

I R-1. 持続的発展のための世界モデルに関する研究

研究課題代表者

環境庁国立環境研究所

西岡 秀三

環境庁国立環境研究所

地球環境研究センター

西岡 秀三, 大坪 國順, 原沢 英夫, 和田篤也

地球環境研究グループ

温暖化影響・対策チーム

森田 恒幸, 甲斐沼美紀子, 増田 啓子

社会環境システム部

環境経済研究室

後藤 則行, 日引 聡

(委託先等)

神戸大学経営学部

天野 明弘

国際大学

穴戸 駿太郎

京都大学工学部

松岡 譲

甲南大学理学部

中森 義輝

大阪大学経済学部

伴 金美

東京理科大学理工学部

森 俊介

平成2-6年度合計予算額 81,369千円

(平成6年度予算額 15,071千円)

〔要旨〕

地球規模の環境問題を体系的に解明し、総合的な問題解決の方策を検討するためには、地球温暖化、オゾン層破壊、森林破壊、砂漠化、海洋汚染などの個別の問題の相互関係を明らかにして地球環境問題全体の構造を把握するとともに、地球環境保全と世界経済の間のトレードオフを分析して、持続的発展の基本条件を見出すために、各種の数値モデルを開発した。5カ年の研究によって、地球環境保全と経済発展の関係を簡略な構造で解析するフレームワーク・モデル、自然現象の体系的解析をめざす3次元物質循環モデル、それに各種の経済モデルを開発した。特に、経済モデルについては、計量経済モデル、一般均衡モデル、動学的最適化モデル、及び、システム・ダイナミックスモデルの開発を進め、各種の持続的発展の観点から解析が可能となった。なお、社会科学・人文科学分野のわが国の地球環境の実態を調査して、今後の研究推進の基礎情報を得た。

〔キーワード〕 持続的発展、フレームワーク・モデル、物質循環、世界経済モデル、

動学的最適化モデル、一般均衡モデル、システム・ダイナミックスモデル

1. 序

地球規模の環境問題を体系的に解明し、総合的な問題解決の方策を検討するためには、地球温暖化、オゾン層破壊、森林破壊、砂漠化、海洋汚染などの個別の問題の相互関係を明らかにして地球環境問題全体の構造を把握するとともに、地球環境保全と世界経済の間のトレードオフを分析して、持続的発展の基本条件を見出していく必要がある。このため、従来からローマクラブの「成長の限界」や「西暦2000年の地球」などにおいて地球環境モデルが作成されてきたが、近

年の科学的知見の蓄積を基礎にしたより体系的な研究が求められている現状にある。また、計量経済モデルを用いて環境保全投資の経済影響が検討されてきたが、近年、超長期の経済発展と地球環境保全とのトレード・オフを分析するために、新たな長期均衡タイプの経済モデルの開発も必要となってきた。さらに、世界規模で進められている各種の地球環境研究プログラムの成果を、人類の持続的発展に向けた政策展開に反映することも求められている。このような背景のもとで本研究は、モデル開発を通じて新しい科学的知見や最新の社会経済動向を総合化し、具体的な政策展開に資する知見を提供するものである。

2. 研究の目的

本研究は、地球環境研究総合推進費に基づく総合化研究として、個々の課題別研究の成果及びIGBPやHDPなどの国際機関の要請や成果に基づいて、地球環境問題を横断的・総合的に検討するとともに、世界経済との関係を検討することによって、持続的発展のための基本的条件を見出すことを目的としている。

3. 研究の成果

(1) 地球環境フレームワーク・モデルの開発

地球環境問題の相互の関係やそれに関連する社会経済活動をマクロにとらえて、地球環境問題の構造やその重要なプロセス、それに問題の解決方針を見出すためには、個々の課題別研究や海外の研究活動から得られた知見を体系的に蓄積し、総合的に組み合わせるシステムが必要である。このため、人類の発展⇒その発展を支える基本的人間活動⇒これらの人間活動に不可欠な活動要素⇒これらの活動要素から生じる廃物⇒活動要素や廃物により変化する地球環境⇒地球環境変化によって生じる人間社会への影響⇒これらの影響による人類の発展の制約、といった一連の体系的分析が可能となるフレームワークモデルの開発を進めている。この構造は図1に示すように7つの指標群と8つのマトリクスによって構成され、各マトリクスの要素に科学的知見がファイリングされる仕組みになっている。

このフレームワークモデルの管理のため、全体のオペレーション制御と管理を担当する「コントロールサブシステム」、指標項目やマトリクス要素の増減や構造モデルの修正を管理する「モデル修正サブシステム」、構造モデルの項目間関係の修正やパラメータの修正を管理する「関係修正サブシステム」、各指標の状態をわかりやすく表示する「状態表示サブシステム」、関係や構造の根拠となる各種知識を管理する「知識ベースサブシステム」を開発中である。コントロール・サブシステムには最適化計算モジュールが用意されており、各指標の制約条件を与えて基本発展指標を最大化させ、それぞれの制約条件のシャドープライスの大きさから、対応する指標の相対的重要度を見いだすことができる。

データについては、世界、アジア、日本、中国、インド、タイ等について収集し、それぞれのパラメータを設定してシミュレーションを実施した。例えば、表1は世界の人口が2倍、豊かさが10倍になったとき、生産、エネルギー消費、大気汚染物質等がどの程度増えるかをシミュレートしたものである。これによれば、エネルギー消費量が3.5倍、固形廃棄物が1.2倍、水質汚濁物質の排出が1.8倍、大気汚染物質の排出が1.2倍になることを示している。これらの環境負荷

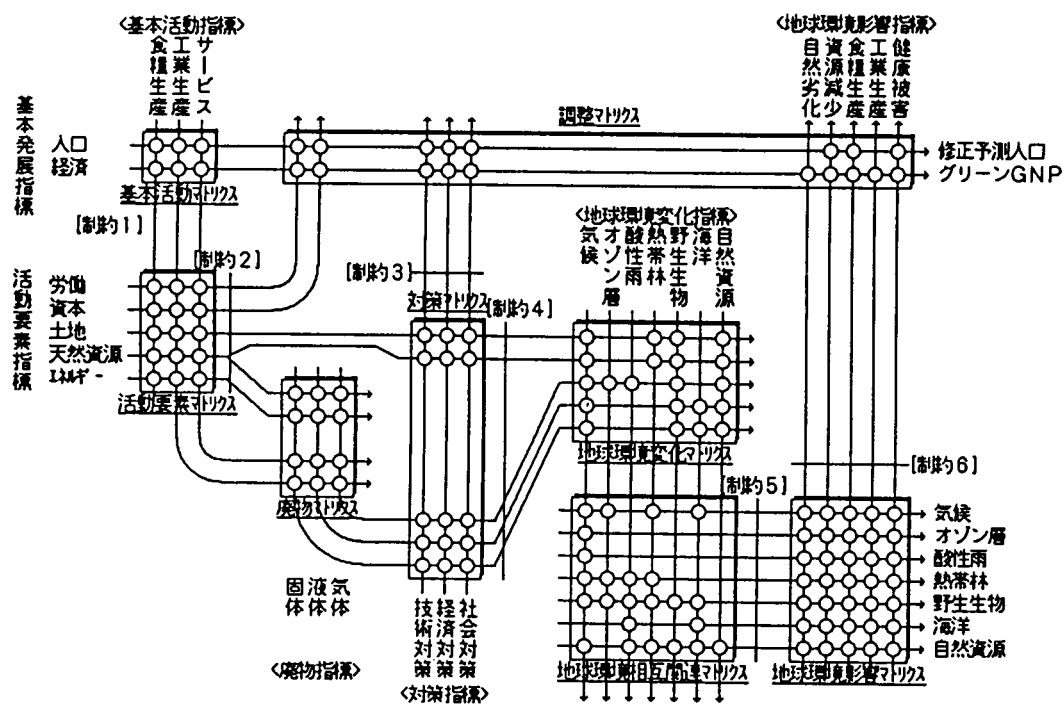


図1 フレームワークモデルの基本構成

表1 世界規模での数値解析例

Coefficient				Initial Setting	
Basic Production Matrix				Population	2.00
Food Production				GDP per Capita	10.00
Industrial Production				Results	
Service				Food Production	3.10
Population				Industrial Production	20.00
GDPperCapita				Service	31.70
Production Factor Matrix				Labor	3.78
Labor				Capital	14.94
Capital				Land	5.12
Land				Natural Resource	1.32
N.Resource				Energy	35.34
Energy				Solid	12.45
Waste Matrix				Liquid	17.89
N.Resource				Gas	12.41
Energy					
Service					
Industrial Production					

がどの程度の環境変化を引き起こすかについてのシミュレーションは、パラメータの設定に問題が残っており、今後の課題となっている。

(2) 地球規模物質循環モデルの開発

地球環境問題相互の関係をより詳細に分析するため、大気輸送・変換プロセスや水域物質輸送プロセスをシミュレートできる3次元物質循環モデルを開発した。

このうち大気輸送・変換モデルは、排出した大気汚染物質の大気中での移動・反応を算定するため、全球を水平方向5度メッシュに区分し、鉛直方向には σ 座標を用いて地形の影響を考慮して、移流、反応、沈着をシミュレートするものである。移流計算は Russellらが用いた二次モー

メント法を使用し、対流混合にはHeimann らがG I S S・G C Mの計算結果から算出したパラメータ値を用いた。また、輸送中に発生する反応、沈着等に関しては、池田らの研究を参考にして大気中の SO_2 濃度、 SO_4^{2-} 濃度及び雲中に取り込まれた SO_4^{2-} の大気換算濃度の関係を定式化した。そして、このモデルを用いて、人為起源の酸性降水物、特に硫酸化物の地球的なスケールでの環境影響を解析した。

一方、水域物質輸送プロセスについては、海洋と河川の双方のモデルを開発した。海洋循環モデルは、米国プリンストン大学地球物理流体力学研究所（G F D L）のブライアンとコックらが開発した海洋大循環モデルを改良して用いた。また、河川流域モデルについては、エドワーズの世界5分×5分メッシュの標高データを用いて流出モデルを作成した。また、これらのモデルの入出力データを統合的に管理するために、地理情報システムを作成して用いた。このモデルを用いて、わが国全域の河川から流出した汚染物質が海洋の中でどのように移動するかについてのシミュレーションを行った。このような水域物質輸送モデルを用いれば、海洋汚染の拡散過程はもとより、水圏、地圏、大気圏、陸上生物圏の間の相互関係をモデル化することも可能となり、今後、さらにモデル改良等の検討を進めたい。

（3）持続的発展を評価するための経済モデルのレビュー

経済発展に伴う二酸化炭素排出量の増大、温暖化防止対策がマクロ経済に及ぼす影響等、地球環境保全と経済成長の関係について分析するために各種の数量モデルが開発されつつある。これらのモデルをレビューしてその構造をやシミュレーション結果を比較分析することは、モデルの改良方向や新たなモデルの設計条件を見出すために不可欠な作業である。このため、この種の国内モデル及び世界モデルを詳細に検討した。

国内の経済への影響については、今までに12の数量モデルが開発されている。これらのモデルの予測結果を、炭素税の税率とその経済的影響の二つの軸で整理したものが、図2である。この図に示すとおり、わが国において2000年から二酸化炭素排出量を概ね1990年レベルに安定化させる炭素税の税率は、1炭素トン当たり約3000円から35000円、この税金による経済成長率の低下は年率0から0.5%ポイントの範囲にばらついている。

このように大きな予測の差が生じる理由として、第一に、モデルの構造があげられる。炭素税の税率や経済成長率の低下が小さめにしているモデルは、長期的な経済の適応過程を強調したモデル（O E C Dのような一般均衡モデル又は後藤等のような動学的最適化モデル）か、エネルギーの需要サイドの適応過程を強調したモデル（A I M開発チームのようなボトムアップ・モデル）である。これらのモデルは、技術や施設が価格に敏感に反応して更新されることを前提としており、その分、炭素税の効果が大きくまた経済的損失も少なめに推定される。逆に、炭素税率及び経済成長率の低下のどちらも大きめに推定しているモデルは、過去10～20年の経済の動きにそって将来を予測しようとする、いわゆる計量経済モデル（伊藤、山地、山崎等）であり、価格による調整メカニズムは上記モデルよりも小さめに記述される。

第二の要因として、モデルの仮定、すなわちどのようなシナリオとか企業の適応能力を前提としているかがあげられる。例えば、将来の潜在的な経済成長率を高く見込む場合には、相対的に高い税率と大きな経済的損失が推定されることになる。また、技術革新やそれに関連するエネルギーの代替弾力性、すなわちエネルギー価格が上がった場合に省エネ技術への程度の投資が増

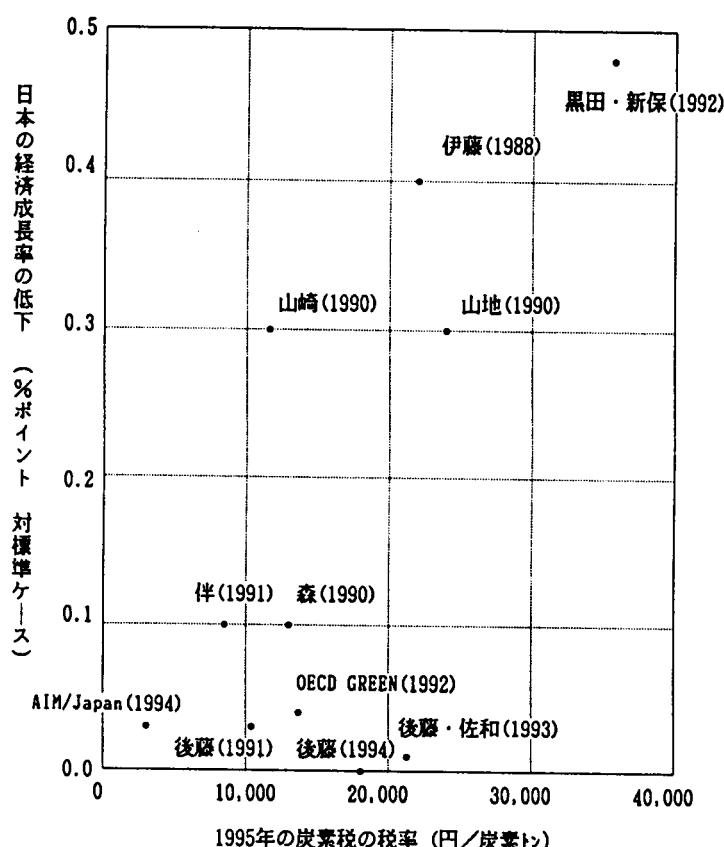


図2 わが国における炭素税の税率と経済成長率低下との関係
(2000年からCO₂排出量を概ね1990年レベルに安定化させる場合)

すかといった前提も大きく影響する。例えば、黒田・新保モデルが長期的な経済の適応過程を強調したモデルでありながら、税率、経済影響ともに例外的に大きい推定になっている理由の一つには、この種の代替効果が非常に低く見積もられていることがあげられる。

第三の要因は、政策の与え方である。例えば、同じ炭素税を課しても、その税収を所得税減税などで返さない（例えば海外に移転する）場合と、税収を省エネ技術導入のために戦略的に活用する場合とでは、結果は大きく違ってくる。炭素税の税収を戦略的に再投資するAIMモデルと、税収を還元しない黒田・新保モデルとの推定結果の大きな差の一部は、この要因で説明可能である。また、発展途上国の対策コストの安さに着目した国際排出権取引についても、この制度を導入するか否かによって結果は大きく違ってくる。例えば、OECDのグリーン・モデルの分析によれば、国際排出権取引制度を導入した場合、マクロ経済へのマイナスの影響は半分に緩和できると予測している。

このように、環境政策の経済的影響は、モデルの構造、仮定、それに政策の与え方によって予測が大きく変わってくるが、今までの大半のモデル計算が示していることは、わが国の二酸化炭素排出量を安定化するという政策目標を前提とするならば、この政策の経済的影響は国民経済的にみて小さいということである。そして、この安定化政策の経済的影響に関して政治的に解決すべきことは、マクロ経済的な損失ではなくて、その影響の部門別・地域別の分布とその調整だと

いうことである。

一方、世界経済に対する温暖化対策の影響を予測するため、今までに約40種類のモデルが開発されている。これらのモデルにおいて、炭素税の税率やマクロ経済影響の推定に大きく作用する要因は、モデルの基本構造（トップダウン vs ボトムアップ、短期マクロ vs 長期均衡、エネルギー部門の有無、技術開発部門の有無等）、モデルの仮定（GNPのトレンド、技術効率の改善－AEEI、エネルギーの代替弾力性－ESUB、化石燃料リザーブの価格による変化、技術革新の費用等）、及び政策の与え方（現存する税の歪みの除去の有無、税収の活用の有無及びその活用方法、国際排出権取引の導入の有無、二酸化炭素排出削減量とそのタイムアロケーション、対策便益の考慮）の3つに分類できる。

また、これらのモデルを用いた今までのマクロ経済影響の推定結果については、次の傾向が認められる。

- ① 地域的、短期的推定の結果は非常に大きな差がある。（今後15年から20年間にわたって標準シナリオから15～40%の二酸化炭素排出量削減に必要な費用は、GNPの1%を超える上昇から数%の減少という幅がある。）
- ② 長期的な推定結果は比較的小さな幅におさまる。（2、3の例外を除いて、二酸化炭素排出量を安定化させるために必要な費用は、世界のGNPの0～3%の範囲である。炭素税の還元等による緩和策を考慮すれば、このGNPのロスも0～1.5%、成長率の低下は0～0.03%ポイント／年程度の範囲におさまる。）
- ③ この種のGNPのロスは、二酸化炭素排出増加率を標準シナリオよりも2%以上減少しようとする場合に急激に増加する。
- ④ 二酸化炭素排出抑制の経済影響に関して問題となるのは、マクロ経済的な損失ではなくて、その影響の部門別、地域別の分布と調整である。

以上の検討の結果、技術革新、税の還元、国際貿易による影響、日本の国際貢献の効果、地球環境悪化に伴う経済的ダメージ等を分析できる新たな経済モデルの開発が必要であることが明らかとなった。

（4）世界経済モデルの開発

①計量経済モデルの開発

地球環境の保全と世界経済の成長との関係を解析する数量モデル開発の第一歩として、中期計量経済モデルの開発を進めた。このモデルは図3に示すように、29カ国及び7地域からなる世界経済モデルであり、先進国においては生産能力面と金融面の二つの制約条件を伴ったケインズ型の需要主導タイプのモデルで、方程式数は一国／地域当たり80本、途上国においては需給調整を伴った供給主導型のモデルで、方程式数は一国／地域当たり60本である。これらの各国／地域モデルは4種類の貿易マトリクスによって連結され、この貿易マトリクスを媒介にして各国の生産・貿易及び価格変動の国際的波及メカニズムが定量的に把握できるようになっている。さらに、工業品生産モデル及び食料・粗原料・燃料生産モデルに環境汚染セクター及び自然環境セクターを連結して、地球環境と経済成長との関係が分析できる。

本モデルを用いたいくつかのシミュレーションにより、中間的な分析を試みた。まず、標準シ

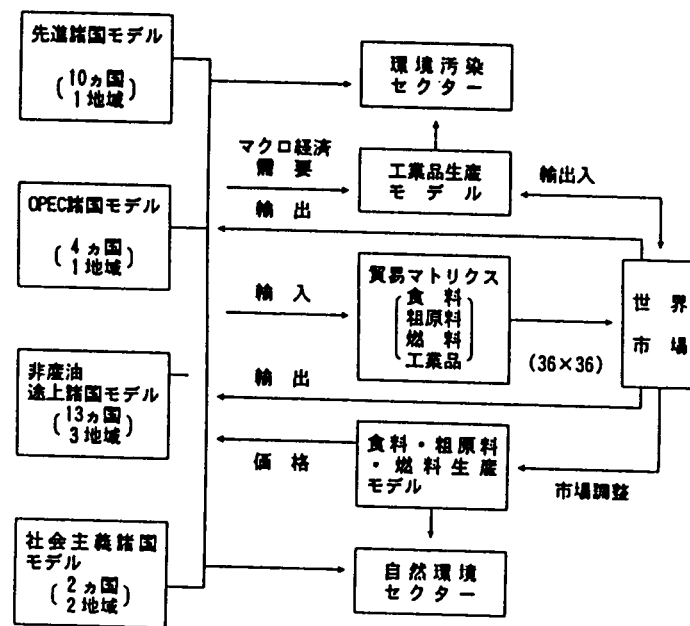


図3 世界経済中期予測モデルの構成

ナリオ（特別な政策を導入しないケース）において、主要な地域の国民総生産当たりの二酸化炭素排出量がどの様に推移するかを予測した結果が表2である。これによると、先進国グループは省エネ化がますます進み、この比率は着実に低減するが、途上国グループはこの比率が少ししか低減しないか逆に増加する傾向を示しており、省エネ格差も南北間でますます拡大する傾向が明らかとなった。次いで、二酸化炭素を大量に排出している途上国である中国とインドに着目して、二酸化炭素排出削減のシミュレーションを行うと、中国では炭素税の導入とそれに伴う経済ロスを補填するためのODAが供与されるのが効果があり、また、インドでは技術誘導型の投資支援のためのODAが効果があるなどの結果が得られた。

②動学的最適化モデルの開発

次に、長期均衡タイプのモデルとして動学的最適化モデルについても、2種類のモデルを開発・改良して、地球温暖化問題の解析に適用した。これらのモデルは、アラン・マン教授の開発したグローバル2100、それにノルドハウス教授の開発したDICEモデルである。

まず、グローバル2100の世界モデルについては、今まで世界を5地域に分割して構成されていたものを、日本、インド及び動態的アジア経済（DAE：韓国、台北、香港、シンガポール、タイ、フィリピンを含む）の3地域を加えて8地域に増やし、それぞれのパラメータを設定した。この改良されたモデルを用いて、アジア太平洋地域における二酸化炭素排出抑制の経済的損失を推定するとともに、二酸化炭素排出抑制に伴って副次的に二酸化硫黄や窒素酸化物等が減少し、地域の環境が改善される効果について推定した。表3には、グローバル2100のシミュレーションによって推定された日本、中国、インド及びDAEにおける二酸化炭素の排出安定化に伴う経済

表2 主要地域での二酸化炭素／G N P比率及び二酸化炭素排出量の推移（標準ケース）

二酸化炭素／G N P比率					
	1990	1995	2000	2005	2010
1. アメリカ	0.381	0.352	0.315	0.282	0.254
2. 日 本	0.163	0.140	0.122	0.102	0.088
3. E C	0.194	0.165	0.143	0.127	0.119
4. 東 欧	0.758	0.720	0.685	0.650	0.614
5. C I S (旧ソ連)	1.075	0.984	0.900	0.824	0.755
6. 産油国	0.217	0.253	0.223	0.259	0.254
7. 中 国	1.102	1.040	0.986	0.935	0.885
8. インド	0.652	0.715	0.773	0.836	0.911
9. 南アジア	0.305	0.304	0.299	0.291	0.286
10. ブラジル	0.181	0.182	0.182	0.182	0.182
11. 世界平均	0.358	0.344	0.330	0.319	0.313

二酸化炭素排出量						
	1990	1995	2000	2005	2010	平均成長率
1. 世界	1450.0	1491.1	1532.6	1582.2	1666.4	0.6
2. 日 本	240.2	270.9	244.0	207.0	214.5	-0.9
3. E C	633.5	623.6	608.2	609.2	652.3	-0.0
4. 東欧	78.6	91.0	110.5	136.0	166.3	3.9
5. C I S (旧ソ連)	419.0	450.6	432.7	319.2	342.0	-1.5
6. 産油国	1046.9	1119.2	1175.6	1235.0	1300.7	1.0
7. 中 国	239.9	321.3	332.0	422.7	499.6	3.7
8. インド	788.3	1028.2	1312.7	1678.3	2154.0	5.1
9. 南アジア	201.0	292.5	491.9	554.5	766.8	7.1
10. ブラジル	135.6	140.6	220.8	270.7	334.7	4.0
11. 南米	76.0	101.1	122.5	145.0	179.4	4.4
12. 中東	223.5	207.6	253.7	317.3	409.1	4.4
13. 全米	3542.9	4176.5	4667.1	7768.4	9007.6	2.5

表3 二酸化炭素排出量安定化に伴う経済的損失と副次的便益

日本				中国					
SO ₂	NO _x	計	CO ₂	SO ₂	NO _x	計	CO ₂		
削減の利益	削減の利益		削減	削減の利益	削減の利益		削減		
2000	0.006	0.079	0.220	-0.148	2000	0.010	0.135	0.378	-0.938
2010	0.008	0.114	0.319	-0.200	2010	0.017	0.227	0.633	-2.095

インド				D A E					
SO ₂	NO _x	計	CO ₂	SO ₂	NO _x	計	CO ₂		
削減の利益	削減の利益		削減	削減の利益	削減の利益		削減		
2000	0.010	0.134	0.373	-0.074	2000	0.047	0.637	1.780	-5.622
2010	0.011	0.154	0.429	-0.389	2010	0.073	0.992	2.769	-9.518

的損失、副次的に生じる二酸化硫黄及び窒素酸化物の排出削減の利益、これらの利益とともに自然環境劣化の緩和や道路交通による被害減少等の利益を加えた合計の二次的利益、のそれぞれを2000年及び2010年について対GDP比率により示している。これによれば、二酸化炭素の排出安定化による経済的損失はD A E諸国において最も大きく、中国においても比較的大きな損失が見込まれる。これに比べてわが国やインドの経済的影響は少ない。また、二酸化硫黄や窒素酸化物

等の排出量が減ることによる副次的な利益は、D A E や中国において大きい、経済的損失をカバーするまでには至らない。これに対して日本及びインドの副次的な利益は経済的損失よりも大きく、温暖化防止に伴う利益を考慮しなくても二酸化炭素の排出量の安定化は経済的に見合うものであることが示唆された。

一方、D I C E モデルは世界全体を一つの閉鎖経済としたモデルであるが、二酸化炭素の排出にとどまらず、温度上昇や温暖化による被害を簡単な関数形を用いて定式化しているため、温暖化の被害も勘案して最適経済成長の経路を推定することができる。このため、このD I C E モデルとグローバル2100モデルの両者の特長を生かし、前者の温暖化と経済活動との相互影響関係のモデルに後者のエネルギー資源利用の考えかたを取り入れ、世界を1地域として地球温暖化と世界経済との相互影響をシミュレートするモデルを開発した。具体的には、エネルギーは石油、石炭、天然ガス、バイオマス、再生可能エネルギー、原子力の6種の一次エネルギーが、一部の電力変換を経て産業、民生、輸送各部門に分配される。経済活動は1マクロ経済部門に統合され、資本、労働、エネルギーは生産関数で結ばれている。民生部門、輸送部門のエネルギー需要はこの算出額の関数で表される。温暖化プロセスは大気と深海の2槽モデル表現され、温度上昇は2次関数として産出額に負の影響を与える。この上で、最適な資本形成のパスを求めるものである。そして、このモデルのパラメータを最新の科学的知見に基づいて設定し、各種のシナリオのもとでの二酸化炭素排出の社会的費用を推定した。表4には、D I C E モデルによって推定された2030年までの二酸化炭素排出の社会的費用がシナリオごとにまとめている。これによれば、二酸化炭素排出の社会的費用は、将来の消費をどのように現時点で評価するか（割引率）、温室効果ガスによってどの程度地球の温度が上昇するか（気候感度パラメータ）、世界の人口が今後どの程度伸びるか、温暖化がどの程度の経済的損害をもたらすか（被害関数の形状）、によって大きく異なることが明らかとなった。

このモデルはさらに、世界を日本、その他OECD、その他の3地域に分割した上、根岸ウェイトを用いてニューメレール財、石油、石炭、天然ガス、バイオマスおよび原子力エネルギー源に関する国際貿易額とその国際市場取引価格の推移を求められるよう拡張された。特に、炭素排出量安定化シナリオでは、世界各地域に適当な炭素排出権を割り当てた上で、それらがどのような価格で国際市場で取引されるかまでをシミュレートできるようにした。

このようなモデル開発の結果、温暖化の影響を考慮した上で、①先進工業国と途上国および日

表4 種々の想定のもとでの二酸化炭素排出の社会的費用

シナリオ	2000	2010	2020	2030
Nordhaus的最適化	5	7	8	10
排出量安定化	48	130	280	375
気温上昇安定化	94	146	219	331
低位気温上昇	41	50	56	62
中位気温上昇	60	76	89	103
(同上、短い時間的視野)	54	69	80	92
高位気温上昇	117	149	174	201
低人口成長等	23	27	30	32
高人口成長等	263	344	415	497
高損害：弾数3.5	257	338	409	493
高損害：損害パラメター 4%	357	461	551	655

本の最適成長パスの相違、②化石燃料、バイオマス、原子力エネルギーの資源制約観点及び国際市場での世界長期的視点からの評価、を行うことが可能となった。A. 標準ケース、B. 原子力導入半減ケース、C. 炭素排出安定化ケースの3通りのシナリオのもとでのシミュレーションの結果、(1). 大気温度はケースA, B では2100年までに約3.3℃上昇するが、炭素排出安定化の場合は約2.1℃に留まる、(2). 炭素排出抑制の経済活動への影響は、特に途上国地域で大きい、等を得た。

③システムダイナミクス・モデルの開発

以上の長期均衡タイプの経済モデルの他に、環境投資の長期的経済効果を評価するために、システム・ダイナミクスモデルの適用を検討した。分析に用いたモデルは、メドウズらが「成長の限界」の分析のために開発してその後改良されたWORLD3であり、工業生産や人口の増加と資源制約や環境制約との関係をダイナミックにモデル化したものである。このモデルに環境投資とその効果推計のモジュールを付加して改良し、環境汚染防止投資に伴う労働力供給の安定化効果や省資源投資に伴う資源供給の安定化効果のシミュレーションを通じて、環境投資が経済発展に及ぼす効果を推定した。

図4はこのシミュレーション結果のうちの2つを示したものである。上の図は特段の環境投資を行わない場合のシミュレーション結果で、これによれば、2040頃から資源制約が環境制約が厳しくなり経済的発展の基盤が失われていくシナリオが示唆されている。これに対して下の図は、汚染防止及び省資源に工業資本の15%程度を投資すれば、来世紀末まで工業生産を増加させることができるシナリオが描ける。長期的にみれば環境投資は結局のところ経済発展を支えるものであり、環境と経済を対立させた概念として論じるのではなく、統合した概念として論じる必要性が明らかにされた。

④二国モデルの開発

以上の世界モデルの他に、日本及び中国の経済発展と地球環境との関連をモデル分析し、エネルギー価格高騰後の産業構造の変化が、両国の関係、地球環境、特に二酸化炭素排出量に与えた

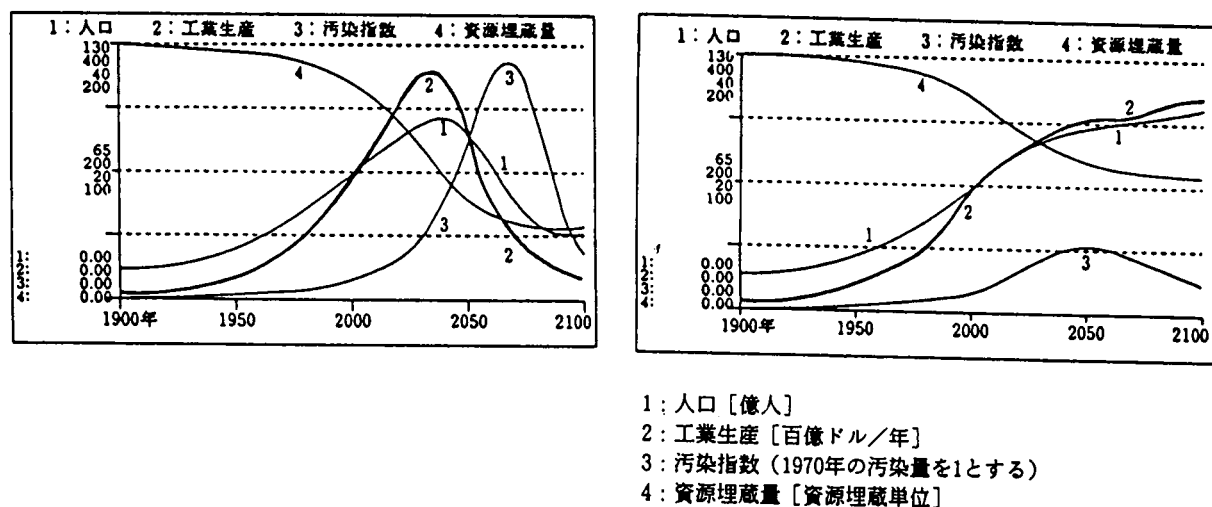


図4 環境投資の超長期的効果

影響などを分析するため、中国と日本の二国モデルも開発した。

このモデルではまず、日本一国のモデルを作成し、2010までの期間について炭素税導入によって削減を目指す政策と、炭素排出量を直接規制する政策が、日本経済に与える影響を比較評価した。分析結果によれば、炭素税導入のような経済的手段による方法が、直接規制よりも、実質総生産の大きさを表した経済厚生損失を低く押さえることが明らかにされた。2010年における炭素排出量を1990年レベルに押さえる場合、炭素税による削減では、累積損失が3兆円であるのに、直接規制では5兆円を上回ることに明らかにされた。さらに、国際収支などの対外的目標に対しても、直接規制が飢餓輸出を増加させるのに対して、炭素税導入が対外不均衡の解消にも役立つことが明らかにされた。

次に、経済発展の著しい中国の動向が、日本の環境に与える影響が大であることから、中国と日本の二国をモデル化して、経済発展が地球環境に及ぼす効果を分析した。この結果、次の諸点が明らかとなった。

- ・日本の炭素排出量は、2010年には現在の水準の12%増となる。
- ・日本の炭素排出量を安定させるには、年率2%でエネルギー価格を上昇させる炭素税の導入が必要である。
- ・中国の炭素排出量は、2010年には現在の水準から40%増となる。
- ・中国の炭素排出量を安定化させるには、年率4%でエネルギー価格を上昇させる炭素税の導入でも十分でない。
- ・中国の炭素排出量を抑制する最も効果的な方法は、石炭から他のエネルギー源に転換することである。
- ・日本が炭素税収入の一部を、中国における石油・天然ガスのパイプライン網の整備目的で資金協力すれば、両国の炭素排出量を減少させる最も効率的な政策となりうる。

（５）国内経済モデルの開発

①一般均衡モデルの開発

地球環境保全と経済発展との相互関係を分析するためには、30年から100年という地球環境保全の時間スケールに合わせて、炭素税等の価格政策の効果や国際マーケットを通じたダイナミックなエネルギー需給の調整などの長期的な経済シナリオを描くモデルが必要となる。このため、長期均衡タイプの2種類のモデル、即ち、一般均衡モデル及び動学的最適化モデルを開発した。

一般均衡モデルについては、米国のバテル研究所のエドモンズ博士を中心に開発中の第二世代モデル（SGM）のプロジェクトに参加して、日本モデルの開発を進めた。このSGMモデルは、図5に示すように、3つの生産部門と家計部門及び政府部門からなる計量一般均衡モデルである。エネルギー部門は8つの部門にさらに分割され、温室効果ガス排出量を詳細に推定できるよう配慮されている。また、世界を最終的に20地域に分割する予定になっており、わが国は一つの地域として独立してモデル化される。そして、エネルギー、農産物、その他生産物に関して地域間貿易が考慮されている。このモデルの特徴は、エネルギー部門を詳しく描いたモデルである。1985年時点の産業連関表を初期値として、5年を1期間として、1990～2030年までの9期間をシミュレートし、将来各期間の産業連関表が計算される。また、産業は、農林水産業、原油、天

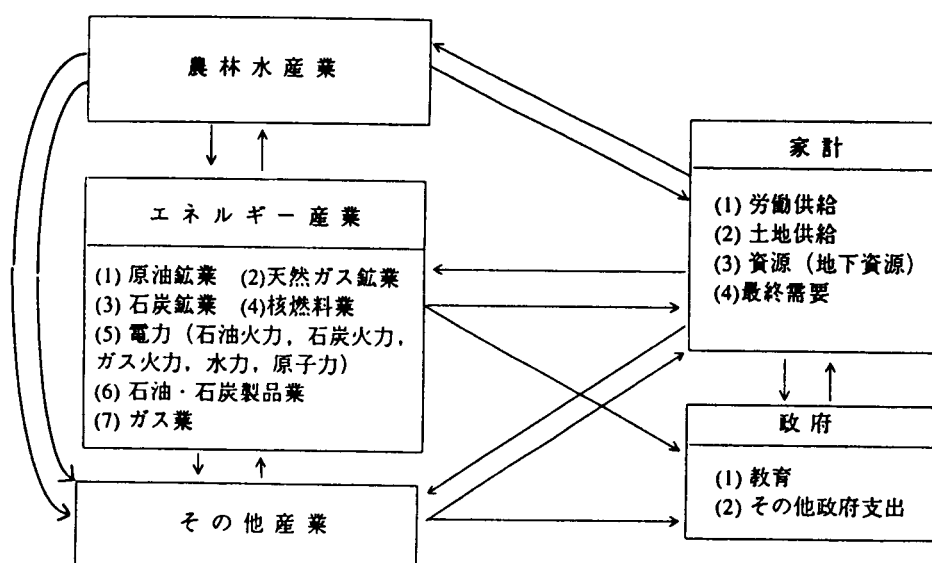


図5 SGMの基本構成

然ガス、石炭、核燃料、電力、石油石炭製品、ガス供給、その他産業の9部門に分割される。ただし、電力部門だけさらに、石油火力発電、LNG火力発電、石炭火力発電、原子力発電、水力発電の5小部門に分割している。

このモデルを用いて、わが国の二酸化炭素排出量を安定化させる場合に、どの程度の炭素税が必要で、それによってどの程度の経済影響が生じるかを分析した。その結果を、図6に示す。2000年以降CO₂排出量を1990年レベルに安定化させるためには、2000年には28%のCO₂を、以降年々CO₂削減率は大きくなり、2030年には44%のCO₂を削減する必要がある。このために必要となる炭素税率（円/TC）は、2000年時点で、40,000円であり、CO₂削減率の増加とともに、年々税率は高くなり、2030年には90,000円となる。これによって、石油、天然ガスの価格は、約2倍になり、石炭の価格は、約3倍になる。実質GDPは、2000年には、0.7%低下するが、以降税率の上昇に伴って、年々低下率は大きくなり、2030年には1.6%低下することになる。これまでの研究成果と比較すると、小さい経済影響となっている。なお、この計算結果は、太陽エネルギーなどに関する新技術の導入については考慮されていない。したがって、新技術の導入可能性について考慮すると、実際には、ここで得られた計算結果よりも、より小さくなるであろう。

②動学的最適化モデルの開発

また、マクロ経済及びそれと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て、二酸化炭素排出量の抑制と経済活動やエネルギー消費との関係を分析する目的でGDMEEMモデルを開発した。これは、エネルギー生産部門とエネルギー消費部門、それに両者を統合する市場均衡と二酸化炭素排出算定モジュールから構成されている。

このモデルを用いて、わが国の二酸化炭素の排出抑制とそのマクロ経済影響との関係に分析した。この結果、表5に示すように、二酸化炭素排出量を1990年レベルに安定化する場合には、わが国のマクロ経済的損失が0.11%程度生じ、ることが分かった。一方、新たな省エネ技術を導入

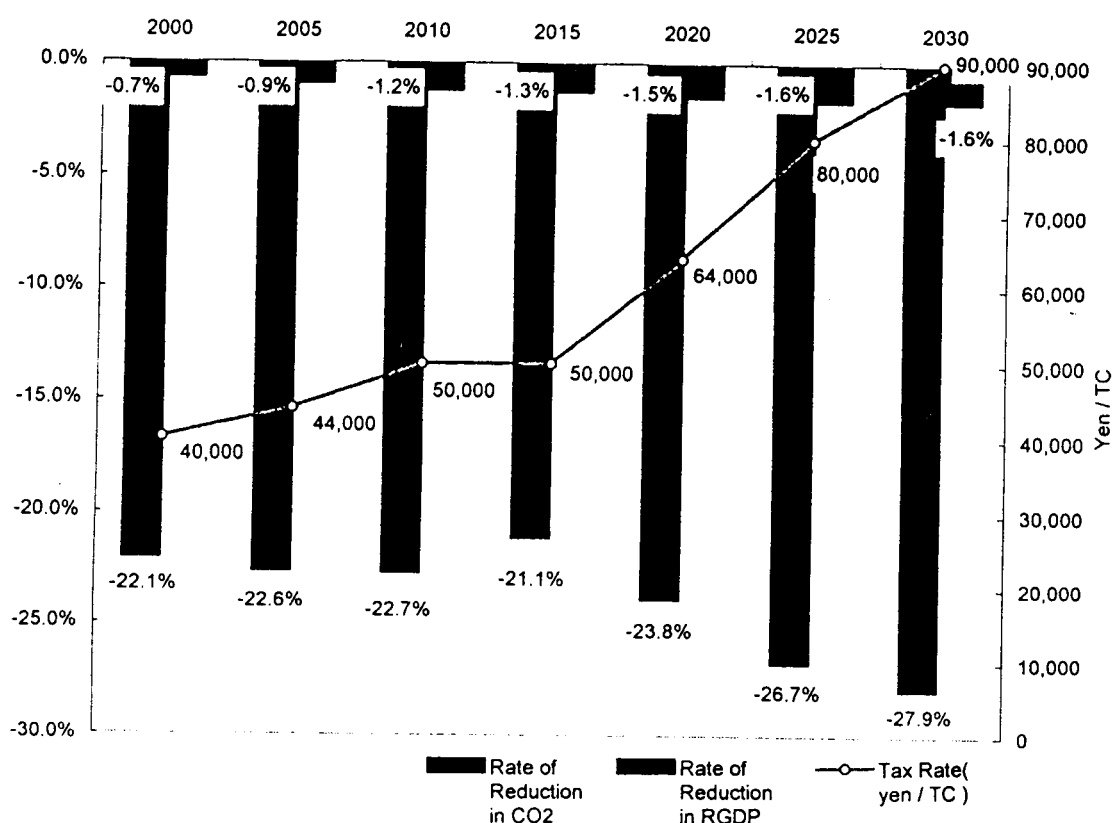


図6 わが国の二酸化炭素排出量安定化に伴う炭素税税率とマクロ経済影響
(SGMによるシミュレーション結果)

表5 わが国の二酸化炭素排出量安定化に伴うマクロ経済影響
(GDMEEMによるシミュレーション結果)

	Calendar Year					Growth R. (%/yr)		Sum (P.V.)
	1990	1995	2000	2005	2010	90/2000	90/2010	\$ billion
Macro-economic indices								
GNP (\$ billion/yr) vs BASE (%)	3,720 (0.00)	4,344 (-0.08)	4,980 (-0.17)	5,644 (-0.09)	6,348 (-0.04)	2.92	2.67	59,130 (-0.11)
Aggr. Energy Demand (trillion kcal/yr) vs BASE (%)	3,141 (0.00)	3,218 (-7.71)	3,435 (-12.34)	3,587 (-16.21)	3,821 (-18.93)	0.90	0.98	
Average Energy Price (\$/million kcal) vs BASE (%)	61.48 (0.00)	85.32 (19.21)	98.75 (28.69)	117.35 (40.83)	134.26 (52.90)	4.74	3.91	
Annual CO2 Emissions (billion ton-C/yr) vs BASE (%)	0.300 (0.00)	0.300 (-7.12)	0.300 (-16.67)	0.300 (-21.47)	0.300 (-26.47)	0.00	0.00	
Avg. (P.V.)								
Shadow Pr. of CO2 Emissions (\$/ton-C)	150.3	220.7	328.3	469.1	649.2	-	-	200.5

(1990 Prices; Exchange Rate = 120 yen/\$; P.V.: Present value, Discount Rate = 5%/yr)

する場合の経済的効果はGNPの0.1%程度あり、このため、新たな省エネ技術の効果を勘案して二酸化炭素排出量の経済影響を推定してみると、マクロ経済的損失は省エネ技術導入のメリットと相殺されて、二酸化炭素排出抑制はGNPに対して中立的な関係となる可能性が示された。

しかし、マクロ経済的効率性のみが望ましくかつ追求すべき唯一の評価基準でないことは明らかであり、「影響（負担）の公平性」というミクロ的視点からの分析へと発展させた。そこでの主要な結論の一つは、「効率性と負担の公平性は基本的にトレード・オフの関係にある」というある意味では自明なものである。試算結果によれば、「上述のCO₂排出量安定化（炭素税、税収の中立性を仮定）に伴うマクロ経済的損失はGNP比で-0.1%程度に過ぎないものの、納税額を含む収益額の変化で評価した産業部門別影響は-0.3%（サービス）から-9.5%（鉄鋼）と大きなバラツキを伴う」ことが示された（図7）。さらに、このような傾向が各産業部門の合理的行動（利潤最大化等）の必然的な結果であることを理論的にも説明した。

次に、省エネ技術導入補助に向けた税収の還流による高い経済的効率性、および上記トレード・オフ関係の緩和の可能性を評価した。特に前者では、1.4兆円の費用（省エネ技術導入補助）によって約7.6兆円のマクロ経済的付加価値が誘発され、ある意味での経済的乗数効果は5倍強と試算された（図8）。

一連の研究からの主要なメッセージを多少の私的見解をも交えながら要約すると、CO₂抑制に対する経済的効率性および影響（負担）の公平性に留意した社会的に柔軟な対応には、

(1) 経済的手段（課税）による市場メカニズムを通じた効率的抑制の実現と税収を財源とするエネルギー代替や省エネ投資への補助、および所得配分に関する公平性（負担の公平性）に配慮した補償措置などソフトな移行を目指す諸緩和政策との望ましいカップリング、そして、その合意に向けた、

(2) 環境税という汚染者負担原則（P.P.P.:Polluter Pays Principle）の1つの具体化と税収の還流による公共財としてとらえた「快適な環境」の保全費用に対する社会的に広く受け入れられている負担（部分的な累進性）の適用という2つのいずれも根拠のある政策手段の理念的調和

という視点からの議論の必要性和重要性が示唆される。

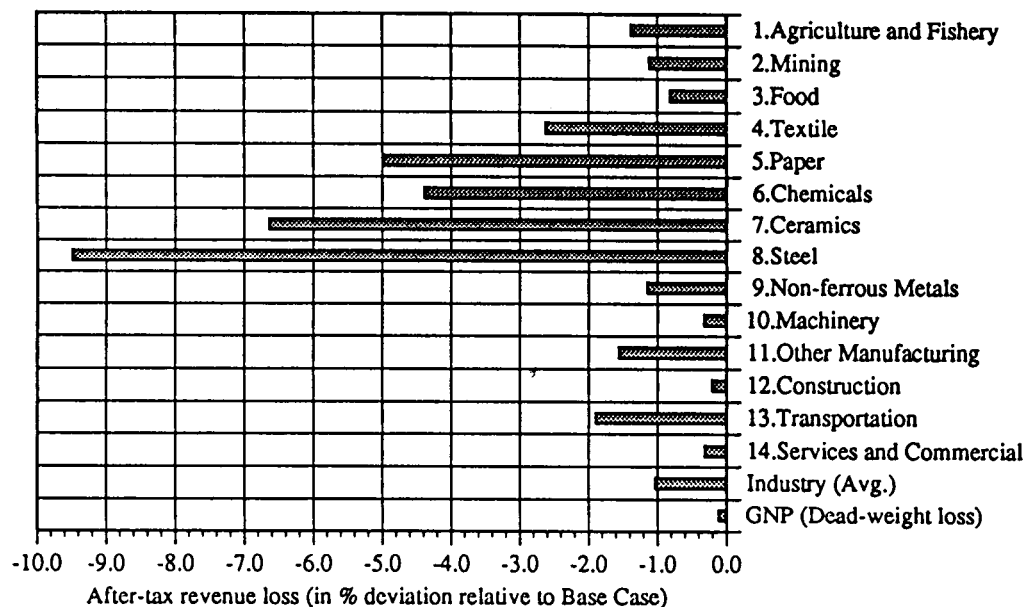


図7 わが国の二酸化炭素排出量安定化に伴う部門別の影響

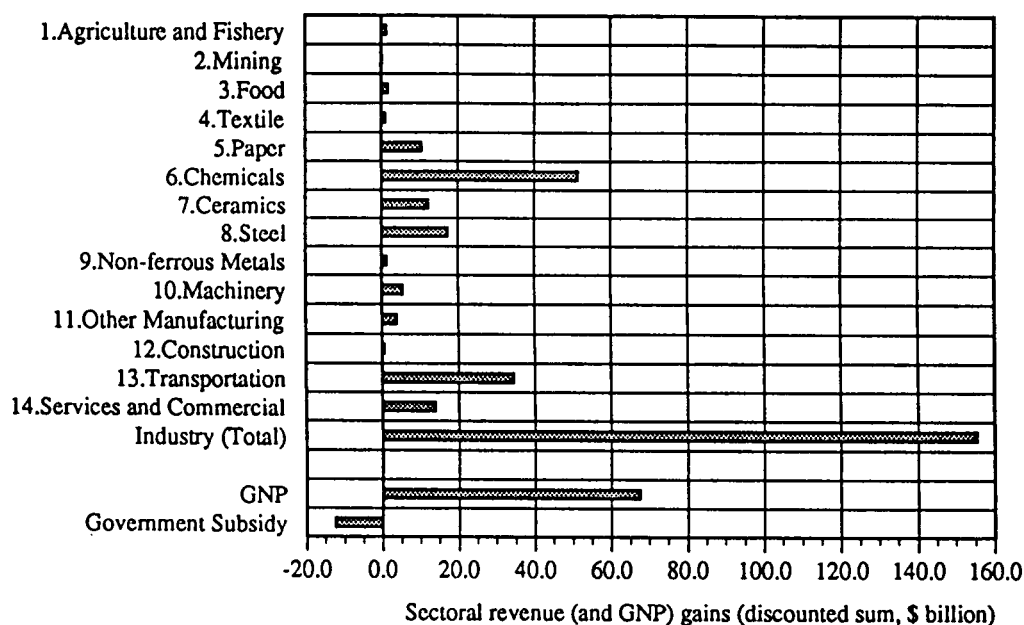


図 8 省エネ補助金による部門別の影響

(6) HDP 活動支援のためのアンケート調査の実施

HDP の国内活動を進めるための基礎情報の整備を目的として、わが国において地球環境変化の人間の社会的側面の分野で研究活動を実施もしくは今後実施予定の研究者に対して、質問紙調査を実施した。調査内容は、各研究者の一般的情報に加えて、HDP 関係分野で参加している学協会、研究プロジェクト、従来の研究実績と今後の研究の関心、HDP への要望等である。

本調査の結果、合計 95 名の研究者から回答を得た。その内訳は、法学 5 名、経済学 20 名、地理学 20 名、工学 23 名、その他が 27 名である。

回答者の今までの研究経験分野をみると、人間と環境との調和に関する領域が最も多く、次いで人間活動が地球環境に影響を及ぼす側面の研究、環境倫理や環境教育分野、総合モデル研究、技術と環境に関する研究と続く。今後特に伸びそうな研究分野は、第一に、地球環境変化が人間社会に影響を及ぼす側面の研究、第二に、環境資産のストック分析、第三に、倫理・教育分野、第四に、総合モデルの分野であった。

4. まとめ

5 か年間の研究により、地球環境保全と経済発展の関係を簡略な構造で解析するフレームワーク・モデル、自然現象の体系的解析をめざす 3 次元物質循環モデル、それに各種の経済モデルを開発した。特に、経済モデルについては、計量経済モデル、一般均衡モデル、動学的最適化モデル、及び、システム・ダイナミクスモデルの開発を進め、持続的発展の分析のための基本的なツールを完成させた。また、社会科学・人文科学分野のわが国の地球環境の実態を調査して、今後の研究推進の基礎情報を得た。

今後はこれらの基本的なツールを体系的に組み合わせて、持続的発展の条件を解明する研究へと発展していきたい。

5. 成果発表

- A. Amano (ed) (1992) Global Warming and Economic Growth : Modeling Experience in Japan. Center for Global Environmental Research, CGER-i001-'92
- A. Amano, S. Nishioka et al. ed. (1994) Climate Change: Policy Instruments and their Implications. CGER-I012-'94, 407 pages.
- 天野明弘 (1994) 世界経済研究. 有斐閣, 280ページ.
- K. Ban (1992) Estimation of Energy Demand Functions Using Non Stationary Data. Osaka Economic Paper 42, 53-57.
- N. Goto and T. Sawa (1993) An Analysis of the Macro-economic Costs of Various CO₂ Emission Control Policies in Japan. The Energy Journal, 14(1), 83-110.
- 松岡 譲・森田恒幸 (1992) 地球温暖化におけるモデルと予測. 計測と制御, 31(5).
- 松岡 譲・辻本 渉 (1993) 河川・海洋を中心とした地球規模の物質循環モデルの開発. 第一回地球環境シンポジウム講演集, 261-270 .
- S. Mori (1994) A Long Term Simulation of DICE model. International Energy Workshop, Honolulu, 21-22, June, 1994.
- Morita, T., Y. Matsuoka, I. Penna and M. Kainuma (1994) Global Carbon Dioxide Emission Scenarios and their Basic Assumptions /1994 Survey. NIES, CGER-I011-'94, 77p.
- 西岡 秀三 (1991) 地球環境. 別冊日経サイエンス, 1991.
- 西岡 秀三 (1991) 地球環境問題解決の展望. 地球環境工学ハンドブック
- S. Shishido (1992) Long-term Impacts of Carbon Taxes on Global Environment and Growth, Paper presented to Project LINK Meeting in Ankara, Sept. 1992.