

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

[要旨]

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」構築に関する平成16年度業務の継続として、平成17年度は、内外の研究者により構築されている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。具体的には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モデルを、ウェブ・ベース基盤を通じてアクセスできる環境を構築した。これに加え、DOMEのさらなる開発をマサチューセッツ工科大学のCAD研究室と継続した。本年度は、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、特に前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の統合を行った。

平成17年度において、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ウェブ・ベース協調基盤についての主な成果は：

1. モデル操作を支援するウェブ・ベース基盤の構築
2. 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
3. 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
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

[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。この世界的な動きの中で、CO₂排出と大きな関係がある都市の電源計画・供給をはじめに、様々な都市生活に必要な不可欠となっている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。そこで、本プロジェクト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の共有を支援する「ウェブ・ベース協調基盤」を実現することにより、本プロジェクトの主な目標に大きく貢献できると考える。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このウェブ・ベース基盤において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る。

2．研究目的

都市対策グループのモデル・データベース統合基盤構築のためのサブグループにおいて、プロジェクト内での複数の専門家間の知識移転を補佐するためのウェブ・ベース協調基盤の構築を継続し、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モデルを、ウェブ・ベース基盤を通じてアクセスできる環境を構築することを研究目的とする。

3．研究方法

本年度の研究目的を達成するための研究方法は、1)前年度までに構築した動的モデルや他のメンバーによるモデルに対して、DOME(distributed object-based modeling environment)ソフトウェアを用いたウェブ・ベース協調基盤のインターフェースを構築する、2)DOMEソフトウェアの統合機能と新機能を適用して構築する電源計画・供給モデルと民生部門モデルとの統合モデルの時系列シナリオを評価する、の2点である。

4．結果・考察

(1)モデル操作を支援するウェブ・ベース基盤の構築

Models		
ID	Model Name	Modeler
1	GIS database aggregator interface	Steven Kraines
2	IO analysis CO ₂ calculator interface	Steven Kraines
13	Electricity Generation Best-Mix Model	
14	SOFC dynamic model	
15	EnergyPlus	
17	Absorption Chiller	
18	Building LCA Model	Toshiharu Ikaga
27	Demonstration Model	
55	Dynamic traffic flow model	Yoshikuni Yoshida
64	Statistical OD Traffic Assignment Model	
67	Statistical Heat Island Model	
68	IO tables in Tokyo	Yoshikuni Yoshida
76	Rooftop PV electricity generation model	Steven Kraines
79	Power Generation Best-Mix Model	
83	Simple counterflow tubular heat exchanger	Steven Kraines
981	Automobile LCA Model rebuilt 20050222	
982	PlasticBlastFurnace20040416	
983	PlasticThermalProcessing 20040416	
994	Total Building Energy Model 20050222	
991	PV Power Generation Model 20040317	
992	Convert PV power to Grid 20050221 rebuilt	
993	Product Manufacture Coefficient Model 20040608	
997	new irradiation model 20050124	
998	PV Cell Tech Model with enumeration 20050222 rebuilt	
999	Building LCA Model 20050222 rebuilt	Toshiharu Ikaga
1000	Ikaga Building Energy Model 20060323	Toshiharu Ikaga
1001	power dispatch model v9 20060409	Yasumasa Fujii
1002	Electricity power planning integrated project 20060327	Steven Kraines

図1： ウェブ・ベース基盤に登録されたモデルのリストを提示するウェブページ

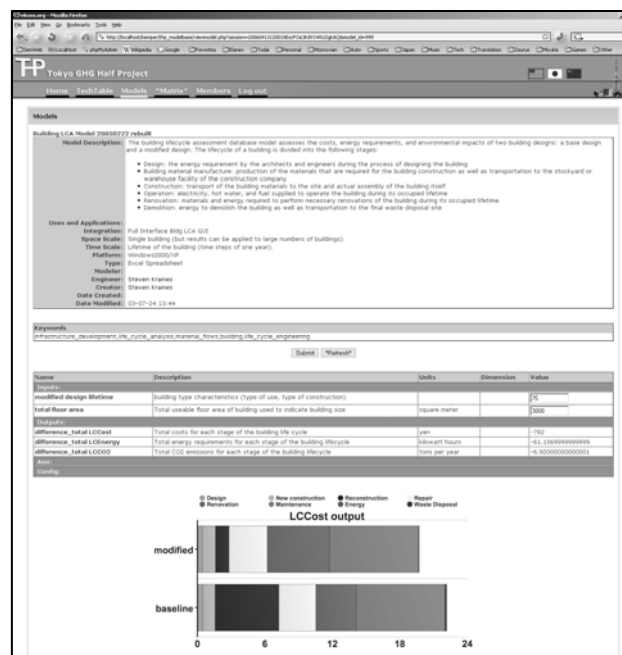


図2： ウェブ・ベース基盤上に構築されたDOMEモデルの基本画面

平成17年度は、都市対策グループのモデル・データベース統合基盤構築のためのサブグループにおいて、プロジェクト内での複数の専門家間の知識移転を補佐するためのウェブ・ベース協調基盤の構築を継続した。特に本年度は、前年度までに構築した動的モデルや他のメンバーによ

るモデルに対して、DOME (distributed object-based modeling environment)ソフトウェアを用いたインターフェースの構築を行った。例えば、ウェブ・ベース基盤のモデル・データベースにおいて、図2に示すように、モデルのパラメータを表示し、ユーザーが操作できる入力フィールドを追加した。(ただし、図1にウェブ・ベース基盤に登録されたモデルリストの提示例を示すが、現段階では全てのモデルがDOMEを通じて直接操作できるようにはなっていない。)

このような入力インターフェースを用いることにより、各ユーザーは各自の特定のシナリオを反映したモデル計算条件を入力することが可能となる。具体的にはウェブを通してモデルパラメータの変更を受け付け、DOMEソフトウェア基盤を通じて実計算を要求するためのJavaサーバを構築した。これにより、計算結果がDOMEからJavaサーバに戻され、さらにユーザーインターフェースに結果が渡される。図3にソフトウェアのスキーム図を示す。

ウェブ・ベース基盤の支援システムにより登録モデルに提供される標準的なページに加え、特定のモデルに対してはカスタマイズされた画面を構築し、DOMEサーバから返されたデータを様々な形で図示するための、進行中にデータを動的に表示する機能を加えた。

カスタマイズされたウェブページは、図4に示すように住宅における省エネルギー対策の相違による省エネルギー可能性を評価するモデルにおいて、その計算結果をサンプル結果として保持している。このモデルは、伊香賀によりMS Excelで構築されたもので、本報告の別節で詳述する。

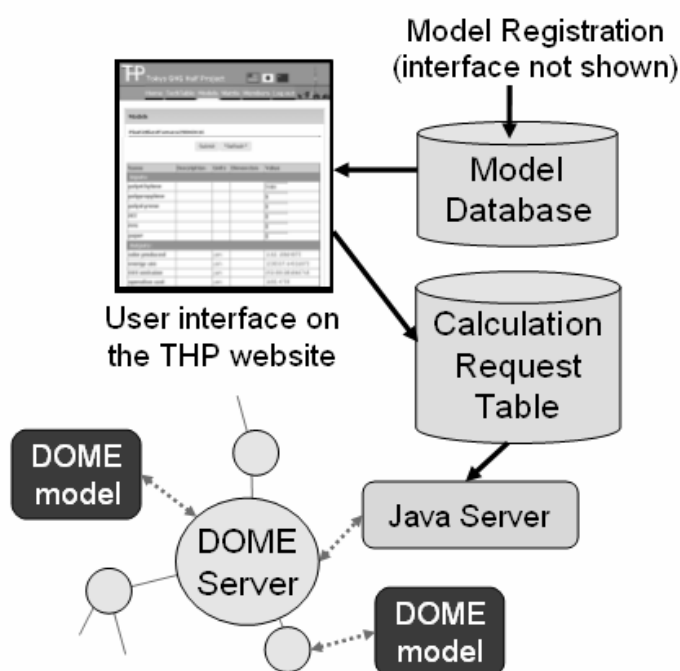


図3： DOME統合基盤とウェブ・ベース基盤を
接続するためのソフトウェアのスキーム図

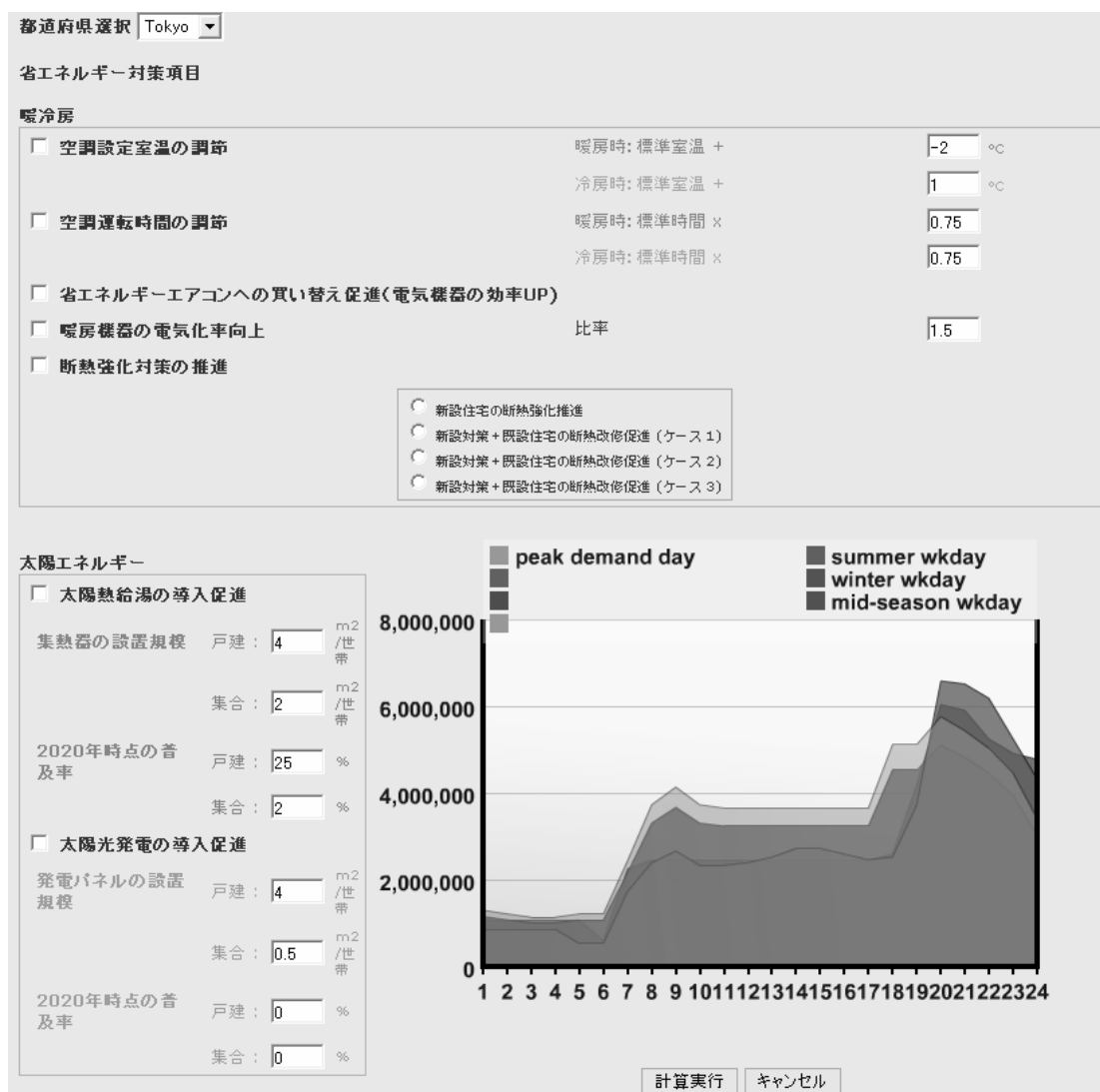


図4： 伊香賀モデルによる住宅建物エネルギー消費モデルのウェブ表示画面の例

(2) 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

DOME (distributed object-based modeling environment) モデルによるソフトウェア統合環境の開発を、マサチューセッツ工科大学のCAD研究室と共同研究を継続し、「モデル統合プロジェクト」と呼ばれるDOME内において複数モデルを時系列に繰り返し計算を可能とする一連のツールが利用可能となった。この繰り返し計算機能には、ユーザーが定義した任意の単位と開始時間、終了時間の定義に基づいたタイムカウンター機能が提供されている。各タイムステップの入力は、DOMEベクトルオブジェクト機能を用いて実行可能となり、タイムカウンターパラメータにより、各タイムステップにおいて正しい入力データが利用されることが担保されている。さらに、DOMEの繰り返し演算機能は、モデル統合プロジェクトからの出力を、タイムステップ「t」における結果をタイムステップ「t+1」にフィードバックさせるようなモデルのインプットデータとして与えることも可能となっている。

(3) DOMEの統合機能を用いた東京における電源計画・供給モデルの評価

2 節で述べたDOME統合機能により、Mathworks Matlab上の電源計画・供給モデルを統合したDOME統合モデルを構築した。従来の研究により構築された電源計画と供給モデルは、特定の地域の需要曲線として、7 季節（夏季平日、夏季休日、冬季平日、冬季休日、中間期平日、中間期休日、ピーク需要）のデータと、その地域で利用可能な電源種別を与えることにより、年間の代表7 季節日別の時間別供給量と電源種別の最適な発電容量を計算することができる。このモデルで扱うことができる電源種別は、水力、原子力、LNG火力、石炭火力、石油火力、ガスコンバインドサイクル、SOFC - ガスタービンコンバインドサイクル、揚水発電である。図 5 に電源計画・供給モデルのDOMEによる基本インターフェース画面を示す。図 6 は、グラフィックユーザーインターフェースをカスタマイズして作成した画面を示す。ウェブ・ベース基盤における電源計画モデルの画面を図 7 に示す。

図 8 に示すようなフィードバックループをDOMEモデル統合プロジェクトにより構築した。図に示すように、電源計画・供給モデルは、それぞれの電源種別において最小の発電容量と設備コストを考慮して最適な計算を行うとともに、さらにシステムの年間コストと年間CO₂排出量に基づいたCO₂税を外生的に与えて計算を行い、最適化された電源種類ごとの発電容量のコストと発電総量もあわせて出力として計算される。最小の容量は、各電源種の現状の容量をあらわしており、この容量は実際には停止することができず、次のタイムステップ（年）にこの容量を使用し、その分の設備費を支払う必要がある。

name	value	
sofc parameters		
sofc use flag	1.00000000	no unit
sofc subsidy (max 377)	0.0	yen per watt
sofc efficiency (def 0.67)	0.670000000	no unit
other input parameters		
co2 tax	0.0	yen per tonne
n_days	7.00000000	no unit
number of days represented	1 x 7	day
generation tech parameters		
installation cost	1 x 11	yen per watt
running cost	1 x 11	yen per watt-hour
upper limit	1 x 11	kilowatt
lower limit	1 x 11	kilowatt
increasing ramp constraint	1 x 11	no unit
decreasing ramp constraint	1 x 11	no unit
offline time	1 x 11	no unit
total annualized cost	3.39949753E12	yen per year
total co2 emissions	5.91842937E7	tonne per year
total annualized cost with co2 tax	3.39949753E12	yen per year
power dispatch data	168 x 11	kilowatt-hour
capacities		
generation amounts		
total power generation	2.18013337E11	kilowatt-hour
power demand data	24 x 7	kilowatt-hour

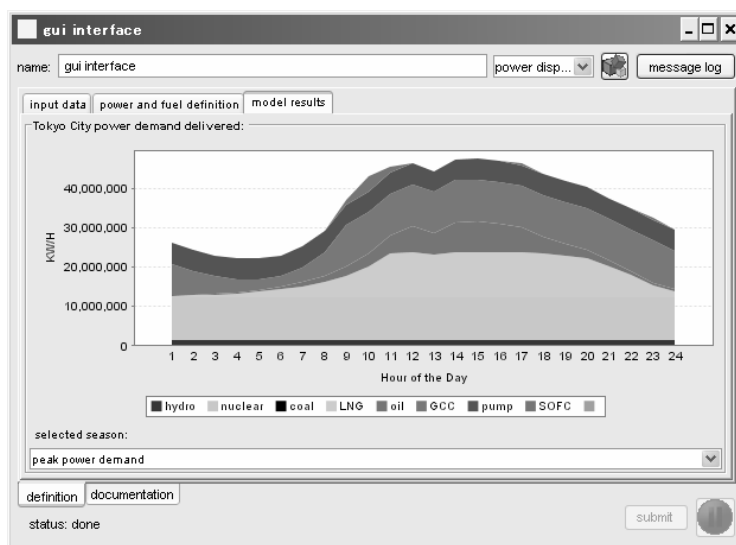


図5: 電源計画・供給モデルのDOMEによる標準インターフェース

図6: カスタマイズされた電源計画・供給モデルのグラフィックインターフェース画面

地球環境研究総合推進費S-3(脱温暖化2050研究プロジェクト)
平成17年度成果(S-3-3(9))

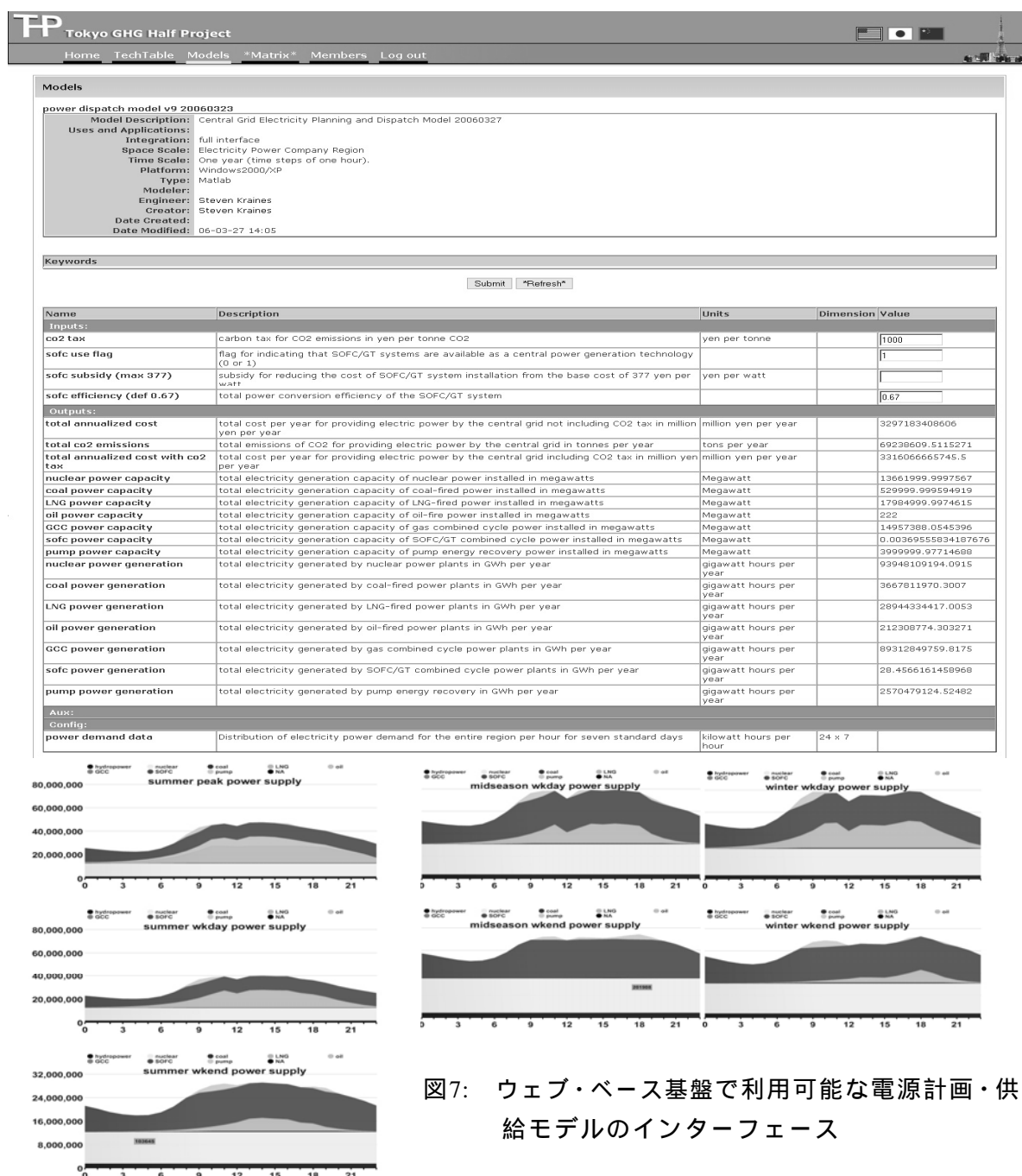


図7: ウェブ・ベース基盤で利用可能な電源計画・供給モデルのインターフェース

計算においてSOFC / GTシステムの設備コストは、基準コストである37,7000円 / kWから、SOFCの導入補助により削減されるような修正を外生的に与えるようにした。発電種類別のCO₂排出係数に基づいたCO₂税を用いて、電源種別の運転コストが変化するように設定した。これらの修正された容量コストと運転コストは、電源計画・供給モデルの最適化の過程で用いられている。

電源計画・供給モデルによる計算の後、その年のCO₂排出量と年間総コストの計算結果がDOMEベクトルオブジェクトとして記録され、さらに発電所の廃止率を提供する簡単なモデルにより、発電容量が修正される。計算で用いるこのモデルは、それぞれの電源種別の最小容量を更新する

ために、毎年10%の容量が廃止されると簡単に設定をしている。これは、電源種類別に停止率に差をつけるなど、さらに詳細な電源廃止モデルにも簡単に代替することが可能である。このように修正された各電源の容量や、SOFC / GT補助金、CO₂税率などの値が、電源計画・供給モデルの入力データとして与えられ、繰り返しループ計算がなされる。

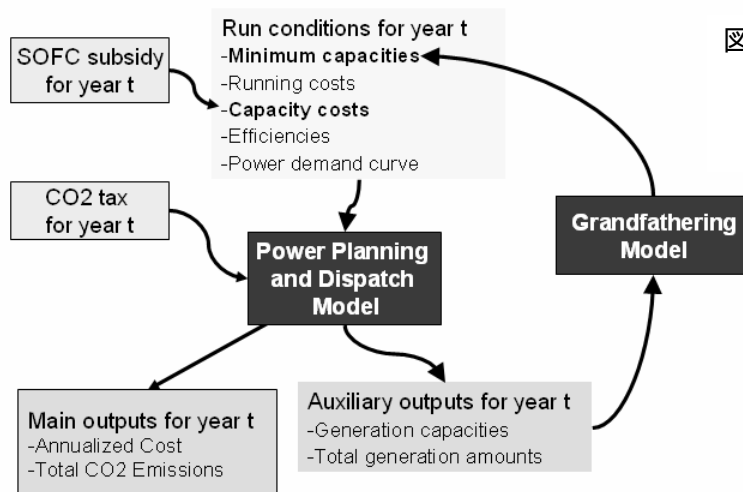


図8: DOMEによる電源計画・供給モデルもフィードバック・ループ

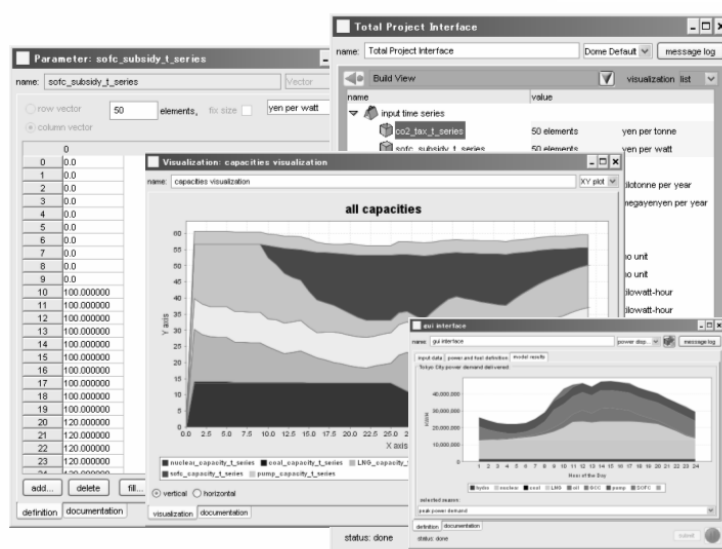


図9: 図8で示したDOMEによるモデル統合プロジェクトの画面の様子

図9に図8で示したDOMEによるモデル統合プロジェクトの画面の様子を示す。モデルの初期条件として与えられている1995年から、2045年まで、49回の繰り返しタイムステップを実行している。

最初の実行ケースとしては、最初の10年間のSOFC補助率が0円 / kWと設定し、次の10年間では100,000円 / kW、その後10年で120,000円 / kW、さらにその後10年間で90,000円 / kW、最後の10年間で0円 / kWに戻るといった設定を行った。この条件は、SOFC / GTシステムの導入補助が段階的に行われていき（設備生産のスケールメリットにより設備単価が減少し）、数十年後に補助を0にすることができるという設定である。

この計算ケースによる年間総コストとCO₂排出量の結果を図10に示す。

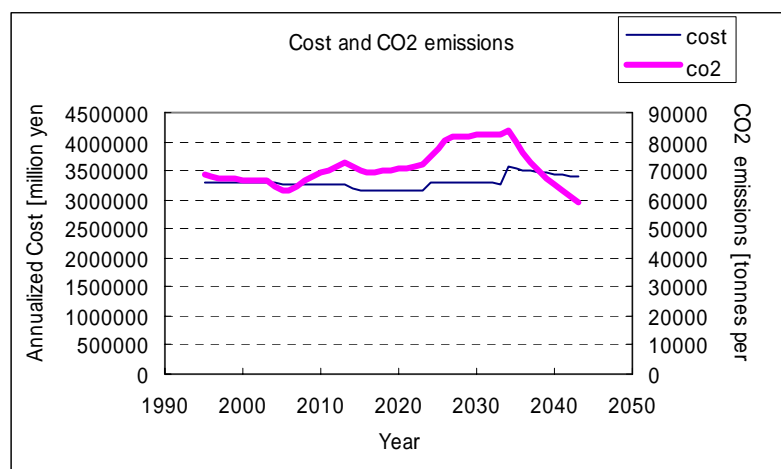


図10: SOFC / GTシステムへの補助金のみを考慮したシナリオにおける
年間総コストとCO₂排出量

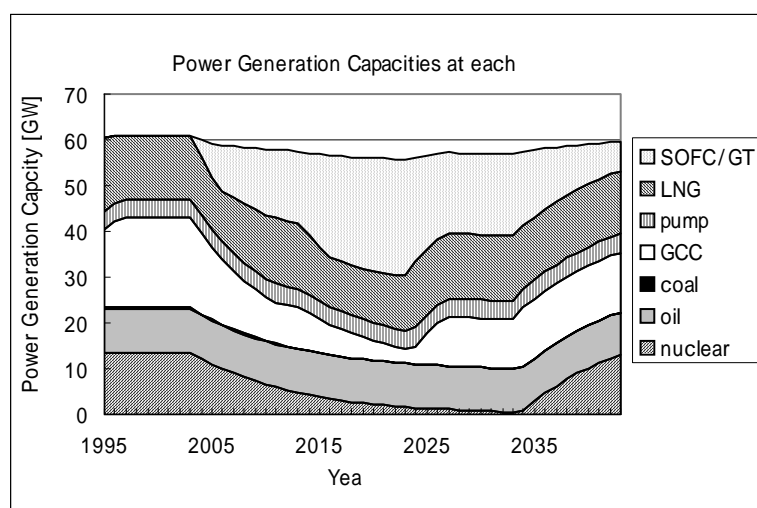


図11: SOFC / GTシステムへの補助金のみを考慮したシナリオにおける
シミュレーション期間の各電源種別の最適化容量

興味深いことに、SOFC / GTシステムへの補助金が導入された当初は、コスト及びCO₂排出量も共に減少し、その傾向は2005年頃まで継続するものの、CO₂排出量はその後2035年にSOFC / GT補助金が完全になくなるまで増加していることがわかる。2035年に補助金を廃止した後、CO₂排出量は減少しており、計算の最終年において最小の値に達している。この直感に反した結果の理由は、図11に示すように計算の各時間ステップにおいて電源種別ごとの容量の変化を考慮することより説明することができる。

図11より、SOFC / GTシステムの初期の導入は、CO₂排出強度が高い電源であるGCCやLNGの容量を削減させており、さらには、CO₂排出量がほとんどゼロである原子力発電も代替していることがわかる。2025年にSOFC / GT補助金が削減されると、SOFC / GTの容量は急速に減少し、各

電源の構成は最初の状態に戻っていくことがわかるが、一方で石炭火力発電の容量はなくなり、GCC容量もわずかに減少していることがわかる(石炭火力発電はコスト効果がなく、一つ前のタイムステップから存続されるものだけが残っていく)。

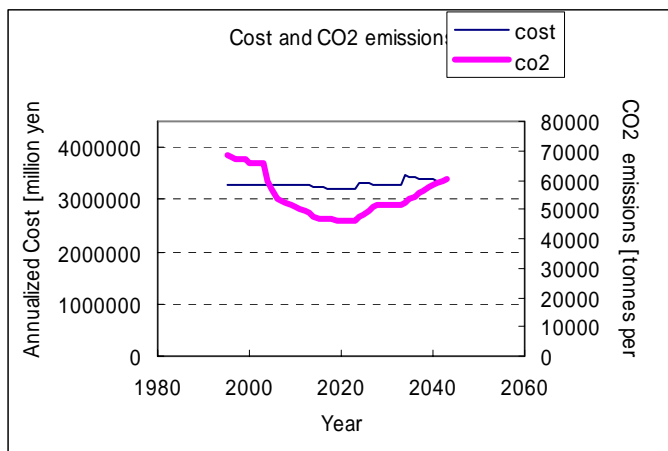


図12: SOFC / GTシステムへの補助金及びCO₂税を考慮したシナリオにおける年間総コストとCO₂排出量

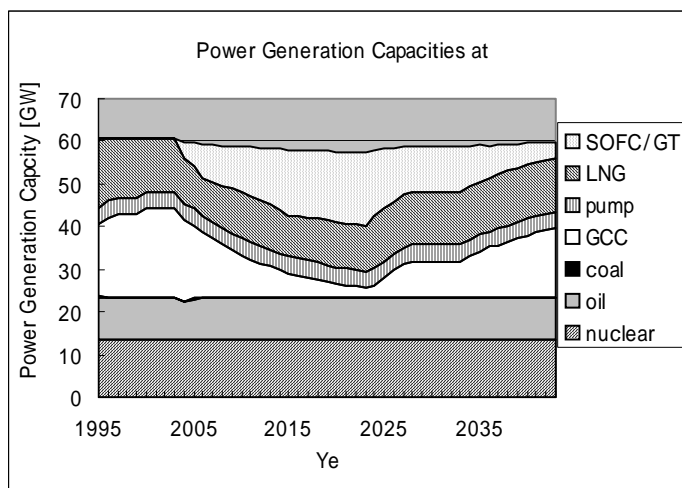


図13: SOFC / GTシステムへの補助金及びCO₂税を考慮したシナリオにおけるシミュレーション期間の各電源種別の最適化容量

さらに、最初のSOFC / GTに補助金を導入するシナリオに加えて、1トン当たり10,000円のCO₂税を2005年から導入された場合の統合モデルの計算を実施した。図12に年間総コストとCO₂排出量の計算結果を示す。図13に各時間ステップの電源種別の容量構成の推移を示す。このシナリオにおいては、CO₂税により原子力発電容量が計算期間全体にわたって最大の1995年レベルで推移していることがわかる。SOFC / GTシステムは最初のシナリオよりも導入量の増加が緩やかである一方で、SOFC / GTシステムは、GCCやLNG火力などの炭素強度のより高い電源のみを代替していることがわかる。

(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

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、前節3.において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14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。

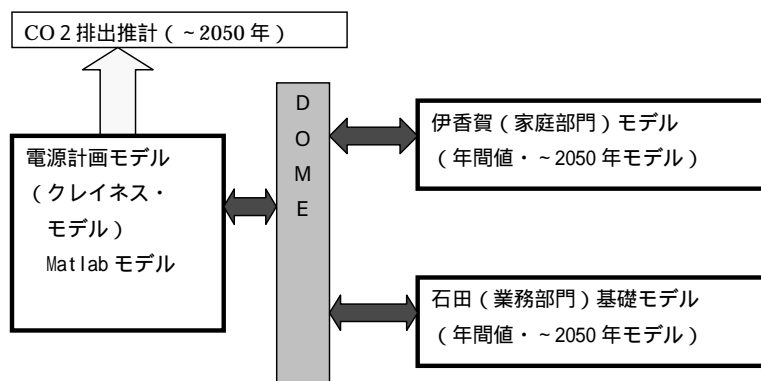


図14: 電源計画モデルと需要部門（民生部門）の統合の概要

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15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。

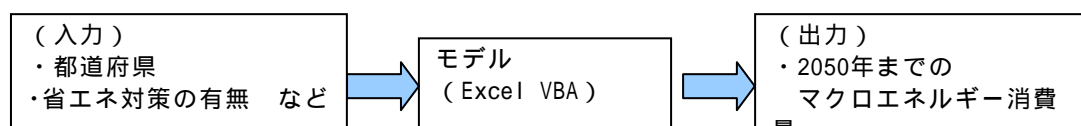


図15: 住宅エネルギー・CO₂のマクロ評価モデル

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。本研究では、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。

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やCGS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16）。

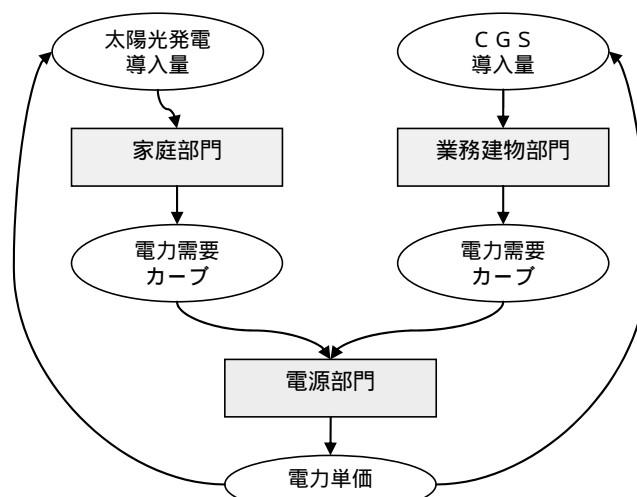


図16: 需要部門モデルと電源計画モデルのフィードバックループ



図17: 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

図17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。今後は、具体的な都市や地域において、様々なパラメータの元での対策相互の効果を評価していく必要があると考えられる。

5．本研究により得られた成果
結果・考察を参照。

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

<その他誌上発表(査読なし)>

なし

(2) 口頭発表(学会)

Steven Kraines, Toshiharu Ikaga, Tomoyuki Chikamoto, David Wallace, ISIE 2006 Annual Meeting (Stockholm, Sweden), International Society for Industrial Ecology (2006)

“Model-Integration Based Evaluation of Technologies to Promote Sustainability in the Building, Electricity, and Transportation Sectors of Tokyo, Japan”(口頭発表)

Steven Kraines, Brian Kemper, Rafael Batres, ISIE 2006 Annual Meeting (Stockholm, Sweden), International Society for Industrial Ecology (2006)

“EKOSS Ontology: A Prototype for a Domain Ontology for Industrial Ecology”(ポスター発表)

Yasuo Inoue, Yukio Yanagisawa, Steven Kraines, ISIE 2006 Annual Meeting (Stockholm, Sweden), International Society for Industrial Ecology (2006)

“Estimation of Collection Costs for Municipal Garbage Using Grid-based City Models”(ポスター発表)

(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

9．成果の政策的な寄与・貢献について

本年度の研究成果を基に、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。