

Report) がまとめられる。それはさらに政策決定者向けの要約 (SPM, 5~10頁程度) と、やや長い部分 (Longer Part, 30~50頁程度) とで構成されることになっている。

IPCC は、予測の不確実性の低減にむけて、科学・技術の分野での成果を正しく反映することと共に、経済・社会的な評価も要請されるようになっている。科学の立場を損ねないようにすること (scientific integ-

city) や、政治的中立の立場を堅持することがますます重要と思われる。

参 考 文 献

Manabe, S. and R. J. Stouffer, 1980: Sensitivity of a global climate model to an increase in the CO₂ concentration in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **85**, 5529-5554.

306:601 (地球温暖化; 温室効果ガス; 排出シナリオ; IPCC)

2. 気候変化予測のための排出シナリオ

森 田 恒 幸*・増 井 利 彦**

1. はじめに

2000年3月15日深夜、ネパールのカトマンズで IPCC (気候変動に関する政府間パネル) の新しい排出シナリオが正式に承認された。1990年と1992年に IPCC 公認のシナリオが作成されて以来、実に8年ぶりの更新である。

地球温暖化がどの程度進むかは、自然の系の不確実な挙動を別にすれば、われわれ人間社会がどのような方向に発展するかによって大きく左右される。将来の社会の発展方向の描き方により、エネルギー利用や土地利用変化の予想が大きく変わり、温室効果ガスや硫黄酸化物などの排出シナリオが大きく違ってくる。その結果、温暖化の予測に大きな差が出てくるし、また、どの程度の温暖化対策を必要とするかにも大きな違いが出てしまう。社会の発展方向の違いが温暖化の程度やその対策には決定的な影響を及ぼしてしまうのである。

今までの地球温暖化予測のほとんどは、IPCC に

よって1992年に作成された排出シナリオ (Houghton *et al.*, 1992) を前提にしてきた。このシナリオは IS92a (「IPCC で作成した参照シナリオ1992年版の a ケース」の意味) と呼ばれ、6つ作られたうちの1つであり、あくまでもひとつの社会の発展方向を描いたものに過ぎない。しかも、このシナリオは1985年のデータを基礎にして描かれ、1990年以降に生じたいろいろな社会変化を当然のことながら考慮していなかった。ソ連崩壊、アジア発展途上国の経済の急激な成長、自由貿易体制の導入などは、1990年代に入って世界の温室効果ガスや硫黄酸化物の排出量を大きく変える要因となった。さらに、1992年のシナリオには先進国の研究者の一方的な考え方が反映されているとして、発展途上国から大きな批判もあった。このような問題点は、1994年の IPCC の特別報告書 (Alcamo *et al.*, 1995) によってレビューされ、新しい温室効果ガス等の排出シナリオの作成が勧告された。

これを受けて IPCC では、1996年から特別のプロジェクトチームを組織し、新しい排出シナリオの作成作業を進めてきた。IPCC は本来、既に発表された学術論文の科学的レビューを行う機関であり、このような独自の研究プロジェクトを組織することは例外的であ

* 国立環境研究所社会環境システム部。

** 国立環境研究所地球環境研究グループ。

© 2000 日本気象学会

る。しかし、排出シナリオは地球温暖化問題を科学的に解明するための基本情報であり、この基本情報の提供がIPCCに求められ、それに応えるためのプロジェクトであった。このプロジェクトに要した期間は3年半にもなり、IPCCの作業としては異例の長期間の作業となった。特に、経済モデルを含めた大規模なコンピュータ・モデルによるシミュレーション作業に多くの時間が費やされた。われわれのチームもこのシミュレーション作業に参加したほか、既存の排出シナリオのデータベースをこのIPCCプロジェクト用に新たに作成するなど、3年半の全ての期間にわたって貢献してきた。そして、一連の成果を「排出シナリオに関する特別報告書」としてとりまとめ、この3月に各国政府の承認を得たので、今年の夏に正式のIPCC報告書として刊行できる運びになった(IPCC, 2000)。この報告書の英文名は、“Special Report on Emission Scenarios”であり、この頭文字を取って、この新しい排出シナリオは「SRESシナリオ」と呼ばれている。

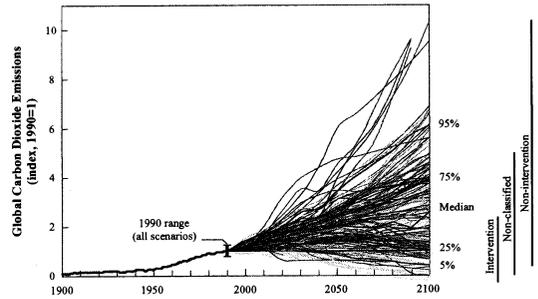
本報告では、SRESシナリオの作成の過程とその含意について、概要を述べる。

2. SRESシナリオの作成過程

SRESシナリオは、既存の排出シナリオのレビュー、叙述的シナリオ(ストーリーライン)の作成、定量的シナリオの作成、インターネットによる公表と意見聴取(オープン・プロセス)、定量的シナリオの改良、という5つの手順を経て作成された。

まず、既存の研究による排出シナリオのレビューは、国立環境研究所においてデータ・ベースを作成することから始まった(Morita and Lee, 1997)。約170のソースから400以上の排出シナリオを収集し、そのうち2100年までを推計期間としている190のシナリオを分析した。第1図はこれらのシナリオの全てについて、二酸化炭素排出シナリオをプロットしたものである。多様な社会経済発展の仮定のもとで非常に大きな幅のシナリオが描かれていることがわかる。これらの多様な仮定や大きな推計幅は、以下のSRESシナリオの作成過程に反映され、このような幅を網羅するシナリオの作成が試みられた。

次のステップとして、将来の社会経済の発展について、叙述的なシナリオを作成した。これは、シナリオ内において一貫性を持った人口統計的・社会的・経済的・技術的・環境的・政治的将来を、量的でなく質的に記述したものである。定量的シナリオの作成の前に



第1図 既存の研究による二酸化炭素排出シナリオ(エネルギー起源及び工業起源二酸化炭素排出)。

このような叙述的シナリオを作成した理由は、研究プロジェクトの各メンバーが複雑な前提条件を一貫性をもって考えやすいようにするため、シナリオを様々な使用者に対して説明しやすくするため、さらに、後の政策分析や気候変動の影響分析においていろいろな仮定を追加する際の指針とするためである。

こうして作られた叙述的シナリオは、後で解説するように4つある。それぞれ、具体的な社会的・経済的・技術的・環境的パラダイムを展開したもので、将来の発展の可能性を全て網羅しているわけではないが、非常に広い範囲にわたる。ただし、モデルでは定量化が難しく、発生の可能性が極端に低いと評価される「サブプライズ」シナリオ、「大惨事」シナリオは除外した。

1998年に入って、4つの叙述的シナリオをベースにした定量化にとりかかった。この作業は次の6つのモデリング・チームが実施した。

- 日本の国立環境研究所のアジア太平洋統合モデル(AIM)チーム
- アメリカ ICF Consulting の大気安定化枠組モデル(ASF)チーム
- オランダ RIVM の温室効果ガス影響評価統合モデル(IMAGE)チーム
- 日本の東京理科大学の多地域資源産業配分モデル(MARIA)チーム
- オーストリア IIASA のエネルギー供給戦略・環境影響モデル(MESSAGE)チーム
- アメリカのPNNLの簡略気候評価モデル(MiniCAM)チーム

各チームがそれぞれアプローチの異なるモデルを用いて複数の叙述的シナリオを作成した。これらのうち、4つの叙述的シナリオに対応して、「マーカー・シナリオ」と呼ばれる排出シナリオが選ばれた。マーカー・

シナリオは、定量化の初期の段階で叙述的シナリオを最もよく反映していたもので、4つの叙述的シナリオ毎にそれぞれ異なるモデルで推計されたものが選ばれた。これらのシナリオは他のシナリオに比べてより中心的である訳ではない。単に、より多くのチェックを受けたという特徴があるに過ぎない。他のシナリオはマーカー・シナリオの人口、GDP、及び最終エネルギー量と調和するよう、それぞれのシナリオを調整した。

4つのマーカー・シナリオの仮バージョンは、1998年6月にホームページに掲載し、広く意見を求めた。そして、寄せられたコメントをもとに後日改訂した。4つのシナリオ群それぞれに対して追加のシナリオがモデリング・チームによって作成され、その結果、改訂された4つのマーカー・シナリオと、他の36の代替シナリオ、計40の排出シナリオが作成された。

3. 4つの叙述的シナリオ

4つの叙述的シナリオ（「ストーリー・ライン」と呼ばれる）は、いずれも地球温暖化の軽減のための政策を含んでいない。4つの異なった発展方向を示し、今よりも一般的に豊かな将来世界を描いたものである。これらのシナリオは、単純に「A1」、「A2」、「B1」、「B2」という記号で簡単に呼ばれる。以下に、各シナリオの概要を説明する。

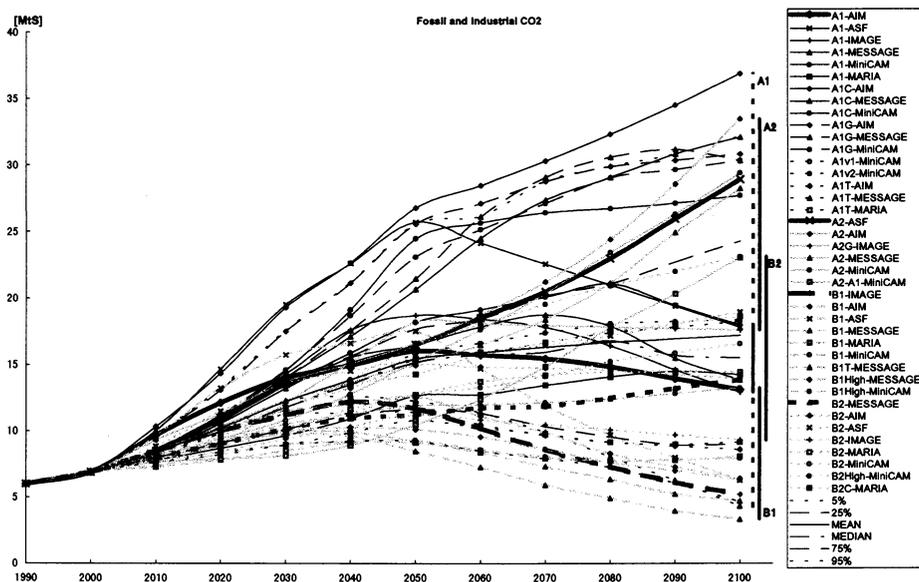
まず、A1シナリオは、「高成長社会シナリオ」とイメージしてほぼ間違いない。マーケットの利点を活用して、世界中がさらに経済成長を遂げ、教育、技術、そして社会制度に大きな革新が生じるシナリオである。過去100年間の平均経済成長率、年約3%が、今後100年間も続くとし、2050年の1人当たり所得は世界平均で2万米ドルを超える。とくに発展途上国の成長がめざましく、南北の格差が急速に縮まる。これにより途上国の出生率は下がり、世界人口は2050年の90億人から2100年には70億人に下がる。平均寿命は伸び、核家族化が進む。急速な経済の拡大は、大量のエネルギー資源を必要とし、資源開発や新エネルギー開発への投資が加速する。途上国の食生活が肉食嗜好に急速にシフトし、集約的農業に移行する。先進国から途上国への技術移転も進み、途上国の技術革新や自動車保有が早まる。環境問題の解決はマーケットによって大きく影響を受け、環境保全というよりも環境管理や創造の観点から解決が図られる。

このA1シナリオは、エネルギー・システムにおける技術革新の選択肢が異なる4つのグループにさらに

分かれる。石炭のクリーン利用技術の大幅な革新を仮定したシナリオ(A1C)、石油と天然ガス関連の技術革新が顕著なシナリオ(A1G)、新エネルギーの大幅な技術革新を見込んだシナリオ(A1T)、そしてこれらの技術革新がバランスして生じるシナリオ(A1B)である。A1のみでこれらの多様なシナリオを作成した理由は、高い経済成長のシナリオでは技術革新の程度も大きく見込まれ、技術革新のいくつかの方向が温室効果ガス等の排出に及ぼす影響の感度を分析するのに好都合だったためである。なお、通常A1シナリオとよばれる場合は、最後のA1Bを示している。

次に、A2シナリオは、「多元化社会シナリオ」とでも呼べるものである。世界の各地域が固有の文化を重んじ、多様な社会構造や政治構造を構築していくことによって、世界の経済や政治がブロック化していくことを仮定している。このような社会では、国や地域の間常に緊張関係が生じ、国際的な貿易や人の移動、技術の移転が制限される。このため経済発展は遅れ、1人当たり所得も2050年で7千ドル程度と伸び悩む。途上国の出生率は下がらず、来世紀末の人口は150億人に達してしまう。地域間の自然資源や資産の格差は、地域間の所得格差をますます拡大させる。資源の少ない地域では技術開発への投資が加速されるが、経済成長が低めであるため一般的に技術革新は遅れ気味となる。環境への関心は相対的に低く、地域的な環境問題の深刻化のみが環境対策の動機づけとなる。

B1は「持続発展型社会シナリオ」と呼ぶのがふさわしい。環境や社会への高い関心に基づいて、地球公財としての環境の保全と経済の発展を地球規模で両立し、バランスのとれた経済発展を図るシナリオである。資源利用の効率化(脱物質化)、社会制度、環境保護に集中的に投資が起こる。資源利用の効率化は、資源の供給側面を重視する高成長社会シナリオと違い、資源の需要面に集中して生じる。また、廃棄物の減量化やリサイクルが進み、資源利用の効率化やリサイクルの活性化によって環境産業の市場が急速に拡大し、これが経済成長の持続に大きく貢献する。経済成長率は高成長シナリオよりは低くはなるが、2050年の1人当たり平均所得は1万3千ドルに達する。発展途上国では、先進国からの先端技術の移転が進み、クリーン技術が普及し、これに伴い、教育やキャパシティビルディングも大きく進展する。このため、いわゆるショートカットと呼ばれる発展パターンに乗って、途上国の公害対策が著しく進展する。公共交通システムが整備



第2図 標準化された40のSRES 二酸化炭素排出シナリオ（エネルギー起源及び工業起源）
 マーカー・シナリオは太黒線で、その他の36シナリオはその他の線で示される。
 マークのない細線は、百分位数、平均値、中央値を示す。

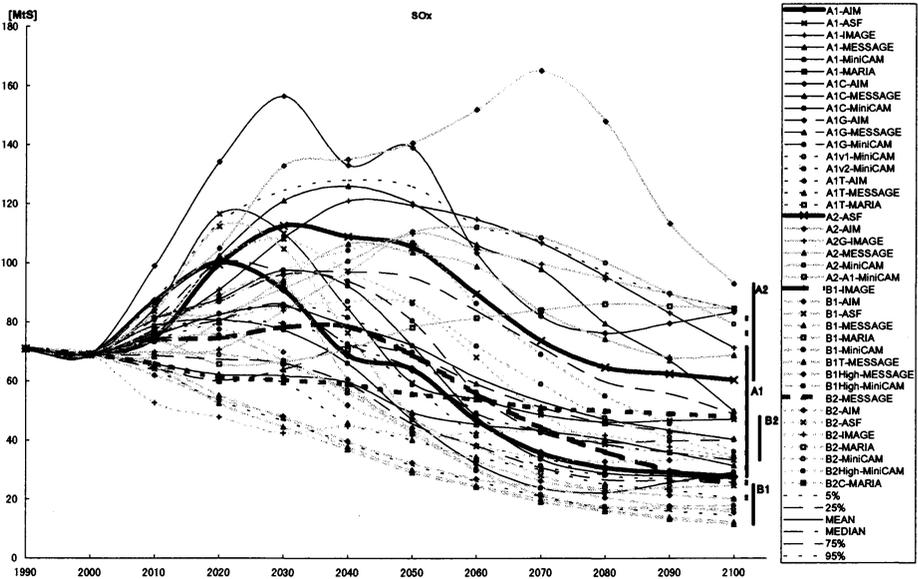
され、都市構造はコンパクト化し、低投入・低負荷型農業が普及する。自然保護を推進することにより農産物価格は相対的に高いが、肉食への食生活へのシフトは抑えられる。

最後のB2は「地域共存型社会シナリオ」と呼べるかもしれない。環境や社会への高い関心に基づくが、地球規模の問題への関心や国際的な問題解決という方向に向かわず、地域の問題と公平性を重視して、ボトムアップの方向で発展を図るシナリオである。マーケットにまかせずローカルな政府の政策が発展を牽引する。教育と福祉向上政策により、発展途上国の死亡率、出生率の双方が下がるため、人口は来世紀末で100億人程度となる。国際マーケットよりも地域の共存を重視する分、経済成長はやや低めとなり、2050年で1人当たり所得が1万2千ドルとなる。個人間及び南北間の所得格差は縮小する。技術移転などの途上国支援は、国際的な統一ルールではなく2国間で別々に進められる。地域的な独立性が高まり、地域毎の経済圏や政治システムが発達していく。これにより、エネルギー、食糧、環境などの問題は、各地域の中で主体的に解決が図られる。

4. 排出シナリオ

では、これらの4つのシナリオを前提にして温室効果ガスを予測したらどうなるか。われわれのチームも含めて世界の6つのチームが定量化を試みた。いずれも、世界経済モデルを中心にして、エネルギーモデルや土地利用モデルを組み合わせ、上記の4つの叙事的シナリオを前提としながら、エネルギー利用や土地利用変化、それに工業プロセスの将来をシミュレートし、この結果排出される二酸化炭素(CO₂)、メタンガス(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)、二酸化硫黄(SO₂)などを総合的に推計した。第2図は、エネルギー及び工業起源の二酸化炭素排出シナリオで、計算された40全てのシナリオと、各シナリオ群のマーカーが示されている。

予想通り、環境を重視したB1シナリオが最もCO₂排出量が少ない。このような社会を築くと、とりたてて温暖化対策をやらなくても温暖化は食い止められる。伝統的な環境保護論者の理想に近いB2シナリオは、経済発展至上主義に近いA1シナリオと比べて、来世紀末のCO₂排出量でほぼ同じとなる。地域を重視して環境問題を解決する方向に働く要因と、経済発展によって技術効率が向上する要因とが、CO₂の排出抑制において同じくらいの効果を発揮した。最も温



第3図 標準化された40のSRES硫黄酸化物排出シナリオ。マーカー・シナリオは太黒線で、その他の36シナリオはその他の線で示される。マーカーのない細線は、百分位数、平均値、中央値を示す。

暖化対策にやっかいな社会は、A1シナリオではなく、意外にも「多元化社会」を指向したA2シナリオであった。このような社会に発展してしまうと、温暖化対策には信じられない程のコストがかかる可能性を示唆している。

この新しいシナリオ作成を通じて、もう1つの意外なことが明らかになってきた。それは、第3図に示した硫黄酸化物(SO_x)の排出のシミュレーションに関係したものである。以前にIPCCが作成したIS92aなど今までの多くのSO_x排出シナリオは、来世紀末まで排出量が伸び続けるというものであったが、今回のシナリオのシミュレーションでは、日本をはじめとする先進国の公害対策の歴史を勘案して、これらの知見をモデルの中に組み入れた結果、すべてのシナリオでSO_x排出量が大きく減少するという結果が得られた。途上国の経済発展に伴って1人当たりのGDPが3千ドルから5千ドルに達すると、公害被害への認識が高まり一気に公害対策が進むという歴史的事実を、モデルに反映した結果である。これによってSO_x排出量は減少し続けるか、あるいは逆U字の形で来世紀に入って減少する(環境クズネツ曲線と呼ばれる)かのいずれかとなる。このSO_x排出量の減少は、大気中の硫酸エアロゾルを減少させ、硫酸エアロゾルのもつ「冷却効

果」を低下させて、その結果、地球温暖化を加速させることが推定される。

第1表に、全てのガスの排出シナリオについての定量化の結果を、マーカーと全ての排出シナリオの幅で整理した。これらのSRESシナリオは、先に示した最近の文献にみられる排出シナリオの幅の大部分をカバーするものとなった。

5. おわりに

以上が、SRESシナリオの全容であるが、最後に、IPCCセッションにおける政策担当者用サマリーの若干の修正と、その後のSRESシナリオを用いた研究について若干補足する。

この報告の初めにも書いたが、2000年3月13日から15日にかけてネパールのカトマンズでIPCCセッションが開催され、SRES特別報告書が承認された。その際、各国政府代表による審議の過程で、政策担当者用サマリーが修正された。主なポイントは2つある。第1は、4つのマーカーに加えて2つの準マーカーが追加され、特に、気候モデルの入力条件に2つの準マーカーを加えるよう推奨することになった。これは、アメリカ政府代表団の強い要請によるもので、その背景には、B1シナリオにおける温室効果ガスの排出量が

第1表 SRES シナリオの定量化の概要 (マーカー・シナリオと全シナリオの推計幅).

	CO ₂ (GtC)	CH ₄ (MtCH ₄)	N ₂ O (MtN)	HFC, PFC, SF ₆ (MtC equiv.)	CO (MtCO)	NMVOCs (Mt)	NOx (MtN)	SOx (MtS)
A1	Median 13.5 (13.5-17.9) by 2100	Low 289 (289-640) by 2100	7.0 (5.8-17.2) by 2100	Median Total of 824 by 2100	Median 1663 (1080- 2532) by 2100	Median 193 (133-552) by 2100	Median. 40.2 (40.2-77.0) by 2100	Low 27.6 (27.6-71.2) by 2100
A1C	High (25.9-36.7)	Median: (392-693)	(6.1-16.2)	as A1	High: (2298-3766)	Median: (167-373)	High: (63.3 -151.4)	High: (26.9-83.3)
A1G	High (28.2-30.8)	Median (289-735)	(5.9-16.6)	as A1	High: (3260-3666)	Median: (192- 484)	High: 39.9-132.7)	Low: (27.4-40.5)
A1T	Low (4.3-9.1)	Low: (274-291)	Low: (4.8-5.4)	as A1	Median: (1520-2077)	Low: (114 -128)	Low: (28.1-39.9)	Very low: (20.2-27.4)
A2	High 29.1 (19.6-34.5) by 2100	High 889 (549-1069) by 2100	16.5 (8.1-19.3) by 2100	High Total of 1096 by 2100	High 2325 (776-2646) by 2100	High 342 (169-342) by 2100	Very high 109.2 (70.9- 110.0) by 2100	High 60.3 (60.3-92.9) by 2100
B1	Low 4.2 (2.7-10.4) by 2100	Low 236 (236-579) by 2100	5.7 (5.3-20.2) by 2100	Low Total of 386 by 2100	Low 363 (363-1871) by 2100	Low 87 (58-349) by 2100	Low 17.7 (16.0-35.0) by 2100	Very low 24.9 (11.4-24.9) by 2100
B2	Median 13.3 (10.8-21.8) by 2100	Median 597 (465-613) by 2100	6.9 (6.9-18.1) by 2100	Moderately high Total of 839 by 2100	Median 2002 (661-2002) by 2100	Median 170 (130-304) by 2100	High 61.2 (34.5-76.5) by 2100	Low-Median 47.9 (33.3-47.9) by 2100

低過ぎるとの政策担当者の直観をもとに、全体のバランスをとるために高い排出量のシナリオを加えるべきとの認識があったように感じられた。A 1 シナリオ群の石油と天然ガス関連の技術革新が顕著なシナリオ (A 1 G) とともに、新エネルギーの大幅な技術革新を見込んだシナリオ (A 1 T) から、それぞれ1つの排出シナリオが準マーカーに選ばれた。もう1つの修正は、SRES シナリオに基づく放射強制力の分析の部分の全面的削除である。サウジアラビアや中国の意見に従ったものである。これらの修正は、SRES シナリオの本質を変えるものではなく、政策担当者への説明のやり方について若干の手を加えたものに過ぎない。

一方、SRES シナリオを用いた新たな研究も始まっている。SRES シナリオはあくまでも温暖化軽減のための対策を含まないシナリオであったが、IPCC の第3次評価報告書 (TAR) 第3作業部会においては、SRES シナリオをベースにした対策シナリオの章が設けられ、このための分析作業が進められている。この対策シナリオは「Post-SRES シナリオ」と呼ばれ、世界の9つのモデリング・チームが参加し、筆者がその分析プログラムのコーディネーターを務めている。この中では、SRES シナリオに描かれた将来の発展方向を前提として、温室効果ガスの大気中濃度がある目標レベルに維持するために排出削減をシミュレートし、対策のレベルや必要とされる技術革新にどのような違いが出てくるかを分析している。そして、どのような発展の方向に向かったとしても意味のある「ロバストな」対策や技術革新とは何かを明らかにすることが、温暖化対策研究にとって重要な研究領域になろうとし

ている。

SRES シナリオは、IPCC によって用意された新しい排出シナリオというだけでなく、多くの科学的あるいは政策的な示唆を与えている。このシナリオが示唆するものは、人類の将来の発展方向は多様であり、これらの発展の方向によって温暖化の程度や温暖化対策の意味は大きく違ってくることである。今、世界の温暖化対策の議論で最も欠けているポイントは、実はここにある。世界の向かっている方向がどのような社会であるのかをまず議論する必要がある。そして、その社会がわれわれを豊かにし、温暖化対策の方向と大筋で一致しているのであれば、温暖化対策を積極的に進めることは、とりもなおさず世界の発展を牽引していることになるのである。

参 考 文 献

Alcamo, J., A. Bouwman, J. Edmonds, A. Gruebler, T. Morita and A. Sugandhy, 1995 : An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. In *Climate Change 1994*, Cambridge Univ. Press, 233-304.
 Houghton, J. T. *et al.* (ed), 1992 : *Climate Change 1992-the Supplement Report to The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge Univ. Press, 200pp.
 IPCC, 2000 : *Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge Univ. Press, 599pp.
 Morita, T. and H. Lee, 1997 : *Emission Scenario Database prepared for IPCC Special Report on Emission Scenarios convened by Dr. Nebosja Nakicenovic*.
 (<http://www-cger.nies.go.jp/ipcc/aim/>)