

環境省 地球環境研究総合推進費 戦略研究開発プロジェクト(S-3)

「脱温暖化 2050 プロジェクト」

低炭素都市の実現へ向けての解析

2009 年 2 月

脱温暖化 2050 プロジェクト・都市チーム

はじめに

将来の持続可能な社会の形成に向けて、低炭素社会への転換はいまや必須となっており、これに加えて循環型社会と自然共生社会とを形成していくことが人類の将来にとって求められている。

低炭素社会を構築するためには、人間の活動の場である都市を低炭素型に変えていく必要がある。都市はそこで行われる生活と産業活動、サービス活動の場として人間の影響を受ける一方で、そのかたちが人間活動と環境負荷に影響を与える側面がある。

低炭素都市の実現に向けて都市を解析し、また望ましい姿を提案していくためには、さまざまな解析手法を用いることが有効である。また、これらの手法は実際の都市の場に適用して初めてその効果を発揮する。

低炭素都市の形成に向けた研究が、平成 16-20 年度環境省地球総合研究推進費 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」(http://2050.nies.go.jp/index_j.html)の一環として「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」【略称：脱温暖化 2050 プロジェクト・都市チーム】(代表：花木啓祐)として行われた。

本リーフリットはそこで行われた研究の成果の中から、実際の都市における解析の方法とその例をハイライト的に示したものである。このリーフレットが、今後の研究、あるいは自治体における低炭素都市形成のための解析と提案に役立つことを期待するものである。

2009 年 2 月

代表 花木 啓祐

目 次

1. 低炭素都市の戦略	2
2. 都市や地域の温暖化緩和策を評価するうえでの特徴	4
3. 都市および地域における緩和策の解析事例	
住宅からの都道府県別 CO ₂ 排出量の 2050 年までの予測	6
業務系建築物からの都道府県別 CO ₂ 排出量の 2050 年までの予測	8
太陽光発電システムの都市への導入による消費電力と CO ₂ 排出削減効果	10
GIS を用いた都市未利用エネルギーの有効活用による CO ₂ 排出削減ポテンシャルの解析	12
清掃工場排熱利用地域冷暖房システムによる CO ₂ 排出削減ポテンシャルの解析	14
全国複数地域街区への地域冷暖房システムによる CO ₂ 排出削減ポテンシャルの解析	16
都市街区内における分散エネルギーネットワーク評価モデルの構築	18
建物個別対策から都市の面的対策までの統一的評価	20
モデル統合基盤により複数対策の相互作用を考慮した CO ₂ 排出削減効果の解析	22
プラグインハイブリッド車および家庭用 CGS/HP の導入拡大による CO ₂ 排出削減量の解析	24
中山間地域の町を対象とした温室効果ガス排出削減ポテンシャルの解析	26
ロードプライシングによる CO ₂ 排出削減ポテンシャルの解析	28
地域間物流に伴う CO ₂ 排出量の変化	30

1. 低炭素都市の戦略

(1) 都市に対する対策の特徴

CO₂をはじめとした温室効果ガスの排出が小さい「低炭素社会」を形成することが求められている。そのような低炭素社会を実現させる場が低炭素都市である。低炭素都市を形成していくためには、コンパクトシティの形成のような都市の計画面、再生可能エネルギーの都市への導入、省エネルギーを通じた排出削減対策を有機的に組み合わせしていく必要があるが、実際の都市においてはまた制約条件もある（表 1）。

都市に対する低炭素化対策の導入の特徴を考えてみるといくつかの点がある。第一は、都市の建物および基盤施設の建設、さらに人間の居住地の変更は 50 年以上を要するゆっくりした変化であるという点である。都市構造の変更の対策を現在から取り始めても、2050 年時点ではまだその変化の途上である。第二は、都市内の面的な建物の分布が対策を立案し、実現する際に重要であるという点であり、これは特に地域冷暖房の導入などで顕著である。第三は、規制と誘導の両者が必要であるという点である。そして最後に、都市の活力と魅力を生かしつつ低炭素化の対策を導入することが必須であり、活力をそぐ形での低炭素化は持続可能ではない、という点が挙げられる。

表 1. 都市における種々のレベルの対策

対策のレベル		対策の内容	制約条件
A.コンパクトシティ形成		A-1.郊外居住から都心居住への転換 A-2.拡散型商業立地の集約化	中心地の活力の保持
B.再生可能エネルギー導入		B-1.再生可能エネルギー（コジェネ・地域冷暖房含む）導入	初期投資費用
C.セクター別直接対策	家庭部門	C-1.戸建て住宅から集合住宅への住み替え C-2.適正な一人あたり住宅床面積 C-3.住宅の省エネ設計	生活の質の保持 居住の自由度の保持
	業務部門（事務所、商業施設）	C-4.業務床面積の抑制 C-5.業務建物の省エネ設計	業務機能の確保
	運輸部門	C-6.モーダルシフト C-7.自動車単体効率向上	モビリティの確保

(2) 都市規模ごとの戦略

中枢都市以上の規模の都市では、一定程度の密度を保持することにより鉄道輸送が可能になり、CO₂ 排出が削減できる。また中核都市から小都市では軽軌道系（LRT）の整備が都市のコンパクトによって可能になる。コンパクトな都市の形成は温暖化対策だけではなく、道路、水道、下水道などのインフラストラクチャのサービス水準の維持のためにも重要である。密度が低く拡散した住形態はインフラストラクチャの維持の費用負担が大きく、それゆえにサービス水準の低下が生じ、人々の生活の質の低下につながる。

このコンパクトさは住環境に対してもあてはまる。わが国の一人あたりの家庭部門のエネルギー消費の増大の背景には社会的な傾向とライフスタイルの変化がある。すなわち、世帯あたりの人数が一貫して減少している一方で、住宅の床面積は増大している。その結果として一人あたりの床面積は増加している。さらに、かつての暖房機器のようにその周辺だけ暖めるのではなく、空間全体を暖める暖房が主力になり、また冷房も空間に対して行われる。集合住宅と戸建て住宅の比率、そして社会として、単身の居住が今後も増加するの

か、多人数居住への回帰が起きるのは大きなポイントである。グローバリゼーションの一環として競争にあらゆる場がさらされている現在、人々は単身赴任をし、家族が別々に暮らす傾向にある。この傾向が今後も続くなれば一人あたりの住宅のエネルギー消費は増加の傾向を続ける基盤となるので、その効果を相殺して更にエネルギー需要の削減を実現していくことが求められる。

都市の規模や特徴によって取るべき長期戦略は異なるであろう（図 1）。

東京、名古屋、京阪神の三大都市圏に代表されるように、規模が大きく密度も高い大都市においては、エネルギー効率の高い集合住宅の導入、CO₂ 削減効果が現れる場所を選んだコジェネレーションと地域冷暖房の導入、そして郊外部からの通勤に対するモーダルシフトなどが有効である。

札幌や仙台のように人口が 100 万人を越えるような中枢都市では集合住宅と戸建て住宅の両者への対策、鉄道の整備とモーダルシフトが考えられる。もっとも、鉄道整備の効果はその都市の地形、物理的な都市域の広がり形状にも依存する。

中規模程度の地方都市の場合、大規模な鉄道を建設することは費用の面で困難である。これらの都市には性能の高い路面電車である LRT やモノレールなどが現実的である。

これに対し、小規模な都市や中山間地域では公共交通を導入することは実際問題として困難である。自家用車のような個人的な移動手段の環境負荷をいかに低下させるかが重要な点となる。一方でこれらの地域は森林系あるいは農業系のバイオマスを活用する可能性も有しており、それらの事業性は検討に値する。

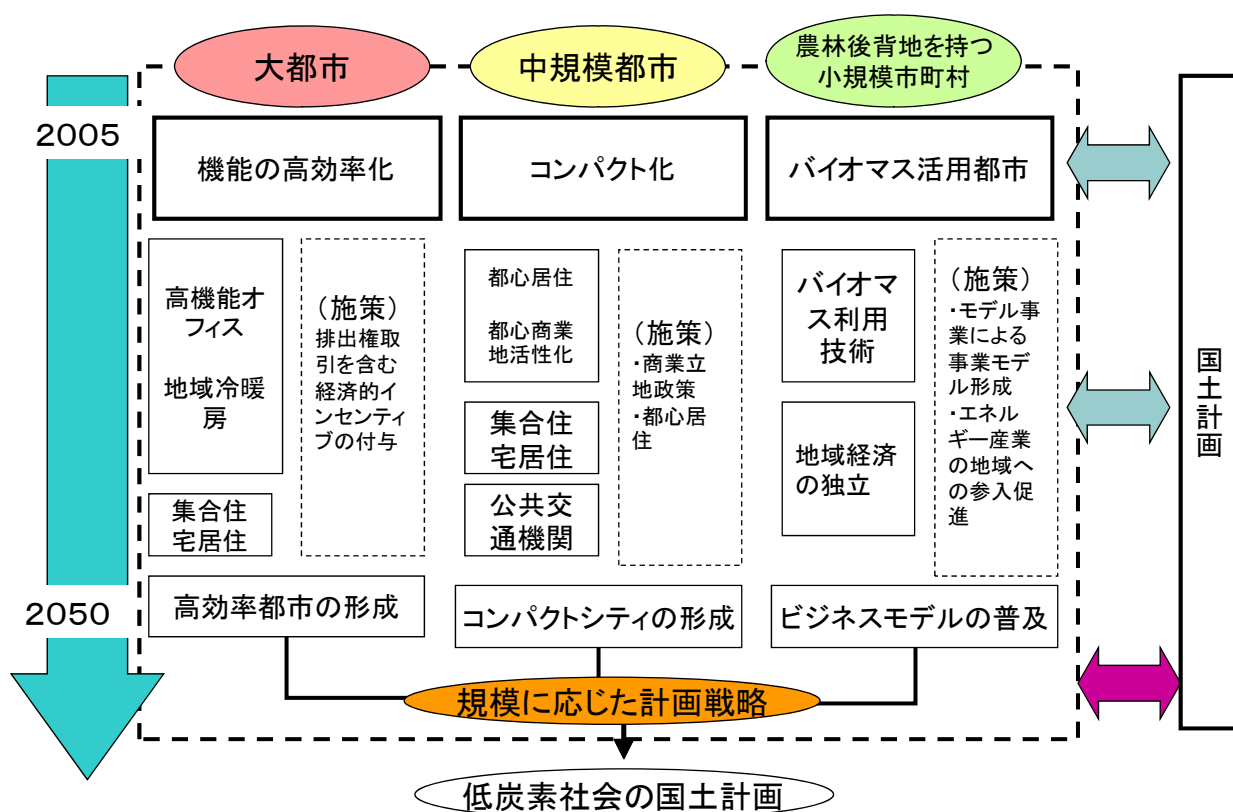


図 1. 規模別の低炭素都市の戦略

(花木啓祐：東京大学大学院工学系研究科)

2. 都市や地域の温暖化緩和策を評価するうえでの特徴

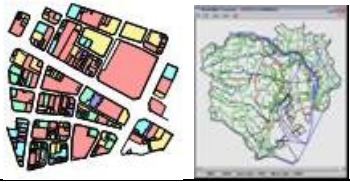
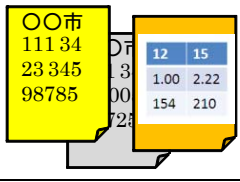
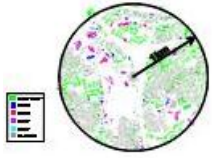
(1) ミクロな解析とマクロな解析の使い分け

都市活動を解析・評価し低炭素化策を提案する場合に、都市内の建物などの分布をも含むいわばミクロな解析と、都市全体としての建物総床面積などのいわばマクロな解析を使い分ける必要がある。

対象とする地域と対策に対応して解析のスケールも異なる。とりわけ、一つ一つの建物や土地利用の情報である地理情報システム(GIS)を用いた解析は、都市の内部でのそれらの建物や土地利用の分布が支配的な因子となる場合に有効である。たとえば、熱需要が異なる建物群を対象にして行われる地域冷暖房は、建物間の距離と熱需要の量によって CO₂ 削減効果が異なる。また都市内で廃棄物を収集しバイオマスとして利用するプロセスの場合も収集距離が重要になるために都市内の住宅やオフィスの分布が必要となる。

一方、個別の建物への対策のように、それぞれの効果を都市全体、あるいは県全体として合算するような場合、分布を伴うような情報は不要であり、またかえって解析を難しくする。行政単位毎の統計情報の方がむしろ有効である。太陽電池の導入の場合には一つ一つの建物の形状に合わせた解析も可能であるが、都市全体での導入効果を評価する場合には分布に関する情報は必ずしも必要ではない。

表 1. 面的情報と数値統計情報の使い分け

	面的情報（建物・土地利用の分布）	数値統計情報（建物・土地利用の量）
基礎情報	GIS に基づく解析 	建物用途と建物数・床面積の数値情報 
解析の規模	街区単位	市町村単位・県単位
解析例	ごみ焼却熱利用地域冷暖房の効果  都市内廃棄物のバイオマス利用	建物のエネルギー性能改善、太陽電池 

(2) 相互作用の重要性

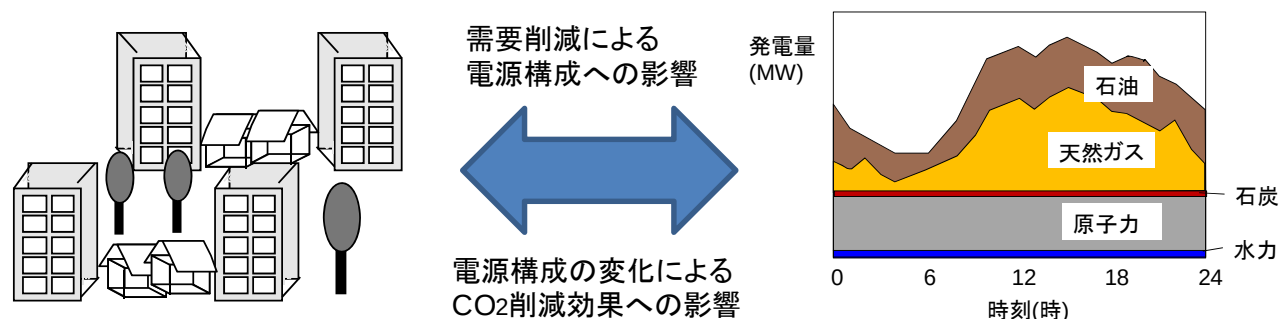


図 2. 電力需要と供給にかかわる相互作用

都市の二酸化炭素削減対策には相互作用を持つものも少なくない。例えば、同時に導入できない二つの対策はそのような例である。また、建物の省エネルギー対策と戸建て住宅から集合住宅への住み替え

は同時に推進されることが考えられる。それぞれの対策で独立して推定した CO₂ 削減量も、両対策が同時に導入されるとその効果は両削減効果の和にはならない場合がある。

対策同士の相互作用に加えて、大きな相互作用は電力の需要と供給に関するものである。電力需要低減の結果、発電所においてどのエネルギー源が削減されるかによって CO₂ 排出削減効果は異なる(図 2)。

(3) ダイナミックな変化と将来推定

将来の人口の動向、一世帯あたりの人数は基本量として CO₂ 排出量に影響を与えることは自明である。将来の人口の動向は地域によって、とりわけ都市部と非都市部では異なり、また将来の社会像によって異なる。脱温暖化 2050 プロジェクトの二つのシナリオにより国土の人口分布は大きく異なる。

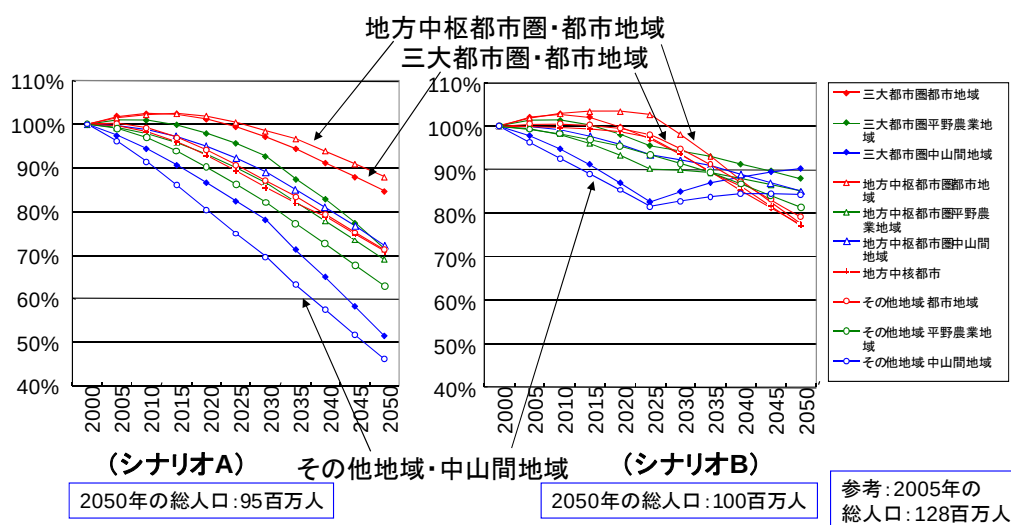


図 3. 脱温暖化 2050 の 2 つのシナリオにおける将来の人口予測

都市の構造は交通需要と交通手段に影響を与え、集合住宅比率を通じて建物のエネルギー消費量にも影響を与える。コンパクトシティ化は都市計画面での対策の一つであるが、その効果についてはそれぞれの都市において検証する必要がある。

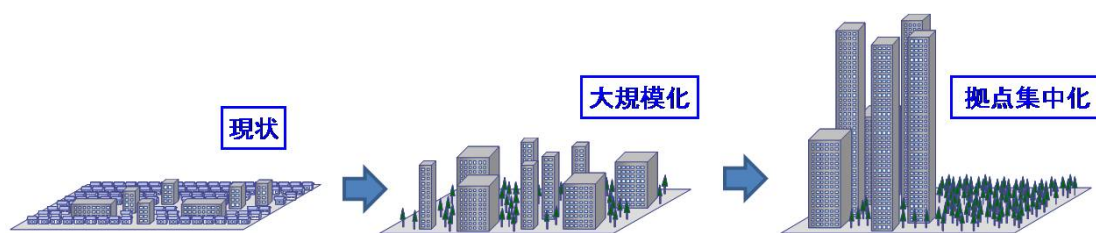


図 4. 都市のコンパクト化

(4) 誘発される温室効果ガスへの配慮

都市を構成する建築物の材料の生産に伴う温室効果ガス排出、また都市の生産・経済活動に伴う物流の発生による生じる CO₂ 排出量も都市活動の一環として評価する必要がある。前者についてはライフサイクルアセスメントで、後者については産業連関分析による推定が可能である。

(花木啓祐：東京大学工学系研究科)

住宅からの都道府県別 CO₂ 排出量の 2050 年までの予測

対象領域	民生家庭部門エネルギー起源 CO ₂ 排出量
評価した緩和策	断熱、省エネ設備、ライフスタイル変革
対象地域および空間スケール	都道府県ごとの解析
時間スケール	1990 年から 2050 年までの解析
計算手法・モデル・ツール	統計データ、県庁所在都市の年間気象データを用いたシミュレーション

(1) 解析の概要

47 都道府県を対象とし、シナリオ A（都市集中型社会）とシナリオ B（地方分散型社会）の中間シナリオ M において、2050 年における住宅居住時の CO₂ 排出量を 1990 年に比べて概ね 60%削減するために、電力事業者の対策（電力の CO₂ 原単位改善）を前提としたうえで、住宅の断熱性能向上、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をどの程度行えばよいかを検討した。

(2) 解析手法

住宅のエネルギー消費量の計算フローを示す(図 1)。都道府県／都市別、7 家族類型別に、(1)暖冷房、(2)給湯、(3)その他（冷蔵庫、厨房、娯楽情報、家事衛生、照明）を分けて計算する。

暖冷房用エネルギー消費量(図 1、(1)): 戸建、集合住宅の標準モデルについて、住宅用熱負荷計算ソフト SMASH を利用し、暖房／冷房負荷算出用重回帰式を作成した。これを用い、図 1 に示す手順で暖冷房負荷を求め、暖冷房用燃料構成と暖冷房機器の COP(Coefficient of Performance: 成績係数)から暖冷房用エネルギー消費量を算出した。

給湯用エネルギー消費量(図 1、(2)): 使用量原単位、利用温度には、空気調和・衛生工学会の生活スケジュール自動生成プログラムを利用して給湯使用行為頻度、世帯数、各月平均水道水温から給湯負荷を求め、燃料別分担と給湯機器の COP から給湯用エネルギー消費量を算出した。

その他のエネルギー消費量(図 1、(3)): 前述の生活スケジュール自動生成プログラムを利用し、家族類型別に各家電機器の電力消費量日積算値を設定した。日積算値に日数および世帯数を乗じてその他のエネルギー消費量を算出した。

太陽熱利用量、太陽光発電量の計算: 戸建、集合住宅別にパネルの設置角度と普及率を設定して算出した。

世帯数将来推計の設定 脱温暖化 2050 プロジェクト シナリオチームの推計データを利用した。

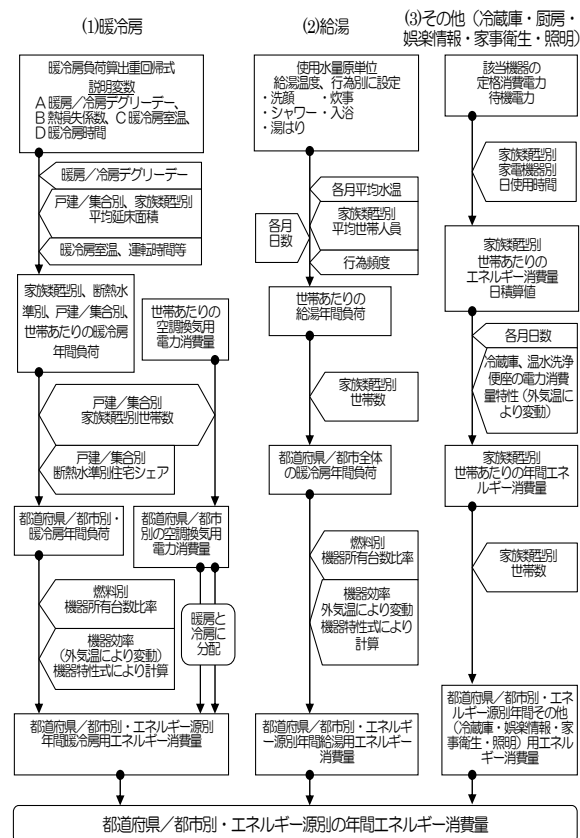


図 1. 住宅のエネルギー消費量の計算フロー

(3) 解析結果

47 都道府県の住宅のエネルギー使用用途別 CO₂ 排出量を 2050 年まで予測した結果を示す(図 2)。電力の CO₂ 原単位が 2005 年以降変化せず(電気事業者の対策無し)、無対策ケースの場合は、2050 年に 1990 年と同レベルとなる。2050 年の電力の CO₂ 原単位が 0.12 kg-CO₂/kWh まで削減されとした経済産業省超長期エネルギー技術ロードマップに基づくケースでは

2050 年には 50% 減となる。表 1 に示す住宅の対策を行ったケースでは、2050 年に 61% まで削減できるという結果が得られた。47 都道府県別の 2050 年に CO₂ 排出量の増減を示す(図 3)。参考文献 1) 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 Vol.12 No.2, pp.191-199, 2007 2) 木本慶介、伊香賀俊治、花木啓祐、新谷圭右、野口宏明：住宅の建設・改修・解体に起因する CO₂ 排出量の 2050 年までの予測、第 4 回日本 LCA 学会研究発表会(北九州)、2009.3

(伊香賀俊治：慶應義塾大学理工学部)

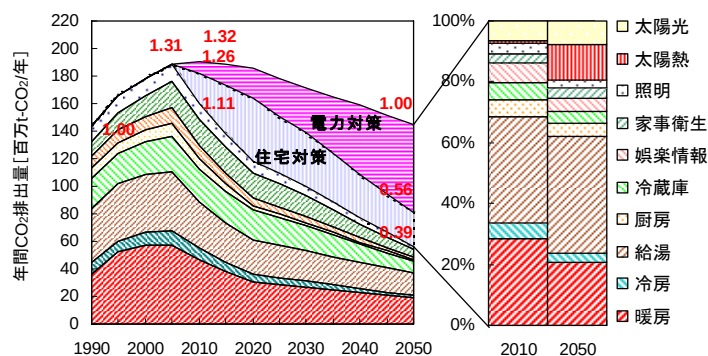


図 2. 全国の住宅 CO₂ 排出量の推移(対策強化ケース)

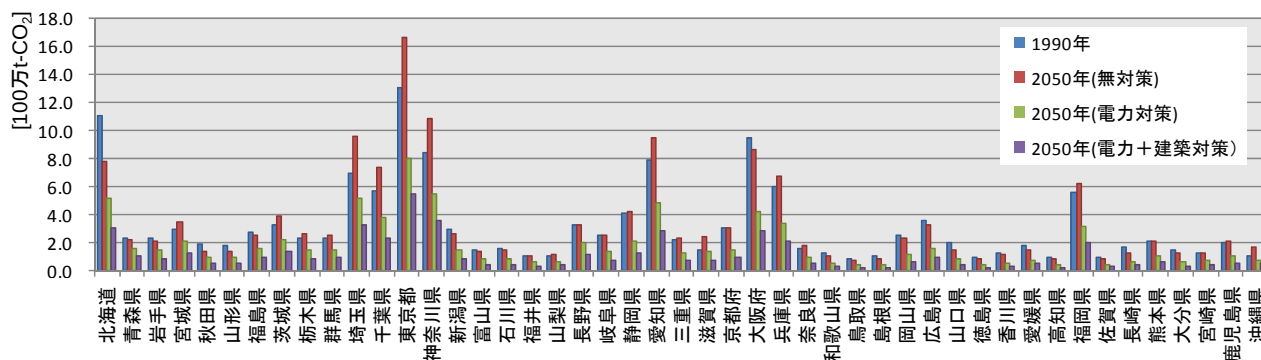


図 3. 都道府県別の住宅 CO₂ 排出量の推移(対策強化ケース)

表 1. 2050 年の CO₂ 排出量を概ね 1990 年比 70% 削減を達成するための省エネルギー対策

省エネルギー対策の内容	
暖房	新築住宅の断熱強化 (2020 年までにすべての新築住宅が次世代省エネ基準を満たす)
	既存住宅の断熱強化 (2005 年以降、毎年全住宅の 1.0% が次世代省エネ基準を満たすように断熱改修される)
	省エネエアコンへの買替促進 (2020 年時点で全世帯平均の暖房 COP が 3.0 から 6.0 へ、冷房 COP が 4.0 から 6.0 へ、2050 年時点で全世帯平均の暖房 COP が 4.0 から 8.0 へ、冷房 COP が 6.0 から 8.0 へ向上する)
	油式から電気式の暖房機器への買替促進 (2005 年を基準として、電化率が 2020 年に 1.5 倍、2050 年 3 倍になる)
	暖房室温を 2℃ 下げ、冷房室温を 1℃ 上げる省エネ行動 (2020 年までに全世帯の 30% で実行され、移行横ばいとした)
	暖房及び冷房の延べ運転時間を 25% 減らす省エネ行動 (2020 年までに全世帯の 30% で実行され、移行横ばいとした)
給湯	電気温水器からヒートポンプ給湯機への買替促進 (2020 年時点までに 1/3、2050 年までに COP6.0 に向上する)
	潜熱回収型給湯機への買替促進 (2020 年時点までに 1/3、熱効率は 1.2 倍に向上する)
	油式から電気式の給湯機器への買替促進 (2005 年を基準として、電化率が 2020 年に 1.5 倍、2050 年 3 倍になる)
	省エネ行動の普及 (① 給湯温度を 1℃ 下げる、② 入浴回数を減らす。風乾燥機の使用を減らす。節水シャワーヘッドを使用する、③ 炊事で湯を使うのを減らす。夏の炊事には水を使うなどの省エネ行動が 2020 年には全世帯の 50% で実行され、以降横ばいとした)
家電製品	省エネ型冷蔵庫への買替促進 (2005 年を基準とし、2020 年に 60%、2050 年に 70%、冷蔵庫の電力消費量が削減される)
	省エネ型テレビへの買替促進 (2005 年を基準として、2020 年には 50%、2050 年には 75%、テレビの電力消費量が削減されるとした)
	省エネ行動の普及 (① 不使用時に家電のコンセントを抜く、② 風乾燥機の残り湯を再利用する、③ 洗濯物を干す。スピードコースで洗う、④ 下・室・面所の熱から電球型照明に交換する、⑤ 温水の温度設定を季節に合わせて調整するなど)の省エネ行動が 2020 年には全世帯の 50% で実行され、以降横ばいとした)
太陽光・太陽熱	太陽熱給湯の普及 (戸建住宅で 4 m ² /戸、集合住宅で 2 m ² /戸の太陽熱給湯器が 2020 年までに戸建で 20%、集合住宅で 2%、2050 年までに戸建で 40%、集合住宅で 4% まで普及する)
	太陽光発電 (戸建住宅で 4 kW/戸、集合住宅で 0.5 kW/戸の太陽光発電が 2020 年までに戸建で 10%、集合住宅で 1%、2050 年までに戸建で 20%、集合住宅で 2% まで普及する)

注：上記のほか、2005 年以前の電力の CO₂ 原単位は全国全電源平均値を用いた。2005 年以降は 2005 年実績値(0.425 kg-CO₂/kWh) を固定したシナリオと、超長期エネルギー技術ロードマップにおける予測値 (2030 年: 0.27 kg-CO₂/kWh、2050 年: 0.12 kg-CO₂/kWh) を採用したシナリオの 2 ケースを想定。

業務系建築物からの都道府県別 CO₂ 排出量の 2050 年までの予測

対象領域	民生業務部門エネルギー起源 CO ₂ 排出量
評価した緩和策	断熱、省エネ設備、長寿命化
対象地域および空間スケール	都道府県ごとの解析
時間スケール	1990 年から 2050 年までの解析
計算手法・モデル・ツール	統計データ、県庁所在都市の年間気象データを用いたシミュレーション

(1) 解析の概要

業務用建築については、運用時の CO₂ 排出量に加えて、新築時、改修時の CO₂ 排出量を加えた 47 都道府県ごとの CO₂ 排出量を 2050 年まで予測した。未来社会像として、シナリオ A、シナリオ B、シナリオ M（シナリオ A と B の中間）について、2050 年における業務用建築からの CO₂ 排出量が 1990 年に比べて概ね 70%削減を達成するために、省エネルギー対策、長寿命化対策をどの程度行えばよいかを検討した。電力事業者の対策として、電力の CO₂ 原単位が 2005 年以降変化しないシナリオと経済産業省の超長期エネルギー技術ロードマップに基づくシナリオを想定した。

(2) 解析手法

解析モデルは以下に示す①～③のサブモデルから構成されている。

①床面積に関する予測モデル

ストック/新築/改修床面積を建物用途別、未来社会像別、都道府県別に 2050 年まで予測する。予測には、将来人口、GDP 成長率や産業別生産額、建物の残存率関数等を用いた。

②床面積当りエネルギー消費原単位のデータベース

低炭素技術の導入による床面積当りのエネルギー消費量および CO₂ 排出量の削減効果を評価し、データベース化する。標準モデル建物を設定し、モデル建物に様々な低炭素技術を採用した場合の床面積当りエネルギー消費量および CO₂ 排出量をビル空調熱源経済性評価プログラム FACES 等で算出する。本研究で対象とした低炭素技術を表 1 に示す。

③低炭素技術の導入評価モデル

各低炭素技術について、経済合理的な導入率を評価する。導入率と投資回収年数の関係を表す選好関数を基に、量産効果を考慮して各低炭素技術の導入率の推移を評価した。

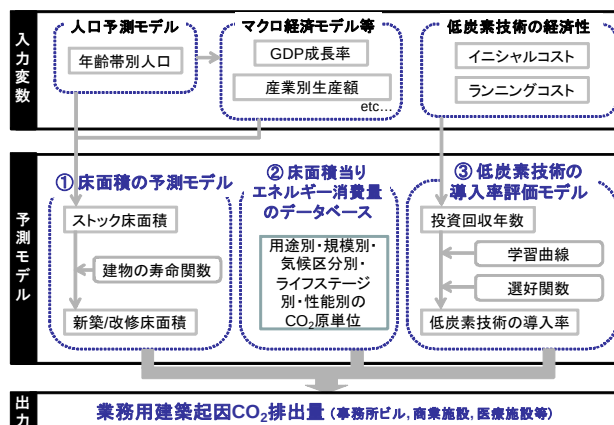


図 1. 解析モデルの概要

表 1. 本研究で扱う低炭素技術

分類	具体的な低炭素技術
1. 長寿命化	階高のゆとり、天井高のゆとり、床荷重のゆとり、十分な耐久性
2. 外皮性能	外壁の高断熱、開口部の高断熱
3. 熱源方式	COP の向上、氷蓄熱、全熱交換器
4. 熱搬送方式	VAV 制御方式
5. 空調方式	外気量制御
6. 照明方式	高効率照明、初期照度補正、昼光連動制御
7. エレベータ	交流 VVVF 制御
8. 給湯方式	高効率給湯

(3) 解析結果

①解析条件

ストック床面積はシナリオ M を想定し、電力 CO₂ 原単位に関しては、住宅における推計と同様に、2005 年以降の電力 CO₂ 原単位を 2005 年度実績値(0.425 kg-CO₂/kWh)に固定したケースと、経済産業省超長期エネルギービジョンに示された値(2050 年 : 0.12 kg-CO₂/kWh)を採用したケースを想定する。

②解析結果

結果を図 2 (全国)、図 3 (都道府県別) に示す。
2050 年の CO₂ 排出量 (図 2) は、1990 年と比べ 36%削減されているが、現状の建築分野の対策だけでは削減目標の達成が非常に困難であることが示された。目標達成には、建築分野における更なる対策の強化あるいは、他分野 (電力分野など) との複合的な対策が求められる。電力 CO₂ 原単位が大幅に改善された場合、最大 71%の削減が可能であることが示唆された。一方、自然ケースにおいては 9%増加する。

都道府県別の運用 CO₂ 排出量 (図 3) は、上位 5 都府県(東京・神奈川・愛知・大阪・福岡)からの CO₂ 排出量が多い。これら自治体の CO₂ 削減ポテンシャルの合計は、全国の総削減ポテンシャルの 45%を占めており、これら都市における重点的な対策が重要である。

参考文献)

- 1)新谷圭右、伊香賀俊治、村上周三、花木啓祐 (2008) : 建築・都市のサステナビリティに関する研究(その 5)、業務用建築起因 CO₂ 排出量の超長期予測モデルの開発、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1063-1064、2008.9
- 2)新谷圭右、伊香賀俊治、村上周三 (2008) : 建築・都市のサステナビリティに関する研究 (その 6)、業務用建築起因 CO₂ 排出量の都道府県別予測、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.2259-2262、2008.8

(伊香賀俊治 : 慶應義塾大学理工学部)

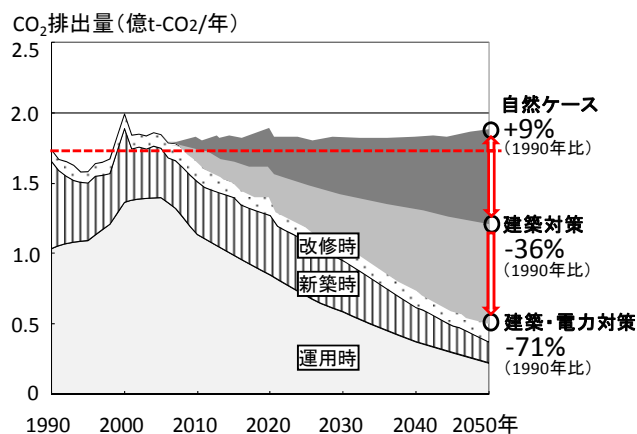


図 2. CO₂ 排出量の全国予測 (シナリオ M)

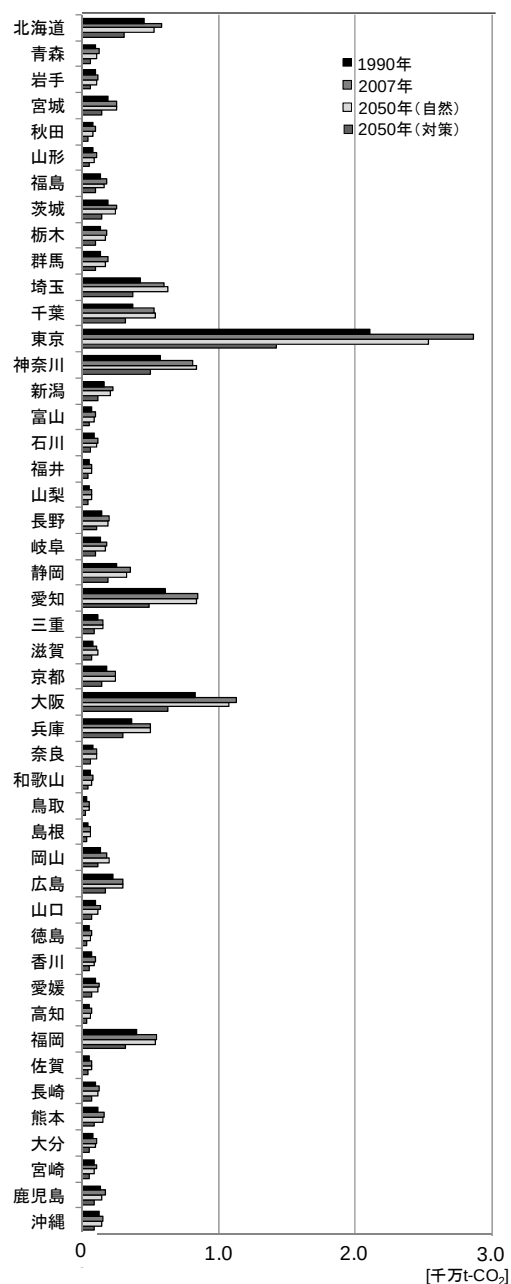


図 3. CO₂ 排出量の都道府県別予測
(シナリオ M、電力の CO₂ 原単位 : 2005 年以降固定)

太陽光発電システムの都市への導入による消費電力と CO₂ 排出削減効果

対象領域	家庭電力消費および CO ₂ 排出
評価した緩和策	住宅用屋根置き型太陽光発電システム
対象地域および空間スケール	全国を対象、都道府県庁所在地ごとの解析
時間スケール	ポテンシャルと 2030 年における導入予測
計算手法・モデル・ツール	気象データ、都道府県別住宅床面積データ

(1) 解析の概要

CO₂ 排出量を削減する方策の一つは、CO₂ 排出原単位の小さいエネルギー源への代替であり、太陽電池はその有力な候補である。我が国では住宅用を中心に太陽電池の導入が進み、2006 年の累積導入量は 1.7 GW となった。NEDO のロードマップ PV2030 では、2030 年の累積導入量の目標値を 100 GW としており、そのためには更なる飛躍的な導入が必要である。一方、太陽電池の出力は気象条件と密接な関係があり、その効果は地域によって異なることが予想される。ここでは、太陽電池による発電量が地域によってどれくらい異なるのか、また、導入の効果として、消費電力に対する太陽電池による電力供給割合、太陽電池導入による CO₂ 排出削減効果を都道府県別に解析し、都市への太陽電池導入評価において地域差を考慮することの重要性について示す。

(2) 解析手法

3.5kW 住宅屋根置き型の太陽光発電システムを想定し、太陽電池は多結晶シリコン型、モジュール効率は 14% とした。日射データには METPV-2 の各都道府県庁所在地の平年データを使用した。多結晶シリコン太陽電池では高温になるほど出力が低下するので、各県庁所在地の月別平均気温のデータを利用し、発電効率の温度補正を行った。これらのデータから各都道府県の太陽電池による年間発電量を計算した。

次に、NEDO のロードマップ PV2030 では、2030 年の太陽電池の累積導入量 100GW、多結晶シリコンのモジュール効率の開発目標値を 22% と設定している。この設定に基づき、2030 年において太陽電池 (PV) 発電量が電力消費に占める割合を都道府県別に計算した。各都道府県の屋根面積あたりの PV 導入率を一律とし、消費電力は 2004 年の実績値を使用した。さらに、前述の仕様の太陽光発電システムについて、製造プロセスの素材、エネルギー投入量および CO₂ 排出量を積み上げたライフサイクルアセスメント (LCA)¹⁾ に基づき、PV 発電電力の CO₂ 排出原単位 (kg-CO₂/kWh) を計算した。さらに、各電力会社の系統電力の CO₂ 排出原単位 (2006 年実績値) を用い、系統電力を PV 発電で代替した場合の CO₂ 排出削減効果を都道府県別に計算した。

(3) 解析結果

図 1 に都道府県別の年間発電量を計算した例を示す。全国平均の年間発電量は 5000 kWh/y であったが、最小



図 1. 3.5 kW 住宅用太陽光発電システムによる都道府県別の年間発電量

は石川県（金沢市）で約 4500 kWh/y、最大は山梨県（山梨市）で約 5700 kWh/y と、地域によって約 24% も発電量が異なった。今回の計算では、日射のみでなく太陽電池の温度上昇による効率低下を月別平均気温を用いて計算し考慮しているため、必ずしも九州や沖縄など南の地域で高い発電量が得られてはいない。沖縄の年間発電量は北海道と同程度である。また、東北や北陸では低く、東海や四国で高い傾向がある。

2004 年の系統電力の総発電量 (1,137 TWh/y) を基準とすると 2030 年の PV による発電シェアは 11 % であり、住宅の屋根面積に占める太陽電池面積は 17 % となった。一方、電力消費に占める PV 発電量の割合は都道府県によって大きく異なり、大阪府で最も小さく 9.0%、鹿児島県が最大で 20% であった (図 2)。住宅の面積当りの消費電力が大きい大都市では、PV 発電で賄える電力供給割合が小さい傾向にある。しかし、必ずしも都市化が進んでいる地域だけでなく、福井、富山、岡山、山口でも東京と同程度の低い値を示しており、都市構造だけでなく産業構造も関係していると考えられる。

同じ太陽電池を使用しても地域によって発電量が異なるため、PV 発電電力の CO₂ 排出原単位も地域によって異なる (0.054~0.062 kg-CO₂/kWh、図 3) が、系統電力の CO₂ 排出原単位の 1/10~1/5 と十分に小さいため、系統電力を PV 発電により代替することにより CO₂ 排出は大幅に削減される。しかし、その効果は代替される系統電力の CO₂ 排出原単位に依存する。図 3 には PV 発電で 1kWh の電力を代替したときの CO₂ 排出削減量 (原単位) を示したが、地域によって 2~3 倍も異なる。これは系統電力の CO₂ 排出原単位が電力会社によって大きく異なるためであり、化石燃料の火力発電の多い地域での削減効果が大きい。CO₂ 排出を効率的に削減するためには、系統電力の CO₂ 排出原単位の大きい地域から太陽電池を優先的に導入することも一つの方策である。

実際には、PV 発電導入量が大きくなると電源構成にも変化を引き起こすことが予想され、さらに、他の省エネ技術などの導入による消費電力の削減とも密接に関係してくるため、CO₂ の排出削減効果の定量には太陽電池を含む他の対策とのインタラクティブな解析が必要となる。

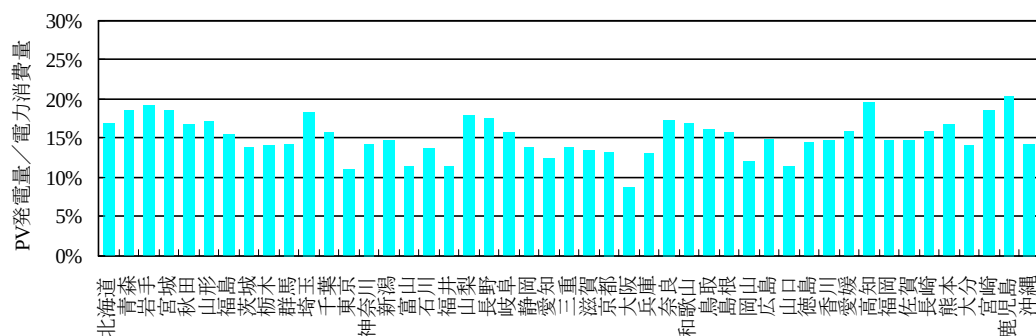


図 2. 都道府県別の電力消費量(2004 年度)に対する PV 発電量(2030 年度予測値)の割合

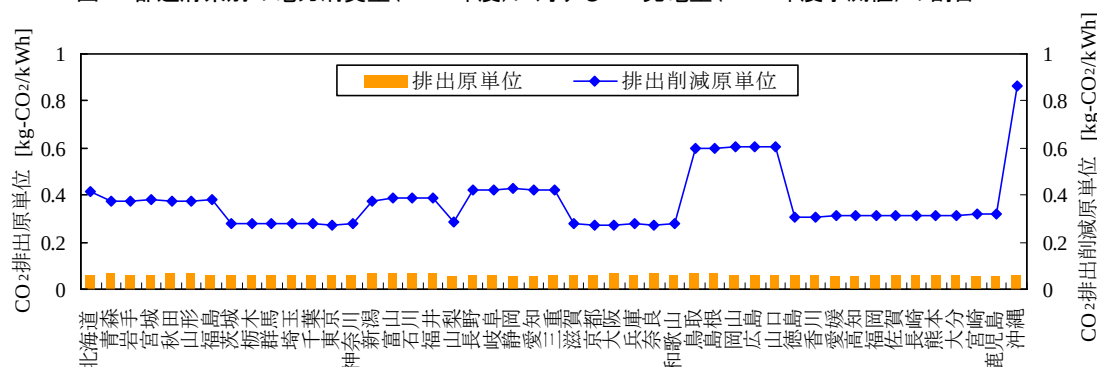


図 3. 都道府県別の CO₂ 排出原単位と CO₂ 排出削減原単位

参考文献)

- 1) 山田興一, 小宮山宏:「太陽光発電工学—太陽電池の基礎からシステム評価まで—」, 日経 BP 社, 東京 (2002)

(高橋伸英: 信州大学繊維学部)

GIS を用いた都市未利用エネルギーの有効活用による CO₂ 排出削減ポテンシャルの解析

対象領域	民生系空調および給湯用エネルギー起源 CO ₂ 排出量
評価した緩和策	未利用エネルギー利用地域熱供給システム
対象地域および空間スケール	特定の都市を対象、建物情報を集約したエリアごとの解析
時間スケール	現状におけるポテンシャルの解析
計算手法・モデル・ツール	地理情報システム、熱の需給バランスの計算、厨芥の収集モデル、下水の収集・流下モデル

(1) 解析の概要

都市には、有機性廃棄物や下水汚泥などの廃棄物系バイオマスや清掃工場排熱や下水熱などさまざまな形の未利用エネルギーが存在する。これら未利用エネルギーの都市内の分布は対象とするエネルギーにより異なるが、有機性廃棄物や下水熱などは都市内に広く分布している。一方その利用の仕方として、有機性廃棄物は直接燃焼やメタン発酵などから電力を得ることは可能であるが、その場合も排熱が発生することから地域熱供給による排熱の利用が一つの選択肢となる。

ここでは、地理情報システム(GIS)を用いて都市内の未利用エネルギーの利用ポテンシャルを解析した事例として、川崎市における厨芥の分別収集と下水汚泥との混合消化によるエネルギー利用の評価、東京都の下水の温度差エネルギーを利用した地域冷暖房の評価の2事例を紹介する。いずれも都市計画情報として整備されている建物スケールの地理情報データを用いて熱需要を解析するとともに、厨芥や下水の発生量を算出し、厨芥の収集や下水の流下について地理情報システムを用いた解析を行っている事例である。

(2) 解析手法

下水温度差エネルギーを利用した地域冷暖房システムの評価の事例では、まず GIS を用いて建物情報を 250m メッシュに集約し、エリアごとに発生下水量を推定した。さらに、下水幹線に沿って発生した下水が流下していくモデルを図 1 のように作成し、下水幹線の各地点において下水量と下水温度が月別時刻別に算出できるモデルを構築した。このモデルにより同じ幹線上において 2 カ所以上で下水熱を利用する場合の上流側熱利用の下流側への影響を考慮できるようになった。さらに下水幹線上にある 250m メッシュについて建物情報から熱需要を算出し、ヒートポンプを用いた地域冷暖房システムモデルを構築し、各メッシュにおいてどの程度下水熱が利用可能となるかを推定した。このモデルでは、地域冷暖房の詳細な機器構成をモデル化するとともに、下水温度によるヒートポンプの成績係数の変化をモデル化しており、より実態に近い状況で下水熱の利用ポテンシャルが算出できるようになっている。これらのモデルを組み合わせることにより、地域全体で下水熱をどの程度利用できるかが算出できるようになった。

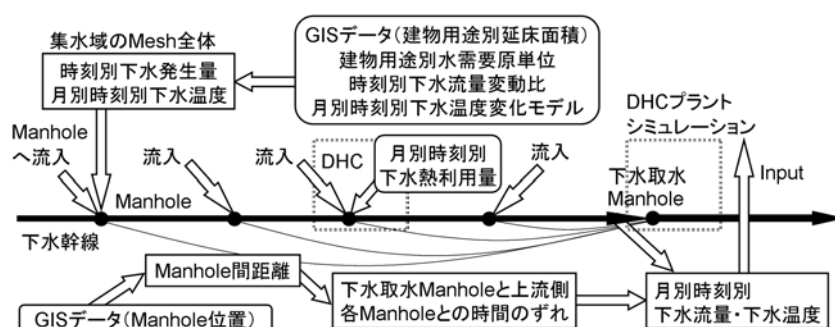


図 1. 下水熱利用可能量算出モデル

厨芥の分別収集と下水汚泥との混合消化によるエネルギー利用のケースでは、まず建物情報から厨芥の排出量を図 2 に示すように町丁目ごとに算出した。さらに道路ネットワークの情報を用いて各町丁目から下水処理場（収集拠点）への走行距離を算出し、収集時の燃料消費を算出した。さらに、回収された厨芥量と下水汚泥の量から嫌気性消化によるメタンガス回収量を推定するとともに、下水処理施設周辺の熱需要を図 3 のように建物情報から推定し、熱利用可能量を推定している。

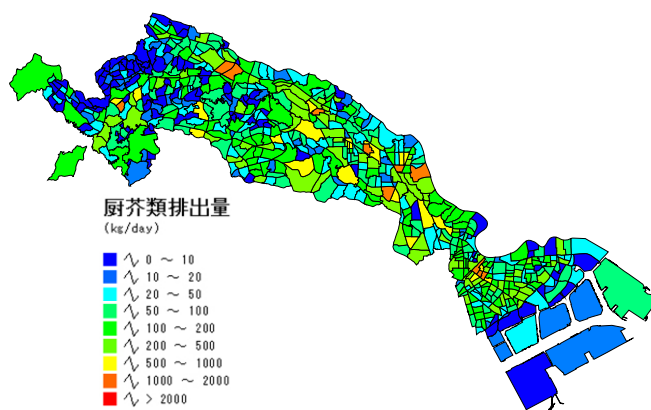


図 2. 町丁目ごとの事業系厨芥排出量

(3) 解析結果

下水温度差エネルギー利用の地域冷暖房システムの導入ポテンシャルについては、図 4 に示すよう都心部を走る芝浦下水処理区高段幹線系において、10 カ所のメッシュで地域冷暖房が導入された場合に最もポテンシャルが高く、1.1 万 t-CO₂/年の CO₂ 削減が見込まれた。この結果は、下水温度差エネルギー利用地域冷暖房施設の建設時における CO₂ 排出も考慮したものである。熱需要が高いこのような地域においては、利用可能な下水熱はほぼ利用されている状況である。

厨芥の分別収集と下水汚泥との混合消化からの熱利用ポテンシャルについては、事業系厨芥を川崎市全域において収集して実施する場合に 0.66 万 t-CO₂/年、家庭からの厨芥も分別収集して実施した場合は 1.2 万 t-CO₂/年の削減ポテンシャルが見込まれた。

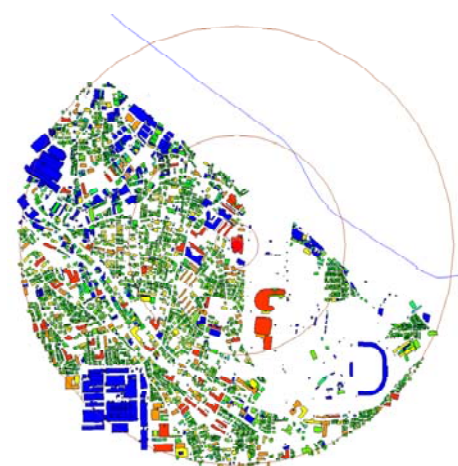


図 3. GIS による地域冷暖房導入対象建物の選定

参考文献)

- 池上貴志、荒巻俊也、花木啓祐(2008)、ライフサイクルインベントリ分析による下水熱利用地域冷暖房システム導入効果の解析、土木学会論文集 G、64(2)、96-106
- 石井暁、花木啓祐(2006)、川崎市下水処理場における有機性食品廃棄物を利用したエネルギー回収および二酸化炭素削減ポテンシャルの推定、土木学会環境システム論文集、34、443-453

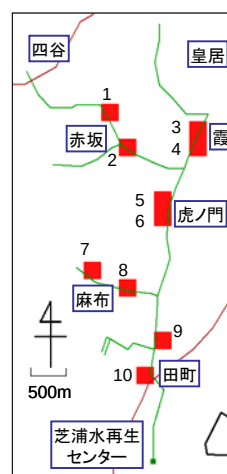


図 4. 高段幹線系に 10 ケ所 DHC を導入する場合の最適メッシュの位置

(荒巻俊也：東洋大学国際地域学部、石井暁：東京大学大学院工学系研究科)

清掃工場排熱利用地域冷暖房システムによる CO₂ 排出削減ポテンシャルの解析

対象領域	民生系空調および給湯用エネルギー起源 CO ₂ 排出量
評価した緩和策	排熱利用地域冷暖房システム
対象地域および空間スケール	全国を対象、清掃工場ごとの解析
時間スケール	現状におけるポテンシャルの解析
計算手法・モデル・ツール	地理情報システム、熱の需給バランスの計算

(1) 解析の概要

清掃工場からの焼却排熱はその量の大きさと温度レベルの高さから積極的活用が期待される未利用エネルギーである。その利用ポテンシャルの推計にあたっては、供給側である清掃工場における排熱の賦存量だけでなく需要側の熱需要を考慮した解析を行う必要がある。また、CO₂ の削減効果を推定するうえでは、比較対象となる熱供給システムをどのように設定するかで評価が大きく変わってくる。

ここでは全国の既存の清掃工場における焼却排熱を利用した場合の CO₂ 削減ポテンシャルを推計した例を示す。推計手法の特徴は、全国の清掃工場配管敷設に伴う CO₂ 排出を推計に取り入れたことで熱需要密度が低い地区は CO₂ 排出削減ポテンシャルが見込めなくなっていること、比較対象として一般的に用いられている個別供給システムを想定していることである。

(2) 解析手法

全国の清掃工場のうち 24 時間焼却炉の運転を行う全連続式炉を持つ清掃工場 536 カ所を解析対象とした。環境省廃棄物処理技術情報が提供する施設整備状況から焼却量を抽出し、清掃工場に搬入されている廃棄物の全国平均の低位発熱量と横浜市の月別の廃棄物搬入量のデータから月別の排熱利用可能量を算定した。

地域熱供給システムは周辺地域に冷房、暖房、給湯の 3 種類の熱を配るシステムを想定し、清掃工場で発生した蒸気が地域冷暖房プラントに送られ、温熱利用の場合そのまま使われ、冷熱利用の場合は吸収式冷凍機で冷熱がつけられると想定した。機器の効率も過去の研究事例を参考に標準的な値を設定した。

清掃工場周辺の熱需要の推定は標準地域メッシュの 3 次メッシュ(約 1km×1km)ごとのデータを用いるため、まず対象とした全清掃工場について地理情報システム(GIS)上で存在するメッシュを特定し、各清掃工場周辺の清掃工場を含む 1km×1km メッシュ、3km×3km メッシュ、5km×5km メッシュの 3 種類の熱供給エリアとして設定した。

熱需要の推定は家庭部門と業務部門に分けて行った。家庭部門は集合住宅を供給対象とし、国勢調査地域メッシュ統計の住宅関連データから住宅形式別の世帯数と住宅床面積ごとの世帯数を用いて集合住宅床面積を推定した。これと用途別熱需要原単位の積からメッシュごとの年間熱需要データを算出し、熱需要用途別月別パターンを用いて月別熱需要を算出した。業務部門は事業所・企業統計調査地域メッシュ統計における業種別従業員数と従業員一人当たり延床面積からメッシュ別延床面積を算出し、さらに用途別熱需要原単位との積によって熱需要を求めた。

このようにして推定された清掃工場周辺の熱需要と清掃工場の利用可能排熱量を月別に比較し、熱供給エリアの設定ごとにどの程度清掃工場排熱で賄えるのかを検討して、CO₂ 排出削減効果が最も高くなる最適熱

供給エリアを推定した。このとき必要熱量が利用可能排熱量を上回る月はガス式地域冷暖房により不足分を供給することとした。

さらに、配管敷設にともなう CO₂ 排出量を実プラントの事例から算出された地域冷暖房の供給面積あたりの配管長原単位と CO₂ 排出原単位から推定した。配管長原単位はプラントにより差が大きいので、低密（大規模需要家が多く配管が少なくすむケース）、平均、高密（小規模需要家が多く配管が多く必要なケース）の 3 ケースを想定した。

地域冷暖房による CO₂ 削減効果を算出するにあってその比較のために、個別の熱供給による CO₂ 排出量を算出した。個別の熱供給による熱利用量は推定した熱需要と等しいとして、熱利用用途別エネルギー源別消費割合と個別熱供給機器の効率を考慮することでエネルギー源別利用量を算出した。最後にエネルギー源別の CO₂ 排出量原単位を掛けて個別の熱供給による CO₂ 排出量とした。電力の排出原単位については清掃工場が存在する地域の電力会社の CO₂ 排出原単位を利用した。

なお、地域冷暖房導入に伴う配管敷設以外の施設や熱源機器の建設・製造・廃棄時の CO₂ 排出量、個別供給における機器の建設・製造・廃棄時の CO₂ 排出量は考慮していない。

（３） 解析結果

CO₂ 排出削減ポテンシャルが見込まれた清掃工場数と排出削減可能量は、配管長原単位が高密のとき 124 カ所で 49 万 t-CO₂/年、平均のとき 229 カ所で 155 万 t-CO₂/年、低密の時 331 カ所で 280 万 t-CO₂/年となった。日本全国の民生部門の CO₂ 排出量は 4 億 1200 万 t-CO₂/年であるので、低密のケースでは民生部門からの CO₂ 排出量の 0.68% を占めるという結果になった。図 2 は低密の時に削減効果が見込まれた清掃工場の分布を示している。利用可能排熱量と熱需要がともに大きい大都市圏に集中している様子が見られる。

また、熱供給エリアは配管長原単位が低密の時は 9 割以上の清掃工場で 3km×3km 以上が最適となるのに対して、高密の時は 3 割の清掃工場が 1km×1km が最適となり、配管長原単位の影響が大きいことが示された。

参考文献

河上裕美、荒巻俊也、花木啓祐(2008)、日本全国の清掃工場を対象とした排熱利用地域冷暖房システムによる CO₂ 排出削減ポテンシャルの推計、環境システム研究論文集、36、87-95

(荒巻俊也：東洋大学国際地域学部)

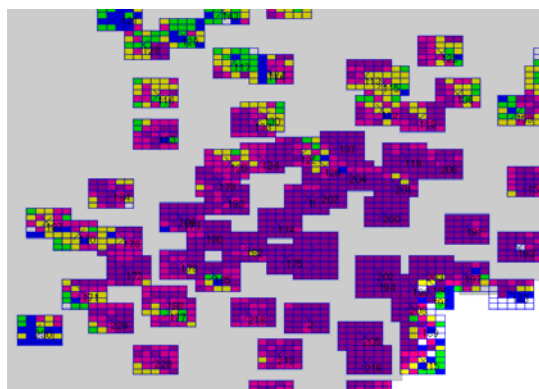


図 1. GIS による清掃工場の位置と周辺熱需要の算出の様子（東京近辺）

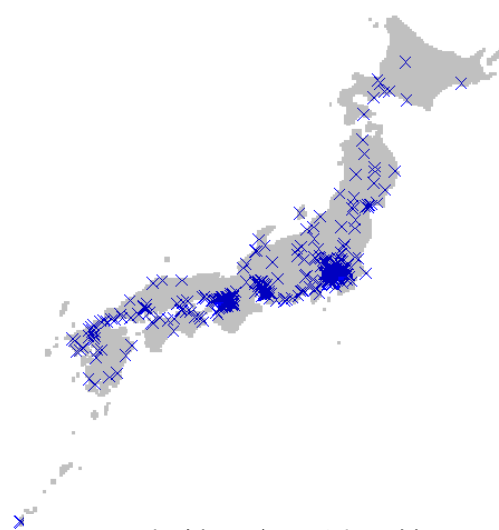


図 2. CO₂ 削減効果が見込まれた清掃工場

全国複数地域街区への地域冷暖房システム導入による CO₂ 排出削減ポテンシャルの解析

対象領域	民生系空調および給湯用エネルギー起源 CO ₂ 排出量
評価した緩和策	排熱利用地域冷暖房システム
対象地域および空間スケール	全国複数地区・街区ごとの解析
時間スケール	現状におけるポテンシャルの解析
計算手法・モデル・ツール	地理情報システム、熱の需給バランスの計算

(1) はじめに

生活に密着する民生部門の省エネルギーと温暖化対策は、コスト、質、さらには社会的な価値観まで絡む問題である。民生部門では、空調と給湯など熱需要が特に大きいため、全電化とコージェネレーションシステム(CGS)という2つの異なる方向に期待が集まっている。しかし、その効果は地域の気候とエネルギー需要特性に強く影響される。例えば CGS は、廃熱を有効利用しないと効率が上がらない。ヒートポンプ(HP)の効率(成績係数)にも外気温依存性がある。そのため地域性を考えるとどこまで成果が上げられるか、また日本全体ではどこまでの効果が期待できるかは、まだ結論が出ていない。ここでは、具体的に宇都宮市、札幌市、那覇市を対象に、都市街区における業務建物群と住宅群に CGS、HP、地域熱供給システム(DHC)を導入して、これらの機器がどの程度効果があるのか、また地域の気候がそれだけ影響しているのかをモデル化し分析する。

(2) 評価の手順

住宅と業務ビルの床面積構成の差を考慮して、札幌では8区、宇都宮7地域、那覇2地域に分割し、GIS(地理情報システム)データに基づき、各地域の業態別(オフィス、飲食店、店舗、病院等)業務用建物及び住宅床面積を求める。エネルギー負荷は用途別需要4種(冷房・暖房・給湯・電力)について、各々7期(冬季・夏季・中間期の各々平日・休日と夏季ピーク)24時間帯で推計し最適な設備導入と運用および CO₂ 排出削減効果をモデルにより計算する。この際、CGSの部分負荷特性やHPの外気温依存性を、混合整数計画法を用い定式化する。日本の北から南、および典型的な地方都市まで大きく気候の異なる都市について、導入とその効果に何らかの共通した傾向が見いだせれば、日本全体への導入効果についてもおおざっぱな効果を推測しても良いだろう。

業務用ビルのエネルギー負荷は、伊香賀^④に基づいた。家庭用負荷は、住宅熱負荷推計ソフト SMASH および家計調査を用い、世帯構成と地域別の推計を行なった。エネルギー需要推計のフローの手順を図1に示す。

(3) モデルの構築

ここでは、CGS(個別、DHC)、PV、CO₂HP、貯湯槽の最適導入評価を行う。このモデルでは熱・電力の需給バランスや、各構成機器の運転とエネルギーサービスの条件式のもとで、CO₂ 排出と費用を考慮した最適なシステムを計算する。CGSや全電化がない場合の在来型システムと比べ、新しいエネルギー機器を導入するとどの程度省エネルギーや CO₂ 排出削減が果たせるかに注目する。

(4) 解析結果

図2には17地域の機器導入シナリオごとの潜在 CO₂ 排出削減率と業務用床面積比率の関係をプロットした。このように、機器導入に制約を設け

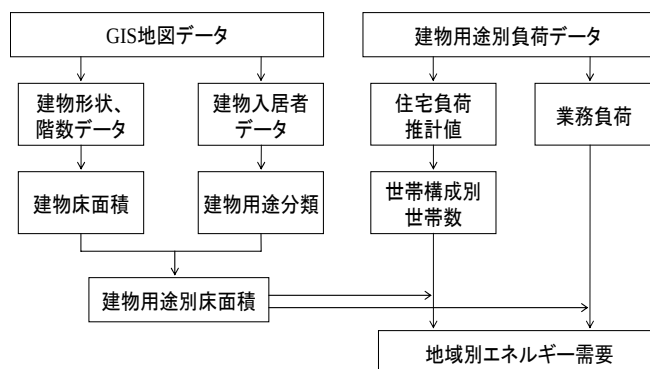


図1. エネルギー負荷の推計フロー

ず最大の CO₂ 削減を求めた場合 (CASE-Full) および全電化ケース (CASE-HP)において、南北各地域に一貫した傾向が示されている。特に、前者は民生部門での CO₂ の排出削減率評価の推計の可能性を示唆する。

図2の関係式を他の地域に適用するには、地域ごとの業務用床面積の比率データが必要となる。現時点では、宇都宮市を取り上げ、中心からの距離と建物面積密度の関係を求め、これを全国950の市町村に当てはめることで一つの推計を試みた。ここで、業務用床面積合計は経済活動に比例、住宅面積は人口に比例するとした。この関係を図2の関係式に当てはめることで、潜在的CO₂排出削減率を推計できる。例えば、千葉県に当てはめた場合、CO₂削減率は鴨川市の16.9%から花見川区の31.5%まで広がる。さらに、このCO₂削減率を市区の面積で加重平均することにより、各都道府県のCO₂削減率を求めた。結果を表1に示す。秋田県の15.9%から東京都の30.4%まで広く分布し、日本全体での集計ではCO₂排出削減ポテンシャルは18.6%となった。

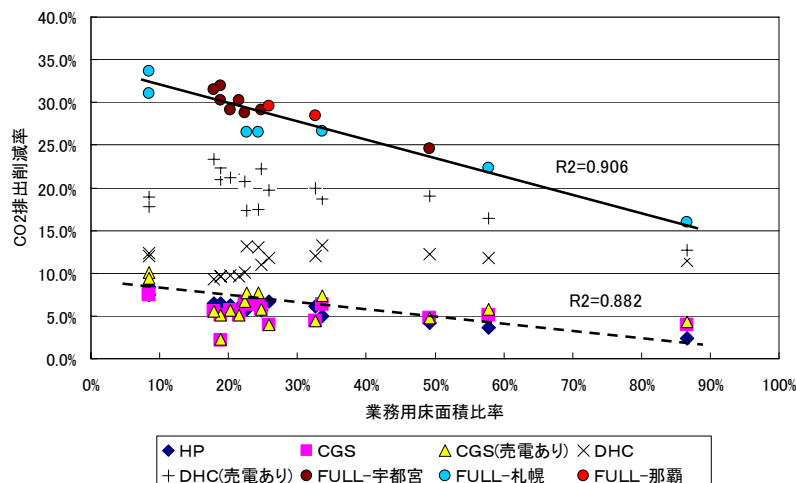


図2. 業務建物の割合とCO₂削減率の関係

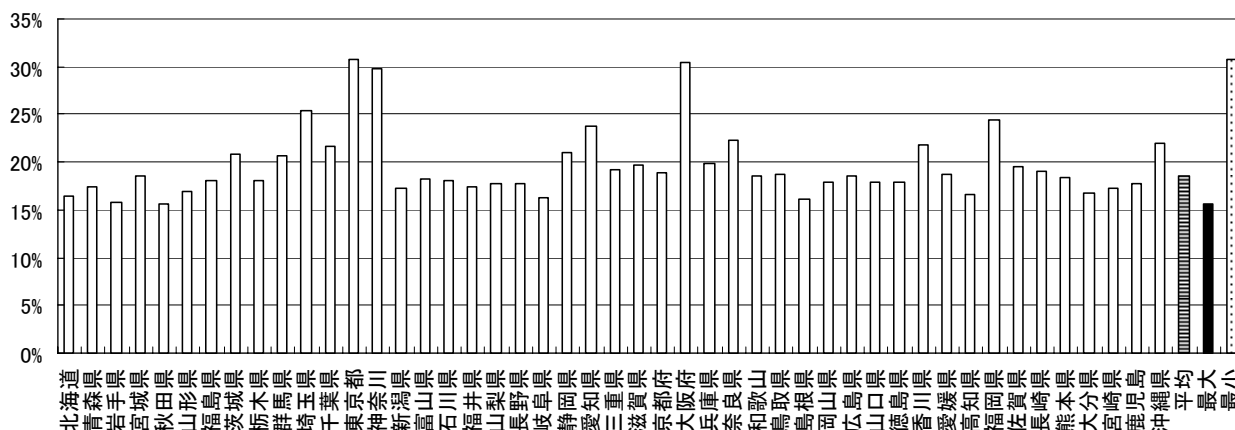


図3. 都道府県別CO₂削減率推計結果

(5) おわりに

本研究では、民生用建物への分散型エネルギー技術導入によるCO₂削減効果をミクロから日本全体に広げる試みを行った。きわめて限られたデータからの推計にとどまるものの、札幌から那覇までの気候の差をカバーするものであるだけに、多くの都市でもほぼこの範囲に収まるものと思われる。

参考文献)

- (1) 伊香賀、近本、永瀬、「集合住宅を対象とした温暖化防止対策とその削減効果(その1) 研究目的と東京各地の冷暖房負荷解析」エネルギー・資源学会大会学術講演論文集(2001)

都市街区内における分散エネルギーネットワーク評価モデルの構築

対象領域	民生部門のエネルギー供給
評価した緩和策	分散エネルギー（CGS、太陽光発電）
対象地域および空間スケール	宇都宮（市内の一部街区でのケーススタディ）
時間スケール	現状における削減ポテンシャルの解析
計算手法・モデル・ツール	エネルギーネットワーク評価モデル（非線形混合整数計画法） 業務建物エネルギー負荷推計モデル

（１） 解析の概要

一般に自然エネルギーは出力が安定しない等、系統側に影響を与えるという課題を抱えており、この課題を克服するために、分散エネルギー間で電力や熱の融通を行い、変動電源である自然エネルギーと、コージェネレーションシステム（CGS）等の新エネルギーを適切に組み合わせ、需要地域内で安定した電力・熱供給を行うことを可能にする「分散エネルギーのネットワーク化」の検討が各所で実施されている。しかし地域の電熱需要の状況や、分散電源の導入条件などを踏まえた分散エネルギーネットワークの最適な設計手法の構築は十分に進んでいない状況である。図1に分散電源ネットワークの形態を決定する要素を示す。本研究は、分散エネルギーネットワークの最適導入手法の検討として、各需要家に設置された分散電源を隣接需要家間で融通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を、非線形計画法により導出するモデル構築を行ったものである。

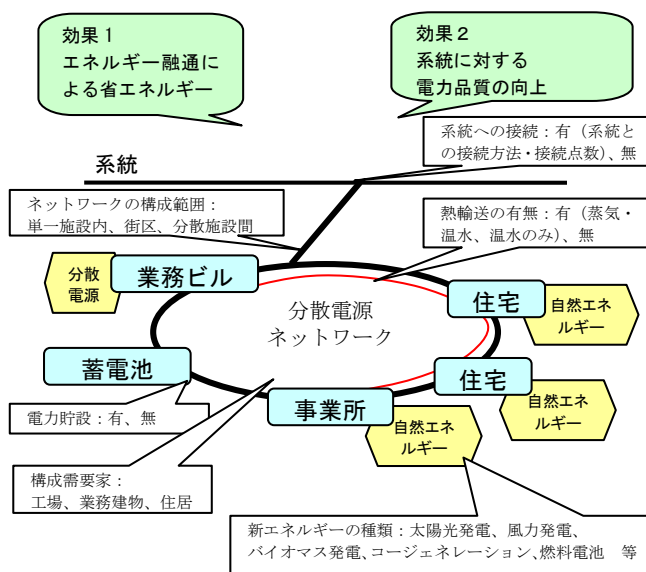


図1. 分散電源ネットワークの形態を決定する要素

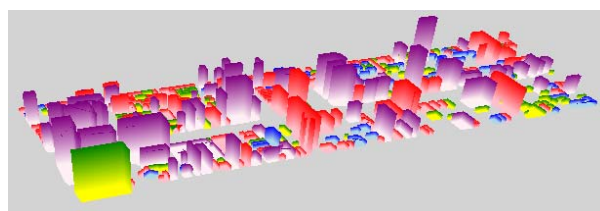


図2. 検討対象街区（栃木県宇都宮市の中心市街地）

（２） 解析手法

実在する都市街区（図2）における業務建物群と住居群を考え、このうち大規模建物2棟（床面積16,529m²のホテル、床面積8,850m²の事務所ビル）に業務用ガスエンジンCGSを、住宅87戸に家庭用太陽光発電システム（PV）を導入した場合を考えた。検討対象の概要を図3に示す。CGS、PVを個別に導入した場合（ケースa）の効果に対して、各需要家を電力線ネットワークや熱配管（給湯配管）で結んだ場合（ケースb）の省エネルギー効果の推計を行った。非線形混合整数計画法によるモデルを構築し、CGS、PVの相互の余剰電力量を考慮したうえでCGSの設備容量・運転パターンの最適化することにより、一層の省エネルギーとなる容量決定、運転条件の導出を行うことが可能となった。さらに最も省エネルギー効果が高くなる業務ビル

規模と住宅数の組合せの最適化計算を行った。

(3) 解析結果

ケース b はケース a に比べ、1.9%の省エネルギーが可能であり、地区内から系統に売電される電力を最小化するという条件を追加した場合は 1.8%の省エネルギーとなった（表 1）。さらに地区内により多くの住宅が存在したと仮定し、エネルギー融通する住宅数を増加させた場合の地区に供給される一次エネルギー削減率の計算を行った（図 4）。これより地区内から系統に売電される電力を最小化した場合は、4350 戸程度の PV 設置住宅とエネルギー融通をした場合に、もっとも街区に供給される一次エネルギー削減率が大きくなり、CGS、PV の余剰電力を地区内で最大限利用できることがわかった。

本開発モデルにより地域分散エネルギーネットワークの省エネルギー面での最適な構成を検討するための基礎モデルの構築、具体的な街区での評価が実施できた。

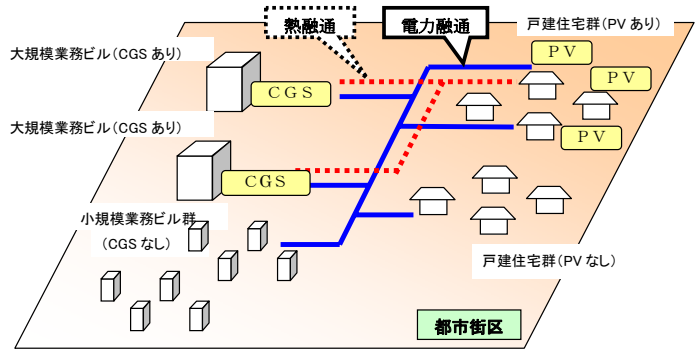


図3. 分散電源ネットワークの検討対象の概要

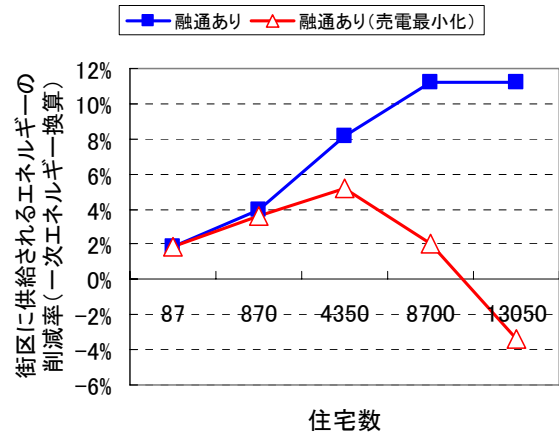


図4. エネルギー融通を行う住宅数を変化させた場合の省エネルギー効果

表 1. 業務建物と住宅のエネルギー融通による街区全体のエネルギー消費量

ケース		CGS最適容量 (kW)		街区の一次エネルギー (TJ/年)	街区のCO ₂ 排出量 (t-CO ₂ /年)	系統への売電量 (MWh/年)
		建物グループ1	建物グループ2			
ケースa	エネルギー融通なし	1台目	249	453	18,797 [28,104]	5,464
		2台目	896			
		合計	1,145			
ケースb	エネルギー融通あり	1台目	534	444	18,674 [26,846]	4,898
		2台目	1,409			
		合計	1,944			
ケースc	エネルギー融通あり 売電最小化	1台目	523	445	18,669 [26,917]	0
		2台目	1,350			
		合計	1,872			

※[]内の数値は、火力発電平均のCO₂排出係数を用いた場合。

参考文献)

1) 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論文誌 (エネルギー資源学会), Vol.29 No. 1, (通巻 167)pp8-14 (2008.1)

(石田武志: 日本工業大学工学部)

建物個別対策から都市の面的対策までの統合的評価

対象領域	民生（業務）部門での需要エネルギー、CO ₂ 排出量
評価した緩和策	太陽光発電、コージェネレーションシステム、BEMS、建物躯体対策、建物内部機器の省エネ、BEMSなど
対象地域および空間スケール	宇都宮市
時間スケール	現状におけるポテンシャルの解析
計算手法・モデル・ツール	業務建物エネルギー負荷推計統合モデル

(1) 解析の概要

本研究は、業務建物において複数の対策の重複効果などの相互関係を評価する方法を明確化するとともに、国内業務部門や都市・地域単位の対策導入効果を様々な条件で容易に評価するための解析ツールを構築し、具体的な都市（宇都宮市）を事例に評価したものである。

この研究では、建物単位のエネルギー負荷推計モデルからエネルギーシステム評価、さらに建物ストック量を踏まえた都市総CO₂排出量の推計までを、一体化して推計するモデルを構築したものである。図1にモデルの構成を示す。これにより、用途別・建物規模別のエネルギー負荷から積み上げ計算を行い、機器の省エネルギーから、地域レベルの対策までの各階層の対策を反映させることが可能となる。このモデルにより、業務部門におけるCO₂削減効果をより精密に評価することが可能となり、温暖化対策導入施策のあり方の検討に反映させることができると考えられる。

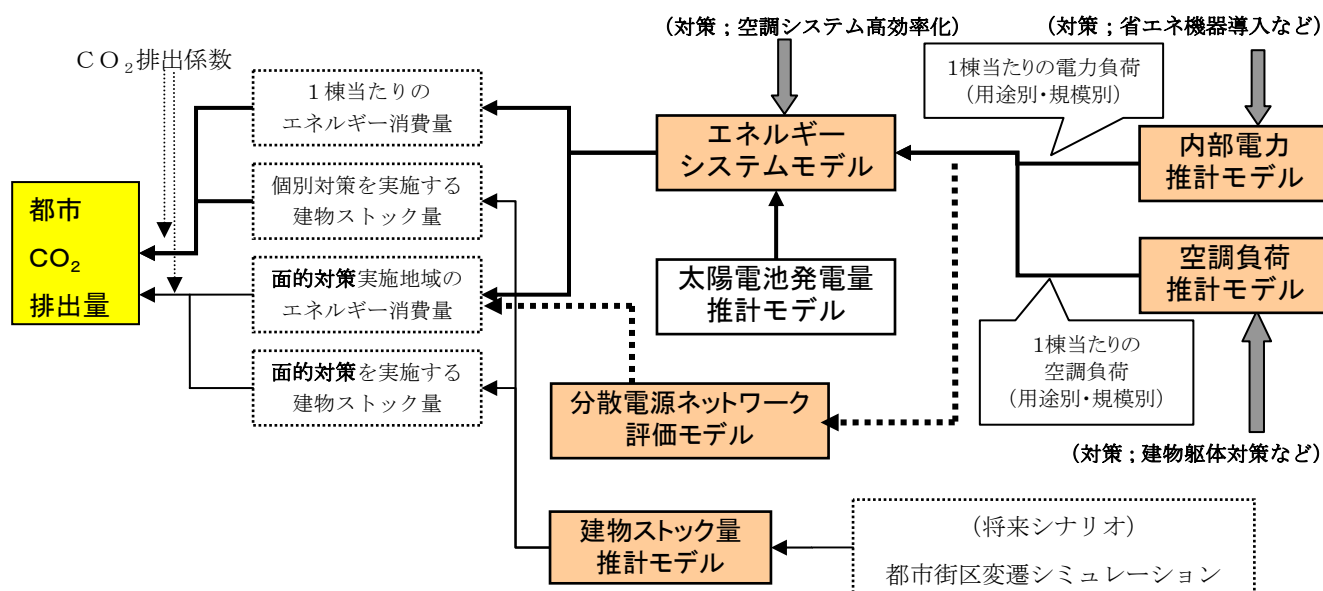


図1. 評価モデルの構造

(2) 解析手法

業務建物部門について、CO₂排出に係わる活動（アクティビティ）について、図1に示すような階層化したモデル化を行い、目標達成計画等で示されている各種対策が反映できるようにした。具体的には、建物単体の内部電力・空調負荷推計モデルにより1棟当たりの負荷を建物用途別規模別に推計し、次にエネルギー

システムモデルにより、単体建物が必要とする負

表 1. 地球温暖化対策の導入率の想定

荷を満たすためのエネルギー所要量が推計される。さらにこの 1 棟当たりのエネルギー消費量と建物ストック量により、都市のエネルギー消費量、CO₂排出量が推計できる。このとき地域冷暖房やマイクログリッドなどの地域に面的に実施される対策は、切り分けて推計している。このようなモデル化により、建物単体の対策から、地域に広がる面的対策までを一括して推計することができ、対策間の重複効果を除外することが可能となる。

(3) 解析結果

表 1 に示すような各対策の導入条件を設定し、各対策を個別に評価し積み上げた場合と、相互効果考慮を考慮したモデルで一括導入して推計した場合の削減量の相違について評価した結果を表 2 に示す。これより、対策ケース

	標準ケース	対策ケース	対策強化ケース	
1. 分散型新エネルギーのネットワーク構築				
○マイクログリッド				
マイクログリッドによる空調エネルギー削減率(対 個別空調)	0	4.4	4.4	%
○地域冷暖房				
地域冷暖房の導入比率(建物数の比率)現状値	0	0	1	%
地域冷暖房の導入比率(建物数の比率)想定値	1	1	2	%
地域冷暖房による空調エネルギー削減率(対 個別空調)	5	5	5	%
2. BEMS(ビルエネルギーマネジメントシステム)の普及				
○BEMSの普及率	0	5	20	%
○削減効果の設定				
照明	5	5	10	%
点灯時間の削減	20	20	20	%
点灯数の削減	5	5	10	%
空調	5	5	10	%
空調負荷の削減	5	5	10	%
空調時間の削減				
3. 新エネルギーシステムの導入				
○太陽光発電の導入				
PV導入量(建物1棟当たり)	0	2	4	kW/棟
○CGS導入率				
対建物数(10,000m ² 以上の建物に対する導入率)	0	5	5	%
CGS容量	400	400	400	kW
4. 高効率空調システムの導入				
○高効率空調システムの普及率	0	5	30	%
電気システムの比率	90	90	90	%
冷房COP(効率)電力	4.0	4.0	5.0	%
暖房COP(効率)電力	4.0	4.0	5.0	%
ガスシステムの比率	10	10	10	%
冷房COP(効率)ガス	3.0	3.0	3.5	%
暖房COP(効率)ガス	3.0	3.0	3.5	%
給湯システム				
給湯COP(効率)電力	3.0	3.0	3.5	%
給湯COP(効率)ガス	3.0	3.0	3.0	%
5. トップランナー基準による機器の効率向上				
○複写機				
機器更新によるエネルギー削減率	0	30	30	%
○パソコン				
機器更新によるエネルギー削減率	0	83	83	%
○照明				
機器更新によるエネルギー削減率	0	16.6	16.6	%
6. 省エネ機器の買い替え促進				
電球型蛍光灯に買い換えられる比率	3.33	3.33	3.33	%
電球型蛍光灯に買い替えた場合の省エネ率	0	80	80	%
7. 高効率照明の普及				
代替率(対フロア)	8	8	8	%
機器更新によるエネルギー削減率	0	50	50	%
8. 建物の省エネ性能の向上				
対策ケース建物省エネ率	0.99	0.87	0.87	
標準ケース建物省エネ率	0.99	0.99	0.99	

の場合で 7.0 千 t-CO₂/年、対策強化ケースの場合 8.5 千 t-CO₂/年の削減効果の相違がでることがわかる。削減量の差は、対策ケースの場合 0.9%、対策強化ケースの場合 1.1%となり対策導入量が大きくなるほど、積算誤差が大きくなることがわかる。今後、長期の CO₂削減量を評価する場合、相互効果を考慮しないと誤差が大きくなると考えられる。排出権取引の制度化など、削減量の評価精度の向上が求められる中、同じ導入条件でも相互効果の考慮の有無で数%の削減量誤差が生じる可能性があることがわかる。

表 2. 個別効果の積み上げと相互効果を考慮した削減効果の比較

	対策ケース		対策強化ケース	
	個別積み上げ	相互評価考慮	個別積み上げ	相互評価考慮
1. 分散型新エネルギーのネットワーク構築	1		1	
2. BEMS(ビルエネルギーマネジメントシステム)の普及	4		18	
3. 新エネルギーシステムの導入	12		29	
4. 高効率空調システムの導入	2		12	
5. トップランナー基準による機器の効率向上	44		44	
6. 省エネ機器の買い替え促進	1		1	
7. 高効率照明の普及	3		3	
8. 建物の省エネ性能の向上	3		3	
合計	72	65	113	104
評価誤差		7.0		8.5

参考文献)

- 1) 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（土木学会），Vol. 63（2007.11），No. 4，pp366-375
- 2) 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（環境情報科学センター），pp625-630（2007.11）

（石田武志：日本工業大学工学部）

モデル統合基盤により複数対策の相互作用を考慮した CO₂ 排出削減効果の解析

対象領域	民生部門を中心とした電力起源 CO ₂ 排出量
評価した緩和策	電力の需要側としての太陽電池、供給側としての炭素税
対象地域および空間スケール	全国を対象、電力会社ごとの解析
時間スケール	2000 年から 2050 年の 5 年毎の解析
計算手法・モデル・ツール	モデル統合基盤（DOME） 電源計画モデル（線形計画モデル） 住宅マクロモデル、業務建物マクロモデル

(1) 解析の概要

ここでは、個別分野の CO₂ 対策効果を評価するモデルを統合化することで、複数の対策技術のインタラクションによる CO₂ 排出の緩和効果を評価する手法を述べる。特定部門を対象とする個々のモデルの相互作用を可能にするため、DOME（Distributed Object-based Modeling Environment—分散型オブジェクト・ベースのモデル化環境）と呼ばれるモデル統合基盤を適用した。DOME は、マサチューセッツ工科大学の CAD 研究室（<http://cadlab.mit.edu>）において開発されているモデル統合基盤であり、マイクロソフトのエクセルをはじめ、様々な汎用アプリケーション上に構築されたモデルをウェブ上で統合化できるツールである。

(2) 解析手法

本研究では、他の研究で構築された電源計画モデルと、電力需要削減を推計するための建物省エネルギー対策モデル、及び住宅省エネルギー対策評価モデルの統合を行った。具体的には、各モデル間のパラメータをリンクさせ、モデル間でデータのやりとりをして、モデルを連動させる。各モデルは異なる研究者が統合することを考慮せずに構築したものであ

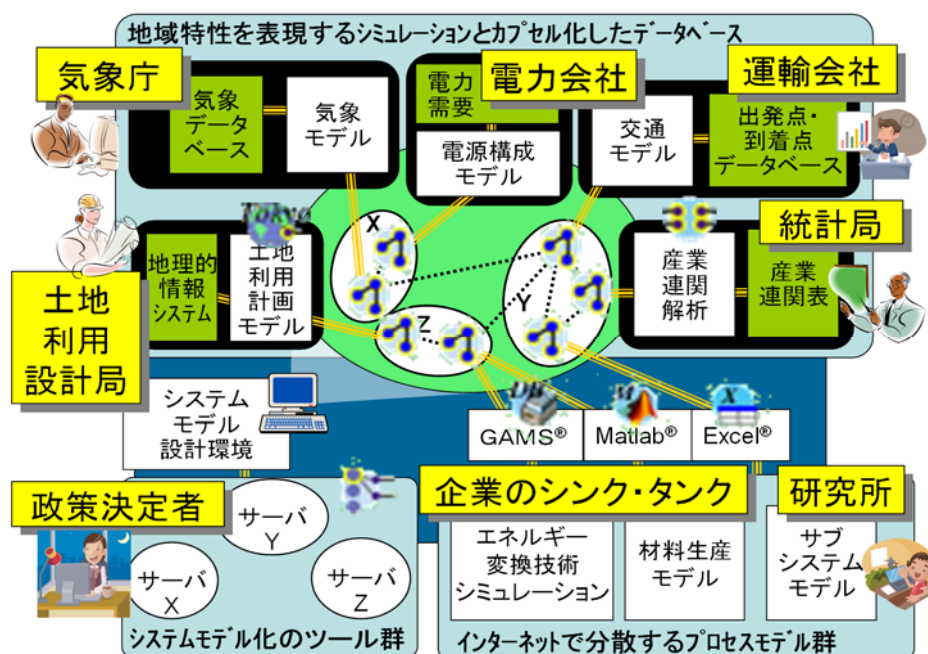


図1. DOMEに基づく協調基盤のイメージ

るが、DOMEを用いることにより、個別モデルでは得られない部門間相互作用の評価もできるようになった。更に、ウェブ上でモデルを統合することができると、図1で示すように、統合化したモデルを用いることにより、異なる環境や知識を持つ関係者が容易にモデルやデータを共有することが可能となる。

(3) 解析例：供給側の炭素税対需要側の太陽電池

太陽電池と炭素税の導入効果を解析したシミュレーションの結果を図2に示す。太陽電池と炭素税が導入されていない「ベースシナリオ」のCO₂排出量は、図2の黒四角(■)で示すように、2050年ではCO₂排出量が2005年と比べて約2割増加することがわかる。しかし、太陽電池を導入すると、CO₂排出量が著しく減少し、2005年と比べて2050年のCO₂排出量が約2割減少する。太陽電池に代わり、1万円の炭素税を導入した場合、CO₂排出量が更に減ることがわかる。そして、太陽電池と炭素税を両方導入した場合は、炭素税のみの場合とほぼ変わらない結果になっている。

個別に導入した場合に効果が大きい太陽電池が、炭素税と合わせると効果が少なくなる理由は、炭素税を導入しないとき、図3に示すよう、低コストの石炭火力発電所が大幅に導入され、それに伴って原子力発電が著しく減少するためである。そのため太陽電池により得られた電力はCO₂排出強度が高い石炭火力を主に代替し、全体のCO₂排出量への効果が大きくなると考えられる。しかし炭素税を導入した場合、図4に示すよう、CO₂排出がほとんど無い原子力発電が増加し、石炭火力発電が削減される。その状態で太陽電池が導入されると、原子力を代替してしまうため、CO₂排出量があまり減らない結果となる。しかし、更に高額な炭素税を導入すると、結果としてGCC（ガス複合発電）などの他の発電技術が太陽電池によって代替され、図2で表示した○と●の結果のように、太陽電池の導入効果が再び大きくなると考えられる。

参考文献

- 1) 石田武志, Steven Kraines : モデル統合基盤により複数モデルを連動させた国内CO₂削減シミュレーション, エネルギー・資源学会 第24回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp223-226 (2008.1)
- 2) 石田武志, Steven Kraines : モデル統合基盤により複数モデルを連動させた首都圏CO₂削減シミュレーション, エネルギー・資源学会 第23回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp159-162 (2007.1)

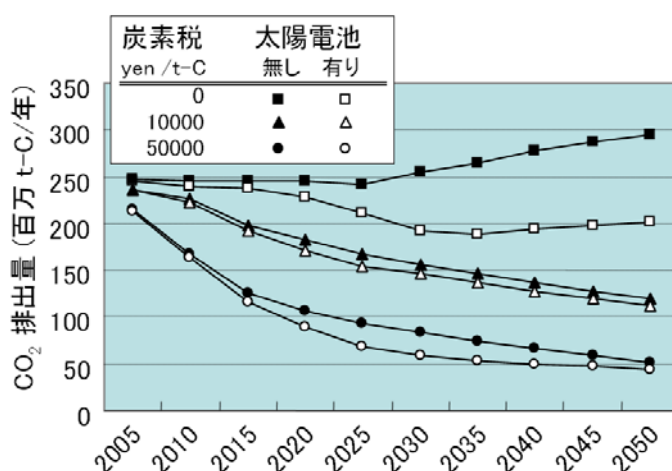


図2. 全国（沖縄除く）のCO₂排出量推計結果

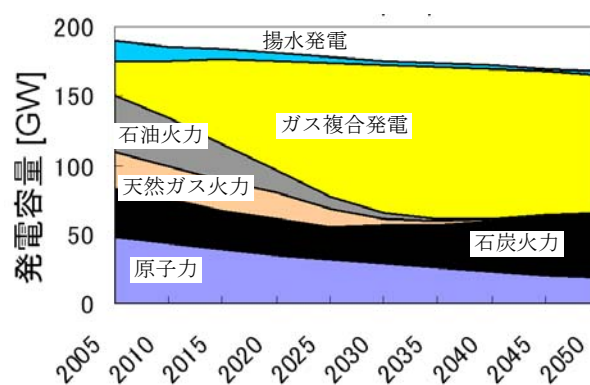


図3. 電源構成比（太陽電池無し、炭素税0円）

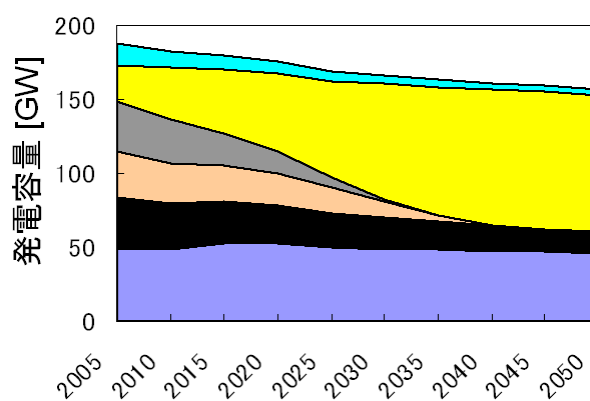


図4. 電源構成比（太陽電池無し、炭素税1万円）

プラグインハイブリッド車および家庭用 CGS/HP の導入拡大による CO₂ 排出削減量の解析

対象領域	運輸自動車部門・民生家庭部門からの CO ₂ 排出量
評価した緩和策	プラグインハイブリッド車、家庭用 CGS、給湯用 HP、発電部門対策
対象地域および空間スケール	全国
時間スケール	2050 年時点におけるポテンシャルの解析
計算手法・モデル・ツール	地域別世帯類型別の家庭のエネルギー需給モデル、交通センサスデータに基づく自動車の走行パターン推計モデル

(1) 解析の概要

最終需要での電力利用に関連した各種の省エネルギー施策の実施が、わが国の CO₂ 排出量に与える影響を電源構成やその運用方法の変化も含めて検討した。電源構成評価に関しては、CO₂ 回収貯留設備 (CCS) も考慮した最適電源構成モデルを構築した。個々の家庭における不確実な電力・熱の負荷曲線を生成するモデルと、確率動的計画法による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、これらの機器の導入による電力とガス需要の変化を推計した。また、プラグインハイブリッド車 (PHEV) の広範な導入が、電力負荷の変動に与える影響を、道路交通センサスデータに基づき推計し、ガソリン等を電力で代替することによる CO₂ 排出削減効果を評価した。

(2) 解析手法

最適電源構成モデルを線形計画問題として定式化した。時間解像度は 7 季節 24 時間帯であり、原子力、石炭、石炭ガス化複合 (IGCC)、LNG、LNG 複合、石油、揚水、一般水力、地熱 (外生値) の各種発電技術を考慮し、わが国の 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や CCS も考慮した¹⁾。発電部門からの CO₂ を 2050 年までに 2005 年比 70%削減する場合の発電電力量と、発電部門からの CO₂ 排出量の推移をそれぞれ図 1 と図 2 に示す。なお、ここでは CO₂ の海洋貯留が可能と仮定したが、その可否は別途検討が必要である。

次に、家庭のエネルギー需要を生成するモデルを構築した。家庭における人間の行動を乱数でモデル化し、行動に関連する機器の電力・熱負荷を積み上げて、時間解像度 10 分で需要を推計し、確率動的計画法で CGS、給湯用 HP の運用方法を決定した。都道府県別・世帯類型別に、生活時間、気候の差異を反映させた戸建住宅 4700 軒分の運用を模擬し、CGS (ガスエンジンや PEFC 形燃料電池) や HP の導入拡大が系統電力需要に与える影響を推定した²⁾。図 3 には、HP や CGS が 100%普及した場合のわが国の家庭部門 (戸建住宅) の電力需要の推計結果を示す。さらに、PHEV が蓄電池の充電エネルギーのみで 30km の走行が可能と想定し、道路

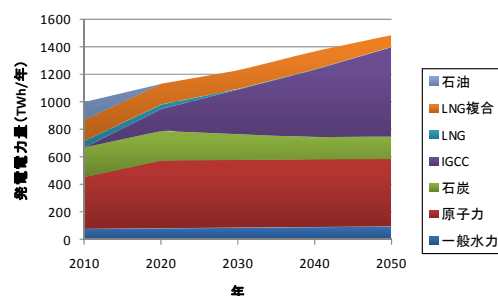
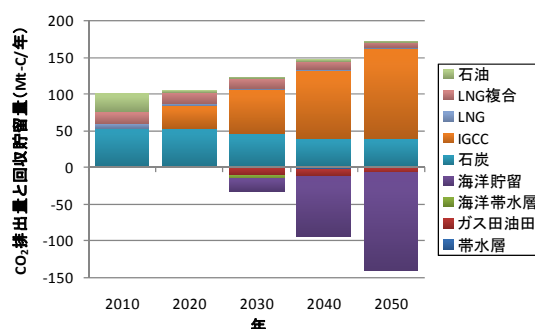


図 1. 発電電力量 (全国) の推移

図 2. 発電部門の CO₂ 排出量・回収量の推移

交通センサによるトリップ長と発生交通量の調査結果に基づいて、全自動車が PHEV になったものとし、電力で代替可能となる液体燃料量を推計した³⁾。充電に必要な電力は、図 4 に示すように、系統電力コストが最小となるように行われるものと想定し、電源運用変化も考慮した CO₂ 排出量削減効果を評価した。

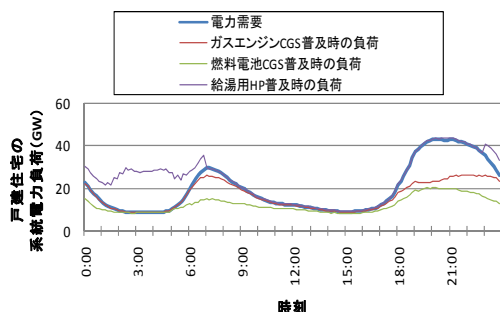


図 3. 冬季平日戸建住宅電力需要（全国 2050 年）

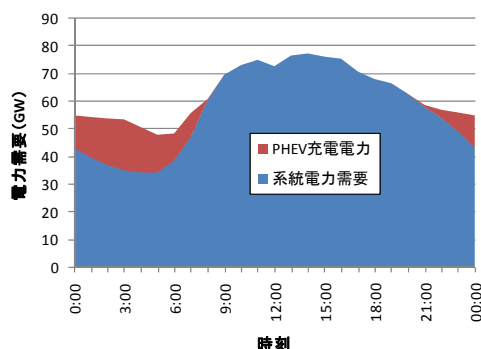


図 4. 夏季最大三日の電力負荷（関東 2050 年）

（3） 解析結果

図 5 には、2050 年の発電部門と運輸部門（自動車）、都市ガス（家庭給湯+CGS）からの CO₂ 排出量を示す。無対策ケース以外では、発電部門からの CO₂ 排出量を 2005 年比 70%削減する排出制約を課している。HP や CGS を導入した場合は、都市ガス起源の CO₂ 排出量の変化分で上限値を補正した発電部門の CO₂ 排出制約を課している。PHEV に関しては、その導入の有無によって発電部門の CO₂ 排出制約の上限値を変化させることはせず、ガソリン等の燃料起源の CO₂ 排出量の削減は、発電部門の削減に追加的に行われるものとした。また、図 5 には、それぞれのケースでの発電部門での限界削減費用も示す。

発電部門の CO₂ 排出量削減には、図 2 に示すように CCS の貢献が無視できない結果となった。CGS や HP の導入効果は量的にはそれほど大きくはない。なお、HP の導入ケースでは限界削減費用が若干安価となる状況が見て取れる。PHEV の普及に関しては、CO₂ 排出量削減効果の絶対量は比較的大きく、充電のための電力需要量増加による発電部門での限界削減費用の上昇幅もそれほど大きくはないという結果となった。ただし、ここでは、HP、CGS、PHEV の導入コストは、解析対象には含まれていない点には注意が必要である。

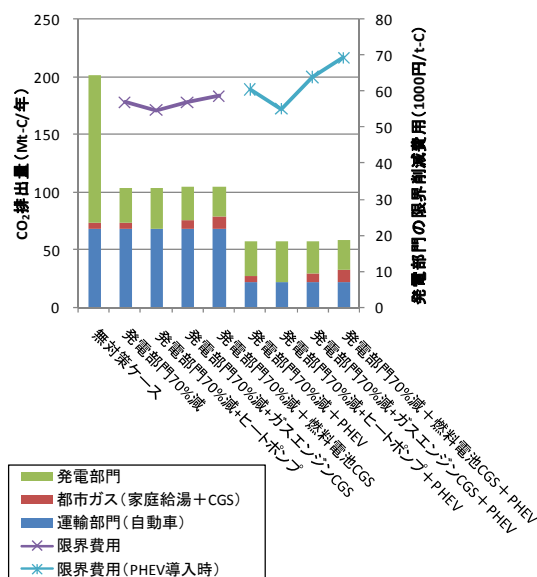


図 5. CO₂ 排出量と限界削減費用（全国 2050 年）

参考文献

- 1) 戸張智貴、横山直規、藤井康正、山地憲治：「負荷の不確実性を加味した家庭用 CGS・給湯 HP の運用が日本のエネルギー需給・CO₂ 排出量に与える影響評価」、平成 18 年電気学会全国大会
- 2) 藤井康正、横山直規、上杉春奈：「家庭用 CGS と給湯用 HP の普及が日本の CO₂ 排出量推移に与える影響」、第 26 回エネルギー・資源学会研究発表会（2007）
- 3) 上杉春奈、藤井康正：「電気自動車の普及が電源構成に与える影響と二酸化炭素削減効果」第 24 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、東京（2008）

（藤井康正：東京大学大学院工学系研究科）

中山間地域の町を対象とした温室効果ガス排出削減ポテンシャルの解析

対象領域	産業、民生（業務、家庭）、運輸の各部門の温室効果ガス排出量
評価した緩和策	再生可能エネルギーの利用、森林吸収、機器効率の改善、etc.
対象地域および空間スケール	町単位の解析
時間スケール	1990 年～2050 年の解析
計算手法・モデル・ツール	マテリアルフロー分析

(1) 解析の概要

都市、自治体が地球温暖化防止に向けて果たすべき役割は大きい。改正温対法にも明記されているように、区域の自然的社会的条件に応じて、温室効果ガスの排出抑制に向けた総合的かつ計画的な施策の実施が今まで以上に求められている。このような社会情勢のもと、内閣官房地域活性化統合事務局でも、わが国全体を低炭素社会に転換していくため、政府として、温室効果ガスの大幅削減など高い目標を掲げて先駆的な取組にチャレンジする都市を「環境モデル都市」に選定し、その実現に向けて重点的に支援するとしている。このように注目されている都市、自治体の環境施策の効果を検討するため、本研究では環境モデル都市を例に CO₂ 削減ポテンシャルを推計した。

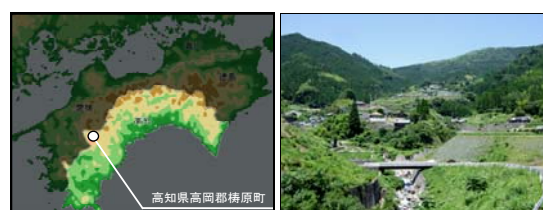
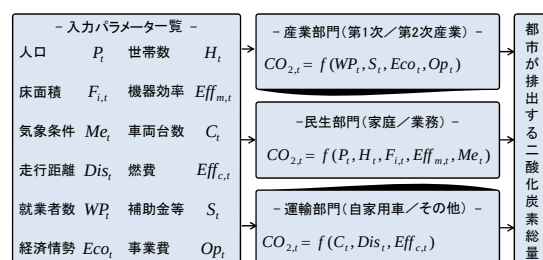


図 1. 町の位置

図 2. 町内の風景

図 3. CO₂ 排出量の推計フロー

(2) 解析手法

対象： 本研究では、内閣官房より環境モデル都市に選定された高知県梼原町（ゆすはらまち）の CO₂ 削減ポテンシャルを推計する。梼原町は典型的な中山間地域に位置し、自然的条件に恵まれた町である（図 1、図 2）。町の約 90% は森林に覆われ、バイオマス資源が豊富である。風況の良い四国カルストには既に 2 基の風力発電設備が建設されているほか、町内では小水力発電設備や太陽光発電装置の設置も進む。こうした地域の潜在的な自然エネルギーを利用する事によって、他の中山間地域の町の模範となる事が期待されている。

解析手法の概要： CO₂ 削減ポテンシャルを以下の手順で推計した。まず無対策ケースにおける町からの CO₂ 排出量を推計する。続いて各種低炭素対策の実施による CO₂ 削減量を積み上げ、これを無対策ケースの結果から差し引く事により対策ケースの CO₂ 削減量を推計した。対象領域はエネルギー転換部門を除く、産業、民生、運輸の 3 部門のエネルギー起源 CO₂ 排出量とした。

産業部門： わが国では市区町村単位での統計データの整備が遅れており、産業部門の活動に起因する CO₂ 排出量を積み上げて計算する事が困難だったため、国立環境研究所の 3EID の CO₂ 原単位を利用した。原単位を適宜統合することにより農業、林業、水産業、鉱業、製造業、建設業の CO₂ 排出原単位を作成した。その値に経済予測より算出された産業毎の総生産額を乗じることによって産業部門の CO₂ 排出量を推計した。

民生部門：民生部門は家庭部門と業務部門大別される。それぞれ住宅マクロモデル、業務用建築マクロモデルに将来推計人口、将来推計世帯数、建築物別将来推計床面積等の推計データを入力する事により CO₂ 排出量を推計した。なお将来人口、世帯数の算出にあたっては国立社会保障・人口問題研究所の推計アルゴリズムを参照し、建築物別将来推計床面積は将来推計人口等に比例して増減する事とした。

運輸部門：自家用車の利用による CO₂ 排出量は登録自動車台数に走行距離、燃費等乗じる事によって算出した。ここで将来の登録自動車台数は将来推計世帯数に比例して増減すると仮定している。自家用車以外の車種の走行に起因する CO₂ 排出量に関しては統計データの不足により 3EID の原単位にガソリン・軽油等の売上量乗じる事によって算出している。

CO₂ 削減対策の実施による削減量の推計方法：表 1 に示す 17 個の削減対策毎に推計された 2050 年における CO₂ 削減期待量を示す。それぞれ予算規模等を考慮しながら導入年次、導入規模等を決定した上で CO₂ 削減量を積み上げ形式で算出した。

(3) 解析結果

エネルギー起源 CO₂ の削減ポテンシャルの推計結果を図 4 に示す。無対策ケースでも今後暫くは町内人口の減少に伴って町からの CO₂ 排出量は減少するがその減少率は逡減する傾向を示す結果となった。一方、町が計画する CO₂ 削減対策が全て実行に移されれば 1990 年時の排出量と比較して約 7 割を削減できる事が示唆された。中でもバイオマス資源（木質ペレット）の利用、太陽光発電装置への助成、低炭素型ライフスタイルの実践といった対策の効果が特に大きい事が判明した。また森林吸収・風力発電による効果を含めると町全体が排出する CO₂ の総量以上に CO₂ の削減が見込める事が判明した（図 5）。以上のように、梶原町が計画する CO₂ 削減対策が確実に実行されれば、その削減効果は極めて大きいものになる事が示唆された。

参考文献 1) 川久保俊、伊香賀俊治、新谷圭右：都市域を対象とした CO₂ 削減ポテンシャルの推計、第四回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、2009.3 2) 大津由紀子、伊香賀俊治、堀池瞬：持続可能な森林施業に伴う CO₂ 収支の 2050 年までの予測、第四回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、2009.3

表 1. CO₂ 削減対策と期待削減量 (t-CO₂/年)

	取組内容	削減量
1	持続可能な森林経営	70,200
2	家庭用ペレット炊きストーブの導入	338
3	ハウス園芸用ペレット炊き温風機の導入	263
4	町内施設のペレット炊き冷暖房機器の導入	680
5	事業用ペレット炊き給湯設備の導入	1,100
6	家庭用ペレット炊き給湯設備導入への助成	705
7	小水力発電施設の導入・活用	162
8	町有施設への太陽光発電施設の新規導入	10
9	家庭用太陽光発電施設導入への助成	700
10	公共施設の太陽光発電施設の継続利用	125
11	BDF 製造装置の導入	12
12	公用車の電気自動車への転換	29
13	家庭用エコ給湯器導入への助成	212
14	家庭用太陽光温水器導入への助成	270
15	家庭用複層ガラス導入への助成	150
16	環境教育・低炭素型ライフスタイルの実践	1,197
17	風力発電施設の拡充	41,207

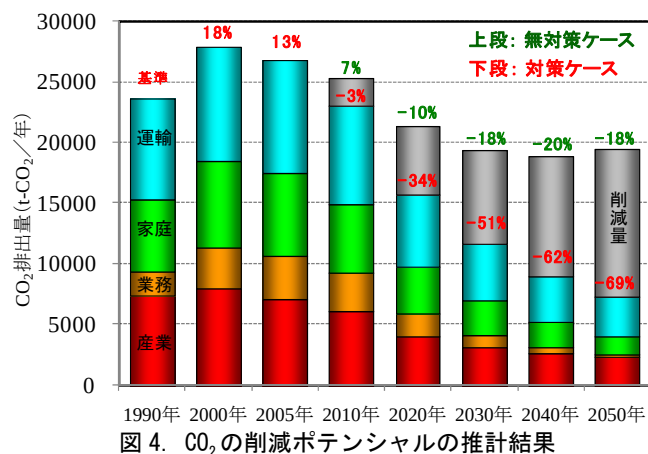


図 4. CO₂ の削減ポテンシャルの推計結果

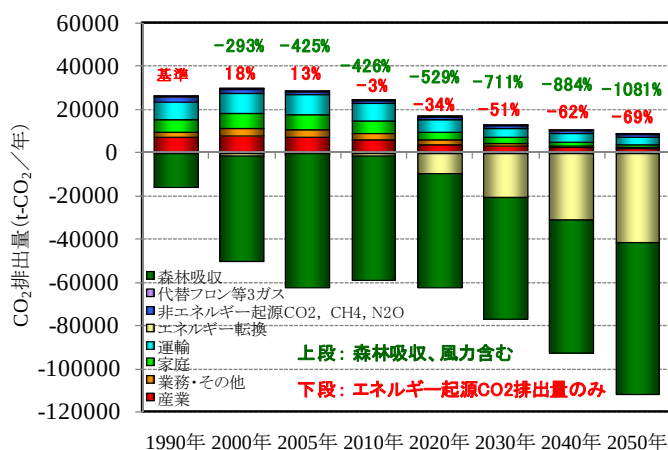


図 5. 温室効果ガス削減、森林吸収ポテンシャルの推計結果

(伊香賀俊治：慶應義塾大学理工学部)

ロードプライシングによる CO₂ 排出削減ポテンシャルの解析

対象領域	自動車交通量起源 CO ₂ 排出量
評価した緩和策	ロードプライシング
対象地域および空間スケール	沖縄都市圏
時間スケール	現状におけるポテンシャルの解析
計算手法・モデル・ツール	地理情報システム、均衡配分手法

(1) 解析の概要

ロードプライシングとは、大都市都心部などの一定の区域における自動車の走行や進入に対して課金を行う政策である。この政策は、交通行動に対し、自動車の走行経路の変更、自動車から他の交通手段の転換、目的地の変更、時間帯の変更、トリップの取り止めといった影響を及ぼしうる。結果、対象区域における自動車利用が減少し、また走行速度が向上することにより、交通渋滞の緩和、大気質の改善、CO₂ 排出量の削減などの効果が見込まれる。

課金の方法には、対象区域への進入に対してその都度あるいは1日1回課金される「コードン課金」や、対象区域内での走行に対して1日1回課金される「エリア課金」などがあり、効果の発現の仕方も異なる。

わが国では東京都で導入が検討された例があるが、未だ実施には移されていない。海外ではシンガポール、ノルウェー（オスロなど）、イギリス（ロンドン）などで既に実施されており、規模や方式にもよるが、技術的には機は熟しつつある。社会的な受容性が問題となりうることから、政治的リーダーシップや課金収入の使途の工夫などが導入に向けての鍵となる。

ここでは、具体的な都市圏の例として、沖縄都市圏を取り上げて、コードン課金とエリア課金の効果を、新しい分析手法を用いて、計測した。

(2) 解析手法

コードン課金の評価は、通常の OD ベースの均衡配分において、コードンを横切るリンクに課金額を賦課することにより、実施した。一方、エリア課金の厳密な評価のために、トリップチェーンベースの非加算型経路コストを考慮することが必要になることを提案し、それを表現可能なネットワーク均衡モデルを示し、そのモデルと等価な最適化問題を示した。そして、沖縄都市圏に適用し、エリア課金とコードン課金の

最適課金や消費者余剰の相違を明らかにした。エリア課金は、対象地域内のすべての走行に対して一日単位で課金するものであり、コードンを横切る走行に課金するコードン課金と比べて、技術的に適用困難であるが、リンク別に最適課金する場合により近くなると考えられる。

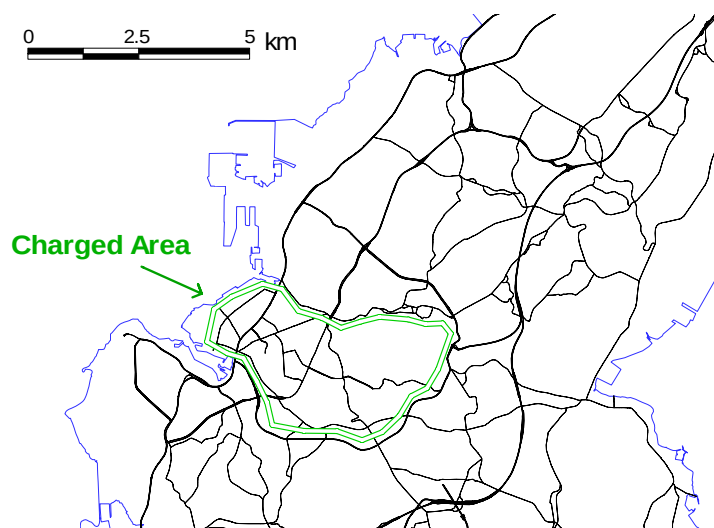


図1. 仮想的な課金対象地域：那覇市都心部

(3) 解析結果

エリア課金は、対象地域内のすべての走行に対して一日単位で課金するものであり、コードンを横切る走行に課金するコードン課金と比べて、技術的に適用困難であるが、リンク別に最適課金する場合により近くなると考えられる。

ここでは、沖縄本島への適用結果を示す。1999 年道路交通センサスデータからトリップチェーンデータを作成し、トリップチェーン単位の需要関数を設定し、非加算経路コストを考慮したトリップチェーン型ネットワーク均衡モデルを適用した。具体的に、那覇市都心部を仮想的な課金対象地域とし、日単位で計算した。図 1 に分析対象地域を示す。

図 2 は、コードン課金とエリア課金の社会的余剰の違いを示しており、最適エリア課金は約 500 円と、最適コードン課金の約 250 円よりも大きく、コードン課金と比べると、社会的余剰はほぼ同じで、より大きな収入が確保できることが示された。また、都市圏全体の CO₂ 排出量を比べると、図 3 に示すように、課金額の増加に対して、コードン剩課金の場合は、課金対象とならない地域内内トリップが増加するため、削減効果が打ち消される仕組みとなっていることが確認された。

宇都宮都市圏の分析結果も踏まえ、以下の関係が多く都市圏において成立すると考えられる。

- ・(次善の) 最適課金レベルは、エリア課金のほうがコードン課金よりも高い。
- ・(次善の) 最適課金時における社会的余剰は、エリア課金とコードン課金でほぼ等しい。または、前者がわずかに高い場合がある。
- ・(次善の) 最適課金時における料金収入は、エリア課金よりもコードン課金のほうが少ない。
- ・エリア課金よりもコードン課金のほうが社会的余剰関数の形状が鋭いため、慎重な料金設定が必要とされる。

参考文献)

- 1) 円山琢也, 原田昇: ネットワーク上での混雑を考慮した最適職住配置手法の構築とその実証研究, 都市計画論文集, No.38-3, pp.517-522, 2003.
- 2) Maruyama,T.,Harata,N.: Difference between area-based and cordon-based congestion pricing: Investigation by trip-chain-based network equilibrium model with non-additive path costs, *Transportation Research Record*, No. 1964, pp.1-8, 2006.

(原田昇: 東京大学大学院工学系研究科)

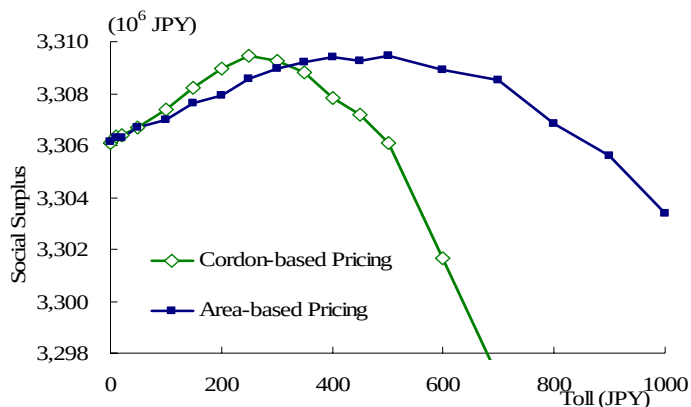


図 2. 課金額と社会的余剰の違い

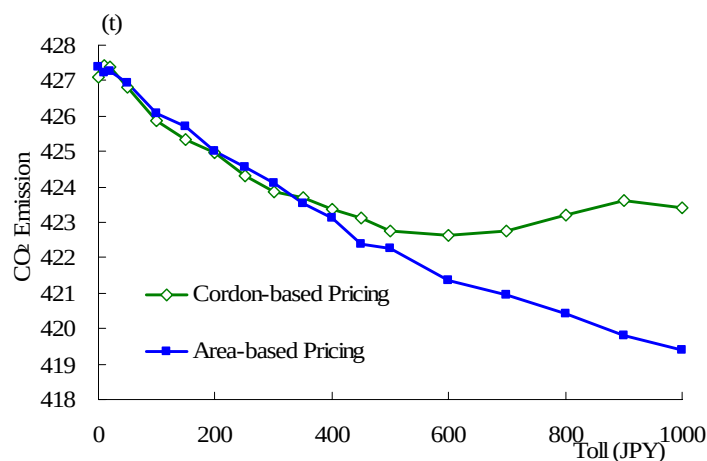


図 3. 都市圏全体の CO₂ 排出量

地域間物流に伴う CO₂ 排出量の変化

対象領域	貨物輸送を起源とする CO ₂ 排出量
評価した緩和策	モーダルシフト、地産地消
対象地域および空間スケール	全国を対象、都道府県ごとの解析
時間スケール	現状におけるポテンシャルの解析
計算手法・モデル・ツール	物流センサス、消費に誘導される物流量の計算

(1) 解析の概要

物流に関連する運輸部門は日本全体の排出量の約 2 割を占める。物流における CO₂ 削減の有力な手段として、輸送距離を減らすこと（地産地消）、低 CO₂ 排出の輸送機関への切り替え（モーダルシフト）の 2 つがある。物流における対策は、一地域内の輸送を単体として評価するだけでは正しく評価ができない。なぜなら素材が輸送されて工場で加工されるように、物流は産業活動と直結するものであり、遡れば消費活動が産業活動を通じて物流を誘発しているものといえるからである。つまり物流における CO₂ 排出削減は、個々の都市における消費活動に誘発される、様々な地域における物流に着目する必要がある。本研究では国土交通省より公表されている物流センサスのデータを利用して、都道府県の消費活動に伴って誘発される各地域における物流量を推計した。

(2) 解析手法

物流センサスは、国土交通省が昭和 45 年度以来 5 年ごとに実施している統計調査である。物流が発生する個々の事業所から出荷されるすべての貨物について、貨物の品目、重量、届先地、荷受人業種、輸送機関、輸送経路、物流時間などを全国規模で調査しているので、全国各地域の物流施設、交通施策計画の基礎資料、その他物流に関する調査研究に広く用いられている。

本研究では、消費に起因して発生する物流を「誘導物流」と呼んでいる。誘導物流は、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物流をさす。産業連関分析では最終需要に由来する生産を求めるが、同様に最終需要に由来して発生する地域間の物流をとらえたい場合に、この誘導物流を用いる。図 1 に誘導物流の計算フローを例示した。最終需要として消費される製品は工場で加工されて出荷される。その原料が工場に入荷される際に誘導物流が発生する。このとき、工場での原料がどれだけ必要かという情報を産業連関表の投入係数行列（図 1 の行列 *A*）によって与え、原料がどの地域から供給されるかを地域間移入行列（図 1 の行列 *R*）によって与える。物流は連鎖的に発生し、通常の原料は別の素材が加工されることによって、原料として供給されるであろう。この連鎖は原料（素材）が、農産物のように第一次的に生み出される場合や、輸入されて供給される場合にまで遡ると終了する。連鎖によって発生する以上の誘導物流を逐次加算して合計することによって、最終製品に起因するトータルの誘導物流量を求めることができる。

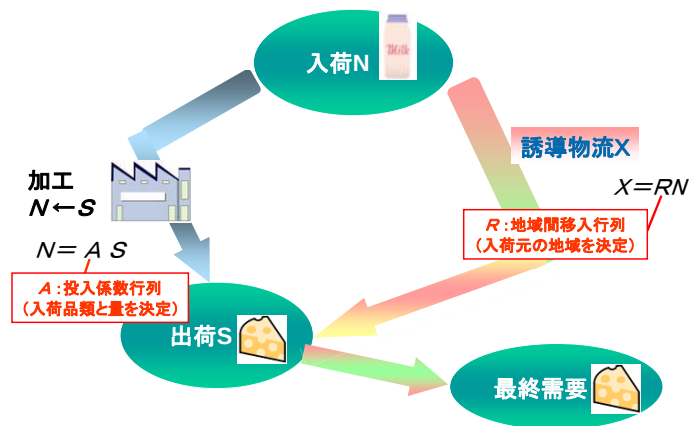


図 1. 誘導物流の計算フロー例

(3) 解析結果

図 2 は 1 トンの農水産品消費によって誘発される物流量を示している。多くの地域に物流を誘発する東京都での消費に対して、地産地消の傾向が強い北海道では、地域内での物流がより多くなっており、地産地消によって輸送距離を減らすことによる CO₂ 削減の効果が結果より示唆される。

モーダルシフトに関しては、政府はモーダルシフト化率（500km 以上での鉄道・海運利用率）を 50%まで向上させる目標を設定している。1 年間の品目別の最終消費量に誘発される誘導物流を求め、モーダルシフトによる日本全体での CO₂ 削減効果を計算し、農水産品以外の品類でモーダルシフトを 50%達成すると、現状比 30%以上の排出削減を見込むことができるとの結果を得た。

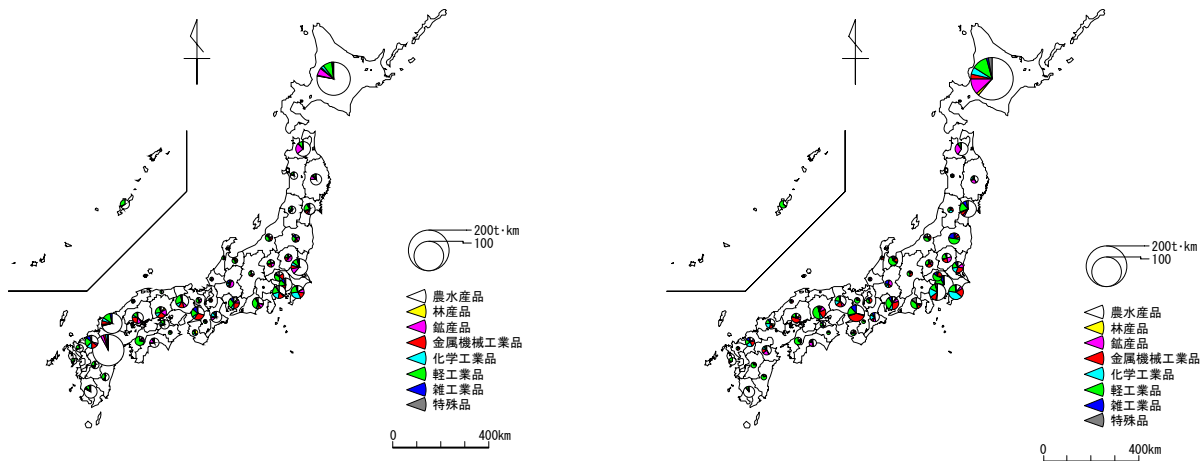


図 2. 1 トンの農水産品消費に誘発される物流(トン・km)。(東京都(左)と北海道(右)での消費に誘発される各都道府県発の物流量)

参考文献)

- 1) 国土交通省, 「第 7 回全国貨物物流調査 (物流センサス)」
- 2) 吉田好邦, 西森千紗, 松橋隆治, 「物流の波及を考慮した貨物輸送の地域連関」, 第 25 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集(2006), 255-258.

(吉田好邦：東京大学大学院新領域創成科学研究科)