An Effect of Output Quantities on Costs for CO₂ Emission Reduction*

Yuta Kamobayashi^a

Ryuta Takashima^{a,†}

^a*Department of Industrial Administration, Tokyo University of Science*

Abstract: One of policies for reduction of greenhouse gas includes the emission trading. The emissions trading, e.g., cap and trade is a market-based approach, which has been used to control pollutions by providing economic incentives for achieving reductions in the emissions. Recently, in previous work, the efficiency of emission trading has been addressed, and various models have been proposed. In this work, we develop a model for analyzing the decision making of firms' emission reductions by taking into account not only emission trading but also control of the quantity of output. Additionally, we analyze how the output quantity affects the emission reduction cost compared to the existing schemes, and derive the conditions for which the scheme in this work is economically justified.

Keywords: Optimal emission control; Emission trading; Banking and borrowing; Financial option; Uncertainty

*Received: October 22, 2018; Accepted: November 14, 2018.

[†]Corresponding author. Address: 2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510, Japan; Phone: +81-4-7122-1372; E-mail: takashima@rs.tus.ac.jp

CO₂ 排出削減費用に対する生産量の影響

鴨林 裕太^a高嶋 隆太^{a,†}^a 東京理科大学理工学部経営工学科

1 本研究の背景と目的

近年、二酸化炭素に代表される温室効果ガス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。この問題の対応策として、京都議定書で活用が認められている排出量取引がある。排出量取引は、制度実施の柔軟的な措置として提案された京都メカニズムの一つで、あらかじめ政府などの規制当局が、排出主体に対し排出枠を割り当て、排出主体同士が、実際の排出枠との差分を相対、または、市場を介して取引するものである。あらかじめ全体の排出上限を割り当てるため、その定量的な効果が把握しやすく、大きな効果が期待できるとされている。京都議定書において、温室効果ガス削減のための柔軟性措置として認められたことから、排出量取引は世界的に注目され、導入されるようになった。

排出量取引の普及とともに、制度設計に関する研究が多く行われるようになった。効率的な排出量取引制度を設計するにあたり、重要な問題となるのは、将来の価格幅であるボラティリティの制御である。Celebi and Graves [1] は、年間排出枠価格が 50%、もしくは、それ以上の標準偏差だと推定している。Chen and Tseng [3] においては、二酸化炭素の排出量取引市場メカニズムが、二酸化炭素削減技術への投資に大きな影響を与えることが示されている一方で、排出枠価格のボラティリティが大きい場合は、二酸化炭素排出量の大幅な削減を達成するために必要な技術への投資を妨げ、遅らせることが示されている。

また、先行研究において、排出量取引における価格ボラティリティの問題に対応するために、いくつかのアプローチが提案されている。Jacoby and Ellerman [7] は、価格の下限と上限を設定する安全弁メカニズムを提案している。Jacoby and Ellerman [7] は、このメカニズムが価格ボラティリティを減少させる一方、低い価格上限は排出超過につながる可能性があることに言及している。Fell et al. [5] は、バンキングが排出枠価格を平滑化し、コストを下げることを可能であることを示している。しかしながら、価格のボラティリティは、高い状況が保持されてしまうことを示している。さらに、バンキング可能な排出枠での価格統制に関する分析をしている先行研究も存在する。Newell et al. [11] は、バンキングやボロイーニングが、無制限かつコストがかからなければ、予想される排出枠価格は、金利によって上昇し、システムの状態が炭素税制度とほぼ同等となることを示している。Maeda [10] は、バンキング可能な排出枠の現物価格と先物価格の関係について分析している。特に、先物価格の不確実性の増加が、現物価格を下げ、その後、先物価格のボラティリティが高くなるとともに現物価格の上昇を引き起こすことを示している。また、Maeda [10] において、どの程度の将来の現物価格のボラティリティが、現在の現物価格とバンキング行動に影響を及ぼす可能性があるかを検討している。これらの先行研究は、バンキングが期待排出枠価格を安定化させることが可能であると結論付けている一方、価格ボラティリティを低い状態にするとといったボラティリティの制御については言及していない。

さらに、先行研究 [6, 4, 9] において、排出量市場のオプション利用の影響について分析を行っている。Grüll and Taschini [6] において、価格統制メカニズムは、ヨーロッパタイプとアメリカンタイプのオプションで、通常の制度により複製することができることを示している。これは、オプションが排出枠価格規制において効率的かつ十分であることを意味する。また、この結果は、バンキングが許可されたときにも有効であることを示している。Chevallier et al. [4] は、EUETS から収集したデータに基づいて、排出枠価格のボラティリティへのオプションの導入影響に関する実証分析を行っている。Chevallier et al. [4] は、オプションの導入が排出枠価格のボラティリティを減少させる可能性があることを示している。Xu et al. [9] は、オプションが現物価格、価格ボラティリティおよび排出制限を達成するための総コストを低減することを示している。Xu et al. [9] は、バンキングとボローイングが可能なシステムをバンキング・ボローイングアプローチ、オプションを導入したシステムを金融オプションアプローチとして、それぞれのシステムのモデル化を行っている。バンキングのないシステムよりバンキングのあるシステムの方がより効果的に機能し、オプションの導入はさらに効率的であることを示している。さらに、これら2つを組み合わせたシステムを提案し、いずれのアプローチよりも効率的であることを示している。本アプローチは、排出量取引以外でも応用されており、Khazaei et al. [8] は、Xu et al. [9] の枠組みを拡張し、確率動的計画法を用いて、再生可能エネルギー証書市場の分析を行っている。特に、Khazaei et al. [8] で提案しているターゲットとペナルティに関する政策により、市場価格のボラティリティが減少し安定化することで、再生可能エネルギーへの投資が促進させることを示している。

Xu et al. [9] の枠組みにおいては、排出規制の不確実性を考慮しておらず、確定的な状況を考えている。本来、各国・企業に割り当てられる初期排出枠は様々な要因から決定されることから、不確実性が高いものと考えられる。そのため、排出規制の不確実性を考慮して、より現実に即した分析をすることが必要である。また、Xu et al. [9] において提案されているシステムは、効率的であることが示されている一方で、排出量取引において指摘されている問題点が解決されていないものと考えられる。その問題点とは、先進国や比較的大きな企業が、より少ない投資や労力で遂行可能な排出量取引を積極的に利用することで、温室効果ガスを削減するための新たな技術やシステムの開発の必要性が薄れ、結果的に温室効果ガスの削減が停滞する可能性があるということである。排出枠に余裕がある国・企業が、開発途上の国・企業の余剰排出枠を買い取り、現状以上に排出することにより、本来減少するはずの地球全体の排出量が、政策を講じる前と同程度、もしくは増える可能性があるものと考えられる。先行研究では、排出量取引の効率化を目的としている研究が多く、これらの問題点を考慮している研究は、ほとんど見受けられない。すなわち、排出を抑えることを前提としたモデルを構築することは大きな意義があるものと考えられる。国・企業の排出削減行動として、大きく分けて、排出削減技術への投資と排出に係る生産量のコントロールの2つが考えられる。前者は、効果を得るまでに多大な時間と投資コストがかかることから、排出量取引の積極的な利用につながるものと考えられる一方、後者は、主体の供給義務等がなければ、即座に意思決定可能であり、時間的制約や投資コストがかかる可能性は低いものと考えられる。

そこで本研究では、より現実的な分析を行うために、先行研究において考えられていない排出規制の不確実性についての導入を行う。また、排出に係る生産量を抑えることを前提としたアプローチ（排出抑制アプローチ）のモデルを構築し、排出量取引に関するコストを抑えることで、温室効果ガス削減への施策に示唆を与えることを目的とする。

2 排出規制の不確実性の導入

本研究では, Xu et al. [9] に基づき, 現在 (時点 $t = 0$) および将来 (時点 $t = 1$) の 2 期間のみが存在するモデルを考える. さらに, Xu et al. [9] のモデルを拡張し, 排出規制の不確実性を考慮した場合のモデルを構築する. 二酸化炭素の排出枠が, 両時点において現物市場で取引が可能である. 本モデルでは, 排出を規制された企業が, N 社あるとし, 企業 i ($= 1, \dots, N$) の時点 t における排出量, 割り当てられた初期排出枠, 排出削減量はそれぞれ $e_{i,t}$ [t], $a_{i,t}$ [t], $q_{i,t}$ [t] と表す. 時点 t における現物価格を P_t [\$/t] とし, 排出削減量 $q_{i,t}$ [t] を達成するコスト関数を $C_{i,t} = C_{i,t}(q_{i,t})$ [\$] とする. 時点 1 での排出量 $e_{i,1}$ [t] および排出枠 $a_{i,1}$ [t] は, 時点 0 において不確定であるとする. これらはそれぞれ, 平均 $\mu_{i,1}$ [t], $\mu_{a_{i,1}}$ [t] と分散 $\sigma_{e_{i,1}}^2$ [t²], $\sigma_{a_{i,1}}^2$ [t²] の確率空間 $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ で与えられる. また, 時点 0 における時点 1 の現物価格を P_1 [\$/t] とする. 一般的に, 異なる企業の排出量, 例えば, 発電事業において, 電源はいくつかの要因によって運転されているため, 任意の i, j ($= 1, \dots, N$) の場合に $e_{i,1}$ と $e_{j,1}$ は相関係数 $\rho_{i,j}$ で互いに相関関係があるものとする. 現物価格の期待値が正の値になることを保証するために, 規制当局は常に予想される排出量よりも個々の排出者に少ない排出枠を割り当てる条件 $a_{i,1} < \mu_{i,1}$ を課す. $c_{i,t}$ [\$/t²] > 0 を時点 t での排出削減能力として, 各企業の削減コスト関数は二次関数 $C_{i,t}(q_{i,t}) = \frac{1}{2}c_{i,t}q_{i,t}^2$ [\$] であると仮定する.

2.1 基本モデル

規制当局の視点から社会厚生を考えると, 政策目標は各遵守期間に, 企業全体が最小のコストで二酸化炭素の排出削減を達成することであると考えられる. 一方, 排出企業の視点から考えた場合, 目標は個々のコストを最小化することである. すなわち, 時点 t で任意の実現された現物価格 P_t に関して, 各企業は P_t が限界コストに等しくなるように,

$$P_t = C'_{i,t}(q_{i,t}) = c_{i,t}q_{i,t}, \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

$q_{i,t}$ の排出量を削減する [9]. 本研究では, 各企業は価格受容者であると仮定し, 現物価格 P_t は次の市場清算条件を課すことによって決定することができるものとする.

$$\sum_{i=1}^N q_{i,0} = \sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0}) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N q_{i,1}(\omega) = \sum_{i=1}^N (e_{i,1}(\omega) - a_{i,1}(\omega)), \quad \omega \in \Omega \quad (3)$$

排出枠の現物価格は (1)–(3) 式より,

$$P_0 = \frac{\sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0})}{\sum_{i=1}^N c_{i,0}^{-1}} \quad (4)$$

$$P_1(\omega) = \frac{\sum_{i=1}^N (e_{i,1}(\omega) - a_{i,1}(\omega))}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} \quad (5)$$

となる. $a_{i,0}$ と $a_{i,1}(\omega)$ を達成するためにかかる総コストは,

$$\begin{aligned} TC_{i,0} &= P_0 [(e_{i,0} - q_{i,0}) - a_{i,0}] + C_{i,0}(q_{i,0}) \\ &= \frac{(e_{i,0} - a_{i,0}) \sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0})}{\sum_{i=1}^N c_{i,0}^{-1}} - \frac{1}{2} c_{i,0}^{-1} \frac{\left[\sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0}) \right]^2}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,0}^{-1} \right)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} TC_{i,1}(\omega) &= P_1(\omega) [(e_{i,1}(\omega) - q_{i,1}(\omega)) - a_{i,1}(\omega)] + C_{i,1}(q_{i,1}(\omega)) \\ &= P_1(\omega) (e_{i,1}(\omega) - a_{i,1}(\omega)) - \frac{1}{2} c_{i,1}^{-1} P_1^2(\omega) \end{aligned} \quad (7)$$

となる．時点 0 において現物価格 $P_1(\omega)$ の期待値および分散は (5) 式より，

$$\mathbb{E}[P_1(\omega)] = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{i,1} - \mu_{a_{i,1}})}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} \quad (8)$$

$$\mathbb{V}[P_1(\omega)] = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{i,1}^2 + \sigma_{a_{i,1}}^2)}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}\right)^2} + \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} (\rho_{i,j} \sigma_{i,1} \sigma_{j,1} + \rho_{a_{i,j}} \sigma_{a_{i,1}} \sigma_{a_{j,1}})}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}\right)^2} \quad (9)$$

のように得られる．時点 1 における総コスト $TC_{i,1}(\omega)$ の期待値は (7) 式より，

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[TC_{i,1}(\omega)] &= \frac{(\mu_{i,1} - \mu_{a_{i,1}}) \sum_{i=1}^N (\mu_{i,1} - \mu_{a_{i,1}})}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} + \frac{(\sigma_{i,1}^2 + \sigma_{a_{i,1}}^2)}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} + \frac{\sum_{j \neq i} (\rho_{i,j} \sigma_{i,1} \sigma_{j,1} + \rho_{a_{i,j}} \sigma_{a_{i,1}} \sigma_{a_{j,1}})}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} \\ &\quad - \frac{1}{2} c_{i,1}^{-1} \left\{ \frac{\left[\sum_{i=1}^N (\mu_{i,1} - \mu_{a_{i,1}})\right]^2}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}\right)^2} + \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{i,1}^2 + \sigma_{a_{i,1}}^2)}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}\right)^2} + \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} (\rho_{i,j} \sigma_{i,1} \sigma_{j,1} + \rho_{a_{i,j}} \sigma_{a_{i,1}} \sigma_{a_{j,1}})}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}\right)^2} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

となる．本モデルの総割引コストは，

$$TC_i = TC_{i,0} + \frac{1}{1+r} \mathbb{E}[TC_{i,1}(\omega)] \quad (11)$$

のように表される．

単純化するために各企業が対称であるとする．すなわち， $e_{i,1}$ および $a_{i,1}$ はそれぞれ独立で同一の確率分布に従う．よって，表記の下付き文字 i を省略することができる．本設定により，時点 0 の価格および時点 1 の価格の期待値と分散は (4), (8), (9) 式より，

$$P_0 = c_0(e_0 - a_0) \quad (12)$$

$$\mathbb{E}[P_1(\omega)] = c_1(\mu_1 - \mu_{a_1}) \quad (13)$$

$$\mathbb{V}[P_1(\omega)] = \frac{c_1^2 (\sigma_1^2 + \sigma_{a_1}^2)}{N} \quad (14)$$

のように表せる．(14) 式から， N が増加するにしたがい，現物価格の分散が減少することがわかる．これは，排出量および排出枠の不確実性は企業数が増加することにより相殺されることを意味する．以上より，総割引コストは (6), (10), (11) 式より，

$$\begin{aligned} TC &= TC_0 + \frac{1}{1+r} \mathbb{E}[TC_1(\omega)] \\ &= \frac{c_0(e_0 - a_0)^2}{2} + \frac{1}{1+r} \left[\frac{c_1(\mu_1 - \mu_{a_1})^2}{2} + \frac{c_1(\sigma_1^2 + \sigma_{a_1}^2)}{2N} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

のように導出される．これらの上記の式は，異なるアプローチとの比較のためのベンチマークとして用いられる．

2.2 バンキング・ボローイングアプローチ

本アプローチは、現時点で余った排出枠を将来に繰り越す（バンキング）、または、将来時点の排出枠を現在時点に繰り入れる（ボローイング）ことを可能とするアプローチである。バンキングが許可されると、企業は未使用の排出枠を将来期間での使用のために保持しておくことができる。また、現在の現物市場から排出枠を購入し、高騰する将来の現物価格をヘッジするために保有を続けることが可能である。一方、ボローイングが許可されている場合には、排出した企業は当期の不足をカバーするために、将来の排出枠を使うことができる。また、将来の現物価格の下落をヘッジするために、現在の現物市場でそれらを売却することが可能である。バンキング・ボローイング量を $B_{i,0}$ [t] とし、各企業 i が時点 0 で排出枠 $B_{i,0}$ をバンキングまたはボローイングが可能である。 $B_{i,0} > 0$ はバンキングである一方、 $B_{i,0} < 0$ はボローイングを表す。

現物価格 P_t^b は次の市場清算条件を課すことによって決定することができる。

$$\sum_{i=1}^N q_{i,0} = \sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0} + B_{i,0}) \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^N q_{i,1}(\omega) = \sum_{i=1}^N (e_{i,1}(\omega) - a_{i,1}(\omega) - B_{i,0}), \quad \omega \in \Omega \quad (17)$$

排出枠の現物価格は (1), (16), (17) 式より、

$$P_0^b = \frac{\sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0} + B_{i,0})}{\sum_{i=1}^N c_{i,0}^{-1}} \quad (18)$$

$$P_1^b(\omega) = \frac{\sum_{i=1}^N (e_{i,1}(\omega) - a_{i,1}(\omega) - B_{i,0})}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} \quad (19)$$

となる。 $a_{i,0}$ と $a_{i,1}(\omega)$ を達成するのにかかる総コストは、

$$\begin{aligned} TC_{i,0}^b &= P_0^b [(e_{i,0} - q_{i,0}) - a_{i,0} + B_{i,0}] + C_{i,0}(q_{i,0}) \\ &= \frac{(e_{i,0} - a_{i,0} + B_{i,0}) \sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0} + B_{i,0})}{\sum_{i=1}^N c_{i,0}^{-1}} - \frac{1}{2} c_{i,0}^{-1} \frac{\left[\sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0} + B_{i,0}) \right]^2}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,0}^{-1} \right)^2} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} TC_{i,1}^b(\omega) &= P_1^b(\omega) [(e_{i,1}(\omega) - q_{i,1}(\omega)) - a_{i,1}(\omega) - B_{i,0}] + C_{i,1}(q_{i,1}(\omega)) \\ &= P_1^b(\omega) (e_{i,1}(\omega) - a_{i,1}(\omega) - B_{i,0}) - \frac{1}{2} c_{i,1}^{-1} P_1^{b^2}(\omega) \end{aligned} \quad (21)$$

となる。時点 0 において不確実な現物価格 $P_1^b(\omega)$ の期待値および分散は (19) 式より、

$$\mathbb{E} [P_1^b(\omega)] = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{i,1} - \mu_{a_{i,1}} - B_{i,0})}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} \quad (22)$$

$$\mathbb{V} [P_1^b(\omega)] = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{i,1}^2 + \sigma_{a_{i,1}}^2)}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1} \right)^2} + \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} (\rho_{i,j} \sigma_{i,1} \sigma_{j,1} + \rho_{a_{i,j}} \sigma_{a_{i,1}} \sigma_{a_{j,1}})}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1} \right)^2} \quad (23)$$

のように得られる。また、時点 1 における総コスト $TC_{i,1}^b(\omega)$ の期待値は (21) 式より、

$$\begin{aligned} \mathbb{E} [TC_{i,1}^b(\omega)] &= \frac{(\mu_{i,1} - \mu_{a_{i,1}} - B_{i,0}) \sum_{i=1}^N (\mu_{i,1} - \mu_{a_{i,1}} - B_{i,0})}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} + \frac{(\sigma_{i,1}^2 + \sigma_{a_{i,1}}^2)}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} \\ &+ \frac{\sum_{j \neq i} (\rho_{i,j} \sigma_{i,1} \sigma_{j,1} + \rho_{a_{i,j}} \sigma_{a_{i,1}} \sigma_{a_{j,1}})}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} - \frac{1}{2c_{i,1}^{-1}} \left\{ \frac{\left[\sum_{i=1}^N (\mu_{i,1} - \mu_{a_{i,1}} - B_{i,0}) \right]^2}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1} \right)^2} \right. \\ &\left. + \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{i,1}^2 + \sigma_{a_{i,1}}^2)}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1} \right)^2} + \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} (\rho_{i,j} \sigma_{i,1} \sigma_{j,1} + \rho_{a_{i,j}} \sigma_{a_{i,1}} \sigma_{a_{j,1}})}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1} \right)^2} \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

のように得られる。本モデルの総割引コストは、

$$TC_i^b = TC_{i,0}^b + \frac{1}{1+r} \mathbb{E} [TC_{i,1}^b(\omega)] \quad (25)$$

のように表される。

単純化するために各企業が対称であるとする、時点 0 の価格および時点 1 の価格の期待値と分散は (18), (22), (23) 式より、

$$P_0^b = c_0(e_0 - a_0 + B_0) \quad (26)$$

$$\mathbb{E} [P_1^b(\omega)] = c_1(\mu_1 - \mu_{a1} - B_0) \quad (27)$$

$$\mathbb{V} [P_1^b(\omega)] = \frac{c_1^2 (\sigma_1^2 + \sigma_{a1}^2)}{N} \quad (28)$$

と表せる。(26)–(28) 式を (12)–(14) 式と比較すると、 $B_0 > 0$ のとき、 P_0^b は増加し、 $\mathbb{E} [P_1^b(\omega)]$ は減少することがわかる。これはバンキングは分散を不変のまま、現物価格の変化を安定化させることを意味する。以上より、総割引コストは (20), (24), (25) 式より、

$$TC^b = \frac{c_0(e_0 - a_0 + B_0)^2}{2} + \frac{1}{1+r} \left[\frac{c_1(\mu_1 - \mu_{a1} - B_0)^2}{2} + \frac{c_1(\sigma_1^2 + \sigma_{a1}^2)}{2N} \right] \quad (29)$$

のように得られる。(29) 式を最小化するような最適なバンキング・ボローイング量は $\partial TC^b / \partial B_0 = 0$ より、

$$B_0^* = \frac{c_1(\mu_1 - \mu_{a1}) - c_0(1+r)(e_0 - a_0)}{c_0(1+r) + c_1} \quad (30)$$

となる。最適総割引コストは (29) 式に (30) 式を代入することで得られる。

2.3 金融オプションアプローチ

本アプローチでは、Xu et al. [9] に従い、原資産を二酸化炭素排出量とするコールオプションを考える。全ての行使価格を有する排出量オプションが取引されており、排出枠が規制されていない企業が M

社存在すると仮定する．オプションは時点 0 において，規制されている企業と規制されていない企業の間で取引されており，これらのオプションの満期は時点 1 であるとする．

全ての存在しうる排出枠価格水準におよぶ行使価格の排出量に関するコールオプションから成るポートフォリオとして定義されるオプション商品を考える．すなわち，これは，ゼロから価格上限まで均等に区分した行使価格を持つコールオプションの集合であるバンドルとみなす [2]．排出枠はバンドルを行使することから各行使価格レベルで購入されうると仮定する．時点 1 において，このようなバンドルでオプションを行使して購入した排出枠の数は $\int_0^{P_1} dP = P_1$ に等しく，このバンドルのペイオフは行使価格を K とすると， $\int_0^{P_1} (P_1 - K) dK = \frac{1}{2} P_1^2$ となる． $i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M$ の場合， θ_i と γ_j を規制された企業 i と規制されていない企業 j によって購入または売却されたバンドルの数として表す．ここで，正の値は購入，負の値は売却に対応する．バンドルの価格を λ とする．現物価格 P_1 が時点 1 において実現されている場合， θ 個のバンドルを保有することは現物市場で $\theta_i P_1$ の排出枠を購入する場合に $\theta_i P_1^2$ にかかるのに対し， $\frac{1}{2} \theta_i P_1^2$ のコストで取得することができる．

現物価格 P_t^o は次の市場清算条件を課すことによって決定することができる．

$$\sum_{i=1}^N q_{i,0} = \sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0}), \quad \sum_{i=1}^N \theta_i = - \sum_{i=1}^N \gamma_j \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^N q_{i,1}(\omega) = \sum_{i=1}^N (e_{i,1}(\omega) - a_{i,1}(\omega) - \theta_i P_1^o(\omega)), \quad \omega \in \Omega \quad (32)$$

排出枠の現物価格は (1), (31), (32) 式より，

$$P_0^o = \frac{\sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0})}{\sum_{i=1}^N c_{i,0}^{-1}} \quad (33)$$

$$P_1^o(\omega) = \frac{\sum_{i=1}^N (e_{i,1}(\omega) - a_{i,1}(\omega))}{\sum_{i=1}^N (c_{i,1}^{-1} + \theta_i)} \quad (34)$$

のとなる． $a_{i,0}$ と $a_{i,1}(\omega)$ を達成するのにかかる総コストは，

$$\begin{aligned} TC_{i,0}^o &= P_0^o [(e_{i,0} - q_{i,0}) - a_{i,0}] + \lambda \theta_i + C_{i,0}(q_{i,0}) \\ &= \frac{(e_{i,0} - a_{i,0}) \sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0})}{\sum_{i=1}^N c_{i,0}^{-1}} + \lambda \theta_i - \frac{1}{2} c_{i,0}^{-1} \frac{\left[\sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0}) \right]^2}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,0}^{-1} \right)^2} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} TC_{i,1}^o(\omega) &= P_1^o(\omega) [(e_{i,1}(\omega) - q_{i,1}(\omega)) - a_{i,1}(\omega) - \theta_i P_1^o(\omega)] + \frac{1}{2} \theta_i P_1^{o2}(\omega) + C_{i,1}(q_{i,1}(\omega)) \\ &= P_1^o(\omega) (e_{i,1}(\omega) - a_{i,1}(\omega)) - \frac{1}{2} P_1^{o2}(\omega) (c_{i,1}^{-1} + \theta_i) \end{aligned} \quad (36)$$

となる．時点 0 において不確実な現物価格 $P_1^o(\omega)$ の期待値および分散は (34) 式より，

$$\mathbb{E}[P_1^o(\omega)] = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{i,1} - \mu_{a_{i,1}})}{\sum_{i=1}^N (c_{i,1}^{-1} + \theta_i)} \quad (37)$$

$$\mathbb{V}[P_1^o(\omega)] = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{i,1}^2 + \sigma_{a_{i,1}}^2)}{\left[\sum_{i=1}^N (c_{i,1}^{-1} + \theta_i) \right]^2} + \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} (\rho_{i,j} \sigma_{i,1} \sigma_{j,1} + \rho_{a_{i,j}} \sigma_{a_{i,1}} \sigma_{a_{j,1}})}{\left[\sum_{i=1}^N (c_{i,1}^{-1} + \theta_i) \right]^2} \quad (38)$$

のように得られる．時点 1 における総コスト $TC_{i,1}^o(\omega)$ の期待値は (36) 式より，

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[TC_{i,1}(\omega)] &= \frac{(\mu_{i,1} - \mu_{ai,1}) \sum_{i=1}^N (\mu_{i,1} - \mu_{ai,1})}{\sum_{i=1}^N (c_{i,1}^{-1} + \theta_i)} + \frac{(\sigma_{i,1}^2 + \sigma_{ai,1}^2)}{\sum_{i=1}^N (c_{i,1}^{-1} + \theta_i)} + \frac{\sum_{j \neq i} (\rho_{i,j} \sigma_{i,1} \sigma_{j,1} + \rho_{ai,j} \sigma_{ai,1} \sigma_{aj,1})}{\sum_{i=1}^N (c_{i,1}^{-1} + \theta_i)} \\ &\quad - \frac{1}{2} (c_{i,1}^{-1} + \theta_i) \left\{ \frac{\left[\sum_{i=1}^N (\mu_{i,1} - \mu_{ai,1}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (c_{i,1}^{-1} + \theta_i)^2} + \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{i,1}^2 + \sigma_{ai,1}^2)}{\sum_{i=1}^N (c_{i,1}^{-1} + \theta_i)^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} (\rho_{i,j} \sigma_{i,1} \sigma_{j,1} + \rho_{ai,j} \sigma_{ai,1} \sigma_{aj,1})}{\sum_{i=1}^N (c_{i,1}^{-1} + \theta_i)^2} \right\} \end{aligned} \quad (39)$$

となる．以上より，本モデルの総割引コストは，

$$TC_i^o = TC_{i,0}^o + \frac{1}{1+r} \mathbb{E}[TC_{i,1}^o(\omega)] \quad (40)$$

のように表される．

単純化するために各企業が対称であるとする．時点 0 の価格および時点 1 の価格の期待値と分散は (33), (37), (38) 式より，

$$P_0^o = c_0(e_0 - a_0) \quad (41)$$

$$\mathbb{E}[P_1^o(\omega)] = \frac{\mu_1 - \mu_{a1}}{c_1^{-1} + \theta} \quad (42)$$

$$\mathbb{V}[P_1^o(\omega)] = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_{a1}^2}{N(c_1^{-1} + \theta)^2} \quad (43)$$

と表せる．(42), (43) 式を (13), (14) 式と比較すると， $\theta > 0$ のとき， $\mathbb{E}[P_1^o(\omega)]$ と $\mathbb{V}[P_1^o(\omega)]$ は減少することがわかる．すなわち，コールオプションは，現物価格と分散を同時に減らすことができる．以上より，総割引コストは (35), (39), (40) 式より，

$$TC^o = \frac{c_0(e_0 - a_0)^2}{2} + \lambda\theta + \frac{1}{1+r} \frac{N(\mu_1 - \mu_{a1})^2 + (\sigma_1^2 + \sigma_{a1}^2)}{2N(c_1^{-1} + \theta)} \quad (44)$$

のように得られる．(44) 式を最小化するような最適なバンドルの購入量は $\partial TC^o / \partial \theta = 0$ より，

$$\theta^* = \sqrt{\frac{N(\mu_1 - \mu_{a1})^2 + (\sigma_1^2 + \sigma_{a1}^2)}{2N\lambda(1+r)}} - c_1^{-1} \quad (45)$$

と表せる．最適総割引コストは (44) 式に (45) 式を代入することで得られる．

3 排出抑制アプローチ

排出を抑えることのメリットは，高騰する排出枠の購入量減少によるコストの減少と二酸化炭素の排出自体を少なくすることである．一方で，デメリットは生産を抑えることによる収入の減少，つまり排出抑制に係るコストが増加することである．排出抑制アプローチと既存の各々のアプローチの総割引コストを比較することで，本アプローチが正当化される排出抑制に係るコスト単価の条件を導出する．時点 1 での排出抑制量を $d_{i,1} \geq 0$ ，排出抑制に係るコスト単価を $k_{i,1} \geq 0$ とする¹．

¹時点 1 のみ排出を抑える理由は，高騰する排出枠価格のリスクをヘッジするという目的のためである．

3.1 モデル

現物価格 P_t^d は次の市場清算条件を課すことによって決定することができる。

$$\sum_{i=1}^N q_{i,0} = \sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0}) \quad (46)$$

$$\sum_{i=1}^N q_{i,1}(\omega) = \sum_{i=1}^N (e_{i,1}(\omega) - d_{i,1} - a_{i,1}(\omega)), \quad \omega \in \Omega \quad (47)$$

排出枠の現物価格は (1), (46), (47) 式より,

$$P_0^d = \frac{\sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0})}{\sum_{i=1}^N c_{i,0}^{-1}} \quad (48)$$

$$P_1^d(\omega) = \frac{\sum_{i=1}^N (e_{i,1}(\omega) - d_{i,1} - a_{i,1}(\omega))}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} \quad (49)$$

となる。 $a_{i,0}$ と $a_{i,1}(\omega)$ を達成するのにかかる総コストは,

$$\begin{aligned} TC_{i,0}^d &= P_0^d [(e_{i,0} - q_{i,0}) - a_{i,0}] + C_{i,0}(q_{i,0}) \\ &= \frac{(e_{i,0} - a_{i,0}) \sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0})}{\sum_{i=1}^N c_{i,0}^{-1}} - \frac{1}{2} c_{i,0}^{-1} \frac{\left[\sum_{i=1}^N (e_{i,0} - a_{i,0}) \right]^2}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,0}^{-1} \right)^2} \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} TC_{i,1}^d(\omega) &= P_1^d(\omega) [(e_{i,1}(\omega) - d_{i,1} - q_{i,1}(\omega)) - a_{i,1}(\omega)] + C_{i,1}(q_{i,1}(\omega)) + k_{i,1} d_{i,1} \\ &= P_1^d(\omega) (e_{i,1}(\omega) - d_{i,1} - a_{i,1}(\omega)) - \frac{1}{2} c_{i,1}^{-1} P_1^{d^2}(\omega) + k_{i,1} d_{i,1} \end{aligned} \quad (51)$$

となる。時点 0 において不確実な現物価格 $P_1^d(\omega)$ の期待値および分散は (49) 式より,

$$\mathbb{E} [P_1^d(\omega)] = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{i,1} - d_{i,1} - \mu_{a_{i,1}})}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} \quad (52)$$

$$\mathbb{V} [P_1^d(\omega)] = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{i,1}^2 + \sigma_{a_{i,1}}^2)}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1} \right)^2} + \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} (\rho_{i,j} \sigma_{i,1} \sigma_{j,1} + \rho_{a_{i,j}} \sigma_{a_{i,1}} \sigma_{a_{j,1}})}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1} \right)^2} \quad (53)$$

のように得られる。時点 1 における総コスト $TC_{i,1}^d(\omega)$ の期待値は (51) 式より,

$$\begin{aligned} \mathbb{E} [TC_{i,1}^d(\omega)] &= \frac{(\mu_{i,1} - d_{i,1} - \mu_{a_{i,1}}) \sum_{i=1}^N (\mu_{i,1} - d_{i,1} - \mu_{a_{i,1}})}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} + \frac{(\sigma_{i,1}^2 + \sigma_{a_{i,1}}^2)}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} \\ &\quad + \frac{\sum_{j \neq i} (\rho_{i,j} \sigma_{i,1} \sigma_{j,1} + \rho_{a_{i,j}} \sigma_{a_{i,1}} \sigma_{a_{j,1}})}{\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1}} - \frac{1}{2} c_{i,1}^{-1} \left\{ \frac{\left[\sum_{i=1}^N (\mu_{i,1} - d_{i,1} - \mu_{a_{i,1}}) \right]^2}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1} \right)^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{i,1}^2 + \sigma_{a_{i,1}}^2)}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1} \right)^2} + \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} (\rho_{i,j} \sigma_{i,1} \sigma_{j,1} + \rho_{a_{i,j}} \sigma_{a_{i,1}} \sigma_{a_{j,1}})}{\left(\sum_{i=1}^N c_{i,1}^{-1} \right)^2} \right\} \end{aligned} \quad (54)$$

のように得られる。以上より、本モデルの総割引コストは、

$$TC_i^d = TC_{i,0}^d + \frac{1}{1+r} \mathbb{E} \left[TC_{i,1}^d(\omega) \right] \quad (55)$$

のように表せる。

単純化するために各企業が対称であるとする。時点 0 の価格および時点 1 の価格の期待値と分散は (48), (52), (53) 式より、

$$P_0^d = c_0(e_0 - a_0) \quad (56)$$

$$\mathbb{E} \left[P_1^d(\omega) \right] = c_1(\mu_1 - d_1 - \mu_{a1}) \quad (57)$$

$$\mathbb{V} \left[P_1^d(\omega) \right] = \frac{c_1^2(\sigma_1^2 + \sigma_{a1}^2)}{N} \quad (58)$$

のように得られる。(27) 式を (13) 式と比較すると、 $k_1 \geq 0$ より、 $\mathbb{E} \left[P_1^d(\omega) \right]$ は減少することがわかる。これは排出抑制は分散を不変のまま、現物価格の変化を安定化させることを意味する。以上より、総割引コストは (50), (54), (55) 式より、

$$TC^d = \frac{c_0(e_0 - a_0)^2}{2} + \frac{1}{1+r} \left[\frac{1}{2} c_1(\mu_1 - d_1 - \mu_{a1})^2 + \frac{c_1(\sigma_1^2 + \sigma_{a1}^2)}{2N} + k_1 d_1 \right] \quad (59)$$

となる。(59) 式を最小化するような最適な排出抑制量は $\partial TC^d / \partial d_1 = 0$ より、

$$d_1^* = (\mu_1 - \mu_{a1}) - \frac{k_1}{c_1} \quad (60)$$

のように得られる。このときの最適総割引コストは (59) 式に (60) 式を代入することで、

$$TC^{d*} = \frac{c_0(e_0 - a_0)^2}{2} + \frac{1}{1+r} \left[\frac{c_1(\sigma_1^2 + \sigma_{a1}^2)}{2N} - \frac{k_1^2}{2c_1} + k_1(\mu_1 - \mu_{a1}) \right] \quad (61)$$

となる。(61) 式から、本アプローチが経済的に効率的であるかは k_1 の値に依存していることがわかる。

3.2 排出抑制に係るコスト単価の条件

前述したように、本アプローチと既存のアプローチの総割引コストを比較することで、本アプローチが正当化される排出抑制に係るコスト単価の条件を導く。

基本モデルとの比較

$$TC^d \leq TC, d_1^* \geq 0 \text{ より,}$$

$$0 \leq k_1 \leq c_1(\mu_1 - \mu_{a1}) \quad (62)$$

バンキング・ボローイングアプローチとの比較

$$TC^d \leq TC^b, d_1^* \geq 0 \text{ より,}$$

$$0 \leq k_1 \leq c_1(\mu_1 - \mu_{a1}) - \{c_1^2 B_0 [2(\mu_1 - a_1) - B_0] - c_0 c_1 B_0 (1+r) [2(e_0 - a_0) + B_0]\}^{\frac{1}{2}} \quad (63)$$

表 1: 本分析に用いるパラメータ

パラメータ	変数	単位	値
企業数	N	社	1000
時点 0 における排出量	e_0	Mt	6.0
時点 1 における排出量の期待値	μ_1	Mt	5.5
時点 1 における排出量の標準偏差	σ_1	Mt	0.5
時点 0 における排出枠	a_0	Mt	5.9
時点 1 における排出枠の期待値	μ_{a1}	Mt	5.1
時点 1 における排出枠の標準偏差	σ_{a1}	Mt	0.5
時点 0 における排出削減能力	c_0	\$/t ²	1.1×10^{-4}
時点 1 における排出削減能力	c_1	\$/t ²	0.6×10^{-4}
時点 0 における排出枠価格	P_0	\$/t	11
時点 1 における排出枠価格	$\mathbb{E}[P_1(\omega)]$	\$/t	24
金利	r	%	2
オプション価格	λ	\$	100

金融オプションアプローチとの比較

$TC^d \leq TC^o$, $d_1^* \geq 0$ より,

$$0 \leq k_1 \leq c_1(\mu_1 - \mu_{a1}) - \left\{ c_1^2(\mu_1 - a_1)^2 - 2c_1\lambda(1+r)\theta - c_1 \left[\frac{N(\mu_1 - a_1)^2 + \sigma_1^2}{N(c_1^{-1} + \theta)} - \frac{c_1\sigma_1^2}{N} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (64)$$

これらの条件を満たしている場合に、排出抑制アプローチは正当化される。すなわち、本条件を満たしている企業は排出抑制アプローチを用いた方がより効率的な排出量取引を行うことができるとともに、排出自体を抑えることも可能となる。

4 結果と考察

本章では 2 章および 3 章で示したモデルのパラメータを設定した後、数値分析を行い、結果および考察を述べる。本分析に用いるパラメータは、比較のため Xu et al. [9] と同じものとし、規制された企業数を $N = 1000$ 、それぞれの排出企業の初期排出量を $e_0 = 6.0$ [Mt]、初期排出枠を $a_0 = 5.9$ [Mt] とする。時点 1 における期待排出枠を $\mu_{a1} = 5.1$ [Mt] として、標準偏差は $\sigma_{a1} = 0.5$ [Mt] とする。また、 $P_0 = 11$ [\$/t]、 $\mathbb{E}[P_1(\omega)] = 24$ [\$/t] とする。排出削減能力は (12), (13) 式から $c_0 = 1.1 \times 10^{-4}$ [\$/t²]、

表 2: 分析結果

(a) 先行研究 [9] の結果				(b) 本研究における結果			
	基本 モデル	バンキング・ ボローイング	金融 オプション		基本 モデル	バンキング・ ボローイング	金融 オプション
P_0	11	19.1638	11	P_0	11	19.1638	11
$\mathbb{E}[P_1(\omega)]$	24	19.5470	14.2717	$\mathbb{E}[P_1(\omega)]$	24	19.5470	14.2606
$V[P_1(\omega)]$	0.9	0.9	0.3183	$V[P_1(\omega)]$	1.8	1.8	0.6355
TC^*	5.2632	4.7983	4.4888	TC^*	5.2706	4.8056	4.4932
B_0^*	—	74216	—	B_0^*	—	74216	—
θ^*	—	—	11361	θ^*	—	—	11383

図 1: コスト単価と最適総割引コストの関係

$c_1 = 0.6 \times 10^{-4}$ [\$/t²] と見積もられる．金利を $r = 2$ [%] と設定し，バンドルの価格を $\lambda = 100$ [\$] とする．これらのパラメータを表 1 にまとめる．

4.1 排出規制の不確実性の影響

本分析結果と，比較のために先行研究の結果も併せて表 2 に示す．表 2 における (a) と (b) を比較すると，全てのアプローチにおいて，時点 1 における排出枠価格の分散，総割引コストが増加していることがわかる．このことから，排出規制の不確実性は，排出枠価格および総割引コストに影響を与えることがわかる．また，金融オプションアプローチにおいては，購入するバンドル量が増加していることがわかる．これは，価格の不確実性が大きいほど価値が増加するオプションの性質を表している．また，表 2 の総割引コストから基本モデル，バンキング・ボローイングアプローチ，金融オプションアプローチの順に効率的であることがわかる．このアプローチ間の効率性の関係は，先行研究と同様の結果である．

図 2: コスト単価と排出抑制量の関係

本研究で提案する排出抑制アプローチの正当化条件 (62)–(64) 式より，以下のような 4 つの領域に分けることができる（図 1）．

全アプローチの中で排出抑制アプローチを実施することが合理的である条件：

$$0 \leq k_1 < 14.2454 \quad (65)$$

基本モデル，バンキング・ボローイングアプローチよりは優れているが，金融オプションアプローチより劣る条件：

$$14.2454 \leq k_1 < 16.4562 \quad (66)$$

基本モデルよりは優れているが，金融オプションアプローチ，バンキング・ボローイングアプローチより劣る条件：

$$16.4562 \leq k_1 < 24 \quad (67)$$

全アプローチの中で排出抑制アプローチが最も劣る条件：

$$24 \leq k_1 \quad (68)$$

また，コスト単価に対する最適総割引コストおよび排出抑制量の関係においては，図 1, 2 からコスト単価が低い企業ほど排出量取引にかかるコストを低減することが可能であると同時に，排出抑制量が大きくなることわかる．

本結果から本アプローチの政策的含意として，(i) 前述の排出量抑制に関するコスト単価の条件を満たしている企業は，排出量取引によってかかるコストを低減することが可能，(ii) 二酸化炭素の排出量も抑えることが可能であることから，排出量取引において指摘されている問題点の解決につながる，の 2 つが挙げられる．

図 3: 時点 1 における排出枠と総割引コストの関係

4.2 比較静学

上記で設定したパラメータに関して、総割引コストや正当化条件に対する比較静学を行う。時点 1 に割り当てられる排出枠が変化した場合について、総割引コストの変化を示す (図 3)。図 3 から、排出規制が厳しくなるにしたがい、それぞれのアプローチの間の差は大きくなり、より効率的なアプローチになるほど、効果が高くなることがわかる。この結果は先行研究と同様の結果である。

バンキング・ボローイング量およびバンドル量が変化した場合について、総割引コストの変化を図 4, 5 に示す。

図 4 は (29) 式のバンキング・ボローイング量を変化させた場合の総割引コストの変化を表している。(29) 式から、 TC^b は B_0 の二次関数であることが確認できる一方、図 4 においてもその様子が示されている。横軸 B_0 の範囲は $P_0^b > 0$ および $P_1^b(\omega) > 0$ から決定している。また、 B_0^* の値も読み取ることができ、表 2 の結果と同様であることがわかる。

図 5 は (44) 式のバンドル量を変化させた場合の総割引コストの変化を表している。図 5 から、総割引コストが最小となるバンドル量が存在することがわかる。この点が θ^* であり、表 2 の結果と同様であることがわかる。また、(44) 式を、

$$f(\theta) = \lambda\theta \quad (69)$$

$$g(\theta) = \frac{1}{1+r} \frac{N(\mu_1 - \mu_{a1})^2 + (\sigma_1^2 + \sigma_{a1}^2)}{2N(c_1^{-1} + \theta)} \quad (70)$$

のように、バンドルの購入コスト項を $f(\theta)$ 、オプションによるリスクヘッジ項を $g(\theta)$ と分解する。(69), (70) 式から、購入コストはバンドル量とともに増加する一方で、バンドル量がリスクヘッジに関するコストを減少させることがわかる。これらのトレードオフの関係により、最適なバンドル量が存在することがわかる (図 6)。

図 7 は (64) 式の排出量および初期排出枠の標準偏差を変化させた場合の正当化条件の上限値の変化を示している。図 7 に示されているように、標準偏差が増加すると、正当化条件の上限値が減少すること

図 4: バンキング・ボローイング量と総割引コストの関係

図 5: バンドル量と総割引コストの関係

CO₂ 排出削減費用に対する生産量の影響

図 6: バンドル量と購入コスト項およびリスクヘッジ項の関係

図 7: 排出量および初期排出枠の標準偏差と金融オプションアプローチと比較した場合の正当化条件の上限値の関係

がわかる。すなわち、排出抑制アプローチが正当化される条件が厳しくなり、金融オプションアプローチの効率性が高くなっているということである。この結果は、不確実性が大きいほど価値が増加するオプションの性質と一致していることがわかる。

5 結論

本研究では、排出量取引において排出規制の不確実性を考慮したモデルにより、市場と取引のスキームとの関係について分析を行った。本分析により、排出規制の不確実性を導入することで、排出量取引に係るコストは増加することが明らかとなった。その上で、排出量取引において指摘されている問題点を解決するために、排出に係る生産量を抑えることを前提とした排出抑制アプローチのモデルの構築を行った。その結果、前述の条件を満たしている企業にとって排出抑制アプローチは効率的であり、適用することによって、温室効果ガス削減への施策に貢献することが可能であることを示した。

本研究において提案したアプローチにより、企業経営に柔軟性を提供することが可能であると考えられる。しかしながら、本研究にはまだ改善点が存在する。現実性という点では、各企業が対称であるとして行っていた議論を非対称とすることによって、より現実性が増すと考えられる。柔軟性という点では、アプローチの選択に関するリアルオプションを導入することによって、より経営の柔軟性が増すと考えられる。今後の展望として、これらを考慮することで現実的かつ柔軟性のあるモデルを構築することを将来研究の一つとしたい。

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。本稿を完成するにあたり、副編集委員長の後藤允先生には大変貴重なご助言を頂いた。ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Celebi, M. and Graves F. (2009): CO₂ Price Volatility: Consequences and Cures, Technical report, The Brattle Group.
- [2] Chao, H.-P. and Wilson, R. (2004): Resource Adequacy and Market Power Mitigation via Option Contracts, Technical report, Electric Power Research Institute and Stanford University.
- [3] Chen, Y. and Tseng, C.-L. (2011): Inducing Clean Technology in the Electricity Sector: Tradable Permits or Carbon Tax Policies? *The Energy Journal*, **32**, 149–174.
- [4] Chevallier, J., Pen, Y.L. and Sévi, B. (2011): Options Introduction and Volatility in the EUETS, *Resource and Energy Economics*, **33**, 855–880.
- [5] Fell, H., MacKenzie, I.A. and Pizer, W.A. (2012): Prices versus Quantities versus Bankable Quantities, *Resource and Energy Economics*, **34**, 607–623.
- [6] Grull, G. and Taschini, L. (2011): Cap-and-Trade Properties under Different Hybrid Scheme Designs, *Journal of Environmental Economics and Management*, **61**, 107–118.

- [7] Jacoby, H.D. and Ellerman, A.D. (2008): The Safety Valve and Climate Policy, *Energy Policy*, **32**, 481–491.
- [8] Khazaei, J., Coulon, M. and Powella, W.B. (2017): ADAPT: A Price-Stabilizing Compliance Policy for Renewable Energy Certificates: The Case of SREC Markets, *Operations Research*, **65**, 1429–1445.
- [9] Xu, L., Deng, S.J. and Thomas, V.M. (2016): Carbon Emission Permit Price Volatility Reduction through Financial Options, *Energy Economics*, **53**, 248–260.
- [10] Maeda, A. (2005): Impact of Banking and Forward Contracts on Tradable Permit Markets, *Environmental Economics and Policy Studies*, **6**, 81–102.
- [11] Newell, R., Pizer, W. and Zhang, J. (2005): Managing Permit Markets to Stabilize Prices, *Environmental and Resource Economics*, **31**, 133–157.