

化石燃料に頼らずとも経済成長は可能か？

- Can we achieve sustained growth without relying on fossil fuels? -

石田 葉月（同志社大学）

[Abstract]

Today, it is getting common to believe that the world can move away from a fossil-based economy without sacrificing sustained economic growth. In order to achieve this win-win goal, two strategies are being intensively attracting attention: improvement of energy efficiency and growth of renewables. Considering the nature of both the production process and the renewable energy sources, however, it is concluded that the win-win goal may be unrealistic.

1 はじめに

2015年のCOP21で採択されたパリ協定では、世界の平均気温の上昇幅を産業革命以前と比べて2℃より十分に低い水準に保つこと、努力目標としては1.5℃以内を目指すこと、が定められた。そのために、今世紀中には人為的な温室効果ガスの排出量を実質ゼロにする、という極めて野心的な目標が設定された。周知の通り、人為的な温室効果ガスの主たる排出源は化石燃料の燃焼なので、この目標が意味するのは、要するに、化石燃料依存型社会からの大幅な脱却を目指すということに他ならない。

ただ単に化石燃料を使わない社会を目指すというのであれば、人類には既に10万年以上もの実績がある。我々の祖先は、地球上に誕生してから実に99%

以上もの年月を、化石燃料にほとんど頼ることなく生きてきた。しかし、化石燃料を使わないかわりに、たとえば江戸時代のような生活に戻るといのであれば、多くの人々が不満の声をあげるだろう。もっとも、江戸時代とて、年月にして人類史のほとんどを占めてきた狩猟採集社会とくらべれば、その社会構造は遥かに高度で近代的である。それでも、いまの繁栄を知っている我々からみれば、江戸時代はあまりにも原始的で不便だと感じるだろう。つまり、我々の挑戦は、ただ単に化石燃料依存からの脱却を目指すことではない。化石燃料によって築き上げた繁栄を化石燃料抜きで維持しようという、人類史上初めての壮大な試みなのである。

それでも、世の雰囲気はあくまで前向きで自信に満ち溢れている。それは決して平坦な道ではないものの、人類の叡智と技術力をもってすれば必ず乗り越えられる、と。こうした明るい雰囲気は、人々が絶望感に陥っているよりはずっとマシであると言いたいところだが、たとえば、頑丈だと信じて皆で渡ろうとした橋が実は脆いかもかもしれないとしたら、どうだろうか。私には、化石燃料の大量消費によって成し得た現代の繁栄を化石燃料抜きで存続させることができるとは、到底思えないのである。

詳しい議論に入る前に、化石燃料によって成し得た「繁栄」の具体的中身について明確にしておかなければなるまい。化石燃料の大量消費が本格的に始まった産業革命以降の社会には、様々な変化があった。生活様式、働き方、政治参加、ジェンダー、芸術、宗教、等々。どの変化も重要には違いないが、ここでは議論を絞り、経済的生産に関心を絞ることにしよう。

産業革命以降の経済成長は、長い人類史からみても稀有な出来事であるといえてよい。産業革命までの10万年以上ものあいだ、経済成長はゼロに等しいくらいゆっくりであった(Clark, 2007; Piketty, 2014)。現代の経済的繁栄は、ただ単に経済の規模が昔と比べて大きくなったということだけではない。

驚異的なのは、経済成長のスピードである。我々は、年率 1%の経済成長率でも物足りないと感じるほど、経済が成長することに慣れてしまっているし、経済は成長すべきであるという考えに取り憑かれてしまっている。しかし、産業化以前の感覚でいうならば、年率 1%という成長率は信じられないほどのスピードなのである。昔の人は、生きているあいだはもちろんのこと、数世代先まで、社会が目立った変化を遂げるとは考えもしなかつただろう。もし所得が年率 1%のスピードで成長したら、およそ 70 年で 2 倍になる。その変化は、おそらく、1 人の生涯のあいだでも十分に実感できるものだろう。

産業革命以降の驚異的な経済成長によって、一部の国々の経済規模は飛躍的に拡大した。1 人あたりの所得は、産業革命以前の 10 倍以上になった（ただし、一部の国々については産業革命以前よりも貧困化した）(Clark, 2007)。化石燃料に頼らずに、先進国の経済水準を維持しつつ、更に途上国の経済水準をも先進国並みに引き上げることが可能か否かと問われたら、私の回答は否定的なものになるだろう。だが、本稿で扱うのはこの問題ではない。というのは、この楽観は、もうひとつの楽観に比べると遥かに程度がマシだと思えるからだ。もうひとつの楽観とは、すなわち、化石燃料を使わずに経済成長を継続させる、というものである。

そんな夢を抱くのは一部の物欲にまみれたカネの亡者だけだ、と反論したくなる人もいるだろう。そういう人は、おそらく、早くからカネ儲け優先主義の弊害に気づいており、環境問題に対する意識が高く、働くことやモノを消費することの意味を深く考え、長期的で幅広い視点から望ましい社会のあり方について思案を巡らせてきたに違いない。しかし、そのような人々たちによる議論の集大成であるはずの SDGs (Sustainable Development Goals) でさえも、経済成長の重要性を強調しているのである。SDGs は、2001 年に策定された MDGs (Millennium Development Goals) の後継として、2015 年の国連

総会で採択された 17 項目の目標群である。MDGs は 8 つの目標から構成されており、主に、途上国における生活水準を改善するための基本的なインフラ整備に関心が置かれていた。一方、SDGs では、目標の数が倍以上に増やされ、天然資源や環境の持続的利用、及びそのためのイノベーションの推進等が盛り込まれた。SDGs の対象が、途上国だけでなく先進国も含まれていることについては、一定の評価に値しよう。

気になるのは、SDGs に新たに盛り込まれた「持続的な経済成長」という目標である。その対象として途上国が強調されてはいるものの、先進国についても排除されているわけではない。「先進国の経済規模はもう十分に大きいので、これ以上成長すべきではない」などとは、どこにも書かれていないのである。SDGs の理念は、文面に何度も登場する「包摂的(inclusive)」な経済成長という言葉に表れている。要するに、途上国も先進国も、全世界の国々がずっと経済成長していきましょう、というわけである¹。

有限な地球の上で、すべての国々が永続的に経済成長することなど、どうしても可能なのだろうか。SDGs によれば、経済成長と環境負荷の関係を切り離すこと(いわゆるデカップリング)によって可能だという。エネルギーについていえば、そのための有力な手段として最も期待されているのが、省エネルギーと再生可能エネルギーだ。本稿では、この 2 つに的を絞り、議論を進めていくことにしよう。

2 エネルギー強度

エネルギー消費量 E と経済的生産量 Y との関係は、次のような単純な恒等

¹ SDGs は 2030 年までの目標であるが、「持続的で包摂的な経済成長」のための条件を 2030 年までに作り出すと表明しているのであって、経済成長が 2030 年で停止してよいと考えているわけではない。

式によって表現することができる。

$$E = (E/Y) Y = R Y \quad (1)$$

ここで、 $E/Y (=R)$ のことを「エネルギー強度」と呼ぶ。エネルギー強度の逆数をとったものが「エネルギー効率」であり、両者ともよく使われる指標であるが、その使い分けは便宜上のものである。

(1) 式から明らかのように、生産水準を高めつつエネルギー消費量を減らすためには、エネルギー強度を低めるしかない。一定の生産水準を、より少ないエネルギー消費で実現できれば、エネルギー強度は低下する（すなわち、エネルギー効率が改善する）。これが、多くの人イメージしている省エネルギーだろう。しかし、エネルギー強度の低下は、必ずしもエネルギー消費の削減に結びつくとは限らない。たとえば、エネルギー強度が半分になったとしても、生産量が 2 倍になれば、エネルギーの消費量は変わらない。我々は、エネルギー強度の低下だけに関心を絞ってはいけないのである。省エネルギーが果たす貢献は、エネルギー強度と生産量の両方についての変化をみってから評価されなければならない。

この問題は決して単純なものではない。仮に、エネルギー強度と生産量の振る舞いが互いに無関係で独立しているのであれば、いかなる状況においてもエネルギー効率の改善は正当化されよう。この場合、エネルギー強度の低下と経済成長がたまたま同時に起こったとしても、エネルギー強度の低下がなかったならばエネルギー消費量はもっと多かったはずだろうから、エネルギー強度の低下には「責任はない」という論法が成り立つ。だが、エネルギー強度の低下それ自体が、何らかのメカニズムを通じて経済成長を促したとすれば、話は別だ。こうなれば、エネルギー消費を抑制するためにエネルギー強度を下げるという大義名分が崩れてしまいかねない。こうした現象はしばしば「リバウンド効果」と呼ばれているが、そのメカニズムと規模は必ずしも十分に明らかにな

っていない。ただ、気になる点は、リバウンド効果は（その名称が明示的に使用されないにしても）、むしろ好意的に受けとめられている傾向がある、ということである。その例として最もわかりやすいのは、「環境に優しい」ことを売り文句にして商品やサービスをどんどん売り込もうという姿勢である。2019年に閣議決定された『パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略』²においても、いわゆる「環境に優しい」ビジネスの成長が国際競争力を高め、販売量の増加に貢献する、と高らかに謳われている。そして、それを可能にするのが「非連続なイノベーション」であるというわけだ。

もっとも、リバウンド効果があっても、エネルギー消費の削減が期待できる場合がある。(1)式は次のように変換することができる。

$$g_E = g_R + g_Y \quad (2)$$

ここで、 g は添字の変数についての変化率をあらわす。つまり、たとえリバウンド効果によって $g_Y > 0$ となったとしても、 g_Y を上回るスピードでエネルギー強度が減少すれば、エネルギー消費は減り続ける。SDGsや政府の長期戦略が期待しているのは、まさにこれである。

繰り返すが、リバウンド効果という現象は現時点でも完全に解明されているわけではないので、どのような制度が $g_Y < |g_R|$ ($g_R < 0$)を保証するのか、必ずしも定かではない。ただ、経済成長が優先されている状況下では、たとえばエネルギー強度が5%低減した場合、経済成長率が1%にとどまるよりも、4%である方が好まれるだろう。もちろん、後者といえども全体としてのエネルギー消費量は1%減る。しかし、経済成長が優先されるとき、エネルギー効率の改善によって当初期待されたエネルギー消費の削減効果が、少なからず失われてしまいかねない。

² 環境省ウェブサイト。 <https://www.env.go.jp/press/106869.html> (最終閲覧日：2019年10月10日)

より本質的な問題は、エネルギー消費を増やさずに経済成長を続けるためには、我々はエネルギー強度をいつまでも下げ続けなければならない、という事実である。果たしてそんなことは可能なのだろうか。一般的な経済学の教科書が教えるところによると、その答えはイエスである。教科書が最初に教える生産関数では、労働と資本だけが投入要素であるとされている。すなわち、経済成長は、労働と資本さえ増やせばいくらでも可能であるということになる。つまり、エネルギーがなくても生産可能であるというわけだ。このような生産過程が現実のものであるならば、エネルギー効率を際限なく改善することができるだろう。

しかし、明らかに、このような生産関数は非現実的である。生産関数におけるエネルギーの重要性を明示するためには、少なくとも、生産要素にエネルギーを加える必要がある。実際、こうした手続きはエネルギー経済学の分野では一般的である。ただし、そこでは、エネルギーと他の生産要素とのあいだに代替関係があると仮定されていることが多い。たとえば、生産関数としてしばしば用いられるコブ=ダグラス型関数を考えよう。この関数では、資本、労働、そしてエネルギーが冪数つきの積のかたちで表現される。掛け算なのだから、エネルギーの投入がゼロであれば、生産量もゼロとなる。この点においては、生産が資本と労働だけで成立すると考える通常の実業モデルから一歩前進しているように見える。しかし、この関数では、一定の実業水準を保ったまま、エネルギーを（ゼロでない限り）どこまでも減らすことができってしまう。資本および労働がエネルギーと代替可能なので、エネルギーを減らしても、資本あるいは労働を十分に増やせばよいのである。したがって、この生産関数は、事実上、生産過程におけるエネルギーの重要性を無視しているのと何も変わらない(Daly, 1996)。エネルギーの投入量を一定にしたまま、いくらでも実業水準を高めることができるので、エネルギー効率は際限なく向上できることにな

ってしまう。

もちろん、現実には、労働投入量には上限があるし、狭い意味での資本、すなわち、設備や建物の容量にも上限がある。しかし、減耗しにくく物理的占有空間もほとんど無視できるような、たとえば知的資本のようなものを資本に含むことにすれば、資本がどこまでも増え続ける経済を思い描くこともできるだろう。しかし、現実における生産過程を考えると、エネルギーと他の生産要素との代替性は、あったとしても例外的であると考えの方が自然である(Daly 2014)。たとえば、自動車（資本）と燃料（エネルギー）の関係を考えてみよう。両者は明らかに役割が異なっており、一方が一方を代替する関係ではない。両者の関係はむしろ補完的であり、両方が揃ってこそ自動車は走行できるのである。知的資本のようなものをいくら思い描いたところで、このことは変わらない。たとえば、高度に知性を持った自動車を想定したところで、それと燃料が果たす役割はまったく別物である。

もちろん、自動車の燃費が技術進歩によって改善されてきたように、より少ないエネルギーで経済が機能するような技術進歩に期待する人もいるだろう。問題は、それがどこまでも可能か、ということなのである。どれだけ技術が進歩しようと、人間がそこで生活する以上、最低限必要な物資が調達されなければならない。それらを動かすだけでもエネルギー（正確に言えば低エントロピーのエネルギー）が必要であり、その結果として生じる廃熱（高エントロピー）を100%リサイクルすることは熱力学の法則により禁止されている。したがって、経済が機能するためには最低限のエネルギーが絶え間なく投入されなくてはならず、100万円の付加価値を生産するために必要なエネルギー量を際限なく下げることができないと考える方が自然である。

ここまでの議論で、私が技術進歩についてどちらかといえば懐疑的な見方をしていることに不満を持つ方は少なくないだろう。念を押すが、私は技術進歩

の可能性を全否定しているわけではなく、過大評価をしないようにしているだけである。その根拠として、たとえば、ドイツ、アメリカ、日本を対象にして経済成長の要因分析を行った実証的な研究事例を持ち出すこともできる (Kummel, 2011)。そこでは、経済成長への技術進歩の寄与はこれまで一般に考えられていたほど小さくなく、一方、これまで寄与が小さいとされていたエネルギーの貢献が大きいことが示されている。この研究が示唆するのは、エネルギー消費の増大によって実現した経済成長の少なからぬ部分が、技術進歩のおかげであると勘違いされてきた、ということである。とはいえ、これは研究事例のひとつに過ぎず、その結果が真実のすべてであるというつもりはない。しかしながら、こうした研究事例は、少なくとも、技術進歩への過度な期待に釘を刺すだけの根拠にはなるだろう。

以上をまとめよう。エネルギー強度には下限がある。その下限に達してしまえば、エネルギー強度はもう下げられない。エネルギー強度が変化しなければ、経済成長率とエネルギー消費の増加率は一致する。したがって、いつまでも経済成長し続ける社会においては、短期的には技術進歩のおかげでエネルギー消費の増加を抑えることができたとしても、長期的にはエネルギーの大量消費から脱却することはできない。

3 再生可能エネルギー

持続的な経済成長に大量のエネルギーが欠かせないとすれば、エネルギー消費の中身を変えればよいのではないか。いまの繁栄を支えているのは化石燃料である。しかし、化石燃料の大量消費を前提とした社会に持続性はない。そこで、地球全体で見れば潜在的に無尽蔵とってよいほど豊富な再生可能エネルギーに期待が寄せられているわけである。

再生可能エネルギーのなかでもとりわけ注目されているのが、風力および太

陽光、バイオマスである。これらは遍在性が小さく、基本的にそこら中にあるのだから、うまく活用すればエネルギーの「地産地消」が可能になる、という理想論を頻繁に耳にする。持続可能な社会の構築と地産地消はセットで語られることが多いので、これらに対する期待はとても大きい。

だが、再生可能エネルギーには、2つの大きな問題がある。ひとつは間欠性であり（特に風力・太陽光については顕著）、もうひとつはパワー密度が小さいことである。この2つの点は、化石燃料と対照的であると同時に、化石燃料が現代の経済的繁栄を可能にした理由とも強く関係していると思われる。

(1) 間欠性とストレージ

まず、間欠性について考えよう。再生可能エネルギーは、一般に、人間が欲しいときに欲しいだけ利用することが難しい。再生可能エネルギーに依存していた社会では、人々は自然の気まぐれに振りまわされていた。一方で、化石燃料はストック的な資源なので、基本的に人間の都合にあわせたペースで利用することができる。例えるなら、化石燃料は銀行口座にある要求払い預金のようなものだ。その金額以内であれば、どのペースでお金を引き出そうと基本的に自由である。これは、毎日その日になってみないとどれくらいのお金がもらえるのかわからないような不安定な収入源とは根本的に異なる。

化石燃料のこうした融通性について、現代人は有り難味をすっかり忘れてしまっているように思われる。高度に発達した現代経済の基盤をなすのは、多種多様な商品を決まった時間に決まった場所へ決まった量だけ正確に流通させるシステムである。人間の都合に合わせて自在に調達できるエネルギー源なしに、このようなシステムがどうやって成立し得るといえるのだろうか。

自然の気まぐれに左右されるエネルギー源に依存していた時代の暮らしは、いまと比べればたいそう不便だったに違いないが、そのおかげともいえるべきか、

そこで生きる人々はつつまじやかで忍耐強い性向を身につけていた。ところが、化石燃料は、人間をせっかちでわがままで支配欲にまみれた生き物にするのに十分な魔力を持っていた。主要なエネルギー資源のタイプが人間の性向や価値観に影響を及ぼすという考え方は、たとえば、N.ジョージ・ジェスク＝レーゲンやI.モリスなどによって示されている(Georgescu-Roegen, 1971; Morris, 2015)。こうした考え方は、人類が再生可能エネルギー社会に再び回帰しても「化石燃料人」の世界観がそのまま継承されるはずだ、という無邪気な楽観論に釘を刺すものである。

不安定なフローである再生可能エネルギーを化石燃料のような安定したストックに変換することができれば、間欠性の問題は解消するだろう。そのような技術が存在しないわけではない。たとえば、縄文式土器は食料（人間を動力とすれば燃料に相当する）の貯蔵を可能にした。食料の採集および狩猟は、季節や気象条件、環境の変化などによって影響を受ける不安定なフローである。たくさん手に入った時に蓄えておけば、自然の恵みが不足気味の時に備えることができる。こうした技術の存在は、縄文時代が狩猟採集社会であったにもかかわらず定住型であったことと強く関係している。

さて、現代人がいまの繁栄を維持するうえで重要となる技術は、風力や太陽光によって発電した電力を大量かつ安価に貯めること（ストレージ）である。しかし、残念ながら、電気エネルギーはその性質上、電気エネルギーのまま長時間大量に貯めておくことができないので、別のエネルギー形態に転換して貯蔵しなくてはならない。最も古典的な方法は揚水発電である。風力や太陽光発電による電力が余ったとき、その電力を利用して水を汲み上げておけば、電力が足りない時にそこから引き出すことができる。すなわち、電気エネルギーを位置エネルギーに変換して蓄えておくわけである。これは特に難しい技術ではない。しかしながら、揚水発電用のダムを確保するのは、一般に、通常のダム

よりも難しい。なぜなら、揚水発電は、上部と下部の両方に水溜を有していなければならぬからだ（そうでなければ、下から水を汲み上げることができない）。通常のダムでさえ、いまや条件のよい立地は希少化しているというのに、それよりも条件が厳しい揚水発電所を十分に確保することは簡単ではない。

ストレージの他の方法として、蓄電池、水素、フライホイール、圧縮空気などがある。これらが大規模に普及するには、乗り越えるべき技術的・経済的障壁が多くある。これらの障壁の多くは、基本的に、質量あたりのエネルギー密度が小さいか、体積あたりのエネルギー密度が小さいか、あるいはその両方に起因している。ということは、それらを大規模に活用しようとするれば、大量の資材や広大なスペースを必要とするので、コストが膨れ上がることになる。化石燃料の優位性のひとつは、質量あたりでも、そして体積あたりでも、エネルギー密度が大きいことである。僅かな量あるいは嵩で大きなエネルギーを供給する力を持つ物質がどれほど便利か、多言を費やすまでもあるまい。たとえば、蓄電池のなかではエネルギー密度が大きい部類に入るリチウムイオン電池でさえ、石油と比べると桁違いに小さいのだ。水素ガスのように、体積あたりでみたエネルギー密度が小さいものは、圧縮もしくは冷却することによって体積を小さくすることが可能だが、そのために必要な装置やエネルギーに関わるコストが無視できない(Trainer, 2007)。

再生可能エネルギー社会を構築するにあたって、安価で安全に大量のエネルギーを貯蔵できるストレージ技術の開発と普及が不可欠であることは、既に広く認識されている。先に挙げたものを含め、候補となり得る方法について私が考える限りにおいては、楽観的な見通しを思い描くことができない。それでも、新聞を広げれば、講演会へ行けば、書店へ行けば、インターネットを覗けば、ストレージ問題に対する前向きで希望に満ちた主張ばかりが目にとまる。彼らからすれば、私のような後ろ向きの姿勢は一顧だに値しないのだろう。それに

ついて、ここで細かい議論をするつもりはない。そこは思い切って譲歩することにして。すなわち、ストレージの問題は、「非連続的なイノベーション」なるものによって、近い将来に解決できると仮定しよう。だとしても、再生可能エネルギーには、多くの人があまり目を向けていないもうひとつの深刻な問題が存在するのである。

(2) パワー密度

再生可能エネルギーを利用するうえで大きな障害となるのが、概してパワー密度が小さい、ということである。パワー密度とは、面積あたりのパワーであり、 $[W/m^2]$ の単位を持つ。もちろん、再生可能エネルギーとひとくちにいてもいろいろなタイプがあり、したがってパワー密度にも違いがあるが、油田や炭田あるいは火力発電所と比較すると、総じて 2~3 桁ほど小さい(Smil, 2015)。多く人は、このことの重要性をあまり意識しないだろう。僅かな敷地から莫大なパワーを生み出せる火力発電所は、都市の旺盛な電力需要を満たすのに、都市面積のうちのほんの僅かな土地を専有するだけで済むのである。迷惑施設ということもあるだろうが、火力発電所をいつも身近に感じる人は多くあるまい。それは、パワー密度が大きいことの裏返しなのである。

パワー密度が小さい再生可能エネルギーに大きく依存する社会の姿は、化石燃料社会とはだいぶ異なったものになるだろう。大量のエネルギーを得るためには、大量の土地を必要とする。つまり、土地集約的な経済にならざるを得ないのである。産業化以前のかつての経済は、まさにそうだった。すべての生産活動は、基本的に、土地のバイオマス生産力を出発点としていた（生産における資本の重要性はそれほど大きくなかった）。もちろん、食料生産は現在でも相変わらずそうである。加えて、昔の主たる燃料は薪炭だった。家庭だけでなく、製鉄やレンガ作りなどの産業も燃料を必要としたので、経済規模の拡大は

大量の森林資源を必要とした。バイオマスのパワー密度は、オーダーで見ると、 $10^{-1} \sim 10^0 \text{ W/m}^2$ 程度（つまり、 1 W/m^2 を上回るかどうか）であり、油田や炭田と比較すると3桁もの開きがある。つまり、化石燃料時代に生きる我々からみると、バイオマス時代は薄く広く散らばったエネルギー資源に依存しており、同じ量のエネルギーを得るためには今よりも広大な土地を必要とした³。古典経済学が、生産要素としての土地を重要視していたのは当然のことである。生産量を増やすために、土地面積を2倍、3倍、・・・と増やし続けることはできない。土地が増えないかわりに労働力（いうまでもなく、土地と並んで重要な生産要素）を増やせば生産量は増加するが、収穫逡減の法則から、1人あたりの生産量は減少する。もちろん、技術進歩によって単位土地あたりの生産量が増えることもあるだろう。しかし、いくら技術が進歩しても、ほとんどすべての生産活動が光合成という自然現象によってひどく制約された経済なのだから、永遠に土地生産性を高めることなど不可能だ。したがって、古典経済学者たちが、経済成長がいつまでも続くはずがないとの考えにおいて一致していたのは、特に驚くべきことではない(Wrigley, 2016)。

一方、現代経済学では、かつて重要な生産要素と位置づけられていた土地が生産理論から追い出され、資本（と労働）のみで生産が可能であるような世界が想定されている。生産設備は建物を階層化するなどして狭いエリアに詰め込むことが可能なので、資本の集約的投入それ自体は土地の制約をあまり受けなくて済むだろう。しかし、すでに述べたように、設備と燃料はまったく役割が異なる。仮に、設備を稼働させるのに必要な燃料がバイオマスだったら、現代経済学でも相変わらず土地が重要な生産要素として位置づけられていたはずだ。産業革命の象徴とされる蒸気機関は、原理的には、燃やせるものは何でも

³ 厳密に言えば、化石燃料も過去の光合成産物だが、ここでは区別している。

燃料になるので、薪でも動くのである。もし、蒸気機関の燃料が薪だったら、そして、蒸気機関の本体となる鉄の生産に使われる還元剤が木炭だったら、蒸気機関の普及は、それまでの土地集約的な経済からの脱却に大した貢献をしなかっただろう。当然、かつてのバイオマス社会では、資本の蓄積も土地の生産力に大きく制約されていた。土地集約的な経済からの脱却は、化石燃料の大量消費なくしては不可能だったのである。

化石燃料の大量消費によって、人口増加と1人あたりの経済成長の両立が可能となったと考えるのは自然である。人口増加には食料増産が欠かせないが、そのためには、土地生産性の向上か耕地面積の拡大の、少なくともどちらかが必要である。農業技術の進歩による土地生産性の向上を軽視するつもりはないが、それにはしばしば化石燃料が貢献していることも忘れるべきではない。たとえば、有名な「緑の革命」は、まさに、化学肥料と農薬の大量投入によってもたらされたものであり、農業の化石燃料依存度を強めたことによる成果である。しかし、化石燃料の農業への貢献はそれだけではない。燃料を薪から化石燃料に転換すれば、薪の生産地だった土地を食料生産にまわせるのである。化石燃料は、このように、食料増産に多面的な貢献をした。

とはいえ、どこまでいっても食料は「土地産物」であるため、「化石燃料産物」ほどのスピードで産出量を増やすことはできない。後者は土地の制約をほとんど受けないからである。したがって、「土地集約型経済」から「化石燃料集約型経済」へのシフトは、人口増加と1人あたり生産量の増加の両方を同時に可能にしたのである。

しかし、「化石燃料集約型経済」が、「再生可能エネルギー集約型経済」にシフトするなら、そう簡単にはいくまい。これまでの工業製品—いうまでもなく、「化石燃料産物」を代表する財—の生産は、もはや、食料生産とのあいだで熾烈な土地の奪い合いを引き起こすだろう。現状でさえ、世界の食料生産は十分

であるとはいい難い。2050年にはほぼ100億になると予測されている世界人口の胃袋を、未来の人たちは何よりもまず満たさなければなるまい。そこではきっと、いま以上に、工業生産よりも食料生産が優先されるに違いない。そして、いま以上に、穀物をふんだんに使って生産される肉類が贅沢品となるだろう。そうした経済に生きる人達は、種族の再生産と維持のためのギリギリの生活物資を得るのがやっとかもしれない。それはまさに、10万年以上の長きにわたって人類が囚われ続けていた「マルサスの罠」そのものなのである（補遺参照）。そこでは、1人あたり所得の長期的な増加などとても期待できるはずもなく、技術進歩がもたらすのは単に人口増加であり、人々の暮らしが向上することはない(Clark, 2007)。

(3) 集積の経済

多くの人が集まる都市というのは、中間投入財や労働者の確保が容易であることに加え、知のスピルオーバー効果も期待できるので、外部効果を通じて生産性が高まる。したがって、都市の存在そのものが経済成長のエンジンである、という考え方があるのも不思議ではない(O’ Sullivan, 2019)。

いうまでもなく、現代の大都市は化石燃料の産物である(Smil, 2017)。バイオマス時代と対比させると、そのことはわかりやすい。狩猟採集社会に都市などあるはずもなく、19世紀初頭のヨーロッパでさえ、都市に住む人の割合は1割にも満たなかった。それが、現在の先進国では、人口の7~8割が都市に住んでいる。それだけではない。現代の大都市は、バイオマス時代の大都市と比べて桁違いに多くの人口を抱えている。化石燃料の力を借りて大量の生活物資を遠方から運んでくることができこそ、巨大な都市人口を養うことができるのである。

都市の存在が経済成長に及ぼす影響を重要視するのであれば、問題は、化石

燃料社会から再生可能エネルギー社会へのシフトが都市の存続にいかなる影響を及ぼすのか、ということになる。我々は、化石燃料の使用をやめても、これまでと変わりなく都市生活を送れるものと勝手に思い込んではいないだろうか。私は、その可能性については懐疑的である。

環境問題への意識が高く、持続型社会の構築に強い関心を持つ人達が思い描く理想は、いわゆる「地産地消型社会」であろう。遠方から大量に物資を運び込まなければならない経済システム自体が化石燃料（特に石油）の大量消費による産物なのだから、それは理解できる。では、都市が必要とするエネルギーをそのエリア内で賄えるかどうか考えてみよう。現代の工業都市におけるエネルギーの需要は、パワー密度にして $15\sim 150\text{ W/m}^2$ 程度である。もちろん都市によるバラツキもあるので、細かい数字の違いを気にしても仕方がない。我々はオーダーを気にすることにしよう。つまり、都市におけるエネルギー需要のパワー密度は 10^1 （温暖地） $\sim 10^2$ （寒冷地） W/m^2 のオーダーだ。

一方で、再生可能エネルギーのパワー密度は、バイオマスが $10^{-1}\sim 10^0\text{ W/m}^2$ 、風力発電が 10^0 W/m^2 、太陽光発電が 10^1 W/m^2 、というオーダーである⁴。もし、都市が必要とするエネルギーのすべてを光合成産物にしたら、すなわち、バイオ燃料で自動車を走らせ、発電機を回し、コークスの代わりに木炭を製鉄の還元剤として用いたら、パワー密度の需給ギャップは最大で 3 桁となる。したがって、仮に、都市エリア全域をバイオ燃料作物の耕作地に充てたとしても、まったく足りない（そもそも、その時点でもはや都市ではない）。では、「地産地消」の理念にのっとって、できるだけ都市の近郊からエネルギ

⁴ 太陽熱のパワー密度は 10^2 W/m^2 のオーダーであるが、このエネルギーはエントロピーが大きく質の低いエネルギーなので、電力や動力を得るのには向いていない。したがって、ここでは議論の単純化のため、重視しないことにする。

ーを調達することにしよう。都市のエネルギー需要を満たすためには、都市エリアの（オーダーで大雑把に言えば）百～千倍もの土地を確保しなければならない。これだけでも気が遠くなる話だが、事態は更に深刻である。「土地を確保した」といっても、実際にその土地のすべての領域を、中心都市にエネルギーを捧げるためだけに使用できるだろうか。そこに住む人たちの住居や生活資財の供給、道路の整備などはどうするのか。地勢的条件はどうか。仮に、都市近郊の土地面積の1割が、都市にエネルギーを供給するために使われるとしよう。そうすると、確保すべき土地面積は更に10倍増やさなければならないことになる。つまり、都市エリアの1万倍だ。それはもはや、「都市近郊」とは呼べないだろう。

単純に、都市を中心にして、同心円状にエネルギー供給地を広げていくとすれば、辺境は都市から相当に距離が離れてしまう。液体燃料であれ、電力であれ、遠方からのエネルギー輸送はそれ相応のエネルギー損失をとまなうので、都市から遠ざかれば遠ざかるほど、 1 m^2 の土地が都市に供給できる正味のエネルギーは目減りしてしまう。こうした損失を見込むと、さらに遠くの土地にまで手を伸ばさなければなるまい。このような都市の姿が持続可能であるとは到底思えないし、そもそも非現実的だ。

太陽光発電のパワー密度はバイオマスよりも大きいので、都市のエネルギー需要をすべて太陽光発電で賄うのであれば、上の議論は幾分マシになるだろう。オーダーでみれば、温暖な地域にある都市であれば、太陽光発電のパワー密度とエネルギー需要のパワー密度はおおよそ一致している。しかし、だからといって、都市エリア全域に発電パネルを敷き詰めることはできないし、近郊エリアのすべてに発電パネルを敷き詰めることもできない。都市内の建物は高さもバラバラなので、日当たりの良い土地や屋上はひと握りだろう。無理をして日当たりの悪い場所に発電パネルを敷けば、パワー密度は格段に低下する。すな

わち、都市エリアの何倍もの土地を確保しなければならないという事情に変わりはなく、地産地消という理想状態からは程遠い。そして、忘れてはならないのは、地産地消型の経済では、食料生産も都市あるいはその近郊で行われなければならない、ということである。日本人1人の胃袋を満たすために必要な農地面積は0.14ヘクタールなので(谷野,1997)、都市全域を農地にしたとして(もちろん、それはもはや都市ではない)、都市エリアだけで養える人口は1km²あたり700人強だ⁵。東京23区や大阪市のような大都市ともなると人口密度は1万人/km²以上、名古屋市や横浜市で同7~8千人/km²程度なので、需給ギャップは1桁もある。私にはどうしても、食料・エネルギーの地産地消と大都市の存続が両立可能であるとは思えない。

食料生産を考えると、風力発電は太陽光発電と比べていくぶん有利なように思われる。太陽光パネルの下で農業はできないが、風車の下ならば耕作が可能だからである。しかし、風車は太陽光パネルと比べて遥かに危険であり迷惑設備なので、都市内あるいはその近くの人口密集地に何本もの風車を設置するのは現実的ではない。強風による倒壊の危険性があるのはもちろんのこと、通常稼働時でさえ、低周波音、振動、シャドウ・フリッカーなどによる健康被害が懸念されているからである(Stevenson, 2013)。要するに、過疎地ならともかく、都市経済においては、風力発電は地産地消に馴染まないのである。

(4) ヒートアイランド現象

再生可能エネルギーの大規模利用については、他にも懸念すべき点がある。繰り返すが、パワー密度が小さい再生可能エネルギーは、要するに、薄く広く

⁵ この値は欧米と比較すると数倍~10倍高い。もっとも、近代農業は化石燃料に依存しているので、それがなければ、ひとりの人間を養うのに必要な土地はもっと広がるだろう。

散らばったエネルギー源である。それらを掻き集め、電力あるいは動力といった最終エネルギー形態として都市に大量投入すれば、何が起こるだろうか。エネルギーは最終的には熱になるので、都市部だけ突出して熱放出が起こるといふ問題は避けられない。これはまさに、ヒートアイランド現象を生み出す主な原因のひとつである。

ヒートアイランド現象とは、郊外に比べて都市が高温化する現象である（神田, 2012）。この現象がもたらす影響として、熱中症患者の増加や生態系の異変、大気汚染物質の増加などが懸念されているが、より深刻なのは、問題の構造が「正のフィードバック」であることだ。つまり、ヒートアイランド現象が進むと、ファンや冷房機器などの使用を更に増やす必要が生じ、そのためのエネルギー需要が増加し、それにより更にヒートアイランドに拍車がかかるのである。

ヒートアイランド現象は、地球温暖化問題に比べればローカルな問題ではあるが、世界人口の半数以上が都市に住んでいる現状を考えると、世界全体で取り組まなければならない問題には違いないだろう。ヒートアイランド現象は、化石燃料の使い過ぎという文脈で語られることが多いが、本質的な問題は、都市部におけるエネルギーの局所的な大量消費である。都市部がその周辺に比べて大量のエネルギーを消費する限り、それが化石燃料由来であれ、再生可能エネルギー由来であれ、最終的には大量の熱となって都市部から排出される。仮に、都市がその周辺の広大な土地からエネルギーを掻き集めることに成功したとしても、郊外で熱になるはずだったエネルギーが都市部で集中的に排熱となるのだから、都市部とその郊外との排熱量のギャップが大きいことに変わりはないはずだ。

正のフィードバック構造を持つヒートアイランド現象は、都市の存続を脅かしかねない問題である。そうであるならば、再生可能エネルギーの大規模利用

もまた問題視されなければなるまい。

4 おわりに

本稿では、化石燃料依存からの大幅な脱却と持続的な経済成長が両立するの
かという問題について、私見を述べた。産業革命以降の長期的な経済成長は化
石燃料の産物である。しかし、化石燃料に依存した経済成長がいつまでも続か
ないことは明らかである。本稿では、エネルギー効率の改善と再生可能エネ
ルギーへの依存度引き上げによる経済成長の持続可能性について探ってみたが、
その答えは懐疑的なものとなった。もちろん、本稿の議論は厳密で科学的な手
続きを踏まえたものではなく、直感に頼る部分や論理的飛躍も随所にみられよ
う。それでも、本稿をきっかけとして、経済成長と豊かな社会についての議論
が多少なりとも再燃するのであれば幸いである。

補遺 「マルサスの罠」と化石燃料

経済の大部分が土地の生産物に直接・間接依存していた社会における生活水
準（いわゆる「暮らしぶり」）は、10 年以上に渡って停滞しており、長期
的な向上はみられなかった。これが、よくいわれる「マルサスの罠」である。

「マルサスの罠」のメカニズムは、いたってシンプルである(Clark, 2007)。
まず、人口（労働力）と生産水準との関係についてみてみよう。図1が示すよ
うに、土地の生産力にほぼすべてを負っている経済では、生産水準 Y は人口
 N が増加するほど高まるものの、その増加の度合いは徐々に鈍化する（人口に
関する収穫逓減）。こうなる理由は、人口が2倍、3倍、...となっても、土地
を2倍、3倍、...と増やすことが一般に困難だからである。土地面積の拡張が
できなければ、一定面積の土地に2倍、3倍、...の労働力を投じたところで、
生産物は2倍、3倍、...と増えてはいかない。なぜなら、一定面積の土地が持

つ生産力には物理的な上限があるからである。

ひとりあたりでみた生活水準は、議論を簡単にするため、 $y = Y/N$ で表すものとする。 Y の傾きが N の増加とともに減少するとき、 y は図1のように右肩下がりとなる（ $N - y$ の関係を「生産スケジュール」と呼ぶ）。

次に、生活水準と出生率および死亡率との関係をみてみよう。図2の上図が示すように、自然な考え方は、暮らしぶりが良くなると出生率 B は上昇し、死亡率 D が減少する、というものである。生活水準があまりに低ければ、子供を生むだけの栄養状態や衛生状態が悪いので、出生率は低い。同時に、衣食住がままならないので、死亡率は高い。こうした状況は生活水準が向上するにしたがって改善されるが、当然のことながら、出生率はどこまでも伸び続けるわけではないし、死亡率もどこまでも下がるわけでもない。しかし、そのことはここでの議論に影響しない。

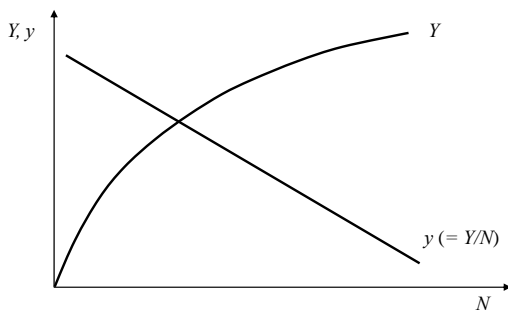


図1 人口（労働）に関する収穫逓減

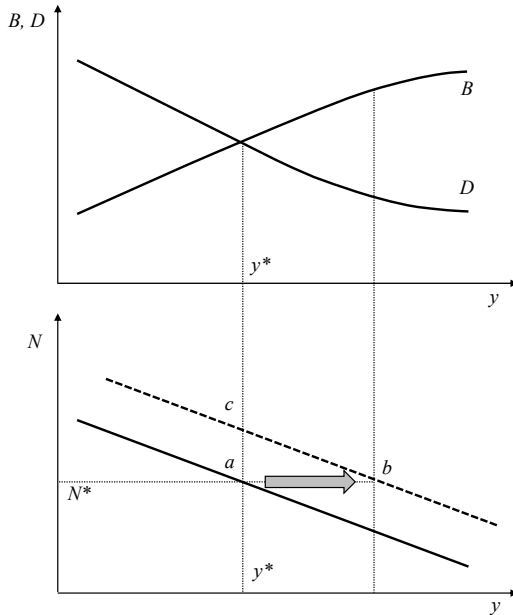


図2 「マルサスの罠」のメカニズム

さて、生活水準はどのように決まるのだろうか。図2の下図は、生産スケジュールを示している（便宜上、 N 軸と y 軸を逆にしている）。まず、生産スケジュールを所与とし、実線のようにしていると仮定しよう。短期的には、この生産スケジュールのうち、どの点を実現させることも可能である。人口が少なければ暮らしぶりは良くなるし、人口が多ければ暮らしぶりは悪化する。しかし、長期的には、均衡点はただひとつ、出生率曲線と死亡率曲線が交わるころ、すなわち y^* に決まってしまう。その理由は、次の通りである。仮に、（実線の）生産スケジュールに沿って均衡点よりも右側の生活水準にあったとする。この状態は、出生率が死亡率を上回っているため、人口が増加する。生

産スケジュールに沿って人口が増加すれば、暮らしぶりは悪化し、いずれは y^* に落ち着く。逆に、均衡点よりも左側の生活水準にあったとすれば、今度は死亡率が出生率を上回るので、人口は生産スケジュールに沿って減少する。そして結局は、やはり y^* に落ち着くのである。

「マルサスの罠」が興味深いのは、たとえ生産技術が進歩しても、生活水準の向上は一時的だということである。技術進歩は、生産スケジュールの右シフト（図2下図中の点線）で表すことができる。元の状態が図中の a 点にあったとすると、技術進歩により b 点に移動する。そこでは、元の状態よりも生活水準は高いものの、出生率が死亡率を超えているため（図2上図）、長続きしない。新しい生産スケジュールに沿って、 b から c へと状態が移り、最終的には元の生活水準に戻ってしまう。長期的にみれば、技術進歩がもたらすのは、ただ単に人口増加だけなのである。

狩猟採集時代から 10 万年のあいだに、人類は幾多の技術進歩を遂げてきた（農耕技術、金属精錬、水車・風車、火薬、印刷機、等々）。しかし、それが生活水準の向上に結びつかなかったとすれば、次のような疑問が湧く。人類が長いあいだ「マルサスの罠」に陥っていたとすれば、なぜ 2 世紀前になって、生活水準の長期的な向上が実現したのだろうか（もちろんそれは、イギリスをはじめ一部の国のことだが）。我々は、産業化以降の繁栄の源泉を技術進歩に求めがちであるが、「マルサスの罠」のメカニズムが示すように、技術進歩は必ずしも生活水準の長期的な向上を約束しない。では、それまでの経済とは何が変わったのか。実のところ、現在においても、人類がなぜ「マルサスの罠」からの脱却に成功したのか、十分に解明されているわけではない。以下に、私の仮説を紹介する。

技術進歩によって生産スケジュールが右にシフトすれば、少なくとも一時的には生活水準は向上する。長期的には、人口増加によって生活水準は元に戻っ

てしまうが、それにはタイムラグがある。すなわち、技術進歩の速度が、人口増加によって生活水準が元に戻ろうとする速度よりも上回り続ければ、生活水準の継続的な向上が可能となる。

化石燃料の大量消費こそが、まさにそれを実現させたと私は考える。化石燃料の貢献は、E.A.リグリーが繰り返し指摘しているように、経済の土地依存を大幅に軽減したことである(Wrigley, 2016)。化石燃料はストックタイプの資源であり、枯渇しない限りにおいては、人口増加にあわせて 2 倍、3 倍、... と消費を増やすことが可能である。

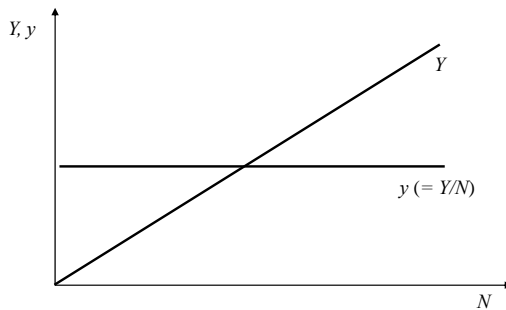


図3 人口（労働）に関する収穫一定

人口に関する収穫逓減に支配されていた経済から脱却し、収穫一定になると、生産スケジュールは図3のように、水平（一定）となる。もっとも、これは極端に仮想的な状態である。現実の経済は、食料生産をはじめ、土地の制約から完全にフリーなわけではないので、いくらかの逓減があるだろう。しかし、化石燃料時代に入って、少なくともそれまでよりは収穫一定に近づいたはずだ。

収穫一定に近づくほど、図4の右図が示すように、生産スケジュールは垂直

に近づく（横軸が y 、縦軸が N であることに注意）。左図と右図の生産スケジュールが同じだけ右シフト（すなわち、同じ速度で技術進歩）した場合、右図のケースは元の生活水準に戻るまでに大きく人口を増やす必要があるため、左図のケースよりもタイムラグが大きくなる。つまり、技術進歩の速度が同じ場合でも、収穫一定に近づくほど、生活水準の向上が継続しやすくなるのである。

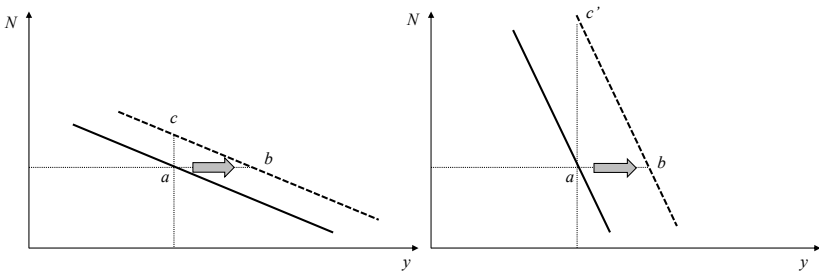


図4 異なる生産スケジュールに対する技術進歩の影響

また、図4から、生産スケジュールが垂直に近づくとき、技術進歩は大幅な人口増加をもたらす（左図 c 点と右図 c' 点を見比べれば明らかである）。人口は「知のプール」でもあるので、人口増加が技術進歩のスピードを速めると考えるのは自然である (Galor, 2011)。このことは、生活水準の継続的な向上が実現する可能性を更に高めるだろう。

参考文献

Clark, G. (2007) *A Farewell to Alms*, Princeton University Press.

Daly, H. (1996) *Beyond Growth*, Beacon Press.

Daly, H. (2014) *From Uneconomic Growth to a Steady-State Economy*,

- Edward Elgar.
- Galor, O. (2011) *Unified Growth Theory*, Princeton University Press.
- Georgescu-Roegen, N. (1971) *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard University Press.
- Kummel, R. (2011) *The Second Law of Economics*, Springer.
- Morris, I. (2015) *Foragers, Farmers, and Fossil Fuels*, Princeton University Press.
- O' Sullivan, A. (2019) *Urban Economics*, McGraw-Hill Education.
- Piketty, T. (2014) *Capital in the Twenty-First Century*, Harvard University Press.
- Smil, V. (2015) *Power Density*, The MIT Press.
- Smil, V. (2017) *Energy and Civilization: A History*, The MIT Press.
- Stevenson, S. (2013) *So Much Wind?* Birlinn.
- Trainer, T. (2007) *Renewable Energy Cannot Sustain a Consumer Society*, Springer.
- Wrigley, E.A. (2016) *The Path to Sustained Growth: England' s Transition from an Organic Economy to an Industrial Revolution*, Cambridge University Press.
- 神田学(2012) 「ヒートアイランドの仕組み」(甲斐憲次編『二つの温暖化-地球温暖化とヒートアイランド』成山堂書店), 124- 143 ページ。
- 谷野陽(1997) 『人にはどれだけの土地がいるか』農林統計協会。