

# 地球温暖化対策をめぐる地域別の交渉指向性の推計 — 統合モデルによるナッシュ均衡とナッシュ交渉解の比較分析 —

鷲田 豊明\*

2008年5月27日

## 概要

温暖化メカニズムと地域分割された経済システムを組み込んだ動的統合モデルを用いて各地域の交渉指向性を推計する。その際、世界的交渉が決裂した状態をナッシュ均衡として求め、交渉が妥結した場合の状態をナッシュの交渉解によって求める。地域分割は、日本、米国、EU、中国、インド、ロシア、中東、高所得国、中所得国、低所得国の10地域にした。終端条件をニュートラルにするために30期、300年の長期シミュレーションとして計測した。各地域における交渉解とナッシュ均衡による交渉水準の差の割合を交渉指向性指標とすると、EU、高所得国、日本、中東、アメリカ、中国、低所得国、インド、中所得国、ロシアの順となることがわかった。また、インドや低所得国においては、ナッシュ均衡解から交渉解に変わることによって著しく、温暖化ガス排出の減少が起こることも分かった。EUが、単に交渉指向性が強いばかりではなく、当面する期間においても交渉によって大幅な削減に合意する可能性があることも示された。インドや途上国は、交渉妥結によって、近い将来における大幅な削減は行わないものの、将来における削減も含めれば、全体として、決裂時と比べて大幅な削減となることも示された。全体として、結果に一定のリアリティがあり、分析手法の有効性が示された。

## 1 はじめに

地球温暖化に関する人々の関心は日々高まり、世界政治の主要課題のひとつになっている。2007年には、IPCCの第4次評価報告書が発表されこの問題に関する多くの知見が整理されまとめられた。京都議定書の第1約束期間が始まり、主要国、特に日本はその目標達成について取り組みが本格化するとともに内外の注目を集めるようになってきている。さらに、ポスト京都議定書に向けた動きも2007年に確認されたバリロードマップをもとに世界的な議論が始まっている。

地球環境という公共財をめぐる、各国、各地域は自己の利害と地球環境の保全という世界的な課題の解決に向けて、真剣な交渉を繰り広げている。交渉によって地域の利得が上昇する可能性はあるものの、地球環境という公共財の本質的性格から、交渉から離脱して自己利害のみを追求する可能性も残されている。もちろん、その結果、世界から受ける負の評価は厳しいものとならざるを得ないが、米国が京都議定書から離脱した事実を踏まえれば、このような自己利害に走る地域や国はありえないと判断するのは非現実的である。

地球温暖化問題は、遠い将来の世代にまで影響を与える問題である。したがって、われわれ現在世代がこの地球環境に対する負荷をどの程度、どのように抑制するかについては、将来世代への影響を考慮して行われるべきである。その点で、将来世代への影響を考慮した多くの理論的分析、およびシミュレーション分析が行われている。IPCCの第4次評価報告書にも、多くのシミュレーションの評価と分析がある (IPCC [5] の Chapter 3)。

\* 上智大学大学院地球環境学研究所 <http://eco.geniv.sophia.ac.jp>

ただし、これまで行われたこうしたシミュレーションの多くが、現在進行している各国の交渉の結果（交渉決裂を含む）を考慮したり、将来における各国の私的利益が各国の交渉姿勢に影響を与えるという事実を明示的に組み込んでいない。基本的なシナリオを前提として温暖化対策の成果を評価したり、暗黙のうちに世界がある望ましい目的のもとに協力することを前提にしたり、世界がひとつの特別な一般均衡を実現することなどを前提にシミュレーションが実行され、政策の評価が行われている。

われわれは、将来における経済社会状況や温暖化からこうむる被害、あるいは温暖化排出がもたらす利得、削減技術にかかわる各国の状況の違いが現在行われている世界的な交渉にどのように影響を与えるものなのか、世界的な交渉の妥結と決裂がもたらす将来世代への影響の違いの程度と内容などを知りたいと思う。これを知るためには、第 1 に、温暖化メカニズムと経済社会システムの基本構造がともに組み込まれ、分析上必要な程度に世界が地域分割されている統合シミュレーションモデルが必要である。第 2 に、このモデルをもとに、交渉が決裂した場合と妥結した場合の厚生比較を可能にする分析枠組みが必要である。

このようなモデルと枠組みを備えた研究としては、Eyckmans の一連の論文がある (Eyckmans [1, 2, 3])。Eyckmans はそれらの論文の中で提携型の協力ゲーム解とナッシュ均衡解を分析している。統合モデルとしては、Nordhaus らの RICE モデルを利用している<sup>1</sup>。ナッシュ均衡を地域分割された統合モデルによって実証的に求めているという点の先駆性は大きく評価されるべきである。一方で、現実の交渉過程で一定の国や地域がグループを形成し協力して望ましい結果を追求するということはあり得ても、利得の移転も含めた提携は、現実の温暖化交渉においては影響ある戦略になってはいない<sup>2</sup>。

本稿では、地球温暖化交渉が決裂した場合における均衡を Eyckmans と同様に、地域分割した統合モデルのナッシュ均衡とし、交渉が妥結した場合の状態を統合モデルをもとにしたナッシュの交渉解とする。その二つの解によって与えられる各国の厚生水準の差は、各国の交渉態度に影響を与えるはずである。交渉によって失われる損失が大きな国は、交渉に対する依存性が高く、交渉の決裂を極力回避しようとする可能性がある。一方、その差が小さな国は、交渉に対して消極的になるか、あるいは逆に、決裂覚悟で大胆な要求を提示する可能性もある。

本稿の目的は、第 1 に、交渉決裂による損失率を交渉指向性指標として定量的に測定すること、第 2 に、交渉の決裂と妥結がその後の温暖化削減プロセスにどのように影響を与えるのかを分析することである。

そのために、世界を 10 地域に分割した統合評価モデルを用いてナッシュ均衡とナッシュの交渉解を比較し、交渉が合意することによる効果を評価するとともに、各地域の交渉に対する指向性を指標化する。モデルは、Nordhaus の DICE2007 モデル (Nordhaus [12]) をもとに、2005 年時点の最新データによって地域別パラメータを与えたものである。ただし、被害係数など一部のパラメータについては RICE1999 (Nordhaus [11]) のものを用いた。

## 2 交渉指向性の定義

交渉指向性をとらえるには、各国が交渉し合意した場合の排出系列がどのようになるか、同じく決裂した場合の排出系列がどのようになるかを確定しなければならない。交渉が決裂した場合には、それぞれの地域が自己の利害のみに関心を持ち行動することが前提となるが、地球環境と

<sup>1</sup>RICE モデルについては、Nordhaus [11]などを参照。

<sup>2</sup>地球環境をめぐる交渉における、提携の理論的分析については藤田 [4] など、少なくない研究が存在している。また、動学的モデルを用いてナッシュの交渉解を含む理論的分析したものとしては柳瀬 [17]がある。

いう公共財を共有しているために、他国の行動の影響を回避できない。このような場合の均衡はナッシュ均衡によって把握することが一般的である。ナッシュ均衡は、関係するすべての主体について、他者の行動を与えられたものとして、自己の最適化が達成されている状態である<sup>3</sup>。

一方、交渉が合意に到達したときの排出系列は、少なくともパレート最適なものではなければならないのは明らかだろう。そのほか、いくつかの妥当な公理を満たす解としてナッシュの交渉解があり、本稿ではこの解によって合意に達した場合の排出系列を与えることにする<sup>4</sup>。

交渉指向性の指数は、ナッシュ均衡とナッシュの交渉解の差の割合によって定義される。世界は交渉に成功しないかぎり、それぞれの地域が独自に最適化を行う状態になり、その状態をナッシュ均衡としてとらえる。ナッシュ均衡状態によって到達する地域の厚生水準を  $\bar{U}$  であらわし、交渉によって到達した最適水準を  $\hat{U}$  とすると、

$$\frac{\hat{U} - \bar{U}}{\bar{U}}$$

を交渉指向性指数と定義する。

以下、より精密に議論しておく。

まず、ナッシュ均衡を単純なモデルによって定義する。地域を  $i$ 、時間を  $t$  で区別しよう。各国は、排出の戦略  $E_t^i$  で選択する。 $E_t^i$  は各地域の経済変数によって決まるものであり、本稿のモデルをあらわした Appendix1 の式 (6) にあらわされている。

ただし、それぞれに地域は、ほかの地域とは独立に総排出に関する排出上限を持っている。すなわち、

$$\sum_{t=0}^n E_t^i \leq E_{max}^i$$

この排出と大気温度  $T_t$  が各国の厚生水準  $u_t^i(E_t^i, T_t)$  に影響を与えよう。割引ファクターを  $\beta_t < 1$  で世界共通であるとする。各国は相互に貿易はせず、相互の関係は大気温度で代表される地球環境を通してのみであると想定する。このとき、各国の厚生水準  $U^i$  の現在価値は次のようにあらわされる。

$$U^i = \sum_{t=0}^n \beta_t u_t^i(E_t^i, T_t) \quad i = 1, 2, \dots, m$$

一方、地球の平均気温は、総排出量に依存する。

$$T_t = T_t \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^t E_{t-j}^i, T_{t-1}, T_{t-2}, \dots \right)$$

いま、各国の排出の時系列ベクトルを  $E^i = (E_0^i, E_1^i, \dots, E_n^i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  とする。したがって、 $U^i$  を次のようにあらわすことができる。

$$U^i = U^i(E^1, E^2, \dots, E^m).$$

このとき、ナッシュ均衡  $\bar{E}^1, \bar{E}^2, \dots, \bar{E}^m$  は次の問題の解としてあらわされる。

$$\begin{aligned} \max_{E^i} \quad & U^i(\bar{E}^1, \dots, \bar{E}^{i-1}, E^i, \bar{E}^{i+1}, \dots, \bar{E}^m) \quad i = 1, 2, \dots, m \\ \text{s.t.} \quad & \\ & \sum_{t=0}^n E_t^i \leq E_{max}^i \end{aligned}$$

<sup>3</sup>ナッシュ均衡については、岡田 [13] など参照。ナッシュのオリジナルは Nash [8].

<sup>4</sup>ナッシュの交渉解については Thomson [14]. 山中 [7] にわかりやすい解説がある。Nash のオリジナル論文は Nash [9].

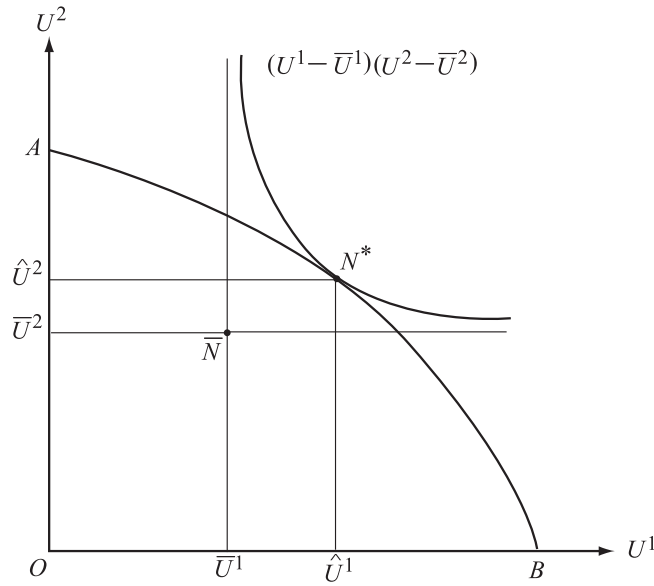


図 1: ナッシュ均衡と交渉解

このナッシュ均衡によってもたらされる厚生水準を  $\bar{U}^i$  としよう。

次にナッシュの交渉解を定義する。

厚生水準に関する実行可能ドメイン  $D$  を次のように定義する。

$$D = \left\{ (U^1, U^2, \dots, U^m) \mid \sum_{t=0}^n E_t^i \leq E_{max}^i \quad i = 1, 2, \dots, m \right\}$$

このとき交渉解は次の問題の解として与えられる。

$$\begin{aligned} & \max_{U^1, U^2, \dots, U^m} \quad \prod_{i=1}^m (U^i - \bar{U}^i) \\ & \text{s.t.} \\ & (U^1, U^2, \dots, U^m) \in D \end{aligned}$$

この交渉解によってもたらされる厚生水準を  $\hat{U}^i, i = 1, 2, \dots, m$  としよう。通常、交渉解はパレート最適解のうちの一つである。

これによって交渉指向性  $\Gamma_i$  の指数が次のように定義される。

$$\Gamma_i = \frac{\hat{U}^i - \bar{U}^i}{\bar{U}^i}$$

すなわち、交渉決裂の結果として世界がナッシュ均衡に陥ることによる厚生損失の割合として定義される。

ナッシュ均衡と交渉解の状態を、2 国の場合について図 1 に示している。

## 3 モデルとデータ

### 3.1 DICE2007 モデルの変形

Nordhaus の DICE-2007 モデルは、世界経済と温暖化に関する地球物理的システムを統合して扱うことのできるモデルである。モデルの構成を記述した文書だけでなく、非線形最適化を可能にする GAMS ソフトウェアで解くことができるプログラムも用意されている。このモデルの詳細については、原著を参考にさせていただきたい。

DICE-2007 は世界を一つに集計したモデルであり、それをそのまま本研究に必要なモデルとすることはできない。世界が一つとなれば、交渉の余地はないからである。これに先立つ RICE1999 は、地域分割を行ったモデルである。この DICE-2007 に対応した地域分割モデルについては、現在、構成中であるという予告はあるものの本論文執筆時点では発表されていない。したがって、われわれは DICE-2007 の基本構造を維持し、世界の各地域が同一の経済社会構造を持っているという想定の下で地域分割を行った。分割された地域は、日本、米国、中国、インド、EU、ロシア、中東、高所得国、中所得国、低所得国である。それぞれの地域を構成している国については、Appendix2 に示している。

地域分割するにあたって、DICE-2007 に加えた主要な変更は、温暖化対策への参加率パラメータを削除したことである。バックストップ技術費用関数など、他の構造については、そのほとんどを本稿の地域モデルに踏襲している。また、地球物理的システムを記述している部分は、構造とパラメータを全く同じものとして用いている。

変形したわれわれのモデルの数学的な体系については Appendix1 に示している。

### 3.2 地域別データの作成

地域分割によって必要となった地域データ作成の概要を以下に示しておこう。

二酸化炭素排出については、Energy Information Administration, International Energy Annual 2005 H.1co2, World Carbon Dioxide Emissions from the Consumption and Flaring of Fossil Fuels, 1980-2005<sup>5</sup>。

GDP については、World Economic Outlook Database, October 2007,<sup>6</sup> Gross domestic product based on purchasing-power-parity (PPP) valuation of country GDP. に依拠している。PPP (購買力平価) データもまたこれに同じである。

世界人口については、UN. World Population Prospects: The 2006 Revision, Medium Variant,<sup>7</sup> に依存している。

資本ストックデータについては、以下のような推計を行った。

(1) OECD, OECD.Stat の Fixed Capital Stock データに記載のある国については、その 2000 年～2005 年データを用いた。(Austria, Belgium, Finland, France, Germany, Italy, Netherland, Portugal, Australia, Japan, Denmark, South Korea, Sweden, USA, Hungary) 一部の年のデータが欠落している場合には、資本係数の同一性を仮定して推計した。その際の GDP は、OECD の名目 GDP のデータを用いている。

(2) ロシアについては、Rossiiskii statisticheskii ezhegodnik, Moscow: Goskomstat Rossii, (『ロシア統計年鑑』、2006 年版、p.323) の固定資本データ (2000 年～2005 年) を直接用いた。

<sup>5</sup><http://www.eia.doe.gov/iea/>

<sup>6</sup><http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2007/02/weodata/download.aspx>

<sup>7</sup><http://esa.un.org/unpp/>

	CO2 10 <sup>6</sup> t-C	GDP 10 <sup>12</sup> US\$	POP 10 <sup>6</sup>	CAPITAL 10 <sup>12</sup> US\$	TFP	CAP /GDP	LAB /GDP
JAPAN	335.6	3.942	127.9	9.119	0.068070	2.313	32.44
USA	1624.6	12.208	299.8	35.687	0.077100	2.923	24.56
CHINA	1451.6	8.854	1313.0	20.212	0.023587	2.283	148.29
INDIA	317.9	3.740	1134.4	7.659	0.014765	2.048	303.34
EU	1166.1	13.288	490.4	36.504	0.059067	2.747	36.91
RUSSIA	462.5	1.580	144.0	3.112	0.034669	1.970	91.11
MiddleEast	439.8	1.853	264.7	4.177	0.024301	2.255	142.87
HighIncome	529.3	3.820	131.1	9.193	0.064674	2.407	34.32
MiddleIncome	706.1	6.746	687.4	13.627	0.031819	2.020	101.89
LowIncome	655.4	5.811	1922.1	20.498	0.011806	3.527	330.76
WORLD	7688.9	61.841	6514.8	159.790	0.028872	2.584	105.35

表 1: 2005 年の地域データ

(3) その他の国については、まず、Nehru [10] の 1990 年データをベンチマークとした。その後、通貨改革のあった、Mexico, Turkey, Brazil, Zimbabwe, Uruguay, Mozambique, Azerbaijan, Nicaragua の国について、調整を行った。それ以後、2004 年までの投資データ (IMF, International Financial Statistics) を用いて、2005 年ストックを導出した。なお、投資データの部分的な欠落部分は、データが存在する直近の年の資本係数を同一として、GDP データから計算可能なものはそれを用いた。欠落年の GDP データがない場合は、できるだけ近い年の投資データに等しいという仮定をおいて求めた。また、ベンチマーク資本ストックおよび投資は GDP デフレータを用いて 2005 年価格で統一している。

(4) さらに、世界を JAPAN, USA, CHINA, INDIA, EU, RUSSIA, MiddleEast, HighIncome, MiddleIncome, LowIncome EE, LowIncome Africa, LowIncome OtherAsia, LowIncome Other-America, LowIncome Oceania, LowIncome ROW の地域に分け、EU 以後の地域で、資本ストックデータの無い国がある場合は、地域内では資本係数が同じとして、GDP データから補完した。

(5) 全データを PPP レートで、世界ドルの値に変換した。ただし、Zimbabwe については、通貨改革のためと思われる PPP データの不適合によって  $ppp=1$  と想定した。

作成されたデータのうち、2005 年時点のものを表 1 にまとめておいた。ただし、全要素生産性 (TFP) については資本の弾力性を 0.3 として推計している。

また、以下、CO2 に関しては炭素換算である。

## 4 シミュレーションの方法

二つのシミュレーションを取り上げる。第 1 に、各国の CO2 排出をもたらず資源、同じ意味で、CO2 の排出枠が余裕を持って与えられる場合である。各地域に、総排出 800Gt-C が割り当てられる。こちらをシミュレーションの A とする。第 2 に、排出枠が人口に比例して割り当てられ、制約がより強められる場合である。世界の総排出を DICE-2007 で用いられている 6000Gt-C とし、2050 年の推計人口の比率で、各地域に割り当てられる。こちらをシミュレーションの B とする。この二つの場合について、ナッシュ均衡と交渉解を求めた。

シミュレーション期間は、30期でおこなった。1期は、10年であるから2005年から300年間のシミュレーションである。実際に300年間のシミュレーションを必要としているわけではなく、当面必要な100年間の結果が終端条件によって影響を受けない程度の長さということで、300年を選択している。

各パラメータは、地域分割によって維持できないものを除いてNordhausのDICE-2007モデルの最適解を求める場合のものを用いている。特に、地球物理的なパラメータは、全く同じである。主要パラメータの一部をAppendix1に示しておいた。

被害係数については、RICE-1999のものを用いている。被害関数の想定そのものは、RICE-1999とDICE-2007で変わってはいない。被害係数は、モデルのパフォーマンスを規定する大事な要素だが、今回新たに推計することはできなかった。IPCCの第4次レポートには、温暖化からくる被害について詳細なレポートが掲載されていて、本来、これに基づいた地域別被害関数の推計が必要だが、膨大な作業が要求されるために、今回は新規の推計を断念せざるを得なかった<sup>8</sup>。

ナッシュ均衡は著者が開発したGENESとGENECという二つのソフトウェアを用いて解いた<sup>9</sup>。GENESはサーバーであり、GENECは一つの地域を担うクライアントである。サーバーとクライアントはネットワーク上におかれる。GENESは初期条件を決定するとともに、各地域クライアントからの、最適排出量の報告を受け取る。また、地域クライアントの要求に応じて、ほかの地域の現状の排出水準を提供する。各地域は、他地域の総排出量を与えられたものとして、自己の最適化を図る。当然その場合、自己の排出量の変化だけが、地球の平均気温の変化をもたらす自己の被害の変化量を決める。

各地域クライアントは、非同期的に自己の最適化を行うわけである。ただし、地域クライアントは、ほかの地域の総排出量が前回の状況と一定の誤差以上に変化していない限り、最適化を行わない。そして、すべての地域が最適化を行わなくなった状態がナッシュ均衡となる。すなわち、すべての主体が、他者の状態に基づいて最適な反応をしているわけである。

ナッシュ均衡を求めるこの方法は、均衡が安定でないと発散してしまい解を得ることができないが、本論文では紹介していないものも含めて、試みたすべての場合について、ナッシュ均衡は強い安定性を持っていた。最終状態がナッシュ均衡であることは、各地域の最適化の結果としてもたらされる地球の平均気温の値、および大気中、海洋上層、海洋深層の二酸化炭素保持水準が等しくなっていることによって確認している。

次に、交渉解の求め方について述べておこう。ナッシュ均衡を、交渉決裂による状態と想定して、ナッシュ積を最大にする点を求めればよいわけであるが、直接推計するには固有の困難が付きまわっている。それは、ナッシュ積が目的関数の誤差をべき乗の次数で増加させるからである。そのために著者が作成したGEBECの場合は、いったん、各地域の総厚生水準を線形の加法型にして最適化を行い、ドメイン $D$ 上のパレート最適点を一つ求め、そこからナッシュ積を最大にする点を求めていくという2段階のアルゴリズムを用いた。その結果、二つのシミュレーションの交渉解を求めることができた。

## 5 シミュレーション結果

まず、それぞれのシミュレーションの直接的結果を示しておこう。

<sup>8</sup>被害関数については、Labriet [6]、Tol [15, 16]を参照。

<sup>9</sup>本論文で用いているシミュレーション用プログラム(GENES, GENEC, GEBEC)については、著者が独自に開発したものであり、希望があれば実行ファイルを無料で提供いたします。また、ソースファイルは、Microsoft Visual Studio C++ 2005で書かれていますが、こちらは、本論文が公開されたのちに、希望者に提供いたします。

	JAP.	USA	CHI.	IND.	EU	RUS.	M.E.	H.I.	M.I.	L.I.
Allocation	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
Nash	254.6	800.0	800.0	800.0	538.2	800.0	800.0	324.5	800.0	800.0
Bargain	202.8	785.8	800.0	237.0	356.5	456.6	800.0	273.1	714.1	542.7
CO2/GDP	0.085	0.133	0.164	0.085	0.088	0.293	0.223	0.139	0.105	0.102

表 2: 地域別排出枠と総排出量: A

## 5.1 余裕のある排出枠：シミュレーション A

均衡解における、各地域の総排出量は表 2 のようになった。

かなり大きな排出枠が与えられているので、ナッシュ均衡においても排出枠を使い切らない地域があらわれている。日本、EU、高所得の 3 地域である。もともと、経済規模が相対的に小さいことが原因である。最下段を見ても分かるように、二酸化炭素排出係数は必ずしも要因とはいえない。ナッシュ均衡の場合、すべての排出枠を使い切らないということは、二酸化炭素排出が経済成長の制約要因にならないことを意味している。すなわちそれは、これらの地域が通常の最適成長シミュレーションに過ぎなくなっているということである。

交渉解になると、パレート最適状態になるために、各地域の総排出量は多くの地域で排出枠に届かなくなる。それでも、中国と中東が排出枠を使い切っている。もう一つ注目すべきことは、インドと低所得地域が、ナッシュ均衡においては、排出枠を使い切っているにもかかわらず、交渉解においては、著しくその排出量を低下させることになっている点である。これらの地域は、成長経路の特色に国際交渉に大きく影響を受けることを意味している。ただ、それがどの程度、厚生水準に影響を与えるかはのちに調べる。

ナッシュ均衡における CO2 排出量の時系列は図 2 に与えられている。ここで各期の排出量は 2005 年から 2015 年までを第 1 期として、以下、10 年単位の値 (Gt-C) になっていることに注意されたい。また、CO2 排出削減率の時系列は図 3 に与えられている。ただし、この削減率の意味は、特定の期からの減少を表すのではなく、各期における費用をかけた削減努力の割合を表す。Appendix1 に示されているここでのモデルに即して言えば、式 (6) における  $\mu$  が削減率を表し、その割合だけ排出が低下する。一方、その排出削減によって式 (8) の分子に現れるような費用がかかる。その意味で、削減に努力しない状態からの減少分であり、温暖化ガス排出の制御率と呼んだほうが妥当かもしれない。

第 1 期が 2005 年で以後 10 年単位で 290 年間の結果である。最終期は、終端条件の影響で極端な値になるので除外している。われわれが関心を持つのは、せいぜい今後 100 年程度の期間であるから、注目すべきは、第 10 期前後までである。が、ここではさしあたって、全体を見てみよう。日本、EU、高所得国は、排出枠とは無関係な成長になっている。他の地域は、排出枠を 30 期間の全体の中で最適に配分している。将来の効用は割り引かれるために、経済成長とともに初期の時点で強く排出枠を使っていることが分かる。

2100 年前後までの動きをみると、アメリカ、中国、EU の排出量がやや目立つが、全体として積極的な削減努力がされていない状況を読み取ることができる。ただし、削減率の第 1 期は、0.005 に固定している。

第 2 期 (2015 年-2025 年) における削減水準を表 3 に示している。ここでも、削減率の小ささが目立っている。

交渉解における CO2 排出量の時系列は図 4 に与えられている。また、交渉解における削減率の



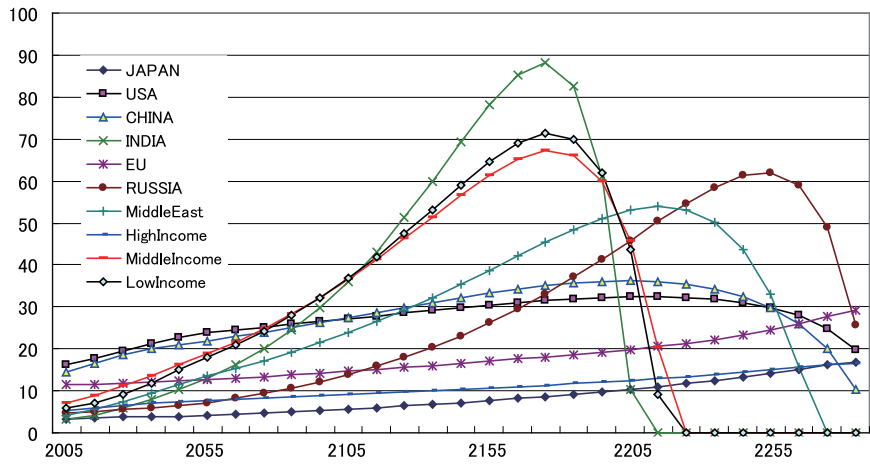


図 2: ナッシュ均衡経路における CO2 排出: A

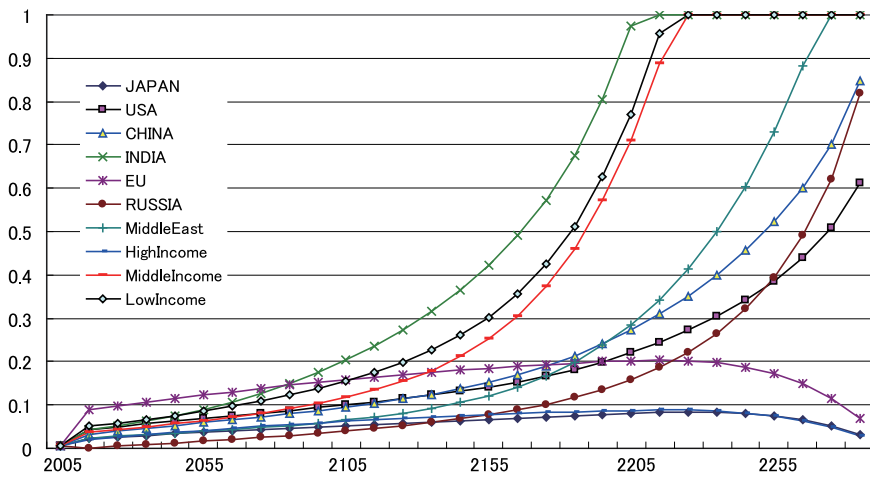


図 3: ナッシュ均衡経路における排出削減率: A

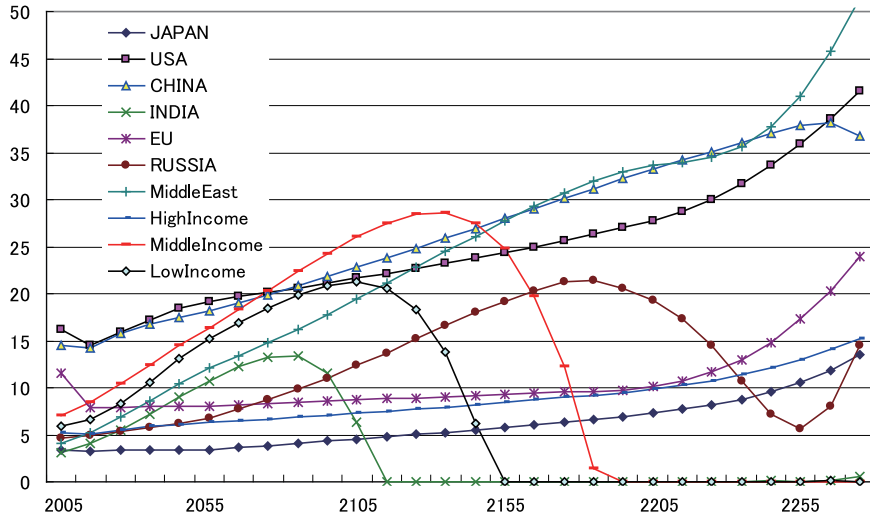


図 4: 交渉解経路における CO2 排出: A

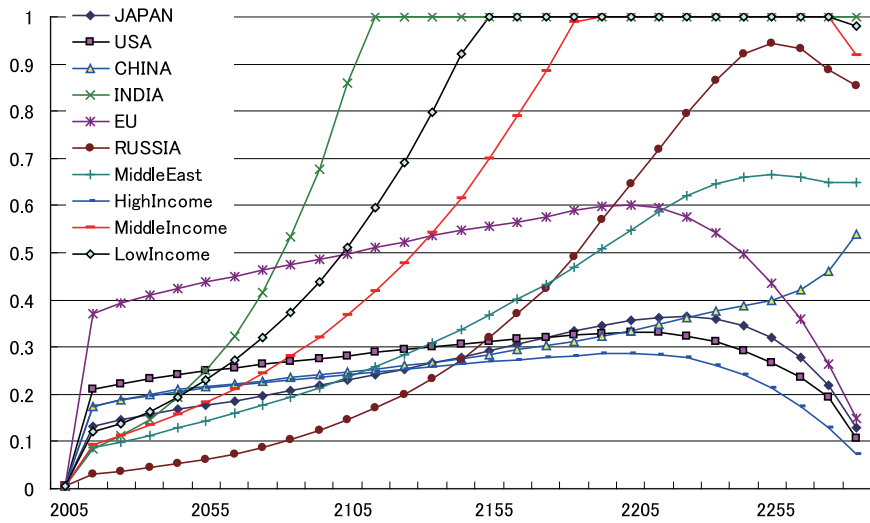


図 5: 交渉解経路における排出削減率: A

	JAP.	USA	CHI.	IND.	EU	RUS.	M.E.	H.I.	M.I.	L.I.
Nash	2.3	4.4	3.3	4.2	8.8	0.1	2.4	1.9	3.7	5.2
Bargain	13.1	21.2	17.4	8.5	37.0	3.0	8.6	17.3	9.4	12.0

表 3: 2015-2025 期間の各地域の削減率 (%): A

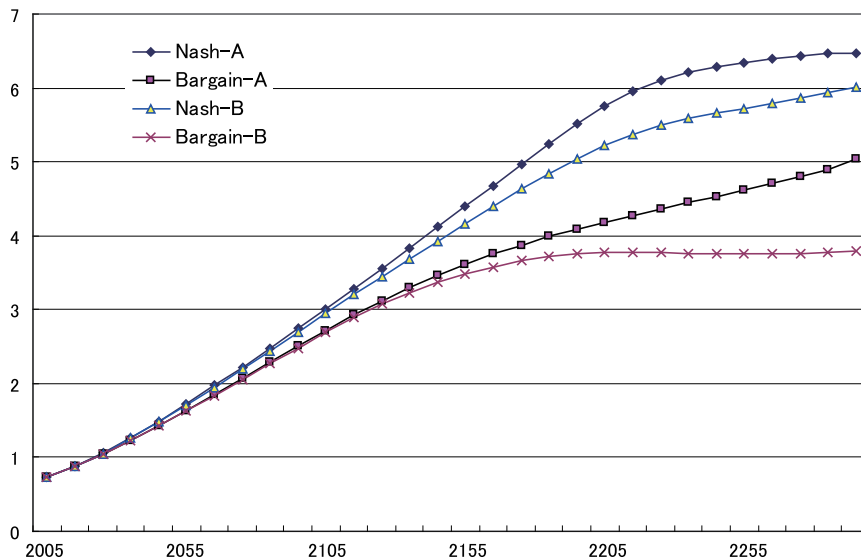


図 6: ナッシュ均衡と交渉解における平均気温上昇 (1900 年と比較した上昇温度): A および B

時系列は図 5 に与えられている。

先に述べたように、排出量は全体として大きく減少している。それは、削減率の状況からも確認でき、極めて早期からすべての地域が大きく削減に向けてかじを取っていることが分かる。第 2 期 (2015 年-2025 年) における削減水準を表 3 に示している。

交渉の結果として、最も高い削減率水準に合意するのは EU であり、以後、米国、中国、高所得国、日本の順になっている。また、図から、インドや中東、そして低所得国は今世紀後半における高い削減率を実現する結果になることが分かる。また、交渉によってロシアは一貫して低い水準の削減に合意することも分かる。また、ナッシュ均衡の場合と比較すると、米国の大きな変化が目され、高所得国や日本の変化も著しいことが分かる。

地球の平均気温の上昇率がナッシュ均衡の場合と交渉解の場合でどのように異なるかを示しているのが図 6 である。Nash-A と Bargain-A を比較してみると、たとえ交渉が合意したとしても第 1 に今世紀中の大きな効果は期待できないこと、また、どちらにしても次世紀以降の気温上昇がもたらされることが分かる。

## 5.2 人口比の排出制約：シミュレーション B

世界の排出総量を 6000Gt と小さくし、2050 年時点の予測人口比で各地域に割り当てた場合のシミュレーション結果を示す。

	JAP.	USA	CHI.	IND.	EU	RUS.	M.E.	H.I.	M.I.	L.I.
Allocation	66.9	262.7	919.7	1082.5	313.0	70.4	312.2	98.4	578.5	2295.7
Nash	66.9	262.7	919.7	1082.5	313.0	70.4	312.2	98.4	578.5	2295.7
Bargain	66.9	262.7	919.7	205.3	277.2	70.4	312.2	98.4	535.8	399.9

表 4: 地域別排出枠と総排出量: B

	JAP.	USA	CHI.	IND.	EU	RUS.	M.E.	H.I.	M.I.	L.I.
Nash	4.7	10.0	3.1	4.2	9.1	3.6	2.9	7.1	3.8	5.2
Bargain	13.9	24.8	16.8	8.3	36.6	4.9	9.4	19.1	9.6	11.6

表 5: 2015-2025 期間の各地域の削減率 (%): B

まず、地域別排出枠と結果的な総排出をまとめると表 4 のようになる。シミュレーション A とは異なり、ナッシュ均衡においてはすべての地域が排出枠を使い切っている。交渉解においては、インド、EU、中所得国、低所得国が排出枠を使い切らない。とくに、インドと低所得国が交渉において著しく総排出量を低下させていることは、シミュレーション A と同じである。

ナッシュ均衡経路における CO<sub>2</sub> 排出の時系列を図 7 に示した。低所得国が上限のない上昇を続けているように見えるが、実際は 180Gt-C のレベルで減少に反転している。シミュレーション A では、排出量制約とは無関係に成長した国も、このシミュレーション B においては、最後には、排出量を減少させる同じような経路を描いていることである。

排出削減率の経路は、図 8 に示されている。まず、初期における削減率はシミュレーション A と同様にごく小さな値である。しかし、削減率は比較的急速に増大する様子が描かれている。

2015 年から 2025 年の削減率は表 5 のようになる。ナッシュ均衡の削減率は、シミュレーション A とかなり大きなものとなっているが、交渉解の水準は大きく異ならないという特徴を読み取ることができる。

交渉解の時系列は図 9 および図 10 に示している。

シミュレーション A と比較すると、次世紀以降の変化は著しいが、それとの比較でみると今世紀中の変化は比較的小さなものであると判断できる。ここでも、交渉解の状況は、排出制約の影響を相対的に受けにくいことが分かる。

シミュレーション B の平均気温の変化を、図 6 に立ち戻って確認しておこう。今世紀中の平均気温はシミュレーション A と大きく異ならないが、次世紀以降では明確な違いがあらわれる。特に、シミュレーション B では、次世紀以降の平均気温が 1900 年比で 4 度弱の上昇で安定化することが分かる。

### 5.3 交渉指数の導出

前節で示した二つのシミュレーションに関する交渉指数を導出しよう。まず、前提として、第 1 に、本モデルにおける各国の厚生水準は、前提とする効用関数の性質から負の値で示されることを知っておいていただきたい。第 2 に、本シミュレーションでは、解を効率的に求めるためにナッシュ均衡において各国の最終的な厚生水準が -10000 となるようにスケールを調整している。このスケールの調整は、地域の目的関数の正数倍が結果に影響を与えないので、前節で示したナッシュ

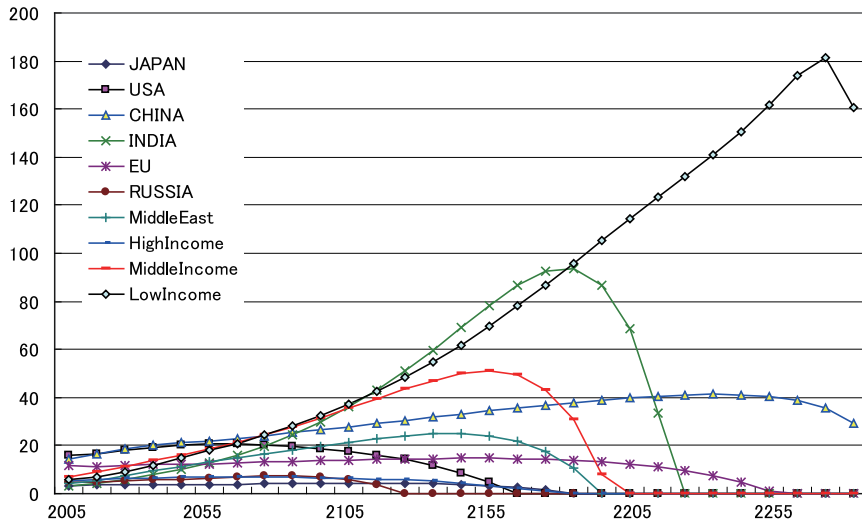


図 7: ナッシュ均衡経路における CO2 排出: B

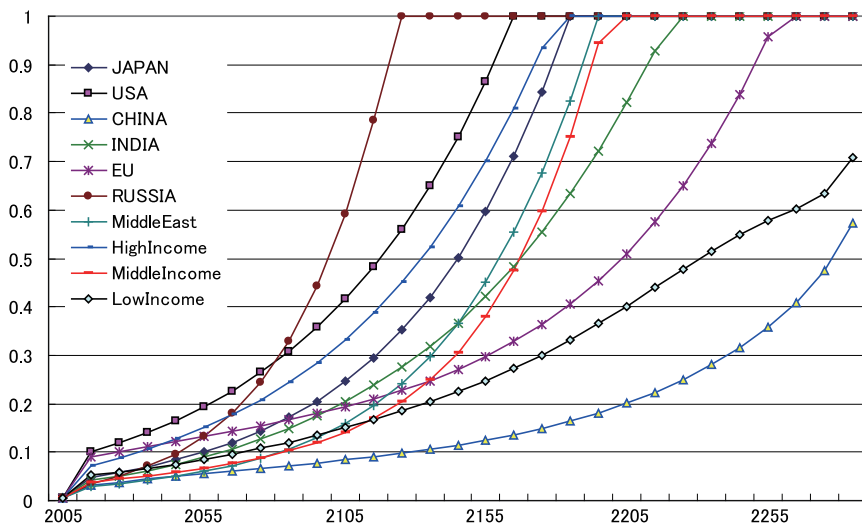


図 8: ナッシュ均衡経路における排出削減率: B

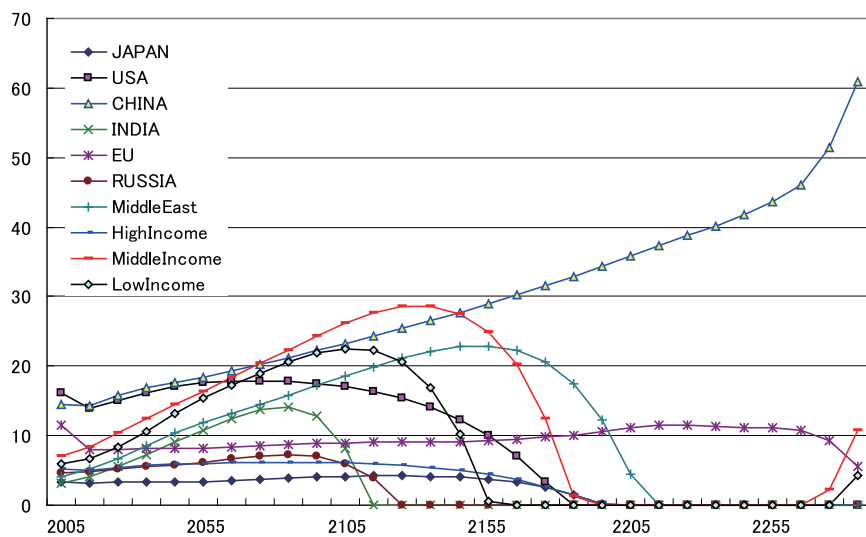


図 9: 交渉解経路における CO2 排出: B

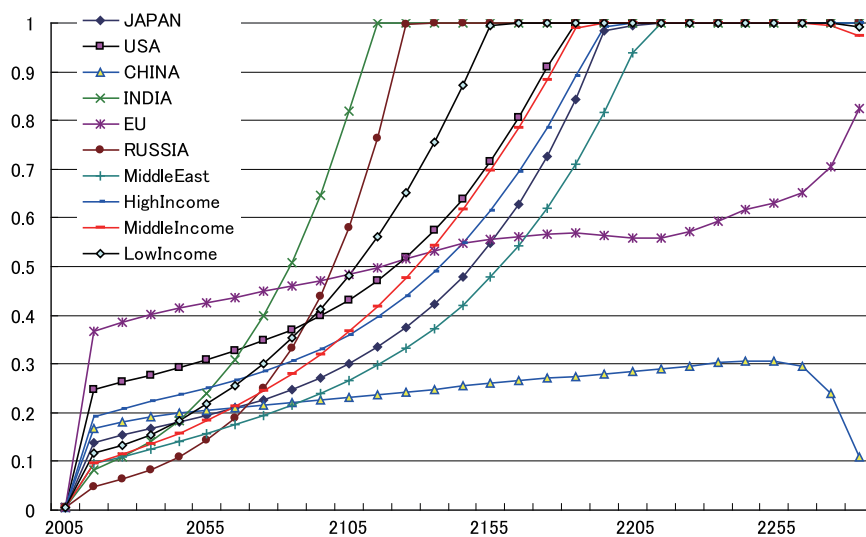


図 10: 交渉解経路における排出削減率: B

	JAP.	USA	CHI.	IND.	EU	RUS.	M.E.
A Nash	-10000	-10000	-10000	-10000	-10000	-10000	-10000
A Bargain	-9986.2	-9991.6	-9991.7	-9994.1	-9976.2	-9997.5	-9990.0
A Index	13.8	8.4	8.3	5.9	23.8	2.5	10.0
B Nash	-10000	-10000	-10000	-10000	-10000	-10000	-10000
B Bargain	-9987.5	-9991.3	-9993.3	-9995.2	-9980.1	-9997.4	-9990.0
B Index	12.5	8.7	6.7	4.8	19.9	2.6	10.0

	H.I.	M.I.	L.I.
A Nash	-10000	-10000	-10000
A Bargain	-9980.7	-9996.1	-9993.3
A Index	19.3	3.9	6.7
B Nash	-10000	-10000	-10000
B Bargain	-9982.1	-9996.6	-9994.7
B Index	17.9	3.4	5.3

表 6: 推計された交渉指向性の指数

均衡解に全く影響を与えない。また、ナッシュ交渉解の性質から、スケール調整された厚生水準を用いてもナッシュ積の最大化点は同じ結果をもたらすことがわかっている。

以上を前提に、二つのシミュレーションにおいて、ナッシュ均衡と交渉解でそれぞれの地域がどのような厚生水準を実現しているかを示そう。結果は、表 6 に示している。A Index がシミュレーション A から導かれた指数であり、B Index がシミュレーション B の結果である。指数は単純に、交渉解とナッシュ均衡との差になっているが、先に与えた定義から見れば、10000 倍しているものと考えればよいだろう。シミュレーション A の EU が交渉によって総厚生水準が 0.24% 増加しているが、これは、温暖化交渉とその妥結が、経済の全体から見て深刻な厚生増加をもたらさないことを意味している。

これらを、指数の値の順に並び変えたものを図で示すと、図 11 のようになる。

二つのシミュレーションを比較をすると、順位に違いはない。制約を厳しくしたほうが、交渉に対する指向性が少し低下することが分かるが、その程度はそれほど大きくはないことがわかった。

## 6 結果の分析

これまでの結果から、考察すべき二つのテーマが存在する。第 1 に、ナッシュ均衡の状態から交渉解の状態に変化するときに、CO<sub>2</sub> 排出減少の差異を生み出す要因である。第 2 に、交渉指向性の差異を生み出す要因である。様々な要因を考察できるシミュレーションモデルに基づいているので、単純な答えを出すことはできないが考えるべき要素を以下に示そう。

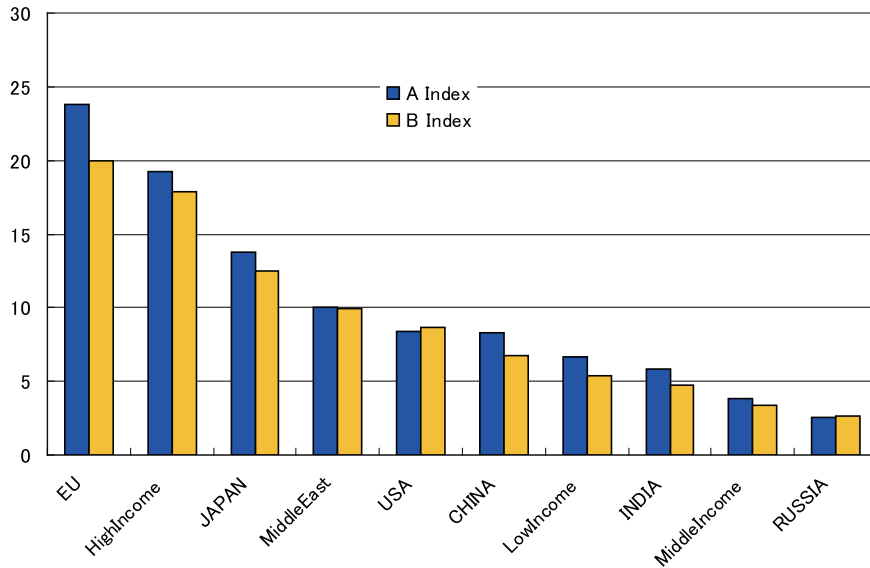


図 11: 交渉指数の順位表示

## 6.1 パレート最適解と交渉解

本稿におけるシミュレーションの場合、構造方程式そのものはそれぞれの国で違いはない。各国の差異が生み出されるのは、パラメータと外生変数の違いによる。そのうち主要なものである人口、GDP、TFP、技術進歩率、CO<sub>2</sub> 原単位とその変化率については、表 1 などで示してきているので、それを参照されたい。

シミュレーション A において、ナッシュ均衡から交渉解への移行の中で、最も CO<sub>2</sub> 排出を減少させているのはインドであり、ついでロシア、低所得国、EU の順になっている。シミュレーション B においては、低所得国、インドの減少率が著しく、次いで EU となっている。とくに、インドと低所得国について、ナッシュ均衡から交渉解への排出量の著しい変化がみられる。

ナッシュ均衡は、それぞれの地域が自地域の総効用水準を最大化するという目的を達成するものとして与えられる。これに対して、交渉解はナッシュ積を最大にするものとして与えられる。交渉解はパレート最適解の一つであり、ナッシュ均衡よりパレート改善が図られていることは確実に予測でき、したがって、各国の排出量は抑制されることは明らかである。しかし、ナッシュ積最大化という目的が達成されることから、各国にどのような影響を与えるのかは、直ちに予測できるものではない。

まず、このような変化が、そもそもナッシュ均衡からパレート最適点への変化によってもたらされるのか、それとも、パレート最適解一般への変化の中で特に交渉解、すなわち、ナッシュ積の最大化という特有の性質によってもたらされるのかということを検討しておく必要がある。これを確認するために、ナッシュ積を最大にするのではないパレート最適点と、これまで示している交渉解における排出量の違いを見ておこう。図 12 に示している。A-Bargain は、交渉解における各地域の排出量である。A-Even は目的関数を各地域の目的関数を単純に合計して求めたパレート最適点における各地域の排出量である。A-UnEven は、各地域の目的関数にあるウェイトをかけて求めたパレート最適点における各地域の排出量である。これを見てわかることは、第 1 は、われわれ



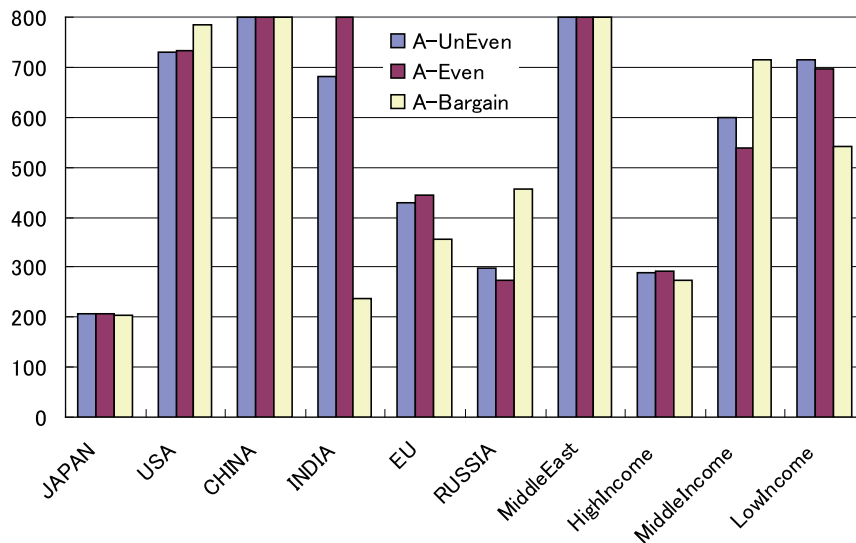


図 12: 交渉解と一般のパレート最適点における CO2 排出量

の注目しているインドについては、交渉解において大きく排出量を減少させているという事実である。第 2 に、低所得国はナッシュ均衡において、すでにかかなりの排出量の減少を行ってしまっていることである。さらに交渉解において減少させて全体としてナッシュ均衡の 800Gt という排出から大きな減少を実現している。

もともと、インドと低所得国は大きな人口ポテンシャルをかかえていて、それによって高い生産水準を確保する力を持っている。それが大きさがまた逆に CO2 排出を減少させる余地をもたらしている可能性はある。しかし、CO2 排出の減少は、温度上昇を抑制することによって、他国の被害を減少させ厚生水準を上昇させるものではあるが、減少させた国には削減費用という代償が要求される。したがって、インドや低所得国の減少は両国の消費に回す生産の余地を少なくしているのだが、その影響を弱めるほどの自国の被害水準の減少をもたらせば、削減費用をある程度相殺させることができる。インドと低所得国は、この相殺可能性をより大きく持っていることが推測されるのである。

## 6.2 生産性係数と被害係数

モデルの中で、人口や資本ストック賦存量をのぞけば、モデル全体のパフォーマンスを規定するのは、生産関数によってあらわされる生産性と被害関数である。そこで、これらがどのような方向の影響を与えるのかを理解するために、本モデルの基本構造を単純に反映させたミニサイズのモデルを組み立て解析しておこう。

二国 (1,2 で区別される) があって、それぞれの厚生水準  $U^i, i = 1, 2$  が次のように与えられるとしよう。

$$U^1 = \frac{E_1^{\alpha_1}}{1 + \beta_1(E_1 + E_2)}$$

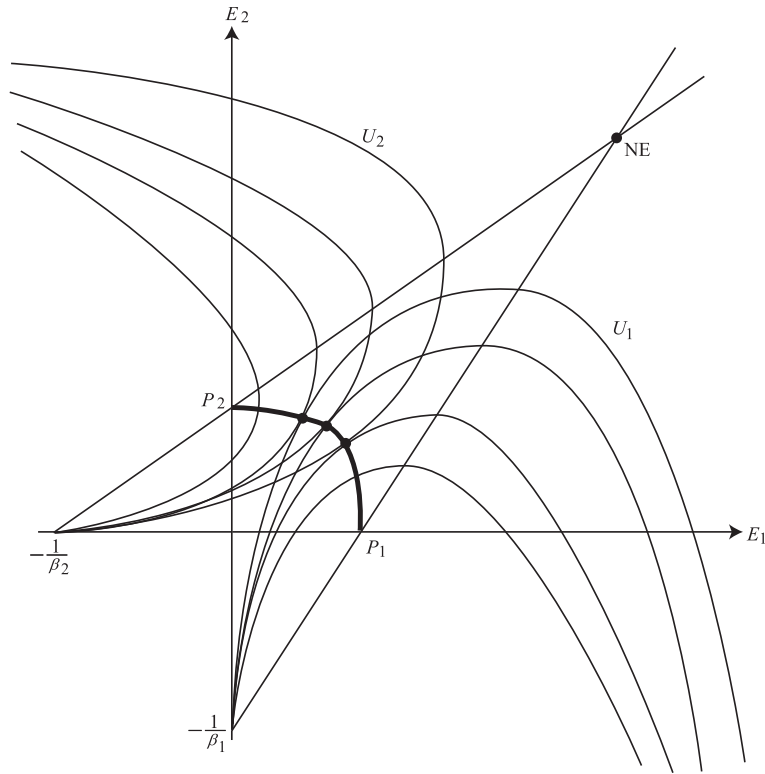


図 13: ミニサイズモデルにおけるナッシュ均衡とパレート最適点

$$U^2 = \frac{E_2^{\alpha_2}}{1 + \beta_2(E_1 + E_2)}$$

ここで、 $E_i, i = 1, 2$  は両国の温暖化ガス排出で、 $\alpha_i, i = 1, 2$  は正の 1 よりも小さいパラメータで生産性をあらわす。また、 $\beta_i, i = 1, 2$  は正のパラメータで温暖化の被害係数である。被害関数の入れ方は、本稿におけるモデルの構造を反映させたものになっている。このとき、生産性のパラメータについて、次の条件が満たされる限り、ナッシュ均衡が存在する<sup>10</sup>。

$$\frac{\alpha_1 \alpha_2}{(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)} < 1$$

このナッシュ均衡点とパレート最適な排出の組み合わせはおよそ図 13 のように描くことができる。ここで、 $P_1, P_2$  をまたぐ太線が、パレート最適な排出の組み合わせであり、ナッシュ均衡は NE 点であらわしている。モデルのパフォーマンスを解析的に明らかにすることは複雑で困難なので、簡単な数値シミュレーションを行った結果を表 7 に示しておこう。

結果から見えることは、被害係数の増加は交渉指向指数を増加させる一方で、ナッシュ均衡と交渉解における排出を減少させる。一方、生産性の増加は、その国の交渉指向指数は増加させるが、他国がそれ以上に上昇することによって、相対的には低下する。ナッシュ均衡においても交渉解においても、生産性の増加した国の排出水準は増加する。

<sup>10</sup>ナッシュ均衡は、第 1 国の場合、次のようになる。

$$E_1 = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{1 - \alpha_1 - \alpha_2} \left\{ \frac{1}{\beta_1} \left( \frac{1}{\alpha_1} - 1 \right) + \frac{1}{\beta_2} \right\}$$

第 2 国については、サフィックスの 1 と 2 を入れ替えたものである。

	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	Index1	Index2	E1 Nash	E2 Nash	E1 Bargain	E2 Bargain
Base	0.3	0.3	1	1	0.202	0.202	0.750	0.750	0.214	0.214
S1	0.3	0.3	1.2	1	0.221	0.184	0.663	0.713	0.182	0.212
S2	0.4	0.3	1	1	0.252	0.338	1.333	1.000	0.346	0.206

表 7: ミニモデルの数値シミュレーション結果

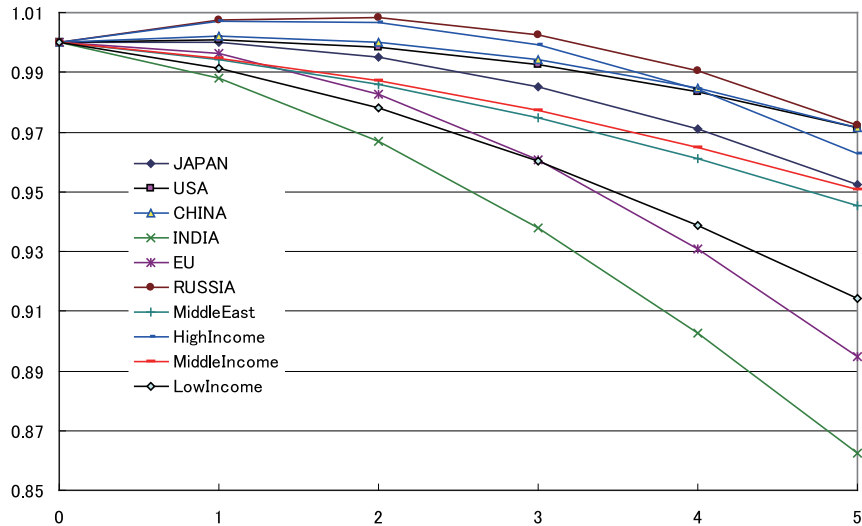


図 14: 地域別被害関数の形状

### 6.3 削減率と交渉指向指数の規定要因

以上を踏まえて、まず、各国の被害関数を見ておこう。

図 14 は、地球の平均気温の上昇によってどれほど GDP が縮小されるのかを示している。全く上昇していない状況では、被害が発生しないのですべての地域の値は 1 となっている。温度が上昇すると、一部地域は、温暖化が好影響となって生産水準にプラスの効果が表示されているが、やがてすべての地域が温度上昇がない状況よりも GDP を縮小させている。そのなかでもインド、EU、低所得国に与える被害が大きいことが読み取られるだろう。

インドと低所得国については、予想通りである。EU についても、一貫して強い削減傾向を持っていることは確認されている。被害の強度は裏を返せば削減のメリットであり、この削減メリットの大きな地域には潜在的に世界全体の厚生水準の増大と自国の削減コストの増大の両者に影響を受けながらも、大きな CO2 削減に向かう動機を与えられるのである。

削減率は被害関数の違いによってある程度説明が可能だが、図 11 にあらわされている交渉指数の国別差異については、簡単に見通せない。指数の上位に入っている国の状況を見れば、生産性の高い国、特に初期の TFP 水準を反映しているようにも思われる。しかし、中東が上位に入っていることなど、そうとも単純に言い切れない要素もある。先のミニモデルでは、 $\alpha$  であらわされるような生産性の違いの場合、この意味での生産性の高さが逆に相対的な交渉嗜好性指数を低下させていることとも、この結果は矛盾しているように見える。ただし、ミニモデルにおける生産性の扱い

は、シミュレーションモデルの複雑な生産性の扱いと対応させることは困難で、ミニモデルの結果を単純に適用することはできない。

このシミュレーション結果に現れた交渉指向性指数の差異は、少なくない要因の相互関係から全体的に現れたと考えることが妥当である。実際、米国を除けば相対的に高所得である国が高い交渉指向性を有していることになっている。米国については、高所得国であるが交渉志向性は高くない。しかし、これもまた今日の世界の現実とある程度対応している。

## 7 まとめ

本稿では、統合シミュレーションモデルを用いてナッシュ均衡解とナッシュの交渉解を求め、それによって実現する各国の厚生水準の変化割合から交渉指向性をもとめた。結果として、現実に近いものが得られたと判断される。

最後に、今後の課題を述べておこう。

第1に、本モデルでは、いずれに解においても、国と国の間の貿易を組み込んでいない。特に、与えられた排出枠の交易、排出権取引を組み込んでいないことは重要な制約となっている。本論文で行っている以上に排出制約をかけたときに、排出権の取引の効果を分析することは不可欠となるが、本モデルではそれを行うことができない。基本的に、これはシミュレーションソフトの改良によって実現可能である。より計算機負荷をかけることになるが、適切な時期にこの制約をはずした分析を行いたい。

第2に、二酸化炭素のシャドープライスが求められていない。これも、シミュレーションの技術的制約であり、早急に改良されなければならないと考えている。

第3に、交渉指向性指数の差異が、現状ではまだ十分分析されていない。この指数の有効性を真に裏付けるためには、交渉指向性を規定する要因を理論的にも実証的にもさらに明らかにしていく必要がある。

## 参考文献

- [1] Eyckmans, J. and Henry Tulkens, 1999, "Simulating with RICE Coalitionally Attable Burden Sharing Agreements for the Climate Change Problem," CESifo Working Paper Series No.228, <http://www.CESifo.de>.
- [2] Eyckmans, J. and Michael Finus, 2003, "Coalition Formation in a Global Warming Game: How the Design of Protocols Affects the Success of Environmental Treaty-Making," Working Paper Series No.2003-17, Faculty of Economics and Applied Economic Sciences, Center for Economic Studies, Energy Transport & Environment, <http://www.kuleuven.be/ete>.
- [3] Eyckmans, J. and Michael Finus, 2006, "New Road to International Environmental Agreements: the Case of Global Warming," *Environmental Economics and Policy Studies*, 7:391-414.
- [4] 藤田敏之, 2002, 「国際協定と提携の安定性」, 所収『環境経済学のフロンティア』, 勁草書房, pp.167-185.

- [5] IPCC, 2007, *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, B.Metz et.al. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, U.K. and New York.
- [6] Labriet,M. and R.Loulou, 2003, Coupling Climate Damages and GHG Abatement Consts in a Linear Programming Framework, *Enviromental Modeling and Assessment*, 8:261-274.
- [7] 中山幹夫, 2005, 『社会的ゲームの理論入門』, 勁草書房.
- [8] Nash,J.F., 1950, Equilibrium Points in n-Person Games,” *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 36:48-49.
- [9] Nash,J.F., 1950, ”The Bargaining Problem,” *Econometrica*, 18:155-162.
- [10] Nehru, Vikram, and Ashok Dhareshwar. 1993. ”A New Database on Physical Capital Stock: Sources, Methodology and Results,” *Rivista de Analisis Economico*, 8(1):37-59.
- [11] Nordhaus,D.William and Joseph Boyer, 2000, *Warming the World — Economic Models of Global Warming*, The MIT Press, London.
- [12] Nordhaus,D.William, 2008, *A Question of Balance — Weighing the Options on Global Warming Policies*, Yale University Press, New Haven & London.
- [13] 岡田章, 1996, 『ゲーム理論』, 有斐閣.
- [14] Thomson, William, 1994, ”Cooporative Models of Bargaining,” *Handbook of Gamge Theory*, Vol.2, Edited by R.R.Aumann and S.Hart, North Holland.
- [15] Tol, Richard S.J., 2002, ”Estimates of the Damage Consts of Climate Change, Part I: Benchmark Estimates,” *Environmental and Resource Economics*, 21:47-73.
- [16] Tol, Richard S.J., 2002, ”Estimates of the Damage Consts of Climate Change, Part II: Dynamic Estimates,” *Environmental and Resource Economics*, 21:135-160.
- [17] 柳瀬明彦, 2003, 「地球温暖化交渉と国際協調の理論：準備的考察」, 名古屋商科大学総合経営・経営情報論集 第47巻2号 2003年3月 (NUCB Journal of Economics and Information Science, Vol.47 No.2, pp.327-336) .

## Appendix1: モデルの構造

### 数式の体系

モデルの基本構造は、DICE2007 モデル (Nordhaus [12]) を踏襲している。以下、モデルの数学的表現を示そう。ただし、 $t$  は期を表わすサフィックスで  $t = 1, 2, \dots, T^{max}$  までの値を持つ。 $T^{max}$  は、最終期である。本モデルでは、10 年を 1 期として 30 期のシミュレーションを行っている。また、サフィックスの  $i$  は地域を示すものである。

まず、各地域の厚生水準は、次の 2 つの式であらわされる。

$$U^i = \sum_{t=1}^{T^{max}} \frac{L_t^i u_t^i}{(1 + \rho)^{t-1}} \quad (1)$$

$$u_t^i = \frac{\left(\frac{C_t^i}{L_t^i}\right)^{1-\alpha} - 1}{1 - \alpha} \quad (2)$$

$L$  は人口水準で、同時に労働力水準でもあると想定している。 $C$  は消費水準であり、 $u$  は 1 人当たりの消費に対する限界効用の弾力性が等しい効用関数で評価されている。 $U$  は地域の総効用であり、割引率  $\rho$  で将来効用は割り引かれている。各期の生産技術を表わす生産関数は、次の式であらわされる。

$$Y_t^i = A_t^i (K_t^i)^\eta (L_t^i)^{1-\eta} \quad (3)$$

ここで、 $Y$  は粗 GDP、 $K$  は資本ストック、 $A$  は全要素生産性である。資本蓄積方程式は次のよう  
にあらわされる。 $I$  は投資で、 $\delta$  は資本減耗率で、すべての地域でひとしいと想定している。

$$K_{t+1}^i = I_t^i + (1 - \delta)K_t^i \quad (4)$$

需給均衡式は次のよう  
にあらわされる。

$$\Omega_t^i Y_t^i = C_t^i + I_t^i \quad (5)$$

$\Omega$  は式 (8) であらわされているように、削減費用と被害による粗 GDP の減少割合を表わすものである。地域の温暖化ガスの排出量  $E$  は次の式で与えられる。

$$E_t^i = (1 - \mu_t^i) \sigma_t^i Y_t^i \quad (6)$$

$\mu$  は排出の制御率、BAU から削減率と考えてよい。 $\sigma$  は排出原単位である。本モデルにおいては各地域に、総排出量の上限  $AE$  が割り当てられると想定している。したがって、次の条件が満たされなければならない。

$$\sum_{t=1}^T E_t^i \leq AE^i \quad (7)$$

温暖化ガスの削減コストと被害関数は次のように統合して与えられる。

$$\Omega_t^i = \frac{1 - B_t^i (\mu_t^i)^\theta}{1 + \psi_1^i T_t^{atm} + \psi_2^i (T_t^{atm})^2} \quad (8)$$

分子は、削減費用を表わしている。このうち  $B$  はバックストップ技術による費用削減効果を含むパラメータである。分母は、大気  
の平均気温上昇による被害を表わしている。

以下は、地球の温暖化メカニズムを表わしたものである。まず、大気中への二酸化炭素の蓄積を表す式は次のようになる。

$$M_t^{atm} = \sum_i E_t^i + E_t^{tree} + b_{11}M_{t-1}^{atm} + b_{12}M_{t-1}^{upp} \quad (9)$$

$M_t^{atm}$  は大気中の二酸化炭素蓄積量である。 $E_t^{tree}$  は森林からの温暖化ガスの排出である。 $b_{11}$  は、前期の大気中の二酸化炭素の持続割合である。 $b_{12}$  は海洋上層から大気中への二酸化炭素の移動割合である。次の式は、海洋下層の二酸化炭素の濃度の式である。 $b_{23}$  は海洋上層から下層への二酸化炭素の移動係数であり、 $b_{33}$  は下層の二酸化炭素の持続係数である。

$$M_t^{low} = b_{23}M_{t-1}^{upp} + b_{33}M_{t-1}^{low} \quad (10)$$

次の式は、海洋上層の二酸化炭素蓄積量である。 $b_{12}$  は大気中から海洋上層への移動係数、 $b_{22}$  の海洋上層の持続率、 $b_{32}$  は下層から上層への移動量である。

$$M_t^{upp} = b_{12}M_{t-1}^{atm} + b_{22}M_{t-1}^{upp} + b_{32}M_{t-1}^{low} \quad (11)$$

次は、放射強制力の式である。

$$F_t = \zeta \log_2 \left( \frac{M_t^{atm}}{596.4} \right) + F_t^{other} \quad (12)$$

$F_t^{other}$  は二酸化炭素以外の温暖化ガスからの放射強制力である。596.4 は産業革命以前の大気中の二酸化炭素濃度である。以下の二つの式は、大気中と海洋の 1900 年と比べた温度上昇分である。

$$T_t^{atm} = T_{t-1}^{atm} + \xi_1 \{ F_{t-1} - \lambda T_{t-1}^{atm} - \xi_3 (T_{t-1}^{atm} - T_{t-1}^{low}) \} \quad (13)$$

$$T_t^{low} = T_{t-1}^{low} + \xi_4 (T_{t-1}^{atm} - T_{t-1}^{low}) \quad (14)$$

## 主要パラメータ

モデルを機能させるためのパラメータは数多くある。DICE2007 モデルのパラメータの多くを踏襲しているが、地域分割したものについては、独自にパラメータを作成したものがある。また、被害関数のパラメータなど、RICE1999 モデルから援用しているパラメータもある。そのすべてをここに示すことはせずに、シミュレーションの特質を規定するパラメータで、本文で示していないものを以下にリストアップしておこう。パラメータの全体を知りたい方には、GENES の初期化ファイル (C++ で記述されている) を提供する。

$\eta$	0.3	$\xi_1$	0.220
$\rho$	0.015	$\xi_3$	0.300
$\delta$	0.1	$\xi_4$	0.050
$\alpha$	2.0	$\zeta$	3.8
b12	0.189288	$\theta$	2.8
b23	0.05		

表 8: 主要パラメータ

## Appendix 2: 地域の定義

EU	Austria, Belgium, Finland, France, Germany, Greece, Ireland, Italy, Luxembourg, Netherlands, Portugal, Spain, Bulgaria, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Hungary, Latvia, Lithuania, Malta, Poland, Romania, Slovenia, Slovakia, Sweden, United Kingdom
MiddleEast	Bahrain, Egypt, Iran, Iraq, Israel, Jordan, Kuwait, Lebanon, Palestinian, Oman, Qatar, Saudi Arabia, Syria, United Arab Emirates, Yemen
HighIncome	Australia, New Zealand, Canada, South Korea, Iceland, Norway, Switzerland, Hong Kong, Singapore, Brunei, Bahamas, Barbados, Trinidad and Tobago, Equatorial Guinea
MiddleIncome	Turkey, Mexico, Malaysia, Maldives, Kazakhstan, Turkmenistan, Thailand, Argentina, Antigua and Barbuda, Saint Kitts and Nevis, Chile, Costa Rica, Uruguay, Brazil, Panama, Grenada, Dominican Republic, Colombia, Croatia, Bosnia and Herzegovina, Azerbaijan, Belarus, Seychelles, Libya, Botswana, Mauritius, South Africa, Tunisia
LowIncome EE	Albania, Armenia, Georgia, Macedonia, Moldova, Montenegro, Serbia, Ukraine, Monaco, Liechtenstein
LowIncome Africa	Algeria, Republic of the Congo, Democratic Republic of the Congo, Central African Republic, Rwanda, Burundi, Sudan, Kenya, Tanzania, Uganda, Djibouti, Eritrea, Ethiopia, Somalia, Angola, Lesotho, Malawi, Mozambique, Namibia, Swaziland, Zambia, Zimbabwe, Benin, Burkina Faso, Cameroon, Chad, Cote d'Ivoire, Cape Verde, Gabon, Gambia, Ghana, Guinea, Guinea-Bissau, Liberia, Mali, Mauritania, Niger, Nigeria, Sao Tome and Principe, Senegal, Sierra Leone, Togo, Comoros, Madagascar, Morocco, Reunion, Western Sahara, Zaire
LowIncome Asia	Kyrgyzstan, Tajikistan, Uzbekistan, Macau, Mongolia, North Korea, Taiwan, Cambodia, East Timor, Indonesia, Laos, Myanmar, Philippines, Vietnam, Afghanistan, Bangladesh, Bhutan, Nepal, Pakistan, Sri Lanka
LowIncome America	Aruba, Bermuda, Belize, British Virgin Islands, Bolivia, Cuba, Dominica, Ecuador, El Salvador, Falkland Islands, Guatemala, Honduras, Paraguay, Peru, Puerto Rico, Venezuela, Cayman Islands, Greenland, Guadeloupe, Guyana, Haiti, Jamaica, Martinique, Montserrat, United States Navassa, Netherlands Antilles, Nicaragua, Saint Barthe'lemy, Saint Lucia, Saint Martin, Saint Pierre and Miquelon, Saint Vincent and Grenadines, Turks and Caicos Islands, United States Virgin Islands, French Guiana, Saint Helena, Suriname, Anguilla
LowIncome Oceania	Christmas Island, Cocos Islands, Norfolk Island, Fiji, New Caledonia, Papua New Guinea, Solomon Islands, Vanuatu, Federated States of Micronesia, Guam, Kiribati, Marshall Islands, Nauru, Northern Mariana Islands, Palau, Cook Islands, French Polynesia, Niue, Pitcairn Islands, Samoa, Tokelau, Tonga, Tuvalu, Wallis and Futuna Islands, Pitcairn, American Samoa
LowIncome ROW	Antarctica, Faroe Islands, Gibraltar, Hawaiian Trade Zone, Former Czechoslovakia, Former Serbia and Montenegro, Former U.S.S.R., Former Yugoslavia, East Germany, West Germany, U.S. Pacific Islands, Wake Island, Andorra, Channel Islands, Faeroe Islands, Holy See, Isle of Man, San Marino