

3. 中長期的な二酸化炭素排出量目標について

Middle to long-range global emission targets of greenhouse gasses

松岡 譲*

Yuzuru Matsuoka

Abstract : By how much and over what time-frame, should anthropogenic emissions of greenhouse gases be reduced to avert global climate change ? Research to answer this question has been strongly promoted within framework of Berlin Mandate. In recent year, two main, but rather different, approaches have been taken. They are: "Optimum Emission Trajectory" and the "Safe Emission Corridor". From the view point of "Safe Emission Corridor", this paper concludes the necessity of implementing major emission reduction policies before 2010. Also it strongly supports existing targets for developed countries to stabilize their emissions by the year 2000, make further reduction by 2010, and cooperate with developing countries to reduce their total emission thereafter.

Keywords : Climate change, Greenhouse gas emission, Berlin Mandate, Safe emission corridor

1. 温室効果ガス排出目標量検討の重要性

世界の温室効果ガス(GHG)排出量をどのレベルまでに抑制すべきかが、大きな争点となっている。気候安定化のために、二酸化炭素などの GHG 排出量を抑制しなければならないことはよく知られているが、そのレベルをどの程度とすべきかはよく知られていない。1990 年の IPCC 報告書では、即時 60%削減の必要性を述べているが、現実性ある主張ではなかった。気候変動枠組条約 (FCCC) 第2条では、気候安定化の目標を、気候システムに危険を及ぼさない程度に大気中の GHG 濃度を抑えることとし、危険でない水準とは、生態系が気候変動に自然に適応し、食糧の生産が脅かされないこととしている。1990 年代に入り、現在まで、気候変動問題に関しては多大の研究者と研究資源が投入され、この危険な水準をめぐる議論が費やされたが、それがどの程度かを確信をもって論ずるには至っていない。この状況が、近々、飛躍的に改善することも考えにくく、かといって、科学的な確実性が十分になるのを待っているのは、回復不可能な損害発生のおそれもある。したがって、不十分な知見であっても、それらをベースとして安全な水準を推測し、それに向けて GHG 排出量抑制施策を遂行していかなければならない状況にある。

2. 排出目標量に関するこれまでの研究

この目的に向けて、これまでどのような研究がなされてきたか。大きく分けて二種類の研究がある。その第一は、Richels・Edmonds(1995)、Manne・Richels(1993)らの研究に代表される「最適排出トラジェクトリー」論であり、第二は WBGU(1995)、RIVM(Alcamo ら、1996)、AIM(Matsuoka ら、1996)などによる「安全排出回廊」論である。

2. 1 最適排出トラジェクトリー

最適排出トラジェクトリー論では、功利主義の立場から経済的効率性の観点を強調し、一定期間内の社会的厚生割引現在価値を最大とするような二酸化炭素排出経路を求めようとする。このような計算を行ってみると、削減対策のタイミングについてかなり遅いものを選ばれる。これは、気候安定化目標として大気濃度を採用しているためである。大気濃度を一定値以下にすることは、ほぼ、目標到達時期までの累積排出量を一定値以下とすることに対応しており、その時期までの排出パターンにはそれほど依存していない。資

* 名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学専攻、Graduate School of Engineering, Nagoya University

本収益率が正である限り、今日の排出削減よりも明日の削減の方が安上がりであるから、削減努力はなるべく後回しにした方が得である。また、エネルギーミックスを化石燃料からクリーンエネルギーに転換していくには、それに対応した技術開発とか資本ストックの回転を期待しなければならないが、そのためには、削減を開始するまでの時間をなるべくかせいでおいた方が得である。これらの理由が複合し、上記のような結果が導かれることになる。今までの計算結果からみると、安定化目標が二酸化炭素濃度 550ppm の場合、2020 年頃までは抑制対策を行わず、その後、2040 年頃までは年 1 % 程度、それ以降は 1 ~ 2 % 程度の削減を 100 年間にわたって行うと目標濃度に達するといった結果が得られている。

この計算は、いろいろな論争を引き起こした。その第一は技術進歩に関する論争である。Richels や Edmonds が使用したモデルでは、技術開発に対する投資を行った場合、それによってどの程度の技術革新が進むかという観点が考慮されていない。わが国の自動車排ガス抑制技術の歴史が教えるように、これをどのように考慮するかによって結果は大きく変化する。例えば、Hourcade ら(1995)、Grubb ら(1995)の検討では、早期抑制の強制が技術開発を促進させ、そうでないときよりも社会的厚生を増大させるとの結果を導いている。

2. 2 安全排出回廊

最適排出トラジェクトリーに対する第二の論争は、温暖化影響評価に関する点である。気候システム安定化を図るにあたり、大気濃度は一つの目標値となり得るが、それ以外の制約はないであろうか。人為的振動の強さには、大気濃度あるいは上昇気温の変化の他に、変化のスピードも考えなければならないであろう。この観点から、気候変化の大きさのみならず変化速度に一定の制約条件を設け、その条件内に入る GHG 排出経路の範囲を探索しようとする試みが行われてきた。安全排出回廊 (Safe emission corridors)、安全着陸アプローチ (Safe landing approach) あるいは受容可能ウィンドウズアプローチ (Tolerable windows approach) がそれである。これらは、いずれも対象期間内での気温変化値、海面水位変化値、気温変化速度及び海面水位変化速度に制約を設け、その範囲であれば気候システムに危険を及ぼさないと考えて、そこに入る排出経路を気候モデルを用いて求めている。今までに、三つの計算結果が報告されている。

最初の例は、第 1 回締約国会議 (COP1) の際にドイツ地球変動諮問委員会 (WBGU) から報告された (WBGU, 1995)。この報告では、気候安定化範囲を気温と気温変化速度で制限し (受容可能な窓、tolerable window)、この窓に入るような二酸化炭素排出量を逆計算により求めた。受容可能な気温範囲としては、近年の地球気温変化幅を $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 広げた $9.9\sim 16.6^{\circ}\text{C}$ (1995 年気温は 15.3°C としている) とし、気温変化速度幅は $\pm 0.2^{\circ}\text{C}/10$ 年とした。この変化速度幅 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}/10$ 年は、世界総生産に 5% 程度の影響を及ぼす値として推測している。彼らの計算では次のような結果が導かれている。まず、現在の排出増加速度 ($1.7\%/年$) を続けている場合は、2025 年に窓境界にぶつかり、それ以降、数年の間に 40% 程度の削減を行わないといけな。一方、今すぐに年 1 % の排出量削減をする場合は、この窓内に留まることが可能であり、2155 年以降は年 0.25% の削減速度でもよい。この WBGU の検討は、気温変化速度を気候変化の許容範囲として明示的に取り扱い、それに向けての逆計算を行った例として注目すべきものであった。この検討は引き続き、ポツダム気候影響研究所 (PIK) の ICLIPS チームにより精力的に行われている。

第二の例は、第 2 回締約国会議 (COP2) の際にオランダ国立衛生環境研究所 (RIVM) の IMAGE2 チームが報告したものである (Alcamo ら、1996)。この研究の基本的な方法論は、先のドイツ地球変動諮問委員会のものを踏襲しているが、より包括的であった。彼らの研究では、IMAGE2 を用いて、GHG 累積排出量と気温上昇、海面上昇のレベル及び気温上昇変化速度の三つのパラメーターとの関係を、概括的に把握する。次いで、それをベースにしてこれら 3 パラメーターと GHG 排出量削減速度に上限を与えた時の排出経路の取りうる範囲を求め、それを安全排出回廊と名付けた。上限値としては、1990 年に対する 2100 年の気温上昇値を $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 、海面上昇値を 20~40cm、上昇速度値を $0.1\sim 0.2^{\circ}\text{C}/10$ 年とし、最大排出削減速度を $2\sim 4\%/年$ とした。この解析によれば、2010 年時点の世界の許容人為起源排出量は、回廊の上端で 93~145 億

C t / 年であった。

第三の例もやはり COP2 の際に、日本の AIM チームから報告されたものである (Matsuoka ら、1996)。彼らの検討は、制約条件として気温上昇速度及び GHG 排出量削減速度に上限を与え、その範囲内に留まるための先進国必要削減量を求めたものである。この解析によれば、

- 1) 先進国排出量を 2000 年までに 1990 年レベルに抑制し、2020 年にはさらに 20% 削減を行わないと回廊から外れる。
- 2) 回廊範囲の温度上昇速度上限値を $0.1^{\circ}\text{C}/10$ 年にとると、発展途上国は 2010 年頃から排出量削減を検討しなければならない。
- 3) 2040 年頃までに世界の CO_2 排出量を年 50 億 C t 程度までに落としておけば、気温上昇速度は $0.1^{\circ}\text{C}/10$ 年程度となり、危険ゾーンからひとまず脱出することになる。

などの結果を得ている。

これらの三つの研究事例は、いずれも初歩的な研究成果であり検討が不十分な点もあったが、GHG 削減量を策定する上での考え方及びその手順を明示的に示したものであり、この種の検討の重要な出発点になったと考えてよからう。ただし、この安全排出回廊の議論を地球環境政策策定の根拠とするためには、解決されなければならない基本的問題をいくつか抱えていることも事実であり、それらを列挙すれば以下になる。

- 1) 地球平均の気温上昇値、気温上昇速度あるいは海面上昇値などをインデックスとして、危険を及ぼさない摂動範囲を定めているが、その設定値の妥当性はどのようにして保障・正当化されるのであろうか。例えば、上記の三事例では、気温変化速度について 10 年あたり $0.1\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ 上昇を回廊境界としているが、その気温変化速度によりどの程度の影響・被害が発生するのであろうか。また、地球平均の気候パラメーターは、各地域の気候変化インデックスとして、どの程度、代替できるのであろうか。
- 2) 今までの検討では、排出量削減に伴う費用の時間的分担及び地域的分担が計算過程に入っておらず、特に、南北間の許容排出量の割り当て問題などにはほとんど貢献できていない。

後者の問題点については、最適排出トラジェクトリーの枠組みから、安全排出回廊的制約に取り組むアプローチも行われており (Amano, 1997)、致命的な問題ではない。問題は前者であり、これについて次節で論ずることにしよう。

3. 気候変化の許容範囲

気候変動の許容限界を検討しようと試みたのは、1988 年に世界気象機構(WMO)と国連環境計画(UNEP)がフィラハ及びベラジオで行ったワークショップ (WMO/UNEP, 1988) である。この会議では、許容できる 10 年あたりの気温上昇速度は、地球平均で 0.1°C 、海面上昇速度は 2~3 cm 以下とされ、この範囲ならば自然生態系の種の変化、森林移動あるいは海面上昇に対する人間社会の追従もそれほど困難ではないと推測された。同様の検討は、Sassin ら(1988)によっても行われ、彼らは人為起因による気候変動の許容幅として、過去の気候変動の「正常範囲」を一つの尺度とすることを主張した。Sassin らの言う「正常範囲」の定義が問題となるが、極度の異常値、例えばヤングドライアス期などは除くものと考えた。彼らは過去の気温変化の解析を行い、気温変動速度が大きいほど、気温変化の絶対幅を小さく取らなければならない、絶対幅を 2°C とすると、許容速度は $0.03^{\circ}\text{C}/10$ 年程度となることを見出している。WMO/ICSU/UNEP の温室効果ガス助言グループ (AGGG) が 1989 年に公表した報告書 (UNEP/Beijer Institute, 1989) では、この Sassin らの主張

を気候変動の制限目標設定の根拠とした。ストックホルム環境研究所（SEI）は、AGGG の検討を継続し、気候変動の制限目標として以下のようにとりまとめた（Rijsberman ら, 1990）。

- 1) 地球平均気温：10 年あたりの最大上昇速度が 0.1°C 。温度変化の絶対値が 1°C 以下ならば低リスク、 2°C 以上ならば高リスクである。
- 2) 海面上昇：10 年あたりの最大上昇速度は 20～50 mm。上昇の最大値は、1990 年を基準として 0.2～0.5 m とする。

この目標設定は、フィラハ・ベラジオワークショップ及び Sassin らの検討に影響を受けたものであり、それらに加え、同様な検討を行ったドイツの研究及びサンゴ礁の成長速度及び海岸湿地帯が追従できる速度などを参照し、定めたものである。

それでは、この 10 年あたりの最大上昇速度 0.1°C とは、生態系にどの程度のストレスを与えるのであろうか。気候変動による温度変化が大きい中緯度及び高緯度地域では、南北方向 100 km の気温差は、ほぼ 0.7°C に相当する。従って 10 年間に 0.1°C の温度変化があるとき、気温条件を同一に保つためには、南北方向に年 1.5 km の移動が必要となる。過去の気候変動時における樹種の移動速度は、年 40～500 m/年程度以下と報告されているから、この変化速度はかなり厳しいストレスとなりうる。

気候パラメーター変化とそれによる影響の関わりについて判明・推測されていることは以上であり、貧弱な内容と言わざるを得ない。これに関する調査・研究を今後も勢力的に行う必要がある。しかし、現在のところ、上に述べた $0.1^{\circ}\text{C}/10$ 年などの安全性について特に否定する事実もなく、当面はこれらの値を採用せざるを得ない。さらに、安全排出回廊で設定する気候パラメーター変化速度と、実際に暴露される変化速度とを結びつける所も問題があり、少なくとも地域的及び短期的時間変動の影響を考慮しなければならないであろう。安全排出回廊で設定する変化速度は、温室効果による地球平均でみた長期的変化傾向成分であり、それ以外の変動分による効果をどれだけ見込むかが、結果を大きく左右すると推測されるからである。

4. 安全排出回廊の算定

第 2 節に述べたように、安全排出回廊はドイツ、オランダ及び日本の温暖化統合評価研究グループによって検討されてきたが、その解析手法、設定条件等もマチマチであり政策策定の立場からは、それらの相互比較による共通点及び相違点の明示化が望まれていた。そこで、同一回廊条件を設定し、より信頼性の高い安全排出回廊を導出することが提案され、現在、その比較プロジェクトが進行中である。設定された回廊条件は、1990 年～2100 年の気温上昇値を 1、1.5 及び 2°C 、気温上昇速度を 10 年あたり 0.1、0.15 及び 0.2°C 、海面上昇値を 20、35 及び 50 cm、海面上昇速度を 10 年あたり 2、3.5 及び 5 cm とし、それらの組み合わせによって種々の回廊境界を構成しようとするものである。速度条件は、2000 年以降適用することとし、10 年単位で 1～3 回程度は、これに違反してもよいとしている。さらに、回廊の対象とする排出量は、GWP（100 年基準）換算した比較的制御可能な GHG

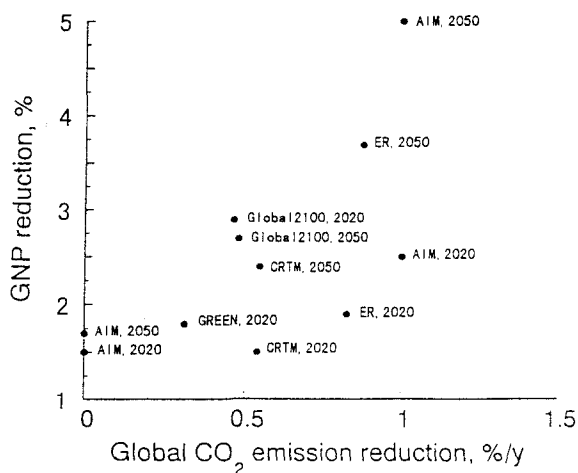


図 1 世界 CO₂ 排出量削減速度と世界 GNP 損失に関する 計算結果

(CO₂、CH₄の一部、N₂Oの一部、CFC)とし、その変化速度は10年間で平均し年±2%を超えないこと、その他の温室効果関連ガスは気候モデルでは考慮するものの削減対象とはせず、SO₂排出量は1990年値で一定とすると仮定する。本論文では、この設定条件をベースとして下に述べる修正を加えた安全排出回廊を算出した。

まず、本論文では、世界排出量の削減速度最大値を年1.5%とする。これは削減によるGNP損失がおおよそ5%程度に相当する速度であり(図1)、これを経済的受認限度と考えたためである。また、排出量上限値は200億tC/yとした。GHG循環・気候モデルには従来から用いているもの(Matsuokaら、1996)を使用した。計算では、排出条件を満足する範囲内にて一様に分布する排出量軌跡を10万本作成し、その内から気候的回廊条件を満たす軌跡が通過した範囲を求めている。図2は気候制約を1条件ずつ与えたときの回廊上限及び下限(LB.)を示したものである。気温上昇速度に0.1℃/10年の、海面上昇速度に2cm/10年の制限を課した時は、10年単位で2回及び4回の違反を認めない限り、回廊を見つけだすことが不可能であり、それらの値を違反許容回数とした。それ以外には1回の違反までは許容した。

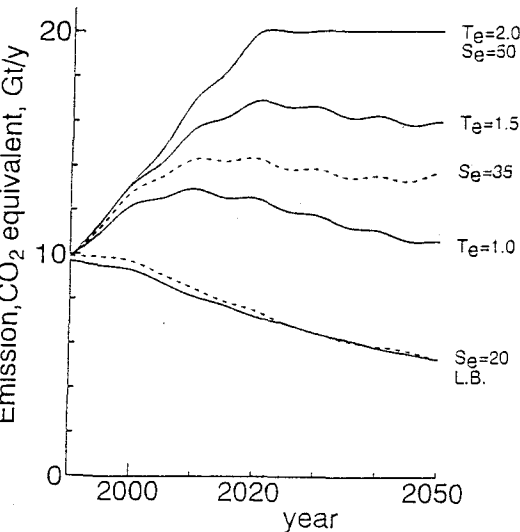


図2 a 上昇量に上限を課した場合の回廊

LB.: 回廊下限、Te: 2100年時点の気温上昇量、
Se: 2100年時点の海面上昇量

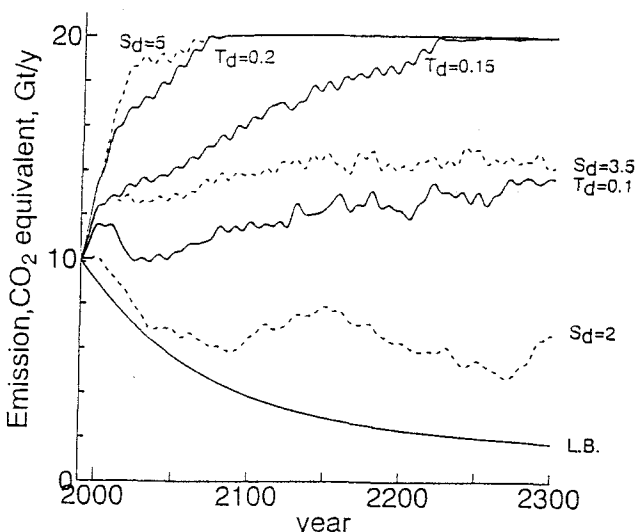


図2 b 上昇速度に上限を課した場合の回廊

LB.: 回廊下限、Td: 気温上昇速度(℃/10年)、
Sd: 水面上昇速度(cm/10年)

これらの回廊範囲は、従来から提唱されている排出シナリオとどのような関係にあるのであろうか。図3は、上昇量及び上昇速度を、厳しい値(strict)、中位値(medium)及び緩やかな値(mild)同士で組み合わせた場合の回廊上限と、IPCCによる1992年シナリオ(IS92)及び濃度安定化シナリオであるWGI及びWREシナリオを同時に記したものである。この結果から、IS92a(IPCC標準排出経路)は、緩回廊のほぼ上限に位置し、WGI550(CO₂安定化濃度550ppmとしてIPCC算出した経路)は中位回廊の上限に、またIS92c(IPCC低位排出経路)あるいはWGI450は厳回廊の外となっている。

5. GHG 排出目標の検討

それでは、この回廊計算からGHG抑制目標立案に対してどのような指針が得られるであろうか。図4は、中位基準(Te=1.5℃、Td=0.15℃/10年、Sd=3.5cm/10年、Se=35cm)の回廊からみた先進国許容排出量範囲を検討したものである。図中の一点鎖線は、回廊基準を満足した排出軌跡のうち、何%がその値を上回って通過したかを連ねたもので、この値(以後、水準値と称す)が大きいほど、強い削減努力なしに回廊

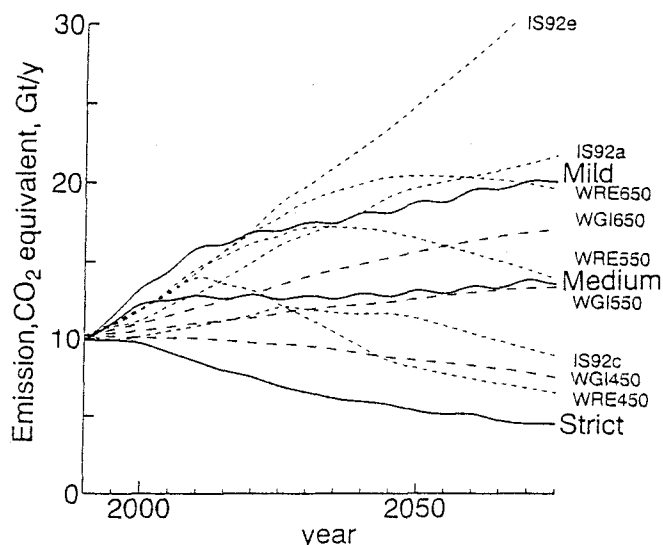


図3 既往の排出シナリオと回廊上限

Mild: $T_e=2, T_d=0.2, S_d=5, S_e=50$ を組み合わせた回廊上限

Medium: $T_e=1.5, T_d=0.15, S_d=3.5, S_e=35$ を組み合わせた回廊上限

Strict: $T_e=1, T_d=0.1, S_d=2, S_e=20$ を組み合わせた回廊上限

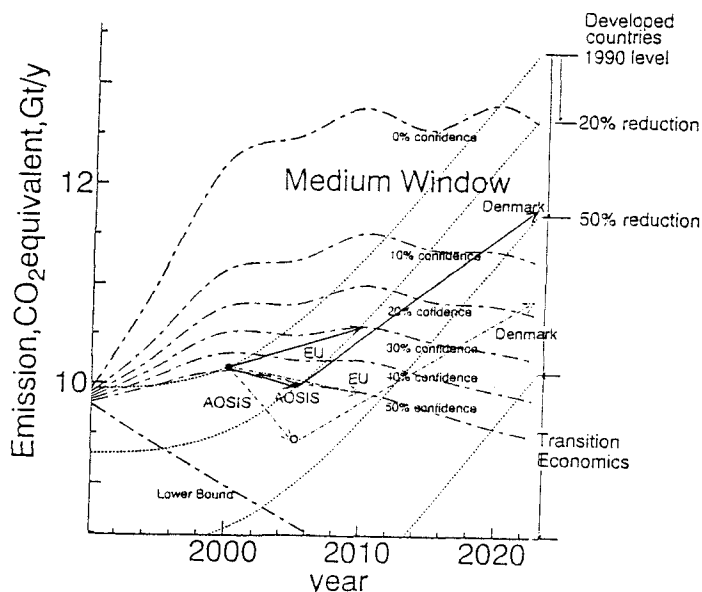


図4 2020年までの安全排出回廊（中位基準：2100年に
て1.5℃上昇、35cm 海面上昇、10年あたりの気温
上昇速度0.15℃、海面上昇速度3.5cm）と世界GHG
排出見通し

条件（安全条件）を守ることが可能である。
これが0%となる点を上回る排出を行うときは、それ以降、最大限の努力をしても回廊基準を満たすことは出来ない。点線は、途上国、移行経済諸国の排出量がIS92aに従って排出されると仮定し、先進国排出量が1990年値、その80%及び50%で固定されたときの世界排出量の軌跡を描いたものである。

さらに図中には、先進国の排出削減目標を2000年に1990年排出量とし（FCCC第4条）、それ以降については、例えば、(1) 2005年にはその20%減、2030年に50%減としたとき（AOSIS・デンマーク提案）、(2) 2010年に20%減としたとき（EU提案）の排出軌跡を実線矢印で記している。鎖線矢印は、付属書I国（先進国+経済体制移行国）がこの(1)あるいは(2)の削減を行った時の軌跡である。この図から、以下のことがわかる。

- 1) 先進国排出量を1990年値に凍結した場合、2018年には中位基準回廊からはみ出し、以後最大限の努力をしても中位基準の気候変化(2100年に1.5℃上昇、35cm 海面上昇、10年あたりの気温上昇速度0.15℃、海面上昇速度3.5cm)を守ることができない。この結果は、先進国排出量を50%削減しても、それほど改善されず、はみだす年が10年程度遅れるのみである。
- 2) 先進国排出量を2000年に1990年値に戻すことは、中位基準回廊の50%水準にほぼ沿ったものである。以後、同じ程度の水準を保つには、2005年には20%削減、2010年頃には付属書I国すべてが20%の削減を行う必要がある。

6. 結論

本論文で示した安全排出回廊の分析では、経済的効率性に基ずく最適排出トラジェクトリーの結果と正反対の結論を得る。すなわち、最適排出トラジェクトリーでは、2020～2030年頃に本格的な削減対策を開始することを主

張する。一方、本分析結果は、逆に先進国 2000 年排出量の 1990 年レベルの安定化、2010 年での本格的な削減を支持し、それ以降は先進国、途上国双方での削減の必要性を強く示唆している。

地球気温は過去 40 年程度の間 0.2~0.3℃上昇した。このような気候変化速度は、少なくとも過去 1 万年の間経験しなかった大きさであり、予想していない急激な環境変化のきっかけとなる可能性を秘めている。海洋熱塩大循環のシャットダウン、陸上生態系の大量枯死の可能性などに関し、かなり判明してきたものの、どの程度の温暖化が地球環境への致命的干渉となるか不明な点が多い。これらの知見の更新に従い、安全排出回廊も漸次修正されなければならないが、少なくとも現時点の知見からは、今後 20 年以内における本格的削減の必要性が不可欠と結論される。

引用文献

- Alcamo, J. and E. Kreilemann, 1996, Emission scenarios and global climate protection, *Global Environmental Change*, **6**, 305-334.
- Amano, A., 1997, On some integrated assessment modeling debates, paper presented at the IPCC Asia-Pacific workshop on integrated assessment models, 10-12 March, Tokyo.
- Grubb, M., M.H.Duong and T.Chapuis, 1995, The economics of changing course, *Energy Policy*, **23**(4/5), 417-432.
- Hourcade, J.C. and T.Chapuis, 1995, No-regret potentials and technical innovation, *Energy Policy*, **23**(4/5), 433-446.
- Manne, A.S. and R.G. Richels, 1993, CO₂ hedging strategies – The impact of uncertainty upon emissions, paper presented at the OECD/IEA conference on the Economics of Climate Change, Paris, 14-16 June.
- Matsuoka, Y. and T. Morita, 1996, Recent global GHG emission scenarios and their climatic implications, (in) *Global warming, carbon limitation and economic development*, ed. A. Amano, CGER-1019-96, 117-136, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba.
- Matsuoka, Y., T. Morita and Y. Kawashima, 1996, An estimation of negotiable safe emission corridors based on AIM model, paper presented at the second conference of the parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Geneva, 8-19 July.
- Richels, R. and J. Edmonds, 1995, The costs of stabilizing atmospheric CO₂ concentrations, *Energy Policy*, **23**(4/5), 373-378.
- Rijsberman, F.R. and R.J. Swart, 1990, *Targets and Indicators of Climatic Change*, The Stockholm Environmental Institute, 166p.
- Sassin, W., J. Jaeger, J.C. di Primio and W. Fisher, 1988, *The Climate Problem between Science and Politics*, KFA Juelich.
- UNEP/Beijer Institute, 1989, *The Full Range of Responses to Anticipated Climatic Change*, United Nations Environment Programme GEMS and The Beijer Institute, 182p.
- WBGU (German Advisory Council on Global Change), 1995, *Scenario for the derivation of global CO₂ reduction targets and implementation strategies*. Statement on the occasion of the First Conference of the Parties to the Framework Convention on Climate Change in Berlin, Bremerhaven.
- WMO/UNEP, 1988, *Developing Policies for Responding to Climatic Change, A summary of the discussions and recommendations of the workshops held in Villach and Bellagio under the auspices of the Beijer Institute*, Stockholm, WCIP-1, WMO/TD-No.225, 53pp.