

# マルチエージェントモデルを用いた排出権取引市場における市場分析

1G05H098-5 林 拓矢

指導教員 逆瀬川 浩孝

## 1. 目的

様々な環境問題のもととなる温室効果ガス(GHG)削減のための施策として、各国で企業の GHG 排出量に制限を設ける制度が制定され始めている。社会全体の削減費用をより低くするためには GHG の排出権の取引が有効な策とされている。日本における制度は試運転を開始したばかりで、まだ効果的な市場取引を行える状況にはない。

本論文の目的は、排出権市場が完全自由市場のもとで、市場制度が市場へ与える影響を分析し、全体の費用負担の最小化などを可能にする制度設計をすることである。その分析手段としてマルチエージェントモデルを用いる。

## 2. 従来研究

マルチエージェントモデルを用いた排出権取引市場についての研究としては、被験者に実際に取引を行わせる実験や、織田ら[1]のようなシミュレーションを用いる実験、2 つを組み合わせたものがある。全て取引方法などに主眼を置いていて、削減費用の概念や罰則の程度については深く触れられていない。

## 3. モデル

### 3.1 状況説明

モデルの説明をする前に、その前提となる状況の説明をする。まず、企業は規制がなければ、毎年同量の GHG (ベース排出量) を排出し続けるものとする。さらに、政府はある基準で、各企業に対して一年間の許容排出量(排出権)を与える。排出権は市場で売買でき、市場価格は市場原理に基づき定まるものとする。許容排出量を超えて GHG を排出した企業は罰則を科せられるので、自社の設備を改良して削減するか、可能ならば不足分を市場から調達する。各企業はベース排出量と排出権が与えられたとき、自社削減の費用と市場取引の費用、罰金の合計を最小とする自社削減量と排出権市場への入札量を決定する。

以上の状況をもとに、個々の企業をモデル化し、制度設計が市場全体に与える影響を観察する。

### 3.2 マルチエージェントモデル

分析手法としてマルチエージェントモデルを用いる。本研究の場合では、与えられた削減投資・排出権市場入札方針に従いエージェント(企業)が自律的に行動し、人工社会(排出権市場)形成の様子を観察する。排出権取引市場では一企業の動きが複雑で全体を一括してモ

デル化することが困難なため、この分析手法を用いる。

$j$  番目の企業を  $A_j$  とする。  $A_j$  のベース排出量を  $B_j$ 、 $t$  年目の排出権を  $W_{j,t}$ 、GHG を削減するための費用を  $C_{j,t}(x)$  とする。さらに、 $t$  年目の削減量を  $x_{j,t}$ 、 $t$  年目までの累積削減量を  $X_{j,t}$ 、 $t$  年目の市場入札量を  $q_{j,t}$ 、入札価格を  $p_{j,t}$  とする。

$$X_{j,t} = X_{j,t-1} + x_{j,t}$$

$$W_{j,t} = B_j \cdot (1 - \alpha_j)^t \quad \alpha_j: \text{年間目標削減量}$$

削減関数は、従来研究では一次関数であったが、本研究では逓増する関数を考える。削減がされなければ年間の排出量は変化しないものとしているので、ある一定水準までしか削減ができないと仮定する。以上の特徴から以下の削減費用関数を用いる。

$$C_{j,t}(x) = -a_j \ln(1 - x/(b_j \cdot B_j)) \quad \begin{cases} 0 < x < b_j \cdot B_j \\ a_j > 0, 0 < b_j < 1 \end{cases}$$

ここで、一度削減した GHG はそれ以降費用なしで削減できると仮定する。  $A_j$  が前年に  $X_{j,t-1}$  まで削減が進んでおり、 $t$  年目に  $x_{j,t}$  だけ削減するときの削減費用は、 $C_{j,t}(X_{j,t-1} + x_{j,t}) - C_{j,t}(X_{j,t-1})$  と表す。

本研究では、1 年間に 1 度取引を行うことができ、その過程を 3 種類のフェーズに分ける。まず、意思決定フェーズで各企業が  $x_{j,t}, q_{j,t}, p_{j,t}$  を決定し、次の市場取引フェーズでは各企業の入札から市場価格を決定して実際に取引を行わせる。その結果、所有する排出権が実際の排出量を超えている企業に罰則を科す。そして、各企業の総費用が求まるので、学習フェーズで各企業がそれを評価し、次年の意思決定に反映させる。

#### (1) 意思決定フェーズ

$t$  年目において、各企業はまず  $x_{j,t}$  と  $q_{j,t}$  を決定する。その際、目標削減量  $O_{j,t} = B_j - W_{j,t}$  を用いる。排出権が予測価格  $P_{j,t-1}^f$  で全て取引できるとしたとき、削減投資額、排出権売買費用、罰金の和が最小となるような  $x_{j,t}$  と  $q_{j,t}$  を求めるために以下の最小化問題を解く。

$$\min_{x_{j,t}, q_{j,t}} \left[ \begin{aligned} & C_{j,t}(X_{j,t-1} + x_{j,t}) - C_{j,t}(X_{j,t-1}) \\ & + P_{j,t-1}^f \cdot q_{j,t} \\ & + \max\{F \cdot (O_{j,t} - (X_{j,t-1} + x_{j,t} + q_{j,t})), 0\} \end{aligned} \right]$$

$$s, t \quad 0 \leq x_{j,t} < O_{j,t} - X_{j,t-1}$$

$F$ は単位不遵守量当たりの罰金を表わす。

この後、前期の削減投資と市場入札を評価するために  $x_{j,t}$  と  $q_{j,t}$  を以下のように修正する。全ての評価値の初期値は1である。

$$x_{j,t} \pm |O_{j,t}| \cdot \{\sigma_j \cdot (\text{評価値} - 1)\}$$

$$q_{j,t} - (\pm |O_{j,t}| \cdot \{\sigma_j \cdot (\text{評価値} - 1)\})$$

$\sigma_j$ は評価値の影響度、評価値は前期の意思決定を評価した値で、学習フェーズで決定する。

次に  $q_{j,t} \neq 0$  の場合は入札価格  $p_{j,t}$  を決定する。入札量分の排出量を、自ら削減するときの費用と排出権購入で賄うときの費用が等しくなるような、企業が最悪許容しうる価格を求め、これを入札価格とする。式で表すと以下ようになる。

$$p_{j,t} = \{C_j(X_{j,t} + q_{j,t}) - C_j(X_{j,t})\} / q_{j,t}$$

## (2)市場取引フェーズ

排出権市場は、完全自由市場で、需給バランスのとれる価格で取引される。購入希望企業が購入量と希望購入価格、売却希望企業が売却量と希望売却価格を同時に入札し、希望購入価格が  $P$  以上の購入量の合計  $Q$  が、希望売却価格が  $P$  以下の売却量の合計  $Q'$  と等しくなる ( $Q = Q'$ ) とき、 $P$  を市場価格  $P_t$  とし、 $Q$  だけ排出権が取引される。取引の結果、排出権が排出量を下回る企業には、罰金を科す。

## (3)学習フェーズ

$t$  年目に購入入札がうまくいかなかった企業は、 $t+1$  年目には購入できない分を自ら削減する必要がある。購売却入札がうまくいかなかった企業は、売却できない分削減量を減らす必要がある。そこで、 $t+1$  年目に意思決定フェーズで決定した  $x_{j,t+1}$  に以下の値を足す。

評価値 = 費用/期待費用

費用 = 排出権売買費 + 罰金 + 売れ残った排出権

期待費用 = 入札が成功した場合の排出権売買費

需要が供給を上回っていれば、排出権売却により利益を得る余裕がまだあり、次年の供給は増えるべきである。そのためには、予測価格は増加する必要がある。逆の場合にも予測を修正する必要がある。従って、 $t+1$  年の予測価格  $P_{j,t}^f$  にはあらかじめ定まっている次年への価格上昇率  $e_t$  とし、以下の値を用いる。 $\gamma_j$  は需給の価格予測への影響度である。

$$P_{j,t}^f = P_{j,t} \cdot \left( 1 + \frac{\text{総需要} - \text{総供給}}{\max(\text{総需要}, \text{総供給})} \right) \cdot e_t$$

## 4. 数値実験の結果と考察

罰則の違いが市場に与える影響を観察する。 $F$  の値

を変化させて 5 年でおわる市場のシミュレーションをそれぞれ 200 回行った。企業については鉄鋼・電力・石油・化学・製紙・セメント業界の計 393 企業を考える。各業界の一企業あたりデータを基に各企業のベース排出量、削減費用関数のパラメータを設定する。 $\sigma_j$  は売却入札の場合には 2、購入入札の場合には 1 とし、残りのパラメータは全企業一律  $\gamma_j = 0.5$ ,  $\alpha_j = 0.02$ ,  $P_{j,0}^f = 57.59$  とした。

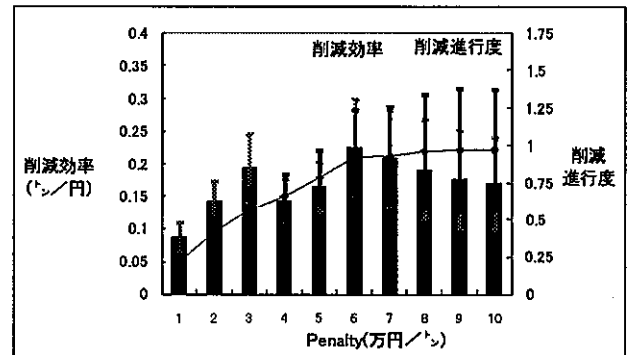


図1 削減効率と削減進行度の平均と95%信頼区間

削減効率 = 5年間の総費用/5年間の累積削減量

削減進行度 = 5年間の累積削減量/5年間の計画削減量

計画削減量は、全ての企業が每期目標通りに削減した場合の累積削減量である。 $F \leq 600$  までは  $F$  と連動して削減進行度も増加するが、 $F > 600$  のときは削減進行度は大して増加しなくなる。また、削減効率は  $F = 600$  で最大となる。どちらの指標も考慮するのなら  $F$  は 600 前後とすると良いといえる。

## 5. 結論

制度設計者の重要視する項目に合った罰金の値があることが示せた。制度を開始する前に参加企業の過去データから望ましい罰金の大きさその値を求める必要がある。

今後の課題は、将来かかる費用を考慮した投資戦略、技術革新による削減費用関数の変化、1 年間の削減投資・排出権取引の機会の増加、などを組み込むことで、よりモデルを現実近くすることである。

## 参考文献

[1] 織田, 木村, 玉田: 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, 情報処理学会研究報告.ICS.[知能と複雑系] p43-46, (2003)