



Title	ジェヴォンズ『石炭問題』を読む：熱は国家なり
Author(s)	大西, 悠
Citation	パブリック・ヒストリー. 2019, 16, p. 48-66
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/71603
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

ジェヴォンズ『石炭問題』を読む

熱は国家なり

大西 悠

1 はじめに

本稿では、19世紀の経済学者・論理学者であるウィリアム・スタンレー・ジェヴォンズの著作のひとつである『石炭問題——国家の進歩の関する問いと、将来やってくる我が炭鉱の枯渇について』（1865年）（以下、『石炭問題』と呼ぶ）を取り上げる⁽¹⁾。

ジェヴォンズは「限界効用」の概念を唱え、新古典派経済学の基盤を作り上げた人物であるが、一方で資源問題特に当時のイギリスの繁栄を支えた石炭に関心をもって同書を執筆した。

『石炭問題』の大まかな概要は以下である。イギリスの繁栄は基本的に良質で豊富な石炭によって支えられており、技術や発明も石炭利用に関わる場所が大きい。しかし自由貿易体制の確立やさらなる商工業の発展により石炭消費は増大し続けており、いずれイギリス産の石炭は枯渇へと向かうだろう。これを回避する唯一の方法は、国債の削減あるいは償還を行うことであり、これによって現世代の消費を抑制し、同時に石炭使用をも節約して将来世代のために資源を残してやらなければならない。

『石炭問題』は発表当時、警世の書としては大きな注目を浴びた。特に石炭枯渇に対する警告を受けて石炭市場は大きく動揺し、価格の高騰という事態を招いている⁽²⁾。

その一方で同書は、現代の歴史学研究・経済学研究の分野において、彼の他著作と比較すれば、語られるところが少ない。その理由として数理経済学者の室田武は、ジェヴォンズが『石炭問題』で示したイギリスにおける石炭資源の急速な枯渇という予言が現実にならなかったこと、1935年にジョン・メイナード・ケインズがジェヴォンズ生誕百周年記念講演の中で行った、『石炭問題』に対する冷淡な評価があるのではないかと推測している⁽³⁾。実際、『石炭問題』の論考

(1) W.S. Jevons, *The Coal Question; An Inquiry Concerning the Process of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal Mines*, London: Macmillan, 1865.

(2) 若林洋夫『イギリス石炭鉱業の史的分析』有斐閣、1985年、iii頁。枯渇に対する恐怖感と価格高騰という事態は、二度組織された勅命委員会による報告によって最終的に沈静化した。

(3) 室田武『エネルギーとエントロピーの経済学』東洋選書、1979年、23-24頁。

は自然科学史や経済学説史の中でもほとんど孤立していると言ってもよい。⁽⁴⁾

埋蔵石炭資源量の計量方法に誤りがあったこと、石油という新しいエネルギーが実用化されていったこと等から、「近い将来での石炭枯渇」という同書の主張が的中しなかったことは事実である。しかしそれだけで同書の持つ学術的な意義の全てが否定されるわけではない。現在では再評価の動きもある。例えば、『石炭問題』で述べられた「石炭使用の効率性が上昇すればするほど全体としての石炭使用量は増大する」という命題は、現代のエネルギー事情においても妥当することから「ジェヴォンズ・パラドックス」と呼ばれ、現在環境・エネルギー問題の専門家らによって改めて研究が進められている。⁽⁵⁾

これ以外にも『石炭問題』には、経済史・経済学研究の文脈からも、注目に値する論考が含まれている。

本稿では、『石炭問題』から、先行研究では触れられていないが重要と思われる論考を抽出し、経済史学・経済学の視点から考察を加えて、同書の学術的意義を再評価する。

ひとつめは、イギリスの繁栄が石炭に強く依存しているとする論考である。ジェヴォンズはイギリス経済における様々な具体例を挙げて石炭の役割を強調しているのでこれは一種の成長論として読み解くことが可能であり、この視点からジェヴォンズの主張の要諦を検証する。この上で、既存の経済史研究において展開されてきた生産性向上の機序ひいては経済の成長論に関する議論、特にジョエル・モキアと斎藤修によって展開されてきた議論について触れる。そして、石炭を重視するジェヴォンズの成長論が、既存の議論に対してどのような含意を持つのかを探る。

もうひとつは、19世紀当時石炭を代替すると期待が寄せられた他エネルギーに対する評価の論考である。当時のイギリス社会においては、石炭の枯渇に対する懸念とその代替となり得る手段に対する楽観とが混在していたが、ジェヴォンズは様々な候補を個別に検討しながら、安易な代替論を強く戒めている。ここではまず、石炭代替エネルギーに対する彼の具体的な指摘を列挙する。さらに、現在における再生可能エネルギーをめぐる状況と展望及びその限界について触れる。代替エネルギーを巡る過去と現在の状況を概観することで、エネルギーに関するジェヴォンズの論考の現代的意義を考察する。

(4) 一方で、ジェヴォンズと同じ問題意識でもって経済を捉えようとした研究者には、自然科学の立場からはフレデリック・ソディが、経済学の立場からはニコラス・ジョージエスク＝レーゲンがいる。F. Soddy, *Wealth, Virtual Wealth and Debt*, London, 1926; ニコラス・ジョージエスク＝レーゲン(高橋正立・神里公訳)『エントロピー法則と経済過程』みすず書房、1993年。

(5) L. Brookes, 'A Low Energy Strategy for the UK by G. Leach et al: a Review and Reply', *Atom*, 1979, No. 269, March, pp.3-8; J. D. Khazoom, 'Economic Implications of Mandated Efficiency in Standards for Household Appliances', *The Energy Journal*, 1980, Vol. 1, pp.21-40; L. Greening, D.L. Greene and C. Difiglio, 'Energy efficiency and consumption the rebound effect a survey', *Energy Policy*, 2000, Vol. 28, issue 6-7, pp.389-401; D. Maxwell, P. Owen, L. McAndrew, *Addressing the Rebound Effect*, Global View, 2011.

2 経済成長論としての『石炭問題』

本節では、19世紀のイギリス経済における石炭の意義と重要性に関するジェヴォンズの見解について触れる。次に、近代経済成長をもたらした生産性向上に関する経済史研究における既存の議論について述べる。その上で、ジェヴォンズの見解に生産性向上をもたらす機序に関して新たな知見が含まれていることを指摘し、この新たな知見と既存の議論との関連について述べる。

ジェヴォンズは『石炭問題』の冒頭で、イギリス経済に果たしている石炭の役割について次のように述べている。以下に引用する。

……日に日に、より一層明確になっていくのは、我々が幸運にも所有している良質な石炭こそが、近代物質文明における原動力であるという事実である。火力の源であると同時に機械動力と化学反応の源でもある。よって石炭こそは、現在を前進させ得る技術に関する改良や発見における、主役なのである。……石炭こそは、他のあらゆる商品と並び立っているのではなく、その上に聳え立っているのだ。それは我が国家における物質的エネルギーの源泉であり、普遍的助力者であり、あらゆる営為における要素なのである。石炭こそが、ほとんど全てのあらゆる偉業を可能ならしめ、容易ならしめるのである。石炭なしでは、我々はかつての労多き貧困の時代に逆戻りしてしまうことだろう。⁽⁶⁾

やや抽象的ではあるものの、この記述からはジェヴォンズが、イギリスにおける経済のみならず、社会そのものを維持し駆動させるための欠くべからざる要素として、石炭に対して大きな評価を与えていることがわかる。さらに彼は、生産におけるほとんど全ての要素に石炭が関わっており、特に火力・機械動力・化学反応の源泉として機能しているとしている。ここでの機械動力とは蒸気動力のことであり、火力や化学反応の源泉とは蒸気動力の生産以外を目的として投げられた熱源としてのものを指すと考えていいだろう。

機械動力については後に述べるとして、以下では熱源としての意味と機能についてジェヴォンズの主張を追っていきたい。

火力としての重要性を示す具体的な事例として彼は、チェシャー州における製塩産業を取り上げている。かつて同州における製塩用燃料は木炭そのほかの植物性資源であったが、それが近年石炭にとって代わられたとする。製塩過程ではその性質上極めて大量の燃料を使用し、よって製造コストの大きな部分を燃料コストが占めるため、安価な石炭の大量使用は、イギリス製の塩の価格競争力を向上させたという。このような燃料コストの極小化によって、かつてはフランス、スペイン、その他環地中海諸国からの輸入に依存していた塩の貿易のトレンドは、今

(6) Jevons, *op.cit.*, pp.1-2. カッコ内邦文は、中略を除いて著者による補足。Jevons の著作から引用する場合、以下も同様。

や完全に逆転したとする⁽⁷⁾。

工業社会が到来する以前から重要な基幹的材料であった塩の生産は、極めて燃料集約的であったため、常に燃料不足の問題が付きまとっていた。ジェヴォンズは、製塩をエネルギー集約産業の代表として挙げ、その生産に当たって石炭が果たした不可欠の役割について端的に示していると言える。

塩以外に生産で大量のエネルギーが投じられる財といえば金属である。金属にも多くの種類があるが、工業時代における質・量の双方で、鉄が他と比較して懸絶した重要な位置を占めるだろう。ジェヴォンズは、中間財としての鉄が大量に用いられる例として鉄道軌条を挙げて論ずる。かつては鉄道を走らせる軌条が木製であったが、石炭の使用により安価かつ豊富な鉄を大量生産できるようになった結果、イギリス全体の軌道で、木から鑄鉄への代替が始まり、やがて鋼鉄の大量生産体制が確立されるようになって、鋼鉄への代替が急速に進んだとする⁽⁸⁾。

化学反応への応用の事例として、ジェヴォンズは特にソーダ類（水酸化ナトリウムや炭酸ナトリウム）を挙げている。ソーダは強塩基製剤として、ガラス、パルプ、石鹼、肥料、モルタル、セメント、金属精錬等様々な関連産業において出発点となる重要な基礎的の化学物質である。工業化時代以前においても大きな需要があったが、かつてはケルプと呼ばれた海藻灰やバリラ等の植物灰から細々と採取されるに過ぎなかった。イギリスは特にその大部分を輸入に依存していたが、しかし石炭燃料の大量使用によって国内での大規模生産が可能となったとしている。また、工業生産において不可避な化学物質はソーダ類以外にも炭酸カリウムなど多くがあるが、これらもまもなく代替されるだろうとする⁽⁹⁾。

つまり、石炭は製鉄・製塩などエネルギー多消費型産業において熱源として機能し、広範な裾野を擁する化学関連産業に投じられる基幹物質の生産においても同様であるということである。

次に機械動力についてである。19世紀において石炭を用いた機械動力とは、ほぼ蒸気機関によって供給される蒸気動力のことと考えられる。経済史的に言えば蒸気動力が投じられた代表的な分野とは、力織機等を大量に配置した綿繊維産業と排水・換気のために蒸気機関が設置された炭鉱産業を指すのが通常であるが、ジェヴォンズは、綿産業における蒸気機関の投入について触れてはいるものの表面的な記述ですませており、多くを語っているわけではない。代わりに彼が強調するのが、炭鉱及び石炭産業での蒸気機関の利用である。以下、引用する。

……蒸気機関の歴史からわかるように、17世紀の初めから炭鉱から排水する上でより強力な手段を獲得するという課題が喫緊のものとして受け取られていたことは間違いない。ジョージ・セルビー卿は早くも1610年に、国会で「ニューカッスルの炭鉱は20年というリース期間を全うできない」と述べている。これは炭鉱から排水するためのコストがあま

(7) *Ibid.*, pp.119-120.

(8) *Ibid.*, pp.114-115.

(9) *Ibid.*, pp.118-119.

りにも大きいことによるものである。……イギリスの炭鉱に対する（蒸気機関の）効果は、まさしく革命的であった。……かつて浸水したため放棄されていた炭鉱は、（燃料となる）石炭が安価になった時、（ニューコメンの）粗野で原始的な大気圧機関によって排水することで再び稼働させることができるようになったのである。⁽¹⁰⁾

元来イギリス諸島は豊富な石炭鉱床を持ち、古くから石炭の利用がさかんであったが、炭鉱が深度を増すにつれて湧水が大きくなり、風車・水車によってかろうじて対応できていたものを除いて、一定の規模に達した炭鉱は放棄される傾向にあった。排水に対する技術的困難が、近世以前の粗放的な採掘法に繋がったということである。

この状況を蒸気機関が変えたことは周知の事実である。蒸気機関がかつては湧水量故に放棄されていた炭鉱を復活させ、新規炭鉱をより深くまで開削させることを可能としたのである。通常石炭採掘においては、最も優良でアクセスのしやすい炭層から手が付けられるため、時間を追うにしたがって炭鉱はその深度を増していった。深度と坑内湧水量及び坑内空間の大きさは比例する関係にあったため、排水と換気の重要性は増す一方であった。そしてこれらの要求を解決できる手段は蒸気機関しか存在しなかった。イギリスの繁栄を支える最も重要な要素は、時間が経つにしたがって獲得の困難性が増すものであったのであり、それを乗り越える上で蒸気機関は必須の要素だったのである。

ここでは機械動力の源泉としての石炭の意義について強調するジェヴォンズが、その応用事例として炭鉱及び石炭産業での使用を示している点に注目したい。石炭の採掘が、蒸気機関を媒介とすることによる石炭の消費なしには進まないことを示すことに繋がるからである。大量の石炭を得るにはそれよりも少量の石炭を投じなければならず、それなしには石炭採掘は覚束ない。言い換えれば、イギリスの繁栄を支える要素を地下深くから取り出すことを担う石炭産業には、石炭の拡大再生産としての機能が備わっていることをジェヴォンズは示唆している。あらゆる生産の基本に石炭があり、かつその石炭が石炭によって生み出されているという構図であり、引用した、「石炭こそは、他のあらゆる商品と並び立っているのではなく、その上に聳え立っているのだ」という文章もそのような状況を簡潔に示した表現と言えるだろう。石炭が石炭を作り、さらにその石炭が多様な基礎的材料を大量に作り出す。ジェヴォンズは生産のあらゆる側面に石炭が関わっていると主張しているのであるから、経済学的な文脈から解釈すれば、『石炭問題』は経済成長と石炭の関連性について示したものであり、歴史的事実を踏まえた成長論のひとつと解釈することができるだろう。

ジェヴォンズの思考は経済のみの枠内に留まらない。彼はさらに考察を発展させる。以下に引用する。

……もし我々が、熱であれ光であれ化学反応であれ機械的動作であれ、何らかの力（force）

(10) *Ibid.*, pp.98, 104, 126.

を保有しているのであれば、我々はそれを何らかの形で変換することができる。しかしいかなる天然資源も存在しないところから何らかの力を取り出せると考えるのは、真空から鉄や金を作り出せると考えるのに等しいくらい愚かなことだ。……力の源泉となる現存の天然資源は、光、熱、太陽光による化学的電磁気的変化の集合体である。光あるいは化学的变化は、木や泥炭、瀝青炭、石炭その他有機燃料の源であり、一方熱は風の動きと水の落下をも引き起こす。……我々人間が自然から切り離された存在であると考えるのは簡単なことだが、しかし実際には経済の本質とは（自然の中に蓄えられた）ごく一部を見つけ出して取り出すことにあるのである。つまり物質的自然は、我々の統制下でない力と物質の継続的な廃棄という側面を提供しているのだ。我々が蒸気機関で用いる力は、自然の力の膨大な浪費から引き出されたごく一部に過ぎないのである。しかし文明とは、リービッヒ卿曰く、動力の経済であり、そしてその本質とは力の小さな断片を、望む様式と瞬間に引き出して、用いることにある。⁽¹¹⁾

彼は同時代のイギリスを観察してその繁栄が石炭に依存したものであり、その石炭もまた石炭によって作られているものと考えた。更にそこから考察を敷衍させて、経済とは外部の自然環境との関連において論じられるべき存在とみなす。その上で、文明社会や経済の本質とは、人間にとって有用なエネルギーや物質を望むときに望む方法で、自然から自由に引き出すことを可能にする体制のことであると喝破している。

ここまで、ジェヴォンズによる石炭とそれに関連する論述に触れてきた。以下では、ジェヴォンズの主張を学説史の中に位置づけるために、古典派経済学者らによって展開されてきた見解と、これまでジョエル・モキアと斎藤修によって為されて来た過去の経済成長を巡る論点にかんする議論を振り返る。

「経済は成長しなければならない」という認識を、なんらかの危機感をもって明白に抱いたのは古典派経済学者らであった。古典派経済学者にはトマス・マルサス、ディヴィッド・リカード、ジョン・スチュアート・ミル、アダム・スミス等が名を連ねているが、中でもマルサスは、「人口は等比級数的に拡大するのに対して、食糧生産は等差級数的にしか拡大しない」という有名なテーゼを唱えて、経済による産出力は人口の増大に追従できず、いずれ人口の大部分が貧困線に釘付けされるという、通常「マルサスの罠」として表現される陰鬱な未来像を描いた。⁽¹²⁾ リカードもまた、資本蓄積という構図を用いることで、産業の各分野における利潤率が次第に低下し、経済は静止状態に至るといふ、論敵であったマルサスのそれとほぼ同じビジョンを示した。⁽¹³⁾ 古典派経済学者の中ではやや例外的な存在であると看做されがちなスミスですら、長期的な経済の展望という意味では他の研究者らと同様の考え方を示しており、「獲得可能な富

(11) *Ibid.*, pp.141-144.

(12) トマス・ロバート・マルサス（斎藤悦則訳）『人口論』光文社、2011年。

(13) ディヴィッド・リカード（羽鳥卓也・吉沢浩樹訳）『経済学および課税の原理』岩波文庫、1987年。

の全量を使いつくしてしまった国では経済は静止状態に向かう」と予測している⁽¹⁴⁾。

古典派経済学者達が生きた18世紀は、経済の大部分を第一次産業である農業が占めていた時代であったから、その関心は土地と食糧生産及び地代論に集中していた。その意味で彼らの観察対象には偏りが含まれていたといえることができるかもしれない。それ故もあって、マクロな経済全体に対する彼らの観察と予言が実際的に的中したとは言い難かった。イギリスに限っても、周知のように18世紀以降同国の経済は全体として緩やかながら確実な拡大を続け、いわゆる産業革命をひとつの契機として、空前の経済的繁栄と物質的生産を達成していくからである。

彼ら古典派経済学者の予測のどこに誤りが含まれていたのか。常々指摘されるのは、前述した農業に視点を集中させた結果、それ以外の、機械や農法などの技術的進歩や貿易の効果など、ある意味で外生的な要素の存在を十分に捕捉し切れなかったという点である⁽¹⁵⁾。現代では、貿易の驚異的な拡大や機械技術を始めとする様々な発明が、近代における劇的な発展の背景にあったことは半ば常識であろう。

しかし古典派経済学者の中にも、当時考えられていた「経済の最終的な静止状態」という宿命論的な展望の中においてすら、一人当たり生産力の向上即ち収穫逓増状態をもたらす何らかの仕組みが内在していることを指摘した人物がいた。それがアダム・スミスであり、有名なピン製造を事例として示した分業論である。スミスによる分業論は、発表当時は大きな反響を呼ばなかったが、後になって経済学研究・歴史研究の双方から強い関心が寄せられて様々な発展的解釈が行われ、現代では前近代以降の各社会における経済成長を説明する主要な原理のひとつとみなされるようになっていく。ここでは発表当時のスミスの考え方をそのまま示すのではなく、現代において為されているスミスの分業論に関する解釈のひとつである、歴史人口学者・経済史家である斎藤修の考察を以下に簡単に紹介したい。

スミスは最初から、分業と生産性の上昇をもたらすメカニズムを連結して考えていた。ピン製造を例に、作業場における工程の分割とそれぞれへの特化が労働者の熟練を向上させて生産性を増大されるという効果である。しかしスミスの分業論は、そのような工場内あるいは作業場内といったローカルな次元に留まらない。スミスは毛織物や造船など他産業部門にも観察を広げて、独立の職業ないしは産業間の相互関連について述べ、社会的な次元においても分業が成立しているとみる。ここに、スミスの真骨頂とも言うべき市場というものに対する注目が加わる。市場とは人々が必要とする生産要素・生産物を交換して調達するための舞台であって、彼にとり経済成長とは市場の成長と不可分であった。しかもその市場とは、最終製品と消費者をつなぐ消費市場に限定されず、中間財同士をつなぐ中間財市場をも含んだものであった。つまり、分業の進展により中間財生産部門が無数に成立してそれぞれの間で市場が成立し、収穫逓増がもたらされるという流れである。さらに、新しい部門や市場の成立により新たな利潤獲

(14) アダム・スミス (山岡洋一訳) 『国富論・上』日本経済新聞出版社、2007年、98-99頁。

(15) リカードは、マルサスよりは機械や貿易などの要素に関してやや柔軟な考えをもっていたようにも思われる。

得機会と参入余地が次々に創出されてお互いの競争が加速するという動学的効果をも持つという。そして、分業の度合いが、市場の度合いに左右されるのであるとするならば、市場の規模は基本的に人口の大きさに比例するのであるから、人口増大が進行するほど分業も進展し、ひいては生産性も上昇するという結論に至る。⁽¹⁶⁾

これが現在、スミスの分業論として定義されている効果のあらましである。スミスの分業論は、陰鬱な古典派経済学の概念枠組みから胚胎してきた成長論であるにも関わらず、「経済は人口に追従できない」とする既成観念を乗り越える理論的發展性を備えたロジックと考えられるようになっていく。

経済の質的な成長とは、個別のミクロな諸主体による生産性を増大させる行為の集成的現象と看做することができるから、生産性上昇の要因を分析することがマクロな経済の拡大の要因を知ることにそのまま繋がる。

もちろんスミスの分業論転じてスミスの成長論以外にも、生産性上昇⇨収穫逓増をもたらすメカニズムについては様々な分野から議論が深められて知見が蓄積されてきた。それら既存の学説を手際よく分類したのが、経済史家のジョエル・モキアであった。⁽¹⁷⁾モキアは成長の源泉を整理して、資本、市場、人口規模、技術進歩の四つを明示的に列挙した。固定資本投資を源泉とする成長は経済学者ソローの名にちなんでソロー的成長、市場メカニズムを通じた成長はスミスの成長、増大する人口規模を通じたボースルプ的成長、技術革新・技術進歩をエンジンとした成長をシュンペーター的成長である。⁽¹⁸⁾

ソロー的成長とは、経済学者のロバート・ソローが1950年に提示したソロー・モデルと呼ばれる経済成長理論にちなんだものである。ソローは各国一人当たり所得水準の相違を説明する上で物的資本の重要性を指摘した。一人当たり生産性の上昇の理由には資本蓄積量があるという考えであり、新古典派経済学における経済成長の説明においては通説的な扱いを受けている。

ボースルプ的成長とは、エステル・ボースルプが1960年代から唱え始めた「人口と経済成長は矛盾しない」とする命題とそれを支持する一連の研究に基づいている。人口と経済の負の相関関係を示唆するマルサスの世界観は長く信じられてきたが、既に1930年代にはアリン・ヤングが、特に産業革命期以後の現実の経済における展開がマルサスの予想とはかけ離れていたと批判し、人口の増加が収穫逓増に帰結し、ひいては経済成長の要因として機能していると

(16) 斎藤修『比較経済発展論』岩波書店、2008年、35-50頁。

(17) J. Mokyr, *The Lever of Riches: Technological Creativity and Economic Progress*, New York: Oxford University Press, 1990, pp.4-6.

(18) 人口規模の増大を通じた成長形式のみモキアは人名を介していないが、斎藤はエステル・ボースルプにちなんでボースルプ的成長と示すのが適切であろうとしており、本稿でもそれに準じた。斎藤、前掲書、51頁。また、ボースルプの英語での綴りは Boserup であり、彼女の著作の邦訳における日本語名はボズラップあるいはボーズラップとしているものが多いが、本論文では斎藤による名称をそのまま使用した。

指摘した。⁽¹⁹⁾その後ボースルプは熱帯アフリカにおける農業の事例研究に基づいて、食糧生産という部門においても人口の増大による収穫増の状況が存在していることを指摘し、後には研究対象を農業以外の分野にまで拡大させて商業や工業といった部門においても人口の増大がむしろ経済を拡大させる方向に働いていることを示している。⁽²⁰⁾彼らの研究を土台として、新古典派経済学における通説的な解釈においてもかつてのマルサスモデルに対しては否定的な見解が主流となっている。⁽²¹⁾

シュンペーター的成長とは、ヨゼフ・アロイス・シュンペーターが1911年に上梓した『経済発展の理論』での、経済の発展とは、彼が新結合と呼ぶ物事のあらたな結び付けによって生じ得るとする主張と、それを支持する後続研究から導き出されたものである。シュンペーターは、レオン・ワルラスによって完成された一般均衡理論が示す最適配分の状態を経済の完成された形としてではなく一種の停滞状態であると看做し、市場経済では生産要素や技術の新たな様式での結びつきが生じることでダイナミックな変化が常に起こっていると⁽²²⁾した。現在、シュンペーターの主張の核心となる新結合という概念は、転じて技術革新あるいは技術進歩として総称され、経済成長における主要な原動力のひとつとされるに至っている。

スミスの成長を除く三つは、歴史学研究からというよりは経済成長論や農業理論などの経済学の分野から導かれてきた知見である。それぞれ考え出されてきた系譜も時代も異なるが、後続研究による精緻化と一般化が進み、過去の経済成長の要因について研究を進めてきた経済史家によるモキアによって最終的な整理が為されている。

注意が必要であるのは、モキアによって分類された四つの成長論は、相互に無関係でも排他的でもなく、むしろ重なり合う部分が大きいということである。例えば綿紡績工場においてジェニー紡績機が導入されることで労働生産性が大幅に上昇したのであれば、それは固定資本投資という意味でソロー的であろうし、技術革新という意味ではシュンペーター的であろう。

以上、ソロー的成長、スミスの成長、ボースルプ的成長、シュンペーター的成長という四つの生産性向上の源泉に関する既存分析を前にして、ではイギリスの物質的繁栄における石炭の絶対的な重要性を指摘してやまないジェヴォンズの主張は、どのように位置づけられるだろうか。

もし、ジェヴォンズが各産業部門を観察した際に見いだしたように、石炭を各産業部門における生産要素としてのみ捉えた場合、それは従来の四つの成長論の範囲内で解釈されるに留ま

(19) R.J. Sandilands (ed.), 'Contributions by Allyn Young to the Encyclopaedia britannica, 1929', *Journal of economic studies*, 1990, Vol.17, No. 3/4, pp.139-140; A.A. Young, 'Increasing Returns and Economic Progress', *The Economic Journal*, 1928, Vol. 38, No. 152, p.536.

(20) エスター・ボズラップ (安澤秀一・安澤みね訳) 『農業成長の諸条件——人口圧による農業変化の経済学』 ミネルヴァ書房、1975年; エスター・ボズラップ (尾崎忠二郎・鈴木敏央訳) 『人口と技術移転』 大明堂、1991年。

(21) ディヴィッド・N・ワイル (早見弘・早見均訳) 『経済成長』 ピアソン桐原、2010年、86-87頁。

(22) ヨゼフ・アロイス・シュンペーター (塩野谷祐一・東畑精一・中山伊知郎訳) 『経済発展の理論——企業者利潤・資本・信用・利子および景気回りの研究 (上・下)』 岩波文庫、1977年。

るだろう。例えば石炭が大量に投じられた製鉄産業における製品は、それぞれ鉄あるいは鋼鉄であるが、これらは前述した通り、基本的に中間財としての意味合いが強いものである。これはスミスの成長論と最も親和性が高いだろう。製造された鉄がそのまま最終製品として需要されることは少なく、その大半は鉄道レール・建築材料・橋梁材料・各種機械のための材料・生活雑貨の材料として、中間財市場の間で取引されて加工され、あるものは最終製品に、あるものは再び中間財として取引されていくだろう。このように考えればジェヴォンズによる石炭の重要性に対する指摘は、中間財市場とそれによる取引拡大を生産性向上の源泉と看做すスミスの成長の理論的妥当性を、投入要素という視点から、強化することに繋がるだろう。

つまり石炭を各産業部門における投入要素として捉える限りにおいては、ジェヴォンズの石炭論は、スミスの成長論を主として既存の成長論の内部に包摂され消化されることとなり、そこに新たな含意を見出すことは難しい。

しかし、そのような産業間や経済の範囲内でジェヴォンズの石炭論を論じるだけでは、その価値は半減してしまうだろう。なぜならば、前述したようにジェヴォンズ論の真髄とは、経済内部だけでは完結しない、経済の外側にある自然環境との繋がりを強く意識した、経済や文明社会の本質にまで迫る思考展開にあるからである。

既存の成長論について改めて振り返ると、四つの成長論は論理展開の前提としてある暗黙の共通項があるように思われる。四つの内いずれもが、基本的に経済ないしは商工業という枠組みの中で意味を持つ概念であるという点である。例えばソロー的成長は固定資本投資について述べたものであるが、具体的には建物や工場、機械設備、船舶といったものを指すだろう。シュンペーター的成長であれば技術革新であるから、蒸気機関や紡績機などであろう。人口による市場の大きさを強調するボースルプ的成長も、中間財市場とそれがもたらすダイナミズムを指摘するスミスの成長もまた同様である。つまり、これら四つの成長論においては、それぞれの成長論の基盤を為す様々な実物的要素については直接の考察の対象とはなり得ず、外生的に所与(given)の存在であると看做されているのである。

ではここでいう様々な実物的要素とは何か。それこそ、産業社会において大量に必要とされる多様な基礎的物質・材料・資材に他ならない。鉄・鋼鉄・銅・亜鉛・塩・炭酸カルシウム・水酸化カルシウム・ガラス・レンガ・モルタル・セメントそして石炭であり、あくまで自然界に溶け込んでいる形で存在している原初物質や資源を、安価な石炭を熱源として大量に使用することで、人間にとって有用な形で取り出されることでしか獲得されないものである。このような点から、中間財に對置させる意味で「原初財」という表現も可能だろう。これら様々な素材が大量かつ安価に供給され準備されることによってはじめて、経済成長と生産性向上をもたらす固定資本投資や技術進歩が可能となるのであり、また中間財市場や人口規模の拡大の前提条件が作り出されるのである。

このように考えれば、ジェヴォンズの石炭論は、前述したような、四つの成長論のいずれかの内部に位置付けられるものに留まらない。むしろ、これら既存の成長論を、基礎材料という実物性の側面から裏打ちすることを示し得ていると理解することができる。

これをさらに、代替可能性という視点から考えてみよう。このような基礎的資材は、石炭以外の生産要素、例えば労働や石炭以外の資本によっても獲得されるものであろうか。それは全く不可能というわけではないにせよ、極めて迂遠で、経済的効率が著しく低い、非常に大きな困難を伴う事業となるだろう。製塩や製鉄、ガラス製造やレンガ製造において必要とされる熱エネルギーと燃料は、経済学や経営学ではなく熱力学の法則から要請されるものであり、そこには回避の余地を許さない原理的な限界が働くからである。

石炭によってなしうるものが、他手段によってはなしえないということは、石炭の比類なき重要性を示すと共に、石炭が四つの成長論の前提条件であり基盤を成すとした前述の位置づけをより補強することになるだろう。

以上、ジェヴォンズの石炭論は、単なる産業部門内部における投入要素としての石炭の重要性にとどまらず、有用な物質を自然環境から大量に取り出すためのほぼ唯一の手段としての石炭の意義をも強調している。そのように考えた場合、ジェヴォンズの石炭論は既存の四つの成長論が当然視する前提条件を問題にしている。経済成長と生産性向上のメカニズムを、ジェヴォンズの『石炭問題』は実物性の側面から裏打ちし補強しているということが可能である。

3 エネルギー論としての『石炭問題』

本節では、『石炭問題』における、エネルギーとしての石炭の絶対的な優越性と、石炭の他資源による代替不可能性に関するジェヴォンズの見解について示す。その上で、化石燃料に対する有力な代替手段として昨今注目を浴びている再生可能エネルギーが抱える問題点について述べる。両者を比較することで、ジェヴォンズの考察が持つ現代的意義及び現代環境論・資源エネルギー論にどのような含意を持つのかを考察する。

以下には他資源エネルギーと比較した場合における、石炭の意義と位置についてジェヴォンズの見解を示す。引用する。

……継続的な科学の進歩が、いずれは石炭と（それに依存する）動力源——蒸気力が畜力よりも優れていると同程度には、蒸気力よりも優れたもの——への代替手段を見出すだろうという考え方は、広く流布されている考え方である。……以上のような仰々しい（石炭が枯渇しても何の心配もいらないという、誤った）フレーズが、今日の科学者に受け入れられるということは流石にあり得ない。しかし多くの階級を構成する一般の人々には別であるようだ。……そして我々の頭上に年間降り注ぐ太陽光は、我々が年間引き揚げる石炭の、数千倍の熱エネルギーに相当する。しかし、我々の制御下にあるほんの数千分の一の量でも、経済と進歩のためにとっては十分なものである。動力エネルギーに求められる最も基本的で重要な必要条件とは、どこでも、好きな時に、必要なだけ使用できるという点である。……これまでは機械的動力についてだけ述べてきたが、もし石炭が枯渇してしまったら動力と同様熱となりうる源泉をも探し出さなければならない。……スティーヴン

ソン氏が言うように、石炭とは一万年に渡って地中に詰め込まれてきた光と熱を含むものであり、そして今再び人間の目的のために生産されようとしている。石炭の内部に含まれる力の総量はとても信じられないほど大きなものなのである。……もちろん私は、もし石炭が枯渇するかあるいはそれに近くなって極めて高い価格でしか売られないようになったら、我々は恐らくは石炭の意味のある代替としての地位を風力や水力、潮汐水車に見出すだろうということを頭から否定するつもりはない。しかし、これは、ないよりはましという程度の意味しかない。そのような代替手段では、かつてのような（経済）効率を維持することは決してできないし、依然として豊富な資源を抱えている他の国々と競争することは全く不可能である。……これは問題の決定的なポイントであるので最後に是非主張しておきたい。科学の発展と技術の向上は、結局のところ蒸気力と石炭の（代替手段となり得るのではなく、むしろその）優越性をますます強化することに繋がるだろう。……だが、石炭こそは我が国が有する最も卓越した授かりものであることを常に思い出そう。仮にいつの日か、まったく新しいエネルギー源が発見されたとしても、それが、石炭ほどの恩恵を我がプリテン島にもたらし得ると考える理由は何もないのである。……我々は、石炭なしでも何事かを為し得ると考えるような、愚か者の天国に安住するべきではないのである。⁽²³⁾

19世紀当時のイギリス社会では、ジェヴォンズほどではないにせよ、自国の繁栄の大きな部分が石炭に拠っていることが共通認識としてあり、それ故に石炭の枯渇に対する懸念と恐怖が通奏低音のように伏在していた。しかしその一方で、石炭が枯渇することになったとしても、他の動力源、例えば風車、水車、潮汐水車、水素、電気等といった代替エネルギー源がその不足分を埋めることになるだろうという一種の楽観論を抱いていたようである。ジェヴォンズはしかし、そのような代替エネルギーが石炭ほどの恩恵をイギリスにもたらすとは到底考えられないし、むしろそのような試みは石炭消費量をますます増大させることにしかならないとして、楽観論を流布する同時代の科学者を厳しく批判している。代替エネルギーとされた他源泉についてもそれぞれ丁寧に検証を行い、石炭と比較した場合における限界について述べている。

まず風車であるが、かつて蒸気機関が登場する以前において風車は、特に炭鉱での排水に用いられていたと述べる。しかし風車は無風時においては全く意味をなさず、それがために出力は不規則であり、炭鉱はその度に水没を余儀なくされた。その間炭鉱に従事する労働力と設備は遊休化し、結果として資本や労働の占めるコストは過大なものになったとする。さらには広大な丘陵地に設置されなければ効果を発揮できず、風車の立地も大きな制約を受けたとする。また、一般的な風車は一基当たり34人の労働者と最低でも7頭の馬を稼働のために必要とし、風車を大量に設置することで大規模な動力施設を建設して製造業に動力を送達するといった試みは全く非現実的であるという。

(23) Jevons, *op. cit.*, pp.140, 144, 161, 165-168.

さらに動力機関への応用における限界についても触れている。広大で風の懸念が少ない外洋では風力は依然として有力な選択肢であるが、ブリテン島からアイルランドや大陸ヨーロッパへ向かうような短距離航行においては風向きが元来不安定であり、適切な風向が得られるまで数週間遅延することも稀ではなかったという。このような不確実性が及ぼす経済的損失や影響は看過できず、だからこそ蒸気船の導入はこのような沿岸・河川交通においてこそ始まっているのであり、これによりかつてならば考えられなかった規則正しい運航と大量輸送が確立された⁽²⁴⁾としている。

次に水車であるが、水車は風車よりもイギリスでは昔より親しまれており、タービンや調速機の改良によって水車は他と比較して安価かつ良質な動力源として機能してきたという。しかしながら水車が設置可能な地域は、水の落下を惹き起こす高低差のある河川あるいは貯水池に限定されるため、水車動力を需要する工場や作業所を集中させることが困難であった。仮に製造業を水車動力施設に集中させたとしても、遠隔地から原材料や工業資材や製品を輸送しなければならず、これによって水車の安価性という優位はほとんど相殺されるかむしろマイナスになってしまうという。実際に、当時称賛されたカトリーン水車動力施設 (Katrine Water Mills) を例に挙げ、同施設は最良の立地に建設されたにも関わらず、輸送コストや渇水期における機能停止等を考慮に入れた場合その優位はほとんど喪われると試算している。また、前述した水車の設置に好適な高低差をもつ地域は、既に過去何世紀にもわたる水力開発の結果占有され尽くして既得権益化しており、今後新たな事業者が参入する余地はほとんどないとし、石炭枯渇時における代替という将来時点での選択肢にもなりにくい⁽²⁵⁾としている。

次が潮汐水車である。これは沿岸部における潮汐作用による高低差を利用した動力であり、イギリスでも水車ほどの存在感は無かったが、古代から連綿と継続されてきた方式であった。しかし潮汐作用による潮位の変化は日によって様々であって決して一定することがなく、このような差異に対応するためには非常に建設コストのかかる潮泊渠 (tidal basin) と呼ばれる複雑な潮留め調整池を建設するか、貯水池に揚水するための各種潮位に対応した潮汐ポンプを設置する必要があるという。そもそも潮汐水車が設置可能な海岸は、地質的に軟らかい砂質土壌で構成されている場所が多く、泊渠や堤防や貯水池その他付属施設の建設や維持には不向きであって、実際に半世紀前に建設されたマーシー川河口のバーケンヘッド埠頭 (Birkenhead Dock) とその周辺の潮汐水車や調整池等の関連施設は、堆積する大量の砂のためにまもなく放棄される⁽²⁶⁾だろうとしている。

さらに以上のような、風車や水車や潮汐水車は、動力源として用いることはできても、熱源として用いることはできないともいう。

次が電磁気エンジンである。これは電気で駆動されるエンジンのことを指しているが、当時は蒸気機関に代わる存在としての電磁気エンジンに対して強い期待が寄せられていたようであ

(24) *Ibid.*, pp.144-149.

(25) *Ibid.*, pp.150-158.

(26) *Ibid.*, pp.158-160.

る。しかしジェヴォンズは、電磁気エンジンという機械部品を構成する金属の精練過程にそもそも石炭が必要とされている上に、電磁気エンジンを駆動するための電力は、石炭を燃焼させる蒸気機関によって発電されたものであって、原理的に言っても代替するようなものではあり得ないという。彼によれば、蒸気動力が電力の源泉になることはできても、その逆は不可能であるということである⁽²⁷⁾。

次が水素ガスである。動力源としてしか用いられない水車や風車を用いて何らかの燃料を作り出そうとする試みは当時も知られており、『タイムズ』誌にも掲載された経緯があったという。水車・風車等を用いて貯水池に対して揚水を行い、水力発電によって電気を作り出し、その電力でもって水を電気分解して、得られた水素を燃料として用いるという発想である。ジェヴォンズはこのような試みは、ただでさえ少ない量でしかない初期投入動力を、揚水→発電→電気分解と複数のプロセスを積み重ねることで消費してしまい、最終的に得られる燃料のエネルギーは初期量と比べて極めて小さなものになってしまうだろうとし、全く無益な行為であると断じる。また仮に生成されたとしても、石炭と比較した場合における、水素ガスの単位熱量当たりの体積量は非常に大きなものとなり、輸送・貯蔵のためには圧縮するほかないが、そのためにもさらに動力を消費してしまうという⁽²⁸⁾。

最後に、在来型燃料である薪炭についても検討を加えている。薪炭は特に製鉄産業においては石炭よりも優れた火力を発揮することがあることは認めつつも、もし現在石炭によって行われている製鉄を薪炭で代替した場合、連合王国構成地域が占める総面積の2.5倍以上の地表を覆う森林を根こそぎ動員しなければならず、仮にできたとしても石炭の埋蔵と比較して森林は広範囲に散らばっているため、極めて効率の低い事業となるだろうと結論としている⁽²⁹⁾。

ジェヴォンズは他エネルギー源が持つ意義の全てを否定しているのではない。しかし、動力源及び熱源としての石炭があまりにも万能であるが故に、石炭と比較した場合どうしても劣った存在になってしまい、よって石炭を代替するという事などあり得ず、イギリスにおける石炭の絶対的優越性と依存が変化することもまた考えられないというのである。

これまで、石炭代替エネルギー・資源に対するジェヴォンズの指摘を見てきた。以下では21世紀現代における化石燃料に代わるとされる再生可能エネルギーの現状と展望について触れる。

今日、地球温暖化やそれに伴う気候変動に対する関心と危機感から、化石燃料に対する視線が厳しいものとなり、その代替として風力や火力、地熱や太陽光といった再生可能エネルギーに対する期待が高まっている。エネルギー資源の海外依存度が高い本邦においては、第一次オイルショック以降に太陽光や風力に関心が寄せられたが、2011年の東日本大震災による福島第一原子力発電所の炉心融解事故をきっかけに、再生可能エネルギーが改めて注目されている。世界エネルギー機関（IEA）は2017年に発表したWorld Energy Outlook 2018の中で2040年ま

(27) *Ibid.*, pp.160-161.

(28) *Ibid.*, p.161.

(29) *Ibid.*, pp.162-164.

で世界全体の一次エネルギー需要増加量の内 40% を再生可能エネルギーが占めることになるとし、英石油大手の BP (British Petroleum) も 2018 BP Energy Outlook で、再生可能エネルギー量は年平均 7.5% で成長し、2040 年までに発電量は 4 倍に、新規電源開発では半数以上を占めるようになるという、同様の予測を発表している⁽³⁰⁾。今後、再生可能エネルギーが存在感を高めていくことは間違いない。

その一方で、再生可能エネルギーが抱える限界や制約についても明らかになりつつある。再生可能エネルギーとは、過去に降り注いだ太陽放射エネルギーが貯蔵された形としての枯渇性資源である石炭や石油とは異なり、今現在地球が受けている太陽エネルギーが形を変えたものであり、そのエネルギー量は年間の化石燃料消費量と比較しても何万倍も大きく事実上無限ともいえるほどである。しかしこれを人間が有用なエネルギーとして取り出し利用できるかはまた別の問題となる。ストック型のエネルギーと言うべき化石燃料と異なり、フロー型のエネルギーであるという事実が、人間による利用を大幅に阻んでいるからである。それを示すのが、出力の不安定性と低いパワー密度 (power density)、熱源としての不確実性等の、再生可能エネルギーに固有の性質に基づく諸問題である。

出力の不安定性とは、人間の都合に従って欲しくないという意味である。主要な再生可能エネルギーのひとつである風車タービンによる風力発電を例にとって考えよう。風力発電は風さえあれば発電が可能であるが、その風の向き・程度は同じ立地であったとしても決して一定することがない。過去のデータから導き出された確率分布から予測しようとしても非常に困難である⁽³¹⁾。電力は貯蔵することが困難であるため、日々刻々と変化する電力需要量に対して供給側も機動的に対応しなければならないが、風力エネルギーはそれが原理的に不可能なのである⁽³²⁾。

同様の不安定性は他再生可能エネルギーについても、程度の差こそあれ、ほぼ同じ理由ではまる。水力発電は渇水や洪水、潮汐発電は潮位、地熱発電は火山活動による熱水や蒸気、太陽光発電や太陽熱発電は日照等、それぞれ異なる予測困難な気象条件や地質的要因によって大きな影響を受ける。

つまり枯渇性資源を用いたエネルギーと、再生可能エネルギーの間には単純な代替関係は成立しないということである。仮に再生可能エネルギーが発電総量で主流を占めるようになったとしても、現代社会を維持する上で絶対的条件ともいえる安定供給を実現するためには、同規模あるいはそれに近い発電能力をもった火力発電所や原子力発電所をバックアップとして常時待機状態に置かなければならない⁽³³⁾。

(30) [https://www.iea.org/weo2018/\(2018年11月28日最終接続\)](https://www.iea.org/weo2018/(2018年11月28日最終接続)); [https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html\(2018年11月28日最終接続\)](https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html(2018年11月28日最終接続))。

(31) Wind Report 2005-National Wind Watch, E. On Netz, [https://docs.wind-watch.org/eonwindreport2005.pdf\(2018年11月29日最終接続\)](https://docs.wind-watch.org/eonwindreport2005.pdf(2018年11月29日最終接続))。

(32) この需給調整に失敗したことが大規模停電 (ブラックアウト) という緊急事態を招いたという最近の経緯がある。平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う大規模停電に関する検証委員会: 中間報告 [http://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/resilience_wg/pdf/002_04_02.pdf\(2018年11月29日最終接続\)](http://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/resilience_wg/pdf/002_04_02.pdf(2018年11月29日最終接続))。

(33) 石田葉月『エネルギーと経済、そして人間』大学教育出版、2017年、130-132頁。

もうひとつが低いパワー密度の問題である。カナダの科学者・政策アナリストであるヴァクラフ・スミルが提唱した概念であるパワー密度とは、単位面積当たりのパワーつまり時間当たりのエネルギーフロー量によって定義されるものであり、エネルギー資源を獲得するに当たって必要とされる土地表面積の大きさを示している⁽³⁴⁾。スミルの試算によると各エネルギーのパワー密度は、石油・ガス田・石炭田で $100 \sim 10000 \text{ W / m}^2$ 、太陽熱温水や地熱で $40 \sim 90 \text{ W / m}^2$ 、太陽光発電で $5 \sim 20 \text{ W / m}^2$ 、水力発電で $0.6 \sim 9 \text{ W / m}^2$ 、風力発電で $0.5 \sim 2 \text{ W / m}^2$ という数値であり、再生可能エネルギーがこのような低値になるのはそのエネルギーがまさしくフロー型であって大気圏から地下に至るまで地球全体に広く散在しているからである⁽³⁵⁾。スミルの想定を受けて石田は、もし日本が再生可能エネルギーのみで年間最終エネルギー需要の全てを賄おうとした場合、エネルギーミックスとして再生可能エネルギーの中でも比較的パワー密度の高い太陽熱温水と、太陽光発電及び木炭とバイオ燃料を用いたとして、最良の組み合わせであったとしても合計 184000 km^2 の土地面積が必要になり日本列島全面積の三分の二に達すると試算している⁽³⁶⁾。このように土地集約的傾向を著しく強めるのが再生可能エネルギーの特徴であり、過去に降り注いだエネルギーを数億年に渡って蓄積してきたストック型の枯渇性資源とは根本的に異なる。

さらには、再生可能エネルギーは基本的に動力源や電源としてのものであって、基本的に熱源には不向きであるということである。風力発電や水力発電は風や水流で直接タービンを回して発電し、太陽光発電は太陽光をシリコン半導体で直接電気エネルギーに変換するため、化石燃料のように燃焼というプロセスを経ることがない。このため再生可能エネルギーで熱源を作り出す場合、得られた電力を熱エネルギーに変換するか、水の電気分解を通して水素ガスへと転換しその水素を燃焼させて熱源とする方法に主に二つがある。前者の方式は家庭用の暖房などには適しているが、電気分解によるアルミニウム等を除いて高熱を必要とする金属精練や重量物輸送用の燃料として不向きであり、産業用・運輸用としては後者に頼らざるを得ない。ドイツでは P2G (Power to Gas) という名称で再生可能エネルギーから水素ガスを製造する試みが複数進行しており、本邦でも同様の実証事業が展開中である⁽³⁷⁾。とはいえ、これらは本来再

(34) V. Smil, 'A new world of energy', in J.R. McNeil, Kenneth Pomeranz (ed.), *The Cambridge World History, Volume VII, Production, Destruction, and Connection, 1750-present*, Cambridge, 2015, pp.194-195.

(35) V. Smil, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015.

(36) 石田、前掲書、144-147 頁。石田は 2015 年の最終エネルギー需要を総計 460GW とし、その給湯・暖房用に 70GW、輸送用燃料として 92GW、金属精練用として 46GW、電力として 115GW、その他に 137GW を計上している。給湯・暖房用エネルギーは太陽熱温水で直接賄うとして、電力需要に関しては太陽光発電を、輸送用燃料と金属精練にはバイオ燃料と木炭を用いるとしている。各エネルギーのパワー密度は、太陽熱温水で 50 W / m^2 (これは理想値で、中緯度温帯地域で 50 に届くことは実際には困難)、太陽光発電で 15 W / m^2 、木炭で 1 W / m^2 、バイオ燃料で 0.5 W / m^2 を想定している。諸外国を事例とした同様の試算として、D.J.C. MacKay, 'Solar energy in the context of energy use, energy transportation, and energy storage', *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 371, Issue 1996, 2013, pp.1-23.

(37) 新エネルギー産業技術総合開発機構：水素社会構築技術開発事業 http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100096.html (2018 年 11 月 29 日最終接続)。

生可能エネルギーがもつ不安定性に対する補償措置として考案されたものであり、実際に熱源として用いられるかは未知数である上、水素を貯蔵・輸送する過程でも大量のエネルギーを必要とするため生産可能な熱量は投入量に比べて非常に小さなものに留まるといふ指摘がある⁽³⁸⁾。

熱源としての不確実性についてはいったんおくとしても、出力の不安定性と低エネルギー密度という二つの制約を完全に克服することは、前述したように物理的な限界を伴うため不可能である。しかしそれでも社会にとって有用な形で取り出そうとするならば、化石燃料と比較した場合投じられる設備や資金やエネルギーがより大きくなることは避けられない。エネルギー生産における効率つまり投入量と生産量の比率という視点からすれば、化石燃料資源であれば再生可能エネルギーであれ、なんらかのエネルギー源は、完全に等価的な尺度というわけではないものの、エネルギー投資効率（EROI, energy return on investment）という統一的な指標によって数量化し比較することが可能となる。

エネルギー投資効率とは、獲得されたエネルギーを投入されたエネルギーで除することによって得られる指標である⁽⁴⁰⁾。例えば石油は、内圧によって自噴するという地質学的性質を抱えているため、獲得できるエネルギーと比較して投入されるエネルギーは非常に少ない量で済む。アクセスの良い中東油田が発見されたこともあって1980～2000年代にかけて世界全体での石油のEROIは約30～40を維持し続けたが、その後緩やかに低下して現在25程度で推移している⁽⁴¹⁾。一方、再生可能エネルギーである風力発電では3～4、太陽熱発電で7～8、太陽光発電では2～4、バイオエタノールで2弱という数字である⁽⁴²⁾。低下傾向にあるとは言え依然として高い数値を示す化石燃料と比較して再生可能エネルギーの非効率性が露わとなるが、このような効率の低さは、単なるコスト面での負担増に留まらず、文明社会の持続可能性にも関わる重大な問題であると指摘する研究者もいる⁽⁴³⁾。

(38) 石田、前掲書、138-189頁。室田は、このような複数の工程を経て動力生産を行うことは迂回度を高めることに繋がり喪われるエネルギーが大きなものになると指摘する。室田、前掲書、21-22頁。

(39) ただし石油や石炭などの枯渇性資源は、通常アクセスの容易な箇所から採掘が始まることから、全体的な傾向として以前よりも採掘の困難は増しつつあり、それに伴って必要とされる資金やエネルギーも大きくなっている。例えば北米で開発が進められている非在来型石油であるシェールオイル・タイトオイル・サンドオイルは、通常の油田と比べても効率が非常に低い。石田、前掲書、113-124頁。

(40) C.J. Cleveland, C.A.S. Hall, R. Kaufmann, *Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process*, New York, 1986. エネルギー投資効率の、産業革命期イギリスの経済史研究に対する含意については、大西悠「環境経済学からみた近代イギリス石炭産業」修士論文、大阪大学、未刊行。

(41) 石田、前掲書、96-98頁。

(42) D. Weissbach, G. Ruprecht, A. Huke, K. Czernski, S. Gottlieb and A. Hussein, 'Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants', *Energy*, Vol. 52, 2013, pp.210-221; C.A.S. Hall, J.G. Lambert, S. B. Balogh, 'EROI of different fuels and the implications for society', *Energy Policy*, 2014, pp.141-152. 技術革新が進む太陽光発電のEROIは、構成物質である多結晶・単結晶型とアモルファス型で異なり、前者で4弱、後者で2弱程度である。

(43) C.A.S. Hall, S. Balogh and D.J.R. Murphy, 'What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have?', *Energies*, 2009, Vol. 2, pp.25-47; J. Lambert, C.A.S. Hall, S. Balogh, A. Poisson, A. Gupta, 'EROI of Global Energy Resources: Preliminary Status and Trends', UK-DFID 59717, 2 November 2012; J. Lambert, C.A.S. Hall, S. Balogh, A. Gupta, M. Arnold, 'Energy, EROI and quality of life', *Energy Policy*, Vol. 64, 2014, pp.153-167.

以上、現代における再生可能エネルギーを巡る問題点について指摘した。この上で、ジェヴォンズの論考と比較した時に何が読み取れるだろうか。

明らかであるのは、再生可能エネルギーが内在的に抱える制約の多くを、ジェヴォンズが19世紀の段階でほとんど全て正確に指摘していたということである。彼は石炭と比較した場合において他エネルギー源が根本的に劣っている点を、総エネルギー量・制御の任意性・熱源としての代替不可能性といった視点から説明しているが、これらは現在明らかとなっている再生可能エネルギーの限界に対する見解とほぼ一致している。ここからは現代でも通用する、各種エネルギーの基本的な概念や性質に対する理解が既にほぼ備わっていたということができよう。石炭と比較して風力や水力がその総量において極めて劣り、かつ任意にそのエネルギーを取り出せないという指摘からは、石炭がストック型エネルギーであり風力・水力がフロー型エネルギーであることを理解していたことがわかる。また電気とは、石炭等燃料を燃やすことによって発生する二次エネルギーであって、一次エネルギーである石炭とは明確に区別されるべき存在であることをも認識している。またフロー型エネルギーのストック化としての側面を持つ水素ガスの製造に対する批判も、現代の同様の試みに対するエネルギー経済学からの批判ともほぼ重なり合っている。各エネルギーを人間に対して熱と動力をもたらすという結果のみから一義的に判断することなく、各種源泉の性質について深い理解を得ていたことを示すものである。

再生可能エネルギーの原理的な限界は、世間一般の期待と科学的知識の不足を前に共有されているとは言い難いが、石炭の枯渇に対する懸念が叫ばれた19世紀イギリスにおいても、石炭を代替するエネルギー源としての再生可能エネルギーに対する過度な楽観と期待感があった。その意味で、19世紀には現在と共通する歴史的事情が存在していたということが出来る。しかしそのような背景にあってもジェヴォンズは、自らの観察と直感によって安易な代替エネルギー論に対して警鐘を鳴らした。なかんずく彼の議論は、二次エネルギーの大部分を占めるようになった電力や太陽光を直接電気に変換する発電方式等その後の技術進歩によって変化した部分や石油の存在を見抜けなかった等の問題はあるものの、現代にも適用可能な普遍性を備えたものであり、さらには再生可能エネルギーの原理的な限界を既に一世紀以上前に指摘していたのである。

4 おわりに

本稿では、学術的に大きな注目を浴びているとは言えないジェヴォンズの『石炭問題』から重要と思われる部分を抽出して、既存の議論における位置づけや現代的意義を探った。

前半では、『石炭問題』を経済の成長論として読み解き、経済史研究における経済成長の源泉に関する議論に位置付けることを試みた。その結果、自然環境をも含んで経済を考察しようとするジェヴォンズの思考の独自性が明らかとなり、既存の議論において等閑視されてきた経済が成長するための前提条件に関する新たな知見を得ることができた。

後半では、石炭代替エネルギーに関するジェヴォンズの論考を、現在のエネルギーをめぐる議論と比較することによって、その現代的意義を探った。検証の結果、ジェヴォンズの代替エネルギーに対する指摘は、現代の再生可能エネルギーをめぐる諸問題とほぼ一致しており、その背景にはエネルギーや各種源泉の本質に関するジェヴォンズの深い理解があることが明らかとなった。エネルギーに関する彼の認識と主張は、21世紀の現在にも多くの示唆を与えている。