

B-15 アジア太平洋地域における温暖化対策分析モデル(AIM)の開発に関する
途上国等共同研究

(1) 温室効果ガス排出モデル(AIM/emission)の開発に関する共同研究

① 基本モデルの開発に関する共同研究

研究代表者 国立環境研究所 森田恒幸

環境庁 国立環境研究所

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 環境計画/環境経済室 原沢 英夫・高橋 潔・川島 康子

(委託先) 名古屋大学工学部 松岡 譲

(海外共同研究機関) 中国エネルギー研究所・インド経営研究所・韓国エネルギー経済研
究院・韓国サンミュン大学・インドネシア環境省・米国国立太平洋
北西研究所・米国エネルギーモデリング・フォーラム

平成6-8年度合計見積予算額 96,142千円

(平成8年度予算額 33,685千円)

[要旨] 本研究の目的は、アジア太平洋地域において排出される温室効果ガス量を予測し、その抑制方策を評価するために、この地域の研究機関と協力してシミュレーション・モデルを共同開発することにある。このため先ず、中国、韓国、インド及びインドネシアを対象にして技術選択を考慮した二酸化炭素排出量の予測モデルを開発し、これらの国の部門別の二酸化炭素排出量や対策効果の評価を進めた。また、既に開発済のわが国のモデルを改良して、最新のデータをもとに炭素税と補助金の複合効果を分析するとともに、2030年までの長期的な二酸化炭素排出量の見通しを推定した。これらのモデル開発の成果は、マニュアルとしてとりまとめられて発展途上国への技術移転が図られた。さらに、国別のモデルをベースにして、アジア太平洋地域及び世界全体のモデルによるシミュレーション分析を進め、二酸化炭素や大気汚染物質の今後の排出量を推計するとともに、削減対策の効果を推計した。また、今後の温室効果ガスや抑制対策が国内の大気汚染対策と連携して実施される見通しであることから、両国の国内の環境政策の発展過程をわが国と比較分析し、国別排出モデルの拡張のニーズを検討した。一方、土地利用変化による二酸化炭素の排出量を予測するため、地球規模の熱帯林の減少モデルを開発した。また、温室効果ガス排出に伴う大気中の濃度変化を推定するため、ミッシングシンクの要因の一つとして注目されている二酸化炭素の肥沃化減少に焦点を当てて、詳細な陸域炭素循環モデルを開発するとともに、このモデルを組み込んで種々の排出シナリオのもとでの気温上昇を推定した。さらにこの炭素循環モデルと気候変化モデルをベースにして、交渉可能安全排出コリダー、即ち、温度上昇の速度等の自然のスレッシュ・ホールドを制約条件として与えた場合に、先進諸国に許容される温室効果ガス排出の範囲について分析した。

[キーワード] 地球温暖化、アジア太平洋地域、シミュレーション・モデル、温室効果ガス、
発展途上国、炭素循環、安全排出コリダー

1. 研究の背景と目的

地球温暖化はアジア太平洋地域の社会経済に著しい影響を及ぼすとともに、その対策にはこの地域に大きな経済的負担を強いるものと予想されている。アジア太平洋地域において温暖化防止対策を総合的に推進するためには、この地域の各国から排出されあるいは吸収される温室効果ガスの量を国際的調整メカニズムを考慮しながら予測し、排出削減の方策を導入した場合の効果を明らかにする必要がある。さらに、アジア太平洋地域におけるわが国の貢献策の効果も分析する必要がある。これらの予測及び評価のためには、総合的なシミュレーション・モデルの開発が不可欠である。

本研究は、過去3か年をかけて開発してきたアジア太平洋圏温暖化対策分析モデル(AIM)をさらに発展させるとともに、これらの地域の具体的な政策の分析に役立てるべく、発展途上国等の研究機関と協力して改良することを目的としている。

2. シミュレーション・モデル(AIM)の基本構造

AIMは、温室効果ガス排出・気候変化・その影響といった一連のプロセスを統合して分析できる「総合モデル」である。この総合モデルは、各国や地域の社会経済にどのような気候変化を結びつけて検討できるだけでなく、地球規模の気候変化が国や地域の社会経済にどのような影響を及ぼすかについても検討できるため、各種温暖化対策を総合的に評価(integrated assessment)することが可能である。

AIMの全体構造は、図1に示すとおり、人為起源の温室効果ガスの排出量を予測する温室効果ガス排出モデル(AIM/emission)、排出された温室効果ガスの大気中濃度を予測して温度上昇を推定する温暖化現象モデル(AIM/climate)、それに、気候変化がアジア太平洋地域の自然環境や社会経済に及ぼす影響を推定する温暖化影響モデル(AIM/impact)から構成されている。本サブテーマはこのうち、AIM/emissionモデルを中心に発展途上国等と共同研究を進めたものである。このモデルの特徴は、市場均衡を基本にし

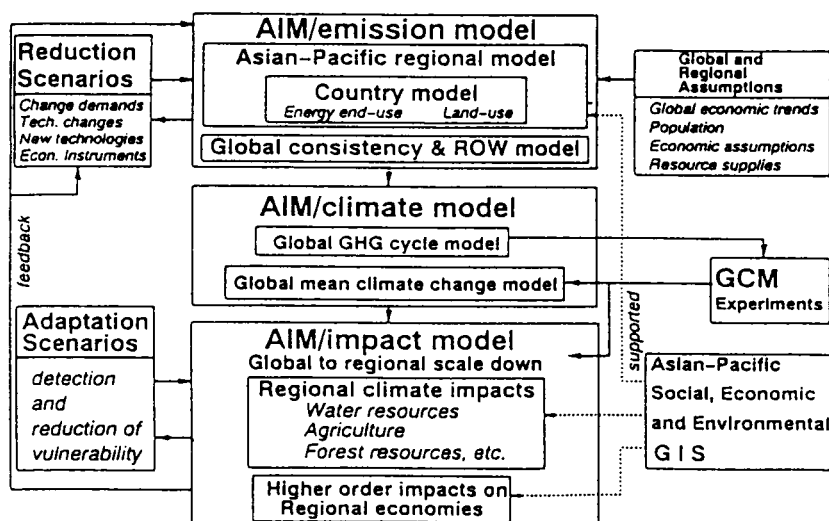


図1 AIMの全体構成

て世界の経済活動の推移を予測するトップダウン型の経済モデルと、各種の技術の導入を考慮してエネルギー消費量等を部門別に積み上げて推定するボトムアップ型の国別エンドユース・モデルを統合したところにある。これによって、世界的な社会経済の趨勢と各国の個別的な対策の効果との関係を体系的に明らかにすることができる。また、本サブテーマでは、AIM/climateモデルのうち炭素循環モデルの開発とこれをベースにした交渉可能安全排出コリダの分析も行った。

3. 本研究により得られた成果

(1) 国別モデルの開発とシミュレーション

まず、AIM/emissionのうち、ボトムアップ型の国別エンドユース・モデルを発展途上国と共同して開発した。このモデルは、図2に示すように、エネルギーによってサービスされるべき各種需要（エネルギーサービス）を見積る「エネルギーサービス量算出モジュール」、エネルギー効率の改善を計算する「エネルギー効率算出モジュール」、そして、エネルギー効率を決定する各種サービス技術を選択する「技術選択モジュール」から構成されている。以下に、各国別のモデル開発の概要とそれを用いたシミュレーションの結果をまとめる。

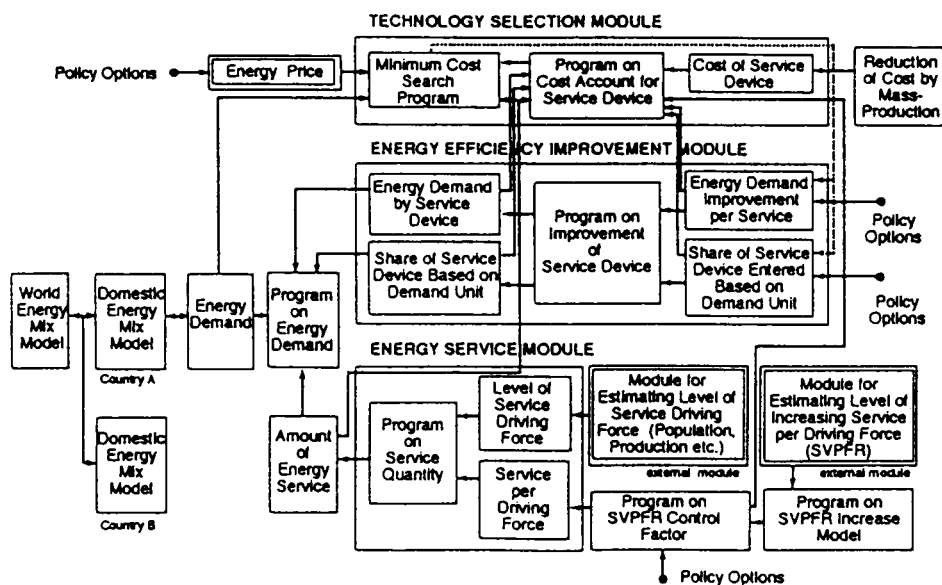


図2 二酸化炭素排出モデルの基本構造

① 中国モデルの開発とシミュレーション

中国については、中国エネルギー研究所と共同してモデル開発を進めた。

対象としたエネルギー消費部門は、工業（鉄鋼・非鉄金属・建材・化学・石油化学・紙パ・繊維・機械）、農業（灌漑・農耕・食品加工・漁業・畜産）、家庭（都市、農村）、サービス、及び運輸である。これらの部門毎に、エネルギーの消費実態とその構造、エネルギーサービス量の将来見通し、エネルギーサービスを提供する際に利用される技術等の実態を調査した。表1には

表1 中国モデルで対象としたエネルギー技術

| Classification | Technologies (equipment) |
|---------------------------------|---|
| Iron & Steel | Coke oven, Sintering machine, Blast furnace, Open hearth furnace (OH), Basic oxygen furnace (BOF), AC-electric arc furnace, DC-electric arc furnace, Ingot casting machine, Continuous casting machine, Continuous casting machine with rolling machine, steel rolling machine, Continuous steel rolling machine, Equipment of coke dry quenching, Equipment of coke wet quenching, Electric power generated with residue pressure on top of blast furnace (TRT), Equipment of coke oven gas, OH gas and BOF gas recovery, Equipment of co-generation. |
| Non-ferrous metal | Aluminum production with sintering process, Aluminum production with combination process, Aluminum with Bayer, Electrolytic aluminum with upper-insert cell, Electrolytic aluminum with side-insert cell, crude copper production with flash furnace, crude copper production with electric furnace, Blast furnace, Reverberator furnace, Lead smelting-sintering in blast furnace, Lead smelting with closed blast furnace, Zinc smelting with wet method, Zinc smelting with vertical pot method. |
| Building materials | Cement: Mechanized shaft kiln, Ordinary shaft kiln, Wet process kiln, Lepol kiln, Ling dry kiln, Rotary kiln with pre-heater, dry process rotary kiln with pre-calciner, Self-owned electric power generator, Electric power generator with residue heat; Brick & Tile: Hoffman kiln, Tunnel kiln; Lime: Ordinary shaft kiln, Mechanized shaft kiln; Glass: Floating process, Vertical process, Colburn process, Smelter. |
| Chemical industry | Equipment of synthetic ammonia production: Converter, Gasification furnace, Gas-making furnace, Synthetic column, Shifting equipment of sulphur removing; Equipment of caustic soda production: Electronic cell with graphite process, Two-stage effects evaporator, Multi-stage effects evaporator, Equipment of rectification, Ion membrane method; Calcium Carbide production: Limestone calciner, Closed carbide furnace, Open carbide furnace, Equipment of residue heat recovery; Soda ash production: Ammonia & salt water preparation, limestone calcining, distillation column, filter; Fertilizer production: Equipment of organic products production, Equipment of residue heat utilization |
| Petrochemical Industry | Facilities of atmospheric & vacuum distillation, Facilities of rectification, Facilities of catalyzing & cracking, Facilities of cracking with hydrogen adding, Facilities of delayed coking, Facilities of light carbon cracking, Sequential separator, Naphtha cracker, de-ethane separator, diesel cracker, de-propane cracker, facilities of residue heat utilization from ethylene. |
| Paper-making | Cooker, facilities of distillation, facilities of washing, facilities of bleaching, evaporator, crusher, facilities of de-water, facilities of finishing, facilities of residue heat utilization, facilities of black liquor recovery, Co-generator, Back pressure electric power generator, condensing electric power generator. |
| Textile | Cotton weaving process, Chemical fiber process, Wool weaving & textile process, Silk process, Printing & dyeing process, Garment making, Air conditioner, Lighting, Facilities of space heating. |
| Machinery | Ingot process: Cupola, Electric arc furnace, fan; Forging process: coal-fired pre-heater, Gas-fired pre-heater, Oil-fired pre-heater, Steam hammer, Electric-hydraulic hammer, Pressing machine; Facilities of heat processing: Coal-fired heat processing furnace, Oil-fired heat processing furnace, Gas-fired heat processing furnace, Electric processing furnace; Cutting process: Ordinary cutting, high speed cutting. |
| Irrigation | Diesel engine, Electric induct motor |
| Farming works | Tractor, Other agricultural machine |
| Agricultural products process | Diesel engine, Electric induct motor, processing machine, coal-fired facilities. |
| Fishery | Diesel engine, Electric induct motor. |
| Animal husbandry | Diesel engine, Electric induct motor, Other machines. |
| Space heating in resident | Heat supplying boiler in thermal power plant, Boiler of district heating, Dispersed boiler, Small coal-fired stove, Electric heater, Brick bed linked with stove (Chinese KANG). |
| Cooling in resident | Air conditioner, Electric fan. |
| Lighting in resident | Incandescent lamp, Fluorescent lamp, Kerosene lamp. |
| Cooking & Hot water in resident | Gas burner, bulk coal-fired stove, briquette-fired stove, Kerosene stove, Electric cooker, cow dung-fired stove, firewood-fired stove, methane-fired stove. |
| Electric Appliance | Television, Cloth washing machine, Refrigerator, others. |
| Space heating in service sector | Heat supplying boiler in the thermal power plant, Boiler of district heating, dispersed boiler, Electric heater. |
| Cooling | System of central air conditioner, Air conditioner, Electric fan. |
| Lighting | Incandescent lamp, fluorescent lamp. |
| Cooking & Hot water | Gas burner, Electric cooker, Hot water pipeline, Coal-fired stove. |
| Electric Appliance | Duplicating machine, computer, Elevator, others. |
| Passenger & freight transport | Railway (passenger & freight): Steam locomotive, Internal combustion engine locomotive, Electric locomotive.; Highway (passenger & freight): Public diesel vehicle, Public gasoline vehicle, Private vehicle, Large diesel freight truck, Large gasoline vehicle, small freight truck. Waterway (passenger & freight): Ocean-going ship, Coastal ship, Inland ship. Aviation (passenger & freight): Freight airplane, passenger airplane. |

評価対象とした技術の一覧を示す。これらの全技術について、初期導入コスト、年次別普及基数、省エネ効果量、技術コーホート、投資回収期間等の基礎データを詳細に調査し、モデルのパラメータや初期条件を設定した。

こうして開発したモデルを用いて、中国及び韓国の二酸化炭素排出量とその削減の可能性についてシミュレートした。シミュレーションに用いたエネルギーサービスの将来需要のシナリオを表2に示す。このモデルでは、技術導入の初期コストの増加とエネルギー節約による便益の増加の比較によって、省エネ技術の導入が判断される。従って、同じエネルギーサービス需要量を前提にしても、炭素税によってエネルギー価格を増加させたり、補助金によって初期コストを下げることにより技術選択が変わり、結果として二酸化炭素の排出量が下がるという、温暖化対策の効果が具体的にシミュレートできる。

表2 中国のエネルギーサービスの将来需要シナリオ

| Energy Service | 1990 | 2000 | 2010 |
|--|------|------|-------|
| Steel Output | 1 | 1.8 | 2.1 |
| Copper output | 1 | 1.5 | 1.7 |
| Aluminum output | 1 | 2.5 | 3.5 |
| Synthetic ammonia Output | 1 | 1.3 | 1.8 |
| Fertilizer Output | 1 | 1.2 | 1.4 |
| Cement Output | 1 | 2.4 | 2.9 |
| Brick & Tile Output | 1 | 1.3 | 1.8 |
| Flat glass Output | 1 | 1.9 | 3.5 |
| Paper and Pulp Output | 1 | 2.1 | 2.6 |
| Irrigated Land area | 1 | 1.0 | 1.1 |
| Cultivated land area | 1 | 1.0 | 1.0 |
| Residential households in the urban | 1 | 1.5 | 2.0 |
| Urban housing area of each household | 1 | 1.3 | 1.6 |
| Changes in cooling intensity in Urban Household | 1 | 1.2 | 1.4 |
| Changes in space heating intensity in Urban Household | 1 | 1.3 | 1.3 |
| Changes in cooking and hot water intensity in Urban Household | 1 | 1.4 | 1.6 |
| Changes in illumination of lighting in Urban Household | 1 | 1.1 | 1.2 |
| Possessing rate of refrigerator in Urban Household | 1 | 1.5 | 1.9 |
| Possessing rate of clothes washing machine in Urban Household | 1 | 1.1 | 1.1 |
| Possessing rate of color TV in Urban Household | 1 | 1.4 | 1.5 |
| Residential household in the rural | 1 | 1.2 | 1.2 |
| Rural Resident housing area | 1 | 1.0 | 0.9 |
| Changes in cooling intensity in Rural Household | 1 | 1.3 | 1.5 |
| Changes in space heating intensity in Rural Household | 1 | 1.2 | 1.2 |
| Changes in cooking intensity in Rural Household | 1 | 1.2 | 1.3 |
| Changes in illumination of lighting in Rural Household | 1 | 1.1 | 1.2 |
| Possessing rate of refrigerator in Rural Household | 1 | 1.4 | 4.3 |
| Possessing rate of clothes washing machine in Rural Household | 1 | 1.3 | 1.5 |
| Possessing rate of TV in Rural Household | 1 | 1.2 | 1.4 |
| Changes in intensity of space heating in service sector | 1 | 1.2 | 1.36 |
| Changes in intensity of space cooling in service sector | 1 | 1.25 | 1.35 |
| Changes in illumination requirement | 1 | 1.10 | 1.20 |
| Changes in electric power consumed by duplicating machine | 1 | 1.10 | 1.15 |
| Changes in electric power consumed by computer | 1 | 1.20 | 1.25 |
| Changes in electric power consumed by elevator | 1 | 1.05 | 1.10 |
| Changes in electric power consumed by other electric appliance | 1 | 1.10 | 1.20 |
| Traffic volume of Railway Freight Transport | 1 | 1.5 | 1.9 |
| Traffic volume of Railway Passenger Transport | 1 | 1.8 | 2.4 |
| Traffic volume of Aviation(freight transport) | 1 | 11.0 | 53.1 |
| Traffic volume of Aviation(passenger transport) | 1 | 11.0 | 52.6 |
| Traffic volume of private car | 1 | 19.8 | 272.4 |
| Traffic volume of Small truck | 1 | 5.1 | 9.2 |
| Traffic volume of Large truck | 1 | 1.7 | 2.9 |

図3は、中国の全部門からの二酸化炭素排出量の推計結果である。市場メカニズムが作用しないと仮定してエネルギー技術のシェアを固定する（ケース1）と、1990年と比較して2010年にはエネルギー消費で2.3倍、二酸化炭素排出量で2.5倍となる。市場メカニズムの導入（ケース2）によってエネルギー効率の高い技術が導入され、二酸化炭素排出量の伸びが約2.2倍まで緩和される。さらにこの市場メカニズムを活用して経済的インセンティブを与え（ケース3）、また省エネルギーの投資回収期間を最大3年から7年まで延長すると（ケース4）、エネルギー消費量で1.5倍、二酸化炭素排出量で1.7倍まで増加を抑えることができる。今後、市場経済の導入や対策野実施によってエネルギー効率を改善する余地が高いことがわかった。

二酸化炭素排出量の伸びを部門別に示すと、図4に示すとおり、民生部門と運輸部門の伸びが著しいことがわかる。二酸化炭素排出の削減可能性は工業及び民生部門で高く、運輸部門で非常に低い。絶対値からみると民生部門の伸びは、対策を導入したとしても著しく、運輸部門とともに今後の対策の要となろう。

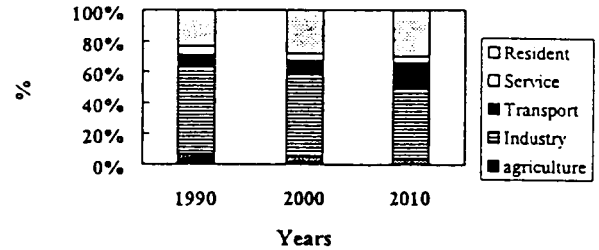
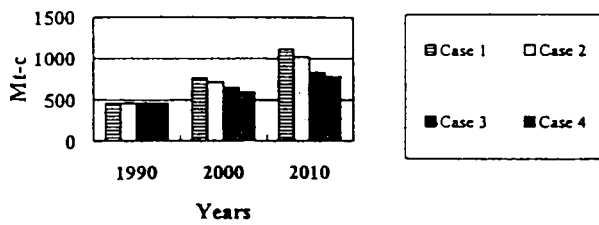


図3 中国の二酸化炭素排出量の予測

図4 中国の二酸化炭素排出量の部門別シェア
(市場メカニズム導入：ケース2)

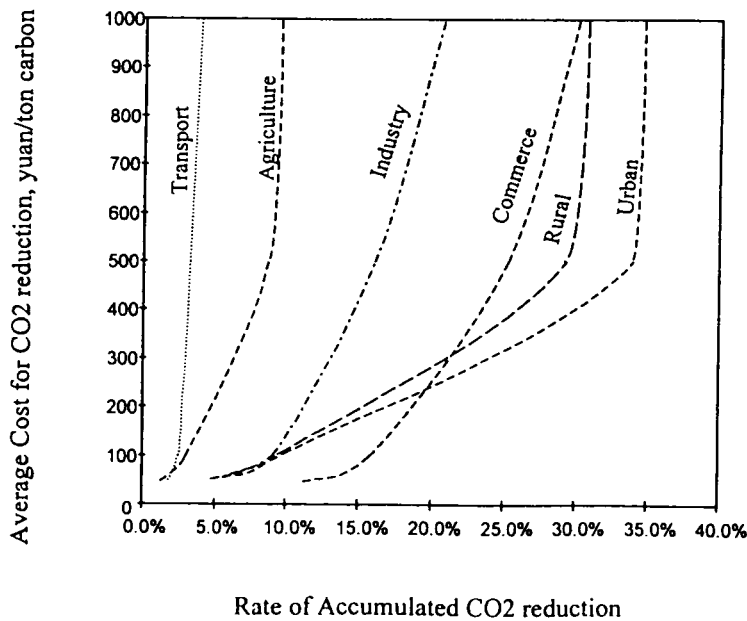


図5 中国の部門別二酸化炭素削減コスト

さらに、各部門の二酸化炭素削減のコストを推定するため、補助金の投入額（二酸化炭素削減のための純費用）と二酸化炭素の策原料の関係をシミュレーションにより明らかにした。図5は、各部門別に二酸化炭素の削減率と平均削減コストを推定し、2000年から2010年までの平均値を用いて両者の関係を示したものである。家庭部門や商業部門については、比較的安い費用で二酸化炭素の削減が可能であるが、運輸部門や農業部門については削減コストが急激に上昇することが分かる。

最後に、以上のシミュレーションにより明らかにした中国の省エネの進展と二酸化炭素の排出の伸びを、従来の他の予測結果と比較した。図6は、エネルギー強度について、今回の推計をIPCCの1992年シナリオ（IS92）、IPCC以外のシナリオ（non-IPCC）、及び国際エネルギーワークショップに参加したシナリオ（IEW）のそれぞれの幅と比較したものである。この図のとおり、ここで推定した将来の中国の省エネの可能性は、従来の推計例に比べて非常に大きいことを示している。このことは、中国の市場経済化に伴って省エネ技術が急激に普及していくことを、本モデルが初めて示したことを意味し、詳細なボトムアップ型モデルの有効性を主張する根拠となった。

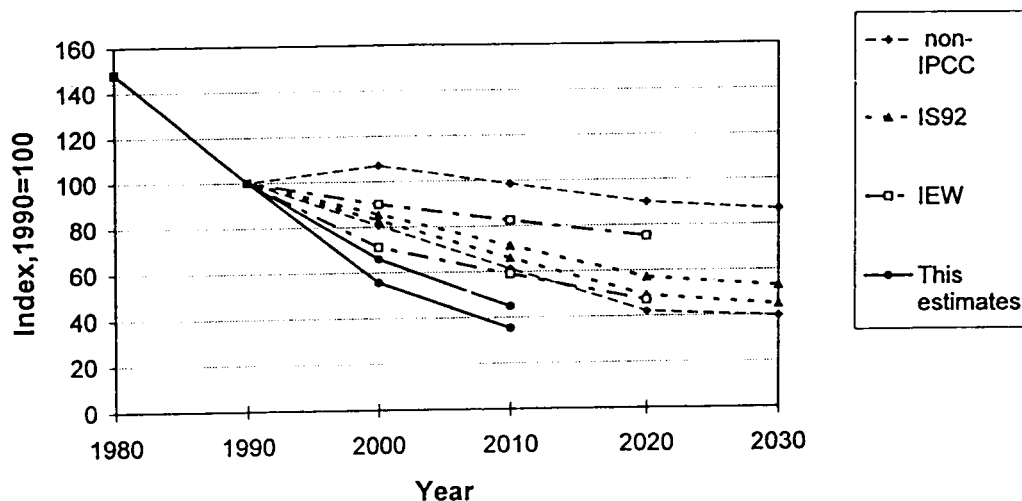


図6 中国のエネルギー強度についての他の予測結果との比較

② インドモデル及びインドネシアモデルの開発とシミュレーション

インドの二酸化炭素排出モデルについてはインド経営研究所と、また、インドネシアモデルについてはインドネシア環境省と共同して開発した。

まず、インドモデルについては、産業部門についてのモデルを完成させた。産業部門は、鉄鋼、アルミニウム、セメント、レンガ、紙、繊維、砂糖、石油化学、肥料、その他の10部門に分類している。表3には、予測に用いた各部門のエネルギーサービスの需要シナリオを示す。

このモデルを用いてシミュレートした結果のうち、産業部門のエネルギー種別の二酸化炭素排出量を表4に、また、産業部門のサブ部門別の二酸化炭素排出量の推計値を図7に示す。表4のとおり、インドの産業部門からの二酸化炭素排出量は、電力の排出量を除いた場合、1995年から2035年の40年間で5千万トンから2億トンへと約4倍に増加する。このうち、9割近くを占める

表3 インドの産業部門におけるエネルギーサービス需要のシナリオ

| Year | Steel (mt) | Aluminium (mt) | Cement (mt) | Paper (mt) | Brick (bill.no.) | Fertilizer (mt) | Caustic soda (mt) | Soda ash (mt) | Sugar (mt) | Textiles (bill.meters) |
|-------------------|------------|----------------|-------------|------------|------------------|-----------------|-------------------|---------------|------------|------------------------|
| 1990* | 13.83 | 0.45 | 48.76 | 2.43 | 40.00 | 8.20 | 0.97 | 1.40 | 12.05 | 20.05 |
| 1995 | 21.36 | 0.53 | 63.8 | 3.10 | 46.20 | 12.08 | 1.25 | 1.54 | 14.08 | 24.10 |
| 2000 | 28.6 | 0.71 | 83.8 | 4.31 | 55.44 | 18.34 | 1.80 | 2.39 | 17.95 | 30.3 |
| 2005 | 38.8 | 0.96 | 113.4 | 5.95 | 65.42 | 26.81 | 2.36 | 3.32 | 22.85 | 38.0 |
| 2010 | 51.7 | 1.28 | 145.5 | 8.14 | 75.89 | 37.37 | 3.07 | 4.48 | 28.65 | 47.1 |
| 2015 | 66.6 | 1.64 | 178.7 | 11.02 | 86.31 | 49.20 | 3.93 | 5.87 | 35.10 | 57.6 |
| 2020 | 82.6 | 2.06 | 210.2 | 14.68 | 96.89 | 61.01 | 4.96 | 7.41 | 42.01 | 69.2 |
| 2025 | 99.3 | 2.50 | 239.6 | 19.20 | 106.58 | 71.51 | 6.13 | 8.99 | 49.06 | 82.0 |
| 2030 | 116.2 | 2.94 | 267.1 | 24.54 | 115.11 | 79.90 | 7.43 | 10.5 | 55.92 | 96.1 |
| 2035 | 133.4 | 3.37 | 294.9 | 30.56 | 122.02 | 86.09 | 8.79 | 11.84 | 62.27 | 112.0 |
| CARG [†] | 4.7 | 4.7 | 3.9 | 5.9 | 2.3 | 5.0 | 5.0 | 5.2 | 3.8 | 3.9 |

* 1990 figures are actual demands.

† Compounded Annual Rate of Growth between 1995 and 2035.

表4 インドの産業部門のエネルギー種別二酸化炭素排出量の予測結果

| Year | Coal | Fuel Oil | Diesel | Natural Gas | Total |
|------|-------|----------|--------|-------------|--------|
| 1995 | 45.70 | 5.57 | 1.49 | 1.29 | 54.06 |
| 2000 | 56.84 | 6.77 | 1.66 | 2.13 | 67.40 |
| 2005 | 70.23 | 7.62 | 1.68 | 3.32 | 82.85 |
| 2010 | 84.34 | 8.94 | 1.87 | 4.91 | 100.06 |
| 2015 | 101.9 | 11.40 | 2.08 | 6.35 | 121.70 |
| 2020 | 120.9 | 12.98 | 2.30 | 8.28 | 144.46 |
| 2025 | 140.7 | 14.54 | 2.50 | 9.93 | 167.69 |
| 2030 | 158.2 | 16.94 | 2.69 | 11.30 | 189.07 |
| 2035 | 173.9 | 19.36 | 2.85 | 12.69 | 208.82 |

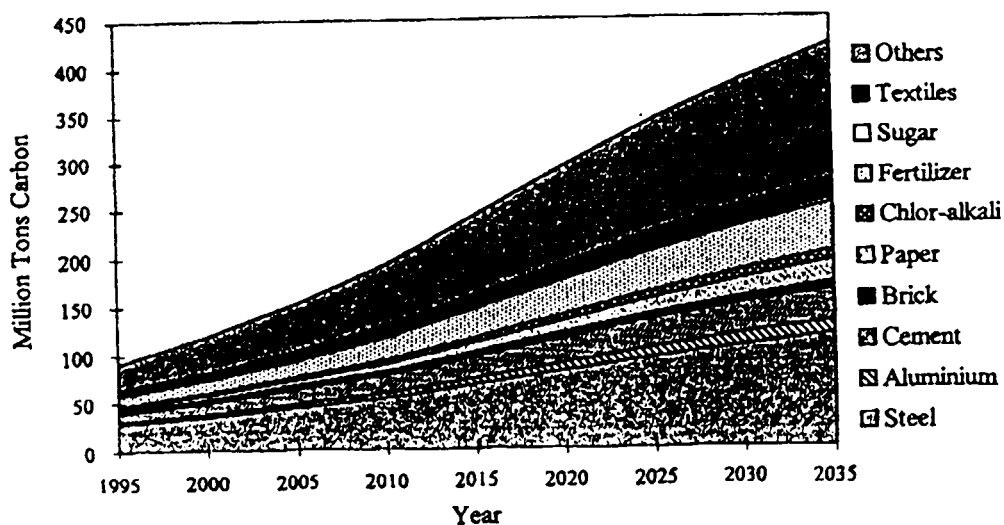


図7 インドの産業部門のサブ部門別二酸化炭素排出量の予測結果

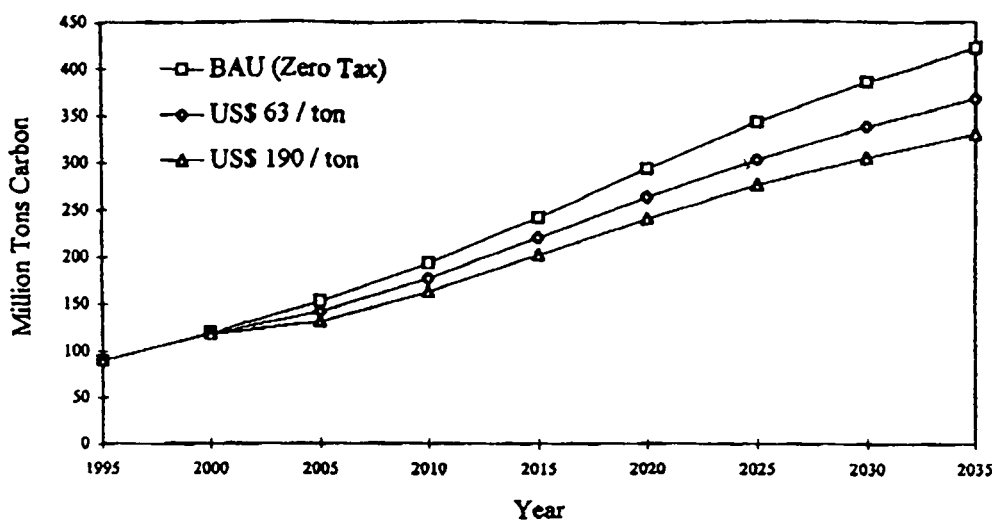


図8 インドの産業部門の二酸化炭素排出削減のシミュレーション

のが石炭で、消費量が40年間で4倍に伸びる。しかし、天然ガスの消費量が約10倍に伸びることや発電のエネルギーミックスが変化することにより、炭素強度は40年間で20%程度下がると予想される。産業部門で消費する電力の二酸化炭素排出分を加えると、産業部門の二酸化炭素排出量は、1995年の9千万トンから2035年の4億2千万トンへと増加する。サブ部門別にこの二酸化炭素の排出量をみると、図7に示すとおり、鉄鋼からの排出量のシェアが最も多く、次いで肥料生産やセメント生産に伴う排出量が急速に増加することが予測されている。特に、インドの鉄鋼生産量は40年間に約4.5倍に伸びてエネルギー消費量が約3倍に、また二酸化炭素は約2.7倍に増加する。二酸化炭素の排出量が鉄鋼生産量に比例しないのは、電気炉のシェアが急速に拡大するとともに、高効率の技術に置き代わり、2015年ころから熔融還元炉が導入されることになってエネルギー効率が改善されるためである。

さらに、インドの産業部門に炭素税を導入した場合、高効率のエネルギー技術の導入促進がどの程度進み、この結果、どの程度の二酸化炭素排出量が削減できるかについてもシミュレートした。図8にこの結果を示す。1炭素トン当たり63米ドル（2000ルピー）の炭素税を課すと2035年の排出量が4億2千万トンから3億7千万トンに減少し、また、190米ドル（6000ルピー）の炭素税では3億3千万トンにまで削減可能なことが示唆された。これらの結果は、インドの産業部門のエネルギー効率を大幅に改善することが可能であり、しかも、市場メカニズムによるインセンティブを一つの方策として検討する必要があることを示している。

一方、インドネシアの二酸化炭素排出モデルについても、エネルギー消費の全容を調査してモデル開発の基本方針を検討するとともに、基礎的なデータを収集した。インドネシアのエネルギー消費の伸びは、今後、工業部門で著しいと予想されるため、安定的に増加を続ける民生部門や運輸部門とともにモデル開発の優先的対象とした。現在、工業部門からモデル開発を進めており、セメント工業などのプロトタイプモデルを完成している。

③ 日本モデルの改良とシミュレーション

日本モデルは、1994年に最初のバージョンが完成したが、このモデルを最新のデータのもとで

更新するとともに、新しい前提条件のもとでシミュレーション分析を行った。今回改良した点は、まず、最新のデータをもとに技術データやエネルギー関連データを更新し、1990年を基準年にしてパラメータを修正するとともに、前提とする経済成長やエネルギー供給についても最新の政府のシナリオに入れ換えた。次いで、エネルギー転換部門や産業部門の未検討分野について、新たにモデル化して日本モデルに加えた。さらに、部門間の相互作用が再現できるように各部門のモデルの構造を統一化するとともに、炭素税の税収を補助金として最適に還元するアルゴリズムを開発した。特に、最後の補助金還元問題は、政府が二酸化炭素を最小化し、市場がコストを最小化するという「スタッケルベルグ寡占問題」として定式化され、その解法が極めて難解な問題として知られており、このアルゴリズムの完成によって炭素税と補助金の組み合わせの効果を体系的に分析することが可能となった。

更新したモデルを用いたシミュレーション結果の一例を、図9に示す。この表のとおり、市場メカニズムによって各種の省エネ技術が普及拡大し、二酸化炭素排出量が削減されるが、特段の対策を導入しない場合には1990年レベルに排出量を安定化させることは難しい。排出量安定化のためには1炭素トン当たり3万円程度の炭素税を導入するか、あるいは3千円程度の炭素税を導入してその税収を省エネ技術普及の補助金に還元する必要がある。

また、このモデルを用いて各部門の二酸化炭素削減のコストを推定するため、補助金の投入額（二酸化炭素削減のための純費用）と二酸化炭素の策原料の関係をシミュレーションにより明らかにした。図10は、各部門別に二酸化炭素の削減率と平均削減コストを推定し、1998年から2005年までの平均値を用いて両者の関係を示したものである。産業部門や運輸部門については、4%程度までの削減ならば比較的安い費用で可能であるが、それ以上の削減にはコストが急激に増加する。これに対して、家庭部門では2%程度までの削減のための限界費用は比較的高いが、それ

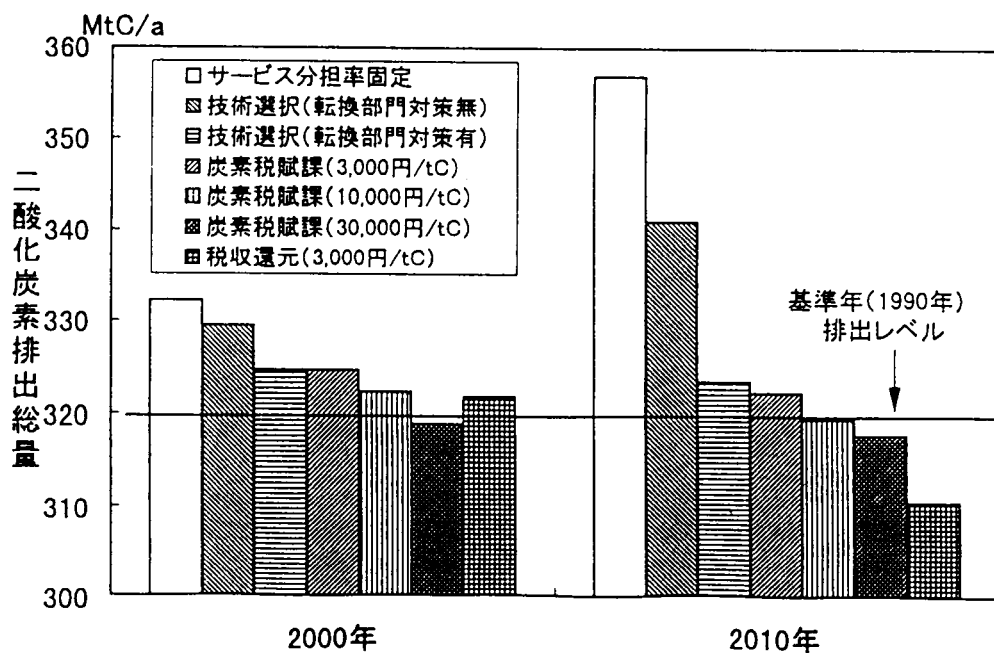


図9 日本の二酸化炭素排出量の予測

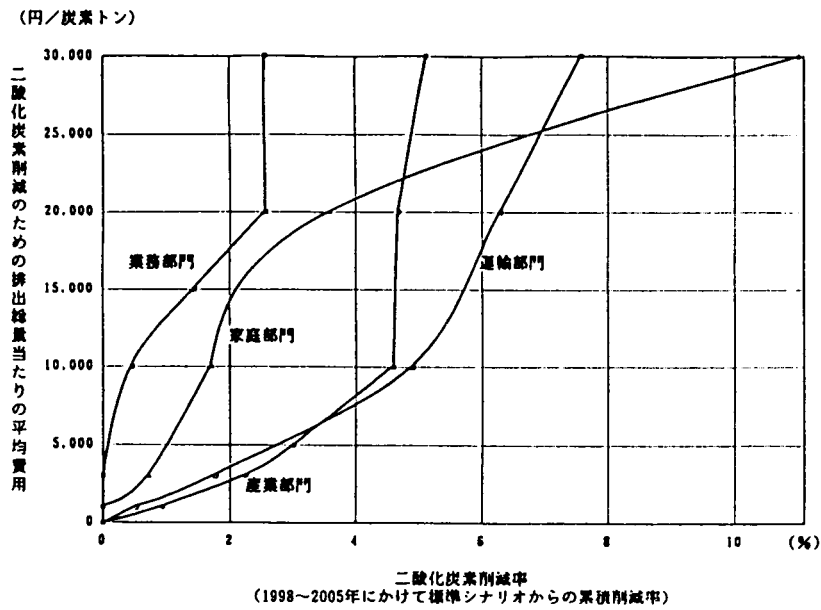


図10 日本の二酸化炭素削減のための部門別費用の比較

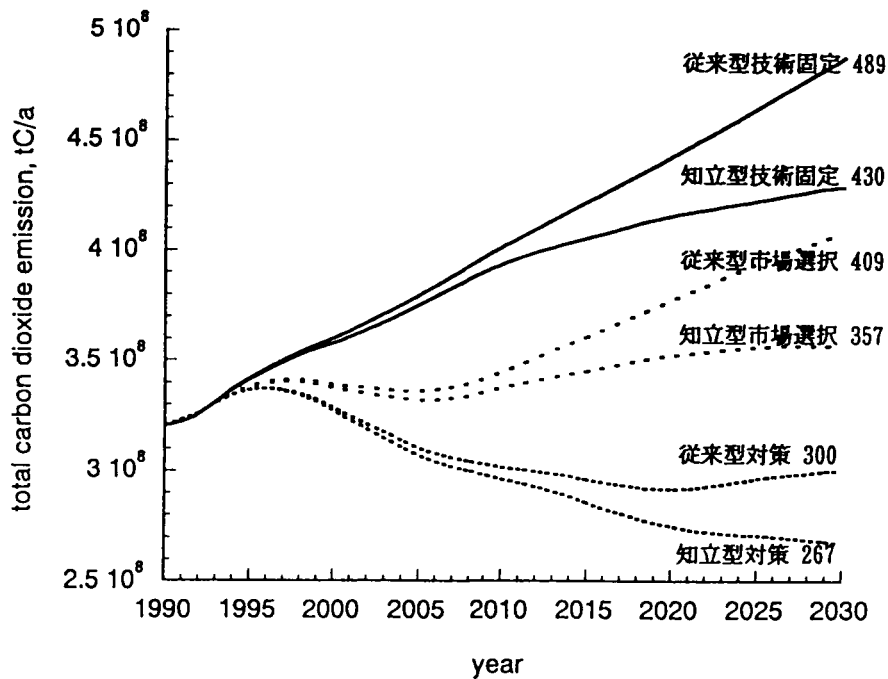


図11 日本の二酸化炭素排出の長期予測

以上の削減を図る場合には限界費用が減少する可能性が明らかとなった。これらの知見は、今後わが国の二酸化炭素削減の総合的政策の展開を検討する際に重要になると考えられる。

さらに、日本モデルを2030年まで予測できるようモデルの構造を改良するとともに、前提条件や技術データなどを補足した。そして、従来型の日本経済がこのまま進むとした「従来型経済大国シナリオ」と、知識集約型の産業やライフスタイルにシフトするとした「知立型生活大国シナ

リオ」の2つのシナリオのもとで、技術効率が改善されないケース、市場を通じて技術効率が改善されるケース、そして1炭素トンの排出当たり限界費用3万円程度のインセンティブを課したケースについてシミュレーションにより予測した。図11は、このシミュレーション結果をまとめたものである。省エネ技術の普及が進まない場合、2020年で1990年の排出水準より30～40%も増加することになるが、市場を通じて合理的な技術選択が進めば10～20%の増加に抑えられる可能性がある。炭素税や補助金などで省エネ技術の導入にインセンティブを与えた場合には、2020年で1990年の排出水準より10～15%の削減が可能であることが分かった。

(2) 地域モデルおよび世界モデルによる分析

① アジア太平洋地域モデルによるシミュレーション

以上の国別の分析をベースにして、アジア太平洋地域モデルにより地域全体のエネルギー消費量、二酸化炭素排出量及び大気汚染物質の排出量を推計した。表5には、地球温暖化防止のための特段の政策を採らなかった場合のこれらの推計値を、1990年レベルと比較して何倍になるかで示している。アジア太平洋地域のエネルギー消費は、2025年には2.3倍から3.8倍に、また来世紀末には3.2倍から16.7倍に増加する。石炭と天然ガスの消費が大幅に増える結果である。これによってこの地域からの二酸化炭素の排出量が急激に増加し、来世紀末には7倍にまで増える可能性がある。そして世界全体の排出量に占めるアジア太平洋地域の二酸化炭素排出量のシェアは、現状の25%から2025年には36%、来世紀末には50%に達すると推定される。また、二酸化硫黄や窒素酸化物の排出も急激に増え、2050年あたりをピークに今の3～4倍になり、都市部での大気汚染被害や東アジアやインドにおける酸性雨の被害が顕在化する可能性が高い。今後、アジア太平洋地域において地球温暖化問題と地域の汚染問題の同時的な解決策の検討が不可欠である。

表5 アジア太平洋地域におけるエネルギー消費と環境負荷の予測

| 年 | 高位推計 | 中位推計 | 低位推計 |
|------------|------|------|------|
| 一次エネルギー消費量 | | | |
| 1990 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 2025 | 3.8 | 2.4 | 2.3 |
| 2050 | 6.8 | 3.7 | 2.9 |
| 2100 | 16.7 | 6.8 | 3.2 |
| 二酸化炭素排出量 | | | |
| 1990 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 2025 | 3.2 | 2.5 | 1.7 |
| 2050 | 5.4 | 3.8 | 1.8 |
| 2100 | 12.5 | 6.9 | 1.6 |
| 二酸化硫黄排出量 | | | |
| 1990 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 2025 | 2.8 | 2.4 | 1.7 |
| 2050 | 4.8 | 3.5 | 1.8 |
| 2100 | 4.6 | 3.0 | 1.1 |
| 窒素酸化物排出量 | | | |
| 1990 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 2025 | 3.4 | 2.8 | 2.0 |
| 2050 | 5.1 | 3.8 | 2.0 |
| 2100 | 8.5 | 5.9 | 1.7 |

(注) 数字は1990年を1とした指数。
環境負荷は化石燃料起源。

② 世界モデルによる先進国対策のシミュレーション

また、国レベルのボトムアップモデルとトップダウン型のA I M世界モデルを組み合わせ、

先進国における二酸化炭素削減のための政策ミックスの効果をシミュレートした。これは、日本以外の先進国が日本並みの技術効率を長期的に達成するよう省エネ基準等の技術政策を導入するとともに、先進国全体で炭素税により市場に介入するという2つの政策を採用した場合、その複合効果を推定するためのものである。このためまず、ボトムアップモデルで部門別に技術政策を導入した場合の技術効率の改善率を推定し、次いでこの効率改善率をトップダウンモデルに与えて炭素税の効果を推定した。この結果、図12に示すように、2010年において先進諸国の二酸化炭素排出量を1990年レベルより20%削減することを目標として、炭素税のみでこの目標を達成する場合（TAX ケース）には、2%近いGDPロスが生じるが、日本以外の国が技術政策を導入すれば（TAX + EEI ケース）、これらの国のロスは半分から3分の2程度に緩和され、さらに、先進国共通の炭素税率を導入すれば（COMMON TAX + EEI ケース）、わが国のGDPロスも大幅に緩和されることがわかった。政策の適切な組み合わせは対策コストの節約に大きな効果がある。

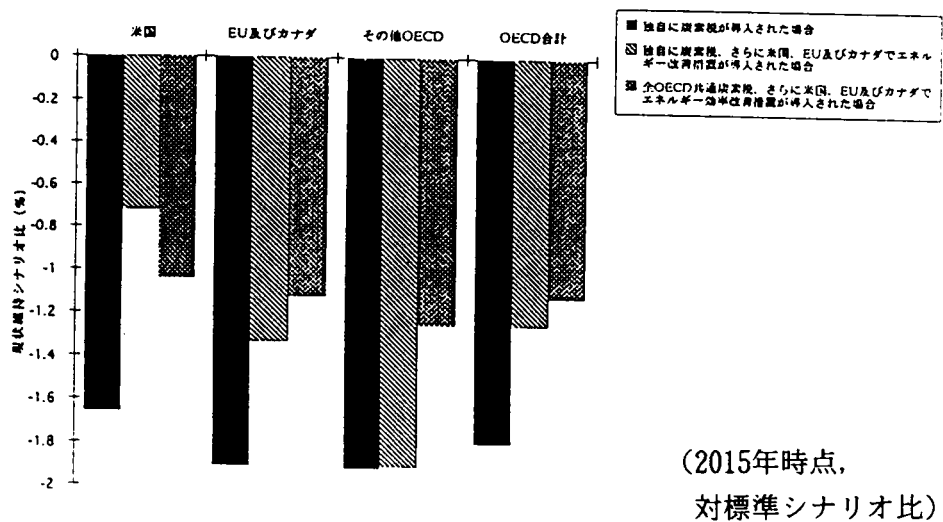


図12 二酸化炭素20%削減に伴うGDP損失

(3) 中国及び韓国の環境政策の比較分析

中国及び韓国においては、地球温暖化防止の政策導入のインセンティブは非常に弱く、国内の大気汚染防止等の政策が目下の緊急ニーズである。このため、二酸化炭素の排出抑制を国内の大気汚染防止と統合して進める可能性が検討されている。このようなニーズに対応するために、二酸化炭素の排出抑制と硫酸化物等の排出抑制との関係を体系的に分析できるよう、AIMモデルの拡張を検討中である。この拡張の方針を明らかにする

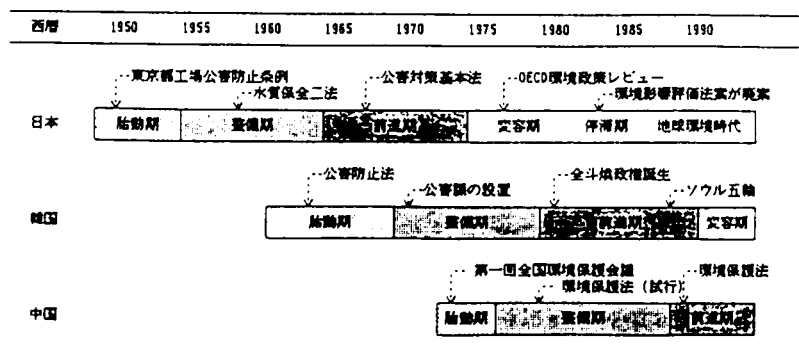


図13 日中韓の環境政策の発展過程の比較

ために、中国及び韓国の環境政策の発展の歴史と今後の見通しについて分析した。

図13は、日中韓の今までの環境政策の歴史を比較したものである。日本と韓国で概ね12~14年、日本と中国で約21~24年のタイムラグがあることがわかる。図14はA I Mのトップダウン型の経済モデルを用いて、日本、韓国、中国の排煙脱硫の最適投資の経路を推定したもので、最も経済効率的な投資額を示している。日本の過去の排煙脱硫投資は経済的にみても合理的なものであることが示唆されているが、この合理的な経路からみると、今まで排煙脱硫が導入されていない韓国では1992年頃からこの種の自発的な投資があってもよいことになる。一方、中国では2014年ころまで自発的な脱硫投資が期待できないと予想され、国際的な支援体制が検討される必要があることが分かった。これらはA I Mの国内問題への拡張の際に重要な設計条件となる。

(4) 熱帯林減少モデルの開発

化石燃料の燃焼以外に二酸化炭素を排出させる人為的要因に、土地利用変化がある。この中でも特に大きな要因は熱帯林の減少である。このため、A I M / e m i s s i o n モデルの一部として、熱帯林減少モデルを開発した。このモデルは、農地への転換、過放牧、焼き畑等の熱帯林減少の要因を人口密度の指標で代表させ、この人口密度の増加と熱帯林の減少との関係を過去百年間のデータを基に明らかにし、この関係を用いて将来百年間の熱帯林の減少量を予測するものである。

図15は、世界の熱帯地域の森林の面積率と人口密度のデータをサブリージョン単位に収集し、その関係をプロットしたものである。そして、A I Mの国別人口予測モデルにより将来の熱帯地域の人口密度の推移を推定し、図14の関係をj用いて熱帯林の減少量を予測した。図16は、こうして予測した減少量を地域別に示したものである。特別の対策を導入しなければ、世界全体で2010年の1380万haをピークに、徐々に減少しながら2050年には年間670万haの減少が見込まれる。特に中南米の排出量の減少が著しく、今世紀かた来世紀初頭にかけて年間の減少面積は600万haを越えることが予想される。これによる二酸化炭素の排出量は世界全体で年間最大13億トン、アジア太平洋地域では3億トンである。アジア太平洋地域の熱帯林減少による二酸化炭素フラックスだけで日本の年間の排出量に相当するほど大きい。

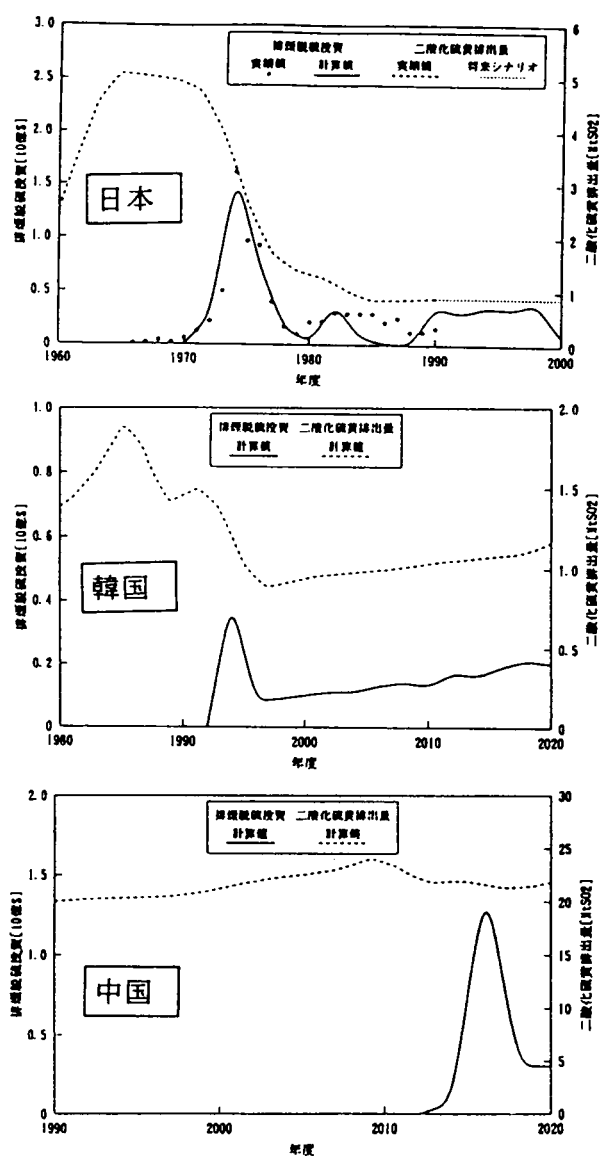


図14 日中韓の排煙脱硫投資の比較

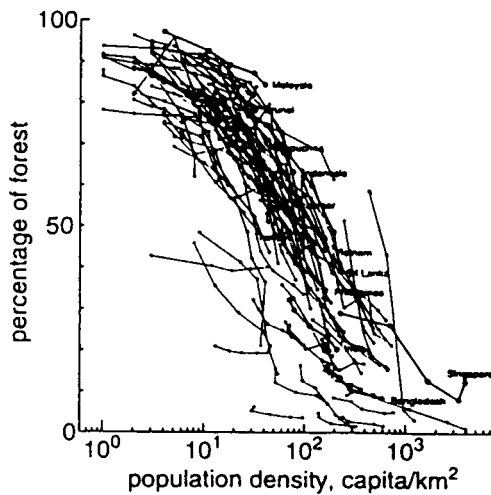


図15 熱帯林の森林面積と人口密度との関係

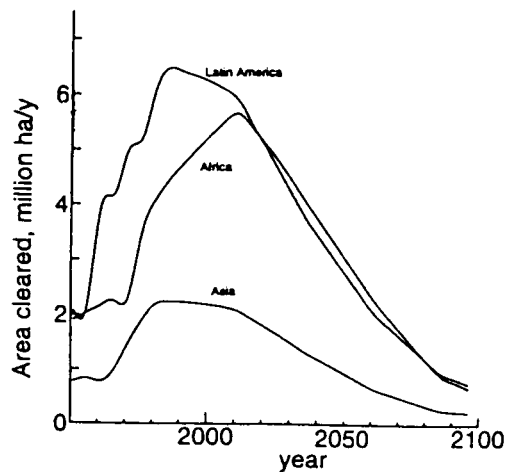


図16 熱帯林の減少予測

(5) 温暖化現象モデルの改良

温室効果ガスの排出量をもとに大気中の温室効果ガス濃度を決定し、気候変化を推定する温暖化現象モデル (AIM/climate) については、今までに開発されている大気科学反応、海洋交換、放射加熱、炭素循環、フィードバック、気候変化等の個別のモデルを、独自のフレームに基づいて組み合わせることによって開発している。このうち、炭素循環についてはイーストアングリア大学で開発された簡略なMAGICCモデルを用いているが、近年、ミッシング・シンクと見なされていた年間約20億炭素トンの行方が、植林や陸域植生の二酸化炭素肥沃化に帰せられる傾向になってきており、その詳細なメカニズムを分析することが求められている。

このため、陸域植生の二酸化炭素肥沃化現象を再現する目的で、陸域炭素循環モデル (AIM/TCM) の開発に着手した。このモデルは、二酸化炭素濃度の増加に伴う植物の純一次生産の増加量を、標高制約、土壌制約、光合成経路の特性、水制約等を勘案して定式化し、0.5度メッシュ毎に分割した世界の陸域の各植生分類毎にこの純一次生産の増加量を求め、さらにこの増加量から種々の過程を経て大気中に排出される二酸化炭素の量を差し引いて、植物の生態系全体の純生産量 (NEP) を求めた。図17はこうして計算された1990年のNEPの強度である。シベリア、北アメリカ、中国山間部などにおいてNEPの強度が大きく、これらの地域が二酸化炭素肥沃化による大きな吸収源になっていることが分かった。そして、二酸化炭素肥沃化による二酸化炭素の吸収量は1990年で9億炭素トン程度と推定され、ミッシングシンクと見なされていた量の約半分がこの現象によって説明できることが分かった。

また、こうして改良した温暖化現象モデルを用いて、今までに推定された種々の温室効果ガス排出シナリオを前提にしたときの、平均気温の上昇量をシミュレートした。図18は、気候感度を2.5℃に設定したときの気温上昇の推定結果である。来世末で平均1℃から4.5℃の範囲で気温上昇が見込まれることが分かった。

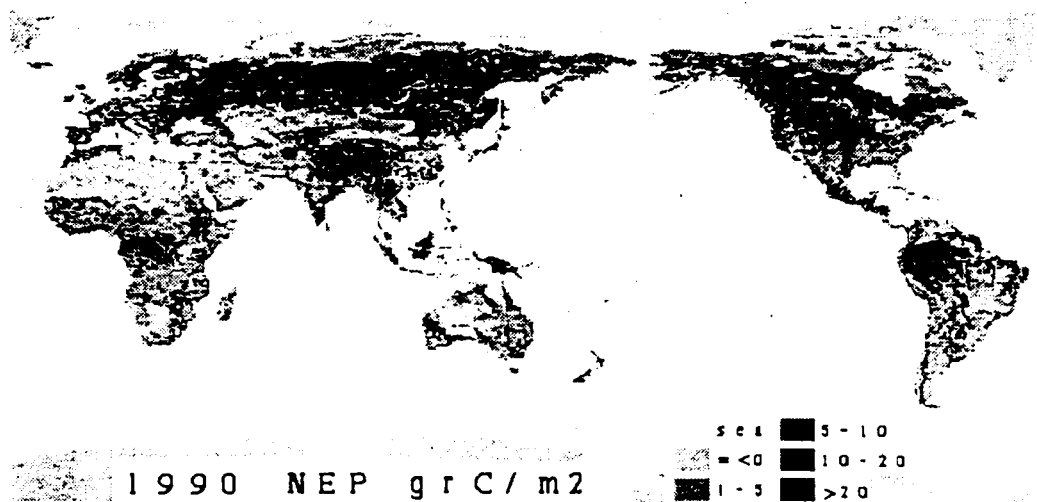


図17 植物の生態系全体の純生産量 (NEP) の強度推定

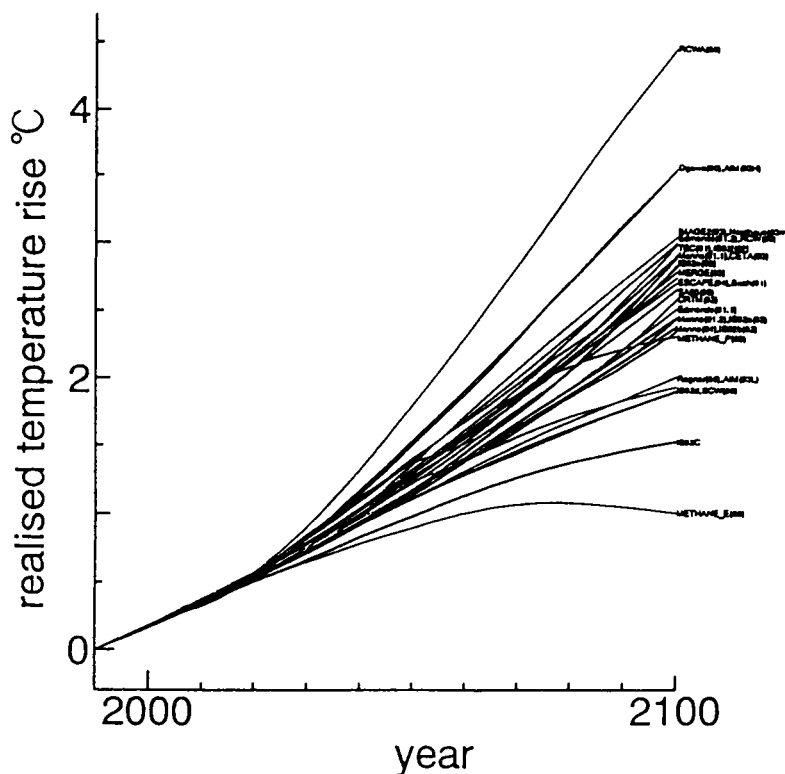


図18 種々の排出シナリオのもとでの気温上昇の予測

(6) 安全排出コリダ－の推定

以上で改良した炭素循環モデルと気候変化モデルをベースにして、交渉可能安全排出コリダ－、即ち、温度上昇の速度等の自然のスレッシュ・ホールドを制約条件として与えた場合に、先進諸国に許容される温室効果ガス排出の範囲について分析した。安全排出コリダ－とは、温室効果ガス排出量の許容域を、気候変化速度が一定値以下であり、かつ削減対策による経済影響が致命的

にならない範囲に限定し、この範囲の中で削減方策の探索と削減交渉を行おうとする考え方である。安全排出コリダーを先進国と途上国の交渉可能性を踏まえて解析したのが、交渉可能安全排出コリダーである。

図19は、安全排出コリダーの算定例であり、温度上昇速度の上限を10年当たり0.15℃、海面上昇速度の上限を10年当たり3.5cmに設定した場合に、許容される排出量の範囲を示したものである。この分析の結果、安全排出コリダーの中に排出量を収めるためには、先進国における排出量は2000年までに1990年レベルまでに抑制するとともに、

2030年には先進国の排出量を1990年レベルの50%にするか、あるいは発展途上国における削減対策を本格的に開始することが必須の条件になることが分かった。

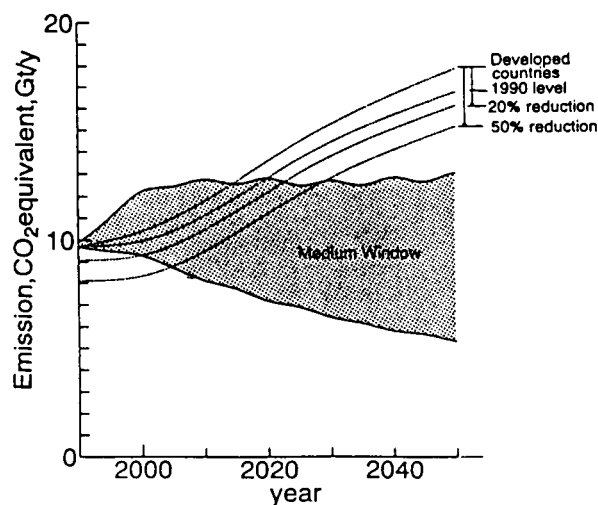


図19 安全排出コリダーの算定例

4. まとめ

3か年の研究により、中国、韓国、インド及びインドネシアと共同してそれぞれの国別モデルを開発するとともに、日本モデルを改良した。そして、これらの国別モデルを用いて各国の二酸化炭素排出量の削減方策をシミュレーションにより検討し、さらに、アジア太平洋地域及び世界モデルを組み合わせて、地域レベル及び世界レベルのシミュレーション分析を行った。また、熱帯林の減少モデル、陸域炭素循環モデル等を開発し、気温上昇のシミュレーション分析を行うとともに、これらのモデルをベースにして、安全排出コリダーを推計した。

本研究は今後、今までのモデル開発研究からモデルの適用研究に移る予定であり、アジア太平洋地域に有効な国別の温暖化対策の分析と国際協力に向けた協調のあり方を分析していきたいと考えている。

5. 成果発表

- Morita, T., Y. Matsuoka, M. Kainuma, H. Harasawa and K. Kai (1994) AIM - Asian - Pacific Integrated Model for Evaluating Policy Options to Reduce GHG Emissions and Global Warming Impacts. In Global Warming Issue in Asia. AIT, 254-273.
- Matsuoka, Y., T. Morita and H. Harasawa (1994) Estimation of Carbon Dioxide Flux from Tropical Deforestation. NIES, CGER-I013-'94, 35p.
- 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.
- Matsuoka, Y., M. Kainuma and T. Morita (1995) Scenario Analysis of Global Warming Using the Asian Pacific Integrated Model (AIM). Energy Policy, 23(4), 1-15.

- Blanis, D., Y. Matsuoka and M. Kainuma (1995) AIM/TCCP/CO₂ Fertilization of Terrestrial Vegetation. Tsukuba Global Carbon Cycle Workshop.
- Morita, T., Y. Matsuoka and M. Kainuma (1995) Long Term Global Scenarios based on the AIM Model. UNU Conference in the Sustainable Future of Global System Impacts. In Global System, Proceedings, 19 pages.
- Morita, T. and Y. Matsuoka (1995) Carbon Dioxide Emission Scenarios and Nuclear Energy. Progress in Nuclear Energy, Vol.29, pp143-150.
- Matsuoka, Y., M. Kainuma and T. Morita (1995) Scenario Analysis of Global Warming Using the Asian Pacific Integrated Model (AIM). Energy Policy, 23(4/5), pp357-371.
- Matsuoka, Y., T. Morita and M. Kainuma (1995) Environmental Changes and their impacts in the Asia-Pacific Region. UNU Conference in the Sustainable Future of Global System Impacts. In Global System, Proceedings, 19 pages.
- China's AIM Project Team (1996) Application of AIM/Emission Model in P.R. China and Preliminary Analysis on Simulated Results. International AIM Workshop, Proceedings, 33pages.
- Shukla, P.R. and R. Pandey (1996) Projection of End-Use Energy Demand and Technology Mix for Steel Industry in India: An Analysis using AIM/ENDUSE Model. mimeo, 15pages.
- Indonesia's AIM Project Team (1996) Emission of Carbon Dioxide from the Indonesia Energy System. International AIM Workshop, Proceedings, 9pages.
- 森田恒幸・松岡譲 (1996) 地球環境の総合化に向けたモデリングの動向. 地球環境, 1(1), pp63-72.
- Morita, T. and Y. Matsuoka (1996) Global Climate Change and Food Problems. Collected Paper of International Symposium "the Origins of Agriculture".
- 松岡譲・森田恒幸他 (1996) エネルギー消費起因の二酸化炭素排出量推計モデルの開発とわが国の二酸化炭素排出量の見通し. 環境システム研究, 24, pp149-156
- 島崎洋一・森田恒幸 (1996) 東アジア地域における排煙脱硫投資のシミュレーション分析. 環境科学会誌, 9(3), pp369-376.
- Morita, T. (1997) An Economic Evaluation of Japan's Response to Air Pollution in "Japan's Experience in the Battle against Air Pollution. The Pollution-related Health Damage Compensation & Prevention Association, pp76-93.
- Morita, T., P.R. Shukla and O.K. Cameron (1997) Epistemological Gaps between Integrated Assessment Models and Developing Countries. IPCC Asia-Pacific Workshop on Integrated Assessment Models, Tokyo, Proceedings 14 pages.
- Morita, T. (1996) The Need for Integrated Environmental Assessment in the Asia-Pacific Region. International Symposium on Prospects for Integrated Environmental Assessment. Toulouse.
- Morita, T., Y. Matsuoka, M. Kainuma, et al (1996) An Asian-Pacific Joint Project on Integrated Modeling. Global Food Modeling Workshop, Bilthoven.