



Discussion Papers In Economics And Business

日本における化石燃料と経済成長の因果性分析
－多変数アプローチに基づいて

石田 葉月

Discussion Paper 11-13

Graduate School of Economics and
Osaka School of International Public Policy (OSIPP)
Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, JAPAN

日本における化石燃料と経済成長の因果性分析
－多変数アプローチに基づいて

石田 葉月

Discussion Paper 11-13

April 2011

Graduate School of Economics and
Osaka School of International Public Policy (OSIPP)
Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, JAPAN

日本における化石燃料と経済成長の因果性分析 ―多変数アプローチに基づいて*

石田 葉月†

要旨: 化石燃料は特異な天然資源であり、他のエネルギー源との代替は限定的である。したがって、化石燃料と経済がどのように結びついているかを知ることは、持続型社会のあるべき姿を議論するうえで極めて重要であると思われる。エネルギーと経済成長の因果関係についての既存研究は多いが、化石燃料と経済成長の因果関係を検討したものは少ない。また、既存研究の多くは2変数による時系列分析を行っている。本研究では、日本を事例として、非化石エネルギーと労働を加えた多変数の時系列分析により、化石燃料の消費量とGDPのGranger因果性を明らかにした。その結果、化石燃料からGDPに対する一方向の因果性が見出された。このことは、化石燃料は経済成長の原動力であり、化石燃料の供給減は経済成長を阻害することを示唆している。また、非化石エネルギーは化石燃料の代わりとはならず、化石燃料依存から脱却するためには経済成長路線そのものを見直す必要があると結論づけた。

JFL Classification: Q32, Q43, Q57

Key Words: 化石燃料, 経済成長, 共和分, Granger 因果性

* 本稿を作成するにあたり、大槻恒裕先生（大阪大学大学院国際公共政策研究科）のご支援を頂きました。ここに感謝の意を表します。

† 福島大学共生システム理工学類, 〒960-1296 福島県福島市金谷川1
電話&FAX: 024-548-8439, e-mail: e059@ipc.fukushima-u.ac.jp

1. はじめに

近代的な経済システムにおいて、動力や電力、高温の熱、といった質の高いエネルギーが重要な役割を果たしていることは明らかである。不運なことに、ごく僅かな例外を除いて、自然はこれらのエネルギーをはじめから人間が使いやすいようには与えてくれないので、我々は天然の低エントロピー資源から人工的にそれらを作り出さなければならない。

いうまでもなく化石燃料は、産業革命以来、経済発展を支えてきた低エントロピー資源である。化石燃料が資源として優れている理由のうち第一に挙げられるべきは、それがストック型の資源であるという点である (Soddy, 1912; Georgescu-Roegen, 1971)。それは地球自身の蓄えであり、人間の都合に合わせて消費速度を自由に変えることができる。したがって、化石燃料と工業的生産が強く結びついているのは、Georgescu-Roegen (1971) が指摘したように、当然のことである。工業的生産は、各資材を必要な時に必要な分だけ流通させることができ初めて成り立つものである。大規模な工業的生産システムの構築においては、我々の都合に合わせて大量の高質エネルギーを供給できるような低エントロピー資源を大量に確保できることが前提条件となる。

一方で、太陽放射線のフローは、天然の低エントロピー資源ではあるけれども、我々の都合に合わせて降り注いでくれるわけではない。また、そのエネルギーを人為的に貯めるにしても、太陽放射線のフローが地質学的な時間を経て蓄積された化石燃料と比較すると、その量は微々たるものである。他にも、化石燃料の優れた点として、エネルギー密度が高いことや、採掘・運搬が容易なこと、利用するための装置や設備が比較的シンプルであることなどが挙げられ、これらの特性こそが、社会が必要とする様々な形態のエネルギーを広くカバーして供給することを可能にしている。とりわけ、輸送機器の動力源としての化石燃料の優位性は圧倒的である。世界で消費される一次エネルギーのおよそ3割は輸送のために使われているなか、そのほとんどは化石燃料（さらにそのほとんどは石油）に依存している。輸送の際と一緒に持ち運ぶ燃料と動力変換装置は、単位出力あたりできるだけ軽量であることが望ましいので、化石燃料が重宝されるのは当然のことである。一方で、化石燃料に依存した経済システムは、気候変動やエネルギー確保の安全保障面において、脆弱なものであるとの認識が広がっている。とはいえ、人間にとってあまりに利便性の高い化石燃料依存からの脱却は可能なのだろうか。化石燃料と経済との関わりについて、我々はもっと深く知る必要がある。

エネルギー供給とGDP(あるいはGNP)の因果関係については、これまで、アメリカをはじめ多くの先進国ならびに発展途上国について検討されてきた。もし、GDPからエネルギー供給への一方向の因果性が見出された場合、一般に、経済成長を損なうことなくエネルギー供給の削減が可能であると解釈されている。逆に、エネルギー供給からGDPへの因果性が見出された場合、エネルギー供給の削減は経済成長を損なうと解釈されている。したがって、エネルギー供給とGDPの因果の方向(有無も含めて)を知ることは、重要な研究課題となっている。しかしこれまでのところ、因果の方向や有無について一致した見解は得られていない。例えば、アメリカについてみると、この研究分野に先鞭をつけたKraft and Kraft (1978) は、GNPからエネルギー供給への一方向の因果性を見出した。この結果は、Abosedra and Baghestani (1989) によっても支持されている一方で、Yu and Hwang (1984) や Yu and Choi (1985) はエネルギー供給とGNPとの因果関係を見出さなかった。また、Stern (1993, 2000) は、エネルギー供給量からGDPへの因果性を見出し、経済成長のためにはエネルギーが不可欠であると結論づけている。

アメリカ以外の国々についての研究結果も様々であり、今のところ、エネルギーとGDPの関連性についての定まった見解は得られていない(Lee, 2006; Mozumder and Marathe, 2007; Chiou-Wei et al., 2008)。また、日本の事例に限ってみても、既存研究は少ないうえに、それらの結果は一致していない。例えばErol and Yu (1988) や Zachariadis (2007) は、エネルギー

供給と GNP とのあいだに双方向の因果性を見出している。また、Soytas and Sari (2003) は、エネルギー供給から GDP に対する一方向の因果性を見出している。一方で、Lee (2006) は、GDP からエネルギー供給に対する一方向の因果性を見出している。

以上のように、エネルギー供給と GDP の因果関係に関する分析結果がまちまちである理由としては、対象とする国およびサンプル期間の違いや、使用されるモデルや変数の違いが挙げられるが、いずれにせよ、それらの結果に基づいて継続的な経済成長の可能性を論じることは不適切であると思われる¹。何故なら、一次エネルギーとは、化石燃料とそうでないものの合計値であり、そこでは両者の本質的な違いが無視され、事実上、両者の完全なる代替性が暗に想定されているからである。したがって、一次エネルギーと GDP の因果性を明らかにしたところで、化石燃料の消費削減が経済成長を阻害するか否かを判断することはできない。

一方で、石油と GDP の関係、あるいは石炭と GDP の関係というように、化石燃料のなかでも特定のものと経済との関係を論じた研究は存在するもの(たとえば、Lee and Chang (2005); Zou and Chau (2006); Zamani (2007); Yuan et al. (2008))、それらは逆に、化石燃料のストック的側面を重視するうえでは区別が細かすぎる。石油や石炭、そして天然ガスは、それぞれに性質の違いがあり、その用途や用法も異なるものの、人間の都合に合わせて取り崩すことができるストック型の低エントロピー資源であるという点では共通している。それらのあいだの代替は必ずしも完全ではないが、フロー型の低エントロピー資源との本質的な違いからすれば、同類のものとして扱って差し障りないであろう。

化石燃料への依存を弱めつつ経済成長を継続させることは可能なのだろうか。本研究は、1970 年以降の日本を事例として、化石燃料の消費と GDP の時系列データに基づく Granger 因果分析により、化石燃料と経済との依存関係を明らかにする。当期間における日本の事例に注目することには、以下のような意味がある。二度のオイルショックと気候変動問題の高まりを受けて、日本は諸外国以上に、化石燃料依存から脱却しようとする強い誘因が働いてきた。というのも、天然ガスについては、周囲を海で囲まれている日本は液化天然ガスをタンカーにより輸入する必要があるが、石油依存から天然ガス依存への転換は、欧州や北米のようにパイプラインで輸送できる国ほど容易ではないという事情があるからである。事実、一次エネルギーに占める天然ガスの割合は、アメリカおよび欧州が 4 分の 1 程度であるのに対して、日本は 5 分の 1 にも満たない。また、石炭についても、国内産の良質な石炭は既にほとんど採掘されてしまっているうえ、燃焼時の環境負荷を考慮すると、石炭依存への本格的な回帰には多大な社会的費用を要する。日本のこうした状況は、化石燃料以外のエネルギー開発を促進させ、1970 年代以降本格化した原子力発電は順調にそのシェアを伸ばした (Figure 1)。また、いわゆる再生可能エネルギーの開発も積極的に進められてきた。とりわけ太陽光発電については、日本は世界で最も導入が進んでいる国のひとつである。さらに、省エネルギー技術の研究開発も活発に行われ、エネルギー効率 (単位エネルギーあたりの GDP) は先進国のなかでも最高水準となった。こうした努力の結果、日本の化石燃料消費の増加率は経済成長率と比較すると緩やかとなったが、かといって長期的な減少傾向に転じたわけではない。化石燃料の消費水準推移をみると、1970 年代初頭から 1980 年代の終わりにかけては横ばいだったものの、それ以降は概して増加傾向にある。一次エネルギーに占める化石燃料のシェアは、1970 年代を通じて 90 パーセントを超えており、近年は 85 パーセント程度に落ち着いてはいるものの、依然として日本が化石燃料時代にどっぷりと浸かっていることは疑いようのない事実である。そして日本ほど技術水準が高く、日本ほど化石燃料依存からの脱却を図ろうとする誘因が大きいにもかかわらず

¹このことは、電力についても同様である。しばしば、電力消費量と GDP の因果関係についても分析されているが、仮に、電力が経済成長に欠かせないとの結論が出されたとしても、電力そのものは加工品であるため、経済成長と天然資源との関わりについては何も言及できない。

ずそれが叶わないのであれば、経済成長と脱化石燃料の両立がいかに難しいかということについての普遍的な見解を与えることになるだろう。

ところで、エネルギー供給と GDP の因果性に関する既存研究の多くは 2 変数による分析であった。2 変数分析はデータの収集が容易であるといった利点を持つものの、GDP との関連においてエネルギーと代替関係にある変数を無視した場合には因果性が正しく見出されないことが指摘されている (Stern, 1993, 2000)。一方で、多変数による分析においては、どの変数を使用するのかということについての定まった見解があるわけではない。いくつかの既存研究は、新古典派経済学の枠組みから、労働と資本からなる従来の生産関数にエネルギーを加えたモデルに基づいて分析を行っている (Stern, 1993, 2000; Ghali and El-Sakka, 2004; Soytas and Sari, 2007; Yuan et al., 2008)。しかし、Daly (1996) が主張しているように、新古典派の生産関数における投入要素間の代替性については、物理学的根拠がない。例えば、運送会社が荷物を運ぶために使用するトラックは資本に分類されるが、これは Georgescu-Roegen (1971) のいうところのファンドであり、それを作用させるためには低エントロピー資源のフロー (ガソリン) を必要とする。ファンドがサービスを生み出す過程で低エントロピー資源は高エントロピーの廃物・廃熱に変換されるのであって、ファンドと低エントロピー資源は、物理学的な機能が本質的に異なるのである。この区別は、経済過程の物理的側面を重視した Soddy (1926) や Georgescu-Roegen (1971) にとっては当然のことだったが、不運なことに、主流の経済学においてはあまり重視されてこなかった。化石燃料が低エントロピー資源であることを重視するなら、我々はその代替として、化石燃料以外の低エントロピー資源に注目すべきである。なぜなら、低エントロピー資源の代わりは低エントロピー資源でしかあり得ないからである。以上を踏まえ、本研究では、化石燃料以外の低エントロピー資源として非化石エネルギーと労働投入量を考え、化石燃料と GDP を加えた 4 変数により時系列分析を行う。

本論文は以下のように構成されている。第 2 節では、モデルおよび手法、用いたデータについて述べている。第 3 節では、分析結果を示している。第 4 節では、分析結果を受けて、経済システムにおける化石燃料の役割について若干の考察を行っている。第 5 節では結論を述べている。

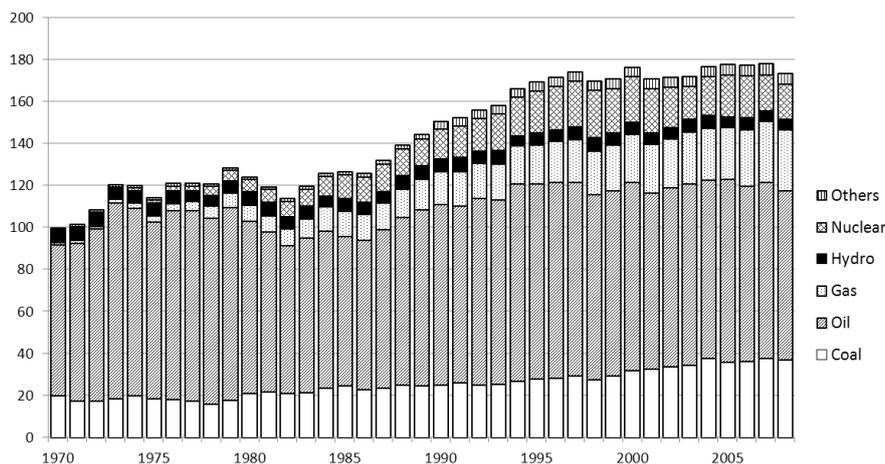


Figure 1: Primary energy supply in Japan (1970=100)

2. 方法とデータ

エネルギーと経済の因果関係に関する時系列分析において、既存研究の多くは2変数モデル(すなわちエネルギー供給量とGDP)を用いている。しかし、GDPとの関連においてエネルギーと代替関係にある変数が存在する場合、2変数による分析結果の信頼性は疑わしいことが指摘されている(Stern, 1993, 2000)。本研究では、熱力学的な観点から、低エントロピー資源としての化石燃料と代替関係にある変数として、一次エネルギーのうち化石燃料ではないエネルギー資源(以後、単に非化石エネルギーと呼ぶ)と労働投入量を考える。非化石エネルギーには、原子力、水力、バイオマス、風力、太陽光などが含まれるが、日本ではこれまでのところ、原子力と水力が大半を占める²。当然、非化石エネルギーと化石燃料は、完全な代替関係にない(でなければ、区別する理由があるだろうか)。原子力と水力は電力しか供給できず、したがって、輸送機械の動力源としての利用は限定的である。とはいえ、化石燃料は電力の生産にも使われているので、非化石エネルギーが化石燃料をまったく代替しないとアприオリに考える理由はない。

人間が労働を生み出す過程は、機械的には動力機関として捉えることができ、そのアウトプットをジュールで表現することも可能である。事実、人間の運動能力は、化石燃料が生み出す動力の一部を代替することができる(文明史においては、人間や家畜の動力を化石燃料が代替してきた)。もっとも、厳密には、人間の活動の源は食料であり、食料は化石燃料や非化石エネルギーから生産されているので、人間の労働を一次エネルギーと同等に扱うのはダブルカウントの問題があるとの批判があるかもしれない。とはいえ、人間の行動がGDPの増大に貢献していようとなかろうと、どちらにせよ食料は消費するわけである。とりわけ現代型の労働形態は、単純な肉体労働よりも情報処理主体としての役割が大きくなっており、就労時間が長いからといってFMR(Field Metabolic Rate)が単純に増加するわけではない。したがって、労働投入量を一次エネルギーから切り離して考えても問題は生じない。情報处理的意味合いとして労働を捉えることは、人間が生み出す労働を単純に物理的仕事として動力換算すべきでないことを意味する(Ayres and Ayres, 1999)。つまり、労働の1ジュールには、エントロピーがゼロであるエネルギー(エクセルギー 100パーセント)ということ以上に経済的な価値があり、化石燃料が生み出す1ジュールと同質ではない。だからこそ、労働と化石燃料は区別が必要なのである。

本研究の分析は、次のような手順で行う。まず、各時系列変数の定常性について、Augmented Dickey-Fuller (ADF) (Dickey and Fuller, 1979) および Phillips-Perron (PP) (Phillips and Perron, 1988) の単位根検定法によってテストする。変数が非定常である場合、それら変数どうしの線形結合が定常(すなわち共和分関係)になる場合がある(Engle and Granger, 1987)。変数間の共和分関係については、Eq.(1)のようなVAR (Vector Autoregressive) モデルに基づき、Johansen and Juselius (1990) の最尤法を用いて明らかにする。

$$X_t = \mu + \sum_{i=1}^p \Pi_i X_{t-i} + \epsilon_t \quad (1)$$

ここで、 X_t は時系列変数ベクトル、 μ は定数項ベクトル、 Π_i は係数の正方行列、 ϵ_t は期待値がゼロで分散が一定の誤差項ベクトルである。変数間に共和分関係がある場合、変数どうしに長期的な因果関係が存在するかもしれない。本研究では、Granger (1988) に従い、

²ウラン鉱石は地球の蓄えではあるものの、原子力エネルギーによる電力は人間の都合に合わせて柔軟に供給を変動させることができないため、火力発電の融通性には遠く及ばない。したがって、原子力エネルギーは化石燃料と同等に扱うべきではない。

VECM(Vector Error Correction Model)に基づいて、化石燃料と GDP の Granger 因果性をテストする。VECM は、Eq.(1) の両辺から X_{t-1} を差し引くことによって得られる。

$$\Delta X_t = \mu + \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i \Delta X_{t-i} + \Pi X_{t-1} + \epsilon_t \quad (2)$$

ここで、 Δ は 1 階差を表し、 $\Pi = \sum_{i=1}^p \Pi_i - I$ 、 $\Gamma_i = -\sum_{j=i+1}^p \Pi_j$ である。なお、 I は単位行列である。

本研究で用いたデータは、日本における 1970 年から 2008 年までの年度ごとの時系列データである。GDP(Y) は内閣府が公表している国民経済計算より、実質 GDP の時系列データを用いた。また、化石燃料供給量 (F) および非化石エネルギー供給量 (NF) については、資源・エネルギー庁が公表しているエネルギーバランス表に基づき、一次エネルギー供給量 (熱量換算) のうち化石燃料によるものを前者、化石燃料以外によるものを後者とした。労働投入量 (L) は、総務省および厚生労働省がそれぞれ公表している就業者数と勤労時間数の積をとった。なお、分析の際、データはすべて自然対数変換した。

3. 結果

Table 1 に、Augmented Dickey-Fuller (ADF) 単位根検定の結果を示す。いずれの変数についても、レベルでは単位根があり、1 階差を取ると単位根を持たないと読み取ることができる。また、Table 2 が示すように、Phillips-Perron (PP) 単位根検定についても同様の結果が得られた。以上より、すべての変数について $I(1)$ であると判断した。

Table 1: Augmented Dickey-Fuller unit root tests

Variables	With a time trend	Without a time trend
Y	-0.0078(2)	-2.6948(2)
F	-2.3553(0)	-1.5183(0)
NF	-0.1099(0)	-2.2209(0)
L	-0.9195(0)	-1.3014(0)
ΔY	-4.9894(1)**	
ΔF	-5.5435(0)**	
ΔNF	-6.4458(2)**	
ΔL	-4.2216(1)*	

Lag lengths(in parenthesis) are determined by AIC.

* Significant at the 5% level.

** Significant at the 1% level.

次に、単位根テストの結果を受けて、変数間における共和分関係の有無を Johansen and Juselius (1990) の手法に基づいて明らかにする。その結果、Table 3 が示すように、GDP、化石燃料、非化石エネルギー、労働のあいだには長期的な関係が存在していることがわかった。なお、共和分ベクトルは GDP を基準とした。共和分関係における化石燃料および労働に関する係数の符号は、予想通りのものであった。すなわち、長期的な関係においては、化石燃料もしくは労働の変化の向きと GDP の変化の向きは一致している。一方、非化石エネルギーについては、予想に反し、その変化の向きと GDP の向きは逆であった。この

Table 2: Phillips-Perron unit root tests

Variables	With a time trend	Without a time trend
Y	-0.9221	-1.7102
F	-2.4743	-1.5229
NF	-0.2856	-2.3153
L	-1.1498	-1.3654
ΔY	-3.9708*	
ΔF	-5.5123**	
ΔNF	-7.8569**	
ΔL	-3.8912*	

* Significant at the 5% level.

** Significant at the 1% level.

Table 3: Maximum likelihood cointegration tests

Cointegration rank	Trace test		Maximum Eigenvalue test	
	Statistics	Critical value ^a	Statistics	Critical value ^a
None	63.337	47.856	35.941	27.584
At most 1	27.395	29.797	15.825	21.131
At most 2	11.569	15.494	11.311	14.264
At most 3	0.257	3.841	0.257	3.841

Normalized cointegration equation

$$Y - 1.292(-2.199)F + 1.499(4.329)NF - 11.267(-5.967)L - 0.008(-0.938)TREND$$

^a 95% Critical value

The lag structure of VAR is determined by AIC.

T-values are given in parentheses.

ことから、GDP との関係において、非化石エネルギーは、化石燃料や労働とは本質的に異なっていることが伺える。

Table 4 は、各変数に関する ECM 評価の結果を示している。また、Table 5 は Granger 因果検定の結果を示している。まず、化石燃料と GDP とのあいだの因果関係については、化石燃料から GDP に対する長期の因果性が見出された。なお、調整係数の符号は理論通りである。すなわち、GDP は長期的均衡を保つように調整される。一方、GDP から化石燃料に対する因果性は、長期・短期とも見出せなかった。これらの結果は、化石燃料の供給増が経済成長をもたらすことを示唆している。

分析結果において興味深いのは、非化石エネルギーと GDP との関係である。Table 5 が示すように、GDP と非化石エネルギーとのあいだには、双方向の因果性が見出された。なお、調整係数の符号は理論通りであり、長期的均衡を保つ力が働いていることがわかる。長期的関係においては、GDP と非化石エネルギーの変化の向きは反対であることに注意されたい。つまり、GDP が下がれば非化石エネルギーの供給が増え、非化石エネルギーの供給が増えれば GDP が下がる、ということである。ただし、短期的因果については、非化石エネルギーから GDP に対して正に有意であり、非化石エネルギーが経済成長にまったく役立っていないと断言することはできない。

ところで、Granger 因果分析は、因果の方向についての判断は出来ても、変数どうしの

Table 4: Estimates of error correction models

Variables	ΔY	ΔF	ΔNF	ΔL
Constant	-8.266(-2.025)*	-0.170(-0.025)	-44.950(-2.729)*	-2.037(-0.418)
$\Delta Y(-1)$	0.082(0.284)	0.187(0.277)	-1.012(-0.780)	0.166(0.511)
$\Delta Y(-2)$	-0.593(-2.190)*	-	-1.303(-1.323)	-0.353(-1.216)
$\Delta Y(-3)$	-	-	-	0.212(0.749)
$\Delta F(-1)$	-0.096(-0.987)	-0.086(-0.372)	-0.416(-1.043)	-0.157(-1.517)
$\Delta F(-2)$	-	-	-	-0.134(-1.195)
$\Delta NF(-1)$	0.101(2.417)*	-0.023(-0.292)	0.029(0.178)	0.066(1.517)
$\Delta NF(-2)$	-	-0.085(-1.026)	-0.064(-0.431)	-
$\Delta NF(-3)$	-	-	-0.297(-1.825)	-
$\Delta NF(-4)$	-	-	0.168(1.071)	-
$\Delta L(-1)$	0.143(0.586)	0.675(1.215)	0.252(0.229)	0.248(0.634)
$\Delta L(-2)$	-	-1.120(-2.591)*	-	-0.081(-0.276)
$\Delta L(-3)$	-	0.286(0.661)	-	-0.088(-0.388)
$\Delta L(-4)$	-	-	-	-0.377(-2.005)
ECT(-1)	-0.050(-2.029)*	-0.001(-0.027)	-0.271(-2.728)**	-0.012(-0.413)
Diagnostic test				
R^2	0.41	0.28	0.50	0.46
\bar{R}^2	0.29	0.06	0.32	0.19
F-statistic	3.28	1.28	2.66	1.69
DW	1.74	1.92	2.01	1.84
ARCH	0.04	0.95	0.72	0.89
BG	0.44	0.13	1.96	0.45

Lag lengths are determined by AIC.

T-statistics are in parenthesis.

* Significant at the 5% level.

** Significant at the 1% level.

動学的影響に関しては明らかにしない。そこで、VAR モデルに基づいてインパルス応答をシミュレートした。結果の一部を、Figure 2 および Figure 3 に示す。図中の実線はインパルス応答を示し、上下の点線は正負の 2 標準偏差バンドを示している。Figure 2 は、各変数のショックに対する GDP の反応を示している。化石燃料、労働に関しては、先の ECM 分析の結果と整合的である。すなわち、化石燃料あるいは労働に対する正のショックは、GDP を正の方向に押し上げ、新たな均衡状態に移行させる。一方、非化石エネルギーについては、GDP に対して何の影響も与えていないようにみえる。やはり、ECM 分析結果が示唆したように、非化石エネルギーと GDP の関係はやや複雑であることを伺わせている。恐らくは、非化石エネルギーと GDP の負の長期的因果関係と正の短期的因果関係が相殺しているものと思われる。

次に、GDP のショックに対する各変数の反応をみてみよう (Figure 3)。これによると、GDP の変化は化石燃料の消費に正の影響を及ぼしているようにもみえる。また、非化石エネルギーの GDP に対する反応については、有意とはいえないまでも、負の影響を受けているようにみえる。これは、ECM 評価における結果と整合的である。なぜなら、ECM 評価の結果によれば、非化石エネルギーに関する誤差修正項の符号は、GDP の増加（減少）

Table 5: Granger causality test results

Dependent variables	F-statistics				T-statistics
	Short-run				Long-run
	ΔY	ΔF	ΔNF	ΔL	ECT_{t-1}
ΔY	-	0.974	5.845*	0.343	-2.029*
ΔF	0.077	-	0.528	2.287	-0.027
ΔNF	1.049	1.088	-	0.052	-2.728**
ΔL	0.659	2.075	2.302	-	-0.413

* Significant at the 5% level.

** Significant at the 1% level.

に対して非化石エネルギーが減少（増加）するように調整されるからである。

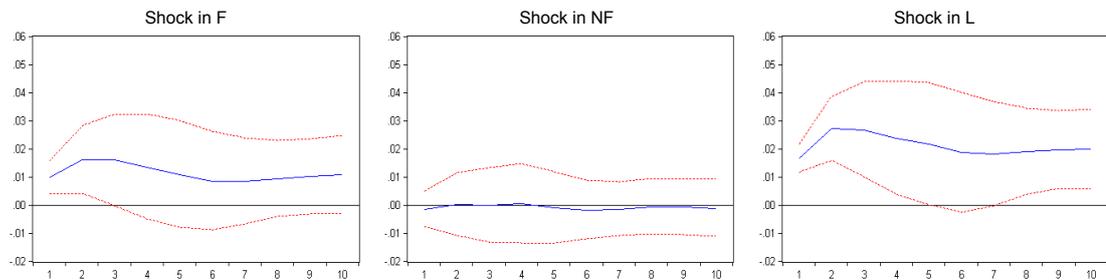


Figure 2: Impulse responses of GDP to generalized one standard deviation shock

4. 化石燃料時代は続くのか

現在、一次エネルギーを構成するエネルギー資源のうち化石燃料が占めるシェアは圧倒的である。世界全体の一次エネルギー供給のうち80パーセントを石炭、石油、天然ガスが占めており、化石燃料のシェアは過去40年間で5ポイント程度しか低下していない。その間、世界はオイルショックを経験し、さらには気候変動問題が取り沙汰され、化石燃料へ大きく依存する経済システムの見直しが急務であるという認識が高まった。とりわけ日本では、化石燃料依存に対する危機感が強かった。そして、高い技術力を背景に、太陽放射線のエネルギーフローを活用するための技術や原子力発電システムの構築に巨額の費用が投じられ、化石燃料依存からの脱却を図ろうと懸命の努力を続けてきた。

本研究で行った共和分分析、Granger 因果分析およびインパルス応答分析の結果は、脱化石燃料と経済成長の両立は可能であるという楽観論に対して否定的なものだった。分析の結果、化石燃料の代わりに労働投入量を増やすことによって経済成長を遂げることは可能であることが示されたが、労働投入量を永久に増加させていくことは不可能である。

他方で、化石燃料を代替すると期待されている非化石エネルギーについては、本研究の結果によれば、化石燃料と同等の役割を必ずしも果たしていないことがわかった。非化石

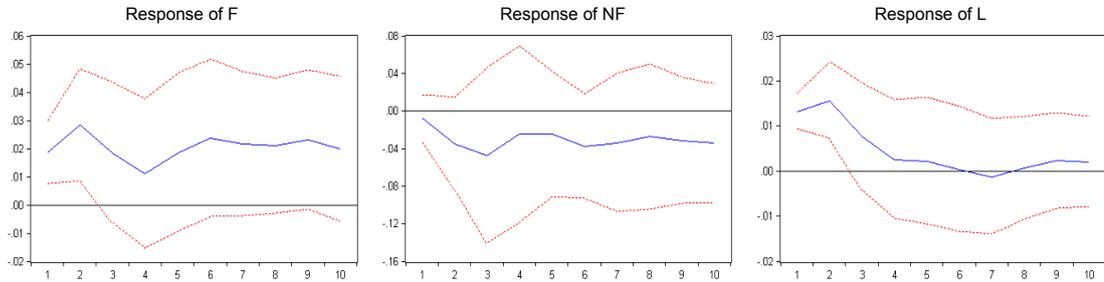


Figure 3: Impulse responses to generalized one standard deviation shock in GDP

エネルギーが経済成長に少しも貢献していないと言い切ることはできないものの、その正の作用は、同時に存在する負の作用により相殺され、全体としては、非化石エネルギーとGDPとの関係は化石燃料ほど明確ではない。非化石エネルギーとGDPが長期的に負の関係にあるという結果が得られた理由としては、いくつかのことが考えられる。たとえば、原子力発電の開発が、いわゆる「新エネルギー」分野の開拓の一環として、国策によって進められてきたことが関係しているのかもしれない (Japanese Atomic Energy Commission, 2005)。事実、1970年以降の非化石エネルギーの増分のほとんどは原子力発電であった (Figure 1)。民間主導とは異なり、国家主導のプロジェクトは景気に左右されにくいだろうし、むしろ景気が低迷期にあるほど有効需要の創出手段として用いられる場合も少なくない。もしそうなら、GDPから非化石エネルギーへの負の作用が存在していても不思議ではない。あるいは逆に、国策による費用の投入は市場メカニズムの効率性を著しく歪め、政府の失敗 (government failure) をもたらし、経済成長を阻害したのかもしれない。もしそうなら、非化石エネルギーからGDPへの負の作用についても説明がつく。

あるいはまた、我々は、化石燃料と非化石エネルギーとの直接的関係にもっと注意を向ける必要があるのかもしれない。非化石エネルギーの開発は、化石燃料の安定的供給に対する不確実性から正当化されている。しかし、非化石エネルギーが化石燃料を代替するのであれば、共和分関係において、非化石エネルギーと化石燃料の係数の符号が異なるはずがない。それでもそのような結果が得られたのは、非化石エネルギーが現実には化石燃料に依存して成り立っていることが反映されたからかもしれない。原子力エネルギーが生み出すのは主に電力であり、輸送機器の動力源としての利用は限定されている。輸送に使われるエネルギーのほとんどは化石燃料に依存しており、原子力発電施設の建設や維持、ウラン鉱石の採掘および運搬を、化石燃料と切り離して行うことは不可能である。

以上の説明は仮説に過ぎないが、もしこれらの説明が正しいとしても次のような反論がなされるかもしれない。すなわち、本研究の結果は、これまでの日本の経験に基づくものであって、今後の脱化石燃料依存の可能性を否定するものではない、と。確かに、再生可能エネルギーである太陽光や風力が一次エネルギーに占める割合は今のところごく僅かであるので、今後の開発に期待する楽観的立場もあり得よう。しかし、一次エネルギーのシェアがごく僅かであることにはそれなりの理由があり、それはすなわち、従来型のエネルギー資源と比べて利用のコストが高いからである。では、なぜコストが高いのだろうか。そもそも太陽光や風力は、「無料」のエネルギーであるはずである。だが、我々が欲しいのは、空間的に薄く散らばった不安定な太陽放射線や風力そのものではなく、面積密度が高く安定した動力および電力である。両者のギャップを埋めるのにためには様々な資源の投

入が必要であり、太陽光や風力によって得られた電力が割高であるのは、そのギャップを埋めるためにそれだけ多くの資源を必要としている証拠である。したがって、太陽光発電や風力発電の普及にあたっては、市場メカニズムにおける民間企業の意志決定に委ねては不十分であり、事実、政府による積極的な介入が行われている。また、再生可能エネルギーの開発を国策によって進めていくことは、関連産業の裾野を広げ、雇用創出および経済成長を導くとの期待から正当化されている。その点において、再生可能エネルギーに対する取り組みは、これまでの非化石エネルギーの開発経緯と変わらない。再生可能エネルギーに対する過度な助成は、再生可能エネルギーの利用における社会的費用の大きさを覆い隠してしまう危険性がある (Trainer, 2007)。そのような政府の失敗がもたらす社会的損失は、再生可能エネルギーが一次エネルギーに占めるシェアが微々たるものであるうちは大して問題とはならないだろうが、額面上のエネルギー供給能力が増大するにつれて顕在化するだろう。

再生可能エネルギーと化石燃料との違いについても、我々は注意が必要である。太陽放射線のフローエネルギーは、地球全体としてみれば潜在量は莫大だが、空間的に薄く散らばっており、しかもその強度は不安定である。太陽光も風も、人間の都合に合わせて降り注いでくれないし、吹いてはくれない。この点において、人間にとって都合がよいペースで消費できる化石燃料とは本質的に異なる資源なのである (Soddy, 1912; Georgescu-Roegen, 1971)。

再生可能エネルギーから安定したエネルギーを得るためには、再生可能エネルギーの不安定さを何らかの方法によって解消しなくてはならない。その方法は二つある。ひとつは、融通の利く化石燃料によってバックアップする方法である。事実、風力発電の不安定な出力を火力発電によってバックアップすることは一般的に行われている。いうまでもなくこれは化石燃料に依存して成り立っている。もちろん、風力発電と火力発電の組み合わせによって、多少なりとも化石燃料の消費を節減できる可能性はあるだろう。だが、風力発電の導入が進むにつれてキャパシティ・クレジットが低下していくという現状や (E.ON Netz, 2005)、バックアップ用の火力発電は常にアイドル状態にしておく必要があるためその燃料が必要であること、そして、不安定な風力発電に合わせた変動の大きい稼働はタービンの寿命を短くすること、などを考慮すると (Trainer, 2007)、風力発電の導入が進めば化石燃料の消費が減っていくと単純に決めつけることはできない。

もうひとつの方法は、太陽放射線のエネルギーフローを何らかの方法で貯めておくことである。しかし、発電した電力は、電力のまま大量に長時間貯めておくことは不可能なので、一旦は別のエネルギー形態に転換する必要がある。その方法としては、ダム、圧縮空気、バナジウム電池、フライホイール、水素貯蔵などが挙げられるが、これらに共通しているのは、化石燃料と比べてエネルギーキャリアのエネルギー密度が著しく小さい、ということである (Trainer, 2007)。更に、電力を一旦別のエネルギー形態に変換して、再び電力に戻すときの全体としての損失を考慮すれば、これらのストアリング技術を用いて火力発電と同等の機能を実現する場合、火力発電施設とは比較にならないほどの大規模な発電システムの構築が必要となる。忘れてはならないのは、大規模な発電システムを構築・維持するためには莫大な資材が生産・運搬されなければならない、それは結局、化石燃料なしでは出来ないという現実である (Ferguson, 2008)。もちろん、ストレージ技術はまだ発展途上にあり (ダム以外) in-out 効率の今後の向上もある程度は望めるだろうが、エネルギーキャリアのエネルギー密度は、キャリアに用いられる物質の特性によって決まり、物質の特性自体は技術がいくら向上しても変わるわけではない。1 トンの水が 100m の高さにあるときの位置エネルギーは、未来永劫不変である。したがって、やはり、現在開発中のストレージ技術が今後急速に脱化石燃料時代をもたらすとは考えにくい。

太陽放射線エネルギーを貯めておく別の方法は、バイオマスの保存である。人類がバイオマスの保存技術を手に入れたのは新しいことではなく、石器時代には一部の狩猟採集

民族が既に行っており、その技術こそが、定住や不平等といういわゆる「高度」な社会の形成の礎をなした (Testart, 1982)。これだけの長い歴史があるのだから、バイオマスがもし化石燃料の代わりになるのなら、我々はとうの昔に今のような経済システムを築けただろう。もっとも、農業技術はこれまでも発展してきたし、今後もいくらかの発展はあるかもしれない。しかしながら、次の理由で、バイオマスが今後飛躍的に化石燃料を代替するエネルギー源になるとは考えにくい。第一に、近代農業が極めてエネルギー集約的であり、ERoEI (Energy Return on Energy Invested) が低いことが挙げられる。例えば、代替ガソリンとして期待されたバイオエタノールの ERoEI は複数の研究者によって試算されているが、大きくても 2 を超えない (Hammerschlag, 2006)。この値は、化石燃料と比べるとオーダーが一桁小さい。第二に、食料生産との競合が挙げられる。食料以外の農産物生産に耕作地を振り向ければ、それだけ食料価格の高騰に拍車がかかる。第三に、近代農業システム自体が、肥料生産から耕耘、資材および作物の運送に至るまで、化石燃料に大きく依存して成り立っていることである。しばしば賞賛される「緑の革命」とは、結局のところ、伝統的農業から化石燃料依存型農業への転換に過ぎない。

以上のことを踏まえると、現段階で一次エネルギーに占めるシェアが小さい再生可能エネルギーが、今後 2~30 年のあいだに脱化石燃料時代をもたらすとは考えにくい。だとすれば、とりわけ先進国は、再生可能エネルギーの開発を推進して成長型経済路線を堅持しようとするのではなく、経済規模の定常あるいは縮小に向けた取り組みを行う方が賢明であると思われる。

5. 結論

本研究は、化石燃料消費量と GDP の因果関係について、日本における 1970 年から 2008 年までの時系列データを用いて分析した。その際、化石燃料の機能をある程度代替すると思われる変数として非化石エネルギーと労働を考え、多変数による時系列分析を行った。単位根検定の結果、すべての変数が $I(1)$ であり、共和分分析の結果、変数間に長期的関係が存在することがわかった。VECM による Granger 因果分析の結果、化石燃料から GDP に対する長期の因果関係が見出された。一方、GDP から化石燃料に対する因果関係は見出されなかった。更に、非化石エネルギーと GDP の因果関係についても検討した。Granger 因果分析の結果、非化石エネルギーから GDP に対して短期および長期の因果関係が見出され、GDP から非化石エネルギーに対しては長期の因果関係が見出された。また、インパルス応答関数の結果、非化石エネルギーの増加が GDP の増加をもたらすと結論づけることはできなかった。すなわち、化石燃料の消費を削減しつつ、非化石エネルギーの開発促進によって経済成長を維持できるという考えに対しては、否定的な結論が導かれた。

References

- Abosedra, S. and Baghestani, H. (1989). New evidence on the causal relationship between U.S. energy consumption and gross national product. *Journal of Energy and Development*, 14(2):285–292.
- Ayres, R. U. and Ayres, L. W. (1999). *Accounting for Resources*, 2. Edward Elgar.
- Chiou-Wei, S. Z., Chen, C., and Zhu, Z. (2008). Economic growth and energy consumption - evidence from linear and nonlinear Granger causality. *Energy Economics*, 30:3063–3076.
- Daly, H. E. (1996). *Beyond Growth*. Beacon Press.

- Dickey, D. A. and Fuller, W. A. (1979). Distribution of the estimation for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*, 74(386):427–431.
- Engle, R. F. and Granger, C. W. J. (1987). Cointegration and error correction: representation, estimation and testing. *Econometrica*, 55:251–276.
- E.ON Netz (2005). *Wind Report 2005*.
- Erol, U. and Yu, E. S. H. (1988). On the causal relationship between energy and income for industrialized countries. *Journal of Energy and Development*, 13:113–122.
- Ferguson, A. R. B. (2008). Wind power: Benefits and limitations. In Pimentel, D., editor, *Bio-fuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems*, chapter 6, pages 133–151. Springer, The Netherlands.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Ghali, K. H. and El-Sakka, M. I. T. (2004). Energy use and output growth in Canada: a multivariate cointegration analysis. *Energy Economics*, 26:225–238.
- Granger, C. W. J. (1988). Some recent developments in a concept of causality. *Journal of Econometrics*, 39:199–211.
- Hammerschlag, R. (2006). Ethanol's energy return on investment: A survey of the literature 1990-present. *Environmental Science and Technology*, 40(6):1744–1750.
- Japanese Atomic Energy Commission (2005). *Framework for Nuclear Energy Policy*.
- Johansen, S. and Juselius, K. (1990). Maximum likelihood estimation and inference on cointegration -with applications to the demand for money. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 52(2):169–210.
- Kraft, J. and Kraft, A. (1978). On the relationship between energy and gnp. *Journal of Energy Development*, 3:401–403.
- Lee, C. (2006). The causality relationship between energy consumption and GDP in G-11 countries revisited. *Energy Policy*, 34:1086–1093.
- Lee, C. and Chang, C. (2005). Structural breaks, energy consumption, and economic growth revisited: Evidence from Taiwan. *Energy Economics*, 27:857–872.
- Mozumder, P. and Marathe, A. (2007). Causality relationship between electricity consumption and GDP in Bangladesh. *Energy Policy*, 35:395–402.
- Phillips, P. and Perron, P. (1988). Testing for unit root in time series regression. *Biometrika*, 75:335–346.
- Soddy, F. (1912). *Matter and Energy*. Henny Holt and Company.
- Soddy, F. (1926). *Wealth, Virtual Wealth, and Debt*. George Allen and Unwin.

- Soytas, U. and Sari, R. (2003). Energy consumption and GDP: causality relationship in G-7 countries and emerging markets. *Energy Economics*, 25:33–37.
- Soytas, U. and Sari, R. (2007). The relationship between energy and production: Evidence from Turkish manufacturing industry. *Energy Economics*, 29:1151–1165.
- Stern, D. I. (1993). Energy and economic growth in the USA. *Energy Economics*, 15:137–150.
- Stern, D. I. (2000). A multivariate cointegration analysis of the role of energy in the US macroeconomy. *Energy Economics*, 22:267–283.
- Testart, A. (1982). The significance of food strage among hunter-gatherers: Residence patterns, population densities, and social inequalities. *Current Anthropology*, 23:523–537.
- Trainer, T. (2007). *Renewable Energy Cannot Sustain a Consumer Society*. Springer, The Netherlands.
- Yu, E. S. H. and Choi, J. Y. (1985). The causal relationship between energy and GNP: an international comparison. *Journal of Energy and Development*, 10:249–272.
- Yu, E. S. H. and Hwang, B. K. (1984). The relationship between energy consumption and GNP: further results. *Energy Economics*, 6:186–190.
- Yuan, J., Kang, J., Zhao, C., and Hu, Z. (2008). Energy consumption and economic growth: Evidence from China at both aggregated and disaggregated levels. *Energy Economics*, 30:3077–3094.
- Zachariadis, T. (2007). Exploring the relationship between energy use and economic growth with bivariate models: New evidence from G-7 countries. *Energy Economics*, 29:1233–1253.
- Zamani, M. (2007). Energy consumption and economic activities in Iran. *Energy Economics*, 29:1135–1140.
- Zou, G. and Chau, K. W. (2006). Short- and long-run effects between oil consumption and economic growth in China. *Energy Policy*, 34:3644–3655.

Causal relationship between fossil fuel consumption and economic growth in Japan: a multivariate approach^{*}

Hazuki Ishida[†]

Abstract: Fossil fuels (oil, coal, gas) are low-entropy natural resources which seem to be indispensable for our economic prosperity. This paper investigates the relationship between fossil fuel consumption and economic growth in Japan, using a multivariate model of fossil fuels, non-fossil energy, labor and GDP. Using the Johansen cointegration technique, the empirical results indicate that there is a long-run relationship among the variables. Then using vector error correction model, the study reveals unidirectional causality running from fossil fuels to GDP. It implies that decline in fossil fuel consumption may hamper economic growth. On the other hand, non-fossil energy used does not appear to have positive effects on economic growth.

JEL Classification: Q32, Q43, Q57

Key Words: Fossil fuels, Economic growth, Cointegration, Granger causality

^{*} I am grateful to Tsunehiro Otsuki for helpful comments and suggestions.

[†] Faculty of Symbiotic Systems Science, Fukushima University, I, Kanayagawa, Fukushima, 960 1296, Japan. Tel&Fax: +81 (0)24 548 8439, e-mail: e059@ipc.fukushima-u.ac.jp