報 告

貯留層地化学の開発・生産への応用*

加藤 進**・西田 英毅***

(Received September 5, 2007 ; accepted November 9, 2007)

Reservoir geochemistry and its application to development and production for petroleum

Susumu Kato and Hideki Nishita

Abstract : Reservoir geochemistry, which studies the compositional variations of petroleum reservoir fluids at a variety of spatial and temporal scales, provides information about details of reservoir filling and leakage, and about petroleum mixing and alteration. This information is useful not only for exploration but also for development and production, and gives us insights not available from other methods.

Our study carried out in the Higashi-niigata gas field clearly shows that reservoir geochemistry using light hydrocarbons is effective for assessing reservoir continuity and charge mixing.

We recommend a routine geochemical analysis of reservoir fluids during production.

Key words : reservoir geochemistry, compositional variation, production, Higashi-niigata gas field, reservoir continuity, charge mixing

1. はじめに

貯留層地化学は 1980 年代後半から発展してきた石油地化学の一分野であり、貯留層中の流体（ガス・原油・地層水）の不均質性、特に地化学的性状の変化を検知し、その原因を解明することで、石油の移動・集積メカニズムを理解し、それを石油の探鉱・開発・生産に活用することを目的としている (England and Later, 2004)。貯留層流体が必ずしも均質ではないことは古くから知られていたが、貯留層流体の組成変化の原因やその応用について言及したのは比較的最近である (例えば, Slenz, 1981; England *et al.*, 1987)。地化学的性状の変化はいろいろな時間的・空間的スケールで起こっており、そこから貯留層への石油の充填と逸散、石油の混合と変質などの情報

を得ることが可能である。

本稿では、主に原油を対象にして、基礎的な地化学性状と最近の貯留層地化学の動向を概説し、ケーススタディとして東新潟ガス田を取り上げて、貯留層地化学の具体的な応用例を述べることにする。

2. 原油の組成と貯留層地化学

原油は炭化水素を主成分とするが、硫黄、酸素、窒素をヘテロ原子として含有する化合物も含んでいる極めて複雑な混合物である。炭化水素はアルカン（パラフィン系炭化水素）、シクロアルカン（ナフテン系炭化水素）および芳香族炭化水素からなる（図 1）。

原油の性状は、根源岩中の有機物の質や熟成度の違いなどの生成プロセス、根源岩や貯留層中での移動・集積プロセス、トラップに集積した後での変質プロセスなどの多くの要因によって影響を受ける（図 2）。原油－根源岩対比では、移動・集積プロセスや変質プロセスの影響をほとんど受けない成分（例えば、炭素数の大きいステランなどのバイオマーカー）が利用されている。一方、貯留層地化学では、移動・集積プロセスや変質プロセスの影響を受けやすい成分（炭素数の小さいガスや軽質炭化水素）を利用して、貯留層の連続性などを検討する（加

* 平成 19 年 6 月 6 日, 平成 19 年度石油技術協会春季講演会 開発・生産部門シンポジウム「油ガス層評価のためのデータの最大活用」で講演 This paper was presented at the 2007 JAPT Development and Production Technology Symposium entitled "Full utilization of various data for better reservoir evaluation" held in Yoyogi, Tokyo, Japan, June 6, 2007.

** 株式会社地球科学総合研究所 JGI, Inc.

*** 石油資源開発株式会社技術研究所 JAPEx Research Center

図1 原油の組成 (Hunt (1996) から作成)

図2 原油の性状に影響を及ぼす要因
(Blanc and Connan (1993) に基づいて作成)

図3 炭素数と主な熟成度指標

藤, 2002a; 図3)。

最近の貯留層地化学分野のトピックスとして、原油の熟成度が用いる熟成度指標によって異なることや、移動・集積は必ずしも一度ではないことを挙げることができる (England and Later, 2004)。原油の熟成度指標の代表的なものとして以下のものがある。

- 1) C_{29} ステランの $20S/(20S + 20R)$ 比
- 2) $Ts/(Ts + Tm)$ 比
- 3) プリスタン (Pr) / nC_{17} 比およびフィタン (Ph) / nC_{18} 比
- 4) 芳香族炭化水素のメチルフェナントレン組成: MPI1 や MPR など
- 5) 軽質炭化水素組成

1) と 2) は環状バイオマーカーであり, 3) は鎖状バイオマーカーである。

Wilhelms and Later (2004) によれば, 彼らの原油データではステラン, メチルフェナントレン, および軽質炭化水素から推定した熟成度の平均値は, ビトリナイト反射率 (R_o) 換算でそれぞれ 0.69%, 0.82%, 0.97% であり, 明らかに炭素数の小さい熟成度指標ほど高い熟成度を示している。このことは, 熟成の進行に伴って生成される原油が, 炭素数の大きい成分から小さい成分へと変化することや, 生成プロセスが連続的であることと調和的である。したがって, 熟成度指標で用いた成分が原油のどの部分を, あるいはどの程度代表しているかを考慮することが必要であることを示している。

3. 東新潟ガス田の貯留層地化学

1959 年 (昭和 34 年) に発見された東新潟ガス田には, 西山層から寺泊層にかけて多くのガス層が発達しており, 椎谷層最上部の 2900m 層が主要ガス層である (図 4)。2900 m 層は上位から, 2900 mA 層, 2900 mB 層, 2900 mC 層および 2900 mD 層に細分され, 最上位の 2900 mA 層にはリングオイルが発達している。1986 年以降, このリングオイルを対象に開発井が掘削されており, 現在 MS-46 まで掘削されている。2900 mA 層はさらに上位から, 2900 mA₀, 2900 mA, 2900 mA₃, 2900 mA₄ に細分されている。この 2900 mA 層を中心に, 原油の一般性状 (API 比重と硫黄分) および軽質炭化水素組成に基づいて, リングオイルの成因やコンパートメント化について検討した。

3.1 試料, 分析方法およびパラメータ

16 坑井から採取した 2900 mA 層の原油試料を分析した。このほかに比較のために, 2900 mB 層などから採取した原油試料も分析した。原油試料は API 比重と硫黄分を測定した。原油 100 ml を蒸留し, 沸点 125°C 以下の軽質留分をガスクロマトグラフ (HP5890B) で分析した。軽質炭化水素組成では, 平塚 (1976) が提案した, 沸点が類似した異なる分子タイプの比を用いる 3 つのパラメータが有用であることが, これまでの経験から分かっている (加藤, 1993)。これらのパラメータは, 次のように定義されている。

図4 東新潟ガス田の層序および位置

進化度指数: $nC_7/1tr3DMCP$ (沸点: 98/92°C)

DMCP: ジメチルシクロペンタン

環境指数: トルエン/MCH (110/101°C)

MCH: メチルシクロヘキサン

水蝕度指数: $2,3DMP/nC_7$ (89/98°C)

DMP: ジメチルペンタン

特に、進化度指数と環境指数のクロスプロットは原油の熟成度、微生物分解、上方移動の推定に有効である (図5)。

3.2 分析誤差および試料ごとの誤差

装置の分析誤差や試料ごとの誤差を検討するために、同じ試料の繰り返し分析や、ほぼ同時期に採取した試料の分析結果を表1に示す。これらの試料はDSTや仕上げテスト時に採取された試料である。試料によってはAPI比重、進化度指数および環境指数がかなりばらつく場合があり (例えばMS-34, MS-45, MS-46)、できる限り複数の試料を採取・分析することが必要である。

保存試料を同じ坑井、同じガス層から採取した試料と比較したものを表2に示す。油層であるNS-4を除き、いずれも保存試料のAPI比重は小さく、進化度指数や環境指数も明らかに小さくなっている。API比重と軽質留分の割合を見ると (図6)、ほぼ同じAPI比重で比較すると、多くの場合保存試料の軽質留分が少なくなっている。これは保存期間中に軽質留分が逸散したためと推定され、軽質炭化水素組成の検討では、保存試料の分析データは利用しないことにする。

進化度指数 ($nC_7/1tr3DMCP$)

図5 進化度指数－環境指数プロット

3.3 API比重と硫黄分

2900 mA 層原油のうち、ガス油比が $1,000 \text{ m}^3/\text{kl}$ 未満の油層から産出する原油は軽質原油や中質原油に分類さ

表1 繰り返し分析に基づく分析および試料ごとの誤差

坑井名	試料 番号 (N)	ガス層	一般性状		軽質炭化水素組成		
			API 比重 (度)	硫黄分 (wt%)	進化度 指数	環境 指数	水蝕度 指数
東新潟 MS-34	323	2900 mA ₄	49.7	0.05	2.98	0.57	0.11
	324		54.0	0.04	3.16	0.73	0.10
MS-41a	482	2900 mA ₄	37.7	0.19	1.93	0.32	0.17
	483		38.0	0.20	1.94	0.32	0.17
	484	2900 mA	49.0	0.08	2.47	0.40	0.14
	485		49.9	0.08	2.47	0.39	0.15
MS-43	523	2900 mA ₃	39.5	0.16	2.29	0.44	0.15
	524		39.1	0.16	2.21	0.43	0.15
MS-44*	542	2900 mA	39.0	0.16	2.03	0.33	0.17
	542				2.06	0.33	0.16
MS-45	653	2900 mA ₄	40.6	0.16	2.32	0.50	0.15
	654	2900 mA ₄	38.7	0.17	2.18	0.45	0.16
	655	2900 mA ₄ +A	39.0	0.16	2.23	0.47	0.15
	656	2900 mA	39.0	0.16	2.23	0.48	0.15
MS-46	679	2900 mA	55.2	0.03	2.76	0.56	0.13
	680		59.0	0.02	2.79	0.54	0.13

*MS-44 は同じ試料を時間を置いて分析

れ、それらの坑井は構造の北東部に位置している（図7）。2900 mA 層以深の油・ガス層から採取した原油の API 比重と硫黄分の関係を図8に示す。2900 mA 層以外の原油の硫黄分は 0.01 ~ 0.02 wt% であるのに対し、2900 mA 層の原油の硫黄分は大きく変化しており、API 比重が小さくなると増加する明瞭な傾向が認められ、これは熟成度の違いを反映していると考えられる。

3.4 進化度指数と環境指数

原油の進化度指数と環境指数との間には正相関が認められ（図9）、熟成度の違いを反映していると推定される。2900 mB 層の原油は右上に比較的集中しており、その中には 2900 mA 層や 2900 mC 層、2900 mD 層の一部の原油も入っている。これに対し、2900 mA 層の原油は大きく分散しており、原油の熟成度が大きく変化していることを示唆している。

2900 mA 層の原油を詳しくみると、多くの場合坑井ごとにほぼ同じ位置にプロットされており、油層はガス層に比べ熟成度が低い（図9）。しかし、MS-41a では 2900 mA と 2900 mA₄ の原油は明らかに異なった位置にプロットされており、これらが別プールであることを示唆して

いる。一方、MS-43 と MS-45 では、2900 mA と 2900 mA₄ あるいは 2900 mA₃、A₄ の原油はほぼ同じ位置にプロットされており、これらが同じプールであるか、あるいは導通していることを示唆している。

3.5 進化度指数と API 比重

原油の熟成度指標であり、軽質留分とバルクの異なる部分を代表している進化度指数と、API 比重のクロスプロットを図10に示す。ほとんどの原油は API 比重が大きくなるとともに進化度指数が増加しており、その右上の端に 2900 mB 層の原油を中心とするグループが位置している。このグループに対し、2900 mD 層やより下位のガス層の原油は進化度指数が大きく、API 比重が小さい傾向が認められる。この API 比重の減少は芳香族炭化水素の割合が増加するためと推定される。また、このプロットでは 2900 mD 層の原油が2つのグループに分かれているが、同じことは進化度指数と環境指数のプロット（図9）でも認められることから、2900 mD 層は2つのプールに分かれていると推定されるが、このことは圧力データからも支持されている（加藤, 2002b）。

2900 mA 層の原油を詳しくみると、幾つかのグループ

表 2 長期間の試料保存の影響

坑井名	試料番号 (N)	ガス層	一般性状		軽質炭化水素組成		
			API 比重 (度)	硫黄分 (wt%)	進化度 指数	環境 指数	水蝕度 指数
東新潟 NS-4	052	2340 m	44.3	0.09	2.94	0.70	0.13
	432		43.4	0.11	3.01	0.74	0.13
NS-6	051	2900 mB	51.4	0.02	3.10	0.65	0.13
	458		55.2	0.02	3.37	0.92	0.12
NS-13	043	2900 mB	41.4	0.05	2.73	0.24	0.20
	439		57.4	0.02	3.44	1.01	0.12
	044	2900 mD	40.6	0.07	2.58	0.20	0.21
	521		51.8	0.01	3.69	0.98	0.11
NS-16	047	2900 mC or D	53.9	0.01	3.20	0.76	0.13
	433	2900 mC (+ D)	56.2	0.01	3.38	0.91	0.12
	434	2900 mD (+ C)	55.6	0.02	3.38	0.94	0.12
NS-10	050	3100 m	50.9	0.04	3.22	0.92	0.13
	451		45.1	0.02	3.92	1.14	0.10

上段：保存試料

API比重

図 6 API 比重と軽質留分の関係

図 7 軽質・中質原油の分布

に細分できる。油層はひとつのトレンドを有しているが、MS-41a, MS-44, MS-43, MS-45 と MS-33, MS-39 の 2 つのサブグループ (D1, D2) に細分される。ガス層は少なくとも 3 つのグループに分かれ、それらは MS-41a (2900 mA) のみ (C), MS-30, MS-28, MS-34, MS-35 のグループ (B), そしてその他のグループ (A) である。これら

API比重

図8 東新潟ガス田における原油の API 比重と硫黄分の関係

の平面的な分布を図 11 に示す。D2 が北側に分布し、A が南を中心に北へ伸び、その周りに B や D1、C が分布している。このような分布は、北方から移動してきた熟成度の低い油と、深部から移動してきた熟成度の高いガス（コンデンセート）の混合で説明できる。このことはガスのメタンの炭素同位体組成（ $\delta^{13}\text{C}_1$ ）の分布からも支持される（加藤，2002b）。

3.6 生産に伴う組成変化

同じ坑井の同じ貯留層から、繰り返し試料を採取・分析することによって、生産に伴って原油の組成がどのように変化するかを把握することができるが、まだこのような報告はほとんど見かけない。進化度指数と環境指数の生産に伴う変化をみると、生産に伴って両指数が減少する傾向は認められるようであるが、必ずしもすべての坑井で同じ傾向とは言えない（図 12）。今後、さらにデータの蓄積が必要である。

3.7 まとめ

原油の貯留層地化学から明らかになったことを整理すると、以下のようになる。

(1) 2900 mA 層

- ・ MS-41a では 2900 mA と 2900 mA₄ の原油は異なってお

進化度指数
($n\text{C}_7/\text{1tr3DMCP}$)

図9 東新潟ガス田における原油の進化度指数と環境指数の関係

り、これらは別プールである可能性が高い。

- ・ MS-43、MS-45 では 2900 mA と 2900 mA₄ あるいは 2900 mA₃、A₄ は同じ原油であり、これらは同じプールであるか、あるいは導通していると推定される。
 - ・ 大きな組成変化は、北方より移動してきた熟成度の低い油が、深部から移動してきたガス（コンデンセート）と混合しているためと推定される。
- (2) 2900 mB 層は軽質炭化水素組成が最も均質であり、1つのプールであると推定される。
 - (3) 2900 mD 層は軽質炭化水素組成に違いが認められることから、2つのプールからなる可能性が高い。

4. おわりに

原油の軽質炭化水素組成は、一般性状など他の成分のデータも活用することによって、貯留層の連続性を判定することに利用することが可能であり、入れ物としての貯留層ではなく、周囲の坑井と同じプールであるのかど

進化度指数 ($nC_7/1tr3DMCP$)

図 10 東新潟ガス田における原油の API 比重と進化度指数の関係

図 11 2900mA 層の原油グループの平面的な分布

うかという流体そのものの坑井対比や、DST などのテスト時の評価、例えば複数の貯留層がある場合にはそれらがひとつのプールであるのかどうかなどを判定することに役立つであろう。また、生産に伴う軽質炭化水素組

進化度指数 ($nC_7/1tr3DMCP$)

図 12 生産に伴う進化度指数と環境指数の変化

成の変化は、モニタリングツールとして利用できる可能性もある。

東新潟ガス田の例では、原油の一般性状と軽質炭化水素組成に的を絞って述べたが、ガスの炭素同位体組成も非常に有益なデータを提供している（加藤，2002b；早稲田・岩野，2007）。地下の貯留層の状況は直接観察することは難しいので、できるだけ多くの間接的なデータを取得して、貯留層を総合的に解析することが重要である。したがって、テスト時の流体試料の採取・地化学分析は当然実施すべきであるが、坑底圧測定などと同様に、定期的な流体試料の採取・地化学分析をルーチンとして実施することを強く推奨したい。

謝 辞

資料の公表を許可された石油資源開発株式会社および三菱ガス化学株式会社に深謝します。東新潟ガス田の貯留層地化学は、平成 11 年度に石油公団（現独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構）石油開発技術センターの委託研究として実施した成果を基に、最近の掘削成果を加えて再検討した。石油資源開発株式会社において、原油やガスの地化学分析を担当している加藤恵悦、早稲田 周、岩野裕継の各社員、東新潟ガス田の貯留層について教えていただいた同社開発本部金子賢嗣社

員に感謝します。

引用文献

- Blanc, Ph. and Connan, J., 1993 : Crude oils in reservoirs : the factors influencing their composition. *Applied Petroleum Geochemistry*, 151–172.
- England, W. A. and Larter, S., 2004 : Introduction. In Cubitt, J. M., England, W. A. and Larter, S. eds. : *Understanding Petroleum Reservoirs : towards an Integrated Reservoir Engineering and Geochemical Approach*, Geological Society, London, Special Publications, **237**, 1–5.
- England, W. A., Mackenzie, A. S., Mann, D. M. and Quigley, T. M., 1987 : The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface. *Jour. Geol. Soc. London*, **144**, 327–347.
- Hunt, J. M., 1996 : *Petroleum Geochemistry and Geology* (2nd ed.). 39, W. H. Freeman.
- 平塚隆治, 1976 : 石油の生成および進化の地化学的考察—後報 油の進化, 変質—. 石技誌, **41** (6), 338–350.
- 加藤 進, 1993 : 本邦の油・コンデンセートの軽質炭化水素組成. 石技誌, **58** (3), 209–217.
- 加藤 進, 2002a : 貯留層地化学. 石技誌, **67** (2), 240–245.
- 加藤 進, 2002b : ガス層の貯留層地化学. 天然ガス 2002, No. 6, 14–24.
- Slenz, L. W., 1981 : Geochemistry of reservoir fluids as a unique approach to optimum reservoir management. *SPE Middle East Technical Conference, Paper 9582*, 37–50.
- Wilhelms, A. and Larter, S., 2004 : Shaken but not always stirred. Impact of petroleum charge mixing on reservoir geochemistry. In Cubitt, J. M., England, W. A. and Larter, S. eds. : *Understanding Petroleum Reservoirs : towards an Integrated Reservoir Engineering and Geochemical Approach*, Geological Society, London, Special Publications, **237**, 27–35.
- 早稲田 周・岩野 裕継, 2007 : ガス炭素同位体組成による貯留層評価. 石技誌, **72** (6), 585–593.