

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） (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. 研究背景 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	
2. 研究目的 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。	
3. 研究の内容・成果 研究全体としては、国内のモデル都市を対象にそこへの対策導入を評価する面と、2050年までを対象にした場合に検討に含める対策の特定、また対策相互間の関係を明らかにすることを目指して研究を進めた。それらの関係を示すと図1のようになる。すなわち、現在のある都市に対して各部門の相互関係を考慮しつつ統合的な計算を行い、これを同じ都市の2020年および2050年にも適用する。さらに、これを他の都市に対しても適用する。	

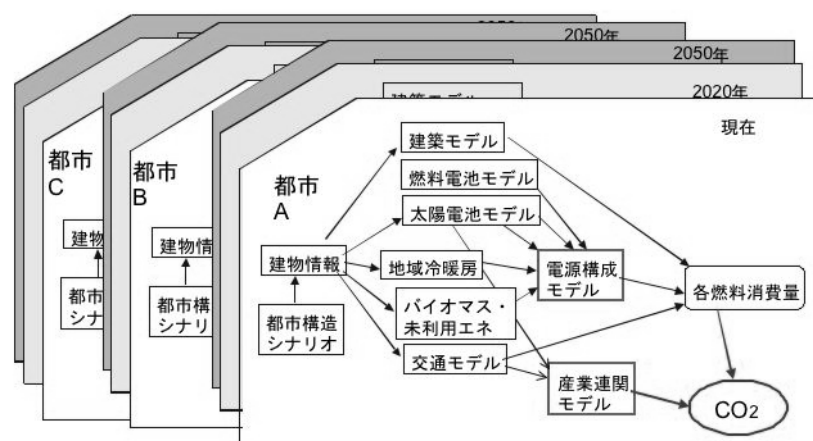


図1. 都市を単位とした二酸化炭素排出削減対策評価のフロー

今年度は統合して一つの都市に対する削減量を与える段階よりはむしろ、日本全体に対して2050年までをも見通した対象主要技術の特定、解析手法の検討に力を注ぎ、宇都宮市を共通の解析都市とした。各分担テーマごとの成果を示すと以下のようになる。

(1) 都市シナリオの設定と二酸化炭素削減量統合評価

日本全国からの都市の中長期的政策オプションの検討として、気候条件、規模を代表する都市として、札幌、宇都宮、東京、広島、那覇の5都市を選定した。そして、2050年の都市からの二酸化炭素排出削減策導入効果を評価するため、都市チームの各研究者による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おこなった(表1)。その結果として、都市の規模により都市形態や社会構造の傾向が異なる可能性が大きいこと、各部門の導入可能技術オプションはそれらの要素に大きく左右されることなどが確認された。これを受けて、各部門の二酸化炭素削減量を統合評価する手法として地域レベルの空間分析を適用することを検討した。具体的には、民生・業務部門やエネルギー部門での削減効果を統合評価する際に有益である都市内部の用途別床面積を、都市計画用途地域の分類を用いることによって効率的に推定する手法を検討した。宇都宮での分析の結果から、用途地域によっては市街地地図および電話帳データベースを用いた推定方法によって(LV.1およびLv.2)高い精度(90%以上)で都市内の個々の建物内の複合用途を表現することが可能であり、この手法の妥当性が示された。また、都市計画基礎調査建物用途現況図のデータを用いることにより、検討された14の用途地域すべてにおいて91%以上という高い割合で建物複合用途が推定できることも示された。本研究で得られた知見は、今後の諸都市の分析および、統合評価法の確立に大きく貢献するものとなった。

表1. 都市の各部門における将来の傾向、検討革新的技術および政策

対象部門	将来の傾向および検討革新的技術・政策	備考
都市全体	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現在より都市規模による人口分布や発展傾向等に明確な差 ・ 物質循環の地産地消化 ・ 情報流通のグローバル化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 都市規模により導入される技術が大きく異なる
民生業務部門	<ul style="list-style-type: none"> ・ 病院の増加や学校の減少 ・ 断熱・空調・照明・給湯の技術革新 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 人口減少と社会構造の変化により建物用途別の床面積が大幅に変化する
交通・自動車単体部門	<ul style="list-style-type: none"> ・ 通勤移動の減少や余暇移動の増加 ・ 最適燃料自動車の導入(燃料電池車、軽油代替DMEなど) ・ 車に対する人の嗜好性の変化 ・ IT化(ホームオフィス化) ・ 居住地事務所等誘導政策 ・ カーボンニュートラル燃料製造技術革新 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 移動目的のシフト
エネルギー部門	<ul style="list-style-type: none"> ・ 家庭用コジェネレーションシステム導入 ・ 燃料電池の系統電力化 ・ 太陽電池の普及 ・ SOFC・薄膜多結晶シリコン太陽電池導入 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 革新的技術導入の幅が大きい

(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

都市部の民生業務・家庭部門における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、電力系統の二酸化炭素排出量に与える影響を詳細に検討するため、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。関東の例を図2に示す。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、9地域別の電力需給構造の差異や地域間での電力の経済融通も考慮している。この最適電源構成モデルは、計算時点間隔を5年として2050年までを対象としており、大規模な線形計画問題として定式化され、変数の個数は約100万個となっている。

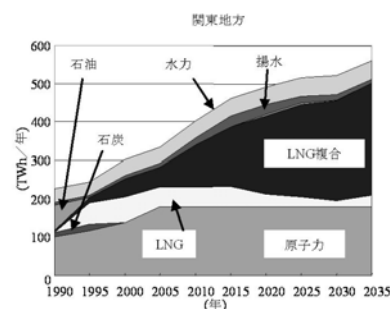


図2 関東の発電電力量の推移

また、二酸化炭素排出削減技術として二酸化炭素回収貯留設備も考慮しているのが特徴である。この最適電源構成モデルを活用すれば、最終需要端での二酸化炭素排出削減策と、発電部門自体での二酸化炭素排出削減策を総合的に評価できることになるため、全電源平均や火力平均などの電力の二酸化炭素排出原単位を用いた試算よりも精度の高い計算ができることになる。今年度の作業では、最適電源構成モデル自体の挙動を調べるために、最終需要端での二酸化炭素排出削減策を考慮せず、所与の電力需要シナリオの下でのモデル試算(2035年まで)を行ったが、二酸化炭素回収処分装置の導入を前提とすれば、天然ガスを利用した発電設備の容量拡大などにより、原子力発電所のそう設備容量が70GWとしても、発電部門だけを見た場合でも、2035年までに1990年比で7割近い二酸化炭素排出量削減が可能となるとの結果を得た。

(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

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対象とする。前者の対策には、断熱性能の向上、省エネ型設備の導入などがあり、後者の対策には、長寿命化やエコマテリアルの採用などがある。さらにライフスタイルの変更も検討対象とする。建築物は、ライフサイクルが長いために、都市内の全建築が更新されるまでに数十年以上かかること、都市計画的には建物規模の誘導が可能である

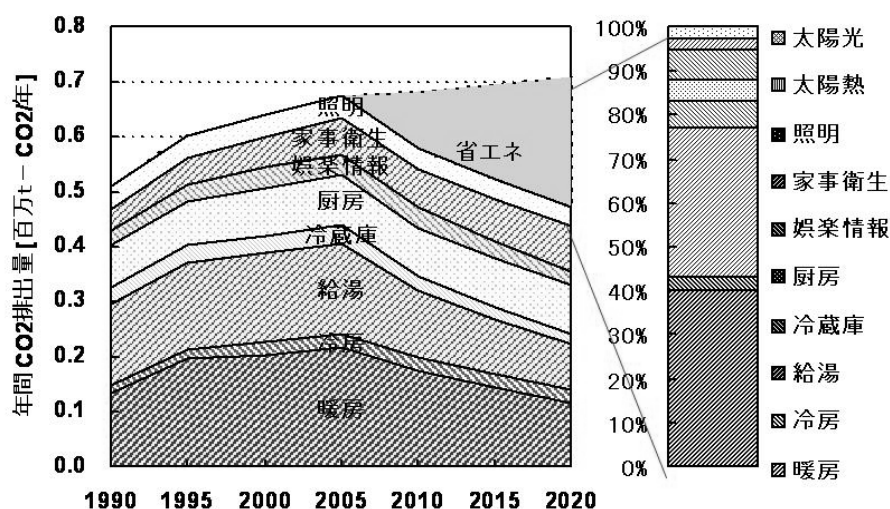


図3 宇都宮市の住宅CO2排出量の推移(対策強化ケース)

こと、家族構成・住宅面積・就業人口比率・勤務時間などのストーリーラインによって影響を受ける社会的な要因が大きいことなどの特徴を有する。

まず、これらの複雑な要素を考えずに複数の都市に導入した場合のエネルギー消費量削減のポテンシャルを求める。次に中期解析に用いる建築物の更新サイクルの検討を対象都市に対して行うと共に、省エネ型の技術の普及を予測し、これらを建築物のエネルギー消費モデルに組み込む。さらに社会の変化に伴う住宅、業務用建築の変化シナリオを作成し、エネルギー消費量を求める。

今年度は、宇都宮市を対象として、家族類型別世帯数・ライフスタイル・住宅断熱水準・家電製品普及率・年間時刻別気象データなどを推計条件として、家庭部門のエネルギー消費量とCO2排出量を2020年まで予測した。宇都宮市の世帯数は、2020年時点で1990年比35%と推計されており、特に高齢世帯と単身世帯が増加傾向にある。家庭部門のCO2排出量は、BAUケースでは、2020年時点で1990年比33%増加すると予測された。これに対して、住宅断熱基準を省エネ法よりも強化(北海道並の住宅断熱基準を適用)、新築時だけではなく改修時の徹底的な断熱強化、暖冷房給湯の電化率の向上とトップランナー設備の普及、省エネ家電への買い替え促進、節約型ライフスタ

イルへの転換などを行った徹底対策ケースでは、1990年比3%削減されると予測された(図3)。

(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

住宅用系統連携太陽光発電システムのLCA評価を行った(表2)。太陽電池は多結晶シリコンとし、システム容量は3.5kWを想定した。分析したケースは現状としてのCase 1 - セル効率15%、セル生産規模10MW/y、将来の技術向上、生産規模増大を想定したケースとして、Case 2 - セル効率17%、セル生産規模1GW/y、およびCase 3 - セル効率20%、セル生産規模100GW/yの3ケースである。

エネルギー投入量はBOSも含んだ値として、Case 1、Case 2、Case 3について、それぞれ31MJ/Wp、17MJ/Wp、11MJ/Wpとなった。投入コストはそれぞれ710円/W、380円/W、290円/Wとなり、太陽光発電システム設置価格の推移データから、Case 1の投入コストは2002年に達成されており、Case 2、Case 3の投入コストはそれぞれ2009年、2012年に到達されると予測された。発電コストは現状のケースでは51円/kWhと高いが、Case 3では20円/kWhまで

低減され、電気事業用電力と競合できるレベルになる。さらにコストを削減するには、保護ガラス、鉄鋼、アルミなどの構造材の高強度化、高耐食化、リサイクル利用が必要である。

CO₂排出原単位はCase 1、Case 2、Case 3について、それぞれ22g-C/kWh、12g-C/kWh、8.4g-C/kWhと計算され、将来ケースでは電気事業電力のCO₂排出原単位の約10分の1以下になる。

都市への太陽光発電システム導入を検討する手始めとして、中規模都市の代表として宇都宮市を選択し、太陽光発電ポテンシャルを推定した。その結果、宇都宮市の住居地域の建築面積に全て太陽電池を敷き詰めた場合、宇都宮市の電力需要量の5倍の発電量となり、電力需要を賄うに十分な面積が存在することが明らかになった。

(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

本年度は、まず都市チーム全体での議論を踏まえて、研究の方針・分析対象都市を決定し、対象都市の関連データの収集・整理を行った。さらに、評価対象政策の選定を行い、都市交通の分析モデルの基礎構造を決定した。

都市交通と環境を評価するモデルは国内外で数多く存在するが、その多くは人の動きのみに着目しており、貨物車の移動の根源である物流を適切に表現したモデルは少ない。しかし、運輸部門からの温暖化ガス排出量のうち貨物輸送のトラックによるものが多くの割合を占めており、貨物輸送トラックに対する対策を評価することが重要となっている。貨物輸送に対する本質的な対策を評価するためには、人の動きのみに着目するだけでは不十分で、物の動き(物流)に対する対策を評価できる分析手法が必要となる。本研究は、人の動きのみならず、物流に対する対策をも適切に評価できる手法の構築を目指しており、その点で特徴のあるものとなっている。

宇都宮都市圏を対象とした予備的な政策分析の結果、職住再配置政策により、CO₂排出量が40%弱削減可能であるという知見が得られた(図4)。また、物流に対する対策を評価するための分析手法の構築を目指した基礎的な研究を行い、宇都宮都市圏の貨物輸送のトリップチェーン特性を明らかにし、東京23区部と比較して、トリップ距離が長いこと、積載率・実車率が高いことなどを示した。また、貨物ODから貨物車ODを推計するモデルの基礎構造を検討した。

表2 太陽電池のLCA分析結果

分析ケース	Case 1	Case 2	Case 3
システム容量 [kWp]	3.5		
モジュール効率[-]	0.118	0.142	0.17
モジュール面積 [m ²]	29.6	24.6	20.6
年間日射量 [kWh/m ² /年]	1,295		
有効発電電力量 [kWh/年]	3,795		
耐用年数 [年]	20		
エネルギー投入量 [MJ/Wp]	31	17	11
EPT[年]	2.7	1.6	1.0
投入コスト [円/Wp]	710	380	290
年経費[千円/年]	31	9.0	7.0
発電コスト [円/kWh]	51	26	20
モジュール	36	15	10
架台/配線材料	4.6	4.1	3.7
設置工事	0.4	0.4	0.4
パワーコンディショナ	5.5	3.6	3.6
修繕・保守費用	4.4	2.3	1.8
CPT[年]	39	16	12
CO ₂ 排出原単位 [g-C/kWh]	22	12	8.4
CO ₂ PT[年]	2.8	1.4	1.0

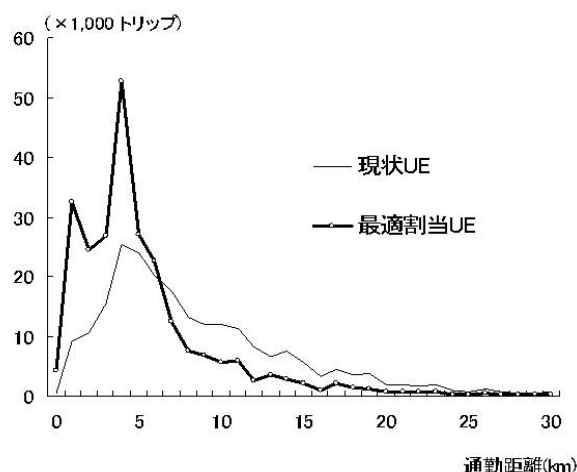


図4 職住最適割当による通勤距離分布の変化(宇都宮)

(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

代表的な未利用エネルギーである下水熱の利用価値を定量的に評価するため、下水幹線のシミュレーションモデルと地域冷暖房(DHC)プラントのシミュレーションモデルを開発した。これらと地理情報システム(GIS)データによって、下水幹線上の各地点での月別時刻別の下水流量や下水温度を計算し、下水熱利用DHCを導入した場合の環境負荷低減効果を計算することができる。下水温度や負荷率によって変化するヒートポンプの効率やDHCを導入した場合の下流側での下水温度変化の効果なども考慮できる点が特徴である。これらを用いて、東京都芝浦処理区にDHCを1ヶ所導入した場合と、1本の幹線上に5ヶ所のDHCを導入した場合のそれぞれについて解析を行った。解析は250m角のメッシュ単位で行い、そのメッシュ内で地域冷暖房を行うものとした。今回のモデルはそれぞれ独自に開発したもので、特に下水熱を利用した地域冷暖房に必要な情報を与え、またその効果が評価できるように工夫して作成した。

シミュレーションの結果、1カ所の設置の場合には、対象地域1077のメッシュのうち、438メッシュはそのメッシュ内に下水幹線を有するが、それらの中で熱需要量が小さすぎたり、逆に下水流量が少なすぎるメッシュを除いた229に対してシミュレーションをすべて行った。その中では最大年間約4,500 t-CO₂の二酸化炭素排出削減が可能メッシュが存在した。また5カ所設置の場合には5メッシュ合計で二酸化炭素の排出量削減は9900 t-CO₂であった(図5)。これらの下水熱利用地域冷暖房は通常のガスの地域冷暖房に比べて二酸化炭素排出量が約半分であった。なお、地域によっては夏季の冷房排熱が大きく利用後の下水の温度が40℃を超えてしまう場合もあり、このような場合は適用不可能と考えた。

これらの検討を通じて、実際の都市内での下水熱利用地域冷暖房による二酸化炭素排出削減効果を緻密なモデルに基づくシミュレーションによって評価することが可能になった。

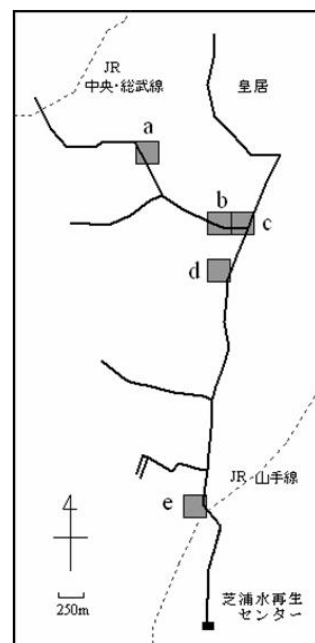


図5 二酸化炭素排出削減量が最大となる5ヶ所のDHC導入メッシュ位置

(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

特定の都市を対象として需要変化による誘発CO₂排出量の評価を行うことを目的とし、東京と札幌市についてケーススタディをおこなった。東京のCO₂排出構造を産業別にみると電力、運輸、最終消費(おもに家計)における排出が多い。また最終需要別には建設、サービスに由来する排出量が大

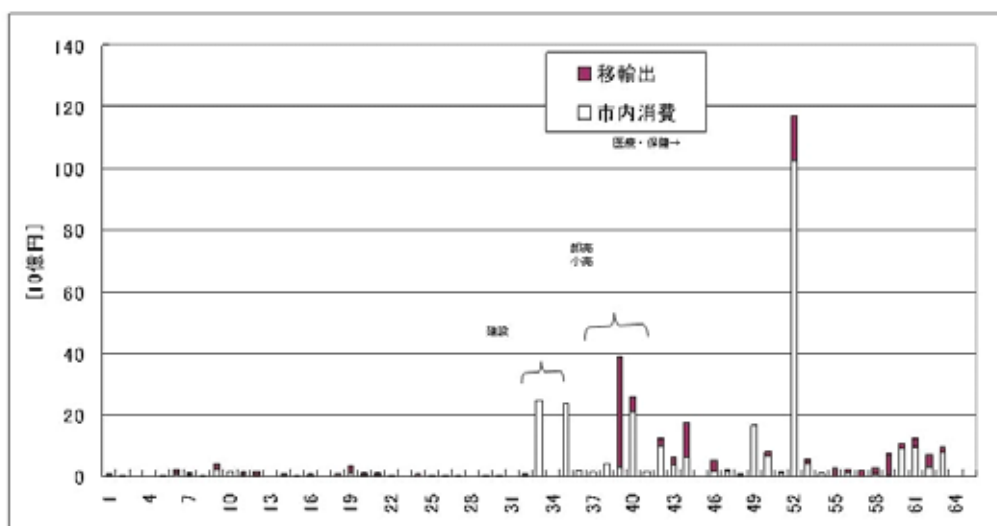


図6 札幌市各最終需要のエネルギー消費誘発額

きい。逆にいえばこれらの部門では削減ポテンシャルが大きいことを意味する。つまり、電力、運輸部門における燃料転換や効率改善、ならびに建築物の長寿命化やサービス業における燃料節約などの省エネ策がCO₂削減に有効であるという示唆が得られる。年度間の比較では1995年は90年と比べて、産業別では運輸、最終消費(おもに家計)が増加、鉄鋼が減少している。最終需要別ではサ

図7 GARUDAシステムの解析の流れ

その1は、各主体の行動を評価するためのモデル開発である。都市の商業用ビルおよび住宅を対象として、用途別エネルギー需要の推計を行い、現実のエネルギー機器の特性を考慮した上での最適な行動が導出できるモデル開発を行った（図7）。これには、非線形混合整数計画法を用いた最適化モデルを必要とした。その2は、多主体間の行動評価の統合ツールの開発である。都市エネルギーシステムには建築、都市計画、交通、電力など複数分野の主体が参加する。そのため、複数のモデルの統合的な解析が必要となる局面が存在する。そこで、本研究では特に分散最適化を目指すツール開発を行った。

The screenshot shows a web browser window with the URL http://133.111.72.18/models/techtable-editactivity.php?user_id=1&view_id=1&editactivity_id=1680&session_id=1. The page title is "Tokyo GHG Half Project" by Steven Kraines. The navigation bar includes links for Home, My Models, Model Database, THP Members, Document Repository, CO2 Tech Table, and Message Board. The main content area is titled "Edit Activity for Kraines, Steven: Tokyo, Honsu" and contains a form with the following fields:

- Activity Name:** residential appliances
- Activity Level:** electric appliances sub-activity
- Activity Description:** CO2 Emission% (3)
- path/model/condition/requirements:** building floor area (Add Requirement)
- technology/policy options to consider:** aluminum recycling (Add Technology)

Below the form is a table showing the contribution of various activities to CO2 emissions:

urban needs / activities	Contribution to CO2 emissions	path/model/condition/requirements	technology/policy options to consider
electricty	25%	central power grid electricity demand	centralized electric power systems
electric appliances	10%		high efficiency appliances
commercial appliances	4%		building materials
office building appliances	12%		
residential appliances	3%	lifestyle	
industrial/manufacturing	5%	manufacturing infrastructure	manufacturing process improvement
lighting	10%	building floor area	daylight savings

する際、どのような計算手法やデータを利用するかも決定すべきである。

- 6 -

都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減技術や政策の評価のための協調基盤に整備した機能は以下の通りである：

- (1)公開サイトとプロジェクト内サイトを分け、プロジェクトのメンバーのページへのパスワード制限アクセスの機能
- (2)ログイン済みのメンバーは、個人情報や発表論文リストを自ら修正でき、電子ファイルの形にある資料をアップロードできる機能
- (3)メンバー毎に以下の機能をもつ「CO2テックテーブル」
 - (ア) メンバー毎の「CO2排出を起こす都市活動」の分類テーブル
 - (イ) メンバー毎の「CO2排出を削減する技術や政策」の分類テーブル(図8)
 - (ウ) 各々の対策効果を評価するために「必要なモデルやデータ」の分類テーブル

4. 考察

本年度は、全研究期間見通して、日本全体の都市の将来の二酸化炭素排出の見通しと、削減可能性を明らかにするための研究戦略に関する議論を重ねた。その中から、宇都宮市を始めとした5都市を対象都市として選定し、宇都宮市からケーススタディを始めることと、対象とする対策の効果の概略の二酸化炭素削減見通しと検討対象とする対策の特定を並行して行うこととした。さほど特徴のある都市ではない宇都宮市を対象に選んだのは、2050年の日本全体の二酸化炭素排出を考えた場合、このような規模と状況にある都市がどのように社会状況にあり、どのような対策が可能かという点が重要であるとの認識に基づくものである。今後は、さまざまな異なる特徴を持つ5都市に対して個別に検討を重ね、最終的には日本全体としての二酸化炭素排出の見通しと、2050年の削減目標達成に必要な対策群を示したい。

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、東京大学大学院工学系研究科助教授

：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、現在、(株)日建設計環境計画室長

：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

：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新領域創成科学研究科教授

：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

6. 成果発表状況

Tomohito Okamura, Ryuji Matsuyhashi, Yoshikuni Yoshida, Hideo Hasegawa, Hisashi Ishitani, "CO2 reduction effect of the utilization of waste heat and solar heat in a city gas system", Electrical Engineering in Japan, Vol. 149, Issue 1, (2004), 22-32.

Hirokazu Shima, Hisashi Tateyashiki, Ryuji Matsuyhashi, Yoshikuni Yoshida, "An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment through Input-Output Analysis", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 3, No. 1(2005), 53-67

Kiyoshi Dowaki and Shunsuke Mori, "Biomass energy used in a sawmill", Applied Energy, Vol.80, PP.327-339, 2005

石田 武志、堂脇 清志、森 俊介、「経済性制約下における業務建物の最適CGS導入決定支援システムの構築」、電気学会論文誌B、Vol.125, No.4, PP.373/380、2005年4月