

〈寄稿〉

今後の石油供給問題がエンジン技術に与える影響（後編） —石油供給減少下におけるエンジン技術—

株式会社テクノバ シニアアドバイザー 中田 雅彦

本稿はニチアス技術時報 2014 No.3「今後の石油供給問題がエンジン技術に与える影響（前編）」の後編です。前編の構成は次の通りです。なお、図・表番号は前編からの通し番号とし、引用・参考文献番号は1) から起こしました。

1. 内燃機関と石油の関わり
- 1.1 内燃機関と石油の関わり の歴史
- 1.2 内燃機関と石油の関わり の今後
2. 石油供給の将来予測
- 2.1 石油の可採埋蔵量に基づく将来予測
- 2.2 種々の石油供給予測の検討
- 2.3 石油供給の将来予測のまとめ

3. 石油と経済の関わり

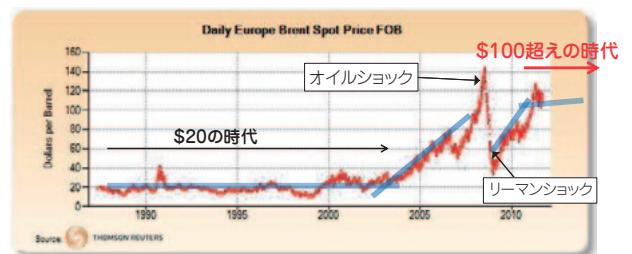
2020年前後から世界の石油供給量は徐々に減少していく可能性があるとして前2項において指摘した。世界の石油供給量が減少すると、当然のことながら、まず、ガソリンや軽油の入手性の問題が懸念される。この懸念としてはまず、燃料価格の上昇問題と、長期的には石油に替わる新しい燃料（代替燃料）をどうするかという問題として表れる。見落とされがちなもの一つの重要な問題として、石油が経済に与える影響がある。ここでは、石油と経済の関わりについて述べる。

3.1 石油価格

2000年頃までは石油価格は \$20/バレル (Brent, 以下同じ) 程度であったのが、2010年以降はほぼ \$100/バレルの高値で安定している。図7に石油価格の推移を示す。

既に安価な在来型石油の大半を人類は消費してしまい、今後は高価な非在来型石油に頼らざるを得なくなっているからである。資材費や人件費の上昇が今後も続くと考えられるので、石

油生産コストは今後さらに上昇していくであろう。また、中東の産油国などは、国家財政維持のために必要な財源を実質的な生産コストに上乗せして、輸出石油価格にすることを要求している。例えば、サウジアラビアは直接的な生産コストは \$20-30/バレル程度と見積もられているが、\$100/バレル程度の市場価格を要求している。以上のようないくつかの理由により、世界大恐慌が起こらない限り、今後石油価格が



この10年で5倍に。\$100/バレル超えの時代に入

要因 (1)需給逼迫←中印の需要増加+生産の停滞
(2)石油開発・生産コストの上昇
(3)産油国の国家財政の赤字化防止 } \$100/バレル近い

(THOMSON REUTERS社発表資料より引用)

図7 石油価格の変遷

\$100/バレルを大幅に下回ることはないと考えられる。

では、石油価格は今後際限なく上昇し続けるかということ、必ずしもそうではない。これについては後述する。

3.2 石油価格が経済に与える影響

人類の歴史とエネルギー消費増大の様子を図8に示す。ワットの蒸気機関（1785年発明）に代表される動力機械が発明され、まず石炭がそれらの燃料として使われ始めて消費が増大し石炭の時代が先行した。その後1859年に石油が発見され、1870年頃に発明された内燃機関に利用され始めて、石油の消費が急速に増大し石油時代に移行した。動力機械と化石燃料の組合せから得られる労働力は人間の労働力よりはるかに強力であり、長時間持続でき、安価であるために、生産性が格段と向上した（筆者の概算では約600倍）。このために産業の工業化が進み、GDPが急増した。図8の中に示すように、1900年頃からエネルギー消費とGDPは良い相関を示しながら現在まで急増している。

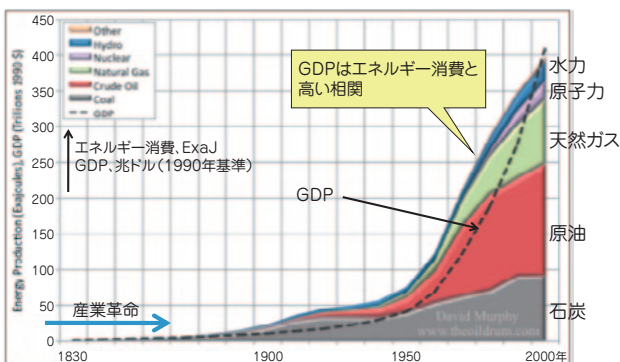
既に図7にて示したように2000年頃までは石油価格は\$20/バレル以下という安価であった。したがって、今まで世界の経済は安価で豊富な石油エネルギーに頼って成長してきたと言える。裏を返せば、石油の高価格が継続すれば、今後の経済成長が止まる可能性があることになる。

図9に示すように、米国の歴史において「 $\frac{\text{石油支出}}{\text{GDP}} > 4\%$ 」で経済不況が発生したと報告され

ている。この「 $\frac{\text{石油支出}}{\text{GDP}} > 4\%$ 」は現時点では「石油価格>\$102」に相当する。この石油価格が米国経済の成り立つ（経済不況が起きない）限界となる。現在既にこの価格に達しているので、石油価格が高いがゆえに米国経済は低迷していると主張する経済専門家もいる。石油価格が現状のレベルを維持するならば、今後経済は回復できないということになる。米国における石油価格と経済の関係はOECD諸国にもほぼ適用できると考えられるので、2008年のリーマン危機から完全には脱却できないまま、今後も世界経済は停滞することになる。

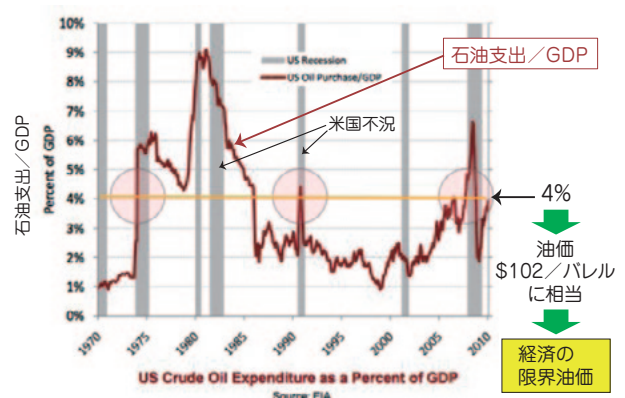
石油の高価格が経済不況を引き起こす理由は次のように説明されている。

- ・産業の視点：石油価格の上昇に加えて、新興国の生産能力向上、新興国の低賃金などにより、先進国の産業の収益性が低下し、経済停滞が発生する。先進国における従来のような産業立国、貿易立国が今後は成立しにくくなっていると言える。
- ・国民生活の視点：上述の産業の停滞のために個人の収入が減少する。これに加えて、石油価格の上昇は全ての生産物のコストの上昇を引き起こし、国民の可処分所得を減少させ、購買意欲を低下させ、経済が停滞する。この状態が進めば、産業も一層停滞して失業者は増加し、社会においては治安が悪化することもある。欧州の中にはすでにこのような状態に達している国もある。



(David Murphy www. thcoildrum.com より引用)

図8 エネルギー消費とGDPの相関（世界）



(Douglas Westwood 社発表資料, 2011より引用)

図9 石油価格上昇と経済不況との関係（米国）

先に述べたように、安い石油が豊富に供給されなければ経済発展は望めなくなる。そうであるならば、石油に替わる新しいエネルギーの提案が仮にあっても、その価格が現在の石油価格より高ければ、経済は回復しないことになる。現時点では、石油より安く入手できる可能性のある代替エネルギーは原子力発電以外には見当たらない。

3.3 石油価格の今後

石油の生産コストの上昇などの理由により、今後（世界大恐慌のような大変事が起こらないかぎり）石油価格が\$100/バレルを大幅に下回ることはないと3.1項で述べた。

一方、あまりに高い石油価格は3.2項に示したように、経済不況を招くことになる。その結果、産業が低迷し、個人レベルの収入も減少し、失業が増加するので、石油の需要が減少することになり、石油価格を押し下げる力が働く。したがって、石油価格が際限もなく上昇し続けることはないと考えられている。現に、日本を含めてOECD諸国では、多くの国の経済が停滞しているために石油消費が減少している。また、高い石油を消費することを避ける自衛措置が個人や国家により取られて消費量が減少する方向にすでに向いている。個人レベルでも、自動車の燃料費や家庭の光熱費を減少させる努力もされている。自動車用の石油代替燃料の利用を促進するための政策もとられている。長期的には、石油の消費を一層減らすために、多くの国で自動車の燃費規制強化が進められている。これらの結果として石油消費も減少傾向にある。

重要なことは、経済原理に基づけば、通常の物品は需給が逼迫すれば価格は高騰し続けるが、石油の場合はそのようなことはないということである。2010年以降石油価格は多少の振れ幅の範囲で、一定の値を保っていることは、この主張がもっともであることを裏付けている。

石油価格の上昇する限界は、経済が破壊される石油価格であることをすでに述べた。現時点では米国において\$100/バレルあたりである。その国の石油のエネルギー利用効率が高ければこの限界価格は、高い方に変化するであろう。

この利用効率は1-2%/年の比率で向上していると言われている。したがって、この程度の割合で経済に対する石油の限界価格は上昇していく可能性はある。1.5%で上昇するとすれば、2030年には、限界石油価格は\$130/バレル程度となる。

以上の考察より、2030年時点で石油価格が現在の価格から3倍、4倍に高騰することはないと考えて良さそうである。

3.4 国家財政の今後

世界の経済は低成長のままで留まる可能性が高いという専門家の主張もある。資本主義経済が限界に来ているという指摘も多く聞かれる^{1, 2)}。先進諸国ではすでにモノ余りの状態で新しい市場がなくなり、産業の方向が決め難くなっている。新自由主義経済の結果として格差社会が拡大して社会に大きな歪ができ社会不安の原因となっている。安易な大衆迎合的な政策により、多くの国家が巨大な負債を抱えている。これらに加えて、石油価格の高値安定により従来産業立国という考えが成り立ちにくくなっている。世界の一国に経済問題が生じれば世界に波及することは避けがたい。このような状況下で、今後の国家財政がどのようになるのかを予測することは容易ではない。しかし、2030年までに、日本の国家財政に何も問題が発生しないと考えることは、あまりに楽観的ではなからうか？

3.5 自動車産業への影響

短期的には石油の消費が少ない自動車が必要とされる。今後の経済の低迷を考慮すれば、顧客の費用負担の少ない自動車が必要とされるであろう。自動車だけでなく交通システムとして石油消費の少ない社会システムとそれに適した自動車を提供することが必要であろう。長期的には、石油に頼らない社会、さらにはエネルギー消費の少ない社会の構築を目指していくことが必要であろう。

また、先進諸国では自動車に対する価値観が変わっていく可能性が高い。ステイタスシンボルとして自動車を所有するという考えはすでに薄らぎつつあるように感じられるが、これが一層進み、自動車が移動の手段の一つであるとい

う考えに移行していくと考えられる。豪華な装備は不要で質素で安価な自動車が必要とされるかもしれない。

新興国が2030年時点で上述のような状況になるとは考えにくい。まだ豪華な自動車を所有することを生活の目標としている可能性もある。そうであるとすれば、先進諸国の自動車産業は、異なる価値観の自動車を並行して開発しなければならない。これは大きな負担である。どのようにこれを乗り越えていくのが課題である。

産業の構造という観点からは、次のような課題がある。安いエネルギーと安い原材料を輸入して、工業製品に加工することにより付加価値を付けて輸出し、その結果として得られた外貨を用いて再びエネルギーと原材料を輸入するという産業構造で日本経済が成長してきた。これが石油価格の上昇により成り立たなくなりつつある。どのようにして産業を成立させるかが、自動車産業を含めて日本の最も重要な課題であろう。石油依存度の少ない産業、石油消費の少ない社会構造を他に先駆けて構築することが、資源を持たない日本が進める方向であろう。

4. 2030年－2050年に向けた自動車用原動機

2030年に製造された自動車は自動車の寿命を15年とすると2045年頃まで市場に存在することになる。したがって、2030年頃の自動車を想定するには、2050年前後の社会的要請や制約を視野に入れることが必要であろう。

1.2項では、石油系燃料が供給される限り内燃機関は使われるであろうと述べた。また、2.3項においては、石油は2020年頃から供給が減少し始め、2030年頃にはかなり深刻な石油供給不足が発生していると想定した。したがって、2050年には豊富で安価な石油系燃料が供給されとは考えにくい。3.5項においては、石油価格の高値安定により今まで経験してきたような経済発展は期待できないと述べた。

上記のような社会環境から、今後の自動車技術を考えてみる。

石油系燃料の供給制約から、2050年においては、石油系燃料以外の燃料（あるいはエネルギー）

で駆動される自動車がある程度市場に供給されていなければならない。

まず、市場における自動車の寿命を15年と考える。そして、現在は内燃機関と石油系燃料の組み合わせが自動車駆動の主流である。上述のように2050年頃には石油系燃料以外で自動車が駆動されているならば自動車技術の大きな変曲点が2030年頃に現れることになる。2030年の自動車技術を検討する場合には、その技術が2050年へ円滑につながっていく必要がある。

経済の観点からは、自動車に対する価値観の変化を考慮した自動車自身の企画と設計、自動車だけでなくそれを利用する交通システムと組み合わせた総合的な技術開発も考慮することが必要であろう。

上記を念頭において、2030－2050年頃に使われる、新しい原動機と燃料（エネルギー）について検討してみる。新しい「原動機と燃料」の組み合わせの候補を表2に示す。

すでに1.2項で述べたように、内燃機関を使う限りは石油系燃料以外の燃料を使う可能性は低い。バイオ燃料や合成燃料は資源量が石油ほどは存在しない上にこれらの燃料を合成するときのエネルギー効率が60%程度しかないことも将来用の燃料としては適さない。アンモニア、天然ガス、水素などは新しく燃料供給インフラが必要になるが、世界中に広くこれらのインフラを新しく構築することはかなり困難なことになる。また、天然ガスは石油と同様に有限な資源であり、石油と同様に近い将来供給に制約が生じると考えられるので、短期間しか使われない燃料の供給インフラ構築に資金を投入するのは社会的な損失になるという問題もある。以上より、内燃機関を継続して用いて石油系燃料以外の燃料を使うという組合せ技術が将来の世界的技術になる可能性は低いと言える。ただし、地域に限定してバイオ燃料や天然ガスが一定の期間使われる可能性はある。

内燃機関以外の駆動システムの候補は、表2に示すように、「モーターと蓄電池と外部電源（すなわちBEV）」と「モーターと燃料電池と水素（すなわちFCV）」が考えられる。FCV用の水素供給

表2 駆動システムと燃料（エネルギー）の組み合わせの候補

	駆動システム	燃料(エネルギー)	備考
在 来 型	内燃機関	石油系燃料	バイオ・合成燃料などの一部混合を含む(他も同じ)
	「内燃機関+モーター+蓄電池」(HV)	石油系燃料	—
	「内燃機関+モーター+蓄電池」(PHV)	石油系燃料+外部電源	—
次 世 代 技 術 候 補	内燃機関	バイオ燃料	100%バイオ燃料(エタノール,バイオディーゼル)
		合成燃料	100%(CTL,GTL,BTL)
		アンモニア	—
		天然ガス	—
		水素	—
	「モーター+蓄電池」(BEV)	外部電源	—
	「モーター+燃料電池」(FCV)	水素など	—

↑↑↑↑↑の可能性あり

注) HV:Hybrid Vehicle
PHV:Plug-in Hybrid Vehicle
BEV:Battery Electric Vehicle
FCV:Fuel Cell Vehicle

CTL:Coal To Liquid
GTL:Gas To Liquid
BTL:Biomass To Liquid

インフラを世界中に設置することはかなり困難なことであり、FCVそのもののコストが高いこともあり、乗用車用としては、今のところ有望な候補とは言えない。また、燃料としての水素の製造方法やその価格もまだ不明確であることもFCVを普及させるための障害の一つである。

以上より、消去法的に候補を絞れば、BEVしか残らない。電気の供給インフラは、充電方法がまだ開発中であるとはいえ、電気自身はほぼ世界中に行きわたっている。蓄電池の性能が内燃機関に及ばないという問題は、今後解決できないかもしれないが、交通システムと組み合わせることで顧客の不便さをある程度解消できる可能性もある。

以上に示した検討結果に基づけば、現在の「石油系燃料と内燃機関」の組み合わせから、将来は「電気とモーター」へ移行する可能性が高い。すなわち、駆動用のエネルギー（燃料）が石油から電気へ移行することになる。もしこのような燃料の変化があるならば、市場に存在する内燃機関を搭載した既販車をどのように扱うかが大きな問題になる。2050年頃に市場にガソリンエンジンだけを搭載した乗用車が残っているのにもかかわらず、市場にガソリンが供給されなくなるという事態は、自動車業界・石油業界ともに避けなければならない。この問題を解決する方法としては、「プラグインハイブリッド車（す

なわちPHV）」が考えられる。石油から電気へ自動車用燃料が徐々に変化していくときに、石油系燃料でも電気でも駆動できるPHVはもっとも適した自動車であると言える。

5. 内燃機関の技術の方向

今まで述べてきたように、石油供給の制約やCO₂削減の見地から、自動車の駆動用燃料は今後石油から電気に徐々に移行していくと考えられる。この燃料（エネルギー）の変化を円滑に進めるためには、この移行期に石油でも電気でも駆動できるPHVを市場に普及させておくことが望ましい。このように考えると、自動車用原動機は、現行の「内燃機関のみ」から「HV」、さらには「PHV」へと変化していき、最終的に蓄電池の電気で駆動されるモーターに移行するまでは内燃機関は継続して使われることになる。しかしながら、重要なことは内燃機関の使われ方が大きく変化していくことである。現行の「内燃機関のみ」の場合は内燃機関の使用域としては、回転数と負荷のすべての領域が想定されて、それを前提とした内燃機関の設計がされてきた。今後「HV」から「PHV」へと進むにしたがって、内燃機関の使用域は熱効率の高い領域を中心とする領域に狭められていくことになる。極端な例は、「レンジエクステンダー（Range Extender, 航続距離延長装置）」のように、最大熱効率が得

られるごく狭い領域のみで内燃機関が運転されることになる。このような運転領域の変化は、内燃機関の本体設計や排気対策技術に影響する。ただし、運転領域の縮小化は今後の蓄電池性能の向上により変わることにも注意が必要である。

6. おわりに

以上に述べてきたように、石油系燃料がいつごろまで安定的に供給されるのかに依存するが、乗用車には今後も20-30年程度は内燃機関が使われていくであろう。しかしながら、その使われ方は今までとは大きく変わっていくであろう。今までは600rpmのアイドリングから6000rpm全負荷の範囲で諸性能や信頼性を保証した設計であったが、今後このエンジン使用域が狭まる方向に変化することと、最大熱効率を向上させるための諸技術がエンジン技術に織り込まれていくことに注目していかなければならない。

引用・参考文献

- 1) 「超マクロ展望, 世界経済の真実」, 水野和夫, 萱野稔人 (集英社新書)
- 2) 「資本主義の終焉と歴史の危機」, 水野和夫 (集英社新書)

筆者紹介



中田雅彦

株式会社テクノバ シニアアドバイザー
トヨタ自動車に入社後、定年退職まで一貫してエンジン開発に従事
トヨタ自動車 第3エンジン技術部 部長, 同第1エンジン技術部 シニアスタッフエンジニアなどを歴任
(株)トヨタテクノサービス主任研究員, アート金属株式会社技術顧問を経て現職
博士 (工学)