最適化型世界エネルギーモデルに基づく 多地域間 CO₂ 排出許可証取引のゲーム論的分析

学生員 秋 元 圭 吾 (横浜国大)

非会員 松 永 敦 (横浜国大)

正 員 藤 井 康 正 (横浜国大)

正 員 山 地 憲 治 (東京大)

Game Theoretic Analysis for Carbon Emission Permits Trading among Multiple World Regions with an Optimizing Global Energy Model

Keigo Akimoto, Student member, Atsushi Matsunaga, Non-member,

Yasumasa Fujii, Member (Yokohama National University)

Kenji Yamaji, Member (University of Tokyo)

Carbon emissions which would cause global warming were agreed to be constrained at COP3 in Kyoto. In addition, carbon emission permits trading was also approved to be introduced. The emission permits trading is expected to achieve efficient carbon emission reduction, equalizing the marginal costs of the emission reduction for the participating countries. In other words, the permits trading allows participants to reduce emissions where it is least expensive to do so. However, the inadequate introduction of the trading systems may impose unfairly greater burden on some countries, and therefore careful evaluation of the system would be indispensable for its implementation.

In this paper, we attempt to analyze the emission permits trading, using the theory of cooperative games with a global energy model of optimization type. We assumed that seven world regions as players participate the permits trading system under the condition of the emission reduction target presented at COP3 and so on, and show the nucleolus of the grand coalition games, and the computational results of primary energy supplies and CO₂ shadow prices.

The insights of this research indicate that in order to stabilize the grand coalition, a noticeable amount of additional transfer of money would be needed besides the payments associated with the emission permits trading.

キーワード：地球温暖化問題、CO₂ 排出許可証取引、ゲーム理論、最適化、グローバルエネルギーモデル

1. はじめに

1997 年 12 月に開かれた気候変動枠組条約第 3 回締約国会議(COP3)において、先進各国の排出削減目標が決められ、CO₂ を主とした温室効果ガス削減に踏み出すこととなった。会議においても明かだったように、CO₂ 排出削減の困難さは各国ごとに大きく異なり、一律の削減は困難である。そして、部分的ではあるものの、CO₂ 排出許可証取引制度の導入も認められることとなった。これは CO₂ 排出許可証を各国に割り当て、それらの売買を認めることにより、市場経済原理に任せた効率のかつ公平な CO₂ 削減を行おうとするものである。一方、COP3 においては、今後 CO₂ 排出増大が見込まれる発展途上地域については、排出削減義務の設定を見送った。しかし、温暖化防止を実効あるものとするには、発展途上国を加えた世界全体による効率的な排出抑制を行う必要がある。そのためには、全世界的規

模での排出許可証取引制度の導入が不可欠であると考えられる。ところが、CO₂ 排出許可証取引制度は、さまざまな面で過去に例を見ない制度となるため、不確定な面が多く、その分析も不十分であり、早急な検討が必要である。特に、CO₂ 許可証取引制度における多国間の協力関係をモデル化した研究はほとんど見受けられない。

本研究においては、世界を多地域分割した最適化型エネルギー需給モデルによるシミュレーションを行い、多地域参加による CO₂ 排出許可証取引制度を各地域の利害関係からゲーム論的に分析、評価を行った。

2. 最適化型世界エネルギー需給モデル

本研究で試算に用いたエネルギー需給モデルは、文献 [3][4] のモデルを基に 1990~2100 年に至る 110 年間のエネルギーシステム総コストを最小にする動的な非線形最

適化型モデルに改良したものである。ただし、本稿では計算時間短縮のため、2010年までの20年間の最適化による分析を行った。本モデルの特徴は、工学的データに基づいた詳細な技術のモデル化により、特に供給サイドにおいて、CO₂問題対策技術のボトムアップ的な評価ができる点にある。また、世界地域分割による地域特性を考慮でき、地域間のエネルギー長距離輸送の可能性、および排出許可証取引の評価も可能である。以下にその概略を示す。コストパラメータ等に関しては、文献[3][4]を参照されたい。

<2.1> 世界地域分割 世界地域分割は以下のような10地域である。

- [1] 北アメリカ [2] 西ヨーロッパ [3] 日本
- [4] オセアニア [5] 計画経済圏アジア
- [6] その他のアジア [7] 中東、北アフリカ
- [8] サハラ以南のアフリカ [9] ラテンアメリカ
- [10] 旧ソ連・東ヨーロッパ

また、これらの地域間の貿易として、天然ガス、石油、石炭、メタノール、水素の各エネルギーおよびCO₂の輸送を考慮している。

<2.2> 想定した1次エネルギー 1次エネルギーは、天然ガス、石油、石炭、バイオマス、水力・地熱、太陽光、風力、原子力の8種類を想定した。

<2.3> エネルギー変換技術

(1) 発電部門 発電設備としては、天然ガス火力、石油火力、石炭火力、CO₂回収装置付の石炭ガス化複合発電(IGCC)、水力・地熱、風力、太陽光、原子力、バイオマス火力、メタノール火力、水素火力による発電を想定した。各種火力発電所におけるCO₂回収装置の形式としては、基本的には化学吸収法を想定する。ただし例外として、石炭ガス化炉との組み合わせで特に有効性が高まる物理吸収法を考慮するために、CO₂回収装置付IGCCを発電設備の一種として追加している。電力需要に関しては、年負荷持続曲線を3時間帯に分割した定式化を行なった。

(2) その他のエネルギー変換技術 各種化石燃料およびバイオマスのガス化および液化、COおよびCO₂とH₂からのメタノール合成、COとH₂からのメタン合成、水電気分解等を想定した。変換過程で発生するCO₂の回収には物理的吸収法を想定している。

<2.4> 最終需要

最終需要部門は以下の4部門とした。

- (1) 気体燃料 (2) 液体燃料
- (3) 固体燃料 (4) 電力

最終需要における省エネルギーコストは、長期価格弾性値を用いたトップダウン的な定式化を行っている。潜在的エネルギー需要はIPCCのIS92aシナリオ^[5]を基に想定した。

<2.5> 対象時点 先に述べたように、本稿におけるモデル分析の対象期間は、2000年、2010年2時点を表点とする1990~2010年に至る20年間とした。

<2.6> 評価関数 2000年を第1期、2010年を第2期とし、下記の評価関数を最小にする非線形計画問題となる。

このようなモデル化によって、世界全体のエネルギーシステム総コストが最小となる将来のエネルギーシステム構成を導き出すことができる。

$$J = \sum_{n=1}^{10} \left\{ \int_{1990}^{2000} \frac{TC_{n0}(2000-t) + TC_{n1}(t-1990)}{10} e^{-\gamma(t-1990)} dt + \int_{2000}^{2010} \frac{TC_{n1}(2010-t) + TC_{n2}(t-2000)}{10} e^{-\gamma(t-1990)} dt \right\} \rightarrow \min \quad (1)$$

ただし、 γ : 割引率(5%)、 TC_{ni} : 第*n*地域、第*i*時点のシステム総コスト(一次エネルギー供給コスト、エネルギー輸送コスト、CO₂回収・処分コスト、各種エネルギープラントの設備費・運転保守費、省エネルギーコスト、排出許可証売買損益)

3. CO₂ 排出許可証取引制度

排出許可証取引制度は、経済効率のよい削減が可能であるため、CO₂削減への導入が検討されている。自国におけるCO₂排出削減の限界対策費用が他国における限界対策費用よりも高ければ、他国から排出許可証を購入する。逆に自国におけるCO₂排出削減の限界対策費用が排出許可証価格よりも安ければ許可証を売却する。許可証市場が競争的であると仮定すると、CO₂削減限界対策費用が等しくなる点で均衡価格が決まり、CO₂排出許可証はこの価格で売買されることで経済的に効率のよい削減ができる(図1)。複数の地域が同時に参加する場合も同様である。また、複数の許可証市場が存在すれば、それぞれの許可証市場に加わっている地域間で排出許可証の取引がなされ、その際の売買価格は、それぞれの提携^[1]内におけるCO₂削減限界費用によって価格付けを行えばよい。

しかし、CO₂排出許可証取引制度は、許可証の初期割当によって全体の効率性は変化しないものの、地域ごとの利害は初期割当によって大きく異なる可能性があり、初期割当によっては合意が困難になる場合も考えられる。本研究では、Annex I諸国^[2]においては、既にCOP3において合意された削減量に基づいた初期割当とし、non-Annex I諸国については、削減割当量をパラメータとして分析を行った。

図1 CO₂ 排出許可証取引の概念

Fig.1. A concept of CO₂ emission permits trading.

一方、排出許可証取引制度をエネルギー需給モデルにおいて定式化するには、各地域が提携 S を作って排出許可証取引制度を導入すると想定すると、(2)(3)式の制約条件で表現できる。排出許可証の均衡価格は、最適化計算の結果、(3)式のシャドウプライスによって得ることができる。

$$E_i \leq LE_i + RB_i - RS_i, \quad i \in S \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sum_{i \in S} RB_i = \sum_{i \in S} RS_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

i : 地域を表す添え字、 E_i : エネルギーシステムからの CO_2 排出量、 LE_i : CO_2 排出許可証初期割当量、 RB_i : 排出許可証購入量、 RS_i : 排出許可証売却量、 S : 排出許可証取引制度における提携

4. 協力型ゲーム理論による定式化

このように CO_2 排出許可証取引制度は、経済効率のよい削減を実現し得るが、地域別に見た場合には、提携によって大きな利得を得る地域とそうでない地域が存在することになる。そこで、地域によっては排出許可証取引に参加するインセンティブが小さくなり、参加しなかったり、もしくは、部分的な提携を作ったりすることが起き得る。それによって、世界全体の最も経済効率のよいエネルギーシステムの構築が阻害されかねない。そこで本研究では、これらの状況を、先に概説したエネルギー需給モデルを用いて、 CO_2 排出許可証取引の可能性を以下のようにゲーム論的に定式化し、分析を行った。

協力ゲーム理論によれば、コアは、他のいかなる配分戦略にも支配されない集合であり、交渉という意味から安定であり、以下の合理性を満たす集合である。

(a) 個人合理性 単独による排出削減よりも、提携による排出削減の利得が大きくなければならない。

$$x_i \geq V(i) \quad \dots\dots\dots (4)$$

x_i : i プレイヤーの利得配分、 $V(i)$: i プレイヤーの利得

(b) 提携合理性 部分提携によって、全体の提携から離脱しないために、全体提携の利得が部分提携による利得よりも大きくなければならない。

$$\sum_{i \in S} x_i \geq V(S), \quad \forall S \subset N \quad \dots\dots\dots (5)$$

$V(S)$: グループ S の提携による利得、 N : プレイヤー集合

(c) 全体合理性 プレイヤー全体による協力関係が成立したときの、全体による獲得可能な利得がすべてのプレイヤーに配分されなければならない。

$$\sum_{i \in N} x_i = V(N) \quad \dots\dots\dots (6)$$

注 1) 本論文においては、当該地域がまとまって一つの CO_2 排出許可証市場を形成し、その市場に参入することを、協力型ゲーム理論においてよく用いられる「提携」という言葉で表現している。

注 2) Annex I: 気候変動枠組条約の附属書 I で定められている国であり、先進国と東欧、旧ソ連諸国である。

本研究で分析する CO_2 排出許可証取引制度では、(4)～(6)式を満たす利得配分 x_i を行うことによって、全プレイヤーは、全プレイヤーによる CO_2 排出許可証取引制度導入のインセンティブを持ち得る。

本研究におけるプレイヤーの想定であるが、ここでは計算時間短縮のため、表 1 のような 7 プレイヤーを想定した。本エネルギーモデルにおける世界地域分割は 10 地域となっているが、排出許可証取引における提携主体（プレイヤー）として、10 地域のうち、[6]その他のアジア、[7]中東、北アフリカ、[8]サハラ以南のアフリカ、[9]ラテンアメリカの 4 地域を 1 プレイヤーとみなした（この 4 地域内においては、常に 4 地域合計の CO_2 排出量で規制されるものとした。）。特に、中東地域は排出許可証取引の提携において、ここで想定した[vii]その他の地域とは異なる提携を取る可能性はある。しかし既に排出抑制目標が設定された先進諸国の提携に関する分析が本研究の中心課題の一つであったため、中東地域は、やむを得ず[vii]その他の地域として集計的に扱った。

表1 想定した CO_2 排出許可証取引におけるプレイヤー
Table 1. Assumed players for CO_2 emission permits trading.

	地 域
[i]	北アメリカ
[ii]	西ヨーロッパ
[iii]	日本
[iv]	オセアニア
[v]	旧ソ連・東ヨーロッパ
[vi]	計画経済圏アジア
[vii]	その他の地域

この 7 プレイヤーによる提携の形態数は、877 通りになる。因みに、10 プレイヤーを想定した場合の提携形態数は、115,219 通りと極めて大きくなり、実用上計算が不可能になる。そこで、本研究では、7 プレイヤーを想定した 877 通りのケースに関し、エネルギー需給モデルによって最適解を求め、割引済みエネルギーシステム総コストを得た。これより、プレイヤーが提携 S をとり、 S 以外の提携構造が β のときの、すべてのプレイヤーが個々に CO_2 排出量削減を行う場合からの利得 $V(S, \beta)$ を(7)式によって求めた。

$$V(S, \beta) = \sum_{i \in S} TC_0(i) - TC(S, \beta) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし S, β は、 $\beta = [B_1, B_2, \dots, B_p, \dots, B_m]$ としたとき、 $S \cup B_1 \cup B_2 \dots \cup B_m = N$ かつ $S \cap B_p = \emptyset$ ($p=1, 2, \dots, m$) かつ $B_p \cap B_q = \emptyset$ ($p=1, 2, \dots, m, p \neq q$) を満たす集合。ここで、 m は S 以外の提携の個数、 B_p は提携構造 β を構成する第 p 番目の提携集合である。そして、また $TC(S, \beta)$ は、 S 以外の提携構造が β のときの提携 S のエネルギーシステム総コストである。また、 $TC_0(i)$ は、7 プレイヤーすべてが単独に削減する際の i プレイヤーのエネルギーシステム総コストである。

しかし、提携構造 β に関しても取り得る提携構造は複数存在し得るので、 $j(1 \leq j \leq n)$ の添字をつけ、提携構造 β_j と表現することとする。ただし、 n は提携構造 β の取り得る最大数で、提携 S に含まれるプレイヤー数によって変化する。ここで注意が必要なのは、CO₂ 排出許可証取引制度による利得を考えると、自らの提携形態だけではなく、他のプレイヤーの提携構造 β_j 如何によって、エネルギー輸出入価格の変動により、自らのエネルギーシステムコストも変化し、利得が異なってくる点にある。例えば、 $S = \{[i][iii][iii][iv]\}$ で提携を組むとしても、他のプレイヤーが、 $\beta_1 = \{[v][vi][vii]\}$ という提携構造をとると、 $\beta_2 = \{[vi], [vi][vii]\}$ のような提携構造をとるとでは、提携 S のエネルギーシステムコストが異なる。

本研究においては、他のグループの提携構造にかかわらず、最低得ることが可能な利得をもとに、利得の再配分を考えた。すなわち、

$$V(S) = \min_{1 \leq j \leq n} V(S, \beta_j) \quad \dots\dots\dots (8)$$

S: 提携集合

ここでは、7 プレイヤーによる提携を考えるので、 S は $2^7=128$ 通りの組み合わせが存在する。

次に協力ゲーム理論における仁の概念を用いてコアの縮小を行い、コアに含まれる利得配分列を求める。仁は、最大要求を最小化する利得配分の集合を次々に縮約していった配分である。それは、以下によって求められる。

$$[1] \quad X_0 = \left\{ x \in R^n \mid \sum_{i \in N} x_i = v(N) \right\}$$

$$I_0 = \{S \mid S \subset N, S \neq \emptyset, N\}$$

$$r=1 \text{ とする。}$$

[2] 以下の線形計画問題を解く。

$$\min \varepsilon_r \quad \dots\dots\dots (9)$$

subject to

$$\varepsilon_r \geq V(S) - \sum_{i \in S} x_i \quad \forall S \subset I_{r-1} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$x \in X_{r-1} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$[3] \quad X_r = \left\{ x \in X_{r-1} \mid V(S) - \sum_{i \in S} x_i \leq \varepsilon_r \quad \forall S \subset I_{r-1} \right\}$$

$$J_r = \left\{ i \in I_{r-1} \mid V(S) - \sum_{i \in S} x_i = \varepsilon_r \quad \forall x \in X_r \right\}$$

$$I_r = \{i \mid (i \in I_{r-1}) \cap (i \in J_r)\}$$

[4] $I_r = \emptyset$ ならば終了

さもなければ、 $r = r+1$ として、[2]へ

また、公平性を考慮した配分を求めるため、上記の仁を求めるアルゴリズムのステップ[2]の線形計画法を解く代わりに、以下の線形計画法を解き、一人当たりの最大要求を最小化した仁も求めた。

$$\min \varepsilon'_r \quad \dots\dots\dots (12)$$

subject to

$$\varepsilon'_r \sum_{i \in S} POP_i \geq V(S) - \sum_{i \in S} x_i \quad \forall S \subset I_{r-1} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$x \in X_{r-1} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 POP_i は i プレイヤーの 1990 年時点の人口

その際、ステップ[3]の X_r, J_r の導出においても、 ε_r の代わりに

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r \sum_{i \in S} POP_i$$

を用いた。

5. 試算結果

以上述べてきたゲーム論的分析手法により、試算を行った。本稿においては、COP3 による合意を参考として、2010 年時点の CO₂ 排出量を表 2 のような排出量レベルに抑制するとの想定を行った。2000 年時点の排出量に関しては、制約しないものとした。ケース A においては、[vi],[vii]地域は、排出許可証取引には参加できないものと想定した。よって、ケース A においては、5 プレイヤーによるゲーム論的分析を行った。また、今後、地球温暖化を防止するには、先進国ばかりではなく、発展途上国の排出抑制も不可欠である。そこで、ケース B として、発展途上国 ([vi],[vii]地域) が 1990 年比 50% 増に抑制するケースを想定して分析を行った。なお本試算においては、CO₂ 排出許可証以外の世界地域間の貿易品 (石油、石炭、天然ガスなど) に関しては、石油危機以降の昨今の状況に鑑みて、それぞれ市場経済に基づいた取引がなされると想定した。特定地域間での優先的あるいは排他的なエネルギー資源の取引やその価格操作の可能性までは、本試算では考慮していない。

表2 想定した各地域の 2010 年時点における
1990 年 CO₂ 排出実績からの削減率

Table 2. Assumed Emission Regulations in 2010.

	case A	case B
[i]北アメリカ	-7 %	←
[ii]西ヨーロッパ	-8 %	←
[iii]日本	-6 %	←
[iv]オセアニア	+7 %	←
[v]旧ソ連・東欧	0 %	←
[vi]計画経済圏アジア	-	+50 %
[vii]その他	-	+50 %

*) COP3 においては、森林吸収等による CO₂ 削減量も含んだネット方式による削減量とされているが、本稿では、すべてエネルギーシステムにおいて削減するものと想定した。また、[i]北アメリカ地域は米国 -7%、カナダ -6% と合意されているが、ここでは -7% とした。一方、[iv]オセアニア地域は、オーストラリア +8%、ニュージーランド 0% で合意されているが、1990 年実績を参考に +7% とした。

図 2 に CO₂ 排出規制なしケースとケース A (排出許可証取引なし) およびケース A (Annex I 諸国内において排出許可証取引) の 2010 年時点の各地域における CO₂ 排出量を

示す。ただし、ケース A における CO₂ 排出許可証の初期割当量は、図 2 には示していないものの、「COP3(提携なし)」ケースの排出量にはほぼ等しい。これを見ると、Annex I 諸国で排出許可証取引制度を導入した場合には、[i]北アメリカ、[ii]西ヨーロッパ、[iii]日本が、[v]旧ソ連・東ヨーロッパから排出許可証を購入する結果となっている。

図2 無規制ケースとケース A (排出許可証取引なし、Annex I 内取引あり) における 2010 年の CO₂ 排出量

Fig.2. CO₂ Emission in 2010 for BAU case and case A.

図3 ケース A (提携なし) における 2010 年の各地域の 1 次エネルギー供給

Fig.3. Primary energy supply in 2010 for case A (no coalition case).

図4 ケース A (提携あり) における 2010 年の各地域の 1 次エネルギー供給

Fig.4. Primary energy supply in 2010 for case A (coalition case).

一方、図 3 にケース A (排出許可証取引なしケース) の 2010 年時点の各地域のエネルギー供給を、図 4 にケース A (排出許可証取引ありケース) の 1 次エネルギー供給を示す。これを見ると、Annex I が提携して、排出許可証取引を行う場合は、[v]旧ソ連地域が石炭を中心にエネルギー供給を小さくする結果となっている。日本に関しては、グラフでは見にくいものの、提携しない場合には、バイオマスも 12MTOE/year 程度利用される結果に対して、排出許可証取引を行う場合は、CO₂ 抑制圧力が下がるため、バイオマスに変わって石油、石炭の利用が増える結果となっている。

ケース A において、提携せずに削減を行った場合と、Annex I 地域が排出許可証取引で提携して削減した場合の各地域の CO₂ シャドープライス (CO₂ 限界削減費用) を表 3 に示す。ただし、ここで示す CO₂ シャドープライスは、2010 年時点のケース A の抑制値を実現するために、2001～2010 年の 10 年間に對する限界削減費用に相当する (付録参照)。また、ケース A においては non-Annex I の CO₂ 規制を想定していないので、non-Annex I の CO₂ シャドープライスは、当然のことながら 0 である。このシャドープライスを見ると、本モデル計算結果からは、[iii]日本は COP3 合意を実現するためには、最も厳しい状況にあると言える。しかし、一方、Annex I 内で排出許可証取引を行うことができれば、CO₂ シャドープライスを大幅に引き下げることができ得ることがわかる。

表3 ケース A における 2010 年時点の CO₂ シャドープライス

Table 3. CO₂ shadow prices in 2010 for case A.

(\$/t-C)	提携なし	Annex I 提携
[i]	133	71
[ii]	135	71
[iii]	316	71
[iv]	0	71
[v]	6	71

先に述べてきたように、排出許可証取引を導入を想定したモデル最適化計算結果は、世界全体の最も経済効率のよいエネルギーシステムを提示するものであるが、地域別に見た場合には、提携によって大きな利得を得る地域とそうでない地域が存在することになる。そこで、地域によっては排出許可証取引に参加するインセンティブが小さくなり、参加しなかったり、もしくは、部分的な提携を作ったりすることが起き得る。それによって、世界全体の最も経済効率のよいエネルギーシステムの構築が阻害されかねない。そこで、先に述べた仁および一人当たりの最大要求を最小にする仁による利得の再配分をケース A において計算した (表 4)。ケース A では、排出許可証を売却する余裕のあるのは、[v]旧ソ連・東ヨーロッパであり、この地域が排出許可証取引に強い影響を持っているため、CO₂ 排出削減のため Annex I 諸国が一致協力して排出許可証取引

を行うには、CO₂削減限界費用で価格付けされた排出許可証の購入代金以外にも 1990 年価値換算で 6~11 billion \$ 程度の資金を[v]地域に与える必要があることがわかる。そうしなかった場合には、[v]地域が部分的な提携によってより多くの利得を得ようとするインセンティブが強く働く可能性があると云える。

また、図 5 に CO₂ 排出許可証の 1990 年価値換算取引額を示す。これを見ると、仁による利得再配分結果からは、[i]北アメリカ地域においては、CO₂ 排出許可証取引の提携維持のためには、CO₂ 限界削減費用によって価格づけられた排出許可証の売買による資金の 20%程度の額がさらに必要なことがわかる。

表4 ケース A における利得配分

Table 4. An allocation of the benefits in case A.

	全体提携 利得	仁		仁（人口比例）	
		再配分	移転額	再配分	移転額
[i]	9.2	5.5	-3.7	5.0	-4.2
[ii]	10.5	8.9	-1.6	8.5	-2.0
[iii]	13.7	12.4	-1.3	11.0	-2.7
[iv]	2.1	2.2	0.1	0.0	-2.1
[v]	20.4	26.8	6.4	31.4	11.0

Unit: Billion \$ in 1990

図5 ケース A の CO₂ 排出許可証取引額Fig.5. An amount of tradable CO₂ emission permits in case A.

次に発展途上国の排出抑制に関する分析を行った。図 6 には、ケース B において世界全体が排出許可証取引において提携した際の 2010 年時点の CO₂ 排出量を示す。世界全体のエネルギーシステムからの CO₂ 排出量は、6874Mt-C/year となっている。これは、ケース A の 7375Mt-C/year よりも 500Mt-C/year 程度低い排出量である。また、このときの CO₂ シャドウプライスは、52 \$/t-C である。これは、ケース A の排出許可証取引を行った場合の 71\$/t-C よりも低い価格である。これは、排出許可証取引を Annex I から世界全体に広げることによって、より低い削減コストでよ

り多くの CO₂ 排出の抑制が可能であることを示している。しかし、このケースでは、[vii]その他の地域の CO₂ 排出量が、許可証割当量にほぼ等しくなっており、[vii]その他の地域がこれ以上厳しい削減をすることは困難と言える。

次に、ケース B において、CO₂ 排出許可証取引を世界全体で導入することによって生じる割引済みエネルギーシステム総コストの利得、仁および一人当たりの最大要求を最小化する仁による利得再配分を表 5 に示す。

このケースにおいては、ケース A のときの結果と異なり、[v]旧ソ連・東ヨーロッパ以外にも、[vi]計画経済圏アジア等にも排出許可証を売却するインセンティブが働く。そのため、[v]旧ソ連・東ヨーロッパ地域は、あまり多くの利得配分を要求することができない状況となっている。よって、[v]地域に大きな利得移転をする必要がない結果となっている。このケースでは、最大要求を最小化した仁および一人当たりの最大要求を最小化した仁ともに、[i]北アメリカ地域が、世界全体での排出許可証制度を形成するために資金を出す必要があることがわかる。

図6 ケース B において世界全体が排出許可証取引において提携したときの 2010 年の CO₂ 排出量Fig.6. CO₂ emission in 2010 for case B (tradable CO₂ emission permits case).

表5 ケース B における利得配分

Table 5. An allocation of the benefits in case B.

	全体提携 利得	仁		仁（人口比例）	
		再配分	移転額	再配分	移転額
[i]	17.2	10.6	-6.6	9.4	-7.8
[ii]	15.6	15.7	0.1	14.0	-1.6
[iii]	16.1	15.9	-0.2	15.3	-0.8
[iv]	1.7	2.0	0.3	1.0	-0.7
[v]	11.2	13.2	2.0	14.6	3.4
[vi]	5.5	7.5	2.0	8.9	4.4
[vii]	0.0	2.3	2.3	4.0	4.0

Unit: Billion \$ in 1990

また、図 7 にケース B における CO₂ 排出許可証の 1990 年価値換算取引額を示す。これからも、CO₂ 排出許可証取引制度の世界的な提携維持のために必要な資金は、CO₂ 限

界費用によって価格づけられた許可証の取引額と比較しても無視できないほど大きいことがわかる。特に本ケースでは、[i]北アメリカ地域の排出許可証取引提携維持のために必要な資金額は大きいことがわかる。

図7 ケース B の CO₂ 排出許可証取引額
Fig.7. An amount of tradable CO₂ emission permits in case B.

6. まとめ

本研究においては、最適化型エネルギーモデルを用いて提携形態によって生じる利得を導出し、ゲーム論的に分析を行うことにより、CO₂ 排出許可証取引制度導入の可能性評価を行った。

本稿では、まず、Annex I 諸国の 2010 年の CO₂ 排出量を COP3 において合意された排出量に抑制するケースについて、最適化型エネルギー需給モデルによる分析を行った。それによると、排出許可証取引制度が導入されなければ、日本の CO₂ 削減限界費用が最も高くなる結果となった。しかし、排出許可証取引制度が Annex I 内で導入されれば、その CO₂ 削減限界費用はかなり小さくなることが示された。そして、そのゲーム論的分析によると、Annex I 全体が協力する排出許可証取引制度を導入するためには、旧ソ連・東ヨーロッパ地域に CO₂ 削減限界費用によって価格づけられた排出許可証の取引だけでなく、それ以上の資金を旧ソ連・東ヨーロッパ地域に送ることによって、提携の形成を容易にし得ることが示された。

また、COP3 では合意されなかったものの、地球温暖化防止のため、今後排出抑制が是非とも必要な発展途上国地域が排出抑制を行う可能性を分析した。これによると、2010 年に 1990 年比+50%程度に抑制することは、排出許可証取引制度を導入すれば、合意され得る目標であることが示された。ただそのためには、発展途上国地域に対しても、北アメリカ地域を中心とした先進国地域から、削減限界費用によって価格づけられた排出許可証の取引による資金だけでなく、それ以外の資金を送る必要性も示された。

従来の研究では、2 カ国間取引の分析を中心として、排出許可証を CO₂ 削減限界費用が一致する価格で取引することによって、利得が最大化されるとの議論が中心であっ

た。しかし、本研究で行った提携形態による利得を考慮したゲーム論的分析によって、世界全体が提携した排出許可証取引制度を導入するためには、CO₂ 削減限界費用によって価格づけられた排出許可証の取引による資金移転だけではなく、それ以外の資金の移転も提携維持の点から必要性が高いことを定量的に示すことができた。

CO₂ 削減に対する排出許可証取引制度は、大きな経済的利点がある一方、ここで分析した多地域参加による影響以外にも数多くの解決しなければならない課題も多いが、本論文が、今後の CO₂ 排出許可証取引制度および地球温暖化対策議論の一助となれば幸いである。

(平成 10 年 2 月 25 日受付、平成 10 年 6 月 30 日再受付)

文 献

- [1] 電力中央研究所調査資料 NO.Y97902: 「COP3 で何が決まったか」 (1997)
- [2] F. Mullins and R. Baron, "International GHG Emission Trading", OECD working paper (1997)
- [3] 藤井、茅: 「世界エネルギーシステムにおける CO₂ 問題対策技術の可能性評価」電学論 B, Vol.113, No.11, pp.1213-1222 (1993)
- [4] 山地、藤井: 「グローバルエネルギー戦略」電力新報社 (1995)
- [5] William Pepper et al., "Emission Scenario for the IPCC an Upgrade, Assumptions, Methodology, and Results", prepared for the IPCC Working Group 1 (1992)
- [6] 植田、岡、新澤: 「環境政策の経済学」日本評論社 (1997)
- [7] 鈴木: 「新ゲーム理論」勁草書房 (1994)
- [8] 日本エネルギー経済研究所他編: 「EDMC/エネルギー・経済統計要覧 (1997 年版)」(財)省エネルギーセンター (1997)
- [9] 佐藤、山地、秋元、藤井: 「New Earth 21 モデルによる CO₂ 排出権市場の評価」第 12 回エネルギーシステム・経済コンファレンス (1996)
- [10] 秋元、藤井、関口: 「エネルギーモデルに基づく CO₂ 削減共同実施のゲーム論的検討」平成 9 年電気学会全国大会

付 録

CO₂ シャドープライスおよび CO₂ 排出許可証取引額に関して

今、最適解における 2010 年の CO₂ 排出量を E_2 とし、その微小変化を δE_2 とすると、2010 年の CO₂ 排出量が微小変化したときの評価関数 J の変化分は、

$$J(E_2 + \delta E_2) - J(E_2) = - \int_{2000}^{2010} \delta E(t) SP(t) e^{-\gamma(t-1990)} dt \quad (A1)$$

と表される。ただし、 $\delta E(t)$ は δE_2 微小変化したときの t 年における排出量の変化量、 $SP(t)$ は 2010 年の CO₂ 排出量制約に対応する t 年のシャドープライス、 γ は割引率(5%)

本論文で用いたエネルギーモデルにおいては、CO₂ 排出量は、2000 年と 2010 年の時点間を(A2)式で示すように線

形近似している。

$$E(t) = \frac{E_1(2010-t) + E_2(t-2000)}{10} \quad (A2)$$

ただし、 E_1 は 2000 年の CO_2 排出量

よって、2010 年の CO_2 排出量 E_2 が δE_2 変化したときの t 年の排出量変化 $\delta E(t)$ は、

$$\delta E(t) = \frac{\delta E_2(t-2000)}{10} \quad (A3)$$

となるから、(A1)式は、

$$J(E_2 + \delta E_2) - J(E_2) = - \int_{2000}^{2010} \frac{\delta E_2(t-2000)}{10} SP(t) e^{-\gamma(t-1990)} dt \quad (A4)$$

と書き換えられ、(A4)式の極限を考えると、(A5)式のようになる。

$$\frac{\partial J}{\partial E_2} = - \int_{2000}^{2010} \frac{t-2000}{10} SP(t) e^{-\gamma(t-1990)} dt \quad (A5)$$

そして、本論文で示した CO_2 シャドープライスは、(A5)式において、 $SP(t) = SP_0$ とした時間に依らず一定の値である。したがって、本論文で示した CO_2 シャドープライスは、2001～2010 年の 10 年間の平均的な値である。

ところで、 CO_2 シャドープライスは、数理計画法の双対性の理論より、最適解で得られた CO_2 排出量を実現するために必要な炭素税とも解釈できる。そこで、もし、2010 年になって初めて炭素税を課して、2010 年の CO_2 排出量を単年で E_2 に抑制しようとするならば、その炭素税額は、(A5)式において、

$$SP(t) = SR \{u(t-2009) - u(t-2010)\} \quad (A6)$$

とした SP_1 の値となる。ただし、 $u(t)$ はユニットステップ関数である。よって、2010 年になって初めて炭素税を課して、本論文の排出抑制値を実現しようとするには、(A7)式のように、本論文で示したシャドープライス SP_0 の 6 倍程度の炭素税課税が必要となる。

$$\begin{aligned} SR &= SP_0 \times \frac{\int_{2000}^{2010} \frac{t-2000}{10} e^{-\gamma(t-1990)} dt}{\int_{2009}^{2010} \frac{t-2000}{10} e^{-\gamma(t-1990)} dt} \\ &\approx 6.1 SP_0 \end{aligned} \quad (A7)$$

一方、 t 年における CO_2 排出許可証の売買量 $x(t)$ については、本モデルでは、 CO_2 排出量と同様に(A8)式のように時点間を線形近似している。

$$x(t) = \frac{x_1(2010-t) + x_2(t-2000)}{10} \quad (A8)$$

ただし、 x_1 は 2000 年の排出許可証の売買量、 x_2 は 2010 年の排出許可証の売買量である。

ところで、本論文では、2000 年時点には CO_2 排出量制約は課しておらず、排出許可証取引は行われたいと想定している。よって、 $x_1=0$ となり、(A8)式は (A9)式のように表現される。

$$x(t) = \frac{x_2(t-2000)}{10} \quad (A9)$$

よって、図 5 および図 7 に示した CO_2 削減限界費用 (CO_2

シャドープライス) によって価格づけられた許可証の売買額 (1990 年時点換算) は、

$$\begin{aligned} C &= \int_{2000}^{2010} x(t) SP(t) e^{-\gamma(t-1990)} dt \\ &= \int_{2000}^{2010} \frac{x_2(t-2000)}{10} SP(t) e^{-\gamma(t-1990)} dt \end{aligned} \quad (A10)$$

で示され、これは(A5)式より、下式のように書き換えられる。

$$C = -x_2 \frac{\partial J}{\partial E_2} \quad (A11)$$

よって、排出許可証取引額については、 CO_2 シャドープライス SP_0 で 2000～2010 年の期間取引されると想定しても、 SP_1 の価格で、2010 年に初めて取引が開始されるとしても、同様に(A11)式で示される額が取引されることになる。

秋 元 圭 吾

(学生員) 1970 年 6 月 16 日生まれ。1994 年 3 月横浜国立大学電子情報工学科卒業。1996 年 3 月横浜国立大学大学院電子情報工学専攻修士課程修了。同年 4 月同博士課程進学。エネルギーシステムを対象とした研究に従事。エネルギー・資源学会会員。1997 年国際応用システム分析研究所(IIASA) Peccei 賞、1998 年電気学会優秀論文発表賞受賞。

松 永 敦

(非会員) 1974 年 10 月 28 日生まれ。1998 年 3 月横浜国立大学電子情報工学科卒業予定。同年 4 月同修士課程進学。エネルギーシステムを対象とした研究に従事。

藤 井 康 正

(正員) 1965 年 4 月 12 日生まれ。1993 年 3 月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年 4 月横浜国立大学電子情報工学科助手。その後、講師を経て、現在、横浜国立大学助教授。エネルギーシステム、離散事象システムを対象とした研究に従事。

エネルギー・資源学会、計測自動制御学会会員。工学博士。

山 地 憲 治

(正員) 1950 年 2 月 25 日生まれ。1972 年東京大学工学部原子力工学科卒業。

1977 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年(財)電力中央研究所入所、その後、米国電力研究所(EPRI)客員研究員、電力中央研究所エネルギー研究室長等を経て、現在、

東京大学教授(工学系研究科電気工学専攻)。エネルギー分析、技術評価に関する研究に従事。エネルギー・資源学会、日本原子力学会、国際エネルギー経済学会(IAEE)会員。工学博士。