

地上施設との比較に基づく大谷採石地下空間の 環境負荷に関する研究 STUDY ON ENVIRONMENTAL LOAD FOR UNDERGROUND QUARRIES IN OYA COMPARING WITH GROUND FACILITY

柴田 正史¹・清木 隆文²・横尾 昇剛³・西田 幸夫⁴

Masafumi SHIBATA・Takafumi SEIKI・Noriyoshi YOKOO・Yukio NISHIDA

Over 200 underground caverns quarrying Oya tuff or Oya stone for a building stone have been remained in the Oya region, Utsunomiya City, Tochigi Prefecture. The number of industries quarrying Oya tuff has been declining since huge collapses of old abandoned underground quarries around 1990. And several plans developing those quarries disappeared. As some of underground quarries still have excavated the Oya tuff, this study evaluated environmental load while storages were constructed and used in two underground quarries and on ground. And the study considered the advantage and disadvantage of reusing the underground quarries. The results tend that the underground storages are better than ground ones in order to reduce environmental load, even though a dehumidifying process needs to find the other way to reduce the load.

Key Words : Oya tuff, underground quarry, environmental load, underground and aboveground

1. はじめに

栃木県宇都宮市の大谷町には、かつて200箇所以上の大谷石採石場があり、その殆どが地表面下から採石するものであった。この結果、採石終了後には、地下に大小様々な採石地下空間が残されている。これらの採石を終えた地下空間(採石跡地下空間)は、そのまま放置され、雨水などが溜まり、荒廃するに任されている。この採石場から採掘されてきた大谷石は、擁壁材として非常に良く使われていたが、1978年(昭和53年)に発生した宮城県沖地震により、家屋の擁壁の構造に対する規制が強まった結果、需要が減少した。さらに、平成元年から3年にかけて発生した大谷石の採石跡地下空間の陥没事故を境に、大谷地域において地下空間を精力的に利用する動きも途絶えつつあった。一方で一部の採石地下空間が商業施設などとして利用されている¹⁾。現実問題としては、大谷地域の安全性を公式に保障することが優先課題であるが、その次に採石場の所有者などが利用する意思がある場合に、採石場を他の施設として二次的に有効利用するメリット、デメリットを明確にしておく必要がある。地下空間施設は、建設工事負荷、施設運用負荷、維持管理負荷などを示すことで、地上に同様の施設を建設する場合と比較した優位な点、不利な点が明確になる。この検討の結果をもとにして、大谷石採石(跡)地下空間の有効利用が地域に及ぼす波及効果などが理解されることで、最終的に意思決定がなされることが考えられる。既往の研究ではNishiら²⁾が、国内の地下鉄施設と景観、住環境と景観との関連をCVMによって施設の地下化について有意さを議論している。ま

キーワード：大谷石、採石地下空間、環境負荷、地上と地下

¹ 正会員 (有) セカンドライン(元宇都宮大学学生)

² 正会員 准教授 宇都宮大学 工学部建設学科建設工学コース

³ 非会員 准教授 宇都宮大学 工学部建設学科建築学コース

⁴ 正会員 CEO 技術者 東京理科大学 総合研究機構火災科学研究センター

た、Gilchrist ら³⁾は、社会資本整備に必要なコストを 22 箇所の工事について都市環境の改善の可能性について、社会指標をもとに評価することを試みている。また、ITA の WG13 は、世界 19 カ国 30 の都市について、都市部の交通機関、建物の地上と地下との選択、コストの違いなどについて、まとめている⁴⁾。しかしながら、都市部近郊の採石跡地下空間など、既存の地下空間の再利用を検討するために、空間の価値は明確にされていない。そこで本研究では、現在大谷地域で掘削されている採石地下空間を対象に、地上施設と比較することにより、環境負荷を一つの視点として有効性を検討することを目的とする。なお、地下空間と地上空間の比較をする前に、対象地域が商業施設などとして成り立つためには、既に流通、交通の便が良いことあるいは、必要なインフラの整備を行うことが前提となるが、この点について考慮しない。

2. 大谷地域の現状および特色

(1) 大谷地区と採石地下空間

大谷石を産する大谷町は、宇都宮市の市街地から北西に約 7 km に位置し、首都圏から約 100 km、東京駅から東北新幹線で 49 分、東北自動車道の浦和 IC から 98 km と、交通の便の良いところにある。大谷石は独特の淡緑色の色調から、土木や建築用資材として古くから採掘されてきた。栃木県内では、国分寺が建立された際の石垣、土留め、土台石や、宇都宮城、松ヶ峰教会等が例として挙げられる。近年大谷石は、旧帝国ホテルの建設材料として用いられ、関東大震災の中で無事であったので、全国的に大谷石の名が知られることとなった。現在では一般に門柱や塀の材料として使われている。また、大谷石は、多孔質構造の間隙周辺部分や火山弾の粘土化した「ミソ」と呼ばれる部分は、モンモリロナイト、イライト、ゼオライト等の粘土鉱物や沸石鉱物を多く含んでいるため、土壌改良剤としても応用されている。1960 年代に手掘りから機械掘りが主流となり、大谷石の生産効率はかなり改善されたが、1973 年の年間生産高 98 億円、石材業者 118 社をピークに、石材産業の斜陽化が進んでいる。これは、大谷石の需要減少が主な原因であるが、従業員の高齢化、石材業者の零細化が拍車をかけている^{1) 5)}。また、最近では石材と加工の人件費の安価な中国からの類似した石材の輸入増加も一因として挙げられる。現在も採石を行っている採石地下空間は、10 箇所程度である。

(2) 大谷石の地質的な特徴と石材としての区分

大谷石は、新第三紀に形成された地質学的に流紋岩質熔結凝灰岩に分類される。今から 1,500 万年以上前に海底火山の激しい噴火活動のもとに火山噴出物(火山灰や岩片)が繰り返し海底に堆積し、現在のような厚い層を形成した。これが隆起して陸地となるところには、緑色凝灰岩(グリーンタフ)に変化した。この層を構成する岩は、膠結組織や気泡組織の発達した層理のない岩体をなす流紋岩質を呈して、基盤層(流紋岩類、チャート、砂岩等)の上に東西約 4 km、南北 5.5 km にわたって分布し、厚いところで 200~300 m の層厚を持っている⁶⁾。またこの淡緑色の凝灰岩は、大谷町の東西約 2 km、南北約 4 km の範囲の所々で露頭している。大谷石の用途は、住宅の擁壁材や壁材、建物の化粧板等に広く使われている。大谷石の石材としての品質は、「ミソ」の密集の度合いで分けられている。特にミソの少ない部分は細目、多い部分を荒目と呼ばれる。大谷層は SS 層、大谷石第 I 層~大谷石 VI 層に分けられ、鎧川周辺にはほぼ南北に向斜軸が見られ、東下がりの緩やかな傾斜が西下がりになる。大谷石 I 層~II 層は、ミソが多く、荒目石が採掘され、その下の大谷石 III 層~IV 層は、ミソの密集度合いが低く、良質な細目石が採掘される⁶⁾。田下石、桜田石は、大谷石 I 層~II 層のミソの含まない細粒凝灰岩層が大谷の西側で浅くなったところで採掘される。これらの石の名前は、採掘する地名に由来している。大谷地域の地下水位は地表から概して 10 m 以浅と比較的浅い。

3. 大谷地区における採石地下空間利用の現状

大谷石の採石地下空間は、年間を通して温度や湿度が一定している⁷⁾ので、現在日本酒やワインの貯蔵庫やハムを熟成させる地下工場として活用されている。この他に、これらの空間の中には、変化に富んだ地下空間や遮音性を利用して、コンサート、美術展、演劇場、教会式結婚式場、写真や映画のスタジオなどのイベントスペースとしても活用されているところもある。また、かつては、外部から遮断されているため宇宙線の研究機関(昭和 58 年~

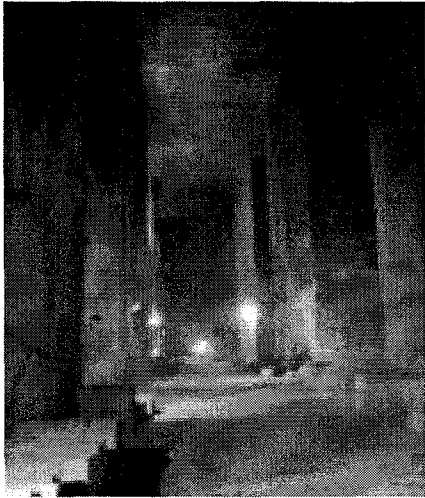


写真-1 対象地下空間 A の主空間の全景

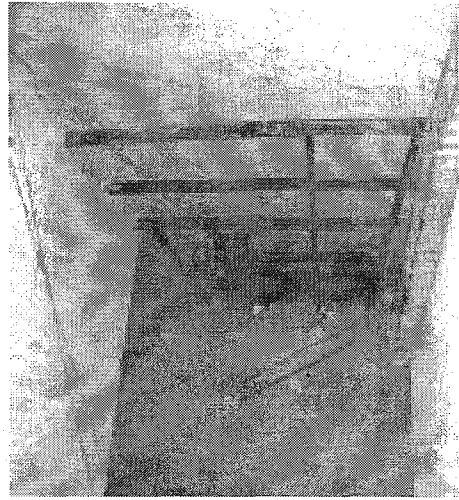


写真-2 対象地下空間 A の補強状況



写真-3 対象地下空間 B の夏季の主空間(湧水が多い)



写真-4 対象地下空間 B の冬季の主空間(湧水なし)

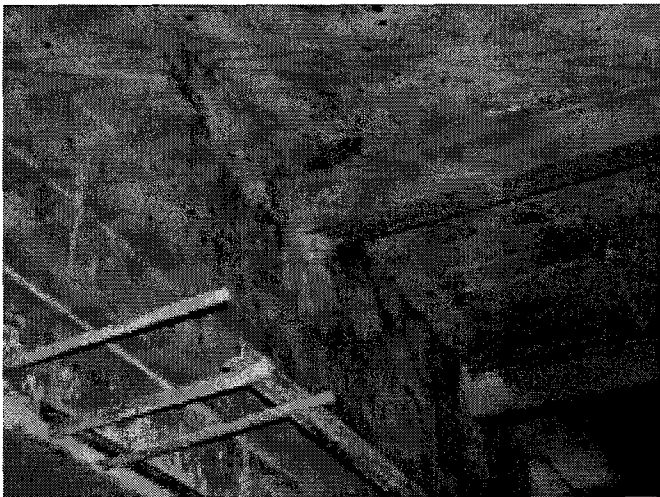


写真-5 対象地下空間 B の天端補強の様子



写真-6 対象地下空間 B の壁面節理に対する補強

平成 7 年), 野菜等の貯蔵庫などにも利用されていたが, 野菜をと貯蔵し, 都市部へと輸送する際の採算性の悪化, 小規模の落盤によるケーブル断線事故などを理由に事業が中止された¹⁾. ストーン・フェスティバルの一環として, 大谷洞窟迷路(昭和 62 年 8 月 8 日~11 月 30 日)のイベント施設として利用された時期もあった¹⁾. 平成元年から 3 年にかけて起こった大陥没事故を境に, 大谷石の採石跡地下空間の有効利用を新たに計画する動きはなくなった.

この後、警戒区域を設定し、県、市、大谷地域が一丸となって、その周辺の警戒と警備にあたっている。現在は、大谷石材組合及び大谷の地域住民が中心となって、採石地下空間の埋め戻しによる安全性向上の検討を行っている。大谷石の採石終了後の地下空間を有効に利用するためには、地下空間が持つ独特な雰囲気売り出すだけでなく、空間を有効利用するため期間の構造安定性を保障しなければならない。これに加えて地上施設に比べて地下空間を利用するメリットが大きく、事業としての採算性を考慮しなければ、施設を運営することは難しい。

4. 大谷地域の対象地下空間および有効利用の条件の設定について

(1) 現場調査

著者らは本研究を実施するために、現在も大谷地域で大谷石を採石している採石地下空間を対象に、採石手順、残柱間隔、残柱高さ、坑内の節理等の分布状況、補強材の有無や設置状況を平成18年6月から平成19年1月にかけて調査した。その結果から採石地下空間の形状を大別すると、残柱を等間隔に残し採石をする採石地下空間と、主な採石地下空間(主空洞)から横方向に矩形の小空間を造りながら、採石する採石地下空間の2種類に分類される。前者は大谷地域の空洞の形状としては一般的で、採石年数が長く、採掘規模の大きい採石場の多くがこの特徴を呈している。この形状を持つ採石地下空間の中で、現在も採石を行っている地下空間の一つを選び、対象地下空間 A とした。また後者は、採石規模が比較的小さく、採石期間が比較的短い場合に相当する。この中で採掘中の採石地下空間の一つを対象地下空間 B とした。また、採石を行っている現場の方々に大谷石採石場の掘削年代および範囲の聞き取りと地下空間の再利用についての意見聴衆を行った結果、将来の用途は現在未定で、地下空間を利用することに特にメリットがあるのであれば、検討をするとの回答が殆どであった。なお、双方の現場ともに、大谷採石地下空間内の気温や湿度は、若干の差はあるが、年間を通して15℃前後、湿度70~80%である。

(2) 対象地下空間 A

対象地下空間 A は土被りが40mで、採石を始めて30年が経過している残柱式の空洞で、柱の高さが最大30m程度まで採掘されており、年間を通して湧水が見られない(写真-1)。場所によっては天端に節理の多い箇所がみられたが、この場所では大谷石の採石を行わず、鉄骨によって補強されていた(写真-2)。

(3) 対象地下空間 B

対象地下空間 B は、土被りが40m程度であり、空間高さが最大15m程度までの採掘がされている。特に夏季は比較的多い量の地下水が湧き出ている(写真-3)が、冬季は一部を除き、湧水が見られなくなる(写真-4)。これは、夏季と冬季の周辺の地下水位の違いが原因と考えられる。対象地下空間 A と同様に、天端に生傷(節理)の多い箇所には鉄骨によって補強がなされ(写真-5)、壁面に生傷が現れている場合は、壁面からの深さを推定して、異型鉄筋でロックボルトのように壁を補強している(写真-6)。本研究では採石地下空間において、夏季の湧水の影響は、水周りを工夫することで排除できるとし考慮しない。

(4) 大谷地下空間の有効利用のために検討すべき条件について

本研究の目標は、大谷地域に存在する採石地下空間を、有効な空間資源と捉えて、有効利用することである。そのために、検討すべき項目は、①大谷地域住民の意志(採石終了後に地下空間を埋め戻すだけでなく、地下空間を有効に利用しようとする意志、地域住民の満足感)、②有効利用しようとする採石地下空間の安全性、③地下に利用施設を建設するメリットとデメリット(建設時、施設運用時、メンテナンス等の維持管理)、④大谷採石地下空間を利用することによる地域への波及効果、のように、様々な観点から地下空間を有効利用するためには検討する必要がある。本研究では特に③の地下空間建設時、施設運用時についてCO₂排出量を評価指標としてまとめた。

5. 対象地下空間における地上と地下の倉庫施設の運用、建設に伴うCO₂排出量、冷却除湿の算出

(1) 各種条件および計算方法について

a) 算出条件の設定

本研究では代表的な地下空間を対象に、用途として最も単純な構造を持つ倉庫施設を地上と地下に建設することを想定し、比較する。仮定した条件は、① 対象地下空間に、地下倉庫施設を建設する。この規模は、地上倉庫施設と同規模とする。② 地上倉庫施設は、本来ならば窓を設置する必要があるが、なるべく地下施設と同じ構造条件で比較を行うために、窓ガラスによる伝熱負荷、日射負荷を考慮しない。③ 倉庫の空調運転時間を、地上で従業員が作業を行う稼働条件に併せて地上と地下の施設ともに12時間(8:00~20:00)とした。ただし、採石地下空間の除湿を行う冷却減湿の検討の際は、最低限の環境を維持するために機器の稼働時間を24時間とした。④ 倉庫施設の運用に伴う従業員数は、施設規模に関係なく10人とする。環境負荷の算定条件は、従業員の人数によって外気負荷が変化するが、従業員の数の違いによる環境負荷の差を求めることが本研究の本来の目的ではないので人数を一定値とした。⑤ 施設運用における電力消費量とCO₂排出量を算出するには、空調熱源、二次ポンプ、空調機ファンなどの空調設備、照明、換気設備、衛生設備、昇降設備の熱負荷、電力消費量を求める必要がある。しかし、本研究は、同規模の地上と地下倉庫施設との環境負荷の比較を行うため、換気設備、衛生設備の熱負荷と電力消費量は、地上、地下倉庫施設ともに同様に影響を与えるとして考慮しない。⑥ 地下倉庫施設の建設コストおよび建設に伴うCO₂排出量を算出するには、仮設、基礎、躯体、防水、屋根外壁、内装、床、天井、電気設備、昇降設備、給排水、消火設備、空調換気設備などの建設コストとCO₂排出量を求める必要がある。しかし、本研究の地下倉庫施設は、採石した後の大谷採石地下空間を無支保で、できるだけそのままの状態で利用するために、最低限必要な躯体設備を検討する。地下倉庫施設は、立坑に昇降設備が必要であるが、その他の設備の建設コストとCO₂排出量は、地上倉庫施設と同様とする。

本研究では、地下倉庫施設A(長さ39.4m×幅75m×高さ18m)を対象地下空間A、地下倉庫施設B(長さ10m×幅88m×高さ10m)を対象地下空間Bにそれぞれ建設することを想定し、各種環境負荷を検討する。地下における環境負荷算出の基本的な考え方は、地上の建築物の場合に従う^{8),9)}。以下に地下倉庫施設Aを建設する概要について説明する。地下倉庫施設Bについては、算出過程が同様であるので、設定項目、結果のみを示す。

b) 地下空間の熱負荷計算に関する検討方法

対象地下空間Aにおける地下倉庫施設、および同規模の地上倉庫施設の熱負荷計算を行う。算出条件は、地上と地下の夏季および冬季の外気温、湿度、外壁の通過熱伝達率、1日の全負荷相当時間の違いのみを反映させ、その他の条件は同一とした。

c) 熱通過率K値の算出方法

地上施設における熱通過率K値は、倉庫構造物としての一般的な仕様を参考⁸⁾にして、屋根を外装+コンクリート+断熱材(厚さ100mm)+内装の構成とし、 $K=1.32 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ ⁸⁾、また外壁を外装+コンクリート+内装の構成とし、 $K=6.75 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ ⁸⁾と設定し、伝熱負荷を算出する。大谷地下倉庫施設は、大谷石壁面をそのまま倉庫の壁として用いるため、大谷石の熱通過率K値を求める必要がある。ここで、大谷石の熱伝導率は、 $\lambda=3.128 \text{ kJ/mh}^\circ\text{C}$ ¹⁰⁾である。設定温度に保った倉庫の室温が、壁面内を伝わる深さ d (m)を(1)式¹¹⁾の計算結果より求める。この深さ d は壁面からの厚さが厚い程、構造物の堅牢さの面から優位であるが、地下空間の恒温性などの利点を生かすことが

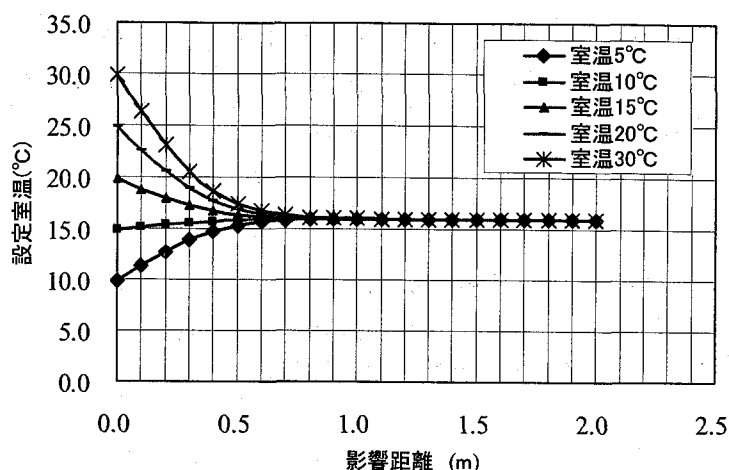


図-1 室温と大谷石の壁面内の影響距離

表-1 従業員数と外気負荷との関係

従業員数 (人)	外気導入量 (m ³ /h)	冷房顕熱負荷 (kJ/h)	冷房潜熱負荷 (kJ/h)
5	100	384	1,592.5
10	200	768	3,185
20	400	1,536	6,370
30	600	2,304	9,555

優位な反面、できるだけ不利な条件で地上施設との比較を行うことにならない。そこで、地下空間内を設定室温(T_{∞})を 10℃～35℃の間でそれぞれ 24 時間保った時、大谷石岩体内の初期温度 $T_i=16$ ℃の分布を乱す最小の厚さ(熱伝達範囲)とし、1.3 m とした(図-1)。

$$T = T_i + (T_{\infty} - T_i) \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) - \exp \left(\frac{hx}{\lambda} + \frac{h^2 \alpha t}{\lambda^2} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{h\sqrt{\alpha t}}{\lambda} \right) \right\} \quad (1)$$

ここに、 α は壁面の熱拡散率(m^2/h) (α (大谷石) = $0.002 \text{ m}^2/\text{h}$)、 h は壁面の熱伝達率($\text{kJ}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$) ($h=39.765 \text{ kJ}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)、 T_{∞} は周囲の温度($^\circ\text{C}$)、 T_i は初期温度($^\circ\text{C}$)、 t は経過時間(h)、 x は壁面からの距離(m)、 λ は壁の熱伝導率($\text{kJ}/\text{mh}^\circ\text{C}$)である。大谷石の熱通過率 K 値は(2)式¹²⁾をもとに計算し、 $K=2.269 \text{ kJ}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ を得た。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda} \quad (2)$$

ここに、 α_i は、室内側壁表面の熱通過率 ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$) (一般値 $\alpha_i = 39.766 \text{ kJ}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)^{7),10)}、なお、本研究では、熱通過率 α_i を(1)式の熱伝達率 h と同じ値とした。

d) 地上倉庫施設の立地方向の影響による伝熱負荷

夏季の屋根と外壁の伝熱負荷は、夏温度差(=相当外気温-室温)に大きく影響を受ける。ここで、地上倉庫施設の立地条件を長方形の平面構造を持つ倉庫の長辺が北-南向き(CASE 1)、東-西向き(CASE2)、南西-北西向き(CASE 3)、北東-南西向き(CASE 4)になる場合に分け、宇都宮の相当外気温、立地条件に応じた屋根と壁の伝熱負荷をもとにして、対象地下空間 A と同規模の地上倉庫施設における伝熱負荷を算出した。この中で最も伝熱負荷が小さい立地方向を選び、夏季の伝熱負荷とした。立地条件の CASE 1～CASE 4 における夏季の室内設定室温 25℃の冷房の場合の伝熱負荷は、CASE 1 の立地条件における屋根と壁の伝熱負荷 654,830 kJ/h が最も小さい値となった。そこで、CASE 1 の北-南向き向きを地上施設の屋根と壁の伝熱負荷を計算する方向とした。対象地下空間 B についても同様の検討を行い、CASE 1 を立地方向とした。

e) 内部負荷、外気負荷の検討

設備の内部負荷は、設備内の冷房負荷(kJ/h)および暖房負荷(kJ/h)を計算する。この際、照明負荷(W/m^2)、コンセント負荷(W/m^2)、人体顕熱負荷($\text{人}/\text{m}^2$)が考慮の対象となる。また、外気負荷については、外気導入量 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 人を基礎として、従業員数をもとに外気負荷を算出する。なお、照明負荷(W/m^2)、コンセント負荷(W/m^2)は、一定値とし、従業員数を変えて、各負荷を算出した結果を表-1 に示す。従業員数に比例させて各負荷が上昇することを示しているが、環境負荷と従業員数の関係を求めることは本来の目的ではないので、従業員の人数を 10 人と仮定した。この条件は地上と地下の施設共に同じとした。ここで、夏顕熱差、冬顕熱差、夏潜熱差、冬潜熱差を計算し、熱交換率を一般的な値として顕熱時 0.6⁹⁾、潜熱時 0.35⁹⁾とした。また、設定室温 5℃～30℃に相当する相対湿度を夏季 50%、冬季 45%とし、それぞれの乾球温度と相対湿度の関係に応じた絶対湿度を湿り空気 $h-x$ 線図⁹⁾から読み取った。

f) ピーク冷暖房負荷、日冷暖房負荷の算出

本研究では、顕熱負荷、潜熱負荷を冷房、暖房の負荷別に、伝熱負荷(kJ/h)、内部負荷(kJ/h)、外気負荷 (kJ/h)をもとに算出する。この際、ダクト損失、配管損失、ファンの再取得熱を考慮し、冷房の全負荷は、顕熱(潜熱)負荷の 1.2 倍⁸⁾、暖房の場合で 1.18 倍⁸⁾とした。

g) 日冷暖房負荷

日冷房負荷($\text{MJ}/\text{日}$)は、ピーク冷房負荷(MJ/h)、全負荷相当時間($\text{h}/\text{日}$)、日冷房運転時間($\text{h}/\text{日}$)の積から求めた。全負荷相当時間は、宇都宮において地上部は一般値として、冷房 10.4 h/日⁸⁾、暖房 7.7 h/日⁸⁾を用いた。地下施設では、冷暖房時間を 12 h/日とした。この条件は、従業員が作業を行う間、地下倉庫施設で常時冷暖房を運転することを意味し、負荷を大きめに見積もったものである。図-2 に、日冷暖房負荷($\text{MJ}/\text{日}$)と室内設定室温($^\circ\text{C}$)の関係を示す。

(2) 日電力消費量の算出

日電力消費は、熱負荷計算と同様に、対象地下空間に倉庫施設を建設する際の日電力消費量を算出することで、地上倉庫施設と比較する。空調熱源機器としては、マルチシステム、ガスエンジンヒートポンプシステム、中央式ヒートポンプチャラー、ガス冷温水発生機、水氷蓄熱システムなど、数多く存在する。どの空調熱源機器も、オフィス、ホテル、工場、デパートなどの施設で使われているが、本研究においては、倉庫事業で一般的に使われている

中央式ヒートポンプチラーを空調熱源機器として採用した。

a) 日冷暖房電力消費量

日冷暖房電力消費量(kWh/日)は、日冷暖房負荷(MJ/日)、冷暖房 COP (Coefficient of Performance)、地区修正係数の積から求めた。この冷暖房 COP は、ヒートポンプの理論最高効率を意味し、冷水温度(°C)、冷却水温度(°C)を設定して求める。宇都宮の地区係数⁸⁾は、東京の値 0.278 を基準として、冷房 1.00 で暖房 1.06 である。地下では、他地域の値で負荷を大きめに見積もるために、冷房 1.09 (名古屋の値)、暖房 1.31 (旭川の値)の係数を現実にある値から選択した。

b) 二次ポンプ

蓄熱設備は、安価な夜間電力を利用して、夜の間に蓄熱槽の冷温水を蓄え、日中に使用する備蓄システムで、空調熱源で作られた冷温水を一次ポンプで一定の温度の水を供給し循環させた後、再び空調熱源機に二次ポンプ水を送る。この二次ポンプが、熱負荷部分に相当する。施設の規模を考え、温水ポンプ電力消費量(kW)は、ピーク冷暖房負荷(MJ/h)を往還温度差(°C)で除し、ポンプ揚程(m)および係数(0.00163)⁹⁾を掛けることから求めた。ポンプ揚程とは、空調熱源で作られた冷温水を、

最高位置まで持ち上げる高さのことである。本研究では、備蓄システムを対象倉庫施設 A の施設天上部に設置するとして、ポンプ揚程を 15 m とした。対象倉庫施設 B では、8 m とした。日冷温水ポンプ電力消費量(kWh/日)は、求めた冷温水ポンプ電力消費量(kW)と一日あたりの冷暖房時間(h/日)の積から求めた。

c) 空調機ファン

空調機風量(m³/h)は、ピーク顕熱負荷(MJ/h)に係数(= 83)⁸⁾をかけ合わせることで求まる。また、空調機ファン動力(kW)は、この空調機風量(m³/h)に静圧(mmAg)を掛け合わせ、係数(176,000)⁸⁾で割ることで求まる。本研究では、空調機ファンの静圧を一般的な値として、90 mmAg⁸⁾を採用する。さらに、日空調電力消費量(kWh/日)は、ここで求めた空調機ファン動力(kW)に、1 日当たり空調運転時間(h/日)をかけ、省エネルギー率を考慮することで求める。本研究では、機種の影響を出来るだけ無視するために、省エネルギー率の最も低いダンパ制御(省エネルギー率=0.35)⁸⁾を選択した。大谷採石地下空間の立坑は、10 m×10 m 程度の矩形断面が一般的であるが、大きなもので 40 m×40 m のものもある。屋外機などは、熱交換の効率を上げるために地上部に設置する方が良いが、現在採石が自然換気のもとで行われている状況を反映し、空調機施設などは立坑底部に設置するものとする。

(3) 地下空間施設のための昇降設備の負荷についての検討

地下空間施設は、荷物、従業員の昇降のために、昇降設備(エレベーター)が必要である。一般の倉庫設備では、倉庫内で荷物を整理するために昇降施設が必要となる場合もあるが、この様な設備は地上、地下ともに共通であるので考慮しない。昇降設備電力消費量(kW)は、乗せる設備の積載荷重(kg)に定格速度(m/分)を掛け合わせ、係数(860/30)⁸⁾で補正した後、必要な台数を掛ける事によって算出される。本研究では、中規模の昇降設備(積載荷重 2,000 kg、定格速度 90 m/min.)⁸⁾を 2 台設置した。この結果をもとに、日昇降設備電力消費量(kWh/日)を日運転時間(h/日)と掛け合わせることで、167.4 kWh/日を算出した。

(4) 日空調と昇降設備運用における電力のエネルギー消費量

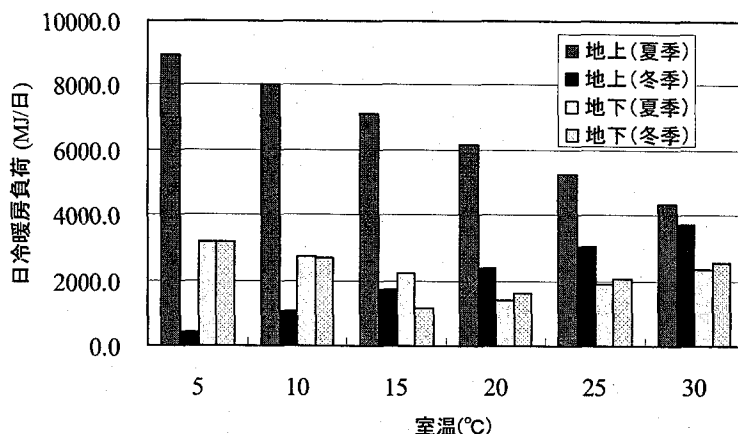


図-2 冷暖房の一日あたりの負荷
(対象倉庫施設 A)

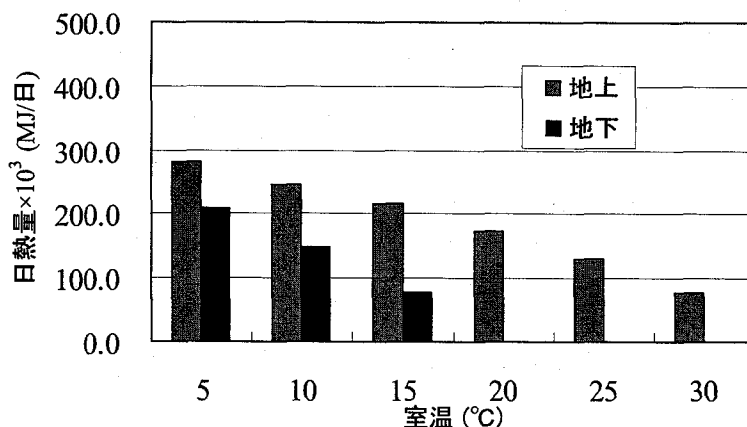


図-3 冷却除湿に要する熱量
(対象倉庫施設 A)

日空調と昇降設備運用における電力のエネルギー消費量は、以上の計算結果に基づいて算出する。日空調と昇降設備運用における電力のエネルギー消費量(MJ/日)は、日設備運用電力消費量(kWh/日)に電力のエネルギー原単位 (MJ/kWh)を掛け合わせることで求まる。ここで、電力のエネルギー原単位を 10.255 MJ/kWh¹⁴⁾とした。

(5) 電力消費による CO₂ 排出量

電力消費量による CO₂ 排出量は、電力の CO₂ 排出原単位 (kg-CO₂/kWh)に日設備運用電力消費量 (kWh/日)をかけることで求めた。ここに、わが国における電力の CO₂ 排出原単位 0.38 kg-CO₂/kWh¹⁵⁾とした。

(6) 冷却除湿に要する熱量

大谷石の採石地下空間内の湿度は、年間を通して 70～90 % と非常に高いので、地下空間の恒温、恒湿性を活かし快適な環境で有効利用するためには、除湿が必要となる。そこで、冷却除湿に要する熱量 q (kJ/h) を(3)式⁹⁾を用いて算出する。ここに、 G を空気の流れ量(kg/h)、 h_1 を外気温(地上)、地下空間内の気温における比エンタルピー (kJ/kg)、 h_2 を設定室温の空気の比エンタルピー (kJ/kg)、 V を標準空気換算の風量(m³/h)、 v_0 を標準空気の比容積($v_0=0.83$ m³/kg)とする。(3)式より、対象倉庫施設 A において、乾球温度(地上では外気温、地下では地下空間内の気温)の空気、その気温に応じた絶対湿度 (g/kg)の空気 5,000 m³/min.を、冷却コイルを通して冷却除湿する。コイルの表面温度が一樣に、設定室温に保たれるとし、またコイルのバイパスファクタを条件の厳しい 10%として、地上施設では 12 時間運用(8:00～20:00)、地下施設では 24 時間運用の冷却除湿のために必要な熱量を求めた。冷却除湿に必要な熱量を算出するための換気率は、倉庫施設では、一般的に保管するものに依存するが、1 時間に 5～10 回程度とされている⁹⁾。対象倉庫施設 A において、53,190 m³の倉庫を 1 時間弱で 5 回換気をする標準空気換算の風量 5,000 m³/min、300,000 m³/h とした。同様に、対象地下空間 B において、8,800 m³の倉庫を 1 時間弱で 5 回換気をする標準空気換算の風量 750 m³/min、45,000 m³/h とした。

図-3 に、冷却除湿に要する熱量(MJ/日)と設定室温(°C)の関連を示す。地下空間においては、年間を通して、気温が 15 °C 前後であるので設定室温が 20 °C 以上の場合、暖房することで除湿できるので扱わない。

(7) 建設コストの算出および CO₂ 排出量への換算

本研究では、地上と地下倉庫施設の仮設、基礎、電気設備、給排水、消火設備、空調換気設備の建設コストは、同値であると仮定した。そのため、地上倉庫施設の躯体と屋根外壁等仕上げ建設コスト、地下倉庫施設における昇降設備建設コストのみを算出した。これらのコストは、参考文献¹⁰⁾の倉庫や流通施設の躯体、仕上げ、昇降設備の建設コスト値を基準にして、S 構造(主に鉄骨で建設する構造)、SRC 構造(主に鉄骨鉄筋コンクリートで建設す

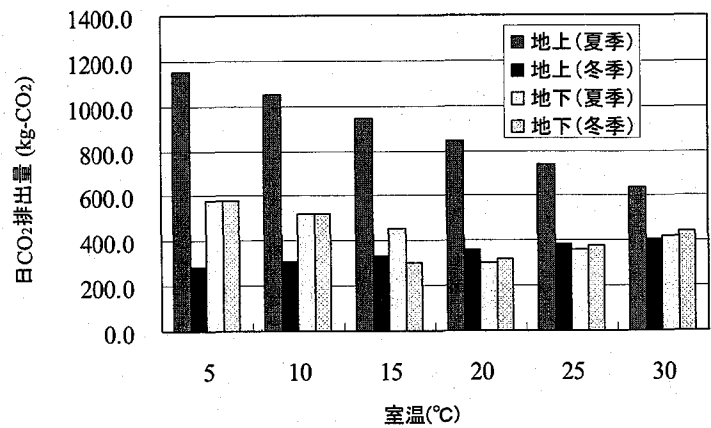


図-4 空調・昇降設備運用における日あたりの CO₂ 排出量 (対象倉庫施設 A)

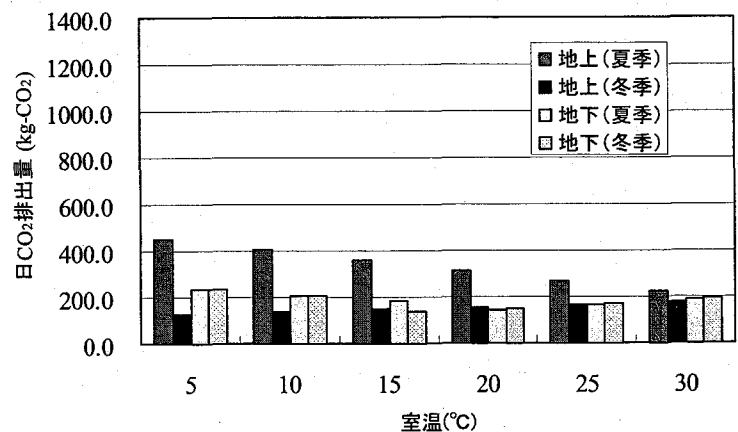


図-5 空調・昇降設備運用における日あたりの CO₂ 排出量 (対象倉庫施設 B)

$$q = G(h_1 - h_2) = \frac{V}{v_0}(h_1 - h_2) \quad (3)$$

る構造)それぞれの躯体と仕上げの工事原価を延床面積で割り、工事単価を概算した。その工事単価に、対象地上倉庫施設の面積を掛けた値を、躯体建設コスト、屋根、外壁、内壁の仕上げ工事に伴う建設コストとした。また、昇降設備の建設コストの算出方法は、S構造体、SRC構造体それぞれの昇降設備の工事原価を階数で割り、その値を1階(高さ4.0 m)分に相当する工事単価とした。昇降設備の建設コストは、この工事単価に対象地下倉庫施設の立坑深さ(対象地下倉庫施設Aの場合90 m、対象地下倉庫設備Bの場合50 m)に換算して得る。躯体工事に必要な型枠、コンクリート、鉄筋、鉄骨量は、延べ床面積当たりの主要資材数量¹³⁾を用いて、SRC構造およびS構造の地上倉庫施設A、Bの規模に換算した。さらに、地上倉庫施設の躯体工事に伴うCO₂排出量は、これらの結果を資材における単位あたりのCO₂排出量¹⁶⁾を用いて換算する。屋根、外壁、内壁仕上げ工事では、屋根、外壁、内壁に使用する建材として、最もCO₂排出量が少ない建材を選び、屋根、外壁、内壁それぞれの面積を掛け、屋根、外壁、内壁仕上げ工事に伴うCO₂排出量を算出した。また、昇降設備建設に伴うCO₂排出量は、地上6階、地下1階建ての20人乗り昇降設備の建設に伴うCO₂排出量45,394.23 kg-CO₂¹⁶⁾を参考に、30人乗り2台の昇降設備建設に伴うCO₂排出量を算定した。

6. 地上施設と地下施設における環境負荷の比較

(1) 空調および昇降設備運用CO₂排出量の比較

地上倉庫施設は、日冷暖房負荷、日冷暖房電力消費量を検討するために、夏季の冷房負荷、冬季の暖房負荷を想定した。一方地下倉庫施設では、夏季に5℃～15℃の温度設定が必要な場合、冷房負荷、20℃～30℃の温度設定が必要な場合は暖房負荷とし、冬季に5℃～10℃の温度設定が必要な場合は冷房負荷、15℃～30℃の温度設定が必要な場合は、暖房負荷として計算した。地上、地下の倉庫施設ともに、設定室温と外気温(地下施設においては地下空間内の気温)との差が広がるほど、CO₂排出量の差も広がる。夏季の設定室温20℃の地下倉庫施設のCO₂排出量は、地上倉庫施設の1/3程度までに抑えられる。しかし、地下倉庫施設のCO₂排出量は、冬季において、最も差が大きい設定室温5℃場合、地上倉庫施設の約2倍も大きくなる結果となった。これは、冬季に地上の外気温が-3.1℃であるのに対して、地下空間内の気温は14℃であるためであり、設定室温5℃のときに、地上施設の方が設定室温に近い環境であり、運用負荷が小さくなるためである(図-4)。図-5に対象地下空間Bの計算結果を示す。対象倉庫施設Aに比べて、施設の規模が約1/6であることもあり、地上と地下のCO₂排出量の差が小さい。冬季において、室温を15℃以下に設定する場合を除き、空調と昇降設備の運用によるCO₂排出量は、対象倉庫施設Aと同様に地下の方が少ない。

(2) 冷却除湿負荷の比較

採石地下空間内は、年間湿度が約80%であるため、地上倉庫施設と同様な湿度環境で利用するためには、除湿が必要である。地下倉庫施設は、設定室温15℃のとき地上倉庫施設の冷却除湿負荷の約36%、設定室温5℃のとき地上倉庫施設の冷却除湿負荷の約73%まで抑えることができる(図-3)。しかしながら、除湿の負荷は、他の負荷(図-2)に比べて地上、地下ともに非常に大きいので、地下を倉庫施設として利用する際に、農作物などのように高い湿度を必要とするものを保存するか、より負荷の低い除湿の方法を検討する必要がある。

(3) 建設工事に伴うCO₂排出量

対象倉庫施設Aの立坑に、30人乗りの昇降設備を2台建設する際のCO₂排出量は、先に設定した条件のもとで計算し、435,785 kg-CO₂を得た。この結果と地上倉庫施設の躯体工事、屋根、外壁、内装、天井工事に伴うCO₂排出量と地下倉庫施設の昇降設備工事に伴うCO₂排出量を比較すると、昇降設備工事に伴うCO₂排出量は、SRC構造の躯体工事、屋根、外壁、内装、天井工事の約30%である(表-2)。さらに、S構造の地上

表-2 地上建設(SRC)工事に伴うCO₂排出量

躯体工事	(kg-CO ₂)
型枠	14,510
コンクリート	500,609
鉄筋	170,047
鉄骨	403,331
屋根・外壁・内壁・天井工事	(kg-CO ₂)
屋根(外部仕上げ モルタル仕上)	15,183
屋根(断熱材100mm)	65,069
屋根(天井 塗装)	5,422
屋根(防水 アスファルト防水)	86,759
外壁(外部仕上げ モルタル仕上)	21,160
内壁(プラスターボード+塗装)	27,206
合計(地上建設工事のみ)	1309,297

倉庫施設の躯体工事と比較すると、約 40 %である。また、対象地下倉庫施設 B の場合、建設工事に伴う CO₂ 排出量は 245,129 kg-CO₂ となり、SRC 構造、S 構造の地上倉庫施設のそれぞれ約 60%、約 80%となった。採石地下空間を利用する最大のメリットは、既存の空間を施設構造物として利用することにあるので、その結果が負荷の差として現れている。

7. 結論および今後の課題

本研究は、宇都宮市大谷地域の採石地下空間を対象に、環境負荷を指標として倉庫を建設、運用することを同規模の地上施設と比較することで、有効利用の可能性について検討した。その結果、採石地下空間は、地下空間がもつ恒温、恒湿性を活かしつつ、地下倉庫施設として利用することで、地上施設よりも有利であることが確認できた。ただし、採石地下空間は地上に比べて湿度が高いので、冷却コイルなどの機器を用いて除湿する場合、環境負荷に与える影響が他の負荷に比べて非常に大きいので、倉庫に保管する物を限定することや、設備等の工夫が必要である。

本研究を通して、既設の地下空間を新たな施設の一例として、都市部近郊の採石地下空間を利用する際の問題点を整理することは有効であるが、地下に施設を建設するメリットについて、簡易な構造を持つ倉庫施設の環境負荷緩和の視点から確認したにすぎない。実際に採石地下空間を利用するためには、今後さらに利用目的を明確にして、採石地下空間の安全性、防災面、維持管理コストなどの観点から事業の有効性を検討する必要がある。さらに、地下施設が地域に与える波及効果も検討する必要がある。

参考文献

- 1) 清木隆文, 鮎澤淳一: 採石跡地下空間の現状と有効利用に関する研究, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 7 巻, 土木学会 [一般投稿論文], pp.287-294, 2002.
- 2) Nishi,J., Tanaka,T., Seiki,T., Ito,H. and Okuyama,K.: Estimation of the Value of the Internal and External Environment in Underground Space Use, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol.15, No.1, pp.79-89, 2000.
- 3) Gilchrist, A and Allouche, E, N: Quantification of social costs associated with construction projects: state-of-the-art review, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 20, pp.89-104, 2005.
- 4) Working Group Number 13 (WG13): Direct and indirect advantages of underground structures, Underground or aboveground? Making the choice for urban mass transit systems, A report by the International Tunnelling Association (ITA), *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 19, pp.3-28, 2004.
- 5) 館野康雄: 大谷石の歴史と巨大地下空間, 大谷資料館, URL: <http://www.oya99.co.jp/>.
- 6) 例えば 太田苗司: 大谷石の研究, 地質学雑誌, pp.85-89, 1949.
- 7) 清木隆文, 江守太郎, アイダン・オメル: 現地調査による採石地下空間の構造安定性に関する考察 ー大谷採石跡地下空間についてー, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 10 巻, 土木学会 [審査付論文], pp.79-88., 2005.
- 8) 岡 建雄: わかりやすい グリーンオフィスの設計, オーム社出版, 2000.
- 9) 空気調和・衛生工学会: 空気調和設備 計画・設計の実務の知識, オーム社出版, 1995.
- 10) 土木学会: 熱環境下の地下岩盤施設をめざして ー熱物性値と解析ー, 丸善株式会社出版, 2006.
- 11) 日本機工学会: JSME テキストシリーズ 伝熱工学, 丸善株式会社出版, 2005.
- 12) 地下室設計施工研究会: 地下室設計・施工マニュアル, オーム社出版, 2005.
- 13) 国立天文台編: 理科年表, 平成 19 年版, 丸善株式会社出版, 2006.
- 14) 例えば, 日本経済新聞: 平成 11 年 6 月 7 日付け朝刊
- 15) 電気事業連合会: CO₂ 排出原単位 (発電端) の各国比較, URL: <http://www.fepc.or.jp/index.html>.
- 16) 建設工業経営研究会: 建築工事原価分析情報, 大成出版社, 1997.