

2010 年度 修士論文

マルチエージェント・シミュレーションを用いた
東京都排出量取引制度の研究

東京大学大学院 新領域創成科学研究科

環境システム学専攻

47-096682 原田 考太

指導教員 松橋 隆治 教授

2011 年 1 月 28 日

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 地球温暖化防止に向けた取り組み	
1.1.3 排出権取引制度の概要	
1.1.4 東京都排出量取引制度の概要	
1.2 既存研究	6
1.3 研究の目的	7
1.4 研究の構成	8
第2章 東京都排出量取引制度モデルの構築	9
2.1 マルチエージェント・システムと人工市場	9
2.2 東京都排出量取引制度モデルの概要	10
2.2.1 想定する排出量取引の種類	
2.2.2 シミュレーションモデルの基本構成（売買モデル）	
2.2.3 取引の流れ	
2.3 取引市場のモデル化	13
2.3.1 取引方法	
2.3.2 取引価格決定モデル	
2.4 目標保有参加者のモデル化	17
2.4.1 大規模事業所のモデル化	
2.4.1 (a) 目標保有エージェントの作成	
2.4.1 (b) 義務削減量の設定	
2.4.1 (c) 限界削減費用曲線の設定	
2.4.1 (d) 各エージェントの属性設定	
2.4.2 大規模事業所の戦略	
2.5 取引参加者のモデル化	27
2.6 価格予想モデルの構築	28
2.6.1 EU - ETS の排出権価格変動を考慮した価格予想モデル	
2.6.2 従来の価格予想モデル	
2.7 情報誤差係数の設定	35
2.8 学習機能の設定	37

2.9 市場分析に用いる指標	37
2.9.1 価格指数	
2.9.2 取引価格の安定性	
2.9.3 注文約定率	
2.9.4 取引継続率	
第3章 モデルを用いた市場分析	41
<hr/>	
3.1 情報誤差の分析	42
3.1.1 背景	
3.1.2 目的	
3.1.3 分析結果	
3.2 クレジット供給量に関する分析	45
3.2.1 背景	
3.2.2 目的	
3.2.3 分析結果	
3.3 学習効果の分析	48
3.3.1 背景	
3.3.2 分析結果	
第4章 結論	53
<hr/>	
4.1 まとめ	53
4.2 今後の課題	54

参考文献

付録

謝辞

第1章 序論

本章では、本研究の背景と既往研究、研究の目的と構成について説明する。

1.1 研究の背景

1.1.1 地球温暖化防止に向けた取り組み

近年、地球温暖化問題に対する国際的な関心が高まり、国際会議や政治活動の公約の中では温暖化への取り組み方が大きな注目を集めるようになった。

地球温暖化とは、人間活動などによって大気中の二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスの濃度が急激に増加し、それに伴い地球の平均気温が長期的に上昇している事である。

この地球温暖化問題に対する対策は 1980 年代後半より必要性が認識されはじめ、1992 年 6 月に開かれた国連環境開発会議の中で国際連合気候変動枠組条約が採択された。この条約により、気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼさない水準において大気中の温室効果ガスの濃度の安定化を目指すことが国際的に約束され、さらに 1997 年 12 月の「地球変動枠組条約第 3 回締約国会議 (COP3)」では、先進国から排出される温室効果ガスの排出削減目標や達成方法などを定めた京都議定書が法的な義務として規定されることとなった。この京都議定書により定められた排出削減目標を達成する為の手段の一つとして、以下の 3 つの手段を定めた京都メカニズムが採択された。

・ 排出量取引(ET : Emission Trading)

温室効果ガス排出許可量を割り当てられた先進国間において、排出量の一部を取引する事を認める制度。自国のみで排出目標を達成する事が困難な国は、目標に余裕のある国から排出量を購入する事で排出削減量を補う事が出来る。

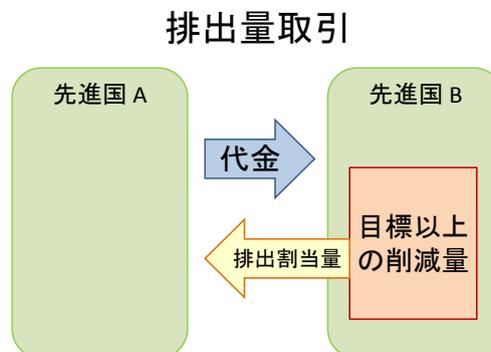


図 1.1 排出量取引の概要^[1]

・共同実施(JI : Joint Implementation)

先進国同士が排出削減事業を共同で実施し、これにより得られた排出削減量を両国間で分け合うことを認める制度。

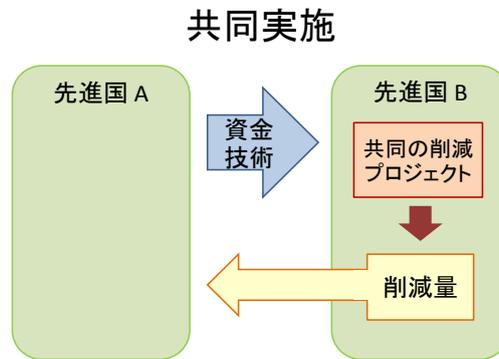


図 1.2 共同実施の概要^[1]

・クリーン開発メカニズム (CDM : Clean Development Mechanism)

先進国と途上国の間で温室効果ガスの排出削減プロジェクトを行う事によって削減された排出量を、一定の認証手続きを得た後に CER として先進国に移転する事を認める制度。

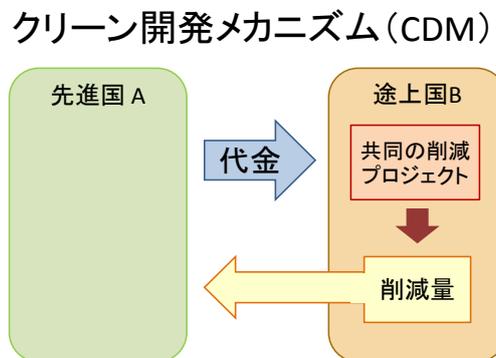


図 1.3 CDM の概要^[1]

1.1.2 排出量取引制度の概要^[2]

排出量取引は京都議定書で定められた制度の一つであるが、国家間だけでなく、企業間などにも適用する事が可能である。現在では、ヨーロッパにおける欧州連合域内排出量取引制度(EU-ETS)やアメリカ合衆国の複数の州における地域温室効果ガスイニシアティブや豪州における国内排出量取引制度など、世界各国で排出量取引制度が検討・実施されている。

このように、排出量取引制度が世界各国で検討・実施されている背景には、排出量取引制度が環境税などの対策に比べて費用効率性と削減の確実性が高いという事情がある。以下に、それぞれについて説明する。

- ・費用効率性

市場メカニズムの活用により、排出量取引制度が全体としての排出削減費用を低く抑えることができる。

排出量価格よりも自ら行う削減対策の費用が高い取引参加者は排出枠を市場で購入する事で対応し、反対に排出量価格よりも削減費用が安いものは目標排出量よりも多く削減を行い、排出枠を市場に売却する事で利潤を得る。つまり、市場メカニズムが安い削減機会を自動的に発掘するため、制度全体での費用効率的な削減が可能となる。

- ・削減の確実性

排出量取引制度では、達成したい目標を最初に定めた分の排出枠だけを発行する。このため、制度が機能する限り確実に目標を達成する事ができる。更に、現在実施されている幾つかの制度では、削減目標未達成の参加者に罰則・罰金を科すことで、削減の確実性を一層高める試みが行われている。

次に、排出量価格について考える。

排出量は、均衡価格で取引がなされると費用効率が最大となる。均衡価格とは、需要と供給のバランスによって決まる価格であり、需給を一致させる理論的な価格の事である。この均衡価格は、各主体の限界削減費用関数が決まれば理論的に求めることが可能となる。

上記について図 1.4 を用いて例示する。個々の利潤追求の為に行動する経済主体 A、B がいるとし、各主体の限界削減費用を所与とする。

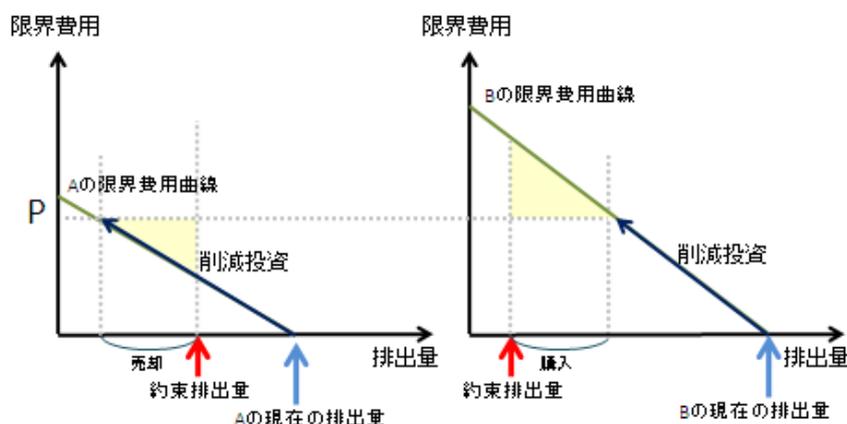


図 1.4 排出権価格の決定理論^[2]

事業者 A は現在の排出量から限界削減費用が排出量の価格 P になるまで削減投資を行う。さらに、約束排出量における限界削減費用は排出量価格 P よりも低いため、さらに追加的に削減投資を行い、余剰分を売却する事で利潤を得ることができる。

次に B について考える。事業者 B は、現在の排出量から限界削減費用が排出量の価格 P と一致するまで排出削減投資を行う。ここで、排出量価格 P は削減投資額よりも小さいため、市場から排出量を購入することができれば費用を小さくする事が出来る。

このように、均衡価格で取引をする事により A、B 共に利益を得ることができ、社会全体で見たときの費用が最少で済む。

1.1.3 東京都排出量取引制度の概要

諸外国において排出量取引制度が数多く実施・検討されているなか、日本においても国内の排出量取引制度の実施検討は為されていた。しかし、産業界の反発などにより、少数の取引参加者で構成される環境省自主参加型国内排出量取引制度(JVETS)の実施以外に大規模な取り組みは進んでおらず、政府与党の民主党は目標としていた 2013 年度からの全国規模での制度導入の先送りを 2010 年 12 月に決定した。

このように、全国規模での排出量取引制度の構築が遅れるなかで、東京都はいち早く排出量取引に目をつけ、2008 年に国内では初となるキャップ&トレード型の排出量取引制度（「温室効果ガス排出総量削減義務と排出量取引制度」）を導入した。本制度は、対象となる東京都内の大規模事業所に定められた削減義務（キャップ）を課すもので、義務未達成の場合も罰則も課された日本国内では初の本格的な排出量取引制度として、その動向が注目されている。

以下に、本制度の概要を記す。

(1) 制度対象

対象施設：

所在地が東京都内であり、燃料、熱及び電気の使用量が原油換算で年間 1500 キロリットル以上の事業所（現在は 1400 事業所程度）

削減義務者：

対象となる事業所の所有者

(2) 削減計画期間

削減計画期間：一期につき 5 年間

第一計画期間：2010~2014 年度

第二計画期間：2015~2019 年度

以後、5 年間ごとの各計画期間のそれぞれについて削減義務が課される。

(3) 義務の内容

対象事業所は、基準となる排出量に対して削減計画期間中の排出量を一定割合以上削減する義務を有する。

基準排出量：

2002~2007年度の間、いずれか連続する3か年度の平均排出量から設定する。

※現行制度期間内に、削減対策の実施により総排出量を削減した事業所についてはその成果が反映されるよう2002~2004年度を選択することが可能である。

※3か年度のうち、排出量が標準的でないとし事が特に認める年度がある場合については、その年度を除く2か年度とすることができる。

削減義務率：

表 1.1 に示す通りである。

表 1.1 対象事業所の区分別義務削減率

区分		削減義務率
I-1	オフィスビル等（※1）と地域冷暖房施設 （区分I-2に該当するものを除く。）	8%
I-2	オフィスビル等（※1）のうち、地域冷暖房を多く利用している（※2）事業所	6%
II	区分I-1、I-2以外の事業所（工場等（※3））	6%

※1 オフィスビル、官公庁庁舎、商業施設、宿泊施設、教育施設、医療施設等

※2 全エネルギー使用量に占める地域冷暖房からのエネルギーの割合が20%以上

※3 区分I-1、区分I-2以外の事業所（工場、上下水施設、廃棄物処理施設等）

(4) 削減義務の履行手段

1 自ら削減

高効率なエネルギー消費施設・機器への更新など

2 他者の「削減量」の取得（排出量取引）

- ・超過削減量：他の対象事業所が義務量を超えて削減した量
- ・中小クレジット：都内の中小規模事業所が省エネ対策の実施により削減した量
- ・都外クレジット：都外の事業所における削減量
- ・再エネクレジット：再生可能エネルギーの環境価値（グリーン電力証書、生グリーン電力、都の太陽エネルギーバンクなど）

(5) 実効性の確保

削減義務未達成の場合、不足量を削減するよう措置命令（必要な削減量は義務違反により加算分を含む）

措置命令違反の場合、罰金（上限50万円）、氏名公表、知事が代わって必要量を調達（費用は違反者に求償）

本制度では、2010年4月から第一計画期間が開始されており、参加事業所間の今後の活

発な取引が予想されている。しかし、世界的に排出量取引の歴史が浅いことや、日本国内での本格的な制度実施の前例がほとんど存在しないことにより、取引制度の設計に関する知見は十分に蓄えられていない。それにより、本制度の制度設計の妥当性や実効性への課題も多く、制度の見直しを求める声も上がっている。

1.2 既存研究

排出量取引制度に関する研究では、これまで経済実験や計算機を使ったマルチエージェント・シミュレーションによる取引市場の制度設計や市場特性などの分析が幾つか行われてきた。

西條^[3]らは排出量取引市場の制度設計に関する研究の中で、どのような制度・市場設計を行えば経済余剰を最大化しつつ取引費用を最小化できるかに焦点を当て、被験者を用いた取引実験を行っている。実験を通じて、西條らは取引結果を複数のパターンに分類していくつかの制度設計評価を行っている。

また、赤井^[4]も西條と同様の実験経済学的手法を用いて排出量取引市場が財の生産に与える影響を評価し、排出量が無償で配布する場合とオークション方式で配分する場合の検証を行った。

マルチエージェント・シミュレーションによる研究には以下の様な例がある。

Swiss AIJ Pilot Program(SWAPP)^[5]のシミュレーションでは、国際排出量取引市場における各国の削減費用や削減量などのパラメータの変化により排出量価格がどのように変化するかを計算できる。SWAPPのシミュレーションでは価格は需要曲線と供給曲線から決まる理論的な均衡価格としている。

山形^[6]は、国際排出量取引市場を対象にエージェントが各年に行う削減量の意味決定を行えるモデル設計を行っている。各年の削減量を決定すると、各年の価格に応じた必要量がエージェント毎に求まり、これにより理論的な均衡価格で取引が行われるものとしている。またエージェントは各年の削減量の意味決定を学習により進化させる。彼らのシミュレーションには投資の意味決定を行わず、エージェント間の取引の意味決定が無い。

木村^[7]は相対取引とダブルオークションの評価を行う事を目的として、エージェントに取引価格・取引量の意味決定を持たせ、エージェント同士が取引を行えるようにしている。またエージェントは注文戦略を取引の成否により強化するものとしている。

岡野^[8]と池田^[9]は国際排出量取引市場を対象に、罰則金の設定や取引方法の制度評価を行った。削減費用関数を定め、エージェントの意味決定には遺伝的アルゴリズムを使用している。取引方法はシングルプライス・オークションと相対取引の二つについて評価を行っ

ている。

宍戸^[10]は、各エージェントの取引における注文の意思決定に関する分析を行った。取引方法はシングルプライス・オークション方式を採用し、取引参加者が市場に参加した場合の市場影響も分析している。

菰塚^[11]と渡邊^[11]は、取引参加者が市場に参加した場合の市場影響を分析し、同様のモデルを用いて排出量取引市場が様々な制度・ルールのもとでどのように機能するかについての分析も行った。

水田^[12]らは、シミュレーションフレームワークであるASIA(Artificial Society with Interacting Agents)を用いて国際排出量取引に関する分析を行った。ASIAでは、エージェントのうちの半分を京都議定書内で目標が設定された先進国、残りの半分を削減目標は定められていないが排出量取引市場に参加できる国として、仮想市場における価格の変動やトータルコストの減少といったシステムのマクロな現象を観察することを可能にした。

所^[13]は、電力市場と排出量取引市場の相互関連を考慮した取引シミュレーションを開発した。共進化型アルゴリズムを用いた最適戦略を学習させることで、排出超過の罰則金を市場の取引価格を基準に決定する取引ルールの下では、排出量を大量に超過するCO₂を排出する戦略を学習するエージェントが現れることを発見した。

このように、マルチエージェント・シミュレーションによる排出量取引市場の研究は、制度設計とその評価や参加主体の最適戦略を導出するものまで幅広く行われている。

しかし、一般的な取引市場や国際排出量取引に関する研究が盛んに行われている一方で、比較的小規模な域内排出量取引市場に関する市場分析はあまり行われておらず、民間企業が取引主体となる市場についての研究もほとんど行われていない。また、効率的な制度設計が喫緊の課題である東京都の排出量取引制度において参照可能な研究成果が存在するとは言い難い。

1.3 研究の目的

これまで述べたように、排出量取引制度は温室効果ガス削減の確実性・費用効率性に優れた手段である。しかしながら、現実の市場においては、様々な戦略を持った市場参加者の行動の結果として均衡価格で取引が行われるとは限らないことや、発展段階の制度である為に制度設計に関する知見・経験が少ないという課題があり、これは今後世界各国で小規模な取引制度が実施される際の足かせになりかねない。

そこで本研究では、昨春に第一計画期間が開始されたばかりの東京都排出量取引制度を

例にとり、様々な個性を持つ参加主体の特性を反映可能なマルチエージェント・システムを用いた東京都排出量取引制度モデルを構築した。そして、構築したモデルにおける市場の様子を経済効率、価格の安定性、取引効率などの側面から分析する事で、市場参加者や市場のルールが市場に与える影響を考察し、東京都排出量取引制度の今後の効果的な制度設計について考察を行う事を目指した。

1.4 研究の構成

第 1 章では、温室効果ガス削減を取り巻く状況と、東京都の排出量取引についての取組みについて述べてきた。そして、マルチエージェント・シミュレーションを用いた排出量取引に関する既存研究とその課題と本研究の目的について述べた。それを受けて、第 2 章ではマルチエージェント・シミュレーションの手法を用いて構築した東京都排出量取引制度モデルについて述べる。はじめにマルチエージェント・システムについて概観し、次に取引市場モデルと制度参加者のモデル、新たに構築した他市場の排出量価格変動を考慮した価格予想モデルと制度の評価指標について述べる。第 3 章では、構築したモデルを用いた取引実験の結果と考察を示す。第 4 章では、結果のまとめと制度設計への提言を行い、その後マルチエージェント・シミュレーションを用いた市場分析の妥当性に関する考察を行うとともに、今後の課題を記す。

第2章 東京都排出量取引制度モデルの構築

本章では、本研究で構築した東京都排出量取引市場モデルについて説明する。

2.1 マルチエージェント・システムと人工市場^{[14][15][16]}

本研究では、排出量取引制度を再現するためにマルチエージェント・システムを採用する。

まず、エージェントとは、コンピュータ上の仮想世界の中でルールをもって自律的に行動する基本単位のことを指す。エージェントは自分の環境を知覚し、各々が保持する戦略に従って自分の目標を達成するような行動をとるので、個々のエージェントを集中的に管理するものはない。

そして、マルチエージェント・システムとはこれらのエージェントが複数集まった集団のことである。全体の挙動は、エージェント同士が相互に作用することによって決定し、さらにこの振る舞いは各エージェントの行動決定に影響を及ぼす。エージェントはこのフィードバックから、各々のルールに従って自分の行動を変化させる。

マルチエージェント・システムの概要について図 2.1 に示す。

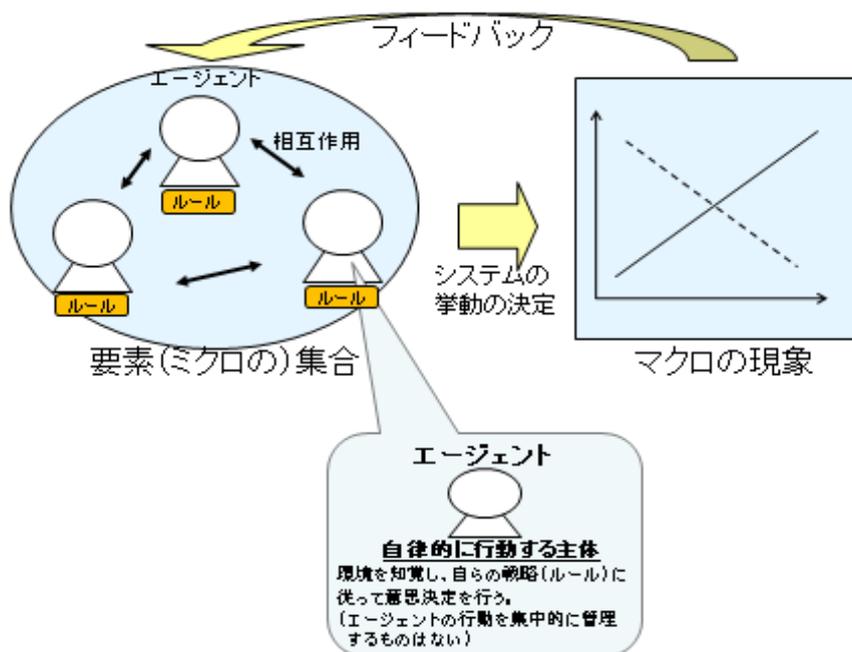


図 2.1 マルチエージェント・システムの概要

マルチエージェント・システムの特徴として、モデルをマイクロ（各エージェント）とマクロ（全体の挙動）の 2 つのレベルでみた場合に、マクロなレベルで創発的現象が現れるということが挙げられる。創発的現象とは、モデルの構成要素どうしの相互作用が集積した結果、突如としてモデル全体にあるパターンが現れることを呼ぶ。

排出量取引制度のように、個々の主体が経済合理性に基づいて戦略的に取引を行う系においては、マルチエージェント・シミュレーションを用いた分析は有効である。

人工市場アプローチの目的として、以下の 3 点が主に挙げられる。

1. 市場現象の分析

バブル現象などの現実の金融市場に見られる現象を人工市場に再現し、どのような条件によってそれらの現象が起こったのかを分析する。

これは本研究の目的と一致する。

2. 支援ツールの構築

現実の金融市場に対してどのようなタイミングでどのような政策を行うと金融価格が安定するかなどの意思決定を支援するシステムを構築する。また、電力市場や排出量取引市場などの制度設計評価を行うこともできる。その目的の場合、エージェントは遺伝的アルゴリズムや強化学習などを用いて最適な戦略を獲得し、現れる現象よりもむしろ最終的な結果に焦点を当てていることが多い。

3. 市場理論の検証

合理的期待仮説、効率的市場仮説など、従来の経済理論で仮定されてきたが最近ではいくつかの批判を受けているような、金融市場に関する仮説や理論の検証を行う。

2.2 東京都排出量取引制度モデルの概要

2.2.1 想定する排出量取引の種類

排出量取引には、「キャップ&トレード型」と「ベースライン&クレジット型」という 2 つの形式が存在する。本研究では、対象とする東京都制度がキャップ&トレード型の取引制度を実施することから、そちらを採用する。

また、市場参加者の参加形態には一般的に「義務参加型」と「自主参加型」の 2 つの類型があるが、本研究では東京都制度に沿って、前者を義務削減対象となる大規模事業所、

後者を中小事業所や都外事業所などの義務削減を伴わない事業所として設定する。

2.2.2 シミュレーションモデルの基本構成（売買モデル）

本研究では、東京都排出量取引制度の参加者をエージェントとしてモデル化し、取引所モデルを介した売買を組み合わせる事で排出権が売買される様子を再現する。本モデルにおける構成要素は、2種類のエージェントと排出量取引制度全体を模擬した取引制度モデルである。

排出量取引制度の主たる参加者は、削減義務を課された事業所（目標保有参加者）であり、これをモデル化したものを目標保有エージェントとする。また、制度には削減義務量を持たずに排出量の売却のみを行う事業所（中小事業所、都外事業所など）も存在する。これを取引参加エージェントとしてモデル化する。また、本研究においては、制度内の全ての参加者の入札を基に約定処理を行い、取引価格と取引量を決定することとする。図 2.2 は本モデルのイメージである。

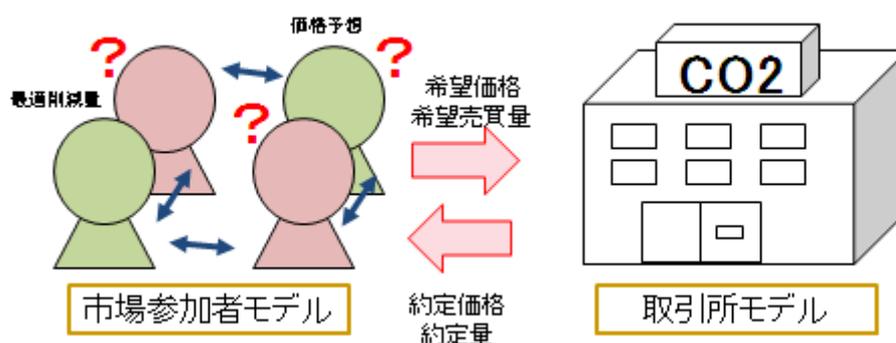


図 2.2 排出量取引市場モデルのイメージ^[1]

2.2.3 取引の流れ

売買は1週間で1回、これを T 回繰り返すことによってシミュレーションを行う。目標保有参加者は、期の初めに割り当てられた排出削減量を達成する為に投資を行う。また、取引参加者は、排出削減量を持たず、保有排出量の売却のために制度に参加する。

取引の流れは以下の手順で行う。図 2.3 は流れを示すイメージである。

取引の流れ

1) 目標削減量と排出削減費用の設定

期の初めに、全ての目標保有参加者の目標削減量と排出削減費用を設定する。

- 2) 市場データの知覚
エージェントが過去の価格などの市場情報を取り込む。
- 3) 価格の予想
エージェントが市場情報から価格を予想する。
(価格予想には、7種類の価格予想モデルを用いる)
- 4) 戦略決定・入札
各エージェントが予想価格を基に自己の戦略を決定。自己削減量と売買の入札を行う。
- 5) 約定処理
市場が全エージェントの入札を基に板寄せ方式で約定処理を行い、市場価格と取引量を計算する。
- 6) 次の取引への移行
2)~5)をN回繰り返し計算する。

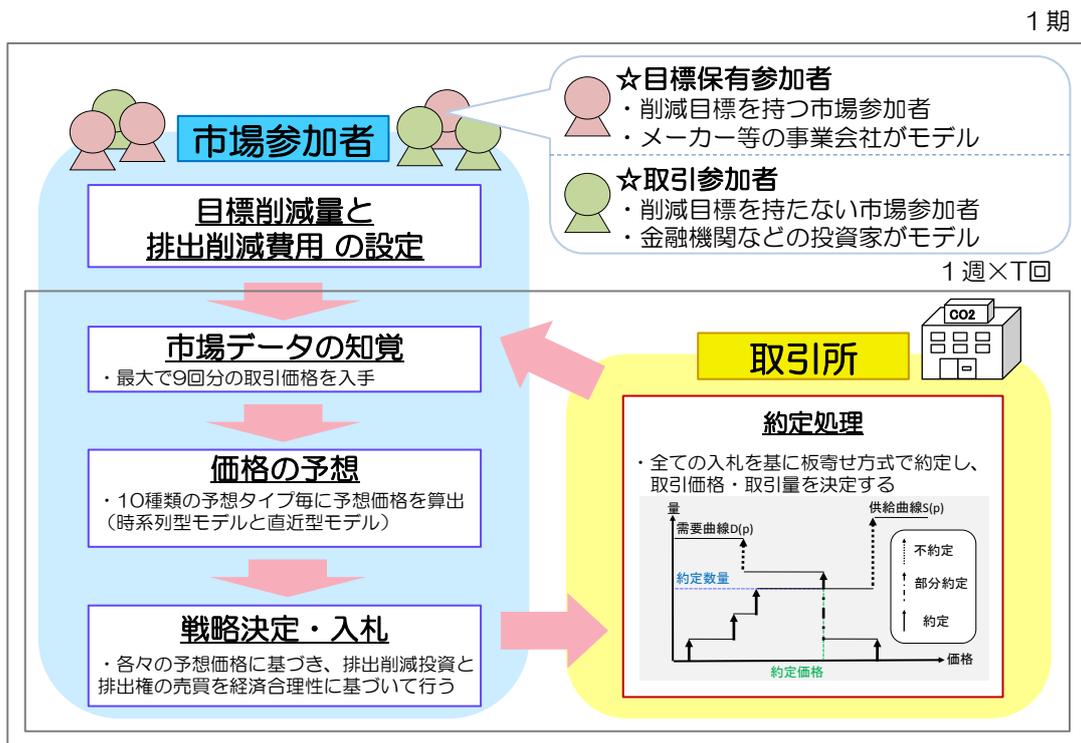


図 2.3 排出量取引制度モデルの流れ^[1]

2.3 取引市場のモデル化

ここでは、排出量の取引市場のモデル化を行う。

2.3.1 項では本モデルで用いる取引方法について、2.3.2 項では取引市場に集まった排出量の売買入札の約定方法について述べる。

2.3.1 取引方法

排出量の取引には、以下の方法が用いられている。

- ・ 相対取引

取引を行う当事者間で価格・数量を決定して売買する取引方法。

2006 年まで実施されていた環境省自主行動計画や国内排出量取引市場、2010 年度に開始された東京都排出量取引制度では、相対取引を採用している。

- ・ 取引所取引

特定の取引所において、全取引者からの注文価格、注文量をまとめて取引を決める方法。取引を約定する時間に応じ、以下 2 種類の取引形式がある。

1. ザラバ取引（連続取引）

あらかじめ定められた一定の取引時間内であればいつでも注文を出すことが出来、買いと売りが合致すれば取引が成立する形式。価格は随時変動する。価格優先、時間優先の原則に基づいて約定される。

随時約定されていくために注文は入りやすいが、流動性の乏しい市場や需給のバランスが大きく崩れている市場ではなかなか取引が成立せず、価格が決まらないことや、自分の成行注文で値段が大幅に動く可能性がある。

排出量取引市場では、ECX(European Climate Exchange)や Nord Pool などで採用されており、株式市場や外国為替市場などの市場ではこの取引が多く用いられる。

2. 板寄せ取引

当初設定した一定時刻に集中的に注文を集め、全ての注文を整理した上で、成行、高い買い、及び安い売りの順に付け合わせ、最も多く約定する価格を決める取引形式。

排出量取引市場では、EEX(European Energy Exchange)で採用されている。また、証券取引所などでは、始値や売買が中断された銘柄の売買が再開された最初の価格などを決定する際に使われる方法である。

相対取引と取引所取引はそれぞれ補完的な関係である(表 2.1)。

表 2.1 排出量取引における取引所取引と相対取引の特徴^[10]

要件	相対取引	取引所取引
契約条件の標準化	交渉により個別決定	標準化されている
市場参加者	限定的	不特定多数
クレジットリスク	相対的に高い (相手方の信用力による)	極めて低い
市場流動性	極めて低い	高い
取引情報	機密性が高い	透明性が高い
価格の指標性	低い	高い

東京都制度においては、取引所は開設せず、取引は各事業所間の相対取引に委ねることになっている。しかしながら、東京都排出量取引制度モデルの構築にあたって、取引の状況が社会的要因等に大きく左右される相対取引をモデル化するのは非常に難しい。

そこで本研究では、U-Mart を初めとする過去多くの人工市場モデルで用いられてきた板寄せ方式を用いて取引メカニズムの設定を行い、各エージェントの価格予想の段階で相対取引を考慮したモデルを構築する。東京都制度には価格を一元的に決定する市場は厳密には存在しないが、以下、市場による取引モデルを便宜的に取引市場（取引所）と呼ぶこととする。その価格決定方法については次節で詳述する。

2.3.2 取引価格決定モデル^[17]

本研究における排出量取引所の価格決定モデルには、板寄せ方式というオークション形式の価格決定モデルを用いる。

この方式は、シングルプライス・ダブルオークション方式と呼ばれるが、これはこの方式が売り手と買い手という 2 種類の立場から受けた注文を集計し、1 つの市場価格が決まる事に由来する。

i は制度参加者のエージェントナンバー、 t は取引回数、市場価格（約定価格）は $P(i, t)$ 、エージェントナンバー i の t 回目の取引における注文価格が $exP(i, t)$ と表されるとすると、これらから、需要曲線 $D(P)$ および、供給曲線 $S(P)$ は以下のように定義される。

$$D(P) = \sum_{i, exP(i, t) \geq P(t)} BUY(i, t) \quad (2.1)$$

$$S(P) = \sum_{i, exP(i, t) < P(i, t)} SELL(i, t) \quad (2.2)$$

ここで、 $BUY(i,t)$ はエージェント i の t 期における買い注文量、 $SELL(i,t)$ は売り注文量を表す。

上記の需要曲線と供給曲線の交点から約定価格と約定数量を決定することにより、最大の約定数量を実現できる。

次ページ以降は、処理の際の詳細なルールについて説明する。

単純に定まる場合

下の注文例 1 は、最も基本的な約定処理の例である。

需要曲線と供給曲線の交点から、約定価格 3000、約定量 30 となる。

注文例 1)

表 2.2 注文例 1 の注文

買い注文量	価格	売り注文量
10	5000	10
5	4000	20
20	3000	0
10	2000	15
20	1000	15

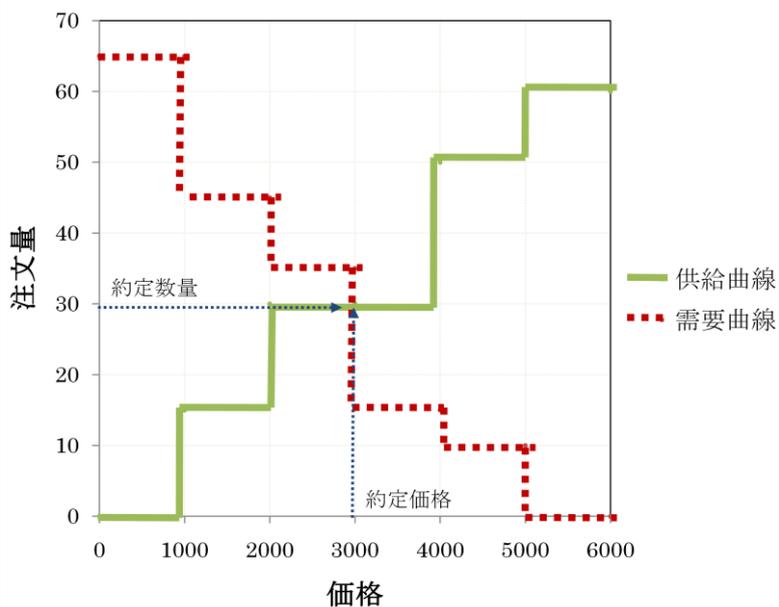


図 2.4 注文例 1 の需要曲線と供給曲線

単純に定まらない場合

需要曲線と供給曲線の離散性により、注文の組み合わせ次第では単純に約定価格・量が定まらない場合がある。

この様な場合は、日本電力卸取引所に従い、以下の様に決定するものとした。

- ・同一価格、複数の量の点で交わる場合は最も多い量を約定量とする（注文例 2）
- ・同一量、複数の点で交わる場合は最も安価な価格を約定価格とする（注文例 3）

注文例 2)

表 2.3 注文例 2 の注文

買い注文 量	価格	売り注文 量
10	5000	10
5	4000	20
20	3000	10
10	2000	5
20	1000	15

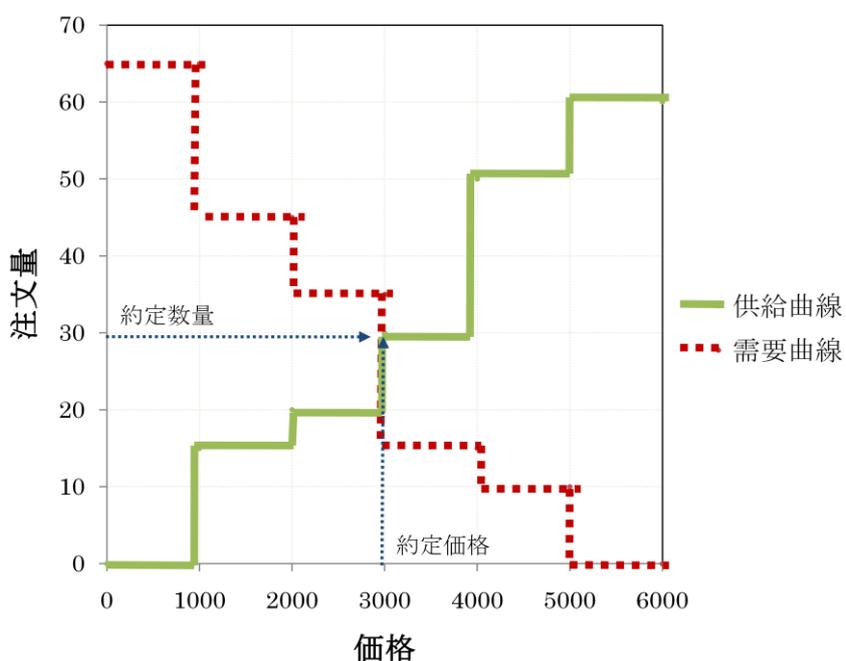


図 2.5 注文例 2 の需要曲線と供給曲線

注文例 3)

表 2.4 注文例 3 の注文

買い注文 量	価格	売り注文 量
15	5000	10
15	4000	15
5	3000	0
10	2000	20
20	1000	15

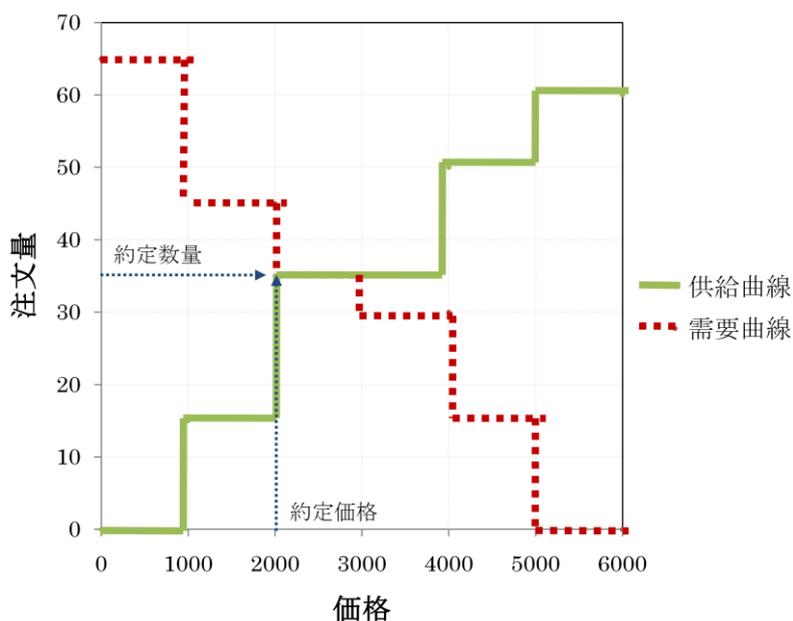


図 2.6 注文例 3 の需要曲線と供給曲線

2.4 目標保有参加者のモデル化

本節では、取引参加者のモデル化の手法を説明する。温室効果ガスの削減義務対象事業所である各エージェントは、それぞれ温室効果ガス排出削減枠（キャップ）を持ち、個々に異なる限界削減費用曲線を有する。これらと市場環境から、経済合理性に基づき戦略的に排出削減を行う。

2.4.1 項では、削減義務対象である目標保有エージェントの作成方法について述べる。

2.4.2 項では、目標保有エージェントの戦略について述べる。

2.4.1 大規模事業所のモデル化

東京都内の大規模事業所は温室効果ガスの削減義務量を課されており、これらを異なる排出削減費用をもち削減義務量を達成する為に排出削減投資と市場による排出量の売買を経済合理性に基づいて行う目標保有参加者としてモデル化した。

本項では、目標保有参加者のキャップと排出削減費用の設定、目標保有参加者の戦略について説明する。

2.4.1 (a) 目標保有エージェントの作成

目標保有エージェントの設定方法を述べる。

本研究では、目標保有参加者として 100 体のエージェントを作成し、これらが東京都制度の義務削減の対象事業所全体を表わすように各属性の設定を行った。その際には、東京都排出量取引制度の前身である「地球温暖化対策計画書制度」において提出・公表された都内大規模事業所の排出量等の統計データ^[18]（以下、計画書データ）記載の約 1400 事業所を、1 エージェントあたりに割り振られる事業所数がほぼ同数となるよう 100 分割して割り当てた。以下で使用する各エージェントの基準排出量や義務削減量は、各エージェントに割り振られた事業所の値の合計値を用いた。

各目標保有エージェントは、それぞれ東京都制度が定める業種と事業所用途によって分類され、事業所用途の特性や同一用途内の各排出データの実際の分布に従って、それぞれ異なる義務削減量と限界削減費用曲線を持つ。業種と事業所用途別のエージェントの数は、実際の業種・事業所用途別の事業所数と同程度の比率になるように設定した。

こうして作成したエージェントがそれぞれ持つ義務削減量と限界削減費用曲線は、以下に述べる方法で設定した。

2.4.1 (b) 義務削減量の設定

各エージェントが取引開始時に保有している温室効果ガス排出削減枠は、東京都制度で定められた義務削減量に従う。東京都が第一計画期間で定める義務削減率より、民生業務部門のエージェントは 5 年間で 8% の義務削減率、産業部門のエージェントは 6% の義務削減率とした。

都制度では、各事業所の年間基準排出量を定め、その対象期間内において毎年基準排出量分を排出した場合の総排出量から、定められた義務削減率分の排出量を削減することとなっている。

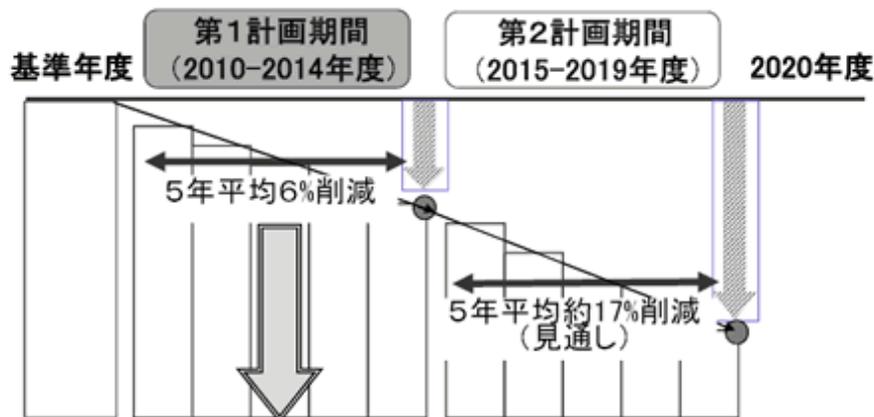


図 2.7 削減義務率の考え方^[19]

エージェントが個々に持つ計画期間内の義務削減量を設定した。

$$\text{義務削減量} = \{ \text{制度開始時排出量} - \text{基準排出量} \times (1 - \text{義務削減率}) \} \times \text{計画年数} \quad (2.3)$$

制度開始時排出量：制度開始時の各エージェント排出量。計画書データにおける 2008 年度の各エージェント排出量を用いた。

基準排出量：計画書制度期間内の各事業所排出量のうち、連続する 3 年間の平均値が高い期間の値を用いた。

計画年数：計画期間の年数。第一計画期間の 5 年間とした。

なお、義務削減量が負値を取るエージェントは余剰排出枠を有していることを意味し、削減義務を持たずに排出量の売却のみを行う。

2.4.1 (c) 限界削減費用曲線の設定

本項では、排出削減費用を決定する関数である限界削減費用関数のモデル化の方法を述べる。

排出量取引制度のモデル化にあたり重要となるのが、排出削減を行う為の投資費用である排出削減費用の取り扱いである。目標保有エージェントは、現状の排出量水準から排出量を削減する為には排出削減投資を行う。なお、目標保有参加者が生産量を下げて使用原料を減らすことで排出量を下げることが考えない。

排出削減投資の際、目標保有参加者は単価や規模の異なる削減技術の中からそれぞれの方針に従って実行する削減対策を**決定**する。例えば、削減単価は安く削減量が大ききな対策を優先的に選択する主体もいれば、削減量の規模とは無関係に削減単価が最も安い対策から優先的に選択する主体もいる。本モデルでは、各主体は後者の様に単価の安い削減対策

から順々に対策を実行していくものとする。

つまり、本モデルにおける限界削減費用とは、安価な技術から使用し、現状の水準からもう 1 単位追加的に削減をする為の費用である。したがって、限界削減費用はそれまでの削減量（累積削減量）が増えるにつれて階段状に増加していくと考えられる。

しかしながら、実行可能な削減対策とその費用・効果が業種や事業用途だけでなく各事業所の個別の環境要因によっても大きく左右されるため、限界削減費用が一般的にどのように推移するかを把握する事は困難である。

そこで本研究では、環境省が 2001 年に発行した「地球温暖化対策中間とりまとめ」における省エネ対策技術一覧^[20]を用いて日本全体での限界削減費用曲線を推定し、その対象範囲や対象時期の違いを調整した一次近似モデルによって、東京都制度下での民生業務部門と産業部門の限界削減費用関数をそれぞれ設定した。

①一次近似式の導出

「中間とりまとめ」の対策一覧は、部門ごとの実行可能な主要省エネ対策のそれぞれについて、削減対策の実施による削減ポテンシャルと削減単価を推計したものである。このデータより都制度の対象となっている民生業務部門と産業部門の対策を抽出し、各対策の削減単価と削減ポテンシャル（計画ケース値+ポテンシャル値）を基にして削減単価の低い順に積み上げた。図 2.8、2.9 は、こうして作成した日本全体の民生業務部門と産業部門の限界削減費用曲線である。

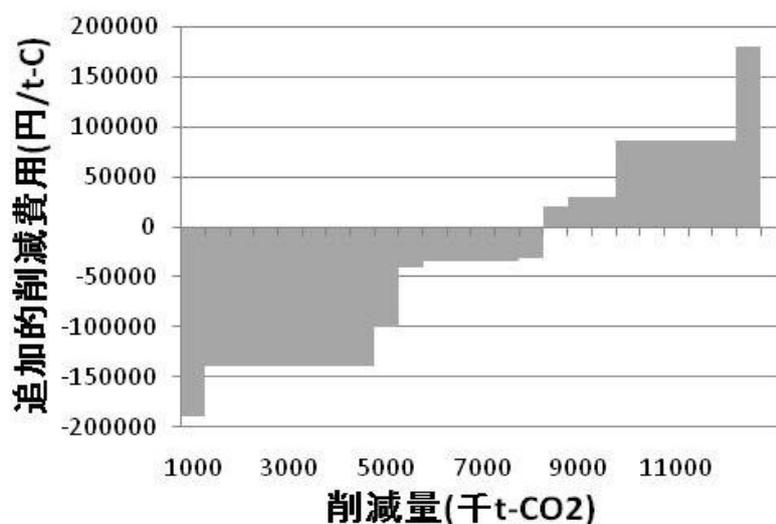


図 2.8 民生業務部門の限界削減費用曲線

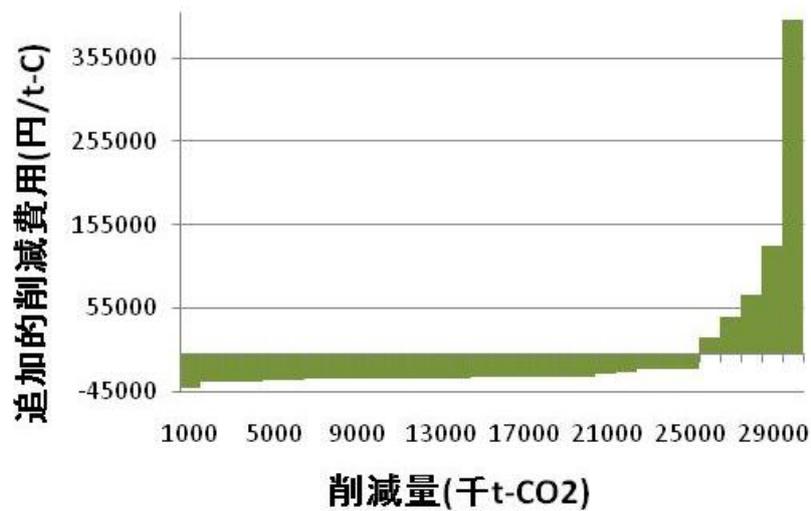


図 2.9 産業部門の限界削減費用曲線

図 2.8、2.9 の限界削減費用曲線は日本全体でのものであり、横軸の累積削減量を本研究が対象とする東京都の数値に換算する必要がある。そこで、上図の民生業務部門と産業部門の累積削減量に、日本全体の温室効果ガス排出量^[21]に占める東京都制度対象事業所の排出量^[18]の比率を乗じることで、東京都の削減ポテンシャル値を推計した。それぞれに乗じた割合は以下の通りである。

民生業務部門：

$$\text{東京都対象比率} = 0.01$$

産業部門：

$$\text{東京都対象比率} = 0.02$$

こうして推計した東京都全体の民生業務部門、産業部門の限界削減費用の積み上げ曲線の一次近似式を、最小二乗法により作成した。以下に、それぞれの式を記す。なお、産業部門の積み上げ曲線は、限界削減費用が負の領域と正の領域では傾きが大幅に異なるので、0 円付近で系列データを分割し、それぞれ別個の一次近似式を求めた。

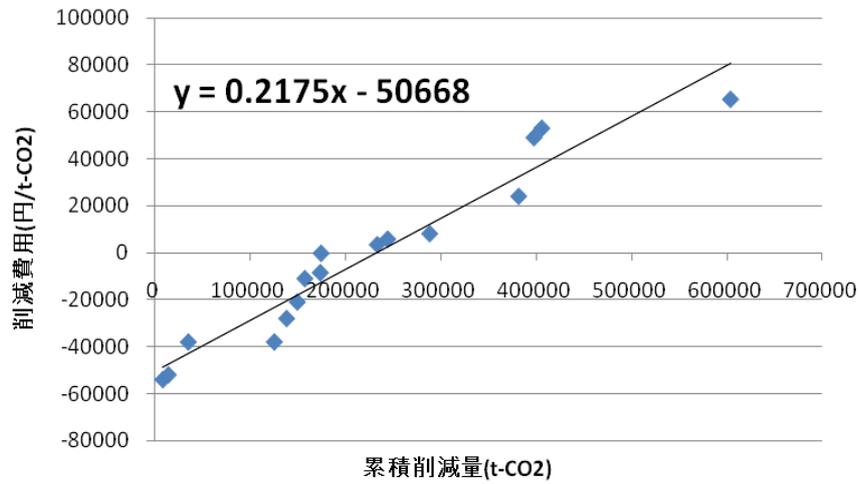


図 2.10 東京都民生業務部門の限界削減費用曲線

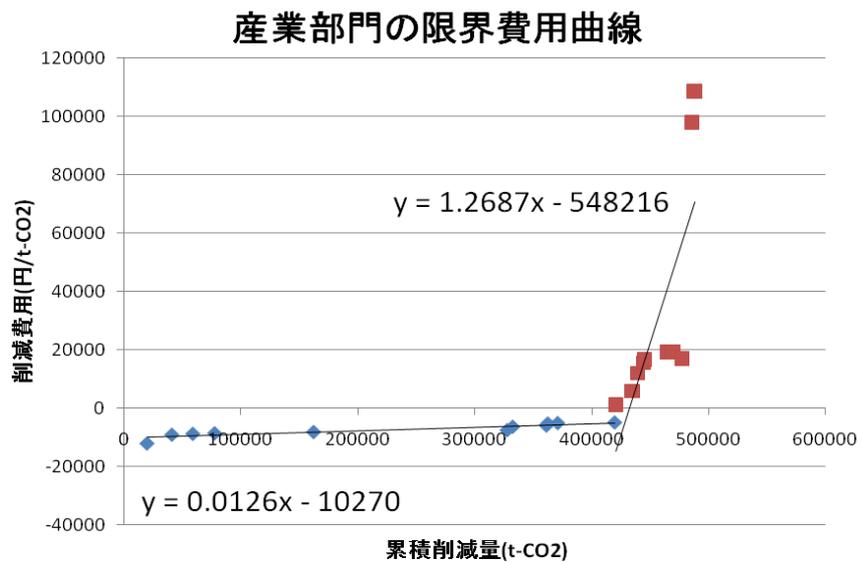


図 2.11 東京都産業部門の限界削減費用曲線

それぞれの一次近似式の傾きを C_1 、 C_{21} 、 C_{22} とすると、

民生業務曲線の傾き：

$$C_1 = 0.22$$

産業曲線の傾き：

$$C_{21} = 0.01 \quad (\text{削減費用} < 0 \text{ の場合})$$

$$C_{22} = 1.27 \quad (\text{削減費用} \geq 0 \text{ の場合})$$

となる。

② 足元限界削減費用の設定

「中間取りまとめ」データにおける各対策の削減ポテンシャルの値は、2001年の発行時に推計されたものであり、現在における数値とは異なると考えられ、2010年の東京都制度開始までに限界削減費用がどの程度上昇しているかを推計する必要がある。しかしながら、過去10年間で各事業者による省エネ対策がどの程度実施され、どれだけの量の温室効果ガスが削減されたかを把握することは極めて難しい。ここでは、2001年からの温室効果ガスの累積排出削減量を、計画書データ内の実績削減量で近似することによって、東京都制度の対象事業所の足元限界削減費用の推定を行った。

東京都対象事業所の2001年からの実績削減量は、式2.4により推計した。

$$\text{実績削減量} = \text{合計基準排出量} \times \text{平均実績削減率} \quad (2.4)$$

合計基準排出量：2000年度の対象部門基準排出量^[22]

平均実績削減率：計画書制度下の対象事業所の実績排出削減率の平均値

①で作成した一次近似式に、計画書データの実績削減量の値を代入し、現時点での足元限界削減費用を求めた。足元限界削減費用を MC_0 (円/t-CO₂)とおくと、

民生業務部門：

$$MC_0 = 752$$

産業部門：

$$MC_0 = -7776$$

となった。

次に、限界削減費用曲線モデルの定式化を行う。

③ 限界費用曲線モデルの定式化

こうして求めた限界削減費用曲線をエージェントモデルに組み込むために、限界削減費用曲線の定式化を行う。限界費用曲線 $MC(i, t)$ は、累積削減量 $ACR(i, t)$ と各エージェント固有のコストパラメータ $C(i)$ 、限界費用初期値 $MC_0(i, t)$ によって決まるものとした。

$$MC(i, t) = C(i) \cdot ACR(i, t) + MC_0(i) \quad (2.5)$$

エージェントのコスト値 $C(i)$ は以下の式2.6によって決まる。 $CF(i)$ は各目標保有エージェントの制度開始時の温室効果ガス排出量（計画書データ2008年度排出量で近似）を表わす。

民生業務部門：

$$C(i) = C_1 \cdot \frac{CF(i)}{\text{民生業務部門総排出量}} \quad (2.6)$$

産業部門：

$0 > MC(i, t)$ の場合

$$C(i) = C_{21} \cdot \frac{CF(i)}{\text{産業部門総排出量}} \quad (2.7)$$

$MC(i, t) \geq 0$ の場合

$$C(i) = C_{22} \cdot \frac{CF(i)}{\text{産業部門総排出量}} \quad (2.8)$$

曲線が $MC(i, t) \geq 0$ に達すると傾きが変わるため、数式上の曲線の初期値も変わるが、これを $MC'_0(i)$ とおき、傾きに応じた修正を行った。

④各エージェントへの限界削減費用曲線モデルの設定

ここでは、各エージェントの限界削減費用曲線モデルの設定を行う。一般に、温室効果ガス排出量の削減対策実施による効果や費用は業種や事業所用途によって異なり、同一用途内でも事業所の性質等によって異なるのが普通である。本研究では、それらの用途間、用途内の限界費用曲線の差異を考慮したエージェントのモデル化を行った。

ECCJ 業種別省エネ対策資料^[23]やクール・ネット東京の業種別省エネルギー対策推進研究会資料^[24]、計画書データなどを参考に、各事業所の削減対策の進捗状況や実施可能性、削減実施率の分布等に応じて異なる限界削減費用曲線を割り当てることとした。その際には、以下に示すように曲線の傾き C_1 、 C_{22} と足元限界費用 MC_0 を①、②で設定した値を参考にそれぞれ幾つかのケースに分け、各エージェントの特性によって個別に設定した。その際には、事業所用途の事務所ビルの中でも温室効果ガスの排出削減対策に関する特性が一般の事務所とは著しく異なる情報部門（データセンターなど）を、西尾ら^[25]を参考に別途設定した。なお、産業部門については、 $MC(i, t) < 0$ の場合の C_{21} はケース分けをせずに、値は固定とした。

2.4.1(d) 各エージェントの属性設定

これまでの項で設定した目標保有エージェントの属性一覧を、巻末付録の表 A に示す。このようにして与えられた属性を基にして、それぞれのエージェントは次節で示す戦略に

基づいて行動する。なお、表 A のエージェント属性一覧表について、産業部門の限界費用曲線の傾きの欄には C_{22} の値を記載し、 $MC(i, t) < 0$ の場合の C_{21} は全ての産業部門エージェントにおいて一定とした。

2.4.2 大規模事業所の戦略

1. 義務削減量が正の場合

義務削減量が正の値を取る目標保有参加者は、削減義務量を達成する為に排出削減投資と市場における排出量の売買を行う。

削減目標保有参加者は、削減義務量を満たす為に、削減投資により排出枠を増やすか市場からの排出枠購入で排出枠を増やすかの判断を、予想される排出量価格に基づいて行う。

目標保有参加者の行動として、限界削減費用が排出量予想価格に達するまで排出削減投資を行うことが考えられ、その場合削減量 $red(i, t)$ は次の式で表わされる。

$$red(i, t) = \frac{exp(i, t)}{C(i)} - ACR(i, t) \quad (2.9)$$

これより、買い注文量 $BUY(i, t)$ を求める式は、以下の様になる。

$$BUY(i, t) = RED(i) - red(i, t) = RED(i) + ACR(i, t) - \frac{exp(i, t)}{C(i)} \quad (2.10)$$

ここで、 $RED(i)$ はエージェント i の各取引期における義務削減量を表し、各エージェントの義務削減量を総取引期数 T で除して算出し、時間 t にかかわらず一定とする。

一方で、排出量の予想価格が限界費用を下回っている場合、削減義務量を全て他の事業所などからの排出枠の購入で賄うことになるため、 $BUY(i, t)$ は、

$$BUY(i, t) = RED(i) \quad (2.11)$$

となる。

また、上の 3 式において、削減量が義務削減量を上回る場合は、余剰排出枠を市場に売却することとなる。従って、排出量の売却注文量 $SELL(i, t)$ は、

$$SELL(i, t) = red(i, t) - RED(i) = RED(i) + \frac{exp(i, t)}{C(i)} - ACR(i, t) \quad (2.12)$$

と表わされる。

以上を整理すると、

・ $red(i,t) \leq 0$ の場合

$$red(i,t) = 0 \quad (2.13)$$

$$BUY(i,t) = RED(i) \quad (2.14)$$

・ $red(i,t) \leq RED(i,t)$ の場合

$$red(i,t) = \frac{exP(i,t)}{C(i)} - ACR(i,t) \quad (2.15)$$

$$BUY(i,t) = RED(i) - red(i,t) = RED(i) + ACR(i,t) - \frac{exP(i,t)}{C(i)} \quad (2.16)$$

・ $RED(i,t) \leq red(i,t)$ の場合

$$red(i,t) = ACR(i,t) - \frac{exP(i,t)}{C(i)} \quad (2.17)$$

$$SELL(i,t) = red(i,t) - RED(i) = RED(i) + \frac{exP(i,t)}{C(i)} - ACR(i,t) \quad (2.18)$$

となる。

2. 義務削減量が負の場合

義務削減量が負の値を取る目標保有参加者は、余剰排出量を保有しており、取引市場において排出量の売却を行うことができる。

ここで、制度対象となる事業所には 5 年ごとに継続して排出削減義務が課されるので、排出枠の余剰分を全て売却してしまえば、次の計画期間に提示された義務削減率の分だけ更なる削減を行う必要がある。したがって、実際の取引参加者が本モデルで考慮する 5 年間で余剰排出枠を全て売却してしまうとは考えにくい。そこで本モデルでは、義務削減量が負の値を取るエージェントは全ての余剰排出量を売却しないよう、売却戦略のモデル化を行った。

各期の目標保有エージェントの排出量の売却注重量 $SELL(i,t)$ は、各エージェントの余剰排出量 $SA(i)$ を用いて以下の式で表わされる。

$$SELL(i) = \frac{SA(i)}{T} \quad (2.19)$$

式 2.19 において、各期の売却排出量は時点 t に依存せず一定とした。各エージェントは制度開始時に保有している余剰排出量を期数で等分した量の売却注文を行うが、本モデルにおいては注文の成約率が 100%にはなりえないことより、全ての保有排出量を売却することはない。

2.5 取引参加者のモデル化

取引参加者は削減目標を持たない市場参加者であり、東京都制度下で取引が認められている外部クレジットを排出量の売却のみを行うエージェントとしてモデル化したものである。取引参加者は、制度開始時の初期保有排出枠を期間中に全て売却することを目的として行動する。

取引参加者は目標保有参加者の様に排出削減投資は行わない為、個々のキャップと限界削減費用曲線を持たない。そこで本項では取引参加者の戦略のみを説明する。

取引参加者は、目標保有参加者と同様に市況を読み取り、市場価格を予想し、それぞれの予想価格を基に以下の3種類の戦略に従って排出枠を売買するものとする。

取引参加者には、取引の開始時に保持排出枠 $R(t)$ とその初期値 R_0 を与え、取引時に $R(t) > 0$ の場合には市場で排出枠を売却するものとする。本モデルでは30体の取引参加エージェントを設定し、その全てが同量の R_0 を持つこととした。東京都の制度に従い、取引参加者は排出量の購入は行わないこととした。

以下に、取引参加者の行動をモデル化する。本モデルでは、次の3種類の行動タイプを定義した。 t 期の市場価格を $P(t)$ とすると、それぞれの行動タイプは以下のように表わせる。

取引参加者の行動タイプ

1. トレンド追随型

市場のトレンドに追随する売買を行う取引参加者。予想価格が市場における前回の取引価格よりも一定割合下降した場合には、次の式で決定される排出枠の売却注文を行う。なお、投資分岐割合を $r(i)$ とする。

・ $\text{ex}P(t) < P(t-1) \cdot (1+r)$ かつ $R(i, t) \geq 0$ の場合

$$SELL(i, t) = \frac{R(i, t)}{N + 1 - t} \quad (2.20)$$

2. 非トレンド型

市場のトレンドに追随しない売買を行う取引参加者。予想価格が前回の取引価格よりも一

定割合上昇した場合には、排出枠を売却する。

逆に、前回の取引価格よりも一定割合下降した場合には、排出枠を購入する。

・ $exP(t) < P(t-1) \times (1+r)$ かつ $R(i,t) \geq 0$ の場合

$$SELL(i,t) = \frac{R(i,t)}{N+1-t} \quad (2.21)$$

、

3. ランダム顧客型

ランダムで注文を決定する取引参加者。

乱数 N (Box=Muller 法による標準正規乱数) の値に基づいてランダムに排出枠の売買注文を行う。

・ $N \geq 1$ の場合

$$SELL(i,t) = \frac{2R(i,t)}{N+1-t} \quad (2.22)$$

、

・ $0 < N < 1$ かつ $R(i,t) \geq 0$

$$SELL(i,t) = \frac{R(i,t)}{N+1-t} \quad (2.23)$$

、

取引参加エージェントの初期保有クレジット量 R_0 は、 $R_0 = 0, 50,000, 75,000, 100,000, 125,000, 150,000$ の 6 つのケースを想定し、3 章ではこれを用いて分析を行った。なお、これらの値は、本研究で扱う東京都制度対象事業所の総基準排出量のそれぞれ 0%、5%、7.5%、12.5%、15%に対応している。

2.6 価格予想モデルの構築

制度参加者は、予想される排出量価格をもとに取るべき戦略を決めることとした。

本モデルでは、排出量価格の予想に①EU-ETS における排出量の価格変動を考慮して価格を予想するモデル、②仮想市場における価格の推移から当期の排出量価格を予想するモデルを用いる。制度に参加する全てのエージェントは、以下に述べる 7 つの価格予想モデルのいずれかを割り当てられることとし、各々の価格予想モデルに基づいて当期の排出量価格を予想し、入札を行う。なお、価格予想には、目標保有参加者と同様の 7 種類の価格予想モデルを用いるものとした。

2.6.1 EU - ETS の排出権価格変動を考慮した価格予想モデル

他の市場における実際の排出量価格の推移を参照して東京都制度モデルの市場価格推移を予想する時系列モデルを構築した。参照する時系列データには、現在各国で行われている排出量取引市場の中で最も歴史の長い EU-ETS の排出量価格 (Dec11 sett) ^[27] の直近 158 週分の価格を用いた (図 2.12)。一週間を一単位として、各週の最初の日における終値を取得し、参照する時期を変えることで、自己回帰モデル (以下 ARMA モデル) と自己回帰和分移動モデル (以下 ARIMA モデル) の 2 つの価格予想モデルを作成した。

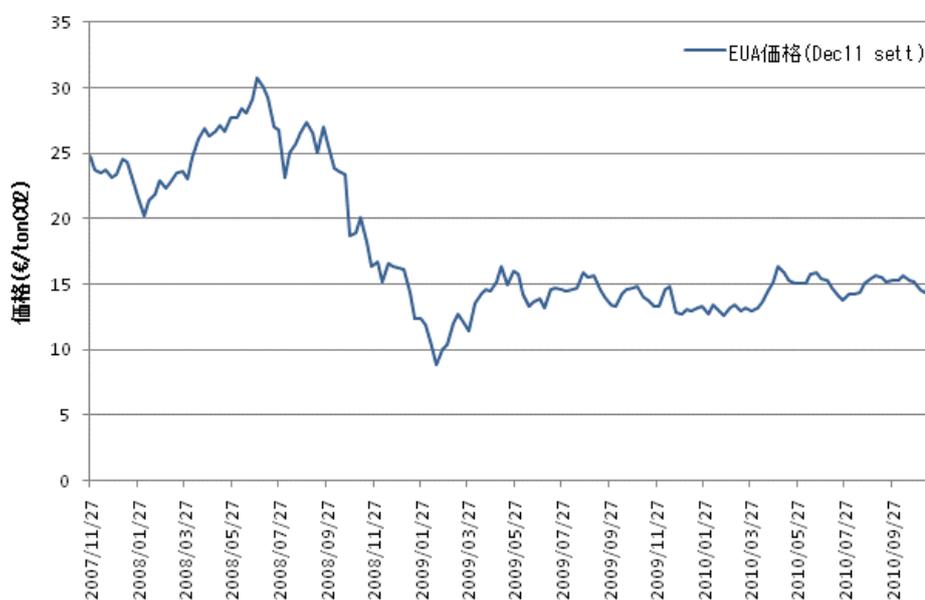


図 2.12 EUA 価格の推移

時系列分析について

時系列分析は、時系列データ (時間変化と共に変動する観測値の系列) を確率変数の実現値とみなし、統計学的な分析によりデータに対して最も当てはまりがいいモデルを推定し、将来を予測する手法である。ここで推定するモデルのことを時系列モデルと呼ぶ。

ここでは、本モデルで用いた時系列モデルの概念を簡単に説明する。

・ AR モデル

AR モデルは、自らの時系列遷移の特徴を自らの過去の値で表す (系列相関を持つ) モデルであり、以下に示す ARMA モデルと ARIMA モデルの基礎となるモデルである。

$$Y_t = C + B_1 Y_{t-1} + B_2 Y_{t-2} + \dots + B_p Y_{t-p} + U_t \quad (2.24)$$

(t は期, c は定数項, $b_1 \dots b_p$ はパラメータ, U_t はホワイトノイズを満たす攪乱項)

このようなモデルを p 次の自己回帰モデルといい、 $AR(p)$ モデルと表記する。

自己回帰モデルにおいては、今期 (t 期) の為替レートの動きは、1期前、2期前、... p 期前までの時系列データと今期の攪乱項 U_t によって説明される。

・ARMA モデル

ARMA モデル (上の AR モデルと自らの行動特性を過去のホワイトノイズの移動加重和で表す MA モデルを組み合わせたモデル)

・ARIMA モデル

ARIMA モデルは、非定常時過程である時系列データの d 階差が ARMA モデルで表現できる場合に適用するモデルである。

比較的小さな p と q の値でも複雑なモデルを表すことができ、株価の予測等に多く用いられる予測モデルである。

時系列モデル作成の手順

時系列モデルの作成は、以下の手順で行った。

- ①EU-ETS の排出量価格データの入力
- ②周期性・定常性の確認 (単位根検定による。確認される場合は除去)
- ③Yule-Waker 法によるモデルの推定
- ④最適モデルの同定 (AIC 最小化法)
- ⑤モデルの診断 (残差検定)

以下に、その具体的な方法を示す。

2つの時系列モデル構築

ECX(Europe Climate Exchange)の WEB サイト^[27]より取得可能な範囲での過去の EUA 価格を取得し、価格推移の傾向から対象期間を前半と後半に分割した。そして、全期間(158 週)と後半部分(79 週)をそれぞれ対象期間として、2つの時系列モデルを推定し、定式化した。

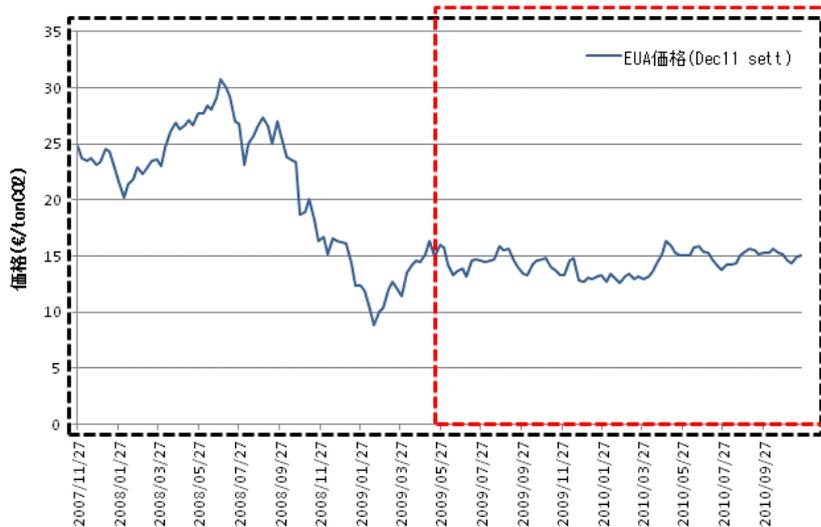


図 2.13 時系列モデルのデータ取得期間区分

各モデルの推定結果と EU-ETS データに対するモデルの当てはまりの良さを検定した結果、元データの周期性の確認結果を示す。

①全期間モデルの定式化

取得した全期間の時系列データを基に推定した価格予想モデルの詳細を示す。

対象となる時系列データに対して単位根検定を行い、時系列が定常過程か否かを判別する。単位根検定は ADF 検定(Augmented Dickey Fuller Test)を行った。検定の結果は以下のとおりである。

$$Dickey-Fuller = -1.5519, \quad p\text{-value} = 0.7632$$

p 値より、帰無仮説が棄却されず、単位根の存在が否定できない。これにより、対象期間の価格系列は定常過程とは言えず、時系列モデルの推定にはデータ変換を行わなければならない。

ここで、Yule-Walker 法によりモデルの次数推定を行い、AIC(赤池情報量基準)が最小である次数と各項の係数を求めた。以下の表 2.6 に示す計算結果について、Coefficients は各項の係数を示し、s.e.は標準誤差を示す。また、 σ^2 は標準偏差、log likelihood は対数尤度 aic は赤池情報基準量を示す。

表 2.6 ARIMA(2,1,2)モデルの推定結果

	ar1	ar2	ma1	ma2
Coefficients	-1.0515	-0.9021	1.1589	0.9115
s.e.	0.0737	0.0652	0.0662	0.0789

sigma² estimated as 0.8834: log likelihood=-212.06, aic=434.12

表のように、対象データは ARIMA(2,1,2)モデルで表わすことができると推定される。次に、上で推定した時系列モデルの診断を行った。診断結果の図 2.14 について、上部は残差のプロット、中部は残差の自己相関プロット、下部は Ljung-Box 検定の p 値のプロットである。

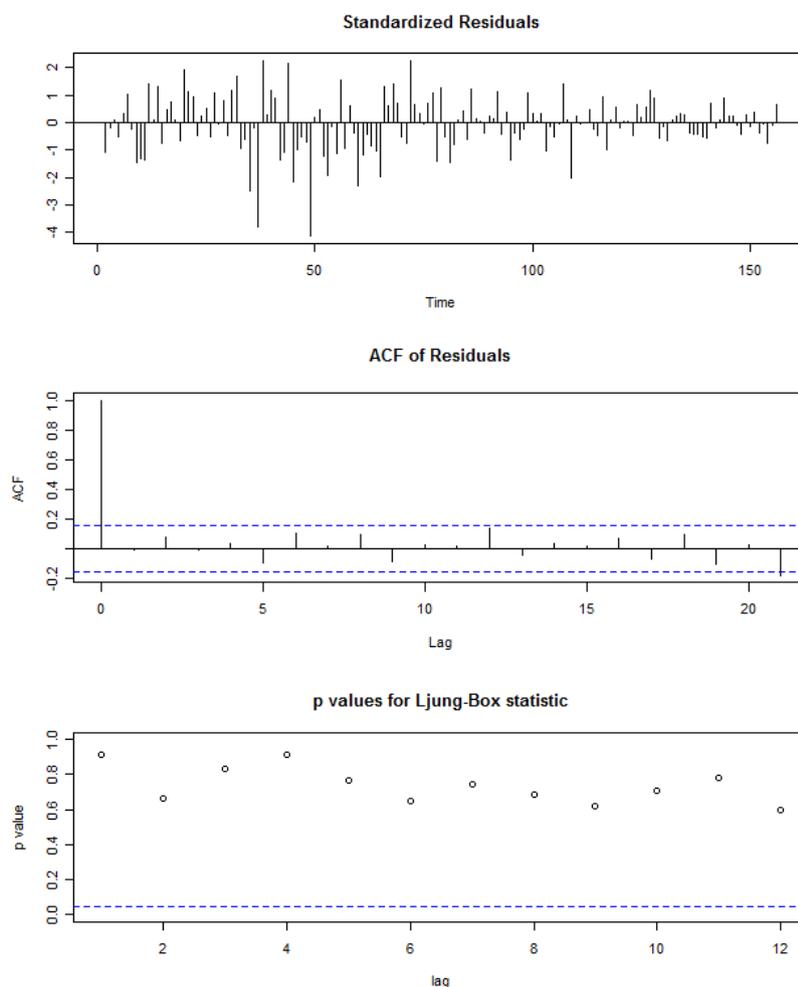


図 2.14 ARIMA(2,1,2)モデルの診断結果

モデルの残渣系列について行った Ljung-Box 検定の p 値が有意水準より大きいことから、

ARIMA モデルの残差は系列相関を持っているとは言えず、ホワイトノイズである可能性が高い。これにより、本モデルの妥当性を示すことができた。

この結果より、全期間モデルを定式化すると、価格予想モデルは

$$\begin{aligned} exP_1(t) = & 0.960 \cdot P(t-1) - 0.018 \cdot P(t-2) - 0.870 \cdot P(t-3) + 0.928 \cdot P(t-4) \\ & + U(t) + 0.009 \cdot U(t-1) - 0.077 \cdot U(t-2) - 0.956 \cdot U(t-3) \end{aligned} \quad (2.24)$$

となる。 $exP(i,t)$ はエージェント i の t 期における予想価格、 $U(i,t-n)$ は標準正規乱数からなる残差系列を表わす。定式化の際には、階差 d の差分を展開する式変形が行われるため、各項の係数が表 2.6 の数値とは異なることに留意する。

②全期間モデルの定式化

取得した EUA 価格の後半部分の時系列データを基に推定した価格予想モデルの詳細を示す。

ADF 検定による単位根検定の結果は以下のとおりである。

$$Dickey-Fuller = -3.2638, \quad p\text{-value} = 0.08383$$

$p < 0.1$ で有意なため帰無仮説が棄却され、単位根は存在しないと言える。これにより、対象期間の価格系列は定常過程とすることができる。

ここで、Yule-Walker 法によりモデルの次数推定を行い、AIC が最小である次数と各項の係数を求めた。なお、表の intercept は定数項を表わす。

表 2.7 ARMA(4,4)モデルの推定結果

	ar1	ar2	ar3	ar4	ma1	ma2	ma3	ma4	intercept
Coefficients	-1.2323	-0.535	0.4061	0.6793	2.4386	2.9893	2.1159	0.6274	14.4624
s.e.	0.0951	0.1723	0.1745	0.0953	0.1151	0.2298	0.2405	0.1234	0.2782

sigma^2 estimated as 0.2151: log likelihood = -54.54, aic = 129.08

表 2.7 のように、対象データは階差無しの ARMA(4,4)モデルで表わすことができると推定される。

ARMA(4,4)モデルの診断の結果は図 2.15 の通りである。

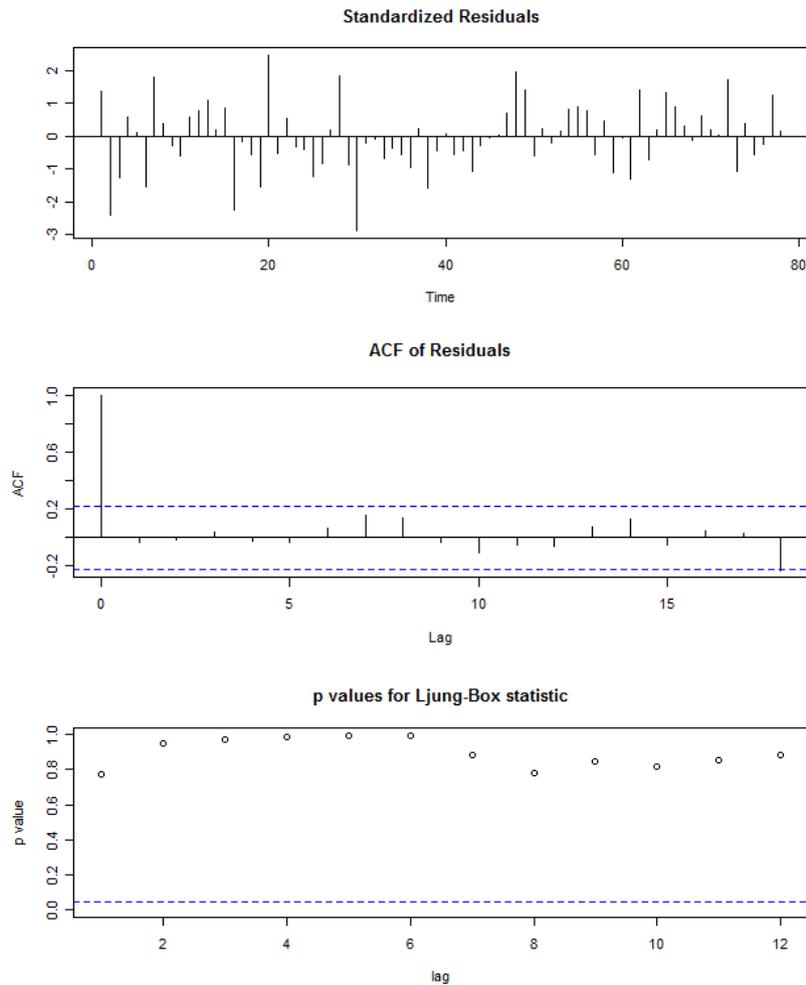


図 2.15 ARMA(4,4)モデルの診断結果

モデルの残差系列について行った Ljung-Box 検定の p 値が有意水準より大きいことから、ARMA モデルの残差は系列相関を持っているとは言えず、ホワイトノイズである可能性が高い。これにより、本モデルの妥当性を示すことができた。

この結果より、後半モデルを定式化すると、価格予想式は

$$\begin{aligned}
 \text{exP}_2(i, t) = & P_m(t) + 0.896 \cdot P(t-1) - 0.725 \cdot P(t-2) + 0.747 \cdot P(t-3) \\
 & + U(t) - 0.001 \cdot U(t-1) - 0.826 \cdot U(t-2) \\
 & + 0.048 \cdot U(t-3) - 0.154 \cdot U(t-4)
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

となる。定数項には、 t 期までの市場価格の平均値 $P_m(t)$ を用いた。

2.6.2 従来の価格予想モデル

宍戸^[10]、菰塚^[11]を参考に、各エージェントが東京都制度モデルにおける過去の価格推移のみから当期の排出量価格を予想する 5 つのモデルを構築した。

③同価格型モデル

前回取引時の市場価格から変化しないと予想するモデル

$$\text{exP}_3(i, t) = P(t - 1) \quad (2.26)$$

④一次関数型モデル

2 期前と 1 期前の市場価格に沿って一次関数的に変化すると予想するモデル

$$\text{exP}_4(i, t) = -P(t - 2) + 2P(t - 1) \quad (2.27)$$

⑤二次関数型モデル

前回取引時までの 3 期分の市場価格に沿って二次関数的に変化すると予想するモデル

$$\text{exP}_5(i, t) = -P(t - 3) + 3P(t - 2) + 3P(t - 1) \quad (2.28)$$

⑥3 日間単純移動平均型モデル

前回取引時までの 3 期分の市場価格の平均値になると予想するモデル

$$\text{exP}_6(i, t) = \sum_{j=1}^3 \frac{P(t-j)}{3} \quad (2.29)$$

⑦7 日間単純移動平均型モデル

前回取引時までの 7 期分の市場価格の平均値になると予想するモデル

$$\text{exP}_7(i, t) = \sum_{j=1}^7 \frac{P(t-j)}{7} \quad (2.30)$$

なお、時系列モデルも含めた上記の全てのモデルにおいて、参照する過去の価格データが無い場合は初期価格 $P(0)$ で代用するものとする。

2.7 情報誤差係数の設定

東京都制度では相対取引による排出量取引が行われるが、価格公表機能を持つ市場が存在する場合と比較して排出量価格に対する市場参加者間の価格認識が異なる。本研究では、市場全体の需要と供給から一意に決定する市場価格と各取引参加者の市場価格の認識とのかい離をモデル化するために、各エージェントの予想価格のバラつきを乱数項を含む情報

誤差係数として設定した。

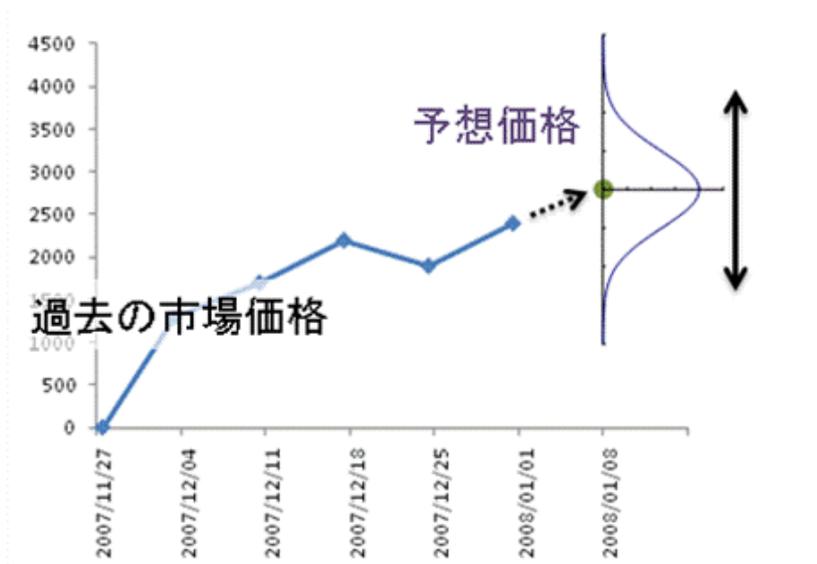


図 2.16 情報誤差のある場合の価格予想の様子

情報誤差を考慮したエージェント i の t 期の予想価格 exP' は、情報誤差係数 $Inf(i, t)$ を用いて

$$exP'(i, t) = Inf(i, t) \cdot exP(i, t) \quad (2.31)$$

と表わされる。ここで、 $Inf(i, t)$ は、

$$Inf(i, t) = 1 + \sqrt{\sigma} \cdot \sqrt{-2 \ln \alpha} \cdot \cos(2\pi\beta) \quad (2.32)$$

$\alpha, \beta : [0, 1)$ の一様乱数の要素

の式で表わされる正規乱数 $N(1, \sigma)$ である。式(2.32)の第 2 項は Box=Muller 法により得られた標準正規乱数に標準偏差 (分散 σ の平方根) を乗じたものであり、 $\sigma=1$ の時は $Inf(i, t)$ の分布は 1 が平均の正規分布に従い、 σ を小さくするにつれて乱数列のバラつきが減じていく。このように、 σ は情報誤差の大きさを表しており、次章でのモデルを用いた分析の際に使用する。

以上のように、過去の正確な市場価格の取得による価格予想 ($\sigma=0$ の場合) と比較して、乱数項を含む情報誤差係数 $Inf(i, t)$ のバラつきによってエージェント間で価格予想に差が生じるよう設定を行い、それによって相対取引による取引をモデル化した。

2.8 学習機能の設定

市場参加者が市況に応じて予想方法を変える様子を再現する為に、渡邊^[1]を参考に学習機能を設定した。この機能により、各参加者は 2.6.1、2.6.2 で構築した計 7 種類の価格予想モデルのうち、予想価格が前回取引時の市場価格に最も近いモデルを選び、次回の価格予想に用いるものとする。

各市場参加者が図 2.17 の動作を行う事で表 2.8 の様な価格選択を行う。

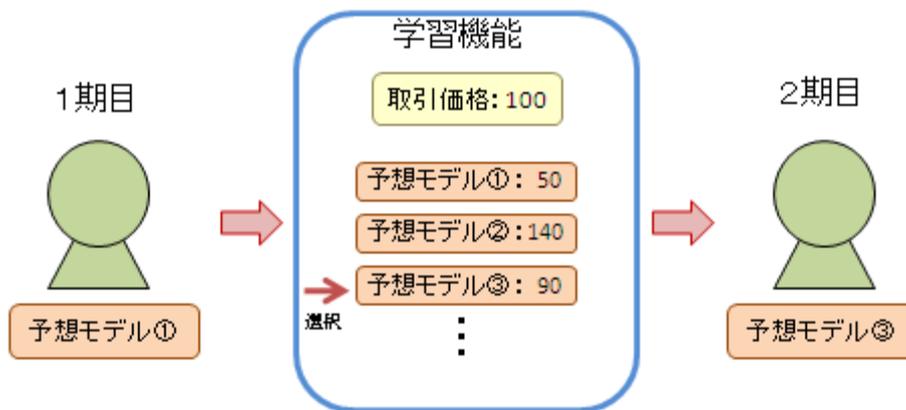


図 2.17 学習機能のイメージ^[1]

表 2.8 各市場参加者が選択する予想モデルの様子

取引日数	exP1	exP2	exP3	exP4	exP5	exP6	exP7
1	10	10	10	10	10	10	10
2	0	0	0	7	9	83	0
3	0	0	0	11	21	17	14
4	12	0	0	4	4	4	4
5	0	18	3	4	14	1	3

3章の分析においては、全エージェント中で学習機能を保有しているエージェントの割合が 0、1/3、2/3、1 の 4 つのケースを想定した。

2.9 市場分析に用いる指標

排出量取引の効率性を測る指標として、本研究では価格指数、取引価格の安定性、注文成約率、取引継続率の 4 つの指標を用いる。

本節では、上記 4 点の指標の測定方法について説明する。

2.9.1 価格指数

価格指数は、目標保有参加者全体で見た時、排出権取引制度によりどの程度費用効率性が達成されたかを測る指標である。本研究では、以下の式で定義する価格指数の全取引日数分の平均値を価格指数とする。

$$\text{価格指数 } E(t) = \frac{\text{取引価格}}{\text{理論価格}} = \frac{P(t)}{P'(t)} \quad (2.33)$$

これより、価格指数が小さい市場ほど費用効率面で優れた市場とみなすことが出来る。次に、価格指数の算出に用いる理論価格の計算方法を説明する。

理論価格の計算方法

理論価格は、全ての目標保有エージェントが全ての義務削減量を削減したとみなしたときの最小の限界削減費用である。

つまり、目標保有参加者の仮想削減量を $red'(i,t)$ 、各目標保有参加者の義務削減量を $RED(i)$ とすると、

$$\sum_i red'(i,t) = \sum_i RED(i) \quad (2.34)$$

となる。

また、仮想削減量には次の式が成立する。

$$red'(i,t) = \frac{P'(i,t)}{C(i)} - ACR(i,t) \quad (2.35)$$

ただし、限界削減費用が既に仮想限界費用を上回っている場合には $red'(i,t)=0$ とする。

2.9.2 取引価格の安定性

取引価格の安定性は、目標保有参加者が排出量取引市場を削減目標達成のために利用する際に重要な指標である。取引価格が不安定な市場はリスクの大きい市場となり、投資機会を減少させる。

本モデルでは、限界費用の上昇により取引価格が上昇する為、取引価格から理論価格を引いた時の価格差の標準偏差を測定する事で、取引価格の安定性を考察する。

また、本モデルでは、条件ごとに取引価格の大きさが変わる為、標準偏差を平均で除した変動係数を安定性の指標として用いる。

従って、

$$\text{取引価格の安定性} = \text{価格変化率の標準偏差} = \text{SD} \left\{ \frac{P(t) - P(t-1)}{P(t-1)} \right\} \quad (2.36)$$

の式で算出する。

2.9.3 注文成約率

取引成功率は、市場におけるエージェント間の取引が効率的に機能しているかを評価する指標である。売買が行われる確率から、以下の式で算出する。

$$\text{取引成功率(\%)} = 100 \cdot \frac{\text{取引成功回数}}{\text{全取引回数}} \quad (2.37)$$

2.9.4 取引継続率

同一条件での複数回のシミュレーションにおいて取引期間終了まで取引が継続した割合であり、取引価格の過度の下落が起こった割合を評価する指標である。

$$\text{取引継続率(\%)} = 100 \cdot \frac{\text{取引継続回数}}{\text{同一条件での全試行回数}} \quad (2.38)$$

本モデルでは、市場価格が 0 円/t-CO₂付近になると取引が起こらなくなるため、期間内に市場価格が 50 円/t-CO₂まで下がった場合にはシミュレーションを強制終了するよう設定した。

第3章 モデルを用いた市場分析

本章では、前章で構築した東京都排出権取引制度モデルを用いて、東京都制度の効率性の分析・評価を行う。

3.1節では、**排出量価格情報の誤差**が制度の効率性に及ぼす影響を分析する。

3.2節では、中小クレジットや都外クレジットなどの供給量が制度の効率性に及ぼす影響を分析する。

3.3節では、エージェントの学習機能が制度の効率性の効率性に及ぼす影響を分析する。

分析に用いるモデルの変数を以下にまとめる。

エージェント

- ・ エージェントナンバー i
- ・ 義務削減量 $RED(i)$
- ・ 累積削減量 $ACR(i, t)$
- ・ 削減量 $red(i, t)$
- ・ 購入入札量 $BUY(i, t)$
- ・ 売却入札量 $SELL(i, t)$
- ・ 予想価格 $exP(i, t)$
- ・ 限界削減費用 $MC(i, t)$
- ・ コストパラメータ $C(i)$
- ・ 保持排出枠 $R(i, t)$
- ・ 学習機能保有割合

取引市場

- ・ 取引期数 t
- ・ 市場価格 $P(t)$
- ・ 理論価格 $P'(t)$
- ・ 情報誤差 σ

また、本研究における初期条件は以下の通りであり、本章で述べる全ての分析について一定とする。

初期条件

- ・ 全取引期数 $T=240$

- ・ 目標保有エージェントナンバー数 100
- ・ 取引参加エージェントナンバー数 30
- ・ 投資分岐割合 $r=0.001$
- ・ 初期排出量価格 $P(0)=1,000$

分析の結果として以下の4つの評価指標を出力する。

評価指標

- ・ 価格指数
- ・ 変動係数
- ・ 注文成約率(%)
- ・ 取引継続率(%)

本モデルは乱数項を含むシミュレーションであるため、同一条件でのシミュレーションにおいても各試行で出力結果が異なる。そこで本章の分析では、複数の条件下での各評価指標の変化の比較・分析の際には、同一条件で100回ずつの試行を行い、出力された結果の平均値をそれぞれの条件での評価指標の値として用いることとした。なお、シミュレーション途中で市場価格が50円/t・CO₂を下回った場合にはその試行を終了することとし、平均の対象から除くこととした。

なお、実際の東京都制度においては、削減義務を達成できなかった事業所には、措置命令違反の場合に知事が代わりに排出量の調達を行い、15,000円/t・CO₂程度で排出量を売却することが検討されており、これが事実上の排出量価格の上限になると推測される。しかし、本研究は今後の制度設計に関する知見を蓄える事を目的としており、この価格上限については考慮しないこととする。

3.1 情報誤差の分析

本節では、情報誤差が制度全体に及ぼす影響について分析する。

3.1.1 背景

世界各国で実施されている多くの排出量取引制度では、取引所が開設されており、取引参加者は常時公表される最新の市場価格を基にブローカーを介して取引を行っている。

一方、東京都が定める排出量取引制度においては、取引参加者を集めた市場は存在せず、全ての取引は事業者同士の相対取引によって行われる。このような仕組みでは、各取引主

体が取引時点での適切な排出量価格を把握することは困難であり、取引主体によって価格の認識がばらつくことによって制度全体の経済効率が低下することが考えられる。東京都は、排出量取引制度の開始にあたって排出量の参考価格の公表を検討しているが、どの程度正確な価格を公表するかによっても、市場の効率性が変化することが懸念される。

3.1.2 目的

2章で構築したモデルを用いて、東京都の制度下での各エージェントの情報誤差が制度全体の経済効率にどのように影響を及ぼし、価格の挙動をどのように変化させるかを分析した。これにより、東京都の制度においてどの程度指標性の高い価格公示を行えば制度の効率性が向上するのかを検証することを目指した。

3.1.3 分析結果

2.7で設定した σ の値を変化させることによって制度における情報誤差の大きさを変化させ、外部クレジットの初期保有排出量が少量の場合と多量の場合の2つのケースにおいて各評価指標がどのように変動するかを評価した。なお、 $\sigma=0$ の時は各エージェントは完全な市場価格情報を持つことを意味し、 $\sigma=1$ の時は各エージェントの予想価格のバラつきが標準正規分布を持つ乱数に従うことを意味する。

ケース1：外部クレジットが少量($R_0=50,000$)の場合

次に、市場に供給される外部クレジット量が比較的少量の場合に情報誤差が効率性に及ぼす影響を評価した。

$\sigma=0\sim 1$ の5条件での各試行における評価指標の平均値と標準偏差は、表3.1のとおりである。なお、学習機能保有割合は2/3とした。

表 3.1 情報誤差による各評価指標の推移

評価指標	σ					
	0	0.001	0.01	0.1	1	
価格指数	mean	0.49	0.49	0.51	0.48	0.48
	SD	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16
変動係数	mean	0.023	0.021	0.023	0.024	0.024
	SD	0.0076	0.0074	0.0085	0.0096	0.0105
注文成約率(%)	mean	39.1	38.8	38.6	39.3	39.0
	SD	3.2	3.4	3.1	3.4	3.1
取引継続率(%)		100	100	100	100	100

表 3.1 より、取引継続率は全ての σ について 100%であり、価格の大きな下落による取引停止は起こっていないことが分かる。

次に、それぞれの条件における表の各評価指標の平均値の違いに統計学的に有意な差があるかどうか検定するため、一元配置分散分析を行った。

表 3.2 一元分散分析の結果

評価指標	F値	p値
価格指数	0.263	0.608
変動係数	1.43	0.232
注文成約率(%)	0.0922	0.762

分析結果の表より、 σ を変化させた場合の各評価指標の平均値の推移に有意な差は見られなかった。したがって、クレジットの供給量が少ない場合には、情報誤差の大きさの変化は市場の効率性に影響を及ぼすとは言えないことが示された。

ケース 2：外部クレジットが多量($R_0=150,000$)の場合

次に、市場に供給される外部クレジット量が十分多い場合に情報誤差が効率性に及ぼす影響を評価した。

$\sigma=0\sim 1$ の 5 条件での各試行における評価指標の平均値と標準偏差は、以下のとおりである。なお、学習機能保有割合は、ケース 1 と同様に 2/3 とした。

表 3.3 情報誤差による各評価指標の推移

評価指標		σ				
		0	0.001	0.01	0.1	1
価格指数	mean	0.10	0.058	0.079	0.090	0.11
	SD	0.10	0.04	0.10	0.09	0.10
変動係数	mean	0.016	0.017	0.014	0.017	0.015
	SD	0.012	0.0180	0.0093	0.016	0.0094
注文成約率(%)	mean	44.7	47.2	45.4	43.9	44.9
	SD	3.9	3.1	4.5	3.8	3.4
取引継続率(%)		22	27	23	24	27

表 3.3 より、取引継続率はケース 1 と比較して低い水準で推移しており、 σ の値による変動はほとんど確認できなかった。

次に、各指標の試行ごとの値についての一元配置分散分析を行った。

表 3.4 一元分散分析の結果

評価指標	F値	p値
価格指数	1.04	0.311
変動係数	2.00×10^{-4}	0.989
注文成約率(%)	3.29	0.072 *

分析結果の表より、 σ を変化させた場合、注文成約率の平均値に有意な差が見られることが分かった。

注文成約率と取引継続率の推移を図 3.1 に示す。

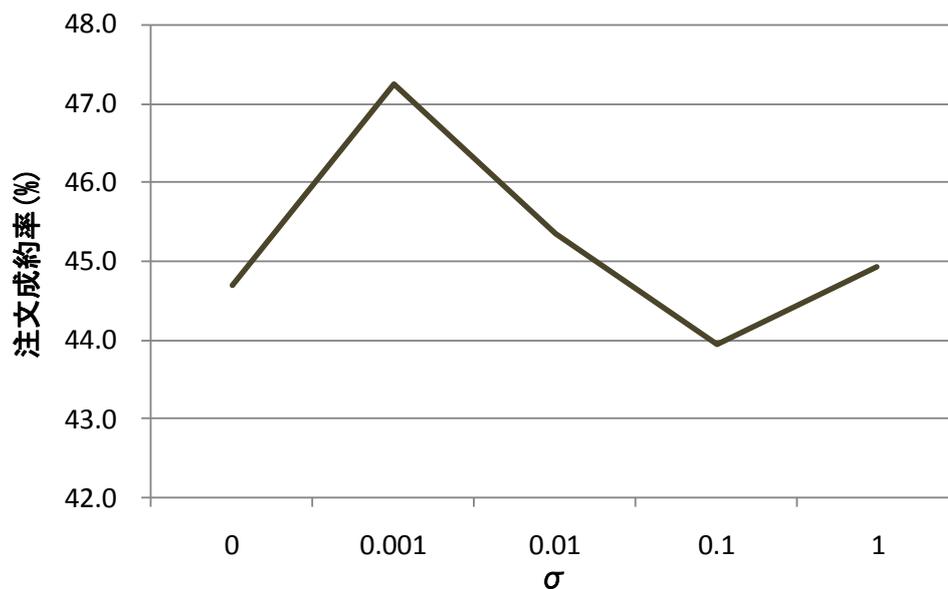


図 3.1 情報誤差の大きさ σ の変化による注文成約率の推移

図 3.1 より、情報誤差 $\sigma=0.001$ の時に注文成約率が最も高いのに比べ、 $\sigma=0$ の時も $\sigma=1$ の時も注文成約率は低水準となり、互いにさほど違いはないことが分かる。これより、クレジットの供給量が十分多い場合には、各エージェントの情報誤差が全くないよりも多少存在する方が効率的な取引が行われると言える。

3.2 クレジット供給量に関する分析

3.2.1 背景

東京都制度においては、大規模事業所同士の相対取引による排出削減以外に、中小事業所や都外事業所が保有するクレジットや再エネクレジット等の取引による排出量削減が認められている。大規模事業所に課された削減義務は現在設定されている第一、第二計画期間以降も継続するので、これら大規模事業所が積極的に排出量を売却することは考えにくい。ゆえに、効率的な制度設計のためには、排出量の主要な売り手となり得る各種クレジットが市場に供給される量の変化が制度全体に及ぼす影響の把握は重要である。

3.2.2 目的

本研究では、取引参加者としてモデル化したクレジットの初期保有排出量がモデルの効率性に与える影響を分析・評価することにより、東京都制度における外部クレジットの供給量と効率性の関係について示唆を得るとともに、今後の制度設計におけるクレジットの最適供給量の把握を行うことを目指した。

3.2.3 分析結果

2.3.1(c)で設定した取引参加者の初期保有排出量 R_0 を変化させることによって、東京都制度モデルに供給されるクレジット量の大きさを変化させ、各評価指標がどのように変動するかを評価した。その際、情報誤差の大きさ $\sigma=0.001$ とし、学習機能保有割合は $2/3$ と設定した。

$R_0=0\sim 150,000$ の6条件での各試行における各指標の平均値と標準偏差は、以下の表3.5の通りである。

表 3.5 取引参加者の初期保有排出量による各評価指標の推移

評価指標		R_0					
		0	50000	75000	100000	125000	150000
価格指数	mean	0.84	0.49	0.33	0.19	0.12	0.06
	SD	0.09	0.15	0.16	0.16	0.11	0.04
変動係数	mean	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	SD	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
注文成約率(%)	mean	34.1	38.8	42.8	46.0	47.4	50.5
	SD	3.4	3.4	4.3	3.9	3.8	3.1
取引継続率(%)		100	100	95	68	48	27

結果より、 $R_o=100,000$ 以降は取引継続率が低下しており、 R_o が増加するにつれて価格の大幅な下落が起こりやすくなることが分かる。

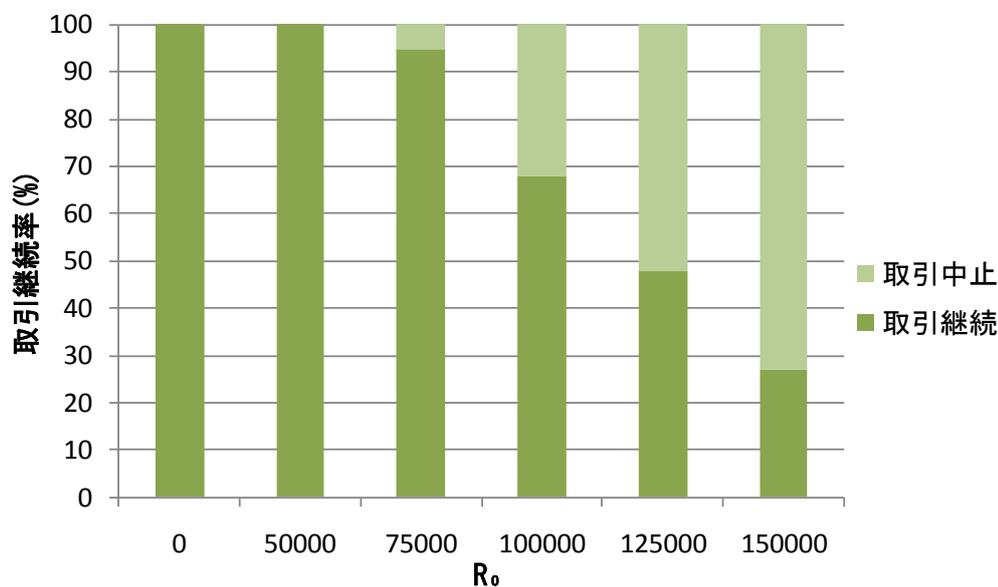


図 3.2 R_o の変化による取引継続率の推移

次に、それぞれの評価指数について一元配置分散分析を行った。

表 3.6 一元分散分析の結果

評価指標	F値	p値
価格指数	1090	$<2.20 \times 10^{-16}$ ***
変動係数	1.03	0.310
注文成約率(%)	778	$<2.20 \times 10^{-16}$ ***

これより、表 3.5 における価格指数と注文成約率の平均値の推移には、 $p < 0.001$ で有意な差があることが分かった。

価格指数と注文成約率の推移は、図 3.3 の通りである。

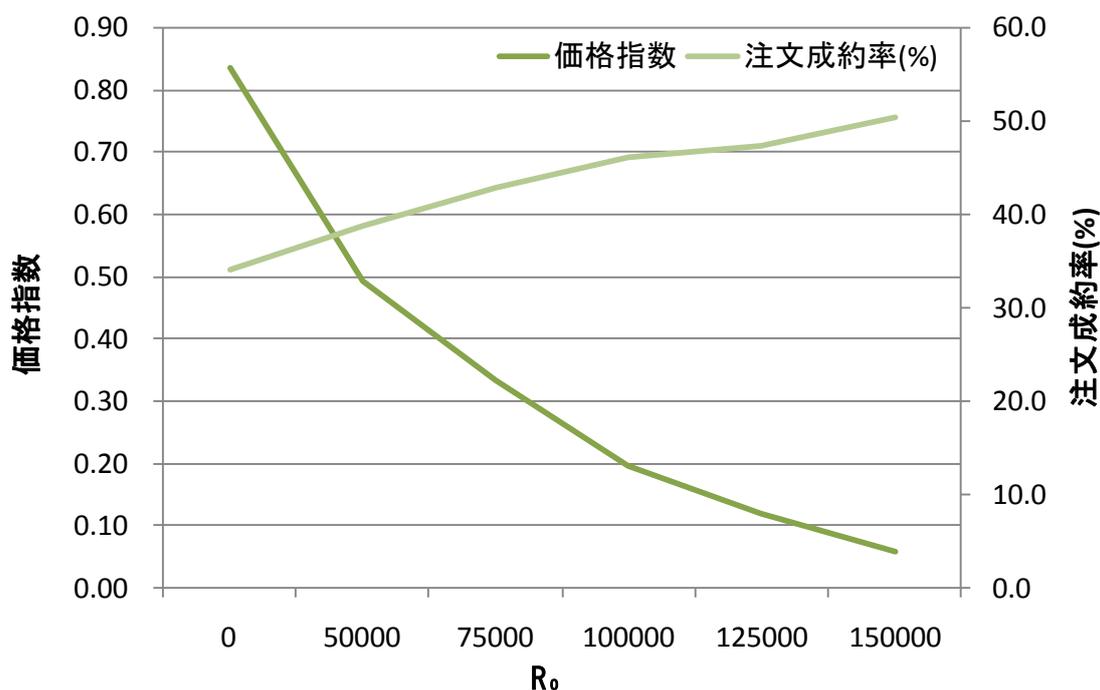


図 3.3 R_o の変化による価格指数と注文成約率の推移

図 3.3 より、 R_o が増加するにつれて価格指数は減少していき、注文成約率は増加していくことが分かる。これより、 R_o が多いほどモデル全体の経済効率性は高まり、取引の成功率も上がることが示された。

これと取引継続率の推移より、 $R_o=75,000$ 程度の時に市場の効率性が最も高くなると言える。

3.3 学習効果の分析

3.3.1 背景

本節では、制度全体の中でエージェントが保有する学習機能の割合が、制度全体の効率にどのように影響を及ぼすかを分析した。

3.3.2 分析結果

学習機能を保有するエージェントの割合を 0、1/3、2/3、1 と変化させ、各評価指標がどのように変動するかを、クレジット量が少量の場合と十分に多い場合の 2 つのケースで分

析・評価した。その際、両方のケースにおいて情報誤差の大きさ $\sigma=0.001$ としてシミュレーションを行った。

ケース 1：外部クレジットが少量($R_0=50,000$)の場合

それぞれの条件での各試行における評価指標の平均値と標準偏差は、表 3.7 のとおりである。

表 3.7 取引参加者の学習機能保有割合による各評価指標の推移

評価指標		学習機能			
		0	1/3	2/3	1
価格指数	mean	0.24	0.29	0.49	0.47
	SD	0.13	0.15	0.14	0.14
変動係数	mean	0.023	0.024	0.024	0.025
	SD	0.010	0.011	0.011	0.014
注文成約率(%)	mean	39.0	39.9	39.5	41.0
	SD	4.6	4.2	3.4	3.3
取引継続率(%)		100	100	100	100

取引継続率を見ると、全ての試行において取引が 100%継続していることが分かる。次に、それぞれの評価指数についての分散分析の結果を示す。

表 3.8 一元分散分析の結果

評価指標	F値	p値
価格指数	186	$<2.20 \times 10^{-16}$ ***
変動係数	1.73	0.190
注文成約率(%)	10.4	1.40×10^{-3} **

これより、表 3.7 における価格指数と注文成約率の平均値の推移には $p<0.001$ で有意な差があることが分かった。

価格指数と注文成約率の推移は、以下の図 3.4 の通りである。

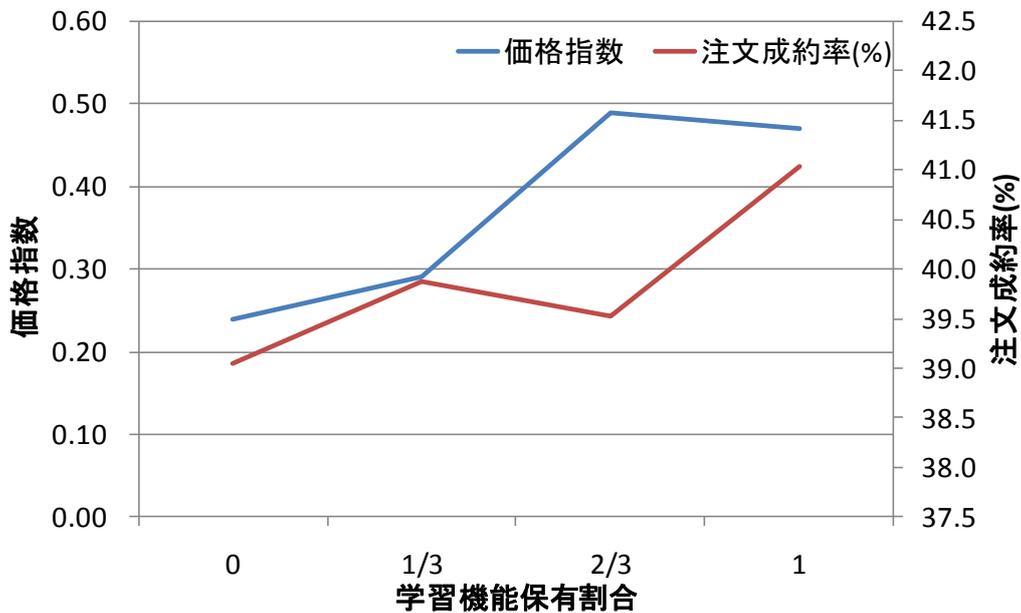


図 3.4 学習機能保有割合の変化による価格指数と注文成約率の推移

図 3.4 より、エージェントの学習機能保有割合が増加するにつれて価格指数と注文成約率は増加していくことが分かる。これより、学習機能を持つエージェントが多いほど取引が成立する確率は高まるが、制度全体の経済効率性は低下することが分かった。これは、学習機能保有割合が高いほど同一の予想価格モデルを持つエージェントが多くなるため、各期における注文価格が硬直化してしまい、全エージェントにとって最適な市場価格が決定しづらくなったためであると考えられる。

ケース 2：外部クレジットが十分多い($R_0=100,000$) 場合

外部クレジットの供給量が $R_0=100,000$ の場合の、各条件での各試行における評価指標の平均値と標準偏差は、表 3.9 のとおりである。

表 3.9 取引参加者の学習機能保有割合による各評価指標の推移

評価指標	学習機能				
	0	1/3	2/3	1	
価格指数	mean	0.10	0.11	0.20	0.18
	SD	0.075	0.11	0.14	0.12
変動係数	mean	0.019	0.017	0.022	0.027
	SD	0.010	0.010	0.010	0.018
注文成約率(%)	mean	45.3	46.2	44.7	46.0
	SD	4.3	3.9	4.0	4.1
取引継続率(%)		99	93	86	58

図 3.5 を見ると、取引継続率は学習機能の割合が増加するに従って低下していることが分かる。

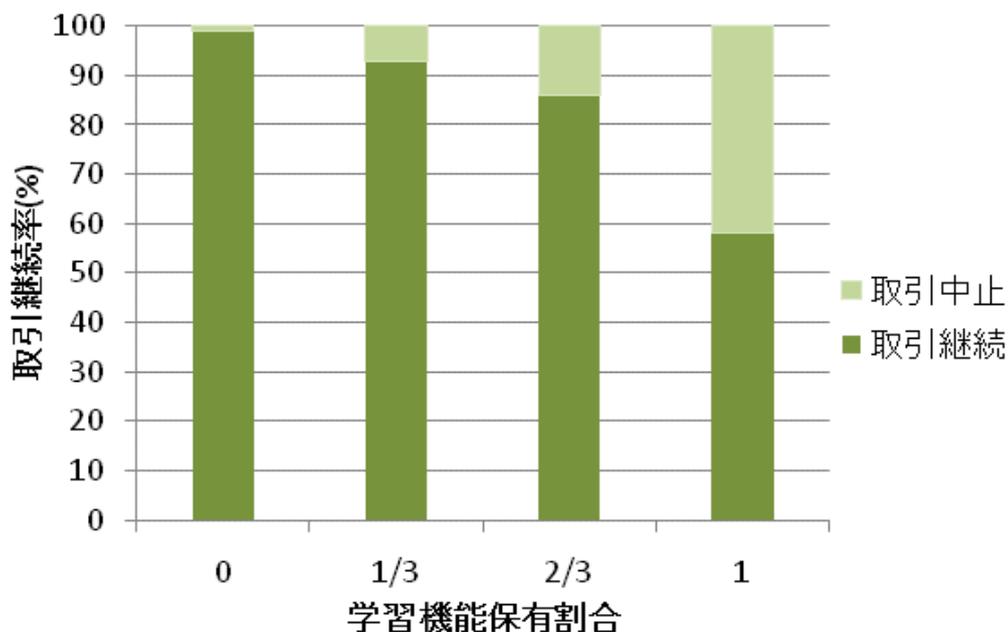


図 3.5 学習機能保有割合の変化による取引継続率の推移

次に、それぞれの評価指数についての分散分析の結果を示す。

表 3.10 一元分散分析の結果

評価指標	F値	p値
価格指数	39.7	9.45×10^{-10} ***
変動係数	21.4	5.25×10^{-6} ***
注文成約率(%)	2.41	0.122

これより、表 3.9 における価格指数と変動係数の平均値の推移には $p < 0.001$ で有意な差があることが分かった。

価格指数と注文成約率の推移は図 3.6 の通りである。

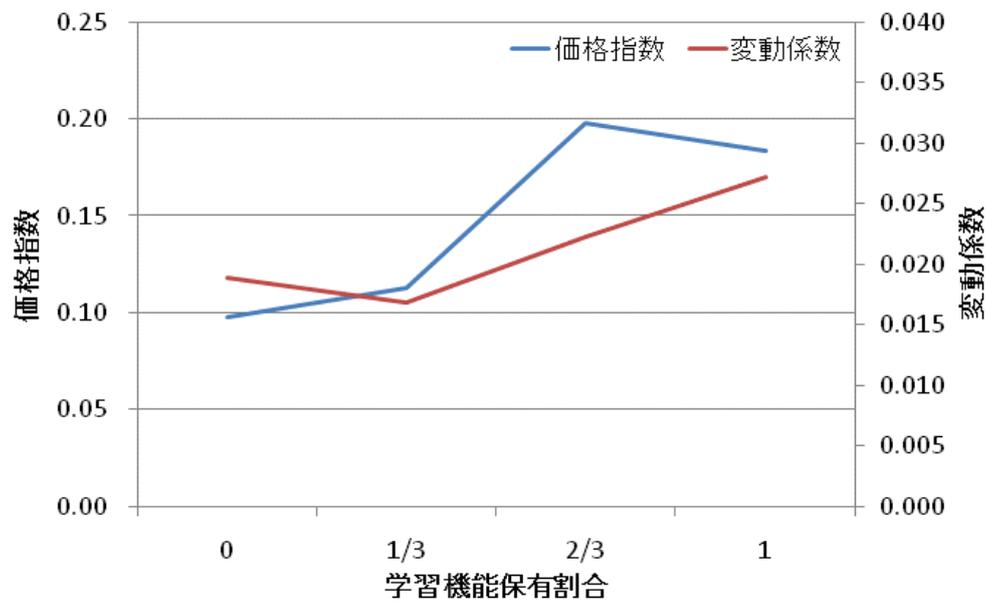


図 3.6 学習機能保有割合の変化による価格指数と変動係数の推移

図 3.6 より、学習機能の保有割合が増加するにつれて価格指数と変動係数には増加傾向が見られる。これより、エージェントの学習機能保有割合が高いほど、ケース 1 と同様に制度全体の経済効率性は低下し、価格の安定性も低下することが示された。

第4章 結論

4.1 まとめ

3章では、2章で構築した東京都排出量取引制度モデルを用いた分析を行い、その結果を示した。

本節では、こうして得られた結果を解釈し、その総括と考察を行った。

3.1節では、排出量価格情報の誤差が制度の効率性に及ぼす影響を分析した。

外部クレジットの市場への供給量が少ないケースでは、情報誤差の程度が市場の効率性にほとんど影響を及ぼさないことが示された。これは、制度内に中小クレジットや再エネクレジットなどの供給量が少ない場合には、完全な市場価格の公示機能を持つ取引所取引であっても相対取引と比較して効率的な制度運営ができるわけではないことを意味している。

外部クレジットの市場への供給量が多い場合の分析結果からは、情報誤差の程度が市場参加者の注文約定率にのみ影響を及ぼすことが示された。外部クレジットの供給が十分に確保されている制度においては、市場参加者の排出量価格の認知に若干のバラつきがある時が最も効率的な取引が行われ、市場価格が完全に公示される場合には取引が成功する確率が低下することが分かった。同様に、市場価格についての情報が全くない場合にも取引効率は低下することが分かった。

どちらのケースにおいても、取引所が持つ市場価格公示の機能は、制度全体の効率性を向上させるわけではないことが分かった。これより、東京都制度における取引所の存在は市場価格の公示機能としては必要ではなく、現在検討されている参考価格の提示が適切に為されるだけで十分に効率的な制度運営が可能であると言える。

3.2節では、中小クレジットや都外クレジットなどの供給量が制度の効率性に及ぼす影響を分析した。

分析結果より、制度に供給されるクレジット量を増加させると制度全体の経済効率性や取引の効率性は向上するが、取引継続率は対象事業所の総基準排出量の10%程度から低下していくことが示された。これより、制度へ供給されるクレジット量は多すぎても少なすぎても市場の効率性を低下させ、合計基準排出量の7.5%~10%付近が効率性の観点から最適なクレジット供給量であると言える。

3.3節では、外部クレジットの供給量の多寡により2つのケースを想定し、エージェントの学習機能が制度の効率性の効率性に及ぼす影響の分析を行った。これより、制度の効率性

に関する知見が得られた。

クレジット供給量が少ないケースでは、学習機能を持つ市場参加者が多いほど取引が成立する確率は高まるが、制度全体の経済効率性は低下することが分かった。

クレジット供給量が十分に確保されているケースでは、学習機能を持つ市場参加者が多くなるにつれて市場価格のボラティリティが大きくなり、経済効率性が低下することが分かった。また、学習機能保有割合が上がると価格が大幅に下落する確率が高まることも確認された。

どちらのケースでも、学習機能を持つ市場参加者が増加すると制度全体の経済効率性が低下することが示されている。この結果から、精度の高い価格予想を常に行う金融機関などの主体が今後市場に参加する際には、効率性の観点からはその参加数や割合に制限を設ける必要があると言える。

以上を踏まえると、次のことが言える。

取引参加者の価格認識の精度は、高すぎても経済効率性を悪化させ、東京都制度における相対取引のように低い水準であっても適切な情報公示を行えば十分に高効率な制度運営を実現できる。

また、外部からのクレジット供給量は制度の効率性に影響を与えるが、その際には供給量の適切な管理が重要であり、多すぎても少なすぎても制度の経済効率が悪化する。

4.2 今後の課題

本研究ではマルチエージェント・シミュレーションを用いて東京都の排出量取引制度の分析を行った。同様のアプローチによる排出量取引制度の研究はこれまで幾つか行われており、他の金融市場や一般的な社会制度を対象としたものを含めると数多くの研究成果が生まれているが、その一方で、マルチエージェント・シミュレーションによる社会システムのモデル化やシミュレーション手法の妥当性についての議論が存在するのも事実である。社会科学の分野においても、この議論に対する一定の見解は確立されておらず、その妥当性を検証する絶対的な手法も存在しない。

Carley and Gasser^[26]は、シミュレーション結果の妥当性検証について次の3つの方法を提唱した。

1. 理論的検証(theoretical verification)

十分かつ正確に実際のシステムやその特徴を概念化できているかどうかを専門家が検証する方法。

2. 外的検証(external validation)

シミュレーション結果が実世界とマッチしているか、あるいは、本質的なところは同じであるかどうかを、実例を基に検査する方法。

3. クロスモデル検証(cross-model validation)

モデルの結果が他のモデルでも同じかどうかを複製することによって検査する方法。

これに従い、本研究において構築したモデルに対して、過去に構築された一般排出量取引市場モデルの分析結果との比較によるクロスモデル検証を行うことで妥当性考察の一助とすることは可能である。葺塚^[11]、渡邊^[1]のモデルで示されたのと同様に、本研究でも取引参加者過多の市場における効率性の低下が確認され、実際の価格と予想価格の乖離が小さい場合の市場の効率性低下も示された。

もちろん、既存研究における一般排出量取引市場モデルと本研究における東京都排出量取引制度モデルには基本的な構造に多くの類似点があることから、本モデルの妥当性が十分に検証されたとは言えず、さらなる妥当性検証は必要である。

しかしながら、数式をベースとした理論的アプローチや実験・ケーススタディを中心とした経験的アプローチでは再現が困難な排出量取引、特に、効率的な制度設計が急務である東京都制度についての知見が得られたことには大きな価値があると考ええる。

上で述べた通り、本モデルの妥当性の厳密な検証は困難であるが、それ以外にも今回行った各エージェントのモデル化には幾つかの改善の余地が存在する。

目標保有エージェントが持つ限界削減費用曲線のモデル化に際しては、簡単のため、排出削減対策の複雑な費用構造のモデルへの反映は行っていない。この点の改善に加えて、曲線のモデル化に使用した削減対策データのアップデートによって、更に精度の高い費用推定が可能となる。

東京都制度が開始直後であるため、実際の制度参加者の行動がどのようなものであるかは判明していない部分が多いが、将来的には、社会調査などによって得られた各事業所の行動特性を本モデルに組み込むことによって、現実に即した高精度のシミュレーションとそれに伴うより現実的な制度分析が可能になると考える。

今後、世界的に多くの域内排出量取引制度の実施が予想され、その際には実際の制度に即した制度分析に関する知見が必要になると考えられる。本研究がその基礎となれば幸いである。

参考文献

- [1] 渡邊吉浩, "マルチエージェントシミュレーションを用いた排出権取引制度の研究", 東京大学修士論文, 2010
- [2] 西條辰義; 地球温暖化対策 排出権取引の制度設計, 日本経済新聞出版社, 2006
- [3] T.Kusakawa and T.Saijo, "Emission Trading Experiments: Investment Uncertainty and Liability", March 2002
- [4] 東京工業品取引所市場構造研究所, "エネルギー使用合理化取引市場設計関連調査"
- [5] Swiss AIJ Pilot Program(SWAPP), "CERT – Carbon Emission Reduction Trade Model"
- [6] Y.Yamada and H.Mizuta, "Agent-based simulation of the International CO2 Emission trading", 2002
- [7] 木村香代子・織田瑞夫, "マルチエージェント・シミュレーションを利用した売買取引事例研究", 2001
- [8] 岡野貴史, "温室効果ガス排出権取引のエージェントベースシミュレーション", 東京大学修士論文, 2002
- [9] 東京工業品取引所市場構造研究所, "エネルギー使用合理化取引市場設計関連調査", 2004
- [10] 宍戸恵一郎, "エージェントベースシミュレーションによる排出権取引市場に関する研究", 2007
- [11] 蕪塚洋平, "マルチエージェントモデルによる国内排出量取引市場の分析", 2009
- [12] 水田秀行・山形与志樹, "国際排出権取引におけるシミュレーションとゲーミング", 2002
- [13] 所健一, "電力市場と CO2 排出権取引市場の相互関係を考慮した取引シミュレーション - 共進化型アルゴリズムを用いたマルチエージェントシミュレーションの開発", 電力中央研究所報告(R02014), 2003
- [14] 和泉潔, 人工市場 —市場分析の付図雑系アプローチ, 森北出版, 2003
- [15] 生天目章, マルチエージェントと複雑系, 森北出版, 1998
- [16] 高安秀樹・高安美佐子, エコノフィジックス市場に潜む物理法則, 日本経済新聞社, 2001
- [17] 山木陽一, よくわかる電力取引入門, エネルギーフォーラム, 2005
- [18] 東京都環境局; 計画書等の公表と削減対策等の集計
http://www6.kankyo.metro.tokyo.jp/tochou_2/Wroot/asp/W200.asp (2010.10.1)
- [19] 東京都環境局, 大規模事業所への温室効果ガス排出総量削減義務と排出量取引制度(義務の内容)
http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/climate/large_scale/cap_and_trade/period.html

(2011.1.1)

- [20] 環境省中央環境審議会地球環境部会, 「目標達成シナリオ小委員会」 中間とりまとめ, 2001
温室効果ガス削減対策技術シート
<http://www.env.go.jp/council/06earth/r062-01/index.html> (2010.8.1)
- [21] 環境省, 2008 年度温室効果ガス排出量 (確定値) について
http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=15529&hou_id=12390 (2010.10.1)
- [22] 東京都, 2007 年度都内の温室効果ガス排出量及びエネルギー消費量 (速報値), 2009 (別紙)温室効果ガス排出量及びエネルギー消費量の状況
<http://www.metro.tokyo.jp/INET/CHOUSA/2009/07/60j7l500.htm> (2010.10.1)
- [23] 財団法人省エネルギーセンター, 工場・ビル・荷主等産業の省エネ
http://www.eccj.or.jp/sub_02.html (2010.11.1)
- [24] 東京都地球温暖化防止活動推進センター, 過去の業種別省エネルギー対策推進研修会
<http://www.tokyo-co2down.jp/c1-jigyou/j2/j2-02.php>
- [25] 西尾健一郎・木村宰・野田冬彦, “業務部門における省エネルギー対策の傾向分析 - 東京都の温暖化対策計画書制度下ではどのような対策が計画されたか? -”, 電力中央研究所報告(Y09012), 2010
- [26] ICE, MARKET DATA(Category : Indices, Market : ICE Future Europe, Report : ECX EUA)
<https://www.theice.com/marketdata/reports/ReportCenter.shtml?reportId=77>
(2010.12.1)
- [27] Carley, Kathleen M. and Les Gasser(1999). Computational and organization theory, in G. Weiss (ed.) Multiagent systems: Modern approach to distributed artificial intelligence. The MIT press, pp.299-330

付録

表 A: 目標保有エージェントの属性一覧

番号 i	業種	事業所用途	義務削減量 (t-CO2)	初期費用 (円/t-CO2)	傾き
1	業務	事務所	-223000	-5000	0.15
2	業務	事務所	-120000	-5000	0.15
3	業務	事務所	-61000	752	0.22
4	業務	事務所	-40000	752	0.22
5	業務	事務所	-32000	752	0.22
6	業務	事務所	-21000	752	0.22
7	業務	事務所	-9000	752	0.22
8	業務	事務所	-2000	752	0.22
9	業務	事務所	3000	752	0.22
10	業務	事務所	6000	752	0.22
11	業務	事務所	10000	752	0.22
12	業務	事務所	14000	5000	0.30
13	業務	事務所	18000	5000	0.30
14	業務	事務所(情報)	24000	752	0.22
15	業務	事務所(情報)	33000	752	0.22
16	業務	事務所(情報)	49000	5000	0.30
17	業務	事務所(情報)	83000	5000	0.30
18	業務	事務所(情報)	131000	5000	0.30
19	業務	事務所(情報)	201000	5000	0.30
20	業務	テナントビル	-302000	-5000	0.15
21	業務	テナントビル	-97000	-5000	0.15
22	業務	テナントビル	-62000	-5000	0.15
23	業務	テナントビル	-36000	-5000	0.15
24	業務	テナントビル	-23000	-5000	0.15
25	業務	テナントビル	-15000	752	0.22
26	業務	テナントビル	-10000	752	0.22
27	業務	テナントビル	-6000	752	0.22
28	業務	テナントビル	-2000	752	0.22
29	業務	テナントビル	1000	752	0.22
30	業務	テナントビル	4000	752	0.22
31	業務	テナントビル	6000	752	0.22
32	業務	テナントビル	8000	752	0.22
33	業務	テナントビル	10000	752	0.22

34	業務	テナントビル	12000	752	0.22
35	業務	テナントビル	13000	752	0.22
36	業務	テナントビル	15000	752	0.22
37	業務	テナントビル	17000	752	0.22
38	業務	テナントビル	20000	752	0.22
39	業務	テナントビル	24000	752	0.22
40	業務	テナントビル	31000	752	0.22
41	業務	テナントビル	37000	5000	0.30
42	業務	テナントビル	47000	5000	0.30
43	業務	テナントビル	61000	5000	0.30
44	業務	テナントビル	76000	5000	0.30
45	業務	テナントビル	264000	5000	0.30
46	業務	医療・宿泊・商業	-176000	-5000	0.15
47	業務	医療・宿泊・商業	-55000	-5000	0.15
48	業務	医療・宿泊・商業	-31000	-5000	0.15
49	業務	医療・宿泊・商業	-21000	-5000	0.15
50	業務	医療・宿泊・商業	-13000	752	0.22
51	業務	医療・宿泊・商業	-9000	752	0.22
52	業務	医療・宿泊・商業	-4000	752	0.22
53	業務	医療・宿泊・商業	-1000	752	0.22
54	業務	医療・宿泊・商業	3000	752	0.22
55	業務	医療・宿泊・商業	6000	752	0.22
56	業務	医療・宿泊・商業	9000	752	0.22
57	業務	医療・宿泊・商業	11000	752	0.22
58	業務	医療・宿泊・商業	13000	752	0.22
59	業務	医療・宿泊・商業	15000	752	0.22
60	業務	医療・宿泊・商業	18000	752	0.22
61	業務	医療・宿泊・商業	22000	752	0.22
62	業務	医療・宿泊・商業	31000	752	0.22
63	業務	医療・宿泊・商業	41000	5000	0.30
64	業務	医療・宿泊・商業	54000	5000	0.30
65	業務	医療・宿泊・商業	80000	5000	0.30
66	業務	医療・宿泊・商業	69000	5000	0.30
67	業務	教育施設	-45000	-5000	0.22
68	業務	教育施設	1000	-5000	0.22

81	産業	工場	-82000	-10000	1.00
82	産業	工場	-51000	-7776	1.27
83	産業	工場	-39000	-7776	1.27
84	産業	工場	-22000	-7776	1.27
85	産業	工場	-8000	-7776	1.27
86	産業	工場	3000	-5000	1.50
87	産業	工場	11000	-5000	1.50
88	産業	工場	32000	-5000	1.50
89	産業	工場	105000	-5000	1.50
90	産業	熱供給施設	-209000	-10000	1.00
91	産業	熱供給施設	-77000	-7776	1.27
92	産業	熱供給施設	-43000	-7776	1.27
93	産業	熱供給施設	-27000	-7776	1.27
94	産業	熱供給施設	-6000	-5000	1.50
95	産業	廃棄物施設	15000	-10000	1.00
96	産業	廃棄物施設	70000	-10000	1.00
97	産業	上下水・その他	-778000	-10000	1.50
98	産業	上下水・その他	-21000	-10000	1.50
99	産業	上下水・その他	10000	-10000	1.50
100	産業	上下水・その他	90000	-7776	1.27

謝辞

本研究を進めるにあたって、指導教官である松橋教授には大変お世話になりました。大変お忙しい中、親身になって相談に乗ってくださいました。

吉田准教授にもいろいろとアドバイスをいただきました。研究が進まずに悩んでいた時も、粘り強く付き合ってください、本当にありがとうございます。

研究室のみんなにも大変お世話になりました。知識に乏しい分野について数え切れないほど相談に乗ってもらいました。特に、同期の杉山君には、2年半前に大学院の入学手続きの代行をしてもらい大変感謝しています。当時誰一人関東で知り合いのいなかった僕の急な頼みに一つ返事で応じてくれたことを、今でも覚えています。あれがなければ、無事に入学し、今回の修士論文を書き上げる事はできなかったでしょう。

最後に、柳沢研究室の小田島さんにはたくさん元気をもらいました。小田島さんがいなければ、日本経済を覆った長く暗いトンネルを抜ける事は叶わなかったと思っています。