

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 6 日現在

機関番号：11401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656543

研究課題名(和文) 光ファイバー温度計を用いたメタンハイドレート層の熱物性現位置評価法の開発

研究課題名(英文) Development of in-situ testing method of methane hydrate deposits using optical fiber thermometers

研究代表者

藤井 光 (Fujii, Hikari)

秋田大学・その他部局等・教授

研究者番号：80332526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：メタンハイドレート開発シミュレータの精度の向上には、入力する熱物性値の正確さが重要である。地層の熱伝導率の値は通常コア分析により決定されているがこの方法では高コストであるだけでなく、コア運搬時にMHが分解するためデータの質保証が難しい。そこで、本研究ではMH生産挙動予測の精度向上を目指して、MH層における熱伝導率分布の原位置測定法を確立させるため室内実験、フィールド試験解析および数値シミュレーションモデルの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：For the improvement of reliability of methane hydrate (MH) simulators, the availability of accurate thermal properties of deposits is of crucial importance. Though these properties are measured through core analysis in oil fields, core analysis for MH is technically challenging since the MH could be dissociated during the transportation from the bottomhole to surface. In this research, therefore, laboratory tests, interpretation of field tests and numerical simulations were carried out to establish the in-situ evaluation procedures of thermal conductivity of MH deposits.

研究分野：地球・資源システム工学

キーワード：メタンハイドレート 熱伝導率 フィールド試験 サーマルレスポンス試験 地中熱利用

1 . 研究開始当初の背景

MH 資源の効率的な生産手法に関する検討は、近年の専用シミュレータの開発により可能となりつつある。シミュレーションの計算精度の向上には、入力する貯留層パラメータの正確さがきわめて重要である。特に MH 層からの生産手法として有望と考えられている減圧法では、MH 層上下盤及び挟在層の顕熱を MH 分解に用いるため、MH 層および周辺地盤の熱伝導率がガス生産挙動に大きく影響する。油ガス田では、一般的に地層の熱伝導率はコア分析により決定されるが、MH 層からコアを採取し、熱伝導率を測定することは、掘削リグを長期間使用するため高コストであり、これに加えてコアを地上に運搬する際に温度上昇や減圧により MH が分解するため、データの質の保証が難しい。

そこで本研究では MH 層の熱伝導率分布を原位置で可能にする地層評価法の開発を地中熱利用技術を用いて目指した。

2 . 研究の目的

MH 層の熱伝導率分布の推定は上述のように重要性が高いが、地中熱利用分野ではサーマルレスポンス試験 (TRT) により地層熱伝導率の現位置推定が行われている。TRT では電気ヒーターで熱負荷を与えた熱媒体を坑井内に循環し、温度上昇曲線の傾きより地層の平均熱伝導率を推定し、試験区間の平均熱伝導率を求めることができる。さらに、申請者らにより提案された光ファイバー温度計を用いた TRT では、深度方向の地温変化より熱伝導率分布が高精度で推定可能であり、その精度はフィールド試験により実証されている。そこで、本研究は TRT 技術を MH 層に適用することにより、MH 層における熱伝導率分布の現位置測定法の確立を目指した。

TRT では通常は坑井内に熱媒体を循環して地層に熱フラックスを与え、この際に坑井で温度応答を光ファイバー温度計で多点同時に温度応答を計測し、このデータを非線形回帰法で逆解析することにより熱伝導率を推定する。しかし、熱フラックスの発生は、MH の分解による地層内での気相の発生を伴うため、これを防ぐことを念頭に、本研究では従来式 (ヒーターによる加熱法) とは異なる冷凍機を用いてマイナスの熱負荷を地層に与える冷却式 TRT の適用を試みた。また、各 TRT で重要になる地層内の温度挙動を高精度で予測するため、坑井周辺の熱輸送を再現する数値モデルを構築・実証した。

3 . 研究の方法

1) MH 層の熱伝導率の原位置評価試験を模した室内試験

本研究項目では、氷飽和した MH 模擬地層を作成し、これに -10 前後の冷却水 (不凍液) を循環して TRT を行った。模擬地層は直径 400mm、深さ 600mm の塩化ビニール管の中央に地中熱交換器を設置し、充填材として川砂

を敷き詰めた。地中熱交換器は内管・外管より構成される同軸型であり、外管には管長 53cm、管径 21.7mm、熱伝導率 16W/(m・K) のステンレス管、内管には管径 12.0mm、熱伝導率 0.21W/(m・K) のアクリル管の地中熱交換器を用いた。内管にアクリル管を用いたのはチュービング・アニュラス間の熱干渉を防ぐためである。

実験中は地盤内の温度変化を高精度で計測するため、地層内に白金測温抵抗体温度センサーを 5 点設置した。また、熱損失を防ぐために模擬地層外壁に断熱シートを 20mm ほどの厚さに巻きつけ、さらに周囲を発泡スチロール板で囲んだ。循環媒体にはエチレングリコール 40% 水溶液を使用した。以下に実験手順を記す。

模擬地下水層の凍結

模擬地層外壁に冷却水を循環する。冷却中は冷却水循環装置のコンプレッサーを停止させないように模擬地層冷却用の熱負荷調整装置を用いて冷却水の温度調整をする。凍結状況を確認するためデータロガーによって土壤温度をモニタリングし、土壤全体の凍結確認後に冷却水循環装置を停止させ、土壤全体の温度が均一になるまで数時間放置する。

TRT の実施

冷却水循環装置内で冷却水を 0 にし、地中熱交換器に冷却水を循環させる。冷却水循環装置の設定温度は -10 にし、TRT 用の熱負荷調整装置によって熱負荷を調整する。循環中は循環水温、地層内温度および循環流量をデータロガーで記録する。地中熱交換器と模擬地層の外壁の距離 (200mm) を考慮して、試験時間は 3 時間とする。

数値モデリング

数値シミュレーションソフト FEFLOW を用いて、3 次元熱輸送モデルを作成し、熱交換井出口水温・地層温度の計算値と実測値の比較によりモデルの妥当性の検証を行う。

2) MH 層の熱伝導率原位置推定を目的とした数値シミュレーションモデルの開発

有限差分法を用いたモデルの構築

TRT 技術を MH 層に適用するために、FORTRAN95 を用いて、同軸型地中熱交換器と周辺地盤の伝熱現象をフィールド規模で再現する数値シミュレーションモデルを構築した。同モデルは熱伝導方程式を有限差分法により離散化し、ADI 法を用いて解いた。同軸型地中熱交換器における熱輸送は一次元エネルギー保存式を用いた。

シミュレーションモデルの検証

秋田県仙北市の地熱地帯に位置する休止地熱井である深度 635m のカラ吹源泉 3 号井では 2002 年から 2004 年に長期水循環試験が実施された。本坑井の仕上げでは MH 層において想定する同軸型地中熱交換器を採用しているため、作成したモデルの妥当性をカラ吹源泉 3 号井で実施した循環試験より得た実

測データを用いて検証した。

シミュレーションモデルを用いた TRT 結果の予測

国内の MH 開発の有望地である南海トラフでの MH 開発を想定して、本研究で提案する TRT を MH 層に適用した場合における TRT 中の温度プロファイルの変化を計算し、適切な試験条件を検討した。

4. 研究成果

1) MH 層の熱伝導率の原位置評価試験を模した室内試験

TRT では、模擬地層を水飽和させた後に冷凍機で造成した -10 の不凍液をモデル外周部に循環して凍結させ、さらに -2 程度になるまで放置して温度を均一化し、これを模擬 MH 層とみなした。次に模擬地層中心部に長さ 50mm の同軸型地中熱交換器を設置し、これに負の熱負荷を与えた不凍液を循環して徐々に地層を冷却して、模擬地層内の温度と循環液の井戸の出入口温度を 3 時間測定した。その結果、冷水の循環により、モデル中心部より徐々に地層温度が低下すること、またモデル浅部では表面の影響を受けて温度低下幅が小さいことが示された。

次に TRT より得た温度変化データを用いて、時間 vs. 温度の片対数グラフにおける傾きより熱伝導率を算出した。この結果はポータブル型熱伝導率計を用いて測定した凍結土壌の熱伝導率とおおむね一致した。すなわち、MH 層において想定する冷却による TRT は従来型の加熱による TRT と同等の精度を持つことが示された。さらに、地下水熱輸送シミュレータ FEFLOW を用いて、模擬地層内温度および冷却水の井戸の出入口温度に関するヒストリーマッチングを行い、すべての温度測定点において、良好な一致を得た。これにより、FEFLOW を用いた冷却 TRT の挙動予測の妥当性が確認された。

2) MH 層の熱伝導率原位置推定を目的とした数値シミュレーションモデルの開発

開発したシミュレーションプログラムにより得られた予測値は、カラ吹源泉 3 号井で測定した出口温度と良好なマッチングを示し、シミュレーションプログラムの妥当性は検証された。さらに、同プログラムにより、地層の熱伝導率の影響を受けたアニユラスの温度挙動を確認することができた。すなわち、同軸型地中熱交換器内の温度挙動は MH と挟在する泥層の熱伝導率差により、深度に対する温度変化率が大きく異なり、地層の熱物性を明瞭には反映することがわかった。

以上の結果から、MH 層における TRT より深度方向の温度プロファイルを取得し、これに非線形回帰法を用いた熱伝導率推定を適用することにより、原位置での MH 層の熱伝導率の分布を逆解析を用いて求めることが可能と判断された。

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 26 件)

1. Fujii, H., Nishi, K., Komaniwa, Y., Chou, N. (2012) Numerical modeling of Slinky-coil horizontal ground heat exchangers, Geothermics Vol.41, No.1, 55-62. (査読あり)
2. 藤井 光・駒庭義人・石上 孝・長 直勝・大島和夫・谷口聡子(2012) 2 層構造を導入した直管式及び Slinky-coil 式水平型地中熱交換器のフィールド試験, 日本地熱学会誌, Vol.34, 37-46. (査読あり)
3. Fujii, H., Maehara, T., Komaniwa, Y., Chou, N., Ishikami, T. (2012) Field Tests and Numerical Modeling of Double-layered Straight Horizontal Ground Heat exchangers, Proc. InnoStock 2012, Paper No. INNO-U-05. (査読なし)
4. Fujimoto, M., Fujii, H., Komaniwa, Y., Chou, N. (2012) Experiments and numerical study on the effects of filling materials in ground heat exchangers, Proc. InnoStock 2012, Paper No. INNO-U-63. (査読なし)
5. Fujii, H., Yamasaki, S., Maehara (2012) Numerical modeling and sensitivity study of Slinky-coil ground heat exchangers, Proc. FEFLOW User Conference. (査読なし)
6. Yoshioka, M., Uchida, Y., Fujii, H., Yamaya, M. (2012) Groundwater flow and heat transfer modeling to estimate the area suitable for ATES, Proc. FEFLOW User Conference. (査読なし)
7. Inoue, Y., Fujii, H., Komaniwa, Y., Ioka, S. (2012) Evaluation on the effect of crossflow of groundwater on heat exchange rates in vertical ground heat exchangers, Proc. Int. Symposium on Earth Science & Technology 2012, 221-225. (査読あり)
8. Maehara, Y., Fujii, H., Komaniwa, Y., Chou, N. (2012) Evaluation on the Effect of Water Injection on Heat Exchange Rates in Vertical Ground Heat Exchangers, Proc. Int. Symposium on Earth Science & Technology 2012, 273-277. (査読あり)
9. 藤井光・駒庭義人・井岡聖一郎・渡部敦史・井上陽平(2012) 垂直型地中熱交換井における地下水のクロスフローが熱交換量に及ぼす影響の評価, 日本地熱学会誌, Vol.34, 175-183. (査読あり)
10. 野本卓也・藤井 光・内田洋平・利部 慎・嶋田 純(2012) 地球温暖化対策効果から見た温暖地方における地中熱利用可

- 能性,日本地熱学会誌,Vol.34, 185-197. (査読あり)
11. Fujii, H., Yamasaki, S., Maehara, T. (2013) Numerical modeling of Slinky-coil horizontal heat exchangers considering snow coverage effects, Proc. Stanford Geothermal Workshop 2013, 1378-1383. (査読なし)
 12. Maehara, T., Fujii, H., Ioka, S., Watabe, A. (2013) Field test of ungrouted ground heat exchangers with in-hole vertical groundwater flow, Proc. Stanford Geothermal Workshop 2013, 1403-1407. (査読なし)
 13. Fujii, H., Yamasaki, S., Maehara, T., Ishikami, T., Chou, N. (2013) Numerical simulation and sensitivity study of double-layer Slinky-coil horizontal ground heat exchangers, Geothermics, Vol.47, 61-68. (査読あり)
 14. 井岡聖一郎・村岡洋文・南條宏肇・藤井光・坂本隼人,長内利夫(2013)青森県における地盤の見かけ熱伝導率,日本地熱学会誌,Vol. 35,105-110(査読あり)
 15. 駒庭義人・藤井光・前原隆広・長直勝(2013)垂直型地中熱交換井への注水が熱交換能力に与える影響に関するフィールド試験による検討,日本地熱学会誌,Vol.35, 137-148. (査読あり)
 16. Fujii, H., Komaniwa, Y., Onishi, K., Chou, N. (2013) Improvement of the capacity of ground heat exchangers by water injection, Geothermal Resources Council Transactions, Vol.37, 589-594. (査読あり)
 17. Li, H., Nagano, K., Li, Y., Shibata, K., Fujii, H. (2013) Evaluating the performance of a large borehole ground source heat pump for greenhouses in northern Japan, Energy, Vol.63, 387-399. (査読あり)
 18. Inoue, Y., Itoi, R., Chou, N., Okubo, H., Chou, N., Fujii, H.(2013) Effects of injecting water into the well on heat exchange rates on vertical ground heat exchangers, Proc. Int. Symposium on Earth Science & Technology 2013, 262-267. (査読あり)
 19. Maehara, T., Fujii, H., Itoi, R., Yamaya, M., Uchida, Y., Yoshioka, M. (2013) Numerical modeling of aquifer thermal energy storage system for Optimal operation scenario, Proc. Int. Symposium on Earth Science & Technology 2013, 366-374. (査読あり)
 20. Inoue, Y., Itoi, R., Chou, N., Okubo, H., Fujii, H. (2014) Enhancement of Heat Exchange Capacity of Ground Heat Exchangers by Injecting Water into Wells, Proc. Stanford Geothermal Workshop 2014, paper No. SGP-TR-202. (査読なし)
 21. Bottarelli, M., Fujii, H., Di Federico, V. (2014) Performance of a drainage trench employed as ground heat exchanger, Proc. 15th International Heat Transfer Conference, Paper No. IHTC15-9937, 11p. (査読あり)
 22. 藤井光・前原隆広・桂木聖彦(2014)帯水層蓄熱システムのフィールド試験と数値モデリング,日本地熱学会誌,Vol.36, 109-120. (査読あり)
 23. Shrestha, G., Uchida, Y., Yoshioka, M., Fujii, H., Ioka, S. (2015) Assessment of development potential of ground-coupled heat pump system in Tsugaru Plain, Japan, Renewable Energy, Vol.76, 249-257. (査読あり)
 24. Fujii, H., Kosukegawa, H., Onishi, K. (2015) Effect of water injection into a ground heat exchanger drilled in a low-formation, Proc. World Geothermal Congress 2015, CD (査読なし)
 25. Kosukagawa, H., Fujii, H. (2015) Development of thermal response test device with automatic control system, Proc. World Geothermal Congress 2015, CD. (査読なし)
 26. Shim, B.O., Park, H.E., Lee, C., Fujii, H. (2015) Performance expectation of a geothermal heat pump system using a numerical model, Proc. World Geothermal Congress 2015, CD. (査読なし)
- [学会発表](計 22件)
1. Fujimoto, M., Fujii, H., Komaniwa, Y., Chou, N., Experiments and numerical study on the effects of filling materials in ground heat exchangers, InnoStock 2012, 2012.05.01, Llieda, Spain.
 2. Fujii, H., Maehara, T., Komaniwa, Y., Chou, N., Ishikami, T., Field Tests and Numerical Modeling of Double-layered Straight Horizontal Ground Heat exchangers, InnoStock 2012, 2012.05.01, Llieda, Spain.
 3. 内田洋平・吉岡真弓・藤井光・山谷睦,帯水層蓄熱冷暖房システムの適地評価手法の開発,日本地下水学会春季講演会,2012.05.26,東京都文京区.
 4. 吉岡真弓・内田洋平・藤井光・山谷睦,山形盆地における帯水層蓄熱冷暖房システムの適地評価,日本地下水学会春季講演会,2012.05.26,東京都文京区.
 5. 井上陽平,藤井光,駒庭義人,井岡聖一郎,帯水層間の地下水流れを伴う地中

- 熱交換井の熱交換能力の評価,日本地下水学会秋季講演会,2012.09.27,東京都文京区.
6. シュレスタ ガウラブ,内田 洋平,吉岡 真弓,藤井 光,井岡 聖一郎,津軽平野における地中熱ポテンシャル評価,日本地熱学会,2012.10.24,秋田県湯沢市.
 7. 谷口 聡子,石上 孝,渡部 敦史,大島 和夫,藤井 光,長 直勝,コイル型水平熱交換器の長期運転実績評価,日本地熱学会,2012.10.24,秋田県湯沢市.
 8. 山崎 将平,藤井 光,石上 孝,長 直勝,駒庭 義人,さまざまな地表条件における水平型地中熱交換器の数値シミュレーション,日本地熱学会,2012.10.24,秋田県湯沢市.
 9. 吉岡 真弓,内田 洋平,藤井 光,山谷 睦,秋田平野における帯水層蓄熱冷暖房システムの適地評価,日本地熱学会,2012.10.24,秋田県湯沢市.
 10. 前原 隆広,藤井 光,駒庭 義人,長 直勝,石上 孝,直管式水平型地中熱交換器のフィールド試験及び数値シミュレーション,日本地熱学会,2012.10.24,秋田県湯沢市.
 11. Fujii, H., Yamasaki, S., Maehara, T., Numerical modeling of Slinky-coil horizontal heat exchangers considering snow coverage effects, Proc. Stanford Geothermal Workshop, 2013.2.13, Stanford, USA.
 12. Maehara, T., Fujii, H., Ioka, S., Watabe, A. (2013) Field test of ungrouted ground heat exchangers with in-hole vertical groundwater flow, Proc. Stanford Geothermal Workshop, 2013.2.13, Stanford, USA.
 13. シュレスタ ガウラブ,内田 洋平,吉岡 真弓,藤井 光,井岡 聖一郎(2013),地中熱利用を目的とした地下水流動・熱輸送モデル構築のための温泉データ・TRT結果の利活用,日本地熱学会秋季講演会,2013.11.07,千葉市.
 14. 井上 陽平,糸井 龍一,長 直勝,大久保博晃,藤井 光(2013),垂直型地中熱交換器への注水による熱交換能力への影響,日本地熱学会秋季講演会,2013.11.07,千葉市.
 15. 多田 和広,森 康二,内田 洋平,吉岡 真弓,藤井 光,山谷 睦(2013),仙台平野を対象とした陸面熱収支を考慮した水・熱輸送モデルの構築及び地中熱利用に関するケーススタディ,日本地熱学会秋季講演会,2013.11.08,千葉市.
 16. 前原 隆広,藤井 光,糸井 龍一,山谷 睦,内田 洋平,吉岡 真弓(2013),帯水層蓄熱冷暖房システムにおける数値モデルの構築及び最適稼働シナリオの検討,日本地熱学会秋季講演会,2013.11.08,千葉市.
 17. 広瀬暉二,尾西恭亮,明石朋也,小助川洋幸,藤井光(2014)女川層の珪質頁岩におけるガス吸着量と岩石物性の関係,石油技術協会春季大会,2014.06.06,新潟市.
 18. 浅井 寛明,糸井龍一,田中俊昭,松尾 憲親,河野新司,藤井 光(2014) 雨水貯水地下タンクを利用した開放型の地中熱ヒートポンプシステム,日本地熱学会秋季講演会,2014.10.29,弘前市.
 19. 池田 菜,藤井 光,内田 洋平,吉岡 真弓(2014) 秋田平野における地中熱利用適地マップの作成,日本地熱学会秋季講演会,2014.10.29,弘前市.
 20. 小助川洋幸,藤井 光(2014) 熱負荷自動調整機能を備えたサーマルレスポンス試験装置の開発,日本地熱学会秋季講演会,2014.10.29,弘前市.
 21. 井岡 聖一郎,藤井 光,村岡 洋文,三上 綾,鈴木 陽大,加藤 和貴,松田 雅司(2014) 浅層地盤の地中熱利用における環境影響評価,日本地熱学会秋季講演会,2014.10.29,弘前市.
 22. シュレスタ ガウラブ,内田 洋平,吉岡 真弓,藤井 光,井岡 聖一郎(2014) 広域における地中熱利用の適地評価,日本地熱学会秋季講演会,2014.10.29,弘前市.
- 〔図書〕(計 3件)
1. 分担執筆(藤井光を含む46名)(2014) 地熱エネルギーハンドブック,地熱エネルギーハンドブック刊行委員会編,オーム社,p923.
 2. 井川怜欧,小野昌彦,利部慎,吉岡真弓,内田洋平,嶋田純,藤井光,野本卓(2014) 水文環境図 No.7,熊本平野,産業技術総合研究所 地質調査総合センター, CD.
 3. 分担執筆(藤井光を含む168名)(2014) 石油鉱業便覧,石油技術協会,p957.
- 〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)
取得状況(計 0件)
- 〔その他〕
ホームページ等
6. 研究組織
- (1)研究代表者
藤井 光(FUJII, Hikari)
秋田大学・国際資源学部・教授
研究者番号:80332526
 - (2)研究分担者
なし
 - (3)連携研究者
なし