

マルチエージェント・シミュレーションを利用した国際排出権取引研究

織田 瑞夫[†] 木村香代子[†] 玉田 正樹[†]

[†] ㈱構造計画研究所 〒164-0012 東京都中野区本町 4-38-13

E-mail: † {oda, kayoko, tamada}@kke.co.jp

あらまし 本報では、マルチエージェントシミュレーションにより、国際取引市場における二酸化炭素の排出権取引の再現を試みる。各エージェントは排出権の購入、または自国内で二酸化炭素の排出量を削減することにより、自国の二酸化炭素排出の不遵守量をゼロにすることを目指す。また、排出権の購入や排出量の削減には費用がかかるが、各国は排出権を安く買って（または国内で排出量の削減を行って）得た排出権を高く売ることができれば、不遵守量の削減に関する収支を改善することができる。本報では、収支の改善および不遵守量の削減という目的をめざして各国が市場取引や自国内での排出量削減を行った場合の、価格の推移や全体としての削減効率等を、相対取引およびオークション取引の場合について観察する。

キーワード 排出権取引, マルチエージェントシミュレーション, 強化学習

Keyword Emission Trading, Multi-Agent Simulation, Reinforcement Learning

1. 序

㈱構造計画研究所では、ネットワーク上で排出権取引実験を行う「ネットワーク取引実験システム」を開発している。これは人間がコンピュータを介して取引を行うもので、プレイヤーは、インターネットやイントラネットで結ばれた遠隔のパソコンから取引を行うことができ、リアルタイムで変化する取引状況を見つづ、売買を行う。取引終了後は、保存された交渉履歴により、商品の特徴と価格変動の関係、投資効果を分析することができる。取引の方法として、相対取引とオークション取引が選択でき、また情報の見せ方、投資の有無、責任制度など、様々な取引条件を指定する。

今回は、人間が介して取引を行うのではなく、マルチエージェントシミュレーションによる、国際取引市場における二酸化炭素の排出権取引の再現を試みる。

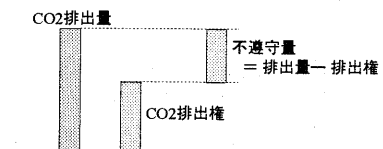
各エージェントは排出権の購入、または自国内で二酸化炭素の排出量を削減することにより、自国の二酸化炭素排出の不遵守量をゼロにすることを目指す。また、排出権の購入や排出量の削減には費用がかかるが、各国は排出権を安く買って（または国内で排出量の削減を行って）得た排出権を高く売ることができれば、不遵守量の削減に関する収支を改善することができる。

収支の改善および不遵守量の削減という目的に合致した行動を取るために、各エージェントは毎ステップに学習を行う。

2. モデルの概要

本モデルで定義されるエージェントは 10 ケ国で、各エージェントはあらかじめ定められたいくつかの取引に関する戦略を有しており、シミュレーションのステップ毎に最適な戦略を選択するよう、毎回学習を行う。各エージェントの第一の目的は、自国から排出され

る二酸化炭素の総量「排出量」が、管理機関から排出してよいと許可された排出量「排出権（初期割当量）」を超えないようにすることである。つまり「排出量 ≤ 排出権」である。理想的には「排出量 = 排出権」にすることである。シミュレーション中、各エージェントは排出量を自分で削減する事によってこの数量を減少させたり（国内削減）、排出権を売買する事によってこの数量を増加・減少させたりすることができる。



目的: 不遵守量を減らす
かつ
手持ちの資金を増やす(減らさない)

- 国内削減を行ってCO2排出量を減らす
- 売買により排出権を増やす

図1 排出権・排出量・不遵守量の関係

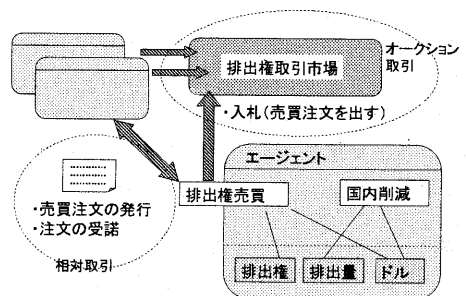


図2 シミュレーションモデル概念図

排出権を売却すると売った値段に応じた収入が得られ手持ちドルが増える。逆に、排出権を購入したり、排出量を削減すると、支出が生じ手持ちドルが減る。

各エージェントの第二の目的は、実験開始時の手持ちドルをできるだけ増やす、又は、できるだけ減らさないようにすることである。

本モデルでは1国が1エージェントに対応し、各国の国内削減に要する費用（単価）は国毎に異なるものとする。取引形態は相対取引およびオークション取引とするが、これについては後述する。

3. 取引形態

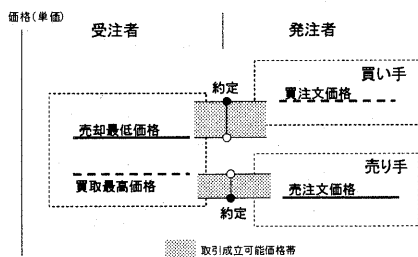
取引方式にはオークション取引と相対取引がある。相対取引は2ヶ国間の1対1の取引である。オークション（取引所取引）取引では、エージェントは現時点で約定されていない売りと買いの注文状況（価格と数量）を見て、いくらの価格なら売り買いできるかを判断し自分の注文を出す。

3.1. 相対取引

相対取引においては、各国が持っている売却最低価格および買取最高価格と、発注者の注文の額を比較して取引の成立・非成立を定める。取引が成立する条件は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{受注者の売却最低価格} &\leq \text{発注者の買注文価格} \\ \text{受注者の買取最高価格} &\geq \text{発注者の売注文価格} \end{aligned}$$

このとき、約定価格は発注者の提示価格とする。



※発注側の提示価格で約定する

図3 相対取引の仕組み

3.2. オークション取引

オークション取引においては、各国は取引先を指定せずに売買注文を発し、発せられた注文は取引所に集められる。取引所において次の条件を満たす場合に売買が成立する。

$$\text{買注文価格} \geq \text{売注文価格}$$

ただし、約定価格は売注文の価格とする。

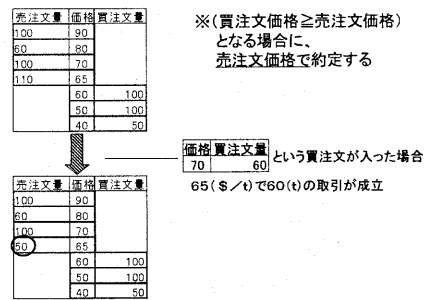


図4 オークション取引の仕組み

4. 国内削減

自分が、現在、二酸化炭素の排出量を抑制する設備を持っているとする。その設備を使ってある量だけ排出量を削減することができる。国内削減は年度の終了時に一度だけ行い、削減量に比例した削減費用がかかるものとする。今回は、設備の固定費は簡単のために設けない。なお、ある国について、国内削減に要する費用と売注文・買注文価格の間には次のような関係がある。

$$(\text{買注文価格}) < (\text{国内削減単価}) < (\text{売注文価格})$$

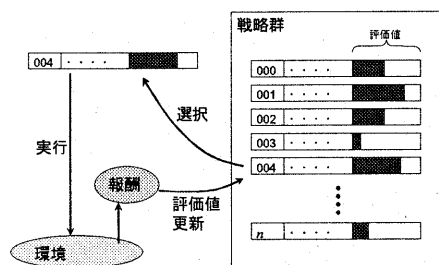
5. 強化学習

エージェントはあらかじめ取引に関する戦略の組を持っている。各戦略には、その戦略がどれだけ優れているか（実績をあげたか）を評価する値が付属している。この評価値が高い戦略は取引において優れた戦略である。したがって、評価値の大きい戦略をとるならば、取引において成功を収めることが期待できる。

学習の進行は以下のようにしてなされる。

(戦略の選択・実行) → (結果の評価) → (評価値の更新) → (戦略の選択・実行) → …

各戦略は評価値の大きさに比例した選択確率で選択される（ルーレット選択）。



※各戦略は評価値の大きさに比例した確率で選択される

図5 学習の仕組み

以下、各取引形態ごとに戦略の定義と戦略の評価方法を記す。

■ 相対取引

・ 戦略の定義

注文発信戦略：注文種，相手国，価格
 注文受諾戦略：相手国，購入可能最高価格，売却可能最低価格
 ただし、価格の与え方は自国の国内削減費用との差で与える。

・ 戦略評価（報酬の与え方）

発信戦略：受諾状況(1,-1)×価格
 受諾戦略：受諾状況(1,-1)×価格

・ 注文発信ルール

戦略に対してルーレット選択を行い，注文を発する。受諾されれば報酬を返す。

・ 注文受諾ルール

ルーレット選択により戦略をロードし，
 売注文：自身の受諾可能（購入可能）最高価格より低い
 買注文：自身の受諾可能（売却可能）最低価格より高い
 ならば，注文を受けて，ロードした戦略に報酬を返す

■ オークション取引

・ 戦略の定義

注文発信戦略：注文種，価格

・ 戦略の評価

価格×（取引量／入札量）

以降に、結果として取引価格の推移の例を示す。

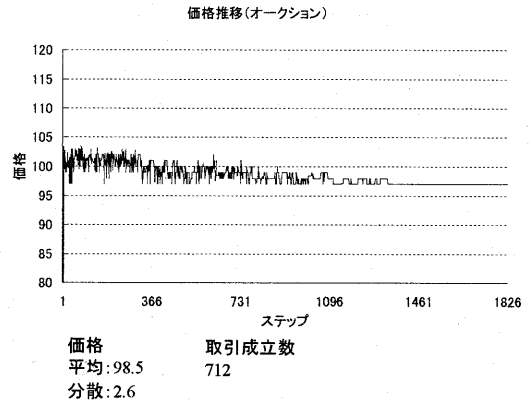


図6 オークション取引における価格推移

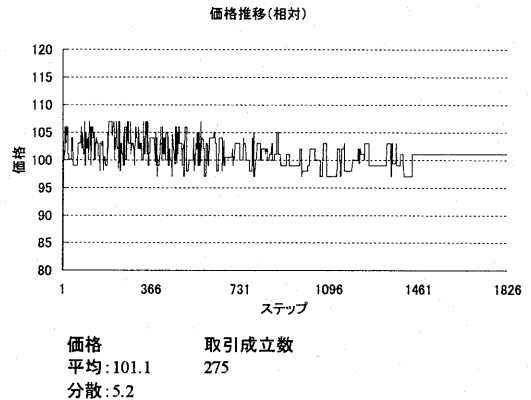


図7 相対取引における価格推移

6. 試行

本モデルを使ってシミュレーションを行い、取引方式の違いにより市場の状況はどのように異なるかを観察する。試行の概要を以下に示す。

■ 10ヶ国で試行

■ 全ての国が不遵守の状態から開始する

■ 自国削減単価が、

- 96 (\$/t) × 1ヶ国，
- 98 (\$/t) × 1ヶ国，
- 100 (\$/t) × 4ヶ国，
- 102 (\$/t) × 1ヶ国，
- 104 (\$/t) × 1ヶ国，
- 106 (\$/t) × 1ヶ国，
- 108 (\$/t) × 1ヶ国

の計10ヶ国。

■ 期間は5年（1000ステップ＝1年）とする

7. 所見

7.1. 取引形態毎の特色

取引形態毎に、以下のような特徴がみられた。

■ オークション取引：

- 取引の成立回数が多く，取引価格が安め
- 取引価格の分散が小さい

■ 相対取引：

- 取引の成立回数が少なく，取引価格が高め
- 取引価格の分散が大きい

■ 価格の推移：

- 取引形態によらず，時間とともに安くなってゆく傾向がある

7.2. 削減効率

また、最終期を終えた段階での残金によって、各取引形態間のパフォーマンスを比較すると、次のような現

象が見られる。

■市場取引の効果：

→ 自国削減のみの場合よりもパフォーマンスがよい

■相対取引よりも、オークション取引のほうがパフォーマンスが良い

■自国削減単価とパフォーマンスの関係：

→ 削減単価が平均的なレベルより離れるほどパフォーマンスがよい傾向にある

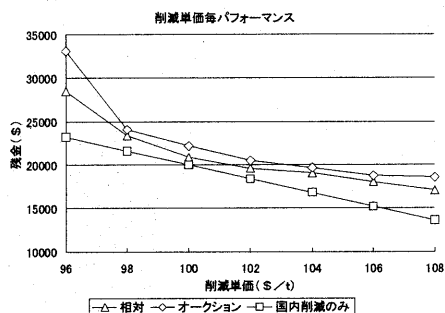


図8 国内削減の単価とパフォーマンスの関係

8. 結

今回は取引をかなり単純化したものに絞ってモデルを作成したが、今後責任制度に関する機能などの追加を行い、モデルを精緻化するとともに、ネットワーク取引実験システムで行った場合との比較などを行い、研究を進めたい。

文 献

- [1] Epstein, J.M. and Axtell, R. (1996), *Growing artificial Societies*, MIT Press. (服部正太, 木村香代子 訳 (1999), 『人工社会』, 共立出版)
- [2] 山影進, 服部正太, 編 (2002), 『コンピュータの中の人口社会』, 共立出版
- [3] KK-MAS : <http://www2.kke.co.jp/mas/>