

東京大学

2010.4.28

卒業論文

「国際環境協力に関する定量分析」

— 京都メカニズムの排出権取引市場を対象に —

国際関係論分科

呉 昊

目次

第一章 はじめに … P 1

第二章 京都メカニズムの詳細 … P 2

第 1 節 柔軟性確保措置としての京都メカニズム … P 2

第 2 節 排出権取引(ET) … P 2

第 3 節 共同実施(JI)とクリーン開発メカニズム (CDM) … P 4

第 4 節 京都メカニズムに関する制度設計上の課題 … P 4

第三章 排出権取引市場に関する先行研究と検証課題の定式化 … P 8

第 1 節 自由な完全競争市場に関する研究 … P 8

第 2 節 取引量制限つき競争市場に関する研究 … P 18

第 3 節 非競争的行動に関する研究 … P 23

第四章 シミュレーションプログラムの紹介 … P 31

第 1 節 マルチエージェントシミュレーター「artisoc」の紹介 … P 31

第 2 節 シミュレーションプログラムの説明 … P 31

第五章 シミュレーション結果及び考察 … P 34

第 1 節 検証課題 1 に関する結果及び考察 … P 34

第 2 節 検証課題 2 に関する結果及び考察 … P 37

第 3 節 非完全競争市場に関する結果と考察 … P 47

第六章 結論 … P 48

参考文献 … P 49

国際環境協力に関する定量分析

一 京都メカニズム下の排出権取引市場における排出権初期配分と均衡価格について

第一章 はじめに

国際環境協力の分野で現在、最も範囲が広くかつ一番関心を集めている事業は、地球温暖化防止の取り組みである。そしてこの中核をなすのが、1997年に開かれた第3回気候変動枠組条約締約国会議（COP3）で決議した「気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書」（以下単に「京都議定書」）である。この議定書の発効により、対象となる締約国は地球温暖化の主要原因の1つと考えられている二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出量を、基準年の1990年比で定められた割合までに削減することとなっている。そして、その目標達成を促進する手段の1つとして、排出権取引（Emission Permit Trading, 以下 ET）・共同実施（Joint Implementation, 以下 JI）・クリーン開発メカニズム（Clean Development Mechanism, 以下 CDM）を三本柱とする「京都メカニズム」に関する規定が盛り込まれた。さらにその後の2001年に開かれた第7回気候変動枠組条約締約国会議（COP7）において、その運用に関数詳細な取り決めが定められた。

これらの3つの制度は対象となる国のグループや方式こそ違うものの、いずれの制度についてもその本質的な目的は次の2点にある：第一に、温室効果ガスの排出削減費用が異なる国家どうしが協力しあい、削減目標を分担することにより全体の削減費用を低減させること；第二に、環境対策技術が立ち遅れている開発途上国には、その経済発展の必要など諸々の考慮から「京都議定書」による削減義務が設けられていないが、それらの国にも京都メカニズムへの参加により排出量削減のインセンティブを持たせること。このうち前者は具体的にいえば、各当事国の限界削減費用を平準化させることによって、すでに成熟した排出削減対策が行われておりこれ以上の削減に多大なコストが伴う先進国の削減費用を低減させることである。そして後者のインセンティブという主観的要素の強いもので対して、前者は定量的に評価が可能である。

本論文では京都メカニズム下における二酸化炭素の排出権取引市場モデルを構築し、そのうえでマルチエージェントシミュレーションを用いて制度設計上最も重要な論点の1つである排出権の初期配分とそれが市場の均衡価格に与える影響について定量分析を試みる。具体的にはさまざまな初期配分のもとでエージェント（当事国）らに取引を行わせ、異なる初期配分が市場均衡価格にどのような影響を与えるか、またそうして決定される均衡価格は果たして最も効率的な限界削減費用を実現してくれるかどうかを検証する。なお次章で詳しく説目するが、前述した京都メカニズムのその三本柱のうち、JI及びCDMで取得された排出権はいずれもETに組み込まれて取引対象とされるので、考察の対象を排出権取引に限定する。

次章以降の構成は、以下の通りである。まず、第二章で京都メカニズムの詳細を紹介し、それに関連する制度設計上の課題を提起し、それらを基に次章以降で展開する定量分析の検証課題を設定する；続く第三章では、前章で設定した検証課題に関連する排出権取引市場の先行研究を紹介し、それを踏まえて前章で設定した検証課題の定式化とモデル化を行う；第四章では本論文の根幹をなす分析ツールである、マルチエージェントシミュレーションプログラムの内容及び目的を説明する；そして第五章でシミュレーションの結果を提示し、それをもとに上記

の検証課題を分析し、第三章でとりあげた先行研究との結果比較も行う；最終章の第六章では、これらの考察・分析をまとめ、「排出権取引市場の価格と効率性は、市場の範囲、取引量に対する制限、そして参加国の非競争的行為によってどのような影響を受けるか」という問いに答える。

第二章 京都メカニズムの詳細

第1節 柔軟性確保措置としての京都メカニズム

本章では、京都メカニズムの制度と運用方法についてより詳しく紹介する。京都メカニズムは京都議定書で削減義務を受け入れた各締約国の削減目標達成を促進するための柔軟性措置であり、各国が実際に行った排出量削減に加えて次の4つの方法で排出削減量と同等のクレジットを取得できるようにする枠組みである。4つの方法とは、前出した ET、JI、CDM に加えて、吸収源活動である。

吸収源活動とは、植林や森林管理などによって二酸化炭素を吸収・固定する吸収源を増やすことにより、増加した吸収量を排出削減量と認める制度である。これについて日本の実施機関である地球温暖化対策推進本部が策定した『京都議定書目標達成計画』ⁱ⁾によれば、森林大国である日本は削減目標の1990年比6%削減のうち、3.9%を森林による吸収で実現する計画となっている。しかし一般的にみれば、現在のところ吸収源となりうるのは実質上森林しかなく、地球範囲で見た時森林資源の量は限られておりまた短期間のうちに増やせるものではない。さらに2001年のCOP7でのマラケシュ合意において、国ごとに森林による吸収量の上限が設けられたⁱⁱ⁾。これらの事情を考慮して本論文で展開する定量分析においては、この吸収源活動による削減分を無視する。本章における以下の議論では、京都メカニズムを ET、JI、CDM の三本柱からなる制度とみなす。

第2節 排出権取引(ET)

吸収源活動を除いた京都メカニズムの三本柱のうち、本論文の分析対象とするのは排出権取引(ET)である。一般に排出権取引とは、環境に有害な物質の排出量削減にあたって、削減コストの異なる複数の主体に排出許可書を発行しそれを市場で取引させることによって、目標とする削減量を各主体の削減コストに応じて効率的に分担させ、全体の削減コストを最小化する制度である。排出権取引にはキャップアンドトレード(Cap & Trade)と、ベースラインアンドクレジット(Baseline & Credit)と呼ばれる2種類の方式がある。前者は当局があらかじめ総許可排出量を決め、それを各排出主体に分配して取引させるものである；それに対して後者は排出主体別の排出枠を設定せず、その代わり各排出主体温室効果ガスの排出削減プロジェクト等を実施し、プロジェクト実施がない場合に比べて削減した温室効果ガスの排出削減量をクレジットとして認定して、そのクレジットを取引させるものである。いずれの場合にしても、最終的には取引を通して各主体の限界削減費用を均等化させることによって、全体の削減コストを最小化するのが目的である。

前述したように、JI や CDM や吸収源活動で取得されたクレジットも ET の取引対象となり、こういう意味でこれらは最終的に ET に組み込まれるものとも考えることもできる。そのため、京

都メカニズムを分析するにあたって、その効果を ET に織り込み済みだと考えることもできる。そこで本節では、モデル化の対象である京都メカニズムの ET 制度について詳しく紹介する。

京都メカニズム下における ET の根拠となるのが、1997 年に COP3 で締結された京都議定書第 17 条ⁱⁱⁱである：

締約国会議は、排出量取引（特にその検証、報告及び責任）に関する原則、方法、規則及び指針を定める。附属書 B に掲げる締約国は、第 3 条の規定に基づく約束を履行するため、排出量取引に参加することができる。排出量取引は、同条の規定に基づく排出の抑制及び削減に関する数量化された約束を履行するための国内の行動に対して補足的なものとする。

このように上記条文では排出権取引を認める趣旨と、それが国内行動に対する補足であるという位置づけを規定したのに過ぎず、具体的な実施方法に関しては 4 年後の 2001 年、COP7 でのマラケシュ合意^{iv}で初めて定められたのである。その主な内容^vは：

1. 付属書 I 国の中で、炭素クレジット(Carbon Credit)を取引することを認め、付属書 B に規定された市場経済移行中の付属書 I 国は付属書 II 国に対して、積極的に参加するよう促進する。
2. 遵守制度の受入れは、京都メカニズムの活用条件としない。
3. ET の位置づけは国内対策の補足であるが、そのための定量的制限は設けない。
4. 排出量取引における売りすぎを防止するため、各国に認められた排出枠の 90%又は直近の排出量のうち、いずれか低い方に相当する排出枠を常に留保する。
5. Carbon Credit として、次の 4 種類のものを認める：
 - ①京都議定書が規定した各国の削減量に応じた初期割当量(Assigned Amount Unit, 以下 AAU)、
 - ②各国が吸収源活動で得た吸収量(Removal Unit, 以下 RMU)、
 - ③JI で得られた排出削減ユニット(Emission Reduction Units, 以下 ERU)
 - ④CDM で得られた認証排出削減量(Certified Emission Reductions, 以下 CER)
6. 実際の排出量が上記の炭素クレジットの合計を下回っている（あるいは下回る見込みの）国が、炭素排出量がそれを上回っている（あるいは上回る見込みの）国に余剰分のクレジットを売ることができる。

以上の合意内容から分るように、マラケシュ合意で具体化された京都メカニズム下の排出権取引は Cap & Trade を基本的な枠組みとしながら、JI や CDM による Baseline & Credit 的な方式によるクレジット取得をも認める、というものである。また次節でより詳しく説明するが、理論的にいえば JI や CDM の本質的な効果と目的はいずれも ET の場合と同じく「限界削減費用の均等化」である。さらに、実際の定量分析においてもこの ET と JI、CDM の等価性が示されている。たとえば（小宮山 2007）^{vi}の試算によれば、付属書 I 国が京都議定書の定める削減目標を達成するのにかかる追加的エネルギー投資額については、ET のみ実施・ET+CDM・JI+CDM の 3 つの場合

で大差はない。また同じく（小宮山 2007）の試算結果から（日本と西欧という 2 つの地域のデータしか示されていないが）限界削減費用のほうについても ET のみ実施の場合と ET+CDM の場合とで大差ないことが示されている。これらのデータから、ET と CDM・JI は実際効果から見て等価であるといえる。従って本論文のモデル化とシミュレーションでは、京都メカニズムを ET のみからなる枠組みに近似する。

第 3 節 共同実施(JI)とクリーン開発メカニズム (CDM)

本節では、以降のモデル化・シミュレーション分析で捨象されることになる JI と CDM 制度の概要を紹介し、それらは本質的に ET と同じ効果をもたらすことを理論的な観点から示す。JI と CDM は対象とする締約国と呼び方こそ異なるものの、その実質は全く同じものである。

CDM は ANNEX1 国が資金・技術を提供し、主に環境対策技術が未熟な途上国である非 ANNEX1 締約国で削減プロジェクトを行い、その削減分の一部を自国のクレジットとして取得するものである。CDM の目的は、もちろん先進国と途上国の間で温室効果ガスの限界削減費用を均等化することである。先進国はすでに技術した技術と比較的に豊富な資金を保有しているが、すでに多くの削減努力を尽くしておりさらなる削減には大変大きなコストが伴う場合が多い；一方途上国は技術や資金面の資源が不足しており、そのため先進国に比べまだ多くの削減努力の余地があり、必要な資源が提供されれば比較的に低いコストで削減量を増やすことが可能である。そこで先進国が途上国に技術や資金面の援助をすることで、得られた追加削減量の一部を自国の削減分として取得できるようにすることで、実質的に両者の削減費用を均等化し、全体の削減費用を最小化することにある。

それに対して JI は先進国と市場経済移行中の途上国を中心とする付属書 I 国（以下 ANNEX1）どうしの間で適用される制度であり、A 国が技術や資金を提供して B 国で二酸化炭素排出削減のプロジェクトを実施し、認定された追加的削減量を両国の間で分配するというものである。先進国どうしでプロジェクトを共同実施する JI の目的は、CDM ほどわかりやすいかもしれない。先進国は平均的に見て環境対策技術が成熟しているけれども、異なる地理的・社会的条件などから豊富に持っている資源や技術も各々異なる。従って先進国どうしであっても、お互いの「比較優位」を生かすことで削減費用を抑えることができる。

このように CDM とは JI は、先進国間で実施するか先進国と途上国の間で実施するかという点が異なるだけであり、両者の最終目的はいずれも世界全体の限界削減費用の均等化である。そしていずれの場合もこの限界削減費用均等化の効果は、次のような一種の「取引」によって実現される。即ち相対的に削減費用の高い国が資金や技術を削減費用の低い国に提供し、その報償として後者における追加削減量の一部を前者の削減分として取得するということである。したがって CDM とは JI は実質的に、ET と同じメカニズムを通して同様な効果をもたらすことは容易に分かる。後述の通り本論文のモデル構築は限界削減費用関数の設定を出発点にしているが、その際に設定した限界削減費用関数にはすでに CDM 及び JI の効果を加味済みだと考える。これによって、京都メカニズムに関する考察を排出権取引に関する考察に限定する。

第 4 節 京都メカニズムに関する制度設計上の課題

本節では京都メカニズムの ET が今課題に直面している制度設計上の課題を提起する。これらの課題こそ、本論文の問題意識であり、そして次章以降の考察の具体的な分析課題に直結するものである。気候変動枠組み条約のオンライン公開資料^{vi}によれば、ANNEX1 国の中で基準年である 1990 年の排出量が最も多いのは欧州連合の 3137 百万トンであり、続く 2 位のロシアは

2535 百万トン、3 位の日本は 10682535 百万トンである。そして非 ANNEX1 国の中では、アメリカと中国が

以上のデータから、多くの ANNEX1 国の排出量実績は楽観的とは言えず、特に EU と日本はむしろ 1990 年から 2007 年の間で排出量がそれぞれ 0.9% と 14% 増加しており、京都メカニズム下の ET が本格的に行われていないに現状では第一約束期間が終了する 2012 年までに定められた削減目標の達成は困難である。また京都議定書から離脱したため削減義務を負っていないものの、排出量が最も多く世界全体の約 20% を占めるアメリカに至っては、20% もの増加となっている。

一方同じ期間中に、世界 3 位で世界総排出量の約 6.6% を占めるロシアは 36.8% の減少を示しており、その他ポーランドなどの旧共産圏の諸国は排出量が大幅に減少している。その理由として、旧体制下における環境対策の極端な軽視などが考えられるが、ともかくこれらの国では他の主要排出国に比べてはるかに低い限界費用で二酸化炭素排出量を削減することが可能である。

このような状況から、京都メカニズムに求められる機能と役割、そして現状においてその制度設計上の課題がみえてくる。まず、上述のように ANNEX1 国の間で削減目標は大きく異なるうえ、ロシアを代表とする旧共産圏諸国は限界削減費用が著しく低いうえ削減目標は非常に緩いものである。たとえばロシアについては、削減目標は 0 つまり現状維持であるが、このままなら削減努力をしなくても今後さらに排出量が減少を続けると予想だれている。さらに中国やインドといった、排出量が大きくかつ削減費用が相当に低い非 ANNEX1 国もある。削減目標を負わないこれらの国が京都メカニズムに本格的に参加するとしたら、各排出主体の保有クレジット及び限界削減費用には大きな差があるといえる。このような状況化で、京都メカニズムの最終目的である限界削減費用の均等化と世界全体での削減費用の最小化を達成するためには、次の 3 点を実現しなくてはならない：

目標 1. ANNEX1 のうち現状で削減費用が非常に高くなっている先進諸国（主に OECD 諸国、特に日本やアメリカ）の削減を容易にするため、取引後の限界削減費用を十分に低くするのに必要な供給量を確保すること。そのためには現状で削減費用が費用に低く、削減ポテンシャルが非常に大きい ANNEX1 国（中国やインドやブラジルなど）積極的な参加を促進すること。

目標 2. 所与の需要量・供給量に対して、各国の限界削減費用が一致するまで、十分な取引量を実現すること。

目標 3. 大量の排出権クレジットを供給または需要する排出主体が、排出権取引市場において価格影響力を行使して均衡価格を歪めるのを防ぐこと。

である。さて、京都メカニズムを ET のみの制度と近似して考える場合、上記の 1 から 3 はそれぞれ次のような政策課題と捉え直し、さらにそれらを本論文の定量分析における具体的な分析課題に変形させることができよう：

政策課題 1. 市場の範囲設定

次に目標 2 に関する政策課題と分析課題を考える。もう一度本節はじめに提示したデータに立ち戻ってみると、現状のまま（ET なし）では ANNEX1 国全体の排出量は増加傾向にある。そのため 5.2% の全体削減目標を達成するためには、京都メカニズムの活用を通して中国やインドといった排出量が大きくかつ現時点での限界削減費用が相当に低い非 ANNEX1 国との間で限界削

減費用の平準化を図り、後者の持つ大きな削減努力の余地を生かすことが必要不可欠である。京都メカニズムが特にその目的のためにデザインした制度が CDM といえるが、前節で議論したようにその本質的効果は ET と等価であり、しかも CDM で得られた削減クレジットも最終的には ET の枠組み内で取引される。従って、第2節で紹介したマラケシュ合意の概要にある通り、非 ANNEX1 国を積極的に ET の枠組みに取り込むことが必要である。

さて非 ANNEX1 の締約国は義務としての数値目標を負っていないので、これらの国が京都メカニズム下の ET に参加する場合は排出権（以下クレジット）の純供給国となる。すなわちこれらの国は、市場均衡価格が自国の限界削減費用を上回る場合に限り、削減努力によって追加のクレジットを創出し、これを ET 市場で売却することで利潤をあげればよい。逆に市場均衡価格が自国の限界削減費用を下回っても、もともと削減義務を負わないのでわざわざクレジットを購入する必要はない。この意味で非 ANNEX1 国は、京都メカニズム下の ET に参加する構造的なインセンティブをもつ。そして理論的には、このようなインセンティブをもっている国に参加させるためには、ET 市場の参入コストをそのインセンティブに対して相当に低い水準に抑えれば十分である。

京都メカニズム下の ET 市場の参入コストとなりうるものは、会計処理や国内制度の整備といった事務的な費用を除けば、クレジット（cap）の取得費用のみである。Cap & Trade 方式の ET では、一般に2通りの取得方法がある：1つは当局が各排出主体に対して無償で排出枠を割り当てる方式、もう1つは当局が全体の割り当て枠（cap の総量）だけを決めて、それをオークションによって各排出主体に分配する方式である。後者の場合、当局に収入が発生する代わりに各排出主体は cap を取得する際に費用を支払わねばならない。前段落の議論を踏まえれば、当然のことながら前者の無償配分方式が目標2を達成するうえでは有利である。また京都メカニズムの場合、「排出主体」が主権国家であり「当局」は主権国家間で合意された条約・あるいはそれに基づく国際組織であるため、その性格からしても前者の方式が妥当である。それはマラケシュ合意が定めた運用規則にも確認されているから、配分対象と配分方式に関しては、一応次のような定性的な結論が得られたといえよう。すなわち、cap の配分対象に関しては ANNEX1 国のみならず、非 ANNEX1 の締約国をもできるだけ取り込むことが望ましい；そして配分方式に関しては、無償でクレジットを取得させる方式をとるべきである。以上の議論を踏まえて、政策課題1に対して次のような実証的な検証課題を設定する：

検証課題 1. 完全競争市場の仮定のもと、主要非 ANNEX1 国が参加する場合としない場合とで、ET 市場における均衡価格・各国の限界削減費用がどれだけ変化するか？

政策課題 2. 取引量上限の設定

マラケシュ合意が規定するように、京都メカニズムの ET は Cap & Trade 方式を基本とするものである。これは前に説明したように、当局があらかじめ全体の許可排出量を決めて各排出主体に割り当てる方式である。そこで容易に想像されるように、実際に ANNEX1 国をはじめ各参加国の削減費用を平準化させるのに十分な取引が可能かどうかは、この全体の許可排出量（以下 cap）に大きく左右されることになる。このことに関する厳密な経済理論の詳細は次章で取り上げるが、仮に排出権取引市場を完全競争市場と見なせるのであれば、その均衡価格は最初に定めた cap と各国の削減費用関数に応じて一意的に決まり、cap の配分方法にはよらない。さらに、その際に市場を通して決定された均衡価格と各参加国の取引量は、自動的に各国の限界削減費用を一致させる。このことから考えれば、京都議定書で定めた削減目標からの各国の最大排出可能量を算出し、その合計を 100%cap としたほうが最も望ましいといえよう。

一方で京都議定書の17条の文言によれば、京都メカニズム下の ET はあくまで ANNEX1 国がその数値目標を達成するのを促進するための補足的な柔軟性措置である。その後のマラケシュ合

意では、確かにこの補足的措置としての性格に基づいた取引の定量的制限はなされなかったものの、第2節で述べたように代わりに排出権の「売りすぎ」を防止するために「各国に認められた排出枠の90%又は直近の排出量のうち、いずれか低い方に相当する排出枠を常に留保する」とする運用規則が設けられた。また、無制限なETを認めてしまうと先進国のほうはこれに頼りっきりになり、これ以上の技術開発をしようとしなくなる、というインセンティブ上の問題もある。これにより世界全体の技術レベルが停滞すれば、長期的・全体的にみて世界の全排出量削減に悪影響をもたらす恐れがあることを根拠に、取引量制限を主張する論調もある。たとえば欧州共同体（以下EU）は、任意の取引参加国のクレジット購入量に対して、次のような上限を提唱している^{viii}：

① $\{ (\text{基準年における排出量} \times 5 + \text{初期排出枠}) / 2 \} \times 5\%$ または

② $| 1994\text{年} \sim 2002\text{年の間の任意の年における排出量実績} \times 5 - \text{初期排出枠} | / 2$

のいずれか高いほう。

(Zhang 1999) によれば、上記①は主に京都議定書の定める削減目標達成の観点を考慮したものであり、一方②は各国の削減努力推奨を考慮したものである。

このように ET 市場における取引量に対する制限は、京都議定書の趣旨から運用上の必要まで、さまざまな要因を考慮したものである。しかしいずれにしても、cap 量を制限するのは前掲の目標 1 を実現するうえでは不利な方向に働く。本節の初めに提示したデータを鑑みれば、ANNEX1 国のうち削減がなかなか思うように進まない先進国と大量の余剰排出枠を保有すると予想される旧共産圏諸国の削減費用には雲泥の差があり、相当量の取引によってこれを平準化させることは目標 1 を達成するうえで必要不可欠である。この事実を考慮にいれてもなお、議定書の趣意通りに京都メカニズムの ET を「補足的」な性格の措置と位置づけるべきかどうか、これについては議論の余地があるだろう。また上述のように ET の制度設計に際して、先進国によるさらなる削減技術を研究開発するインセンティブを損なわないように、さるべき配慮が必要だとする論量にも一理があるだろう。しかし本論文の目的はあくまで ET 制度に関する定量的な分析であるので、これらの非定量的な要素に関する議論には立ち入らない。従って次章以降の分析では、この政策課題 2 を次のような分析課題として具体化する：

分析課題 2. 完全競争市場の仮定のもと、取引量に対する制限はどのように均衡価格・市場均衡点における各排出主体の限界削減費用に影響するか？

政策課題 3. cap の初期配分、特に非 ANNEX1 国の初期配分の決定

ところで上記の定性的結論に従って実際に cap を配分する場合、非 ANNEX1 国の初期配分量を以下に決定するかが問題となってくる。そもそも Cap & Trade 方式の ET のメリットは、当局が cap の設定によって最初から全体の排出削減量を確保できることである。京都メカニズムの場合、もし配分対象とする排出主体が ANNEX1 国だけであれば、各国の数値目標から対象期間内の最大排出可能量を計算し、その合計をクレジットとすれば自動的に全体の削減目標を確保できるわけである。しかし非 ANNEX1 国の場合、もともと削減目標を持たないので、クレジット配分の基準を新たに設定する必要がある。上掲の目標 2 を達成することのみを目的とするならば、前述したように無償配分方式をとるだけで非 ANNEX1 国には構造的インセンティブが生まれるから、非 ANNEX1 国にはそれぞれ現状の排出実績（現状排出量）、あるいは追加対策なし（Business As Usual, 以下 BAU）のままで見込まれる対象期間における排出量（見込み排出量）をそのまま排出枠として割り当てればよい。そうすれば非 ANNEX1 国は ET 参加によって、相

当に大きな生産者余剰（つまり利潤）をあげることを見込める。そして参加した非 ANNEX1 国が十分なクレジット提供してくれれば、京都議定書が定めた ANNEX1 国全体の削減量も確保できるため、理論的には目標 2 を完璧に達成することができる。

しかしながら、「非 ANNEX1 国が十分なクレジット提供する」という前提は、無条件に実現されるわけではない。より踏み込んでいえば、それはさらに 2 つの前提条件があつて初めて実現される：第一に、ET 市場が完全競争市場に十分に近く、参加するすべての排出主体はプライス・テーカーとして振舞い、均衡価格を変更する影響力を行使しないこと、特に非 ANNEX1 国の側は自身の限界削減費用と均衡価格が一致するまでに十分なクレジットを供給すること；第二に、そもそも参加した非 ANNEX1 国が ET のメカニズムを通して提供できる削減余地が、ANNEX1 国全体の削減不足分を補うのに十分であること。

第一の条件は要するに、これまでの検証課題設定に際して無条件に仮定してきた「完全競争市場」である。しかしここで議論している初期配分しだいでは、この条件が成立しなくなる恐れがある。前段落で述べたような、非 ANNEX1 国の cap を現状排出量あるいは見込み排出量と等しくするような初期配分はでは、排出量の継続的な減少が見込まれる旧共産圏諸国に膨大な余剰クレジットを保有させることになる。これはとりもなおさず ET 市場には巨大な供給者が出現したことになり、これは経済学の一般理論を持ち出すまでもなく、常識や感覚から判断しても当該の排出主体に価格影響力を持たせることになりかねない。そうなれば非 ANNEX1 国からは完全競争市場の均衡よりも少ないクレジットしか供給されないことになる。

第二の条件は、本節のはじめに提示した各国の排出実績と削減費用関数の他に、実は ET 市場のクレジット価格によっても左右されること、そして当の ET 市場価格は第一の条件次第で変わることである。言い換えれば、この 2 条件は連動しており、さらに両者はともに非 ANNEX1 国に対する cap の初期配分量に依存する。そのため最終的に目標 2 と目標 3 がどの程度達成されるのかは、これら諸条件の間の複雑な相互影響にかかっている。このような事象を分析するのに、次章以降で行うマルチエージェント型にシミュレーションは有力なツールである。その際の分析課題を、目標 2 に関するこれまでの議論を踏まえながらまとめると：

検証課題 3. 非完全競争市場における価格は、完全競争市場の均衡価格に比べどれだけに変化するのか？またその変動幅と排出権の初期配分との間にどのような関係があるのか？

第三章 排出権取引市場に関する先行研究と検証課題の定式化

第 1 節 自由な完全競争市場に関する研究

本章ではまず排出権取引市場に関する一般的な経済学理論をとりあげ、次に前章で設定した 3 つの検証課題に直接関係する先行研究をまとめる。そしてこれを踏まえたうえで、それらの分析課題を定式化・モデル化する。前掲した検証課題について、その中心的なテーマを整理してみると次のようになる：検証課題 1 と 2 は完全競争市場の均衡における均衡価格・限界削減費用であり、検証課題 3 は価格影響力の発生条件とそれによる市場価格・限界削減費用への影響である。従って本節ではまず完全競争市場を仮定して、排出権取引市場の均衡価格決定に関する一般理論と検証課題 1 に関する定量的・実証的な研究を紹介する；次いでに 2 節で取引量を

制限した競争市場に関する研究を、第3節で排出権取引市場における非競争的行為とそれが市場に与える影響に関する研究を紹介する。

完全競争市場と仮定した排出権取引市場の均衡価格・及び均衡点における限界削減費用に関しては非常に多くの先行研究があるが、理論面の研究に関していえば独立変数を削減量とするか排出量とするかなどの技術的な処理の違いを除いて、標準的な理論が確立されているといえる。以下では主に（前田 2009）¹⁸と（鷲田 2004）¹⁹を参考にしながらこの理論を再構成するが、他の先行研究のほとんども実質的に同じ内容となっている。

（前田 2009）では汚染物の排出による環境問題を外部性の問題として捉え、排出権取引を直接規制と環境税に並ぶ解決方法としてとりあげた。ここでもまず排出権取引が解決せんとする、外部性問題としての環境問題の本質を明らかにしてみよう。たとえば代表的な温室効果ガスである二酸化炭素は、多くの財の生産に伴って発生する汚染物質であるが、通常の財市場ではその排出による環境への悪影響（経済学的に言えば負の効用）を取り込んでおらず、あるいはその対策に必要な費用は供給者の生産費用関数に含まれていないといってもよい。そのため当然、当該財の供給曲線と需要曲線の交点として決定される市場価格にもこの費用は反映されていない。このような意味でこの環境面の負の効用あるいはその解消にかかる費用は、通常の財市場の外に存在するものとして「外部費用」と呼ばれ、その発生は一般に経済学的に「外部性の問題」と呼ばれる。もう1つの見方として社会全体の便益を考えれば、温暖化といった環境問題は一人一人の生活の質に関わるものである、生産がもたらす環境面の負の効用は確実に社会の便益を減少させるものであり、あるいは社会的費用を増加させていると考えてもよい。この社会的費用は生産者の私的な費用関数に含まれておらず、前述の「外部費用」はこの社会的費用と私的費用の差とみることができる。そして2つの費用関数から導かれる供給曲線と需要曲線の交点は一般に一致せず、通常の財市場の均衡点における生産量（私的最適な生産量）は社会的最適な生産量より多くなる。

社会的最適な生産量（排出量）と私的最適な生産量（排出量）の差を求めるために、外部性問題を次のように定式化できる：

各生産者の排出量を e_i として、その排出による便益を $B_i(e_i)$ とする。また社会全体の排出総量は $e = \sum e_i$ となるが、それによって社会が被る外部費用を $D(e)$ とする。

各生産者は私的便益を最大化しようとする：

$$\text{Max } B_i(e_i) \quad (1.1.0)$$

その解を e_i^P とすれば、 e_i^P は私的最適な排出量である。

一方で、社会全体が得られる便益は、各生産者の便益の合計から外部費用 $D(e)$ を差し引いたものである。前者を $B(e)$ とすると、社会的最適は社会的便益の最大化に他ならない：

$$\text{Max } S(e) = B(e) - D(e), \quad B(e) = \sum B_i(e_i) \quad (1.1.1)$$

$B(e)$ 、 $D(e)$ の一階微分をそれぞれ $MB(e)$ 、 $MD(e)$ とすれば、(1.1.1) の一階の必要条件は：

$$MB(e) - MD(e) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad MB(e) = MD(e) \quad (1.1.2)$$

限界効用逓減の法則から $S(e)$ の二階微分は負になるので、(1.1.2)は十分条件でもある。

また(1.2)の左辺の $MB(e)$ に関して、包絡線定理からすべての i に対して：

$$MB(e) = MB_i(e_i) \quad \forall i \quad (1.1.3)$$

が成り立つ。

(1.2)と(1.3)から社会的最適解を e^S とすれば、 e^S は次の必要十分条件を満たす：

$$MD(e^S) = MB(e^S) = MB_i(e_i^S) \quad (1.1.4),$$

$$e^S = \sum e_i^S \quad (1.1.5)$$

(1.4), (1.5)から e^S と各 e_i^S は一意的に決まり、次の性質を満たす：

$$0 < e_i^S < e_i^P \quad \forall i$$

従って社会的最適な生産量（排出量）と私的最適な生産量（排出量）の差は

$$\sum e_i^S - \sum e_i^P$$

となる。

さてこのような外部性問題を解決する方法は、量的規制と経済的手法の2種類に分けられる。量的規制とは行政当局が外部費用を抑えるために生産量（排出量）の上限を強制的に設定し、それによって社会的最適な生産量を達成するものである。この方法の問題点として、実際に様々な財の生産による外部費用の大きさを計算するのは大変難しく、そのため社会的最適な生産量（排出量）を正確に見積もることも困難である。これに対して経済的手法はさらに環境税と排出権取引に大別され（自主的に汚染物質の排出量を減らした生産者に補助金をあげる方法もあるが、補助金を負の税率と考えれば本質的には課税と同じである）、どちらも自動的に社会的最適な生産量（排出量）を実現できるという利点をもつ。以下では課税と排出権取引のそれぞれの場合を定式化する。

まず環境税の場合、汚染物の単位排出量あたりに一定の税率 t をかけることにあつた。前出の定義と記号をそのまま使用して、税率 t の設定は次のような社会的最適問題として定式化される：

各生産者の便益最大化条件は

$$\text{Max } B_i(e_i) - t e_i \quad (1.2.1)$$

前出ように $B_i(e_i)$ の一階微分を $MB(e_i)$ とすると、(1.2.1)の解は e_i^T

$$MB_i(e_i^T) = t \quad \forall i \quad (1.2.2)$$

を満たす。これと(1.1.3)の導出で使った包絡線定理から

$$t = MB(e^S) \quad (1.2.3)$$

のように税率 t を設定すれば、(1.2.2)、(1.2.3)、(1.1.3)、(1.1.4) から自動的に

$$e_i^T = e_i^S \quad \forall i$$

となり、量的規制を行うことなく、また社会最適な生産量（排出量）を当局が正確に分からなくても、環境税によって自動的にそれを実現することができる。この時の税率 t は (2.3) より、各生産者の排出による限界便益と等しいが、これは見方を変えれば各生産者の限界削減費用と考えることもできる。このよう単位排出量あたりに限界削減費用と同じだけの税をかける方法は、環境税の典型的な方式でピグー税と呼ばれる。

一方排出権取引の場合、各生産者に割り当てられる初期排出枠を l_i 、その合計を $\sum l_i = 1$ 、また排出権と市場価格を p として、次のように定式化される：

各生産者の便益最大化条件は

$$\text{Max } B_i(e_i) - p(e_i - l_i) \quad (1.3.1)$$

この解を e_i^M とすれば、(1.2.2)と同じように e_i^M は一階の必要条件

$$MB_i(e_i^M) = p \quad \forall i \quad (1.3.2)$$

を満たし、またこれに取引市場の均衡条件（需要＝供給）をあてはめると

$$\sum e_i^M = \sum l_i \quad (1.3.3)$$

(3.2)、(3.3)と包絡線定理から

$$p = MB_i(e_i^M) = MB(\sum e_i^M) = MB(\sum l_i) = MB(l) \quad (1.3.4)$$

(1.3.4)から分ることは、当局が実際の社会的最適な総排出量 e^S を実現するには、許可する総排出量を

$$l = e^S \quad (1.3.5)$$

と設定すればよく、その時 (1.2.3) と(1.3.5)から、

$$p = t$$

が導かれ、すなわち社会的最適な排出量を実現する排出権価格＝各生産者の限界削減費用はピグー税の税率に一致することが分かる。また(1.3.4)、(1.3.5)と(1.1.3)、(1.1.4)から

$$e_i^M = e_i^S \quad \forall i$$

すなわちその時各生産者の排出量は自動的に社会便益を最大化する値になる。ここで注意してほしいのは、排出権取引によって社会的最適性を実現するには(3.5)の条件だけで十分であり、この $1 = e^S$ なる総排出枠をいかに各主体に分配するかによらない。これはより広義な命題であるコースの定理にも合致する結果であり、排出権取引の経済効率性を主張する強力な根拠となっている。

以上の分析をまとめると、理論的には完全競争市場を仮定した場合の排出権取引は環境税と同じような効果をもち、排出権取引市場の均衡価格は環境税の税率に対応する。また権取引市場の均衡価格・そして各排出主体の排出量は排出権の総量のみによって決定され、排出権の初期配分の仕方によらない。現実の京都メカニズムについても、排出権の初期配分をいかにするかは大変関心を集めている政策課題となっているが、上記の理論によれば初期配分の仕方は市場の効率性に全く関係しないということになる。

ここまでの排出権取引市場に関する標準的な理論であるが、それには次のような前提があることを忘れてはならない：第一に、はじめの仮定にあるように市場が完全競争的であること；第二に、式 (1.3.2) が満たされるまで、つまり個々の排出主体が自身の限界削減費用と市場価格が等しくなるまで、実際に取引を行うことが必要である。そしてこれは前章で設定した検証課題 2 に直接に関わる。もしマラケシュ合意で定めた排出枠の留保等の規定で取引量を制限してしまうと、一部の排出主体にとって取引可能な排出量が、限界削減費用を市場価格に一致させるのに必要な取引量に満たない可能性が出てくる。そこで実際にこのような取引量に対する制限が最終的な市場価格やその際の各主体の限界削減費用をどのように左右するだろうか。これを検証するために次節の最後に提示する「取引量制限つき完全競争モデル」を構築するが、その前にまず検証課題 1、つまり排出権取引市場に参加する国の範囲によって、完全競争市場の均衡価格と全体の削減費用がそのように変化するかについての研究を 2 つ紹介する。

最初に取り上げるのは、他の後続研究に重要な実証データを提供した (Ellerman & Decaux, 1998) である。これは 2010 年を京都議定書の第一約束期間 (2008–2012) を代表する時間点として、二酸化炭素のみを対象に OECD Only with No Trade, OECD Only、OECD + ANNEX1、World Wide 参加の 3 つのケースについて定量分析を行ったものである。筆者らは EPPA という MIT Joint Program の世界経済に関する一般均衡モデルを使って、12 の主要な国・地域における排出量削減費用を算出した結果、その結果各国の限界削減費用関数は削減量 Q の二次関数 $MAC = aQ^2 + bQ$ として極めてよい精度で近似できるとした (R^2 が極めて 1 に近い)。それに基づいて生成した限界削減費用関数を次頁の表 1-1 に示す。

表1 (Ellerman & Decaux, 1998) の EPPA モデルに基づく 限界削減費用関数 $MAC=aQ^2+bQ$,			
Region	a	B	R ²
USA	0.0005	0.0398	0.9923
JPN	0.0155	1.816	0.9938
EEC	0.0024	0.1503	0.9951
OOE	0.0085	0.0986	0.9981
EET	0.0079	0.0486	0.9973
FSU	0.0023	0.0042	0.9938
EEX	0.0032	0.3029	0.9983
CHN	0.00007	0.0239	0.9992
IND	0.0015	0.0787	0.9970
DAE	0.0047	0.3774	0.9996
BRA	0.5612	8.4974	0.9997
ROW	0.0021	0.0805	0.9967

表1-1

なお出典の脚注にあるように、上表において排出量Qと限界削減費用MACの単位はそれぞれ[100万トン炭素]と[\$ 1/1.5USD at year 1998]である。

表1の限界削減費用関数をもとに、(Ellerman & Decaux 1998) ^{xi}が計算した各ケースの均衡価格及びANNEX 1 全体削減費用は次頁の表1 - 2の通りである。

表 1-2 (Ellerman & Decaux, 1998) の完全競争市場の範囲と均衡価格				
	OECD No Trade	OECD Only	ANNEX1(include OECD)	World Wide
均衡価格(\$/ton C)	-	240	127	24
ANNEX 1 全体の削減費用(billion \$)	120	107	54	11

表 1-2

表 1-2 から分るように、排出権取引市場の範囲が拡大するにつれて、特に現状でより限界削減費用の低い国が積極的に参加すればするほど、全体の供給量が増え均衡価格が低下する。OECD だけが参加する場合を基準とすると、それを含んだ ANNEX1 全体が参加する場合に均衡価格約 1/2 に、世界全体で取引した場合にはさらにその約 1/6 にまで下がるのである。取引後において、ごく一部の大量な排出権不足を抱える国を除けば、均衡価格は各国の限界費用に必ず一致するので、均衡価格の低下はそれらの国の削減費用軽減に他ならない。もちろん排出権を供給した国は、ホットエアを保有している場合を除きそれ自身の削減量と削減費用が増えるが、市場価格がその時どきの限界削減費用を上回る場合にしか次の単位を供給しないので、これらの国も取引から利益を得る。そのため ANNEX1 以外の世界各国が市場に参加してくれば、ANNEX1 全体が京都議定書を順守するために必要な削減費用は\$54billion から\$11billion へと約 1/5 にまで低減するという結果になっている。

ANNEX1 と World Wide の 2 ケースについて、上記とほぼ同じような計算結果は (Gusbin, Klaassen & Kouvaritakis) らによる長期エネルギー需要モデル POLES に基づく計算から得られた。その結果を次頁の表 1-3 と表 1-4 に示す。

表3 with trading among Annex I in 2010

	Costs of reduction (in mil \$1990)					Costs of reduction as % of GDP 2010			
	Costs of domestic reduction			Expenditures on acquisitions	Total costs of red.	Costs of domestic reduction			Total expenditures
	No trade	Full trade	Half trade	Full trade	Full trade	No trade	Full trade	Half trade	Full trade
Canada	1168	631	907	512	1143	0.145	0.078	0.113	0.142
Visegrad*	37	859	350	-1263	-404	0.006	0.14	0.057	-0.066
European Union	10423	5146	7203	3664	8810	0.123	0.061	0.085	0.104
Russia, Ukraine, Baltics	0	2830	0	-20934	-18104	0	0.144	n.a.	-0.92
Japan	11432	970	4715	4436	5405	0.311	0.026	0.128	0.147
Rest of Cent. Europe in Ann.B	1	338	79	-712	-373	0	0.136	0.032	-0.15
Australia, New Zealand	1263	763	987	419	1182	0.209	0.126	0.163	0.196
United States	30211	11184	19374	13872	25056	0.355	0.131	0.227	0.294
Total Annex I	54535	22721	33613		22721	0.219	0.091	0.135	0.091
Cost savings in %		58%	38%		58%				
Permit price in \$ (price level 1990)/tC					66.5				

* Poland, Hungary, Slovakia, Czech Republic.

表1-3

表4 with worldwide emission trading in 2010

	Costs of reduction (in mil \$1990)					Costs of reduction as % of GDP 2010			
	Costs of domestic reduction			Expenditures on acquisitions	Total expenditures	Costs of domestic reduction			Total expenditures
	No trade	Full trade	Half trade	Full trade	Full trade	No trade	Full trade	Half trade	Full trade
Canada	1168	70	476	490	560	0.145	0.009	0.059	0.07
Visegrad*	37	85	61	-58	28	0.006	0.014	0.014	0.005
European Union	10423	822	3793	3722	4544	0.123	0.01	0.045	0.054
Russia, Ukraine, Baltics	0	480	n.a.	-6286	-5805	0	0.024	n.a.	-0.295
Japan	11432	144	3281	2047	2191	0.311	0.004	0.089	0.06
Rest of Cent. Europe in Ann. B	1	57	18	-110	-53	0	0.023	0.007	-0.021
Australia, New Zealand	1263	108	512	504	612	0.209	0.018	0.085	0.101
United States	30211	1702	10934	10186	11887	0.355	0.02	0.128	0.14
Total Annex I	54535	3468	19075	10495	13963	0.219	0.014	0.077	0.056
Cost savings in %		94%	65%		74%				
Rest of the World	0	5076	1244	-10495	-5419	0	0.019	0.005	-0.02
World	54535	8544	20319		8544	0.104	0.016	0.039	0.016
Cost savings in %		84%	63%		84%				
Permit price in \$ (price level 1990)/tC					24				

* Poland, Hungary, Slovakia, Czech Republic

表1—4

これを(Ellerman & Decaux 1998)の結果(表1-2)と比較すると、ANNEX1 Only ケースの均衡価格は約半分になっているが、World Wideケースでは一致している。さらに単位に用いている米ドルの為替レートの基準時点が異なることを考慮しても、均衡価格と参加国の範囲の組み合わせについて2つの計算結果に線形関係はなく、World Wideケースの均衡価格が一致しているのは偶然であろう。これは計算のツールとなるモデルが異なり、経済市場の一般均衡と長期のエネルギー需給という本質的に異なるアプローチをとっているためであろう。さらに限界削減費用や排出量を設定する際のグループ分けについても、POLESは(Ellerman & Decaux 1998)と違って地理的な区分の仕方をしている。一方、取引前後のANNEX 1 全体の削減費用の変化をみると、その変化量については2つの結果に線形関係があり、どちらもANNEX 1 Only ケースでNo Trade ケースの約半分を、World Wideケースでさらにその約1/5 (つまりNo Tradeケースの約1/10) となっている。従って以上の比較から分るように、この種の排出権取引市場の数値シミュレーションに関しては、モデルの背後にある基礎理論やそのアプローチが異なれば、均衡価格の値そのものに関しては大きく異なる結果をはじき出す可能性がある。

さて前出した計算結果はどちらも実用上大変有意義なものであろうが、(Ellerman & Decaux 1998)の最大な貢献は恐らく極めて高精度の限界費用関数の近似であろう。その精度の良さから、また表2の結果と比較しやすい考慮から、本論文のシミュレーションにおいても上記表1の限界削減費用関数をそのまま適用する。これを基に市場均衡価格を求めるため、下記のモデルを構築する。モデルの目的は、限界削減費用関数と予想BAU排出量から市場全体の総需曲線と供給曲線を生成し、その交点を均衡点として特定することである。また分析の精度をあげるため、限界削減費用関数に関しては表1に従ってグループ別に設定するが、予想BAU排出量については国別に最新のデータを用いる。そして参加国の範囲設定についても、ANNEX1のみを出発点にして、中国やインドなど前章の考察で関心をもった国を1国ずつ追加しながら分析を進める。下記のモデルを使った検証課題1に関する分析結果は、第五章の第1節に述べる。

モデル1 自由な完全競争市場モデル

京都メカニズム下の排出権取引市場で、完全競争的かつ取引量を制限した市場をモデル化する。市場の参加者は $i=1, 2 \dots N$ 国として、それぞれに

排出枠の初期割り当て量: L_i

現状（追加対策なしの場合）における排出量: Q_i^{BAU}

取引終了後の排出量: q_i

排出削減費用関数: $C_i(r_i)$ ただし、 $r_i = Q_i^{BAU} - q_i$ は排出削減量

を設定する。

最終的な市場価格を p^* と表す。

なお上記のうち大文字で表される量及び排出削減費用関数は外生的に与えられるものとし、 q_i 及び p^* はこれらをもとに、次のようなアルゴリズムをもつシミュレーションモデルによって求められる。

p を1から十分大きな P まで1単位ずつ増加させながら、各 p に対して市場の総供給量と総需要量を次のように計算する：

総供給量 $S(p) = \sum s_i$,

ただし s_i は取引前の限界削減費用が p よりも低いすべての排出主体にとって、限界削減費用を p に一致させるのに必要な排出削減量である。すなわち、

$$s_i = \min \{ MC_i^{-1}(p), M_i \} \quad \forall i: MC_i(0) < p,$$

$$s_i = 0 \quad \forall i: MC_i(0) \geq p,$$

(MC_i は C_i の一階導関数、以下同様)

同様に総需要量 $D(p) = \sum d_i$

d_i は取引前の限界削減費用が p よりも高い全ての排出主体にとって、限界削減費用を p に一致させるのに必要な排出権購入量である。すなわち、

$$d_i = \min \{ MC_i^{-1}(p), M_i \} \quad \forall i: MC_i(0) > p$$

$$d_i = 0 \quad \forall i: MC_i(0) \leq p,$$

こうして各 p について算出した総供給量と総需要量から排出権市場の供給曲線、需要曲線を構成し、その交点を求めればそれが市場均衡点となる。ただし実際のアルゴリズムでは、両曲線の交点を求める代わりに、各 p に対する総需要量と総供給量の差をとり、それが初めて正から負になる $p = p^*$ を求める。そして、この p^* を生成した各 s_i 、 d_i はそのまま各国の実際取引量になる。さらにそれらを各 MC_i に代入することで、取引終了後の各国の限界削減費用を算出することができる。

第2節 取引量制限つき競争市場に関する研究

本節では前節で分析した完全競争市場において、取引量（供給量または需要量またはその両方）に上限を設けた場合に関する2つの先行研究を紹介する。(Zhang 1999)は前出した(Ellerman & Decaux, 1998)の限界削減費用関数を用いて、制限なし・EUによる購入量上限案・ホットエアに取引による禁止、の3ケースにおける均衡価格を計算した。また前節の表3、表4にあるように(Gusbin, Klaassen & Kouvaritakis)は、制限なしのFull Tradeケースと各国の取引量を制限なし完全均衡における取引量の半分に制限したHalf Tradeケースに関する比較を行った。後ほど説明するように、この2つの先行研究から得られたデータは互いに補完関係にあり、検証課題2を考察する際に大変参考になる文献の組み合わせである。まず、両者の分析結果を次頁の表2-1、表2-2に整理する：

OECD Only の場合、取引量に対する制限とその影響 from (zhang 1999)

	取引なし	制限なし	EU 案	ホットエアなし
OECD Only, 均衡 価格 (\$/ton C)	/	9.6	5.6	12.6
OECD 全体の削減 費用	-0% , /	-86.5% , /	-78.4% , /	-82.4% , /
アメリカの削減費 用,限界削減費用	-0% , 160.1	-85.2% , 9.6	-79.8% , 46.3	-81.0% , 12.6
日本の削減費用,限 界削減費用	-0% , 311.8	-93.1% , 9.6	-76.5% , 126.4	- 91.0% , 12.6
EU の削減費用,限 界削減費用	-0% , 9.1	-0.2% , 9.6	-16.3% , 6.1	-2.3% , 12.6
その他の OECD 国 全体の削減費用,限 界削減費用	-0% , 33.4	-45.3% , 9.6	-63.9% , 6.2	-33.5% , 12.6

表 2-1

ANNEX1 Only or または World Wide の場合、取引量に対する制限とその影響 from (Gusbin, Klaassen and Kouvaritakis)

	Full Trade	Half Trade
ANNEX1 Only, 均衡価格	66.5	/ ¹
ANNEX1 Only, ANNEX1 の削減費用	-58%	-38%
World Wide, 均衡価格	24	/
World Wide, ANNEX1 の削減費用	-94%	-65%
World Wide, World の削減費用	-84%	-63%

表 2-2

表 2-1 と表 2-2 をみると、まず両者の分析対象や分析範囲が補完しあう関係にあることに気づく：表 5 は市場の範囲については OECD Only での取引に限定し、EU 案とホットエアなしの 2 通りの取引量制限の各場合について、取引前後における各国の総削減費用および限界削減費用の変化に注目した；一方後者は制限方式を Half Trade のみに、分析対象を総削減費用にそれぞれ限定する代わりに、ANNEX1 と World Wide の 2 つの市場の範囲について分析した。また制限方式に関していえば、表 5 の EU 案は需要量のみに対する制限であり、ホットエアなしのケースは供給量に対する制限と考えてよく、これらに対して表 6 は需要量と供給量の双方に対する制限である。従って上記のデータのみからでも、検証課題 2 で注目している取引量制限が市場均衡に与える影響に関する多くの考察が得られる。

まず市場の巨視的な挙動を示す最も重要な変数として、各種取引量制限に対する均衡価格の変化を見てみよう。表 5 から分るように、均衡価格は需要量のみ制限した場合は上昇し、供給量のみを制限した場合には下落する。これは経済学の基本理論からして自明であるが、双方を制限した場合については、(Gusbin, Klaassen and Kouvaritakis) の指摘通り制限による実際の供給量と需要量の変動幅には複雑な関係があるので、一般的に新たな均衡価格を予測することは難しい。しかし脚注 1 にあるように、数値シミュレーションの場合は具体的なデータに対して確定した値を計算することは可能である。前述したように理想的な完全競争市場における均衡価格 P^* は各国の取引後の限界削減費用に一致し、理論的にはそれが全体の削減費用を最小化する値であるので、制限を設けた場合の市場価格 P_c の P^* からの乖離度 $d = |1 - P_c / P^*|$ で市場全体の効率性を評価することができる。表 5 のデータからそれを求めてみると、EU 案ケースでは $d = 41.7\%$ 、ホットエアなしケースでは $d = 31.2\%$ である。前章で政策課題 2 について考察したように、ET 市場の取引量を制限する大きな目的の 1 つは世界全体の実質的な削減量が ET によって過度に割り引かれるのを防止することである。その方趣旨で考えれば特に防止すべきは、大量

¹ 筆者らは取引量制限つきの場合の市場価格を求めようとする際、制限なしの場合における供給曲線と需要曲線を変更せず、代わりにその均衡点の半分にあたる取引量と両曲線との交点に対する 2 つの異なる価格 P_s と P_d として、制限つきの市場価格 P_r はその間にあるとしかいえないという結論に至った。しかし後で紹介する本論文のモデル 2 のように、取引量制限を考慮した新たな供給曲線と需要曲線生成してその交点を求めれば P_r は確定できるのである。

に超過排出している需要者がその削減目標の大部分を ET での購入に頼り、しかも購入したクレジットの多くは実際の排出削減に結びつかないホットエアであるような事態である。この目的のみを考えると需要量制限と供給量制限は両方とも有効であるので、市場の効率性に対する攪乱がより少ないという意味で、また問題のホットエアにピンポイントを定めることができるという意味で、供給量制限のほうが政策オプションとしより望ましいという結果が導かれる。同様の結論は均衡価格の代わりに、表 5 中にある OECD 全体の削減費用に注目しても得られる（ホットエアなしケースは EU 案ケースに比べて、取引なしケースの削減費用を 4% 分多く低減できる）。

また表 2-2 から、取引量を本来の均衡点の半分に制限すると、ANNEX1 のみの市場で全体の削減費用が 20% 上昇した；世界全体が参加する市場においては ANNEX1 全体の削減費用が約 30%、世界全体の削減費用は約 20% 上昇した。これを表 5 のどのケースと比べても、取引量制限による削減費用の上昇幅ははるかに大きい。表 5 の市場は OECD 諸国のみを対象とするものであるが、グループ全体の削減費用や限界削減費用については OECD > 他の ANNEX1 である。従って同じだけの削減費用増加効果をもつ制限方式を適用した場合 OECD の削減費用増加は ANNEX1 全体よりも大きいはずである。このことに注意して考えると、表 5 と表 6 の比較から各国の取引量を一律に本来の半分までに制限する方式のほうは、各国の BAU 排出量や初期排出枠に基づいた比例制限に比べて、市場の効率性をより大きく損ねることが示唆される。なお (Gusbin, Klaassen and Kouvaritakis) はこうした効率性喪失（削減費用増加）の対価として、Half Trade の制限を設けると世界全体の二酸化炭素削減量が約 1% 増えると試算した。これを費用対効果の観点からどう評価するべきかという問題は本論文の考察対象外であるが、ともかく取引量制限にはこうした積極的な効果もあることに留意すべきである。

最後に表 5 に戻って、OECD 諸国のみ市場内部で各参加者の費用がどう変化するかをみてみよう。表 5 でまず気づくことは、取引量制限はアメリカ・日本と EU・その他の OECD 諸国とに正反対な影響を与える。前二者は限界削減費用が著しく高く市場において常に需要者であるから、取引量を制限するとそれだけの分の削減はよりコストの高い国内努力によって達成されなくてはならないからである。一方限界削減費用の低い後二者は全体として常に供給者であり、需要量が制限されるとその取引による利得は増加する；また供給量を制限したホットエアなしケースでは、ホットエアを持たない EU の利得はほぼ変わらないが、ホットエアを大量に保有するその他の OECD 国は利得が大幅に減少する。このように制限方式と各国の排出費用構造の組み合わせ次第で、各参加国間における利得配分は制限なしの場合に比べて大きく変わる可能性がある。そして各国の利得配分の変動幅は一般に、市場全体の揺らぎの程度を示す均衡価格の変動幅を大きく上回るようである。

これを確認する別の計算結果として、前出した (Ellerman and Decaux 1998) が自身の限界削減費用関数を基に、ANNEX1 Only 市場において需要量のみに対して各国の初期排出枠の 1/3 という上限を設定したケースがある。この制限により市場価格は制限なしケースの \$127/ton C から \$114/ton へと 10% だけ下がり、その結果限界削減費用の一番高くかつ最大需要者である日本の利得は \$19 billion から \$15 billion へと 20% も減少する。一方向白いことに、同じく需要者であるアメリカやエネルギー輸出国 (OOE) は、限界削減費用が日本に比べてかなり低いので、市場価格の低下によって逆に利得が増加する。需要者全体でみると取引による利得は制限なしケースの 99% とさほど変わることなく、利得の配分が前者から後者へ移動しただけである。また最大の供給者である旧ソビエト連邦 (FSU) と東欧諸国 (EET) は価格低下と売り上げ減少の影響を受けて利得が減少した。筆者の指摘通りこれは需要量に対する制限によって、日本という巨大需要者がほとんど市場から除外され、その結果重要曲線全体が下へシフトしたためである。そして ANNEX1 全体の取引による利得は \$66 billion から \$61 billion へと約 5% だけ減少した。上記各量の制限による変動幅についてまとめると、市場全体の利得変動 < 均衡価格の変動 < 参加者間における利得配分の変動という傾向がみられる。なおこの傾向は前出した各ケースについても当てはまる。

また (Ellerman and Decaux 1998) は ANNEX1Only 市場に続いて、World Wide 市場に対して同じく需要量の 1/3 を適用してみた。その結果均衡価格が\$24 から\$6 へと 75% も低下し、エネルギー輸出国 (EET) を除く受容側全体の利得は著しく減ると同時に、供給側の利得も\$14 billion から\$1.7 billion へと劇的に減少する。次節でもみられるように (Ellerman and Decaux 1998) の用いるモデルとデータの性質上、市場の範囲を World Wide に拡大する途端に各種結果が劇的に変動するという、前出した他のモデルに見られない傾向がある。そのため World Wide 市場の場合、それらの結果を定量的に比較することは困難であるが、定性的な結論として、市場範囲が ANNEX1Only から広がるのにつれて、取引量制限による影響の度合いは大きくなるといえよう。

以上の考察をまとめると、検証課題 2 に関する分析で最も中心的な対象は、やはり市場の効率性を代表する制限なしの均衡価格からの乖離度である。その乖離度が大きくなれば、市場参加者全体の削減費用の増加量も大きくなる。取引量制限による全体の削減費用増加は、その制限方式に関わらず一般に供給者と需要者の間に非対称に分配され、限界削減費用の高い需要者ほどその影響をそり多く受けるという定性的結論が成り立つ。また制限方式として、各国の取引量に一律な上限を設けるよりも、それぞれの BAU 排出量や割り当て排出枠に比例した上限を設定したほうが、市場全体の効率性に対するダメージが小さい。本論文の関心は個々の参加者の利得ではなく市場全体の効率性にあるので、制限なしの均衡価格からの乖離度に焦点を絞り、下記のモデル 2 を用いて分析を進める。その際、市場の範囲については「ANNEX 1 + USA」と「ANNEX1 + 主要非 ANNEX1」(中国、インド、その他のアジア諸国、ブラジル) の 2 ケースを考え、また制限方式については

① BAU 排出量の一定割合、

② BAU 排出量と初期排出枠の差の一定割合、

3 ホットエアによる取引の禁止

の 3 パターンを考える。

モデル 2 取引量制限つき完全競争モデル

京都メカニズム下の排出権取引市場で、完全競争的かつ取引量を制限した市場をモデル化する。市場の参加者は $i = 1, 2 \dots N$ 国として、それぞれに

排出枠の初期割り当て量: L_i

現状 (追加対策なしの場合) における排出量: Q_i^{BAU}

取引終了後の排出量: q_i

排出削減費用関数: $C_i(r_i)$ ただし、 $r_i = Q_i^{BAU} - q_i$ は排出削減量

を設定する。また各国の取引可能量の上限は M_i に設定し、最終的な市場価格を p^* と表す。

なお上記のうち大文字で表される量及び排出削減費用関数は外生的に与えられるものとし、 q_i 及び p^* はこれらをもとに、次のようなアルゴリズムをもつシミュレーションモデルによって求められる。

p を 1 から十分大きな P まで 1 単位ずつ増加させながら、各 p に対して市場の総供給量と総需要量を次のように計算する：

$$\text{総供給量 } S(p) = \sum s_i,$$

ただし s_i は取引前の限界削減費用が p よりも低いすべての排出主体にとって、限界削減費用を p に一致させるのに必要な排出削減量と取引量上限 M_i のいずれか低いほうである。すなわち、

$$s_i = \min \{ MC_i^{-1}(p), M_i \} \quad \forall i: MC_i(0) < p,$$

$$s_i = 0 \quad \forall i: MC_i(0) \geq p,$$

(MC_i は C_i の一階導関数、以下同様)

$$\text{同様に総需要量 } D(p) = \sum d_i$$

d_i は取引前の限界削減費用が p よりも高いすべての排出主体にとって、限界削減費用を p に一致させるのに必要な排出権購入量と取引量上限 M_i のいずれか低いほうである。すなわち、

$$d_i = \min \{ MC_i^{-1}(p), M_i \} \quad \forall i: MC_i(0) > p$$

$$d_i = 0 \quad \forall i: MC_i(0) \leq p,$$

こうして各 p について算出した総供給量と総需要量から排出権市場の供給曲線、需要曲線を構成し、その交点を求めればそれが市場均衡点となる。ただし実際のアルゴリズムでは、両曲線の交点を求める代わりに、各 p に対する総需要量と総供給量の差をとり、それが初めて正から負になる $p = p^*$ を求める。そして、この p^* を生成した各 s_i 、 d_i はそのまま各国の実際の取引量になる。さらにそれらを各 MC_i に代入して取引後の限界削減費用を算出することができる

第3節 非競争的行動に関する研究

前節までの議論では、一貫して無条件に完全競争市場を仮定してきた。しかしながら、あらゆる財貨の市場と同じように、排出権取引市場も一般には完全競争市場の諸条件を完璧に満たすとは考えにくい。排出権取引市場も一般の市場と同様に、他の参加者を凌駕する大きな規模を持つ供給者または需要者が存在したら、その影響力を行使して自己利潤の最大化のため市場価格を操作しようとする。特に京都メカニズム下の排出権取引の場合旧共産圏諸国を代表とする一部の ANNEX1 国では、これから大量の余剰排出枠（ホットエア）を保有することが予想されているので、こうした国が大口の供給者として排出権の売り惜しみにより市場価格をつりあげることが可能性は看過できない。また、現時点で議定書から離脱したままになっているアメリカについては、世界一の排出量を排出しているうえ京都議定書で定めた目標排出量を 20% 以

上も上回っている。排出権取引をはじめとする柔軟措置はもともと米国が強力に推した案であるだけに、将来米国が京都メカニズムの枠内に戻る可能性もある。その際アメリカ国は日本に並ぶ大口の需要者となり、これらの国々が排出量の惜しみ市場価格を引き下げようとするだろう。

こうした一部の参加者による価格影響力の行使が、最終的に排出権の市場価格にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることは、実用上大変重要な意義をもつ。特にホットエアを大量に保有する大口の供給者の価格影響力により、限界削減費用の均等化という政策目的が妨げられるのであれば、排出枠の初期配分を適切に調整することでこれを未然に防止することも可能となる。本節ではまず排出権取引市場において価格影響力をもつ排出主体が出現する条件に関する理論を紹介し、それを参考にしながらモデル1、2を基礎に検証課題3のためのモデルを構築する。

排出権取引市場における価格影響力を最初に考察したのは、(Hahn 1984)^{xii}である。そこで彼は価格影響力の発生条件を考えることなく、とにかくある排出主体が価格支配力をもっている状態を仮定して議論の出発点とした。彼のモデルを簡単にまとめると、次のようになる：

排出主体 $i = 1, 2 \dots N$ に対して、それぞれ L_i なる排出枠が初期配分されているとする。

そして排出枠の総量を

$$L = \sum L_i$$

として、市場価格を p とする。さらに各排出主体の排出量を q_i として、その排出量削減費用を q_i の関数として

$$C_i(q_i)$$

と定める。（前節では削減費用を削減量の関数としたが、ここでは Hahn の原著に従う）

上記のうち L と各 L_i 及び費用関数 C_i は外生的に与えられるものであり、 p と q_i は内生的に決定される変数である。

さて上記の準備作業のもとで Hahn は排出主体1にだけ価格影響力を持たせ、他の排出主体と差別化した。（価格影響力をもつ排出主体が複数存在する場合でも、それらをまとめて1つの巨大な市場支配者と考えれば同じ議論でカバーできる）。

排出主体1を除く他の参加者は、プライステーカーとして次のように費用最小化行動をする：

$$\text{Min } C_i(q_i) - p \times (q_i - L_i) \quad \forall i = 2 \sim N \quad (2.1.1)$$

この解を Q_i とすると Q_i は次の必要条件を満たす：

$$C_i'(Q_i) + p = 0 \quad (2.1.2)$$

(2.1.2) から分るように Q_i は p の関数として $Q_i(p)$ と表せ、これを p で微分すると

$$Q_i'(p) = -1/C_i'' \quad (2.1.3)$$

限界削減費用逦増の法則から、(2.1.3)の $C_i'' > 0$ 、よって $Q_i'(p) < 0$ である。

Hahn はこれらの式によって価格影響力を持たない排出主体 2～N の排出量が決定されるとして、排出主体 1 の費用最小化行動を次のように規定した：

$$\text{Min } C_1(q_1) + p \times (q_1 - L_1) \quad (2.1.4)$$

subject to $q_1 = L - \sum Q_i(p)$ (\sum は 2 番目から N 番目の和をとるという意味)

この場合排出主体 1 は価格影響力をもつので、(2.1.4)において p はまた変数であり、また q_1 は p の関数として表せることに留意する必要がある。(2.1.4)の解 P 、 $Q_1(P)$ は必要条件

$$-(C_1'(Q_1(P)) + P) \times \sum Q_i'(P) + (Q_1(P) - L_1) = 0 \quad (2.1.5)$$

$$Q_1(P) = L - \sum Q_i'(P) \quad (2.1.6)$$

(2.1.5)と(2.1.6)から排出主体 1 の費用を最小化する $p = P$ が一意的に決まる。

さて(2.1.5)を変形すると、

$$(C_1'(Q_1(P)) + P) \times \sum Q_i'(P) = (Q_1(P) - L_1) \quad (2.1.5)'$$

となり、(2.1.3)より $Q_i'(P) < 0$ であるから(2.1.5)'より

$C_1'(Q_1(P)) + P$ と $Q_1(P) - L_1$ の符号は逆である (※)

※から排出主体 1 への初期配分 L_1 と、それが価格支配力を発揮して自身の費用最小化を実現するための排出量 $Q_1(P)$ と等しくない限り、その限界削減費用 $C_1'(Q_1(P))$ と市場価格 P が等しくなることはない。しかし現実的には $Q_1(P)$ を正確に算出することは不可能なので、不適切な初期配分設定のため、排出主体 1 がその価格影響力を行使して市場をゆがめ、結果として限界削減費用の均等化に失敗するというのである。

Hahn の研究の一番大きな意義は、価格影響力をもつ排出主体の存在を仮定した場合、最終的な市場価格及びその効率性は排出権の初期配分に依存するという結論である。これは完全競争市場の条件が成り立たないと、コースの定理に反して権利の初期配分が市場の効率性に影響を与えることを、理論的に示すさきがけとなった。

(Burniaux)^{xiii} は排出主体 1 をホットエア保有量の最も多いロシアとウクライナーからなるカルテルとして、Hahn の理論モデルを ANNEX1 のみの ET 市場に適用した。そしてこの二国だけが自己利潤を最大化しようと行動し、他のすべての参加国がプライステーカーとしてふるまう場合、ET にとる市場全体の余剰（全参加国の削減費用の低減量）の約 1/3 が失われるという結果を得た。これは後で紹介する（前田 2009）の結論と正確に一致するが、両者のアプローチは次の 2 点において本質的に異なるものである：第一に前者の仮定した非完全競争市場で価格影響力を発揮する参加者は、ホットエアを大量に保有した大口の供給者である排出主体 1 のみであり、

後者はそれに加えて不足排出枠を大量に抱えた大口需要者である排出主体 2 も仮定している；第二に前者は単純に排出主体 1 による自己利得最大化によって市場価格を決定しているのに対し、後者は排出主体 1 と排出主体 2 のゲーム状況を想定している。従って両者の結論が一致することは、異なる理論的なアプローチから同じ結果を得たということであり、その結論の説得力は大きい。

これらの結果に対して、(Ellerman and Decaux 1998) は前出した自前の限界削減費用関数を基に、ANNEX1 だけからなる ET 市場において旧ソビエト連邦 (FSU) を大口供給者として (ET 市場モデルにおける価格影響力では、実質的に「ロシア+ウクライナ」とほぼ同じである)、Burniaux 型のアプローチからずいぶん異なる結果にたどり着いた。それによれば FSU が価格影響力を行使した場合、市場価格は完全競争均衡の \$127/\text{ton C}\$ から \$142/\text{ton C}\$ へと約 10% だけ上昇せず、その結果全参加国の余剰は \$66 \text{ billion}\$ から \$64 \text{ billion}\$ まで僅かに減少する。従って市場全体の効率性はさほど損なわれたわけではなく、ただ取引による利得の配分が変わっただけである (FSU の余剰は \$2.4 \text{ billion}\$ 増え、排出権を輸入する側全体の余剰は \$4.7 \text{ billion}\$ 減少した)。また市場の範囲が世界全体に拡大した場合、非 ANNEX1 国全体または「非 ANNEX1 国+FSU」でカルテルを形成すると市場価格は \$24\$ からそれぞれ \$63\$ または \$108\$ へと大幅に増加するという。筆者はこの理由を ANNEX1 国の排出費用構造が、FSU に比べて市場支配行為からより多くの利得が得られるためだと論じた。ただ、非 ANNEX1 グループは多数の国からなっておりそれぞれ異なる排出費用構造をもっているだけでなく、政治的な要因を考慮してもそれら全てが共同して市場支配行為を行うとは考え難い。従って (Ellerman and Decaux 1998) 2 つ目の計算結果の意義は、実証的なものであるというより、市場の範囲によってもそれが非競争的行為から受ける影響が異なりうることを示したことであろう。

上記の Hahn の理論をはじめ、多くの研究は最初から価格影響力をもつ排出主体が存在すると仮定したが、このような排出主体が本当に存在するかどうか、そして存在する可能性があるとするればその条件は何かについては全く考察していない。その点について、上記の研究とは全く異なるアプローチとして、(西條 2000)^{xy} の実験研究や (前田 2009) のゲーム理論による理論研究がある。(西條 2000) では、市場支配力を持つ主体がその支配力を認識しやすい状況作り、売り手と買い手が同じ場で同時に取引価格と取引量をオファーする「ダブル・オーション」による取引実験を行った。その結果は前出した (Ellerman and Decaux 1998) の ANNEX1 のみを対象にした計算と同じく、市場全体の効率性が損なわれず余剰の分配に偏りだけが発生する。

(西條 2000) はその理由として、「独占社がひとつの購入価格をすべての売り手に提示し、それを呑むか呑まないかという教科書的な需要独占の理論が想定している状況」は実験室における被験者の実際の行動とは大きく異なるためだと指摘している。この「理論と現実のズレ」は、次に紹介する前田 (2009) のゲーム理論によるアプローチに対しても提起しうる問題である。それに対して実験を用いた手法は、どのような市場におけるどのような現象も人間の行動によってもたらされる、という点を十分反映するメリットがある。しかし実験的手法はさまざまな制約を伴うことが多く、また条件設定や被験者の選択などの要因によっても得られたデータがばらつく可能性が高い。さらに実験的研究は時間的にも経済的にもコストの極めて高いものである。これに対して本論文で用いるマルチエージェントシミュレーションという手法は、両者の長所を併せ持つものといえる：コンピューター上で個々の参加者の需要構造と行動規則を定め、市場を忠実に再現することで理論研究と現実現象の距離をある程度縮めることができる；そのうえ一つ一つの市場に対して瞬間的に結果を算出できるので、極めて低いコストで様々な設定について調べることが可能である。

(前田 2009) は価格影響力を行使する試みが成功するかどうかを検証するため、独自の数理モデルをたてて分析した。そのモデル自体は数学的に幾分複雑なものであるから、ここでは詳細の紹介を省略してその概略だけを示す。前田モデルでは上記の Hahn モデルと同じような排出権取引市場において、大口供給者である排出主体 1、大口需要者である排出主体 2、そしてプライステーカーとして振る舞う排出主体 3~N を設定した。取引前において排出主体 1 は自身の現状 (BAU) 排出量を大幅に上回る排出枠を初期配分され、そのため大量の余剰排出量 S_1 を保有

しており、対して排出主体 2 は自身の現状 (BAU) 排出量を大幅に下回る排出枠しか配分されず、そのため大量の不足排出量 D_2 を抱えている。前田はこの二つの価格影響力をもつ排出主体を「マーケットメーカー」と呼び、両者による Nash ゲームの均衡点として市場価格を決定するものである。具体的には、排出主体 1, 2 がそれぞれの利得を最大化するように自身の取引量 (排出主体 1 の場合は供給量、排出主体 2 の場合は需要量) T_1, T_2 を提示する。そして最終的な市場価格 P は T_1 と T_2 の組み合わせに応じて決まるので、排出主体 1 はあらゆる T_2 に対する最適反応 T_1^* という戦略をとり、同様に排出主体 2 はあらゆる T_1 に対する最適反応 T_2^* という戦略をとる。 T_1^* と T_2^* を表す 2 つの最適反応曲線の交点が、上記 Nash ゲームの均衡点であり、均衡点における取引量に基づいて最終的に市場価格 P_g が決定されるのである。

記設定のもとで、各排出主体の削減費用関数を削減量の二次関数に近似して計算した結果、以下の諸結論を得たという。

結論 1 これはマーケットメーカーが価格影響力を行使しないと仮定した、もともとの完全競争市場における均衡価格 P_c が正の場合について成り立つ結論である。

大口供給者の余剰排出量 S_1 が市場全体の総需要 D よりも大きい場合、 $P_g > P_c$ であり、その比は

$$P_g/P_c = 1 + (S_1/D - 1)/2 \quad (2.2.1)$$

となり、また S_1 が D よりも小さい場合

$$P_g/P_c \approx 1 \quad (2.2.1)'$$

となる。

(ただし $D = \sum (D_i)$, D_i は排出主体 2~N の BAU 排出量と初期配分枠の差)

結論 2 逆にマーケットメーカーが価格影響力を行使しないと仮定した、もともとの完全競争市場における均衡価格 P_c がゼロの場合について成り立つ結論である。

この場合の均衡価格 P_g は、排出主体 1 が保有する余剰排出量を除外した市場における均衡格を P_c' とすると、近似的に

$$P_g = P_c'/2 \quad (2.2.2)$$

となる。

(2.2.2) の意味するところは、もともと全体の余剰排出枠が総需要量を上回っているためにゼロとなるはずの完全競争価格は、大口供給者の価格操作によって逆に正なる値に跳ね返るということ。

また、結論 1 と結論 2 に共通していえるのは、非完全競争価格 P_g は専ら大口供給者の保有する余剰排出量に依存し、大口需要者の付属分には依らない。これは言い換えれば、上記モデルのような排出権取引市場で価格影響力を発揮しうるのは大口供給者だけであり、大口需要者は

その規模にかかわらず大きな価格影響力を発揮しえないということである。また前者についても、保有する余剰排出量が一定の値 ($D = \sum (D_i)$) を越えて初めて価格影響力を行使することも分かる。

そして筆者は京都議定書の ANNEX I 国の削減目標と現状の排出実績についての比較的最近のデータ結論を用いて、結論 2 をアメリカなどが含まれない市場にそれぞれ適用して、前者の場合について次のような数値計算例を示した：

(1) ロシア 1 国のみが「大口供給者」として価格影響力を行使する場合：

$$P_g/P_c = 1 + 11\%$$

(2) ロシアとウクライナ 2 国がカルテルを結んで価格影響力を行使する場合：

$$P_g/P_c = 1 + 36\%$$

(3) 上記 2 国を含む市場経済移行国全体が共同して価格影響力を行使する場合：

$$P_g/P_c = 1 + 55\%$$

この計算結果をみると、京都議定書付属書 B の規定した削減目標に基づいて、そのまま排出権を初期配分してしまうと、いわゆる「ホットエア問題」によって、京都メカニズムの ET 市場の効率性がかなりの程度攪乱される恐れがある

以上の前田モデルから導かれる結果は、かなり悲観的なものといえる。ところでその理論構築から結論の導出にいたるまで、やや複雑な数学が使われており、実際に排出権市場の参加者たちが自身の最適戦略を理解し、その通りに行動するかどうかはかなり予測し難い。たとえばロシアなど市場支配力をもつ可能性が囁かれる国が、彼のモデル通りに Nash ゲームを行うとして、果たして上記結論のようにそれほど市場を攪乱してしまうだろうか。また、やはりその結論通りになるとしたら、そのように初期配分を工夫すればその影響を解消できるのか。さらに大口需要者はその需要量がいくら大きくても価格影響力を発揮しえないとされたが、これは一般的な非完全競争市場の状況とは幾分か離れた結論であり、どのようにこれを理解すべきだろうか。これらの問題を解明するため、本論文ではマルチエージェントシミュレーションという全く別のツールを使って分析したい。具体的には以下のようなアルゴリズムに基づいて、彼の設定と同じように市場影響力を発揮しようとする排出主体 1、2 とプライステーカーである排出主体 3～N からなる排出権取引市場をモデル化する：

モデル 3 「大口供給者と大口需要者が Nash ゲームを行う非完全競争市場」

このモデルは、モデル 2 の「ANNEX I 国のみ参加の完全競争市場モデル」をサブアルゴリズムとして重層的に繰り返すことによって、排出主体 1、2 それぞれの最適反応曲線を構成し、それに基づいて均衡点における排出主体 1、2 の取引量を決定し、さらにそれから排出権価格を算出する。アルゴリズムの概略を次のフローチャートに示す。

準備作業はモデル 1 やモデル 2 の場合と同じく、

市場の参加者は $i = 1, 2 \dots N$ 国として、それぞれに

排出枠の初期割り当て量: L_i

現状（追加対策なしの場合）における排出量: Q_i^{BAU}

取引終了後の排出量: q_i

排出削減費用関数: $C_i(r_i)$ ただし、 $r_i = Q_i^{BAU} - q_i$ は排出削減量

を設定する。最終的な市場価格を p と表す。

なお上記のうち大文字で表される量及び排出削減費用関数は外生的に与えられるものとする。

以上の準備作業のもとで、アルゴリズム 3 を構築する。

アルゴリズム 3 :

1 国の供給量 T_1 を 0 から $L_1 - Q_1^{BAU}$ まで 1 単位ずつ増加させながら、次の T_1 を所与とするサブアルゴリズムから 1 国の利得 $G_1(T_1, T_2^*)$ を計算する

2 国の需要量 T_2 を 0 から $Q_2^{BAU} - L_2$ まで 1 単位ずつ増加させながら、次の T_1, T_2 の両方を所与とするサブアルゴリズムから 2 国の利得 $G_2(T_2)$ を計算する。

↓

モデル 2' において、 $s_1 = T_1, d_2 = T_2$ とするマイナー修正を加えたアルゴリズム

↓

$G_2(T_2)$ の最大値を見つけ、そのときの T_2 を T_2^* とし、

$T_2 = T_2^*$ なる時の $G_1(T_1)$ を $G_1(T_1, T_2^*)$ とする

↓

$G_1(T_1, T_2^*)$ の最大値を見つけ、そのときの T_1 を T_1^* とし、 $T_1 = T_1^*$ なる時の $G_1(T_1, T_2^*)$ を $G_1(T_1^*, T_2^*)$ とし、その時の $G_2(T_2^*)$ を $G_2(T_1^*, T_2^*)$ とする。

によって確定した (T_1^*, T_2^*) が均衡点における排出主体 1、2 の取引量である。

なお参考のため上記フローチャート中における修正されたモデル 2' のアルゴリズムを再掲する：

市場の参加者は $i=1, 2, \dots, N$ 国として、それぞれに

排出枠の初期割り当て量: L_i

現状（追加対策なしの場合）における排出量: Q_i^{BAU}

取引終了後の排出量: q_i

排出削減費用関数: $C_i(r_i)$ ただし、 $r_i = Q_i^{BAU} - q_i$ は排出削減量

を設定する。最終的な市場価格を p と表す。

p を 1 から十分大きな P まで 1 単位ずつ増加させながら、各 p に対して市場の総供給量と総需要量を次のように計算する：

$$\text{総供給量 } S(p) = \sum s_i + T_1$$

ただし $\sum s_i$ は排出主体 1 を除く取引前の限界削減費用が p よりも低いすべての排出主体にとって、限界削減費用を p に一致させるのに必要な排出削減量であるの合計である。すなわち、

$$s_i = MC_i^{-1}(p) \quad (\forall i: i \neq 1, MC_i(0) < p,$$

$$s_i = 0 \quad (\forall i: MC_i(0) \geq p,$$

(MC_i は C_i の一階導関数、以下同様)

$$\text{同様に総需要量 } D(p) = \sum d_i + T_2$$

$\sum d_i$ は排出主体 2 を除く取引前の限界削減費用が p よりも高いすべての排出主体にとって、限界削減費用を p に一致させるのに必要な排出権購入量である。すなわち、

$$d_i = \min MC_i^{-1}(p) \quad (\forall i: i \neq 2, MC_i(0) > p$$

$$d_i = 0 \quad (\forall i: MC_i(0) \leq p,$$

こうして各 p について算出した総供給量と総需要量から排出権市場の供給曲線、需要曲線を構成し、その交点を求めればそれが市場均衡点となる。ただし実際のアルゴリズムでは、両曲線の交点を求める代わりに、各 p に対する総供給量と総需要量の差をとり、それが最少になる $p = p^*$ を求める。そして、この p^* を生成した各 s_i 、 d_i は排出主体 1, 2 を除く各国の実際の取引量になる。

第四章 シミュレーションプログラムの紹介

第1節 マルチエージェントシミュレーター「artisoc」の紹介

本章と第五章では、実際にマルチエージェントシミュレーションを行い、第二章で設定した検証課題を検証します。そのための道具として、マルチエージェントシミュレーション向けに開発された **artisoc** という専用のソフトウェアを使う。そこでシミュレーションの結果を提示する前に、本章でまず **artisoc** について簡単に紹介してから、第三章に提示したアルゴリズムを書き換えた **artisoc** プログラムの概要及びパラメーター設定について説目しておく。

「**artisoc**」は株式会社構造計画研究所と東京大学総合文化研究科の山影進教授が共同で開発した、汎用型のマルチエージェントシミュレーターである。その主な応用対象であるマルチエージェントシステムは、複数のエージェントから構成されるシステムである。**artisoc** では個々のエージェントやエージェント群に異なる関数や命令を定めることによって、エージェントの複雑な相好作用によって規律される系をコンピューター上に再現し、さまざまな設定のもとで系の挙動を調べるような課題に大変有用である。

第2節 シミュレーションプログラムの説明

本節では第三章に提示したアルゴリズムに基づいて作成した **artisoc** プログラムについて、その概要及びパラメーター設定について説目する。まず検証課題1のために作ったプログラムの概略を次頁のフローチャートに示す：

Step 1

排出権取引市場の参加国を表すエージェント i ,
各々の排出権初期配分量 L_i ,
取引後の排出量 q_i ,
限界削減費用関数 MC_i ,
現状（追加対策なしの場合）における排出量 Q_i^{BAU} ,
さまざまな価格 p に対する排出権の供給量 s_i または需要量 d_i ,

をそれぞれ第三章のアルゴリズムと同様に初期設定する



Step 2

市場価格 p を 1 から十分大きな値 PM まで 1 単位ずつ変化させながら、それぞれの p に対して:

各 i の排出量 q_i を 0 から L_i までに変化させながら、それぞれの q_i に対して MC_i を計算する。それが p を下回る時があれば i を供給者として、初めて MC_i が p を下回る時の q_i からその供給量を $s_i = L_i - q_i$ を決定する;

MC_i が p を下回ることがなければ、引き続き q_i を L_i から Q_i^{BAU} まで変化させながら、 MC_i が p を下回る時があれば i を需要者として、初めて MC_i が p を下回る時の q_i からその需要量 $d_i = q_i - L_i$ を決定する。



Step 3

各 p に対して、Step2 で決定された s_i と d_i を合計して、その p における市場の総供給量 $S(p) = \sum s_i$ と総需要量 $D(p) = \sum d_i$ を算出する。

そして全ての p に対する $S(p)$ 、 $D(p)$ から供給曲線 S と需要曲線 D を生成し、その交点における p の値（実際は $D(p) - S(p)$ の符号が正から負に逆転する $p = p^*$ ）を市場均衡価格として確定する。

そして、検証課題 1 用のプログラムは、上記のプログラムを次のように修正したものである:

① Step1において、各 i に対してさらにその供給量の上限 SC と需要量の上限 DC を加える。なおこれらの上限の具体的な値は、各 i の排出量 Q_i^{BAU} または排出権の初期配分量 L_i あるいは Q_i^{BAU} と L_i のうち低い方のいずれかに対する一定割合として設定する。

② 上記の上限を、以下のように Step2 に反映させる

Step 2

市場価格 p を 1 から十分大きな値 PM まで 1 単位ずつ変化させながら、それぞれの p に対して：

各 i の排出量 q_i を 0 から L_i までに変化させながら、それぞれの q_i に対して MC_i を計算する。それが p を下回る時があれば i を供給者として、初めて MC_i が p を下回る時の q_i からその供給量 $s_i = \min\{L_i - q_i, SC\}$ を決定する；

MC_i が p を下回ることがなければ、引き続き q_i を L_i から Q_i^{BAU} まで変化させながら、 MC_i が p を下回る時があれば i を需要者として、初めて MC_i が p を下回る時の q_i からその需要量 $d_i = \min\{q_i - L_i, DC\}$ を決定する。

最後に、検証課題 3 については、上記検証課題 1 用のプログラムに対して以下のような修正を加えたものを、繰り返し用いる：

①各 i のうち $i = 1$ を潜在的な大口供給者として、その提示する供給量と完全競争市場におけるその供給量の差を $-SS$ とする。潜在的な供給者は大量のホットエアを保有している国であるので、完全競争市場における供給量はどの p に対しても $L_1 - Q_1^{BAU}$ であり、そのため $SS > 0$ である。

②各 i のうち $i = 2$ を潜在的な大口需要者として、その提示する需要量と完全競争市場におけるその需要量の差を $-DD$ とする。潜在的な供給者は排出枠が絶対的に不足している国であるので、完全競争市場における需要量は均衡点 p^* に十分近い（限界削減費用 MC_2 が十分大きい）どの p に対しても $Q_2^{BAU} - L_2$ であり、そのため $SS > 0$ である。

③上記の SS 、 DD の値の様々な組み合わせに対して、均衡価格 p_g を上記大口供給者 1 と大口需要者 2 の余剰をそれぞれ次のように計算する：

$$\text{供給者余剰 } RS = \text{供給量}(L_1 - Q_1^{BAU} - SS) \times \text{均衡価格 } p_g$$

$$\text{需要者余剰 } RD = \text{取引前の削減費用 } C_2(q_2 = Q_2^{BAU}) - \text{取引後の削減費用 } C_2(q_2 = L_2 + DD) - \text{需要量}(Q_2^{BAU} - L_2 - DD) \times \text{均衡価格 } p_g$$

④ ③のデータから最適な（大口需要者が提示する DD を定数と見た場合、大口供給者の余剰を最大にする）供給量 $SS^*(DD)$ を DD の関数として求め、同様に最適な（大口供給者が提示する SS を定数と見た場合、大口需要者の余剰を最大にする） $DD^*(SS)$ を DD の関数として求める。そして SS^* と DD^* から両者の「最適反応曲線」を求め、その交点を (SS^{**}, DD^{**}) は第三章で定義した nash ゲームの nash 均衡点である。

以上までが、本論文で使うマルチエージェントシミュレーションプログラムの概要である。その特徴は、実際に多数のエージェントが自己利益（供給者余剰または需要者余剰）の最大化を図りながら相互作用しあう市場の様子を再現できている点である。この点について、経済学と数学を駆使して数式均衡価格を算出するようなアプローチ、たとえば前章に紹介した前田氏の理論とは対照的である。次章では、2つの異なるアプローチから得られた結果を詳しく比較する。なお Step1 における各種初期値については、付録の初期設定を基本としながら、各検証課題に応じて初期配分量 L_i を適当に変更することがある。

第五章 シミュレーション結果及び考察

第1節 検証課題1に関する結果及び考察

本章では検証課題1，2，3に関するシミュレーション結果を提示し、それらをもとに対応する政策課題1,2,3について考察する。本節は検証課題1を扱う。

まず検証課題1に関する結果について、①「ANNEX1 + USA」だけからなる完全競争市場と、②それに中国・インド・それ以外のアジア経済体及びブラジルを順次追加した市場における均衡価格・①の場合からの乖離度を表1-1に示す。

完全競争市場

	ANNEX1 + USA	inc CHN	inc IND	Inc DAE and BRA
p	164	123	116	114
\$/ton	12.3	9.2	8.7	8.6

	ANNEX1 + USA	+ CHN	+ IND	+ DAE and BRA
p	164	123	151	158
\$/ton	12.3	9.23	11.3	11.8

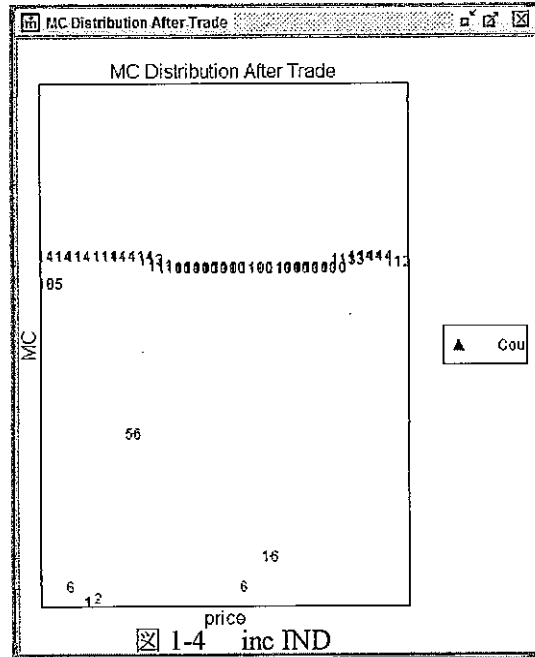
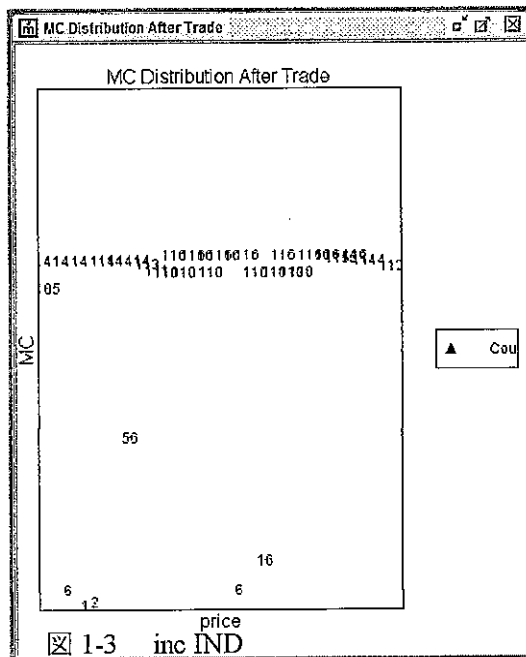
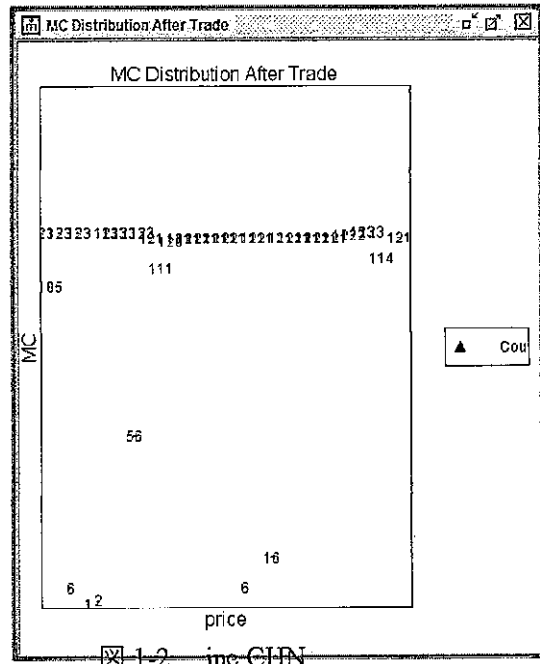
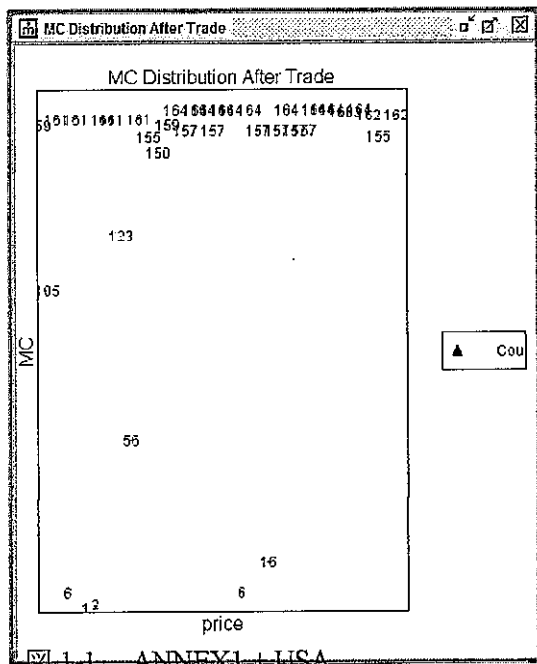
表 1-1 完全競争市場の範囲と均衡価格

表 1-1 上段の各列は次の通りに異なる市場範囲に対応している：ANNEX1 + USA は ANNEX1 国全体に、議定書を脱退したものの元々削減義務が定められたアメリカを加えたグループ；それから出発して inc CHN は ANNEX1 + USA に中国を加えたもの、inc IND は inc CHN にさらにインドを加えたもの、Inc DAE and BRA は inc IND にさらに「中国とインドを含まないアジア経済体及びブラジル」を加えたものである。また下段の各列は、ANNEX1 + USA に前記の国・地域をそれぞれ単独に加えたものである。表中の P は実際に用いたシミュレーション中で市場価格を表すパラメーターであり、それを炭素 1 トンあたりの 1998 年時点の米ドルに換算したのが下の\$である（1\$ = 13.3p）。\$の値をみると、第三章で紹介したいずれの先行研究よりも断然低い結果となっているが、前述したように均衡価格の値自体は用いているモデルやアプローチま

たは地域・国グループの区分によって大きく変わりうる。重要なのは、分析したい各種条件に応じて p がどのように変化するかである。なおここで定義した p と $\$$ は、本章を通して使用する。

上段から分るように、市場が限界削減費用の低い国をより多くとり込むにつれて、均衡価格が低下する。また下段のデータから、先行研究ではあまり扱われなかった、個別の国・地域についてその参加の有無による違いが分かる：上記各国の中で中国の参加によるメリットは一番大きく、均衡価格が約 1/4 も低下する；一方インドの参加と「中国とインドを含まないアジア経済体及びブラジル」の参加と同じだけのインパクトをもち、市場均衡価格は約 4% 低下する。従って今後の制度設計においては、非 ANNEX1 国全般の参加を促進する政策と合わせて、中国とインドの重要性からピンポイントにこの 2 国を市場に誘う施策も考えられる。

なお上段の各ケースにおいて、各国の限界削減費用がそれぞれの市場価格を中心にどの程度ばらついているかを示すため、次頁の図 1-1 から図 1-4 までを付した。これらの図において、各点の Y 座標はその国の限界削減費用を示しており、また X 座標は前章末の表中における各国の ID 番号である。図をみるさいは縦方向のみに注目して、そのばらつき具合をみてほしい。ばらつきが大きいほど、当該市場の限界費用均等化効果が弱い、つまり効率性が低いといえる。本論文ではこの図を「取引後限界削減費用分布図」として、以降「MC 分布」と略す。なお用いたプログラムの性質上、市場価格より下側の分布しか出力できない。しかし市場の効率性を評価する際我々の関心は専ら市場全体の限界削減費用平準化の度合いにある。市場価格より下半分のばらつきが分かれば対称性により上半分も分かるので、平準化の度合いについてその大まかな傾向を知るのには十分である。



ところでロシアのような大量のホットエアを保有している国は、実質的な削減を行わなくてもホットエアの売却だけで自己利得の最大化を果たしうるので、図において市場価格よりはるかに下のほうに位置している点はこれらの国を示している。このことを考慮して、次節以降の各ケースにおける市場価格の値に応じて Y 方向の範囲を変えることがある。これは市場価格周辺の様子をより詳しく示すためであるが、その際にこれらの国を代表する点は省略されることになる。

さて図 1-1 から図 1-4 を見比べると、各ケースの限界削減費用のばらつき具合は概ね同じようである。強いて言えば、市場の範囲が拡大するにつれて上述したような「限界削減費用が

均衡価格から遠く離れている国」の数は減少傾向にある。市場の参加者が多くなれば、より多数の相異なる限界削減費用を平準化することになるから、平均値から極端に離れる国の数が減るのは合理的な結果といえよう。結論として、完全競争市場性さえ確保できれば、参加国が増えても限界削減費用平準化の効果は低減しない。従って政策課題1に結びつけていえば、制度設計の際に市場拡大を促進させる政策を立案する場合、その政策の副作用として市場の競争性への影響のみを考慮すればよい。市場の規模そのものが直接に効率性を損ねる心配はないといえる。

第2節 検証課題2に関する結果及び考察

本節では検証課題に関するシミュレーション結果を示し、それについて考察する。検証課題2は取引量の制限に関するものであるが、検証対象となる制限量の決め方については①各国の初期排出枠をベースとするもの、①各国の削減目標または余剰排出量（|初期排出枠 - BAU排出量|）をベースとするもの、②ホットエア輸出の禁止の3パターンあり、さらに①②についてはそれぞれ需要量のみ・供給量のみ・需給双方を制限するという3つのオプションがあるため、合計7つのケースがある。それらを表2-1から2-7に示す。なお①、②6ケースについては、それぞれの制限量を変えながら市場価格 p 及びその完全競争均衡価格からの乖離度 d を計算する。その際、制限量の変動範囲及び変動する単位刻みの大きさは、モデルの特性を考慮して適切に調整を加える。また表2-1についてのみ、各制限量に対する「MC分布」を付した。その他の各ケースについても、計算データからそれと同じ特性をもつ「MC分布」が得られたからである。

パターン1 初期排出枠に基づく上限設定

ケース1 初期排出枠の一定割合を上限として、需要量・供給量双方を制限する場合。

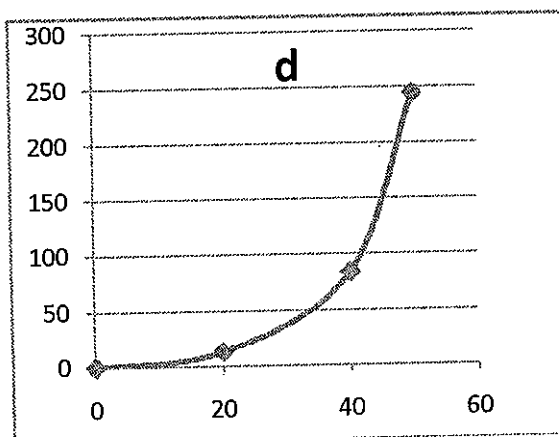
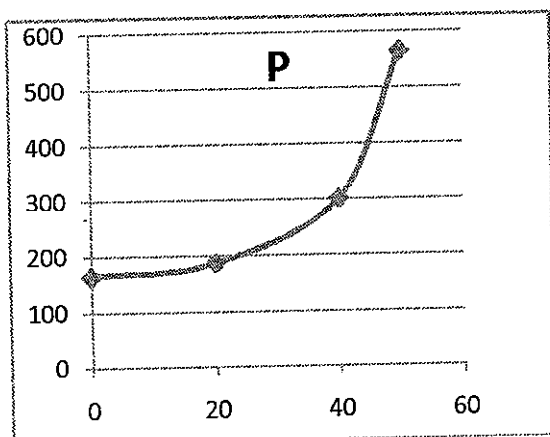
（次頁の表2-1）

ANNEX1 +
USA

制限方式 1 (排出枠ベース)

Demand and
Supply Limit

%	100	80	60	50
p	164	186	301	565
\$	12.3	14.0	22.6	42.4
d	0	13.4	83.5	244.5



ANNEX1 + USA + CHN + IND +
DAE and BRA

制限方式 1 (排出枠ベース)

Demand and
Supply Limit

%	100	80	60	50
p	114	127	174	286
\$	8.6	9.5	13.1	21.5
d	0	11.4	52.6	150.9

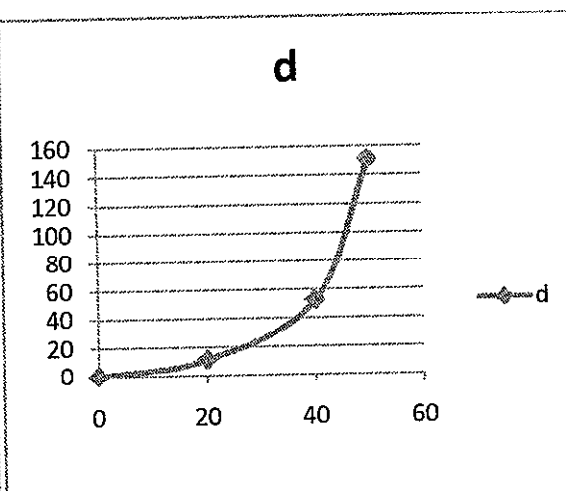
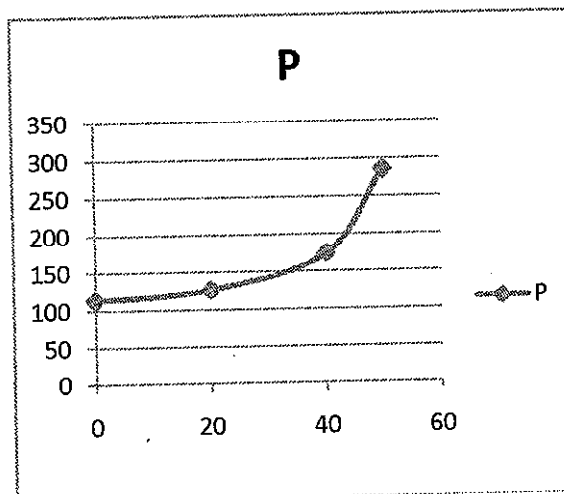


表 2-1

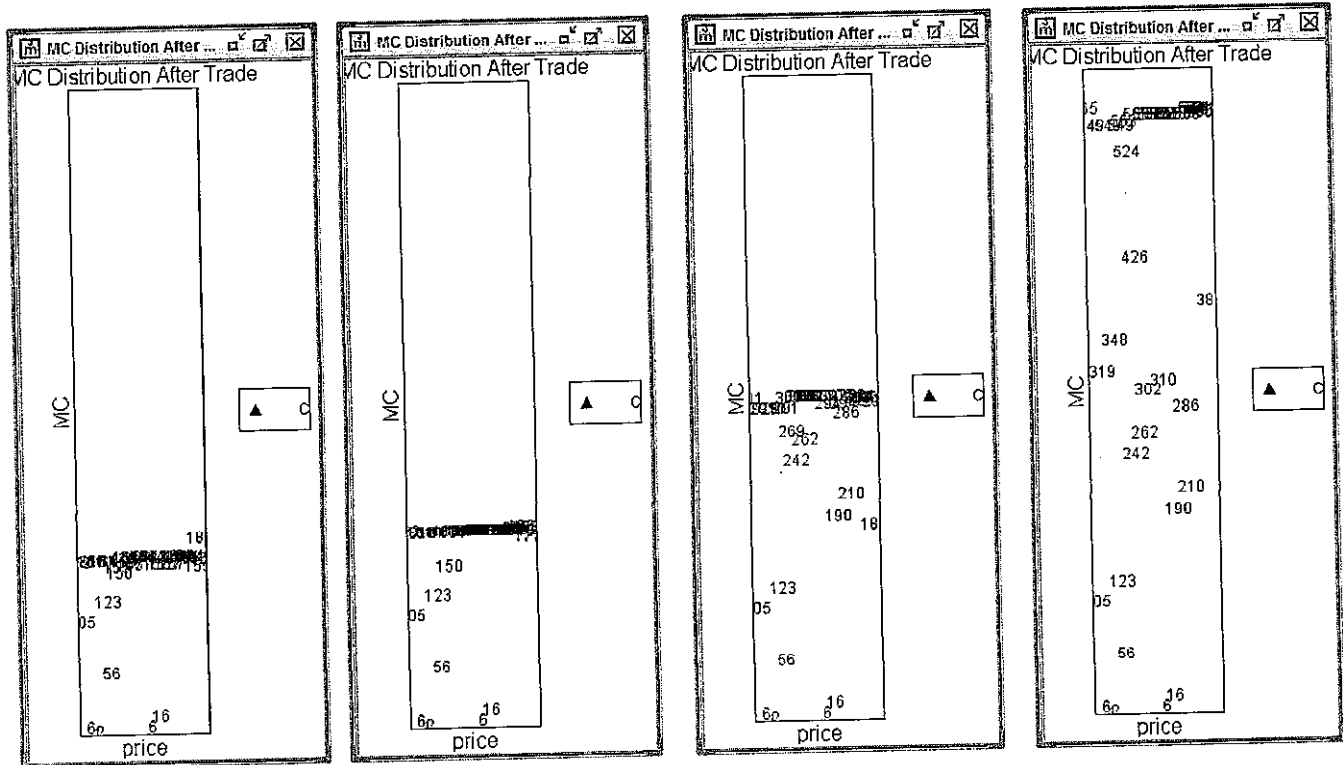


図 2-1

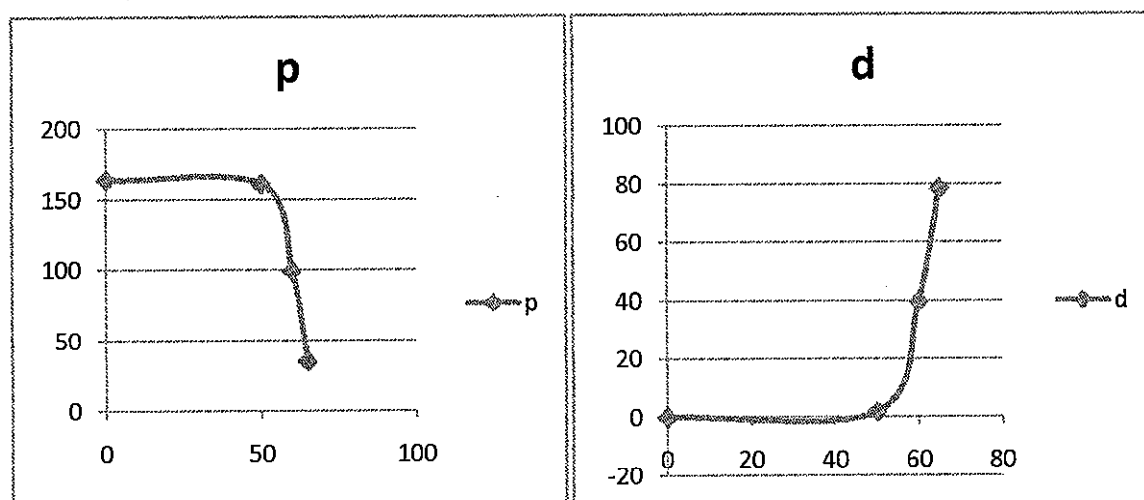
まず表 2-1 から表 2-6 の見方について説明する。表 2-1 の各列の一番上は各国に課した取引
量（供給量及び需要量）の上限を初期排出枠に対する割合（％）として表したものであり、2 行
目の p と三行目の d は前節と同様に定義したものである。前節の表になかったのは 4 行目の d
であるが、これは各制限量に対する市場価格 p と制限なしの場合の均衡価格 p^* の乖離度を示すパ
ラメーターであり、 $d = |1 - p/p^*| \times 100\%$ である。表 2-1 のグラフ（ANNEX1 + USA ケースと
ANNEX1 + USA + CHN + IND + DAE and BRA ケースそれぞれの表の直下にある）は、表中のデ
ータ基に作成し制限量と p 及び p^* の関係を示すものである。これらのグラフをみると、初期配
分量の一定割合を上限として供給量と需要量の双方を制限した場合、市場価格 p 及びその均衡価
格からの乖離度 d は、制限量の関数として一時微分と二次微分がともに正であるような曲線にな
る。またこのことは市場の範囲を拡大しても成立することが確認された。従って以下では、同
じ制限パターンに対して ANNEX1 + USA ケースのみグラフを付すことにする。

また図 2-1 の下半分は右側から順に、各国の取引量上限を初期配分枠の 100%、80%、60%、
50% に設定した時の MC 分布図である。この図から取引後限界削減費用のばらつき度合いは、
取引量上限が 80% から 60% に変わる間に目立つ増加を示した。このことから、取引制限を厳し
くしていくと、ある臨界点を境に限界削減費用平準化効果は目立って低下する、という仮説を
立てることができる。これが他の制限パターンのもとでも成立することが、その他の各ケース
でも確認されているので、以下ではこれを省略する。

ケース 2 初期排出枠の一定割合を上限として、需要量のみを制限する場合。

（次頁の表 2-2）

ANNEX1 + USA	制限パターン 1 (排出枠ベース)			Demande Limit Only
%	100	50	40	35
p	164	161	99	35
\$	12.4	12.1	7.4	2.6
d	0	1.8	39.7	78.6



ANNEX1 + USA + CHN + IND + DAE and BRA	制限パターン 1 (排出枠ベース)			Demande Limit Only
%	100	50	40	35
p	114	112	65	25
\$	18.6	18.4	4.9	1.9
d	0	1.8	43.0	78.0

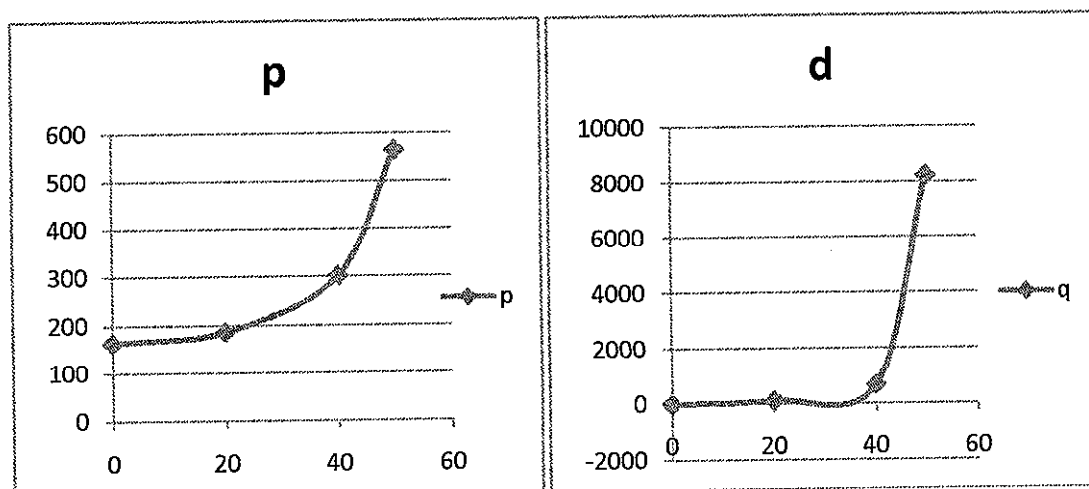
表 2-2

表 2-2 から分るように、需要量の上に初期排出枠に比例した上限をかける場合、制限量がある臨界点を超えるまでに d はほぼ 0 であるが、それを超えると d は傾きの急な直線のように増加する。なお MC 分布図は付さなかったが、取引後限界削減費用のケース 1 (図 2-1) の場合と同じく、取引量上限が 80% から 60% に変わる間に目立って増加した。

ケース 3 初期排出枠の一定割合を上限として、供給量のみを制限する場合。

(次頁の表 2-3)

ANNEX1 + USA	制限方式 1 (排出枠ベース)				Supply Limit Only
%	100	80	60	50	
p	164	186	302	565	
\$	12.3	14.0	22.7	42.4	
d	0	13.4	84.1	244.5	



ANNEX1 + USA + CHN + IND + DAE and BRA	制限方式 1 (排出枠ベース)				Supply Limit Only
%	100	80	60	50	
p	114	127	174	286	
\$	8.6	9.5	13.1	21.5	
d	0	11.4	52.6	150.8	

表 2-3

表 2-3 から、供給量のみに初期排出枠に比例する上限を設定した場合は、需要量のみを制限した場合と同じく、その前後で d の値が急に増加し出すという特徴的な傾向がある。これは自由な完全競争市場における多くの国の取引量が、初期排出枠に一定の割合で比例するということを示唆している。これが一般的に成り立つならば、初期排出枠を適切に再設定することによって、この種の取引量制限による市場効率性の阻害を最小限に抑えることができる。これは検証課題 2 に関する制度設計問題の、大きなヒントとなりうるであろう。

さて肝心の市場効率が阻害される度合いについて、ケース 1~3 を比較してみると、初期排出枠に比例する上限を設定するパターンでは、次のような結果が得られる：

①需要量のみを制限したほうが供給量のみを制限する場合に比べて、市場の効率性に対する悪影響がはるかに小さい。

②需要量と供給量の双方を制限した場合の価格変動と市場の効率性の変化は、供給量のみを制限する場合とほとんど同じである。

③需要量のみを制限した場合、市場効率性は制限量がある臨界値を超えるまではあまり変動せず、逆に制限量がそれを超えると効率性は急激に低下する。

④供給量のみを制限した場合、または需要量と供給量の双方を制限した場合の市場効率性は、制限量がゼロから大きくなっていくにつれて加速的に低下する。

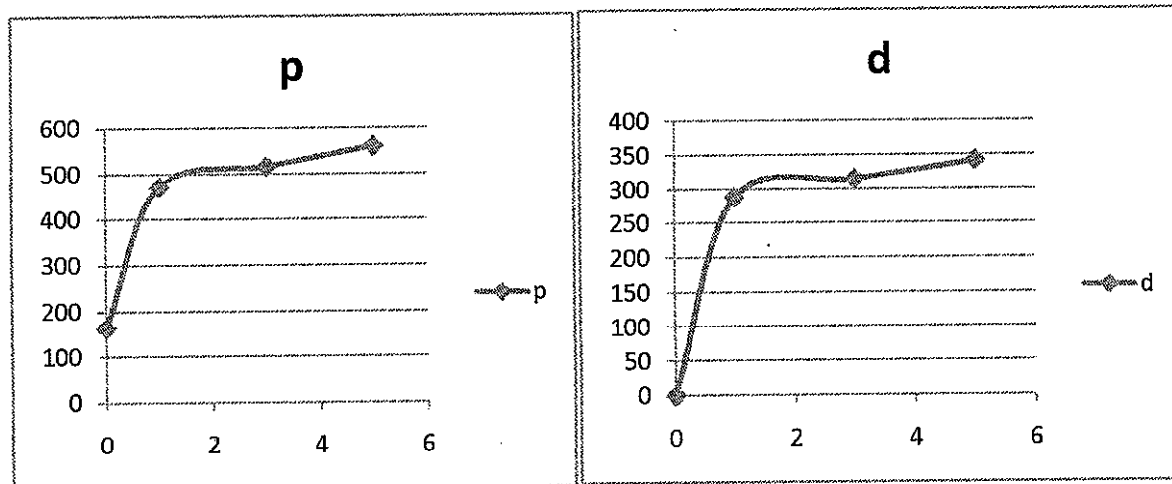
なお上記①～④の結果は、市場の範囲が拡大しても成り立つことも確認された。以上ケース 1 からケース 3 の計算結果をまとめると、政策課題 1 に対する部分的な答えが得られる：初期排出枠に比例する取引量制限を設定するなら、需要量のみを制限すべきであり、なおかつ市場効率性の急激な低下を避けるために制限量がある一定の臨界値を超えないように十分注意すべきである。

パターン 2 初期排出枠と BAU 排出量の差に基づく上限設定

ケース 4 | 初期排出枠－BAU 排出量 | の一定割合を上限として、需要量と供給量の双方を制限する場合。

(次頁の表 2-4)

ANNEX1 + USA	制限方式 2 (排出枠 - BAU 排出量 ベース)			Demande and Supply Limit
%	100	99	97	95
p	164	472	516	560
\$	12.6	36.3	39.7	43.1
d	0.0	287.8	314.6	341.5



ANNEX1 + USA + CHN + IND + DAE and BRA	制限方式 2 (排出枠 - BAU 排出量 ベース)			Demande and Supply Limit
%	100	99	97	95
p	114	472	516	560
\$	8.6	35.4	38.7	42.0
d	0	314.0	352.6	391.2

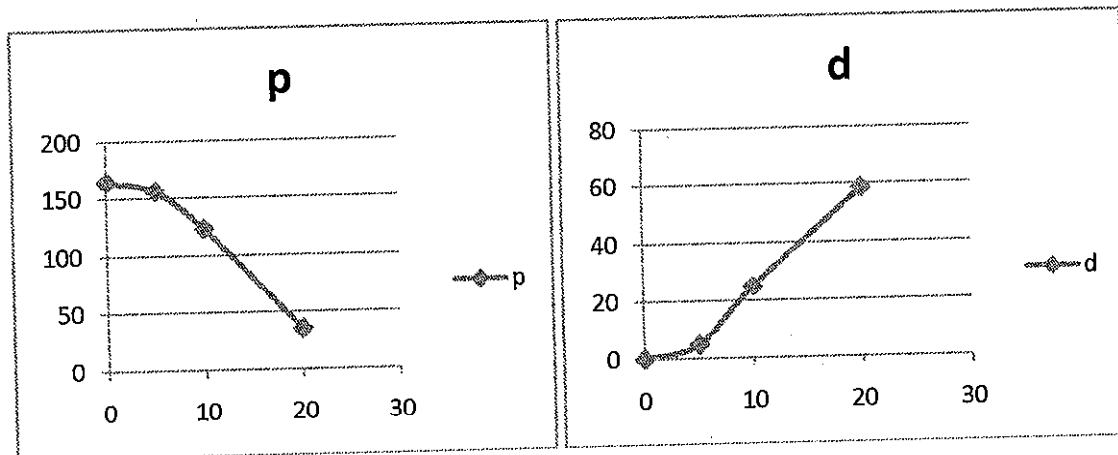
表 2-4

続いて初期排出枠と BAU 排出量の差の一定割合を上限とする制限パターンについて考察。まず表 2-4 とそのグラフから読み取れるように、需要量と供給量の双方を制限した場合、市場価格は極めて敏感に反応する。たとえばわずか 1% の制限量に対して、市場価格は約 3.5 から 4 倍も跳ね上がる。そのため制限量を変えながら計算を進めようとした際、実質的な意義がある制限量の値は精々 5% ぐらいまでである。それよりも制限量を大きくすると、市場価格は実用的な範囲から離れた極めて大きな値へと発散した。

ケース 5 | 初期排出枠 - BAU 排出量 | の一定割合を上限として、需要量のみを制限する場合。

(次頁の表 2-5)

ANNEX1 USA	+	制限方式 2 (排出枠 - BAU 排出 量 ベース)	Demande Only	Limit
%	100	95	90	80
p	164	156	123	35
\$	12.6	12.0	9.5	5.2
d	0.0	4.9	25.0	58.5



ANNEX1 + USA + CHN + IND + DAE and BRA	+	制限方式 2 (排出枠 - BAU 排出量 ベース)	Demande Only	Limit
%	0	95	90	80
p	114	106	87	47
\$	8.8	8.2	6.2	3.6
d	0	7.0	23.7	58.8

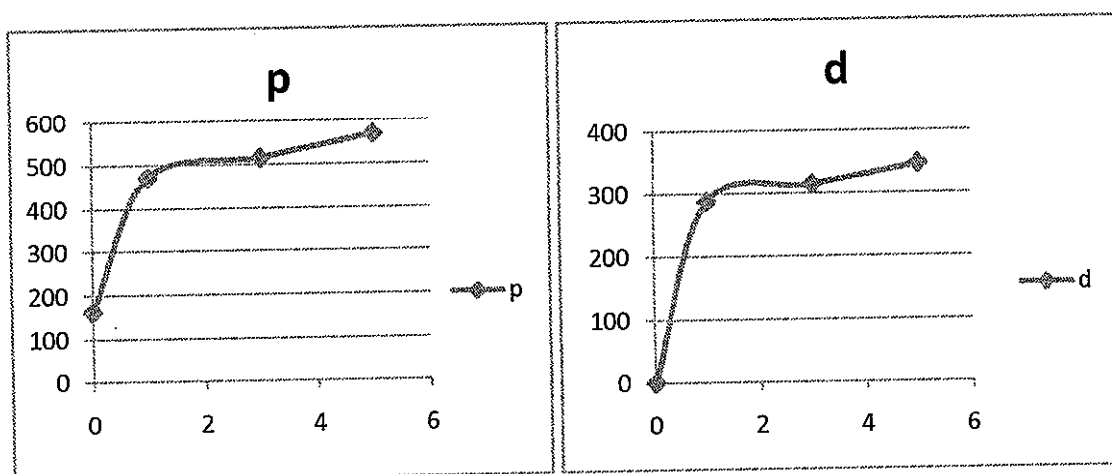
表 2-5

また需要量のみを制限した場合、表 2-5 から制限量が大きくなるに従って、市場価格は及び市場の効率性は概ね直線的に変化する。

ケース 6 | 初期排出枠 - BAU 排出量 | の一定割合を上限として、供給量のみを制限する場合。

(次頁の表 2-6)

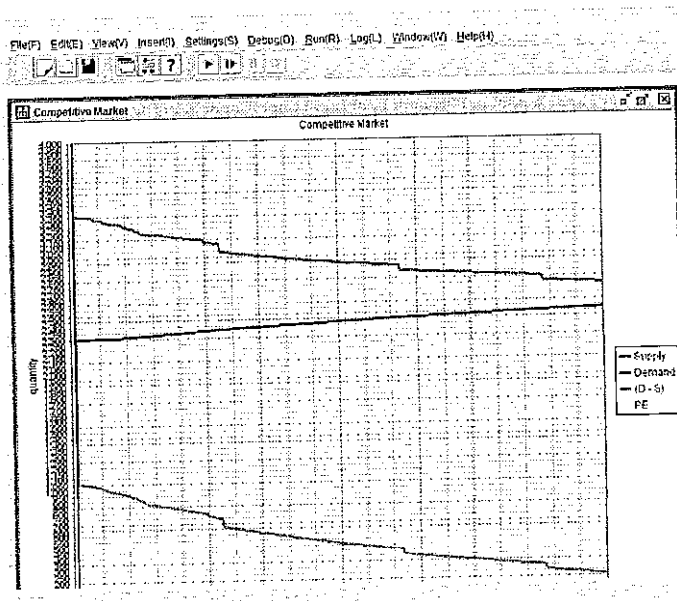
ANNEX1 + USA		制限方式 2 (排出枠 - BAU 排出量 ベース)			Supply Limit Only
%	100	99	97	95	
p	164	472	516	569	
\$	12.6	36.3	39.7	43.8	
d	0.0	287.8	314.6	347.0	



ANNEX1 + USA + CHN + IND + DAE and BRA		制限方式 2 (排出枠 - BAU 排出量 ベース)			Supply Limit Only
%	100	99	98	95	
p	114	472	516	560	
\$	8.8	36.3	39.7	43.1	
d	0	414.0	452.6	491.2	

表 2-6

最後に供給量のみを制限した場合について、表 2-6 と表 2-4 のデータを比較してみるとその値はほとんど同じであるから、市場に対する影響は需要量と供給量の双方を制限した場合と同様である。このことは、表 2-6 に現れている市場価格の供給量制限に対する極端な敏感性から、著観的に理解できよう。初期排出枠と BAU 排出量の差に比例する制限パターンでは、供給量に対する制限のほうが重要量に対する制限を凌駕する劇的な効果をもつ。その理由については、おそらく供給曲線が需要曲線に比べて支配的に市場価格を決定しているためだと思われる。次頁の図 2-2 はシミュレーションプログラムが実際に生成した需給曲線の一例であるが、それを見ると真中の青色で示される供給曲線が一番上の赤色の需要曲線に比べてより平である。そのため需要曲線の傾きが少しでもこれ以上小さくなると、市場価格は大きく右側に移動するのである。このことは根本的には、排出権供給国全体の削減費用構造によるものである。



さてケース 4～ケース 6 の考察をまとめると、|初期排出枠-BAU 排出量|に比例する制限パターンでは、市場価格とその効率性は供給側に対する制限に極めて敏感に反応する。一方需要側のみを制限する場合、市場の効率性はほぼ非加速的に（直線的に）低下するだけである。結局制度設計上の問題の答えとしては、初期排出枠に比例した制限パターンの場合と同様、需要量のみを制限したほうがよい。ただ前者の場合におけるような「臨界値」は存在せず、制限量に比例した効率性低下が発生する。

以上の結論を最終的にまとめると、ET 取引に対する量的制約を課す際は需要側のみを制限したほうがよい。また初期排出枠と不足排出枠（=初期排出枠-BAU 排出量）のどちらを基準にするかという問題に対しては、前者の場合市場効率性が急激に低下し出す臨界値が存在するので、それが十分大きい時には初期排出枠を基準とし、そうでない時には不足排出枠を上限設定の基準とするとよい。

ケース 7 ホットエアによる取引を禁止した場合

最後にホットエアによる取引だけを禁止した場合の結果を表 2-7 に示す。

	ホットエアあり（制限なし）ケースの価格 p	ホットエアなしケースの価格 p^*	$ 1-p/p^* $
ANNEX1 + USA	164	1883	10.4
ANNEX1 + USA + CHN + IND + DAE and BRA	114	901	6.9

表 2-7

これをみると、制限された市場価格と均衡価格の乖離度は前出したケース 1～6 にどれよりもはるかに高い。これは本論文のモデルで考えている ET において、ホットエアが供給量のかなりの部分を占めているためである。現実の京都メカニズムにおいてもこの事情は成り立つので、実際の制度設計においてホットエアだけを禁止する政策オプションは現実味を持たないだろう。また完全な禁止ではなく比例制限とする場合も、結局はケース 3 やケース 6 と同じような効果になるので、需要側に対する制限より劣る選択肢である。

第3節 非完全競争市場に関する結果と考察

非完全競争市場に関して、本論文のモデルとプログラムからは次のような問題を単純化するのに役立つ結論を得た：

①需要側については、アメリカを潜在的な市場支配者と仮定した場合、その純利得最大化行動の範囲はごく狭いものである。より具体的にいえば、アメリカは 2115M ton もの不足排出枠を抱えている；それに対して排出権購入量を意図的に抑えることによって価格操作をする場合、純利を最大化する抑え幅は供給側の価格操作行動を考慮しても 0 から約 150M ton の範囲を出ることとはない。

②上記の狭い変動幅に対して、供給側（ロシア一国のみの場合でもロシアとウクライナがカルテルを組む場合でも）の最適反応はあまり変わらない。より具体的にいえば、アメリカが購入量の抑制幅を 0 から約 150M ton のどこに設定しても、ロシア一国で価格操作する場合はその保有するホットエアの約 3 割、ロシアとウクライナがカルテルを組む場合は両国が保有するホットエアの約 4 割に相当する供給量を抑えることが最適反応となる。

上記結果をまとめると、（前田 2009）で想定するような Nash ゲームにおいて、潜在的独占需要者であるアメリカはその削減費用構造の特性上、最適反応曲線上に存在しうる需要抑制量が自身の需要量に対して著しく狭い範囲内に限られている。一方でその狭い範囲内のどの戦略に対しても、供給側の最適反応となる供給抑制量変わらない、つまり供給側の最適反応曲線は近似的に直線とみなしうる。このことはまさに、第三章で紹介した（前田 2009）の結論を確認したものといえる。

さてこの直線上に需要側であるアメリカの純利得が最大となる点を見つければ、それが Nash ゲームの均衡点となる。計算の結果 Nash ゲーム均衡点における市場価格を表 3-1 にまとめる。

	完全競争市場	ロシア v.s. アメリカの Nash ゲーム	ロシア&ウクライナ v.s. アメリカの Nash ゲーム
ANNEX1 + USA	164	263	407
ANNEX1 + USA + CHN + IND + DAE and BRA	110	170	250

表 3-1

上記の結果と(前田 2009)などの先行研究とを比較すると、ANNEX1 + USA 市場と ANNEX1 + USA + CHN + IND + DAE and BRA 市場のいずれでも、またロシアのみの場合でもロシアとウクライナーがカルテルを組む場合でも、市場価格と完全競争均衡における価格の乖離度はどの先行研究よりも大きい。前田 2009 などの理論から非完全競争市場の価格は初期配分に依存するから、この差はおそらく使用した初期値データの違いによるものであろう。しかし定性的な傾向については、前章に紹介した先行研究の結果と一致している。表 3-1 だけでみると、市場の範囲が大きくなるにつれて価格支配行動の影響は小さくなる。これは市場参加者が多くなればなるほど完全競争市場に近づくという、一般的な経済学理論から考えても納得できる結果だろう。

さて先行研究に従うにしても、上記のデータを認めるにしても、ET 市場は非競争的行為とりわけホットエアを大量に保有する供給者のそうした行為によって、それ効率性を大きく損なわれる可能性がある。そこで政策課題 3 の答えとして、どのような制度設計の工によって市場支配行為による非効率性を予防できるかを考える。ホットエアを市場から排除するという手段も考えられるが、その場合は前節最後で分析した結果となってしまう、かえって市場の効率性を損なう。また取引量の下限を設けたり、価格の上限を設定したりするといった方法も理論的には有効であるかもしれないが、現実的には政治的な要因などから実施は困難だと思われる。そこで本論文では初期排出枠のさまざまな再配分を試み、その結果「ロシア及びウクライナーが保有するホットエアの半分を、他の全参加国の排出枠として均等に分配する」という初期配分案により、新たな Nash ゲーム均衡における市場価格が完全競争市場の均衡価格に十分近い値に近づけることに成功した。その際のロシア・ウクライナーカルテルとアメリカそれぞれの最適戦略にあたる取引抑制量は、完全競争市場における本来の取引量に対して 5%未満の範囲内に限られる。

第六章 結論

前章までの結果をまとめると、「排出権取引市場の価格と効率性は、市場の範囲、取引量に対する制限、そして参加国の非競争的行為によってどのような影響を受けるか」という問いに対しては次のような回答が得られた：

1. 市場の効率性は市場の範囲や規模と直接的には関係がなく、完全競争性が保たれる限り市場の拡大はその効率性を損なわない。また中国とインドをはじめとする低限界削減費用国をとり込むことができれば、ET による利得を大きく増大させる。
2. 取引量に対する制限は一般に市場の効率性を害する。その点についてさまざまな量的制限の中でも、需要量のみに対する制限は効率性の観点から最も犠牲の少ない方式である。
3. ET 市場における非競争的行動が市場の効率性をどれだけ害するかは、初期配分に大きく依存する。初期配分をうまく工夫することによって、ロシアやアメリカのような潜在的な価格支配者の自己利得最大化行動を、市場の効率性実現と同じ方向に導くことは可能である。

今後に残す研究課題として、マルチエージェントシミュレーションと他の定量研究の方法論的比較と、それによる今回 ET の中に包含してしまった CDM や JI に関する分析があげられる。末筆ながら国際環境協力分野における定量的分析の発展を願いながら、本稿を締めくくる。

参考文献

- ⁱ 地球温暖化対策推進本部『京都議定書目標達成計画』,
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/index.html> Accessed On 2009.1.10
- ⁱⁱ 環境省「京都メカニズム情報コーナー」,
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/gaiyo_m.pdf Accessed On 2009.1.10
- ⁱⁱⁱ 奥脇直也編集「国際条約集 -- International Law Documents 2009 年版」有斐閣, 2009
- ^{iv} 気候変動枠組み条約サイト <http://unfccc.int/resource/docs/cop7/13a02.pdf> Accessed On 2009.1.10
- ^v 地球温暖化対策推進本部 オンライン公開資料
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/gaiyo_m.pdf Accessed On 2009.1.10
- ^{vi} 小宮山涼一『京都メカニズムのマクロ的定量分析』, 日本エネルギー経済研究所サイト, 2007
- ^{vii} 気候変動枠組み条約サイト <http://unfccc.int/resource/docs/2009/sbi/eng/12.pdf> Accessed On 2009.1.10
- ^{viii} (Zhang 1999) ZhongXiang Zhang “An Economic Assessment of the Kyoto Protocol Using a Global Model Based on the Marginal Abatement Costs of 12 Regions”, presentations at the Asian Development Bank/United Nations Environment Programme’s Workshop for Policymakers on the Institutional Design of the Kyoto Protocol Cooperative Implementation Mechanisms, 1999
- ^{ix} (前田 2009) 前田章「排出権取引制度の経済理論」, 岩波書店, 2009
- ^x (鷺田 2004) 鷺田豊明「環境政策と一般均衡」勁草書房, 2004
- ^{xi} (Ellerman & Decaux 1998) Ellerman & Decaux, “Analysis of Post-Kyoto CO2 Emissions Trading Using Marginal Abatement Curves”, MIT
- ^{xii} (Hahn 1984) “Market power and transferable property rights”, Quarterly Journal of Economics, 99(4)
- ^{xiii} (Burniaux) “How important is market power in achieving Kyoto ? An assessment based on the GREEN model.”, 出版年など不詳
- ^{xiv} (西條 2000) 西條辰義『排出権取引：理論と実験』, 大蔵省財政金融研究所「フィナンシャル・レビュー」2000

附録 1

	Country	L	QB	a	2a	b
0	ロシア	2299	986	23	46	42
1	ブルガリア	69	24	79	158	486
2	チェコ	141	92	79	158	486
3	エストニア	35	5	79	158	486
4	ハンガリー	66	43	79	158	486
5	ラトビア	21	2	79	158	486
6	リトアニア	34	3	79	158	486
7	ポーランド	324	249	79	158	486
8	ルーマニア	154	45	79	158	486
9	スロバキア	51	26	79	158	486
10	スロベニア	12	17	79	158	486
11	ウクライナ	672	135	79	158	486
12	オーストラリア	281	417	32	64	3029
13	日本	958	1309	155	310	18160
14	ニュージーランド	22	45	85	170	-986
15	オーストリア	50	69	24	48	1503
16	ベルギー	99	135	24	48	1503
17	デンマーク	40	50	24	48	1503
18	フィンランド	55	55	24	48	1503
19	フランス	353	395	24	48	1503
20	ドイツ	762	720	24	48	1503
21	ギリシャ	88	109	24	48	1503
22	アイスランド	2	3	24	48	1503
23	アイルランド	34	56	24	48	1503
24	イタリア	374	453	24	48	1503
25	ルクセンブルク	8	6	24	48	1503
26	オランダ	150	196	24	48	1503
27	ノルウェイ	29	40	24	48	1503
28	ポルトガル	50	90	24	48	1503
29	スペイン	237	393	24	48	1503
30	スウェーデン	53	53	24	48	1503
31	スイス	37	43	24	48	1503
32	イギリス	490	504	24	48	1503
33	カナダ	404	645	5	10	398
34	アメリカ	4536	6651	5	10	398
35	中国	3473	3473	0.7	1.4	239
36	インド	1007	1007	15	30	787
37	上記以外のアジア	971	971	47	94	3774
38	ブラジル	327	327	5612	11224	84974
39	上記以外の全世界	11466	11466	21	42	805