熱水圧入法における貯留層内現象 ならびにガス産出挙動に関する室内実験研究* —メタンハイドレート貯留層の浸透率評価に関する研究(第2報)—

坂本 靖英¹ 駒井 武² 川辺 能成¹
川村 太郎³ 天満 則夫⁴ 山口 勉⁵

Experimental Study on Physical Phenomena in Methane Hydrate Reservoir and Its Gas Production Behavior during Hot Water Injection Process -Estimation of Permeability in Methane Hydrate Reservoir, Part2-

by Yasuhide SAKAMOTO^a, Takeshi KOMAI^b, Yoshishige KAWABE^b, Taro KAWAMURA^c,
Norio TENMA^d and Tsutomu YAMAGUCHI^e

- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Institute for Geo-Resources and Environment, Geo-Environment Analysis and Evaluation Group, 16-1 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8569, Japan (Corresponding author: E-mail sakamoto-yasuhide@aist.go.jp)
- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Institute for Geo-Resources and Environment, Geo-Environment Analysis and Evaluation Group
- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Energy Technology Research Institute
- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Institute for Geo-Resources and Environment, Geo-Energy and Environment Research Group
- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Institute for Geo-Resources and Environment

Methane hydrate is one of the potential resources of natural gas in the near future, because a large amount of reservoir exists in marine sediments and permafrost regions worldwide. It is very important to investigate physical phenomena in hydrate reservoirs, especially for developing an extraction system for gas hydrates, and in considering the environmental impacts by the development.

In this study, we carried out an experimental research on hot water injection process as one of the thermal stimulation methods, using a special-type apparatus designed for simulating hydrate reservoir. As a result of the experiments, it was found that the dissociation process by hot water injection consisted of the following four stages, such as (1) displacement of free methane gas due to water injection, (2) additional hydrate formation at downstream zone due to migration of dissociated gas and water, (3) actual dissociation, (4) completion of dissociation. In addition, the permeability of the hydrate reservoir was observed as a function of time that, tended to decrease during the additional hydrate formation period and increase during the actual hydrate dissociation period. Based on experimental data of temperature distribution during dissociation, the reservoir could be divided into three zones from upstream edge, and dissociation zone was extremely narrow area depending on the dissociation rate. Furthermore, we discussed the effect of injected water temperature, reservoir pressure and hydrate saturation on the movement of dissociation front and gas production behavior.

KEY WORDS: Methane Hydrate, Sediment, Hot Water Injection, Dissociation, Change of Permeability

1. 緒 言

メタンハイドレート(以下, MH)は, 水分子により形成されたカゴ状構造(ケージ)内にメタンガス分子を包蔵した, 低温・高圧条件下で安定な氷状の固体結晶である。近年, 大水深の海洋堆積層中や, 永久凍土層中に多量の MH が賦存していることが確認され, 石油や石炭に変わる非在来型エネルギー資源としての注目が集まっている。日本近海の海洋堆積層にも, わが国の年間天然ガス消費量の約 100 年分にも相当する資源量が試算されており, 将来の国産エネルギーとしての開発が期待されている^{1,2)}。著者らは, MH を含む堆積層から高い生産性と経済性を有したガス生産技術を確認することを目的とした研究開発を進めている。

現在考案されている MH 貯留層からのメタンガスの回収法には熱刺激法, 減圧法, インヒビター圧入法等が挙げられるが, い

*2004 年 6 月 21 日受付 2005 年 1 月 12 日受理

1. 普通会員 工博 (独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 研究員
2. 普通会員 工博 (独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 地圏環境評価研究グループ長
3. 普通会員 工博 (独)産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 研究員
4. 普通会員 工博 (独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 主任研究員
5. 普通会員 工博 (独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 副研究部門長

[著者連絡先] FAX: 029-861-8701(産総研 地圏資源環境研究部門・坂本)
E-mail: sakamoto-yasuhide@aist.go.jp

キーワード: メタンハイドレート, 堆積層, 熱水圧入法, 分解, 浸透率変化

ずれも原位置で MH をガスと水とに分解させてガスを生産する方法である。ゆえに、貯留層においては以下のような複雑な物理現象を伴うことが想定される。1) MH の分解に伴う固体部分の消失に起因して、貯留層の孔隙率や浸透率が非定常的に変化する。2) 分解に伴う吸熱反応、流体の流動に伴うエンタルピーの移動、熱伝導により貯留層温度が変化する。MH 貯留層からのメタンガスの生産性を評価するためには、上記の物理現象を加味した生産シミュレータを開発し、パラメータスタディを実施することが必要不可欠である。とりわけ堆積層内の熱・物質移動、MH の分解および堆積層の圧密による浸透率変化を予測するための数値解析手法および評価モジュールを開発することが極めて重要となる。

前報³⁾では、評価モジュールの開発に先立ち、多孔質体における MH の生成・分解実験を行い、模擬 MH 堆積層作成手法を確立するとともに、孔隙径が小さくなるほど MH の生成速度が大きくなることや、熱水圧入により MH が分解し、サンドバックの浸透性が回復していく挙動を明らかにした。本報では、MH 分解に伴う浸透率変化、ガス・水混相流動挙動、温度分布、ガス産出挙動等の一連のデータ取得を目的とし、熱刺激法の一つとして熱水圧入法を対象として、貯留層圧力、圧入温水温度、MH 飽和率をパラメータとした実験的検討を行った。なお、本研究により得られたデータは、以降の生産シミュレータ開発に直接的に用いられるものである。

2. 実験装置および実験方法

2・1 流動様式可視化装置（電子冷熱式 MH 生成・分解装置）

本研究では、MH の分解プロセスにおける温度変化を精度良く観察するために、前報とは異なる新たな装置を開発した。実験装置は大別すると、模擬 MH 貯留層、流体圧入部、流体産出部、計測部の4つの部分からなる。実験装置の概略図を Fig.1 に示し、以下にそれらの詳細について述べる。

2・1・1 模擬 MH 貯留層 貯留層モデルは一次元であり、内径 65mm、長さ 539mm、肉厚 12mm のステンレス製管型容器（最高使用温度 50℃、耐圧 15MPa）に砂、水およびメタンガスを充填し、孔隙内に MH を生成・成長させたものを模擬 MH 貯留層（以下サンドバック）とした。蓋にはそれぞれ2つの穴が開けられており、一方は流体の圧入・排出用、もう一方は圧力測定用に用いる。さらに両端の蓋の内側には、容器内からの砂の流出を防ぐために、焼結金属フィルターを取り付けるとともに、圧入端のみ、圧入水

の予熱のためのヒータを設置した。

本実験では、熱水の圧入・流動や MH の分解により、サンドバック内の温度が非定常的に変化する。その温度変化を精度良く観察するために、Fig.2 の容器断面図に示すような、特殊な温度制御を施すこととした。容器の中心軸上には、内部温度測定用の熱電対が 37mm 間隔で 12 本挿入されている。また、管外壁面上の内部熱電対の接点に対応した位置に、同様に 12 本の熱電対を設置した。温度制御のために、管両端の 40mm を除く 459mm の区間を計 12 個のブロックに分割し、それぞれに水冷式サーモモジュール（熱電子工業株式会社製）を設置した。MH 生成プロセスにおいては、外部の熱電対による検出温度を基に、所定の生成温度（約 3℃）に制御した。一方、熱水圧入による MH 分解プロセスにおいては、径方向の熱伝導の影響を最小限に留めるようにした。すなわち、伝熱について理想的な 1 次元モデルとして取り扱うために、内部と外部の二つの熱電対による検出温度の差が ±0.1℃ 以内になるように、温度コントローラを用いてサーモモジュールの出力制御を行った。さらに断熱効果を高めるために、全体を断熱材で覆い保温した。各位置での圧力の測定が可能のように、熱電対の測定点に対応した位置に圧力変換器を接続した。容器はガスの均等圧入のために垂直に設置して使用した。

2・1・2 流体圧入部 水はブランジャーポンプを用いて、常温で一定の体積流量で圧入した。メタンガスはボンベより供給され、マスフローコントローラを用い、常温常圧下で一定の体積流量で圧入した。

2・1・3 流体産出部 貯留層圧力は背圧弁を用いて制御した。背圧弁から排出された流体は、気液分離器により水とガスとに分離される。産出ガスはシリカゲル充填層を通過させることにより水分を除去した後、マスフローメータにより流量の測定が行われる。

2・1・3 計測部 サンドバック両端の差圧の計測には、2 種類の差圧変換器（共最高測定圧力 0.05MPa および 0.5MPa）を用い、実験の状況に応じて使い分けた。なお、温度・圧力の各信号はデータ収集システムを介して、一括してパーソナルコンピュータに出力した。

2・2 温度制御の妥当性

本実験装置を用い、水圧入による熱供給の実験を行い、その結果を有限差分法による単相流プログラムを用いた計算結果と比較することで、先に述べた分解プロセスにおける温度制御の妥当性を検証した。実験では、水で飽和されたサンドバックに対して、

Fig. 1 Experimental apparatus for simulating MH reservoir.

Fig. 2 The cross sectional surface of the stainless steel vessel.

室温（約 21℃）の水を圧入し、その際のサンドバック内温度分布のデータを取得した。実験条件を以下に示す。

- ・孔隙率 : 40.0%
- ・実験圧力 : 2.00MPa
- ・水压入流量 : $1.00 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{min}$
- ・初期温度 : 4.0℃

計算条件はグリッドサイズを 36mm、タイムステップを 10sec とし、その他は上記の実験条件に対応させて設定した。Fig.3 に温度分布の比較を示す。実験値と計算値を比較すると、圧入水のフロントの進行に対応した下流域の温度上昇についてはおおむね一致しており、径方向の熱伝導の影響を最小限に留め、伝熱に関して 1 次元モデルとして取り扱うための温度制御の妥当性が確認された。

Fig. 3 Comparison of experimental and calculation results for temperature distribution in the process hot water injection.
(a) Experimental, (b) Calculated

2・3 実験に用いた砂

本研究では、豊浦標準砂を用いてサンドバックを作成した。主成分は SiO_2 であり、平均粒径は $200 \mu\text{m}$ 程度である。

2・4 実験方法

実験方法は、前報で報告した手順におおむね従う。

- (1) 砂充填によるサンドバックの作成
- (2) 絶対浸透率の測定
- (3) メタンガス圧入による不動水飽和状態の作成
- (4) MH の生成・成長

先に述べたように、MH の生成温度は外部熱電対による検出温度を基に、所定の温度（約 3℃）に制御した。本実験では上記の不動水に対して高压のメタンガスを導入し MH を生成させる。MH の生成はパッチ系にて行い、成長に伴う装置圧力の低下分とメタンガスの占める孔隙容積から、次式を用いてサンドバックの MH 飽和率 (S_h) を推算した。なお、MH 1m^3 当たりメタンガス包蔵量は 172m^3 と仮定した。

$$S_h = \frac{Q_{wt}}{172} \cdot \frac{\Delta P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_f} \cdot \frac{1}{AL\phi}$$

ここで、 S_h : ハイドレート飽和率 [-], Q_{wt} : ガス圧入による置換水量 [m^3], ΔP : ハイドレート成長に伴う装置圧力の低下分 [MPa], P_0 : 基準圧力 [MPa] ($=0.101325\text{MPa}$), T_0 : 基準温度 [K], T_f : MH 生成温度 [K], A : サンドバックの断面積 [m^2], L : サンドバックの長さ [m], ϕ : 孔隙率 [-] である。

- (5) メタンガス圧入により、所定圧力（約 10MPa）までの加圧
- (6) 熱水圧入による MH の分解実験

先に述べたように、分解プロセスにおいては、内部と外部の二つの熱電対による検出温度の差が $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内になるように、温度コントローラを用いてサーモモジュールの出力制御を行った。サンドバック内の温度分布、両端の差圧、ガス産出速度を測定し、さらに測定したデータを基に、絶対浸透率と相対浸透率の積である水の有効浸透率（以下、水浸透率）を算出し、水の流動挙動を指標として MH 分解時の浸透性の変化を評価した。

2・5 実験条件

実験条件を Table.1 に示す。圧入水温度、貯留層圧力、MH 飽和率を実験パラメータとして、数段階にわたって変化させ、計 8 回の実験を行った。なお、各実験には便宜上、No.1 ~ 8 の通し番号を付した。

Table 1 Experimental conditions for each run.

Run No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Pore Volume, m^3	7.03E-04	7.09E-04	7.20E-04	7.14E-04	7.11E-04	7.09E-04	7.03E-04	6.77E-04
Porosity, %	39.3	39.7	40.3	39.9	39.8	39.7	39.3	37.9
Absolute permeability, $(\mu\text{m})^2$	27.8	27.2	30.7	25.3	25.2	27.9	26.8	20.0
Gas injection rate, Sm^3/min	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	3.00E-04	4.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04
Irreducible water saturation, %	25.8	23.3	25.6	29.5	30.4	22.3	24.4	31.5
Initial pressure for MH formation, MPa	10.0	10.0	10.0	5.30	7.00	10.0	10.0	10.0
Pressure drop during hydrate growth, MPa	5.60	5.23	5.60	1.91	3.40	5.00	5.30	6.40
Hydrate saturation, %	30.0	28.9	30.1	9.7	17.0	27.9	28.7	31.5
Water injection rate for MH dissociation, m^3/min	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05
Temperature of injected hot water, $^\circ\text{C}$	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	26.0	31.0	41.0
Pressure at dissociation, MPa	5.20	7.50	10.8	10.7	10.7	10.0	10.0	10.7
Cumulative gas production due to MH dissociation, Sm^3	0.034	0.0308	0.0412	0.0133	0.0219	0.0288	0.0316	0.0307

※ Sm^3 : standard cubic meter

3. 実験結果と考察

3・1 MH 分解に伴う浸透率変化およびガス産出挙動

MH 分解に伴う浸透率変化およびガス産出挙動の一例として、圧入水温度を 41°C 、貯留層圧力を 10MPa に設定した、実験 No.8 の結果について考察する。Fig.4 に、熱電対ごとの温度変化、差圧および水浸透率、ガスの産出挙動の経時変化を示す。図より、熱水圧入による MH 分解プロセスは、次の 4 段階から成ることが示された。Stage1 (0 ~ 30min) は、水圧入によるメタンガスの置換過程に相当する。サンドバックの温度は上流側より徐々に上昇していくが、まだ平衡温度 (分解温度、約 15°C) に達していないため、MH の分解は起こらない。ゆえにこのとき産出したガスは、分解により生成したものではなく、ガスと水との相対浸透性のみに依存して、水の圧入により置換されたフリーガスとして定義される。また、フリーガスの置換が進行するに伴い、水が主としてサンドバック内を流動する現象が支配的となる。水の粘度はガスに比べて著しく高く、その流動に高い圧力勾配を要することから、徐々に差圧は上昇していく挙動を示す。なお、初期段階で孔隙内の飽和状態は、MH 存在下での不動水飽和状態にあるため、圧入水フロントが流出端に到達する 30min 付近まで、水の産出はない。

Fig. 4 Change of temperature and water permeability in sand column and gas production behavior in the process of MH dissociation by hot water injection. (Run No.8)
(a) Temperature, (b) Differential pressure and water permeability, (c) Cumulative production of gas and water

圧入開始より 30min 経過した時点では、上流側は既に平衡温度に達し分解が開始されているものの、下流の温度はそれよりも低い状態にある。結果として、下流域において、上流側での分解により生成したメタンガスと圧入水の混相流動が生じたことに起因して、この区域で MH の成長・再生成が促進される (Stage2)。差圧は著しく上昇する挙動を示し、それに対応して水浸透率も急激に減少している。また、30 ~ 60min にかけて、ガスの産出はなく、水のみが産出しており、上流側で分解により生成したガスは全て下流側でハイドレート化しているものと考えられる。この時のサンドバックの温度および圧力分布の変化を Fig.5 に示し、この現象について以下に詳しく述べることにする。40min の時点で、圧入端より 362mm の位置までの圧力が徐々に上昇し始め、MH の成長に伴い孔隙が閉塞したことに起因して、50min の時点では 362 ~ 473mm の区域において、水の流動のために 3MPa 程度の差圧が生じている。その後、下流の温度が平衡温度に達した時点 (55 ~ 60min の間) で差圧が急激に低下する。このことから、上流側で分解により生成したガスは下流域で一旦ハイドレート化するが、下流域の温度が上昇して MH の分解が開始された時点で再びガスとして産出すると解釈できる。なお、生成した MH は流路近傍に存在するものであり、一旦平衡温度に達してしまえば、すみやかに分解してしまう性質のものであると考えられる。実験条件により程度の差はあるものの、この現象は全ての実験で確認された。とりわけ、上流域でいち早く分解が進行する、圧入水の温度を高くした場合や、貯留層圧力の低い条件で顕著であった。ゆえに、浸透性を低下させることなく水の圧入を継続させるためには、いかに早く貯留層の温度を平衡温度に達せさせられるかが重要であることが示唆された。実フィールドを想定した場合には、貯留層内に極端に浸透性の低い区域が形成され、圧入水が他の浸透性の高い区域、方向に選択的に流入する、圧入水の掃効率の低下を引き起こす可能性がある。浸透性改善のためには、平衡温度を低くするためのインヒビターの活用や、坑井パターンと

Fig. 5 Additional MH formation at downstream zone of sand column in the second stage of the process. (Run No.8)
(a) Temperature, (b) Pressure

して水平坑井を用い⁴⁾、事前に坑井内に温水を循環することにより、貯留層全体を予熱する等の対策が考えられる。

Stage3 (60min ~ 250min) は、MH の実質的な分解が開始されたことによる分解生成ガスの産出段階に相当する。ガスの産出が再び開始されるとともに、ガスおよび水の流動を妨げる MH の消失に起因して、差圧は著しく低下し、水浸透率は時間とともに回復していく。なお、温度は平衡温度に一旦維持されているが、これはハイドレート分解反応が起こっており、吸熱によりそれ以上の温度上昇がないためである。その後は、上流側より平衡温度から逸脱し圧入熱水の温度まで上昇していく。平衡温度からの逸脱は各位置での MH の分解の終了を示唆するものである。

最も下流の 473mm に設置した熱電対が、圧入水の温度に達した 250min 以降 (Stage4) は、分解ガスの産出は終了し、水のみが産出するという結果となった。これに対応して、差圧と水浸透率の値がそれぞれ 0.0044MPa, $4.0\mu\text{m}^2$ 程度に収束する挙動を示した。

3・2 熱水圧入法における貯留層内挙動

熱水圧入法における貯留層内挙動の一例として、同様に圧入水温度を 41°C に設定した、実験 No.8 の結果について考察する。Fig.6 に、圧入開始より 120min 経過後の温度分布を示す。貯留層内分解挙動の理解のために、サンドバックを上流側より Zone1 から Zone3 の 3 つの区域に分割し、それぞれの状況を検討する。

Fig. 6 Temperature distribution in sand column at 120min after water injection. (Run No.8)

(1) Zone1

Zone1 は圧入端を含む区域であり、既にこの区域の温度は圧入水温度で保持されており、分解は完全に終了している。流体の飽和状態としては、圧入水によるガスの置換は既に終了しているため、ガス-水二相系における残留ガス飽和状態に相当する。なお、分解の進行に伴い、Zone1 は下流方向に伸張していく挙動を示す。

(2) Zone2

Zone2 は分解フロント域である。MH の分解反応は吸熱反応であるため、この区域では、圧入水温度 (41°C) より平衡温度まで温度が急激に低下している。この区域の最下流側の温度が平衡温度を示す位置が分解フロントとして定義される。

本実験は 1 次元モデルであり、浸透率も比較的大きいため、熱水の流動に伴うエネルギーの供給が MH の分解に対して支配的となる。ゆえに、分解フロント域は図のように、熱水の流入する、すなわちエネルギーが十分に供給される極めて狭い範囲に形成されており、これは温度制御の 1 ブロック分 (37mm) に相当する。一方、実フィールドを想定した場合には、浸透率が本実験よりも著しく小さいこと、さらには浸透率の異方性等が考えられ、熱水によるエネルギーの供給のみなら

ず、熱伝導による MH 層の加熱の影響が大きくなり、結果として分解フロント域は実験と比較して広範にわたることが予想される。

(3) Zone3

Zone3 は、流出端を含む区域であり、MH 残存域 (未分解域) に相当する。温度は平衡温度で保持されており、分解が著しく進行することはない。分解の進行に伴い、Zone3 は縮小していく挙動を示す。同様にフリーガスの置換は既になされているため、この区域の流体の飽和状態は、ガス-水-MH 三相系における残留ガス飽和状態に近いと思われる。

Fig.7 にサンドバック内温度分布の経時変化を示す。時間の経過に伴い、先に定義した Zone1 から Zone3 の区域は、その順序を変えずに流出端方向に進行していく挙動が示されている。

また、一連の実験を通じて Fig.8 に示すように、多孔質体においては Sloan⁵⁾ の計算プログラムより得られる理論値と比較して、平衡温度が 2°C 程度高温側に、すなわち分解しにくい方向にシフトすることが観察された。この要因としては、孔隙内のミクロスケールでの MH とガスの界面状態や、分解ガスに起因する圧力分布が生じている等が考えられる。しかし、多孔質体における MH の平衡条件そのものを取り扱った研究例は少なく、引き続き検討を進める予定である。

Fig. 7 Temperature distribution in sand column with time. (Run No.8)

Fig. 8 The relation between temperature and pressure at the dissociation point of MH in the series of run.

3・3 各パラメータの影響

3・3・1 圧入水温度 ここでは分解挙動に及ぼす圧入水温度の影響について検討するために、圧入水温度を $21 \sim 41^\circ\text{C}$ の 4 段階に変化させた実験 (実験 3, 6 ~ 8) の比較を行う。分解フ

ロントの進行と累計ガス産出量の経時変化を Fig.9 に示す。なお、3・1 で述べた Stage3 における累計ガス産出量変化を線形近似することで、平均分解ガス産出速度を求め、分解挙動を検討するための指標とした。

図より、圧入水の温度が高いほど、分解フロントの進行速度が大きくなっている。これは、分解のために必要な熱が貯留層により多く供給されることや、分解フロント近傍における温度勾配が大きいことに起因すると考えられる。その速度は 46.7mm / hour (21℃) から 130mm / hour (41℃) まで変化した。圧入水の温度が 21℃ と 26℃ の場合で、約 2 倍に増加しており、分解フロントの進行に及ぼす圧入水温度の影響が最も顕著に見られている。ゆえに、この温度範囲 (21 ~ 26℃) において、分解速度が圧入水温度に依存して急激に上昇することが示唆された。一方、平均分解ガス産出速度は、 $7.30 \times 10^{-5} \sim 1.79 \times 10^{-4} \text{Sm}^3/\text{min}$ となり、圧入水温度の上昇に伴い、分解フロントの進行速度とほぼ等しい割合で上昇する結果が得られた。さらに、フロントが流出端に到達した時点でガスの産出はおおむね終了するが、温度が高いほどその時間が早く、21℃ に設定した実験 3 では 600min 程度を要するのに対し、41℃ の場合 (実験 8) には 200min 程度と約 3 分の 1 の時間で終了している。

3・3・2 貯留層圧力 貯留層圧力を、5.2 ~ 10.8MPa (実験 1 ~ 3) の 3 段階にわたって変化させた場合の分解フロントの移動を Fig.10 に示す。図より、貯留層圧力が低いほど、分解フロントの進行速度が大きくなっており、46.7 ~ 111mm / hour の

範囲であった。この要因としては、圧力が低いことに起因して、分解速度が大きくなったことが挙げられる。ガスの産出挙動も、前項と同様にフロントの進行速度と関連しており、貯留層圧力の低下に伴い、 $7.30 \times 10^{-5} \text{Sm}^3/\text{min}$ から $1.42 \times 10^{-4} \text{Sm}^3/\text{min}$ まで上昇し、ガスの産出が早期に終了することがわかった。

3・3・3 MH 飽和率 MH 飽和率を、9.70 ~ 30.1% (実験 3 ~ 5) の 3 段階にわたって変化させた場合の分解フロントの移動を Fig.11 に示す。なお、MH 飽和率はサンドバック全体の値として算出しているが、生成のための初期圧力の低い条件 (低 MH 飽和率条件) では、充填したメタンガスに対して水が多量に存在している条件であったため、MH の生成に多少の不均一性が生じてしまい、結果としてフロントの進行が不安定となっている。図より、MH 飽和率が低いほど、分解フロントの進行速度が大きくなっている。これは、圧入条件が等しく、貯留層に等しい熱が供給されたため、MH 量の少ない低飽和率条件では、各位置の分解が早期に終了したためである。その速度は 46.7 ~ 273mm/hour であった。ガスの産出挙動も、前項と同様にフロントの進行速度に関連し、MH 飽和率の低下に伴い、ガスの産出が早期に終了することがわかった。

4. 結 言

本報では、MH 分解に伴う浸透率変化、ガス-水混相流動挙動、温度分布、ガス産出挙動等の一連のデータを実験的に取得し、熱水圧入法における貯留層内現象ならびにガスの産出挙動を明らか

Fig. 9 Effect of injected water temperature on MH dissociation behavior. (a) Movement of dissociation front, (b) Cumulative gas production

Fig. 10 Effect of reservoir pressure on movement of dissociation front.

Fig. 11 Effect of MH saturation on movement of dissociation front.

にすることを目的とした検討を行った。結果をまとめると以下のようである。

- (1) 熱水圧入による MH 分解プロセスは、1) 圧入水の掃攻によるフリーガスの置換、2) 下流域での更なる MH の成長による浸透性の低下、3) 分解生成ガスの産出、4) ガス産出の完了の 4 段階から成ることがわかった。
- (2) 熱水圧入法において貯留層内は、上流側より 1) 既分解域、2) 分解フロント域、3) MH 残存域（未分解域）の 3 つの区域に分割される。なお、分解フロント近傍では、圧入水温度から平衡温度まで、温度が急激に低下する結果を示した。1 次元モデルの場合、MH の分解に対して熱水の流動が支配的であるため、分解フロント域は層内の極めて狭い区域に形成されていることが明らかとなった。
- (3) 圧入水の温度を高くした場合、分解フロントの進行は著しく速くなり、結果として分解ガスの産出は早期に終了する。これは、温度が高いほど、貯留層に多量の熱が供給されるとともに、分解フロント近傍での温度勾配が大きくなり、結果として分解速度が大きくなったためと考えられる。
- (4) 貯留層圧力が低いほど、分解フロントの進行が速くなった。分解生成ガスの産出挙動は、分解フロントの進行と相関があり、圧力が低い場合には、産出が早期に終了する結果が

得られた。

- (5) MH 飽和率が低いほど、分解フロントの進行は速く、ガスの産出も早期に終了した。これは、圧入条件が等しいため、貯留層に等しい熱が供給されたことによる。

謝辞 本研究は、経済産業省委託研究「メタンハイドレート資源開発・生産手法開発」によるものである。ここに付記して謝意を表する。

本研究の実施に当たり、独立行政法人産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門 山本佳孝博士、同地圏資源環境研究部門

羽田博憲博士には貴重なご助言をいただいた。また、同地圏資源環境研究部門 テクニカルスタッフ 大野孝雄氏、小川桂子氏には多大なる協力をいただいた。以上の方々に厚くお礼申し上げる。

References

- 1) M. Sato and Y. Aoki: J. Jpn. Inst. Energy, **80** (2001), 973-995.
- 2) M. Sato: J. Jpn. Inst. Energy, **80** (2001), 1064-1074.
- 3) Y. Sakamoto et al.: Shigen-to-Sozai (Journal of MMIJ), **120** (2004), 85-90.
- 4) K. Sasaki et al.: Proc. MMIJ Annual Meeting (2004), Vol. 1, pp.135-136.
- 5) Sloan, E.D.: *Clathrate Hydrates of Natural Gases. Second Edition, Revised and Expanded*, (1998)
- 6) AIST: Annual Report of MH21, (2002).