

研究ノート

石油ピーク後の食料事情

Antony F.F. Boys¹

投稿受付：2009年8月17日 受理日：2009年8月24日 WEB公開日：2010年2月22日

Abstract

The advanced industrialized countries use 13-18% of their energy budget on food production and consumption. The main components of this energy consumption are machinery, fuel, chemicals (fertilizers and pesticides), transport, food processing, packaging, retailing, and preparation. Currently, over 10 calories of fossil energy are used to provide each calorie of food in these countries. The decline in availability of fossil resources, symbolized by the term Peak Oil, is a serious threat to the ability to provide food for the global population. Countermeasures to this threat are proposed.

要旨

先進工業国は、エネルギーの総消費量の13～18%を食料生産と消費に向けている。このエネルギー消費の主な要素は機械類、燃料、化学製品（化学肥料や農薬）、輸送、食品加工、包装、販売と厨房関係などである。これらの国々では、食料1カロリーを口に入れるために10カロリー程度の化石資源を消費している。「石油ピーク」という言葉で象徴される今後の化石資源の入手困難な事態は、世界の人口の食料供給に対する大きな脅威である。この文章の最後で、その脅威への対策を提案する。

【キーワード】：石油ピーク、食料生産、緑の革命、化学肥料、農薬、農機具、輸送

1. はじめに

世界の石油産出ピーク（Peak Oil）というのは、世界全体の従来型石油の年間産出が最大となり、その後次第に減退することである（大久保 泰邦「石油ピークって何？」参照）。石油ピークをいつ迎えるかについては様々な見解があり、中には、すでに2005年にピークを過ぎたか、あるいはまさに現在石油産出曲線の山頂の平坦部（数年続く）にいるのではないかという意見もある。また、従来型・非従来型石油と天然ガスの産出ピークは2020年までに、石炭の産出ピークも2040年までには訪れると言われ、もはや避けられない事態なのだ。

ここでは、従来型石油、そしてやがて化石燃料全体（石油、天然ガス、石炭）の産出が今世紀中に緩やかに減少していく（価格が高くなる）中で、世界や日本の食料生産と流通などがどのような影響を受けるのか、どのような対策がとれるのかを検討したいと思う。そこでまず、現在までのエネルギーと食料の

関係を見てみたいと思う。

2. 産業革命

そもそも、約200年前までは、食料生産（農業）を営むためのエネルギーはほとんどすべてを太陽から直接得たと言っても良いだろう。植物は光合成で成長し、人間や家畜がそれを食べて、そのエネルギーで田畑を耕すなど毎年の農業のサイクルを営んだ。太陽エネルギーを間接的に利用した例は、例えば穀物を挽くための風車や水車であった。また、漁業は地引網や帆船などによって行なわれた。そして、ほとんどの食料は「地産地消」か、さほど遠くない市場へ徒歩あるいは牛馬によって運ばれ売られた。料理も基本的には木を燃やすことによって行なわれた。

1750年前後にイギリスで始まった産業革命は、簡単にいえば、それまで主要なエネルギー源だった森林が危機的状況に陥り、それに代わるエネルギー源として石炭を利用するための技術的な対策だったといってもいいだろう

¹ アントニーF.F.ボーイズ 東北大学大学院農学研究科非常勤講師

う。産業革命中に開発された科学技術は 19 世紀になると様々な形で農業の中で応用された。それは大きく分けて機械化と化学化である。蒸気機関は様々な機械を可能にし、人間と家畜の力で行っていた作業をより速くより多くなすトラクターや刈入れ機などが、次第にヨーロッパや北米の農場に導入されていった。

3. 科学の進歩

19 世紀半ばのヨーロッパでは、化学研究が進み、無機化学化合物でも植物の肥料になりうるということがわかった。とりわけ窒素、燐、カリウムの無機化学化合物が植物の主な栄養源だということが判明したのは重要だった。現在も化学肥料として使われている燐とカリウムは（資源は限られているが）鉱業に頼っているが、肥料として最も重要な窒素化合物はほとんど水に溶けてしまうので、世界では利用できる資源が非常に少なく（例えばペルーの海岸に近い島のグアノ（鳥糞石）やチリ北部の硝酸ナトリウム(NaNO_3)）20 世紀初頭には資源が実質的に枯渇してしまった。これでは食料増産は難しいと知った欧米では、19 世紀末頃から空気中に豊富な窒素ガスを利用して窒素化合物を生成しようという研究が盛んになった。やがてドイツのハーバー（Fritz Haber, 1869-1934）が 1909 年にアンモニア（ NH_3 ）の生成に成功した。アンモニアは窒素化合物全体の生成の出発点なので、さっそうとドイツの BASF 社の社員であったボッシュ（Carl Bosch, 1874-1940）がハーバーの生成法を実用化し、1913 年 9 月に日量 30 トンの商業用工場でアンモニアの生産が始まった。しかし、翌年第一次大戦が勃発し、以降戦争が終わるまで工場は肥料用の硫化アンモニア生産から爆薬製造の原料となる硝酸（ HNO_3 ）の生産に切り換えられた。1917 年 4 月には巨大なアンモニア工場がドイツに建設され、1918 年の終戦後は両方の工場が主に肥料用アンモニアの生産に向けられた。

かくして 1930 年代以降の肥料の大量使用の準備が整ったわけだが、ここで重要なのは、現在「ハーバー・ボッシュ法」と呼ばれるこのアンモニアの生成法は、エネルギー消費の極めて大きいプロセスである点だ。1920 年当初、石炭を利用したハーバー・ボッシュ法はアンモニア 1 キログラムを生産するのに約 100MJ のエネルギーを必要とした（ガソリン 1 リットルのエネルギーは約 32MJ）。1950 年代から、アンモニア生成の原材料として天然ガスを利用するようになるとエネルギー効率が上がり、2000 年代までには最もエネルギー効率のいい工場ならアンモニア 1 キログラムの生産に必要なエネルギーは約 26MJ 程度になった。しかし、この場合は原材料も生産プロセスのエネルギー源も天然ガスである。現

在では、世界の天然ガスの総消費量の約 5%（約 2800Gm³中の 150Gm³程度）がアンモニア生産に向けられているという。つまり、窒素系の化学肥料は化石燃料以外の何物でもないわけで、これから減退していく化石燃料を利用して生産する窒素肥料によって私たちの食卓が支えられていることを考えると大変憂慮する事態だと思う。また、アンモニアは直接田畑に施肥するわけではなく、さらに反応させ、尿素（ $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ）、硫酸アンモニア（ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ）や硝酸アンモニア（ NH_4NO_3 ）などに転換するが、そこでさらにエネルギーを使う。（尿素の場合はさらに 25MJ/kgN、硫酸アンモニアや硝酸アンモニアの場合は 15~20MJ/kgN）

窒素（N）に次いで化学肥料として重要なのはリン（P）とカリウム（K）である。（化学肥料の主要栄養素はそういうわけで「NPK」という）燐とカリウムの供給は鉱石の発掘に頼るが、リン鉱石の採掘には 1kg 当たり約 4~5MJ のエネルギー投入が必要である。鉱石がその後、過リン酸（リン含有率 8~9%）に換えられるときには 1kg 当たり約 15~20MJ、また、リン酸二アンモニウム（ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 、リン含有率 23%、「リン安」や DAP と呼ばれる）に換えられるときには 1kg 当たり 28~33MJ のエネルギー投入が必要となる。3 つ目のカリウムに関して言えば、塩化カリウム（KCl）の採掘には 1kg 当たり 4~5MJ 程度、また溶解採取によって得る場合 1kg 当たり 15~20MJ のエネルギー投入が必要である。しかし、燐とカリウムの鉱石はともに有限資源であり、採掘すればするほど値が上がり（採掘のエネルギーが多くなる）、やがて採れなくなる。特に燐鉱石の不足は今世紀の半ば頃までには深刻な状況になるのではないかと思われる。

現在、農業で消費されるエネルギーの 28% 程度が化学肥料という形で使われている。作物が吸収する窒素の約 40% が窒素化学肥料によって供給される。人類が摂取する窒素の約 75% が作物（あるいは作物を食べた動物）から得られるので、人類の身体にあるたんぱく質に含まれる窒素の約 30% が窒素化学肥料から得られていることになる。言い換えれば、現在生きている約 67 億人のなんと 20 億人が窒素化学肥料のおかげで命をつないでいる計算で、逆に化石資源が採れにくくなれば、世界の人口がその分減るという事態になりかねない。

また、堆肥などのバイオマスの代わりに化学肥料を施肥することで様々な問題が起きている。施肥される化学肥料の窒素の約半分は植物に吸収されずに雨や灌漑水によって洗い流され、硝酸汚染で水質の窒素過多（富栄養化）を引き起こしている。また土壌の酸性化によって土壌中にある微生物などを殲滅させ、

土壌を「殺す」が、これが土壌侵食の原因となる。つまり、化石資源を化学肥料に転換させたことが、人間を含むすべての生命にとって最も重要である「資源」、健康的な土壌、の破壊につながっている。21世紀中に、石油、天然ガス、石炭の産出が減退し十分な化学肥料が生産できなくなるのと同時に、世界の土壌の大半が劣化状態に陥って世界の人口に大きな影響を及ぼすのではないかと思われる。

1920年代末、トウモロコシの新品種（高収量品種）が合衆国で導入され、土地生産性の向上を可能にした。それ自体はエネルギー投入の増加にはならないが、毎年新たに種子を購入する必要がある新品種の導入に付随して、化学肥料、農薬、施肥・散布用機械類や収穫用の巨大で高額な機械類も市販されるようになった。（エネルギー計算を行う際には、燃料ばかりでなく、機械製造時のエネルギー消費も計算に入れなければならない）その結果、生産過多でトウモロコシの価格は下落し、反面、現金投入財は増加した。これは土壌品質の悪化につながると同時に、安価な食料を供給することによって増加する人口を支えた。30年代の合衆国でのトウモロコシ農業は、その後世界の主流となる農業の工業化（機械化、化学化、電化）の原型であった。さらに50年代に小麦と稲の新品種が開発され、発展途上国にこのような農業の近代化・工業化を促した。この動きは「緑の革命」と呼ばれ、確かに食料の大幅増産という結果をもたらした。しかし、それと同時に、化学肥料の大量投下は土壌品質に悪影響を及ぼし、大面積の均一品種を栽培することで作物の病気と害虫による損害が前より多くなり、主に石油を原料として生産される様々な農薬（殺菌剤、殺虫剤など）の使用を促進させた。（農薬生産に向けられるエネルギーはどの程度なのか、正確な数字はないが、生産プロセスのエネルギーも含めて世界で年間約600PJ（ 10^{15} J）あたりと推測されている。原油に換算すれば、約1億バレルになる。現在、世界の原油産出は日量約8千200万バレルなので、1億バレルという量は産出日量の1日分強にあたる。）

発展途上国における食料増産はほとんどの場合、面積拡大によるものではなく、面積当たりの収量増加によってなされた。1961年から1985年の間は穀物生産が倍増し、人口増加のペースについていったが、その後は収量増加の上昇が鈍くなっている。実は、「緑の革命の父」として知られるボーローグ氏（Norman Borlaug）は、1970年のノーベル平和賞受賞演説で次のように語っている。「緑の革命は飢えと貧困に対する人類の戦いにおける一時的な成功を勝ち取った。つまり人類に一息つく時間を与えた。完全に実施すれば、緑の革命は今後30年間人類に十分生きていく食料を供

給することができる。しかし、それと同時に人類の再生産という恐ろしい力も抑制しなければならない。さもないと、緑の革命の成功は短命に終わるだろう」ボーローグ氏のこの警告からまもなく40年が過ぎようとしている。

4. 農業とフード・システムの工業化

1970年代以降は、機械類（農機具）や化学肥料・農薬だけではなく、農業には多くのエネルギーが使われている。例は、灌漑用電気ポンプ、（石油から生産する）プラスチック資材やハウス設備、冬季のハウス暖房、電気による作物の乾燥や精米などがそれである。日本のような先進国では、国全体のエネルギー消費の約3~5%を農業分野が占めている。しかし、私たちが毎日の食料を農場から直接もらっているわけではない。それでは、農産物はどのような経路をたどって私たちの口に入るのだろうか。

農場を出た生産物は、まず輸送され、野菜や果物のような生鮮食品は市場を経て小売店に並ぶ。その他の生産物は、さまざまな加工のプロセスを経て、パックや瓶に詰められて小売店に並ぶ。この輸送、加工、パッケージは多くのエネルギーを消費する。輸送距離が短い、加工の度合いが小さい、パッケージが簡素なものから、輸送距離が遠い空輸し、加工の度合いが大きい、パッケージが複雑なものまで、個々の食品にはそれなりの事情があるために、数量化することは簡単ではない。ただし、次の2点を指摘したいと思う。パッケージにおけるエネルギー消費の非常に極端な例がある。そのひとつは355mlのアルミ缶に入った「ダイエット」飲料である。アルミ缶1本を製造するのに6.9MJ、中身を作るのに2.4MJ、わずかに4.2J（1カロリー）の飲料のために、合計9.3MJものエネルギーを消費するのである。2点目は、国際輸送の問題である。供給熱量（カロリー）で計算すれば食料自給率約40%の日本は、残りの60%を海外に頼り、当然船と飛行機で海外から食料を運んでくるので、大変なエネルギーを必要とする。

なお、現代社会で実際に食べる時にはさらにエネルギーを消費しなければならない。それは小売店で使われるエネルギー（照明、冷蔵・冷凍関係など）、飲食店で使うエネルギー（厨房、冷蔵・冷凍、照明など）、小売店や飲食店までの交通関係（徒歩や自転車を除く）または住宅で料理をするエネルギー（厨房、冷蔵庫など）がそれである。このエネルギー消費と上記の輸送、加工、パッケージのために消費されるエネルギーを合わせれば、先進国の場合は、国全体のエネルギー利用の10~13%に当たるといえる。農場で直接使われるエネルギーが国全体のエネルギー利用の3~5%

だということなら、食べるためには合わせて13~18%になる。60%の食料を輸入し、エネルギー集約的な農業を行う（農業人口が少ない）日本は、世界の国々の中でも高い方で、17%前後とされる。これは、ガソリンに換算すれば1,200億リットル、つまり日本のガソリンの総需要の1.7倍程度にあたる。バレルに換算すれば約7.6億バレル、つまり日本の年間原油輸入約18.5億バレルの40%程度の量にあたる。日本のエネルギー自給率は、原子力発電を国内生産と計算すれば約17%（ウランを海外に頼るといことで原子力発電を国内生産から外せば自給率はぐっと下がって5%となる）。このようにみれば、世界石油（化石資源）の産出ピークを越えていく中期展望としての、日本の食料にかかわるエネルギー事情は大変深刻なものであるとしか言い様がないだろう。

また、私たちが食べることにに関して、化石資源にいかにかかっているかを示すもう一つのデータがある。現在先進国では、1カロリーを口に入れるために10カロリー程度の化石資源を消費しているというものだ。石油ピーク後、先進国の食料事情は果たして大丈夫なのだろうか。

5. 今後の対策

さて、上記の議論の結果、石油を含む化石燃料を利用して農業（食料生産）や食品産業全体の工業化を図ってきた人類が、いよいよ中期展望として化石資源の減退期を迎えた現

在、大変なピンチに陥ったことが理解できたことと思う。著者としても、ある程度の「解決策」を示さなければ無責任かと思われるので、下記に表の形で上記の議論のポイントと今後考えられる対策を示したいと思う。

参考文献

- Kimbrrell, Andrew (ed.), *Fatal Harvest: The Tragedy of Industrial Agriculture*, Island Press, 2002. 大型で高価（US\$75）な本だが、農業の工業化に関する百科事典のような力作。
- Smil, Vaclav, *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*, Massachusetts Institute of Technology, 2001. 肥料として使われる窒素の歴史と徹底的な分析。農業とエネルギー分野の世界的な権威者の1人による見事な執筆。
- Montgomery, David R., *Dirt: The Erosion of Civilizations*, University of California Press, 2007. 文明の盛衰における土壌浸食のかかわりと歴史、また現代世界の状況を平易な言葉遣いで解説した、一読に値する本である。
- アントニー F.F. ボーイズ著、日本における農業とエネルギー—21世紀の食料事情を考える— 8年前の拙作だが、英・和文ともに著者 HP (<http://www9.ocn.ne.jp/~aslan/>) で入手可。

石油ピーク後の問題	考えられる対策
農機具とその燃料	食料生産と競合しないバイオエタノール、バイオディーゼルの生産（食料と競合しない、森林・湿地などの持続可能な利用によってエタノールを生産するためのバイオマスを収穫）する。エタノールの場合は既存の内燃機関を簡単に改造して使うことができる。長期的には、家畜を利用する。（頭数を増やすのに時間がかかる）
化学肥料、農薬	堆肥などを利用する。そのためには、農業の工業化のプロセスの中で引き離された植物農業（耕種）と家畜農業（養畜）を再統合し、混合農業を行うこと（ゆっくり移行する余裕があれば、収量を心配することはさほどない）。 農薬が必要ななら、有機農業や伝統農法のもの（木酢液など）を利用する。
電気	太陽光発電、風力発電、小規模水力発電など。それができない場合、伝統的な方法。（例えば米の場合、天日干し、手動機械で脱穀、精米）
輸送	極力しない。地産地消。しかし、日本の食料輸入が問題。
食品加工	伝統的加工（発酵・保存食品など）以外は原則としてしない。とりたての新鮮な食材を入手して自分で料理することが基本となる。
パッケージ	原則としてしない。新鮮な食材を買ったら自前のバッグで持ち帰る。
厨房	木、バイオガス、太陽光などを利用する。
冷蔵・冷凍	冷蔵庫など太陽・風力・水力発電などで利用する。

日本特有の問題	<p>単純計算では、供給熱量ベースの約 60%にあたる輸入食品で養えるのは、人口の 6 割程度である。それは、日本の 10 万人以上の人口を抱える都市の住民全員と同数だ。日本の食料自給率を上げるのは当然だが、同時に人口が自然に減っていくことをよしとしなければならない。それでも、日本の食料自給率が 100%に近づくのは数 10 年先と思われるので、それまでは輸入に頼らざるを得ない。それについては、世界全体の食料情勢を考えなければならない（下記の 2 項目）。</p>
世界の耕地	<p>国連食糧農業機関（FAO）の統計によれば、世界の耕地面積は約 14.6 億ヘクタール（ha）で、牧草地と家畜用作物の面積は約 35 億 ha だという。しかし、同時に耕地の 3 分の 1 で栽培されている穀物が家畜飼料になる。人間の植物由来の作物を栽培する面積は 10 億 ha 弱になった。1 人を養う作物を栽培するのに 0.2ha が適当というならば、世界の人口（現在約 67 億人）はすでに多すぎるので、次のような措置が必要：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 家畜に人間の食料と競合する穀物飼料を与えない。 2. 牧草地で飼いきれない家畜を飼わない（動物性食品の消費を減らす） 3. 世界全体の耕地で消費されているエネルギー（化学肥料などを含む）を次第に減らし、有機農法などの技術で土壌を回復させる。 <p>（上記の 3 点を森林保護・回復と合わせて「新緑の革命」と呼びたい）</p>
世界の人口	<p>世界で摂取される食料は現在 1 人当たり 1 日平均 2800 カロリーだが、10 億人以上が十分な食料を得ていない。この流通のアンバランスを是正する必要がある。しかし、食料増産が人口増加を呼ぶということを第二次大戦後の 60 年間の歴史は示している。国連と各国政府が人口の抑制・減少政策を、例えば国連の下で、行わなければならない（使いたい人に避妊具を供給し、その他出生率を低下させる政策—教育、社会保障、医療へのアクセスなど—を講じる必要がある）。</p>