

# ポリシーミックスは合理的か？

## —排出規制と再生可能エネルギー普及促進策—

高嶋 隆太, 伊藤 真理, 浅羽 峻也

近年、二酸化炭素に代表される温室効果ガスの排出による地球温暖化に大きな関心が集まっている。その対策として、温室効果ガスの排出を抑制するさまざまな政策が提案されている。本稿では、排出規制と再生可能エネルギー普及促進策に焦点を当て、最適な規制水準を決定する分析モデルを構築し、これらの政策の併用により市場価格や社会厚生、二酸化炭素排出に与える影響について論じる。

キーワード：Cap-and-Trade, 再生可能エネルギー利用割合基準, 二酸化炭素排出量, 電力価格, 社会厚生

### 1. はじめに

近年、二酸化炭素に代表される温室効果ガスの排出による地球温暖化問題が世界的に大きな関心を集めている。さまざまな二酸化炭素の排出抑制策が、世界各国で提案されており、その代表的な制度として、Cap-and-Trade 排出量取引（以下、C&T 排出量取引）が挙げられる。C&T 排出量取引は、国や地域、企業ごとに設定された二酸化炭素の排出許容枠に対し、目標を上回る削減を達成した市場参加者と未達成の参加者が過不足分を売買する、市場を介しての取引である。一方、電気事業においては、再生可能エネルギーの導入を促進し、二酸化炭素の排出量を抑えるため、その普及促進策が講じられている。その代表的な制度として、再生可能エネルギー利用割合基準制度（Renewables Portfolio Standards 制度；以下、RPS）や固定価格買取制度（Feed-in Tariffs 制度；以下、FIT）、市場プレミアム買取制度（Feed-in Premiums 制度；以下、FIP）があり、本稿では、RPS に注目する。RPS は、発電事業者が発電量の一定割合（以下、RPS 要求割合）を再生可能エネルギーによって発電することを義務づける制度である。この義務の履行方法の一つとして、再生可能エネルギーの導入の代わりに、再生可能エネルギー電力証書（Renewable Energy Certificates；以下、REC）などの再生可能エネルギー等電気相当量の取引をすることによって補うことが認められている。

これらの排出量取引や再生可能エネルギー普及促進策

はさまざまな国や地域において導入されている [1, 2]。また、EU 圏内や米国内においては、両制度・政策が講じられている国や地域が存在する。Böhringer and Behrens [3] は、EU 圏内のこのような国や地域を対象として、C&T 排出量取引と RPS, FIT, FIP のような再生可能エネルギー促進策とのポリシーミックスの効率性について分析している。Böhringer and Behrens は、それぞれの施策について社会厚生に関する評価をしているが、最適な政策水準については議論していない。Siddiqui et al. [4] では、RPS 政策の電力市場や REC 市場における競争への影響について分析しており、社会厚生上最適な RPS 要求割合を算出している。Tanaka and Chen [5] では、C&T 排出量取引が電力市場に与える影響について分析している。Tanaka and Chen は、キャップの水準と市場均衡との関係について示しているが、社会的に最適なキャップの設定については考えておらず、パラメータとして外生的に与えている。

そこで本研究では、C&T 排出量取引政策と再生可能エネルギー普及促進策である RPS 政策の両施策が講じられているとき、社会が両制度それぞれの規制水準を決定するような分析モデルを構築する。特に、本分析により、ポリシーミックスが市場価格や社会厚生、二酸化炭素排出に与える影響を明らかにする。

### 2. モデル

本研究では、電力市場に再生可能エネルギー事業者 1 社と非再生可能エネルギー事業者（主に火力電源を保有）が 2 社存在すると仮定する。各事業者の費用については、発電量に関して二次関数とし、発電量が等しいとき、再生可能エネルギー発電の限界費用は、非

たかしま りゅうた, いうま り, あさば しゅんや  
東京理科大学理工学部  
〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641  
takashima@rs.tus.ac.jp

再生可能エネルギー発電の限界費用よりも高いと仮定する。また、電力価格は、それぞれの事業者の発電量に関する一次の逆需要関数で表されると仮定する。さらに、非再生可能エネルギー発電による二酸化炭素排出の社会的損害に関する費用を発電量に関する二次関数として表す。

電力市場における政策決定者の目的は、社会厚生を最大化することである。本研究における社会厚生は、電力市場における社会余剰に加え、二酸化炭素排出による社会的損害（負の効果）から構成されるものとする。一方で、上述の各事業者は、政策決定者の定めた政策の条件下で、それぞれの利潤が最大となるよう発電量を決定する。したがって、政策決定者にとっての関心の対象である社会厚生は、政策決定者の定めた政策の枠組みの中、個々の事業者の利潤最大化を介して定まることになる。すなわち、この問題は、目的関数である社会厚生を構成する各事業者の発電量が、個別の利潤最大化問題の解と等しいという制約条件をもつバイレベル最適化問題と捉えられる。このとき、政策決定者の政策決定（規制や基準の決定）が上位レベル、個々の事業者による発電量の決定が下位レベルとなる。

このようなフレームワークの中、市場において講じられる以下のような政策に対し、社会厚生の見点から比較を行う。

#### ベンチマークケース

二酸化炭素排出量や RPS 要求割合などの規制が存在しないケース。各企業が、利潤最大化することにより発電量が決定され、それぞれの最適な発電量により社会厚生が得られる。下記のほかのケースとの比較のため、本ケースをベンチマークとして用いる。

#### RPS 政策

REC 市場が存在し、その市場価格は内生的に決定される。非再生可能エネルギー事業者は、再生可能エネルギー事業者の発行した REC を購入することにより、RPS 要求割合を達成することができる。再生可能エネルギー事業者は、余分な REC を売却することによって収入を得る。下位レベルでは、各事業者は、REC の売買を考慮したうえで利潤を最大化するように発電量の決定を行う。上位レベルにおいては、政策決定者は、社会厚生を最大化するように RPS 要求割合を決定する。

#### C&T 排出量取引政策

C&T 排出量取引市場が存在し、排出量の市場価格は内生的に決定される。非再生可能エネルギー事業者間で排出量を取引する。下位レベルでは、非再生可能エ

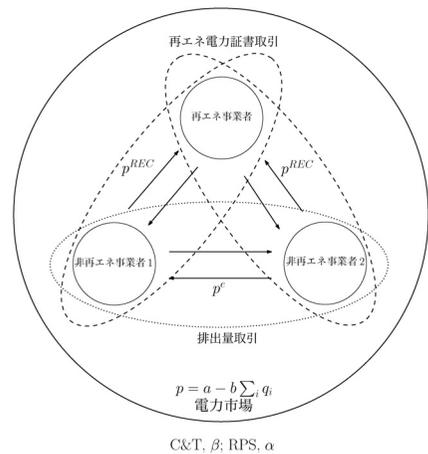


図1 モデルの概念図

ネルギー事業者は、排出キャップを考慮したうえで、利潤を最大化するように発電量の決定を行う。また、再生可能エネルギー事業者は、二酸化炭素を排出しないため、排出キャップを考慮することなく、利潤を最大化するよう発電量の決定を行う。上位レベルにおいては、政策決定者は、社会厚生を最大化するように排出削減割合を決定する。

#### 混合政策

非再生可能エネルギー事業者は、RPS 要求割合を満たせなかった場合、不足分を REC の購入によって達成する。さらに、非再生可能エネルギー事業者間で排出量を取引する。再生可能エネルギー事業者は、余分な REC の売却によって収入を得る。下位レベルでは、各事業者は上記を考慮したうえで利潤を最大化するように発電量の決定を行う。上位レベルにおいては、政策決定者は、社会厚生を最大化するよう RPS 要求割合および排出削減割合を決定する（図1）。

#### 2.1 文字の定義

本研究で用いる定数、変数を以下のように定義する。

##### 定数

- $a$ : 逆需要関数の切片
- $b$ : 逆需要関数の傾き
- $c_i$ : 非再生可能エネルギー事業者  $i$  の限界費用の係数
- $c_r$ : 再生可能エネルギー事業者の限界費用の係数
- $r_i$ : 非再生可能エネルギー事業者の排出係数
- $e_{cap}$ : 排出キャップ
- $e_i^b$ : 非再生可能エネルギー事業者  $i$  のベンチマークケースでの二酸化炭素排出量
- $k$ : 温室効果ガス排出による被害費用の係数

## 変数

$q_i$ : 非再生可能エネルギー事業者  $i$  の発電量

$q_r$ : 再生可能エネルギー事業者の発電量

$p$ : 電力価格,  $p = a - b(q_1 + q_2 + q_r)$

$p^{REC}$ : REC 価格

$p^e$ : 排出量価格

$\alpha$ : 再生可能エネルギー発電割合及び RPS 要求割合

$\beta$ : 排出削減割合

$e_i$ : 非再生可能エネルギー事業者  $i$  の排出量,

$$e_i = r_i q_i$$

非再生可能エネルギー事業者  $i$  の発電費用関数は,  $C_i(q_i) = c_i q_i^2 / 2$ , 再生可能エネルギー事業者の発電費用関数は,  $C_r(q_r) = c_r q_r^2 / 2$  とする. ただし, 再生可能エネルギー事業者の限界費用が, 非再生可能エネルギー事業者の限界費用より高く, また, 市場均衡を保証するため  $b < c_i < c_r < a$  と仮定する. さらに, 非再生可能エネルギー事業者の二酸化炭素排出による被害費用関数は  $d(q_1, q_2) = k(q_1 + q_2)^2 / 2$  である. ただし,  $k > 0$  であるとする.

## 2.2 ベンチマークケース

各企業は自社の利潤を最大化するように発電量を決定する.

$$\max_{q_1 \geq 0} \pi_1 = p q_1 - C_1(q_1) \quad (1)$$

$$\max_{q_2 \geq 0} \pi_2 = p q_2 - C_2(q_2) \quad (2)$$

$$\max_{q_r \geq 0} \pi_r = p q_r - C_r(q_r) \quad (3)$$

(1)~(3) は凸関数であるため, KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件として書き換えられる.

$$0 \leq q_1 \perp -\{a - b q_1 - c_1 q_1 - b(q_1 + q_2 + q_r)\} \geq 0 \quad (4)$$

$$0 \leq q_2 \perp -\{a - b q_2 - c_2 q_2 - b(q_1 + q_2 + q_r)\} \geq 0 \quad (5)$$

$$0 \leq q_r \perp -\{a - b q_r - c_r q_r - b(q_1 + q_2 + q_r)\} \geq 0 \quad (6)$$

(4)~(6) を用いて, 最適な発電量  $q_1^*$ ,  $q_2^*$ ,  $q_r^*$  を求める. 社会厚生は以下のように表される.

$$a(q_1^* + q_2^* + q_r^*) - \frac{1}{2}b(q_1^* + q_2^* + q_r^*)^2 - C_1(q_1^*) - C_2(q_2^*) - C_r(q_r^*) - d(q_1^*, q_2^*) \quad (7)$$

ベンチマークケースにおける非再生可能エネルギーの排出量を  $e_i^b$  として, 排出量取引のある政策に対してベンチマークパラメータとして扱う.

## 2.3 RPS 政策

### 下位レベル

下位レベルで, 各企業は自社の利潤を最大化するように発電量を決定する.

$$\max_{q_1 \geq 0} \pi_1 = p q_1 - C_1(q_1) - \alpha p^{REC} q_1 \quad (8)$$

$$\max_{q_2 \geq 0} \pi_2 = p q_2 - C_2(q_2) - \alpha p^{REC} q_2 \quad (9)$$

$$\max_{q_r \geq 0} \pi_r = p q_r - C_r(q_r) + (1 - \alpha) p^{REC} q_r \quad (10)$$

RPS 施行下では, 非再生可能エネルギー事業者は RPS 要求を達成するために REC を購入する. 一方, 再生可能エネルギー事業者は余った REC を売却することによって追加の利益を得る. なお, 再生可能エネルギー事業者による REC 売却分は, 再生可能エネルギー発電量から減ぜられる. また再生可能エネルギー事業者も RPS 要求割合を満たす必要があるため, 可能な REC の売却量は  $(1 - \alpha)q_r$  である. (8)~(10) は凸関数であるため, KKT 条件として書き換えられる. REC 価格については, REC 市場の清算条件を加味し, (14) のように表される.

$$0 \leq q_1 \perp -\{a - b q_1 - c_1 q_1 - b(q_1 + q_2 + q_r) - p^{REC} \alpha\} \geq 0 \quad (11)$$

$$0 \leq q_2 \perp -\{a - b q_2 - c_2 q_2 - b(q_1 + q_2 + q_r) - p^{REC} \alpha\} \geq 0 \quad (12)$$

$$0 \leq q_r \perp -\{a - b q_r - c_r q_r - b(q_1 + q_2 + q_r) + p^{REC} (1 - \alpha)\} \geq 0 \quad (13)$$

$$0 \leq p^{REC} \perp (1 - \alpha)q_r - \alpha q_1 - \alpha q_2 \geq 0 \quad (14)$$

(11)~(14) を用いて, 最適な発電量  $q_1^\circ$ ,  $q_2^\circ$ ,  $q_r^\circ$  を求める.

### 上位レベル

上位レベルで, 下位レベルで求めた最適な発電量  $q_1^\circ$ ,  $q_2^\circ$ ,  $q_r^\circ$  を用いて社会厚生を最大化するように最適な RPS 要求割合  $\alpha$  を決定する.

$$\max_{\alpha} a(q_1^\circ + q_2^\circ + q_r^\circ) - \frac{1}{2}b(q_1^\circ + q_2^\circ + q_r^\circ)^2 - C_1(q_1^\circ) - C_2(q_2^\circ) - C_r(q_r^\circ) - d(q_1^\circ, q_2^\circ) \quad (15)$$

## 2.4 C&T 排出量取引政策

### 下位レベル

下位レベルで, 各企業は自社の利潤を最大化するように発電量を決定する.

$$\max_{q_1 \geq 0} \pi_1 = p q_1 - C_1(q_1) - p^e (r_1 q_1 - \beta e_1^b) \quad (16)$$

$$\max_{q_2 \geq 0} \pi_2 = pq_2 - C_2(q_2) - p^e(r_2q_2 - \beta e_2^b) \quad (17)$$

$$\max_{q_r \geq 0} \pi_r = pq_r - C_r(q_r) \quad (18)$$

(16)と(17)では、非再生可能エネルギー事業者はベンチマークケースで決定した排出量  $e_i^b$  と排出削減割合  $\beta$  を基にした排出キャップを超えないように、発電量を決定する。(16)~(18)は凸関数であるため、KKT条件として書き換えられる。排出キャップは、 $e_{cap} = \beta e_1^b + \beta e_2^b$  で与えられる。排出量取引市場の清算条件については、(22)のように表される。

$$0 \leq q_1 \perp -\{a - bq_1 - c_1q_1 - b(q_1 + q_2 + q_r) - p^e r_1\} \geq 0 \quad (19)$$

$$0 \leq q_2 \perp -\{a - bq_2 - c_2q_2 - b(q_1 + q_2 + q_r) - p^e r_2\} \geq 0 \quad (20)$$

$$0 \leq q_r \perp -\{a - bq_r - c_rq_r - b(q_1 + q_2 + q_r)\} \geq 0 \quad (21)$$

$$0 \leq p^e \perp r_1q_1 + r_2q_2 - e_{cap} \geq 0 \quad (22)$$

(19)~(22)を用いて、最適な発電量  $q_1^\dagger, q_2^\dagger, q_r^\dagger$  を求める。

#### 上位レベル

上位レベルで、下位レベルで求めた最適な発電量  $q_1^\dagger, q_2^\dagger, q_r^\dagger$  を用いて社会厚生を最大化するように最適な排出削減割合を決定する。

$$\max_{\beta} a(q_1^\dagger + q_2^\dagger + q_r^\dagger) - \frac{1}{2}b(q_1^\dagger + q_2^\dagger + q_r^\dagger)^2 - C_1(q_1^\dagger) - C_2(q_2^\dagger) - C_r(q_r^\dagger) - d(q_1^\dagger, q_2^\dagger) \quad (23)$$

## 2.5 混合政策

#### 下位レベル

下位レベルで、各企業は自社の利潤を最大化するように発電量を決定する。

$$\max_{q_1 \geq 0} \pi_1 = pq_1 - C_1(q_1) - \alpha p^{REC} q_1 - p^e \{(1 - \alpha)r_1q_1 - \beta e_1^b\} \quad (24)$$

$$\max_{q_2 \geq 0} \pi_2 = pq_2 - C_2(q_2) - \alpha p^{REC} q_2 - p^e \{(1 - \alpha)r_2q_2 - \beta e_2^b\} \quad (25)$$

$$\max_{q_r \geq 0} \pi_r = pq_r - C_r(q_r) + (1 - \alpha)p^{REC} q_r \quad (26)$$

(24)と(25)では、非再生可能エネルギー事業者はRPS要求割合と排出削減割合を考慮しながら、発電量を決定する。(24)~(26)は凸関数であるため、KKT条件として書き換えられる。排出キャップは、 $e_{cap} = \beta e_1^b + \beta e_2^b$  で与えられる。排出量取引市場の清算条件については、(30)のように表される。REC価格については、REC

表1 本分析で用いるパラメータ

逆需要関数の切片	$a$	100
逆需要関数の傾き	$b$	0.01
非再生可能企業1の限界費用の係数	$c_1$	0.026
非再生可能企業2の限界費用の係数	$c_2$	0.024
再生可能企業の限界費用の係数	$c_r$	0.25
非再生可能企業1の排出係数	$r_1$	0.5
非再生可能企業2の排出係数	$r_2$	0.8
損害コスト係数	$k$	[0, 0.1]

市場均衡条件を加味し、式(31)のように表される。

$$0 \leq q_1 \perp -\{a - bq_1 - c_1q_1 - b(q_1 + q_2 + q_r) - p^e(r_1(1 - \alpha)) - p^{REC}\alpha\} \geq 0 \quad (27)$$

$$0 \leq q_2 \perp -\{a - bq_2 - c_2q_2 - b(q_1 + q_2 + q_r) - p^e(r_2(1 - \alpha)) - p^{REC}\alpha\} \geq 0 \quad (28)$$

$$0 \leq q_r \perp -\{a - bq_r - c_rq_r - b(q_1 + q_2 + q_r) + p^{REC}(1 - \alpha)\} \geq 0 \quad (29)$$

$$0 \leq p^e \perp r_1q_1 + r_2q_2 - e_{cap} \geq 0 \quad (30)$$

$$0 \leq p^{REC} \perp (1 - \alpha)q_r - \alpha q_1 - \alpha q_2 \geq 0 \quad (31)$$

(27)~(31)を用いて、最適な発電量  $q_1^*, q_2^*, q_r^*$  を求める。

#### 上位レベル

上位レベルで、下位レベルの求めた最適な発電量  $q_1^*, q_2^*, q_r^*$  を用いて社会厚生を最大化するように最適なRPS要求割合と排出削減割合を同時に決定する。

$$\max_{\alpha, \beta} a(q_1^* + q_2^* + q_r^*) - \frac{1}{2}b(q_1^* + q_2^* + q_r^*)^2 - C_1(q_1^*) - C_2(q_2^*) - C_r(q_r^*) - d(q_1^*, q_2^*) \quad (32)$$

## 3. 結果と考察

本節では、前節で説明したモデルを用いて、再生可能エネルギー発電量、市場価格、社会厚生、二酸化炭素排出量に対して、RPS政策、C&T排出量取引政策、混合政策の比較を行う。本分析では、先行研究[4, 5]を基に、表1のようなパラメータ値を用いる。

図2は、ベンチマークケースおよび各政策下での再生可能エネルギーの発電量に対する限界損害コストの増加率  $k$  の影響を示している。図中において、ベンチマークケースをBC、RPS政策をRPS、C&T排出量取引政策をC&T、混合政策をMIXとしている(以下、同様)。それぞれの政策における再生可能エネルギー発電量は、 $k$ が低い領域では、ベンチマークケースとほ

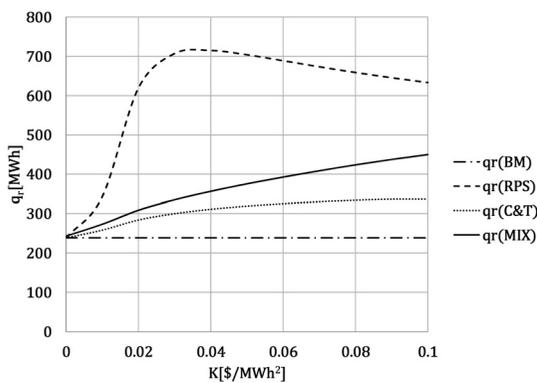


図 2 再生可能エネルギー発電量

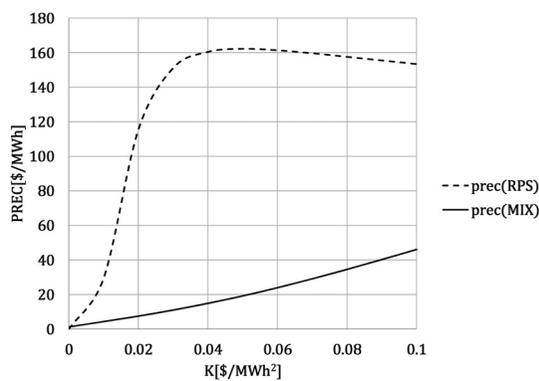


図 4 REC 価格

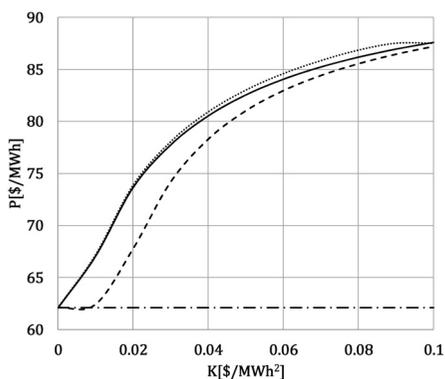


図 3 電力価格

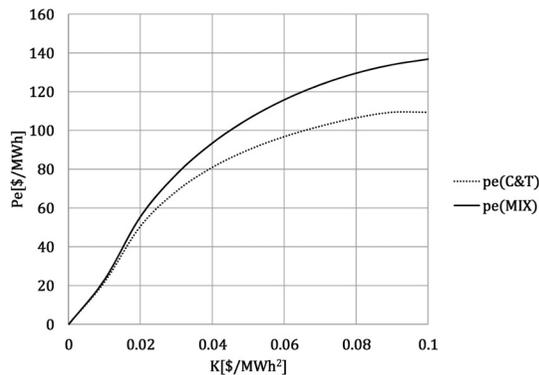


図 5 二酸化炭素排出量取引価格

とんど変わらない値である一方、 $k$ が大きくなるに従い発電量は増加する傾向にあることがわかる。特に、再生可能エネルギーの直接的な政策である RPS 政策が最も高い発電量を示している。しかしながら、 $k$ が 0.03 付近から発電量が減少していることがわかる。これは、 $k$ が増加するとともに非再生可能エネルギーの発電量が減少することや、RPS 政策が発電量に対する再生可能エネルギー相当の比率を対象とするという特徴によるものである。また、混合政策は、RPS 政策より低い発電量となっている。これは、混合政策では、二酸化炭素排出を削減する手段として排出量取引も存在するため、再生可能エネルギーを増やす必要がないことを示している。さらに、C&T 排出量取引政策において、再生可能エネルギー事業者は、本政策に直接的影響なく発電量を決定することができる一方、図 2 においては、 $k$ とともに増加することが示されている。これは、排出キャップを設けることにより、非再生エネルギー事業者が一定以上発電できなくなることに伴い、電力市場価格が高くなり、相対的に高コストな再生エネルギーの供給が増加したためである。

図 3 は、それぞれのケースの電力価格に対する  $k$  の

影響を示している。電力価格は再生可能エネルギー発電量と非再生可能エネルギー発電量の合計に依存する。C&T 排出量取引政策のときが、最も高い電力価格を示している。これは、非再生可能エネルギーの発電量が低い傾向にあることによるものである。このとき、政策に影響なく発電量を決定できる再生可能エネルギー事業者は、高利潤を得るために発電量を増加させるのである (図 2)。RPS 政策は、再生可能エネルギー発電量の増加の影響により、電力価格が低い状況になることがわかる。さらに、混合政策は、その中間の値をとることが示されている。

図 4 は、RPS 政策と混合政策の REC 価格に対する  $k$  の影響を示している。混合政策と比べ、RPS 政策が非常に大きな REC 価格の値を示していることがわかる。これは、図 2 における再生可能エネルギー発電量の結果に影響しており、再生可能エネルギー発電証書を売買する取引量が多いため、REC 価格が高くなると考えられる。その一方、混合政策では、C&T 排出量取引があるため、REC 市場での取引量が少なくなり、REC 価格は比較的低い値となる。図 5 は、C&T 排出量取引政策と混合政策の排出量価格に対する  $k$  の影響

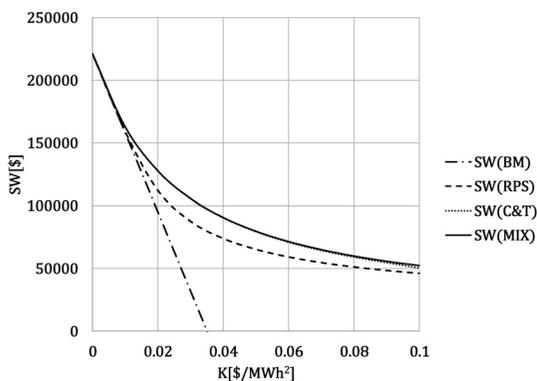


図6 社会厚生

を示している。図4のREC市場の結果と同様、 $k$ は市場取引量に影響し、混合政策よりC&T排出量取引政策の方が低い価格を示している。図4、図5のREC価格と排出量価格への影響に対する結果から、混合政策は、REC市場に大きな影響を与える一方、排出量取引市場へは、影響が比較的小さいことがわかる。

図6は、それぞれのケースの社会厚生に対する $k$ の影響を示している。 $k$ が増加することにより二酸化炭素排出の損害費用の影響が大きくなり、社会厚生は減少することがわかる。RPS政策とC&T排出量取引政策の社会厚生を比較すると、C&T排出量取引政策の方が高い結果となった。これは、図3で示されている電力価格の影響が大きく、C&T排出量取引政策における電力市場の社会余剰が比較的大きいことが原因であると考えられる。混合政策は、最も高い社会厚生の値を示しており、経済合理性の観点から選択すべき政策であるといえる。しかしながら、これらの政策の目的は、社会厚生の最大化のみならず、二酸化炭素排出量の抑制もある。

図7は、それぞれのケースにおける二酸化炭素排出量に対する $k$ の影響を示している。いずれの政策も $k$ が大きくなるに従い、排出量を抑制する傾向にあることがわかる。それぞれの政策を比較すると、RPS政策の排出量が最も高いことがわかる。これは、RPS政策の特徴から、再生可能エネルギーを増やすことにより、非再生可能エネルギーの発電量も高めることができるため、比較的排出の抑制が効かないことが考えられる。一方、C&T排出量取引政策は、直接的に排出を抑制する政策であるため最も低い排出量となっている。混合政策は、その中間であり、排出量抑制の観点からは、ベストな政策であるとはいえない。

#### 4. おわりに

本研究では、地球温暖化の原因と考えられる温室効

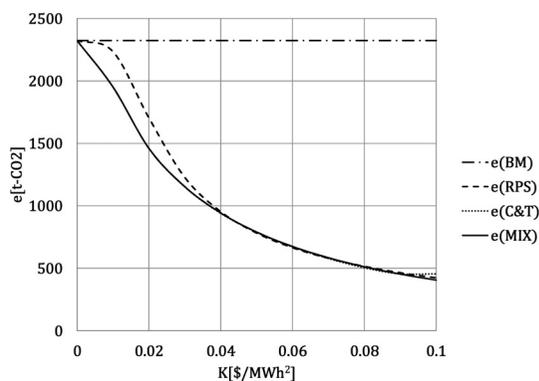


図7 二酸化炭素排出量

果ガスの削減を目的とした政策の比較を行った。RPS政策とC&T排出量取引政策、それぞれの混合政策に関する分析モデルを構築した。本モデルにより、それぞれの政策における最適な発電量、電力価格、RPS要求割合、排出上限割合を決定し、規制水準が市場均衡に対し、どのような影響を与えるかについて分析を行った。さらに、社会厚生最大化を目的として、政策決定者が、どのように規制水準を決定すべきかについてモデル化を行った。その結果、混合政策が最も社会厚生が高く、社会厚生の観点から理論的には最適な政策である一方、二酸化炭素排出については、C&T排出量取引のほうが、より抑えられることが明らかとなった。

本研究では、非再生可能エネルギー事業者2社と再生可能エネルギー事業者1社に対する簡便な問題設定により分析を行った。実際には、世界各国、それぞれの地域により、企業数、再生可能エネルギー事業者の比率等異なるため、企業数が設定可能なモデルへ拡張することが、今後の研究として考えられる。また、本研究では、再生可能エネルギー促進策としてRPSのみを考えたが、Böhringer and Behrens [3]と同様に、FITやFIPについて考えることも今後の研究として挙げられる。

**謝辞** 本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業 基盤研究(B) (課題番号: 15H02975) を受けて実施したものである。

#### 参考文献

- [1] International Carbon Action Partnership/ICAP, "Emissions trading worldwide: Status report 2017," 2017.
- [2] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century/REN21, "Renewables 2017 Global Status Report," 2017.
- [3] C. Böhringer and M. Behrens, "Interactions of emission caps and renewable electricity support schemes,"

*Journal of Regulatory Economics*, **48**, pp. 74–96, 2015.

- [4] A. S. Siddiqui, M. Tanaka and Y. Chen, “Are targets for renewable portfolio standards too low?: The impact of market structure on energy policy,” *European Journal of Operational Research*, **250**, pp. 328–341, 2016.

- [5] M. Tanaka and Y. Chen, “Market power in emissions trading: Strategically manipulating permit price through fringe firms,” *Applied Energy*, **96**, pp. 203–211, 2012.