

地球環境対策に関する国際協力のゲーム理論的分析

藤田 敏之

博士学位論文

地球環境対策に関する国際協力の  
ゲーム理論的分析

指導教官 伏見正則教授

東京大学大学院工学系研究科  
先端学際工学専攻

37242

藤田敏之

## 目次

1 序論	1
1.1 地球規模の環境問題	1
1.2 地球環境問題の経済学的分析とゲーム理論	2
1.3 研究の対象	4
2 地球環境問題についての一般的事項	7
2.1 地球温暖化問題	7
2.1.1 一般的事項	7
2.1.2 既存の研究	9
2.2 酸性雨問題	11
2.2.1 一般的事項	11
2.2.2 既存の研究	12
2.3 オゾンホール問題	13
3 静学的分析	15
3.1 協力ゲームの理論	15
3.2 地球環境の協力ゲームモデル	17
3.3 数値計算	18
3.3.1 主な仮定	18
3.3.2 シミュレーション結果	19
3.4 感度分析	21
3.5 まとめ	27
4 動学的分析	29
4.1 動的ゲームとその均衡	29



4.2 地球環境の動的ゲームモデル . . . . .	32
4.3 数値計算 . . . . .	37
4.3.1 主な仮定 . . . . .	37
4.3.2 シミュレーション結果 . . . . .	39
4.4 感度分析 . . . . .	42
4.5 モデルの拡張 . . . . .	48
4.5.1 資本蓄積の導入 . . . . .	48
4.5.2 ルールの見直し . . . . .	49
4.6 まとめ . . . . .	50
5 結論 . . . . .	52
謝辞 . . . . .	55
参考文献 . . . . .	56

## 第 1 章

### 序論

#### 1.1 地球規模の環境問題

現代社会において指摘される問題には、科学技術の発展によってもたらされたものが少なからず存在するが、その中でも深刻かつ緊急であると認識されているのが地球環境問題である。科学技術という手段により、人類は資本を蓄積し生産性を高め、1人あたりの消費や生活の質を向上させてきた。一般的には、これは望ましいことである。しかし20世紀も終盤に入り人口が爆発的に増加した現代の高度科学技術社会では、地球温暖化問題、酸性雨問題、オゾンホール問題、森林破壊問題、土地劣化問題などが顕在化し、人類の活動が地球規模の環境に過度の負荷を与えることが懸念されるようになってきている。

地球全体を1つの大きなシステムと考えると、その中の部分システムとして人類の生産、消費活動を含んだ社会システムがあり、その外側の自然環境システムと相互に関連し合いながら成り立っている。人類は環境から資源の供給を受け、生産活動において資本、労働、技術といった生産要素とともに資源を用い、最終的には廃棄物または汚染物質、排気ガスといった形態で環境に資源を戻す。環境は汚染物質を吸収し、その一部をさまざまなプロセスによって再生する。このような関連があり、社会と自然は平衡状態になっているのである。

さて人類が少数であり、技術が未発達段階では、社会が自然環境に与える影響、自然環境から受ける影響はわずかであった。しかし人類は技術を発達させ、同一量の生産要素からより多くの人工物を生産することを可能にした。それと同時に、人類の潜在的破壊力も増大することとなった。そして20世紀になって社会が自然環境に与える影響は甚大なものとなり、ついに地球の有限性と人類の成長との矛盾が認識されるようになった(たとえば Meadows *et al.*[28] 参照)。地球環境問題は、この矛盾を象徴的に表しているといえる。

地球環境問題のもつ重要な性質として、汚染物質の発生源および汚染による被害が企業、市民といったマイクロレベルはもとより国家という枠をも越えて地球規模に広がる点、そして

被害が長期的かつ不確実である点があげられる。地球環境問題は、これらの点で従来の公害問題とはまったく質の異なるものであるといえる。汚染の発生源、被害が1国の問題にとどまらないことから、問題の解決に国際協力が不可欠となることは明らかである。そこで1972年のスウェーデンでの世界環境会議以来、多数の環境保全に関する国際会議が開催され、地球環境問題への対策が議論されている。1980年代には、将来世代の厚生も考慮に入れた「持続可能な発展(sustainable development)」という成長形態が提唱された。また1980年代後半には、地球環境問題はさまざまなメディアによって大きくとりあげられ、一般レベルでも世界的な注目を浴びることとなった。

しかし環境保全または汚染物質排出の削減に関する世界規模の具体的な協定は、未だに合意に達していない。多くの発展途上国では、将来の潜在的な経済成長力があり、汚染物質削減のための資本も整備されていない。したがって地球環境対策を行うとすると、それらの国には過大なコストがかかることになる。環境保全と経済成長とのトレードオフが存在するわけである。それでも深刻な被害が目に見える形で直ちに現れることが確実であれば途上国も対策を行うであろうが、先に述べたように地球環境問題の被害は長期的であり、実際に影響を受けるのは次世代以降の人々となることが予想されている。また被害の程度も不確実である。以上の点により、途上国では汚染物質の排出を削減するためのインセンティブが働きにくく、環境対策を先進国に任せる傾向がある。しかし先進国は、環境対策を先進国だけで行っても効果は少なく、途上国を含めた全世界での対策が必要であると主張している。このような対立があるため、全世界規模での汚染物質削減を制度的に実現することは困難になっている。1992年6月のブラジルでの国連環境開発会議(United Nations Conference on Environment and Development: UNCED)において、地球温暖化に関する気候変動枠組条約などが締結されたが、肝心のCO<sub>2</sub>削減の目標値や費用負担といった具体的な内容については未だに交渉の成立には程遠い状況である。しかし現状を放置しては不可逆的な環境破壊が生じる可能性も否定できないので、世界的な協力態勢を早急に整える必要がある。以上の事項を踏まえて我々はこの問題を効率良く、しかも実現可能なかたちで解決するために努力しなければならないであろう。

## 1.2 地球環境問題の経済学的分析とゲーム理論

地球環境問題の重要性が認識されるにつれて、自然科学、社会科学両方のさまざまな角度からこの問題へのアプローチが試みられているが、以下では経済学的な分析を主にとりあげることとする。



環境問題への対策と経済成長とのトレードオフは、以前から問題とされている。環境問題の主要原因は、人間の排出する汚染物質であり、汚染物質はあらゆる生産活動から生じる。したがって汚染物質を削減するためには、経済成長をある程度抑制しなければならない。しかしたとえば地球温暖化を防止するために、温室効果ガスの排出量を1990年レベルで安定化させる、またはそれ以下に削減するという協定が1988年のトロント会議<sup>1</sup>で提案されているが、現在の人口増加率、技術進歩率などのトレンドを考えると、これは実現不可能に近い。また人間には生来的に成長への欲求が備わっているため、不確実性のある将来の環境予測をもとに成長を抑制させ、人々に自分とは直接関係のないかもしれない将来世代のために我慢させるというのは、少なくとも現段階では無理であろう。しかし先にも述べたが、削減をまったくしないで放置することも危険である。

これまで環境問題への対策を経済学的に分析する研究では、環境汚染という外部性を内部化するために、汚染物質排出とその削減の費用便益分析がなされている。汚染物質を削減するためには、生産水準を下げたり、省エネルギーや代替エネルギー開発のための投資をしなければならないので、ある程度のコストがかかる。しかし削減をしない場合には、汚染物質の蓄積によって長期的にはさまざまなダメージをこうむることになる。このような費用と便益のバランスを考慮することによって、社会的厚生を最大化するような汚染物質の最適管理政策が理論的に求まる。既存の研究では、Falk and Mendelsohn[10]、Nordhaus[34][35]がこうした枠組で地球温暖化問題を扱い、最適なCO<sub>2</sub>の削減率を求めている。またAmano[2]、Edmonds and Reilly[9]、Manne and Richels[24]は、ある水準にCO<sub>2</sub>排出量を安定化させるのに必要な炭素税率(シャドープライス)を、エネルギー需給に関するいろいろな仮定をもとに、大規模なモデルを用いて計算している<sup>2</sup>。

地球環境問題を分析するとき、意思決定を行う主体が国家であるとする、複数の主体が存在し各主体の決定が相互的な外部性(externalities)をもつので、ゲーム理論を適用してそれらを考慮に入れることが<sup>3</sup>1つの有効なアプローチとなる<sup>3</sup>。ゲーム理論は、もともと寡占問題、産業組織論などに適用され、現代ではミクロ経済学における最も重要な分析手法の1つとなっている[22][37]。各プレイヤーを国とし、その戦略を汚染物質の排出量とすると、各国

<sup>1</sup> この会議では、先進国地域は1990年レベルより温室効果ガスの排出量を20%削減、それを維持すること、途上国地域には1990年レベルより1.5倍の排出量の伸びを認めるというスキーム(Toronto scheme)が提案されている。

<sup>2</sup> 松岡、森田[26]は、このような研究に関するサーベイである。

<sup>3</sup> 外部性とは、「主体間の市場機構を媒介しない直接的な相互依存性」[37]を指し、他の主体の効用を上昇させる外部経済(external economies)と、効用を低下させる外部不経済(external diseconomies)とがある。環境汚染は後者の典型的な例である。

の排出量決定はその国を含むすべての国の利得または損失に影響を与えることになる。ゲーム理論は、こうした条件のもとでの各国の合理的な意思決定を定量的に分析するのに用いられる。1.1節でふれたように、地球環境問題を国際問題としてみたとき、先進国と途上国の考え方の相違が南北の政治的対立に発展しているように思われる。しかしこの対立は、調停不可能な価値観や根本的な利害の対立ではなく、お互いのおかれた状況の差が生み出す利得関数の相違、非対称性によるものである。ゲーム理論は、こうした条件のもとでの合理的な妥協の可能性を明らかにし、精神論などに頼らない国際協調の道を示唆するものである。

現状では、先進国は途上国が今後経済成長を遂げることによって地球規模の汚染が深刻になるのを恐れているが、地球環境保全のために先進国が途上国に対して成長を抑制すべきだという態度で交渉を行うのは不合理であるし、またそのような態度に基づく国際協定が合意に達するのは困難であろう。このような場合、先進国が途上国に対して援助を行い汚染物質削減のインセンティブを与え、途上国の発展過程を環境保全的なものにすることが1つの解決策となるであろう<sup>4</sup>。援助の形式としては、資金援助や環境保全技術の移転などが考えられる。本論文では、国際協力によって汚染物質の管理がどれだけ最適な形に近づくのかを、ゲームモデルを用いて検証する。ここで「最適」というのは、ある規定された基準、つまり汚染物質管理に関する目的関数の最大化（または最小化）が実現されていることを指す。

ゲーム理論の枠組で問題を分析した既存の研究としては、ヨーロッパ地域での酸性雨問題を扱った Mäler[23]、それを応用してフィンランド、旧ソ連間の酸性雨に関する協力ゲームのシミュレーションを行い、非協力ゲームの均衡と比較した Kaitala *et al.*[18]、Tahvonen *et al.*[40]、簡単な静的モデルを用いて均衡解の性質を分析した Hoel[16]、Welsch[42]、地球温暖化についての協力ゲームを定式化し、コアが存在する条件などを求めた川島、林、森田[21]、動的ゲームの均衡を計算した Cesar[7]、Martin *et al.*[25] などがあり、分析の対象やモデルの構成法は多岐にわたっている。しかし一般的にいて、ゲーム理論を適用した地球環境問題の分析は、現在のところまだ未熟な段階にあり、今後の発展が期待される。

### 1.3 研究の対象

本論文では、地球環境問題についてのゲームモデルを2種類考える。第1に静学的な協力ゲームを考える。ゲームの解としては仁という概念を用い、各地域が今後削減すべき汚染物質の量および各地域のコスト負担を求める。分析の手法は川島、林、森田[21]と同じであ

<sup>4</sup>室田、伊藤[31]は途上国が経済成長を遂げ、人口動態、産業構造が先進国に近づくことによって、温暖化問題が解決の方向に向かう可能性を示唆している。



るが、[21]での分析では各地域の戦略が2つ(前述のトロント会議での提案を受け入れるか否か)であるのに対しそれを精密化し、無限戦略ゲームを解く。そして世界全体の損失を最小化する共同戦略および各地域の負担すべきコストなどを求める。環境対策についての取り決めが存在しない場合、それぞれの地域は私的な損失を最小化するように行動すると考えられるが、これは一般には世界全体の損失を最小化することにはつながらない。したがって世界全体の福祉という面からみて最適な状態を実現するためには、汚染物質削減についての拘束力のある協定をもうけて全地域がそれに従うようにしなければならない。しかし協定を結ぶことによって損害をこうむる地域があれば、その協定は不安定になるであろう。そこですべての地域が合意に達するためには、別払いというルールが必要になる。このような事項をシミュレーションによって明らかにするのが目的である。

第2に時間的要素を考慮に入れた動学的な非協力ゲームを考え、その均衡解および均衡経路における世界全体の損失が国際的な技術援助、経済援助によってどのように変るかについて検証する。上にあげた既存の研究をみると、[16][18][21][23][42]での分析は、ある時点にのみ注目した比較静的なものにとどまっている。[7][25]は動的ゲームを用いているが、極限的な定常状態のみを扱っており、実際に均衡戦略の経時変化を求めた研究は少ない。さらに計算の基礎となっている効用関数などに関する各種の仮定にも恣意性が残る。本論文では動的ゲームのフィードバック均衡を、動的計画法を用いてあらわに計算する。またこのゲームのPareto最適な協力解もあわせて計算し、比較する。いずれのシミュレーションにおいても、各地域での経済成長率は外生的に与えられているものとし、汚染対策によって経済成長の規模は変化しないことを仮定する。

地球環境対策は、共有財産(コモンズ)の問題[15]などと同様、「囚人のジレンマ(prisoner's dilemma)」に類似した状況にあり、単独で対策を行う国が損害をこうむることになるので、結局どの国もすすんで対策を実行しようとしなくなる危険性が指摘されている[4]。しかしこれは1回限りの非協力ゲームの均衡解であり、国家間で協定を結んで対策をとれば(協力ゲーム)、各国の利得の合計が最大になるであろうし、この問題を繰り返しゲームとしてみれば、試行錯誤の後に、あるルールのもとでは対策を行うという戦略が均衡になることも十分考えられる。そして国際的な援助があるというルールのもとでは、利得関数の形が変化するので、どの国も環境対策に積極的になるという均衡が実現されるであろう。国際協力によって、協力が無い場合に比べて各国の利得が増加し、Pareto優越的な状況が実現されるならば、個人合理性が満たされ、その協力態勢は安定したものになる。協力態勢が安定しているとは、各国がそれを抜けてただ乗りをする可能性が低いという意味である。本論文では世界の全地域が合意に達するような、汚染物質削減に関する国際協定を提案することを

目的とする。

以下2章では地球環境問題の原因、被害状況、対策についての一般的事項や先行研究のいくつかを紹介する。3章では協力ゲームの概念と、地球環境問題の協力ゲームモデルについて説明する。4章では、動的ゲームの概念と、地球環境問題の動的ゲームモデルについて説明する。3章、4章の両方において、地球温暖化問題をケーススタディとしてとりあげたシミュレーション結果を示し、その結果の感度分析を行う。5章ではシミュレーション結果から導かれる結論をまとめる。

## 第 2 章

### 地球環境問題についての一般的事項

#### 2.1 地球温暖化問題

##### 2.1.1 一般的事項

本章では、地球環境問題の具体的な内容、またその対策、先行研究例などを紹介するが、まずここでは最も規模が大きく、複雑である地球温暖化問題 (global warming problem) について述べる [11][20][30]。

地球温暖化は、ある種の大気中の気体 ( $\text{CO}_2$ 、メタン、フロン、オゾン、水蒸気など) が太陽光を通過させる一方で、地球の放射する赤外線を吸収するという働きをすることによって起こる。このような気体は温室効果ガス (greenhouse gas: 以下 GHG と略す) と呼ばれ、温暖化を起こす働きは温室効果 (greenhouse effect) と呼ばれる。温室効果の存在は 19 世紀から知られていたが、20 世紀中頃には平均気温が下降していたということもあり、あまり注目されなかった。しかし温室効果は地球の熱収支に大きな影響を与える。温室効果がないものとする、地球表面の平衡気温はおよそ  $254\text{K}(-19^\circ\text{C})$  であり、とても人間が住めるような環境ではない。現在の地表の平均気温は約  $288\text{K}(15^\circ\text{C})$  であるが、この気温の差は温室効果によるものであるということで専門家の意見は一致している。大気中の GHG 濃度は確実に上昇し、産業革命以前に比べて約 20% 上昇して現在は約  $350\text{ppm}$  というレベルに達している。そしてそれにともない平均気温は  $0.3\text{--}0.6\text{K}$ 、海面は  $10\text{--}20\text{cm}$  上昇したという報告がある。特に 1988 年の北米での異常気象によって、地球温暖化は急速に注目を浴びることになった。

GHG の中で温暖化に最も大きく寄与しているのは、いうまでもなく  $\text{CO}_2$  であり、その寄与度は約 55% とされている。 $\text{CO}_2$  の排出源は、主に化石燃料 (石油、石炭、天然ガス) の燃焼、森林破壊であり、炭素の人為的排出は年間約  $7\text{Gt}$  と見積もられている。その国別の内訳は、米国 25%、残りの OECD 諸国 23%、旧ソ連、東欧 26%、中国 10%、残りが 16% となっている (1990 年のデータ)。地球上では大気圏と生物圏、海洋との間で生物、化学過程による相



当量の炭素交換が行われている。人間の排出する炭素のうち、約半分の 3.3Gt が大気中に蓄積される。そして残りの半分は海洋に吸収されるといわれているが、詳しいことはわかっていない。その他の GHG についても未解明なことが多い。

地球温暖化による被害としては、南極大陸の氷床の溶解による海面上昇、降水パターンの変化などの気候変動、生態系の混乱などが考えられ、農業が深刻な打撃を受けることが予測されている。もちろん温暖化によって環境が改善される地域もあるだろうが、急激な気候変動が望ましいとは思えない。GHG 排出量が現在のベースで増加し続けることは危険である。

地球温暖化問題への対策としては、GHG 排出、特に CO<sub>2</sub> 排出の削減、安定化が中心となるが、それには大きく分けて技術的対応と制度的対応がある。技術的対応はエネルギー利用効率の向上や、CO<sub>2</sub> 排出に寄与しない新エネルギーの開発、植林などを含む。2 度の石油危機を経て、先進諸国におけるエネルギー利用効率は著しく向上した。特に日本では、GDP 1 単位あたりのエネルギー消費は約半分になった。しかし、多くの発展途上国では効率が悪く、先進諸国と 10 倍ほどの格差がある。省エネルギー技術の全世界への普及が重要となる。

新エネルギーとしては、太陽熱、地熱、水力、バイオマスの利用などが考えられる。バイオマスとは、資源として加工利用される生物体（主に植物）のことである。しかしいずれのエネルギーも、今のところコストの採算がとれないので、大規模な導入は難しいという状況である。

制度的対応としては、CO<sub>2</sub> 排出に対する課税、CO<sub>2</sub> 排出権市場の創設などが提案されているが、それらの実現可能性については疑問が残る。汚染物質排出に対する課税政策は、経済の停滞をもたらすというネガティブな響きがあるためか、日本においても根強い反対にあっていて、発展途上国でも経済成長を優先しているので、すすんで税を徴収することは期待できない。また税収を政府がどのように管理し、再分配すべきかについての合意がなされていない。排出権市場をつくり権利を売買する（つまり先進国が途上国から排出権を買う）ことによって排出の総量規制を行うというオプションも最近は大規模に研究されているが、これについても排出権の割り当て、モニタリング、違反した場合の罰則などについてのルールがはっきりしないという問題点がある。

地球温暖化対策についての最大の問題点は、GHG 排出がエネルギー消費を通じて人間のあらゆる経済活動と密接に結びついていることと、温暖化のメカニズムや影響評価について科学的な知見不足が大きいことである。GHG を規制しなければならないといっても、経済成長を抑制することには多くの人々の抵抗があるし、誰がどのようにしてコストを負担すべきなのかははっきりしない。しかも GHG 排出量と濃度の関係、GHG 濃度と平均気温の関係は、定量的にはほとんど未解明であり、きびしい GHG 削減を正当化する科学的根拠は今の

ところ存在しない。GHG 濃度が倍増するときの気温上昇が大規模な気候モデルにより予測研究されているが、その結果は 1.5-4.5K と大きな不確実性の幅をもっている。温室効果による気温の変化よりも、日常の気温変化の方がはるかに規模が大きいこと、雲や海洋の役割が未解明であること、気温変化には色々な正負のフィードバック効果が働くことなどにより、問題は複雑になっている。なお少数ながら、温暖化ではなく地球寒冷化を唱える研究者もいる [29]。したがって早急の GHG 排出量の削減だけを最優先課題として扱うべきではなく、さまざまな基礎研究への投資を今の内にしておくことが色々な意味で大切だと考えられる。

## 2.1.2 既存の研究

地球温暖化問題を経済学的に分析した研究例は多数あるが、以下では Nordhaus[35] と Martin *et al.*[25] の内容を簡単に紹介する。

まず [35] では、世界を 1 つの地域とみなした動学的最適化モデルである DICE モデル (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy) が記述される。社会は総生産に対する消費の割合と、GHG 排出の削減率を逐次決定し、目的関数を最大化する。目的関数は、各時刻における消費による効用の現在価値の総和とされる。GHG 削減には削減率に応じたコストがかかる。GHG の粗排出量 (gross emissions) は、総生産の関数である。そして排出された GHG の蓄積により地表の平均気温が上昇し、社会にダメージを与える。これらのコスト、ダメージは次期の総生産に影響を与えることになる。温暖化によるダメージは、気温増分の 2 乗に比例するという仮定がおかれている。以上のような関係が十数本の方程式系で定式化される。

シミュレーションは初期時刻を 1965 年、10 年を 1 期として行われ、各状態変数の値が一定となる定常状態に収束するまで続けられる。結果の概要は表 2.1 の通りである。

表 2.1 DICE モデルの結果

ケース	GHG 濃度 (2075 年, 単位 ppm)	目的関数の値 ( $10^{12}$ ドル)	GHG 削減率 (2075 年, %)
規制なしケース	609	730.90	0.0
最適化ケース	575	731.17	13.4
排出量安定化ケース	463	723.83	62.5
気候安定化ケース	345	689.92	94.2

規制なしケースは、GHG 削減率をつねに 0 とおいて消費についての決定だけを行う場合である。最適化ケースは消費、GHG 削減の両方の決定を行い目的関数を最大化した場合であ



る。排出量安定化ケースは、排出量を1990年水準に安定化させた場合、気候安定化ケースは、地表の平均気温を10年あたり0.2K以下の上昇に抑え、定常状態でも1990年レベルより1.5K以下の上昇に抑えるという制約を課した場合である。

表2.1より、規制なしケース、最適化ケースの結果にほとんど差がみられないことがわかる。最適化ケースでの目的関数の値は、規制なしケースでの値よりも0.037%大きいだけである。最適なGHG削減率は、シミュレーション期間を通じて10%前後と低い。排出量安定化ケース、気候安定化ケースでは目的関数の値は規制なしケースよりも低くなり、とくに気候安定化ケースでは5.61%も低くなってしまふ。これらの結果により、排出量の安定化、気候の安定化という政策はコストが過大であり、あまり合理的な目標であるとはいえないし、実現可能性が低いことがわかる。もちろんこの結果は、現実の外挿として将来を考えるという前提の上に立っているので、今後技術面や自然科学の発達により状況が変わるという可能性も否定できない。

[25]では、世界を複数地域に分割した動的ゲームモデルが分析される。この場合、[35]とは異なり、各地域の意思決定の相互作用を考慮することが可能になる。しかし、計算が複雑になってしまうので、モデルの構造は簡略化したものにせざるを得ないという欠点もある。このモデルでは、各地域（プレイヤー）は戦略として毎年のCO<sub>2</sub>排出量のみを決定し、CO<sub>2</sub>濃度と排出量（エネルギー消費量とみなされる）に依存した利得関数の現在価値の総和を最大化する。各地域はCO<sub>2</sub>濃度を観測し、それに応じて戦略を決定する。その結果としてフィードバック Nash 均衡（本論文の第4章参照）が計算される。炭素税の徴収、再分配という政策が検討され、均衡を比較することによって政策の効果が考察される。

このモデルの顕著な特徴は、利得関数の違いによって各地域の非対称性が扱われていることである。動的ゲームを用いた他のほとんどの研究例では、すべてのプレイヤーは同一（identical）であるという非現実的な仮定をおいていることからすると、これは評価すべきである。

この論文では地域数を2としたシミュレーションが、さまざまなパラメーター値について行われている。しかしシミュレーションにおける仮定は、現実には即しておかれていないといいたい。パラメーターが標準的な値をとるときの結果を表2.2に示す。実際のところ[25]では均衡を求めるためのアルゴリズムやパラメーター値選択の根拠、税率と利得の単位、割引率の値が明らかにされていないなど曖昧な記述が散見される。またここでも定常状態しか扱われていない。したがってこれらの結果から、現実の地球温暖化対策へのインプリケーションを導くのは困難であろう。ただしこの研究は動的ゲームの地球環境問題への適用という分野における先駆的研究の1つであり、その存在価値は大きいといえる。



表 2.2 動的ゲームモデルの結果<sup>1</sup>

炭素税率	CO <sub>2</sub> 濃度 [ppm]	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>
0.00	550	22.99	22.23
0.05	550	22.11	21.52
0.10	—	—	—
0.15	463	16.53	16.02
0.20	397	14.95	14.54
0.25	358	13.87	13.47
0.30	350	12.98	12.55

## 2.2 酸性雨問題

### 2.2.1 一般的事項

石油や石炭に含まれる硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)が原因となって、酸性度の高い雨が降り、森林、湖沼に被害を与える現象を酸性雨(acid rain)という。酸性雨問題も、地球温暖化問題と同様、19世紀から指摘されていたが、社会問題として大きくとりあげられるようになったのはドイツのシュヴァルツヴァルト、ケルン大聖堂などの被害が顕在化した1980年代になってからである。現在では中国、インドをはじめとするアジア地域、米国、カナダなど問題は全世界のさまざまな地域に広がりつつある。

酸性雨は、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>が大気中で上空のオゾンが分解してできた酸素原子と化合して硫酸、硝酸に変化することによって生じる。そして風、大気の流れによってときには数百kmも運ばれ、雨となって地上に沈着(deposit)する。雨のpHは通常5.6程度であり弱酸性だが、酸性雨の深刻な地域ではpHが4.5以下となっている。酸性雨の被害には、植物の葉を枯らすという直接的なものと、土壌の酸性化によってアルミニウム、マンガンイオンなどが溶解し、植物の根をいため、水生生物を絶滅させるといった間接的なものがある。このアルミニウムが人間の脳に蓄積することによって、アルツハイマー病を引き起こす可能性が最近指摘されている[41]。酸性雨は地球規模の問題ではないが、複数の国にわたる問題であることは確かであり、局地的な問題というよりも、重要な国際問題となっている。

酸性雨への対策には、自動車の排気ガス対策や、石油、石炭の脱硫といったものがある。その対策に関しては、1979年にジュネーヴで長距離越境大気汚染条約が締結され、1985年には

<sup>1</sup>税率0.10の結果が空欄になっているのは、複数の均衡が存在するためである。またV<sub>1</sub>、V<sub>2</sub>はそれぞれ第1地域、第2地域の利得を示す変数である(単位は不明)。V<sub>1</sub>/V<sub>2</sub>は常にはほぼ一定の値をとっているが、これはその値が一定になるように税収の再分配率を定めたことによる。

ヘルシンキ会議において  $\text{SO}_x$  を 1980 年の排出量から 30% 削減することが採択された。しかし発展途上国、旧共産圏では、エネルギー源を硫黄分の高い石炭に依存しており、今後も排出量が増加すると考えられるので、これを事前に抑えることが重要である。以前から問題となっているのは、旧ソ連の西部地域での排出によってフィンランドに発生する酸性雨である [18]。両国の間では、フィンランドが技術を提供して共同で  $\text{SO}_x$  の削減を行う (目標は 50% 削減) という協定が合意に達している。日本と中国の間でも今後同様の問題が生じることが懸念される [3]。

ただ酸性雨は原因、被害、対策が比較的明確であるので、近い将来世界規模での  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  削減が制度化されることになるであろう。

## 2.2.2 既存の研究

酸性雨問題の分析例として、Mäler [23] の内容を以下に紹介する。[23] はヨーロッパ全域での越境汚染物質  $\text{SO}_2$  による酸性雨問題を、静的協力ゲームの枠組を用いて分析している。ゲームのプレイヤーはヨーロッパの国々であり、それらの戦略は  $\text{SO}_2$  の排出量である。排出された硫黄は風によって運ばれ、広範囲に沈着する。各国での排出量と沈着量を並べたベクトルは線形の関係にあると仮定され、その関係は  $\text{SO}_2$  の輸送係数行列 (transportation matrix) によって記述される。各国の損失は、 $\text{SO}_2$  削減にかかるコストと硫黄の沈着による環境へのダメージの和とする。

この論文では各国の損失の合計を最小にする解 (協力学解) を求めている。数値計算の際に、各国の削減コスト関数は他の研究結果 [1] から引用されているが、ダメージは沈着量に比例するとおき、その係数は、現実にとられている戦略 (1984 年における排出量) が Nash 均衡であるという仮定に基づき推定されている<sup>2</sup>。表 2.3 は協力学解における各国の  $\text{SO}_2$  排出量、削減率、協力によって得られる便益の数値を示す。

ヨーロッパ全体での最適な削減率は 39% となる。これはヘルシンキ会議での目標 (2.2.1 節参照) である 30% よりも大きい。そして協力学解では、削減を行わない場合 (Nash 均衡、または現状) にくらべて 60 億 DM 余りの便益が生じる。しかし、イギリス、イタリア、スペインなどいくつかの国では協定に参加することによって損害をこうむることになる。したがってこれらの国に協定に参加するインセンティブを与えるために、別払いの譲渡が必要となる。別払いがない場合には、協定の実現可能性が低くなってしまう。これらの結果から、Mäler は大幅な  $\text{SO}_2$  の削減の必要性和、協力学解を実現するための別払いの重要性を主張している。

<sup>2</sup>このようなアプローチは顕示選好理論 (revealed preference theory) と呼ばれる。

表 2.3 Mäler モデルの協力解<sup>3</sup>

	SO <sub>2</sub> 排出量	削減率 [%]	便益 [10 <sup>6</sup> DM]
チェコスロバキア	1219	75	152
フランス	104	10	879
(旧) 西ドイツ	1040	80	11
(旧) 東ドイツ	1183	86	328
ギリシア	303	86	52
ハンガリー	635	77	5
イタリア	634	33	-84
ポーランド	560	27	599
スペイン	231	14	-29
トルコ	299	62	0
(旧) ソ連	107	2	1510
イギリス	1494	81	-336
ユーゴスラビア	465	79	346
ヨーロッパ合計	9011	39	6248

## 2.3 オゾンホール問題

成層圏のオゾン層がフロン (chlorofluorocarbon) によって破壊され、有害な紫外線の地上への到達量が増加し、人間の健康に被害を与えることが問題となっている。フロンによるオゾン層の破壊は 1970 年代に指摘されたが、国際問題となったのは 1985 年以降である。

オゾンは地上およびその近辺では非常に有害な物質であるが、成層圏中では有害な紫外線を吸収する役割を果たす。フロンは炭素、塩素、フッ素化合物の総称で、無色、無臭、不活性、低毒性、揮発性などの便利な性質をもち、主に半導体洗浄、エアコン、冷蔵庫の冷媒に使われてきた。しかしフロンは排出され上空の成層圏に達すると、紫外線によって分解され塩素原子を放出する。これがオゾンと結びついて触媒連鎖反応を何十万回というオーダーで繰り返し、オゾンを破壊していく。このオゾンの減少により、紫外線の照射量が増加し、悪性の皮膚ガン、白内障、免疫性疾患を引き起こすといわれている。

このようなメカニズムが明らかになり、南極上空でのオゾンホール (ozone hole) が発見されたのが 1985 年である。その後急速にフロンガスは全面廃止への一途をたどり、1987 年

<sup>3</sup>本表は [23] に示される表の一部を抜粋したものであり、いくつかの国の結果は省略してある。したがって最下行の合計は上の数値の合計と一致しない。DM はドイツマルクの略である。



に採択されたモントリオール議定書ではフロン生産、使用の半減が定められ、その2年後の1989年にはフロンを2000年までに全廃するというヘルシンキ宣言が採択された。

しかしフロンは大気中での寿命が長く、今後フロンの生産、消費を停止したとしても、長期にわたってフロンが蓄積し、オゾン破壊を続けることになる。ただしそれらに関する予測はきわめて困難である。それからフロンの代替物は高価であり、安定性などの特性でも既存のフロンに劣る。また代替物が安全であるという保証はない。今後世界規模でエアコン、冷蔵庫などの需要は確実に高まるであろう。安全な代替物の開発が望まれる。

以上、特定の汚染物質が原因となる3つの問題について述べた。地球環境問題と呼ばれる問題群の中には、この他に野生生物種の減少、砂漠化、熱帯雨林の減少などがあり、いずれも人類の文明と深く関わっている。またこれらの問題どうしても複雑に結びついており、対策を安易に講じることはできない。

一般に、地球環境問題は科学技術の発展によってもたらされたといえる。しかし、問題の解決のために科学技術を否定し、経済成長を抑制すべきだという議論は成り立たない。現在でも多くの国々において生活水準は低く、それらの国の国民は先進国社会を目標としている。したがって重要なのは、理想論かもしれないが、経済成長の規模はそのまま、技術を制御することによってなるべく環境保全的な社会システムを構築し、全世界の福祉の向上を目指すことであると思われる。本論文では技術面の具体的な事項にふれることはしないが、世界の各地域が協力してそのようなシステムを作ることができるのかどうかを、簡単なモデルを用いて分析していく。

## 第 3 章

### 静学的分析

#### 3.1 協力ゲームの理論

本章では、協力ゲームモデルを用いて、地球環境問題を分析することを試みる。まず本章での分析の理論的基礎となる、協力ゲームの定式化について簡単にまとめる [38]。

ゲーム理論 (game theory) は、社会問題を記述、解析するための道具として広範囲にわたり活用されている。ゲーム理論におけるゲームとは、ある問題を規定する 1 組のルールのことを指す。ゲームにおいては複数の意思決定主体がルールにしたがい行動を選択し、その結果として利得またはコストを受ける。それぞれの意思決定主体はプレイヤー (player)、その行動は戦略 (strategy) と呼ばれる。ゲームには、協力ゲームと非協力ゲームがある。協力ゲーム (cooperative game) とは、すべてのプレイヤーの間にとるべき戦略についての合意が成り立っているゲームであり、非協力ゲーム (noncooperative game) とは、そのような取り決めが存在しないゲームである。

以下ゲームは非対称な  $n$  人のプレイヤーによって行われる協力ゲームであり、戦略はそれぞれのプレイヤーによって 1 回ずつ選択されるものとする。ここでプレイヤーがお互いに非対称であるとは、それぞれのプレイヤーの目的関数 (利得関数またはコスト関数) が異なる形をとっているという意味である。まずプレイヤーの集合を  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  とおき、プレイヤー  $i \in N$  のとりうる戦略の集合を  $U_i$  とおく。各プレイヤー  $j \in N$  が戦略  $u_j \in U_j$  をとったときに、あるプレイヤー  $i$  の受けるコストを  $f^i(u)$  という関数によって表す。ここで  $u = (u_1, \dots, u_n)$  である。プレイヤー  $i$  にとって、 $f^i(u)$  の値が小さい方が望ましいのは明らかである。

次に  $N$  の任意の部分集合を提携 (coalition) と呼ぶ。同じ提携に属するプレイヤーの間では十分なコミュニケーションが行われ、提携としての共同戦略が決定される。提携としてプレイヤー全体の集合  $N$  をとっても構わないし、ただ 1 人のプレイヤーからなる集合、また

空集合をとつても構わない。

協力ゲームでは、任意の提携  $S \subset N$  に対して、次のように定義される実数値  $v(S)$  を対応させ、これを特性関数 (characteristic function) と呼ぶ。

$$v(S) = \min_{u_S \in U_S} \max_{u_{N-S} \in U_{N-S}} \sum_{i \in S} f^i(< u_S, u_{N-S} >). \quad (3.1)$$

ここで  $u_S, u_{N-S}$  はそれぞれ提携  $S$  に属しているプレイヤー、属していないプレイヤーの戦略を表すベクトルである ( $U_S = \prod_{i \in S} U_i$ )。  $< u_S, u_{N-S} >$  はそのときの全プレイヤーの戦略を、プレイヤー 1 のものから  $n$  のものまで順に並べたベクトルである。(3.1) からわかる通り、 $v(S)$  は最悪の場合、つまり  $S$  に属していないプレイヤーが 1 つの提携を形成して  $S$  にとって都合の悪い戦略をとる場合でも、提携  $S$  の受けるコストがそれ以上にはならないことが保証される値である。空集合  $\phi$  については  $v(\phi) = 0$  とおく。このように定義される特性関数は、von Neumann-Morgenstern 型と呼ばれる。この特性関数の定義によって協力ゲームの記述は完了する。そして交渉が行われ、各プレイヤーのとるべき戦略が決定される。このとき必要に応じて、あるプレイヤーから他のプレイヤーに対する別払いの譲渡がなされることもある。このような手続を経てプレイヤーの戦略、コスト負担が決定される。

次にこのような協力ゲームの解として、どのようなものが適当であるかについて述べる。いまある協定に基づく行動の結果として、プレイヤーの受けるコストのベクトルが  $x = (x_1, \dots, x_n)$  となったとする。ここで  $x$  は  $\sum_{i \in N} x_i = v(N)$  をみたすものとする。このようなベクトル  $x$  は配分 (imputation) と呼ばれる。このとき提携  $S$  について

$$e_x(S) = \sum_{i \in S} x_i - v(S) \quad (3.2)$$

とおくと、 $e_x(S') > 0$  となるような提携  $S'$  が存在するならば、 $S'$  に属するプレイヤーのみの力で、提携  $S'$  の受けるコストを、配分  $x$  にしたがう場合よりも少なくすることができる。したがって  $S'$  は配分  $x$  を拒否するであろう。このような提携  $S'$  が存在することにより、配分  $x$  を実現するような協定は不安定であることになる。(3.2) のように定義される  $e_x(S)$  を、配分  $x$  に対する提携  $S$  の超過要求 (excess demand) または不満 (complaint) と呼ぶ。 $e_x(S) \leq 0, \forall S \subset N$  となるような配分はコア (core) と呼ばれ、協力ゲームの重要な解の 1 つとなっている。

いま 2 つの異なる配分  $x, y$  が与えられているとして、すべて ( $2^n$  通り) の提携  $S$  に対する  $e_x(S), e_y(S)$  を大きい順に並べたベクトルをそれぞれ  $\varepsilon(x), \varepsilon(y)$  とおく。このとき  $\varepsilon(y)$  が  $\varepsilon(x)$  よりも辞書式順序の意味において大きい<sup>1</sup> ならば  $x$  は  $y$  より受容的 (acceptable) で

<sup>1</sup> 成分の個数が同じであるベクトル  $x, y$  の成分を大きいものから順に比較したとき、最初に異なる成分が  $x', y'$



あるといい、 $x \succ y$ と表す。ある配分  $x$  が、 $x$  以外のすべての実現可能な配分  $y$  に対して  $x \succ y$  をみたすならば、この配分  $x$  はゲームの仁 (nucleolus) であるという。仁は最大超過要求の最小化にともなう解であり、提携同士の不満をお互いに均衡させていき調整を行い、交渉を帰結させた結果の解である。したがって仁はコアよりも限定的な概念である。通常の  $n$  人ゲームにおいて、コアの存在は一般には保証されていないが、仁は一意に存在することが知られている [39]。

## 3.2 地球環境の協力ゲームモデル

1 章でも述べた通り、地球環境対策を行うためには一部の国の努力だけでは不十分であり、世界全体での協力による汚染物質削減が必要である。そこで地球環境問題に関する協力ゲームを記述し、その解を求めることを試みる。

まず世界全体を  $n$  地域に分割する。ゲームのプレイヤーは各地域とし、その集合を  $N = \{1, \dots, n\}$  と表す。時間  $t$  を離散的にとる。各地域の生産活動によって生じる特定の汚染物質に注目し、時刻  $t$  における第  $i$  地域の汚染物質粗排出量を  $E_i(t)[t-C]$  とおく<sup>2</sup>。将来にわたる  $E_i(t)$  の経路は外生的に与えられているものとする。そして各地域の戦略は汚染物質の削減率であるとし、これを  $a_i \in [0, 1]$  と表す。 $a_i$  は時間  $t$  によらず一定であるとする。よって時刻  $t$  での第  $i$  地域の純排出量は  $(1 - a_i)E_i(t)$  となる。このとき第  $i$  地域には削減率に応じたコスト  $C_i(a_i)$  がかかる。汚染物質の削減によって各地域の GDP は減少するが、この減少率を削減コストと表現する。 $C_i(\cdot)$  は連続、単調増加、厳密に凸関数であり、 $C_i(0) = 0$  をみたすことを仮定する。

次に時刻  $t$  での汚染物質の大気中蓄積量 (濃度)<sup>3</sup> を  $M(t)$  とおき、 $M(t)$  が

$$M(t+1) = (1 - \delta)M(t) + \sigma \sum_{i \in N} (1 - a_i)E_i(t), M(0) = M_0 \quad (3.3)$$

という方程式をみたすことを仮定する。ここで  $\delta$  は大気中の汚染物質が吸収される割合、 $\sigma$  は排出された汚染物質の中で大気中に入る割合である ( $0 \leq \delta \leq 1, 0 \leq \sigma \leq 1$ )。 (3.3) はこのような場合にしばしば使われる単純な関係式である。各地域の戦略  $a_i$  が決定されれば、動的過程によって  $M(t)$  は変化していく。次に汚染による第  $i$  地域へのダメージは、汚染物質の蓄積量  $M(t)$  だけに依存していることを仮定し、それを  $D_i(M(t))$  と表す。 $D_i(\cdot)$  も  $C_i(\cdot)$  と

であり、 $x' > y'$  のとき、 $x$  は  $y$  よりも辞書式順序の意味で大きいという。

<sup>2</sup> 排出量の単位  $[t-C]$  は、炭素換算トン (ton-Carbon equivalent) を意味する。

<sup>3</sup> 大気中蓄積量は、適当な定数で割れば濃度となるので同一の変数とみなしてよい。

同じく、連続、単調増加で厳密に凸であることを仮定する。削減コストとダメージは貨幣価値で算定され、各地域の生産量 (GDP)  $Y_i(t)$  との比率によって表されているものとする。

以上により、時刻  $T$  における第  $i$  地域の損失は

$$f^i(a) = Y_i(T) \{C_i(a_i) + D_i(M(T))\} \quad (3.4)$$

となる。ここで  $a = (a_1, \dots, a_n)$  である。この  $f^i(a)$  を、最小化すべき第  $i$  地域の目的関数とする。

このとき提携  $S \subset N$  に対する特性関数は

$$v(S) = \min_{a_S} \max_{a_{N-S}} \sum_{i \in S} f^i(<a_S, a_{N-S}>) \quad (3.5)$$

となる。ここで  $a_S, a_{N-S}$  はそれぞれ提携  $S$  に属している地域、属していない地域の戦略 (削減率) を表すベクトルであり、 $<a_S, a_{N-S}>$  は各地域の戦略を地域 1 から  $n$  まで並べたベクトルである。初期時刻  $t = 0$  において地域間で話し合いがもたれ、これから各地域がとるべき長期的戦略 (削減率) が決定される。それは上のゲームの解を求めることに相当する。これを今後「協定を結ぶ」ということにする。協定は拘束力をもっており、一度結ばれれば変更されることはなく、各地域がそれに従わなければならない。どのような協定が結ばれるかは、特性関数の値に依存している。以上記述したゲームモデルの仁を、実際の問題に即して次節で求めることにする。

### 3.3 数値計算

#### 3.3.1 主な仮定

本節では、具体的な問題として地球温暖化問題を取りあげ、協力ゲームモデルを用いて実証分析を行う。つまり汚染物質は各地域の生産活動によって排出される GHG であり、ダメージは気温上昇による被害であるとする。そして世界を 4 つの地域に分割し、第 1 地域を米国、第 2 地域を米国以外の OECD 諸国<sup>4</sup>、第 3 地域を中国、第 4 地域をその他の国々とおく。米国を他の先進国地域と分けたのは、米国の GHG 排出量が際だって多く、世界全体の約 1/4 にあたるほどであることによる。中国を他の途上国地域と分けたのは、予測される将来の中国の GHG 排出量増加率が、他の地域と比較して大きく、21 世紀には中国がかなり重要な GHG 排出国になることが予想されるからである。

<sup>4</sup>これらはいわゆる先進国であり、具体的には旧ソ連、東欧を除くヨーロッパ全域、カナダ、日本、オーストラリア、ニュージーランドからなる。

さらに GHG の削減コスト、温暖化によるダメージは、次の式によって表されるとする。

$$C_i(a) = c_i a^3, \quad (3.6)$$

$$D_i(M) = d_i (M - M_0)^2, \quad (3.7)$$

ここで  $M_0$  は GHG 濃度の初期値であり、単位は ppm(parts per million) である。(3.6) は Nordhaus[35] が色々な研究によるコスト評価 [33] を回帰分析した式に基づく。(3.7) は [10] に基づく。これらの  $c_i, d_i$  をそれぞれコスト係数、ダメージ係数と呼ぶことにする。

表 3.1 に各地域の粗排出量  $E_i$ , GDP  $Y_i$  の増加率、コスト係数  $c_i$ , ダメージ係数  $d_i$  の具体的な数値を記す。コスト係数の値は文献 [6] と (3.6) の式をもとに推算したものである。ここでダメージ係数についても地域ごとに推定すべきであるが、GHG 濃度と平均気温の上昇との関係、また気温上昇が社会に与える影響を定量的に評価した研究は数少なく、特に途上国地域での影響についてはまったく未解明であるといえる。温暖化による被害は、先進国地域よりも農業に依存する割合の高い途上国地域において深刻であると考えられるが、上に述べた理由により、また温暖化問題のグローバルな性質を考慮して、ダメージ係数には地域差をつけずに全世界で共通の値を用いた ( $\forall i, d_i = d = 3.0 \times 10^{-7}$ )。この値は、以下の根拠に基づくものである。GHG 濃度が産業革命以前のレベルの 2 倍になるとき、気温上昇は約 3K となるとされている [20]。このとき社会のこうむる被害は [35] によると GDP の 1.3% と推算される。この関係を (3.7) に代入して  $d$  の推定値  $3.0 \times 10^{-7}$  を得た。また  $t = 0$  となる時点を経 1990 年とおき、 $T = 60$  [年] とした。さらに式 (3.3) の中のパラメーターについても [35] になら  $\delta = 0.004, \sigma = 0.64$  とおいた。

表 3.1 地域別各種データ

地域	GDP, 粗排出量増加率 [%]			コスト係数	ダメージ係数
	1990-2010	-2030	-2050		
1	2.5, 1.0	1.9, 0.9	1.4, 0.6	0.04	$3.0 \times 10^{-7}$
2	2.3, 1.2	1.6, 0.8	0.5, 0.2	0.05	$3.0 \times 10^{-7}$
3	4.2, 3.0	4.1, 2.3	3.4, 1.9	0.20	$3.0 \times 10^{-7}$
4	3.9, 2.6	3.4, 2.1	2.8, 1.2	0.11	$3.0 \times 10^{-7}$

### 3.3.2 シミュレーション結果

以上の前提のもとで、各提携の特性関数値を求めた結果を表 3.2 に示す。表 3.2 の中で、たとえば提携 {1} の特性関数の値は 72 となっているが、これは第 1 地域以外の地域の削減



率がすべて0のとき第1地域のこうむる損失の最小値が720億ドルとなることを意味する。また表3.3には、表3.2の値から求められる仁と仁の配分を実現するための別払い (side payment) の金額および各地域の共同戦略、私的戦略、ただ乗り利益を示す。すべての提携の超過需要を辞書式順序の意味で最も小さくすることにより、仁の配分が得られる。共同戦略 (joint strategy) とは、世界全体の損失が最小値 (ここでは2020億ドル) をとるときに各地域の戦略である。つまり協力態勢のもとでは、世界全体が共同戦略をとるという協定を結ぶことになる。しかし共同戦略をとるとき、各地域の損失は仁の配分とは異なる値をとる。したがって表3.3に示すような別払いが必要となる。ある地域の別払いの値が正であることは、その地域がさらに支払いを行うことを意味し、それが負であることは、他からの支払いを受けることを意味する。地域*i*の私的戦略 (private strategy) とは、地域*i*が他の地域と協力しない (提携 {*i*} として行動する) ときの最適戦略を指す。これから世界全体が共同戦略、私的戦略をとる状況をそれぞれ協力解、非協力解と呼ぶことにする。また地域*i*のただ乗り利益 (benefit of free-riding) とは、*i*以外の地域が共同戦略をとっているとして、地域*i*だけが協定を抜けて最適な行動をとるときに、協定を守るときに比べてどれだけ地域*i*の損失を減少させられるかを示す。

表3.2 特性関数の値 [単位  $10^9$  ドル]

<i>S</i>	<i>v</i> ( <i>S</i> )	<i>S</i>	<i>v</i> ( <i>S</i> )	<i>S</i>	<i>v</i> ( <i>S</i> )	<i>S</i>	<i>v</i> ( <i>S</i> )
$\phi$	0	{4}	115	{2,3}	117	{1,2,4}	207
{1}	72	{1,2}	160	{2,4}	185	{1,3,4}	158
{2}	106	{1,3}	85	{3,4}	76	{2,3,4}	185
{3}	17	{1,4}	156	{1,2,3}	165	N	202

表3.3 仁、別払いなどの計算結果 [単位  $10^9$  ドル]

地域	仁	別払い	共同戦略	私的戦略	ただ乗り利益 (対 GDP 比)
1	45	2	0.26	0.15	$6(3.8 \times 10^{-4})$
2	75	20	0.20	0.13	$4(1.7 \times 10^{-4})$
3	5	-11	0.23	0.06	$8(2.2 \times 10^{-3})$
4	77	-11	0.22	0.14	$13(4.7 \times 10^{-4})$
世界全体	202	0	0.23	0.13	$31(4.4 \times 10^{-4})$

表 3.3 より、すべての地域において共同戦略が私的戦略よりも大きい値をとることがわかる。なおすべての地域が削減を行わないとすると、世界全体の損失は 3410 億ドルとなってしまう。また非協力解においては、それは 2280 億ドルとなり、協力解での損失よりも 260 億ドル多くなる。協調関係の中で、各地域が勝手に行動をとるときよりもよい状態が生じていることが示される。しかし世界全体の平均削減率は、協力解においても 20-25% であり、それほどきびしい削減は要求されない。そして世界全体の損失を最小にする状態を実現するためには、主に第 2 地域から第 3、第 4 地域への別払いが必要であるという結果が出ている。相対的にみて、受ける別払いの金額は、第 3 地域の方が大きくなっている。これは潜在的な成長率が高く、また削減コスト係数も大きい第 3 地域は、相応の援助を受けることなしには GHG の削減率を共同戦略のレベルまで上昇させないであろうということを示している。表 3.2 をみると提携 {1,2,4} の特性関数の値は、全提携  $N$  のそれよりも大きくなっている。つまり第 3 地域の協力がなければ、他の地域は必ずかなりの損失をこうむることになる。またただ乗り利益の対 GDP 比をみると、別払いがない場合、この協力態勢を抜ける可能性の高い地域が第 3 地域であることも示される。

### 3.4 感度分析

以上、パラメーターが標準値をとるときの計算結果を示した。しかしパラメーターの値には不確実性があり、その値を変化させた場合に、計算結果の定性的な性質が大幅に変化するという可能性がある。そこで以下では実験計画法 (design of experiments) [17][36] を用いて、各パラメーターの変化が計算結果にどのような影響を与えるか、またパラメーター間の相互作用がどのようになるかを検証するための感度分析を行う。

実験計画法においては、ある実験 (この場合はシミュレーション) の結果に影響を及ぼすと考えられる原因のうち、特にとりあげて変化させるものを因子 (factor) と呼び、因子のとりうる値を水準 (level) と呼ぶ。そして因子の水準と計算結果の間に線形の関係が成り立つことを仮定し、

$$y = A\theta + e \quad (3.8)$$

とおく。ここで  $y$  は結果を並べたベクトル、 $A$  は因子の水準を示す計画行列、 $\theta$  は因子の効果を示す変数からなる未知のベクトル、そして  $e$  は誤差を示すベクトルである。計画行列  $A$  を定めると、シミュレーションによって  $y$  が得られ、最小 2 乗法により  $\theta$  の推定ベクトル  $\hat{\theta}$  が得られる<sup>5</sup>。これにより各因子の変化が結果に及ぼす効果が推定できる。この効果は、1 因子

<sup>5</sup> 正規方程式  $A^T A \hat{\theta} = A^T y$  を解けばよい。



の主効果, 2 因子以上の交互作用に区別される。結果の平方和は変動因による平方和に分割され, 分散分析を行うことにより, さまざまな主効果, 交互作用が有意であるかどうかを検定することができる。

しかし因子数が多い場合, 各因子水準のすべての組合せについて実験を行うのに時間と労力がかかりすぎる。このとき一部の交互作用だけを考慮すればよいという仮定のもとに, 実験回数を減らすことができる。通常, A としては直交行列をとる。そしてこの場合,  $\hat{\theta}$  の計算, 分散分析も容易になる。これは要因実験の一部実施と呼ばれる。

表 3.4 因子とその水準

因子	パラメーター名称	記号	標準値	水準	
				-1	1
$F_1$	ダメージ係数 (第 1, 第 2 地域)	$d_1, d_2$	$3.0 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-7}$	$3.6 \times 10^{-7}$
$F_2$	ダメージ係数 (第 3, 第 4 地域)	$d_3, d_4$	$3.0 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-7}$	$3.6 \times 10^{-7}$
$F_3$	GHG 吸収率	$\delta$	0.004	0.0032	0.0048
$F_4$	GHG 残存率	$\sigma$	0.64	0.512	0.768
$F_5$	コスト関数の指数	$\gamma_c$	3.00	2.55	3.55
$F_6$	ダメージ関数の指数	$\gamma_d$	2.00	1.74	2.32

以上の方法を, 上にあげた地球温暖化の協力ゲームモデルのシミュレーション結果に適用する。第 1, 第 2 地域のダメージ係数  $d_1(d_2)$ , 第 3, 第 4 地域のダメージ係数  $d_3(d_4)$ , GHG 吸収率  $\delta$ , GHG 残存率  $\sigma$ , コスト関数の指数  $\gamma_c$ , ダメージ関数の指数  $\gamma_d$  の 6 つのパラメーターを因子とし, これらを 2 水準に変化させる。結果としては, 協解での世界全体の損失 ( $y_1[10^9 \text{ドル}]$ , 必要となる第 1, 第 2 地域から第 3, 第 4 地域への別払いの額 ( $y_2[10^9 \text{ドル}]$ ), および協解での世界全体の平均削減率 ( $y_3[\%]$ ) をとる。各因子に番号づけを行い,  $F_1, \dots, F_6$  とおき (表 3.4 参照), 結果の平均値を  $\mu$ , 因子  $F_i$  の主効果を  $\theta_i$ , 因子  $F_i, F_j$  の交互作用を  $\kappa_{ij}$  とおく。また平均の平方和を  $S_\mu$ ,  $F_i$  の主効果による結果の変動の平方和を  $S_i$ ,  $F_i, F_j$  の交互作用による平方和を  $S_{ij}$ , 誤差による平方和を  $S_e$  とおく。そして因子の水準を -1, 1 と正規化しておく。たとえば因子  $d_1$  の標準値は  $3.0 \times 10^{-7}$  であるが, 2 水準  $2.4 \times 10^{-7}, 3.6 \times 10^{-7}$  をとって  $d'_1 = \frac{d_1 - 3.0 \times 10^{-7}}{0.6 \times 10^{-7}}$  とおき,  $d'_1$  を新しい因子  $F_1$  としてとる。このとき, 2 つの水準はそれぞれ標準値の 2 割減, 2 割増とおいたものであり, この定め方に統計的な根拠があるというわけではない。  $F_2, F_3, F_4$  についても  $F_1$  と同様, 標準値の 2 割減, 2 割増として水準をとった。コスト関数の指数については, 削減率 0.15 に対応する削減コストは共通, 削減率 0.3



に対応する削減コストが指数 3.00(標準値)のときの 2 割減, 2 割増になるように水準を定めた。ダメージ関数の指数についても同様に, GHG 濃度 450ppm に対応するダメージは共通, GHG 濃度 550ppm に対応するダメージが指数 2.00 のときの 2 割減, 2 割増になるように水準を定めた。これらの場合, 指数の変化にともない, コスト係数, ダメージ係数も変化することは明らかである。各地域のコスト係数を因子として選ばなかったのは, 予備的なシミュレーションによってコスト係数が結果に与える影響がわずかであることが判明したからである。直交表と因子の割付け, 一部実施を行った結果をそれぞれ表 3.5, 表 3.6 に示す。

表 3.5 直交表と因子の割付け

番号	$\mu$	$F_1$	$F_2$	$F_3$			$F_6$			$F_4$			$F_5$	結果
1)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2)	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
3)	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
4)	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
5)	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
6)	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
7)	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
8)	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1
9)	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
10)	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1
11)	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1
12)	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
13)	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1
14)	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
15)	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
16)	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1
推定値	$\hat{\mu}$	$\hat{\theta}_1$	$\hat{\theta}_2$	$\hat{\kappa}_{12}$	$\hat{\theta}_3$		$\hat{\theta}_6$	$\hat{\kappa}_{16}$	$\hat{\kappa}_{26}$		$\hat{\theta}_4$	$\hat{\theta}_5$		
平方和	$S_\mu$	$S_1$	$S_2$	$S_{12}$	$S_3$		$S_6$	$S_{16}$	$S_{26}$		$S_4$	$S_5$		

表 3.6 シミュレーション結果

番号	$y_1$	$y_2$	$y_3$	番号	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1)	312	56	24.9	9)	54	4	16.0
2)	85	9	18.5	10)	265	9	20.6
3)	152	25	25.0	11)	454	32	26.5
4)	476	34	23.8	12)	150	4	20.8
5)	241	85	34.1	13)	45	5	13.2
6)	75	9	14.3	14)	208	19	26.0
7)	141	20	17.5	15)	333	80	37.4
8)	368	66	34.3	16)	130	7	15.3

表 3.7  $\theta$  の推定値

効果	$y_1$	$y_2$	$y_3$	効果	$y_1$	$y_2$	$y_3$
$\hat{\mu}$	218	29.0	23.0	$\hat{\theta}_5$	19.2	-7.50	-3.50
$\hat{\theta}_1$	13.2	9.00	1.04	$\hat{\theta}_6$	-1.56	9.38	1.31
$\hat{\theta}_2$	25.4	-7.38	-1.00	$\hat{\kappa}_{12}$	-0.438	0.375	0.00
$\hat{\theta}_3$	-57.4	-4.50	-2.06	$\hat{\kappa}_{16}$	-18.2	14.1	0.0125
$\hat{\theta}_4$	114	18.6	5.44	$\hat{\kappa}_{26}$	1.06	-1.75	-0.225

シミュレーションは16回行い、各シミュレーションに1), 2), ... と番号をつける。表 3.5 中の16次正方行列は直交行列であり、式(3.8)のAに相当する。各因子は、行列の中の1つの列に対応しており、行列の成分は各シミュレーションでのその因子の水準を表している。たとえば因子 $F_1$ はシミュレーション1)から8)までは水準1をとり、9)から16)までは水準-1をとる。これを、因子 $F_1$ をAの第2列に割付けるといふ。これらの割付けにより、各交互作用も割付けられることになる<sup>6)</sup>が、ここでは $F_1F_2, F_1F_6, F_2F_6$ の交互作用だけを考慮することにした。つまり先進国地域と途上国地域のダメージ係数の間、ダメージ係数とダメージ関数の指数には特別な関連があることを予想したのである。3因子以上の交互作用については考えない。

表 3.6 より、各々の計算結果が、パラメーター値の変化によって広範囲にわたって変動することがわかる。表 3.7 は、表 3.5、表 3.6 をもとに推定されるベクトル $\hat{\theta}$ の成分を記したものである。この値が正のときは、効果と計算結果との間に正の相関、負のときは負の相関があることになる。以下因子ごとに影響をみていく。

<sup>6)</sup> 因子 $F_i, F_j$ が割付けられる列の各成分の積を成分とする列はAの中のいずれかの列になるが、それが $F_iF_j$ の交互作用が割付けられる列となる。

まずダメージ係数( $F_1, F_2$ )に関しては、世界全体の損失( $y_1$ )と正の相関にあるが、途上国地域のダメージ係数( $F_2$ )の方が相関が強い。この事実は、2050年における途上国のGDPがかなり大きくなっていることを示す。必要となる別払いの額( $y_2$ )は、 $F_2$ が増加するにつれて減少する。これは $F_2$ が大きい場合、途上国地域の私的戦略が大きくなり、共同戦略との差が小さくなるためであろう。協力解での平均削減率( $y_3$ )も $F_2$ と負の相関にあるが、これは途上国地域の粗排出量が先進国地域に比べて少ないためであると思われる。

GHG吸収率( $F_3$ )は、すべての結果と負の相関にある。逆にGHG残存率( $F_4$ )は正の相関にある。これらの効果の符号は予想される通りである。 $F_4$ の主効果の絶対値はつねに最大となっているのが注目される。 $F_4$ がGHG濃度の上昇を通じて、長期にわたって結果に影響を及ぼすことがわかる。

コスト関数、ダメージ関数の指数( $F_5, F_6$ )の影響はさほど大きくないが、シミュレーション期間を延長すれば、急激にこれらの影響が強まることが予想される。交互作用については、 $F_1 F_6$ の作用と結果 $y_1, y_2$ との相関が大きいものの、他のものは無視できる範囲にある。

表3.8、表3.9、表3.10は、表3.6、表3.7をもとに求められる分散分析表である。表の中の「分散比」とは各要因による変動の平方和を誤差分散 $V_e$ で割った値であり、要因の自由度、誤差の自由度に依存した $F$ -分布にしたがう。 $F$ 検定によってこの要因の効果が有意であるかどうかを判断する。5%の水準で有意なものには印\*、1%の水準で有意なものには印\*\*をつけてある。この場合は、誤差の自由度が6なので、ある要因の分散比が $F$ -分布表での $F_6^1(0.05) = 5.99$ 以上の場合に、それが5%の水準で有意であるとし、さらに $F_6^1(0.01) = 13.7$ 以上の場合には、1%の水準で有意であるとする。

$F_4$ だけがすべての計算結果に1%の水準で有意な影響を与えている。また $F_3$ の影響も結果 $y_1, y_3$ において1%の水準で有意である。今後のGHGの大気中での挙動に関する研究が重要になることが示される。その他目立つのは、 $F_5$ の主効果、 $F_1 F_6$ の交互作用である。これらのパラメーターについても、さらに厳密な推定が必要となる。



表 3.8 分散分析表 ( $y_1$ )

変動因	自由度	平方和	分散比
$\mu$	1	760384	
$F_1$	1	2788	*8.60
$F_2$	1	10323	**31.9
$F_3$	1	52716	**163
$F_4$	1	207936	**642
$F_5$	1	5898	**18.2
$F_6$	1	38.9	0.120
$F_1F_2$	1	3.07	0.00948
$F_1F_6$	1	5300	**16.4
$F_2F_6$	1	18.0	0.0556
誤差	6	1946	$V_e = 324$

表 3.9 分散分析表 ( $y_2$ )

変動因	自由度	平方和	分散比
$\mu$	1	13456	
$F_1$	1	1296	*6.65
$F_2$	1	871	4.47
$F_3$	1	324	1.66
$F_4$	1	5535	**28.4
$F_5$	1	900	4.62
$F_6$	1	1408	*7.22
$F_1F_2$	1	2.25	0.0115
$F_1F_6$	1	3181	**16.3
$F_2F_6$	1	49.0	0.251
誤差	6	1167	$V_e = 195$

表 3.10 分散分析表 ( $y_3$ )

変動因	自由度	平方和	分散比
$\mu$	1	8464	
$F_1$	1	17.3	3.44
$F_2$	1	16.0	3.18
$F_3$	1	67.9	*13.5
$F_4$	1	473	**94.0
$F_5$	1	196	**39.0
$F_6$	1	27.5	5.47
$F_1 F_2$	1	0.00	0.00
$F_1 F_6$	1	0.0025	0.0005
$F_2 F_6$	1	0.810	0.161
誤差	6	30.2	$V_e = 5.03$

### 3.5 まとめ

本章の内容をここで簡単に総括する。

まず 3.1 節では協力ゲームの定式化、提携、特性関数、そしてゲームの解の概念として、すべての提携の不満を調整する配分である仁について紹介した。

3.2 節では地球環境対策に関する協力ゲームモデルを記述した。ここではプレイヤーを世界の各地域、戦略を各地域の汚染物質排出量の削減率とし、目的関数を将来の 1 時刻における削減コストと汚染によるダメージの和 (損失) とおいた。協力解において、プレイヤーが世界全体の損失を最小化するように行動をとることを仮定し、それを共同戦略と呼ぶことにした。

3.3 節では具体的な問題として地球温暖化問題を取りあげ、数値計算を行った。その際、世界を 4 分割し、第 1 地域を米国、第 2 地域をその他の OECD 諸国、第 3 地域を中国、第 4 地域を残りの国々とした。その結果、2050 年における世界全体の目的関数の最小値は 2000 億ドル余りとなり、そのときの共同戦略はおおよそ 20-25% となった。提携の特性関数の値をもとに仁を計算し、各地域のコスト負担を求めたところ、この状態を実現するためには、主として第 2 地域から第 3、第 4 地域への別払いが必要となることが示された。また各地域のただ乗り利益を、他の地域が共同戦略をとっているときに、自分だけが協定を抜けて最適戦略をとるとどれだけ得になるのかを示す変数として定義したが、その対 GDP 比では第 3 地域が際だって大きく、協定を抜ける可能性が高いのが第 3 地域であることがわかった。

3.4 節では実験計画法を用いて感度分析を行った。考慮した因子は先進国地域、途上国地

域のダメージ係数、GHG 吸収率、GHG 残存率、コスト関数、ダメージ関数の指数の計 6 つであり、それらを 2 水準に変化させ、一部実施を行い、因子が計算結果に与える効果を推定した。ここで計算結果としては、協力解での世界全体の損失、必要となる先進国から途上国への別払いの金額、協力解での GHG の平均削減率をとった。さらに先進国と途上国のダメージ係数の間と、ダメージ係数とダメージ関数の指数の間に交互作用があることを仮定した。またその効果が有意であるかどうかを、分散分析により検定した。

感度分析により、計算結果が幅広い値をとること、GHG 残存率、GHG 吸収率という GHG の挙動を表す因子が結果に大きな影響を与えることなどが示された。ダメージ関数の指数の影響はそれほど大きくないが、先進国地域のダメージ係数との交互作用が有意になった。ただしこれらは因子の水準の選び方、割付けの方法にある程度依存していることも考えられるので、さらに慎重な分析が必要となるであろう。



## 第 4 章

### 動学的分析

#### 4.1 動的ゲームとその均衡

3 章で地球環境対策を協力ゲームとして定式化し解を求めた結果、途上国地域への別払いが必要になることが明らかになった。しかしこの分析では、目的関数を将来の 1 時刻におけるプレイヤーの損失としているので、問題の動的な性質を捉えるには不十分である。また不確実性という点からも、長期間一定の割合で削減を続けるという協定はあまり現実的でない。そこで本章では地球環境対策を動的ゲーム (dynamic game) によって記述し、その非協力 Nash 均衡を求める。この場合、戦略は各期の汚染物質削減率とする。別払いの方法としては、汚染物質削減に関する技術援助、資金援助を考える。さらに、このゲームが協力ゲームであるとしたときの Pareto 最適解を求め、非協力均衡解と比較する。

まず本節では、動的ゲームの定式化およびその解について紹介する [5][7][19]。以下考えるのは、非対称な  $n$  人のプレイヤーによる非零和、非協力ゲームである。3 章と同様にプレイヤーの集合を  $N = \{1, \dots, n\}$  と表し、時間  $t$  を離散的にとる<sup>1</sup>。プレイヤー  $i \in N$  はそれぞれ時刻  $t$  の戦略として制御変数  $u_i(t) \in U_i^t$  を決定して、次の目的コスト関数を最小化する。

$$J^i(u_1, \dots, u_n) = \sum_{t=0}^T \rho^t f^i(t, x(t), u_1(t), \dots, u_n(t)). \quad (4.1)$$

ここで  $u_i = (u_i(0), \dots, u_i(T)) \in U_i (= \prod_{t=0}^T U_i^t)$ ,  $T$  はゲームの終端となる時刻,  $\rho$  は割引パラメーターである。目的関数は、各時刻でのコストの現在価値の総和であるということになる。 $x$  はゲームの「状態 (state)」を表す変数であり、状態方程式

$$x(t+1) = g(t, x(t), u_1(t), \dots, u_n(t)), x(0) = x_0 \quad (4.2)$$

<sup>1</sup> 時間を連続的にとる場合の動的ゲームは、微分ゲーム (differential game) とも呼ばれる。

にしたがって推移する。つまりあるプレイヤーの戦略は、自分のコストだけではなく、他のプレイヤーのコスト、さらにはゲームの状態にも影響を与える。動的ゲームは、プレイヤーの戦略に依存してゲームの状態が変化していくという点で、同一のゲームを複数回繰り返すことを仮定した繰り返しゲーム (repeated game) とは区別される。

戦略の組  $(u_1^*, \dots, u_n^*)$  が<sup>2</sup>

$$\begin{cases} J^1(u_1^*, \dots, u_n^*) \leq J^1(u_1, u_2^*, \dots, u_n^*) \quad \forall u_1 \in U_1, \\ \vdots \\ J^n(u_1^*, \dots, u_n^*) \leq J^n(u_1^*, \dots, u_{n-1}^*, u_n) \quad \forall u_n \in U_n \end{cases} \quad (4.3)$$

をみたすとき、 $(u_1^*, \dots, u_n^*)$  を Nash 均衡、または単に均衡 (equilibrium) と呼ぶ。均衡となる戦略がとられているとき、各プレイヤーは自分の戦略を変えるインセンティブをもたない。なぜなら、均衡状態においては、ひとりのプレイヤーが戦略を変えると、そのプレイヤーのコストが増加することになるからである。以下、各時刻  $t$  でのプレイヤー  $i$  の均衡戦略を  $u_i^*(t)$  と表す。

動的ゲームの均衡はゲームの情報構造 (information structure) <sup>2</sup>によっていろいろと分類されるが、以下ではフィードバック均衡について考える。フィードバック均衡 (feedback equilibrium) とは、プレイヤーが各時刻  $t$  においてその期の状態変数の値を観測し、それだけをもとに戦略を決定する、すなわち  $u_i(t) = u_i(t, x(t))$  であるときの均衡である<sup>3</sup>。このときプレイヤーの戦略は、過去の戦略や状態変数の過去の値にも依存しない。各プレイヤーのフィードバック均衡戦略を、すべての部分ゲーム (subgame) <sup>4</sup>に限定したときに得られる戦略は、その部分ゲームの均衡となる。これはフィードバック均衡の部分ゲーム完全 (subgame perfect) と呼ばれる性質である。厳密には、 $\forall i \in N, \forall u_i(t) \in U_i^t \ (t = 0, \dots, T)$  に対して、フィードバック均衡  $(u_1^*, \dots, u_n^*)$  は (4.3) よりも限定的な次の式をみたさなければならない。

$$\begin{cases} J^1(u_1(0), \dots, u_1(T-1), u_1^*(T), \dots, u_n(0), \dots, u_n(T-1), u_n^*(T)) \\ \leq J^1(u_1(0), \dots, u_1(T-1), u_1(T), \dots, u_n(0), \dots, u_n(T-1), u_n^*(T)), \\ \vdots \\ J^n(u_1(0), \dots, u_1(T-1), u_1^*(T), \dots, u_n(0), \dots, u_n(T-1), u_n^*(T)) \\ \leq J^n(u_1(0), \dots, u_1(T-1), u_1^*(T), \dots, u_n(0), \dots, u_n(T-1), u_n(T)), \end{cases}$$

<sup>2</sup>ゲームの情報構造とは、それぞれのプレイヤーが過去、現在の情報 (自分の戦略、他のプレイヤーの戦略、ゲームの状態など) の中で何をもとに戦略を決定するかを示す。

<sup>3</sup>他の均衡の概念としては、open-loop 均衡、closed-loop 均衡などがある。

<sup>4</sup>あるゲームの部分ゲームとは、もとのゲームの1時点を初期点とおいたゲームのことを指す。

$$\begin{cases}
J^1(u_1(0), \dots, u_1(t-1), u_1^*(t), \dots, u_1^*(T), \dots, u_n(0), \dots, u_n(t-1), u_n^*(t), \dots, u_n^*(T)) \\
\leq J^1(u_1(0), \dots, u_1(t-1), u_1(t), u_1^*(t+1), \dots, u_1^*(T), \dots, u_n(0), \dots, u_n(t-1), u_n^*(t), \dots, u_n^*(T)), \\
\vdots \\
J^n(u_1(0), \dots, u_1(t-1), u_1^*(t), \dots, u_1^*(T), \dots, u_n(0), \dots, u_n(t-1), u_n^*(t), \dots, u_n^*(T)) \\
\leq J^n(u_1(0), \dots, u_1(t-1), u_1^*(t), \dots, u_1^*(T), \dots, u_n(0), \dots, u_n(t-1), u_n(t), u_n^*(t+1), \dots, u_n^*(T)), \\
\vdots \\
J^1(u_1^*(0), \dots, u_1^*(T), \dots, u_n^*(0), \dots, u_n^*(T)) \leq J^1(u_1(0), u_1^*(1), \dots, u_1^*(T), \dots, u_n^*(0), \dots, u_n^*(T)), \\
\vdots \\
J^n(u_1^*(0), \dots, u_1^*(T), \dots, u_n^*(0), \dots, u_n^*(T)) \leq J^n(u_1^*(0), \dots, u_1^*(T), \dots, u_n(0), u_n^*(1), \dots, u_n^*(T)).
\end{cases}$$

上式は、各時刻  $t$  において過去のプレイヤーの戦略の履歴 (history) がどのようなものであっても、その時刻での戦略  $(u_1^*(t), \dots, u_n^*(t))$  が Nash 均衡戦略となることを示している。これらをみたす戦略の組  $(u_1^*, \dots, u_n^*)$  は (4.3) もみたすことが容易に確かめられる。

以上の定義から明かなように、フィードバック均衡を求めるためには、動的計画法 (dynamic programming) を用いることが必要である。時刻  $t$  において状態変数の値が  $x$  であるとする。ここで  $x$  は、固定されたある値であることに注意する。このとき戦略の組  $(u_1^*, \dots, u_n^*)$  は、以下の再帰関係式をみたす関数  $V^i$  が存在する場合、そしてその場合に限りフィードバック均衡戦略となる。

$$\begin{cases}
V^1(t, x) = \min_{u_1(t)} \{ \rho^t f^1(t, x, u_1(t), u_2^*(t), \dots, u_n^*(t)) + V^1(t+1, x(t+1)) \} \\
= \rho^t f^1(t, x, u_1^*(t), u_2^*(t), \dots, u_n^*(t)) + V^1(t+1, g(t, x, u_1^*(t), u_2^*(t), \dots, u_n^*(t))), \\
\vdots \\
V^n(t, x) = \min_{u_n(t)} \{ \rho^t f^n(t, x, u_1^*(t), \dots, u_{n-1}^*(t), u_n(t)) + V^n(t+1, x(t+1)) \} \\
= \rho^t f^n(t, x, u_1^*(t), \dots, u_{n-1}^*(t), u_n^*(t)) + V^n(t+1, g(t, x, u_1^*(t), \dots, u_{n-1}^*(t), u_n^*(t))) \\
(t \leq T-1),
\end{cases} \quad (4.4)$$

$$\begin{cases}
V^1(T, x) = \min_{u_1(T)} \rho^T f^1(T, x, u_1(T), u_2^*(T), \dots, u_n^*(T)) \\
= \rho^T f^1(T, x, u_1^*(T), u_2^*(T), \dots, u_n^*(T)), \\
\vdots \\
V^n(T, x) = \min_{u_n(T)} \rho^T f^n(T, x, u_1^*(T), \dots, u_{n-1}^*(T), u_n(T)) \\
= \rho^T f^n(T, x, u_1^*(T), \dots, u_{n-1}^*(T), u_n^*(T))
\end{cases} \quad (4.5)$$

(4.4), (4.5) を連続時間におきかえた偏微分方程式は、Hamilton-Jacobi-Bellman 方程式と



呼ばれる [32]. 関数  $V^i(t, x)$  は, 他のプレイヤーの将来の戦略が均衡戦略であるとき, 時刻  $t$  以降, プレイヤー  $i$  が受ける総コストの最小値を意味する. つまり

$$\begin{cases} V^1(t, x) = \min_{u_1(t), \dots, u_1(T)} \sum_{\tau=t}^T \rho^\tau f^1(\tau, x(\tau), u_1(\tau), u_2^*(\tau), \dots, u_n^*(\tau)) \\ \vdots \\ V^n(t, x) = \min_{u_n(t), \dots, u_n(T)} \sum_{\tau=t}^T \rho^\tau f^n(\tau, x(\tau), u_1^*(\tau), \dots, u_{n-1}^*(\tau), u_n(\tau)) \end{cases} \quad (4.6)$$

である. 以下  $V^i(t, x)$  を, プレイヤー  $i$  の状態評価関数 (state evaluation function) と呼ぶことにする.

フィードバック均衡  $(u_1^*, \dots, u_n^*)$  は, (4.4), (4.5) で表される計  $n \times (T+1)$  本の式をみたさなければならない. フィードバック均衡を求めるためには, (4.5) を境界条件として, まずすべての状態  $x$  について各プレイヤー  $i$  の終端期における均衡戦略  $u_i^*(T, x)$ , 状態評価関数  $V^i(T, x)$  の値を求め, (4.4) を用いて時間的に後向きに逐次解いていく. そしてすべての時刻  $t$ , 状態  $x$  について  $u_i^*, V^i$  が求まれば, 今度は  $x$  の初期値をもとに時間的に前向きに均衡戦略, 均衡解における状態変数の経路を求めていけばよい. プレイヤー  $i$  の目的関数の値は, 時刻  $t=0$ , 状態  $x_0$  における状態評価関数  $V^i(0, x_0)$  の値となる.

なお各時刻, 状態での均衡戦略がどのように求められるかについて補足しておく. まずある時刻, ある状態において他のプレイヤーの戦略が与えられたときに, 各プレイヤーがどの戦略をとれば自分の状態評価関数を最小化できるかを計算しておく. この戦略を最適反応戦略 (optimal response strategy) と呼ぶ. そしてある  $(u_1^*(t, x), \dots, u_n^*(t, x))$  という戦略の組合せにおいて, 各々の  $u_i^*(t, x)$  が他のプレイヤーの戦略に対する最適反応戦略になっているとき, これらは時刻  $t$ , 状態  $x$  における均衡戦略となる. このような小問題を次々と解いていくことによって全時刻, 全状態に関する均衡戦略を求めることができる. しかし通常の場合, 動的ゲームのフィードバック均衡を解析的に求めることは不可能であり, 数値解を求めることになる.

動的ゲームの均衡は, コスト関数, 状態方程式を表す関数が連続であり, かつコスト関数が戦略の凸関数になっているときには, その存在が保証されている. しかし一意性については, 一般には保証されない.

## 4.2 地球環境の動的ゲームモデル

4.1 節で紹介した動的ゲームを用いて地球環境対策をモデル化する. 以下使用する記号は 3.2 節と重複しているものが多いので, その場合は特に説明を加えない.

各地域の戦略は, 各期の汚染物質排出量の削減率  $a_i(t) \in [0, 1]$  であるとする. 第  $i$  地域の

目的関数 (損失) は,

$$J^i(a_1, \dots, a_n) = \sum_{t=0}^T \rho^t Y_i(t) \{C_i(a_i(t)) + D_i(M(t))\} \quad (4.7)$$

となる。ここで  $a_i$  は第  $i$  国の削減率をなすベクトルである。第  $i$  地域の損失は、汚染物質削減コストと、汚染によるダメージの現在価値の総和である。また汚染物質濃度  $M(t)$  を状態変数とみなし、(3.3) 式と同様の

$$M(t+1) = (1-\delta)M(t) + \sigma \sum_{i \in N} (1-a_i(t))E_i(t), \quad M(0) = M_0 \quad (4.8)$$

という状態方程式をみたすことを仮定する。この場合フィードバック均衡  $(a_1^*, \dots, a_n^*)$  は、(4.4)、(4.5) に相当する

$$\begin{aligned} V^i(t, M) &= \min_{a_i(t)} [\rho^t Y_i(t) \{C_i(a_i(t)) + D_i(M)\} + V^i(t+1, M(t+1))] \\ &= \rho^t Y_i(t) \{C_i(a_i^*(t)) + D_i(M)\} \\ &\quad + V^i(t+1, (1-\delta)M + \sigma \sum_{i \in N} (1-a_i^*(t))E_i(t)) \quad \forall i \quad (t \leq T-1), \quad (4.9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V^i(T, M) &= \min_{a_i(T)} \rho^T Y_i(T) \{C_i(a_i(T)) + D_i(M)\} \\ &= \rho^T Y_i(T) \{C_i(a_i^*(T)) + D_i(M)\} \quad \forall i. \quad (4.10) \end{aligned}$$

という式をみたす。そして状態評価関数  $V^i(t, M)$  は

$$V^i(t, M) = \min_{a_i(t), \dots, a_i(T)} \sum_{\tau=t}^T \rho^\tau Y_i(\tau) \{C_i(a_i(\tau)) + D_i(M(\tau))\} \quad (4.11)$$

と表される。まず (4.9)、(4.10) をもとに均衡を計算して、基準ケースでの結果を得る。このとき前節と同様、(4.10) をもとに時刻  $T$ 、状態  $M$  における均衡削減率  $a_i^*(T, M)$ 、状態評価関数  $V^i(T, M)$  を求め、(4.9) を用いて時間的に後向きに逐次解いていく。各時刻において、すべての地域の削減率が他の地域の削減率の最適反応戦略になっている場合、それらの削減率は均衡であると判断される。実際のところ、(4.10) およびコスト関数、ダメージ関数の性質から、時刻  $T$  においてすべての地域の均衡削減率が 0 となることは明らかである。したがってそれを出発点として均衡を求めていくことになる。地域  $i$  の目的関数の値は  $V^i(0, M_0)$  となる。

最適反応戦略の概念図を、プレイヤー数 (地域数) が 2 のときを例にとり、図 4.1 に示した。図の横軸、縦軸はある時刻、状態におけるプレイヤー 1、プレイヤー 2 の戦略をそれぞれ示している。図の中の 2 つの曲線は、2 人のプレイヤーが、他のプレイヤーの戦略に対してと

る最適反応戦略を表しており、それらの交点が均衡戦略を表すことになる。最適反応戦略の曲線は右下がりになることが予想される。

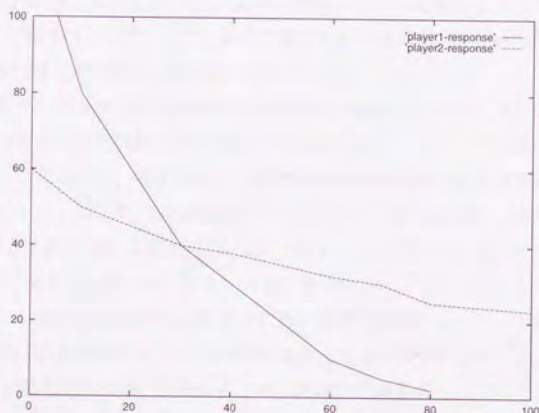


図 4.1 ある時刻、状態における最適反応戦略の概念図

次に国際協力を行う場合を考える。ここでは技術援助ケース、経済援助ケースという2つの援助形式を考える。

技術援助ケースとは、援助地域が被援助地域に対してODA(政府開発援助)を通じて汚染物質削減技術の移転を行い、被援助地域の削減の一部を負担するという協定をもうけた場合である[27]。削減率の決定は、各地域に任されているとする。援助地域は専門家や協力隊を被援助地域に派遣し、被援助地域の工場、発電所などの古い設備を新しいものに更新したり、汚染物質削減に寄与する機材の供与を行う。また必要に応じて環境保全設備のマネージメントについての教育を現地で行い技術者を養成する。これらの技術移転は無償で行われるものとする。先進諸国は公害問題、オイルショックを経験しており、汚染物質削減、省エネルギーに関する技術やノウハウの蓄積があるので、これらの分野での発展途上諸国への援助が有効であると考えられる。

日本から中国への $\text{SO}_x$ 削減技術の移転を例にとって説明しよう[8]。中国ではエネルギー源を、硫黄分を多く含む石炭に依存しているので、その燃焼によって酸性雨の原因となる $\text{SO}_x$



が大量に排出されることになる。そこで  $\text{SO}_x$  削減のために日本が中国の製鉄所、火力発電所に排煙脱硫装置を供給するという技術援助が実際になされている。この場合、日本側が装置の図面を提供し、組み立て作業は中国で実施される。派遣された日本の技術者は装置の据え付けの監督、試運転の指導、メンテナンス方法の指導に関しても責任をもって行うことになる。つまりハード面だけでなく、ソフト面での協力も不可欠である。これら一連の技術協力には、1年あたり数億ドルの資金が投入されている。

次に経済援助ケースとは、援助地域が被援助地域の削減コストの一部を資金援助の形で支払い、被援助地域が自国の技術で削減を行う場合である。

技術援助ケースにおいて、第  $j$  地域の汚染物質削減の中で第  $i$  地域が負担する割合を技術援助係数と呼び、 $h_{ij}$  と表す。経済援助ケースにおいて、第  $j$  地域のコストの中で第  $i$  地域が負担する割合を経済援助係数と呼び、 $h'_{ij}$  と表す。ここで  $0 \leq h_{ij} \leq 1, 0 \leq h'_{ij} \leq 1 \forall i, j, \sum_{i \in N} h_{ij} = \sum_{i \in N} h'_{ij} = 1 \forall j$  という条件をおく。

第  $i$  地域がある地域の排出量の  $a_i$  の割合にあたる分を削減しようという場合には、仮定によりその地域の GDP の中で  $C_i(a_i)$  の割合にあたる金額の投資が必要である。第  $i$  地域が第  $j$  地域に技術援助を行うとき、協定により第  $j$  地域の削減量の  $h_{ij}$  にあたる部分を担当することになるので、第  $j$  地域が決定する削減率  $a_j$  に応じて  $Y_j h_{ij} C_i(a_j)$  の投資を行う。これは先に述べたように第  $i$  地域が、第  $j$  地域の工場などの一部に、削減率  $a_j$  を実現するための削減設備（例えば排熱利用設備や脱硫装置など）を設置することに相当する。結果的にこれは第  $j$  地域の削減量 1 単位あたりのコストを下げるのに寄与する。この場合技術はフローとして考えられ、ストックの蓄積による効果はないものとする。また外国への投資は一般に、本国の場合とは技術的、制度的条件の違いにより効率が異なる可能性はあるが、ここでは効率は変らないものとする。この技術援助は、最近盛んに議論されている、汚染物質削減に関する複数国の共同実施 (joint implementation) の最も単純な形とみなされる。

経済援助ケースにおいては、第  $i$  地域の負担する第  $j$  地域の削減コストは  $h'_{ij} Y_j C_j(a_j)$  となる。これは第  $j$  地域の削減コストが  $Y_j C_j(a_j)$  であることから明らかである。

以上により第  $i$  地域の目的関数は、技術援助ケースでは

$$J^i(a_1, \dots, a_n) = \sum_{t=0}^T \rho^t \left\{ \sum_{j \in N} h_{ij} Y_j(t) C_i(a_j(t)) + Y_i(t) D_i(M(t)) \right\}, \quad (4.12)$$

経済援助ケースでは

$$J^i(a_1, \dots, a_n) = \sum_{t=0}^T \rho^t \left\{ \sum_{j \in N} h'_{ij} Y_j(t) C_j(a_j(t)) + Y_i(t) D_i(M(t)) \right\} \quad (4.13)$$

となる。これらのケースでの解を、非協力ゲームの均衡として計算する。(4.12)、(4.13)の相違点は少し分りにくい、 $C_i(a_j(t))$ ,  $C_j(a_j(t))$ の部分であり、これは第  $j$  地域の削減コストを負担する主体が異なることを意味している。

国際協力を分析する際に、非協力ゲームのモデルを用いるのは少し不自然であるように響くかもしれない。そこで誤解を避けるために再度述べておくが、非協力ゲームとはプレイヤーのとり戦略についての拘束力をもった協定が存在しないゲームのことを指すのであって、プレイヤー同士が敵対しあう事態を定式化するものとは限らない。ここでは各地域の削減率に関する強制的な取り決めがない代りに、国際援助を行うという枠組をつくり、その仮定の下で援助国、被援助国が自主的な決定をするという状況を記述するために非協力ゲームのモデルを用いている。削減コストが相対的に高い国では、通常汚染物質を削減する誘因が働かないと考えられる。そこで他の国が援助することによって汚染物質の排出を抑え、世界全体の目的関数の総和を基準ケースよりも低下させることができるかどうかを確かめる。この援助は、経済援助ケースにおいては協力ゲームでの別払い(3章参照)に相当すると考えられる。(4.12)、(4.13)を比較すると、技術援助が経済援助よりも大きな効果をあげることは自明である。なぜなら技術援助を通じて、コスト係数の高い国における削減をコスト係数の低い国が代りに受けもって行うことによって、地域全体の目的関数を低下させることができるからである。したがって以下のシミュレーションでは、技術援助の効果を検証するとともに、技術援助ケースと経済援助ケースの均衡解の差異がどの程度あるかということも分析の対象とする。

以上是非協力ゲームの均衡であったが、次にこのゲームが協力ゲームであるとするとき、つまり各国が事前に拘束力をもった協定を結ぶとすると、どのような解が得られるのかを求める。すべての国が協力して削減を行う場合の Pareto 最適解は<sup>5</sup>

$$(\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n) = \arg \min \left\{ \sum_{i \in N} \alpha_i J^i(a_1, \dots, a_n) \right\} \quad (4.14)$$

をみだす  $(\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n)$  として求められる。この解を各ケースでの協力学と呼ぶことにする。ここで  $\alpha_i (\geq 0)$  は重みパラメーターであり、 $\sum_{i \in N} \alpha_i = 1$  をみだす。この解は Nash 均衡という概念とは異質のものであり、1人ゲームの最適解ということになっている。つまり何らかの超国家的組織が存在して、地域ごとの重みに依存した目的関数を最小化するという少々

<sup>5</sup>  $n$  人の主体のコストを並べた 2 つのベクトル  $x = (x_1, \dots, x_n)$ ,  $y = (y_1, \dots, y_n)$  について  $x_i \leq y_i$ ,  $\forall i \in N (= \{1, \dots, n\})$  かつ  $\exists j \in N$  s.t.  $x_j < y_j$  が成り立つとき、 $x$  は  $y$  を Pareto 支配する、または  $x$  は  $y$  よりも Pareto 優越的であるという。あるコストベクトル  $x \in X$  が  $X$  に属する他のどのベクトルにも Pareto 支配されない場合、 $x$  は  $X$  内で Pareto 最適であるという。Pareto 最適な状況下では、ひとりのコストを低減させるためには必ず他の誰かのコストを上昇させなければならない。詳しくは [37] など参照。



非現実的な状態を想定している。本章においては基本的に非協力ゲームの均衡として解を求めるが、それはその方が現実的であり、しかも強制的な協定よりも、全地域が自発的な決定をするという協定の方が受け入れられやすいと判断したからである。各ケースの均衡における各地域の目的関数の値が、この協力解での値にどれだけ近づくかに注目する。

### 4.3 数値計算

#### 4.3.1 主な仮定

ここでは動的ゲームを用いて3章と同様、地球温暖化対策を分析する<sup>6</sup>。まず計算にかかる時間を評価しなければならない。

数值的に均衡を解く場合、戦略や状態を離散化する。プレイヤーの人数を  $n$ 、とりうる戦略の数を  $s$  とおくと、ある時刻  $t$ 、状態  $x$  におけるプレイヤー  $i$  の均衡戦略を求める場合、他のプレイヤーの戦略のすべての組み合わせ  $s^{n-1}$  通りに対するプレイヤー  $i$  の最適反応戦略を求めなければならないので、 $s^n$  回状態評価関数の計算をすることになる。これを  $i = 1, \dots, n$  について行うので、計算の回数は  $ns^n$  となる。この計算にかかる時間はプレイヤーの数  $n$  に比例し、考慮する時刻、状態の数は定数であるので、時間計算量 (time complexity) のオーダーは  $O(n^2 s^n)$  ということになる。ここで  $s$  が 2, 3 といった小さな値をとればよいが、たとえば戦略を 0.01 刻みに離散化する場合、 $s = 101$  となり、 $n$  が 2 から 3 に増えるだけでも計算量が 200 倍以上になってしまい、2 から 4 に増えるならば、40000 倍以上になってしまう。したがって本節では 3 章と同じく地域数を 4 とする (地域分割の方法も 3 章と同じ) が、計算時間を考慮して戦略 (削減率) を 0.05 刻みに離散化し、また次節の感度分析では地域数を 2 として計算を行う。GHG 濃度については、上限 (650ppm)、下限 (350ppm) を設けて 1ppm 刻みに離散化した。各パラメーターの値は 3 章と同じとする。割引パラメーター  $\rho$  は 0.96 とおく。コスト関数、ダメージ関数の形状も 3 章と同じとする。下にそれらを再掲する。

$$C_i(a) = c_i a^3, \quad (4.15)$$

$$D_i(M) = d_i (M - M_0)^2. \quad (4.16)$$

シミュレーションは削減なしケース、基準ケース、技術援助ケース、経済援助ケースの 4 通りについて行う。削減なしケースは比較の対象として計算され、削減率を  $a_i(t) \equiv 0$  とおい

<sup>6</sup>本節の内容は、筆者が先に行った研究 [12][13][14] と同じであるが、ここではデータの改良、技術援助の定式化などの再検討を行い、計算をし直した結果を示す。[12][13][14] では地域数を 2 とした計算結果が記述されているが、本節ではモデルを拡張して地域数を 4 とした。



た場合である。これは温暖化によるダメージが存在しないと仮定すれば、最適解ということになる。

基準ケースは式(4.9)、(4.10)によって均衡を求めた場合である。これはいわゆる将来の予測というわけではない。ただし基準ケースでの均衡戦略は、今後各地域にコストやダメージについての正確な情報が与えられるという仮定のもとでの、各地域の合理的な戦略と解釈される。

次に地域間の技術援助、経済援助を考慮した技術援助ケース、経済援助ケースは、先進国地域が途上国地域のGHG削減に対し、技術的、経済的な援助をしてコストを負担する場合であり、それぞれ式(4.12)、(4.13)によって均衡が求められる。さまざまな援助形式があると思われるが、以下ではどこが援助をすべきかということに焦点をおき、次の単純化された3通りの形式を考える。

#### 1. 第1地域負担形式

第2地域からの援助係数は0とし、第1地域から第3、第4地域への援助だけが行われるとする。さらに単純化して  $h_{13} = h_{14}$ ,  $h'_{13} = h'_{14}$  とおく。その他の援助係数は、 $h_{11} = h_{22} = 1$ ,  $h_{33} = 1 - h_{13}$ ,  $h_{44} = 1 - h_{14}$ , それ以外は0となる(経済援助ケースの場合も同様)。

#### 2. 第2地域負担形式

1.とは逆に第1地域からの援助係数を0とし、第2地域から第3、第4地域への援助だけが行われるとする。ここでも単純化して  $h_{23} = h_{24}$ ,  $h'_{23} = h'_{24}$  とおく。

#### 3. 第1、第2地域共同負担形式

第1地域と第2地域が共同で援助を行うとする。単純化して  $h_{13} = h_{23}$ ,  $h_{14} = h_{24}$ ,  $h'_{13} = h'_{23}$ ,  $h'_{14} = h'_{24}$  とおく。

このようなルールを定めた上で、どのような均衡が得られるのかを計算する。援助係数にはさまざまな値をとらせる。

基準ケース、技術援助ケースでは、均衡解のほかに、各地域が初期時刻において拘束力のある協定を結んで、全体の目的関数を最小化する場合のPareto最適な協力解もあわせて計算する。

### 4.3.2 シミュレーション結果

2060年までのシミュレーションによって、目的関数の値、均衡解、協力解、GHG濃度の経時変化を求めた結果を表4.1、表4.2、表4.3、図4.2に示す。表4.1の中の「コスト」、「ダメージ」は、それぞれGHG削減コスト、温暖化によるダメージの現在価値の総和を表しており、それらの和が $J^1, \dots, J^4$ (目的関数の値)となっている。各ケースでの協力解は $\alpha_i = 1/4 \forall i$ とおいた場合、つまり $\sum_i J^i$ が最小になる場合の結果を示している。

表4.1 目的関数の値 [単位  $10^{12}$  ドル]

		第1地域			第2地域		
		コスト	ダメージ	$J^1$	コスト	ダメージ	$J^2$
削減なしケース		0	0.71	0.71	0	1.25	1.25
基準ケース (均衡解)		0.10	0.43	0.53	0.08	0.75	0.83
(協力解)		0.07	0.36	0.43	0.04	0.62	0.66
技術援助ケース	第1地域負担 (均衡解)	0.26	0.35	0.61	0.07	0.61	0.68
	(協力解)	0.51	0.24	0.75	0.04	0.42	0.46
	第2地域負担 (均衡解)	0.12	0.34	0.46	0.19	0.60	0.79
	(協力解)	0.08	0.29	0.37	0.38	0.50	0.88
	共同負担 (均衡解)	0.18	0.32	0.50	0.19	0.56	0.75
	(協力解)	0.25	0.27	0.52	0.24	0.47	0.71
経済援助ケース	第1地域負担 (均衡解)	0.11	0.44	0.55	0.03	0.77	0.80
	第2地域負担 (均衡解)	0.06	0.44	0.50	0.07	0.77	0.84
	共同負担 (均衡解)	0.08	0.44	0.52	0.05	0.77	0.82

第3地域			第4地域			$\sum_{i=1}^4 J^i$
コスト	ダメージ	$J^3$	コスト	ダメージ	$J^4$	
0	0.14	0.14	0	1.01	1.01	3.12
0.00	0.09	0.09	0.08	0.61	0.69	2.14
0.04	0.07	0.11	0.14	0.51	0.65	1.84
0.00	0.07	0.07	0.07	0.51	0.58	1.93
0	0.05	0.05	0	0.35	0.35	1.61
0.00	0.07	0.07	0.06	0.48	0.54	1.85
0	0.06	0.06	0	0.41	0.41	1.71
0.00	0.07	0.07	0.08	0.46	0.54	1.86
0	0.05	0.05	0	0.38	0.38	1.67
0.00	0.09	0.09	0.05	0.63	0.68	2.11
0.00	0.09	0.09	0.05	0.63	0.68	2.11
0.00	0.09	0.09	0.05	0.63	0.68	2.11

世界全体の損失 ( $\sum_{i=1}^4 J^i$ ) は削減なしケースでは 3.12 兆ドル、基準ケースの均衡解では 2.14 兆ドルとなる。各々の地域が他の地域の戦略を考慮に入れて行動した結果、削減なしケースよりも損失は 31% 低下したわけである。基準ケースでの協力解では、均衡解よりもさらに損失は 14% 低下する。協力解では均衡解に比べて、第 1、第 2 地域の削減コストが減少し、第 3、第 4 地域の削減コストが増加している。世界全体の削減率はさほど変化しないが、削減が実施される場所が途上国地域にシフトしていることがわかる。

経済援助ケースでの 3 通りの援助形式の均衡解では、損失は基準ケースよりもそれぞれ 9.8%, 14%, 13% 低下しており、第 2 地域援助形式が最大の効果を示しているが、これらの間に大きな差異はみられない。均衡解での最適な援助係数は、第 1 地域負担形式では 0.8、第 2 地域負担形式では 0.75、共同負担形式では第 1 地域 0.4、第 2 地域 0.35 となった。大規模な援助が必要とされることがわかる。協力解では、損失は大幅に低減している。最適な援助係数は、第 1 地域負担形式、第 2 地域負担形式では 1、共同負担形式では両地域 0.5 となり、途上国の削減コストを先進国がすべて負担するのが最適ということになる。途上国地域の削減率は、この援助態勢の中で相当上昇している。それでも第 1、第 2 地域の損失は基準ケースの均衡解よりも減少しているのが注目される。

経済援助ケースでは均衡解だけを求めたが、協力解を求めなかったのは、 $\alpha_i = 1/4 \forall i$  とすると、目的関数の形が基準ケースの協力解と同一になり、同じ解が得られることになるからである。均衡解では、基準ケースの均衡解とさほど変らない結果が出ている。経済的な援助だけでは、途上国の GHG 削減の自発的増加は望めないようである。

表 4.2 は、各ケースにおける両地域の GHG の累積排出量の平均削減率を示している。この表の中で、技術援助ケースの均衡解、協力解、経済援助ケースの均衡解のところでは、 $\sum_i J^i$  が最小になるときの削減率が示されている。3 章での結果と同様、削減率は協力解の場合の方が均衡解の場合よりも高くなっている。全体的に第 1 地域、第 2 地域の削減率はほぼ同じ値をとっているが、第 3 地域、第 4 地域の削減率は 2% 以下から 40% 以上まで広範囲にわたっている。第 3、第 4 地域の今後の削減率が重要になることが示される。

これにともない GHG 濃度の値も変化している。図 4.2 は削減なしケース、基準ケース、技術援助ケース (共同負担形式) の均衡解での GHG 濃度の値をグラフにしたものである。表 4.3、図 4.2 によると 2020 年までの値は削減なしケースを除くとほとんど差がみられず、それ以降が拡大している。このことから地球温暖化問題は超長期的な問題であることがわかる。



表 4.2 平均削減率 [%]

	第 1 地域		第 2 地域		第 3 地域		第 4 地域	
	-2020	-2060	-2020	-2060	-2020	-2060	-2020	-2060
削減なしケース	0	0	0	0	0	0	0	0
基準ケース								
(均衡解)	19.0	19.5	8.7	7.3	4.3	1.6	9.8	9.9
(協力解)	16.6	20.2	9.7	10.6	17.0	16.6	15.6	15.3
技術援助ケース								
第 1 地域負担 (均衡解)	27.2	14.6	10.5	6.2	6.6	4.1	25.8	14.8
(協力解)	17.6	19.6	11.4	8.7	47.9	36.8	33.9	24.6
第 2 地域負担 (均衡解)	20.6	20.6	9.1	14.9	5.0	8.8	17.6	20.5
(協力解)	18.4	17.4	8.7	11.2	34.4	32.7	29.6	21.4
共同負担 (均衡解)	23.2	17.0	16.1	8.7	6.8	6.4	23.2	20.4
(協力解)	17.4	18.3	10.0	8.7	43.3	34.8	26.9	25.8
経済援助ケース								
第 1 地域負担 (均衡解)	18.7	14.5	7.0	1.2	5.0	2.1	12.7	11.3
第 2 地域負担 (均衡解)	18.7	14.5	7.0	1.2	5.0	2.1	12.7	11.3
共同負担 (均衡解)	18.7	14.5	7.0	1.2	5.0	2.1	12.7	11.3

表 4.3 GHG 濃度 [単位 ppm]

年	1990	2000	2020	2040	2060
削減なしケース	350	372	435	520	625
基準ケース					
(均衡解)	350	365	410	470	563
(協力解)	350	364	408	467	552
技術援助ケース					
第 1 地域負担 (均衡解)	350	362	398	458	548
(協力解)	350	361	392	440	515
第 2 地域負担 (均衡解)	350	365	404	458	536
(協力解)	350	360	396	449	523
共同負担 (均衡解)	350	362	401	455	536
(協力解)	350	362	397	444	519
経済援助ケース					
第 1 地域負担 (均衡解)	350	365	407	473	566
第 2 地域負担 (均衡解)	350	365	407	473	566
共同負担 (均衡解)	350	365	407	473	566

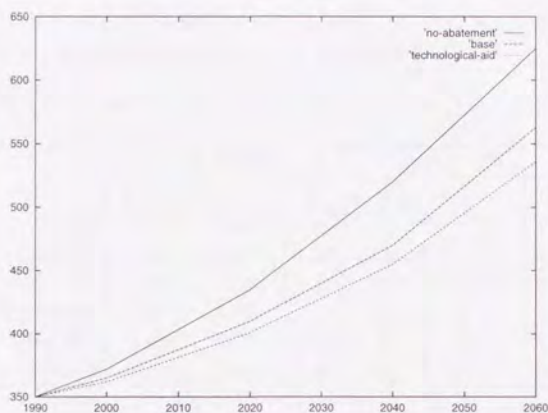


図 4.2 GHG 濃度のグラフ

#### 4.4 感度分析

動的ゲームのシミュレーションに関して、3章と同様に感度分析をする。4.3.1節で述べたように、動的ゲームの均衡解の計算にかかる時間は、プレイヤー数  $n$  が増加するにつれて大幅に増加し、 $n = 4$  の場合には何日にもおよぶ。そこで感度分析をするにあたり  $n = 2$  として、第1地域を先進国地域（今までのモデルでの第1、第2地域）、第2地域を途上国地域（同じく第3、第4地域）とおく。それぞれの地域のGDP  $Y_i(t)$ 、GHG粗排出量  $E_i(t)$  の増加率、コスト係数、ダメージ係数の値を表4.4に示す。

表 4.4 2地域モデルにおける各種データ

地域	GDP, 粗排出量増加率 [%]			コスト係数	ダメージ係数
	1990-2010	-2030	-2060		
1	2.8, 1.2	1.7, 0.8	1.4, 0.4	0.05	$3.0 \times 10^{-7}$
2	4.0, 2.4	3.0, 2.0	0.5, 1.6	0.12	$3.0 \times 10^{-7}$

感度分析の結果を記す前に、パラメーターが標準的な値をとるときの計算結果を、簡単に表4.5、表4.6にまとめておく。削減なしケース、基準ケースについては前節と同じ計算を行った。技術援助ケース、経済援助ケースでは、第1地域から第2地域への援助だけが行われるとし、 $h_{12}$  にさまざまな値をとらせた。2つの援助ケースの最適解は、目的関数の総和が最

小になるときの結果を、そして技術援助ケースの協力解は、重みパラメーターを  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$  とおいて同じく目的関数の総和を最小化したときの結果を示す。

表 4.5 2 地域モデルにおける目的関数の値 [単位  $10^{12}$  ドル]

	第 1 地域			第 2 地域			$J^1 + J^2$
	コスト	ダメージ	$J^1$	コスト	ダメージ	$J^2$	
削減なしケース	0	2.03	2.03	0	1.12	1.12	3.15
基準ケース (均衡解)	0.28	1.07	1.35	0.11	0.60	0.71	2.06
(協力解)	0.08	1.02	1.10	0.23	0.57	0.80	1.91
技術援助ケース (均衡解)	0.30	0.82	1.12	0.12	0.46	0.58	1.70
(協力解)	0.42	0.75	1.17	0	0.42	0.42	1.59
経済援助ケース (均衡解)	0.26	1.02	1.28	0.08	0.57	0.65	1.94

表 4.6 2 地域モデルにおける平均削減率 [%]

	第 1 地域		第 2 地域	
	-2020	-2060	-2020	-2060
削減なしケース	0	0	0	0
基準ケース (均衡解)	19.9	14.2	12.8	12.2
(協力解)	12.9	11.8	20.3	15.2
技術援助ケース (均衡解)	16.0	13.3	24.7	21.1
(協力解)	14.4	12.6	29.7	26.1
経済援助ケース (均衡解)	16.5	14.2	18.0	14.1

目的関数の総和は、基準ケースの均衡解において 2.06 兆ドルであり、削減なしケースに比べて 35% 低下している。しかし基準ケースの協力解では、均衡に比べその低下率は 7.3% であり、両者の間にさほど大きな相違がみられないのが注目される。技術援助ケースの最適均衡解は、 $h_{12} = 0.75$  のときに得られ、目的関数の総和は基準ケースに比べて 17.5% 低下している (第 1 地域、第 2 地域の目的関数はそれぞれ 17.0%、18.3% の低下)。大幅な技術援助によって、両地域のコストが低下し、望ましい状態が実現されている。また援助によって地域間の公平性が失われるということもない。技術援助ケースの協力解では、第 2 地域の削減コストをすべて第 1 地域が負担することになる ( $h_{12} = 1$ ) が、それでも第 2 地域だけでなく、第 1 地域においても基準ケースの均衡解より目的関数の値が低下している。これらの結果により、技術援助の有効性が示される。

一方経済援助ケースの最適均衡解は  $h_{1j}^* = 0.5$  のときに得られたが、目的関数の低下率は 5.8% であり大きな効果はみられず、経済援助だけでは不十分であることを示している。基準



ケースと経済援助ケースの協力解では目的関数の形が同一となるので、削減率は同じであり、両地域のコスト負担だけが異なっている。

表 4.6 より、技術援助が第 2 地域の削減率の上昇を促しているのがわかる。以上の結果の定性的性質は、前節のシミュレーション結果とはほぼ一致しているといえるであろう。

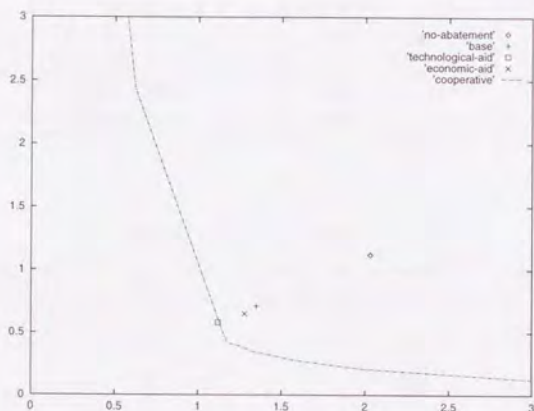


図 4.3 各ケースの均衡解と技術援助ケースの協力解

図 4.3 は、横軸に  $J^1$ 、縦軸に  $J^2$  をとり、各ケースでの均衡解、および技術援助ケースでの協力解を図示したものである。図中の曲線は  $\alpha_1, \alpha_2$  の値を変化させて、 $\sum \alpha_i J^i$  の値を最小化したときの協力解をプロットしてつないだものである。このとき  $\alpha_1$  の値に応じて最適な  $h_{12}$  の値も変化し、たとえば  $\alpha_1 = 0.2$  のとき 100% であり、 $\alpha_1 = 0.8$  のとき 10% となる。この曲線の右側が技術援助ケースでの実現可能領域ということになる。また 'no-abatement', 'base', 'technological-aid', 'economic-aid' という点はそれぞれ削減なしケースの解、基準ケース、技術援助ケース、経済援助ケースの均衡解を示している。技術援助によって、結果が実現可能領域とそうでない領域の境界線に近づくことがわかる。

以下、この 2 地域モデルの結果に関する感度分析について記述する。今回は考慮する因子の数を 7 とする。各因子と、その水準、直交表については表 4.7、表 4.8 に記す。今回は  $F_1 F_2, F_4 F_5$  の 2 種類の交互作用を考えることにする。

表 4.7 因子とその水準

因子	パラメーター名称	記号	標準値	水準	
				-1	1
$F_1$	ダメージ係数 (第 1 地域)	$d_1$	$3.0 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-7}$	$3.6 \times 10^{-7}$
$F_2$	ダメージ係数 (第 2 地域)	$d_2$	$3.0 \times 10^{-7}$	$2.4 \times 10^{-7}$	$3.6 \times 10^{-7}$
$F_3$	割引パラメーター	$\rho$	0.96	0.952	0.968
$F_4$	GHG 吸収率	$\delta$	0.004	0.0032	0.0048
$F_5$	GHG 残存率	$\sigma$	0.64	0.512	0.768
$F_6$	コスト関数の指数	$\gamma_c$	3.00	2.55	3.55
$F_7$	ダメージ関数の指数	$\gamma_d$	2.00	1.74	2.32

表 4.8 直交表と因子の割付け

番号	$\mu$	$F_1$	$F_2$	$F_3$			$F_7$			$F_6$			$F_4$	$F_5$	結果
1)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2)	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
3)	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	
4)	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	
5)	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	
6)	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	
7)	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	
8)	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	
9)	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	
10)	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	
11)	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	
12)	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	
13)	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	
14)	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	
15)	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	
16)	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	
推定値	$\hat{\mu}$	$\hat{\theta}_1$	$\hat{\theta}_2$	$\hat{\kappa}_{12}$	$\hat{\theta}_3$		$\hat{\theta}_7$	$\hat{\kappa}_{17}$	$\hat{\kappa}_{27}$		$\hat{\theta}_6$	$\hat{\theta}_4$	$\hat{\theta}_5$		
平方和	$S_\mu$	$S_1$	$S_2$	$S_{12}$	$S_3$		$S_7$	$S_{17}$	$S_{27}$		$S_6$	$S_4$	$S_5$		

一部実施を行った結果を表4.9にまとめた。結果としては、基準ケースにおける世界全体の損失の和 ( $y_1[10^{12}$  ドル]), 技術援助による損失の減少率 (最適解の場合) ( $y_2[\%]$ ), 技術援助ケースの最適解での世界全体の平均削減率 ( $y_3[\%]$ ) をとった。  $y_1, y_2, y_3$  の最大値を最小値で割った値はそれぞれ 12.6, 3.7, 2.8 となり、仮定に応じて結果が幅広い値をとることが分る。

表4.10はベクトル  $\hat{\theta}$  の成分の推定値を示している。  $\hat{\mu}$  はそれぞれの結果の平均値、  $\hat{\theta}_i$  は因子  $F_i$  の主効果、  $\hat{\kappa}_{ij}$  は  $F_i F_j$  の交互作用である。世界全体の損失 ( $y_1$ ) と負の相関にあるのは GHG 吸収率 ( $F_4$ ) であり、その他は正の相関にある。主効果の絶対値が大きい因子は、割引パラメーター ( $F_3$ ), GHG 残存率 ( $F_5$ ) である。  $y_2$  は技術援助の有効度を示す指標であるが、第2地域のダメージ係数 ( $F_2$ ) と負の相関にある。これは途上国地域の人々が温暖化の被害が大きいと認識するならば、自発的に GHG の削減率を高めるので、その分技術援助の必要性が小さくなることを意味する。  $y_2$  と強い相関をもつのは、  $F_6, F_7$  というコスト、ダメージ関数の指数である。効果の符号は納得のいくものである。平均削減率 ( $y_3$ ) に関する主効果の符号は  $F_4$  を除いて  $y_2$  に関するものと一致しており、大幅な削減が必要とされる場合に、技術援助が有効であることがわかる。  $y_3$  と強い相関をもつのは  $F_5, F_6$  である。全般に、交互作用の中で目だって大きいものはみられなかった。

表4.9 シミュレーション結果

番号	$y_1$	$y_2$	$y_3$	番号	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1)	5.17	19.9	24.4	9)	1.12	16.3	18.6
2)	2.41	17.0	24.6	10)	4.54	8.4	18.8
3)	1.08	19.5	21.4	11)	2.54	11.4	21.4
4)	1.89	10.6	20.7	12)	0.531	10.5	15.4
5)	2.37	14.8	17.6	13)	4.93	30.8	35.9
6)	3.71	25.9	31.8	14)	1.04	8.7	14.6
7)	1.85	29.2	32.7	15)	0.410	9.0	12.7
8)	0.977	10.1	16.3	16)	1.75	14.9	24.5

表4.10  $\theta$  の推定値

効果	$y_1$	$y_2$	$y_3$	効果	$y_1$	$y_2$	$y_3$
$\hat{\mu}$	2.27	16.1	22.0	$\hat{\theta}_6$	0.10	-4.45	-3.65
$\hat{\theta}_1$	0.16	2.31	1.73	$\hat{\theta}_7$	0.16	2.80	1.13
$\hat{\theta}_2$	0.14	-1.86	-1.30	$\hat{\kappa}_{12}$	0.07	0.24	0.39
$\hat{\theta}_3$	0.89	1.66	1.33	$\hat{\kappa}_{17}$	0.02	-0.33	-0.79
$\hat{\theta}_4$	-0.30	0.20	-0.60	$\hat{\kappa}_{27}$	-0.10	-0.23	-0.34
$\hat{\theta}_5$	1.03	2.83	4.31				



表 4.11, 表 4.12, 表 4.13 は  $y_1, y_2, y_3$  に関する分散分析表である。3 章と同様,  $F$  検定により 1% の水準で有意な効果に印 \*\*, 5% の水準で有意な効果には印 \* をつけた。すべての計算結果に有意な影響を与えているのは GHG 残存率 ( $F_5$ ) である。コスト関数の指数 ( $F_6$ ) の効果も大きい。分散比の値は 3 章での感度分析に比べ, 全体的に小さいようである。

表 4.11 分散分析表 ( $y_1$ )

変動因	自由度	平方和	分散比
$\mu$	1	82.5	
$F_1$	1	0.41	0.65
$F_2$	1	0.31	0.49
$F_3$	1	12.7	**20.0
$F_4$	1	1.44	2.27
$F_5$	1	17.0	**26.8
$F_6$	1	0.16	0.25
$F_7$	1	0.41	0.65
$F_1 F_2$	1	0.078	0.12
$F_1 F_7$	1	0.008	0.013
$F_2 F_7$	1	0.15	0.24
誤差	5	3.18	$V_e=0.635$

表 4.12 分散分析表 ( $y_2$ )

変動因	自由度	平方和	分散比
$\mu$	1	4147	
$F_1$	1	85.4	*11.1
$F_2$	1	55.4	*7.19
$F_3$	1	44.1	5.72
$F_4$	1	0.64	0.083
$F_5$	1	128	**16.6
$F_6$	1	317	**41.1
$F_7$	1	125	**16.2
$F_1 F_2$	1	0.92	0.12
$F_1 F_7$	1	1.74	0.23
$F_2 F_7$	1	0.85	0.11
誤差	5	38.6	$V_e=7.71$

表 4.13 分散分析表 ( $y_3$ )

変動因	自由度	平方和	分散比
$\mu$	1	7744	
$F_1$	1	47.9	*8.05
$F_2$	1	27.0	4.54
$F_3$	1	28.3	4.76
$F_4$	1	5.76	0.97
$F_5$	1	297	**49.9
$F_6$	1	213	**35.8
$F_7$	1	20.4	3.43
$F_1 F_2$	1	2.43	0.41
$F_1 F_7$	1	9.99	1.68
$F_2 F_7$	1	1.85	0.31
誤差	5	29.7	$V_e=5.95$

## 4.5 モデルの拡張

### 4.5.1 資本蓄積の導入

本章の分析に用いられたモデルの構造はきわめて単純であり、各地域の制御変数(戦略)、状態変数はどちらも1種類しか考慮していない。これは複数地域の戦略がお互いに複雑に関係しあうので、均衡の計算が困難になることを防ぐためにとった措置である。しかし現実の世界をモデル化する上で、モデルの改良が必要であることはいうまでもない。本節では今後のモデルの拡張の方向性について記述するが、まずここでは汚染物質削減資本の導入をとりあげる。

我々のモデルでは、技術をフローとしてとらえた。つまりある時刻 $t$ に行われる投資は、その時刻における削減コストを低下するのに寄与するが、その効果が時刻 $t$ 以降に持続することはない。しかし本来技術というのは、長年にわたって蓄積されるものであり、一旦確立した技術の効果が短期間で消えてしまうとは考えにくい。そこで技術をストックとしてとらえた、次のような定式化を提案する。

地域 $i(i \in N = \{1, \dots, n\})$ は、時刻 $t$ において汚染物質削減のための投資(以下簡単に環境投資と呼ぶ)の、総生産に対する割合 $b_i(t)$ を決定する。総生産 $Y_i(t)$ は外生的に与えられる。地域 $i$ の環境投資 $I_i(t)$ は、

$$I_i(t) = b_i(t)Y_i(t) \quad (4.17)$$

となる。環境投資は蓄積して環境資本となるが、固定資本は毎年少しずつ減耗する。時刻  $t$  で  
の環境資本を  $K_i(t)$  とすると、

$$K_i(t+1) = I_i(t) + (1 - \delta_K)K_i(t) \quad (4.18)$$

となる。ここで  $\delta_K$  は資本減耗率である。第  $i$  地域の目的関数は、

$$J^i(b_1, \dots, b_n) = \sum_{t=0}^T \rho^t Y_i(t) \{b_i(t) + D_i(M(t))\} \quad (4.19)$$

と表される。ここで  $b_i = (b_i(0), \dots, b_i(T))$  である。汚染物質の蓄積量  $M(t)$  の時間的推移は

$$M(t+1) = (1 - \delta)M(t) + \sigma \sum_{i \in N} E_i(K_i(t), Y_i(t)), M(0) = M_0 \quad (4.20)$$

となる。ここで  $E_i(K_i(t), Y_i(t))$  は時刻  $t$  における地域  $i$  の汚染物質排出量であり、環境資本、  
総生産に依存する。GDP1 単位あたりの排出量  $E_i(t)/Y_i(t)$  は、 $K_i(t)$  が大きくなるにつれて  
減少する。

以上で資本蓄積を考慮したモデルの記述は完了する。戦略は 1 種類であるが、状態変数は  
汚染物質蓄積量  $M(t)$ 、各地域の環境資本  $K_i(t) (i \in N)$  の合計  $n+1$  種類ある。計算量のオー  
ダーは、離散化した際の資本量のとりうる値の個数を  $k$ 、戦略の数を  $s$  とすると、 $O(n^2(k s)^n)$   
となる。環境資本、投資に関するデータとして信頼できるものが乏しいので、今のところ計算  
は困難である。

地域  $i$  から地域  $j$  への環境投資を  $I_{ij}(t) = h_{ij}b_j(t)Y_j(t) (h_{ij} \geq 0)$  とすると、技術援助  
ケースでの地域  $i$  の目的関数は

$$J^i(b_1, \dots, b_n) = \sum_{t=0}^T \rho^t \left\{ \sum_{j \in N} h_{ij}b_j(t)Y_j(t) + D_i(M(t))Y_i(t) \right\} \quad (4.21)$$

という形になる。資本蓄積にある程度の時間がかかるので、技術援助の効果はすぐには現れ  
ないであろうが、長期的には望ましい均衡解が得られることが予想される。

#### 4.5.2 ルールの見直し

本論文では、具体的な別払いの方法として、地域間の技術援助、経済援助を分析したが、他  
の援助手段や定式化も考えられる。

我々のモデルでは、第  $i$  地域が第  $j$  地域を援助するとき、第  $j$  地域が決定した削減率に応  
じて、その一部を第  $i$  地域が負担するという仮定をおいた。このとき第  $i$  地域は第  $j$  地域の中  
に汚染物質削減設備を建設し、その運営コストもすべて負担する。しかし実際に行われてい



る技術援助においては、援助側は設備投資だけを行い、運営は被援助側の企業などに任されていると思われる。このような場合、技術援助ケースの均衡解がどのように変化するかを検証するのも重要な研究課題になる<sup>7</sup>。定式化としては、削減コストを固定費用 (fixed cost) と、実施される削減量に依存した可変費用 (variable cost) に分けて記述すればよい。

次に、援助によって汚染物質削減へのインセンティブを与えるというルール以外にも、課徴金の徴収などによって汚染物質の排出を規制するというルールをもとにゲームモデルを記述することができる。炭素税などが導入されれば、効率的に排出量の削減がなされ、得られた収入を適当に再分配することによって、我々のモデルでの協力解と同じ状況が実現されるであろう。2.1.2 節で紹介した Martin *et al.* [25] は、このルールを用いて地球温暖化問題を分析している。課徴金徴収という政策を世界的に実施するのは、現状では困難ではないかと思われる (ただし北欧の一部の国々ではすでに実施されている) が、この政策の効果を厳密に研究することは今後ますます重要になるであろう。

#### 4.6 まとめ

本章の内容を以下にまとめて記す。

まず 4.1 節では一般的な動的ゲームの定式化と、そのフィードバック均衡の定義、解法について紹介した。

4.2 節では、動的ゲームの枠組を用いた地球環境対策のモデル化について説明した。ここでのプレイヤー、戦略、目的関数などの考え方は 3.2 節とほぼ同じである。3 章での分析との大きな相違点は、3 章でのモデルが、プレイヤーの戦略決定が 1 回限りの静的ゲームであるのに対し、この動的モデルではプレイヤーが各時刻ごとに、その時刻での GHG 蓄積量を観測し、それに応じて戦略を決定することと、このゲームが、プレイヤーのとるべき戦略についての取り決めが存在しない非協力ゲームであるということである。このゲームのフィードバック均衡 (基準ケース)、それからある国が他の国の削減の一部を負担する国際援助を考えた場合 (技術援助ケース、経済援助ケース) の均衡の求め方、さらにこのゲームが協力ゲームである場合の各ケースでの Pareto 最適な協力解の求め方について説明した。

4.3 節では、再び地球温暖化問題をケーススタディとしてとりあげ、シミュレーションを行った。長期的なシミュレーションによって、さまざまなケースについての均衡を求めた。その結果、先進国が途上国に対して GHG 削減技術援助を行う技術援助ケースでは、途上国

<sup>7</sup>[41] の 4 章に、技術投資をしたものの被援助側が設備の運営コストをまかなうことができず、結局設備が使用されなかったという例が報告されている。

地域での削減率が上昇し、基準ケースに比べて最大14%世界全体の損失が減少したが、協力解との間には多少の差がみられた。ただしシミュレーションでは、計算時間を短縮するために、いくつか粗い近似を行っているので、均衡解はさらに慎重に検討しなければならないであろう。一方経済援助ケースでは、損失は最大でも1.4%しか低下せず、効果に限界がみられた。なお基準ケースの均衡解では、世界全体の削減率は10.1%、協力解では15.3%であった。

4.4節では、3章と同様、感度分析を行った。計算にかかる時間を考慮して地域数は2とおき、第1地域を先進国地域、第2地域を途上国地域とした。因子は3章で選んだものと、割引パラメーターの計7個とした。計算結果としては、基準ケースにおける世界全体の損失の和と、最適な技術援助による損失の減少率、そのときの世界全体の平均削減率をとった。いずれのものについても、計算結果が幅広い値をとった。ここでも因子のなかではGHG残存率の効果が最大となった。3章での分析と同様、気候変動に関するパラメーターの方が結果に大きな影響を与えることが示された。

4.5節では、今後の研究課題として、モデルの拡張についてコメントした。

## 第5章

### 結論

本論文では、地球環境対策に関して世界のそれぞれの地域がとるべき合理的な戦略を分析するために、2種類のゲームモデルを記述し、実際の問題として地球温暖化問題を取り上げシミュレーションを行った。シミュレーションによって得られた知見は以下のようにまとめられる。

3章での静的協力ゲームの分析では、GHG削減に関する国際協定のための交渉を扱った。世界の4つの地域をプレイヤー、GHG削減率を戦略としたゲームの協力解を求めたところ、世界全体での最適な状態を実現するための共同戦略は20-25%程度であり、各地域の私的な損失を最小にする私的戦略との乖離がみられた。全地域に共同戦略をとらせ、協定を成立させるためには、先進国地域から途上国地域への別払いの譲渡が必要となること、仁のコスト配分を求めることにより示された。特に潜在的成長率が高く、削減コスト係数の大きい中国には相対的に、多額の別払いが必要となる。中国は、ただ乗り利益の対GDP比率も高く、協定を抜けるインセンティブが最も大きい。地球環境保全にとって、中国の今後の政策および他の地域の中国に対する交渉が極めて重要になることが示された。

4章の動的ゲームの分析では、具体的な別払いの方法としてGHG削減に関する技術援助、資金援助を考え、それらによってゲームの均衡戦略がどのように変化するかを検証した。このときそれぞれの地域は1年ごとにGHG蓄積量を観測し、それをもとに戦略を決定する。地域分割、戦略、損失などの概念は3章での分析とほぼ同じである。シミュレーションは削減なしケース、基準ケース、技術援助ケース、経済援助ケースの4通りについて行い、援助ケースでは先進国地域(第1、第2地域)が途上国地域(第3、第4地域)の決定する削減率に応じて、その一部を技術援助、資金援助の形で負担することを仮定した。さらに援助形式として第1地域負担形式、第2地域負担形式、共同負担形式という3通りを考えた。基準ケース、技術援助ケースではPareto最適な協力解も求めた。

シミュレーションの結果、基準ケースの均衡解での世界全体の損失は2兆ドル余りとなっ



た。均衡削減率は世界全体でおよそ 15% であり、第 1 地域が最も高く、第 3 地域が最も低い。協力解では、全体の削減率は均衡解と同様であるが、途上国地域において上昇している。

技術援助ケースでは、いずれの援助形式の場合でも最適な援助係数は大きく、途上国の削減の 80% を負担するという大幅な援助が必要となることがわかった。しかし損失の低下率は 10% ほどと少なく、協力解との差がみられた。技術援助ケースの協力解では、先進国が途上国の削減コストをすべて負担することになるので、途上国では大幅な削減率が実現される。この仮定自体は非現実的であるが、ある程度拘束力をもった協定を結ぶという政策を考えなければならぬであろう。

経済援助の効果は、技術援助ケースに比べて小さく、損失の低下率は 1-2% 程度であった。定義上、経済援助ケースの協力解での損失が基準ケースの協力解での損失よりも小さくなることはあり得ないので、結局基準ケースにおける均衡解と協力解の差がわずかであることが、経済援助の効果が高い原因となっている。逆にいうと、これはコスト、ダメージや各パラメーターの値に関する情報をすべての地域が把握できれば、最適に近い状況が均衡解として得られることを示している。

3 章、4 章のシミュレーションに関して感度分析をいくつかの計算結果を選んで行った。因子は協力ゲームの方では 6 個、非協力ゲームの方では 7 個選び、それらを 2 水準に変化させた。その結果、GHG の大気中の挙動に関するパラメーター、特に GHG 残存率が主要な計算結果に大きな影響を与え、その効果はほとんどが分散分析表を用いた検定によっても有意であることが示された。コスト関数、ダメージ関数の指数はそれに比べて影響が小さかったが、これはシミュレーション期間の短さによるものであろう。計算結果はパラメーター値の変化にともない、大幅に変動した。今後地球温暖化問題に関するパラメーターの研究が重要になると思われる。

以上の結果から、最適な GHG 削減率は、20% 程度であり、一般に提唱されている目標よりもはるかに低いことがわかった。国際会議などで提案されている GHG 排出（絶対）量の削減や GHG 濃度の安定化といった実現不可能に近い目標を、現段階で議論するのはあまり意味がないであろう。むしろ現時点では、汚染物質の共同削減実施や、技術援助などが円滑に行われるためのシステムづくりが急務であると思われる。

もちろんこれらのモデル解析には、いくつかの問題点がある。まず地球環境問題（特に温暖化問題）の長期的性質からみて、本論文のシミュレーション期間は非常に短いといわざるを得ない。地球温暖化問題を取り扱った既存の動的分析においては、通常モデルのタイムスパンは 200 年以上という超長期にわたっている。本論文において長期にわたるシミュレーションを行わなかったのは、第 1 に計算量が過大になるのを防ぐためであり、第 2 に経済主

体が意思決定の過程において何百年も先のことを考慮に入れるというのが現実にはそぐわないと考えたためでもある。しかし期間が短いことにより将来のダメージが過小評価される危険性も無視できないので、我々のモデルにおいてもシミュレーション期間の延長を検討することが今後の重要な課題となる。

次にモデルの構造が非常に単純であるという問題がある。時間計算量の関係で今のところあまりモデルを複雑にはできないが、モデルの信頼性を少しでも高めるために、均衡の計算に関するもっと効率の良いアルゴリズムを考案することも検討しなければならないであろう。

## 謝辞

本論文の作成にあたり、指導教官である東京大学工学部計数工学科の伏見正則教授には、忍耐強く御指導をいただき、つねに適切なアドバイスを賜りましたことに関し、厚く感謝の意を表したいと思います。そして修士課程時代から面倒を見ていただいている明治学院大学の竹内啓教授、東京大学の廣松毅教授にも数多くの貴重な御助言をいただきました。本論文の改訂に関しては、伏見先生、廣松先生の他に、審査委員として私の発表に出席された先端科学技術センターの児玉文雄教授、計数工学科の杉原厚吉教授、松井知巳助教授、電気工学科の山地憲治教授からも有益な御教示をいただきました。心から感謝申し上げます。

計数工学科・数理第2研究室の金子敬一助手、諸星穂積助手、秘書の赤穂由美子氏、大学院学生の李明哲氏、荒井日見子氏、上村京生氏、一上響氏、松浦史郎氏、青野和彦氏、北村考氏、高島宏平氏、長楽彰規氏、宮本裕一郎氏には輪講やその他の場において色々とお世話になり、楽しい時間を共に過ごすことができました。また合同輪講においてさまざまな御教示を下さった数理第5研究室の速水謙助教授、今井敏行助手、第2研究室での輪講に加わっていただいた数理第5研究室の大学院学生の皆川剛氏、日吉久礎氏、統計研究会で行われている竹内ゼミにおいて有意義な示唆を下さった新潟大学の和合肇教授、静岡県立大学の大平純彦助教授、高垣行男氏、浜岡豊氏、児玉晴男氏、河野仁志氏、酒井正子氏、中国における環境問題について教えて下さった電力中央研究所の明日香壽川氏、そして東京大学先端科学技術研究センターの(旧)竹内研究室、廣松研究室の皆様、学会での研究発表会において有益なコメントを下さった方々、投稿論文の作成に関し御指導いただいた一橋大学経済研究所『経済研究』編集部およびレフェリーの方々、『日本経済研究』編集部およびレフェリーの方々、その他私が刺激を受けたすべての人々にも深く感謝いたします。



## 参考文献

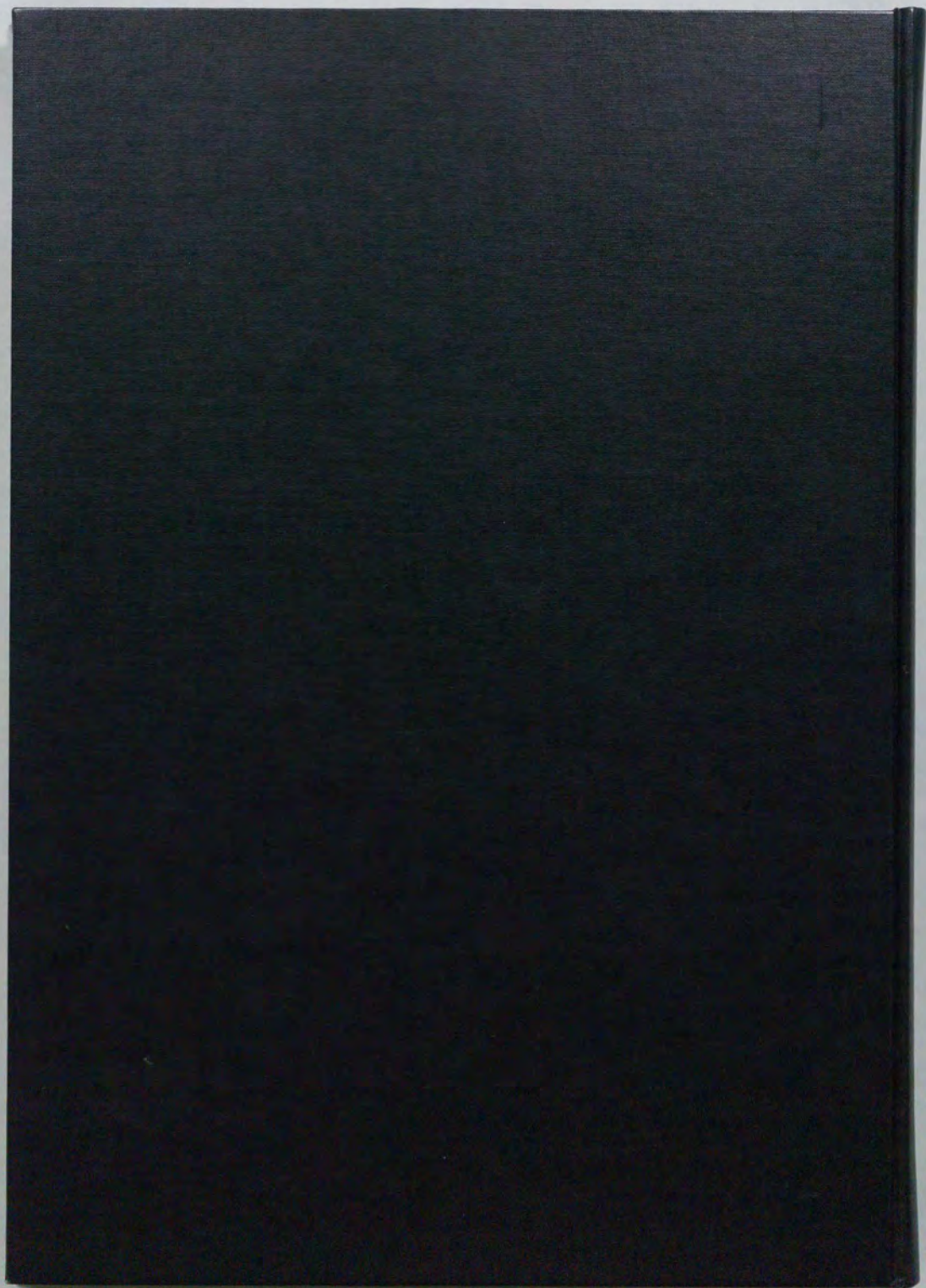
- [1] Amann, M. and G. Kornai(1987). *Cost Functions for Controlling SO<sub>2</sub> Emissions in Europe*, Working Paper, WP-87-065, IIASA, Laxenburg.
- [2] Amano, A.(1992). *Global Warming and Economic Growth - Modeling Experience in Japan -*, Center for Global Environmental Research.
- [3] 明日香壽川(1995). “アジアにおける環境リスクマネジメント,” エネルギー・資源, 16, 6, 586-591.
- [4] Barrett, S.(1991). “Economic Analysis of International Environmental Agreements: Lessons for a Global Warming Treaty,” in *Responding to Climate Change: Selected Economic Issues*, OECD, Paris.
- [5] Başar, T. and G.J. Olsder(1995). *Dynamic Noncooperative Game Theory*, 2nd edition, Academic Press, London.
- [6] Burniaux, J.-M., J.P. Martin, G. Nicoletti and J. Martins(1992). *The Cost of Reducing CO<sub>2</sub> Emissions: Evidence from GREEN*, Economics Department Working Papers, No. 115, OECD, Paris.
- [7] Cesar, H.S.J.(1994). *Control and Game Models of the Greenhouse Effect*, Lecture Note on Economics and Mathematical Systems, No. 416, Springer-Verlag, Berlin.
- [8] 中国研究所編(1995). 中国の環境問題, 新評論.
- [9] Edmonds, J. and J. Reilly(1983). “Global Energy and Carbon to the Year 2050,” *The Energy Journal*, 4, 21-47.

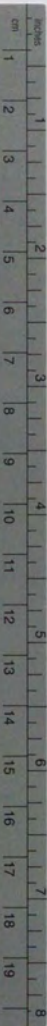
- [10] Falk, I. and R. Mendelsohn(1993). "The Economics of Controlling Stock Pollutants: An Efficient Strategy for Greenhouse Gases," *Journal of Environmental Economics and Management*, **25**, 76-88.
- [11] Fankhauser, S.(1995). *Valuing Climate Change*, Earthscan Publications Limited, London.
- [12] 藤田敏之 (1995). "動的ゲームを用いた越境汚染問題の分析," 第 14 回研究発表会講演論文集, エネルギー・資源学会, 171-176.
- [13] 藤田敏之 (1996). "越境汚染問題と国際協力に関するゲーム理論的考察," 経済研究, 一橋大学経済研究所, 掲載予定.
- [14] 藤田敏之, 伏見正則 (1995). "地球環境問題における国際協力の効果の検証," 1995 年度秋季研究発表会アブストラクト集, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, 76-77.
- [15] Hardin, G.(1968). "The Tragedy of Commons," *Science*, **162**, 1243-1248.
- [16] Hoel, M.(1991). "Global Environmental Problems: The Effects of Unilateral Actions Taken by One Country," *Journal of Environmental Economics and Management*, **20**, 55-70.
- [17] 石井吾郎 (1972). *実験計画法の基礎*, サイエンス社.
- [18] Kaitala, V., M. Pohjola and O. Tahvonen(1992). "An Economic Analysis of Transboundary Air Pollution between Finland and the Former Soviet Union," *Scandinavian Journal of Economics*, **94**, 3, 409-424.
- [19] Kamien, M.I. and N.L. Schwartz(1991), *Dynamic Optimization*, 2nd Edition, North-Holland, Amsterdam.
- [20] 霞ヶ関地球温暖化問題研究会編訳 (1991). IPCC 地球温暖化レポート, 中央法規.
- [21] 川島康子, 林亜夫, 森田恒幸 (1993). "地球温暖化防止に向けた国家間の協調の可能性," 計画行政, **16**, 2, 93-106.
- [22] Kreps, D.M.(1990). *A Course in Microeconomic Theory*, Princeton University Press, Princeton.

- [23] Mäler, K.-G.(1989). The Acid Rain Game, in *Valuation Methods and Policy Making in Environmental Economics*, (eds.)H. Folmer and E. van Ierland, 231-252, Elsevier, Amsterdam.
- [24] Manne, A.S. and R.G. Richels(1991). "Global CO<sub>2</sub> Emissions Reductions – the Impacts of Rising Energy Costs," *The Energy Journal*, **12**, 87-107.
- [25] Martin, W.E., R.H. Patrick and B. Tolwinski(1993). "A Dynamic Game of a Trans-boundary Pollutant with Asymmetric Players," *Journal of Environmental Economics and Management*, **24**, 1-12.
- [26] 松岡譲, 森田恒幸 (1992). "地球温暖化によるモデルと予測," 計測と制御, **31**, 5, 577-585.
- [27] 松下和夫 (1990). "開発途上国との環境協力," '地球環境と政治', 講座 [地球環境] 第4巻所収, 181-198, 中央法規.
- [28] Meadows, D.H., D.L. Meadows, J. Randers and W.W. Behrens III(1972). *The Limits to Growth*, Universe Books.
- [29] Miller, G.H. and A. Vernal(1992). "Will Greenhouse Warming Lead to Northern Hemisphere Ice-Sheet Growth?," *Nature*, **355**, 244-246.
- [30] 森俊介 (1992). 地球環境と資源問題, 岩波書店.
- [31] 室田泰弘, 伊藤浩吉 (1995). "温暖化問題と途上国 – 発展の加速による問題解決の可能性," 日本経済研究, **30**, 171-194.
- [32] 西村清彦 (1990). 経済学のための最適化理論入門, 東京大学出版会.
- [33] Nordhaus, W.D.(1991). "The Cost of Slowing Climate Change," *The Energy Journal*, **12**, 37-65.
- [34] Nordhaus, W.D.(1991). "To Slow or Not To Slow – the Economics of the Greenhouse Effect," *Economic Journal*, **101**, 920-939.
- [35] Nordhaus, W.D.(1994). *Managing the Global Commons – the Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge.



- [36] 奥野忠一, 芳賀敏郎 (1969). 実験計画法, 培風館.
- [37] 奥野正寛, 鈴木興太郎 (1988). ミクロ経済学 II, 岩波書店.
- [38] 鈴木光男 (1994). 新ゲーム理論, 勁草書房.
- [39] 鈴木光男, 中村健二郎 (1976). 社会システム, 共立出版.
- [40] Tahvonen, O., V. Kaitala and M. Pohjola (1993). "A Finnish-Soviet Acid Rain Game: Noncooperative Equilibria, Cost Efficiency, and Sulfur Agreements," *Journal of Environmental Economics and Management*, **24**, 87-100.
- [41] 竹内啓, 湯本昌編 (1992). 地球を考える, 三田出版会.
- [42] Welsch, H. (1993). "An Equilibrium Framework for Global Pollution Problems," *Journal of Environmental Economics and Management*, **25**, S64-S79.





# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM Kodak

Blue	Cyan	Green	Yellow	Red	Magenta	White	3/Color	Black

## Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

