

環境クズネッツ曲線と人口

欧米諸国とアジア諸国の事例

駒澤大学大学院 経済学研究科

博士後期課程 増田幹人

2003年12月

キーワード

環境クズネッツ曲線、I=PAT モデル、共分散型 I=PAT モデル

要旨

本稿では、人口(P)、経済(1人当たり GDP(A))、科学技術(1次エネルギー原単位(T))といった三つの環境決定要因を取り上げ、これらの要因が相互作用しながら環境インパクトに対していかなる影響を与えるかを、共分散型 I=PAT モデルを用いて数量的に分析した。またこの分析を行なうに際し、A と T との相関に焦点を当て、環境クズネツ曲線の議論をもとにこの二つの要因の相関を数量的に分析した。ここでは、欧米諸国とアジア諸国を比較する形で分析を行なった。

この結果国により様々であったが、多くの国に関しては A と T との間に逆 U 字型の相関が見られた。共分散型 I=PAT モデルによる計算ではこの点を考慮に入れ、環境転換を経験した国に関しては転換点前後の期間に分けて計算を行なった。その結果、負の共分散を示した国はすべて、そのマイナス分だけ環境インパクトを減じるように作用していた。しかしながら、A と T の負の相関に關すると、欧米諸国の場合は環境クズネツ曲線の議論によって説明できても、アジア諸国は説明することができない。なぜならアジア諸国において、1人当たり GDP が低い経済成長の初期の段階において、エネルギー原単位の低下傾向を示しているからである。

駒澤大学大学院 経済学研究科 増田幹人
連絡先：東京都世田谷区駒澤 1-23-1 第 2 研究館
Tel：03-3418-9185
E-mail：3312202m@komazawa-u.ac.jp

目次

はじめに

1. 環境決定要因の相互作用

1-1 環境決定要因の性質

2-2 相互作用の性質

2. 環境クズネッツ曲線を交えた環境決定要因の相互作用分析

2-1 経済要因と科学技術要因との相関

2-2 共分散型 I=PAT モデルによる分析

おわりに

はじめに

今日、地球環境問題は非常に重要な議題となっており、その解決のため「持続可能な発展」という概念が中心的役割を担ってきている。「持続可能な発展」は福利水準が世代を越えて持続することを意味するが（WCED 1987）、その中でも環境保全は最重要課題である。この場合、環境を決定する要因を考察することが重要になるが、本稿の目的は人口、経済、科学技術といった三つの環境決定要因に焦点を当て、これらの相互作用の視点に立って考察を進める。

本稿では、人口、経済、科学技術といった環境決定要因が相互作用し合いながら、環境インパクトに対していかなる影響を与えるかを考察する。1.では、環境決定要因の相互作用を多面的に考察する。ここではまず環境決定要因の性質を提示し、共分散型 I=PAT モデルを基礎にこれらの要因の相互作用を捉える。そして環境クズネッツ曲線の議論を提示することにより経済要因と科学技術要因の関係を考察し、環境決定要因の相互作用の分析を深める。本稿における経済要因は 1 人当たり GDP であり、科学技術要因は、環境クズネッツ曲線の議論において環境指標としても用いられ、環境保全型技術の進歩を計る指標でもある GDP 単位当たりの 1 次エネルギー消費、すなわちエネルギー原単位である。

2.では、環境クズネッツ曲線の議論を基礎に、時系列データを用いて経済要因である 1 人当たり GDP と科学技術要因であるエネルギー原単位との相関を分析する。そしてこのことを踏まえ、共分散型 I=PAT モデルを用いて、人口、経済、科学技術要因が相互作用しながら環境インパクト、すなわち総 1 次エネルギー消費に対していかなる影響を与えるかを数量的に分析する（要するに各要因の I に対する寄与率を算出する）。ここでは、欧米諸国とアジア諸国を対象地域として取り上げ、両地域の性質を比較する。

1. 環境決定要因の相互作用

1-1 環境決定要因の性質

持続可能な発展を目指す上で環境保全は最重要課題であるが、それを考える場合環境決定要因の視点に立つことは重要である。本稿では人口、経済、科学技術といった三つの環境決定要因に焦点を当てる。実際、ブルントラント委員会の名で知られる「環境と開発に関する世界委員会(WCED)」¹や「世界資源研究所(WRI)」はこの三要因を重要視している(WCED 1987, WRI 1992)。本稿で扱う環境決定要因は以上の三つであるが、実際にはさらに多く存在している。環境決定要因は、主に人口、経済、文化に大別される。そして人口要因は、人口規模、人口増加率、出生率、人口分布、人口構造(年齢構造)、人口移動、さらには人口の質ともいえる健康状態などを内包しており、経済要因は、財、サービスの交換や生産のための人的、物質的調整などを含む。文化要因は、価値判断、技術、教育、そして社会的、政治的制度などである。ただしこれらの境界はあいまいで、例えば法律や技術は、文化と経済の両方に属している(J.E.Cohen 1995)。

人口・経済・科学技術の相互作用を数量的に分析する場合、各要因を指数として表さねばならない。ここではI=PATモデルを参考にする。P.R.アーリックとJ.P.ホールドレンは、環境決定要因として人口(P)、豊かさ(A)、科学技術(T)の三要因を取り上げ、環境インパクト(I)をこれらの要因の積和として表し、I=PATという方程式を提示している(P.R.Ehrlich and J.P.Holdren 1974)。ここで豊かさは1人当たり所得として表され、科学技術は所得単位当たり消費および汚染される水準として表される。この科学技術はここで明らかなように通常の科学技術と異なり、消費財を供給する際の環境破壊指数である。

本稿では1次エネルギー消費を環境指標として用いるが、これは時系列データとしての利用しやすさもあるが、環境問題にとって最も重要な指標だと考えられるからである。1次エネルギーは、石炭、石油、天然ガス、原子力、水力それぞれのエネルギー消費によって構成されており、これらの消費増は、地球温暖化を引き起こす温室効果ガスや大気汚染の原因となる二酸化硫黄や二酸化窒素の排出を増加させることになる(松井 2000)。したがって1次エネルギー消費の低下は、環境問題の解決にとって重要な変化であると考えられる。

エネルギー原単位の低下は、通常環境保全型科学技術(環境保全に貢献する科学技術)が進歩したことを意味する。要するに、同一のエネルギー資源を投入した場合に産出が増加するか、もしくは同一の産出された所得における汚染、消費の水準が低下する過程を環境保全型科学技術の進歩と考えることができる。これを技術の進歩と捉える方法は、通常の科学技術の議論によると、労働生産性や土地生産性を技術進歩と捉える部分生産性方法と同じ質のものと考えられる(山口 2001)。

¹ 「持続可能な発展」という概念を世界的次元に広げたのはこの委員会である。

1-2 相互作用の性質

人口、経済、科学技術は絶えず相互作用し合って地球環境に影響を与えており、この性質が「持続可能な発展」の水準を規定すると考えられる。したがって、人口、経済、科学技術要因は、地球環境に負荷を与えないよう調和的に相互作用する必要がある。前述したI=PATモデルは、環境決定要因の相互作用を考慮に入れていない。まさにこのモデルが示しているように、各要因が増加すればする程環境インパクトは増加することになるのである。

このI=PATモデルに基づく各要因のIへの寄与率は、様々な環境指標に関して多くの研究者により計算されている（B.Commoner 1991, B.Commoner 1994, P.Harrison 1992, D.W. Pearce 1991, J.C.Cramer 1998）。I=PATモデルを増加率で示す場合、

$$I = P + A + T \quad (1)$$

と表すことができ、各要因のIへの寄与率は(1)の両辺をIで除した

$$1 = P/I + A/I + T/I \quad (2)$$

によって算出することができる。

しかしながら(2)式からでは、各要因の相互作用を考慮に入れた寄与率を算出することはできない。各要因は他の要因に影響を与えることにより、逆にその要因の増加が環境インパクトを減じるように働く場合もありうる。S.H.プレストン(S.H.Preston 1996)は(1)式を改良し、各要因の相互作用を考慮に入れた共分散型I=PATモデルを示した。これは次式によって示される。

$$\sigma_I^2 = \sigma_P^2 + \sigma_A^2 + \sigma_T^2 + 2COV_{PA} + 2COV_{AT} + 2COV_{PT} \quad (3)$$

σ^2 は各要因(環境インパクト、人口、豊かさ、科学技術)の分散を表すものであり、 $2COV$ は各要因間の共分散を表すものである。式は、環境インパクトの分散が、人口、豊かさ、科学技術各要因の分散と、各要因の共分散の和であることを示しており、各要因の寄与率は、各要因の分散値とその要因が属する共分散の値との和を環境インパクトの分散値で除することにより算出することができる。

例えば経済成長が促進され環境保全型科学技術の適用率が高まり所得単位当たりの汚染(消費)の水準が低下すれば、豊かさと科学技術の共分散値はマイナスになり、負の相関を示すことになる。この場合、豊かさと科学技術それぞれの環境インパクトに対する寄与率は、豊かさと科学技術との負の共分散によって相殺されることになる。

この豊かさと科学技術の相関は本稿の分析対象であるが、これを示す例として環境クス

ネット曲線の議論を挙げる事ができる。環境クズネット曲線とは、横軸に所得水準、縦軸に汚染水準をとった場合、逆U字型の曲線として示されるものである。これは、所得水準がある程度まで成長すると環境保全が進むことを意味する。汚染水準が低下する変化のことは環境転換と呼ばれている。この曲線は、S.クズネット(S.kuznets 1955)が導いた、所得水準と所得分配の不平等との間に見られた逆U字型の関係を、所得水準と汚染水準との関係に応用したものである。

環境クズネット曲線を導く要因としてはまず以下の五つの点を上げることができる。第1は行動上の変化と選好であり、これは環境の質が一般に上級財であるため、所得水準の上昇は清浄な環境に対する需要を高め、環境改善のための支出を増加させることを意味するものである。2つ目の制度的変化は、所得の上昇により、財産権の確立、環境に対する配慮の向上や環境教育、さらには開かれた政治システムを通じての環境政策の実施など、社会制度が環境保全をサポートするように変化していくことを意味する。3点目の技術上および製品構成上の変化は、経済成長過程で進む資本蓄積や技術革新によって、古い資本ストックや技術がより効率的なものに取って代わられるが、それに応じて環境への負荷が小さくなることを意味するものである。4点目の構造的変化は、経済成長に伴い、大量のエネルギー資源の利用および環境汚染を引き起こす工業化社会から、環境への負荷を小さくする脱工業化社会へ移行することを意味するものである。最後の国際的再配分は、経済成長に伴い国際貿易が活発化するが、その国際貿易を通じて環境に対する負荷の大きい産業が先進国から途上国へとその生産拠点を移すことを意味する(柳瀬 2000)。

環境クズネット曲線の研究は、1992年における世界銀行の報告書(World Bank 1992)で取り上げられたのを契機として、それ以後多くの研究者により、理論、実証ともに精力的な研究が行なわれている。近年、実証分析に関しては、所得水準だけでは環境クズネット曲線を説明し得ないという立場が強くなり、所得水準以外の要因も説明変数にとり、重回帰分析を行なうことにより多面的に分析が行なわれている。所得水準以外の要因としては、生産・消費構造、国際貿易、権力および所得の不平等、経済活動の集中度、経済成長率、エネルギー価格、外部的圧力、人口増加などが用いられている。こうした分析には時系列データを基にした分析もあるものの、ほとんどは資料の制約上クロス・セクションデータを基にした分析である(G.M.Grossman and A.B.Kruger 1992, G.M.Grossman and A.B.Kruger 1995, R.Shafik and S.Bandyopadhyay 1992, T.Panayotou 1993, T.M.Selden and D.Song 1994, M.Torras and J.K.Boyce 1998, D.Holtz-Eakin and T.M.Selden 1995, S.M.de Bruyn et al. 1998, V.Suri and D.Chapman 1998, R.K.Kaufmann et al. 1998, G.C.Unruh and W.R.Moomaw 1998, 速水 1995、入江・小林・森田 2001)。しかしながら、すべての環境指標に関して環境クズネット曲線が導き出されているわけではない。実際、環境クズネット曲線の議論は普遍性のあるものでないという批判も存在している(P.Ekins 1997)。

本稿で用いる環境決定要因を用いて、それらの相互作用の分析を行なった実証研究を二つ挙げておく。ここでも環境クズネット曲線の議論が基礎に置かれている。S.J.デカニオは、人口増加率、1人当たりGDP、1人当たりエネルギー使用量、1人当たり二酸

化炭素排出量を指標として用い、回帰分析を行なうことにより要因間の相互作用を明らかにしている。データは世界全体のクロス・セクションデータである。人口増加率は 1965-75 年のデータであり、それ以外は 1987 年のデータである。これによると と の間には負の相関が、 と の間には逆 U 字型の関係が、そして と の間にも逆 U 字型の関係が見出されている。 と の間の負の相関は、経済成長が高まる程人口増加率は低下することを示している。 と 、 と の逆 U 字型の関係は、環境クズネツ曲線の議論により示すことができる。これは、豊かな国程エネルギー効率がよく、また化石燃料への依存が減り、エネルギー単位当たりの二酸化炭素排出量の少ない化石燃料を使用するようになることを示している。これら両汚染水準の環境転換における所得水準は約 7,000 ドルであると推計している (S.J.DeCanio 1992)。

デカニオは以上の回帰分析をもとに将来の二酸化炭素排出量の推計を行なっている。推計は非常に楽観的な経済成長予測にもとづくものから非常に悲観的な予測にもとづくものまでの範囲で 4 つ提示されている。ここで人口増加は、直接的にエネルギー消費や二酸化炭素排出量の増大に結びつくとして仮定されている。結果として 4 つの推計結果にはそれ程差が見られていない。これは、経済成長が高まる程人口増加率が低下し、1 人当たりエネルギー消費量や 1 人当たり二酸化炭素排出量が低下することを反映しているのである (S.J.DeCanio. 1992)。

T.ディエツと E.A.ローザは、人口規模と 1 人当たり GDP を取り上げ、回帰分析を行なうことによりこれらの要因が二酸化炭素排出量に与える影響を明らかにしている。データは任意に選ばれた 111 カ国のクロス・セクションデータである。その結果、人口規模と人口影響乗数の間には二次関数の関係が見られるが、ほとんど線形の関係であった。これは中国とインドという人口大国以外の人口影響乗数はあまり大きくないことを反映している。しかしながら、人口が二酸化炭素排出に与える影響が重要であることに変わりはない。1 人当たり GDP とその影響乗数の間には逆 U 字型の関係が見られ、10,000 ドルをピークに影響乗数は低下している。これもデカニオの議論のように、環境クズネツ曲線の議論によって説明される (T.Dietz and E.A.Rosa 1997)。

ではここで、共分散型 I=PA^αPT^βモデルにおける PA と PT の相関の議論についても簡単に触れておく。まず人口と豊かさの相関に関してであるが、人口増加は、大きい若い人口のコーホートを造り出し、このコーホートが労働市場に参入することにより、従属人口に対する労働力人口の比率を高め、1 人当たり所得の増加を促進させる (N.Birdsall et al. 2001)。人口と科学技術との相関に関しては修正主義の議論を挙げることができる。修正主義は、J.サイモン (J.Simon 1996) S.クズネツ (S.Kuznets 1960) E.ボーズラップ (E.Boserup 1960, E.Boserup 1981) M.クレマー (M.Kremer 1993) 等により展開されており、人口増加は科学技術の進歩を促進すると主張されている。環境保全型科学技術に関してはサイモンの議論が明示的である。サイモンによると、人口増加は科学技術進歩のインセンティブになる。人口増加はより大きな生産を意味するので、これは短期的には公害や環境汚染の増加を引き起こす。しかしながら、追加的な人間は公害や環境汚染を減少させる新しい方

法を作り出し、またそれらと戦う追加的財源を供給するのである（岡田 1996）。ただし本稿では、この PA、PT の相関に関してはこれ以上言及しないこととする。

2. 環境クズネッツ曲線を交えた環境決定要因の相互作用分析

2-1 経済要因と科学技術要因との相関

2-1 では、環境クズネッツ曲線の議論を基礎に、時系列データを用いて経済要因である 1 人当たり GDP と科学技術要因であるエネルギー原単位との相関を明示的に示す。まず欧米諸国の事例を見てみよう。図 1、表 1 は、任意の欧米諸国を対象に、1960 年から 89 年までの 1 人当たり GDP とエネルギー原単位との相関を示したものである。ここでは各国それぞれにおいて、エネルギー原単位を、1 人当たり GDP を説明変数とする一次式、二次式、三次式に回帰させ、最もフィットする関数形を採用した。

ここにおけるエネルギー原単位の解釈は、単なる科学技術進歩の指標と環境指標であるというものだが実際は複雑である。エネルギー原単位はエネルギー消費を所得で除したものであるため、技術進歩が一定であったとしても、付加価値の高い製品の生産量が多ければ、エネルギー原単位は低下してしまう。一般的に、産業内におけるエネルギー多消費産業のウエイトが高く、エネルギー効率の低い生産設備が利用され、エネルギー自給率が高く、エネルギー消費構成に占める電力のウエイトが高い場合、エネルギー原単位は大きくなると言われている（松井 2000）。したがって、エネルギー原単位の低下が一概に環境保全型科学技術の進歩を意味するわけではない。

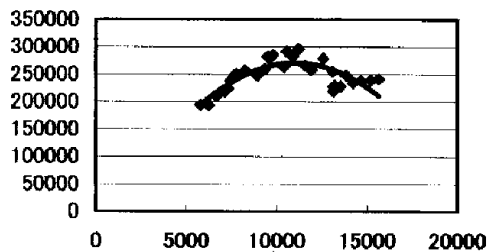
また本稿では、1 人当たり GDP とエネルギー原単位との関係を環境クズネッツ曲線の議論で捉えようとする都合上、エネルギー原単位を環境指標としても扱っている。確かにエネルギー原単位は広義の環境指標であり、これを指標として用いた環境クズネッツ曲線の分析もある（速水 1995）。しかしながら、エネルギー原単位はあくまで科学技術進歩を計る尺度であり、環境指標としてはふさわしくないという批判もある（松岡・松本・河内 1998）。このように、エネルギー原単位の解釈は難しく更なる考察が必要であるように思われる。しかし本稿におけるエネルギー原単位の解釈は、あくまで上に示した単純なものに留めておくことにする。

推定式に三次関数を加えたのは、先に提示した多くの環境クズネッツ曲線の先行研究において、三次式までが妥当な関数形であると示されているからである。この結果表 1 における t 値が示しているように、すべての国に関して係数は 5% 水準で有意であった。なお、係数はスケールの影響を除去するため標準化係数を用いている。

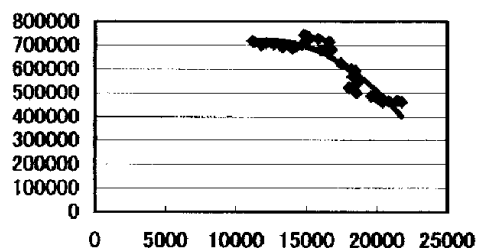
イギリス、スペインを除くすべての国に関して、逆 U 字型の環境クズネッツ曲線を示している。イギリスはエネルギー原単位が終始低下するといった右下がりの一次関数の形をしている。これは、1960 年以前においてすでにピークを経験した（すなわち 1960 年以前

図1 欧米諸国における1人当たりGDPとエネルギー原単位との相関

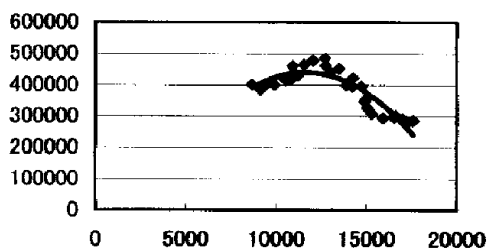
イタリア



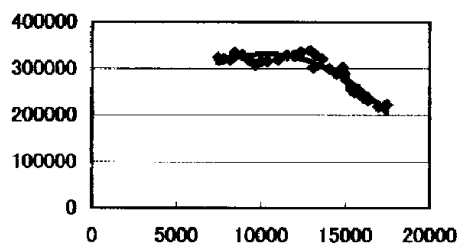
アメリカ



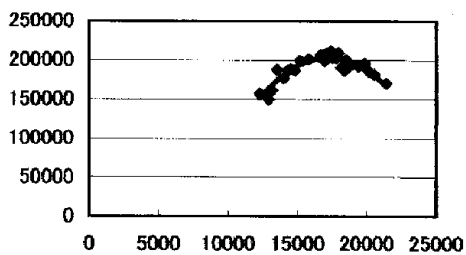
スウェーデン



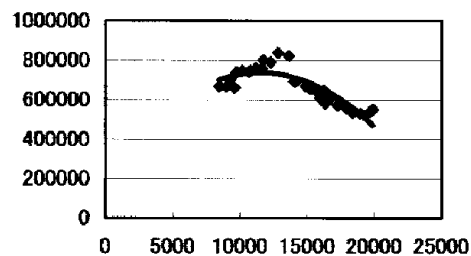
フランス



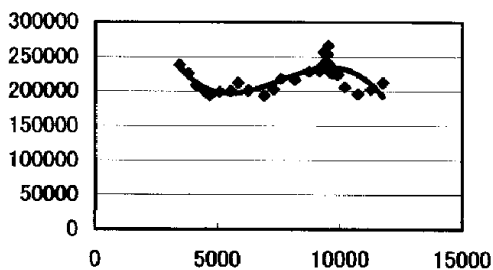
スイス



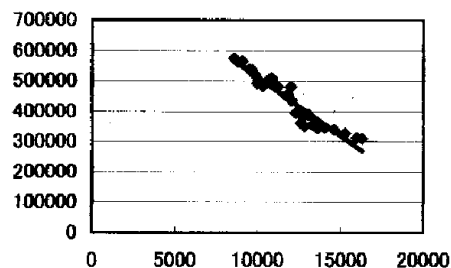
カナダ



スペイン



イギリス



注：対象期間は1960-89年である。

縦軸はエネルギー原単位で単位はトン/10億ドル、横軸は1人当たりGDPで単位はドルである。

出所：1次エネルギーデータは、United Nations. 各年版. *Statistical Yearbook*. United Nations.

所得データは、A. Maddison. 1995. *Monitoring the World Economy 1820-1992*. OECD.

を使用。

表 1 欧米諸国における 1 人当たり GDP とエネルギー原単位との相関

	1 人当たり GDP	1 人当たり GDP ²	1 人当たり GDP ³	修正 R2
イタリア	6.451 (6.557)	-6.287 (-6.391)		0.591
スウェーデン	5.28 (5.947)	-6.005 (-6.764)		0.796
スイス	11.281 (10.439)	-10.908(-10.094)		0.812
アメリカ	2.582 (3.45)	-3.469 (-4.635)		0.857
カナダ	3.351 (3.628)	-4.112 (-4.452)		0.717
フランス	4.13 (6.354)	-4.947 (-7.612)		0.873
スペイン	-20.863 (-4.8)	44.547 (5.058)	-23.763(-5.174)	0.515
イギリス	-0.96 (-8.224)			0.919

注：対象期間は図 1 に同じ。

カッコ内は t 値である。

出所：図 1 に同じ。

にエネルギー効率を改善するような科学技術が考案された)と考えることもできるが、この要因は本稿では扱わない。スペインは、最もフィットした関数は三次関数であり、低下、上昇、低下を示している。しかしながらピークを経験しており、環境転換を経験したと言っている。スペインの場合だけなぜ三次関数の形をしているのかに関して本稿では扱わない。

では欧米諸国に関して、ピーク点における所得水準と年に関しては共通性があるだろうか。ピーク年に関してはだいたい 1970 年から 80 年の間に集中している。これは、石油ショックもさることながら、60 年代後半から公害の深刻化に伴い、環境問題に対する取り組みが急速に進んだことを反映していると考えられる。所得水準に関しては、1 万ドルから 1 万 5000 ドルの間に集中しているが、分散が大きく転換の目安として捉えるには無理があると言えるだろう²。

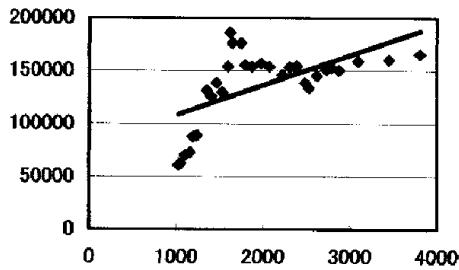
いずれにせよ、これらの国のすべてがピークを経験するといった逆 U 字型を示していないものの、エネルギー原単位に関しては低下傾向を示している。また、プロットした点は比較的安定して動いている。

では次にアジア諸国の事例を見てみることにする。図 2、表 2 は、任意のアジア諸国を対象に、欧米諸国の場合と同じ要領で 1960 年から 89 年までの 1 人当たり GDP とエネルギー原単位との相関を示したものである。アジア諸国においても、表 2 における t 値が示しているように、すべての国に関して係数は 5%水準で有意であった。ただ相関の形は欧米

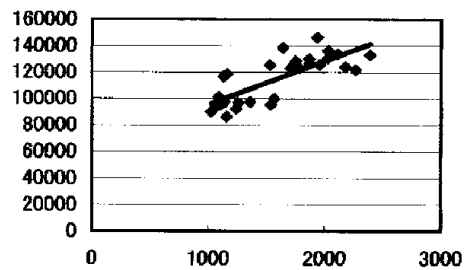
² この場合のピーク年およびそこにおける所得水準の導出方法は、 $T/A=0$ によって算出したのではなく、単に

図2 アジア諸国における1人当たりGDPとエネルギー原単位との相関

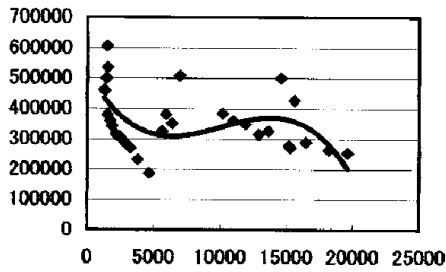
タイ



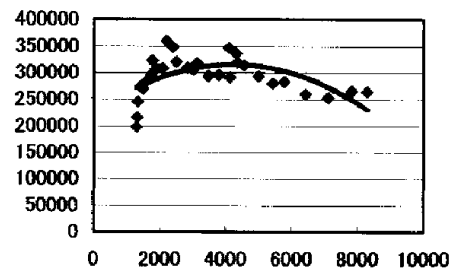
インドネシア



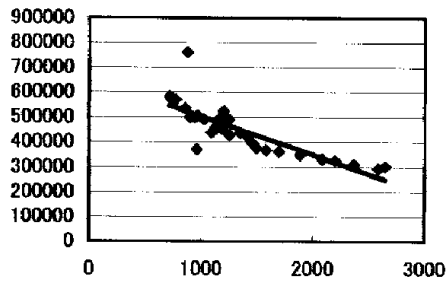
シンガポール



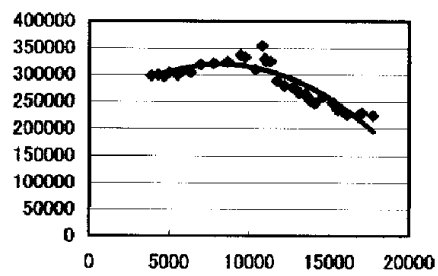
韓国



中国



日本



注：図1に同じ。

出所：シンガポールの所得データ以外は図1に同じ。

シンガポールの所得データは、

Department of Statistics. 各年版. *Yearbook of Statistics Singapore*.

プロットした点の最大値における水準を提示しただけである。これはアジア諸国の場合も同じである。

表2 アジア諸国における1人当たりGDPとエネルギー原単位との相関

	1人当たりGDP	1人当たりGDP ²	1人当たりGDP ³	修正R2
日本	2.448(5.021)	-3.181(-6.526)		0.777
タイ	0.605(4.026)			0.344
インドネシア	0.796(6.97)			0.621
韓国	2.385(3.457)	-2.522(-3.656)		0.285
シンガポール	-4.867(-2.494)	10.456(2.435)	-6.103(-2.431)	0.184
中国	-0.813(-7.38)			0.648

注：表1に同じ。

出所：図2に同じ。

諸国の場合と異なり様々である。

日本は欧米諸国と同じく、逆U字型の環境クズネッツ曲線を示している。ピーク点における1人当たりGDPの値も10800ドルというように欧米諸国に近い。そして、プロットした点は比較的安定して変動している。

韓国も逆U字型のクズネッツ曲線を示しているが、ピーク点である1970年において所得水準は2208ドルというように欧米諸国や日本と比べるとはるかに低い。シンガポールは、最もフィットした関数は三次関数であり、低下、上昇、低下を示しているがピークは経験していない。中国は、最もフィットした関数は一次関数であり終始低下傾向を示している。これらの国において、いずれも全体として見るとエネルギー原単位は低下傾向を示しているが、所得水準が非常に低い段階からそれが見られる。シンガポールがなぜこのような相関の形をしているかについては今後の課題である。

タイ、インドネシアは反対に増加傾向を示す一次関数の形をしている。これらの国はいまだに所得水準が低く、環境クズネッツ曲線の議論にしたがうならば、1人当たりGDPはまだ環境転換を達成するに必要な水準に達していないと考えることができる。したがって、両国は今後環境転換を達成する可能性があると考えられる。日本を除くアジア諸国について共通していることは、プロットした点が非常に不安定に変動しているということである。特にシンガポールではこうした特徴が見られる。

所得水準が低い段階にエネルギー原単位の低下傾向を示すという状況の背後にはいかなる要因があるのだろうか。その背景には直接投資の存在があると考えられる。アジア諸国の経済発展、さらに科学技術の進歩は、直接投資に強く影響を受けている。直接投資は、日本や欧米といった先進諸国の資本・技術・経営ノウハウを受け入れることができる。したがってアジア地域における途上諸国は、発展段階のより初期の段階において、

エネルギー効率を高めるようなより進んだ環境保全型科学技術を享受するという後発の利益を得ることができたのだろう。

また、プロットした点が安定して変動していない背景にも、直接投資の存在があると考えられる。アジア諸国の経済発展は直接投資に強く影響を受け、自発的に達成されていないため、独自の安定した科学技術体系が確立されず、その結果プロットした点は安定していないのではないかと考えられる。

2-2 共分散型 I=PAT モデルによる分析

2-2 では、先に示した共分散型 I=PAT モデル、すなわち(3)式を用いて、人口、経済、科学技術要因が相互作用しながら環境インパクトに対していかなる影響を与えるかを数量的に分析する。用いるデータ、対象国、そして対象期間は2-1で用いたものと同じである。ここでは、2-1で示した経済要因である1人当たりGDPと科学技術要因であるエネルギー原単位との相関において、多くの国が逆U字型の環境クズネツ曲線を示していたことを考慮に入れ、ピークを経験した国に限りその前後の期間に分けて計算を行なう。

本稿においてもそうであったように、通常環境クズネツ曲線の分析において指標は絶対値が用いられる。しかしながら、共分散型 I=PAT モデルを用いた計算において絶対値をそのまま用いると問題が生じる。なぜなら、分散、共分散を計算する際、これらの値はスケールに影響を受けてしまい、結果としてスケールの一番大きい指標の寄与率が最も大きくなってしまふのである。したがってスケールに影響を受けない指標を用いることが必要である。

スケールに影響を受けないようにする手立てとして、各変数の増加率を指標として用いることを挙げることができる。共分散型 I=PAT モデルを考案した S.H. プレストンは増加率を指標にとって計算を行なっている (S.H. Preston 1996)。プレストンはいくつかの環境指標を用い、先進地域と途上地域といった大まかな地域区分に基づき計算を行なったが、この結果 A と T の共分散は負の値を示していた。しかしながら、環境クズネツ曲線の分析において増加率が指標として用いられたことはない。絶対値を指標として用いた場合には所得水準と環境指標との間に逆U字型の相関、もしくは負の相関が見出されたとしても、増加率を指標にとるとこうした相関が必ずしも見出されるとは限らないのである。

実際、2-1で扱ったデータを増加率指標(年平均増加率)にして共分散型 I=PAT モデルで計算してみたが(表3、表4)、欧米、アジア両諸国ともに AT の共分散の値は必ずしもマイナスにはなっておらず国により異なる。これは他の共分散の値にもいえることである。したがって、本稿において A と T の相関を環境クズネツ曲線の議論に基づいて考察している都合上、増加率を指標にとることは望ましくないと考えられる。

そこで本稿では、人口規模、1人当たりGDP、エネルギー原単位それぞれの絶対値を各平均値で除することによってスケールの影響を除去した。この指標を用いることにより、

表 3 増加率指標に基づく欧米諸国における共分散型 I=PAT モデルによる推計

国	σ_I^2	σ_P^2	σ_A^2	σ_T^2	$2COV_{PA}$	$2COV_{AT}$	$2COV_{PT}$	寄与率 P	寄与率 A	寄与率 T
イタリア	0.00408	0.00000658	0.000675	0.003246	0.0000108	0.0000803	0.0000622	2.0	18.8	83.0
スウェーデン	0.00335	0.00000763	0.000357	0.0027	0.0000145	0.000209	0.0000593	2.4	17.3	88.7
スイス	0.00358	0.000078	0.000536	0.00303	0.0000931	-0.000256	0.0000962	7.5	10.4	80.3
アメリカ	0.00113	0.00000376	0.000532	0.000592	0.00000316	0.00000516	0.0000076	1.3	46.9	52.6
カナダ	0.00309	0.00102	0.00112	0.00166	-0.000802	-0.0000197	0.000115	10.8	9.6	56.8
フランス	0.00209	0.0000133	0.00027	0.001454	0.0000317	0.000276	0.0000471	4.4	27.6	84.9
スペイン	0.00402	0.0000103	0.00119	0.00303	0.0000214	-0.000241	0.0000135	1.1	24.1	69.7
イギリス	0.00129	0.00000738	0.000423	0.000789	0.00000462	0.000047	0.000016	2.2	36.9	66.2

注： σ^2 は各変数の分散を表すものであり、 $2COV$ は各変数間の共分散を表すものである。各要因の寄与率は、各要因の分散値とその要因が属する共分散の値との和を環境インパクトで除すことにより算出される。

出所：図 1 に同じ。

表 4 増加率指標に基づくアジア諸国における共分散型 I=PAT モデルによる推計

国	σ_I^2	σ_P^2	σ_A^2	σ_T^2	$2COV_{PA}$	$2COV_{AT}$	$2COV_{PT}$	寄与率 P	寄与率 A	寄与率 T
日本	0.00331	0.00000832	0.0012	0.00178	0.000018	0.000281	0.0000263	15.9	45.4	62.9
タイ	0.015	0.0000274	0.000636	0.0136	-0.0000414	0.00061	0.000169	1.0	8.0	95.9
インドネシア	0.00947	0.00000609	0.00168	0.0077	0.0000198	-0.000041	0.00941	0.7	17.7	81.8
韓国	0.00517	0.0000371	0.00147	0.0049	-0.0000492	-0.00135	0.000161	2.9	1.4	71.8
シンガポール	0.0627	0.0000398	0.00865	0.0551	0.0000445	-0.00105	-0.00016	-0.1	12.2	86.1
中国	0.0163	0.0000651	0.00408	0.0117	0.000212	-0.0000369	0.000279	3.4	26.1	73.2

注：表 3 に同じ。

出所：図 2 に同じ。

スケールの影響を除去できつつも、もとの絶対値における増加の程度を忠実に反映することが可能となる。この指標を用いた共分散型 I=PAT モデルの計算結果は以下に示す通りである。

最初に欧米諸国の事例を見てみよう。表 5 を見れば明らかであるが、まずピーク以前の期間において、全体的に見ると A の寄与率は大きく P の寄与率は小さい。そして、どの国もマイナスの共分散の値はなく、各要因の寄与率はすべてプラスである。ピーク以降の期間においては、PA の共分散値はプラスだが、AT、PT の共分散値はマイナスである。終始低下傾向を示すイギリスもそうである。この二つのマイナスの値をとる共分散は、各要因の分散の値を減じるように働く。このことを受けて、イタリアを除けばピーク以降の期間の

表 5 欧米諸国における共分散型 I=PAT モデルによる推計

国および期間	σ_I^2	σ_P^2	σ_A^2	σ_T^2	$2COV_{PA}$	$2COV_{AT}$	$2COV_{PT}$	寄与率 P	寄与率 A	寄与率 T
イタリア (1960-76)	0.07195	0.00104	0.02482	0.01844	0.0047	0.01905	0.0039	13.4	67.5	57.5
(76-89)	0.02251	0.0047	0.01905	0.0039	0.00116	-0.0057	-0.0006	23.4	64.5	-10.7
スウェーデン (1960-70)	0.02844	0.00051	0.00865	0.00853	0.00186	0.00708	0.00181	14.7	61.8	61.3
(70-89)	0.02454	0.00024	0.01244	0.02993	0.00153	-0.0173	-0.0023	-2.2	-13.6	42.1
スイス (1960-78)	0.0423	0.00258	0.01245	0.00918	0.00519	0.00868	0.00422	28.4	62.2	52.2
(78-89)	0.00548	0.00035	0.00472	0.00323	0.00108	-0.0031	-0.0008	11.5	49.3	-12.2
アメリカ (1960-70)	0.01252	0.0013	0.00738	0.00064	0.00277	0.00026	0.00017	33.9	83.1	8.5
(70-89)	0.02641	0.00399	0.01558	0.02831	0.00733	-0.0189	-0.0099	5.4	15.2	-1.9
カナダ (1960-72)	0.03785	0.00528	0.00894	0.0065	0.00553	0.00654	0.00506	41.9	55.5	47.8
(72-89)	0.02763	0.00364	0.02209	0.01762	0.00828	-0.0169	-0.0071	17.4	48.8	-23.1
フランス (1960-73)	0.02873	0.0015	0.01952	0.00086	0.00493	0.00156	0.00036	23.6	90.5	9.7
(73-89)	0.0153	0.00066	0.01064	0.01636	0.00244	-0.0118	-0.003	0.7	8.4	10.2
スペイン (1960-80)	0.12188	0.00367	0.07476	0.0092	0.01548	0.01504	0.00373	18.8	86.4	22.9
(80-89)	0.01327	0.0002	0.01058	0.00918	0.00101	-0.0065	-0.0012	0.08	38.4	11.2
イギリス (1960-89)	0.03867	0.00055	0.03304	0.03835	0.00363	-0.0331	-0.0038	1.0	9.2	3.7

注：表 3 に同じ。

出所：図 1 に同じ。

P、A の寄与率はピーク以前と比べて小さくなっている。また、イタリア、スイス、アメリカ、カナダはこの AT、PT における負の共分散の影響を受け、T の環境インパクトに対する寄与率はマイナスになっている。しかしながら、P、A に関しては相殺されておらずプラスの値をとっている。イギリス、スペイン、フランスに関してはどの要因に関しても相殺されておらず、すべての要因の寄与率はプラスである。スウェーデンに関しても、同じく AT、PT の共分散はマイナスの値をとっているが T は相殺されておらず、逆に P と A が相殺されており、P、A の寄与率はマイナスで、T の寄与率はプラスとなっている。この意味することは、1 人当たり GDP の増加は I の増加に全く影響を与えておらず、むしろ減じるように作用していたということである。

次にアジア諸国の事例を見てみよう。表 6 を見れば明らかであるが、ピークを経験した日本、韓国に関して、ピーク以前の期間においてはやはり A の寄与率は大きく P の寄与率は小さい。そして、どの国もマイナスの共分散の値はなく、各要因の寄与率はすべてプラスである。このことは終始増加傾向にあるタイ、インドネシアにも言えるが、P の寄与率はいくぶん大きい。ピーク以降の期間における日本と韓国は、PA の共分散値はプラスだが、

表 6 アジア諸国における共分散型 I=PAT モデルによる推計

国および期間	σ_I^2	σ_P^2	σ_A^2	σ_T^2	$2COV_{PA}$	$2COV_{AT}$	$2COV_{PT}$	寄与率 P	寄与率 A	寄与率 T
日本 (1960-74)	0.08329	0.00218	0.05483	0.00342	0.0101	0.01064	0.00212	17.3	90.7	19.4
(74-89)	0.03935	0.00136	0.04098	0.01763	0.00678	-0.0229	-0.0045	9.3	63.2	-24.8
タイ (1960-89)	0.42618	0.04996	0.13832	0.06574	0.07832	0.05592	0.03792	39.0	64.0	37.4
インドネシア (1960-89)	0.23864	0.03727	0.07325	0.02439	0.04948	0.03252	0.02173	45.5	65.1	33.0
韓国 (1960-70)	0.06567	0.00453	0.0078	0.0267	0.00528	0.01185	0.00951	29.4	38.0	73.2
(70-89)	0.27055	0.00944	0.25383	0.01129	0.04389	-0.0406	-0.0073	17.0	95.0	-13.5
シンガポール (1960-79)	0.74543	0.01989	0.63359	0.07592	0.10173	-0.0677	-0.018	13.9	90.0	-1.3
中国 (1960-89)	0.19489	0.027	0.16038	0.05302	0.05789	-0.0724	-0.031	27.7	74.8	-25.9

注：表 3 に同じ。

出所：図 2 に同じ。

AT、PT の共分散値はマイナスである。これは全体として低下傾向を示しているシンガポール、中国にも言えることである。AT、PT における負の共分散の影響を受けて、ピーク以降の期間における日本、韓国の P の寄与率はピーク以前と比べて小さくなっているが、A の寄与率に関する日本は小さくなったが韓国は逆に大きくなっている。また、この AT、PT における負の共分散の影響を受けて、日本、韓国、シンガポール、中国の T の寄与率はマイナスになっている。しかしながら P、A の寄与率は相殺されておらずプラスとなっている。

以上のように、欧米、アジア両諸国においても見られることだが、共分散が負の値をとる場合、各要因の寄与率を減じるように作用するが、その中でも A と T の共分散の値は大きく重要な役割を演じている。したがって、A の寄与率は全体的に見ると三要因の中で最も大きく算出されているが、T の低下に影響を与えることにより間接的に環境インパクトの減少に対して影響を与えている。この A と T の負の相関は、先に示した環境クズネツ曲線の議論によって説明することができる。ある程度まで経済成長が進むと環境保全型科学技術は進歩し、その結果環境インパクトは減じられたのである。

日本を除くアジア諸国における A と T の負の相関は環境クズネツ曲線の議論によって説明することはできない。これは先に示したように、1 人当たり所得が低い経済成長の初期の段階においてエネルギー原単位が低下傾向を示しているからである。したがって、先に示した直接投資のような所得水準以外の要因の分析を今後深める必要があるだろう。いずれにせよ、欧米諸国、日本はもちろんのこと、韓国、シンガポール、中国に関しても環境インパクトは減じられており、この状況は持続可能な状態に近づいているかの一つの目安として考えてもいいように思われる。

おわりに

本稿では、人口、経済（1人当たり GDP）、科学技術（1次エネルギー原単位）を環境決定要因とし、環境クズネツ曲線の議論を基に一人当たり GDP とエネルギー原単位との相関を考察し、これを踏まえた上でこれらの要因が相互作用しながら環境インパクトに対していかなる影響を与えるかを分析した。この場合、欧米諸国とアジア諸国を比較する形で分析を行なった。

1人当たり GDP とエネルギー原単位との相関に關すると、欧米諸国の場合、イギリス、スペイン以外の国はすべて逆U字型の環境クズネツ曲線を示している。スペインは低下、上昇、低下を示す三次関数の形をしていたが、ピークを経験しており環境転換を達成したと言ってよい。イギリスは終始低下傾向を示す一次関数の形をしている。これらにおいて、係数はすべて5%水準で有意であった。また、散布図におけるプロットした点も安定して動いている。このように、欧米諸国はすべてエネルギー原単位に関して低下傾向にある。ピーク点における年は1970年から80年の間に、そして所得水準は1万から1万5000ドルの間に集中している。ピーク点が1970年から80年に集中しているのは、石油ショックもさることながら、60年代後半から公害の深刻化に伴い、環境問題に対する取り組みが急速に進んだことを反映していると考えられる。

アジア諸国の場合相関の形は画一的でない。日本は欧米諸国の場合と同じく環境クズネツ曲線を示しており、ピーク点における1人当たり GDP の値も10800ドルというように欧米諸国に近く、その形状も比較的安定している。韓国も環境クズネツ曲線を示しているが、ピーク点である1970年における所得水準は欧米諸国や日本と比べるとはるかに低い。シンガポールは、低下、上昇、低下を示す三次関数の形をしているがピークは経験していない。中国は終始低下傾向を示す一次関数の形をしている。これらの国はいずれも全体として見ると低下傾向を示しているが、それは所得水準が低い段階から見られている。タイ、インドネシアは反対に増加傾向を示す一次関数の形をしている。これらの国はいまだに所得水準が低く、環境クズネツ曲線の議論に従うならば、今後環境転換を達成する可能性があると考えることができる。日本を除くアジア諸国について共通していることは、プロットした点が非常に不安定に変動しているということである。

次に、共分散型 I=PAT モデルを用いて、これらの要因が相互作用し合いながら環境インパクトに対していかなる影響を与えるかを数量的に分析した。欧米諸国の場合、ピーク以前の期間においてはどの国もマイナスの共分散はなく、寄与率はすべてプラスである。ピーク以降の期間に關すると、ピークを経験した国において PA の共分散の値はプラスだが、AT、PT の共分散の値はマイナスである。終始低下傾向を示したイギリスもそうである。こうした負の値をとる共分散は、各要因の環境インパクトに対する寄与率を減じるように作用している。

アジア諸国の場合も欧米諸国と同じく、ピーク以前の期間においては、ピークを経験した日本、韓国ともにマイナスの共分散はなく、寄与率はすべてプラスである。終始増加傾

向を示したタイ、インドネシアも同じである。ピーク以降の期間に関しては、日本、韓国における PA の共分散の値はプラスだが、AT、PT の共分散の値はマイナスである。このことは終始低下傾向を示したシンガポール、中国も同じである。その結果、やはり負の値をとる共分散は、その分各要因の環境インパクトに対する寄与率を減じるように作用している。

欧米、アジア両諸国において、共分散が負の値をとる場合各要因の寄与率を減じるように作用するが、その中でも A と T の共分散の値は大きく重要な役割を演じている。したがって、A の寄与率は全体的に見ると三要因の中で最も大きい、T の低下に影響を与えることにより、A の増加が間接的に環境インパクトの減少に対して影響を与えていると考えられる。欧米諸国に関して、この A と T の負の相関は先に示した環境クズネツツ曲線の議論によって説明することができる。しかしながら、日本を除くアジア諸国における A と T の負の相関は環境クズネツツ曲線の議論によって説明することはできない。これは、1 人当たり所得が低い経済成長の初期の段階においてエネルギー原単位の低下傾向を示しているからである。

この背景に存在する要因の一つとして、後発の利益を得ることを可能にした先進諸国による直接投資の存在があると考えられる。また、日本を除くアジア諸国において、プロットした点が安定して変動していない背景には、独自の安定した科学技術体系が確立されていないということを考えることができる。この背後にも、アジア諸国の経済発展が直接投資に強く影響を受け、自立的に達成されていないということがあるかもしれない。ただこれは多分に憶測の域を出ておらず、この点の議論については今後の解明すべき課題としたい。

参考文献

- Birdsall, N, A.C.Kelly, S.W.Sinding. 2001. Population Matters : Demographic Change, Economic Growth, and Poverty in Developing World. Oxford University Press, Oxford.
- Boserup, E. 1965. The Condition of Agricultural Growth. George Allen & Unwin Ltd, London. 安澤秀一・安澤みね訳『農業成長の諸条件』。ミネルヴァ書房。1975。
- _____ . 1981. Population and Technological Change. The University of Chicago Press, Chicago. 尾崎忠二郎・鈴木敏央訳『人口と技術移転』大明堂。1991。
- Cohen, J.E. 1995. How Many People Can the Earth Support?. W.W.Norton & Company, New York. 重定南奈子・瀬野裕美・高須夫悟訳『新「人口論」 - 生態学的アプローチ』。農文協。1998。
- Commoner, B. 1991. "Rapid Population Growth and Environmental Stress". International Journal of Health Services. Vol.21. No.2. pp.199-227.

- _____. 1994. "Population, Development and the Environment: Trends and Key Issues in the Developed Countries". Population, Environment and Development. United Nations. New York. pp.64-77.
- Cramer, J.C. 1998. "Population Growth and Air Quality in California". Demography, Vol.35, No.1. pp.45-56.
- de Bruyn, S.M., J.C.J.M. van den Bergh, J.B. Opschoor. 1998. "Economic Growth and Emissions : Reconsidering the Empirical Basis of Environmental Kuznets Curves". Ecological Economics, Vol.25. pp.161-175.
- DeCanio, S.J. 1992. "International Cooperation to Avert Global Warming : Economic Growth, Carbon Pricing, and Energy Efficiency". The Journal of Environment and Development. Vol.1. No.1. pp.41-62.
- Department of Statistics. 各年版. Yearbook of Statistics Singapore.
- Dietz, T. and E.A. Rosa. 1997. "Effects of Population and Affluence on CO₂ Emissions". Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol.94. pp.175-79.
- Ehrlich, P.R. and J.P. Holdren. 1974. "Impact on Population Growth". Science, No, 171. _____ . and _____. 1974. "Human Population and the Global Environment". American Scientist, Vol.62.
- Ekins, P. 1997. The Kuznets Curve for the Environment and Economic Growth : Examining the Evidence. Environment and Planning, Vol.29. pp.805-830.
- Grossman, G.M. and A.B. Kruger. 1992. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. Woodrow Wilson School, Princeton.
- Grossman, G.M. and A.B. Kruger. 1995. "Economic Growth and the Environment". Quarterly Journal of Economics, Vol.110. pp.353-377.
- Harrison, P. 1992. The Third Revolution : Environment, Population and a Sustainable World, I.D. Tauris and Company in Association with Penguin Books, London.
- Holtz-Eakin, D. and T.M. Selden. 1995. "Stoking the Fires? CO₂ Emissions and Economic Growth". Journal of Public Economics. Vol.57. pp.85-101.
- Kaufmann, R.K., B. Davidsdottir, S. Garnham, P. Pauly. 1998. "The Determinants of Atmospheric SO₂ Concentrations : Reconsidering the Environmental Kuznets Curve". Ecological Economics, Vol.25. pp.209-220.
- Kremer, M. 1993. "Population Growth and Technological Change : One Million B.C. To 1990". Quarterly Journal of Economics, Vol.108.
- Kuznets, S. 1955. "Economic Growth and Income Inequality". American Economic Review, Vol.45. pp.1-28.
- Kuznets, S. 1960. "Population Change and Aggregate Output". Demographic and Economic Change in Developed Countries. Princeton University Press, Princeton.
- Maddison, A. 1995. Monitoring the World Economy 1982-1992. OECD.

- Meadows,D.H., D.L.Meadows, J.Randers. 1992. Beyond The Limits. Chelsea Green Publishing Company, Vermont. 茅陽一監訳『限界を超えて』.ダイヤモンド社.1992. pp.254-58.
- Panayotou,T. 1993. “ Empirical Test and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stage of Economic Development ” . Working Paper WP238 Technology and Employment Programme. International Labor Office, Geneva.
- Pearce,D.W. 1991. Blueprint 2 : Greening the World Economy. Earthscan, London. pp.109-137.
- Preston,S.H. 1996. “ The Effect of Population Growth on Environmental Quality ” . Population Research and Policy Review, Vol.15. No.2. pp.95-108.
- Selden,T.M. and D.Song. 1994. “ Environmental Quality and Development : Is There a Kuznets Curve for Air Pollution Problems? ” . Journal of Environmental Economics and Management, Vol.27. pp.147-162.
- Shafik,R. and S.Bandyopadhyay. 1992. “ Economic Growth and Environmental Quality : Time Series and Cross-Country Evidence ” . World Bank Policy Research Working Paper WRS 904.
- Simon,J.L. 1996. The Ultimate Resource 2. Princeton University Press,Princeton.
- Suri,V. and D.Chapman. 1998. “ Economic Growth, Trade and Energy : Implications for the Environmental Kuznets Curve ” . Ecological Economics, Vol.25. pp.195-208.
- Torras,M. and J.K.Boyce. 1998. “ Income, Inequality, and Pollution : Reassessment of the Environmental Kuznets Curve ” . Ecological Economics, Vol.25. pp.147-160.
- United Nations. 各年版. Statistical Yearbook. United Nations.
- Unruh,G.C. and W.R.Moomaw. 1998. “ An Alternative Analysis of Apparent EKC-Type Transitions ” . Ecological Economics, Vol.25. pp.221-229.
- World Bank. 1992. World Development Report 1992 : Development and the Environment. Oxford University Press, New York.
- World Commission on Environment and Development. 1987. Our Common Future. Oxford University Press, New York. 環境と開発に関する世界委員会編『地球の未来を守るために』.福武書店.1987.
- World Resources Institute. 1992. Toward Sustainable Development. Oxford University Press, New York. 森島昭夫・加藤久和監訳『世界の資源と環境 1992-93』.ダイヤモンド社.1992.
- 入江・小林・森田. 2001. 「環境クズネッツ曲線を用いた低公害型経済発展の政策分析」. 環境経済・政策学会編『経済発展と環境保全』. 東洋経済新報社. pp.114-130.
- 岡田實. 1996. 「人口思想史」. 岡田實・大淵寛編『人口学の現状とフロンティア』. 大明堂. pp.22-44.

- 速水佑次郎．1995．『開発経済学』．創文者．
- 松岡俊二・松本礼二・河内幾帆．1998．「途上国の経済成長と環境問題：環境クズネツ曲線は成立するか」『環境科学会誌』11巻4号．環境科学会．pp.349-362．
- 松井賢一．2000．『エネルギー経済・政策論』．嵯峨野書院．
- 山口三十四．2001．『人口成長と経済発展』．有斐閣．
- 柳瀬明彦．2000．『環境問題と経済成長理論』．三菱経済研究所．