

二酸化炭素排出と環境クズネッツ曲線*

— ダイナミック・パネルデータ推定による検証 —

内 山 勝 久[†]

(日本政策投資銀行設備投資研究所)

* 本稿の作成にあたっては、浅子和美（一橋大学）、宇沢弘文（同志社大学）、木下宗七（椙山女学園大学）、柳沼寿（法政大学）の各先生、および設備投資研究所における制度設計研究会（座長：鈴木興太郎・一橋大学教授）参加者の方々から有益なコメントをいただいた。また、データ整理等にあたり設備投資研究所の上石幸恵さんの協力をいただいた。以上の方々に対し記して感謝の意を表したい。もちろん、残された誤りは筆者の責任である。

[†] E-mail: kauchiyo@dbj.go.jp

CO₂ Emission and the Environmental Kuznets Curve

: Evidence from Dynamic Panel Data Estimation

Economics Today, Vol. 27, No. 3, March, 2007

Katsuhisa UCHIYAMA

Research Institute of Capital Formation

Development Bank of Japan

要 旨

本稿では、地球温暖化問題のもとでの持続可能な発展の可能性を検討するために、一つの手法として「環境クズネッツ曲線」を取り上げて検証を行った。環境クズネッツ曲線はナイーブな議論だけに理論面・実証面ともに批判も多い。このため、まず、現状までの議論をサーベイした。次に、二酸化炭素に関する環境クズネッツ曲線の推定を行い、その成立の是非を確認した。分析の特徴としては、(1) 推定手法としてダイナミック・パネル分析を採用し、(2) パネル単位根検定やパネル共和分検定によりデータの統計的特性にも注意を払い、(3) 2003 年までの最新のデータを利用したことが挙げられる。

分析の結果、環境クズネッツ曲線仮説が成立し、転換点は全世界ベースで約 25,000 米ドル（2000 年価格）であることがわかった。また、京都議定書採択が環境クズネッツ曲線の変動に影響を及ぼしたとすれば、それは非附属書 I 国中心の部分的なものにとどまる可能性を示唆するファインディングを得た。

キーワード：環境クズネッツ曲線，地球温暖化，ダイナミック・パネル分析

JEL classification: O13; Q56

目次

1	はじめに	1
2	先行研究	4
2.1	理論モデルの簡単なサーベイ	4
2.2	Stokey の蓄積性汚染を伴うモデル	5
2.3	実証分析のサーベイ	10
3	環境クズネッツ曲線の問題点	15
3.1	問題点 (1)—概念的側面	15
3.2	問題点 (2)—実証的側面	17
4	実証分析	19
4.1	データ・ソース	19
4.2	パネルデータの定常性	23
4.2.1	パネル単位根検定	23
4.2.2	パネル共和分検定	25
4.3	環境クズネッツ曲線の推定	26
4.3.1	推定方法	26
4.3.2	推定 (1)—静学的パネルデータ推定	27
4.3.3	推定 (2)—ダイナミック・パネルデータ (Arellano and Bond) 推定	29
4.3.4	推定 (3)—システム GMM (Blundell and Bond) 推定	32
4.4	転換点に関する若干の考察	35
5	おわりに	39
	参考文献	41
	補論 A Stokey の蓄積性汚染を伴うモデル	49
A.1	最適成長経路の導出	49
A.2	定常状態における成長率	50
	補論 B 非定常パネルデータ	52
B.1	パネル単位根検定	52
B.1.1	パネル単位根検定の概要	52

B.1.2 Levin, Lin and Chu テストに関する補足	53
B.2 パネル共和分検定	54
補論 C ダイナミック・パネルデータ推定	56
C.1 Arellano and Bond のダイナミック・パネルデータ推定	56
C.1.1 推定方法	56
C.1.2 モデル特定化のテスト	60
C.2 Blundell and Bond のシステム GMM 推定	60
付表	63

表目次

1	環境クズネッツ曲線（二酸化炭素）に関する代表的実証研究	14
2	分析対象国（気候変動枠組条約附属書に基づく分類）	21
3	記述統計量	22
4	パネル単位根検定	24
5	パネル共和分検定	26
6	推計結果（1）：ランダム効果モデル	28
7	推計結果（2）：Arellano and Bond（1991）ダイナミック・パネルデータ・ モデル	31
8	推計結果（3）：Blundell and Bond（1998）システム GMM・モデル . . .	34
9	平均 1 人あたり実質 GDP と転換点の推移	36
10	京都議定書締結国数（締結年別）	37
付 1	パネル単位根検定（平均からの偏差による LLC 検定）	64
付 2	パネル共和分検定（Pedroni 検定）	64

図目次

1	環境クズネッツ曲線	2
2	環境クズネッツ曲線（Stokey モデル）	10
3	散布図（全観測値）	20

1 はじめに

環境問題と経済活動とは密接な関係があることについて異論の余地はないだろう。現在の地球規模で生じている環境問題はもちろん、公害問題に代表される従来のローカルな環境汚染についても両者には密接なつながりがあるのであって、多くの環境破壊の根本原因は経済活動にあるということは、広く合意があるように思われる。

有名なローマ・クラブの『成長の限界』(Meadows *et al.*, 1972)では、「世界人口、工業化、汚染、食糧生産、および資源の使用の現在の成長率が不変のまま続くならば、来るべき100年以内に地球上の成長は限界点に到達するであろう」(訳書 p. 11)と結論し、地球容量が無限であるかのように経済と人口の双方の成長を追求することに警鐘を鳴らした。しかしながら、この報告書が出版されてから現在まで既に35年が経過したが、そこで予想されていたような危機は到来しておらず、その兆しも現在のところ少ないように思われる¹。むしろ同書で懸念されていた点については改善が進んでいるとする見方もある。こうした点からすれば、環境と経済成長はトレード・オフの関係にはないといえるかもしれない。とはいえ、『成長の限界』は環境問題や資源問題が経済成長のための大きな制約条件となりうることを認識させ、また、その後の多くの研究に影響を与えることになった点で評価しうるものである。

成長の限界に代わって登場したのが「持続可能な発展」(sustainable development)という考え方である。この考え方自体は現在多くの人々に定着した感があるが、持続可能な発展の定義は実に多様である。もっとも有名な定義としてしばしば引用されるのが、「環境と開発に関する世界委員会」(World Commission on Environment and Development: WCED)²が1987年に公表した報告書 *Our Common Future* (WCED, 1987)の中心的な考え方として取り上げた概念である。そこでは持続可能な発展は、「将来の世代の欲求を満たしつつ、現在の世代の欲求も満足させるような開発」(訳書 p. 66)と定義されている。この概念は、環境と発展をトレード・オフではなく共存し得るものとして捉え、環境保全を考慮した節度ある発展が重要であるという考え方に立っている。その後、持続可能な発展は

¹ 代わりに当時はあまり深刻には予想されていなかった地球温暖化などの地球環境問題が登場するようになり、新たな懸念すべき問題となっている。

² ノルウェー首相(当時)のブルントラント女史が委員長を務めていたことから、通称「ブルントラント委員会」とも呼ばれる。

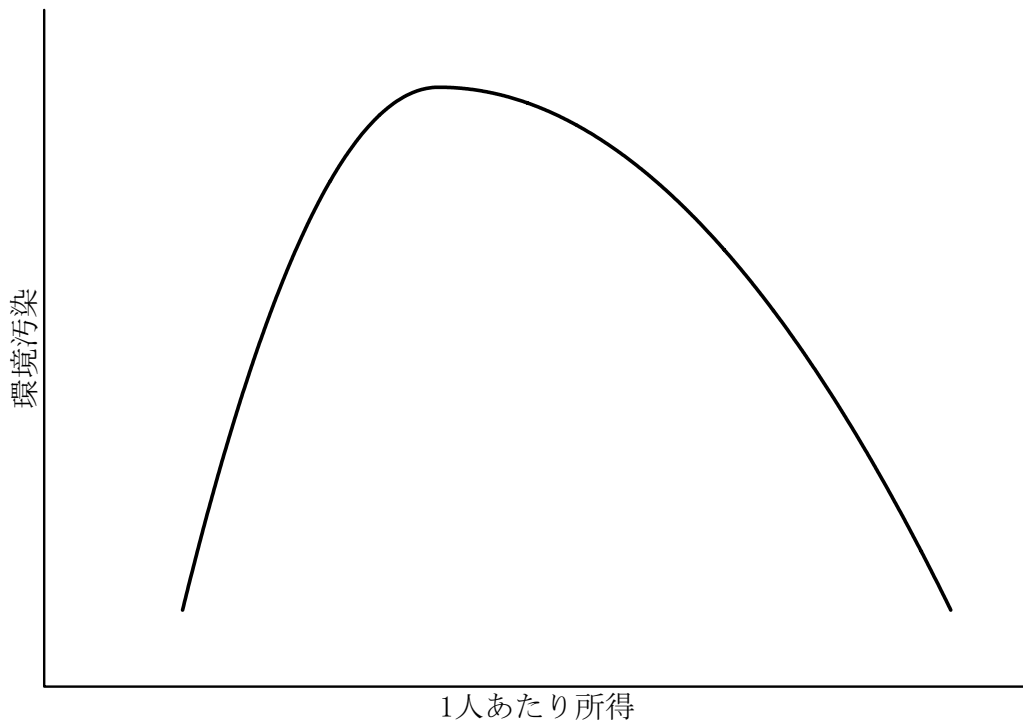


図1 環境クズネッツ曲線

1992年の「環境と開発に関する国連会議」(通称「地球サミット」)における基本理念としても採用され、環境問題と経済発展を考える上での大きな価値基準となっている。

環境問題と経済発展の関係を考える際の一つの仮説として、「環境クズネッツ曲線」(Environmental Kuznets Curve: EKC)仮説がある。これは経験に基づく仮説であって、ある一国について1人あたり所得と環境の質との関係を図示すると逆U字型曲線を描くというものである。換言すれば、経済発展の初期段階では環境負荷は増加するが、所得がある水準を超えると、所得の増加に伴い環境負荷は低下するという仮説である(図1)³。サイモン・クズネッツ(Simon Kuznets)は1人あたり国民所得と不平等度の関係を捉え、経済発展の初期段階では所得格差が拡大するが、ある段階を超えると縮小に転じるとする仮説を提示した(Kuznets, 1955)。環境クズネッツ曲線仮説はこの仮説のアナロジーであって、データ観測による経験則から生まれたものである。経済成長が環境に与える影響を理解す

³ 一般的には「成長」が量的な概念であるのに対して、「発展」は量的な概念と質的な概念の双方を含むものとして捉えられることが多い。しかし、経済の質的な側面を定義するのは困難を伴うことも多く、前掲のWCED(1987)でも「発展」については何も定義していない。環境クズネッツ曲線は、量的増加と環境面での質的改善の関係を捉えようとするものである。

ることは近年ますます重要になってきているが、環境クズネツツ曲線の考え方はその一助となるものとして、近年盛んに研究されている。

環境クズネツツ曲線に関する研究は、Grossman and Krueger (1991) や、World Bank (1992) のバックグラウンド・ペーパーである Shafic and Bandyopadhyay (1992) を嚆矢とし、World Bank (1992) によって広くその名が知られるようになった。そして環境クズネツツ曲線の存在は、持続可能な発展が実現可能であることの一つの有力な証左となりうると考えられるようになった。また、長期的な環境変化の予測と予防的な政策的対応にも貢献するものと期待されている。この分野における包括的なサーベイ論文としては、Stern (1998, 2004), Panayotou (2000), Dasgupta *et al.* (2002), Dinda (2004) などがある⁴。

本稿の目的は、環境クズネツツ曲線の推定というアプローチにより、経済発展と環境の質との関係を考察することである。特定の環境問題として、地球温暖化問題を対象にする。これは、(1) 持続可能な発展というときは、超長期の問題を検討する必要がある、地球温暖化問題はその代表的なものであること、(2) 二酸化炭素排出に関する環境クズネツツ曲線は、存在の有無を巡ってさまざまな結果が報告されており、追加的な研究の余地があること、(3) 京都議定書が採択された 1997 年以降に何らかの構造変化が起きているのか否かに関心があること、といった問題意識があるためである。

本稿では大まかにいって、前半で理論・実証面での先行研究のサーベイ、後半で実証分析を行っている。構成は以下の通りである。次節では環境クズネツツ曲線に関する先行研究を理論面・実証面にわたってサーベイする。第 3 節では先行研究を巡って指摘されている問題点を整理する。第 4 節では実証分析として、先行研究で残された問題を検討しながら二酸化炭素に関する環境クズネツツ曲線の推定を試みる。第 5 節は全体のまとめである。

⁴ 環境クズネツツ曲線に関する研究においては、専門雑誌における特集号もあり (*Environment and Development Economics*, Vol. 2, Part 4, 1997 年, *Ecological Economics*, Vol. 25, No. 2, 1998 年), 多くの研究者の関心を集めている。

2 先行研究

2.1 理論モデルの簡単なサーベイ

環境クズネッツ曲線は、いわば「定型化された事実」である。World Bank (1992) によって環境クズネッツ曲線概念が広く知られるようになってからは、各種の環境問題に関してさまざまな汚染指標に基づきながら、その存在を確認・検証するための実証研究が先行した。一方、当初は環境クズネッツ曲線に関する精緻な理論は存在しなかったが、それが理論的に起こりうることの説明に対する必要性も高まり、事実を整合的に説明するような理論研究がその後多くなされるようになった。

動学的モデルの背景を有する理論研究として、これまでにさまざまなものが提示されてきた。John and Pecchenino (1994) は、世代重複モデルを利用し、汚染ストックを対象にした環境クズネッツ曲線を導出している。汚染物質は主として消費からの排出を想定している。Selden and Song (1995) では、Forster (1973) の成長と環境のモデルをベースに修正を加えた Ramsey-Cass-Koopmans 型モデルを適用している。そこでは生産過程から排出されるフローの汚染物質を分析の対象としている。その結果、ある条件の下では逆 U 字型の曲線が出現する可能性があることを導出している。Stokey (1998) は AK モデルおよび Ramsey-Cass-Koopmans 型モデルを導入している。汚染排出は生産過程からなされると想定し、フローおよびストックの汚染物質を分析対象としている。社会的厚生を上昇させるためには生産量を抑えてでも環境汚染に対する規制を行い、排出量を低減させるべきとの示唆が得られている。

López (1994) および Bulte and van Soest (2001) では自然資源ストックの枯渇を対象としている点が特徴的である。Dinda (2005) は内生的成長モデルの枠組みで検討している。そこではストックの環境を扱い、それが効用に影響を与えると同時に生産要素としても利用されること、資本ストックは生産要素として利用され汚染排出の原因となると同時に汚染削減活動にも利用される設定となっていることが特徴的である。

López (1994) および Stokey (1998) では上記のような動学モデルとともに静学モデルも紹介されている。他の静学的モデルとしては次のようなものがある。Lieb (2002) は McConnell (1997) の静学モデルの拡張であり、消費からの汚染物質排出を分析対象としている。結論として消費の飽和 (satiation) が環境クズネッツ曲線導出の必要条件であること

を示している⁵。また、ここで導出された環境クズネッツ曲線は Stokey (1998) のモデルを特殊ケースとして含むとしている。Andreoni and Levinson (2001) では、環境クズネッツ曲線導出には汚染削減活動における規模の経済性が十分条件であると結論している⁶。

動学的理論モデルとしてしばしば引用される John and Pecchenino (1994) および Selden and Song (1995), Stokey (1998) のモデルでは、次のような点が特徴的である。第 1 に、資本蓄積が少ない発展の初期段階では汚染削減支出を行わなかったりクリーンな技術を導入したりしないコーナ解の状態にあるが、資本蓄積に伴いこれらの汚染削減活動を導入するような内点解への移行が生じ、その結果逆 U 字型の関係がもたらされる可能性を示している点である。第 2 に、逆 U 字型の関係がもたらされないのは、経済がコーナ解の状態にあるケースであるが、汚染削減支出やクリーンな技術の導入は汚染物質ごとに収益性に差があると考えられ、コーナ解からの離脱をもたらす所得水準は汚染物質ごとに異なる可能性があるという点である。これは、汚染物質によっては環境クズネッツ曲線が存在しないとする実証分析結果 (2.3 節を参照) の理論的な解釈となり得る可能性がある (柳瀬, 2002)。

なぜ環境クズネッツ曲線は逆 U 字型になるのか、すなわち、なぜコーナ解から内点解への移行が生じるのかについてはいくつかの解釈がある。代表的な説明は、(1) 生産や消費の構成が変化すること、(2) 環境に対する選好が強まること、(3) 外部不経済を内部化するような制度の導入、(4) 汚染削減活動における規模に関する収穫逓増の効果、というものである (Andreoni and Levinson, 2001)。

環境クズネッツ曲線の理論的導出は、上記のようにさまざまなものが試みられているが、対象となっている汚染指標の経路は各種の仮定やパラメータの値に依存している。この点を見るために、さらに後の実証分析との関係を検討するために、理論モデルの代表的なものを節を改めて概観したい。

2.2 Stokey の蓄積性汚染を伴うモデル

以下では、最適成長理論のフレームワークで環境クズネッツ曲線を理論的に導出している代表的な研究として Stokey (1998) を取りあげ、赤尾 (2002) や伊ヶ崎 (2004) を参考にしながら理論的な解説を行う。

⁵ 要するに、追加的な所得の増加分は汚染削減の支出にまわるというストーリーからこの条件が導出されている。

⁶ Andreoni and Levinson (2001) は理論モデルの簡単なサーベイも行っている。

Stokey (1998) では、(a) 静学モデル、(b) フロー汚染物質の動学モデル、(c) 外生的技術進歩を (b) に組み込んだ動学モデル、(d) ストック汚染物質の動学モデル、の 4 種のモデルが分析され環境クズネッツ曲線が導出されている。地球温暖化問題は二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの大気中への蓄積が問題となっていることから、本稿では二酸化炭素というストックの汚染物質を念頭に置く。したがって、ここで展開されているモデルのうち、(d) のストック汚染物質を伴うモデルを取りあげることにする。

このモデルでは、外生的な技術進歩を組み込んだ次のコブ・ダグラス型の生産関数を設定する。

$$Y(t) = Ae^{gt} K(t)^\alpha L^{1-\alpha} z(t) \quad (1)$$

ただし、 $Y(t)$ は総生産量、 A は生産性のパラメータ、 g は外生的な技術進歩率⁷、 $K(t)$ は資本ストック量、 L は経済全体の労働の投入量であり、時間を通じて一定であると仮定する。 α は $\alpha \in (0, 1)$ とする。

$z(t)$ は環境技術の指標を表し、 $z(t) \in [0, 1]$ とする。 $z(t) = 1$ は汚染物質を最大に排出する生産技術を表し、逆に $z(t) = 0$ は最もクリーンな生産技術を採用していることを表すものとする。

汚染物質は生産過程からのみ排出されるものとし⁸、汚染排出（フロー）を表す関数を次のように設定する。

$$x(t) = Ae^{gt} K(t)^\alpha L^{1-\alpha} z(t)^\beta \quad (2)$$

ただし、 $x(t)$ は汚染フローの各時点での排出量、 β は環境技術と汚染フローの関係を表すパラメータで、 $\beta > 1$ とする。

$z(t) = 1$ のとき、生産量および汚染排出量は最大になる。Stokey (1998) はこのときの生産量を「潜在的生産量」(potential output)と呼んでおり、実際の生産量と潜在的生産量が一致することになる。 $z(t)$ を 1 から減少させると、クリーンな技術の導入とともに環境は改善されるが、生産量の減少という代償を要求されることになる。 $z(t) = 0$ のときは生産

⁷ Stokey (1998) では、(b) (および (a)) において基本モデルとして AK モデルをベースとしてそこに環境制約を導入している。このモデルによると、結果としてすべての変数の成長率がゼロであるような定常状態に収束してしまう。これは後に示すように $z(t)$ が時間とともに単調減少することに伴い、資本の限界生産性 ($\partial Y(t)/\partial K(t) = \partial(AK(t)z(t))/\partial K(t) = Az(t)$) も単調減少するからである。すなわち長期的な成長率はゼロになり、「持続可能な成長」は実現しないことになる。この点を修正するため、(c) および (d) のモデルでは外生的な技術進歩が導入されている。新古典派モデルと同様に外生的な技術進歩が生産性の上昇をもたらす、 $z(t)$ の低下を補うので、定常状態における成長率はプラスになる。

⁸ ゴミ問題のような、消費が環境に影響を与えるケースはここでは想定しない。

量および汚染量ともゼロになる．このように，実際の生産量は潜在的生产量と環境技術の積で表されているとも考えられる⁹．

1 人あたりの生産量は，

$$y(t) = Ae^{gt}k(t)^{\alpha}z(t) \quad (3)$$

となる．ここで， $y(t) \equiv Y(t)/L$ は 1 人あたりの生産量， $k(t) \equiv K(t)/L$ は 1 人あたりの資本ストック量を表す．また，汚染排出量を表す (2) 式は，

$$x(t) = Ae^{gt}k(t)^{\alpha}Lz(t)^{\beta} \quad (4)$$

と書ける．

無限期間生存する代表的個人の t 期における瞬時的効用関数は次のようなものを想定する．

$$u(t) = \frac{c(t)^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma} - \frac{B}{\gamma}X(t)^{\gamma} \quad (5)$$

ただし， $u(t)$ は代表的個人の効用， $c(t)$ は 1 人あたりの財の消費量， σ は Arrow-Pratt の相対的リスク回避測度（消費の異時点間の代替の弾力性の逆数）を表すパラメータで， $\sigma > 0$ とする． B と γ は汚染に対する不効用の程度を表すパラメータで， $B > 0$ ， $\gamma > 1$ とする． $X(t)$ は経済における汚染ストックの水準を表す．

(5) 式は，右辺第 1 項が標準的な CRRA (constant relative risk aversion) 型効用関数であり，右辺第 2 項が汚染ストックから被る不効用を表す加法分離的な効用関数である．汚染の増加は消費者の効用を低下させ，さらにその限界不効用は逓増する．このように代表的個人の効用関数は環境水準に影響されることになる．

汚染の蓄積方程式は次のように書ける．

$$\dot{X}(t) = x(t) - \eta X(t) \quad (6)$$

ここで， η は汚染の自然浄化能力の程度（あるいは汚染除去比率）を表し， $\eta \in [0, 1]$ であるとする¹⁰．なお，変数に関するドットは時間に関する導関数，すなわち， $\dot{X}(t) \equiv dX(t)/dt$ を表すものとする．

⁹ (1)，(2) 式から明らかなことであるが， $z(t)$ の値が大きいたまには， $z(t)$ をわずかに減少させることによる生産量の減少に比べて汚染排出量の減少幅の方がより大きいことになる．一方， $z(t)$ の値が小さいときには汚染排出量の減少幅はそれほど大きくない．

¹⁰ $\eta = 1$ のときは，汚染ストックが当期中に除去されてしまうことから，フローの汚染物質を意味する特別な場合と考えられる．

また，資本の蓄積方程式は，

$$\dot{K}(t) = Ae^{gt}K(t)^\alpha L^{1-\alpha}z(t) - \delta K(t) - C(t)$$

すなわち，

$$\dot{k}(t) = Ae^{gt}k(t)^\alpha z(t) - \delta k(t) - c(t) \quad (7)$$

となる．ここで， δ は資本減耗率であり， $\delta \in [0, 1]$ とし， $C(t) \equiv c(t)L$ は総消費量を表す．

以上の設定のもとで，社会的計画者は次の代表的個人の目的関数最大化問題を解くことになる．

$$\begin{aligned} \text{(問題)} \quad & \max \int_0^\infty e^{-\rho t} \left(\frac{c(t)^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma} - \frac{B}{\gamma} X(t)^\gamma \right) dt \\ & \text{subject to} \quad \dot{k}(t) = Ae^{gt}k(t)^\alpha z(t) - \delta k(t) - c(t) \\ & \quad \dot{X}(t) = Ae^{gt}k(t)^\alpha Lz(t)^\beta - \eta X(t) \\ & \quad k(0) = k_0, \quad X(0) = X_0 \end{aligned}$$

ただし， ρ は主観的割引率であって， $\rho \in (0, 1)$ とする．

定常状態 (steady state) への最適経路上においては，次の条件が満たされることになる (補論 A.1 節参照)．

$$c(t) = \lambda(t)^{-\frac{1}{\sigma}} \quad (8)$$

$$z(t) = \begin{cases} 1 & (\lambda(t) \geq \mu(t)\beta L \text{ のとき}) \\ \left(\frac{\lambda(t)}{\mu(t)\beta L} \right)^{\frac{1}{\beta-1}} & (\lambda(t) < \mu(t)\beta L \text{ のとき}) \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{\dot{\lambda}(t)}{\lambda(t)} = \begin{cases} \rho + \delta - \alpha \left(1 - \frac{\mu(t)L}{\lambda(t)} \right) \frac{y(t)}{k(t)} & (z(t) = 1 \text{ のとき}) \\ \rho + \delta - \alpha \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) \frac{y(t)}{k(t)} & (z(t) < 1 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\dot{\mu}(t)}{\mu(t)} = \rho + \eta - \frac{BX(t)^{\gamma-1}}{\mu(t)} \quad (11)$$

ただし， $\lambda(t)$ ， $\mu(t)$ はそれぞれ資本ストック $k(t)$ ，汚染ストック $X(t)$ のシャドー・プライス (shadow price) あるいは効用単位での帰属価値を表す．

次に各変数の動学を検討する．このモデルには 2 つの状態変数 (state variable) $k(t)$ ， $X(t)$ があるので，位相図 (phase diagram) による分析は不可能である．そこで，いくつかの変数に焦点を当てて考察する．今，初期資本ストック $k(0) = k_0$ が定常状態より小さな値をとっているものとする．このとき資本ストック $k(0)$ のシャドー・プライス $\lambda(0)$ は汚染ストック $X(0)$ のシャドー・プライス $\mu(0)$ より十分大きく，その結果 $z(0)$ は 1 の値を

とる． $k(t)$ は最適経路において定常状態に向けて通時的に上昇するが， t が十分小さい場合（経済発展の初期段階にある場合）は $k(t)$ は小さく， $z(t) = 1$ の状態となる． $z(t) = 1$ のときは $y(t)$ ， $k(t)$ ， $x(t)$ とともに通時的に上昇する．しかし資本蓄積が進むにつれて， $\lambda(t)$ は低下し， $\mu(t)$ は上昇する．そしてある時期を過ぎると $\lambda(t)$ は $\mu(t)$ より小さくなり， $z(t) < 1$ となる．その後 $z(t)$ は通時的に減少する．この場合，汚染排出量も減少する可能性がある．

次に定常状態に焦点を当て，長期的な成長率を見してみる．この経済は唯一の（内点）定常状態に収束する．定常状態における $y(t)$ ， $k(t)$ ， $c(t)$ の成長率は同一となり，それは，次式で与えられる．

$$g_y = \frac{\gamma(\beta - 1)g}{(1 - \alpha)\gamma(\beta - 1) + (\gamma + \sigma - 1)} \quad (12)$$

ここで， $g_{\bullet}$ は添字の変数に関する成長率を表す（ $g_y \equiv \dot{y}/y$ ）．このとき汚染排出量の変化率は次式となる（補論 A.2 節参照）．

$$g_X = g_x = \frac{1 - \sigma}{\gamma} g_y \quad (13)$$

したがって $\sigma > 1$ のとき，かつそのときに限って (13) 式はマイナスになり，長期的に汚染フローおよび汚染ストックは減少する¹¹．すなわち環境クズネッツ曲線は右下がりになる¹²．

以上をまとめると，経済発展の初期段階では生産の増加とともに汚染排出も増加するが，経済がある一定水準にまで発展すると省エネなど環境に配慮した生産技術が導入され，汚染排出量が減少する．また，定常状態においても汚染のフローおよびストックは減少する．すなわち環境クズネッツ曲線が理論的に導出されたことを示している．ただしそれは，消費の異時点間の代替の弾力性の逆数 σ に関する条件に依存している．なお，このモデルで理論的に導出された環境クズネッツ曲線を模式的に示すと図 2 のようになる．

¹¹ 上でみたように，Stokey（1998）のモデルでは技術進歩が外生的に与えられている．伊ヶ崎（2004）では技術進歩を内生化する試みを行っている．そこでは持続可能な成長が可能となっており，かつ（技術進歩が内生的，外生的にかかわらず $\sigma > 1$ のときに）汚染排出量は通時的に減少することが示されている．

¹² (12)，(13) 式から明らかなように， η は長期的な成長率および汚染排出量変化率には含まれない．すなわち汚染のストックとフローの相違は長期的な成長率および汚染排出量変化率に影響を与えないことがわかる．また，資本ストックの減耗率 δ も長期的な成長率および汚染排出量変化率に影響を与えないことがわかる．なお，宇沢（1995）では最適成長モデルによって二酸化炭素のストックは成長率と無関係であると指摘されている．

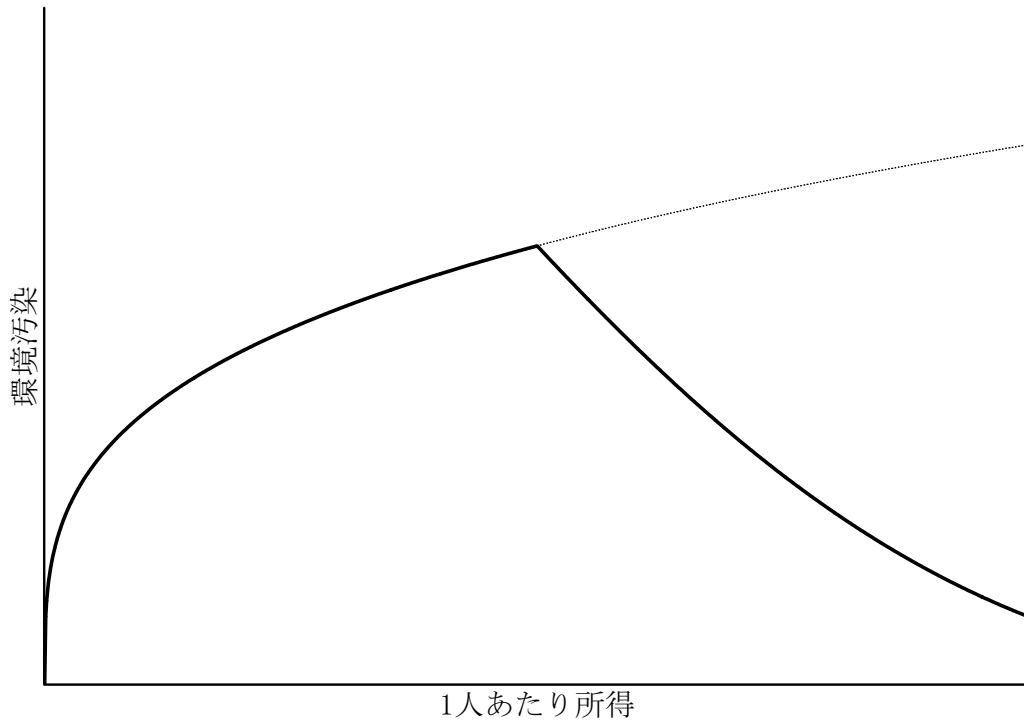


図 2 環境クズネッツ曲線 (Stokey モデル)

2.3 実証分析のサーベイ

環境クズネッツ曲線に関しては、ナイブな概念であることや解明されていない点が多いことなど、その不完全性がゆえに研究者の関心を引くことになった。元々実証研究が先行していたこともあって、これまでに豊富な研究蓄積がある。そのすべてを網羅することは困難であるので、ここでは代表的な研究のいくつかを取り上げる。

Grossman and Krueger (1991) の先駆的な研究以来、実証研究においては、1 人あたり所得水準の 2 次式によって 1 人あたり汚染水準を説明しようとするものが一般的となっている¹³。標準的な回帰式は次のようなものであり、これは現在多くの実証研究においてパネルデータが用いられていることに対応している。

$$\left(\frac{E}{P}\right)_{it} = \mu_i + \lambda_t + \beta_1 \left(\frac{GDP}{P}\right)_{it} + \beta_2 \left(\frac{GDP}{P}\right)_{it}^2 + u_{it} \quad (14)$$

¹³ 速水 (2000) 等、単位所得あたりの二酸化炭素排出量を被説明変数としている研究も存在するが、これは省エネなどのエネルギー利用効率の指標であり、環境クズネッツ曲線あるいは環境水準一般の指標としては必ずしも適切ではないかもしれない。

ここで、 E は環境汚染の指標、 P は人口である。また、 i は国や地域、 t は時間、 μ_i は個別効果、 λ_t は時間効果を表している¹⁴。

このとき、 $\beta_1 > 0$ 、 $\beta_2 < 0$ で統計的に有意であって、汚染水準が低下に転じる「転換点」(turning point) が常識的に考えて納得できる水準にあれば環境クズネッツ曲線が成立するとされる (Selden and Song, 1994)。(14) 式の場合、転換点を示す 1 人あたり所得水準は $(-\beta_1/(2\beta_2))$ で与えられる。そして、実証分析上の最大の関心は転換点の水準がどのくらいであるかということにある。

実際の分析では (14) 式を基本とするが、特に森林などの天然資源利用を分析対象にする場合は、被説明変数がゼロ以下になることは許されない。この点を考慮して対数線形や半対数線形にしたモデルもある。また、1 人あたり所得水準の 3 次の項を加えている分析もある。これは、所得の上昇により汚染水準が低下するのは一時的なもので、技術的な限界等の理由により、さらに高い所得の段階に移行すると逆に汚染水準が悪化する、すなわち、環境クズネッツ曲線は N 字型を示すという仮説にしたがった定式化である¹⁵。さらに追加的な説明変数を伴った研究も存在する¹⁶。

これまでの実証研究においては、大気質、水質、廃棄物、都市衛生、エネルギー利用等が対象になってきた。とりわけ大気質 (二酸化硫黄: SO_2 、窒素酸化物: NO_x 、一酸化炭素: CO 、二酸化炭素: CO_2 、粒子状浮遊物質: SPM) に関するものが研究の中心を占めている。

二酸化炭素以外の大気質に関する代表的な研究としては以下のものがある。Selden and Song (1994) は、二酸化硫黄、粒子状浮遊物質、窒素酸化物、一酸化炭素の分析を行っており、環境クズネッツ曲線の成立を確認している。転換点は 10,000 米ドル (1985 年価格) 前後の水準となっている。特徴的な点は説明変数に人口密度を加えていることである。Grossman and Krueger (1995) は大気質と河川水質に関する計 14 種類の環境指標を対象にして分析している。そのほとんどの環境指標について環境クズネッツ曲線が成立するこ

¹⁴ 本節では、変数記号の表記法が 2.2 節とは異なっている点、注意する必要がある。

¹⁵ N 字型曲線の可能性を考慮して 3 次の項を説明変数に加えている分析としては、Grossman and Krueger (1995)、Vincent (1997) などがあり、有意な結果を得ている。大坂 (2002) は二酸化炭素の分析に所得の 3 次関数を適用しているが N 字型曲線の成立には否定的である。なお、二酸化炭素に関して日本のデータのみを観察すると、N 字型を示しており、逆 U 字型の環境クズネッツ曲線は当てはまらないように見える。

¹⁶ Agras and Chapman (1999) では、所得以外の説明変数をサーベイしている。しかし、過去の研究においては結局のところ所得の説明力が一番高いとしている。Stern (1998)、Neumayer (2002) でも同様の結論を支持している。

とを確認している．転換点は多くの環境指標で 8,000 米ドル（1985 年価格）未満となっている．Cole *et al.* (1997) では，追加的ないくつかの説明変数を利用し，ローカルな大気汚染物質について環境クズネッツ曲線の成立を支持している．転換点は汚染物質によって異なるが 6,000 から 18,000 米ドル（1985 年価格）の水準となっており，サンプルの範囲内に収まっている．Stern and Common (2001) は硫黄排出物を対象にしている．逆 U 字型の関係を確認しているが，サンプルとして OECD 諸国を採った場合は，転換点もサンプル内の妥当な水準（9,181 米ドル，1990 年価格）であるのに対して，非 OECD 諸国や全世界をサンプルにした場合には転換点の水準が極端に高くなり，実質的には単調増加の関係を示している．このように，サンプルの選択が重要な影響を及ぼすことを指摘している．

以上のように，人間の健康に直接的な影響を及ぼす大気汚染物質のいくつかの環境指標については環境クズネッツ曲線の成立を支持する研究が多い．しかし，環境改善が開始する転換点については一致した見解や合意は見られない．

一方，二酸化炭素など地球規模での汚染物質については，他の大気質に比べて研究の蓄積は少なく，かつ環境クズネッツ曲線の成立について明快な結論は得られていないのが現状である．二酸化炭素に関する代表的な研究としては次のものがある．Shafic (1994) は World Bank (1992) を発展させたものであるが，そこでは環境クズネッツ曲線は単調増加するとしている．Holtz-Eakin and Selden (1995) では逆 U 字の関係を見出しているが，その転換点は 35,428 米ドルまたは 800 万米ドル以上の極端に高い値であり，実質的に単調増加に等しい．Schmalensee *et al.* (1998) では，同じデータを利用し高所得の国において負の所得弾力性が確認できること，つまり環境クズネッツ曲線の成立を支持しており，その転換点もサンプルの範囲内にあるとしている．

Agras and Chapman (1999) は説明変数にエネルギー価格と貿易量-GDP 比を採用している．さらに自己回帰分布ラグ (autoregressive distributed lag: ADL) モデル (ADL(1,0)) を適用し，ダイナミックな過程を考慮している点に特徴がある．結論としてエネルギー価格は重要な説明変数となりうることを指摘し，転換点は 13,630 ドル（1985 年価格）としている．速水 (2000) は，1995 年時点のクロス・カントリー 25 カ国の簡単な分析である．所得あたりの排出量を 1 人あたり所得で説明している．環境クズネッツ曲線が成立するとしており，その転換点は 10,000 米ドル（1995 年価格）弱となっている．Neumayer (2002) は，気温などの自然要因や一国の経済活動地域面積比率を説明変数に加えている．Cole (2003) は，貿易の影響を考慮しているのが特徴的である．環境クズネッツ曲線の成立を確認してお

り、転換点の水準は採用するモデル（説明変数）により差があるが、20,352 から 56,696 米ドル（1985 年価格）の幅にあるとしている。

Dijkgraaf and Vollebergh（2005）では、転換点として 20,600 米ドル（1990 年価格）を得ているが、各国のパラメータの同質性は成立しないという結論を得ている。つまり、各国共通の環境クズネッツ曲線は成立せず、個別効果で各国の異質性を考慮するのみならず、所得にかかるパラメータにも異質性を許す必要があると主張している。Richmond and Kaufmann（2006）では、変数欠落バイアスに対応するため、説明変数に燃料種別のシェアを採用している。結論として全サンプルでは環境クズネッツ曲線が成立し、29,687 米ドル（1996 年価格）の転換点を得ている。また、OECD 諸国のみから構成されるサブサンプルでも成立を確認している（転換点は 25,450 米ドル）が、非 OECD 諸国のみのサブサンプルでは成立しないとしている。Galeotti *et al.*（2006）は IEA のデータと ORNL のデータとで推定結果を比較している。加えて従来の所得の多項式とは別の非線形の関数型を採用し検討を加えている点が特徴的である。環境クズネッツ曲線の成立を確認しており、転換点は採用する関数型やデータ・ソースにも依存するが、OECD 諸国で 15,698 米ドルから 16,595 米ドル、非 OECD 諸国のサンプルで 15,600 から 21,186 ドル（1990 年価格）の範囲にあるとしている（表 1 参照）¹⁷。

このように、二酸化炭素の場合は、環境クズネッツ曲線は単調増加するという場合と成立するという場合が並存している。推定期間の終期が 1995 年以降である分析では成立するという結論が多くなる傾向がある。成立するという場合も転換点は 20,000 米ドルを超えているケースが多く、他の汚染物質と比べて高い水準にあるというのが現状の研究動向である。また、二酸化炭素に関しては、個別の国に関して成立が観察されたとしても、世界全体では単調増加となり成立しないと結論する研究もあり、サブサンプルと全体とでは異なる推定結果である研究結果も多い。

以上をまとめると、大気質に関して環境クズネッツ曲線が観察されるのは、汚染エリアがローカルであって、比較的短時間のうちに分解されるという意味でフローの、しかも既に何らかの規制が導入されているという特徴を持つ汚染物質についてであるといえる。二酸化炭素のようなストックの汚染物質で規制が導入されていないか導入後間もないという特徴を有する場合には、環境クズネッツ曲線の存在については議論の余地が残されているという見方が一般的である。

¹⁷ 実証研究では二酸化炭素の排出のみを扱っており、吸収源を考慮したものは見あたらない。

表 1 環境クズネッツ曲線（二酸化炭素）に関する代表的実証研究

	データ	推定期間	分析国数	曲線の形状	転換点	モデルの特徴等
Shafik (1994)	ORNL PWT	1960-89	153	単調増加	—	
Holtz-Eakin and Selden (1995)	ORNL PWT	1951-86	130	(逆 U 字型)	35,428-800万 (1985USDル)	実質的に単調増加と結論
Cole <i>et al.</i> (1997)	ORNL PWT	1960-91	7 地域	(逆 U 字型)	25,100-62,700 (1985USDル)	実質的に単調増加と結論
Schmalensee <i>et al.</i> (1998)	ORNL PWT	1950-90	141	逆 U 字型	N.A. (1985USDル)	
Agras and Chapman (1999)	ORNL PWT, UN	1971-89	34	逆 U 字型	13,630 (1985USDル)	貿易指標とエネルギー価格を採用 自己回帰分布ラグモデル
Galeotti and Lanza (1999)	IEA OECD	1971-96	110	逆 U 字型	15,073-16,646 (1990USDル)	非線形の関数型を採用
速水 (2000)	WDI	1995	25	逆 U 字型	9,258-9,601 (1995USDル)	1995 年のクロス・カントリ分析
Neumayer (2002)	ORNL PWT	1960-88	106	(逆 U 字型)	N.A. (1985USDル)	自然要因を考慮 実質的に単調増加と結論
Cole (2003)	ORNL PWT	1975-95	32	逆 U 字型	20,352-56,696 (1985USDル)	貿易を考慮
Dijkgraaf and Vollebergh (2005)	OECD	1960-97	24	(逆 U 字型)	20,647 (1990USDル)	所得のパラメータが各国共通の 環境クズネッツ曲線は成立しない
Richmond and Kaufmann (2006)	IEA PWT	1973-97	36	逆 U 字型	29,687 (1996USDル)	燃料種別シェアを採用
Galeotti <i>et al.</i> (2006)	IEA, ORNL OECD, WDI	1960-97	N.A.	逆 U 字型	15,600-21,186 (1990USDル)	非線形の関数型を採用

(注) ORNL: Oak Ridge National Laboratory, PWT: Penn World Table, WDI: World Development Indicator.

曲線の形状におけるカッコは、逆 U 字曲線が形式的には成立するが実質的に成立していないことを意味する。

Galeotti *et al.* の転換点は、OECD 諸国と非 OECD 諸国のサンプルによる推定結果を合わせたものである。その他の研究の転換点は全世界（全サンプル）ベースである。

3 環境クズネツツ曲線の問題点

3.1 問題点 (1)—概念的側面

環境クズネツツ曲線は以上で見たように理論的にも実証的にも非常にナイーブな仮説であるといえる。そのためこれまでに多くの研究成果がもたらされることになったが、その一方で多くの批判的検討も行われてきた。そこでここでは先行研究を踏まえ、環境クズネツツ曲線の概念的側面を中心にこうした批判や問題点を簡単に整理してみたい。

環境クズネツツ曲線については、(1) 低所得のうちは環境と経済成長はトレード・オフの関係にあるので、成長のためには多少の環境汚染はやむを得ず、その結果として不可逆的な環境破壊を生じさせる可能性があること、(2) 汚染の増大に伴い環境は相対的に希少な財になり、その価値は増加すること、また、成長に伴う資本蓄積もあって適切な汚染防止対策がとられるようになることから、成長と環境保全の両立がはかれるようになる、という理解が一般的になされる傾向がある。そして初期の頃の研究のほとんどは環境クズネツツ曲線の存在、すなわち、経済成長と環境改善は関連づけられるのか否かを検証することに力点が置かれていた¹⁸。

しかしながら、批判的検討の契機となった Arrow *et al.* (1995) は、「いくつかの環境指標で経済成長と環境改善が関連づけられたとしても、一般に環境改善を誘発するためには経済成長だけで十分であるということではなく、経済成長による環境への影響を無視してよいということでもない」と述べている。経済成長のみに依存すべきでないとするこの批判に異論を挟む余地は少ないであろう。彼らはこの点に加えていくつかの問題点の指摘を行っている。また、他の論文でもこれを踏まえた形でさまざまな問題点の指摘がなされている。

Arrow *et al.* (1995) やその後発表されたいくつかの論文で指摘されている問題点を要約すると次のようになる¹⁹。

問題の第 1 は、環境破壊が生産および所得に及ぼすフィードバック効果が考慮されていないことである。本来であれば環境破壊は成長を抑止する方向に影響を与えられらるが、環境クズネツツ曲線では所得が外生変数として仮定されており、生産および所得から環境への経路しか考慮されていないため、こうした相互依存関係のメカニズムが考慮されて

¹⁸ このような研究動向は現在もそれほど変わっていない。

¹⁹ Arrow *et al.* (1995) を巡っては、*Ecological Economics*, Vol. 15, No. 2, 1995 年、*Environmental and Development Economics*, Vol. 1, Part 1, 1996 年、においていくつかの議論が行われている。

いない。

第 2 は、システム全体における排出削減については何も言及していない点である。先進国では多くの汚染物質についてその汚染水準は環境規制の導入や技術進歩により低下した。しかし、ある国におけるある汚染物質の削減は、その物質と代替的な他の汚染物質の排出をもたらすかもしれない。あるいは、当該物質の他国での排出を誘発するなど、他の問題を誘発する可能性も考えられる。

第 3 は、貿易の影響に関するものである。労働や天然資源が相対的に豊富な発展途上国が、人的資源が豊富な先進国より汚染を伴う生産に比較優位を持つ。貿易が比較優位に基づいて行われるとするならば、所得が低く、汚染に対する選好があまり強くない発展途上国は汚染集約的な産業に特化し、排出を増加させることになる。また、先進国における環境規制の増加は、より規制が緩い国や地域への汚染集約的産業の移転を伴う²⁰。こうした汚染集約的産業の移転は、より低所得国へと向かうことになる²¹。しかし既存の研究ではこのような貿易の影響（あるいはリーケージの影響）が考慮されているものは少ない。

第 4 は、世界各国の所得分布と長期的動向に関するものである。個々の国や汚染物質に関して環境クズネッツ曲線の存在が確認されたとしても、世界の所得分布は一樣ではないことが問題になる。世界では発展途上国に属する人口が大部分であるので、曲線の右上がりの部分に位置する彼らが成長を続けるならば、今後相当の長期間にわたって、世界全体で見た汚染水準は悪化し続けると予想される。すなわち、地球規模で見た環境クズネッツ曲線は単調増加の可能性がある²²。

このように、環境クズネッツ曲線が存在するとしても、なぜそれが生起するのかという問題に関する産業構造・貿易構造や制度的側面等にまで立ち入った分析は、現在のところ理論的にも実証的にもあまり行われていない²³。

²⁰ 大抵の場合は、環境の改善は所得の上昇というよりもむしろ、外部不経済を内部化するための当該国の制度上の改革、すなわち環境規制の導入やインセンティブを伴う制度の導入、あるいはそこから派生する技術革新によってもたらされるのではないかとする指摘もある。

²¹ 最後に汚染移転を受けた国は、経済成長を実現できたとしても、それ以上汚染を移転させうる国が既に存在しないので、環境改善を達成することは不可能かもしれない。

²² Selden and Song (1994), Holtz-Eakin and Selden (1995) を参照。

²³ 二酸化炭素の場合、逆 U 字曲線が成立するとしても、それは削減努力がなされたというよりも、むしろ単に石油危機とその後の省エネルギーの反映でしかないのではないかという批判も多い。

3.2 問題点 (2)—実証的側面

環境クズネツ曲線の実証研究については、前節で言及したもの以外にもさまざまな環境指標を対象にして、大変多くの結果が報告されている。これらの成果を踏まえて、ここでは実証分析の観点からの問題点を簡単に整理してみたい。

問題の第 1 は、モデルの定式化に関するものである。推定モデルは初期の頃から現在に至るまで (14) 式のように、所得の多項式で回帰するのが標準的手法となっている。一方、理論モデルによる説明は実証分析に比べ遅れて進展したが、理論モデルにしたがった実証分析は存在しない。所得の多項式による推定ではパラメータの値に対する経済学的な解釈を与えることはできず、理論と実証との間に距離感があるナイーブなものとなっている。このような定式化による推定がやむを得ないと考えられているのは、主として環境指標データの利用可能性やデータの質の問題が大きいと思われる。

また、多くの実証研究はパネルデータに基づいて行われており、個別国ごとの推定はあまり行われていない。パネルデータによる推定は、すべての国が同様の軌跡を持つことを想定している。しかし、容易に想像がつくように、実際には自然条件や社会状況など経済発展を規定する各種の条件は国ごとに異なる。また、発展途上国では後発の利益により、曲線が左下にシフトしている可能性も考えられる。このためパネルデータによる分析手法に対する疑問もある。Dijkgraaf and Vollebergh (2005) はパネルデータを用いた各国同一のパラメータ推定には問題があると主張し、二酸化炭素に関する環境クズネツ曲線の存在に疑問を呈している。

定式化に関しては、変数欠落のバイアス (omitted variable bias) の問題も指摘されている。所得の多項式による推定が行われた場合にも、所得以外に環境指標に影響を与えると考えられる変数、例えば貿易の影響やエネルギー価格の影響などが欠落しているという問題である²⁴。産業構造の変化や制度的変更の影響を分析した研究がほとんど存在しないのも、利用可能データの不足による変数欠落の問題として考えられる。

問題の第 2 は、計測に際しての技術的な問題である。一つには同時性 (simultaneity) の問題がある。前述のように環境クズネツ曲線は所得の多項式により推定されているが、こ

²⁴ 説明変数に貿易の影響を加えたものとして、Suri and Chapman (1998)、Cole (2003, 2004) がある。エネルギー消費構造の影響を考慮したものとして Richmond and Kaufmann (2006) がある。また、気温などの自然要因を考慮したものとして Neumayer (2002) がある。

れは外生変数である所得から環境負荷への因果関係を示すものにすぎず、逆方向の因果関係については何も説明していない²⁵。また、前述した変数欠落のバイアスは、系列相関の問題をもたらすほか、固定効果推定とランダム効果推定の推定量の大きな相違を招いたり、サブサンプルの採り方次第で推定量にばらつきが出たりするなどの弊害をもたらしている。

不均一分散の問題も指摘されている。パネルデータによる分析は個別経済主体の相違に焦点を当てているので、一般的にこの問題はパネルデータでは常に存在する。環境クズネッツ曲線に関しても、その背景にある各国の社会的条件は異なるのが自然である。

さらに、Stern and Common (2001) が指摘するように、データの定常性の問題がある。これまでの環境クズネッツ曲線に関する実証研究では、データの定常性についてはあまり意識されていなかった。最近になって Perman and Stern (2003)、および二酸化炭素のデータに関しては Cole (2003)、Dinda and Coondoo (2006) や Richmond and Kaufmann (2006) などごく少数の研究が単位根検定や共和分検定を行っているにすぎない。

以上のように、これまで報告されてきた環境クズネッツ曲線の推定結果には多くの問題があるといわざるを得ない。しかしながら、こうした点を改善しようとする場合にも、環境に関する利用可能なデータが質的にも量的にもきわめて不十分であるという現状を踏まえると、困難や限界に直面せざるを得ない。

以下では、環境クズネッツ曲線の問題点のうち実証的側面、とりわけ計測に際しての技術的側面に焦点を当てて、その改善を試みた分析を行う。表 1 に掲げた既存の実証分析では、主としてモデルの定式化に焦点を当てた分析がほとんどであり、技術的側面の問題点に対応した分析はなかったからである。

²⁵ Coondoo and Dinda (2002) は二酸化炭素排出と所得について、1960–90 年のデータによりグレンジャーの因果関係テストを行っている。途上国では因果関係なしあるいは所得から排出の因果関係が見られ、先進国では排出から所得への因果関係があると報告している。

4 実証分析

4.1 データ・ソース

環境クズネツ曲線の推定を行うにあたって、まず利用するデータについて概観する。

本稿では推定にあたって利用可能な最新のデータを採用する。この点は本稿の特徴の一つである。これまでの二酸化炭素に関する環境クズネツ曲線の実証分析では大半が 1990 年前後ないし 1995 年までのデータを用いており、ごく最近になって Dijkgraaf and Vollebergh (2005) などいくつかの研究が 1997 年までのデータを分析しているにすぎなかった。本稿では 2003 年までのデータを分析対象とすることにより、1997 年に採択された京都議定書が何らかの構造変化をもたらしたのであれば、それを確認することも目的の一つとしている。

各国の二酸化炭素データについては、先行研究と同様に Oak Ridge National Laboratory (ORNL) のものを利用した。このデータでは化石燃料の消費とセメント生産からの二酸化炭素排出量が利用可能となっており、最新のデータでは 2003 年までの排出量が提供されている。なお、二酸化炭素はストックの汚染物質であるが、(13) 式よりストックとフローの相違はないと考え、ストック系列は作成せず、先行研究と同様にフローのデータを利用することにする²⁶。

1 人あたり所得に関するデータについては、基本的に Penn World Table Version 6.2 (PWT 6.2) (Heston *et al.*, 2006) を利用した。1 人あたり実質 GDP のデータとして採用したのは系列 RGDPCH である。これは購買力平価 (PPP) で評価されている。ただし、収録されている国・地域のうち、Grade D であるもの (推定精度が相対的に劣るもの) については、これを分析対象から除外している²⁷。また、異常値による変動を回避するため、各国のデータの分布状況を検討した結果、特異性がある国を除外した²⁸。

本稿で利用するデータセットは、以上のような方法により ORNL と PWT 6.2 から共通

²⁶ スtock変数としては (1) 累積排出量、(2) 大気中の濃度、が考えられる。前者は吸収や分解が考慮されていないこと、後者は、(科学的な厳密性は欠くが) 国別で相違はなく地球上でほぼ一定であると考えられることから、環境クズネツ曲線の分析目的にあまり適さない。こうした理由もあって本稿では先行研究と同様にフローのデータを利用している。

²⁷ 各国の Grade に関する情報は、PWT 6.1 のものを利用している。

²⁸ 具体的にはバーレーン、クウェート、ルクセンブルク、カタールを除外した。さらに、観測値数が少ないアルメニア、アゼルバイジャンも除外している。

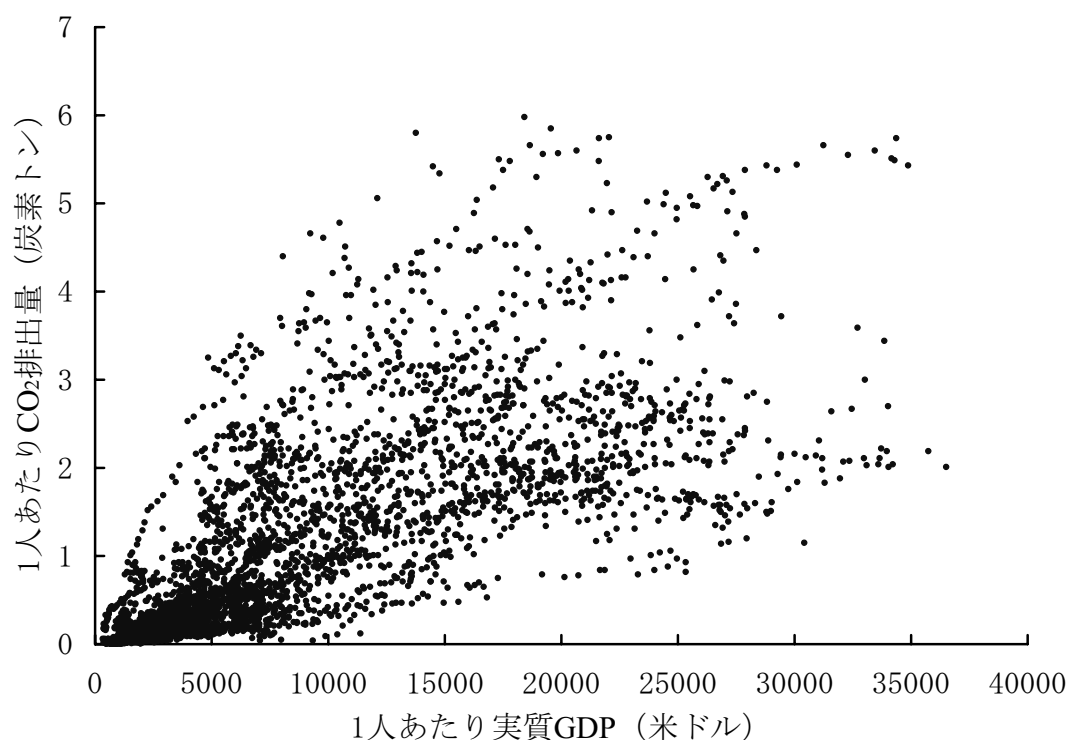


図3 散布図（全観測値）

して得られた 124 カ国・地域について，基本的に 1960 年から 2003 年までの時系列データを利用して構築したパネルデータである．時系列方向に関しては，一部の国について 2003 年までのデータ取得や 1960 年までのデータの遡及が不可能だったケースもある．そのため分析対象とするデータセットは非バランス型・パネルデータ（unbalanced panel data）である．124 カ国・地域のうち 1960 年から 2003 年までデータが揃っているのは 73 カ国・地域（全体の 59 %）である．分析対象の 124 カ国・地域は 2003 年において，人口ベースで見ると世界の約 92 %（PWT 6.2 ベース）を占めており，また，二酸化炭素排出量で見ると世界全体の排出量の約 89 %（ORNL ベース）をカバーしている．全観測値の散布図を示すと，図 3 のようになる．

分析対象とした国・地域を「気候変動枠組条約」附属書の分類により整理すると，表 2 のようになる²⁹．本稿では主として全サンプルによる推定に関心を寄せるが，後の実証分析で

²⁹ 先行研究においては分析対象国を OECD 諸国と非 OECD 諸国とに分類しているものがほとんどである．環境クズネッツ曲線は経済発展との関連を捉えるものであるからこの分類方法は適切なものであるといえる．本稿において気候変動枠組条約附属書の分類にしたがったのは，附属書 I 国の大部分は OECD に加盟しており，先行研究の分類と大きな差はないこと，さらに，地球温暖化問題の国際交渉が当該条約に基づくグループで行われることが多いといった政治的な背景を意識していることによる．

表 2 分析対象国（気候変動枠組条約附属書に基づく分類）

附属書 I 国（36 カ国）
附属書 II 国（23 カ国）
オーストラリア ^{*†} 、オーストリア [*] 、ベルギー [*] 、カナダ [*] 、デンマーク [*] 、フィンランド [*] 、フランス [*] 、ドイツ [*] 、ギリシャ [*] 、アイスランド [*] 、アイルランド [*] 、イタリア [*] 、日本 [*] 、オランダ [*] 、ニュージーランド [*] 、ノルウェー [*] 、ポルトガル [*] 、スペイン [*] 、スウェーデン [*] 、スイス [*] 、トルコ ^{*†} 、イギリス [*] 、アメリカ合衆国 ^{*†}
市場経済移行国（13 カ国）
ブルガリア、クロアチア [†] 、チェコ [*] 、エストニア、ハンガリー [*] 、ラトビア、リトアニア、ポーランド [*] 、ルーマニア、ロシア、スロバキア、スロベニア、ウクライナ
非附属書 I 国（85 カ国）
アルバニア、アンチグア・バーブーダ、アルゼンチン、バハマ、バングラデシュ、バルバドス、ベリーズ、ベニン、ボリビア、ボツワナ、ブラジル、ブルキナファソ、ブルンジ、カメルーン、チリ、中国、コロンビア、コンゴ、コスタリカ、コートジボワール [†] 、ドミニカ、ドミニカ共和国、エクアドル、エジプト、エルサルバドル、エチオピア、フィジー、ガボン、ガンビア、グルジア、ガーナ、グレナダ、グアテマラ、ギニア、ホンジュラス、インド、インドネシア、イラン、イスラエル、ジャマイカ、ヨルダン、カザフスタン [†] 、ケニア、韓国 [*] 、キルギスタン、レバノン、マケドニア、マダガスカル、マラウイ、マレーシア、マリ、モーリタニア、モーリシャス、メキシコ [*] 、モルドバ、モロッコ、ネパール、ニカラグア、ナイジェリア、オマーン、パキスタン、パナマ、パラグアイ、ペルー、フィリピン、ルワンダ、セネガル、シエラレオネ、シンガポール、南アフリカ、スリランカ、セントクリストファー・ネービス [†] 、セントルシア、セントビンセントおよびグレナディーン諸島、スワジランド、シリア、タンザニア、タイ、トリニダード・トバゴ、チュニジア、ウルグアイ、ベネズエラ、ベトナム、ザンビア、ジンバブエ [†]
気候変動枠組条約の非対象地域（3 地域）
バミューダ [†] 、香港 [†] 、マカオ [†]

（注）“*”は OECD 加盟国。

“†”は京都議定書未批准国（2007 年 2 月 14 日現在）。

はこの分類に基づくサブサンプルによる推定も行う。

分析対象となるデータの記述統計量は、表 3 のようになる³⁰。平均値を見るといわゆる先進国グループである「附属書 II 国（23 カ国）」の値が二酸化炭素排出量、実質 GDP とも高い。ただし、二酸化炭素に関して平均値と中央値に乖離があり、分布に偏りがあることがうかがわれる。「非附属書 I 国（85 カ国）」および「気候変動枠組条約の非対象地域（3 地域）」（以下、この 88 カ国・地域を「非附属書 I 国等（88 カ国）」という）はいわゆる発展途

³⁰ 1 人あたり実質 GDP の 2 乗項については省略している。

表 3 記述統計量

	平均値	中央値	最大値	最小値	標準偏差	変動係数	観測値数
1人あたり CO ₂ 排出量 (CO ₂ /P): 炭素トン/人							
全対象国 (124 カ国)	0.98	0.44	5.98	0.01	1.13	0.87	4,520
附属書 I 国 (36 カ国)	2.23	2.06	5.85	0.17	1.08	2.07	1,211
附属書 II 国 (23 カ国)	2.27	2.08	5.85	0.17	1.13	2.00	981
市場経済移行国 (13 カ国)	2.05	1.95	4.40	0.69	0.78	2.62	230
非附属書 I 国等 (88 カ国)	0.53	0.25	5.98	0.01	0.75	0.71	3,309
1人あたり実質 GDP (GDP/P): 米ドル/人							
全対象国 (124 カ国)	7,740	5,007	36,505	332	7,240	1.07	4,520
附属書 I 国 (36 カ国)	14,981	14,806	34,875	1,276	6,836	2.19	1,211
附属書 II 国 (23 カ国)	16,507	16,582	34,875	2,250	6,481	2.55	981
市場経済移行国 (13 カ国)	8,473	7,928	19,758	1,276	3,821	2.22	230
非附属書 I 国等 (88 カ国)	5,090	3,546	36,505	332	5,319	0.96	3,309

(注) 1人あたり実質 GDP は 2000 年価格。

上国のグループであるが、イスラエル、シンガポール、香港、マカオ等の比較的所得の高い国・地域も含む。したがって、二酸化炭素、実質 GDP とともに最大値と平均値・中央値の乖離が大きく、分布が極端に偏っている。また、「市場経済移行国（13 カ国）」はほとんどの国において 1992 年以降のデータしか揃っていないことを踏まえると、分析結果にはある程度のバイアスが生じる可能性がある点、留意が必要である。

4.2 パネルデータの定常性

4.2.1 パネル単位根検定

環境クズネッツ曲線の実証分析においてはパネルデータの利用が主流となっている。パネルデータでも時系列方向にかなり長期にわたるのであればデータの定常性について考慮する必要があるが、これまで定常性に関して注意が払われることは少なかった。パネルデータが非定常な変数である場合、時系列データ分析と同様に見せかけの（spurious）回帰になってしまうおそれがある。しかし、個別主体ごとの単位根検定は検定力が低く³¹、データが非定常過程であるという帰無仮説を受容しがちであるという問題点がある。近年、パネルデータの単位根検定に関する手法が発展してきたことにより、分析に先立ってデータの特性について検討を加える研究も現れ始めた。Perman and Stern（2003）は硫黄排出物を対象としているが、回帰分析で使用する各変数に関してパネル単位根検定を行っており、「単位根がある」という帰無仮説を棄却できないという結論を得ている。Cole（2003）は二酸化炭素排出量および所得その他の説明変数に関してパネル単位根検定を実施しているが、同様に帰無仮説を棄却することはできず、1 階の階差をとった系列が定常であること、すなわち $I(1)$ であるという結論を得ている。

本稿においても使用する各変数に関して分析対象の 124 カ国をサンプルにパネル単位根検定を実施した。パネル単位根検定としては、Levin and Lin（1993）を拡張した Levin, Lin and Chu（2002）テスト（LLC）、Im, Pesaran and Shin（2003）テスト（IPS）、Maddala and Wu（1999）および Choi（2001）による Fisher type ADF（Augmented Dickey-Fuller）テスト（F-ADF）、Hadri（2000）テストなどいくつかの手法が提案されている。

本稿では LLC、IPS および頑健性チェックの意味も含めて F-ADF による 3 通りの検定を行った³²。パネル単位根検定は仮定の相違に基づき大きく 2 つのタイプに分類されるが、

³¹ 通常の個別主体ごとの単位根検定がパネルデータによる単位根検定に比べて検定力（power）が低いのは、主として時系列方向のサンプル数が不足しがちなためであると考えられている。

³² Perman and Stern（2003）および Richmond and Kaufmann（2006）は LLC および IPS の手法を、

表 4 パネル単位根検定

レベルデータ		タイム・トレンドあり		タイム・トレンドなし	
		統計量	p 値	統計量	p 値
CO ₂ / P	LLC	0.347	0.636	-0.658	0.255
	IPS	2.087	0.982	0.560	0.712
	F-ADF	239.840	0.599	308.017	0.004
GDP/ P	LLC	5.046	1.000	4.920	1.000
	IPS	5.922	1.000	11.653	1.000
	F-ADF	174.024	1.000	116.067	1.000
(GDP/ P) ²	LLC	8.730	1.000	14.497	1.000
	IPS	8.706	1.000	17.378	1.000
	F-ADF	162.353	1.000	97.419	1.000

1 階の階差データ		タイム・トレンドあり		タイム・トレンドなし	
		統計量	p 値	統計量	p 値
CO ₂ / P	LLC	-33.707	0.000	-28.868	0.000
	IPS	-28.531	0.000	-28.356	0.000
	F-ADF	1786.188	0.000	1535.129	0.000
GDP/ P	LLC	-23.734	0.000	-19.210	0.000
	IPS	-20.409	0.000	-22.172	0.000
	F-ADF	1242.009	0.000	1178.644	0.000
(GDP/ P) ²	LLC	-17.979	0.000	-10.105	0.000
	IPS	-17.729	0.000	-14.881	0.000
	F-ADF	1189.467	0.000	899.812	0.000

(注) 帰無仮説は「単位根あり」.

LLC: Levin, Lin and Chu (2002) テスト .

IPS: Im, Pesaran and Shin (2003) テスト .

F-ADF: Fisher type ADF (Maddala and Wu, 1999; Choi, 2001) テスト .

LLC は第 1 のタイプに , IPS および F-ADF は第 2 のタイプに対応するものである (補論 B.1 節参照). 検定に当たっては定数項 (individual effects) を含めたモデルを採用し , さらにトレンドの有無を考慮した . 結果は表 4 のとおりである . なお , 1 人あたり二酸化炭素排出量を “CO₂/ P ” , 1 人あたり実質 GDP を “GDP/ P ” , およびその 2 乗を “(GDP/ P)²” と表記することにする .

Cole (2003) および Dinda and Coondoo (2006) は IPS の手法をそれぞれ用いている .

第 1 に、 CO_2/P についてレベルに関する検定結果（表 4 上段）を見ると、F-ADF のトレンド無しの場合を除くすべての検定において「単位根がある」という帰無仮説を有意水準 10 % でも棄却できないという結果になった。1 階の階差をとると（表 4 下段）帰無仮説を棄却することができ、定常過程となることがわかる。第 2 に、 GDP/P 、および $(GDP/P)^2$ についてレベルに関する検定結果を見ると、トレンドの有無にかかわらずいずれの検定でも帰無仮説を棄却できない。すなわち、単位根の存在が疑われることを示している。しかし 1 階の階差をとった場合は帰無仮説を棄却することができ、定常過程となる。以上の検定結果を踏まえ、以下の分析においては各変数とも $I(1)$ であると仮定することにする。

4.2.2 パネル共和分検定

本稿で用いる各変数は非定常であるので、データの水準を用いた回帰分析は見せかけのものになる。しかし、ここでは各変数が $I(1)$ であることを前提として、(14) 式にあるような関係が長期的に安定した均衡関係として成立するか否かをパネル共和分検定により検証する。長期的な均衡関係が確認できれば各変数が定常性を満たさない場合であっても見せかけの回帰ではなくなる。パネル共和分検定についてもいくつかの手法が提案されている（補論 B.2 節参照）。単位根検定と同様に共和分検定においても、個別主体ごとの検定に比べてパネル共和分検定は検出力が高いことが知られている³³。

本稿では検定の頑健性を確認する意味も含めて、Kao (1999) および Pedroni (1999) の 2 通りの方法により検定を行った³⁴。Kao (1999) の ADF テストにおけるラグ数は 1 とした。検定統計量の計算には GAUSS 上で動作する NPT 1.3 (Chiang and Kao, 2002) を利用した。結果は表 5 のとおりである。

検定結果からは、いずれの検定方法においても帰無仮説は有意に棄却されており、 CO_2/P 、 GDP/P 、 $(GDP/P)^2$ の各変数間において共和分関係が検出されていることがわかる。すなわち、これらの各変数は長期的に安定した均衡関係にあることを支持していることになる。

以上の結果を踏まえ、以下における環境クズネッツ曲線の推定においては、長期的関係として各変数のレベル・モデルを用いた推定を行うことにする。

³³ 個別主体ごとの小標本に基づく検定では統計量の分散が大きくなりがちであり、長期的に安定した関係が存在してもそれを検出するのは困難であることが指摘されている。

³⁴ Richmond and Kaufmann (2006) は Pedroni (1999) の検定手法を採用している。

表 5 パネル共和分検定

変数 : CO_2/P , GDP/P , $(\text{GDP}/P)^2$

(1) Kao (1999) テスト		(2) Pedroni (1999) テスト		
統計量		統計量		
		トレンドあり		トレンドなし
1. DF- ρ	-132.865 (0.000)	1. panel ν	-19.722 (0.000)	-12.315 (0.000)
2. DF- t	4645.546 (0.000)	2. panel ρ	-57.823 (0.000)	-74.006 (0.000)
3. DF- ρ^*	-176.953 (0.000)	3. panel t (non-parametric)	-57.855 (0.000)	-55.205 (0.000)
4. DF- t^*	-58.514 (0.000)	4. panel t (parametric)	-58.626 (0.000)	-55.854 (0.000)
5. ADF	-28.989 (0.000)	5. group ρ	-43.930 (0.000)	-60.795 (0.000)
		6. group t (non-parametric)	-56.556 (0.000)	-58.949 (0.000)
		7. group t (parametric)	-63.363 (0.000)	-65.219 (0.000)

(注) 帰無仮説は「共和分関係なし」.

カッコ内は p 値.

ADF テストのラグ数は 1 とした.

検定の概要については補論 B.2 節を参照.

統計量の算出には, NPT 1.3 (Chiang and Kao, 2002) を利用した.

4.3 環境クズネッツ曲線の推定

4.3.1 推定方法

先にも述べたように, 先行研究においては理論モデルにしたがった構造型による推定を行った実証研究は見あたらない. その理由の一つは, 前節で見たように理論モデルでは環境クズネッツ曲線の成立がパラメータに依存する形になっており, その代理変数となりうる適切なデータを見つけるのは困難であるためであると思われる. また, 環境に関するデータそのものの利用可能性が乏しいということも実証分析を困難にしていると考えられる. このような難点を伴うため, 本稿においても構造型による推定には立ち入らず, (14) 式に基づく従来の定式化による推定を行うことにしたい. 所得の多項式による推定を行うことで, 他の環境クズネッツ曲線研究と整合性をとったり, 比較可能にしたりする利点があるとも考

えられる。

以下では、(1) 静学的パネルデータ推定、(2) Arellano and Bond (1991) によるダイナミック (動学的) パネルデータ推定、(3) Blundell and Bond (1998) によるシステム GMM 推定により環境クズネッツ曲線を推定する。

4.3.2 推定 (1)—静学的パネルデータ推定

多くのパネルデータを用いた先行研究で主として採用されてきたのは標準的なモデル、すなわち静学的パネルデータのモデルである。このモデルを環境クズネッツ曲線の推定に適用しようとする場合には、いくつかの問題点を含むと考えられるが、推定結果比較のため、本稿でも先行研究にならってこの標準的な推定を今回構築したデータセットを用いて行うことにする。

個別主体と時系列観測値を表すインデックスをそれぞれ i および t ($i = 1, 2, \dots, N$; $t = 1, 2, \dots, T_i$) とする。 N は個別主体の総数、 T_i は個別主体 i における利用可能な期間の数である。ここで推定するモデルは次のような二元配置誤差構成要素 (two-way error component) モデルである。

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 x_{it} + \beta_2 x_{it}^2 + \mu_i + \lambda_t + u_{it} \quad (15)$$

ここで、 $y_{it} = (\text{CO}_2/P)_{it}$ 、 $x_{it} = (\text{GDP}/P)_{it}$ であり、 u_{it} は攪乱項である。また、 μ_i および λ_t はそれぞれ個別効果と時間効果である。観察不可能な個別効果の導入は、所得の高い国は寒冷地に位置する場合が多いなどの要因をコントロールするためのものであり、観察不可能な時間効果の導入は、石油価格、技術変化、景気変動、環境政策や環境水準等のコントロールのためである。時間効果は各年のタイム・ダミーによるパラメータにて計測する。

この式についてレベルデータでの推計を行う。説明変数は 1 人あたり所得のみとするが、これは所得の説明力がもっとも高いという Stern (1998)、Agras and Chapman (1999)、および Neumayer (2002) の指摘、および先行研究においても 1 人あたり所得のみを説明変数とするケースが多いことを踏まえたものである。期待される符号条件は $\beta_1 > 0$ 、 $\beta_2 < 0$ である。

以下では 124 カ国ベースの全サンプル (以下、「全世界」という) を使用した推定結果に主として注目するが、各グループごとの動向にも関心があることや頑健性チェックの意味も含めて、附属書 II 国、附属書 I 国、非附属書 I 国等のサブサンプルごとの推定も行うことにする。

表 6 推計結果 (1): ランダム効果モデル

グループ	全世界	附属書 I 国	附属書 II 国	非附属書 I 国等
定数項	1.066E-01 (1.48)	4.505E-01 ** (1.98)	7.813E-01 *** (2.67)	-1.635E-02 (-0.27)
GDP/ P	1.547E-04 *** (29.87)	1.569E-04 *** (11.01)	1.606E-04 *** (10.08)	1.256E-04 *** (21.49)
(GDP/ P) ²	-2.74E-09 *** (-19.56)	-2.60E-09 *** (-8.60)	-3.28E-09 *** (-9.86)	-1.33E-09 *** (-7.26)
R^2	0.621	0.257	0.312	0.518
転換点	28,230	30,173	24,482	47,218
対象国数	124	36	23	88
観測値数	4,520	1,211	981	3,309

(注) 係数推定量下段のカッコ内は z 統計量を示す。

係数推定量右側の***, **, *印は, それぞれ 1 %, 5 %, 10 %水準で有意であることを示す。

転換点の単位は米ドル (2000 年価格) である。

ランダム効果モデルによる推定結果は表 6 のとおりである。結果の表では個別効果, 時間効果の報告は省略している³⁵。推定されたパラメータは有意であって期待される符号条件を満たし, 形式的にはすべてのケースで環境クズネッツ曲線の成立を確認することができる。

全世界の転換点は 28,230 米ドル (2000 年価格) であり, その転換点はサンプル内にあることがわかる。二酸化炭素に関しては, 全世界ベースでは環境クズネッツ曲線は成立しにくいという研究もあるが, それとは対照的である。

グループ別の転換点を見ると, 附属書 II 国の 24,482 米ドルが最小であり, 附属書 I 国は 30,173 米ドルである。いずれのグループにおいても転換点はサンプル内にあり, 先行研究に近い水準であることが確認できる。なお, 附属書 I 国は附属書 II 国に市場経済移行国を加えたものである。市場経済移行国が転換点の上方シフトをもたらしていると考えられるが, 市場経済移行国のサンプル数が少ないため, 結果の評価には留意を要する。

非附属書 I 国等の転換点は 47,218 米ドルであり, サンプル内には存在しないことがわかる。推定された転換点は, いくつかの先行研究の結果と比較すると低い数値になっている。しかし, この数値はサンプルの上限 (36,505 米ドル) を大きく超えており, サンプルを構成する国々の現状の所得水準から考えると当面は単調増加に近い。この意味で非附属書 I 国

³⁵ 以下の各推定結果の表においても同様とする。

等では環境クズネツ曲線は成立しないということもできよう。サブサンプルによる推定も行っている先行研究においては、所得の高い先進国でのみ成立し、発展途上国においては成立しないとする結果が多いのと整合的な結果である³⁶。

しかし、3.2 節でも指摘したとおり、この推定方法にはいくつかの技術的な問題がある。

4.3.3 推定 (2)—ダイナミック・パネルデータ (Arellano and Bond) 推定

二酸化炭素排出量と所得の関係は長期的に安定した均衡関係として捉えることができる (4.2.2 節参照)。したがって環境クズネツ曲線が成立するとすれば、それは長期的均衡への調整過程を意味しており、しかも調整過程にある程度の時間を要していると考えられる。この場合、モデルの定式化には時間要素を考慮したモデルの採用が適切になる (Perman and Stern, 2003)。一方、(15) 式のような静学的モデルは (短期的な) 均衡を表している式、あるいは調整速度がきわめて速い場合の推定に妥当するものと考えられる。

また、3.2 節でも述べたとおり、(15) 式では同時性を考慮していないという大きな問題点がある。先行研究では (15) 式のような定式化を「誘導型」(reduced form) と記述しているものが多いが、誘導型であるならば、説明変数は外生変数、先決内生変数など外生性を満たすものに限られる。しかし、同時性が考えられる状況下では外生性の条件は満たされない。

これらの問題点に対処するための一つの方法として、ダイナミック・モデルおよび操作変数を用いた GMM (一般化モーメント法) 推定を適用することが考えられる。環境クズネツ曲線のダイナミックなプロセスが明らかになれば、それを基にした将来の変動予測に資することが可能になると思われる。先行研究の中では、Agras and Chapman (1999) がダイナミックな過程を考慮しており、自己回帰分布ラグ (ADL) モデルを適用している。Halkos (2003) は硫黄排出物に関する環境クズネツ曲線の推定に Arellano and Bond (1991) によるダイナミック・パネルデータ・モデルを適用している。

Arellano and Bond (1991) による手法は、上記のような環境クズネツ曲線の静学的パネルデータの推定から生じる問題点に対する一つの解決法を与える。本稿でも Halkos (2003) にならってこのモデルの適用を試みる (補論 C.1 節参照)。二酸化炭素を対象とした環境クズネツ曲線の推定において、このモデルを適用した先行研究は、現在のところ見

³⁶ 非附属書 I 国等のサブサンプルの推定でパラメータが有意になっているのは、非附属書 I 国等に高所得の国・地域も含まれることが要因となっている可能性もある。非附属書 I 国等から高所得の国、具体的には 2003 年の 1 人あたり実質 GDP が、附属書 II 国の同年の平均値 (16,507 米ドル) を超えている 8 カ国・地域 (バハマ、イスラエル、韓国、シンガポール、トリニダード・トバゴ、バミューダ、香港、マカオ) を除外して推定したところ、単調増加となる結論が得られ、環境クズネツ曲線は成立しなかった。

あたらない．GMM による推定は固定効果およびランダム効果を区別する必要がないことに加え，撓乱項の分布に関して特定化する必要がないという特長があるので，このモデルを採用することで，推定方法，統計的処理に厳密性をもたせることも可能になるというメリットがある．

推定式は次の通りである．

$$y_{it} = \alpha y_{i,t-1} + \beta_1 x_{it} + \beta_2 x_{it}^2 + \mu_i + \lambda_t + u_{it} \quad (16)$$

ダイナミック・パネルデータ・モデルの特徴は，このように説明変数にラグ付き被説明変数があることである．

この式に対して GMM 推定を行うので適切な操作変数が必要になる．Arellano and Bond (1991) の手法にしたがい，ラグ付き被説明変数 $y_{i,t-1}$ と個別効果 μ_i の相関から生じる同時性バイアスは y_{it} の 2 期前以前のラグ項を操作変数とし， x_{it} およびその 2 乗項と撓乱項 u_{it} の相関から生じる同時性バイアスは， x_{it} および x_{it}^2 の 2 期前以前のラグ項を操作変数とする（補論 C.1.1 節参照）．ただし，理論的には 2 期前以前の説明変数が操作変数になりうるが，実際の推定においては必ずしもすべての操作変数を利用するのは望ましくもないとも考えられている．情報の少ない操作変数は不要という発想である．実際，多くの操作変数を利用することは overfitting バイアスを生じやすい．また，本稿のように説明変数が内生変数の場合，多くの操作変数を利用することは，推定にバイアスを生じさせることも知られている．

このため操作変数は，被説明変数のラグ項については 10 期分 ($y_{i,t-2}, \dots, y_{i,t-11}$)，内生の説明変数については 5 期分 ($x_{i,t-2}, \dots, x_{i,t-6}$ ， $x_{i,t-2}^2, \dots, x_{i,t-6}^2$) とした．

推定結果は表 7 のとおりである．推定には Ox 4.1 (Doornik, 2006)，および DPD 1.24 (Doornik *et al.*, 2006) を使用した．

推定に際しては one-step 推定と two-step 推定を試みた．前者は撓乱項の均一分散を仮定するものであり，後者は撓乱項の分布に特段の制約を置かない手法である．two-step 推定については，表 7 では全世界についてのみ報告している．これは各サブサンプルを用いた推定ではパラメータが安定しなかったためである³⁷．

推定されたパラメータを見ると，すべてのグループで符号条件を満たしており，かつ，1 %水準で有意であるという結果となった．

³⁷ two-step 推定ができなかったことで，各サブサンプルについては不均一分散への対応が不完全になってしまいうという問題点が残ることになる．

表 7 推計結果 (2): Arellano and Bond (1991) ダイナミック・パネルデータ・モデル

グループ 推定手法	全世界		附属書 I 国		附属書 II 国		非附属書 I 国等	
	one-step	two-step	one-step		one-step		one-step	
定数項	2.220E-02 *** (2.76)	2.304E-02 *** (2.75)	5.508E-02 *** (3.15)		5.836E-02 *** (3.10)		5.907E-03 (0.76)	
$(CO_2/P)_{-1}$	6.468E-01 *** (22.4)	6.464E-01 *** (22.3)	7.976E-01 *** (24.8)		8.702E-01 *** (25.7)		6.966E-01 *** (38.7)	
GDP/P	6.524E-05 *** (4.33)	6.088E-05 *** (3.62)	5.045E-05 *** (4.37)		2.844E-05 *** (2.94)		5.967E-05 *** (4.53)	
$(GDP/P)^2$	-1.264E-09 *** (-3.92)	-1.154E-09 *** (-3.16)	-8.755E-10 *** (-4.00)		-6.537E-10 *** (-2.96)		-8.886E-10 *** (-2.74)	
AR(2) テスト (p 値)	-1.527 (0.13)	-1.537 (0.12)	1.179 (0.24)		0.758 (0.45)		-1.688 (0.09)	
Sargan テスト (p 値)	2724 (0.00)	82.13 (1.00)	908.8 (0.00)		796.7 (0.26)		2677 (0.00)	
転換点	25,806	26,373	28,810		21,752		33,573	
対象国数	124		36		23		88	
観測値数	4,272		1,139		935		3,133	

(注) 係数推定量下段のカッコ内は t 統計量を示す。

係数推定量右側の***, **, *印は, それぞれ 1%, 5%, 10% 水準で有意であることを示す。

操作変数: $(CO_2/P)_{-2}, \dots, (CO_2/P)_{-11}, (GDP/P)_{-2}, \dots, (GDP/P)_{-6}$ and $(GDP/P)^2_{-2}, \dots, (GDP/P)^2_{-6}$ 。

One-step 推定では robust standard error を適用している。

Two-step 推定では Windmeijer (2005) による finite sample corrected standard error を適用している。

AR(2) テストは, 1 階の階差式の残差における, 2 階の自己相関の有無をテストする (帰無仮説は「2 階の自己相関なし」)。

Sargan テストは過剰識別制約のテストである (帰無仮説は「過剰識別制約は有効である」)。

転換点の単位は米ドル (2000 年価格) である。

モデル特定化に関するテストは、AR(2) テストと Sargan テストを実施した（補論 C.1.2 節参照）。

AR(2) テストは u_{it} が 2 階以上の自己相関を持たないことをテストするものである。2 階以上の自己相関を持つ場合には操作変数として利用できないものが存在することになり、ダイナミック・パネルデータ推定は適用不可能になるので、これは重要な仮定である。「2 階以上の自己相関がない」という帰無仮説に対して、非附属書 I 国等を除く他のグループにおいては有意水準 10 % でもこれを棄却することはできない。非附属書 I 国等についても 5 % 水準では棄却できないという結果が得られた。

Sargan テストは操作変数に関する過剰識別制約テストである。「過剰識別制約は有効である」という帰無仮説に対して、one-step 推定では附属書 II 国でこれを棄却できないが、他のグループでは棄却するという結果となり、two-step 推定（全世界）では棄却できないという結果が得られた。ただし、Sargan テストは撓乱項が不均一分散のときには過剰に棄却してしまう傾向があることが指摘されている（Arellano and Bond, 1991）。one-step 推定で附属書 II 国を除くグループで帰無仮説が棄却されているのは、パネルデータに特有の不均一分散が存在しているためである可能性がある。

転換点については、全世界では one-step, two-step 推定それぞれ 25,806 米ドル（2000 年価格）、26,373 米ドルとほぼ同じになった。各グループについても 21,752 米ドル（附属書 II 国）から 33,573 米ドル（非附属書 I 国等）の範囲であり、いずれのグループについても各サブサンプル内に存在することが確認できた。転換点の水準については、いずれのグループでも 20,000 米ドルを超えているが、表 6 の静学的モデルの結果より低く、また、多くの先行研究よりやや低めの結果となっている³⁸。

以上の結果を踏まえると、Sargan テストの問題は残るが、すべてのグループについて環境クズネッツ曲線の成立を確認できよう。

4.3.4 推定 (3)—システム GMM (Blundell and Bond) 推定

Arellano and Bond (1991) によるダイナミック・パネルデータ推定は、時系列方向のデータ数 T が小さいときはバイアスが大きく、その結果として検定のサイズが歪むことが知られている。さらに、一般的に GMM に基づく推定法では、操作変数の弱相関問題も指

³⁸ Halkos (2003) による Arellano and Bond モデルを用いた硫黄排出物に関する研究でも、先行研究 (Stern and Common, 2001) よりも低い転換点水準になるという結論を得ている。

摘されている。

Blundell and Bond (1998) による手法 (システム GMM 推定) は、この問題に対応するための一つの解決方法となりうる。この手法はダイナミック・パネルデータ推定の一種であり、Arellano and Bond (1991) の拡張となっている。具体的には、 y の水準だけでなく、 y の階差 (Δy) と撓乱項からも有益な情報 (直交条件) を獲得し、これに基づいて操作変数を拡張して推定を行うものである (補論 C.2 節参照)。本稿においても上記の問題点を改善し推定の精度が高まる可能性を考慮して、この手法による推定を試みた。ここで用いた操作変数は、4.3.3 節で採用した操作変数に加え、 $\Delta y_{i,t-1}$ 、 $\Delta x_{i,t-1}$ 、および $\Delta x_{i,t-1}^2$ とした。

推定式は (16) 式と同じであり、推定結果は表 8 のとおりである。推定には Ox 4.1 (Doornik, 2006)、および DPD 1.24 (Doornik *et al.*, 2006) を使用した。

推定に際しては 4.3.3 節と同様に one-step 推定と two-step 推定を試みた。two-step 推定について全世界についてのみ報告しているのは、やはりサブサンプルを用いた推定ではパラメータが安定しなかったためである³⁹。

推定されたパラメータを見ると、すべてのグループで符号条件を満たしていることがわかる。また、それらは 1 %水準ないし 5 %水準で有意であるという結果が得られた。また、 x_{it} と x_{it}^2 のパラメータの絶対値は表 7 における結果よりも小さくなっている。これは、Arellano and Bond (1991) による推定ではバイアスがあった (パラメータが過大推定だった) 可能性を示唆しているのかもしれない。AR(2) テストおよび Sargan テストも行ったが、附属書 II 国で Sargan テストの結果が棄却されることになったほかは、結果は 4.3.3 節と同様であった。

転換点については、全世界では one-step、two-step 推定それぞれ 24,856 米ドル (2000 年価格)、25,115 米ドルとやはりほぼ同水準となった。各グループごとに見ると 25,676 米ドル (附属書 I 国) から 27,465 米ドル (非附属書 I 国等) の範囲となり、転換点はやはりサブサンプル内に存在することが確認できた。また、その水準はやはり 20,000 米ドルを超えていることがわかる。転換点の水準を表 7 と比較すると、全世界ではほぼ同じ水準である。附属書 II 国では上昇しており、表 6 における結果をも上回っている。その他のグループでは小さくなっている。さらに、各グループ間の転換点のばらつきは表 7 と比較すれば小さくなっている。

³⁹ two-step 推定ができなかったことによる問題は、4.3.3 節と同様である。

表 8 推計結果 (3): Blundell and Bond (1998) システム GMM・モデル

グループ 推定手法	全世界		附属書 I 国		附属書 II 国		非附属書 I 国等	
	one-step	two-step	one-step	one-step	one-step	one-step	one-step	
定数項	-6.228E-02 *** (-4.20)	-5.572E-02 * (-2.90)	-1.777E-02 (-0.44)	-6.064E-02 (-1.48)	-4.752E-02 ** (-2.50)			
(CO2/P) ₋₁	8.169E-01 *** (29.9)	8.223E-01 *** (28.5)	9.245E-01 *** (37.6)	9.378E-01 *** (40.8)	8.164E-01 *** (25.7)			
GDP/P	5.008E-05 *** (8.15)	4.770E-05 *** (7.08)	2.156E-05 *** (3.27)	2.373E-05 *** (3.02)	3.954E-05 *** (4.99)			
(GDP/P) ²	-1.007E-09 *** (-6.54)	-9.497E-10 *** (-5.53)	-4.199E-10 ** (-2.53)	-4.520E-10 *** (-2.74)	-7.198E-10 *** (-3.92)			
AR(2) テスト (<i>p</i> 値)	-1.514 (0.13)	-1.516 (0.13)	1.210 (0.23)	0.800 (0.42)	-1.677 (0.09)			
Sargan テスト (<i>p</i> 値)	3621 (0.00)	82.05 (1.00)	1807 (0.00)	1760 (0.00)	4768 (0.00)			
転換点	24,856	25,115	25,676	26,248	27,465			
対象国数	124		36	23	88			
観測値数	4,396		1,175	958	3,221			

(注) 係数推定量下段のカッコ内は *t* 統計量を示す。

係数推定量右側の ***, **, *印は, それぞれ 1%, 5%, 10% 水準で有意であることを示す。

1 階の階差式に対する操作変数は, 表 7 に同じ。

レベル式に対する操作変数は, $\Delta(CO_2/P)_{-1}$, $\Delta(GDP/P)_{-1}$ and $\Delta(GDP/P)^2_{-1}$ 。

One-step 推定では robust standard error を適用している。

Two-step 推定では Windmeijer (2005) による finite sample corrected standard error を適用している。

AR(2) テストは, 1 階の階差式の残差における, 2 階の自己相関の有無をテストする (帰無仮説は「2 階の自己相関なし」)。

Sargan テストは過剰識別制約のテストである (帰無仮説は「過剰識別制約は有効である」)。

転換点の単位は米ドル (2000 年価格) である。

これまでの結果を総合的に判断すると、やはり Sargan テストの問題は残るが、すべてのグループについて環境クズネッツ曲線の成立を確認できると考えても差し支えなからう。

4.4 転換点に関する若干の考察

推定された転換点と京都議定書の関係に着目してみる。本稿で使用したデータは先行研究よりも期間の長い 2003 年までのデータを使用していることから、京都議定書を採択した 1997 年を境として何らかの変化が生じたのだとすれば、転換点にそれが反映されているのかもしれないという問題意識に基づくものである。換言すれば、京都議定書の採択や批准は二酸化炭素排出量削減のため、あるいは転換点を低下させるための「制度」として影響を持ったのかどうかということである。外部不経済を内部化するような何らかの「制度」の導入は転換点をもたらしたり変化させたりするための要因の一つであると考えられるからである。以下ではこうした環境クズネッツ曲線の構造変化の問題を簡単に考察してみたい。

構造変化の検証は、本来ならば Chow テストなどの仮説検定を行うべきである。しかし、ここでの問題意識にしたがって仮に 1997 年でサンプル期間を区分した場合、1998 年以降のサンプルに十分な自由度を確保できないという困難があるので断念せざるを得ない。そこでここでは代替案として、推定期間の終期を 1995 年から 1 年ずつ 2003 年まで変更しながら、上で採用した 2 種類のダイナミック・パネルデータ推定を繰り返し、得られた転換点の推移を簡単に検討することにする。転換点の推移は表 9 のとおりである。

表 9 を見ると、1995 年から 2003 年まで推定期間を 1 年ずつ伸ばした場合、各グループの 1 人あたり実質 GDP のサンプル平均値も上昇していることがわかる。一方、転換点の推移は各グループで増減に差があることがわかる。2 種類の推定方法による結果を総合的に検討すると、転換点は 1997 年までは各グループとも上昇しているが、1998 年ではグループにより異なる傾向が読み取れる。

つまり、非附属書 I 国等は 1998 年以降、転換点は傾向的に低下しているが、他のグループでは引き続き上昇傾向にある⁴⁰。この点を説明する一つの可能性として、非附属書 I 国等

⁴⁰ 転換点は $(-\beta_1/(2\beta_2))$ で与えられる。先に指摘したように、パラメータの経済学的解釈は困難であるが、参考までに推定パラメータの変動傾向を記述しておく。一般に、 β_1 の上昇は転換点の右方シフトと曲線全体の上方シフトをもたらす。また、 $|\beta_2|$ の上昇は転換点の左方シフト、曲線全体の下方シフトのほか、曲率を大きくする効果を有する。この点から非附属書 I 国等を見ると、推定期間の延長とともに β_1 は上昇しているが、それ以上に $|\beta_2|$ が上昇している傾向が捉えられ、転換点は低下傾向にあることがわかる。附属書 II 国を見ると、 β_1 の下落以上に $|\beta_2|$ が下落している傾向があり、結果として転換点は上昇している。

表 9 平均 1 人あたり実質 GDP と転換点の推移

(単位: 米ドル)

推定期間	全世界		附属書 I 国		附属書 II 国		非附属書 I 国等	
	平均 GDP	転換点	平均 GDP	転換点	平均 GDP	転換点	平均 GDP	転換点
1960-1995	7,066	23,660 22,186	13,855	22,762 19,576	14,941	18,076 20,061	4,669	N.A. 28,294
-1996	7,143	24,430 23,338	13,965	23,721 21,919	15,115	18,232 21,491	4,721	N.A. 29,195
-1997	7,225	24,623 24,185	14,088	24,572 22,943	15,300	18,738 22,771	4,775	41,701 32,432
-1998	7,306	24,211 24,342	14,219	25,176 23,566	15,492	19,148 22,954	4,827	39,113 31,295
-1999	7,390	24,573 24,509	14,360	26,382 N.A.	15,691	20,188 23,800	4,879	36,493 31,051
-2000	7,479	24,266 25,184	14,514	26,940 N.A.	15,900	20,168 24,732	4,934	35,173 29,894
-2001	7,565	24,658 25,006	14,669	27,198 26,538	16,106	20,672 25,365	4,985	34,735 28,946
-2002	7,651	25,766 25,361	14,824	29,549 N.A.	16,308	22,796 29,078	5,036	34,865 28,803
-2003	7,740	26,373 25,115	14,981	28,810 25,676	16,507	21,752 26,248	5,090	33,573 27,465

(注) 転換点の上段は, Arellano and Bond 推定 (表 7) による転換点。下段は, Blundell and Bond 推定 (表 8) による転換点。

全世界の転換点は two-step 推定, 他のグループは one-step 推定による。

平均 GDP は, (GDP/P) のサンプルの単純平均値。

“N.A.” は有意な推定結果が得られず, 転換点が計算できなかったことを示す。

平均 GDP および転換点は 2000 年価格。

表 10 京都議定書締結国数（締結年別）

締結年	国数	比率	うち、分析 対象の国数	比率
1998	4	2.4%	2	1.8%
1999	17	10.0%	10	8.8%
2000	10	5.9%	5	4.4%
2001	15	8.8%	11	9.7%
2002	55	32.4%	45	39.8%
2003	19	11.2%	12	10.6%
2004	13	7.6%	8	7.1%
2005	24	14.1%	12	10.6%
2006	12	7.1%	7	6.2%
2007	1	0.6%	1	0.9%
計	170	100.0%	113	100.0%

（注）2007 年 2 月 14 日現在。

本稿の分析対象国は、113 カ国に議定書未締結の 8 カ国および気候変動枠組条約非対象の 3 地域を加えた 124 カ国・地域である。

（資料）環境省資料より作成。

が後発の利益を享受していることが考えられる。転換点のシフトをもたらす要因の一つとして技術進歩やイノベーションの影響が考えられるが、京都議定書の採択を受けて、特に附属書 II 国からの技術移転等により非附属書 I 国等の転換点が低くなり、環境クズネツ曲線自体が左方にシフトしているというものである。

したがって、1997 年の京都議定書の採択は、附属書 II 国に対しては、自身の転換点を低下させるまでには及んでいないという点で影響を与えていない可能性がある。また、非附属書 I 国等の転換点に影響を及ぼすのは主として附属書 II 国の経済行動であると考えられるならば、非附属書 I 国等の転換点が低下しているという意味では、京都議定書は附属書 II 国に影響を与えている可能性がある。

ところで、京都議定書の採択は 1997 年だったが、多くの国では運用ルールの細則（マラケシュ合意）が決まった 2002 年以降に議定書を批准している。表 10 を見ると、全世界で 2002 年に京都議定書を批准したのはもっとも多い 55 カ国である。そのうち本稿で分析対象となっているのは 45 カ国である。45 カ国のうち附属書 I 国は 25 カ国を占め、特に附属書 II 国は EU 諸国や日本などを含め 19 カ国に達する。多くの附属書 II 国がこの年に京都議定書の拘束を受けることになった。それゆえ、京都議定書の影響を分析するという意味で

は 2003 年以降の動向を評価すべきかもしれず、あるいは第 1 約束期間が開始する 2008 年以降に変化が現れる可能性もある。こうした点を踏まえると、本稿のデータセットでは不十分かもしれない。

しかし、以上の点はいずれも推測にすぎない。本稿の分析からはこれ以上の確定的なことは何もいえず、今後の課題として残る点である。

5 おわりに

本研究の特徴と結論を要約すると、以下のようになる。

まず、先行研究と比較した本研究の特徴は、第 1 に、推定手法として 2 種類のダイナミック・パネルデータモデルを採用し、同時性バイアス等の推定における技術的な問題に対応したこと、第 2 に、先行研究では取り上げられることが少なかった、パネル単位根検定とパネル共和分検定を行い、パネルデータの定常性について注意を払ったこと、第 3 に、2003 年までの最新のデータを利用し、1997 年の京都議定書採択後の動向も含めて検討したことである。

得られた結論は、第 1 に、環境クズネッツ曲線の成立を確認したこと、第 2 に、転換点の水準は全世界ベースで約 25,000 米ドル（2000 年価格）であって、その水準は先行研究の結果と比較してやや低めの水準であることを確認したことである。

推定結果を基にすると、非附属書 I 国等の環境クズネッツ曲線が左方ヘシフトしていることがわかる。その理由の一つとして、京都議定書の導入が影響を及ぼした可能性が考えられるが、単に後発の利益を享受しているだけかもしれない、確定的な理由とはいえない。

注意すべき重要な点は、環境クズネッツ曲線が確認されたからといって、単純に経済成長を追求するような政策の採用が問題解決になると結論するのは危険である。3.1 節で述べた Arrow *et al.* 等の指摘は否定されるべきものではない。指摘の中でも特に地球温暖化問題に関しては、世界の大部分の国が発展途上にある非附属書 I 国に属することから、その転換点の水準の高さも考慮すると、世界全体で考えた場合、当面は成長に伴い排出量が増加し続けるのは避けられない。

世界全体の排出量を抑制するためには、環境クズネッツ曲線との関係では転換点の水準を低下させることが必要であって、そのためには次の点が重要になる。

第 1 に、環境クズネッツ曲線上の転換点を生じさせるためには、二酸化炭素は将来甚大な被害をもたらす「汚染物質」であることを認識させる必要がある。それと同時に、環境改善は社会的費用を意識させる制度改革（環境規制の導入）から生じることも認識すべきである。京都議定書の採択や批准がその役割を果たすものと期待されたが、4.4 節で見たように、京都議定書は附属書 I 国自身の転換点の低下には影響を与えていないようである。したがって、京都議定書以外の環境規制、例えば、炭素税の導入なども本格的に検討する必要があるかもしれない。また、ポスト京都議定書、すなわち 2013 年以降の国際協調の枠組み、

ルールの役割はきわめて重要である。

第 2 に、世界の大半が位置する環境クズネツツ曲線の左側の部分の場合、すなわち、所得増加とともに環境が悪化する場合は、社会的費用よりも削減費用が相対的に高いと考えられ、排出量の削減は困難である。現状では二酸化炭素排出量を削減するためには省エネルギーに頼るしか有効な手段は見あたらない。環境クズネツツ曲線の政策的含意の一つとして発展途上国に対する経済援助があるが、こうした国々に対して排出量削減を促進するためには、まず省エネ技術の普及促進が急がれる。加えて、二酸化炭素削減技術開発を急ぐべきであろう。附属書 II 国で環境技術、特に真に革新的な二酸化炭素削減技術が開発・導入されれば、それは附属書 II 国自身の環境クズネツツ曲線を左下方にシフトさせることになる。また、開発援助や直接投資による技術移転が行われれば、非附属書 I 国等自身の環境クズネツツ曲線をさらに左下方にシフトさせる可能性もある。

本稿で十分に検討できなかった問題は次のような点である。

第 1 に、推定式の定式化、精緻化にかかる問題である。本稿では所得の 2 次式を採用したが、先行研究には 3 次式を採用し、環境クズネツツ曲線が N 字型を示す可能性を検討しているものもある。所得以外の説明変数採用の是非も本稿では十分に検討していない。各国同一のパラメータを持つ環境クズネツツ曲線の推定に問題があるならば、random coefficient モデルなどの採用も検討に値しよう。また、所得の多項式以外の定式化も検討の余地がある。あるいは、単純な放物線よりも非線形の関数型の方が適切であるかもしれない。理論モデルにしたがった構造型による定式化ができればもっとも望ましい。

第 2 に、環境クズネツツ曲線のシフトの要因に関する検討である。京都議定書との関係は 4.4 節でごく簡単に考察したが、不十分であり、今後はこれを深める必要がある。また、技術進歩との関係を明らかにすることも興味深い点である。いずれもデータを用意するには時間を要するが、検討に値する重要な問題であると考えられる。

以上の点については今後の課題としたい。

参考文献

- Aghion, P. and P. Howitt (1998), *Endogenous Growth Theory*, MIT Press.
- Agras, J. and D. Chapman (1999), “A Dynamic Approach to the Environmental Kuznets Curve Hypothesis,” *Ecological Economics*, 28, pp. 267–277.
- Andreoni, J. and A. Levinson (2001), “The Simple Analytics of the Environmental Kuznets Curve,” *Journal of Public Economics*, 80, pp. 269–286.
- Arellano, M. (2003), *Panel Data Econometrics*, Oxford University Press.
- Arellano, M. and S. Bond (1991), “Some Tests of Specification for Panel Data: Monte Carlo Evidence and an Application to Employment Equations,” *Review of Economic Studies*, 58, pp. 277–297.
- Arellano, M. and O. Bover (1995), “Another Look at the Instrumental Variables Estimation of Error-Components Models,” *Journal of Econometrics*, 68, pp. 29–51.
- Arrow, K., B. Bolin, R. Costanza, P. Dasgupta, C. Folke, C. S. Holling, B.-O. Jansson, S. Levin, K.-G. Mäler, C. Perrings and D. Pimentel (1995), “Economic Growth, Carrying Capacity and the Environment,” *Science*, 268, pp. 520–521. (Reprinted in *Ecological Economics*, 15, pp. 91–95, in *Environment and Development Economics*, 1, pp. 104–110, and in *Ecological Applications*, 6, pp. 13–15.)
- Baltagi, B. H. (2005), *Econometric Analysis of Panel Data*, 3rd ed., John Wiley & Sons.
- Barro, R. J. and X. Sala-i-Martin (2003), *Economic Growth*, 2nd ed., MIT Press. (大住圭介訳 (2006), 『内生的経済成長論 I・II[第2版]』九州大学出版会.)
- Blundell, R. and S. Bond (1998), “Initial Conditions and Moment Restrictions in Dynamic Panel Data Models,” *Journal of Econometrics*, 87, pp. 115–143.
- Bulte, E. H. and D. P. van Soest (2001), “Environmental Degradation in Developing Countries: Households and the (Reverse) Environmental Kuznets Curve,” *Journal of Development Economics*, 65, pp. 225–235.
- Chiang, M-H. and C. Kao (2002), “Nonstationary Panel Time Series Using NPT 1.3 — A User Guide,” Center for Policy Research, Syracuse University.
- Choi, I. (2001), “Unit Root Tests for Panel Data,” *Journal of International Money and*

- Finance*, 20, pp. 249–272.
- Cole, M. A. (2003), “Development, Trade, and the Environment: How Robust is the Environmental Kuznets Curve?” *Environment and Development Economics*, 8, pp. 557–580.
- Cole, M. A. (2004), “Trade, the Pollution Haven Hypothesis and the Environmental Kuznets Curve: Examining the Linkages,” *Ecological Economics*, 48, pp. 71–81.
- Cole, M. A., A. J. Rayner and J. M. Bates (1997), “The Environmental Kuznets Curve: An Empirical Analysis,” *Environment and Development Economics*, 2, pp. 401–416.
- Coondoo, D. and S. Dinda (2002), “Causality between Income and Emission: A Country Group-Specific Econometric Analysis,” *Ecological Economics*, 40, pp. 351–367.
- Dasgupta, S., B. Laplante, H. Wang and D. Wheeler (2002), “Confronting the Environmental Kuznets Curve,” *Journal of Economic Perspectives*, 16, pp. 147–168.
- de Bruyn, S. M. (1997), “Explaining the Environmental Kuznets Curve: Structural Change and International Agreements in Reducing Sulphur Emissions,” *Environment and Development Economics*, 2, pp. 485–503.
- de Bruyn, S. M., J. C. J. M. van den Bergh and J. B. Opschoor (1998), “Economic Growth and Emissions: Reconsidering the Empirical Basis of Environmental Kuznets Curves,” *Ecological Economics*, 25, pp. 161–175.
- de Bruyn, S. M. and R. J. Heintz (1999), “The Environmental Kuznets Curve Hypothesis,” in J. C. J. M. van den Bergh (ed.), *Handbook of Environmental and Resource Economics*, Edward Elgar.
- Dijkgraaf, E. and H. R. J. Vollebergh (2005), “A Test for Parameter Homogeneity in CO₂ Panel EKC Estimations,” *Environmental and Resource Economics*, 32, pp. 229–239.
- Dinda, S. (2004), “Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey,” *Ecological Economics*, 49, pp. 431–455.
- Dinda, S. (2005), “A Theoretical Basis for the Environmental Kuznets Curve,” *Ecological Economics*, 53, pp. 403–413.
- Dinda, S. and D. Coondoo (2006), “Income and Emission: A Panel Data-Based Cointegration Analysis,” *Ecological Economics*, 57, pp. 167–181.

- Doornik, J. A. (2006), *Object-Oriented Matrix Programming using Ox*, 5th ed., Timberlake Consultants Press.
- Doornik, J. A., M. Arellano and S. Bond (2006), “Panel Data Estimation using DPD for Ox,” *mimeo*. (available at <http://www.doornik.com/download/dpd.pdf>)
- Ekins, P. (1997), “The Kuznets Curve for the Environment and Economic Growth: Examining the Evidence,” *Environment and Planning*, 29, pp. 805–830.
- Forster, B. A. (1973), “Optimal Capital Accumulation in a Polluted Environment,” *Southern Economic Journal*, 39, pp. 544–547.
- Galeotti, M. and A. Lanza (1999), “Richer and Cleaner? A Study on Carbon Dioxide Emissions in Developing Countries,” *Energy Policy*, 27, pp. 565–573.
- Galeotti, M., A. Lanza and F. Pauli (2006), “Reassessing the Environmental Kuznets Curve for CO₂ Emissions: A Robustness Exercise,” *Ecological Economics*, 57, pp. 152–163.
- Grossman, G. M. (1995), “Pollution and Growth: What Do We Know?” in I. Goldin and L. A. Winters (eds.), *The Economics of Sustainable Development*, Cambridge University Press.
- Grossman, G. M. and A. B. Krueger (1991), “Environment Impacts of a North American Free Trade Agreement,” NBER Working Paper, No. 3914, NBER.
- Grossman, G. M. and A. B. Krueger (1995), “Economic Growth and the Environment,” *Quarterly Journal of Economics*, 110, pp. 353–377.
- Hadri, K. (2000), “Testing for Stationarity in Heterogeneous Panel Data,” *Econometric Journal*, 3, pp. 148–161.
- Halkos, G. E. (2003), “Environmental Kuznets Curve for Sulfur: Evidence using GMM Estimation and Random Coefficient Panel Data Models,” *Environment and Development Economics*, 8, pp. 581–601.
- Heston, A., R. Summers and B. Aten (2006), *Penn World Table Version 6.2*, Center for International Comparisons of Production, Income and Prices at the University of Pennsylvania.
- Hettige, H., R. E. B. Lucas and D. Wheeler (1992), “The Toxic Intensity of Industrial Production: Global Patterns, Trends, and Trade Policy,” *American Economic*

- Review*, 82, pp. 478–481.
- Holtz-Eakin, D. and T. M. Selden (1995), “Stoking the Fires? CO₂ Emissions and Economic Growth,” *Journal of Public Economics*, 57, pp. 85–101.
- Hsiao, C. (2003), *Analysis of Panel Data*, 2nd ed., Cambridge University Press.
- Im, K. S., M. H. Pesaran and Y. Shin (2003), “Testing for Unit Roots in Heterogeneous Panels,” *Journal of Econometrics*, 115, pp. 53–74.
- Islam, N., J. Vincent and T. Panayotou (1998), “Unveiling the Income-Environment Relationship: An Exploration into the Determinants of Environmental Quality,” Working Paper, 98-12, Emory University.
- John, A. and R. Pecchenino (1994), “An Overlapping Generations Model of Growth and the Environment,” *Economic Journal*, 104, pp. 1393–1410.
- John, A., R. Pecchenino, D. Schimmelpfennig and S. Schreft (1995), “Short-Lived Agents and the Long-Lived Environment,” *Journal of Public Economics*, 58, pp. 127–141.
- Jones, L. E. and R. E. Manuelli (2001), “Endogenous Policy Choice: The Case of Pollution and Growth,” *Review of Economic Dynamics*, 4, pp. 369–405.
- Kahn, M. E. (1998), “A Household Level Environmental Kuznets Curve,” *Economics Letters*, 59, pp. 269–273.
- Kao, C. (1999), “Spurious Regression and Residual-Based Tests for Cointegration in Panel Data,” *Journal of Econometrics*, 90, pp. 1–44.
- Kao, C. and M. H. Chiang (2000), “On the Estimation and Inference of a Cointegrated Regression in Panel Data,” *Advances in Econometrics*, 15, pp. 179–222.
- Kuznets, S. (1955), “Economic Growth and Income Inequality,” *American Economic Review*, 45, pp. 1–28.
- Kuznets, S. (1965), *Economic Growth and Structural Change*, Norton.
- Kuznets, S. (1966), *Modern Economic Growth*, Yale University Press. (塩野谷祐一訳 (1968), 『近代経済成長の分析』 東洋経済新報社 .)
- Levin, A. and C.-F. Lin (1992), “Unit Root Tests in Panel Data: Asymptotic and Finite-Sample Properties,” Discussion Paper No. 92-93, Department of Economics, University of California at San Diego.

- Levin, A. and C.-F. Lin (1993), “Unit Root Tests in Panel Data: New Results,” Discussion Paper No. 93-56, Department of Economics, University of California at San Diego.
- Levin, A., C.-F. Lin and C.-S.J. Chu (2002), “Unit Root Tests in Panel Data: Asymptotic and Finite-Sample Properties,” *Journal of Econometrics*, 108, pp. 1–24.
- Lieb, C. M. (2002), “The Environmental Kuznets Curve and Satiation: A Simple Static Model,” *Environment and Development Economics*, 7, pp. 429–448.
- Lindmark, M. (2002), “An EKC-Pattern in Historical Perspective: Carbon Dioxide Emissions, Technology, Fuel Prices and Growth in Sweden 1870–1997,” *Ecological Economics*, 42, pp. 333–347.
- López, R. (1994), “The Environment as a Factor of Production: The Effects of Economic Growth and Trade Liberalization,” *Journal of Environmental Economics and Management*, 27, pp. 163–184.
- Lucas, R. E. B., D. Wheeler and H. Hettige (1992), “Economic Development, Environmental Regulation and the International Migration of Toxic Industrial Pollution: 1960–1988,” in P. Low (ed.), *International Trade and the Environment*, World Bank Discussion Paper No. 159, World Bank.
- Maddala, G. S. and S. Wu (1999), “A Comparative Study of Unit Root Tests with Panel Data and a New Simple Test,” *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61, pp. 631–652.
- Managi, S. (2006), “Are There Increasing Returns to Pollution Abatement? Empirical Analytics of the Environmental Kuznets Curve in Pesticides,” *Ecological Economics*, 58, pp. 617–636.
- McConnell, K. E. (1997), “Income and the Demand for Environmental Quality,” *Environment and Development Economics*, 2, pp. 383–399.
- McKoskey, S. and C. Kao (1998), “A Residual-Based Test of the Null of Cointegration in Panel Data,” *Econometric Reviews*, 17, pp. 57–84.
- Meadows, D. H., D. L. Meadows, J. Randers and W. Behrens (1972), *The Limits to Growth*, Universe Books. (大来佐武郎監訳 (1972), 『成長の限界—ローマ・クラブ「人類の危機」レポート』ダイヤモンド社.)

- Munasinghe, M. (1999), “Is Environmental Degradation an Inevitable Consequence of Economic Growth: Tunneling through the Environmental Kuznets Curve,” *Ecological Economics*, 29, pp. 89–109.
- Neumayer, E (2002), “Can Natural Factors Explain Any Cross-Country Differences in Carbon Dioxide Emissions?” *Energy Policy*, 30, pp. 7–12.
- Panayotou, T. (1993), “Empirical Tests and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development,” Working Paper, WP238, Technology and Employment Programme, International Labor Office.
- Panayotou, T. (1997), “Demystifying the Environmental Kuznets Curve: Turning a Black Box into a Policy Tool,” *Environment and Development Economics*, 2, pp. 465–484.
- Panayotou, T. (2000), “Economic Growth and the Environment,” CID Working Paper No. 56.
- Pedroni, P. (1999), “Critical Values for Cointegration Tests in Heterogeneous Panels with Multiple Regressors,” *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61, pp. 653–678.
- Pedroni, P. (2004), “Panel Cointegration: Asymptotic and Finite Sample Properties of Pooled Time Series Tests with an Application to the PPP Hypothesis,” *Econometric Theory*, 20, pp. 597–625.
- Perman, R. and D. I. Stern (2003), “Evidence from Panel Unit Root and Cointegration Tests that the Environmental Kuznets Curve does not Exist,” *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 47, pp. 325–347.
- Phillips P. C. B. and B. E. Hansen (1990), “Statistical Inference in Instrumental Variables Regression with I(1) Processes,” *Review of Economic Studies*, 57, pp. 99–125.
- Richmond, A. K. and R. K. Kaufmann (2006), “Is There a Turning Point in the Relationship between Income and Energy Use and/or Carbon Emissions?” *Ecological Economics*, 56, pp. 176–189.
- Schmalensee, R., T. M. Stoker and R. A. Judson (1998), “World Carbon Dioxide Emissions: 1950–2050,” *Review of Economics and Statistics*, 80, pp. 15–27.
- Selden, T. M. and D. Song (1994), “Environmental Quality and Development: Is There

- a Kuznets Curve for Air Pollution Emissions?" *Journal of Environmental Economics and Management*, 27, pp. 147–162.
- Selden, T. M. and D. Song (1995), "Neoclassical Growth, the J Curve for Abatement, and the Inverted U Curve for Pollution," *Journal of Environmental Economics and Management*, 29, pp. 162–168.
- Shafik, N. and S. Bandyopadhyay (1992), "Economic Growth and Environmental Quality: Time Series and Crosscountry Evidence," World Bank Policy Research Working Paper, WPS 904.
- Shafik, N. (1994), "Economic Development and Environmental Quality: An Econometric Analysis," *Oxford Economic Papers*, 46, pp. 757–773.
- Stern, D. I. (1998), "Progress on the Environmental Kuznets Curve?" *Environment and Development Economics*, 3, pp. 173–196.
- Stern, D. I. (2004), "The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve," *World Development*, 32, pp. 1419–1439.
- Stern, D. I., M. S. Common and E. B. Barbier (1996), "Economic Growth and Environmental Degradation: The Environmental Kuznets Curve and Sustainable Development," *World Development*, 24, pp. 1151–1160.
- Stern, D. I. and M. S. Common (2001), "Is There an Environmental Kuznets Curve for Sulfur?" *Journal of Environmental Economics and Management*, 41, pp. 162–178.
- Stokey, N. L. (1998), "Are There Limits to Growth?" *International Economic Review*, 39, pp. 1–31.
- Suri, V. and D. Chapman (1998), "Economic Growth, Trade and Energy: Implications for the Environmental Kuznets Curve," *Ecological Economics*, 25, pp. 195–208.
- Uzawa, H. (1965), "Optimal Technical Change in an Aggregative Model of Economic Growth," *International Economic Review*, 6, pp. 18–31.
- Uzawa, H. (2003), *Economic Theory and Global Warming*, Cambridge University Press.
- Vincent, J. R. (1997), "Testing for Environmental Kuznets Curves within a Developing Country," *Environment and Development Economics*, 2, pp. 417–431.
- Windmeijer, F. (2005), "A Finite Sample Correction for the Variance of Linear Two-step GMM Estimators," *Journal of Econometrics*, 126, pp. 25–51.

- Wooldridge, J. M. (2002), *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*, MIT Press.
- World Bank (1992), *World Development Report 1992: Development and the Environment*, Oxford University Press.
- World Commission on Environment and Development (1987), *Our Common Future*, Oxford University Press. (大来佐武郎監修・環境庁国際環境問題研究会訳(1987),『地球の未来を守るために』福武書店.)
- 赤尾健一(2002),「持続可能な発展と環境クズネッツ曲線」中村愼一郎編『廃棄物経済学をめざして』, pp. 52-79, 早稲田大学出版部.
- 浅子和美・川西諭・小野哲生(2002),「枯渇性資源・環境と持続的成長」『経済研究』, 53, pp. 236-246.
- 天野明弘(2003),『環境経済研究—環境と経済の統合に向けて—』有斐閣.
- 伊ヶ崎大理(2004),『地球環境と内生的成長—マクロ動学による理論分析—』九州大学出版会.
- 宇沢弘文(1990),『経済解析 基礎篇』岩波書店.
- 宇沢弘文(1995),『地球温暖化の経済学』岩波書店.
- 大坂仁(2002),「環境クズネッツ曲線の検証: 国際データによるクロスカントリー分析」細江守紀・藤田敏之編『環境経済学のフロンティア』, pp. 241-273, 勁草書房.
- 北村行伸(2005),『パネルデータ分析』岩波書店.
- 速水佑次郎(2000),『新版開発経済学—諸国民の貧困と富』創文社.
- 矢口優・園部哲史(2007),「経済発展と環境問題—環境クズネッツ・カーブ仮説の再検討—」清野一治・新保一成編『地球環境保護への制度設計』, pp. 55-86, 東京大学出版会.
- 柳瀬明彦(2002),『環境問題と経済成長理論』三菱経済研究所.

補論 A Stokey の蓄積性汚染を伴うモデル

A.1 最適成長経路の導出

以下では 2.2 節で設定したモデルから最適成長経路を導出する．各変数の表記法は本文と同一であり，2.2 節を参照のこと．

解くべき問題を再掲すると，それは次のようなものである．

$$\begin{aligned}
 (\text{問題}) \quad & \max \int_0^\infty e^{-\rho t} \left(\frac{c(t)^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma} - \frac{B}{\gamma} X(t)^\gamma \right) dt \\
 & \text{subject to} \quad \dot{k}(t) = Ae^{gt} k(t)^\alpha z(t) - \delta k(t) - c(t) \\
 & \quad \quad \quad \dot{X}(t) = Ae^{gt} k(t)^\alpha Lz(t)^\beta - \eta X(t) \\
 & \quad \quad \quad k(0) = k_0, \quad X(0) = X_0
 \end{aligned}$$

ハミルトニアン (current-value Hamiltonian) を次のように設定する．

$$\begin{aligned}
 \mathcal{H} \equiv & \frac{c(t)^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma} - \frac{B}{\gamma} X(t)^\gamma + \lambda(t)(Ae^{gt} k(t)^\alpha z(t) - \delta k(t) - c(t)) \\
 & - \mu(t)(Ae^{gt} k(t)^\alpha Lz(t)^\beta - \eta X(t))
 \end{aligned}$$

不効用をもたらす汚染ストック $X(t)$ のシャドー・プライスは負値になる．そこで， $-\mu(t)$ をシャドー・プライスとすることにより， $\mu(t) > 0$ として考える．

最大値原理より，最適化のための必要条件 (1 階の条件 (first-order condition) および横断性条件 (transversality condition)) は，

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial c(t)} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial z(t)} \geq 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial k(t)} = \rho \lambda(t) - \dot{\lambda}(t) \quad (19)$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial X(t)} = -\rho \mu(t) + \dot{\mu}(t) \quad (20)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\rho t} \lambda(t) k(t) = 0 \quad (21)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\rho t} \mu(t) X(t) = 0 \quad (22)$$

で与えられる．なお， $z(t) \in [0, 1]$ であることに注意すると，(18) 式においては $z(t)$ が内点解となるとときに等号が成立することになる． $\mathcal{H}$ が制御変数 $c(t)$ ， $z(t)$ と状態変数 $k(t)$ ， $X(t)$ について凹関数であるので，(17) ~ (22) 式は最適化のための必要十分条件となる．

$z(t) \in [0, 1]$ を考慮して (17) ~ (20) 式をそれぞれ整理すると, 2.2 節の (8) ~ (11) 式が得られる.

A.2 定常状態における成長率

A.1 節で導出した最適化条件を満足し, かつすべての変数が一定の率で成長する定常状態における成長率を検討する.

(8) 式より, $\frac{\dot{c}(t)}{c(t)} = -\frac{1}{\sigma} \frac{\dot{\lambda}(t)}{\lambda(t)}$ が得られるので, 定常状態で $\frac{\dot{c}(t)}{c(t)}$ が一定ならば $\frac{\dot{\lambda}(t)}{\lambda(t)}$ も一定となる. したがって (10) 式より $\frac{\dot{y}(t)}{y(t)}$ も一定, すなわち, $g_y = g_k$ となる.

(7) 式より, $\dot{k}(t) = y(t) - \delta k(t) - c(t)$ であるから, $g_k \equiv \frac{\dot{k}(t)}{k(t)} = \frac{y(t)}{k(t)} - \delta - \frac{c(t)}{k(t)}$ となり, これは定常状態で一定であるから $\frac{\dot{c}(t)}{c(t)}$ も一定となる. すなわち, $g_c = g_k$ となる. 以上より,

$$g_y = g_k = g_c \quad (23)$$

が得られ, 定常状態における y, k, c の成長率は等しいことがわかる.

(8) 式および (9) 式よりそれぞれ,

$$g_y = -\frac{1}{\sigma} g_\lambda \quad (24)$$

$$g_z = \frac{1}{\beta - 1} (g_\lambda - g_\mu) \quad (25)$$

が得られる.

また, (6) 式より,

$$g_X = \frac{\dot{x}(t)}{X(t)} - \eta$$

となり, 定常状態では g_X および η は一定となるので, $\frac{\dot{x}(t)}{X(t)}$ も一定となる. すなわち,

$$g_x = g_X \quad (26)$$

が得られる.

(4) 式より, $x(t) = y(t)Lz(t)^{\beta-1}$ と書けるので, 次式が成り立つ.

$$g_x = g_y + (\beta - 1)g_z \quad (27)$$

(25), (26), (27) 式より,

$$g_X = g_x = g_y + g_\lambda - g_\mu \quad (28)$$

となり，また (11) 式より，

$$(\gamma - 1)g_X = g_\mu \quad (29)$$

が得られる．

(24)，(28)，(29) 式より， $g_X = g_x = g_y - \sigma g_y - (\gamma - 1)g_X$ となるので，これを整理すると以下の関係が成立する．

$$g_X = g_x = \frac{1 - \sigma}{\gamma} g_y \quad (30)$$

これは定常状態における汚染排出の変化率を表している．

このとき定常状態における成長率は，(3) 式，および (23)，(24)，(29)，(30) 式により，

$$\begin{aligned} g_y &= g + \alpha g_k + g_z = g + \alpha g_y + \frac{1}{\beta - 1}(g_\lambda - g_\mu) \\ &= g + \alpha g_y - \frac{\sigma}{\beta - 1} g_y - \frac{1 - \sigma}{\beta - 1} \frac{\gamma - 1}{\gamma} g_y \end{aligned}$$

となり，これを整理すると，

$$g_y = \frac{\gamma(\beta - 1)g}{(1 - \alpha)\gamma(\beta - 1) + (\gamma + \sigma - 1)} \quad (31)$$

が得られる．

補論 B 非定常パネルデータ

B.1 パネル単位根検定

B.1.1 パネル単位根検定の概要

パネルデータの単位根検定には Levin and Lin (1993) を拡張した Levin, Lin and Chu (2002) テスト, Im, Pesaran and Shin (2003) テスト, Maddala and Wu (1999) および Choi (2001) による Fisher type ADF テスト, Hadri (2000) テストなどが提案されている⁴¹。

これらのパネル単位根検定は大きく 2 種類に区分される。各検定の特徴を理解するために、パネルデータに対する次のような AR(1) 過程を考えてみる。

$$y_{it} = \alpha_i y_{i,t-1} + x'_{it} \beta_i + u_{it}$$

i はクロス・セクション, t は時間を表す。また, x_{it} は外生変数で定数項やトレンド項を表す。

分類基準の第 1 は各主体共通の (homogeneous) 単位根 ($\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = \alpha$) の存在を仮定するものである。第 2 は各 α_i は共通ではない (heterogeneous) と仮定するものである。

前者の仮定を採用する検定は：

- Levin, Lin and Chu (2002) テスト (LLC): 基本的な ADF モデルを採用し、各主体共通の単位根 ($\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = \alpha$) の存在を仮定するものである。
- Hadri (2000) テスト: 定数項あるいは定数項とトレンド項のみによる OLS 回帰から求められる残差を分析し、LM (Lagrange Multiplier) 統計量を検定するものである。

後者の仮定を採用する検定は：

- Im, Pesaran and Shin (2003) テスト (IPS): 各 α_i は共通ではないので、個別の単位根検定と同値である。個別の ADF 回帰により得られた α_i の t 統計量の平均値を検定統計量として利用するものである。

⁴¹ パネル単位根検定については Baltagi (2005) の第 12 章で手際よくまとめられている。

- Fisher type ADF テスト (F-ADF): IPS と同様に、個別主体の ADF 検定を集計して全体的な検定を行うものである。すなわち、個別の ADF 回帰により得られた α_i の p 値を組み合わせて検定を行うものである。

Hadri テストは「単位根は存在しない」ということを帰無仮説とするのに対し、他のテストは「単位根が存在する」ことを帰無仮説とする。より正確には、帰無仮説を H_0 、対立仮説を H_1 とすると、

LLC	$H_0: \alpha = 1, \quad H_1: \alpha < 1$
Hadri	$H_0: \alpha < 1, \quad H_1: \alpha = 1$
IPS, F-ADF	$H_0: \alpha_i = 1 \quad \text{for all } i,$ $H_1: \alpha_i < 1 \quad \text{for at least one } i$

となる。

B.1.2 Levin, Lin and Chu テストに関する補足

4.2.1 節では対象パネルデータの水準および 1 階の階差について、3 種類の検定を実施した。このうち LLC については、同時点における攪乱項 (u_{it}) のクロス・セクション方向の相関が推定上大きな歪みをもたらす可能性が指摘されている。例えばある時点におけるエネルギー価格の大きな変動が各国に波及した過程を考えると、各国の攪乱項が相関している可能性は否定できない。そこで、 u_{it} のクロス・セクション方向での相関をコントロールするための一つの簡便な方法として、各変数 z_{it} のクロス・セクション方向の平均値からの偏差 ($z_{it} - (1/N) \sum_{i=1}^N z_{it}$) を表す系列を作成し、これについて LLC を実施してみた⁴²。

対象国を全 124 カ国とした場合の検定結果は付表 1 のとおりである。CO₂/P の場合はトレンド項の有無に関わらず、非定常性の帰無仮説を棄却できる、すなわち I(0) であるという結果を得た。一方、GDP/P、(GDP/P)² については、各変数とも I(1) であることを示唆する結果を得た。

この結果を踏まえると、CO₂/P の定常性の解釈については悩ましい面がある。しかし、ここでのクロス・セクション方向の相関の除去の方法にも問題がないわけではないことから、4.2.1 節で示した検定結果を採用し、CO₂/P についても I(1) であると仮定することにする。

⁴² Perman and Stern (2003) では、タイム・ダミーを導入することによってこの問題に対応している。

B.2 パネル共和分検定

パネルデータの共和分検定には、4.2.2 節で採用した Kao (1999) テスト、Pedroni (1999) テストのほか、McCoskey and Kao (1998) テスト、Pedroni (2004) テストなどが提案されている⁴³。最初の 2 つのテストの概要は次のようなものである。

- Kao (1999) テスト：すべての個別主体で同一の自己回帰係数を仮定する。検定の手続きとしては、パネル推定の残差に DF テスト、および ADF テストを適用する。OLS から求めた推定残差の自己回帰係数を ρ とすると、帰無仮説は $H_0: \rho = 1$ (共和分関係なし)、対立仮説は $H_1: \rho < 1$ として与えられる。

5 種類の検定統計量が用意されており、そのうち DF テストに基づく 4 種類の統計量はそれぞれ次のように分類される (残り 1 種類は ADF 統計量)。

- DF- ρ , DF- t : 説明変数が攪乱項と相関を持たない強外生性および自己相関なしを仮定。
- DF- ρ^* , DF- t^* : 説明変数の内生性を考慮。

すべての統計量は漸近的に標準正規分布にしたがう。片側検定であり、(負値を含めた) 小さな値であるほど帰無仮説を棄却する可能性が高まる。

- Pedroni (1999) テスト：一部の統計量で個別主体ごとに異なる自己回帰係数を許容する点に特徴がある。標準正規分布にしたがう 7 種類の検定統計量が用意されている。

そのうち 4 種類 (panel ν , panel ρ , panel t (non-parametric), panel t (parametric)) は within 型 (panel 型) 統計量として分類され、すべての個別主体に共通の推定残差の自己回帰係数、すなわち $\rho_i = \rho$ (for all i) を仮定する。帰無仮説を $H_0: \rho_i = \rho = 1$ (for all i)、対立仮説を $H_1: \rho_i = \rho < 1$ (for all i) として残差ベースの検定を行う。

残り 3 種類 (group ρ , group t (non-parametric), group t (parametric)) は between 型 (group 型) 統計量として分類され、すべての個別主体に共通の推定残差の自己回帰係数を仮定しない。帰無仮説を $H_0: \rho_i = 1$ (for all i)、対立仮説を $H_1: \rho_i < 1$ (for all i) として残差ベースの検定を行う。

panel ν , panel/group ρ , panel/group t (non-parametric) 統計量はノンパラメ

⁴³ パネル共和分検定の手法については Baltagi (2005) で簡単にサーベイされている。

トリックな検定統計量である．すなわち自己相関を制御する手法として Phillips-Perron テストのような処理を採用している．panel/group t (parametric) 統計量はパラメトリックな処理をしている．

残りの 2 つのテストの概要は，簡単に記述すると以下のようなになる．

- McCoskey and Kao (1998) テスト：他のテストとは異なり，帰無仮説を「共和分関係あり」としている．パネル推定の残差に基づく LM (Lagrange Multiplier) テストである．共和分ベクトルのパラメータを推定する際に Phillips and Hansen (1990) の FMOLS (Fully Modified OLS) 等を利用し，その残差を分析するものである．
- Pedroni (2004) テスト：単位根検定における Phillips-Perron テストのタイプのノンパラメトリックなテストである．パラメトリックな DF テストや ADF テストに比べて攪乱項の分布に関する仮定が緩い．また，説明変数の強外生性を仮定している．

ここでは参考までに対象国を 124 カ国とした場合の Pedroni (2004) テストも行ってみた．検定結果は付表 2 のとおりである．結果からは他のテストと同様に各変数間の共和分関係が検出されていることが確認できた．

補論 C ダイナミック・パネルデータ推定

C.1 Arellano and Bond のダイナミック・パネルデータ推定

C.1.1 推定方法

ダイナミック・パネルデータ・モデルの特徴は、ラグ付きの被説明変数が説明変数に含まれることである。このとき操作変数を適切に設定し GMM で推定することにより一致推定量を得ようとするのがこの推定手法である。

ダイナミック・パネルデータ・モデルを一般的に記述すると、

$$y_{it} = \sum_{p=1}^q \alpha_p y_{i,t-p} + x'_{it} \beta + \varepsilon_{it} \quad (i = 1, 2, \dots, N; \quad t = q + 1, \dots, T_i) \quad (32)$$

となる。ここで x_{it} は説明変数のベクトル、 β はパラメータのベクトルである。 q はラグの最大の長さである。 T_i は個別主体 i における利用可能な期間の数であり、個別主体の総数 N よりも小さいものとする。利用可能な観測値の数は $\sum_i T_i$ となる。誤差項 ε_{it} は二元配置誤差構成要素 (two-way error component) モデルにしたがっているとすると、

$$\varepsilon_{it} = \mu_i + \lambda_t + u_{it} \quad (33)$$

となる。ここで λ_t と μ_i はそれぞれ時間効果と個別効果であり、 u_{it} は攪乱項 (idiosyncratic shock) である。誤差構成要素に関して以下の仮定をおく。

$$\begin{aligned} \mu_i &\sim i.i.d. (0, \sigma_\mu^2) \\ \lambda_t &\sim i.i.d. (0, \sigma_\lambda^2) \\ u_{it} &\sim i.i.d. (0, \sigma_u^2) \end{aligned}$$

ダイナミック・パネルデータ推定における問題点の一つは、ラグ付き被説明変数 $y_{i,t-p}$ が個別効果 μ_i と相関する ($\text{Cov}(y_{i,t-p}, \mu_i) \neq 0$) ことである。そのため α_p を一致推定することができない。一致推定量を求めるために操作変数を用いる必要があるが、Arellano and Bond (1991) は最大ラグ数より過去の被説明変数のラグ値を操作変数として効率的に組み合わせながら利用し、かつ GMM を導入することで一致推定量を求める方法を提示した⁴⁴。以下ではその概要を説明する。

⁴⁴ この方法は Arellano and Bover (1995), Blundell and Bond (1998) で一般化や拡張が行われている。

(32) 式および (33) より，個別主体 i に関する $(T_i - q)$ 本の式を行列表示すると，

$$y_i = W_i \gamma + \delta_i \mu_i + u_i \quad (34)$$

となる．ここで， γ はパラメータのベクトルで， α_p や β ， λ_t を含むものである． W_i は説明変数のデータ行列であり， $y_{i,t-p}$ や x_{it} ，タイム・ダミーを含むものである． δ_i はすべての要素が 1 である $(T_i - q) \times 1$ ベクトルである．

このとき γ の GMM 推定量は次のように求められる．

$$\hat{\gamma} = \left[\left(\sum_i W_i^{*'} Z_i \right) A_N \left(\sum_i Z_i' W_i^* \right) \right]^{-1} \left(\sum_i W_i^{*'} Z_i \right) A_N \left(\sum_i Z_i' y_i^* \right)$$

ここで

$$A_N = \left(\frac{1}{N} \sum_i Z_i' H_i Z_i \right)^{-1}$$

である⁴⁵． Z_i は操作変数行列， H_i は GMM 加重行列を表す．また， W_i^* と y_i^* は個別効果 μ_i を消去するために，それぞれ W_i と y_i を適切に変換したものである⁴⁶．

以下では y_i^* や W_i^* への変換の方法として 1 階の階差モデルを想定する．

簡単な例として，本稿で推定している (16) 式のような $q = 1$ の場合，すなわち， $t = 2, 3, \dots, T_i$ の場合を考えてみる．

1 階の階差モデルの場合， u_{it} が 2 階以上の自己相関を持たなければ，2 期ラグをとった y_i の水準は撓乱項の階差とは無相関になる．すなわち，

$$E(y_{is} \Delta u_{it}) = 0 \quad (t = 3, 4, \dots, T_i; s = 1, 2, \dots, t - 2) \quad (35)$$

という直交条件が成立することになる．つまり 操作変数になりうるのは $(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{i, T_i-2})$ ，および，強外生性 (strict exogeneity) つまり $E(x_{it} u_{is}) = 0$ (for all t and s) を満たす説明変数の階差 $(\Delta x'_{i3}, \Delta x'_{i4}, \dots, \Delta x'_{iT_i})$ の組み合わせであって⁴⁷，操作変数行列 Z_i は次の

⁴⁵ とくに Z_i の列数が W_i^* の列数と同じであるとき， $\hat{\gamma}$ は

$$\hat{\gamma} = \left(\sum_i Z_i' W_i^* \right)^{-1} \left(\sum_i Z_i' y_i^* \right)$$

として求められる．

⁴⁶ 変換方法の例としては 1 階の階差，直交偏差 (orthogonal deviations) (Arellano and Bover, 1995)，個別主体の平均からの偏差などが考えられる．詳しくは Doornik *et al.* (2006) を参照．

⁴⁷ 例えば $t = 3$ のとき，(32) 式より，

$$(y_{i3} - y_{i2}) = \alpha(y_{i2} - y_{i1}) + (x'_{i3} - x'_{i2})\beta + (\lambda_3 - \lambda_2) + (u_{i3} - u_{i2})$$

ようになる。

$$\mathbf{Z}_i = \begin{bmatrix} [y_{i1}] & & & 0 & \Delta x'_{i3} \\ & [y_{i1} \quad y_{i2}] & & & \Delta x'_{i4} \\ & & \ddots & & \vdots \\ 0 & & & [y_{i1} \quad \dots \quad y_{i,T_i-2}] & \Delta x'_{iT_i} \end{bmatrix} \quad (36)$$

もし x_{it} が強外生性を満たす変数ではなく先決変数 (predetermined) であるならば, すなわち,

$$\begin{aligned} E(x_{it}u_{is}) &\neq 0 && \text{for } s < t \\ &= 0 && \text{for } s \geq t \end{aligned}$$

であるならば⁴⁸, 操作変数としては y_{it} と同様に x_{it} の階差ではなくレベルを用いた $(x'_{i1}, x'_{i2}, \dots, x'_{i,T_i-1})$ の組み合わせを利用する。同様に考えて, もし x_{it} が内生変数 (endogeneous) であるならば, すなわち,

$$\begin{aligned} E(x_{it}u_{is}) &\neq 0 && \text{for } s \leq t \\ &= 0 && \text{for } s > t \end{aligned}$$

であるならば, 操作変数になりうるのは $(x'_{i1}, x'_{i2}, \dots, x'_{i,T_i-2})$ の組み合わせとなる。

以上をまとめると, 本稿のような説明変数の内生性を考慮したモデルにおける操作変数行列の設定については, 効率的に GMM 推定の計算を行うために, 次のような操作変数行列

となる。通常 y_{it} はある程度の自己相関を持つと考えられるので, この場合 y_{i1} は $(y_{i2} - y_{i1})$ と相関が高い。一方, y_{i1} は u_{it} に 2 階以上の自己相関がない限り $(u_{i3} - u_{i2})$ とは無相関となる。したがって y_{i1} は操作変数として有効である。同様に, $t = 4$ のとき,

$$(y_{i4} - y_{i3}) = \alpha(y_{i3} - y_{i2}) + (x'_{i4} - x'_{i3})\beta + (\lambda_4 - \lambda_3) + (u_{i4} - u_{i3})$$

において, y_{i2} と y_{i1} は $(y_{i3} - y_{i2})$ と相関が高いが, $(u_{i4} - u_{i3})$ とは無相関になり, 操作変数として有効である。

⁴⁸ 以下では x_{it} は個別効果と相関する場合, すなわち $E(x_{it}\mu_i) \neq 0$ の場合を考える。

Z_i を採用することになる⁴⁹ .

$$Z_i = \begin{bmatrix} [y_{i1} & x'_{i1}] & & & & \dots \\ & [y_{i1} & y_{i2} & x'_{i1} & x'_{i2}] & \dots \\ & & 0 & & & \ddots \\ & & & & & \dots \\ & \dots & & & 0 & \\ & \dots & & & & \\ & \dots & & & & \\ & \dots & [y_{i1} & \dots & y_{i,T_i-2} & x'_{i1} & \dots & x'_{i,T_i-2}] \end{bmatrix} \quad (37)$$

加重行列の設定については，撓乱項 u_{it} に均一分散を仮定した場合の one-step 推定では，

$$H_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ -1 & 2 & -1 & \ddots & & \vdots \\ 0 & -1 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & -1 & 0 \\ \vdots & & \ddots & -1 & 2 & -1 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

を使用する．一方， u_{it} に不均一分散があるなど，分布に制約を課さない場合の two-step 推定では，

$$H_i = \hat{u}_{1,i}^* \hat{u}_{1,i}^{*'} \quad (39)$$

で (38) 式を置き換える．ここで， $\hat{u}_{1,i}^*$ は one-step 推定の残差である⁵⁰ .

なお，モンテカルロ実験の結果によると，撓乱項に不均一分散がある場合でも，two-step 推定における標準誤差に関しては過小バイアスがあり信頼性に問題があることが指摘されてきた．この場合，むしろ one-step 推定の方が two-step 推定よりも標準誤差に関して信頼性のある結果が得られる場合がある（詳細は Arellano and Bond (1991), Blundell and Bond (1998) を参照）．しかし分散推定量に関する，Windmeijer (2005) によって提案された小標本修正を行うことにより，two-step 推定で得られた標準誤差に基づいて各変数の有意性を評価することができる⁵¹ .

⁴⁹ 非バランス型パネルデータや missing observations の場合には，操作変数行列においてデータの無い行を削除したりデータの無い部分を 0 で置き換えたりすることにより対処する．

⁵⁰ one-step 推定と two-step 推定は撓乱項が *i.i.d.* にしたがう場合には漸近的に等しくなる．

⁵¹ Ox における最新バージョンの DPD パッケージではこの修正が標準で適用されている．

C.1.2 モデル特定化のテスト

撓乱項 u_{it} に 2 階以上の自己相関がないことはダイナミック・パネルデータ・モデルにおける重要な仮定の一つである．この仮定が満たされない場合は (35) 式は成立せず，操作変数として不適切なものが存在することになる．そのような操作変数で得られた GMM 推定量は一致性をもたない．そのため，Arellano and Bond (1991) では自己相関に関する検定を提案している (AR テスト)．これは撓乱項に関して 2 階の自己相関 (AR(2)) の有無をテストするものである．帰無仮説を「自己相関なし」とした場合に，統計量は漸近的に標準正規分布にしたがう⁵²．

Arellano and Bond (1991) では，操作変数に関する次のような過剰識別制約テストも提案している (Sargan テスト)⁵³．検定統計量は，one-step 推定の場合を S_1 ，two-step 推定の場合を S_2 とすると，

$$S_1 = \left(\sum_{i=1}^n \hat{u}_{1,i}^* Z_i \right) A_{1,N} \left(\sum_{i=1}^n Z_i' \hat{u}_{1,i}^* \right) \left(\frac{1}{\hat{\sigma}_{1,u}^2} \right) \quad (40)$$

$$S_2 = \left(\sum_{i=1}^n \hat{u}_{2,i}^* Z_i \right) A_{2,N} \left(\sum_{i=1}^n Z_i' \hat{u}_{2,i}^* \right) \quad (41)$$

で与えられる．これらは漸近的に自由度 $(l - k)$ の χ^2 分布にしたがう．ここで l は Z_i の列数であり， k は W_i の列数である．また， $\hat{u}_{\bullet,i}^*$ は one-step 推定または two-step 推定の残差であり， $\hat{\sigma}_{1,u}^2 = \hat{u}_{1,i}' \hat{u}_{1,i} / (\sum_i T_i - k)$ である． $A_{\bullet,N}$ もそれぞれ one-step，two-step 推定に対応するものである．

Sargan テストの帰無仮説は「過剰識別制約は有効である」とするものである．また，テストの限界として次の点が指摘されている．第 1 に，小サンプルでは検定力が低いことである．第 2 に，one-step のテストにおいては，不均一分散の下では帰無仮説が過剰に棄却されがちであるということである．

C.2 Blundell and Bond のシステム GMM 推定

GMM 推定では問題点として時間方向のデータ数 T が小さいときはバイアスが大きいことや，操作変数の弱相関問題 (weak instruments) が指摘されている．Arellano and Bond

⁵² 検定統計量については Arellano and Bond (1991) や Doornik *et al.* (2006) を参照．

⁵³ Hansen の J 検定と基本的に同様のアイデアである．

(1991) の GMM 推定に関しては, α_p が 1 に近づくか μ_i の分散が大きいとバイアスが大きくなるという問題点が指摘されている．この場合, 操作変数 $y_{i,t-2}$ は $\Delta y_{i,t-1}$ と弱相関になる．

Blundell and Bond (1998) は, ダイナミック・パネルデータ推定において操作変数行列を拡張することによって GMM 推定のバイアスを改善できることを示した (システム GMM 推定)．例えば, (32) 式で $q = 1$ の場合,

$$y_{it} = \alpha y_{i,t-1} + x'_{it}\beta + \mu_i + \lambda_t + u_{it} \quad (42)$$

であり, $\text{Cov}(y_{i,t-1}, \mu_i) \neq 0$ である．このとき両辺の 1 階の階差を考えると,

$$\Delta y_{it} = \alpha \Delta y_{i,t-1} + \Delta x'_{it}\beta + \Delta \lambda_t + \Delta u_{it} \quad (43)$$

となり, Δy_{it} は個別効果 μ_i に依存しない．したがって, u_{it} に 2 階以上の自己相関がなければ, $\Delta y_{i,t-1}$ は (42) 式の攪乱項 u_{it} に関して,

$$E(\Delta y_{i,t-1} u_{it}) = 0$$

となる．すなわち, $\Delta y_{i,t-1}$ は (42) 式の操作変数として有効である．同様に考えると, $(\Delta y_{i2}, \Delta y_{i3}, \dots, \Delta y_{i,t-1})$ が (42) 式の操作変数として有効である．しかし, $\Delta y_{i,t-2}$ 以前のラグ付き変数は, 階差式 (43) 式で既に設定されている操作変数と線形関係にあるため, 情報としては特段必要ないものである．

レベル式 (42) 式と階差式 (43) 式を同時にシステム推定するのが, Blundell and Bond (1998) が提案したシステム GMM 推定である．階差式のみを用いた推定は Arellano and Bond (1991) のダイナミック・パネル推定に相当する．つまり Arellano and Bond (1991) は Blundell and Bond (1998) の特殊ケースとして考えられる⁵⁴．システム GMM 推定はより多くの情報を利用しているため, 上記の GMM の問題点を改善し, より精度の高い推定量を提供する．

Arellano and Bond (1991) と同様にシステム GMM 推定の場合でも, シミュレーション結果によると標準誤差に関しては two-step 推定では過小バイアスがあることが指摘されており, one-step 推定の標準誤差の方が信頼性が高い場合がある．しかしこの場合も Windmeijer (2005) による小標本修正が適用可能である．また, モデルの特定化に関する

⁵⁴ システム GMM 推定の場合の, 他の説明変数 (x'_{it}) を考慮した操作変数行列 Z_i , および加重行列 H_i の設定については, Doornik *et al.* (2006) を参照．

AR テストと Sargan テストに関しても Arellano and Bond (1991) と同様に考えることができる .

付 表

付表 1 パネル単位根検定 (平均からの偏差による LLC 検定)

レベルデータ				
	タイム・トレンドあり		タイム・トレンドなし	
	統計量	p 値	統計量	p 値
CO_2/P	-1.956	0.025	-3.507	0.000
GDP/P	6.823	1.000	8.845	1.000
$(GDP/P)^2$	14.347	1.000	23.540	1.000

1 階の階差データ				
	タイム・トレンドあり		タイム・トレンドなし	
	統計量	p 値	統計量	p 値
CO_2/P	-32.486	0.000	-36.092	0.000
GDP/P	-21.123	0.000	-12.217	0.000
$(GDP/P)^2$	-8.931	0.000	-4.675	0.000

(注) 帰無仮説は「単位根あり」.

LLC: Levin, Lin and Chu (2002) テスト.

付表 2 パネル共和分検定 (Pedroni 検定)

変数: CO_2/P , GDP/P , $(GDP/P)^2$

Pedroni (2004) テスト

	統計量	p 値
PC_1	-385.320	0.000
PC_2	-380.917	0.000

(注) 帰無仮説は「共和分関係なし」.

検定の概要については補論 B.2 節を参照.

統計量の算出には, NPT 1.3 (Chiang and Kao, 2002) を利用した.

経済経営研究目録

(1980 年 7 月より 2007 年 3 月まで)

Vol. No. 発行年月

経済一般理論・実証

日本の景気循環の推計	26 (1)	2005 . 5
- Markov Switching Dynamic Factor Model を用いた検討 -		
経済の情報化と IT の経済効果	22 (1)	2001 . 11
日米経済と国際競争	20 (4)	2000 . 3
現金収支分析の新技法	16 (3)	1995 . 11
日米独製造業の国際競争力比較	12 (1)	1991 . 6
- 実質実効為替レートを利用した要因分析 -		
レーガノミックスの乗数分析	10 (1)	1989 . 5
為替レートのミスアラインメントと日米製造業の国際競争力	9 (1)	1988 . 7
貯蓄のライフ・サイクル仮説とその検証	2 (3)	1982 . 1
今後のエネルギー価格と成長径路の選択	1 (1)	1980 . 7
- 期待されるエネルギーから資本への代替 -		

設備投資

1990 年代不況下の設備投資と銀行貸出	26 (7)	2006 . 3
R&D のスピルオーバー効果分析	26 (2)	2005 . 6
- 日本のハイテク産業における実証 -		
1990 年代の設備投資低迷の背景について	25 (4)	2004 . 12
- 財務データを用いたパネル分析 -		
設備投資と不確実性	25 (2)	2004 . 9
- 不可逆性・市場競争・資金制約下の投資行動 -		
大都市私鉄の運賃改定とその過程の研究	16 (6)	1996 . 1
- 1985 ~ 1995 年 -		
大都市私鉄の運賃改定とその過程の研究	16 (2)	1995 . 11
- 1966 ~ 1984 年 -		

大都市私鉄の運賃改定とその過程の研究 - 1945 ~ 1965 年 -	15 (1)	1994 . 12
大都市私鉄の投資と公的助成 - 地方鉄道補助法とその評価 -	14 (1)	1993 . 4
鉄道運賃・収支と設備投資	13 (2)	1992 . 7
大都市圏私鉄の設備投資について	12 (3)	1991 . 8
設備投資と資金調達 - 連立方程式モデルによる推計 -	11 (4)	1991 . 2
土地評価とトービンの q / Multiple q の計測	10 (3)	1989 . 10
我が国の設備機器リース - その特性と成長要因 -	9 (5)	1989 . 3
設備の償却率について - わが国建設機械の計測例 -	9 (3)	1988 . 9
設備投資の決定要因 - 各理論の実証比較と VAR モデルの適用 -	6 (5)	1986 . 3
設備投資研究 '85 - 主要国の設備投資とわが国における R&D 投資の構造的特色 -	6 (4)	1985 . 9
設備投資研究 '84 - 変貌する研究開発投資と設備投資 -	5 (1)	1984 . 7
設備投資研究 '82 - 調整過程における新たな企業行動 -	4 (2)	1983 . 7
投資促進施策の諸類型とその効果分析	4 (1)	1983 . 7
設備投資研究 '81 - 研究開発投資の経済的効果 -	3 (4)	1982 . 7
税制と設備投資 - 調整費用、合理的期待形成を含む投資関数による推定 -	3 (3)	1982 . 7
時系列モデルの更新投資への適用	3 (2)	1982 . 7
設備投資研究 '80 - 投資行動分析の新しい視角 -	2 (2)	1981 . 7

金融・財政

貸し手間の協調の失敗と公的政策	27 (1)	2006 . 5
日本企業のガバナンス構造	24 (1)	2004 . 1
- 所有構造、メインバンク、市場競争 -		
非対称情報下の投資と資金調達	23 (3)	2003 . 2
- 負債満期の選択 -		
- 投資非効率と企業の規模 -		
メインバンク関係は企業経営の効率化に貢献したか	21 (1)	2000 . 8
- 製造業に関する実証研究 -		
ドル・ペッグ下における金融危機と通貨危機	20 (3)	1999 . 8
アメリカ連邦政府の行政改革	20 (1)	1999 . 6
- GPRA を中心にして -		
なぜ日本は深刻な金融危機を迎えたのか	19 (1)	1998 . 9
- ガバナンス構造の展望 -		
国際機関投資家の新潮流	16 (4)	1995 . 9
アメリカの金融制度改革における銀行隔離論	13 (1)	1992 . 6
メインバンクの実証分析	12 (4)	1992 . 3
Asset Bubble のミクロ的基礎	11 (3)	1990 . 12
資産価格変動とマクロ経済構造	11 (2)	1990 . 7
貯蓄・投資と金利機能	11 (1)	1990 . 6
金融構造の変化について	10 (2)	1989 . 8
公的部門の金融活動	9 (4)	1988 . 10
- 米国での動きとわが国との対比 -		
クラウディング・アウトについての研究	8 (1)	1987 . 11
- 国債発行の国内貯蓄および金融仲介への影響 -		
アメリカの金融システムの特徴と規制緩和	7 (1)	1986 . 10
アメリカの金融自由化と預金保険制度	6 (3)	1985 . 6
西ドイツの金融自由化と銀行収益および金融制度の安定	6 (2)	1985 . 7
西ドイツの公的金融		
- その規模と特徴 -		

アメリカの公的金融	6 (1)	1985 . 7
- フェデラル・ファイナンス・バンクと住宅金融 -		
金融市場の理論的考察	5 (2)	1984 . 7
債券格付に関する研究	2 (1)	1981 . 7
資本市場に於ける企業の資金調達	1 (2)	1980 . 10
- 発行制度と資金コスト -		

資源・環境

二酸化炭素排出と環境グズネツ曲線	27 (3)	2007 . 3
- ダイナミック・パネルデータ推定による検証 -		
カーボンファイナンスの評価と今後の可能性	25 (5)	2004 . 12
- モンテカルロ法によるシミュレーション分析 -		
地域経済と二酸化炭素排出負荷	24 (4)	2004 . 3
エネルギー問題に関する理論および実証のサーベイ	1 (3)	1981 . 2

会計・企業・財務

日本の M&A	26 (6)	2006 . 3
- イベント・スタディによる実証研究 -		
ベトナム私法整備の経緯と日本支援の役割	26 (5)	2006 . 3
- 社会的共通資本としての法学の視点から -		
DIP ファイナンスの実証研究	26 (4)	2006 . 3
税効果会計と利益操作	25 (6)	2005 . 3
- 倒産企業による実証分析 -		
コーポレート・ガバナンスの世界的動向	25 (3)	2004 . 9
- 欧米、中国・韓国における法制度を中心とする最近の展開 ならびに「会社法制の現代化に関する要綱試案」の動向 -		
コーポレート・ガバナンス改革の現状と課題	24 (5)	2004 . 3
- 経営機構改革の具体例の検討、内部統制システム等 に関する考察を中心として -		
利益の質による企業評価	24 (3)	2004 . 3
- 利質分析の理論と基本的枠組み -		

企業の再生と挫折	24 (2)	2004 . 3
- UAL におけるターンアラウンド戦略の評価 -		
商法改正後の新しいコーポレート・ガバナンスと企業経営	23 (6)	2003 . 3
- 社外取締役、監査役会など米国型機構、従来型機構の検討を中心として -		
日本の製造業	23 (5)	2003 . 3
- 長期データに基づく収益力の再検証 -		
利益操作の研究	23 (4)	2003 . 2
- 不当な財務報告に関する考察 -		
バブル崩壊後の企業財務の推移と課題	18 (3)	1998 . 3
連結決算 20 年のデータで見る日本企業の資本収益性低下	18 (2)	1998 . 3
日米医療 NPO (非営利組織) の経済分析	17 (2)	1997 . 3
企業のリストラクチャリングについて	16 (1)	1995 . 5
日本主要企業の資本構成	12 (2)	1991 . 7
企業における情報行動の分析	7 (2)	1987 . 3
- 職場における情報行動に関する調査報告 -		
ビジネス・リスクと資本構成	3 (1)	1982 . 4
産業構造・労働		
防衛的技術進歩	26 (3)	2005 . 7
- グローバル経済下の内生的技術進歩 -		
技術進歩と人的資本	25 (1)	2004 . 5
- スキル偏向的技術進歩の実証分析 -		
我が国の半導体産業とイノベーション	23 (7)	2003 . 3
- イノベーション経営研究会報告書 -		
我が国製造業の打開策を探る	23 (2)	2002 . 11
- プロダクション・ニューパラダイム研究会報告書 -		
貿易と雇用	23 (1)	2002 . 11
- グローバル化の産業と地域への影響 -		
グローバリ化と労働市場	21 (2)	2000 . 11
- 日本の製造業のケース -		

偏向的技術進歩と日本製造業の雇用・賃金	20 (2)	1999 . 6
- コンピュータ投資にみる技術進歩の影響 -		
戦間期日本における農工間賃金格差	19 (3)	1998 . 12
日本の労働市場と失業	9 (2)	1988 . 8
- ミスマッチと女子労働供給の実証分析 -		
産業調整問題に関する理論および実証	3 (5)	1982 . 8
地域政策		
ハイテク型産業クラスターの形成メカニズム	27 (2)	2006 . 10
- フィンランド・オウル ICT クラスタにおける歴史的実証 -		
地域・目的別社会資本ストックの経済効果	19 (2)	1998 . 11
- 公共投資の最適配分に関する実証的分析 -		
地域間所得移転と経済成長	18 (1)	1998 . 3
アジアにおける地域の国際ネットワーク化試論	17 (1)	1997 . 3
- ネットワークの理論的考察とその応用としてのアジア重層ネットワーク構想 -		
新しい町づくりの試みサステイナブル・コミュニティ	16 (5)	1995 . 10
- 真のベター・クオリティ・オブ・ライフを求めて -		
首都圏を中心としたハイテクゾーンの現状と将来	6 (6)	1986 . 3