

経済成長とエネルギー消費の関係における 技術革新の役割

馬 場 正 弘

1. はじめに

環境クズネッツ曲線概念は、経済発展に伴う環境汚染物質の排出量と所得水準の推移の間に存在する逆U字型の関係を記述する。環境に対する経済活動の影響は石油や石炭などのエネルギー資源の消費と密接な関係を有することから、この概念をエネルギー消費と経済成長の関係を論じる際のツールとして利用することが考えられる。本稿ではこれを特に、技術革新に対する経済的、技術的な誘因の効果およびそれが経済成長とエネルギー消費行動の関係を説明する程度という観点から実証的に検討する。

本稿における主要な関心は次の2点にある。第1に、一国の経済発展におけるエネルギー消費による経済成長という局面からエネルギー節約と所得の拡大の両立という局面に至る過程について、これを産業構造の変化の結果として捉え、環境クズネッツ曲線と同様のモデルを適用することを試みる。第2に、より主要な論題として、産業構造の変化とならんで、エネルギー価格の変動に対処する技術革新および産業の需要側の要因がもたらす技術革新を個々の産業におけるエネルギー消費集約性を変化させる2つの技術的要因として直接検討することを通じて、上記の関係を経済成長のメカニズムの中で内生的に説明することを試みる。そこでは同時に、外生的ショックとしてのエネルギー価格変動という現象を、エネルギー消費に影響を及ぼす新たな技術革新の誘発要因として考慮する。そしてこれらをもとに、1960年代以降の日本の産業時系列データを用いて、エネルギー分

野における技術革新の誘発効果とそこから生じるエネルギー消費抑制効果を検証する。

2. 環境クズネッツ曲線とエネルギー消費

2.1 環境クズネッツ曲線の概念

一国の経済発展に伴う所得分配の不平等度の変化を観察した Kuznets [1955]においては、市場における資源配分の合理的変化の帰結として産業間における資本と労働力の配分が変化し、その結果、経済発展の初期においては所得分配の不平等度が拡大するが、ある水準にまで発展した経済においてはその後不平等度が低下するという関係が見出された。この関係は今日、クズネッツ曲線として知られている。一方、1990年代に入ると、社会や企業における環境問題への意識の高まりの一方で、途上国の経済発展に伴う急速な工業化の進展が地域および地球環境にもたらす悪影響が懸念されるようになった。国際的な環境保全政策の重要性をめぐる議論の中で、このクズネッツ曲線は一国の経済発展の水準と環境汚染水準との間の非線形的な関係を表すためのツールとして注目され、環境クズネッツ曲線と呼ばれる概念が生まれた。これは、所得分配の不平等度の変化と同じように、経済発展の初期の段階においては所得水準の拡大につれて環境汚染が進行するが、やがてある水準に達すると所得水準の拡大は反対に環境汚染度を低下させるように作用するという仮説である。

変数間に観察される関係の記述という意味では、環境クズネッツ曲線の形状を説明するメカニズムとしてしばしば次のような過程が言及される。まず、工業化が開始される以前の経済においては、環境への汚染効果が相対的に小さい農業を中心とした産業構造が特徴であるのに対し、工業化が進展するにつれて環境汚染への影響が大きい製造業のウェイトが上昇し、

これに伴って環境汚染が進行するが、さらに経済の発展段階がサービス部門のウェイトを上昇させる局面に至ると、再び環境汚染への影響が低下する。そして結果として、経済発展に伴って拡大するとされる所得水準を横軸に、環境汚染の程度を縦軸にとったグラフにおいては、両者の間に逆U字型の関係が生じる。この関係については、Grossman and Krueger [1995] や近年では Harbaugh, Levinson, and Wilson [2002]、大坂 [2002] などが途上国を含めたクロスカントリーデータを用いて、また Andreoni and Levinson [2001] が米国内の州・産業と時系列のパネルデータを用いて検討を行っている。

一方、環境クズネッツ曲線のような関係が成立する理論的なメカニズムについては、例えば Stokey [1998] によって以下のような説明がなされている。まず、環境汚染増大がもたらす費用は直接的な負の効用という費用であり、加法的に分離可能な選好のもとでは、これは所得水準から独立である。一方、環境汚染増大がもたらす便益は環境汚染の代償として可能になる産出ひいては消費量の増大であり、これは伝統的な投入要素の水準に依存する。要素の投入水準が低いときは産出量も小さく、したがって消費がもたらす限界効用は大きい。その結果、そこではたとえ環境汚染を最大にするような技術であっても、環境汚染をいっそう増大させることによる限界便益は負の効用の増大という限界費用を埋め合わせて余りある。かくして、所得水準が低い場合には環境汚染が最も大きく、その反面生産性が最も高いような技術が採用され、そこでは所得増加とともに環境汚染は増大する。しかし、この伝統的投入要素の投入増加が続くとの関係は変化する。すなわち、もしも消費の限界効用が弾力的であれば、伝統的投入要素の増大とともに環境汚染の限界価値が低下するという代替的關係が成立し、この場合に山の形の関係が所得と環境汚染の間に成立する（反対に消費の限界効用が非弾力的であれば、汚染と伝統的投入は補完的であり、所得が増えるにつれて常に汚染は拡大する）。この関係は環境汚染の便益

の弾力性ではなく消費の弾力性の値に依存しているため、弾力的な消費のもとでは、AKモデルのような成長モデルであっても所得が時間とともに成長するにつれて逆U字型の関係が描ける。¹⁾

このような逆U字型の関係の有無を明らかにするための実証分析においては、前述のように世界各国の経済発展度の違いを環境汚染物質の排出量と結びつけたクロスカントリーデータによる分析という手法が用いられることが多い。そこでは、被説明変数として窒素酸化物や硫黄酸化物、重金属類の排出量や、河川の酸素要求量など各種の環境汚染指標が用いられ、一方説明変数として、一国の経済発展度を測るための所得水準とその2乗値および3乗値の他に、人口密度、地域特性、工業化度、人口増加率、貿易開放度、投資率など各国の経済状況を反映させたコントロール変数が用いられる。計測に際しては、対数をとったGDPあたり環境汚染排出量 E と一人あたり所得水準 y に加えて国別の特徴を反映したダミー変数 DUM からなる、

$$E = \beta_1 + \beta_2 y + \beta_3 y^2 + \beta_4 DUM + u \quad (1)$$

というタイプを基本としたものが一般的であり、この式を計測した推定値について $\beta_2 > 0$ 、 $\beta_3 < 0$ 、 $|\beta_2| > |\beta_3|$ という関係が成立するとき、変数間に逆U字型の関係が認められることになる。²⁾これに基づいた代表的な実証分析のひとつであるGrossman and Krueger [1995]は、各国の一人あたり所得水準と各種の環境汚染指標の関係について、所得水準の拡大とともに環境の質が一方的に悪化するという証拠は認められず、むしろ初期の悪化の後には改善局面が続くとした。そして、汚染物質の種類によって変わるものの、この改善局面が発生する一人あたり所得水準として8000米ドル(1985年価格)という値を計算し、さらに10000米ドルを超える所得水準の国についていっそうの経済成長が環境を悪化させるという仮説を統計的に棄却している。³⁾

さらに、Stokey [1998]は今後検討されるべきテーマのひとつとして内

生的技術進歩を伴うモデルの分析に言及し、いっそう環境汚染を減少させるような種類の技術進歩が生み出されるような内生的技術進歩モデルの考察を提案している。そして、その際に重要な要素として、市場が環境汚染を低下させる技術を開発させるのに十分なインセンティブを企業に対してもた⁴⁾らすかどうかを取り上げている。

2.2 エネルギー消費の変化を説明するモデルへの適用

本稿では、本来のクズネッツ曲線が上記のような方法で環境問題に対して援用された際の手法を参考にしつつ、これを一国の経済成長および産業部門の所得成長とそこにおけるエネルギー消費水準との間の関係の分析に対して適用することを試みる。一国の工業化の進展に伴う石油や石炭という既存のエネルギーの消費という活動は環境汚染物質の排出源として大きな部分を占めていることから、エネルギー消費の変化と環境汚染の抑制の間には密接な結びつきが存在する。そこで本稿では、エネルギー消費と経済成長の間には環境クズネッツ曲線の場合と同様のメカニズムが存在するという仮説を検討する。そこでは、経済の発展段階の進展という側面からは、経済成長が開始される以前の経済が他産業に比べてエネルギー非集約的な第1次産業や軽工業を中心とした産業構造を有するのに対し、経済成長が開始されるとエネルギー集約的な素材産業や重工業のウェイトが上昇し、その後の段階として、再びエネルギー集約度が低い組立型産業や第3次産業のウェイトが高まるという推移に注目する。この一連の現象の結果として、この経済は所得水準の上昇に伴うエネルギー消費の集約性の上昇とその後のエネルギー消費集約性の低下という現象を経験すると考えられる。

しかし、このような発展段階としての説明は、一国の経済におけるエネルギー消費集約性の推移をその経済成長に伴う産業構造の変化の反映とし

て記述しているに過ぎない。経済活動の活発さとエネルギー消費集約性の間に存在する関係を論じるためには、これと同時に、所得水準の拡大が個々の産業に対してもエネルギー消費を抑制に向かわせるという効果を有する可能性を説明するメカニズムが検討される必要がある。これについて Stokey [1998] における環境汚染の限界費用と限界便益の関係に関する記述を援用すると、次のような説明が可能である。まずエネルギー消費という行動がもたらす費用のひとつである環境悪化による限界的な効用低下はその他の環境汚染と同様に一定であるとする。これに加えて、石油・石炭エネルギー消費の増大はエネルギーの種類や調達先に関するポートフォリオの偏りというリスクをもたらし、これはエネルギー消費増大とともに上昇するため、全体としてエネルギー消費の限界費用はエネルギー消費の増加とともに上昇する。一方、エネルギー消費の効用は産出（消費）の効用であり、これは限界的に低下する。かくして、環境汚染の場合と同様に、あるいはそれよりも速く、所得水準の拡大はエネルギー消費の拡大にブレーキをかけることが考えられる。これは他のプロセスが介在することなしに所得成長とエネルギー消費の間に成立する関係である。⁵⁾

本稿では、このようなエネルギー消費による費用の増大と効用の低下に対する産業の対応のひとつとして、技術革新によってエネルギー消費の増大を抑制するという行動を取り上げる。一方で、エネルギー価格の上昇やエネルギー大量消費への環境面からの批判という外生的ショックに直面した企業が、これらを新たな動機としてエネルギー消費の抑制を図る技術革新を行うことによって対応する際、産業の所得水準の成長が技術革新の経済的機会あるいはインセンティブを拡大するものとして作用し、その意思決定に影響するという経路にも注目し、双方のメカニズムの複合として、エネルギー消費についてクズネッツ曲線と同様の関係が説明されると予想する。⁶⁾

3. 産業部門のエネルギー消費と技術革新

3.1 技術革新という観点からの解釈

本稿では、所得成長や産業規模の拡大が環境やエネルギーに関する諸問題に配慮した企業活動の実現の一環としてこれらの分野における技術革新活動を促進しているかという点と、その場合、こうした技術革新活動の成果が実際にエネルギー消費の抑制という形で観察されるかという点を検討することによって、上記のような環境クズネッツ曲線に相当する関係の成立の有無を論じる。環境問題への対応の必要性が企業の技術革新に対して促進的な影響を及ぼすという関係自体を直接的なモデルで実証したものとしては Jaffe and Palmer [1997] や Brunnermeier and Cohen [2003] が、また同様にエネルギー価格の変動という問題に対する企業の技術革新による対応の様子を計測したものとしては Popp [2002] という先行研究がある。これらは本稿におけるエネルギー消費と所得成長に関する仮説の一部に対応する先行研究であるが、後述のようにこれらはいずれもヒックスに始まる誘発的技術革新仮説に基礎を置くものである。一方、技術革新の誘発について経済的機会としての需要面に注目した、市場の拡大が需要の拡大として企業の技術革新を刺激するという見方も古くからあり、Schmookler [1966] をはじめとして様々な検討が行われている。一方これに続く段階として、このような技術が実際に産業で利用され、効果をあげているかという問題があるが、これについては各種技術革新への投入と産出の関係を生産性上昇や特許出願などの技術進歩によって測定するという広く行われている研究手法がある。

こうした関係から生じる技術革新を介した個々の産業の所得成長とエネルギー消費量の間の逆U字型の関係は、次のようなメカニズムを持つと考えられる。まず、当該産業が成長の初期段階にあるとき、市場から得られ

る収益には限りがある一方で先発する他国における同種の産業との間で競争を行わなければならない。その場合に産業に対してまず求められる技術や設備とは、大量生産によるコスト削減や生産性の上昇を目標としたものであり、既存エネルギー節約や環境負荷の軽減のための技術開発よりもこれらを優先させざるを得ないだろう。やがて産業が成長し、国際市場において一定のシェアを獲得し、企業の資金的余裕も大きくなると、直接利益の拡大や生産性上昇に結びつきにくい分野の技術開発への配分が増加し、その一方で同時に環境問題やエネルギー問題に関して産業界や大企業が社会的責任を果たすことを求める世論への配慮の必要も高まる。こうして生産拡大とともに環境への配慮の必要やエネルギー資源の希少化への認識が強まるにつれて、産業構造がエネルギー節約的になるだけでなく、個々の産業内において、所得水準の拡大が既存エネルギーを中心とした大量消費の見直しのための資源配分の優先順位を引き上げる。かくして、経済成長がエネルギー消費集約度の低下をもたらすという、逆U字型の右半分の部分の形状が成立することになる。

なお、こうしたエネルギー節約的な技術革新は、エネルギー消費の抑制や新エネルギーへのシフトとして生じるだけではなく、反対に産業の成長という側にも効果をもたらす可能性がある。環境規制と経済成長の関係に関して Porter and van der Linde [1995] などにおいて提起された仮説もその1つである。これによれば、厳しい環境規制が世界的に敷かれつつある中では、国内のより厳しい環境規制をクリアすることに成功した企業や産業は、自国内でより緩やかな規制しか課されなかったために環境保全技術で劣位に立った企業に比べて先進国の市場において競争上の優位を獲得し、利潤を上げることができる。⁷⁾ この関係が成立するならば、環境保全活動への積極的な取り組みはその産業のいっそうの成長をもたらさう。かくして、環境クズネッツ曲線における逆U字型の形状の右半分は、所得増加が環境汚染の減少をもたらすというだけでなく、環境汚染の減少が所得増加

をもたらすという関係として説明することもできる。そしてこのような関係は、1970年代の石油価格の世界的高騰に直面して、海外の石油資源への依存度が高く、その影響を受けやすかった日本においてエネルギー節約的な技術革新が促進され、結果として日本製品がその低コスト、省エネルギーという特徴ゆえに世界市場で受け入れられるようになったという経験を考慮するとき、環境面での制約だけでなくエネルギー面での制約とりわけエネルギー価格におけるショックについても成立する可能性がある。

本稿では上述の観点から、エネルギー消費集約度や環境汚染作用の点で異なる諸産業のウェイトの時系列的変化を表す産業構造変数と並んで、産業における既存エネルギーの消費を節約する活動とマクロ的な経済成長の関係を説明する変数としての各産業自身における技術革新活動の成果という変数を取り上げ、その効果を検討する。

3.2 エネルギー技術革新を促す外生的要因と総需要

環境やエネルギーに関するこれらの対応は、企業に対して環境汚染への対応を迫る政府の規制や、エネルギー消費の見直しを迫るエネルギー価格の上昇など、外生的な要因によっても影響される。企業が直面する外生的な要因の変化が技術革新を誘発するという見方は誘発的技術革新の文脈において検討されるもので、そこでは資本と労働の相対価格の変化の発生が生産における両者の最適な組み合わせを変化させ、その結果既存の技術の下では最適とされていた技術よりもより効率的な技術が選択されるとされる。そしてその際、企業はこの新たな技術を採用するために、それを開発するための費用を支払わなくてはならない⁸⁾。この費用が技術革新活動に対するR&D支出であり、相対価格変化に適応するための調整費用の一種として解釈される。そしてR&Dの成果として特許などで計られる技術の産出が行われる。本稿で検討する環境規制やエネルギー価格の変化も既存の

生産要素を利用するための費用を変化させる要因であり、したがって生産要素の相対価格の変化をもたらすことから、これらが技術革新を促進するという定式化はこのような調整費用モデルのひとつであるといえる。

なお、この調整のための支出を行うか否かという意思決定は、ショックが発生した部門に対してその産業がどの程度依存していたかによって異なると考えられる。すなわち、対応へのインセンティブはその産業が外生的変化に対応しなくてはならないと認識する程度に影響される。エネルギー価格変化の場合であれば、その産業がどの程度エネルギー消費集約的な性質を有するかによって、エネルギー節約的技術革新を行うか否かの判断は異なる。また時系列的にも、エネルギー消費集約性が高い時期と節約が進行した時期とでは、このインセンティブは異なると考えられる。

さらに、このような要素の相対価格の変化と並んで技術革新を誘発する要因として、経済の需要側の拡大も注目される。例えば、産業に対する需要水準の上昇は、R&Dのための資金の増加や将来における技術革新の費用を回収する見込みを向上させる利潤予想の改善を通じて、その産業の技術革新活動を刺激する。また、企業規模の拡大や寡占化が市場における競争の停滞よりもむしろ豊富な資金の裏づけや成果の利用機会の拡大を通じて技術革新活動を促進するという見方は、シュンペーター・ガルブレイス仮説として知られる。これらの経済的機会について実証分析を行い、その技術革新誘発効果を認める研究も行われている。⁹⁾ 需要拡大による効果の存在を支持するこのような見方によれば、経済成長に伴う各産業の市場規模や企業規模の拡大は各企業のR&D体制を充実させ、短期的な収支よりも長期的な企業の成長という視点に基づく意思決定を可能にする。これはエネルギー資源の長期的な枯渇予想や環境面への配慮と関連した代替エネルギー開発の必要性を認識する企業に対して、単なる短期的な節約にとどまらない対応を可能にする。かくして、これはエネルギー技術革新に対してもプラスの効果を持つと考えられる。このメカニズムは、経済成長を達成

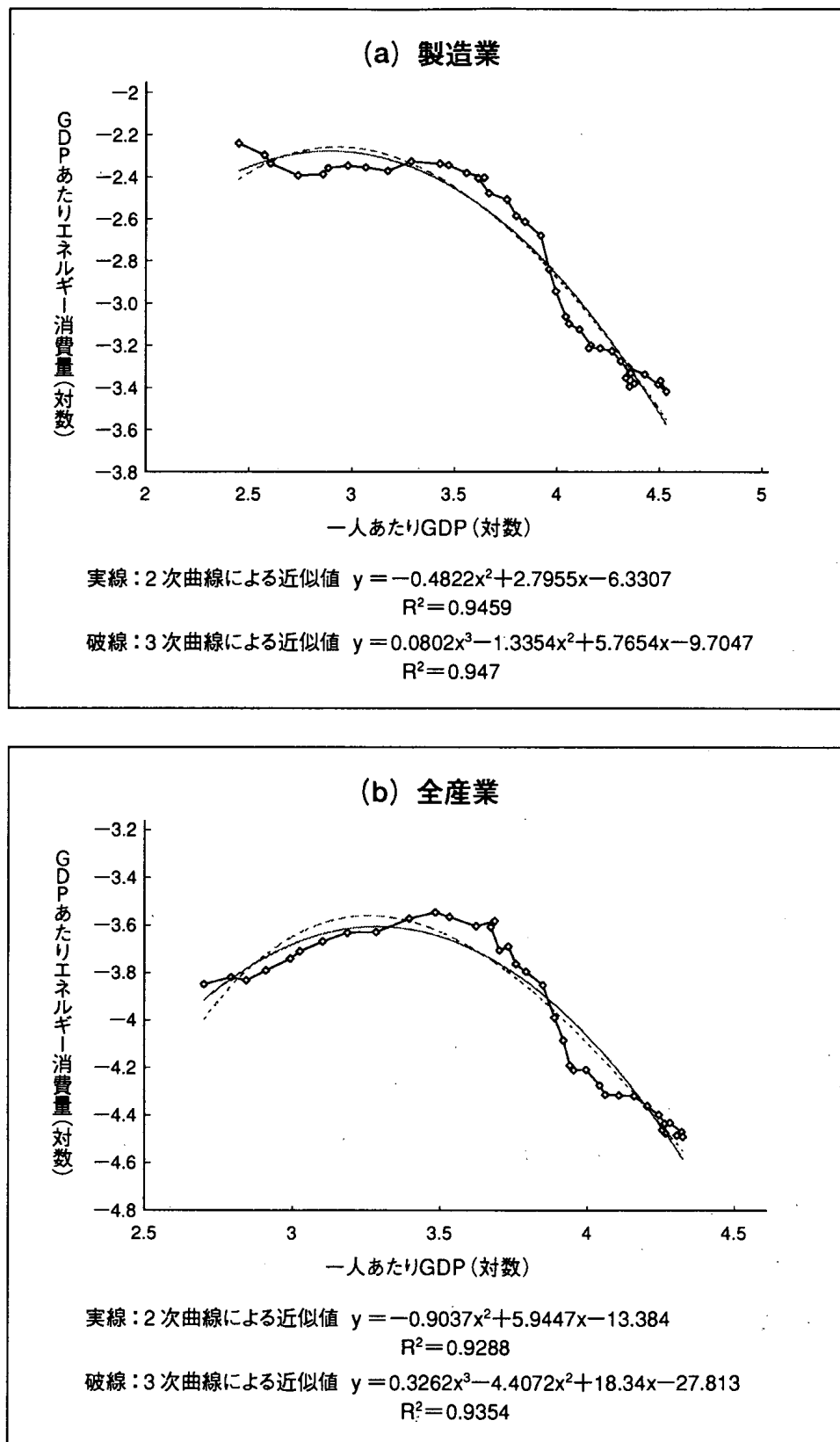
した国においては所得拡大がエネルギー消費集約性や環境汚染を低減させるという仮説の、技術革新という面からの説明となりうる。

3.3 日本のエネルギー消費および所得データから読み取れる関係

本稿では、高度経済成長期以降の日本の産業部門における時系列データを用いて、GDPあたりの石油および石炭系のエネルギー消費量で表したエネルギー消費集約度と一人あたりGDP水準の間に環境クズネッツ曲線に類する逆U字型の関係が認められるか否かを観察しつつ、そこで技術革新が果たした役割を検討する。まず、この期間における両変数間の関係の時系列的な推移を図1に示す。この図の(a)において、横軸は製造業全体における就業者1万人あたりの実質GDP（単位10億円）、縦軸は同じく実質GDP10億円あたりの石油・石炭エネルギー消費量（単位 10^{15} J）で、いずれも対数値である。また同じく図1の(b)は同様の関係を非製造業を含む全産業について描写したものである。¹⁰⁾これらの図からは、ひとまず他の要因の影響を考慮せずに比較する限り、エネルギー消費集約度と一人あたりGDPの間に逆U字型の関係が存在することが読み取れる。なお、各図におけるGDPあたりエネルギー消費量のピークは全産業で1970年、製造業で1969年である。図には両変数間のこのような関係について2次関数（実線）および3次関数（破線）による近似を行った結果も示したが、描かれた近似曲線は、前述の環境クズネッツ曲線の一般形である(1)式においてこの形状が成立する条件である $\beta_2 > 0$ 、 $\beta_3 < 0$ 、 $|\beta_2| > |\beta_3|$ を満たしており、データへのあてはまりも良い。しかし一方で、これらの図においては全産業では1982年、製造業では1983年ごろを境にGDP上昇に伴うエネルギー消費集約度の低下傾向が鈍化し、逆U字型からの乖離が発生しているようにも見える。

こうした1960年代の終盤を境とした日本の製造業および全産業のエネル

図1 所得水準とエネルギー消費集約性



ギー消費集約性の上昇から低下傾向への転換は、様々な要因が複合した結果であり、注意が必要である。まず、ここには1970年代半ば以降の石油ショックによるエネルギー価格高騰が直接の原因となっている部分も含まれており、これはエネルギー価格変動の消費抑制効果という短期的要因によって説明される必要がある。またその後の消費集約度の低下傾向もこれを契機としたエネルギー代替の進行という長期的効果による部分があると考えることができ、これはエネルギー技術革新という要因による説明が必要である。また、全産業に関するエネルギー消費の変化については、製造業を原動力とした高度経済成長の終焉に伴うサービス経済化という産業構造の変化によって説明される部分がある。同様に全製造業に関しては、エネルギー消費的な素材型産業と組立型産業の比率の変化も影響を及ぼしている。さらに、これらとは別に、各年の細かな増減は景気変動による需要変化という短期的な要因に関連している。

本稿ではこれらの要因をコントロールする複数の変数を説明変数として考慮し、各要因の貢献の大きさを測ることを試みる。もしもこれらによってエネルギー消費の変動が説明されれば、逆U字型の関係を生じさせるメカニズムがどのようなものであったかが明らかになる。そしてその際、とりわけエネルギー消費に関する技術革新という要因が有意な効果を持つことが明らかとなったならば、それはこの種の技術革新がエネルギー消費集約度を低下させる作用を有するということを意味する。そして、こうした技術進歩を可能とした当該産業の生産水準の向上とエネルギー消費の間の負の関係を成り立たせるメカニズムとして、計測結果を解釈することが可能となる。

4. モデルの定式化

4.1 エネルギー消費集約度を説明する定式化

以上のように、本稿では一国の経済成長とエネルギー消費集約度の間の非線形的な関係を技術革新の誘発という経路を経た2つの段階の結果として捉え、それぞれのメカニズムとして、エネルギー消費をエネルギー技術革新で説明する部分と、このエネルギー技術革新を技術的機会や外生的ショックとともに所得水準という経済的機会で説明する部分とに分けて検討する。前者は環境クズネッツ曲線に類するものとして、後者は誘発的技術革新仮説としてそれぞれ論じられるモデルであり、本稿では以下のような定式化による実証分析を試みる。

まず、環境クズネッツ曲線を援用したエネルギー消費関数については、(1)式の形で典型的に表される Grossman and Krueger [1995] のモデルに従って、図1で用いた一人あたり所得水準およびその2乗、3乗を説明変数としつつ、GDPあたりの環境汚染物質排出量に代えて同じく図1のGDPあたりのエネルギー消費量を被説明変数とする。一方、本稿ではクロスカントリー分析ではなく単独の経済における時系列分析を行うため、前述の各要因を代表する時系列データそのものが説明変数に含まれる。なお、この分野における多くの実証分析は各要因の対数値どうしでの関係を検討しているが、時系列データを用いる本稿ではこれと並んで変化率どうしの計測も行う。かくして、

- ① エネルギー消費集約性の指標として、石油・石炭系エネルギー消費量対GDP比率の対数値 LEC_t ならびに同対前年変化率 GEC_t
- ② 産業の規模の指標として、実質GDP対就業者比率の対数値 $LGDP_t$ ならびに同対前年変化率 $GGDP_t$
- ③ エネルギー技術革新の指標として、新エネルギー開発および既存エ

エネルギー節約的技術の当該期間中の特許公開件数の対数値 $LNEPt$ ならびに同対前年変化率 $GNEPt$

- ④ エネルギー価格の指標として、卸売物価指数総平均に対する石油・石炭輸入物価指数の比率の対数値 $LPEt$ ならびに同対前年変化率 $GPEt$
- ⑤ 長期的な産業構造の変化の指標として、化学、窯業・土石産業、一次金属（鉄鋼および非鉄金属）の各産業の就業者が製造業ないし全産業の就業者に占める割合の対数値 $LRATEt$ ならびに同対前年変化率 $GRATEt$

をそれぞれ変数として用いて、

$$GECt = \alpha_0 + \alpha_1 GGD Pt + \alpha_2 (GGD Pt)^2 + \alpha_3 (GGD Pt)^3 + \alpha_4 GNEPt + \alpha_5 GPEt + \alpha_6 GRATEt + \epsilon t \quad (2)$$

および

$$LECt = \alpha'_0 + \alpha'_1 LGD Pt + \alpha'_2 (LGD Pt)^2 + \alpha'_3 (LGD Pt)^3 + \alpha'_4 LNEPt + \alpha'_5 LPEt + \alpha'_6 LRATEt + \alpha'_7 t + \epsilon' t \quad (2')$$

が計測される。¹¹⁾

4.2 技術革新関数の定式化

一方、後者の技術革新決定モデルについては、前述の Jaffe and Palmer [1997] や Popp [2002] などの先行研究において検討されている誘発的技術革新モデルを想定し、これらに依拠することによって以下の可能性を検討する。まず、外生的ショックとしてエネルギー価格の上昇に注目し、これが短期的には生産調整によるエネルギー利用の手控えなどの反応を起こすこととは別に、長期的にはより多くの資源を省エネルギー・代替エネルギーの技術革新へまわす動機となる様子を検討する。その際、市場の規模が大きいほど技術革新活動に利用できる資源は多く、エネルギー節約的技術革新との間に正の相関が生じうる。一方で技術革新の成果としてのエネルギー

ギー集約度変化は新たな技術革新のインセンティブに影響するためこれも変数とする。なお、上記の先行研究では対数値での計測だが、本稿では時系列データの性質への考慮から変化率どうしでの計測も試みる。かくして、前述の変数の他、産業部門の実質研究費支出額（単位10億円、以下同じ）の対数値を LRD_t 、その対前年度変化率を GRD_t 、研究機関における実質研究費支出額の対数値を $LIRD_t$ 、その対前年度比率を $GIRD_t$ として、

$$GNEP_t = \gamma_0 + \gamma_1 GGD P_{t-2} + \gamma_2 GRD_{t-2} + \gamma_3 GIRD_{t-2} + \gamma_4 GPE_{t-2} + \gamma_5 GEC_{t-2} + \mu_t \quad (3)$$

および

$$LNEP_t = \gamma'_0 + \gamma'_1 LGD P_{t-2} + \gamma'_2 LRD_{t-2} + \gamma'_3 LIRD_{t-2} + \gamma'_4 LPE_{t-2} + \gamma'_5 LEC_{t-2} + \gamma'_6 t + \mu'_t \quad (3')$$

¹²⁾を計測する。なお、ここではR&Dに関する意思決定や実際の資金投入と特許公開という成果産出の間の時間を考慮して、2年のタイムラグを想定している。

本稿で検討する既存エネルギー消費の節約およびこれに代わる新エネルギー開発のための技術の範疇は、Popp [2002]の方法に依拠する。すなわち、「石炭液化」、「石炭（粉状・粒状燃料）ガス化」、「太陽エネルギー」、「太陽電池」、「燃料電池」、「燃料としての廃棄物利用」、「廃熱のエネルギーとしての利用」、「スターリングエンジン」、「ヒートポンプ」、「熱交換装置」、「熱交換器冷却」、「連続鋳造」、「連続圧延」の各技術である。本稿では、日本におけるこれらの技術革新に関する時系列データの入手先として、特許庁「特許電子図書館」サービスを利用し、ここを検索して得られる特許公開件数をそれぞれの技術革新活動の指標とする。¹³⁾

なお、このようにエネルギー技術革新は技術革新活動への投入量のほか実質GDP水準にも影響される変数であるため、前述の(2)および(2')式においては、変数 $GNEP$ および $LNEP$ をこれによって定まる確率変数として、実質GDP、技術革新およびエネルギー消費間の同時的關係を考慮するとい

う方法が考えられる。しかし本稿では、(3)および(3')式において実質GDPから技術革新に至る関係に2年間という長いタイムラグを想定しており、これと(2)および(2')式における関係とでは直接の影響は小さいと見て、単一のモデルとしてではなく独立した別個の推定とした。

5. 実証分析

以上の2つの定式化に従って本稿では、経済成長から技術革新を経てエネルギー消費集約度変化へと至る過程を、誘発的技術革新モデルにエネルギー消費を加味したモデルとして検討する。

5.1 エネルギー消費関数の計測

まず、集計単位を製造業およびこれに非製造業を加えた全産業とし、計測期間を高度経済成長期と2回の石油ショック、および安定成長期と近年の低成長期をおおむねカバーする1961~98年として、石油・石炭エネルギーに関するエネルギー消費集約度ないしその変化率を被説明変数とした(2)式および(2')式を計測した結果を表1に示す。ただし、各産業の景気動向はGDP変数と動きが重なるため、多重共線性の可能性を考慮して計測には含めなかった。また、前述の理由から実質GDP水準および成長率に関する同時的関係は考慮せず、変化率形での計測ではOLS推定を用い、対数線形での計測では誤差項に1階の系列相関を想定して最尤推定法を用いた。

まず、前述の図1(a)(b)に示した対数どうしでの関係を検討するために対数線形どうしで行った計測の結果(表1(a))からは、図1における近似曲線の係数が示すものと同様の関係が他の変数を考慮してもなお認められ、しかも5%水準以上で有意であることがわかる。GDP以外の変数も有意かつ予想した符号条件を満たしており、エネルギー技術革新の進展とエ

表1 石油・石炭エネルギー消費集約度の計測

(a) 対数線形での計測

期間：1961-1998年

推定方法：最尤推定法

被説明変数： LEC_t

	(1.1) 全産業	(1.2) 全産業	(1.3) 製造業
定数項	-13.358 (-1.239)	-9.905** (-4.866)	-0.600 (-0.803)
$LGDP_t$	7.117 (0.786)	4.178** (4.381)	2.503** (7.283)
$LGDP_t^2$	-1.400 (-0.544)	-0.561** (-3.895)	-0.283** (-4.263)
$LGDP_t^3$	0.0791 (0.326)	—	—
$LNEP_t$	-0.0431 (-1.596)	-0.0452† (-1.751)	-0.106** (-4.014)
LPE_t	-0.0646* (-2.124)	-0.0649* (-2.165)	-0.0948** (-3.485)
$LRATE_t$	0.296 (0.973)	0.313 (1.067)	3.351** (11.033)
t (1960=1)	-0.0210** (-2.009)	-0.0200* (-2.037)	-0.0230** (-2.890)
s	0.0361	0.0356	0.0439
決定係数	0.974	0.974	0.990
DW	1.545	1.549	1.952

(b) 変化率形での計測

期間：1961-1998年

推定方法：OLS

被説明変数： GEC_t

	(1.4) 全産業	(1.5) 製造業	(1.6) 製造業
定数項	-0.0227† (-1.815)	-0.0234* (-2.142)	-0.0136 (-1.447)
$GGDP_t$	-1.588* (-2.330)	-1.218** (-3.510)	-0.900** (-3.043)
$GGDP_t^2$	45.114* (2.305)	22.294* (2.631)	8.916** (3.643)
$GGDP_t^3$	-230.40† (-1.694)	-80.768 (-1.645)	—
$GNEP_t$	-0.0338 (-1.532)	-0.0638* (-2.676)	-0.0708** (-2.943)
GPE_t	-0.0716* (-2.360)	-0.0877** (-3.029)	-0.0797* (-2.722)
$GRATE_t$	0.186 (0.642)	0.541 (1.579)	0.542 (1.543)
s	0.0370	0.0345	0.0355
決定係数	0.358	0.414	0.383
DW	1.540	1.534	1.368

()内は推定値の t 値。**は1%水準、*は5%水準、†は10%水準で推定値が有意であることを示す。 s は回帰の標準誤差。決定係数は自由度修正済み決定係数。DWはダービン・ワトソン統計量。

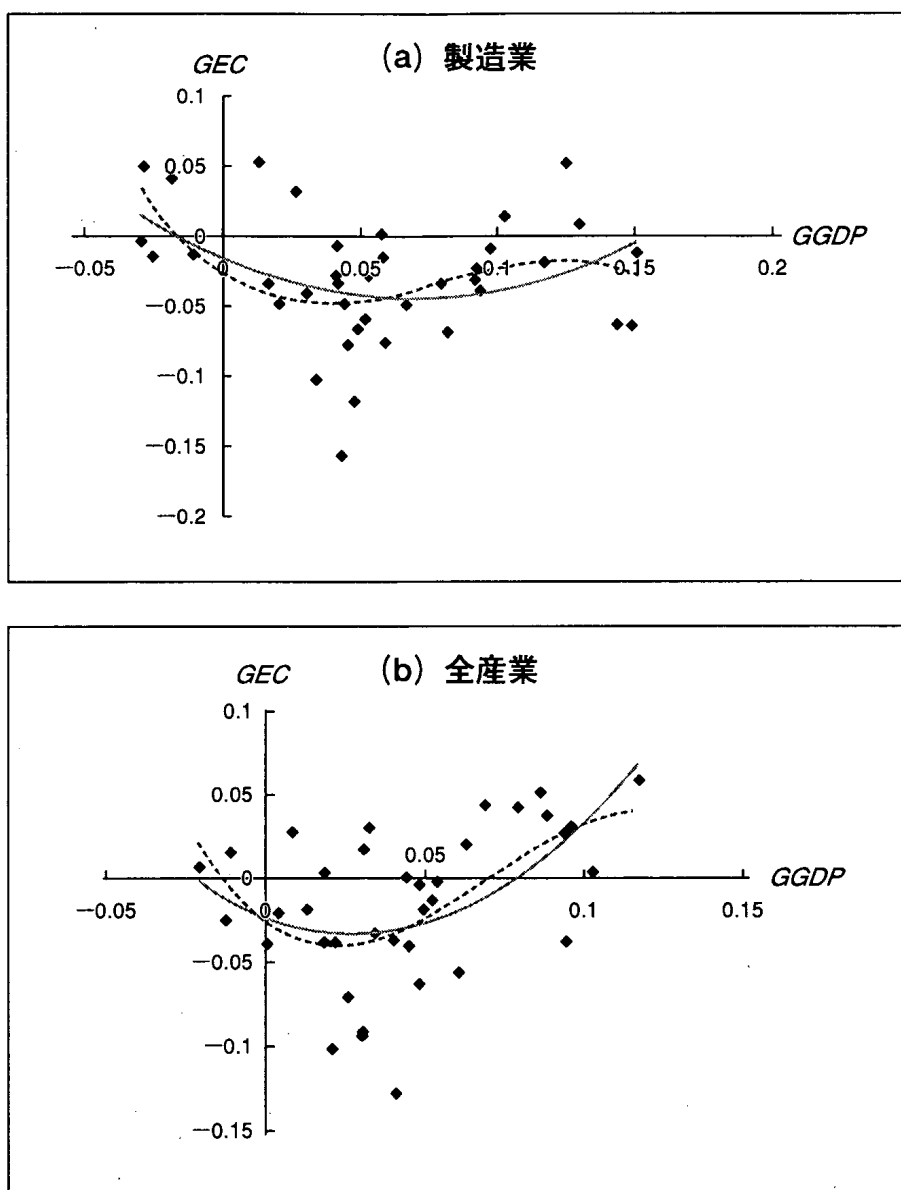
エネルギー価格の相対的上昇によってエネルギー消費集約度の動きが有意に説明されることと、産業構造の変化がエネルギー消費の節約をもたらすことがうかがえる。

一方、変化率形での計測から変数間の関係を見た場合（表 1 (b)）には、対数線形の場合のような逆U字型とは整合しない結果が得られた。すなわち、所得水準の成長率が高まるにつれてエネルギー消費の集約度の成長は鈍化してマイナスに至るが、さらに高い所得成長率においては反対にエネルギー消費集約度の上昇率が拡大するということを計測結果は示唆しており、横軸にGGDP、縦軸にGECをとったグラフ（図 2 (a)(b)）においてもこれが認められる。これについては、環境に負荷を与えやすい技術が生産性の上昇を優先するタイプの技術であるとする、次のような説明が可能である。まず、生産の増大に伴う消費の限界効用の低下とともに環境に対する影響が大きい技術が次第に選択されなくなる結果、水準で測った場合には所得の増加とエネルギー消費集約性の低下が対応する。しかしこのような技術は生産の伸び率における生産性上昇による寄与を減らし、その結果、変化率で測定した場合にはエネルギー消費集約性の低下が経済成長率の低下と対応することになる。

なお、環境クズネッツ曲線の成立の一因として言及される産業構造変化の指標GRATEの係数はいずれの計測においても正值であり、10%水準ではあるが有意に近い。これは、エネルギー使用的な産業が全体に占めるウェイトの増減がエネルギー消費集約性の高低と正の相関をし、期間中のエネルギー消費傾向の変化にはこれによって説明される部分があるということを示しており、対数線形での計測結果と一致する。

また、石油・石炭エネルギー相対価格の変動という外生的ショックに対する企業の短期的反応を表すGPEの係数は有意な負の値である。これは、短期的視点でも期間中のエネルギー価格の上昇と低下に対応してエネルギー消費節約を伴う企業行動がとられてきたことを意味し、原油価格の高騰

図2 経済成長とエネルギー消費集約性の変化



という状況が所得の拡大と石油エネルギーの節約という現象の両立をもたらした一因であるということを示し、やはり対数線形での関係と一致する。

この短期的対応としてのエネルギー節約が行われる一方で、本稿の主要な関心の対象である長期的反応を表すエネルギー節約的技術革新の関与については、 $GNEP$ の係数は概ね有意かそれに近い負値であった。これは、既存エネルギーの節約や新エネルギー技術開発の成果の利用によってエネ

ルギー節約的な生産活動が長期的に実現されていたことを示している。これもまた、対数線形での関係と整合的である。

このように、対数線形と変化率形のいずれの定式化においても、エネルギー価格上昇とエネルギー技術革新には有意にエネルギー消費集約性を低下させる効果が認められる一方で、変化率形で定式化し、さまざまな要因による部分を取り除いた後では、環境クズネッツ曲線に類した逆U字型の関係自体をエネルギー消費に関して見出すことはできなかった。

なお、表1では石油および石炭系のエネルギー消費集約性とその変動を被説明変数としたが、これに代わって電力やガス、新エネルギーなどの消費を含めたエネルギー消費総量に注目し、全エネルギー消費の対GDP比率の変化率 $GEC2_t$ を被説明変数として行った、同様の計測結果を表2に示す。その結果は表1とほぼ同様であり、技術革新によるエネルギー節約が石油・石炭系エネルギーだけではなく総量での消費の抑制をもたらしていることを示している。

表2 全エネルギー消費集約度の計測

期間：1961－1998年

推定方法：OLS

被説明変数： $GEC2_t$

	(2.1) 全産業	(2.2) 製造業	(2.3) 製造業
定数項	-0.0185 (-1.604)	-0.017 [†] (-1.755)	-0.00925 (-1.118)
$GGDP_t$	-1.377* (-2.184)	-1.093** (-3.557)	-0.841** (-3.240)
$GGDP_t^2$	38.716* (2.138)	18.464* (2.461)	7.880** (3.667)
$GGDP_t^3$	-196.065 (-1.561)	-63.896 (-1.470)	—
$GNEP_t$	-0.0287 (-1.408)	-0.0572* (-2.712)	-0.0628** (-2.971)
GPE_t	-0.0628* (-2.236)	-0.0767** (-2.994)	-0.0705** (-2.738)
$GRATE_t$	0.192 (0.715)	0.503 (1.659)	0.504 (1.633)
s	0.0342	0.0306	0.0311
決定係数	0.325	0.420	0.399
DW	1.593	1.525	1.372

記号の意味は表1を参照。

5.2 エネルギー技術革新関数の計測

a) エネルギー技術革新全体との関係

次に、前項の計測からエネルギー消費集約度を引き下げる作用があることが明らかとなった新エネルギー・既存エネルギー節約的技術革新について、これが需要側の要因による技術革新の誘発の結果として産業の所得水準の拡大との間に有すると予想される関係を、(3)式および(3')式を適用して計測した。その際、個々の技術革新が特定の産業分類と完全に対応するとは限らないため、計測は全産業および製造業を集計単位とした。また、技術革新活動の投入要素のうち産業における研究費支出変数 *LRD* および *GRD* については、その原資となる産業部門の所得が同時に変数となっていることから計測には含めず、技術革新成果の成長を経済的機会としての産業の所得の変化による効果、誘発的要因としての相対価格変化による効果、技術革新の機会を提供して民間のR&Dを促すと同時に自らも技術革新を産出する公的研究活動による効果の3つの結果として説明するという形をとった。推定方法是对数線形での計測では最尤推定法、変化率形での計測ではOLSとした。また、計測期間については、ここでの計測が技術革新を通じて経済成長がエネルギー節約をもたらすという関係の有無を検討することを目的としているため、前項のような高度成長期全体を含むものとはせず、エネルギーおよび環境問題への関心が高まり、また実際にエネルギー消費集約度が低下を始めた時期を取り上げて、1970年代以降の時系列データを用いた計測とした。

表3に示した計測結果では、変数 *LPE* および *GPE* の係数が有意ないし有意に近い正值であることから、前項において短期的なエネルギー消費節約効果が認められたエネルギーの相対価格ないしその変動という外生的要因について、同時に企業の長期的な反応としての技術革新の誘発という効果も有するという関係が認められた。また、技術革新への投入要素である

表3 エネルギー技術革新の計測

(a) 対数線形での計測

期間：1971-1998年

推定方法：最尤推定法

被説明変数： $LNEP_t$

	(3.1) 全産業	(3.2) 製造業
定数項	-10.348** (-2.925)	-8.556** (-2.710)
$LGDP_{t-2}$	2.575* (2.330)	1.647* (2.192)
$LISRDI_{t-2}$	1.388* (2.443)	1.637** (3.124)
LPE_{t-2}	0.481** (5.327)	0.435** (4.327)
t (1970=1)	-0.111** (-3.386)	-0.106** (-3.368)
s	0.141	0.141
決定係数	0.810	0.791
DW	2.009	1.964

(b) 変化率形での計測

期間：1971-1998年

推定方法：OLS

被説明変数： $GNEP_t$

	(3.3) 全産業	(3.4) 製造業
定数項	-0.0809 (-1.313)	-0.0735 (-1.188)
$GGDP_{t-2}$	2.735* (2.200)	1.744 [†] (2.021)
$GISRD_{t-2}$	1.175 [†] (1.754)	1.390* (2.113)
GPE_{t-2}	0.319* (2.071)	0.304 [†] (1.952)
s	0.182	0.185
決定係数	0.276	0.257
DW	2.266	2.208

記号の意味は表1を参照。

研究機関研究費支出について有意な正の推定値が得られていることから、新エネルギーの開発やエネルギーの節約という種類の技術革新に対する、研究機関におけるR&D活動そのものあるいは企業におけるR&D活動への支援を通じた寄与があったことがうかがえる。

さらに、産業のGDP水準で表した需要側要因が有する技術革新の誘発効果については、変数 $LGDP$ および $GGDP$ の係数がエネルギー技術革新全

般について有意ないしそれに近い正值であるという結果が得られた。これは産業のGDP規模の拡大がエネルギー節約的技術革新を促す効果を有することを示しており、市場の成長がタイムラグを伴ってエネルギー節約的技術革新をもたらし、前項の計測から明らかとなったその効果としてエネルギー消費集約性を低下させる、という仮説を支持する。¹⁴⁾

b) 新エネルギー開発と既存エネルギー節約技術の比較

一方、Popp [2002] および本稿のエネルギー技術に関するデータには異なるタイプの技術が併存している。すなわち、ここでとりあげたエネルギー関連技術のうち、鉄鋼・非鉄金属工業などで用いられる連続圧延・鋳造技術、各種産業で広く用いられる熱交換装置の技術などが既存のエネルギーの利用の効率化を目指している一方で、太陽エネルギーや燃料電池、廃棄物燃料などの技術は従来の石炭・石油とは異なる新たなエネルギー源の開発である。そこで、これまで検討してきた変数 *GNEP* について、前者を中心とした既存エネルギー節約技術の特許件数の合計に関する変数 *GNEP1* と、後者を中心とした新エネルギー技術に関する *GNEP2* とに分け、その所得水準およびエネルギー価格変動との関係について別個に計測を行うことも試みた。またその際、所得による効果と相対価格変化による効果が互いにあいまって増幅されるという関係の可能性を考慮するため、エネルギー価格変化率と所得水準変化率の積を説明変数とする計測も行った。

表4に示した計測結果からは、前者のタイプの技術の場合には産業のGDPという経済的機会要因が公的研究と並んで有意に作用したことがわかる。一方後者のタイプの技術については、特に石油石炭の価格上昇という外生的要因の作用が大きいという特徴が読み取れる。だが、そこでは一人あたり所得の成長率の効果はラグを想定しない場合に10%水準で有意に近いものの必ずしも明白ではなかった。その一方で、エネルギー価格変化率と一人あたり所得の成長率の積の項が2期のラグを伴って有意な正の値を

表4 2つのタイプのエネルギー技術革新の比較

期間：1971-1998年

推定方法：OLS

	(4.1) 製造業	(4.2) 製造業	(4.3) 製造業
被説明変数	$GNEP1_t$	$GNEP2_t$	$GNEP2_t$
定数項	-0.110 (-1.671)	-0.0323 (-0.400)	-0.0706 (-0.908)
$GGDP_t$	—	—	2.128 (1.676)
$GGDP_{t-2}$	2.719** (2.957)	1.066 (0.947)	—
$GISRD_{t-2}$	1.417 [†] (2.022)	1.250 (1.456)	1.207 (1.517)
GPE_{t-2}	0.190 (1.141)	0.424* (2.083)	0.406* (2.128)
$(GPE \times GGDP)_{t-2}$	—	—	11.067* (2.071)
s	0.197	0.241	0.226
決定係数	0.318	0.120	0.229
DW	1.699	2.399	2.074

記号の意味は表1を参照。

$GNEP1_t$ ：「石炭液化」、「石炭ガス化」、「ヒートポンプ」、「連続圧延」、「連続鋳造」、「熱交換器冷却」、「熱交換装置」の特許公開件数の対前年変化率。

$GNEP2_t$ ：「太陽エネルギー」、「太陽電池」、「燃料電池」、「燃料としての廃棄物利用」、「廃熱のエネルギーとしての利用」、「スターリングエンジン」の特許公開件数の対前年変化率。

とっており、この種の技術にとっては両者の相乗効果という形で所得水準の上昇が効果的であったことをうかがわせる。

c) 所得成長、技術革新、およびエネルギー消費

以上の計測結果は、産業部門の所得拡大からエネルギー消費集約度の低下へと至る過程が、前項の計測結果が示すような産業構造の変化を通じて発生すると同時に、エネルギー価格高騰という外生的ショックに誘発されたエネルギー節約的技術革新を総需要の側から促進するという経路を通じて、タイムラグを伴いながら発生することを示している。これは、エネルギー消費における環境クズネッツ曲線に類した関係が、経済成長が企業の技術革新を促すというメカニズムの結果生じるものとして解釈可能であることを示している。また、生産の増加による消費の限界効用の低下は経済

成長率とエネルギー消費の双方の低下をもたらすが、その一方で生産の増加がこのような技術革新への効果を通じて成長とエネルギー節約の両立を可能とする結果として、より高い経済成長率とより低いエネルギー消費集約性が両立しうることが示唆される。そして、対数線形では所得増加が技術成果を増加させ、所与の所得水準のもとでのエネルギー消費集約性を低下させる結果、図1のような逆U字型の関係が成り立つという説明が可能となる。

6. 結びに代えて

本稿における分析の意図は、環境クズネッツ曲線の概念を産業におけるエネルギー消費の時系列的動向の説明に利用し、そこにおけるエネルギー技術革新という要因の作用を明らかにするというものであった。そして、一国あるいは産業の所得の成長が技術革新をもたらし、その結果としてエネルギー消費集約度が低下するという過程を想定することによって、所得、技術革新、およびエネルギー消費の間の関係を内生的に説明することを試みた。

実証分析の結果からは、エネルギー消費集約度の時系列的な変化は、先行研究におけるクロスカントリーデータを中心とした分析と同様に、所得水準および産業構造の変化によって説明される部分を有し、近年においては経済成長がエネルギー節約的な経済の実現と結びついていることがあらためて確認された。

同時に、この変化はエネルギー消費的産業のウェイトの低下によって説明されるだけでなく、所得の成長という経済的要因や公的な研究活動の成果という技術的要因、そしてエネルギー価格の変動という外生的な要因に誘発された企業の技術革新活動の結果として、数年のタイムラグを伴って説明されるものであることが明らかとなった。これらは、産業の所得成

長がエネルギー技術の革新を通じてエネルギー消費構造を変化させるという経路の存在を示している。

これらの計測結果は、途上国の経済発展と環境問題の関係と同様に、経済成長に伴うエネルギー需要の増大がやがてエネルギー需要の伸び自体を自律的に頭打ちにし、エネルギー節約的な経済へと転換させるという関係が成立することを示唆している。しかし、これが日本という特定の国の高度経済成長から安定成長への転換という特定の歴史的経験にとどまらず、現在高い経済成長を経験している諸経済に一般化されるかどうかは、この国の経験が他国にも、そして異なる歴史的結果としての現在にも適用可能な普遍的なものであるか否か次第であり、例えばクロスカントリー分析の結果の解釈に当てはめることができるということを保証しない。

また、経済成長から技術革新を経てエネルギー消費集約度の変化に至ると同時に、これが企業のエネルギー技術革新のインセンティブを変化させることを通じて、あるいはエネルギー節約技術が産業の競争力を強めることを通じて、再び経済成長の動向に影響を及ぼすという双方向的な関係については、VARモデルによるグランジャー的な因果関係の検定などを行っても明確な関係を見出すことができなかった。本稿の定式化では技術革新の生産に関して比較的大きなタイムラグの存在を事前に想定しており、そのためこれらを独立した関係として推定を行ったが、これらの問題についても今後の課題としたいと考えている。

注 1) この説明は Stokey [1998], pp.22-23に基づく。

2) 大坂 [2002], pp.249-250による。

3) Grossman and Krueger [1995], pp.370-371による。

4) Stokey [1998], p.24による。

5) 新エネルギー開発や石油・石炭の消費抑制を意図した技術革新には経済活動の環境への負荷を低減するための技術と重なる部分が多いということも、エネルギー消費と環境汚染の問題に関する接近法との類似性をもたらしてい

る。

- 6) エネルギー問題に直面した産業に属する企業は、長期的にはエネルギー節約的な新たな産業に移行するかもしれないが、むしろ同じ産業にとどまって技術革新活動を活発化させることでこの問題に対応するという行動も自然である。マクロ経済的な推移と異なり、こうした特定の経済や産業におけるエネルギー消費の時系列的推移に関しては、経済の発展段階の移行の結果として説明することはできない。
- 7) 彼らは、環境規制には企業に適合のための費用を課す一方で、この費用を相殺しうる技術革新の引き金ともなりうるという2つの側面があることに注目し、後者が卓越する場合には規制は結局利潤をもたらすとした。これは「ポーター仮説」として知られ、彼らによれば、利潤が十分大きければ規制の費用は相対的に低く、環境マネジメントに関して楽観的であってよいということになる。Porter and van der Linde [1995], p.98。
- 8) 例えば Ruttan [2001], pp.101-4などを参照。
- 9) ここに挙げた経済的機会に注目して、総需要の拡大が技術革新活動の成果の大きさに影響を及ぼすことを示した実証研究として、Schmookler [1966] や Geroski and Walters [1995]、Ben-Zion and Ruttan [1978] などがある。
- 10) データの出所は、エネルギー消費量は資源エネルギー庁『総合エネルギー統計』、実質GDPおよび就業者数は内閣府『長期遡及主要系列・国民経済計算報告 1990年基準』による。なおエネルギー消費量は石油製品計、石炭、コークス、原油の消費量の合計である。
- 11) 各種物価水準については日銀『物価指数年報』による。産業別就業者数については内閣府『国民経済計算年報』の数字による。なお、各種のエネルギー技術革新件数については、本稿の次項に示した方法で算出した。
- 12) 研究費支出データの出所は、総務省『科学技術研究調査報告』による。なおデフレーターは文部科学省（科学技術庁）の計算によるものを用いた。
- 13) このサービスでは詳細な技術分類に対してコード番号が付されており、この番号を用いて個々の特許が検索できる。本稿では個々の特許の内容ではなく各技術に分類される特許の件数に関心があるので、次の方法でこの検索においてヒットした件数を集計する。まず、エネルギー技術に関する上記の各技術名称を検索語として、このサービスのうちの「FIハンドブック」照会においてキーワード検索を行い、技術の内容説明においてこれらの検索語が使用されている技術分類を抽出し、それに割り当てられたコード番号を見つけ出す。そしてその中から、その技術そのものが使われたのではなく、他の技術の説明の中で検索語が言及されたようなケースがヒットしたものを取り除く。そのうえで、このコード番号を検索語として各年において公知となった公開特許を検索し、それらの合計ヒット件数を各年について集計する。なお、この検索と集計は2002年8月21日現在でのデータベースによる。

- 14) なお、エネルギー消費集約度自身がこの技術革新活動に影響するという可能性については、この定式化に関しては明確な関係を見出せなかったため、本稿ではこの変数を含まずに行った計測の結果を示した。

主要参考文献

- Andreoni, James and Arik Levinson [2001], "The Simple Analytics of the Environmental Kuznets Curve," *Journal of Public Economics*, Vol.80, No.2, pp.269-86.
- Ben-Zion, Uri and Vernon W. Ruttan, [1978], "Aggregate Demand and the Rate of Technical Change," in Hans P. Binswanger and Vernon W. Ruttan (eds.), *Induced Innovation: Technology, Institutions, and Development*, Baltimore, Md.: Johns Hopkins University Press, pp.261-75.
- Binswanger, Hans P. [1978], "Induced Technical Change: Evolution of Thought," in H. P. Binswanger and V. W. Ruttan (eds.), *Induced Innovation: Technology, Institutions, and Development*, Baltimore, Md.: Johns Hopkins University Press, pp.13-43.
- Brunnermeier, Smita B. and Mark A. Cohen [2003], "Determinants of Environmental Innovation in US Manufacturing Industries," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.45, No.2, pp.278-93.
- Geroski, Paul A. and C. F. Walters [1995], "Innovative Activity Over the Business Cycle," *Economic Journal*, Vol.105, pp.916-28.
- Grossman, Gene M. and Alan B. Krueger [1995], "Economic Growth and the Environment," *Quarterly Journal of Economics*, Vol.110, Iss.2, pp.353-77.
- Harbaugh, William T., Arik Levinson, and David M. Wilson [2002], "Reexamining the Empirical Evidence for an Environmental Kuznets Curve," *Review of Economics and Statistics*, Vol.84, No.3, pp.541-51.
- Jaffe, Adam B. and Karen Palmer [1997], "Environmental Regulation and Innovation: A Panel Data Study," *Review of Economics and Statistics*, Vol.79, No.4, pp.610-9.
- Kuznets, Simon [1955], "Economic Growth and Income Inequality," *American Economic Review*, Vol.45, No.1, pp.1-28.
- OECD International Energy Agency [1989], *Energy and the Environment: Policy Overview*. (日本開発銀行地球環境問題研究会訳 [1990]、『地球環境とエネルギー』、電力新報社。)

- 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（編著）『環境経済学のフロンティア』、
勁草書房、pp.241-73。
- Popp, David [2002], "Induced Innovation and Energy Prices," *American Economic
Review*, Vol.92, No.1, pp.160-80.
- Porter, Michael E. and Claas van der Linde [1995], "Toward a New Conception of
the Environment-Competitiveness Relationship," *Journal of Economic
Perspectives*, Vol.9, No.4, pp.97-118.
- Ruttan, Vernon W. [2001], *Technology, Growth, and Development: An Induced
Innovation Perspective*, New York: Oxford University Press.
- Schmookler, Jacob [1966], *Invention and Economic Growth*, Cambridge, Mass.:
Harvard University Press.
- Stokey, Nancy L. [1998], "Are There Limits to Growth?" *International Economic
Review*, Vol.39, No.1, pp.1-31.
- 和合肇・伴金美[1995]、『TSPによる経済データの分析（第2版）』、東京大学出
版会。
- World Bank [1992], *World Development Report 1992*. （世界銀行[1992]、『世界開発
報告1992』。）