

経済成長信仰はどこが間違っているか

-再生可能エネルギーは救世主にならない-

石田 葉月*

2010年8月14日

1 はじめに

GDP が豊かさの水準を表すのに適切な指標であるか否かの議論は脇に置いておくとしても、GDP の成長は、資源および環境の制約からいって、いつまでも続くとは思えない。縮小社会への第一歩は、経済成長はいつまでも続かないということ、多くの人々が認識することである。だが、このことを示すのは、それほど簡単なことではない。そして、その難しさこそが、有限な地球上で経済成長をいつまでも続けることが可能であるかのような幻想を、少なからぬ人々に抱かせてきたともいえる。

経済成長信仰者（以下、単に「成長信者」）も、天然資源の消費水準や廃棄物の排出水準（これらを総称して「環境負荷」）をこれ以上増やせないことは、十分に理解しているはずである。にもかかわらず成長信者であり続けられるのは、結局のところ、環境負荷を増やさなくとも GDP を高めることができるという「デカップリング信仰」に取り憑かれているからに他ならない。

デカップリングとは、要は、GDP と環境負荷の比（すなわち「環境効率」）を高めることであるが、環境負荷とは、本来、多次元の指標である。すなわちそれは、二酸化炭素排出量かもしれないし、枯渇性資源の消費量かもしれないし、あるいはエコロジカル・フットプリントかもしれない。当然のことながら、成長信者は、考えられるすべての環境負荷について、環境効率が継続的に向上し得ることを示さなくてはならない。なぜなら、特定の環境負荷に関してデカップリングが実現しないのならば、たとえそれ以外の環境負荷においてデカップリングできて、その環境負荷がボトルネックとなり、経済成長を阻害するからである。

逆にいえば、「反」成長信者の強みは、特定の環境負荷についてデカップリングが実現しないことを示せばよい、というところにある。本稿では、エネルギー消費量に注目し、デカップリングの非現実性について考えてみたい。

*福島大学共生システム理工学類

〒960-1296 福島市金谷川1

Tel/Fax:024-548-8439

E-mail:e059@ipc.fukushima-u.ac.jp

2 エネルギーの質

厳密には、エネルギーの消費という言葉は正しくない。というのも、エネルギー保存則によれば、消費したからといってエネルギーそのものが失われるわけではないからである。エネルギーの消費過程において文字通り「消費」されるのは、エネルギーではなく、エクセルギーである。つまり、我々が消費するのはエネルギーそのものではなく、エネルギーの「質」なのである。そして、エネルギーと経済活動に関する既存研究においてしばしば見られる致命的な誤りは、エネルギーの質の違いがほとんど考慮されていない、という点にある。

物理的には、動力および電力（すなわち、仕事）は100%がエクセルギー（すなわちエントロピーがゼロ）なので、エネルギーとしては最も高品質である。熱力学第二法則により、仕事は、早晩、熱となって環境中に散逸していく。一方で、熱は、そのすべてを仕事に転換することができない。一定量の熱から理論的にどれだけの仕事を得られるかは、その熱を受け入れるときの絶対温度と廃熱時の絶対温度との比によって決まり、廃熱時の温度を環境温度とすれば、高温で受け入れる熱ほどエクセルギーが大きく、質が高い。廃熱時の温度と同じ温度で受け入れる熱はエクセルギーがゼロであり、最も質が低い。エネルギー資源を、ジュールやカロリー、BTUといった熱量換算によって評価することは一般的だが、この方法ではエネルギーの質の違いが反映されない。

エネルギーの質を定量化する方法として直ちに考えつくのは、エクセルギーの大きさに注目する、という方法である。エクセルギーは物理的に厳密に定義されるので、その計算手続きに曖昧さがなく、という利点がある（実際の計算が簡単かどうかは別にしても）。しかし一方で、エクセルギーの大きさは、エネルギーの潜在的な仕事能力のみを捉えた指標であるため、現実の有用性と必ずしも合致していない、という問題点がある。あるエネルギー資源のエクセルギーがすべて有用な仕事に転換できるかどうかは、その資源の物理化学的特性のみならず、それを利用するための技術や制度的条件にも依存する。たとえ大きなエクセルギーを含有しているエネルギー資源があっても、そこからエクセルギーを取り出す過程で大きなエントロピーの発生があれば、利用できる正味のエクセルギーは小さくなってしまふ。

たとえば、風力の運動エネルギーはエントロピーを持たないが、だからといって、等しいジュールの風力と家庭用コンセントから得られる電力が、エネルギーとして同等の質を持つと考えるのは誤りである。風力はきわめて不安定であり、人間が欲しい時に欲しいだけ風が吹くとは限らず、そのエクセルギーは、そのままでは人間にとって有用なものではない。したがって、風力のエクセルギーは大半が捨てられるか、あるいは、それを無理矢理に利用しようとするれば、他の低エントロピー資源を大量に投入しなくてはならないのである。そうでなければ、風力によって発電した電力が割高になる理由はどこにあるのか？ 風力の問題については、後に詳しく取り上げよう。

いずれにせよ、エネルギーの質は、その物理的性質のみならず、人間にとって有用かどうかという経済的文脈が盛り込まれている必要があり、したがって、一切の主観や恣意性を排した評価は不可能である。さらに、人間にとっての有用性は固定的な概念ではなく、その時に利用可能な資源や技術の状況にも依存するので、流動的である。

ある程度の不完全さを認めながらも、計算手続きが比較的容易であり、なおかつ恣意性が小さいと思われるのは、価格に注目する方法である。価格情報には、その対象に対する総合的な有用性が集約されている。実際、たとえば石炭と石油を比較すると、単位熱量あたりの

価格は同じではなく、後者の方が高い。もしも、エネルギーの質が熱量だけで決まるのであれば、両者の価格は等しくなるはずである。

価格情報には、しばしば、外部性が反映されていなかったり（市場の失敗）、過剰な税や補助金が掛けられていたり（政府の失敗）するため、バイアスがかかっている。ただし、そうしたバイアスを是正する作業それ自体にも恣意性が入り込む余地が大きいいため、とりあえずのベンチマークとして価格情報を用いるのは妥当であろう。

3 GDPのエネルギー効率

経済はどれだけのエネルギーを投入して成り立っているのだろうか？その効率性を測る最も簡単な方法は、GDPを一次エネルギーの投入量で割ることである。以下、それを単に「エネルギー効率」と呼ぶことにしよう。

通常、エネルギー効率を算出する際、各種一次エネルギーの投入量は熱量換算によって通分されている。そして、熱量換算でみたエネルギー効率は、多くの先進国で長期的に向上していることが知られている。この現象は、成長信者にとっては大変な強みであるようにみえる。だが、既に述べたように、熱量換算に基づく計算方法は、エネルギーの質の違いが考慮されないため、適切ではない。では、価格情報に基づいて一次エネルギーの投入量を計算し直すと、デカップリングは本当に起きているのだろうか？

この検討は、既に行われている。それによると、アメリカの第二次大戦後からの長期トレンドでは、「修正済み」のエネルギー効率は大きく向上していないことが示されている (Stern, 2000)。つまり、GDPとエネルギーは密接に関係しており、大雑把に言えば、GDPを2倍にするためには、良質なエネルギーの投入量を2倍にしなければならないと結論づけて、ほぼ間違いない。そしてこのことは、アメリカに限らず、日本を含む他の先進国についても同様であることが示唆されている (Cleveland et al., 2000)。

4 風力は救世主？

「だったら、良質な一次エネルギー源の開発を進めていけばよいではないか」

それでもまだ成長信者は、こう言って食い下がるかもしれない。確かに、我々には、良質な一次エネルギー源を開拓してきたという歴史がある。たとえば、石炭時代から石油時代への変革とは、より質の高いエネルギーを利用する社会への変革であった。とはいえ、我々は依然として、化石燃料時代に生きていることには変わらない。世界全体の一次エネルギー投入量のうち、80%は化石燃料によるものである（熱量換算ではあるが）。枯渇性資源に依存した社会が、永遠に経済成長を続けられるはずがない。それなら、と成長信者は夢を膨らませる。質が高く、事実上無尽蔵のエネルギーを利用すればよいのではないか？言うまでもなく、成長信者の期待は、いわゆる「再生可能エネルギー」に向けられる。成長信者は言う。太陽から地球上に降り注ぐエネルギーは莫大であり、事実上無制限である、と。

ここでは、再生可能エネルギーのなかでも特に注目されている風力発電に話を絞ろう¹。地球上の風力エネルギーをすべて利用すれば、世界が一年間に消費する化石燃料の10倍を超え

¹細かい点は違えども、ここでの議論は太陽光発電についても当てはまる。

る量に相当すると言われている (Smil, 2008)。一方、実際に利用されている風力エネルギーは、世界全体の一次エネルギー投入量のうち1%にも満たず、数字だけみれば、まだまだ開発の余地があるように見える。しかも、風力発電によって得られるのは、エントロピーがゼロという、エネルギーの「優等生」である電力である。

5 風力エネルギーの質

しかし、風力エネルギーの評価に関しては、注意すべき点がある。たとえば、IEA(国際エネルギー機関)は、風力発電によって得られた電力を、そのままそっくり一次エネルギーとしてカウントしている。これではまるで、電力がそのまま自然から与えられているかのような誤解をもたらす。人間が利用する電力は、天然資源の「加工品」であり、「加工品」には必ず「原料」がある。風力発電においては、その原料とはもちろん、風力エネルギーである。仮に、風力発電によって投入される原料が風力エネルギー「のみ」で、そのほとんどを電力に変換できるのなら、上記の誤解にも、それほど問題は生じない。

確かに、物理的には、風力エネルギーのほとんどを電力に変換することは禁じられていない。というのも、風力の運動エネルギーはエントロピーがゼロであり、出力される電力のエントロピーもゼロだからである。風力発電システムが定常開放系ならば(これはシステムが持続するための必要条件である)、システムの質量、エネルギー、そしてエントロピー水準は、それぞれ常に一定でなければならない。ただしエントロピーに関しては、システム内部での発生があるため、必然的に、入力するエントロピーよりも、出力するエントロピーの方が大きくなる。したがって、入力するエントロピーがゼロ(究極の低エントロピー!)なら、そして、システム内部で発生するエントロピーを極力抑えることができれば、入力した風力エネルギーのほとんどを電力に変換することは可能である。エントロピーの発生は、可逆システムでない限り逃れることはできないが、一般に、作りが単純なシステムほど、内部で発生するエントロピーは小さいという傾向がある。風車の原理は、素人目にも単純である。風力発電は、確かに、成長信者の熱い視線を浴びるだけの魅力を持っている。

だが、既に述べたように、低エントロピー資源が、どれも人間にとって同じように価値が高いと決めつけるのは誤りである。そのことは、槌田敦(1992)が示したビール瓶の例をみれば理解しやすい。いま、同じ本数のビール瓶の空き瓶が、それぞれA、Bの状態にあるとする。状態Aでは、ビール瓶がちゃんとケースに収まっている。状態Bでは、瓶が割れ、その欠片が散乱している。どちらの状態も、ガラスという物性を維持しているので、エントロピーの水準は変わらない。しかし、ビール瓶を再生する際の有用性は、状態Aの方が大きい。状態Aは、ビール瓶を洗うだけで済む。しかし、Bの状態からビール瓶を再生するには、瓶の欠片を集め、溶かして型に入れる必要があり、その過程で多くの低エントロピー資源を必要とするのである。

風力も、同じ理由で、エネルギー資源としての質は低い。重要なことは、ただ単に電力を得ることではなく、人間にとって有用な状態の電力を得ることである。人間にとって有用な電力とは、高密度で安定した電力である。ところが、風力から有用な電力を得るためには、その過程で多くの低エントロピー資源を必要とする。その理由は二つある。ひとつは、風力エネルギーの面積密度に関係している。1平方メートルあたりの風力エネルギーは数W程

度であり、現代の都市型経済が消費するエネルギー密度の100倍から1,000倍の開きがある。そもそも、太陽から降り注ぐエネルギーの面積密度が小さいのだから、これは仕方がない。そして、これが意味することは、もしも風力エネルギーによって都市型経済のエネルギー需要を賄おうとするなら、最低でもその都市面積の100倍から1,000倍の面積を確保しなければならないのと同時に（実際にはそれではまったく不十分だろうが）、その広大な面積に散らばる風力エネルギーを、少なくとも100倍から1,000倍に「濃縮」しなければならない、ということである (Smil, 2008)²。当然、散乱の度合いが大きいほど、濃縮の過程で失われるエクセルギーも大きい。それに抗しようとするれば、必然的に、低エントロピー資源の更なる投入を要請する。そして、その低エントロピー資源とは、結局のところ化石燃料に頼る他ないのである。その理由は、次に述べるように、風力の持つもうひとつの問題と強く関連している。つまり、風というものは、人間の都合に合わせて吹いてくれない、ということである。

6 化石燃料の優位性

化石燃料の最大の利点は、人間の好きなペースで採掘できる、ということである（もちろん、使い切れればそれまでだが）。この点において、エネルギー資源としての風力と化石燃料は、本質的に異なっている。そして Georgescu-Roegen (1971) は、この違いが意味することの重要性に気づいていた。風力は化石燃料を代替するエネルギー源だと位置づける楽観的な考え方は、すべて、この違いを無視しているところからきている。本質的に異なる資源どうしは、単純な代替関係にあるはずがない。例えるなら、化石燃料は口座にある貯金であり、風力は毎月の不安定な給料のようなものである。ある月の給料が生活費に足りない場合、それを補うには、貯金からいくらか引き出さなくてはならない。

事実、風力発電の不安定な出力は、火力発電のバックアップを受けて、全体としての出力が安定化されている。それが可能なのは、火力発電がきわめて融通が利く発電方法だからである。火力発電の出力をコントロールするには、化石燃料の投入を、必要に応じて増やしたり減らしたりすればよい。融通の利かない風力発電は、融通が利く火力発電の助けを借りて、ようやく有用な電力を供給できる。すなわち、化石燃料と風力は代替関係ではなく、化石燃料が風力を一方向的に補完する関係なのである。したがって、風力発電システムを建造したら、その分だけ火力発電所を減らせると考えるのは誤りである (E.On Netz, 2005)。

それでも、と成長信者は反論するかもしれない。すなわち、火力発電所の建設を止めることはできなくても、風力を多少なりとも利用した方が、化石燃料を節約できるのではないかと。だが、仮にそうだとすると、「化石燃料の節約」と「化石燃料からの脱却」は意味がまったく違う。一本の水筒を片手に砂漠を横断するとき、水の消費を極力抑えることはできても、途中で水が無くなってしまえば死ぬことには変わりない。風力発電が火力発電のバックアップを必要とする限り、化石燃料に依存していることには変わりないのである。

それに加えて、風力発電が本当に化石燃料の消費を削減できるか否かは、今のところ明ら

²もちろん、風力発電の過程で発生するエントロピーの発生にともなうエネルギー損失を考慮すれば、実際に必要とされる濃縮度はそれ以上である。一方、エネルギーを濃縮しないで済ますのであれば、伝統的な風車が活躍した前化石燃料時代がそうであったように、現在のエネルギー消費密度を、風力のエネルギー密度に合わせて大幅に希薄化しなければならない。そのような社会が、現在の大規模都市型経済とはまったく別の代物であることは言うまでもない。

かではない。というのも、風力発電のバックアップとしての火力発電においては、不測の変動に備えてタービンを常にアイドリング状態にしておかなくてはならず、その間も燃料を消費する。また、変動の大きな運転は火力発電の効率を低下させるうえに、タービンの寿命を短くする原因にもなる。これらのことを踏まえると、風力発電との併用は、火力発電単体の場合と比べて、単位発電量あたりの化石燃料消費量をむしろ増やす可能性がある (Trainer, 2007)。少なくとも現時点では、風力発電の推進が劇的に化石燃料の消費を減らすと決めつけるのは早計である。この問題が顕在化していないのは、現在のところ、一次エネルギーに占める風力発電の割合が極めて小さい (1%にも満たない) からである³。

7 電力を貯める？

では、人為的に「貯金」を増やすことはできないのだろうか。風は、強い日もあれば弱い日もある。風が強い時に発電した電力を、そのままそっくり貯めておけば良いのではないかと

不運なことに、電力はその性質上、電力として長時間大量に貯めておくことができない。電力エネルギーを貯めるためには、一旦別の形態のエネルギーに変換して貯める他なく、今のところ、ストレージの方法として挙げられるのは、ダム、圧縮空気、バナジウム電池、フライホイール、水素貯蔵である。しかし、例えば、ストレージ用のダムを確保するための条件は、我々にとって馴染みのあるダムよりも厳しい。通常のダムであれば高いところに水を貯めておく空間があればよいが、ストレージ用のダムは、高所にはもちろんのこと、低所にも「水溜め」が必要なのである。水力発電は、既に、一次エネルギー源として一定の地位にあり、世界全体としては、2030年においても現在の寄与が高まることはないと予測されている (IEA, 2008)。通常のダムでさえ年々確保が困難になってきているのに、ストレージに適した好条件のダムが今後どれだけ建設できるというのか。

それ以外のストレージ方法に至っては、大都市における数日分の消費電力に相当するエネルギーを蓄える、という意味での実用化の目処は立っていない。もちろん、ストレージの技術はまだまだ発展途上であり、今後改善される余地はあるだろう。しかしながら、どのストレージ方法においても共通する難点は、単位体積あたりのエネルギー密度が小さい、ということである。この問題は、エネルギーを蓄える物質の物理的性質からくることであり、物性それ自体は、いくら技術が進歩しても変わるわけではない。たとえば、水素が軽くてリークしやすいという性質は、水素そのものの物性であり、今後いくら技術が進歩しても不変なのである。体積密度が小さい物質を圧縮すればその過程で低エントロピー資源を必要とするし、圧縮しなければ広大な施設を要するので、その建設・維持に、やはり低エントロピー資源を必要とする。

³局所的にみれば、例えばデンマークのように、風力発電が電力消費量の20%にも達している国も存在する。しかし、この情報には注意が必要である。実際には、デンマークは、消費電力の20%を風力で賄っているわけではない。風力は国内電力需要のせいぜい5%程度を占めるに過ぎず、それ以外の電力はノルウェーやスウェーデンに輸出されている。ノルウェーやスウェーデンは、デンマークと比べると大国であり、小国デンマークから送られてくる不安定な電力を「吸収」する余力(ダム)を持っている。風力発電による不安定な電力は、デンマーク国内では消費しきれず、周辺の大国に買い叩かれているのが現状なのである。デンマークが今後新設する風力発電所で発電される電力は、ほとんどすべてが輸出にまわされると見られており、デンマーク国民が多大な費用を負担して発電した電力は、より一層、輸出先に買い叩かれると懸念されている (CEPOS, 2009)。

また、電力を他のエネルギー形態に変えて、それを再び電力に変換するときのエントロピー発生も無視できない。更には、エネルギーを貯めているあいだにも、熱力学第二法則により、必ず劣化が進行してエクセルギーが失われる。これらの損失を踏まえると、我々は更に規模の大きなストレージシステムを確保しなければならないことになる。

忘れてはならないのは、ストレージシステムに限らず、現代の「高度な」社会を支える基盤システム（資源採掘、輸送、建設、製造、廃棄など）の構築・維持は、すべて、化石燃料時代に入ってから可能になったということである。化石燃料の優位性として、体積あたりのエネルギー密度が大きいことや、石油や天然ガスのように流動性が大きく輸送が容易であること、自噴するので採掘コストが小さいこと、などいろいろ挙げられるが、なんといても際立つのは、既に述べたように、それがストック型資源であるということである。その消費速度を人間が自由に決められるということがどれほど重要なことであるかは、いくら強調してもし過ぎることはない。資材や製品の納入が一ヶ月後になるのか、あるいは半年後になるのか分からないのが当たり前だった時代において、現代のような大規模経済システムが成立するかを考えてみるとよい。大量の資材や製品を人間の都合に合わせて滞りなく流すためには、人間の都合に合わせてインプットできる資源が安価で大量に存在していなくてはならない。いったい、化石燃料以外で、どの資源がそれを可能にするというのか？バイオマスだろうか？確かにバイオマスは、ある程度は貯めておくことができるので、化石燃料同様、ストック的な側面を持つ。だが、バイオマスだけで現在の経済規模が成り立つというのであれば、化石燃料時代以前から実現できたはずである。

化石燃料に依存しているという意味で、風力発電は「自己完結」していない。そのことは、太陽光発電も、原子力発電も、そして近代農業によるバイオマス生産も同様である。クリーンで環境に優しいというイメージばかりが先行しているこれらの技術は、「天使の顔をした悪魔」と呼べるかもしれない。一見すると健全なそのイメージは、成長信仰からの脱却を遅らせるのに多大な貢献をしているのである。

8 化石燃料の将来

それでは、化石燃料の将来は明るいのだろうか？結論からいえば、その答えはノーである。化石燃料は当分、枯渇しない。だが、化石燃料が「安価」であることが当たり前である時代は、そう遠くない将来に終焉すると思われる。

このことを考えるために、まず、ERoEI (Energy Return on Energy Invested) という指標を導入しよう。エネルギーの希少性を考えるとき、エネルギーを獲得するためにはいくらかのエネルギーを投入しなくてはならないという事実は極めて重要である。ERoEIとは、一単位のエネルギーを投入して何単位のエネルギーを獲得できるかを表す指標である。ERoEIが1を下回る場合、得られるエネルギーよりも投入するエネルギーの方が多いので、正味のエネルギー産出はマイナスとなる。このような一次エネルギー源は、もはや一次エネルギー源と呼ぶことはできない。

極めて大きなERoEIのエネルギー資源を主要エネルギー源とする社会は、利用可能なエネルギーの大部分を財やサービスの生産・消費に充てることができる。一方、ERoEIが小さいエネルギー資源しか利用できない場合、利用可能なエネルギーのうち多くの部分が、次期

のエネルギー獲得のために取られてしまう (Cleveland et al., 1984)。つまり、ERoEI が小さなエネルギー資源は、たとえ物理的に大量に存在していても、実質的には希少であり、安価なエネルギー資源にはならないのである。

ERoEI が経済に与える影響については、これまで十分に議論されてこなかった。その理由はおそらく、現在の主要エネルギー資源である化石燃料の ERoEI が十分に大きく、その影響を深刻に論じる必要性がなかったためであると思われる⁴。

化石燃料の採掘が進むにつれて ERoEI が減少していくのは、自然な現象である。なぜなら、採掘が容易な化石燃料から先に採掘されるに従い、あとに残るのは採掘の限界費用が高い化石燃料ばかりになっていくからである。実際に、アメリカ国内で産出される原油の ERoEI は、1930 年代には 100 を超えていたが、現在では 20 程度にまで低下している (Hall et al., 2003; Cleveland, 2005)。油田の開発において他の産油国を先行してきたアメリカの事例は、何年かの遅れはあれども、世界全体の原油産出にも当てはまるだろう。

主要なエネルギー資源における ERoEI の低下が経済に及ぼす影響についての検討は極めて少ないが、皆無ではない。Hall et al. (2008) は、ERoEI の低下がアメリカ経済にどのような影響を及ぼすのかをシミュレーションしている。その結果、ERoEI の低下とともに、エネルギー獲得のために多くの投資を必要とするようになり、財やサービスの消費水準が著しく減少することが示されている。化石燃料の低 ERoEI 化が、経済成長の大きな阻害要因となるのは、間違いないだろう。

それでも、次々に良質な油田が発見されていけば、全体としての ERoEI の低下を食い止めることができるかもしれない。しかし、油田の開発は、通常、採掘の限界費用が小さい（すなわち質のよい）油田から先に行われるため、新たな油田の開発は徐々に困難になっていく。油田における、広い意味での質の低下（原油そのものの質の低下、油田へのアクセス難化、油田の規模縮小など）は、原油の回収のために多くのエネルギーを投入しなくてはならないことを意味し、結果として ERoEI が低下することになる。

油田の開発が黎明期にあり、目の前には手つかずの良質な油田がたくさん残されている状況であれば、将来 ERoEI が上昇に転じるとの期待を持てるかもしれない。だが、油田開発の歴史を先行してきたアメリカの原油生産量は、1970 年代に既にピークを迎えている⁵。また、Worldwatch Institute (2005) によれば、大口の産油国 48 カ国のうち 33 カ国で、原油生産量が減少している。

世界全体の原油生産量は、まだピークを迎えていないのかもしれない。だが、油田の発見については既にピークを過ぎており、1980 年代以降、年間発見量が年間産出量を下回っている (EWG, 2008)。原油の年間産出量のピークは、油田発見のピークに遅れて訪れるだろう。それが具体的にいつであるかについては議論の余地があるが、それでも概ね 2010 年程度、長くてもせいぜい 2020 年代であるとの見方が多い (Almeida and Silva, 2009)。このような状況を踏まえると、今後、原油の ERoEI が継続的な上昇に転じる可能性は低いものと思われる。

こうした事情は、天然ガスについても同様である。ガス田は、当然、アクセスが容易で大規模なガス田から優先的に開発される。したがって、それらが枯渇してくれば、小規模なガス田や海洋のガス田にも開発の手を伸ばさなくてはならず、それだけ多くのパイプラインを

⁴もうひとつの理由としては、投入されるエネルギーの種類や質の違いが十分に反映されていないため、その数値の意味するところが必ずしも明瞭ではない、ということが挙げられる (Smil, 2008)。

⁵See EIA Home Page <http://tonto.eia.doe.gov/basics/quickoil.html>

設置する必要が生じる。それは結局、一単位のガスを回収するのに投入しなければならないエネルギーの増大を意味する。もっとも、パイプラインの設置にともなうエネルギーは、回収されるガスのエネルギーに比べると微々たるものであるともいわれている (Smil, 2008)。だからこそ天然ガスは、原油とならんで、他のエネルギー資源と比較して相対的に大きな EROEI を実現し、安価なエネルギー時代を支えてきたのである。だが、たとえいま現在がそうであっても、今後もその状況が続くと楽観視するのは賢明ではない。仮に、同じ量のガスを回収するのにパイプラインの総延長を二倍にする「だけ」で済むのであれば、パイプラインの設置にともなうエネルギー投入量は、回収されるガスのエネルギーからみれば相変わらず微々たるものであろう。しかし、ガス田の規模が小さくなれば、パイプラインのライフタイムも短くなる。また、大規模なガス田ひとつの産出量を小規模ガス田により実現しようとすれば、分散したガス田を開発せざるを得ないので、パイプラインはそれだけ空間的に密に敷かれることになる。さらに、パイプラインを海底に敷くのは、同じ長さでも、地上に敷くよりも多くのエネルギーを要する。液化して運搬するにしても、そのための余分なエネルギーを必要とする。ガス田の開発が進めば進むほど、これらのことが「同時に」起こり、加速度的にエネルギーコストは跳ね上がるのである。これらのことすべてを考慮すれば、天然ガスの EROEI がいつまでも大きいままであるとは考えにくい。実際、カナダの天然ガス産出の EROEI は、1996 年は 40 程度であったものが、その後 10 年間で 20 以下にまで低下している⁶。

石炭は、埋蔵量や EROEI でみると、石油や天然ガスよりも楽観視できるように思われる。例えば、1950 年代のアメリカの石炭産出の EROEI は 100 であったが、半世紀経っても 80 程度の水準を維持している (Cleveland, 2005)。とはいえ、石炭も枯渇性資源であると同時に、採掘が進むほどに深く掘り進まなくてはならないことには変わりない。そして、EROEI の低下の度合いは、今後ずっと緩やかであるという保証もない。石油や天然ガスの採掘が進み、これらの EROEI が低下すれば、EROEI の大きい石炭の採掘に拍車かかるかもしれない。しかし、石油や天然ガスの利便性を石炭で実現しようとすれば、多くのコストを要する。石炭は固体であるため、石油や天然ガスのような流動性がなく、ポンプやパイプによって輸送することができない。そのうえ、同一質量から得られる石炭の熱量は石油のそれよりも少ないため、同量の熱を得るためにはより多くの石炭の輸送しなくてはならない。また、石炭の燃焼にともなって発生する硫黄や窒素、煤塵などは大気汚染を引き起こすので、脱硫や集塵が必要である。大気汚染の防止策は、今後一層強化されることがあっても、時代に逆行して緩やかになることはないだろう。それらに加えて、温暖化ガス排出の削減策（地中に埋めるなど）をとるのであれば、そのぶんコストも増大する。このように、石炭の「便利かつクリーンな」利用の追求は、一定のエネルギーを得るために要するコストを押し上げる要因となる。

非従来型オイル（タールサンド、オイルシェールなど）は、物理的な量としては大量に存在する。だが、それらから従来型の石油を精製するためには極めて多くのエネルギーや水を投入しなければならない。多量の不純物を含むという物理的性質により、非従来型オイルを利用する限り、大量の低エントロピー資源を投入しなければならないという問題それ自体は、技術によって解消されることはない。将来、非従来型オイルの生産量増加が見込まれているが (IEA, 2008)、これらが従来型オイルと競合できるようになるのは、非従来型オイルが安

⁶See The Oil Drum, <http://theoil Drum.com/node/3673>

くなるからではなく、従来型オイルが高価になっていくからである⁷。

なお、再生可能エネルギーの ERoEI は総じて小さく、10 のオーダーに乗るものは少ない。例外的に、近年、風車の大型化にともなって ERoEI が 20 を超えるような風力発電も現れているが、この計算には、先述したバックアップがまったく考慮されていない。

以上が意味することは、簡単である。大量の動力や電力を安価で利用できた時代はまもなく終わる、ということである。

9 技術の限界を知ることが本当の進歩である

これまでの議論を大まかにまとめると、次のようになる。GDP を高めるには、質の高いエネルギーの投入を増やさなくてはならない。質の高いエネルギーの投入を増やすためには、化石燃料の消費を増やさなくてはならない。化石燃料の消費速度が上がれば、化石燃料の ERoEI 低下に拍車がかかる。したがって、経済成長率が高いほど、「安価」な化石燃料は急速に枯渇していく。

化石燃料の価格が実際にどれほどの速度で上昇していくかを正確に予測することは不可能に近い。ホテリング・ルールによれば、枯渇性資源の価格は時間選好率に等しい変化率で上昇していくはずだが、それが成り立つのは、採掘の限界費用がゼロであり、資源の需要関数がシフトしないという条件下においてである。しかし実際には、ERoEI の低下とともに採掘の限界費用は上昇するうえ、中国やインドのような大国の経済成長にともなって需要関数も上方にシフトする。これらの要因が、化石燃料の価格上昇率を更に高めることは間違いないだろう。

もっとも、市場メカニズムの機能を信奉する者は、化石燃料消費の限界費用が経済成長の限界効用に等しくなった時点で経済成長は自然に止まるのだから、ただ黙って放任していればよい、と主張するかもしれない。しかし、これには二つの問題がある。ひとつは、化石燃料の社会的費用は、必ずしも市場価格に反映されていないという問題である。例えば原油価格の変動には、政治的・投機的な要因が大きく影響しており、なおかつ、賦存量や採掘費用に関する情報には著しい非対称性がある。もうひとつの問題は、市場メカニズムは、経済的格差の問題には無力である、ということである。化石燃料の価格上昇率が高いほど、経済は大きな混乱に見舞われるだろう。一般に、その犠牲者となるのは所得の低い層である。そしてそれは、真珠やダイヤモンドが高騰するのは事情が異なる。化石燃料は、衣・食・住・移動という、人間の基本的ニーズすべての根幹に関わっている資源であり、それが高騰するということは、基本的な生活が著しく脅かされる、ということなのである。

経済成長を続けることは、目の前に壁が迫っているのにアクセルペダルを踏み込むようなものである。もはや衝突は避けられないかもしれないが、それでも、早くにブレーキを踏めば、それだけ被害は小さい。ブレーキを踏むとは、すなわち、成長信仰を捨てることである。成長信仰は、結局のところ、技術に対する信仰である。人間は実に多くの偉業を成し遂げてきたのだから、引き続き今後も、人間の英知が何でも解決すると考えるのは、甚だしい奢りである。化石燃料時代以降なされた発明は、自然の恵みである化石燃料を上手に利用する方

⁷非従来型オイルの ERoEI 値はほとんど分かっていないが、オイルシェールについては 20 に満たないと見積もられている (Cleveland, 2005)

法を見つけただけのことであり、化石燃料そのものを人間が作り出したわけではない。そして我々は未だに、化石燃料と同じくらい優れた別のエネルギー資源を見つけてはいないのである。

10 環境問題は単純な社会的ジレンマ問題ではない

風力発電の問題には、環境問題の持つ本当の難しさが潜んでいる。それは単に、「環境にやさしい」行動をいかにして人々に広めるか、という問題として片付けることができないのである。

もちろん、「環境にやさしい」行動を広めること自体も、簡単な問題ではない。この問題は、ゲーム理論的には社会的ジレンマの一種として位置づけられる。社会的ジレンマとは、個々人がある行動（「協力行動」と呼ぼう）をとることが集団全体としては望ましいにもかかわらず、個々人それぞれは、自分だけは協力行動を逃れて他人に「ただ乗り」した方が得であると判断するため、結局は全員がただ乗りする、という現象である。「環境にやさしい」行動は、個々人にとってはコストを要するが、その便益は全員に広く行き渡るので、協力行動の一種とみなされることが多い。

社会的ジレンマは、以前「非協力」だった者が、次からは大きなコスト負担を強いられるような仕組みがあれば解消し得ることが知られている。そのコストが、個々人にとって、長期的にみて協力した方が得であると判断するのに十分な大きさなら、誰もが協力的に振る舞うはずである。だが、事態はそれほど簡単ではない。そうした仕組みが有効に機能するための条件については、現在も議論が続いている。たとえば、相互作用がどれくらい繰り返されるのか、2人ゲームかそれともN人ゲームか、相互作用は局所的かグローバルか、強い互惠の影響、高次のフリーライダー問題、などである。

だが、環境問題には、従来の社会的ジレンマ研究の枠組みでは捉えられない難しさがある。というのは、社会的ジレンマ問題では、一般に、誰が「協力者」で誰が「非協力者」かを識別できる状況が暗黙のうちに前提されている。だが、「環境にやさしい」行動をとる者は、本当に「協力者」なのだろうか。人間-環境システムは複雑であり、「環境にやさしい」とされる行動の環境負荷削減効果は、疑わしい場合が少なくない。環境負荷はしばしば、知覚が難しく、加害者と被害者の境界も曖昧であり、その影響は空間的および時間的な広がりを持つので、行動と結果の因果関係を突き止めるのは難しいのである。環境負荷を定量的に評価する方法としてLCA(Life Cycle Assessment)があるが、LCAは、バウンダリの設定、不確実性を含む自然および社会状況の前提条件等に大きく左右されるので、同じ対象にLCAをかけても、10人が10通りの結果を示すことは十分にあり得る。

悪いことに、環境問題におけるこのような難しさは、「環境にやさしい」というイメージだけが先行し、社会全体が誤った「環境ブーム」に乗せられていく余地を与えているように思われる。イメージの偏向は環境情報にバイアスをかけ、更にそれがイメージを歪めるといふ悪循環を生む。そうした過程で環境ブームの勝ち馬に乗った者は、その利権を壊すまいと様々な手を打ち、悪意のあるなしに関わらず、科学的で冷静な議論を難しくするような雰囲気を作る。少々意地悪な見方をすれば、「環境ブーム」とは、「環境にやさしい」というイメージだけを表面的に取り繕うフリーライダーが蔓延している状況であるといえるかもしれ

ない。こうしたフリーライダーたちは、必ずしも悪意に基づいて行動しているわけではないが、それだけに、誰が本当にフリーライダーなのかを知ることは難しい。風力発電が本当に「クリーン」であると信じ切っている者からすれば、その推進に尻込みをする者はフリーライダーに見えるだろう。しかし、私からみれば、風力発電を盲信し、それに対して少しでも批判的な見解を示す者を退けようとする者こそがフリーライダーなのである。この問題についての研究は、まだこれからである。

11 若干の補足

11.1 バイオエタノール

採掘が進行すれば ER_{oEI} が低下するという化石燃料の悲劇から逃れられそうな燃料として、バイオエタノールが注目されている。持続可能な農業にもとづいて生産されるバイオエタノールならば再生可能エネルギーであるが、現実のバイオエタノール生産は化石燃料に依存して成り立っており、その ER_{oEI} は小さい。代表的なバイオエタノールであるコーンエタノールの ER_{oEI} は、複数の研究者によって試算されているが、その値は大きくても 1.65 であり、小さいものでは 1 を超えないという報告もある (Hammerschlag, 2006)。その理由は、農作物の生産に多量のエネルギーが投入されているからであるが、そもそも近代的農業は燃料や肥料面で原油や天然ガスに依存しているため、バイオエタノールを化石燃料にとって替わるエネルギー源として位置づけることはできない。このように低い ER_{oEI} にもかかわらず、アメリカでのバイオエタノールの生産量はここ 10 年で急増しているが、それは莫大な補助金によって支えられていた結果である (Koplow and Steenblik, 2008)。すなわち、その普及は、バイオエタノールの ER_{oEI} 値を反映したものではないのである。さらに、バイオエタノールの生産は食料生産と競合するため、生産の拡大は食料価格の高騰をもたらすという問題も見逃せない。

11.2 原子力発電

放射性物質を扱うというやっかいな点を除いたとしても、天然のウラン鉱石は、そのままではウラン濃度が低いいため濃縮する必要があり、エネルギー資源としての質は低い。比較的質が高いウラン鉱石 (ウラン含有率 0.2% 以上) は化石燃料と比較して十分に存在するとはいえず、大量に存在するのは、それよりもさらに 10 分の 1 ほどウラン濃度が低い低質のウラン鉱石である。原子力の ER_{oEI} は現在でも 5 程度だが、質の低いウラン鉱石を用いた場合の ER_{oEI} は 1 を下回るとの見解も示されている (van Leeuwen and Smith, 2004)。原子力の性質上、LCA に必要な情報の入手は困難であるため、その将来像は不確実性が大きい。それでも明らかなのは、原子炉の建設および維持、廃炉、ウラン鉱石の採掘から輸送、転換、濃縮、そして放射性廃棄物の処理および管理に至るまで、化石燃料の手を一切借りずになし得た経験はない、ということである。例えば、周知の通り、ほとんどすべての運輸エネルギー源は化石燃料であるが、原子力発電に要する資材の輸送をすべて原子力船によって行うと考えるのはあまりに現実離れしたシナリオだし、仮にそれを無理矢理実現すれば、そのときの

電力は考えられないほど高価になっているだろう。

参考文献

- Almeida, P. and Silva, P. D. (2009). The peak of oil production - timings and market recognition. *Energy Policy*, 37:1267–1276.
- CEPOS (2009). *Wind Energy -The Case of Denmark*. Center for Politiske Studier.
- Cleveland, C. J. (2005). Net energy from the extraction of oil and gas in the United States. *Energy*, 30:769–782.
- Cleveland, C. J., Costanza, R., Hall, C. A. S., and Kaufmann, R. (1984). Energy and the U.S. economy: A biophysical perspective. *Science*, 225:890–897.
- Cleveland, C. J., Kaufmann, R. K., and Stern, D. I. (2000). Aggregation and the role of energy in the economy. *Ecological Economics*, 32:301–317.
- E.ON Netz (2005). *Wind Report 2005*.
- EWG (2008). *Crude Oil - The Supply Outlook*. Energy Watch Group, revised edition february 2008 edition.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press.
- Hall, C., Tharakan, P., Hallock, J., Cleveland, C., and Jefferson, M. (2003). Hydrocarbons and the evolution of human culture. *Nature*, 426:318–322.
- Hall, C. A. S., Powers, R., and Schoenberg, W. (2008). Peak oil, EROI, investments and the economy in an uncertain future. In Pimentel, D., editor, *Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems*, chapter 5, pages 109–132. Springer.
- Hammerschlag, R. (2006). Ethanol's energy return on investment: A survey of the literature 1990-present. *Environmental Science and Technology*, 40(6):1744–1750.
- IEA (2008). *World Energy Outlook*. International Energy Agency.
- Koplow, D. and Steenblik, R. (2008). Subsidies to ethanol in the United States. In Pimentel, D., editor, *Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems*, chapter 4, pages 79–108. Springer.
- Smil, V. (2008). *Energy in Nature and Society*. The MIT Press.
- Stern, D. I. (2000). A multivariate cointegration analysis of the role of energy in the US macroeconomy. *Energy Economics*, 22:267–283.

Trainer, T. (2007). *Renewable Energy Cannot Sustain a Consumer Society*. Springer.

van Leeuwen, J. W. S. and Smith, P. (2004). *Can nuclear power provide energy for the future; would it solve the CO₂-emission problem?* <http://www.autonavzduch.cz>.

Worldwatch Institute (2005). *State of the World*. W.W.Norton and Company.

槌田敦 (1992). 熱学外論. 朝倉書店.