

GISPRI 仮訳

Intergovernmental Panel on Climate Change

I P C C 技術報告 3

大気中の温室効果ガスの安定化：物理的、生物学的、社会経済的影響

1997年2月

(注) 図、表は原文参照

## 要約

はじめに

温室効果ガス濃度の安定化を抑制する要因を理解することは、国連気候変動枠組み条約の目標とその実施に関する政策作成の基本である。このテクニカル・ペーパーは、以下を提供する。

- (a) 温室効果ガスの安定化、放射強制 1 の推定、「二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 換算」(一定種類のガスが考慮されている場合に、すべてのガスの増加予想に従って地球の平均放射強制を導く CO<sub>2</sub> の濃度) という概念に関する手引き
- (b) 1,000ppmv で安定化させる単一プロファイルにより、2 種類の方法を通じて 350 ~ 750ppmv の範囲の安定化につながる CO<sub>2</sub> 安定化プロファイルの基本セット (図 1)
- (c) 上述の濃度安定化プロファイルの推定排出量
- (d) CO<sub>2</sub> 以外の放射強制因子の安定化についての考察
- (e) メタン (CH<sub>4</sub>)、亜酸化窒素 (N<sub>2</sub>O)、二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>) についての一定範囲の推定排出量のほかに、気候感度の様々な値と不確実性を特徴づけるための氷溶解モデル・パラメータを用いた CO<sub>2</sub> プロファイルの地球平均温度と海面の変動値
- (f) 温度と海面の派生的変動による潜在的環境影響の説明
- (g) 緩和コストに影響を与える要因の説明
- (h) 大気構成の変化による結果についてより完全な見方を得るために、気候と海面の変動影響と緩和コストを統合する方法の吟味

【図 1】 350 ~ 1,000ppmv の濃度での安定化を導く CO<sub>2</sub> プロファイル。比較のため、産業化以前の濃度をおよそ 280ppmv、現在の濃度をおよそ 360ppmv とする。350 ~ 750ppmv の濃度で安定化させるために、2 つの異なる安定化方法が示される。すなわち、(IPCC 94 からの) S プロファイルと (Wigley, et al., 1996 年からの) WRE プロファイルである。これらは、(安定化レベルによって) CO<sub>2</sub> 排出量を 2000 年またはそれ以降までは IS92a に従わせることを可能にする。単一プロファイルは、1,000ppmv の濃度について定められている。これら 2 種類のプロファイルは、一定の有望な安定化方法から得た例にすぎない。

ファンダメンタルズ

温室効果ガスのうち、本書で焦点を置くのは CO<sub>2</sub> である。というのは CO<sub>2</sub> は、これまで放射強制に最大の影響を与えてきたし、また今後も与えると予想されるためである。他の温室効果ガスの影響も考察し、それらの将来の排出量について一連の仮定が行われる。

さらに、地球を冷やす作用をもつエアロゾルの影響が考察される。化石燃料やバイオマスの燃焼のほか他の人為的発生源から生じる対流圏のエロゾル (微視的空中粒子) は、不確実性の高いマイナス強制を引き起こしてきた。エアロゾルは大気中での寿命が短いた

め、その分布と即時の放射影響は、特徴として非常に地域的なものになる。

### 温室効果ガスの安定化に付随する影響

一定範囲のCO<sub>2</sub> 安定化事例の調査では、450～1,000ppmvの濃度で安定化させるには、1991～2100年の人為的な累積排出量は630～1,410GtCとなる。比較するためにIPCC IS92 排出量シナリオのこれに対応する累積排出量は、770～2,190GtCの範囲になる。

一定範囲の安定化のレベルと方法に合わせたCO<sub>2</sub> 排出量の計算値は、IPCC第二次評価報告の発表時点で利用可能で一般に受け入れられているモデルと入力データを利用して得られる。生態系と海洋のフィードバックにより、地上と海洋の炭素貯蔵を、本書と第二次評価報告書で利用された単純地球炭素循環モデルで推定した値を若干下回る水準まで低下させる可能性がある。気候変動時の潜在的に重要な海洋プロセスと生物圏プロセスを省略することで生じる不確実性が、安定化に付随する排出量に関する結論に重大な影響を与えるかもしれない。

「気候感度」に関係する不確実性を前提に、将来の人為的気候変動は、CO<sub>2</sub> レベルだけでなく、すべての人為的温室効果ガスおよびエアロゾルから生じるプラスとマイナスの放射強制の合計によって決まる。本書で考察する強制シナリオは、すべての微量ガス（CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、オゾン（O<sub>3</sub>）など）とエアロゾルの放射強制の合計を使用する。合計放射強制はCO<sub>2</sub> 「換算」濃度から生じたもののように扱われる場合がある。したがって、「CO<sub>2</sub> 換算」濃度とは、CO<sub>2</sub>、他の温室効果ガス、エアロゾルの一定の混合として同量の地球平均放射強制を生じるCO<sub>2</sub> 濃度である。

CO<sub>2</sub> 換算レベルと純粋なCO<sub>2</sub> レベルの格差は、他の放射力のあるガスとエアロゾルの濃度が安定化するレベルによって左右される。

温室効果ガスの影響は累積的であるため、およそ500ppmv以上のレベルでのCO<sub>2</sub> 濃度の安定化は、産業化以前のCO<sub>2</sub> レベルの少なくとも2倍に相当する人為的变化をもたらす可能性がある。

温度と海面の予測は、想定される気候感度、CO<sub>2</sub> 濃度安定化に向けて選ばれた目標と方法、他の温室効果ガスとエアロゾルの強制についての想定シナリオに依存する。2.5 という中間気候感度では、世界の平均温度は、基準安定化事例の場合は1990年から上昇する。このケースでは、CO<sub>2</sub> 以外のガスとSO<sub>2</sub> の排出量は1990年レベルで安定し、温度範囲は2100年までは0.5～2.0 になると想定される（図2）。産業化以前の時代からの上昇については、0.3～0.7 を加えなければならない。向こう50年間の温度変動率は、10年間で0.1～0.2 の範囲になる。1990～2100年の海面上昇の推定値は、中間気候感度と氷溶解パラメータの値で考えると25～49cmの範囲になる（図2）。温度と海面の推定値は、他

のガスとエアロゾルについての推定値に敏感である。

本書は、様々な温室効果ガス安定化レベルから生じる可能性のある温度と海面の変化について説明している。ただし、さらに研究を進めれば、気候変動の影響に直接的に関係する温度または海面の変動目標については、個別政策目標を達成するのに必要な温室効果ガス安定化レベルを推定することが可能である。

【図2】 (a) CO<sub>2</sub> 濃度がSプロファイルとWRE 550および1,000プロファイルに従って安定化するときの地球の予想平均温度。CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub> の排出量は1990年レベルで一定すると想定し、また、ハロゲン化炭素は、モントリオール議定書に基づいた排出量シナリオに従うものとする。気候感度は2.5 の中間値になると想定する。比較するために、2100年についてのIS92a、c、eの排出量シナリオの結果が示されている。各値は、1990年と比較して表示されている。産業化以前の時代からの人間に起因する変化を知るためには、さらに0.3~0.7 を加える必要がある。(b)(a)に関しては、中央氷溶解パラメータを用いた地球の海面変化を除いている。

## 気候変動の影響

特定のシステムと部門の潜在的感度および脆弱性については、多くのことがわかっている。また、大きなリスクと潜在的利益の双方を確認することもできる。しかし現時点では、この情報をさまざまな安定化レベルまたは排出量曲線 (emissions trajectories) に付随する影響の評価に結びつける我々の能力は、比較的限られている。

将来の気候変動の地域的パターンは十分にわかっていないが、人為的排出量に付随する放射強制の別のパターンは地域の気候を大幅に変え、さまざまな地域の気候条件に多様な影響を及ぼすことは明かである。こうした国レベル、地域レベルの変化には、栽培期間の長さの変化、水の利用可能性、擾乱状況の発生（極端な気温上昇、洪水、干ばつ、火災、伝染病の発生）が含まれる。これらは後に、自然環境と人間が創出した環境の構造と機能に重要な影響を及ぼすだろう。気候変動とそれに関連する海面の変化にとくに敏感なシステムと活動には、森林、山地、水生生態系と沿岸生態系、陸水学と水資源管理（氷雪圏を含む）、食料と繊維の生産、人間の生活基盤と健康などが含まれる。

各種の影響は、気候変動の規模と速度の線形関数ではない。一部の種（したがってシステム）については、温度、降水量または他の要素の変化の基準が存在する場合がある。この基準を一度超えると、生存可能性、構造または機能の断続的变化につながるおそれがある。地域的気候変動と地域の反応、自然システムと人間の健康に与える影響の評価の困難さ、地域間と世代間の公平性に関する問題などの理由から、地球規模の評価を作成するために影響をまとめることは、現在では不可能である。

濃度が上昇する速度とともに、大気に到達する温室効果ガスの最終的濃度は、気候変動の速度が遅くなればシステムの採用により多くの時間をかけることができるため、各種の影響に作用する可能性がある。しかし、変化の明確な基準速度および規模を特定するための知識は、現時点では十分ではない。

## C O<sub>2</sub> 濃度安定化のための緩和コスト

C O<sub>2</sub> 緩和コストに影響を及ぼす要素には、以下のものが含まれる。

- (a) 政策を導入しない場合の将来の排出量（「基準」）
- (b) 排出量について利用できる炭素バジェットを決定する濃度目標と安定化方法
- (c) 選ばれた濃度目標と方法に利用できる排出量炭素バジェットに影響を与える自然炭素循環の動作
- (d) 化石燃料と無炭素代替燃料間のコスト格差と異なる化石燃料間のコスト格差
- (e) 技術進歩と生産されるエネルギー単位当たりの炭素排出が少ない技術の採用度
- (f) 資本ストック回転率に付随する転換コスト。これは実施時期が早すぎると増加する。
- (g) 国際協力の進展度。これは、世界の様々な地域でコスト軽減オプションが実施される度合いを決定する。
- (h) 異なる時期でコストを比較するために利用される割引率についての前提

排出量削減コストは排出量「基準」、すなわち政策が導入されない場合に排出量がどのように増加すると予測されるかにかかっている。この基準が高いほど、特定の安定化目標を満たすためにより大量の炭素を除去しなければならない。したがって、政策導入の必要が高まる。排出量削減コストはまた、濃度安定化目標に敏感である。最初の推定のように、安定化目標とは、現在から目標達成予定日までに排出される炭素量を定めるものである（「炭素バジェット」）。「炭素バジェット」の大きさは、緩和コストの重要な決定要因である。安定化目標が小さいほど、炭素バジェットが小さくなる。これは一層の政策導入を必要とする。

C O<sub>2</sub> 濃度の安定化コストは、無炭素代替燃料と比べた化石燃料のコストにも左右される。安定化目標を満たすためのコストは、一般に化石燃料と無炭素代替燃料のコスト格差とともに増加する。コスト格差が大きいということは、化石燃料を無炭素代替燃料に切り換えることで排出量を減らすため、消費者のエネルギー関連支出が大幅に増加することを意味する。非在来型化石燃料と無炭素代替燃料のコスト格差は、在来型の石油・ガスと無炭素代替燃料のコスト格差よりも小さくなると思われる。一定の安定化目標に従って世界のC O<sub>2</sub> 排出量を削減しなければならないときに、石油とガスがエネルギー構成において依然として大きな比率を占めるとすれば、燃料切換えコスト (transition cost) は、石油とガスがエネルギー使用のわずかな部分を占める場合よりも高くなるだろう。無炭素代替燃料のコストプレミアムは、安定化レベルが高いほど小さくなる可能性があるが、このコスト格差が時間の経過とともにどのように変化するかは予測できない。さらに、安定化レ

ベルが高い場合は合計エネルギー需要が増えるため、異なる安定化レベルの場合の燃料切換えコストに与える純粋な影響は明かではない。

一定の濃度目標は、1つ以上の排出方法によって達成される可能性がある。短期の排出量は、長期の排出量に対してバランスがとれるかもしれない。一定の安定化レベルでは、累積的な炭素排出許容量である「バジェット」が存在する。また、安定化方法の選択は、この炭素バジェットを一定期間中にどのような形で最適に（すなわち、最大限の経済効率と最小限のマイナス影響）割り当てるかという問題とみなされる場合がある。同一の安定化レベルでの排出量削減方法の相違は、方法によってコストが異なることから重要である。初期の排出量が大きいくほど、後になって排出量を調整するオプションが少なくなる。

エネルギー関連資本ストックは、通常は寿命が長く、寿命前の廃棄はコストを割高にする傾向がある。寿命前の廃棄を回避するために、軽減努力は、時間的、空間的により均等に行うべきである。安定化目標のコストは、新規投資と設備の経済寿命終了時（すなわち、資本ストックの交換時）での取替えに焦点を置くことで削減できる。これは、継続的なプロセスである。

安定化方法のコストは、技術がある時点およびある一定期間で排出量削減コストにどのように影響を与えるかということにも左右される。一般に、排出量削減方法のコストは、ある時点で削減しなければならない排出量とともに増加する。排出量削減コストの緩和に必要な技術的变化は、さまざまな措置の組み合わせを必要とするだろう。政府による研究開発活動の拡大、技術の開発・普及に対する市場障壁の除去、明確な市場支援、優遇税制、適切な排出抑制は、人間に起因するCO<sub>2</sub>の濃度安定化コストの軽減に必要な技術を促進する作用をもたらすかもしれない。

緩和コストに関しては、正の割引率が、発生するコストの現在価値を引き下げる。これは、将来行われる投資に対する負担を軽減するためである。確かに将来の経済的負担（ここでは排出削減量）が大きくなるほど、コストの現在価値は小さくなる。より広い意味で考えると、割引は、現在のエネルギー使用の利益に比べて将来の環境影響に課される負担を減らす。割引の使用により、将来におけるエネルギー・システムの早急な切換えなどの重大な問題は現在ドル価値の点では容易であると思わせる。また、世代間の公平性の問題に影響を与えるかもしれない。

### 影響に関する情報と軽減コストの統合

本書は、気候変動のコスト、利益、影響に関する情報を統合するための枠組みを提供する。数十年という期間にわたり「通常通りの」排出量をもたらす濃度安定化プロファイルは、何の処置も必要としない提案であると解釈されてはならない。実際に各種調査は、ある一定期間に通常通りの排出量を発生させるケースであっても、排出量が後に減少するように

するために当該期間に処置を講じなければならないと示唆している。通常レベルを下回る即時のまたは最終的な削減につながる処置のポートフォリオを作成するための戦略を以下に説明する。

気候変動への適合を促し、温室効果ガス排出量を削減し、将来の排出量を削減する技術を創出するためには、様々な政策措置が利用できる。CO<sub>2</sub>換算または合計放射強制で表示する場合、様々なガスの排出削減量の組み合わせを通じて、また、温室効果ガスの吸収源を強化することで、一定の安定化レベルを満たすことができる。各国政府は、この問題に集中するための資源の量と最も効果的であると自身が考える措置の組み合わせを決めなければならない。IPCC・WG (1996年)<sup>2</sup> は、重要な「ノー・リグレット3」措置が利用できると述べている。ノー・リグレット政策は現在有効であることから、各国政府が現在直面している問題は、フルレンジのノー・リグレット措置の実施方法と純粋なノー・リグレット措置をいつ、どの程度まで進めるかということである。気候変動による全体的な純粋な影響のリスク、リスク回避の検討、予防原則の適用は、ノー・リグレット措置よりも優れた措置の論理的根拠を与える。

---

<sup>2</sup> : 以下、SAR・WG という。

<sup>3</sup> : 「ノー・リグレット」措置とは、エネルギーコストの削減、各国/地域の汚染物質排出量の削減などの利益が、気候変動軽減の利益を除き、社会に対するこの措置のコストと等しいまたはそれを上回る措置である。

## 1. 序論

### 1.1 目的

このテクニカル・ペーパーは、IPCC 第二次評価報告書 (IPCC・WG<sub>II</sub>、WG<sub>II</sub> およびWG<sub>II</sub>、1996年<sup>4</sup>) の資料に基づき、国連気候変動枠組み条約 (UN/FCCC) の目的の解釈に関係のある科学的ならびに技術的な問題を記述し、明らかにする。この条約の目的は、第2条 (国連、1992年) に次のように述べられている。

<sup>4</sup> : 以下、SAR・WG<sub>II</sub>、SAR・WG<sub>II</sub> およびSAR・WG<sub>II</sub> という。

「この条約および締約国会議が採用し得る関連の法的文書の究極的な目的は、条約の関連条項に従って、気候系への危険な人為的干渉を防止する水準で、大気中の温室効果ガス濃度の安定化を達成することである。そのような水準は、生態系が気候変動に自然に適応でき、食物生産が脅かされず、経済発展が持続可能な形で進められるのに十分な時間的枠組みの中で達成されるべきである。」

第2条は、温室効果ガス濃度の安定化を要求している。ここではCO<sub>2</sub> を重視するが、より一般的な多種類の気体安定化の目的に関連した不確実性を説明し、ある程度の確信を持って言えることを強調するため、他のいくつかの気体についても考察する。

CO<sub>2</sub> の排出量と大気中の濃度の変化との明らかな歴史的関係、および炭素循環についての我々のかなりの知識から、化石燃料、セメント生産、土地利用にかかわるCO<sub>2</sub> 排出が、歴史的な、現在の、あるいはより高い率で今後も続けば、この温室効果ガスの大気中の濃度が高まることが予想される。CO<sub>2</sub> 濃度が将来どのように変化するかを理解するには、炭素循環のモデルを用いてCO<sub>2</sub> の排出量と大気中の濃度との関係を定量化する必要がある。

この論文は、SAR・WG<sub>II</sub>、WG<sub>II</sub> およびWG<sub>II</sub> で与えられた情報を基にしている。まず各レベルに到達する2つの経路を含む、大気中のCO<sub>2</sub> の安定化のいくつかのレベルについて、排出量と濃度の関係を分析するのに用いられたある範囲の標準化された計算 (1994年のIPCC報告<sup>5</sup> およびSAR・WG<sub>II</sub> で提示された) の結果について検討する。次にわれわれは、他の温室効果ガスおよび硫酸塩エアロゾル (SO<sub>2</sub> 排出から生じる) の影響を考察し、研究対象となる種々の安定化レベルにかかわる温度と海面の変動を概算する。最後に、予想される温度と海面の変動に関連した起こり得る好影響と悪影響について簡単に検討し、温室効果ガスの安定化にかかわる軽減コストについて論じる。

<sup>5</sup> : IPCC (1995年)、以下IPCC94という。

温度変動と海面上昇の予測は、SAR・WG<sub>II</sub> で使用した単純化モデル、すなわちより複雑なモデルに対して調整されたモデルを用いて計算される。これらのより複雑なモデル

は、ここに提示する分析には使用しない。それらをここで研究する多数の事例について実行するには余りにもコストと時間を要するからであり、またそれらの地球規模の平均結果は、より単純なモデルを用いて十分に表されると思われるからである（IPCCテクニカル・ペーパー「IPCC第二次評価報告書で使用された単純気候モデルの手引き」（IPCC TP SCM、1997年）参照）。

SAR・WG では、(a) 一連の経路によるCO<sub>2</sub> 濃度の安定化 (b) CO<sub>2</sub> 以外の微量ガスについての将来のありそうな排出量のシナリオ、および(c) 将来のSO<sub>2</sub> 排出量のいくつかのレベル（種々のレベルのエアロゾルを生じる） - - によって気候に生じ得る結果を評価するため、一連の選択的な濃度プロファイルが使用された。第2条の文脈では、様々な可能性や影響を考慮できるように、大気中の濃度を安定化させ得る温室効果ガスの一連の排出量プロファイルを調べることが大切である。さらに、いくつかのプロファイルを評価する場合、「危険な干渉」に当たる気候変動の速さまたは大きさに関して判断するのは避ける。温室効果ガスの安定化に対する制約の理解は、UN/FCCCの目標およびその実施に関する政策立案にとって基本になるため、このテクニカル・ペーパーはIPCC 94およびSAR・WG、WG で提示された安定化の計算について、指導的および詳細な評価を与える。

このテクニカル・ペーパーは特に、以下の役目を果たす。

- (a) 温室効果ガスの安定化、放射強制の評価および「CO<sub>2</sub> 換算」（一組のガスを考慮する場合、すべてのガスの予想増加量と調和した地球の平均放射強制をもたらすCO<sub>2</sub> の濃度）の概念に関する指導を与える。
- (b) 2種類の経路により、350~750ppmvでの安定化に至るCO<sub>2</sub> 安定化プロファイルと、1000ppmvで安定化する1つのプロファイルの基本的な組を提示する。
- (c) 上記の濃度安定化プロファイルに関する導出された排出量を提示する。
- (d) CO<sub>2</sub> 以外の放射強制因子の安定化を考察する。
- (e) 不確実性の特質を記述するため、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>OおよびSO<sub>2</sub> の一連の排出量の仮定、ならびに気候感度および氷融解モデルのパラメータ値の種々な値を用いて、CO<sub>2</sub> プロファイルに関する地球の平均温度および海面の変動を計算する（単純化された気候モデルにより）（単純気候モデルの議論についてはIPCC TP SCM、1997年参照）。
- (f) 導出された温度と海面の変動により環境に生じ得る結果について論じる。
- (g) 軽減コストに影響を及ぼす要因について論じる。
- (h) 大気の組成の変動の結果についてより完全な見方を得るため、気候と海面の変動の影響と軽減コストを統合する方法を吟味する。

## 1.2 要点

### 1.2.1 温室効果ガスおよび対流圏エアロゾルに関する基本的事項

(詳細についてはSAR・WG 参照)

温室効果ガスのうち、この論文がCO<sub>2</sub>に重点を置くわけは、これまで放射強制に最大の影響を及ぼしており、これからも及ぼすと予想されるからである(1990年にはCO<sub>2</sub>が1.56Wm<sup>-2</sup>に対し、CH<sub>4</sub>は0.47Wm<sup>-2</sup>、N<sub>2</sub>Oは0.14Wm<sup>-2</sup>、ハロカーボンは0.27Wm<sup>-2</sup>)。気候変動の研究における放射強制の有用性の議論については、IPCC94(4章)およびIPCC T P S C M (1997年)を参照されたい。この論文では、他の温室効果ガスおよび主要なエアロゾル前駆体であるSO<sub>2</sub>の可能な将来の排出量について、一連の仮定を行う場合に生じる影響についても考慮する(エアロゾルは地球を冷却する作用をもつ場合がある)。

化石燃料の燃焼、バイオマス燃焼など人為的発生源から生じる対流圏エアロゾル(微細な浮遊粒子)は、地球全体の平均としての過去百年間の直接的強制が-0.5Wm<sup>-2</sup>(範囲:-0.25~-1.0Wm<sup>-2</sup>)と非常に不確実な評価になっている。定量化が依然として非常に困難な負の間接的強制(雲の変化による)もあるかもしれない(SAR・WG : 2章)。エアロゾルは大気中での寿命が短いため、その分布と、したがって直接的な放射への影響は、非常に地域的な性格を有する。局地的には、エアロゾル強制は、温室効果ガスによる正の強制を相殺して余りあるほど大きい可能性がある。ただ、負の強制は特定の地域や大陸よりも小さい地域に集中するとは言え、大気循環による結合により、大陸から半球規模の影響を気候に及ぼす。

### 1.2.2 CO<sub>2</sub>濃度の安定化(詳細についてはSAR・WG 参照)

研究対象の一連の安定化の想定例の間では、1991年から2100年までの累積する人為的排出量は、450~1000 ppmvの安定化レベルについて、630~1410 GtCの間に入る。それに比べ、IPCC・IS92の排出量シナリオの対応する累積排出量は770~2190 GtCの範囲にわたる。

350~750ppmvの各安定化レベルについて、次の2つの経路が考察される。IS92aからすぐにそれる「S」経路と、初めはIS92aをたどる「WRE」経路である。1000ppmvで安定化するただ1つの経路も考察する。WRE経路は、短期的には排出量がより多いが、排出量の増大から減少への変化がより早く急速であり、その後の排出量は少なくなる。

生態系と海洋からのフィードバックは、陸上と海洋の炭素貯蔵量を、本書と第二次評価報告で用いられた、単純化された地球の炭素循環モデルで仮定されたよりも幾分低いレベルに減少させる可能性がある。過渡的気候変動期の潜在的に重大な海洋および生物圏の過程の省略から生じる不確実性は、安定化にかかわる排出量に関する結論に大きな影響を及ぼすかもしれない。

### 1.2.3 他の温室効果ガスとエアロゾルの気候への影響を考慮する：CO<sub>2</sub> 概算の概念

気候感度に関する不確実性を前提とするが（下記参照）、将来の人為的な気候変動は、CO<sub>2</sub> だけのレベルではなく、すべての人為的な温室効果ガスおよびエアロゾルから生じる、すべての正および負の強制的総和によって決まる。モデルの実行の多くで使用される強制的シナリオは、すべての微量ガス（CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、O<sub>3</sub> 等）とエアロゾルの放射強制的総和である。強制的全体は、CO<sub>2</sub> 「換算」濃度から来たかのように扱ってよい。それゆえ、「CO<sub>2</sub> 換算」濃度は、CO<sub>2</sub>、他の温室効果ガスおよびエアロゾルの与えられた混和と同量の地球規模の平均放射強制を引き起こすCO<sub>2</sub> の濃度である。

CO<sub>2</sub> 換算レベルと実際のCO<sub>2</sub> レベルとの差異は、他の放射上活発なガスおよびエアロゾルの濃度が安定化するレベルによって決まる。CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub> について選ばれた安定化レベルは、CO<sub>2</sub> 換算に著しい影響を与える可能性がある。これらのガスの排出量が今日のレベルで一定に保たれるとすれば、CO<sub>2</sub> 換算はCO<sub>2</sub> のみのレベルよりも約26ppmv (S350) から74ppmv (WRE1000) 高い水準で安定化しよう。温室効果ガスの影響は加算的であるため、約500ppmvを上回るどんなレベルでのCO<sub>2</sub> 濃度の安定化も、少なくとも産業化以前のCO<sub>2</sub> レベルの2倍に相当する大気中の変化を生じるものと思われる。

### 1.2.4 温室効果ガスの安定化が地球上の温度と平均海面に持つ意味

この報告書は、地球上の平均温度と平均海面の上昇という2つの単純な気候変動の指標を考察する。地球上の平均温度の変化は、平均海面の上昇を決定する主要因である。それは総体的な気候変動の有用な代理指標でもある。しかし、気候変動は地球全体で一様に生じるのではない、ということを理解することが重要である。温度ならびに降水量、雲の多さ、激しい事象の頻度など他の気候変数の変動は、地域間で大きく異なる。気候変動の結果を評価するためには、気候強制、気候反応、地域の人的および自然資源の体系の影響されやすさなど、あらゆる要因の空間的な変動性を考慮しなければならない。もっとも、地域的詳細についての考察はこの論文の範囲外である。

いくつかの放射強制因子、特にエアロゾルの空間的パターンは非常に多様であり、そのため気候変動の空間的な変動性をさらに増大させる。この論文では、エアロゾル強制は、その予想される全体的な大きさ、その地球上の平均温度への影響、その平均海面の上昇への影響などについて印象が得られるように、全地球の平均として提示する。しかし、気候変動の細部へのエアロゾル強制の影響は、温室効果ガスによる全地球の平均としての同様な大きさの強制的影響とはかなり異なっていると思われる。それゆえ、地域的な気候変動および影響に関しては、エアロゾル強制による負の強制あるいは冷却は、温室効果ガスによる強制的単なる相殺と考えてはならない。

温度と平均海面の予測は、仮定される気候感度、CO<sub>2</sub> 濃度の安定化に選ばれる目標値と経路、および他の温室効果ガスとエアロゾルの強制的想定されるシナリオに依存する。これらの要因の比重は、それらが比較される時間間隔に依存する。2050年までは、どの安定化目標値についても、CO<sub>2</sub> 濃度経路の相違は目標値の選択と同じくらい重要である。

しかし、より長い時間枠では、目標値の選択が（必然的に）より重要である。しかし、これらすべての要因に重要さで勝っているのは、気候感度であり、その不確実性はすべての予測における不確実性を支配する。

#### 1.2.5 影響

特定のシステムや部門の潜在的な感度および影響されやすさに関しては多くのことが知られており、重大なリスクと可能な利益をともに確認することができる。しかし今のところ、この情報を種々の安定化レベルまたは排出量曲線に関する影響の評価に統合するわれわれの能力は比較的限られている。

将来の気候変動の地域的パターンはよくわかっていないが、人為的排出量にかかわる放射強制のパターンの変化が地域の気候を著しく変化させ、異なった地域の気候状態に異なった影響を及ぼすであろう、ということは明らかである。これら局地的、地域的な変化は、必然的に植物生育期の長さ、水の利用可能性、攪乱状況（極端な気温上昇、洪水、干ばつ、火災、伝染病の発生）の発生率などの変化を含むであろう。これがまた、自然環境および人為的環境の構造と機能に重大な影響を及ぼすであろう。気候変動および関連する平均海面の変動に特に敏感な系および活動には、森林、山岳・水・沿岸生態系、水文学および水資源管理（氷雪圏を含む）、食物や繊維の生産、人間の生活基盤、人間の健康などが含まれる。影響に関する現存のほとんどの研究は、CO<sub>2</sub> 換算レベルの倍増に関連した平衡気候変動の結果として生じ得ることの分析である。温室効果ガス濃度の増加を伴う、より現実的な状況への時間を通じての反応を考察した研究はほとんどない。

影響は、気候変動の大きさと速さの一次関数ではない。一部の種（したがって系）にとっては、温度、降水量、あるいは他の要因の変化の閾値が存在する可能性があり、それをひとたび越えれば、生活力、構造、または機能の非連続的な変化をもたらす可能性がある。

地球規模の評価を生むための各種の影響の総合は今のところ不可能であるが、それは地域の気候変動および地域の反応についてのわれわれの知識が不足しているため、自然の系および人間の健康への影響を評価するのが困難なため、そして地域間および世代間の公平に関する問題があるためである。

大気中の温室効果ガスが到達する究極的な濃度、ならびに濃度が上昇するスピードは、影響を左右する可能性が高い。気候変動の速さが緩慢であれば、系が適応する時間が多くなるからである。しかし、変動の速度と大きさの明確な閾値を確認するには、今のところ知識が不十分である。

#### 1.2.6 CO<sub>2</sub> 濃度を安定化させる緩和コスト

CO<sub>2</sub> の緩和コストに影響を及ぼす要因には以下のものが含まれる。

- (a) 政策介入がない場合の将来の排出量（「基準」）。
- (b) 濃度の目標値および安定化への経路、これらは排出量に利用できる炭素バジェット

(量) を決定する。

- (c) 自然の炭素循環の動作、これは選択された濃度目標値および経路に関して利用できる排出量の炭素バジェットに影響を及ぼす。
- (d) 化石燃料と炭素を含まない代替手段の間の、および異なった化石燃料の間のコストの格差
- (e) 技術の進歩、および生産されるエネルギー 1 単位当たりの炭素排出量が少ない技術の採用率
- (f) 資本ストック回転率に関連する過渡的コスト、これは実施時期が早すぎると増大する。
- (g) 国際協力の度合い、これは世界各地の低コストの緩和オプションが実施される程度を決定する。
- (h) 異なった時点でのコストの比較に用いられる割引率に関する仮定。

#### 1.2.7 影響と緩和コストに関する情報の統合

この報告書は、気候変動のコスト、ベネフィット、影響に関する情報を統合する枠組みを提供する。以下に述べる要点の前置きとして、二・三十年から数十年間「平常通り」の排出量をたどる濃度安定化プロファイルは、その期間に何の対策も必要でないことを示唆するものと解釈すべきではない、という極めて重要な事柄を述べなければならない。実際、研究によれば、ある期間にわたるそれらの「平常通り」の排出量の場合でも、排出量が大幅に減るよう、その期間に対策を講じなければならないことがわかる。平常通りを下回る水準へと直ちに、またはいつかは削減できるようにする行動のポートフォリオを作成する戦略について以下に論じる。

この論文は、大気中の温室効果ガスを安定化させることのコスト、影響、ベネフィットに関し、情報をどのようにして集められるかを明示することを目的にしている。この分析は、多くの意思決定の形態を支援するもので、2つの「部門」を有する。第一の部門の「影響」では、想定される濃度変動に始まる情報を集め、次に起こり得る気候変動およびその結果を評価する。第二の部門の「緩和」では、一連の安定化の経路およびレベルの達成にかかわる排出量と緩和コストに関する情報を集める。2つの部門は、気候変動と安定化の総合的評価を生むために結び付けなければならない(図3)。

CO<sub>2</sub> 換算すなわち総体的放射強制について表現するなら、与えられた安定化レベルは、種々のガスの排出量の削減を色々に結合すること、そして温室効果ガスの吸収源を強化することにより、達成することができる。そのようなオプションをすべて考慮し、様々な発生源や吸収源を考慮しつつ最も低コストのものを選択すれば、緩和コストが低下するはずである。最適構成に近づくには、種々な排出量戦略が濃度と気候に対して持つ意味、種々のオプションの緩和コストその他の特徴、および種々のガスの比較に用いる(気候および気候以外の)影響の適切な時間枠と指標に関する決定、などについての情報が必要である。不確実性が大きいいため、改善された情報が入手できるようになるにつれ、これらのオプション構成を発展的過程において再評価し、修正しなければならない。

気候変動に取り組む行動のポートフォリオを実行するためには、政府はこの問題に振り分ける資源の量と、最も効果的と考える方策の構成を決定しなければならない。ノー・リグレット（後悔しない）政策が現在では有益であるため、政府が直面する問題は、全範囲のノー・リグレット措置をどのように実施すべきか、および単にノー・リグレットのオプションを越えて進むべきか、もしそうなら、いつ、どこまでそうすべきか、ということである。気候変動による総合的な純影響のリスク、リスク回避の考慮、および予防の原理の適用が、ノー・リグレットを越える措置の理由を与える（SAR・WG）。

気候変動への適応を促進し、温室効果ガスの排出量を削減し、将来の排出量を削減する技術を生み出すために、数多くの政策措置が利用できる。これらには、気候変動を緩慢にするための排出量の速やかな削減、将来の軽減コストを減らすための新たな供給・環境保全技術の研究開発、重大な科学的不確実性を減らすための研究の継続、および悪影響の緩和により、またCO<sub>2</sub>の増加から生じる利益（たとえば、CO<sub>2</sub>の増加によるある種の作物の水または栄養素の利用効率の向上）により、気候変動への人間および自然の系の適応を助長する措置への投資が含まれる。この問題は「二者択一」の問題ではなく、同時にまたは順次採用されるオプションの適切な構成（すなわちポートフォリオ）を見出す問題である。どの時点での構成もさまざま、濃度の目標によって異なるであろう。この目標自体も科学的、経済的な知識ベースの進歩とともに調整される可能性がある。適切なポートフォリオは、国によっても様々であり、エネルギー市場、経済的問題、政治体制、社会的受容によっても左右される。

### 1.3 この報告書への「ロードマップ」

#### 1.3.1 報告書の戦略

この報告書の構成を図3に示す。この構成は、UN/FCCCの目標の実施に携わる様々な政策担当者に関係のある重要な情報を集めるように考案されている。情報は、大気中の安定化にかかわるコストとベネフィットを理解するのに必要な2つの一般的な区分に入る。第一の区分（あるいは「部門」）は気候変動とその結果に関する情報を集め、第二の区分は排出量と緩和コストに関する情報を集める。この方法は、温室効果ガスの安定化の問題に関するSAR・WG、WG、WGの情報を、より統合された分析に用いられるように編成する。

#### 【図3】 このテクニカル・ペーパーの構成と論理の概観

選択される戦略は、SAR・WGから出発する。SAR・WGは単純化されてはいるが、海洋および陸地の生態系の基本的な物理的過程および生活現象と両立する人為的排出量を導出するための基礎として、一連の濃度プロファイルを考察している（不確実性については、セクション2.2.1.3参照）。濃度プロファイルから、SAR・WG（セクシ

ョン 6.3) の単純化された気候モデルを用いて、これら CO<sub>2</sub> 濃度プロファイルの地球上の平均温度および平均海面への結果を計算する (セクション 2.3 で論じる)。また、これら中心的な CO<sub>2</sub> 分析への他のガスおよびエアロゾルの影響を示す感度の分析も行う。これらの地球上の平均温度と平均海面の変動は、自然資源、インフラ、人間の健康など気候の影響を受ける部門への結果を考慮するための状況を提供する (セクション 3.1 で論じる)。これで分析の「影響の部門」は完結する (図 3 参照)。この分析は、結果についての単純化された地球平均の見方を提供するにすぎない、ということに注意されたい。より適切な詳細な見方を得るには、地域の気候変動および系の影響され易さを考慮しなければならない (地域の気候変動および影響され易さの議論については、SAR・WG : 6 章および SAR・WG を参照)。

この分析の「緩和コストの部門」も、濃度プロファイルで始まる (図 3 参照)。濃度プロファイルは次に人為的排出量を計算するため、炭素循環モデル (SAR・WG : セクション 2.1 および IPCC94 : セクション 1.5 を参照) とともに用いられる (セクション 2.2.1 で論じる)。適切な仮定があれば、これらの導出された排出量は、平常通りのプロファイルよりもむしろ安定化プロファイルに従う「緩和」コストを概算するため、経済モデルで使うことができる (セクション 3.2 で論じる)。究極的な安定化の目標値および経路の関数としての、あり得る緩和コストの範囲についての認識を与えるため、緩和コストは広範囲の安定化プロファイルについて、複数の経済モデルを用いて計算することができる。これらの分析はすべて、個々の特定の濃度プロファイルにかかわる緩和の経済コストを考慮していることに注意されたい。したがって、それらは「最適な」曲線でもなければ、政策上の勧告を示すものでもない。むしろ、それらは濃度から排出量への、そしてそれから緩和コストへのつながりを説明するものである。

2 つの部門は、最後に、影響と緩和コストの情報の統合に関するセクションで概念的に合わされる (セクション 3.3)。どちらの部門も意思決定のための完全な基礎を与えるものではない。この一般的な種類の問題は、広範囲の意志決定の枠組みを支援する。枠組みはこの情報を種々な方法で統合することができる (SAR・WG : 4 章参照)。

### 1.3.2 意志決定の枠組み

大気中の安定化にかかわるコストとベネフィットに関する情報を収集することは重要であるが、収集は単純なコスト・ベネフィット分析を勧めることと同じではない。コスト・ベネフィットのパラダイムは、コストとベネフィットの均衡をとる経済学の決定に関する最もありふれた用途であるが、それだけが利用可能な取組み方法ではない。他の手法として、コスト効果分析、多基準分析、決定分析などがある (SAR・WG、P.151)。意志決定の枠組みは、予想される濃度変化の、その結果生じる気候への影響の、および人間と自然の系への結果の不確実性を考慮しなければならない。この不確実性を扱うための広範なパラダイムも同様に存在し、SAR・WG にまとめられている。

この報告書で提示される生物物理学的および経済学的な不確実性の分析は、問題の簡単

な要約にすぎない。SAR・WG、WG、WGにはより詳細な議論が見られるが、濃度を究極的にコストおよび結果に結び付ける分析の不確実性の範囲すべては、今なお活発な研究領域である。意志決定の過程でいつかは採用される方法にかかわらず、排出量緩和のコストとベネフィットに関する情報は、政策決定の質を高めるために使用することができる。

この文書は、排出量緩和の戦略を実施する実際的な問題について評価しようとするものではなく、そのような検討を取り巻く公正と公平の問題を考察するものでもない。ここで採用する地球的な視点は、方法論的、教育的な便宜のためである。それは地域的な問題は重要性がより低いと言っているのではない。明らかに、気候に関する政策は、考慮すべき多くの広範な国家および国際的な政策問題の脈絡の中でとられなければならない。このような問題は、政策担当者が取り組まなければならない問題の豊かな複雑さを増すものである。

## 2. 温室効果ガスの安定化に関する地球物理学的意味

### 2.1 安定化の一般原則：二酸化炭素および他のガスの安定化

特に「寿命」の概念に関して、他のガスの濃度の安定化と比較した大気中のCO<sub>2</sub>濃度の安定化の科学的側面には、これまで混乱が見られた。主要なガスの寿命を支配する過程は、SAR・WG（2章）およびIPCC94で詳細に検討されており、それはここでの簡単な再検討の極めて重要な背景材料となる。

ほとんどの炭素貯蔵物は、大気とCO<sub>2</sub>を交換する。それらはCO<sub>2</sub>を吸収（海洋）または同化（生態系）するとともに、放出（海洋）または呼吸排出（生態系）する。ここで重要なのは、大気中に排出された人為的炭素は破壊されるのではなく、炭素貯蔵源に加わり、再配分されるということである。これら貯蔵源は、それぞれの交代時間によって決まる広範な時間枠で、相互に炭素を交換する。交代時間は数年から数十年（植物の炭素交代）から数千年（深海や永続的な土壌プールの炭素交代）の範囲にわたる。これらの時間枠は、特定のCO<sub>2</sub>分子が大気中で過ごす平均時間（約4年にすぎない）に比べて一般にはるかに長い。広範囲の交代時間はもう1つの注目すべき結果を有する。それは、混乱した大気中のCO<sub>2</sub>濃度が新たな平衡に向かう緩和は、単一の時定数では記述できないということである。したがって、大気からの人為的CO<sub>2</sub>の除去を単一の時定数（たとえば100年）で特性記述しようとする試みは、定性的な意味でのみ解釈されなければならない。単一の寿命に基づく定量的評価は誤りである。

CO<sub>2</sub>とは対照的に、エアロゾルおよびハロカーボン、メタン、N<sub>2</sub>OなどのCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスは破壊される（例えば、酸化、光化学分解により、またエアロゾルの場合は地上への沈殿により）。このような分子（または粒子）が大気中にとどまる平均時間（すなわち交代時間）は調節時間に等しいか、またはほぼ同じである。

メタン(CH<sub>4</sub>)は一連の発生源から大気に排出され（SAR・WG参照）、主として大気中のヒドロキシル基(OH)による酸化、および地中の微生物によって破壊される。大気中のメタンの混乱の調節時間は、他の貯蔵源との交換よりも、酸化(CO<sub>2</sub>と水蒸気への)によって制御される。他の貯蔵源は、後にメタンを再び放出して大気に戻す可能性がある。メタンの寿命は、メタンとOHの間のフィードバックによって複雑化する。メタン濃度を増加させると、メタン除去率は、メタンの増加1%につき-0.17~+0.35%変化する（SAR・WG：セクション2.2.3.1）。CH<sub>4</sub>-CO-O<sub>3</sub>-OH-NO<sub>x</sub>-UV系の他の多くのフィードバック過程も、メタンの寿命に影響を及ぼす。メタンは、その大気中の寿命、すなわち数十年以下の時間枠で安定化し得る。

亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)は、100~150年という長い寿命を持つ。N<sub>2</sub>Oは成層圏との交換により対流圏（そこで温室効果ガスとして作用する）から除去される。成層圏では光化学分

解により徐々に破壊される。メタンと同様、その寿命は破壊の速さによって制御され、またメタンと同様、他のN<sub>2</sub>O 貯蔵源と交換されるよりもむしろ破壊される。N<sub>2</sub>O 濃度の安定化には発生源の削減が必要であり、このガスの ~120年という寿命のため、そのような削減は、濃度に影響を及ぼすためには長期間にわたって行われる必要がある。一方、大気中のエアロゾル濃度は、エアロゾルおよびエアロゾルの先駆ガスの排出量の変化に、数日から数週間以内に対応する。

## 2.2 濃度プロファイルの説明、他の微量ガスのシナリオ、CO<sub>2</sub> 換算の計算

### 2.2.1 安定化が排出量にもたらす結果

#### 2.2.1.1 安定化に至る濃度プロファイル

このテクニカル・ペーパーでは、SAR・WG で論じられたような、例証となる11のCO<sub>2</sub> 濃度プロファイル（「S」および「WRE」プロファイルと呼ばれ、350~1000 ppmvで安定化する）を評価する。これらのプロファイルは、規定されたレベルでの安定化へと徐々に至る、時間に関する濃度の経路を規定する（図4）。WREプロファイルは、Sプロファイルに比べると、早い時期にはCO<sub>2</sub> 濃度の上昇が大きい、同じ安定化レベルに至る（Wigley, et al., 1996年）。濃度プロファイルは、時間の経過を通じて許容される排出量の範囲を計算するための入力としても用いることができる。導出された排出量は、指定された濃度プロファイルをたどる排出量削減に関連する緩和コストを計算するため、経済モデルの入力として用いることができる。このアプローチは、排出量の最適の経路について計算を可能にしたり、それについて何かを示唆するものではない、ということに注意されたい。

#### 2.2.1.2 CO<sub>2</sub> 濃度の安定化が排出量に対して持つ意味

この分析で、IPCC94（1章）およびSAR・WG（セクション2.1）に記述されたS350~750プロファイルとWRE350~1000プロファイルを再び考察するが、それらの文書のいずれかで可能であったこと以上に、完全な考察を行う。第一に11のプロファイルすべてについて、時間に対するCO<sub>2</sub> 濃度を示すグラフ（図4）、およびそれに対応する時間に対する排出量を示すグラフを、比較のためIS92a、cおよびeのシナリオとともに提示する（図5）。IS92aおよびeシナリオの2050年のCO<sub>2</sub> 排出量は、すべてのSおよびWREプロファイルの排出量よりも高い（2050年までIS92a濃度をたどるように構成されたWRE1000を除く）ということに注意されたい。IS92cシナリオの2050年の排出量は、S550、WRE550、およびそのいずれの排出量経路でもそれより高いすべての安定化レベルよりも低いことがわかる。

これらの結果を導き出すために用いた仮定、ならびにモデル間の相違に関する詳しい情報については、Enting, et al., (1994年)を参照されたい。与えられた安定化プロファイルでは一般に、排出量の増加する期間に安定化水準までの急速な減少が続く。このパタ

ーンは S 350 と W R E 350 のプロファイルには当てはまらないこと、および 350 ppmv は現在の大気中の濃度よりも低いこと、これらの場合はある期間の排出量の減少を示唆していることも注目される。図 5 から、W R E プロファイルは初めに排出量がより多いが、排出量の増加から減少への変化が速く、その後 S と W R E の両方のプロファイルの排出量が一点に収束する前に、排出量がより少なくなることもわかる。われわれはここで最善の排出量経路が何であるかを論じるわけではなく、ただ濃度安定化への規定された経路による排出量の結果を示すにとどまる。

図 6 は、350、450、550、750、1000ppmv での安定化についての、時間の経過につれての累積 CO<sub>2</sub> 排出量、およびそれに対応する I S 9 2 a、c、e のシナリオに関する排出量を示す。同図は、2100 年には I S 9 2 a および e のシナリオに関する累積排出量が、すべての S および W R E プロファイルよりも高いことを明示している。図 5 と同様、図 6 では、W R E プロファイルは近い将来には排出量がかなり高くなること、しかし、またその後の W R E プロファイルの累積排出量は、S プロファイルのもとでの総排出量とほとんど同じになることが明らかである。これは、ある与えられた安定化レベルでは、長期的な累積排出量は安定化へとたどる経路の影響を比較的受けないためである。

安定化に至るある与えられた濃度プロファイルに関する導出された排出量は、化石燃料の燃焼、セメント生産、土地利用の転換、その他の活動から生じる人為的排出量に利用できる「炭素バジェット」を規定する。累積排出量が多いほど（より高い安定化レベルに対応）、人為的活動にとって利用できる炭素バジェットは大きい（セクション 3.2 参照）。炭素バジェットの規模は、特に早い時期には、経路の選択にも影響されやすい（図 6 で S プロファイルと W R E プロファイルの相違によって例示）。

【図 4】 350 ~ 1000ppmv の濃度での安定化に至る CO<sub>2</sub> のプロファイル。産業化以前の濃度は 280ppmv に近かったが、現在の濃度は約 360ppmv である。350 ~ 750ppmv の濃度での安定化については、安定化への 2 つの異なる経路が示されている。すなわち S プロファイル（I P C C 94 より）および W R E プロファイル（Wigley, et al., 1996 年より）で、後者は CO<sub>2</sub> 排出量が 2000 年以後まで（安定化レベルに応じて）I S 9 2 a をたどれるようにする。1000ppmv については、1 つのプロファイルだけが規定されている。これら二組のプロファイルは、規定され得る安定化への可能なルート範囲からとられた例にすぎない。

【図 5】 Bern 炭素循環モデルを用いて算出された、図 4 に示したプロファイルによって安定した CO<sub>2</sub> 濃度を達成する 1990 年から 2300 年までの推定される人為的（化石燃料、セメント、土地利用）CO<sub>2</sub> 排出量。1990 年から 2050 年までの期間は、比較のため I S 9 2 a、c および e の CO<sub>2</sub> 排出量とともに、拡大された枠の中に、より詳細に示す。W R E の結果は、CO<sub>2</sub> 排出量が最初は I S 9 2 a をたどることを可能にし、S プロファイルの結果よりも最大排出量が高いが、排出量の増加から減少への移行がより急速に早期に起こる。I P C C 94 および S A R ・ W G （セクション 2.1）の分析によれば、

他のモデルによる結果はこれらの結果と ±15% 異なり得る。それ以外の不確実性は、われわれの理解の不十分、および SAR・WG（セクション 2.1）で用いられた炭素循環モデルから、重大な生物圏過程と、気候変動に対するその反応が除外されたことから生じる（セクション 2.2.1.3 参照）。

【図 6】 1990年から時間の経過とともに累積する人為的 CO<sub>2</sub> 排出量。最初、S プロファイルの累積排出量は WRE プロファイルよりも少ないが、排出量が次第に長い期間累積するにつれ、2つのプロファイルの結果は、与えられたどの安定化レベルについても収束してくる。いつかは到達する安定化レベルが高いほど、累積排出量（本文では「炭素バジェット」と呼ぶ）は大きく、2つの異なったプロファイルの収束は遅くなることに注意されたい。これらの結果は、Bern 炭素循環モデルを用いて得られた（不確実性の議論についてはセクション 2.3.3 および図 5 の説明参照）。

#### 2.2.1.3 重大な炭素循環の不確実性

一連の安定化レベルおよび経路と調和した排出量の計算のため、SAR・WG（セクション 2.1）は、その当時一般に受け入れられていたモデルと入力データを使用した。このテクニカル・ペーパーでは、SARの資料を再吟味し、総合し、したがってその文書に提示されたモデルを頼りにする。しかし、SAR・WG（セクション 2.1 および 9、10 章）で検討された作業は、単純化された地球上の炭素循環モデルに含まれないメカニズムが、結果に大きく影響する可能性があることを示唆している。重大であり得る海洋および生物圏の過程の省略から生じる不確実性、および過渡的な気候変動時のそれらの反応は、影響に関する結論に大きな影響を及ぼすかもしれない。

SAR・WG で使用され、このテクニカル・ペーパーで拠り所とされた炭素循環のモデルは、CO<sub>2</sub> による植物成長の促進を、環境条件と地球上の炭素との唯一の相互作用として含んでいる。SAR・WG（セクション 2.1 および 9 章）で論じられているように、この前提はいくつかの点で潜在的な欠陥がある。第一に、生態系フィードバックは地球上の炭素貯蔵量の感度を、SAR・WG で用いられた単純化された全地球的炭素循環モデルで仮定されたよりも幾分低いレベルに調節するかもしれない。この不確実性は、SAR・WG（セクション 2.1）および IPCC 94（1 章）に示された図で探究されている。第二に、CO<sub>2</sub> に対する感度は順応によって変わるかもしれない、これも時がたつにつれて影響を弱めるかもしれない。他の植物過程は反対方向に作用する可能性があり、炭素の取り込みに関する均衡はわかっていない（SAR・WG：9 章）。最後に、それ以外の過程が現在および将来、地球上の炭素貯蔵に影響を及ぼすかもしれない。これらには、窒素沈殿による肥沃化、気候変動（Dai and Fung、1993年）、土地利用の変化（SAR・WG：セクション 2.1 および 9 章）などが含まれる。窒素沈殿などこれらのメカニズムのあるものは、効果が「飽和」し、将来、森林の枝枯れ病を生じることさえあり得る。これらの相互作用に対する感度は探究されているが（たとえば VEMAP、1995年）、それらをどのようにして単純化されたモデルに組み込んだら最適かについて、まだ見解の一致は見られない。SAR・WG（セクション 2.1 および 9 章）および IPCC 94（1 章）の結

果を総合すると、生物圏の交換は、安定化までの化石燃料からの累積排出量を論じられた場合に比べ、 $\pm 100 \text{ GtC}$  変化させる可能性がある。軽減コストへのこの影響については、セクション 3.2 で論じる。

さらに、海洋の循環や生物地球化学的過程あるいは陸上の生態系への気候フィードバックは、濃度からの排出量の炭素循環モデルによる計算に含まれていない。温度に対する生物圏の  $\text{CO}_2$  排出量のかなりの感度を支持する理論的 (Townsend, et al., 1992年、IPCC 94: 1章) ならびに観察上の証拠が存在する (Keeling, et al., 1995年)。しかし、そのような温度感度はおそらく地理的に様々であり (IPCC 94: 1章)、したがってその総体的影響は、全地球的平均の変動よりも地域的な気候変動に影響されやすい (セクション 3.1 参照)。温暖化と降水量の変化は、生態系からの短期的な炭素流出を引き起こすかもしれないが (Smith and Shugart, 1993年、Townsend, et al., 1992年、Schimel, et al., 1994年、Keeling, et al., 1995年、SAR・WG : 9章)、また長期的な蓄積を生じる可能性もある (VEMAP、1995年)。

気候フィードバックは、海洋炭素循環にも大きな影響を及ぼす可能性がある。IPCC 94 (1章) では、将来の海洋吸収の長期的な不確実性の範囲が、2つの異なった定常状態の海洋を持つ将来の可能な海洋での生物過程の役割に関する仮定に基づいて、 $-120 \text{ ppmv} \sim +170 \text{ ppmv}$  と推定された。しかし、気候の過渡期 (Manabe and Stouffer, 1994年のような) における海洋循環の変化の影響は、まだ検討されていない。海洋炭素循環の変化によって生じ得る影響は、安定化と調和した化石燃料からの排出量を著しく変化させる可能性があり、将来の分析はこれらの要因を考慮されたい。

#### 2.2.2 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ その他のガスの安定化

様々な  $\text{CO}_2$  濃度安定化プロファイルが地球上の平均温度および平均海面にもたらし得る結果については、セクション 2.2.4 で述べる。これらの計算を行うためには、他のガスの排出量または濃度が将来どのように変化するかについての仮定が必要である。というのも、 $\text{CO}_2$  が唯一の人為的な気候強制要因ではないからである。UN/FCCC の第2条は全般的な温室効果ガス濃度の安定化を目標にしているが、安定化レベルも安定化への経路も明示していない。また UN/FCCC は、主要なエアロゾル前駆体である  $\text{SO}_2$  も、他のエアロゾルやエアロゾル前駆体も対象にしていない。したがって、ここでは他の微量ガスが将来どのように変化し得るかについての可能性の範囲を考察する。

考慮しなければならない  $\text{CO}_2$  以外の温室効果ガスは、SAR・WG で取りあげられているもので、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、ハロゲン化炭素および対流圏オゾンである。水蒸気も温室効果ガスで、気候フィードバックの一部としてわれわれの分析対象に入る (IPCC TSPSCM, 1997年参照)。メタンは、直接、そしてまた大気中の化学作用へのその影響により (対流圏オゾンを生成)、またその酸化の結果として、気候に影響を及ぼす。メタンの酸化は、対流圏の  $\text{OH}$  濃度に影響を及ぼし、それにより大気中の酸化能力、したがって他の微量ガスの濃度に影響を及ぼし、成層圏に水蒸気を追加する。ハロカーボンによって引き起

こされる成層圏下層でのオゾンの減少も、考慮しなければならない気候上の結果を生じる (SAR・WG : セクション 2.4 および IPCC TP SCM、1997年参照)。最後に、SO<sub>2</sub> の排出 (酸化されて種々の硫酸塩になる) はエアロゾルの生成につながり、これは日光を反射することにより気候を冷やす働きをする (SAR・WG )。硫酸塩の粒子は凝結核としても働き、雲の放射特性を変えることがある。

すべての温室効果ガス (CO<sub>2</sub> だけでなく) の安定化を求める第2条の全般的意味を評価することは難しい。メタン、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>、その他のガスの予想される将来の排出量について、明確に規定された範囲が欠けているからである。したがって、種々のガスについてほとんど無数の要因の組み合わせを作ることができる。ガスとエアロゾルの一連の組み合わせに対する、放射強制と気候反応の潜在的感度を証明するため、いくつかの例証となる組み合わせの選択を試みた。問題を「限定」しようとはしなかったのは、将来のメタンとN<sub>2</sub>O の排出量の予想範囲については、これらのガスの排出量の生物地球化学的作用および気候への感度に関する不確実性のため、意見の一致が見られないからである。将来のSO<sub>2</sub> 排出量の範囲についても意見の一致は見られない。これは技術の選択、経済活動、および「大気汚染防止」政策が、どの程度まで世界的規模になるかによって異なる。

硫酸塩エアロゾルの影響は、この点で評価するのが特に難しい。エアロゾルの影響はこれまで重要であり (例えば SAR・WG : 8章、Penner, et al., 1994年、Mitchell, et al., 1995年参照)、したがって将来の気候変動のどんなモデル計算にも含めなければならない。なぜなら、この変動の大きさは過去の放射強制の想定される歴史に左右されるからである。将来の気候変動の予想では、エアロゾルに関する不確実性がかなり重要である。この不確実性は2つの理由で生じる。すなわち、SO<sub>2</sub> 排出量と放射強制の不確かな関係と将来のSO<sub>2</sub> 排出量に関する不確実性により生じる。これらの不確実性は、SAR・WG に記述された文献で考察されているため、ここで検討する (以下参照)。Raper, et al., (1996年) は前者の不確実性を検討しており (1990年のエアロゾル強制のレベルに種々な値を想定することにより)、一方、Wigley, et al., (1996年) は後者を考察している (増加する、および一定のSO<sub>2</sub> 排出量を想定した将来のシナリオを評価することにより)。

SAR・WG (セクション 6.3) の安定化の計算は、これら他のガスについてかなり具体的であるが恣意的なシナリオを想定している (1990年以降のSO<sub>2</sub> の一定の排出量、CO<sub>2</sub> 以外の温室効果ガスの一定の濃度)。IS92の排出量シナリオについての気候の計算では、SAR・WG は、エアロゾルとCO<sub>2</sub> 以外の温室効果ガスについて、より広範囲の可能な将来のシナリオを考察している。特に硫酸塩エアロゾルについては、SAR・WG は変動するSO<sub>2</sub> 排出量 (IS92シナリオで規定された) と1990年以後の一定のSO<sub>2</sub> 排出量のどちらも考察している。

われわれがここで採用する方法は、総体的および個々のガスの感度をとともに評価することに向けられている。それは将来のCO<sub>2</sub> 以外の温室効果ガスの濃度と、これらの濃度を

導出するのに用いられるモデルに関して SAR・WG によって与えられるデータ、および SAR・WG (セクション 6.3) で使用される単純化された気候モデルに基づく。このモデルは (われわれがここでするように) 個々のガスの強制に関するデータをその主要な入力として用いる。

IS92 シナリオ下での強制への種々のガスの相対的寄与を調べることにより、CO<sub>2</sub> 以外のガスの重要性へのいくつかの洞察を得ることができる (表 1 参照)。これによると、一連の「現行政策」シナリオのもとでは、CO<sub>2</sub> が断然優勢なガスである。しかし、累積的には、CO<sub>2</sub> 以外の温室効果ガスの影響はかなり明白であり得る。1990~2100年の期間のそれらの寄与は 0.7Wm<sup>-2</sup> (IS92c) から 1.8Wm<sup>-2</sup> (IS92f、表 1 には示さない) までである。CO<sub>2</sub> 強制に対する比率としては、CO<sub>2</sub> 以外の温室効果ガスの強制は 28% (IS92e) から 40% (IS92c) までである。この寄与は IS92a、b、e および f では負のエアロゾル強制によって著しく相殺されるが、IS92c および d では、2100年の SO<sub>2</sub> 排出量が 1990年よりも少ないため、エアロゾル強制の変化は他のガスによる強制を増大させる。エアロゾルと非 CO<sub>2</sub> 温室効果ガスの強制が組み合わせされると、IS92 シナリオでの 1990~2100年のそれらの合計は、0.4Wm<sup>-2</sup> (IS92e) から 1.0Wm<sup>-2</sup> (IS92c および f) までである。CO<sub>2</sub> に対する比率で表すと、CO<sub>2</sub> 以外のガスの値は 9% (IS92e) から 53% (IS92c) までである。

ここに示す数字は SAR・WG (セクション 6.3) で用いられたものである。エアロゾルについては、SAR・WG (セクション 6.3) は SO<sub>2</sub> 排出量とエアロゾル強制の関係について中心の評価のみを用いている (1990年までの硫酸塩エアロゾル強制の総体的寄与は -1.1Wm<sup>-2</sup>、それに対して温室効果ガスの総体的寄与は 2.6Wm<sup>-2</sup>となる)。エアロゾル強制を変化させれば、その相対的重要性は低下するか、または増大するであろう。しかし、明らかに、これによって非 CO<sub>2</sub> 温室効果ガスの疑いの余地がない重要性が動かされることはないであろう。

エアロゾル強制の不確実性は、将来の SO<sub>2</sub> 排出量の不確実性により、また他のエアロゾル (バイオマス燃焼、鉱物粉塵、硝酸塩などによる) の不確実な影響により一層悪化することに注意されたい。将来の排出量に関しては、最近の研究 (IIASA/WEC、1995年) は、SO<sub>2</sub> 排出量が将来 IS92a および e のシナリオで想定されたよりも低くなり得ることを示唆している。もしそうなら、表 1 の全地球的な相殺効果は過大評価されているかもしれないが、SAR・WG は将来の SO<sub>2</sub> 排出量が 1990年レベルで一定に保たれる場合を考慮することにより、この可能性を検討に入れている (SAR・WG : セクション 6.3 参照)。将来の SO<sub>2</sub> 排出量は幾分論争のある問題であり、排出量の増加と減少のいずれの可能性についても有力な議論が提示されている。

【表 1】 IS92a、c、e の排出量シナリオにおける、1990~2100年の全地球的放射強制の総変化量への種々のガスの相対的寄与。ここに示す強制の数値は SAR・WG (セクション 6.3) で用いられたものである。硫酸塩エアロゾル強制の低、中、高の値

は、1990年の直接的エアロゾル強制：-0.2、-0.3、-0.4 Wm<sup>-2</sup>、間接的エアロゾル強制：-0.4、-0.8、-1.2 Wm<sup>-2</sup>の強制値に基づく（エアロゾル強制の不確実性の全範囲はこれよりも大きい、SAR・WG，P.P.113-115参照）。中間のエアロゾル強制値だけがSAR・WG（セクション6.3）で用いられた。強制値はWm<sup>-2</sup>の単位で示す。CO<sub>2</sub>以外のガスの強制値はCO<sub>2</sub>の値に対する百分率としても示す。CH<sub>4</sub>強制は、関連する対流圏オゾンと成層圏水蒸気の変化の影響を含む。ハロカーボンの強制は、成層圏オゾンの変化の影響を含む。

### 2.2.3 基準の安定化シナリオ

「現行政策」の仮定のもとでCO<sub>2</sub>と比較してCO<sub>2</sub>以外のガスの役割に非常に大きな不確実性があるとすれば、そして濃度安定化の仮定のもとでそれらの役割を吟味する包括的研究は行われていないとすれば、われわれはそれらを感じ度研究の関連においてのみ考察することができる。それゆえ、われわれは、CO<sub>2</sub>排出量が一連の安定化経路をたどり、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>OおよびSO<sub>2</sub>の排出量が1990年のレベルで一定にとどまると仮定し、ハロカーボンはSAR・WG（セクション6.3）の地球上の平均温度と平均海面の計算で使用されたモントリオール議定書のシナリオに従う、一組の基準のケース（場合）から始める。

基準のシナリオにおけるハロカーボンについては、モントリオール議定書が厳格に適用されると仮定するため（SAR・WG：2、6章参照）、これらのガスについては将来のシナリオがたった1つあるだけである。1990～2100年のこれらのガスの総体的強制（成層圏オゾンの変化の影響を生じる）は比較的小さいため（0.3Wm<sup>-2</sup>）、同議定書の不完全な遵守および将来の代替物（ハイドロフルオロカーボン、HFC）または抑制されないガスの排出、あるいはそのいずれかによる不確実性は、さらに小さいと思われる。したがって、全地球的な気候変動の関連では、またそれらがSAR・WGで検討されていないことを考え、われわれはこれらの不確実性を含めないことにした。しかし、もし安定化の包括的（多気体）枠組みが採用されるなら、ハロカーボン強制のより詳細なガス毎の評価が特定の国レベルで必要になるかもしれない。

ここで行う計算は2100年以降に及ぶため、この年以後のハロカーボンの排出量に関してある仮定を行わなければならない。この排出量が2100年のレベルで一定にとどまれば、強制レベルは0.3Wm<sup>-2</sup>近くにとどまるであろう。これにより、ハロゲン化炭素（主としてHFCs）濃度は比較的高いレベルで安定化するであろう。基準ケースについては、ハロカーボンの排出量が2100年レベルで一定にとどまると仮定する。それでいつかは、濃度は第2条に従って一定状態になるであろう。しかし、2100年レベルで一定する排出量の仮定は、2100年以後に究極的には最大0.4Wm<sup>-2</sup>の全地球的平均強制の過大評価を生じる可能性があることに注意する。

対流圏オゾンについては予測が存在しないため、またSAR・WG（セクション6.3）に従って唯一の強制の変化が、メタンが引き起こす対流圏の化学的過程の変化によって生み出されるオゾンから生じるものと仮定する。この項はIS92aで2100年までに約0.

15Wm<sup>-2</sup> になるが、一定のCH<sub>4</sub> 排出量を仮定する基準ケースではずっと少ない。窒素、炭化水素、あるいはオゾン濃度と結び付いた他のオゾン前駆体が人為的汚染の増大によって増加するなら、ここでの仮定は非現実的かもしれない。

注意すべきことは、基準ケースが、とりわけ将来のSO<sub>2</sub> 排出量に関して、将来の予測を何らかの点で反映しているとか、それらが政策の目標であるべきだとか言っているのではない、ということである。基準ケースの要点は、将来の地球上の平均温度および平均海面の変動を算定する上で、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub> 排出量の相対的重要性を評価するのに役立つことである。

他のガスに対するCO<sub>2</sub> 換算の感度を定量化するため、われわれは基準ケースからの変動を考慮する。そこでは1990～2100年にCO<sub>2</sub> の年間排出量が1990年に比べて合計 ±100 Tg (CH<sub>4</sub>) (すなわち±75 TgC) だけ線形に増減し、その後は一定状態になり、1990～2100年にN<sub>2</sub>O の年間排出量が1990年に比べ合計 ±2 Tg(N) だけ線形に増減し、その後は一定状態になり、1990～2100年にSO<sub>2</sub> の年間排出量が1990年レベルに対して±50% (すなわち37.5 TgS) だけ線形に増減し、その後は一定状態になる。3つのすべてのガスについて、これらのシナリオは濃度安定化に導くが、SO<sub>2</sub> については事実上直ちに、CH<sub>4</sub> については数十年で、N<sub>2</sub>O については数百年で安定化に導く。これらの変動をより広い関連の中に位置付けるため、表2でそれらをIS92a、c、eと比較する。ここでも、これらの変動は将来の特定の結果あるいは政策目標を表すものと解すべきでない、ということに注意されたい。

【表2】 この研究で使用する変動の値と比較したIS92a、c、eでの1990～2100年のCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>の排出量の変化(単位: CH<sub>4</sub>はTg(CH<sub>4</sub>)、N<sub>2</sub>OはTg(N)、SO<sub>2</sub>は1990年レベル75 TgSの百分率)。

#### 2.2.4 CO<sub>2</sub> 換算濃度の安定化

第2条の明示的な目標である大気中の温室効果ガス濃度の安定化は、必ずしも放射強制の人為的な変動の安定化をもたらさないであろう。これは第2条で明示的に言及されていないエアロゾルも放射への影響を生じるためである。温室効果ガスとエアロゾルの濃度がどちらも安定化すれば、これは全地球的な平均放射強制の人為的な変動を安定化させるであろう<sup>6</sup>。エアロゾルは均一に混合したガスではないため、エアロゾルおよびそれらの前駆体の排出量の地理的分布が、地域の気候に重要な影響を及ぼし得ることにも注意されたい。全地球的な平均放射強制の人為的な変動の安定化は、CO<sub>2</sub> 濃度のみの安定化とは明らかに異なる。したがって、軽減の努力は一組の温室効果ガスの構成ガスに向けられているかもしれないが、影響に関する研究は多くのガスおよびエアロゾルの影響を受ける気候を考慮しなければならない。「CO<sub>2</sub> 換算」は、多くの放射強制要因を全体として考察する方法である。

<sup>6</sup> : 気候系は人為的影響を越えてかなりの自然変動性を示すため、これによって気候の変動性がなくなることはないであろう。

SAR・WG（6、7章）で示された将来の地球上の平均温度および平均海面の変動の計算では、モデルは総放射強制によって駆動されたが、これは人為的に発生するすべての微量ガス（表1参照）による強制を合計することによって得られた。全地球的平均に関しては、この総強制はCO<sub>2</sub>の変化からのみ、すなわち「CO<sub>2</sub>換算濃度」から生じるかのように扱うことができる。したがって、CO<sub>2</sub>換算濃度、C<sub>eq</sub>は、実際のCO<sub>2</sub>濃度と放射強制の関係から定義することができる。SAR・WGで用いられた関係は、第一次評価報告書（IPCC、1990年）から得られたものであった。この関係の不確実性は、最高で約±20%と見られている（IPCC T P S C M、1997年）。

CO<sub>2</sub>換算の概念は教育上有用でありCO<sub>2</sub>の影響を他のガスと比較する手段を与えるが、短所も有する。1つの重要な短所は、放射強制とCO<sub>2</sub>濃度の非線形の関係から生じる。この非線形関係は、高いCO<sub>2</sub>レベルでは、放射強制を同量だけ増加するのに、より大きなCO<sub>2</sub>変化量が必要である、ということの意味する。このため、放射強制の変化は合計することができるが、CO<sub>2</sub>換算量はできない。それゆえ、われわれは主要な変数として放射強制の使用を維持した。

CO<sub>2</sub>換算概念のもう1つの短所は影響評価の関連では、気候変動の側面にのみにかかわるといことである。増加するCO<sub>2</sub>（たとえば肥沃化）、硫酸塩エアロゾル（酸性化）およびオゾンの他の影響も重要であろう。放射強制と同様、CO<sub>2</sub>換算概念でも、地球規模の総合尺度は、影響を評価する上で極めて重要な気候変動の地域的側面に関する情報を包含している。たとえば、全地球的平均強制はゼロであるが、地域の気候には大きな変動をもたらす強制パターンを気候系に加えることが可能であろう。

様々な濃度安定化レベルについて、CO<sub>2</sub>換算の結果を示す。S350、S450、S550、S650、S750およびWRE1000を、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>の排出量が1990年レベルで一定に保たれる基準ケース、およびモントリオール議定書に従うハロゲン化炭素の排出量とともに考察する（セクション2.2.2参照）。CO<sub>2</sub>換算レベルがCO<sub>2</sub>安定化への経路に依存することを例証するため、WRE550も考察する。これら基準ケースの結果を図7に示すが、そこでは強制の値は1990年の値（産業化以前のレベルより約1.3Wm<sup>-2</sup>高い）と比べた値である。CO<sub>2</sub>換算の安定化時点に近い2500年には、CO<sub>2</sub>換算濃度は実際のCO<sub>2</sub>レベルより26ppmv（S350）から74ppmv（WRE1000）高くなる。すべての場合、CO<sub>2</sub>以外のガスによる強制の差分は同じで、1990年から2500年まで0.66Wm<sup>-2</sup>である。上述のように、CO<sub>2</sub>換算/放射強制の関数の非線形性のため、これは濃度レベルに応じて異なったCO<sub>2</sub>の量に対応する。

ここで1990年代半ばのCO<sub>2</sub>換算レベルは342ppmvと、実際のCO<sub>2</sub>レベル（354ppmv）を幾分下回ることには注意されたい。これは、1990年にはエアロゾルによる負の強制が、非CO<sub>2</sub>温室効果ガスによる正の強制を上回るからである。しかし、この値は、主としてエアロゾル強制の大きさの不確実性により、非常に不確実である。1990年のエアロゾル強制

の不確実性  $\pm 0.5 \text{ Wm}^{-2}$  に対し、1990年の  $\text{CO}_2$  換算レベルは316 ~ 370ppmvの間で変動する。

S 450とS 650について、非 $\text{CO}_2$  ガスの排出量に関する仮定への総体的な感度を図 8 に示す。ここでは、同じ基準ケース (図 7) を、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_2$  について2100年まで I S 9 2 a の排出量が用いられ、その後の排出量が一定になるケースとともに示す。この第二のケースでは、非 $\text{CO}_2$  ガスによる1990年と比べた最終的な強制の増分は  $1.13 \text{ Wm}^{-2}$  である (基準ケースでは  $0.66 \text{ Wm}^{-2}$ )。2100年の  $\text{CO}_2$  換算レベルは491ppmv (S 450) および627ppmv (S 650) で、それに対し基準ケースでは、473ppmv (S 450) および604ppmv (S 650) である。図 8 は、 $\text{CO}_2$  のみによる強制も示す。

図 7 および 8 に示した結果を表 3 に特質を表示し、要約する。これは 350ppmvから1000ppmvまでの  $\text{CO}_2$  安定化レベルについて、他のガスの強制への影響に関する 3 つの異なった仮定、すなわち他のガスの影響がない場合 ( $\text{CO}_2$  の変化のみ)、基準ケース ( $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_2$  の排出量が一定)、および I S 9 2 a の延長された場合での、1765年からの放射強制の変化および  $\text{CO}_2$  換算レベルを示す。 $\text{CO}_2$  安定化の時点 (安定化レベルによって異なる) での結果を示す。

上記の計算は、 $\text{CO}_2$  換算レベルを算定する上での他のガスの重要性、および他のガスの寄与度の算定に伴う不確実性の総体的レベルを例証するために提示する。研究されたケース ( $\text{CO}_2$  のみの場合、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_2$  の排出量が1990年レベルで一定の場合、I S 9 2 a に基づく場合) はどれも、特定の将来のシナリオ、あるいは政策上の勧告と考えるべきではない。それらの結果は、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  および  $\text{SO}_2$  に選んだ濃度安定化レベルが、将来の  $\text{CO}_2$  換算の変化および  $\text{CO}_2$  換算の安定化レベルに大きな影響を及ぼし得ることを示している。個々の感度については次のセクションで検討する。

このセクションの最後の要点として、我々の例では  $\text{CO}_2$  換算レベルは2500年でも安定化しない、ということに注意する。 $\text{CO}_2$  の安定化 (すなわち S 450 では2100年、S 650 では2200年) の時点以後、小さいが注目すべき強制の変化 (約  $0.1 \sim 0.3 \text{ Wm}^{-2}$ ) が生じる。これは主として  $\text{N}_2\text{O}$  の長い寿命によるもので、このため2100年に排出量が安定化した後このガスにはかなりの濃度変化が起こる。しかし、2500年以後の変化はごく小さい。

【図 7】 S 350、S 450、S 550、W R E 550、S 650、S 750、W R E 1000のプロファイル (図 4 参照) をたどる  $\text{CO}_2$  濃度と1990年レベルで変わらない  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_2$  の排出量についての1990年から2100年までの放射強制 (1990年と比較)。ハロカーボンについては、モントリオール議定書の遵守と両立する単一の排出量シナリオを仮定する。これらの仮定は、本文および以後の図表説明文で「基準ケース」と呼ぶ。 $\text{CO}_2$  換算レベルは右の軸上の点で示す。例えば S 450 (S 650) プロファイルでは、2100年の  $\text{CO}_2$  濃度は450 (575) ppmv (図 4 より) であるが、他の温室効果ガスおよび  $\text{SO}_2$  の付加的な影響により、 $\text{CO}_2$  換算濃度は473 (604) ppmvとなる。これらの結果は、Wigley と Raperの単純な気候モデル (I P C C T P S C M、1997年参照)、および I P C C

(1990年) とその後の更新で与えられた放射強制 / 濃度の関係を用いて得られた。

【図 8】 S 450およびS 650の濃度プロファイル (図 4 参照) に関する、種々な非CO<sub>2</sub> ガス排出量プロファイルの放射強制 (およびCO<sub>2</sub> 換算) への影響。短い破線は、「CO<sub>2</sub> のみ」の結果を示す。実線は「基準ケース」 (図 7 参照) を示し、長い破線はCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>排出量が2100年までIS 9 2 aに従って増加し、その後安定化する場合 (「IS 9 2 a ケース」) の結果を示す。最初、基準ケースの放射強制が「IS 9 2 a ケース」よりも少ないことに注意されたい。これはエアロゾルの負の強制効果による。またCO<sub>2</sub> のみのケースでは1990年の値の相違から、CO<sub>2</sub> 換算レベルが実際のCO<sub>2</sub> レベルよりも低いことに注意されたい。

【表 3】 非CO<sub>2</sub> 温室効果ガスおよびエアロゾルに関する種々な仮定での、CO<sub>2</sub> 安定化の時点でのCO<sub>2</sub> 換算 (ppmv) および放射強制 (1765年からの変化量) ( F )。基準ケースは、SO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> について1990年以後一定の排出量と仮定する。「CO<sub>2</sub> のみ」の欄は、1990年以後の変化がCO<sub>2</sub> のみに生じると仮定する (SAR・WG 同様)。1990年のCO<sub>2</sub> とCO<sub>2</sub> 換算のレベルの相違により、これらの場合におけるCO<sub>2</sub> 安定化時点のCO<sub>2</sub> 換算レベルはCO<sub>2</sub> 安定化レベルと異なることに注意されたい。

#### 2.2.5 CO<sub>2</sub> 換算の感度

セクション 2.2.4は、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub> およびハロゲン化炭素の集積的影響を含むCO<sub>2</sub> 換算の概算を与える。ここでは、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>OおよびSO<sub>2</sub> の影響を個別的に考察する。これを行うため、われわれは1990年レベルの一定の排出量を保つ基準ケースについて排出量の変動を用いる。

CH<sub>4</sub> (図 9 a) については、1990年から2100年までの $\pm 75 \text{ TgC}$  ( $\pm 100 \text{ Tg(CH}_4\text{)}$ ) の年間排出量の変動が、濃度安定化時点での放射強制を約 $\pm 0.20 \text{ Wm}^{-2}$ 変化させる。これはS 450で約 $\pm 15 \text{ ppmv}$ 、S 650で $\pm 22 \text{ ppmv}$ のCO<sub>2</sub> 換算の差異に換算される。N<sub>2</sub>O の年間排出量では、1990年から2100年までの $\pm 2 \text{ Tg(N)}$  の変動が、濃度安定化時点で強制を $\pm 0.16 \text{ Wm}^{-2}$  変化させ、S 450で $\pm 12 \text{ ppmv}$ 、S 650で $\pm 18 \text{ ppmv}$  の濃度の差を生む (図 9 b 参照)。

二酸化硫黄の感度は2つの形で生じる。第一に、排出量の不確実性に対する基本的な感度が存在する (図10 a)。濃度安定化時点で、SO<sub>2</sub> の年間排出量の1990年比 $\pm 50\%$ の変動 (すなわち $\pm 37.5 \text{ TgS}$ ) が、 $-0.37/+0.45 \text{ Wm}^{-2}$ の強制の差を生じ、これはS 450で $-27/+36 \text{ ppmv}$ 、S 650で $-40/+52 \text{ ppmv}$ のCO<sub>2</sub> 換算の濃度差に換算される (強制または濃度差の符号が排出量変動の符号と反対であることに注意)。

排出量の不確実性の影響のほか、CO<sub>2</sub> 換算濃度へのSO<sub>2</sub> の影響は、SO<sub>2</sub> 排出量と放射強制の非常に不確実な関係にも敏感である。SO<sub>2</sub> から誘導される硫酸塩エアロゾル

は、晴天の状態で直接的に、および雲のアルベドの変化により間接的に放射強制に影響を及ぼす。1990年の直接的な硫酸塩エアロゾル強制の中心推定値は、 $SAR \cdot WG$  で  $-0.4 \text{ Wm}^{-2}$  と算定され、間接的強制については  $SAR \cdot WG$  のセクション 6.3で  $-0.8 \text{ Wm}^{-2}$  の推定値が用いられた。炭素質（煤）エアロゾル強制の  $+0.1 \text{ Wm}^{-2}$  と合わせると、硫酸塩エアロゾルの総強制は  $-1.1 \text{ Wm}^{-2}$  となる。この量の不確実性に対する感度を評価するため、われわれは直接的強制に  $\pm 0.1 \text{ Wm}^{-2}$ 、間接的強制に  $\pm 0.4 \text{ Wm}^{-2}$  の範囲を用いる（硫酸塩（プラス煤）エアロゾルの総強制の範囲は  $-1.1 \pm 0.5 \text{ Wm}^{-2}$  となる）。

この排出量 / 強制の不確実性がわれわれの計算で最初に表れるのは、1990年の  $\text{CO}_2$  換算レベルにおいてである。先に述べたように、 $C_{eq}$  (1990年) の「最善の推量」値は  $342 \text{ ppmv}$  であるが、1990年のエアロゾル強制レベルの  $\pm 0.5 \text{ Wm}^{-2}$  に対応する範囲は  $316 \sim 370 \text{ ppmv}$  である。将来の強制については、 $\text{SO}_2$  排出量が増加しない基準ケースを用いるなら、排出量 / 強制の不確実性は何の影響も与えない - 排出量 / 強制の関係がどうであれ、排出量の変化がゼロなら強制もゼロである。1990年の強制の不確実性は「そのまま」将来に伝えられるだけである（図10b）。

しかし、将来の  $\text{SO}_2$  排出量が1990年レベルから増加または減少するなら（図10aで考察する排出量の変動の場合のように）、排出量 / 強制の不確実性は将来のエアロゾル強制に確かに影響を及ぼす。これは図10cに明示する。ここでは（ $S_{650}$ の場合についてのみ）排出量と強制とともに関連した不確実性を示す。中央の太い曲線は  $\text{SO}_2$  排出量の基準ケース（1990年以後変化しない）で、それには排出量 / 強制の不確実性の幅は存在しない。上部の3つの曲線は  $\text{SO}_2$  排出量が減少する（1990～2100年に50%）場合に相当し、1990年の硫酸塩エアロゾル強制レベル（ $-1.1 \pm 0.5 \text{ Wm}^{-2}$ ）の低、中、高の値についての結果を示す。1990年の強制が高ければ、基準ケースから逸脱は大きくなる。下部の3つの曲線は  $\text{SO}_2$  排出量が1990～2100年に50%増加する場合である。ここでも、1990年の強制が高い場合は、必ず基準ケースからの大きな逸脱（この場合は負の）につながるであろう。

【図9】 (a)  $S_{450}$ と $S_{650}$ の濃度プロファイル（図4参照）に関する  $\text{CH}_4$  排出量に対する放射強制（および  $\text{CO}_2$  換算濃度）の感度。「 $\text{CH}_4$  低」 / 「 $\text{CH}_4$  高」曲線は、 $\text{CH}_4$  の年間排出量が1990年から2100年までに  $100 \text{ Tg}(\text{CH}_4)$  だけ線形に減少 / 増加すると仮定している（表4参照）。(b)  $S_{450}$ と $S_{650}$ の濃度プロファイル（図4参照）に関する  $\text{N}_2\text{O}$  排出量に対する放射強制（および  $\text{CO}_2$  換算濃度）の感度。「 $\text{N}_2\text{O}$  低」 / 「 $\text{N}_2\text{O}$  高」曲線は、 $\text{N}_2\text{O}$  の年間排出量が1990年から2100年までに  $2 \text{ Tg}(\text{N})$  だけ線形に減少 / 増加すると仮定している（表4参照）。

【図10】 (a)  $S_{450}$ と $S_{650}$ の濃度プロファイルに関する  $\text{SO}_2$  排出量への放射強制（および  $\text{CO}_2$  換算濃度）の感度。実線は「基準」ケースを示す。短い / 長い破線は、1990～2100年に排出量が  $\pm 50\%$  だけ線形に増加 / 減少する「高  $\text{SO}_2$ 」 / 「低  $\text{SO}_2$ 」の場合を示す。(b) 1990年の硫酸塩エアロゾル強制（産業化以前の時代と比較した）、それぞれ  $-0.6$ 、 $-1.1$ 、 $-1.6 \text{ Wm}^{-2}$ 、に対する放射強制（および  $\text{CO}_2$  換算濃度）の感度。この図

の放射強制の値は産業化以前と比較したものであることに注意。(c) S 650 の濃度プロファイルのみについて、SO<sub>2</sub> 排出量と1990年のエアロゾル強制への感度が放射強制（およびCO<sub>2</sub> 換算濃度）に与える合体した影響。E 高 / E 低は1990年から2100年までの増加 / 減少するSO<sub>2</sub> 排出量を示す（これらは図10 a の対応する曲線と同じである）。Q 高 / Q 低は1990年の高い / 低いエアロゾル強制を示す（これらは図10 b の対応する曲線と同じである）。

【表 4】 感度の研究で考察される排出量の場合

要素	考察される濃度 / 排出量の場合
C O <sub>2</sub>	S 350、450、550、650、750 W R E 550、1000
C H <sub>4</sub>	基準：1990年以後、1990年レベルで一定の排出量* 低：1990～2100年に100 Tg(C H <sub>4</sub> )の線形減少、2100年以後は一定の排出量 高：1990～2100年に100 Tg(C H <sub>4</sub> )の線形増加、2100年以後は一定の排出量
N <sub>2</sub> O	基準：1990年以後、1990年レベルで一定の排出量* 低：1990～2100年に2 Tg(N)の線形減少、2100年以後は一定の排出量 高：1990～2100年に2 Tg(N)の線形増加、2100年以後は一定の排出量
S O <sub>2</sub>	基準：1990年以後、1990年レベルで一定の排出量* 低：1990～2100年に50%の線形減少、2100年以後は一定の排出量 高：1990～2100年に50%の線形増加、2100年以後は一定の排出量
八口カーボン	2100年まで S A R ・ W G <sup>§</sup> 、2100年以後は一定の排出量
対流圏 O <sub>3</sub>	S A R ・ W G と同様：1990年以後、直接的変化なし。C H <sub>4</sub> によって生じる変化はC H <sub>4</sub> の項目に含まれる

\* : S A R ・ W G : 6章と同様、排出量は1990年バジェットを均衡させるように調整されている。

+ : I S 9 2 のシナリオと同様、75 Tg S / 年。

§ : S A R ・ W G の第2章に示された排出量の総合、第6章に示された他の重要性の低い種類とともに。成層圏オゾンの影響は第6章と同様に説明される。

## 2.3 C O<sub>2</sub> 濃度安定化による温度と平均海面の結果

### 2.3.1 温度と平均海面の分析：方法

他のガスに導入されたシナリオとともに上で説明したC O<sub>2</sub> 濃度の安定化プロファイルは、地球上の平均温度と平均海面の結果を評価する単純化された気候モデルへの入力として用いられた。これは安定化が気候に持つ全面的な意味と取り組むことへの第一歩にすぎない。包括的にそうするためには、少なくとも、温度と海面の地域規模の変化、および他の気候変数（降雨量や土壌水分など）の変化を考慮することが必要である。しかし、そのような地域的な多変数の影響を確信を持って予測できるほど、気候モデルはまだ正確ではない。

今回の分析は、表4に示すように、CO<sub>2</sub>を他のガスの影響のいくつかの可能な組み合わせとともに含んでいる。この方法は、将来の温室効果ガスとSO<sub>2</sub>の排出量に関する仮定への温度と平均海面の感度について、いくらかの洞察を与えるために選ばれた。この方法は可能性の全範囲に及ぶように意図されたものではない。各組み合わせについて、われわれは次の4つの変数を計算する。

- (a) 放射強制 (Wm<sup>-2</sup>)
- (b) 他のガスの特定の組み合わせに関するCO<sub>2</sub>換算濃度
- (c) 地球の平均温度の変動
- (d) 地球の平均海面の変動

(a)と(b)の結果はセクション 2.2で示した。このセクションでは、地球の平均温度と平均海面にかかわる意味について考える。変化の速さは、与えられた結果からグラフで評価されるであろう。

さらに、主として気候の感度の不確実性による、外的強制への気候系の反応の不確実性 (SAR・WG (セクション 6.3) に従い3つの場合を考える) すなわち (T<sub>2x</sub> = 1.5、2.5、4.5)、および氷融解のモデル化の不確実性による海面上昇の不確実性 (SAR・WG : 7章) を考慮する必要がある。後者については、われわれは低い海面上昇 (T<sub>2x</sub> = 1.5、少ない氷融解と結び付いた)、中程度の海面上昇 (2.5、中程度の氷融解)、高い海面上昇 (4.5、多くの氷融解) のケースを考えることにより、その範囲をカバーする。これは強制の各ケースについて三組の気候/平均海面の出力を与える。示される結果は、SAR・WG (セクション 6.3) で使用されたWigley and Raper (1992年) のモデルを用いる (Raper, et al., 1996年も参照)。SAR・WG では de Woldeと同僚たちが開発したモデル (たとえばde Wolde, et al., 1995年) が使用されたが、かれらの気候モデルは倍加されたCO<sub>2</sub>で2.2という固定化された温度変化の感度を採用しており (T<sub>2x</sub> = 2.2)、今回の関連ではそれを使用することはできない。モデルの構造とモデル間の相違に関する情報については、IPCC TP SCM (1997年)を参照。

モデルによるシミュレーションの数が多く、反応変数もいくつかあるため、ここでは起こり得る結果を説明するため、計算結果の一部を提示するにとどめる。[ 詳細な結果に関心を持つ向きもあると思われるため、炭素循環および気候モデルによるすべての計算の完全な結果が、電子的にインターネット (WWW) (あるいはフロッピーディスク) で入手できるようになるであろう ]。

### 2.3.2 温度と海面にとっての温室効果ガス安定化の意味

ここに示す結果は、安定化に関する問題について、SAR・WG のどの単一の章から得られるよりも統一された見解を与える。これらの結果の大部分は、中間の値である 2.5 の気候感度 (T<sub>2x</sub>) に関するものである。本当の値がより低いか、より高い場合には、下で論じるように、結果はそれに応じて調整されよう。さらに、示された結果は全地球的な平均であることを強調しておく。影響と軽減措置はともに、気候と海面変動の地域パタ

ーンに敏感である。なぜなら地域的な機会と弱さは非常に変動しやすいからである。

ここに示す温度と平均海面に関する結果は、比較的単純な複数のモデルを用いて計算された。IPCC T P S C M (1997年) で論じているように、これらのモデルは、合理的な忠実度で、複雑なモデルの全地球的に平均化された挙動を再現するように設計されている。それらはまた、歴史的観測および今日の観測、またはそのどちらかと比較されている。それらは、より複雑なモデルと同様、すべての可能な相互作用と気候フィードバックを含むわけではないが、それらはわれわれの知識の現状を反映している。

主要な計算は、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub> の排出量が1990年レベルで一定の基準ケースを用いる (表4参照)。これは異なったCO<sub>2</sub> 安定化レベルおよび経路の間の比較を容易にし、先に示したCO<sub>2</sub> 換算の結果と両立する。IS92シナリオの下でのこれらのガスの排出量は基準ケースと著しく異なる (表1、2参照)。基準ケースのほか、われわれはCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>の排出量レベルに対する種々の温度および平均海面の結果の感度を、これらのガスの排出量の種々な場合を考えることによって評価する。

CO<sub>2</sub> 以外の微量ガス(CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>) の将来の排出量曲線が、どのCO<sub>2</sub> 安定化プロフィールに関連した総強制に対しても著しい影響を及ぼし得ることを上で注意した。例えば、実際のCO<sub>2</sub> 濃度が450ppmvで安定化するとして、メタンの排出量が増え続けるなら、放射強制はCO<sub>2</sub> のみに関連した場合よりもかなり高くなるであろう。下で示すように、より高い温度と海面の変化も予想されよう。

1990~2100年の地球の平均温度と平均海面の変動に関する結果を図11~15に示す (2300年までの結果については付属資料1を参照)。これらは現在 (名目上は1990年) からの変化である。SAR・WG で用いられた歴史的強制の中心推定値に基づいて、1880年からの地球上の平均温度の人為的变化を求めるためには、0.2~0.5 を加えるべきである。産業化以前の時代からの変化を得るには、さらに0.1~0.2 を加えるべきである。

全地球的な平均量は、将来可能な気候変動の総体的な大きさについての指標にすぎないことに注意されたい。すなわち、地域の気候変動は、全地球的な平均変動とは著しく異なることがあり得るし、降水量など他の変数の変化は全地球的な平均温度の変化と単純にあるいは直接的に関連するわけではない (SAR・WG : 6章参照)。地域的な海面変動も、陸地の運動および海洋循環またはそのどちらかの影響により、全地球的な平均と異なることがあり得る (SAR・WG : 7章参照)。

図11 a および b は、350、450、550、650、750、1000ppmvのCO<sub>2</sub>安定化レベルについて、他のガスの基準ケース (CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub> の1990年レベルでの一定の排出量) を用いて、現在からの温度と平均海面の変化を示す。これらの計算は、温度と平均海面の変化が選択された安定化レベルに応じてどのように変わるかを示すことを目指しており、そこでは2.5 の気候感度と氷融解パラメータの中間値 (SAR・WG : 6、7章参照) が使

用される。550ppmvの場合は、安定化へとたどる経路に対する変化の感度を例証するため、「S」と「WRE」の結果をともに示す。2050年頃までは、WRE 550の結果はS 750の場合をも上回る温暖化および海面上昇を示す(1000ppmvの場合には及ばない。これはWRE 550のCO<sub>2</sub>濃度と常に等しいか、またはそれよりも高いように制約されているため)。図11 a、bから変化の率を引き出すことができよう。今後50年間の温度の変化率は10年につき0.1~0.2である。

図12 aおよびbは、CO<sub>2</sub>以外のガスの排出量が将来の地球の平均温度と平均海面の変化にどのように影響し得るかを例示する(450ppmvおよび650ppmvのCO<sub>2</sub>安定化レベルについて)。そこに示した事例は、図12で用いた基準ケースである。すべての排出量(CO<sub>2</sub>以外)が2100年までIS 9 2 aに従う事例、および1990年以後CO<sub>2</sub>の変化のみが考慮される - すなわち、他のすべてのガスの放射強制が1990年レベルで変わらない - 事例である。SAR・WGでは最後の事例のみが考慮された(図6.26および7.12を参照)。他のガスの重要性はこの図から明らかである。基準ケースと他のガスにIS 9 2 aの排出量が想定される場合との差は、2050年頃まではS 450とS 650の差を上回る。IS 9 2 aの結果は、このシナリオで増加するSO<sub>2</sub>排出量の全地球的な平均相殺効果により(2050年頃まで)他のものよりも低い。だが、これは重要な地域的詳細を覆い隠しており、この場合にかかわる気候変動の厳しさ(その影響という意味での)が少ないことを必ずしも意味しない。

図11および12の結果は、「最善の推量」の気候および氷融解モデルパラメータのみに関するものである。図13は、異なる気候感度(1.5、2.5、4.5)に、それぞれ低、中、高の氷融解モデルのパラメータを組み合わせた(海面上昇に関して)場合について、450ppmvと650ppmvの結果を示す。所与の安定化レベルでも、モデルパラメータの不確実性に関する不確実性は、450ppmvと650ppmvの安定化レベルの結果の差異、特に海面についての差異よりもはるかに大きい。計画のためには、モデルパラメータの不確実性を減らすことは、明らかに有利であろう。しかし、安定化レベルが可能性として制御できるのに対し、これらは気候/海面系の制御できない側面である。したがって、図13の比較により、気候と平均海面の予測の総体的不確実性に関して、可能な制御の範囲を図式的に理解することができる。

図14および15は、ガス別の将来の排出量の不確実性に対する450ppmvと650ppmvの結果の感度を示す。図14ではCH<sub>4</sub>排出量の基準ケースに関する1990~2100年の±100 Tg(CH<sub>4</sub>)の変化、図15ではSO<sub>2</sub>排出量の基準ケースに関する1990~2100年の±50%(すなわち37.5 Tg S)の変化に対する感度を示す。(セクション 2.3.1では強制とCO<sub>2</sub>換算の不確実性の評価で同じ感度のケースが考察された)。N<sub>2</sub>Oの感度が示されていないのは、先に考慮された±2 Tg(N)の変動では、CH<sub>4</sub>に比べてN<sub>2</sub>Oの長い寿命により、感度は短期的にCH<sub>4</sub>よりも明らかに少ないからである(図9 aと9 bを比較すること)。

この感度分析の関連では、考慮される変動によるCH<sub>4</sub>とSO<sub>2</sub>の長期的影響は、異な

った安定化レベルの結果の差異に比べて比較的小さい（付属資料1の図A4およびA5を参照）。しかし短期的影響は、それに比べはるかに大きい（図11と図A2を比較）。これはCH<sub>4</sub>とSO<sub>2</sub>誘導エーロゾルの反応時間がともにCO<sub>2</sub>に比べてはるかに短いためである。したがって、異なったCO<sub>2</sub>安定化目標値に関する気候への差別的影響が現れるのは、CH<sub>4</sub>とSO<sub>2</sub>の排出量変化へのより急速な反応に比べ、はるかに長い時間がかかる。

リスクの程度に関する種々な安定化レベルおよび経路の相違をわれわれはまだ特性を記述することはできないが、SAR・WG（セクション6.3）およびWigley, et al., (1996年)で述べられているように、安定化レベルと経路の選択がともに将来の気候および海面の変動の大きさと速さに影響を及ぼすことは明らかである。他の温室効果ガスの将来の排出量も、将来の気候と平均海面に明らかに影響を及ぼし、一般にCO<sub>2</sub>排出量のみによる場合よりも大きな変化を生じる。したがって、これら他のガスの排出量の軽減は、気候系への危険な干渉を防止するための計画の貴重な要素である。長期的には（2100年以降）、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>の将来の排出量の不確実性は、異なったCO<sub>2</sub>安定化レベルの間の差異にかかわる不確実性よりも一般に小さな影響を及ぼす。しかし短期的には（2050年頃まで）、他のガスの排出量の重要性はそれに比べはるかに大きい。将来のCH<sub>4</sub>とSO<sub>2</sub>の排出量の不確実性は、異なったCO<sub>2</sub>濃度プロファイルによる不確実性を上回る気候変動の不確実性を生じる。

SO<sub>2</sub>排出量に関する状況は、その非常な空間的多様性により、温室効果ガスの排出量の状況よりも複雑である。SO<sub>2</sub>排出量の冷却効果は、温室効果ガス排出量の温暖化効果を単に相殺するものと考えすることはできない。

【図11】 (a) CO<sub>2</sub>濃度が図4に示すSプロファイル、WRE550および1000プロファイルに従って安定化する場合に予想される地球上の平均温度。CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>排出量はそれらの1990年レベルで一定にとどまると仮定され、ハロゲン化炭素はモントリオール議定書の遵守と両立する排出量シナリオに従う（すなわち基準ケース）。地球上の温度がそこから導出された放射強制（およびCO<sub>2</sub>換算）は先に図7で示した。気候感度は2.5の中間値と仮定する。比較のため、2100年についてIS92a、c、eの排出量シナリオの結果を示す。SAR・WGで用いられた歴史的強制の中心推定値に基づき、1880年以降の地球上の平均温度の人為的变化を求めるには、0.2~0.5を加算すべきである。産業化以前の時代からの変化を求めるには、さらに0.1~0.2を加算すべきである。(b)(a)と同様、ただし中心の氷融解パラメータを用いた地球の平均海面の変化。結果はすべてWigley and Raperの単純な気候/海面モデルを用いて算出された（IPCC T P S C M、1997年を参照）。

【図12】 (a) S450およびS650濃度プロファイル（図4参照）についての地球上の温度変化への異なった非CO<sub>2</sub>ガス排出量プロファイルの影響。実線は「基準」の結果を示す。短い破線は「CO<sub>2</sub>のみ」の結果を、長い破線はCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>の排出量が2100年までIS92aに従って増加する場合（「IS92aケース」）の結果を示す。

気候感度は 2.5 の中間値と仮定する。(b) (a)と同様、ただし地球の平均海面の変化。

【図13】 (a) S 450およびS 650のCO<sub>2</sub> 濃度プロファイル、非CO<sub>2</sub> ガスの基準ケースに関する地球の平均温度への気候感度の不確実性の影響。気候感度 ( T<sub>2x</sub>) の範囲は 1.5~4.5 で、中間値は 2.5 。気候感度の同じ範囲について、IS 9 2 a 排出量シナリオの1990~2100年の地球上の平均温度の変化は1.4~2.9 で、中間値は 2.0 。(b) (a)と同様、ただし地球の平均海面の変化。極端な範囲を示すため、気候変動性の低、中、高の値がそれぞれ低、中、高の氷融解パラメータと組み合わせられる。気候変動性と氷融解パラメータの同じ範囲について、IS 9 2 a 排出量シナリオの1990~2100年の地球の平均海面の上昇は19~86cmで、中間値は49cmである。

【図14】 (a) S 450およびS 650濃度プロファイル (図 4 参照) に関するCH<sub>4</sub> 排出量への地球の平均温度の変化感度。実線は「基準」の結果を示す。「CH<sub>4</sub> 低」/「CH<sub>4</sub> 高」曲線はCH<sub>4</sub> の年間排出量が1990~2100年に 100 Tg(CH<sub>4</sub>)だけ線形に減少/増加すると仮定 (表 4 参照)。地球上の温度がそこから導出された放射強制 (およびCO<sub>2</sub> 換算) は先に図 9 a に示した。(b) (a)と同様、ただし地球の平均海面の変化。氷融解パラメータの中心の値を仮定している。

【図15】 (a) S 450およびS 650濃度プロファイル (図 4 参照) に関するSO<sub>2</sub> 排出量への地球の平均温度の変化感度。図10a と同様、実線は「基準」ケースを示す。短い破線は、排出量が1990年の75 TgS /年から 2100年の112.5 TgS /年へと線形に増加する「高SO<sub>2</sub>」ケースを示し、長い破線は、排出量が 2100年の37.5 TgS /年へと線形に減少する「低SO<sub>2</sub>」ケースを示す。地球上の温度がそこから導出された放射強制 (およびCO<sub>2</sub> 換算) は先に図10 a で示した。(b)(a)と同様、ただし地球の平均海面の変化。氷融解パラメータの中心の値を仮定している。

### 3. 温室効果ガスの安定化に伴う影響と軽減コスト

#### 3.1 さまざまな排出曲線に伴う影響

UN/FCCC 第2条 (セクション 1.1を参照) は、「気候系に対する危険な人為的干渉」が生じるかどうかを判断する上で自然の生態系、食料生産および持続可能な経済発展の重要性を明確に認めている。SAR・WG とWG に含まれた情報に基づき、本稿のセクション2に示された排出曲線に付随する見込みのある気候変動の速度とレベルは、様々な地域の天然資源システムに大きな影響を及ぼす可能性がある。特定の場所の特定のシステムの反応については多くのことが知られており、かなりのリスクと潜在的利益の双方を確認することができる。今のところ、この情報をさまざまな安定化水準または排出曲線が地球規模で及ぼす影響の評価に統合するのは不可能である。というのも、地球規模の気候変動予測が不確実で、多くの重要なプロセスに対するわれわれの理解が不十分であり、気候系が気候上・気候外の多数のストレスを受けており、着実に増加する温室効果ガス濃度に対するダイナミックな反応または大気中のCO<sub>2</sub>換算濃度の倍加を上回る濃度の上昇の影響がごくわずかしか考慮されていないためである。また、単純気候モデルの予測は、全地球平均量しか生成しないため、影響研究のためのシナリオを生成するには適していない。先に指摘したように、セクション2に示された全地球平均温度および海水面予測は、気候変動の指標に過ぎない。

##### 3.1.1 安定化に関する意思決定に当たりの影響の重要性

安定化目標についての意思決定に気候変動の潜在的影響に関する情報を取り入れるアプローチは、SAR・WG (第5章および第6章) で考察されている。こうしたアプローチのほとんどでは、正味の影響値は人為的気候変動のある将来と人為的気候変動のない将来との幸福の差と定義される。一般に「コスト・ベネフィット分析」と呼ばれているもう1つのアプローチでは、適応の潜在的悪影響、ベネフィット、コストを潜在的緩和コストと比較する。その目的は、正味ベネフィット (気候変動の削減のベネフィットから排出量削減のコストを差し引いたもの) を最大にすることである。緩和が正当化されるのは、その期待コストがその期待ベネフィット (回避される潜在的悪影響の値に「副次的緩和ベネフィット」の値を加えたもの) を上回らない水準までである。

「持続可能性アプローチ」というもう1つの枠組みでは、主要なシステム、活動または地域に対する特定のストレス水準を回避することが最優先されている。そうするために、社会は変化の目標水準 (温度変化または将来において許容不能なリスクをもたらす10年間の変化率の絶対量など) を確認する。次いで、許容不能なレベルの変化を回避するために放射強制と大気安定化目標が定義される。今のところ将来のコストと公平性を比較してさまざまな重要な問題 (市場外の影響のリスク、不確実性、不可逆性、経済的評価など) を取り扱おうとする双方の枠組みでいくつかのアプローチが開発されている (SAR・WG : セクション 6.1.2)。

持続可能性アプローチとコスト・ベネフィットアプローチは、ともに影響に関する詳細

な情報を必要とするが、要求される情報の正確さは、個々のアプローチの間で異なる。コスト・ベネフィット・アプローチは、様々な状況とシステムの多種多様な影響の組合せを共通の（しばしば金銭換算(monetize)した) 基準に還元する必要がある。様々なシステムの利害得失を比較するこのアプローチを適用した例がある。理論上、金銭換算により、さまざまな部門と地域の利害得失が比較可能になる。あいにく、地球レベルでは言うまでもなく、国内または部門別研究についても、影響の集計的評価と軽減に伴う利益の金銭換算後の集計的評価には大きな不確実性がある。また、「ベネフィット曲線」の推定値は、あるとしてもきわめて限られており、存在する推定値はほとんどが単純な点推定値に過ぎない(SAR・WG : セクション 5.4.1)。こうした理由その他により、コスト・ベネフィット・アプローチは、適切な軽減水準を確実に予測することができない。持続可能性アプローチは、影響を共通の基準に還元せず、したがって物理的システムと社会経済的情勢にまたがる影響を比較することができない。さらに、軽減のコストを含めるのは困難である。しかし、持続可能性アプローチは、個別の物理的影響の分析を可能にする。

影響のレベルが場所的にも時間的にも大きな差があること、気候に左右されやすい部門（自給自給農業など）から国民所得の多くの割合を得ており、適応のための資源が比較的限られている国もある（通常、開発途上国）ことを考えると、所与の安定化目標または排出量曲線の相対的許容可能性を比較するのは、いずれの分析的アプローチをもってしてもきわめて困難であろう。このような比較には、倫理上・政治上多くの問題を伴うとなればなおさらである。

### 3.1.2 SAR・WG における潜在的生物物理学的影響の評価

特定の陸上・水生生態系、水管理システム、農業、人間の生活基盤、人間の健康の潜在的感度と脆弱性について多くのことが知られている。現在の科学的・技術的情報はSAR・WG（第1章から第18章まで）に要約されているが、今のところこれを特定の気候シナリオに関連づけるのは困難である。

SAR・WG で浮き彫りにされた潜在的影響の必ずしも完全でないが代表的な例には以下が含まれる。

#### (a) 森林

CO<sub>2</sub> 換算の均衡倍加に関する一般循環モデル(GCM)が予測した温度と水の利用可能性の変化が示唆するところでは、世界の既存の森林面積のかなりの部分（全世界平均で3分の1、地域別では7分の1から3分の2までに及ぶ）が、広範囲の植物種で大きな変化を経験する（最大の変化が生じるのは高緯度地帯で、最小の変化は熱帯で生じる）。気候変動は、森林種が成長、再生産、再定着する速度より急速に生じると予想されている(SAR・WG : 政策当局向け要約)(SPM)(セクション 3.1) および第1章)。森林に対する複数のストレス(オゾンとSO<sub>2</sub> 酸性化を含む)とともに、気候とCO<sub>2</sub> の変化は、著しい付加的影響を及ぼす可能性がある。

#### (b) 山岳生態系

植生の高度分布は、海拔が高くなると予測されており、気候帯域が山岳上部に限られ

る種には、居住環境の消失または移住の余地の低下のために絶滅するおそれもある（SAR・WG：SPMセクション 3.1および第5章）。山岳生態系の変化は、高度植生の調節機能を変化させ、多くの地域で水文パターンを改変する。

(c) 水生および沿岸生態系

湿地の地理的分布は、気温と降水量の変化につれてシフトする見込みがある。沿岸生態系には、特に危険な状態にあるもの（塩水湿地、マングローブ生態系、砂質海浜、サンゴ礁、環礁、三角州を含む）もある。こうした生態系の変化は、観光、淡水供給、漁業、生物多様性に大きな悪影響をもたらすおそれがある（SAR・WG：SPMセクション 3.1および第6章、第9章および第10章）。

(d) 水文学と水資源管理

モデルの予測では、既存の山岳氷河塊の3分の1から2分の1までのかなりの面積の永久凍土が向こう数百年間で消失するおそれがあり、氷河の広さと積雪の深さが減少すれば、水力発電と農業向けの河川流量と給水の季節的分布が影響を受けるおそれもある。気温と降水量が僅かに変化しただけで、蒸発散と土壌水分に及ぼす非線形効果と相まって、特に準乾燥地域の流去水に比較的大きな変化が生じるおそれがある。給水の量と質は、一部の低地沿岸地域、三角州、小島嶼国を含めた多くの地域では現在すでに深刻な問題である。そのため、こうした地域は、特に固有の給水がさらに削減されやすくなる（SAR・WG：SPMセクション 3.2および第7章、第10章第14章）。

(e) 食糧および繊維

既存の研究が示すところでは、全体として世界の農業生産は、CO<sub>2</sub> 換算均衡倍加条件の下で予測された気候変動にもかかわらず、基準生産量に比例して維持される可能性がある。この結論は、CO<sub>2</sub> の成長力向上作用という有益な効果を考慮に入れているが、害虫と気候変動のばらつきに伴って起り得る効果の変化を考慮していない。しかし一部の地域では、飢餓と飢饉が拡大する可能性がある。最大の危険にさらされているのは、世界の最貧国の多数の住民（亜熱帯および熱帯に生活している人びとと準乾燥地帯における孤立した農業システムに依存している人びと）のである（SAR・WG：SPMセクション 3.3および第13章、第16章）。

(f) 人間の生活基盤

気候変動は、洪水、浸食性の土地喪失に対する一部の沿岸住民の脆弱性を高めることは明らかである。一部の小島嶼国とその他の国々は、既存の海上・海岸線防護システムが十分に確立されていないため、より大きな脆弱性に直面することになる。人口密度が高い国々では、脆弱性は大きくなろう。風津波、高潮と洪水は、文化全体を危険にさらすおそれがある。こうした国々の場合、海面上昇が国内または国際的移住を余儀なくさせるおそれがある（SAR・WG：SPMセクション 3.4、第9章、第11章、第12章、第17章）。

(g) 人間の健康

気候変動は、人間の健康に広範囲にわたる主として有害な影響を及ぼす見込みがあり、人命の損失を伴う。健康への直接的影響には、予想される熱波の強度と継続期間の増加による死亡率と疾病（主として心肺系）の増加が含まれる。寒冷地域での温度上昇は、低温関連（cold-related）の死亡率を低下させるはずである。優位を占めると予想され

る気候変動の間接的影響には、媒介動物の地理的領域と季節的拡大による媒介動物が媒介する感染症（マラリア、デング熱、黄熱病、一部のウィルス性脳炎など）の潜在的伝染率の上昇などが含まれる。淡水供給と栄養価の高い食糧に対する制限も、大気汚染の悪化とともに、人間の健康に影響を及ぼす（SAR・WG：SPMセクション 3.5、第18章）。

### 3.1.3 影響の経済的評価

気候変動に伴う影響の経済的評価は、様々な行動方針が及ぼす潜在的成本・ベネフィットの比較に使用されるコスト・ベネフィット分析その他の意思決定枠組みにとって不可欠の入力の1つである。こうした研究は、SAR・WG（第6章）で評価されているもので、このセクションの基礎でもある。

CO<sub>2</sub>換算の倍加した気候から生じる影響の金銭換算値は、市場経済のいくつかの部門について推定されている。基準尺度（一人当り国内総生産（GDP）でみた影響など）は、影響の中には金銭評価になじみやすい影響もあれば、金銭単位による評価が容易でないものもあるため、気候変動の潜在的影響の比較考量には不十分であるということで広く意見が一致している。こうした影響（人命、種の喪失、新しい種の集団の価値など）の金銭換算に使用可能な認められた方法が存在しない一部の市場外の影響や、一部の部門における市場と市場外の影響（森林の木材損失や公共利用価値の損失など）の複合的効果について推定がある。気候変動の正味の影響には、定量化が可能な限り市場と市場外の双方の影響が含まれ、場合によっては適応コストが含まれることがある。影響は、分配上の公正性の問題が曖昧にされる場合でも、気候変動には多少とも有益な効果を及ぼす可能性があるという事実を考慮するために、正味の影響で表現される。気候変動が幸福に及ぼす影響を十分に評価するときは、ここに示される影響推定値の不完全性に留意しなければならない。

SAR・WG でレビューされた利用可能な研究は、現在と同様の世界（すなわち、人口統計上の性格、社会構造、経済的条件）に対する 2.5 の地球温暖化（CO<sub>2</sub>換算濃度の倍加に伴う均衡全地球気温上昇の中間推定値）に伴う経済的損失を次のように推定している。

- (a) 先進国の影響：年間国内GDP 1～1.5%
- (b) 開発途上国の影響：年間国内GDP 2～9%

SAR・WG がレビューした研究は、GDPの1.5～2%の全地球合計についてこうした推定値をGDPに比例して集計した。こうした集計済みコスト範囲は、多数の単純化と論議の的になる前提に基づいている。こうした推定値は、市場と市場外の影響をともに含め、場合によっては適応コストを含めている比較的限られた研究の「最良推定」中心推定値に相当するもので、こうした推定値の及ぶ（最大）範囲を示していない。こうしたコスト範囲は、GDPが人間と社会の福祉を正確に測定していないという意味でも完全でない。このような集計は、多数の障害に直面し（SAR・WG：第3章、第6章）、SAR・WG：政策立案者向け要約で重大な懸念を表明された。

既存の推定値が不十分な段階にとどまっていること理由はいくつかある。上述したところや、SARWG で指摘された個別部門での影響評価に影響を及ぼす多くの問題以外の不確実性には以下が含まれる。

- (a) 推定値は、主として米国と他の経済協力開発機構（OECD）加盟国についてのもので、地域別推定値と全地球推定値はこうした結果の外挿に基づくものが多い。他の国々に関する資料は乏しいものの、増加している。したがって、今のところ地域的影響と局所的影響の知識は限られている。
- (b) 金銭換算した影響推定値は、CO<sub>2</sub> 換算濃度倍加シナリオについてのもので、通常現在の経済に基づき、GDPに占める割合として表示されている。単に損失割合を予測する上で満足すべき近似とは言にくい。将来の影響は、将来の条件を現在とは一変させる経済的、人口統計上、環境上の動向に依存するからである。気候変動の影響の中には、増加率がGDP成長率を上回る見込みのあるもの（市場外の財貨の経済的価値など）もあれば、下回る見込みのあるもの（農業など）もある。
- (c) 影響が判明している場合でも、影響の経済的価値の測定が困難な場合がある。これが特に当てはまるのは、市場外の影響と途上国での影響である。健全な意思決定のためには、このような影響の金銭的評価が不可欠であるとする向きもあれば、人命や生物多様性などの影響の評価を倫理上の理由から排除する向きもある。
- (d) 影響の全地球集計の計算には、特に所得その他の社会的格差を考えると、各国間の公平性をめぐる困難な問題を伴う。GDP推定値を単純に集計するということは、2国において影響が同等であっても、国内経済生産物に大きく依存して与えられるウェイトが変わってくるということを意味する。このような集計に伴う倫理上の問題は、既存の研究では明確に取り上げられていない一貫性の問題を提起する（SARWG：第3章、第6章）。
- (e) 割引率の設定が困難な場合がある。割引率は、異時点間で生じる経済的影響を比較するためにエコノミストが使用する分析手段である。これが重要なのは、気候変動の影響が将来世代にコストを負わせる見込みがあるためである。

こうした推定値を気候変動の意思決定に実際に適用するのは、推定値自体が不確実であるだけでなく、問題が地球全体と世代間に影響するため困難である。地域のシステムによっては、ある期間にわたり気候変動の恩恵に与る可能性があるものもあれば、悪影響を受けるものも多い。したがって、影響は不均等に分布することになる。気候変動は、きわめて複雑に入り組んだ人間社会に影響を及ぼし、社会の一部には他より適応する潜在力が乏しく、したがって他よりも多くの被害を被るおそれがある。評価は、影響区分、地域、国、世代、個人の間でのトレード・オフを伴う。このようなトレード・オフを見易くかつ扱い易くする様々な手法が存在するが、どの影響が特にコストがかかるかを判断する実際の意思決定は政治的な決定である。十分に発達した制度/経済/政治システムの中では、トレード・オフを行い、敗者に補償を提供するメカニズムが存在する。国際間と世代間では、既存メカニズムはうまく機能しそうもない。今のところ、気候変動の影響に関する知識は、こうしたトレード・オフを明確にするほどには発達していない。

### 3.1.4 様々な影響曲線の予測に当たっての不確実性

この範囲の両極では、放射強制の目標濃度が比較的高く、変化が比較的早いため、自然と人間のシステムに及ぼす影響が放射強制蓄積の鈍化と濃度の安定化の低下を想定する曲線を上回ると予想される。しかし、1つの安定化目標または環境曲線に伴う影響が他の目標または曲線に伴う影響とどのように異なるかを判断するのは今のところ不可能である。多くの理由により、温室効果ガスおよびエアロゾルの排出量・潜在的影響と大気中濃度との間には単純な関係はない。その理由には、以下が含まれる。

- (a) 放射強制と気候の地球平均変化のパターンの変化が気候条件に及ぼす影響は、地域によって異なる。こうした局所的条件と地域条件（生育季の長さの変化、水の利用可能性、擾乱域の発生率（極端な気温上昇、洪水、干魃、火災、害虫発生）を含む）は、自然と人工の環境の双方の構造と機能に大きな影響を及ぼす。
- (b) システムによって、地域の気候の変化に対する脆弱性に差がある。例えば、人間のシステムは比較的適応力が高く、したがって平均して脆弱性が少ない。森林地帯のシステムは、牧草地より定着に長期を必要とし、したがって温度と降水パターンの変化につれて条件の適した新しい場所に移住可能な余地が少ない。
- (c) 個々の地域によって相対的脆弱性に差がありそうである。システムは、開発途上国で脆弱性が大きいのが普通である。開発途上国では、経済的・制度的状況が先進国より不利だからである。準乾燥地域、高地地域、低地沿岸地域または小島嶼の住民は、特に気候変動にさらされやすい。河川の氾濫原と海岸平野などの影響を受けやすい地域は、人口密度と経済活動の結果として暴風雨、洪水、干魃などの危険にさらされやすくなっている。
- (d) 影響は、変化の大きさと速度の一次関数ではない。一部の種（およびしたがってシステム）の場合、温度、降水量またはその他の要因の変化には、その値を上回れば成長力、構造または機能の不連続変化をもたらすという閾値が存在することがある。ということは、局所的気候の僅かな変化が不相応に大きな影響を及ぼすおそれがあるということの意味する。
- (e) 既存の研究のほとんどは、CO<sub>2</sub>換算の均衡倍加という気候に伴う変化から生じる影響の分析に限られていた。着実に増加する温室効果ガス濃度または安定化シナリオに対するダイナミックな反応を検討した研究はきわめて限られており、大気中CO<sub>2</sub>濃度の倍加を上回る影響を検討した研究はそれ以上に少ない。多数のストレス要因（気候変動とCO<sub>2</sub>変化の存在下でのO<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>酸性化またはその他の汚染物質ストレスなど）の影響を評価した研究はもっと少ない。

最後に、大気中で温室効果ガスが達する最終濃度は、濃度の増加速度とともに影響を左右する見込みがある。気候変動が鈍化すれば、システムが余裕をもって適応できるようになる。今のところ、変化の明確な閾値の率と大きさを示すに十分な知識は不足している。

## 3.2 CO<sub>2</sub>濃度安定化の軽減コスト

このテクニカル・ペーパーの前セクションでは、さまざまな安定化水準の物理的側面を探求し、それらの気候影響を考慮している。ここで温室効果ガス濃度安定化に伴う「コスト」に眼を転じる。こうしたコストは、安定化の「レベル」と安定化にいたる「経路」に大きく依存する。われわれは、化石燃料の燃焼によるCO<sub>2</sub>（CO<sub>2</sub>の最大の人為的寄与因で、これまで最も多くの文献で取り上げられたガス）に重点を置く。

CO<sub>2</sub> 緩和コストに影響する要因には以下が含まれる。

- (a) 政策介入がない場合の将来排出量（「基準」）
- (b) 濃度目標と安定化に至る経路 - 排出される見込みのある炭素バジェットを決定する。
- (c) 自然の炭素サイクルの動作 - 選択された濃度目標および経路について排出が見込まれる炭素バジェットに影響を及ぼす。
- (d) 化石燃料と無炭素代替物との間、および様々な化石燃料相互間のコスト差
- (e) 技術進歩とエネルギー生産量 1 単位当り炭素排出量の少ない技術の採用率
- (f) 資本ストック回転率に伴う切り換えコスト - 早期廃棄が行われると増加する。
- (g) 国際協力の度合 - 世界各地で低コスト緩和オプションが実施される度合を決定する。
- (h) 異時点間のコスト比較に使用される割引率に関する前提

排出量削減の実施に使用される特定の政策・措置、発生源 / 国家間の規制責任の配分上認められる柔軟性の度合、技術移転活動は、社会が行うインフラ投資の種類（公共輸送機関か高速道路網の拡大か）とともに、安定化のために選ばれた濃度レベルは、生じる実際のコストに影響する。

### 3.2.1 CO<sub>2</sub> 濃度安定化に伴う経済的要因

#### 3.2.1.1 除去すべき炭素の量

炭素抑制のコストは、排出量の「基準」（すなわち、政策介入がない場合に予測される排出量の増加）に依存する。

基準が高ければ高いほど、特定の炭素バジェットを達成するために除去しなければならない炭素の量が多くなり、したがって介入の必要性が大きくなる。表16aに、6種のIS92基準シナリオの人為的CO<sub>2</sub> 排出量を示す。排出量の差をもたらす要因は、人口、経済成長、エネルギー・システムの供給側および需要側代替案のコストおよび利用可能性、その他の要因に関する異なる前提の差である。

IS92シナリオでは、1つを除いてすべて排出量は増加する。これは、SAR・WGで最近レビューされた圧倒的多数と一致している。サーベイされた十数件の研究のうち少数のものを除いて、排出量基準の増加が示されている。排出量が増加するのは、経済成長による排出量増加率がエネルギー集約度の低下率と炭素集約度の少ない発生源への燃料転換による排出量の削減率を上回ることをこれらの研究が予想しているためである。

基準の上昇は、化石燃料には経済的に有利な代替物が - エネルギー・システムの供給側と需要側のいずれにも - ないということの意味しない。このようなオプションは、ほとんどの経済分析にかなり多く含まれているのが普通である。基準の引上げは、こうしたオプションが炭素排出量の増加率抑制に十分な速度で実施されないことを意味するに過ぎない。これは、ノーリグレット・オプションの供給不足による。

図16bは排出シナリオをCO<sub>2</sub>濃度に変換したものである。6種のシナリオのうち2100年より前に濃度を安定化するものはないが、IS92cでは2050年以降にCO<sub>2</sub>濃度の増加率が極めて小さくなる。IS92a、b、eおよびfは、すべて2070年より前にCO<sub>2</sub>濃度が工業化前の2倍になる。

【図16】 (a) IS92の排出量シナリオに基づく人為的CO<sub>2</sub>総排出量 (b) Bern炭素サイクル・モデルを用いて計算されたIS92排出シナリオについての大気中CO<sub>2</sub>濃度の削減 (SAR・WG (セクション2.1)を参照)(SAR・WG : テクニカルサマリーから抜粋)。

### 3.2.1.2 安定化目標

炭素抑制のコストは、濃度安定化目標にも左右されやすい。安定化目標は、第一次近似として、現在からその目標を達成すべき時期までに排出される可能性のある炭素の量(「炭素バジェット」)を定義する。安定化目標が低ければ低いほど、炭素バジェットは少なくなる(すなわち累積排出量が少なくなる)。表5に、安定化プロファイル 450ppmv、550ppmv、650ppmv、750ppmvおよび1,000ppmvに伴う2100年までの「炭素バジェット」を示す(炭素バジェットを求める基礎になる累積排出量については図6を参照)。安定化目標が低ければ低いほど、炭素バジェットは少なくなる(すなわち、累積排出量が少なくなる)。

「炭素バジェット」の大きさは、軽減コストの重要な決定因の1つである。安定化目標を低くするためには、炭素バジェットを少なくする必要がある、そのためには介入の割合を高める必要がある。表5は、図5および図6からの安定化レベルおよび経路のための炭素バジェットとIS92排出量シナリオの人間に起因するCO<sub>2</sub>累積排出量とを比較している。

### 3.2.1.3 化石燃料と無炭素代替燃料との間のコスト差

CO<sub>2</sub>濃度安定化のコストは、無炭素代替燃料に対する化石燃料のコストにも左右される。所与のエネルギー需要について、エネルギー関連CO<sub>2</sub>排出量の削減コストは、地球のCO<sub>2</sub>排出量が削減される時点での利用可能な化石燃料と無炭素代替燃料との間のコスト差に依存する。

在来型化石燃料(在来型原油、天然ガス、石炭など)と無炭素代替燃料とのコスト差は僅かと予測されるが、そのコスト差がどれくらいかは依然として不明であり、広く論議さ

れている。向こう数百年間に、在来型化石燃料のコストは、こうした資源が利用されるにつれて増加するはずであり、コストが最も安価で、特に採掘しやすい石炭鉱床が採鉱される。それと同時に、基礎科学、工学、制度取決めの改善が無炭素技術（および非在来型化石燃料）のコストを削減するはずである。

累積排出量が在来型原油・天然ガス資源を上回る度合は、こうした燃料がどれくらい総エネルギー消費に寄与しているかを示すある程度の目安になる（地球全体のエネルギー埋蔵量および資源の推定値については気候変動軽減のための技術、政策、措置に関する IPCC テクニカル・ペーパー（IPCC T P P & M、1997年）の表9を参照<sup>7</sup>）。ある安定化目標に伴う累積排出量は、在来型石油およびガス資源の燃焼から生じる累積排出量に等しいかまたはそれを下回るとき、こうした燃料はおそらく無炭素代替燃料への移行期を通じて総エネルギー供給の主要な要素の1つになろう。他方、ある安定化目標に伴う累積排出量が在来型原油・天然ガス資源の燃焼から生じる累積排出量を大幅に上回るときは、こうした燃料は、おそらく移行期を通じて総エネルギー供給の比較的わずかな部分を占めるだろう。化石燃料と無炭素代替燃料とのコスト差は、後者の場合には比較的小さくなる。無炭素代替燃料のコスト・プレミアムは安定化水準の上昇につれて、総エネルギー需要は大きくなるため、経過コストに及ぼす正味効果ははっきりしない。

<sup>7</sup> : ここで資源に重点を置いているのは、資源は、まだ燃焼されずにいる量（既知の量と未知の量の双方）に相当するためである。

しかし、非在来型化石燃料と無炭素代替燃料とのコスト差の絶対水準が、時間の経過につれてどのように変化するかを予測することができない。技術変化は、おそらく非在来型化石燃料と無炭素代替燃料のコスト差を縮小することになるだろうが、技術の変化率には差がありそうである。無炭素代替燃料に対して非在来型化石燃料のコストを引き下げる技術上の利益は、化石燃料と無炭素代替燃料とのコスト差を増加することによって切り換えコストを増加するのに対して、無炭素技術のコストを引き下げる技術変化はそれと逆方向の影響を及ぼす。

利用可能な化石燃料のコスト差も、同様に切り換えコストに影響を及ぼす。

【表5】 1991～2100年に累積する人為的CO<sub>2</sub>総排出量(GtC)。すべて1980年代の炭素バジェット（IPCC94：第1章）およびBern炭素サイクル・モデルを用いて計算。

#### 3.2.1.4 排出経路

図5に示され、セクション2.2.1.2で説明されているように、いくつかの排出経路を通じて同一の濃度目標（図4を参照）を達成することができる。短期の排出量は、長期の排出量によって相殺されることがある。他方、早期の排出量が高ければ、後に排出量を調整するオプションが少なくなる。図5では、破線（WREプロファイル）が示す排出量は早期年次の排出量が大いなのに対して、排出量が増加傾向から減少傾向へと急激に移行する実線（Sプロファイル）の経路は、排出量が後に大きくなる余地があるが、早期年次に排出

量が低下している。こうして、セクション 2.2.1.2 で説明されているように、所与の安定化水準について許容可能な累積炭素排出量の「バジェット」および安定化にいたる経路の選択は、この炭素バジェットを時間の経過につれてどのように配分するのが最善（すなわち、経済効率が最大で悪影響が最も少ない）かという問題とみなすことができる。

同一の安定化水準を実現するための排出経路に差があることが重要なのは、経路間でコストに差があるためである。SAR・WG は、代替経路のコストに影響を及ぼす要因として、(a) 既存および将来の資本ストックの扱い (b) 技術進歩の見通し (c) 割引率 (d) 炭素バジェット - - を確認している。

#### 資本ストック、資本ストック回転、新規投資

軽減コストは、既存の設備・機械の耐用年数に依存する。エネルギーを生産・利用する資本ストック（発電設備、住宅、輸送用機器など）の耐用年数は一定していない。耐用年数は、保守費や信頼性など時間の経過とともに変化する要因によって変化する傾向がある。にもかかわらず、エネルギー関連の資本ストックは耐用年数が長く、早期廃棄は、コストがかかる傾向がある。早期廃棄を回避するために、緩和努力は時間の経過につれて、また空間的により均等に分散することができる。SAR・WG は、安定化目標のコストを削減するためには、設備・機械の経済的耐用年数末（すなわち、資本ストック回転時）に新規投資と取替えに重点を置く必要があることを重視している。

新規投資の重視は「何もしない」ことを意味するわけではない。行動をとるのが遅すぎる（低コスト措置すら講じようとしない）のは、後により迅速な行動を迫られることによって安定化経路のコストを増加することがある。これには、その間に建設された資本ストックを早期に廃棄せざるを得ないことを含む。例えば緩和を20年遅らせると、地球の化石燃料排出量を著しく増加させることになる（例えば、IS92や他のいくつかのシナリオなど）。しかし、濃度を450ppmv以下に安定化させるためには、2040年頃までに排出量を1990年水準に、その後はさらに低位に戻さなければならないことになる。そのためには、社会はその間に建設された多くのストックを取り替えなければならないことになり、こうしたコストは実施の繰延べから得られる経済的ベネフィットと比較考量する必要がある。

資本ストックの最適取替え率は、エネルギー・システムの慣性(inertia) をめぐる幅広い問題を反映する。たとえば、投資によって、それに伴う時間的影響が異なる。耐用年数が長い新しい炭素集約型インフラを建設すると、向こう数十年にわたり排出量を制限するためのコストを引き上げるおそれがある。大気中濃度をさらに高レベルで安定化する長期コストを引き下げるためには、現時点で非効率な建物またはその他の都市インフラ、幅広い炭素集約型活動を促すその他の都市インフラなどの投資を抑制することが重要である。しかし、慣性の問題とそれがさまざまな投資にどのような影響を及ぼすかは十分に理解されていない。

図5が示すように、450ppmv限度の達成には、全地球排出量の削減を逸早くスタートさ

せる必要がある一方で、限度の引上げは制限の必要性を遅らせるおそれがある。一部の国で排出量が増加しても、ある程度の期間にわたり他の地域での減少によってそれが相殺されることはあるにしても、最終的に、その限度を達成するためにはすべての地域で排出量の増加を抑制しなければならないことになる。

### 技術進歩

安定化経路のコストは、一定の時点と時間の経過につれて技術がどのように排出量緩和コストに影響を及ぼすかに依存する。一般に、ある排出経路のコストは、任意の時点での軽減すべき排出量とともに増加する。しかし、技術変化は時間の経過につれて単位削減量当り単位コストを引き下げざるはずである。

任意の時点での軽減コストは、その時点で緩和される排出量とともに増加する。SAR・WG に説明された一連の緩和技術は、「供給曲線」を形成するものと考えることができる。最初に最低コストの措置を講じ、その目的の達成に必要なよりコストのかかる措置を用いて「供給曲線」を作成するのが最も経済的であることは明らかである。

技術変化は、時の経過につれて緩和コストを削減する見込みがある。この削減率は、安定化水準と排出経路に依存する可能性がある。より即時の削減を意味する安定化水準と排出経路は、新しい低炭素技術の開発（「誘発」技術開発）を促進する可能性がある。このことは、長期的柔軟性を高め、炭素抑制の長期コストを - ただし短期価格でみて - 引き下げる。この主張によれば、技術開発によって将来の軽減コストが引き下げられるのを待つ代わりに、早期の排出抑制によって適切な研究開発（炭素集約型資源および技術の利用と開発とは別の研究開発投資の転換を含む）の実施を民間部門に促すということになる。

誘発（内生）技術変化は、価格シグナルがどれくらい革新を刺激するかに依存する。それが、最大になる見込みがあるのは、円滑に機能する市場機構の下だけである。技術開発の早期段階では、研究結果の所有権を確立するのが困難である。したがって、民間部門は十分な研究開発への投資に消極的である場合が多い。将来市場の見通しが、この問題を全面的に克服することはなさそうである。このよく知られた市場の失敗は、研究開発への政府の関与の正当化の根拠とされる場合が多く、このような研究開発は、早期に技術開発を促進する上できわめて重要である。

政府の研究開発と排出抑制は、技術の開発、拡散、普及の率に影響を及ぼすため、行使しうる唯一の手段ではない。税制上の優遇措置と「保護」市場の支持（再生可能エネルギー向けの割増金の支払いなど）も、民間部門による無炭素エネルギーへの投資と関連業種の育成を促す可能性がある。技術の拡散・普及も市場の失敗によって妨げられ、その克服のために個別の政策を必要とすることがある。

現実には、こうしたすべての措置の組合せ（政府の研究開発の大幅増加、技術分配の支持、明確の市場支持、適切な排出抑制）は、おそらく一体となって大気中CO<sub>2</sub>濃度の安

定化コストの引下げに必要な技術を刺激することになる。SAR・WG で評価された文献は、適切な政策構成と排出経路の持つ意味について明らかな目安を示していない。

### 国際協力

最も経済的な緩和オプションは、新規投資を伴う場合が多い。こうした機会を利用するためには、新規投資が世界全体で行われるときは低コスト緩和措置を採用することがコスト効果的なアプローチであろう。排出量取引や共同実施などの仕組みは、コスト効果を促進しながら、各国間での緩和コストの分配を容易にする形でこの戦略の実施に利用することができる。一般にこうしたアプローチを「場所的」柔軟性というが、これが機能するのは、CO<sub>2</sub> 排出量削減の気候上のベネフィットが場所に依存しないためである。

### 割引率

緩和コスト（このセクションのテーマ）に関して、正の割引率は発生したコストの現在価値を低下させる。これは、将来行われる投資に与えられるウェイトが割引率によって引き下げられるためである。実は、経済的負担（ここでは排出削減）が生じる時期が先になればなるほど、コストの現在価値は小さくなる。もっと広い意味では、割引率を適用すると、現在のエネルギー利用のベネフィットとの比較で将来の環境影響に置かれるウェイトが引き下げられる。割引率の利用は重大な課題であり（将来のエネルギー・システムへの急激な転換など）、現行ドル額でみると簡単なように思わせ、世代間の公平性という要因に影響を及ぼす。

### 炭素バジェット

炭素排出量は、一定の安定化目標を達成するために様々な経路をたどる可能性がある（図5および図6を参照）。海洋と陸上の生物圏によるCO<sub>2</sub> 摂取を支配するプロセスに大きな混乱がないとすれば、所与の安定化経路について長期の累積排出総量は安定化目標にいたる経路とはほぼ独立している（図6およびセクション2.2を参照）。しかし、排出量の時間的配分は、経路に依存する。向こう数十年間の排出量は、当初IS92aがたどる経路では極めて大きくなる可能性がある（図6および図7を参照）。こうして、短期的に比較的成本のかかる無炭素代替燃料の需要が削減され、排出量削減の強化は将来に繰り延べられる。

しかし、当初のIS92aシナリオをたどる排出量の経路に伴うリスクがある。早期の排出量が比較的多く、それに伴う濃度および濃度増加率が比較的大きいと、炭素の流量を支配する物理的・生物化学的プロセスを混乱させるおそれがある。このことは、一定の安定化目標を達成するために排出量は、予想されるよりも少なくなければならないことを意味する。また、早期の排出量が多ければ、気候変動が加速することになり、コストが大きくなることがある。当初の排出量が比較的大きいことを意味する経路では、排出量が増加から減少へとより急速に移行することがある。これは、緩和コストを増加することになる。

#### 3.2.2 CO<sub>2</sub> 濃度安定化コストのモデル化

緩和コストのモデル化は、人をおじけづかせる作業である。向こう数十年間にわたるエネルギー - 経済システムの進展を予測するのは困難である。一世紀以上にわたる予測は、かなり慎重に取り扱わなければならない。にもかかわらず、このような作業は、有益な情報を与えてくれる。しかしその価値は、個々の数字にあるのではなく、一般に政策立案に役立つ結果にある。

### 3.2.2.1 SAR・WG の時点で利用可能な研究

最近まで、気候変動対策に関する提案は、濃度より排出量に重点を置く傾向があった。例えば、2000年までに1990年レベルに排出量を戻す、または2005年までに20%削減するというのがそれである。その結果、SAR・WG の時点で、安定化の経済性を検討した分析はほとんどない。それらが検討した結果は、SAR・WG の第9章および第10章でレビューされており、以下に説明する（その後いくつかの追加研究が行われているが、テクニカル・ペーパー作成指針に従い、ここではレビューしない）。

数人の研究者が特定のCO<sub>2</sub> 濃度目標のコスト効果を探求している。例えばNordhaus (1979年)とManne and Richels(1995年)は、一連の代替濃度目標を達成するための最低コスト緩和戦略を確認している。これらの研究は、最低コスト緩和戦略が当初排出量ベースラインからの軽微な削減を伴うことを見出した。濃度目標が高まれば、排出量はその基準をたどる期間がより長期になる。

Richels and Edmonds(1995年)とKosobud, et al.(1994年)は、大気中濃度安定化の代替排出経路を検討している。その結果が示すところでは、技術変化、資本ストック回転、割引率、炭素バジレットの効果に関する前提を考えると、早期年次に軽微な削減を伴う経路（後に削減率が急増する）は、（緩和コストでみて）短期的な削減量を大きくしなければならぬ経路よりもコストが小さくなる。排出削減のタイミングを「時間的」柔軟性という。

安定化目標の引上げは、基準から逸脱する柔軟性を拡大する。しかし基準からの逸脱率とは無関係に、ある安定化経路は「何もしない」戦略または「静観」戦略ではない。第一に、個々の濃度経路は、依然として将来の設備機器の炭素集約度が炭素限度のないシナリオより低くなければならないということを意味する。エネルギーを生産・利用する機器は耐用年数が高いことを考えると、これは現行の投資決定に影響を及ぼす。第二に、新しい供給オプションは、市場参入まで何年もかかるのが普通である。十分な量の低コスト低炭素代替物を確保するためには、現時点で研究開発実証に継続的に取り組まなければならない。第三に、排出量削減のための利用可能なノー・リグレット措置は、即時に採用されると想定される。これは、政府措置を必要とすることがある。

### 3.2.2.2 既存研究の限界

上記の研究の2つの側面（つまり、その目標と、高度に単純化したエネルギー - 経済システムのモデルへの依存）は、かなりの論議を引き起した。前者については、研究者は、

特定の濃度目標を達成するための最適コスト経路に注目して軽減コストに研究の重点を置き、1つの排出経路の影響を検討するのが重要であると強調した。排出経路が変われば緩和コストが変わるだけでなく、回避された環境影響でみたベネフィットも変わるほか、新しい環境問題（バイオマス燃料がもっと重要になった場合に生じる可能性のある問題など）の考慮も変わってくる。

分析は、不確実性の取扱い方によっても制限される。最終的目標に関する不確実性は、暫くの間持続する見込みである。こうした条件の下では、政策当局は、行動をとるのが遅すぎる場合のリスクと、とる行動が行過ぎる場合のコストとのバランスをとる慎重な短期ヘッジ戦略を確認しなければならない。SAR・WG で引用されたいくつかの研究は、抑制に関する短期の意思決定の長期濃度目標に対する頑健性を評価しようとしているが、こうした研究は明確に不確実性の効果を分析していない。

批評家の中には、こうした研究の根底にある手法にも異論を唱える向きもある。彼らが疑問視しているのは、エネルギー - 経済システムを単純化せざるを得ないモデルが、資本ストック、その相互関連、システム内での他の慣性の発生源の複雑さをどこまで十分に把握できるかという点である。たとえば、既存モデルは、投資相互間の関連をシミュレートしていない。現時点でわれわれが行う投資の中には、きわめて長期にわたって継続し、全体として相互に関連した投資のネットワーク（工業施設や住宅の空間的パターン）を作り出す道路のように、数世紀にわたって排出制限のコストに影響を及ぼすものがある。

こうしたモデルは、技術変化のプロセスも単純化している。こうしたモデルは、技術変化率が排出抑制の割合とは独立したものと想定している。上述したように、排出抑制が技術革新を誘発するなら、排出削減の最適水準は、その他の場合を上回る可能性があり、内生的技術変化の概念は重要である - 従来よりもっと注目されてしかるべきである。しかし、注意しなければならないのは、その効果の規模が依然として不明確なことである。

### 3.2.3 他の基本的考慮要因

濃度目標と安定化にいたるルートを選択は、きわめて複雑な意思決定である。安定化につながる炭素バジェットの割合には、著しい不確実性が残る。セクション 2.2.1.3で指摘したように、SAR・WG で利用された世代のモデルは、生物圏による吸収と海洋による吸収の表示を単純化し、気候変動が陸上と海洋の吸収率に影響を及ぼす可能性を無視している。緩和コストは、所与の安定化目標と一部の基準に即して排出量の間差に依存するため、生態系または海洋のフィードバックを無視すると、ある安定化水準に伴う排出量と緩和コストを増加させることもあれば減少させることもある。炭素モデルの科学的な不確実性を考えると、海洋と陸上のフィードバックによる不確実性は、 $\pm 100 \text{ GtC}$  以上になる見込みがある。

実際には適切な安定化水準が分からず、そのため適切な戦略は一段と複雑になる。研究開発政策の強化は、急激な排出量削減の潜在的コストに比べて経済的であり、広範囲にわ

たる影響に対して優良な投資のように見える。また、特に新規投資の時点で早期に緩和されれば、当初予想されたよりも低い安定化目標を達成するために解明しなければならない課題に取り組むために要する、おそらく大きなコストを経済に負担させる可能性が小さくなる。ノー・リグレット戦略と低コスト措置が十分に実施されれば、影響削減に役立つだけでなく、経済を安定化に備えさせる上でも役に立つ。

### 3.3 影響と軽減コストに関する情報の統合

#### 3.3.1 はじめに

安定化水準の差、安定化にいたる経路の差に伴うコスト、影響、リスクの均衡を図ることはきわめて複雑な作業であり、許容可能なリスク水準の差、リスクの種類の違い、国民・国の違い、さらにはまた影響の及ぶ時期や（緩和と気候変動の双方による）影響の差に応じてどのようなウェイトを付与すべきかについていくつかの政治的判断を含めなければならない作業である。

上述したように、実際的な温室効果ガス政策においては、気候変動政策措置のコストと地球の気候変動の望ましくない結果を削減するという点から、このような措置が何を実現しうるかとともに、意思決定者は他の影響を考慮しなければならない。セクション 3.1では、影響の問題と低位の安定化目標を採用することによってそれらの影響をどのように削減できるかを考察した。セクション 3.2では、安定した大気中濃度を達成するための人為的CO<sub>2</sub>排出量の制限に伴う緩和コストを考察した。このセクションでは、本稿に含まれたこうした関連情報やその他の情報を統合することによってどのような洞察が得られるかを考察する。

#### 3.3.2 一貫性と幅広い見通しの必要性

特にセクション 3.1とセクション 3.2で提起された問題は、緩和コストと気候影響の双方に一貫して適用されることが重要である。

**慣性(inertia)**。気候系の慣性は、現在の排出量が多年（または海面上昇の場合にはおそらく数世紀）にわたり影響を及ぼす可能性があるということの意味する。温室効果ガスは大気中の寿命が長く、過酷な排出量変化でも徐々に濃度に作用するに過ぎない。温室効果ガスを排出する既存の資本ストックの慣性は、排出量をきわめて迅速に削減するのはきわめて不経済であるということも意味する。双方の種類の間には、システムへのショックを最小限にするという長期的目標にいたる曲線のみで、前向きな思考、分析、行動の必要性を強調する。

**技術開発**とその他の形態の革新・適応は、緩和コストと影響の双方に対して意味をもつ。緩和と適応の双方を目指した研究開発は、きわめて有益な効果をもたらす。緩和を遅らせることは、比較的 low cost の緩和技術を開発する時間的余裕を大きくする可能性があるが、対応する影響に適応する時間的余裕を小さくする。

時間選好も重要な要因の1つである。排出量の発生から結果として生じる影響までに遅れがあることは、割引率が正であれば、緩和コストに対して影響の現行加重を引き下げる傾向があり、したがって全体としての緩和の度合を緩めさせる傾向があるということの意味する。

**気候上の異常事象。**気候変動に意外な結果があり、物理系、生物系または社会経済系を通じた閾値がある可能性がある - 早期に行動をとらなければ、こうした事象に対処するのは困難になる。

**気候以外の外部的影響。**われわれは、温室効果ガス緩和戦略とその他の環境外部性（局所的大気汚染、都市の混雑、または土地・天然資源の悪化など）の軽減との間の相乗効果も考慮する必要がある。これはノー・リグレット措置または、それに伴う正味コストが少ない措置とみなすことができる緩和オプションの範囲を拡大する可能性がある。

**その他の温室効果ガスと発生源。**統合分析は、化石燃料からのCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスも説明しなければならない。

- (a) 森林伐採は、今のところ化石燃料排出量の20%近く占めることがあり（ただし、その相対的寄与率は減少すると予想される）、再植林はCO<sub>2</sub>吸収に大きく寄与する可能性がある。
- (b) 分析が示すところでは、特にメタンは重要な温室効果ガスになる可能性があり、経済的なメタン緩和オプションがいくつか有るかもしれない。
- (c) 窒素酸化物とハロゲン化炭化水素についても、特にこの種のガスは長寿命であるため注意しなければならない。

こうした問題はすべて、特に影響とそれらを定量化する方法をめぐる多くの不確実性に関連してきわめて複雑であるため、経済学だけでは排出経路の正しいバランスについて統一的な解決策を示すことができない。また、それと同様のまたはその他の理由から、「最適」安定化水準について明確に定量化された結論に達することもできない。

### 3.3.3 ポートフォリオ分析

気候変動による将来世代に対するリスクを削減するために利用可能な政策措置は数多くある。そうした措置には、(a) 気候変動を鈍化させるための排出量の削減 (b) 将来の緩和コストを削減する新しい供給技術と省エネ技術に関する研究開発 (c) 重要な科学的不確実性を削減するための継続的研究 (d) 人間と自然のシステムの気候変動への適応力を支援する活動に対する投資 - - が含まれる。問題は、「二者択一」(either-or)の問題ではなく、正しいオプションの組合せ（ポートフォリオ）をどのように見つけ出すかという点である。政策当局は、所与の時点で、努力と金融上の支援をどれくらい影響緩和に配分すべきか、技術開発の促進に向けた公的研究開発と市場インセンティブにどれくらい配分すべきか、気候に関連した不確実性の削減にどれくらい配分すべきか、社会が気候変動に適応するのを援助するためにどれくらい配分すべきかである。SAR・WG に略述され

たこうしたオプションとその他のオプションを次のカコミに要約する。

## 【カコミ】

### 活動のポートフォリオ

「低コストおよび／またはコスト効果的な措置を実施するために……政策当局が考慮することができるポートフォリオ」

(出所：S A R・W G : 政策当局向け要約)

- ・ エネルギー効率改善を妨げる制度上の障害の除去を含めたエネルギー効率向上措置の実施
- ・ 温室効果ガス排出量を増加する既存の歪曲的政策および慣行（一部の補助金および規制、環境コストの非内部化、輸送価格決定上の歪みなど）の段階的廃止
- ・ 炭素集約度の高い燃料から炭素集約度の低い燃料および無炭素燃料（再生可能エネルギーなど）へのコスト効果的な燃料転換措置の実施
- ・ 温室効果ガスの吸収源および貯蔵源を強化する措置（森林管理方法・土地利用慣行の改善など）
- ・ メタン、亜酸化窒素、その他の温室効果ガスの排出量を削減する措置の実施および技術の開発
- ・ 温室効果ガスを制限するための各種の国際協力（調整のとれた炭素／エネルギー税、共同実施活動、取引可能な割当枠の実施など）の奨励
- ・ 国内および国際的エネルギー効率基準の策定および実施の促進
- ・ 気候変動の影響に適応する措置の立案および実施
- ・ 気候変動の原因および影響に対する理解を深め、気候変動に対するより効果的な適応促進を目指した研究の実施
- ・ 化石燃料の継続的使用から生じる温室効果ガス排出量の最小化と商用非化石燃料源を開発することを目指した技術研究の実施
- ・ 気候変動による損害のリスクを分担するための制度上のメカニズム改善（保険契約の改善など）の実現
- ・ 温室効果ガス排出量を削減する自主的活動の促進
- ・ 教育・訓練の促進、気候変動の軽減および適応を容易にする持続可能な開発および消費パターンに関する情報および助言措置の実施

最適なポートフォリオを選択する決め手は、各種のオプションがどのように相互作用するかを理解することである。特に重要なのは、研究開発投資と緩和コストの問題である。一般に、研究開発投資は将来の緩和コストを削減する。S A R・W G に含まれた一例が示唆するところでは、化石燃料に対して経済的競争力のある代替燃料の広範囲にわたる開

発は、CO<sub>2</sub> 排出量を20%削減する（1990年水準以下にする）ための緩和コストを約3分の2ほど削減する可能性がある。このような節減は、気候変動の脅威に対処し、他の社会的ニーズに対応するために必要な資源を解放することができる。逆に、IS92シナリオに具体化されているのは、エネルギー・システムの供給側と需要側の双方に関する技術進歩に対する期待である。こうした技術進歩は、様々な方面（公共部門と民間部門の双方）で研究開発が継続されない限り望めない。

科学的不確実性の削減もコストを削減する。現時点では、気候系に対する「危険な」人為的干渉を構成するものは何かという疑問は解決されていない。いずれかの方向にせよ誤りを犯した場合のコストは大きいため、気候変動に関する情報の価値は大きなものになりそうである。文献が示すところでは、特に重要なのは、温室効果ガスとエアロゾルに対する気候感度、気候影響関数の決定因、経済成長率およびエネルギー効率改善率などの変数に関する情報である。

活動のポートフォリオへの依存は、個々のカテゴリー内でも当てはまる。例えば、一部の温室効果ガス発生源の緩和コストは、他のものより経済的である。SAR・WG が示唆するところでは、メタンとハロゲン化合物の工業発生源を抑制するオプションは相対的にコストがかからない可能性があるのに対して、メタンとN<sub>2</sub>O の農業発生源はもっと困難になる可能性がある。最低コスト・オプションを用いて排出量を削減すると、まず合計緩和コストが削減される。森林伐採を鈍化させ再植林によりCO<sub>2</sub> を吸収することによって、CO<sub>2</sub> 排出量を削減する可能性もCO<sub>2</sub> 濃度削減コストを引き下げる機会をもたらす。

政策措置の最適ポートフォリオは国によって異なる。各国は、自国の目的と制約を反映するポートフォリオを選択することになる。各国にとって関心があるのは、そのポートフォリオが様々な経済グループ、国際競争力、国際的公正、世代間の公正に及ぼす影響などである。しかし、各国を通じた調整は必要である。数人の研究者が、一方的措置と国際協力のコストを比較し、国際協力による経済的見返りが大きいことを明らかにしている。

#### 3.3.4 連続的な意思決定

気候変動問題は、「今行動せよ」(act now) または「静観」という観点から表現されることがあまりにも多い。意思決定問題をこのように定式化するのは、評価すべき選択肢と時間を通じた選択肢の相互作用を曖昧にするため、誤りであり、誤解を招くおそれがある。気候変動と新しい知識はともに継続的プロセスであるため、気候変動に対処する行動は、新しい情報に基づいて絶えず調整しなければならない。

UN/FCCCは意思決定プロセスの動的な性質を認識している。その起草者は、気候政策を「一回限り」の事象ではなく継続的プロセスとみなした。UN/FCCCは、「気候変動とその影響に関して利用可能な最善の科学的情報とともに関連する技術、社会的・経済的情報に照らして」定期的なレビューを求めている。こうしたレビューに基づき、既存の約束の手直しを含めて、適切な措置を講じることになる。

このような連続的な意思決定プロセスは、長期の不確実性に際して短期の戦略を確認することを目指している。次の数十年間は、多くの学習の機会とコースの中間点での軌道修正を提供することになる。これに関連して重要な問題は、「次の 100 年にとって最善のコースはどれか」ということよりも「ある程度の長期目的を考慮して次の 10 年間にとって最善のコースはどれか」である。こうして、問題は、気候変動に対処する行動の適切なポートフォリオをどのように選択し、情報の改善に照らして時間を通じてそれらをどのように調整するかの問題である。

気候変動に対処する行動のポートフォリオを実施するために、政府はどれくらいの資源をこの問題に振り向け、特に効果的と考える措置をどのように組み合わせるべきかを決定しなければならない。前者については、問題は純然たるノーリグレット・オプションをどれくらい逸脱するかである。SAR・WG で指摘しているように、「気候変動による集計的純損害のリスク回避の考慮、予防の原則の適用は、ノー・リグレット以外の措置の根拠になる」。どの程度の行動をとるかという決定は、「利害関係」、「勝算」(odds)、政策措置のコストに左右される。リスク・プレミアム（リスクを削減するために社会が支払う意思のあるコスト）は最終的に政治上の意思決定であって、国によって異なる。

## 付属資料 1

1990～2300年のCO<sub>2</sub>濃度安定化による気温と海水面への影響

セクション 2.3では、1990～2100年に重点を置き温室効果ガスの安定化が気温と海水面に及ぼす影響を考察した。本付属資料ではより長期的な見通しを示すため、図11から図15までに示した（およびセクション 2.3で考察した）気温と海水面を2300年に延長して示す（図A 1 から図A 5まで）。

【図A 1】(a) CO<sub>2</sub>濃度が図4のSプロファイルならびにWRE550 および1000プロファイルに従って安定化した場合の地球平均温度。CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>の排出量は1990年水準で一定にとどまり、ハロカーボン<sup>2</sup>は2100年までモントリオール議定書に即した排出量シナリオに従い、その後一定になると想定されている（すなわち、基準ケース）。(b) 海水面の変化と氷溶融パラメータの中央値を除き (a)の場合と同じ。結果は、すべて Wigley and Raper の単純気候/海水面モデル (IPCC TPCM(1997年))を用いて求められたものである。1990～2100年の結果については図11を参照されたい。

【図A 2】(a) S450 およびS650 濃度プロファイルについての、地球温度変化に関する様々な非CO<sub>2</sub>ガス排出プロファイルの影響（図2を参照）。実線は「基準」の結果を示す。短い破線は「CO<sub>2</sub>のみ」の結果、長い破線はCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>の排出量がIS92aに従って2100年まで増加し、次いで安定化するという結果を示す（「IS92aのケース」）。気候感度は中位値 2.5 と想定されている。(b) 海水面の変化を除き (a)の場合と同じ。氷溶融パラメータの中央値が想定されている。1990～2100年の結果については図12を参照されたい。

【図A 3】(a) 非CO<sub>2</sub>ガスのS450およびS650濃度プロファイルおよび基準ケースについての気候感度の不確実性が地球平均温度に及ぼす影響。気候感度の範囲 (Tx) は 1.5～4.5 で、中位値は 2.5 である。(b) 全地球海水面の変化を除き (a)の場合と同じ。気候感度の最低値、中位値、最高値をそれぞれ氷溶融パラメータの最低値、中位値、最高値と組み合わせて両極値の範囲を求めている。1990～2100年の結果については図13を参照されたい。

【図A 4】(a) S450 およびS650 濃度プロファイルについての、CH<sub>4</sub>排出量に対する地球平均温度変化の感度（図4を参照）。実線は「基準」の結果を示す。「CH<sub>4</sub>低」/「CH<sub>4</sub>高」の曲線は、年間CH<sub>4</sub>排出量が1990～2100年に100Tg(CH<sub>4</sub>)ずつ増加/減少し、その後一定にとどまると想定している（表4を参照）。(b) 海水面の変化を除き (a)の場合と同じ。氷溶融パラメータの中央値が想定されている。1990～2100年の結果については図14を参照されたい。

【図A 5】(a) S450 およびS650 濃度プロファイルについての、SO<sub>2</sub>排出量に対する地球平均温度変化の感度（図4を参照）。実線は「基準」ケースを示す。短い破線は排出量が1990年に75TgS/年、2100年に112.5TgS/年ずつ線形に増加し、その後一定にとどまる「SO<sub>2</sub>高」のケース、長い破線は排出量が2100年に37.5TgS/年に線形に減少し、その後一定にとどまる「SO<sub>2</sub>低」のケースを示す。(b) 海水面の変化を除き (a)の場合と同じ。氷溶融パラメータの中央値が想定されている。1990～2100年の結果については図15を参照されたい。

付属資料 2

用語集

エアロゾル (Aerosol)

浮遊粒子の集り。この用語は、誤って「エアゾール・スプレー」に使用される高圧ガスを連想させるようになった。

バイオマス (Biomass)

所与の地域または容積における有機体の総重量または総容積。

バイオーム (Biome)

自然に発生する植物相および動物相の群落・群集（または当該群落・群集が占める地域）で、それらが発生する特定の条件に適応したもの（ツンドラなど）

資本ストック (Capital stocks)

製品の生産またはサービスの提供のために任意の時点で経済に利用可能な機械類・構造物の蓄積。こうした活動は、その機械類または構造物の利用率に大きく左右される一定量のエネルギーを必要とするのが普通である。

炭素サイクル (Carbon cycle)

大気、海洋、陸上生物圏、地質上の堆積物の間での炭素の交換（二酸化炭素などの様々な形態での）を説明するときに使用される用語。

炭素質エアロゾル (Carbonaceous aerosol(s))

炭素を含むエアロゾル [当該項を参照]。

気候 (Climate)

気候は、平均気象 (average weather)、より厳密には数十年間（通常 WMO が定義した 30 年間）の関連する量の平均とばらつきで定義されるのが普通である。こうした量は、たいていの場合、気温、降水量、風などの表面変数であるが、広義では、「気候」とは気候系の状態の説明である。

気候変動 (Climate change)(UN / FCCC の用語法)

地球大気の組成を改変する人間活動に直接または間接に帰せられ、かつ比較可能な期間にわたり観測される自然の気候変動に上乗せされる気候の変化。

気候変動 (Climate change)(IPCC の用語法)

気候の観測記録にいう気候変動が生じる原因は、気候系内もしくはその要素間の相互作用の内部変化、または自然もしくは人間活動のいずれかによる外部強制の変化にある。一般にこれらのどの原因に帰せられるかを定めるのは、明らかに不可能である。IPCC が報告した将来の気候変

動の予測は、一般に温室効果ガス的人為的増加と人間に関連したその他の要因が気候に及ぼす影響のみを考慮している。

気候感度 (Climate sensitivity)

IPCC 報告では、気候感度とは大気中の CO<sub>2</sub> 濃度 (または CO<sub>2</sub> 換算濃度) の倍加後の地球平均表面温度をいうのが普通である。より一般的には、放射強制 1 単位の変化後の表面温度の均衡変化 ( /W m<sup>-2</sup>) をいう。

雲の凝結核 (Cloud condensation nuclei)

凝結の初期サイトとなり、雲の水滴を形成することができる浮遊粒子。

CO<sub>2</sub> の成長力向上作用 (CO<sub>2</sub> fertilization)

大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇による植物の成長力の向上。

氷雪圏 (Cryosphere)

地球全体の雪、氷、永久凍土層。

損害関数 (Damage function)

気候の変化と経済活動の抑制との間の関係を、気候が不変とした場合に可能な率で比較したもの。

割引率 (Discount rate)

現在事象の効果と比較可能にするために将来事象の効果を換算する年利率。

日周温度範囲 (Diurnal temperature range)

24時間にわたる最大温度と最低温度との差。

渦混合 (Eddy mixing)

小規模な乱流プロセス (渦) による混合。このようなプロセスは、現在使用されている最も解像度の高い大気・海洋一般循環モデル (AGCM) でも明確に解明することができないため、渦混合効果は最大規模の条件に関連づけなければならない。

均衡反応 (Equilibrium response)

加わった放射強制に対する気候系 (または気候モデル) の定常状態反応。

CO<sub>2</sub> 換算濃度 (Equivalent CO<sub>2</sub>)

CO<sub>2</sub> と他の温室効果ガスの所与の混合率と同一量の放射強制を引き起す CO<sub>2</sub> 濃度。

外部的影響 / 外部性 (External impact / externalities)

情報不足および / またはその情報をもとに行動をとり得ないために、競争市場では評価することができない気候変動 (またはその他一部の環境変化) がもたらす影響。

反証可能性ルール (Falsifiability rule)

現代の科学は、いかなる仮説またはモデルについても絶対的に真であることを証明する方法がないことを認めている。同じ観察結果について異なる説明が常に成り立つからである。この意味で、最も確立した物理法則でも「条件付」である。したがって、ある仮説が真であることを争う余地なく証明することができず、証明可能なのは、それが偽でないということだけである。

フィードバック (Feedback)

ある系の 1 の変数が第 2 の変数の変化を引き起し、それが最終的に最初の変数に影響を及ぼすこと。正のフィードバックはその効果を強め、負のフィードバックはその効果を弱める。

フラックス調整 (Flux adjustment)

結合大気・海洋一般循環モデルにおいて、一部の非現実的な気候状態（熱帯太平洋での異常高温など）に陥る問題を回避するために、熱流束と降水量（また時には海洋表面に風が及ぼす効果から生じる表面ストレス）がモデルの海洋に加わる前に調整項を適用することができる。

化石燃料埋蔵量 (Fossil fuel reserves)

地質学と工学上の証拠に基づき、また現在の経済条件および運用能力の下で存在量が判明している回収可能な化石燃料の量。

化石燃料資源 (Fossil fuel resources)

存在すると考えられ、将来の経済条件および運用能力に関する明確なシナリオに基づき回収可能な化石燃料の量。

GDP (Gross Domestic Product)

国内総生産。1 国の領域内で生産された製品・サービスの価額。

温室効果ガス (Greenhouse gas)

地球の表面と雲が放射する放射線（赤外線）のスペクトル内の特定の波長の放射線を吸収するガス。このガスが今度は気温が表面より低いレベルから赤外線を放射する。その効果、エネルギーの吸収量の一部が局所で捕獲され、地球表面が温暖化することになる。水蒸気(H<sub>2</sub>O)、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)、メタン(CH<sub>4</sub>)、オゾン(O<sub>3</sub>)が地球の大気中の主要な温室効果ガスである。

ハロカーボン (Halocarbons)

塩素、フッ素またはブロン素および炭素のいずれかを含む化合物。このような化合物は、大気中で強力な温室効果ガス [当該項を参照] として作用する可能性がある。ハロカーボンを含む塩素とフッ素も、オゾン層の減少にかかわっている。

赤外線 (Infrared radiation)

## GISPRI 仮訳

地球の表面、大気、雲が放射する放射線。陸上放射線、長波長放射ともいう。赤外線には、地球 - 大気系の温度が支配する明確なスペクトル（すなわち、波長の範囲）がある。赤外線のスペクトルは、太陽と地球 - 大気系との間の温度差のために、実際には太陽の放射（日射） [当該項を参照] または短波長放射とは種類が異なる。

### 統合評価 (Integrated assessment)

気候変動の影響とその影響に対する政策上の反応を予測するために、物理学、生物学、社会学による結果とモデル、当該要素間の相互作用を一貫した枠組みの中で組み合わせた分析方法。

### 寿命 (Lifetime)

一般に寿命とは、1個の原子または分子が所与の貯留層（大気または海洋など）で消費する時間の平均長さをいう。濃度の摂動(perturbation)の反応時間と混同してはならない。CO<sub>2</sub> は寿命が1つではない。

### 限界コスト (Marginal cost)

努力を1単位追加するコスト。排出量削減の場合は、排出量をさらに1単位削減するために要するコストをいう。

### 海洋生物圏 (Marine biosphere)

生きている海洋有機体の総称。

### 市場損害 (Market damages)

気候変動（またはその他一部の環境変化）が引き起す損害のうち、競争市場に提供され、かつ競争市場が使用可能な情報に基づき評価された損害の価額。

### 緩和限界コスト関数 (Mitigation marginal cost function)

削減された排出量の総量と削減された最終単位の限界コストとの間の関係。限界緩和コストは、一般に削減された排出量の総量とともに増加する。

### 窒素の成長力向上作用 (Nitrogen fertilization)

大気中の窒素濃度の上昇による植物の成長力の向上。IPCC報告では、一般に人為的窒素発生源（人工肥料や化石燃料の燃焼から放出される一酸化窒素など）による成長力向上作用をいう。

### 「ノー・リグレット」緩和オプション ("No-regrets" mitigation options)

「ノー・リグレット」緩和オプションは、そのベネフィット（エネルギー・コストの削減や局所/地域汚染物質の排出量の削減など）が気候変動軽減に伴う利益を除外して、社会にとってのコストに等しいかそれを上回るオプションをいう。「とにかく実行に値する措置」ともいう。

### 市場外の損害 (Non-market damages)

気候変動（または他の一部の環境変化）が引き起す損害のうち、情報不足および/または、その情報をもとに行動をとり得ないため競争市場では評価することができない損害。

最適抑制率 (Optimal control rate)

限界介入コストの純現在価値が純限界介入ベネフィットの純現在価値に等しい介入率。

パラメータ表示 (Parameterize /parameterization)

気候モデルの作成に当って、この用語はモデルの解像度で明確に解明し得ないプロセス（サブグリッド・プロセス）を、このようなサブグリッド・プロセスの地域平均効果とより大規模な流量との間の関係によって定式化する手法をいう。

光合成 (Photosynthesis)

植物が空気中（または水中）から  $\text{CO}_2$  を摂取して植物物質を作り、その過程で  $\text{O}_2$  を放出する代謝プロセス。

ポートフォリオ分析 (Portfolio analysis)

排出量を削減し、または気候変動に適応するために政策当局者が利用できる処置の組合せの分析。

予防原則 (Precautionary principal)

ある解決法の基礎となる前提が間違いであるために取返しのきかない解決策を回避して、表面上劣ってはいるが原状に復し得る解決策を支持すること。

放射減衰 (Radiative damping)

地球 - 大気系に加わる正の放射強制 [当該項を参照]（温室効果ガスの追加を通じたものなど）は、エネルギー余剰に相当する。次いで表面と下層大気の温度は上昇し、それが今度は宇宙に放射される赤外線を増加させ、したがってエネルギー収支が確立される。所与の温度の上昇についての宇宙への赤外線の排出量の増加量を放射減衰という。

放射強制 (Radiative forcing)

潜在的気候変動メカニズムのうち重要な単純な尺度の1つ。放射強制は、たとえば二酸化炭素濃度の変化または太陽の出力の変化が生じた後の、地球 - 大気系のエネルギー収支に対する摂動 ( $\text{Wm}^{-2}$ ) である。気候系は、エネルギー収支が再確立するように放射強制に反応する。正の放射強制は、表面を温暖化する傾向があり、負の放射強制は、表面を冷却する傾向がある。放射強制は、地球の年平均値として引用されるのが普通である。IPCC 報告で使用された放射強制のより厳密な定義では、成層圏が地球平均放射均衡の状態に再調整することを考慮した後の表面 - 対流圏系のエネルギー収支の摂動とされている (IPCC94の第4章を参照)。「気候強制」ということもある。

呼吸 (Respiration)

有機体はそのエネルギー必要量を満たし、 $\text{CO}_2$  を放出する代謝プロセス。

土壌水分 (Soil moisture)

大陸表面に貯蔵され蒸発しやすい水。IPCC (1990年) では、1つの貯蔵源 (または「バケツ」(bucket)が気候モデルで一般に使用された。キャノピー〔天蓋〕(canopy)と土壌プロセスを取り入れる現在のモデルでは、土壌水分を植物「萎凋点」(wilting point)を超えて保持される量とみなしている。

太陽光度 (Solar luminosity)

太陽の輝度 (すなわち、太陽が発する日射 [当該項を参照] の量) の尺度の1つ。

日射 (Solar radiation)

太陽が放射する放射線。短波長放射ともいう。日射には、太陽の温度が支配する明確なスペクトル (すなわち波長の範囲) がある。日射のスペクトルは、太陽と地球・大気系との間の温度差のために赤外線 [当該項を参照] または陸上放射線とは著しく異なる。

面積尺度 (Spatial scales)

それぞれの面積は大陸で1,000万~1億平方キロメートル(km<sup>2</sup>)、地域で10万~1,000km<sup>2</sup>)、地方で10万km<sup>2</sup>。

スピン・アップ (Spin-up)

「スピン・アップ」は、AOGCMの初期化に使用される手法の1つである。今のところ、結合大気-海洋系の状態を正確に診断することができず、したがってAOGCMで実験するための観測された初期条件を規定するのは不可能である。その代わりに、モデルの大気と海洋の要素は「観測された」境界条件によって強制されて別個に実行され、次いでおそらくその後の「スピン・アップ」期間が続く。その間に大気と海洋が結合されて、AOGCMは定常状態に近づいていく。

成層圏 (Stratosphere)

対流圏の上方約10kmから約50kmまでに及ぶ高度に層化した安定した大気の領域。

持続可能な開発 (Sustainable development)

持続可能な開発は、将来世代のニーズを満たす能力を損なうことなく現行世代のニーズを満たす開発をいう。

陸上生物圏 (Terrestrial biosphere)

陸上で生きているすべての有機体の総称。

サーモクライン〔水温躍層〕 (Thermocline)

世界の海洋のうち通常深さ1kmの地域で、深くなるにつれて温度が急落し、表面と深海との間の境界を画するところ。

## GISPRI 仮訳

### サーモハライン (Thermohaline)

温度と塩分の差を原動力とする海洋の大規模な密度主導の循環。

### 気候の過渡的応答 (Transient climate response)

時間で変動する強制の変化に対する気候系の時間に依存する反応。

### 圏界面 (Tropopause)

対流圏 [当該項を参照] と成層圏 [当該項を参照] との境界。

### 対流圏 (Troposphere)

大気圏の中緯度で表面から約10kmまでの最も下層の部分 (平均して高緯度地帯で約9kmから熱帯で約16kmまでに及ぶ) で、雲と「気象」現象が起こるところ。対流圏は、温度が一般に高度とともに低下する領域と定義される。

### ターンオーバー時間 (Turn-over time)

ある貯留層の質量 (大気中のNO<sub>2</sub>の質量など) とその貯留層からの除去率 (NO<sub>2</sub>の場合、成層圏 [当該項を参照] 内での日光による破壊率) との比率。

### 揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds: VOC)

植物により、または石油製品の蒸発を通じて大気中に放出され、化学的に反応度が高い対流圏オゾンの生成の化学的条件にかかわるいくつかの有機化合物の1つ。CH<sub>4</sub>は厳密にいうとVOCの定義に当てはまるが、別扱いされるのが普通である。

### 湿性 / 乾性堆積 (Wet / dry deposition)

降雨としてのウォッシュアウト (湿性堆積) を通じて、または表面への直接堆積 (乾性堆積) を通じてある物質が除去されること。

### WG の LESS シナリオ (WG LESS scenario)

世界のCO<sub>2</sub>排出量の少ない供給システムを評価するためにSAR・WG用に作成されたシナリオ。このシナリオを、WGのLESS (低排出量供給システム: Less Emission Supply System) シナリオという。

### 時間的柔軟性と場所的柔軟性 ("When" and "where" flexibility)

気候変動に伴うコストを削減するために、軽減オプションまたは適応方式を実施する時期 (when) または場所 (where) を選択する能力。