報 告

生産予測・可採埋蔵量の振れ幅の評価*

田 中 弘 樹**

(Received July 16, 2001; accepted November 9, 2001)

Evaluation for uncertainty range of reserves
estimate and production forecast

Hiroki Tanaka

Abstract: The classical deterministic approach subjectively treats the uncertainty range based on sensitivity analysis. The probabilistic approach is able to deliver quantified probability (distribution) for the possible outcomes of the process in question. This is a major advantage and allows the use of the results for the formal decision process.

At the prospect evaluation stage, the expected reserves are usually estimated by a Monte Carlo analysis but the production profiles are somewhat problematic. In this paper, parametric production profile modeling is proposed to help the evaluation. The proposed approach is a correlative method. A representative data-set of historical reserves and production data for the producing fields of a basin are taken, and a series of four statistically acceptable correlations that will be subsequently used to predict the main parameters of a production forecast are developed. The four good correlations (reserves vs. peak flow rate, reserves vs. plateau production volume, reserves vs. decline rate and reserves vs. producing wells) are developed and the proposed method is proved to be a reasonable and justifiable one.

At the production stage, a deterministic approach is commonly applied to evaluate the reserves. In this paper, recent probabilistic methods are introduced. Probabilistic methods available for uncertainty analysis range from full stochastic reservoir modeling, to very simplistic modeling and analytic propagation of errors. The full stochastic approach has been given up as a practical proposition due to the requirement of the large amount of manpower and computer resources. The dominating practice can be characterized as probabilistic post-processing of sensitivity data generated by reservoir simulation. A simplified reservoir model is constructed from such sensitivity data, e.g., by linear regression, typically to predict recovery (reserves) as a function of the uncertain input data. Next, this simplified reservoir model is used in a Monte Carlo analysis to produce a probability distribution for reserves.

Key words: deterministic approach, probabilistic approach, uncertainty, reserves, production profile

* 平成13年 5 月31日, 平成13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・ガス田開発のリスク評価」で講演 This Paper was presented at the 2001 JAPT Development and Production Technology Symposium entitled "Risk evaluation in development of oil and gas fields" held in Makuhari, Chiba, Japan, May 31, 2001.

** 石油公団技術部 Japan National Oil Corporation, Technical Department

1. はじめに

生産挙動の評価手法としては、探鉱中の未発見構造に対しては確率論的概念を用いた評価手法が近年広く用いられている。一方、既発見構造に対しては決定論的手法が主流であるが、近年では確率論的手法も導入されつつある。決定論的手法では油田のリスクやポテンシャルを定量的に評価することには限界がある。確率論的手法を

図1 3 ケースの期待可採埋蔵量に対する NPV の算出

図2 北海 (North Sea Basin) についての相関図

用いて、生産挙動を振れ幅をもって評価することにより、リスクを定量的に評価できる。ここでは確率論的手法を用いた生産予測・可採埋蔵量の振れ幅の評価手法について述べる。

2. 未発見構造における生産シナリオ立案手法

リスクを反映させた経済性指標として代表的なものには期待貨幣価値 (EMV: Expected Monetary Value)

図 3-1

図 3-2

図 3-3

図 3 相関式から計算される生産プロファイルの比較

があり、これはある投資に対する収支の数学的期待値である。石油公団においても探鉱プロジェクトのリスク評価の指標として EMV（石油公団では期待現在価値＝ENPV：Expected Net Present Value と呼んでいる）を用いている。EMV を算出するために、3 ケースの期

待可採埋蔵量に対する生産シナリオを作成し、それぞれのケースの現在価値（NPV：Net Present Value）を算出している。図 1 にその概念図を示す。

未開発構造における期待可採埋蔵量の振れ幅については、通常モンテカルロシミュレーションによって評価される。ここで算出された各ケース（パーセンタイル）の可採埋蔵量に対する生産シナリオの想定に際し、これまでは評価者の主観によるものが少なからず存在し、一貫性のある評価手法とは言い難いものであった。そこで客観的かつ簡便な評価手法の確立が必要であると考え、統計データに基づいたパラメトリックな評価手法が適用可能であるかどうか検討した。

2.1 検討内容

2.1.1 データの収集・解析

北海で原油の生産実績のある油田を対象として、石油公団が所有する各種データベースを用いて、原始埋蔵量、可採埋蔵量、油層面積、坑井数、孔隙率、浸透率、原油比重、ガス油比、生産ヒストリー、開発費、操業費などのデータを収集した。また、生産ヒストリーをグラフ化し、生産挙動を解析することにより、ピークレート、プラトール期間、プラトール期間回収量、減退率を求めた。

2.1.2 相関式の作成

収集・解析したデータを用いて、主要な項目ごとの相関関係について調べた。これらのうち、相関関係が認められ、かつ生産プロファイルを作成するために必要な次の 4 組の相関式を作成した。

- ① 可採埋蔵量－坑井数
- ② 可採埋蔵量－ピークレート
- ③ 可採埋蔵量－プラトール期間回収量
- ④ 可採埋蔵量－減退率

上記のうち②、③、④の相関式を求めることができれば、ある可採埋蔵量に対する生産プロファイルを作成することが可能となる。また、①の生産井数については、生産プロファイルの作成には直接には関係ないが、開発計画の策定の際には必要となる。北海（North Sea Basin）についての相関図を図 2 に示す。

2.1.3 相関式の妥当性の検証

相関式の妥当性を検証するために、北海における公団関連プロジェクトのこれまでの生産ヒストリーおよび現在の生産予測と、相関式から計算される生産プロファイルと比較した。その一例を図 3 に示す。本図から、相関式より計算される生産プロファイルは、おおむねこれまでの生産ヒストリーおよび現在の生産予測とマッチしていることが分かる。

また、坑井数の実績と、相関式から計算される坑井数

についても比較した。その一例を図4に示す。本図から、相関式より計算される坑井数は実績より多くなっている。開発に必要とされる坑井数については、近年の掘削・仕上げ技術の進歩に伴って減少してきており、また公団関連プロジェクトの油田は比較的最近開発されたものが多く、そのために相関式より計算される坑井数が実績を上回ったものと考えられる。

2.2 検討結果

検証の結果、相関式から計算される生産プロファイルは、未開発構造の生産予測の精度としては許容できるものであることが分かった。また、本手法について海外の石油開発会社26社にインタビュー調査を行ったところ、否定的な意見は特に聞かれなかった。したがって、未開発構造の経済性評価に用いる生産予測に本手法を適用でき、それにより客観的で一貫性を持った評価ができるものとする。

なお、北海以外についての相関式についても検討を行ったので、これらの一例としてオーストラリア北西大陸棚 (Carnarvon Basin)、インドネシア (Baram Basin)、南シナ海 (Malay Basin) についての相関図を図5～7に示す。

2.3 今後の課題

今後の課題としては、以下のようなことが挙げられる。これらの点についてさらに検討を加え、本手法を改良していきたい。

- ・統計的に扱うのに十分なデータ数が必要であり、対象地域・油層は限られる。データ数の限られているフロンティア地域においては、本手法をどのように応用していけば良いのか。

- ・実現可能な掘削スケジュールを考慮して、ピークレートに達するまでのビルドアップ期間を設ける必要がある。
- ・必要とされる坑井数については、近年の掘削技術の進歩に伴って減少してきており、統計データとの乖離が見られる。サンプルの抽出方法に工夫が必要である。

図8に、今後石油公団が開発する計画である未開発構造の生産シナリオ立案手法に関するソフトウェアの概念図を示す。

3. 既発見構造における確率論的手法による生産予測

既発見構造においては、将来の生産挙動を予測し可採埋蔵量を評価する際に、油層シミュレーションを用いた決定論的な手法が広く用いられている。この手法で生産挙動の不確実性を評価する時には、通常はベースケースの他に悲観的および楽観的な油層パラメータを設定して、ローケース、ハイケースの生産プロファイルを作成する。しかし、これらのケースは主観的に決められたものであり、生産挙動の不確実性を十分に反映していたか疑問が残る。

一方、近年導入されつつある確率論的な手法では各パラメータの不確実性を直接取り込むことができ、評価における主観性を除去することができる。そして、それぞれの油田のもつリスクやポテンシャルを定量的に評価することができる。そこで、確率論的評価手法の現状についての調査を行った。

図4 相関式から計算される坑井数の比較

図5 オーストラリア北西大陸棚 (Carnarvon Basin) についての相関図

図6 インドネシア (Baram Basin) についての相関図

図7 南シナ海 (Malay Basin) についての相関図

1,2,3: Incorporating Probability Analysis based on Monte-Carlo Methods

図8 生産シナリオ立案手法に関するソフトウェアの概念図

3.1 地質統計学的モデル

生産挙動の不確実性を扱う方法として、地質統計学的なモデリング (Stochastic Reservoir Modeling) がある。通常は、リアライゼーションにより複数の地質モデルが作り出されるが、これらすべてが地質的不確実性を表す。地質統計学的モデルの長所として、以下の点挙げられる。

- ・データの空間的分散を取り入れることができる。
- ・ハードデータやソフトデータなど、異なった種類のデータを取り込むことができる。
- ・新しいデータが得られた際、モデルのアップデートが容易である。

地質統計学的モデルを用いて生産予測を行うには、多数のリアライゼーションを行い、作られたそれぞれの地質モデルに対しアップスケーリングを行ってフローシミュレーションを実施する。しかし、これには多大な労力と時間が必要であり、現実的とはいえない。地質統計学的モデルを用いた生産予測のワークフロー概念図を図9に示す。

3.2 単純化油層モデル

生産挙動の不確実性を定量化するために、実際には単純なスカラーモデルが用いられることが多い。モデルが単純であると、モンテカルロ計算ループの中に組み入れやすくなる。

3.2.1 乗積モデル

最も簡単な乗積モデルは原始埋蔵量を求める式で、次のように表される。

$$\text{原始埋蔵量} = \text{集油面積} \cdot \text{ネットペイ} \cdot \text{孔隙率} \\ \cdot \text{油飽和率} \cdot \text{容積係数}$$

各パラメータの確率分布から、モンテカルロ法によって簡単に原始埋蔵量を計算することができる。また、回収率を求める時にも乗積モデルが用いられる。

$$RF_{total} = RF_{ref} \cdot RF_{aq} \cdot RF_{kv} \cdot RF_{seal} \cdot RF_{kr}$$

例えば、回収率に及ぼす影響の大きい油層パラメータがアキファー (aq)、垂直方向の浸透率 (kv)、断層のシール能力 ($seal$)、相対浸透率 (kr) であった場合、標準モデルの回収率 (RF_{ref}) にこれらの補正係数を乗じて全体の回収率 (RF_{total}) の確率分布を求める。通常これらの補正係数は、油層シミュレーションの感度分析結果から、確率分布を作成している。

乗積モデルは単純ではあるが、パラメータ間に従属性が必要となることもある。その場合、各パラメータ間の従属性を十分検討する必要がある。

3.2.2 応答曲面モデル

一般に n 個の変数 ($x_1, x_2, \dots, x_n$) と p 個の定数 ($a_1, a_2, \dots, a_p$) の応答曲面は関数

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n, a_1, a_2, \dots, a_p)$$

で表される。これを用いると、変数 ($x_1, x_2, \dots, x_n$) とは不確実性をもつパラメータであるアキファー (aq)、垂直浸透率 (kv)、断層のシール能力 ($seal$) などであり、定数 ($a_1, a_2, \dots, a_p$) は求めるべき定数である。定数が定まれば、パラメータによる可採埋蔵量への影響を評価することができる。通常はこれらの定数 ($a_1, a_2, \dots, a_p$) は、油層シミュレーションの感度分析結果を用いて、多変数の線形回帰によって求める。

$$E = a_1 + a_2(aq - aq_b) + a_3(kv - kv_b) \\ + a_4(seal - seal_b)$$

3.3 生産プロファイルのモデリング

3.3.1 パラメトリックな手法

パラメトリックな手法は、可採埋蔵量、ビルドアップ期間、ピークレート、プラトール期間回収量、減退率などのパラメータを用いて生産プロファイルを表す。このモデルは単純であるため、簡単にモンテカルロ計算に組み入れることができる。このモデルで最も重要なのは、各パラメータの確率分布をどう与えるかである。それには統計データを用いるのが理想ではあるが、そのようなデータベースを持っていることはまれであり、主観的に与えることが多い。

3.3.2 減退曲線法

減退曲線は油生産量と時間または累計生産量の関係を表す単純な式である。減退率は実際の生産ヒストリーから求め、その値を将来の生産予測に用いる。減退曲線法は簡単な手法であるため広く用いられている。減退曲線のパラメータは、油層性状や開発方法に大きく影響を受ける。

図9 地質統計学的モデルを用いた生産予測のワークフロー

3.3.3 解析的な手法

解析的な手法は、油層シミュレーションと減退曲線法の中間的なもので、ある程度の物理学的な要素を含んだ評価方法である。代表的なものとして次のような方法が挙げられる。

- ・物質収支法
- ・Buckley-Levelett タイプの解析
- ・垂直平衡タイプの解析

これらの手法を適用する際には、生産履歴あるいは油層シミュレーション結果との比較・検討が必要である。

3.3.4 油層シミュレーション

これまで述べてきた単純化モデルも、モンテカルロ計算を行うためには結局多くの油層シミュレーションが必要であった。そこで、油層シミュレーションを行うものの、その回数を減らすことがよく行われている。例えば生産挙動に及ぼす影響の大きい4つのパラメータについてそれぞれ3ケース設定して、合計 $3^4=81$ のリアライゼーションを作り、それに基づいて評価する。

この方法は地質統計学的モデリングとモンテカルロ法との折衷的なものとなっている。単純化モデルよりは正確な予測ができるが、油層シミュレーションを何度も行わなければならない。図10に油層シミュレーション結果に基づく回収率の確率分布を示す。

3.3.5 確率論的生産プロファイル

生産プロファイルの確率分布評価は非常に難しい。例えばP90挙動と言ってもその明確な定義はなく、また挙動のランク付けも困難である。実際には以下のような方法が用いられている。

- ・P90埋蔵量を生産するようなプロファイルを主観的に選ぶ。

に選ぶ。

- ・ベースケースのプロファイルがある場合、P90埋蔵量を生産するようなプロファイルにベースケースのプロファイルをスケリングする。
- ・P90埋蔵量を生産するようなプロファイルについて、2つの極端なケースを主観的に選ぶ。すなわちプロファイルの不確実性の幅を選ぶ。
- ・P90パーセンタイルのプロファイルを選ぶ。

どの方法もP90のプロファイルを正確には表してはいないが、最初の2つの方法がよく用いられている。

3.4 確率論的手法の問題点

単純化油層モデルを用いた生産予測のワークフロー概念図を図11に示す。生産挙動に影響を及ぼすパラメータの抽出には、油層シミュレーションの感度分析が行われる場合が多い。図12に感度分析結果であるトルネードチャートの一例を示す。

生産挙動の不確実性を定量評価するのに確率論的手法は有用であるが、現状では次のような問題点があると考えられる。

- ・入力パラメータの不確実性を過小評価しがちであり、結果として生産実績が評価した不確実性の範囲に収まらないことが少なくない。
- ・入力パラメータの確率分布やパラメータ間の従属性を与えるのは主観的になってしまうことが多い。
- ・確率論的手法は可採埋蔵量評価が主な目的であり、生産プロファイルを予測することは難しい。

4. ま と め

一般に感覚的な不確実性の幅は狭いものであり、決定論的手法では油田の持つリスクやポテンシャルを定量的

図10 油層シミュレーション結果に基づく回収率の確率分布

図11 単純化油層モデルを用いた生産予測のワークフロー

図12 生産挙動に影響を及ぼすパラメータ例

に評価することには限界がある。

生産挙動の評価手法としては、探鉱中の未発見構造に対しては確率論的概念を用いた評価手法が近年広く用いられている。生産プロファイルについては主観的に作成されることが多いが、統計データに基づいたパラメトリックな手法によって生産プロファイルを作成することにより、客観的で一貫性のある評価を行うことができる。

既発見構造における生産挙動の評価手法としては、油層シミュレーションを用いた決定論的な手法が広く用いられているが、生産挙動の不確実性は十分に評価されて

はない。確率論的な手法では各パラメータの不確実性を直接取り込むことができ、評価における主観性を除去することができる。

地質統計学的モデルを用いるには多大な労力がかかり現実的ではない。そこで現在では単純化油層モデルを用いてモンテカルロ計算によって不確実性を定量評価するのが一般的である。今後確率論的な手法によって評価を行うにあたっては、次のような事項が重要であると考え

- ・考えられる可能性は極力取り込んで、十分に幅広い不確実性をもった入力パラメータにする。
- ・実際のフィールドデータから統計データベースを作り、これを入力データの分布や従属性に反映させる。
- ・予測と実績を比較検討し、経験を評価に反映させるシステムを確立する。

参考文献

- 石油公団, 2001: 平成12年度技術動向調査「未開発構造の生産シナリオ立案手法標準化に関する調査」調査報告書, 石油公団。
- 石油公団, 2001: 平成12年度技術動向調査「既発見油田における油層挙動の確率論的評価手法に関する調査」調査報告書, 石油公団。