

IMES DISCUSSION PAPER SERIES

バブルの推計： 米国の二酸化硫黄排出権市場の場合

とおやまゆうた わたなべやすとら
遠山祐太・渡辺安虎

Discussion Paper No. 2024-J-2

IMES

INSTITUTE FOR MONETARY AND ECONOMIC STUDIES

BANK OF JAPAN

日本銀行金融研究所

〒103-8660 東京都中央区日本橋本石町 2-1-1

日本銀行金融研究所が刊行している論文等はホームページからダウンロードできます。

<https://www.imes.boj.or.jp>

無断での転載・複製はご遠慮下さい。

備考：日本銀行金融研究所ディスカッション・ペーパー・シリーズは、金融研究所スタッフおよび外部研究者による研究成果をとりまとめたもので、学界、研究機関等、関連する方々から幅広くコメントを頂戴することを意図している。ただし、ディスカッション・ペーパーの内容や意見は、執筆者個人に属し、日本銀行あるいは金融研究所の公式見解を示すものではない。

バブルの推計: 米国の二酸化硫黄排出権市場の場合

とおやまゆう た * わたなべやすとら **
遠山 祐太 *・渡辺安虎 **

要 旨

本論文では米国の二酸化硫黄（SO₂）排出権市場において、排出権価格のバブルが発生したのかを考察する。通常、資産のファンダメンタルバリューとバブルの有無や程度を測定することは困難であるが、SO₂ 排出権については SO₂ 排出量の限界削減費用がファンダメンタルバリューであると考えられる。これは各発電所が SO₂ 排出量規制を満たすためには排出権を購入する代わりに、硫黄分の少ない石炭への代替や硫黄分除去装置を設置することにより、追加的な費用で排出量を削減することが可能であるためであり、排出権の価値は発電所の費用最小化問題における排出量制約のシャドープライスとなっているためである。限界削減費用がファンダメンタルバリューであるため、SO₂ 排出権の取引価格と計測された限界削減費用の差がバブルとなり、これを計測する事で、発電所単位でバブルの識別が可能となる。推定の結果、2005年から2006年の期間にかけ、排出権価格は大半の発電所の限界削減費用の推定値を上回っており、バブルが発生していたことが示された。

キーワード：バブル、排出権取引、限界削減費用

JEL classification: D24、G12、Q52

* 早稲田大学政治経済学部准教授 (E-mail: yuta-toyama@waseda.jp)

** 東京大学大学院経済学研究科教授 (E-mail: yasutora@e.u-tokyo.ac.jp)

本稿は、筆者の一人（渡辺）が日本銀行金融研究所の国内客員研究員の期間に行った研究をまとめたものである。本稿の作成に当たって、平野智裕氏および日本銀行金融研究所スタッフからいただいたコメントに感謝する。また、牧野圭吾氏と北島健都氏のリサーチアシスタンスに感謝する。ただし、本稿に示されている意見は、筆者たち個人に属し、日本銀行の公式見解を示すものではない。また、ありうべき誤りはすべて筆者たち個人に属する。

目次

1. イントロダクション.....	1
1.1. リテラチャー	3
2. 米国の二酸化硫黄排出権市場.....	4
2.1. 酸性雨プログラム	4
2.2. SO ₂ の排出削減手段.....	5
2.3. Clean Air Interstate Rule のアナウンスとその後（2004年以降）	5
3. データ	7
3.1. データソース	7
3.2. 記述統計：排出権価格とスクラバー導入のパターン	7
4. 誘導型分析.....	8
4.1. スクラバーの設置に関する分析	8
4.2. 燃料選択に関する分析.....	10
5. 排出権のファンダメンタルバリューとバブル	12
5.1. SO ₂ 削減費用と短期の費用最小化問題.....	12
5.2. 短期と長期の限界削減費用.....	14
5.3. 燃料費用関数の推定.....	15
5.4. バブルの推定	17
6. 推定結果.....	17
6.1. 推定値	17
7. 結論.....	23
参考文献	24

1. イントロダクション

資産バブルはどのように発生し、どのように拡大し、どのように破綻するのか。バブルの発生時と拡大時にその資産を誰がどのように売買し、それがバブルの拡大と破綻とどのように関係するのか。バブルの発生・拡大・終了のメカニズムを理解することは経済学的に重要な問いであり、これが本論文のリサーチクエストである。また、これらの問いに答えることは金融政策上も極めて重要なインプリケーションを持つ。

しかしながら、以下の2つの理由からこれらの問いに答えるのは困難である。一つ目の、そして最も本質的な理由は、資産のファンダメンタルバリューの計測が困難であることである。資産のファンダメンタルバリューを計測することは、ファンダメンタルバリュー自体が当該資産の将来の収益に関する市場参加者の期待に強く影響を受けるため、その計測は通常は原理的に非常に困難である。

二つ目の理由は、もし一つ目の理由が克服された場合であっても、個々の市場参加者がバブルの各段階でどのように当該資産を取引しているかを市場のすべての参加者について観察することが困難であることである。このため、金融業者とそれ以外の市場参加者がバブルの各段階でどのような役割を担っているかも観察が困難である。

本論文では、米国の二酸化硫黄 (SO₂) 排出権の市場において 2004 年から 2008 年にかけて発生した排出権価格のバブルのケースを題材とすることで、上記の二つの問題を克服することが可能になることを示したうえで、当該市場におけるバブルの発生・拡大・終了のメカニズムの解明を目指す。

二点目の問題については、本論文で注目する米国の SO₂ 排出権の市場において、米国環境庁が排出権の保有者をデータベース上で管理しており、すべての取引が記録されていることから、当該市場への参加者間のすべての取引が観察可能であることにより解決が可能となる。各発電所及び金融業者がどの時期どのように排出権を取引・保有したかが観察可能であり、それぞれがバブルの発生・拡大・終了の各段階でどのような役割を果たしたかを分析することが可能となる。

本論文の最大の着想であり、より本質的な問題である一つ目の困難さの克服については、今回の分析対象の資産が SO₂ の排出権であることに拠っている。ここでは資産が通常の金融資産とは異なり排出権であることが重要な役割を果たす。排出規制を満たすためには排出権の購入との代替的な手段が存在するため、これらの代替的な手段を用いた際にかかる費用を計算することで、排出権のファンダメンタルバリューを計算することができる。

具体的には、この資産は SO₂ の排出権であるが、排出規制を満たすためには排出権を保

有するのみが手段ではなく、各石炭発電所は(i)硫黄分含有量の少ない石炭の利用を増やす、または(ii) 硫黄分除去装置（スクラバー）¹を設置する、という代替手段によっても排出量を減少させることができる。(i)と(ii)いずれの場合も、SO₂の排出量1トンを減少させるのに必要な費用が推計可能であり、各発電所にとってはこの費用が排出権のファンダメンタルバリューとなる。いいかえると、ある石炭発電所にとって、SO₂の排出量1トンの排出権のファンダメンタルバリューは、SO₂の排出量を1トン減少させるのに必要な費用を上回ることはなく、上回るのであれば排出権を購入することとなる。より技術的に言い換えると、発電所の費用最小化問題を考える際、排出権の価値はSO₂の排出量制約に関するシャドープライスとなっており、このためSO₂の排出量を減少させるのに必要となる限界削減費用が排出権の価値と一致する。

本論文ではまず石炭火力発電所がSO₂排出権の価格の増加に応じて(i)硫黄分含有量の少ない石炭の利用を増やすこと、および(ii) 硫黄分除去装置の導入を進めることを誘導型分析で示す。誘導型分析により石炭火力発電所がSO₂排出権価格に反応することを確認することにより、排出権とこれらの手段が排出量規制を満たすための代替的な規制であることが確認される。

次に、これらの代替的な手段によりSO₂の排出量1トンを減少させるのに必要な費用の費用関数を推定する方法を議論する。具体的には、石炭火力発電所の排出量規制下での費用最小化問題から短期の費用曲線を導出し、これが各発電所にとってのファンダメンタルバリューの推定値の上限²となることを示したうえで、その推定について述べる。

限界削減費用の推定結果は2005年～2006年の期間にかけ、大半の発電所において排出権価格が限界削減費用を上回っており、バブルが発生していたといえる。スクラバーを導入していない発電所において特にファンダメンタルバリューと排出権価格の差が大きく、また中西部及び西部の発電所において排出権価格と限界削減費用の差が大きいことが示された。

以下では、まず第2節において米国のSO₂排出権市場についての制度的な説明をおこなう。SO₂排出量規制としてのAcid Rain Programについて2.1節にて概観した後、個々の石炭発電所における排出削減手段について2.2節にて説明し、2.3節ではClean Air Interstate

¹ スクラバーは発電機のボイラーに設置されるものであり、排ガスからSO₂を取り除くものである。

² このため、本論文では、排出権価格からファンダメンタルバリューの上限の推定値を引くことで、バブルの推定値の下限を得ている。

Rule の導入に伴う規制の変化について述べる。3 節では本論文で使用するデータのデータソースについて説明するとともに、その記述統計を示す。4 節では排出権価格がスクラバーの導入に及ぼした影響、および硫黄分含有量の少ない石炭への代替に及ぼした影響を誘導型分析で示す。5 節では短期の費用関数の推計値がファンダメンタルバリューの推計値の上限となることを示したうえで、その推定法を提示し、6 節を結語とする。

1.1. リテラチャー

資産市場におけるバブルの発生と識別についてはこれまで長年にわたりファイナンス分野で研究が続けられている。この一連の研究ではバブルの識別の問題は株式のファンダメンタルバリューの計測の問題であり、この研究についてのサーベイである鈴木(2019)はファンダメンタルバリューの計測として(i)時系列モデルを用いたアプローチ、(ii)アナリスト予想を用いたアプローチ、(iii)デリバティブ価格を用いたアプローチ、の3つの異なるアプローチに整理している。本研究ではこれらの方法ではなく、上述のように、石炭発電所にとっての排出権のファンダメンタルバリュー自体が排出量を減少させるための費用であることを用いてファンダメンタルバリューを識別しようとしている点で、既存文献とは異なるアプローチをとっている。

本論文ではバブルの存在とその発生・拡大・終了のメカニズムについて、米国の SO₂ 排出権のケースについて、ケーススタディとして分析を行う。同様にバブルの存在について、個々のケースについて検証した論文としては以下が存在する: Xiong and Yu (2011)、Lamont and Thaler (2003)、Temin and Voth (2004)、Jovanovic (2013)、Giglio, Maggiori, and Stroebe (2016)。Xiong and Yu (2011)は中国株式のワラント市場において、特定の株式に関するワラントが理論的にはほぼ無価値であるにもかかわらず、一定期間高価格で取引されており、それがバブルであるとともに、そのバブルが空売り規制と市場参加者の Belief の異質性に拠っていると議論している。Temin and Voth (2004)は 18 世紀イギリスの南海泡沫事件について、バブルを認識していた銀行が、そのバブルの認識にもかかわらず「バブルに乗って」利益を得るために取引を行っていたことを歴史的な取引データから示している。Lamont and Thaler (2005)は子会社のスピンアウトの際の株式カーヴアウトに際して、主に空売りのコストにより、裁定条件が働いておらず Mispricing が発生していることを示している。Jovanovic (2013)では有限資源の消費パターンと価格から当該資源価格のバブルの識別方法を提示した上で、原油と年代物ワインのデータを用いてこれらの市場でバブルが発生していることを示している。これらの個別ケースにおけるバブルの存在を示す研究とは対照的に、Giglio, Maggiori, and Stroebe (2016)は英国とシンガポールにおける不動産の無期限リ

ース契約と（多くは 700 年以上の期限の）超長期リース契約との価格を比較することで、横断性条件が満たされており、不動産バブルが発生していたと考えられていた時期においても、バブルが発生していないことを示している。

2. 米国の二酸化硫黄排出権市場

本節では実証分析の題材となる、米国の二酸化硫黄排出権取引規制の概要について説明する。

2.1. 酸性雨プログラム

化石燃料を使用する発電所、特に石炭火力発電所では、発電の副産物として二酸化硫黄（以下 SO₂）が排出される。SO₂ は酸性雨の元となり自然環境に被害をもたらすと同時に、大気汚染による健康被害にもつながる。SO₂ 規制として米国では 1970 年代以降、様々な手段を取ってきており、その中で最も有効であったと言われているのが、1995 年に導入された Acid Rain Program である。

Acid Rain Program は、SO₂ 排出に関する排出権取引制度であり、1995 年に開始された。規制の対象となるのは、化石燃料を使用する発電容量が 25 メガワット以上の発電機である。Acid Rain Program では、発電所からの SO₂ 排出量を 1980 年の半分に削減することを目標としており、その目標に基づいて各年の排出許可証の総数が決定されている。

Acid Rain Program 排出許可証は、既存の発電所（発電機）に対して無料で割り当てられた。割当量は発電機の特性に依拠している。³割り当てられた許可証は参加者間での取引が認められていた。また、米国環境庁は毎年オークションを行い、排出権の年間割当のうち約 2.7% を分配していた。しかしながら、中央集権的な取引所は存在せず、排出権を他の参加者と取引するには、ブローカーが仲介する二者間取引が主な方法となっていた。

規制されている発電機の稼働状況、特に SO₂ の排出量は、Continuous Emissions

³ 排出権割当量は主に 1985 年から 1987 年における燃料投入量（入熱量）と、各年における目標排出率（すなわち、入熱量あたりの SO₂ 排出量）によって決定される。具体的には、1995 年から 1999 年（フェイズ 1）における目標排出率は 100 万ブリティッシュ・サーマル・ユニット（MMBtu）あたり 2.5 ポンドであり、2000 年以降（フェイズ 2）の排出率は 1.2 ポンド/MMBtu となっている。一部のユニットには、技術的・政治的な考慮に基づいて追加の許可証が割り当てられていた。詳しくは Joskow and Schmalensee (1998) を参照。

Monitoring System(以下 CEMS)を通じて記録されている。各暦年の終わりに、SO₂ の年間排出量が確定し、各発電所は 60 日間の猶予期間内に排出許可証を米国環境庁に提出することが求められる。1 トンの SO₂ 排出量を相殺するためには、1 単位の排出許可証が必要となる。使用しなかった排出許可証は、次年度に持ち越される。この点をしばしば排出権のバンキングと呼ぶ。なお、バンキングされた排出許可証には有効期限はない。

2.2. SO₂ の排出削減手段

石炭の発電に伴う SO₂ 排出を減らす手段は、石炭による発電量を減らすか、発電に伴う SO₂ の排出率を減らすかのいずれかである。前者については、米国において石炭発電がベースロード電源であったため、主な排出削減手段としては用いられなかった。より重要であったのが、後者の SO₂ 排出率、すなわち発電量あたりの SO₂ 排出量の削減である。

SO₂ 排出率の削減のためには大きく分けて 2 つの手段がある。1 つ目が、使用する石炭をより高品質なものに変更することである。米国では各地方で産出される石炭の質は異なっており、それら石炭の硫黄含有量も異なっている。2 つ目が、スクラバーの設置である。スクラバーは発電機のボイラーに設置されるものであり、排ガスから SO₂ を取り除くものである。ただし、設置に際しては高い固定費用がかかり、工事期間も 2 - 3 年かかるものである。

2.3. Clean Air Interstate Rule のアナウンスとその後（2004 年以降）

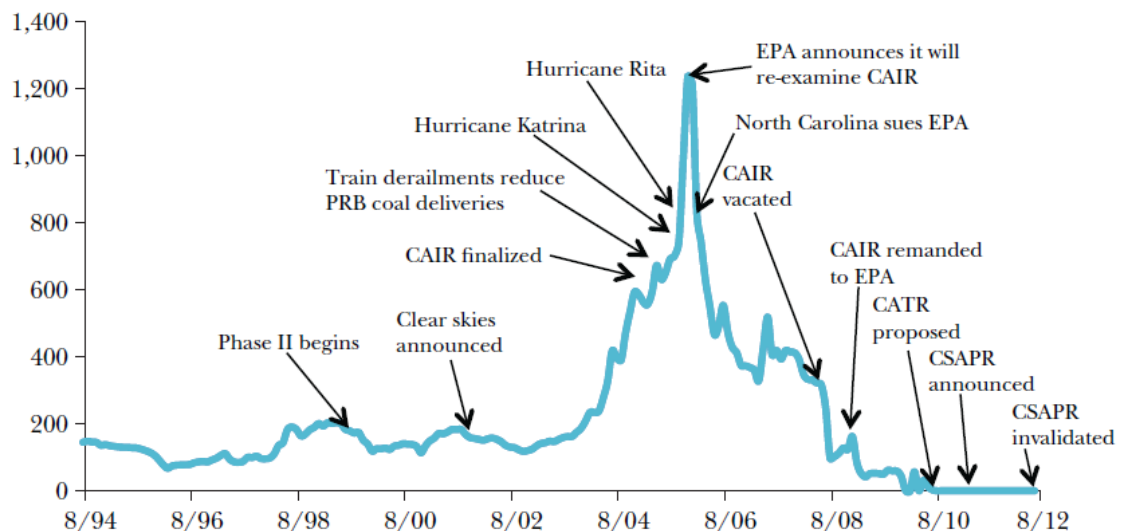
酸性雨プログラムの転機となったのが、2003 年末である。⁴米国環境庁は 2003 年 12 月に Clean Air Interstate Rule (以下 CAIR) と呼ばれる追加的な SO₂ 規制の検討をアナウンスした。CAIR の目的は、2010 年以降に、Acid Rain Program に上乗せする形で、一部地域における SO₂ 規制を厳しくすることである。具体的には、CAIR の対象となった地域においては、SO₂ 1 トンの排出に対して、Acid Rain Program 用に 1 排出権を支払うことに加えて、CAIR 用に 2 排出権を支払うように求めた。すなわち、2010 年以降の排出枠が実質的に三分の一になったということである。しかしながら、2010 年以前にバンキングした排出権であれば、CAIR 用に 1 排出権を支払うのみで良いという扱いになっていた。このような政策

⁴ 以下の説明は Schmalensee and Stavins (2013) に基づいている。詳細についてはそちらを参照されたい。

変更のアナウンスを踏まえて、2003年12月以降排出権価格が急激な上昇を見せた(図1)。

しかしながら、この排出権価格のトレンドは2005年に急激に変化した。2005年12月に米国環境庁がCAIRの見直しを発表した。それを受けて価格が急激に低下した。その後、2008年7月11日にCAIRの導入を巡って起きていた訴訟(State of North Carolina v. Environmental Protection Agency, 531 F. 3d 896)により、CAIRの導入が正式に見送られることとなった。その後、Cross-State Air Pollution Rule(以下CSAPR)と呼ばれる、新たなSO₂規制の導入が提案された。このCSAPRは酸性雨プログラムよりもSO₂の規制基準が厳しいものであった。結果、CSAPRにおけるSO₂の規制基準を満たすべくSO₂の排出量を減らすと、その排出量は酸性雨プログラムの規制を満たすのに十分低い量となるため、酸性雨プログラム自体が規制として無意味なものとなった。さらには、CAIRとは異なり、酸性雨プログラムの排出権をCSAPRにおいて使用することができなかったため、CSAPR開始前に酸性雨プログラムの排出権を購入して貯蔵しておくという必要性もなくなってしまった。これらを受けて、酸性雨プログラムの排出権価格はほぼゼロとなった。

図1：酸性雨プログラムの排出権価格と各種イベントの関係



注：Schmalansee and Stavins (2013)の Figure 2 より引用。縦軸の単位はドル(1995年)。スポット価格は、2001年9月11日まではCantor FitzgeraldのPower & Energy Analytic Resources (PEAR) Incより。それ以降はICAP Unitedより。CAIRは“Clean Air Interstate Rule.” CATRは“Clean Air Transport Rule.” CSAPRは“Cross-State Air Pollution Rule.”の略称。

3. データ

3.1. データソース

本研究では、米国の電力産業及び SO₂ 排出権取引に関連する複数のデータソースを組み合わせて分析を行っている。

1つ目のデータソースは、CEMS によって収集された発電ユニットレベルの運転データである。米国における多くの発電機には CEMS が設置されており、各種汚染物質の排出量や発電量が高頻度で記録されている。本データは米国環境庁によって公開されている。具体的な情報として、総発電量（単位：MWh）、燃料投入量（単位：MMBtu）、および SO₂ 排出量（単位：ショートトン）が含まれる。

2つ目のデータソースは、Acid Rain Program 下における排出権価格である。本データは SO₂ 排出権市場における主要なブローカーが示している価格インデックスに基づいている。具体的には BGC Environmental Brokerage Services より取得した。データの頻度は月次である。

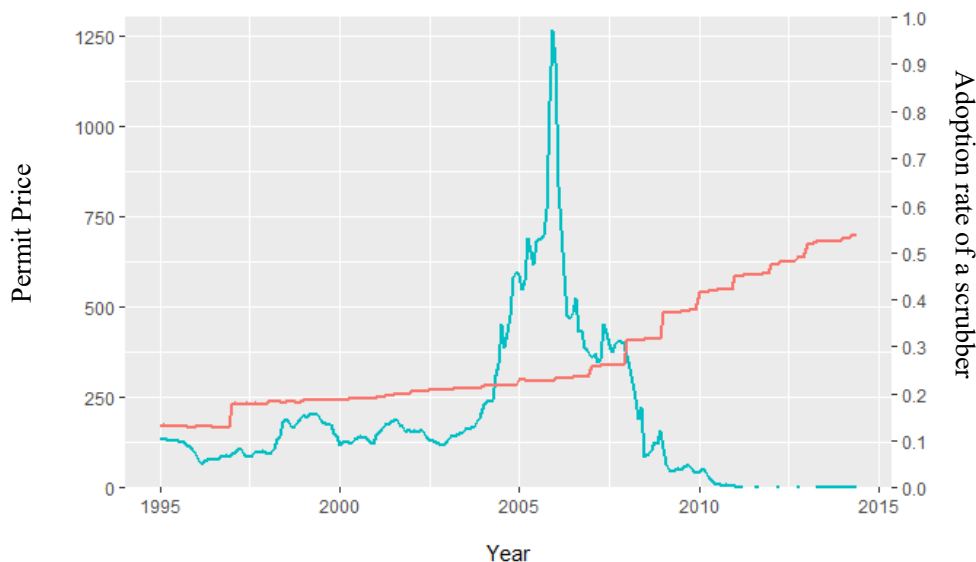
3つ目のソースは各発電所の燃料調達データである。1990 年から 2007 年までは Form FERC No.423 (EIA-423) “Monthly Report of Cost and Quality of Fuels for Electric Plants” より取得した。2008 年から 2011 年については Form EIA-923 detailed data “Power Plant Operations Report” より取得した。本データにおいては、各発電所が調達した燃料の種類、硫黄分、熱量、購入コスト（物流コストを含む）、調達年月などの情報について、調達レベルで取得可能である。

3.2. 記述統計：排出権価格とスクラバー導入のパターン

図2は排出権価格の推移と発電機レベルでのスクラバーの導入率の関係を示している。スクラバーの導入率は Acid Rain Program 開始当初は 13%であり、1997 年に 18%程度に上昇した後、徐々に導入が進んでいる。顕著な導入が見られるのは、2007 年・08 年付近であり、それ以降も導入が進み、2015 年には約 5 割程度の導入が見られた。一方排出権価格を見ると、急激な上昇が観察されるのは 2004 年からであり、ピークは 2005 年 12 月となっている。スクラバーの導入は、排出権価格のピークよりも遅れて発生している。これは、スクラバーの導入に時間がかかるためであると考えられる。一方、排出権価格が非常に低くなった 2010 年以降にも導入が進んでいる。これは、CAIR が見送られた後に導入が検討された

Cross-State Air Pollution Rule(CSAPR)という新たな規制を見越したものと考えられる。

図 2： 排出権価格(左軸)とスクラバーの導入率(右辺)



注：青線(左軸)は月毎の排出権価格の推移を示しており、この価格単位はドル／1 排出権(1 SO₂ ショートトン)である。赤線(右軸)はスクラバーの導入率を示す。

4. 誘導型分析

排出権価格が高騰した場合、石炭発電所は 2 つの方法で排出権価格の上昇に対応することができる。一つの方法はスクラバーを設置する固定費用を支払って SO₂ の排出量を減らす方法であり、もう一つの方法は硫黄分の少ない石炭に燃料を変更する方法である。このセクションでは最初に排出権価格の変動がスクラバーの設置に及ぼす影響について誘導型で分析し、次に排出権価格の変動が燃料選択に及ぼす影響について分析する。これらの分析により石炭発電所がどのように排出権価格の変化に対応したかを記述する。

4.1. スクラバーの設置に関する分析

スクラバーの設置については、3 節で説明した発電所レベルのパネルデータを用いて、固定効果モデルを推定することで、排出権価格がスクラバーの設置に及ぼした影響を分析する。発電所 i の時間(年月) t におけるスクラバーの導入ダミーを変数 $Scrubber_{i,t}$ で表し、こ

これを時間(年月) t における発電所 i の総投入熱量 $HeatInput_{i,t}$ 、排出権価格 $PermitPrice_t$ 、および発電所の固定効果に回帰することとし、以下のモデルを推定する。

$$Scrubber_{i,t} = \alpha + \beta HeatInput_{i,t} + \gamma PermitPrice_t + \delta_i + \varepsilon_{i,t}$$

ここで δ_i は発電所の固定効果、 $\varepsilon_{i,t}$ はランダムショックであり、分析の主たる関心は γ の推定値である。

推定結果は表1に示されている。2年、3年、4年のラグを取った排出権価格についてはスクラバーの設置と1%有意水準で正の相関があり、1年のラグを取った排出権価格についても10%有意水準で正の相関があるが、ラグを取らないものについては負の相関がある。この結果については、スクラバーの設置には意思決定から2~3年の時間を要することが影響していると考えられる。熱投入量が有意となっていない点については、発電所固定効果を含んでいることに起因する。当該固定効果をコントロールした後は、同一発電所内における熱投入量の時間を通じた変動が限定的になるため、スクラバー投資への効果も検出しづらくなると考えられる。

表1：スクラバーの設置と排出権価格の関係

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
熱投入量	0.046 (0.0257)	0.0269 (0.0234)	0.0153 (0.0234)	-0.0393 (0.0213)	0.0009 (0.0204)
排出権価格	-0.0016*** (0.0007)				
1年前排出権価格		0.0014* (0.0006)			
2年前排出権価格			0.0054*** (0.0008)		
3年前排出権価格				0.0081*** (0.0009)	
4年前排出権価格					0.0062*** (0.0008)
発電所固定効果	Included	Included	Included	Included	Included
サンプルサイズ	199337	197424	198418	195408	184793
決定係数	0.0039	0.0045	0.0047	0.0069	0.0062

注：*は10%、**は5%、***は1%の有意水準を示す。

4.2. 燃料選択に関する分析

燃料選択についても、3節で説明した発電所レベルのパネルデータを用いるが、発電所ごとに調達可能な炭鉱における石炭種類等の要因により、どの程度のSO₂含有量の石炭を用いているかにより、排出権価格が変更した場合の代替パターンが異なる可能性が高い。そこで、平均的なSO₂含有量への効果ではなく、分位点回帰を行うことで、排出権価格が石炭の選択に及ぼした影響を分析する。発電所*i*の時間*t*におけるSO₂含有比率を $SO_2Rate_{i,t}$ で表し、これを時間*t*における排出権価格 $PermitPrice_t$ 、発電所*i*の1990年時点でのSO₂含有比率 $SO_2RateIn1990_i$ 、に回帰することとし、以下のモデルの分位点回帰を行う。

$$SO_2Rate_{i,t} = \alpha + \beta PermitPrice_t + \gamma SO_2RateIn1990_i + \varepsilon_{i,t}$$

推定結果は表2に示されている。排出権価格の影響は、1パーセントおよび5パーセントといったSO₂含有比率の低い発電所については有意な影響はない一方で、10パーセントでは10%有意で負の関係があり、20パーセント、50パーセントと90パーセントでは1%有意で、95パーセントと99パーセントでは5%有意で排出権価格と燃料のSO₂含有率に負の関係があることを棄却できず、排出権価格が高いほどよりSO₂含有率の低い石炭が燃料として用いられると解釈できる。

1990年段階での石炭選択は常に有意な結果である一方、排出権価格は質の悪い石炭を用いていた発電所のみで有意となっていることから、規制の影響を強く受けたのは低品質の石炭を従来より用いている発電所であり、これらが排出権市場における需要サイドにいたことを示唆している。

表 2：燃料選択と排出権価格の関係

	(1)	(2)	(3)	(4)
Quantile	0.01	0.05	0.1	0.2
定数項	0.3336*** (0.0055)	0.4158*** (0.004)	0.4809*** (0.0044)	0.5413*** (0.0053)
排出権価格	-0.00002 (0.00001)	0.00001 (0.00001)	-0.00001* (0.00001)	-0.00004*** (0.00001)
1990年のSO2排出率	0.0095*** (0.0011)	0.0069*** (0.0013)	0.0263*** (0.0019)	0.0766*** (0.0033)
サンプルサイズ	55512	55512	55512	55512
	(5)	(6)	(7)	(8)
Quantile	0.5	0.9	0.95	0.99
定数項	0.5116*** (0.0061)	0.4042*** (0.0075)	0.5637*** (0.0113)	1.0503*** (0.0276)
排出権価格	-0.0001*** (0.00001)	-0.00006*** (0.00001)	-0.00005** (0.00003)	0.00013** (0.00006)
1990年のSO2排出率	0.4431*** (0.0042)	0.8784*** (0.0031)	0.8886*** (0.0035)	0.9279*** (0.0143)
サンプルサイズ	55512	55512	55512	55512

注： *は 10%、**は 5%、***は 1%の有意水準を示す。

以上 4.1 節および 4.2 節から、石炭火力発電所が排出権価格に応じて、石炭の種類を選択するとともにスクラバーの設置についても考慮していることがうかがえる。そこで、以下では発電所が排出権価格が上昇した際に SO2 含有率の低い石炭への代替やスクラバーの設置といった方法を用いて排出規制を満たそうとすることから、排出権のファンダメンタルバリューはこれらの方法の限界削減費用で計測することができると思われる。

5. 排出権のファンダメンタルバリューとバブル

本節では SO₂ 排出権のファンダメンタルバリューの計測方法について議論する。取引価格とファンダメンタルバリューの差がバブルであることから、ファンダメンタルバリューを計測することができれば、それは直接的にバブルを計測したことと同じと考えられる。

石炭火力発電所にとっては、排出量規制を満たすために SO₂ 排出量 1 トンを減少させるためには(i)排出権を購入する、(ii) スクラバーを設置する (iii) SO₂ 含有量の少ない石炭へと燃料を代替する、という 3 つの方法がある。そして、前節の結果から、排出権価格の上昇とともに石炭火力発電所は排出量規制を満たすために石炭種類の変更やスクラバーの設置を行っている可能性が示唆されており、これら 3 つの手段が代替的であると言える。これら 3 つの手段が代替的である場合、SO₂ 排出量 1 トン分の排出権のある石炭発電所にとっての価値は、(ii)及び(iii)のどちらかより費用の低い方法で排出量 1 トンを減少させる費用（限界削減費用）と同等と考えられる。排出量 1 トンを減少させる費用（＝排出権のファンダメンタルバリュー）の方が排出権価格より高いのであれば排出権を購入し、排出権価格より低いのであれば排出権を売って(ii)及び(iii)の方法で排出量を削減しようとするだろう。

以下ではこの排出権のファンダメンタルバリューである代替的な手段による排出量削減の費用を計測する方法を議論する。具体的には、石炭火力発電所の排出量規制下での費用最小化問題から短期の費用曲線を導出し、これが各発電所にとってのファンダメンタルバリューの推定値の上限となることを示したうえで、その具体的な推定について述べる。

5.1. SO₂ 削減費用と短期の費用最小化問題

この節では石炭火力発電所の制約付き費用最小化問題を考えることにより、費用関数と限界削減費用を求める。発電所の直面する短期の制約付き費用最小化問題は、一定の SO₂ 排出量以下に抑えながら、最も費用の安い石炭燃料を選ぶ問題と定式化できる。なお、発電量については各発電所の意思決定ではなく需要に応じて外生的に決まるものとする。また、スクラバーについてはその設置の意思決定から工事の完了までに 2～3 年ほどの時間がかかることから、ここでの短期の費用最小化問題においてはスクラバーの有無については外生的に扱い、5.2 節でスクラバーの設置まで考慮した長期の限界削減費用について議論することとする。

石炭はその種類により熱量と硫黄分含有量が異なっている。この石炭種類の選択を表すため、ある石炭の含有熱量あたりの SO₂ 排出量を s で表すこととする。石炭種類により石炭

価格は異なるため、含有熱量あたりの価格を $w(s)$ と表すこととする。石炭火力発電所の発電量と石炭の含有熱量との間には線形の関係があり、発電量は需要に応じて外生的に決まることから、 h で表される発電所が投入する石炭の総含有熱量については所与のものとする。よって発電所の直面する短期の費用最小化問題は、排出量規制を無視するのであれば、費用 $w(s)h$ を最小にするように s を選ぶ問題と考えられる。

これまでも議論しているように、スクラバー設備の設置により SO2 の排出量を大幅に減らすことができるため、スクラバー設備の有無によりどのような SO2 含有量の石炭 s を用いるかに影響を及ぼす。そこでスクラバーの SO2 除去率を $\alpha \in [0,1]$ とあらわすこととすると、 h の総含有熱量の下での発電に伴う SO2 排出量 e は $e = (1 - \alpha)sh$ と書くことができる。スクラバーを設置していない場合については $\alpha = 0$ に対応している。スクラバーの運用費用については発生する SO2 の量 sh に依存すると考え、 $\alpha C(sh)$ と書けるとする。

スクラバーについては上記のように意思決定から設置に 2～3 年の時間がかかるとともに、一定の初期投資費用が必要となるため、石炭火力発電所の短期の費用最小化問題においては α を外生的に扱う。つまり、発電所は α を所与として、そして各発電所に許容されている SO2 排出量 \bar{e} を所与として（また、同様に h と $w(\cdot)$ を所与として）、どのような質 s の石炭を用いるかを決定する。よって、 $(\bar{e}, h, \alpha, w(\cdot))$ を所与として、短期の費用最小化問題は以下のように書くことができる。

$$\begin{aligned} \min_s \quad & w(s)h + \alpha C(sh) \\ \text{s.t.} \quad & \bar{e} \geq (1 - \alpha)sh \end{aligned}$$

この費用最小化問題の最適条件は以下のように書くことができ、

$$\frac{\partial w(s)}{\partial s} h + \alpha \frac{\partial C(sh)}{\partial s} h - \lambda(1 - \alpha)h = 0 \quad (1)$$

ここで λ は制約 $\bar{e} \geq (1 - \alpha)sh$ に関するラグランジュ乗数である。この短期の費用最小化問題の解から得られる総費用関数を $TC(\bar{e}, h, \alpha)$ と書くこととする。

我々の関心は排出権のファンダメンタルバリューを計測することであるが、排出権のファンダメンタルバリューは排出量を減少させる限界削減費用であり、 $\partial TC(\bar{e}, h, \alpha) / \partial \bar{e}$ である。ここで包絡線定理から $\partial TC(\bar{e}, h, \alpha) / \partial \bar{e} = \lambda$ であり、これは排出権は上記の制約付き費用最小化問題の制約 $\bar{e} \geq (1 - \alpha)sh$ のシャドープライスに対応しており、(1)式から限界削減費用は

以下のように求められる：

$$\frac{\partial TC(\bar{e}, h, \alpha)}{\partial \bar{e}} = \frac{1}{1 - \alpha} \left(\frac{\partial w(s)}{\partial s} + \alpha \frac{\partial C(sh)}{\partial s} \right) \quad (2)$$

各発電所の α はデータから直接観察することが可能であり、ファンダメンタルバリューである限界削減費用は(2)式を用いることで、関数 $w(\cdot)$ と関数 $C(\cdot)$ を得ることで求めることができる。

なお、ここまでの議論では短期的な費用最小化問題を考慮しており、スクラバー設備の有無については外生的に取り扱ってきた。次節でこの点を議論する。

5.2. 短期と長期の限界削減費用

本節では前節の議論から求められる短期の費用最小化問題の解から得られる限界削減費用が長期の限界削減費用の上限となっていることを示し、よって短期の限界削減費用をファンダメンタルバリューとして計測されたバブルは、長期の限界削減費用をファンダメンタルバリューとしてバブルを計測した場合と比較して、バブルの計測値がより小さくなることを議論する。

最初にスクラバーの設置まで考慮した長期の総費用を考えると、以下のように書くことができる：

$$LRTC(\bar{e}, h) = \min_a TC(\bar{e}, h, a) + E(a) \quad (3)$$

ここで $E(a)$ はスクラバーの設置コストであり、 $a \in \{0,1\}$ はスクラバー設備の有無を表す変数と考える。スクラバーの設置は離散選択であることから、Milgrom and Segal(2003)の離散変数の場合を含んだ包絡線定理を用いることで、以下のように言える：

$$\frac{\partial LRTC(\bar{e}, h)}{\partial \bar{e}} = \frac{\partial TC(\bar{e}, h, a^*)}{\partial \bar{e}} \quad (4)$$

ここで a^* は最適なスクラバー設備の導入であり、長期の限界削減費用は最適なスクラバー

設備の導入を考えた場合の短期の限界削減費用と一致する。

しかしながら、実際のスクラバー設備の導入が最適に行われていない可能性はつねにあり、この場合、短期の限界削減費用は長期の限界削減費用よりも高くなる。つまり、短期の限界削減費用の推定値は長期の限界削減費用の推定値の上限と考えることができる。長期の限界削減費用の測定は必ずしも容易でないことから、ここでは短期の限界削減費用を推定し、これをファンダメンタルバリューの上限値と考えると、結果として取引価格とファンダメンタルバリューの差がバブルであることを考えると、短期の限界削減費用の推定値を用いたバブルの計測値は、バブルの推計値の下限となっている。

なお、この論文におけるファンダメンタルバリューの計測においては石炭の使用の変化から短期の限界削減費用を計測するというアプローチをとっているが、代替的なアプローチとしてスクラバー投資のタイミングを用いてファンダメンタルバリューを計測することも考えられる。後者の場合、スクラバー投資により削減できる排出量に相当する排出権の価値がファンダメンタルバリューに対応しており、スクラバー投資にかかる総費用等との比較検討によりリアルオプション理論を用いてファンダメンタルバリューの計測が可能になる。理論的には市場が十分に機能しているのであれば前者と後者による推計値は極めて近い値となるものと考えられる。しかしながら、市場が十分に機能していない可能性もあり、後者のアプローチも利用することでより正確な計測の可能性が高まると考えられるが、これは今後の課題とする

次節では、この考えに基づき、前節の(2)式を用いて短期の限界削減費用の推定を議論する。

5.3. 燃料費用関数の推定

本節では(2)式に基づいて短期の限界削減費用の推定について議論する。(2)式では関数 $w(\cdot)$ と関数 $C(\cdot)$ を得ることができれば短期の総削減費用が計算でき、これに基づき限界削減費用が計算できることがわかる。なおスクラバーの運転費用 $C(\cdot)$ は比較的小さいため、本分析においては関数 $C(\cdot)$ については捨象して分析を行う。

石炭の質と価格に関する供給関数である $w(\cdot)$ の推定を考える。燃料調達に関するデータセットにおいては、発電所 j の時間(年月) t における調達 k における石炭燃料の価格 $w_{k,j,t}$ 及びSO₂含有量 $s_{k,j,t}$ が記録されている。本データを用いて、以下のようなヘドニック回帰モデルを推定する。

$$\log w_{k,j,t}(s_{k,j,t}) = \gamma_r \log s_{k,j,t} + u_j + u_t + u_{k,j,t} \quad (5)$$

ここで u_j は発電所が所在する州に関する固定効果、 u_t は時間(年・月)固定効果、そして $u_{k,j,t}$ はランダムショックである。SO2含有量の係数 γ_r は、発電所が属する地域によって異なることを許している。これは、地域によって炭鉱へのアクセスが異なることに起因する石炭価格の異質性を捉えるためである。

表3が燃料費用関数の推定結果を示している。州固定効果及び年月固定効果を用いた列[1]では係数は全ての地域において負となっており、これはSO2含有量が低い石炭(すなわち綺麗な石炭)であるほど値段が高いことを示唆している。また、地域2と地域4の係数は絶対値の意味で小さくなっており、より綺麗な石炭を購入しても追加的な費用が低いことを示唆している。この推定結果は、地域2(中西部)と地域4(西部)が、硫黄含有量が低い石炭を多く生産しているPowder River Basinに地理的に近いことによるものと考えられる。以下のバブルの推定においては、州固定効果及び年月固定効果を用いた列[1]の結果を用いる。

表3：燃料価格関数の推定結果

	[1]	[2]	[3]	[4]
log(SO2含有率)*(地域1)	-0.1219*** (0.0046)	-0.1516*** (0.0041)	-0.1172*** (0.0050)	-0.1048*** (0.0038)
log(SO2含有率)*(地域2)	-0.0204*** (0.0016)	-0.0071*** (0.0019)	-0.0230*** (0.0018)	-0.0024 (0.0018)
log(SO2含有率)*(地域3)	-0.1026*** (0.0016)	-0.1290*** (0.0022)	-0.1151*** (0.0021)	-0.1178*** (0.0019)
log(SO2含有率)*(地域4)	-0.0175 (0.0132)	0.3407*** (0.0064)	0.0108 (0.0121)	0.3483*** (0.0059)
サンプルサイズ	140,970	140,970	140,970	140,970
決定係数	0.567	0.06185	0.28223	0.32172
州固定効果	Yes	No	Yes	No
年月固定効果	Yes	No	No	Yes

注：***は1%水準で有意であることを示す。地域は米国センサスの基準による。地域1はNortheast (CT, ME, MA, NH, RI, VT, NJ, NY, PA), 地域2はMidwest (IL, IN, MI, OH, WI, IA, KS, MN, MO, NE, ND, SD), 地域3はSouth (DE, DC, FL, GA, MD, NC, SC, VA, WV, AL, KY, MS, TN, AR, LA, OK, TX), そして地域4はWest (AZ, CO, ID, MT, NV, NM, UT, WY, AK, CA, HI, OR, WA)である。

5.4. バブルの推定

前節の方法で(5)式を用いて関数 $w(\cdot)$ を推定し、これに基づいて(2)式に基づいて短期の限界削減費用を計測する事ができる。5.2節で議論したように、この短期の限界削減費用は長期の限界削減費用を上回ることから、排出権の取引価格と短期の限界削減費用の差はバブルの計測値の下限となっている。

(5)式に基づいて、SO₂含有率に対する石炭の限界価格を以下のように計算することができる。

$$\frac{dw(s)}{ds} = \gamma_r s^{\gamma_r - 1} \cdot \exp(u_j + u_t + u_{kjt}) \quad (6)$$

この推定結果に基づいて限界価格を計算し、(2)式に代入することで、排出権のファンダメンタルバリューを計算することができる。

6. 推定結果

6.1. 推定値

本節では短期の限界削減費用の推定結果、およびその推定値から導かれるバブルの計測結果を示す。なお、以下の推定結果では、外れ値への対処として、限界削減費用の推定値の99%分位点においてトップコーディングしている。

表4：限界削減費用の推定値

	Mean	Std.Dev	25%	Median	75%
Scrubber なし	183.3	285.8	53.9	116.8	227.0
Scrubber あり	1,188.7	1,745.3	175.9	473.0	1,272.6

注：SO₂の1ショートトンあたりの限界削減費用の推定値を示している。単位は米ドル。

表4は限界削減費用の推定結果を全期間を通してスクラバーの有無ごとに集計したもの

である。スクラバーが導入されていない発電所の限界削減費用は1ショートトン当たり中央値が116.8ドルなのに対して、スクラバーが導入されている発電所については473.0ドルであり、スクラバーの有無により限界削減費用が大幅に異なることが示されている。この差は、すでにスクラバーが存在していることから、追加的にSO₂の排出を削減することが難しくなっていることを反映している。第一四分位点と第三四分位点を見ても同様であり、スクラバーが導入されていない発電所の限界削減費用についてはそれぞれ53.9ドルと227.0ドルであるのに対して、スクラバーが導入されている発電所ではそれぞれ175.9ドルと1272.6ドルとなっている。なお、平均については第三四分位点と比較してもさらに高い数字となっており、これは一部の発電所について極端に大きな推計値が得られていることに起因している。

なお、スクラバーへの投資は不可逆でありサンクコストとなるため、排出権のファンダメンタルバリューにより対応しているのはスクラバー投資をする前の発電所の限界削減費用であると考えられる。一方で何らかの理由（政府による排出権規制の一層の強化等）によりスクラバー投資後の発電所についても追加的な削減を考慮する可能性があることもあり、また投資後の発電所のファンダメンタルバリューがより高いことから、バブルの推計値の下限としては後者の推定値を用いることも意味があることから、以下では両者を推計値として議論を進める。

表5および図3は限界削減費用の推定結果をスクラバーの有無について年ごとに集計したものである。中央値、各四分位点、平均のいずれにおいても全ての年においてスクラバーが導入されている発電所の限界削減費用が高いことが示されている。図3の限界削減費用の経時的な変化を示した図からは、スクラバーが導入されていない発電所の限界削減費用は2003年ごろまでは市場価格とはあまり大きな乖離がないが、2003年から2008年にかけての排出権価格の高騰時には限界削減費用自体は上昇はしているものの、取引価格の上昇と比較するとその上昇幅は小さく、排出権取引価格と限界削減費用は大きく差が開いていることが見て取れる。スクラバー導入済みの発電所についても同様のパターンが読み取れる。これら両タイプの発電所にとっての排出権のファンダメンタルバリューである限界削減費用が、両タイプの発電所いずれも2003年～2008年ごろにかけて取引価格との間に大きな差が生じていることから、この期間にはバブルが生じていたと考えることができる。⁵

⁵ このことは政府の規制の強化とそれに伴う将来的な更なる規制の強化の可能性がバブルの発生の要因となっていたことを示唆している。一方で、排出権は翌年への持ち越しが可

表5：限界削減費用の年毎の推定値

	Mean	Std.Dev	25%	Median	75%		Mean	Std.Dev	25%	Median	75%
1995	101.7	230.4	24.2	73.7	124.5	1995	761.7	1,021.8	86.8	307.7	1,184.2
1996	87.3	135.7	21.3	64.6	113.7	1996	731.7	921.4	88.6	377.5	1,045.5
1997	124.2	237.2	39.5	86.2	174.0	1997	495.9	833.9	80.4	212.6	501.9
1998	128.0	235.0	40.4	88.0	176.8	1998	468.2	790.2	74.0	198.1	501.4
1999	127.4	196.2	40.0	88.0	180.0	1999	463.5	812.7	72.1	200.6	501.4
2000	126.9	185.8	41.9	88.3	177.2	2000	497.8	822.5	88.1	230.3	530.9
2001	158.1	255.6	50.3	112.6	211.2	2001	652.7	1,053.9	101.2	286.6	699.1
2002	148.2	179.6	49.7	107.7	206.8	2002	688.4	1,148.6	113.6	281.8	736.5
2003	154.4	210.5	50.9	108.6	207.3	2003	704.4	1,146.1	112.9	301.2	792.6
2004	185.9	263.6	62.4	124.1	244.7	2004	917.7	1,355.9	158.3	413.5	1,012.1
2005	211.6	243.4	71.2	146.0	284.5	2005	1,087.6	1,599.4	189.3	463.3	1,157.3
2006	224.6	304.2	76.8	148.7	288.2	2006	1,195.1	1,719.3	208.0	512.8	1,347.1
2007	213.8	309.2	71.9	135.4	275.6	2007	1,275.1	1,798.6	205.9	547.0	1,479.6
2008	294.4	373.4	100.7	186.9	391.9	2008	1,580.8	2,007.7	294.8	775.1	1,856.1
2009	319.0	463.8	102.8	188.4	396.6	2009	1,881.9	2,206.9	363.5	862.1	2,760.0
2010	261.4	360.4	85.9	149.0	336.6	2010	1,806.9	2,085.6	377.6	836.3	2,714.7
2011	272.6	432.9	94.1	153.4	327.1	2011	1,915.2	2,186.8	393.4	863.6	2,952.5

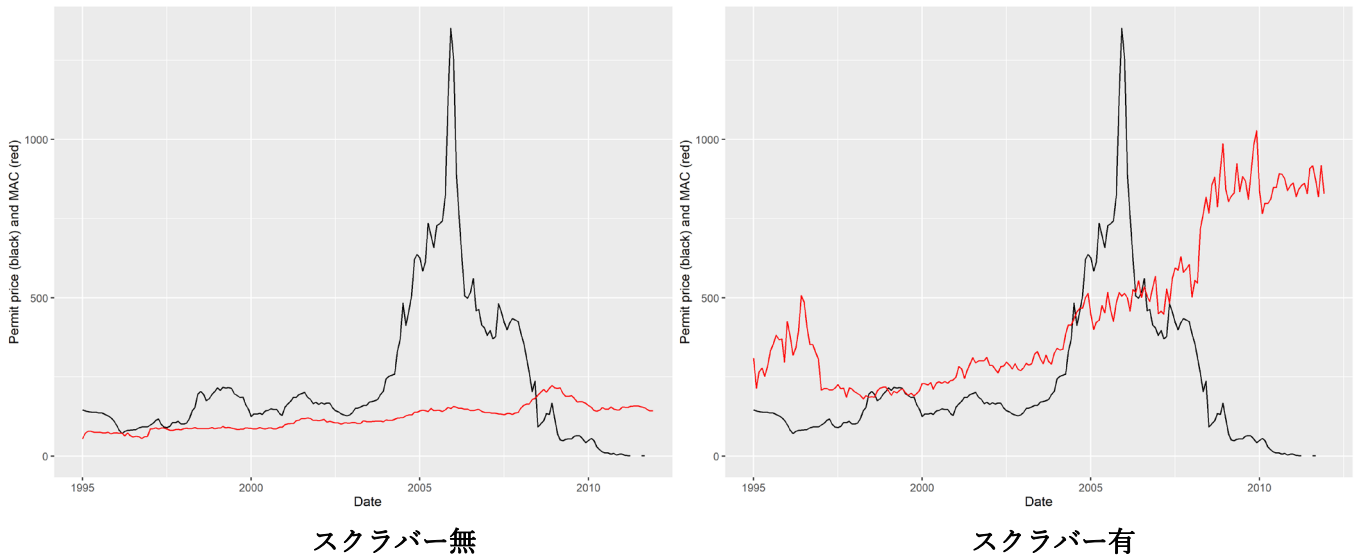
スクラバー無

スクラバー有

注：SO₂の1ショートトンあたりの限界削減費用の推定値。単位は米ドル。

能なため、本論文では、発電所が異時点間の排出権の取引について最適化しているという仮定の下では、限界削減費用をファンダメンタルバリューと考えてバブルを計測している。

図3：限界削減費用と排出権価格のプロット：スクラバーの有無



注：黒実線はSO₂ 排出権1単位(SO₂ の1ショートトンに相当)の価格である。赤実線は、SO₂ の1ショートトンの限界削減費用の推定値について各月ごとに中央値を取ったものである。単位は米ドル。

表6は、表5及び図3で示された価格と限界削減費用の差を示したものであり、各発電所レベルでのスクラバーの有無に応じたバブルの推計値の下限を示したものである。中央値で見るとスクラバーが導入済の発電所については2005年と2006年、第3四分位点で見ると2008年までのほぼ全ての年において排出権価格が限界削減費用を上回っていることが分かる。スクラバーが導入されていない発電所に関しては中央値及び第3四分位点のいずれも2008年、2009年までは排出権価格が限界削減費用を上回っていた。これらを総合すると、少なくとも2005年から2006年の時期には1ショートトンあたり数百ドルのレベルでバブルが発生していたと考えることができる。なお、これまで議論しているように一部の発電所の限界削減費用が極めて高く推計されてしまっているため、平均の数字に基づいた議論は行わない。

表 6：(排出権価格－限界削減費用) の年毎の推定値

	Mean	Std.Dev	25%	Median	75%		Mean	Std.Dev	25%	Median	75%
1995	32.9	230.7	9.3	62.1	108.3	1995	-627.1	1022.5	-1043.1	-167.2	47.9
1996	-1.3	136.1	-30.4	21.8	62.8	1996	-645.7	921.3	-958.2	-289.3	-3.1
1997	-21.4	237.3	-70.5	16.9	64.9	1997	-393.0	833.9	-400.8	-109.2	22.2
1998	37.2	238.4	-10.5	72.1	129.9	1998	-303.5	791.1	-336.9	-41.6	72.7
1999	69.3	197.2	16.5	107.8	157.2	1999	-267.0	813.1	-303.1	-4.5	117.9
2000	11.3	186.0	-37.8	50.0	95.5	2000	-359.6	822.6	-392.2	-95.3	48.4
2001	22.5	255.8	-31.2	67.7	129.3	2001	-472.3	1053.7	-520.6	-106.4	77.2
2002	0.9	180.0	-54.7	39.1	97.7	2002	-539.4	1148.8	-592.2	-133.8	40.2
2003	13.4	211.1	-39.9	56.8	115.0	2003	-536.6	1146.2	-619.1	-132.3	53.3
2004	216.4	289.7	116.2	227.1	366.1	2004	-514.2	1358.2	-591.0	-38.3	200.1
2005	573.5	323.7	432.8	567.2	683.3	2005	-303.6	1610.0	-421.3	293.8	546.6
2006	387.4	382.0	247.1	379.8	514.3	2006	-580.9	1737.5	-747.3	58.5	353.3
2007	202.4	311.0	141.0	274.2	344.1	2007	-858.6	1798.4	-1054.4	-124.9	214.2
2008	-85.8	394.5	-201.2	-10.7	118.3	2008	-1372.7	2016.8	-1664.6	-599.1	-80.5
2009	-256.6	463.9	-329.3	-126.9	-40.9	2009	-1819.9	2207.2	-2694.9	-798.3	-293.8
2010	-238.9	361.2	-311.0	-129.9	-64.0	2010	-1784.8	2085.9	-2689.0	-812.1	-351.4
2011	-267.0	387.3	-324.8	-151.0	-92.6	2011	-1908.5	2201.0	-2936.8	-867.6	-378.5

スクラバー無

スクラバー有

注：排出権価格から SO2 の限界削減費用を引いた値に基づいて各種統計量を計算している。正の場合は排出権価格の方が限界削減費用よりも高く、負の場合はその逆を意味する。

表 7：限界削減費用及び(排出権価格－限界削減費用)の地域別の推定値

スクラバー有

Panel A: 限界削減費用

	Mean	Std.Dev	25%	Median	75%
Northeast	1630.5	1401.8	722.2	1102.6	2238.4
Midwest	443.1	916.9	79.5	174.3	409.8
South	2012.5	2216.5	426.4	1001.2	2919.2
West	373.9	473.5	92.4	225.0	467.5

Panel B: 排出権価格－限界削減費用

	Mean	Std.Dev	25%	Median	75%
Northeast	-1413.5	1390.6	-2043.5	-971.6	-487.8
Midwest	-202.3	939.1	-227.3	6.9	127.3
South	-1739.9	2222.9	-2578.5	-730.8	-209.9
West	-122.3	511.8	-276.9	-8.0	117.0

スクラバー無

Panel A: 限界削減費用

	Mean	Std.Dev	25%	Median	75%
Northeast	311.7	509.7	109.5	150.4	355.6
Midwest	74.7	175.1	29.1	56.6	98.8
South	291.4	269.3	167.8	239.4	348.6
West	64.6	133.2	36.3	47.3	66.6

Panel B: 排出権価格－限界削減費用

	Mean	Std.Dev	25%	Median	75%
Northeast	-56.0	544.4	-155.7	25.5	98.2
Midwest	172.9	280.0	56.9	117.5	233.4
South	-37.6	340.4	-145.3	-31.8	71.7
West	178.0	254.3	68.3	121.9	195.1

注：地域の定義については表 3 の注を参照。

表7はこれまで示してきた限界削減費用及びその取引価格との差を地域別に示したものである。左図はスクラバーが導入済の場合、右図はスクラバーが導入されていない場合に対応している。スクラバーの導入の有無にかかわらず、いずれの場合においても中西部と西部の限界削減費用が南部および北東部と比較すると大幅に低いことが確認できる。排出権の取引価格は全国一律の為、排出権価格と限界削減費用の差については中西部と西部で大きく、スクラバーが導入されていない場合、中西部及び西部では大半の発電所において排出権価格が限界削減費用を上回っている一方、北東部と南部のスクラバー導入済の発電所においては多くの場合、排出権価格を限界削減費用が上回っている。この理由としては、中西部及び西部においては硫黄分含有量の低い石炭がより低い費用で調達が可能であるのに対して、北東部及び南部においては硫黄分含有量の高い石炭が主に用いられており、輸送費を含め、より高品質な石炭への代替に高い費用が掛かることが原因として考えられる。

表8：限界削減費用及び（排出権価格－限界削減費用）の発電所規模別の推定値

スクラバー有						スクラバー無					
Panel A: 限界削減費用						Panel A: 限界削減費用					
	Mean	Std.Dev	25%	Median	75%		Mean	Std.Dev	25%	Median	75%
発電所サイズ：0-25%	1544.1	2117.3	226.0	628.2	1656.6	発電所サイズ：0-25%	159.6	349.1	41.6	94.5	182.8
発電所サイズ：25-50%	1127.5	1487.3	225.0	552.7	1212.7	発電所サイズ：25-50%	185.4	368.9	58.4	117.9	202.1
発電所サイズ：50-75%	1138.5	1712.8	181.8	410.3	1228.4	発電所サイズ：50-75%	159.9	221.3	47.7	104.2	201.3
発電所サイズ：75-100%	1161.5	1752.6	155.0	424.3	1262.2	発電所サイズ：75-100%	211.3	221.0	68.5	141.8	296.2
Panel B: 排出権価格－限界削減費用						Panel B: 排出権価格－限界削減費用					
	Mean	Std.Dev	25%	Median	75%		Mean	Std.Dev	25%	Median	75%
発電所サイズ：0-25%	-1334.9	2129.8	-1414.9	-525.0	-33.6	発電所サイズ：0-25%	87.9	399.1	-19.1	86.7	180.5
発電所サイズ：25-50%	-861.1	1493.6	-985.3	-300.1	-8.4	発電所サイズ：25-50%	62.3	425.6	-45.4	69.1	167.9
発電所サイズ：50-75%	-869.9	1696.6	-980.0	-207.7	41.9	発電所サイズ：50-75%	89.7	309.5	-33.5	74.9	171.4
発電所サイズ：75-100%	-902.9	1755.3	-1026.5	-232.5	54.6	発電所サイズ：75-100%	43.4	305.9	-89.6	46.8	145.7

注：発電所のサイズについて、発電所ごとの年間合計の熱投入量を計算し、そのサンプル期間の中央値にもとづいて定義している。

表8は限界削減費用及びその取引価格との差を発電所の規模別に示したものである。これまでと同様にスクラバー導入済の発電所はスクラバーが導入されていない発電所と比較し限界削減費用が高いことがわかる。また、発電所の規模と限界削減費用の関係をみるとスクラバーの有無により傾向が逆になることが示唆されている。すなわち、スクラバーが導入されていない場合、発電所の規模がより小さい場合に限界削減費用が比較的低くなる一方

で、スクラバーが導入されている場合には逆に発電所規模がより小さい場合に限界削減費用が高くなる傾向がみられる。しかしながら、限界削減費用の標準偏差が平均と比べて非常に大きいため、解釈には注意を要する。

7. 結論

本研究では米国の SO₂ 排出権市場における排出権価格のバブルの発生について考察した。通常、バブルの可能性のある資産のファンダメンタルバリューを測定することは困難であるが、SO₂ 排出権については SO₂ 排出量の限界削減費用がファンダメンタルバリューとなることを利用し、本論文では発電所レベルでの排出権のファンダメンタルバリューを推計することで、バブルの発生を識別する方法を提示した。各発電所が SO₂ 排出量規制を満たすために排出権を購入する代わりに、硫黄分の少ない石炭への代替や硫黄分除去装置（スクラバー）を設置することにより、追加的な費用で排出量を削減することが可能であることを利用している。限界削減費用がファンダメンタルバリューとなるため、SO₂ 排出権の取引価格と計測された限界削減費用の差がバブルとなり、これを計測する事で、発電所単位でバブルの識別が可能となる。

本論文での推計値では、2005 年から 2006 年にかけての時期において大半の発電所にとって排出権価格がそのファンダメンタルバリューである限界削減費用を大幅に上回っており、SO₂ 排出量 1 ショートトン当たり数百ドル相当のバブルが発生していたといえる。また、スクラバーを導入していない発電所において特にファンダメンタルバリューと排出権価格の差が大きく、また中西部及び西部の発電所において排出権価格と限界削減費用の差が大きいことが示された。

この分析により各発電所についてデータ期間における排出権のファンダメンタルバリューが計算できたことから、次に分析すべきは推定された限界削減費用と排出権の取引行動の関係である。取引費用が存在しないような状況においては、排出権価格が限界削減費用を上回る場合に各発電所が排出権を売り、また排出権価格が限界削減費用を下回る場合は排出権を購入するという行動が想定される。しかしながら、前者のような場合に各発電所が排出権を売らないだけでなく、むしろ購入するような行動をとっているのであれば、「バブルに乗る」ような行動をしていたことを示すことが可能となる。このバブル下の行動については非常に興味深い、ここでは将来の研究課題とする。

参考文献

鈴木雅貴 (2019) “株式バブルの発生メカニズムとその識別” *現代ファイナンス*, 41, 1-25.

Giglio, S., M. Maggiori, and J. Stroebel (2016) “No-Bubble Condition: Model-Free Tests in Housing Markets,” *Econometrica*, 84(3), 1047-1091.

Lamont, A. O. and R. Thaler (2003) “Can the Market Add and Subtract? Mispricing in Tech Stock Carve-outs,” *Journal of Political Economy*, 111(2), 227-268.

Joskow, P. and R. Schmalensee (1998) “The Political Economy of Market - Based Environmental Policy: The U.S. Acid Rain Program,” *Journal of Law and Economics*, 41(1), 37-83.

Jovanovic, B. (2013) “Bubbles in Prices of Exhaustible Resources,” *International Economic Review*, 54(1), 1-34.

Milgrom, P. and I. Segal (2002) “Envelope Theorems for Arbitrary Choice Sets,” *Econometrica*, 70(2), 583-601.

Schmalensee R. and R. N. Stavins (2013) “The SO2 Allowance Trading System: The Ironic History of a Grand Policy Experiment,” *Journal of Economic Perspectives*, 27(1), 103-122.

Temin, P. and H.J. Voth (2004) “Riding the South Sea Bubble,” *American Economic Review*, 94(5), 1654–1668.

Xiong, W. and J. Yu (2011), “The Chinese Warrants Bubble,” *American Economic Review*, 101(6), 2723–53.