



第5巻 第1号 (2012年7月)

目次

巻頭言

現場・現実と学会のあり方を考える.....	大川原 正明	1
-----------------------	--------	---

報文

シェールガス革命がもたらしたエネルギー勢力図の再編.....	須藤 繁 増田 優	2
石油販売業の公共性と社会インフラの側面に関する考察.....	吉原 有里 増田 優 須藤 繁	15

報告

太陽熱利用システムにおける熱媒技術の役割.....	椿 善太郎	27
液体の微粒化技術と社会ニーズ.....	今井 健太 小金井 稔元	34

編集後記.....		40
-----------	--	----

社会技術革新学会
＝現場基点学会＝

現場・現実と学会のあり方を考える

私は化学機械製造業（工業材料生産設備）の技術を作り続けることをしながら、製造業の中小企業における経営者としての一面を持ち、化学工学会や粉体工学会の理事、さらには当学会に理事の役目を仰せつかっている。

工学に関わる学会は、いつの間にか実学・実用学・現場を離れ、学問のための学問になってきている。古臭いものの代表として“学会もん”という言葉があるように、研究と言う名の深い狭い、先進的と称する世の中と離れたことを行っている人達を学者・先生と呼んで、一般の人々はそのギャップを楽しんでいる。そして、そのギャップが何とかならないかと思っていた。

そんな時に、社会技術革新学会と言う、現実・現場基点から世の中の動きを見る、特に技術と社会の関係を見ていこうとする学会ができた。それは、現在までの事実に基づいて、これからの方向を考えてみるのが重要であり、これを論文・報文としてまとめ上げることによって、思考に深みをつけ、更なる進歩を期待できる学会である。

学会というと、すでになされた研究、すなわち、我々にとって、最もわかりにくく、具体的に世のためになっていないことが多い行為をベースに更なる研究の保持・促進と後進の教育に力を注ぐこととされる。企業では研究中とは結果を出さないことの代弁ともとられており、開発は結果を出すことが求められている。実社会で経営する者としては研究を少なくとも現場において結果を出すものとして開発と同列に考えたい。

当学会は、そのベースになる“研究対象”を広く工学の原点であるべき技術革新と経済学と社会学の原点であるべき社会変革としている。そして、過去の業績をまとめること、即ち一般の人によくわからない研究でなく、実際に開発したこと、経験したこと、現実にかきたことをまとめ上げ、公表できるようにすることを学ぶことと、これからの方向・考え方を討議し、若手に伝え、教え、継げることを年齢に関係なく行っていくことを期待しているし、進めていきたいと考えている。

これまで学会とは無縁だったと思っていた方々が、真の人間関係や社会の発展、もちろん会社に属する人は会社の真の発展を思って、互いに考え方を学ぶ場を提供することが学会の使命と考えていることを伝えて、多くの若い人たちの参加を期待したい。

理事 大川原 正明

シェールガス革命がもたらしたエネルギー勢力図の再編

Reorganization of the energy power balance driven by technology innovation on shale gas development

須藤 繁¹

Shigeru SUDO

増田 優²

Masaru MASUDA

要 旨：シェールガスは、頁岩の岩盤に封じ込められた非在来型資源の一つで、1990年代までは経済的に掘り出すことが困難とされてきたが、水平掘り、水圧破砕を中心とする近年の石油産業上流部門の技術革新を背景に米国を中心に開発が進められ、2000年以後、大きく生産を伸ばしている。

シェールガスの開発は、既存のガス供給国間の利害関係、さらに消費国との関係を微妙に変えつつあり、その地政学的な意義としては、米国のLNG輸入計画の大幅廃棄に伴うLNG国際需給環境の緩和、欧州ガス輸入国の選択肢の拡大、即ち、ロシアの政治力の低下、中国の資源外交の変化の可能性、中東・北アフリカガスへの相対的依存度低下が挙げられる。さらに、シェールガス開発技術が今後世界各地のシェールオイル開発に本格的に適用されれば、石油地政学のパラダイムを大きく変える可能性がある。

Abstract : Shale gas is one of the non-conventional resources which deposits in shale rock deep underground and thought to be difficult to recover commercially until 1990s. However, in the background of the technology innovation in upstream sector of oil industry in recent years, shale gas development has been advanced in the United States and its production in the U.S. has skyrocketed from virtually nothing in 2000 to 20 percent of the U.S. natural gas supply in 2010.

Shale gas development is changing delicately not only the interest among the existing gas supply countries but also a relation with the consuming countries. Following points such as the possible change in international LNG supply and demand balance due to large abandonment of a U.S. LNG import plan, increase of the options for European gas importing countries and the fall of the political power of Russia, the possibility of China energy resources policy change and decrease of oil and gas dependency on Middle East oil can be pointed out from geopolitical point of view.

キーワード：非在来型ガス、シェールガス、水平掘り、水圧破砕、石油地政学

Keywords : Non-conventional Gas, Shale Gas, Horizontal Drilling, Fracking, Geopolitics

¹ 須藤 繁 帝京平成大学 現代ライフ学部 経営マネジメント学科 教授
〒170-8445 東京都豊島区東池袋 2-51-4 shigeru.sudo@nifty.com

² 増田 優 お茶の水女子大学大学院教授 ライフワールド・ウォッチセンター長
masuda.masaru@ocha.ac.jp

2011.12.5 受付, 2012.6.13 受理

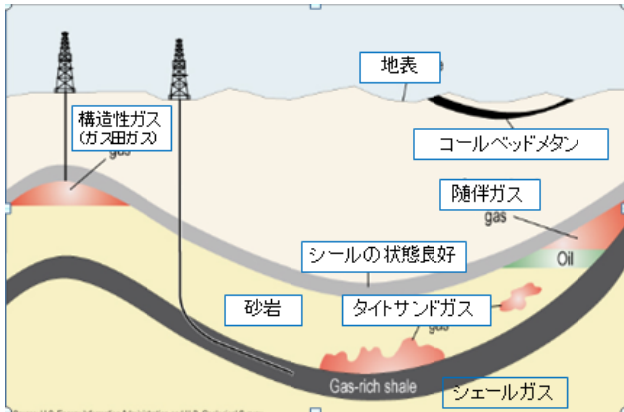
社会技術革新学会第5回学術総会(2011.9.28)にて発表

1. はじめに

近年、米国を中心にシェールガス開発が積極的に行われている。シェールガスとは頁岩の岩盤に封じ込められた非在来型資源の一つで、これまで経済的に掘り出すことが困難とされてきた。

図1に示すとおり、これまでのガス資源は構造的ガス（ガス田ガス）、油田の随伴ガスといった在来型ガスが専らだったが、近年米国を中心に急速に新しい形態のガス（非在来型ガス）が生産されるようになった。同図が示すように、炭層ガス（コールベッドメタン）、タイトサンドガス、シェールガスが非在来型ガスに該当し、中でもシェールガスは米国で大幅に生産を伸ばし、今後さらに生産を伸ばすとみられている。

図2にみるとおり、米国の天然ガス生産量は、1990年代以後2002年まで微増し、その後わずかに減少した。その間、絶対量はさほど変化しなかったものの、その内訳は大きく変化した。2000年には僅かに2%に過ぎなかったシェールガスの割合は2010年には20%に達するに至った。



非在来型天然ガス	一般的定義(主成分)
タイトサンドガス	浸透率0.1md未満の砂岩に含まれるメタンを主成分とする天然ガス
コールベッドメタン	石炭層に吸着したメタン
シェールガス	浸透率が0.001md未満の泥岩の一種である頁岩(シェール)に含まれるメタンを主成分とする天然ガス

注: 1 md(ミリダルシー) = $9.87 \times 10^{-16} \text{ m}^2$

図1：非在来型ガスの概念図

出所：米国エネルギー省エネルギー情報局（DOE/EIA）資料より作成。

シェールガス開発の本格化は、米国内のガス需給のみならず、国際ガス需給、さらにはエネルギー地政学を様々な点で変えつつある。シェールガス革命と称される所以であるが、本稿では、まず、シェールガス革命の背景とその展開、次に同開発のエネルギー情勢に及ぼしている影響をまとめた後、シェールガス開発が直面している課題とその石油地政学的な意義を考察する。

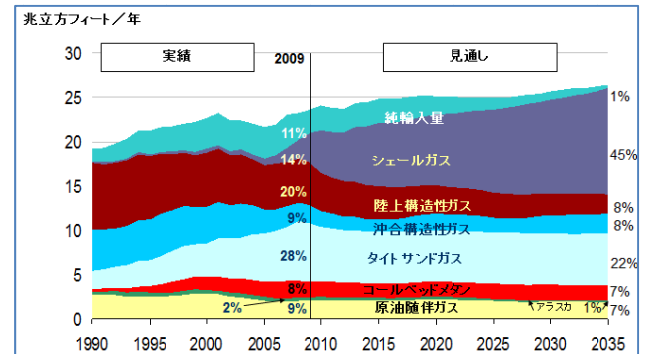


図2：米国のガス生産実績と見通し

出所：米国エネルギー省エネルギー情報局
“Annual Energy Outlook, 2011年版”

2. シェールガス革命の背景とその展開

2.1 石油上流部門における革新技術の適用

米国でベンチャー企業がシェールガス開発に参入した背景には、石油価格の高騰もさることながら、1980年代後半以後に確立された石油産業上流部門の技術革新の影響が大きい。表1は1980年代以後の石油産業上流部門における主な技術革新を列挙したものであるが、シェールガス開発では水平掘りと水圧破碎（フラッキング）という岩盤に割れ目を入れる技術の貢献が大きい。

表1：1980年代以後における石油産業上流部門での主な技術革新

1. 第3次元地震探査
2. 水平掘り
3. 高精度油層シミュレーション
4. 大偏距傾斜掘り
5. 大水深海底坑口仕上げ装置
6. 海底生産システム
7. 浮体式生産貯蔵積出システム
(FPSO: Floating Production Storage and Offloading System)
8. 水圧破碎

水平掘りは、図3に概念を示したとおり、1000メートル、2000メートルと掘った途中から井戸を角度を自在に曲げて掘ることを可能とした技術である。また、水圧破碎技術はスーパーコンピュータの利用による岩層内圧力分布の把握、注入水の挙動シミュレーション、注入剤の選択、プロパント（割れ目を一定の状態に保つ石材）の利用等の要素技術の集積からなるものであるが、これによる実際の岩盤の破壊のイメージを図4に示した。

これらの技術の適用により頁岩の岩盤に沿って対象鉱区を区切り、区画毎に数百気圧の圧力をかけ岩盤に割れ目を作り、ガスを取り出すことが可能となった。

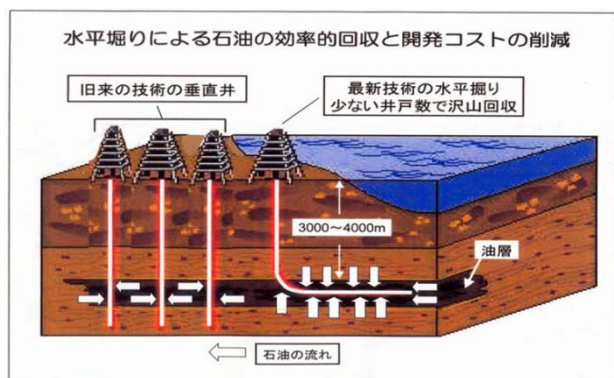


図3:水平掘りのイメージ

出所：月刊出光（2000年6月号）

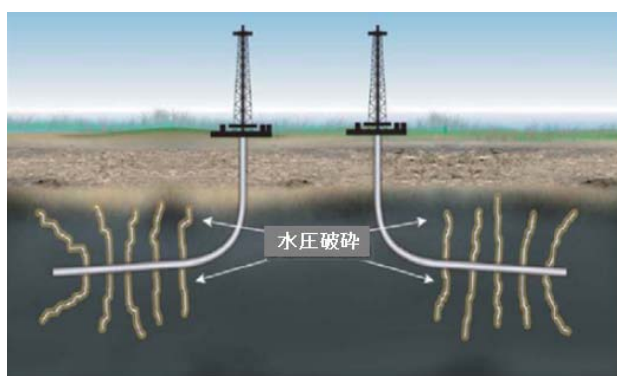


図4：水圧破碎のイメージ

出所：米国エネルギー省エネルギー情報局

2.2 技術の集積と他分野への適用の試み

米国の石油産業は、既存油田・ガス田の生産減を補うため、1980年代から二次回収・三次回収に徹底

的に取り組む中で、コンピュータ関連技術の発達に合わせて限界油田生産や油層管理に関し様々な試みに取り組んだ。

しかしながら岩盤を割ることに關しては、蓄積技術の適用は在来型資源を対象とした操業の延長でなく様々な試行錯誤の結果であった。その意味で、EOR技術³、コンピュータ解析・油層解析技術のシェールガス開発（岩盤破壊）への適用は技術の非連続な展開であり、在来型資源開発で培った技術を非在来型資源に適用してみようというポリシーを思い付いたことがこの非連続性を作り出す原動力であった。

こうしたポリシーイノベーションがもたらされたことに関しては、以下の要素が指摘できる。まず、第一にそれまでの地道な操業により生産・油層管理に関し卓越した技術（ツール）が集積されたこと、第二に在来型石油・ガス資源が枯渇しつつあるという危機感を持ちつつ原油価格が高騰していることをチャンスとしてとらえたこと、第三に在来型ガスとは別の形で非在来型天然ガスが賦存しているかも知れないという科学的な想定に対する真摯な取り組み等の要素である。

大きな技術革新を起爆剤とする産業や社会の大きな変革は、一般的にこうした要素がない限り確保されない。したがって、米国石油産業が二次回収・三次回収に徹底的に取り組む技術を磨かず、また国家安全保障（ナショナルセキュリティ）の概念が希薄で危機感に乏しく、さらに科学的な真摯な態度を持ち合わせない産業人集団に担われていたならば、こうしたポリシーイノベーションはもたらされなかった。

水平掘りに關しては、考え出された技術というよりは、実際の探査・開発活動で井戸を掘った際に硬い岩盤に遭遇して結果として井戸が曲がり、あるいは水流の關係でビッドの挙動が一律でなくなり結果的に井戸が曲がってしまった経験を逆手にとり、その曲がりの力学を応用して産まれた技術である。まさに、ひとつの技術を徹底的に極めた成果である。

³ Enhanced Oil Recovery（原油増進回収法）

石油産業のように自然界に働きかけて取り組む産業の技術には、経験をベースにした工学の要素が大きく、地道な操業の蓄積が次なるイノベーションを培うという側面がある。

また、1980～90年代にDOE（エネルギー省）と地質調査所（US Geological Survey）が行った徹底的な地質調査もこうした動きを底支えた。こうした地道な作業の結果として集積された膨大な地質情報が科学的な想定を蓋然性を高め、ベンチャー企業に対して大きな可能性を開くことにつながった。まさに、政府機関が行うべき王道ある。この点に関して日本は逆に、産業技術総合研究所の一部に地質調査所を編入してしまうという失政を演じた。

要は、新しい技術やビジネスを創り出す契機は、いつでもどこでもあるということであり、結果の違いは、これを掴むか否か、その準備と意思の差である。

2.3 シェールガス開発におけるベンチャー企業と石油会社の役割分担

米国におけるシェールガス開発を振り返ると、まず初めに成功したのはテキサス州バーネットシェールを手掛けたミッチェルエナジー社及び同社を2002年に買収したデボン社である。デボン社はバーネットシェールにおける最大の生産者となっている。バーネットシェールでは他にチェサピーク社とXTOエナジー社やエンカナ社等も開発に取り組んでいる。バーネットシェールにおけるシェールガス生産量は2000年の2億立方フィート/日から急増して、2010年には50億立方フィート/日を超えた。その後、2005～2006年にアーカンソー州のファイエットビル及び北東部のマーセラスでシェールガスの賦存が確認され、さらに2007年にはルイジアナ州のヘイネスビスでシェールガスの賦存が確認された。

2011年現在開発が進んでいるのは、米国ではバーネット、ファイエットビル、マーセラス、ヘイネスビスの4地域のシェールガスであり、同地域のポテンシャルと操業会社を表2に示す。

表2：米国の主要シェールガス田の概要

シェールガス田	概要	主な事業者	可採埋蔵量
バーネット (Barnett) テキサス州	1981年発見 面積5,000平方マイル 深度6,500～8,500フィート 層厚100～600フィート	デボン XTOエナジー チェサピーク EOGリソース エンカナ	44兆立方フィート
ファイエットビル (Fayetteville) アーカンソー州	2005年確認 面積9,000平方マイル 深度1,000～7,000フィート 層厚20～200フィート	サウスウエスト エンカナ ヘンドフォーク	41.6兆立方フィート
マーセラス (Marcellus) 北東部	2006年確認 面積95,000平方マイル 深度4,000～8,500フィート 層厚50～200フィート	チェサピーク アトラスエナジー レンツリソース	262兆立方フィート
ヘイネスビス (Haynesville) テキサス州 ルイジアナ州	2007年確認 面積9,000平方マイル 深度10,500～13,500フィート 層厚200～300フィート	アハツ・エンカナ EOGリソース ネクセン	251兆立方フィート

出所：DOE “Shale Gas Primer 2009”より筆者作成

次に石油会社の規模の視点から見ると、2008年以後、大手石油会社の参入という点が注目される。時系列に振り返ってみると、2007年にシェールがエンカナ社とパートナーシップを結んだことを皮切りに、2008年にBPがチェサピークのウッドフォードシェールを36.5億ドルで買収、2009年にフランスのトタル（現トタルフィナエルフ）がチェサピーク社のバーネットシェールの権益の25%等を22.5億ドルで買収した。それに加えて最大の動きは、2010年にエクソンモービルがベンチャー企業では大手のXTOエナジー社を人材・ノウハウを含め410億ドルで買収したことである。

大手石油会社の中には、コノコフィリップスのように自らシェールガス事業に乗り出した石油会社がある他、マラソン社のようにオイルシェール開発に乗り出した会社もある。

このように、まずベンチャー企業が事業の開拓を手掛け、そのあとでその事業を石油会社が引き継ぐことでシェールガス開発が本格化した流れが跡付けられ、両者が果たした役割分担が明確に窺われる。

米国のベンチャービジネスの意義は、半ば好奇心の赴くまま科学的知見が指し示す可能性を追求し、可能性が開け株価がピークを打つ前に売り抜けるといふことにある。彼らは環境対策、製品安全対策などの産業の基盤整備に対する関心は低く、それらは

大手企業が行えばいいという考え方で、大きな枠組みでの社会的分業に徹している。

一般的にベンチャーは攻めるに強く大手企業は守りに固い。一つの製品を開発するには様々な安全性の確認など地道で長時間を要する作業を行わなければならない。こうしたことはベンチャー企業が得意とするところではなく、大手企業が責任を持って進めるべき分野であるともいえよう。シェールガス開発は両者の役割分担が明確に行われた好例である。

2.4 シェールオイルへの適用の技術的側面

水平掘りと水圧破碎の技術的組み合わせは、将来的にはシェールオイル開発にも適用可能である。もちろんシェールオイルは液体であるので、シェールガス程容易には回収できないが、基本的には、水平掘りと水圧破碎という二つの技術が適用できる。

水圧破碎においては注入水には腐食防止剤、プロパントを沈積させないための高粘性のゲル化剤等を添加するが、詳細は公表されていない。破碎した頁岩層の隙間を維持するために封入するプロパントは基本的には砂粒であるが、形状・粒度の詳細は、各社のノウハウに係る事項である。

米国ではシェールガス開発はベンチャー系企業を中心に着手されたが、シェールオイル開発はバッケンシェール（モンタナ・ノースダコタ州）の開発を手掛けるヘスやマラソン等の中小・中堅石油会社を中心である。米国石油会社では現在、中堅企業は収益性の改善を目的にシェールガスからシェールオイルへ投資先をシフトさせる事例が多く、これらの会社は企業の枠を超えて技術的知見や工夫を共有している。

3. シェールガス開発の 国際エネルギー情勢への影響

本項では、シェールガス開発の国際エネルギー情勢への影響を考える。シェールガスの登場は既存のガス供給国間の利害関係、さらに消費国との関係を

微妙に変えつつある。

シェールガス登場の地政学的な意義としては、米国のLNG輸入計画の大幅廃棄に伴うLNG国際需給環境の緩和、欧州ガス輸入国の選択肢の拡大、すなわちロシアの政治力の低下、中国の資源外交の変化の可能性、そして中東・北アフリカガスへの相対的依存度低下が挙げられる。

3.1 米国の天然ガス供給力の増大とLNG需給環境の変化

既に図2でみたとおり、米国はガス需要の増加を北米での供給増だけでは充足できず、2009年には消費量の11%を純輸入量で賄った。その時点では将来の需要を充足するには海外市場からのLNG調達は不可避とみられ、全米各地にLNG輸入ターミナルの建設が計画された。現実にはガス不足は生じなかったものの、需要増が続けば不足も起こり得た。

しかしながら、特に2000年以後、米国の天然ガス産業は劇的に変化した。2.1項で見たとおり、そこには頁岩の岩盤層に賦存するガスの回収を可能とした水平掘りや水圧破碎技術を嚆矢とする技術革新がある。こうして創造された技術の新たな活用により需要を上回る新規供給源が開発されたので、米国における天然ガス需給の緩和がもたらされた。

米国の天然ガス需給は、生ガス(パイプラインガス)⁴の生産減を補うため2002年以前には年間500万トン以下だったLNGの輸入量が、2003年に1,050万トン、2004年1,300万トンに増加した。こうした輸入増を背景に2004年策定の年次エネルギー見通し⁵では、米国の2025年のLNG輸入量は1億トン以上に増加すると見積もられた。輸入増に対応するため、各地で大幅なLNG輸入基地建設計画が立てられた。

2004年時点のLNGの輸入基地は、表3に示す4カ所であったが、2005年時点では既存基地の拡張に

⁴ パイプラインで井戸元から消費地に供給されるガス。パイプラインガスともいう。

⁵ DOE/EIA “Energy Outlook, 2004”
[http://www.eia.gov/forecasts/archive/aeo04/pdf/0383\(2004\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/archive/aeo04/pdf/0383(2004).pdf)

加えて、58カ所もの新規基地建設が計画された。しかしながら、その後本格化したシェールガス生産はこれらの建設計画の大部分を中断もしくは無期延期にした。

表3：米国のLNG輸入基地（2004年現在）

基地名	所在地	受入能力 (万トン)	供給元
Everett	マサチューセッツ	530	アルジェリア、トリニダード ⁶
Cove Point	メリーランド ⁶	760	ナイジェリア、トリニダード ⁶
Elba Island	ジョージア	330	トリニダード ⁶
Lake Charles	ルイジアナ	480	アルジェリア、UAE、トリニダード ⁶ 、カタール、ナイジェリア、オマーン

出所：DOE 資料より筆者作成。

米国のLNG輸入を当て込んで中東・アフリカ諸国（カタール、ナイジェリア、トリニダードトバゴなど）はLNG生産量能力を大幅に拡張したが、米国との契約に至らなかったため大量のLNGが長期契約以外の形態で取引されるようになった。

LNGの生産能力は2011年末現在で約25,000万トンの規模に達した。2005年以後に投資が決定された案件には、2005年のカタールの4,500万トン、2006年のペルーの450万トン、2007年の豪州（ウッドサイド社）430万トンやアンゴラ520万トン、2008年のアルジェリア450万トン、2009年の豪州（Gorgonプロジェクト、1,500万トン）やパプアニューギニア（670万トン）、2010年の豪州（ブリティッシュガス、850万トン）が数えられた。これらのプロジェクトが立ち上がった結果、LNG輸出国の中で最大の生産能力を持つことになったのがカタールである。カタールのLNG生産能力は2008年末で3,000万トンであったが、2009～2010年に大型プロジェクトを相次いで稼働させた結果、2011年には年産7,700万トンの生産態勢を確立した。

3.2 欧州ガス輸入国の選択肢の拡大

(1) 欧州のLNG輸入動向

各国で積極的なLNG開発が進められた結果世界のLNG需給は緩和し、行先を失ったLNGはスポ

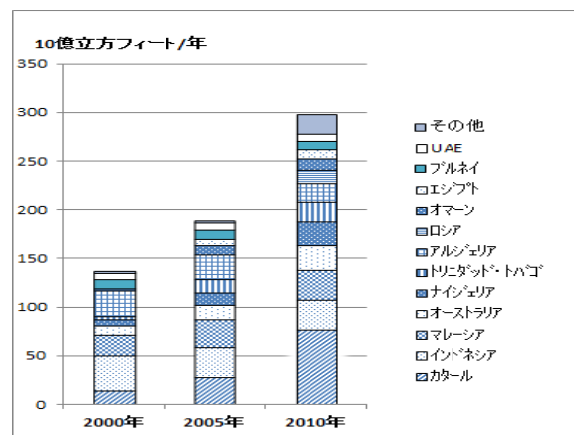
ット市場に流れ、主に欧州市場で売買されている。

図5はBP統計より作成したLNG輸出入量の2000年、2005年と2010年の比較である。これによれば、欧州のLNG輸入量は2005年の年間476億立方フィートから2010年には同878億立方フィートに増加した。増加率は84.4%で、LNGの最大の需要地であるアジア・太平洋の45.2%や世界平均の57.6%を大きく上回った。これはスポット取引の増加を反映している。

また同統計からLNGの国別輸出力をみると、カタールは2005年から2010年の間に輸出力を2.8倍に伸ばし世界最大のLNG輸出国になった。

シェールガス開発の本格化と軌を一にして起きたことは、LNG取引の買い手市場化の中で欧州のガス・電力会社は一時ロシアからの長期契約ガスの引き取りを止めてスポットLNGに切り替えたことである⁶。国際取引上は契約違反になるこうした対応に対して、ロシアは長期契約顧客との関係を損なうべきでないとの判断から、価格方式を一部改定し長期契約顧客を繋ぎ止めようとせざるを得なかった。

(1) 国別輸出力



⁶ 21世紀に入ると、LNG市場でも短期のスポット取引の割合が増えてきた。2000年時点では3%ほどであったが、2007年にはスポット取引の割合は20%に増加した。さらに、余剰LNG生産を背景とする市場の流動化により、輸出先を決めないでLNGを購入し、購入後顧客を探すというビジネスも出てきた。2008年時点では、こうした取引は大西洋市場では取引全体の4割にも達しているといわれる。アジア市場では長期契約が中心であり、そうした取引は6%にとどまっている。

(2) 地域別輸入量

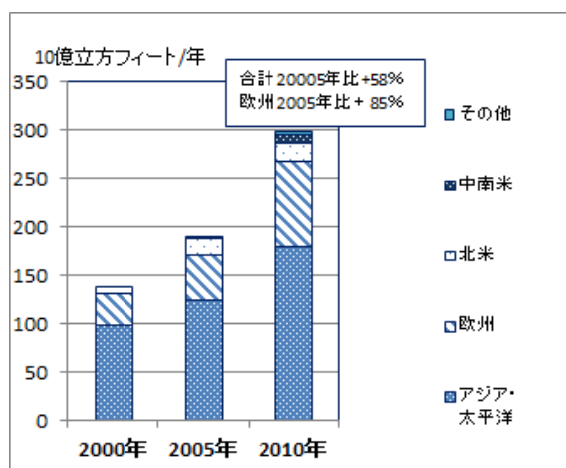


図5: LNG輸出入量の推移

出所: BP 統計各年版

世界のガス市場には、大きく米国市場、欧州市場、アジア市場がある。各市場で取引基準となるのは、米国はパイプラインガスのヘンリーハブ渡し価格であり、欧州は石油製品価格に連動したパイプラインガスと同ガスと競合するLNG、アジアは原油価格に連動するLNGの価格である。これらの3市場における価格は、各市場が抱える需給条件、気象条件等によりそれぞれ独自に変動している。BP統計により、その推移をみると、表4のとおりとなる。

LNGの価格動向に関しては、東日本大震災後の原子力発電所停止の影響から日本では前年比で10%以上LNG輸入が増えており、2011年の東アジア向けのスポットLNG価格は上昇気味であった。東アジアのスポット価格指標と英国市場価格(NBP)の差は、2011年3月まで2ドル/百万Btuであったが、3月の原発事故以後は両市場間の価格差は拡大し、2011年12月には8ドル程になった。

表4: 天然ガスの市場別価格

単位: 米ドル/百万Btu

		2010年	2011年
パイプラインガス	米国	4.38	4.11
	欧州	7.61	10.27
LNG	米国	4.79	5.44
	欧州	6.85	9.4
	日本	11.02	15.19

出所: IEA "Energy Price and Taxes"

(2) 輸入国の選択肢拡大の地政学的意味

中・長期的な影響に関しては、シェールガス開発は米国内だけの展開に止まらない。米国以外では、中国、カナダ、メキシコ、ポーランドで大きな賦存が確認されている。米国で開発された技術が適用されれば、数年の内にそれらの地域のシェールガスは天然ガス市場に供給されるとみられる。

欧州における最大規模のシェールガス層はポーランドで発見された。これにはシェブロンやエクソンモービル等の米国石油会社の協力が大きい。今世紀に入り東欧諸国に対するロシアの天然ガス供給停止問題は世界の注目を浴びたが、ポーランドでシェールガスが本格的に開発されればロシアの地位の相対的低下は避けられない。

ポーランド等の欧州外縁地域におけるシェールガスの開発はEU各国の対ロシア発言力の増大につながる。ドイツをはじめEUは現在天然ガス供給の3割をロシアに依存しているが、需要家がLNG調達を選択肢を増やすことは買い手としての交渉力を相対的に高める。ポーランドやドイツのシェールガス開発は、欧州諸国にとって対ロシアカードを一枚増やすことを意味する。

3.3 中国の資源外交変化の可能性

LNG需給の国際的緩和及びシェールガスの開発は、アジアでは中国とロシアの関係を成熟に向かわせる要素となる。ロシアは欧州ガス輸入国の選択肢拡大の動きに直面しているため、販路の確保に向けて東方(中国)へ一定程度のシフトを進めなければならない。

東シベリアガス田開発及び中国向けパイプラインの建設はこうした文脈で考えることが可能であり、中国とロシアはエネルギー戦略において基本的に相互補完関係に立ち得る。ロシアは2009年2月に中国に20年間にわたり石油を供給するとともに総額250億ドルの融資を申し出た。そして両国は2009年4月に石油・天然ガス・原子力・電力分野における協定を定めた政府間協定に調印したが、これにより石油パイプライン建設や石油取引に関する包括的な協定

が直ちに発効し、同契約も正式に発効した。

2011年6月16日のメドベージェフ大統領と胡錦濤国家主席による首脳会談においては、両国は経済協力で基本合意に達したものの、天然ガス問題では合意を得ることができなかった。両国は2009年にロシアが中国に680億 m^3 のガスを供給するとの基本合意を成立させているものの、価格面では最終合意に至っていない。

こうした展開をみていると中国はロシアの足元を見ていると評価せざるを得ない。ロシアは欧州顧客の低価格攻勢に遭遇し、中国にも欧州並みの価格を提示しているが、中国はトルクメニスタンやウズベキスタンからの供給を視野に入れ、ロシアにより安い価格の提示を求めている。

天然ガス交渉が当面中国主導になるとみられるのは、ロシアとのガス交渉で主導的な立場に立つこともさることながら、シェールオイル開発で一層の存在感を発揮するとみられるからでもある。

すなわち2011年7月に発表された米国ベーカー研究所の報告によれば、中国には6.5兆立米のシェールガスが賦存している（図6参照）。

このようにシェールガス開発は中国の資源外交のスタンスを一変させる可能性がある。端的に言えば、「資源買い漁り路線」から「自国資源開発」あるいは「国際ルールに則った技術保有会社の誘致と地道な合弁事業の組成」を骨子とする資源戦略への移行に加え、対ロシアガスへのスタンスを一層強化する可能性も大きい。

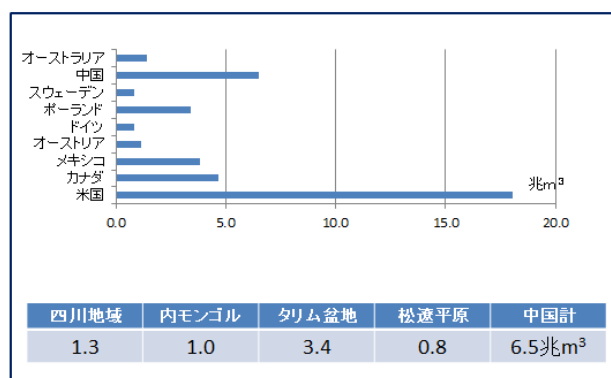


図6：シェールガスの回収可能量

出所：米国ベーカー研究所レポート（2011年7月）

4. シェールガス開発の課題

4.1 環境保全の動き

米国では農地におけるシェールガス田開発では農業用水へのガス・油分の混入が問題となり得るが、これまでのところ水圧破碎に用いられる注入水は完全に分離されており、農地としての利用や土地の売買の上で大きな問題は報告されていない。

しかしながら、シェールガス開発が進むにつれ、シェールガス開発に伴う環境問題が人々の関心を集めるようになった。米国でシェールガス開発に反対の立場をとる人々が挙げる問題点は、以下に要約できる。

まず、大量の地下水が水圧破碎には使用されることである。水圧破碎では大量の水の確保が課題となる。河川水その他、バーネットシェールガス開発では空港の水供給設備から供給を受けた。消火用水を利用する事例も報告されている。

注入水の水処理に関しては、水圧破碎後に地上に戻る水であるフローバックの問題が顕在化している。フローバックの主な処理方法は、公共水面への排水、工業用水としての利用、枯渇油井、ガス油井、帯水層への圧入、水圧破碎への循環的適用が該当する。この内、公共水面への排水と工業用水としての利用に関しては州の規制を満足する排水処理が必要であり、今後多くの州で規制が強化されることが予想される。

現在規制の導入を検討している州はニューヨーク州である。同州は2010年7月に飲料水用として良質な水源の確保を優先する対処方針案を発表した。「飲料水汚染防止に向けた規制（案）」は、ニューヨーク市及びシラキューズ水源地、飲料水用帯水層、環境保護区等での地表掘削を禁止すると共に、汚染防止対策の強化策としてガス流体の流出を防ぐためのケーシング・雨水管理・フローバック水の取扱い基準の強化、水圧破碎に用いる化学品の提出義務を課している。

また連邦レベルでも、環境保護庁（EPA）が、

水圧破碎と帯水層の関係性の有無を2014年までに検討するとして他、エネルギー省は専門家委員会を設置して注入薬品名の公表に動いている。

テキサス州、ワイオミング州、アーカンソー州は、添加薬品の公表に関し法制化に動いている。表5に示す通り2011年9月現在、州、連邦レベルで法律と関連規制の整備が進められている。

テキサス州の経緯をみると、2011年3月下院州議会に提出されたテキサス州法案（HB 3328）は、6月にペリー州知事の署名を経て9月に発効した。そして同法は、「石油会社は、規制当局（鉄道委員会）に対し、掘削仕上げの報告時に合わせて各井戸の薬品構成を提出することを義務付ける。また、ウェブサイトでも一般公開することを義務付ける。ただし、機密事項に該当するものは除外する」と規定している。

次に、水圧破碎で使用する圧入水により地下水が汚染される可能性があること、さらに開発が進むにつれて水圧破碎後に地上に戻る水の排水に伴う環境汚染が懸念されるようになった。したがって、シェールガスの開発業者にとり水圧破碎と帯水層汚染の因果関係の解明は避けられない課題となった。

水圧破碎に用いられる流体は、水、プロパント、化学物質を混合されたものである。したがって、シェールガス開発は、同時に水の処理など環境対策を伴うものでなければならない。

表5：法整備と関連規制の現状（2011年9月）

	関係省庁、州	規制内容
連邦レベル	環境保護庁(EPA)	水圧破碎と帯水層の関係の有無を分析(2014年まで)
	エネルギー省(DOE)	添加物質の公表方法、公表範囲を検討
	内務省(DOI)	連邦保有地における開発のあり方、対応策を検討
州レベル	テキサス州	添加物質の公表に関し法制化
	ワイオミング州	
	アーカンソー州	
	ルイジアナ州	添加物質を法制化を検討中
	モンタナ州	
	ニューヨーク州	2011年7月までガス井掘削を禁止。同措置は2012年6月まで延長。

出所：石油専門各誌より作成

浅部の帯水層や水源汚染への懸念から、ニューヨーク州は、2010年8月シェールガス開発のためのガス井掘削を一時停止する措置を講じた。この措置は2011年7月まで適用された後、2012年6月1日まで延期された。

4.2 注入化学物質の公開

シェールガス開発は地下水の汚染に必ずつながるというものではないにせよ、シェールガス開発によって住民の環境意識の高まりは逆風を形成しつつある。注入される化学物質の成分は公開対象とされる方向にあるが、他方企業によっては企業秘密を盾に公表を拒む例もみられる。

石油専門誌によれば、混合される化学物質の事例として、セメントや鉱物の溶解を目的とする塩酸、バクテリアによる腐食防止を目的とする殺生物剤、注入水の粘性を低下させプロパントの残存分を増加させる過硫酸アンモニウム、腐食防止剤、温度上昇時の粘性維持を目的とする架橋剤、摩擦損失低減を目的とする摩擦低減剤等が示されている。主な添加物質のタイプを表6にまとめた。

表6：水圧破碎における注入物質と注入目的

添加物の種類	添加目的	物質	混合割合の一例
プロパント	フラクチャー支持	砂	5～9%
酸	セメントや鉱物の溶解	塩酸	0.1%
ゲル化剤	プロパント随伴性向上	非公開	0.05%
殺生物剤	バクテリアによる腐食防止	エタノール	0.01～0.05%
架橋剤	温度上昇時の粘性維持	ホウ酸塩	0.01%
摩擦低減剤	摩擦損失低減	ポリアクリルアミド	0.08%
鉄分制御	金属酸化物物の沈殿防止	クエン酸	0.004%
スケール防止剤	スケール付着防止	エチレングリコール	0.043%

出所：<http://www.energyindependentth.org/frac-fluid.pdf>より作成

4.3 取り組むべき環境対策

本稿でシェールガス開発を取り上げた理由は、米国の石油・ガス産業のダイナミズムをエネルギー確保に意味ある動きとして評価しているからである。米国のこれらの産業は日本の石油・ガス産業がいまだに獲得できていないダイナミズムを有している。

このダイナミズムは現在、地下水汚染という新たな課題に直面している。既述の通り一部の州は、水圧破碎の適用禁止や注入化学物質成分の公表等の方

向に動いている。これは試練ではなく、産業として取り組むべき当然の対策である。その結果コストの問題が発生するが、そうしたコスト競争・経済性の問題が克服できなければ、シェールガスは地下に回収不能資源として残置されるだけであろう。

「頁岩からエネルギーを（EnergyFromShale.org）」という名称の産業団体が、「シェールオイル開発を巡る議論には二つの立場しかない。問題は、石油・天然資源がほしいか、あるいは石油・天然資源の開発はまったく不要とするか、という点である」として二者択一を迫っているが、この論の立て方は公正でない。また、そうした風潮は日本の石油産業関連機関あるいはシェールガス開発を支持する専門家に、多かれ少なかれ見られることには自戒を込めて留意しておかねばならない。問題の要は、シェールオイル開発自体の必要性ではなく、安全で、環境対策を万全に講じた上でのシェールオイル開発をいかに進めるかということである。

その点に関してポール・クルーグマンは2011年11月7日付けのニューヨークタイムズ⁷の紙上でその点に関し、経済学者らしい観点で、「水圧破碎法の特別扱いは、自由市場の原則をばかにした行為であると指摘しておきたい。水圧破碎法を推す政治家たちは補助金には反対だと主張しているが、ある産業が他に犠牲を強いているのにその補償を行わなくていいとするのは実質的に多額の補助金を与えるのと同じことである。彼らは、政府が勝者を決めるのには反対だと口では言いながらこの産業の勝利を求めているからこそ、特別扱いを要求しているのである」と書いている。

米国にこうした乱暴なロビー活動が存在するか否か、日本からは窺い知れないが、想像することは可能だろう。

しかしながら、そうした要素を加味してもなおかつ、米国の石油・ガス産業には健全なダイナミズムが見られる。ここでいう健全なダイナミズムとは大

きくはイノベーションに対する真摯な姿勢、ベンチャーと石油会社の機能分担からなる。中核事業領域における地道な努力に裏打ちされたベンチャーの挑戦と石油会社のフォローアップ及び最終事業化といった機能分担が、全体として揺るぎない成果を確保するという構造である。

エクソンモービルは、シェールガス開発で第二の地位にあったベンチャー企業であるXTOエナジー社を買収したが、それは成果を掠め取ったわけではなく、両者は単に機能を分担しただけである。他方、大手石油会社の中でもシェルはベンチャーに近い戦略を取り、またヘス社やマラソン社はそれぞれの事業規模に応じたポートフォリオを設定してオイルシェール開発を手掛けようとしている。

5. シェールガス開発の影響の 石油地政学的側面

5.1 非OPEC石油の生産増

シェールガス開発で蓄積された技術革新がオイルシェールに及んだ場合の石油地政学上の影響はどう評価されるか。

既に北米ではシェールガス開発技術をコンデンセート成分に相当するシェールオイルへ適用することは一つの潮流になっており、シェールオイル生産量は2010年の38万B/Dから2016年には170万B/Dに達すると産業界はみている（表7参照）。

表7：米国シェールオイルの生産見通し
(単位：千B/D)

	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
Williston Basin(バッケン他)	270	400	580	730	800	840	880
バーネット	20	20	30	40	50	50	50
イーグル・フォード	30	100	140	200	260	340	390
モンテレー	10	10	10	20	30	40	50
ニオブララ	30	40	60	70	90	100	120
ユチカ	0	0	0	0	10	50	90
その他シェールオイル	20	50	50	80	80	110	120
シェールオイル計	380	620	870	1,140	1,320	1,530	1,700
原油・コンデンセート	5,090	5,040	4,910	4,750	4,630	4,750	4,920
液体燃料生産量計	5,470	5,660	5,780	5,890	5,950	6,280	6,620

出所：IEA「月次石油市場報告（2011年12月号）」より作成。

⁷ “Here comes the Sun” Paul Krugman, The New York Times, 2011年11月6日付け

米国の動きを受けて各国でシェールガス開発が起ることが予想される。また、技術的にはシェールオイル回収はシェールガス回収よりも難しいが、石油はガス（LNG）に比べて大掛かりなインフラの整備が必要ないという事情を考慮すれば、途上国においてはシェールガス開発よりもシェールオイル開発の方が立ち上がりやすいという要素もある。シェールガス開発技術が、今後世界各地のシェールオイル開発に本格的に適用されれば、石油地政学のパラダイムは大きく変わり得る。

そのことを2011年における石油産業動向から跡付けてみる。2011年6月に発表されたIEAの中期石油・ガス見通しをみると、2010～16年の非OPEC諸国の石油生産量は年平均50万B/D、期間合計で340万B/D増加するとみられている。図7のとおり、その内、270万B/Dが米国とカナダでもたらされ、120万B/Dがブラジルとコロンビアからもたらされる⁸。また、プロセスゲイン・バイオ燃料は90万B/D増加し、これらは、北海の減産を補う。一方、上流部門投資の継続や限界油田の操業継続はOPEC以外の中東産油国の減産幅を最大50万B/Dに抑えることに寄与する。

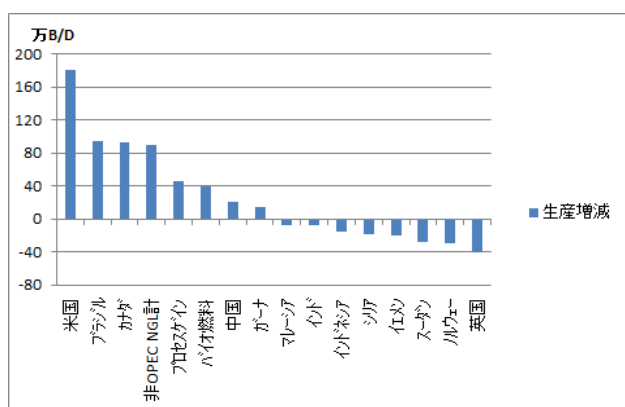


図7：主要非OPEC産油国の原油生産増減
(2010年と2016年の比較)

出所：IEA「月次石油市場報告（2011年12月号）」より作成。

⁸ 非OPEC全体としては、北海（英国、ノルウェー）、スーダン、イエメン等で減産が見込まれるので、合計340万B/Dの増産に止まる。

こうした全体的な絵の中で、米国の石油生産動向をみると米国の石油生産量は、2011年の781万B/Dから2016年までに約20%増加して960万B/Dになる。非在来型石油の生産見通しは上方修正される基調にあるが、このことは原油／ガスの現行価格差が石油比率の大きい鉱区の開発を優先させる一因をなすためである。シェールオイルやガスの開発はコンデンセートの増産につながる。これらの増産分はガス処理用や石油化学用として用いられる他、カナダのオイルサンドの希釈剤に用いられる。

既にみたとおりシェールオイル開発の米国の石油需給バランスへの影響としては、非在来型石油生産量は2010年の38万B/Dから2016年には170万B/Dに増加する。非在来型石油の石油生産総量に占める割合は2010年の6.9%から2016年には25.7%に増加する。その最大の貢献は、88万B/Dのバッケンシェールを含むウィリストン堆積盆地と39万B/Dのイーグルフォードである。

5.2 米国エネルギー外交の復権

2011年夏以来国際外交誌で、「米国はエネルギー外交のリーダーに返り咲く（世界のエネルギー供給の中心は米州（南北アメリカ大陸）に移行）」という文脈での論考が目に残まるようになった。それらの論考の主旨⁹は、シェールガスやオイルサンド等の非在来型資源に関して、米国には2兆バレルを超える非在来型ガス・石油資源が賦存するが、これに対して中東・北アフリカ地域に賦存する在来型炭化水素資源は1.2兆バレル程に過ぎないとの事実認識を示した後、この半世紀の間は世界的なエネルギー供給の中心は中東だったが、今やこの構図は変わろうとしている。2020年までに世界のエネルギー供給の中心はおそらく米州に移行していくとの展望を示した後、非在来型資源の台頭が国際政治に与える影響について筆者と同じ論考と認識を主に以下のとおり指摘している。

i) エネルギーを必要としている中国は、米州にお

⁹ 参考文献6) 参照。

けるエネルギー資源のポテンシャルを認め、米国と同様カナダや南米に数十億ドルもの投資をしている。

- ii) 体制変革運動が広がっている中東と北アフリカ諸国では、米国の非在来型資源開発の動きが同地域に残存する独裁者の政治姿勢に影響を与えている。即ち、シェールガス、シェールオイルの出現による石油・ガス価格の上昇圧力の緩和は、当該地域の為政者が石油収入のばら撒きにより国民の不満を抑えることができなくなることを意味する。
- iii) イラン、ロシア、ベネズエラ等の産油国は、米国のガス生産増を目の当たりにし動揺し始めている。米国の資源余剰は、資源輸入国にとって供給源を増やし、資源生産国の高圧的なエネルギー外交の行使を困難にしている。
- iv) 資源大国に圧力をかける先兵を務めるのは米国のエネルギー産業である。欧州諸国や中国が、米国の資源メジャーから必要な技術援助を受けて、自国内の非在来型資源を採掘することで、ロシアや湾岸諸国に迎合する必要がなくなる。

5.3 湾岸産油国の産油能力拡張計画への影響

サウジアラムコのファリーフCEOが、2011年11月にシェールガス革命の影響に関して初めて発言した¹⁰。発言の要点は二つあった。一つは、詳細評価を行うことは時期尚早としつつも、新たな石油供給源の出現は、競争者の出現としてよりは、石油時代を長引かせるものとして歓迎されるという点である。今一つは、新石油供給源の出現はイラク石油開発の本格化と相俟って、サウジの原油生産能力の拡張計画を後ろ倒しするだろうという点である。

このことのエネルギー安全保障上の含意は大きい。これまで世界の石油緊急時対応はOPEC加盟国、就中、サウジアラビアの余剰能力に依拠するところが大きく、サウジアラビアはこの視点から産油能力の拡張を手掛けてきた。しかし、2011年の展開は非

在来型石油開発の予想を上回る進展、イラクの石油開発の本格化はサウジアラビアを産油能力拡張計画の見直しに向かわせたということである。

IEA月次石油市場報告12月号より、OPECの余剰産油能力を国別にみると、表8のとおりとなる。これを踏まえて2015年までの展望を、

- ① 2015年までの対OPEC石油需要増250万B/D、
- ② 生産を伸ばすと見られる国としてイラク150万B/D、リビア80万B/D、アンゴラ24万B/D、ナイジェリア19万B/D

等の前提により試算してみると、サウジアラビアの需要は伸びず拡張計画のスピードを鈍化したとしてもOPEC全体としては463万B/Dの余剰能力を維持し、その内、207万B/Dはサウジアラビアが保持するバランスとなる。

表8：OPEC加盟国別余剰生産能力の規模
(単位：百万B/D)

	2011年(IEA石油市場報告)			2015年(試算)		
	産油能力	11月生産量(A)	余剰能力	産油能力	生産見込(B)	余剰能力
アルジェリア	133	129	4	136	129	7
アンゴラ	196	169	27	242	199	43
エクアドル	52	50	2	48	50	-2
イラン	370	355	15	312	310	2
イラク	276	272	4	425	422	3
クウェート	286	267	19	275	267	8
リビア	44	55	11	174	155	19
ナイジェリア	271	210	61	267	225	42
カタール	102	82	20	97	82	15
サウジアラビア	1,204	975	229	1,182	975	207
UAE	272	252	20	332	252	80
ベネズエラ	261	253	8	292	253	39
OPEC11カ国(イラクを除く)	3,191	2,797	394	3,357	2,897	460
OPEC計	3,467	3,069	398	3,782	3,319	463

注：2015年時点の対OPEC石油需要の増加を250万B/D(3,069万B/D→3,319万B/D)と見込み、国別生産量増加見込みは2015年の生産量見込み量(B)と2011年11月生産実績(A)の差より試算すると、不足分はサウジアラビアの余剰能力(207万B/D)で埋め合わされる。

出所：IEA「月次石油市場報告(2011年12月号)」より作成。

6. おわりに

数年来の米国石油産業関係者の高揚感、シェールガス革命によりもたらされたものである。こうした高揚感、1990年代初めの興隆期に示されたニューヨーク商品取引所(NYMEX)関係者のマインドに通じるものがある。

¹⁰http://www.tradearabia.com/news/OGN_208356.html

1960～80 年代の石油価格決定の歴史を跡付けると、1960 年代は国際石油カルテルの時代であり米国大手石油会社が石油価格を決めていた。その後、1970 年代の OPEC による石油価格支配権の確立があり、1980 年代を通じて石油価格は下がったものの価格決定権を回復するのは 1990 年代の N Y M E X の成功まで待たねばならなかった。

様々な石油産業文献をみると、1993 年になると N Y M E X の成功を正面から受けとめ、その高揚感を謳い上げる論文が目に残るようになった。

近年の米国エネルギー産業関係者の高揚感は、1993 年当時のこのムードに近いと感じるのである。

さて、この半世紀の間、世界的なエネルギー供給の中心は中東であった。この事実は地政学的に大きな意味を持っていたが、今やこの構図は変わろうとしている。米国には 2 兆バレルを超える非在来型ガス・石油資源、カナダには 2.4 兆バレルのオイルサンド、さらに南米には 2 兆バレルの超重質油が賦存すると推定されるのに対し、中東・北アフリカ地域に賦存する在来型炭化水素資源は 1.2 兆バレル程に過ぎない。

既述の通り、水平掘りや水圧破碎技術の適用により米国のシェールガス生産量はこの 10 年間で事実上ゼロの状態から同国天然ガス総供給量の 20% を占めるまでに急増した。シェールガス生産量は、2040 年までに同 5 割に達するとの見通しも見られる。シェールガス生産の急成長の結果、米国のガス生産者は供給確保の問題から解放された反面、皮肉なことに今や供給余剰分に関し顧客を見出すことに頭を悩ますことになった。

関係者の中には、米国は再びエネルギー外交のリーダーの地位に帰り咲くだろうと指摘する者も現れた。現実には米国がエネルギー外交のリーダーの地位に帰り咲くのは容易なことではない。しかし、少なくとも、米国のリーダーとしてオバマ大統領はエネルギー戦略の策定に真摯に取り組んでいる。

2009 年 1 月にオバマ大統領は、「我々の石油まみれの生活様式が我々の敵を利している」と述べ、米国

民に対してガソリン漬けの生活態度の是正を求めた。具体的には経済の再生及び再生エネルギーの促進を重視する一方で、国内ガス開発を支援し始めた。さらに、中国やポーランドとの二国間協力にシェールガス開発協力を盛り込み、多国間でもシェールガス開発に関する国際フォーラムを開催して技術協力を主導しようとしている。

米国エネルギー会社はオバマ政権の後押しを受けて、世界的に新たな展開にみせていることに留意しておく必要がある。

3・11 東日本大震災を経験し、日本はエネルギー政策の抜本的見直しを迫られている。世界で胎動しつつある大きな潮流を見据えたエネルギー戦略の再構築が急がれるのみならず、これを先導する産業界のダイナミズムの発揮が期待される。

参考文献

- 1) 「技術革新がもたらしたエネルギー革命」(須藤)、社会技術革新学会第 5 回学術総会(2011 年 9 月 28 日) 予稿集
- 2) DOE“Shale gas primer 2009”
- 3) Shale Gas and U.S. National Security, The James A. Baker III Institute, 2011 年 7 月
- 4) 「世界の天然ガス埋蔵量の急増」伊原賢, JOGMEC (2011 年 8 月 11 日)
<http://oilgas-info.jogmec.go.jp/>
- 5) “Here comes the Sun” Paul Krugman, The New York Times, 2011 年 11 月 6 日
- 6) “The Americas, Not the Middle East, will be the world capital of energy” Amy M. Jaffe, Foreign Policy, 2011 年 9 月
- 7) “Saudi sees threat of shale oil revolution”
http://www.tradearabia.com/news/OGN_208356.html
- 8) “Medium-Term Oil & Gas Markets”, IEA, 2011 年 7 月
- 9) “Oil Market Report”, IEA, 2011 年 12 月号

石油販売業の公共性と社会インフラの側面に関する考察

Study on Public Responsibility and the Aspect of Social Infrastructure of Oil Distribution

吉原 有里¹

Yuli YOSHIHARA

増田 優²

Masaru MASUDA

須藤 繁³

Shigeru SUDO

要 旨 : エネルギーは生活の根幹を支えるものであり、エネルギー供給インフラには公共性がある。2011 年 3 月に起こった東日本大震災は、エネルギーというものを生活の安全保障の観点から再考する契機となった。平常時において人々の活動の足を支える燃料等として電気や都市ガスと共に国民の生活を支えている石油は、災害時においては供給の柔軟性による早期の復旧で被災地での足を確保するのみならずより広いエネルギー供給の役割を担い、復旧を促進した。一方、給油所は経済的効率化を理由に 1999 年を機に急速に減少が進み、今後更に減少していくと予想される。社会インフラとして機能し、公共性を有する給油所がこのまま減少していくことは、生活の安全保障を損なうことにつながりかねない。

Abstract : Energy is a commodity which supports the base of our lives, and energy infrastructure should be public. On March 11th in 2011, the severe earthquake called “the Great East Japan Earthquake” occurred in Eastern Japan, which provided us with a chance to consider energy as a critical item for life security. Oil is usually used as fuel mainly for cars and helps people with their movement. However, when a disaster occurs, because of the flexibility of its supply, oil supply line will be quickly recovered, and therefore, oil can help many people’s lives. On the other hand, since 1995, the number of gasoline service stations has been decreasing rapidly for improving its economic efficiency. We need to think of this gasoline service station decrease from the point of view of life security and to recognize the aspect of social infrastructure of oil distribution.

キーワード : 社会インフラ、ガソリン給油所の減少、流通の合理化、セルフ給油所、供給ラインの強靱性

Keywords : Social infrastructure, Gasoline service station decrease, Economic efficiency, Self-service gasoline station, toughness of supply line

¹吉原 有里 社会技術革新学会 学生会員 (お茶の水女子大学 学部 2 年)
〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1 yoshihara.yuli@gmail.com
²増田 優 お茶の水女子大学 ライフワールド・ウオッチセンター
〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1 masuda.masaru@ocha.ac.jp
³須藤 繁 帝京平成大学 現代ライフ学部 経営マネジメント学科
〒170-8445 東京都豊島区東池袋 2-51-4 shigeru.sudo@nifty.com

2011.12.11 受付, 2012.6.13 受理
社会技術革新学会第 5 回学術総会 (2011.9.28) にて発表

1. はじめに

エネルギーによって国民生活の根幹は常に支えられている。しかし、災害時には供給ラインが寸断されることでエネルギーの供給が断たれる可能性がある。そのため、平常時だけでなく災害時においても安定したエネルギー供給ラインを確保しておくことが生活の安全保障の観点から重要となる。2011年3月11日の東日本大震災や福島原子力発電所の事故は、そのことを改めて認識する契機となった。

一方で、小売業に分類されると同時に石油というエネルギーの供給の末端を担う給油所は、経済的な側面から減少を続けている。この給油所数の減少について、平常時と災害時における社会インフラの側面から検証しつつ考察する。

2. 給油所数の減少

2.1 小売業者数の減少の要因

図1に小売業の事業所数（以下、「小売業者数」と表記する。）と商品総販売額（年間）の推移を示す。小売業者数は1982年の172万店をピークに減少し、2007年に113万店となっている。その年平均減少率は1.64%である。また、商品総販売額も1997年の148兆円をピークに、それ以降減少している。

小売業者数と商品総販売額の推移を重ねると、小売業者数の減少期には異なる二つの期間がみられる。一つは小売業者数が減少しつつ商品総販売額が増加している1982年から1997年までの期間である。そしてもう一つは小売業者数と商品総販売額がどちらも減少傾向にある1998年から2007年までの期間である。

後者の1998年から2007年の期間における小売業者数の減少は、主に商品総販売額の減少によりもたらされたものである。一方、前者の1982年から1997年の期間においては商品総販売額が増加しているにもかかわらず小売業者数が減少しているため、小売業者数の減少の原因を同様に商品総

販売額の減少に求めることはできない。

小売業は物流の末端、すなわち商品を消費者に販売するところである。同じ量の商品を販売するにしても、店舗数が多いほど販売拠点は分散し、商品の運送費や拠点の運営費等のコストが増大する。商品総販売額が増加している時期に小売業者数が減少しているのは、店舗数を減らすことで物流コスト等の経費を削減する「流通の合理化」が行われたためである。

このように小売業者数の減少は、まずは1982年からの流通の合理化によりもたらされ、1997年以降はそれに加えて商品総販売額が減少し始めたことにより進行している。

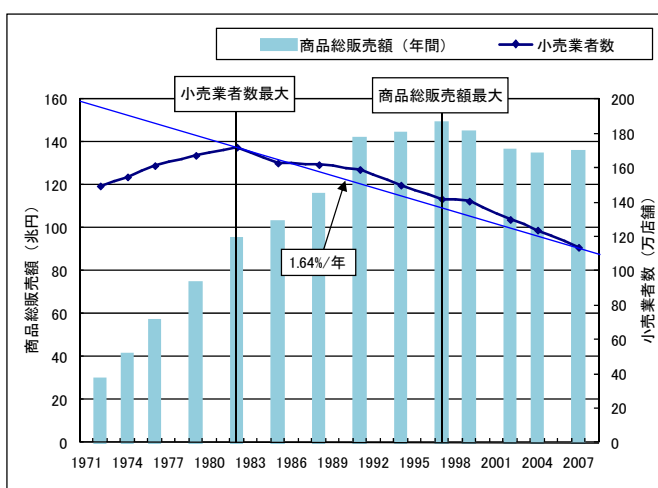


図1 小売業者数と商品総販売額の推移

（出所：経済産業省の商業統計（1972 - 2007）より作成）

2.2 給油所数と小売業者数の減少の比較

図2に給油所数とガソリン総販売量（年間）の推移を示す。給油所数は1995年の60,421店をピークに減少し、2011年に38,777店となっている。その年平均減少率は2.73%である。また、ガソリン総販売量も2005年の6,100万kl（キロリットル）をピークに、それ以降減少している。

給油所数とガソリン総販売量の推移を重ねると、小売業者数と同様に、給油所数の減少期にも異なる二つの期間がみられる。一つは給油所数が減少しつつガソリン総販売量が増加している1995年

から 2005 年までの期間、もう一つは給油所数とガソリン総販売量がどちらも減少傾向にある 2006 年から 2011 年までの期間である。

小売業者数の減少は流通の合理化と商品総販売額の減少によってもたらされているが、給油所も例外ではない。1995 年から 2005 年までの期間は流通の合理化により減少し、2006 年以降はさらにガソリン総販売量が減少したことを背景に減少

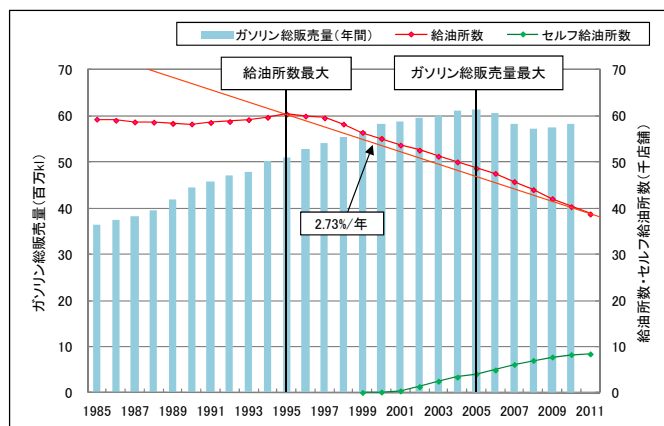


図 2 給油所数とガソリン総販売量の推移

（出所：「ガソリン総販売量」は経済産業省のエネルギー生産・需給統計年報（1989～2001）および資源・エネルギー統計調査年報（2002～2010）、「給油所数」は経済産業省の揮発油販売業者数及び給油所数の推移（2011）、「セルフ給油所数」は財団法人日本エネルギー経済研究所石油情報センターのセルフ SS 出店状況（2011）より作成）

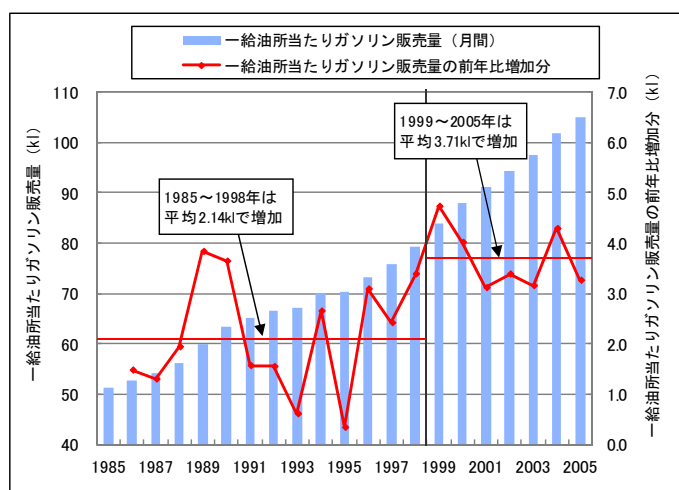


図 3：一給油所当たりガソリン販売量の推移と前年比増加分

（出所：「ガソリン総販売量」はエネルギー生産・需給統計年報および資源・エネルギー統計調査年報、「給油所数」は揮発油販売業者数及び給油所数の推移より作成）

している。

しかし、両者は減少の傾向は同じであるが、減少速度が異なっている。小売業者数は 1982 年から 2007 年の 25 年間で 34 %減少し、給油所数は 1995 年から 2011 年の 16 年間で 36 %減少している。これを幾何平均した減少速度（年平均減少率）で表すとそれぞれ 1.64 %/年と 2.73 %/年となり、給油所数の減少速度は小売業者数の減少速度の 1.7 倍となっている。

2.3 ガソリン供給に関する構造変化

(1) 一給油所当たりガソリン販売量の変化

図 3 にガソリン総販売量が増加している 2005 年以前の一給油所当たりガソリン販売量（月間）とその前年比増加分の推移を示す。

1985 年から 2005 年までの期間を 1999 年の前後で分ける。そしてそれぞれの期間で一給油所当たり月間ガソリン販売量の前年比増加分の平均をとると 2.14 kl と 3.71kl となり、1999 年の前後で 1.7 倍の差がある。このように、1999 年の前後でガソリン供給に関してある種の構造変化が起こっている。

図 2 にセルフ給油所数の推移を示す。規制緩和の流れから 1999 年にセルフ給油所の導入（以下、「セルフ導入」と表記する。）が行われた。それ以降セルフ給油所は年々増加し 2011 年には 8,449 店舗となり、全給油所のうち 22 %がセルフ給油所となった。

このように 12 年間でセルフ給油所が急増したことが給油所全体へ何らかの影響を与えている可能性が高い。1999 年の前後でみられる構造変化とセルフ給油所との関係を以下で検証する。

(2) セルフ給油所のガソリン販売量

セルフ給油所は 1999 年以降現れてきて年々増加しているが、そのガソリン販売量は従来型の給油所（フルサービス給油所）と異なっている。

表 1 に給油所タイプ別の一給油所当たりガソリン販売量（月間）を示す。従来型の給油所とセルフサービス給油所（セルフ給油所と同義）の 2003

年から 2008 年までの一給油所当たりガソリン販売量の平均はそれぞれ 75 kl/月と 256 kl/月である。両者のガソリン販売量を比較すると、セルフ給油所はフルサービス給油所の 3.5 倍のガソリンを販売している。

表 1 給油所タイプ別の一給油所当たりガソリン販売量（月間）

	2003	2004	2005	2006	2007	2008
フルサービス給油所	65.7	84.2	79.3	74.6	75.0	69.5
(kl)	平均 74.7					
セルフサービス給油所	265.7	250.1	248.3	235.7	274.3	261.5
(kl)	平均 255.9					
ガソリン販売量比（セルフ/フル）	4.0	3.0	3.1	3.2	3.7	3.8
(倍)	平均 3.5					

（注*）「セルフサービス給油所の一給油所当たりガソリン販売量」を「フルサービス給油所の一給油所当たりガソリン販売量」で除したもの。

（出所：財団法人日本エネルギー経済研究所石油情報センターの平成 21 年度給油所数経営・構造改善実態調査報告書（2010）より作成）

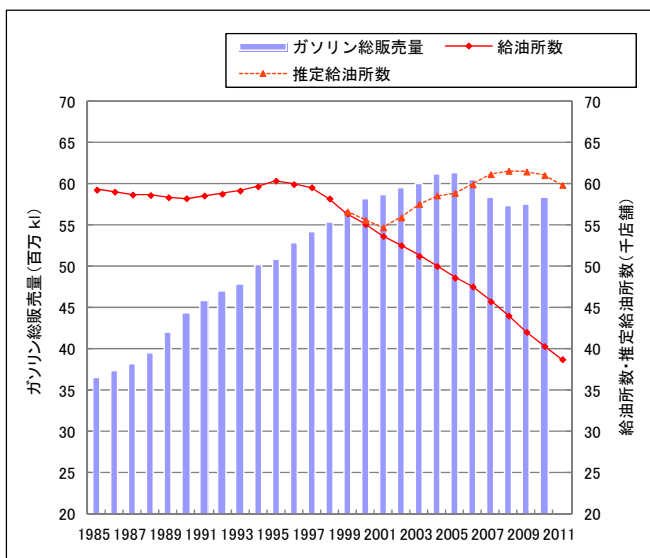


図 4 推定給油所数の推移

（出所：「ガソリン総販売量」はエネルギー生産・需給統計年報および資源・エネルギー統計調査年報、「給油所数」は揮発油販売業及び給油所数の推移、「セルフ給油所数」はセルフ SS 出店状況より作成）

（3）推定給油所数による検証

セルフサービス給油所はフルサービス給油所の 3.5 倍のガソリンを販売しているので、セルフ給油所 1 店舗は従来型の給油所の 3.5 店舗分に相当することになる。そこで、セルフ給油所がなかった

場合を想定した「推定給油所数」を「推定給油所数」＝「従来型の給油所数」＋「セルフ給油所数×3.5」によって算出し、その推移を図 4 に示す。

推定給油所数は 1999 年から 2001 年の期間で一時的に減少しているものの、2002 年から 2008 年にかけてはその数が増加している。このことから、推定給油所数は流通の合理化による影響をほとんど受けず、ガソリン総販売量の増加に伴い店舗数が増加することがわかる。

また、2011 年時点で実際の給油所数が 1995 年時点から 21,644 店舗（36%）減少したのに対し、同年の推定給油所数の減少は 522 店舗（1%）とほとんど減少していない。これは、ガソリン総販売量の減少が 2005 年から始まるため、2011 年時点ではその影響は小さく推定給油所数はほとんど減少しないことを示している。

2.4 給油所数減少の総括

給油所数の 1995 年からの減少は流通の合理化によりもたらされている。2005 年以降の給油所数の減少については、さらにガソリン総販売量の低下が減少の要因として加わっているが、その重みは相対的に大きくはない。

セルフ導入の給油所数への影響に関する推定の結果は、セルフ導入がなければ給油所数は流通の合理化による影響をほとんど受けず、ガソリン総販売量の減少だけが給油所数の主な減少要因となることを示している。そして、2005 年以降はガソリン総販売量の減少に伴い給油所数は減少していかざるを得ないと予想されるにもかかわらず、推定結果からはその影響が 2011 年時点でほとんど確認されない。これらのことは、1999 年以降のセルフ給油所の導入とその増加が給油所数の減少を導いた最も大きな要因となっていることを示している。

1999 年以降のセルフ導入により流通の合理化が加速し給油所数は急速に減少してきた。そしてその数は 2011 年時点で 38,777 店舗、つまりピーク時の 1995 年の 60,421 店舗に対して 64%にまで減少している。

3. 平常時における給油所の公共性

平常時において、給油所は自家用車の燃料を供給する社会インフラとしての役割を果たしている。しかし、その社会インフラとしての機能は全ての地域で一様なものではない。公共交通機関の整備状況の違い等から、地域により給油所の公共性は異なっている。

地域により異なる給油所の公共性を、家計調査のデータから分析する。

3.1 地域ごとの構造の違い

表2に県庁所在地別一世帯当たりの年間ガソリン消費量を示す。最上位の山口市と最下位の大阪市とではガソリン消費量に5.5倍の差があり、上位の地域と下位の地域とでガソリン消費量に大きな差がある。

このようなガソリン消費量の違いは地域ごとの交通事情の違いを反映している。つまり、山口市等の地域では自家用車が主要な交通手段になっているが、逆に東京都区部や大阪市等では電車や地下鉄等の公共交通機関が整備されており自家用車の代替となる交通手段が確保できる。

3.2 生活における石油の重要度

可処分所得とは所得のうち個人が自由に使える資金を指す。ある支出が可処分所得に占める割合の大きさは、個人がその支出に対してどれだけ生活の重きをおいているかの指標となる。

表3に県庁所在地別一世帯当たりの可処分所得に占めるガソリン購入額の割合を示す。上位の都市は、ガソリンを生活に必要不可欠なものとして購入している地域である。逆に下位の都市では生活におけるガソリンの重要度は低い。

この表3の上位5市は表2の上位15市の中に含まれており、表3の下位5市は表2の下位5市と一致することから、ガソリン購入量と可処分所得に占めるガソリン購入額の割合に関係性がみられる。この両者を散布図にして図5に表すと、両者の間には相関係数0.94という強い正の相関関係が

ある。

これは、電車や地下鉄等の公共交通機関が整備されている地域に住む人々にとって、生活における石油の重要度は低いことを意味している。特に、

表2 一世帯当たりの年間ガソリン消費量

順位	県庁所在地	ガソリン消費量(ℓ)
1	山口市	850,842
2	山形市	777,020
3	水戸市	753,775
4	福井市	746,384
5	金沢市	728,875
6	津市	714,558
7	長野市	699,707
8	大分市	698,033
9	富山市	686,663
10	徳島市	683,790
...		
11	松江市	680,985
12	新潟市	665,368
13	福島市	661,640
14	鳥取市	647,368
15	宮崎市	647,253
...		
43	横浜市	320,585
44	さいたま市	319,667
45	京都市	265,291
46	東京都区部	188,028
47	大阪市	154,218

(出所：総務省の家計調査（2010）より作成)

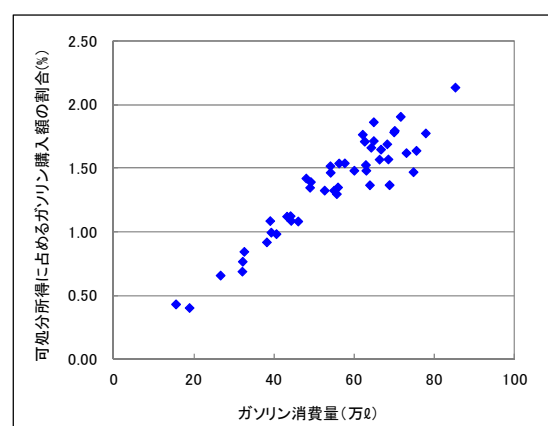


図5 ガソリン購入量と可処分所得の占めるガソリン購入額の割合の相関図（全県庁所在地）

(出所：総務省の家計調査（2010）より作成)

表3 一世帯当たりの可処分所得に占めるガソリン購入額の割合

順位	県庁所在地	可処分所得に占める ガソリン購入額の割合 (%)	可処分所得 (年間)		ガソリン購入額 (年間)	
			金額 (円)	順位	金額 (円)	順位
1	山口市	2.14	5,054,784	28	108,100	1
2	津市	1.91	4,716,768	37	90,021	9
3	宮崎市	1.87	4,439,772	45	82,843	15
4	長野市	1.80	5,079,024	27	91,315	6
5	大分市	1.79	5,100,972	26	91,132	7
...						
43	横浜市	0.77	5,392,212	14	41,447	43
44	さいたま市	0.69	5,880,648	4	40,613	44
45	京都市	0.66	5,153,952	22	33,992	45
46	大阪市	0.43	4,590,516	41	19,879	47
47	東京都区部	0.40	6,057,120	3	24,497	46

(出所：総務省の家計調査 (2010) より作成)

表2、3の下位の5市、つまり大都市部ではとりわけその重要度が低くなっている。しかし、大都市部と違い、自家用車が主要な交通手段となっている地域では、人々の生活における石油の重要度は格段に高い。

4. 災害時における給油所の公共性

次に、災害時における石油、都市ガス、電気それぞれの供給ラインの特性を検証していくことにより、石油の災害時における社会インフラの側面を考察する。

今回、災害の事例として1995年の阪神・淡路大震災と2011年の東日本大震災の例をとる。そのためにまずこの二つの災害の概要を以下で簡潔に示す。

阪神・淡路大震災は1995年1月17日に起こったマグニチュード7.2の直下型地震による災害である。この地震による被害は神戸を中心とした局地に集中していた。

東日本大震災は、2011年3月11日に宮城県沖で起こったマグニチュード9.0の地震とそれに伴う津波の発生により、東北地方および関東地方の広域に被害を与えた災害である。

4.1 石油供給ラインの被害と復旧

(1) 阪神・淡路大震災の事例

阪神・淡路大震災では製油所や油槽所には被害がなかった。ただし、道路の寸断や震災直後の一部の製油所の自動停止により、出荷が数日遅れた。

表4に給油所の被害について示す。

被災地にあった869カ所の給油所の3分の2にあたる579ヶ所で被害がみられた。そのうち3割前後で建物破損や防火塀破損等の被害があった。しかし、建物全壊や地下タンクへの被害、または火災があったという給油所はなかった。これらのことは、給油所の防火塀は火事から建物を守り、また地下タンクや建物自体は地震に対して十分な耐震性をもっていたことを示している。このように給油所は震災に対して強い構造になっている。

表4 阪神・淡路大震災における給油所の被害状況

被害状況	件数
被災地給油所数	869ヶ所
被災給油所数	579ヶ所 (66.6%)
内訳	
建物全壊	0ヶ所
建物半壊	9ヶ所 (1.0%)
建物破損亀裂等	242ヶ所 (27.8%)
防火塀倒壊半壊	68ヶ所 (7.8%)
防火塀破損等	295ヶ所 (34.0%)
地下タンク被害	0ヶ所
火災	0ヶ所

(注) () 内のパーセンテージは被災地給油所数を母数とする。

(出所：兵庫県石油商業組合の阪神・淡路大震災給油所の使命と安全性 (1995) p.6 より作成)

表 5 東日本大震災における石油供給拠点の被害状況と対応

	製油所	油槽所	給油所（東北元売7社）
3月11日	9製油所のうち6製油所が操業停止 (2件火災、1件被害大)	東日本全域の29油槽所が出荷停止	東北地方全域の給油所で被害
3月17日	2製油所が操業再開	塩釜油槽所の一部出荷開始	
3月21日	1製油所が操業再開	塩釜油槽所の本格出荷開始	69%が営業中
4月1日	震災前と同じ水準まで回復	29中24油槽所（83%）が出荷可能	81%が営業中
4月7日		29中26油槽所（90%）が出荷可能	90%が営業中

（出所：石油連盟の2011年4月1日、7日の定例記者会見・配布資料および出光興産株式会社の月刊出光2011年5月号（2011）p.18～21より作成）

(2) 東日本大震災の事例

東日本大震災では、海岸沿いに立地している製油所や多くの油槽所が津波による被害を受けた。また、給油所も地震や津波の影響により多くが営業を停止した。表5に東日本大震災における石油供給拠点の被害と対応を示す。

震災により東日本の9製油所のうち6製油所が操業を停止した。停止した製油所のうち2ヶ所で火災が発生し、1ヶ所では被害が大きく操業不可能となった。他3ヶ所は10日以内に操業を再開した。

油槽所に関しては、東日本の太平洋側のすべての油槽所で出荷が停止した。そのため地震発生から数日間は、出荷可能な日本海側の新潟や秋田、そして山形の油槽所からの陸上輸送によるガソリン配送が主であった。また、被災地にあった油槽所のうち塩釜油槽所は被害が軽微であったため、港湾が整備され製油所からの海上輸送が受けられるようになった3月21日から本格的に出荷を開始した。この塩釜油槽所を石油供給各社が共同利用することにより被災地への石油の供給を促進した。そして8割以上の油槽所が4月1日までに出荷が可能な状態となった。

給油所も地震等の影響で震災直後は多くが営業を停止した。しかし、4月7日時点で9割は営業を再開しており、復旧は1ヶ月程度で完了した。また、津波により給油所がすべて流されてしまった陸前高田市などの地域では、地上タンク式の簡易給油所を設置する試みがなされ、供給拠点がなくなってしまった地域においても迅速な供給再開

が図られた。

東日本大震災では、東北地方のタンクローリー約150台が津波に流された。もともと東北地方で稼働しているのは700台であったため、被災地ではタンクローリーが不足し、給油所にガソリンが配送できなくなった。そのため、被災地周辺の近隣地域のタンクローリーが一時的に被災地の配送に回った。さらに、地震から約1週間後に西日本からのタンクローリーの投入が開始され、4月13日までに300台の被災地への投入が完了し、タンクローリーによる配送体制は1ヶ月で整った。

4.2 都市ガスと電気の供給ラインの被害と復旧

(1) 被害と復旧の実態

電気の供給ラインは、両震災において送配電線などの供給ネットワークだけでなく発電所や変電所などの拠点も地震や津波による被害を受けた。

図6に阪神・淡路大震災の供給停止戸数の推移を、図7と表6に東日本大震災の供給停止戸数の推移を示す。なお、図7の供給停止戸数は、地震発生時の供給停止戸数を100とした指数で表している。

多くの発電所や変電所が地震を感知し被害の大小に関わらず自動停止したため、地震発生直後、阪神・淡路大震災で260万世帯、東日本大震災で470万戸が停電した。そして図6と図7の地震発生から数日間のグラフの傾きが急に見えるのは、自動停止したもののうち被害が軽微な発電所や変電所から順に自動停止が解除されていったからである。

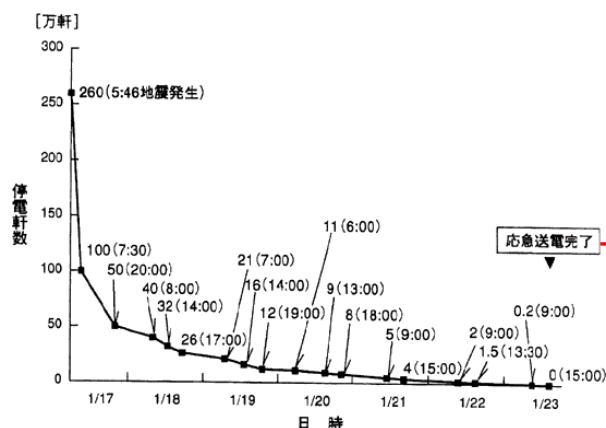


図6 阪神・淡路大震災における電気の供給停止戸数の推移

(出所：関西電力ホームページの「停電件数の時間推移」を引用)

表6 東日本大震災における電気と都市ガスの供給停止戸数

	電気 (戸)	割合 (%)	都市ガス (戸)	割合 (%)
3月11日	4,747,604	100.000	401,388	100.0
4月11日	43,954	0.926	92,228	23.0
4月15日	39,139	0.824	19,939	5.0
4月20日	32,058	0.675	4,188	1.0
4月25日	12,485	0.263	2,875	0.7
4月28日	10,508	0.221	1,959	0.5
5月4日	—	—	0	0.0
5月6日	6,141	0.129		
5月13日	3,465	0.073		
5月20日	1,452	0.031		
5月27日	323	0.007		
6月3日	121	0.003		
6月18日	0	0.000		

石油供給復旧完了

(注)「石油供給復旧完了」は、石油連盟の「今日の石油産業 2012」(2012) p.73 より、4月18日とされている。

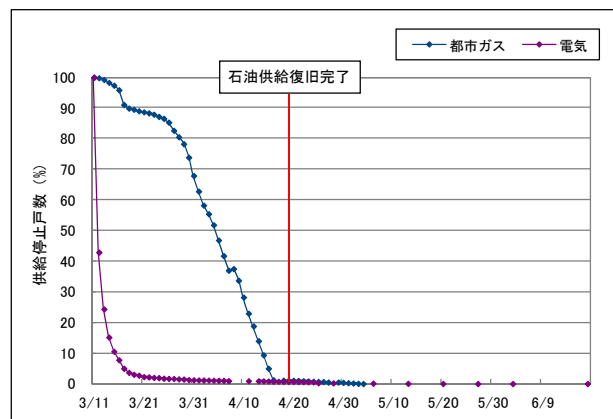


図7 東日本大震災における電気と都市ガスの供給停止戸数の推移

(注)「石油供給復旧完了」は、石油連盟の「今日の石油産業 2012」(2012) p.73 より、4月18日とされている。

(出所：「電気供給停止戸数」は東北電力株式会社ホームページの東北沖地震に関する、停電状況、「都市ガス供給停止戸数」は日本ガス協会ホームページの東北地方太平洋沖地震による都市ガスの停止状況より作成)

(出所：「電気供給停止戸数」は東北電力株式会社ホームページの東北沖地震に関する、停電状況、「都市ガス供給停止戸数」は日本ガス協会ホームページの東北地方太平洋沖地震による都市ガスの停止状況より作成)

表7 両震災での都市ガスの被害状況と対応

	阪神・淡路大震災	東日本大震災
対象戸数	600万戸	1,400万戸
供給停止戸数	85.7万戸	40.2万戸
被害戸数率	14.3%	2.9%
復旧日数	94日	54日
最大復旧人数	9,700人	4,600人
復旧延べ人数	72万人・日	10万人・日
PE管化率	6.5% (1994年末)	35.6% (2009年末)

(出所：日本ガス協会の平成23年東北地方太平洋沖地震による一般ガス事業者の被害状況 (2011) p18, 25 より作成)

このように、震災による被害が軽微であっても発電所や変電所には自動停止する特性があるために、多数の家庭への電気の供給が一時的とはいえ停止することが両震災を通して共通に示されている。

都市ガスにおいて、ガス製造所やガスホルダー等の拠点は、阪神・淡路大震災では被害がなかった。また、東日本大震災では津波により停止したガス製造所などもあったが、新潟県からの天然ガスパイプラインによる供給でそれを補うことができた。

しかし、家庭へ都市ガスを配送する役目をもつガス管には両災害において被害がみられた。表7に両災害での被害概要を示すが、供給停止の多くはガス管の寸断が原因となっている。

都市ガスは、阪神・淡路大震災では 85.7 万戸、東日本大震災では 40.2 万戸への供給が停止した。東日本大震災のほうが阪神・淡路大震災よりも対象戸数が多いことから、被害範囲が大きいことが分かる。東日本大震災において、被害範囲が大きいにもかかわらず供給停止戸数が少なかったのは、ポリエチレン管の普及（PE 管化率）が進んでいたからである。

(2) 被害と復旧の特徴

電気は発電所や変電所から家庭まで電線で供給され、都市ガスはガス製造所やガスホルダーから家庭までガス管を通して供給される。電気と都市ガスの供給ラインには、拠点と拠点の間が配線や配管でつながっているという共通点がある。しかし、その供給ラインの被害や復旧についてはそれぞれ特徴がある。

図 6 と図 7 のグラフの形に注目する。電気の供給停止戸数の推移を示すグラフは、阪神・淡路大震災（図 6）と東日本大震災（図 7）はいずれも同じような漸近線形になっている。一方、都市ガスのグラフ（図 7）はこれとは異なる山形になっている。このことから都市ガスより電気のほうが初期の復旧速度が大きいことがわかる。

このように両者の初期の復旧速度に大きな差があるのは、電気は発電所や変電所の自動停止を解除していくことで復旧が急速に進むというだけではなく、電気と都市ガスとではネットワークの復旧作業に違いがあることが関係している。すなわち、都市ガスの復旧には地面を掘り起こしガス管を取り替える作業を行わなければならないが、これは電気の復旧作業における電柱を建て直して電線を張る作業に比べてより多くの時間を要する。そのため電気の初期復旧は速く進み、図 7 から地震発生から 10 日後には 90%後半まで供給が回復し

ていることが分かる。

しかし、電気は初期の復旧速度は速いが、地震発生から日が経つにつれその速度は次第に遅くなっている。特に東日本大震災においては、地震発生から 1 ヶ月経過した時点で電気の供給停止戸数は残り 1 %を切っていたにもかかわらずその全復旧に 3 ヶ月以上の日数を要している。

これは、東日本大震災では被害範囲が広域に及んだため、比例して復旧範囲も広域となったことによるところが大きい。電気は単位長さ当たりの復旧作業は都市ガスに比べて手間が少ないのは確かであるが、被害が広域に及んで郡部にまで被害がある場合、郡部の復旧を進めるためには長い距離の電線を復旧する必要があるため、復旧に時間を要する。

表 8 に東日本大震災における都市ガス事業者別の被害と対応を示す。都市ガスの全供給停止戸数の 40.2 万戸の約 8 割にあたる 31.1 万戸が仙台市ガス局の被害である。東日本大震災では地震や津波が広範囲の地域を襲ったにもかかわらず、都市ガスの供給停止が発生した地域はほぼ仙台市に限られていた。このように都市ガスの供給停止戸数がある地域に集中するのは、都市ガスの供給地域が一般に都市部に限られているという特徴を反映するものである。

また都市ガス事業者の中で比較すると、復旧作業開始日が最も遅くかつ復旧速度が最も小さかったのは石巻ガスである。一方、復旧作業開始日が最も早くかつ復旧の進行が最も速かったのは仙台市ガス局である。これは、一般に復旧対象の戸数が多く集中しているところから復旧が行われる傾向があることが主な誘因となっている。

復旧作業ではより多数の人をより早く助けることが重要である。都市ガスの復旧はこうした考えに沿って進められた。実際にそれでもより多くの

表 8 東日本大震災における都市ガス事業者別の被害状況と対応

都市ガス事業者	仙台市ガス局	塩釜ガス	釜石ガス	常盤共同ガス	石巻ガス
供給停止戸数(戸)	311,144	9,665	6,342	14,572	6,738
復旧作業開始日	3月23日	3月25日	3月28日	3月29日	4月10日
復旧完了日	4月16日	4月12日	4月11日	4月15日	5月3日
復旧作業所要日数	25日	19日	15日	36日	24日
復旧速度(戸/日)	12,446	509	423	405	281

(出所：日本ガス協会の平成 23 年東北地方太平洋沖地震による一般ガス事業者の被害状況 (2011) p23, 25, 33 より作成)

世帯のより早い復旧を行うため、復旧対象が集中する戸数規模が大きい都市部のほうから集中的に作業を行い復旧する措置がとられた。

都市ガスの普及はもともと都市部に集中している。そのため、都市ガスよりも広範囲に普及している電気の復旧ではさらにその傾向が強くなる。被害範囲が大きい場合、電気の復旧作業を効率的に行い多数の人をできる限り早く助けるためには、都市部のほうから順に復旧作業を進めることになり、結果的に郡部の復旧は遅れることになる。

阪神・淡路大震災のように被害範囲が小さい場合には電気は早期復旧が可能であった。しかし、東日本大震災のように広範囲に被害が及んだ場合には郡部ほど電気の復旧は遅くなり長期的に供給が停止した。電気の復旧は、阪神・淡路大震災では6日後には完了したが、東日本大震災では約3ヶ月後であった。

4.3 災害時における石油供給ラインの特性

表6をみると、電気は初期の復旧が早く進行するため1ヶ月経つと供給停止戸数が残り1%を切る。しかし、普及率が高い電気の供給停止戸数の1%というのは絶対数でいうと無視できない大きさになる。4月11日時点で4万強の世帯に電気が供給されていない。初期の復旧に時間を要するため、都市ガスについてもこの時点で2割強にあたる9万世帯で供給が回復していない。地震から1ヶ月を経過した時点ではガスの供給停止戸数が電気を上回っている。

しかし、地震から2ヶ月を経過した時点では都市ガスが全世帯への供給を回復していたのに対し、電気はまだ3千世帯で供給が停止しており、さらには3ヶ月以上供給が停止していた地域もある。災害時における生活の安全保障を考えるとときにはこうした諸点も重視しなければならない。

調理、照明、暖房、情報収集などに使用できるという広い汎用性から、電気は日常においてなくてはならないものである。しかし、特に郡部において、災害時に長期にわたって電気の供給が停止する可能性がある。

一方、石油は阪神・淡路大震災では被害が軽微であり供給に支障は出なかった。東日本大震災では津波により被害を受けた製油所や油槽所は1ヶ月内で供給機能を回復した。給油所も1ヶ月後には9割が営業を再開している。製油所や油槽所、そして給油所などの拠点は、震災があっても被害を受けにくく、被害があっても早期に復旧し供給体制を整えられるという特性がある。

さらに東日本大震災では、給油所が津波に流されてしまった地域に対して地上タンク式の給油所が設置された。初めての試みであったにもかかわらず震災から約1ヶ月後の4月22日という比較的早期に営業が開始された。これにより石油供給には高い柔軟性があることが示された。

そして、石油供給の最大の特性はこれらの拠点さえあればその拠点間をつなぐタンクローリー等を柔軟に活用することでどの地域にも普遍的に供給することができる場所にある。これらの特性に支えられ、石油は他のエネルギーよりも普遍的かつ早期にそれぞれの地域で供給を再開することができる。

実際に、表6に示すように、東日本大震災において石油供給の復旧は電気や都市ガスのいずれよりも早く完了した。石油は災害時の社会インフラとしての役割を十分に果たしうる強靱にして柔軟な供給ラインを有している。

このように3つのエネルギー供給ラインはその特性がそれぞれ異なっている。大規模な震災があった場合、電気の供給は広範囲の地域で多数の世帯への供給が一時的とはいえ寸断されるのみならず、郡部では復旧が遅くなり長期的に供給が断たれる地域が出る。また、都市ガスは供給地域が限られているため人員を効率的に使えば早期復旧が期待できるが、それでも郡部ではやはり復旧が遅れる可能性がある。

一方、石油の供給は拠点の強靱さとネットワークの柔軟性によりどの地域でも早期に復旧し供給再開することが可能である。そのように考えたとき、長期にわたって電気や都市ガスの供給が寸断される可能性のある地域において、石油の供給イ

ンフラは生活の安全保障上の観点から重要な位置を占める。

災害時に最低限必要なものは、水、食事、暖房、情報である。水を得るためには井戸が必要であり、井戸から水を汲むためにはエネルギーが必要である。また、食事、暖房に関しては加熱のためにエネルギーが必要であり、そして情報を得るためにはエネルギー、とりわけ電気が必要となる。

しかし、災害時には電気の供給が長期にわたって停止する可能性がある地域がある。そうした地域では予備電源が必要であり、したがって予備電源を動かすための燃料が必要になってくる。早期復旧が可能な石油は、電気を確保するための予備電源の燃料にもなり、また水、食事、暖房などの確保を可能にするエネルギーとしても活用できる。

5. まとめ

給油所は、平常時には自動車の燃料の供給拠点として、災害時には必要最低限の生活を保障するエネルギー供給拠点として、国民生活の根幹を支えている。

しかし、石油流通のさらなる効率化が進行すれば、給油所数がさらに減少し各地域への供給はしだいに脆弱化していくことになる。それによって石油供給ラインの柔軟性が失われれば、災害時において石油供給の再開が遅れるのみならず供給が行き届かなくなる地域が生じる可能性がある。

給油所数は1995年から減少しており、今後ますます減少していく傾向にある。その減少により平常時や災害時において生活に支障が出てくるのは、地方、とりわけ郡部である。社会インフラとして機能する給油所が各地域にある一定数以上確保されない状況になることは、平常時だけでなく災害時においても、国民の生活安全保障上の観点から問題がある。

給油所は小売業であるが、給油所が販売しているのは生活の根幹を支えている石油というエネルギーである。小売業としての給油所が流通の合理化の中でさらに減少していくことが予想される。

しかし、給油所が平常時や災害時において石油を供給する社会インフラとして機能することを認識すれば、単に経済的合理性の観点から給油所が減少していくことに対して危機感を持ち、生活の安全保障という観点も踏まえて今後の在り方を再検討していかななくてはならない。

補遺

今後普及していく動きにある電気自動車は、給油所の在り方にも影響を与えると予測されている。ゆえに、電気自動車の普及の動きにも今後注目していく必要があり、この論文においては生活の安全保障の観点から以下のように考える。

電気自動車が普及していくことで、今後は自家用車の燃料が石油から電気に次第に移行していくことになる。現行の給油所数の減少に加え、電気自動車の普及に伴うガソリン需要のさらなる低下が予想される。平常時における給油所の必要性の低下から、その数はさらに減少していくと考えられる。

自家用車の燃料を電気へと移行していくことは脆弱な供給ラインである電気に交通手段をも依存することを意味する。長期的な電気の供給停止が起こった場合、災害時に必要な物資や情報だけでなく被災地での足までもが奪われる事態を招き、災害時にさらなる困難を被災者に与えることになりかねない。

もちろん、電気自動車にはガソリン自動車にはない利点がある。大型蓄電装置でもある電気自動車を災害時の予備電源として活用することも可能である。それは確かに短期的な電気供給の停止の場合には有効であるが、長期的に供給が途絶えた場合には石油を活用した発電などによるバックアップが不可欠である。電気自動車には一時的な電気供給体としての役割しか期待できず、災害時の国民生活を保障するものとしては不十分である。

このように電気自動車の普及は、交通手段までも脆弱な供給ラインである電気により依存せざるをえない状況を導く可能性があるだけでなく、ガ

ソリン需要を低下させ給油所数の減少を加速して社会のエネルギー供給体制の脆弱化を招くことにつながりかねないことに注意しておかなくてはならない。

参考文献

- 1) 総務省；家計調査（2010）
- 2) 経済産業省；商業統計（1972 - 2007）
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁；揮発油販売業者数及び給油所数の推移（登録ベース）（2011）
- 4) 財団法人日本エネルギー経済研究所石油情報センター；セルフ SS 出店状況（2011）
- 5) 経済産業省；エネルギー生産・需給統計年報（1989 - 2001）
- 6) 経済産業省；資源・エネルギー統計調査年報（2002 - 2010）
- 7) 財団法人日本エネルギー経済研究所石油情報センター；平成 21 年度給油所数経営・構造改善実態調査報告書（2010）
- 8) 兵庫県石油商業組合；阪神・淡路大震災 給油所の使命と安全性（1995）p.6
- 9) 石油連盟；4 月 1 日、7 日、18 日の定例記者会見・配布資料（2011）
http://www.paj.gr.jp/from_chairman/data/2011/index.html#id514
- 10) 石油連盟；今日の石油産業 2012（2012）p.73
- 11) 日本ガス協会「平成 23 年東北地方太平洋沖地震による一般ガス事業者の被害状況」（2011）
- 12) 関西電力；阪神・淡路大震災～応急送電までの 7DAYS～：図 3-1 停電件数の時間推移
<http://www1.kepco.co.jp/kyousei/more/days/>
- 13) 東北電力株式会社；東北地方沖地震に関する、停電情報
<http://www.tohoku-epco.co.jp/emergency/9/index.html>
- 14) 日本ガス協会；東北地方太平洋沖地震による都市ガスの停止状況（3 月 11 日～5 月 18 日）
<http://www.gas.or.jp/tohoku/press/index.htm>

太陽熱利用システムにおける熱媒技術の役割

The role of heat transfer fluid technology in solar thermal utilization system

椿 善太郎¹

Yoshitaro TSUBAKI

要 旨：世界的な水不足、化石燃料の枯渇、地球温暖化といった課題を背景に再生可能エネルギーへの期待が高まっている。現在、様々な再生可能エネルギーが存在するなかで太陽熱利用は世界的に注目されつつあるが、日本は1981年の実証実験を境に大きな開発はされず国際的に後塵を拝している。近年、諸外国の太陽熱利用の増大に伴い、日本では新しい集光方法を開発するなど再び活発化しつつある。1932年以来様々な社会ニーズに対応し変革を遂げてきた熱媒体は太陽熱利用システムの高度化ニーズに対応すべく新たな開発が求められており、その動向と熱媒体の役割について報告する。

Abstract : The worldwide water shortages, exhaustion of fossil fuels and global warming have led to the increase of the interest of renewable energy. Among them, solar thermal utilization is said to be worldwide promising, but Japan is slower to develop it, comparing to other countries, since the demonstration experimental in 1981.

But now, Japan have been active to develop technology for the new system .Heat transfer fluid developed in 1932 and changed in various ways accommodating industrial needs, is required to be further developed in needs of solar thermal utilization system. I report trends of solar thermal utilization system and social role of heat transfer fluid.

キーワード：熱媒体、熔融塩、太陽熱発電、再生可能エネルギー

Keywords : heat transfer fluid, molten salt, concentrating solar power, renewable energy

¹椿 善太郎 綜研テクニクス株式会社 技術統括部 技術開発部 太陽熱システム開発PJ

〒171-8531 東京都豊島区高田 3-29-5 tsubaki@soken-tecnix.co.jp

2011.11.30 受付, 2012.5.15 受理

社会技術革新学会第5回学術総会(2011.9.28)にて発表

1. はじめに

現在、太陽熱利用システムは主に太陽熱発電として日射量が豊富なサンベルト地帯を中心に計画・建設が盛んに進められているが、日本での認知度は低い。再生可能エネルギー利用のなかでの太陽熱利用の必要性、太陽熱発電の市場や集光方法、日本での実証実験等を紹介しながら、太陽熱利用システムにおける熱媒体の役割について報告する。

2. 再生可能エネルギー利用の背景

水不足、化石燃料の枯渇、地球温暖化といった人類の世界的な課題が存在する。地球上で安全な飲料水を継続して利用できない人口は現在約 10 億人存在していると言われている。淡水の水源そのものが不足しているため、灌漑や治水だけでは限界があり、海水淡水化が有力な解決方法とされている。その海水淡水化は主に海水に熱を加え蒸発させる蒸発法と逆浸透膜を利用する膜分離法があるが、仮に後者を利用し 10 億人分を賄うとすれば年間 2 兆 kWh の電力が必要となる。

化石燃料はかつて生存していた植物や微生物が何億年もかけ現在の石油や石炭、天然ガスとなったものである。可採年数は石油が 40 年、石炭が 120 年、天然ガスが 60 年程度である。石油と天然ガスの可採年数はここ数十年安定的に推移しているが、その有限性から枯渇のリスクが消えることはない。

1950 年以降、大気中の二酸化炭素の濃度は 31%、メタン濃度は 150% 増加しており、過去 50 年間に観測された地球温暖化の大部分は人間活動に由来している。年々増え続けている二酸化炭素の排出量を仮に 2008 年の排出量である 29 ギガトンに抑え続けたとしても被害予測の容認限界温度上昇の 2℃まであと 25 年程度と言われている。上記 10 億人分の海水淡水化電力の 2 兆 kWh をすべて化石燃料で賄うとすれば 1 ギガトンもの二酸化炭素が排出されることになる。

水不足、化石燃料の枯渇、地球温暖化は連鎖関係にあり、水不足を解消するためのエネルギー源に化石燃料を利用するとそれは枯渇リスクが増し、同時に二酸化炭素が排出され地球温暖化が進む。温暖化による気候変動により水資源の偏在が大きくなり、さらに水不足が深刻になるという負のスパイラルに陥る。

その根底には世界人口の増加が背景にある。18 世紀に始まった産業革命を境に急激に人口が増加し、現在の人口は約 70 億人程度であるが、2050 年には約 90 億人、2100 年には約 100 億人になると予測されている。100 億人が生活できるエネルギーをいかに確保するかという大きな課題が浮上し、化石燃料価格の見通しやエネルギー安全保障などから再生可能エネルギーへの期待が高まっている。^{1) 2)}

3. 太陽熱利用の位置づけ

太陽熱利用は太陽光発電と同様に再生可能エネルギーの 1 つであるが、そのエネルギー変換の原理は異なる。太陽光発電は太陽の光エネルギーを直接電気に変換するのに対し、太陽熱利用では太陽の光エネルギーを一度熱に変換する。太陽熱利用にはその熱を利用し、発電、海水淡水化や石炭液化など様々な用途がある。

メガワット規模の発電量の太陽光発電、風力発電、水力発電といった再生可能エネルギーの発電コスト及び発電量の安定性を比較すると、発電コストは出典により様々であるが、太陽熱発電は太陽光発電より発電コストが低く、風力発電、水力発電より高い。発電量の安定性については太陽光発電が日射量に応じて変動するのに対し、風力発電は風況に応じて変動、水力発電はおおむね安定であるが渇水時には不足するといった特色がある。太陽熱発電は太陽光発電と同様、発電量は日射量に応じて変動するが蓄熱設備を備えれば安定性を増すことができる。

日射量には大気を透過して直接入射する直達日射量と大気中の水蒸気やエアロゾルなどで散乱し

入射する散乱日射量に分けられる。太陽熱利用はサンベルト地帯とよばれる直達日射量の多い地域（図1 赤枠）が適している。図1の青色から赤色になるほど直達日射量が多いことを示しており、一般に 1800kWh/m²/y 以上（黄色以上）が太陽熱発電に最適とされている。この地域は砂漠地帯や水不足地帯とほぼ重なっているため太陽熱を利用

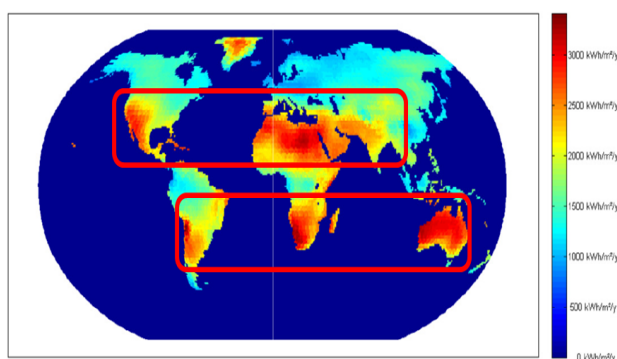


図1 サンベルト地帯

出典：GLOBAL ENERGY SUPPLY POTENTIAL OF CONCENTRATING SOLAR POWER
http://www.trec-uk.org.uk/reports/Breyer_paper_SolarPACES_GlobalEnergySupplyPotentialCSP_final_090630_proc.pdf

した海水淡水化の重要性が拡大すると予想される。

2050 年には世界の太陽熱発電は太陽光発電と同程度の発電量になると予測されている。特に地中海地域では砂漠地帯からエネルギーを生み出す

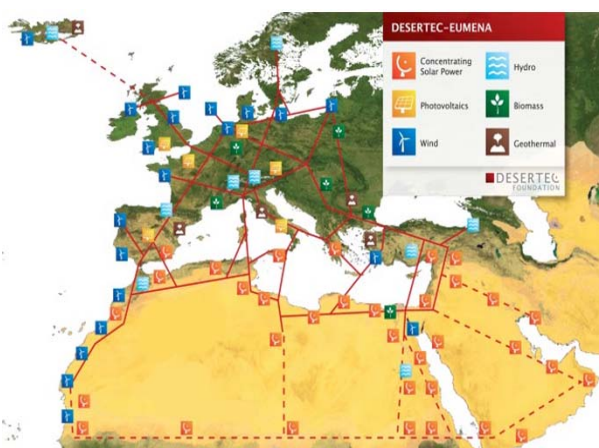


図2 デザートテック構想

出典：<http://www.desertec.org/jp/global-mission/focus-region-greater-east-asia-jp/>

という意味のデザートテック構想（図2）が現実味を帯び、2050 年にはこの地域の発電量の半分程度を占めるとも言われている。この計画には風力発電や太陽光発電も含まれるが、主に北アフリカや中東の砂漠地帯で太陽熱により発電しヨーロッパへ送電する壮大なものとなっている。

4. 太陽熱利用システムの種類

太陽熱利用は太陽光を鏡で反射し集光することの特徴とするが、図3に示す通り太陽光を管に集光する線集光（図3 上段）と点に集光する点集光（図3 下段）がある。また、太陽を追尾する鏡と集光部分が共に動くもの（図3 左）と不動（図3 右）のものがある。そしてこれらの組合せによって、トラフ型、フレネル型、ディッシュ型、タワー型の4つに分けられる。

現在、太陽熱発電の設置場所はスペインとアメリカが大部分を占めているが、技術的に先行しているトラフ型が8～9割の市場を占有している。スペインでは電力の固定価格の買い取り融資を受けやすくするため技術的に成熟しているトラフ型が多く採用されているが、アメリカでは発電コストを下げる目的で大規模化や技術的には未成熟だが発電効率の高い他の方式の採用が始まっており、今後トラフ型が年々市場占有率を下げると予測されている。

トラフ型は曲面鏡により太陽光が受光管に集光され、熱に変換された約400℃の熱媒体（合成油）がスチームと熱交換しタービンを回し発電する。蓄熱設備を有していれば昼間発電と平行して溶融塩に蓄熱し、夜間にその熱を利用し発電を行う。設備の設置には広大な敷地が必要とされる。

フレネル型は鏡の上部に置かれた受光管に集光され、熱に変換された250℃程度のスチームを発生させタービンを回し発電する。鏡や受光管の部材は安価で光学的な性能は低いが建設費・運転費・メンテナンス費は低く抑えられる。

ディッシュ型はパラボラアンテナのような鏡により1点に集光され、スターリングエンジンで発

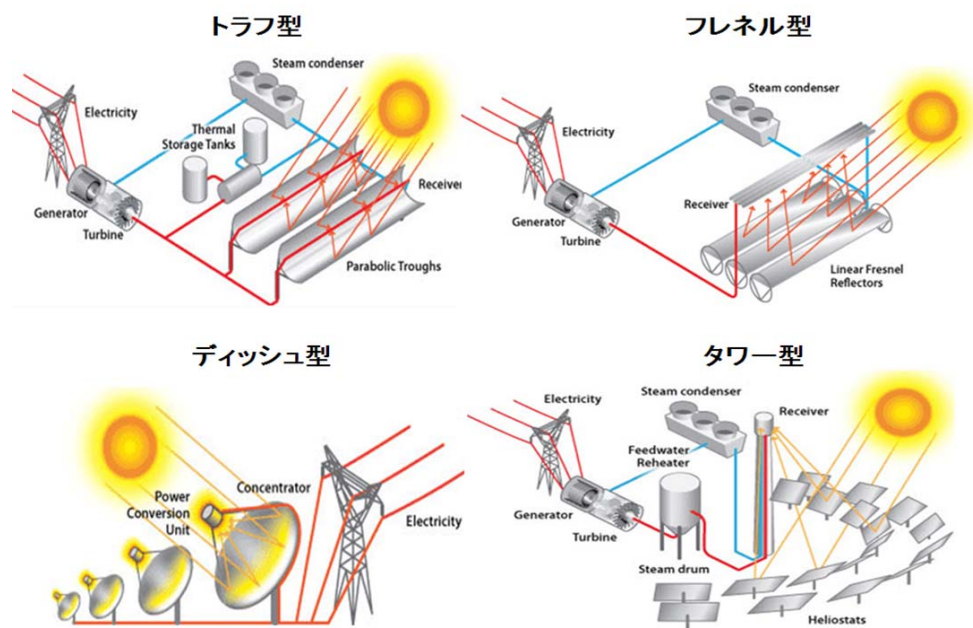


図3 太陽熱利用システムの種類

出典： http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/csp.html

電するため熱媒体は使用されていない。小規模であり分散型の電力供給に適している。

タワー型はギリシャ神話のヘリオスになぞらえ付けられたヘリオスタットと呼ばれている鏡によりタワーのトップに集光し、熱に変換された約550℃の熱媒体（熔融塩）がスチームと熱交換し、タービンを回し発電する。蓄熱設備を有していれば昼間はトラフ型と同様に熔融塩タンクに蓄熱し夜間はその熱を利用し発電する。

たが、1985年に中止となってしまった。その要因として日射量が少ないためと言われているが、実態は効率の低い設備にあったと考える。仁尾町のタワー型ではヘリオスタットが非常に密に配置されているため、互いに干渉し合い十分な集光が難しい。海外では一般的にタワーの高さと鏡の敷地面積の比が1対6～7であるのに対し、この設備は1対1となっていることから干渉し易いことがわかる。

5. 日本の太陽熱利用技術開発

世界の太陽熱発電プラントの建設費による市場規模は2015年には2兆円、2020年には4兆円、2050年には10兆円と予測されている。しかし、日本企業は2009年まではほとんど太陽熱発電市場に参入しておらず、世界から大きく遅れをとっている。その背景には香川県仁尾町での太陽熱発電の実証実験（写真1）の中断が1つの転換点になった。

1973年のオイルショックを契機とするサンシャイン計画の一環として石炭液化や太陽光発電と共に太陽熱発電の開発が進められた。この実証設備は1981年に世界に先駆け1MWの発電に成功し



写真1 仁尾町太陽熱実証実験設備

出典： <http://www.suga-ac.co.jp>

また、海外から高級材料を集め 100 億円程度かかった設備費に対し効果が伴わなかったとも言われているが、直達日射量が少ないことから日本での太陽熱発電は不向きと結論付けられ、その後の太陽熱利用の開発の方向性に大きな影響を与えた。

そこから 30 年程経過した近年、日本はようやく太陽熱利用の開発が活発化し始めてきた。その 1 つに日本が世界に先駆けて開発したタワー型の課題を解決したビームダウン方式（図 4）が挙げられる。

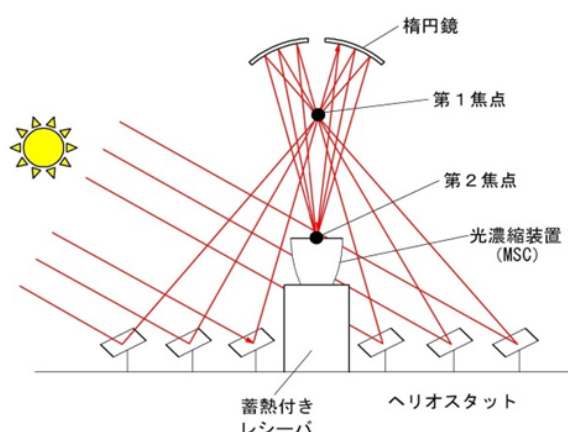


図 4 ビームダウン方式

出典：三鷹光器株式会社

タワー型は 4 つの集光タイプのなかでは効率は高いが、集光部は設備規模にもよるが 100m を超える高いタワーのトップに位置する。そのためタワートップでは風の影響により熱が奪われやすく効率が落ちやすいこと、タワートップまで熱媒体を循環させるため大きな動力が必要なこと、タワートップでのメンテナンスが困難なことによりコストアップになることが課題となっていた。ビームダウン方式ではヘリオスタットで集めた光をさらに上部の鏡で反射させ地上に集光させるため、タワー型の上記 3 つの課題を一挙に解決できる。

このようなビームダウン方式は上部の鏡の形状が異なるなど数種考案され、2009 年に国内では東京都三鷹市で 57kW、海外ではアブダビで 100kW の実証試験が行われ、2012 年には長野県で 250kW の熔融塩を用いた実証試験が計画されている。いずれも海外の太陽熱発電市場への参入を視野に入

れたものだが、特にこの 2012 年長野県での実証試験においては、集光された光エネルギーを熱として熱媒体（熔融塩）に蓄えその熱で発生させた蒸気量を測定する計画であり、効率面で世界的な優位性が実証されると期待されている。この結果によっては仁尾町の実証実験以来、日本国内での太陽熱利用が難しいとされている常識を覆す大きな一歩を踏み出す可能性がある。

6. 太陽熱利用システムにおける熱媒体

熱媒体の選定で重要な要素は使用温度である。使用温度に応じ主に耐熱性、凝固点（融点、流動点）、沸点から総合的に経済性の高い熱媒体が選定される。耐熱性の高い熱媒体は補充量が少なく使用期間も長いため単年当たりの費用を下げられる。凝固点は低い方、沸点は高い方が設備費を抑えられる。

熱媒体は化学業界を中心に利用されてきた。低圧又は常圧でスチーム加熱以上の高温加熱のニーズの高まりで沸点が 257℃と高い世界初の熱媒体が 1932 年に開発された。しかしその熱媒体は凝固点が 12℃であり冬場固化しないニーズに応えるため凝固点がマイナス 10℃と低い日本初の熱媒体が 1952 年に開発された。その後、気相加熱から液相加熱へのシフト、素材型化学品から加工型化学品・ファインケミカル品への移行に伴いその社会的ニーズに応えるべく耐熱性、凝固点、沸点のバランスが様々な熱媒体が開発されてきた。

現在の主流は高沸点、高耐熱性を有するジベンジルトルエンを主成分とするものである。使用上限温度が 350℃程度で沸点も 390℃程度と高温でありながら、流動点はマイナス 30℃程度と低く、幅広い使用温度範囲をもち、常圧で長期間使用できる。また、劣化した際は再生によりランニングコストが低く抑えられる点も主流である理由の 1 つである。

日本ではそのような熱媒体に対しても化学物質の人や動植物への環境影響を低く抑えるニーズが存在し、それに応える熱媒体の開発が期待されている。

一方、世界的には太陽熱発電の発電コストを下げる目的で耐熱性、凝固点、沸点に加え蓄熱性能をキーワードとした熱媒体のニーズが浮上している。

日本の熱媒メーカーは主に国内のニーズに応えることでその変遷を遂げてきた。現在、太陽熱利用という新たな分野で世界規模のニーズに対し技術革新により応える新たな段階にきている。

トラフ型の使用温度は 400℃である。スチームを熱媒体として使用すれば蒸気タービンに直接利用できるため合成油、熱交換器が不要となる。しかし長年にわたり研究されてきたがその沸点の低さを要因とする設備上の問題で商業化には至っていない。現在では沸点 257℃、凝固点 12℃、耐熱温度 400℃の合成油が主流となっている。タワー型ではスチームは使用されているが、使用温度が低いことと蓄熱性のニーズから耐熱温度が 600℃、融点が 220℃、沸点を持たない（沸騰の前に分解）溶融塩にシフトしつつある。

しかし、それでもなおトラフ型、タワー型共にニーズに十分に答えられてはいない。太陽熱発電は風力発電や水力発電、火力発電などと比べ発電コストが高くそのコストを下げるためのしぎを削っている。蒸気タービンによる発電は上限はあるが蒸気温度が高いほど有利とされている。設備上はトラフ型は 500℃、タワー型は 1000℃まで可能と言われている。現状は熱媒体の耐熱温度がネックとなり低く抑えられ、効率を上げることができていない。発電コストを下げることに繋げるためにはさらなる高耐熱性を有する熱媒体が必要である。同時に使用温度領域を広がることにより熱媒体の使用量を減らし設備の小型化に繋げることも可能となる。

また、トラフ型では耐熱性に蓄熱性能を加えた熱媒体として溶融塩が注目されている。溶融塩は伝熱と蓄熱の両方の機能を兼ね備えられることが大きな特色である。太陽熱利用が他の再生可能エネルギーと大きく異なるのは蓄熱が可能である点である。太陽光発電などは蓄電が可能であるがそのコストには大きな開きがあり、蓄熱の方が非常に有

利とされている。溶融塩を使用することにより熱交換器と熱媒体（溶融塩）の使用量が低く抑えられる。溶融塩の融点の高さから商業化には至っていないが、溶融塩の融点を下げる研究が盛んに進められている。

太陽熱発電は広い敷地を必要とし熱媒体の使用数量も多く、一般に合成油で数千トン、蓄熱用の溶融塩で数万トンが使用されている。市場が急激に拡大しているなか、将来すべての太陽熱発電所で同成分の熱媒体が使用されると、世界的に熱媒体の供給が追い付かずいずれ太陽熱発電の市場自体が縮小してしまうことも考えられる。熱媒体の性能だけを追うのではなく、世界的な成分の供給能力とのバランスを考慮にいたした開発が必要と考える。

太陽熱利用で既に稼働・計画されている設備は発電用途がほとんどであるが、集めた熱を電気へ変換せずそのまま利用する海水淡水化用途も計画されている。海水淡水化は先述したが水不足地帯とサンベルト地帯がほぼ重なり、水不足問題が負のスパイラルの要素の 1 つになっていることから太陽熱利用による海水淡水化に期待がよせられている。海水淡水化は逆浸透膜法と蒸発法に大きく分けられるが、ここでは熱を利用する蒸発法について述べる。蒸発法は海水を加熱し蒸発させその蒸気だけを集め冷却し真水にする。その加熱源に太陽熱を利用する。蒸気を大量に効率よく発生させるためには高温の熱源が必要となり、発電用途と同様に耐熱性の高い熱媒体が求められることが予想される。

熱媒体のニーズに応えることと市場発展のための長期的視点を考慮にいたした技術革新が求められており、それを実現することで冒頭で申し上げた世界的課題の解決に少しでも近づけると考える。

³⁾

7. おわりに

18 世紀の産業革命に伴う石炭の恩恵を受けた経済は、20 世紀には石油へとシフトし、21 世紀には太陽エネルギーへシフトしようとしている。一

部にはシェールガスがその前に来るとも言われているが、いずれその有限性から直接的な太陽熱利用や太陽光発電だけでなく間接的な風力や水力、バイオマスなどを含む太陽エネルギー利用が必要不可欠となる。その1つである太陽熱利用は現在、技術的にまだ発展途上である。トラフ型が今後も主流であり続けるとは限らない。

タワー型の課題を解決したビームダウン方式を日本が世界に先駆けて開発・実証するなど注目を浴びてきている。30年前の実証実験では日本での太陽熱利用は難しいと言われたが、現在の最新技術での実証実験はなされていないのが現状である。電気の多くが熱として利用されている今日、太陽熱利用システムで集光した熱を熱のまま利用できれば、電気を熱として利用するよりも変換ロスの発生がなく無駄が省ける。発電だけではなく様々な温度域での熱利用、蓄熱を加えた地域分散型のスマートエネルギーネットワークの実現にもつながる。特に被災された東日本でこれを進めることにより復興の後押しをし、新たな価値の創造・発信基地として発展する契機ともなりうるかもしれない。

引用文献

- 1) 鳥井弘之“科学技術文明再生論”12 ページ
日本経済新聞社(2007)
- 2) 菊池隆、堀田善治“太陽熱エネルギー革命”
181～183 ページ
日本経済新聞出版社(2011)
- 3) GLOBAL ENERGY SUPPLY POTENTIAL OF
CONCENTRATING SOLAR POWER
[http://www.trec-uk.org.uk/reports/
Breyer_paper_SolarPACES_GlobalEnergySupplyPot
entialCSP_final_090630_proc.pdf](http://www.trec-uk.org.uk/reports/Breyer_paper_SolarPACES_GlobalEnergySupplyPotentialCSP_final_090630_proc.pdf)

参考文献

- 1) 別所信次、椿善太郎
“熱媒加熱システムの変遷と今後の方向性” 社会技術革新学会 (2009)
- 2) Global Concentrated Solar Power Markets and
Strategies:2010-2025(2010)

液体の微粒化技術と社会ニーズ

Liquid atomization technology and social needs

今井 健太¹

Kenta Imai

小金井 稔元²

Toshiyuki Koganei

要 旨 : 液体の特徴は、容器に合わせて自由に形を変えることができることと自ら表面張力で丸くなろうとすることである。この性質を利用して、液体を微粒化し空中に分散させることを微粒化技術と言い、その技術を使って様々な産業が発展してきた。微粒化に対する社会ニーズの変遷と微粒化技術の発展について考察する。

Abstract : The liquid characteristic is that it can change form in conformity to a container freely and is going to curl up by surface tension by itself. Liquid atomization technique means that liquids are scattered in the air by using this property. And various industries developed using the technique. In the text, I consider the change of the social needs for the liquid atomization and the development of the atomization technology.

キーワード : 微粒化、液体、粒子、噴霧

Keyword : Atomization, Liquid, Particle, Spray

¹ 今井 健太 大川原化工機株式会社 特機グループ
224-0053 横浜市都筑区池辺町 3847 k_imai181@oc-sd.co.jp

² 小金井 稔元 大川原化工機株式会社 生産部特機チーム
224-0053 横浜市都筑区池辺町 3847 t_koganei108@oc-sd.co.jp

2012.1.4 受付, 2012.5.15 受理

社会技術革新学会第5回学術総会(2011.9.28)にて発表

1. 緒言

昔、家庭でアイロンをかけるときに良く使った霧吹きは、よくできた外部混合式の二流体式噴霧器であった。エンジンの気化器の原理もこれと同じである。気化器がダイムラーによって発明されたのは 1880 年頃のことであるが、その後しばらくの間は気化器での燃料の微粒化について研究らしい研究もされぬまま、実用に耐えるエンジンが作られていた。このように液体の微粒化技術は、現場での経験と勘と工夫に基づいた試作とテストの繰り返しによって一応の対応ができるものとして開発されていた。しかし今日、一般の技術レベルが著しく向上し、環境問題、省エネルギー、省資源などに対する要求が厳しくなり、他の工学の分野と同様に、学問的な研究とその結果への依存の必要性が急に高まってきた。

液体の微粒化が関係する分野は、機械工学ばかりでなく、食品、化学工業、農業、医療など様々な分野に及び、その応用例は広い。表 1 のように、燃料噴射、噴霧塗装、噴霧乾燥、噴霧冷却、表面処理の他、殺虫剤、ヘアスプレーなど家庭用品にまで及んでいる。

本稿では、あまり紹介されることのなかった液体の微粒化技術について、その内容や社会ニーズの変遷の観点から考察する。

表 1 液体の微粒化技術を利用した代表的な例

内燃機関・燃焼炉	液体燃料の噴霧・燃焼、排ガス処理
化学工業	吸着塔、冷却塔、カーボンブラック製造
塗装	ペイント吹きつけ
医薬・食品製造	スプレードライ、コーティング、造粒
医療・調湿	加湿、調湿、ネブライザ
農業	液剤の散布、噴霧かん水
金属	融液原料の噴霧(固体粒子)
機械	噴霧潤滑、セミドライ加工
その他	消火、噴霧冷却、洗浄、インクジェット静電気除去

2. 液体についての技術

液体の微粒化を説明するにあたり、先ず液体の特徴について述べる。

地球上にある物質の多くは、その生成段階で液体の状態を通過している。岩石や金属でさえ一度

溶融し液体になり、その後固化して、ある形状を保っている。また、地球表面の 7 割を占める海も液体である海水でなりたっているし、雲や地上に降り注ぐ雨も水という液体である。人間も水と言う液体なしでは生きていけず、石油と言う液体の争奪で戦争に発展することもある。全ては液体から始まると言っても過言ではない。私たち人間は身近にあるこの液体の特徴を利用して様々な物を作り、文明や文化を発展させ現代に引き継いでいる。

まず、液体の特徴を考えた時、前述したように固体とは異なり自由に形を変えることができることがあげられる。そして、もう一つ重要な特徴として表面張力で自ら丸くなろうとする性質である。人類がこの現象に気づき、様々な用途を考え出したのは比較的最近になってからである。それまでの液体は単に流動性の良い性質だけが利用され、燃料や塗料、調味料や薬剤などの日常的に使われる液体の多くは単に容器に入れられて、そのままの状態で使用され流通していた。

3. 微粒化技術

3.1 微粒化の原理

液体の微粒化と言ってもその方法は様々であるが、基本的には Dombrowski らが提唱した液膜分裂理論に基づく。液膜状になった液体は空中に放出されると同時に、液膜に波が発生し、振幅が大きくなってやがて分裂する。その分裂過程は、まず液膜が紐状になり、紐にくびれができて離れ、分裂した粒子は空中で丸くなる(図 1)。したがって、如何に安定した液膜を作るかが微粒化の基本となる。

内燃機関の燃料の微粒化などでは、気道に設けられた細い孔から燃料を噴出させる。塗装や調味料、医薬品の微粒化では、様々な微粒化方法が採用されている。何れにしても、求められる液滴は粒径の揃った比較的細かい粒子である。しかし、液体は分裂過程を経て微粒化したとき、各粒子の粒子径は完全には均一にならず、ある粒子径を中心に小さい粒子と大きい粒子が存在する正規分布となる。

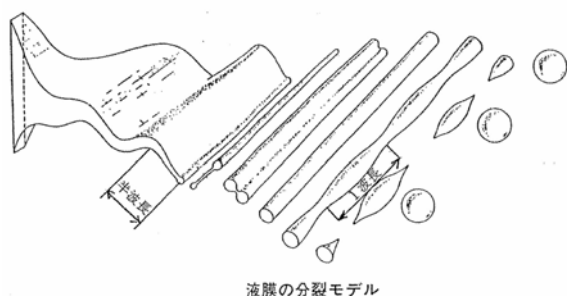


図1 液体の微粒化過程における変化

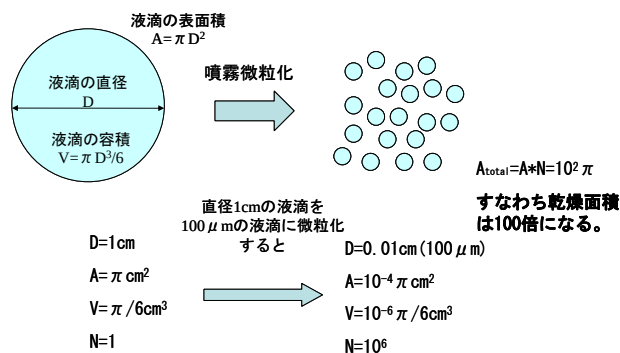


図3 微粒化と乾燥面積

3.2 微粒化の効果

液体の微粒化は従来、燃焼機器、塗装、粉末製造、医療、環境機器、農業など、多くの分野で利用されてきた。液体を微粒化することによって得られる主な利点としては、次のようになる。

- ・ 液滴数の増加により、広い範囲に均一に分散させることができる。
- ・ 表面積の増加により、反応あるいは熱移動や乾燥が促進される。
- ・ 表面張力で球状の形態をとる。

これらの利点のいくつかを利用するため、それぞれの分野において様々な微粒化の手法が用いられてきた。

図2のように一つの大きな粒子を微粒化することでより広範囲に均一に分散させることができる。また、図3のように、1cmの液滴を100μmに微粒化した場合、その乾燥面積は100倍となる。先に述べた液体燃料の燃焼機関などは微粒化し、液滴を小さくすることで燃焼や乾燥を促進させている。また、スプレー式の塗料などは、広範囲に均一に噴射させることで斑を極力少なくし、液滴の乾燥面積を多くすることで瞬時に乾燥させ液垂れも生じないようにしている。何れにしても微粒化することにより、広範囲に効率よく液滴を分散し、短時間で乾燥する性質を利用している。

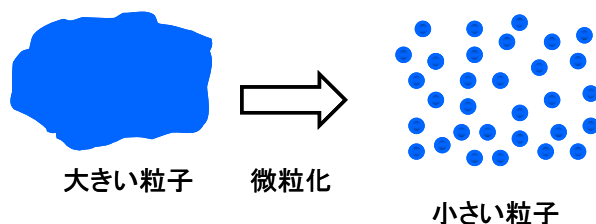


図2 微粒化の効果

3.3 微粒化方法

微粒化は様々な分野で利用されているが、その用途、目的により方法も異なる(表2)。以下にその一部を紹介する。

(1) ノズル噴霧方式

① 加圧ノズル

ノズル噴霧方式の一つとして圧力ノズル方式がある。液体原料はポンプやタンク内で加圧され、コアと呼ばれる旋回室に導入される。旋回力が与えられた液体原料は、オリフィスを通過し、膜状になり微粒化される(図4)。

圧力ノズル方式は、一品種の液体原料を大量に処理することに適している。粒子径制御は、ノズル部品であるコアとオリフィスの組合せを変える必要があり、連続運転の途中での変更は困難である。

② 二流体ノズル

二流体ノズルは液体原料に圧縮空気を接触させ、せん断することで微粒化を行う(図5)。

このノズルの特徴は、微粒化用の空気を調節することで液体原料の粒子径制御が可能である。しかし、高圧の空気が必要となるため、エネルギーコストが大きくなる欠点があり、少量の微粒化に適している。

③ 加圧二流体ノズル

加圧二流体ノズルは、前述の2種のノズルの特徴を生かしたノズルであり、中心部に加圧ノズルを備え、その周囲から低圧のアシストエアを流すことで微粒化を促進することができる(図6)。

アシストエアを使用することで、従来の加圧ノズルでは難しかった液体原料の粒子径制御が容易になった。

(2) ディスク噴霧方式

ノズル噴霧方式と異なりディスク噴霧方式は、

図 7 の様な高速で回転するディスクの中心部に液体原料を供給し、遠心力によりディスク外周部で液体の微粒化を行う。液体原料の粒子径制御は、ディスクの回転数を可変することでコントロールが可能となる。

特徴は、ノズル方式より液体原料の粒子径制御が容易であり、粒子径もノズル方式と比較し均一である。しかし、構造が複雑で、メンテナンスには専門的な知識と技術・経験が必要となる。

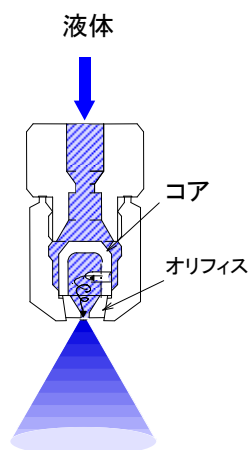


図 4 圧力ノズル

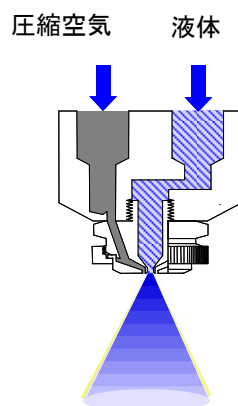


図 5 二流体ノズル

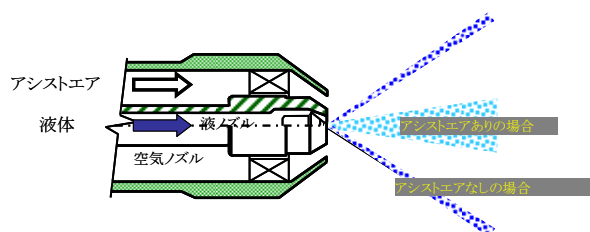


図 6 加圧二流体ノズル

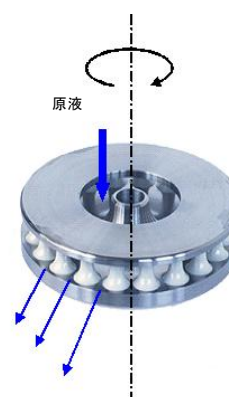


図 7 噴霧盤

表 2 微粒化装置の特徴

方式	回転円盤	加圧ノズル	二流体ノズル
粒子径の制御	運転中の制御可能	運転中の制御困難	運転中の制御可能
送液ポンプ	低圧ポンプ	中・高圧ポンプ	低圧ポンプ
処理液の物性	比較的高粘度に対応	高粘度に不向き	高粘度に向く
構造	ノズルに比較し複雑	単純	単純
処理量	少量多品種、中処理	一品種大処理量	少処理量
立ち上げ停止	可能	困難	可能

4. 社会ニーズの変遷

先にも述べたが、液体を微粒化して様々な用途に使用するようになったのは比較的最近である。それまでの液体は単に流動性の良い性質だけが利用され、燃料や塗料、調味料や薬剤などの日常的に使われる液体の多くは単に容器に入れられそのままの状態で使用されていた。しかし、技術革新と社会変革第1巻第1号でも報告したように、例えば粉乳や調味料等の食品では長期保存するために乾燥させて、粉末化するが、単純に乾燥するだけでは一度に処理する量も限られて、時間もかかり効率が悪い。そのため、短時間で大量に粉末化するために、乾燥の過程で微粒化を行うようになった。食品や医薬品などの分野では、微粒化した液滴を乾燥することで取扱いや後工程の効率化に寄与している。このように、液体の特徴である自由に形を変える性質と表面張力で丸くなる性質を利用して、今日の社会は大きく発展してきた。

イギリスで始まった産業革命の進展とともに発展した内燃機関(エンジン)は、初期のころは気化器を用いたガスエンジンが使用され、その後ガソリンエンジンが開発された。1890年頃になると自動車レースが盛んになり、より高出力・高性能のエンジンが求められた。最近ではガソリンエンジンも効率を上げるために、気化させた燃料に着火させる方法から、高速の空气中に燃料を噴出させて液滴にして、エンジン内部に送り込んで燃焼させる直噴式に切り替わってきた。燃料は微粒化されることによって表面積が格段に増し、瞬時に気化し燃焼する。これは高出力・高性能・省エネルギーに貢献している。

また、他の分野、例えば塗料では、かつて古代エジプトの壁画にも使われ、東洋特産の漆は漆器の表面に刷毛で塗られた。日本海海戦の勝利の要因の一つに当時の船底塗料の効用があるとも言われている。20世紀になり速乾性の塗料が開発されると同時に、スプレー塗料技術も開発され自動車生産のライン塗装が可能となった。

塗料を斑なく綺麗に早く塗装するにはどうするか、均質で取扱い易い調味料や薬剤を得るにはどうしたら良いか、その答えが液体の微粒化で表面張力を利用し、球形の液体に分散させることであった。

大処理量化や、高出力化が求められる中で生産

の効率化、燃焼の効率化を進めるため、液体を微粒化することで課題を解決してきた。さらに塗料の廃棄等にもなう環境汚染への配慮や、無駄の削減そして、製品の小型化などより高い品質がもとめられる中で、さらに細かく、均一な粒子が求められるようになっていった。

5. 液体の微粒化の用途の拡大

今日、これまでに紹介した産業のみならず、化学、農業、金属、機械、冷却、医療など、液体の微粒化技術が応用されている分野は広い。現代社会にとって非常に重要な分野となってきたIT関連製品やエネルギー、環境関連製品でも微粒化技術が応用されている。積層ピエゾヘッドを使ってインク液滴を噴射させて印刷するプリンタも微粒化技術の一つであり、今注目を集めている二次電池の材料もスラリを微粒化し、乾燥させる噴霧乾燥技術によって作られている。しかし、既に紹介したように物理的な液膜分離から生産される液滴には粒度分布があり、今後は如何に、粒度分布の狭いシャープな液滴粒子を作るかが課題となっていくだろう。

6. 液体の微粒化の今後の課題

粒度分布がシャープな液滴にすることは、燃料の世界では気化する時間が均一になり燃焼制御や効率を良くし、塗装では均質な塗膜を可能にし、二次電池材料では安定した充放電性能を保持するのに重要な課題である。

現在均質な粒子径を得る微粒化の方法の一つとして、微粒化装置に振動を与えることが提唱されている。どのような液体原料にどの程度の液滴径を想定してどの程度の振動を与えるとシャープな粒子径を持った液滴が得られるかは、今後の課題である。

このように微粒化技術は、現代社会の多くの産業設備の基本要素として重要な位置をしめている。この微粒化技術には、先に述べたノズル方式や回転円盤方式などが考案されているが、利用される産業分野において、さらに様々な装置が付加され発展してきている。

液体の微粒化と乾燥そして、粒子作りに加えて、更に社会ニーズが求める均一な液滴粒子径をキー

ワードに、微粒化技術がさらに展開していくことが想定される。

参考文献・参考資料

- 1) 倉林俊雄：液体微粒化技術の最近の動向
日本機械学会誌 第 89 巻 第 811 号
- 2) フジテクノシステム：微粒子工学大系 第 1 巻 基本技術(2001)
- 3) フジテクノシステム：微粒子工学大系 第 2 巻 応用技術(2002)
- 4) 鈴木孝司：液体微粒化の基礎
- 5) 森北出版：アトマイゼーションテクノロジー
-微粒化の基礎と基本用語辞典-(日本微粒化学会 2001)
- 6) 小金井稔元：粉末製品の性状の要求変化に伴う噴霧乾燥技術の発展 - 液体の微粒化から見た 1975 年からの 20 年 - 技術革新と社会変革 第 1 巻 第 1 号
社会技術革新学会 (2008)
- 7) ウィキペディア フリー百科事典
- 8) 大川原化工機株式会社 会社案内及びカタログ

編集後記

「技術革新と社会変革」の第5巻第1号をお届けできることになりました。本号には、4稿が投稿され、数次の査読過程を経て、全稿が掲載される運びとなりました。査読者各位、投稿者の真摯な取り組みに敬意を表します。

さて、ご案内のとおり、昨年6月の理事会で学会誌の投稿細則が改定され、同細則に基づき昨年7月第4巻第1号が発刊されましたが、その際、編集委員会には理事会のメンバーより一つ「宿題」が出されました。新細則は、投稿原稿を、①総合報文、②報文、③短報に分類しましたが、その分類自体には認識を共有しつつも各原稿の名称には必ずしもしっくりこない面があるので、より趣旨に馴染む名称を継続して模索するという宿題でした。

半年間の模索後の議論の結果、最終的には、①総合報文、②報文、③報告という名称が与えられることになりました。3月22日付け理事会資料には、変更理由として、「当学会の学会誌では、現行の区分を、総合報文、報文、短報の3種類に区分し、第9条においてその定義を明らかにしている。前2者が『論考』であり、広く社会に提言する投稿』であるのに対し、短報は『国内外の動向や実践的な活動については報告する投稿』である。当学会で言う短報はページ数の多寡や内容の価値を区別したものではなく、投稿者が何を意図しているかで分類しているに過ぎない。しかしながら、区分名称（短報）が原稿区分の定義を彷彿させにくいとの意見もあり、変更することとする。区分名称は定義文から引用して「報告」とする」とあります。なお、参考までに英文を記載すれば、総合報文（Comprehensive Article）、報文（Article）、報告（Report）であります。

討議の到達点を確認し、認識を共有するために、本細則適用後初めての発刊になる本号の編集後記の場をかりて、周知の場として活用させていただきました。

新編集委員長として、2号目の発刊になりますが、今後とも新細則をよりどころに、学会誌の編集に携わって行く所存です。

編集委員長 須藤 繁