

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

1-2003 地域資源と地域間連携を活用した地域循環共生圏の計画と
その社会・経済効果の統合評価に関する研究
(JPMEERF20201003)

令和2年度～令和4年度

Development of Integrated Assessment Approach for Designing and Assessing the Socio-economic Impact
on Regional Circular and Ecological Sphere utilizing Regional Resources

<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>

東北大学

名古屋大学

令和5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. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5－1. 成果の概要	
5－2. 環境政策等への貢献	
5－3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6－1. 査読付き論文	
6－2. 知的財産権	
6－3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II－1 社会・経済効果を考慮した地域循環共生圏の統合的な計画・評価モデル開発と実証	19
(国立研究開発法人国立環境研究所)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II－2 国土利用の変遷を考慮した地域資源と地域間連携の分析手法開発	38
(国立研究開発法人国立環境研究所、東北大学)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II－3 ストック型地域資源のポテンシャル評価と循環利用方策の検討	56
(名古屋大学)	

要旨

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

III. 研究成果の発表状況の詳細		72
-------------------	-------	----

IV. 英文Abstract		83
----------------	-------	----

I. 成果の概要

課題名 1-2003 地域資源と地域間連携を活用した地域循環共生圏の計画とその社会・経済効果の統合評価に関する研究

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システム領域地域計画研究室
主席研究員)

重点課題 主：【重点課題②】ビジョン・理念の実現に向けた研究・技術開発

副：【重点課題①】持続可能な社会の実現に向けたビジョン・理念の提示

行政要請研究テーマ（行政ニーズ） (1-1) 「地域循環共生圏」の創造に向けた理論の構築と地域での実証

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

研究経費

83,801千円（合計額）

（各年度の内訳：令和2年度：30,631千円、令和3年度：26,585千円、令和4年度：26,585千円）

研究体制

（サブテーマ1）社会・経済効果を考慮した地域循環共生圏の統合的な計画・評価モデル開発と実証（国立研究開発法人国立環境研究所）

（サブテーマ2）国土利用の変遷を考慮した地域資源と地域間連携の分析手法開発
（国立研究開発法人国立環境研究所・東北大学）

（サブテーマ3）ストック型地域資源のポテンシャル評価と循環利用方策の検討（名古屋大学）

研究協力機関

研究協力機関はない。

本研究のキーワード 地域脱炭素、地方自治体、地域資源、再生可能エネルギー、地産地消、地域間連携、分析モデル、地理情報システム

1. はじめに（研究背景等）

第五次環境基本計画では、環境・経済・社会の統合的向上の鍵として地域循環共生圏の創造による持続可能な社会の実現を掲げており、いくつかの地域では、環境省の支援等で先行的な取り組みが進められている。このような中、2020年10月26日に菅総理より「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことが宣言され、地域についても2021年5月26日の地球温暖化対策推進法の一部改正で地方公共団体実行計画において地域脱炭素化促進事業の計画作りに努めることとされた。また、同年6月9日の国・地方脱炭素実現会議で地域脱炭素ロードマップが取りまとめられ、2030年までに少なくとも100か所の脱炭素先行地域を創出する目標が掲げられた。これに基づいて環境省において脱炭素先行地域の募集が開始され、2022年11月に行われた第2回選定時点では29都道府県66市町村の46提案が選定されるなど、地域脱炭素に関する先行的な取り組みが進められている。さらに、2022年10月28日には地球温暖化対策の推進に関する法律に基づいて株式会社脱炭素化支援機構が設立され、資金・金融の観点からの脱炭素化支援も広がりつつある。

これら取組を加速化し、わが国で広く地域循環共生圏、特に脱炭素化を実現し、着実に根付かせてい

くには、地域の有するエネルギーや都市基盤、産業集積等の資源（地域資源）の量と質を明らかにするとともに、人口減少等も考慮した国土利用の姿も踏まえつつ、地域資源を地域内や地域間で循環させたシステムの姿とその実現の道筋を具体的に示すことが重要となる。特に脱炭素型地域実現に向けた動きが進む中では、再生可能エネルギーも含む地域資源とその地域間連携を活用した自立・分散型システムの姿を具体的に示すことが求められている。

2. 研究開発目的

本研究では、上記研究開発背景のもと、地域循環共生圏を構成する要素のうち特に地域脱炭素に焦点をあて、（1）将来の国土利用の変遷も考慮した地域エネルギー資源とストック型地域資源の定量評価手法の開発、（2）地域資源の空間分布も踏まえた具体的な地域間連携の検討・提案手法の開発、（3）地域AIMを発展させた、地域資源と地域間連携を活用した地域循環共生圏の計画と実装に伴う社会・経済効果の統合評価モデルの開発、（4）開発した手法の具体的な地域を対象とした実証と有効性を高めるための検討、の4点に関する研究開発を行った。

3. 研究目標

全体目標	人口減少等も考慮した将来の国土利用の変遷を評価する手法と、その結果も考慮した地域資源の質と量を明らかにする手法を開発し、地域内・地域間連携を通じた活用方策を検討・提案する。また、開発済みの地域AIMにこれら地域資源に関する成果を組み合わせ、地域資源と地域間連携を活用した地域循環共生圏を計画するモデルと、実装による社会・経済効果を評価する手法を開発し、全体を「地域循環共生圏の設計・効果評価モデル」としてとりまとめる。開発した手法は課題全体で設定した対象内の具体地域に適用するとともに、研究結果をもとにした対象地域内の地方自治体との討議等を実施し、開発したモデル等の有効性を検証し改良を進める社会実装型の研究プロセスの構築に資する知見を整理する。
サブテーマ1	社会・経済効果を考慮した地域循環共生圏の統合的な計画・評価モデル開発と実証
サブテーマリーダー /所属機関	芦名 秀一／国立研究開発法人国立環境研究所
目標	低炭素型地域の統合評価モデル（地域AIM）にサブテーマ2・3の地域資源分析手法を組み込み、先行研究・事業等の成果や技術開発の見通しも踏まえて、地域経済分析システム（RESAS）等を活用する地域診断と経済特性の解析とともに、地域資源と地域間連携を活用した地域循環共生圏の姿とその創造の道筋を計画するモデルと、地域循環共生圏に関する施策・技術システムの実現による人口や地域経済への影響（社会・経済効果）の評価手法を開発し、全体を「地域循環共生圏の設計・効果評価モデル」としてとりまとめる。また、課題共通で設定した対象（福島県内の地域、九州の地域等）内の具体地域への適用と、その成果に基づく地方自治体との討議等を実施し、手法の有効性の検証と改良を進め、開発した手法を用いた実際の計画立案までのプロセスを明らかにする。
サブテーマ2	国土利用の変遷を考慮した地域資源と地域間連携の分析手法開発
サブテーマリーダー /所属機関	松橋 啓介／国立研究開発法人国立環境研究所

目標	日本全国の国土利用の変遷を評価する手法および地域エネルギー資源の量と分布を評価する手法を開発する。課題共通で設定した対象内の具体地域を対象に現在から将来までの人口・地域資源等の空間分布の推移を明らかにする。また、地域エネルギー資源を地域内で循環利用するシステムの設計手法を開発する。さらに、サブテーマ3のストック型地域資源の成果と合わせ、異なる質や量の地域資源を有する地域間の連携を資源の輸送も考慮して検討・提案する手法を開発し、具体地域で検討・提案する。
サブテーマ3	ストック型地域資源のポテンシャル評価と循環利用方策の検討
サブテーマリーダー /所属機関	谷川 寛樹／名古屋大学
目標	森林資源や建築解体材・土木インフラ等のストック型地域資源を対象に、質及び量の空間的な分布を定量評価する手法と、資金の地域内循環の視点も含めて地域内で循環利用するシステムの検討手法を開発し、サブテーマ2の地域間連携の検討結果も踏まえて、課題共通で設定した対象内の具体地域へ適用して地域内での利用と地域間連携を通じた活用を具体的に検討し、提案する。

4. 研究開発内容

本研究課題では、対象とする地域資源の種類や特徴に基づいてサブテーマを設定し、相互に成果を共有することで全体として研究開発目的を達成するものとした。図-0.1に、研究課題全体の構成を示す。

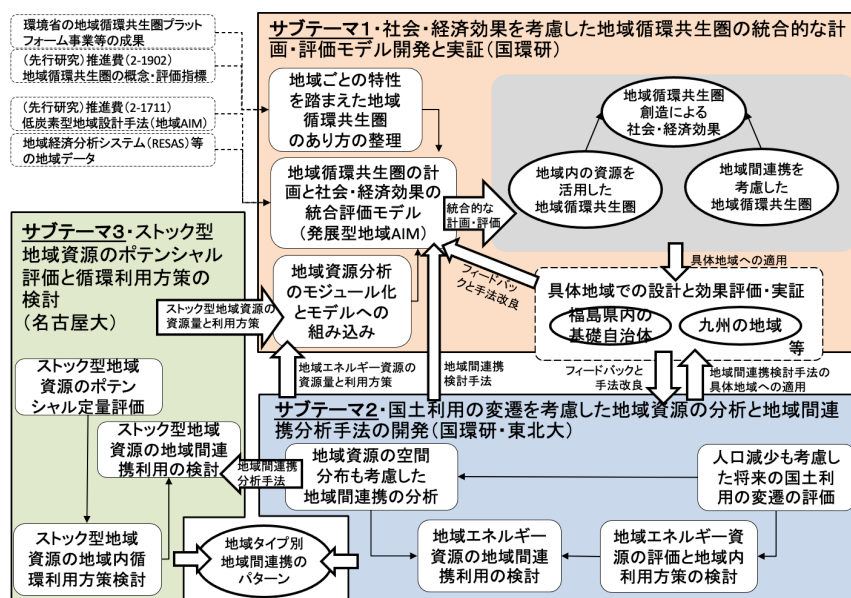


図-0.1 研究開発目的・研究目標達成に向けた本研究課題の構成

サブテーマ1では、地域資源と地域間連携を活用した地域脱炭素社会の姿とそこにいたる道筋や特に地域間連携の構築による社会・経済効果を評価する手法を開発し、地域内での資源循環による地域脱炭素化方策や地域間連携のためのネットワーク構造や実現による社会・経済効果の分析や、脱炭素政策作りにおける気候市民会議の活用に向けた検討を行った。

これら分析に先立ち、サブテーマ1ではまずサブテーマ2とも連携して全ての市区町村を対象に、2013年度から2018年度までのエネルギーバランス表の整備とエネルギーフロー図の作成を行った。作成に当たっては、都道府県別エネルギー消費量から、製造品出荷額等や従業者数、世帯数等の部門別に設定し

た指標で按分して求めている。また、工業統計細分類を用いた循環利用による代替可能需要の推計手法開発も行った。

地域内での資源循環による地域脱炭素化方策によるCO₂削減効果の分析については、エネルギー需要側での対策とエネルギー供給側での対策を多段的に評価できるモデルを開発し、全ての市区町村を対象に、将来年度におけるマクロフレーム変化のみを考慮したエネルギー消費量とCO₂排出量を基準に、エネルギー需要側での需要削減、燃料転換、効率改善、エネルギー供給側での地域資源の地域内利活用（地産地消）や系統電力のカーボンニュートラル化によるエネルギー消費量やCO₂排出量の削減効果を推計した。これに加えて、気候変動影響による再生可能エネルギー発電の出力変化を評価し、結果に対する影響を分析した。

地域間連携による脱炭素効果の分析については、まず、地域が有する再生可能エネルギー資源を地産地消した余剰を他地域へ融通すると想定して、国全体として再生可能エネルギー資源による電力供給量を最大化できるネットワーク構成を分析するとともに、地域間融通による資金の循環など社会・経済効果の評価を行った。その後、1時間単位での需要量と再生可能エネルギー出力に、融通ネットワーク構造も考慮して、費用最小化原理に基づいて対象地域全体としての需給バランスや地域エネルギー資源利用量等を検討できるモデルを開発・適用して、毎時単位での需給の変動の再生可能エネルギー導入量への影響や地域間連携の有無による違いなどを分析し、地域間連携構築の効果について評価を行った。

サブテーマ2では、日本全国の国土利用の変遷を評価する手法および地域エネルギー資源の量と分布を評価する手法を開発し、具体地域を対象に現在から将来までの人口・地域資源等の空間分布の推移を明らかにするとともに、地域エネルギー資源を地域内・地域間で循環利用するシステムを検討した。

国土利用の変遷の評価については、まず過去の国土変化の特徴検討として都道府県別に人口推移の年齢・時代・コーホート効果を分析し、それぞれの特徴を明らかにした。分析では、都道府県別の5歳階級別人口の推移の要因を年齢・時代・コーホート効果に分類するベイズ型APC分析を用い、1980年から2015年までの8時点を対象に、国勢調査の都道府県別5歳階級別人口を用いて人口変動要因の年齢・時代・コーホートの分離と特徴の類型化を行った。また、つくば市と柏市を例にメッシュ単位でのコーホート効果、時代効果、年齢効果の分布の検討と分析を行った。つぎに、市街地面積に着目して、都道府県内の人口が減少することを所与として、市街地の平均人口密度を現在と同水準に維持するパターンを2種、郊外の平均人口密度を現在と同水準に維持するパターンを2種の合計4パターン設定して、全国を対象に将来の人口分布の推移を検討した（図-2.4）。

地域エネルギー資源の資源量については、太陽光発電、風力発電、木質バイオマス、廃棄物発電を対象として、気象衛星観測データや森林簿・森林計画図、環境省の一般廃棄物処理実態調査をもとに評価

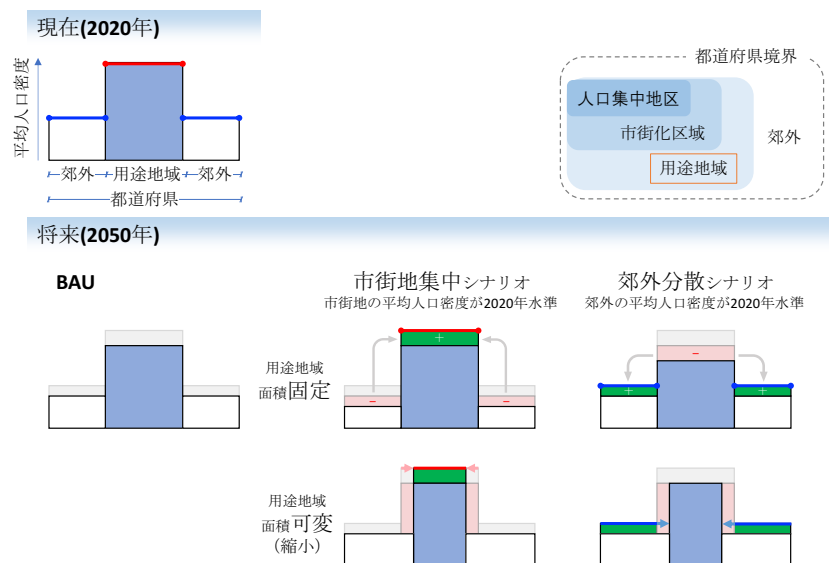


図-2.4 市街地面積固定又は可変を想定する場合の市街地集中及び郊外分散のシナリオの概念

を行い、全国大でのデータ整備を行った。太陽光発電と風力発電については、メッシュ単位で毎時発電量を評価したうえで自治体単位で集計し、国内の全市区町村の太陽光・風力発電の時間別発電出力プロファイルを整備した。木質バイオマスについては、対象を民有林（人工林・天然林）とし、森林簿の森林成長量を持続的に供給可能な資源賦存量と仮定して推計し、賦存量や導入ポテンシャル、事業性を考慮した導入ポテンシャルを推計した。廃棄物発電については、一般廃棄物（可燃ごみ）処理量をもとに、人口増減や廃棄物組成（プラスチック系、非プラスチック系）を考慮して推計した。さらに、これら推計結果をもとに、最終エネルギー消費量から対数化して求めるエネルギー需要規模、エネルギー需要の部門構成（17部門）、対数化した再生可能エネルギーポテンシャル（8種）の3つの指標に対して、標準偏差に基づく統計的分類手法と階層型クラスター分析手法（Ward法）を適用して類型化を行い、各地域のエネルギー需給の特性等の評価した。

地域エネルギー資源の地域内・地域間循環利用システムの検討については、物理的な輸送を必要とする木質バイオマス資源と、送配電網により広域的に融通できる太陽光発電等の再生可能エネルギー発電の別にシステム設計手法を開発し、具体的な地域間連携の検討を行った。木質バイオマス資源については、対象地域内の全市区町村間の輸送費用が最小となる最小費用流問題として地域間融通構造を設計した。再生可能エネルギー発電の広域的な融通と地域間連携については、サブテーマ1の成果をもとに視点を時間単位での需給バランスに拡張して分析を行うこととし、市区町村単位で毎時の再生可能エネルギー発電量と蓄電量、また隣接市区町村間での時間単位の再エネ融通量を評価できる高時空間解像度のエネルギーシステムモデルを開発した。さらに得られた結果をもとに、全市区町村の電力需給構造を階層型クラスター分析手法（Ward法）により類型化し、需給構造の類似性の分析と議論を行った。

サブテーマ3では、森林資源や建築解体材・土木インフラ等のストック型地域資源の地域内における循環利用に向け、都市の物質代謝の将来予測手法を開発するとともに、具体地域を対象として、都市内の建築物ストックの物質代謝に関する将来予測に関する分析と、森林資源を対象とした地域材の地域内での利用促進が将来の都市・人工林内炭素貯蔵量に与える影響に関する分析を実施した。分析は、本研究課題共通で設定した対象地域から九州北部の福岡県北九州市を設定した。これは、北九州市は100万人規模の都市の中でも特に人口減少・高齢化が顕著な都市であり、それによる空き家などの社会問題が顕在化してそれらの対策が求められている地域であるとともに、地域内の木材利用の拡大の検討においても全国のパイロットケースになりえることから、対象地域として設定したものである。

都市の物質代謝の将来予測については、建築物の位置や形状の情報に高さ情報を加えた3d-GISを時系列的に整備した4d-GISデータベース（一例を図-3.3に示す）を用いて、各建築物ストックを構成する資材を定量化し、解体確率と退蔵確率を考慮したモデルを構築して将来のストック量、排出量と質の変化を推計した。これらモデルは、建物特性や地理的条件等を説明変数として、ストックが解体されたり退蔵ストックへ移行するか否かを確率的に検討するものである。なお、本研究ではホールドアウト法による未知のデータに対する予測性能（汎化性能）評価を行い、開発したモデルの精度評価を行っている。そののち、モンテカルロシミュレーションを行うことによって、2015年から2050年までの将来の物質代謝

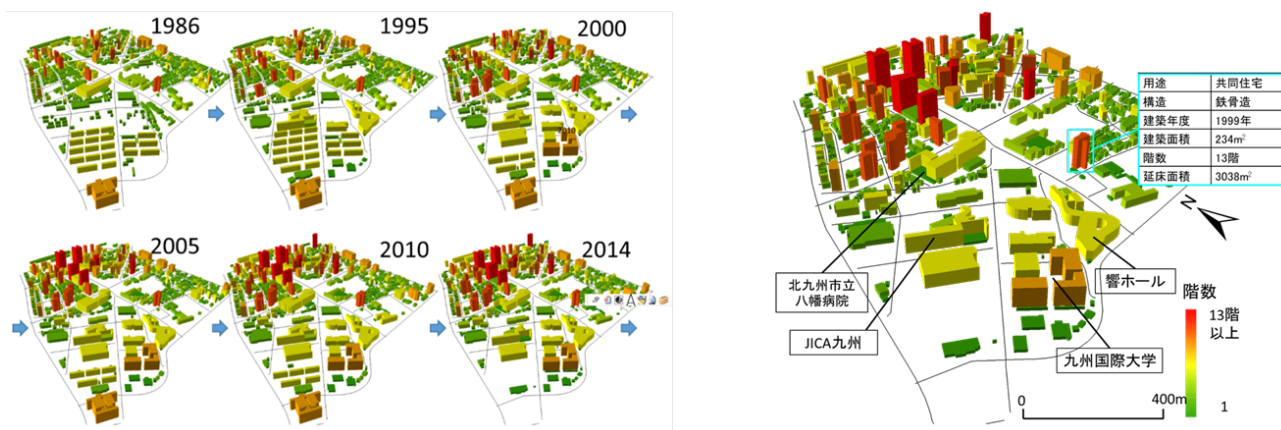


図-3.3 4d-GISデータの一例（北九州市八幡駅周辺、右拡大図は2018年）

の推計を行った。

森林資源を対象とした地域材の地域内での利用促進が将来の都市・人工林内炭素貯蔵量に与える影響に関する分析については、地域の建築用木材の需要拡大を想定して、再造林率及び都市と人工林の炭素貯蔵量に与える影響や、木材輸送に伴う炭素排出量の削減効果の推計を行った。推計では、人工林及び地域材で建てられた木造建築物を対象とすることとして、人工林では建築物向けの地域材需要量を賄う量を伐採すると仮定して伐採から再造林・保育に至る収支に基づき再造林が実施されるかどうかを判定し、木造建築物については非木造の非住宅・中高層建築物の木造化を想定したシナリオを設定して将来の木材需要量を評価して輸送に伴うCO₂排出量の変化や地域内に蓄積される炭素ストック量の変化を評価した。さらに、これらの知見をサブテーマ2と共有することで、木質資源を地域間で循環利用するためのシステム設計と地域間連携の検討を行った。

以上に加えて、長崎県五島市などで本研究課題の成果に基づく地方自治体担当者との意見交換を進めたほか、各種シンポジウムや高校等での講義を通じた成果普及を推進してきた。地方自治体等との討議に関しては、地方自治体での脱炭素社会への転換には市民の果たす役割が非常に大きいとの認識のもと、川崎市の気候市民会議にて本課題の成果等を提供してきたほか、東京都武蔵野市や所沢市での取り組みにも関わってきた。さらに、これらをもとに、地方自治体において脱炭素政策作りに気候市民会議方式を活用するための手法やプロセス等の整理・検討を行った。

また、地域エネルギー資源量の評価結果については、市区町村単位のエネルギー需給データを公開するWebサイト「地域エネルギー需給データベース」(<https://energy-sustainability.jp/>)に本研究より得られた成果を統合して公開することで、研究成果の普及を推進してきた。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

全市区町村を対象にしたエネルギーバランス表を整備し、総エネルギー消費量は市区町村ごと偏りが大きく、特に産業部門のうち製造業の割合が大きく影響することを明らかにした。また、廃棄物の循環利用により代替可能なエネルギー需要の推計では、欠測・秘匿データの影響を最小限として代替可能性のある燃料消費量が求められたことを確認した。

地域内での資源循環による地域脱炭素化方策によるCO₂削減効果の分析では、産業部門での二酸化炭素回収・貯留（CCS）や全国大でのCCS付きバイオマス発電（BECCS）を想定していないことを勘案しても、2050年に90%以上の削減となった自治体が全体の9割を超え、国全体の脱炭素化シナリオで想定される対策を着実に実施することが、地方自治体においても重要となることを明らかにした（図-1.10）。

また、全市区町村に対して2020年から2050年までのCO₂削減の道筋についても分析を行った結果、自治体ごとのCO₂削減に効果的な対策は異なることを示した（図-1.12より一部抜粋）。また、再生可能エ

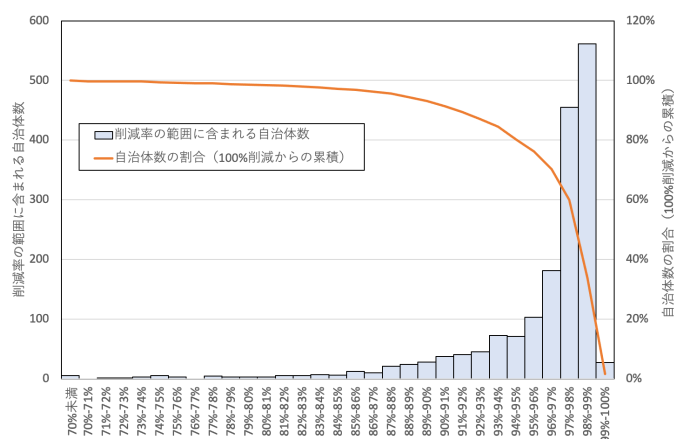
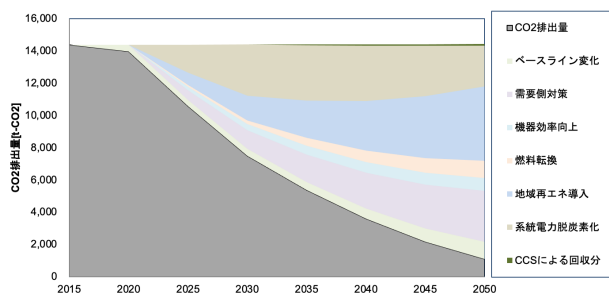
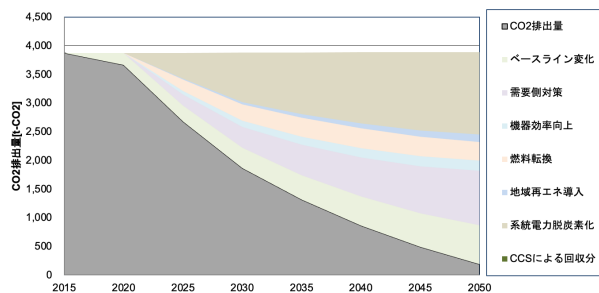


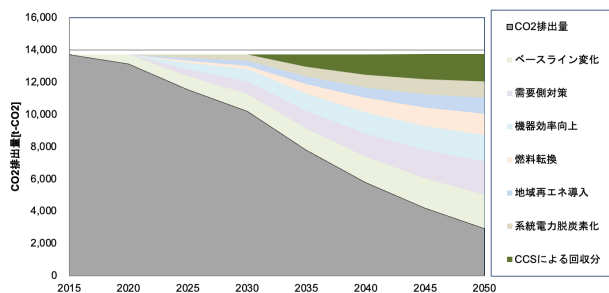
図-1.10 2050年の基準年比削減率の分布と100%削減からの自治体数の累積（割合）



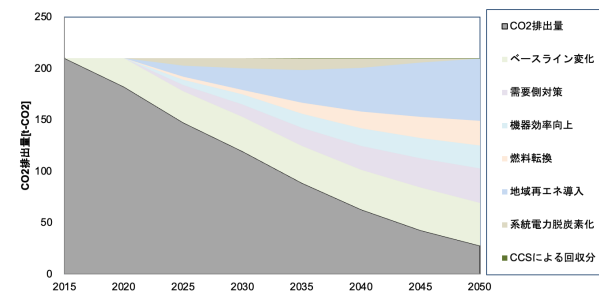
(a) 北海道札幌市



(h) 東京都新宿区



(o) 福岡県北九州市



(p) 長崎県五島市

図-1.12 対策シナリオに基づく市区町村別CO₂削減の道筋の分析結果（一部抜粋）

エネルギーポテンシャルが豊富な地域でもその導入には時間を要するため、中期的には系統電力の脱炭素化に依らざるを得ず、国全体として再生可能エネルギーの利活用推進とともに、系統電力での脱炭素化に向けた取り組みも平行していくことが肝要であることを示した。これら分析結果より、おおむね削減量の半分以上が需要側対策であり、地域での再生可能エネルギーの利用拡大も含めると、地域の主体的な取り組みが不可欠であるいっぽう、系統電力の脱炭素化や、産業部門でのCCS普及、BECCS等ネガティブ排出技術の開発など、国レベルで実施する供給側対策も同様に重要であり、地方自治体の脱炭素化を達成するためには、国と地域が連携した対策・施策の実施が重要であることを示した。

これに加えて実施した太陽光発電と風力発電における気候変動影響の評価では、大きくは太陽光発電の発電量は増加するが、風力発電はほぼ基準年と同程度の発電量が維持される傾向があることを明らかにし、太陽光発電を主とした脱炭素型エネルギーシステムへ移行する地域では、長期的に見ると設計時よりも多くの発電量が得られることになり、大規模な太陽光発電の導入を予定している自治体では、既設設備の発電量の変化に応じた設備容量の見直しを定期的に行うことにより、設備設置のための投資額を当初計画時よりも抑制できる可能性があることを示した。

地域間連携による脱炭素効果の分析については、市区町村別の電力需要量と再生可能エネルギー導入ポテンシャル量をもとに、複数の組合せを設定して地域間融通ネットワークを設計した。住宅系太陽光発電と陸上風力発電、中小水力発電と地熱発電の4種を対象とした場合には、東日本では北海道から東北を経由して関東へ向かう流れとなり、西日本では多くの再生可能エネルギーポテンシャルを有する地域が中核となった放射状のネットワークが形成されることがわかった。しかし、洋上風力発電も加えると、北海道や東北地方からのフローは大幅に減少し、茨城県や千葉県などの関東地方の沿岸部、新潟県や北陸地方の沿岸部からの流れが中心となり、ネットワーク構造が大きく変わることを明らかにした。さらに公共系太陽光も加えると、東京都や名古屋市、大阪市など地域の中核的な都市に周辺地域から余剰ポテンシャル量が融通される構造となり、地方をまたぐような融通は大きく抑制されることがわかった。また、このようなネットワーク構造を実現することによる資金循環を見ると、関東地方は他地域への支払いが超過するが、他地域では再生可能エネルギーの融通により追加的な収入や、融通用の再生可能エネルギー設備の追加設置による雇用増が期待できることを明らかにした。

さらに、毎時単位での需給バランスも考慮して地域間融通も考慮した脱炭素型エネルギーシステムの

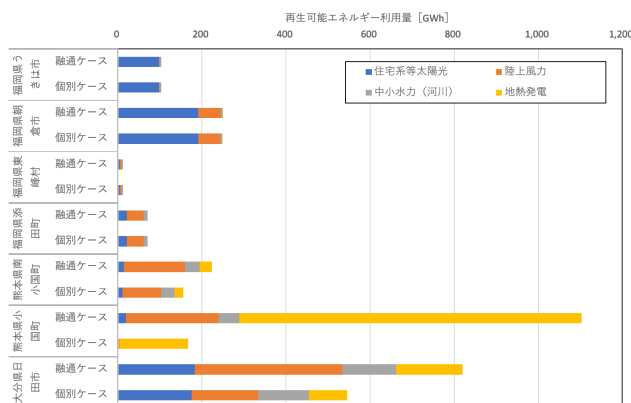


図-1.20 地方自治体別再生可能エネルギー利用量のケース間比較

実現可能性を九州地方の7市町村を対象に検討した結果では、地域間融通を考慮すること（融通ケース）で、地産地消のみを想定した場合（個別ケース）と比較して対象地域全体での再生可能エネルギー利用量は増加することを示した（図-1.20）。また、毎時単位で評価をすることで、蓄電池利用に際しての充放電ロスのほか、充電を考慮してもなお供給力が余剰となる時間帯が生じることで、その回避のために再生可能エネルギー導入の抑制が行われてしまうため、年間値で評価する場合と比較して再生可能エネルギー導入量は低い水準に留まってしまう可能性があることを明らかにした。

過去の国土変化の特徴検討については、ベイズ型APC分析を用いた都道府県別の人口推移の要因分析より、年齢効果、時代効果、コーホート効果のうち、41道府県でコーホート効果が最大であり、うち38道府県では次に年齢効果、最後に時代効果の順となることがわかった。また、6都府県（群馬、東京、岐阜、静岡、京都、和歌山）では、いずれも年齢効果が最大で、コーホート効果、時代効果の順となることがわかった。さらに特徴に基づき、年齢効果は年少型、老年型、就業型、時代効果は増加型、減少型、凸型、凹型、コーホート効果は古い生まれ年の世代に有意にプラスのコーホート効果がみられ日本の平均と比較して高齢化が早期に進行したことを表す旧世代型と、新しい生まれ年の世代に有意に正の効果が見られる新世代型に、それぞれ分類した。これら結果より、地方圏は共通して人口減少と高齢化の課題に直面しているものの、年齢効果の観点から見ると、年少型と老年型という異なる特徴を有する地域に分類できることが分かった。このことから、同じ旧世代型の特徴を持つ地域であっても、相対的に多い年齢層向けのサービスを確保する点は共通しつつも、引きつけたい年齢層とその方策は異なることを示唆しているものと考えられる。

さらに、柏市とつくば市を対象にメッシュ別の人口変動要因を分析する（図-2.6）と、いずれでもコーホート効果となったメッシュの割合が高く、年齢効果は類似しているが、時代効果は両市で大きく異なることがわかった。空間的な分布を見ると、柏市では、柏駅を中心にJR・私鉄沿線の広い範囲でコーホート効果が多くみられ、JR沿線や駅周辺、柏の葉の大学キャンパス周辺では年齢効果が最大となるほか、つくばエクスプレス（TX）の駅周辺では時代効果が見られ、沿線開発による人口増加の影響が反映していることがわかった。いっぽうつくば市では、つくば駅周辺と市南部にコーホート効果が面的に広がるが、その面積は広くなく、沿線開発による人口増を反映し、TX沿線と駅から半径約1～2kmの範囲で面的に繋がる時代効果がみられることがわかった。

これら分析も踏まえて、平均人口密度の変化に着目して設定した4つのシナリオそれぞれに、全国で将来のメッシュ人口分布と用途内外別の人口の変化を分析し、想定するシナリオによって、用途地域の広がりが大きく異なることや用途地域内の人口密度も異なることを明らかにした。たとえば用途地域内人口の割合が高い北九州市（図-2.8）は、用途地域の面積を固定した想定のうち市街地集中シナリオでは総人口でもBAUより高くなり、郊外分散シナリオではBAUより低くなるという、異なる方向性の結果となることがわかった。これに加えて、都道府県別自動車CO₂排出量の推計への応用も進め、例えば静岡県を対象とした分析では、県全体の合計で見ると、市街地面積固定の場合の市街地集中シナリオと郊外分散シナリオで約10～15%の差が生じ、市街地集中を誘導しないまでも、郊外分散と市街地人口密度の低

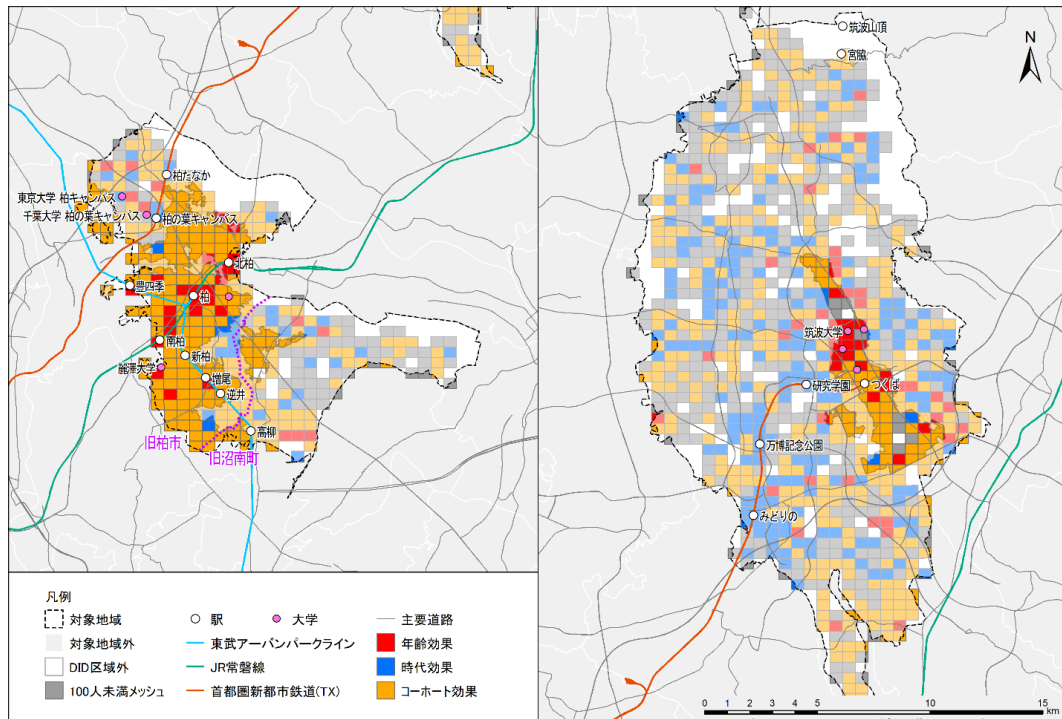


図-2.6 最大効果のメッシュ別分析結果（100人以上メッシュ）（左：柏市、右：つくば市）

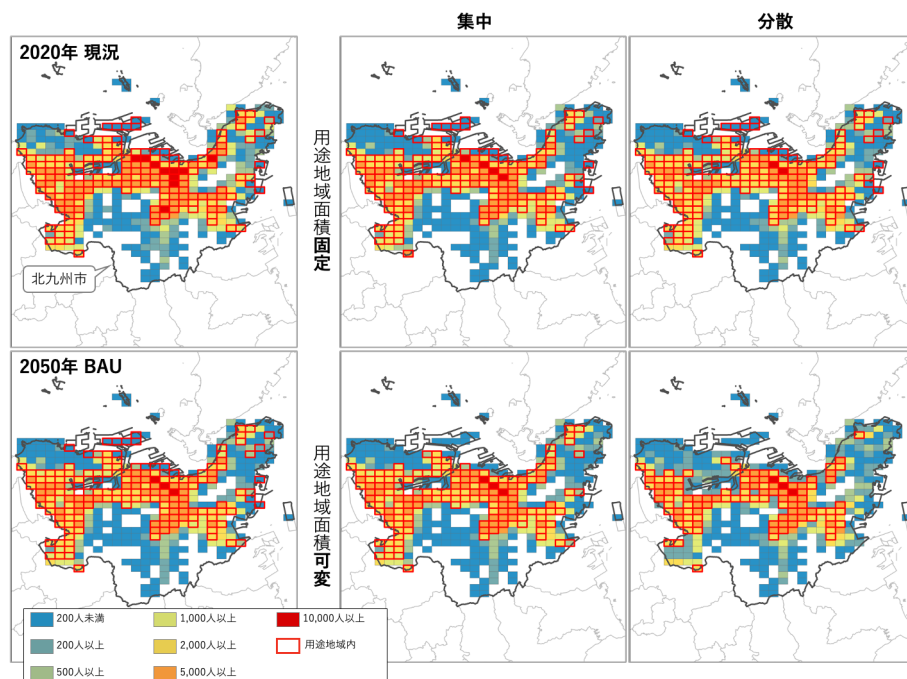
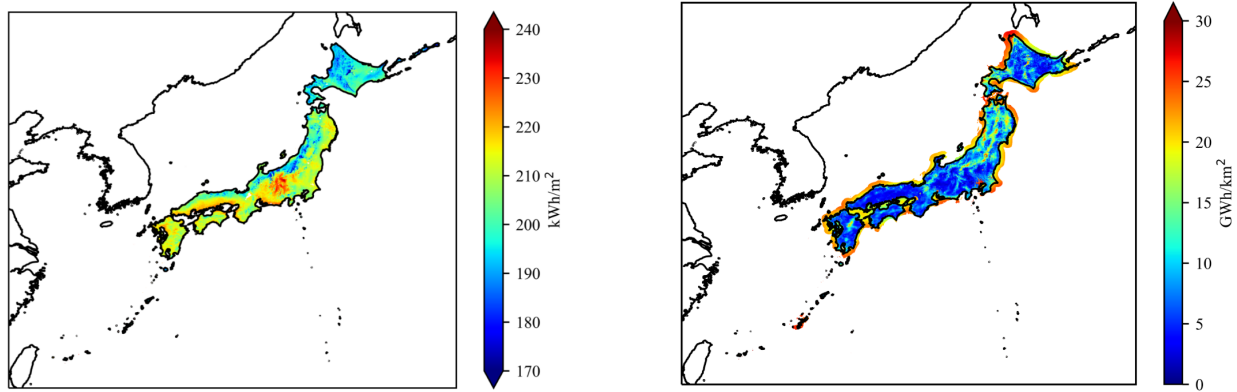


図-2.8 人口の空間分布パターン（福岡県北九州市の例）

下を抑制することで、運輸部門からのCO₂排出量の増加を6%程度は回避できることがわかった。

地域エネルギー資源の資源量の分析より、太陽光発電及び風力発電の賦存量の推計結果（図-2.10）を見ると、太陽光発電は太平洋側に多く、日本海側に少ない傾向があり、特に岐阜県周辺や愛知県沿岸部、瀬戸内海沿岸部、長崎県などが多いいっぽう、陸上風力発電は東北地方を中心に山間部のポテンシャルが多く、洋上風力発電は宗谷湾、襟裳岬沖、銚子市沖、志摩沖などが多いことがわかった。さらに毎時出力や市区町村別の設備利用率の分布も分析し、設備利用率に関する分析では、隣接する市区町村間でも出力変動に有意な差がみられ、再生可能エネルギー発電設備の導入を検討するにあたっては、近傍の市区町村の結果を単純に参照するのではなく、該当地域の情報を収集・整備して検討することが重要



(a) 太陽光発電

(b) 風力発電（陸上・洋上）

図-2.10 再生可能エネルギー資源賦存量の推計結果（年間発電量ベース）

であることを明らかにした。木質バイオマス資源量に関する分析では、日本全体で見ると358 PJもの賦存量があるが、事業性も考慮すると森林資源の約80%は利用が困難であることを明らかにした。また、廃棄物発電ポテンシャル量については、多くの地域で人口減少が予測されていることもあり、全体としては減少傾向であるが、東京都や沖縄県などは将来においても2015年と同程度か微増となり、これらの地域では廃棄物発電からのエネルギー利用は脱炭素化対策として有効となり得ることを示した。

これら地域エネルギー資源に関する結果にエネルギー需要量の情報も加えて各地域のエネルギー需給特性を評価した結果では、対数化した市区町村別最終エネルギー消費量では需要低位+/-、中位+/-、高位+/-の計6階級、エネルギー需要量の部門別・業種別構成に対しては農林水産業、交通、複合産業、商業・観光業、製紙業系、窯業系、鉄鋼業系、化学工業に特徴を持つ計8クラスター、対数化した再生可能エネルギー資源量については、地理的特性や都市構造を反映した沿岸山地、沿岸平地、都市、火山地域、中山間地域、山林地域の6クラスターが得られることを明らかにした。これら3種類の類型を複合化することで、地域規模や産業構造、地理的特性などを反映した計288分類が得られ（図-2.18）、例えば「需要中位-」+「交通」+「中山間地域」が107と最も多く、モデル事例の横展開の可能性は大きい、需要量合計は日本全体の総需要の約5%に過ぎず、横展開による脱炭素効果は限定的であるいっぽう、「需要高位+」と「需要高位-」に属する地域は、合計エネルギー需要は日本全体の76%と多いが、個々の分類に属する市区町村数は少なく、横展開の広がりには狭いことがわかった。

エネルギー 需要規模類型	エネルギー 需要構成類型	再生可能エネルギー資源類型					
		沿岸山地	沿岸平地	都市	中山間地域	火山地域	山林地域
需要 高位+ [$\mu+2\sigma, \infty$]	製紙業系	0	0	0	0	0	1
	窯業系	0	0	0	0	0	0
	複合産業	0	1	1	1	1	4
	商業・観光業	2	1	4	0	0	1
	農林水産業	0	0	0	0	0	0
	交通	0	0	0	0	1	0
	鉄鋼業系	2	4	4	3	0	2
	化学工業	2	5	1	2	0	1
需要 高位- [$\mu+\sigma, \mu+2\sigma$]	製紙業系	3	2	2	2	0	2
	窯業系	0	1	2	5	1	1
	複合産業	4	9	17	7	6	7
	商業・観光業	6	9	23	15	7	6
	農林水産業	0	0	0	0	0	0
	交通	3	0	12	4	2	3
	鉄鋼業系	1	6	16	12	0	3
	化学工業	5	4	9	11	0	3
需要 中位+ [$\mu, \mu+\sigma$]	製紙業系	1	1	1	1	0	2
	窯業系	2	3	4	8	0	3
	複合産業	11	22	57	57	15	23
	商業・観光業	14	16	30	21	8	7
	農林水産業	4	4	0	2	3	0
	交通	19	21	54	43	21	34
	鉄鋼業系	1	5	19	12	1	9
	化学工業	2	5	9	12	0	2
需要 中位- [$\mu-\sigma, \mu$]	製紙業系	0	0	0	0	0	0
	窯業系	0	1	2	3	0	2
	複合産業	6	17	33	49	1	6
	商業・観光業	9	26	16	17	8	6
	農林水産業	16	15	1	8	4	25
	交通	26	42	65	107	11	56
	鉄鋼業系	0	1	1	8	0	2
	化学工業	0	2	2	1	0	0
需要 低位+ [$\mu-2\sigma, \mu-\sigma$]	製紙業系	0	0	0	0	0	0
	窯業系	0	0	0	0	0	0
	複合産業	1	0	2	2	0	1
	商業・観光業	1	5	2	14	5	4
	農林水産業	6	8	3	12	4	13
	交通	13	22	30	68	1	33
	鉄鋼業系	0	0	0	0	0	0
	化学工業	0	0	0	0	0	0
需要 低位- [- $\infty, \mu-2\sigma$]	製紙業系	0	0	0	0	0	0
	窯業系	0	0	0	0	0	0
	複合産業	0	0	0	0	0	0
	商業・観光業	0	4	2	4	0	0
	農林水産業	1	1	0	3	0	0
	交通	0	3	3	9	0	2
	鉄鋼業系	0	0	0	0	0	0
	化学工業	0	0	0	0	0	0

● 横浜市 ● 品川区 ● 鎌倉市 ● 宮古市 ● ニセコ町 ● 南富良野町

図-2.18 エネルギー需給特性に基づく市区町村類型の複合分布と各分類に属する市区町村数

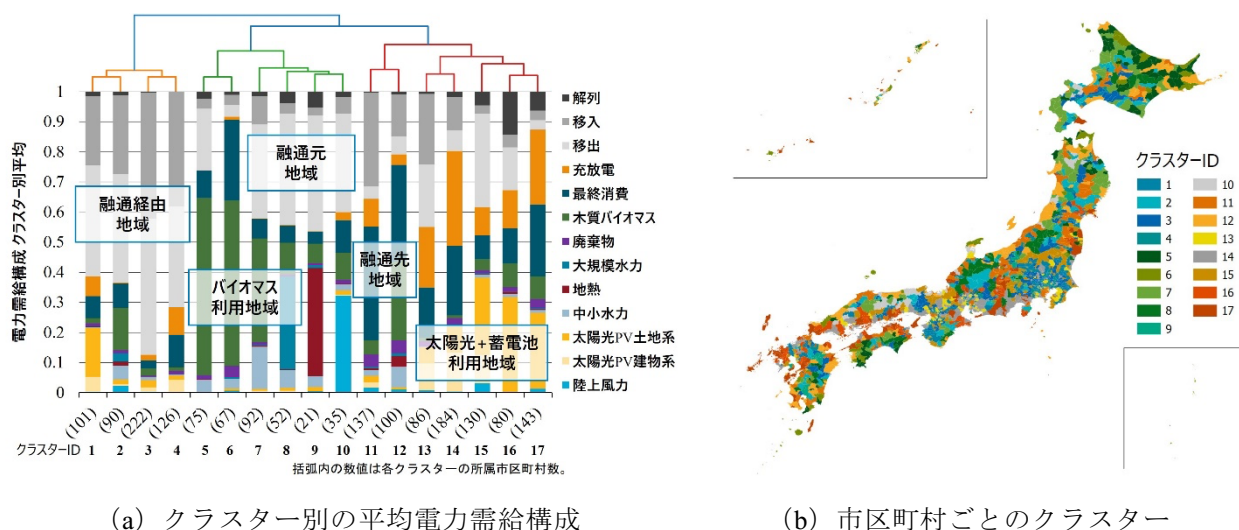


図-2.22 再生可能エネルギー利用および地域間連携の類型化結果

地域エネルギー資源の地域間循環利用システムの検討として、岩手県を対象に木質バイオマスの循環利用システムを設計した結果では、ポテンシャルが温熱需要を上回る市町村から下回る9市に向けて融通されるネットワークが構成され、融通により9市中4市が熱需要を満たすに十分な資源量が確保できることがわかった。再生可能エネルギー発電の広域的な融通の分析では、サブテーマ1の結果と同様に札幌市や東京都、名古屋市、大阪市など各地方の中核的な都市を中心に周辺から電力融通を行うツリー構造が形成されることがわかった。このネットワーク実現により、77%の市区町村で電力自給率が100%を上回り、多くの市区町村にとって再エネ資源の地域間融通が重要であることを示した。さらに、これら結果をもとに地域内での再生可能エネルギー利用と地域間での循環的利用の特徴に基づいて全市区町村の電力需給構造をクラスター分析により階層的に類型化した結果（図-2.22）、市区町村は17分類することができ、同じクラスターに属する地域は地理的に近い範囲に分布する傾向がみられることがわかった。また、これら分類は、さらに大きく木質バイオマスを主なエネルギー源とするバイオマス利用地域、太陽光と蓄電池を合わせて利用する太陽光+蓄電池利用地域、電力需給構造に占める電力移出の割合が高い融通元地域、同様に電力移入の割合が高い融通先地域、そして電力移入量と電力移出量がそれぞれ高い割合を占める融通経路地域の5系統に分けられることがわかった。これらより、地域間連携の検討においては融通元・先地域の単純な需給バランスだけでなく、経路地域の役割や便益（例えば送電インフラの固定資産税税収や災害時のレジリエンス）など、経路地域を巻き込むことの重要性が示された。

都市の物質代謝の将来予測では、4d-GISデータベースをもとに北九州市における建築物ストックを定量化した結果（図-3.9、図-3.10）、全物質ストックは1986年、2005年、2018年において、それぞれ、77.9百万トン、115.7百万トン、126.3百万トンと推計され、蓄積されるストック量は年々増加傾向にあるが、その増加速度はやや緩やかになりつつあることがわかった。また、データベースに基づいて退蔵確率と解体確率に影響する要因（パラメータ）を分析し、例えば退蔵確率については、建物年齢の高さのほか、傾斜が急であること、最も近い道路の幅が狭いこと、立地適正化計画において都市機能誘導区域または居住誘導区域に定められていないことが影響していることを明らかにした。また解体確率については、建物年齢が約40年を超えると解体確率が高まる傾向があるが、建物年齢約40年未満でも建物面積が小さい場合に確率が高まることなど、CART法を用いることで交互作用を考慮した分析が可能であることを示した。これら分析結果も含めてモンテカルロシミュレーションにより都市内のストック（蓄積）量、都市からの排出量、都市への投入量を、現役ストック、退蔵ストック、およびそれらの合計について、人口安定化シナリオと人口減少・高齢化シナリオの2種類のシナリオ別に予測すると（図-3.14）、退蔵ストックは両シナリオで年々の増加が予測されたいっぽう、全体のストックおよび現役ストックは人口減少・高齢化シナリオにおいて減少が予測され、人口減少・高齢化によるストック需要の低下速度が人口減少による退蔵ストックの増加速度を上回る可能性があることを明らかにした。また、排出量および投

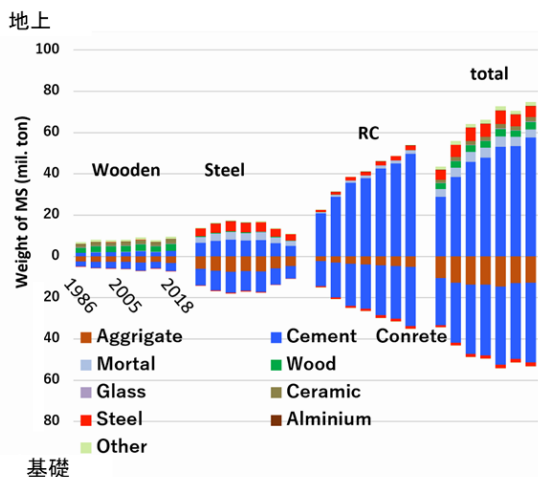


図-3.9 北九州市における物質ストックの
経年変化（1986-2018）

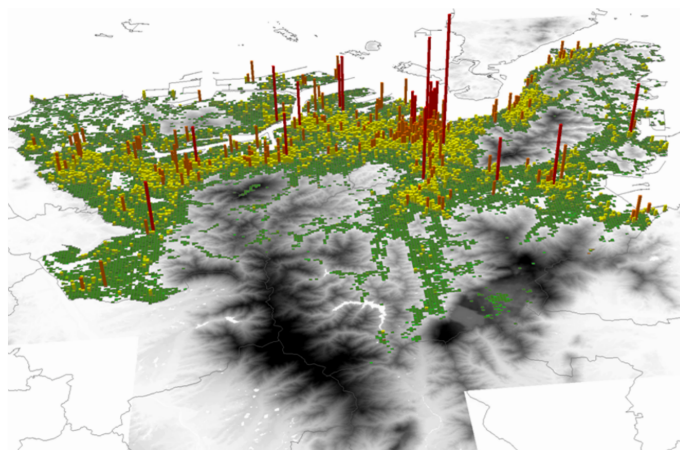


図-3.10 物質ストックの空間分布（2018年）

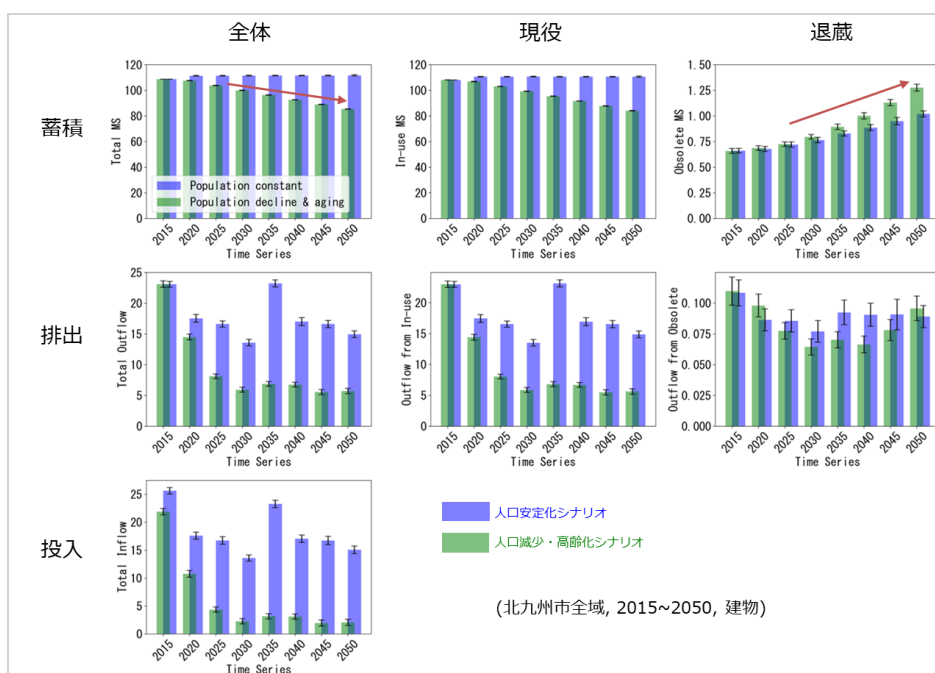


図-3.14 シナリオ別都市物質代謝の将来予測⁴⁾

入量はいずれも、人口安定化シナリオが人口減少・高齢化シナリオを大きく上回り、人口減少・高齢化による物質代謝の停滞を反映しているものと考えられた。これらを資材別に見た結果では、退蔵ストックから排出される資材は現役ストックと比較して木材の割合が大きい、これは退蔵ストックの多くが木造住宅であることに加えて、退蔵確率を高める条件（傾斜が急である、最も近い道路の幅が狭い、立地適正化計画において都市機能誘導区域または居住誘導区域に定められていないこと等）が揃った地域において木造住宅が多いという地域特性も影響しているものと考えられた。

森林資源を対象とした地域材の地域内での利用促進の影響に関する分析では、建築物用の地域材需要量はWood-useシナリオでは中高層および非住宅建築物の木造化により2020年から2070年までの累計でBAUシナリオの1.5倍となると推計された。収支がプラスと推計された人工林は、BAUシナリオではハーベスタやウインチ、フォワーダ・トラックを使用する作業システムが利用できる人工林のみであったのに対し、Wood-Useシナリオでは、さらに伐採にチェーンソーも使用できるとした人工林も含まれ、再造林面積は2020年から2070年の期間の累計で、BAUシナリオでは0.6千haであったのに対し、Wood-useシナリオではBAUシナリオと比較して約4倍大きい2.5千haであることを明らかにした。これによる都市と人工林の炭素ストックは、2070年では都市ではBAUシナリオで16.8万t-C、Wood-Useシナリオで27.2万

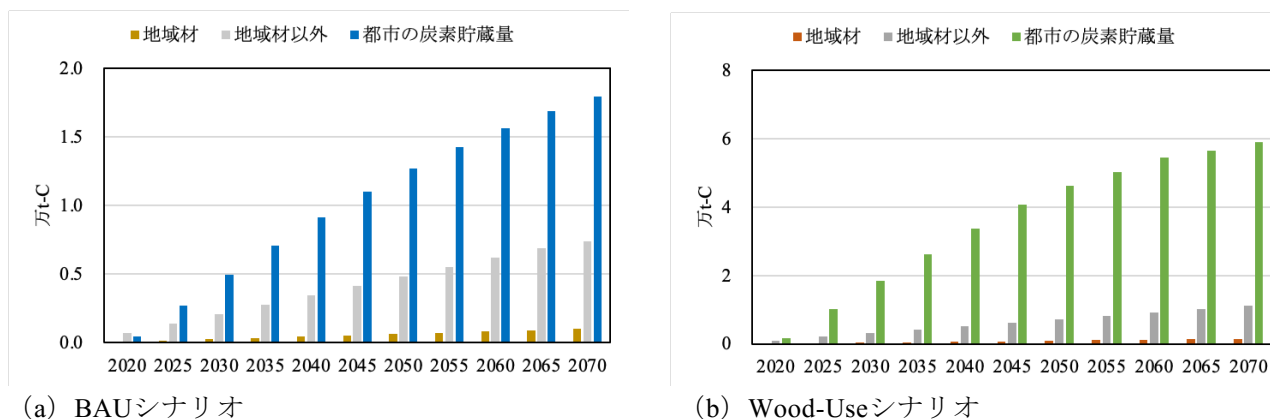
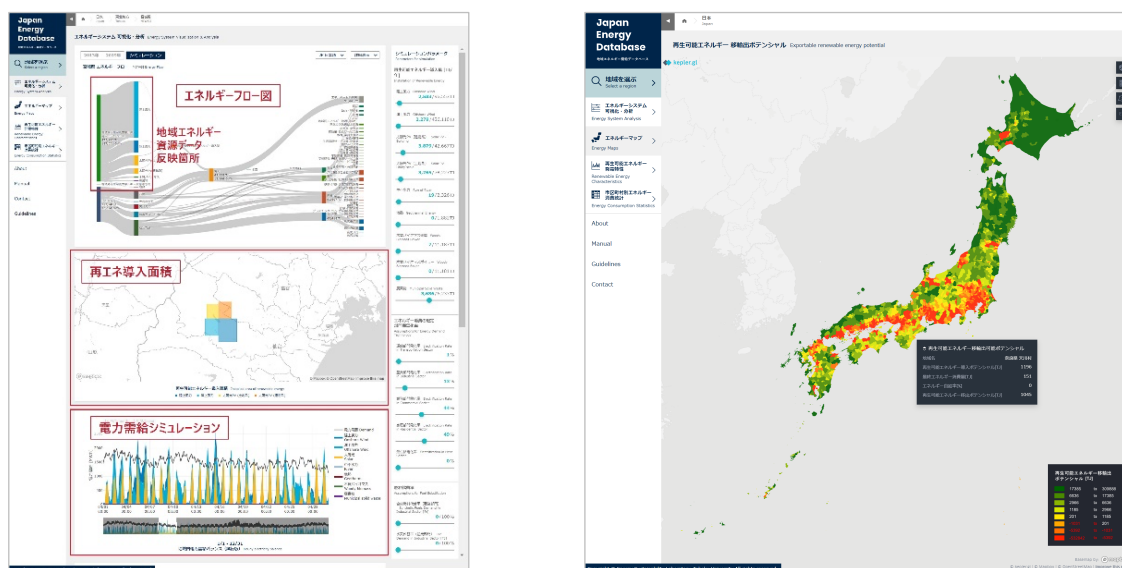


図-3.18 木材輸送に伴う炭素排出量の推計結果

t-C、人工林はBAUシナリオで1.8万t-C、Wood-Useシナリオで5.9万t-Cと推計され、建築部門における地域材利用の推進が炭素貯蔵量の増加に貢献することを示した。さらに、木材輸送に伴う炭素排出量の結果（図-3.18）より、都市の炭素貯蔵量に占める木材輸送に伴う炭素排出量の割合は、2070年では、地域材を使用した場合BAUシナリオで5.6%、Wood-Useシナリオで2.6%と低い、地域材を使用しなかった場合は、BAUシナリオで41.1%、Wood-Useシナリオで19.0%と、地域材を地域内で循環利用することが木造建築物の炭素貯蔵効果を効果的に発揮するうえで有用であることを示すことができた。

地方自治体での気候市民会議方式を活用するための手法やプロセス等の整理・検討については、サブテーマ1・2を中心に、川崎市での脱炭素かわさき市民会議に専門家として関わったほか、主催者の協力を得て振り返り調査を行い、開催回数・日時や会議参加により脱炭素社会作りを考える機会とできたなどの評価もあったが、リモート会議の運営、議論の前提となる知識の整理・提供方法や将来に向けた提言へ向けるための議論の方法など、会議実施やファシリテーションに関する課題・意見等が整理された。これを踏まえて、気候市民会議を実施するにあたって、実施体制の整備や経費、市民提案（会議出力）の位置づけの明確化や実施プロセス、会議運営の観点からのプロセスを整理した。

さらに、サブテーマ2では、すでにWeb公開されている「地域エネルギー需給データベース」で、再生可能エネルギーの資源量推計結果のうち木質バイオマス賦存量及び廃棄物発電ポテンシャル、移輸出ポテンシャルの地理分布や再生可能エネルギー発電の導入に伴う所要土地面積を示す地図を公開することで、研究者や専門家、地方自治体の政策担当者等への情報提供を推進してきた（図-2.23）。

図-2.23 地域エネルギー需給データベース (<https://energy-sustainability.jp/>)

5－2．環境政策等への貢献

＜行政等が既に活用した成果＞

環境省の中央環境審議会地球環境部会・総合政策部会炭素中立型経済社会変革小委員会（第8回）（2022年10月8日）にて、有識者ヒアリングの一部として話題提供「炭素中立と国土・土地利用」を行い、同小委員会のとりまとめ「GXを支える地域・くらしの脱炭素～今後10年を見据えた取組の方向性について～」において、「国土・土地利用について」（60ページ）の取組みの方向性に【効率的な国土・土地利用】、【再エネ資源を最大限活用する国土・土地利用】として反映された。

また、環境省が運営する再生可能エネルギー情報提供システム（REPOS）の「時空間ポテンシャルデータ」にて、本研究の成果である太陽光発電および風力発電ポテンシャルデータが公開された（<https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/41.html>）ほか、ポテンシャル推計の改善に向けた議論を実施するなど、再生可能エネルギー利活用促進による脱炭素化加速に向けてデータや知見を通じた貢献を実施した。

地方自治体での貢献については、岩手県宮古市で脱炭素先行地域の計画策定に向けた情報提供を実施し、事業計画提案書（広域合併したまちの脱炭素地域づくり～宮古市版シュタットベルケから始まる地域内経済の好循環の拡大を目指して～）（2022年8月26日）において、宮古市のエネルギーフロー図（5ページ目）、エネルギー需給特性の分析結果（50ページ目）などの複数の図表等が採用されてエネルギー需給構造の客観的評価や地域の類似性に基づく自治体間の情報共有や施策の水平展開に関する検討結果に対する定量的な根拠として活用され、第2回脱炭素先行地域としての選定に貢献することができた。

以上のほか、本研究課題参画者が専門家として関与した川崎市での気候市民会議（脱炭素かわさき市民会議）の提案については、川崎市長及び市の政策担当者へ提出・説明され、2022年3月31日に決定された川崎市地球温暖化対策計画の検討プロセスでの貢献も行ってきたところである。

＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

本研究で整備した人口分布や過去の変化要因、エネルギーバランス表・エネルギーフロー図や、再生可能エネルギー賦存量等に関する市区町村単位やメッシュ単位でのデータベースは、環境省の再生可能エネルギー情報提供システム（REPOS）や内閣府の地域経済分析システム（RESAS）と組合せて用いることで、これから脱炭素化に向けた施策・対策を検討する地方自治体に対して定量的な基礎情報として活用できるのみならず、年々の更新を積み重ねていくことで、既に脱炭素先行地域に選定された岩手県宮古市など先行的な取組を進める市区町村においても、進捗評価や対策・施策効果の定量的な検証への活用ができるものと見込まれる。また、特に地域資源の地域内循環を想定した市区町村単位でのCO₂削減効果に関する研究成果は、対策別の効果も含めて市区町村が地域の独自性を活かしつつ脱炭素化に向けた検討を進めるにあたって役立つ知見となるほか、開発した手法を用いてもらう、又は本研究課題参画者が検討プロセスの一部を担うことで、地方自治体の脱炭素化に向けた検討の加速化に貢献できると見込まれる。加えて、地域材利用の効果に関する知見は、特定の自治体を対象としたケーススタディであるため今後さらなる研究蓄積は必要ではあるものの、他地域での検証を積み重ねていくことで建築用材の地域内需拡大により、森林の若返りによる炭素吸収量の増加や、建材等としての炭素貯蔵量の増加に有効となりうる可能性があることを示唆している。

本研究により得られたエネルギー需給特性に基づく地域類型や再生可能エネルギー融通ネットワークとそれに基づく地域間連携の類型に関する成果を活用することで、地域脱炭素化に向けた自治体同士の情報共有や今後の具体的な地域間連携の検討に向けたエビデンスを提供することができ、施策連携や再生可能エネルギーの地域間連携の議論の加速に向けた基礎資料としての活用が期待できる。また、特に類型・クラスタ分析の成果は、脱炭素ドミノの実現に向けて、環境省における市区町村に対する戦略的なアプローチ・戦略作りや、市区町村においては脱炭素施策の水平展開に寄与できると期待される。

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
人口減少等も考慮した将来の国土利用の変遷を評価する手法と、その結果も考慮した地域資源の質と量を明らかにする手法を開発し、地域内・地域間連携を通じた活用方策を検討・提案する。また、開発済みの地域AIMにこれら地域資源に関する成果を組み合わせ、地域資源と地域間連携を活用した地域循環共生圏を計画するモデルと、実装による社会・経済効果を評価する手法を開発し、全体を「地域循環共生圏の設計・効果評価モデル」としてとりまとめる。開発した手法は課題全体で設定した対象内の具体地域に適用するとともに、研究結果をもとにした対象地域内の地方自治体との討議等を実施し、開発したモデル等の有効性を検証し改良を進める社会実装型の研究プロセスの構築に資する知見を整理する。	<u>目標どおりの成果をあげた。</u> 各サブテーマの達成状況にて説明した通り、2020年10月に地域脱炭素化が喫緊の課題として位置づけられたことを踏まえて地域循環共生圏の中でも地域脱炭素に焦点を当てることとして、それぞれの目標について（1）人口減少等も考慮した将来の国土利用の変遷を評価する手法と地域資源の質と量を明らかにする手法の開発（Ⅱ-2・3-1-2節/3-2-1節、Ⅱ-3・3-1節/4-1節）、（2）地域内・地域間連携を通じた活用方策の検討・提案（Ⅱ-1・3-1-1節/4-1-1節、3-1-2節/4-1-2節、3-2節/4-2節、Ⅱ-2・3-2-2節/4-2-2節、3-3節/4-3節、Ⅱ-3・3-2節/4-2節）、（3）地域資源と地域間連携を活用した地域脱炭素化の姿とその創造の道筋と実現による人口や地域経済への影響の評価手法の開発と具体地域への適用（Ⅱ-1・3-1-1節/4-1-1節、3-1-2節/4-1-2節、3-2節/4-2節）、（4）モデル分析の成果に基づく地方自治体等との討議を通じた実際の計画立案までのプロセスの検討（Ⅱ-1・3-3節/4-3節）を実施し、目標とした成果を達成できたことから、目標どおりの成果をあげたと自己評価する。

サブテーマ1 目標	目標の達成状況
低炭素型地域の統合評価モデル（地域AIM）にサブテーマ2・3の地域資源分析手法を組み込み、先行研究・事業等の成果や技術開発の見通しも踏まえて、地域経済分析システム（RESAS）等を活用する地域診断と経済特性の解析とともに、地域資源と地域間連携を活用した地域循環共生圏の姿とその創造の道筋を計画するモデルと、地域循環共生圏に関する施策・技術システムの実現による人口や地域経済への影響（社会・経済効果）の評価手法を開発し、全体を「地域循環共生圏の設計・効果評価モデル」としてとりまとめる。また、課題共通で設定した対象（福島県内の地域、九州の地域等）内の具体地域への適用と、その成果に基づく地方自治体との討議等を実施し、手法の有効性の検証と改良を進め、開発した手法を用いた実際の計画立案までのプロセスを明らかにする。	<u>目標どおりの成果をあげた。</u> 本サブテーマでは、左記目標に対して、2020年10月に地域脱炭素化が喫緊の課題として位置づけられたことを踏まえて地域循環共生圏の中でも地域脱炭素に焦点を当てることとして（1）地域資源と地域間連携を活用した地域脱炭素化の姿とその創造の道筋と実現による人口や地域経済への影響の評価手法の開発と具体地域への適用（Ⅱ-1・3-1-1節/4-1-1節、3-1-2節/4-1-2節、3-2節/4-2節）、（2）モデル分析の成果に基づく地方自治体等との討議を通じた実際の計画立案までのプロセスの検討（Ⅱ-1・3-3節/4-3節）を実施し、目標とした成果を達成することができた。また、地域内・地域間の地域資源の循環とその効果の検討においては、特定の自治体だけではなく、全ての地方自治体を対象とした分析を行い、わが国全体が脱炭素社会に向かう中で、それぞれの地方自治体において地域特性も踏まえ

	た効果的な対策の検討や、現在から2050年に向けた対策実施の道筋検討を実施してきた。加えて、再生可能エネルギーに対する気候変動影響を考慮した計画作りに向けた知見の蓄積も進めてきたところであり、目標どおりの成果をあげたと自己評価する。
--	--

サブテーマ2 目標	目標の達成状況
日本全国の国土利用の変遷を評価する手法および地域エネルギー資源の量と分布を評価する手法を開発する。課題共通で設定した対象内の具体地域を対象に現在から将来までの人口・地域資源等の空間分布の推移を明らかにする。また、地域エネルギー資源を地域内で循環利用するシステムの設計手法を開発する。さらに、サブテーマ3のストック型地域資源の成果と合わせ、異なる質や量の地域資源を有する地域間の連携を資源の輸送も考慮して検討・提案する手法を開発し、具体地域で検討・提案する。	<u>目標どおりの成果をあげた。</u> 本サブテーマでは、左記目標に対して、(1) 日本全国の国土利用の変遷を評価する手法および地域エネルギー資源の量と分布を評価する手法の開発(Ⅱ-2・3-1-2節/3-2-1節)、(2) 具体地域を対象にした現在から将来までの人口・地域資源等の空間分布の推移の評価(Ⅱ-2・3-1-1節/4-1-1節、3-1-2節/4-1-2節、4-2-1節)、(3) 地域エネルギー資源の地域内・地域間で循環利用するシステムの検討手法開発と具体地域での検討・提案(Ⅱ-2・3-2-2節/4-2-2節、3-3節/4-3節)、を実施し、目標とした成果を達成することができた。さらに、地域エネルギー資源量の評価結果のWeb公開や気候市民会議の取り組みへの専門家としての関与・他地域への展開など、研究成果の普及や社会実装への貢献についても進めてきたことから、目標どおりの成果をあげたと自己評価する。

サブテーマ3 目標	目標の達成状況
森林資源や建築解体材・土木インフラ等のストック型地域資源を対象に、質及び量の空間的な分布を定量評価する手法と、資金の地域内循環の視点も含めて地域内で循環利用するシステムの検討手法を開発し、サブテーマ2の地域間連携の検討結果も踏まえて、課題共通で設定した対象内の具体地域へ適用して地域内での利用と地域間連携を通じた活用を具体的に検討し、提案する。	<u>目標どおりの成果をあげた。</u> 本サブテーマでは、左記目標に対して、(1) スtock型地域資源の質及び量の空間的な分布を定量評価する手法の開発と具体地域での適用(成果・Ⅱ-3・3-1節/4-1節)、(2) 資金の地域内循環の視点も含めてストック型地域資源の地域内利用システムの検討手法の開発と具体地域での地域内利用の効果の検討(Ⅱ-3・3-2節/4-2節)、(3) サブテーマ2との連携によるストック型資源の地域間連携を通じた活用方策の検討(サブテーマ2・Ⅱ-2・3-3節/4-3節)、を実施し、目標とした成果を達成することができたことから、目標どおりの成果をあげたと自己評価する。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

24件

<主な査読付き論文>

- 1) L. GAO, Y. HIRUTA, S. ASHINA: Renewable Energy, 162, 818-830 (2020) (IF:8.634), Promoting renewable energy through willingness to pay for transition to a low carbon society in Japan.
- 2) 芦名秀一: 地球環境, 27 (1), 19-29 (2022), 地域連携を考慮した再生可能エネルギーを活用した脱炭素型エネルギーシステムの実現可能性検討.
- 3) 芦名秀一: 地球環境, 27 (2), 137-146 (2023), 地方自治体レベルでの2050年脱炭素社会の実現可能性の検討.
- 4) 金晃敏, 松橋啓介, 石河正寛, 有賀敏典: 都市計画論文集, 55 (3), 1121-1127 (2020), 第4次メッシュレベルの人口変動に及ぼす年齢・時代・コホート効果の分析.
- 5) 金晃敏, 松橋啓介, 石河正寛, 有賀敏典, 崔文竹: 都市計画論文集, 56(3), 1282-1288 (2021), 都道府県別人口変動に及ぼす年齢・時代・コホート効果の分析.
- 6) 小野寺弘晃, 根本和宜, 中田俊彦: エネルギー・資源, 42(5), 337-350 (2021), 市区町村のエネルギー需給特性を考慮した広域圏エネルギーシステムの設計.
- 7) R. DELAGE, T. MATSUOKA, T. NAKATA: Energies, 14(8), 2168-2179 (2021) (IF: 3.252), Spatial-Temporal Estimation and Analysis of Japan Onshore and Offshore Wind Energy Potential.
- 8) W. WUYTS, R. SEDLITZKY, M. MORITA, H. TANIKAWA: Sustainability, 2, 13 (2020) (IF: 3.889), Understanding and managing vacant house in support of a material stock type society-The case of Kitakyushu, Japan.
- 9) H. TANIKAWA, T. FISHMAN, S. HASHIMOTO, I. DAIGO, M. OGUCHI, A. MIATTO, S. TAKAGI, N. YAMASHITA, H. SCHANDL: Journal of Cleaner Production, 285 (2020) (IF: 11.072), A framework of indicators for associating material stocks and flows to service provisioning: Application for Japan 1990-2015.
- 10) 山下奈穂, 加用千裕, 谷川寛樹: 環境科学会誌, 34(4), 184-195 (2021), 木造住宅と森林の木材需給を考慮した炭素ストックのシナリオ分析.

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	8件
口頭発表（学会等）	89件
「国民との科学・技術対話」の実施	30件
マスコミ等への公表・報道等	11件
本研究費の研究成果による受賞	4件
その他の成果発表	1件

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 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システム領域地域計画研究室主席研究員

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システム領域地域計画研究室長。

2) 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。

3) 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。

Ⅱ．成果の詳細

Ⅱ－1 社会・経済効果を考慮した地域循環共生圏の統合的な計画・評価モデル開発と実証

国立研究開発法人国立環境研究所

社会システム領域地域計画研究室

社会システム領域

福島地域協働研究拠点地域環境創生研究室

社会システム領域システムイノベーション研究室

芦名 秀一

藤田 壮

五味 馨

牧 誠也

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所

社会システム領域地域計画研究室

Gao Lu（令和2年度～令和3年度）、蛭田有希（令和2年度～令和3年度）、金晃敏（令和4年度）

[要旨]

本サブテーマでは、地域資源と地域間連携を活用した地域脱炭素社会の姿とそこにいたる道筋や特に地域間連携の構築による社会・経済効果を評価する手法を開発し、地域内での資源循環による地域脱炭素化方策や地域間連携のためのネットワーク構造や実現による社会・経済効果の分析や、脱炭素政策作りにおける気候市民会議の活用に向けた検討を行った。

地域内での資源循環による地域脱炭素化方策の検討については、地域経済分析システム（RESAS）での地域診断情報や地域データを活用して市区町村別エネルギー需給構造の推計と地方自治体ごとの特性分析を行い、エネルギー需要側での対策とエネルギー供給側での対策を多段的に評価できるモデルを適用して、地方自治体での対策・施策実施による2050年におけるCO₂削減効果や、2050年までのCO₂削減の道筋を分析し、自治体ごとに効果的なCO₂削減や、地方自治体と国が連携した対策実施が重要であることを示した。さらに、複数の気候モデルの出力結果を用いた評価を通じて気候変動影響により太陽光発電の発電量は増加するが風力発電の発電量はほぼ横ばいとなることを示し、特に太陽光発電を中心とするシステムに向かう自治体では設備設置のための投資額を抑制できる可能性があることを明らかにした。

地域間連携を考慮した地域脱炭素化方策の検討については、想定する再生可能エネルギー種に応じて、東日本では北海道・東北から関東、関東沿岸部から内陸、新潟・北陸から関東の3方向からのフローがあり得るいっぽう、西日本では多くの再生可能エネルギーポテンシャルを有する地域が中核となった放射状のネットワークが形成されることを明らかにした。また、地域エネルギー資源の融通による地域間での資金循環や雇用増への効果についても評価した。さらに、ネットワークが完結する一群の地域を対象に、毎時単位での需給バランスも考慮できるモデルを用いて脱炭素対策の分析を行い、蓄電池利用の拡大や一部の時間帯における供給力余剰が生じるため、時間での出力変動を考慮すると再生可能エネルギー利用率は年間値での評価よりも低い水準にとどまる可能性があることを示した。

これらに加えて、他のサブテーマも含めて地方自治体担当者との意見交換を進めたほか、シンポジウムや高校等での講義を実施しての成果の普及を推進するとともに、脱炭素かわさき市民会議をもとに地方自治体において脱炭素政策作りに気候市民会議方式を活用するための手法等を整理し、住民参加型討議手法として気候市民会議を実施するに際してのプロセス等を整理した。

1. 研究開発目的

第五次環境基本計画では、環境・経済・社会の統合的向上の鍵として地域循環共生圏の創造による持続可能な社会の実現を掲げており、いくつかの地域では、環境省の支援等で先行的な取り組みが進められている。このようななか、2020年10月26日に菅総理より「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことが宣言され、地域についても2021年5月26日の地球温暖化対策推進法の一部改正で

地方公共団体実行計画において地域脱炭素化促進事業の計画作りに努めることとされるなど、地域循環共生圏を構成する要素のうち、特に脱炭素社会作りへの取り組みが先行的に進められている。このような地域の脱炭素化を全国各地で広げるとともに、これを発展させて地域循環共生圏を全国的に実現していくためには、地域資源を地域内や地域間で循環させたシステムの姿とその実現の道筋を具体的に示すことが重要となる。そこで本サブテーマでは、特に地域脱炭素社会への移行に焦点をあてて、これまで開発してきた低炭素型地域分析のための統合評価モデル（地域AIM）を発展させ、地域の脱炭素化に向けた方策とその効果を評価できる枠組みを構築し、具体地域で分析・提示していくとともに、地方自治体や関連ステークホルダーとの討議等を通じた社会実装のプロセスを検討することを目的とする。

2. 研究目標

低炭素型地域の統合評価モデル（地域AIM）にサブテーマ2・3の地域資源分析手法を組み込み、先行研究・事業等の成果や技術開発の見通しも踏まえて、地域経済分析システム（RESAS）等を活用する地域診断と経済特性の解析とともに、地域資源と地域間連携を活用した地域循環共生圏の姿とその創造の道筋を計画するモデルと、地域循環共生圏に関する施策・技術システムの実現による人口や地域経済への影響（社会・経済効果）の評価手法を開発し、全体を「地域循環共生圏の設計・効果評価モデル」としてとりまとめる。また、課題共通で設定した対象（福島県内の地域、九州の地域等）内の具体地域への適用と、その成果に基づく地方自治体との討議等を実施し、手法の有効性の検証と改良を進め、開発した手法を用いた実際の計画立案までのプロセスを明らかにする。

3. 研究開発内容

本サブテーマで開発した「設計・効果評価モデル」は、4つのモデル・手法から構成される。具体的には、地域内の資源利活用を考慮した脱炭素対策の対策・施策評価モデル、地域エネルギー資源の地域間融通ネットワーク分析モデル、地域間での資源循環を考慮した脱炭素型エネルギーシステム分析モデルと、地域資源の地域間融通による社会・経済効果評価手法である。図-1.1に、これらモデル・手法の関係性を示す。地域循環共生圏の理念も踏まえ、地域資源はまずそれぞれの地域内で地産地消し、さらに地域間で融通することとして、地域内での資源の利活用を検討したのち、地域間の融通を検討する構成としている。これらモデル・手法は、入力データや結果を介して連結できるようになっている。なお、本サブテーマでは年単位の情報をもとに地域間ネットワークを設計しているが、サブテーマ2では毎時単位での需給バランスを考慮した設計手法（手法及び成果はそれぞれ42ページと52ページを参照）とするなど、サブテーマ間では、分析結果だけではなく手法開発についての連携も進めた。

3-1. 地域内の資源利活用を考慮した脱炭素対策の対策・施策評価モデルを用いた分析

3-1-1. 市区町村別エネルギー需給構造の推計

脱炭素対策の対策・施策の評価にはエネルギー需給情報が不可欠であるが、市区町村については公的統計としては整備されていない。そこで、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.1.1」を参考に、都道府県別のエネルギー消費量から部門別に設定した指標

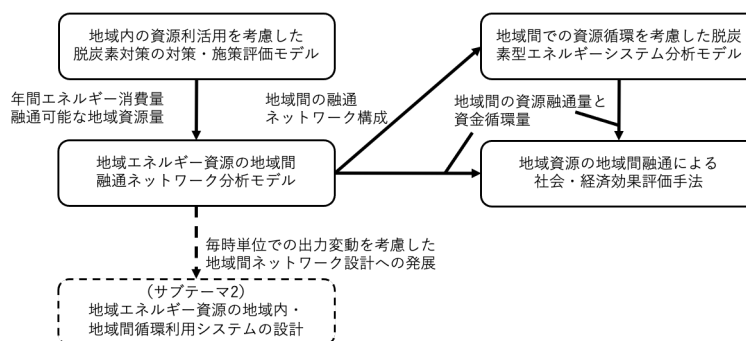


図-1.1 本研究で開発した「設計・効果評価モデル」の構成と他のサブテーマとの関係

で按分することで、2013年度から2018年度までの市区町村別消費量を求めた。按分指標は、産業部門のうち製造業は地域経済分析システム（RESAS）及び工業統計調査から得られる製造品出荷額等を用い、食品飲料製造業など11業種の別に推計した。産業部門の農林水産業、鉱業他、建設業と業務部門の電気ガス熱供給水道業などの14業種はRESASや経済センサスにおける従業者数、家庭部門は世帯数に比例するとして推計した。運輸部門は、国土交通省の自動車燃料消費量調査をもとに市区町村別の自動車保有台数を指標として按分を行った。なお、本研究では、運輸部門のうち二輪車、鉄道、船舶、航空は、これらを合計したエネルギー消費量が国全体では運輸部門全体の12.7%であることも鑑み、推計の対象外とした。推計に当たって設定した燃料種は、都道府県別エネルギー消費統計の分類に基づき石炭、軽質油製品、石油ガス、天然ガス、都市ガス、電力等を設定した。うち、天然ガス、都市ガスと、運輸部門のLPGの消費量は、ガス供給事業者の供給区域やLPガススタンドの立地も考慮して推計した。

これら市区町村単位のエネルギー消費量推計の一環として、廃棄物を地域資源として循環利用するシステムの検討のために、工業統計細分類を用いた循環利用による代替可能需要の推計手法を開発した。産業部門のエネルギー消費量は、上述の通り製造品出荷額等から推計できるが、産業細分類別統計表は都道府県別であるもののデータの欠測や秘匿データが含まれ、需要の過小推計や調査年度によるずれが生じるおそれがある。そこで、従業員数を変数とする時系列予測式を用いた多重代入法による欠測・秘匿データの補間アルゴリズム（図-1.2）を開発し、代替可能な需要の推計を行った。

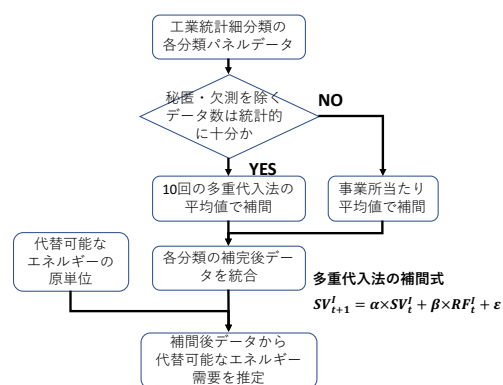


図-1.2 秘匿・欠測データ補間フロー

これらに加えて、分析の基礎的情報として他のサブテーマで整備する情報以外の就業者数や事業所・企業数等の社会経済データ、エネルギー消費量や暖房度日、冷房度日等のエネルギーデータ、気温、日射量、風速等の気象データ等を経年的に整備し、課題全体で共有できるようにした。なお、過去のデータにおいては、廃置分合前の基礎自治体を単位として記録されている場合があることから、1970年以降について廃置分合・時期のデータベースと、自治体の変遷の視覚化チャートを作成して適宜現在の市区町村（1,741自治体）へ集約してデータを作成した。図-1.3に、視覚化チャートの一例を示す。

3-1-2. 地方自治体での対策・施策実施によるCO₂削減効果分析

本研究では、Fujino et al.¹⁾のアプローチを参考に、エネルギー需要側での対策とエネルギー供給側での対策を多段的に評価できるモデルを開発し、地方自治体での対策・施策実施によるCO₂削減効果を分析した。図-1.4は、開発したモデルにおける分析フローである。モデルでは、まず基準年におけるエネルギー消費量やCO₂排出量をもとに、将来年度における人口・世帯数や産業部門活動量などの変化（マクロ

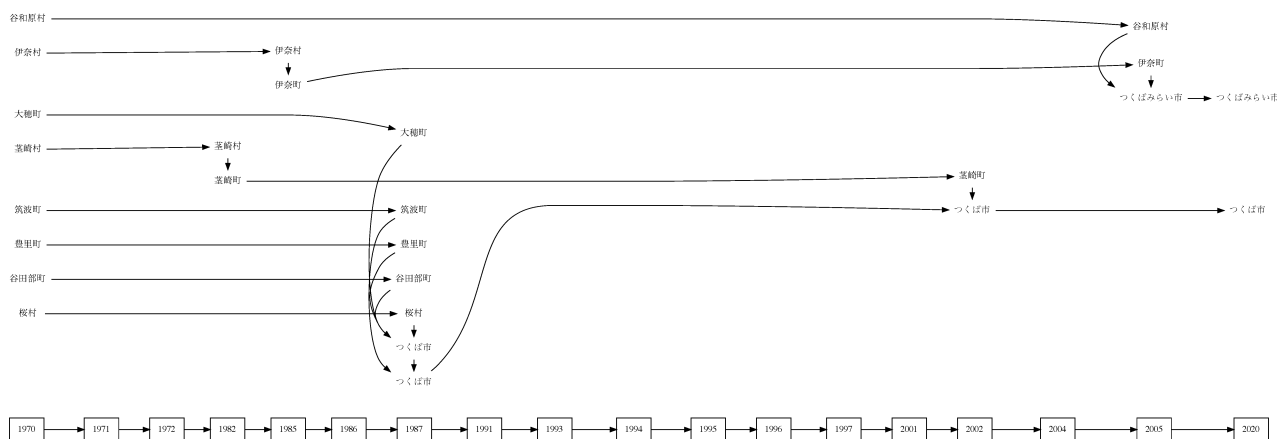


図-1.3 自治体変遷の視覚化チャート（茨城県つくば市・つくばみらい市の例）

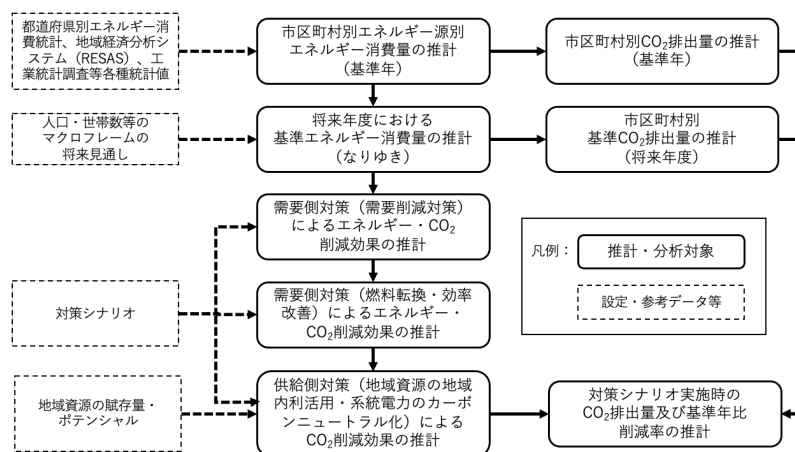


図-1.4 地方自治体での対策・施策評価モデルの分析フロー

フレーム変化)のみを考慮したなりゆきでの基準エネルギー消費量とCO₂排出量を求める。これにエネルギー需要側での需要削減、燃料転換、効率改善に関する対策の効果や導入率の想定(対策シナリオ)を適用することで、それぞれの対策実施によるエネルギー消費量やCO₂排出量の変化を求める。つぎに、エネルギー供給側での対策として地域資源の地域内利活用や系統電力のカーボンニュートラル化によるCO₂削減効果を推計し、対策実施時のCO₂排出量の変化や基準年比削減率を推計した。

本研究では、国立環境研究所AIMプロジェクトチーム²⁾を参考に、需要側対策として大きく需要削減、燃料転換、効率改善の別に対策やその効果を設定して分析した。エネルギー供給側の対策は、市区町村ごとに需要側対策実施後の電力消費量と地域資源量を比較することで地域資源により供給可能な電力消費量の割合とCO₂削減効果を求め、残った電力消費量は系統電力で供給されるとの想定のもと、系統電力の排出係数の変化によるCO₂排出量の変化を対策の効果と見なした。

3-1-3. 地域エネルギー資源に対する気候変動影響の評価

地域エネルギー資源は、市区町村におけるエネルギー供給側対策として重要な役割を演じることが期待されているが、特に太陽光発電や風力発電は、気候変動による日射量や風況の変化により利用可能量が変化することが見込まれる。そこで、基準年及び今世紀内の将来時点を対象に、複数の気候モデルの出力を用いて太陽光発電及び風力発電の出力の変化を分析した。分析では、サブテーマ2の再生可能エネルギー資源量の推計と同様に1kmメッシュ(3次メッシュ)ごとの毎時単位出力を、第6期結合モデル相互比較計画(CMIP6)の気候モデル群から日本周辺の解像度も考慮して選択した5種について評価した。なお、脱炭素対策の有無による違いを見る観点から、それぞれの気候モデルについて、IPCC第6次評価報告書も参考に、SSP1-RCP2.6(ssp126)、SSP2-RCP4.5(ssp245)、SSP5-RCP8.5(ssp585)の3つのシナリオに対する結果を用いている。

3-2. 地域エネルギー資源の地域間融通を考慮したネットワーク・システム分析とその効果の評価

3-2-1. 再生可能エネルギー資源の地域間融通ネットワーク分析

地域間融通ネットワークの分析にあたっては、現時点で熱を長距離輸送することが困難であるため、電力需要を対象とし、また、地域エネルギー資源のうち発電利用が可能なもののみを対象とした。分析では、地域が有する再生可能エネルギー資源は、まずその地域の電力需要に供給され(地産地消)、エネルギー資源に余剰がある場合に他の地域へ送電できるとし、国全体として再生可能エネルギー資源による電力供給量を最大化するように地産地消量や他地域への送電量を決定した。なお、送電は物理的に隣接した自治体間のみで行われるとして、例えば青森県横浜町から神奈川県横浜市へ直接送電するなどは想定しない。また、送電に際しては100kmあたり1%の送電損失を想定した。

さらに、得られた地域間の融通量に基づき、地域間での地域エネルギー資源の融通による社会・経済効果の評価を行った。本研究では、経済効果としてエネルギー融通量に基づく地域間での資金の移動と

その効果を、社会効果として雇用者数への影響を評価することとした。なお、再生可能エネルギー設備の製造増加等による経済規模の拡大や新たな産業立地により、市区町村をまたいだ人口移動も想定されるが、本研究では将来人口はサブテーマ2の分析に基づく固定値として設定しているため考慮しない。

3-2-2. 地域間での資源循環を考慮した脱炭素型エネルギーシステム分析モデルによる分析

エネルギー需要など社会経済活動の水準は、昼夜、季節ごとに変動する。太陽光・風力などの地域資源も同様に変動するが、社会経済活動とは必ずしも連動しておらず、需要より少ない量の資源でも時間帯によっては需要を超える量が確保できる場合もある。そこで、より詳細な時間スケールで地域資源の利用可能量、需給バランスや地域間での循環等を検討するために、本研究ではAIMモデル群のうち多地域電源計画モデル（AIM/MOGPM）をもとに、市区町村単位での地域資源の循環を考慮した分析ができるよう改良して脱炭素型エネルギーシステム分析モデルを開発して分析を行った。開発したモデルは、1年単位で毎時（8,760時間）の電力需要と再生可能エネルギー設備の設備1kWあたりの出力を入力として、設備費、運転維持費、燃料費等の費用合計を最小化する最適化計算により、設備容量や毎時出力、エネルギー消費量、CO₂排出量や毎時単位での地域間の電力融通量を求めることができる。モデルでは、蓄電池などの電力貯蔵設備も考慮でき、また、需要を超過して蓄電や送電も困難な再生可能エネルギー出力は解列されるものとしている。

分析に用いる毎時電力需要は、年間の電力需要量を毎時単位に配分することで作成する。産業部門のうち化学工業や鉄鋼業等は24時間操業を仮定して年間を通じて一定の需要量とした。産業部門のその他の業種や民生部門（家庭・業務）は社会生活基本調査結果の時刻区分活動率や毎時気温を参照して作成した。再生可能エネルギー発電設備の毎時出力は、自治体ごとに設定した地上気象観測点の観測値から、設備1kW単位での毎時発電量を算出する。なお、地熱発電は年間を通じて一定の出力を想定している。

3-3. 地方自治体等との討議を含めた成果の普及に関する取り組み

本研究では、他のサブテーマも含めて、長崎県五島市などで本研究課題の成果に基づく地方自治体担当者との意見交換を進めたほか、各種シンポジウムや高校等での講義を通じた成果普及を推進してきた。

地方自治体等との討議に関しては、地方自治体での脱炭素社会への転換には市民の果たす役割が非常に大きいとの認識のもと、サブテーマ2とも連携し、川崎市が協力し、脱炭素かわさき市民会議実行委員会（事務局・川崎市地球温暖化防止活動推進センター）が主催する『脱炭素かわさき市民会議～市民提案：川崎の2050年脱炭素社会の実現に向けて～』にて本課題参画者（松橋・芦名）が会議設計や実施に関わるとともに、専門家として本課題の成果等を提供してきたほか、東京都武蔵野市や所沢市での気候市民会議においても本課題参画者（松橋）が関わってきた。さらに、これら実績をもとに、地方自治体において脱炭素政策作りに気候市民会議方式を活用するための手法等を整理し、住民参加型討議手法として気候市民会議を実施するに際してのプロセス等を検討した。

4. 結果及び考察

4-1. 地域内の資源利活用を考慮した脱炭素対策の対策・施策評価モデルを用いた分析

4-1-1. 市区町村別エネルギー需給構造の推計

地球温暖化対策計画での将来の削減目標の基準年（2013年度）について、部門別エネルギー消費量の推計結果を、総エネルギー消費量の順に並べた結果を図-1.5に示す。総エネルギー消費量をみると、市区町村ごとの差は大きく、最大は610.5 PJ、最小は16 TJと、3万8千倍もの差がある。また、全自治体のエネルギー消費量総計に対する割合を見ても、上位19自治体でエネルギー消費量全体の30%、上位67自治体で50%、上位201自治体で70%と、偏りが大きいことがわかる。これは、人口等の差のほか、製造業の有無や立地する業種にも影響されており、上位67自治体のエネルギー消費量における部門別シェア（図-1.6）を見ると、産業部門のうち製造業の割合が大きい自治体が多く含まれることがわかる。特に、化学工業や鉄鋼・非鉄・金属製品製造業の製造品出荷額等が大きい千葉県市原市や岡山県倉敷市、大分県大分市等が上位に位置している。また、人口が多く商業活動が活発であり、かつ周辺地域の中核となっている北

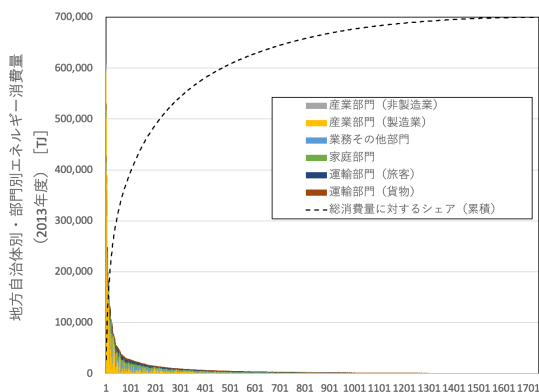
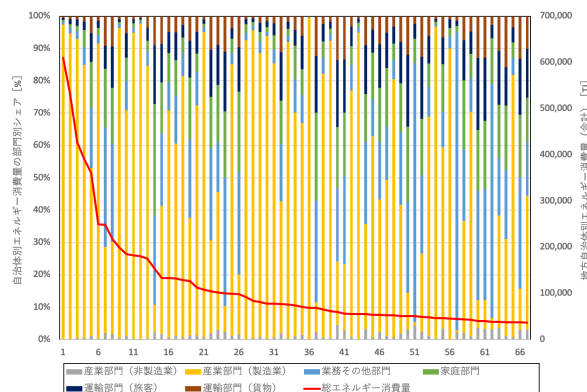
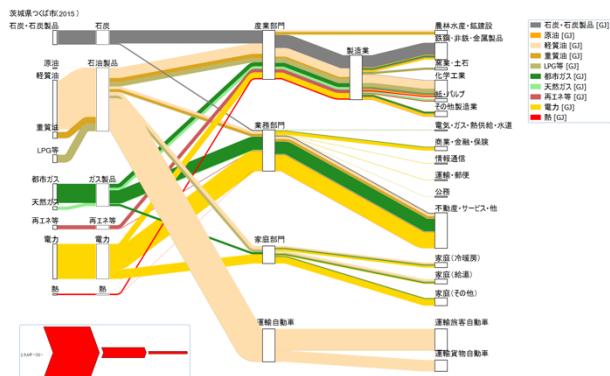


図-1.5 市区町村別エネルギー消費量の推計結果

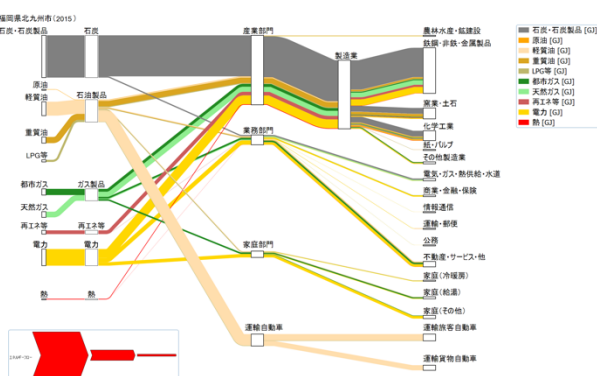
図-1.6 エネルギー消費量の部門別シェア
(消費量上位67自治体)

2015FY	Code	100	150	200	250	250A	250B	250C	400	450	500	550	600	700	800	800	810	820
茨城県つくば市	石炭	石炭製品	原油	石油製品	軽油製品	重油製品	石油ガス	天然ガス	都市ガス	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用
Code	Energy Unit	石炭	石炭製品	原油	石油製品	軽油製品	重油製品	石油ガス	天然ガス	都市ガス	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用
Display Unit	石炭+	石炭製品+	原油+	石油製品+	軽油製品+	重油製品+	石油ガス+	天然ガス+	都市ガス+	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用	再生可能・未利用
500000	Final Energy Cons. 最終エネルギー消費	2,523,827	236,873	173	12,280,155	9,504,485	1,232,998	1,522,872	619,834	3,694,047	781,101	0	0	6,758,829	270,659	21,145,297	25,204,595	1,940,701
600000	Industry + 企業・事業用	2,523,827	236,873	173	4,730,143	2,520,255	1,232,998	976,889	619,834	3,284,172	781,101	0	0	4,964,628	270,659	17,411,409	15,470,708	1,940,701
	Industry 産業(農林を除く)	2,315,138	219,508	173	3,826,414	1,989,529	772,966	863,919	495,384	766,723	671,879	0	0	1,112,397	246,996	9,454,412	7,513,710	1,940,701
810000	ABCD Agriculture 農林水産	12	13	0	762,416	326,110	435,065	1,241	24,638	12,547	52	0	0	69,355	0	869,033	765,968	103,065
811000	AB Agriculture 農林水産	0	2	0	544,705	215,851	328,771	83	0	254	52	0	0	28,937	0	573,950	571,644	2,306
812000	C Cattle 畜産	12	11	0	10,876	10,401	464	11	24,638	1,801	0	0	0	3,379	0	40,517	40,497	20
813000	D Dairies 畜産	0	0	0	206,835	99,858	105,829	1,147	0	10,892	0	0	0	37,040	0	254,588	153,827	100,739
820000	E Manufacturing 製造業	2,315,138	219,508	173	2,863,999	1,663,418	377,902	862,878	470,745	754,176	671,827	0	0	1,043,042	246,996	8,585,378	6,747,142	1,837,636
821000	E09-10 Manufacturing 食品飲料製造業	740	59	0	41,732	5,979	29,137	6,616	23,352	128,547	1,295	0	0	57,634	12,253	265,611	265,611	0
822000	E11 Manufacturing 繊維工業	3	0	0	525	159	347	19	28	536	1	0	0	1,110	12	2,212	2,212	0
823000	E12-13 Manufacturing 木材・家具・木工業	63	43	0	22,133	13,996	3,872	4,265	789	17,733	94,386	0	0	49,732	21,585	206,289	206,289	0
824000	E14 Manufacturing 印刷・出版・紙加工品製造業	19,315	0	0	20,094	2,226	16,867	1,209	286,483	30,759	185,235	0	0	36,389	2,095	580,377	580,377	0
825000	E15 Manufacturing 印刷・出版業	0	72	0	9,136	1,048	2,889	5,198	8,608	41,331	711	0	0	39,859	0	99,717	99,717	0
826000	E16-17 Manufacturing 化学工業(石油・石炭製品を除く)	1,633	71,504	6	2,434,886	1,582,427	42,770	809,689	50,346	124,662	233,100	0	0	179,787	188,732	3,284,666	1,447,154	1,837,512
827000	E18-20 Manufacturing プラスチック・ゴム・皮革製品製造業	31	0	0	114,115	26,545	81,749	5,821	35,117	77,599	30,860	0	0	59,432	15,170	441,924	441,800	124
828000	E21 Manufacturing 金属・土壌製品製造業	71,477	38,100	54	11,115	26,545	81,749	5,821	35,117	77,599	30,860	0	0	59,432	15,170	441,924	441,800	124
829000	E22-E24 Manufacturing 鉄鋼・非鉄・金属製品製造業	2,221,766	108,504	113	172,261	11,303	144,845	16,113	51,589	237,414	125,861	0	0	307,552	4,376	3,229,434	3,229,434	0
830000	E25-E31 Manufacturing 機械・電気・電子製品製造業	109	673	0	37,469	13,700	11,363	12,408	11,142	66,376	3	0	0	224,441	2,209	342,421	342,421	0
841000	E32 Manufacturing 電気・電子製品製造業	0	541	0	5,116	5,826	2,454	856	1,402	14,069	107	0	0	74,643	70	99,948	99,948	0
850000	F-S Commerce (第三次産業)	208,889	17,365	0	1,103,728	530,727	460,032	112,970	124,540	2,517,449	109,422	0	0	3,852,230	23,663	7,956,997	7,956,997	0
851000	F Electricity 電気	35,057	896	0	4,996	89	470	4,437	38,517	6,086	454	0	0	4,491	6	88,502	88,502	0
852000	G Inform 情報通信業	0	0	0	1,869	593	192	865	0	7,707	0	0	0	66,253	32	75,682	75,682	0
853000	H Transport 運輸業・郵便業	0	0	0	26,900	19,776	5,854	1,270	0	5,384	0	0	0	59,074	0	91,358	91,358	0
854000	I Wholesale 卸売業・小売業	0	12	0	76,080	50,152	9,528	16,401	75	89,890	13	0	0	603,255	66	769,191	769,191	0
855000	J Finance 金融業・保険業	0	0	0	2,122	1,360	475	286	0	5,810	0	0	0	28,227	6	36,164	36,164	0
856000	K Real Es 不動産業・物品賃貸業	0	0	0	13,046	10,960	1,852	524	0	23,464	1	0	0	42,544	1,176	80,231	80,231	0
857000	L Scientific 学術研究・専門・技術サービス	173,600	0	0	259,848	73,281	180,246	6,322	86,051	978,103	3,528	0	0	1,436,870	4,624	2,943,625	2,943,625	0
858000	M Accom 宿泊業・飲食サービス業	0	0	0	136,631	56,273	42,012	38,346	0	291,821	0	0	0	249,225	77	677,554	677,554	0
859000	N Living 1 生活関連サービス業・娯楽業	1	0	0	97,577	37,540	53,291	6,745	0	205,857	16	0	0	171,801	0	475,252	475,252	0
860000	O Educat 教育・研究開発業	0	1	0	129,636	63,241	66,802	9,543	0	392,553	89	0	0	516,716	361	1,039,356	1,039,356	0
861000	P Medical 医療・福祉	0	0	0	154,930	70,246	62,955	21,729	21	249,821	14	0	0	256,238	540	661,563	661,563	0
862000	Q Compos 複合サービス業	0	0	0	523	333	146	45	0	834	0	0	0	3,081	0	4,439	4,439	0
863000	R Miscell 雑貨サービス業	31	16,455	0	182,385	141,995	34,837	5,753	1,767	60,251	105,222	0	0	227,365	2,019	586,495	586,495	0
864000	S Govern 公務	0	0	0	11,854	4,180	7,462	211	0	12,333	0	0	0	22,703	3	46,893	46,893	0
899999	Unable 業種不明・分類不能	0	0	0	5,531	1,006	4,060	465	19	186,935	86	0	0	164,358	14,751	371,681	371,681	0
700000	X Resident 家庭	0	0	0	1,180,991	680,006	0	500,955	0	409,875	0	0	0	1,794,001	0	3,384,967	3,384,967	0
710000	Space 1 暖房	0	0	0	438,449	274,211	0	164,239	0	134,370	0	0	0	322,229	0	895,048	895,048	0
720000	Cooling 冷房	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64,083	0	64,083	64,083	0
730000	Hot Wa 給湯	0	0	0	612,663	405,795	0	206,867	0	169,246	0	0	0	137,408	0	919,316	919,316	0
740000	Cooling 調湿	0	0	0	129,879	0	0	129,879	0	106,259	0	0	0	4,591	0	240,729	240,729	0
750000	Power 照明・動力	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,265,690	0	1,265,690	1,265,690	0
800000	Transport 運輸	0	0	0	6,349,021	6,304,224	0	44,797	0	0	0	0	0	0	0	6,349,021	6,349,021	0
810000	Passen 旅客	0	0	0	4,167,509	4,127,531	0	39,978	0	0	0	0	0	0	0	4,167,509	4,167,509	0
811000	Pass 乗用車・バス	0	0	0	4,167,509	4,127,531	0	39,978	0	0	0	0	0	0	0	4,167,509	4,167,509	0
820000	Freight 貨物	0	0	0	2,181,512	2,176,692	0	4,819	0	0	0	0	0	0	0	2,181,512	2,181,512	0
821000	Freig 貨物自動車・トラック	0	0	0	2,181,512	2,176,692	0	4,819	0	0	0	0	0	0	0	2,181,512	2,181,512	0
900000	Non-Energy 非エネルギー利用	0	66,611	0	1,874,090	1,579,983	103,277	190,830	0	0	0	0	0	0	0	1,940,701	0	1,940,701
910000	Industry 産業部門	0	66,611	0	1,874,090	1,579,983	103,277	190,830	0	0	0	0	0	0	0	1,940,701	0	1,940,701
920000	ResCom 民生・運輸部門	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図-1.7 本研究で整備した地方自治体別エネルギーバランス表(茨城県つくば市・2015年度の例)



(a) 茨城県つくば市 (2015年度)



(b) 福岡県北九州市 (2015年度)

図-1.8 地方自治体のエネルギーフロー図の例

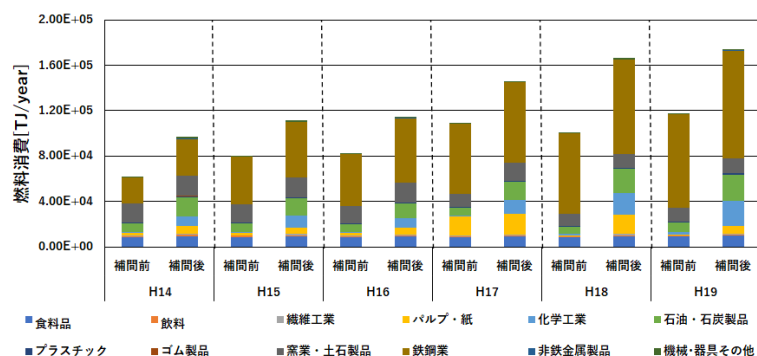


図-1.9 代替可能性のある燃料需要の推計結果（北海道、平成14年～19年）

北海道札幌市や東京都区部、名古屋市、大阪市などもエネルギー消費量が大きい傾向がある。エネルギー源別に見ると、例えば鉄鋼・非鉄・金属製品製造業の立地する自治体では石炭消費量が大きく、化学工業の立地する自治体では石油・石油製品の消費量大きい。また、民生部門（家庭・業務）の割合が大きい自治体では、電力や都市ガス又はLPGの割合が大きい傾向がある。

これら推計結果をもとに、全ての基礎自治体（1,741自治体）について2013年度から2018年度を対象期間としてエネルギーバランス表を整備し、またあわせてエネルギーフロー図の作成も行った。それら成果の一例を、図-1.7と図-1.8に示す。

これらに加えて行った、廃棄物の循環利用により代替可能なエネルギー需要の推計結果から、北海道での推計結果を図-1.9に示す。工業統計が平成20年に産業中分類を見直したことを勘案し、本研究では平成14年から19年の工業統計を用いて手法開発と推計を行った。北海道での推計結果を主要となる産業12種にまとめた結果を見ると、欠測・秘匿データが少なかった平成17年のパルプ・紙産業を除き、欠測・秘匿データが含まれる業種のいずれにおいても補間後のほうが需要が大きく推計されており、欠測・秘匿の影響を最小限として代替可能性のある燃料消費量が求められていると考えられる。

4-1-2. 地方自治体での対策・施策実施によるCO₂削減効果分析

対策シナリオに基づいて推計したCO₂排出量について、2050年の基準年に対する削減率の分布としてまとめたものを図-1.10に示す。分析で産業部門での二酸化炭素回収・貯留（CCS）や全国大でのCCS付きバイオマス発電（BECCS）を想定していないこともあり、想定した対策シナリオのみでカーボンニュートラル（100%削減）に到達する自治体はなかったが、90%以上の削減となった自治体が全体の9割を超え、国全体の脱炭素化シナリオで想定される対策を着実に実施することは、地方自治体の脱炭素化においても重要となることが明らかとなった。また、削減率が低い自治体は共通してエネルギー消費に占める化学工業や鉄鋼・非鉄・金属製品製造業等の割合が高く、これら自治体においてはCCSや二酸化炭素回収・有効利用（CCU）等の二酸化炭素回収に関する技術の導入が重要となる。ただし、本研究の分析では地方自治体をまたいだ産業移転等は考慮しておらず、国全体の産業立地の再配置により地方自治体の脱炭素対策も大きく変わりうることを示唆されたものと考えられる。

CO₂削減量とCO₂削減量に占める部門別の割合を見ると、削減量の大きな自治体は産業部門の割合が高い傾向があり、千葉県市原市や岡山県倉敷市、大分県大分市などはCO₂削減量の90%以上が産業部門である。いっぽう半数以上の自治体は、民生（業務・家庭）部門の割合が4割を超え、7割以上の自治体は運輸部門の割合が3割を下回る。ただし、東京都区部や沖縄県那覇市等、卸小売業やサービス業などの業務部門（第三次産業）の従業者数がそれぞれの周辺地域と比較して大きい自治体では、民生部門の削減量が8割を超える場合もある。運輸部門の割合が全体の4割を超える自治体もわずかに存在するが、福島県内の自治体を除くと、多くは運輸部門のエネルギー消費量が全体の50%を超える自治体である。

対策実施によるCO₂削減率の変化を対策なし、需要側対策、供給側対策の順に累積で求め、標準地域コードに基づき北海道から順に昇順に並べたものを図-1.11に示す。なお、図中の負の領域は基準年よりもCO₂排出量が増加することを示しており、主に2013年から2018年にかけて企業の新規立地などで製造

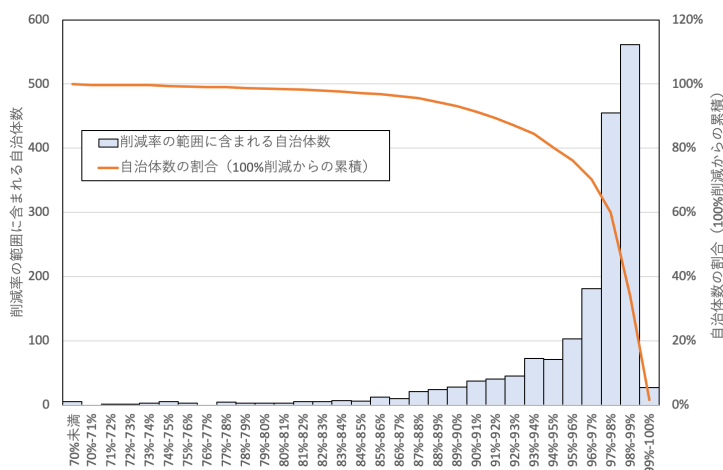


図-1.10 2050年の基準年比削減率の分布と100%削減からの自治体数の累積（割合）

業のCO₂排出量が増加した自治体が位置している。人口や産業活動の水準（マクロフレーム）の変化のみを考慮した対策なしの結果を見ると、多くは人口減少等によりCO₂排出量は基準年よりも減少する。これに需要側対策を想定することで、全自治体の約95%でCO₂削減率が50%を超え、一部の自治体では80%を超える。さらに供給側対策を加えると、図-1.10にも示したように9割を超える自治体ではCO₂削減率が90%以上に達する。特に、地域内の再生可能エネルギー資源の活用に着目すると、約9割の自治体がそれぞれの電力消費量を地域内の再生可能エネルギーで賄うことができ、カーボンニュートラル化された系統電力が必要となるのは、それぞれの地方の中核的な都市やその周辺の自治体であることがわかった。ただし、コストなどの事業性を考慮した場合には、本研究で想定した量よりも少ない導入ポテンシャル量にとどまる可能性があることには留意が必要である。

これらに加えて、地方自治体ごとの需要側対策（需要削減、燃料転換、効率改善）の効果の違いを見ると、総じて北海道や東北地方、新潟を含めた北陸地方などの寒冷地では需要削減の効果が大きく、九州地方など温暖な地域では電化など燃料転換の効果が大きいことがわかった。ただし、東京都区部などエネルギー消費量に占める業務部門の割合が大きい自治体では、もともと電力の割合が高いため、電化などの燃料転換の効果が低くなる傾向も見られた。

本研究では、同様に全市区町村（1,741自治体）に対して、2020年から2050年までのCO₂削減の道筋についても分析を行った。分析では、シナリオとして想定した対策・施策が2025年から実施され、2050年には対策シナリオとして設定した対策効果や導入率に達するものとした。なお、これまでの分析に加え

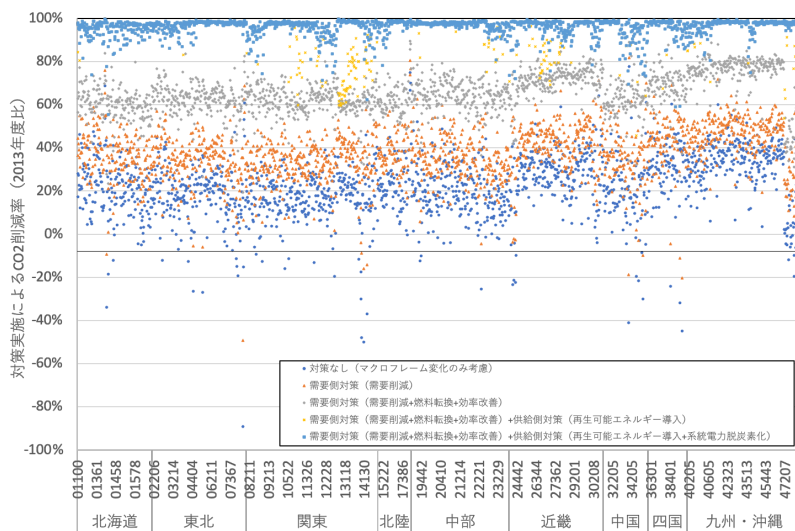
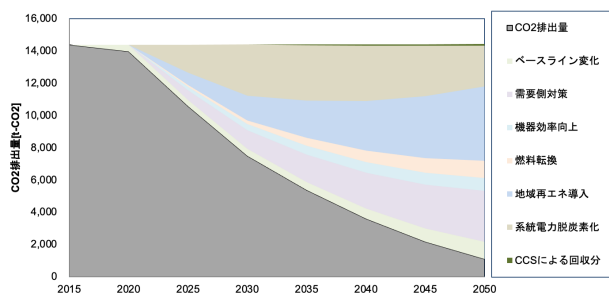
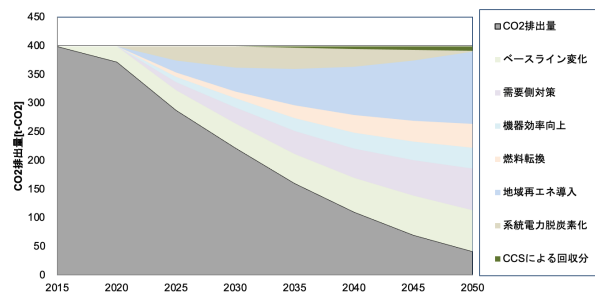


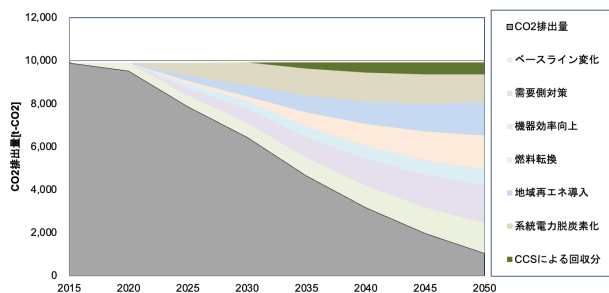
図-1.11 地方自治体別の対策実施による累積CO₂削減率の比較



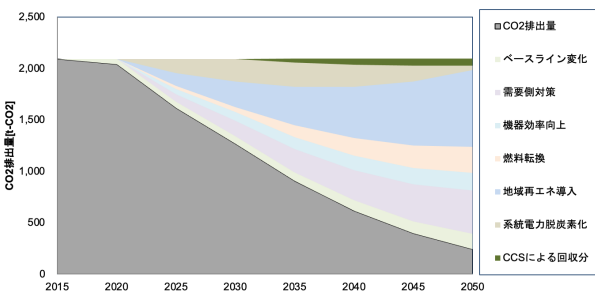
(a) 北海道札幌市



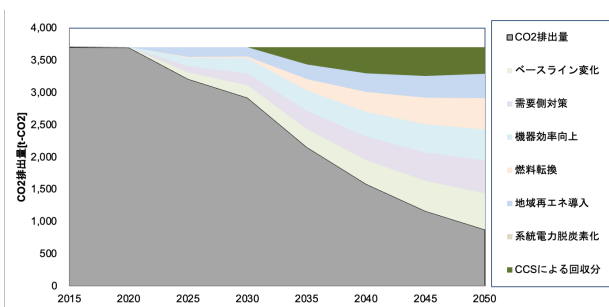
(b) 岩手県宮古市



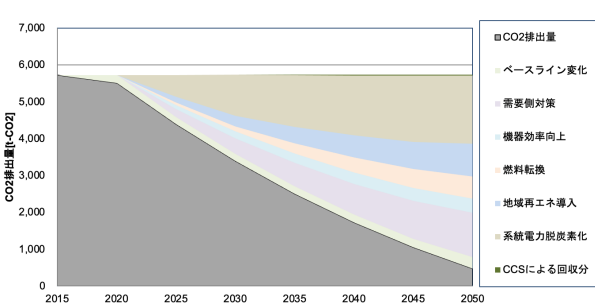
(c) 宮城県仙台市



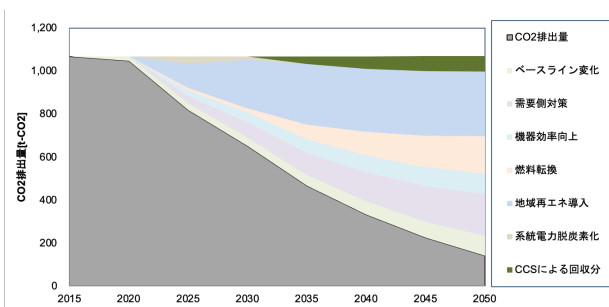
(d) 茨城県つくば市



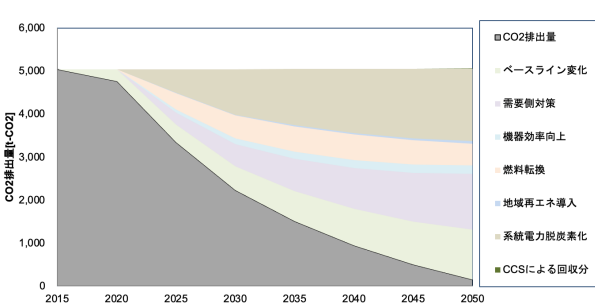
(e) 茨城県鹿嶋市



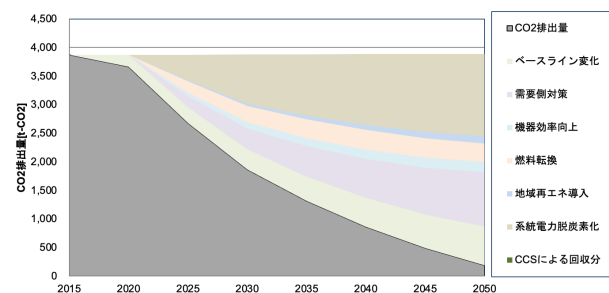
(f) 埼玉県さいたま市



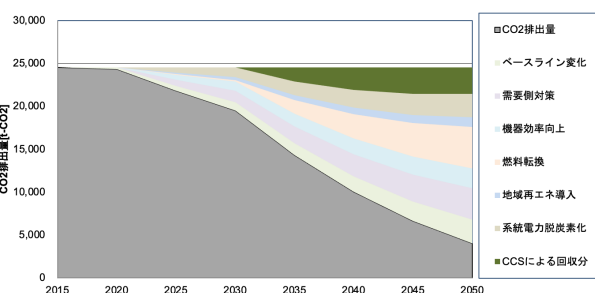
(g) 千葉県木更津市



(h) 東京都千代田区

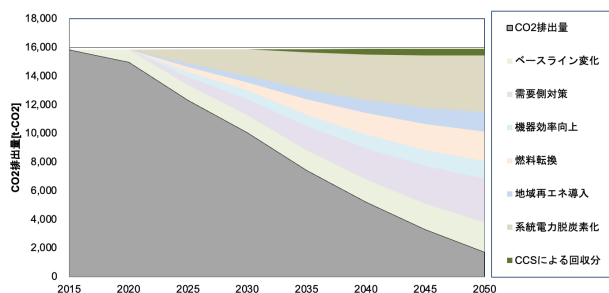


(i) 東京都新宿区

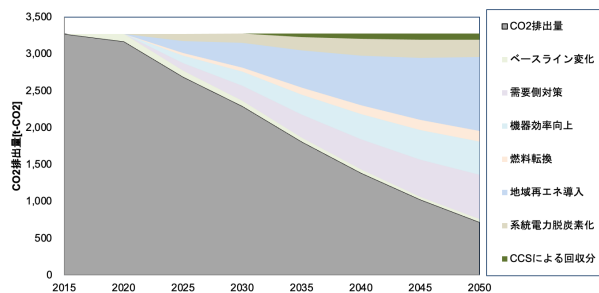


(j) 神奈川県川崎市

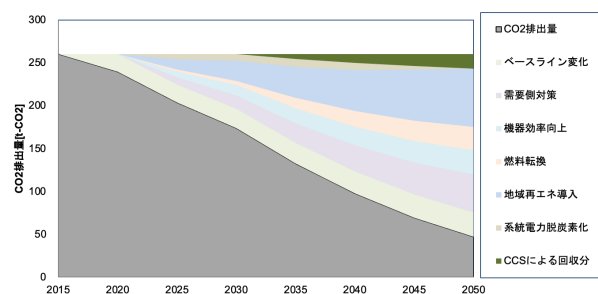
図-1.12 対策シナリオに基づく市区町村別CO₂削減の道筋の分析結果



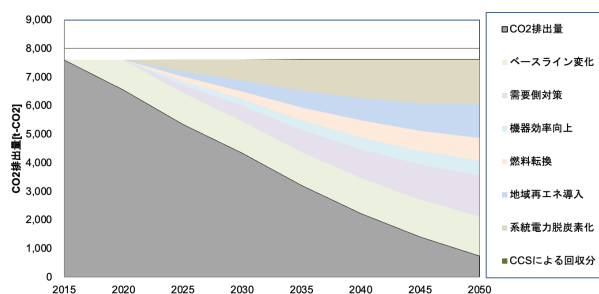
(j) 愛知県名古屋市



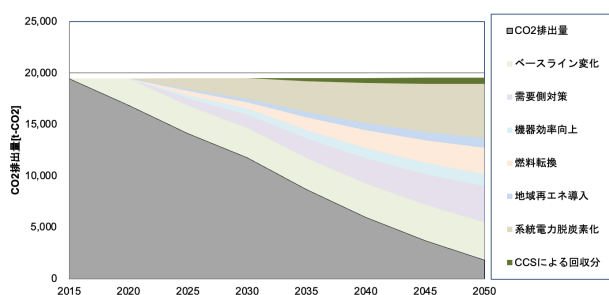
(k) 愛知県豊田市



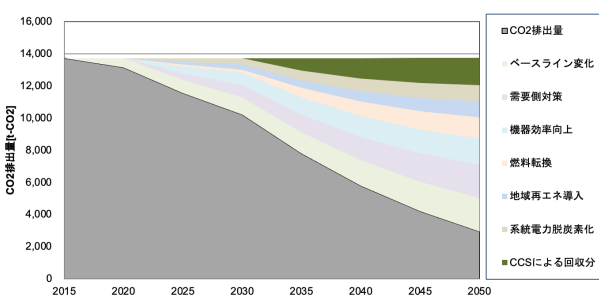
(l) 滋賀県米原市



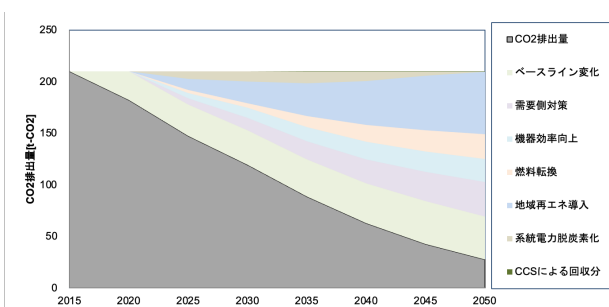
(m) 京都府京都市



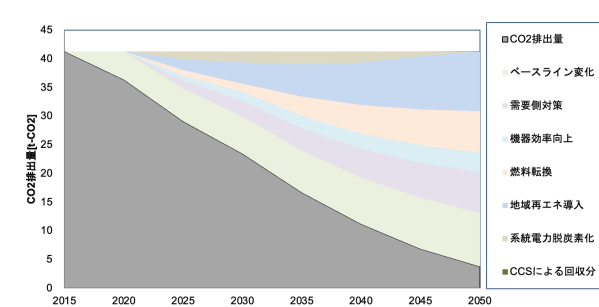
(n) 大阪府大阪市



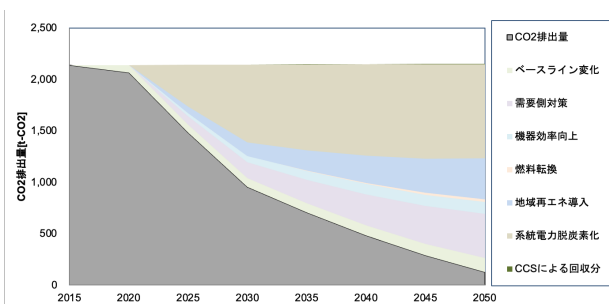
(o) 福岡県北九州市



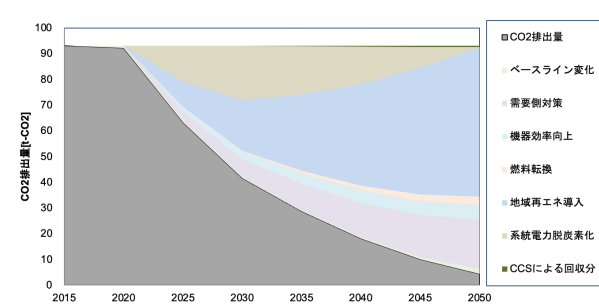
(p) 長崎県五島市



(q) 熊本県小国町



(r) 沖縄県那覇市



(s) 沖縄県与那原町

図-1.12 対策シナリオに基づく市区町村別CO₂削減の道筋の分析結果（続）

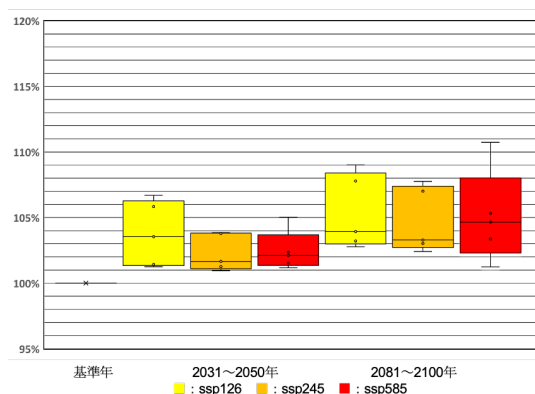
て、産業部門でのCCS利用を考慮することとし、2030年以降の鉄鋼業や化学工業等での利用を想定した。図-1.12に、一例として20自治体の分析結果を示す。自治体ごとにCO₂削減に効果的な対策は異なり、例えば宮城県仙台市や熊本県小国町では需要側対策の削減効果が大きい。北海道札幌市や東京都千代田区、沖縄県那覇市は系統電力の脱炭素化も含めて供給側対策の効果が大きい。供給側対策の効果が大きい自治体でも、東京都千代田区・新宿区や沖縄県那覇市は再生可能エネルギーポテンシャルが十分ではないため、専ら系統電力の脱炭素化が主たる対策となるが、沖縄県与那原町のように十分な再生可能エネルギーポテンシャルを有する地域では、地域内での再生可能エネルギー利用が中心的な対策となる。また、本分析では再生可能エネルギー導入量は2050年に向けて徐々に増加するとの想定を置いていることから、北海道札幌市や沖縄県与那原町で見られるように2030年～2035年頃までは系統電力の脱炭素化の効果が大きく、以降は再生可能エネルギー導入による削減量が拡大して系統電力の削減効果が縮小していく傾向が見られる。これは、再生可能エネルギーポテンシャルが豊富な地域であっても、その導入には時間を要するため、中期的には系統電力の脱炭素化に依らざるを得ず、国全体として再生可能エネルギー導入や地域での利活用を推進するとともに、系統電力での脱炭素化に向けた取り組みも平行していくことが肝要であることを示唆していると考えられる。

本研究より、国全体の脱炭素化対策を前提とした場合でも、地方自治体でもCO₂排出量の大幅削減が可能であることがわかった。また、おおむね削減量の半分以上が需要側対策であり、地域での再生可能エネルギーの利用拡大も含めると、地域の主体的な取り組みが不可欠であることが示唆されている。いっぽう、系統電力の脱炭素化や、産業部門でのCCS普及、BECCS等ネガティブ排出技術の開発など、国レベルで実施する供給側対策も同様に重要であり、地方自治体の脱炭素化を達成するためには、国と地域が連携した対策・施策の実施が重要であるといえる。

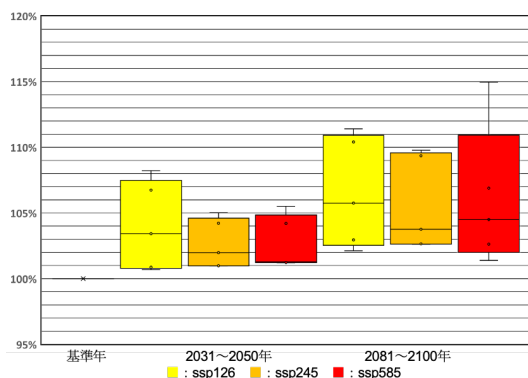
4-1-3. 地域エネルギー資源に対する気候変動影響の評価

前節で述べたように、再生可能エネルギーは多くの地方自治体の脱炭素化に重要な役割を演じるが、気候変動によって生じる日射量や風況の変化で導入ポテンシャル量が変化すると、本研究で検討した対策・施策による2050年のCO₂削減効果やCO₂削減の道筋が変化する可能性がある。

図-1.13及び図-1.14に、将来の2時点（2031年～2050年、2081年～2100年）について太陽光発電と風力発電の全国合計での発電量から求めた基準年（1981年～2000年）からの変化を示す。図では、気候モデル間の結果のばらつきは箱ひげ図として表現している。太陽光発電の結果に着目すると、大きくは太陽光発電の発電量は増加する傾向があることがわかる。また、2030～2050年の結果においては、排出量の少ないシナリオ（ssp126）のほうが、排出量の多いシナリオよりも太陽光発電の発電量は大きくなる傾向が見て取れるが、2081～2100年ではいずれのシナリオでもほとんど差はない。また、気候モデル間の差は、建物系太陽光発電よりも土地系太陽光発電のほうが大きい。これは、建物系では屋根の種別により東西向きや北向きにも設置されると想定しているが、土地系では南向きのみを想定したことによる影響

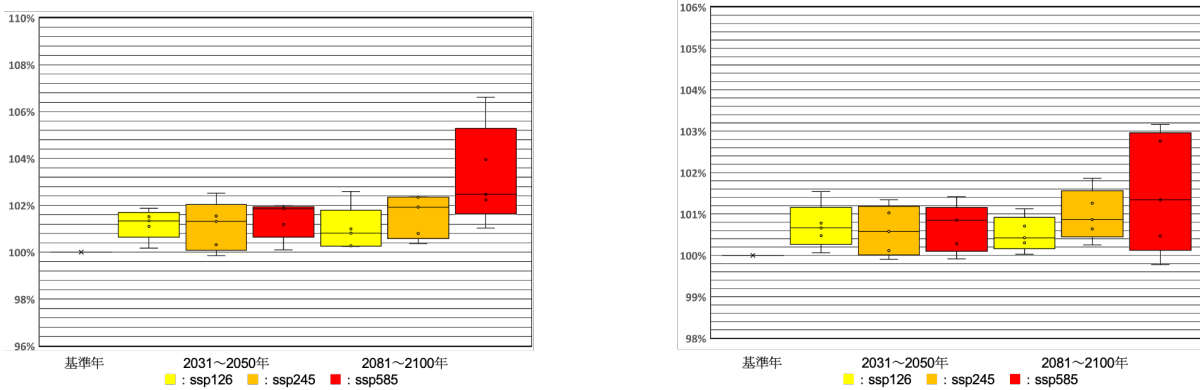


(a) 建物系太陽光発電



(b) 土地系太陽光発電

図-1.13 太陽光発電に対する気候変動影響の評価結果（全国計の発電量の基準年比増減）



(a) 陸上風力発電

(b) 洋上風力発電

図-1.14 風力発電に対する気候変動影響の評価結果（全国計の発電量の基準年比増減）

であると考えられる。季節別の変化を見ると、年間発電量と同様にいずれの季節でも発電量は増加傾向を示しているが、秋冬期においては、一部の気候モデルで基準年を下回る結果となる場合もある。これら結果より、太陽光発電を主とした脱炭素型エネルギーシステムへ移行する地域では、長期的に見ると設計時よりも多くの発電量が得られることになり、追加的な蓄電池の設置や余剰電力解消方策が求められる可能性があることを示唆していると言える。他方で、発電量の増加は、必要となる設備容量を削減できるということであり、大規模な太陽光発電の導入を予定している自治体では、既設設備の発電量の変化を継続的にモニタリングし、その増加に合わせた設備容量の見直しを定期的に行うことができると、太陽光発電設置のための投資額を当初計画時よりも抑制できる可能性がある。

いっぽう風力発電では、陸上風力発電と洋上風力発電のいずれでも、排出量の大きなシナリオ(ssp585)を除いては、気候変動影響を考慮しても、ほぼ基準年と同程度の発電量が維持される傾向が見て取れるが、特に洋上風力発電においては一部の気候モデルでは現在よりも減少する可能性があることが示唆されている。モデル間のばらつきは、ssp585ではやや大きいものの最大・最小の差は3%程度であり、その他シナリオを含めても太陽光発電ほど大きくはない。そのため、陸上と洋上のいずれでも、風力発電の導入を脱炭素化の中核とする地域では、計画通りの設備設置やそのための投資を着実に進めることが肝要であることを示唆している。

世界全体が脱炭素社会への移行を推進した場合に近いssp126シナリオでの全気候モデルの平均として求めた2031～2050年の発電量変化を、7つの地域区分で見た結果を表-1.1にまとめる。建物系の太陽光発電は、北海道地方は全国平均（3.8%増）よりもやや低い2.4%の増であるが、それ以外は全国平均と同程度の増加が見込めることがわかる。土地系太陽光発電の基準年からの増加量は、北海道地方が全国平均よりも低い、東北地方や関西地方、九州・沖縄地方は5%を超え、中国・四国地方では5.8%と6%に迫る増加となる。風力発電についてみると、多くの地域では基準年からの変化率は1%に満たない程度であるが、東北地方では陸上風力発電は2.2%、洋上風力発電は1.8%と全国平均の2倍近い増加となる。これらの

表-1.1 ssp126での2031～2050年における地域別発電量の基準年比増減

	太陽光発電		風力発電	
	建物系	土地系	陸上	洋上
全国	3.8%	4.0%	1.2%	0.7%
北海道	2.4%	2.7%	0.9%	0.7%
東北	4.2%	5.4%	2.2%	1.8%
関東	3.8%	4.5%	1.1%	0.5%
中部・北陸	3.3%	4.3%	0.9%	0.8%
関西	3.9%	5.2%	0.6%	0.1%
中国・四国	4.2%	5.8%	0.7%	0.1%
九州・沖縄	4.0%	5.4%	0.6%	0.3%

ことから、太陽光発電についてはいずれの地域でも全国と同様に発電量の変化を考慮した設備導入計画の柔軟な見直しが重要となるが、風力発電については東北地方では発電量増加に合わせた対応は必要となるものの、それ以外の地域では計画に影響を及ぼすほどの発電量変化は生じないことがわかる。

4-2. 地域エネルギー資源の地域間融通を考慮したネットワーク・システム分析とその効果の評価

4-2-1. 再生可能エネルギー資源の地域間融通ネットワーク分析

本研究ではまず、市区町村別の電力需要量と住宅系太陽光発電と陸上風力発電、中小水力発電と地熱発電の4種類の再生可能エネルギー設備からの発電量をもとに再生可能エネルギー資源の地域間融通ネットワークを設計し、得られたネットワークにおける地域間の電力フローと地産地消も含む市区町村ごとの電力需要に対する再生可能エネルギー発電の供給率（需要充足率）を図-1.15にまとめる。図中の矢印の向きは、電力の流れの方向を示し、幅は融通量を表す（ただし、10 TWh/年以下は等幅とした）。

国全体としてのネットワーク構造を見ると、東日本では北海道から東北を経由して関東へ向かう流れとなるが、西日本では多くの再生可能エネルギーポテンシャルを有する地域が中核となった放射状のネットワークが形成されることがわかる。北海道からのフローは、一部は新潟県や長野県、岐阜県を経由して愛知県まで到達する。東日本では、青森県で関東に向かう流れと日本海側を経由して愛知県まで至る流れに分岐する。東北地方の太平洋側では、青森県を出発点に岩手県や宮城県を経由して関東地方に至る融通ネットワークも構成されるが、フロー量は大きくない。

融通ネットワーク構築による需要充足率を見ると、全自治体の78%（1,360自治体）が地産地消と地域間融通を合わせることで、電力需要を再生可能エネルギーのみで賄える可能性があることがわかった。残る自治体のうち、303自治体は需要充足率が50%に満たないが、島しょ部を除くと多くは瀬戸内海沿岸や九州北部に位置しており、東日本ではほとんどの自治体が高い需要充足率を達成できることがわかる。

本分析で得られた地域間融通ネットワークでは、北海道と青森県の間では320 TWh/年もの融通量が必要となる。これを実現するための連系線容量は最小でも36.5 GWと、現在の容量や電力広域的運営推進機関（OCCTO）が検討する系統増強案よりもはるかに大きい。そこで、北海道-青森県間の連系線容量を900 MWに制約した場合の融通ネットワークにおける電力フロー量と需要充足率の結果を図-1.16に示す（想定した再生可能エネルギー種は図-1.15と同じ）。連系線容量に上限を課すことで、北海道では札幌市など電力需要の大きな地域へ周辺地域の余剰分が融通されるネットワーク構造が構築されるのみで、



図-1.15 地域間融通フロー量と需要充足率
（住宅系太陽光・陸上風力・中小水力・地熱）

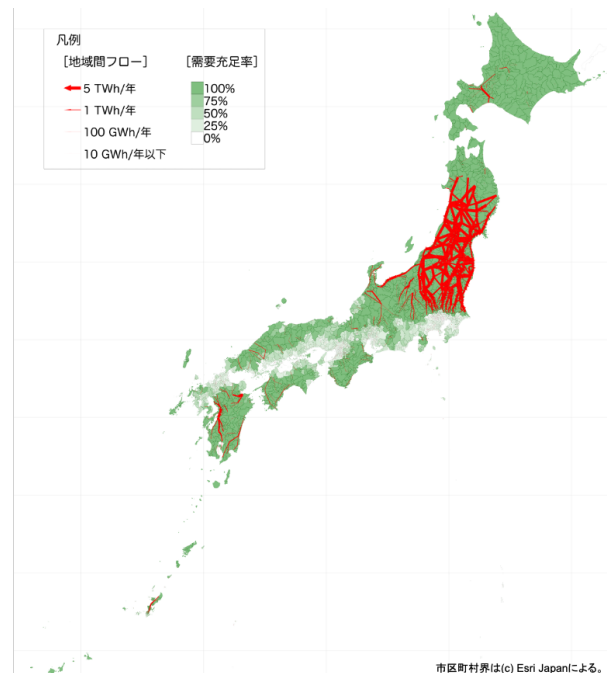


図-1.16 地域間融通フロー量と需要充足率
（北海道-青森県間を上限900 MWに制約）

道外への融通はほとんど行われたい。関東地方に向けては、北東北（岩手県・秋田県）を出発点に、東北地方や新潟県、群馬県や栃木県などの北関東を経由して融通が行われるが、北海道からのフローが大幅に抑制されるため東京都内や千葉県、静岡県、愛知県を中心に需要充足率が100%以下となる自治体が増加し、需要充足率が100%となる自治体数も1,077自治体に減少する。

つぎに、洋上風力も地域エネルギー資源として地産地消や地域間融通が可能とした場合の地域間融通ネットワークの分析結果を図-1.17に示す。分析では、洋上風力発電のポテンシャルは該当海域の再近傍かつ海に面する市区町村に属すると仮定してポテンシャル量を配分してネットワーク設計を行った。

洋上風力発電を考慮しない場合のネットワーク構造（図-1.15、図-1.16）と比較すると、関東地方への融通については、北海道や東北地方からのフローは大幅に減少し、茨城県や千葉県などの関東地方の沿岸部、新潟県や北陸地方の沿岸部からの流れが中心となることがわかる。また西日本については、洋上風力を考慮することで、沿岸部の自治体での再生可能エネルギーポテンシャル量が増加し、地産地消を



図-1.17 地域間融通フロー量と需要充足率
(住宅系太陽光・陸上/洋上風力・中小水力・地熱)

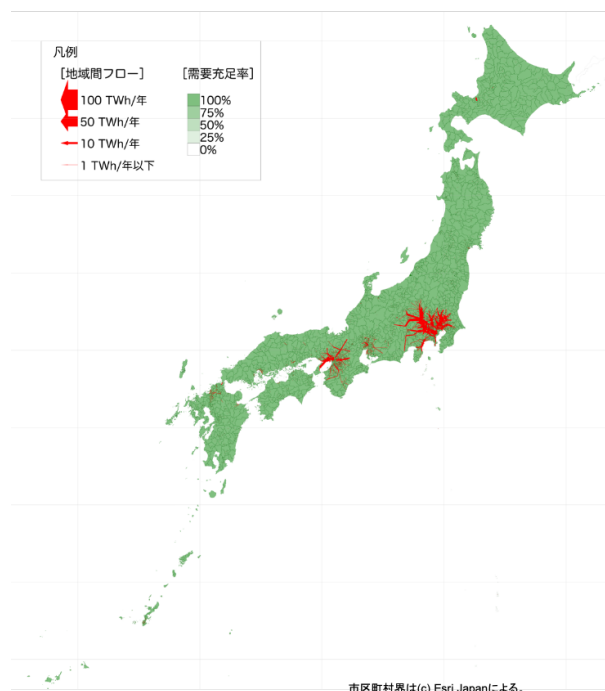


図-1.18 地域間融通フロー量と需要充足率
(左記5種+公共系太陽光)

表-1.2 地域間でのエネルギー資源融通による資金循環量

(10億円)	ケース1 (10.87円/kWh)				ケース2 (16.47円/kWh)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
北海道	3,612	1	0	0	5,473	1	0	0
東北	1,501	950	92	0	2,274	1,440	139	0
関東	-3,584	-847	-1,506	-547	-5,430	-1,283	-2,281	-828
甲信越	-59	-20	619	365	-89	-31	938	553
北陸	-123	-84	1,222	0	-186	-127	1,851	0
東海	-894	32	203	282	-1,354	48	308	428
関西	8	10	-566	-80	12	15	-857	-121
中国	0	0	43	45	0	0	65	68
四国	0	0	21	0	0	0	32	0
九州・沖縄	2	2	-44	-45	3	3	-67	-68

※A：住宅系太陽光発電・陸上風力発電・中小水力発電・地熱発電を対象とした融通フロー（図-1.15）、B：Aに北海道-東北間の連系容量上限を追加（図-1.16）、C：Aに洋上風力発電を追加（図-1.17）、D：Cに公共系太陽光を追加（図-1.18）

考慮しても需要量を超える発電量が確保できることから、余剰分が内陸の大都市に融通されることになり、名古屋市や京都市・大阪市に向けた融通ネットワークや、九州北部から内陸に向けたフローが新たに構築されることがわかる。これにより島嶼部を除くほとんどの地域が需要充足率が100%に達する。

最後に、住宅系太陽光発電、陸上・洋上風力発電、中小水力発電、地熱発電に加えて、公共系建築物や未利用農地、耕作放棄地等の農地を含む公共系太陽光も地域での地産地消や地域間の融通ができると想定して設計した地域間融通ネットワークの分析結果を図-1.18に示す。図-1.15～図-1.17と比較すると、北海道や東北も含めて地方をまたぐ融通フロー量は大きく減少し、東京都や名古屋市、京都市・大阪市、福岡市・北九州市などのそれぞれの地域の中核的な都市に、周辺地域から余剰ポテンシャル量が融通される構造となり、地方をまたぐ融通は大きく抑制されることがわかる。なお、本研究課題では、サブテーマ2にて本分析を発展させて毎時単位での需給バランスも考慮した地域間融通のネットワーク構造の分析を行っているが（図-2.20）、本分析結果はこれと類似した結果となっている。

表-1.2に、地方自治体ごとの再生可能エネルギー融通量をもとに求めた地域間の資金循環量の結果を示す。正の値は他地域から再生可能エネルギーの融通によりエネルギー代として受け取る金額を示し、負の値は他地域へ支払う金額を示す。また、表中のA～Dは、それぞれ図-1.15～図-1.18に相当する結果を示す。評価では、再生可能エネルギー電力の価格として、日本卸電力取引所の2019年度～2021年度のシステムプライス平均値（10.87円/kWh）とエネルギー白書における電灯・電力平均での電気料金の2019年度～2020年度平均値（16.47円/kWh）の2種を想定した。

結果より、地域間融通を想定する地域エネルギー資源の種類によらず、関東地方は他地域への支払いが超過することがわかる。金額は想定により異なるものの、北海道からの融通を想定する場合には3.5兆円～5.5兆円、本州内からのエネルギー融通が中心となる場合には、1～2兆円が他地域へと支払われる。いっぽう、北海道地方は、再生可能エネルギーポテンシャルが豊富であることもあり、北海道・東北間に容量制約がない場合には4～5兆円前後を受け取ることができ、さらに地域間融通を目的とした再生可能エネルギー設備の追加的な導入により、再生可能エネルギー電力の価格に応じて10万～16万人の雇用増が誘発されることが示唆された。しかし、送電容量に制約があったり、関東地方近傍の洋上風力発電や公共系太陽光を活用する場合には、北海道からの融通量が大幅に抑制され、地域経済や雇用への効果も極めて少ない水準にとどまる。その他の地方は、地域間融通を行う地域エネルギー資源種の想定によって、エネルギー代を払い出すか受け取るかが変わりうる。

4-2-2. 地域間での資源循環を考慮した脱炭素型エネルギーシステム分析モデルによる分析

本サブテーマでは、前節で検討した地域間の地域エネルギー融通ネットワークの分析結果（図-1.15）をもとに一群の地域を設定し、毎時単位での需給バランスも考慮して地域間融通も考慮した脱炭素型エネルギーシステムの実現可能性を検討した。

対象地域は、相互に隣接し、またネットワーク構成が地域完結する九州中部の福岡県うきは市・朝倉市・東峰村・添田町、熊本県南小国町・小国町、大分県日田市とした。対象地域の年間の電力需要と住宅系等太陽光、陸上風力、中小水力（河川）、地熱発電の導入ポテンシャル量と前節で検討したネットワーク構造及び融通フロー量を図-1.19にまとめる。福岡県うきは市・朝倉市・東峰村・添田町は、再生可能エネルギー導入ポテンシャル量が電力需要量を下回り、熊本県南小国町・小国町と大分県日田市は地産地消による需要充足率が100%を超えている。そのため、年間値を元にした融通ネットワークを検討した結果においても、大分県日田市をハブとして熊本県南小国町・小国町の余剰ポテンシャルを福岡県の4自治体に融通する構造となっている。

本研究では、地域間の融通を想定するケース（融通ケース）と、比較としてそれぞれの自治体での地産地消のみを想定するケース（個別ケース）の2ケースについて、対象地域のCO₂排出量を可能な限り削減する制約条件下で費用最小化とした最適化計算を行って解を得た。図-1.20に、地域内の再生可能エネルギー導入ポテンシャル量のうち利用されている量（再生可能エネルギー利用量）に関する結果をまとめる。福岡県の4自治体は、電力需要量よりも導入ポテンシャル量が低いため、いずれのケースでも地域内のポテンシャル量は最大限活用されるため、利用量に差は生じない。いっぽう、熊本県南小国町・小

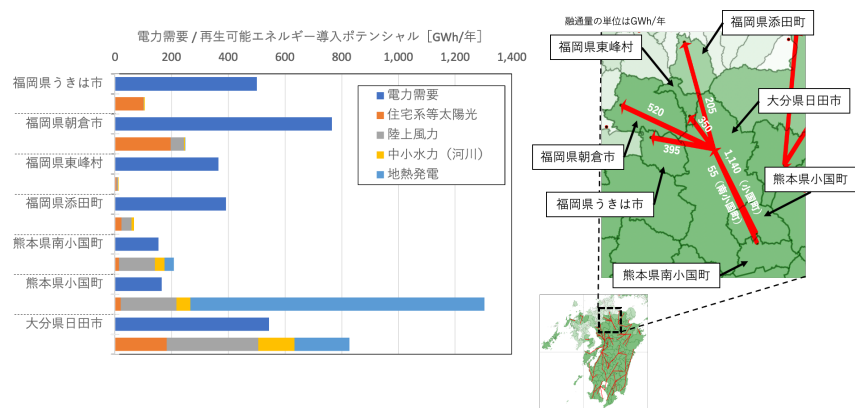


図-1.19 対象地域の電力需給及びエネルギー融通フローの概要

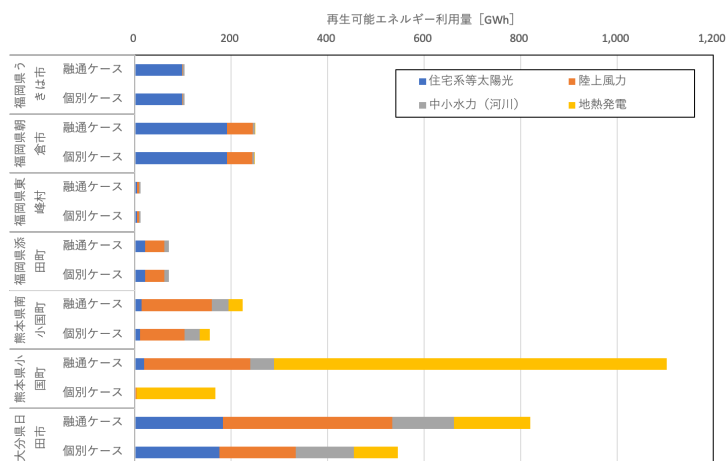
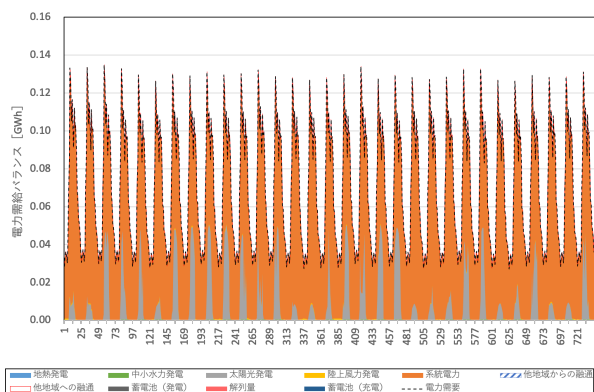


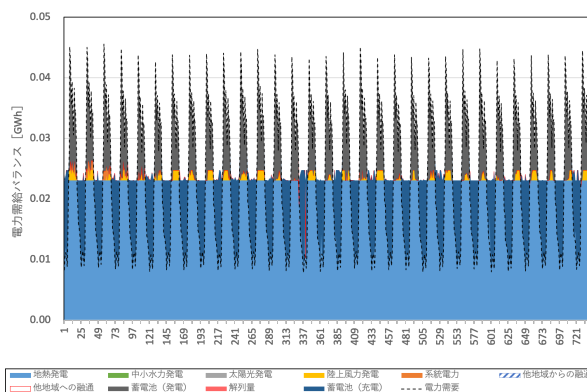
図-1.20 地方自治体別再生可能エネルギー利用量のケース間比較

国町と大分県日田市は、地域間融通を想定したケース（融通ケース）で利用量が増加する。熊本県小国町は、地域間融通を想定することで地熱発電の発電量が大きく増加し、熊本県南小国町と大分県日田市とともに陸上風力発電の利用が促進される結果となった。

これについて、毎時単位での需給バランスの観点から分析した結果から、福岡県うきは市と熊本県小国町の1月を例に、個別ケースを図-1.21に、融通ケースを図-1.22に示す。個別ケースでは、福岡県うきは市では日中の太陽光発電利用はあるが、大部分は系統電力に依存していることがわかる。この傾向は、福岡県朝倉市・東峰村・添田町でも同様である。熊本県小国町は、地熱発電が一定出力となっていることを活用して、夜間に充電して日中に放電することで一日を通じた需給バランスを確保している。熊本



(a) 福岡県うきは市



(b) 熊本県小国町

図-1.21 毎時電力需給バランスの解析結果（固定ケース・1月1日～31日）

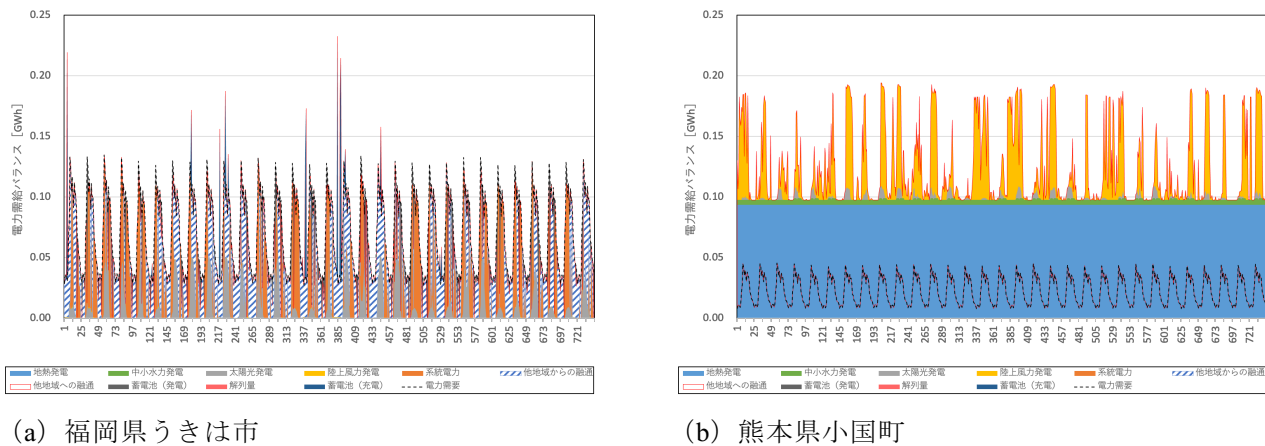


図-1.22 毎時電力需給バランスの解析結果（融通ケース・1月1日～31日）

県南小国町や大分県日田市では、太陽光発電と陸上発電について、出力が豊富な時間帯に蓄電して夜間や微風時に放電するような運用となる。融通ケースの結果を見ると、福岡県うきは市では、個別ケースで系統電力に依存していた時間帯の一部が他自治体からの融通電力に代替される。いっぽう、熊本県南小国町・小国町と大分県日田市では、余剰の再生可能エネルギー出力は他地域へ融通される。特に熊本県小国町では、自治体内の電力需要を大きく上回る量を発電できる設備導入が行われることがわかる。また、他自治体への融通が可能となることで蓄電池利用は大幅に抑制され、定格出力では熊本県小国町は個別ケースの27 MWに対して融通ケースではゼロとなる。他方、他地域からの融通を受ける福岡県の4自治体では、融通ケースでの蓄電池の定格出力は個別ケースの数倍に増加する。

融通ケースでは、個別ケースと比較して対象地域全体での再生可能エネルギー利用量は増加し、熊本県南小国町・小国町と大分県日田市の需要充足率は100%となるが、その他自治体では75%～85%にとどまる。前節に示した結果では、福岡県添田町の需要充足率が70%、その他自治体は100%であったことと比較すると、一部の自治体についての需要充足率は低い水準にとどまる。これは、蓄電池利用に際しての充放電ロスのほか、充電を考慮してもなお供給力が余剰となる時間帯が生じることで、その回避のために再生可能エネルギー導入の抑制が行われてしまうためと考えられる。融通ケースでの再生可能エネルギー利用量を導入ポテンシャル量と比較すると、太陽光発電や陸上風力、中小水力発電は全自治体で上限まで導入されているが、地熱発電は導入ポテンシャル量の80%程度の利用量にとどまっており、これが需要充足率の低下につながっているものと考えられる。

4-3. 地方自治体等との討議を含めた成果の普及に関する取り組み

本研究では、サブテーマ2と連携して、川崎市での脱炭素かわさき市民会議に関わり、市民による討議を通じた地方自治体の脱炭素政策作りに関する取り組みを進めてきた。本市民会議は、2021年3月に川崎

移動	27項目	項目数	主要な提言の内容
1	公共交通機関が便利で自家用車に依存せずに生活できるまち	10	・公共交通整備の水準を上げる（インフラ、モビリティマネジメント等） ・拠点連携型の都市計画（コンパクト、公共交通・徒歩・自転車と連携） ・乗り合いタクシー等の地域シェアリング交通の整備 ・ゼロカーボン配達の促進
2	徒歩・自転車で暮らせるまち	7	・自転車の通行環境の整備（2050年までに300kmの自転車通行環境、駐輪場の整備（駐車場を駐輪場にするなど） ・歩行者の通行の整備（バリアフリーの歩行者ネットワーク、トランジットモールの整備） ・シェアサイクルの整備 ・自転車利用にインセンティブ（企業の奨励、電動自転車の普及等）
3	電気自動車普及したまち	8	・電気自動車普及へのインセンティブ（税制、計画的普及政策、カーシェアリングにおける電気自動車の導入） ・市や公共交通における電動車両化の率先 ・EV充電器の普及（集合住宅での普及策、駐車場に充電装置の設置等）
4	横断的な取組	2	・拠点駅（川崎駅東側、武蔵小杉、溝の口、新百合ヶ丘）において、モデルプロジェクトを立上げ、その成果を検証し、全市に拡げる

図-1.23 「移動」に関する脱炭素かわさき市民会議からの提案の概要³⁾

市民から性別や年齢構成、居住地も考慮しつつくじ引き（無作為抽出）により選ばれた75名の市民により、2021年5月22日に第1回を開催し、2021年10月23日まで合計6回（うち5回はリモート開催）の会議を開催した。会議では、「移動」「住」「消費」の分野に対して複数の提言案を作成し、参加市民からそれぞれの提言に対する賛同の度合いを表す投票を経て、合計77項目の提言としてとりまとめた。一例として、サブテーマ2（松橋）が専門家として関わった移動に関する提言の概要を図-1.23に示す。その後、2021年11月11日に提言を公表するとともに川崎市へ提出することで地球温暖化対策計画への反映について努めている。また、脱炭素かわさき市民会議振返り会合を実施して、参加市民とともに意見交換や議論を行い、提言の具体化に向けた取り組みを継続的に進めている。

本研究では、他の自治体での脱炭素政策作りにおける気候市民会議の活用を目指し、主催者の協力を得て、主催者を通じて参加市民にアンケート調査を行うとともに、主催者、専門家、ファシリテータにも振り返り調査を行い、参加者の観点からの脱炭素かわさき市民会議の特徴や課題の整理とともに、それらを踏まえた気候市民会議を実施するに際してのプロセス等の検討を行った。

参加市民へのアンケートからは、開催回数や日時は概ね妥当であり、会議参加により脱炭素社会作りを考える機会とできたなどの評価が得られているが、リモート開催であったことによるシステム操作も含めた会議・議論の運営方法、議論の前提となる知識の整理・提供方法などの課題も指摘された。主催者や専門家への調査では、市民提案作成段階での政策立案に関する専門家関与の必要性や市民提言に対

表-1.3 気候市民会議実施のためのプロセス（概要）

1. 実施体制の整備	● 実施主体は、自治体や自治体を含む実行委員会形式が望ましい。 ● どのような実施主体であっても、自治体、地域の地球温暖化防止活動推進センター、地域の大学等の研究機関（専門家）、NPO等との協働体制を構築することが重要。 ● 専門家には、エネルギーや気候変動などの脱炭素社会に直接関係する研究分野だけではなく、政策、地域研究、市民参加等の分野から参画することが望ましい。 ● 事務局（会議運営）には、全体統括のほか、ファシリテータ、記録、アンケート設計・分析の役割が求められる。
2. 実施に当たっての経費について	総額は実施主体や規模により変化するが、実施においては以下の費目の支出が見込まれる。 ● 事務局経費（実施期間中恒常的に設置することで生じる人件費） ● 参加市民への謝礼 ● 専門家・ファシリテーター・その他スタッフに対する謝金 ● 無作為抽出作業実施経費 ● 通信費、郵送費、印刷費、その他 ● 会場費又はオンライン会議システム経費
3. 市民提案（会議出力）の位置づけの明確化	● 市民提案をどのように活かすか（誰に提出するのか）を予め明確することが重要。 ● 地方自治体の基本計画や行動計画に反映することを目指す場合には、これら計画策定・改訂のスケジュールも踏まえた会議実施スケジュールとすることが不可欠。 ● 議論の設計においては、この出力も見つつ、地域社会が主導権・責任を持って推進すべき分野や、市民の行動・選択と密接不可分な分野をカバーする構成とすることになる。
4. 会議実施プロセス	● 参加市民の募集・選出（2ヶ月程度） ● 会合実施（4～6回程度、半年程度） ● 市民提案の最終整理（1ヶ月程度） ● 市民提案の報告・出力
5. 会議の運営について	● 参加市民が主体的に議論に参加できるようにするために、知識の共有やファシリテータの活用による参加者同士が話しやすい場作り、オンラインツールも活用した議論の見える化が重要となる。また、オンラインを前提とする場合には、システム利用支援や一部参加者は集合して参加などの対応策を予め用意しておく。 ● 参加市民の議論を提案にまとめる段階では、検討プロセスの透明化と専門家による伴走型支援、意思表示としての投票も含む参加市民の納得感を高める工夫が必要。

する専門家の関与の程度、オンラインであることによる運営の利点・欠点、川崎市の政策や脱炭素社会に関する情報提供方法、現状の課題から将来に向けた提言へ向けるための議論の方法、さまざまな意見のとりまとめ方法、ファシリテーションに関する課題・意見等が整理された。これら気候市民会議実施に関する経験や参加者からの意見等を踏まえて、他地域で気候市民会議を実施するに際してのプロセスを整理した。本研究で整理したプロセスの概要を表-1.3に示す。

5. 研究目標の達成状況

本サブテーマでは、2. 研究目標に示したとおり、(1) 地域資源と地域間連携を活用した地域循環共生圏の姿とその創造の道筋と実現による人口や地域経済への影響の評価手法の開発と具体地域への適用、(2) モデル分析の成果に基づく地方自治体等との討議を通じた実際の計画立案までのプロセスの検討、の2つの目標を設定している。これらについて、以下の通り目標とした成果を達成することができた。特に、地域内・地域間の地域資源の循環とその効果の検討においては、特定の自治体だけではなく、全ての地方自治体を対象とした分析を行い、わが国全体が脱炭素社会に向かう中で、それぞれの地方自治体において地域特性も踏まえた効果的な対策の検討や、現在から2050年に向けた対策実施の道筋検討を実施してきた。加えて、再生可能エネルギーに対する気候変動影響を考慮した計画作りに向けた知見の蓄積も進めてきたところである。

目標 1) 地域資源と地域間連携を活用した地域循環共生圏の姿とその創造の道筋と実現による人口や地域経済への影響の評価手法の開発と具体地域への適用

- 脱炭素社会作りにおいて特に重要となるエネルギー消費に関して市区町村別エネルギー需給データを整備し、市区町村別の特徴分析を行った (3-1-1 節/4-1-1 節)
- 地域内での地域資源利用を想定して、地方自治体単位での脱炭素対策効果評価のための手法を開発し、全地方自治体 (1,741 自治体) を対象に、2050 年の姿と、そこに至る道筋の検討を行った (3-1-2 節/4-1-2 節)
- 地域間での地域エネルギー資源融通のためのネットワーク・システム分析手法を開発し、再生可能エネルギー融通に関する複数の想定を設けての地域間フローを分析し、地域間融通を実現することによる社会・経済的な効果の分析を行った (3-2 節/4-2 節)

目標 2) モデル分析の成果に基づく地方自治体等との討議を通じた実際の計画立案までのプロセスの検討

- 長崎県五島市等で自治体担当者との議論を行ったほか、自治体の脱炭素計画立案へ関わるなど、本研究成果に基づく政策や計画立案への貢献を行った (3-3 節)
- 川崎市での脱炭素かわさき市民会議に専門家として関わったほか、その経験を踏まえて他の自治体での脱炭素政策作りにおける気候市民会議の活用に向けたプロセスの検討を行った (3-3 節/4-3 節)

6. 引用文献

- 1) J. FUJINO, G. HIBINO, T. EHARA, Y. MATSUOKA, T. MASUI and M. KAINUMA. (2011) Back-casting analysis for 70% emission reduction in Japan by 2050. Climate Policy, 8(sup1), pp.S108-S124.
- 2) 国立環境研究所AIMプロジェクトチーム. (2021) 2050年脱炭素社会実現に向けたシナリオに関する一分析. https://www-iam.nies.go.jp/aim/projects_activities/prov/2021_2050Japan/20210630_NIES.pdf
- 3) 脱炭素かわさき市民会議. (2021) 脱炭素かわさき市民会議からの提案：2050年脱炭素かわさきの実現に向けて. <https://cdn.goope.jp/61503/211203132814-61a99cdeb802b.pdf>

Ⅱ－２ 国土利用の変遷を考慮した地域資源と地域間連携の分析手法開発

国立研究開発法人国立環境研究所
社会システム領域地域計画研究室

東北大学大学院工学研究科

松橋 啓介
有賀 敏典
中田 俊彦
Delage Remi

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所
社会システム領域地域計画研究室
東北大学大学院工学研究科

石河正寛、金晃敏、崔文竹
末松天地（令和2年度）
小野寺弘晃（令和4年度）

〔要旨〕

本サブテーマでは、日本全国の国土利用の変遷を評価する手法および地域エネルギー資源の量と分布を評価する手法を開発し、具体地域を対象に現在から将来までの人口・地域資源等の空間分布の推移を明らかにするとともに、地域エネルギー資源を地域内・地域間で循環利用するシステムを検討した。

日本全体の国土利用の変遷については、空間情報を活用して国土利用の変遷を評価する手法を開発し、都道府県を対象に、これまでの人口推移の年齢・時代・コーホート効果を分析するとともに、その特徴を踏まえて、人口減少に応じて市街地面積が維持される場合と縮小される場合の将来の人口の空間分布の推移を明らかにした。これまでの都道府県別人口推移の要因分析では、群馬、東京、岐阜、静岡、京都、和歌山の6都府県で年齢効果がコーホート効果を上回り特定年齢層が多い/少ない特徴があること、地方圏は共通して旧世代型の特徴を持ち人口減少と高齢化の課題に直面しているものの年少型と老年型の異なる年齢別の特徴に分類されること、埼玉、千葉、神奈川、愛知、京都、大阪の6府県は就業型、増加型、凹型、新世代型の類型の一つ以上あてはまること、三重は大都市圏内だが長野に類似していること、滋賀は大都市圏隣接県だが大都市圏内に類似していること等を明らかにした。将来の人口分布の推移については、メッシュ人口推移の要因分析を踏まえ、用途地域内外の市街地集中と郊外分散のシナリオを、その面積固定と可変の場合について4パターンの人口分布の推移データを全国について整備した。

地域資源に関する分析については、エネルギー資源を対象に、量と分布を評価する手法を開発して現在から将来までの推移を明らかにした。さらに、それらの結果やサブテーマ3のストック型地域資源に関する研究成果も合わせて、地域エネルギー資源を地域内で循環利用するシステムの設計手法と異なる質や量の地域資源を有する地域間の連携を資源の輸送も考慮して検討・提案する手法を開発し、具体地域で検討・提案した。さらに、エネルギー資源も含めた地域特性に応じた地域間連携の姿を都市、農山漁村などの地域のタイプ別に検討し、パターンとして整理し、再エネ融通の元・先・経由の3パターンと資源構成によって特徴づけられた17クラスターの特性を明らかにした。

1. 研究開発目的

市区町村等のスケールで脱炭素社会をはじめとした持続可能な地域への移行を促進していくには、地域の有するエネルギー等の資源（地域資源）を明らかにして、エネルギー需要も踏まえながら地域内や地域間で循環利用するためのシステム作りが不可欠となっている。他方、人口減少等が進む中では、システム作りの段階で特に人口分布などの将来の国土利用の姿の変遷も踏まえていくことが肝要である。そこで本サブテーマでは、人口減少等も考慮した将来の国土利用の変遷を明らかにし、それを踏まえながら、持続可能な地域循環共生圏および脱炭素型地域社会の戦略的構築の基盤となる地域資源情報を整備し、地域エネルギー資源の融通を軸とする地域間連携のあり方を検討することを目的とする。

2. 研究目標

日本全国の国土利用の変遷を評価する手法および地域エネルギー資源の量と分布を評価する手法を開発する。課題共通で設定した対象内の具体地域を対象に現在から将来までの人口・地域資源等の空間分布の推移を明らかにする。また、地域エネルギー資源を地域内で循環利用するシステムの設計手法を開発する。さらに、サブテーマ3のストック型地域資源の成果と合わせ、異なる質や量の地域資源を有する地域間の連携を資源の輸送も考慮して検討・提案する手法を開発し、具体地域で検討・提案する。

3. 研究開発内容

本サブテーマでは、図-2.1に示すように、空間情報を活用した国土利用変遷評価手法と地域エネルギー資源評価手法を開発する。これら成果に他のサブテーマの成果も加え、将来の国土利用の基本パターンや地域の資源量情報を整備する。さらに、この両者の知見を組み合わせることで、地域内・地域間の地域資源循環利用方策の評価と提案を行った。

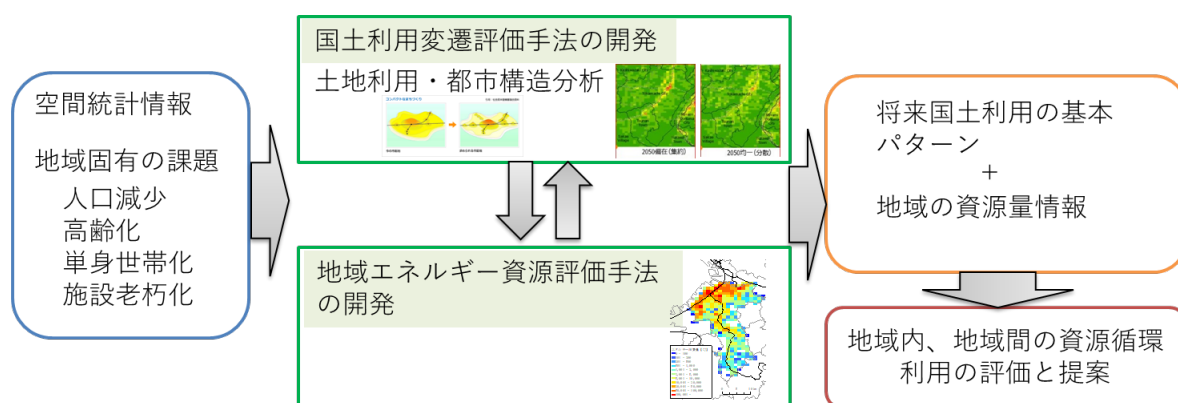


図-2.1 本サブテーマの取り組みの全体像

3-1. 国土利用変遷評価手法の開発

3-1-1. 都道府県別の人口推移の年齢・時代・コーホート効果の分析

人口減少に応じた将来の人口の空間分布の推移を検討するに先立ち、本研究では、過去の国土変化の特徴検討として都道府県別に人口推移の年齢・時代・コーホート効果を分析し、それぞれの特徴を明らかにすることとした。分析では、都道府県別の5歳階級別人口の推移の要因を年齢・時代・コーホート効果に分類するベイズ型APC分析(Age-Period-Cohort Analysis)を用いた。小地域でのコーホート分析には、コーホートの2時点間の変化率等を若いコーホートに適用するコーホート変化率法や自然増減・社会増減を求める方法がよく用いられているが、APC分析は、一定期間の年齢階級別の時系列変動要因を加齢による「年齢効果」、時勢により変化する「時代効果」、同一世代により変化する「コーホート効果」の3つに分離する手法である(図-2.2)。これまでのAPC分析には「時代」=「年齢」+「コーホート」となる課題があったが、本研究では各効果の推定値の総和を0とするゼロ和制約を付加することで効果の識別を可能としたKnorr-HeldとRainerの階層ベイズ型コーホートモデルを用いた。

年次	2000	2005	2010	2015	2020
年齢	時代効果(P)				
0-4	18	19	20	21	22
5-9	17	18	19	20	21
10-14	16	17	18	19	20
15-19	15	16	17	18	19
20-24	14	15	16	17	18
25-29	13	14	15	16	17
...	...	...	...	...	...
60-64	6	7	8	9	10
65-69	5	6	7	8	9
70-74	4	5	6	7	8
75-79	3	4	5	6	7
80-84	2	3	4	5	6
85-	1	2	3	4	5

← APC分析 → コーホート変化率法 * 表中の数字はコーホート番号を表す

図-2.2 APC分析とコーホート変化率法の比較

開発した手法を用いて、1980年から2015年までの8時点を対象に、国勢調査の都道府県別5歳階級別人

口を用いて人口変動要因の年齢・時代・コーホートの分離と特徴の類型化を行った。また、各メッシュの人口変動要因を明らかにするために、つくば市と柏市を例に2000年から2015年までの国勢調査地域メッシュ統計へベイズ型APC分析を適用し、コーホート効果、時代効果、年齢効果の分布を把握し、特に年齢効果は詳細な分析を加えた。

3-1-2. 市街地面積の変化に着目した将来の人口分布の推移の分析

将来の国土利用の変遷の評価は、市街地面積に着目して行うこととした。市街地としては、人口集中地区（DID）、用途地域、市街化区域が考えられる。人口集中地区（DID）は、人口密度4千人/km²以上の地区が隣接して5千人以上のまとまりを形成する地区を指す。用途地域は、建てることのできる建物の種類や容積率等を定めたもので、人口集中地区や、都市計画法で定めるすでに市街化している区域および10年以内に市街化を図るべき区域を指す市街化区域よりも、広範な市町村に設定されている。一例として、沖縄県を除く九州地域での用途地域の分布を図-2.3に示す。

これら3種類の市街地の定義に対して将来の市街地面積を変更した人口分布パターンを試行的に検討した結果、もっとも計算エラーが起これにくかったことから、本研究では市街地として用途地域を対象とすることとした。

本研究では、都道府県内の人口が減少することを所与として、市街地の平均人口密度を現在と同水準に維持するパターンを2種、郊外の平均人口密度を現在と同水準に維持するパターンを2種の合計4パターン設定して、全国を対象に将来の人口分布の推移を検討した（図-2.4）。市街地の平均人口密度を維持するパターンについては、郊外から市街地に人口を移動させることで維持する市街地集中面積固定シナリオと、市街地人口は都道府県内の人口減少に合わせて減少するが、用途地域の面積を縮小させることで平均人口密度を維持する市街地集中面積可変シナリオの2つを置いた。同様に、郊外の平均人口密度を維持するパターンについては、人口を市街地から郊外に移転させることで平均人口密度を維持する郊外分散面積固定シナリオと、市街地面積を縮小してその分の人口を郊外に組み入れることで維持する郊外分散面積可変シナリオの2つを置いた。これら4つのシナリオに対して、将来の市街地面積とメッシュ別の人口分布を求めた。

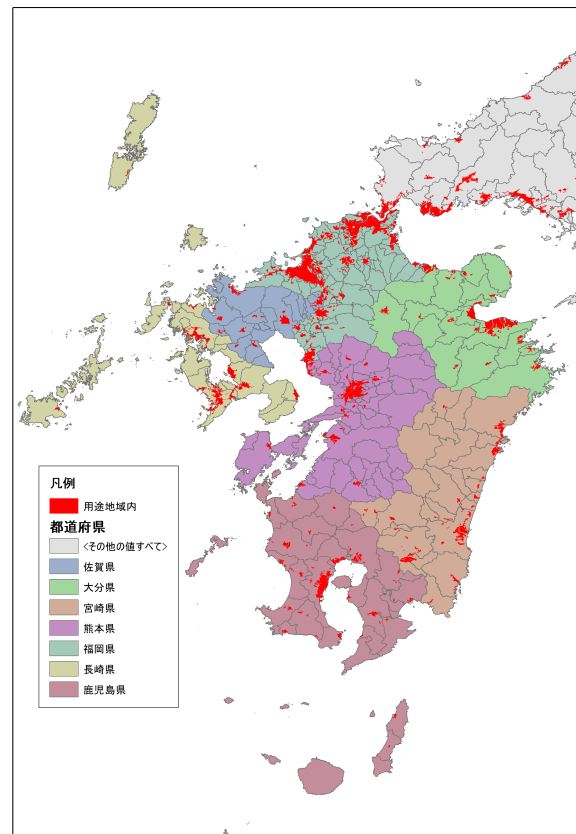


図-2.3 沖縄県を除く九州地方における用途地域の分布

3-2. 地域エネルギー資源の資源量評価手法の開発

3-2-1. 再生可能エネルギー資源量の推計と評価

本研究では、再生可能エネルギー資源のうち、太陽光発電、風力発電、木質バイオマス、廃棄物発電を対象として資源量の推計と評価を行った。

太陽光発電と風力発電については、気象衛星観測データを用いて、市区町村単位での毎時発電量を推計し、その結果をもとに設備利用率等の評価を行った。気象衛星観測データは、欧州中期予報センター（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts、ECMWF）が提供する気象観測・再解析データセット ECMWF Reanalysis v5（ERA5）¹⁾と特定非営利活動法人太陽放射コンソーシアムが提供する AMATERASSデータセット²⁾の2種を用いた。なお、ERA5の空間解像度は30kmメッシュ、時間解像度は1

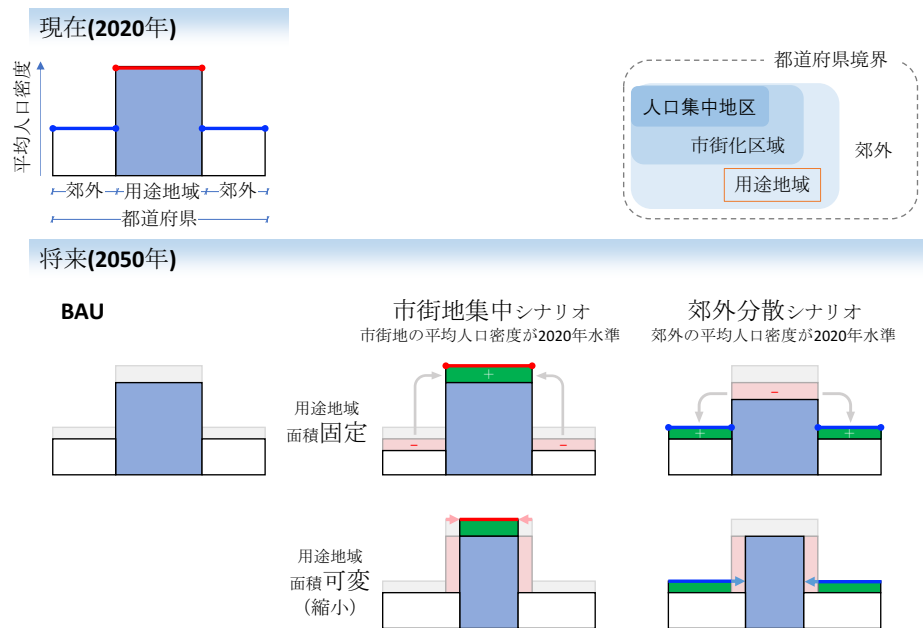


図-2.4 市街地面積固定又は可変を想定する場合の市街地集中及び郊外分散のシナリオの概念

表-2.1 本研究で想定した計算条件等

発電技術	技術想定	計算条件
太陽光発電	- インバータ等効率：90% - パネル傾斜角：南向き10度	パネル効率は、周辺気温・日射強度・風速によるパネル温度への影響を考慮し算出
陸上風力	- 発電密度：4.3 MW/km² - ローター直径：120m, 単機出力:4MW - ストーム制御あり	- 高度補正（10m→100m） - 開発不可条件はREPOSに準拠
洋上風力	- 発電密度：3.9 MW/km² - ローター直径：200m 単機出力:10MW - ストーム制御あり	- 高度補正（10m→150m） - 開発不可条件はREPOSに準拠

時間、AMATERASSデータセットは空間解像度1kmメッシュ、時間解像度は30分である。

発電量の推計は、太陽光発電と風力発電（陸上・洋上）のいずれでも、環境省の再生可能エネルギー情報提供システム（REPOS）での推計式を参照しつつ、独自に表-2.1に示す計算条件を設定して求めた。推計では、メッシュ単位で毎時発電量を評価したうえで自治体単位で集計し、国内の全市区町村（1,741自治体）の太陽光・風力発電の時間別発電出力プロファイルを整備した。さらに、地域ごとの単位面積あたり発電量を算出することで、再生可能エネルギー発電の導入に伴う所要土地面積を評価することを可能とした。

木質バイオマスについては、各都道府県から提供された森林簿と森林計画図を用い、またサブテーマ3が開発した森林資源の評価手法とその成果（手法及び結果はそれぞれ62ページと68ページに示す）も踏まえながら、市区町村別木質バイオマス資源賦存量および導入ポテンシャルを推計した。本研究では、対象を民有林（人工林・天然林）とし、森林簿の森林成長量を持続的に供給可能な資源賦存量と仮定して推計し、自治体ごとに集計することで市区町村別の賦存量を求めた。さらに、導入ポテンシャルは、資源賦存量から保安林の資源賦存量を差し引くことで求め、あわせて事業性を考慮した導入ポテンシャルの推計も行った。本研究では、事業性は支出と収益の差額が森林所有者への返却金（山本立木価格）を上回るか否かで評価することとして、支出として伐採に係る労務費等に加え、林業機械システム費、炉網整備費、再造林費を考慮し、収益は地域別の木材販売額として林小班単位で事業性を評価した。

廃棄物は、地域のエネルギー資源であるとともにCO₂排出源（回収源）でもあるが、そのポテンシャル量は、環境省のREPOSを含めて十分整備されていない。本研究課題では、サブテーマ1で廃棄物の熱利用に向けた評価を行っているが（手法及び結果はそれぞれ21ページと25ページを参照）、本サブテーマで

は発電での利用を想定したポテンシャル推計を行った。

廃棄物資源は人口動態や資源循環によりその総量変動するため、他の地域エネルギー資源とは異なり、将来の人口等の変化も考慮したポテンシャル推計が求められる。本研究では、環境省の一般廃棄物処理実態調査の一般廃棄物（可燃ごみ）処理量をもとに、将来の人口増減予測や廃棄物組成（プラスチック系、非プラスチック系）を考慮して、将来の廃棄物発電ポテンシャルを評価した。なお、可燃・不燃の区別のない地域の可燃ごみ搬入量は、混合ごみ搬入量に可燃ごみ比率の全国平均値を乗じて推計することとした。

3-2-2. 地域エネルギー需給データに基づく地域特性の評価

本サブテーマでは、再生可能エネルギー資源量の推計結果に基づき、地域エネルギー収支の評価と市区町村の類型化を行った。

地域エネルギー収支は、再生可能エネルギー導入ポテンシャルからエネルギー需要を差し引くことで求める。各地域がどれだけ他地域にエネルギー資源を融通できるかを示す指標であり、地域単位でのエネルギーの自給の可能性を示すとともに、エネルギー資源の地域間融通の検討に向けた基礎情報としても利用することができる。本研究では、本サブテーマの研究参画者及び研究協力者らの既存研究³⁾を踏まえ、本研究で推計する木質バイオマス資源量と廃棄物資源量に加え、精緻化された再生可能エネルギー導入ポテンシャル⁴⁾も考慮して全市区町村を対象に地域エネルギー収支を求めた。

本研究では、再生可能エネルギー導入ポテンシャルにエネルギー需要の情報も加味して市区町村の類型化を行った。これは、エネルギー需給の特性が類似する地域は気候変動対策や地域エネルギー計画においてとりうる施策が類似していることが推察されるところ、地域相互の類似性を明らかにしていくことで、ある地域・自治体で検討した政策を横展開する際に有用な情報となり得ると考えられるためである。本研究では、最終エネルギー消費量から対数化して求めるエネルギー需要規模、エネルギー需要の部門構成（17部門）、対数化した再生可能エネルギーポテンシャル（8種）の3つの指標に対して、標準偏差に基づく統計的分類手法と階層型クラスター分析手法（Ward法）を適用して類型化を行った。さらに、得られた類型を組み合わせた複合類型を作成して、各地域のエネルギー需給の特性等を評価した。

3-3. 地域エネルギー資源の地域内・地域間循環利用システムの設計と地域間連携の検討

地域エネルギー資源の地域内・地域間循環利用システムの検討については、物理的な輸送を必要とする木質バイオマス資源と、送配電網により広域的に融通できる太陽光発電等の再生可能エネルギー発電の別にシステム設計手法を開発し、具体的な地域間連携の検討を行った。

木質バイオマス資源の地域間融通については、サブテーマ3での地域内での循環利用に関する知見（手法及び成果はそれぞれ62ページと68ページを参照）も踏まえ、対象地域内の全市区町村間の輸送経路（市区町村完全グラフ）上の輸送量を変数としたモデルを構築し、輸送費用が最小となる最小費用流問題（輸送費用最小化問題）として求解することで、地域間融通構造を設計することとした。モデルでは、木質バイオマス資源の供給量は本サブテーマで求める事業性を考慮した導入ポテンシャルを上限とし、対象とするエネルギー需要は民生部門（家庭・業務）の温熱利用と想定している。本研究では、開発した手法を岩手県に適用し、具体の地域間循環利用システムの設計を行った。分析では、岩手県内の33市町村をノードとする完全グラフ構造の道路輸送ネットワークを構築し、輸送費用（輸送距離）が最小となる経路別木質バイオマス融通量と、熱需要の県内自給率（熱需要充足割合）を評価した。

各地域の再生可能エネルギー発電の広域的な融通と地域間連携については、サブテーマ1にて本サブテーマの推計結果も踏まえて年間単位での需給バランスに基づいた地域間の電力融通システムの検討が行われているが（手法及び結果はそれぞれ22ページと31ページを参照）、本サブテーマでは、視点を時間単位での需給バランスに拡張して、市区町村間の再生可能エネルギー資源の融通に関する分析を行った。分析にあたって、本研究では、サブテーマ1での特定地域群での分析（九州地方北部、手法及び結果はそれぞれ22ページと33ページを参照）も参照しながら、市区町村単位で毎時の再生可能エネルギー発電量と蓄電量、また隣接市区町村間での時間単位の再エネ融通量を評価できる高時空間解像度のエネル

ギーシステムモデルを開発した。モデルは、各地域における電力需給バランスの同時同量等の制約式で構成する線形計画モデルとして定式化されており、目的関数として設定したシステムコストを最小化する最適化計算により解を得る。システムコストは、エネルギー転換設備、エネルギー貯蔵設備、エネルギー輸送設備に係る固定費と、火力発電の燃料費の総和とした。また、制約式には、各地域・各時間におけるエネルギーの需要量と供給量の一致（同時同量）や、蓄電等設備の蓄電・充放電量、地域間の送受電量のバランス等が含まれる。分析で考慮する地域エネルギー資源は、陸上風力、太陽光発電（土地系）、太陽光発電（建物系）、地熱、中小水力、木質バイオマス、廃棄物、大規模水力である。解析期間は、年間の需要パターン（8,760時間）から季節ごとに代表的なパターンを抽出して構成した4週間分とし、各種コストは2030年時点を想定した予測値を用いた。なお、電力需要の時間別プロファイルには旧一般電気事業者の実績値をMin-Max法により正規化した値を用いた。

これら分析に加えて、得られた結果（設計したネットワーク）を地図上に可視化することで、地域間連携の構造分析を行った。具体的には、設計した全市区町村の電力需給構造（資源別発電量と需要量、充放電量、送受電量の期間内合計）を、階層型クラスター分析手法（Ward法）により類型化し、地域エネルギー資源の地域内および地域間利用パターンを抽出した。また、その類型を地図上に可視化することで、需給構造が類似する（施策の水平展開が期待される）地域の分布を明らかにし、施策上の地域間連携の可能性についても議論した。

3-4. 課題全体での成果の共有及びWebや気候市民会議での成果の公開・普及

本サブテーマで整備した都道府県ごとのシナリオ別人口分布パターンや地域エネルギー資源量の成果は、他のサブテーマに提供することで、課題全体での連携を推進してきた。

地域エネルギー資源量の評価結果については、Webを通じた公開を行った。本サブテーマを分担する東北大学大学院中田俊彦研究室では、市区町村単位のエネルギー需給データを公開するWebサイト「地域エネルギー需給データベース」（<https://energy-sustainability.jp/>）を開発・運用しているが、本研究より得られた木質バイオマス賦存量や廃棄物発電ポテンシャルなどを統合して公開することで、研究成果の普及を推進している。

また、サブテーマ1と連携して、神奈川県川崎市等の気候市民会議の取り組みに専門家として関わり、特に移動に関して、研究成果に基づく参加市民に対する情報提供や気候市民会議方式の国内他地域への展開に関する調査等を実施した（本研究課題における気候市民会議の取り組みについては、サブテーマ1の23ページと35ページを参照）。

4. 結果及び考察

4-1. 国土利用変遷評価手法の開発に関する結果及び考察

4-1-1. 都道府県別の人口推移の年齢・時代・コーホート効果の特徴

図-2.5は、ベイズ型APC分析を用いた都道府県別の人口推移の要因分析の結果より、九州地方を抜粋したものである。全都道府県の結果は、サブテーマ2の査読付き論文成果7)にて示している。

分析結果より、年齢効果、時代効果、コーホート効果のうち、41道府県でコーホート効果が最大であり、うち38道府県では次に年齢効果、最後に時代効果の順となることがわかった。また、6都府県（群馬、東京、岐阜、静岡、京都、和歌山）では、いずれも年齢効果が最大で、コーホート効果、時代効果の順となることがわかった。

これら効果について、特徴に基づく分類を実施した。年齢効果は、有意に正となる区間に着目して、年少型、老年型、就業型の3つに分類した。年少型は、0-14歳又は5-14歳の区間の年齢効果が有意に正で10-14歳をピークに低下する類型であり、高校・大学への入学を機に他県へ社会移動したままの人口が大きい、宮城を除く東北、新潟、鳥取、島根、福岡を除く九州など13県が該当する。老年型は、高齢層の年齢区間で有意に正となるもので、出身地等へのU・Jターンや帰農が高齢層で生じている山梨、長野、和歌山、高知、熊本、沖縄等11県が該当する。就業型は、20-24歳又は25-29歳の年齢区間でピークを持ち、大学等の高等教育や就職機会の多い大都市部の東京、神奈川、愛知、京都、大阪が該当する。

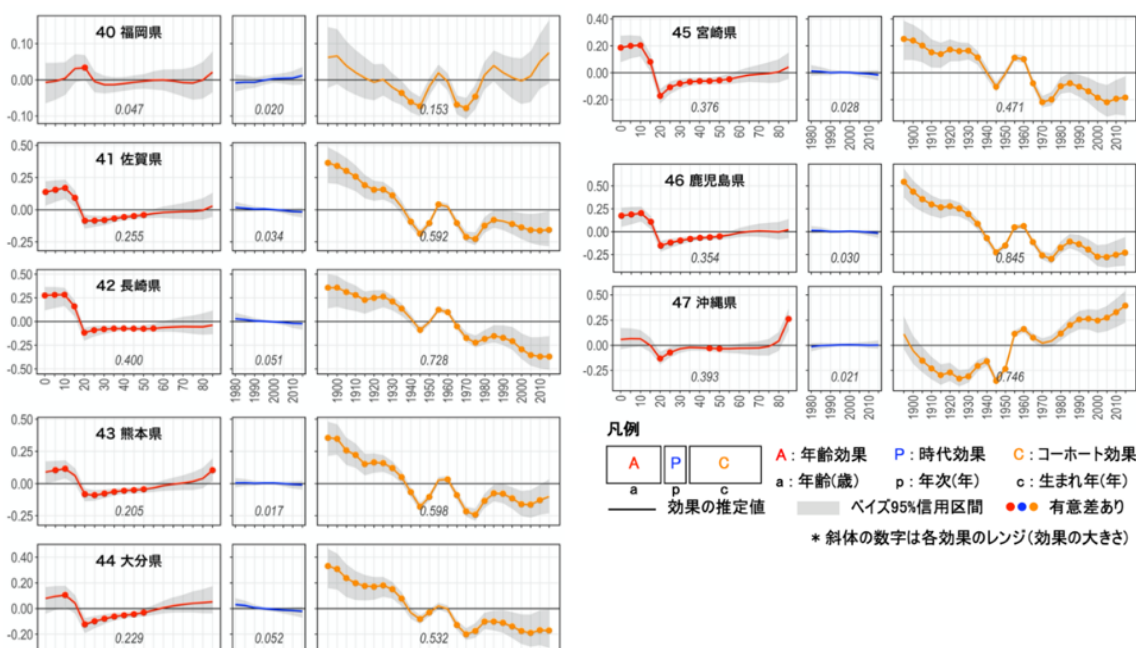


図-2.5 都道府県別APC分析結果（九州地方の抜粋）

時代効果は、増加型、減少型、凸型、凹型の4つに分類した。増加型は、右上がりを示す類型であり、大都市圏の都心隣接県で人口増となる埼玉、千葉、神奈川、滋賀が該当する。減少型は、右下がりを示す類型であり、就業を機とした労働人口の大都市圏への転出が継続的に進行する和歌山、山口が該当する。凸型は、一定期間のみ正となる類型であり、バブル期とその後の地価高騰によって大都市圏の外側での宅地開発等と人口増となる茨城、山梨、奈良が該当する。凹型は、一定期間のみ負となる類型であり、凸型と対称に地価高騰の影響や工場や大学の移転等による大規模な転出傾向が続く東京が該当する。

コーホート効果は、古い生まれ年の世代に有意にプラスのコーホート効果がみられ日本の平均と比較して高齢化が早期に進行したことを表す旧世代型と、新しい生まれ年の世代に有意に正の効果がみられる新世代型の2つとした。新世代型は宮城、埼玉、千葉、神奈川、愛知、滋賀、沖縄の7県が該当し、旧世代型はそれ以外の中から28県が該当する。

これらの結果より、地方圏は共通して人口減少と高齢化の課題に直面しているものの、年齢効果の観点から見ると、年少型と老年型という異なる特徴を有する地域に分類できることが分かった。このことから、同じ旧世代型の特徴を持つ地域であっても、相対的に多い年齢層向けのサービスを確保する点は共通しつつも、引きつけたい年齢層とその方策は異なることを示唆しているものと考えられる。一方、埼玉、千葉、神奈川、愛知、京都、大阪では、就業型、増加型、凹型、新世代型の類型の一つ以上あてはまること、三重は大都市圏内だが長野に類似していること、滋賀は大都市圏隣接県だが大都市圏内に類似していること等が分かった。

つぎに、APC分析に基づくメッシュ別の人口変動要因の分析結果について述べる。柏市とつくば市を対象に、メッシュごとの効果を分析したところ、図-2.6に示すようにいずれでもコーホート効果となったメッシュの割合が高く、全メッシュに対する割合では、柏市では68.4%、つくば市では44.7%であった。年齢効果は柏市が13.1%、つくば市が10.1%と類似しているが、時代効果が最大となるのは柏市が18.5%に対してつくば市は44.7%と大きく異なることがわかった。空間的な分布では、柏市では、柏駅を中心にJR・私鉄沿線の広い範囲でコーホート効果が多くみられ、JR沿線や駅周辺、柏の葉の大学キャンパス周辺では年齢効果が最大となる。つくばエクスプレス（TX）の駅周辺では時代効果が見られ、沿線開発による人口増加の影響が反映していると考えられる。つくば市では、つくば駅周辺と市南部にコーホート効果が面的に広がるが、その面積は広くない。また、沿線開発による人口増を反映し、TX沿線と駅から半径約1～2kmの範囲で面的に繋がる時代効果がみられる。つくば駅周辺やつくば駅北部の筑波大学周辺では、年齢効果が面的に広がることがわかる。

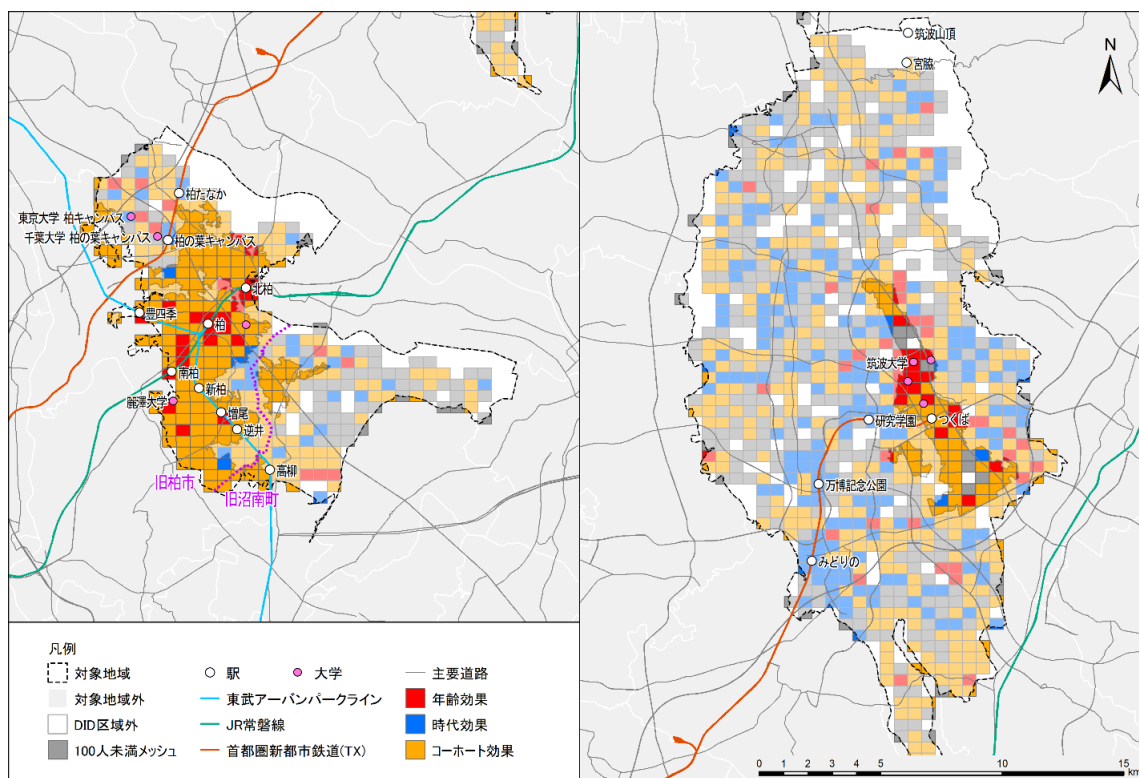


図-2.6 最大効果のメッシュ別分析結果（100人以上メッシュ）（左：柏市、右：つくば市）

さらに、最大効果が年齢効果となるメッシュについて、年齢効果が最大となる年齢区間を分析した。柏市では、JR沿線は15～24歳、25～39歳の年齢区間の効果が最大となっており、東京方面への利便性を反映して学生や若年の就業者が選びやすい地域となっていたと考えられる。他方、郊外や農村部では、75歳以上の高齢者層のメッシュが多く見られる。つくば市は、筑波大学周辺で15～24歳の年齢区間がピークであり、学生期間のみ居住する人口であることが示唆される。また、筑波大学の北側、つくば駅の東側、つくば駅から離れた南東部では、0～4歳と25～39歳の年齢区間が第1、第2のピークであり、子育て世帯が多いことがわかる。なお、駅・研究所周辺では25～39歳が最大であり、研究者が多いことが示唆された。

4-1-2. 市街地面積の変化に着目した将来の人口分布の推移の分析

本研究で想定した4つのシナリオに沿って、全国を対象に将来のメッシュ人口分布と用途地域内外別の人口の変化について結果を得たが、ここでは福島県相双地域（新地町、相馬市、南相馬市）と福岡県北九州市を例に図-2.7と図-2.8に示す。

色を付けたメッシュは人が居住することを示しているが、想定するシナリオによって、赤枠で示す用途地域の広がりが大きく異なることや用途地域内の人口密度も異なることが分かる。詳細に見ていくと、いずれの地域でも社人研の中位推計の手法をメッシュに適用して推計した2050年のBAU（Business As Usual）シナリオでは、2020年と比較すると用途地域の内外ともに人口減少の傾向にある。しかし、用途地域面積や市街地・郊外への集中・分散を考慮して設定したシナリオに沿った分析では、BAUと比較して各市域等の総人口が異なる結果となることがわかる。たとえば用途地域内人口の割合が高い北九州市は、用途地域の面積を固定した想定のうち市街地集中シナリオでは総人口でもBAUより高くなり、郊外分散シナリオではBAUより低くなるという、異なる方向性の結果が得られていることがわかる。いっぽう、用途地域内人口の割合が低い相双地域では、これらと逆の傾向を示しており、面積可変では人口密度の変化を避けるように用途地域の面積が変化するものの、総人口の大きな変化は生じない。この傾向は、地域内のメッシュを合計して求めたシナリオ別の用途内外の人口の割合（図-2.9）を見るとより明確であり、福島県相双地域では総人口や用途地域内人口はシナリオごとに大きく異なるが、用途地域内人

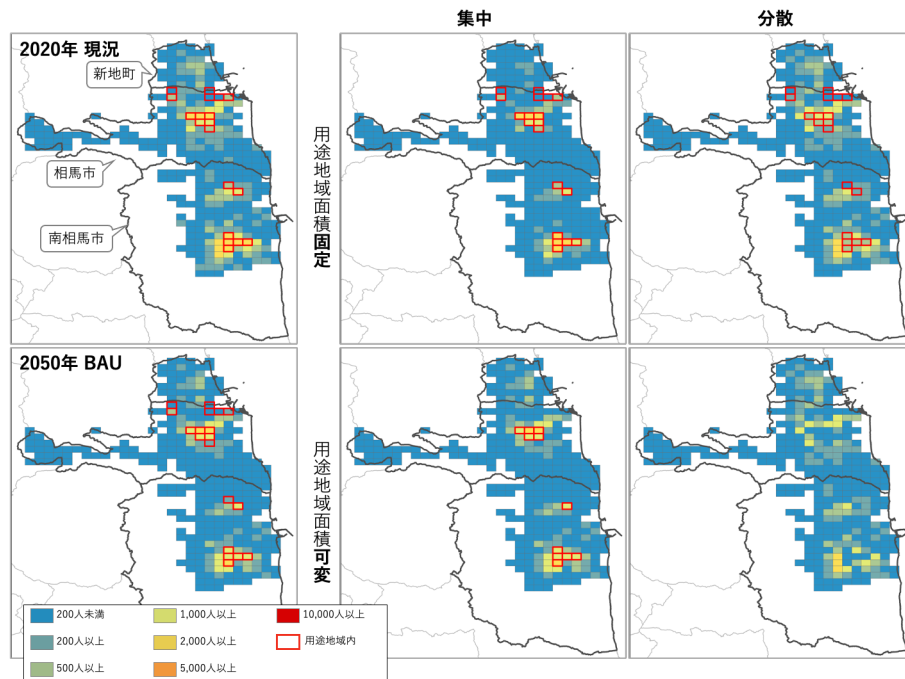


図-2.7 人口の空間分布パターン（福島県相双地域の例）

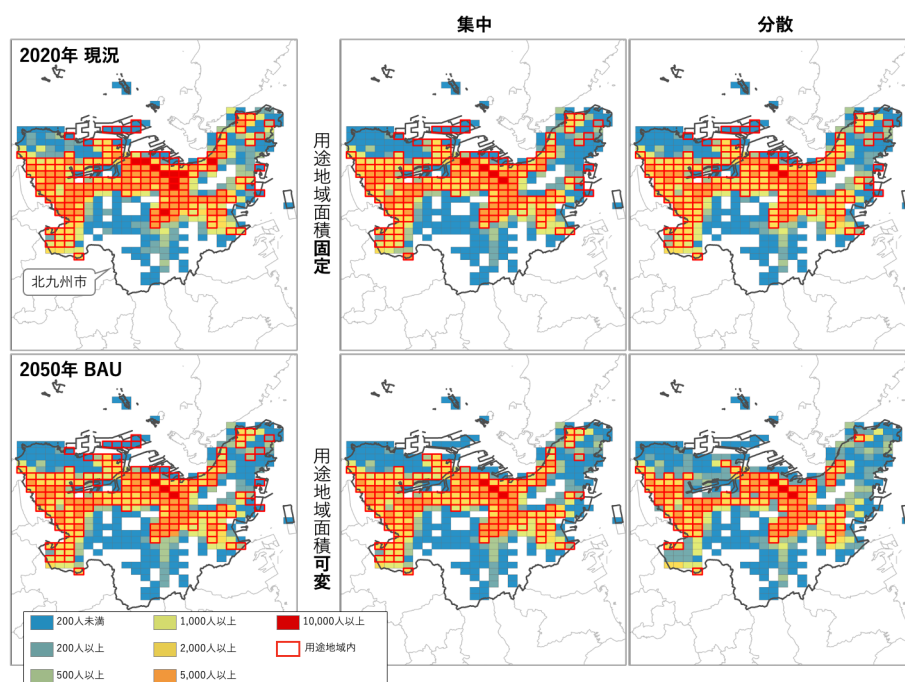


図-2.8 人口の空間分布パターン（福岡県北九州市の例）

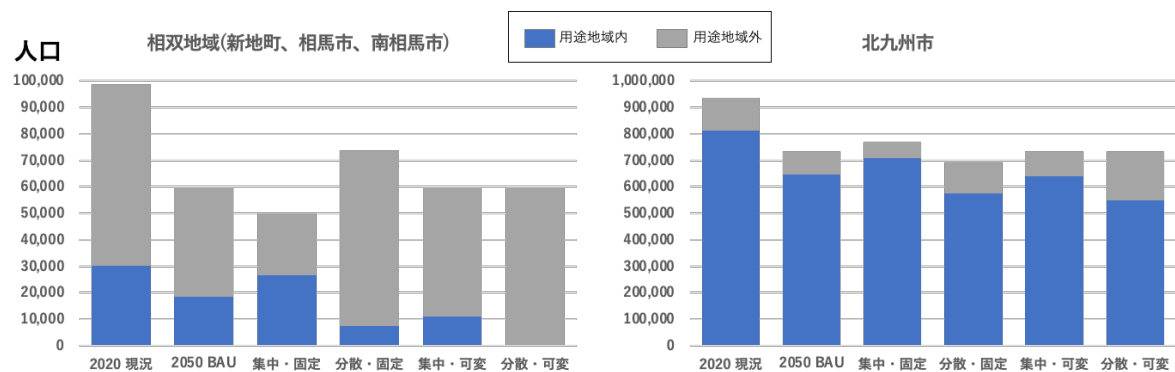


図-2.9 シナリオ別の用途地域内外の人口の割合

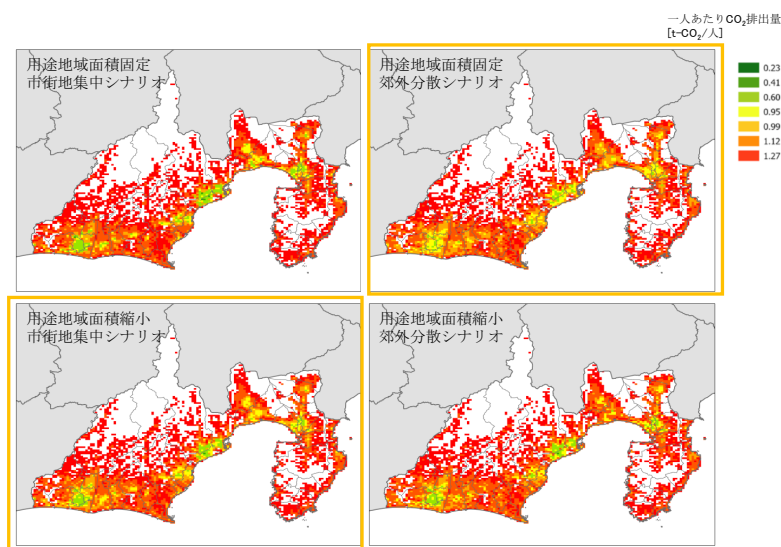


図-2.10 自動車CO₂排出量分布のシナリオ別の推計結果（静岡県の例）

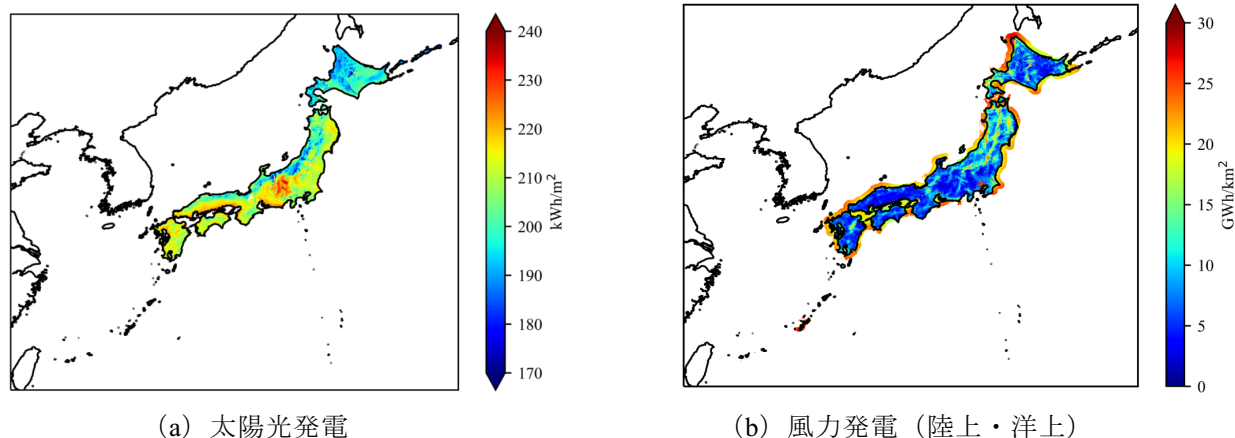
口の割合が高い福岡県北九州市では、シナリオ間での用途地域内外の人口の割合等に大きな差は見られないことがわかる。

これらシナリオに基づいた推計結果は、他のサブテーマに提供してサブテーマ間連携を推進するとともに、将来のシナリオ別の都道府県別自動車CO₂排出量の推計への応用も進めた。推計は全国を多少に行ったが、結果の一例として図-2.10に、静岡県における一人あたり自動車CO₂排出量のシナリオ別推計結果を示す。シナリオ間で比較すると、一人当たり排出量の少ない緑色となる地域の広がりや、郊外の橙色の広がり異なることが分かる。県全体の合計で見ると、市街地面積固定の場合の市街地集中シナリオと郊外分散シナリオで約10～15%の差が生じることが分かった。この結果より、市街地集中を誘導しないまでも、郊外分散と市街地人口密度の低下を抑制することで、運輸部門からのCO₂排出量の増加を6%程度は回避できることがわかる。

4-2. 地域エネルギー資源の評価に関する結果及び考察

4-2-1. 再生可能エネルギー資源量の推計と評価

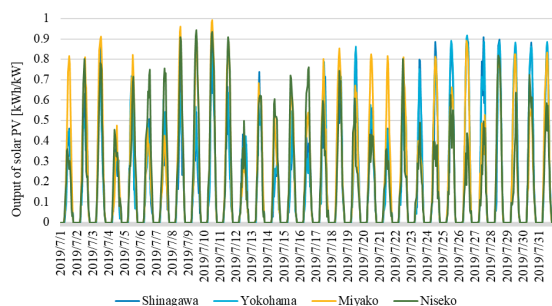
図-2.11に、年間発電量ベースでの太陽光発電及び風力発電（陸上・洋上）の賦存量の推計結果を示す。太陽光発電に着目すると、賦存量は太平洋側に多く、日本海側に少ない傾向がみられる。地域別に見ると、岐阜県周辺には230 kWh/m²を超える地点が集中し、愛知県沿岸部、瀬戸内海沿岸部、長崎県などでも220 kWh/m²程度の賦存量となっている。いっぽう、新潟県や山形県の内陸部や北海道西北部では、220 kWh/m²を下回る地点が多い。また、陸上風力発電は東北地方を中心に山間部に10 kWh/m²を超える地点



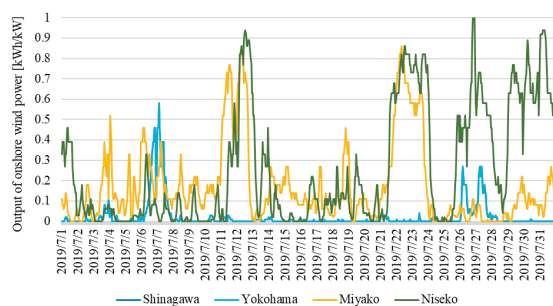
(a) 太陽光発電

(b) 風力発電（陸上・洋上）

図-2.10 再生可能エネルギー資源賦存量の推計結果（年間発電量ベース）

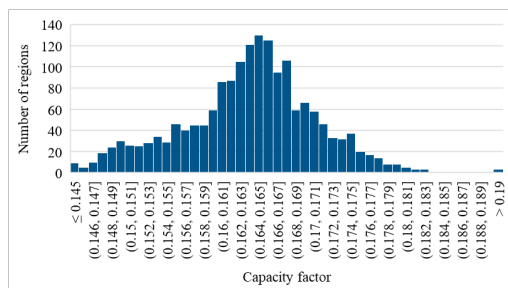


(a) 太陽光発電

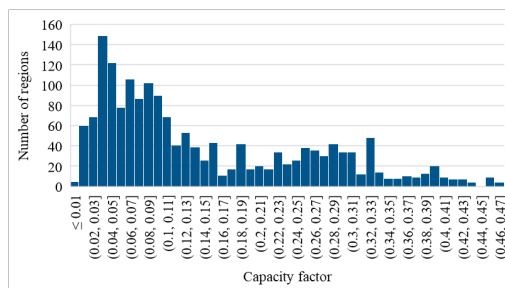


(b) 陸上風力発電

図-2.12 市区町村別再生可能エネルギー発電出力変動の分析結果例（2019年7月）

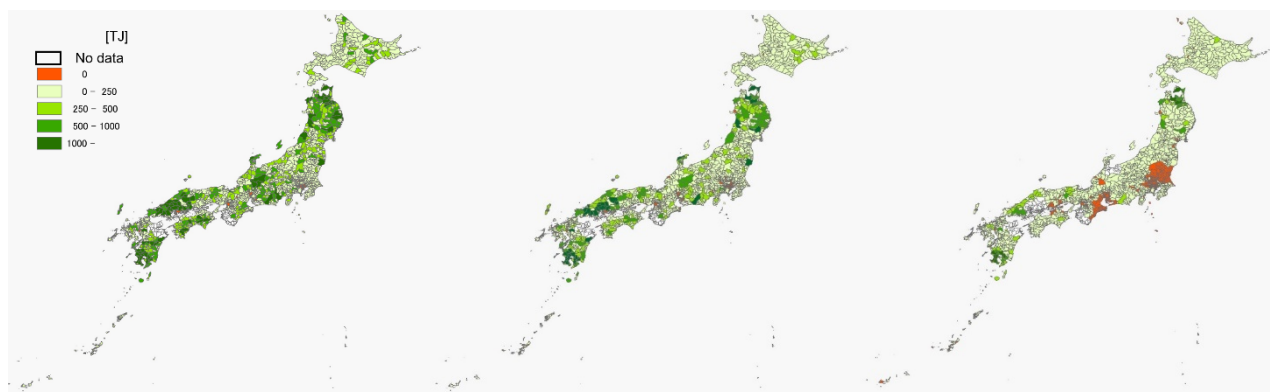


(a) 太陽光発電



(b) 陸上風力発電

図-2.13 再生可能エネルギー発電の設備利用率の市区町村別分析結果



(a) 賦存量

(b) 導入ポテンシャル

(c) 事業性を考慮したポテンシャル

図-2.14 市区町村別木質バイオマス資源量の推計結果

が分布している。洋上風力発電は宗谷湾、襟裳岬沖、津軽海峡、銚子市沖、志摩沖などで 25 kWh/m^2 を超える地点がみられる。

つぎに、毎時出力に関する推計結果と、市区町村別の設備利用率の分布に関する結果をそれぞれ図-2.12と図-2.13に示す。太陽光発電の毎時出力に着目すると、日射量に応じて日中にピークが現れる特徴的な変動を示す。この特性は各市区町村でおおむね共通しているが、市区町村ごとの設備利用率の分布をみると、16.8%を平均に15%から19%の幅を持つ正規分布を示すことがわかった。また、隣接する市区町村間でも出力変動に有意な差がみられた。例えば、江東区と荒川区の設備利用率は、それぞれ17.0%と16.1%であり、この差は年間発電量に換算すると約5%の差となり、太陽光発電の利用率を検討するにあたっては、近傍の市区町村の結果を単純に参照するのではなく、該当地域の情報を収集・整備して検討することが重要であることを示唆しているものと考えられる。陸上風力発電は、太陽光発電のように周期的なパターンは観測されないが、全体としての傾向は類似していることがわかる。また、市区町村別設備利用率は、17%を境に2峰の山がみられ、風力資源の有無によって二極化されることを示している。

木質バイオマス資源量に関する推計結果を図-2.14に示す。日本全体で見ると、賦存量が358 PJであるが、そこから保安林を除いた導入ポテンシャルは230 PJ、さらに事業性を考慮した導入ポテンシャルが

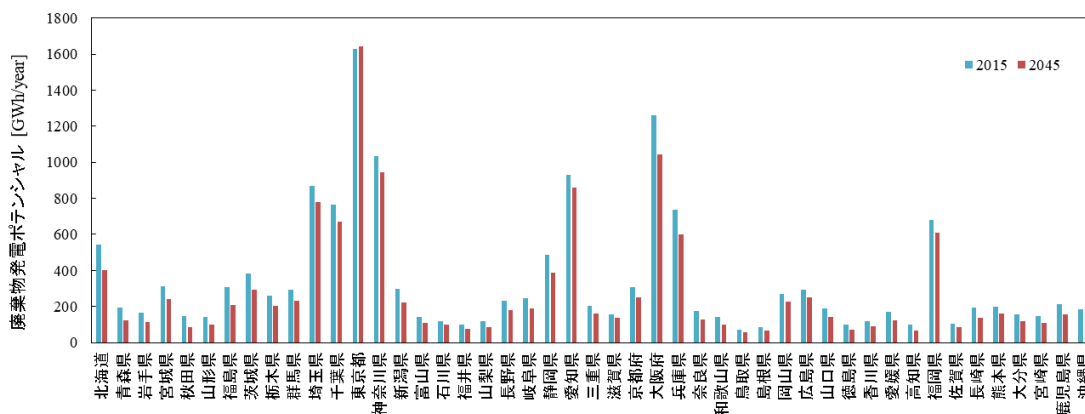


図-2.15 廃棄物発電ポテンシャルの推計結果（2015年・2045年）

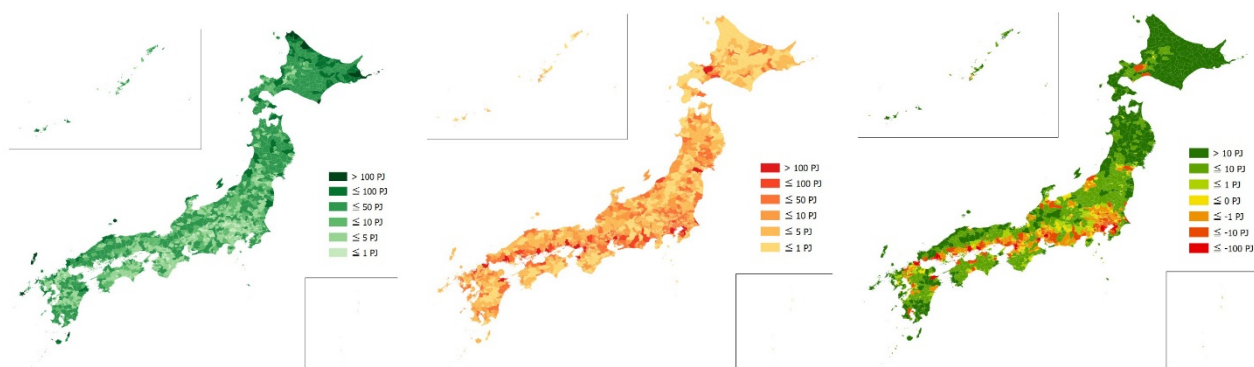
73 PJと、約80%の森林資源は事業性の観点で利用が困難であることがわかった。事業性を考慮した導入ポテンシャルを市区町村別に見ると、比較的豊富なポテンシャル量（1,000 TJ以上）を有する地域は青森県と鹿児島県に集中して分布するいっぽう、関東地方や三重県などは十分な資源量が確保できない。

最後に、廃棄物発電ポテンシャル量の推計結果を図-2.15に示す。2015年の一般廃棄物発電のポテンシャル量は、年間では16.0 TWhと推計された。これは、同年の電力需要（950 TWh/年）の1.7%に相当する。将来として設定した2045年においては、多くの地域で人口減少が予測されていることもあり、全体としては減少傾向であり、日本全体の合計でも13.3 TWh/年と2015年の83%に低下する。しかし東京都や沖縄県などは将来においても2015年と同程度か微増となる結果となっており、これらの地域では廃棄物発電からのエネルギー利用を促すことが長期的な脱炭素化において重要な方策となり得ることが示唆されるものである。なお、本研究では廃棄物処理量は人口増減にのみ影響すると仮定して将来のポテンシャル量を推計したが、リサイクルなどの資源循環や資源代替による発熱量の変化、その他の社会変容などもポテンシャル量に影響し得ることには留意が必要である。

4-2-2. 地域エネルギー需給データに基づく地域特性の評価

図-2.16に、地域エネルギー収支の推計結果と、推計の元とした市区町村別の再生可能エネルギー導入ポテンシャルと最終エネルギー消費量を示す。

地域内資源量がエネルギー需要を上回り地域エネルギー収支が正となるのは、地域内でエネルギー自給と脱炭素化を達成した上で他地域に資源を融通する役割がある地域で、東北や北海道、中国地方日本海側や九州太平洋側に分布する。いっぽう、地域内資源量がエネルギー需要を下回り地域エネルギー収

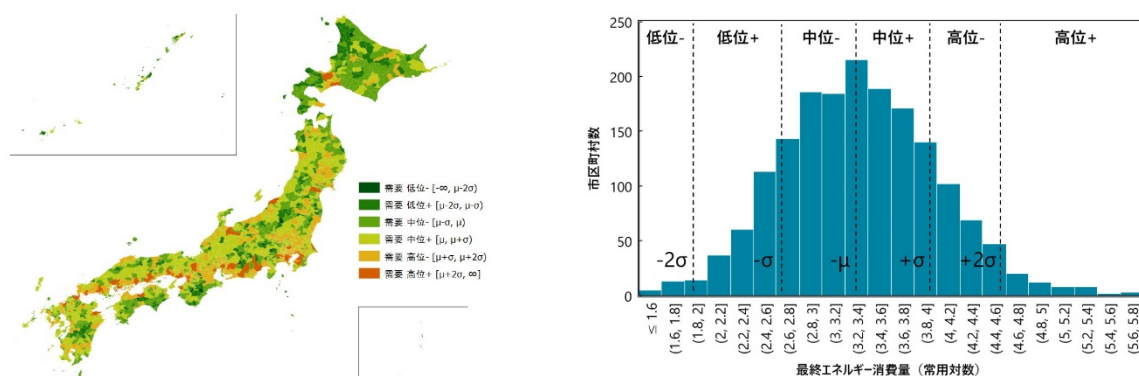


(a) 再生可能エネルギー
導入ポテンシャル

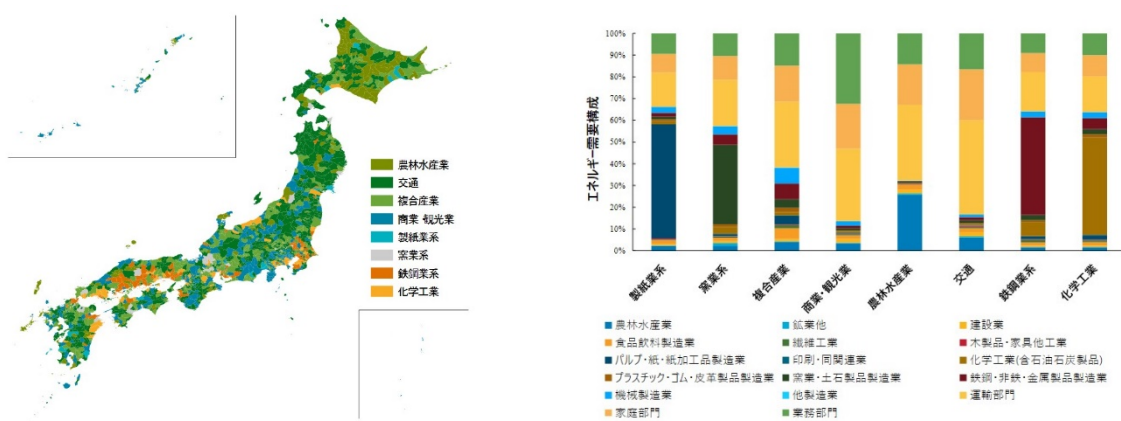
(b) 最終エネルギー消費量

(c) 地域エネルギー収支

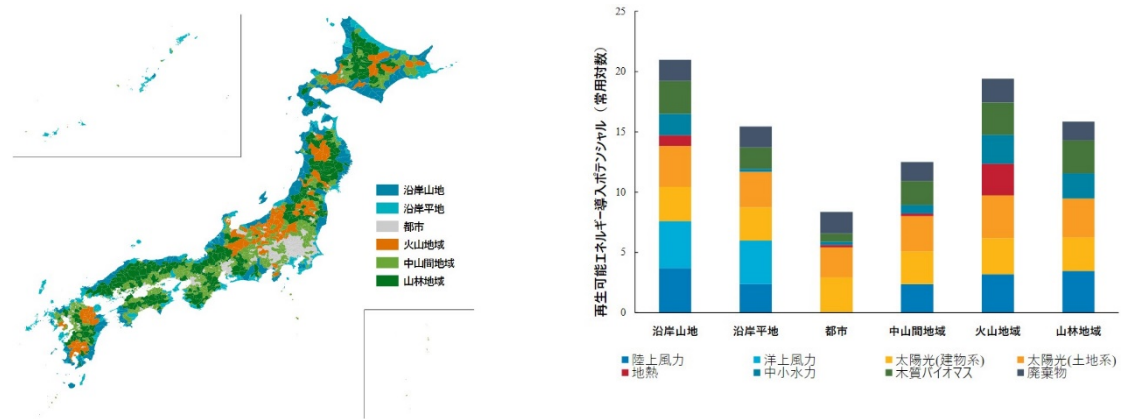
図-2.16 地域エネルギー収支の推計結果（再生可能エネルギー導入ポテンシャル-最終エネルギー消費量）



(a) 対数化した最終エネルギー消費量の規模に基づく市区町村の類型



(b) エネルギー需要量の部門・業種別構成に基づく市区町村の類型



(c) 対数化した再生可能エネルギー資源量に基づく市区町村の類型

図-2.17 エネルギー需給特性に基づく市区町村類型の分析結果

支が負となるのは、再生可能エネルギー導入のみでの脱炭素化は難しく、さらなる脱炭素化には他地域との連携が求められる地域で、首都圏と太平洋ベルト一帯、地方都市に分布する。

両者の地域が連携し、地域エネルギー収支が負の地域では脱炭素化を促進し、収支が正の地域ではエネルギー代金を受け取る等で資金を循環させる、エネルギーと資金が関連した循環構造を形成していくことが重要であるが、地域や資源ごとにコストや変動性といったエネルギー供給の質が異なり、さらに、地域ごとに必要とされるエネルギー種にも地域特性があるため、それらも考慮しながらわが国全体として最適な供給構造を見いだしていく（全体最適アプローチ）ことが重要となる。そこで本サブテーマでは最適化モデルを用いた地域エネルギー資源の地域内・地域間循環利用システムの検討を行ったが、その成果については4-2-3にて述べる。



図-2.18 エネルギー需給特性に基づく市区町村類型の複合分布と各分類に属する市区町村数

地域エネルギー収支の推計結果も含めて、地域ごとのエネルギー需給特性に基づく市区町村の類型化を行った結果を図-2.17に示す。対数化した市区町村別最終エネルギー消費量(図-2.17 (a))は、典型的な正規分布となることがわかる。そこで平均値(μ)と標準偏差(σ)に基づいて需要低位+/-、中位+/-、高位+/-の計6階級の分類を設定することとした。市区町村ごとの階級を示した地図を見ると、首都圏や工業都市、主要地方都市が高位+階級に所属していることが確認できる。エネルギー需要量の部門別・業種別構成(図-2.17 (b))に対しては、Ward法による階層的な分類を試みた結果、農林水産業、交通、複合産業、商業・観光業、製紙業系、窯業系、鉄鋼業系、化学工業に特徴を持つ計8クラスターを抽出することができた。対数化した再生可能エネルギー資源量(図-2.17 (c))については、地理的特性や都市構造を反映した沿岸山地、沿岸平地、都市、火山地域、中山間地域、山林地域の6クラスターが得られた。例えば、山林地域クラスターは、中小水力、陸上風力、木質バイオマスといった山林に賦存する資源が多く、火山地域クラスターは、これに地熱が加わる。市区町村ごとの類型を示した地図を見ると、火山地域は、有珠山(北海道)や御嶽山(長野県)、阿蘇山(大分県近隣)、霧島山(鹿児島県)などの火山周辺に分布し、都市クラスターが首都圏に集中していることなどが確認できる。

これら3種類の類型を複合化することで、地域規模や産業構造、地理的特性などを反映した計288分類が得られた(図-2.18)。各類型に属する市区町村数を見ると、「需要中位-」+「交通」+「中山間地域」が107と最も多く、ここに含まれる地域でモデル事例を作ると多くの地域へ横展開できると期待されるが、エネルギー需要量の観点では「需要中位-」全体でも需要量合計は日本全体の総需要の約5%に過ぎず、横展開による日本全体での脱炭素効果は限定的である。一方で、「需要高位+」と「需要高位-」に属する地域は、合計エネルギー需要は日本全体の76%を占めるが、個々の分類に属する市区町村数は少なく、横展開の広がりには狭い。

4-3. 地域エネルギー資源の循環利用システムの設計と地域間連携の検討に関する結果及び考察

物理的な輸送を伴う地域エネルギー資源である木質バイオマスの循環利用システムについて、本研究では岩手県を対象とした設計を行った。4-2-1に示した資源量推計結果より、岩手県全域における事業性を考慮した木質バイオマス導入ポテンシャルは3.9 PJ/年、民生部門(家庭・業務)の温熱需要は11.4PJである。利用機器のエネルギー効率を80%と仮定すると、県内の木質バイオマス資源により民生部門温熱需要の27%が供給可能であり、特に県内33市町村のうち24市町村では導入ポテンシャルが温熱需要を上

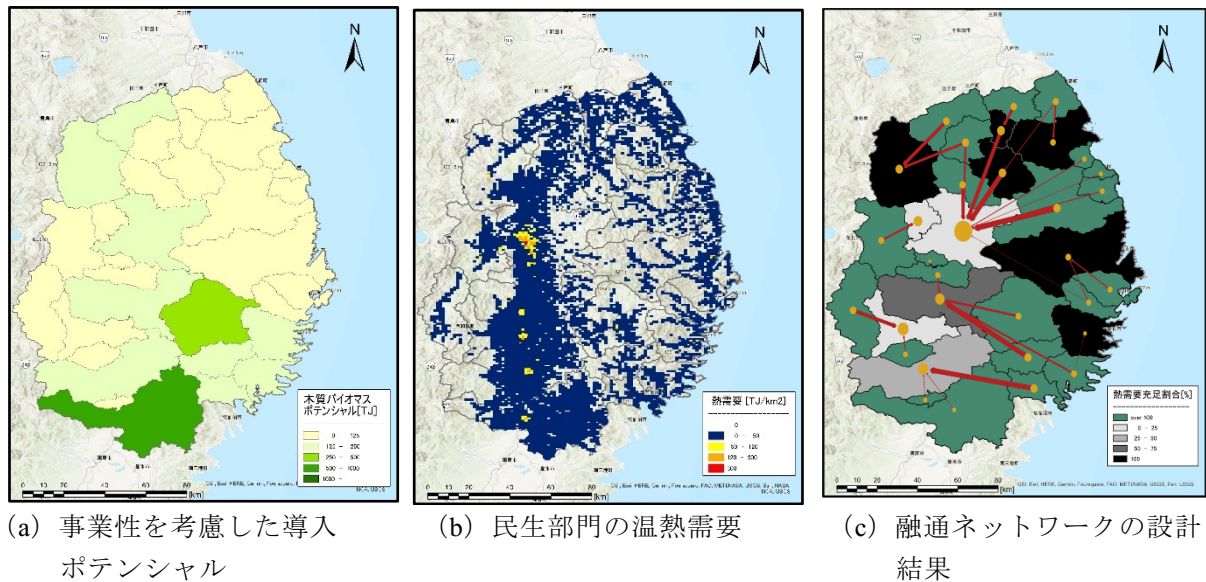


図2.19 岩手県を対象とした木質バイオマス資源融通ネットワークの設計結果

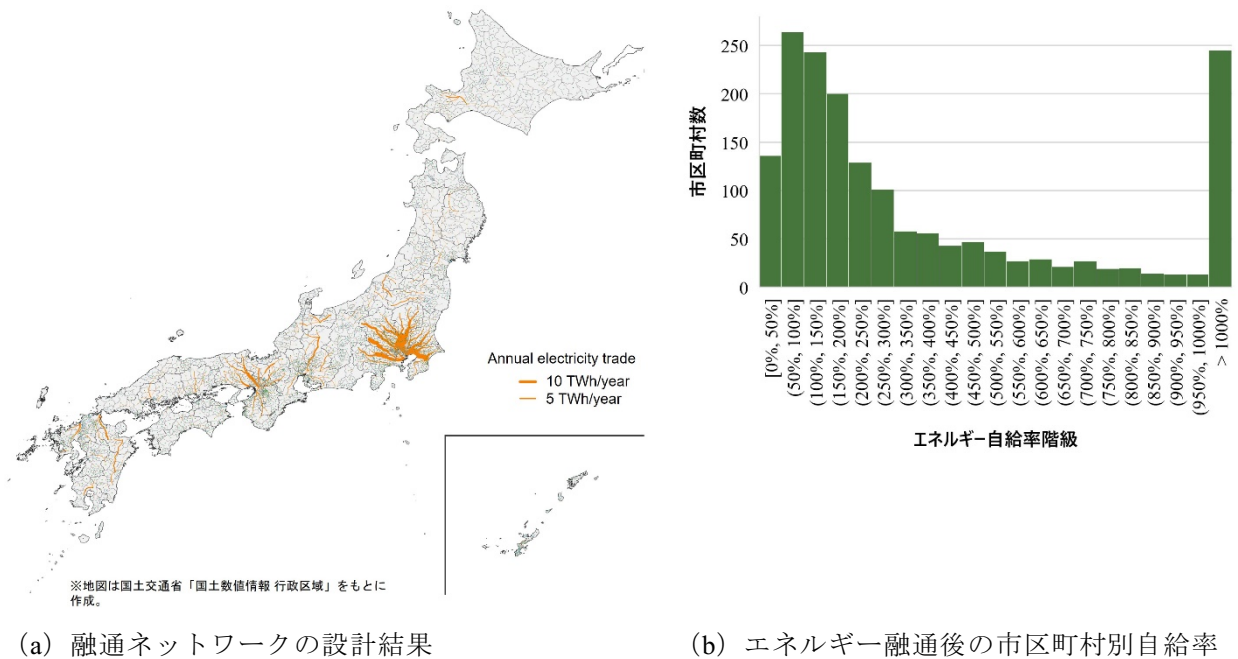


図-2.20 再生可能エネルギー発電の広域融通ネットワークの設計結果

回る(図-2.19 (a) (b))。これに基づいて融通ネットワークを検討した結果(図-2.19 (c))、ポテンシャルが温熱需要を上回る市町村から残りの9市に向けて融通され、9市のうち4市(久慈市、八幡平市、宮古市、釜石市)は周辺地域からの融通により熱需要を満たすに十分な資源量が確保できることがわかった。盛岡市は、県内で最も熱需要が高いため全量を木質バイオマス資源により供給するには至らないが、周辺の9市区町村からの融通により熱需要の11.6%に相当する719 TJを供給することができる。

つぎに、再生可能エネルギー発電の広域的な融通と地域間連携に関する成果について述べる。図-2.20 (a) に示す融通ネットワークの構造に着目すると、札幌市や東京都区部、名古屋市、大阪市など各地方の中核的な都市を中心に周辺から電力融通を行うツリー構造が形成されることがわかった。これは、サブテーマ1で公共系太陽光発電も考慮して検討したネットワーク構造(図-1.18)と類似した結果となっている。このようなツリー構造の系統とすることで、ある経路が災害等で遮断されてもバックアップとできる経路が多いため、大規模発電所から限られた幹線で送電する系統に比べて災害レジリエンスが向上できると考えられる。さらにツリー構造の末端を環状に接続して網目上のグリッドを形成することで、さらなるレジリエンス強化が期待できるものの、一方で系統運用の複雑化による人為的ミスや種々の災

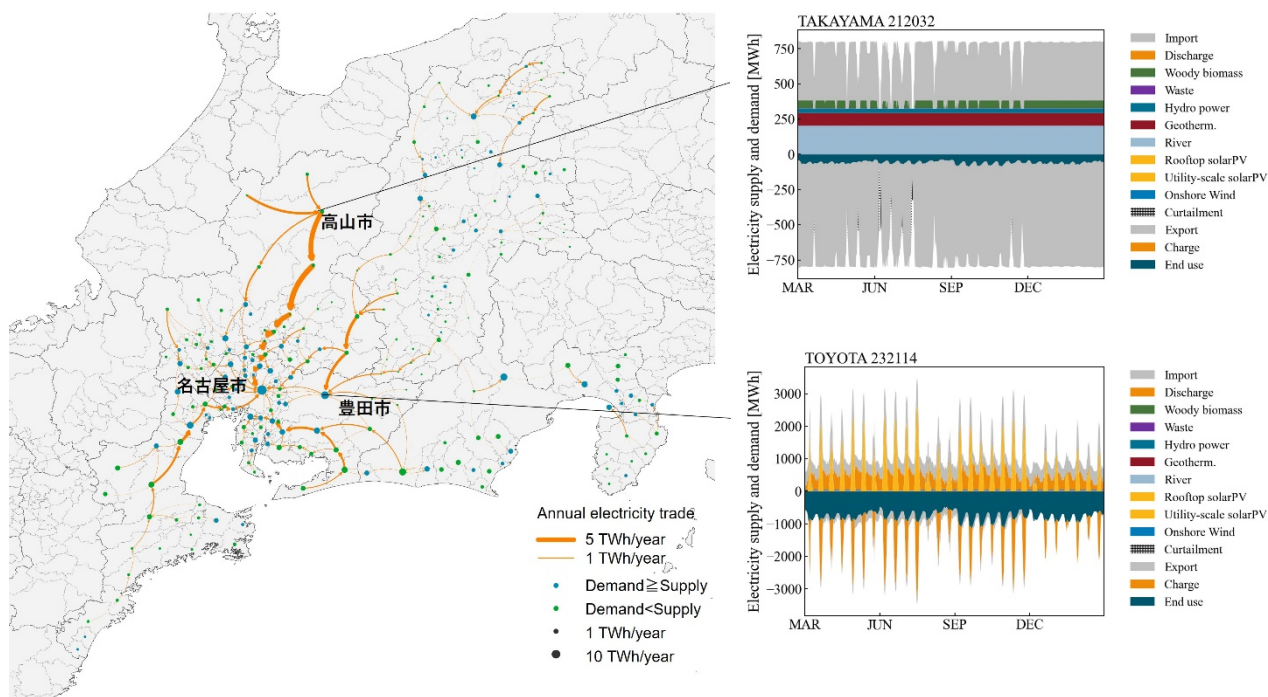
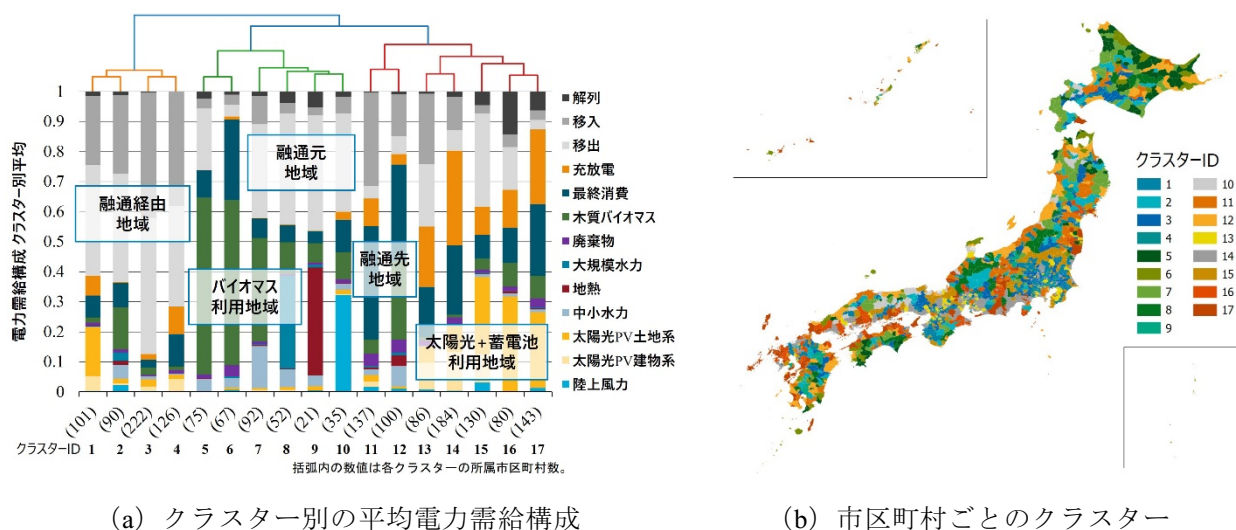


図-2.21 中部エリアにおける電力ネットワーク運用の分析結果



(a) クラスタ別の平均電力需給構成

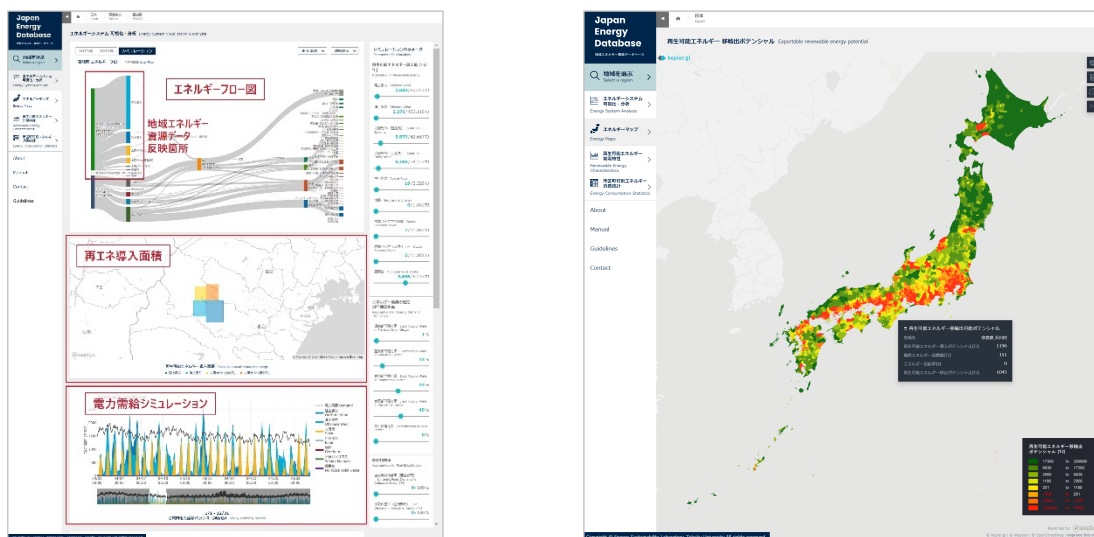
(b) 市区町村ごとのクラスター

図-2.22 再生可能エネルギー利用および地域間連携の類型化結果

害への被災確率が増加することによる事故リスクの増加が懸念される。

融通ネットワークを構築することで、図-2.20 (b) に示すように、77%の市区町村で電力自給率が100%を上回り、多くの市区町村にとって再エネ資源の地域内利用が電力システムの自立性向上に有効であることがわかり、電力の自給を基本とする自律分散型システムの形成が再生可能エネルギーを主体とするエネルギーシステムの実現において重要であることを示唆している。

本研究では、毎時単位での電力需給バランスを考慮して融通ネットワークの分析を行っているが、中部エリアを例に毎時単位での運用の結果を述べる (図-2.21)。中部エリアは、名古屋市や豊田市のように電力需要の大きな都市を複数擁しており、これら都市では太陽光発電による電力供給が行われるものの、例えば名古屋市での電力自給率は50%にとどまるなど、需要を賄うには十分ではない。そのため、中小水力や地熱、木質バイオマス発電のポテンシャル量が大きく電力自給率が753%と高い高山市が、隣接して水力発電のポテンシャル量が大きい白川村からの電力も中継する形で、名古屋市に向けて融通経路周辺の余剰再生可能エネルギー発電量を加えながら送電が行われるネットワークが構成される。これらネットワークでは、融通される電力は基本的には都市部に向かって一方向の流れとなるが、浜松市と



(a) エネルギー資源量に関連する情報 (b) Web公開版地域エネルギー収支マップ
図-2.23 地域エネルギー需給データベース (<https://energy-sustainability.jp/>)

磐田市間のように、時間帯によっては受電と送電が逆転するような地域間連携も確認された。

最後に、これら市区町村間の融通ネットワークの分析結果をもとに、地域内での再生可能エネルギー利用と地域間での循環的利用の特徴に基づいて全市区町村の電力需給構造をクラスター分析により階層的に類型化した結果、市区町村を17分類することができた(図-2.22 (a))。各分類を大別すると、木質バイオマスを主なエネルギー源とするバイオマス利用地域、太陽光と蓄電池を合わせて利用する太陽光+蓄電池利用地域、電力需給構造に占める電力移出の割合が高い融通元地域、同様に電力移入の割合が高い融通先地域、そして電力移入量と電力移出量がそれぞれ高い割合を占める融通経由地域の5系統に分けられる。本サブテーマ参画者及び研究協力者の実施した既存研究³⁾では、おもに融通元地域と融通先地域の組み合わせを議論してきたが、本分析では融通経由地域が全体の31%を占めることがわかり、地域間連携の検討においては融通元・先地域の単純な需給バランスだけでなく、経由地域の役割や便益(例えば送電インフラの固定資産税収入や災害時のレジリエンス)も考慮するなど、経由地域を巻き込むことの重要性が示唆された。このように日本全体で最適な地域間連携構造の検討には、周辺地域だけ、あるいは一対一だけでの検討を行うのではなく、広域にわたって地域の特性や関係を俯瞰することが不可欠といえる。

これらクラスターの空間的な分布に着目すると(図-2.22 (b))、同じクラスターに属する地域は地理的に近い範囲に分布する傾向がみられる。例えば、木質バイオマスを移出する第5クラスターは北海道東部に、太陽光と蓄電池により電力を自給する第17クラスターは瀬戸内海周辺や九州北部に、太陽光で自給しながらも一部移入に依存する第14クラスターは東海地方沿岸に集中している。これだけでなく、隣接地域同士が同じクラスターに属する構図も全国的に散見される。この結果は、エネルギー供給においてとるべき脱炭素施策が類似する地域が近隣に分布する可能性が高いことを示している。

4-4. Webでの成果の公開・普及について

本サブテーマでは、4-2-1で述べた再生可能エネルギーの資源量推計結果のうち、木質バイオマス賦存量及び廃棄物発電ポテンシャルを、すでにWeb公開されている「地域エネルギー需給データベース」に統合し、エネルギーフロー図の一部としても組み込んだ(図-2.23)。これに加え、再生可能エネルギー導入ポテンシャル及び移輸出ポテンシャルの地理分布や再生可能エネルギー発電の導入に伴う所要土地面積を示す地図も公開し、研究者や専門家だけではなく、地方自治体の脱炭素に関する政策担当者への地域エネルギー資源に関する情報提供を推進してきた。

5. 研究目標の達成状況

本サブテーマでは、2. 研究目標に示したとおり、(1) 日本全国の国土利用の変遷を評価する手法および地域エネルギー資源の量と分布を評価する手法の開発、(2) 具体地域を対象にした現在から将来までの人口・地域資源等の空間分布の推移の評価、(3) 地域エネルギー資源の地域内・地域間で循環利用するシステムの検討手法開発と具体地域での検討・提案、の3つの目標を設定している。これらについて、以下の通り目標とした成果を達成することができた。また、地域エネルギー資源量の評価結果のWeb公開や気候市民会議の取り組みへの専門家としての関与・他地域への展開など、研究成果の普及や社会実装への貢献についても進めてきたところである。

目標 1) 日本全国の国土利用の変遷を評価する手法および地域エネルギー資源の量と分布を評価する手法の開発

- 国土利用の変遷として人口分布に着目し、メッシュ人口をもとに、用途地域の内外の人口密度の想定に応じた人口分布や用途地域面積の変化を評価する手法を開発した (3-1-2 節)
- 気象衛星観測データや森林簿等を用いて、全国を対象に、太陽光発電・風力発電については毎時・メッシュ単位、木質バイオマス資源や廃棄物発電ポテンシャルについては市区町村単位での地域エネルギー資源量を評価する手法を開発した (3-2-1 節)

目標 2) 具体地域を対象にした現在から将来までの人口・地域資源等の空間分布の推移の評価

- ベイズ型APC分析を用いて年齢効果、時代効果、コーホート効果の観点から人口推移の要因を明らかにした (3-1-1 節/4-1-1 節)
- 用途地域内外の人口密度の変化に着目して4つのシナリオを設定し、それぞれについて全国を対象に将来の人口分布の推移を明らかにした (3-1-2 節/4-1-2 節)
- 全国を対象に、太陽光発電・風力発電・木質バイオマス資源のポテンシャル評価を行い、市区町村別にとりまとめた結果も整備した。また、廃棄物発電ポテンシャルについては、地域ごとに現状のポテンシャル量とともに将来のポテンシャル量の推計も行った (4-2-1 節)

目標 3) 地域エネルギー資源の地域内・地域間で循環利用するシステムの検討手法開発と具体地域での検討・提案

- 再生可能エネルギー資源およびエネルギー需要の地域特性をクラスター分析および統計的分類手法により類型化し、その分布を地図上に可視化することで、その地理的特性を明らかにした (3-2-2 節/4-2-2 節)
- 木質バイオマス資源の地域間融通を最小費用流問題として求解する手法を開発し、岩手県の33市町村を対象に適用し、木質バイオマス資源の地域内・地域間での利用システムに関する分析を行った、また、再生可能エネルギー電力については、システムコスト最小化の原理に基づいて設計する市区町村間再生可能エネルギー融通モデルを開発し、全国を対象に特に地域間での地域エネルギー資源融通システムの検討を行った (3-3 節/4-3 節)

6. 引用文献

- 1) ECMWF, ECMWF Reanalysis v5 (ERA5), <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>
- 2) 太陽放射コンソーシアム, <http://amaterass.org/data.html>
- 3) 小野寺弘晃, 根本和宜, 中田俊彦. (2021) 市区町村のエネルギー需給特性を考慮した広域圏エネルギーシステムの設計, エネルギー・資源学会論文誌, 42巻5号 p. 337-350.
- 4) 環境省. (2022) 令和3年度再エネ導入ポテンシャルに係る情報活用及び提供方策検討等調査委託業務報告書.

Ⅱ－３ ストック型地域資源のポテンシャル評価と循環利用方策の検討

名古屋大学大学院環境学研究科

谷川 寛樹

白川 博章

郭 静（令和2年度～令和3年度）

蛭田 有希（令和4年度）

<研究協力者>

名古屋大学大学院環境学研究科

山田 久太（令和2年度～令和3年度）、森田 大登

株式会社エックス都市研究所

東 修

〔要旨〕

サブテーマ3では、森林資源や建築解体材・土木インフラ等のストック型地域資源の地域内における循環利用に向け、都市の物質代謝の将来予測手法を開発するとともに、具体地域を対象として、都市内の建築物ストックの物質代謝に関する将来予測に関する分析と、森林資源を対象とした地域材の地域内での利用促進が将来の都市・人工林内炭素貯蔵量に与える影響に関する分析を実施した。これらに加えて、サブテーマ2と連携して、森林資源のエネルギー利用に関する地域間連携に関する分析を行った。

建築物ストックの物質代謝に関する将来予測では、建物4d-GISに基づく物質ストックとフローの質量化、退蔵確率モデル・解体確率モデルの構築、モンテカルロ法による予測シミュレーションを含む一連の手法を開発した。これを北九州市に適用した結果より、建築物の平均滞留年数は人口減少・高齢化に伴い2015年の34.2年から2050年には60.1年まで延びることがわかった。また、退蔵ストックは、2015年時点では都市の外縁部や都市の内部でも斜度が強く住宅密度の高い市街地に存在しているが、2050年にかけてその総量は増加し分布も拡大することが把握でき、行政介入等を行わない場合には、退蔵ストックは今後も増加し続けることが示唆された。

森林資源を対象とした地域材の地域内での利用促進が将来の都市・人工林内炭素貯蔵量に与える影響に関する分析では、高価な建築用材の需要拡大によって、建材として蓄積される地域材が1.5倍（24万m³増）、再造林面積が4.4倍（1.9千ha増）となることが推計され、地域材利用を促進したシナリオでは都市と人工林の炭素貯蔵量が現状維持シナリオより1.8倍大きい33万t-Cと推計された。このことから、地域材利用の促進は、ストック型資源やエネルギー資源の投入量抑制や輸送にかかるCO₂排出量の低減などのほか、炭素貯蔵量の増大にも貢献することが示唆された。

1. 研究開発目的

都市に蓄積された物質（以下「ストック」という。）は、地域に存在する主たる資源のひとつである。これらストックを長期的かつ効率的に利用できれば、セメント、木材、鋼材といった物質資源だけではなく、その製造・加工段階も含めてエネルギー資源の新規投入も抑制でき、結果として環境負荷を低減することが可能となる。このように、ストックの長期的かつ効率的利用によって実現される持続可能な社会は「ストック型社会」と呼ばれており、人口減少が進むなかで、社会構造の変化を踏まえつつストック型社会への移行を目指すことは今日的な課題の一つであるといえる。

そこで、本サブテーマでは、本研究課題全体として目指す人口減少化社会における社会構造の変化を踏まえた地域内・地域間連携の検討と実現に向け、特に森林資源や建築解体材・土木インフラ等のストック型地域資源の質と量を明らかにする手法を開発して具体の対象地域を設定して資源評価を行うとともに、地域内でのストック型資源の活用による効果の評価や、他のサブテーマとの連携による地域間での循環利用システム・方策の検討・提案に資することを目的とする。

2. 研究目標

森林資源や建築解体材・土木インフラ等のストック型地域資源を対象に、質及び量の空間的な分布を定量評価する手法と、資金の地域内循環の視点も含めて地域内で循環利用するシステムの検討手法を開発し、サブテーマ2の地域間連携の検討結果も踏まえて、課題共通で設定した対象内の具体地域へ適用して地域内での利用と地域間連携を通じた活用を具体的に検討し、提案する。

3. 研究開発内容

本サブテーマは、都市内の建築物ストックを対象とした都市の物質代謝の将来予測に関する分析と、地域材の地域内での利用促進が将来の都市・人工林内炭素貯蔵量に与える影響に関する分析の2つから構成される。両分析では、手法の開発に主眼を置いているが、開発された手法を具体地域へケーススタディとして適用しての将来予測や評価も実施している。

3-1. 都市の物質代謝の将来予測に関する分析

本研究では、「都市の物質代謝」の概念に基づいてモデル構築や分析を実施した。都市の物質代謝は、図-3.1に示すように、物質が都市外から都市内へ投入され、ストックとして蓄積され、解体されることで都市外に排出されるという一連の物質の動き全体を指す概念である。ストックには、利用されているストック（現役ストック）と利用されなくなった（退役した）退蔵ストックの2種類があり、これら異なる蓄積形態間での移動も生じており、これら2種類のストック間の移動も対象となる。

都市内の物質代謝は、人間の社会経済活動や地理的・気候的条件等の様々な要因によって駆動される。例えば、近年その増加が問題となっている空き家の増加は、都市内の退蔵ストックを増加させる要因となっている。またこれら空き家の解体を促進することは、解体された建築物に含まれる物質の都市外への運搬（排出）を増加させる要因になりえる。ストック型社会への移行による環境負荷低減の実現に向けては、このような都市の物質代謝をモデル化して将来の物質ストックや排出を予測し、それら結果を踏まえながら効率的な物質の活用、循環、廃棄を検討していくことが重要である。

そこで本研究では、ストック型地域資源のうち、建築物ストックに含まれる骨材、セメント、木材、鋼材等の物質を対象として、都市の物質代謝の将来予測を行う手法を開発し、具体の対象地域へ適用して将来のストック量の推計を行った。開発した手法は、図-3.2に示すように、①建物4d-GISに基づく物質ストックとフローの質量化、②退蔵確率モデルの構築、③解体確率モデルの構築、④モンテカルロシミュレーションによる将来予測の4段階から構成される。

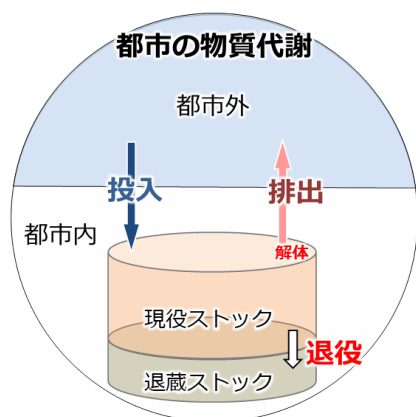


図-3.1 本研究で想定する都市の物質代謝の概念

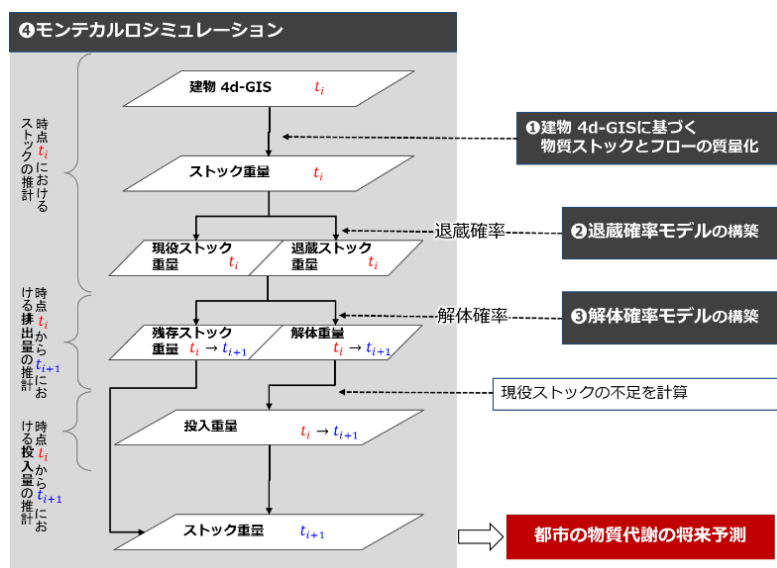


図-3.2 都市の物質代謝の将来予測のフロー

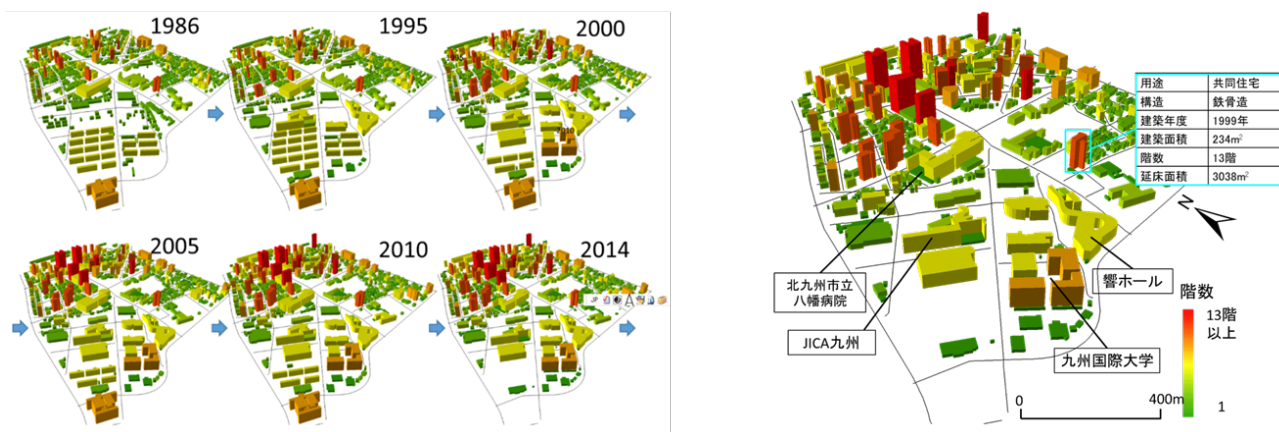


図-3.3 4d-GISデータの一例（北九州市八幡駅周辺、右拡大図は2018年）

3-1-1. 建物4d-GISに基づく物質ストックとフローの質量化

本研究では、建築物の位置や形状の情報に高さ情報を加えた3d-GISを時系列的に整備した4d-GISデータベース（4 dimensions Geographic Information System）を用いて、各建築物ストックを構成する資材を定量化した。4d-GISデータベースに格納されたデータの一例を図-3.3に示す。各建築物を表すポリゴンには様々な属性情報が入力されており、建築物の状態の可視化はもとより、建物の位置や形状といった空間情報と建築物の構造や履歴等の属性情報とを合わせた分析が可能となっている。また、都市計画等の諸制度による境界や地理的条件といった他の空間情報と、個々の建物ストックを重ね合わせて集計や抽出を行ったり、他の空間情報に含まれる情報を個々の建物ストックに与えて分析を行うことも可能である。

建築物の物質ストックは、建築物を木造、鉄骨造（S造）、鉄筋コンクリート造（RC造）に分類し、それぞれの規模・延床面積（建築面積に階数を乗じた面積）に構造種別の資材投入原単位を乗ずる原単位法により求めた（式-3.1）。資材投入原単位とは、構造物の単位面積当たりの資材投入量を示しており、構造物の規模情報に乗ずることでコンクリート、鉄、木材、石材等素材別に蓄積された物質資源量を推計することができる。

$$MS_{t,s,m} = TFA_{t,s} \cdot MI_{t,s,m} \quad (\text{式-3.1})$$

- $MS_{t,s,m}$: t 年に建設された建物構造種別 s の建築物の、建設資材 m の蓄積量（建設資材ストック）
 TFA_s : t 年に建設された建物構造種別 s の建築物の延床面積
 $MI_{s,m}$: t 年に建設された建物構造種別 s の建築物の単位延床面積当たりに投入される、建設資材 m の投入量（資材投入原単位）

なお、建設された年代による構造や使用された資材の量と質の違いを反映するために、既往研究²⁾に基づき、時間的な変化も考慮した資材投入原単位を用いている。この原単位は、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たうえで延床面積で除して推計されており、これを用いることで、物質ストックを上部構造と下部構造に分けて推計できるほか、リサイクル可能性についても検討することができる。

3-1-2. 退蔵確率モデル及び解体確率モデルの構築

将来のストック量、排出量と質の変化については、解体確率と退蔵確率を考慮したモデルを構築して推計した。本分析で開発した推計モデルのフローを図-3.4に示す。モデルでは、基準年の建物現況データを出発点に、退蔵確率モデルを適用して現役ストックと退蔵ストックを分類し、それぞれに解体確率モデルを適用して残存するか次期までに解体されるかを推計した。なお、解体と予測された建築物は、次の推計年に同一建築物が建設されると仮定した。

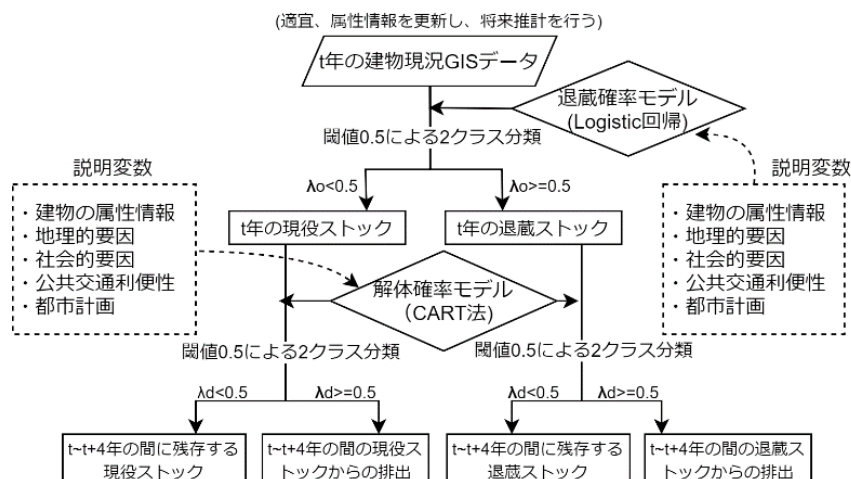


図-3.4 将来の現役・退蔵ストック量及び排出量の推計フロー

退蔵確率モデルとは、建築物が適切な管理がなされず使うことが困難な廃屋や空き家などのストック（退蔵ストック）に移行するか否かを確率的に判定するモデルであり、ストックが退蔵ストックとなるか否かと多様な外生要因（建物特性、地理的・社会的要因等）との関係性を表している。本分析では、解体確率は建物属性（建物年齢、建物面積）、地理的条件（建設地点の傾斜角度、最近道路幅）、社会要因（住宅密度、総人口、高齢者人口）、公共交通の利便性（駅・バス停までの距離）、立地適正化計画における誘導区域か否か、の5つの要因に影響されるとし、合計11種類の説明変数を想定した。表-3.1は、退蔵確率モデルに適用した説明変数の一覧である。

モデルでは、ある建築物が退蔵ストックとなるか否かをベルヌーイ分布に従う確率事象 y_0 とみなし、ベルヌーイ分布のパラメータとなる退蔵確率 λ_0 を、一般化線形モデル（GLM; Generalized Linear Model）によるロジスティック回帰によって推計した（式-3.2、式-3.3）。

$$y_0 \sim \text{Bern}_{y_0}(\lambda_0) \quad (\text{式-3.2})$$

$$\lambda_0 = f(X_0) = \text{Sigmoid}(\alpha_0 + X_0^T \beta_0) \quad (\text{式-3.3})$$

ここで、 y_0 は退蔵ストックか否かを表す2値の変数ベクトルであり、 X_0 は q 種類の説明変数ベクトルからなる行列である。 α_0 は推計されるコンスタントなパラメータである。 β_0 は q 種類の各説明変数に対応する

表-3.1 退蔵確率モデルの説明変数一覧

説明変数（単位）	説明
x_{d1} 建物年齢（年）	各建物建築後の経過年数
x_{d2} RCダミー（0, 1 二値）	各建物がRC造の場合は1、そうでない場合は0
x_{d3} 木造ダミー（0, 1 二値）	各建物が木造の場合は1、そうでない場合は0
x_{d4} 建物面積（㎡）	各建物の合計床面積
x_{d5} 傾斜（℃）	10mメッシュのDEM（Digital Elevation Model）に基づく各地点の傾斜
x_{d6} 住宅密度（個/10000㎡）	各建物が属するメッシュ（100m）内の建物個数
x_{d7} 人口（人）	各建物が属するメッシュ（1km）内の人口
x_{d8} 高齢者人口（人）	各建物が属するメッシュ（1km）内の65歳以上の人口
x_{d9} 最寄り駅までの距離（m）	各建物と最寄り駅との間の距離
x_{d10} 最寄りバス停までの距離（m）	各建物と最寄りのバス停との間の距離
x_{d11} 立地適正化計画ダミー（0, 1 二値）	立地適正化計画で定められる都市機能誘導区域または居住誘導区域は1、そうでない場合は0



図-3.5 現地調査の例（青：流通空き家、赤：老朽空き家）

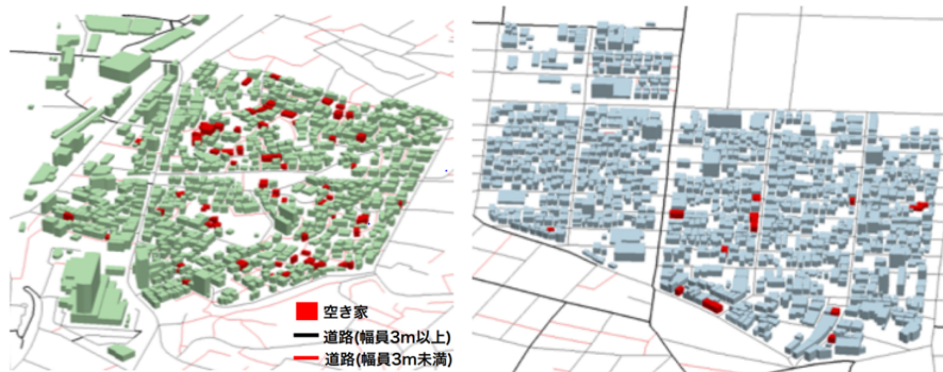


図-3.6 現地調査結果の4d-GISへの組み込みの例
（左：枝光地区、右：浜町地区、いずれも北九州市）

パラメータからなるベクトルである。

退蔵確率モデル構築にあたっては、建築物が退蔵ストックであるか現役ストックであるかを示す教師データが必要だが、既存データは市区町村レベルが最小集計単位であり、位置情報やその変化のみから推定することが困難であるため、個々の建築物の退蔵確率を推計するに十分なデータを得ることができない。そこで、本分析では、後述する対象地域とした北九州市内の3地域において、現地調査を実施し、退蔵ストックデータベースを整備した。現地調査では、広域での詳細な空き家調査を効率的に行うため、自動車の屋根に360度カメラ（Insta360 EVO）を設置して走行しながら建物外観を撮影し、空き家データを収集、4d-GIS上で表現した。現地調査による空き家判定の例を図-3.5に、結果の4d-GISへの組み込み例を図-3.6に示す。

つぎに、ある建築物がある時点（ t_i ）から次の時点（ t_{i+1} 、5年後）までの間に解体されるか否かを判定する解体確率モデルについて述べる。本分析における解体確率モデルとは、ある建築物がある時点から次の時点までに解体される確率を、ベルヌーイ分布に従う確率的事象 y_d とみなし、外生要因（建物特性、地理的・社会的要因等）に基づいて、ベルヌーイ分布のパラメータとなる解体確率 λ_d を推計するモデルである。モデル構築用データの y_d は、4d-GISデータベースの各建築物に付された「解体」及び「残存」を示す2値の変数であり、外生変数を表す行列 X_d は、表-3.2に示す説明変数から構成されるベクトルからなる。一般に建築物は耐用年数を迎えた後に解体されるため、建物年齢が大きくなるにつれて増加すると予想される。また、建築物解体の傾向は、建物年齢を含む建築物自体の特性に加えて、周辺環境の地理的・社会的要因によって異なると考えられる。そこで、本分析では、建物年齢やRC造・木造かどうかなどの建物の属性、地理的条件として各地点の傾斜角度、社会的条件として住宅密度や人口・高齢者人口、公共交通利便性として最寄り駅・バス停までの距離、都市計画制度上の条件として立地適正化誘導区域か否か、といった解体に影響する要因を指標化し、説明変数として採用した。

モデル構築にあたっては、教師有り機械学習の一つであるCART法（決定木）（Classification and Regression Trees）を用い、建物年齢等の建物情報、地理的・社会的要因等の多様な説明変数を用いてモデルを構築した（式-3.4、式-3.5）。

表-3.2 解体確率モデルの説明変数一覧

説明変数（単位）	説明
x_{01} 建物年齢（年）	各建物建築後の経過年数
x_{02} 建物面積（㎡）	各建物の合計床面積
x 傾斜（℃）	10mメッシュのDEM（Digital Elevation Model）に基づく各地点の傾斜
x_{04} 最近道路幅（m）	各建物と最も近い道路の幅
x_{05} 住宅密度（個/10000㎡）	各建物が属するメッシュ（100m）内の建物個数
x_{06} 人口（人）	各建物が属するメッシュ（1km）内の人口
x_{07} 高齢者人口（人）	各建物が属するメッシュ（1km）内の65歳以上の人口
x_{08} 工業地域ダミー（0, 1 二値）	建物が工業地域（都市計画 用途地域）から500m以内にある場合は1、そうでない場合は0
x_{09} 最寄り駅までの距離（m）	各建物と最寄り駅との間の距離
x_{010} 最寄りバス停までの距離（m）	各建物と最寄りのバス停との間の距離
x_{011} 立地適正化計画ダミー（0, 1 二値）	立地適正化計画で定められる都市機能誘導区域または居住誘導区域は1、そうでない場合は0

$$y_d \sim \text{Bern}_{y_0}(\lambda_d) \quad (\text{式-3.4})$$

$$\lambda_d = f(X_d) = \text{CART}(X_d) \quad (\text{式-3.5})$$

なお、モデル構築に際しては、既存研究で用いられているロジスティック回帰によるモデル（式-3.6、式-3.7）とCART法により構築したモデルを同様の条件で構築し、それらの精度を比較評価することにより、手法の有効性および結果の妥当性を検討した。

$$y_d \sim \text{Bern}_{y_0}(\lambda_d) \quad (\text{式-3.6})$$

$$\lambda_d = f(X_d) = \text{Sigmoid}(\alpha_d + X_d^T \beta_d) \quad (\text{式-3.7})$$

3-1-3. モデル精度の評価

退蔵確率モデルと解体確率モデルの精度評価においては、ホールドアウト法による未知のデータに対する予測性能（汎化性能）評価を行った。評価手法には、ROC（Receiver Operating Characteristic）曲線とその評価指標AUC（Area Under the Curve）を用いた。これに加えて、結果解釈に役立てるため、PDPおよびSobol感度解析によって、それぞれの説明変数が退蔵確率にどのように影響しているかを定量化し可視化した。PDP（Partial dependence plot、部分従属プロット）とは、機械学習においてモデルの解釈可能性を得る手法のひとつであり、他の説明変数を固定した状態で対象の説明変数のみを変化させてモデル出力値の変動を可視化する方法である（図-3.7）。本分析では、すべての学習データに対してこの操作を行い、モデル出力値の統計量をPDPとして描画することで、各説明変数とモデル出力値の関係性の把握を試みた。また、Sobol感度解析とは、分散に基づく大域的な感度解析の代表的手法であり、モデル出力

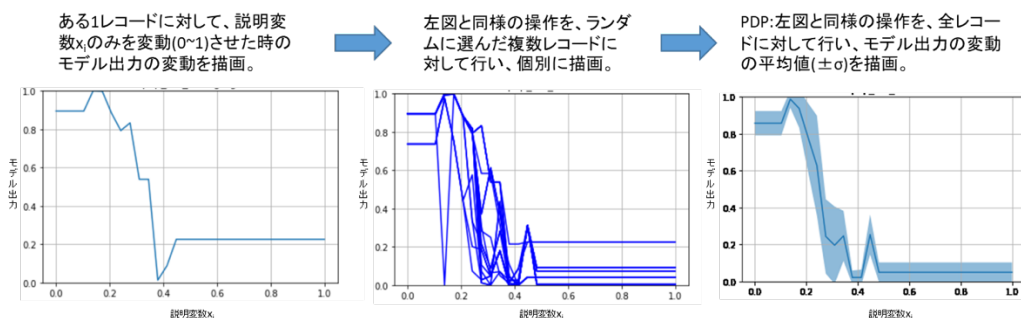


図-3.7 PDP（Partial Dependence Plot、部分従属プロット）の作成方法

の分散に対する説明変数の寄与分を把握することができる。

3-1-4. モンテカルロシミュレーションによる将来予測

2015年から2050年における将来の物質代謝は、構築した4d-GISデータベース、退蔵確率モデル、解体確率モデルを用い、モンテカルロシミュレーションを行うことで予測した。

ある時点 t_i から次の時点 t_{i+1} にかけての予測プロセスは、4段階により構成される。まず、4d-GISデータセットに基づき各建築物ストックに含まれる資源（骨材、セメント、木材、鋼材等）の質量を定量化する。つぎに、 t_i 時点におけるストックを推計する。具体的には、時点 t_i における各建築物の説明変数を退蔵確率モデルに入力して各建築物の退蔵確率 λ_o を得たのち、パラメータ λ_o のベルヌーイ分布に従う乱数より各建築物が現役ストックか退蔵ストックかの判定を得て、この判定別に各建築物ストックに含まれる資源（骨材、セメント、木材、鋼材等）の量を集計して t_i 時点における現役ストックに含まれる各資源の質量と、退蔵ストックに含まれる各資源の質量を把握する。そののち、ある時点 t_i から次の時点 t_{i+1} にかけての資源の排出量推計として、時点 t_i における各建築物の説明変数を解体確率モデルに入力して各建築物の解体確率 λ_d を得て、パラメータ λ_d のベルヌーイ分布に従う乱数より、各建築物が残存か解体かを判定し、この判定別に各建築物ストックに含まれる資源（骨材、セメント、木材、鋼材等）の量を集計してある時点 t_i から次の時点 t_{i+1} にかけて排出される各資源の質量と、都市内に留まる各資源の質量を把握する。最後に、2015年の一人当たりの現役ストック量をもとに人口を乗じることで t_{i+1} 年の現役ストック量を推計し、 t_i 年から t_{i+1} 年に残存している現役ストック量と t_{i+1} 年の必要現役ストック量の不足分を新規投入量で賄うものとして、ある時点 t_i から次の時点 t_{i+1} にかけての資源投入量を推定する。これらののち時点 t_{i+1} における説明変数データセットを更新し、時点 t_{i+1} から時点 t_{i+2} に対する一連のシミュレーションが行われる。

モンテカルロシミュレーションでは、図-3.8に示すように、これらの過程を10000回繰り返しその期待値を得ることで将来推計を行っている。

本研究では、課題全体で設定する共通地域の中から具体地域を設定して2015年から2050年にかけての将来の物質代謝や、現役ストックの平均寿命と現役ストック割合等を予測することとした。また、人口減少化社会における社会構造の変化の影響を理解するために、人口安定化シナリオと人口減少・高齢化シナリオの2つのシナリオを用いたシミュレーションを行った。人口安定化シナリオでは、2015年の国勢調査における人口および人口の年齢構成が2050年まで一定に維持されることを仮定し、人口減少・高齢化シナリオでは、2015年の国勢調査による人口及び人口の年齢構成とサブテーマ2の1kmメッシュ単位での人口予測結果（図-2.7や図-2.8を参照）を参照して将来の人口を設定した。

3-2. 地域材の地域内での利用促進が地域の炭素貯蔵量に与える影響

日本のCO₂吸収量のうち森林は84%（2018年度）を占めており、地域内の森林木質資源を循環させ、そ

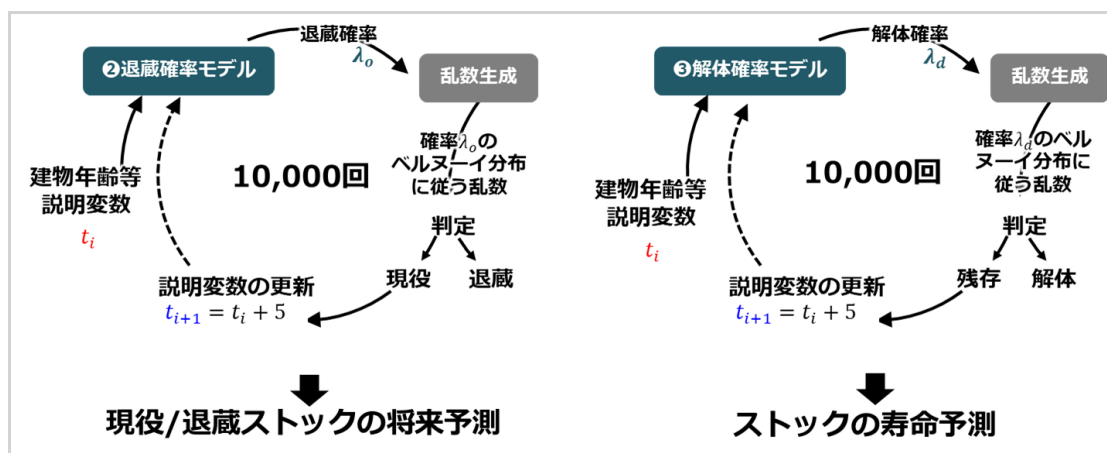


図-3.8 モンテカルロシミュレーションの概念

のCO₂吸収・固定機能を高度に発揮させることは、地域循環共生圏や地域脱炭素化の推進において重要な観点である。人工林は、森林面積の約4割を占めるものの、主伐期を迎えた11齢級以上については年間成長量の約6割が未利用であり、採算性が低いこともあって主伐後の再造林も進んでいない状況が見られる。そこで本研究では、木質資源の地域内循環利用の促進によるCO₂吸収・固定への影響を検討するため、地域の建築用木材の需要拡大を想定して、再造林率及び都市と人工林の炭素貯蔵量に与える影響や、木材輸送に伴う炭素排出量の削減効果の推計を行った。

推計では、人工林及び地域材で建てられた木造建築物を対象とすることとして、人工林では建築物向けの地域材需要量を賄う量を伐採すると仮定して伐採から再造林・保育に至る収支に基づき再造林が実施されるかどうかを判定し、木造建築物については非木造の非住宅・中高層建築物の木造化を想定したシナリオを設定した。

3-2-1. 人工林と木造建築物のストック量推計

分析では、資金循環の検討として立木販売の収益と再造林・育林費用に着目することとして、立木販売による収益が再造林・育林費用を超過する場合には伐採後に再造林が行われるものとした。立木販売による収益は、木材の品目ごとに山元立木価格に材積密度を乗じ、建築物用の木材需要量を継続的な収穫が可能となるよう設定した人工林の伐採量上限で除して求める品目別生産割合を加味して合計することと求める。山元立木価格は、木材価格統計調査を参考にして設定した1m³あたりの素材価格から、斜度および林道からの距離に基づいて選択される作業システムに応じた伐採・搬出費と、製材工場までの輸送距離に単位輸送コストを乗じて求める運搬費を除くことで算出した。再造林・育林費用は、林野庁による試算に基づき、対象地域ごとに設定する補助割合も考慮して設定することとした。なお、本研究においては、これらコストは将来にわたって変化しないものと仮定している

建築用の地域材需要量は、現状維持を想定したBAUシナリオと地域材の利用促進を想定したWood-Useシナリオを設定する。BAUシナリオでは、解体前と同じ構造の建築物が建てられることとし、木材需要量に占める製材用材の需要量の割合は将来にわたり一定であると仮定した。Wood-useシナリオでは、非木造の非住宅及び中高層建築物の木造化の対象を事務所建築物および4階建て以上の共同住宅として、それらの新規着工量の一部が木造に置き換えられ、うち半数程度が地域材で供給されることとした。

新規着工面積は、滅失延床面積に2000年比で求める人口割合を乗じて算出した。さらに、新規着工面積に単位面積あたりの木材投入量を乗じて建築物用の木材需要量を算出した。滅失延床面積は、小松ら³⁾の残存率に従って推計することとして、木造住宅およびRC造事務所の残存率は式-3.8、RC造共同住宅、S造共同住宅、鉄骨造事務所の残存率は式-3.9で求める。

$$R(x) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^x \frac{1}{t} \exp\left\{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dt \quad (\text{式-3.8})$$

$$R(x) = \exp\left\{-\left(\frac{t - \delta}{\eta}\right)^m\right\} \quad (\text{式-3.9})$$

ここで、 R ：残存率、 x ：築年数、 μ ：平均値、 σ ：標準偏差、 δ ：位置パラメータ、 m ：形状パラメータである。

3-2-2. 人工林および都市の炭素貯蔵量の将来推計

人工林と木造建築物の炭素ストック量は、それぞれ式-3.10と式-3.11に基づいて算出する。

$$C = \sum_j \{(V_j * D_j * BEF_j) \cdot (1 + R_j) \cdot CF\} \quad (\text{式-3.10})$$

$$C_w = stock(t) \times MI \times D_j \times CF \quad (\text{式-3.11})$$

ここで、 C ：炭素ストック量（t-C）、 V ：材積（ m^3 ）、 D ：容積密度（t-dm/ m^3 ）、 BEF ：バイオマス拡大係数（ m^3/m^3 ）、 R ：地上部・地下部比（ m^3/m^3 ）、 CF ：炭素含有率（t-C/t-dm）、 C_w ：木造建築物による炭素固定量（t-C）、 $stock(t)$ ：木造建築物の延床面積（ m^2 ）、 MI ：単位面積当たりの木材量（ m^3/m^2 ）、 D_j ：容積密度（t-dm/ m^3 ）、 CF ：乾物重量あたりの炭素含有率、 j ：樹種である。

3-2-3. 木材輸送に伴う炭素排出量の推計

木材輸送に伴う炭素排出量は、輸送量、輸送距離と、単位距離・量あたりのCO₂排出原単位から求める。本分析では、地域材の地域内での利用に伴う便益を評価するために、地域材を使用する場合と使用しない場合それぞれの木材輸送に伴う炭素排出量を推定した。地域材を使用する場合のCO₂排出原単位は、輸送手段を自動車と仮定して輸送距離に応じて求めることとした。

3-2-4. ストック型地域資源の地域間利用システムの検討（サブテーマ2との連携）

本サブテーマでは、主に木質資源について物理的な輸送も考慮して地域内で循環利用することによる効果の分析を行ったが、これら知見はサブテーマ2と共有し、木質資源を地域エネルギー資源として地域間で循環利用するためのシステム設計と地域間連携の検討を行った。本サブテーマでは、輸送量と輸送距離の積を目的関数とした最小化問題を求解することで、輸送コストや輸送に伴う炭素排出量の推計を行ったが、サブテーマ2では、これに費用の観点も加味した輸送費用最小化問題へ発展させて、地域間融通構造を設計している。これら地域間利用システムの検討に関する手法及び成果は、それぞれサブテーマ2の42ページと51ページを参照されたい。

3-3. 分析の対象地域の設定

本研究では、分析の対象地域として、本研究課題共通で設定した対象地域から九州北部の福岡県北九州市を設定した。北九州市は、面積約492km²、人口約94万人（2021年時点）の政令指定都市であり、100万人規模の都市の中でも特に人口減少・高齢化が顕著な都市である。市内の人口推移については、1979年の約107万人をピークに停滞、減少に転じており、2040年には約78万人に減少すると推計される。年齢別の比率では、65歳以上の割合が1985年から全国平均を上回り、その後も継続的に上昇して2010年には25%に達している。このような人口減少に伴い、都市のコンパクト化に関する取り組みが行われており、2017年からの立地適正化計画では、公共交通利便性の高い都心・副都心・地域拠点（計12箇所）が都市機能誘導区域に、その周辺が居住誘導区域に指定されており、都市機能誘導区域では、商業、業務、文化、交通といった都市機能集積のための誘導が、居住誘導区域では、良好な住環境の維持と効率的な土地利用に向けた誘導が図られている。また、2016年から北九州市空き家等対策計画が施行され、空き家の利活用や除去を促進する取り組みが整備されつつある。

また、北九州市では、1997年に循環経済（Circular Economy、CE）の考えに基づく「あらゆる廃棄物を他の産業分野の原料として活用し、最終的に廃棄物をゼロにすること（ゼロ・エミッション）」を目指すエコタウン事業がスタートし、2008年には内閣府及び環境省が推進する低炭素社会への転換を目指し先駆的に取り組む都市である環境モデル都市に選定された。加えて、北九州市の人工林面積は市域の10%弱に相当する4,584haであり、非住宅や中高層の建築物に対する需要も多く見込まれているため、木材供給量のポテンシャルは十分であり、地域内での循環利用システムの成立可能性は高いものと考えられた。しかし、全国の傾向と同様に北九州市においても森林の高齢化は深刻化しており、2018年時点では人工林面積の67%が11齢級以上となっていることから、森林資源の健全な循環システムの構築に向け新しい木材需要の創出、地域材の利用拡大に伴う再植林の促進を行うことが求められる地域である。

以上のように、北九州市は、人口減少と高齢化が先行し、それによる空き家などの社会問題が顕在化してそれらの対策が求められている地域であるとともに、地域内の木材利用の拡大の検討においても全

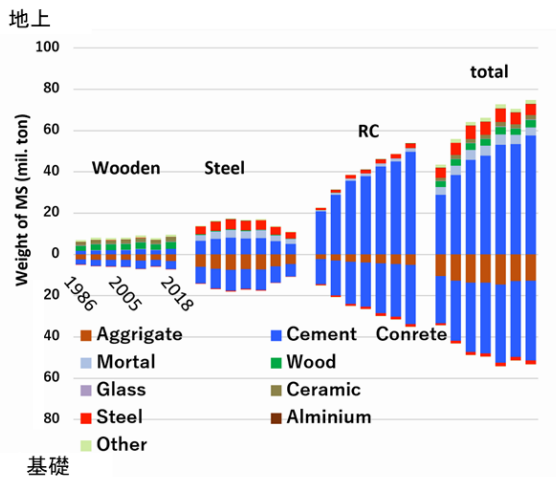


図-3.9 北九州市における物質ストックの
経年変化（1986-2018）⁴⁾

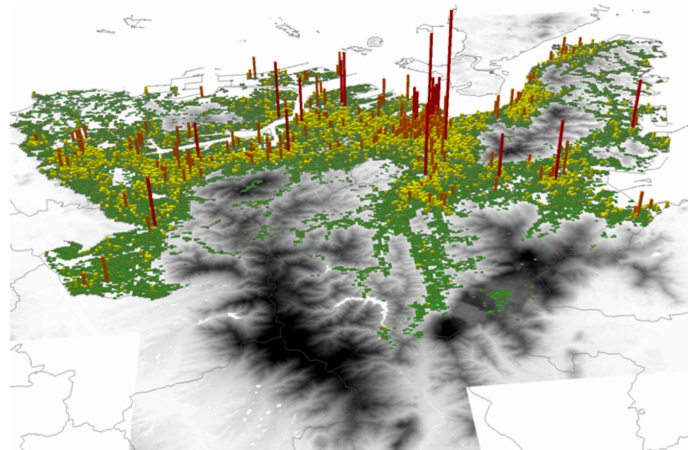


図-3.10 物質ストックの空間分布（2018年）⁴⁾

国のパイロットケースになりえることから、本研究から得られた成果や知見は他の自治体でも大きく役に立ちうると考えられたことから、本サブテーマでは特に北九州市での分析を中心として実施することとしたものである。

4. 結果及び考察

4-1. 都市の物質代謝の将来予測に関する分析結果

4-1-1. 建物4d-GISに基づく物質ストックとフローの質量化

時系列的に整備した4d-GISデータベースをもとに北九州市における建築物ストックを定量化した結果について、1986年から2018年までの経年変化を図-3.9に、2018年時点での空間分布を図-3.10に示す。北九州市における全物質ストックは、1986年、2005年、2018年において、それぞれ、77.9百万トン、115.7百万トン、126.3百万トンと推計された。北九州市に蓄積されるストック量は年々増加傾向にあるが、その増加速度はやや緩やかになりつつあることがわかる。

4-1-2. 退蔵確率モデル

図-3.6に、構築した退蔵確率モデルについて、訓練用データと検証用データによるROC曲線およびAUCを示す。訓練用データと検証用データのAUCはそれぞれ0.866、0.812であり、構築したモデルは極端に過剰適合していないと判断された。また、検証用データで80%程度の正解率が確保された。

表-3.3に、最尤推定によって得られた退蔵確率モデルのパラメータの一覧を示す。これらパラメータや、PDP、Sobol感度解析より、退蔵確率には、建物年齢の高さのほか、傾斜が急であること、最も近い

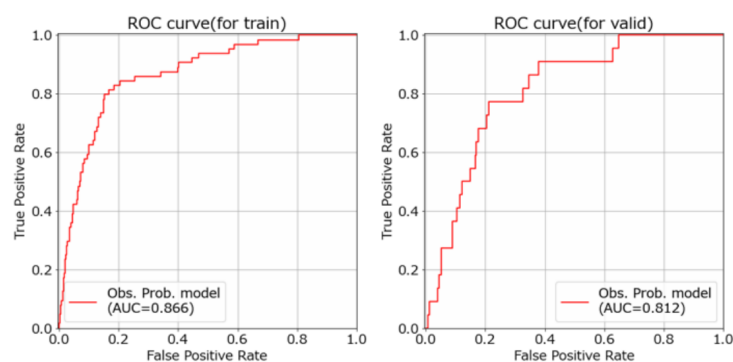


図-3.11 退蔵確率モデルの ROC曲線とAUC指標⁴⁾

表-3.3 最尤推定から得られた退蔵確率モデルのパラメータ

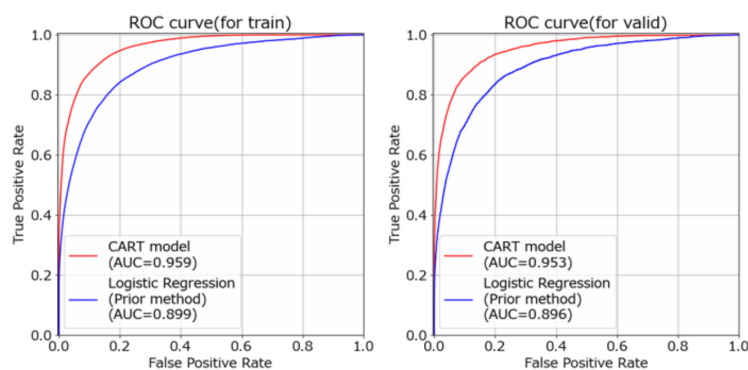
パラメタ	説明変数 (単位)	回帰係数
β_{01}	建物年齢 (年)	0.04
β_{02}	建物面積 (㎡)	-0.01
β_{03}	傾斜 (°C)	0.06
β_{04}	最近道路幅 (m)	-0.15
β_{05}	住宅密度 (個/10000㎡)	-0.01
β_{06}	人口 (人)	0.00
β_{07}	高齢者人口 (人)	0.00
β_{08}	工業地域ダミー (0, 1二値)	-0.10
β_{09}	最寄り駅までの距離 (m)	0.00
β_{010}	最寄りバス停までの距離 (m)	0.00
β_{011}	立地適正化計画ダミー (0, 1二値)	-0.92

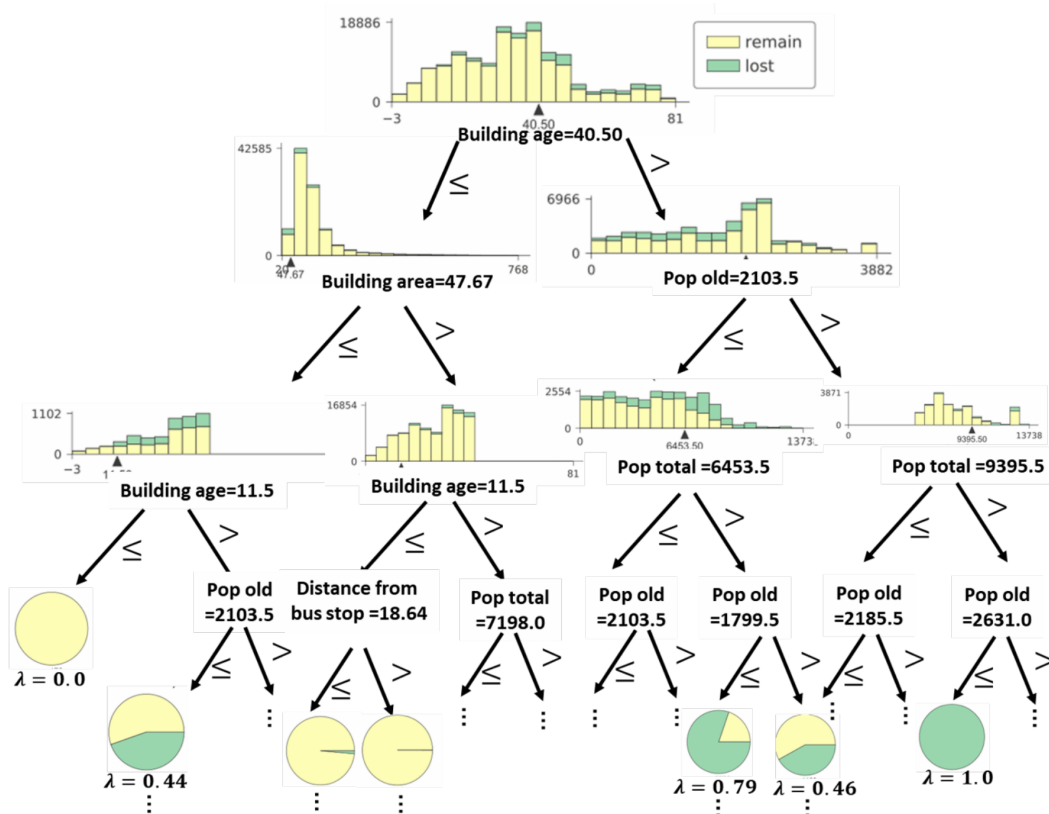
道路の幅が狭いこと、立地適正化計画において都市機能誘導区域または居住誘導区域に定められていないことが影響していることが明らかとなった。これは、急傾斜地や道幅の狭い場所、将来の市街化への誘導が見込めない場所では開発圧力が弱いため、建替えが進みにくく、ストックが利用されなくなる（退蔵ストックに移行する）確率が高いことを示唆している。

4-1-3. 解体確率モデル

図-3.7に、解体確率モデルにおける訓練用データと検証用データのROC曲線およびAUCを示す。CART法では、訓練用データによる評価のAUCは0.959、検証用データによる評価のAUCは0.953であり、構築したモデルの高い予測精度と汎化性が確認された。既存研究でも用いられているロジスティック回帰では、訓練用データと検証用データのAUCがそれぞれ0.899、0.896であり、本研究で採用したCART法のほうが、ロジスティック回帰の精度を上回っていることがわかった。

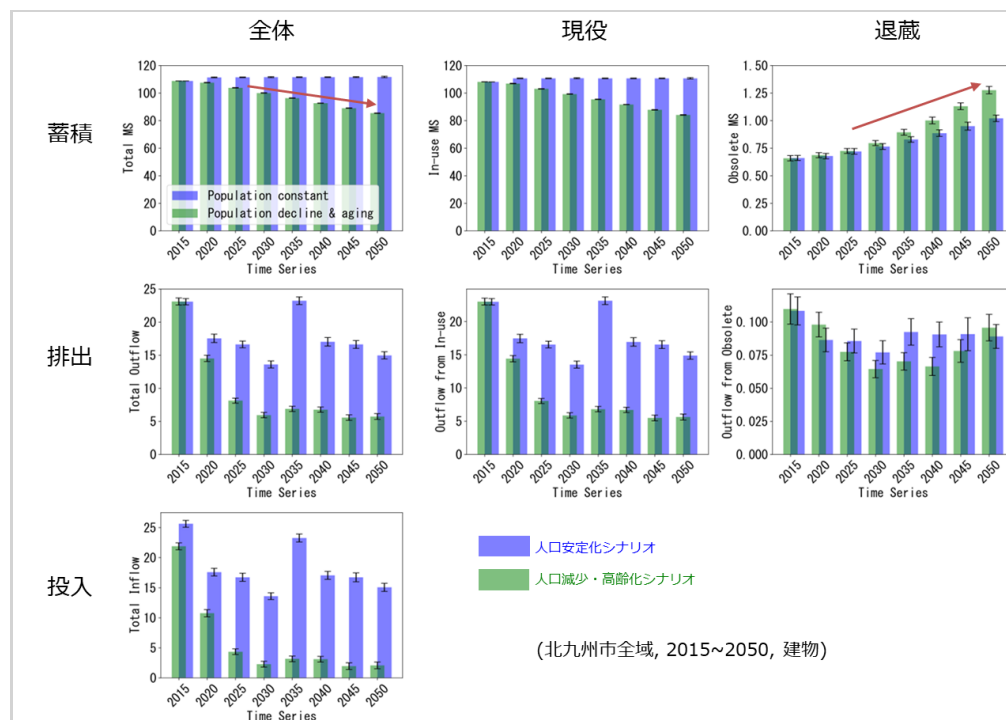
CART法により構築された分類木を図-3.13に示す。最も影響の大きい最初の分岐は建物年齢40.5年であり、建物年齢が約40年を超えると、解体確率が高まる傾向があることがわかる。しかし、建物年齢約40年未満では、建物面積が小さいこと、建物年齢約40年以上では、高齢化人口が少なく人口が多いこと等が解体確率の高さに影響している。これら分析結果より、CART法によりこのような交互作用を考慮でき、モデル精度の向上やより実態に即した推計を可能にできていることがわかった。

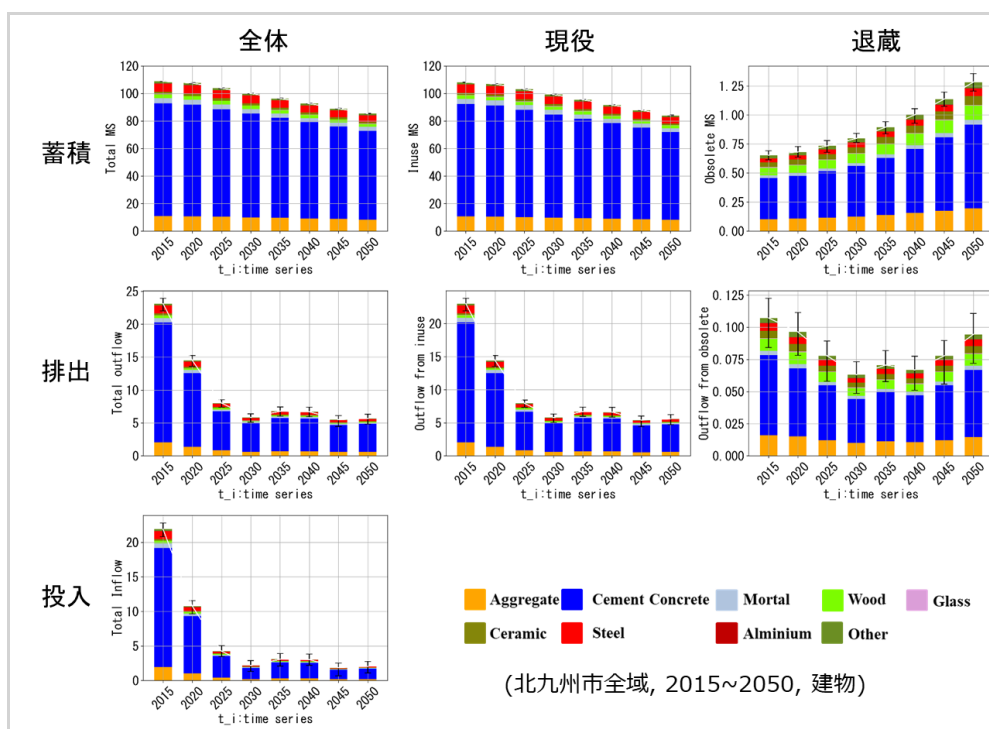
図-3.12 解体確率モデルのROC曲線とAUC指標^{4,5)}

図-3.13 解体確率モデルの分類木^{4,5)}

4-1-4. モンテカルロシミュレーションによる将来予測

都市内のストック（蓄積）量、都市からの排出量、都市への投入量を、現役ストック、退蔵ストック、およびそれらの合計について、人口安定化シナリオと人口減少・高齢化シナリオの2種類のシナリオ別に予測した結果を、図-3.14に示す。

図-3.14 シナリオ別都市物質代謝の将来予測⁴⁾

図-3.15 資材別都市物質代謝の将来予測⁴⁾

退蔵ストックについては両シナリオで年々の増加が予測されたいっぽう、全体のストックおよび現役ストックは人口減少・高齢化シナリオにおいて現象が予測された。これは、人口減少・高齢化によるストック需要の低下速度が、人口減少による退蔵ストックの増加速度を上回ったためと考えられる。

排出量および投入量については、いずれも人口安定化シナリオが人口減少・高齢化シナリオを大きく上回った。これは、人口減少・高齢化による物質代謝の停滞を反映しているものと考えられる。なお、退蔵ストックにおける排出量については、シナリオ間で差が殆どみられず、継続的な発生が予測されたものの、退蔵ストックからの排出量が全体の排出量に占める割合は大きくない。

つぎに、都市内のストック（蓄積）量、都市からの排出量、都市への投入量を、現役ストック、退蔵ストック、およびそれらの合計について、資材別に予測した結果を図-3.15に示す。退蔵ストックから排出される資材では、現役ストックと比較して木材の割合が大きい。これは、退蔵ストックの多くは木造住宅であることによるものと考えられるが、木造住宅であることが直接的に退蔵化の要因になっているとは言い切れず、退蔵確率モデルのモデル解釈で示された退蔵確率を高める条件（傾斜が急である、最も近い道路の幅が狭い、立地適正化計画において都市機能誘導区域または居住誘導区域に定められていないこと等）が揃った地域において、木造住宅が多いという地域特性の影響も考えられる。

また、退蔵ストックの空間分布の変化に着目すると、2015年において、退蔵ストックは、市街地辺縁部、市街地内、急傾斜地、密集した市街地に多かったが、2050年にかけて、その範囲と質量が空間的に拡大することが把握された。

以上のように、本研究では建築物ストックに含まれる物質を対象として、人口減少化社会における社会構造の変化を考慮しつつ、都市の物質代謝の将来予測を行う手法を考案し、構造別、資材別の資源量把握や、建物特性や建物立地条件等により異なる解体確率・退蔵確率の推計と建物解体や退蔵ストック化の要因についても検討できる手法を確立できた。

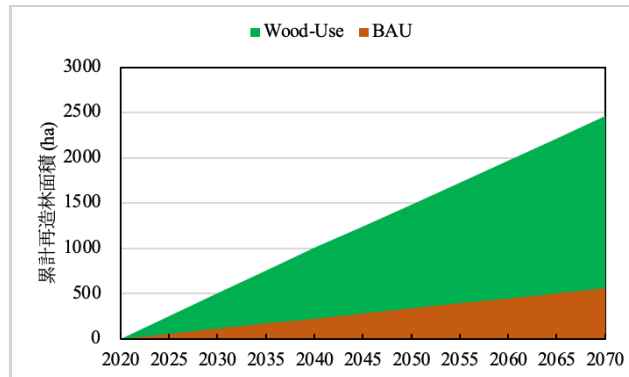
4-2. 地域材の地域内での利用促進が地域の炭素貯蔵量に与える影響

4-2-1. 木造建築物と人工林のストック量の推計結果

建築物用の地域材需要量の推計結果では、Wood-useシナリオでは中高層および非住宅建築物の木造化により、2020年から2070年までの累計の建築用の地域材需要量が、BAUシナリオの1.5倍となる32.5万m³

表-3.4 再造林にかかる収支のシナリオ間比較

作業 システム	A 収入 (円/㎡)		B 伐採・搬出コ スト (円/㎡)	C 輸送コスト (円/㎡)	(A - B - C) × 395/10000 - 31 山元立木価格 - 再造林・育林コスト (万円/ha)	
	BAU	Wood-Use			BAU	Wood-Use
1	11290	14866	6000	2745	70	211
2	11290	14866	11000	2745	-128	13
3	11290	14866	15600	2745	-310	-168
4	11290	14866	13700	2745	-235	-93

図-3.16 累計での再造林面積の推計結果⁶⁾

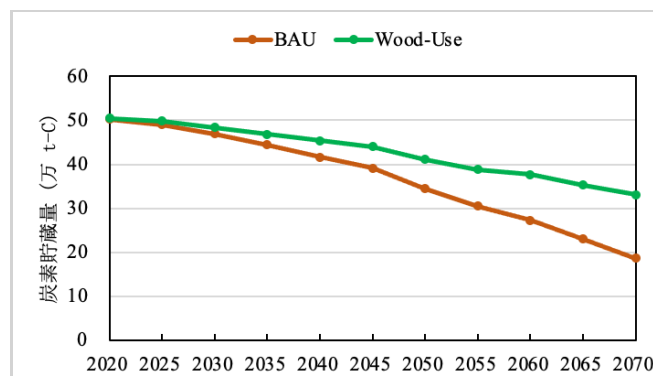
の増加になると推計された。また、木材輸送距離は 61 km、木材輸送コストは 2,745 円/m³と推計された。山元立木価格から再造林、育林の費用を差し引いた収支を、表-3.7 に示す。

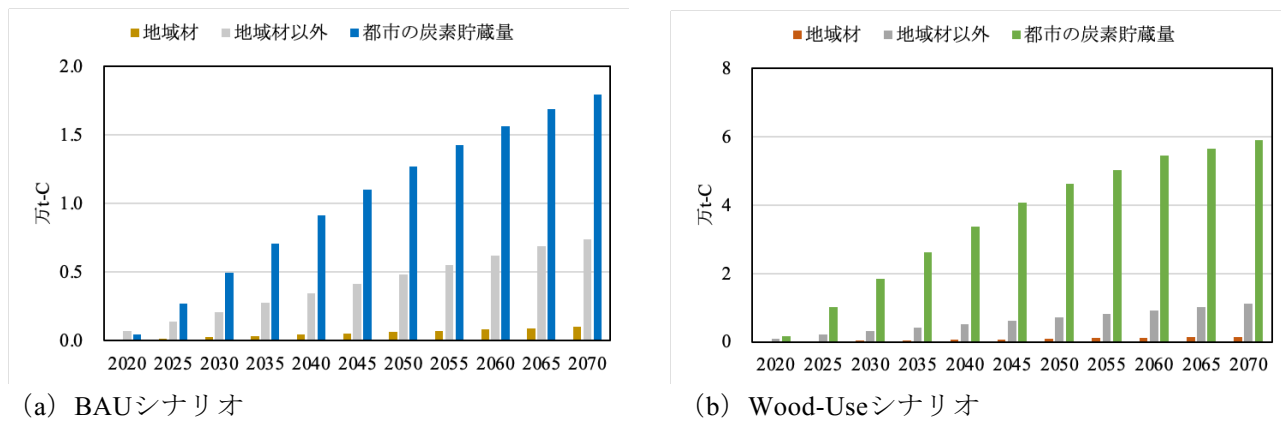
収支がプラスと推計された人工林は、BAUシナリオではハーベスタやウインチ、フォワーダ・トラックを使用する作業システムが利用できるとした人工林のみであったのに対し、Wood-Useシナリオでは、さらに伐採にチェーンソーも使用できるとした人工林も含まれる。シナリオ別の再造林面積の推計結果は、図-3.16に示すように、2020年から2070年の期間の累計で、BAUシナリオでは0.6千haであったのに対し、Wood-useシナリオではBAUシナリオと比較して約4倍大きい2.5千haであった。

4-2-2. 都市と人工林の炭素貯蔵量の推計結果

想定したシナリオそれぞれでの、都市と人工林の炭素ストック量の推計結果を図-3.17に示す。2070年における炭素貯蔵量は、BAUシナリオの18.6万t-C、Wood-Useシナリオでは33.1万t-Cと推計された。このうち、都市の炭素貯蔵量は、BAUシナリオで16.8万t-C、Wood-Useシナリオで27.2万t-C、人工林の炭素貯蔵量はBAUシナリオで1.8万t-C、Wood-Useシナリオで5.9万t-Cと推計された。

Wood-Useシナリオの都市と人工林の炭素貯蔵量は、BAUシナリオと比較して約1.8倍（14.5万t-C）大き

図-3.17 都市と人工林の炭素貯蔵量の推計結果⁶⁾

図-3.18 木材輸送に伴う炭素排出量の推計結果⁶⁾

く、建築部門における地域材利用の推進が炭素貯蔵量の増加に貢献することが示された。Wood-Useシナリオの炭素貯蔵量が大きく推計された要因として、都市側では、建築物としてストックされる木材の量がBAUシナリオと比較して1.5倍（24万m³）大きく、都市の炭素貯蔵量が4.1万t-C大きく推計されたこと、人工林側では、再植林面積が4.4倍（1.9千ha）大きく、人工林の炭素貯蔵量が10.4万t-C大きく推計されたことが挙げられる。

4-2-3. 木材輸送に伴う炭素排出量の推計結果

木材輸送に伴う炭素排出量の推計結果を図-3.18に示す。2070年における都市の炭素貯蔵量に占める木材輸送に伴う炭素排出量の割合は、地域材を使用した場合では、BAUシナリオで5.6%（0.1万t-C）、Wood-Useシナリオで2.6%（0.2万t-C）と低い割合であった。他方、地域材を使用しなかった場合では、BAUシナリオで41.1%（0.7万t-C）、Wood-Useシナリオで19.0%（1.1万t-C）と推計され、地域材より炭素排出量が大きく推計された。この結果から、地域材を地域内で循環利用することが木造建築物の炭素貯蔵効果を効果的に発揮するうえで有用であることが示された。

5. 研究目標の達成状況

本サブテーマでは、2. 研究目標に示したとおり、（1）ストック型地域資源の質及び量の空間的な分布を定量評価する手法の開発と具体地域への適用、（2）資金の地域内循環の視点も含めてストック型地域資源の地域内利用システムの検討手法の開発と具体地域での地域内利用の効果の検討、（3）サブテーマ2との連携によるストック型資源の地域間連携を通じた活用方策の検討、の3つの目標を設定している。これらについて、以下の通り目標とした成果を達成することができた。また、サブテーマ2の共通シナリオ利用や整備した地理情報データの他サブテーマとの共有など、サブテーマ間の連携についても進めてきたところである。

目標 1) ストック型地域資源の質及び量の空間的な分布を定量評価する手法の開発と具体地域への適用

- 都市の物質代謝の概念を踏まえて、時系列も考慮した地理情報システム（4d-GIS）も活用して物質の投入・排出や都市内でのストックを評価する手法を開発し、福岡県北九州市への適用を通じて建築物の解体やストックの退蔵に影響する要因等の検討を行った（3-1 節/4-1 節）

目標 2) 資金の地域内循環の視点も含めてストック型地域資源の地域内利用システムの検討手法の開発と具体地域での地域内利用の効果の検討

- ストック型資源の中でも特に建築材での利用やエネルギー利用など多様な用途が考えられる森林資源を対象に、地域内での活用によるストック量への影響や炭素貯蔵量の変化を評価できる手法を開発し、福岡県北九州市への適用を通じて人工林の活用による経済性や木造住宅建築用材の利用拡

大、炭素貯蔵量の変化等の検討を行った（3-2 節/4-2 節）

目標 3) サブテーマ 2 との連携によるストック型資源の地域間連携を通じた活用方策の検討

- 本サブテーマが実施した森林資源の地域内活用に関する成果も参考に、サブテーマ2にて木質バイオマス資源の地域間融通を最小費用流問題として求解する手法を開発し、森林資源のエネルギー利用としての木質バイオマスの地域間での利用システムの検討を行った（サブテーマ2・3-3節/4-3節）

6. 引用文献

- 1) 岡本久人. (2006) ストック型社会への転換 :長寿命化時代のインフラづくり. 鹿島出版会.
- 2) H. TANIKAWA, S. HASHIMOTO. (2009) Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4d-GIS. *Building Research & Information*, 37, 483–502.
- 3) 小松幸夫, 加藤裕久, 吉田倬郎, 野城智也. (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 : 1987年固定資産台帳に基づく推計. *日本建築学会計画系論文報告集*, 439, 101–110.
- 4) 森田大登. (2022) 現役・退職を考慮した都市物質代謝の将来予測に関する研究 -北九州市を事例として- (修士論文)
- 5) 森田大登, 深堀秀敏, 郭静, 白川博章, 谷川寛樹. (2021) 4d-GISと機械学習を用いた建築物ストックの解体現象のモデル化 : 福岡県北九州市を対象としたケーススタディ. *環境システム研究論文発表会講演集*, 31–36.
- 6) 山田久太. (2022) 循環型社会の構築に向けた地域の炭素貯蔵量のシナリオ分析—北九州市の森林資源を例に— (修士論文)

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) L. GAO, Y. HIRUTA, S. ASHINA: Renewable Energy, 162, 818-830 (2020) (IF:8.634), Promoting renewable energy through willingness to pay for transition to a low carbon society in Japan.
- 2) L. GAO, S. ASHINA: Journal of Cleaner Production, 330, 129828 (2021) (IF: 11.072), Willingness-to-pay promoted renewable energy diffusion: The case of Japan's electricity market.
- 3) 芦名秀一: 地球環境, 27 (1), 19-29 (2022), 地域連携を考慮した再生可能エネルギーを活用した脱炭素型エネルギーシステムの実現可能性検討.
- 4) Y. HIRUTA, L. GAO, S. ASHINA: Science of The Total Environment, 819, 152893 (2022) (IF: 10.754), A novel method for acquiring rigorous temperature response functions for electricity demand at a regional scale.
- 5) Y. HIRUTA, N.N. ISHIZAKI, S. ASHINA, K. TAKAHASHI: Energy Conversion and Management: X, 14, 100172 (2022), Regional and temporal variations in the impacts of future climate change on Japanese electricity demand: Simultaneous interactions among multiple factors considered.
- 6) Y. HIRUTA, N.N. ISHIZAKI, S. ASHINA, K. TAKAHASHI: Data in Brief, 108047 (2022), Hourly future climate scenario datasets for impact assessment of climate change considering simultaneous interactions among multiple meteorological factors.
- 7) 芦名秀一: 地球環境, 27 (2), 137-146 (2023), 地方自治体レベルでの2050年脱炭素社会の実現可能性の検討.

【サブテーマ2】

- 1) 石河正寛, 陳鶴, 松橋啓介, 金森有子, 有賀敏典: 土木学会論文集G, 76 (5), II_199-II_207 (2020), 住宅と自動車の利用に伴うメッシュ別CO₂排出量の推計と考察.
- 2) 金晃敏, 松橋啓介, 石河正寛, 有賀敏典: 都市計画論文集, 55 (3), 1121-1127 (2020), 第4次メッシュレベルの人口変動に及ぼす年齢・時代・コホート効果の分析.
- 3) F.E.K. SATO, T. NAKATA: Energies, 13 (9), 2396 (2020) (IF: 3.252), Analysis of vehicle production through a material flow approach.
- 4) Y. BARDENHAGEN, T. NAKATA: Energies 13(23), 6303 (2020) (IF: 3.252), Regional Spatial Analysis of the Offshore Wind Potential in Japan.
- 5) T. FURUBAYASHI, T. NAKATA: Journal of Cleaner Production, 125665-125665 (2020) (IF: 11.072), Analysis of Woody Biomass Utilization for Heat, Electricity, and CHP in a Regional City of Japan.
- 6) 金晃敏, 松橋啓介, 石河正寛, 有賀敏典: 土木学会論文集G, 77 (6), II_227-II_234 (2021), 運転免許保有者数と運転者数の推移における年齢・時代・コホート効果の分析と将来推計.
- 7) 金晃敏, 松橋啓介, 石河正寛, 有賀敏典, 崔文竹: 都市計画論文集, 56(3), 1282-1288 (2021), 都道府県別人口変動に及ぼす年齢・時代・コホート効果の分析.
- 8) 長野尚也, 古林敬顕, 中田俊彦: 地域学研究, 50 (2), 1-15 (2021), 地域の脱炭素化に向けたエネルギー需給構造の解析 岩手県宮古市及び宮古スマートコミュニティのケーススタディ.
- 9) 小野寺弘晃, 根本和宜, 中田俊彦: エネルギー・資源, 42(5), 337-350 (2021), 市区町村のエネルギー需給特性を考慮した広域圏エネルギーシステムの設計.
- 10) F.E.K. SATO, T. NAKATA: Resources, Conservation and Recycling, 164, 105118 (2021) (IF: 13.716), Analysis of the impact of vehicle lightweighting on recycling benefits considering life cycle energy reductions.
- 11) N. NAGANO, R. DELAGE, T. NAKATA: Energies, 14(10), 2823-2848 (2021) (IF: 3.252), Optimal Design and Analysis of Sector-Coupled Energy System in Northeast Japan.
- 12) R. DELAGE, T. MATSUOKA, T. NAKATA: Energies, 14(8), 2168-2179 (2021) (IF: 3.252), Spatial-

Temporal Estimation and Analysis of Japan Onshore and Offshore Wind Energy Potential.

- 13) 石河正寛, 加藤秀樹, 有賀敏典, 金森有子, 金晃敏, 崔文竹, 松橋啓介: 交通工学, 8 (5), 1-10 (2022), 自動車検査証の個別統計を用いた全国地域別乗用車CO₂排出量の試算.

【サブテーマ3】

- 1) 齋藤隆成, 平井千津子, 芳賀智宏, 松井孝典, 白川博章, 谷川寛樹: 土木学会論文集G, 76 (6) (2020), 衛星夜間光情報に基づく深層学習による建築物の延べ床面積推計に関する研究.
- 2) W. WUYTS, R. SEDLITZKY, M. MORITA, H. TANIKAWA: Sustainability, 2, 13 (2020) (IF: 3.889), Understanding and managing vacant house in support of a material stock type society-The case of Kitakyushu, Japan.
- 3) H. TANIKAWA, T. FISHMAN, S. HASHIMOTO, I. DAIGO, M. OGUCHI, A. MIATTO, S. TAKAGI, N. YAMASHITA, H. SCHANDL: Journal of Cleaner Production, 285 (2020) (IF: 11.072), A framework of indicators for associating material stocks and flows to service provisioning: Application for Japan 1990-2015.
- 4) 山下奈穂, 加用千裕, 谷川寛樹: 環境科学会誌, 34(4), 184-195 (2021), 木造住宅と森林の木材需給を考慮した炭素ストックのシナリオ分析.

<その他誌上発表(査読なし)>

【サブテーマ1】

- 1) 芦名秀一: 日本LCA学会誌 (2021)
「地域での技術・政策評価における統合評価モデルの活用：日本での脱炭素に向けたシナリオ検討を例に」

【サブテーマ2】

- 1) 松橋啓介: 商工金融, 70(8), 48-51 (2020)
「脱炭素社会と交通の姿」
- 2) 松橋啓介: 日交研双書「運輸部門の気候変動対策」(室町泰徳 編著), 成山堂書店, 109-120 (2020)
「乗用車起因のCO₂排出量とメッシュ人口との関係」
- 3) 松橋啓介: 東京モーターショーシンポジウム2019「運輸部門のゼロエミッション化」, 14-23 (2020)
「乗用車起因CO₂排出量の地域別動向およびそのメッシュ人口との関係」
- 4) 松橋啓介: 運輸と経済, 交通経済研究所, 887, 4-10 (2021)
「特集 交通と環境－脱炭素社会に向けて－「都市と交通の未来」」
- 5) 松橋啓介: JIR常陽産研NEWS, 385, 12-15 (2022)
「気候危機に地域はどのように対応していくか?」
- 6) 中田俊彦: 太陽エネルギー, 48 (1), 58-63 (2022)
「再生可能エネルギーを利用した被災地の取り組み事例 - 宮古市スマートコミュニティ」
- 7) 中田俊彦: 日本機械学会誌, 126, 30-32 (2023)
「グリーン電力を主体とする地域エネルギーシステムのデザイン」

(2) 口頭発表(学会等)

【サブテーマ1】

- 1) Y. HIRUTA, L. GAO, S. ASHINA: Thirteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium, Online (2020)
“Impact of COVID-19 Pandemic on Electricity Consumption in the Greater Tokyo Area”
- 2) 蛭田有希, L. GAO, 芦名秀一: 第48回環境システム研究論文発表会, オンライン (2020)

“新型コロナウイルス感染症の流行による社会経済活動の変化が東京電力管内の毎時電力消費量に与えた影響の定量的把握”

- 3) S. ASHINA: The 26th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan and Online (2020)
“New Research Project at NIES (3):Development of Integrated Assessment Approach for Designing and Assessing the Socio-economic Impact on Regional Circular and Ecological Sphere utilizing Regional Resources (1-2003)”
- 4) Y. HIRUTA, L. GAO, S. ASHINA: The 1st International Association for Energy Economics (IAEE) Online Conference, Online (2021)
“Modeling the response of hourly electricity demand to climate conditions in Japan”
- 5) L. GAO, Y. HIRUTA, S. ASHINA: The 1st International Association for Energy Economics (IAEE) Online Conference, Online (2021)
“Impacts assessment of willingness to pay on the installed and transmission capacities of renewable energy resources in Japan”
- 6) 蛭田有希, L. GAO, 芦名秀一: 第49回環境システム研究論文発表会, オンライン (2021)
「新型コロナウイルス感染対策に伴う行動変容が電力需要に与えた影響の気温による違いの検出」
- 7) 牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘: 環境科学会年会, オンライン (2021)
「収集運搬モデルによる焼却施設の廃棄物組成と家計消費との結合データセットの作成」
- 8) Y. HIRUTA: The 27th AIM International Workshop, Online (2021)
“Assessing the impacts of climate change on electricity consumption in Japan: The regional and temporal variations in the impacts”
- 9) L. GAO, Y. HIRUTA, S. ASHINA: The 27th AIM International Workshop, Online (2021)
“Optimal allocation of willingness to pay for renewable electricity generation and grid transmission in transition to a low-carbon society in Japan”
- 10) S. ASHINA: The 27th AIM International Workshop, Online (2021)
“Assessment of local GHG mitigation actions toward the net-zero emissions in Japan”
- 11) S. ASHINA: The 27th AIM International Workshop Online (2021)
“Contribution of AIM to update NDC and LTS in Japan”
- 12) Y. HIRUTA, L. GAO, S. ASHINA: The Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC), Online (2021)
“Climate change impacts on electricity demand in Japan: simulations based on the hourly resolution climate scenarios”
- 13) 牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘: 第17回日本LCA学会研究発表会, オンライン (2022)
「工場名称データを用いたテキストマイニング手法による熱需要を持つ産業の抽出法の検討」
- 14) 岡部紘樹, 藤田壮, 堀啓子, 中谷隼, 牧誠也, 五味馨: 第17回日本LCA学会研究発表会, オンライン (2022)
「地域特性を考慮する脱炭素シナリオの計画システムについての研究」
- 15) S. ASHINA: Tsukuba Global Science Week (TGSW) 2022 / Tsukuba Conference Session “Promoting a Decarbonized Society - Zero emissions challenge against climate change from basic science to social implementation in Tsukuba Science City”, Tsukuba, Japan (2022)
“Role of Local Actions toward a Decarbonized Society: Our Experiences and Future Perspectives”
- 16) S. ASHINA, K. GOMI: The 28th AIM International Workshop, Online (2022)
“Local Decarbonization”

【サブテーマ2】

- 1) R. DELAGE, T. NAKATA: 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Osaka, Japan (2020)

- “Machine learning for modeling energy systems complexity”
- 2) 松橋啓介: 土木学会全国大会研究討論会 (2021)
「低炭素都市から脱炭素都市へ」
 - 3) 松橋啓介: 日本機械学会2021年度年次大会 (2021)
「脱炭素社会実現に向けた運輸部門の将来ビジョン」
 - 4) 松橋啓介: 土木学会スマートシェアリングシティ研究小委員会 (2021)
「脱炭素社会とスマートシェアリングシティ」
 - 5) 松橋啓介: 環境科学会2021年会 (2021)
「カーボンゼロ社会に向けた脱炭素かわさき市民会議の進捗」
 - 6) 松橋啓介, 石河正寛, 金晃敏: 日本交通政策研究会 (2021)
「バイズ型APC分析を用いた免許保有者数と運転者数の年齢・時代・コーホート効果の分析と将来値の試算」
 - 7) 末松天地, R. DELAGE, 根本和宜, 中田俊彦: 第37回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2021)
「重回帰分析を用いた地域別旅客自動車消費エネルギーの推定」
 - 8) R. DELAGE, 中田俊彦: 第37回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2021)
“Cluster analysis of Japan households’ energy consumption per resource”
 - 9) 尾崎竣也, 中田俊彦, R. DELAGE, 根本和宜: 第37回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2021)
「Power-to-heatを考慮した地域熱供給システムの設計」
 - 10) 千田遥斗, 根本和宜, 中田俊彦: 第16回バイオマス科学会議 (2021)
「木材生産の作業システムを考慮した木質バイオマス資源の広域利活用のモデル分析」
 - 11) 末松天地, R. DELAGE, 根本和宜, 中田俊彦: 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 (2021)
「マルチエージェントシミュレーションに基づく地域間再生可能エネルギー融通ネットワークの設計」
 - 12) 根本和宜, 中田俊彦: 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 (2021)
「持続可能性を考慮した市区町村別木質バイオマス ポテンシャルの推計」
 - 13) R. DELAGE, 中田俊彦: 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 (2021)
“Estimating electricity demand profiles from smart meter meshed data using independent component analysis”
 - 14) 小坂健太, 根本和宜, 中田俊彦: 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 (2021)
「再生可能エネルギーを利活用した脱炭素型製造業への移行シナリオ」
 - 15) 楠本祥喜, R. DELAGE, 中田俊彦: 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 (2021)
「地域の熱・電力エネルギー需要量の推定と全国データベース作成」
 - 16) 松岡太一, R. DELAGE, 中田俊彦: 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 (2021)
「陸上・洋上風力と太陽光発電の時間変動性を考慮したポテンシャルマップの作成」
 - 17) 天野哲, 中田俊彦: 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 (2021)
「携帯電話位置情報を用いるV2G導入ポテンシャルの推計」
 - 18) 中田俊彦: 4DHフォーラム国際オンラインセミナー (第3回) (2021)
「地域でのセクターカップリングの実現可能性」
 - 19) T. MATSUOKA, T. AMANO, R. DELAGE, T. NAKATA: EGU General Assembly 2021, Online (2021)
“Spatiotemporal wind energy potential estimation and analysis in Japan”
 - 20) 松橋啓介: DBJ設備投資研究所経営会計ミーティング(2022)
「日本版SSP (社会経済シナリオ) について」
 - 21) 中田俊彦: 電気学会全国大会 (2022)

- 「地域エネルギーシステムデザインのガイドライン」
- 22) R. DELAGE, 中田俊彦: 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2022)
 “Nonlinear, multiscale temporal analysis of regional electricity demand”
- 23) 阿彦貴規, 松岡太一, R. DELAGE, 中田俊彦: 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2022)
 「太陽光発電の時空間ポテンシャルの推計および評価」
- 24) 中田俊彦, 天野哲, R. DELAGE: 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2022)
 「携帯位置情報を用いるV2G導入ポテンシャルの時空間分析」
- 25) 長谷山光代, 天野哲, R. DELAGE, 中田俊彦: 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2022)
 「携帯電話の位置情報を用いた運輸部門のエネルギー需要推計」
- 26) 末松天地, R. DELAGE, 中田俊彦: 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2022)
 「エージェントシミュレーションに基づく再生可能エネルギー発電ポテンシャルの地域特性を考慮した地域間電力融通ネットワークの設計」
- 27) 小野寺弘晃, 根本和宣, R. DELAGE, 中田俊彦: 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2022)
 「セクターカップリングによる需給調整の事業性を考慮したエネルギーシステムの最適設計」
- 28) H. ONODERA, R. DELAGE, K. NEMOTO, T. NAKATA: 43rd IAEE International Conference, Tokyo Japan (2022)
 “The Role of Subsidies for Carbon- Neutral Energy Systems with Sector Coupling - A Case Study of Japan”
- 29) R. DELAGE, T. NAKATA: 43rd IAEE International Conference, Tokyo, Japan (2022)
 “A Toy Model for Decentralized Energy Systems Evolution”
- 30) K. NEMOTO, T. NAKATA: 69th Annual North American Meetings of the Regional Science Association International, Ottawa, Canada (2022)
 “Analysis of local energy supply and demand for woody biomass in Japanese municipalities”
- 31) R. DELAGE, TINAKATA: 第41回エネルギー・資源学会研究発表会 (2022)
 “A simplified simulation of decentralized energy systems evolution”
- 32) 松岡太一, R. DELAGE, 中田俊彦: 第41回エネルギー・資源学会研究発表会 (2022)
 「地域の風速分布を考慮した陸上・洋上風力発電機種を選定と発電ポテンシャル推計」
- 33) 楠本祥喜, R. DELAGE, 中田俊彦: 第41回エネルギー・資源学会研究発表会 (2022)
 「機械学習による市町村別電力需要推計手法の開発」
- 34) 鈴木琢允, 根本和宣, 中田俊彦: 第18回バイオマス科学会議 (2022)
 「事業性を考慮した地域別木質バイオマスの熱供給可能量の分析」
- 35) 鈴木琢允, 根本和宣, 中田俊彦: 第31回日本エネルギー学会大会 (2022)
 「森林簿を用いた市区町村別木質バイオマスポテンシャル推計手法の開発」
- 36) 松橋啓介: 東京大学サステナブル未来社会創造プラットフォーム『2050年の社会、まち、くらしの描き』第5回研究会 (2023)
 「日本版SSP（社会経済シナリオ）の叙述とイメージについて」
- 37) 松橋啓介: オール東京62気候変動対策研究会第4回緩和策分科会 (2023)
 「基礎自治体における交通分野の脱炭素施策について」
- 38) 松岡太一, R. DELAGE, 中田俊彦: 第39回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2023)
 「全国の風速分布を考慮した陸上・洋上風力発電機種のパワーカーブの選定」

- 39) 直井宏樹, 小野寺弘晃, 根本和宜, R. DELAGE, 中田俊彦: 第39回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2023)
「日本の電力システムにおけるデータセンターの分散配置および負荷分散の効果分析」
- 40) 森田雄大, R. DELAGE, 中田俊彦: 第39回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2023)
「家庭部門内での電力取引を対象とした取引頻度の影響評価」
- 41) 楠本祥喜, R. DELAGE, 中田俊彦: 第39回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2023)
「機械学習による市町村別電力需要推計手法の開発」
- 42) R. DELUBAC, 中田俊彦: 第39回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2023)
“Nonlinear optimization of combined heat and power systems in district heating networks in northern Japan”

【サブテーマ3】

- 1) 吉田英立, 白川博章, 谷川寛樹: 環境科学会2020年会 (2020)
「同一性判定システムを用いた浸水想定区域における建設資材ストック・フロー分析・東京都市圏におけるケーススタディー」
- 2) 森田大登, 白川博章, 谷川寛樹: 環境科学会2020年会 (2020)
「建築物解体に伴うコンクリート塊の需給バランスの将来予測」
- 3) 山田久太, 白川博章, 谷川寛樹, 深堀秀敏: 環境科学会2020年会 (2020)
「木材の地産地消を考慮した都市と人工林の炭素ストック量の将来推計-福岡県北九州市におけるケーススタディー」
- 4) 水嶋彩恵, 白川博章, 谷川寛樹: 環境科学会2020年会 (2020)
「浸水深別被害率を用いた洪水浸水被害による水害廃棄物発生量の推計・名古屋市におけるケーススタディー」
- 5) 松代竜毅, 山下奈穂, 白川博章, 谷川寛樹: 環境科学会2020年会 (2020)
「日本におけるストック由来の建設廃棄物量の推計」
- 6) 岩下樹, 吉田英立, 白川博章, 谷川寛樹: 環境科学会2020年会 (2020)
「名古屋市中心部における洪水浸水地域の建設資材ストック推計」
- 7) 山田久太, 白川博章, 谷川寛樹, 深堀秀敏: グリーンインフラネットワークジャパン (2020)
「木造住宅の地産地消が人工林の炭素ストックに与える影響-福岡県北九州市におけるケーススタディー」
- 8) 齋藤隆成, 平井千津子, 芳賀智宏, 松井孝典, 白川博章, 谷川寛樹: 第48回環境システム研究発表会 (2020)
「衛星夜光情報に基づく深層学習のよる建築物の延床面積推計に関する研究」
- 9) 太田裕也, 吉田英立, 郭静, 白川博章, 谷川寛樹: 2021年度土木学会関西支部年次学術講演会 (2021)
「地理情報システムを用いた関東1都4県の建築物に関する物質ストック・フロー分析」
- 10) 玉崎美結, 森田大登, 山田久太, 郭静, 白川博章, 谷川寛樹: 2021年度土木学会関西支部年次学術講演会 (2021)
「名古屋市中心部における建設資材ストックの推移に関するデータベースの構築」
- 11) 吉田英立, J. GUO, 白川博章, 谷川寛樹: 第49回環境システム研究発表会 (2021)
「GIS データベースの拡充と日本全国の建築物に関する物質ストック・フローの動態分析」
- 12) 水嶋彩恵, R. ZHANG, J. GUO, 白川博章, 谷川寛樹: 第49回環境システム研究発表会 (2021)
「水害による災害廃棄物量の推計とその処理能力の評価: 名古屋市における建築物を対象としたケーススタディ」
- 13) 森田大登, 深堀秀敏, 郭静, 白川博章, 谷川寛樹: 第49回環境システム研究発表会 (2021)

- 「4d-GISと機械学習を用いた建築物ストックの解体现象のモデル化-福岡県北九州市を対象としたケーススタディ-」
- 14) 山田久太, 郭静, 白川博章, 谷川寛樹, 深堀秀敏: 第49回環境システム研究発表会 (2021)
「木材輸送時の炭素排出量を考慮した、都市と人工林の炭素ストックの将来推計 -福岡県北九州市におけるケーススタディー-」
- 15) R. ZHANG: International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021, Online (2021)
“Evaluation of potential environmental impacts on urban building system during floods”
- 16) 砂澤祐太, 水嶋彩恵, 吉田英立, 白川博章, 谷川寛樹: 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会 (2022)
「愛知県における水害発生時の災害廃棄物処理能力の評価」
- 17) 太田裕也, 蛭田有希, 白川博章, 谷川寛樹: 第50回環境システム研究発表会 (2022)
「日本全国における建築物と土木構造物を対象とした建設活動由来のCO₂排出量推計」
- 18) 永田聡太, 蛭田有希, 白川博章, 谷川寛樹: 第50回環境システム研究発表会 (2022)
「災害被害削減・GHG 排出削減の住宅ストック更新からの検討」
- 19) 蛭田有希, 白川博章, 谷川寛樹: 第50回環境システム研究発表会 (2022)
「日々の流動人口の多寡が電力需要に与える影響の検出」

<ポスター発表>

【サブテーマ1】

- 1) Y. HIRUTA, L. GAO, S. ASHINA: Thirteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC), Online (2020)
“Impact of COVID-19 Pandemic on Electricity Consumption in the Greater Tokyo Area”

【サブテーマ2】

- 1) H. CHIDA, K. NEMOTO, T. NAKATA, S. NAKAMURA, M. OOBA: 28th European Biomass Conference and Exhibition, Online (2020)
“Analysis of the Productivity of Woody Biomass Supply Chain for Gentle and Steep Slopes”
- 2) K. NEMOTO, T. NAKATA, S. NAKAMURA, Y. MORI, M. OOBA: 28th European Biomass Conference and Exhibition, Online (2020)
“Comparison of Carbon Emissions Utilizing Different Residential Heating Systems in Mountainous Areas”

【サブテーマ3】

- 1) Z. LIU: International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021, Online (2021)
“An Attempt to Estimate Total Floor Area for Urban Material Stock Calculation Using Deep Learning Inspired Method”
- 2) 吉田英立, 白川博章, 谷川寛樹: CSIS DAYS 2021 「全国共同利用研究発表大会」 (2021)
「関東一都六県の浸水想定区域における建設資材ストック・フローの動態分析」
- 3) 太田裕也: 2021年度環境情報科学研究発表大会 (2021)
「GISを用いた同一性判定に基づく建築物のLCA環境負荷の評価～関東地方におけるケーススタディー～」
- 4) K. KHUMVONGSA, J. GUO, S. THEEPHARAKSAPAN, H. SHIRAKAWA, H. TANIKAWA: The 14th ISIE Socio-Economic Metabolism section conference, Vienna, Italy (2022)
“Sustainability challenge of transportation infrastructure development in Bangkok from material stock viewpoint”
- 5) Y. HIRUTA, H. TANIKAWA: The 14th ISIE Socio-Economic Metabolism section conference, Vienna, Italy (2022)
“The effectiveness of teleworking as an electricity-saving practice may be conditional on weather”

- 6) 永田聡太, 白川博章, 谷川寛樹: 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会 (2022)
「住宅ストックの更新を適応策・緩和策双方から評価するための地理情報システムを用いた基盤構築」
- 7) 藤川奈々, 山下奈穂, 蛭田有希, 白川博章, 谷川寛樹: 環境科学会2022年会 (2022)
「滞留年数の延長による将来ストックフロー及びCO₂排出量への影響評価—道路におけるケーススタディー」
- 8) 砂澤祐太, 蛭田有希, 白川博章, 谷川寛樹: 第50回環境システム研究発表会 (2022)
「愛知県における水害発生時の廃棄物処理過程の検討」
- 9) 藤川奈々, 山下奈穂, 蛭田有希, 白川博章, 谷川寛樹: 2022年度環境情報科学研究発表大会 (2022)
「滞留年数の延長による将来ストック・フロー及びCO₂排出量への影響評価—道路におけるケーススタディー」

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【研究課題全体】

- 1) 推進費2-1908、1-2002、1-2003国民対話シンポジウム「日本の2050年脱炭素社会」（主催：国立環境研究所社会環境システムセンター、2021年3月10日、オンライン、参加者144名）にて講演
芦名秀一「資源・エネルギーを活用した脱炭素地域の実現に向けて：計画分析モデルの開発と具体地域での実証」
- 2) 脱炭素かわさき市民会議「脱炭素かわさき市民会議からの提案 2050 年脱炭素かわさきの実現に向けて」（主催：脱炭素かわさき市民会議実行委員会、2021年5月～11月、参加市民：75名）にて成果紹介と専門家としての議論への貢献（松橋啓介・芦名秀一）
- 3) 環境科学会2022年会シンポジウム「持続可能な未来都市に向けた分析・計画・実装」（主催：公益社団法人環境科学会、2022年9月9日、オンライン）にて講演及び討論
松橋啓介 「持続可能な社会設計に向けたシナリオ評価と社会への反映」
藤田壮 「脱炭素未来都市の社会実装研究に向けて」
芦名秀一 「エネルギー資源の地域循環を活用した脱炭素地域づくり」
谷川寛樹 「ストック型社会の構築に向けた地域の建設系物質代謝」

【サブテーマ1】

- 1) 第23期地域環境リーダー育成講座（主催：認定NPOアクト川崎・川崎市、2020年9月27日、川崎市高津市民館、参加者約40名）にて講演（芦名秀一）
- 2) 立命館慶祥高等学校における特別講義「高校生ノーザンカンファレンス—30年後の脱炭素社会とエネルギー選択：北海道の挑戦—」（主催：学校法人立命館立命館慶祥高等学校（スーパーサイエンスハイスクール指定校）、2020年11月7日・28日・12月12日、オンライン、参加学生38名）にて成果紹介（芦名秀一）
- 3) 第24期地域環境リーダー育成講座（主催：認定NPOアクト川崎・川崎市、2021年7月4日、川崎市高津市民館、参加者約40名）にて講演（芦名秀一）
- 4) 環境科学会2021年会シンポジウム「炭素中立の未来への地域環境イノベーション」（主催：公益社団法人環境科学会、2021年9月10日、オンライン）にて講演（芦名秀一・藤田壮）
- 5) 一般公開ワークショップ「次世代エネルギーワークショップ（若手社会人編）」（主催：次世代エネルギーワークショップ推進委員会・一般社団法人政策対話研究所・国立研究開発法人国立環境研究所、2021年1月11日・30日・2月20日、オンライン、参加者46名）にて成果紹介（芦名秀一）
- 6) 立命館慶祥高等学校における特別講義「高校生ノーザンカンファレンス—30年後の脱炭素社会とエネルギー選択：北海道の挑戦—」（主催：学校法人立命館立命館慶祥高等学校（スーパー

サイエンスハイスクール指定校)、2021年12月11日・12日、参加学生約40名)にて成果紹介(芦名秀一)

- 7) 一般公開ワークショップ「2021年度次世代エネルギーワークショップ(若手社会人編)」(主催:次世代エネルギーワークショップ推進委員会・一般社団法人政策対話研究所・国立研究開発法人国立環境研究所、2022年1月11日・25日・2月15日、オンライン、参加者約40名)にて成果紹介(芦名秀一)
- 8) 第16回東京都病院学会環境問題検討委員会企画「第20回医療から取り組む環境会議」(主催:一般社団法人東京都病院協会、2022年2月27日、オンライン)にて講演(芦名秀一)
- 9) 第25期地域環境リーダー育成講座(主催:認定NPOアクト川崎・川崎市、2022年6月26日、川崎市大山街道ふるさと館、参加者約40名)にて講演(芦名秀一)
- 10) 北海道根室振興局管内自治体職員向け勉強会(主催:北海道根室振興局、2022年8月18日・19日、北海道中標津町役場内・北海道根室振興局内、参加者約40名(合計))にて講演(芦名秀一)
- 11) 杉並区環境フェア2022(主催:東京都杉並区、2022年11月13日、杉並清掃工場、参加者約30名)にて講演(芦名秀一)

【サブテーマ2】

- 1) 市区町村別の家庭CO₂排出量を地図化(主催:国立研究開発法人国立環境研究所対話オフィス、2021年2月18日、Twitter公開、同3月末時点で30件のリツイート9件の引用ツイート72件のいいね)(松橋啓介)
- 2) 日本版気候若者会議(第3回)(主催:日本若者協議会、2021年6月6日、オンライン、参加者約100名)にて「移動と脱炭素」について講演(松橋啓介)
- 3) 新環境基本計画・脱炭素社会実現実行計画キックオフイベント(主催:福島市、2021年6月28日、こむこむワイワイホール、定員130名)にて基調講演及びパネルディスカッション・コーディネータ(中田俊彦)
- 4) 自動車技術会フォーラム(主催:自動車技術会、2021年7月8日、オンライン)にて講演会「「SDGsつくる責任 つかう責任」から考える自動車リサイクルの価値創出」を実施(中田俊彦)
- 5) 福島市民の暮らし展2021(主催:福島市民の暮らし展実行委員会・福島市、2021年8月28日、福島市アクティブシニアセンター・アオウゼ)にて講演(中田俊彦)
- 6) CEATEC2021(主催:一般社団法人電子情報技術産業協会、2021年10月19日~22日、オンライン)にて講演・動画配信(中田俊彦)
- 7) 福島イノベーション・コースト構想シンポジウム(主催:福島県・経済産業省・復興庁、2021年12月11日、linkる大熊)にて基調講演(中田俊彦)
- 8) NACSカーボンニュートラル連続講座(主催:日本消費生活アドバイザー・コンサルタント・相談員協会(NACS)、2022年1月14日、オンライン、参加者49名)にて講演(松橋啓介)
- 9) 大阪大学テクノアリーナフォーラム(主催:大阪大学大学院工学研究科、2022年1月24日、大阪大学吹田キャンパス・オンライン)にて基調講演(中田俊彦)
- 10) ENEX2022(地球環境とエネルギーの調和展)(主催:一般財団法人省エネルギーセンター、2022年1月26日~28日、東京ビックサイト)にて講演・動画配信(中田俊彦)
- 11) オンラインセミナー「脱炭素かわさき市民会議の報告」(主催:環境政策対話研究所、2022年3月22日、オンライン、参加者約60名)にて成果報告と議論(松橋啓介)
- 12) 子ども大学水戸第9期(主催:NPO法人子ども大学水戸、2022年6月18日、参加者118名)にて講義(松橋啓介)
- 13) 武蔵野市気候市民会議(第3回)(主催:武蔵野市、2022年9月27日、むさしのエコreゾート及びオンライン、参加者約60名)にて成果紹介(松橋啓介)
- 14) オンラインセミナー「脱炭素かわさき市民会議から1年」(主催:環境政策対話研究所、2022

年11月1日、オンライン、参加者54名)にて講演(松橋啓介)

- 15) “くるまからモビリティへ”の技術展(主催:公益社団法人自動車技術会、2022年2月18日、オンライン)にて基調講演(中田俊彦)
- 16) マチごとゼロカーボン市民会議(第4回)(主催:所沢市、2022年11月27日、所沢市役所、参加者約50名)にて成果紹介(松橋啓介)

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

(4) マスコミ等への公表・報道等

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ2】

- 1) 電気新聞(2022年1月13日、全国版、1面、「脱炭素の実像 第3部 まち×エネルギー 6」)(中田俊彦)
- 2) 電気新聞(2022年1月19日、全国版、1面、「脱炭素の実像 第3部 まち×エネルギー 9」)(中田俊彦)
- 3) 仙台放送(2022年8月17日、「「風力発電事業」公表から撤回までわずか2カ月 住民と行政からの強い反対の声受け」にコメント)(中田俊彦)
- 4) 電気新聞(2022年8月24日、「独自の脱炭素分析ツール公開」)(中田俊彦)
- 5) 河北新報(2022年9月6日、「東北の資源活用探る」)(中田俊彦)
- 6) 福島民報(2022年9月24日、1面、「丁寧な合意形成必要 環境アセスに課題 撤回相次ぐ風力発電計画」)(中田俊彦)
- 7) 朝日新聞(2022年10月23日、デジタル、「つくば市の変遷、40年にわたり定点撮影 街づくりを考える資料に」)(松橋啓介)
- 8) 日本経済新聞(2022年12月15日、「東北 エネルギーの今(中) 風力、秋田・青森で計画動く」)(中田俊彦)
- 9) 朝日新聞(2022年12月24日、茨城地域版、「人口分散率1位 なぜ茨城県」)(松橋啓介)
- 10) 広報みやこ「SDGs特集 持続可能なまちへそのためにできること」(2023年1月1日号、10ページ、「宮古市のこれから」)(中田俊彦)
- 11) 朝日新聞(2023年1月4日、デジタル、「江戸時代の藩の名残?それともTX? 茨城が人口分散率1位の背景」)(松橋啓介)

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞

- 1) 中田俊彦:日本エネルギー学会賞(学術部門)(日本エネルギー学会、2021年2月26日)
- 2) 金昶敏, 松橋啓介, 石河正寛, 有賀敏典, 崔文竹:日本都市計画学会2021年年間優秀論文賞(日本都市計画学会、2022年6月3日、「都道府県別人口変動に及ぼす年齢・時代・コーホート効果の分析」(サブテーマ2・誌上発表7))
- 3) 松橋啓介:2022年環境科学学会学術賞(環境科学会、2022年9月9日)「持続可能な社会設計に向けたシナリオ評価と社会への反映」
- 4) 藤川奈々, 山下奈穂, 蛭田有希, 白川博章, 谷川寛樹:事務局賞(2022年度環境情報科学研究発表大会、2022年12月5日~11日)

(6) その他の成果発表

【サブテーマ2】

- 1) 地域エネルギー需給データベース, オンライン公開, <https://energy-sustainability.jp/>
(研究成果の一部を公開)

IV. 英文Abstract

Development of Integrated Assessment Approach for Designing and Assessing the Socio-economic Impact on Regional Circular and Ecological Sphere utilizing Regional Resources

Principal Investigator: Shuichi ASHINA, Keisuke MATSUHASHI, Toshihiko NAKATA, Hiroki TANIKAWA

Institution: National Institute for Environmental Studies, Tsukuba City, Ibaraki, JAPAN

Tel: +81-29-850-2227

E-mail: ashina.shuichi@nies.go.jp

Cooperated by: Tohoku University, Nagoya University

[Abstract]

Key Words: Local decarbonization, Municipalities, Local resources, Renewable energies, Local production for local consumption, Inter-regional cooperation, Analytical models, Geographical Information System

This project aimed to develop a methodology for designing transition scenarios toward local decarbonization, a key concept of the Regional Circular and Ecological Sphere, utilizing regional resources, such as renewable energies, forest resources and building stocks, while considering population decline and other future socio-economic changes in local areas in Japan. For this purpose, we developed a series of analytical models to evaluate impacts of local decarbonization actions on carbon dioxide reductions and to design inter-regional network structure for enhancing use of local energy resources among municipalities by using Geographical Information System.

The project maintained databases of population distribution, energy demand and supply, renewable energies and building stocks from past to present by municipalities and/or 1km-mesh resolution to provide basic information for the analytical processes in the project. The database also used to analyze historical changes and its driving forces in the municipalities; we identified impacts of age effect, period effect and cohort effect on changing population distribution by applying APC analysis, and investigated explanatory variables for transition to dead stock in building stocks of a municipality.

The models were applied to municipalities to gain insight into how to transition to decarbonized society by utilizing local resources. Taking actions proposed in a national decarbonization scenario will lead more than 90% of municipalities to reduce their CO₂ emissions by 90% in 2050; Demand side actions, such as energy efficiency and fuel shift, will contribute around 50% of CO₂ reductions, and installation of renewable energies and decarbonization of grid electricity will reduce another half of CO₂ emissions in 2050. In addition, local production for local consumption of forest resources will suppress use of new materials and increase in carbon stocks in the municipality. We found that suitable cooperation network differs between western and eastern Japan; all the network connects to Tokyo metropolitan area in western Japan, on the other hand, eastern Japan formulates cluster-like network which renewable rich zone as a core node. Such inter-regional cooperation network will enhance use of renewable resources and may gain additional incomes and jobs in energy export areas such as Hokkaido and Tohoku. Based on such results, cluster analysis was used to classify types of cooperation network and we found five cooperation types as biomass-core type, solar+battery type, resource production type, resource use type, and transferring zone.