Original Paper

History Matching on Micro-Pilot Tests of CO₂ Sequestration and ECBM in the Ishikari Coal FieldShinji YAMAGUCHI^{*1}, Kotaro OHGA^{*2}, Masaji FUJIOKA^{*3}, and Masao NAKO^{*4}

(Received January 26, 2006)

石狩炭田におけるCO₂炭層貯留とECBM実験のヒストリーマッチング
山口伸次^{*1}, 大賀光太郎^{*2}, 藤岡昌司^{*3}, 名子雅夫^{*4}

Coal beds adsorb abundant volume of methane gas, which is so-called coalbed methane gas and now utilized as an unconventional natural gas source in the U.S.A. Enhanced coalbed methane (ECBM) technology, which increases methane gas production by injecting carbon dioxide (CO₂) into coal beds, is now viewed as one of the technologies to prevent the greenhouse effect. This technology may store the CO₂ discharged from thermal power plants in coal seams in a stable state, and in the process, recover coalbed methane gas as a clean energy source. Many field experiments have been conducted in the world to investigate the possibility of this technology.

In Japan, General Environmental Technos. Co., Ltd. began "Japan CO₂ Geosequestration in Coal Seams Project (JCOP)" in 2002 as a consignee of the project. As a part of the project, a micro pilot test started at the Minami Oh-Yubari district in the Ishikari coal field in 2003, and will be continued until the end of 2007.

In this research, a numerical simulation model, which is named as Ishikari Model, has been constructed with a commercially available numerical simulator, which is widely used in coalbed methane gas industry. The model is based on the reservoir parameters obtained through the micro pilot test. Not all of the data necessary to construct the model were obtained; therefore a history matching study was conducted to estimate some unknown reservoir parameters such as pore compressibility and gas-water relative permeability curve. The developed Ishikari Model indicated the degree of enhancement effect observed in the micro pilot test, and also the degree of permeability decrease due to CO₂ adsorption on coal.

Key Words

CO₂ storage, Coal seams, History matching, Coalbed methane gas, Enhanced coalbed methane (ECBM)

1. 緒言

炭層には元来メタンを主成分とする炭層ガス（コールベッドメタンガス，以下CBMガス）が含まれており，非在来型天然ガス資源として米国を中心に，開発利用されている。そのCBMガス産出促進手法として，二酸化炭素（以下CO₂）や窒

素（以下N₂）などのガスを炭層に圧入する，いわゆるECBM（Enhanced Coalbed Methane）がある。本技術は，地球温暖化防止技術の一つとしても，近年，注目されてきている。すなわち，火力発電所などからCO₂を分離回収し，炭層に圧入することにより，CO₂を炭層に固定すると同時に炭層から産出

- * 1 Department of Earth Science and Technology,
Faculty of Engineering and Resource Science,
Akita University
1-1 Tegata Gakuenmachi, Akita 010-8502, Japan
- * 2 Graduate School of Engineering, Hokkaido University
Kita 8-jo, Nishi 5-chome, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido
060-0808, Japan
- * 3 Japan Coal Energy Center
Meiji-Seimei Mita Building 9F, 3-14-10, Mita, Minato-ku,
Tokyo 108-0073, Japan
- * 4 General Environmental Technos Co., Ltd.
1-3-5, Azuchimachi, Chuo-ku, Osaka 541-0052, Japan

- * 1 秋田大学工学資源学部地球資源学科
〒010-8502 秋田市手形学園町1-1
- * 2 北海道大学工学研究科
〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目
- * 3 (財)石炭エネルギーセンター
〒108-0073 東京都港区三田3-14-10
明治安田生命三田ビル9階
- * 4 (株)環境総合テクノス
〒541-0052 大阪市中央区安土町1-3-5

るCBMガスをエネルギー源として利用できると考えられるからである。本技術の可能性、有効性を検討するため、世界各地で現場実験が実施されている^{1)~4)}。

我が国においても、(株)環境総合テクノスが事業主体となり、2002年より「二酸化炭素炭層固定化技術開発」が開始され、2003年より石狩炭田南大夕張地区で、CO₂圧入予備実験(以下予備実験)が2007年までの予定で実施されている⁵⁾。

本研究では、CBMガス開発に広く使われている数値モデルCOMET3⁶⁾を用い、同予備実験から得られた炭層特性値を基に石狩モデルを構築した。また、予備実験データを用いたヒストリーマッチングを実施し、予備実験からは得られていない孔隙圧縮率、ガス-水相対浸透率等の値を推定した。更に、構築した石狩モデルを用いて、現場実験におけるCO₂圧入によるCBM生産促進効果の程度やCO₂圧入により炭層浸透率が大きく低下することなどを示した。

2. 数値モデルの概要

炭層内の水-ガス挙動をあらわす多成分3次元数値モデル⁷⁾を構成する数学モデルを以下に示す。

2.1 流動方程式

数値モデルを構成する基本方程式を以下に示す。

水：

$$\nabla \cdot [b_w M_w (\nabla P_w + \gamma_w \nabla Z)] + q_w = (d/dt) (\phi b_w S_w) \quad (1)$$

ここで、

b_w ：水容積係数の逆数、—

M_w ：水相の易動度、 $m^2/(Pa \cdot s)$

P_w ：水相圧力、Pa

γ_w ：水相の圧力勾配、Pa/m

Z ：深度、m

q_w ：単位時間単位体積あたりの水産出量、 s^{-1}

t ：時間、s

ϕ ：クリート孔隙率、—

S_w ：水飽和率、—

ガス成分1 (例えばCH₄)：

$$\nabla \cdot [b_g M_g y_1 (\nabla P_g + \gamma_g \nabla Z)] + q_{m1} + q_g y_1 = (d/dt) (\phi b_g S_g y_1) \quad (2)$$

ガス成分2 (例えばCO₂)：

$$\nabla \cdot [b_g M_g y_2 (\nabla P_g + \gamma_g \nabla Z)] + q_{m2} + q_g y_2 = (d/dt) (\phi b_g S_g y_2) \quad (3)$$

ここで、

b_g ：ガス容積係数の逆数、—

M_g ：ガス相の易動度、 $m^2/(Pa \cdot s)$

y_i ：ガス相中のガス成分*i*のモル分率 ($i = 1, 2$)、—

P_g ：ガス相圧力、Pa

γ_g ：ガス相の圧力勾配、Pa/m

q_{mi} ：単位時間単位体積あたりのガス成分*i*のマトリックスからクリートへの拡散量 ($i = 1, 2$)、 s^{-1}

q_g ：単位時間単位体積あたりのガス産出量、 s^{-1}

S_g ：ガス飽和率、—

式(1)~(3)中の水相およびガス相の易動度は次式で表わされる。

$$M_w = k k_{rw} / \mu_w \quad (4)$$

$$M_g = k k_{rg} / \mu_g \quad (5)$$

ここで、

k ：石炭層の絶対浸透率、 m^2

k_{rw} ：水相対浸透率、—

k_{rg} ：ガス相対浸透率、—

μ_w ：水の粘性係数、 $Pa \cdot s$

μ_g ：ガスの粘性係数、 $Pa \cdot s$

式(2)、(3)中のマトリックスからクリートへのガス拡散量 q_{mi} は、以下の式で表わす。

$$q_{mi} = \frac{V_m [C_i - C_i(P_i)]}{\tau_i}, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

ここで、

C_i ：単位体積あたりのガス成分*i*の平均ガス吸着量、—

V_m ：単位体積あたりのマトリックス体積、—

τ_i ：ガス成分*i*の吸着(脱着)時間、s

また、補助式として、以下の関係が成り立つ。

$$\sum_{i=1}^2 y_i = 1 \quad (7)$$

$$P_{cgw} = P_g - P_w \quad (8)$$

$$S_g + S_w = 1.0 \quad (9)$$

ここで、

P_{cgw} ：ガス-水相間の毛細管圧力、Pa

2.2 ガス吸着モデル

多成分ガスの石炭への吸着は、単成分の吸着式を多成分ガスに拡張した拡張ラングミュア吸着式で表わす^{8)~11)}。以下には、2成分の場合を示す。

$$C_i(P_i) = \frac{V_{Li} P_i}{P_{Li} \left[1 + \sum_{j=1}^2 (P/P_{Li})_j \right]}, \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

ここで、

C_i ：単位体積あたりのガス成分*i*の吸着量、—

V_{Li} ：ガス成分*i*のラングミュア体積、—

P_{Li} ：ガス成分*i*のラングミュア圧力、Pa

P_i ：ガス成分*i*の分圧、Pa

ガス成分*i*の分圧は、以下の関係式を満たす。

$$P_i = P y_i, \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

$$P = \sum_{i=1}^2 P_i \quad (12)$$

3. 初期石狩モデル

2003年より、(財)石炭エネルギーセンター(以下JCOAL)が実施主体となり、北海道石狩炭田南大夕張地区で予備実験を開始した⁵⁾。2003年には、炭層の諸調査を実施すると共にその後の予備実験用の坑井としてIW-1を掘削した。実施した調査項目は、1)現位置ガス包蔵量と炭層ガス成分、2)石炭コアサンプル採取と工業分析、3)石炭のガス吸着特性、4)地質

構造調査, 5) 炭層の厚さと深度の確定, 6) 炭層の絶対浸透率とクリート開口圧力, 7) 炭層の初期貯留層圧力と温度, である¹²⁾。現位置ガス包蔵量は, $22\text{m}^3/\text{t}$ と求まり, 海外のCBMガス田と比較してもガス包蔵量が多いことが確認された。また, 炭層圧力およびガス吸着曲線より, 初期状態では, 炭層のクリート内は水飽和でかつ炭層に吸着しているガスは飽和状態であると推測された。Table 1 に炭層ガス成分の実測値を示す。CH₄が主成分であるが, CO₂も初期状態で若干含まれることが判明している。

以上の予備実験の現位置測定データ, 坑井試験データ, 採取した石炭コアによる室内実験結果, 工業分析結果を基に数値モデルCOMET3を用いて初期石狩モデルを構築した¹³⁾。モ

デル化対象領域は断層により囲まれており, これらの断層は不透水境界とし, また炭層が薄いことから水平二次元モデルとした。グリッド分割は, IW-1, PW-1周辺では10m間隔に分割し, 坑井から離れるに従ってグリッド間隔を大きくした。Fig. 1中の彩色部がガス, 水の流動領域であり, 白抜部は不透水領域である。Table 2に初期石狩モデルで与えた炭層特性値およびその値の出所を示す。これらのほとんどの値は, 予備実験における実測データおよび室内実験結果に基づいているが, *印をつけた特性値は特定されておらず, 推定値を用いた。

4. 改良石狩モデル

4.1 2004年予備実験の概要

2004年には, PW-1を掘削し, IW-1におけるハフパフテスト(1坑井によるCO₂圧入およびCBMガス産出テスト)およびIW-1, PW-1の2坑井を用いたCO₂圧入・固定, CBMガス産出テストを実施した¹⁵⁾。本実験は, 我が国の炭層で初めて行われたCO₂圧入・固定現場実験である。

2坑井テストでは, CO₂の圧入に先立ち, 10月8日から10月30日までPW-1からCBMガスを産出した。PW-1は, 10月31日に一時シャットインしたが11月13日にCBMガス産出を再開し, 12月20日まで継続した。IW-1は, 圧入坑底圧力をほぼ15MPaにコントロールしながら, 11月9日から11月25日までCO₂を圧入した。この圧入坑底圧力は, クリートの炭層上下盤への進展を抑えCO₂の地上への漏洩を防ぐ観点から, クリート開口圧力である15.8MPaより低い値に設定した。Fig. 2にCO₂の圧入挙動, Fig. 3にCBMガスの産出挙動を示す。CO₂は16日間ほぼ2 t/dの一定量で圧入され, 圧入期間中の全圧入量は35.7tであった。また, Fig. 3より, CO₂圧入後からCBMガス産出量が増加しかつCO₂圧入終了後CBMガス産出量が減少傾向にあることにより, CO₂によるCBM生産促進効果がみとれる。

Table 1 Measured original gas composition

Component	CH ₄ (%)	C ₂ H ₆ (%)	C ₃ H ₈ (%)	C ₄ H ₁₀ (%)	N ₂ (%)	CO ₂ (%)
Sample 1	98.22	0.04	0.04	<0.01	0.15	1.55
Sample 2	97.89	0.03	0.04	<0.01	0.37	1.66
Sample 3	98.33	0.03	0.03	<0.01	0.06	1.55
Average	98.15	0.03	0.04	0	0.19	1.59

Fig. 1 Grid division of the Ishikari Model

Table 2 Coal seam properties of the initial Ishikari Model

Property	Value	Data Source
Gross interval top depth, m	890.08	Drilling and Log data
Gross interval bottom depth, m	896.30	Drilling and Log data
Net coal thickness, m	5.55(IW-1), 4.19(PW-1)	Drilling and Log data
Dip angle, degree	34.9(PW-1)	Drilling data
Absolute Permeability, m ²	1.0×10^{-15}	Water Injection/Falloff test
Relative permeability	Gash model ¹⁴⁾ *	Tentative curve
Cleat spacing, mm	7.5	Core observation
CH ₄ Langmuir volume, m ³ /t	28	Laboratory measurement
CH ₄ Langmuir pressure, kPa	1785	Laboratory measurement
CH ₄ Sorption time, d	5.0*	Tentative value
CO ₂ Langmuir volume, m ³ /t	44	Laboratory measurement
CO ₂ Langmuir pressure, kPa	972	Laboratory measurement
CO ₂ Sorption time, d	2.5*	Tentative value
Moisture and ash content, %	8.37	Core measurement
Porosity, %	1.0*	Tentative value
Pore Compressibility, kPa ⁻¹	0.0*	Tentative value

Fig. 2 CO₂ injection performance at IW-1 of the 2004 multi well test

Fig. 3 Gas and water production performance at PW-1 of the 2004 multi well test

4.2 改良石狩モデルの構築

初期石狩モデルでは予備実験データで得られなかった炭層特性値に関しては、推定値を用いている。そこで、2004年に実施したIW-1, PW-1の2坑井を用いたCO₂圧入・固定、CBMガス産出試験データを用いてヒストリーマッチングスタディを行い、より精度の高い改良石狩モデルを構築した¹⁶⁾。改良石狩モデル構築にあたっては、坑井掘削、現場試験、現場測定、室内実験、工業分析などで得られた炭層特性値の実データ値は変更することなく、推定データについてのみセンシティブスタディを行い、CBMガス産出量や水産出量に関するヒストリーマッチングによりモデルを改良した。ここでいう推定データは、Table 2の*で示した相対浸透率、脱着時間、孔隙率、孔隙圧縮率である。Table 3にそれらの値を示す。また、ヒストリーマッチング実施に当たっては、IW-1におけ

Table 3 History matching parameters

Parameters	Value
Relative permeability	Gash model ¹⁴⁾ , Linear model*
CH ₄ Sorption time, d	0.5, 5.0*, 50
CO ₂ Sorption time, d	0.25, 2.5*, 25
Porosity, %	0.6, 0.8*, 1.0
Pore Compressibility, kPa ⁻¹	0, 1.0×10 ⁻³ , 1.0×10 ⁻⁴ *, 1.0×10 ⁻⁶

Fig. 4 Relative permeability curves

るCO₂圧入量、PW-1における水産出量を入力データとし、PW-1におけるCBMガス産出量をマッチング対象とした。

相対浸透率については、Gashモデル¹⁴⁾とLinearモデルとを比較検討した。それぞれの相対浸透率曲線をFig. 4に示す。センシティブスタディよりLinearモデルの方が適していることが示唆されたが、さらにガス、水産出量の実測データからも検討した。ガス、水産出量から以下の式でガス・水相対浸透率比を推定することができる¹⁷⁾。

$$\frac{k_g}{k_w} = \frac{k_{Tg}}{k_{Tw}} = \frac{(q_g - R_{sw}q_w)\mu_g B_g}{q_w \mu_w B_w} \quad (13)$$

ここで、

k_g = ガスの有効浸透率, m²

k_w = 水の有効浸透率, m²

R_{sw} = ガス溶解度, -

B_g = ガス容積係数, -

B_w = 水容積係数, -

ガス、水産出量の実測データ、初期石狩モデルで用いた粘性係数、容積係数の値を用い、水へのメタンガス溶解は無視して、(13)式よりガス・水相対浸透率比 (k_{Tg}/k_{Tw}) を求めた。結果をFig. 5に示す。この図より、予備実験期間終了付近のガス・水相対浸透率比はほぼ0.05付近であることがわかる。また、GashモデルとLinearモデルの相対浸透率曲線について求めたガス・水相対浸透率比をFig. 6に示す。PW-1周辺の水飽和率変化は、初期石狩モデルの解析によれば、予備実験期間中は1.0から0.95程度である。従って、水飽和率0.95でガス・水相対浸透率比がほぼ0.05であるLinearモデルのガス・水相

Fig. 5 Relative permeability ratio obtained from production data

Fig. 6 Relative permeability ratio obtained from relative permeability curves

対浸透率曲線の使用が妥当であることがガス・水産出量の実データからも裏付けられた。

CH₄ 脱着時間および CO₂ 脱着時間は、センシティビティスタディより、極端に小さな値以外はガス産出挙動には大きな影響を与えないことがわかったので、値を変更しないこととした。

孔隙率についてはセンシティビティスタディより、生産開始後のCBMガス産出量の増加割合に影響を与えることが判明した。CO₂ 圧入後のCBMガス産出量増加割合に関するヒストリーマッチングから、0.8%が妥当との結論を得た。

Fig. 3 に示したようにCBMガス産出量は、CO₂ 圧入期間中は増加するが、CO₂ 圧入終了後減少する。この、CBMガス産出の減少挙動が、孔隙の収縮に関連していると推定されることから、孔隙圧縮率が 0 kPa⁻¹、 1×10^{-3} kPa⁻¹、 1×10^{-4} kPa⁻¹、 1×10^{-6} kPa⁻¹ の値を与えて、CBMガス産出の減少挙動に関するヒストリーマッチングを行った。これより、孔隙圧縮率は 1×10^{-4} kPa⁻¹ の値が妥当であるとの結論を得た。孔隙圧縮率は、砂岩など一般的な岩石ではおよそ 1×10^{-6} kPa⁻¹ のオーダーであることが知られているが、ここで与えた値はそれより 2 桁程度大きな値である。Zheng ら¹⁸⁾ および Seidel ら¹⁹⁾ によれば、米国の代表的なCBMガス生産地である Black Warrior BasinのBlue Creek, Freeport, Warrior BasinのOak Grove, San Juan BasinのFruitland Formationで得られた石炭サンプルで測定された孔隙圧縮率は、 1×10^{-4} kPa⁻¹ のオーダーであると報告されている。これより、ヒストリーマッチングスタディより推定された石狩炭田南大夕張地区の炭層の孔隙圧縮

率は、一般的な貯留岩より 2 桁程度大きな値であるが、米国の代表的なCBMガス生産地の炭層と同程度であり、妥当な値であることが文献からも裏付けられた。

最終的に得られたヒストリーマッチング結果を Fig. 7 に、また、ヒストリーマッチング時の諸パラメータ値をTable 3中に*印で示す。これらのヒストリーマッチングスタディより、クリート中のガス・水の 2 相流動は、Linear モデルの相対浸透率曲線が適していること、CO₂ 圧入終了後のCBMガス産出の減少挙動は孔隙の収縮、すなわちクリエットの閉塞が関係していることが推察された。

5. 改良石狩モデルの検証と考察

5.1 2005 年予備実験の概要

2005 年には、2004 年に引き続き IW-1, PW-1 による 2 坑井試験を実施した。PW-1 では、8 月 1 日から CBM ガス産出を開始し、積雪で実験を終了した 12 月 18 日まで継続した。IW-1 は、圧入坑底圧力をほぼ 15.5MPa にコントロールしながら、8 月 26 日から 10 月 6 日まで、42 日間 CO₂ を圧入した。Fig. 8 に CO₂ の圧入挙動、Fig. 9 に CBM ガスの産出挙動を示す。Fig. 8 中で一時的に圧入坑底圧力が低下し CO₂ 圧入量が減少している時期があるが、これは試験的に CO₂ 圧入量と坑底圧力の関係を調べるため坑底圧力を低下させたためである。また、Fig. 9 中で CBM ガス産出が大きく低下している期間があるが、これはポンプの故障により、一時的に揚水できない期間があったためである。また、Fig. 9 中で水および CBM ガス産出データを 12 月 7 日までしか示していないが、これは、12 月 8

Fig. 8 CO₂ injection performance at IW-1 of the 2005 multi well test

Fig. 7 History matching for gas production at PW-1 of the 2004 multi well test

Fig. 9 Gas and water production performance at PW-1 of the 2005 multi well test

日以降外気温が低下し、正確な CBM ガス流量が測定できなかったためである。2005 年の CO₂ 圧入試験では、初期圧入量は、1.6t/d と 2004 年の CO₂ 圧入量より低い値を示した。この原因としては、海外における炭層への CO₂ 圧入実験でも指摘されているように^{20) 21)}、2004 年に圧入された CO₂ が吸着し石炭が膨潤した結果、CO₂ 圧入性能が低下した可能性が考えられる。また、2004 年の CO₂ 圧入実験では、CO₂ 圧入量はほぼ一定であったのに対して、2005 年の圧入実験では、CO₂ 圧入を継続するにつれて、CO₂ 圧入量は徐々に増加し、圧入終了時点では、3.5t/d と初期圧入量のほぼ 2 倍に達した。これは、2004 年より長期間、より高い圧力で CO₂ を圧入した結果、クリートへの有効応力が減少し、クリート幅が広がることにより CO₂ 圧入能力が増加したためと考えられる。42 日間にわたる圧入期間中の全圧入量は 115.4t であった。また、Fig. 9 より、CO₂ が圧入され始めると CBM ガス産出量が増加に転じ、CO₂ 圧入が終了すると CBM ガス産出量が減少に転じていることから、2005 年の 2 坑井試験においては、より明確に CO₂ 圧入による CBM 生産促進効果があらわれているとみることができ

5.2 改良石狩モデルの検証

2005 年に実施した CO₂ 圧入・固定、CBM ガス産出の 2 坑井試験実測データと改良石狩モデルのシミュレーション結果との比較により、改良石狩モデルを検証した。IW-1 における CO₂ 圧入量、PW-1 におけるガス産出量を入力データとし、PW-1 における水産出量をマッチングデータとした。Fig. 10 に実測データと改良石狩モデルのシミュレーション結果との比較を示す。PW-1 からの水産出量の実測データとシミュレーション結果はほぼ同様の傾向を示しており、改良石狩モデルが検証されたと考えられる。

5.3 考 察

改良石狩モデルを用いて、CO₂ 圧入による CBM 生産促進効果と CO₂ 圧入による炭層の浸透率低下について考察した。

まず、CO₂ 圧入による CBM 生産促進効果について述べる。2005 年の 2 坑井試験データを用い、PW-1 からの水産出量は同じと仮定して、CO₂ を圧入するケースと圧入しないケースについて、改良石狩モデルを用いて PW-1 からの CBM 産出挙動を

Fig. 10 Comparison of measured and calculated production performance

Fig. 11 Comparison of gas production rate for CO₂ injection and no injection case

Fig. 12 Comparison of measured and calculated CO₂ injection rate

比較した結果を Fig. 11 に示す。2005 年の 2 坑井試験では、2004 年の 2 坑井試験と比べて、CO₂ 圧入期間が長くかつ総 CO₂ 圧入量が多いため CO₂ 圧入による CBM 生産促進効果は顕著であり、CO₂ を圧入しない場合に比べて、ほぼ 10 倍の CBM ガスを産出することが示された。これにより、我が国の炭層においても、CO₂ 圧入による CBM 生産促進効果が顕著であることが改良石狩モデルによる考察により示された。

次に、CO₂ 圧入による炭層の浸透率低下について述べる。2004 年および 2005 年の 2 坑井試験結果より、圧入された CO₂ の石炭への吸着により石炭が膨潤し CO₂ の圧入性能が低下していることが推察されたため、改良石狩モデルを用いて、IW-1 周辺の炭層浸透率変化を調べた。IW-1 の CO₂ 圧入圧力を 15.5 MPa で一定とし、IW-1 周辺の絶対浸透率をパラメータとして CO₂ 圧入量の実測データと改良石狩モデルの CO₂ 圧入量の比較を Fig. 12 に示す。これにより、2004 年に CO₂ 圧入実験が終了してから、2005 年の CO₂ 圧入実験開始までの間に CO₂ の石炭への吸着による膨潤作用により、IW-1 周辺の絶対浸透率が $1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ から $6.0 \times 10^{-17} \text{ m}^2 \sim 7.0 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 程度まで大きく低下したと推定された。

6. 結 言

本研究では、CBM ガス開発に広く使われている数値モデル COMET3 を用い、2003 年より石狩炭田南大夕張地区で実施されている CO₂ 圧入予備実験から得られた炭層特性値を基に改良石狩モデルを構築し、以下の結論を得た。

- 1) 石狩炭田の孔隙圧縮率は、米国の代表的なCBMガス生産地と同様、 $1 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$ 程度である。
- 2) 石狩炭田を対象とするシミュレーションモデルでは、相対浸透率曲線はLinearモデルが適している。
- 3) 石狩炭田におけるCO₂圧入によるCBM生産促進効果は顕著であり、2005年のCO₂圧入予備実験では、CO₂を圧入しない場合と比べて10倍程度CBMガス産出量が増加したと推定された。
- 4) CO₂を炭層に圧入すると、CO₂の石炭への吸着による膨潤作用により、炭層の浸透率が、低下する。石狩炭田におけるCO₂圧入予備実験では、圧入井周辺の炭層浸透率が、 $1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ から $6.0 \times 10^{-17} \text{ m}^2 \sim 7.0 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 程度まで大きく低下したと推定された。

謝 辞

本研究は、経済産業省二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業「二酸化炭素炭層固定化技術開発」(事業者、(株)環境総合テクノス)により実施された。

文 献 : References

- 1) Gunter, W. D., Mavor, M. J., Robinson, J. R., Proc. of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Vol. I, p. 413 (2005)
- 2) Pagnier, H., et. al., Proc. of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Vol. II, p. 1391 (2005)
- 3) Wong, S., et. al., Proc. of the 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, (2006)
- 4) Connell, et. al., Proc. of the 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, (2006)
- 5) 名子雅夫, 片桐政信, 山口伸次, 資源・素材2004(盛岡)予稿集, B1-7, p. 135 (2004); Nako, M., Katagiri, M., Yamaguchi, S., Proc. of Sigen Sozai 2004(Morioka), B1-7, p. 135 (2004)
- 6) Advanced Resources International, COMET3 Version 2.0 Users Manual, (2005)
- 7) 山口伸次, 日エネ誌, **83**, 513 (2004); Yamaguchi, S., *J. Jpn. Inst. Energy*, **83**, 513 (2004)
- 8) Ruthven, D. M., Principle of Adsorption and Adsorption Processes, (John Wiley & Sons, Inc.), (1984)
- 9) Yang, R. T., Gas Separation by Adsorption Processes, (Butterworths Publishers), (1987)
- 10) Arri, L. E. et al., SPE24363, Proc. of the SPE Rocky Regional Meeting, p. 18 (1992)
- 11) Hall, F. E. et al., SPE19194, Proc. of the 1994 Eastern Regional Conference & Exhibition, p. 8 (1994)
- 12) 藤岡昌司, 山口伸次, 資源・素材2004(盛岡)予稿集, B1-8, p. 139 (2004); Fujioka, M., Yamaguchi, S., Proc. of Sigen Sozai 2004(Morioka), B1-8, p. 139 (2004)
- 13) Yamaguchi, S., Ohga, K., Fujioka, M., Muto, S., Proc. of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Vol. I, p. 423 (2005)
- 14) Gash, B. W., SPE22909, Proc. of the 66th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, (1991)
- 15) 山口伸次, 藤岡昌司, 名子雅夫, 日本機械学会2005年度年次大会講演論文集, Vol. 3, p. 283 (2005); Yamaguchi, S., Fujioka, M., Nako, M., Proc. of Mechanical Engineering Congress 2005 Japan, Vol. 3, p. 283 (2005)
- 16) Yamaguchi, S., Fujioka, M., Nako, M., Proc. of the Fifth International Conference on Materials Engineering for Resources, p. 316 (2005)
- 17) Saulsberry, J. L., Schafer, P. S., Schraufnagel, R. A. (Eds.), A Guide to Coalbed Methane Reservoir Engineering, (Gas Research Institute), p. 5.15 (1996)
- 18) Zheng, Z., McLennan, J. D., Jones, A. H., Spafford, S., Proc. of the 1992 International Gas Research Conference, Vol. I, p. 77 (1993)
- 19) Seidle, J. P., Jeansonne, M. W., Erickson, D. J., SPE24361, Proc. of the SPE Rocky Mountain Regional Meeting, (1992)
- 20) Reeves, S., Taillefert, A., Pekot, L., Clarkson, C., Topical Report, U.S. Department of Energy, DE-FC26-0NT40924 (2003)
- 21) Shi, J. Q., Durucan, S., Proc. of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Vol. I, p. 431 (2005)