

K-2 地球温暖化対策のための京都議定書における国際制度に関する政策的・法的研究
(4) 炭素クレジットの国際市場形成に関する数理モデル分析

独立行政法人国立環境研究所 地球温暖化研究プロジェクト

炭素吸収源評価研究チーム

山形与志樹

大阪大学社会経済研究所

西條辰義

平成12～14年度合計予算額 17,358千円

(うち、平成14年度予算額 6,286千円)

〔要旨〕京都議定書は、各国政府による批准が進められており早ければ来年中にも発効する予定である。一方、具体的な地球温暖化対策の推進のあり方については、特に効果的かつ効率的な京都メカニズム、特に国際排出量取引の具体的な運用については、さらに慎重な検討が必要である。

エージェントベース・アプローチは、このような経済や国際関係に係わる多様な主体（エージェント）が複雑に相互作用するシステムを研究する手法として、近年注目されて分析手法である。エージェントとして多様な振る舞いをモデル化し、コンピュータを用いてシミュレートすることで、ミクロなダイナミクスとマクロな現象を関連づけることができる。同時に、人間の意思決定を再現する現実的なモデルを構築し、検証するには、実際の人間が参加するゲーミングが有効である。

本研究では、エージェントシミュレーションフレームワークを構築し、国際排出量取引市場のシミュレーションプロトタイプを作成してきた。また、このようなモデルの構築、検証のためのゲーミングシミュレーションシステムを開発し、現実の人間をプレイヤーとした実験を行った。さらに単純化したモデルにおけるゲーム理論的解析も行った。

また、京都議定書において定められた付属書B国の温室効果ガス排出目標達成の補完的手段の一つである排出権取引を、どのような制度のもとで行うかの詳細について、制度設計工学的手法によりデザインすることを試みた。つまり、比較すべき異なる制度のもとでそれぞれ経済実験を行い、それらの結果を比較することにより、望ましい制度を明らかにした。「京都先買手責任制度」と我々が呼ぶ制度の下では低い効率性（排出権取引によって節約できる削減費用を表す指標の一つ）しか達成出来ないのに対して、「売手責任制度」や「国先買手責任制度」と我々が呼ぶ制度の下では、比較的高い効率性が平均的には達成できることを発見した。

〔キーワード〕京都議定書、排出量取引、エージェントベース・アプローチ、ゲーミング、投資の不確実性

1. はじめに

京都議定書で議論されているような地球温暖化や排出量の国際取引を考える上で、条件の異なる国々間の複雑な相互作用とシステム全体の複雑で動的な振る舞いを理解することが重要な課題となる。しかし従来の経済学や社会学の手法では、このように複雑で動的な状況を扱うのは困難である。そこで我々は、以下2つの研究を並行して行うことによって、排出量取引に関する制度のあり方を研究した：(1) エージェントベース・アプローチによって個々の主体のダイナ

ミックな相互作用を考慮し、2008年から2012年の第一約束期間における京都メカニズムの効率的な運用のためのレジーム設計への貢献を目的とした研究を実施した。(2) 制度設計工学の手法を用い、被験者を用いた経済実験を実施することによって排出量取引の望ましい具体的制度を明らかにした。(なお、前者については、日本アイ・ピー・エム(株) 東京基礎研究所 水田秀行氏の解析を含む。)

2. 研究方法と結果・考察

(1) エージェントベース・アプローチを用いた排出量取引制度の研究

① エージェントベース・アプローチ

多様な要素がダイナミックに関係するマーケットや社会がどのような挙動を示すのか解析するための方法論として、エージェントベース・アプローチに注目し、これまで研究を行ってきた¹⁾。個々のミクロな主体のモデルから出発し、系全体としてのマクロな現象を説明するためには、人工市場²⁾といったシミュレーションによる手法によってミクロ-マクロ問題を考える必要がある。

我々は再利用性や仕様変更を考慮し、なるべく単純な構造から出発したレイヤー構造を用いたフレームワークを構築し、その上にアプリケーションとして国際排出量取引をモデル化したエージェントベース・シミュレーションを構築した。

また、温暖化ガス排出量取引市場のように、現在まだ本格的に実現していない市場のモデルをシミュレーションによって考えていく上で、人間もプレイヤーとして参加し、その振る舞いを観察できるゲーミングシミュレーションも同時に実施していくことは、モデルの妥当性を確認する上でも重要である。そのため、我々はエージェントシステムと連携したウェブアプリケーションとしてのゲーミングシステムも構築し、実験を行った。

このように、シミュレーションとゲーミング、そして解析という研究サイクルをバランス良く実施していくことは、エージェントベース・アプローチという新たな領域において健全な研究を行うための重要な指針となると考えている。

② 国際排出量取引とエージェントベース・シミュレーション

多様な要因が複雑に相互作用する国際排出量取引市場について、エージェントベース・アプローチを用いた検討を行う。

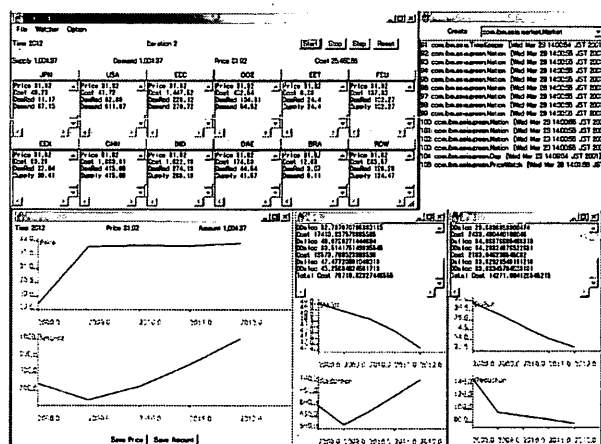
Grutter による CERT (Carbon Emission Reduction Trading) モデル³⁾に基づき、参加国を12の地域に分け、それぞれを独立した行動主体(エージェント)として考える。これら12のエージェントごとに異なる限界削減コスト(MAC)関数が推定されている。取引は中央の市場において期間ごとに決められた価格で行われるものとする。一回の取引における各エージェントの排出量売買高、国内削減量、および取引価格は、MACに基づく均衡条件から決定できるものとする。

以上のモデルをエージェントベース・シミュレーションとして構築した。市場を運営するCOP エージェントは、まず仮の取引価格を設定して RFB メッセージを参加国(Nation エージェント)に送る。Nation エージェントは RFB を受け取ると、自分の MAC が提示価格と等しくなる国内削減量を求める。国内削減量が求まると、市場で買いたい、あるいは、売りたい量が、定

められた削減目標との差として求まる。こうして求まった各 Nation エージェントの需要あるいは供給量が BID メッセージを通じて市場に集められる。総需要量と総供給量が等しい場合、現在の提示価格が均衡価格であることが分かる。需要と供給に過不足がある場合は、提示価格を変化させ、これらの処理を均衡に達するまで繰り返すことになる。

次に第一約束期間である 2008 年から 2012 年までの 5 年間の取引を考える。削減目標は 5 年間に削減すべき総量として与えられ、それを各年度ごとにどのように割り振るかは各エージェントの戦略にまかされる。年度ごとには、削減目標と MAC が与えられると、最適な国内削減量と取引量、均衡価格が決められる。

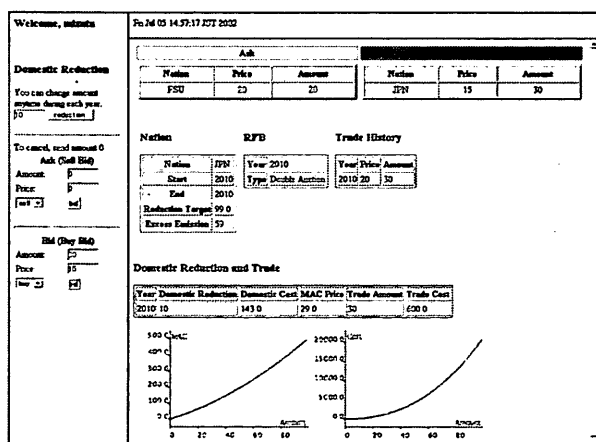
そのため、次に MAC のダイナミクスに注目しよう。ここでは MAC そのものではなく、その逆関数の微分をテクノロジー関数として考える。テクノロジー関数は単価に応じて利用可能な削減技術を削減量で与える。時間が経つにつれ、技術の進歩や利子率に応じて、利用可能な技術は次第に単価の安い方へとシフトしていく。また、技術には一度しか有効ではないものと何度も繰り返し使用可能な（あるいは毎年保持する必要がある）ものがあるとする。ある年の市場価格が定まり、その価格より安価な技術が全て活用された後の年には、テクノロジー関数に不連続な縮小が生じる。エージェントは、自分や周りの状況を考慮しつつ、割り当てられた総削減目標を 5 年の取引期間のそれぞれに分割し、コストをできるだけ抑えるものとする。



シミュレーションでは、5年間の試行(これを 1 Game とする)を繰り返し行うことにより、エージェントが同じ条件下でより良い戦略に近づくようにした。もちろん、各エージェントが調整できるのは自分自身の分割のみであるため、他のエージェントの行動によって望む結果がすぐには得られないかもしれない。しかし、このような調整を繰り返すことによってトータルでは最適な戦略へと近づいてゆくことが期待される。

③ゲーミングシステムと実験

前節において、国際排出量取引市場をモデル化し、単純なソフトウェアエージェントによるシミュレーションを紹介した。一方、現実の世界での行動主体や市場ルールは、非常に複雑であり、我々の単純化したモデルがどれだけ妥当であるか、十分検証を行わなければならない。また、その結果を反映し、エージェントモデルやレジームの改良を続けていく必要がある。このように、エージェントベース・シミュレーションと現実の社会との関係を考えてとき、人間が参加するゲーミングシミュレーションというもう一つのアプローチを併用し、モデルの検証および再設計を行うことが



重要である。さらに、それぞれ独立したプラットフォームで実験を行うのではなく、ネットワークによって互いに連携し、同一の条件において、エージェントと人間の行動を調査することによって、モデルの検証と改良がより効率よく行えると期待される。

本研究は、ウェブアプリケーションとしてゲーミングシステムを構築し、エージェントシステムとメッセージの交換を通じて連携させた。排出量取引を行うゲーミングシミュレーションでは、参加するプレイヤー各々に対応するエージェントを用いて、プレイヤーに割り当てられた資源や条件を管理し、中央の取引市場とのやりとりを仲介させることになる。標準的なインターネットプロトコルを使用することにより、プレイヤーは使い慣れたウェブブラウザを用いて、どこからでもゲームに参加することができる。

各プレイヤーは取引年度や価格、割り当て削減量や、取引履歴等の情報を参照して、各年度の削減量や売買する量をフォームに入力する。クライアントのブラウザ上に表示されたプロトタイプ実験システムの様子を図に示す。

実験には東京大学工学部の学生10名が参加した。この10人の学生を2人一組とし、Annex I 各国から US を除いた 5 地域にランダムに割り当てた。ワルラス均衡価格モデルとDouble Auction による実験を行った。学生達には、実験経済学では一般的である金銭等の報酬は与えられず、代わりに各チームのパフォーマンスを公開することにより競争への動機付けとした。

ワルラス均衡価格モデルを用いた実験では、プレイヤーによる入力ミスや意図的な売り控えによって、一時間以上経過しても全く取引を行うことができなかった。そこで Double Auction (DA) 方式によって各プレイヤーが希望価格と取引量を自由に入力し、売値が買値以下となった時点で即座に取引が成立する取引モデルを用いて実験を行った結果を示す。

Reference (1 Year, Equilibrium Price = \$66.44)

Nation	JPN	EEC	OOE	EET	FSU
Cost(M\$)	5883	16932	2166	-3664	-11503

Gaming 1 (DA 1 Year)

Nation	JPN	EEC	OOE	EET	FSU
Cost(M\$)	6320	18387	2209	-4323	-12769
Performance	-7.43%	-8.59%	-1.99%	17.99%	11.01%
Price	\$72.47	\$73.58	\$73.67	-\$73.67	-\$73.13

Reference (5 Years)

Nation	JPN	EEC	OOE	EET	FSU
Cost(M\$)	11489	34648	5667	-6443	-21067

Gaming 2 (DA 5 Years)

Nation	JPN	EEC	OOE	EET	FSU
Cost(M\$)	22191	69780	7088	-16549	-25852
Performance	-93.15%	-101.40%	-25.07%	156.85%	22.71%

り手側の FSU (Former Soviet Union) 及び EET (Economies in Transition of Eastern Europe) が好成績となっている。

Double Auction 方式では、1年の間に複数の取引を行うことができるが、国内削減に関して

DA方式を用いて 2010年の1年 (Gaming 1, Gaming 2)、及び、2008年から2012年までの5年間 (Gaming 3) に国際排出量取引を行った結果において、それぞれのペアの総費用 (M\$) と成績を表に示す。

Reference として示されているのは、ワルラス方式を用いたエージェントシミュレーションによる結果であり、その総費用からどれだけ改善したかを成績として示した。また、1年の実験における平均取引価格も与えられている。ここで、負の価格は、そのペアが売り手として取引したことを示す。売

は、ワルラス方式と同様、1年の最後に登録した削減量のみが有効なものとして扱われ、その後、次の年度になると、前年度の削減量に変更することはできない。また MAC に関しても、その年度の間は固定されており、年度が変わるごとに既に述べたダイナミクスに従って変動する。

これらの実験において、少なくとも議定書で定められた削減目標を達成するよう指導し、全ペアともこれを達成した。但し、他のペアは丁度目標値を達成したのに対し、FSU は Gaming 3 において目標を大きく上回る削減をし余剰分 375 MtC の排出量を売却しないまま終了した。

さらに実験では、随時、国内削減量や Bid の入力、および成立した取引についてデータベースに発生時刻も含めて記録した。開始後しばらく経過した後、取引が成立し、価格も当初の高値から次第に減少していく傾向が見られた。FSU が Gaming 3 において大量の排出量を残しているが、どの実験においても本来売り手となると予想された FSU や EET の売り渋りが見られ、その結果として均衡価格より高い取引が行われた。実験後のインタビューからも、こうした傾向が確認された。さらに、EET を担当したペアは前日 FSU を担当した経験から、その傾向をより認識し、高騰した価格で FSU が売る前に、大量に売り抜けることにより大きな利益を上げていたことも明らかとなった。

（２）制度設計工学の手法を用いた排出量取引に関する研究

① 研究方法

制度設計工学の手法を用いた。具体的には、自己の利益を最大化するように金銭的に動機づけられた被験者を用いて、複数の実験を実施した。各実験では異なるルール（制度）を用い、それらの結果を比較することにより、どの制度が望ましいのかを明らかにした。本研究では、特に取引の責任制度と取引方法に着目し、主に経済効率性と環境保全性の観点から、望ましい制度を明らかにした。責任制度とは、例えば削減の裏付けのない排出権が取引された場合、その責任を売り手が負う「売手責任制度」がよいのか、あるいは責任を買い手が負う「買手責任制度」がよいのか、という問題である。買手責任制度に関しては、国同士の取引の責任を果たすのが先で、京都議定書に対する責任は後、という「国先買手責任」と、京都議定書が先で他国は後、という「京都先買手責任制度」をデザインし、実験により比較した。取引方法に関しては、ダブルオークションと呼ばれる取引所取引と、国同士で個別に行う相対取引の二つを比較した。

②研究結果及び考察

責任制度間で効率性を比較すると、まず買手責任制度の中では、国先買手責任制度の方が京都先買手責任制度よりも高い効率性を達成できることが分かった。これは、京都先買手責任制度のもとでは、各国が意図的にデフォルトを起こすインセンティブがあるからである。次に、売手責任制度と国先買手責任制度を比較すると、効率性の平均値に差は無かったが、売手責任制度では高い効率性を達成できる場合と低い効率性しか達成できない場合の大きく2つにはっきり分かれるのに対して、国先買手責任制度では大きく成功することも大きく失敗することもなく、ほどほどの結果が得られることが分かった。

5. おわりに

本報告では、京都議定書における国際排出量取引制度に関し、(1) エージェントベース・シミュレーション、および、ウェブ上のゲーミングシステムを用いたゲーミング実験、及び(2) 制度設計工学の手法を用いた経済実験による研究、について紹介した。

(1) に関しては、今後の課題として、二国間の個別の交渉による価格決定や不均衡状態における市場価格の変動、オプション取引などの金融工学的手法の導入が考えられる。また、ゲーミング実験の結果を参考により現実的な交渉戦略や取引を取り入れたモデルの構築も行っていきたい。

現時点において京都議定書はまだ発効しておらず、また排出量取引をはじめとする有効な運用方法等の検討も今後議論していかなければならない。こうした、まだ運用実績の乏しい複雑な社会システムを構築していく上で、その有効性や性質等をパラメータやルールそのものをさまざまに変化させて実験できるアプローチは、強力な手法として期待される。また、排出量取引の正式運用の際には、こうしたシミュレーションやゲーミングシステムは、実施者や政策決定者のトレーニングやサポートにも有効に活用できる。

このようにシミュレーションやゲーミング、解析からなるエージェントベース・アプローチは社会科学における新たなパラダイムとして、今後ますます重要性を増すものと期待される。

(2) に関しては、排出権取引において買手責任を用いる場合、京都議定書に対する責任をまず果たさなければならぬ京都先責任制度が望ましいと考えられがちだが、実際には京都先買手責任制度のもとでは意図的にデフォルトを起こす国が発生し易いため、議定書に対する責任が後回しになる国先買手責任制度よりも低い効率性に終わってしまうことが明らかとなった。

6. 引用文献

- 1) H. Mizuta and Y. Yamagata: "Agent-based Simulation and Greenhouse Gas Emissions Trading," Proceedings of WSC'01, 535-540 (2001)
- 2) 和泉潔・植田一博: 「人工市場入門」 人工知能学会誌, Vol.15, No.6, 941-950 (2000)
- 3) J. M. Grütter: "World Market for GHG Emission Reductions," the World Bank's National AIJ/JI/CDM Strategy Studies Program (2000)

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表(学術誌・書籍)

<学術誌(査読あり)>

- ① H. Mizuta and Y. Yamagata: "Agent-based Simulation for Economic and Environmental Studies"

LNAI 2253, 142-152 (2001)

- ② T. Kusakawa and T. Saijo: "Emissions Trading Experiments: Investment Uncertainty and

Liability,” Andrea E. Rizzoli and Anthony J. Jakeman (eds.), *Integrated Assessment and Decision Support: Proceedings of the First Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society*, Vol. 2, 454-459, iEMSs, June (2002)

- ③ T. Kusakawa and T. Saijo : “Emissions Trading Experiments: Investment Uncertainty Reduces Market Efficiency,” T. Sawa (ed.), *International Frameworks and Technological Strategies to Prevent Climate Change*, 45-65, Springer-Verlag (2003)

<学術誌（査読なし）>

- ① 草川孝夫・西條辰義：経済セミナー(日本評論社)、12月号, 36-41 (2000)
「地球温暖化 環境鎖国の経済的帰結」
- ② 山形与志樹、水田秀行：オペレーションズ・リサーチ学会誌、46,10 (2001)
「京都議定書・国際排出量取引のエージェントベースシミュレーション」
- ③ 水田秀行、山形与志樹：シミュレーション学会誌、21,1 (2002)
「国際排出量取引のエージェントベース・シミュレーション」
- ④ 山形与志樹、水田秀行：システム/制御/情報学会誌、47, 9 (2002)
「京都議定書に係わる国際制度設計：マルチエージェントシミュレーションの役割」
- ⑤ Y. Hizen, T. Kusakawa, H. Niizawa and T. Saijo: “Two Patterns of Price Dynamics were Observed in Greenhouse Gases Emissions Trading Experiments: An Application of Point Equilibrium,” 一橋大学経済研究所 世代間利害調整プロジェクト ディスカッションペーパー No.86, 4月 (2002)

<書籍、報告書類等>

なし

(2) 口頭発表

- ① H. Mizuta and Y. Yamagata : Winter Simulation Conference (WSC2001) (2001) “Agent-based Simulation and Greenhouse Gas Emissions Trading”
- ② H. Mizuta and Y. Yamagata : Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS2001) (2001) “Agent-based Simulation and Gaming System for International Emissions Trading”
- ③ 西條辰義：環境経済・政策学会2001年大会 (2001) “Two Patterns of Price Dynamics were Observed in Greenhouse Gases Emissions Trading Experiments: An Application of Point Equilibrium”
- ④ 西條辰義：気候変動枠組み条約第7回締約国会議 (2001) “Emissions Trading Experiments: Investment Uncertainty and Liability”
- ⑤ H. Mizuta and Y. Yamagata : Winter Simulation Conference (WSC2002) (2002) “Transaction Cycle of Agents and Web-based Gaming Simulation for International Emissions Trading”
- ⑥ 水田秀行、山形与志樹：日本シミュレーション&ゲーミング学会 秋季大会 (2002)
「エージェントベース・アプローチと京都議定書・国際排出量取引」

- ⑦ Y. Yamagata and H. Mizuta : Complex Systems (2002) “Agent-based simulation of the International CO₂ Emission Trading: Emergent behavior of countries”
- ⑧ 水田秀行、山形与志樹：OR学会シンポジウム (2002)「京都議定書・国際排出権取引のエージェントベースシミュレーション」
- ⑨ H. Mizuta and Y. Yamagata : International Congress of Mathematicians Game Theory and Application Satellite Conference (ICM2002GTA) (2002)“International Emissions Trading with Agent-based Simulation and Web-based Gaming”
- ⑩ 水田秀行、山形与志樹：計測自動制御学会 システム工学部会第25回研究会 (2002)「エージェントフレームワークとウェブゲーミングシステムを用いた国際排出権取引実験」
- ⑪ 水田秀行、山形与志樹：情報処理学会 知能と複雑系研究会 (2002)「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」
- ⑫ Y. Yamagata and H. Mizuta : Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS2002) (2002) “An International Regime Design Regarding the Kyoto Protocol: The Role of Multi-Agent Simulation”
- ⑬ 西條辰義：気候変動枠組み条約第8回締約国会議 (2002) “Evaluating Commitment Period Reserve: An Experimental Approach”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

気候変動枠組み条約第7回および第8回締約国会議のサイドイベントで報告を行うことにより、各国の交渉担当者などに研究成果を提示した。