

エネルギー集約度と省エネルギー・イノベーション

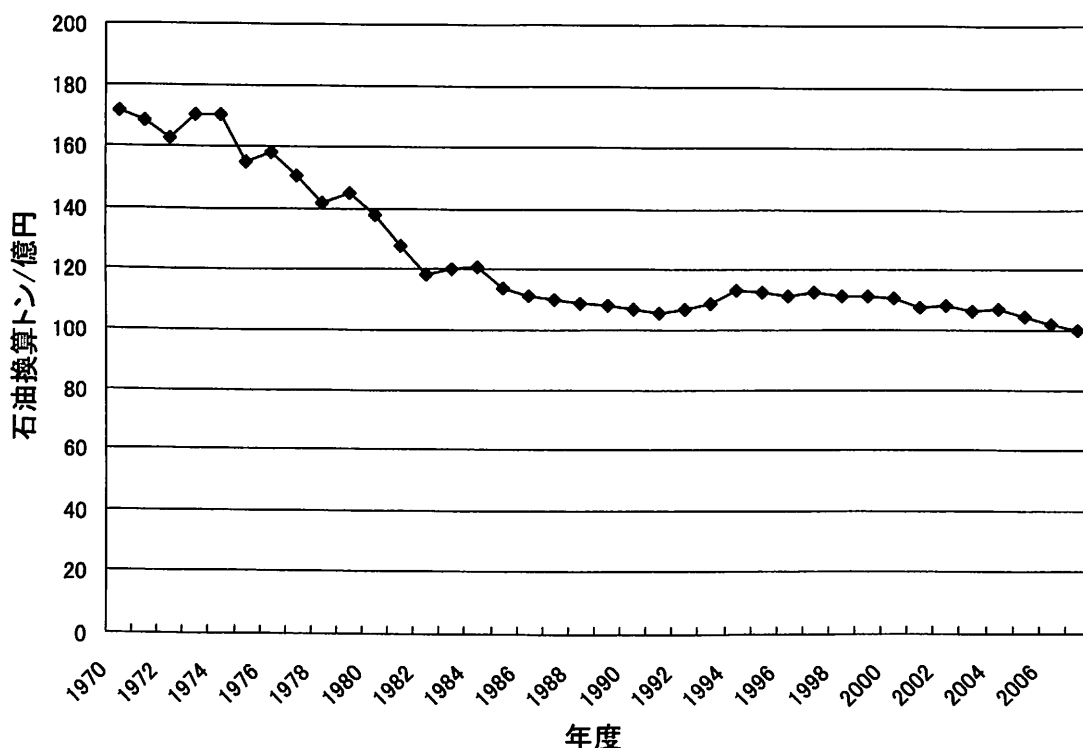
浜本 光紹

1. はじめに

エネルギーのほとんどを輸入に依存する日本は、エネルギー効率性の改善に努め、経済全体のエネルギー集約度の低減を実現してきた。GDP当り1次エネルギー総供給で測った日本のエネルギー集約度の推移が図1に示されている。1971～79年における日本のエネルギー集約度の平均年間変化率は-1.75%、1980～89年は-2.85%であった。その後の1990～99年にはエネルギー集約度の平均年間変化率は0.32%となり、エネルギー効率性はむしろ悪化したが、2000～07年には-1.32%となり、近年になって再びエネルギー集約度の低減が進んでいることが窺われる¹⁾。今日では、気候変動問題への対応としてさらなる省エネルギー（以下、省エネと略す）の進展が要請されるようになっている。地球温暖化防止を目的として長期にわたりエネルギー集約度を低減させるためには、省エネ技術におけるイ

ノベーションを促進させることが不可欠である。ただし、気候変動対策の制度設計のあり方を議論するためには、エネルギー集約度の低減あるいは新たな省エネ技術の創出に向けた取り組みが、気候変動にかかわる技術的課題にとってどのような意味を持つのかを明確にしておく必要がある。また、エネルギー集約度に影響を及ぼす諸要因の中で、省エネ技術におけるイノベーションの進展がエネルギー集約度低減に対してどの程度の役割を果たしうるのかという点については、実証的な検討が十分になされているとはいえない。こうした問題意識から、本稿では、気候変動対策においてエネルギー集約度の低減に向けた取り組みが持つ意味について確認したうえで、省エネ技術知識の蓄積がエネルギー集約度に対して与える影響に関して、日本のマクロ・データを用いて定量的把握を試みる。

図1 日本のGDP当り1次エネルギー総供給の推移(1970～2007年)



出典：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編(2010)に基づき筆者が作成。

2. エネルギー集約度と気候変動対策

大気中の温室効果ガス濃度を人類にとって危険でないレベルに安定化させることは、気候変動対策における究極目的である。この目的を達成するためには、炭素排出を伴わないエネルギー(carbon-free energy: CFE)を大幅に導入していくことが不可欠であるが、これは技術的にかなり挑戦的な課題である。この難題に関してHoffert et al.(1998)は、エネルギー集約度との関連で次のように予測している。二酸化炭素(CO₂)の大気中濃度を550ppmvに安定化させることを目標とし、世界全体のGDPが年率2.9%で2025年まで成長し、その後のGDP成長率は2.3%になるという前提の下で、どの程度の規模のCFEが必要になるかを推計すると、エネルギー集約度が年率2.0%で低減していくと仮定した場合には、2100年までに必要となるCFEは10TWに満たない量であり、それほど大きな規模にはならない。しかし、エネルギー集約度が不変のままであるとした場合には、約40TWのCFEが2050年までに必要になると予測される。これは、エネルギー集約度の低減率とCFE必要量との間にトレードオフの関係があることを意味している。

Hoffert et al.(1998)が指摘したこのトレードオフ関係に基づき、Green et al.(2007)は先進的エネルギー技術ギャップ(advanced energy technology gap: AETG)の推計を試みている。AETGとは、将来のCFE必要量と、在来的CFE技術によって達成可能なCFE最大供給量との差である。在来的CFE技術には、水力、原子力(nuclear power with a once-through fuel cycle)、太陽光・風力エネルギー(電力グリッドへの直接接続)、バイオマス、地熱エネルギーが含まれる。エネルギー集約度低減率を年1.0%とし、在来的CFE技術によって2100年までに達成可能なCFE最大供給量が12TWであると仮定した場合、AETGは約25TWになると予測される。しかし、エネルギー集約度の低減率が年1.2%に上昇するならば、AETGは約15TWにまで引き下げることが可能である。

太陽光や風力などの再生可能エネルギーの供給量を今後大幅に拡大していくためには、グリッド統合や蓄電などの分野におけるさらなる技術開発が必要と

なる(Green et al., 2007)。したがって、再生可能エネルギーを将来大規模に供給することが可能かどうかについては不確実性が拭えない。また、原子力発電を増強させるようなエネルギー政策は、昨今の反原発の世論の高まりを考慮するならば、大きな制約に直面せざるをえない。このようなことから、在来的CFE供給量の大幅な拡大は困難であるかもしれない。将来のCFE必要量と在来的CFEの最大供給可能量との差であるAETGは、未知の、あるいは研究の初期段階にあるCFE技術(先進的エネルギー技術)を今後開発し、これを普及させることによってしか埋め合わせることができないが、その技術開発に成功するか否かは不確実である。Green et al.(2007)の分析は、エネルギー集約度の低減率を高めることによって、不確実性を孕んだ先進的エネルギー技術への将来的な依存度を軽減することができるという示唆を含んでいる。

今後、2100年に至るまでにエネルギー集約度はどの程度低減させることができるのであろうか。この論点をめぐってPielke et al.(2008)は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が、CO₂排出の将来予測の際に、気候変動対策を採らない場合のエネルギー集約度の低減率を年1.0%以上とするシナリオを用いていることを指摘し、エネルギー集約度の低減に関する前提が楽観的すぎると批判している。経済活動の部門間シフトによってエネルギー集約度が低減する余地は将来的には限られてくると予想されることから、エネルギー効率性を着実に高めていくためには、新たな省エネ技術の開発が不可欠である(Pielke et al., 2008)。

3. 省エネ技術知識とエネルギー集約度

3.1. 分析方法

本節では、省エネ技術知識の蓄積がエネルギー集約度にどのような影響を及ぼしてきたかを検討することを目的として、日本のマクロ・データを用いた定量分析を行う。この分析では、蓄積された省エネ技術知識の指標として、省エネ技術関連の特許データに基づいて作成された省エネ特許ストックを用いる。特許データを使用するのは、省エネにかかわる研究開発活動や技術知識の水準を示すと考えられる他の長期データが存

在しないためであるが、ここで特許データを利用することの意義と課題について確認しておきたい。環境政策がイノベーションにもたらす影響を実証的に検討する際の課題の1つとして、どのような指標を用いて研究開発活動や技術知識の水準を測るかという点が挙げられる。通常用いられる指標は、研究開発支出、あるいは研究開発支出を売上高で除した研究開発集約度、および特許数である。近年、環境政策とイノベーションの関係にかかわる実証研究では、環境・エネルギー関連技術の特許データを用いた分析が多くみられるようになっている(Popp, 2002, 2003; Brunnermeier and Cohen, 2003)。そうした研究において特許データを用いることの利点として、Popp(2005)は、①特許データには研究開発支出のデータでは明らかにされない技術知識の詳細情報が含まれるため、例えば大気汚染物質対策の技術という分類だけでなく、SO_x削減技術か、NO_x削減技術かといった細かな分類を行えること、②各国の特許データから、技術知識の国際的な普及の実態を解明できること、③特許の引用情報から知識フローを把握できること、を挙げている。ただし、特許データの欠点としてPopp(2005)は、それぞれの特許の持つ価値が異なること、および研究開発の成果のすべてが特許となるわけではないことを指摘している。

省エネ技術知識のほかに、エネルギー集約度に影響を及ぼす要因として挙げられるのは、エネルギー価格の動向であろう。原油価格は代表的なエネルギー価格であり、経済主体にとって象徴的な意味を持っていることからその動向は行動の変化をもたらしうると考えられる。また、輸入エネルギー費用は経済主体にとっての実際のエネルギー関連の費用負担を表す指標である。そこで、エネルギー価格が及ぼす影響に関しては、原油輸入CIF価格を説明変数に用いる場合と、輸入エネルギー費用を説明変数に用いる場合の双方について分析を行う。輸入エネルギー費用のデータは、原油、C重油、ナフサ、原料炭、一般炭、LPG、LNGに関して各々の輸入CIF価格と輸入量を掛け合わせて合計することにより作成する。

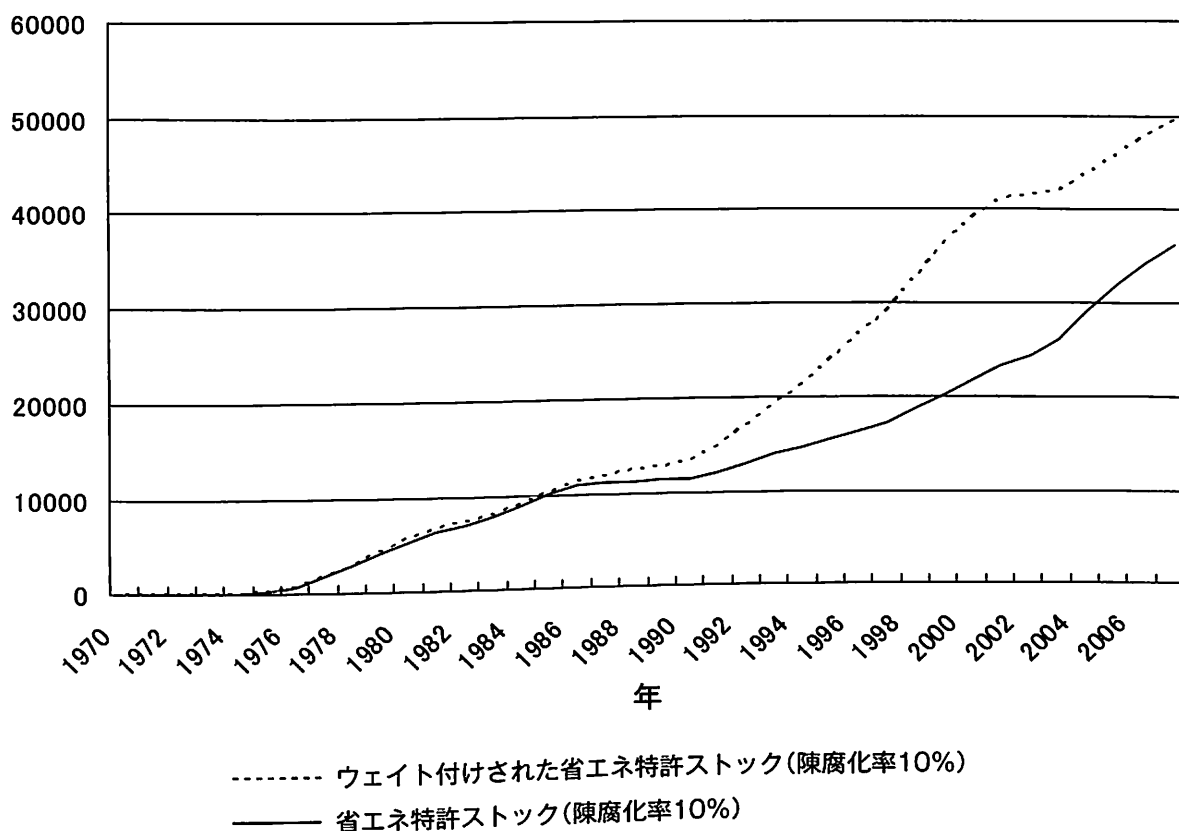
企業の投資活動を通じて、エネルギー効率性などの面で新しい技術が体化された生産設備の導入が進展す

るならば、民間企業の新規投資は経済全体としてエネルギー集約度を引き下げる効果を持ちうるかもしれない。また、経済構造の変化に伴い国内産業の中心が第2次産業から第3次産業に移行していく場合、そうした変化はエネルギー集約度を低下させることにつながるだろう。そこで、民間企業設備投資およびGDPに占める第3次産業の比率についても、エネルギー集約度に影響を及ぼす要因として定量分析に盛り込む。

本節の分析では、1970年から2007年までの時系列データを用いる。省エネ技術関連の特許出願件数のデータは、株式会社パトリスより提供を受けたものである。これは、特許出願の明細書に記載されている「省エネ」関連の用語を基に検索し、日本の企業や組織・団体、個人が出願人となっているもの、あるいはそれらの主体を出願人に含むものを抽出して得られたデータである。GDP当り1次エネルギー総供給と民間企業設備投資(実質)のデータ、および原油、C重油、ナフサ、原料炭、一般炭、LPG、LNGの輸入CIF価格と輸入量のデータについては、日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編(2010)に基づいている。なお、原油輸入CIF価格および輸入エネルギー費用のデータは消費者物価指数により実質化して分析に用いる。第3次産業(卸売・小売業、金融・保険業、不動産業、運輸・通信業、サービス業)のGDPシェアのデータについては『国民経済計算年報』によっている。

蓄積された省エネ技術知識の指標としての省エネ特許ストックについては、次の2つの方法によって計測したものを準備する。1つは、ある年(t 期)の省エネ特許ストックに関して、陳腐化率を10%として0期(1970年)から t 期までの出願件数を積算する方法である。この場合、出願された各々の特許が持つ価値の差や質的な違いは反映されない。もう1つは、それぞれの特許の質的差異を考慮するため、被引用回数を用いてウェイト付けされた省エネ特許ストックを計測する方法である。これは、特許1件当りの被引用回数に関するラグ分布を作成し、それを基に切断バイアスを修正した被引用回数を積算することによって得られる²⁾。なお、ここで採用される省エネ特許ストックの計測方法は山田(2009)にしたがっている³⁾。その詳細につい

図2 省エネ特許ストックの推移



では付録を参照されたい。以上の2つの方法を用いて計測された省エネ特許ストックの推移を図2に示している⁴⁾。

計量分析において時系列データを用いる場合、単位根検定によりデータの定常性について検証する必要がある。ここで用いる各変数(エネルギー集約度、原油価格、輸入エネルギー費用、省エネ特許ストック、ウェイト付けされた省エネ特許ストック、民間企業設備投資、第3次産業のGDPシェア)の対数値についてDickey-Fuller検定を行ったところ、すべての変数に関して、単位根が存在するという帰無仮説を10%の有意水準で棄却できなかった。そこで、各変数の対数値に関して1回の階差をとったデータについてDickey-Fuller検定を行った。その結果、ウェイト付けされた省エネ特許ストック以外の変数に関しては5%の有意水準で、ウェイト付けされた省エネ特許ストックについては10%の有意水準で単位根が存在するという帰無仮説が棄却された。

以上の単位根検定の結果を踏まえて、次のようなモデルを採用する。

$$\begin{aligned} \ln(EI_t/EI_{t-1}) = & a + b_0 \ln(EP_t/EP_{t-1}) \\ & + b_1 \ln(EP_{t-1}/EP_{t-2}) \\ & + b_2 \ln(KS_{t-1}/KS_{t-2}) \\ & + b_3 \ln(PI_{t-1}/PI_{t-2}) \\ & + b_4 \ln(GT_t/GT_{t-1}) + u_t \quad (1) \end{aligned}$$

ここで、EIはエネルギー集約度、 a は定数項、EPはエネルギー価格、KSは省エネ技術知識ストック、PIは民間企業設備投資、GTは第3次産業のGDPシェア、 u_t は誤差項を表す($t=1972, \dots, 2007$)。なお、ウェイト付けされた省エネ特許ストックについてはWKSと表記する。上に示されるように、EI、EP、KS(およびWKS)、PI、GTは、いずれも年間変化率に1を加えた値(対前年比)の対数値としてモデルに組み込まれている。

上記モデルの推定の際には、省エネ技術知識ストックのデータとして陳腐化率10%で積算された省エネ特許ストックを用いる場合と、ウェイト付けされた省エネ特許ストックを用いる場合とに分け、前者においてエネルギー価格のデータとして原油輸入CIF価格を使用するものをモデル1A、輸入エネルギー費用を使用

するものをモデル1Bとし、同様に後者において原油輸入CIF価格を用いるものをモデル2A、輸入エネルギー費用を用いるものをモデル2Bと呼ぶことにする。

3.2. 分析結果と考察

(1)式のモデルを最小二乗法で推定した結果を表1と表2に示している。表2にあるウェイト付けされた省エネ特許ストックを用いたモデル2A・2Bの結果は、全般的にみて表1のモデル1A・1Bの結果と同様である。回帰係数をみると、1期ラグのエネルギー価格上昇率、1期ラグの省エネ技術知識ストック増加率、1期ラグの民間企業設備投資増加率、および第3次産業のGDPシェアの増加率については符号が負となっている。しかし、1期ラグの民間企業設備投資増加率および第3次産業のGDPシェアの増加率の係数については統計的に有意ではない。このことから、民間部門の新規投資の増加率が高まったり、産業構造の第3

次産業へのシフトが加速しても、エネルギー集約度低減率はほとんど影響を受けないということが窺われる。一方、1期ラグの省エネ技術知識ストック増加率の係数については、モデル1A・1Bにおいては10%の水準で有意となっており、モデル2A・2Bにおいては5%の水準で有意である。その係数は、省エネ技術知識ストック増加率に対するエネルギー集約度低減率の弾力性が0.020~0.029の範囲にあることを示している。また、1期ラグのエネルギー価格上昇率の係数はいずれのモデルにおいても5%の水準で有意である。1期ラグのエネルギー価格上昇率に対するエネルギー集約度低減率の弾力性は0.035~0.038である。ただし、ラグのないエネルギー価格上昇率の係数は、モデル1B・2Bにおいては5%水準で、モデル1Aでは10%の水準で有意となっているが、4つのモデル全てにおいて係数の符号は正となっている。

表1 省エネ特許ストックがエネルギー集約度に与える影響

変数	モデル1A		モデル1B	
	回帰係数	p値	回帰係数	p値
定数項	-0.005073	0.470	-0.006498	0.347
$\ln(EP_t/EP_{t-1})$	0.028927	0.073	0.042037	0.017
$\ln(EP_{t-1}/EP_{t-2})$	-0.035104	0.038	-0.036200	0.048
$\ln(KS_{t-1}/KS_{t-2})$	-0.020363	0.059	-0.020490	0.053
$\ln(PI_{t-1}/PI_{t-2})$	-0.066406	0.357	-0.062921	0.374
$\ln(GT_t/GT_{t-1})$	-0.171183	0.665	-0.082171	0.832
Durbin-Watson	2.10723		2.02844	
R-squared	0.333759		0.367062	

表2 ウェイト付けされた省エネ特許ストックがエネルギー集約度に与える影響

変数	モデル2A		モデル2B	
	回帰係数	p値	回帰係数	p値
定数項	-0.003274	0.646	-0.004798	0.495
$\ln(EP_t/EP_{t-1})$	0.025745	0.101	0.038430	0.026
$\ln(EP_{t-1}/EP_{t-2})$	-0.036266	0.028	-0.037953	0.034
$\ln(WKS_{t-1}/WKS_{t-2})$	-0.029262	0.036	-0.028598	0.037
$\ln(PI_{t-1}/PI_{t-2})$	-0.077400	0.281	-0.072724	0.304
$\ln(GT_t/GT_{t-1})$	-0.150563	0.700	-0.069201	0.856
Durbin-Watson	2.14038		2.06157	
R-squared	0.352862		0.380521	

以上の結果は、エネルギー価格と省エネ技術知識がエネルギー集約度に与える影響に関して次のようなことを示唆していると思われる。エネルギー価格上昇という外生的ショックは、経済主体の行動が調整されるまでの間、一時的にエネルギー集約度の低減率を鈍化させることにつながる。しかし、エネルギー価格の上昇を受けて経済主体の行動調整がなされることにより、エネルギー効率性の改善が進んでいくことになる。そして、省エネ関連の技術知識が蓄積していく速度が高まると、エネルギー集約度低減率も高まっていく。

上の定量分析の結果が示すように、省エネ技術知識の蓄積を促すことは、エネルギー集約度の低減の度合いを高めていくために不可欠な要素の1つである。Popp(2002)は、特許データに基づいて構築された知識ストックの影響にも配慮した計量モデルによる推計から、米国においてエネルギー価格上昇が省エネ関連技術の特許取得活動にポジティブな影響を与えたことを見出している。この結果は、炭素税や排出権取引といった経済的手段の導入による炭素価格の設定を通じてエネルギー価格が政策的に引き上げられることで、省エネ分野におけるイノベーションが促進される可能性があることを示唆している。省エネ技術知識の蓄積を長期的に促していくためには、このような政策措置により経済主体に対して省エネ技術開発のインセンティブを継続的に与えていく必要がある。

このように、エネルギー価格の上昇は、省エネ技術知識の蓄積を促すことを通じてエネルギー集約度の低減をもたらすという間接的・長期的効果を持つと考えられる。これに加えて、本節の定量分析の結果から、エネルギー価格の動向がエネルギー集約度に対して直接的・短期的効果を持っていることが窺われる。注目されるのは、ラグのないエネルギー価格上昇率の増加はエネルギー集約度低減率を鈍化させるという結果である。ラグのないエネルギー価格上昇率に関する回帰係数が、「予測されない」エネルギー価格上昇率増加の影響を示しているとするならば、この結果は炭素価格設定を目的とする政策手段の選択に関して次のようなことを示唆する。排出権取引制度の下では排出権価格が市場での需給関係によって決定されるので、その変動

は避けられず、場合によっては排出権価格の暴騰や急落が起こりうる。原油をはじめとするエネルギーの価格も国際市場の動向の影響を受けるため不確実な要素がつきまとう。もともと不確実な動きを示すエネルギー価格に、外部費用を反映させることを目的として排出権取引制度によって炭素価格を付加することは、エネルギーにかかわる価格の不確実性をさらに増大させることにつながりかねない。炭素価格も含めたエネルギー価格に関して予測されない高騰が発生する可能性が高まるならば、一時的にせよエネルギー集約度低減率が鈍化するという事象も増加することになってしまう。こうした事態を避け、エネルギー集約度を長期にわたって安定的に低減させていくためには、経済主体にとって将来の炭素価格の動向に関して予測可能となる炭素税の方がより望ましい政策手段であるといえるのかもしれない。

4. おわりに

低炭素経済を構築するためには、在来的CFEの普及に必要とされる技術や先進的エネルギー技術の研究開発を進めると同時に、エネルギー集約度を着実に低減させていくことが不可欠である。本稿の定量分析は、省エネ技術知識ストックの増加率を高めることがエネルギー集約度低減率の向上につながるということを明らかにした。ただし、こうした研究開発の推進や技術知識の蓄積を実現するためには、何らかの政策措置を通じて経済主体に対して適切にインセンティブを付与しなければならない。Popp(2002)が示唆するように、省エネ分野におけるイノベーションの促進という点で、経済的手段の導入による炭素価格の設定は重要な役割を担うことになる。Galiana and Green(2010)は、未知のCFE技術の開発を促すことを目的として、エネルギー技術の研究開発に力点を置いた技術主導の気候政策(technology-led climate policy)を採用すべきであると主張している。また、技術知識の創出や技術採用にかかわる外部性を考慮すると、環境技術の研究開発や普及を促進するためには環境政策によるインセンティブ付与だけでは不十分であり、技術政策との組み合わせが必要であるという見解もある(Jaffe et al., 2005)。こ

うした議論を踏まえると、気候変動対策においては、環境政策と技術政策の政策統合が不可欠であると考えられる。その制度設計がどのようになされるべきかという点は、今後の重要な検討課題である。また、エネルギー価格上昇がその発生と同時期においてエネルギー集約度低減率の鈍化をもたらすという本稿の分析結果が排出権取引に対する炭素税の優位性を示唆しているとするならば、気候変動対策の制度設計に関する議論が排出権取引を中心に展開していくことは、必ずしも望ましい状況であるとはいえないように思われる。

<付録>

技術知識ストックの計測に関しては、次のように特許出願件数の積算によって特許ストックを算出する方法がある。

$$PTS_t = (1 - \delta) PTS_{t-1} + APT_t$$

ここで、 PTS_t は t 期の特許ストック、 δ は技術知識の陳腐化率、 APT_t は t 期の特許出願件数を表す。本稿では、省エネ技術知識ストックの計測方法の1つにこれを採用し、陳腐化率を10% ($\delta=0.1$)として省エネ特許ストックを算出している。

この計測方法については、それぞれの特許が持つ質的な違いが考慮されないという問題がある。これに対処するためには、次のような被引用回数でウェイト付けされた特許ストックを計測する方法が用いられる。

$$CTS_t = (1 - \delta) CTS_{t-1} + \sum_{i=0}^h CT_{t,t+i}$$

ここで、 CTS_t は t 期のウェイト付けされた特許ストック、 $CT_{t,t+i}$ は t 期に出願された特許が $t+i$ 期に引用された回数、 h は引用が発生する最長期間を表す。特許が出願された年からデータ観測年までの期間が h よりも短い場合、データに反映されない被引用回数が生じる。これは被引用回数に関する切断バイアスと呼ばれるが、その補正については山田(2009)にしたがって以下のように行う。

日本の特許データベースでは、出願年からデータ観測年までの被引用回数の累積数のみ収録されているということから、次のような累積密度関数を推計して、被引用回数に関するラグ分布を作成するという方法が採用される。

$$\ln(\sum_{i=0}^r CT_{t,t+i}/APT_t) = \alpha + \beta (1/r)$$

ここで、 r は出願がなされた t 期からデータ観測年である e 期の差($r=e-t$)を表す。回帰分析により α と β を推定し、それらを用いて次のように被引用回数を補正する。

$$\sum_{i=0}^{24} CT_{t,t+i} = \sum_{i=0}^r CT_{t,t+i} \{D(24)/D(r)\},$$

$$D(r) = \exp\{\alpha + \beta (1/r)\}$$

なお、 l は出願がなされた t 期からの経過年数を意味する。また、引用が発生する最長期間を24年と仮定している。

表A 被引用に関する累積密度関数の推計結果

	係数	p値
α	0.676526	0.000
β	-11.7552	0.000
1975～79年ダミー	-0.217577	0.327
1980～84年ダミー	-0.225344	0.311
1985～89年ダミー	0.015965	0.943
1990～94年ダミー	0.346495	0.135
1995～99年ダミー	0.538697	0.033
2000～04年ダミー	0.086399	0.780
2005～07年ダミー	-0.801424	0.222
Adjusted R-squared	0.935868	

表Aは、1970～2007年の省エネ特許に関する時系列データを用いて最小二乗法により累積密度関数を推計した結果を示している。この推計では、技術知識は創出された年によってその価値が異なるという「出願年効果」を考慮して、5年ごとの時間ダミーを加えている。この時間ダミーに関しては、統計的に有意な「1995～99年ダミー」の係数のみを被引用回数の補正の際に使用している。また、本稿での省エネ特許の被引用回数に関する切断バイアスの補正においては、被引用回数の予測値と実際の観測値の乖離率を調整する作業を施している。その詳細に関して

は、山田(2009)の第4章第3節を参照されたい。

付記

本稿は、環境省『環境経済の政策研究』の研究課題「国内排出量取引の国際リンクによる経済的影響に関する研究」における研究成果の一部である。

注

- 1) 日本のGDP当り1次エネルギー総供給の平均年間変化率は、日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編(2010)のデータを用いて算出している。
- 2) 被引用回数は、出願年が経過するにつれて増加し、ある経過年数でピークを迎えた後に減少するという傾向を示す。そのため、出願年がデータ観測年に近いほど、データに反映されない被引用回数が増えてしまう。これが被引用回数に関する「切断バイアス」である。
- 3) 日本の引用情報に関しては、出願人引用ではなく審査官引用を収集したものであることから、それが特許の価値を反映した指標とみなせるか否かが問題となりうる。この点について山田(2009)は、審査官引用が特許価値を判別する指標として有用であることを実証的に明らかにしている。ただし、日本の特許データベースの場合、出願年からデータ観測年までの被引用回数の累積数しか得られないため、引用年が識別できる米国の特許データベースを用いる場合と比較して、切断バイアス修正の精密度という点で劣ることは否めない。
- 4) 陳腐化率を15%とした場合の省エネ特許ストックについても計測し、これを用いて以下で解説する回帰分析と同じ作業を行ったが、得られた結果は陳腐化率10%の場合とほぼ同様であった。

参考文献

Brunnermeier, S. B., and M. A. Cohen(2003)
 “Determinants of Environmental Innovation in US Manufacturing Industries,” *Journal of Environmental Economics and Management* 45, pp.278-293.

Galiana, I. and C. Green(2010) “Technology-Led Climate Policy,” in B. Lomborg, ed., *Smart Solutions to Climate Change: Comparing Costs and Benefits*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp.292-339.

Green, C., S. Baksi, and M. Dilmaghani(2007)
 “Challenges to a Climate Stabilizing Energy Future,” *Energy Policy* 35, pp.616-626.

Hoffert, M. I., K. Caldeira, A. K. Jain, E. F. Haites, L. D. D. Harvey, S. D. Potter, M. E. Schlesinger, S. H. Schneider, R. G. Watts, T. M. L. Wigley, and D. J. Wuebbles(1998) “Energy Implications of Future Stabilization of Atmospheric CO₂ Content,” *Nature* 395, pp.881-884.

Jaffe, A. B., R. G. Newell, and R. N. Stavins(2005)
 “A Tale of Two Market Failures: Technology and Environmental Policy,” *Ecological Economics* 54, pp.164-174.

日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編(2010)
 『EDMC/エネルギー・経済統計要覧(2010年版)』財団法人省エネルギーセンター。

Pielke, R., Jr., T. Wigley, and C. Green(2008)
 “Dangerous Assumptions,” *Nature* 452, pp.531-532.

Popp, D.(2002) “Induced Innovation and Energy Prices,” *American Economic Review* 92(1), pp.160-180.

Popp, D.(2003) “Pollution Control Innovations and the Clean Air Act of 1990,” *Journal of Policy Analysis and Management* 22, pp.641-660.

Popp, D.(2005) “Lessons from Patents: Using Patents to Measure Technological Change in Environmental Models,” *Ecological Economics* 54, pp.209-226.

山田節夫(2009)『特許の実証経済分析』東洋経済新報社。

Energy Intensity and Innovation in Energy Conservation Technology

HAMAMOTO Mitsutsugu

This paper investigates the effect of innovations in energy conservation technology on energy efficiency in Japan. The findings indicate that accelerated accumulation of the knowledge stock of energy conservation technology brings about increases in the rate of energy intensity declines. The paper also discusses what policies are needed to realize century-long improvements in energy efficiency for mitigating climate change.