

## 1. 緒言

地球温暖化防止のために各国で温室効果ガス排出削減の取り組みがなされている。欧州では域内排出権取引制度（EU-ETS）が創設され、2005年1月より本格稼働している。排出権取引とは、企業や国ごとに排出できる温室効果ガスや汚染物質の量を排出枠として割当て、売買することである。排出実績が割当量を下回ればその分を売却できるため、排出量の削減が促され、社会全体で汚染物質を効率よく削減できる。温室効果ガスの排出権取引はEUなどで実施されているほか、米国北東部7州においても導入が検討されている。

排出権取引市場の参加者の目的としては約束排出量の遵守以外にも利潤の追求などが挙げられ、それぞれ異なる戦略を保持して取引に参加するであろう。市場が経済合理的な目標保有参加者だけから構成されるのであれば、排出権価格は理論的な均衡価格に収束するであろうが、戦略の異なる主体が参加する場合は、価格や値動きに影響があると考えられる。日本国内では自主参加型排出量取引制度が導入されたばかりであり、今後、本格的に排出権市場を整備する場合、これらの参加主体ごとの行動の違いが市場に与える影響についての知見を有しておくことは、制度設計にあたり有効である。

そこで本研究では、参加主体の戦略の違いを考慮するためにマルチエージェントモデルを採用し、排出権取引市場モデルの構築を行った。そして、異なる戦略を設定した参加主体の活動により、どのような市場構造が生まれるのかを考察する。

## 2. マルチエージェントシステム

「エージェント」とは参加主体の行動を模倣したプログラムで、意思決定能力を備えた主体である。マルチエージェントシステムは、複数のエージェントを用いて対象とするシステムの創発的な現象を分析しようとする方法論である。特定の実験的な応用例を正確に描いてみせるのが目的ではなく、基本的なプロセスについての理解を深めるのが目的である。

## 3. 排出権市場モデルの構築

### 3.1. 排出権市場モデルの概要

市場参加者をエージェントとしてモデル化し、売買の場となる市場モデルを組み合わせる排出権取引市場を構成する。排出量の上限が設けられるキャップ&トレード型の取引を想定し、市場参加エージェントは、キャップが設定された目標保有参加者と、取引のみに参加する取引参加者をモデル化する。

本モデルにおける時間の単位は、次の通りである。

- ・ 目標保有参加エージェントは排出削減の決定を1期に一度行い、全シミュレーション期間をN期とする。
- ・ 1期につきT回の取引を行う。

約定処理には、板寄せと呼ばれるオークション方式を用いる。

### 3.2. 排出削減技術関数

本研究では目標保有参加者の排出削減費用関数を以下のように設定している。

排出削減量（Q）は、資本設備投資（K）と可変要素投入量（V）により決定されると仮定する。収穫逦減の法則を満たし、コブ＝ダグラス型の関数として表されるものとする。

$$Q = AV^{\alpha}K^{\beta} \quad (1)$$

ここで、 $A$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ は参加主体ごとに異なる削減技術のパラメータである。

また、単位当たりのレンタル費用を  $r$ 、単位当たりの可変要素価格を  $w$  とすると、削減にかかる総費用  $C$  は、次式で表される。

$$C = rK + wV \quad (2)$$

(1)、(2)より長期限界費用曲線 (LMC) と短期削減費用曲線 (SMC) を導出する。ここで、SMC 曲線は資本設備の量を固定した時の限界削減費用曲線であり、LMC 曲線は資本設備と可変費用を最適に組み合わせた時の限界削減費用曲線である。

(1)、(2)において資本設備投資  $K$  を固定してにおいて、 $C$  を可変要素投入量  $V$  により微分することで短期削減費用曲線 SMC を得ることができる。

$$SMC = A^{-\frac{1}{\alpha}} K^{-\frac{\beta}{\alpha}} \alpha^{-1} w Q^{-1+\frac{1}{\alpha}} \quad (3)$$

長期限界削減費用曲線 LMC は次のように表すことができる。

$$LMC = \left( A^{-1} \alpha^{-\alpha} \beta^{-\beta} r^{\beta} w^{\alpha} Q^{1-\alpha-\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha+\beta}} \quad (4)$$

投資は不可逆的であるとし、一度投資を実施すると次期以降においてもレンタルコストを継続的に支払う義務が発生する。設備の償却および投資のタイムラグについては考えないこととする。

### 3.3. エージェントの意思決定

エージェントの意思決定が必要なパラメータは、排出削減量、排出権注引量、単位当たりの注文価格である。

#### (1) 各期首での排出削減量の決定

各期における排出削減量  $Q$  の意思決定の対象とすることも考えられるが、今回は限界削減費用が前期の排出権価格の平均値に一致するまで削減を行うものとする。資本設備投資額は、最も効率的な資本投資額、つまり決定した排出削減量の値で LMC 曲線と SMC 曲線が交叉するような資本額を投資する。ただし、資本設備の償却を考えず投資の不可逆性を仮定しているため、最適資本設備投資額が前期よりも低い場合に減らすことはできない。

#### (2) 提示価格、注文量の決定

目標保有参加者の戦略を、岡野 [3] が提案した Adaptive 戦略およびゲーム理論より以下のように定義した。

##### ① 取引の成功を重視する戦略 (Adaptive 戦略)

前回の取引の成功・失敗に基づいて、次の取引が成功するように決定する (Fig 2)。

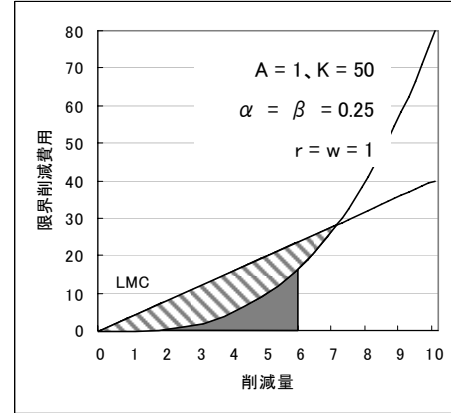


Fig 1. 限界削減費用曲線

##### ①前回の取引成功時

$$\begin{cases} P_i(t) = \frac{P_i(t-1) + P_i(t-1)}{2} \\ Q_i(t) = \frac{R_i(t) - N \{ LMC^{-1}(P_i(t)) \}}{T} \end{cases}$$

##### ②前回の取引失敗時 ( $P(t-1) \neq P_i(t-1)$ )

$$\begin{cases} P_i(t) = P_i(t-1) \\ Q_i(t) = \frac{R_i(t) - N \{ LMC^{-1}(P_i(t)) \}}{T} \end{cases}$$

##### ③前回の取引失敗時 ( $P(t-1) = P_i(t-1)$ )

$$\begin{cases} Q_i(t) = \frac{Q_i^*(t-1) + Q_i(t-1)}{2} \\ P_i(t) = LMC \left[ \frac{\{ R_i(t) - T \cdot Q_i(t) \}}{T} \right] \end{cases}$$

$P_i(t)$ 、 $Q_i(t)$ :時刻 $t$ でのAgent  $i$  の注文価格、注文量  
 $P(t)$ 、 $Q_i^*(t)$ :時刻 $t$ での取引価格、Agent  $i$  の取引量  
 $R_i(t)$ :エージェント $i$ の削減目標  
 $N$ :残り期間数、 $T$ :残り取引回数

Fig 2. Adaptive 戦略のアルゴリズム

② 自己の短期的な利益を重視する戦略（Nash 最適反応戦略[4]）

前回の他のエージェントの注文に対して、利益を最大にするように（Nash 最適反応）決定する（Fig 3）。

③ 混合戦略

排出権を購入場合は Adaptive 戦略で注文を行い、売却する場合は Nash 最適反応戦略で注文を行う。

$$u_i(s_i^*(t), s_{-i}(t-1)) = \max u_i(s_i(t), s_{-i}(t-1))$$

$u_i$ : Agent iの利益、  
 $s_i(t)$ : 時刻tにおけるiの注文(注文価格、注文量)  
 $s_{-i}(t)$ : 時刻tにおけるi以外の注文(注文価格、注文量)

Fig 3. Nash 最適反応戦略のアルゴリズム

取引参加者の戦略は、以下のようなものを定義した。

- ① トレンドに対して順張りの注文を行う（トレンド追随型）。
- ② トレンドに対して逆張りの注文を行う（トレンド追随型）。
- ③ ランダムに注文を行う（ランダム顧客）。
- ④ 過去3回分の注文を2次関数に当てはめて価格を予想し、注文する（トレンド予想型）。

## 4. シミュレーションの実施

### 4.1. パラメータの設定

シミュレーション期間は5期とし、1期に50回の取引を行うとした。罰金は80000 円/tCO<sub>2</sub>に設定した。目標保有エージェントの設定は Fig 4 のようにし、 $\alpha = 0.4$ 、 $\beta = 0.1$ とし、要素価格は  $w = r = 1$ （円）とした。このときの競争均衡価格は 17820 円/tCO<sub>2</sub>である。

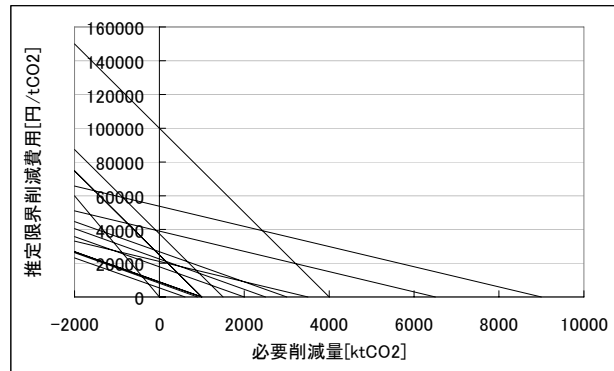


Fig 4. 削減必要量と LMC

### 4.2. シミュレーションの実施①

目標保有エージェントのみが市場に参加している場合についてのシミュレーションを行った。①全てのエージェントが Adaptive 戦略を採用するケース、②全てのエージェントが Nash 最適反応戦略を採用するケース、③全てのエージェントが混合戦略を採用する場合についてのシミュレーションを、開始時の価格を様々に変えて行った。その結果、戦略と初期条件によっては、目標が達成されないケースや、経済効率（＝獲得余剰 / 最大余剰）が悪いケースが存在することを確認した。

### 4.3. シミュレーションの実施②

前節で、目標達成率および経済効率が悪かった「全てのエージェントが Nash 最適反応戦略を採用し、初期の価格が 15000 円/tCO<sub>2</sub>」のケースについて、取引参加エージェントを様々に追加し、再度シミュレーションを行った。適切な

Table 1. 各ケースにおける達成率

初期価格 (円/tCO <sub>2</sub> )	①	②	③
30000	100.4%	167.9%	167.6%
25000	101.3%	140.0%	139.7%
20000	101.6%	112.2%	112.2%
15000	100.6%	84.6%	100.4%
10000	100.2%	56.5%	103.8%

Table 2. 各ケースにおける経済効率

初期価格 (円/tCO <sub>2</sub> )	①	②	③
30000	74.0%	-43.0%	-42.0%
25000	88.5%	24.6%	25.2%
20000	97.1%	79.7%	79.6%
15000	98.4%	13.7%	98.9%
10000	95.9%	-152.8%	89.5%

数の取引参加者が市場に参加することで、取引が促進され目標達成率・経済効率が向上することが分かった。

また、追加したエージェントの種類や数が同じでも、回によって価格の推移が全く異なり、不安定になるケースも観察された (Fig 6)。

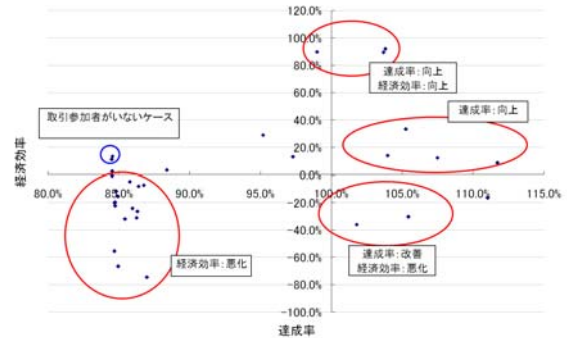


Fig 5. 取引参加エージェントを加えた場合の  
目標達成率と経済効率

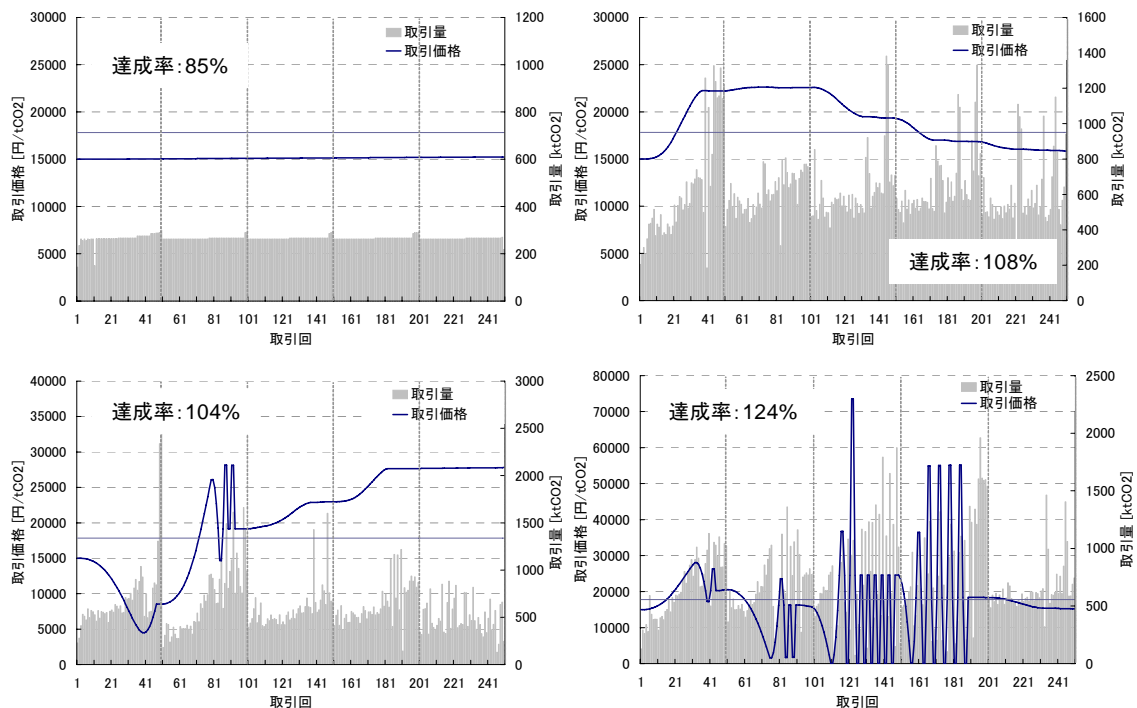


Fig 6. ランダム顧客 10 体、トレンド予想型 38 体を追加したケース  
(左上のみ取引参加者を追加していないケース)

## 5. 結言

本研究では、市場参加者の戦略の多様性を考慮に入れたマルチエージェントシステムに基づく GHG 排出権取引市場のモデルを構築した。構築したモデルを用いて排出権取引シミュレーションを行い、目標保有参加者だけでは採用する戦略によって排出権取引が有効に機能しない場合があること、また、そこに適当な数の投機目的の参加者が加わることで、取引が促進され目標達成率や経済効率が向上することが分かった。

## 参考文献

- [1] 和泉潔; 人工市場 市場分析の複雑系アプローチ, (2003), 森北出版
- [2] 西條辰義; 地球温暖化対策 排出権取引の制度設計, (2006), 日本経済新聞社
- [3] 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)
- [4] ロバート・ギボンズ; 経済学のためのゲーム理論入門, (1995), 創文社.