

## 温暖化対策の経済性評価 - 数量モデルによる評価 -

### 1. 背景・目的

地球温暖化対策による二酸化炭素排出削減の可能性を分析するために、これまでに様々な数量モデルが開発されてきた。ここでは我が国の代表的な 6 種の数量モデルによって、京都議定書の目標を達成するために必要な経済的措置や、温暖化対策がもたらす国内経済への影響などに関して分析を行うものである。

### 2. 分析を行ったモデルの概要

#### (1) AIM エンドユースモデル

AIM エンドユースモデルは、エネルギーサービスと詳細な条件設定を行った機器を前提として省エネルギーが進む様子をシミュレートするボトムアップ型モデルである。将来必要なエネルギーサービス量を部門毎に積み上げ、そのサービスを最も経済効率的に満たす技術を選択して決定されたエネルギー効率とサービス量とから最終的なエネルギー消費量が求められる。また技術はイニシャル及びランニングコストを個別に考慮するため、炭素税等によるエネルギー価格の引き上げや補助金等による初期投資引き下げからの排出抑制を数量的に評価でき、将来の生活活動に変化なく、技術的な効率改善のみによる削減をシミュレートするものである。

#### (2) GDMEEM

GDMEEM は、マクロ経済及びそれとリンクしたエネルギー市場を対象とした動的市場均等モデルであり、想定した技術や経済的諸条件の下で将来のマクロ経済動態、ならびにエネルギー需給均衡をシミュレートするモデルである。市場均衡経路に伴う大気中への二酸化炭素排出量はリンクされたサブ・モデルによってシミュレートされ、これは排出抑制条件としても役割を果たす。よってシャドー・プライス、GDP 損失、エネルギー均衡価格の変化などから排出抑制の有無を評価することが可能となる。

#### (3) MARIA

地球環境統合モデル MARIA は、世界を 8 地域に分け、1990 年を初期時点として 1 期 10 年とする 2100 年までの超長期シミュレーションを行う非線形最適化モデルであり、国際貿易収支を含めつつ地球環境対策技術、土地利用、気候変動の戦略策定が可能である。

ただし、経済部門がマクロ化（マクロ経済活動1部門）されているため、他部門間の相互影響評価や短期的な分析には不向きな点がある。また、炭素税は限界費用変化から求めることができる。

#### (4)SGM

SGM は、国民所得勘定をベースに構築された古典派型の動学的応用一般均衡モデルであり、4つの経済主体（家計、企業、政府、外国部門）行動をモデル化し、炭素税導入によるエネルギー価格上昇が各部門に与える影響や、それによって新たに生じる財源の利用、すなわち、炭素税収を所得税還付や政府支出増加などの税収還流策が各部門の生産量や実質 GDP に及ぼす影響も考慮した分析を行うことができる。これにより経済への影響を最小にしつつ二酸化炭素排出量を削減するための炭素税と税収還流策の最適な組み合わせを求めることが可能となる。

#### (5)AIM/Material モデル

AIM/Material モデルは、AIM 日本モデルに廃棄物の排出とその処理をはじめとする環境問題を経済活動に統合させた応用一般均衡モデルベースのモデルである。このモデルは二酸化炭素のほかに廃棄物の排出を捉え、排出のみならず処理も分離して評価できる構造であるため、廃棄物最終処分量と二酸化炭素排出量に対して制約を課し、リサイクル政策等の効果を分析することが可能である。

#### (6)WWF シナリオ

WWF ジャパンによる我が国における温室効果ガス削減のためのシナリオである。シナリオの主要な要素は、利用効率の高い最新の技術革新、サービス経済への転換、ライフスタイルの変換などである。なお、新しい技術や政策提案の効果を実際にシミュレーション計算を行うにあたり、AIM エンドユースモデルを用いる。

### 3. ベースラインシナリオについて

モデル間の比較分析や削減ポテンシャル検討との比較分析を公平に行えるよう、ベースシナリオの想定は、「温室効果ガス排出削減技術シナリオ策定調査検討会」において対策技術の効果を算定するために用いられた社会・経済活動量と同一のものをを用いることとした。下表に主要な要素である経済成長率、人口、エネルギー価格の想定を示す。

#### (1) 経済成長率

2001年～2010年の経済成長率については、1997年7月に作成された経済計画「経済社会のあるべき姿と経済申請の政策方針」の想定を用いた。

表1. 経済成長率の想定

	'91-'95	'96-'00	'01-'05	'06-'10
経済成長率（年平均）	1.4%	1.0%	2.0%	2.0%

#### (2) 人口

人口の推移について、国立社会保障・人口問題研究所の中位推計（平成9年度）を用いた。

表2. 人口の想定

	1990	1995	2000	2010
人口（千人）	123,611	125,570	126,892	127,623

#### (3) 原油・石炭・天然ガス価格

原油価格は、名目値で2001年25\$から2010年30\$に推移すると想定した。LNG価格は、原油価格に連動すると想定し、石炭価格の年平均伸び率は、原油価格の年平均伸び率 - 0.5%と想定した。

表3. 原油・石炭・天然ガス価格の想定

	1990	1995	2000	2010
原油（\$/バレル）	23	18	27	30
一般炭（\$/t）	51	50	35	36
LNG（\$/t）	202	179	239	262
為替レート（円/\$）	142	96	107	120

#### (4) 京都議定書達成の目標値

以上の基本的な前提の下で、2010年時点で二酸化炭素排出量を1990年時点と比較して概ね2%下げること为目标とし、シミュレーションを行った。なお、京都議定書では2008年から2012年までに、温室効果ガス（二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、HFCs、PFCs、SF6）の排出量を1990年時点と比較して6%削減することを我が国の目標としている。今回の試算では二酸化炭素以外のガス、二酸化炭素の吸収源、排出権取引やCDMなどの柔軟性措置についてはモデルの対象としていないため、暫定的にエネルギー起源の二酸化炭素排出量を基準年（1990年）比-2%削減すること为目标とした。

#### 4. ケース設定について

各モデルは、以下に示すようなケース毎に必要な経済的措置（炭素税率）や国内経済への影響、二酸化炭素排出量などの推計を行なう。

##### (1) AIM エンドユースモデル

###### 基準ケース（技術固定ケース）

エネルギー消費技術の使用シェアが将来にわたり変化しないと想定したケース  
対策ケース 1（炭素税ケース）

炭素トンあたり 3 万円の炭素税を導入したケース。炭素税が導入されることによってエネルギーコストが上昇するため、省エネ投資に対する動機付けが働き、初期投資コストが高い技術の導入が進む。その結果として、どの程度二酸化炭素排出量が削減されるかが示される。

###### 対策ケース 2（炭素税+補助金ケース）

炭素トンあたり 3 千円の炭素税を導入し、その税収を二酸化炭素削減技術・設備導入の補助金として還元させるケース。より低い税率であるが、税収を地球温暖化対策の目的に限定して活用することで、どの程度二酸化炭素排出量が削減されるかが示される。

##### (2) GDMEEM

###### 基準ケース（BaU ケース）

新たに追加的な対策をとらないと仮定したケースであり、政策評価のための比較基準としての役割を果たす。

###### 対策ケース

2010 年において基準年比-2%削減するために必要な炭素税（税収は全額経済に中立的に還流）を推計する。また、同時に GDP や経済構造も推計されるため、目標を達成するために生じる経済的ロスや構造変化が示される。

##### (3) MARIA

###### 基準ケース（BaU ケース）

新たに追加的な対策をとらないと仮定したケースであり、政策評価のための比較基準としての役割を果たす。日本以外の地域は基本的に IPCC-B2Marker をトレースした。

###### 対策ケース

2010 年において基準年比-2%削減するために必要な炭素税（税収は全額経済に中立的に還流）を推計する。また、同時に GDP も推計されるため、目標を達成するため

に生じる経済的ロスが示される。

#### (4) SGM

##### 基準ケース (BaU ケース)

新たに追加的な対策をとらないと仮定したケースであり、政策評価のための比較基準としての役割を果たす。

##### 対策ケース

2010 年において基準年比-2%削減するために必要な炭素税( 税金は全額経済に中立的に還流 ) を推計する。エネルギー価格の上昇がもたらす経済的影響だけでなく、税金還流策がもたらす影響も推計される。以下の 3 ケースの還流方法について、それぞれシミュレーションを行なう。

##### ・ 対策ケース 1 ( 政府支出増加ケース )

炭素税金による増収分だけ政府支出( 政府消費支出と政府資本支出 ) を増加させるケース

##### ・ 対策ケース 2 ( 財政赤字削減ケース )

炭素税金の分だけ財政収支を改善するために、炭素税金を用いて国債の償還を行なうケース

##### ・ 対策ケース 3 ( 所得税還付ケース )

炭素税金による増収分を所得税還付による家計への税金還流の財源にあてるケース

#### (5) AIM/Material モデル

##### 基準ケース (BaU ケース)

新たに追加的な対策をとらないと仮定したケースであり、政策評価のための比較基準としての役割を果たす。

##### 対策ケース

2010 年において基準年比-2%削減するために必要な炭素税( 税金は全額経済に中立的に還流 ) を推計する。また、同時に GDP も推計されるため、目標を達成するために生じる経済的ロスが示される。

#### (6) WWF シナリオ

##### 対策ケース ( WWF シナリオ導入ケース )

AIM エンドユースモデルをベースとし、その対策ケースにさらに先駆的な温暖化対策技術の導入シナリオやライフスタイルの変化シナリオなどを加えたものである。

AIM エンドユースモデの対策ケースに、利用効率の高い最新の技術革新、サービス経済への転換、ライフスタイルの変換などのシナリオを加えたものである。

表5 . モデルの概要とケース設定

モデル名	開発者 / 分析者	モデルの概要	ケース設定
AIM エンドユースモデル	国立環境研究所 京都大学	エネルギーサービスと詳細な条件設定を行った機器を前提として省エネルギーが進む様をシミュレートするボトムアップ型モデル	基準ケース (技術固定ケース) 対策ケース1 (炭素税ケース) 対策ケース2 (炭素税+補助金ケース)
GDMEEM	東京大学 後藤則行	マクロ経済及びそれとリンクしたエネルギー市場を対象とした動態的市場均等モデルであり、想定した技術や経済的諸条件の下で将来のマクロ経済動態、ならびにエネルギー需給均衡をシミュレートするモデル	基準ケース (BaU ケース) 対策ケース
MARIA	東京理科大学 森 俊介	地球環境統合モデル MARIA は、世界を 8 地域に分け、1990 年を初期時点として 1 期 10 年とする 2100 年までの超長期シミュレーションを行う非線形最適化モデル。本分析には日本モジュールを用いる。	基準ケース (BaU ケース) 対策ケース
SGM	国立環境研究所 日引 聡 米国バットル研究所	SGM は、国民所得勘定をベースに構築された古典派型の動学的応用一般均衡モデルであり、4 つの経済主体 (家計、企業、政府、外国部門) 行動をモデル化している。	基準ケース (BaU ケース) 対策ケース1 (政府支出増加ケース) 対策ケース2 (財政赤字削減ケース) 対策ケース3 (所得税還付ケース)
AIM/Material モデル	国立環境研究所 増井利彦 京都大学	AIM 日本モデルに廃棄物の排出とその処理をはじめとする環境問題を経済活動に統合させた応用一般均衡モデルベースのモデル	基準ケース (BaU ケース) 対策ケース
WWF シナリオ	WWF 日本 鮎川ゆりか システム技術研究所 槌屋治紀	AIM エンドユースモデルをベースとし、その対策ケースにさらに先駆的な温暖化対策技術の導入シナリオやライフスタイルの変化シナリオなどを加えたものである。	対策ケース (WWF シナリオ導入ケース)

# AIM エンドユースモデルによるシミュレーション

AIM プロジェクトチーム

## 1. モデルの概要

AIMは、アジア太平洋地域を中心に、温室効果ガスの発生及び削減対策とその結果としての気候変動による環境影響を評価する目的で国立環境研究所及び京都大学のプロジェクトチームにより開発されているものである。

本検討では、AIMのうち「エンドユースモデル(エネルギー最終消費についてのモデル)」の部分を用いて行うこととする。エンドユースモデルはエネルギーサービスとその機器に関して詳細な条件設定を行い、それを前提にして省エネルギーが進んでいく模様をシミュレートすることができる。

これは、いわゆる「ボトムアップ型」のモデルであり、将来必要となるエネルギーサービス量を部門毎に外生的に積み上げ、それぞれの部門のエネルギーサービスを満たすのに最も経済効率的な技術を選択する。そしてその結果決まるエネルギー効率をエネルギーサービス量と掛け合わせることによって、最終的なエネルギー消費量が決まる。技術導入の初期コスト運転時のエネルギーコストを勘定して個々の技術が選択されるため、炭素税等によりエネルギー価格が政策的に引き上げられ場合や補助金等により初期投資を引き下げた場合にどの程度まで排出量を抑制できるかを数量的に評価できる。このモデルでは、マクロ経済の成長率や部門毎の産出量などを外生的に与える。対策の如何によらず、各部門がそれぞれで極めて経済合理的な技術選択を行う。そのため、本モデルでは、将来のエネルギーサービス量を減らすことなく、すなわち将来の生産活動や生活に変化無く、技術的な効率改善のみによってどこまで二酸化炭素を削減できるかがシミュレーションされる。また逆に、望ましい水準の技術的な効率改善を動機づけるために必要な対策について、シミュレーションによって明らかにすることもできる。他方、エネルギー価格の上昇が直接的にエネルギー需要を抑制したり、貯蓄を減少させたりする関係はモデル分析の場外に置かれる。

同モデルの基本構造は次図のとおりである。

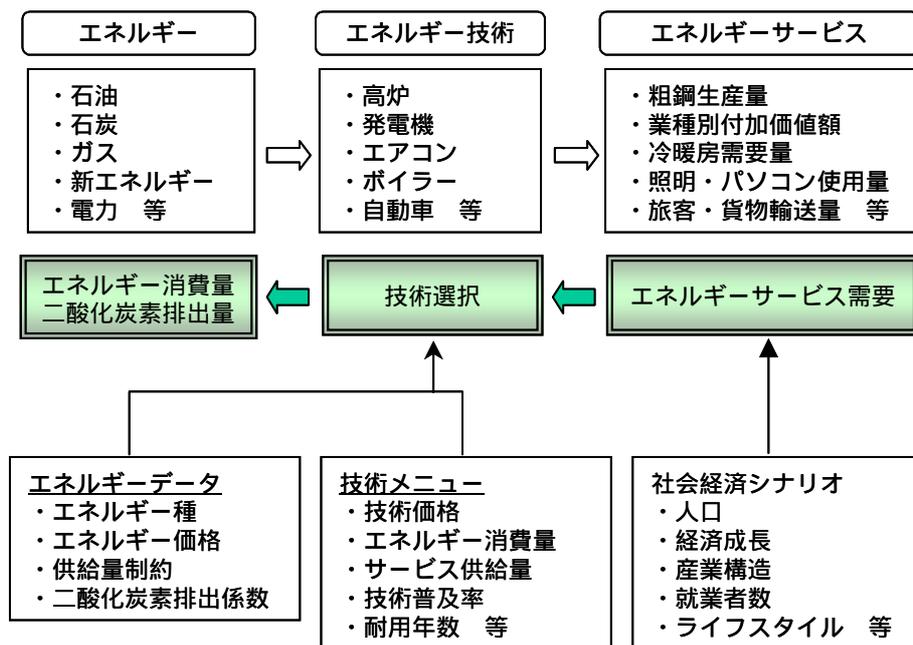


図1 . AIM エンドユースモデルの概要

表1 . AIM エンドユースモデル 省エネ技術・新エネ技術

産業部門	鉄鋼	石炭調湿装置 自動燃焼制御 次世代コークス炉 乾式コークス消火設備 COG 顕熱回収設備 自動点火装置 主廃熱回収 クーラー廃熱回収 高炉(廃プラ利用) 乾式高炉炉頂圧発電 密閉式転炉ガス回収装置 LDG 顕熱・潜熱回収 スクラップ予熱 直立式電気炉 熔融還元炉 連続鋳造法 熱片挿入 直送圧延 高効率加熱炉 熱延ミル加工熱処理装置 コイル巻取調整装置 高効率連続焼鈍設備
	セメント	堅型ミル 改良型キルンバーナ 流動床焼成炉 高効率クリンカクーラ 予備粉砕機 堅型ミル 廃熱発電 コンバインドサイクル発電 高炉セメント フライアッシュセメント
	石油化学	高性能ナフサ分解装置 ナフサ接触分解 電力回収ガスタービン 高性能ポリエチレン装置 高性能ポリプロピレン製造装置 高効率工業炉 酸素制御装置 高性能ボイラー コンバインドサイクル自家発電
	紙パルプ	直接苛性化 予備浸透型蒸解装置 高性能パルプ洗浄装置 液膜流下型蒸発缶 酸素脱リグニン装置 ディフューザー漂白装置 高濃度抄紙 高性能面圧脱水装置 高性能ドライヤーフード プレストライニング、インパルスドラインク 高性能サイズプレス装置 酸素制御装置 レジェネボイラ 高効率黒液ボイラ
	その他製造業	酸素制御装置 レジェネボイラ 高効率工業炉 インバータ制御 高効率モータ リパワリング コンバインドサイクル発電
家庭部門	省エネ型エアコン 潜熱回収型給湯器 CO2 冷媒給湯器 太陽熱温水器 ソーラーシステム 家庭用燃料電池 白熱灯型蛍光灯 小電力型安定器蛍光灯 インバータ蛍光灯 Hf インバータ蛍光灯 省エネ型冷蔵庫 省エネ型 TV 省エネ型 VTR 省エネ型ステレオ 省エネ型 CD ラジカセ 太陽光発電	
業務部門	省エネ型エアコン ガスタービンコジェネレーション 燃料電池コジェネ 潜熱回収型給湯器 太陽熱温水器 未利用エネルギー利用 Hf インバータ照明(照度調整, タイマ制御) センサー付き照明 高輝度誘導灯 省エネ型計算機 省エネ型複写機 省エネ型空調搬送動力(VAV 制御, 低圧損) 太陽光発電	
運輸部門	低燃費ガソリン自動車(省エネ基準レベル, GDI 搭載車, CVT 搭載車) 低燃費ディーゼル自動車(省エネ基準レベル) ガソリンハイブリッド自動車 電気自動車 天然ガス自動車 ディーゼルハイブリッドバス	

\* 省エネ型エアコン, 省エネ型冷蔵庫, 省エネ型 TV, 省エネ TVR : 現行省エネ基準機種(1997 年最高機種レベル)と 2000 年最高機種の 2 種の技術を分析の対象とした。

## 2. ケース設定

AIM エンドユースモデルでは、基準ケースに加え、炭素税により二酸化炭素排出量の削減を図るケース、さらに炭素税を導入しその税収を省エネルギー設備導入のための補助金として還流させる 2 種類の対策ケースについて二酸化炭素排出量の推計を行う。

AIM エンドユースモデルでは、基準ケースに加え、炭素税により二酸化炭素排出量の削減を図るケース、さらに炭素税を導入しその税収を省エネルギー設備導入のための補助金として還流させる 2 種類の対策ケースについて二酸化炭素排出量の推計を行う。

### 基準ケース（技術固定ケース）

エネルギー消費技術の使用シェアが将来にわたり変化しないと想定したケース

### 対策ケース 1（炭素税ケース）

炭素トンあたり 3 万円の炭素税を導入したケース。炭素税が導入されることによってエネルギーコストが上昇するため、省エネ投資に対する動機付けが働き、初期投資コストが高い技術の導入が進む。その結果として、どの程度二酸化炭素排出量が削減されるかが示される。

### 対策ケース 2（炭素税+補助金ケース）

炭素トンあたり 3 千円の炭素税を導入し、その税収を省エネルギー整備導入の補助金として還元させるケース。より低い税率であるが、税収を地球温暖化対策の目的に限定して活用することで、どの程度二酸化炭素排出量が削減されるかが示される。

## GDMEEM (Goto's Dynamic Macroeconomic-Energy Equilibrium Model) によるシミュレーション

東京大学大学院総合文化研究科国際社会科学専攻  
後藤 則行

### GDMEEMの基本的特徴 (図1参照)

GDMEEM (現在、version 8) はマクロ経済 (部門分割)、及びそれと相互連関的にリンクしたエネルギー市場からなるシステムを対象とした動態的市場均衡モデルであり、想定された技術・経済的諸条件の下で将来のマクロ経済動態、ならびにエネルギー需給均衡をシミュレート (模擬実験) する。

GDMEEMは、市場の柔軟な調整機能を主体とする多分に規範的な性質を有するモデルであり、長期的かつマクロ経済的観点から種々の状況要因の影響分析、経済・エネルギー・環境政策のフィージビリティ (実行可能性) と有効性の評価など、多様なシナリオ分析を主要な目的として構築されたものである。

モデルは相当規模の非線形連立方程式体系として記述されるが、非線形関数 (生産関数、効用関数、エネルギー供給関数等) を区分的線形近似し、経済的競争均衡解と最適化問題における解の数学的同値性を基礎に、線形最適化問題 (変数約8,000個、制約式約4,000本; ただし、線形近似の精度に依存) の形で定式化され、強力な線形計画法のアルゴリズムにより容易に解を求めることができる (パソコンで数分)。

最適解については、次のような市場均衡概念に基づく経済学的解釈が可能である。すなわち、産業用エネルギー消費主体 (非エネルギー財の生産者) は、エネルギー価格に応じてその需要を決定し、生産によって生み出される利潤を最大化する (経済学における基本的な生産者行動理論)。民生部門におけるエネルギー消費者は、所与の所得の下でエネルギー価格に応じて消費者効用を最大化する (同じく、消費者行動理論)。そして、これら両者の最適行動がエネルギー需要関数を定義する。

他方、競争的なエネルギー生産者はモデルで実態的、あるいは潜在的に利用可能性を想定された資源、変換技術オプション等で構成される経済的・技術的条件の下で費用最小で供給を行い (経済効率的な資源・技術選択)、これがエネルギー供給関数を定義する。そして、市場均衡はこれら需要曲線と供給曲線の交点で達成され、このときマクロ経済的付加価値 (民生部門における消費者効用も含めて) は最大になる。

均衡経路に伴う大気中へのCO<sub>2</sub>排出量はリンクされたCO<sub>2</sub>サブ・モデルによってシミュレートされる。また、このサブ・モデルはCO<sub>2</sub>排出量抑制が課された場合の制約条件としての役割も果たす。即ち、CO<sub>2</sub>抑制策が講じられた場合、モデルは想定された諸制約条件の下で経済 (産業ならびに民生部門) が市場効率 (最小費用) 的な対応をした場合の状況を描写する。そして、両者 (抑制の有無) の差 (政策の影響) は、抑制に伴う機会費用 (シャドウ・プライス)、GDP損失 (成長率低下)、各部門における諸変数の変化、エネルギー均衡価格上昇とそれに伴う需要減少やエネルギー代替等の指標によって評価される。

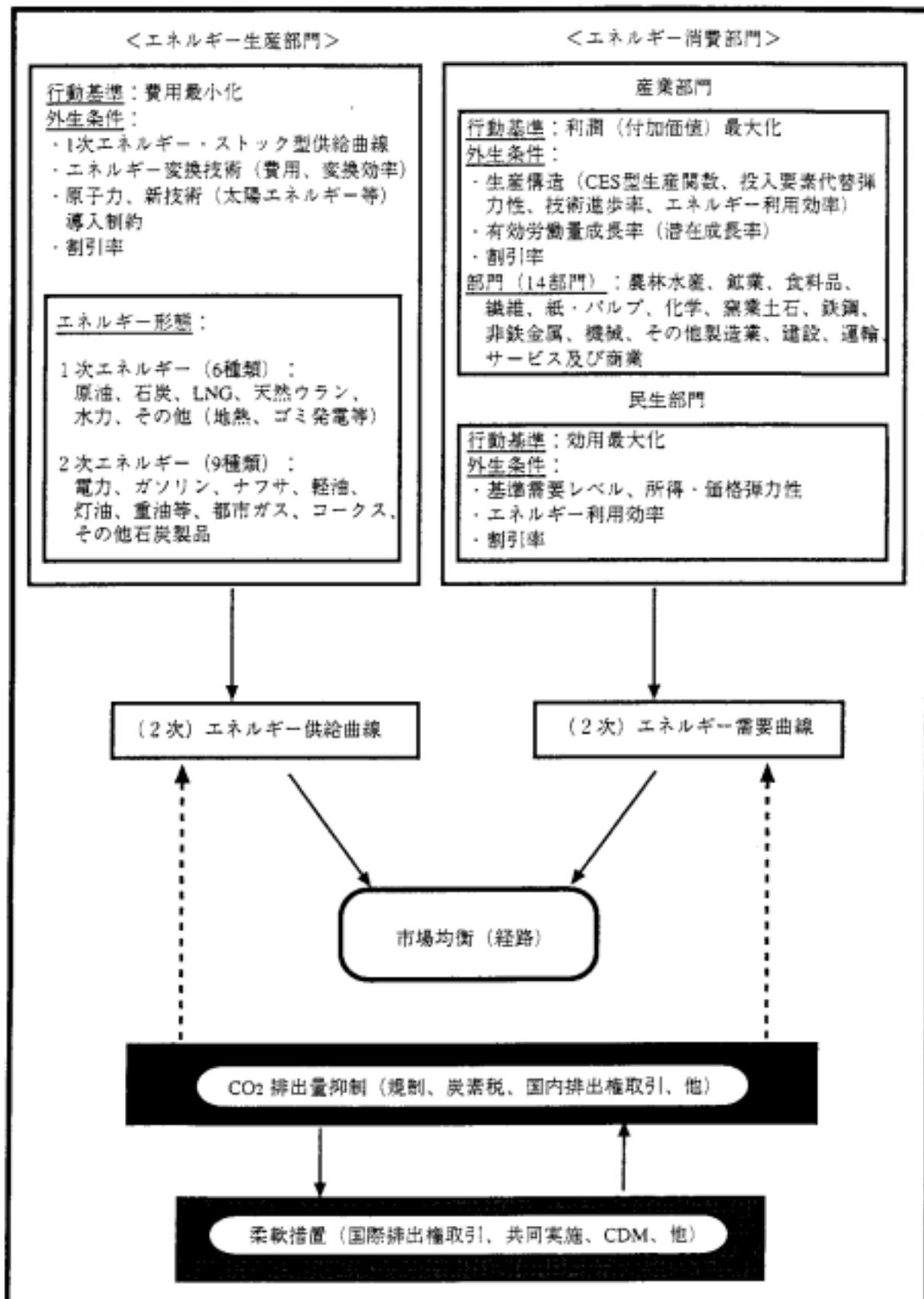


図1 GDMEEMの基本構造

### モデルの基本特性に関する簡単な数値例（参考1）

シミュレーション結果の解釈を助けるために、モデルの依拠する理論的背景を用い、きわめて概略的にCO<sub>2</sub>排出抑制のマクロ経済的影響を考察する。以下は、後述モデルで概ね控えめな計算結果が得られる（と評価される？）ことの根拠確認のために試みられたものである。したがって、適時大きな近似と簡略化が行われている。

#### エネルギー価格変化に対する生産調整

議論の出発点は、初等経済学において馴染みのものである。今、標準的な生産要素である資本（K）と労働（L）にエネルギー（Q）を加えた3種類の投入要素からなる生産関数（マクロ経済、あるいは特定の製造部門）を、 $Y = Y(K, L, Q)$  とする。ここに、エネルギー投入（Q）は、Yがマクロ経済の場合は外国から輸入、特定の製造業の場合は他部門（エネルギー部門）から購入されるものとする。なお、生産関数Yは、通常仮定される諸条件（一次同次性、各投入要素に関する一次偏導関数>0、各投入要素間の代替性等）を満たす。以下において、要点のみを簡潔に示すため、説明上資本と労働を一定（しかし、それらのレントは変化）と仮定する。ただし、前提条件の変更（例えば、賃金を一定とした労働雇用による調整等）、緩和によって、主要な論点は概ね変わらないことを付け加えておく。唯一の必須条件は、利潤最大化の条件の下にエネルギー投入量は最適水準に決定されるということである。

今、 $P_Q$  を最終財で測った実質エネルギー価格としよう。エネルギー投入量が利潤最大化（すなわち、Maximize:  $Y(K, L, Q) - P_Q Q$ ）によって決定されるならば、以下の最適条件が導かれる。

$$\partial Y / \partial Q = P_Q \quad \dots\dots\dots (1)$$

上の関係式は、最適なエネルギー投入量はその限界生産物が費用（価格）に等しくなる点で決まることを示している。（1）式をQについて解くと、エネルギー派生需要関数  $Q = D(K, L, P_Q)$  が求められる。さて、 $G = Y - P_Q Q$  を資本および労働に帰属する実質付加価値生産額（あるいは、実質所得）とする。これに導出されたエネルギー派生需要関数  $Q = D(K, L, P_Q)$  を代入すると、いわゆる実質所得関数  $G = G(K, L; P_Q)$  が得られ、以下のような双対関係が成り立つ。

$$\partial G / \partial P_Q = \partial (Y - P_Q Q) / \partial P_Q = -Q \quad \dots\dots\dots (2)$$

YとGの関係について、簡単にチェックする。関数Yは3投入要素（K、L、Q）について線形同次であるから、関数GはKとLに関して線形同次になり、各々の限界生産物は互いに等しい（すなわち、 $\partial Y / \partial K = \partial G / \partial K$ 、 $\partial Y / \partial L = \partial G / \partial L$ ）。よって、オイラーの定理により  $G = (\partial G / \partial K)K + (\partial G / \partial L)L$  が成り立ち、これは実質所得（付加価値）Gが、各々の限界生産物にしたがって資本と労働に完全に分配されることを示す。さて、外生的なエネルギー価格（ $P_Q$ ）の変化を考えると、（2）式より、次式が導かれる。

$$(\partial G / \partial P_Q)(P_Q / G) = -P_Q Q / G = -P_Q Q / (Y - P_Q Q) = -s_Q / (1 - s_Q) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $s_Q$  はエネルギー・シェア（粗生産に占めるエネルギー費用の比率）である（ $s_Q = P_Q Q / Y$ ）。（3）式は、実質所得のエネルギー価格に対する部分弾力性は、粗生産に占めるエネルギー・シェアと付加価値生産額の比率の比に等しいことを示している。

次に、価格変化に対するエネルギー需要の反応を考察しよう。関数Yに弱分離可能性、 $Y = Y(N(K, L), Q)$ 、を仮定し、 $\sigma (< 0)$  をCES型生産関数を想定した場合の非エネルギー投入要素（N：資本と労働の複合）とエネルギー（Q）間の代替弾力性とする。 $R_N$  をNのレントとすると、以下の式が成り立つ。

$$Q/N = (P_Q/R_Q)^\sigma \quad \dots\dots\dots (4)$$

よって、Nが一定の条件の下では、エネルギーの価格変化に対してそのレントが均衡条件を満たすように調整され（即ち、 $dR_N/dR_N = -[s_Q/(1-s_Q)](dP_Q/P_Q)$ ）、エネルギー需要の変化率は以下で示される、

$$dQ/Q = \sigma[1 + s_Q/(1-s_Q)](dP_Q/P_Q) = \sigma[1/(1-s_Q)](dP_Q/P_Q) \quad \dots\dots\dots (5)$$

#### 数値例（粗い概算値）

マクロ経済全体について推計し、以下の数値が得られたと仮定しよう（推計値、あるいは実測値）、

$$s_Q = 0.039 \text{ (計画期間中の平均)} \quad \text{〔本モデルの試算結果より*〕}$$

$$\sigma = -0.70 \text{ (全産業部門の平均)} \quad \text{〔回帰推定による〕}$$

今シナリオとして、2010年にCO<sub>2</sub>排出量を約-17.6%（対ベースライン）の水準に抑制するには約16.4%（対ベースライン）のエネルギー消費節減が必要であると想定する（注：これらの数値は、最近のシミュレーション結果より採用\*）。このとき、（5）より、

$$dP_Q/P_Q = (dQ/Q)(1-s_Q)/\sigma = (-0.164)(1-0.039)/(-0.70) = 0.225$$

すなわち、上記のエネルギー需要量の減少を価格効果によって達成するためには、エネルギー価格が約22.5%（2010年）上昇する（たとえば、炭素税によって）必要があることを意味する。ただし、実際のモデルには民生部門（弾力性の値は小さく、約-0.2）、およびエネルギー代替に硬直性等が仮定されているため（石炭は自動車燃料にはならない）、先の試算結果では\*約51.6%の価格上昇（炭素税=約¥35,000/tCに相当）となった。そして、以下、この試算値を基にそのマクロ経済への影響を概算すると、

（3）よりマクロ経済部門（産業部門）の税引き後の収益減少分（比率）は、エネルギーシェアを価格上昇前後の平均値で近似して（ $s'_Q = (1+1.516)/2 = 0.049$ ）、

$$dG/G = -[s'_Q/(1-s'_Q)](dP_Q/P_Q) = -[(0.049)/(1-0.049)](0.516) = -0.0266$$

ただし、このうち一部は納税分であり（所得移転にすぎず、損失ではない）、その税収分（比率）は、

$$(dP_Q/P_Q)s'_Q(1-0.164) = (0.516)(0.049)(0.837) = 0.0212$$

よって、税収の中立性を仮定すれば、マクロ経済的影響（損失、比率）は、

$$-0.0266 + 0.0212 = -0.0054$$

すなわち、約-0.54%\*\*（対ベースラインGDP比）と概算される。

\*「温暖化対策税を活用した新しい政策展開」、環境庁企画調整局、大蔵省印刷局、平成12年6月30日

\*\*上記報告書における推定値は-0.68%であり、差がある。これは、ここではモデルの基本構造を説明するために均衡価格を用いてエネルギーシェアを仮定した（そして、本メモの文脈では当価格でエネルギーは輸入されると仮定）が、この価格には国内エネルギー産業の付加価値分も含まれるため多分に粗い近似となっていること、エネルギー代替を無視したこと、民生部門を分けて考えなかったこと、などによる。これらを考慮すれば、むしろ、後述モデルで「なぜ1%に満たない軽微なマクロ経済的損失と評価されるのか？」の理論的背景のエッセンスの確認という意味では、十分に近い値が得られたと言える。

（注）後述モデルで示される、こうした軽微なマクロ経済的損失は各産業部門間の不均一な損失（所得移転効果；納税分を含めたエネルギー多消費産業の収益減は10%を超える（鉄鋼）ことにもなる）と表裏一体であり、社会的観点（公平性等）からは影響が軽微と評価することは正しくない。両者はトレード・オフの関係にあり、適切な補完措置と組み合わせると有効な対応策が見い出されると解釈すべきである。

モデルの数学的定式化（参考2）

A. 目的関数

$$\text{Maximize } \Phi = \sum_{t=0}^T [AV(t) + NU(t)]/(1+r)^t = \sum_{t=0}^T [F(t) + U(t) - C(t)] / (1+r)^t \quad \text{..... (1)}$$

$$F(t) = \sum_k f(k'; t) = \sum_k A(k'; t) [a(k')Q(k'; t)^{1+\rho k'1/\rho k'} + b(k')N(k'; t)^{1+\rho k'2/\rho k'}]^{1+\rho k'1/\rho k'} \quad \text{..... (2)}$$

$$U(t) = \sum_{k''} u(k''; t) = \sum_{k''} \int_0^{Q(k''; t)} p(q(k''; t) dq(k'')) = \sum_{k''} B(k''; t) Q(k''; t)^{1+\rho k''/\rho k''} \quad \text{..... (3)}$$

$$C(t) = \sum_{i,h,j,k} [\lambda(i, j; t)X(i, j; t) + \mu(i, h, j; t)Y(i, h, j; t) + \nu(j, k; t)Z(j, k; t)] \quad \text{..... (4)}$$

- AV = 非エネルギー産業部門における純生産（付加価値）
- NU = 民生部門におけるエネルギー消費者純効用
- F = 非エネルギー産業部門における粗生産
- U = 民生部門におけるエネルギー消費者効用
- C = エネルギー生産、変換、および輸送のための総費用
- f = 各産業部門別生産関数（CES型生産関数）
- A = 各産業部門別技術進歩係数
- Q = 各部門別エネルギー均衡需要量
- N = 各産業部門別非エネルギー生産要素（労働・資本の複合形）投入量
- u = 各民生部門エネルギー消費者効用関数
- B = 各民生部門における国民所得とエネルギー需要（基準量）の関係を表わす係数
- p = 各民生部門エネルギー（逆）需要関数
- X = 1次から2次へのエネルギー変換プラント建設量（ストック）
- Y = 1次から2次へのエネルギー変換量
- Z = 2次エネルギー輸送量
- r = 割引率
- $\rho$  = 各産業部門別エネルギー・非エネルギー投入要素間の代替弾力性
- a, b = 各産業部門別生産要素の投入比率を表わす係数
- $\epsilon$  = 各民生部門別エネルギー需要の価格弾力性
- $\lambda$  = 資本費
- $\mu$  = 2次エネルギー生産費（資本費を除く）
- $\nu$  = 輸送費
- i = 1次エネルギーの種類
- h = 各1次エネルギーの費用ランク（供給曲線のステップ状近似）
- j = 2次エネルギーの種類
- k = エネルギー需要部門
- k' = 産業部門
- k'' = 民生部門
- t = 時刻
- T = 計画期間

B. 制約条件

(B.1) 基本変数の動態的關係

$$\sum_h Y(i, h, j; t) \leq \sum_{u=0}^t \zeta(i, j; u)X(i, j; u), \quad \text{all } i, j, t \quad \text{..... (5)}$$

- $\zeta$  = プラントの稼働率
- t = プラントの寿命

(B.2) 1次エネルギー供給制約

$$\sum_{t=0}^T \left[ \sum_j [Y(i, h, j'; t) / \eta(i, j')] + V(i, h; t) \right] \leq R(i, h), \quad \text{all } i, h \quad \text{..... (6)}$$

$$V(i, h; t) \geq Y(i, h, j''; t) / \theta(i, j''), \quad \text{all } i, h, j'', t \quad \text{..... (7)}$$

- R = 1次エネルギー（種類、費用ランク別）供給可能量  
 V = 分離プロセス（複数の2次エネルギー形態の生産）向け1次エネルギー量  
 $\eta$  = エネルギー変換効率（単一プロセス）  
 $\theta$  = エネルギー変換効率（分離プロセス）  
 $f$  = 単一プロセスより生産される2次エネルギーの種類  
 $f'$  = 分離プロセスより生産される2次エネルギーの種類

(B.3) 2次エネルギー需給バランス

$$\sum_i \sum_h Y(i, h, j; t) \geq \sum_k Z(j, k; t), \text{ all } j, t \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\sum_j \xi(j, k) Z(j, k; t) \geq Q(k; t), \text{ all } k, t \quad \dots\dots\dots (9)$$

- $\xi$  = 輸送及び利用効率

(B.4) 核燃料サイクル・バランス条件

$$\sum_{m=0}^t \sum_l [ F(l, m, h; u) + G(l, m, h; u) ] \leq R(m, h), \text{ all } m, h, t \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$F(l, m, h; t) = \sum_j [\alpha(l, m) Y(l, m, h, j; t)] \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$G(l, m, h; t) = \sum_j [\beta(l, m) X(l, m, h, j; t) - \gamma(l, m) X(l, m, h, j; t-t)] \quad \dots\dots\dots (12)$$

- l = 炉型  
 m = 核燃料の種類（ウラン、プルトニウム）  
 $\alpha$  = 経常的純消費量（交換必要量マイナス使用済燃料からのリカバリー）  
 $\beta$  = 初期インベントリー  
 $\gamma$  = 廃炉からのリカバリー

(B.5) 新技術（原子力等）導入制約

$$u(n) \geq s(n) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$X(n; u) \leq X_0(n) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$X(n; t) \leq X^0(n; t), \quad t \geq u(n) \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$X(n; t+1) \leq \phi(n) X(n; t), \quad t \geq u(n) \quad \dots\dots\dots (15)$$

- s = 技術的導入可能時期  
 u = シミュレーション（最適化計算）において、初めて導入される時期（内生）  
 $X_0$  = 導入開始時期における建設量上限  
 $X^0$  = 各時期における建設量上限  
 $\phi$  = 導入速度上限  
 n = 新技術の種類

C. 大気中へのCO<sub>2</sub>排出量制約

$$\Omega [E(1), E(2), \dots, E(T), M(1), M(2), \dots, M(T)] = 0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$E(t) = \sum_i \sum_h \sum_j \phi(i; t) \omega(i) Y(i, h, j; t) \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$M(t) = (1 - \sigma) E(t) + \delta M(t-1) \quad \dots\dots\dots (18)$$

- $\Omega$  = CO<sub>2</sub>排出に関する抑制等の制約条件  
 E = 大気中へのCO<sub>2</sub>排出量  
 M = 大気中におけるCO<sub>2</sub>蓄積量（残存量）  
 $\omega$  = 各エネルギー消費単位量あたりの大気中へのCO<sub>2</sub>排出量  
 $\phi$  = 技術的なCO<sub>2</sub>排出抑制（除去）ファクター  
 $\sigma$  = CO<sub>2</sub>排出量のうち、短期に雨水、海水、植物等に吸収される割合  
 $\delta$  = 大気中におけるCO<sub>2</sub>の減衰係数

# MARIA によるシミュレーション

東京理科大学理工学部経営工学科 森 俊介

## 1. MARIA の特徴

地球環境統合評価モデル MARIA は、IPCC の SRES、TAR に参加した世界を 8 地域に分け、1990-2100 年間で最適化を行うことで、国際貿易収支を含めつつ地球環境対策技術、土地利用、気候変動の戦略を策定するモデルである。以下の特徴を持つ。

- 1) 世界を、北米、日本、他 OECD、中国、アジア NIES、南アジア、他（アフリカ、南米、中近東）の 8 地域に分けている。
- 2) 1990 年を初期時点として、1 期 10 年として 2100 年までの超長期シミュレーションを行う非線型最適化モデルとして定式化されている。（計算そのものは 2110 年まで実施）変数約 18,000、制約式数約 15,000 本。
- 3) 経済部門はマクロ経済活動 1 部門のみ。ただし、貿易収支の均衡条件が根岸ウェイトにより与えられている。炭素税は、炭素排出量に制約を加える際の限界費用変化から求められる。
- 4) 一次エネルギー源として石炭、石油、天然ガス、原子力、バイオマス、風力、地熱、水力が与えられる。
- 5) 2 次エネルギー源として電力、石油製品(ガソリン、軽油、重油)メタノール、エタノール、水素(原子力核熱を用いた改質技術)に変換される。
- 6) 最終エネルギー需要部門は産業、運輸、その他（民生・農業）の 3 部門。運輸部門では、燃料需要が航空、海運、陸上に分割される。
- 7) 簡易気候変動モデルとして、Bern 炭素循環モデルを組み込んでおり、温暖化プロセスが簡便な形で内生化する。
- 8) 土地利用変化と食糧供給ブロックを持ち、天然林、人工林、草地、耕地、その他の間の相互転換が内生化する。これにより炭素吸収量の評価が内生化する。
- 9) 食糧需要として、熱量とタンパク質重要が一人当たり所得の関数として地域別に与えられ、穀物、牛・羊(草食餌)、豚・鶏(穀物餌)の生産フローを持つ。

10) 温暖化ガスとして、CO<sub>2</sub> は内生化するが、それ以外は石炭、天然ガス等の化石燃料生産と消費に、一定の係数をかけることで推計可能としている。これらの非 CO<sub>2</sub> 温暖化ガスは、放射強制力に換算されて温暖化ブロックにフィードバックすることも可能としているが、今回はこれは用いない。

このように、エネルギー需給、輸送部門、食糧受給を明示的にモデルに取り込んでいること、グローバル・超長期の問題を単一のクローズドモデルとして扱う点に特徴がある。

反面、地域分割がさほど詳細でないこと、1 期を 10 年とする超長期モデルであるため短期的分析には不向きであること、経済活動がマクロ化されているため多部門間の相互影響を評価できない点に限界がある。

## 2. シミュレーションシナリオ

今回は、以下のシミュレーションシナリオを設定した。

BAU ケース: 事務局より与えられた最終エネルギー、経済成長、CO<sub>2</sub> 排出を与えるようにパラメータを調整したケース。なお、そのほかの地域は、基本的に IPCC-B2 Marker をトレースするように設定した。

政府目標ケース: CO<sub>2</sub> 排出量を 2010 年で目標値である 1990 年の 2.5% 削減とするもの。ただし、日本だけに制約を課す。炭素税は、マクロ経済に還流される構造となる。なお、2010 年以降にも同様の制約が与えられている。

なお、土地利用変化が内生化するため、これによる吸収量変化が評価されるが、現時点ではその評価基準がなお定まっていない。そこで、ここでは土地利用変化のパターンは BAU から不変とした。

# SGM 日本モデルによるシミュレーション

国立環境研究所 日引 聡

## 1. モデル概要

SGM では、経済主体は、家計、企業、政府、外国部門の 4 主体に分けられ、各経済主体の行動は、以下のように記述される。

家計は、財の最終需要者であると同時に、労働、資金の供給者である。したがって、家計は、労働、資金（貯蓄）を他の主体に供給することによって所得を得、それを消費と貯蓄に配分する。

企業は、労働、資本に加え、各企業が生産した財を生産要素として投入して財を生産する。生産によって生じた収入は、各種税金を支払った後に、各企業から購入した生産要素、労働に対する支払いにあてる。残ったもの、すなわち、企業利潤は企業の所有者に分配される。産業部門は、表 1 に示すように 17 部門からなる。すなわち、各部門は、最大 17 部門からの中間投入と労働、資本を生産要素として財を生産する。

表 1 SGM 日本モデルの部門分類

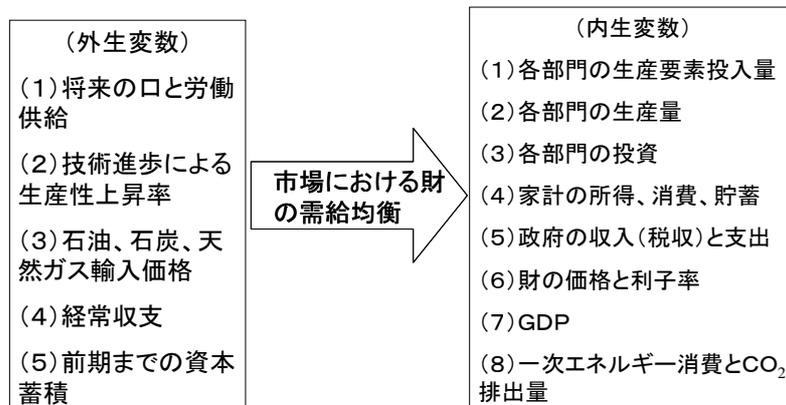
部門分類	部門分類
農林水産業	石油製品製造業
石油鉱業	その他製造業・その他鉱業
天然ガス鉱業	都市ガス
石炭鉱業	電力
石炭製品	・石油火力
紙パルプ	・LNG 火力
セメント	・石炭火力
化学	・原子力
鉄鋼業	・水力
非鉄金属	旅客輸送
	貨物輸送
	その他サービス業

政府は、所得税、法人税、社会保障税、純間接税を財源として、政府消費支出と政府固定資本形成を決定する。

外国部門については、簡単化のため、将来の経常収支が 1995 年時点のそれと同じであると仮定している。

このモデルは、国民所得勘定をベースとしに構築された古典派型の動学的応用一般均衡モデルであり、1995 年を基準年、5 年を 1 期間として 2020 年までの 6 期間をシミュレーションする。本モデルにおける外生変数と内生変数は、表 2 に示す通りである。

表2 モデルにおける外生変数と内生変数



## 2. シミュレーションのケース設定

SGM 日本モデルは、一般均衡モデルであるので、炭素税の導入によるエネルギー価格の上昇が、各部門に及ぼす直接的な影響を分析できるだけでなく、炭素税収を利用した所得税還付や政府支出増加などの税収還流策が、各部門の生産量や実質 GDP に及ぼす影響も考慮した分析を行なうことができるという利点を持つ。

2010～2020 年の CO<sub>2</sub> 排出量を排出削減目標(1990 年比 -2%)まで抑制するために、2010 年時点で炭素税を導入した場合、次の三つの炭素税収還流ケースについて、炭素税の効果をシミュレーションした。検討するケースは、

- ①炭素税収により財政赤字削減するケース(財政赤字削減ケース)
- ②炭素税収による増収分だけ政府支出を増加させるケース(政府支出拡大ケース)
- ③炭素税収による増収分を、所得税減税による家計への税収還流の財源にあてるケース(所得税還付ケース)

である。



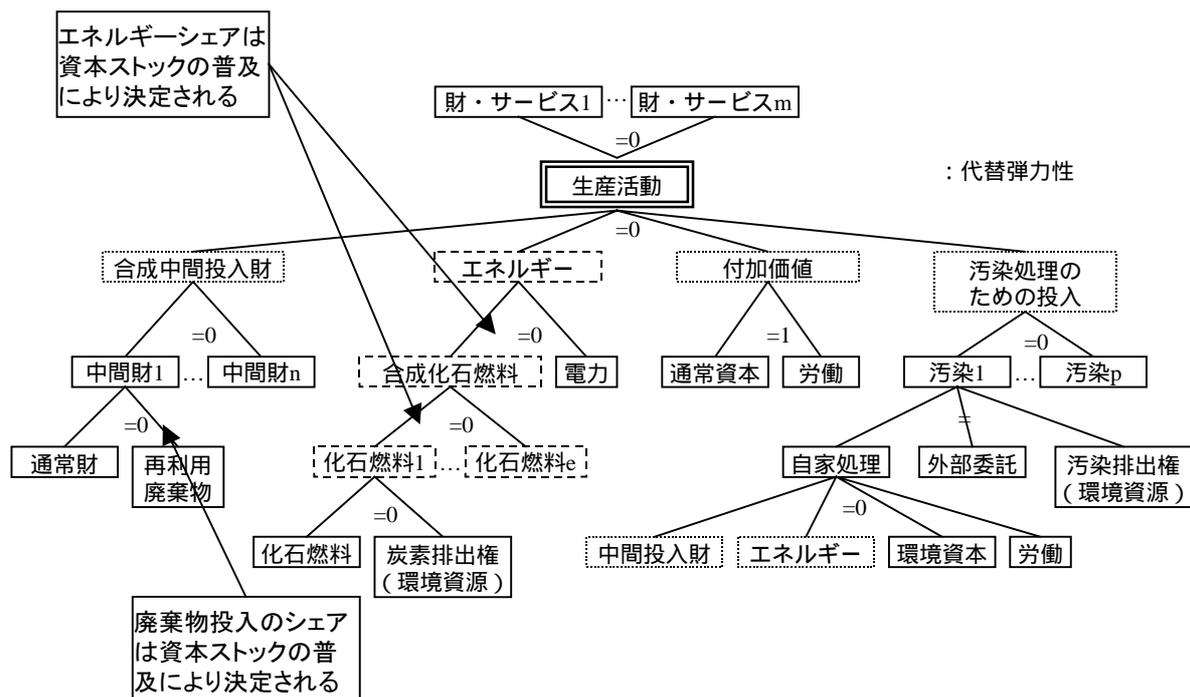


図2 生産構造

表1 部門及び財の種類

AGR	農林水産業	FIN	金融・保険業
MIN	鉱業	EST	不動産業
FOD	食料品	TRS	運輸・通信業
TEX	繊維	SRV	サービス業
PLP	パルプ・紙	GOV	政府サービス生産者
CHM	化学	NPS	対家計民間非営利サービス生産者
NMM	窯業・土石	EMC	環境装置製造業
BMT	一次金属	SEW	下水処理業
FMT	金属製品	MWM	一般廃棄物処理業
MCH	一般機械	IWM	産業廃棄物処理業
ELM	電気機械	COL	石炭
TRE	輸送機械	OIL	石油
PRI	精密機械	GAS	ガス
OTH	その他製造業	THE*	火力発電
CNS	建設業	HYD*	水力発電
WTR	水道業	NUC*	原子力発電
SAL	卸売・小売業	ELE**	電力

\* : 部門のみ \*\* : 財のみ

## 2. ケース設定

AIM / Material モデルでは、基準ケースに加え、炭素税により二酸化炭素排出量の削減を図るケースについて二酸化炭素排出量の推計を行う。

### 基準ケース（BaU ケース）

新たに追加的な対策をとらないと仮定したケースであり、政策評価のための比較基準としての役割を果たす。

### 対策ケース（排出量上限制約に見合う炭素税を導入する場合）

2010年時点での二酸化炭素排出量を目標に抑制するための炭素税を導入するケース。

## WWF シナリオに基づくシミュレーション

(財)世界自然保護基金ジャパン  
(WWF ジャパン)

WWF ジャパンでは1997年にCOP3に向けた報告「日本におけるCO2削減のためのキーテクノロジー政策」を作成し、地球温暖化問題の解決のためになし得る政策を研究してきた。今回ここに再び最新の知識をもとに新しく以下のようなシナリオ研究を行った。

### 1. WWF シナリオの特徴

シナリオの主要な要素は、利用効率の高い最新の技術革新、サービス経済への転換、ライフスタイルの変換、CDM/JI(クリーン開発メカニズム/共同実施)の4点である。

表1 WWF シナリオの構成

	シナリオの方針	内容
利用効率の高い最新の技術革新	各種の技術革新が進行中であるが、将来、燃料電池やLED照明の機能達成やコスト低下が実現するかは不確定である。しかし、太陽電池の例では学習曲線に乗ってコストが低下しており、研究開発だけでなく利用普及促進がコスト低下の大きな原因となっている。このメカニズムを積極的に利用する。	ハイブリッドカー 燃料電池自動車 高効率蛍光灯 LED(発光ダイオード照明)、インバータ制御モータ 燃料電池コジェネレーション アモルファストランス 高性能工業炉、太陽電池、風力発電、バイオマス発電など
サービス経済	「もの」の生産・販売・使用・廃棄というビジネスに代わって、「もの」のレンタルまたはリースによりサービスを提供し、修理・リサイクルを積極的に引き受けるビジネスを奨励する。この傾向は材料資源を大切に長期に利用する循環型社会への方向と一致し、同時に新しい雇用の創出に寄与する。	リフォーム・ビジネスの奨励 レンタカー・ビジネスの奨励(カーシェアリングビジネス) 自動車メンテナンス 家電製品の修理・リサイクル オフィス・レンタルサービス モータの効率的利用サービス・ビジネス 効率の高い照明灯配布計画
ライフスタイルの変換	これまで、エネルギーや資源の過剰な消費を社会が容認してきた。今後は、税制、奨励策などを通じて人々のライフスタイルが資源浪費的でない方向へ変化するように働きかける。	軽・小型自動車の奨励 環境定期券 エコドライブ・ライセンス 過剰な照明・冷房・暖房の抑制
CDM/JI	先進国と途上国間(CDM)、先進国間(JI)で、省エネルギーやクリーンな技術のプロジェクトを通し、最も資金効率のよい温室効果ガスの削減を行う。	天然ガス発電所の建設 太陽電池、風力、バイオマス・バイオガス発電の設置 省エネルギー技術の移転

## 2. シミュレーションの方法と計算結果

新しい技術や政策提案の効果を実際にシミュレーション計算するには国立環境研究所のもつ AIM エンドユースモデルを利用した。AIM エンドユースモデルでは、住宅の断熱化、電気機器の効率向上、産業技術の交代など各種の技術を織り込んで、1990年レベルを基準にして2010年の温室効果ガスの排出量を推計する。

WWF シナリオはさらに、実現可能性のある案を提示して、全体で大幅な削減が可能なことを示す。

表2 温室効果ガスの排出量

	計算結果 2010年	計算結果 2020年
AIM モデルによる計算	%	%
WWF スタディ 新技術革新、サービス経済、ライフスタイル	%	%
合計	%	%

(数字は1990年をベースにして2010年、2020年の削減割合を示す)