論 文

火山岩貯留層のモデリングとフローシミュレーション：
多点法地球統計学と確率摂動法の応用*

山田 知己**・岡野 祥之***

(Received August 26, 2005 ; accepted January 13, 2006)

**Modeling and flow simulation of a volcanic reservoir:
Application of multi-point geostatistics and probability perturbation theories to a real field**

Tomomi Yamada and Yoshiyuki Okano

Abstract : A domestic gas field was modeled and flow-simulated. Its reservoir body comprises stacked rhyolite lava domes erupted under submarine environment. Porous network developed inside and chilling by seawater formed hyaloclastite to deposit around it. Although hyaloclastite is also porous, its permeability has been dramatically reduced by clay minerals. Impermeable basaltic sheets and mud seams are also present. Each facies plays a specific role in the pressure system of the field.

Stratigraphic correlation originally identified multiple reservoirs. Gas has been produced according to priority assigned to each, assuming that it is sealed from others. However, it is noticed by now that pressures of unexploited units have also declined with variety of rates. In addition, some unusual local pressure behaviors have been recorded. It was decided to re-model the whole pressure system to reasonably explain these observations.

Combination of multi-point geostatistics and probability perturbation theories was employed. It successfully reproduced non-linear features of stacked lava domes, while allowing pressure data for controlling geo-body distributions in larger scale. A common difficulty of building a proper training image, further pronounced for a volcanic reservoir, was solved by iteratively adjusting its prototype until the number of perturbations for history matching was minimized. Ambiguous reservoir boundary, due to lava growth in random directions, was stochastically represented by populating a predetermined modeling space with both pay and non-pay pixels.

Resulted realizations closely simulate pressure history to every detail and look realistic in facies distribution. They ascribe the uneven pressure decline between different units to tortuous flow channels connecting them. They also uncovered the cause of the unusual smaller-scale pressure performances. OGIP evaluated by 20 equally probable realizations stay within $\pm 15\%$ around the mean. Incremental recovery by adding a new well indicates wider scatter than that by installing a booster compressor, which quantifies geological risk associated to it.

Key words : volcanic reservoir, multi-point geostatistics, probability perturbation, uncertainty quantification

1. はじめに

火山岩貯留層の貯留層工学的な挙動は、溶岩体における孔隙発達のある方と密接に関連する。本章では流紋岩での孔隙発達のメカニズムから想起された、当ガス田のモデリングとシミュレーションスタディに関する技術的な課題を述べる。

溶岩は、特に海底で噴出した場合、水冷によって破碎

* 平成 17 年 6 月 1 日、平成 17 年度石油技術協会春季講演会、地質・探鉱部門シンポジウム「多様な貯留層を対象にした特性解析技術の進展」で講演 This paper was presented at the 2005 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Recent progress in characterization and analysis for various types of reservoirs" held in Tokyo, Japan, on June 1, 2005.

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

*** 日本海洋石油資源開発株式会社 Japex Offshore Ltd.

図1 流紋岩の溶岩ドーム概念図
(McPhie and Allen, 1992 を改変)

されるため、油・ガスの貯留岩になりやすいと考えられる。マグマは海底面に達すると溶岩ドームとなり、その内部にはガス成分が分離して気泡が形成され、外面は溶岩自身の流動と海水による急冷によってひび割れる。外面のひび割れが進むと溶岩は破碎し、ドームを取り囲むようにハイアロクラスタイトが堆積し、その一部は再動して、さらに周囲遠方に再堆積する。図1¹⁾はそうした流紋岩ドームの概念図である。

当ガス田で溶岩ドームを成す流紋岩は10%前後の孔隙率と1 md程度の浸透率を持ち、主たる貯留岩となっている。一般的には、個々の溶岩ドームには数十～百m程度の高さと数百m程度の広がりがあり、外面はひび割れていると考えられるが、当ガス田では二重孔隙を示唆する圧力挙動は観察されていない。こうした溶岩ドームが折り重なってできた複合岩体は、横方向に厚さが激しく変化するため、近隣坑井間でも生産能力が大きくばらつく。このような複合岩体がさらにいくつか集まって、当ガス田を形成していると思われる。

当ガス田の流紋岩質ハイアロクラスタイトはドーム内部の溶岩相に匹敵する孔隙率を持つものの、変質作用で形成された粘土鉱物の影響で浸透率が数桁低い。そのためガスの生産中には、個々の岩体の連続性や大きさにより、ガスの流れを制約することもある。圧力減退が周囲より遅れることにより、局所的な圧力供給源にもなり得る。粘性の低い玄武岩も、数十m程度の厚さで数kmの範囲にシート状に定置しているが、当ガス田では非浸透性で、特に構造の翼部で卓越している。非貯留岩であって横方向に連続性が良いことから、玄武岩は垂直方向の圧力伝播を妨げる効果が強いと見られる。当ガス田の圧力システムを正しく説明するには、流紋岩以外のこれらの岩体の役割も、適切にモデリングすることがカギとなる。なお貯留層の上下には非浸透性の泥岩が堆積しており、モデリング上は玄武岩と泥岩を合わせて「非貯留岩」と呼ぶことにする。

図2 坑井間対比とユニット区分

図3 各坑井の密閉圧ヒストリー

2. 経緯

当ガス田では開発当初、堆積岩と同様に坑井間対比が行われ、検層カーブの形や区間毎の岩相比率などを手掛かりに、複数のユニットに区分された(図2参照)。貯留層管理上それらは互いに独立したものとして取り扱われ、生産能力の高いユニットを優先に、坑井#1-#3などが連続生産されてきた。その間ほぼ全坑井で密閉圧が定期測定されてきたが(図3)、開発後15年目頃から、ほとんど生産していない坑井#4の圧力減退が目立ち始め、同様の変化が次第に他の密閉井にも広がった。現在までにすべての密閉井で圧力減退が確認されているが、圧力の落ち方にはユニット間で大きなばらつきがある。一方シミュレーションスタディはこの間も繰り返されたが、モデルは各ユニットを独立と仮定したままだったので、連続生産しているユニットの圧力変化を再現するには、非現実的に強い水押しを想定しなければならなかった。

これらのことから、モデリングされた領域の外部からガスが流入し、貯留層圧力を補填していることが強く疑われた。地域への天然ガス供給上の要求からも、こうした圧力挙動を矛盾なく説明できる貯留層モデルの作成が急務となっていた。

また図3からは、近接する連続生産井（坑井 #1-3）の間にも、相当の圧力差があることが分かる。さらに坑井 #1 の圧力履歴は、最後の1点で上昇に転じている。この区間内で数カ月間密閉したためと見られるが、ユニット全体の圧力は一貫して低下していることから、局所的なコンパートメントから圧力が供給された可能性が高い。いずれも火山岩貯留層特有の圧力的連続性を反映したものと見られ、それらを合理的に説明することも課題であった。

3. 貯留層スタディの手法

ガス田全体が圧力的つながりを持つと分かったが、岩相変化が激しいために、坑井間対比によってユニット間の連続性を推定することができず、また震探データからの解釈も困難と判断された。そこで圧力履歴を最大限に活用すべく、溶岩ドーム集合体の再現に適すると見込んだ多点法地球統計学の手法を、動的データを拘束条件としてストカスティックモデリングする確率摂動法に組み込んだアルゴリズム²⁾を採用した。

地球統計学は、複数地点での物性の類似性が、それらの相対配置に関連することに着目し、分布の場をモデリングする。そのなかで、2点間の類似性を関数（バリオグラム）化して取り扱う二点法に対し、3点以上の相関性に着目したものを多点法と呼ぶ。多点法のストカスティックシミュレーションは、バリオグラムに代わって貯留層地質の概念図（訓練像）を直接用いる³⁾ので、より複雑な貯留岩分布のモデリングに適している。特に曲面に沿った空間分布を取り扱うには3点以上の情報が必要なため、多点法地球統計学は、河川性の砂の蛇行や、溶岩ドームなどのモデリングに威力を発揮する。本スタディでは、次パラグラフで述べるアルゴリズムのなかで、検層からの岩相解釈を「硬い情報（ハードデータ）」とし、折り重なる溶岩ドームの概念図を訓練像として、多点法のストカスティックシミュレーションを行った（図4）。ここで白はドーム内部の流紋岩溶岩、薄めの灰色はハイアロクラスタイト、黒は非貯留岩を表す。具現像の水平断面からは、ハイアロクラスタイトが流紋岩ドームを囲む様子が再現されているのが分かる。従来の二点法では、非現実的な仮定をいくつも設けなければ、モデリングできなかった岩相分布である。

確率摂動法は、訓練像が与える地質構造を損なうこと

図4 多点法地球統計学のストカスティックシミュレーション

なく具現像を変形し、ヒストリーマッチングさせるアルゴリズムである（図5）。ピクセルベースの地球統計学は「すべての地点には固有の、各岩相の発生確率が定義される」と考えるが、1つの具現像もそうした確率分布マップの極端な（各岩相の出現確率がすべて0か1の）ケースと見る事ができる。もう一方の極として、岩相

図5 確率摂動法による具現像変形のアルゴリズム

ごとにすべての地点が同じ出現確率（領域全体で地質的に想定される、各々の岩相の平均的な出現比率）を持つ、つまり先程の具現像からの情報を一切含まないマップが準備できる。確率摂動法はこれら両極端なものを内挿していくつかの確率分布マップを描き、それらを「軟らかい情報（ソフトデータ）」として、ストカスティックシミュレーションを行うものである。その結果、先程の具現像の影響を次第に薄めた、複数の新たな具現像が得られる。これらすべての絵をフローシミュレーションに投入（内反復）して生産履歴に最も近いものを選び、それを再び「極端な確率マップ」とする（外反復）というプロセスを反復し、生産履歴に近づけていく。この間、一貫して同じ「硬いデータ」と訓練像が使われるため、モデリングしようとする地質構造のイメージが維持されるのである。

ストカスティックシミュレーションは、1つの確率分布マップ（ソフトデータ）を使って多数の具現像を描けるが、履歴マッチングの目的では、もとの具現像と局所的傾向の似た（しかしその影響度をコントロールした）新たな具現像を描く必要がある。そのため内反復では「ランダムシード（1つの具現像を描くための乱数列。具現像同志はランダムシードだけが違うので確率的に等価）」を1つ設定して固定し、それぞれの確率分布マップに対し1つだけ具現像を描くのである。したがって内反復の回数は、内挿で得られた確率分布マップの個数プラス2回（「両極端なマップ」の分）となる。内反復によって履歴マッチを改善する具現像が1つも得られない場合は、別のランダムシードを設定して内反復を再開する。つまりランダムシードを設定することで、もとの具現像を摂動する方向を決め、それで履歴マッチが改善されなければ、新たに別の方向を設定して摂動（内反復）を繰り返すのである。

このアルゴリズムでは、生産履歴とのマッチングは、フローシミュレーション結果と実測値との差の単調増加関数（目的関数）を反復によって極小化する、いわゆる最適化問題として取り扱われる。したがって他の最適化問題と同様に、反復のたびに目的関数が減るとは限らず、また局所的な最小値（Local Minimum）に陥り、何回反復してもそれ以上変化しなくなることもありうる。さらに訓練像や各岩相の貯留層物性の与え方が不適切であれば、許容できる履歴マッチングに至らないであろう。そのため本スタディでは、後に述べるように訓練像の設定に相当の試行錯誤を繰り返した。また各岩相の孔隙率や浸透率はそれぞれ1つの値で代表させ、貯留層の不均質性はもっぱら岩相分布に支配されるものとしたが、これらの値もモデル上の圧力挙動を見ながら、コア分析からの値に若干の修正を加えた。しかしながら最適化のアルゴリズム自体に起因する、目的関数が停滞するなどの問題は起こらなかった。その理由の1つには、本スタディの履歴マッチングは主に圧力を対象とするものなので、技術的に比較的容易だったことも挙げられよう。

なお複数の「履歴マッチされた具現像」は、確率摂動のアルゴリズムに最初に投入する「もとの具現像」を入れ替える、すなわち最初のストカスティックシミュレーションのランダムシードを変えることによって得られる。

この手法による、本スタディでの履歴マッチ状況の一例を図6に示す。このアルゴリズムは、シミュレートされた圧力が実測値に近づくように具現像を変形していくが、最初広くばら撒かれていた溶岩ドームが、次第に集まって複合岩体に成長し、貯留層全体が形作られるのが分かる。圧力データはこのプロセスの原動力として作用し、具現像に「非正常性（局所性を持つ統計的性質）」

摂動前

摂動2回目

摂動5回目

摂動16回(完了)

図6 確率摂動法による具現像変形とヒストリーマッチ

を加える役割を持っていたと理解できる。

このように、圧力ヒストリーが具現像の変形に大きく影響した理由は、訓練像が与えた地質的な「対比可能距

離」と、数十年の生産による坑井からの「圧力影響範囲」の大小関係にある。すなわち坑井位置で流紋岩が見られた場合、それを含む溶岩ドームの大きさは数百 m 程度

なので、さらに遠くの岩相はコントロールできない。ところが長年の生産により、坑井の圧力は数 km 先の岩相分布にまで影響されている。逆に考えれば、坑井圧力データによるコントロールは数 km の範囲に及ぶことになる。そのため静的なデータのみを使って描かれた最初の「定常的（統計的な物性が一様）な」具現像は、圧力データによってさらに数 km 規模の空間的構造を印加されるのである。このスケールはフィールド全体の大きさに匹敵することから、先述のように「非正常性」を導入したことになる。もし貯留層流体が重質油であれば、あるいは生産履歴が数週間程度と短ければ、坑井圧力のコントロールできる範囲は狭いため、圧力履歴による具現像の変形はごくわずかであつたろう。

4. 理論の実用化にあたって

提唱された理論を実在のフィールドに適用するにあたっては、相当の工夫を要した。

まず多点法地球統計学を実用する際の共通の悩みが、適切な訓練像の準備である。特に火山岩貯留層の場合は、溶岩ドームの集合体の概念図を描ける規模の露頭が見当たらず、またその統計量（個々の火口間の距離、噴出岩体個々の容積分布、貯留層全体での岩相比率などの統計データ）は文献にもほとんど見つからない。そこでまず、これら統計量に任意の値や分布を与えた、訓練像の原型を準備した（図 7-1）。それを確率摂動法のアルゴリズムに投入し、できるだけ少ない変形回数でヒストリーマッチングが得られるように、これらの統計量を試行錯誤的に調整した。変形回数がより少なくて済むということは、それだけ訓練像が貯留層地質の実態に近いと考えたのである。最終的に得られた訓練像（図 7-2）は、その原型と比べて特に岩相比率が大きく変わっている。しかしながら、次節で述べるようなモデリング空間を考慮すれば、合理的な変化といえる。

次に、溶岩ドームの成長によって形成された貯留層の外縁は複雑に入り組んでおり、坑井間対比などから一義的には決定できないという、火山岩貯留層に固有の問題がある。これを解決するにあたっては、貯留層全体が十分に収まる大きさの「モデリング空間」を用意し、ストカスティックシミュレーションによって、これを孔隙質・非孔隙質の両方の岩相で埋め尽くすことにした。その結果、図 8 に示すような、複雑に入り組んだ外縁を持つ貯留層の絵を、多数描き出すことができた。情報のない事象を「決定」しようとするのではなく、共通の空間統計を持つ具現像を多数作ることによって、それが「分からない」ことを考慮に入れた生産挙動や経済性を、確率的に定量化することにしたのである。なお「モデリング空間」

図 7-1 訓練像の原型
(上：水平断面，下：垂直断面)

図 7-2 最終的な訓練像
(上：水平断面，下：垂直断面)

図 7 反復近似的に作成された訓練像

図 8 貯留層外縁の確率論的なモデリング

間」を埋めるには貯留層の外側にも非孔隙質のピクセルを撒かなければならない。そのため全体では孔隙質の岩相の比率が下がることになり、前述のような訓練像の変化となったのである。

5. ヒストリーマッチの結果と具現像

確率摂動法によるヒストリーマッチングは、ユニット間の圧力干渉の強弱のみならず、各坑井の圧力履歴の細部まで再現することに成功した。前述した 2 点、すなわち連続生産している近接 3 坑井（坑井 #1-#3）の圧力コントラストと坑井 #1 の履歴の最後の圧力上昇（図 6）は、薄く広がるハイアロクラスタイトがガスの流れを遮ったことと、圧力減退の遅れたハイアロクラスタイト相や孤立した溶岩相から、坑井周辺に流体が供給されたことで、それぞれ説明された。こうした岩相分布のパターンは訓練像によって与えられる。前章で述べたように、それ自体が試行錯誤の結果得られたものだが、最終的に

図 9-1 外部からの鳥瞰図

図 10 2003 年現在の圧力分布推定

図 9-2 モデルの内部

図 9-3 図 9-1 の矢印部分の拡大

図 9 ヒストリーマッチ後の具現像の 1 つ

でき上がった訓練像は、こうした圧力システムを再現できるだけの空間統計を捉えたといえる。

こうしてヒストリーマッチされた具現像の 1 つを図 9 に示す。外側から見るとハイアロクラスタイト相が優勢に見えるが、その内部は溶岩相が中核を占めることが分かる。これは火山岩体が外部から急冷されたことを良く反映している。また巨視的には、複数の複合岩体が連続性良く分布しているように見えるが、詳しく見れば、それらは非常に縞れたフローチャンネルを介してつなが

ているのが分かる (図 9-3)。そのためにシミュレートされた圧力は、複合岩体の境界で大きく変化する階段状の分布を示しており (図 10)、それがユニット間の圧力のばらつきとして観測されたことが分かった。

同一の静的・動的な情報を説明できる貯留層の絵は無数に描けるが、地球統計学のストカスティックシミュレーションは、理論上等確率で出現し得る具現像を、いくつでも作ることができる。この「等価性」は、多数の具現像による評価値の振れ幅を、そのまま確率分布に変換することを可能にする。本スタディでは、最終決定した訓練像を使って、20 のヒストリーマッチされた具現像を作り (そのうちのいくつかを図 11 に示す)、鉱量評価や将来予測を確率論的に行った。

6. 確率的な鉱量評価と将来予測

ヒストリーマッチされた 20 具現像から得られた原始鉱量の分布を図 12 に示す。これは平均値で除した値のヒストグラムで、ばらつき具合を表現するものだが、すべての具現像からの評価値が $\pm 15\%$ 程度の範囲に収まっていることが分かる。仮に 21 番目の具現像がその外に出たとしても、「95% 強の確率で $\pm 15\%$ の範囲にある」といった定量的な判断ができよう。数十年の生産履歴を持つガス田でもなお、原始鉱量にこれだけの不確定性が残ることは、火山岩貯留層の評価の難しさを示すものといえる。

さまざまの投資に対し、その効果の不確定性も評価された。図 13 は予め指定したロケーションに開発井を掘削した場合と、中央基地にブースターコンプレッサーを設置してガス井にかかる背圧を下げた場合の、追加可採鉱量のヒストグラムで、それぞれの平均値に対して無次元化してある。新掘ケースの追加鉱量の方が大きくばら

図 11 ヒストリーマッチ後の具現像

ついているが、これは地質リスクが定量化されたものと理解できる。ガス生産量の減退予測も 20 とおりできるので、それぞれをキャッシュフローに変換すれば、割引現在価値や内部利益率といった経済性指標も、確率分布として評価できる。経済性評価の期待値が同程度の事業であっても、不確定性の大きいものと小さいものでは、おのずと戦略的な位置付けが異なってくる。ここに示し

た「不確定性を定量化する」という考え方と手法は、そうした企業戦略の組み立てにも、大きく貢献するであろう。

7. 結 論

1. あるガス田について、火山岩貯留層の岩相分布と圧力システムが、多点法地球統計学と確率摂動法

図 12 無次元化された原始鉱量分布

の組み合わせによつて的確にモデリングされ、細部に至るまで良くヒストリーマッチングされた。

2. 確率摂動法による具現像変形の過程では、広範囲の空間的構造を反映する坑井圧力履歴のデータが、溶岩ドーム同士を引き付け、より大きな複合岩体に成長させ、貯留層の全体像を形成させる方向に作用した。
3. 折り重なる溶岩ドームの訓練像は、ヒストリーマッチングに要する確率摂動の回数を極小化する様、試行錯誤的に決定された。その結果、近隣坑井間の圧力コントラストや局所的な圧力供給をもたらすような、地質体の空間統計を、訓練像のなかに捉えることができた。
4. 予測の難しい、複雑に入り組んだ火山岩貯留層の外縁は、あらかじめ準備したモデリング空間を、ストカスティックシミュレーションによつて孔隙質・非孔隙質双方の岩相で埋め尽くすことによつて、確率的に表現された。
5. 最終決定された訓練像を使い、ヒストリーマッチされた20の具現像を作った。これらによる原始鉱量は $\pm 15\%$ の範囲にばらついた。また、開発井掘削による追加鉱量は、地質リスクのために、昇圧

図 13 異なる投資による可採鉱量の増分

コンプレッサー設置によるそれより不確実性が大きいということが、定量的に示された。

謝 辞

本稿の公表を許可した石油資源開発㈱に謝意を表す。本スタディでは及川 透氏、近藤和也氏ならびに山田泰生氏に、流紋岩貯留層の地質に関する、貴重な助言を継続的にいただいた。シミュレーションによるケーススタディの一部は中川裕幸氏に協力を仰いだ。諸氏のご厚情に対し、ここに厚くお礼申し上げる。

引 用 文 献

- 1 McPhie, J. and Allen, R.L., 1992 : Facies architecture of mineralized submarine volcanic sequences : Cambrian Mount Read Volcanics, Western Tasmania. *Econ. Geol.*, **87**, 587-596.
- 2 Caers J., 2002 : "History matching under training-image based geological model constraints", Report No.15, Stanford Center for Reservoir Forecasting, May 2002.
- 3 Strebelle, S., 2000 : "Sequential simulation drawing structures from training images", vol.1, Report No.13, Stanford Center for Reservoir Forecasting, May 2000.