

## 米国石油地質家協会（AAPG）研究会議

### 「石油の起源、無機起源か有機起源か」に参加して

総合戦略ユニット 主任研究員 中島敬史

#### はじめに

石油鉱業に携わる地質専門家にとり、世界的に最も権威ある学会と認識されている米国石油地質家協会（American Association of Petroleum Geologists、AAPG）は、1917年の設立以来 88 年の伝統を有する地質関係の学会で、地球科学分野で世界最大の会員数を誇る。

今年 6 月 19 日から 4 日間に亘り、カナダのカルガリーで AAPG 年次総会が開催された。AAPG は石油地質学に関する学術団体としての位置づけと、石油鉱業に携わる職業地質家による団体というビジネス色彩の濃い側面を持ち合わせている。従って、同協会の年総会は、世界の石油地質研究者および石油開発企業の地質技術者が一同に集まる一大イベントであり、石油地質に関する最先端の研究成果や、世界で行われている石油天然ガスの探鉱や開発に関するホットな最新事例が数多く紹介され、地質専門家同士による活発な意見交換の場ともなっている。今回、50 ヶ国から約 7,335 人の参加者があった。なお日本からの参加者は事前登録数約 10 名だったが、実際にはそれ以上と思われる。



カルガリー市内



AAPG 開催会場（Stampede Park）

（筆者撮影）

## 1. AAPG 年次総会

### 1-1. 年次総会の概観

今年の AAPG 年次総会では、図 1 に示した 11 分野が主要分野に掲げられ、3 日間で発表された論文は口頭発表 470 論文、ポスターセッション 300 論文であった（プログラムに基づく）。

口頭発表された分野別の論文数を図 1 に（ ）で示した。「堆積学」に関する 138 論文と「世界各所の探鉱事例」に関する 101 論文の合計で全体の半分を占めている。次いで「構造地質やトラップ形成」70 論文、「非在来型油・ガス田」50 論文、「環境関係や CO<sub>2</sub>の地層封じ込め」35 論文、「開発技術関係」30 論文、「根源岩」30 論文、そして「天体地質（特に火星の地質）」4 論文と続く。また科学技術専門の学会でありながら、「上流ビジネスと経済」に関する 13 論文も発表された。



図 1 2005 年 AAPG 年次総会における主要な地質テーマと発表論文数

筆者が 4 日間（19 日の開催式後の講演から 22 日まで）に訪ねたテーマ会場の中では、「天体地質」に関する会場に多数の聴講者が集まり、火星表面の最新画像を紹介した発表には多くの質問が寄せられた。また、先ごろユタ州中央部の乾燥地帯で突然 10 億バレルという大規模油田を発見した Wolverine Gas & Oil 社の発表にも大勢の聴講者が集まり、これまで誰も関心を寄せなかったフロンティアで大油田発見の偉業を達成した同社に対して、賞賛の声と、探鉱地質家の興味と関心が集まった。

## 1-2. 上流ビジネスと経済分野

「ビジネスと経済」に関する発表はやや空席が目立ったものの、以下に概説したいくつかの重要な発表があった。

### (1) 石油埋蔵量評価者の認証制度

そのうちの一つは、埋蔵量評価の話題である。地質的に試算された埋蔵量評価値は、埋蔵量を資産として保有する企業の株価と連動する<sup>1</sup>。また過去 2 年間、企業が開示した埋蔵量値は、必ずしも米国証券取引等監視委員会（SEC）の基準に則していないことが明らかとなり、企業は複数回に亘って公表埋蔵量値の下方修正を余儀なくされた<sup>2</sup>。これが投資家の埋蔵量値に対する不信感に繋がった。世界の確認埋蔵量を金銭的価値に置き換えると 600 兆ドルと膨大であることから、経済的な側面で石油の埋蔵量評価基準を見直す議論が国際的に高まっている。

そこで、世界中に地質専門家の会員を擁する世界最大の地球科学分野の学会である AAPG が、「石油埋蔵量評価者の認証制度（Certification of Petroleum Reserves Evaluators）」の新設に向けて動き出した。SPEE、SPE、WPC など 7 学会が、この制度趣旨に賛同しており、米国政府、USGS、ASC、SEC が招かれ、石油メジャー企業 7 社の協賛を得ている。

AAPG では、まず学会内部に「Geoscience Recommended Practice Committee」と呼ばれる組織委員会を設立し、地質学や地球物理学、岩石物性学の 3 分野に分かれて活動を行う。制度制定に向けたこれらの活動は、AAPG 内で自主的な参加の下に進められる。AAPG は既に上海で、今年 5 月にはクアラルンプールで、同制度に関する説明会を開催し、

---

<sup>1</sup> 口頭発表のなかで、「埋蔵量値はそれを保有する企業の株価と 83%の確率で連動している」というライス大（米）の研究報告が紹介された。

<sup>2</sup> R/D Shell は保有確認埋蔵量を数次に亘り下方修正し、最終的に当初報告の 22%減の値を報告した。

中国やマレーシアの AAPG 会員が既に動き出している。また 8 月にはヒューストンで、各界から意見を求める会合を開き、2005 年第 4 四半期には、AAPG がこうした制度制定の責を担うかどうかが決まされる。既に、会員企業の 80%と個人会員 84%が、本制度の必要性に賛同しており、この制度が本格化すれば、AAPG は世界の石油埋蔵量評価に関する重要な役割を担うことになり、単なる学術団体の枠を超えて、社会経済に大きな影響力を持つ社会団体となる一つのステップになる可能性が高まっていると感じた。

## (2) 確認可採埋蔵量、PD と PUD

各企業が報告する確認可採埋蔵量は、これまで長い間 SPE (Society of Petroleum Engineers) の定義に則って評価されてきた。SPE 定義における確認可採埋蔵量とは、既に試掘井や評価井で確認された埋蔵量のうち、現在の油価や技術水準で採掘可能な量である。しかし、確認可採埋蔵量として計上されていたものの中には、既発見油ガス田でありながら、今後の油価変動による採算性悪化や購入者が決まらないなどの理由で、開発が断念される危険性がある埋蔵量も含まれていた。これら開発未着手の確認可採埋蔵量 (PUD: Proved Undeveloped) の扱いが、問題の対象となっており、SEC の基準における確認埋蔵量は、既に開発済みでいつでも生産可能な状態にあるもの (PD: Proved Developed) の埋蔵量値と定めている。

何度か埋蔵量値の下方修正を行った R/D Shell は、2002 年から 2003 年にかけて確認可採埋蔵量における PUD の割合を縮小した。しかしその他の各社では、PUD の平均的な割合は、2003 年以降 30%から 40%へ増加傾向にあるという。

PUD の割合が増加する背景には、埋蔵量成長や新規大型油ガス田の発見がある。PUD の割合増加を嫌う石油開発企業は、大型の新規油ガス田の発見というよりは、開発が容易な既存油ガス田の周辺を探鉱する傾向を助長しているとも言われている。近年、大型の油ガス田が発見されない背景には、こうした埋蔵量評価における制度変更が大きく影響していると言える。

一方、国営石油会社は発見した油ガス田を未開発のまま、将来まで温存しておくことが可能であり、PUD の割合には無関心である。従って、新規の大型油ガス田の探鉱を大いに進められるという有利な立場にある。本来、大規模な油ガス田を発見することが石油開発企業の最大の収益源であったはずであるが、それが容易に行えない事情となってきた。

(3) 石油開発のリスク分析

石油開発をビジネスとして捉えた場合、通常のビジネスと大きく異なる点は、そのリスクの高さにある。すなわち、油ガス田発見までには、鉱区取得費や掘削費という先行投資があり、試掘に失敗すると収益は大きなマイナスで終わる。一方、成功すれば先行投資以上のリターンがあり、通常のビジネスに比べてその収益率はかなり高い（図 2 参照）。

こうした観点から、石油開発企業では既存油ガス田周辺の小規模追加鉱量を目指す探鉱でリスクを軽減すると共に、高リスクでも高収益を期待した大規模油ガス田の探鉱を同時に行い、それらの投資配分（ポートフォリオ）が議論されてきた。今回 AAPG で紹介されたある試算によると、2~5 週間で生産が可能な小規模油ガス田ばかりを狙ったケース A と、2~5 年で生産が可能な中規模油ガス田を狙ったケース B について比較したところ、ケース A がはるかに高い収益性が期待できる結果となった。年間 36 プロスペクトを試掘すると想定したケース A では、わずか 1 年で NPV (Net Present Value) が 5 倍になるとの試算結果も出され、小規模油田を対象に早期回収する方針が成功への近道である、と結論された。近年、大規模な油ガス田が発見されない背景には、こうした石油開発企業の最近の投資傾向も影響しているようだ。

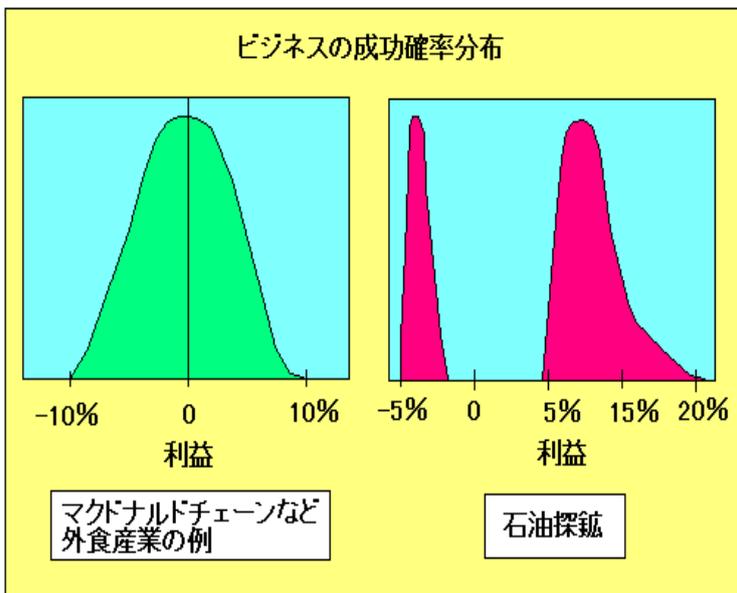


図 2 一般ビジネスと石油上流ビジネスのリスク比較概念図

## 2. AAPG 主催の研究会議「石油の起源、無機起源か有機起源か？」

### 2-1. 石油の起源に関する 2 学説の概要

#### (1) 石油の有機起源説

油ガス田の成立には、油ガスを生成する根源岩の存在が不可欠である、と言われるが、これが有機起源説である。石油の根源岩は、一般に海底や湖底に堆積した泥質堆積物から成っており、そこには豊富な有機物が含まれている。これら有機物が地層内で適度の圧力と温度に保たれた結果、石油ガスを生成する。

有機起源説に基づけば、油田や天然ガス田が形成されるには、3 つの大きな要素を全て満たしていなければならない。それらは、①石油やガスの根源岩が存在すること、②根源岩で生成され排出された油ガスを集積する貯留層が存在すること、③それら油ガスを逃がさないシール（帽岩）から成るトラップ構造（地質構造）が存在すること、である。これら油ガス田を成立させる一連の枠組みを「石油システム（Petroleum System）」と呼ぶ。AAPG をはじめ世界の石油地質学は、各地域における「石油システム」を論じることで発展してきたと言っても過言ではない。

有機起源説では、堆積盆地の地層中に堆積した根源岩から油・ガスが生成され、油田やガス田も堆積盆地内に限って分布するものと考えられてきたことから、堆積盆地の基底以深に厚く分布する結晶質基盤岩<sup>3</sup>はこれまで探鉱対象と見做されていなかった。近年、ベトナムやイエメンなど、基盤岩の内部で商業生産が可能な規模の油田が相次いで発見されており（参考文献 2）、我が国でも北海道で花崗岩質基盤岩をガス貯留部とする勇払ガス田が発見されている。有機起源説ではこれらは特殊なケースと考えられており、これまでダウンマイグレーション<sup>4</sup>により説明されてきた（図 3 参照）。

---

<sup>3</sup> 堆積盆地の基底を構成する岩石類で、マグマが冷えて形成した火成岩（花崗岩、玄武岩など）や高温高圧下で形成した変成岩（片麻岩や緑色片岩など）から成り、大陸地殻を形成している。

<sup>4</sup> 基盤岩の一部が隆起した地塁構造を形成している場合、基盤岩の上方及び側方に分布する根源岩から油・ガスが側方に移動、あるいは異常高圧の上位地層から圧力勾配に応じて下方に移動するなどして、基盤岩中の断裂中に入り込む現象。これらは若い地層（根源岩）から古い岩石（基盤岩）への移動であり、通常の移動とは逆方向であることからダウンマイグレーションと呼ばれる。

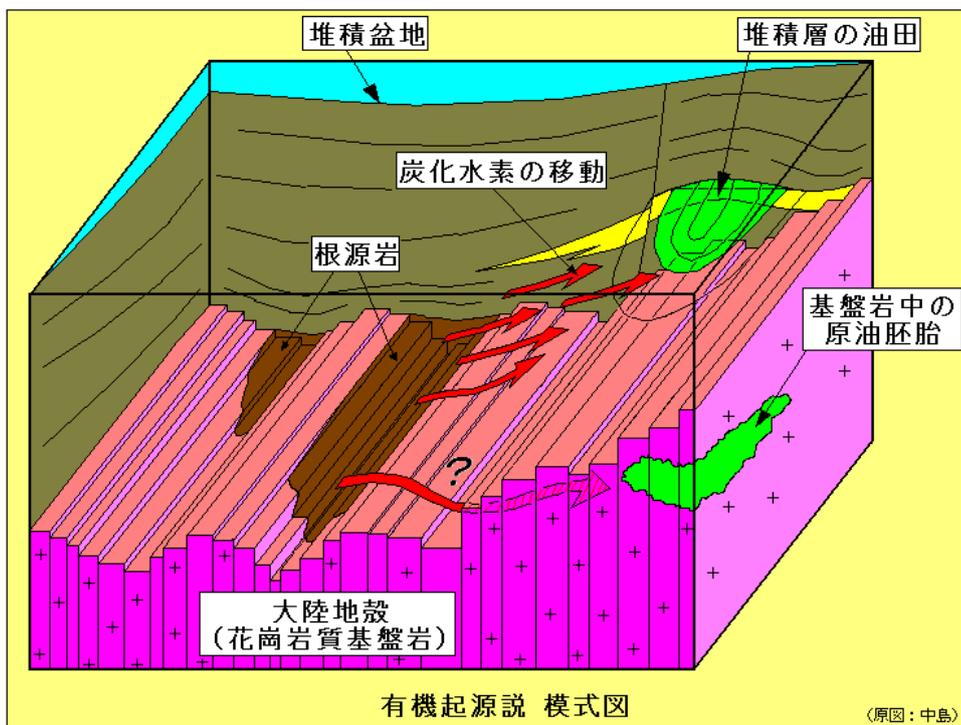


図 3 有機起源説による油・ガスの移動を示した模式図

(出所) 筆者描画

## (2) 石油の無機起源説

従来の学説に対して全く対極を成す油田形成の説がある。それが石油の「無機起源説」である。ロシアや旧ソ連を中心に発展したその学説は、周期律表で有名なメンデレーエフが 1870 年代に発表したことが始まりとされる。19 世紀から 20 世紀初頭には、石油の「無機起源説」が世界の主流の考え方として定着した時期もあったが、その後、西洋科学の発達と共に石油の起源は有機起源説で説明されるようになり、石油システムを中心とする学問体系が確立していった。しかし、ロシアやウクライナでは、先人の確立した無機起源説を継承し続ける複数の研究者がおり、今日も主要な学説として位置づけられている（無機起源説は参考文献 12 に詳しい）。

無機起源説は「宇宙起源説」と「無機成因説」とに大別できる。前者は、地球創生期に地球外天体で生成された石油が隕石により運ばれ、地球内部に取込まれたという学説であり、後者は地球深部（上部マントルや地殻深所）で無機的な反応により炭化水素が形成し続けているという学説である。

2005 年 1 月、土星の月「タイタン」に探査機が着陸し、同天体に大量の液体炭化水素（主としてメタンとエタン）が存在することが確認された。液体炭化水素は河川となって地表を侵食し、水系を形成していること（図 4 左参照）、さらに炭化水素が火山として地表に噴出している姿など（図 4 右参照）が捉えられた（NASA, 2005）。すなわち、今日、炭化水素はもはや地球に限って存在する特殊な物質ではないことは明らかである。果たして、これらは大量の生物により有機的に生成されたのであろうか。

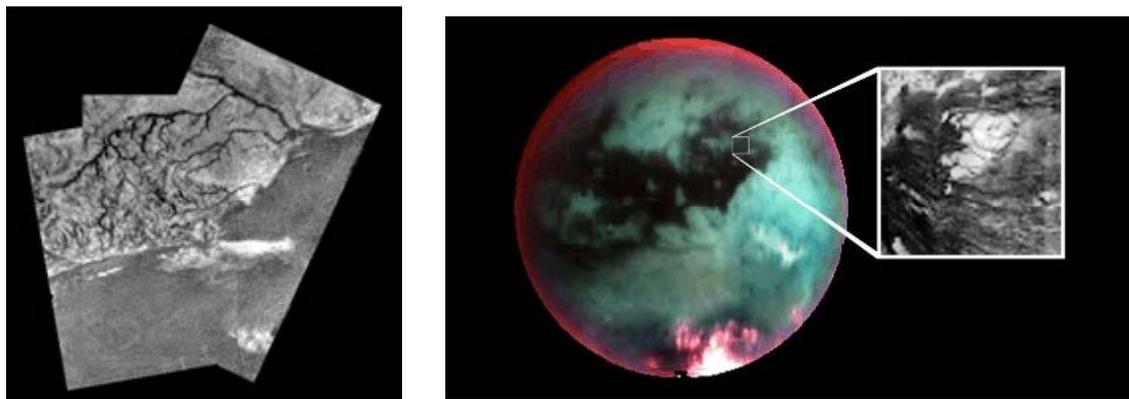


図 4 土星の月タイタンにおける画像

液体炭化水素により形成された水系模様（左図）、炭化水素を噴出する火山（右図）

（出所）NASA ウェブサイト

無機成因説を支持するものとしては、上部マントルの主要な構成岩石であるカンラン岩が蛇紋岩に変わる過程で、フィッシャー・トロプッシュ反応<sup>5</sup>により炭化水素が無機的に生成していることを示唆する現象が複数報告されている（Szatmari, 1989、参考文献 20 参照）。また東太平洋海膨で海底から噴出する熱水中には、炭化水素が含まれていることが知られているが、これを分析した結果、無機的な生成物であることが確認され、ネイチャー誌上に論文が掲載された（Nature, 2002 年 4 月、参考文献 19 参照）。

さらに 2004 年、米国の大学や研究所が横断的な研究チームを結成し、上部マントルの温度圧力状態を実験室で再現した。ダイヤモンドセルにより閉鎖系を作り、その中に石灰岩・鉄化合物・水を入れて反応を調べたところ、炭素数 6 までの炭化水素（C<sub>1</sub>～C<sub>4</sub>の天然ガスと C<sub>5</sub>～C<sub>6</sub>の軽質の油）が無機的に生成することが確認された<sup>6</sup>（図 5 参照）（Scott *et al.*, 2004、米国科学アカデミー PNAS, 2004 年 9 月、参考文献 18 参照）。

<sup>5</sup> 二酸化炭素に富む熱水流体と、還元環境下にある水素が結びついて、水と炭化水素を合成する反応、例えば  $n\text{CO}_2 + (3n+1)\text{H}_2 = \text{C}_n\text{H}_{(2n+2)} + n\text{H}_2\text{O}$  などの反応。

<sup>6</sup> 反応式の一例として  $8\text{FeO} + \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CH}_4 + \text{CaO}$  が紹介されている。

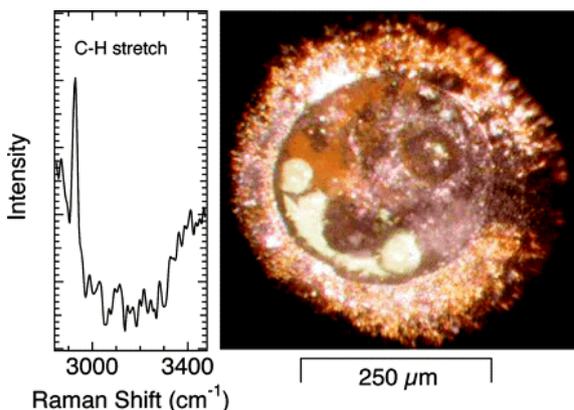


図 5 室内実験で上部マントルの温度圧力条件を再現し、メタンやC<sub>6</sub>までの炭化水素を無機的に生成した例

(出所) Scott *et al.* (2004) 米国科学アカデミーオンライン情報

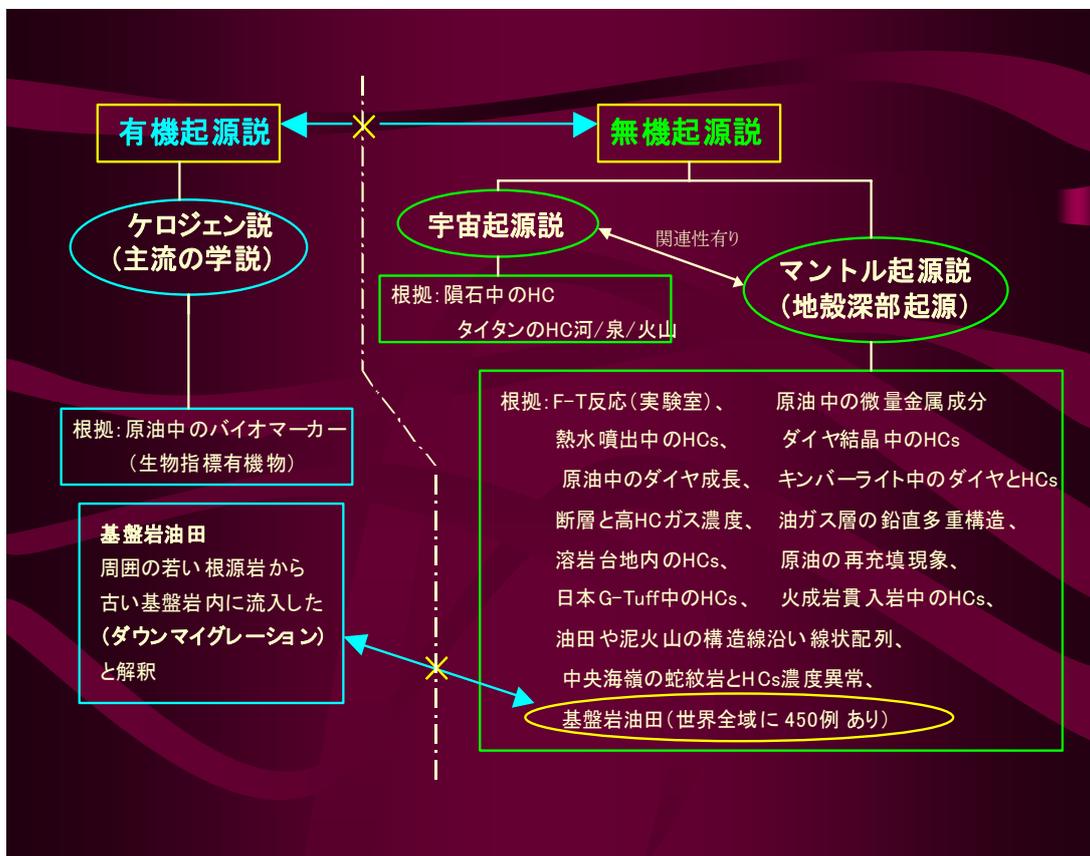


図 6 石油の有機起源説と無機起源説、それらの根拠比較

(出所) 各種資料より筆者作成

このように、海や湖に沈積した有機物の存在に頼らずとも石油・ガスが生成し得る、という説が無機起源説であり、現在主流である有機起源説と対極を成す考えである。そして、今日までに、石油の無機起源説を示唆する多くの状況証拠が世界中から報告されているのである (図 6 参照)。

従来は、砂岩や泥岩、炭酸塩岩（石灰岩や苦灰岩）などから成る堆積層が試掘の対象であり、その下位に厚く分布する基盤岩に達する直前で掘り止めることが常識とされてきた。それでも、堆積層を掘削中に堆積盆地の基底まで掘り進んでしまい、偶然に基盤岩中の原油胚胎を確認する例があった。ウクライナ科学アカデミーの Kitchka 氏によると、商業的な埋蔵量を有する基盤岩油・ガス田は、南極大陸を除く全ての大陸に分布しており、その数は 450 以上に及ぶ (Kitchka, 2004、参考文献 5)。イエメンの Masila 堆積盆やベトナムの Cuu Long 堆積盆では、基盤岩中に膨大な原油が発見されるケースが次々と発生したため、最近では、基盤岩を意図的に掘削する傾向にある。またマレーシアでも、今年マレー堆積盆で生産中の Malong 油田（堆積層を油層とする）で、その地下深部の結晶質基盤岩が 250m 掘削され、基盤岩部分から相当量の原油産出が確認された(4月 25 日付 OGJ)。

またイエメンの石油大臣は先ごろ、同国で探鉱する石油会社に対して異例の勧告をした。試掘井は堆積層のみならず、その下位の基盤岩も深く追掘するよう、勧めたのである(2005 年 6 月 27 日付 WPA)。基盤岩油田は、もはや偶然に発見されるものではなく、また特殊な地質状況にのみ発見される油田とは言えない状況になりつつあると言える。

これら基盤岩油田のなかには、結晶質基盤岩の上面から基盤岩内部に数百 m 入った部分から深部にかけて原油が胚胎しているという油田 (図 7 参照) も存在し、最近ではベトナム沖で、基盤岩上面から基盤岩内部で垂直方向に 2,000m 間以上も原油が連続して胚胎し、油層の下位に分布するはずの水層が未だ確認できないケース (油層が延々と地殻深部まで続くケース) も現れてきた。これらは従来のダウンマイグレーションだけでは容易に説明できない。

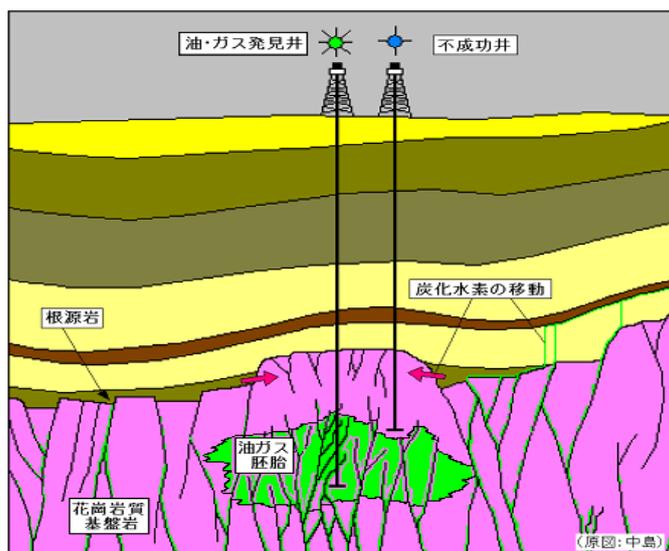


図 7 基盤岩内部に原油が胚胎した事例

(※) 西シベリア堆積盆、Maloitch 油田に関する記述を基に描いた筆者の想像図

## 2-2. 「石油の起源」に関する議論の活発化

このように、これまで石油探鉱の対象と見做されていなかった結晶質基盤岩にも大量の原油が胚胎していることが、世界中のあちこちで確認され、基盤岩油田の存在が無視できない状況になるに及んで、英国地質学会 (The Geological Society, London) は 2001 年 2 月に「結晶質基盤岩中の炭化水素」と題するシンポジウムを開催した (参考文献 15 参照)。

シンポジウムでは、Schutter (2003) が、火成岩中に油・ガスが胚胎する例が世界 100 ヶ国で見られることを紹介した (参考文献 17 参照) 他、Koning (2003) は、インドネシアや米国、ベネズエラにおける大規模な基盤岩油田や基盤岩ガス田の地質状況を紹介し、基盤岩油田がもはや偶然の発見ではなく、石油が基盤岩中に分布するのは地質的に必然性がある集積した結果である、と報告した (参考文献 6 参照)。

さらに Potter & Konnerup-Madsen (2003) が、コラ半島に分布するヒビナ・アルカリ火成岩貫入岩体<sup>7</sup>やレボゾノ火成岩貫入岩体に含まれる流体包有物中に高濃度の炭化水素 (原油を含む) が含まれること、及びその炭素同位体組成比<sup>8</sup>が重いことから、これらの炭化水素は無機起源であると報告した (参考文献 16 参照)。同論文では、これら無機起源の炭化水素は、カンラン岩の蛇紋岩化作用で形成した水素と二酸化炭素を含む熱水とがフィッシャー・トロプッシュ反応 (前述) により形成された、と結論している。さらに火成岩貫入岩その他で観測されるガス徴において、メタン (C<sub>1</sub>) エタン (C<sub>2</sub>)、プロパン (C<sub>3</sub>)、ブタン (C<sub>4</sub>)、ペンタン (C<sub>5</sub>) の量が、グラフ上、対数直線上に分布すること (炭素数に応じて級数的に減少) から、これらの炭化水素は、生物によりランダムに生成されたとは考え難く、物理化学的なプロセスで無機的に形成されたことを示す、と述べている (参考文献 16 参照)。

モスクワでも、2002 年に「地球の脱ガス化と炭化水素流体の生成と集積」と題するカンファレンスが開催され、石油の無機起源説を支持する研究者が数百名集まった (ロシア科学アカデミー石油ガス研究所室長 Valyaev 氏の情報、同氏よりカンファレンスの論文集を頂戴した)。同会議は、さらに 2005 年 11 月にも開催される予定で、次回は第 5 回を数えると言う。

---

<sup>7</sup> 上部マントル起源の火成岩が、地殻中に割れ目を作って上昇し、地表付近で冷えて固まった岩体で、上部マントルの地質情報を与えてくれる。また各種の金属鉱床を形成することが多い。

<sup>8</sup> メタンの炭素同位体組成比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) から、メタンの起源が推定される。生物プロセスを経て生成したメタンはほとんど  $^{12}\text{C}$  から成り、 $\delta^{13}\text{C}$  値が低い。一方、地球深部で無機的に生成されたものは  $^{13}\text{C}$  の割合が多く、 $\delta^{13}\text{C}$  値が高い。大西洋の中央海嶺や東太平洋海膨から噴出する熱水中のメタンや隕石中のメタンは  $\delta^{13}\text{C}$  値が極めて高い。

このように、無機起源説を示唆する現象は俄かに世界の石油探鉱関係者の関心を集めており、「石油の起源」に関する議論が今後、活発化することは必至である。

### 2-3. AAPG 主催の研究会議「石油の起源」開催までの経緯

2005 年 AAPG 年次総会の開催前日の 18 日、カルガリー市内のホテルで「石油の起源、無機起源か有機起源か？」と題する AAPG 主催の研究会議が開催された。1917 年の設立以来、世界の石油鉱業界をリードしてきた AAPG は、今日の石油地質学の主流学説である「ケロジェン説で代表的される有機起源説、または有機成因説」を積極的に推進してきた母体でもある。従って、AAPG はこれまで、有機起源説に反する学説である「無機起源説」を異端として扱ってきた経緯がある。その AAPG が同会議を開催するに至った背景には、昨年他界した故 Halbouty 氏の存在が大きい。

生涯に数千本という試掘に関与したワイルド・キャッター (wildcatter)<sup>9</sup>の故 Michel T. Halbouty 氏 (1909-2004) は、数々の油田を発見して大成功を収めたことで著名である。またアラスカで初めて原油を発見した人物としても知られている。同氏は多くの名誉ある賞を受賞し、1966-67 年には AAPG の会長も歴任している。昨年 95 歳で他界した Halbouty 氏は、ロシアの地質研究者とも交流があり、生前、AAPG 上層部に対して、「西洋諸国の石油鉱業界にとっては古いアイデアである無機起源説について、オープンな議論を行うべきである」と主張し、無機起源の会議を開催するよう強く働きかけていた。

AAPG の執行役員は、長い経験と豊富な知識を有する Halbouty 氏に対して、「なぜ、ここまで無機起源説を含めた会議の開催に拘るのか」と尋ねたところ、同氏は「現在の学説では、全ての疑問に答えることができないからだ。石油の起源について無機起源説も取り入れて、改めてオープンな会議を行うことで、今後どこを探せば新たな油田やガス田が見つかるか、ヒントが得られるかも知れないからだ。」と答えたという。さらに、同氏はワイルド・キャッターらしく「そうしたヒントが、私にさらなる利益をもたらすだろう。」と付け加えた。

AAPG は Halbouty 氏の意見に耳を傾け、2003 年にロンドンで「石油の起源」と題する研究会議を開催することを計画した。しかし、同会議は 2004 年のウィーン会議に延期となり、最終的にはその会議もスポンサー問題などからキャンセルとなった。そして 2005

---

<sup>9</sup> これまで油田やガス田の発見が知られていないフロンティア地域で掘削する坑井をワイルドキャット井 (wildcat well) と呼ばれる。フロンティア地域で、独自の地質概念や勘を頼りに試掘を行い、次々と成功を収めた者を、石油鉱業界では尊敬の念を以ってワイルドキャッター (wildcatter) と呼ぶ。

年、Halbouty 氏の遺志を継いで、AAPG 執行役員の Mancini 氏（アラバマ大）が会議開催に向けて各所に働きかけ、オクラホマ大の協賛を得て、AAPG 年総会が開催される前日の 6 月 18 日に、ようやく「石油の起源、無機起源か有機起源か？」と題する会議の開催が実現したのである。

#### 2-4. AAPG 研究会議「石油の起源」の内容

18 日午前中には、無機起源説を支持する研究者の発表が行われ、続いて午後には有機起源説を支持する研究者の発表が行われた（発表者一覧参照）。当初、ロシアから 1 名有機起源説支持派として招かれていたが、当日欠席であった。また、午前中に無機派に混じって発表した 1 名は、発表の中で、同氏はむしろ有機起源説支持者であると表明した。よって発表者の最終的な位置づけは、無機起源説支持派 7 名、有機起源説支持派 6 名となった。ただし、無機派の 1 名と有機派の 1 名は、それぞれ発表の中で、対極する学説をミックスすることが望ましいと述べ、中立の立場を表明した。

なお、司会者はフロアーの聴講者から追加発表を希望する者を募り、筆者とロシア科学アカデミーより 1 名がこれに応じて登壇した。

(1) 無機派の論理展開

無機起源説支持者による発表は、炭素と水素の同位体組成比、プレート境界と石油システム、熱水起源の炭化水素、蛇紋岩と海底メタンアノマリー、原油中の微量金属、流体包有物、水素化合物など、多岐分野に及んだが、これらは以下のような一本のストーリーとしてまとめることができる（図 8 参照）。

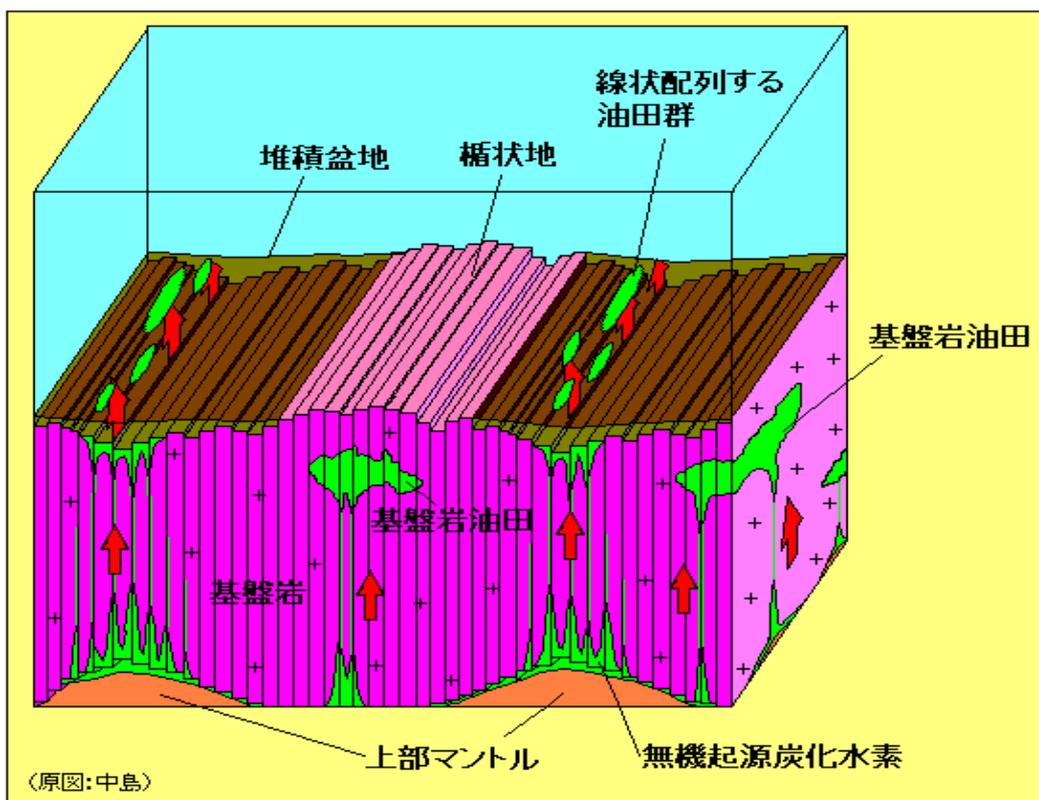


図 8 石油の無機起源説の模式図

(出所) 筆者の推定図

(※) 上部マントルから地殻深部で炭化水素が無機的に生成され、地殻中の断裂を通じて垂直上方に移動。基盤岩内の断裂が集中する箇所でも油田を形成。さらに堆積盆地内でも油田を形成し、それらは線状配列することが多い。

上部マントル及び地殻深部において、上部マントルの主要構成岩であるカンラン岩が蛇紋岩化する過程で水素が発生する<sup>10</sup>。水素は、地殻深部に存在する熱水流体中の二酸化

<sup>10</sup> Potter and Konnerup-Madsen (2003) は蛇紋岩化の反応例として「苦土カンラン石+鉄カンラン石+9H<sub>2</sub>O=蛇紋石+水滑石+磁鉄鉱+2H<sub>2</sub>O+H<sub>2</sub> (水素)」や、「普通輝石+チタン磁鉄鉱+霞石+正長石=黒雲母+磁鉄鉱+エジリン輝石+チタン石+曹長石+4H<sub>2</sub> (水素)」を掲げている (参考文献 16 参照)。

炭素と接触し、フィッシャー・トロプッシュ反応（注釈 5 参照）により炭化水素（油・ガス）が無機的に生成している。地殻深部で生成された炭化水素は熱水中に含まれ（hydrothermal hydrocarbon）、地殻を構成する結晶質基盤岩（花崗岩や片麻岩）中に発達した垂直方向の断裂やプレート境界を經由して上方移動し、基盤岩中で割れ目が集中する部分に集積して「基盤岩油・ガス田」を形成する。また基盤岩中の断裂を經由して、堆積盆地内に滲出した炭化水素は、堆積層内に油・ガス田を形成する。その結果、炭化水素が堆積盆地内に滲出する箇所では、油ガス胚胎層が垂直方向に幾重にも重なって分布する結果となる。また地殻深部で生成された石油が堆積層内を通過する際、堆積盆地の底部に分布する有機物に富む泥質岩から、有機起源説の根拠としているバイオマーカーを取り込むのであろう。

今回のカンファレンスでは、無機起源説に立脚するこのストーリーを裏付ける幾つかの状況証拠が揚げられた。以下にそれらを列挙する。

#### <原油中の微量金属成分>

上部マントルを構成する主要な岩石はカンラン岩であるが、世界の 77 油田の原油における含有微量金属の成分が、そのカンラン岩に特徴的な Cr、Mn、Fe、Co、Ni で構成されることが掲げられた。原油中、大陸地殻中、海洋地殻中、コンドライト隕石中、海水中に各々含まれる微量金属 22 成分について分析し、互いの相関関係を調査した。その結果、以下の相関係数が導かれた（図 9 参照）。

| 原油との相関係数 ( $r^2$ ) |              |
|--------------------|--------------|
| 原油－コンドライト隕石        | : $r^2=0.77$ |
| 原油－カンラン岩           | : $r^2=0.76$ |
| 原油－マントル初生物質        | : $r^2=0.60$ |
| 原油－海洋地殻            | : $r^2=0.41$ |
| 原油－大陸地殻堆積岩         | : $r^2=0.35$ |
| 原油－海水              | : $r^2=0.02$ |

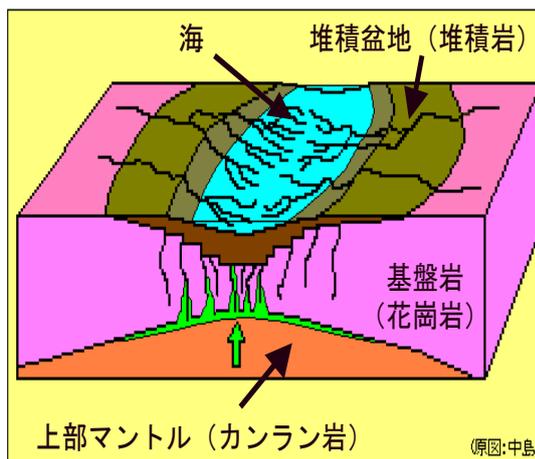


図 9 上部マントルと地殻の概念図

(出所：筆者描画)

原油中の微量金属成分の組成比は、隕石やカンラン岩と高い相関性があり、とりわけ、カンラン岩に特徴的なコバルト (Co) とニッケル (Ni) の組成比で著しい一致性が見られたという。一方、原油中の微量金属成分の組成比は、地殻の堆積岩や海水に含まれる微量金属成分の組成比とは大きく異なっている。原油がカンラン岩起源 (上部マントル起源) であることを示唆する一例である。

#### <大西洋中央海嶺における海水溶存メタン濃度>

フランスの研究機関を主体とする海底調査の結果、世界には蛇紋岩分布地帯とメタンの高濃度アノマリーが一致する傾向があるらしい。発表によると、大西洋アゾレス海の海底に分布する中央海嶺では、海嶺の延長方向に対して雁行する小規模な割れが複数条認められ、これらは海嶺の一部が横ずれを生じて形成された開口クラック (展張裂罅) であった。その一帯にはクラックに沿って蛇紋岩<sup>11</sup>が分布するが、ちょうど海底から噴き出すメタンの高濃度アノマリーと一致することが判った。またメタンの  $\delta^{13}\text{C}$  は重く、すなわち地殻深部由来と考えられ、蛇紋岩と炭化水素生成の関連性が示唆される、と結論された。また同様の事例が他の海域にも見られることも報告された (参考文献 4)。

海嶺などで見られる熱水噴出では、同時に大量のメタンが噴出していることが知られている。それらのメタンはこれまで、周囲の堆積物中の有機物から生成されたと言われてきたが、今回の発表では、そのメタンの起源が上部マントルあるいは地殻深部のカンラン岩であることを示唆する現象が、報告されたのである。

#### <原油中のダイヤモンド微粒子>

原油が無機的に生成された証拠として、無機物質の代表である微細なダイヤモンド粒子が、全ての原油中に 100ppm の濃度で普遍的に存在する点が掲げられた。また電子顕微鏡で撮影された、原油 ( $\text{C}^{26}\text{H}^{30}$ ) 中のダイヤモンド結晶の写真が公開され、ダイヤモンド粒子が、原油中で成長して結晶化している事実も例示された。これらは、原油がダイヤモンドと同じく無機的に生成していることを示唆している。

---

<sup>11</sup> 蛇紋岩とは、上部マントルを起源とするカンラン岩が水と反応 (蛇紋岩化) して滑石と共に形成される岩石。地殻に生じた大規模断層 (上部マントルに達するような大規模なもの) やプレート境界、海嶺などに沿って、マントル物質が絞り出された岩石である。これら海洋地殻を形成したマントル由来の岩石類をオフィオライト岩類と呼ぶ。

<炭化水素含有熱水 (hydrothermal hydrocarbon) >

また、炭化水素が熱水中に含まれ、熱水と共に地殻中を上昇しているという“hydrothermal hydrocarbon 説”も提唱された。ダイヤモンドを形成する炭素は、地殻深部では豊富に存在し、上部マントルや地殻深部ではカンラン岩から蛇紋岩化作用で生成した水素（注釈 10 参照）と反応し、炭化水素を生成している。またそれらが地殻深部に存在する熱水流体中に含まれ、結晶質基盤岩（花崗岩や片麻岩）中に発達した垂直方向の断裂やプレート境界を通じて熱水と共に上昇移動している、という説である。

この考え方に関しては、無機派発表者の多くが整合的な見解を述べた。ダイヤモンド中の流体包有物中に炭化水素が普遍的に含まれる事実とも併せて、この含炭化水素熱水のメカニズムにより、極めて若い原油が油田を形成しているという考え（参考文献 5 参照）や、この学説を支持する現象として、西シベリアのウレンゴイ・ガス田の下部に、垂直方向に幾重にも重なってガス胚胎層が複数存在する例が掲げられた（図 10 参照）。

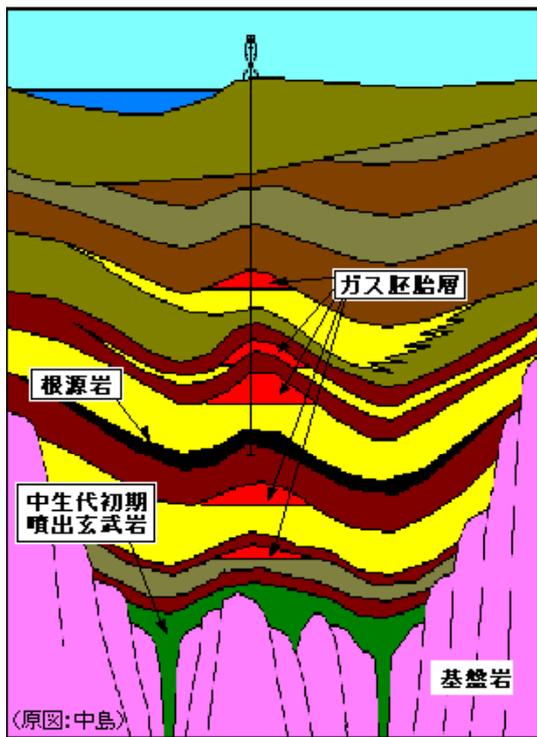


図 10 多重ガス層が基盤まで垂直方向に連続分布する事例  
(モデル: 西シベリア堆積盆、ウレンゴイ・ガス田)  
(出所) 口頭発表を基に筆者描画

メキシコ湾大水深部に存在する Eugén Island 300 油田は、長年の原油生産にも拘わらず残存埋蔵量が増加していることで知られている。無機的に生成した炭化水素を含む熱水が、地殻深部から断層を経由して上昇しているなら、同油田における不思議な現象（原油の再充填現象）も説明可能である、と指摘する発表者もいた。

加えて、ペルシャ湾からイラク内陸部に至る世界最大の産油地域において、油田が直線状（北西－南東方向）に配列するが、この配列方向はちょうどアラビアプレートとユーラシアプレートの境界線に平行する（図 11 左参照）。これは、地殻深部で無機的に生成された油・ガスが、プレート境界に沿って上昇・移動した結果とも考えられる。

さらにプレート同士の圧縮と横ずれの応力を受けて、プレート境界方向（北西-南東方向）に雁行する南北方向の開口クラック（基盤岩の展張割れ）が生じ（図 11 右参照）、そのクラックを通じて地殻深部由来の原油が上昇した結果、世界最大のガワール油田が形成された、との説明もあり、南北方向に伸長した構造の同様の油田が、付近に未発見で残っている可能性も指摘された。

**AAPG Research Conference**

**“石油の起源” 無機派の主張根拠**

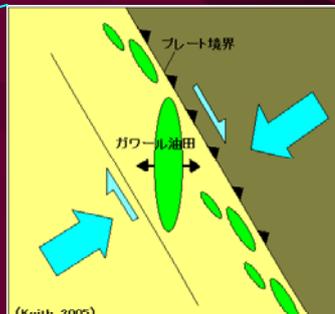
- ペルシャ湾、2つの大陸プレートが衝突:北西－南東方向
- 世界最大 ガワール油田 圧縮応力 + 横ずれ 南北方向の開口クラック



ユーラシアプレート  
アラビアプレート

(T.Gold, 2001)

**プレート境界に沿って  
原油が上昇移動！**



プレート境界  
ガワール油田

(Keith, 2005)

**地殻深部より原油充填！**

図 11 ガワール油田を形成した開口クラックの概念図

(出所) 口頭発表の内容から筆者がコンパイル

<バイオマーカー>

発表者の中には、有機起源説の根拠となっているバイオマーカーについても言及する者もいた。すなわち、堆積盆地底部に分布する泥質岩は有機物に富んでおり、地殻深部で生成された石油が堆積層内を通過する際、それら泥質岩からバイオマーカーが熱水中に取り

込まれた可能性がある、と指摘した。

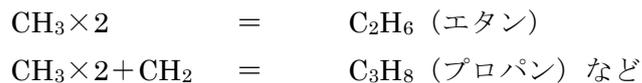
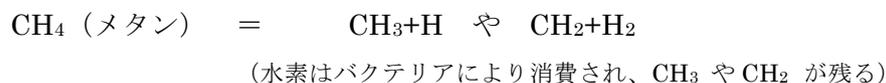
#### < $\delta^{13}\text{C}$ による有機起源の判定手法 >

炭素同位体組成比によるメタン起源の同定手法 ( $\delta^{13}\text{C}$  法) は、現在一般的な手法である (注釈 8 参照)。しかし、無機派の中には、この手法自体が必ずしも正確ではない可能性がある、と指摘する者もいる。一般に、深部層ほど  $\delta^{13}\text{C}$  値が高く、浅部で低いことが知られているが、 $^{13}\text{C}$  はバクテリアや生物代謝により容易に  $^{12}\text{C}$  に変換されるため、浅部に分布するメタンは、その起源とは無関係に  $^{13}\text{C}$  の割合が極めて低い、と言う。従って、低  $\delta^{13}\text{C}$  値を示すメタンが、必ずしも生物起源であることを証明しない。例えば、ガスハイドレートはその低い  $\delta^{13}\text{C}$  値から生物起源と言われるが、元々、地殻深部より無機起源のメタンガスが上昇して、海底下 300m (水深は 1,000m 以上) という浅部に滞留し、バクテリアにより  $\delta^{13}\text{C}$  値が低下したものであろう、と指摘された。

#### < 脱水素化炭化水素 >

一般にタールや特重質の原油は地表付近に存在し、軽質原油やコンデンセートは深部に存在することが知られている。もし熟成した根源岩から炭化水素が生成されているなら、深部にもタールや特重質油が存在しても良いのではないかと主張した発表者もいた。発表によると、根源岩で生成した可動の原油は、もっと地表付近に普遍的に分布して良いはずであり、それが限られた箇所には分布しないのは、断層など地殻中の通路を経由して上昇しているためである、と指摘した。

同発表では、地球深部からはメタンが上昇し、地殻中でバクテリアにより脱水素化し、それらが再結合した結果、炭化水素が合成されたのではないかと、言う。すなわち、以下に示すように、無機起源メタンは、バクテリアにより水素が奪われ、残った  $\text{CH}_3$  や  $\text{CH}_2$  の結合により炭化水素が形成された、という“脱水素化合物 (Anhydride) 説”である。



## (2) 無機派の統一見解と今後の課題

今回行われた無機派の発表は、いずれも上部マントルや地殻深部で炭化水素が生成していることや、その生成にはカンラン岩が関与していること、並びにそれら無機的に生成された炭化水素が熱水中に含まれ、地表近くまで垂直上方に移動したこと、について同調的である。これらの報告はまた、前述の米国科学アカデミーの報告に掲載された Scott *et al.* (2004) の室内実験結果（上部マントル付近の温度圧力条件下で無機的に油ガスが生成することを確認したもの、図 5 参照、参考文献 18 参照）とも整合的と言える。

しかし、原油の生成に関して 7 名の無機派発表者は、①C<sub>29</sub> 付近までの高分子石油化合物が上部マントルで生成していると考える者（4 名）、②上部マントルで生成されたメタンが地殻中を上昇する過程で石油に変化していると考える者（2 名）、③現時点では天然ガスの無機的な生成は明言できるものの原油まで生成しているかは不明と言う者（1 名）の大きく 3 グループに分かれた。今後の研究課題であると言える。

## 2-5. 「石油の起源」カンファレンスの結論

会議を設定した AAPG 事務局によると、同会議への参加申し込み者数は、当初予想をはるかに超えて 140 名に達したが、最終的な参加者数は 80 名程度であった。なお、日本人の参加者は筆者一人であった。

同会議の目的は、両学説を互いに吟味し、評価することにあつた（参考文献 13 参照）。会議に出席した有機派の一部からは、「両派の学説を共に尊重すべきである」との良識を主張する者もいたが、有機起源説が如何に伝統ある確立された学問体系であるかを力説する有機派が多く、有機起源説以外に受け入れる余地は全く無いと主張する者さえ現れた。

両派による激しい意見の攻防が続いたものの、大半の意見は自説を強調するに留まり、上述した蛇紋岩化作用に伴う油ガスの生成根拠や、含油ガス熱水の垂直上方移動など、新しいデータに基づく無機起源的な学説について、科学的に吟味される議論には発展しなかった。そして両派の意見は最後まで噛合うことなく会議は終了した。

会議後、参加者の数人に感想を聞いたところ、「せっかく両派が互いの見解を吟味しあう良い機会であったにも拘わらず、両極に分かれて自説を主張し合うことに留まり、極めて残念である。」といった感想が多かった。一方、「これまでこうした会議は一度も開かれたことすらなかったので、一歩前進したのではないか。」、「保守的とも言える AAPG が、

こうした会議を設定したこと自体、かなり歩み寄ったと言えるのではないか。」、という意見も聞かれた。また複数の方々から、「無機起源説に興味はあるものの、各種の制約から不用意に賛同者として表明できない。」といった実情も語って戴いた。

筆者の発表に対しては、無機派の発表者から賛同の意を戴いた。また「参加者の多くが聞きたかったのは、探鉱に直結する具体的な話だったのだらうと思う。そういう点で、あなた（筆者）の発表は最も説得力があった。ただし、優れた根源岩はあちこちに分布しており、やはり私は石油の起源は有機（生物起源）だと思う。」といった有機派の感想も頂戴した。

### 3. まとめ

これまで異端として扱われてきた学説も、新しいデータが加わることにより矛盾のない新説として生まれ変わることがあって良いのではないか。AAPGのように、世界的に権威ある学会だからこそ、そうしたオープンな技術討論に意味があると考えます。将来、AAPG年次総会の開催前日ではなく、AAPGの本会議の中で「石油の起源」に関する会議が行われる日が来ると期待したい。それにより石油地質学の発展が促され、有用地下資源のさらなる発見に繋がると信ずる。

無機起源説が仮に正しい場合、①まず探鉱対象が堆積盆地に限定されず、平面的および深度方向に大幅に拡大され、地球の石油資源量は大きく増大する可能性もあり、その場合、石油資源枯渇論は霧消する。②次に探鉱の狙いどころが大規模な断裂やプレート境界付近となるため、これまで探鉱が活発ではなかった地域にも油田の発見が進み、石油賦存の地域偏在性が薄まる。③特に、我が国のようにプレート境界が集中した火山国は、探鉱対象地域として最も有望な地域に転ずることになるかも知れない。このように我が国にとり無機起源説は、計り知れないほど大きな経済的効果をもたらす可能性が高いのである。

我が国で発見された油・ガス田の多くはグリーンタフと呼ばれる火成岩中に油・ガスを胚胎している他、近年では、深成岩から成る基盤岩を貯留層とするガス田も発見されている。今後、我が国では古くて新しい「石油の無機起源説」も視野に入れた研究が必要ではないか。筆者も、世界各所で活発化するであろう「石油の起源」に関する議論について、今後もその動向を追うつもりである。

以上

技術士（応用理学・地質）

AAPG 会員

お問い合わせ：[report@tky.ieej.or.jp](mailto:report@tky.ieej.or.jp)

参考文献

1. AAPG (2002), Gas Origin Theories to be Studied, AAPG EXPLORER November 2002
2. AAPG (2005), Vietnam Finds Oil in the Basement, AAPG EXPLORER February 2005
3. AAPG (2005), Abiotic Debate, Gas Origin Views Get Spotlight, AAPG EXPLORER June 2005
4. Charlou J.L. *et al.* (1998), Intense CH<sub>4</sub> plumes generated by Serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the 15° 20' N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge, *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 62 (13), 2323-2333
5. Kitchka A. A. (2004), Juvenile Petroleum Pathway: from fluid inclusions via tectonics and outgassing to its commercial fields, *Exploration and Production Oil Gas and Minerals, Ukrainian Geologist*, No.2, April-June 2004
6. Koning T. (2003), Oil and gas production from basement reservoirs: examples from Indonesia, USA and Venezuela, "Hydrocarbons in Crystalline Rocks" published by The Geological Society, London, special publication 214, 84-92
7. Nakashima K. (2004), Petroleum Potential in the East Siberian Region, web-site of The Institute of Energy Economics, Japan (IEEJ)
8. 中島敬史 (2004), 東シベリアの石油地質ポテンシャル, 研究レポートおよび第5回研究報告討論会 (2004年7月14日開催) 資料, 財団法人日本エネルギー経済研究所ホームページ 04年7月
9. 中島敬史 (2004), 東シベリアの地質と石油資源ポテンシャル, ペトロテック, 27巻, 11号, p16-21
10. 中島敬史 (2005), 東シベリア地域の地質と石油資源ポテンシャル, エネルギー経済, 31巻, 2号, p52-71
11. 中島敬史 (2005), 東シベリアの石油資源ポテンシャル, 石油技術協会誌, 70巻, 2号, p132-141
12. 中島敬史 (2005), 無機起源石油・天然ガスが日本を救う!?! -地球深層ガス説の新展開-, 石油・天然ガスレビュー, 39巻, 3号, p13-24
13. 中島敬史 (2005), 石油起源に関する議論の復活、無機起源説 vs.有機成因説 -2005年6月開催の米国石油地質家協会 (AAPG) 年次総会-, 財団法人日本エネルギー経済研究所ホームページ 2005年6月
14. 中島敬史 (2005), 石油の起源に関する論争が復活、「非生物由来」に新たな研究報告, 日経エコロジー 2005年8月号, p12
15. Petford N. and McCaffrey K.J.W. (edited) (2003), Hydrocarbons in Crystalline Rocks, Special Publication 214, The Geological Society, London, 242p
16. Potter J. and Konnerup-Madsen J. (2003), A review of the occurrence and origin of abiogenic hydrocarbons in igneous rocks, "Hydrocarbons in Crystalline Rocks" published by The Geological Society, London, special publication 214, 151-173
17. Schutter S. R. (2003), Hydrocarbon occurrence and exploration in and around igneous rocks, "Hydrocarbons in Crystalline Rocks" published by The Geological Society, London, special

- publication 214, 7-33
18. Scott H. P. *et al.* (2004), Generation of methane in the Earth's mantle: In situ high pressure – temperature measurements of carbonate reduction, PNAS, Sept. 28, 2004, Vol. 101, no. 39, 14023-14026, online publish
  19. Sherwood-Lollar B. *et al.* (2002), Abiogenic formation of Alkanes in the earth's crust as a minor source for global hydrocarbon reservoirs, Nature, 416, 522-524
  20. Szatmari P. (1989), Petroleum formation by Fischer-Tropsch synthesis in platetectonics, AAPG Bulletin, 73 (8), 989-998