

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

(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

総括プロジェクト機構領域創成・学術統合化プロジェクト研究部門

ステーヴェン クレイネス

<研究協力者> 日本工業大学

工学部システム工学科

石田 武志

[要旨] 日本全国の様々な気候や他の特性をもつ都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減を満たすための技術や政策の導入効果を網羅的に評価することは、極めて複雑な問題である。これらの評価のためには、地域特性を反映する都市生活や産業活動を整理するとともに、技術や政策などの施策も整理する必要がある。温暖化対策を評価するためには、極めて幅広い分野の専門家が参加していることが特徴である。しかし、この幅広い専門性を協調的に機能させることは極めて難しい問題である。そこで、本研究では、それぞれの研究者間に遍在する知識を、インターネットの利用により、知識協調を行い、プロジェクトの目標達成を支援する「ウェブ・ベース協調基盤」の設計と構築を行ったものである。

この「ウェブ・ベース協調基盤」構築に関して、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中心に実施した。これに加え17年度は、当該プロジェクト内において開発された複数のモデルを連動させるための統合モデルを中心に、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、17年度に作成した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。18年度においての主な成果は：

1. DOME統合機能を用いた電源計画・供給モデルと民生部門モデルとの統合モデルの構築
2. 電源計画・供給モデルの拡張（9地域の計算）及び全国CO₂排出量評価
3. 9地域の計算へ拡張した電源計画・供給モデルと民生部門モデルとの統合解析及び全国CO₂排出量評価

[キーワード] 二酸化炭素、技術評価、モデル統合化、電源計画モデル、ウェブ技術

1. はじめに

近年、CO₂排出の増加に伴う地球温暖化が顕著になり、CO₂排出の効果的な制御方法が広く研究されてきている。この国際的な動きの中で、CO₂排出と大きな関係がある電源構成や、様々な都市生活の消費活動を最適化することができれば、都市におけるCO₂排出抑制の一手段となりうる。

しかし温暖化対策を評価するためには、極めて幅広い分野の専門家が参加しており、この幅広い専門性を協調的に機能させ、最適な施策を導出することは極めて難しい問題である。

一方で、近年のインターネットの普及やIT技術の発展により、様々な情報・知識を簡易に共有していく技術基盤を作ることが可能となりつつある。温暖化研究に参加する広い分野の専門家の計算モデルやデータベースなどの知識リソースを共有する技術基盤を構築することができれば、中長期の最適な温暖化施策を精度よく導出できると考えられる。例えば、内外の研究者により構築されている数値計算モデルを、インターネットを介してウェブにより外部から操作できるようにすれば、都市をはじめに、日本国内の活動に伴うCO₂排出の削減対策の総合的な効果を素早く評価したり、最適の解を検討したりするための有効な手段になると考えられる。

2. 研究目的

本研究では、それぞれの研究者間に遍在する知識を、インターネットの利用により、知識協調を行い、プロジェクトの目標達成を支援する「ウェブ・ベース協調基盤」の設計と構築を行ったものである。さらに、当該プロジェクト内において開発された複数のモデルを連動させるための統合モデルをDOME (distributed object-based modeling environment)のモデル統合基盤を用いて構築し、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。この統合モデルにより、首都圏や国内のCO₂排出量を評価できることを示すことが目的である。

3. 研究方法

DOME(distributed object-based modeling environment)ソフトウェアを用いて様々なモデルを統合し、モデルを連動させて評価を行う機能を実現した。昨年度は、下記a)、b)を構築し、本年度は下記のc)～e)を実施した。

- a)時系列シナリオ評価を含めた統合モデルを実現するためのDOMEツールの構築
- b)東京都の電源計画・供給モデルの適用によるDOME統合機能の評価
- c)DOME統合機能を用いた電源計画・供給モデルと民生部門モデルとの統合モデルの構築
- d)電源計画・供給モデルの拡張（9地域の計算）及び全国CO₂排出量評価
- e)9地域の計算へ拡張した電源計画・供給モデルと民生部門モデルとの統合解析及び全国CO₂排出量評価

DOMEは、マサチューセッツ工科大学のCAD研究室において開発されているモデル統合基盤であり、MS ExcelやMathworks Matlabなどの各種ソフトウェアを用いて構築されたモデルや、Javaによる記述されたモデルに対して、各モデル間のパラメータをリンクさせ、モデルを連動させることができるツールである。

本研究では、Matlabにより構築された電源構成モデルや、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、住宅省エネルギー対策評価モデルの統合を行った。各モデルは、異なる研究者によりそれぞれ構築されたもので、統合することを考慮して作成されたものではないが、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ことを示した。

4. 結果・考察

(1) DOME統合機能を用いた電源計画・供給モデルと民生部門モデルとの統合モデルの構築

1) 統合モデルの概要

地球温暖化対策には需要対策と供給面の対策があり、とりわけ電力の場合には需要側対策と供給側の対策が相互に関連を持つため、その両面を同時に検討していかなければ真に対策の有効性を評価することができない。実際の都市に複数の対策が導入されたときの効果を評価するためには、それらの対策の効果を個別に推定して加算するだけではなく、これらの対策効果を同時に評価できるような解析方法の確立が必要になる。本研究では、関連する複数の対策の相互関係を評価する方法を構築するために、昨年度構築された電源計画モデルに、民生部門のモデルを統合し、対策導入効果を様々な条件で評価するための解析ツールの構築を行った。

構築したシステムは、図1に示すように電源計画モデルと、家庭部門のエネルギーモデル、業務建物部門のモデルをDOMEにより結合した。

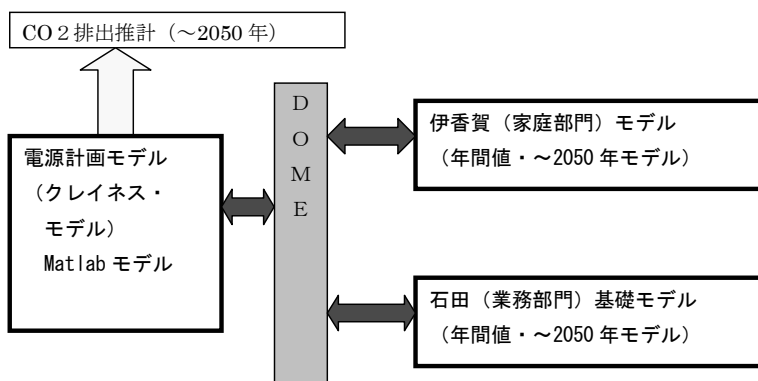


図1 電源計画モデルと需要部門（民生部門）の統合の概要

2) 住宅エネルギー・CO₂のマクロ評価モデル

伊香賀による住宅エネルギー・CO₂のマクロ評価モデルは、図2に示すように都道府県、対策の種類等を入力データとして与えると、2050年までの家庭部門のエネルギー消費構成が出力されるモデルである。このモデルはExcel VBAにより構築されており、内部の計算値は、年間値のみで、時刻別データは扱っていない。また5年ステップでの計算である。住宅エネルギー原単位データベースの構築には、SMASHを用いて、エネルギー需要を求めている。対策コストに関してはモデル内では考慮していない。

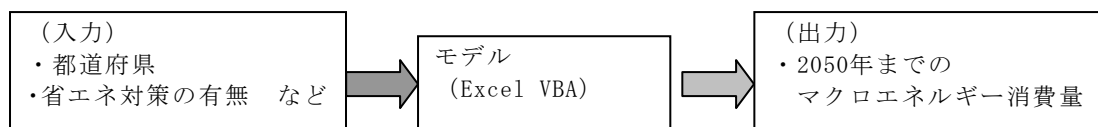


図2 住宅エネルギー・CO₂のマクロ評価モデル

3) 業務エネルギー・CO₂のマクロ評価モデル

従来、業務用建物における空調熱源システムを検討する場合、建物設計時におけるエネルギー負荷予測や、エネルギー負荷計測事例から作成した用途別エネルギー負荷原単位により推計することが一般的である。しかし、実際の建物におけるエネルギー消費は、建物内の用途構成比やそ

それぞれのテナントにおける稼働形態、稼働時間などで様々に変動する。従来の方法ではこのような外部条件による負荷変動を詳細に考慮することが困難であった。また空調負荷を推計する既存システム（例えばMICRO-PEAKなど）を負荷推計システムとして最適化モデルに含めることは困難であった。

今後、CGSやHPなどの空調システムの導入可能性を、精度良く検討するためには、建物のエネルギー負荷を各種省エネルギー対策も含めて、エネルギーシステムの評価と一体化して推計することが必要である。本モデルでは、建物の電力・エネルギー負荷を細分化して定式化し、建物概要、建物用途、気象データに基づく建物内部からの発熱、壁面での熱貫流や外気交換による熱損失などの算出方法を明確にし、様々な条件下でのエネルギー負荷を簡易推計する計算ブロックをモデル内に明示的に導入することを可能とした。このモデルを地球温暖化対策等の施策評価においても、従来は原単位などを用いたマクロ的な評価が中心であったが、各種条件が詳細に設定できることから、各対策間の効果を相対的に評価するなど、施策決定支援の側面でも利用できるモデルである。モデルは、Excel VBAにより構築されており、内部の計算値は、年間12ヶ月の代表日の時刻別データを推計している。

4) 電源計画－需要部門の統合モデルの計算事例

住宅及び業務エネルギー・CO₂のマクロ評価モデルを、DOMEに接続し、電源計画・供給モデルと統合し、時間ステップごとの計算を行うことができる統合モデルを構築した。家庭部門では、太陽光発電の導入量が年々増加するような設定とし、さらに電力会社の電力単価に導入量が左右されるようにした。需要部門での分散電源導入により、需要サイドの電力デマンドは減少し、電力会社側の発電構成に影響を与え、発電単価が増減し、それが需要部門の太陽光発電の導入判断に影響を与えるようなフィードバックループが構成される（図3）。

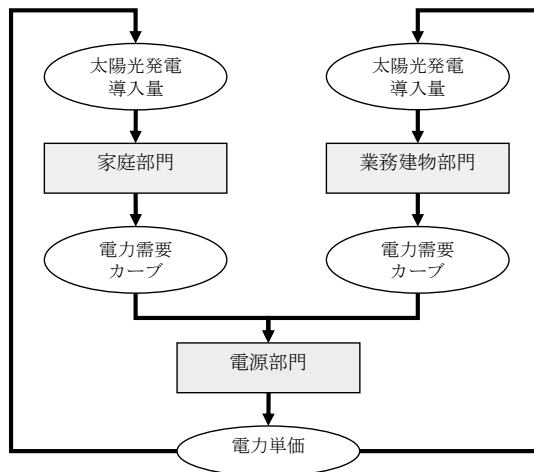


図3 需要部門モデルと電源計画モデルのフィードバックループ

図4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規模になってくると、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稼働している。

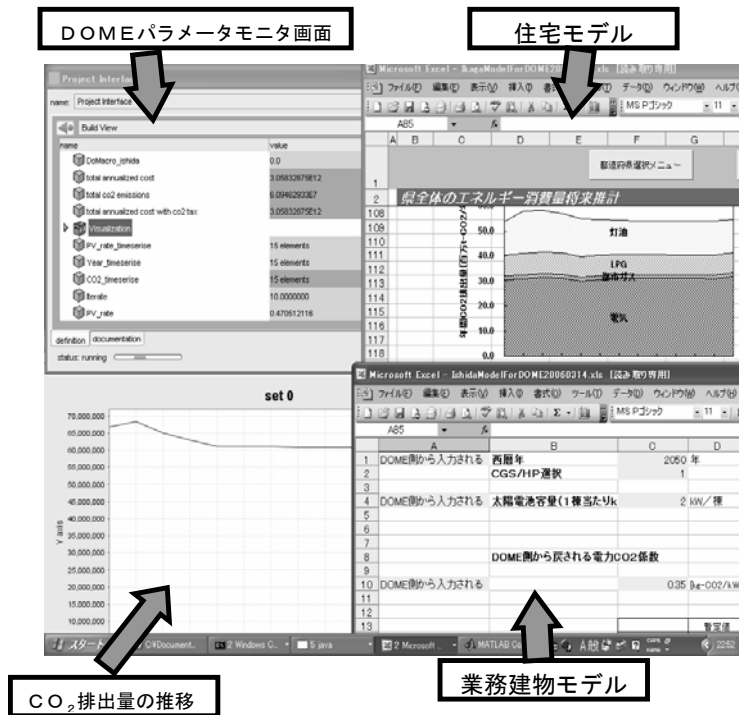


図4 DOME統合機能を用いた電源計画・供給モデルと民生部門モデルとの統合の様子

5) 計算ケースの設定

各モデルにおいては、様々な対策の導入設定が可能であるが、本研究では各モデルにおける以下の対策パラメータを変化させて、モデル間の連動効果を評価した。

電源計画モデル：SOFC/GT(固体酸化物燃料電池・ガスタービンの複合サイクル)の補助金、CO₂税

業務建物モデル：太陽光発電

住宅モデル：太陽光発電

想定した計算ケースは以下の7通りである。

- ケース1 - 基本シナリオ： 各対策の標準導入時
- ケース2 - SOFC/GTシナリオ： 基本シナリオ+SOFC/GT発電システムが導入された場合
- ケース3 - SOFC/GT+CO₂税シナリオ： SOFC/GTシナリオ+2005年以降にCO₂税の導入した場合
- ケース4 - 太陽光発電一定シナリオ： 基本シナリオ+需要サイドでの住宅太陽光発電の導入（2010年～）
- ケース5 - 太陽光発電フィードバックシナリオ：
基本シナリオ需要サイドでの住宅太陽光発電の導入（2010年～）。
太陽光発電導入量が電源計画による電源構成に基づく電力単価に左右される場合
- ケース6 - 太陽光一定+SOFC/GT+CO₂税シナリオ：
SOFC/GT +CO₂税シナリオ及び住宅太陽光発電導入（フィードバックなし）
- ケース7 - 太陽光（フィードバック+SOFC/GT+CO₂税シナリオ：
SOFC/GT +CO₂税シナリオ及び住宅太陽光発電導入（フィードバックあり）

6) 計算結果

各ケースの設定に基づいて2050年までの計算を行った結果を図5に示す。太陽光発電のフィードバックを行った場合としない場合では、削減量に相違がでてくることがわかる（ケース4と5、ケース6と7の比較）。今回の計算は住宅用の太陽光発電の導入のみのフィードバックであるため、排出量全体の変化は小さいものの、他の対策によるフィードバックや対策相互効果を考慮した場

合は、大きな差になる可能性も考えられる。

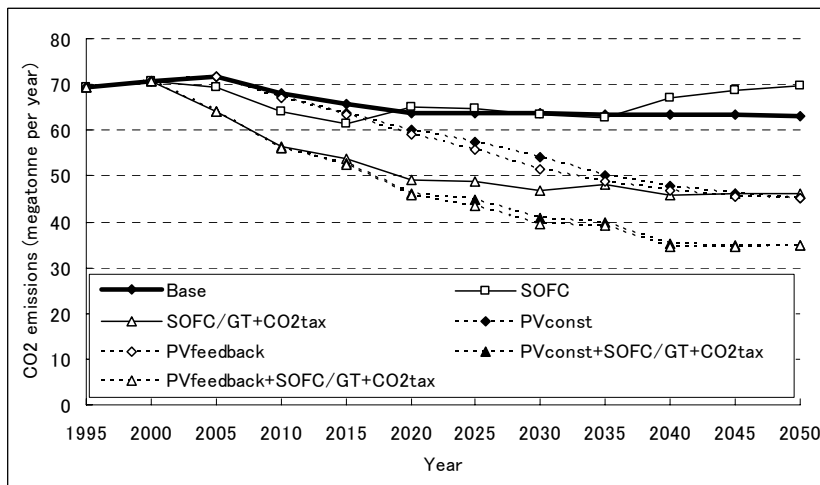
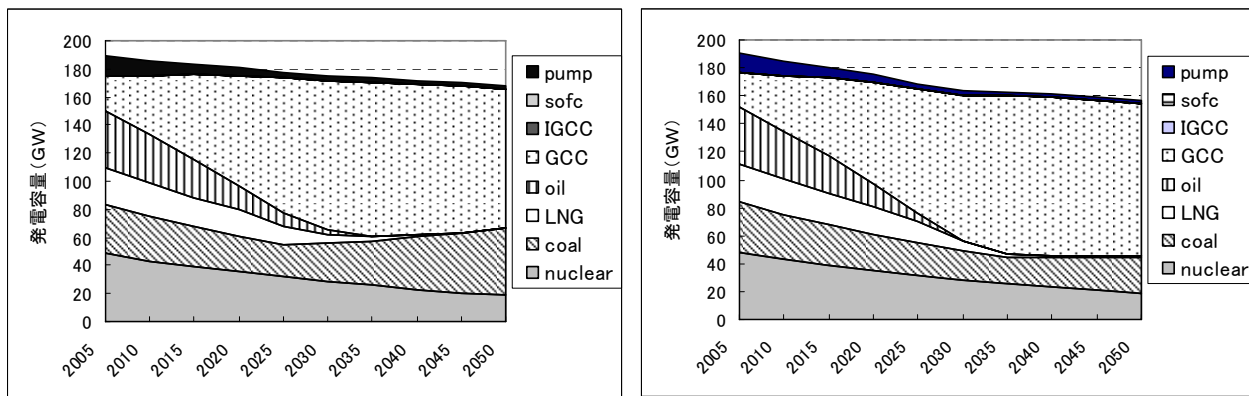


図5 各ケースのCO₂排出量計算結果

(2) 電源計画・供給モデルの拡張(9地域の計算)及び全国CO₂排出量評価

昨年度構築した電源計画モデルは関東地域のみであったが、それを拡張し9地域(北海道、東北、関東、北陸、中部、関西、中国、四国、九州)別の推計ができるように改良した。各地域の現状の電源種構成比を設定し、地域別に需要カーブ、電源種類ごとの発電容量の上限・下限の設定などを選択できるようにしている。また、需要部門の対策による電力需要の削減や、太陽光発電の導入による電力需要の増減についてのデータも外生的に与えることができるようにしている。

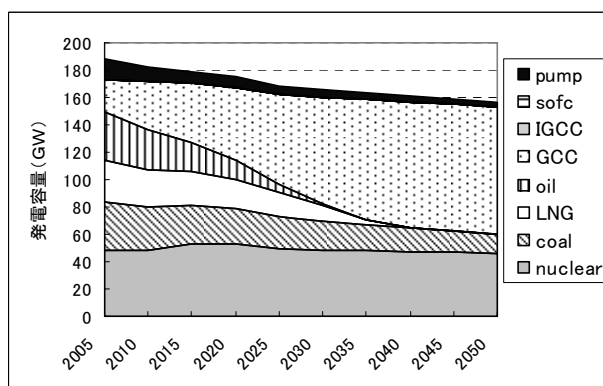
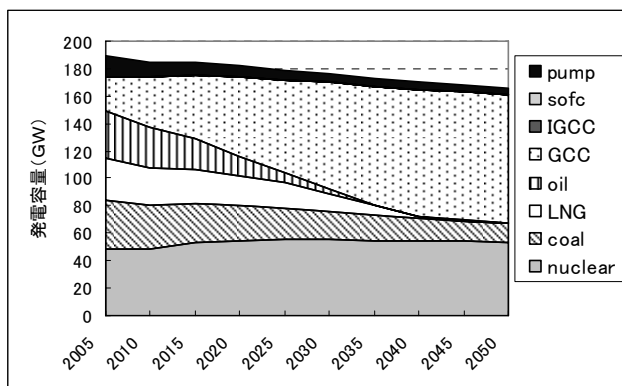
この拡張モデルを用いて、9つの地域ごとに計算を行い、それぞれの計算結果を積算することにより、国内全体の発電構成や発電量、CO₂排出量を導出した。図6-図8に発電容量の最適化結果の事例を示す。それぞれPV導入により電力需要が変動する場合としない場合について、さらに炭素税の導入有無による相違を示している。同様に図9にCO₂排出量の推計結果を示す。



(a) PVによる需要変動なし

(b) PVによる需要変動あり

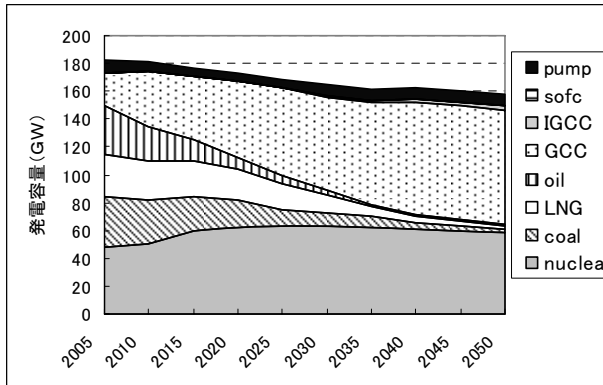
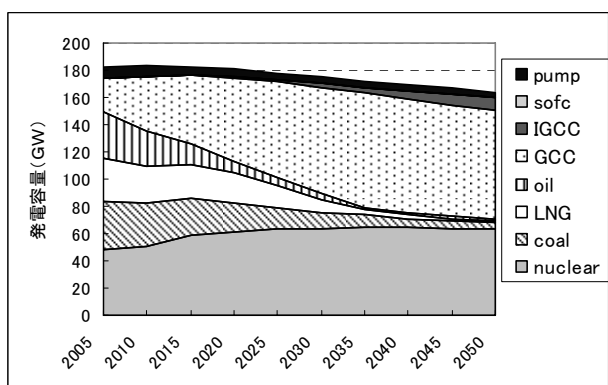
図6 全国の発電容量の最適化結果(炭素税なしの場合)



(a) P Vによる需要変動なし

(b) P Vによる需要変動あり

図7 全国の発電容量の最適化結果 (炭素税 1 万円/ t-CO₂) の場合)



(a) P Vによる需要変動なし

(b) P Vによる需要変動あり

図8 全国の発電容量の最適化結果 (炭素税 5 万円/ t-CO₂) の場合)

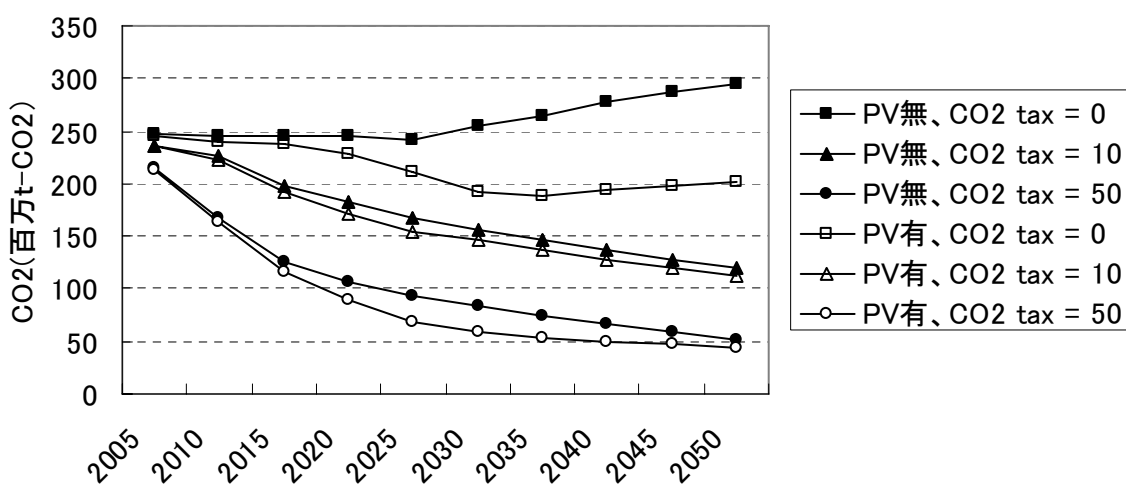


図9 全国の電源起源CO₂排出量推計結果 (炭素税の単位は円/kg-CO₂)

以上のようにDOMEを基礎として、様々なモデルの統合や時系列計算が可能となった。

(3) 9地域の計算へ拡張した電源計画・供給モデルと民生部門モデル

との統合解析及び全国CO₂排出量評価

上記(1)に示した電源計画モデルと民生需要部門モデルの統合解析についても、9地域別に推計できるように改良を行った。また、シナリオ検討チームの結果に基づいて世帯数、業務床面積等を設定できるようにした。モデルの統合の概要を図10に示す。

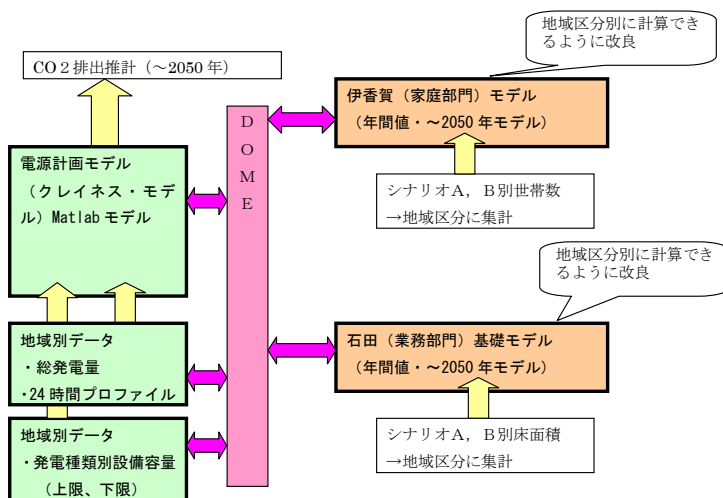


図10 電源計画モデルと需要部門（民生部門）の統合の概要

1) 電源計画モデル

(2)で説明したように、電源計画モデルを拡張し9地域（北海道、東北、関東、北陸、中部、関西、中国、四国、九州）別の推計ができるように改良した。各地域の現状の電源種構成比を設定し、地域別に需要カーブ、電源種類ごとの発電容量の上限・下限の設定などを選択できるようにしている。また、需要部門の対策による電力需要の削減や、太陽光発電の導入による電力需要の増減についてのデータも外生的に与えることができるようにしている。このモデルでDOME側から制御しているパラメータは以下のとおりである。

設定パラメータ

- ・地域選択（1：北海道、2：東北、3：関東、4：北陸、5：中部、6：関西、7：中国、8：四国、9：九州）
- ・需要データに太陽光発電による需要減を含めるかどうか（0：含めない、1：含める）
（太陽光発電量は高橋先生推計データによる）
（太陽光発電を含めない場合は、電力需要は将来も一定としている）

2) 家庭部門モデル（伊香賀モデル）

(1)で示した伊香賀らによる家庭モデルを9地域別に計算できるように変更をおこなった。さらに9地域別の世帯数を集計し、入力データとして設定した。世帯数は、シナリオチームから与えられたシナリオA、シナリオBの都道府県別データを集計したものである。また、太陽光発電の導入率については、高橋らの推計結果が電源計画モデルの入力条件として既に設定されているため0%に設定している。その他対策として、以下の対策を考慮し、対策による需要電力減を、DOMEを介して電源計画モデルに渡す構造となっている。

・家庭部門モデル設定している対策

空調運転適正化、空調設備更新、断熱強化、太陽熱温水器、太陽光発電、給湯温度の適正化、給湯利用の適正化、家電使用の適正化など

3) 業務部門モデル (石田モデル)

(1) で示した業務モデルの建物数を9地域別に分割して設定した。分割比率は、過去の建築着工数の累積数による。また、業務の将来増加については、シナリオチームによる床面積推計値(表1)の2000年値と2050年値から年増加率を算定して用いた。

表1 業務床面積の増加動向 (シナリオチームより)

		1990	1995	2000	2050A	2050B
Office & Buildings	Million m2	313.0	394.0	435.0	521.0	502.4
Wholesales & Retails	Million m2	299.4	355.6	405.9	420.3	380.1
Restaurants	Million m2	50.4	56.9	61.9	178.6	75.5
Schools	Million m2	311.0	328.0	342.0	210.0	264.0
Hotels & Inns	Million m2	76.6	88.8	89.6	250.0	161.4
Hospitals	Million m2	64.6	73.8	93.2	108.8	110.8
Amusement places	Million m2	24.1	29.3	33.3	101.8	71.4
Others	Million m2	146.0	166.0	193.0	143.7	152.5
Total	Million m2	1,285.1	1,492.4	1,653.9	1,934.0	1,718.1

また、太陽光発電の導入率については、高橋らの推計結果が電源計画モデルの入力条件として既に設定されているため、業務モデル内では太陽光発電の導入率を0%に設定している。その他対策として、以下の対策を考慮し、対策による需要電力減を、DOMEを介して電源計画モデルに渡す。設定している対策は表2のとおりである。年度により導入率、削減率は変わらないとした。

4) 計算結果

1) - 3) の条件を設定して、各地域の計算を行い、地域別電力を合計することにより、全国のCO₂排出量、電源構成を算出した。

(計算条件)

- ・シナリオA及びBによる世帯数、床面積増加率を用いた場合
- ・PVによる需要の減少を考慮しない場合及び考慮する場合
- ・住居、業務部門対策は2)、3)の対策の設定の場合

各地域の計算をした結果を合計したCO₂排出量と電源構成を図11に示す。それぞれのケースの電源構成の推移を図12～図15に示す。

表2 業務モデルの対策の設定

	対策設定	
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		
マイクログリッドの導入比率(建物数の比率)	2	%
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)	5	%
○地域冷暖房		
地域冷暖房の導入比率(建物数の比率)現状値	1	%
地域冷暖房の導入比率(建物数の比率)想定値	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	%
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	5	%
○削減効果の設定		
照明		
点灯時間の削減	5	%
点灯数の削減	20	%
照明電力構成比(対内部電力)	30	%
空調		
空調負荷の削減	5	%
空調時間の削減	5	%
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	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)	5	%
CGS容量	400	kW
CGS発電効率	30	%
CGS熱回収効率	40	%
温水吸収式COP	1.2	
冷温水発生機COP	1	
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	5	%
電気システムの比率	90	%
冷房COP(効率)電力	4.00	
暖房COP(効率)電力	4.00	
ガスシステムの比率	10	%
冷房COP(効率)ガス	3.00	
暖房COP(効率)ガス	3.00	
給湯システム		
給湯COP(効率)電力	3.0	
給湯COP(効率)ガス	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		
特定機器の電力消費比率	1.66	%
平均使用年数	5.00	年
機器更新によるエネルギー削減率	30	%
○パソコン		
特定機器の電力消費比率	3	%
平均使用年数	5.00	年
機器更新によるエネルギー削減率	83	%
○照明		
特定機器の電力消費比率	30	%
平均使用年数	20.00	年
機器更新によるエネルギー削減率	16.6	%
6. 省エネ機器の買い替え促進		
業務床面積あたりの白熱電球の電力量	0.087	W/m ²
電球型蛍光灯に買い換えられる比率	3.33	%
電球型蛍光灯に買い替えた場合の省エネ率	80	%
7. 高効率照明の普及		
特定機器の電力消費比率	30	%
平均使用年数	20.0	年
代替率(対フロー)	8	%
機器更新によるエネルギー削減率	50	%
8. 建物の省エネ性能の向上		
対策ケース建物省エネ率	0.87	
標準ケース建物省エネ率	0.99	

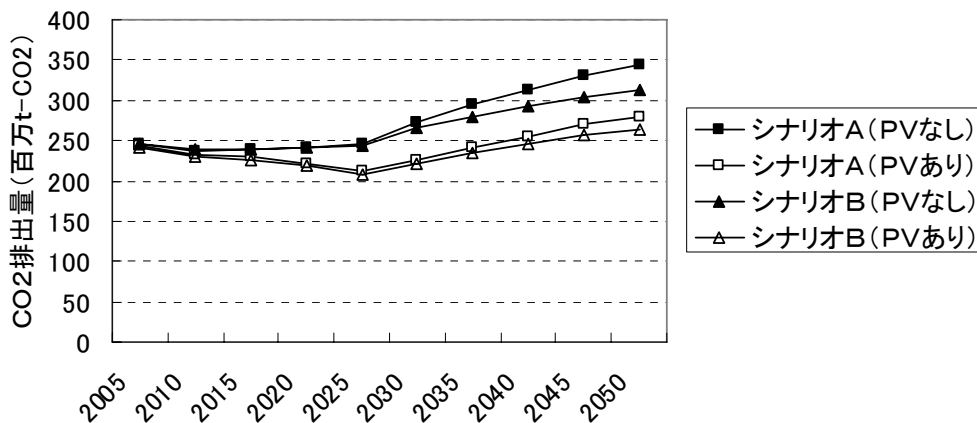


図 1 1 全国（沖縄除く）のCO₂排出量推計結果

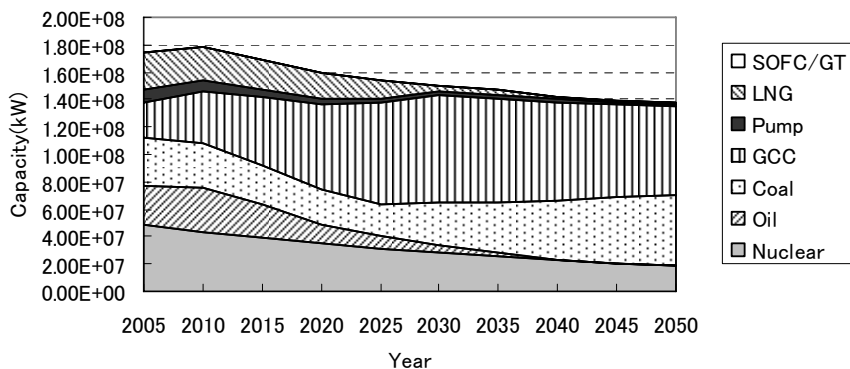


図 1 2 電源構成比（全国（沖縄除く）、シナリオA + P V 導入なし）

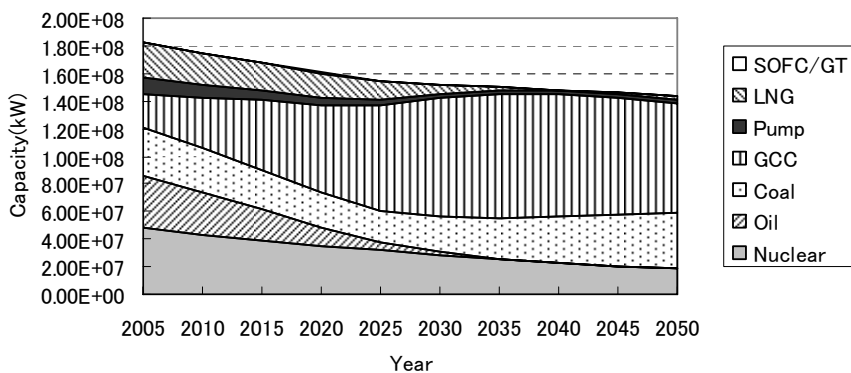


図 1 3 電源構成比（全国（沖縄除く）、シナリオA + P V 導入あり）

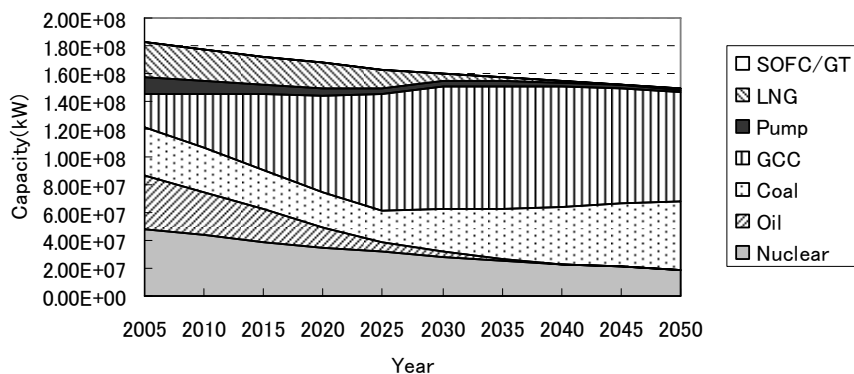


図 1 4 電源構成比（全国（沖縄除く）、シナリオB + P V 導入なし）

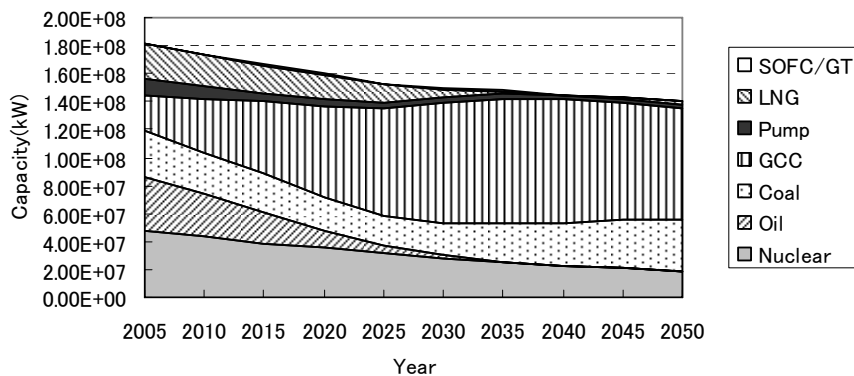


図 1 5 電源構成比（全国（沖縄除く）、シナリオB + P V 導入あり）

(5) まとめ

- ・ 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。
- ・ 太陽光発電の大規模導入した場合の各地域推計結果を、2つの社会シナリオに基づいて計算を行うことができた。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、各部門で作成された詳細モデルを統合することにより、部門間相互作用を DOME (distributed object-based modeling environment) と呼ばれるモデル統合基盤を用いて統合し評価する手法を開発したものである。具体的には、Matlabにより構築され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、住宅省エネルギー対策評価モデルの統合を行った。各モデルは、異なる研究者によりそれぞれ構築されたもので、統合することを考慮して作成されたものではないが、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や時系列の評価もできることを示すことができた。

(2) 地球環境政策への貢献

研究成果を基に、更に有用な協調基盤となるウェブサイトを構築するとともに、プロジェクト内のモデル開発メンバーの協力を得た上で、この電源計画モデルと需要モデルの統合モデルなどの協調基盤を、温暖化対策の政策立案に利用できるものとしていく予定である。

6. 引用文献

特になし。

7. 国際共同研究等の状況

マサチューセッツ工科大学のCAD研究室との共同研究を継続し、分散型モデル統合化のためのソフトウェア開発を行った。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

なし

<査読付論文に準ずる成果発表>

なし

<その他誌上発表>

なし

(2) 口頭発表(学会)

- 1) S. Kraines, T. Ikaga, T. Chikamoto, and D. Wallace, "Model-Integration Based Evaluation of Technologies to Promote Sustainability in the Building, Electricity, and Transportation Sectors of Tokyo, Japan", ISIE 2006 Annual Meeting, Stockholm, Sweden, 2006
- 2) S. Kraines, B. Kemper, and R. Batres, "EKOSS Ontology: A Prototype for a Domain Ontology for Industrial Ecology" (poster), ISIE 2006 Annual Meeting, Stockholm, Sweden, 2006
- 3) Y. Inoue, Y. Yanagisawa, and S. Kraines, "Estimation of Collection Costs for Municipal Garbage Using Grid-based City Models" (poster), ISIE 2006 Annual Meeting, Stockholm, Sweden, 2006
- 4) 石田 武志, S. 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」, 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, 159-162, 2007

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし