

Title	国内排出権取引市場：スポット、先物、バンキング
Sub Title	
Author	前田, 章(Maeda, Akira)
Publisher	慶應義塾大学産業研究所
Publication year	2001
Jtitle	KEO discussion paper. G : 『アジア地域における経済および環境の相互依存と環境保全に関する学際的研究』(KEO discussion paper. G : "Inter-disciplinary studies for sustainable development in Asian countries"). No.G-120
JaLC DOI	
Abstract	概略国内GHG排出権取引制度について、排出権取引現物価格と先物/先渡価格の価格形成メカニズム、さらに、バンキングが可能な場合の現物市場と先物/先渡市場の相互作用をミクロ経済学的に分析した。はじめに、当該年度ビントリーの排出権を当該年度末に取引する現物市場(スポット取引)の価格形成メカニズムについて考察した。ここでは、各経済主体からの潜在的排出量の確率的相関関係が起源となって、市場均衡解としての排出権スポット価格が確率的な変数となることが示された。続いて、先物/先渡市場均衡価格について考察した。排出権先物/先渡価格は排出削減限界費用の期待値には等しくはならず、これより大きくも小さくもなる。その大小関係は、排出削減限界費用が逓増型であるか低減型であるかによって決定されることが示された。最後に、バンキングが可能な制度を想定し、将来の潜在的排出量およびその不確実性、経済主体のリスク回避度、などが現物市場価格に及ぼす影響について分析した。バンキング導入は現物価格の高騰に寄与することはあっても、低下に寄与することはないということが示唆された。
Notes	表紙上部に"日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業複合領域「アジア地域の環境保全」"の表示あり
Genre	Technical Report
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA12113622-00000120-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

国内排出権取引市場： スポット、先物、バンキング

前 田 章

No.G-120

学振未来 WG2-44

国内排出権取引市場：スポット、先物、バンキング*

前田 章

(慶應義塾大学 総合政策学部)

2001年1月

概略

国内 GHG 排出権取引制度について、排出権取引現物価格と先物／先渡価格の価格形成メカニズム、さらに、バンキングが可能な場合の現物市場と先物／先渡市場の相互作用をミクロ経済学的に分析した。はじめに、当該年度ビンテージの排出権を当該年度末に取引する現物市場(スポット取引)の価格形成メカニズムについて考察した。ここでは、各経済主体からの潜在的排出量の確率的相関関係が起源となって、市場均衡解としての排出権スポット価格が確率的な変数となることが示された。続いて、先物／先渡市場均衡価格について考察した。排出権先物／先渡価格は排出削減限界費用の期待値には等しくはならず、これより大きくも小さくもなる。その大小関係は、排出削減限界費用が逓増型であるか低減型であるかによって決定されることが示された。最後に、バンキングが可能な制度を想定し、将来の潜在的排出量およびその不確実性、経済主体のリスク回避度、などが現物市場価格に及ぼす影響について分析した。バンキング導入は現物価格の高騰に寄与することはあっても、低下に寄与することはないということが示唆された。

目次

- 1 はじめに
- 2 国内排出権取引制度
- 3 現物取引
- 4 先物／先渡価格
- 5 バンキング
- 6 おわりに
- 参考文献

* 本研究の一部は、「国内排出権取引市場における先物価格形成の数理」(慶應産業研究所ディスカッションペーパー、2000年3月)を改定したもの。

1. はじめに

1997 年の京都議定書以来、先進各国の間では、国内排出削減策の一つとして国内排出権取引¹ が真剣に検討されている。これまで、環境政策の一つとしての排出権取引に類似する制度は、米国での連邦レベル SO₂ アローワンス取引など実施例があった。² CO₂ をはじめとする GHG は経済活動との直接的な結びつきが強く、SO₂ よりも取引に関わる範囲がはるかに広範で取引全体の規模もはるかに大きい。そのため、学術的な議論を超えたより現実的な制度設計具体案へはなかなか発展しない状態が続いてきたといえる。それが、京都会議以降、先進各国内で急速に国内排出権取引の議論が表面化して、広まってきている。現在具体的な議論が進んでいく国としては、英国、デンマーク、ニュージーランド、オーストラリアなどがある。(松尾(2000)参照) 特に、英国では、産業界から政府に対して積極的な制度導入提案がある。(Emission Trading Group, 1999) また、UNIPED には電力売買も含めた形で欧州電力会社間での排出権取引実験も試みられている。(Baron, R. and R. Cremades in Collaboration with the UNIPED · EURELECTRIC Working Group on Climate Change, 1999)

現在一般に指摘されている排出権取引制度の利点は、主に次のようなものである。

- 1 排出削減限界コストが均一になるように各経済主体にとっての排出削減量が決定されるため、経済学的な意味で効率的である。
- 2 この効率性は市場メカニズムを通して達成されるため、政策当局が価格の決定や個別排出削減行動の規制等を行う必要がない。
- 3 炭素税に比して、総排出削減量が政策当局によって直接的に設定されるため、確実な削減量が保証される。

1番目と2番目の意味するところは次のようにまとめられる。まず、排出量許容上限が政策当局から与えられたとして、このような制約のない場合の元々の排出量(潜在的排出量)を制約上限まで削減するには、コストがかかる。このコストは各排出源によって一般に異なり、経済社会全体で見ると高コストを負わなくてはならない排出源から低コストで済む排出源まで大きなばらつきが生じる。そこで排出出来る量を市場を通して取引できるようにすれば、高コストの排出源では、削減量を少なくしてその結果不足する分は市場で調達できる。一方低コストの排出源では、より多く削減して、余った分を市場で売却し利益を得ることができる。こうして各排出源の直面する排出削減限界コストは均一になり、経済的効率性と社会厚生最大化が達成される。このようにして達成される均一の削減限界コストは市場で売買される排出量(権利)の価格と同一になる。すなわち、市場メカニズムを通して、「市場均衡価格＝排出削減限界コスト」となる。3番目の利点は、炭素税の場合は、適正

1 Emissions Trading という言葉の翻訳として、排出権取引の他、排出量取引などいくつかの言葉が提案されている。ここでは、これを持っていれば排出してもよいが、なければ出来ない、また、持っても権利行使した排出をしなくても問題ない、という観点から、「権利」という言葉に統一したい。

2 これは取引可能排出許可証を導入することにより発電所等からの SO₂ 排出を取引するものである。学術的な文献はそれほど多くはないが、市場のメカニズムを分析するものとして Cason and Plott (1996)、Joskow, Schmalensee and Bailey (1998)、Schmalensee, Joskow, Ellerman, Montero, and Bailey (1998)、Stavins (1998)などがある。

な税の設定を誤ると政策当局の目標どおりの総排出量が達成できないこともあるかもしれないが、排出権取引は原理的に総排出量を市場に設定してしまうので、必ず目標が達成される、ということである。理論と実験については西條(2000)他が詳しい。また、SO₂削減の脈絡ではあるが、最近の理論的論文としては Coggins and Swinton (1996)などがある。

ここで、国内と国際の違いに言及してみたい。この両者は、取引主体が誰であるか、という違いだけで、純粹経済理論的な観点から見ると本質的な相違はない。ただ、国際レベルの排出権取引は、取引の主体が国家になり、その他の政策(共同実施(JI)およびCDM)の可能性と絡んで、制度設計と運営自体が国際政治の力学によってドライブされる可能性が大きいと考えられる。また、参加する国々は京都議定書にリストアップされているいわゆる Annex B 国であるが、それぞれの国の経済的社会的情勢にばらつきが大きく、均一な市場参加者による(経済学的に)効率的な市場形成は、現時点では考えにくい。これに対して、国内に限定した排出権取引は、一旦一国の政策として決定されれば、一貫した法体制のもとで比較的均質な市場参加者が参加する、資本市場や商品市場にも匹敵するような効率的な市場形成につながっていく可能性は大変高い。実際、国際取引制度導入の前段階として各国の国内取引制度を確立して、各国のシステムを結びつける形で国際取引へと発展させていく、というのが、最も現実的な京都メカニズムの導入手順であると多くの専門家は指摘している。(IPCC, 1999) したがって、経済学的に効率的な市場形成の現実性という点では、国内取引制度の方が経済学的な分析によくなじむと考えられる。

さて、排出権取引市場が創造され、そこで取引がなされる場合、その市場均衡価格は上述のように排出削減限界コストに等しくなる。この排出削減限界コストは、排出制限がなかった場合の排出量(潜在的排出量)や排出源の技術水準によって決定される。特に、潜在的排出量は、各経済主体の経済活動や技術水準に大きく依存すると考えられるが、そうした要因の背景には、全経済主体に共通するマクロ経済的環境や社会全体の技術進歩レベルといったよりファンダメンタルな要因が存在すると考えられる。言い換えると、景気動向や技術動向といった要因が根本にあって、その影響で各経済主体の潜在的排出量は互いに相関を持った変動をする可能性がある。さらにこうした潜在的排出量の確率的変動が元となって、市場均衡スポット価格が確率的に変動するかもしれない。すなわち、排出権スポット価格は景気動向と技術動向によって、年々変動することが予想される。

マクロ経済環境のような根本的な不確定要因によって、排出権スポット価格は変動する。その姿は商品取引所や株式取引所で取引される商品や株式の資産価格変動と極めた類似したものであるといえる。現在存在する商品取引や株式取引においては、その価格変動に起因する経済的リスクをヘッジするツール、あるいは、そうした価格変動から投機的な利益を稼ぐツールとして、幅広く先渡し/先物やオプションなどのデリバティブ取引が利用されている。目下のところ、排出権取引制度導入に対する政策的、学術的議論においては、排出権のスポット的な取引を想定した議論しかなされていない。しかしこの制度が徐々に現実的なものとなってくれば、必ずや、この排出権を原資産とする先物取引やオプション取引が一般的に行われるようになるであろう。既に実際、米国では民間の会社で将来の取引制度を想定して将来の排出権およびそれを売買できる権利の売買を

開始しているところもある。こうした例は、まさに排出権の先物やオプションである。(ネット上で市場を開設している例は、Science Applications International (<http://www.greenonline.com>) などがある。)また、後述するように、ビンテージのついた年度指定の排出権を前もって取引するとすれば、それは、本質的に先渡し取引であるといえる。

本研究では、以上のように近年急速に現実味を帯びてきた GHG 排出権取引制度について、その排出権取引市場均衡価格の価格形成メカニズムをミクロ経済学的に分析することを目的とする。特に、排出権現物(スポット)とその派生商品である先物または先渡し取引の価格形成、さらに排出枠の保管(バンキング)の影響を数理的に分析する。以下では、始めに排出権取引市場の制度について現在なされている議論を概観し、分析のフレームワークとする。続く3節、4節にて現物(スポット)取引と先物／先渡し契約の価格形成メカニズムとその経済学的含意を考察する。現物の市場と先物の市場は、その二つの市場の間で排出枠を自由に動かせるような仕組みが存在しない限り、互いにリンクすることはない。こうした仕組みは、排出枠の保管(あるいは先送り)(バンキング)と前借り(ボローイング)が認められるかどうかという政策決定に依存している。5節では、バンキングが政策的に認められる場合の現物市場と先物／先渡し市場のリンクと相互作用のメカニズムを考察する。

2. 国内排出権取引制度

現時点での国内取引制度を巡る議論において、確定したことは何もない状態といえる。ただ、実現可能な制度の大枠としては米国での SO_x排出権取引の例を参考して、ある程度コンセンサスが得られてきている。本節では、続く理論的分析を念頭において、多くの議論に共通する制度の枠組みをまとめる。

2. 1 制度の基本的枠組み

排出枠(Target)：

GHG 排出を規制するために、規制当局が GHG 排出源に排出の上限を設定し、これを排出枠とする。各 GHG 排出源はその枠の範囲で自由に GHG を排出してもよいという「権利」を持っていると同時に、排出量をその枠の範囲内に収めなくてはならないという義務を負っている。この排出枠を売買の対象とする制度が排出権取引制度である。取引にあたっては、排出枠、あるいは排出してもよい権利、を証券の形に直して流通させてもよいし、電子取引システムのようなものを整備して、電子のフォームのみで取引をしてもよい。いずれにせよ、取引が円滑かつ公正になされるような流通システムが必要である。

排出許可証(Emission Permit / Allowance)：

GHG を排出する権利を証券化したものが排出許可証である。この排出許可証は排出削減のコミットメントが始まる前に発行、配布される。ただし、コミットメントの年度になるまで、その効力は発効しない。このような使用年度指定をビンテージという。

各経済主体に初期配分される排出許可証はその経済主体の排出上限またはターゲットを規定することになる。実際の排出量がこれを超える場合は、超過分に相当する排出許可証を購入し、反対に実際の排出量がこれに満たない場合は、余剰分に相当する排出許可証を売却することになる。これは一般に Cap and Trade と呼ばれている。

タイムスパン：

あるビンテージの排出許可証は〇〇Mt-CO₂/yr という形で規定され、その総和は年当りの国内総排出量となる。各排出源は、年度毎に、実際の年間 GHG 排出量と等量の排出許可証を規制当局に提出する義務を負う。提出の時期は、多くの議論では、年度末とされる。このように年毎に排出量が規定されているのは京都議定書に由来する。

権利行使：

排出源となる経済主体は、コミットメント年度の年度末に、実際の年間 GHG 排出量と等量で同ビンテージの排出許可証を規制当局に提出することにより、その保有している排出枠ないしは排出

許可証を「消費」する。これは排出許可証を「排出してもいい権利」と考えるなら、「権利行使」といってもよい。この消費ないしは権利行使により、そのコミットメント年度ビンテージの排出許可証は市場から消滅することになる。

初期割り当て：

排出許可証は規制当局の定める量だけ無償配布されとするのが現在の制度設計を巡る議論において最も一般的な議論であろう。無償配布の方法の一つとして、過去の実績に基づいて初期配分を決定するのが、いわゆる Grandfathering と呼ばれる方式である。この場合、排出源を持つ新規の市場参加者に対してはどのように割り当てるか、という問題は制度設計の大きな論点となっている。そこで、新規参加者も含めて、初期割り当てはすべて Auction によって決定されるのがよい、との主張も見受けられる。³ Auction の場合、規制当局がその Auction によって得た収入をどのように使うかが一つの大きな論点となる。これを直接的、あるいは間接的に排出源となる経済主体に還元するならば、経済学的には、無償配布と同じになる。また、その Auction 価格は排出権取引市場価格と同一になる。したがって、本研究では、割り当てに至るまでのプロセスはさておいて、一旦割り当てられた排出権が市場でどのように価格付けされ、取引されるか、についてのみ分析の対象を絞ることとする。

市場参加者：

排出権市場の市場参加者は規制の範囲（いわゆる Coverage）にもよるが、一般的にはエネルギー産業や運輸産業の企業などが想定されている。加えて、将来的に排出権（ないしは排出許可証）の売買のみを手がけるブローカーが登場してくるものと思われる。経済学的には、全て一括りにして、「経済主体」ないしは「取引主体」として特に区別する必要はない。

2. 2 取引形態

現物取引（スポット取引）：

あるコミットメント年度において、その年度のビンテージの排出枠を取引することを「現物取引」という。取引のタイミングがその年度末に近ければ、前述のようにそのビンテージの権利行使はその年度末であるので、実際の排出量が確定した時点で取引を行うことになる。これは、必要なものを必要なときに買う、あるいは売る形で、スポット取引と呼んでよい。これに対して、取引のタイミングがその年度初めに近ければ、当該年度終了時点での年間総排出量を予測して取引を行うことになり、必要なものを必要なときに、という形とは異なり、次項の「先渡契約」または「先物取引」に近くなってくる。スポットに近いと考えるべきか、先物／先渡に近いと考えるべきかは当該年度のどの時点で取引がなされるか、というタイミングの問題と取引時点で当該年度一年分の実排出量をどれだけ

3 無償配布とオークションについて両者の比較および炭素税との比較などは、IPCC Third Assessment Report (1999) などに詳しく述べられている。その他、排出削減方策一般の比較は、Whalley and Wigle (1991)、税制と取引可能排出許可証の比較は、Stavins (1996)、Watson and Ridker (1984)などがある。

正確に把握しているか、という計画・実施の問題によって決まる。本研究では、スポット的な取引と先物的な取引を明確に区別するために、現物取引、すなわち、ある年度にその年度のビンテージを取引するもの、は、全てその時点でその年度の総実排出量が確定しててなされるものと仮定し、「スポット」と同義に考える。

先渡契約と先物取引：

将来のビンテージを前もって取引することもあり得る。これはある年度に当該年度よりも将来のビンテージを取引するもので、取引の時点ではそのビンテージ年度末での実排出量がわかっていないというのが、前項の「スポット」との本質的な相違点である。

こうした場合、売買契約だけ行って、受け渡しと支払いは将来の時点で行うことを「先渡し取引 (Forward Contract)」という。この支払いを現時点で行ったとしても、それはフィナンシャルには、デフォルトが無い限り、本質的に同じであって、先渡しといってよい。商品取引や金融取引の世界で「先渡し取引」と言うとき、多くの場合相対取引を意味する。これを取引所にて毎日決済しながら組織的に行うものが「先物 (Futures)」であると考えてよい。本研究では、デフォルトリスクは分析の範囲外として、先物と先渡を本質的に同一のものとして扱う。⁴

バンキングとボローイング：

排出権取引が通常の証券取引と本質的に異なる点は、その資産としての価値に期限がある、という点である。通常の証券のように未来永劫資産として存在するものではなく、排出権は権利行使ないしは消費という形で特定の時期に消滅する。しかも、その有効期間はビンテージとして規定されている。年間の国内総 GHG 排出量を削減するという政策的目的から、原則として年度を跨った排出枠の取引は許されない。すなわち、特定のビンテージの排出許可証を他のビンテージとして利用することは原則としてできない。

ただ、各排出源主体にとっては、ビンテージ間の排出枠の移動は、現物と先物／先渡を組み合わせることにより、実質的に可能ではある。例えば、ある主体が、今年の排出量を大幅に減らして、その分を来年分にまわしたいと考えたとする。この場合、現物市場で排出権を売ると同時に来年度分の先渡契約で等量の排出権を買っておけばよい。反対に、将来の排出量を大幅に減らす代わりに、現在の排出量を増やしたいと考えるカウンターパーティーがいるなら、その二つの排出源主体同士でビンテージの交換をすればよい。これは、スワップと呼ばれる。

このように、現物と先物／先渡の組合せまたはスワップにより、排出枠の時間軸上の移動は、個別排出源レベルでは出来る。しかし、それによって各年度のビンテージの総量に変化するわけではないので、市場全体として、年度を跨った取引、より正確にはビンテージ間の排出量交換はできないことになる。そこでこうしたビンテージ間の排出量交換を制度的に認めるものが、いわゆるバンキング：Banking (保管、先送り)、ボローイング：Borrowing (前借り) である。現在のところ、バンキン

⁴ 先渡し取引と先物取引の違いについては金融取引に関する書物を参照されたいが、細かい議論をさておけば、理論的には本質的に同一のものであるとされる。理論面に焦点を当てる本論文では、以下完全に同一のものとして取り扱う。

グは認めてもよいがボローイングは認めるべきではない、というのが、一般的な論調であろう。ただし、多くの政策的議論では、何らかの形でバンキングに制約を課すべきであるとされる。最も簡単な制約の課し方は、バンキングできる量に上限を設けることである。もう少し政策的に自由度の大きいやり方は、バンキングの一部を徴収することである。すなわち、バンキングによって年度を移転された排出許可分（許可証）と移転先のビンテージの排出許可分（許可証）との間の移転比率を1対1にはしない、ということである。これは、バンキングによる時点間移転分の一部を政策当局が政策的に接收して、オークションにかける形で市場に還元し、流動性の向上を図るというものである。この接收分を本研究では移転減耗率と呼ぶことにする。いずれにせよ、バンキングとボローイングを認めるかどうか、認めるとしたらどういう条件のもとでみとめるか、といったことについては、本来、制度的、政策的問題である。ところが、こうした制度を認めると、現物市場と先物／先渡市場がバンキングなりボローイングを介してリンクすることになる。そのため、それぞれの市場の価格形成に相互作用を発生させることになる。本研究では、この問題を第5節で分析する。

その他のデリバティブ：

以上のような取引からさらに派生してさまざまな取引が行われる可能性もある。現物を原資としてその上にオプションを考えたり、あるいは先物／先渡を原資としてオプションを考えたりすることはいくらかも可能である。排出権取引が実際の稼働を始めれば考え付く限りのデリバティブが取引され始めることになるかもしれない。本研究では、さしあたって、先物／先渡以上のデリバティブは分析の範囲外とする。

取引に対する制約：

現在の制度設計を巡る議論において、経済学のいうところの「市場メカニズム」を絶対的に信じてよいのか、という批判もある。そうした批判に対する妥協としてしばしば持ち出される案が、取引の自由度になんらかの制約を課すというものである。そうした制約の例は、取引量や取引価格に上限を設けるということである。こうした政治的妥協案は、しかし、経済理論的には市場の効率性を歪めるものであるといえる。本研究では理論的考察の立場から、バンキング・ボローイングは別にして、少なくとも現物と先物／先渡に関しては、こうした人為的・政治的な介入のない、効率的な市場の存在を想定する。

3. 現物取引

本節では、排出権権利行使が必要な時に取引がなされ、その取引時点で即時決済がなされる排出権取引(以下、これをスポットという)について、その価格形成の原理を考察する。よく知られているように、不確定な要因が全くない場合、その価格は排出削減限界費用に等しくなる。本節の焦点は、経済主体からの潜在的排出量が確率変動をする場合に、それが排出権価格(あるいは排出取引許可証価格)の形成にどのような影響を及ぼすかである。

3. 1 排出許可証スポット価格の形成

はじめに、使用する文字を以下のように定義する。

$i = 1 \cdots N$: 経済主体を表すインデックス

N : 経済主体の総数

T_i : 政策当局によって経済主体 i に課せられた排出上限(Target)、

ないしは配布された排出許可証によって表される排出可能量 [Ton-CO₂/year]

G_i : 排出制限がない場合に排出するであろう経済主体 i の潜在的排出量(Potential Give-off) [Ton -CO₂/year]

X_i : 経済主体 i の排出削減量(Reduction) [Ton -CO₂/year]

$C_i(X_i)$: 経済主体 i の排出削減に要するコスト(Reduction Cost) [\$/year]

S : 排出許可証スポット取引価格 [\$/Ton-CO₂]

R_i : 排出削減と排出権取引に関わる経済主体 i の総利益 [\$/year]

以上の定義のもと、経済主体 i の実際の排出量は、次のようになる。

$$G_i - X_i$$

従って、この経済主体は排出上限との差となる次の排出量だけ、取引市場で売買することになる。

$$T_i - (G_i - X_i)$$

経済主体 i の総利益は次のようになる。

$$R_i = S \cdot \{T_i - (G_i - X_i)\} - C_i(X_i)$$

経済主体 i の最適排出削減量は、次の最適化問題によって決定される。

$$\max_{X_i \geq 0} R_i \quad (3-1)$$

コスト関数の数学的な性質に関して適切な仮定をおくなら、この問題は次の必要条件を示唆する。

$$\frac{dR_i}{dX_i} = S - MC_i(X_i) = 0 \quad (3-2)$$

従って、最適排出削減量は、次のようになる。

$$X_i^* = MC_i^{-1}(S) \quad (3-3)$$

これは、排出権取引制度のもとでは、排出削減量は限界削減費用が市場取引を通して経済主体間で均一化されるように決定される、ということの意味し、一般的に指摘されている排出権取引制度のメリットとして挙げられていることである。

実際のスポット価格は次のマーケットクリア条件により決定される。

$$\sum_{i=1}^N MC_i^{-1}(S) = \sum_{i=1}^N (G_i - T_i) \quad (3-4)$$

この式からわかるように、 $\{G_i\}_{i=1}^N$ と $\{T_i\}_{i=1}^N$ が確定されれば、スポット価格は一意に決定される。すな

わち、スポット価格は、 $\{G_i\}_{i=1}^N$ と $\{T_i\}_{i=1}^N$ の関数である。このことは、言い換えると、もし $\{G_i\}_{i=1}^N$ が不確定な要因をはらんでいるならば、スポット価格も不確定な変動をする可能性を示唆する。実際、

$\{G_i\}_{i=1}^N$ は、排出制限がない場合の潜在的排出量であって、各経済主体が置かれている経済環境（景気動向など）や炭素含有資源利用技術の動向などによって変化するものであろう。しかも、実際の値は、排出制限が課せられた場合は実現しえない値であり、したがって、実測不可能な値となる。このように考えてみると、 $\{G_i\}_{i=1}^N$ を確定的な変数として扱うことは現実的ではないように思われ

る。そこで、以下では、 $\{G_i\}_{i=1}^N$ が確率的な変数であるとみなせる場合を想定し、市場均衡解としてのスポット価格がどのような確率変動を起こすか考察してみる。

3. 2 不確定性

潜在的排出量 $\tilde{G}_i$ が次のような確率的な変数とみなされる場合を考える。

$$\text{期待値: } E[\tilde{G}_i] \equiv \bar{G}_i$$

$$\text{分散: } E[(\tilde{G}_i - \bar{G}_i)^2] \equiv \sigma_i^2$$

いま一番目のインデックスで表される経済主体 ($i = 1$) の潜在的排出量を基準にして、それ以外の経済主体 ($i \geq 2$) について平均値からの乖離が相関を持つものとする。すなわち、

$$\tilde{G}_i - \bar{G}_i = \beta_i \cdot (\tilde{G}_1 - \bar{G}_1) + \tilde{\varepsilon}_i \quad (3-5)$$

ただし、

$$E[\tilde{\varepsilon}_i] = 0 \quad \text{for all } i \geq 2$$

$$E[\tilde{\varepsilon}_i \tilde{\varepsilon}_j] = 0 \quad \text{for all } i, j \geq 2$$

$$Var[\tilde{\varepsilon}_i] \equiv \sigma_{\varepsilon_i}^2$$

このとき、式(3-4)の右辺は次のように書ける。

$$\sum_{i=1}^N (\tilde{G}_i - T_i) = \left(1 + \sum_{i=2}^N \beta_i\right) (\tilde{G}_1 - \bar{G}_1) + \sum_{i=1}^N (\bar{G}_i - T_i) + \sum_{i=2}^N \tilde{\varepsilon}_i \quad (3-6)$$

したがって、潜在的排出量と削減目標値との差の経済主体間平均値の期待値と分散は次のようになる。

潜在的排出量と削減目標値との差の経済主体間平均値の期待値：

$$E\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{G}_i - T_i)\right] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{G}_i - T_i) \quad (3-7)$$

潜在的排出量と削減目標値との差の経済主体間平均値の分散：

$$Var\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{G}_i - T_i)\right] = \frac{1}{N^2} \left(1 + \sum_{i=2}^N \beta_i\right)^2 \sigma_1^2 + \frac{1}{N^2} \sum_{i=2}^N \sigma_{\varepsilon_i}^2 \quad (3-8)$$

ここで、

$$\frac{1}{N^2} \sum_{i=2}^N \sigma_{\varepsilon_i}^2 \leq \frac{1}{N^2} \sum_{i=2}^N \sigma_{\max}^2 = \frac{N-1}{N^2} \sigma_{\max}^2$$

(ただし、 $\sigma_{\max}^2$ は $\sigma_{\varepsilon_i}^2$ の中で最大のものを指す。)

よって、経済主体の総数が多くなるにしたがって、

$$\frac{1}{N^2} \sum_{i=2}^N \sigma_{\varepsilon_i}^2 \rightarrow 0 \quad \text{as } N \rightarrow \infty$$

すなわち、

$$Var\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{G}_i - T_i)\right] \rightarrow \frac{1}{N^2} \left(1 + \sum_{i=2}^N \beta_i\right)^2 \sigma_1^2 \quad (3-9)$$

となることがわかる。

この式(3-9)は、経済主体の総数が大きくなると、潜在的排出量と削減目標値との差の経済主体間平均値は、経済主体1を基準とするシステムティックな変動のみが全体の変動に影響を与える要素として残り、互いに相関を持たないノンシステムティックな変動の影響はキャンセルアウトして消えてなくなってしまうことを意味する。

ここで、 β_i と相関係数 (ρ_{1i}) には次のような関係があることがよく知られている。

$$\beta_i = \frac{\rho_{i1}\sigma_i}{\sigma_1} \quad (3-10)$$

したがって、式(3-9)の意味するところは、
「相関がゼロ」 $\Leftrightarrow$

$$Var\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N(\tilde{G}_i - T_i)\right] \rightarrow \frac{1}{N^2}\left(1 + \sum_{i=2}^N\beta_i\right)^2\sigma_1^2 = \frac{1}{N^2}\sigma_1^2 \rightarrow 0 \quad as \quad N \rightarrow \infty \quad (3-11)$$

すなわち、潜在的排出量と削減目標値との差の経済主体間平均値の分散は経済主体の総数が大きくなるとゼロになる。言い換えると、潜在的排出量と削減目標値との差の経済主体間平均値は確率変動を含まない確定的な値となる。したがって、式(3-4)より、

$$(\text{各経済主体の限界費用逆関数の平均値}) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^N MC_i^{-1}(S) \rightarrow (\text{確定値})$$

となる。この場合、排出権均衡スポット価格は確定値となり、潜在的排出量変動の影響を受けない。これは直感的には大数の法則で生命保険会社の支出総額にリスクがほとんどないのと同じロジックである。

これに対して、
「相関がゼロでない」 $\Leftrightarrow$

$$Var\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N(\tilde{G}_i - T_i)\right] \rightarrow \frac{1}{N^2}\left(1 + \sum_{i=2}^N\beta_i\right)^2\sigma_1^2 = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N\rho_{i1}\sigma_i\right)^2 \quad (3-12)$$

(ただし、 $\rho_{11} \equiv 1$)

となり、経済主体の総数が大きくなっても、潜在的排出量と削減目標値との差の経済主体間平均値の分散は正なる値のままゼロになることはない。すなわち、

$$(\text{各経済主体の限界費用逆関数の平均値}) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^N MC_i^{-1}(S)$$

$$\rightarrow (\text{期待値: } \frac{1}{N}\sum_{i=1}^N(\bar{G}_i - T_i), \text{ 標準偏差: } \frac{1}{N}\sum_{i=1}^N\rho_{i1}\sigma_i \text{ の確率変数})$$

となる。

このことは排出権均衡スポット価格が確率変数となることを意味する。すなわち、市場内にいる全ての取引主体の潜在的排出量が互いに相関を持って変動するなら、排出権価格も同じように確率変動をすることになる。経済主体が均一であるならば、これはさらに、

(各経済主体の限界費用逆関数の平均値)

$$\rightarrow (\text{期待値: } \bar{G}_1 - \bar{T}_1, \text{ 標準偏差: } \sigma_1 \text{ の確率変数})$$

となる。

以上より、経済主体の総数が多い場合に絞って考えると、次のことが示唆される。

- 1) 各経済主体の潜在的排出量の確率的変動が互いに無相関であるなら、その影響は相互に相殺されて、均衡解として市場で決定される排出許可証現物価格は確定的な値となる。
- 2) 各経済主体の潜在的排出量の確率的変動が互いに相関を持っているなら、均衡解として市場で決定される排出許可証現物価格は確率的な変数となる。

年間潜在的排出量は、各経済主体の経済活動や技術水準に大きく依存すると考えられるが、そうした要因の背景には、全経済主体に共通するマクロ経済的環境や社会全体の技術進歩レベルといったよりファンダメンタルな要因が存在すると考えられる。すなわち、景気動向や技術動向といった要因が根本にあって、その影響で各経済主体の潜在的排出量は互いに相関を持った変動をする可能性がある。前節より、このように各経済主体の潜在的排出量間になんらかの相関が認められる時、排出権取引の市場均衡現物価格は毎年確率的な変数となることが示された。こうして、排出許可証現物価格は景気動向や技術動向によって、年々変動することが予想される。

4. 先物／先渡価格

本節では、前節でその可能性を明らかにした確率的排出権現物価格と排出権取引市場での先物／先渡取引市場の存在を前提として、先物価格形成の原理について考察する。排出権(取引許可証)の現物と先物との最適ヘッジ戦略を組む経済主体の行動と先物市場均衡の条件から、排出権先物は最適排出削減量によって決まる排出削減限界費用にいくつかの項が付加された形になることが示される。

4. 1 先物／先渡価格形成の理論的枠組み

経済主体の行動：

排出取引許可証現物価格の確率的変動をヘッジするためその先物を利用する経済主体を想定する。この経済主体は先物の導入により次のような期末利益を得ることになる。

$$\tilde{R}_i^F = \tilde{S} \cdot \{T_i - (\tilde{G}_i - \tilde{X}_i^*)\} - C_i(\tilde{X}_i^*) + h_i \cdot (\tilde{S} - F) \quad (4-1)$$

ここで、 F は排出取引許可証先物価格 [\$/Ton-CO₂]、 h_i は先物購入枚数 [Ton-CO₂/year]を表す。また、式(3-3)から、

$$\tilde{X}_i^* = MC_i^{-1}(\tilde{S}) \quad (4-2)$$

である。

前セクションで論じたように、 $\{\tilde{G}_i\}_{i=1}^N$ を根本的な確率変数として、スポット価格 $\tilde{S}$ の変動が引き起こ

され、式(4-2)を通じて、 $\{\tilde{X}_i^*\}_{i=1}^N$ の変動が引き起こされる。したがって、これらはすべて同一の確率

構造を持った確率変数となり、結果として、期末利益 $\tilde{R}_i^F$ も同一の確率構造のもとでの確率変数となる。ただし、先物購入枚数 h_i を適正に選ぶことにより、リスクをコントロールすることができる。すなわち、経済主体 i の最適先物ポジション戦略は次のような期待効用最大化問題として定式化できる。

$$\max_{h_i} E[U_i(\tilde{R}_i^F)] \quad (4-3)$$

ただし、 $U_i(\cdot)$ は経済主体 i のリスク選好を表す効用関数である。

先物市場の均衡：

適切な数学的仮定のもとで式(4-3)は h_i に関して一意に解ける。その解は、 $\{\tilde{G}_i\}_{i=1}^N$ の確率変数

としての性質(平均や分散、さらにはより高次のモーメントなど)および排出権先物価格の関数となる。 $\{\tilde{G}_i\}_{i=1}^N$ の確率的性質を所与とするならば、 h_i は F の関数とみなすことができる。すなわち、次の形で書き表すことができる。

$$h_i^* \equiv \text{Arg max}_{h_i} E[U_i(\tilde{R}_i^F)] = f_i(F) \quad (4-4)$$

したがって、排出権先物の市場均衡価格は次のマーケットクリア条件により一意に決定される。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N h_i^* &= 0 \\ \Leftrightarrow \\ \sum_{i=1}^N f_i(F) &= 0 \end{aligned} \quad (4-5)$$

4. 2 排出権先物市場均衡価格

式(4-5)は数学的表現として極めて単純な形をしているが、式(4-1)～(4-4)から推測されるように実際の解析的取り扱いは大変複雑なものとなる。そこで以下では、確率変数の性質や効用関数の形、および各経済主体間の相関について極めて単純化された仮定において、式(4-5)の示唆する排出権先物市場均衡価格の理論的な性質について分析する。

まず、各経済主体間の多様性に起因する問題の複雑さを除外するため、先物市場参加者となる経済主体はすべて同一の排出構造、排出削減コスト構造、リスク選好を持っているものとする。また、規制当局が各経済主体に割り当てる排出上限も同一であるとする。これらの仮定により、式(4-1)～(4-5)のインデックス i は以降考慮しなくてよいことになる。別の見方をすれば、市場が典型的な単一の経済主体によって代表されている、すなわち、Representative Agent の存在が仮定できる、と考えてもよい。

さらに、この代表的経済主体のリスク選好とそれに起因する期待効用を次のような形式で記述できると仮定する。⁵

$$E[U(\tilde{R}^F)] \equiv E[\tilde{R}^F] - \frac{\gamma}{2} \text{Var}[\tilde{R}^F] \quad (4-6)$$

ここに γ はリスク回避係数(Risk Averse Coefficient)である。

式(4-6)の意味するところは、リターンの期待値は大きいほど望ましく、リターンの変動幅は小さいほど望ましい、ということである。より具体的には、 $\gamma = 0$ のとき、リスク中立的となり、 $\gamma > 0$ が大きくなるにしたがって、リスク回避的な度合いが強くなっていく。

最後に、根本的な確率的要因である潜在的排出量に簡略化された仮定をおく。上記の「同一の

⁵ 期待効用関数がこのような形に仮定できる理論的背景や必要な前提については、一般的な経済理論書(例えば、Huang and Litzenberger, (1988).など)を参照されたい。

排出構造」の仮定ないしは Representative Agent の仮定により、潜在的排出量は相関係数1で互いに相関を持っていると考えてよい。そこで、この確率変数がある期待値の周りで一定の標準偏差を持つ正規分布として近似できると仮定する。すなわち、

$$\tilde{G} \propto N(\bar{G}, \sigma)$$

経済主体の均一性の仮定より、式(3-4)は次のようになる。

$$T - \tilde{G} + \tilde{X}^* = 0 \quad (4-7)$$

$\tilde{G}$ は仮定により正規分布をするので、 $\tilde{X}^*$ も同様な正規分布をすることになる。すなわち、

$$\tilde{X}^* \propto N(\bar{X}^*, \sigma) \quad \text{ただし、} \bar{X}^* \equiv E[\tilde{X}^*] = \bar{G} - T$$

式(4-7)より、式(4-1)は次のように簡略化される。

$$\tilde{R}^F = -C(\tilde{X}^*) + h \cdot \{MC(\tilde{X}^*) - F\} \quad (4-1)'$$

式(4-1)'よりこの期末利益の期待値と分散を算定すると、式(4-6)は次のようになる。

$$\begin{aligned} E[U(\tilde{R}^F)] \\ = -E[C(\tilde{X}^*)] + h \cdot \{E[MC(\tilde{X}^*)] - F\} \\ - \frac{\gamma}{2} Var[C(\tilde{X}^*)] - \frac{\gamma}{2} h^2 Var[MC(\tilde{X}^*)] + \gamma h Cov[C(\tilde{X}^*), MC(\tilde{X}^*)] \end{aligned} \quad (4-8)$$

したがって、式(4-3)の期待効用最大化問題から次の一階の必要条件が導かれる。

式(4-3) $\Rightarrow$

$$\begin{aligned} \frac{dE[U(\tilde{R}^F)]}{dh} &= 0 \\ \Leftrightarrow E[MC(\tilde{X}^*)] - F - \gamma h^* Var[MC(\tilde{X}^*)] + \gamma Cov[C(\tilde{X}^*), MC(\tilde{X}^*)] &= 0 \end{aligned} \quad (4-9)$$

式(4-5)のマーケットクリア条件は、経済主体均一性の仮定の下では、

$$h^* = 0$$

となるので、式(4-9)から次のような排出権先物市場均衡価格が導出される。

$$F = E[MC(\tilde{X}^*)] + \gamma Cov[C(\tilde{X}^*), MC(\tilde{X}^*)] \quad (4-10)$$

さらに Stein の補題 (Stein's Lemma)⁶を用いると、

$$Cov[C(\tilde{X}^*), MC(\tilde{X}^*)] = E[MC(\tilde{X}^*)]E[C'(\tilde{X}^*)]Var(\tilde{X}^*)$$

と変形できるので、式(4-10) は次のように変形される。

$$F = E[MC(\tilde{X}^*)] \left\{ 1 + \gamma E[C'(\tilde{X}^*)]Var(\tilde{X}^*) \right\} \quad (4-11)$$

すなわち、先物／先渡価格は、「排出削減限界費用の期待値」×(1+「排出削減費用の二次導関数の期待値」×「排出削減量の分散」×リスク回避係数)となる。排出削減限界費用は、その時点でのそのビンテージの価格(現物価格)に等しくなるので、先物／先渡価格は、「将来の現物価格の期待値」×(1+「排出削減費用の二次導関数の期待値」×「排出削減量の分散」×リスク回避係数)である、と言い換えてもよい。

式(4-10)の意味するところは、排出権先物市場均衡価格は排出削減費用とその限界費用の共分散が、リスク回避係数(γ)の大きさに応じて、排出削減限界費用の期待値に上乗せされた形になる、ということである。排出削減費用とその限界費用はどちらも最適排出削減量という確率変数の関数であるので、互いに相関を持っている。式(4-11)によると、その相関関係は、限界費用関数が増加関数であるなら、正の相関、減少関数であるなら、負の相関となる。正の相関であるのか負の相関であるのかによって、上乗せ項は正にも負にもなりえる。したがって、排出権先物市場均衡価格と排出削減限界費用の期待値の大小関係は次のようにまとめられる。

ケース1) 排出削減費用関数が限界費用逓増型: $C'' > 0$ であるなら、

$$F > E[MC(\tilde{X}^*)]$$

すなわち、(排出権先物市場均衡価格) > (排出削減限界費用の期待値)。

ケース2) 排出削減費用関数が限界費用低減型: $C'' < 0$ であるなら、

$$F < E[MC(\tilde{X}^*)]$$

すなわち、(排出権先物市場均衡価格) < (排出削減限界費用の期待値)。

また、経済主体(この場合、市場全体)のリスク回避係数(γ)が大きいほど、この排出権先物市場均衡価格と排出削減限界費用の期待値との乖離は大きくなる。

⁶ 微分可能な関数 g と正規分布をなす二つの確率変数 $\tilde{X}$ 、 $\tilde{Y}$ に対して、次の公式が成り立つことが知られている。

$$Cov[g(\tilde{X}), \tilde{Y}] = E[g'(\tilde{X})]Cov[\tilde{X}, \tilde{Y}]$$

4. 3 先物価格の要素分解

式(4-11) に現れるのは、排出削減限界費用とその導関数の期待値である。これに対して、実際の政策的あるいは経営的観点からは排出削減費用関数の計測と排出削減量の期待値が直接的な意思決定材料になると考えられる。この場合、一般に、ある確率変数によって決定される関数の期待値とその確率変数の期待値に対する関数値とは異なることに注意をしなければならない。この点を明確にする目的で、以下のように式(4-11)についてさらに分析を進める。

排出削減限界費用を最適排出削減量の期待値の周りに Taylor 展開し、期待値を取ると、

$$E[MC(\tilde{X}^*)] = MC(\bar{X}^*) + \frac{1}{2}C^{(3)}(\bar{X}^*) \cdot \sigma^2 + \frac{1}{8}C^{(5)}(\bar{X}^*) \cdot \sigma^4 + \dots$$

ここで、 $\sigma^2 \equiv Var(\tilde{X}^*)$ である。

排出削減費用2次導関数についても同様にして式展開していく。最終的に、 $\tilde{G}$ が正規分布すると仮定のもとで、先物価格を表す式(3-11)は6次以降の高次項を無視して次のように変形できる。

$$\begin{aligned} F &\cong MC(\bar{X}^*) \\ &+ \left\{ \frac{1}{2}C^{(3)}(\bar{X}^*) + MC(\bar{X}^*)C''(\bar{X}^*) \right\} \cdot \sigma^2 \\ &+ \left[\frac{1}{8}C^{(5)}(\bar{X}^*) + \frac{\gamma}{2} \left\{ C''(\bar{X}^*)C^{(3)}(\bar{X}^*) + MC(\bar{X}^*)C^{(4)}(\bar{X}^*) \right\} \right] \cdot \sigma^4 \end{aligned} \quad (4-12)$$

ここに、 $\bar{X}^* = \bar{G} - T$ である。

式(4-12)の意味するところは、本質的に式(4-11)と同様であって、先物価格は、「排出削減限界費用の期待値」に「排出削減量の分散」とリスク回避係数に比例したズレ分を加えたものとなる。ただ、それぞれの要素はさらに、細かい要素に分解されることが、式(4-12)からわかる。

排出削減限界費用は概して非線形な形をしているので、その期待値は、「最適排出削減量の期待値に対する限界費用」とは異なる。その乖離部分が式(4-12)第2項括弧内前半および第3項括弧内前半として表される。排出削減費用関数の第3次導関数 $C^{(3)}(\bar{X}^*)$ または第5次導関数 $C^{(5)}(\bar{X}^*)$ がゼロでない限り、潜在的排出量の分散(標準偏差: σ)が大きくなるにしたがって、「排出削減限界費用の期待値」は「最適排出削減量の期待値に対する排出削減限界費用」からずれてくることになる。そのずれは、第3次導関数または第5次導関数の符号が正なら、正、負なら、負である。

同様に、リスク回避係数に関する項を最適排出削減量の期待値を中心にして展開したものが、式(4-12)第2項括弧内後半と第3項括弧内後半である。ここにも、排出削減費用関数の非線形性に由来する乖離が見られることになる。式(4-12)第2項括弧内後半は、排出削減費用関数の第1次

導関数と第2次導関数の積、式(4-12)第3項括弧内後半は同様に「第2次導関数と第3次導関数の積」そして「第1次導関数と第4次導関数の積」を含んでいる。4. 2節で挙げた、ケース2(排出削減費用関数が限界費用低減型)であるならば、式(4-12)第2項括弧内後半は負となる。その場合でも、第3次、第4次導関数については情報がないので、式(4-12)第3項括弧内後半は正とも負とも言えない。導関数が高次になるにしたがって符号を変えるなら、これらの項は全て負となる。しかし、式(4-12)第3項には、潜在的排出量の分散(σ)の4乗がついているので、分散が大きくなるにしたがって、この項の影響は顕著になってくる。

4. 4 数値例

以下に数値例を挙げる。

ケース 1： 指数関数型排出削減費用関数

排出削減費用関数が次のように指数関数の形をしているケースを考える。

$$C(X) = K \cdot (e^{aX} - 1)$$

このとき、 n : 整数に対して、

$$C^{(n)}(X) = Ka^2 e^{aX} = a^{n-1} MC(X)$$

よって、式(4-12) は次のようになる。

$$F = MC(\bar{G} - T) \cdot \left(1 + \frac{1}{2} a^2 \sigma^2 + \frac{1}{8} a^4 \sigma^4 \right) + \gamma (MC(\bar{G} - T))^2 a \sigma^2 \cdot (1 + a^2 \sigma^2)$$

図 4-1、図 4-2 に、リスク回避係数 $\gamma=0.1$ の例、 $\gamma=1$ の例をそれぞれ示す。ただし、 $MC=1$ 、 $a=1$ として規格化してあるので、絶対的な数値自体はあまり意味がない。ここで、 MC は最適排出削減量の期待値に対する排出削減限界費用、 $E[MC]$ は排出削減限界費用の期待値、 F は先物価格である。横軸の標準偏差で表される潜在的排出量の不確定性が大きくなるにしたがって、先物価格が排出削減限界費用から乖離していく様子が見て取れる。

ケース 2： 二次関数型排出削減費用関数

同様に排出削減費用関数が次のように二次関数の形をしているケースを考える。

$$C(X) = KX^2$$

このとき、

$$MC(X) = 2KX$$

$$C''(X) = 2K$$

$$C^{(n)}(X) = 0 \quad \text{for } n \geq 3$$

よって、式(4-12)は次のようになる。

$$F = MC(\bar{G} - T) \cdot (1 + 2\gamma K \sigma^2)$$

図 4-3、図 4-4 に、リスク回避係数 $\gamma=0.1$ の例、 $\gamma=1$ の例をそれぞれ示す。前術同様、 $MC=1$ 、

$K=1$ として規格化してあるので、絶対的な数値自体はあまり意味がない。横軸の標準偏差で表される潜在的排出量の不確定性が大きくなるにしたがって、先物価格が排出削減限界費用から乖離していく。

ケース 3： 対数関数型排出削減費用関数

最後に排出削減費用関数が次のように対数関数の形をしているケースを考える。これは、排出削減限界費用低減のケースである。

$$C(X) = K \cdot \ln(X + 1)$$

このとき、

$$MC(X) = \frac{K}{X + 1}$$

$$C^{(n)}(X) = (n-1)! \cdot \left(\frac{-1}{K}\right)^{n-1} (MC(X))^n \quad \text{for } n \geq 1$$

よって、式(4-12)は次のようになる。

$$F = MC(\bar{X}^*) + (MC(\bar{X}^*))^3 \sigma^2 \frac{1}{K^2} (1 - \gamma K) + (MC(\bar{X}^*))^5 \sigma^4 \frac{1}{K^4} (3 - 4\gamma K)$$

図 4-5、図 4-6 に、リスク回避係数 $\gamma=0.1$ の例、 $\gamma=1$ の例をそれぞれ示す。 $MC=1$ 、 $K=1$ として規格化してある。前述同様、横軸の標準偏差で表される潜在的排出量の不確定性が大きくなるにしたがって、先物価格が排出削減限界費用から乖離していくが、一つだけ大きな相違がある。それは、

$$\text{図 4-5 では、} \quad MC < F < E[MC]$$

$$\text{図 4-6 では、} \quad F < MC < E[MC]$$

となり、どちらも、排出削減限界費用の期待値よりも先物価格が低くなっていることである。これは排出削減限界費用低減の帰結である。

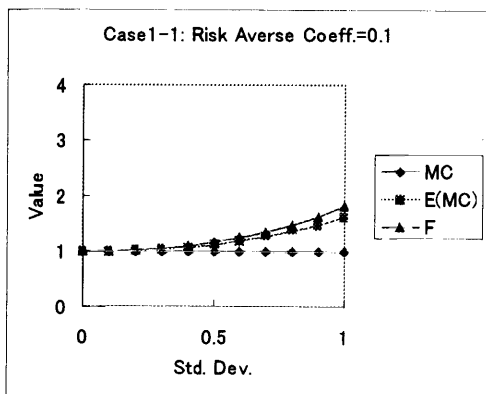


図 4-1 指数関数型(リスク回避係数=0.1)

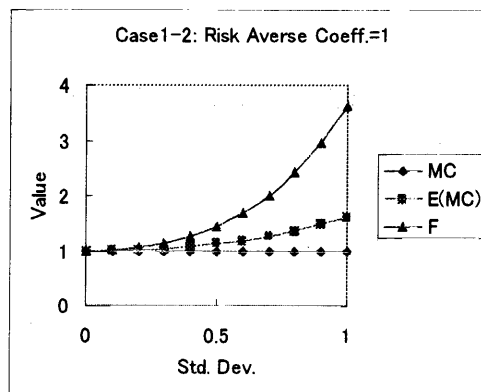


図 4-2 指数関数型(リスク回避係数=1)

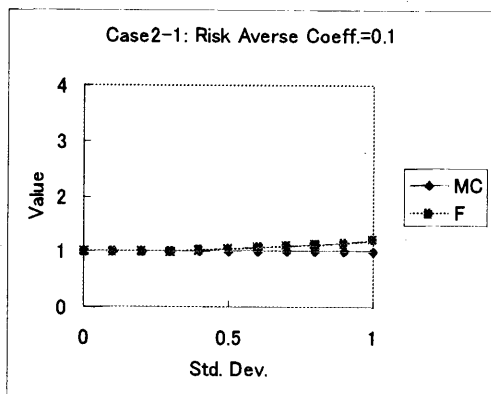


図 4-3 二次関数型(リスク回避係数=0.1)

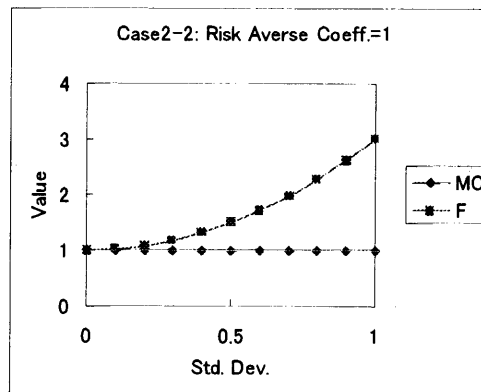


図 4-4 二次関数型(リスク回避係数=1)

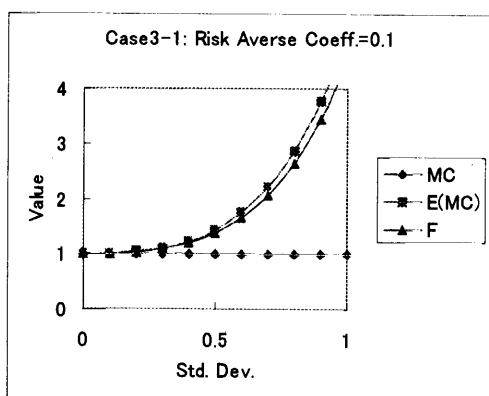


図 4-5 対数関数型(リスク回避係数=0.1)

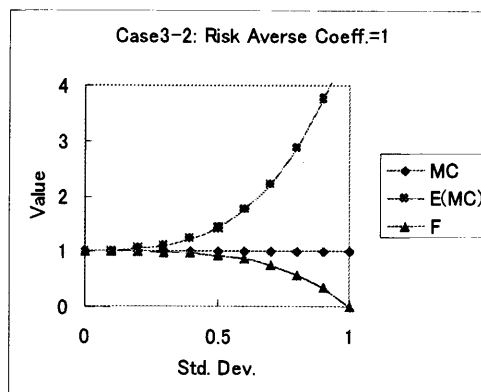


図 4-6 対数関数型(リスク回避係数=1)

5. バンキング

本節では、バンキングが可能な制度を想定し、将来の潜在的排出量およびその不確実性、経済主体のリスク回避度、などが現物市場価格に及ぼす影響について分析する。バンキングが許されない場合と許される場合の決定的な違いは、ビンテージの異なる排出許可証の価格が互いにリンクするかどうかである。バンキングが許される場合、潜在的排出量に関する将来見通しなどの先物市場を決定付ける要因が、無裁定条件を通じて現物市場に間接的に影響を及ぼすことが示される。

5. 1 アービトラージ

現時点を時点0、将来時点を時点1とする一期間二時点モデルを考える。

現時点での現ビンテージの取引が現物取引（スポット取引）、現時点での時点1ービンテージの取引が先渡契約または先物取引である。また、将来において、時点1になったとき、時点1ービンテージの取引が、その時点での現物取引として行われることになる。これらの取引の時点0からみた価格をそれぞれ、

$$S(0), F, \tilde{S}(1)$$

とする。ここに、

homogenous な経済主体を想定すると、前述のように、時点1の予想現物価格と先渡価格の間には、次のような関係がある。

$$F = E[\tilde{S}(1)] + \gamma E[C'(\tilde{X}(1))\sigma^2] \quad (5-1)$$

括弧は時点1の変数であることを表す。homogenous な経済主体を想定しているので、各経済主体を区別する添字 i は省略している。以下、同様である。

ここでバンキングが可能である場合の経済主体の利益を考える。

バンキングが可能である場合、時点0から時点1へのバンキング量を

$$B(0)$$

とする。この場合、時点0において、潜在的な排出量から削減分を差し引いたもの $(G(0) - X(0))$ が実際の排出量となる。また、与えられた排出枠からバンキング量を差し引いたもの $(T(0) - B(0))$ が、時点0でのターゲットとなる。そのため、買い付ける必要がある（あるいは、売りに出す）排出量は、

$$(G(0) - X(0)) - (T(0) - B(0))$$

となる。経済主体は、これを現物取引価格で取引し、次の利益を得る。

$$-S(0)\{(G(0) - X(0)) - (T(0) - B(0))\}$$

このバンキングに伴い、時点1では、排出枠が増えることになる。現在一般的になされている政策的議論では、バンキングによる時点0をまたがる排出許可分（許可証）とともとのビンテージの排出許可分（許可証）との交換比率を1対1にはしない、という考え方がある。バンキングによる時点間移転分の一部を政策当局が政策的に接收して、オークションにかかる形で市場に還元し、流動性の向上を図るというものである。この接收分を移転減耗率と名づけ、これを

$$\alpha \quad (0 \leq \alpha \leq 1)$$

とする。このとき、バンキングにより増加した新たな排出枠は、

$$T(1) + (1 - \alpha)B(0)$$

となる。従って、時点1での購入量（あるいは、売り出し可能量）の予測値（期待値）は、次のようになる。

$$(\bar{G}(1) - \bar{X}(1)) - \{T(1) + (1 - \alpha)B(0)\}$$

この量を、時点0での先物／先渡取引により売買すると、時点0でのトータルな利益は次のようになる。

$$\begin{aligned} \Pi &= -S(0)\{(G(0) - X(0)) - (T(0) - B(0))\} - \frac{1}{1+r}F\{(\bar{G}(1) - \bar{X}(1)) - \{T(1) + (1 - \alpha)B(0)\}\} \\ &= \left\{\left(\frac{1-\alpha}{1+r}\right)F - S(0)\right\}B(0) - \left[S(0)\{(G(0) - T(0)) - X(0)\} + \frac{F}{1+r}\{(\bar{G}(1) - T(1)) - \bar{X}(1)\}\right] \end{aligned}$$

ここに、 r は時点0、1間の利子率である。

ここで、次の二つのケースを考える。

$$\text{ケース1) } \left(\frac{1-\alpha}{1+r}\right)F > S(0) \text{ の場合}$$

このとき、バンキング量（ $B(0)$ ）を大きくすればするほど、利益がリスクフリーで無限に大きくなる。このようなアービトラージの可能性を排除するためには、

$$\left(\frac{1-\alpha}{1+r}\right)F \leq S(0)$$

でなければならない。

一方、

$$\text{ケース2) } \left(\frac{1-\alpha}{1+r}\right)F < S(0) \text{ の場合}$$

このとき、バンキング量を小さくすればするほど、利益は大きくなる。ただし、政策的に、ボローイング（Borrowing: 前借り）が認められていない場合は、 $B(0)$ は最小でゼロまでしか出来ない。

以上二つのケースの考察より、次のことが言える。

ボローイング（Borrowing: 前借り）が認められていない限り、次のどちらかしかありえない。

$$S(0) = \frac{1-\alpha}{1+r}F \quad \text{with } B(0) > 0$$

or

$$S(0) > \frac{1-\alpha}{1+r}F \quad \text{with } B(0) = 0 \quad (5-2)$$

もしボローイング (Borrowing: 前借り) が認められているなら、条件なしで、一番目の等式が成立していなくてはならない。以下、これを無裁定条件式と呼ぶことにする。

5. 2 バンキングの現物市場への影響

バンキングの可能性は、現物市場と先物市場を結び付け、上で議論したように、それぞれの市場での価格の間に一定の等式(または不等式)を成立させる。このため、先物市場価格に影響を与えるような変化(例えば、時点0から見た時点1の不確定性の増大)がバンキングを通して現物市場価格へ影響を及ぼすことになる。以下では、この現物市場価格への影響を解析的に分析する。

まず、解析的な扱いやすさのため、引き続き、均一な (homogenous) 経済主体を想定する。さらに、排出削減コスト関数について、線形の限界コスト関数を想定する。すなわち、

時点0での限界削減コスト関数: $MC(X(0), 0) \equiv c(0)X(0)$

時点1での限界削減コスト関数: $MC(X(1), 1) \equiv c(1)X(1)$

とする。ここに、均一な (homogenous) 経済主体の仮定より、

時点0での排出削減量: $X(0) = (G(0) - T(0)) + B(0)$

時点1での排出削減量: $X(1) = (G(1) - T(1)) - (1 - \alpha)B(0) - \alpha B(0) = (G(1) - T(1)) - B(0)$

である。

時点1での排出削減量については、バンキング時に接收された分 ($\alpha B(0)$) が政策当局により市場に還流されるため、その分トータルな必要削減量が減少することを考慮している。

以上の設定のもとで、バンキングが発生している場合 ($B(0) > 0$)、先物／先渡価格式(5-1)と無裁定条件式(5-2)から次の式が成立しなくてはならない。

$$c(0)(G(0) - T(0)) + c(0)B(0) = \frac{1-\alpha}{1+r} \left\{ c(1)(\bar{G}(1) - T(1)) - c(1)B(0) \right\} (1 + \gamma c(1)\sigma^2) \quad (5-3)$$

これより、バンキング量が次のように算定される。

$$B(0) = \frac{(\bar{G}(1) - T(1))\sigma^2 + \frac{1}{\gamma c(1)}(\bar{G}(1) - T(1)) - \frac{1}{\gamma c(1)}\left(\frac{1+r}{1-\alpha}\right)\left(\frac{c(0)}{c(1)}\right)(G(0) - T(0))}{\sigma^2 + \frac{1}{\gamma c(1)} + \frac{1}{\gamma c(1)}\left(\frac{1+r}{1-\alpha}\right)\left(\frac{c(0)}{c(1)}\right)} \quad (5-4)$$

従って、時点0での排出削減量は、

$$X(0) = \{(\bar{G}(1) - T(1)) + (G(0) - T(0))\} \cdot \frac{\sigma^2 + \frac{1}{rc(1)}}{\sigma^2 + \frac{1}{rc(1)} + \frac{1}{rc(1)} \left(\frac{1+r}{1-\alpha} \right) \left(\frac{c(0)}{c(1)} \right)} \quad (5-5)$$

さらに、時点0での現物取引価格（スポット価格）は次のようになる。

$$S(0) = c(0) \{(\bar{G}(1) - T(1)) + (G(0) - T(0))\} \cdot \frac{\sigma^2 + \frac{1}{rc(1)}}{\sigma^2 + \frac{1}{rc(1)} + \frac{1}{rc(1)} \left(\frac{1+r}{1-\alpha} \right) \left(\frac{c(0)}{c(1)} \right)} \quad (5-6)$$

あるいは、

$$S(0) = c(0) \{(\bar{G}(1) - T(1)) + (G(0) - T(0))\} \cdot \left[1 - \frac{\frac{1}{rc(1)} \left(\frac{1+r}{1-\alpha} \right) \left(\frac{c(0)}{c(1)} \right)}{\sigma^2 + \frac{1}{rc(1)} \left\{ 1 + \left(\frac{1+r}{1-\alpha} \right) \left(\frac{c(0)}{c(1)} \right) \right\}} \right] \quad (5-6)'$$

となる。

ボローイング（前借り）が許されていない場合、バンキング量は必ず非負でなくてはならないので、(5-4)式より次の条件が成立しなくてはならない。

$$B(0) \geq 0$$

$\Leftrightarrow$

$$(\bar{G}(1) - T(1))\sigma^2 + \frac{1}{rc(1)}(\bar{G}(1) - T(1)) \geq \frac{1}{rc(1)} \left(\frac{1+r}{1-\alpha} \right) \left(\frac{c(0)}{c(1)} \right) (G(0) - T(0))$$

$\Leftrightarrow$

$$\sigma^2 \geq \frac{1}{rc(1)} \left\{ \left(\frac{1+r}{1-\alpha} \right) \left(\frac{c(0)}{c(1)} \right) \left(\frac{G(0) - T(0)}{\bar{G}(1) - T(1)} \right) - 1 \right\}$$

これより、一般に、

$$\sigma^2 > \text{Max} \left\{ 0, \frac{1}{rc(1)} \left\{ \left(\frac{1+r}{1-\alpha} \right) \left(\frac{c(0)}{c(1)} \right) \left(\frac{G(0) - T(0)}{\bar{G}(1) - T(1)} \right) - 1 \right\} \right\} \quad (5-7)$$

の範囲において、 $B(0) > 0$ であり、

(5-6)式（ないしは(5-6)'式）が成立するといえる。

一方、

$$0 \leq \sigma^2 \leq \text{Max} \left\{ 0, \frac{1}{\gamma c(1)} \left\{ \left(\frac{1+r}{1-\alpha} \right) \left(\frac{c(0)}{c(1)} \right) \left(\frac{G(0)-T(0)}{\bar{G}(1)-T(1)} \right) - 1 \right\} \right\} \quad (5-8)$$

の範囲において、 $B(0)=0$ であり、

$$\sigma^2 = \frac{1}{\gamma c(1)} \left\{ \left(\frac{1+r}{1-\alpha} \right) \left(\frac{c(0)}{c(1)} \right) \left(\frac{G(0)-T(0)}{\bar{G}(1)-T(1)} \right) - 1 \right\}$$

を(5-6)式に代入することにより、

$$S(0) = c(0)(G(0)-T(0)) \quad (5-9)$$

であることがわかる。

これらの結果を図示すると、図 5-1、図 5-2 のようになる。これは、双曲線の一部であり、単調非減少関数である。

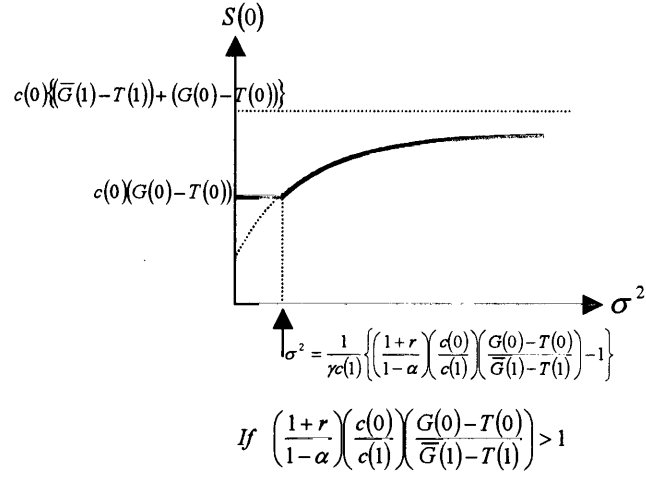


図 5-1 時点1の不確実性と時点0の現物価格の関係(1)

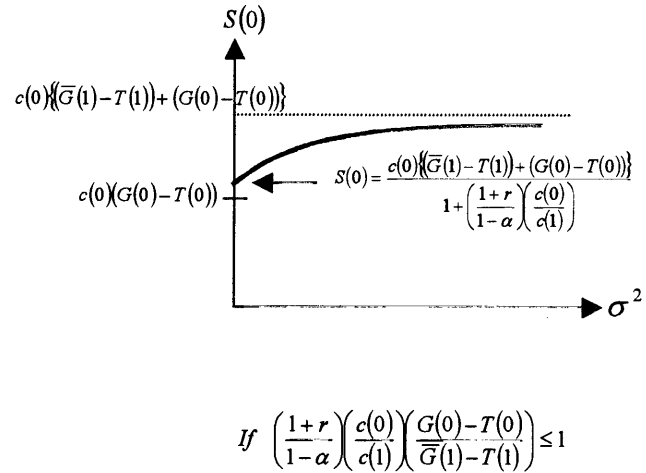


図 5-2 時点1の不確実性と時点0の現物価格の関係(2)

不確定性の影響：

式(5-6)ないしは(5-6)'、および図 5-1、図 5-2 からわかるように、時点1の不確定性の上昇は、時点0の現物市場の価格(スポット価格)の上昇を招く。その上昇は単調非減少の傾向で、下限はバンキングが許されない場合の現物市場価格($c(0)(G(0) - T(0))$)、上限は二つの市場が統合された場合に起こりえる価格($c(0)\{G(0) + \bar{G}(1) - (T(0) + T(1))\}$)となっている。

このような、時点1についての不確定性の上昇に伴う現物市場の価格上昇は、次のようにして解釈することができる。

まず、時点1の潜在排出量の不確定性が上昇すると、先物／先渡取引価格の価格決定式に従って、先物／先渡価格が上昇する。その結果、無裁定条件より現物市場価格が上昇する。同時に、現物市場からバンキングを通して排出枠が時点1に移り、時点1での排出枠供給量過剰が引き起こされ、時点1での現物価格の下落が予想されるようになる。このため、時点0での先物／先渡価格も下落する力が働き、上昇の歯止めとなる。その結果の均衡解が(5-6)式となる。

リスク回避度の影響：

リスク回避度の上昇による影響は、上述の不確定性上昇と基本的に同じである。若干異なるのは、リスク回避度上昇が、直接的には将来への備えを誘発し、これによりバンキングが大量に起こることとなる。時点0での排出枠の減少により現物価格が上昇すると同時に、時点1での排出枠の増加により予想される時点1での現物価格、時点0での先物／先渡価格の下落が引き起こされ、価格上昇の歯止めとなる。この時点0の現物価格とリスク回避度の関係は、(5-6)式を変形すれば直ちにわかるように、図 5-1、5-2 と同じような双曲線の一部で、単調非減少の形をしている。

潜在排出量と排出枠の影響：

潜在排出量(ないしはその期待値)の上昇は各時点での排出枠供給不足につながり、現物価格および先物／先渡価格の上昇へとつながる。同じことが、規制当局によって定められた排出枠の増加にも言え、その増加は先物／先渡価格の下落へとつながる。(5-6)式(ないしは(5-6)'式)によれば、その影響は線形である。

技術進歩の影響：

技術の進歩は、本モデルでは、限界削減コスト関数の係数比 $\left(\frac{c(0)}{c(1)}\right)$ の上昇として解釈することができる。これは将来のコスト減少であるから、バンキング意欲を減退させ、価格下落にもつながる。これも(5-6)式から明らかである。但し、バンキングの下限に張り付く場合($B(0) = 0$)二つの市場は切り離され、それ以上は価格の下落はありえない。

移転減耗率の影響：

最後に、(5-6)式において α ($0 \leq \alpha \leq 1$) が上昇すると、価格は下落することになる。これは、

規制当局に没収される分が増えてくることによって、バンキングの意欲が減退していくからと考えられる。 α が1に近づくと実質的にバンキングするメリットがなくなり、時点0市場と時点1市場は切り離されることになる。これは σ^2 がつねに(5-8)式の範囲に落ちることを意味し、つねに(5-9)式が成立していることになる。

6. おわりに

本研究では、国内 GHG 排出権取引制度について、排出権取引現物価格と先物価格の価格形成メカニズム、さらに、バンキングが可能な場合の現物市場と先物市場の相互作用をミクロ経済学的に分析した。

第3節にて明らかになった排出権現物価格（あるいは排出取引許可証価格）変動のメカニズムは以下のようにまとめられる。

- 1) 各経済主体の潜在的排出量の確率的変動が互いに無相関であるなら、その影響は相互に相殺されて、均衡解として市場で決定される排出権現物価格は確定的な値となる。
- 2) 各経済主体の潜在的排出量の確率的変動が互いに相関を持っているなら、均衡解として市場で決定される排出権現物価格は確率的な変数となる。

GHG 排出はエネルギー消費を中心としてあらゆる経済活動に深く関係している。したがって、各経済主体からの排出量は国内全ての経済主体を取り囲むマクロ経済環境、景気動向、技術動向などによって互いに強い相関を持って変化する可能性が高い。この場合、上記2)が当てはまり、排出権現物価格の確率的な変動が引き起こされる。

第4節では確率的排出権現物価格と排出権先物取引市場の存在を前提として、先物市場均衡価格について考察した。よく知られているように、不確定な要因が全くない場合、排出権価格は排出削減限界費用に等しくなる。これは先物についても基本的に同様であるはずである。ところが各経済主体の潜在的排出量が相関を持って確率的変動をするときは必ずしもその限りではない。第4節では、先物価格は、「排出削減限界費用（＝その将来時点での現物価格）の期待値」×（1＋「排出削減費用の二次導関数の期待値」×「排出削減量の分散」×リスク回避係数）となることが示された。各要素はさらに、それぞれ二つの要素に分解され、最終的に先物／先渡価格は「最適排出削減量の期待値に対する排出削減限界費用」に排出削減費用関数の非線形性に由来する項とリスク回避特性に由来する項が付加される形となる。その付加される項は、排出削減費用が限界費用通増型であるか低減型であるかによって、正にも負にもなりえる。

第5節ではバンキングが可能な制度を想定し、将来の潜在的排出量およびそれの不確定性、経済主体のリスク回避度、などが現物市場価格に及ぼす影響について分析した。バンキングが許されない場合と許される場合の決定的な違いは、ビンテージの異なる排出許可証の価格が互いにリンクするかしないかである。バンキングが許される場合、普通の商品や証券の取引のように、現物と先物の間にスプレッドがあれば、そこにアービトラージを取る可能性が生じる。そのため、無裁定条件から、現物と先物の価格間には一対一の関係が成立しなくてはならない。これと第4節での結果から、潜在的排出量に関する将来見通しなどの先物市場を決定付ける要因が、現物市場に間接的に影響を及ぼすことがわかる。すなわち、将来の潜在的排出量の不確定性が増大すると排出枠の現在から将来への移転が起こり、現物市場の需給が逼迫することになる。その結果、現物市場の価格が上昇することになる。この潜在的排出量に関する不確定性の増大と現物価格の上昇は単

調非減少関数の関係にある。現物価格の下限は、バンキングがない場合（許されない場合、および、許されていても経済的にバンキングが起こらない場合、の両方）の現物価格となり、上限は、ビンテージという概念が取り払われた場合の現物価格となる。

年度ごとの排出量を削減するというのが、排出権市場導入のそもそもの動機であるから、バンキングを許すというのは、本来あまり整合性のある政策的措置であるとはいいがたい。それでも、条件の厳しい制度のもとで排出権価格が高騰し、健全な経済活動に支障をきたすよりは、柔軟な措置を取るべきである、との発想から、バンキング許可が検討されてきた。ところが、本研究結果は、バンキング導入は現物価格の高騰に寄与することはあっても、低下に寄与することはないことを示唆する。もちろん、バンキングによって、将来の価格高騰が緩和されるという可能性も大いにある。したがって、バンキング導入の是非は、総合的な観点から判断されるべきである。いずれにせよ、本研究はこの問題に対して極めて重要な政策的インプリケーションを提示している。

参考文献

- 1) Baron, R. and R. Cremades in Collaboration with the UNPEDE-EURELECTRIC Working Group on Climate Change ; Greenhouse Gass and Electricity Trading Simulation, October 1999.
- 2) Cason, T.N. and C.R. Plott ; EPA's New Emissions Trading Mechanism ; Alaboratory Evaluation, Journal of Environmental Economics and Management 30, 1996, pp. 133-160.
- 3) Coggins, J.S. and J.R. Swinton ; The Price of Pollution ; A Dual Approach to Valuing SO₂ Allowances, Journal of Environmental Economics and Management 30, 1996, pp. 58-72.
- 4) Emissions Trading Group ; Outline Proposals for a UK Emissions Trading Scheme, November 1999.
- 5) Huang, C. and R.H. Litzenberger ; Foundations for Financial Economics, Prentice Hall, 1988.
- 6) Intergovernmental Panel on Climate Change ; Policies, Measures and Instruments, as Chapter 6 in Mitigation of Climate Change - Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, First Order Draft, November 1999.
- 7) Joskow, P.L., R. Schmalensee, and E.M. Bailey ; "The Market for Sulfur Dioxide Emissions," The American Economic Review, Vol.88, No.4, September 1998, pp. 669-685.
- 8) Schmalensee, R., P.L. Joskow, A.D. Ellerman, J.P. Montero, and E.M. Bailey ; An Interim Evaluation of Sulfur Dioxide Emissions Trading, Journal of Economic Perspectives 12(3), 1998, pp. 53-68.
- 9) Stavins, R.N. ; Correlated uncertainty and policy instrument choice, Journal of Environmental Economics and Management 30, 1996, pp.218-232.
- 10) Stavins, R.N. ; What Can We Learn from the Grand Policy Experiment? Lessons from SO₂ Allowance Trading, Journal of Economic Perspectives 12(3), 1998, pp. 69-88.
- 11) Watson, W.D., and R.G. Ridker ; Losses from effluent taxes and quotas under uncertainty, Journal of Environmental Economics and Management 11, 1984, pp.310-316.
- 12) Whalley, J. and R. Wigle ; Cutting CO₂ Emissions: The Effects of Alternative Policy Approaches, Energy Journal 12(1), 1991, pp.109-124.
- 13) 松尾直樹 : 導入見込み国の国内排出権取引制度設計議論の概要 - version 5.1、(財)地球環境戦略研究機関(IGES)、2000年1月
- 14) 西條辰義 : 排出権取引:理論と実践、大蔵省財政金融研究所フィナンシャルレビュー、2000年4月、pp. 28-57