

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12437

研究課題名(和文) 大谷石採掘跡地内貯留水の低温化メカニズム解明と持続的冷熱利用のための技術開発

研究課題名(英文) Elucidation of the mechanism of low-temperature storage water in the Oya Stone Mining Site and development of technology for sustainable use of cryogenic heat

研究代表者

富樫 聡 (Tomigashi, Akira)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究チーム長

研究者番号：00740010

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)：大谷地域の地下空間貯留水を一斉観測した結果、半水没状態の地下空間で貯留水温の顕著な低温化が認められた。また、連続モニタリングを実施したサイトAにおいて熱収支の概略検討を行った結果、地下空間からの全損失熱量のうち98%が蒸発による損失熱量と評価されたため、大谷地域における地下空間貯留水の低温化において、貯留水の蒸発の影響は無視できないと判断した。さらに、連続モニタリング、熱収支解析、事業者ヒアリング等の結果から、大谷地域の地下空間貯留水は、冬期に冷却された外気が地下空間に流入して冷却源となる「顕熱プロセス」と、貯留水の蒸発によって水温低下が生じる「潜熱プロセス」により低温化すると推測された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果より、人為的な温度管理を行わない限り、地下空間内の貯留水の温度は自然状態まで上昇する可能性が高いことが明らかとなった。したがって、貯留水の温度管理が持続可能な事業継続のために不可欠であり、適切な地下空間利用を実現するために、研究成果を反映した事業者用ガイドランを取りまとめている。

研究成果の概要(英文)：As a result of the observation of groundwater storage in the Oya area, a significant decrease in storage water temperature was observed in the semi-submerged groundwater space. In addition, as a result of a schematic study of the heat balance at the investigation site, 98% of the total heat loss from the underground space was evaluated to be due to evaporation, and it was concluded that the influence of evaporation of the stored water cannot be ignored in the low temperature of the underground space storage water in the Oya area. Furthermore, based on the results of continuous monitoring, heat balance analysis, and interviews with operators, it was inferred that the low temperature of the underground space storage water in the Oya area is caused by the "sensible heat process," in which cooled outdoor air flows into the underground space in winter and becomes a cooling source, and the "latent heat process," in which the water temperature decreases due to evaporation of storage water.

研究分野：地下水工学

キーワード：地中熱 地下熱 未利用熱 地下空間 再生可能エネルギー 自然エネルギー 地球温暖化 産業遺構

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

宇都宮市大谷町には、かつて地域の主要産業であった石材産業(大谷石)の採掘跡地が存置されており、その多くは高さ 10m 以上の巨大な地下空間を形成している。1970 年代以降は石材産業が衰退し、また採石法施行以前の無計画な採掘に起因して幾度かの陥没事故が発生したため、地下空間は長らく負の産業遺構となっていた。しかしながら近年、地下空間は地域資源として、観光や農業などの分野で注目され始めた。例えば、宇都宮市では地下空間の貯留水を冷熱源として利用する夏イチゴ栽培を推進・支援している。

事前調査の結果、大谷町の地下水の温度(15 ~ 17 程度)に対して、一部の貯留水は夏季でも 10 以下と非常に低温であることが判明した。これは貯留水が何らかの影響を受けて低温化していることを示している。この貯留水を冷却水として利用できれば投入コストを抑えた収益性の高い夏イチゴ事業や物流・保冷库事業の実現が期待される。これら事業の実現性や持続性を高めるには、冷熱エネルギー潜在量や利用可能量の評価および将来予測が不可欠である。評価・予測には、地熱であれば地温と浸透率、地中熱であれば地質構造と地下水流速など、熱源種別によって支配的な因子が異なるため適切な指標を用いた評価手法の確立が必要となる。

なお既往研究では、ダム湖やため池、雨水貯留槽の貯留水に関しては熱源利用の研究報告があるものの、地下空間かつ低温化した貯留水の熱利用に着目した研究は皆無であった。

2. 研究の目的

官民の精力的な取組みにより、貯留水を活用して産業振興と地域活性化がすすむ大谷町において、現在の最大の課題は地下空間貯留水の低温化メカニズムが未解明なことである。さらに地下空間貯留水は、通常では考えにくい地下に存在する冷熱源であり、また閉鎖空間内に存在するため多量に利用すると温度回復しない可能性が高い。したがって、地熱・地中熱といった従前の地下熱源とは性質がまったく異なることに留意が必要であり、低温化メカニズムの解明結果に基づいて持続的利用の在り方を科学的に検証しなくてはならない。

本研究では、自然エネルギーとして地下空間貯留水を熱源利用する独創的な産業振興・地域活性化を目指して、現地調査・数値解析・室内実験等による総合的研究に基づき、貯留水の低温化メカニズムを明らかにする。また、冷熱源としての持続的利用を実現するため、貯留水に特化したエネルギー潜在量・利用可能量の評価・予測手法を確立する。さらに、今後の事業拡大と水平展開を見据え、人工の地下空間が生み出す低温化メカニズムに人為的措置を加えて、貯留水を再生可能エネルギーとして転換・強化する技術開発をおこなう。

なお、本研究は、先例のない熱源である地下空間貯留水の社会実装と、その持続的利用により産業振興や地域活性化を目指す独創的な研究である。

3. 研究の方法

本研究では以下に示す 3 つの研究主題に取り組む。まず貯留水の低温化メカニズムを解明し、次に、既に進められている地域熱供給事業(夏イチゴ、保冷倉庫等)の持続可能性を確保するために利用可能量評価や再エネ転換技術を開発する。

(1) 地下空間貯留水の低温化メカニズムの解明

先行研究より、貯留水の低温化は顕熱と潜熱の両プロセスに起因すると考えられる。貯留水の低温化メカニズムを解明するにはより詳細な地下空間と貯留水の状態量を把握する必要があるため、地下空間の温度、湿度、風速、貯留水の深度別水温、貯留水深等を多地点で連続モニタリングする。また、取得した現地データを条件に用いて、顕熱・潜熱モデルによる再現計算や室内実験を実施し、低温化に対する潜熱と顕熱の寄与度を検証する。モニタリングは低温化が顕著にみられる地下空間を対象とし、定期的にデータ回収と地下空間・周辺状況の現地調査を実施する。

(2) 冷熱エネルギー潜在量・利用可能量の評価手法開発

冷熱エネルギー潜在量を評価するために、既往調査で取得した大谷町全域の貯留水深・水温等の現地データを活用して評価指標を選定すると共に、潜在量を推計する。また、利用可能量を評価するには、現在の低温状態がいつまで維持できるかを予測する必要がある。そこで非定常熱移動モデルによる数値解析によって大谷石岩体内の熱移動現象を再現し、冷熱源としての持続可能性を検証する。

(3) 貯留水の再生可能熱源への転換技術開発

偶然そこに存在する自然エネルギーである貯留水に人為的措置を加えることで、再生可能エネルギーとして転換・強化を図る。具体的には断熱加工を施したアクリル製水槽等による室内実験装置を作成し、貯水位・風量を模擬的に変化させて、蒸発潜熱による貯留水の低温化効果を最大化し、かつ安全性配慮を両立する技術を実験的に検証する。安価かつ安定した冷熱源確保を実現する開発技術は、将来的に国内他地域への水平展開も考えられる。

予備実験の結果、送風により貯留水の低温化が確認でき、低温化の程度は風量や貯水量で変化することがわかった。このように地下熱源に人の手を加えて再エネ化した事例は皆無である。なお、満水状態から貯留水位を下げると力学的安定性が損なわれ陥没事故の原因となりうるため、

安全性にも配慮して実現可能な技術開発をおこなう。

4. 研究成果

本研究の成果を3つの研究主題ごとに整理する。

(1) 地下空間貯留水の低温化メカニズムの解明

大谷地域の冷熱利用事業の持続可能性を高める目的で、冷熱源となる地下空間貯留水の実態把握と低温化メカニズムを考察した。本研究で実施した地下空間の一斉観測と連続モニタリング・室内模型実験等より得られた知見、想定される貯留水の低温化メカニズムを以下に示す。なお、宇都宮市は本報で報告した地下空間貯留水温の一斉観測結果を受けて、大谷地域振興のひとつに冷熱エネルギー利用事業を位置づけると共に、事業実施適地の検討を進めている。

・大谷地域の地下空間貯留水を一斉観測した結果、半水没状態の地下空間で貯留水温の顕著な低温化(5 ~ 10 程度)が認められた。

・2003年度から2015年度にかけて、満水状態の地下空間の割合が68%から83%に増加した。また、同期間の貯留水温を比較すると、満水状態で0.6、半水没状態で2.0の上昇が見られた。特に2003年度時点は半水没状態であったが2015年度に満水状態となった地下空間貯留水で大きな温度上昇量が確認された。

・連続モニタリングを実施したサイトAにおいて熱収支の概略検討を行った。その結果、地下空間への入熱(取得熱量)は2017年: 3.3×10^6 MJ, 2018年: 4.0×10^6 MJ, 地下空間からの熱損失(損失熱量)は2017年: 3.2×10^6 MJ, 2018年: 3.9×10^6 MJであった。全損失熱量のうち98%が蒸発による損失熱量と評価されたため、大谷地域における地下空間貯留水の低温化において、貯留水の蒸発の影響は無視できないと考えられる。

・連続モニタリング、熱収支解析、事業者ヒアリング等の結果から、大谷地域の地下空間貯留水は、冬期に冷却された外気が地下空間に流入して冷却源となる「顕熱プロセス」と、貯留水の蒸発によって水温低下が生じる「潜熱プロセス」により低温化すると推測される。

・室内模型実験より、貯留水量を半分にすると、水槽内通気開始から24時間後までの温度低下量が1.61倍となり、地下空間内の貯水量が少ない(貯留水位が低い)ほど貯留水の温度低下量が大きくなることがわかった。

・室内模型実験より、水槽内通気中の貯留水温と室内空気の相対湿度には正の相関関係があり(決定係数R²は0.7以上)、地下空間に流入する空気の相対湿度が低いほど貯留水の温度低下を促進させることが明らかとなった。

・室内模型実験の結果は構築予定の数値解析モデルの検証用データとして利用すると共に、数値解析モデルを用いて現地地下空間の温度・湿度・風況等を再現した。その結果、「顕熱プロセス」と「潜熱プロセス」がそれぞれ低温化現象の要因になることが物理モデルでも検証できた。

(2) 冷熱エネルギー潜在量・利用可能量の評価手法開発

大谷地域に平面的に広がる大谷石の熱物性値を評価するため、地下空間を利用した原位置調査と数値解析を組合わせた熱物性評価手法を提案した。地域全域で平面的に岩相が偏在する大谷地域において、採取試料を用いる室内試験で評価した熱物性値を地域の代表値とするには課題が残る。また、従来の原位置調査ではボーリングマシンによる調査孔掘削が必要となるが、提案手法はコアドリルで観測用の掘削孔を作成するため、安価かつ岩盤環境を攪乱せずに調査が可能である。さらに、大谷地域に散在する多数の地下空間で調査できるため、偏在性の評価にも有用と考えられる。宇都宮市が実施した、地下空間の温度特性を活かして地下空間内に熱的インパクトを与える原位置実験の観測データより、岩体内部は熱伝導現象に従う(地下水の流れがない)ことが明らかとなった。地下空間内の温度をより変化させる実験ほど岩体内温度の変化量が大きくなるため、数値解析を用いた熱物性値の推定に適すると考えられる。また、一次元非定常熱伝導解析による原位置実験の再現計算を行った。再現計算には文献調査とあらたに室内試験で測定した熱物性値を用いており、すべての実験で良好な再現結果が得られた。これら結果を踏まえると、本研究で利用した原位置実験で得られる現象は、一次元問題として扱うことができる。さらに、加熱実験は温度変化量が大きく熱物性の違いによる計算値に乖離が生じることから、送風実験と無攪乱実験より確からしい熱物性値の評価が期待できる。なお、加熱実験に関しては壁面の加熱面積を広くすることで、より一次元問題に近づくものと考えられる。ただし、加熱するための十分な壁面面積が確保できない等の理由で加熱実験を実施できない地下空間では、送風実験や無攪乱実験での熱物性値評価が有効と思われる。以上の結果から、大谷地域の平面的な熱物性把握には提案手法の適用が大いに期待できる。ただし、数値解析を一次元問題として扱う妥当性の確認や、適切なパラメータを同定するためのプログラムの拡張等、いくつかの検討を実施する必要がある。提案手法は、地下空間であれば適用可能であるため、他地域への展開も見据えて、提案手法の改良をすすめる。

冷熱エネルギー源としての利用が期待されている宇都宮市大谷地域の地下空間貯留水を対象として、地下空間を考慮した広域三次元数値解析モデルを構築し、地下空間貯留水の低温保持期間推定を試みた。地下空間の形状は複雑かつ不明瞭である等、社会的・物理的な制約がある中で、地下空間形状のモデル化や低温状態の地下温度分布の計算を工夫した。地下空間貯留水の温度

に着目して将来予測計算（400年間）を行った結果、貯留水の低温保持期間は20～210年と幅を有し、平均で95.5年と予測された。以上の結果より、現状は貯留水と周辺岩体が低温状態を保持しているものの、半水没状態を維持する、低温促進技術を開発・導入する等の人為的な温度管理を行わない限り、自然状態の温度に戻る可能性が高いことが明らかとなった。また、地球温暖化を考慮した将来予測計算の結果から、外気温上昇に伴って地下空間の温度上昇は促進される可能性が高いことが示唆された。さらに、ハウス栽培や保冷倉庫の冷熱源として、地下空間貯留水が保有する冷熱エネルギーを短期間かつ大量に利用すると、低温保持期間は推定値よりもさらに短くなる（事業の持続可能性が低下する）。したがって、本研究成果を踏まえると、低温保持期間をより長くするための取り組み（例えば、人為的に地下空間内の貯留水位を管理する、暖房時のヒートポンプ熱源として貯留水を利用して冷排熱を地下空間に蓄熱する等）や冷熱利用事業化に適した地下空間の選定等を行い、冷熱利用事業の持続可能性を高める必要があることが明らかとなった。なお、本研究では様々な不確実性が考えられる中で、現状入手可能なデータを用いて（冷熱利用事業者にとって）安全側となるような条件の下で低温保持期間を推定した。今後は、現地データのモニタリングを継続して実施すると共に、より精度を高めた低温保持期間の推定を目指す。

(3)貯留水の再生可能熱源への転換技術開発

貯留水の低温化促進を図るため、地下空間に送風して蒸発潜熱を利用する原位置低温化実験を実施した。原位置実験は2020年3月と6月の2度実施した。3月に実施した実験では貯留水の冷却効果が認められたが、6月に実施した2回目の実験では温度変化は確認できなかった。これは、送風した空気の湿度が原因と考えられる。これらの実験結果は、効果的な貯留水の冷却技術の確立に役立つ。貯留水低温化促進を図るため、地下空間に送風して蒸発潜熱を利用する原位置低温化実験を実施した。実験の結果、地下空間へ送る空気（外気）の湿度が、貯留水の低温化に強く影響を及ぼす可能性が示唆された。今後は、実証実験サイトにおいて実施した原位置送風実験データを解析して、人為的に低温化促進を図る上で必要な条件（最適な送風時期、送風量等）を検討する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 富樫聡, 霜山峻, 藤原盛光, 佐藤大地, 佐藤怜, 内田洋平	4. 巻 77 (5)
2. 論文標題 宇都宮市大谷地域における地下空間貯留水の低温化メカニズム	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集G (環境)	6. 最初と最後の頁 209-220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 霜山峻, 富樫聡, 佐藤大地, 金子翔平, 佐藤怜, 柴崎直明	4. 巻 76(5)
2. 論文標題 大谷地域の地下空間を利用した原位置調査と数値解析による岩盤の熱物性評価手法の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集G (環境)	6. 最初と最後の頁 _289-299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 富樫聡, 内田洋平, 嶋田一裕, シュレスタガウラブ, 石原 武志, 佐野星河	4. 巻 76(5)
2. 論文標題 石川県河北平野に導入した地中熱ヒートポンプシステムの性能評価と導入時の留意点	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集G (環境)	6. 最初と最後の頁 _277-287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Shohei Kaneko, Akira Tomigashi, Takeshi Ishihara, Gaurav Shrestha, Mayumi Yoshioka, Youhei Uchida	4. 巻 13
2. 論文標題 Proposal for a Method Predicting Suitable Areas for Installation of Ground-Source Heat Pump Systems Based on Response Surface Methodology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 1872
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en13081872	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 富樫聡	4. 巻 44(4)
2. 論文標題 地中熱利用システムの現状と社会実装に向けて	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 エネルギー・資源	6. 最初と最後の頁 10-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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14件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 富樫聡
2. 発表標題 大谷石採取場跡地における貯留水温の現状とその低温化メカニズム
3. 学会等名 地下空間内における冷熱エネルギーの発生・賦存メカニズムに関する勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 霜山竣
2. 発表標題 大谷石の熱的特性の把握と持続的冷熱利用の可能性
3. 学会等名 地下空間内における冷熱エネルギーの発生・賦存メカニズムに関する勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富樫聡, 杉中隆史, 内田洋平
2. 発表標題 地下空間貯留水の低温化現象に関する数理モデル
3. 学会等名 日本地熱学会令和2年学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 霜山峻, 富樫聡, 柴崎直明
2. 発表標題 円筒型熱源関数を用いた宇都宮市大谷地域の岩盤熱物性推定手法の提案
3. 学会等名 日本地熱学会令和2年学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 霜山峻, 富樫聡, 佐藤大地, 柴崎直明
2. 発表標題 持続可能な地下蓄熱の実現に役立つ岩盤熱物性評価手法の開発
3. 学会等名 令和2年度日本応用地質学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富樫聡, 霜山峻, 内田洋平, 石原武志, シュレスタガウラブ
2. 発表標題 地盤・岩盤の体積熱容量を推定するための原位置試験と解析手法の提案
3. 学会等名 令和2年度日本応用地質学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富樫聡, 杉中隆史, 佐藤怜, 霜山峻, 内田洋平
2. 発表標題 地下空間貯留水の低温化メカニズムに関する数値解析的アプローチ
3. 学会等名 日本応用地質学会東北支部第27回研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 霜山峻，富樫聡，佐藤大地，益子暁式，藤原盛光，柴崎直明
2. 発表標題 地下空間貯留水の低温状態の保持・促進技術開発に向けた実証実験
3. 学会等名 日本応用地質学会東北支部第27回研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石原武志，富樫聡，内田洋平，神宮司元治，須藤明德，宮田弘幸，加藤邦康
2. 発表標題 福島県における地質調査孔を用いた簡易熱応答試験結果と地形・地質条件との関係
3. 学会等名 日本地理学会2020年春季学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富樫聡，佐藤怜，久我幸史，霜山峻，柴崎直明，内田洋平
2. 発表標題 大谷石採掘跡地貯留水の冷熱利用に関する研究（4）低温化の実験的検証
3. 学会等名 日本地熱学会令和元年学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 霜山峻，富樫聡，藤原盛光，久我幸史，柴崎直明
2. 発表標題 大谷石採掘跡地貯留水の冷熱利用に関する研究（3）低温貯留水の特性
3. 学会等名 日本地熱学会令和元年学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 霜山峻, 富樫聡, 柴崎直明, 藤原盛光
2. 発表標題 大谷石の熱移動解析に向けた物性試験および岩体内温度測定結果
3. 学会等名 第73回地学団体研究会総会(東京)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 霜山峻, 富樫聡, 柴崎直明, 藤原盛光, 佐藤怜, 久我幸史, 内田洋平
2. 発表標題 地下空間貯留水の冷熱利用可能量の評価に向けた数値解析的検討
3. 学会等名 令和元年日本応用地質学会東北支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富樫聡, 霜山峻, 柴崎直明, 藤原盛光, 佐藤怜, 久我幸史, 内田洋平
2. 発表標題 大谷石採掘跡地貯留水の低温化メカニズムに関する一考察
3. 学会等名 令和元年日本応用地質学会東北支部研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 富樫聡, 藤縄克之, 大谷具幸, 芝芳郎, 奥村健夫, 香田明彦, 高杉真司, 斎藤健志, 小松登志子, 竹村貴人, 遠藤崇浩, 岡村和夫, 山本晃, 桂木聖彦, 谷藤允彦, 高橋直人, 仁木康介, 中村三昭, 宮下秀樹	4. 発行年 2020年
2. 出版社 藤原印刷	5. 総ページ数 288
3. 書名 地中熱利用技術ハンドブック	

〔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
研究 分 担 者	柴崎 直明 (Shibasaki Naoaki) (70400588)	福島大学・共生システム理工学類・教授 (11601)	

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