

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)
研究体制 (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) (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) (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((株)日建設計(現所属:慶應義塾大学)) (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(成蹊大学) (5)都市圏におけるモビリティ由来のエネルギー消費と変革による削減効果(東京大学) (6)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) (7)都市における需要変化に伴う誘発二酸化炭素排出量変化(東京大学) (8)都市への対策導入における各主体間の協力・競合関係の総合的評価とシミュレーション(東京理科大学) (9)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)	
研究概要 1. 序 <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>研究初年度に当たる16年度は、日本全体の将来の二酸化炭素排出と対策効果を見積もることを最終目的として、タイプの異なる5つの都市を選定し、それらの中でも宇都宮市を対象にして地理情報システムの活用による解析の可能性を検討し、いくつかの対策の導入効果について技術面及び都市への適用の面の評価を開始した。17年度はこれらの成果に基づき、宇都宮市および他の都市を対象に検討を進めるとともに将来の予測についてもその手法面での検討を行った。</p> 2. 研究目的 <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. 研究の内容・成果

研究の全体方針としては、図1に示すように、タイプの異なるわが国の都市（札幌、宇都宮、東京、広島、那覇）を選び、それぞれに対して、対策技術の相互作用を考慮した上で二酸化炭素削減可能量を推定し、それらの結果を基に日本全体を推定するという方法をとる。これは都市の立地条件や規模・密度によって対策の有効性が異なるためである。

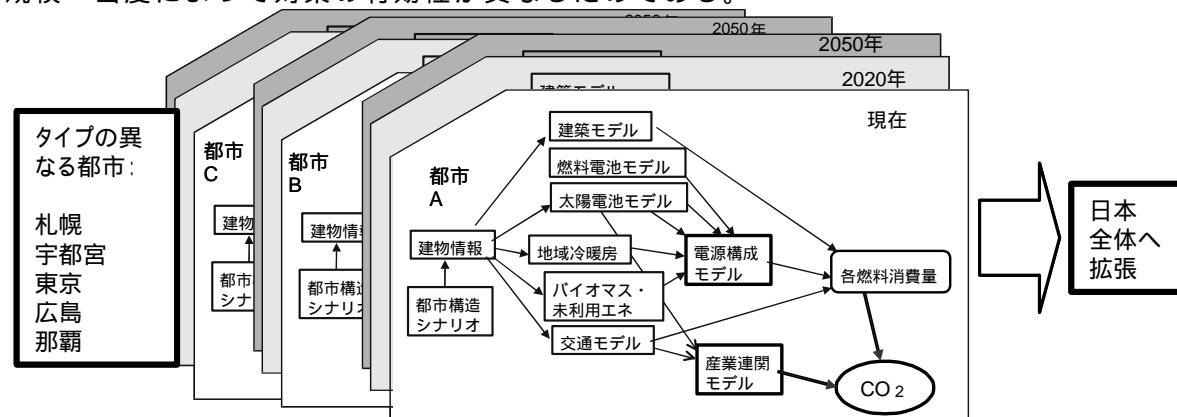


図1. 都市を単位とした二酸化炭素排出削減評価のフローと全国への展開

(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）

16年度、都市における中長期的な二酸化炭素排出削減策として将来可能性のある導入技術の洗い出しと、将来の都市シナリオの取りまとめを行った。これを受けて、17年度の研究では、札幌、宇都宮、東京、広島、那覇の5都市において、民生部門からの二酸化炭素排出量の面的な分布を推定した。電子市街地地図、自治体で作成する都市計画基礎調査建物現況調査を電話帳データベースで補完して求めた用途別床面積に、気候特性を反映した空調設備、熱需要、各電力会社の二酸化炭素排出量原単位を乗じた。

この結果、札幌市、宇都宮市、那覇市における建物由来の年間二酸化炭素排出量は、それぞれ8.57, 1.43, 2.53 Mt-CO₂/yearとなり、札幌市の排出量分布は図2のようになる。

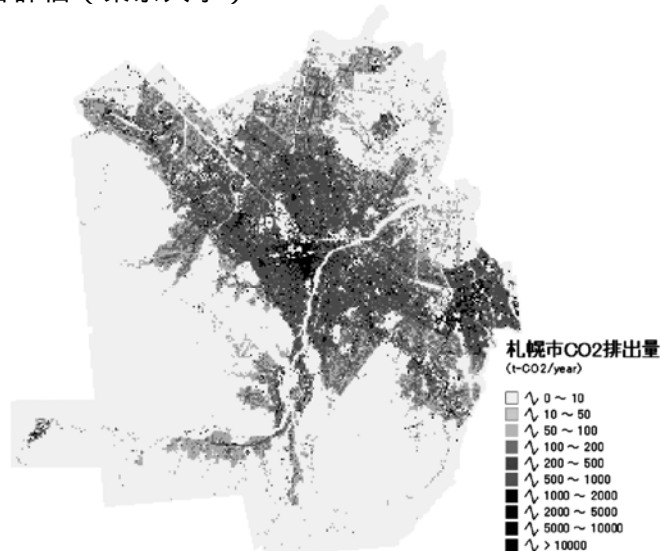


図2. 札幌市における建物由来の二酸化炭素
排出量の分布

(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）

最終需要端での省エネルギー施策の導入や分散電源の大規模導入が、日本の電力系統の電源構成や運用方法に影響を与え、その結果として現れる日本のエネルギー需給とCO₂排出量に与える影響を詳細に検討することを目的として研究を進めた。

16年度は、日本全国を9地域に分割した最適電源構成モデルを構築した。本モデルの時間解像度は、7季節、24時間帯であり、電源の種類としては原子力、石炭、IGCC、LNG、LNG複合、石油、揚水、一般水力、地熱（外生値）を考慮し、CO₂回収貯留設備も考慮した。

17年度は、個々の家庭における不確実な需要を生成するモデルを構築した。このモデルは、世帯を構成する各人の行動を乱数で決め、その行動に関連する機器の電力・熱負荷を積み上げることで、時間解像度10分の詳細な日負荷曲線を得るものである。この日負荷曲線を用いて、確率動的計画法により個々の家庭でのコージェネレーションシステム（CGS）、給湯用ヒートポンプ（HP）の最適運転方法を決定するモデルを構築した。全国47都道府県別の世帯構成、生活時間、気候の差異を反映させた戸建住宅4700軒分のCGSとHPの運用シミュレーションを行い、CGSやHPが大規模導入された場合の日本の各地域の系統電力の日負荷曲線の形状に与える影響を推定した。昨年度構築した最適電源構成モデルを用いて、日負荷曲線の変化も考慮したCO₂排出削減効果を評価した。その結果、

例えば、2050年に1990年比80%削減を達成する場合(図3)では、期間平均のCO₂排出原単位として、CGS、HP導入ケースでそれぞれ0.07、0.04kg-C/kWhが得られた。

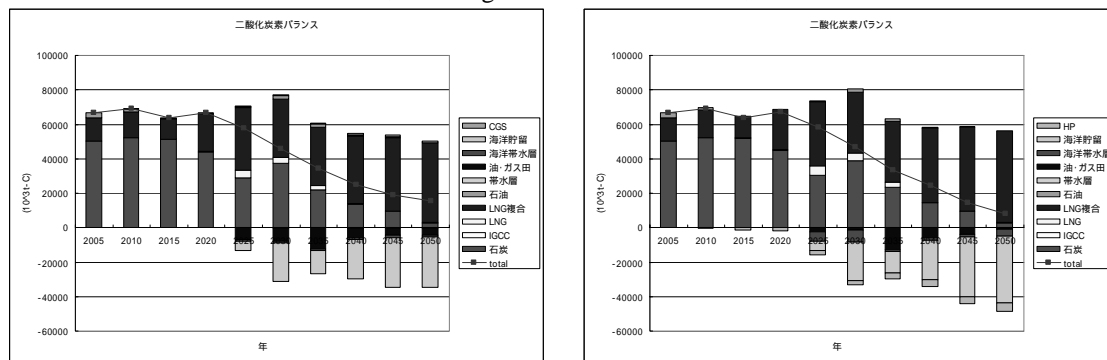


図3.CO₂の8割削減ケースのCO₂バランス(左:CGS導入ケース 右:HP導入ケース)

(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(株)日建設計(現所属:慶應義塾大学))

建築物に対するさまざまな対策と更新スケジュールを検討した16年度からの取り組みをさらに発展させ、住宅や業務建築の運用に伴うエネルギー消費と、それらの建設に伴う誘発環境負荷の両者を評価した。選定された4都市(宇都宮市、札幌市、広島市、那覇市)に対して、人口の変化及び世帯人員の変化という将来の社会の変化を考慮に入れ、家族類型別世帯数の将来推計を2050年まで延長する検討を行った。また、図4に示すように、ライフスタイルの変化、社会の変化のシナリオを住宅部門に反映させ、住宅の断熱、高効率家電製品の買い替え促進、省エネ型ライフスタイルへの変革による二酸化炭素の削減ポテンシャルを算出した。これらの結果、家庭部門では、2050年には対1990年比で45-70%の削減の可能性があることが示された。

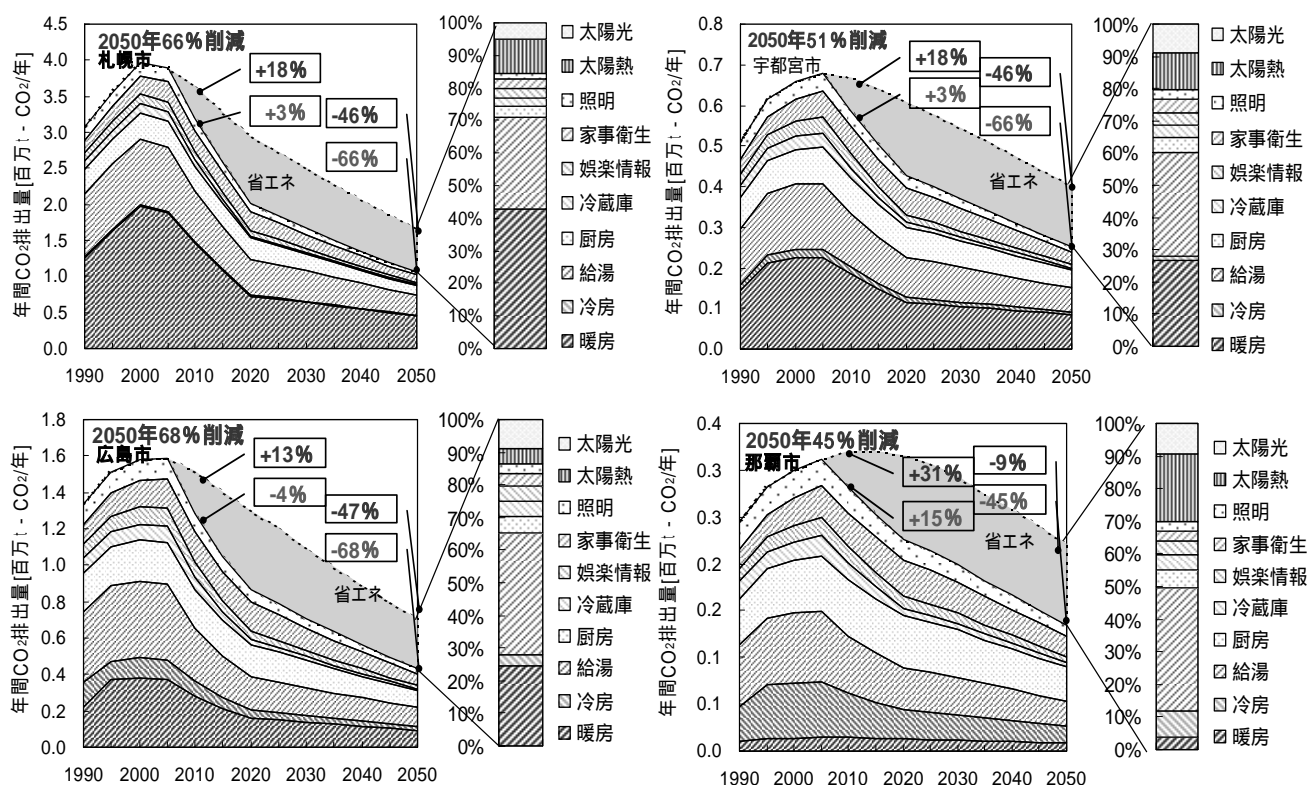


図4. 札幌市、宇都宮市、広島市、那覇市の家庭部門CO₂排出量の2050年までの予測

(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(成蹊大学)

16年度は太陽電池のLCAと価格競争力の検討を行った。17年度は、宇都宮市と札幌市に太陽電池を導入した場合について、各都市の用途別建築面積データを利用して、太陽電池設置による発電ポテンシャル、CO₂削減量の推定を行った。建物用途別に導入率と発電容量を想定し、太陽電池パネルは南向き、アレイ角30度とした。太陽電池の種類は多結晶シリコン、モジュール効率は技術革新

を見込んだ17%と仮定した。また系統連携とし、インバーター効率を含めた全体のシステム効率を81%と仮定した。

各都市における建物用途別の太陽光発電量ポテンシャルは表1のように計算された。発電量の合計は、宇都宮市で120万MWh/y、札幌市で300万MWh/yとなった。宇都宮市では総電灯電力使用量の約50%を供給でき、電力消費由来CO₂排出の46%、全体の年間排出CO₂の17%を削減できる。また、全ての建築面積を太陽電池で覆うと仮定すれば、電力消費の約1.8倍の発電が可能である。一方、札幌市では総電力使用量の26%が太陽光発電のポテンシャルで、このときCO₂排出削減量は電力消費由来では24%、全体の排出量に対しては約11%の削減である。全ての建築面積に太陽電池を敷き詰めても、その発電量は総電力消費の73%にとどまる。

(5)都市圏におけるモビリティ由来のエネルギー消費と変革による削減効果(東京大学)

都市圏規模での交通システムと二酸化炭素排出の関係に着目して研究を進めている。削減効果を推計する戦略モデル構築のために、勤務地と居住地を近接化させる職住分布最適化モデル、分布・配分統合型ネットワークモデル、ならびに貨物車需要予測手法の改良を進めた。16年度は、ネットワーク混雑を考慮した拡張型の職住分布最適化モデルを構築し、宇都宮都市圏と東京都市圏に適用した。平成17年度は、この拡張型モデルを沖縄にも適用し、規模の異なる都市圏について、40%程度のCO₂削減効果があることを明らかにした(表2)。

表1.建物用途別太陽光発電ポテンシャル

	総発電量[MWh/year]	
	宇都宮	札幌
住宅	537,275	1,171,593
共同住宅	180,551	930,270
文教厚生施設	89,046	231,007
業務施設	78,467	154,065
運輸倉庫施設	40,975	143,358
商業施設	72,372	128,044
軽工業施設	142,673	89,152
商業系用途複合施設	3,513	33,999
危険物貯蔵・処理施設	2,771	30,419
遊戯施設	8,488	25,707
宿泊施設	5,800	20,529
官公庁	19,303	20,238
サービス工業施設	11,629	17,597
その他	5,172	11,285
家内工業施設	1,862	9,726
農漁業用施設	9,891	4,664
娯楽施設	6,785	3,536
重工業施設	330	507
合計	1,216,902	3,025,696

表2. 職住分布最適化後の平均通勤時間/CO₂排出量と現状からの削減率

都市圏	平均通勤時間(分)	削減率	CO ₂ 排出量(ton)	削減率
東京	31.65	-23%	1,192	-34%
宇都宮	21.69	-29%	94	-37%
沖縄	17.70	-28%	89	-39%

また、ロードプライシングにおけるエリア課金を的確に分析する新しいモデルを構築し、コードン課金との比較を、沖縄、宇都宮都市圏を対象に実施し、最適料金、社会的余剰、並びに二酸化炭素排出量削減効果を明らかにした。加えて、貨物自動車ODの推計に関して、平成16年度から検討を進め、平成17年度は東京都市圏を対称に三種類の方法を比較検討し、ロードプライシング施策等において、貨物自動車ODへの影響を考慮した効果推定を可能にした。また、自動車から自転車や徒歩への転換が可能性が高いトリップとして、荷物を伴わないピストン型の短距離移動に着目し、道路交通センサデータを用いて、その削減ポテンシャルを明らかにした。

(6)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)

都市における未利用エネルギーとして、16年度は下水熱の利用を検討し、特に現実の下水幹線沿いに熱回収を行った

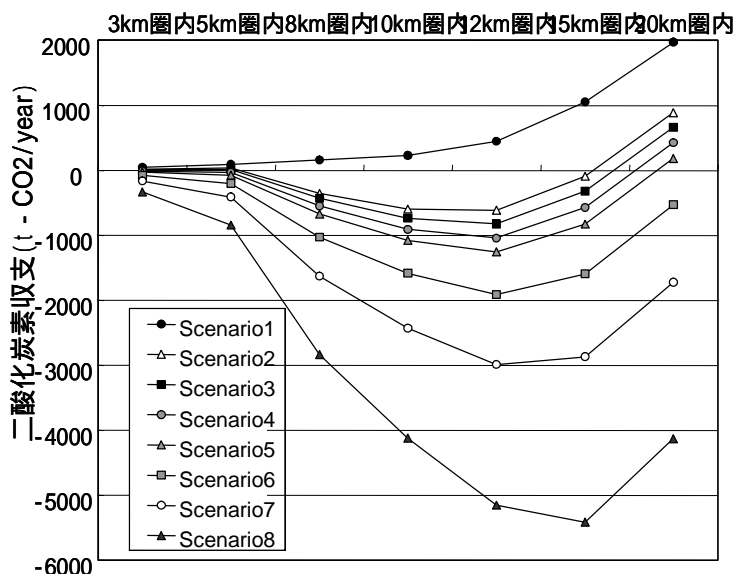


図5. 都市厨芥類の利用による収集シナリオ別距離圏別二酸化炭素収支

場合の効果を下水幹線及び建物データを元に緻密に評価した。

1年度は、家庭及び事業所からの有機系食品廃棄物（以下、厨芥類とする）に着目し、その利用価値を二酸化炭素の削減効果に焦点を当て定量的に計算した。検討にあたり、都市計画基礎調査および事業所企業調査の統計データ、地理情報システム(GIS)を用いることにより、各建物における厨芥類排出量を推定する方法を立案した。これにより、従来3次メッシュ（1km×1km）等を用いて流域圏や都道府県単位でしか検討されなかった資源利用の空間解析を、都市街区・建物レベルにまで高め、輸送負荷を考慮した総合的な検討が可能となった。

横浜市北部汚泥センターにて事業系および家庭系厨芥を受け入れ、メタン発酵技術により電力および熱を回収する場合を想定し、7通りの距離圏別、8つの収集シナリオ別の計56通りについて、厨芥類の受け入れポテンシャルとそれによるエネルギー回収およびCO₂削減のポテンシャルの推定を行った結果、食品リサイクル法対象の事業系および家庭由来の厨芥類を全て収集、運搬、利用した場合、最大で5411.8 t-CO₂/yearの二酸化炭素削減効果があることが明らかとなった。また、収集距離圏の拡大と共に増加していた二酸化炭素の削減効果は15km圏、20km圏で傾向が逆転し、10-12km圏における収集範囲において最も安定的にCO₂削減効果が見込まれることが明らかとなった（図5）。

(7)都市における需要変化に伴う誘発二酸化炭素排出量変化（東京大学）

16年度の成果である産業連関表を用いた誘発二酸化炭素排出量の分析から得られた結果のひとつとして、運輸部門におけるCO₂排出量の削減が大きな効果を持つことが示唆された。この結果を踏まえ今年度は都市間の貨物物流に着目し、需要変化に伴って誘発される貨物物流におけるCO₂排出量を評価した。ある製品が生産されたときにそれが最終消費者に搬送されるまでに発生する地域間の物流である派生物流と、最終消費者が消費する製品の製造過程をさかのぼるときに、製造過程で地域間に発生する誘導物流を求めた。北海道で農水産物が1トン生産されたときの派生物流を図6に示す。このように農水産物の生産による物流は、農水産物自体の搬送にとどまらず、軽工業品（加工食品を含む）等に形を変えて各地域に物流を誘発することがわかる。農産物の自給率の向上による国内の物流増加によるCO₂排出量の評価、また、鉄道、海運へのモーダルシフトのCO₂削減ポテンシャルを検討した。食料自給率45%を達成すると98万トンのCO₂排出増加が見込まれること、モーダルシフト効果は軽工業品・金属機械工業品において大きく、シフト率30%でそれぞれ100万トン程度のCO₂削減ポテンシャルを有することが示された。

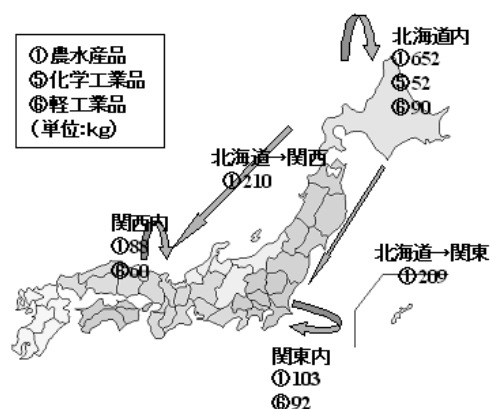


図6 北海道における農水産物1トン生産による派生物流

(8)都市への対策導入における各主体間の協力・競合関係の総合的評価とシミュレーション（東京理科大学）

分散型電源の実効性を検討する意味で電力の供給と消費に関わるさまざまな主体間の関係を中心に検討した。16年度は、単独の需要家を対象とする場合のCGS導入によるCO₂排出削減効果を、機器特性の部分負荷特性に着目して混合整数非線形計画法で表現するモデルを開発した。

17年度はさらに具体的な表現を持つモデルを拡張し、特に地域における需要家の分布を考慮した上で、CGSあるいはHP導入による省エネルギーやCO₂排出削減評価を行うシステムの構築を行った。宇都宮市において、GISデータをもとに中心業務地区および周辺の住居・業務混合地域における導入効果を評価した。図7にはCO₂排出削減率評価の例を示す。本研究の成果は、

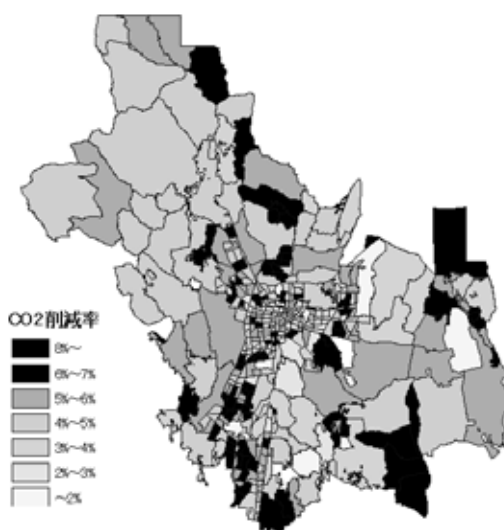


図7 宇都宮市におけるコージェネとヒートポンプ導入による行政区画別CO₂削減率評価結果例

以下のようにまとめられる。

空調容量・基数、稼働パターン決定モデルを、非線形混合整数計画法により実現することができた。さらにこのモデルを、エネルギー負荷簡易推計モデルと一体化した形で実現し、都市の気候特性を踏まえた最適化を可能とした。

街区レベルで複数の需要家、分散エネルギーをネットワークしたときの省エネルギーの可能性、最適な需要家用途構成の導出を評価する数理計画モデルの構築を行った。

具体的な街区の評価事例により、エネルギー融通による省エネルギー性の可能性や、最適化需要家構成を示すことができた。これにより、今後どのような需要家構成において、地域性との関係の上で分散エネルギーネットワークが有効性の明確化を可能とした。

地域における需要家の分布を考慮した上で、CGSあるいはHP導入による省エネルギーやCO₂排出削減評価を行うシステムの構築を行った。本研究の結果、宇都宮市全域でのCO₂排出削減ポテンシャルは、HPおよびCGS単独導入の場合で約6%、熱電融通を取り入れるDHC(地域冷暖房)では約12%、さらに売電まで可能とすると約17%に達するという評価が得られた。

(9)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)

図1に示した統合解析は、各分担者が担当するそれぞれの対策のモデルを個々に独立して適用するだけでは達成できず、対策面での相互の関連を明らかにし、またモデル計算において入出力の交換を行う必要があり、そのために知識情報と計算結果の交換を行う統合ツールが必要となる。

16年度は対策間の相互作用が重要な本プロジェクトの分担者同士がそれぞれの対策の特徴を示し、概略の削減量をWeb上で提示しあう「ウェブ・ベース協調基盤」構築を行った。

17年度は、各対策の数値モデルをWebサイトを介して外部から操作できるインターフェース作成を中心に研究を実施した。具体的には、当方の協力を得てマサチューセッツ工科大学のCAD研究室で開発しているDOME(distributed object-based modeling environment)のモデル統合基盤を用いて、MS ExcelやMathworks Matlabなどのソフトウェアを用いて構築された各モデルにアクセスできる環境を構築した。また、本研究の検討対策とする対策の相互関係に関し、この統合ツールで解析すべき対策群と独立した計算で進めるものの峻別を行った。

16年度までに構築した電源構成モデルと、電力需要を削減するための建物省エネルギー対策モデル、太陽電池による発電モデルの統合解析を行った。図8に、計算を実施している画面の様子を示す。需要部門における太陽光発電の導入量が大幅になってくると、電源構成に影響を与え、特に火力発電等の稼働率の低下等により電力単価が変動し、それにより需要側の分散電源の導入量が左右されるというフィードバックループが働いている状況を示すことができた。このように、電源計画と需要モデルとの統合により、様々な温暖化対策を部門間のインタラクションを考慮した中で、評価することができる可能性を示すことができた。

4. 考察

本研究は、都市人口が8割にも及びわが国の人間活動由来の二酸化炭素排出とその対策は、個別の技術を独立に評価する方法では推定できず、また都市による相違が大きいため、日本全体をまとめて扱う解析からも十分に推定できないとの認識に立っている。以下に考察と課題を記す。

(1) 都市による相違



図8. 電力需要変化、太陽光発電と系統電力の間の相互作用を表現するモデルのインターフェイス画面

従来、東京のような大都市に対してはさまざまな解析が行われてきたが、本研究で対象とする宇都宮などについては十分な評価がされていない。しかし、日本全体の評価を行うときには、中規模都市の存在は非常に大きい。太陽電池が果たす役割、交通対策の種類が都市によって異なることが本研究でも示されている。都市ごとの相違を明らかにしたあと、それを日本全体に拡張していく際の都市の類型化、非都市の扱いが今後の課題である。

(2) 対策相互の関係

対策相互の関係で最も典型的なものは、電力の需要と分散型および系統供給の間のものであり、大幅な二酸化炭素排出削減を図るときにはこの関係は重要であることが、エネルギー供給、建築物、太陽電池、分散型電源など、本研究で取り上げた課題でも現れている。統合解析ツールはこのように大幅な二酸化炭素削減のための対策の組み合わせを評価する際に有効であろう。

(3) 社会変化

最終的に将来の社会変化が与える影響を組み込んだ上で対策の有効性を示すことを最終的な目標にしている。将来の変化は、個人規模ではライフスタイルの変化、建物規模では世帯構成の変化、都市規模では交通システムの変化、国土規模では国全体としての都市と非都市の人口の配分など、空間規模と時間規模の異なる変化を織り込んでいく必要がある。

5. 研究者略歴

課題代表者：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手、現在、東京大学大学院新領域創成科学研究科助教授

(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助教授、(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)：山田興一

1939年生まれ、横浜国立大学工学部卒業、工学博士(東京大学)、住友化学主席研究員、東京大学大学院工学系研究科教授、信州大学繊維学部教授、現在、成蹊大学工学部特別研究招聘教授

(5)：原田昇

1955年生まれ、名古屋大学卒業、工学博士。現在、東京大学大学院工学系研究科教授

(6)：吉田好邦

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

(7)：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

(8)：スティーヴン・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助教授

6. 成果発表状況

池上貴志，荒巻俊也，花木啓祐：下水熱利用地域冷暖房システムの戦略的導入による環境負荷低減効果の解析，環境システム研究論文集，Vol. 33, 343-354 (2005).

伊香賀俊治・三浦秀一・外岡豊・下田吉之・小池万理・深澤大樹：住宅のエネルギー消費量とCO₂排出量の都道府県別マクロシミュレーション手法の開発、日本建築学会技術報告集第22号、pp.263-268 (2005)

古川雄一，円山琢也，原田昇：ロードプライシング実施時の貨物輸送の変化に関する研究，土木学会論文集，No.807/IV-70, pp.11-20, (2006)

Maruyama, T. and Harata, N.: Optimal job-housing location pattern in several Japanese cities: Considering modal split and congestion in network, Proceedings of International Symposium on City

Planning 2005, pp. 159-171, (2005)

長谷川貴彦,吉田好邦,松橋隆治,「消費者の選好を考慮した燃料電池自動車の普及可能性評価」,エネルギー・資源,27,2,46-52 (2006)

浅野琢,松橋隆治,吉田好邦,行本正雄,「地域特性を考慮したDME・発電ハイブリッドシステムの設計・評価」日本エネルギー学会誌,85,1,58-65 (2006)

石田武志・森俊介・堂脇清志:「経済性制約と機器の部分負荷特性を考慮した業務建物の最適CGS導入決定支援システムの構築」,電学会論B vol.125 No.4 pp373-380 (2005)

石田武志・森俊介:「地域の気候特性を考慮した業務建物における空調機器の容量・稼働条件決定モデルに関する研究」,電学会論B vol.125 No.10 pp1522-1529 (2005)

