

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2012

課題番号：23686129

研究課題名（和文） 石炭のクリートネットワークにおける流体流動の解明と CO<sub>2</sub>-ECBM/S への応用研究課題名（英文） Investigation of fluid flow through a cleat network in coal and its application to CO<sub>2</sub>-ECBM/S

研究代表者

渡邊 則昭 (WATANABE NORIAKI)

東北大学・大学院環境科学研究科・助教

研究者番号：60466539

研究成果の概要（和文）：

本研究では、CO<sub>2</sub>-ECBM/S への応用を念頭に、石炭のクリート（き裂）ネットワークにおける二相流体流動特性を解明することを目的とした。上下面がかみ合ったき裂に対する封圧下二相流動実験を実施し、相対浸透率の顕著な毛管圧依存性を明らかにした。また、き裂開口幅分布を用いた二相流動モデル解析を実施し、どの既存モデルとも異なる相対浸透率曲線を得た。今後、より広範な条件での二相流動特性に関する研究の必要性が明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

The main objective of the present study was to clarify two-phase flow characteristics of a cleat (fracture) network in coal, for applications to the CO<sub>2</sub>-ECBM/S. Two-phase flow experiments and model simulations on mated fractures revealed relative permeability curves of fractures, which were entirely different from existing models, suggesting necessity of further studies on two-phase flows through fractures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2012 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
年度			
総計	6,200,000	1,860,000	8,060,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：資源開発工学、流体、二酸化炭素排出削減、フラクチャー、二相流

## 1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素がメタンよりも石炭へ吸着しやすいことを利用して、石炭の空隙表面に吸着しているメタンを二酸化炭素で置換し、二酸化炭素を固定すると同時にメタンを生産する、CO<sub>2</sub>-Enhanced Coal Bed Methane/Sequestration (CO<sub>2</sub>-ECBM/S) と呼ばれる二酸化炭素固定法があり、実用化に向けた取り組みが米国やカナダそして我が国などで実施されている。

CO<sub>2</sub>-ECBM/S は、メタンの生産により二酸化炭素の固定に要するコストの一部もしくは全部をまかなうことができる点で他の方法と比較して優位性があると言われている。また、同じ温度・圧力条件下では炭層メタン貯留層の方が同規模の在来型天然ガス貯留層よりも二酸化炭素の固定量およびメタンの生産量が大きいと言われており、全世界の炭層メタン貯留層の二酸化炭素固定ポテンシャルは 225Gt～964Gt と膨大である。しかし、

学術的基盤が整備されておらず、在来型天然ガス貯留層開向けの古い技術が用いられることが多い。

例えば、CO<sub>2</sub>-ECBM/Sにおいては、炭層メタン貯留層におけるクリート（フラクチャー）ネットワークにおける水（濡れ相）とガス（非濡れ相）の二相流動特性の把握が重要であるが、そもそもフラクチャーにおける二相流動特性に関する研究は非常に限られており、しかも既存の研究においては、ガラスや樹脂で作製した模擬フラクチャーが使用されてきた。フラクチャーの二相流体流動特性は、フラクチャーの表面の濡れ性や、封圧条件等に依存した開口幅分布に大きく影響されると考えられるが、既存の研究で用いられた模擬フラクチャーの濡れ性や開口幅分布は、フラクチャーのもととは異なっている。したがって、既存の研究で得られたXモデル等の相対浸透率曲線が、フラクチャーに適用可能かどうかは不明である。

## 2. 研究の目的

本研究では主に、CO<sub>2</sub>-ECBM/Sへの応用を念頭に、室内実験および数値モデル解析とカップリングした独自の研究手法により、封圧下のフラクチャーの二相流動特性を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

直径50mm、長さ50mmの単一のフラクチャーの上下面同士が良くかみ合ったフラクチャーを含む二相流動実験用サンプルを作製し、後述の二相流動数値モデル解析で使用する開口幅分布の決定するため、実験前にフラクチャーの表面形状をレーザー変位計で測定した。

二相流動実験では、Semi-dynamic法と呼ばれる方法を用い、封圧下のフラクチャーにおける非濡れ相の相対浸透率と毛管圧力の影響を評価した。この方法では、非濡れ相のみを流動させ、濡れ相を流動せずに一定の圧力に保つため、毛管圧力の制御が容易である。

後述の二相流動実験の結果より、毛管圧力の影響が大きいことが明らかになったため、二相流動モデル解析では、これまでに用いてきた実際のフラクチャーの開口幅分布を使用可能な定常・単相流モデル解析を発展させ、二つの相の粘度および二相間にはたらく毛管圧力の両方の影響を考慮した非定常・二相流動モデル解析手法を用い、相対浸透率曲線の取得を試みた。ここで、二相流モデル解析に用いるフラクチャーの開口幅分布は、上述の表面形状の測定データから決定されるものであり、実験サンプル中のフラクチャーの絶対浸透率を再現可能なものである。

## 4. 研究成果

### (1) 二相流動実験

二相流動実験により、封圧下のフラクチャーにおける非濡れ相の相対浸透率と毛管圧力の関係を評価したところ、多孔質岩と同様にフラクチャーにおいても毛管圧の影響が無視できないことが明らかになった（図1）非濡れ相の相対浸透率は、毛管圧力の減少に伴って減少し、ある毛管圧以下で急激に減少することがわかった。また、封圧が大きいほど、同じ毛管圧力における非濡れ相の相対浸透率は小さいことがわかった。

このような二相流動実験の結果から、ガラスや樹脂等で作製した模擬フラクチャーを用いた既往の研究で得られた相対浸透率曲線のうち相間の相互干渉を全く考慮しないXモデルや、粘性による相間の相互干渉のみを考慮したViscous coupling modelモデルでは、毛細現象の影響が無視できないフラクチャーの二相流動特性を再現できないことが明らかになった。

したがって、本二相流動実験では測定できないフラクチャー内部の各相の飽和率を決定し、相対浸透率曲線を得るための二相流動モデル解析には、毛細現象の影響を考慮した二相流動モデルが必須であることがわかった。

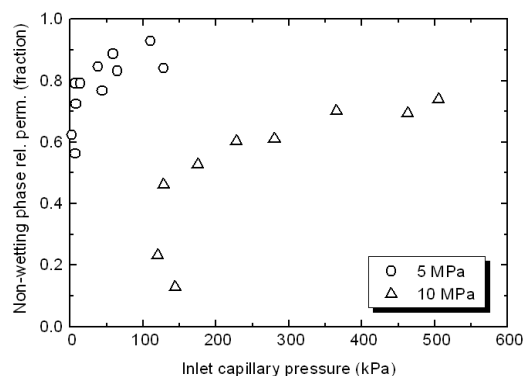


図1. 封圧下のフラクチャーにおける非濡れ相の相対浸透率と毛管圧力の関係。

### (2) 二相流動モデル解析

毛管現象を考慮した二相流動モデル解析を実施するために、既存のLocal Cubic Law (LCL)に基づく定常・単相流モデルと、Young-Laplace方程式に基づく局所毛管現象モデルとを組み合わせた、毛管現象と粘性の影響の両方を考慮可能な定常・二相流動モデルを構築した。本モデルにおける方程式は、既知の相分布における瞬間的な流体流動を記述するものであるが、相分布を時間発展させながら本方程式を繰り返し解くことにより、非定常・二相流動解析が可能である。

まず、本二相流動を検証するために、二相流動実験で得られた非濡れ相の相対浸透率と毛管圧の再現を試みた（図2）。その結果、

モデル解析結果は、実験結果と完全には一致しないものの、ほぼ実験結果を再現可能であることがわかった。

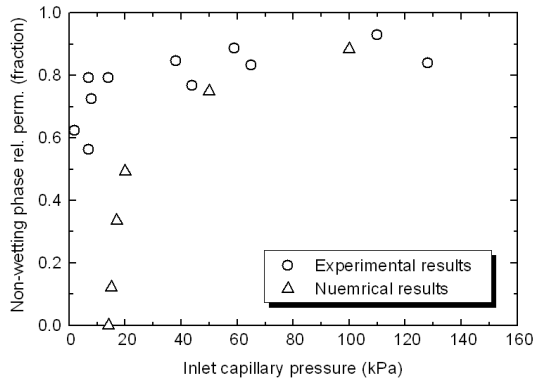


図2. 二相流動モデル解析による二相流動実験結果の再現.

そこで実験で使用したフラクチャーに関して、濡れ相および非濡れ相の相対浸透率と飽和率の関係を評価し、相対浸透率曲線を求めたところ、やはりフラクチャーの相対浸透率曲線は、相間の相互干渉を全く考慮しない X モデルや、粘性による相間の相互干渉のみを考慮した Viscous coupling model モデルとは全く異なり、加えて毛管現象の影響を考慮した多孔質岩に良く用いられる Corey モデルとも異なるものであった (図3)。フラクチャーの相対浸透率曲線は、Corey モデルと比較して、非濡れ相の相対浸透率に対する濡れ相の飽和率の依存性が極めて大きいことが特徴的である。このことは、多孔質岩と比較して、フラクチャーにおける相間の相互干渉が大きいことを示唆している。フラクチャー内の二相流動においては、多孔質岩の場合とは異なり、二次元的な流路しか形成できない。したがって、多孔質岩と比較して、非濡れ相が濡れ相を迂回する流路が形成されにくいと言える。このことが、多孔質岩よりもフラクチャーにおいて相間の相互干渉が大きい要因となっていると考えられる。

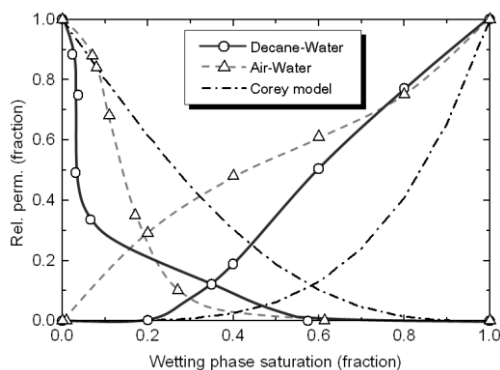


図3. 封圧下のフラクチャーにおける相対浸透率曲線 (Corey モデルと比較).

本研究を実施することにより、既存の相対

浸透率曲線では、フラクチャーの二相流動特性を表現することができないことが明らかになった。しかしながら本研究では、フラクチャーの上下面が良くかみ合ったフラクチャーのみを使用しており、また封圧条件も限られている。フラクチャーの上下面のかみ合い (せん断変位) の変化や封圧により開口幅分布が変化した場合、二相流動特性も本研究のものとは異なる可能性があるため、今後より広範な条件での二相流動特性の評価が必要であることが明らかになった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① T. Ishibashi, N. Watanabe, N. Hirano, A. Okamoto, N. Tsuchiya, GeoFlow: A novel model simulator for prediction of the 3-D channeling flow in a rock fracture network, Water Resources Research, 査読有, 48, 2012, W07601, DOI:10.1029/2011WR011226
- ② N. Watanabe, T. Ishibashi, N. Tsuchiya, Y. Ohsaki, T. Tamagawa, Y. Tsuchiya, H. Okabe, H. Ito, Geologic core holder with a CFR PEEK body for the X-ray CT based numerical analysis of fracture flow under confining pressure, Rock Mechanics and Rock Engineering, 査読有, 46(2), 2012, 413-418, DOI:10.1007/s00603-012-0311-5
- ③ N. Watanabe, K. Sakurai, T. Ishibashi, N. Tsuchiya, Relative permeability measurement and numerical modeling of two-phase flow through variable aperture fracture in granite under confining pressure, Geothermal Resources Council Transactions, 査読有, 36, 2012, 583-587, URL: <https://www.geothermal-library.org/index.php?mode=pubs&action=view&record=1030285>
- ④ T. Ishibashi, N. Watanabe, N. Hirano, A. Okamoto, N. Tsuchiya, Upgrading of aperture model based on surface geometry of natural fracture for evaluating channeling flow, Geothermal Resources Council Transactions, 査読有, 36, 2012, 481-486, URL: <https://www.geothermal-library.org/index.php?mode=pubs&action=view&record=1030268>
- ⑤ T. Ishibashi, N. Watanabe, N. Hirano,

A. Okamoto, N. Tsuchiya, T. Tamagawa, Impact of 3D channeling flow on well productivity in the Yufutsu oil/gas field, Proceedings of the 18th Formation Evaluation Symposium of Japan, 査読無, 2012, Paper K

- ⑥ N. Watanabe, K. Sakurai, T. Ishibashi, N. Tsuchiya, Experimental and numerical investigation of two-phase flow in a rock fracture under confining pressure, Proceedings of the 18th Formation Evaluation Symposium of Japan, 査読無, 2012, Paper G
- ⑦ T. Ishibashi, N. Watanabe, N. Hirano, A. Okamoto, N. Tsuchiya, Experimental and numerical evaluation of channeling flow in fractured type of geothermal reservoir, Proceedings of Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 査読無, 2012, 759-766

[学会発表] (計 15 件)

- ① N. Watanabe, T. Ishibashi, T. Tamagawa, N. Tsuchiya, Field-scale fluid flow analysis by a novel fracture network model simulator, GeoFlow, 10<sup>th</sup> International Workshop on WATER DYNAMICS & ICDP Japan Beyond-Brittle Project, 2013年3月14日, 仙台
- ② T. Ishibashi, N. Watanabe, T. Tamagawa, N. Hirano, A. Okamoto, N. Tsuchiya, Challenging to analysis of 3-D channeling flow through fractured type of reservoir by GeoFlow, 10th International Workshop on WATER DYNAMICS & ICDP Japan Beyond-Brittle Project, 2013年3月12日, 仙台
- ③ K. Sakurai, N. Watanabe, T. Ishibashi, T. Tamagawa, N. Hirano, A. Okamoto, N. Tsuchiya, Relative permeability measurement and numerical modeling of two-phase flow through fracture in granite under confining pressure, 10th International Workshop on WATER DYNAMICS & ICDP Japan Beyond-Brittle Project, 2013年3月12日, 仙台
- ④ 石橋 琢也, 渡邊 則昭, 玉川 哲也, 平野 伸夫, 岡本 敦, 土屋 範芳, GeoFlow によるマルチスケールフラクチャーネットワークの流体流動特性の評価と予測, 日本地熱学会平成 24 年学術講演会, 2012 年 10 月 24 日, 秋田
- ⑤ 櫻井 圭介, 渡邊 則昭, 石橋 琢也, 土屋 範芳, 実験および数値解析による封圧下花崗岩き裂における非混和二相

流動特性の解明, 日本地熱学会平成 24 年学術講演会, 2012 年 10 月 25 日, 秋田

- ⑥ 石橋 琢也, 渡邊 則昭, 玉川 哲也, デレック エルスワース, 土屋 範芳, き裂系における地殻流体の流動, 資源・素材学会東北支部 第 5 回若手の会, 2012 年 10 月 12 日, 秋田
- ⑦ 櫻井 圭介, 渡邊 則昭, 石橋 琢也, 土屋 範芳, 実験および数値解析による封圧下花崗岩き裂中の二相流動特性の解明, 資源・素材学会東北支部 第 5 回若手の会, 2012 年 10 月 12 日, 秋田
- ⑧ N. Watanabe, K. Sakurai, T. Ishibashi, N. Tsuchiya, Relative permeability measurement and numerical modeling of two-phase flow through variable aperture fracture in granite under confining pressure, 2012 Geothermal Resources Council Annual Meeting, 2012 年 10 月 2 日, リノ, 米国
- ⑨ T. Ishibashi, N. Watanabe, N. Hirano, A. Okamoto, N. Tsuchiya, Upgrading of aperture model based on surface geometry of natural fracture for evaluating channeling flow, 2012 Geothermal Resources Council Annual Meeting, 2012 年 10 月 2 日, リノ, 米国
- ⑩ N. Watanabe, K. Sakurai, T. Ishibashi, N. Tsuchiya, Experimental and numerical investigation of two-phase flow in a fracture under confining pressure, The 18<sup>th</sup> Formation Evaluation Symposium of Japan, 2012 年 9 月 27 日, 千葉
- ⑪ T. Ishibashi, N. Watanabe, N. Hirano, A. Okamoto, N. Tsuchiya, Impact of 3D channeling flow on well productivity in the Yufutsu oil/gas field, The 18<sup>th</sup> Formation Evaluation Symposium of Japan, 2012 年 9 月 27 日, 千葉
- ⑫ 渡邊 則昭, 櫻井 圭介, 石橋 琢也, 土屋 範芳, 封圧下のフラクチャーにおける二成分二相流に関する相対浸透率測定および数値モデリング, 平成 24 年度石油技術協会春季講演会, 2012 年 6 月 6 日, 秋田
- ⑬ 石橋 琢也, 渡邊 則昭, 平野 伸夫, 岡本 敦, 土屋 範芳, GeoFlow によるマルチスケールフラクチャーネットワークの流体流動特性の評価と予測, 平成 24 年度石油技術協会春季講演会, 2012 年 6 月 6 日, 秋田
- ⑭ N. Watanabe, H. Ito, X-ray CT imaging and hydrologic characterization of fractured core samples under stress, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 24 日, 千葉
- ⑮ T. Ishibashi, N. Watanabe, N. Hirano,

A. Okamoto, N. Tsuchiya, Experimental and numerical evaluation of channeling flow in fractured type of geothermal reservoir, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 2012年1月31日, 2012, スタンフォード, 米国

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 則昭 (WATANABE NORIAKI)  
東北大学・大学院環境科学研究科・助教  
研究者番号：60466539

(2) 研究分担者

該当無し ( )  
研究者番号：

(3) 連携研究者

該当無し ( )  
研究者番号：