報 告

勇払ガス層におけるコンデンセートリッチガスの挙動*

藤 本 光 宏**

(Received August 11, 2006 ; accepted November 9, 2006)

Behavior of condensate rich gas in Yufutsu gas reservoir

Mitsuhiro Fujimoto

Abstract : Yufutsu gas condensate field has a fractured reservoir which consists of conglomerate and granite. It contains condensate-rich gas. We observed some strange fluid behaviors. Production gas oil ratio ranges from 900 m³/k/ to 1,900 m³/k/ according to production area where reservoir depth is different. Gas production started ten years ago. At the early stage of the production, gas oil ratio decreased with time. This trend is opposite from normal behavior of a gas condensate reservoir. Also, we observed that heavy gas existed on light gas in a tubing at a specific well.

In order to explain such strange phenomena, we introduced a thermal diffusion theory in 1999 and 2000 by a support of Japan National Oil Corporation (currently JOGMEC). The reservoir is approximately from 4,000 m to 5,000 m deep and 1,000 m thick. So, pressure and temperature are varying in a wide range with the reservoir depth. Gas compositions at the top and the bottom of the reservoir are so different that methane, the lightest component, tends to increase with depth and temperature due to the thermal diffusion effect, because methane has larger thermal diffusion coefficient than the other heavier gas components. We expect that this assumption could explain the strange fluid behaviors.

This paper reviews the above phenomena and the theory and reports current effort to increase condensate recovery using gas cycling scheme.

Key words : condensate-rich gas, Yufutsu field, fractured reservoir, thermal diffusion, gas oil ratio, gas cycling

1. はじめに

勇払ガス田は、平成 8 年初頭から生産を開始し、現在まで約 10 年間の生産を行っているが、生産開始当初から南勇払構造の坑井にて生産ガス油比がコンスタントに低下していく挙動が観察された。これは当初想定していた一般的なガスコンデンセート層の挙動と大きく異な

り、過去に報告された事例がなく、既存の理論では説明が困難な挙動であった。また、坑井内ガス密度の逆転、地域（深度）によるガス油比の違いなどのいくつかの不可思議な現象・挙動も確認された。これらの現象を理論的に解明するために平成 11 ～ 12 年度にわたり、石油公団（現 JOGMEC）の操業ニーズ支援にて調査を実施した。その結果、PVT テストの結果から想定される勇払の貯留層の状態では温度差に起因する熱拡散（thermal diffusion）の影響が支配的となり、深度とともにメタンの割合が増加する特異な現象が生じることで、前述の挙動をある程度再現可能であることが判明した。

2. 勇払ガス田概要

勇払ガス田の貯留層は、世界的にも珍しい白亜紀花崗岩ならびに古第三紀石狩層群礫岩層が主要貯留岩となっ

*平成 18 年 6 月 1 日、平成 18 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「特色ある貯留層流体に関する技術」で講演 This paper was presented at the 2006 JAPT Development and Production Technology Symposium entitled "Technologies on unique reservoir fluid" held in Sendai, Miyagi, Japan, June 1, 2006.

**石油資源開発株式会社 Development Division, Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

ているガスコンデンセート層であり、貯留層の層厚が非常に厚いため、同一貯留層内で深度により温度・圧力が大きく異なっている。貯留層は深度 3,800 m 以深に分布しており、大局的には馬の鞍状のホルスト構造にある沼ノ端とあけぼの構造、一段下がった部分にある南勇払構造の 3 つからなっている（図 1）。

貯留層を構成する岩石は一般的に堅硬緻密でマトリックスの孔隙率は小さく、浸透率も低い、内部にフラクチャーが発達している。炭化水素は主に、このフラクチャー部に胚胎しており、また、生産もフラクチャーを通して行われていると考えられている。フラクチャーについては、垂直・水平方向のいずれも不均質であり、フラクチャーの分布については依然不明な点が多く存在する。

生産される炭化水素の起源は、石炭と同じ植物性有機物と考えられている。天然ガスはメタン、エタンを主成分とし、1%程度の窒素ガスを含む以外は、硫化水素や二酸化炭素などの酸性腐食性ガスを含んでおらず、非常に良質なガスである。一方、コンデンセートリッチなガス層であるため、天然ガスに付随して多くのコンデンセートを産出し、ガス田全体の平均的な初期生産ガス油比は 1,400 ~ 1,600 m³/kl 程度であった。コンデンセートの性状はパラフィン系の比重 0.8 程度の軽質油で、ワックス分を十数%含み、流動点が 27℃と高いため、生産処理時に加温が必要なことが難点となっている（図 2）。

3. 勇払ガス田における不可思議な現象と挙動

勇払ガス田では、現在まで約 10 年間生産を継続してきたが、その間に通常のガス田では見られない以下に述べる 2 つの不可思議な現象と挙動に直面した。

① 生産開始当初、主として南勇払の 1 坑井から生産を行っていたが、この坑井において、生産ガス油比がコンスタントに低下していく挙動が観察された。具体的には、生産開始当初、約 1,400 m³/kl であった生産ガス油比が、コンスタントに約 900 m³/kl まで低下した（図 3）。

また、平成 11 年 11 月から南勇払構造で別坑井からも生産を開始したが、この坑井においても、生産ガス油比がコンスタントに低下していく挙動が観察された。すなわち、生産ガス油比の低下という挙動は、特定の坑井のみにおいて見られた特異な挙動ではなく、南勇払構造の複数の坑井で確認された挙動ということである。

通常ガスコンデンセート層では、生産開始後、生産ガス油比は増加する。これは生産に伴い圧力が低下し、飽和圧力（露点圧力）を下回って、貯留層内でコンデンセートがレトログレードして液化する。この状態のコンデンセートはある飽和率（臨界油飽和率）に達するまで流動しないため、それまでガスに含まれて地上に産出されていたコンデンセートが

図 1 勇払油ガス田構造

●産出天然ガスの成分(腐食性ガス含まず)

- CH₄: 85%
- C₂H₆: 8%
- C₃H₈: 3%
- C₄H₁₀～C₆H₁₄: 3%
- N₂ : 1%
- H₂S & CO₂ : 0%

● 産出原油 (ガスコンデンセート)の性状

- 軽質原油 (42～45° API)
- 約15% ワックス(パラフィン)分を含む
- 高流動(曇り)点原油: +27°C(+42°C)
- ガス油比(初期): 1400～1600m³/KL

[貯留層コア]

図2 勇払ガス田概要(流体)

図3 南勇払坑井の累計生産量に対するガス油比推移

貯留層内に取り残され、生産ガス油比は増加する。さらに、レトログレードしたコンデンセートの飽和率が臨界油飽和率を越えると、コンデンセートは流動し始めるが、ガスの易動度がコンデンセートの易動度よりも大きい場合、ガスの方がコンデンセートよりも流れやすく、生産ガス油比は引き続き増加する。このような挙動が一般的である。

- ② 次に直面した不可思議な現象は、坑口密閉状態で坑内圧力測定したとき、坑井内の圧力勾配が、ある深度で深でいったん大きくなり、貯留層に近づくにつれて再び小さくなるという逆転現象である(図4)。

具体的には、坑口から2,500 m 付近までは、圧力勾配は 0.35 MPa/100 m 程度でほぼ一定である

が、2,500 m 以深で圧力勾配はいったん 0.5 ～ 0.6 MPa/100 m 程度まで大きくなる。それ以深、貯留層に近づくにつれて圧力勾配は 0.35 MPa/100 m 程度まで再び小さくなる。

特徴的なのは、長期間密閉している坑井において、この流体の圧力勾配が経時変化していない点である。すなわち、この圧力勾配の分布は過渡期の現象ではなく、定常的な現象ということである。これを密度で考えると、重い流体が軽い流体の間に安定して存在することを意味する。なおこの現象については、密閉でチュービング上部にあったコンデンセートが下がってきたというような過渡的現象が起こったわけではないと判断されている。このような現象が過去に報告された事例は見当たらない。これら

図4 チューピング内の圧力勾配の推移（圧力勾配逆転現象）

の現象は通常のフローシミュレーターでは再現することが困難であり、その理論的な説明が急務であった。

4. 熱拡散理論の導入

この現象を理論的に説明するために熱拡散理論を導入した。熱拡散とは2成分以上からなる系に温度勾配がある場合、系の各成分はその温度勾配にしたがって、重い成分が低温側に移動し、軽い成分が高温側に移動して、系のなかに濃度勾配が形成される物理現象である（図5）。

多成分の挙動については、主に3つの力が作用してい

る。通常は重力分離の影響が支配的であり、分子の密度差によって重い分子ほど深い方に多く存在する。したがって、通常密度の軽いメタンは浅い方に多く存在する。しかし、厚い貯留層では深い方の温度が高いため、熱拡散が起こるとメタンには高温側に移動する力が働き、メタンの割合は深度とともに増加する傾向が生じる。

一方、分子拡散はこの2つの力によって生じた濃度差を均質化しようとして働く。貯留層内の炭化水素分子は、組成・温度・圧力によって、これら3つの力が影響を及ぼす程度が変化し、そのバランスによって各成分の移動の方向が決まる。勇払ガス田では層厚が厚く、貯留層上部と下部の温度差が大きいため、熱拡散の影響が大きく現れるモデルを導入することによって、チューピング内の密度逆転現象をある程度理論的に表現することができた。

しかしながら、ガス油比の低下現象については、依然説明されていない点も多く、現在も研究中である。ガス油比については、南勇払構造では生産とともにその低下が見られたが、沼ノ端およびあけぼの構造ではガス油比低下は観察されていない。また、南勇払構造と比較して深度が浅い沼ノ端およびあけぼの構造では反対にガス油比が高く、前述したチューピング内ガス密度逆転現象は現れていない（図6）。これは熱拡散で重い成分が貯留層上位に多く、軽い成分が下位に多いという仮定と逆で

図5 多成分系内、メタン分子での拡散の働き

図6 地域（深度）による生産ガス油比の違い

ある。

これに対しては、水平方向の温度勾配が異なることが影響しているのではないかと解釈している。つまり、同一深度では、沼ノ端およびあけぼの貯留層の温度が南勇払貯留層の温度よりも高いので、同一深度における組成は、温度の高い沼ノ端およびあけぼの構造の方が南勇払構造よりも軽い成分が多くなると考えている。なお、これまでの研究で貯留層の初期状態が油層であるかガス層であるかについては、ガス油比の挙動にほとんど影響を与えないことが分かった。臨界点の近くでは、ほんの少しの組成の変化でガス層にも、油層にもなりうる。具体的には、温度を約1℃変化させただけで、臨界点近くの流体は、ガス相から油相に変化する。

5. コンデンセート回収率増大への取り組み

勇払ガス田の貯留層内では、シミュレーションモデルによる計算ならびに PVT 試験の結果から、生産開始後すぐに油飽和率の増加することが予想された。

ここで懸念される事項は、以下の2点である。

- ① 坑井近傍にコンデンセートが取り残されると、コンデンセートバンキングのため、ガスの相対浸透率が小さくなり、ガスの流れが阻害され、ガスの産出能力が大幅に減少する可能性があること。
 - ② 貯留層内にコンデンセートが残留することによって、コンデンセートの回収率が低くなること。
- これらに対しては以下のような対策および検討を行っている。

コンデンセートバンキングの影響を予測するため、シングルウェルモデルを使ったスタディを実施して、生産

挙動を検討した。シングルウェルモデルは図7のような二次元放射状流断面モデルであって、坑井を中心に半径方向に7分割し、垂直方向に13分割した。生産量、坑底圧とガス油比が実際の坑井のデータに合うようにシミュレーションのパラメーターを設定した。勇払ガス田の貯留層はフラクチャータイプであるため、フラクチャー内の流速は速い。したがって、ある程度大きなガスレートで生産すると、ペロシティ・ストリッピングの効果によって臨界油飽和率が下がり、坑井近傍でレトログレードしたコンデンセートがガスで吹き飛ばされるため、流路となるフラクチャー内ではコンデンセートバンキングが起りにくいことが示唆された。

また、実際の生産挙動でも、コンデンセートバンキングの影響は、今のところ確認されていない。

さらに、このシングルウェルモデルで将来予測をした結果、坑井周辺のコンデンセートはペロシティ・ストリッピングによって、地上に生産されることに加え、垂直方向のフラクチャーが発達していることから、コンデンセートはフラクチャー内を落下し、坑井周辺にはほとんど留まらない可能性が高いことも判明した（図8）。したがって、コンデンセートリッチではあるが、コンデンセートバンキングによる生産能力の低下は起りにくいものと考えている。

次にコンデンセートの貯留層内残留の問題に対しては、コンデンセートの回収率改善策を検討している。具体的な対策としては、現在ガスサイクリングによるコンデンセートの回収を考えている。ガスサイクリングとは、ガスとコンデンセートを生産し、地上でコンデンセートを分離した後、販売ガス以外のドライガスを貯留層に再

Velocity Strippingの有無とガス油比挙動

図7 シングルウェルモデルとシミュレーションの結果

図8 シングルウェルモデルによるシミュレーション結果概念

び圧入することによって、貯留層圧力を高く維持し、地下でコンデンセートが大量に凝縮する前に、コンデンセートをガスとともに回収する手法である（図9）。シミュレーションによると、早期のガス圧入開始によって、累計油生産量の増加が可能となることが分かった。

また、この手法による経済性を検討した結果、十分に経済性のあることが判明したため、現在早期実施に向けて検討を重ねている。さらに、以下の問題を解決する必要がある、検討作業を実施中である。

- ① 圧入井と生産井の間に直接導通性のあるフラクチャーが存在する場合には、ガスサイクリングの効果が著しく低下する可能性がある。したがって、導通の度合いを確認するために、似た圧力挙動を示し、コミュニケーションがよいと考えられる生産井と圧入候補井の間で、干渉テストを行う。
- ② フラクチャー型貯留層では、フラクチャーとマトリックス間の成分移動が小さいと、ガスサイクリン

図9 コンデンセート回収プロジェクトの概念図

グの効率が低い可能性はあるが、分子拡散が大きい場合には、マトリックスとフラクチャーの間で濃度の均質化が起りやすく、回収率が向上する可能性がある。これらのメカニズムについては、現在海外

のコンサルタントに研究を依頼し、基礎的な実験などを実施している。

6. 最 後 に

以上、勇払ガス田のガスおよびコンデンセートの貯留層内挙動ならびに生産挙動の特徴を説明し、今後の課題として、ガスサイクリングによるコンデンセートの回収率向上を目指していることを報告した。特殊な流体挙動の背景には、フラクチャー貯留層自体の不確かな特性や、厚い貯留層で上下の温度差が大きいという条件など、複雑な要因が絡んでいるので、さらなるデータ収集、モデル構築、検討作業が必要である。本報告は、過去に公表された論文などを元に記述したので、末尾に参考文献として紹介する。

参 考 文 献

- 1) Ghorayeb, K., Anraku, T. and Firoozabadi, A., 2000 : Interpretation of the Fluid Distribution and GOR Behavior in the Yufutsu Fractured Gas-Condensate Field, *paper SPE 59437 Presented at SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management, 25-26 April, Yokohama, Japan.*
- 2) Ghorayeb, K., Firoozabadi, A. and Anraku, T., 2002 : Modeling of the Unusual GOR Performance in a Fractured Gas-Condensate Reservoir, *paper SPE 75258 Presented at SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, 13-17 April, Tulsa, Oklahoma.*
- 3) Tamagawa, T., Matsuura, T., Anraku, T., Tezuka, K. and Namikawa, T., 2002 : Construction of Fracture Network Model Using Static and Dynamic Data, *paper SPE 77741 Presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 29 September-2 October, San Antonio, Texas.*
- 4) 吾妻高志・横井 悟・稲葉 充, 1996 : 北海道勇払地域におけるフラクチャー解析. 石技誌, **61**, 45-50.
- 5) 寒河井正・青山栄享, 1998 : 先進技術と新しい発想による北海道勇払の天然ガスおよびコンデンセートの開発. 石技誌, **63**, 105-110.
- 6) 藤井 健, 森谷信明, 1998 : 勇払開発 10 年の歩み. 石技誌, **63**, 369-375.
- 7) 松裏 達彦・手塚 和彦・玉川 哲也, 2003 : 静的, および動的データを用いたフラクチャーモデリング. 石技誌, **68**, 479-488.