

課題名	S-3 脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案手法の確立に関する総合研究プロジェクト 3. 都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減策導入効果の評価
課題代表者名	花木啓祐 (東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻)
<p>研究体制</p> <p>(1) 都市シナリオの設定と二酸化炭素削減量統合評価 (東京大学)</p> <p>(2) 都市エネルギー供給由来の二酸化炭素排出評価と変革による削減効果 (東京大学)</p> <p>(3) 都市建築物由来のエネルギー消費と変革による削減効果 (慶應義塾大学、(株)日建設計総合研究所)</p> <p>(4) 都市への燃料電池と太陽電池導入によるエネルギー削減効果 (信州大学)</p> <p>(5) 都市系バイオマスと未利用エネルギーの活用によるエネルギー削減効果 (東京大学)</p> <p>(6) 地域間物流に伴う二酸化炭素排出の変化 (東京大学)</p> <p>(7) 地域冷暖房とコジェネの導入による削減効果 (東京理科大学、日本工業大学)</p> <p>(8) さまざまな主体の知識共有のための統合ツール開発 (東京大学)</p>	
<p>研究概要</p> <p>1. はじめに</p> <p>わが国の二酸化炭素排出量の動向を見ると、交通、業務、家庭部門の伸びが著しく、これらの部門への対策がわが国の二酸化炭素排出量削減の成否を握っている側面が非常に大きい。これらの二酸化炭素排出のほとんどは都市の場において生じているものであり、それは都市活動や都市構造と深い関係がある。二酸化炭素削減対策としては、エネルギー消費量の削減を図る技術、再生可能エネルギーを始めとして供給エネルギーの炭素強度を下げる技術があり、その開発が進んでいる。しかし、これらの技術による二酸化炭素の削減可能量の推定に当たっては、技術のみを取り出して行う評価ではまったく不十分であり、実際に都市に導入された状況を想定して推定を行うことが必要である。とりわけ、複数の対策が同時に導入される場合には、対策相互の相殺効果、電力需要変化に伴う系統電力の炭素強度の変化など、複雑な問題が存在しており、これらを考慮せずに技術評価を行うと対策効果の過大評価につながる。本研究は、対策技術適用の場であり、また将来の社会的な変化が端的に現れる都市を対象にした対策効果の解析を行う。</p> <p>16、17、18年度は、個々の都市の解析に力点を置いた。19年度は日本全体としてのシナリオチームから提供されている2つの社会シナリオの元での対策の効果を評価することを中心とした。従って、個々の都市の相違よりも、都市の規模などの相違点を加味しながらも全国の評価を網羅的に行うことを優先した。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究では都市に対して取られるさまざまな対策間の相互関係を考慮した統合解析を現実の都市の場に対して適用することによって、都市単位での実際の削減可能量を推定することを目的とする。気候条件、人口規模、都市活動の内容が異なるわが国の複数の都市を対象にして、技術開発の動向を織り込んだ2020年までの削減可能量と、2050年での削減可能量を、複数の社会経済的なストーリーラインシナリオ毎に算出し、またそれらの実現に当たっての都市側の主体間の協力の必要性を示すことを最終目的とする。とりわけ、2050年に対しては削減目標を設定し、その実現のために必要な都市における対策とその組み合わせを明らかにすることを目標とする。今後人口減少が開始するわが国にあって、それぞれの都市の活動度がどのように変化するかは温室効果ガスの排出量を大きく左右する要因であるが、また確実な予測を行うことは困難であり、将来のシナリオを設定して温室効果ガスの排出量予測と対策の効果を評価していくことが必要である。本研究では、実際の都市におけるそれぞれの対策の間に相互関連があることを重視し、各分担サブテーマ間の整合性、相互関連を重視して研究を行う。</p>	

3. 研究の方法と結果

(1) 都市シナリオの設定と二酸化炭素削減量統合評価 (東京大学)

平成16～18年度において、全国における都市由来の二酸化炭素排出量推定作業として、都市への将来導入可能技術を取りまとめ、都市内部の空間分析手法の検討と適用を行ったのち、廃棄物バイオマスのバイオガス発電を例として、二つの超長期シナリオ(以下、「将来社会シナリオ」)について、全国の都市全体を対象とする分析手法および推計結果について考察した。

19年度の研究では、各分担者の成果を集約し、また都市分野の必要施策を検討する一方で、個別研究も行った。

都市シナリオの設定と二酸化炭素削減量統合評価において重要な検討事項となる都市形態が温室効果ガス削減に及ぼす影響について宇都宮市を例に検討を行った。

都市形態として将来社会シナリオを意識しながらコンパクトシティに代表される中央密集型、地域における「独立・分散」をキーワードとする平坦型、それらの中間である中間型を仮定した。2050年の宇都宮市を対象に検討した結果(図1)、太陽光発電および地域熱供給技術の両方の便益を享受できる中央密集シナリオ(×シナリオA)における民生建物からの温室効果ガス排出量の削減率は24%だった。一方、平坦シナリオ(×シナリオB)では地域熱供給システムの導入条件を満たす地域が存在せず、削減率20%であった。また、一人当たりの温室効果ガス年間排出量においても、中央密集シナリオ>平坦シナリオ>均等減少シナリオとなり、地域熱供給システムの制約条件が太陽光発電技術のそれよりも厳しいという結果となった。

将来の都市形態として「現状維持」では温室効果ガス削減効率が悪いため、将来の脱温暖化社会構築のためには、戦略的な都市計画および都市環境政策に基づいて都市形態を変化させてゆく必要があることが示された。

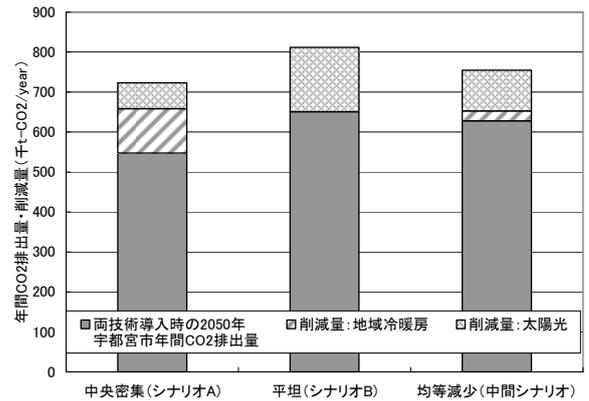


図1 都市シナリオ別民生建物エネルギー由来の温室効果ガス削減ポテンシャル

(2) 都市エネルギー供給由来の二酸化炭素排出評価と変革による削減効果 (東京大学)

19年度は、系統電力との相互作用が比較的強い以下の2つのエネルギー利用技術の導入によるCO2排出削減効果の評価に向けた研究を行った。評価結果をまとめると以下ようになる。

1) 電気自動車の大規模導入によるCO2排出削減効果の評価

電気自動車(EV)やプラグインハイブリッド車(PHEV)の大規模導入によるCO2排出削減効果を、最適電源構成モデルを利用し評価した。その結果、6kWh程度のバッテリーを利用した電気自動車が普及し、火力発電所でのCO2回収貯留を実施すれば、大幅なCO2排出削減が期待できることがわかった。(図2を参照) 電気自動車が大規模に導入されても発電設備を大幅に増やす必要性は低いが、電力消費量自体は顕著に増加し、発電用の石炭消費量が大きく増加する可能性があることがわかった。

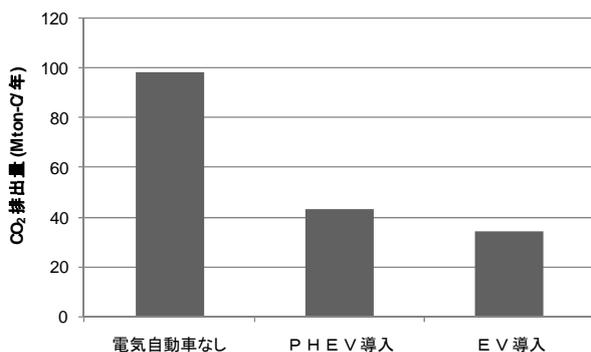


図2. 発電部門と運輸部門の総CO2排出量 (2050年)

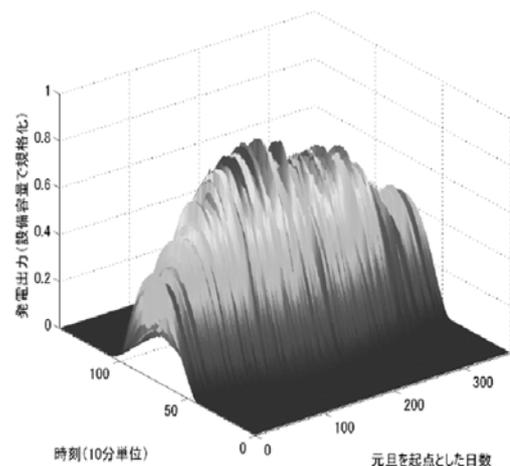


図3. 日本全体の太陽光発電出力の推計値

2) 住宅用太陽光発電の導入ポテンシャル評価

全国686地点の気象観測データに基づき、住宅の屋根に設置する太陽光発電システムの発電出力の時間変動と発電電力量の地点別のポテンシャルを推計した。日本の住宅の屋根に一様に太陽電池が設置された場合の出力の時間変動を評価した。(図3を参照) また、地点別は、住宅屋根の半分に太陽電池を設置できるものと想定し、各地点での家庭用電力需要の大きさと比較した。

(3) 都市建築物由来のエネルギー消費と変革による削減効果(慶應義塾大学、(株)日建設計総合研究所)

19年度は、業務用建築の運用時、新築時、改修時のCO₂排出量を、建物用途別(事務所ビル、商業施設、教育施設、医療施設、宿泊施設、その他)・都道府県別に2050年まで予測した。表1に示すように、未来社会像として、シナリオA(都市集中型社会)、シナリオB(地方分散型社会)、シナリオM(シナリオAとBの中間)を設定し、電力部門の対策として、電力のCO₂原単位が2005年以降変化しないシナリオ1と経済産業省の超長期エネルギービジョンに基づくシナリオ2を想定した。

M1シナリオの予測結果を表1と図4に示す。2050年におけるCO₂排出量は1990年に比べて、自然体ケースでは9%増加し、対策ケースでは36%削減できる。また、M2シナリオでは、表1と図2とに示すように、自然体ケースでは47%削減され、対策ケースでは71%削減できることがわかった。

表1 検討シナリオと業務用建築の運用・新築・改修時のCO₂排出量削減率

No.		未来社会シナリオ		電力部門シナリオとCO ₂ 原単位(kg-CO ₂ /kWh)			CO ₂ 排出量削減率(1990年=100%)			
				1990年	2020年	2050年	自然体ケース		建築対策ケース	
				1990年	2020年	2050年	2020年	2050年	2020年	2050年
A1	Aシナリオ	1	2006年以降固定	0.421	0.390	0.390	+18%	+11%	-7%	-33%
A2		2	超長期ビジョン	0.421	0.315	0.120	-7%	-45%	-21%	-70%
B1	Bシナリオ	1	2006年以降固定	0.421	0.390	0.390	+13%	+7%	-3%	-40%
B2		2	超長期ビジョン	0.421	0.315	0.120	-8%	-49%	-22%	-73%
M1	Mシナリオ	1	2006年以降固定	0.421	0.390	0.390	+15%	+9%	-5%	-36%
M2		2	超長期ビジョン	0.421	0.315	0.120	-7%	-47%	-21%	-71%

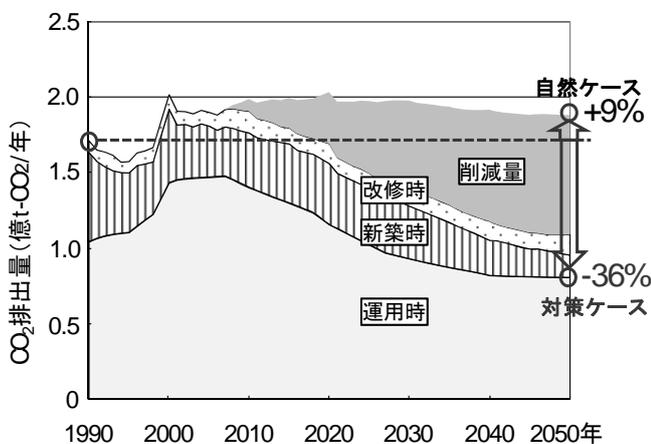


図4 全国の業務用建築からのCO₂排出量 (表1に示すM1シナリオ)

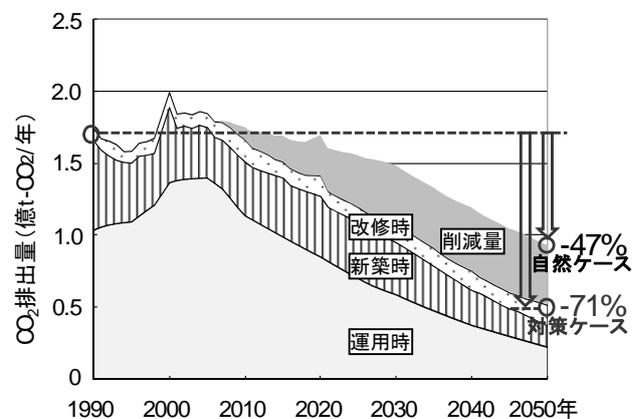


図5 全国の業務用建築からのCO₂排出量 (表1に示すM2シナリオ)

(4) 都市への燃料電池と太陽電池導入によるエネルギー削減効果(信州大学)

住宅用屋根置き型の太陽光発電システムについて、日射量および月別平均気温の地域差を考慮したモデルにより、都道府県別の年間発電量を推定し、システムのLCA結果を利用し、都道府県別の発電コストおよびCO₂排出原単位を推定した。さらに各電力会社の電源構成を考慮した発電コストおよびCO₂排出原単位の実績値を元に、都道府県別のCO₂排出削減コストの推定を試みた(図6)。

電力会社の電源構成が不変とした場合には、既存の系統電力のCO₂排出原単位が大きい沖縄電力、中国電力、中部電力管轄地域でCO₂排出削減コストは低く、一方、東京電力および関西電力管轄地域では高くなった。都道府県で平均したCO₂排出削減コストは現状のCase 1では約95,000円/t-CO₂と推定された。しかし石油火力または石炭火力の代替として太陽光発電を導入したと仮定したCO₂排出削減コストは平均でそれぞれ43,000円/t-CO₂と37,000円/t-CO₂とより低い値となった。CO₂排出削減コストは地域によって大きく異なり、技術進歩、生産規模拡大による発電コストの低下によって地域差はさらに拡大する傾向が示された。このことより、太陽光発電の導入はCO₂排出削減コストが低い地域から優先的に進め、技術進歩、生産規模拡大によるコストの低下が達成されるにつれ、よりCO₂排出削減コストが高い地域へと導入を拡大するなどの戦略的な導入シナリオが、より低コストで太陽光発電の導入を促進するためには有効であると示唆された。

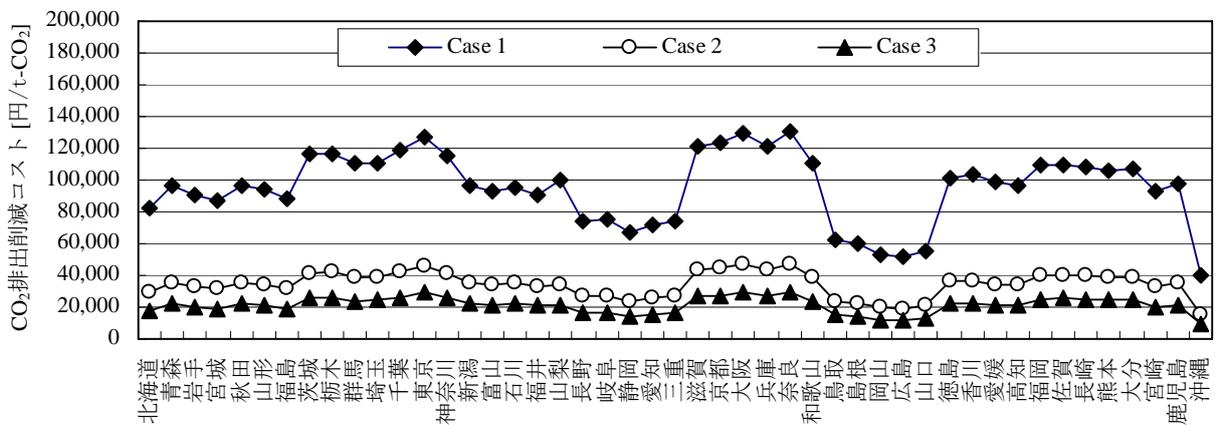


図6 3.5kW住宅用屋根置き型太陽光発電システムの都道府県別CO₂排出削減コスト
 (各電力会社の発電コスト、CO₂排出原単位を考慮した場合、
 Case 1-現状、Case 2、Case 3-将来)

(5) 都市系バイオマスと未利用エネルギーの活用によるエネルギー削減効果(東京大学)

18年度までに、都市湿系廃棄物(厨芥、下水汚泥)からのメタンガス製造ポテンシャルとそれに伴うライフサイクルでの二酸化炭素排出削減量の推定、東京都区部を対象として下水流下モデルと地域冷暖房プラントモデルによる下水熱利用地域冷暖房導入ポテンシャルの推定、建設発生木材および栽培系バイオマスによるバイオエタノール製造と二酸化炭素削減ポテンシャルの推定を行ってきた。

19年度は未利用バイオマスエネルギーの一つである清掃工場排熱を対象として、横浜市および全国の清掃工場において地域冷暖房システムにより利用した場合の二酸化炭素排出削減ポテンシャルを推定した。横浜市の清掃工場を対象とした建物情報を用いた詳細な熱需要解析では、排出削減ポテンシャルは6.4~15[万t-CO₂/yr]と推定され、横浜市の全排出量の0.33~0.76%を占めることがわかった。全国の清掃工場を対象とした解析では1kmメッシュ単位の地理情報を用いた解析を行ったが、図7に示すように個別供給時と比較して50~280万[t-CO₂/yr]の削減ポテンシャルが見込まれ、日本全体の排出量の0.04~0.22%を占めた。また、配管長について高密配管地域、平均、低密地域を想定した配管長原単位

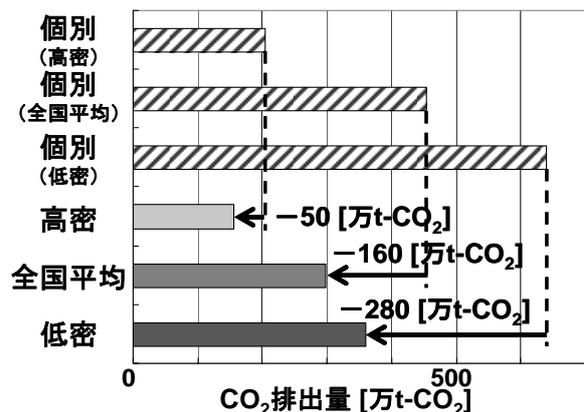


図7 日本全体の最大CO₂削減量 [t-CO₂/yr]

個別供給時と比較して50~280万[t-CO₂/yr]の削減ポテンシャルが見込まれ、日本全体の排出量の0.04~0.22%を占めた。また、配管長について高密配管地域、平均、低密地域を想定した配管長原単位

を用いたケース間で削減ポテンシャルが大きく違い、配管敷設に伴う二酸化炭素排出の重要性が示唆された。

また、18年度の建設発生木材や栽培系バイオマスによるバイオエタノール生産ポテンシャルの成果をふまえて、木質資源フローに関わる政策による二酸化炭素排出削減効果の評価するためのフレームを構築した。

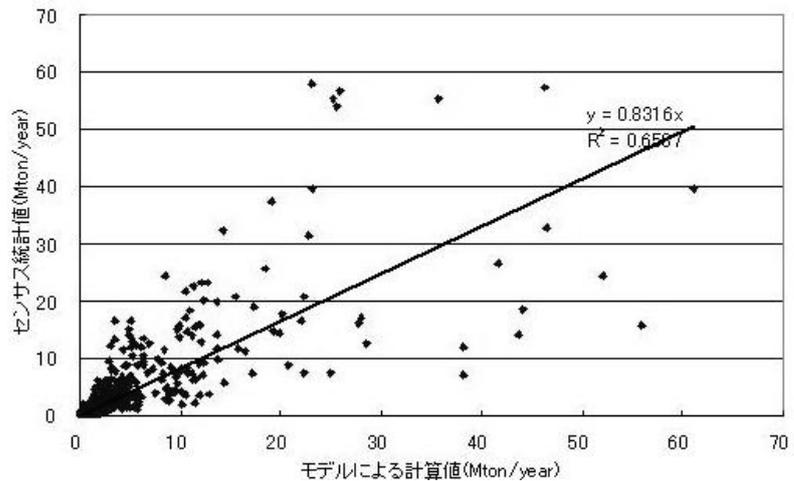


図8 都道府県間年間物流量のモデルによる計算値と実績値の比較

(6) 地域間物流に伴う二酸化炭素排出の変化 (東京大学)

19年度の研究では平成18年度までに構築した物流の波及に注目した地域間の物流量の新しい計算手法による推定物流量の、実績物流量との整合性の検証をおこなった。

実績とモデルの整合性は、本研究の信頼性を担保する上で、重要な意義がある。各種の修正を経て、物流全体の総量は実績と推定値が概ね合致した(図8)。また都道府県間の物流量においても概ね整合的である結果が得られた。これらの結果は昨年度に示したシナリオ別の脱温暖化社会における物流分野でのCO₂削減ポテンシャルの推定結果の妥当性を担保するものといえる。モデルの信頼性を確認した後、特定の都道府県で最終需要が発生したとき、どの地域からどのような品類を出荷しているか、また最終需要が入荷する際に、他にどのような品類がどの程度入荷するかを計算し、波及によって発生した物流に伴うCO₂排出量を都道府県別品目別に計算した。地産地消型の消費をする傾向のある都道府県と、製品の輸送を誘発する消費構造の都道府県では物流に伴うCO₂排出量が大きくことなることが示唆された。例えば、沖縄では地域的に輸送距離が大きくならざるを得ないため誘発されるCO₂排出量も大きい。東京の農水産品の最終需要は他地域での生産による輸送に依存するため比較的大きな値であった。

(7) 地域冷暖房とコジェネの導入による削減効果 (東京理科大学/日本工業大学)

京都議定書の発効と地球温暖化問題への実効性ある取り組みが重視される中、民生部門、特に都市部での住宅と業務用建物のCO₂排出削減の手段の重要性とその効果に注目が集まっている。その手段として、ガス小型発電と廃熱利用により総合的なエネルギー効率向上を目指すコジェネレーションの導入と、集中型発電設備の効率性を主張するヒートポンプの双方に期待が寄せられている。しかしそのCO₂削減ポテンシャルは需要パターン、機器特性、温度特性に依存するところが大きい。昨年度まで、地域の個別建物・機器の特性を地域の詳細なエネルギー需要の推計と合わせ機器導入によるCO₂排出削減評価を行ってきた。平成18年度は、この方法を札幌市および那覇市に適用し、気候特性の異なる日本の3都市17区に対して適用を行い、日本全体を通じた日本の各市町村のCO₂排出削減ポテンシャルは人口密度、経済活動に基づく業務用ビルの全建物床面積に対する比率のばらつきから大きく変化するものの、日本全体ではおよそ18.6%の排出削減ポテンシャルのあることを導いた。

平成19年度は、さらにこの研究に3方向の拡張を加えた。一つは、環境省脱温暖化プロジェクトが提示した日本の将来のライフスタイルと経済・産業に関する姿を描いたAシナリオ、Bシナリオ2つの将来シナリオに対し、都市集中型と郊外分散型社会においてどのようなCO₂排出削減の姿が得られるかの評価を行った。この結果、人口の減少とあいまって2050年では2000年を基準としてAシナリオでは42%、Bシナリオでは38.6%の削減ポテンシャルを得た。二つ目は、温暖化対策として以前から注目されながらなかなか評価に含められなかった太陽熱利用空調設備である。本年度は、大型商業施設と住宅に対し、新しい太陽熱利用空調設備がどのような効果を持ちうるかの評価を行った。これにより、CO₂削減効果としてPV単独よりも除湿を組み合わせたデシカント空調との最適な組み合わせの存在することが示された。3つ目として、電力品質の向上及び省エネルギーを両立させる試みとして、一部で実証試験も始められている分散エネルギーのネットワークについて、最適導入手法の検討の第一段階として、各需要家に設置された分散電源を隣接需要家間で連動運転することによる省エネ

ルギー可能性及び最適用途構成の条件を、モデル化し分析を行った。これによりエネルギー融通により一層の省エネルギーが可能であるとともに、CGSと太陽光発電容量の最適な組み合わせが存在することが示された。

(8) さまざまな主体の知識共有のための統合ツール開発 (東京大学)

知識共有のための統合ツールとしての「ウェブ・ベース協調基盤」の構築に向けて、平成16年度は、「CO₂テックテーブル」と呼ばれる研究者間の知識共有情報基盤の構築を行った。さらに平成17年度は、数値モデルをウェブ・ベース基盤において外部から操作できるインターフェース作成を行い、電源構成モデルと電力需要を削減するための住宅・建物省エネルギー対策モデルの統合を行った。平成18年度は、その統合モデルを用いて、国内の地域別の計算を行い、国内CO₂排出量を計算することができることを示した。平成19年度は、数値モデルや専門知識をさらにインターネット上における有効な共有を実現するため、ウェブ・ベース専門知識の共有基盤であるEKOSSの開発と応用を行った。平成19年度における主な成果は下記の3つである。

1) エネルギーと持続性技術に関連する研究を行っている研究者の選定

東京大学のエネルギー関連研究ネットワークとの共同で、東京大学に所属するエネルギーと持続性技術(温暖化緩和技術など)に関連する研究を行っている研究者の選定を行った。そして、研究者一人当たり、その研究者の研究内容の紹介資料をウェブや学術論文などから集めた。

2) 選定した研究者の研究内容の

「Semantic Statement」の作成
 ウェブや論文などから集めた資料に基づいて、EKOSSの使用により、選定した研究者の研究課題が表現する「Semantic Statement」を、既存の研究で構築したSCINTENGオントロジーで作成した。SCINTENGオントロジーは、記述論理に基づいて構築した知識表現言語であるため、人間の理解できることとコンピュータの理論的推論できることとの適切な釣り合いを取っていると考えられる。

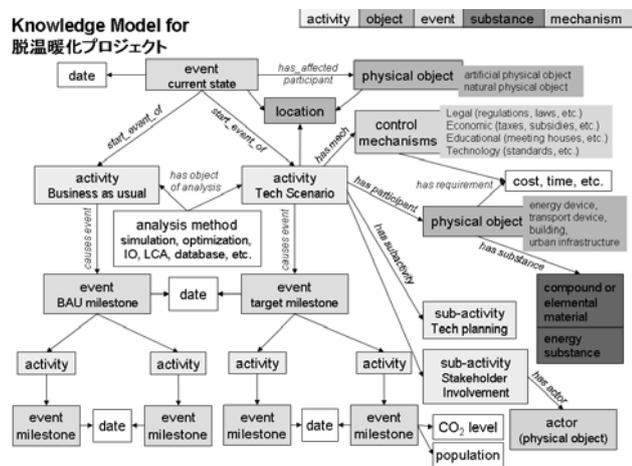


図9 改善したSCINTENGオントロジーのナレッジモデル

3) エネルギーと持続性技術に関するオントロジーの作成

本研究において、SCINTENGオントロジーをもっと正しく脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションを表現するため、様々な関連する概念(開発活動の制御機構、研究の解析方法、イベントや人間活動の種類など)を追加し、それから必要な論理構成も拡張した。そのように改善したSCINTENGオントロジーのナレッジモデルを図9に示す。

4. 考察

過去3年度はモデル都市を対象にした解析から開始し、それらを全国の都市の二酸化炭素の排出とその削減に展開するべく研究を進めてきた。19年度は日本全体の都市の状況を把握することを念頭に置きつつ、全国水準での推計を中心的に行った。しかしながら、都市のコンパクト化のように、都市内の活動の分布が重要な事項については特定の都市を取り上げた計算も合わせて行った。これらの結果から、日本全体としての各対策による二酸化炭素削減可能量を推定するとともに、都市内の分布を含めた解析を同時に進めることも重要であることがわかる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

従来、二酸化炭素排出削減のための個別技術の評価はあったものの、実際の人間居住の場に適用した場合の定量的な二酸化炭素評価はなされていなかった。それらを、都市の規模や人口密度など、将来の都市構造も考慮した上で評価した点に新しさがある。

(2) 地球環境政策への貢献

2050年を見通したわが国の将来の二酸化炭素排出量とその削減可能性を明らかにするためには、将来の国土への人口の配分を考慮した上で、排出量を算定し、また対策の効果を評価することが必要である。これらの評価は、電力の供給と需要のバランスなど、複雑な要因を含んだ上で行われるものであり、本研究ではそれらに対して考察を行った。

また本研究で用いた手法は、そのままの形ではないにせよ、海外の都市に対しても適用が可能であり、地球温暖化の緩和策の研究手法として有用な知見を提供している。

6. 研究者略歴

テーマ代表者：花木啓祐

1952年生まれ、東京大学工学部卒業、工学博士。現在、東京大学大学院工学系研究科教授

主要参画研究者

(1)：花木啓祐 (同上)

(2)：藤井 康正

1965年生まれ、東京大学工学部卒業、博士(工学)。横浜国立大学工学部助教、現在、東京大学大学院新領域創成科学研究科准教授

(3)：伊香賀俊治

1959年生まれ、早稲田大学理工学部卒業、博士(工学)。東京大学生産技術研究所准教授、(株)日建設計環境計画室長、現在、慶應義塾大学理工学部教授

(4)：林 立也

1973年生まれ、早稲田大学理工学部卒業、東京大学大学院工学系研究科修了、博士(工学)。現在、(株)日建設計総合研究所、主査研究員

(5)：高橋伸英

1971年生まれ、東京大学工学部卒業、博士(工学)、現在、信州大学繊維学部助手

(6)：荒巻俊也

1968年生まれ、東京大学工学部卒業、博士(工学)。現在、東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻准教授

(7)：吉田好邦

1968年生まれ、東京大学工学部卒業、博士(工学)。現在、東京大学大学院新領域創成科学研究科准教授

(8)：森 俊介

1953年生まれ、東京大学工学部卒業、工学博士。現在、東京理科大学理工学部教授

(9)：石田 武志

1966年生まれ、東京理科大学工学部卒業、博士(工学)。現在日本工業大学工学部講師

(10)：スティーヴェン・クレイネス

1969年生まれ、Oberlin College卒業、工学博士。現在、東京大学総括プロジェクト機構准教授

7. 成果発表状況 (本研究課題に係る論文発表状況。)

(1) 査読付き論文

- 1) 荒巻俊也、石井暁、園田隼也、加用千裕、花木啓祐、「廃棄物バイオマスの利用ポテンシャルの将来予測と温室効果ガス排出削減効果の解析～都市湿系バイオマスと建設発生木材を対象として」、地球環境、12(2)、201-207, 2007
- 2) 伊香賀俊治：「住宅および事務所ビルにおける温暖化対策の2050年までの予測」、地球環境、12(2)、191-199, 2007
- 3) 吉田好邦、金山真之、松橋隆治、「選好分析による住宅用太陽光発電の普及可能性評価」、日本太陽エネルギー学会誌、34巻、1号、47-54(2008)
- 4) Y. Yoshida and R. Matsuhashi, "Analyzing the Environmental Effect of Greening the Automobile Tax System in Consideration of Consumers' Preferences", Journal of Environmental Information Science 36(5), 81-86, 2008
- 5) S. Mori, S. Koike and T. Ishida, "An Analysis of Regional Energy Demand and an

Assessment of Potential CO2 Emission Reduction in Japan using GIS”, Environmental Informatics and Systems Research, Sep. 2007, Shaker Verlag, Aachen1,1, 459-463, 2007

- 6) 石田武志、森 俊介、「都市街区内におけるマイクログリッド等の分散エネルギーネットワーク評価モデルの構築」、エネルギー・資源学会誌、29(1)、8-14、2007
- 7) 石田武志、「業務建物に導入される地球温暖化対策の相互効果評価モデルの構築」、環境情報科学論文集21、625-630、2007
- 8) 石田武志、「建設・運用・廃棄時を考慮した業務建物の環境負荷評価モデルの構築」、土木学会論文集G、63(4)、366-375、2007

(2) 査読付論文に準ずる成果発表

- 1) 伊香賀俊治：「建築における省エネルギーと温暖化対策」、エネルギー・資源、28(6)、14-18、2007

