

大谷石採取場跡地の大規模地下空間と地盤の冷熱利用の可能性検討

来山 尚義^{1*}・的場 征史²・半田 正道²・近久 博志³

¹復建調査設計株式会社 技術研究所（〒732-0052 広島県広島市東区光町2-10-11）

²宇都宮市 経済部産業政策課（〒320-8540 栃木県宇都宮市旭1-1-5）

³山口大学 イノベーション推進機構（〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1）

*E-mail: kitayama@fukken.co.jp

宇都宮市中心部から北西に約6kmの位置にある大谷地区は、古くから大谷石の採取が行われており、その採取場跡地には大規模な地下空間が広がっている。この空間は恒温・恒湿であり、また神秘性を有しているなど優れた利用可能性を有しているため、その特性を利用してさまざまな活用が試みられてきている。しかしながら、日本では、一般の人が地下空間を利用することは少なく、地下に関する情報も少ないため、本格的に利用されることは多くない。本論文は、この地下空間が有する特徴を整理し、利用可能性の抽出と、利用促進のための課題の抽出を行う。そして、地下空洞内に設置された発熱体を例にして、地下の冷熱源の利用による冷熱効果について述べる。

Key Words : *underground opening, industrial heritage, cold source, cooling efficiency*

1. はじめに

旧帝国ホテルの壁材として利用されて全国的に有名となった大谷石は、宇都宮市大谷地区で採取され、その採取は古墳時代に始り、採取場跡地には大規模な地下空間が多数広がっている。

地下空間は、外部との遮断性（気候変動、電磁波、放射能などからの遮断）、恒温恒湿性、気密性、遮音性、低振動性などの内部環境特性、地震動に対して安定性が高いなどの構造特性、非日常性、神秘性などの心理特性に優れている。

大谷石採取場跡地でも、これらの特性を活かして、資料館、観光・イベント会場、玄米・ワインの貯蔵、ハムの熟成、撮影会場等としての利用が行われているが、恒常的な利用は限定されているのが実情である。

筆者らは、大谷石採取場跡地の恒常的な利用を促進することを目的として、大谷地区における利用可能性について検討を行った結果、温度特性（恒温性）を期待した施設が多く挙げられた¹²⁾。そこで、これらの施設への利用実現性を検討するため、地下空洞内に設置された発熱体を例にして、地下の冷熱源の利用による冷熱効果について検討を行った。

2. 大谷石採取場跡地の概要

大谷地区は、図-1に示すように東京から北に約100kmの宇都宮市中心部から北西約6kmの位置にある。宇都宮市は、東北自動車道、東北新幹線が市内を南北に縦断しており、平成23年には北関東自動車道が全通し、水戸から宇都宮、関越自動車道を經由して新潟まで高速道路でつながる予定である。

大谷石は新第三紀頃（約2000万年前）に形成された代表的な溶結凝灰岩であり、基盤層（流紋岩類、チャート、砂岩など）の上に東西約8km、南北約37kmにわた



図-1 宇都宮の交通環境³⁾

表-1 大谷石の標準的な物性値⁴⁾

| 物性項目 岩種 | 見かけ比重 | | 空隙率 (%) | 一軸圧縮強度 (MPa) | | 圧裂引張強度 (MPa) | | 弾性係数 (GPa) | | ポアソン比 | |
|------------|-------|------|------------|-----------------|------|-----------------|------|---------------|------|-------|-------|
| | 乾燥 | 湿潤 | | 乾燥 | 湿潤 | 乾燥 | 湿潤 | 乾燥 | 湿潤 | 乾燥 | 湿潤 |
| | 荒目 | 1.40 | 1.76 | 37.9 | 10.9 | 5.46 | 1.55 | 0.84 | 4.69 | 2.17 | 0.199 |
| 細目 | 1.40 | 1.76 | 38.5 | 21.4 | 6.71 | 2.48 | 0.87 | 4.00 | 1.33 | 0.165 | 0.232 |
| 田下 | 1.76 | 2.04 | 29.8 | 32.0 | 10.8 | 3.66 | 1.16 | 4.96 | 1.68 | 0.193 | 0.238 |
| 桜田 | 1.84 | 2.12 | 28.2 | 41.1 | 8.82 | 5.07 | 0.84 | 4.65 | 0.71 | 0.127 | 0.193 |

表-2 大谷石採取場跡地下空間（規模別）¹⁾

| 面積(m ²) | 空洞数 (個) | 深度別内訳(個) | | |
|---------------------|------------|-----------|-------------|------------|
| | | 50m 未満 | ~100m 未満 | 100m 以上 |
| 5,000 未満 | 164 | 65 | 92 | 7 |
| ~1,000 未満 | 51 | 5 | 40 | 6 |
| ~15,000 未満 | 20 | 1 | 15 | 4 |
| ~20,000 未満 | 8 | 0 | 5 | 3 |
| ~25,000 未満 | 4 | 0 | 3 | 1 |
| 合計 | 247 | 71 | 155 | 21 |

表-3 地下空間内温湿度計測結果例¹⁾ (単位℃)

| | | 気温 (℃) | | | | | | 湿度 (%) | | | | | |
|-----|-----|---------|------|------|---------|------|------|---------|----|----|---------|----|----|
| | | 平成元年 8月 | | | 平成2年 2月 | | | 平成元年 8月 | | | 平成2年 2月 | | |
| | | 平均 | 最高 | 最低 | 平均 | 最高 | 最低 | 平均 | 最高 | 最低 | 平均 | 最高 | 最低 |
| 外部 | | 25.0 | 33.0 | 20.1 | 3.5 | 15.9 | -6.1 | 83 | 98 | 59 | 75 | 98 | 37 |
| 空洞内 | 入口 | 13.9 | 20.9 | 10.0 | 欠測 | | | 90 | 92 | 89 | 欠測 | | |
| | 南西部 | 8.8 | 12.1 | 7.5 | 3.8 | 5.6 | 1.6 | 94 | 94 | 94 | 90 | 95 | 72 |
| | 中央部 | 8.0 | 9.1 | 7.8 | 2.0 | 4.4 | -1.0 | 97 | 97 | 97 | 88 | 98 | 65 |
| | 北東部 | 7.8 | 8.6 | 7.6 | 1.1 | 3.8 | -1.0 | 97 | 97 | 95 | 91 | 99 | 70 |



写真-1 地下空間内部の状況

って分布し、厚いところで200~300mの層厚を有している。このうち、採取区域は東西約3km、南北約6kmにおよんでいる。

表-1に、大谷石の標準的な物性値⁴⁾を示す。

大谷石採取後の跡地には、表-2に示すように現在247箇所の地下空間が形成されている。そのうち面積5000m²未満のものが164箇所で全体の70%弱を占め、地表から空間底部までの深さが50~100mのものが155箇所と最も多い。

このうち、非水没（一部湛水を含む）、非陥没、非埋戻、振動が多発していない、形状が明確等、利用にあたって障害が少ない空洞は約30である。

また、写真-1に地下空間内部の状況を示す。

地下空間内での温度・湿度の観測結果の例を表-3に示す。これより、地下空間内の気温は-1~12℃程度で推移

して、同時に観測した外気温（-6~33℃）と比較して変動が小さいことがわかる。また、湿度は冬季に70%程度まで低下する場合があるものの、全体的には90%以上で推移している。また、別の空間内で観測した地下水温度は5℃前後で一定している。

3. 大谷石採取場跡地の新たな利用可能性の検討⁵⁾

当跡地は、これまで観光・イベント会場、柑橘類、玄米、ワインなどの貯蔵庫、ハムの熟成場、養殖場・製造所、研究所および映画・テレビ等のロケーション会場等としての利用が行われてきた。しかしながら、現在は資料館、玄米・ワインの貯蔵、ハムの熟成、撮影会場等としての利用に止まっている。

そこで、筆者らは、大谷石採取場跡の大きな特徴（大規模地下空間、恒温・恒湿、神秘性、耐震性等）を考慮に入れ、これまでの利用実績、利用者へのヒアリング結果などをもとに、当地区で可能性がある利用策を挙げ、その利用を行う上で期待・要求される特徴と、当地区が有する特徴とを対比することにより利用可能性の検討を行った。

これより、いずれも一長一短があり、利用に際して解決すべき課題があるものの、物流施設（倉庫、物流センターなど）、野菜工場、精密機械、スポーツ施設、文化施設、コンピュータセンターなどが候補として挙げられ、それぞれについて、メリット、デメリット、売り込み対象業種等について検討を行った。図-2に物流基地の建設



図-2 物流基地建設イメージ

イメージを示す。

これらの中で、特に、解決すべき課題として以下の事項が考えられた。

- ①地理解：跡地にはそれぞれ複数の土地所有者、採掘権所有者があり、利用にあたってはこれらの同意を得る必要がある。合わせて、円滑な利用推進にあたっては、地元住民の理解を得ることが必要である。
- ②消防法、建築基準法への対応：空洞内を利用するに当たり、防災に対する対策も必要となる。特に、煙制御、避難経路の確保、スプリンクラーの設置などが必要となるが、実施にあたっては関係機関との十分な協議が必要である。

また、大谷石採石場跡地における利用を促進するための助成金、補助金について、特に中小企業が進出するための主な補助金等をまとめた。なお、当地区の特性を活かした企業の進出を促進するため、新たな助成制度の新設を検討することも必要と考えられた。

4. 空洞内に設置される発熱体の冷却

(1) 空洞内に設置した発熱体と空洞の仕様

空洞内に設置した発熱体の冷却効果の検討に際して、土被り60mの位置に、高さ20m、幅10mの空洞が3つ並んでいる大谷石採取場跡の空洞に、高さ2m、幅6mの発熱体（発熱量：約2400kJ/day）が連続して並べられていることを想定する。表-4に解析に用いた入力定数を示す。また、温度管理値に対する必要冷却率は、開発してきた修正シンプレックス法を用いた逆解析システム⁹を用いて求めた。

(2) 解析期間

解析期間は、2年間2ヶ月（初日4月22日）とし、2年目の4月22日から一年間、発熱体が稼働することを想定して熱伝導解析を行う。このとき、初年度は、地盤内部の

表-4 解析に用いた入力定数

| 項目 | 体積熱容量 (kJ/m ³ /°C) | 熱伝導率 (kJ/m/day/°C) | 初期温度 (°C) | 備考 |
|--------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------|----------------------------|
| 1 地盤 | 3040 | 90.72 | 12 | |
| 2 発熱体 | 3620 | 6511 | 12 | |
| 3 発熱体 | — | — | — | 発熱量: Q=2387 (kJ/day) |
| 4 断熱材 | 6.96 | 1.81 | 12 | |
| 5 地上気温 (外気温) | — | — | 12 | 最大:34°C, 最低: -10°Cの正弦曲線 |
| 6 空洞内気温 (空洞内気温) | — | — | 12 | 最大:10°C, 最低: 0°Cの正弦曲線 |
| 7 地中の温度 | — | — | 12 | |

| | 熱伝達係数 (kJ/m ² /day/°C) | 初期温度 (°C) | 備考 |
|--------------------|--------------------------------------|--------------|---------------------|
| 8 地表面と地上気温 の熱伝達 | 63.0 | — | 外部温度 (外気温No.5) |
| 9 空洞と空洞内空気 の熱伝達 | 63.0 | — | 外部温度 (空洞内気温No.6) |
| 10 空洞と発熱体の 熱伝達 | 63.0 | — | 外部温度 (空洞内気温No.6) |

クーリング期間(2010年4月22日~2010年4月22日)
解析期間(2009年4月22日~2010年6月22日)

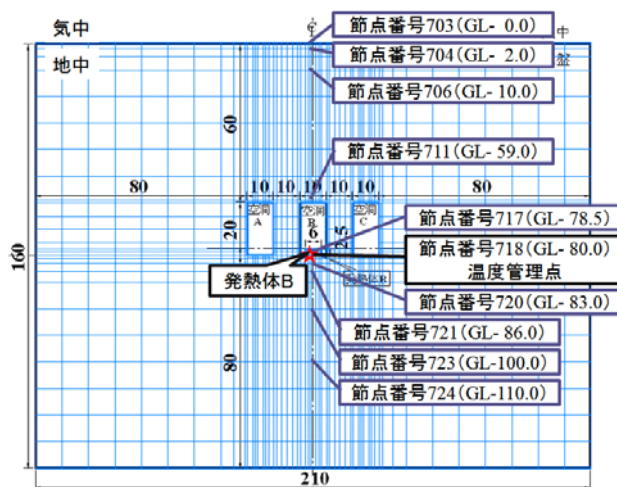


図-3 解析モデル

温度分布（発熱体設置前の状態）を作るために設ける。

(3) 解析モデル

解析モデルを図-3に示す。

境界条件は、つぎのようである。

- ① モデル上面(地上部)：外気温との熱伝達境界
- ② モデル側面：断熱境界
- ③ モデル底面(最深部)：温度指定境界 (12°C)
- ④ 空洞面と空洞内部，発熱体と空洞内部との熱伝達境界

また、解析モデル中には、本文で地盤内温度を検討の際に使用する節点を記す。そして、発熱体と地盤の境界の節点（節点番号718、深度GL-80m）を温度管理用として用いることとした。

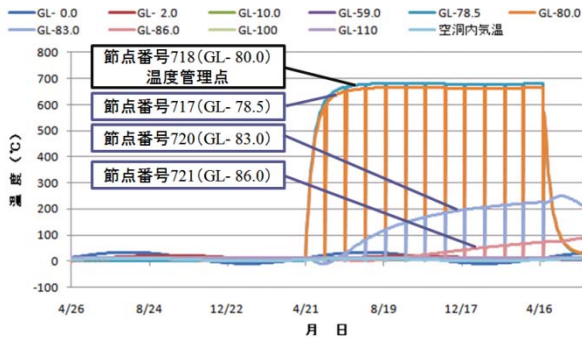


図-4 発熱体を冷却しないで空洞内部に放置した場合の発熱体と地盤内部の温度変化(断熱状態)

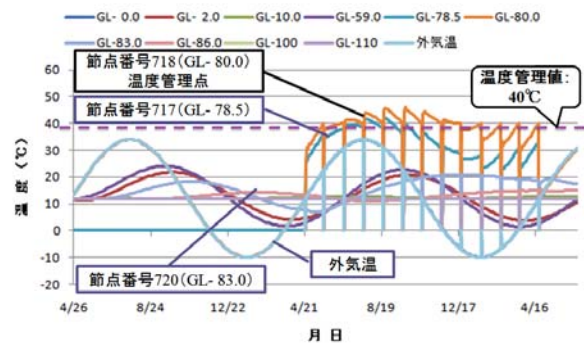


図-6 外気温内に設置した発熱体を冷却した場合の発熱体と地盤内部の温度変化(管理目標値を40°C)

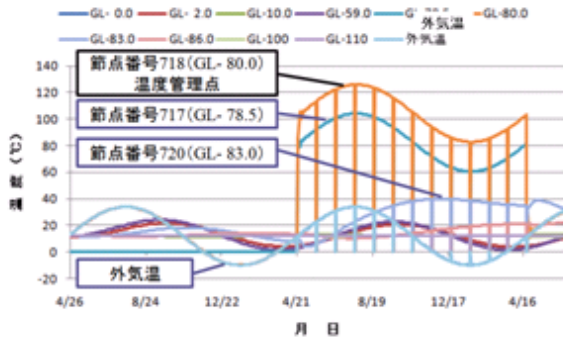


図-5 発熱体を冷却しないで空洞内部に放置した場合の発熱体と地盤内部の温度変化(外気温による熱伝達)

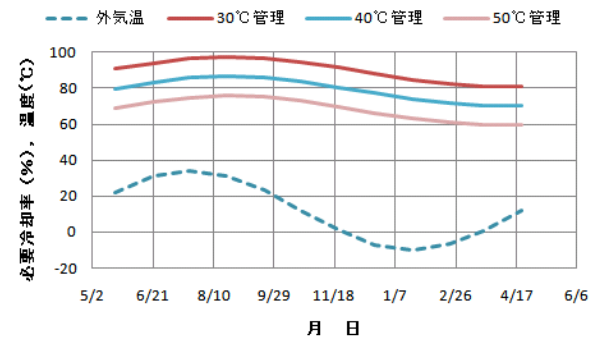


図-7 温度管理値と必要冷却率の変化(外気温による熱伝達の場合)

5. 熱伝導解析の結果

(1) 発熱体を冷却しないで、断熱材で覆った場合(空洞内気温による熱伝達)

空洞内に設置した発熱体を直接冷却しないで断熱材で覆った場合の地盤内の温度分布を図-4に示す。この発熱体を直接冷却しないで、空洞内に放置(発熱体と地盤の熱伝導)しておくと、発熱体の内部温度は夏場で682°C、冬場で677°C程度になる。

(2) 発熱体を冷却しない場合(外気温による熱伝達)

発熱体を直接冷却しないで、外気温を流入させた場合の地盤内の温度分布を図-5示す。この場合、発熱体からの熱移動は、発熱体と地盤の熱伝導と外気温との熱伝達になり、発熱体の内部温度は夏場で126°C、冬場で83°C程度になる。

(3) 発熱体を冷却する場合(外気温による熱伝達)

発熱体を直接冷却して、外気温を流入させた場合の地盤内の温度分布を図-6(温度管理値:40°Cの場合)示す。この場合、発熱体からの熱移動は、発熱体と地盤の熱伝導と空洞内気温との熱伝達だけになる。また、発熱体の冷却量は、発熱体と地盤との境界に設けた温度管理点の温度が、解析ステージの最終時間に30, 40, 50°Cとなるように設定した場合の熱量を求めた。それぞれの温度管

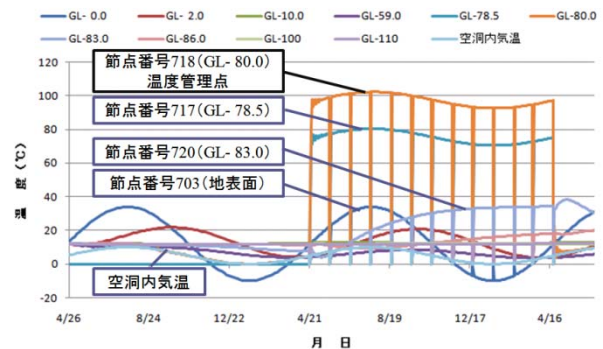


図-8 発熱体を冷却しないで空洞内部に放置した場合の発熱体と地盤内部の温度変化(空洞外気温による熱伝達)

理値に対する必要冷却率を図-7に示す。

(4) 発熱体を冷却しない場合(空洞内気温による熱伝達)

この発熱体を直接冷却しないで、空洞内気温が循環する空洞に放置した場合の地盤内の温度分布を図-8に示す。この場合、発熱体からの熱移動は、発熱体と地盤の熱伝導と空洞内気温との熱伝達であり、発熱体の内部温度は夏場で102°C、冬場で92°Cになる。

(5) 発熱体を直接冷却する場合(空洞内気温による熱伝達)

空洞内に設置した発熱体を直接冷却した場合の地盤内

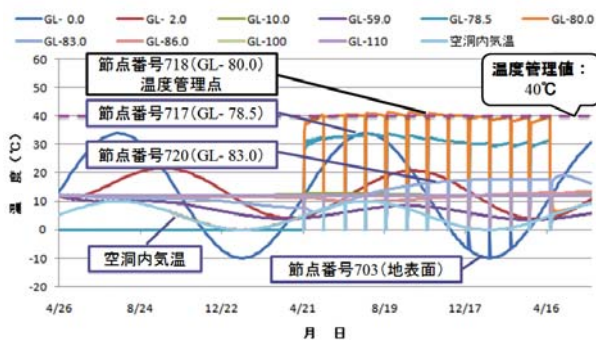


図-9 空洞内気温内に設置した発熱体を冷却した場合の発熱体と地盤内部の温度変化(管理目標値を40℃)

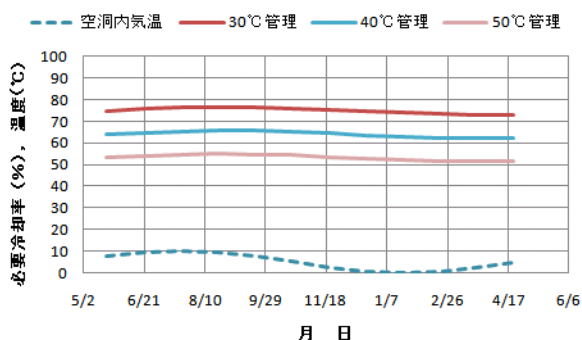


図-10 温度管理値と必要冷却率の変化(空洞内気温による熱伝達の場合)

の温度分布を図-9に示す。また、図-10には、各温度管理値に対する必要冷却率を示す。

6. まとめ

大谷石の採取場跡地に形成されている大規模地下空間を有効利用することを目的として、地下空洞が有する様々な特性を整理するとともに、他地区での利用例も参考に利用可能性の検討を行った。その結果、様々な分野での利用が考えられるが、いずれのケースも解決すべき課題が浮かび上がったところである。

そのため、今後は、有効利用の障害となるこれらの課題の解決を図るほか、民間事業者の進出を促すような支援策の研究を行いながら、事業環境を整えていきたいと考えている。

また、地下空洞内に設置された発熱体を例にして、地下の冷熱源の利用による冷熱効果について検討を行った。その結果を、管理温度と発熱体の必要冷却率との関係

表-5 管理温度と発熱体の必要冷却率 (%)

| 管理温度(℃) | 30 | 40 | 50 |
|---------|------|------|------|
| 外気温 | 90.0 | 79.1 | 68.3 |
| 空洞内気温 | 75.0 | 64.1 | 53.2 |

にまとめ、表-5に示す。当然のことながら外気温に比べて涼しい空洞内の空気を活用すると、必要冷却率は下がることが分かる。外気温に較べると管理温度によっても違って来るが、本解析によって、17~22%の減少につながることが分かった。

また、今回の発熱体の冷却には、地下水の活用を考えている。地下水は、特に、冷却効率を高める必要のある夏場の水温が低いため、効率の良い冷却媒体となる。そして、冷却媒体として、暖められた後、空洞内にある地下水などで冷却することを考えている。これによって、地上に較べて、地下空洞に発熱体を設置する場合は、非常に高い冷却効率の良いシステムの構築が可能になることが分かる。今後、さらに、地下水や地下の冷熱源の利用の可能性を探りたいと考えている。

参考文献

- 1) 的場征史, 半田正道, 中村有希, 近久博志, 田口岳志, 來山尚義: 大谷石採取場跡地に形成されている大規模地下空間の有効利用策について(その1: 現状紹介), 土木学会第65回年次学術講演会、III-098, 2010.
- 2) 的場征史, 半田正道, 中村有希, 近久博志, 田口岳志, 來山尚義: 大谷石採取場跡地に形成されている大規模地下空間の有効利用策について(その2: 利用策検討), 土木学会第65回年次学術講演会、III-099, 2010.
- 3) 宇都宮市: 第5次宇都宮市総合計画, 2008
- 4) 清木隆文, アイダンオメル, 西淳二, 田中正一: 既設地下空間の構造的安定性に関する一考察—大谷石採掘跡地空間について—, 地下空間シンポジウム論文報告書, 第10巻, pp.79-88, 土木学会, 2005.
- 5) 來山尚義, 近久博志, 的場征史, 半田正道: 産業遺産として残された大谷石採取場跡に広がるの大規模地下空間の有効利用に関する可能性策の検討, 土木学会第15回地下空間シンポジウム論文・報告集, 投稿中, 2011.
- 6) H.Chikahisa, T.Taguchi, N.Fujii, M.Wada, S.Kawamura: Field measurement and evaluation of thermal characteristics of the ground and the boundary for the utilization of cold source within the ground, European Rock Mechanics Symposium, pp.849-852, 2010.

UTILIZATION OF LARGE-SCALE UNDERGROUND OPENINGS REMAINED AS INDUSTRIAL HERITAGE AFTER QUARRYING OHYA STONE AND ITS COLD SOURCE WITHIN THE GROUND

Naoyoshi KITAYAMA, Masashi MATOBA, Masamichi HANDA
and Hiroshi CHIKAHISA

Large-scale underground openings remained as an industrial heritage after quarrying Ohya stone are located northwest in Utsunomiya city. Because underground openings have good merits such as constant temperature and humidity, interruption performance, mystique and so on, they are often studied for utilization of various types of facilities using its merits. Authors studied utility of underground space and its cold source remained in Utsunomiya. In this paper, after the possibility of utilization of underground space are demonstrated, the efficiency of cooling system using cold source within the ground for heat-generated facilities installed in underground space is discussed.