

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 6 種の数量モデルを用いて、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 : Asian-Pacific Integrated Model)

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 (Goto's Dynamic Macroeconomic-Energy Equilibrium Model)

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。AIM エンドユースモデルにおいて考慮した二酸化炭素排出削減技術についてデータを簡略化し、それぞれの技術の省エネ量と導入費用をボトムアップ構造の中に想定した。

(3) MARIA (Multiregional Approach for Resource and Industry Allocation)

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 (Second Generation Model)

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、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 日本モデルとして開発された応用一般均衡モデルに、二酸化炭素排出量を評価するモジュール及び廃棄物の排出とその処理を評価するモジュールを組み入れたモデルである。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 ((財)世界自然保護基金)

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。

表1．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子をシミュレートするボトムアップ型モデル。400 種を超えるエネルギー技術を用いて、各部門のエネルギー消費構造を詳細に表現する。	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。AIM エンドユースモデルの技術データを簡略化して、ボトムアップ構造の中に組み込んでいる。	基準ケース（BaU ケース） 対策ケース（炭素税ケース）
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（トップダウン型モデル）。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（炭素税ケース）
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（トップダウン型モデル）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。税の還流方法の違いが各部門の生産量や付加価値額に及ぼす影響を分析することができる。	基準ケース（BaU ケース） 対策ケース1（政府支出増大） 対策ケース2（金融市場への還流） 対策ケース3（家計への還流）
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。二酸化炭素排出量の制約と廃棄物最終処分量の制約を同時に課すことが可能である。	基準ケース（BaU ケース） 対策ケース（炭素税ケース）
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）

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ボトムアップ方式による経済性評価との比較分析を公平に行えるよう、ベースラインシナリオは、基本的に本小委員会の活動量シナリオ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2. 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3. 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4. 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) 二酸化炭素排出量削減の目標値

以上の基本的な前提の下で、2010年時点での二酸化炭素排出量を1990年時点と比較して概ね2%下げることが目標とし、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%削減することを目標とした。

4. AIM エンドユースモデルによるシミュレーション

① シミュレーションの結果

AIM エンドユースモデルでは以下のケースについてシミュレーションを行なった。

(a) 基準ケース（技術一定ケース）

現行の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技術一定ケースのシミュレーション結果を表 5 に示す。このケースの場合、2010 年における二酸化炭素排出量は 1990 年と比較して 18% 増となる。部門別にみると、1990 年と比較すると産業部門で 4%、家庭部門で 34%、業務部門で 35%、運輸部門で 30%、エネルギー転換部門で 17% 増加になる。

(b) 対策ケース 1（炭素税ケース）

二酸化炭素排出量を削減するために炭素トン当たり 3 万円の炭素税を導入したケースである。各主体は、技術の初期コストとエネルギーコストの両方を勘案し、合理的な選択を行う。投資回収年数は 3 年以内を仮定している。炭素税を導入することで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。このケースの結果を表 6 に示す。2010 年での二酸化炭素排出量は 1990 年と比較して 2% 減となっている。部門別にみると、1990 年の排出量からの変化は産業部門で 8% 減、家庭部門で 5% 減、業務部門で 2% 減、運輸部門で 15% 増、エネルギー転換部門で 7% 減となり、運輸部門以外では 1990 年の排出量を下回っている。

基準ケースにおける 2010 年の排出量との比較では、産業部門は 12% 減、家庭部門は 29% 減、業務部門 28% 減、運輸部門 12% 減となり、家庭部門や業務部門の削減の割合が大きくなっている。

(c) 対策ケース 2（炭素税 + 補助金ケース）

炭素トン当たり 3 千円という(b)に比べ低額の炭素税を導入し、その税収を二酸化炭素削減排出技術・設備導入のための補助金として、最も効率的に還流させるケースである。炭素税によるエネルギーコストの上昇が低くなるため、課税効果による設備等の導入促進効果は大きくないが、導入費用に対する補助が行なわれるために結果として大きな削減効果が見込まれる。

このケースでは、表 7 に示すような二酸化炭素排出削減技術に補助金が還流され、表 8 に示すように 2010 年の二酸化炭素排出量は 1990 年と比較して 2% 減となり、炭素トンあたり 3 万円の炭素税を導入した(b)と同様の結果となっている。

②考察

AIM エンドユースモデルによるシミュレーションによって、限界費用 3 万円までの技術のスムーズな導入によって、二酸化炭素排出量を 1990 年比 2%削減することは可能であると示された。そして、排出量の削減効果はどの部門においても非常に大きいものであるが、特に民生部門が大きいという結果が示された。また、炭素税が低くとも、その税収を二酸化炭素排出削減技術の導入のための補助金として最適に還流することができれば、より高額な炭素税（炭素トン当たり 3 万円）と同等の二酸化炭素排出削減技術の導入インセンティブ効果を発揮することができることも示された。

但し、以上の結果については、モデルの特性に基づくいくつかの留意点がある。まず、技術導入についてであるが、このモデルでは、経済合理的な判断による技術選択を仮定している。つまり、社会的な障害などを考慮していないため、経済性を持った技術はスムーズに導入が進むことになる。したがって、このモデルが示すような技術普及を実現化するためには、消費者の地球温暖化問題に対する理解を進めるための啓蒙活動や規制緩和等による技術選択の障害を少なくする必要がある。

また、このようなボトムアップ方式のモデルに共通する問題であるが、技術の網羅性に関する問題がある。技術の積み上げ方式による二酸化炭素排出量の削減量の推計は、現実的に導入可能な二酸化炭素排出削減技術をどの範囲まで考慮できるかが推計結果に影響を及ぼすことになる。AIM エンドユースモデルは、各部門のエネルギーシステムを 400 種を越えるエネルギーサービス技術によってモデル化しているが、それでも対象としていない技術は多数存在する。例えば、素材産業以外では、モータやボイラなどの汎用的な技術は対象としているが、組立用ロボットやダイカストマシンのような特定製品を生産するため用いられるような技術は情報収集の限界から分析の対象としていない。分析する技術の範囲をさらに広げていけば、さらなる削減の可能性は見込まれるであろう。

さらに、今後、普及が進むことによって価格の低下が予想される技術、例えば、太陽光発電、ハイブリッド自動車、燃料電池などは、現状の価格を用いてシミュレーションを行っているため、炭素トン当たり 3 万円の炭素税では市場性を持たず、排出の削減に寄与していない。したがって、このような技術の将来価格の動向次第では、さらなる排出量の削減も充分にありうる。

表5．基準ケース（技術一定ケース）：二酸化炭素排出量・エネルギー消費量

	単位	1990	1998	2005	2010
二酸化炭素排出量	百万tCO2	1,051	1,120	1,212	1,239
	'90年=100	(100)	(107)	(115)	(118)
産業部門	百万tCO2	514	499	541	536
	'90年=100	(100)	(97)	(105)	(104)
家庭部門	百万tCO2	139	152	176	186
	'90年=100	(100)	(109)	(126)	(134)
業務部門	百万tCO2	123	143	157	166
	'90年=100	(100)	(116)	(128)	(135)
運輸部門	百万tCO2	217	265	272	283
	'90年=100	(100)	(122)	(125)	(130)
エネルギー転換部門	百万tCO2	57	61	65	67
	'90年=100	(100)	(107)	(114)	(117)
最終エネルギー消費量	PJ	14,004	15,662	16,850	17,186
	'90年=100	(100)	(112)	(120)	(123)
一次エネルギー消費量	PJ	18,868	21,433	23,021	23,555
	'90年=100	(100)	(114)	(122)	(125)

表6：対策ケース1（炭素税ケース）：二酸化炭素排出量・エネルギー消費量

	単位	1990	1998	2005	2010	対基準比
二酸化炭素排出量	百万tCO2	1,051	1,134	1,124	1,027	-17.1%
	'90年=100	(100)	(108)	(107)	(98)	
産業部門	百万tCO2	514	511	512	472	-11.9%
	'90年=100	(100)	(99)	(100)	(92)	
家庭部門	百万tCO2	139	156	153	132	-29.0%
	'90年=100	(100)	(112)	(110)	(95)	
業務部門	百万tCO2	123	143	137	120	-28.0%
	'90年=100	(100)	(116)	(111)	(98)	
運輸部門	百万tCO2	217	262	262	249	-11.9%
	'90年=100	(100)	(121)	(120)	(115)	
エネルギー転換部門	百万tCO2	57	63	60	54	-20.2%
	'90年=100	(100)	(110)	(105)	(93)	
最終エネルギー消費量	PJ	14,001	15,660	15,961	15,252	-11.3%
	'90年=100	(100)	(112)	(114)	(109)	
一次エネルギー消費量	PJ	18,868	21,433	21,861	21,002	-10.8%
	'90年=100	(100)	(114)	(116)	(111)	

表7：補助金の対象となる二酸化炭素排出削減技術・設備

部門名	二酸化炭素排出削減技術・設備
産業部門	高炉廃プラ利用施設，高効率連続焼鈍設備，高性能ナフサ分解装置 高性能工業炉，リジェネボイラ，リバワリング
家庭部門	高断熱住宅，高効率エアコン，潜熱回収型給湯器（LPG）， インバータ・省電力型蛍光灯，高効率冷蔵庫， その他動力（待機電力削減タイプ）
業務部門	ビルエネルギーマネジメントシステム，高効率エアコン， 高効率ガスヒートポンプエアコン，潜熱回収型給湯器（LPG）， Hf インバータ照明，空調搬送動力（VAV 制御等） その他動力（待機電力等削減），高効率吸収式冷暖房（都市ガス）
運輸部門	小型乗用車（直噴式エンジン搭載車） 普通乗用車（直噴式エンジン搭載車） 営業乗用車（直噴式エンジン搭載車）

表8：対策ケース1（炭素税＋補助金ケース）：二酸化炭素排出量・エネルギー消費量

	単位	1990	1998	2005	2010	対基準比
二酸化炭素排出量	百万tCO2	1,051	1,120	1,127	1,030	-16.8%
	'90年=100	(100)	(107)	(107)	(98)	
産業部門	百万tCO2	514	499	513	475	-11.4%
	'90年=100	(100)	(97)	(100)	(92)	
家庭部門	百万tCO2	139	152	153	132	-29.0%
	'90年=100	(100)	(109)	(110)	(95)	
業務部門	百万tCO2	123	143	138	120	-27.8%
	'90年=100	(100)	(116)	(113)	(98)	
運輸部門	百万tCO2	217	265	262	249	-11.9%
	'90年=100	(100)	(122)	(120)	(115)	
エネルギー転換部門	百万tCO2	57	61	60	54	-20.2%
	'90年=100	(100)	(107)	(105)	(93)	
最終エネルギー消費量	PJ	14,001	15,660	16,007	15,292	-11.0%
	'90年=100	(100)	(112)	(114)	(109)	
一次エネルギー消費量	PJ	18,868	21,433	21,913	21,055	-10.6%
	'90年=100	(100)	(114)	(116)	(112)	

5. GDMEEM によるシミュレーション

① シミュレーションの結果

GDMEEM では以下のケースについてシミュレーションを行なった。

(a) 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基準ケースにおけるシミュレーション結果を表9に示す。二酸化炭素排出量は1990年時点と比べて20%増加している。また、2001年から2010年にかけて国内総生産は年率2.1%増加している。

(b) 対策ケース (炭素税ケース)

2010年時点で二酸化炭素排出量を基準年比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)は、炭素1トンあたり34,560円と推定された。また、炭素税導入に伴う経済的影響については、GDPを基準ケースと比較した場合、2010年の総額で0.7%減少という結果となっている。この影響は各部門によって異なっており、特にエネルギー多消費産業では経済的影響が大きく、付加価値額が鉄鋼業では基準ケース比10.5%減、紙パルプ6.7%減、窯業土石4.6%減となっている。

② 考察

GDMEEMはボトムアップ式モデルとトップダウン式モデルの間を結ぶモデルと言える。AIM エンドユースモデルにおいて考慮した二酸化炭素排出削減技術のデータを簡略化して、それぞれの技術の省エネ量と導入費用をボトムアップ構造の中に想定している。エネルギー消費の削減量を個別技術の積み上げによって集計することで、各部門のエネルギー効率の変化を推計する。このような定式化はボトムアップ構造を有するモデルの利点であり、弾力性のみでエネルギー消費構造を表現するトップダウンモデルでは定式化困難な部分である。

GDMEEMのシミュレーションによると2010年時点で二酸化炭素排出量を基準年比2%削減するために必要な炭素税は、炭素1トンあたり3万5千円程度であり、AIM エンドユースモデルによる結果と同程度である。このモデルも省エネ量を技術データに基づくボトムアップ方式であるため、AIM エンドユースモデルと同様に技術データの網羅性や将来の技術価格に関する問題を含んでいる。対象技術の拡大や技術価格の習熟曲線を考慮することで、より低い価格での目標達成の可能性もある。

一方、炭素1トンあたり3万5千円程度の炭素税を導入した場合の経済に対する影響は、2010年時点でGDPが0.7%減という結果となっており、マクロ経済への影響は軽微

といえる。しかし、業種ごとに影響の割合は異なっており、特に鉄鋼業や紙パルプなどのエネルギー多消費産業に対する影響が大きくなっていることに留意する必要がある。

表9：基準ケース（BaU ケース）：マクロ指標結果

	単位	2000	2005	2010	年率 (’01-’10)
二酸化炭素排出量	百万tCO2 '90年=100	1,101 (106)	1,160 (112)	1,243 (120)	1.2%
国内総生産	兆円	486.0	536.2	597.9	2.1%
農林水産業	兆円	9.7	9.8	9.8	0.1%
鉱業	兆円	0.9	0.9	0.9	-0.1%
建設	兆円	42.9	45.4	47.9	1.1%
食料品	兆円	12.7	12.8	13.0	0.2%
繊維	兆円	1.9	1.9	1.9	-0.2%
パルプ・紙	兆円	3.5	3.6	3.9	1.0%
化学	兆円	12.6	15.0	18.0	3.6%
窯業・土石製品	兆円	4.6	4.9	5.2	1.1%
鉄鋼	兆円	8.7	8.7	8.9	0.1%
非鉄金属	兆円	2.9	3.0	3.2	1.1%
金属機械	兆円	74.7	89.2	106.5	3.6%
その他製造業	兆円	17.7	18.4	19.2	0.9%
サービス業	兆円	278.7	307.9	344.2	2.1%
最終エネルギー消費量	PJ	14,143	15,047	16,370	1.5%
産業部門	PJ	10,320	10,915	11,807	1.4%
家計部門	PJ	3,823	4,132	4,564	1.8%

* 国内総生産は1990年価格。

* 国内総生産のマクロ数値と各部門の合計との差は、石油・石炭製品およびエネルギー転換部門の値に相当。

表10：対策ケース（炭素税ケース）：マクロ指標結果

	単位	2000	2005	2010	(対BaU)	年率 (’01-’10)
二酸化炭素排出量	百万tCO2 '90年=100	1,100 (106)	1,158 (111)	1,019 (98)	-18.0%	-0.8%
国内総生産	兆円	486.0	536.1	593.6	-0.7%	2.0%
農林水産業	兆円	9.7	9.8	9.6	-1.9%	-0.1%
鉱業	兆円	0.9	0.9	0.9	-1.1%	-0.2%
建設	兆円	42.9	45.4	47.8	-0.2%	1.1%
食料品	兆円	12.7	12.8	12.9	-0.9%	0.1%
繊維	兆円	1.9	1.9	1.8	-2.7%	-0.4%
パルプ・紙	兆円	3.5	3.6	3.6	-6.7%	0.3%
化学	兆円	12.6	14.9	17.5	-2.6%	3.4%
窯業・土石製品	兆円	4.6	4.9	4.9	-4.6%	0.7%
鉄鋼	兆円	8.7	8.7	7.9	-10.5%	-1.0%
非鉄金属	兆円	2.9	3.0	3.1	-3.2%	0.7%
金属機械	兆円	74.7	89.2	106.0	-0.4%	3.6%
その他製造業	兆円	17.7	18.4	18.8	-2.1%	0.6%
サービス業	兆円	278.7	307.8	342.8	-0.4%	2.1%
最終エネルギー消費量	PJ	14,143	15,035	13,875	-15.2%	-0.2%
産業部門	PJ	10,320	10,902	9,605	-18.7%	-0.7%
家計部門	PJ	3,823	4,132	4,271	-6.4%	1.1%
炭素税額	円/tC	-	-	34,560	-	-

* 国内総生産は1990年価格。

* 国内総生産のマクロ数値と各部門の合計との差は、石油・石炭製品およびエネルギー転換部門の値に相当。

6. MARIA によるシミュレーション

① シミュレーションの結果

MARIA では以下のケースについてシミュレーションを行なった。

(a) 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基準ケースにおけるシミュレーション結果を表 11 に示す。二酸化炭素排出量は 1990 年時点と比べて 22%、最終エネルギー消費量も 22% 増加している。また、2001 年から 2010 年にかけて国内総生産は年率 1.9% 増加している。なお、日本以外の地域は基本的に IPCC-B2Marker をトレースした。

(b) 対策ケース (炭素税ケース)

2010 年における二酸化炭素排出量を基準年比 2% 削減するために必要な炭素税額 (税収は全額経済に中立的に還流) 及びその制約のもとでの最終エネルギー消費量や国内総生産を表 12 に示す。目標を達成するために必要な炭素税は、炭素トンあたり 13,148 円と推定された。また、経済への影響では、基準ケースとの比較において、2010 年で GDP 損失が 0.4% となっている。

② 考察

MARIA は一期を 10 年とする 2100 年までの超長期シミュレーションモデルであり、さらに経済活動はマクロ経済一部門で表現されているため、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。しかし、世界モデルであることから、日本が対策を行った場合の経済的影響を世界全体のエネルギー構造の状況を踏まえて概観することは可能であろう。

MARIA のシミュレーション結果によると、2010 年時点で二酸化炭素排出量を基準年比 2% 削減するために必要な炭素税は炭素トンあたり 1 万 3 千円程度であると推定された。また、経済への影響は基準ケースとの比較において 2010 年で GDP 損失 0.4% となり、マクロ経済への影響は軽微なものといえる。

表11：基準ケース マクロ指標結果

	単位	1990	2000	2010	年率 (’01-’10)
二酸化炭素排出量	百万tCO2 '90年=100	1,135 (100)	1,227 (108)	1,381 (122)	1.2%
最終エネルギー消費量	PJ '90年=100	13,598 (100)	15,257 (112)	16,587 (122)	0.8%
一次エネルギー消費量	PJ '90年=100	18,394 (100)	19,535 (106)	21,049 (114)	0.7%
国内総生産	兆円	430.0	494.3	595.8	1.89%

* 国内総生産は1990年価格。

表12：対策ケース マクロ指標結果

	単位	1990	2000	2010 (対BaU)	年率 (’01-’10)
二酸化炭素排出量	百万tCO2 '90年=100	1,135 (100)	1,174 (103)	1,104 (97) -20%	-0.6%
最終エネルギー消費量	PJ '90年=100	13,598 (100)	15,038 (111)	15,288 (112) -8%	0.2%
一次エネルギー消費量	PJ '90年=100	18,394 (100)	19,332 (105)	19,642 (107) -7%	0.2%
国内総生産	兆円	430.0	494.3	593.4 0%	1.84%
炭素税額	円/tC	-	-	13,148 -	-

* 国内総生産は1990年価格。

7. SGM 日本モデルによるシミュレーション

① シミュレーションの結果

SGM 日本モデルでは以下のケースについてシミュレーションを行なった。

(a) 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基準ケースにおけるシミュレーション結果を表 13 に示す。二酸化炭素排出量は 1990 年時点と比べて 24%、一次エネルギー消費量も 28% 増加している。また、2001 年から 2010 年にかけて国内総生産は年率 1.9% 増加している。

(b) 対策ケース (炭素税ケース)

2010 年において二酸化炭素排出量を基準年比 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) について、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った。

・対策ケース 1 (政府支出増大)

炭素税収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 (金融市場への還流)

政府による国債の償還などによって、炭素税収の全額を金融市場に供給するケース

・対策ケース 3 (家計への還流)

炭素税収による増収分を所得税還付による家計への税収還流の財源にあてるケース

炭素税額は、どのケースにおいても炭素トンあたり 2 万円程度であると推定された。これに伴いエネルギー価格が上昇し、その結果、エネルギー消費量が減少する。エネルギー消費量の減少率は、一次エネルギーベースでどのケースも 16% 程度である。

炭素税導入に伴う GDP 損失は、還流方法によって異なっている。炭素税額によって政府の支出を増大させるケース 1 と炭素税収による増収分を所得税還付による家計への税収還流の財源にあてるケース 3 では GDP 損失が同程度であり、2010 年において基準ケース比 0.30% 減程度である。一方、政府による国債の償還などによって、炭素税収の全額を金融市場に供給するケース 2 が他のケースよりも GDP 損失が小さく、2010 年において基準ケース比 0.06% である。

② 考察

SGM のシミュレーション結果によると、2010 年において二酸化炭素排出量を基準年比 2%削減するために必要な炭素税は、税収の還流方法によって大きな違いはなく、概ね炭素トン当たり 2 万円程度である。しかし、その際の GDP 損失については、還流方法によって違いが生じている。税収をどのように還流させても、最終的には税収全額が最終需要を喚起させることになるが、資本ストックの減少が少なく経済への生産力効果への影響が少ない還流方法ほど、実質 GDP への影響を小さくすることができる。SGM のシミュレーションでは、ケースによって、税収が資本ストックに至るまでの経路が異なっている。対策ケース 1 では、炭素税収が政府消費支出と政府資本形成（国・自治体が有する企業、学校、医療施設などの消費、投資）に当てられるため、政府資本形成の分だけ経済全体の資本ストックが増加する。対策ケース 2 では、政府による国債の償還などによって、炭素税収の全額が金融市場に供給される。利子率の低下を通じて、炭素税が資本形成の財源に使われる。対策ケース 3 では、所得税還付などによって家計へ直接税収を還流する。この場合、家計消費だけでなく、民間資本形成も増加する。なぜなら、家計消費の増加が貯蓄を増加させ、その結果、実質利子率の低下を通じて、企業の設備投資を増加させるからである。

SGM のシミュレーション結果によると、ケース 2 が他のケースと比べて GDP 損失が小さくなっているのは、このケースが他の 2 ケースと比較して資本ストックの誘発効果が最も大きいからである。

このことは、長期的な経済影響の観点からすると、資本形成を促進するような還流方法を採用することがより小さい GDP の減少を実現するために望ましいことを意味する。AIM エンドユースモデルのシミュレーションにおいて設定した「税収を省エネ及び新エネ設備の導入に還流する」というケースは、まさに資本形成を促進するような還流方法となり得るであろう。

表13：基準ケース マクロ指標結果

	単位	1995	2000	2005	2010	年率 (’01-’10)
二酸化炭素排出量	百万tCO2 '90年=100	1,139 (109)	1,201 (114)	1,242 (118)	1,301 (124)	0.8%
一次エネルギー消費量	PJ '90年=100	21,383 (110)	22,472 (115)	23,456 (120)	25,010 (128)	1.1%
国内総生産	兆円	505.6	530.7	579.2	636.6	1.8%

* 国内総生産は1995年価格。

表14：対策ケース マクロ指標結果

	単位	対策ケース1	対策ケース2	対策ケース3
税収の還流方法	-	政府支出増大	金融市場への還流	家計への還流
二酸化炭素排出量	百万tCO2 '90年=100	1,028 (98)	1,028 (98)	1,028 (98)
国内総生産	兆円 対BaU	634.7 -0.30%	636.2 -0.06%	634.9 -0.28%
民間消費支出	対BaU	-1.8%	-1.5%	-0.7%
資本ストック	対BaU	0.0%	0.5%	0.0%
一次エネルギー消費量	PJ 対BaU	21,019 -16.0%	21,022 -15.9%	21,031 -15.9%
炭素税額	円/tC	20,424	21,100	21,080

* 国内総生産は1995年価格。

8. AIM/Material モデルによるシミュレーション

① シミュレーションの結果

AIM/Material モデルでは以下のケースについてシミュレーションを行なった。

(a) 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基準ケースにおけるシミュレーション結果を表 16 に示す。2010 年における二酸化炭素排出量は 1990 年時点と比べて 18% 増加している。また、国内総生産は 2001 年から 2010 年にかけて年率 1.8% で増加している。

(b) 対策ケース A (炭素税ケース)

このケースでは、他のモデルとの比較を行なうために廃棄物モジュールを用いずに、2010 年において二酸化炭素排出量を基準年比 2 % 削減するために必要な炭素税及びそれに伴う経済に対する影響を推計した。

2010 年において二酸化炭素排出量を基準年比 2% 削減するために必要な炭素税は、表 17 に示すように炭素トンあたり 15,587 円であると推定された。また、炭素税導入に伴う経済的影響については、GDP を基準ケースと比較した場合、2010 年で 0.54% 減となっている。

(c) 対策ケース B (炭素税 + 廃棄物対策ケース)

廃棄物対策がもたらす地球温暖化対策への副次的効果を推計するために、2010 年の廃棄物最終処分量の制約を現状の半分と想定し、その制約のもとで二酸化炭素排出量の目標を達成するために必要な炭素税及びその経済への影響を推計した。廃棄物対策の実施レベルに以下のような 2 ケースを想定し、比較検討を行なった。

・対策ケース B-1 (リサイクル水準固定ケース)

2010 年において二酸化炭素排出量を基準年比 2% 削減するとともに、現状レベルでのリサイクルの水準によって、廃棄物最終処分量を現状の半分程度にするケース。

・対策ケース B-2 (リサイクル拡大ケース):

2010 年において二酸化炭素排出量を基準年比 2% 削減するとともに、表 15 に示すような対策によって、廃棄物最終処分量を現状の半分程度にするケース。

2010 年の廃棄物の最終処分量に対して現状水準の半分程度という制約を課し、2010 年において二酸化炭素排出量を基準年比 2 % 削減するために必要な炭素税及びそれに

伴う経済に対する影響を推計した結果を表 18 に示す。このような制約にも関わらず、リサイクル水準が現状のままの場合、2010 年の二酸化炭素排出量を基準年比 2%削減するために必要な炭素税は、炭素トンあたり 21,238 円であると推定された。また、基準ケースと比較した GDP 損失は、2010 年において 0.94%減となっている。それに対して、様々な廃棄物対策を実施し、リサイクルを拡大した場合には、表 19 に示すように炭素税も GDP 損失も低くなっている。2010 年における排出量の目標を達成するための炭素税額は炭素トンあたり 15,409 円であり、また、基準ケースと比較した GDP 損失は 2010 年で 0.6%減となっている。

表15：AIM/Material モデルの廃棄物対策

部門	廃棄物対策
農業	コンポスト（肥料）の利用
繊維	繊維くずの利用
紙・パルプ	古紙・木くずの利用
窯業土石	セメント原料等に鉱さい等を利用
金属	金属くず・廃プラスチック（コークスの代替）の利用
その他（プラスチック）	廃プラスチックの利用
その他（製材）	木くずの利用
建設	建設材料・路盤材等に鉱さい等を利用
発電	廃棄物発電

② 考察

AIM/Material モデルの特徴は、経済フローとマテリアルフローを同時に推計し、さらに、廃棄物フローを推計するモジュールを持つことで、二酸化炭素排出量と廃棄物発生及び処分量を整合性のとれた枠組みで推計できる点にある。しかし、他のモデルは廃棄物に関するシナリオまでは考慮していないため、まずは、廃棄物モジュールを用いずにシミュレーションを行なった。2010 年において二酸化炭素排出量を基準年比 2%削減するための炭素税は、1 万 5 千円程度と推定され、その際の GDP 損失は 0.54%となっている。

続いて、廃棄物最終処分量に対し、現状の半分程度という制約を課し、シミュレーションを行なった。その際に、現状程度のリサイクル水準のまま推移すると想定したケースと、今後、様々な廃棄物対策の実施を想定したケースの 2 ケースにおいて、目標達成のための炭素税や経済的影響を推計した。必要な炭素税額を両ケースで比較すると、リサイクル水準が現状のままの場合には、炭素トンあたり 2 万 1 千円程度となるが、廃棄物対策を実施した場合には炭素トンあたり 1 万 5 千円程度となり、廃棄物対策によって大幅なコストの削減が行なわれている。また、GDP 損失においても大きな差があり、

リサイクル水準が現状のままの場合には、基準ケース比 0.94%減に対して、廃棄物対策を実施した場合には基準ケース比 0.6%減となっている。このことは、廃棄物の最終処分量を削減することを目的として行なわれた廃棄物対策が、副次的に二酸化炭素排出量の削減にも繋がっていることを示している。二酸化炭素削減効果だけに着目した場合、経済性を持たない技術も、廃棄物削減に対して非常に効果的である場合には、地球温暖化対策以外の要因によって導入が進む。この例は、廃棄物問題だけではなく、大気汚染問題、水質汚濁問題に対する対策の全てに言えることである。つまり、温室効果ガス削減対策を実施する際に、その他の対策を複合的に実施することによって、その費用は大幅に削減できる可能性があることが示唆された。

表16：基準ケース マクロ指標結果

	単位	1995	2000	2010	年率('01-'10)
二酸化炭素排出量	百万tCO2 '90=100	1,244 (108)	1,277 (111)	1,365 (118)	0.7%
国内総生産	兆円	486	532	638	1.8%

表17：対策ケース A マクロ指標結果

	単位	1995	2000	2010 (対BaU)	年率('01-'10)
二酸化炭素排出量	百万tCO2 '90=100	1,244 (108)	1,277 (111)	1,129 (98) -17.3%	-1.22%
国内総生産	兆円	485.9	532.5	634.9 -0.54%	1.78%
炭素税	円/tC	0	0	15,587 -	-

表18：対策ケース B-1 マクロ指標結果

	単位	1995	2000	2010 (対BaU)	年率('01-'10)
二酸化炭素排出量	百万tCO2 '90=100	1,244 (108)	1,277 (111)	1,129 (98) -17.3%	-1.22%
国内総生産	兆円	485.9	532.5	632.4 -0.94%	1.73%
炭素税	円/tC	0	0	21,238 -	-

表19：対策ケース B-2 マクロ指標結果

	単位	1995	2000	2010 (対BaU)	年率('01-'10)
二酸化炭素排出量	百万tCO2 '90=100	1,244 (108)	1,277 (111)	1,129 (98) -17.3%	-1.22%
国内総生産	兆円	485.9	532.5	634.6 -0.60%	1.77%
炭素税	円/tC	0	0	15,409 -	-

9. WWF シナリオによるシミュレーション

① シミュレーションの結果

WWF シナリオでは、以下のケースについてシミュレーションを行なった。

(a) 対策ケース (WWF スタディ)

AIM エンドユースモデルをベースとし、その対策ケースに WWF ジャパンの温室効果ガス削減のためのシナリオを導入している。具体的な対策については表 20 に示す。但し、他のモデルは CDM や共同実施などを考慮していないため、以降に示す WWF シナリオに基づく二酸化炭素排出量は CDM や共同実施などの対策を除いたものである。

表20 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

このケースでは、表 21 に示すように 2010 年時点での二酸化炭素排出量は基準年比 10%減と推定された。また、部門別に見ると、基準年に対して産業部門で 12%減、家庭部門で 14%減、業務部門で 8%減、運輸部門で 6%減、エネルギー転換部門で 4%減となっている。なお、この推計結果には、CDM や共同実施による削減分は含まれていない。

② 考察

AIM エンドユースモデルや GDMEEM では、現状のコストにおいて導入の可能性が現実的に可能な技術を対象としており、今後の技術普及や技術開発の動向によって価格が低下する可能性については考慮していない。また、ライフスタイルや商業システムの変化が技術にもたらす影響についても考慮していない。WWF シナリオでは、最新の技術革新の知見やサービス経済へのシフト、ライフスタイルの変換に伴う削減シナリオを作成し、それに基づく排出量の推計を行なった。その結果、2010 年における二酸化炭素の排出量は 1990 年比 10%減となり、京都議定書の目標を上回る対策ポテンシャルの存在が示された。

表21：対策ケース（WWF スタディ）：二酸化炭素排出量・エネルギー消費量

	単位	1990	1998	2005	2010	年率 (’01-’10)
二酸化炭素排出量	百万tCO2	1,051	1,120	1,072	943	-1.7%
	’90年=100	(100)	(107)	(102)	(90)	
産業部門	百万tCO2	514	499	494	450	-1.0%
	’90年=100	(100)	(97)	(96)	(88)	
家庭部門	百万tCO2	139	152	141	120	-2.3%
	’90年=100	(100)	(109)	(101)	(86)	
業務部門	百万tCO2	123	143	129	114	-2.3%
	’90年=100	(100)	(116)	(105)	(92)	
運輸部門	百万tCO2	217	265	249	205	-2.6%
	’90年=100	(100)	(122)	(114)	(94)	
エネルギー転換部門	百万tCO2	57	61	59	55	-1.1%
	’90年=100	(100)	(107)	(103)	(96)	
最終エネルギー消費量	PJ	14,001	15,659	15,612	14,311	-0.9%
	’90年=100	(100)	(112)	(112)	(102)	
一次エネルギー消費量	PJ	18,868	21,433	21,085	19,240	-1.1%
	’90年=100	(100)	(114)	(112)	(102)	

10. シミュレーション結果の比較

(1) 経済的措置（炭素税）について

2010年時点の二酸化炭素排出量を1990年比2%減するために必要な炭素税を表22に示す。各モデルのシミュレーション結果が示す炭素税は、炭素トンあたり1万3千円から3万5千円の範囲となった。

なお、技術データの積み上げによって省エネルギー量を推計するという特徴を有するAIMエンドユースモデルとGDMEEMは、技術データの範囲を拡張することによって、炭素税額がより低い結果となる可能性がある。また、廃棄物対策や大気汚染対策などの地球温暖化対策以外の対策と合わせて地球温暖化対策を実施することによって、炭素税額が低額になることもありえる。

さらに、これらのモデルでは、経済合理的な判断により、技術選択が行なわれること、エネルギー価格の変化がエネルギー効率を弾性的に改善させることなどを前提としており、個別の対策が含有する社会的制約は反映されていない。

表22：各モデルの炭素税額

モデル名	ケース名	炭素税額(2010)
AIMエンドユースモデル	技術一定ケース	-
	炭素税ケース	30,000
	炭素税+補助金ケース	3,000
GDMEEM	BaUケース	-
	炭素税導入ケース	34,560
MARIA	BaUケース	-
	炭素税導入ケース1	13,148
	炭素税導入ケース2	14,359
SGM	BaUケース	-
	政府支出増加ケース	20,424
	財政赤字削減ケース	21,100
	所得税還付ケース	21,080
AIM/Materialモデル	BaUケース	-
	炭素税導入ケース	15,587
WWFモデル	WWFスタディ	-

単位：円/tC

(2) 経済的措置（炭素税）の導入が我が国経済に与える影響

2010年時点の二酸化炭素排出量を1990年比2%減するために必要な炭素税を導入した場合におけるGDPの損失を基準ケースとの比較によって表したものを表23に示す。各モデルのシミュレーション結果が示すGDPの損失は、基準ケースと比較して0.06%から0.72%の範囲となった。

表23：各モデルの炭素税額とGDP損失との関係

モデル	ケース	GDP損失 (対基準;2010年)	炭素税額 (円/tC)
AIM/Material	対策ケース	0.54%	15,587
GDMEEM	対策ケース	0.72%	34,560
MARIA	対策ケース	0.40%	13,148
SGM	対策ケース1 (政府支出増大)	0.30%	20,424
SGM	対策ケース2 (金融市場への還流)	0.06%	21,100
SGM	対策ケース3 (家計への還流)	0.28%	21,080

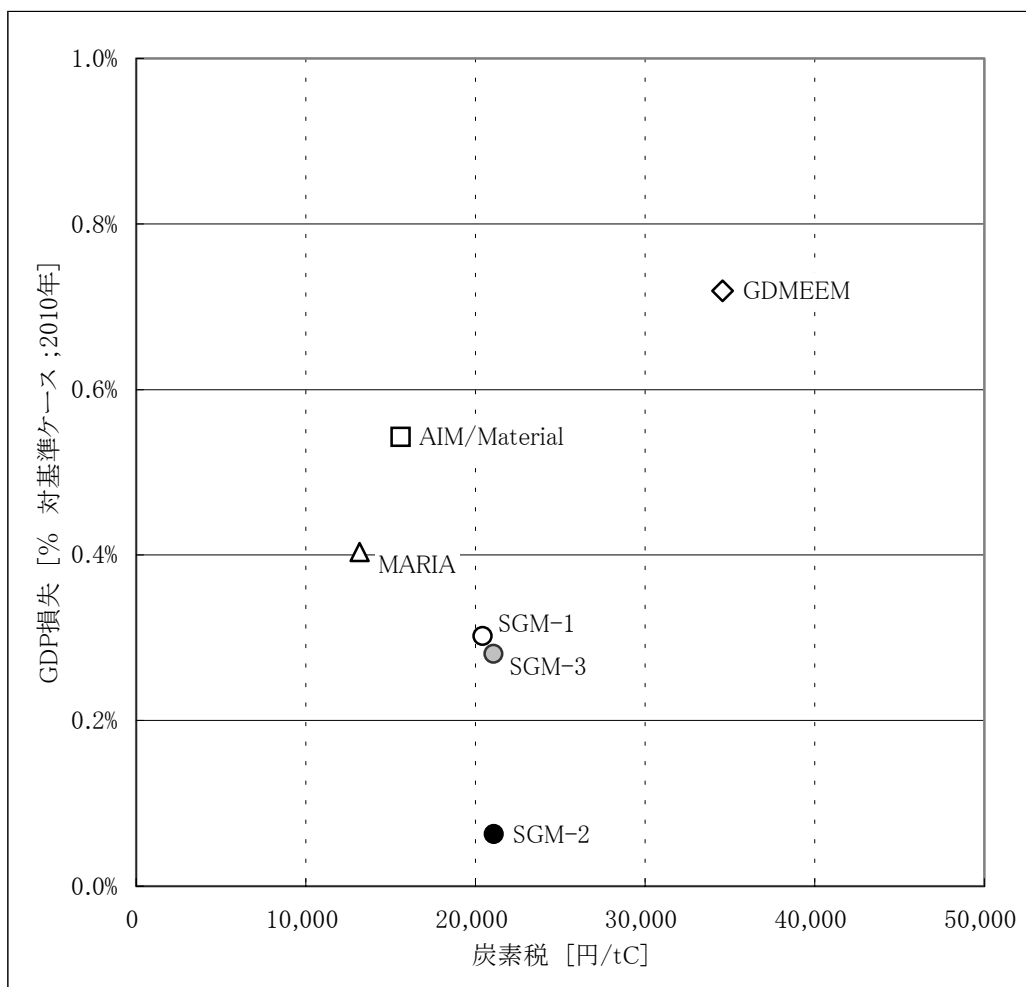


図1：各モデルの炭素税額とGDP損失との関係

(3) 二酸化炭素排出量の削減の可能性について

各モデルの結果から 1 万 3 千円～3 万 5 千円程度の炭素税によって、二酸化炭素排出量は 1990 年比 2% 減程度になることが示された。特に、また、AIM エンドユースモデルや GDMEEM では分析の対象とする技術の範囲に制約があるが、WWF シナリオでは、AIM エンドユースモデルや GDMEEM が扱っていない将来の技術、現状のコストでは市場性を持たないが、今後の技術開発によって価格の低下が見込まれる技術を対象とした。さらに、ライフスタイルや商業システムの変換がもたらす影響も考慮した。その結果、2010 年における二酸化炭素の排出量は 1990 年比 10% 減となり、京都議定書の目標を上回る対策ポテンシャルの存在が示された。

11.まとめ

以上、6種の数量モデルによるシミュレーション分析によって次のようなことが示された。

- 炭素トンあたり1万3千円～3万5千円程度の炭素税の課税によって、2010年における二酸化炭素排出量を1990年比2%減とすることが可能である。現状において、限界費用が1万3千円～3万5千円程度までの二酸化炭素排出削減技術の導入によって、2010年における二酸化炭素排出量を1990年比2%減とすることが可能である。
- また、炭素トンあたり3千円という低額の課税であっても、その税収を二酸化炭素排出削減技術導入のための補助金として最適に還流することができれば、炭素トンあたり3万円の炭素税と同程度の導入インセンティブ効果を発揮する。
- 2010年における二酸化炭素排出量を1990年比2%減となるように炭素税を課税した場合の経済的損失（GDP損失）は0.06～0.72%の範囲であり、軽微なものである。
- 但し、地球温暖化以外の環境問題に対する対策を合わせて実施することによって、地球温暖化対策に係るコストやそれによって生じる経済的損失は小さくなる。
- 今後の技術導入コストや技術導入に係る施策によっては2010年における二酸化炭素排出量の削減可能性は、1990年比10%程度のポテンシャルを持っている。