多層アンカー仕上げ坑井の産量推定シミュレーター*

田 崎 義 行**

(平成元年7月31日受付, 9月8日受理)

A Simulator to Predict Production Rates of Long Perforated-Pipes Wells

By

Tazaki YOSHIYUKI

Abstract: The deposits of Minami Kanto gas field is very thick and reserves amount of methane and iodine. Production wells are completed with long perforated pipes. Most of these wells are tubingless and the artificial lift method is continuous gas lift.

I have developed a simulator which is formed with a three dimensional, two-phase double porosity reservoir model and a gas lift program. Using this simulator, production rates of wells can be predicted and production tests are analized exactly.

1. はじめに

南関東ガス田の鉱床を形成する上総層群は未固結な砂岩と泥岩の互層であり、そこにメタンとよう素を溶解したかん水が存在する。この鉱床から水溶性ガスとよう素を営利的に採取するには大量のかん水を汲み上げる必要があり、採取方法として水中電動ポンプ又はガスリフトを使う。坑井は一般に長孔明管といわれる数百メートル以上の長さを持つアンカーパイプで多層を同時に仕上げている。

複数の層から同時に生産するとき、地層の圧力とガスの飽和率、浸透率、有効層厚といったパラメータが各層で異なるため生産量の予測が困難であった。また、仕上げ層の重複する生産井や圧入井の干渉により貯留層内での流れが複雑となり、それが生産量に大きく影響する。そこで貯留層から坑井そしてフローラインを通りセパレーターに達する水ガス2相の流れの圧力損失を計算し、貯留層の排出エネルギー及び坑井の生産能力にあった各仕上げ層からの水とガスの産出量を求めるシミュレーターを開発した。

このシミュレーターは田崎(1988)が南関東ガス田を

対象として開発した3次元2相でダブルポロシティ・タイプの貯留層モデルと外吹き込み方式ガスリフトのプログラムを組み合わせたものである。外吹き込み方式ガスリフトのプログラムについては杉原(1987)紹介している。

ここでは多層アンカー仕上げの坑井に外吹き込み方式でガスリフトを掛けるといった南関東ガス田独特の採取方法とその機構を数値モデル化したシミュレーターについて概要を説明する。さらにシミュレーターの使用例として生産量の予測、坑井の設計そして坑井テストの解析を行う。

2. 採取方法

水溶性ガス田でかん水を汲み上げる方法として主なものに水中電動ポンプとガスリフトの2種類がある。水中電動ポンプは通常型ガス田によく使われる。通常型ガス田ではガス水比が溶解ガス水比に近い小さな値で、ガスの絡みによる効率減退の心配がないからである。逆に茂原型ガス田にはガスリフトが使われる。ガスリフトは外吹き込み方式を採用しているのでガス水比が上昇して自噴が始まるときに人工採取から自噴採取への切り換えが容易にできるという利点を持つ。自噴採取から人工採取への切り換えも同様である。

外吹き込み方式ガスリフトの採取機構を図1に示す。この採取方法で汲み上げるとき流体の流れは次のように

* 平成元年6月7日 第54回石油技術協会総会開発・生産部門シンポジウム「人口採油・採取技術」講演

** 関東天然瓦斯開発(株) 茂原鉱業所

図1 採取機構

なる。

貯留層から坑底に流入した水とガスはアンカーパイプとそれに直結したケーシングを上昇し、ガス吹き込み管の接続口でガスリフトを掛けられ流速を増して坑口に達する。さらに坑口からフローラインを通してセパレーターまで2相で流れる。セパレーターで水とガスは分離されるが、そのときのセパレーター背圧力は大気圧より僅かに高い程度で、水柱にして1m前後と考えてよい。分離された水は沈砂槽で砂粒子を落とし、排水管でヨード工場に送られる。ガスの一部は圧縮機で加圧されガスリフト用に使われる。残りのガスが生産ガスとして集ガスラインに乗る。

外吹き込み方式のガスリフトを採用するためには坑井を仕上げる段階で吹き込み深度を決め、その深度のケーシングに吹き込み口を開けガス吹き込み管を外側から接続して、ケーシングに添わせて降管する。通常、4本のガス吹き込み管をほぼ等間隔に接続する。生産が進み水位が低下すると地上のバルブを操作して吹き込み深度を切り換える。ガス吹き込み管が4本に限定されるため、吹き込み深度の決定は重要で、ケーシングの径や圧縮機的能力と併せて慎重に決めなければならない。外吹き込み方式ガスリフトではチュービングを使わず、ケーシングそのものを揚水管としていることから、この方式のガスリフトを設計することは取りも直さず坑井そのもの

を設計することになる。

3. 産量推定シミュレーター

3.1 数値モデル化

貯留層に掘削された坑井で生産を行うときに生じる水ガス2相の流れをBROWN (1977)を参考に数値モデル化しシミュレーターとして使えるようにした。シミュレーターの流れ図を図2に示し概略を説明する。

最初に貯留層データと坑井データを入力する。貯留層データの主なものには地層の深度と構造、孔隙率、浸透率、そして圧縮率などが上げられる。茂原ガス田はダブルポロシティ・タイプであるから砂岩と泥岩の岩質を入力する。坑井データとしてはケーシングの径、圧縮機の機種、ガス吹き込み深度といったものがある。

各種データの入力後、初期化として地層条件を設定する。ここでは開発初期の地層圧及び砂岩と泥岩に存在するガスの飽和率を入力することになっている。

次に生産圧入ループに入る。各坑井の生産又は圧入方式をコード(NCODE)で入力し、コード番号に従って各仕上げ層の産出量又は圧入量、坑底圧を計算する形になっている。NCODEが1のときは自噴のみによって生産が行われるとして、生産量や各仕上げ層の産出量、坑底圧を計算する。NCODEが2のときはガスリフト採取で、ガス吹き込み段数を指定し生産量などを求める。NCODEが3のときは自噴又はガスリフト採取で最も生産量の大きいケースを自動的に選択し、そのときの各仕上げ層の産出量や坑底圧を計算する。NCODEが4のときは生産水量を指定し、ガスの生産量、各仕上げ層の産出量、坑底圧を求める。圧入方式は2種類ある。NCODEが-1のときは坑口圧を指定し、全圧入水量と各仕上げ層の圧入水量、坑底圧を計算する。NCODEが-4のときは逆に全圧入水量を入力し、計算でそれを各仕上げ層に振り分けるとともに坑底圧を求める。

以上のように各坑井の生産圧入方式が指定されると、それによって各坑井の水及びガスの産出量又は圧入水量が仕上げ層ごとに計算される。

全坑井の生産量又は圧入量が求められると、それに伴う地層圧の変化を計算し、さらにガスの飽和率を計算する。計算結果は出力コードに従って出力され、つぎのタイムステップへと進む。そして再び坑井の生産量又は圧入量を計算する。

このように産量推定シミュレーターは地層圧とガスの飽和率の変化を追いつながら、坑井の生産量又は圧入量を求めていく経時的なシミュレーターである。

3.2 産出量の計算手順

多層アンカー仕上げ坑井で生産を行うとき、個々の仕

図2 流れ図

上げ層からの流体の流れをコントロールすることはできない。すなわち、ある水量を生産するとき各仕上げ層から産出する水及びガスの量は圧力バランスが保てるように一義的に決まる。シミュレーターではこういった各仕上げ層からの産出量と坑底圧をどのように求めていくか以下に手順を示す。

1. 水の生産量 QWT を設定する。
2. 各仕上げ層(L)から管内への水の流量 $QWL(L)$ を仮定する。
3. 仕上げ層(L)から管内への水の流入に付随するガスの流量 $QGL(L)$ を計算する。
4. 管内垂直方向の水とガスの流量 $QQW(I)$, $QQG(I)$ を求める。
5. 各仕上げ層の中央深度に対応する坑底圧 $PWFL(L)$ を最下部坑底圧から順次, ORKISZEWSKI(1967)の垂直二相流圧力損失式を使って求める。
6. 地層圧 $PL(L)$ と $PWFL(L)$ から新たに管内への水の流量 $QWL'(L)$ を求める。
7. $QWL'(L)$ の合計が QWT に収斂したときループ

から出て, 11.へ飛ぶ。

8. $QWL'(L)$ の合計と QWT との差から $PWFL(L)$ の修正値 $PWFL'(L)$ を求める。
9. $PL(L)$ と $PWFL'(L)$ から $QWL(L)$ を計算する。
10. 3. 戻る。
11. $QWL'(L)$ に付随するガスの流量 $QGL'(L)$ を計算する。
12. 水の生産量を QWT としたときの各仕上げ層からの水の産出量は $QWL'(L)$, ガスの産出量は $QGL'(L)$, 坑底圧は $PWFL(L)$ となる。
自噴又はガスリフト採取のときはさらにセパレーターまでの圧力損失を BEGGS and BRILL (1973) の式で計算し, 接点解析法で真の QWT を求める。

4. 使用方法

開発計画を立てるとき, 経済性評価の面から各坑井の生産量を推定する必要がある。生産に移行してからも産量調整などで将来の予測ができれば有益であろう。産量推定シミュレーターを開発した理由がそこにある。また

図3 Forecast (NCODE=3)

表1 貯留層データ

孔 隙 率	砂 岩	0.35
	泥 岩	0.43
浸 透 率	砂 岩	200 [md]
	泥 岩	0.002 [md]
砂 岩 含 有 率		0.3
泥 岩 の 枚 数		60

表2 坑井データ

仕 上 げ 層		層 1.~層 3.
産 出 指 数		10[kL/d/ksc]
ケ ー シ ン グ の 径		3 in
圧 縮 機		22kW 二段
外吹き込み深度	1 段	150 [m]
	2 段	190 [m]
	3 段	230 [m]
	4 段	270 [m]

このシミュレーターを使ってケース・スタディを行うことで最適な坑井を設計できる。逆に、既存の坑井について各仕上げ層の産出量と坑底圧を計算できることが

ら、坑井テストの解析にも使用可能である。

これらの使用方法の例を以下に記す。

例 1. 生産量の予測

ある貯留層に坑井を掘削し、アンカーパイプで3層を同時に仕上げたとして生産量の予測を行った。坑井による排出領域はほぼ1000m 四方である。仕上げ層の全層厚は300m, 上端の深度は700m である。貯留層をXY方向それぞれ5分割, Z方向3分割して坑井をその中央に配置した。

貯留層データを表1, 坑井データを表2に示す。3枚の仕上げ層は貯留層データとして同じ値をとる。初期値として地層圧とガスの飽和率を表3のように設定した。

まず、生産方式をNCODE=3に指定して最適なケースでの生産量を計算してみた。その結果を図3に示す。生産が進むに従ってガス吹き込み段数が変化している。生産開始から3年間は水位が高くてもガス水比が小さいために2段にガスを吹き込みガスリフトを掛けている。3年経過するとガス水比が上昇し、1段にガスを吹き込むときが最適となる。さらに生産が進み水位が低下するとガス吹き込み深度は2段, 3段と深くなる。

生産開始から3年が経過すると自噴するようになる。そこで4年目から自噴(NCODE=1)に切り換えてみた。その結果が図4である。図3と図4の比較からガス水比が高くなると自噴でもガスリフト採取でも生産量に

図4 Forecast (NCODE=3.1)

図5 Forecast (NCODE=4)

表3 初 期 値

地 層 圧	層 1.	73.30 [ksca]
	層 2.	83.32 [ksca]
	層 3.	93.34 [ksca]
ガスの飽和率	砂 岩	0.003
	泥 岩	0.006

表4 ケース・スタディ(圧縮機, ケーシング)

	ケーシングの径		
	3 in.	4 in.	5½ in.
11kW圧縮機	揚水不可	揚水不可	揚水不可
22kW圧縮機	216[kl/d]	223[kl/d]	185[kl/d]
37kW圧縮機	249[kl/d]	259[kl/d]	222[kl/d]

大差が無いことがわかる。

地盤沈下抑制又はガスバランスから生産量を制限することがある。生産水量を130kl/d に制限して13年間生産を続けるとガスの生産量はどのように変化するかを調べた。その結果を図5に示す。制限せずに生産した場合と比べてガス水比の上昇速度が小さくなる。そのため自噴採取に切り換えられる時期が生産開始から4年半後と遅くなる。

このように貯留層の条件と坑井仕様が定まれば生産方式を指定して生産量を予測することができる。

例2. 坑井の設計

前述のように外吹き込み方式を採用するときは坑井の設計段階でガスリフトの重要な点が決まる。ケーシングの径やガスリフト用圧縮機は特に重要で生産に直接影響する。そこで、この2項目を変化させたとき生産量がどのようになるか産量推定シミュレーターを使いケース・スタディを行った。そのときの貯留層は例1で設定したもの(表1)をそのまま使い、坑井はケーシングの径と圧縮機以外、表2の仕様とした。初期値も同様に表3を設定した。一般に使用されるケーシングの径は3in., 4in., 5½in. である。ガスリフト用圧縮機には動力が11kW, 22kW, 37kWの3機種を選んだ。

ケース・スタディから求められた初期の生産水量を表4にまとめた。動力が11kWの圧縮機では揚水が不可能である。ケーシングの径が4in. で圧縮機が動力37kWのとき揚水量は最大になる。

実際に坑井を設計する場合は初期の揚水量だけでなく、長期間にわたる生産の推移を計算し、結果の信頼性を把握する必要がある。

例3. 坑井テストの解析

図6 坑井配置

B-29号井の生産開始時期にはすでに図6に示す生産井や圧入井が附近に存在した。表5にそれらの坑井の仕上げ層を表わす。図7には生産開始から Pressure Build-up Test までのB-29号井の生産量を図示する。流動坑底圧はPBUTの直前に、静止坑底圧はPBUTの後に測定した。その測定値と産量推定シミュレーターによって求めた坑底圧の計算値とのマッチングを行い、地層圧やガスの飽和率、産出指数を推定した。マッチングの結果を図8に示す。表6に推定された地層圧、ガスの飽和率、産出指数を記す。また、生産状態での各仕上げ層からの産出量を図9に、静止状態での産出量を図10に示す。図9を見ると、ガスの産出量は大田代層下部(層4)が最大であり、梅ヶ瀬層中部(層1)では生産状態であってもガスと水が地層へ逆流している。地層圧のアンバランスから生産を止めても図10のように梅ヶ瀬層下部(層2)、大田代層上部(層3)、下部(層4)から梅ヶ瀬層中部(層1)へ多量のガスと水が流れる。

以上のように、このシミュレーターを使えば他坑井の影響を入れて生産量と坑底圧の測定結果から貯留層の性状や仕上げ層ごとの産出量を推定できる。

ま と め

産量推定シミュレーターを開発したことにより、南関東ガス田に掘削された多層アンカー仕上げ坑井の生産量を鉱床のエネルギー及び坑井の生産能力から経時的に予測することが可能になった。開発計画を立案し、その経

図7 Production rate (B-29)

表5 仕 上 げ 層

	地 層 名	生 産 井				圧 入 井				
		B-29	B-10	A-28	A-29	B-1	B-5	B-7	B-27	O-8
層 1.	梅ヶ瀬層中部	○	○			○	○	○	○	
層 2.	梅ヶ瀬層下部	○	○			○	○	○		
層 3.	大田代層上部	○		○	○					
層 4.	大田代層下部	○		○	○					○

表6 マッチングの結果

	地 層 名	地 層 圧	ガスの飽和率		産出指数
		[ksca]	砂 岩	泥 岩	[kl/d/ksc]
層 1.	梅ヶ瀬層中部	19.0	0.015	0.024	30.0
層 2.	梅ヶ瀬層下部	35.5	0.016	0.024	35.0
層 3.	大田代層上部	52.0	0.008	0.005	10.0
層 4.	大田代層下部	63.0	0.015	0.013	5.0

済性を評価するときこれが役立つ。また、このシミュレーターを使えば目標とする生産量を達成するための坑井仕様を見出すこともできる。このように産量推定シミュレーターは開発計画を立てる上で有用な道具となる。

さらに坑井テストの解析を行うとき、その坑井が隣接した他坑井の生産又は圧入の影響を受けていても、このシミュレーターで解析すれば地層の状況のある程度正確に把握できる。

図8 坑底圧

図9 産出量 (flowing)

図10 産出量 (static)

参 考 文 献

- BEGGS, H. D. and BRILL, J. P., 1973: A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes, *JPT*, May.
- BROWN, K. B., 1977: The Technology of Artificial Lift Methods, 1, Petroleum Publishing

Company.

- ORKISZEWSKI, J., 1967: Predicting Two-Phase Pressure Drops in Vertical Pipe, *JPT*, June.
- 杉原豊, 1987: パソコンを使ったガスリフト効果の計算システム, 石技誌, 52(6), 520-526.
- 田崎義行, 1988: 水溶性天然ガス鉱床と sand/silt system. 石技誌, 53(4), 256-264.