論 文

室内実験による茂原型ガス産出挙動の検証

小勝 武*・田崎 義行**

(Received January 25, 2000; accepted November 17, 2000)

Investigation of Mobara type gas production behavior
from laboratory experiments

Takeru Ogatsu and Yoshiyuki Tazaki

Abstract: Minami-Kanto gas field yields natural gas dissolved in water from the formations consisting of alternating thin beds of sandstone and mudstone. As its remarkable feature, there are regions which show so-called Mobara type gas production behavior characterized by both increase of gas water ratio and rapid depletion of reservoir pressure.

A series of laboratory experiments was carried out using X-ray CT scanner in order to investigate the fluid behavior in mudstone because most of the produced gas is considered to be supplied from very low permeable mudstones in this region. In each experiment, gas flow rate was measured with incremental drop of pore pressure, while the effective confining pressure was maintained so as to prevent the core from compaction.

Our experiments showed that the existence of free gas in mudstone greatly contributed to the Mobara type gas production behavior, and that the mudstone beds might act as reservoirs for gas fields showing the Mobara type gas production behavior.

Key words: natural gas dissolved in water, Minami-Kanto gas field, mudstone, Mobara type gas production behavior, X-ray CT scanner

1. はじめに

水溶性ガス田である南関東ガス田は、千葉県を中心に広がり、北東―南西系走向、北西傾斜約 5° という緩やかな同斜構造を示す上総層群からガスおよびオイルを生産している。このガス田には「茂原型」と呼ばれる産出挙動を示す鉱床がある。その鉱床は半深海成で砂層の連続性の乏しい砂泥薄互層から成るという地質的特徴を示し、その産出挙動は生産に伴い間隙水圧が急激に低下しガス水比が上昇するという特異な性質を示す。

茂原型ガス産出挙動のメカニズムについてはこれまでいくつかの考察が重ねられ¹⁻⁴⁾、下位層にあるガスが断層を伝わり流動するという説や断層トラップされた遊離ガスが移動するという説、泥岩に吸着されていたガスが流出するという説などが唱えられた。今日では、砂層の間隙水圧が低下することに伴い遊離ガスが泥岩層から砂層に流動するという、いわゆる「泥岩説」が比較的支持されていると思われる⁵⁻⁷⁾。

秋林ら⁸⁾、田崎ら^{9,10)}は「泥岩説」に基づき数値モデル化を行い、木村ら¹¹⁾はセンシティブリティスタディを通して「茂原型」と「通常型」両産出挙動を表現した。しかし、未だ低浸透性の泥岩層から砂層に遊離ガスが流動するという説は実験室レベルで検証されていない。

そこで本研究では、南関東ガス田地域から採取した泥岩コアを用いて、泥岩内の流体挙動を再現することを目的とした室内実験を実施した。その実験結果を解析して、茂原型ガス産出挙動のメカニズムに関する検討を

* 石油公団石油開発技術センター (現関東天然瓦斯開発株式会社)
Technology Research Center, Japan National Oil
Corporation (Present Address: Kanto Natural Gas
Development Co., Ltd.)

** 関東天然瓦斯開発株式会社 Kanto Natural Gas Development
Co., Ltd.

行った。

2. 実験の内容

実験の初期状態として、泥岩コアを生産開始前の圧力、温度、ガスの存在状況に設定した。南関東ガス田の泥岩内でのガスの存在状況は以下であると考えられる。孔隙内を満たす地層水（以後、かん水と呼ぶ）にメタンを主成分としたガスが溶解している。ガスが飽和状態で溶解しているときに限り、若干の遊離ガスが存在する場合がある。実験では、初期状態のかん水には、遊離ガスの有無にかかわらず、メタンガスが飽和状態で溶け込んでいるとした。

フィールドでは、生産によって砂層の間隙水圧が低下し、砂層と泥岩層の間に圧力差が発生すると考えられる。実験では、この圧力差の発生を、初期状態に設定した泥岩コアの一端の圧力を下げることで模擬した。これに伴い泥岩コアから流出する流体量とコア端面の圧力を適時測定した。同時に、X線CTスキャナ（以後、CTスキャナと呼ぶ）を用いて、泥岩コア内の流動の様子を観察した。

実験は条件を変え3回実施した。

3. 試料と実験装置

実験に使用した試料と実験装置について説明する。

3.1 流体試料

流体試料として、メタンが飽和状態で溶解しているかん水（以後、メタン飽和かん水と呼ぶ）を室温（エアコンで20℃に設定）、圧力50 kgf/cm²（ゲージ圧、以後、圧力はすべてゲージ圧）の条件下で作製し使用した。かん水は南関東ガス田の生産設備から採取したものである。生産ガスを分析した結果、成分の約99%をメタンが占めていたので、実験ではメタンガス（純度99.99%以

上）を使用した。

以下の要領で、メタン飽和かん水を作製した。かん水は濾紙で濾過し浮遊固形物を除去しておいた。この後、かん水にNaIを添加した。NaIは泥岩孔隙内での気相と液相とのCT値（3.3項を参照）のコントラストを強調するためのドーパントとして働く。かん水を一度真空脱気し、PVT装置を用いてかん水にメタンガスを飽和状態になるまで溶解させた。作製したメタン飽和かん水は、圧力を保ちながら耐圧フリーピストンセルに移し保管した。

3.2 岩石試料

岩石試料である泥岩コアは、茂原市周辺の水溶性ガス貯留層である梅ヶ瀬層、大田代層、黄和田層から採取した。試料は乾燥・変質を避けるため、かん水に漬けて保管した。実験に使用する際は、あらかじめ孔隙内を脱気かん水で満たした。

泥岩の孔隙率は、Bush and Jenkinsの方法¹²⁾にしたがい温度40℃湿度60%で乾燥して測定した結果、約40%であった。絶対浸透率は10⁻³ mdオーダーであった。なお測定流体として30,000 ppm NaCl水溶液あるいはかん水を用いた。窒素ガス-30,000 ppm NaCl水溶液系での不動水飽和率は非定常法による相対浸透率測定結果から約70%と求められた。脱気かん水で飽和した泥岩の窒素ガスによる置換圧は1.1~2.1 kgf/cm²であった。この値は一般的な帽岩としての頁岩に比べ小さい。

南関東ガス田の泥岩の特徴として軟質であることが挙げられる。このことがCTスキャナによる観察にどのような影響を及ぼすかを以下の方法で調査した。脱気かん水で満たしたベレア砂岩と泥岩をそれぞれコアホルダーにセットし、間隙水圧あるいは周圧のどちらか一方を変え、平均CT値の変化を計測した。調査結果の一例として、間隙水圧の変化に対する平均CT値の変化を図1に

図1 CT値の圧力依存性

示す。図1から泥岩は周圧を変えずに間隙水圧を変化させると平均CT値が大きく変化することが分かった。平均CT値が大きくなることはかさ密度が増加したことを示し¹³⁾、泥岩が圧縮されたことを示唆している。このことは、CT スキャナによって泥岩孔隙内の相変化を観察する上で支障になると考えられる。そこで、周圧と間隙水圧の差（以後、有効封圧と呼ぶ）ができるだけ一定になるように間隙水圧とともに周圧を変化させたところ、平均CT値がほぼ一定の値となった。このことから、今回の実験では、泥岩コアの間隙水圧を低下させる際、有効封圧をできるだけ一定に保つように周圧を調節した。

3.3 内部観察装置

内部観察装置として、石油公団所有のCT スキャナを用いた。CT スキャナはすでに、岩石の不均質性やフラクチャーの有無などの内部調査や、孔隙率分布調査および流動実験における飽和率のモニタリングなどに使用されている^{13,14)}。以下に、CT スキャナの測定原理と密度の関数であるCT値の定義について簡単に説明する。

X線発生装置から放射されたX線強度 I_0 と物体を透過した後検出されたX線強度 I には、次の関係式が成り立つ。

$$I = I_0 \exp(-\sum(\mu_i \times \Delta Xi)) \quad (\text{式1})$$

ここで、

μ_i : X線が透過した物体 i の線吸収係数

ΔXi : 物体 i の微小領域の長さ

全周方向から測定したX線強度 I を計算処理することで、測定データは 픽셀ごとに次式で表すCT値として求められる。

$$\text{CT 値} = \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \quad (\text{式2})$$

ここで、

μ : 픽셀ごとの線吸収係数

μ_w : 水の線吸収係数

水および空気のCT値はそれぞれ0および-1,000で

ある。

1回のスキャンで得られるCT値は、0.35mm×0.35mm（スライスの厚さは2mmもしくは5mmを使用した）の領域で1つの値を持つ二次元分布をなしている。実験では、平均CT値として、関心領域内のCT値を単純に平均した値を求めた。

3.4 流動実験装置

流動実験装置の概略図を図2に示す。実験装置は、泥岩コアをセットするCTスキャナ専用のコアホルダー、コアホルダーの出口側の圧力を設定するバックプレッシャーレギュレータ（以後、BPRと呼ぶ）、泥岩コアから流出した流体量を測定する気液測定装置、コアホルダーの入口側の圧力と出口側の圧力と周圧を測定および記録する測定装置とペンレコーダからなる。

実験の手順を以下に記す。手順①～④は、泥岩コアを初期状態にする工程であり、手順⑤～⑥は、出口側の圧力を下げ、泥岩コアから流出した流体量を測定する工程である。

- ① BPRの設定圧力を初期の間隙水圧に調節し、コアホルダー内の系がその圧力以上を保つようにする。
- ② ホルダーの入口側のバルブよりメタンガスまたは窒素ガスを圧入する。圧入するガスは、適当な湿度を含ませるため、いったん水中を通す。
- ③ ホルダーの入口側のバルブよりメタン飽和かん水を圧入する。圧入のようすを適時CTスキャナで観察し、置換の進行具合を把握する。
- ④ 圧入による置換が終了したら入口側のバルブを閉め、泥岩試料全体がBPRの設定圧力になるまで静置する。
- ⑤ 出口側に、流出した流体量を測定するための気液測定装置をセットする。
- ⑥ BPRの設定圧力がある圧力に下げる。このとき、最終の有効封圧ができるだけ一定になるように

図2 流動実験配管図

BPR の設定圧力と同時に周圧も調整する。

- ⑦ 入口側の圧力が BPR の設定圧力に至るまでのようすを適時 CT スキャナで観察し、同時に流出した水およびガスの量を測定する。
- ⑧ 泥岩試料の間隙水圧が一定になったら、BPR の設定圧力をさらに一段階下げ、⑥～⑧を繰り返す。

4. 実験の条件と結果

一連の実験として、下記の 3 実験を行った。

実験 1: 同一コアを用い、遊離ガスが存在する場合と存在しない場合の流出挙動を比較した。

実験 2: プラグコアを用いて、泥岩コア内の遊離ガスの流動挙動を観察し、数値モデルを用いて、実験で観察された泥岩コア内の流体挙動を検討した。

実験 3: 流出ガス量の測定精度を向上させるためにホールコアを用い、フィールドデータと比較することで茂原型ガス産出挙動を検討した。

各実験で使った岩石試料のサイズ、絶対浸透率および実験室の温度を表 1 に示す。以下に実験条件と結果を述べる。

4.1 実験 1

実験 1 の目的は、CT スキャナによってガスの発生および流動挙動が観察できるかどうかを確かめ、遊離ガスの果たす役割を調査することにある。

4.1.1 実験条件

実験 1 では、遊離ガスが存在する場合と存在しない場合の初期状態をそれぞれ次の工程で設定した。

1) 遊離ガスが存在しない場合

メタンガスを圧入せず、NaI 濃度が 2% のメタン飽和かん水を平均 CT 値が変化しなくなるまで圧入した。

2) 遊離ガスが存在する場合

メタンガスをブレイクスルーするまで圧入した後、NaI 濃度が 2% のメタン飽和かん水を平均 CT 値が変化しなくなるまで圧入した。

比較実験のため岩石試料として同一の泥岩コアを使用

表 1 各実験の岩石試料と実験温度

	岩石試料			実験室の 温度(°C)
	直径 (cm)	長さ (cm)	絶対浸透率 $\times 10^{-3}(\text{md})$	
実験 1	3.8	4.6	6.3	20
実験 2	3.8	7.0	7.6 ^{*1}	20
実験 3	6.6	8.7	8.1	20

^{*1} コア破壊前に測定

した。同一の軟岩を用いる場合、圧密履歴を検討する必要がある。九十九里地域南部の梅ヶ瀬、大田代、黄和田各層の泥岩の圧密降伏応力は 150 kgf/cm^2 以上¹⁵⁾ と高い。実験の有効封圧の範囲は圧密降伏応力以下であり、実験による変形は弾性領域内で起こっていると考えられる。したがって、同一の泥岩コアを使用した 2 度の実験は有効封圧の変化に対してほぼ同一の変形を示すと考えられる。

4.1.2 実験結果

実験 1 では、入口側の圧力と出口側の圧力が同圧になったときの平均 CT 値を測定した。初期状態である間隙水圧 50 kgf/cm^2 時を基準とした平均 CT 値の減少量を計算し、図 3 に示す。横軸のスライス位置は、入口側に基準位置 0 mm をとり出口側に向かい正方向をとった。縦軸の平均 CT 値の減少量は減少分を正方向で表した。間隙水圧約 10 kgf/cm^2 までは、どちらの場合も平均 CT 値の減少量はわずかであった。間隙水圧を大気圧近くまで下げたとき、遊離ガスが存在する場合のみ平均 CT 値は顕著に減少した。

間隙水圧を 0 kgf/cm^2 まで下げたときの流体の流出量を表 2 に示す。

図 3a 遊離ガスが存在しない場合の CT 値の減少量 (間隙水圧 50 kgf/cm^2 時を基準)

図 3b 遊離ガスが存在する場合の CT 値の減少量 (間隙水圧 50 kgf/cm^2 時を基準)

表2 実験1の流出量比較

実験	ガス量(cm ³)	水量(cm ³)
遊離ガスが存在しない場合	2.7	0.3
遊離ガスが存在する場合	260	10

4.2 実験2

実験2の目的は、CT スキャナを用いて泥岩コア内の遊離ガスの流動挙動を観察することにある。その結果、流体挙動に特異な現象が見られたため、数値モデルを用いて検討した。

4.2.1 実験条件

実験の初期状態は次の工程で設定した。

保安上の理由から平均 CT 値が変化しなくなるまで窒素ガスを圧入し、その後軽く真空引きし、メタンガスを圧入した。最後に、平均 CT 値が変化しなくなるまで NaI 濃度が5%のメタン飽和かん水を圧入した。

実験1では圧力を大気圧近くまで下げないと CT スキャナでガスの発生を観察できなかった。このことを受け、BPR の設定圧力を50→30→15→5→0 kgf/cm²と大気圧まで下げていった。初期状態に設定するとき泥岩試料の入口側の一部が破壊したので、観察は破壊していないスライス位置30～60mm についてのみ実施した。

4.2.2 実験結果

圧力と流出量の経時変化をそれぞれ図4と図5に示す。図5を見ると、実験のステージが進むにつれ累計水量の上昇速度はガスに比べ遅くなり、累計ガス水比が上昇する傾向が窺われた。間隙水圧を50 kgf/cm² から5 kgf/cm² まで下げる間に、累計で水6.6 cm³、ガス436 cm³の流出量を得た。

間隙水圧50 kgf/cm² 時の平均 CT 値を基準とし、各間隙水圧段階で入口側の圧力と出口側の圧力が等しくなった時点、すなわち間隙水圧に勾配がなくなった時点の平均 CT 値の減少量を図6に示す。全体的に間隙水圧が下がるにしたがって、各スライスの平均 CT 値の減少量は増加していった。また、各間隙水圧における平均

図4 圧力の経時変化

CT 値の減少量は、出口側のよりもコア中心部の方が大きかった。

BPR で設定される出口側の圧力を50 kgf/cm² から30 kgf/cm² に下げた瞬間から入口側の圧力がほぼ30 kgf/cm² に下がるまでの平均 CT 値の減少量の推移を図7に示す。設定圧力を下げた瞬間は出口側の平均 CT 値が低下した。その後、時間の経過とともに平均 CT 値の低下傾向は入口側へと伝わり、出口側の平均 CT 値は低下傾

図5 累計流出量の経時変化

図6 間隙水圧変化による平均 CT 値の減少量
(間隙水圧50 kgf/cm² 時を基準) 図7 平均 CT 値の減少量の推移
(実験値, 50 kgf/cm² 時を基準)

向から上昇傾向に転じた。19時間後以降は全体的に平均 CT 値が上昇した。このような傾向は、BPR の設定圧力を 30 kgf/cm^2 から 15 kgf/cm^2 に下げた過程、および 15 kgf/cm^2 から 5 kgf/cm^2 に下げた過程においても観察された。

図 6 および図 7 における CT 値の変化量 ΔCT は、次式で示されるように飽和率の変化を表している¹³⁾。

$$\Delta CT = -\Delta Sg \times (CTw - CTg) \times \phi \quad (\text{式 3})$$

ここで、 ΔSg : ガス飽和率の変化量

CTw : 水単体の CT 値

CTg : ガス単体の CT 値

ϕ : 孔隙率

図 6 は、間隙水圧が低下するにしたがって、ガス飽和率が初期ガス飽和率から上昇する傾向を表している。図 7 は BPR の設定圧力を下げてから間隙水圧が平衡に達するまでのガス飽和率の変化のようすを表している。ここで、間隙水圧に勾配があると、入口側の方では有効封圧が小さくなっており、その要因による平均 CT 値の低下が含まれる。そのため、ガス飽和率の上昇は図 7 で示される平均 CT 値の減少分よりも小さいと考えられる。図 1 をもとに試算したところ、有効封圧が 20 kgf/cm^2 低下すると平均 CT 値は 3 程度低下するという結果が得られた。

4.2.3 数値モデルを用いた実験結果の検討

a. 数値モデル

実験 2 で観察された現象について、数値モデルを作成し検討した。しかし、実験中に生じた破壊部のモデル化および境界条件の設定が困難であったため、実験で観察された平均 CT 値の推移の傾向を感度解析を行うことによって確かめる程度にとどめた。

使用したモデルは図 8 に示す $17 \times 1 \times 1$ の一次元モデルである。グリッドのサイズは、 y 方向および z 方向がすべて 3.3 cm 、 x 方向は、両端のグリッドが 0.1 cm 、両端に隣接したグリッドが 0.25 cm 、その他のグリッドが 0.5 cm である。両端のグリッドは配管部に該当し、その他のグリッドは泥岩コアに該当する。図 8 の右側を出口側と置き、右端のグリッドに境界条件として BPR の設定圧力を施した。

実験 2 に使用した泥岩コアの物性値の中で、絶対浸透率は測定したが、孔隙率、相対浸透率、毛管圧などは測定しなかった。したがって、モデルには物性値として南関東ガス田貯留層の泥岩の一般的な値を入力した。数値解析に用いた入力データを表 3 に示す。また、配管部での毛管圧は泥岩部に比べ非常に小さいと考え、無視した。流体の物性値は温度 20°C として求めた。

表 3 数値解析に用いた入力データ

絶対浸透率	配管部	10 darcy
孔隙率	泥岩部	40%
	配管部	100%
初期ガス飽和率		5%
初期間隙水圧		50 kgf/cm^2
右端境界条件	間隙水圧 30 kgf/cm^2	

b. 感度解析結果

数値モデルの浸透率、相対浸透率および毛管圧を変えて感度解析を行った。この感度解析では、絶対浸透率および毛管圧はガス飽和率の挙動に対しセンシティブなパラメータであった。絶対浸透率を大きくするとガス飽和率の推移の進行速度は速くなり、また、毛管圧を大きくすると出口側におけるガス飽和率の上昇が抑制される傾

図 8 シミュレーションモデル

向を示した。

パラメータを操作した結果、泥岩の絶対浸透率を 5×10^{-3} md, 相対浸透率と毛管圧を図9の曲線としたとき、計算結果が実験で観察された平均CT値の推移の傾向と最も類似した。計算による、BPRの設定圧力を50 kgf/cm² から30 kgf/cm² に下げたときの流出挙動を図10に示す。図10は、図7と比較するために計算によって求められたガス飽和率の経時変化を平均CT値の減少量に換算し、表した。平均CT値が出口側から減少し入口側へと伝わっていき、ある時間を境にして全体的に上昇するという、実験で観察された傾向は、数値モデルによる計算でも確認することができた。

4.3 実験3

実験3の目的は、流出した流体量を測定し、その挙動と「茂原型」を示す坑井の産出挙動とを比較することによって、茂原型ガス産出挙動の要因を検討することにある。

4.3.1 実験条件

実験3では、ホールコアを使用することで孔隙容積を大きくし、流出量の計量に及ぼすデッドボリュウムの影

図9 相対浸透率と毛管圧

図10 平均CT値の減少量の推移
(計算値, 50kgf/cm²時を基準)

響を相対的に小さくした。実験に使用した岩石試料のかさ容積を比較すると、実験2では79 cm³, 実験3では297 cm³と3.8倍になっている。一方、デッドボリュウムは3 cm³であった。

この実験の初期状態は以下の工程で設定した。

脱気したNaI濃度が3%のかん水、メタンガスの順でそれぞれ平均CT値が変化しなくなるまで圧入した。その後NaI濃度が3%のメタン飽和かん水を圧入した。

平均CT値が変化しなくなるまで十分ガスを圧入した実験2において、間隙水圧を50 kgf/cm² から30 kgf/cm² に下げた最初のステージで泥岩内の遊離ガスの発生および流動を観察できた。実験3においても、間隙水圧を20 kgf/cm² 程度下げることにより遊離ガスの発生および流動を観察できると推定した。また、茂原型ガス産出挙動を示す坑井の生産期間における静水位の低下が圧力換算で10~20 kgf/cm² 程度である⁹⁾ことから、この実験では、BPRの設定圧力を50 kgf/cm² から25 kgf/cm² まで、段階的に5 kgf/cm² づつ低下させて調査した。

4.3.2 実験結果

入口側と出口側の圧力が等しくなったときの平均CT値の推移を図11に示す。図中凡例に記されている3% NaI かん水とは、岩石試料が脱気したNaI濃度3%のかん水で満たされた状態である。スライス位置40 mmから出口に至る区間では、スライス位置65 mmを最大として、NaI濃度が3%のかん水で満たされた状態の平均CT値と実験の初期状態の平均CT値との差が大きい。これはこの部分に遊離ガスが多く残っていることを示唆している。また、実験2でも観察されたように、初期状態から間隙水圧を下げていくことに伴う平均CT値の低下は、コアの端部よりも中央部の方で大きかった。

圧力の経時変化を図12に、累計流出量の経時変化を図13に示す。実験2と同様に、累計ガス水比は間隙水圧の

図11 平均CT値の推移

図12 圧力の経時変化

図13 累計流出量の経時変化

低下に伴い上昇していった。また、各ステージにおける流出量を表4に示す。各ステージでの流出水量は1cm³程度と少ない。一方、流出ガス量はBPRの設定圧力が低くなるにつれ増えていった。実験を通して回収したガス量および水量はそれぞれ3.5 cm³ および188 cm³ であった。

表4 実験3の各ステージにおける流出量

BPRの設定圧 (kgf/cm²)	水 流 出 量 (cm³)	ガス流出量 (cm³)	累計ガス水比 (cm³/cm³)
50 → 45	1.6	22	14
45 → 40	0.3	32	28
40 → 35	0.7	35	34
35 → 30	0.4	48	46
30 → 25	0.6	51	52

5. 考 察

比較実験である実験1では、泥岩コアから流出するガス量は泥岩コア内の遊離ガスの有無に依存することが示された。このことから、泥岩中の初期ガス飽和率はガス水比が上昇していく茂原型ガス産出挙動を決めるパラメータの1つであり、その役割は重要であると考えられ

る。

実験2では、時間の経過とともに出口側のガス飽和率がいったん上昇しその後初期ガス飽和率付近まで低下するという流体挙動が観察された。この現象は泥岩コアから配管へと流れる際の毛管圧の変化によって起こっており、その現象の大きさは泥岩コアの毛管圧曲線に影響されている¹⁶⁾と考えられる。また、出口側のガス飽和率が低下することに伴い、泥岩内全体のガス飽和率が低下していった。この現象は泥岩コアの出口側と内部側の毛管圧に差が生じておりガスが流出していることを示唆していると考えられる。南関東ガス田貯留層においても砂岩は泥岩に比べ毛管圧がかなり小さいと考えられるため、ガスが流出するこの現象が茂原型ガス産出挙動のメカニズムに寄与している可能性があるが、その検討については今後の課題としたい。

間隙水圧の低下に伴う累計ガス水比の推移について実験3の結果とフィールドの生産データを比較し、茂原型ガス産出挙動の要因を検討した。例として「茂原型」を示す隣り合う2地区の生産データを選択した。その結果を図14に示す。CSH-1地区は顕著に高いガス水比を示す地区である。2つの地区では、坑井間隔、断層の発達などの地質構造、周辺地区の開発状況などが異なるため、ガス水比の上昇の程度に違いが起きていると考えられる。実験3の累計ガス水比は2地区の生産データよりも高い。その原因は、フィールドでは泥岩のほかに泥岩に比べ絶対浸透率が高く水の供給が大きい砂層からも流体が供給され生産されているのに対し、実験では泥岩から流出する流体のみを計量していることにあると考えられる。また、実験3では出口側にガス飽和率の高い部分が存在していたことも原因であると考えられる。このような相違点はあるものの、実験値および生産データともに間隙水圧の低下に伴い累計ガス水比が上昇していく挙動を示した。以上のことから、茂原型ガス産出挙動は間隙水圧の低下に伴い泥岩から遊離ガスが流出することに

図14 貯留層圧の低下に伴う累計ガス水比の推移

より起きている可能性が高いことを示している。

泥岩から砂層へ流体を排出するエネルギーには、間隙水圧の低下による泥岩の圧密、遊離ガスの膨張、溶解度の低下、水の膨張などがあると考えられる。生産により泥岩の間隙水圧が50 kgf/cm² から30 kgf/cm² に低下したときのこれら4つのエネルギーについて検討した。泥岩の物性値は、孔隙率40%、体積圧縮係数 5×10^{-5} cm²/kgf を用いた。ガスはメタンガス、水はかん水とした。メタンガスはかん水に飽和状態で溶解しているとし、その溶解度は測定値を用いた。4つのエネルギーによる単位体積あたりの流体排出量をガス飽和率の関数として試算した。その結果を図15に示す。流体を排出するエネルギーの主たる要素は、遊離ガスの膨張、および溶解度の低下によるガスの遊離であり、遊離ガスの膨張による体積増加は、ガス飽和率に大きく依存している。相対浸透率、毛管圧がガス飽和率の関数であることから、泥岩中のガス飽和率は泥岩から砂層への流動に大きく寄与するが、さらにエネルギーの面からも重要であると考えられる。

図15 ガス飽和率と流体排出量の関係

6. ま と め

南関東ガス田の貯留層から採取した泥岩を用い、間隙水圧の低下に伴い発生する泥岩内のガスおよび水の流動挙動を調査した。この実験結果を以下にまとめる。

- 1) 泥岩からの流出ガスは、遊離ガスの有無に依存した。実験1における流体の流出量は、遊離ガスが存在しない場合が水0.3cm³、ガス2.7cm³であるのに対し、遊離ガスが存在する場合は、水10cm³、ガス260cm³であった。泥岩中の遊離ガスは茂原型ガス産出挙動に大きな役割を果たしていると考えられる。
- 2) CT スキャナを用いて、BPR の設定圧力を一段階下げた後から間隙水圧が平衡に達するまでの岩石試

料内の流体挙動を観察した。平均 CT 値は、まず出口側で低下が始まり、次第に入口側での低下へと移行する。その後、平均 CT 値は出口側より再び上昇するという傾向を示した。この傾向は飽和率の移り変わりを示しており、数値モデルを用いた計算結果においてもこのような飽和率の変動の傾向が見られた。

- 3) 泥岩層は、浸透率が 10^{-3} md オーダーと低浸透性であるが、今回の実験によって、茂原型水溶性ガス田の貯留層の役目を果たしうることを確認できた。また、実験で観察された流出挙動が茂原型ガス産出挙動と同様な特徴を有していることから、茂原型ガス産出挙動は主に泥岩から遊離ガスが供給されることによって生じていること、すなわち「泥岩説」を検証することができたと考えられる。

謝 辞

本研究は、石油公団と水溶性天然ガス開発会社8社間で執り行った共同研究「水溶性天然ガス採取技術開発」の1テーマとして実施した。研究実施にあたり、石油公団石油開発技術センター油層研究室の皆様にご指導、ご協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

SI 単位換算表

$$\begin{aligned} \text{kgf/cm}^2 \times 9.80665 \quad \text{E}+04 &= \text{Pa} \\ \text{md} \times 9.86923 \quad \text{E}-16 &= \text{m}^2 \end{aligned}$$

引用文献

- 1) 兼子 勝, 1956: 本邦天然ガス鉱床の地質学的研究. 地質調査所報告, 169, 26-27.
- 2) 金原均二・本島公司・石和田靖章, 1958: 天然ガス一調査と資源一. 229-244, 朝倉書店.
- 3) 河井興三, 1961: 南関東ガス田地帯についての鉱床地質学的研究. 石技誌, 26 (5), 212-266.
- 4) 秋林 智・山口伸次・藤田豊久, 1992: 水溶性天然ガス田の高ガス水比挙動シミュレーション. 石技誌, 57 (5), 427-433.
- 5) 名取博夫, 1997: 茂原型天然ガス鉱床はメタンハイドレート起源か. 地質ニュース, 510, 59-66.
- 6) 天然ガス鉱業会, 1998: 日本の石油と天然ガス, 148-149, 天然ガス鉱業会.
- 7) Manrique, J. F. and Kaneko, T., 2000: Reservoir management strategies for development of gas dissolved in water (brine) reservoirs. (SPE59420), SPE.
- 8) 秋林 智・周 萍, 1986: 茂原型水溶性ガス田における産出挙動の予測モデル. 石技誌, 51 (6), 486-491.
- 9) 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.
- 10) 田崎義行, 1992: 茂原ガス田の産出挙動と毛細管圧力の関係について. 石技誌, 57 (2), 151-156.
- 11) 木村 健・小勝 武・田崎義行, 1993: 南関東ガス田産出挙動の貯留層パラメータ・センシティブティ. 石技誌, 58 (6), 447-455.
- 12) Bush, C., Darre and Jenkins, Ralph, E., 1970: Proper hydration of clays for rock property determinations. (SPE2589), *JPT*, July 1970, 800-804.
- 13) Wellington, S. L. and Vinegar, H. J., 1987: X-ray computerized tomography. *SPE*, August 1987, 885-898.
- 14) Hove, A. O., Ringen, J. K. and Read, P. A., 1987: Visualization of laboratory corefloods with the aid of computerized tomography of X-rays. *SPE*, 1987 May, 148-154.
- 15) 細野高康・小泉和広・杉田信隆・小川正二, 1993: 上総層群の高圧圧密試験. 応用地質, 34 (5), 223-232.
- 16) Hinkley, R. E. and Davis, L. A., 1986: Capillary pressure discontinuities and end effects in homogeneous composite cores: Effect of flow rate and wettability. *The 61st Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE*, 1986.