

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K05350

研究課題名(和文)天然ガスハイドレート備蓄における岩盤タンクの低温下挙動評価技術の確立

研究課題名(英文) Establishment of Evaluation Techniques for the Behavior of Rock Tanks in Natural Gas Hydrate Storage at Low Temperatures

研究代表者

木下 尚樹 (Kinoshita, Naoki)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・准教授

研究者番号：30263958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：低温下で砂岩のガス浸透実験を行い、浸透率に及ぼす氷飽和度の影響を評価した。結果、浸透圧の増加に伴い、浸透率が減少する傾向が確認された。また、20度で測定された初期浸透率と比較し、-20度で測定された浸透率は小さい値を示した。氷飽和度の増加に伴い浸透率が減少することが確認され、推定した空隙占有比が0での浸透率は水の浸透実験から求めた浸透率とほぼ一致していた。つぎに弾性波伝播速度を測定し、P波速度と氷飽和度の関係を見出し、実験結果を考察した結果、P波速度は、氷飽和度の増加と調和しており、空隙占有比が70%以上では2倍となった。また、空隙率が0.1～0.2の範囲では、実験値は推定値の範囲内であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

岩盤タンク方式では地下水により石油および石油ガスを封じ込め、気密性を保つ水封式が取られ、そのシステムは確立されている。この方式は、必要な土地面積が少ない、地震、落雷など自然災害に強い、漏出、拡散の危険性が低い、景観への影響が少ないなどのメリットを持っている。ただし、NGHを地下岩盤タンク内に備蓄する新たな技術の確立のためには、低温下における岩盤の気・液浸透特性、力学・変形特性を精密に定量評価、把握することが必要であり、岩盤タンクの挙動、堅牢性、気密性の評価技術が不可欠となる。本研究成果はこれらの基礎的資料となるものであり、本研究により社会実装に向けて技術が向上したと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, gas permeability experiments were conducted on Berea sandstone at low temperatures, which have not been done before, to evaluate the effect of ice saturation on the permeability. As a result, it was confirmed that the permeability tended to decrease with an increase pore fluid pressure. Compared to the initial permeability measured at 20 °C, the permeability measured at -20 °C showed a smaller value. Furthermore, it was observed that the permeability decreased with increasing ice saturation. The water permeability was estimated by taking into account the Klinkenberg effect, and the change in permeability was examined using the Kozeny-Carman equation. As a result, the permeability at a pore occupation ratio of 0, estimated from the regression curve, tends to overestimate the permeability obtained from the water permeability experiments.

研究分野：岩盤工学

キーワード：氷飽和度 ガス浸透性 弾性波速度 凍結ペレア砂岩 岩盤タンク 天然ガスハイドレート

1. 研究開始当初の背景

近年、再生エネルギー等の導入が進められているが、依然として化石エネルギーへの依存度は大きく、その傾向はしばらくの間継続するものと考えられる。その中でも天然ガスは石油・石炭と比較して二酸化炭素排出量が少ないクリーンエネルギーとして注目され、供給量は増加しており、現在化石エネルギーの約3割を占めている。天然ガスは、体積圧縮率が600/1であることから液化天然ガス(LNG)として輸送され、地上および半地下式のタンクにて貯蔵している。LNGは-162℃以下に冷却液化する必要があるため、大規模製造設備が必要なことから、経済的に大規模ガス田からの大量・長距離輸送が行われているが、冷却用エネルギーを要することから石油の様な長期備蓄は行われていない。

一方で、LNGではコストが見合わない中小ガス田は、世界の埋蔵量の40%と言われており、東南アジア、オセアニアに多く分布している。また、天然ガスの新たな輸送手段としてハイドレート化する研究・開発が進んでいる。天然ガスハイドレート(以下NGH)は、水分子の立体網状構造の内部に天然ガス分子が取り込まれた包接水和物で、人工的に製造され、天然資源のメタンハイドレートと区別されている。NGHの圧縮率は170/1であるが、大気圧下-20℃で安定することから、コスト面で中小ガス田の開発・輸送手法として注目されている。また、低コストであることから長期備蓄も可能であると考えられる。

石油および石油ガスの備蓄方式は地上および地中タンク方式、地下岩盤タンク方式、洋上タンク方式等がある。岩盤タンク方式では地下水により石油および石油ガスを封じ込め、気密性を保つ水封式が取られ、そのシステムは確立されている。この方式は、必要な土地面積が少ない、地震、落雷など自然災害に強い、漏出、拡散の危険性が低い、景観への影響が少ないなどのメリットを持っている。ただし、NGHを地下岩盤タンク内に備蓄する新たな技術の確立のためには、低温下における岩盤の気・液浸透特性、力学・変形特性を精密に定量評価、把握することが必要であり、それらを踏まえた、岩盤タンクの挙動、堅牢性、気密性の評価技術が不可欠となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、NGHを地下岩盤タンク内に備蓄する新たな技術の確立であり、そのために低温下における岩盤の気・液浸透特性、力学・変形特性を精密に定量評価、把握することである。本研究では、特に不飽和状態の凍結岩石のガス浸透特性および弾性波伝播速度を室内実験において定量的に評価することを主目的とした。

3. 研究の方法

低温下の岩石の力学特性や熱物性の研究、低温物質の岩盤空洞貯蔵に関しては、これまで多くの研究事例がある。Inada et al.は低温下における岩石の力学特性を実験により求め、それらの結果を用いてLNGを岩盤タンクに備蓄した場合の岩盤空洞の挙動について解析により検討している。ただし、低温下の岩石および空洞周辺岩盤のガス浸透特性を検討した事例は見当たらない。一方で、低温下のガス浸透特性はメタンハイドレート開発の目的で凍結地盤について検討されている。Seyfried and Murdockは砂のガス浸透率は氷と水の飽和度に依存し、同飽和度では、凍結したサンプルの方が凍結していないサンプルよりも浸透率が低くなると指摘している。Wang et al.は凍結砂のメタンガス浸透性と氷飽和度の関係を実験的に明らかにし、乾燥状態の浸透率が2.7 darcy、空隙率が0.4の砂供試体において、氷飽和度が0.6では浸透率は1/100に、0.8では 10^{-5} となる結果を得ている。Chuvilin et al.は空隙率が0.4程度の砂供試体において、氷飽和度が0.5程度では浸透率は 10^{-2} - 10^{-4} となる結果を得ている。また、室温以上の温度での岩石のガス浸透実験は報告されている。Eischens and Swansonは難浸透性岩石のガス浸透実験方法について提案している。また、Takeda et al.は拘束圧下で岩石のガス浸透実験が可能な装置を開発し、 10^{-20} m²オーダーの浸透率を計測している。Klinkenbergは岩石のガス浸透実験で求めた浸透率が水浸透実験で求めた浸透率より大きいことを指摘し、これをKlinkenberg効果と呼んで、ガス浸透率と水浸透率の関係性を導いた。Tanigawa and Shimamotoは同一試料においてガスと水の浸透率を測定し、浸透率が 10^{-18} m²以下かつ間隙差圧が0.3 MPa以下の条件でKlinkenberg効果が無視できないと報告している。

本研究では、低温下でベレア砂岩を用いたガス浸透実験を行い、浸透率に及ぼす氷飽和度の影響を評価した。また、Klinkenberg効果を考慮して水浸透率を推定し、Kozeny-Carman equationを用いて浸透率の変化を検討した。さらに、弾性波伝播速度を測定し、P波速度と氷飽和度の関係を見出した。Jacoby et al. および Dvorkin and Nurは、鉱物粒子同士がcementにより力学的に接触するとしたcementation theoryに基づき推定式を提案し、砂岩や飽和凍結砂のP波速度と空隙率の関係を見出している。Yasuhara et al. ベレア砂岩を用いてP波速度と空隙内のmineral trappingによる炭酸カルシウム析出量との関係性をこの推定式により検証している。本研究においても、この推定式を適用し、実験結果の妥当性を考察した。

4. 研究成果

ガス浸透実験において、浸透圧の増加に伴い、浸透率が減少する傾向が確認された。これは、Klinkenberg 効果によるものと考えられる。また、20℃で測定された初期浸透率と比較し、-20℃で測定された浸透率は小さい値を示した。温度が低下すると空隙径が収縮しガスが浸透しにくくなったことが考えられる。また、水飽和度の増加に伴い浸透率および正規化浸透率が減少することが確認され、空隙中の氷により、気体が浸透できる連続空隙が遮断されたものと考えられる。低温下の P 波速度は、空隙占有比の増加に伴い増加する傾向にあり、空隙占有比が 70 % 以上では、正規化 P 波速度は 2.0 程度となった。つぎに、ガス浸透実験の結果から、Klinkenberg 効果を考慮して液体浸透率を推定し、Kozeny-Carman 式を用いて、透過率と空隙占有比の関係を検討した。その結果、回帰曲線から推定した空隙占有比が 0 での浸透率は、水の浸透実験から求めた浸透率とほぼ一致していた。また、Dvorkin and Nur により提案された推定式を用いて、P 波速度を推定し、実験結果と比較した結果、空隙率が 0.1 ~ 0.2 の範囲では、実験値は推定値の範囲内であったが、空隙率が 0.1 以下の範囲では、実験値は推定値を上回っていた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Ogata Sho, Yasuhara Hideaki, Kinoshita Naoki, Kumagai Takeru, Inui Toru, Mishima Seiki, Kishida Kiyoshi | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Multi-physics simulation for predicting the permeability change of single rock fracture due to geochemical effect depending on pH condition | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Geotechnical Society Special Publication | 6. 最初と最後の頁 71～76 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3208/jgssp.v09.cpeg045 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Kinoshita Naoki, Yasuhara Hideaki | 4. 巻 64 |
| 2. 論文標題 Effect of Ice Saturation on Gas Permeability and Elastic Wave Velocity of Frozen Berea Sandstone | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS | 6. 最初と最後の頁 196～204 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/matertrans.m-m2022813 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 加藤雅也, 安原英明, 木下尚樹 |
| 2. 発表標題 低温条件における岩石の透気特性に関する基礎的実験およびKozeny-Carman 式を用いた理論値との比較 |
| 3. 学会等名 令和3年度地盤工学会四国支部技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 加藤雅也, 木下尚樹, 安原英明 |
| 2. 発表標題 低温 履歴を与えた岩石の透気特性評価 |
| 3. 学会等名 令和2年度地盤工学会四国支部技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|