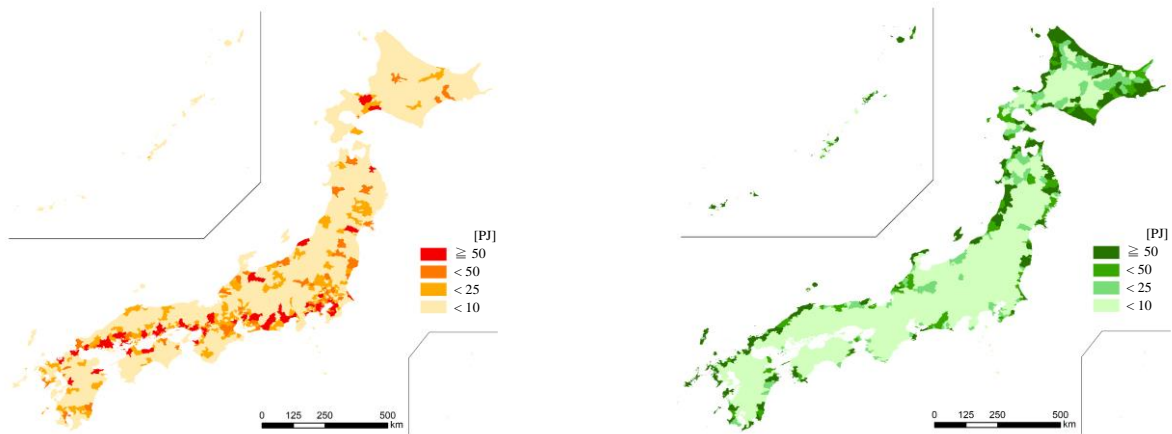


図4.4.8 エネルギー消費構成の地域特性



(a) 最終エネルギー消費量（合計）

(b) 再生可能エネルギーポテンシャル（合計）

図4.4.9 市区町村別エネルギー需給特性の分析結果

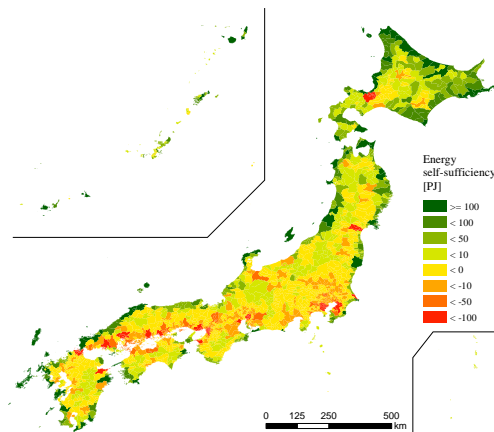


図4.4.10 市区町村別地域エネルギー収支（需要と供給の差）

傾向がある。民生主体型はエネルギー消費量の大小の差が大きい。これは、エネルギー消費の多い都市部と製造業が少なく観光業が発展した離島などが混在しているためである。運輸特化型の地域はエネルギー消費量が少ない傾向がある。この分類には中山間地域等が多く分布していることから、産業や商業が発展していないことで相対的に運輸部門の割合が高まっていること、林道や山道が多いこと、商業施設や職場等が遠方にあり自動車による遠距離移動が多いこと、公共交通機関などの輸送手段が少ないことなどが影響していると考えられる。

部門ごとの比率による三角グラフとエネルギー源ごとの比率による三角グラフを比較すると、両グラフにおける各類型の配置が対応していることが確認できる。このことは、エネルギー消費構成において需要部門における産業部門、業務・家庭部門、運輸部門の割合がエネルギーキャリアにおける熱、電力、輸送用燃料にそれぞれ対応していることを示唆していると考えられる。

次に、図4.4.9に、市区町村別の最終エネルギー消費と再生可能エネルギーポテンシャルの分析結果を地図として示す。最終エネルギー消費量の分布を見ると、首都圏や太平洋ベルトをはじめ、札幌市、仙台市、富山市といった地方都市において高い傾向が見られる。また、各資源のポテンシャルを足し合わせた再生可能エネルギー発電ポテンシャルについては、太陽光は都市部、陸上風力は北海道から東北にかけて、中小水力および地熱は飛騨・高山地方などでポテンシャルが高い傾向が見られた。また、これらを比較すること、エネルギーの需要地と供給地は地理的に対称的に分布していることがわかる。

図4.4.10に示した市区町村別の地域エネルギー収支（需要と供給の差分）についてみると、北海道や東北、中国、九州地方の沿岸部などでは需要を超える再生可能エネルギー供給ポテンシャルを有している（供給主体地域）が、首都圏や太平洋ベルト、地方都市などでは需要未満の供給ポテンシャルしか得られず（需要主体地域）、エネルギー収支には地域差があることが明確に表れている。なお、札幌市や仙台市などの地方都市周辺においては、需要主体地域を取り囲むように供給主体地域が位置する地域も散見される。

他のサブテーマでの検討において、都市・地域が低炭素に向かうためには都市構造の集約化が重要であることが示唆されているが、特にサブテーマ2の圏域を用いた検討においては市区町村内に留まらない広域的な集約化の重要性が示唆されている。本サブテーマにて実施したエネルギー需給特性の分析も踏まえると、広域的に都市構造が集約していくことで供給主体地域と需要主体地域の差がより大きくなり、二極化していくことが見込まれる。そのため、特に需要主体地域の周囲に供給主体地域が位置するなどの特徴を持つ地域では、再生可能エネルギーを広域的に連携して利用するためのインフラ整備や、それを想定したエネルギーシステム設計とその実現が重要となると考えられる。

## (2) 広域圏の試設計結果

本研究では、広域圏の設計において表4.4.2の8つのケースを想定した。図4.4.11に、ケース8を例に広域圏の設計結果を示す。

ケースごとの広域圏設計の結果を比較すると、いくつかの共通した傾向を確認することができた。具体的には、広域圏は、洋上風力をはじめとした資源が豊富な沿岸地域や財政基盤の安定した地方の県庁所在地などを中心として形成されること、需要主体地域が密集して分布している首都圏や太平洋ベルト、ならびに供給主体地域が密集する北海道東部では、広域圏はほとんど形成されないこと、西部では東部と比較して発電コストの水準が高いため、広域圏が形成される地域が限定的であることである。

表4.4.3は、各ケースで形成された広域圏の特徴をまとめたものである。最も多くの広域圏が形成されたのはケース8であり、全体の圏域数は154となった。いっぽう、ケース5は最も少なく、24の圏域が形成されるにとどまった。広域圏の類型の内訳をみると、I型の広域圏数が最多となったのはケース2（32地域）であり、最小となったのはケース5（3地域）である。また、II型とIII型に分類される広域圏が形成されたのは提携における十分条件が存在しないケース8のみであることが確認できる。構成地域は、ケース8が792地域と突出して多く、ケース2が161と最も少ないが、類型の内訳に着目すると、広域圏の形成によりI型に移行した地域数はケース2が117地域となり、ケース6について2番目に多い。

表4.4.2 広域圏設計における設定ケース一覧

ケース	提携価値の指標	提携関係	固定資産税	事業性指標	財政力指数 基準	圏域直径の 上限
1	経済合理性・ 財政力指数	余剰融通	課税	加重平均LCOE	0.5	70 km
2	経済合理性・ 財政力指数	併合	課税	加重平均LCOE	0.5	70 km
3	経済合理性・ 財政力指数	余剰融通	免税	加重平均LCOE	0.5	70 km
4	経済合理性・ 財政力指数	余剰融通	課税	資源別LCOE	0.5	70 km
5	経済合理性・ 財政力指数	余剰融通	課税	加重平均LCOE	0.7	70 km
6	経済合理性・ 財政力指数	余剰融通	課税	加重平均LCOE	0.5	100 km
7	経済合理性・ 財政力指数・ 相互補完性	余剰融通	課税	加重平均LCOE	0.5	70 km
8	経済合理性・ 財政力指数	-	課税	加重平均LCOE	-	70 km

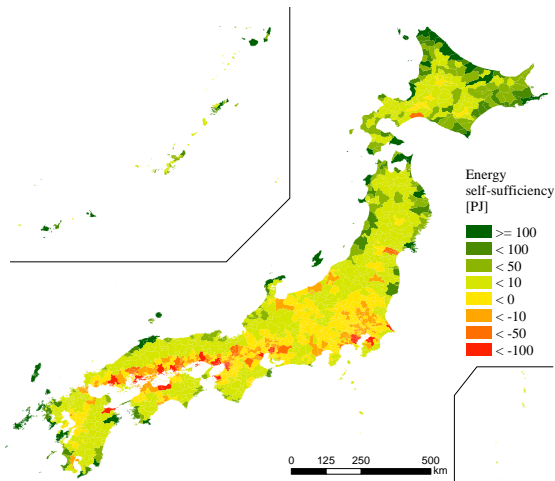
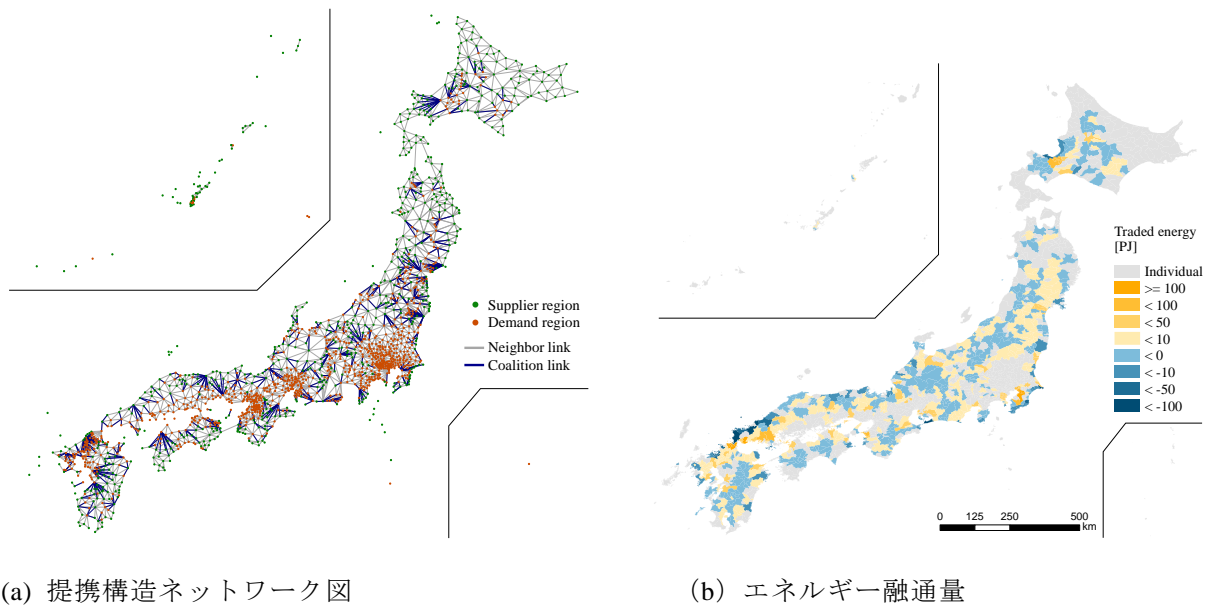


図4.4.11 広域圏の設計結果（ケース8）

エネルギー需給の変化に着目すると、すべての需要主体地域のエネルギー不足量の合計13 EJに対し、広域圏が形成されることで供給主体地域から融通されるエネルギー量の合計はケース1で1.4 EJ、ケース8では2.4 EJとなり、広域圏の形成によりエネルギー不足量の5～18%が解消されることがわかる。

ケース間の比較として、特に固定資産税の免税政策の影響について着目する。免税政策により発電コストが低下するために、再生可能エネルギー導入は促進されるが、同時に税収が減少するために財政効果は弱まることになる。これについて、ケース1（固定資産税課税）とケース3（固定資産税免除）を比較すると、形成される広域圏の数はケース1で49、ケース3で71となり、ケース3の方がケース1に比べて45%増加することがわかった。また、これに伴って融通エネルギー量もケース3の方が24%高くなる結果となった。このことから、固定資産税の免除によって発電コストの水準が下がることで地域間の提携が進み、広域圏の形成が促進されることがわかった。

つぎに、地域エネルギー収支と財政力指数の地域特性を、市区町村別と広域圏別に図4.4.12に示す。広域圏の図（図4.4.12（b））では、円の大きさはその圏域の中で融通されるエネルギー量を示しており、円が重なっているところは、複数のケースにおいて類似の圏域が形成されていることを示している。ケ

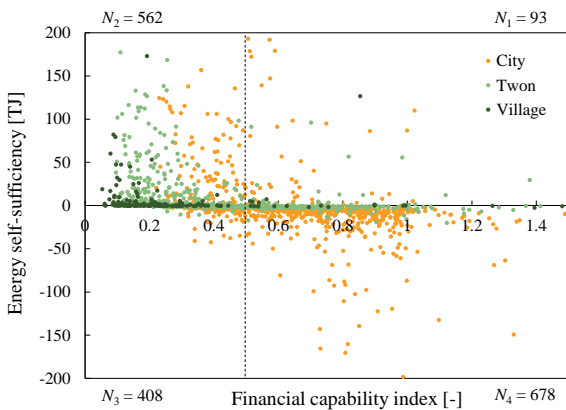


表4.4.2 広域圏の設計結果のケース比較

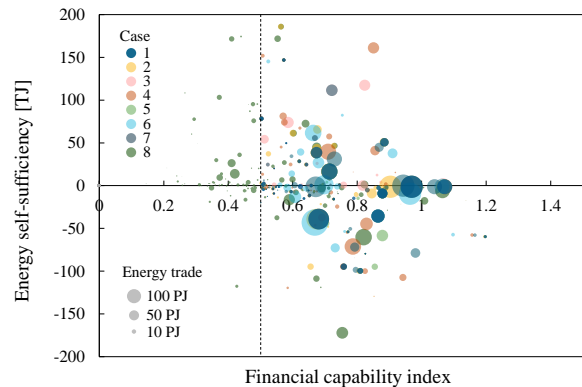
ケース	1	2	3	4	5	6	7	8
広域圏数	49	32	71	70	24	41	54	154
I型	14	32	23	32	3	15	17	26
II型	0	0	0	0	0	0	0	47
III型	0	0	0	0	0	0	0	22
IV型	35	0	48	38	21	26	37	59
構成地域数	284	161	372	374	167	346	272	792
I型市区町村数	190(108)	245(140)	243(161)	260(168)	141(54)	248(169)	182(99)	244(182)
II型市区町村数	525(0)	618(0)	500(0)	475(0)	574(0)	506(0)	541(0)	519(129)
III型市区町村数	300(0)	298(0)	288(0)	300(0)	321(0)	278(0)	300(0)	246(77)
IV型市区町村数	726(108)	580(0)	710(120)	706(114)	705(74)	709(106)	718(105)	732(188)
エネルギー 融通量 (EJ)	1.33	0.57	1.71	1.22	0.69	1.83	1.29	2.43

※1 地域エネルギー収支と財政力指数の地域特性 (図3.4.6) の各象限を順にI型、II型、III型、IV型とした。

※2 ( ) の内数は他の類型から遷移した地域数を表す。

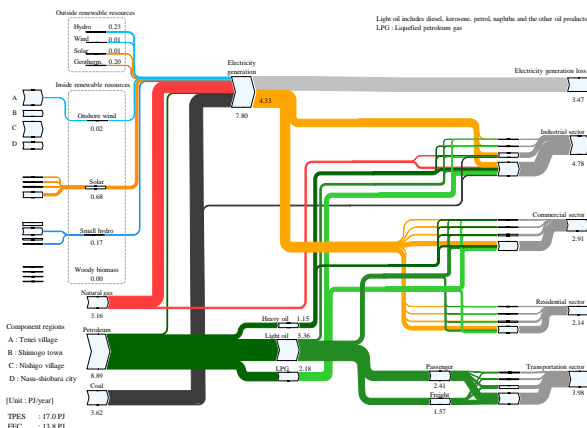


(a) 市区町村

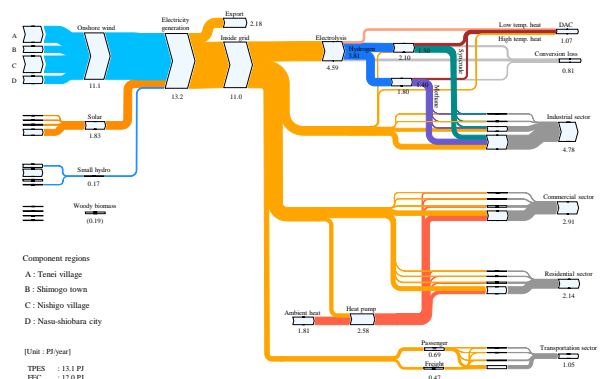


(b) 広域圏別 (ケースごと)

図4.4.12 地域エネルギー収支と財政力指数の地域特性の比較



(a) 2015 (現状)



(b) 広域圏形成後

図4.4.13 那須塩原広域圏のエネルギーフローの変化



ースごとに見ると、ケース2ではすべての広域圏のエネルギー収支が正となっている。また、ケース8のみ、財政力指数が平均（0.5）を下回る圏域が形成されていることがわかる。

最後に、形成された広域圏の中で最も提携の価値が高かった那須塩原広域圏を対象に、その圏域の特徴とエネルギーフローを分析した結果を図4.4.13に示す。那須塩原広域圏は栃木県の那須塩原市、福島県の天栄村、下郷町、西郷村の4市町村によって構成される。那須塩原市と西郷村には新幹線駅が立地しているなどの影響で財政力が高く、天栄村、下郷町、西郷村には安価で豊富な陸上風力資源が賦存している。2015年には、これら4市町村のエネルギー消費は石炭・石油・天然ガスといった化石燃料に依存しているが、広域圏を形成することで需要主体地域である那須塩原市に供給主体地域から再生可能エネルギーを融通する構図が確認でき、特に風力資源が豊富な地域からのエネルギー供給量が増加するとともに、CO<sub>2</sub>排出量の観点でも大幅な削減が期待できることが明らかとなった。

## 5. 本研究により得られた成果

### （1）科学的意義

地域エネルギーシステムの設計にあたって地域資源の事業性を考慮することは重要であるが、多くの既往研究では単純な地域資源のコストの評価にとどまっており、地域外の資源との競争を考慮した事例はない。そこで本研究では、地域内外の再生可能エネルギー資源の市場均衡を考慮し、その価格競争を内生化した設計手法を開発した。加えて、その設計手法を用いたケーススタディの結果、地域内外の資源をそれぞれ導入した一次エネルギー供給構造が市場原理において最も経済合理的であることがわかった。このことから、経済合理的な地域エネルギーシステムの設計にあたっては、地域内の資源だけでなく地域外の資源も考慮することが重要であることが示された。

また、都市・地域が単独で低炭素化を推進するには系統電力などの地域外の主体の低炭素化も重要となるが、第五次環境基本計画で地域循環共生圏の構想が示されるなど、従来の地域の境界を越えた連携と圏域の形成に注目が集まっている。地域エネルギー政策においても、個別地域が抱える課題を解決する手段として広域化が期待されるが、エネルギー需給の補完関係を考慮して合理的に構成地域を選択し、広域圏を設計した事例はない。本研究では、広域圏の設計を大規模な提携構造形成問題として捉え、その解法として地域間の提携をボトムアップで成立させていくヒューリスティクス手法を提案し、提案したアルゴリズムに基づいて広域圏を試設計した。その結果、全国の適地で広域圏が形成され得ることが示された。一方で、性質が偏った地域が密集している領域をはじめとして、広域圏の形成が困難な領域が存在することがわかった。このようにエネルギー需給の補完関係を考慮した広域圏を構築することで地域間の再生可能エネルギー資源の融通による地域内資源の活用と低炭素化が進むことを示し、地域内だけでなく特に近隣の地域との広域的な連携も含めて低炭素方策を考えることの重要性を示した。

これら成果は、国内外の雑誌での論文発表や学会等での報告を行い、論文賞等を受賞している。

### （2）環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で明らかにした部門別最終エネルギー消費量データベース、再生可能エネルギーポテンシャルマップ、エネルギーフロー図等の市区町村単位の情報を活用することで、全国一律の係数を乗じるなどの手法と比較して、より都市・地域の特性を反映した現況把握や将来シナリオの検討を行うことができる。また、自地域内のエネルギー需給の特性だけでなく、周辺地域等の特性も把握することで、文化的要因、地理的要因、政治的要因などの実務的な制約を考慮した実効的な広域圏や地域エネルギーシステムの姿を提示することができ、地域循環共生圏などの地域間の連携を活用した持続可能な社会作りに向けた政策の立案や実施に役立つことが期待される。その一環として、日本全体や青森、長野、福島等のエネルギーシステムの分析結果として作成したエネルギーフロー図、やカーボンフロー図、キャッシュフロー図をWebサイトを通じて公開している。（<http://www.eff.most.tohoku.ac.jp/charts/>）（2020年3月19日

現在、41件のフロー図を掲載）。

区域施策編では、対象とする区域の特性を踏まえて望ましい地域の将来像を構想し、提示することが推奨されているが、エネルギー消費の部門別構成に基づく地域の類型化を活用することで、他と比較した地域の特徴を検討したり、方策や取組の検討にあたっての参考を類似地域から得るなどが可能となる。また、これらの情報は地方自治体だけではなく住民等にとっても地域特性を把握することに役立ち、地方自治体にて幅広いステークホルダーが関与しての温暖化対策策定及び実施の助けとなりうる。

また、これら成果は、四国経済産業局と地域の現状把握のための「地域のエネルギーの見える化」について愛媛県新居浜市を対象としたモデル分析を実施し、分散型エネルギーシステム普及・啓発セミナーVol.1（主催：四国経済産業局、株式会社いよぎん地域経済研究センター）での講演など、地域における低炭素型エネルギーシステム検討へ貢献してきた。

## 6. 国際共同研究等の状況

フラウンホーファー研究所（ドイツ）のDr. Karin Jahnとの共同研究体制を構築し、エネルギーシステム分析についてドイツの都市エネルギー分析の知見を踏まえたモデリング手法の開発とそれを用いた評価を行った。

## 7. 研究成果の発表状況

### （1）誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) 佐藤高士, 古林敬顕, 根本和宣, 中田俊彦: 森林利用学会誌, 35(1), 15–24 (2020)  
「中山間地域における持続可能な森林利用のための伐出工程機械化の生産性評価」
- 2) F.E.K. SATO and T. NAKATA: Sustainability, 12(147), 1–18 (2020)  
“Recoverability Analysis of Critical Materials from Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries through a Dynamic Fleet-Based Approach for Japan”
- 3) C.S. GOH, T. AIKAWA, A. AHL, K. ITO, C. KAYO, Y. KIKUCHI, Y. TAKAHASHI, T. FURUBAYASHI, T. NAKATA, Y. KANEMATSU, O. SAITO and Y. YAMAGATA: Sustainability Science, 1–11 (2019)  
“Rethinking sustainable bioenergy development in Japan: decentralised system supported by local forestry biomass”
- 4) 内田皓久, 古林敬顕, 中田俊彦: 日本機械学会論文集, 85(872), 1–18 (2019)  
「燃料電池自動車のシステム性能分析と運輸旅客部門への導入可能性評価」
- 5) S. FUJII, T. FURUBAYASHI and T. NAKATA: Energies, 12(7), 1–14 (2019)  
“Design and analysis of district heating systems utilizing excess heat in Japan”
- 6) F.E.K. SATO, T. FURUBAYASHI and T. NAKATA: Applied Energy, 237, 779-794 (2019)  
“Application of energy and CO<sub>2</sub> reduction assessments for end-of-life vehicles recycling in Japan”
- 7) 古林敬顕, 赤尾貢佑, 中田俊彦, 河西英一: 日本エネルギー学会誌, 97(10), 314–329 (2018)  
「国際輸送を考慮した持続可能なEFB利活用システムの設計」
- 8) T. FURUBAYASHI and T. NAKATA: Journal of Cleaner Production, 174, 1044–1053 (2018)  
“Cost and CO<sub>2</sub> reduction of biomass co-firing using waste wood biomass in Tohoku region, Japan”
- 9) 古林敬顕, 佐藤雄治, 中田俊彦, 河西英一: 日本機械学会論文集, 84(860), 17-00565 (2018)  
「施設配置問題を考慮した持続可能な木質バイオマスサプライチェーンの設計」

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) F.E.K. SATO and T. NAKATA: Proceedings of EcoDesign 2019 International Symposium (C3-3) 505–512 (2019)  
“Analysis of electric vehicle batteries recoverability through a dynamic fleet based approach”

- 2) T. FURUBAYASHI and T. NAKATA: Sustainable Development of Energy, Water and Environmental System (SDEWES) Conference proceedings 0418, 1–2 (2017)  
 “Design of the regional energy system in Japan for zero carbon and high resilience”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 中田俊彦: えねるみくす, 98(6), 637–637 (2019)  
 「量から質への時代における普遍性と特異性」
- 2) 長野麻子, 鮫島正浩, 相川高信, 山地憲治, 泊みゆき, 中田俊彦, 坂西欣也, 松村幸彦: えねるみくす, 98(1), 2–28 (2019)  
 「バイオマス部会座談会「バイオマス利用のこれから」」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 中田俊彦: 分散型エネルギーシステム普及・啓発セミナー, 高松 (2020)  
 「地域エネルギーの見える化手法」
- 2) 小野寺弘晃, 中田俊彦: 第36回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京 (2020)  
 「市区町村の地域特性を考慮した 広域エネルギーシステムの統合設計」
- 3) 長野尚也, 中田俊彦: 第36回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京 (2020)  
 「セクターカップリングを考慮した脱炭素型エネルギーシステムの最適設計及び性能評価」
- 4) 尾崎竣也, 中田俊彦: 第36回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京 (2020)  
 「セクターカップリングを考慮した余剰電力を活用する地域熱供給システムの設計」
- 5) R. DELAGE, 中田俊彦: 第36回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京 (2020)  
 “Autoencoder for the Analysis of Energy Systems Data”
- 6) 根本和宜, 中田俊彦: 第15回バイオマス科学会議, 郡山 (2019)  
 「中山間地域における森林資源を利用した家庭向け熱供給システムの検討」
- 7) 海邊健二, 大友順一郎, 中田俊彦: 第15回バイオマス科学会議, 郡山 (2019)  
 「木質バイオマスの利用拡大に向けた技術評価」
- 8) 千田遥斗, 根本和宜, 中田俊彦: 第15回バイオマス科学会議, 郡山 (2019)  
 「森林資源の空間情報を考慮した素材生産システムのモデル開発」
- 9) ドラージュ・レミ, 中田俊彦: 日本機械学会技術と社会部門講演会, 仙台 (2019)  
 「機械学習を用いたエネルギーシステムの分析」
- 10) 尾崎竣也, 中田俊彦: 日本機械学会技術と社会部門講演会, 仙台 (2019)  
 「エネルギー需給の空間情報分析に基づく地域熱供給システムの設計」
- 11) 根本和宜, 中村省吾, 森保文, 大場真, 中田俊彦: 日本機械学会技術と社会部門講演会, 仙台 (2019)  
 「地域における木質バイオマス利用技術の選択要件」
- 12) N. NAGANO and T. NAKATA: 5th International Conference on Smart Energy Systems, Copenhagen, Denmark (2019)  
 “Introducing sector coupling to utilize renewable resources for regional decarbonization in Japan”
- 13) 小野寺弘晃, 中田俊彦: 第38回エネルギー・資源学会研究発表会, 東京 (2019)  
 「エネルギー需給特性を考慮した市区町村のクラスター分析」
- 14) 長野尚也, 中田俊彦: 第38回エネルギー・資源学会研究発表会, 東京 (2019)  
 「東北地方におけるセクターカップリングを考慮した地域エネルギーシステムの設計」
- 15) Y. YOKOI, T. FURUBAYASHI, T. NAKATA and H. KASAI: European Biomass Conference and Exhibition (EUBCE) 2019, Lisbon, Portugal (2019)  
 “Analysis and integrated design for supply chain of Empty Fruit Bunch (EFB) pellet”
- 16) 中田俊彦: 福島産業創生協議会第29回フォーラム, 福島 (2019)  
 「環境とエネルギーの視点からの被災地のスマートシティの可能性」

- 17) 中田俊彦: 日本伝熱学会東北支部, 仙台 (2019)  
「持続可能なエネルギーシステムの統合デザインと分析」
- 18) 佐藤高士, 古林敬顕, 中田俊彦: 第130回日本森林学会大会, 新潟 (2019)  
「森林空間情報に基づく林業機械の最適運用計画と生産性評価」
- 19) 高橋遼, 古林敬顕, 中田俊彦: 第35回エネルギーシステム・環境・経済コンファレンス, 東京 (2019)  
「部分均衡エネルギー・経済モデルによる2050年脱炭素社会に向けた持続可能エネルギーシステムの統合デザイン」
- 20) 長野尚也, 古林敬顕, 中田俊彦: 第35回エネルギーシステム・環境・経済コンファレンス, 東京 (2019)  
「セクターカップリングを考慮した脱炭素型地域エネルギーシステムの設計」
- 21) 村形夏生, 古林敬顕, 中田俊彦: 第35回エネルギーシステム・環境・経済コンファレンス, 東京 (2019)  
「交通手段選択の分析に基づく, 持続可能な社会に向けた地域内旅客運輸システムのエネルギー消費の構造分析」
- 22) 角田友明, 古林敬顕, 中田俊彦: 第35回エネルギーシステム・環境・経済コンファレンス, 東京 (2019)  
「地域資源・エネルギー需給の分析に基づく脱炭素社会に向けたエネルギーシステムの最適設計」
- 23) 古林敬顕, 中田俊彦: 第35回エネルギーシステム・環境・経済コンファレンス, 東京 (2019)  
「熱導管ネットワークの拡張を考慮した地域熱供給システムの性能解析」
- 24) 横井佑香, 古林敬顕, 中田俊彦: 第14回バイオマス科学会議, 広島 (2019)  
「EFBサプライチェーンの分析および統合デザイン」
- 25) 佐藤高士, 古林敬顕, 中田俊彦: 第14回バイオマス科学会議, 広島 (2019)  
「福島県奥会津地域を対象とした持続可能な林業施策モデルの開発」
- 26) 古林敬顕, 中田俊彦: 第14回バイオマス科学会議, 広島 (2019)  
「熱, 電力及びCHPを考慮した地域バイオマスエネルギーシステムの解析」
- 27) 高橋遼, 古林敬顕, 中田俊彦: 日本機械学会講演会, 東京 (2018)  
「2050年脱炭素社会に向けた持続可能エネルギーシステムの統合デザイン」
- 28) S. FUJII, T. FURUBAYASHI and T. NAKATA: 4th International Conference on Smart Energy Systems And 4th Generation District Heating, Aalborg, Denmark (2018)  
“Design and analysis of district heating system utilizing excess heat in Japan”
- 29) 長野尚也, 古林敬顕, 中田俊彦: 日本地域学会第55回年次大会, 札幌 (2018)  
「スマートコミュニティのエネルギー需給分析とシステム性能評価」
- 30) T. NAKATA: International Workshop: Future perspectives of bioenergy development in Asia, Tokyo, Japan (2018)  
“Future perspectives of regional development”
- 31) 清野若菜, 古林敬顕, 中田俊彦: 日本機械学会東北支部第53期講演会, 仙台 (2018)  
「地域エネルギー需給の空間情報分析と福島県のエネルギーシステム設計への応用」
- 32) 古林敬顕, 中田俊彦: 第34回エネルギーシステム・環境・経済コンファレンス, 東京 (2018)  
「導管熱密度を考慮した地域熱供給システムの設計」
- 33) 藤井伸, 古林敬顕, 中田俊彦: 第34回エネルギーシステム・環境・経済コンファレンス, 東京 (2018)  
「欧州型地域熱供給の特性と日本への導入ポテンシャル評価」
- 34) 村形夏生, 古林敬顕, 中田俊彦: 第34回エネルギーシステム・環境・経済コンファレンス, 東京 (2018)

- 「シェアードカー移行に伴う地域エネルギーシステムの構造変化」
- 35) 川島彩貴, 古林敬頭, 中田俊彦: 第34回エネルギーシステム・環境・経済コンファレンス, 東京 (2018)  
「世界と日本のフロー分析に基づく食料・エネルギーネクサス」
- 36) 北村駿太郎, 古林敬頭, 中田俊彦: 第34回エネルギーシステム・環境・経済コンファレンス, 東京 (2018)  
「持続可能な自動車製造業に向けた工場近隣ゾーンの再生可能エネルギー利用システム設計」
- 37) 中田俊彦: 持続可能な超スマート社会を実現するエネルギーサービスデータベースの構築戦略, 仙台 (2018)  
「エネルギーデータマップと地域デザイン」
- 38) 中田俊彦: 第13回バイオマス科学会議, 仙台 (2018)  
「持続可能なバイオマスエネルギー事業のソリューション」
- 39) 古林敬頭, 中田俊彦: 第13回バイオマス科学会議, 仙台 (2018)  
「資源有効利用率を考慮した地域バイオマスエネルギーシステムの設計」
- 40) 岡野航介, 古林敬頭, 中田俊彦, 大場真: 第13回バイオマス科学会議, 仙台 (2018)  
「森林資源の空間情報分析に基づく木質バイオマス伐出システムの統合デザイン」
- 41) 川島彩貴, 古林敬頭, 中田俊彦: 第13回バイオマス科学会議, 仙台 (2018)  
「マテリアル・エネルギーフロー分析に基づく食料・エネルギーネクサスの評価」
- 42) 角田友明, 古林敬頭, 中田俊彦: 第13回バイオマス科学会議, 仙台 (2018)  
「都市・地域レベルの脱炭素化に向けた下水熱エネルギー利用システムの統合デザイン」
- 43) 横井佑香, 古林敬頭, 中田俊彦: 第13回バイオマス科学会議, 仙台 (2018)  
「パーム空果房(EFB)の広域収集・運搬システムの統合デザイン及び分析」
- 44) 中田俊彦, 古林敬頭: 電気システム/スマートファシリティ合同研究会, 東京 (2017)  
「持続可能なエネルギーシステムの統合デザイン」
- 45) T. NAKATA: 6th Annual Meeting of the LoCARNet, Bangkok, Thailand (2017)  
“Integration of local actions into national development towards achieving SDGs in Asia and the role of science and technology: Development and application of models and monitoring technologies to evaluate transition to the SDGs”
- 46) 中田俊彦: 日本機械学会東北支部特別講演会, 仙台 (2017)  
「持続可能なエネルギーシステムの統合デザイン」
- 47) F.E.K. SATO, T. FURUBAYASHI and T. NAKATA: 自動車技術会2017年秋季大会学術講演会, 大阪 (2017)  
“Optimization of the Vehicle Life Cycle Considering the End of Life Phase”
- 48) 川島彩貴, 古林敬頭, 中田俊彦: 日本地域学会第54回(2017年)年次大会, 京都 (2017)  
「マテリアル・エネルギーフロー分析に基づく食料・エネルギー供給のネクサスの評価」

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

## (6) その他

- 1) 論文賞，一般社団法人日本エネルギー学会，2017年8月1日，古林敬顕・中田俊彦「資源有効利用を考慮したバイオマスエネルギーシステムの定量評価」
- 2) 学生発表賞，一般社団法人エネルギー・資源学会，2018年6月11日，村形夏生「シェアードカー移行に伴う地域エネルギーシステムの構造変化」

## 8. 引用文献

- 1) 瀧田祐樹，古林敬顕，中田俊彦：日本機械学会論文集，82，844，16-00100-16-00100 (2016)  
スマートコミュニティの実装に向けた地域エネルギー需給構成の分析とエネルギー空間情報の可視化
- 2) 藤井康正：電気学会論文誌B，125，9，833-836 (2005)  
分散エネルギーシステムの展望と課題
- 3) T. BROWN, D. SCHLACHTBERGER, A. KIES, S. SHRAMM, and M. GREINER: Energy, 160, 720-739 (2018)  
Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system
- 4) 環境省：地方公共団体における地方公共団体実行計画に基づく地球温暖化対策への取組状況等，  
<https://www.env.go.jp/earth/dantai/index.html> (2019)
- 5) 環境省：地方自治体の地域エネルギー政策推進に向けた取組み状況について（報告） (2015)
- 6) 関川千恵美：公共研究，12，1，230-248 (2016)  
地方自治体における再生可能エネルギー政策の現状と課題（その2）
- 7) 新エネルギー・産業技術開発機構：風力発電導入ガイドブック，102-103 (2008)
- 8) IEA: Offshore Wind Outlook 2019 (2019)
- 9) IEA: Technology roadmap - Wind energy 2013 edition (2013)
- 10) IRENA: Renewable Power Generation Costs in 2017 (2018)
- 11) 資源エネルギー庁（総合資源エネルギー調査会）：長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告，  
[https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/mitoshi/cost\\_wg/pdf/cost\\_wg\\_01.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/pdf/cost_wg_01.pdf) (2015)
- 12) 森のエネルギー研究所：木質バイオマスボイラー導入指針，[http://www.mori-energy.jp/pdf/lca\\_boilershishin.pdf](http://www.mori-energy.jp/pdf/lca_boilershishin.pdf) (2014)



### III. 英文Abstract

#### **Development of Analytical Models for Low Carbon Re-development Planning coupling with Resources and Energy Use, and their Application to Municipalities**

Principal Investigator: Shuichi ASHINA

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)  
 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, JAPAN  
 Tel: +81-29-850-2227 / Fax: +81-29-850-2572  
 E-mail: ashina.shuichi@nies.go.jp

Cooperated by: Nagoya University, Tohoku University

[Abstract]

**Key Words:** Region and City, Low carbon scenario, Integrated assessment model, Geographical information, Urban structure, Population distribution, Building stock, Stock-type city, Regional energy system, Simplified tool

This project aimed to establish a methodology for designing scenarios and roadmaps to realize low-carbon cities and regions while considering regional characteristics such as urban structure, population distribution, building stock, and energy systems. For this purpose, we developed a series of analytical models, including a low-carbon urban space model that evaluates future urban structure by considering local social issues such as population decline and aging and incorporating geographical information; a construction stock renewal evaluation system that relies on geographical information to evaluate the lifespan of buildings and material stock and flow amounts; a regional energy system model that designs an optimal energy system on the basis of a region's energy demand and its supply of renewables; and a low-carbon policy evaluation model to design scenarios and roadmaps. We also developed a method for estimating current and future energy demand and CO<sub>2</sub> emissions for passenger transportation and residential sectors as well as a simplified analytical tool that employs both Excel macros and Web systems.

The models and tools were applied to specific cities to gain insight into how to transition from high carbon to low-carbon regions. Changing urban structure was identified as key in the creation of low-carbon regions. A transition to compact cities will contribute to counteracting the effects of a declining population and decreasing the overall energy demand and CO<sub>2</sub> emissions, but a rapid transition will cause an increase in the amount of construction waste. Regional cooperation was also identified as extremely important. Some regions with large urban areas have large energy demands but less renewable energy (demand-excess areas), whereas others have a large supply of renewable resources but lower energy demand (supply-excess areas). Enhancing cooperation among these areas will increase the utilization of renewable energy and reduce CO<sub>2</sub> emissions. Many regions, however, will still need to rely on low-carbon electricity from the grid. Finding low-carbon solutions when faced with social challenges such as an aging society and an increase in unoccupied residences is also important, but solutions to social challenges are sometimes in conflict with low-carbon solutions. Considering the impacts of (and resilience to) climate change in low-carbon scenarios is critically important because some impacts have positive effects while others have negative

impacts. In addition, constructing compact cities without considering these impacts may increase the potential for damage to urban structures and people's daily lives through increased flooding.