

H-11 京都議定書の目標達成に向けた各種施策（排出権取引、環境税、自主協定等）の効果実証に関する計量経済学的研究

(3) 排出権制度の有効性に関する計量経済学的研究

上智大学経済学部

有村俊秀

〈研究協力者〉	カナダ コンコーディア大学	今井晋
	アメリカ合衆国 フロリダ大学	Paul Sotkiewicz
	アメリカ合衆国 未来資源研究所	Dallas Burtraw

平成14～16年度合計予算額	12,335千円
(うち、平成16年度予算額)	7,837千円)

〔要旨〕京都議定書での排出目標を遵守する方策として、排出権取引制度に対する関心が国内外で高まっている。これにともない、排出権取引制度が実効性、経済効率性などの観点から望ましい機能を発揮するために、どのように制度を設計すべきかについての検討が進められている。

排出権取引制度のメリットは、二酸化炭素の排出量を確実に排出目標値に抑制しつつ、社会全体の二酸化炭素削減費用を最小にできる点にある。しかし、現実には、企業の行動はさまざまな政策（規制、補助金など）によって影響を受けるため、排出権制度がこのような望ましい機能を発揮するとは限らない。

本研究の目的は、アメリカのSO₂排出承認証制度を対象に、それに基づいて、排出権取引が企業行動に及ぼす影響を定量的に明らかにし、制度が効率的に機能するためにどのように制度設計すべきかを検討することにある。

本研究では、排出権制度が有効に機能しない要因について、アメリカのSO₂承認証市場を対象に定量的に分析した。この分析結果から、PUCの規制が電力会社に対して、承認証市場よりも燃料転換、混合使用といった承認証取引を抑制する行動を選ばせるように促していることがわかった。このことは、SO₂削減の限界費用が高い発電所であっても、承認証市場を使用せずに、自らがSO₂を削減することになるため、SO₂削減費用は社会全体で最小化されない。以上の分析から、排出権市場が汚染物質削減費用最小化という望ましい機能を果たすためには、制度の立案と同時に、汚染物質削減費用最小化を阻害するような規制、制度を修正することを検討することが重要である。

さらに、本サブテーマは、脱硫装置の設置やバンキングという動学的な意思決定まで含めた発電所の動学離散選択モデルを構築し、分析を行った。その結果、バンキング制度による費用削減分は1.62億ドルになることがわかった。つまり、バンキングによる費用節約削減効果は無視できない規模であるが、同時に、その相対的大きさは、空間取引による節約効果に比べて小さいことも確認された。

また、ボーナス承認証が、公害防除投資の早期投資を促進すること確認された。

[キーワード] 京都議定書、排出権取引制度、SO₂排出承認証制度、プロビットモデル、バンキング、離散動学モデル

1. はじめに

京都議定書での排出目標を遵守するための方策として、排出権取引制度に対する関心が国内外で高まっている。これにともなって、排出権取引制度が実効性、経済効率性などの観点から望ましい機能を発揮するために、どのように制度を設計すべきかについての検討が進められている。また、近年、排出権取引の将来の導入可能性をにらみ、企業や産業界では自主的に排出権制度を構築し、実験的に排出権取引を行う試みも見られるようになってきた。

排出権取引制度のメリットは、二酸化炭素の排出量を確実に排出目標値に抑制しつつ、社会全体の二酸化炭素削減費用を最小にできる点にある。しかし、現実には、企業の行動はさまざまな政策（規制、補助金など）によって影響を受ける。したがって、排出権制度がこのような望ましい機能を発揮することを阻害する要因について分析し、どのような制度設計が必要かを検討する必要がある。また、排出権制度自体がどのように企業行動（燃料転換、投資など）点について明らかにすることも必要とされている。

2. 研究目的

近年、排出権取引の将来の導入可能性をにらみ、企業や産業界では、実験的に排出権取引を行う試みも見られるようになってきた。欧州でも、EUによる排出量取引制度が2005年1月から開始された。しかし、長期にわたって安定的に実施されてきた排出権取引制度の実施例は、アメリカのSO₂排出承認証制度に見られるくらいである。

本研究の目的は、アメリカのSO₂排出承認証制度を対象に、排出権取引制度について定量的に分析し、それに基づいて、排出権取引が企業行動に及ぼす影響を明らかにし、制度が効率的に機能するためにどのような制度設計が必要かを検討することにある。対象として、アメリカのSO₂排出承認証制度を選んだのは、第一に、本制度が長期にわたって安定的に実施されているため、それによって得られるデータ（発電所別の燃料消費、承認証（排出権の一種）価格など）が安定的であると考えられることとである。第二に、分析に必要なデータが公開されており、入手が比較的容易だからである。第三に、同承認証制度では、未使用の排出権は将来に繰り越せるというバンキング制度が導入されているからである。京都議定書の国際的な排出量取引制度でも、バンキング制度が導入されており、その効果の分析が重要であると考えられているのである。

本サブテーマは、第一にアメリカのSO₂排出承認証制度が望ましい機能（費用最小化機能）を果たしていたかどうかを検証することを目的としている。これまで、さまざまな規制の存在や州レベルの政策が承認証取引に影響を及ぼす結果、制度の費用最小化機能が歪められているのではないかという点が指摘されてきた。本研究では、発電所レベルのデータを用いて、燃料転換、承認証売買、SO₂削減に関する発電所レベルの意志決定をモデル化し、それらに影響を及ぼしている要因を定量的に分析する。その結果、規制の存在や州レベルの政策が承認証取引を歪め、費用最小化機能が歪められていることを明らかにする。

米国のSO₂排出承認証制度は、京都議定書でも認められている排出量のバンキングが導入されていた。排出量取引は、基本的には、限界削減費用の高い主体と低い主体間による排出量の取引（空間取引：trading over space）によって経済全体での費用節約効果をもたらすものである。しかし経済主体に排出削減のタイミングに関して柔軟性を与えるというメリットがある一方で、各年度の排出量を確定できないというデメリットもある。従って、そのメリットを定量的に評価することが温暖化対策にも資すると考えられる。本サブテーマの第二の目的は、このバンキングがもたらす費用節約効果を定量化するものである。

また、米国のSO₂排出承認証制度は、ボーナス承認証の配布という興味深い政策も行っている。つまり、規制の初期における公害防除投資（脱硫装置の設置）を行う発電所に対し、承認証をボーナスとして付与するというものである。この制度がどの程度公害防除投資促進に効果があったかを明らかにすることは、温暖化対策の制度設計にも重要な知見を提供することになると考えられる。これが本サブテーマの第三の目的である。

3. 研究方法

サブテーマ3A：燃料転換

排出権取引制度に関する従来の実証分析のほとんどは、アメリカのSO₂排出承認証制度を対象にしたものである。その中で、特に、環境規制や電力料金を設定する公益事業委員会（PUC）による規制の存在が企業行動および承認証取引を歪めるかどうかを分析した研究がいくつかある。それらの研究の主要な結論は、PUCの規制や環境規制が、SO₂の限界削減費用と承認証価格を乖離させる結果、削減費用最小化機能が損なわれ、SO₂削減費用を引き上げるというものである。^{1),2)}この点に関しては、費用が2倍以上になる可能性を指摘するものもある。²⁾

これらの研究は、承認証市場における電力会社の行動がPUCや規制によってどのような影響を受けるかを明らかにした。しかし、電力会社の発電所はさまざまな地域に位置し、それらの意志決定は、それが位置する地域的な要因（政策要因など）、発電所のタイプ（発電容量の大きさ）などによって異なるものと考えられる。したがって、より詳細に分析するためには、発電所単位での意志決定をモデル化する必要がある。本研究では、従来分析を発電所レベルに拡張し、発電所単位での燃料選択やSO₂承認証取引に関する意志決定を分析する。

（モデルの定式化）

ここで、発電所レベルの意志決定に関して説明しよう。各発電所は、発電に際して高硫黄炭と低硫黄炭のどちらを用いて発電する。SO₂排出承認証制度の下では、ある一定の承認証を無償で受け取る（初期配分）が、それによって許可される排出量を超えてSO₂を排出する発電所は、不足分を市場で承認証を購入し、許可量以下でしか排出しない発電所は、余った承認証を市場で売却する。

したがって、高硫黄炭を使って発電しようとする、それによるSO₂排出量は、初期配分を上回るため、市場で承認証を購入しなければならない。ただし、高硫黄炭の石炭の価格は低硫黄炭に比べると安い。また、高硫黄炭から低硫黄炭へ燃料転換を進めて、使用燃料を切り替えるか、あるいは、高硫黄炭と低硫黄炭を混合して使えば、SO₂排出量を抑制することができる。このため、

承認証が余れば、それを市場で売ることができる。ただし、燃料転換のためには費用がかかる。特に、環境規制の強い地域ほど燃料転換のための費用は大きなものとなる。

よって、各発電所は、高硫黄炭を利用して（したがって、承認証を購入して）発電した方が、低硫黄炭を利用する場合と比較して、費用が低ければ高硫黄炭を利用し続け、承認証不足分を市場で購入しようとする。逆に、燃料転換のための費用も含めた費用が高硫黄炭を利用する場合と比較して低ければ、発電所は燃料転換を進めようとする。

以上から、発電所 i の高硫黄炭を利用する場合と低硫黄炭を利用する場合の費用の差 NB_i を以下のように定義すると、発電所の意志決定は次のように記述できる。

$$NB_i = (\text{低硫黄炭利用の費用}) - (\text{高硫黄炭利用費用})$$

$$= F(\text{高硫黄炭価格、低硫黄炭価格、排出承認証価格、発電所 } i \text{ の燃料転換費用})$$

ただし、 F はそれぞれの変数と NB_i との関係を表す関数であり、高硫黄炭価格または上昇する、あるいは、低硫黄炭価格が低下すると NB は減少し、燃料転換費用が増加すると NB は増加するという関係にあると考えられる。

$NB_i \geq 0$ のとき発電所は燃料転換をあきらめ、高硫黄炭を選択し、不足分の承認証を市場で購入する、 $NB_i < 0$ のとき発電所は燃料転換を行う。

また、燃料転換費用は、石炭産業保護政策や規制値などの政策変数の関数であると考えられる。たとえば、規制の強化に伴って費用は増加するものと考えられるからである。したがって、

$$(\text{発電所 } i \text{ の燃料転換費用}) = G(\text{発電所 } i \text{ が直面する政策変数})$$

という表すことができる。

以上から、 NB_i を以下のように定式化する。

$$NB_i = \beta_0 - P^S + \frac{P_i^L - P_i^H}{\mu_i^H - \mu_i^L} + R_i' \beta^R + K_i \beta^K + \varepsilon_i \quad (1)$$

ただし、 P^S 、 P_i^L 、 P_i^H 、 μ_i^L 、 μ_i^H 、 R_i 、 K_i はそれぞれ、承認証価格、低硫黄炭価格、高硫黄炭価格、低硫黄炭の硫黄含有量、高硫黄炭の硫黄含有量、政策変数ベクトル、発電所の属性ベクトルである。また、 ε_i は誤差項であり、 NB_i に影響を及ぼす変数のうち観測できない未知の変数を表している。 β_0 、 β^R 、 β^K は推計すべきパラメータあるいはパラメータベクトルである。また、下付文字 i は発電所 i を意味している。

本研究では、(1)式を利用し、プロビットモデルを応用して、発電所レベルの意志決定（高硫黄炭を利用し、承認証を購入するか、燃料転換を行い低硫黄炭を利用するかという離散選択の意志決定）をモデル化する。これを、最尤法を用いて推計する。

(データ)

石炭価格と硫黄含有量のデータセットはEIA423（連邦エネルギー規制委員会（FERC）に提出されたレポート）にもとづいて作られた。EIA423により、発電所レベルの譲渡した費用、熱量、石炭の硫黄含有量のデータを手にすることができた。硫黄酸化物の排出量の境界線、すなわち3.0ポンド/mmBtu、は低硫黄と高硫黄のタイプを識別するのに用いた。

発電能力に関する情報は、プラントの管理者によってFERCに提出されたEIA860から手に入れることができた。これはメガワット/時間で計測されている。

いくつかのフェーズIユニットには、酸性雨プログラムに加えて、SO₂排出量に関するPUCの規制が課せられている。これらの規制に関するデータは、EIA767から手にすることができる。

また、いくつかの州では、その地域の高硫黄石炭に対して保護政策を実施している。（ケンタッキー州、イリノイ州、インディアナ州、オハイオ州、ペンシルヴァニア州）この情報はEllerman and Montero(1998)³⁾とRose(1997)⁴⁾から使った。

発電所レベルのデータに対する基本統計量は表1に示してある。

表1 基本統計量

変数	単位	平均	標準偏差	最小値	最大値	合計
燃料転換の有無	Dummy	0.4457	0.4985	0.0	1.0	78
MAC ^F	\$/pound	0.006936	0.1204	-0.5727	0.4516	1.2138
PUC規制適用の有無	Dummy	0.9086	0.289	0.0	1.0	159
石炭産業保護政策の有無	Dummy	0.5823	0.4945	0.0	1.0	102
発電容量	Megawatts	336.8	232.2	100.0	1150.2	58939.1

ただし、MAC^Fは(1)式右辺第3項であり、単位SO₂排出量あたりに換算した石炭価格の差である。

サンプルは高硫黄石炭と低硫黄石炭の使用が観察されたユニットから収集され、標本数は175である。それらのうち、97ユニットで低硫黄石炭が使われていた。それに対し、追加的な承認証を取得した（高硫黄石炭を使っていた）のは78ユニットであった。また、102ユニットは、高硫黄石炭産業を持つ州に位置していた。TVAユニットの標本数は16であり、その他はPUCユニット（PUCによって規制を受けるユニット）であった。

(推計結果と考察)

(1)式より、モデル式は、

$$NB_i = \beta_1 + \beta_2 MAC_i^F + \beta^{R1}(\text{PUC規制ダミー}) + \beta^{R2}(\text{石炭産業保護政策ダミー}) + \beta^K(\text{発電容量}) + \varepsilon_i$$

でかつ、 $NB_i \geq 0$ ならば承認証の購入、 $NB_i^* < 0$ ならば燃料転換というものである。ただし、

$$\beta_1 = \beta_0 - P^S, \quad MAC_i^F = \frac{P_i^L - P_i^H}{\mu_i^H - \mu_i^L} \text{である。}$$

ここで、 NB_i は観測されずに、行動の結果（燃料転換か、承認証の購入か）だけが観察される。このため、プロビットモデルによる推計を行った。推計結果は表2に示されている。

表2 プロビットモデルの推計値

変数	推計値	標準誤差	t-値	P値
燃料転換の有無	1.2888	0.5544	2.3247	0.020
MAC ^F	3.0454	1.1056	2.7545	0.006
PUC規制適用の有無	-1.9198	0.5665	-3.3886	0.001
発電所地元高硫黄石炭保護政策の有無	0.7343	0.2358	3.1137	0.002
発電容量	-0.3908E-03	0.4686E-03	-0.8339	0.404

MAC_i^F の係数は正であり、1%有意水準で統計的に有意であった。このことは、 MAC_i^F の大きい発電所では、低硫黄石炭に燃料転換もしくはこれの混合使用をするより、むしろ追加的な承認証の取得をする傾向にあるということを意味している。このことは、燃料費用など発電に関わる費用が企業の燃料選択の意思決定に影響を及ぼすことを意味しており、排出権制度や環境税などの経済的手段が企業の汚染物質削減を促進することができることを意味している。

PUC規制ダミー変数の係数は、負で有意水準1%のレベルで0と有意に異なる。これは、PUCの規制に直面している電力発電装置が、低硫黄石炭への転換もしくはこれを混合使用することを促進していることを示している。逆に、もしPUC規制がなければ、発電所は高硫黄石炭を使い、追加的な承認証を購入したであろう。

発電所地元の高硫黄石炭の保護ダミーの係数は、正かつ有意である。したがって、もしユニットが高硫黄石炭の炭鉱のある州に位置しているとき、州の圧力によって高硫黄石炭に有利な燃料選択をするように影響を受けていたことが示されている。

以上から、規制や保護政策が発電所の燃料選択や承認証購買行動に影響を与え、SO₂承認証市場に歪みをもたらす結果、SO₂削減費用の最小化が妨げられていたといえる。

(シミュレーション分析)

モデルの推計結果から、PUCの規制や石炭保護策が燃料転換や承認証書の購買行動に影響を与えていたことがわかった。以下では、推計結果から得られるモデルを用いて、PUC規制や石炭保護政策が発電所の燃料選択にどの程度歪みをもたらしたのかについて分析しよう。シミュレーション結果は、表3の通りである。

表3 シミュレーション結果

シナリオ	承認証(高硫黄石炭利用)購入プラント数	燃料転換(低硫黄石炭利用)プラント数
基本ケース(観測値)	78	97
PUCの規制の無いケース	161	14
地元石炭保護の無いケース	52	123
PUCの規制も地元石炭保護もないケース	152	23

表の1行目(基本ケース)は、観測地を表しており、前発電所175のうち、承認証を購入していた発電所が78、燃料転換を行い承認証を購入しなかった発電所が97であることを示している。

2行目はPUC規制を廃止した場合のシミュレーション結果であり、161の発電所が承認証の取引に参加し、14の発電所が燃料転換を行い、承認証の取引に参加しないことを意味している。すなわち、PUC規制の廃止が承認証取引を活発化させることを意味している。このことは、社会全体のSO₂削減費用の低下に貢献するであろう。

3行目は、すべての州で石炭保護政策だけを廃止した場合についてのシミュレーション結果である。この場合、石炭保護政策の廃止は、むしろ承認証の取引を抑制する方向に働くことがわかる。この意味では、石炭保護政策は、過度に承認証取引を促進していることがわかる。

4行目は、すべての州においてPUC規制と石炭保護政策の両方を廃止した場合の効果を示している。PUCの規制による市場への影響の方向と地元石炭の保護による影響の方向は正反対である。したがって、このシミュレーションによって、PUC規制と石炭保護政策の存在が承認小市場に与える影響の総合効果を明らかにすることができる。このシミュレーションからわかるように、規制と保護政策の廃止の総合効果は、承認証の取引に参加する発電所数を増加させる。したがって、承認証市場に歪みを与えるPUC規制と石炭保護政策の存在が承認小市場に与える影響の総合効果は、承認証の取引を抑制する結果、社会全体のSO₂削減費用を過大にしていると結論づけることができる。SO₂承認証制度が実施された当初、承認証の価格が予想よりもはるかに低いといわれていた。この分析結果は、承認証が低価格であったことを裏づけている。

サブテーマ3B : バンキング 動学モデル

(背景)

SO₂の承認証市場は、まだ精査されていない興味深い特徴をいくつかもっている。第一は、段階的な規制である。承認証の分配に関する非常に基本的な規則によれば、SO₂承認証の初期配分は、使用した燃料の熱量に対し、第一期では2.5ポンド/mmBTU、第二期では1.2ポンド/mmBTUとなっている。承認証のバンキングと合わせると、段階的な規制は排出量を平滑化し、時間を通じて排出削減費用を最小化にする誘引をもっている(図2)。二番目に興味深い特徴は、重要な法令遵守方法のひとつとして、脱硫装置の設置という不可逆的な動学的二項選択が存在することである。これは二項選択であるため、限界削減費用曲線は、論文で典型的に仮定されるほど滑らかにならない三つめは公害防除投資促進のボーナス承認証制度である。本サブテーマでは、これらの点に焦点を当てることでこれまでの承認証の研究を拡張する。

本サブテーマの目的は三つある。第一の目的は、SO₂承認証のバンキングシステムがない場合と

比較し、バンキング可能な承認証取引システムによって削減可能な費用を定量化することである。承認証市場は、企業が（バンキング可能な承認証システムを利用して）余剰承認証を将来の使用のために貯蓄できる点で独特である。段階的な規制と同様に、バンキング可能な承認証システムは排出量を平滑化する誘引を持つ。そして、それは異時点間の取引を通じて費用削減をもたらす。つまり、バンキング可能な承認証システムは、バンキングができない承認証システムと比べて、時間を通じて排出量を平滑化することによって排出削減費用を抑制することができるのである。本サブテーマでは、バンキングできない承認証システムを仮想実験することによって、この種の費用削減分を定量的に評価する。

本サブテーマの第二の目的は、バンキングがある場合とない場合で、排出削減技術に対する投資行動がどのように変化するかについて明らかにすることである。承認証価格の軌跡は両システム間で異なると思われる。異なる承認証価格を所与とした場合、排出削減技術に対する投資行動は異なり得る。この違いは、両システムを選択する上で、含意となる。これが、分析しようとする第二の問題である。

第三の目的はボーナス承認証の効果の分析である。承認証市場では、規制初期の脱硫装置の設置に対して、承認証をボーナスとして付与した。しかし、この制度が促進効果を持ったかどうかは明らかではない。これを定量的に分析するのが、第三の目的である。

排出承認証のバンキングについていくつかの研究が報告されている。Rubin and Kling (1993) は石油精製に関する承認証のバンキングについて実証研究を行った。本サブテーマは、彼等の研究を組み込み、最も大規模な承認証取引システムであるSO₂承認証取引市場について分析している。この他に、本サブテーマは彼等の研究を以下の点で拡張している。それは、脱硫装置の設置に関する動学的な二項選択と段階的な規制という点と、ボーナス承認証の効果である。

制度的背景

80年代から北アメリカでの酸性雨問題に関心が高まっていた。酸性雨の原因は、産業からのSO₂と窒素酸化物である。1980年には全米のSO₂排出量の70%以上が電力会社から排出されていた。この問題に対処するため、電力産業はSO₂排出量規制の対象とされたのである。

1990年にSO₂の承認証市場が連邦議会によって大気浄化法の一部として制定された。その中には、それぞれのスタック⁸が過去の排出水準と熱投入量に基づいて承認証が付与されるということが定められている。

第一期（フェーズⅠ：1995～1999）には、261の最も汚染度の高い発電ユニットがこの規制の対象となった。これらのユニットは「Table A ユニット」と呼ばれている。第一期では、フェーズⅠユニットからのSO₂排出量を削減する代わりに、企業は「代替ユニット」と呼ばれるフェーズⅡユニットからの排出を減らすことができる。発電ユニットが「代替ユニット」として指定されると、これらは費用をかけずに承認証の初期分配を受け取ることができる。本サブテーマでは、Table A ユニットと代替ユニットは「フェーズⅠユニット」と称されている。

2000年以降の第二期（フェーズⅡ）では25MWの発電容量以上の、ほとんどの火力発電ユニットがこの規制を遵守しなくてはならないことになっている。2000年以降のみ規制対象となっている

⁸ 煙突のことである。一つのユニットに、一つもしくは複数のスタックが設置されている。

ユニットは「フェーズⅡユニット」と呼ばれている。

4条項の基本的な規定によれば、SO₂排出承認証の分配は、第一期においては熱投入量mmBTUあたり2.5ポンド、第二期においては同1.2ポンドとなっている。分配を決定する際に用いられる熱投入量のベースは、それぞれのスタックにおける1985年から1987年間の平均熱投入量となっている。1993年には、それぞれのスタックは1985～1987年の熱投入量と目標とする排出水準をベースとして各年の分の承認証が分配された。ただし、この規定は起点にすぎない。この規定には、さまざまな改正があったのである。厳密な意味での承認証の取得は環境保護局から分配されたものしかない。一度承認証が与えられれば、電力会社はそれらを売買することができる。

第二期の終了までに、発電所からのSO₂排出量は1980年レベルの年間1890万トンから890万トンのレベルまで減少することが予定されている。

この承認証市場以前においても、電力会社はSO₂排出量を規制されていた。1970年代には、環境保護局はそれぞれの州に対して、個々の排出源を管理する方法やその工程の明瞭な実行計画を提出することを求めている。しかしながら、多くの地域で、1975年までにその目標を達成することができなかった。この対処の遅滞に応じて、連邦議会は大気浄化法の1997年改正を行った。法改正に基づいて、環境保護局は目標を満たさなかった全地域を「未達成地域」として指定した。これらの地域の新規建設もしくは改修したすべての排出源は、排出量を「最も達成困難な排出率」に抑制しなくてはならない。他の比較的汚染度の低い地域では「大幅な悪化の防止(PSD)」政策が実行されている。この政策は、PSD地域に設置しようとしている新規排出源に対し、「最も利用可能な排出削減技術」を装備することを求めた。その結果、すべての新しい石炭火力発電所は脱硫装置を設置しなくてはならなくなった(Carlson et al. (2000))。

Table Aユニットは、この技術規制の対象ではなかった。したがって、1985年の時点ではこれらのユニットは脱硫装置を設置していなかった。これと対称的に、フェーズⅡユニットには、脱硫装置と同様に低硫黄石炭を導入しているユニットが存在している。

エミッション・スモーキング

本承認証制度は、上述のように二段階の規制を行っている。つまり、最初の5年間は比較的規制が緩く、その後一気に割り当てが半分以下に削減される。これは、潜在的には、異時点間での限界削減費用の不均等をもたらす。従って、図1に示すように、バンキング制度を利用して、排出削減をより段階的に行う、つまり排出量を標準化するエミッション・スモーキングにより、排出の削減費用の割引現在価値の均等化を通して、費用を削減することができる。これが、バンキングのもたらす費用削減効果である。

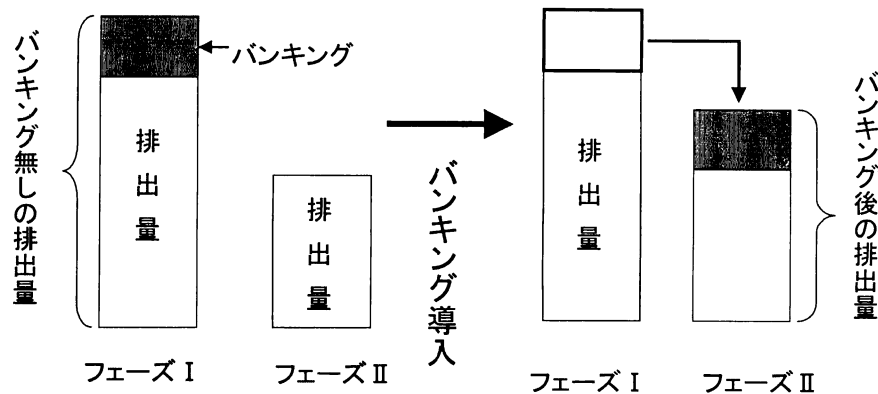


図1：エミッションスムージング

(モデルの定式化)

サブテーマ3Bでは、SO₂承認証市場に参加している石炭火力発電ユニット（スタックレベル）の動学的モデルを示す。石炭火力の発電プラントは3つの構成要素から成っている。すなわち、ボイラー、ジェネレーター、スタックである。石炭はボイラーの中で燃料され、熱を発生させる。その熱はジェネレーターに送られ、電力を生み出す。石炭が燃焼する過程で副産物としてSO₂が発生し、スタックを通して大気中に放出される。脱硫装置をスタックにつけることで、このSO₂排出を減らすことができる。このモデルは脱硫装置の設置をしようかどうかという重要な意思決定も含めたスタックレベルにおける長期的な意思決定を調べるものである。「発電ユニット」は1つのスタックに接続されているボイラーと発電機の集合体を指すこととする。

SO₂承認証市場の規定を遵守するためには、いくつかの方法を用いることができる（図2）。第一に、経営者は追加的な承認証を取得することができる。第二に、高硫黄石炭から低硫黄石炭を変えることができる（燃料転換）。第三に、脱硫装置を設置することができる。第四に、操業を停止することができる。第一期では、Table A ユニットはさまざまな遵守方法をとった。エネルギー情報局（EIA(1997)）によれば、52%のユニットは燃料を低硫黄石炭に転換もしくはこれを混合使用し、32%は追加的な承認証を取得した。そして、10%は脱硫装置を設置し、3%が操業を停止した。本サブテーマでは、主な3つの選択肢に焦点をあてる。すなわち、1) 承認証の取得、2) 燃料転換、3) 脱硫装置の設置である。

他の法令遵守方法である天然ガスの使用も重要な法令遵守方法である。しかし、操業停止などこれらの法令遵守戦略は、ここではその影響が限定的であることから扱わないこととする。

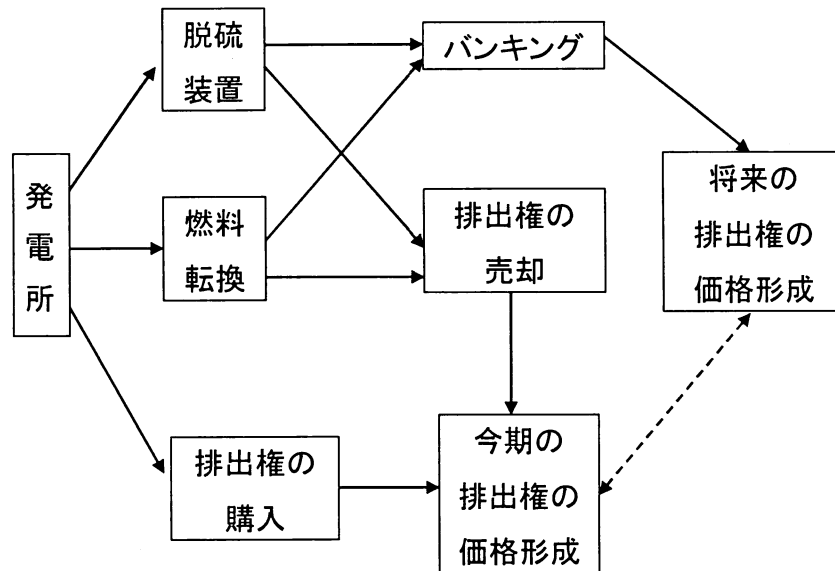


図2：発電所の遵守手段と承認証市場

発電所の行動

長期的な承認証取引制度の影響を分析するため、発電所の動学モデルを構築した。発電所の管理者は毎期、以下の①～③選択肢から行動を選ぶような離散型動学モデルを設計した。

①燃料転換

発電所は規制遵守のため、燃料転換を行うことができる。ここで扱う燃料転換は、硫黄分の多い高硫黄石炭から、硫黄分の少ない低硫黄石炭への燃料転換である。もし、低硫黄石炭の価格が低ければ発電所が燃料転換を行うだろう。仮に、低硫黄石炭の価格が、高硫黄石炭より高くても、低硫黄石炭への転換によって発生する余剰排出承認証の売却の利益が、その差額を補填できるのであれば、発電所は燃料転換を行うことが合理的になる。燃料転換を行うか否かは、基本的には、サブテーマ1の MAC_i^F (燃料に関する限界費用) によって決定される。 MAC_i^F は、ユニット i の意思決定者が脱硫装置を設置していない状態で追加的に1ポンドの SO_2 排出量を削減するために支払わなくてはならない費用をあらわしている。これは限界的な SO_2 排出削減費用の概念と似ている。すべての企業は同じ SO_2 承認証価格に直面しているので、企業 i によって燃料転換の選択は MAC_i^F によって左右される。 MAC_i^F が大きい企業の意思決定者は追加的な承認証を取得し、 MAC_i^F が小さい企業では燃料の転換か混合使用を行うだろう。このことは、Arimura (2002) のモデルと共通している。

②脱硫装置の設置

二つ目の遵守方法は、脱硫装置の設置である。脱硫装置を設置すれば、現行技術では、90%以上の二酸化硫黄を排出ガスから除去できる。しかし、脱硫装置は資本集約的で費用が高い。脱硫装置の設置が費用効果的な遵守手段となるのは、脱硫装置設置後に発生する余剰承認証の売却

利益が、脱硫装置設置と維持費用を上回る場合である。従って、使用している燃料の硫黄分が多く、かつ、低硫黄石炭が高いなど燃料転換が魅力的でない場合に、脱硫装置の設置が遵守手段として選ばれる。

ここで脱硫装置の設置を行うタイミングについて言及しよう。脱硫装置を早めに設置すれば、その分、長期にわたって余剰承認証売却のメリットを享受できる。従って、脱硫装置が設置されるのは、規制の初期における可能性が高いと考えられる。しかし、脱硫装置は、規制初期に設置されない場合でも、それ以降の時点で設置されることがある。この脱硫装置の設置の遅れは、意思決定者がタイミングを遅らせることで利子の支払いを回避できるために行われるのである。しかしながら、時間が過ぎるにつれて、承認証価格は上昇するがその上昇は一定で止まる。したがって、時期を見送ることによる費用の節約分は小さくなり、脱硫装置の設置はより好ましい法令遵守方法になるであろう。

③承認証の購入

また、燃料転換も脱硫装置の設置も行わずに、操業に変更を行わず、必要な承認証を他の発電所から購入することも可能である。これは、低硫黄石炭の値段が高く、かつ、高硫黄石炭と低硫黄石炭の硫黄含有量がそれほど多くない場合に、選択されやすい。

均衡における承認証価格

承認証価格はどのように決定されるのだろうか？図2の中央から右側に基本的な構図が示されている。各期の承認証価格と将来の承認証価格、それぞれについて価格形成について説明しよう。初めに、各期の承認証価格について考察する。核燃料転換や脱硫装置の設置の結果発生する余剰承認証は、バンキングされるものもあるが、一部は、当期の承認証市場で売却される。このとき、高硫黄石炭と低硫黄石炭の硫黄分による価格差（硫黄プレミアム）と承認証価格の間にギャップがあると、裁定取引による利潤の可能性が発生する。従って、均衡では、承認証価格は石炭市場の硫黄プレミアムを反映することになる。

将来の承認証価格はどのように決定されるのであろうか？これはバンキングによって決定される。二酸化硫黄排出削減によって発生する余剰承認証は、必ずしもすぐに売却する必要は無い。将来利用のためにバンキングすることも可能である。ここで、承認証の所有者は、承認証をバンキングすることと、売却してその利益をリスク中立的な債権に投資することのメリットの比較を行うことになる。均衡では、両者の利益は均等化される。したがって、承認証価格は不確実性のない世界では、利子率で上昇することとなる。この上昇は、市場全体でバンキングする余剰承認証がなくなるまで続く。いわゆる枯渇性資源のホテルンルールが成立するのである。

(シミュレーション結果と考察)

パラメータ

バンキング制度が存在する場合と存在しない場合のモデルを定量的に解くためには、さまざまなパラメータとデータが必要となる。モデルの対象期間を30年 ($T = 30$)、利子率を $r = 0.05$ と

仮定した。

モデルには、脱硫装置の資本費用と操業にかかる固定費および変動費に関する情報が必要である。この情報はSrivastava (2000)のものを利用する。第一期の観測によれば、SO₂の排出削減効率は95%と仮定して問題がない。

石炭価格と石炭のSO₂発生量のデータはEIA423より作成した。シミュレーションで用いた石炭価格は、長期契約による取引価格とした。低硫黄石炭と高硫黄石炭の区別には、硫黄発生量の境界値である1.2ポンド/mmBTUを用いた。いくつかのプラントについては、石炭価格のデータが欠損していた。たとえば、一種類しか石炭を購入しない場合、そのプラントについては他方の種類の石炭価格が欠けるのである。しかしながら、石炭価格の大きな部分を輸送費が占めていることが知られている。Ellerman and Montero (1998)は、プラントの燃料選択にとってモンタナ州とワイオミング州にあるPowder River Basin地域からの距離が重要な要因になることを示している。すべてのプラントについてそれぞれの緯度と経度のデータを用いて、この地域からの距離を計算した。算出した距離をもとに、石炭価格について欠損値がある場合は、そのプラントから最も近いプラントのデータを用いた。

発電容量と発電量と、石炭投入量はEIA767から取得した。熱効率は、EIA860から得た。脱硫装置の電力消費量は、EIA767から得た純発電量と熱投入量のデータより推定した。

いくつかのユニットは、酸性雨プログラムの他に、SO₂排出量に関する地域的な環境規制に従わなければならない。これらの地域的な規制に関する情報はEIA767のものを利用した。

上で述べたすべてのデータは、エネルギー情報局から入手することができる。SO₂排出量と酸性雨プログラムの対象ユニットのリストは環境保護局から取得した。

データ

シミュレーションで用いられるスタックには、176のTable Aユニットと78の代替ユニットと556のフェーズIIユニットが含まれている⁹。したがって、動学的プログラミングモデルは254のフェーズIユニットと556のフェーズIIユニットについて解いた。

1995年時点での燃料転換と脱硫装置設置に関する選択は表2にまとめた。フェーズIIユニットについては、116の脱硫装置が酸性雨プログラム以前に取り付けられていた。代替ユニットでも、17の脱就装置が1995年より以前に設置されていた。したがって、133の脱硫装置が4条項とは関係なく設置されていたと言える。Table Aユニットのうちでは、23の脱硫装置が設置されていた。しかしながら、Table Aユニット中で、1990年の大気浄化法以前に脱硫装置を設置したユニットは存在しなかった。

脱硫装置を設置していない250のフェーズIIユニットは高硫黄石炭、すなわち1.2ポンド/mmBTU以上の硫黄含有量の石炭を使用していた。脱硫装置なしの185のユニットは低硫黄石炭を使用していた。Table Aユニットについては、高硫黄石炭の使用割合のほうが高かった。これは、Table AユニットがSO₂排出の点で環境負荷が高いためである。

シミュレーションによると、1995年におけるSO₂排出量は、254のフェーズIユニットから51.02

⁹ ユニットのうち操業を停止したものや天然ガスにシフトしたもの、またはデータが欠けているものについては、シミュレーションから除外している。

億トン、556のフェーズⅡユニットから56.59億トンであった。これらの数値は、1985年にフェーズⅠユニットから95.06億トン、フェーズⅡユニットから49.97億トン排出されていたのと比べて、排出総量が著しく減少していることを示している。フェーズⅡユニットからの排出量が増加しているのは、フェーズⅡユニットからの発電量が増加したためと考えられる。フェーズⅠユニットに対するSO₂承認証分配量の総量は65.5億トン分であるのに対し、第二期のすべてのユニットに対するそれは、最初の10年で75.07億トンとそれ以降で71.63億トンとなっている。それぞれのユニットに対する承認証の分配量の情報はCode of Federal Regulations 40 (2002)より得た。

シミュレーション方法

シミュレーションは以下の方法で行った。

最初に、バンキング制度下の競争的な動学的均衡を算出する。均衡点における承認証価格は、初期価格 P_0^A と承認証価格の上昇が停止するタイミング \tilde{T} の値をいくつかシミュレーションすることで求めることができる。そして (P_0^A, \tilde{T}) の組み合わせを所与として、それぞれの時点における法令遵守方法は、すべての意思決定者について動学的プログラミングモデルをバックワードに数値解法を用いて求める、その後、均衡点についての条件を点検する。もし、均衡の条件が満たされなければ、\$1.00/SO₂トンごとに他の (P_0^A, \tilde{T}) の組み合わせを試していく。この計算が、均衡条件が満たされるまで繰り返される。もし均衡条件が成立すれば、その組み合わせは、第二期の排出削減目標を達成したときの承認証市場と承認証価格の均衡点を示すことになる。総排出量の時間経路は図5に示した。モデル中の時間は離散的である。したがって、最終期における排出レベルは第二期の目標値と正確には等しくならない。また、バンキング量は近似的にしかゼロにならない。そのため、承認証価格の経路は、最終期におけるSO₂排出量の絶対値が第二期の目標値に最も近い値をとる軌跡を選択した。

承認証価格の経路は図3に示してある。承認証価格は\$125/トンで始まり、 $t = 28$ において\$470に達した。これはSO₂排出量の総量が第二期の目標値まで減少したときである。 $t = 28$ 後は、承認証の分配に変化はない。つまり、価格は $t = 28$ 後には変化しないことになる。

1995年には、承認証市場の価格は非常に低くなると考える専門家もいた。しかしながら、実際の石炭価格と電力需要を所与とすると、オークションにおける承認証価格は合理的であるということがわかる。

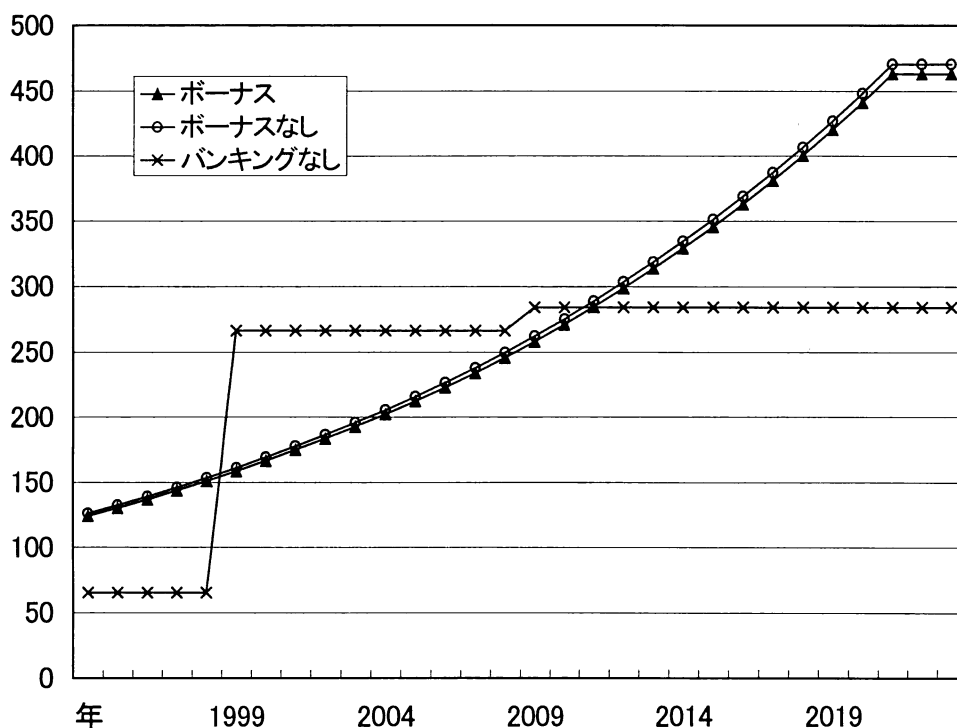


図3：承認価格の推移 (シミュレーション)

排出量のスムージングは図4で確かめることができる。実線はフェーズ I ユニットからのSO₂排出量を、点線はフェーズ I ユニットに対する承認証の初期分配量を示す。第一期においては前者よりも後者のほうが大きい。したがって、第一期間の承認証は2000年後の使用のために貯蓄されていたのである。第一期が終了すると、排出量は分配量を上回った。つまり、バンキングされていた承認証が第二期で使用されたのである (エミッション・スムージング)。この時間を通じた承認証の取引は、排出量の平滑化をもたらした。フェーズ I ユニットからの排出量は時間を通して徐々に減少するが、他方で第二期の承認証分配量は急激に減少する。この排出量の平滑化 (エミッション・スムージング) は、汚染者が排出削減費用を時間を通じて最小化しようとする誘引によって引き起こされる。

初期5年における割当量と二酸化硫黄排出量の差が毎年バンキングされ、それがフェーズ II で用いられている。フェーズ II の初期における二酸化硫黄排出量が割当量よりも多いところでは、このバンキングされた承認証が用いられている。図を見ると、バンキングされた量のほうが、フェーズ II の初期に使用された量より多くなっていることが分かる。これは、Table A ユニットによってバンキングされた承認証が、Table A ユニットだけではなく、フェーズ II ユニットでも用いられているためである。

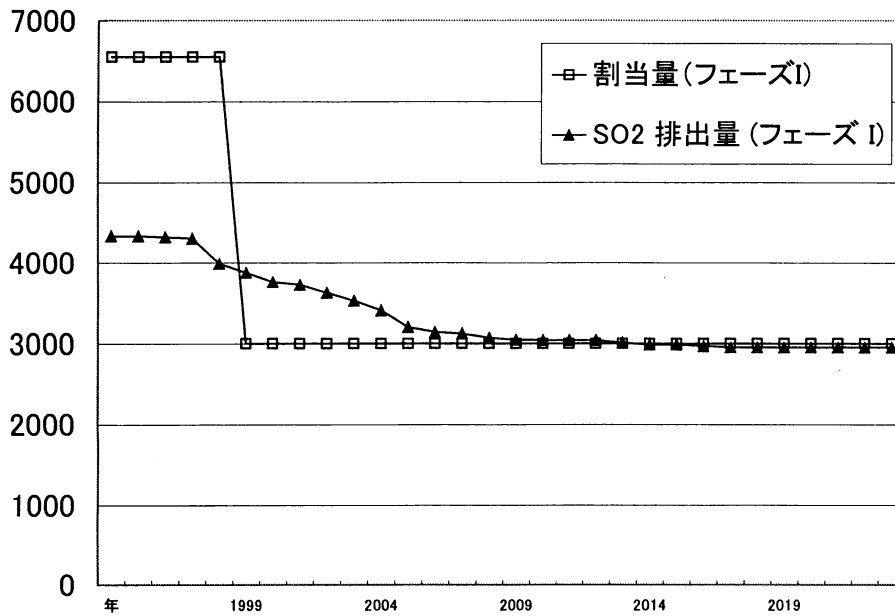


図4：フェーズI ユニットによるエミッションスムージング

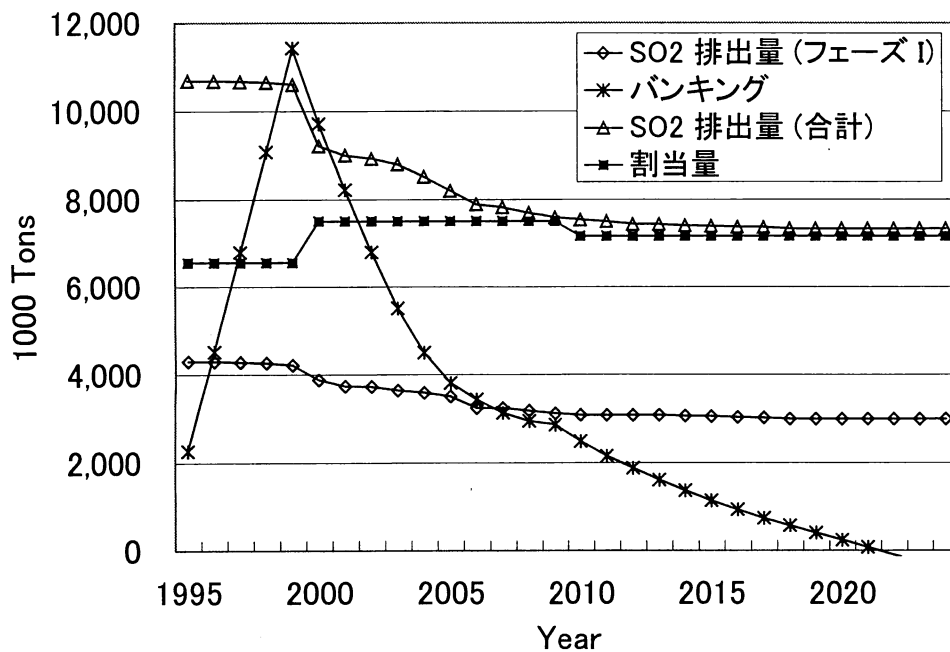


図5：均衡での排出量変化

図4に示されている排出量のスムージングは脱硫装置の設置と燃料転換によるものである。脱硫装置の設置数の推移は図6にあらわされている。いくつかのスタックは、 $t=1$ かそれ以降に脱硫

装置を設置している。したがって、均衡点においては、何人かの意思決定者にとっては、脱硫装置を設置するために数年待つほうが費用が低いのである。均衡点においては、第一期の最初の時点で15の脱硫装置が設置された。

最後の脱硫装置は $t = 12$ の時点で設置された。もし彼等がそれ以上待てば、彼等は余剰承認証を売却した分で脱硫装置の設置費用を回収することができなくなるのである。脱硫装置の大幅な増加は2000年 ($t = 5$) に観察された。これはフェーズIIユニットが規制の対象化になるからである。

実際には、1996年までに21の脱硫装置が設置された。したがって、モデルは脱硫装置の設置数を過小評価していることになる。この違いはいくつかの理由によって説明できる。第一に、これは地域の炭鉱保護政策によって説明できる可能性がある。州の管理当局によるこの種の介入の影響は、Arimura (2002)で確認することが出来る。第二に、この不一致は、第一期の開始時点で脱硫装置を設置した場合に贈与される承認証ボーナスによって生じたものかもしれない。このメカニズムについては後述する。

エミッションスモーキング

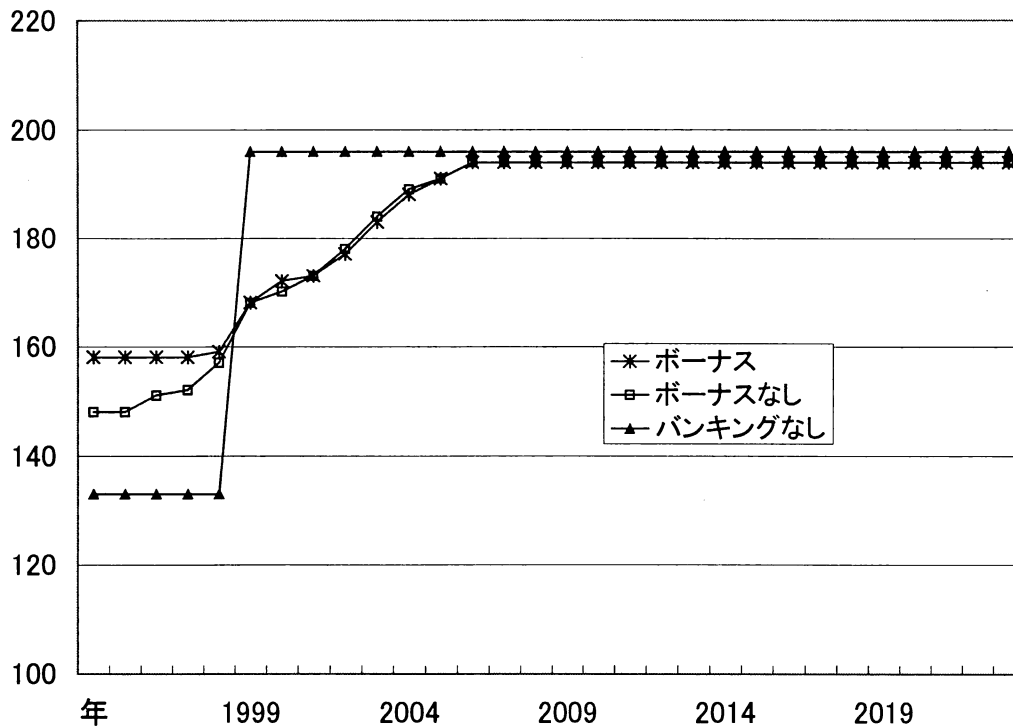


図6：脱硫装置設置数（シミュレーション）

燃料転換をすユニットの数は、時間を通じてどのように変化するのだろうか？承認証価格が上昇するに従って、低硫黄石炭を使用するユニットの数は、排出量の総量が第二期の目標を満たすまで ($t = 28$) 増加する。燃料転換を行うユニットは、第二期の規制が始まる年である2000年 ($t = 5$) に著しく増加する。

バンキングが許容される場合の承認証取引制度のもとで真に必要な総費用、すなわち、燃料の

総割引現在費用や燃料転換、脱硫装置に関する費用は、3781.92億ドルである。他方で、4条項の規制がなければ、現実にかかった総費用は361.96億ドルである。したがって、法令遵守に要した費用（酸性雨プログラムによるSO₂の排出規制を満たすために追加的に企業が支払わなければならない費用）は1496.96億ドルであった。

バンキングが無い場合

次に、バンキング制度が存在しなかった場合における競争的な動学的均衡を求めた。このとき、市場で取引が全て成立するという条件は次の式によって与えられる。

$$\sum_{i=1}^N E_{it} = \sum_{i=1}^N A_{it} \quad (32)$$

これは、すべての t について成立する。総排出量のレベルは各期において一定であるので、承認証価格は各期で固定的である。承認証価格の組み合わせ $(P^{A,1}, P^{A,2}, P^{A,3})$ を所与としたとき、個々の動学的モデルが定量的に解くことができる。次に、取引が全て成立するという条件(32)式がすべての t について満たされるかどうかを検査する。もし条件が満たされなければ、他の $(P^{A,1}, P^{A,2}, P^{A,3})$ の組み合わせを試していく。この過程を、条件が満たされるまで続けていく。

このシュミレーションにおける承認証価格の軌跡は図2に示してある。

均衡点における3つの承認証価格は、第一期では65、第二期の最初の10年で266、第二期のそれ以降で284ドルであった。

図2からは、バンキングがなかった場合の第二期の開始時点における承認証価格が、バンキングがあった場合のそれよりも高かったこともわかる。対称的に、最終期においては、承認証価格はバンキングがあった場合の均衡点においてより高くなった。

バンキングが許容されない場合の承認証取引制度のもとで真に必要な総費用、すなわち、燃料の総割引現在費用や燃料転換、脱硫装置に関する費用は、3742.69億ドルである。したがって、法令遵守に要した費用は151.58億ドル(3783.54-3631.96)である。バンキングが許容された場合の費用と比較すると、バンキングによって得られた費用削減分は1億6200万ドル、すなわち1.4%である。

バンキングがない場合では、法令遵守方法を3回しか変えないことがわかった。すなわち、第一期の開始時と第二期の開始時と承認証の分配量が減少するときである $t=16$ である。脱硫装置の設置と燃料転換の経過の様子はそれぞれ図3と図4に示している。バンキングがない場合の均衡点における脱硫装置への投資行動は、バンキングがある場合のそれとは、たとえ最終期におけるSO₂排出レベルが同じだとしても異なる。

バンキング制度がある市場よりもバンキング制度がない市場において、より多くの脱硫装置が設置される。他方で、燃料転換は、バンキング制度がない場合のほうが選択されにくくなる。これらの相違は、第二期の開始時点の承認証価格が、バンキングがない場合のほうがバンキングがある場合よりもかなり高いことによる。したがって、多くの意思決定者は、バンキング制度がない場合のほうがバンキングがある場合よりも脱硫装置の設置費用が安くなると考えているという

ことである。バンキング制度がない場合の第二期の開始時において一度脱硫装置を設置した場合、彼等はバンキング制度がある場合よりも高い価格で余剰承認証を売却することができる。たとえ、バンキング制度がある場合のほうがバンキング精度がない場合よりも最終期における承認証価格が高くなったとしても、脱硫装置の設置という選択肢は、バンキング制度下の多くの意思決定者にとって魅力的なものであるのではない。それは、彼等が将来における余剰承認証の売却益を割引くからだ。この投資行動における相違は、バンキング制度がある承認証取引市場に対してバンキング制度がないそれよりも有利な点をもたらす。もし市場に予期していない貯蓄が生じた場合、プラントの意思決定者は後者より前者のシナリオにおいて、それに対してより柔軟に対応できる。

費用の比較

本サブテーマは、承認証取引市場に関するこれまでの研究を、米国のSO₂承認証市場制度のバンキング可能なシステムについて分析することによって拡張している。そして、本サブテーマでは動学的離散選択モデルを用いている。具体的には、SO₂承認証市場における競争的な動学的均衡を、承認証のバンキングと排出削減技術への離散的な投資行動に焦点をあてることによって明らかにした。エネルギー情報局と環境保護局から入手したデータを用いてモデルを定量的に解き、シミュレーションによって、以下のような結果が得られた。第一に、バンキング制度がある場合のSO₂承認証市場の競争的な動学的均衡を求めることができた。州の管理当局による介入がないと仮定すると、均衡点における承認証価格は、排出量が第二期の目標レベルまで減少する最終時点において、約470ドルにまで上昇することが予想される。第一期の開始時における承認証価格は約120ドルである。直接規制と比べた場合の費用削減分は約150億ドル、つまり15%になる。

表4：遵守費用の比較

基準遵守費用のシナリオ比較	
scenario	compliance acost (\$ Billion)
排出量取引(バンキング有)	11.221
排出量取引(バンキング無)	11.06
直接規制	26.218
Model of 30 Years(1995-2024). Present Value in 1995 dollars.	

直接規制による政策

比較のために、直接規制による政策のシミュレーションを行った。すなわち、管理当局が、1985年時にSO₂を最も排出していたスタックに対して脱硫装置を設置するように義務付けるのである。この種の政策は、かつて検討され、それにかかる費用の分析が行われた(Energy Ventures Analysis (1986))。さらに、酸性雨プログラム以前にも、環境保護局はすべての新規建設の発電ユニットに対して脱硫装置を設置するように求めた。したがって、この種の直接規制は、もし承認証取引市場がなかった場合に実行される政策と大差ないものであろう。

具体的には、次のような直接規制が考えられるだろう。管理当局は1995年以前にどちらのタイプの石炭が使用されていたかを知っていたと考えられる。当局は、総SO₂排出量が各期において目

標排出レベルを満たすまで、1985年時点において最もSO₂を排出していたスタックに対し、使用石炭にもとづいて、脱硫装置の設置を強制する。脱硫装置の設置を求められたスタックの選択は、1985年のSO₂排出量にもとづいて行われる。なぜなら、酸性雨プログラムではSO₂承認証の分配が1985年の排出量と熱投入量にもとづくからである。直接規制による脱硫装置の設置数は、表3にまとめた。直接規制の下では、第一期の目標を満たすために、9つのユニットが脱硫装置の設置を義務付けられた。低硫黄石炭の価格が低かったことは、強い規制がなくてもSO₂排出量の減少を実現させた。しかしながら、第二期の排出レベルの目標を達成するためには、さらに119の脱硫装置の設置が必要であった（合計で128の新規脱硫装置）。このことは、承認証取引による規制と明らかに対称的である。

直接規制のために真に必要な費用は、30年間で3894.13億ドルである。したがって、法令遵守費用は、362.18億ドル（3894.14-3631.96）である。直接規制による政策は、承認証市場の数値的なシミュレーションの結果と比較することができる。バンキングがある承認証市場による（30年間の）費用削減分は、112.21億ドルである。3つのシナリオにおける結果は表4にまとめた。

費用削減分は、時間と同様に空間を通じた承認証の取引によってももたらされる。時間を通じた費用削減分は、前節で1.62億ドルであることがわかった。したがって、バンキングによる費用削減分は依然として大きい。費用削減分のほとんどは空間を通じた承認証の取引によるものである。

Winebrake et al. (1995)は、承認証市場と直接規制の比較も行っている。そこでの直接規制とは、個々のプラントが承認証市場における承認証分配量までしかSO₂を排出できないような規制である。彼等の結果は表5に示してある。彼等によると、承認証市場の規制を遵守するために必要な費用の総計は、502万ドルであり、直接規制の場合のそれは921万ドルであると推定された。彼等のモデルでは、最初の10年間の費用削減分は419万ドルであり、本サブテーマで用いたモデルによる推定値と異なる結果となった。

しかしながら、結果を単純に比較することはできない。なぜなら、彼等のモデルは、Table Aユニットのみを扱っているが、本サブテーマのモデルはTable Aユニットに加えて代替ユニットとフェーズIIユニットを対象としているためだ。さらに、彼等の研究のモデルは、プラントレベル（スタックレベルではない）であり、対象期間を10年としている。したがって、彼等のモデルでは \tilde{T} は外生的に決定されるが、このモデルは \tilde{T} を内生変数として扱っている。実際に、 \tilde{T} は28になることがわかった。彼等のモデルにおける石炭タイプの分類のほうが細かいが、このモデルのほうが石炭価格の情報がより新しいものである。

Ellerman et al. (2000)はバンキングによる費用削減分を推定した。彼等の推定では、最初の13年間で4.40億ドルとなった。本サブテーマの推定では、最初の13年間の費用削減分は3.44億ドルであった。したがって、これらの結果は比較可能である。

ボーナス排出承認証

脱硫装置の設置は、ボーナス承認証の割当てによって支援されていた。脱硫装置が第一期の間に設置された場合、ボーナス承認証が与えられるのである。環境保護局が準備していたボーナス承認証の総量は、350万トン相当であった。しかしながら、結果的には非常に多くの企業がボーナ

ス承認証に応募した。環境保護局は、ボーナス承認証を贈与するに抽選を行うことにした。その結果、電力会社は確実にボーナス承認証を手に入れるために連携を組んだのである。抽選で当たった会社は団体にボーナス承認証を提供し、その団体は連携を組んだ電力会社にそれらを順次再分配した。このときの配分のルールは、基本的に、過去の排出量に応じて、希望者間にボーナス承認証を配分するものであるようである（図7）。

そこで、本研究では、以下のような承認証配分ルールに基づき、ボーナス承認証のシミュレーションを行った。ボーナス承認証 A^B_i は、 i 番目のプラントが第一期の開始時に脱硫装置を設置した場合に与えられる。したがって、承認証の初期分配の数列 $\{A_{it}\}_{t=0}^T$ は次のようにモデル化することができる。

$$A_{it} = \begin{cases} A_i^1 + A_i^B D_{it}^S & \text{for } t = 0, \dots, 4 (\text{Phase I: 1995-1999}) \\ A_i^2 & \text{for } t = 5, \dots, 15 (\text{Phase II: 2000-2009}) \\ A_i^3 & \text{for } t = 16, \dots, T (\text{Phase II: 2010-}) \end{cases} \quad (3.3)$$

この誘引のモデル化は、ボーナス承認証の量 A^B_i が $t = 0$ における脱硫装置の設置数に依存するため、複雑である。ひとつの方法は、 A^B_i が彼等の過去の排出量と比例する、すなわち c を定数、 E_{1990} を1990年のSO₂排出量として、 $A^B_i = cE_{1990}$ が成り立つと仮定することである。しかし、係数の c の値は、ボーナス承認証の総量が、環境保護局が準備している量と等しいように決定されるのである。

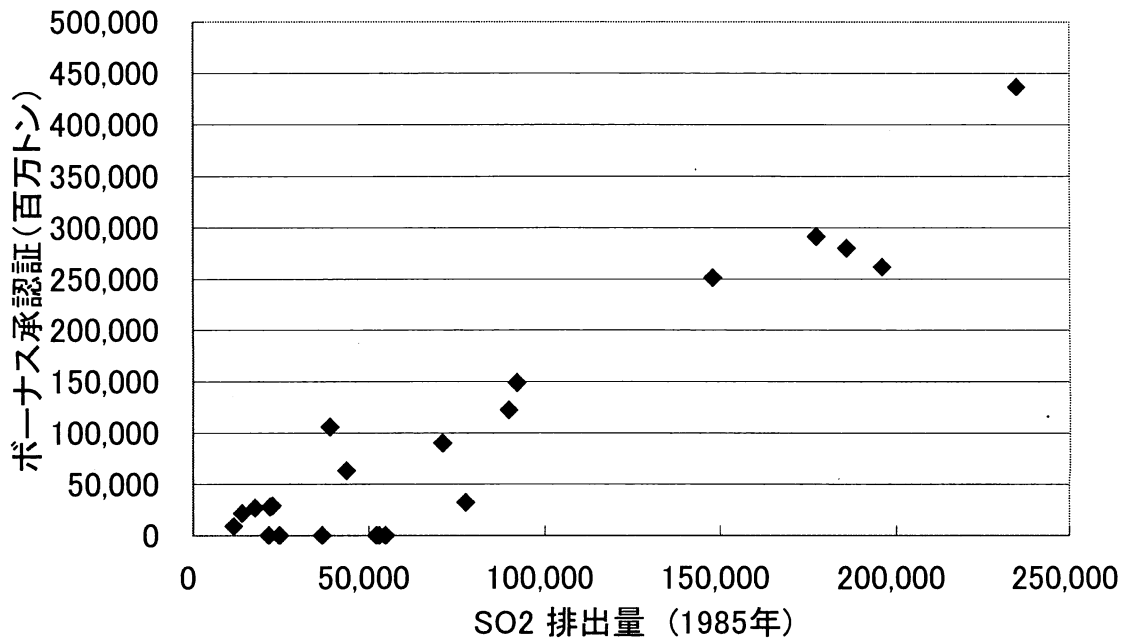


図7：ボーナス承認証の配分

ボーナス承認証の効果

このような均衡条件の下での承認証価格の推移を求め、図3に示した。このときの脱硫装置の設置数は図6に示した。その結果、ボーナス承認証制度の下では、 $t = 0$ の初期において脱硫装置数が増加すること、さらに、フェーズI期間中には、その後、脱硫装置の設置が行われなかったことが明らかになった。つまり、ボーナス承認証は、脱硫装置設置のタイミングを早める効果があったことが確認できた。

5. 本研究により得られた成果

本研究では、排出権制度が有効に機能しない要因について、アメリカのSO₂承認証市場を対象に定量的に分析した。この分析結果から、PUCの規制が電力会社に対して、承認証市場よりも燃料転換、混合使用といった承認証取引を抑制する行動を選ばせるように促していることがわかった。このことは、SO₂削減の限界費用が高い発電所であっても、承認証市場を使用せずに、自らがSO₂を削減することになる。この結果、SO₂削減費用は社会全体で最小化されない。

以上の分析からわかるように、排出権市場が汚染物質削減費用最小化という望ましい機能を果たすためには、制度の立案と同時に、汚染物質削減費用最小化を阻害するような規制、制度を修正することを検討することの重要性を示唆している。

このことは京都議定書の目標達成にどのような示唆を持つであろうか？サブテーマaの結果は、二酸化炭素の排出量取引を効果的に行うためには、承認証売買の会計取引ルールの早期の決定や、既存の燃料税制の改革が必要であることを示唆していると言える。

さらに、本サブテーマは、脱硫装置の設置やバンキングという動的な意思決定まで含めた発電所の動学離散選択モデルを構築し、分析を行った。具体的には、バンキングの費用節約効果を試算し、バンキングが無い場合の空間上の取引による費用節約効果を試算した。その結果、バンキング制度による費用削減分は1.62億ドルになることがわかった。つまり、バンキングによる費用節約削減効果は無視できない規模であるが、同時に、その相対的大きさは、空間取引による節約効果に比べて小さいことも確認された。

このことは地球温暖化対策でどのような含意を持つであろうか？バンキングは費用削減効果をもたらすため、行うべきである。しかしながら、バンキングによる費用削減効果は、排出量取引で可能な費用削減のごく一部でしかない。そのため、政府は、京都議定書の第一約束期間に関しては、ロシアの排出量購入の機会を十分に活かすべきである。

また、より長期的な視点、第二約束期間以降については、積極的な発展途上国の取組を行うべきである。そうでなければ、排出量取引の潜在的な効果を十分に活用することができないのである。

時間を通じた取引（バンキング）による費用削減分は、空間を通じたそれよりも小さい。しかしながら、バンキング制度は、バンキングがないシステムに対し、もうひとつの利点をもっている。両方の市場における投資行動は、長期においてSO₂排出削減量が同じでありながら、極めて異なる。バンキングがないシステムにおいてはより多くの脱硫装置が設置されることがわかった。脱硫装置に対する投資は不可逆であるため、もし石炭市場や電力需要に予期しないショックがあった場合に、バンキングがないシステムではかなり費用がかかるであろう。言い換えれば、バ

ンキングシステムは、排出削減技術に対する不必要な投資を潜在的に抑制することができるのである。したがって、このことから、バンキング制度は、排出量の平滑化による費用削減という点で支持されるべきである。

また、本研究では、ボーナス承認証という誘導策が、公害防除投資の早期化に寄与することも確認された。温室効果ガスの早期削減にも、このような誘導策の効果が期待される。

6. 引用文献

- 1) Arimura, T. (2002) "An Empirical Study of the SO₂ Allowance Market: Effects of PUC Regulations," *Journal of Environmental Economics and Management*, 44, pp.271-289
- 2) Carlson, C., Burtraw, D., Copper, M., Palmer, K. L. (2000) "Sulfur Dioxide Control by Electric Utilities: What Are the Gains from Trade", *Journal of Political Economy*, 108(6), pp.1292-1326.
- 3) Coggins, J. S. and Swinton, J. R. (1996) "The Price of Pollution: A Dual Approach to Valuing SO₂ Allowances", *Journal of Environmental Economics and Management*, 30, pp.58-72.
- 4) Energy Ventures Analysis (1986) Evaluation of SO₂ Emissions and the FGD Retrofit Feasibility at the 200 Top Emitting Generating Stations, pp.1-151.
- 5) Fullerton, D., McDermott and S. P., Caulkins, J. P. (1997) "Sulfur Dioxide Compliance of a Regulated Utility", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.34, No.1, pp.32-53.
- 6) Ellerman, A. D., Montero, J. P. (1998) "The Declining Trend in Sulfur Dioxide Emissions: Implications for Allowance Prices", *Journal of Environmental Economics and Management*, 36, pp.26-45.
- 7) Rose, K. (1997) "Implementing an Emissions Trading Program in an Economically Regulated Industry: Lessons from the SO₂ Trading Program", In Richard F. Kosobud and Jennifer M. Zimmerman (Ed.) *Market Based Approaches to Environmental Policy: Regulatory Innovations to the Fore*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- 8) Rubin, J., Kling, C. (1993) "An Emission Saved is an Emission Earned: An Empirical Study of Emission Banking for Light-Duty Vehicle Manufactures", *Journal of Environmental Economics and Management*, 25(3), pp.257-274

"Pollution-Permit Market Efficiency: Hedonic Prices of Sulfur in Coal under the U.S. SO₂ Allowance Market"

④ 有村俊秀：日本経済学会（2002），小樽商科大学，北海道

"Hedonic Prices of Sulfur in Coal under the U.S. SO₂ Allowance Market",

⑤ Toshi H Arimura: Summer Meeting, American Agricultural Economics Association, Montreal, Quebec, Canada (2003) "How much can we save from emissions permit banking: The case of the U.S. SO₂ allowance market"

⑥ Toshi H Arimura: Resource for the Future, Bag Lunch Seminar (2003) "How much can we save from emissions permit banking: The case of the U.S. SO₂ allowance market"

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、一般誌への寄稿などを通じ、成果の広報・普及に努める