

Title	京都議定書遵守による国際的産業構造変化と炭素リーケージ：動学的応用一般均衡モデルによる分析
Author(s)	爲近, 英恵; 伴, 金美
Citation	大阪大学経済学. 2006, 55(4), p. 91-105
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/15289
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

京都議定書遵守による国際的産業構造変化と炭素リーケージ¹

—動学的応用一般均衡モデルによる分析—

爲 近 英 恵²・伴 金 美³

要 旨

本論文は、動学的応用一般均衡モデルを用い、京都議定書の遵守が世界経済に及ぼす影響を国際的な産業構造の変化に焦点を合わせて分析し、その結果として炭素リーケージがどの程度生じるのかを明らかにする。本論文の分析の特徴は、米国とオーストラリアの京都議定書からの離脱を前提としていることである。なお、二酸化炭素排出量を削減する方法としては、削減義務を負う各国が単独で削減を行う場合と削減義務を負う国同士で排出権取引を行う場合の2つがあり、これを比較する。分析結果によれば、削減国におけるエネルギー集約産業の生産量は、単独で削減する場合は最大20%減少し、排出権取引を行う場合は最大8%程度減少する。その結果、炭素リーケージは、単独で削減する場合は53%であり、排出権取引を行う場合は27%となる。排出権取引を行うことで削減国の負担は緩和されるので産業移転と炭素リーケージは縮小する。なお、単独で削減する場合も排出権取引を行う場合も、炭素リーケージは先行研究と比較して大きい。これは本論文では米国を非削減国として扱っていることによるものである。さらに、米国への産業移転と炭素リーケージが大きな比重を占めることが示される。

JEL classification: C68, Q50

キーワード：応用一般均衡モデル、京都議定書、産業構造変化、炭素削減、炭素リーケージ

1. はじめに

気候変動に関する国際連合枠組み条約第3回締約国会議（京都会議、1997）で附属書B締約国⁴（先進国・移行経済国を含む）における温室効果ガスの排出削減目標が設定された。これによれば、附属書B締約国は第1約束期間

の2008年から2012年の温室効果ガス排出量を1990年レベルから平均5.2%削減することになる。しかし、京都議定書を批准した附属書B締約国（以下、「附属書B締約批准国」という）のみが二酸化炭素削減対策を講じることから、附属書B締約批准国において相当量の排出削減がされても、発展途上国の二酸化炭素排出量が増加するという影響（以下、「炭素リーケージ」という）が懸念されている。特に、米国が離脱した京都議定書の枠組みでは、米国への炭素リーケージが生じる可能性も考えられ、炭素リーケージの値が大きければ、京都議定書の有効性は低いものになる。

Jean-Marc Burniaux and Joaquim Olivera Martins (2000) は、一国あるいは一部の国のグループが二酸化炭素排出量の削減を行った場合、環境効率性に問題が生じることを指摘している。そ

¹ 本論文作成にあたり、大阪大学大学院経済学研究科 阿部顕三教授、大阪大学社会経済研究所 西條辰義教授に貴重なご意見を頂いた。ここに感謝の意を表す。なお、本稿における誤りあるいは不十分な点は全て筆者の責任に帰するものである。

² 大阪大学大学院経済学研究科後期課程, dg069th@mail2.econ.osaka-u.ac.jp

³ 大阪大学大学院経済学研究科, ban@econ.osaka-u.ac.jp

⁴ オーストラリア、ブルガリア、カナダ、クロアチア、EU25（キプロス・マルタは除く）、日本、リヒテンシュタイン、モナコ、ニュージーランド、ノルウェー、ルーマニア、ロシア連邦、スイス、ウクライナ、米国。

の原因として、第一に、特定の諸国での排出量の削減にとどまるので、世界全体の二酸化炭素排出量からすれば、その影響が小さくなる可能性がある。第二に、削減を行わない諸国で二酸化炭素排出量が増加することで、世界全体の二酸化炭素排出量の減少量が小さくなる可能性がある。第三に、炭素リーケージは、排出規制のない国の産業が炭素税を支払わなければならない国に対して競争的優位をもつ「ただ乗り」効果を生み出し、排出削減の協定に参加しないインセンティブを生む。

Burniaux and Martins (2000) と天野 (1997) によると、炭素リーケージはエネルギー市場と非エネルギー市場の両チャンネルを通じて生じる。すなわち、エネルギー市場では削減を行う国の化石燃料需要量の減少により世界の化石燃料価格が低下する。これにより削減を行わない国での化石燃料需要量が増大する。また、エネルギー価格の低下はエネルギー輸出国の交易条件（輸出価格／輸入価格）を不利化し、エネルギー輸入国の交易条件を有利化するので、国際規模の所得再分配が起こる。

さらに、非エネルギー市場では、エネルギー集約財の生産拠点が削減を行わない地域へ移転するという「貿易転換効果」が生じる。つまり、削減を行う国ではエネルギー価格の上昇に伴いエネルギー集約財の生産コストが上昇する。このため削減を行わない国へ生産拠点が移転するので、削減を行う国のエネルギー集約産業は国際市場でのシェアを失う。

本論文は、応用一般均衡モデルである GTAP-EG モデル (Rutherford and Paltsev, 2000) を用いて、附属書 B 締約批准国が京都議定書を遵守した際に京都議定書が各国経済に及ぼす影響を国際間の産業配置の変化と炭素リーケージに焦点を当てて動的的に分析を行う。ここでは、第 1 約束期間を含む 2006 年から 2015 年において、各国が単独で削減を行うケースと削減国間で排出権取引を行うことで限界削減費用を均

等化するケースの 2 つについて分析する。

本論文の主要結論は以下のとおりである。単独で削減する場合、削減国のエネルギー集約産業の生産量は最大 20% 減少し、炭素リーケージは 53% に達する。これに対して、削減国間で排出権取引を行う場合、削減国のエネルギー集約産業の生産量は最大 8% 減少し、炭素リーケージは 27% にとどまる。すなわち、排出権取引を行うことで限界削減費用を低下させることが可能となり、その結果、産業移転や炭素リーケージがともに軽減されることが分かる。さらに、より重要な事実として、附属書 B 締約離脱国である米国への産業移転や炭素リーケージが大きいことが明らかにされる。

炭素リーケージを評価する応用一般均衡モデルを用いた分析はこれまでも多く行われている。Light *et al.* (1999) は GTAP モデルを用いて、石炭市場の統合度に焦点をあてた分析をしている。ここでは、附属書 B 締約国が単独で削減を行う場合（排出権取引は行わない）の炭素リーケージが、各国の石炭財が国際石炭市場において完全代替であるときは 40% (2010 年)、不完全代替であるときは 20% (2010 年) と試算している。Bollen *et al.* (1999) は、WorldScan モデルを用いて、エネルギー効率革新が標準的に向上する場合と急速に起こる場合の 2 ケースについてリーケージを試算している。これによると、エネルギー効率が標準的に向上するケースにおいて、附属書 B 締約国が単独で削減を行う場合の炭素リーケージが 20% (2010 年)、附属書 B 締約国間で排出権取引を行う場合の炭素リーケージが 19% (2010 年) である。また、Manne A. *et al.* (1998) は、Merage 3.0 を用いて、炭素リーケージの大きさを見積もったが、附属書 B 締約国が単独で削減を行う場合、炭素リーケージは 20%⁵ (2010 年) である。さらに、Babiker and Jacoby (1999) は、

⁵ Jean-Marc Burniaux and Joaquim Olivera Martins が Manne and Richel (1998) の論文に掲載されている figure

EPPA-GTAP を用いて、京都議定書が経済に与える影響についての分析を行った。Babiker 等の分析するところでは、附属書 B 締約国では生産コストの上昇に伴い、エネルギー集約産業が途上国へ移転する。これを受けて、産業が移転することで利益を受ける途上国もあるが、附属書 B 締約国が輸出国として大きなシェアを占めていた途上国では損失を被る。そして、附属書 B 締約国が単独に削減を行った場合、その炭素リーケージは 6% (2010年) になる。

McKibbin *et al.* (1999) も、国際貿易のシステムと資本移動に焦点をあて、京都議定書が経済に与える影響について G-Cubed を用いた定量分析を行っている。炭素リーケージは、附属書 B 締約国が単独で削減を行うケースが 6%、附属書 B 締約国間で排出権取引を行った場合が 7%、附属書 B 締約国間で排出権取引を行うが取引量に制限を設けたケース (Double Umbrella もしくは Double Bubble) が 6% (それぞれ2010年の値) という試算がなされている。

ところで、上記のいずれの先行研究においても、二酸化炭素排出量の削減国に京都議定書から離脱した米国とオーストラリアが含まれている。しかし、米国とオーストラリアは現在発効している京都議定書を批准しておらず、排出削減を行わない。そこで、本論文では米国とオーストラリアを非削減国として扱い、シミュレーションを行っている。米国が削減を行わない枠組みにおいては炭素リーケージは大きくなり、削減国が排出権取引なしの単独で削減する場合が 53%、排出権取引を行う場合が 27% である。米国への炭素リーケージが生じることで、先行研究の炭素リーケージと比較して大きくなる。

本論文の構成は次のとおりである。つづく 2 章では、分析に用いるモデルについて言及し、

3 章でシミュレーションの諸結果の考察を行う。最後に、4 章で結論・まとめを述べる。

2. Dynamic GTAP - EG モデル

本論文の分析に用いるモデルは、動学的応用一般均衡モデルとして知られる GTAP-EG (Rutherford and Paltsev, 2000) に基づいている。GTAP-EG モデルとは、米国コロラド大学の Rutherford 教授が、GTAP データ⁶⁾を基本に、国際エネルギー機関 (IEA) の作成した化石燃料などのエネルギーデータと二酸化炭素排出量データを統合し、新たなデータを作成し、それをベンチマークデータとして作成した Forward-looking 型の動学的応用一般均衡モデルである。

GTAP-EG モデルにおける財と要素のフローを表したものが図 1 である。モデルでは、各国・地域ごとに、企業と家計の 2 つの取引主体の存在が仮定されている。GTAP-EG では、家計と政府は統合され地域家計という広義の取引

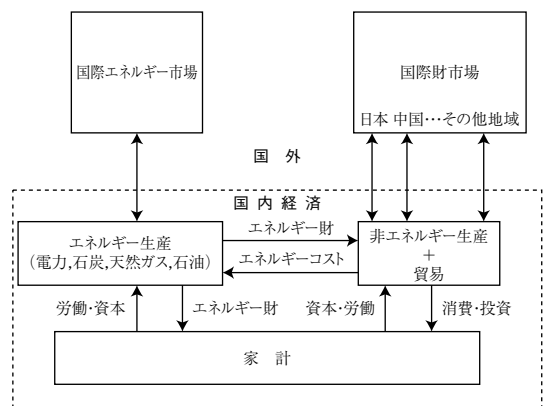


図 1 GTAP-EG モデルにおける財と要素のフロー

6.1より推定した値を用いた。Carbon Emission Leakages: A General Equilibrium View (2000) を参照。

⁶⁾ 米国パデュエ大学の T. Hertel 教授グループが中心に作成した国際的な産業・貿易取引データをまとめたデータベースであり、応用一般均衡モデルとして広く用いられる。

⁷⁾ 本論文の GTAP-EG モデルでは、基準年データとして GTAP, version 5, IEA の 95年のエネルギーデータと二酸化炭素排出量データを使用している。

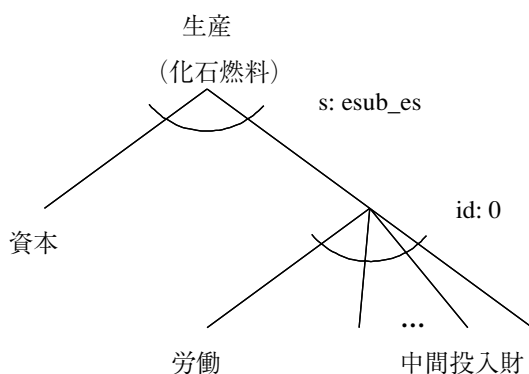
主体として表される。したがって、政府は税を徴収する主体であるが、税収は家計に一括して移転される。家計は予算制約のもと効用を最大化するように消費と投資を決定するが、消費と貯蓄には政府消費と政府貯蓄が含まれる。

家計は生産要素である労働と資本を企業部門に供給し、対価として所得を得る。この所得に政府から一括して移転された税収を加えたものが家計の予算制約である。所得と税収から地域家計所得が決まり、消費と貯蓄に配分される。なお、貯蓄はラムゼイ型動学的最適行動に基づいて決定される。モデルでは、労働は国・地域内でのみ移動可能であり、資本は国際間で移動可能であると仮定されている。したがって、賃金は各国で異なるが資本収益率は世界共通である。

企業は規模に関して収穫一定の技術を持ち、生産量を所与として中間投入と生産要素投入を費用最小化原理に基づいて決定する。生産される財には化石燃料（石炭、石油、天然ガス）と非化石燃料（電力、石油精製を含む）があり、その生産方法は異なる。

各国は財の貿易を通して世界経済と関係している。なお、各国で生産された財は同質ではなく、不完全に代替する財であると仮定されている (Armington, 1989)。したがって、財の貿易は国間のフローとして表される。

GTAP-EG モデルにおいて生産構造は、以下



注) 右かたの数値は弾性値である。

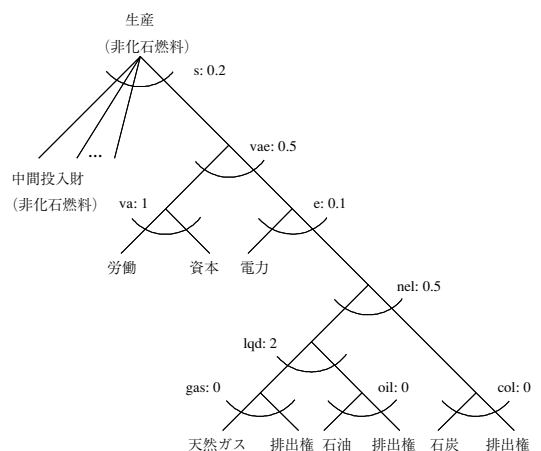
図2 化石燃料生産

の化石燃料生産と非化石燃料生産の2構造である。

化石燃料生産には、石炭、天然ガス、石油の生産が含まれる (図2参照のこと)。化石燃料生産の構造は2段階からなる。まず、労働と中間投入財 (アーミントン集計済) がレオンチェフ型関数で合成され、これと資本がCES型関数に従って統合し生産が行われる。資本と資本以外の合成の代替弾力性 (s:esub_es) は、資本投入量のシェアの大きさ、地域・産業により各々異なる。

非化石燃料生産 (電力と石油精製を含む) の生産構造は多段複合型である (図3参照のこと)。まず、各化石燃料と排出権 (もしくは炭素税) がレオンチェフ型関数で集計される。次に、化石燃料のうち、石油と天然ガスがCES型関数で結合され、さらに石炭とCES型で結合され、最後に、電力とCES型生産関数で合成され、エネルギーとなる。一方、資本と労働はコブ・ダグラス型関数で合成されて付加価値を形成する。付加価値とエネルギーはCES型関数で結合され、さらに、非エネルギー中間財とCES型関数で結合されて、非化石燃料生産は行われる。

家計の最終需要は附属資料における図4に示されるような効用関数の構造に基づいて決定さ



注) 右かたの数値は弾性値である。

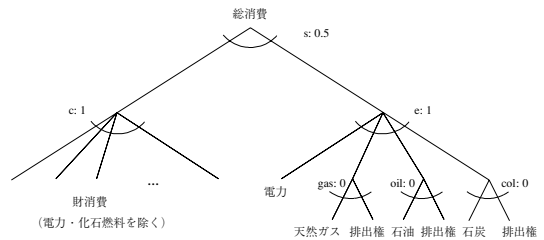
図3 非化石燃料生産

れる。効用関数は多段であり、化石燃料については各化石燃料と排出権（もしくは炭素税）がレオンチェフ型関数で結合され、これと電力とがコブ・ダグラス型関数で結合されている。一方、非エネルギー財もコブ・ダグラス型関数で結合される。最後に、エネルギー財と非エネルギー財が CES 型関数で結合されている。

GTAP-EG モデルでは、国内財と輸入財は不完全代替、すなわち異なる財としてあつかわれるアーミントンの仮定が用いられる。したがって、最終需要、あるいは、中間投入財が与えられると、それが国内財と輸入財に振り分けられるようになっている。国内財・輸入財代替弾力性を4、輸入国間の代替弾力性を8と仮定する。各地域からの輸入は輸送サービスを要する。国際輸送は各地域における国内マーケットで提供されるコブ・ダグラス型複合財であると仮定されている（図5参照のこと）。

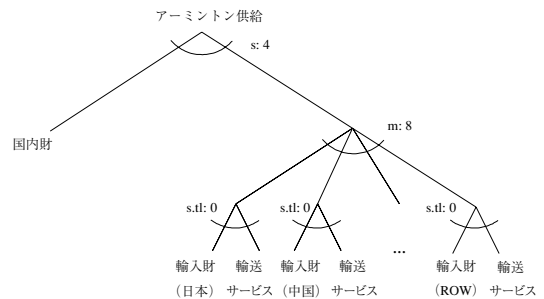
本論文の動学的モデルは、無限期間生存する代表的家計を仮定しているが、モデルを数値的に解くために最終期を設定する必要がある。そこで、最終期においては投資の成長率と総生産量の成長率が等しくなるという終端条件をおく⁸。

本論文では、世界の地域・国の区分を10地域に集計している。まず、削減国については、批准国である日本、カナダ・ニュージーランド、拡大EUと旧ソ連の4地域である。京都議定書附属書B締約離脱国の影響を見るために、米国とオーストラリアはそれぞれ単独の一国として扱う。非附属書I締約国の区分については、二酸化炭素排出量の増大が見込まれる中国、インドをそれぞれ単独の一国として扱うとともに、経済成長が著しいNIEsとASEANを東アジアとして集計して扱っている。国・地域の区



注) 右かたの数値は弾力値である。

図4 最終需要



注) 右かたの数値は弾力値である。

図5 アーミントン集計

分は表1でまとめてある。

産業は12産業に集計する。なお、二酸化炭素の発生源であるエネルギー産業は、化石燃料産業の石炭、石油、天然ガス、エネルギー生産産業の石油精製、電力で、GTAP-EG内の区分をそのまま採用する。非エネルギー産業のうちエネルギー集約産業への影響は詳細に見る必要があるので、鉄鋼業と化学、その他製造業の3産業に集計する。エネルギー資源の消費が多い運送業も単独で扱う。そのほかの非エネルギー産業には、農業、機械、サービスがある。産業の区分は表2に示す。

批准国が2006年から二酸化炭素排出量削減を開始し⁹、2008年以後は京都レベル¹⁰に安定させるという京都議定書シミュレーションについて

⁸ 終端条件の与え方については、M. I. Lau, A. Phlke and T.F. Rutherford (2002), Approximating infinite-horizon models in a complementarity format: A primer in dynamic general equilibrium analysis, Journal of Economic Dynamics and Control 26, 577-609.

⁹ 2006年、2007年の排出量目標値を次のように与える。例えば、2006年の場合、「2005年基準ケースの排出量+（京都目標値-2005年基準ケースの排出量）×（2006-2005）/3」が削減目標値になる。

¹⁰ 京都レベルとは京都議定書で定められた各国の削減目標値である。

表1 国・地域の区分

国・地域名	略号	国・地域	GTAP-EG モデルにおける国・地域
1. 日本*	JPN	日本	
2. カナダ・ニュージーランド*	CAZ	カナダ, ニュージーランド	
3. 拡大EU*	EEU	EU15, その他EFTA, 中央ヨーロッパ諸国	
4. 旧ソ連*	FSU	旧ソビエト連邦	
<hr/>			
5. 中国	CHN	中国	
6. 東アジア	EAS	韓国, 台湾, 香港, インドネシア, マレーシア, フィリピン, シンガポール, タイ, ヴェトナム	
7. インド	IND	インド	
8. オーストラリア*	AUS	オーストラリア	
9. 米国*	USA	米国	
10. その他地域	ROW	その他の国	

注) *は附属書B 締約国, 破線より上の4国あるいは地域が批准国

表2 産業の区分

産業名	産業	GTAP-EG モデルにおける産業
1. 石炭	石炭	
2. 石油	石油	
3. 天然ガス	天然ガス	
4. 石油精製	石油精製	
5. 電力	電力, 熱	
6. 農業	農業, 食料品	
7. 鉄鋼業	鉄鋼業	
8. 化学	化学	
9. 機械	運送機器, その他機械産業	
10. その他製造業	鉱業, 非金属鉱物, パルプ・紙ほか, 木材・木材製品, 繊維・皮革製品, 非鉄金属	
11. 輸送業	空輸, 貿易・運輸	
12. サービス	建設業, 住宅賃貸料, 広告, その他サービス(民間・政府)	

考察する。以下, 3つのシナリオ,

- (1) 基準ケース 京都議定書が発効されないケース(批准国は二酸化炭素排出量削減を行わない)。
- (2) 排出権取引なし 批准国が各々の京都目標を達成する政策として国内炭素税を適用す

る。
 (3) 排出権取引あり 批准国間で排出権取引を行う, つまり各国の限界削減費用は等しくなる。

についてシミュレーションを行う。批准国とは日本, カナダ・ニュージーランド, 拡大EU, 旧ソ連である。なお, 2012年以降は“Kyoto Forever”¹¹を適用し, 12年以降の二酸化炭素排出量を京都レベルに安定させるものとする。両シナリオの炭素税もしくは排出権売却による歳入は各地域の代表的個人に一括交付されるものとする。

各国の排出削減目標値は京都議定書に従うものとし, マラケシュ合意の森林シンクを考慮する。以下の表3に1995年を基準年とした各国の排出枠を示す。

基準ケースの二酸化炭素排出量は, 1995年から2002年までは実績値を考慮し, 2003年から2015年までは World Energy Outlook, 2004. の予測に準拠する。

¹¹ Kyoto Forever とは, 京都議定書で附属書I 締約国に設定された目標が21世紀中は継続されるとするシナリオである。

表3 各国の排出枠（1995年基準）

日本	基準年の91.4%	(8.6%削減)
カナダ・ ニュージーランド	基準年の98%	(2%削減)
拡大EU	基準年の96%	(4%削減)
旧ソ連	基準年の142.7%	(-42.7%削減)

シミュレーション(3)では排出権取引を行うが、旧ソ連のホットエア^{12 13}の量が削減国の排出削減総量を上回ったため、排出権市場の需給均衡条件が満たされない。そこで、シミュレーション(3)については、新たに旧ソ連の排出枠を設定する。以下の表4に旧ソ連の排出枠を示す。

なお、シミュレーションによる計算は1995年から2015年の20年間を解いている。

3. シミュレーション結果

京都議定書が各国に与える影響について考察する。考察を行う項目は、限界削減費用（3-1節）、炭素排出量（3-2節）、炭素リーケージ（3-3節）、産業構造の変化（3-4節）、実質GDP（3-5節）である。

3-1 限界削減費用

削減国が排出権取引なしの単独で削減を行う場合、日本の限界削減費用が最も高く211ドル/炭素トンであり、次いでカナダ・ニュージーランド108ドル/炭素トン、拡大EU69ドル/炭素トンと続く。このように、各国の限界削減費用にばらつきがある1つの要因として各国の

¹² 京都議定書で定められた温室効果ガス削減目標に対し、経済活動の低迷などの理由により二酸化炭素の排出量が減少していて、相当の余裕をもって目標を達成することが見込まれる国の達成余剰分のこと。

¹³ 本論文においては、批准国のうちホットエアを所有している国・地域は旧ソ連のみである。実際には英国やドイツ、東欧諸国にもホットエアは存在するが、拡大EUとして集計するため、拡大EU全体としてホットエアはないものとして扱う。

表4 旧ソ連の排出枠（1995年基準）

2006	1.000
2007	1.100
2008	1.150
2009	1.200
2010	1.250
2011	1.300
2012	1.350
2013	1.400
2014	1.427
2015	1.427

削減率の違いがあげられる。本論文の場合、標準シナリオからの削減比率は2010年時点で、日本-24%、カナダ・ニュージーランド-40%、拡大EU-15%である。

ただ、日本の削減率はカナダ・ニュージーランドより低いにも関わらず、限界削減費用はカナダ・ニュージーランドの約2倍と高い。日本の限界削減費用がカナダ・ニュージーランドより高くなる理由として、両国のエネルギー組成の相違がある。カナダの場合、安価である水力の占める割合が12%と高く、水力発電の増加による二酸化炭素排出量削減の余地が高い。一方、日本では、エネルギー集約産業のなかでは、削減の切り札といわれる原子力の増設が困難な状況にある。したがって、日本は電力部門よりも、限界削減費用が相対的に高くなる鉄鋼などのその他のエネルギー集約産業で削減せざるをえない。これらの結果により、日本の二酸化炭素の限界的な削減は高くなっている。

旧ソ連の限界削減費用はシミュレーション期間を通じて0ドルとなる。これは、90年代の経済の後退と産業改革により、基準ケースの排出量レベルが1990年レベルより大きく下回ったからである。つまり、旧ソ連はホットエアの恩恵を大きく受けることがわかる。

削減国間で排出権取引を行うシミュレーションケースでは、各国の限界削減費用がすべて等しくなるように排出権価格が決定され、価格は

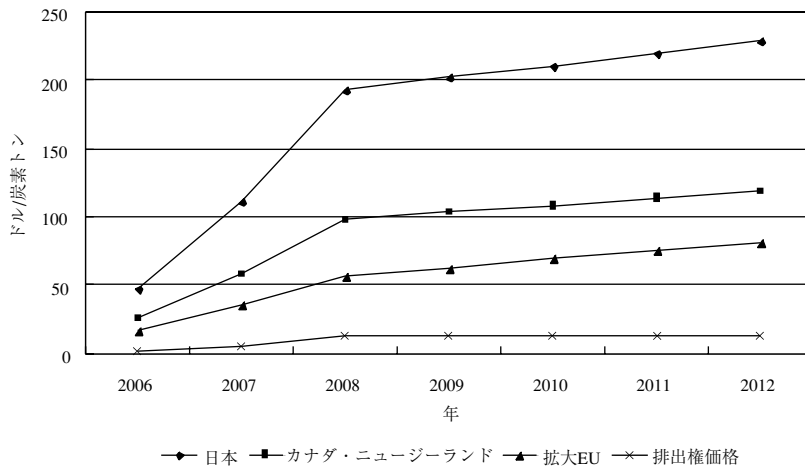


図6 限界削減費用の比較

2-13ドル程度に収まる。排出権取引なしのケースのときの各国の限界削減費用の差が大きいということが示されたが、これより排出権取引を行うことで、日本、カナダ・ニュージーランドや拡大EUは削減費用を大幅に低下させることができる。これらの各国が単独で削減を行う場合と排出権取引を行う場合の限界削減費用の比較を図6に表す。

3-2 炭素排出量

削減国が排出権取引なしの単独で削減を行った場合、表5が示すように、削減を行わない国は炭素排出量を増加させており、炭素リーケージが発生していることが伺える。興味深いのは、旧ソ連で5.37%と大きく増加していることである。旧ソ連の場合、京都議定書に基づく排出枠が基準ケースの二酸化炭素排出量よりも十分に大きい、すなわちホットエアが存在するので、排出量を増加させる。旧ソ連がほかの批准国に対して、エネルギー（あるいは炭素）集約度の高い財を生産する相対的な優位を持つので、生産を増加させて炭素排出量を増やしてしまうことになる。但し、炭素排出量の増加を数量ベースで比較すれば（表6）、米国は47百万炭素トンとなり炭素排出の増加が最大の国となる。

しかし、排出権取引を行うことで、日本、カナダ・ニュージーランド、拡大EUは削減量を大幅に減らすことができる。なお、非削減国における炭素排出量増加の中で、米国が最も大きく9百万炭素トン増加し、中国が4百万炭素トン増加する。ところで、旧ソ連は基準ケースよりさらに削減を行い、排出権として売却する。すなわち、旧ソ連の場合は排出権を売却することで生産量を減らしても利益を得ることができるとを意味する。排出権取引を行うことで削減国の二酸化炭素削減目標は緩和される。その結果、炭素リーケージも小さくなる。

3-3 炭素リーケージ

炭素リーケージは、削減国の炭素総排出量減に対する非削減国の炭素総排出量増の割合を示したものである¹⁴。炭素リーケージの数値結果は表7に示す。排出権取引なしの場合、炭素

¹⁴ 例えば、炭素リーケージ50%は、仮に削減国で1億トン炭素を減らしたとするならば、非削減国で5千万トン炭素が増加していることを意味する。 n を非削減国数、 m を非削減国数、 $CARB_0$ をベンチマークの炭素排出量、 $CARB_1$ をシナリオの炭素排出量とすると、リーケージは以下、

$$\text{炭素リーケージ(\%)} = \frac{\sum_n (CARB_{1,n} - CARB_{0,n})}{\sum_m (CARB_{0,m} - CARB_{1,m})} \times 100$$

と表される。

表5 炭素排出量変化（基準ケースからの乖離：％），2010年

	JPN	CAZ	EEU	FSU	CHN	EAS	IND	AUS	USA	ROW
排出権取引なし	-24.14	-28.20	-13.22	5.37	1.26	3.19	1.49	4.38	2.49	3.41
排出権取引あり	-2.18	-4.84	-2.78	-8.64	0.27	0.52	0.26	0.80	0.48	0.85

表6 炭素変化量（基準ケースからの乖離：百万炭素トン），2010年

	JPN	CAZ	EEU	FSU	CHN	EAS	IND	AUS	USA	ROW
排出権取引なし	-89	-49	-153	35	17	17	6	5	47	44
排出権取引あり	-8	-8	-32	-56	4	3	1	1	9	11

表7 炭素リーケージ（％），2010年

	CHN	EAS	IND	AUS	USA	ROW	総計
排出権取引なし	6.7	6.5	2.2	1.9	18.2	17.2	52.7
排出権取引あり	3.6	2.6	0.9	0.9	8.5	10.5	27.0

表8 総削減量の比較 百万炭素トン

	排出権取引なしのケース		排出権取引ありのケース	
	批准国内の削減量	総削減量	批准国内の削減量	総削減量
2010年	256	120	104	75

リーケージが高い国は米国18.2%，中国6.7%，東アジア6.5%，その他の地域17.2%となる。それに対して，排出権取引ありの場合，米国8.5%，中国3.6%，東アジア2.6%，その他の地域10.5%である。いずれのケースにおいても，米国への炭素リーケージは大きく，総リーケージに占める米国のシェアは，排出権取引なしでは34.5%，排出権取引ありでは31.5%である。

なお，総リーケージは，排出権取引なしで52.7%，排出権取引ありで27.0%である。したがって，排出権取引を行うときの非削減国内の炭素リーケージは，排出権取引なしの単独で削減を行うケースの半分に減少する。炭素リーケージが軽減される理由として，批准国である旧ソ連に相当量のホットエアが存在することがあげられ，それを反映して，排出権取引を行うと批准国の削減費用が大幅に緩和されるため

ある。

炭素リーケージの結果によれば，炭素リーケージの低い排出権取引ありのケースにおいて高い炭素総削減効果が期待されるが，表8によれば，炭素の総削減量は排出権取引なしでは120百万炭素トン，排出権取引ありでは75百万炭素トンとなる。これは，批准国間で排出権取引を行うと，旧ソ連のホットエアを受けて批准国の削減量が大きく減少することによる。

3-4 各国の産業構造の変化

本節では，京都議定書が各国に及ぼす影響を各国の産業配置の構造変化について考察する。なお，文中で示した数値は2010年度の値である。

排出権取引を行わないケース

エネルギー産業には、化石燃料生産とエネルギー生産がある。二酸化炭素削減を行うと、削減国ではエネルギー価格の上昇により需要量が減少する。削減国では化石燃料の投入を減少させるが、化石燃料の総需要は、基準ケースと比較してやや減少するものの、殆ど変わらない。これら化石燃料の需要の減少をうけて、各化石燃料の生産量は減少する結果となる。石炭・原油は全世界で生産量が減少する。天然ガスについては、中国、インドを除いた国で減少する。中国、インドでは天然ガスの国内需要を補填するために国内生産を増やす。

エネルギー生産には、石油精製と電力の2産業が含まれる。石油精製、電力ともに、旧ソ連を除く批准国で生産量が減少し、そのほかの国では生産量は増加する。

非エネルギー産業のうち、エネルギー集約産業は鉄鋼業、化学、その他製造業である。鉄鋼業、化学、その他製造業の生産量は、削減国である日本、カナダ・ニュージーランド、拡大EUで減少する。具体的には、鉄鋼業の生産量は、日本が-13.08%、カナダ・ニュージーランドが-8.30%、拡大EUが-3.48%と減少し、旧ソ連は11.50%、東アジアは7.38%、オーストラリアは7.18%増加する。化学の生産量は、カナダ・ニュージーランドが-19.56%、日本が-12.86%、拡大EUが-3.01%と減少し、東アジアは5.39%、旧ソ連は4.58%、オーストラリアは3.85%増加する。その他製造業の生産量は、カナダ・ニュージーランドが-6.93%、日本が-6.27%、拡大EUが-1.73%と減少し、オーストラリアは2.03%、旧ソ連は2.00%、東アジアは1.94%増加する。これらのエネルギー集約度の高い産業は、削減国において生産コストが上昇し、競争力が低下する。これにともない、炭素税のかからない非削減国へ生産拠点が移転するので、削減国のエネルギー集約産業は国際市場でのシェアを失う。

機械は、日本(-2.32%)、拡大EU(-0.28%)に加えて東アジア(-0.34%)でも生産量が落ち、長期的には中国でも減少するが、これは、機械が加工産業・水平分業であるために国際的波及効果があるからである。

化石燃料消費の多い輸送業でも、削減国である日本、カナダ・ニュージーランド、拡大EUで生産量を-8.15%、-9.21%、-4.62%減少させる。農業については、日本(-2.76%)、カナダ・ニュージーランド(-1.84%)、拡大EU(-0.96%)は減少させる。中国では、長期的には農業生産を減少させ、製造業のウエイトを増やしていることが分かる。サービス業では、日本(-0.71%)、中国(-0.20%)、東アジア(-0.38%)、米国(-0.04%)、拡大EU(-0.11%)、旧ソ連(-0.27%)で生産量が減少する。中国、東アジア、米国、旧ソ連といった削減を行わない国々のサービス業の生産量が減少するのは、サービス業から製造業への労働移動による(本節末の表9を参照のこと)。

排出権取引を行うケース

排出権取引を行わないケースと同様に、エネルギー産業では化石燃料需要の減少を受けて、石炭・石油の生産量は全世界で減少し、天然ガスはインド(0.02%の増加)を除いた全ての国で減少する。インドでは天然ガスの国内需要を補填するために国内生産を増やす。

エネルギー生産である石油精製と電力の生産量は、批准国では減少し、そのほかの国では増加する。

非エネルギー産業のうちエネルギー集約産業では、削減国から非削減国への産業移転がみられる。鉄鋼、化学、その他製造業に関して、批准国で生産量が減少し、削減を行わない国では増加する。鉄鋼業は、生産量の減少率の高い国から順に、旧ソ連-8.49%、日本-0.72%、カナダ・ニュージーランド-0.64%、拡大EU-0.43%である。そして鉄鋼業は、東アジア、

表9 生産量の変化率（基準ケースからの乖離：％）、2010年
排出権取引なし

	JPN	CAZ	EEU	FSU	CHN	EAS	IND	AUS	USA	ROW
農業	-2.76	-1.84	-0.96	0.94	0.01	0.52	0.31	0.32	0.35	0.28
鉄鋼	-13.08	-8.30	-3.48	11.50	3.11	7.38	2.72	7.18	2.99	4.92
化学	-12.86	-19.56	-3.01	4.58	2.10	5.39	2.18	3.85	3.26	2.53
機械	-2.32	3.09	-0.28	0.39	0.01	-0.34	0.66	1.01	0.20	0.58
その他製造	-6.27	-6.93	-1.73	2.00	0.86	1.94	1.42	2.03	0.99	1.40
輸送	-8.15	-9.21	-5.24	3.26	1.32	2.92	1.74	4.10	2.85	2.62
サービス	-0.71	0.12	-0.11	-0.27	-0.20	-0.38	0.41	0.21	-0.04	0.21

排出権取引あり

	JPN	CAZ	EEU	FSU	CHN	EAS	IND	AUS	USA	ROW
農業	-0.13	-0.02	-0.10	-2.59	-0.04	0.03	0.05	0.16	0.07	0.06
鉄鋼	-0.72	-0.64	-0.43	-8.49	0.50	1.01	0.40	1.01	0.47	0.94
化学	-0.76	-2.49	-0.54	-2.94	0.27	0.54	0.30	0.51	0.39	0.39
機械	-0.14	0.56	-0.10	-1.48	0.08	-0.01	0.02	0.13	0.01	0.09
その他製造	-0.37	-0.73	-0.25	-2.63	0.11	0.24	0.21	0.33	0.15	0.26
輸送	-0.36	-1.10	-1.00	-1.95	0.25	0.43	0.26	0.71	0.44	0.41
サービス	-0.09	-0.23	-0.01	-0.14	0.08	0.07	0.01	-0.02	0.00	0.03

表10 GDPの変化率（基準ケースからの乖離：％）、2010年

	JPN	CAZ	EEU	FSU	CHN	EAS	IND	AUS	USA	ROW
排出権取引なし	-3.97	-4.32	-1.50	0.52	0.06	0.39	0.60	0.64	0.26	0.67
排出権取引あり	-0.28	-0.65	-0.24	-2.06	0.07	0.12	0.07	0.06	0.05	0.12

オーストラリア（ともに1.01％）、その他の地域（0.94％）に多く移転する。化学は、旧ソ連（-2.94％）、カナダ・ニュージーランド（-2.49％）、日本（-0.76％）、拡大EU（-0.54％）で生産を減らし、東アジア（0.54％）、オーストラリア（0.51％）、米国、その他の地域（ともに0.39％）に流れる。その他製造業は、旧ソ連（-2.63％）、カナダ・ニュージーランド（-0.73％）、日本（-0.37％）が生産量を減少させ、オーストラリア（0.33％）、その他の地域（0.26％）、東アジア（0.24％）に移る。

機械は、加工産業であるので、削減国である日本（-0.14％）、拡大EU（-0.10％）、旧ソ連（-1.48％）において生産量が減少するとと

もに、日本の機械生産量の落ち込みを受けて東アジア（-0.01％）でも生産量を減少させる。排出権取引ありのケースにおいても、輸送業の生産量は、削減を行う批准国で減少するが、その減少率は排出権取引なしのケースよりも小さい。また、農業については、批准国及び中国で生産が減少する。排出権取引なしのケースと同様に、中国において農業の生産量が減少するのは、中国の産業構造が農業から製造業に移行するからである。最後に、サービスの生産量は日本、カナダ・ニュージーランド、オーストラリア、拡大EU、旧ソ連で減少する。削減を行わないオーストラリアでサービスの生産量が減少するのは、オーストラリア国内におけるサービス

業から製造業への労働移動による。

排出権取引を行うケースでは、削減国が排出権取引を行うことで削減負担を緩和させることができるため、生産量の減少と生産拠点の移転が縮小できることが明らかとなった。

3-5 実質 GDP

京都議定書が各国のマクロ経済に与える影響について GDP より考察する。削減国が単独で削減を行う場合、基準ケースと比較した GDP の変化率は、削減国（日本、カナダ・ニュージーランド、拡大 EU）でマイナス、非削減国はプラスである。影響の大きさは、カナダ・ニュージーランドの GDP は4.32%、日本の GDP は3.97%、拡大 EU の GDP は1.50%と低下する。限界削減費用が高い日本でマクロ経済的な影響が大きく出ない理由のひとつとしては、日本が国内で化石燃料の生産を行っておらず、化石燃料の削減の直接的影響が小さいためである。それに対して、化石燃料生産・輸出国であるカナダの GDP の減少率は大きい。

排出権取引を行う場合、削減国の GDP は減少し、非削減国の GDP は増加する。旧ソ連の GDP は2.06%、カナダ・ニュージーランドの GDP は0.65%、日本の GDP は0.28%、拡大 EU の GDP は0.24%とそれぞれ低下する。旧ソ連を除いた削減国の GDP 変化率は排出権取引なしのケースの時より改善する。特に、限界削減費用が低くなった日本の GDP が改善される。旧ソ連は GDP を低下させるが、排出権に価格がつくことで化石燃料の機会費用が高まり、生産・消費に影響が出るためである。

3-6 米国・オーストラリアが削減に参加

米国は2001年3月に京都議定書からの離脱を明らかにした。また、オーストラリアも温暖化防止のために二酸化炭素排出削減を義務づけた京都議定書の批准を拒否している。そこで、本論文では米国とオーストラリアを非削減国とし

て扱い炭素リーケージを試算したところ、炭素リーケージは排出権取引なしのケースが52.7%、排出権取引ありのケースが27.0%となり、いずれのケースも先行研究と比較して大きくなる。3-3節においていずれのケースにおいても米国への炭素リーケージが大きいことが示されたが、このことが本論文の炭素リーケージが高くなった原因である可能性がある。そこで、米国およびオーストラリアも削減を行う先行研究と同様のシナリオを計算する。両国の排出率は表11に示される。

米国とオーストラリアが削減に参加する場合について計算すると、排出権取引なしでは総リーケージは19.4%となる。両国が削減に参加することで炭素リーケージは52.7%から19.4%に大幅に減少する。これより、本論文の試算する炭素リーケージが先行研究より大きいのは、削減国に米国が含まれないことが原因であるといえる。なお、米国とオーストラリアが参加し各国が単独で削減を行う場合の炭素リーケージは19.4%であるが、これは、Bollen *et al.* (1999) や Manne A. *et al.* (1998) の試算結果20%とほぼ同じである。

米国とオーストラリアが削減に参加し排出権取引で削減費用を低下させる場合、炭素リーケージは、2010年で15.8%となる。参加しない場合は27.0%であることから、米国とオーストラリアが削減することにより炭素リーケージは減少することが確かめられる。先行研究¹⁵において排出権取引ありの場合の炭素リーケージは2-20%であり、本論文の試算する炭素リーケージはその範囲にある。

表11 米国・オーストラリアの排出率(1995年基準)

米国	基準年の98.1%	(1.9%削減)
オーストラリア	基準年の100.2%	(-0.2%削減)

¹⁵ Bollen *et al.* (1999), manne A. *et al.* (1998), Babiker and Jacoby (1999), McKibbin *et al.* (1999), Gree OECD (1999) 参照のこと。

表12 炭素リーケージ (%), 2010年

	CHN	EAS	IND	ROW	総計
排出権取引なし	2.9	3.7	1.9	11.0	19.4
排出権取引あり	2.2	2.4	1.6	9.5	15.8

4. 結論・まとめ

本論文の目的は、京都議定書の遵守が世界経済に与える影響を、国際的な産業構造の変化と炭素リーケージの観点より検証することにある。特に、米国とオーストラリアが削減しない状況での影響に重点を置いて分析している。分析では、削減国が単独で削減を行う場合、削減国間で排出権取引を行い限界削減費用を均等化する場合の2つのケースについて分析している。

分析結果によれば、排出権取引なしの各国が単独で削減するケースでは、日本、カナダ・ニュージーランド、拡大EUは二酸化炭素排出量を削減するが、旧ソ連は削減することなく目標を達成することができる。それに対して、削減国が排出権取引をして限界費用を均等化する場合、旧ソ連は二酸化炭素排出量を削減する。

その他に、本論文の諸分析・試算の結果、以下の結論が得られる。

- (1) 炭素リーケージは、
排出権取引なしのケースは52.7%
排出権取引ありのケースは27.0%
である。
- (2) 限界削減費用は、
排出権取引なしのケースでは、
日本 211ドル／炭素トン
カナダ・ニュージーランド 108ドル／炭素トン
拡大EU 69ドル／炭素トン
旧ソ連 0ドル／炭素トン
排出権取引ありのケースでは、

13ドル／炭素トン

である。排出権取引を行うことにより批准国の削減費用負担を緩和できる。

- (3) 炭素リーケージとホットエアにより世界全体の炭素削減総量は減少する。
- (4) 各国が京都議定書を遵守すれば、国際的な産業構造変化が起こる。

産業構造の変化と炭素リーケージの大きさは、排出量制約はもとより排出量削減に参加する国に大きく依存している。本分析では、米国におけるリーケージの大きさが大きいことが明らかされたが、将来的には米国を含めた削減シナリオが望ましい。また、成長の著しい中国や東アジアを京都議定書に組み入れていくことも必要であろう。

(大阪大学大学院経済学研究科博士後期課程)

(大阪大学大学院経済学研究科教授)

参考文献・参考資料

- 天野明弘 (1997) 『地球温暖化の経済学』日本経済新聞社。
- Armington, P. S. (1969) "A Theory of Demand for Distinguished by Place of Production," *IMF Staff Papers*, 16, 159-178.
- Babiker, M. and H. D. Jacoby (1999) "Developing Country Effects of Kyoto-Type Emissions Restrictions," Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Massachusetts Institute of Technology, mimeo.
- Bollen, J., T. Manders, and H. Timmer (1999) "Kyoto and Carbon Leakage: simulations with WorldScan," paper presented at the IPCC Working Group III Expert Meeting, May-27-28, The Hague, mimeo.
- Burniaux, J.-M. and J. O. Martins (2000) "Carbon Emission Leakages: A General Equilibrium

- View,” Organisation for Cooperation and Development (OECD), Economics Department, Working Paper No. 242.
- Böhringer, C. and T. F. Rutherford (2002) “Carbon Abatement and International Spillovers: A decomposition of General Equilibrium Effects,” *Environmental and Resource Economics*, 22 (3), 391–417.
- International Energy Agency (2004) *World Energy Outlook 2004*, Paris: IEA Publications.
- Light, M. K., C. D. Koldstad, and T. F. Rutherford (1999) “Coal Markets and the Kyoto Protocol,” University of Colorado, Boulder, Working Paper No. 99–23.
- Manne, A. S. and R. G. Richels (1999) “The Kyoto Protocol: A Cost–Effective Strategy for Meeting Environmental Objectives?,” *The Energy Journal*, special issue, May 1999, 1–23.
- McKibbin, W. J., M. T. Ross, R. Shackleton, and P. J. Wilcoxon (1999) “Emissions Trading, Capital Flows and the Kyoto Protocol,” Brookings Discussion Paper in International Economics #144, The Brookings Institution, Washington DC.
- Lau, M. I., A. Pahlke, and T. F. Rutherford (2002) “Approximating infinite–horizon models in a complementarity format: A primer in dynamic general equilibrium analysis,” *Journal of Economics Dynamics & Control*, 26, 577–609.
- Paltsev, S. V. (2000) “The Kyoto Protocol: “Hot air” for Russia?,” Discussion Papers in Economics, University of Colorado, Working Paper No. 00–9.
- Paltsev S. V. (2004) “Moving from Static to Dynamic General Equilibrium Economic Models (Notes for a beginner in MPSGE),” MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, technical Note 4, Cambridge, MA.
- Rutherford, F. (1999) “Applied General Equilibrium Modeling with MPSGE as a GAMS Subsystem: An overview of Modeling Framework and Syntax,” *Computational Economics*, 14, 1–46.
- Rutherford, T. F. and S. V. Paltsev (2000) “GTAP in GAMS and GTAP–EG: Global Datasets for Economic Research and Illustrative Models,” Department of Economics, University of Colorado, Working Paper.
- Rutherford, T. F. (2004) “Dynamic General Equilibrium with GAMS/MPSGE,” Lecture Notes Prepared for the UNSW Workshop, February 24–27, 2004.

International Industry Spillover and Carbon Leakage under the Kyoto Protocol

Hanae Tamechika and Kanemi Ban

The Kyoto Protocol sets carbon emission targets for 2008–2012 for the Annex B countries. If such unilateral action by one set of countries is to be taken, the associated competitive effects may lead to a significant relocation of the Annex B countries' industries, which can induce "carbon leakage" as a result. This paper explores these issues using a dynamic Computable General Equilibrium model of the world economy. In particular, we address the influence of the United States' and Australian withdrawals. In order to analyse the effects of different carbon abatement regimes, the following three scenarios are set up: a reference case, no carbon permit trading, and carbon permit trading among the Annex B countries other than the United States and Australia. The results suggest that a maximum of 20% of energy-intensive production may relocate away from the emissions-capped countries, with a leakage rate as high as 53%, where countries apply domestic carbon taxes. The trading scenario turns out to sift up to 8% of energy-intensive production from abating countries towards non-abating countries, generating roughly a 27% leakage rate. Permit trading considerably reduces the magnitude of relocation and leakage under the Kyoto Protocol to non-abating countries as compared to the no trading case. These leakages are higher than those in the literature. This is because we take into account the non-compliance of the United States. Moreover, the values of relocation and leakage to the United States are quite significant.

JEL Classification: C68, Q50

Key Word: carbon abatement; Carbon Leakage; CGE model; Kyoto Protocol; relocation of industries