



RIETI Discussion Paper Series 08-J-063

電力の先渡し・スポット市場と排出権取引

田中 誠
経済産業研究所



Research Institute of Economy, Trade & Industry, IAA

独立行政法人経済産業研究所

<http://www.rieti.go.jp/jp/>

電力の先渡し・スポット市場と排出権取引*

田中誠

経済産業研究所ファカルティフェロー

政策研究大学院大学

要旨

近年、排出権取引の導入に伴う諸問題に関して議論が活発に行われている。本稿では、先渡し契約・スポット取引の両方で構成される寡占的電力市場において、排出権取引が導入される場合を分析する。特に、内生的な先渡し・スポット市場の枠組みの中で、排出権価格が戦略的な駆け引きのもとで決まる問題を考え、均衡制約をもつ均衡問題 (EPEC: Equilibrium Problem with Equilibrium Constraints) として定式化を行う。そして、モデルにもとづく簡単な数値例を用いて、戦略的な駆け引きのもとで排出権の均衡価格がどのように決まるかを分析する。また、排出権の初期配分量の違いが、社会的余剰にどのような影響をもたらさうかを考察する。

* 本稿の内容は筆者個人の見解を示すものであり、筆者が所属する機関の公式見解を示すものではない。

1 はじめに

自由化の進んだ電力市場では、先渡し契約とスポット取引の両方が市場参加者に活用されるのが一般的である。

企業が合理的であるならば、先渡し契約・スポット取引量の配分を内生的に決定する。Allaz and Vila (1993) は、不確実性のない一般財の市場を対象として、危険中立的な複占企業によるクールノー競争を考え、先渡し契約とスポット取引を内生的にモデル化する先駆的な研究を行った。彼らのモデルでは、各企業は、リスク・ヘッジのためでなく、ファースト・ムーバーとなりスポット取引で有利な立場に立つために、先渡し契約にコミットしようとする。しかし実際には、一社だけでなく全ての企業が先渡し契約にコミットしうるので、結局は囚人のジレンマの状況が生じる。寡占市場において先渡し契約が存在する場合には、市場価格が低下し、社会的余剰が増加することを彼らは示した。

近年、Allaz and Vila のモデルを電力市場の分析に応用する研究が増えている。Bushnell (2007) は、多数の対称的な企業によるクールノー競争を考え、先渡し契約とスポット取引の2期間モデルに関する均衡を解析的に導出している。そして、対称的な企業の仮定のもとで、米国の電力市場のデータを用いたシミュレーションを行っている。しかし現実においては、各企業の生産規模や費用構造は異なっており、非対称の状況が観察されるのが普通である。Green (1999) は、やはり先渡し契約とスポット取引の2期間モデルを用いて、英国の電力市場の分析を行っている。Yao et al. (2004) は、さらに送電制約も考慮して、ごく小規模の数値例に関して数値計算を行うことを試みている。

一方、電力市場に関する比較的新しいトピックとして、近年、電力市場と排出権取引の諸問題に関して議論が活発に行われるようになってきている。欧州では既に本格的に排出権取引制度が導入されているのをはじめ、日本でも試験実施が開始されようとしている。

寡占的電力市場と排出権取引の問題を扱った研究はまだそれほど多くない。その中で、Chen and Hobbs (2005) や Chen et al. (2006) は、スポット市場の寡占競争モデルに NO_x の排出権取引を組み込み、PJM 市場のデータを用いたシミュレーションを試みている。しかし、筆者の知る限り、先渡し契約・スポット取引の両方で構成される寡占的電力市場の枠組みで、排出権取引の問題を詳細に分析したものはないようである。

そこで本稿では、先渡し契約・スポット取引の両方で構成される寡占的電力市場において、排出権取引が導入される場合を分析する。特に、内生的な先渡し・スポット市場の枠組みの中で、排出権価格が戦略的な駆け引きのもとで決まる問題を考え、均衡制約をもつ均衡問題 (EPEC: Equilibrium Problem with Equilibrium Constraints) として定式化を行う。そして、モデルにもとづく簡単な数値例を用いて、戦略的な駆け引きのもとで排出権の均衡価格がどのように決まるかを分析する。また、排出権の初期配分量の違いが、社会的余剰にどのような影響をもたらすかを考察する。

本稿の構成は、次のとおりである。第2節で、一般的なモデルを定式化し、第3節で、簡単な数値例による分析を行う。第4節で、以上の議論を簡単に要約し今後の課題に触れる。

2 モデル

2.1 非対称企業による2期間モデルと排出権取引

本稿では、Allaz and Vila (1993) や Bushnell (2007) のクールノー競争モデルを拡張する形で、排出権取引の仕組みを導入する。Bushnell では、対称的な企業を仮定することで、先渡し契約とスポット取引の2期間モデルに関する均衡を解析的に導出している。しかし、先述のとおり、現実においては、各企業の生産規模や費用構造は異なっており、非対称の状況が観察されるのが普通である。

そこで、本稿では、**Bushnell** の分析を多数の非対称な企業によるクールノー競争の分析に拡張する。また、**Bushnell** では捨象されていた発電容量の上限等の制約も考慮することで、より現実的なモデルへの拡張を行なう。その上でさらに、排出権取引の仕組みをモデルに組み込む。モデルの期間構造に関しては、**Bushnell** と同様に先渡し契約とスポット取引の2期間モデルを考える。各企業は、第1期に先渡しの契約を行い、第2期にスポットの取引を行い、同時に排出権取引も実施する。したがって、内生的な先渡し・スポット市場の枠組みの中で、排出権価格が戦略的な駆け引きのもとで決まる問題を考えることになる。

以下に、本稿で用いる主な記号について記載しておく。

i, j	企業のインデックス.
I	企業数.
q_i	企業 i の発電量. $q_i \geq 0$.
\bar{q}_i	企業 i の発電量上限 (発電容量) .
q_i^f	企業 i の先渡し契約量. $q_i^f \geq 0$.
$q_i - q_i^f$	企業 i のスポット取引量. $q_i - q_i^f \geq 0$ はスポット販売, $q_i - q_i^f \leq 0$ はスポット購入を表す.
$C_i(q_i)$	企業 i の発電費用.
Q	全企業の発電量合計 = 需要量合計. $Q = \sum_i q_i$.
$P(Q)$	スポット取引価格 (逆需要関数) .
P^f	先渡し契約価格.
r_i	企業 i の CO2 排出率.

e_i CO2 排出権の企業 i への初期配分.

P^e CO2 排出権価格.

2.2 スポット取引 (第 2 期)

第 2 期における企業 i のスポット取引量は, 発電量と先渡し契約量との差, すなわち $q_i - q_i^f$ と表される. $q_i - q_i^f \geq 0$ にスポット取引価格を乗じた $P(Q)(q_i - q_i^f)$ が, 企業 i のスポット販売収入となる. $q_i - q_i^f \leq 0$ となる場合には, 企業 i はスポット購入を行うので, $P(Q)(q_i - q_i^f)$ はスポット購入費用を表す. 企業 i の発電費用は, $C_i(q_i)$ と表す.

次に, 各企業の排出権取引に関する費用や収入について定式化する. 企業 i が q_i の発電を行うと, CO2 排出率 r_i に応じて $r_i q_i$ の CO2 が排出されるものとする (排出量の単位はトンやキログラム等). 本稿では, 単純化のため, 各企業の CO2 排出率が定数で表されると仮定する. 企業 i の CO2 排出量 $r_i q_i$ が初期配分量 e_i を超える, すなわち $r_i q_i - e_i \geq 0$ の場合には, 超過分の排出権を排出権価格 P^e で購入しなければならない. 逆に, 企業 i の CO2 排出量が初期配分量を超えない, すなわち $r_i q_i - e_i \leq 0$ の場合には, 余った排出権を排出権価格 P^e で売却することができる.

以上の設定を踏まえ, 第 2 期のスポット取引に関する企業 i の問題は, 第 1 期に決定済の先渡し契約量のもとで, 発電量の非負制約と上限制約も考慮しながら, スポット取引から得られる利潤を最大化する問題として定式化できる.

$$\max_{q_i} : P(Q)(q_i - q_i^f) - C_i(q_i) - P^e(r_i q_i - e_i) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } q_i \leq \bar{q}_i \quad (2)$$

$$0 \leq q_i \quad (3)$$

発電量の上限制約に関する未定乗数を $\rho_i \geq 0$ とおくと，ラグランジアンは，

$$L_i = P(Q)(q_i - q_i^f) - C_i(q_i) - P^e(r_i q_i - e_i) + \rho_i(\bar{q}_i - q_i) \quad (4)$$

と表される．すると，第2期の企業*i*の問題に関するカラシュ＝クーン＝タッカー条件(KKT条件)は以下のように求まる．

$$0 \leq q_i \perp -\frac{\partial L_i}{\partial q_i} \geq 0 \quad (5)$$

$$0 \leq \rho_i \perp \bar{q}_i - q_i \geq 0 \quad (6)$$

なお， $0 \leq a \perp b \geq 0$ の記号法は，相補性条件を表しており， $0 \leq a$ ， $0 \leq b$ かつ $ab = 0$ を意味する．

2.3 排出権取引（第2期）

第2期における排出権取引市場の均衡条件を定式化する．全企業のCO2排出量合計は，初期配分量合計を超えることはできない，すなわち $\sum_i (e_i - r_i q_i) \geq 0$ である．また，排出

権価格は非負 $P^e \geq 0$ である。もしも全企業の CO2 排出量合計が初期配分量合計に等しく、排出権取引の需給均衡が成り立つ場合には、排出権価格は 0 以上となる。しかし、CO2 排出量合計が初期配分量合計よりも少なく、排出権が余る場合には、排出権価格は 0 となる。つまり、 $P^e \sum_i (e_i - r_i q_i) = 0$ が成立する。したがって、排出権取引市場の均衡条件は、次の相補性条件として定式化することができる。

$$0 \leq P^e \perp \sum_i (e_i - r_i q_i) \geq 0 \quad (7)$$

2.4 先渡し契約（第 1 期）

各企業は、第 1 期において、先渡し契約から得られる収入を含めた利潤最大化問題に直面する。本稿では、Allaz and Vila (1993) や Bushnell (2007) と同様、不確実性がない市場において、危険中立的な企業が意思決定を行う状況を考えている。そして、先渡し契約とスポット取引の間に裁定機会が存在しない状況下で、先渡し契約価格 P^f とスポット価格 P とが等しくなるものと仮定している。すると、先渡し契約から得られる収入も考慮した上で、の企業 i の利潤は、

$$\begin{aligned} & P^f q_i^f + P(Q)(q_i - q_i^f) - C_i(q_i) - P^e(r_i q_i - e_i) \\ & = P(Q)q_i - C_i(q_i) - P^e(r_i q_i - e_i) \end{aligned} \quad (8)$$

と表すことができる。

第 1 期の各企業は、続く第 2 期のスポット取引と排出権取引に関して正しく予想した上

で、自らの利潤を最大化する。したがって、第 2 期の全ての企業に関する KKT 条件および
 排出権取引市場の均衡条件が、第 1 期の企業 i の問題の制約条件となる。以下に示すように、
 第 1 期の先渡し契約に関する企業 i の問題は、均衡制約をもつ数理計画問題 (MPEC:
 Mathematical Program with Equilibrium Constraints) として表現できる。

$$\max_{q_i^f, \mathbf{q}, \boldsymbol{\rho}, P^e} : P(Q) q_i - C_i(q_i) - P^e(r_i q_i - e_i) \quad (9)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq q_j \perp -\frac{\partial L_j}{\partial q_j} \geq 0, \quad \forall j \quad (10)$$

$$0 \leq \rho_j \perp \bar{q}_j - q_j \geq 0, \quad \forall j \quad (11)$$

$$0 \leq P^e \perp \sum_i (e_i - r_i q_i) \geq 0 \quad (12)$$

$$0 \leq q_i^f \quad (13)$$

上記で、 \mathbf{q} 、 $\boldsymbol{\rho}$ はそれぞれ $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_I)$ 、 $\boldsymbol{\rho} = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_I)$ を表す。この問題の
 未定乗数を、制約条件 (10) については $\mu_{i,j}^1 \geq 0, \mu_{i,j}^2 \geq 0, \mu_{i,j}^3$ 、制約条件 (11) については
 $\nu_{i,j}^1 \geq 0, \nu_{i,j}^2 \geq 0, \nu_{i,j}^3$ 、制約条件 (12) については $\phi_i^1 \geq 0, \phi_i^2 \geq 0, \phi_i^3$ とおくと、ラグランジアンは、

$$\begin{aligned}
L_i^f &= P(Q)q_i - C_i(q_i) - P^e(r_i q_i - e_i) \\
&+ \sum_j \left(\mu_{i,j}^1 q_j - \mu_{i,j}^2 \frac{\partial L_j}{\partial q_j} - \mu_{i,j}^3 q_j \frac{\partial L_j}{\partial q_j} \right) \\
&+ \sum_j \{ \nu_{i,j}^1 \rho_j + \nu_{i,j}^2 (\bar{q}_j - q_j) + \nu_{i,j}^3 \rho_j (\bar{q}_j - q_j) \} \\
&+ \phi_i^1 P^e + \phi_i^2 \sum_j (e_j - r_j q_j) + \phi_i^3 P^e \sum_j (e_j - r_j q_j)
\end{aligned} \tag{14}$$

と表される．すると，第1期の企業*i*の問題に関する KKT 条件は以下のように求まる．

$$0 \leq q_i^f \perp -\frac{\partial L_i^f}{\partial q_i^f} \geq 0 \tag{15}$$

$$\frac{\partial L_i^f}{\partial q_j} = 0, \quad \forall j \tag{16}$$

$$\frac{\partial L_i^f}{\partial \rho_j} = 0, \quad \forall j \tag{17}$$

$$\frac{\partial L_i^f}{\partial P^e} = 0 \tag{18}$$

$$0 \leq q_j \perp \mu_{i,j}^1 \geq 0, \quad \forall j \tag{19}$$

$$0 \leq -\frac{\partial L_j}{\partial q_j} \perp \mu_{i,j}^2 \geq 0, \quad \forall j \tag{20}$$

$$-q_j \frac{\partial L_j}{\partial q_j} = 0, \quad \forall j \tag{21}$$

$$0 \leq \rho_j \perp v_{i,j}^1 \geq 0, \quad \forall j \quad (22)$$

$$0 \leq \bar{q}_j - q_j \perp v_{i,j}^2 \geq 0, \quad \forall j \quad (23)$$

$$\rho_j (\bar{q}_j - q_j) = 0, \quad \forall j \quad (24)$$

$$0 \leq P^e \perp \phi_i^1 \geq 0 \quad (25)$$

$$0 \leq \sum_j (e_j - r_j q_j) \perp \phi_i^2 \geq 0 \quad (26)$$

$$P^e \sum_j (e_j - r_j q_j) = 0 \quad (27)$$

2.5 均衡解の計算

2.4 で求めた第 1 期における個々の企業の KKT 条件を、全ての企業に関して計算し集めると、以下に示す均衡制約をもつ均衡問題を構成することができる。この問題を数値計算により解き、均衡における各企業の先渡し契約量やスポット取引量、排出権価格等を求める。

$$0 \leq q_i^f \perp -\frac{\partial L_i^f}{\partial q_i^f} \geq 0, \quad \forall i \quad (28)$$

$$\frac{\partial L_i^f}{\partial q_j} = 0, \quad \forall i, j \quad (29)$$

$$\frac{\partial L_i^f}{\partial \rho_j} = 0, \quad \forall i, j \quad (30)$$

$$\frac{\partial L_i^f}{\partial P^e} = 0, \quad \forall i \quad (31)$$

$$0 \leq q_j \perp \mu_{i,j}^1 \geq 0, \quad \forall i, j \quad (32)$$

$$0 \leq -\frac{\partial L_j}{\partial q_j} \perp \mu_{i,j}^2 \geq 0, \quad \forall i, j \quad (33)$$

$$-q_j \frac{\partial L_j}{\partial q_j} = 0, \quad \forall j \quad (34)$$

$$0 \leq \rho_j \perp v_{i,j}^1 \geq 0, \quad \forall i, j \quad (35)$$

$$0 \leq \bar{q}_j - q_j \perp v_{i,j}^2 \geq 0, \quad \forall i, j \quad (36)$$

$$\rho_j (\bar{q}_j - q_j) = 0, \quad \forall j \quad (37)$$

$$0 \leq P^e \perp \phi_i^1 \geq 0, \quad \forall i \quad (38)$$

$$0 \leq \sum_j (e_j - r_j q_j) \perp \phi_i^2 \geq 0, \quad \forall i \quad (39)$$

$$P^e \sum_j (e_j - r_j q_j) = 0 \quad (40)$$

3 数値例

3.1 基本設定

本稿では、特徴の異なる 2 つの企業が取引を行う仮想的な市場を考える。企業 1 は、発電の限界費用は高めだが、CO₂ の排出率は低いものとする。これに対して、企業 2 は、発電の限界費用は低めだが、CO₂ の排出率は高いものとする。例えば、仮想的な状況として、企業 1 は LNG 火力、企業 2 は石炭火力により発電を行うケースを想定することができる。

企業 1 と 2 の発電の限界費用をそれぞれ $C'_1(q_1) = 0.01q_1 + 1$, $C'_2(q_2) = 0.005q_2 + 1$ とする。また、企業 1 と 2 の CO₂ 排出率をそれぞれ 0.4, 0.8 (kg-CO₂/kWh) とする。他方、逆需要関数については、 $P(Q) = 0.03Q + 110$ とおく。なお、この数値例では、排出権取引の分析により焦点を当てるために、発電容量は十分にあるものと仮定し発電量の上限制約はバインディングでない状況を考える。

実際の計算には、数値計算ソフトウェアである GAMS を使い、ソルバーとして PATH (Dirkse and Ferris, 1995) を利用する。

3.2 排出権取引のないケース

まず、排出権取引がない場合を考え、スポット取引のみで構成される市場と先渡し契約・スポット取引の両方で構成される市場とを比較する。

本稿の設定のもとで、先渡し契約とスポット取引の両方が存在する場合には、寡占企業は先渡し契約を行うインセンティブをもつ。これは、Allaz and Vila (1993) が論じているように、各企業が、先渡し契約にコミットすることでファースト・ムーバーとなり、続くスポット取引でシュタッケルベルク・リーダーとしての有利な立場に立ちたいと考えるからである。表 1 が示すように、各々の発電量のうち、企業 1 は 46%、企業 2 は 43% を先渡し契約分にまわす。

(この辺に挿入) 表 1

仮に 1 社のみが先渡し契約にコミットできるのなら、その企業はファースト・ムーバーとしての恩恵を受けることができる。しかし、実際には全ての企業が先渡し契約を行うことができるので、Allaz and Vila が論じるように、結局、各企業は囚人のジレンマの状況に陥る。表 2 が示すように、先渡し契約とスポット取引の両方が存在する場合には、市場に供給される電力量が 2,240MWh から 2,596 MWh に増大し、価格は 43 円/kWh から 32 円/kWh に低下する。その結果、消費者余剰が増大し、生産者余剰は減少する。最終的に、先渡し契約・スポット取引の両方で構成される市場では、スポット取引のみで構成される市場に比べて、社会的余剰が増加する結果となる。表 3 は、両方の企業とも生産者余剰が減少する状況を示している。

(この辺に挿入) 表 2

(この辺に挿入) 表 3

3.3 排出権取引を導入するケース

以下では、先渡し契約・スポット取引の両方で構成される市場において、排出権取引が導入される状況を想定し、二つのケースについて考察する。

まずケース 1 として、過去の CO₂ 排出実績に比例して排出権の初期配分を行う状況を分析する。ここでは、排出権取引導入前の先渡し・スポット市場のモデルにより算出される CO₂ 排出量をもとに、その 95%が排出権の初期配分量として各企業に与えられるとする。具体的には、企業 1 に 452t、企業 2 に 1,068t が配分されるものとする。この初期配分量の

もとで排出権取引や先渡し契約・スポット取引がどのような結果となるかを、表 4 から表 6 に示してある。

表 4 や表 5 が示すように、排出権取引導入後の均衡では、導入前に比べて、企業 1 は発電量ひいては CO2 排出量を減らし、逆に企業 2 は発電量ひいては CO2 排出量を増やす。その結果、余分な排出権をもつ企業 1 が、排出権が不足する企業 2 に対して、51 円/kg の価格で 133t の排出権を売却する。

表 5 が示すように、企業 2 は、先渡し契約へのコミットを大幅に高める形で発電量を増やす。実際の発電量以上の先渡し契約を行い、不足分はスポット取引により調達する。一方、企業 1 については、先渡し契約の比率がやや高まるものの、企業 2 ほどの変化は見られない。

排出権取引導入後に、企業 1 と企業 2 が上記の行動をとることにより、両社とも生産者余剰を増加させることが可能なことを表 6 が示している。企業 1 は、排出権取引導入前と比較して、電力取引から得られる利潤を減らす、それを補って余りある排出権取引収入を獲得するため、最終的に生産者余剰が増大する。一方、企業 2 は、排出権を購入するための費用が生じるが、電力取引から得られる利潤がそれ以上に増加するため、最終的に生産者余剰が増大する。

本稿のモデルのように、排出権価格が戦略的な駆け引きのもとで決まる場合には、排出権の均衡価格が上がり上がる可能性がある。ケース 1 における排出権の均衡価格が高めの数値となっているのは、そのためであると考えられる。

(この辺に挿入) 表 4

(この辺に挿入) 表 5

(この辺に挿入) 表 6

次にケース 2 として、過去の CO2 排出実績に比例しない形で排出権の初期配分を行う状況を分析する。ここでは、排出率が相対的に低い企業 1 に対して排出権の初期配分量を多くし、排出率が相対的に高い企業 2 に対しては排出権の初期配分量を少なくする場合を考える。具体的には、先述のケース 1 の比例的な初期配分量をベースとして、企業 1 には 100t 増しの 552t、企業 2 には 100t 減の 968t が配分されるものとする。排出権の初期配分の総量は、ケース 1 とケース 2 とも同じである。この初期配分量のもとで排出権取引や先渡し契約・スポット取引がどのような結果となるかを表 7 から表 9 に示してある。

表 7 や表 8 が示すように、排出権の初期配分を減らされた企業 2 は、ケース 1 と比べると発電量ひいては CO2 排出量を減らす。一方、排出権の初期配分が増加した企業 1 は、ケース 1 と比べると発電量ひいては CO2 排出量を増やす。ケース 2 においても、ケース 1 と同様、企業 1 から企業 2 に排出権が売却される。ただし、均衡において、ケース 1 と比べて排出権の需給逼迫度合いが緩和され、排出権価格は 51 円/kg から 34 円/kg に低下する。

表 8 が示すように、ケース 1 と比較すると、企業 2 は、発電量を減らすのに伴い、先渡し契約にコミットする度合いも低下させる結果となる。一方、企業 1 については、先渡し契約の比率にほとんど変化が見られない。

排出権の初期配分の仕方を変えることにより、両企業が獲得する生産者余剰の大きさも変わる状況が表 9 に示されている。排出権の初期配分が企業 1 に有利に行われることにより、ケース 2 ではケース 1 に比べて、企業 1 に有利に余剰が分配される。具体的には、ケース 2 をケース 1 と比較すると、企業 1 の生産者余剰は 35,554 千円から 37,252 千円に増大し、逆に企業 2 の生産者余剰は 47,634 千円から 42,365 千円に減少する。両企業が生産者余剰の合計は、ケース 2 ではケース 1 よりも減少する。

(この辺に挿入) 表 7

(この辺に挿入) 表 8

(この辺に挿入) 表 9

表 10 には、ケース 1 とケース 2 における発電量、電力価格、余剰の結果を整理してある。CO₂ 排出量の削減によりもたらされる便益に関しては、金額換算の評価が分かれうるので、ここでは余剰の金額には入れていない。そのため、排出権取引の導入前の状況とケース 1・2 を単純に比較することはできない。しかし、ケース 1 とケース 2 とでは、CO₂ 排出の削減総量自体は等しく設定されているので、削減の便益評価を考慮せずにケース間の比較をすることが可能である。そこで、ケース 1 とケース 2 ではどのような違いが生じるのか、社会的余剰の観点から比較する。

CO₂ の排出総量は等しいにもかかわらず、表 10 が示すように、ケース 2 では、ケース 1 に比べて、発電量の総量が増加する。これは、ケース 2 では、ケース 1 と比較して、CO₂ 排出率の低い企業 1 の発電量がより多く、CO₂ 排出率の高い企業 2 の発電量がより少ないからである。このように、CO₂ の排出総量が一定でも、排出率の低い企業がより多く発電することで、発電量の総量は増加する。発電総量の増加に伴い、ケース 2 では、ケース 1 に比べて、電力価格が 41 円/kWh から 38 円/kWh に低下する。

ケース 2 では、発電の限界費用の劣る企業 1 がより多く発電することで社会的費用は増加するが、電力価格の低下による社会的便益の増加がそれを上回る。この結果、社会的余剰は、ケース 1 よりもケース 2 の方が増大する。一般に、完全競争の仮定のもとでは、排出権の初期配分の仕方を変えても、効率性には影響を与えない。しかし、寡占競争の仮定のもとで、企業が戦略的に行動する状況下では、排出権の初期配分の仕方が効率性に影響

を与えうる。本稿の数値例の設定のもとでは、排出率が相対的に低い企業に対して排出権の初期配分を多くすることで、社会的余剰が増大する結果を得る。

(この辺に挿入) 表 10

4 結語

本稿では、先渡し契約・スポット取引の両方で構成される寡占的電力市場において、排出権取引が導入される場合を分析した。特に、内生的な先渡し・スポット市場の枠組みの中で、排出権価格が戦略的な駆け引きのもとで決まる問題を考え、均衡制約をもつ均衡問題として定式化を行った。そして、モデルにもとづく簡単な数値例を用いて、戦略的な駆け引きのもとで排出権の均衡価格が高めの数値をとる状況を分析した。また、今回の数値例では、排出率が相対的に低い企業に対して排出権の初期配分を多くすることで、社会的余剰が増大する結果を得た。

今後の課題について何点か言及する。第一に、仮想的に先渡し契約が存在しない状況下の排出権取引を分析し、本稿の結果と比較することが挙げられる。それにより、先渡し契約の存在が排出権取引にどのような影響を与えるか、含意がより明確になるであろう。第二に、モデルにおけるCO₂排出率の扱いをより現実に近い形に拡張することが必要である。本稿のモデルでは各企業のCO₂排出率が一つの定数で表されると仮定したが、現実には各企業が燃料種の異なる複数の電源を所有しそれぞれのCO₂排出率も異なる状況が観察される。この点をモデル化した上で、企業の戦略的な意思決定を分析することが必要である。第三に、オークション方式等も含め、排出権の初期配分方法に関する様々なケースをシミュレーション分析することが課題となる。また、より現実に近い詳細な数値例を用いたシミュレーションを実施することも重要である。第四に、本稿では考慮していない送電線の

容量制約を組み込んだモデルに拡張していくことも課題となる。

参考文献

- Allaz, B., and J. L. Vila (1993) "Cournot Competition, Forward Markets and Efficiency," *Journal of Economic Theory* 53(1), 1-16.
- Bushnell J. B. (2007) "Oligopoly Equilibria in Electricity Contract Markets," *Journal of Regulatory Economics* 32(3), 225-245.
- Chen, Y., and B. F. Hobbs (2005) "An oligopolistic power market model with tradable NOx permits," *IEEE Transactions on Power Systems* 20(1), 119-129.
- Chen, Y., B. F. Hobbs, T. Munson, and S. Leyffer (2006) "Leader-Follower Equilibria for Electric Power and NOx Allowances Markets," *Computational Management Science* 3(4), 307-330.
- Dirkse, S. P., and M. C. Ferris (1995) "The PATH Solver: A Non-Monotone Stabilization Scheme for Mixed Complementarity Problems," *Optimization Methods and Software* 5, 123-156.
- Green, R. J. (1999) "The electricity contract market in England and Wales," *Journal of Industrial Economics* LVII(1), 107-124.
- Yao, J., S. S. Oren, and I. Adler (2004) "Computing Cournot Equilibria in Two-settlement Electricity Markets with Transmission Constraints," *Proceeding of the 37th Hawaii International Conference on Systems Sciences*.

表 1 排出権取引がないケースの先渡し契約・スポット取引

		単位: MWh			
		企業1		企業2	
スポット市場のみ		1,045	(100%)	1,195	(100%)
	先渡し契約	549	(46%)	602	(43%)
先渡し・スポット市場	スポット取引	641	(54%)	803	(57%)
	計	1,190	(100%)	1,406	(100%)

表 2 排出権取引がないケースの結果

	スポット市場のみ	先渡し・スポット市場
発電量(MWh)	2,240	2,596
電力価格(円/kWh)	43	32
消費者余剰(千円)	75,246	101,073
生産者余剰(千円)	84,609	68,775
社会的余剰(千円)	159,855	169,848

表 3 排出権取引がないケースの生産者余剰

		単位: 千円	
		企業1	企業2
スポット市場のみ		38,236	46,374
先渡し・スポット市場		29,962	38,814

表 4 ケース 1 の排出権取引

	企業1	企業2
排出権初期配分量(t)	452	1,068
排出量(t)	319	1,201
排出権取引量(t)	133	-133
排出権価格(円/kg)	51	51
排出権取引収入(千円)	6,813	-6,813

表 5 ケース 1 の先渡し契約・スポット取引

	単位: MWh	
	企業1	企業2
先渡し契約	413 (52%)	1,784 (119%)
スポット取引	385 (48%)	-282 (-19%)
計	798 (100%)	1,502 (100%)

表 6 ケース 1 の生産者余剰

	単位: 千円	
	企業1	企業2
排出権取引がないケースの生産者余剰(先渡し・スポット市場)	29,962	38,814
ケース1の電力取引に関する余剰の増減	-1,220	+15,634
ケース1の排出権取引に関する余剰の増減	+6,813	-6,813
ケース1の生産者余剰	35,554	47,634

表 7 ケース 2 の排出権取引

	企業1	企業2
排出権初期配分量(t)	552	968
排出量(t)	387	1,133
排出権取引量(t)	165	-165
排出権価格(円/kg)	34	34
排出権取引収入(千円)	5,672	-5,672

表 8 ケース 2 の先渡し契約・スポット取引

		単位: MWh	
	企業1	企業2	
先渡し契約	501 (52%)	1,321 (93%)	
スポット取引	467 (48%)	95 (7%)	
計	968 (100%)	1,417 (100%)	

表 9 ケース 2 の生産者余剰

		単位: 千円	
	企業1	企業2	
排出権取引がないケースの生産者余剰(先渡し・スポット市場)	29,962	38,814	
ケース2の電力取引に関する余剰の増減	+1,618	+9,224	
ケース2の排出権取引に関する余剰の増減	+5,672	-5,672	
ケース2の生産者余剰	37,252	42,365	

表 10 ケース1・2の結果

	ケース1	ケース2
発電量(MWh)	2,300	2,385
電力価格(円/kWh)	41	38
消費者余剰(千円)	79,327	85,315
生産者余剰(千円)	83,188	79,617
社会的余剰(千円)	162,515	164,932