

石油文明の黄昏について

Notes on the Twilight of the Oil Civilization

大谷 正幸
OHTANI Masayuki

My previous works on the predicament of the oil civilization are summarized while introducing the recent related topics. An empirical formula of nominal economic scale is derived as the function of primary energy supply. Based on the formula, changes in the industrial structure, so called the Petty-Clark's law, is explained from the viewpoint of thermodynamic constraint and economical profit. Furthermore, it is revealed that the energy development of low EROEI is antagonized to modern food supply system. Dmitry Orlov's "the five stages of collapse" scenario is briefly introduced as an outlook of oil civilization.

1. はじめに

化石燃料由来のエネルギーを利用することで産業革命がもたらされ、この200年ほどの間に社会もライフスタイルも大きく様変わりしたが、いよいよ利用可能なエネルギー供給量を増加させることが困難な時代に突入している。現代文明の生き血とも言える石油の生産が翳り始めているからだ。世界全体の在来型油田の石油生産量は2006年頃から頭打ちになっており¹、今やシェールオイルバブルも弾け、新規油田開発の資金調達が困難になるなど石油業界の苦境を伝えるニュースも増えている。

石油生産の将来予測としてサウジアラビアの石油生産量の数倍に匹敵するほどの未発見・未開発油田の埋蔵量を加えた非常に楽観的なモデルが示されることもあるが、2010年にメキシコ湾の深海油田で原油流出事故が起こったとき、オバマ大統領（当時）が「地上や浅瀬で掘削できるところがなくなっている」²とコメントしていたことこそ真実であろう。1956年のアメリカ映画『ジャイアンツ』のワンシーンのように簡単に掘り当てて石油が噴き出す地上の油田はほとんどなくなっており、もはや莫大な開発コストがかかる深海や極地の油田あるいは油母を含

んだ頁岩のようなものしか残っていないのである。すでにイージーオイルは減退しており、石油開発において、EROEI(Energy Return on Energy Investment)というエネルギーの質を表す指標（市場に出回って利用可能となるエネルギーと開発のために費やされるエネルギーの比）の低下は明らかなのだ。

石油は、大規模かつグローバルな物流をも可能にしてきた燃料源だが、その生産量および利用可能な供給量は今後、低下の一途を辿ると予期すべきであろう。それに伴い、物流の規模が縮小することは理の当然である。石油はまたプラスチックや医薬品、化学繊維等さまざまな石油化学製品の原材料でもあり、今後、原料が減って最終生産物が増える道理はない。

石油の大量消費の上に成り立ってきた現代文明は今、もはや成長を望めない変曲点を過ぎたと見るべきであり、今後、EROEIがさらに低下し、なおかつ利用可能なエネルギー供給量が減少し続けると、いかなる問題に直面し得るかを予見しておくことが重要である。それは決して省エネや節約あるいは新エネルギー技術によってのみ克服できる問題ではない。国際分業や成長を前提としたシステム全体に及ぶ不具合を招来するものであると認識して、コン

ティンジェンシー・プランを構想しておくことが肝要である。

本稿では、石油文明の行く末を考察するために取り組んできた筆者のこれまでの研究を要約するとともに、最近の動向について示唆を与えたい。

2. エネルギー利用と経済規模

ペティ＝クラークの法則と呼ばれる経済法則は、一国の経済が豊かになるにつれて産業構造が一次産業から二次産業、三次産業へとウェイトがシフトしていくことを主張する。この法則は経済成長に伴う都市化の進展と農漁村を擁する地方の衰退という社会変化を含意せずにはおかないが、経済学的な「豊かさ」の増進とは、モノ・サービスの充実を指しており、物理的な意味でのエネルギーの利用拡大を伴ってもたらされてきたことは言を俟たない。

では、今後予想されるエネルギー利用の縮小局面において、帰農が進むような産業構造の可逆変化は起こるだろうか？これについて筆者は、「おいそれと帰農できない理由について」³と題してすでに論じている。それは、経済規模をエネルギー供給量の関数として近似的に表すことで、エネルギー供給量の縮小局面を展望する上での手掛かりをつかむ試みであった。

まず注目すべきは、各種のエネルギー価格がエネルギー単位と貨幣単位を直接結びつけているということである。1000リットルの原油は38.1GJ（ギガ・ジュール=10億ジュール）の熱エネルギーに変換可能であり、1 kWh（キロワット時）の電力は0.0036GJ、10kg（キログラム）の米は含水率15%の炭水化物として0.136GJに相当する。したがって、たとえば30000円/kLの原油ならば787円/GJ、20円/kWhの電力は5555円/GJ、4000円/10kgの米は19411円/GJへとそれぞれエネルギー単価（円/GJ）に換算して比較可能になる。

図1に、原油（輸入CFI）、電力（総合単価）、および米のエネルギー単価としての推移を示す。図1には日本の名目GDP（1954年以前は名目GNP）を一次エ

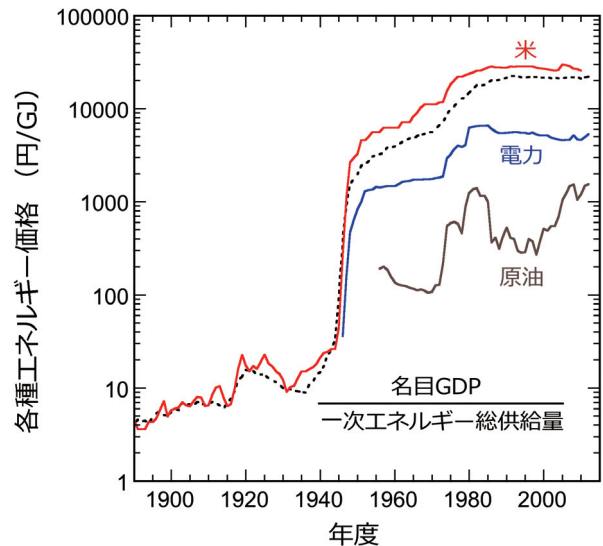


図1 エネルギー単価換算された原油、電力、米の価格および名目GDPを一次エネルギー総供給量で除算した値（破線）の推移

ネルギー総供給量で除算した値の推移も載せている。

なお、原油価格、電力価格、名目GNP、名目GDP、一次エネルギー総供給量および家庭部門での最終エネルギー消費量については、矢野丈太郎記念会編『数字で見る日本の100年 改定第4版』および『EDMC/エネルギー・経済統計要覧（2016年版）』を出典としている。米価については、「消費者米価」が発表されていた2004年までのデータは既報³にて用いた低位の米価であり、2005年以降は総務省統計局小売物価統計調査結果（<http://www.stat.go.jp/data/kouri/doukou/3.htm>）による東京都区部のうち米価格を用いて算出した。

興味深いことを指摘すれば、原油、電力、米をエネルギー単価として比較するならば、物理学的には等価なはずの1 J（ジュール）のエネルギーに価格差が存するという事実がある。エネルギー単価に換算して顕わになる各種エネルギー価格の序列は経済活動が熱力学の法則を免れないことに由来する。熱力学が教えるように、エネルギーは保存されるが質の低下を免れないからだ。そのため、現代文明が機能するように各種エネルギー価格の序列が規定されざるを得ないのである。

たとえば火力発電のエネルギー変換効率が40%だとすれば、1 J の原油が0.4 J の電力に変換されるということだが、0.4 J 分の電力価格が1 J 分の原油価格より高価でなければ燃料コストさえ賄えない。したがって、エネルギー単価として電力は原油の2.5倍以上の水準にならないと採算が合わず、経済過程として継続し得ないということでもある。また、近代農業は多量の化石燃料を用いて成り立っており、1 カロリーの食材が食卓に届くまでに10カロリーの化石燃料を用いているという報告⁴もある。したがって、エネルギー単価として食材は原油の10倍以上の水準でなければ現代の食糧供給システムは破綻してしまうのだ。

ともあれ図1において、名目GDPを一次エネルギー総供給量で除算した値がエネルギー単価としての米価と同じオーダーで平行に推移してきた事実気づけば、経済規模についての経験式を誘導することが可能になる。すなわち、

$$\frac{\text{名目GDP}}{\text{一次エネルギー総供給量}} \propto \text{米価}$$

これより、年々の名目の経済規模は、ある年のエネルギー単価として換算された米価にその年の一次エネルギー総供給量を乗じた量に比例するような規模となることが推察される。言い換えるならば、原油等の安価な一次エネルギーが経済活動を通して米価ほどの高値となるような付加価値を生んできたということである。家庭部門でのエネルギー利用が付加価値を生まないことを考慮して、家庭部門での最終エネルギー消費を一次エネルギー総供給量から差し引き、また、国外からの原材料等の仕入れ原価にあたる輸入総額を差し引けば、次式のように名目経済規模 V_j を表す経験式を導くことができる。

$$V_j = P_j \times (E_j - H_j) - I_j$$

ここで、添え字 j は年度を表し、 P_j はエネルギー単価として表した米価、 E_j は一次エネルギー総供給量、 H_j は家庭部門における最終エネルギー消費量、 I_j は輸入総額である。

この式を用いて算出した名目経済規模 V_j と名目GDPの政府発表値の推移を図2に示す。導出された

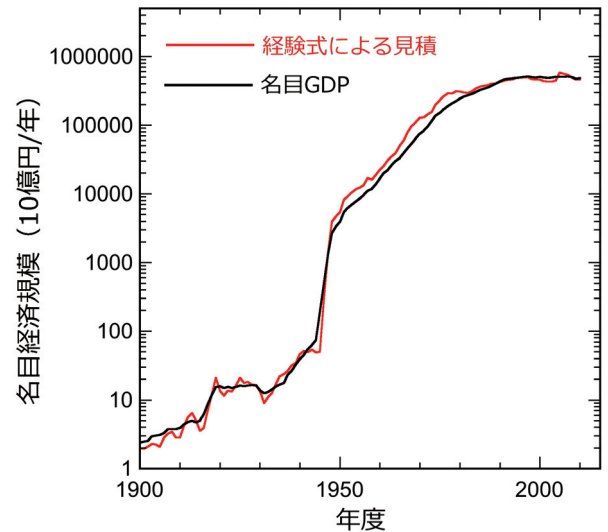


図2 経験式を用いて見積もった名目経済規模 (V_j) と名目GDP (1954年以前は名目GNP) の比較

経験式を用いることで、経済規模の長期的な傾向を一次エネルギー総供給量と関係づけてうまく再現できることは一目瞭然であろう。図2から推察されることは、経済活動において、安価な1 GJのエネルギーの化身としてのモノやサービスは、平均すれば、およそ1 GJ分の米に匹敵する高値で取引されてきたということである。そして、このように帰納された関係性にもとづき、産業構造変化とエネルギー開発事業の進展について、演繹的な考察が可能になる。なお、なぜ米価が経済規模に関わるベンチマークとなるのかについては、既報³にて考察している。

3. エネルギー利用と産業構造変化

あらゆる経済活動はエネルギーの散逸を伴うがゆえにエネルギー・コストを免れない。それゆえ、最終販売価格とエネルギー・コストの差額によって、限界的な生産額（以下、「粗生産額」と称す）が決まる。

1 GJ分の米価を X 、1 GJ分の化石燃料（一次エネルギー）の価格を Y とするならば、図2に示される傾向より、平均的な経済活動において1 GJのエネルギー利用から生み出される粗生産額は、 $X - Y$ と表せる。 n GJのエネルギーを投じたならば、 n GJ分の米

に匹敵する売り上げが期待されるので、販売価格と燃料コストの差額として表される粗生産額は $nX-nY$ となる。

一方、近代農業は化石燃料の大量利用の上に成り立っているが、1 GJ分の米の生産に n GJの化石燃料を投入しているとしよう。ここで、 $n > 1$ である。1 GJ分の米の販売価格と n GJ分のエネルギー・コストの差額として表される粗生産額は $X-nY$ となる。

同一のエネルギー・コストながらも粗生産額に違いが生じることが示唆することは、明らかに米生産の所得効率は平均的な経済活動よりも悪いということであり、化石燃料利用が進めば進むほど農外に就業機会が生まれてペティ＝クラークの法則に従った産業構造の変化が促されるわけである。実際に日本において、「国民所得倍増計画」の理論的支柱であった下村治が「経済成長が進むとともに、農民は自分の経済的な運命を自分の創意と工夫と責任で選択し、自分の最も幸福と思う方向に進んでいくということになるに違いない」⁵と記していた通りのことが起こったことは、歴史が証明している。

付言すれば、1931年の米穀法改正から1995年に食糧管理制度が廃止されるまで米価は管理されており、とりわけ戦後日本において食糧価格の支持が高度経済成長の核であった工業化の推進に寄与したであろうと考えられる。翻って、21世紀の日本経済の低迷と格差社会化は、産業革命を牽引した19世紀大英帝国において、穀物法にもとづいた保護主義の撤廃が低賃金労働政策を推し進めて覇権の喪失と階級社会化をもたらしたことを想起させる。そうはいつでも、粗生産額の比較が示唆する、おいそれと帰農できない数理が働き続けているのである。

4. エネルギー開発と都市のジレンマ

2008年7月にWTI原油価格が1バレル147ドルを記録したが、その史上最高値に迫る過程で漁業、畜産業、運送業といった業者の抗議活動が世界中で沸き起こった。同年9月には投資銀行のリーマン・ブラザーズが破綻、いわゆるリーマン・ショックが世

界を駆け巡った。その後、原油価格は下落に転じて、1バレル60ドルにも落ち込むと、新規のエネルギー開発事業（EROEIは低い）の延期・中止を伝えるニュースが届けられるようになった。原油価格の高騰と下落に伴った、この一連の出来事も前節と同様の数理的思考によって考察可能である⁶。

n GJのエネルギーを投じて m GJのエネルギーを産出するエネルギー開発事業において、販売額とエネルギー・コストの差額として表される粗生産額は $mY-nY$ であり、これを变形すれば、 $nY\{(m-n)/n\}$ と表せる。このエネルギー開発事業のEROEIは、

$$\text{EROEI} = \frac{\text{市場に出回るエネルギー}}{\text{開発に投入したエネルギー}} = \frac{m-n}{n}$$

である。したがって、このエネルギー開発事業の粗生産額は nY とEROEIの積の形になる。これが n GJのエネルギーを投じた平均的な経済活動の粗生産額 $nX-nY$ よりも大きいとき、エネルギー開発事業は生産額において魅力的な経済活動となる。すなわち、

$$nY \cdot \text{EROEI} > nX - nY$$

であり、これより、

$$\text{EROEI} > \frac{X}{Y} - 1$$

という不等式が得られる。EROEIがこの不等式を満たすようなエネルギー開発事業ならば、平均以上の生産額が見込める合理的な経済活動となる。

EROEIの低い新規のエネルギー開発事業が進むには、 X/Y の値が小さい方がよいことになるが、それは主食価格据え置きで化石燃料価格が上昇するような場合であり、エネルギー価格の上昇時に新規エネルギー開発事業が進展するというのはこれまでは当然のことのように思われてきた。

ところが、1カロリーの食材が食卓に届くまでに10カロリーを使うような先進国の食糧供給システムでは、 X/Y の値は10以上でなければ食糧供給システムの採算が取れない。実際、2008年の原油価格高騰時には運送業者らがエネルギー・コストに圧迫されて利益を確保できない事態となり、それが抗議活動という形になった。实体经济の根幹である食糧供給システムが機能不全に陥っては、需要の減退を招き、

エネルギー開発も頓挫するよりほかない。

都市を支える食糧供給システムが機能するには主食と石油等の一次エネルギーに価格差が要求されるが、その価格差はエネルギー開発が進む条件に制約を加えているわけである。まことに主要な一次エネルギーである原油の価格が上昇すればエネルギー開発事業には好機であるはずながらも都市を支える食糧供給システムに支障が生じ、原油価格が下落すればエネルギー開発事業が頓挫して未来社会に影が差すというジレンマに陥っているのが、現代文明の姿なのである。というのも、すでにイーザーオイルが減退して、石油生産におけるEROEIの値が10に迫るくらいにまで低下していると見積もられているような状況だからである⁷。

5. 「成長の限界」から「崩壊5段階説」へ

ローマ・クラブによる「成長の限界」レポート(1972年)の追認調査が行われ、かつてなされた予測の妥当性が確認されている⁸。その「標準計算」における予測とは、工業生産やサービス生産のピークが2015~2020年頃に訪れるというものであった。その予測と符合するかのようになり、アメリカでは石油および天然ガスの生産部門の雇用者数が2014年10月のピーク以来減少中にある⁹。

「成長の限界」に至るとして、その後の経済の縮小予測が大勢を占めるようになれば、エネルギー開発向け投資が減少するばかりか、あらゆる産業において融資が慎重になり、経済の縮小に拍車を掛けることになるだろう。アイルランドのシンクタンクFeastaのデイビッド・コロウィッツ(David Korowicz)は、貿易金融のしくみに注目し、掛け売りによって営まれている国際貿易の不具合とそれに伴うインフラストラクチャーの機能不全を予測している¹⁰。2011年の東日本大震災の後に部品不足が生じてサプライチェーンが寸断されたようなことが経済の縮小による金融面での不具合から生じ、国際分業によって供される各種の部品が不足する事態に陥り、インフラストラクチャーの維持・更新が困難になるとい

うのである。奇しくも、2016年8月末に韓国海運最大手の韓進海運が事実上倒産、本稿を執筆している最中にも、日本で日本郵船、商船三井、川崎汽船の海運大手3社が採算の悪化した定期コンテナ船事業を統合するニュースが届いたが、これらは国際貿易がすでに縮小していることの証左である。

このような時勢だけに、エネルギー供給量の不可避的減少と経済の縮小を与件とした将来展望が渴望されよう。

たとえば、オックスフォード大学の政治学者イェルク・フリードリッヒ(Jörg Friedrichs)は、1918~1945年の日本の軍国化、ソビエト崩壊後の北朝鮮の全体主義傾向とキューバの社会経済的適応を参照しつつ、エネルギー危機に陥った国の進路についての論考を発表している¹¹。日本の社会科学分野においても、聖泉女子大学の山本達也は世界的なエネルギー事情の悪化が民主主義的諸価値を脅かすものであるとして考察を深めている¹²。

そして、筆者がとくに注目したのは、ピークオイル論者のドミートリー・オルロフ(Dmitry Orlov)の論考である。オルロフは、コロウィッツの論考¹⁰を踏まえて、エネルギー供給量の減少に端を発する社会変化について「崩壊5段階説」¹³を提唱した。

「崩壊5段階説」は、これまで当たり前だと信じていたことが失墜する段階に応じて社会変化を崩壊過程として順序立てたものである。第1段階は「金融の崩壊」であり、「平常通りのビジネス」という信頼が失われる。第2段階は「商業の崩壊」であり、「市場が供給してくれる」という信頼が失われる。第3段階は「政治の崩壊」であり「政府が面倒を見てくれる」という信頼が失われる。第4段階は「社会の崩壊」であり、「周りの人々があなたを気遣ってくれる」という信頼が失われる。第5段階は「文化の崩壊」であり、「親切気、寛大さ、思いやり、情愛、正直さ、もてなしのよさ、同情心、慈悲」といった人間の善良さへの信頼が損なわれる、というものである。

「崩壊5段階説」の機序は次のようなものである。エネルギー制約によって不可避的にもたらされる生産活動の縮小が成長を前提とした金融の仕組みと齟

齟をきたし（第1段階：金融の崩壊）、金融危機ゆえに掛け売りが滞って商業の不具合が広がる（第2段階：商業の崩壊）。すると、徐々に課税基盤が棄損され、政治の不如意からナショナリズムが呼び起こされ、専制と化すことが懸念される（第3段階：政治の崩壊）。苛斂誅求が闇経済の温床となる一方で、支配層は戦時体制の微発から私腹を肥やすまでに腐敗して、他者に構えないほどに人々が疲弊すれば、社会の紐帯が綻んでしまう（第4段階：社会の崩壊）。さらにオルロフは、アフリカのイク族の暮らしを描いた人類学者コリン・ターンブルの著書『プリンジ・ヌガク 食うものをくれ』を参照しつつ、「人間らしさ」を喪失しつつも生命サイクルを繰り返すような状況をも深慮する（第5段階：文化の崩壊）。

オルロフは、第1段階および第2段階を食い止めることは数理として不可能だが、第3段階以降の崩壊を食い止めることに知恵を働かせよ、と説いているのである。

6. おわりに

2007年に出版されたデイヴィッド・ストロンの著書『地球最後のオイルショック』の中には、「経済成長にとって石油が重要なのは自明であり、経済学者は石油の動向を注視し、その重要性を正確に分析していると思うかもしれない。だが、これまで、そうした研究はないに等しかった」¹⁴と指摘されており、また、IMF（国際通貨基金）の報告書に「ピークオイル」が考慮され始めたことが窺えるようになったのもようやく2012年10月になってからのことである¹⁵。

したがって本研究は、手探りの状態から始められたわけであるが、名目の経済規模をエネルギー供給量の関数として近似的に表すことで、ペティ＝クラークの法則に示される産業構造変化を熱力学的制約と採算性の観点から考察することを可能にした。さらに、エネルギー開発事業が進む条件を考察することにより、現代の食糧供給システムが成立する経済的要件にEROEIの低下が抵触することを簡単な

不等式で表し、石油文明が苦境に立たされる数理を明示した。それが石油文明の終焉さえも得心させるものであったがゆえに、筆者は石油文明の行く末を考察した論考の読解へと誘われた。

わけでもオルロフの『崩壊5段階説』は興味深く、筆者はその邦訳出版にも取り組んだ。その論考は、石油減耗問題という人類史の大津波を前に、多数派同調性バイアスおよび正常性バイアスに呪縛されて逃げ遅れることのないようにするためのイメージトレーニングを供している。金融緩和策の限界、国際貿易の縮小、ナショナリズムの台頭など、すでに石油文明の黄昏を告げる症状は現れ始めている。苦難を予見しつつオルロフは、贈与経済の再考を促し、ソーシャル・キャピタル（互恵的な人的ネットワーク）の構築に光明を見出している。それは貨幣経済が席捲してゲゼルシャフト化した社会に慣れた現代人に待ち受ける、大いなる試練である。

註

- 1 “Crude oil output reaches an undulating plateau of around 68-69 mb/d by 2020, but never regains its all-time peak of 70 mb/d reached in 2006, while production of natural gas liquids (NGLs) and unconventional oil grows strongly.” International Energy Agency, World Energy Outlook 2010, p.48.
<http://www.worldenergyoutlook.org/media/weo2010.pdf> (2016年10月28日アクセス)
- 2 The White House Office of the Press Secretary, Remarks by the President to the Nation on the BP Oil Spill (2010年6月15日付)
<https://www.whitehouse.gov/the-press-office/remarks-president-nation-bp-oil-spill> (2016年10月28日アクセス)
- 3 大谷正幸「おいそれと帰農できない理由について」、もったいない学会WEB学会誌、第1巻、2007年、pp.21-29.
- 4 US department of Agriculture, National Resources Conservations Service, “Grazing Lands”, RCA Issue Brief #6, (1995年11月6付),
http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/technical/nra/?&cid=nrcs143_014209 (2016年11月2日アクセス)
- 5 下村治『日本経済成長論』、1962年、金融財政事情研究会、p.190。（同書復刻版、1962年、中央公論社、p.245）
- 6 大谷正幸「ひと夏の経験～EPRと経済の関係が示唆する現

- 代文明の翳り〜」、もったいない学会WEB学会誌、第2巻、2008年、pp.49-52.
- 7 Charles A.S. Hall, Jessica G. Lambert and Stephan B. Balogh, “EROI of different fuels and the implications for society”, *Energy Policy*, 64, 2014, pp.141-152.
 - 8 Graham Turner and Cathy Alexander, “Limits to Growth was right. New research shows we’re nearing collapse”, *The Guardian* (2014年9月2日付),
https://www.theguardian.com/commentisfree/2014/sep/02/limits-to-growth-was-right-new-research-shows-were-nearing-collapse?CMP=share_btn_tw (2016年11月1日アクセス)
 - 9 米エネルギー省エネルギー情報局, “OIL AND NATURAL GAS PRODUCTION JOBS IN MAY WERE 26% LOWER THAN IN OCTOBER 2014” (2016年8月5日付),
http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=27392#tabs_SpotPriceSlider-1 (2016年11月1日アクセス)
 - 10 David Korowicz, “Trade-Off: Financial System Supply-Chain Cross-Contagion: a study in global systemic collapse”, 2012, <http://www.feasta.org/wp-content/uploads/2012/06/Trade-Off1.pdf> (2016年11月1日アクセス)
 - 11 Jörg Friedrichs “Peak Oil Futures: Same Crisis, Different Responses Energy”, in Oliver Inderwildi and Sir David King (eds), *Transport, & the Environment*, 2012, London: Springer, pp. 55-75.
 - 12 山本達也「エネルギー環境の構造的変化と民主主義に関する一考察」、清泉女子大学人文科学研究所紀要、第37号、2016年、pp.29-45.
 - 13 Dmitry Orlov, *The Five Stages of Collapse: Survivors’ Toolkit*, 2013, Canada: New Society Publishers. (大谷正幸訳『崩壊5段階説 生き残る者の知恵』、2015年、新評論)
 - 14 デイヴィッド・ストローン『地球最後のオイルショック』、2007年、新潮社、p.150.
 - 15 Michael Kumhof and Dirk Muir, “Oil and the World Economy: Some Possible Futures”, *IMF Working Paper*, 2012, <http://www.imf.org/external/pubs/ft/wp/2012/wp12256.pdf> (2016年11月5日アクセス)

(おおたに・まさゆき

一般教育等／物理化学・エルゴソフィ)

(2016年10月31日 受理)

