

大谷採石地下空間の環境負荷に基づいた再生用途に関する検討

CONSIDERATION TO REUSE OF UNDERGROUND QUARRIES BASED ON ENVIRONMENTAL LOAD IN THE OYA REGION

舟山 雅史¹・清木 隆文²・西田 幸夫³・西 淳二⁴

Masashi FUNAYAMA・Takafumi SEIKI・Yukio NISHIDA・Junji NISHI

This study tried several cases calculating environmental loads while precision processing firms, climate test chambers, storages and data server stations are being constructed and used on the ground and underground quarries in the Oya region, Utsunomiya city, Tochigi prefecture. In addition, the authors estimated those construction cost and checked the advantage and disadvantage. Moreover, the authors compared those results to consider choosing the way utilizing the underground quarries. The results showed that the climate test chambers are the most useful way of them. Finally, the authors carried out heating and dehumidifying experiment in small storage in a underground quarry and compared the results and the calculation. It cleared that the calculation is about 1.7 times as large as the empirical ones.

Key Word : underground quarry, Oya tuff, environmental load, reuse, environmental experiment

1. はじめに

高度成長期を経て、わが国の社会資本は充実し、特に都市部においては、人々の生活を支えるための機能はある程度整備されたが、さらに都市部の生活をより快適にするために、大規模交通施設やライフラインなど新たに建設が望まれている。この中で2001年に大深度地下の公共的使用に関する特別措置法が制定され、残されたフロンティアとしての大深度地下の利用が注目されている。また一方で、先進諸国が、現在のままに発展するスピードを維持すれば、都市部の過密化が増々進行し、深刻な環境問題を引き起こす可能性は明らかである。また、近年世界中で地球温暖化が進行しており¹⁾、CO₂削減をはじめとした環境負荷の低減が求められている。そこで、地下空間の特性を利用することで、施設の建設、運営に要する環境負荷を低減し、環境負荷を配慮することが可能である。既存の地下空間を貴重な環境資源として捉え、種々の用途への利用が求められている。

わが国では、石材は古くから主に建築材料(石壁、石堀、門柱、コンクリートの骨材)として、広く用いられてきた。この結果として生み出された採石場跡地(以後 採石跡地下空間)はその一部が観光用に利用されていることを除けば、積極的な利用の事例はまだまだ少ないのが現状である。栃木県宇都宮市の大谷地区においても同様に、古くから大谷石の採石が盛んに行われ、より良い品質の大谷石を得るために、地下を掘削し、その結果として、多数の採石地下空間ができた²⁾。しかしながら、採石終了後は、ほとんどの採石跡地が放置され、雨水などが溜まり、荒廃するに任している。採石跡地下空間は、地下空間が有する特性を活かした再利用を行うことで、有効な空間資

キーワード：採石地下空間、大谷石、環境負荷、再生用途、環境実験

¹正会員 東日本旅客鉄道株式会社(元宇都宮大学学生)

²正会員 准教授 宇都宮大学 大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻

³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

⁴フェロー 株式会社ユニオン・エンジニアリング

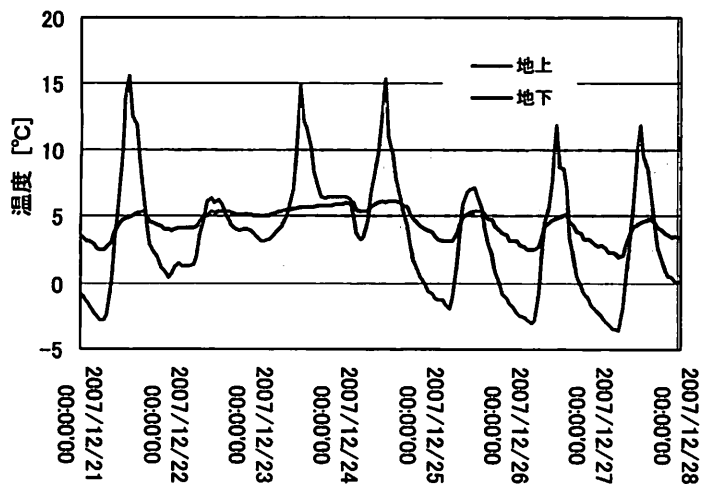


図-1 対象地下空間 A の温度変化例

(計測期間の一部[2007 年 12 月 21 日～28 日])

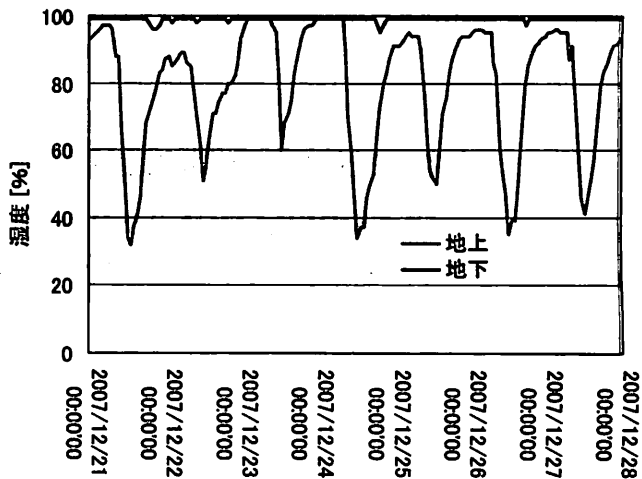


図-2 対象地下空間 A の湿度変化例

(計測期間の一部[2007 年 12 月 21 日～28 日])

源となると考えられる。また、これまでに、栃木県宇都宮市大谷地区における地下空間を、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、地上施設よりも環境負荷の面で有利であることが確認されている³⁾。本研究では、宇都宮市大谷地区を対象に、これら採石跡地下空間を有効利用するにあたり、複数の用途を想定し、それぞれ同規模の地上施設と環境負荷を基準として比較を行い、用途別の地下空間利用のメリット、デメリットを具体的に検討することを目的とする。大谷石の採石地下空間は、石材会社の商業活動から生まれたものであるため、これらの空間の再利用や埋め戻しは、原則として自助努力で行うべきである。しかしながら、これらの事業には莫大な費用がかかることが予想され、個人企業で負担することが困難である。このために、採石地下空間を利活用する新たな事業を興して、構造の補強費用を織り込む一方で、効果的にその事業を展開するために、将来陥没などが起こり、危険であると推定される採石地下空間を埋め戻すことが望まれる。本研究では、問題を単純化して、各種施設を追加補強せずに採石地下空間内に新設することを想定し、同仕様の地上施設との比較を行う。

2. 大谷石の利用状況と地質概要

大谷石が使用された最も古い事例は、古墳時代までさかのぼり、栃木県内の壬生町車塚古墳などの石棺や石室に使用され、その後、18 世紀の始めには、鬼怒川の水利を利用し、いかだで江戸へ搬出されていた。更に、大正 11 年、アメリカの建築家フランク・ロイド・ライトの設計により、大谷石を用いて旧帝国ホテルが建築された。

大谷地区の地質⁴⁾を大別すると、先第三紀、新第三紀および第四紀の地層からなっている。先第三紀系としては、足尾帯に属する中・古生層と後期中世代の流紋岩質酸性火砕岩類とがある。新第三紀系は、グリーンタフの変動による火山岩類と緑色凝灰岩を主とし、大谷層と呼ばれる。第四紀系は、川崎層群の礫層小規模に見られ、平地部では、洪積統の段丘礫層と河川流域の沖積低地に段丘礫層が分布し、沖積統を除き関東ローム層が全域を覆っている。

3. 地下空間利用の特性

地下空間は、地上とは異なる特性を有している。地下空間の特性をその性質により区別すると、遮断性、安定性などに分類できる⁹⁾。これらの特性は、地下空間を利用するにあたって、その用途や施設によりメリット、デメリットのどちらにもなりうる。例えば、恒湿性は、地下空間を倉庫として利用する場合、高い湿度が保たれることで貯蔵する食品の品質保持に有利で、メリットとなる一方で、紙、精密機器など、湿気を嫌うものを貯蔵、使用する場合はデメリットとなる。本研究では、大谷地域の採石地下空間を後述する一般的な用途で再利用する際、これらの特性の内、地上部と比較することが容易な恒温、恒湿性に絞って検討を行う。

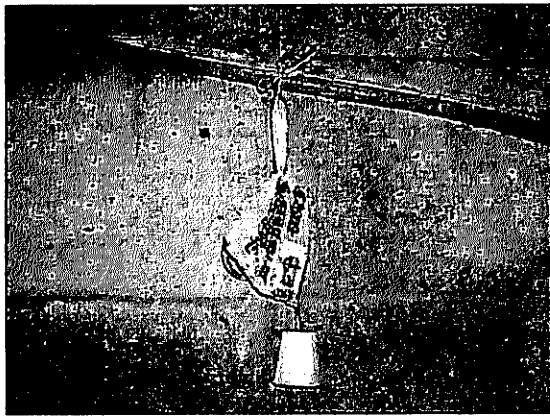


図-3 対象地下空間 A の環境条件調査



図-4 対象地下空間 A の立坑



図-5 対象地下空間 A の坑内

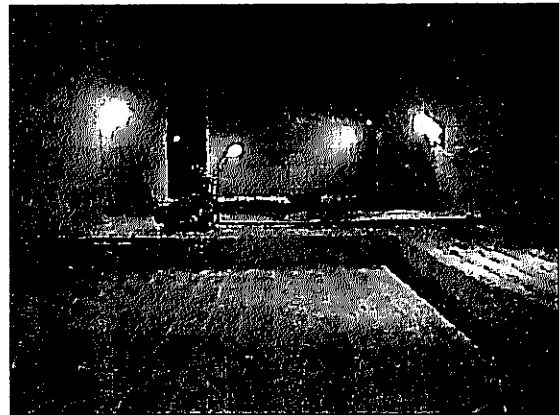


図-6 対象地下空間 A における採石

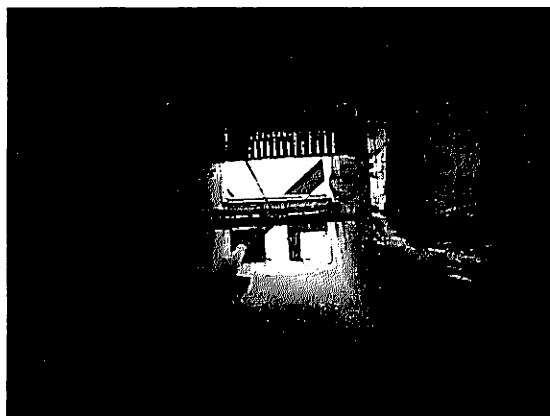


図-7 対象地下空間 B の立坑



図-8 対象地下空間 B の坑内

4. 大谷地域の対象地下空間および有効利用の条件設定について

(1) 対象地下空間の設定と現地調査

本研究では、採石跡地下空間における再生用途の検討を行うために、大谷地域内で現在採掘中の採石跡地下空間の中から代表的な箇所を2つ選び、対象とした(以下、対象地下空間 A、B とする)。これらの対象地下空間を対象に環境負荷などを検討する前に、空間の構造および環境条件を把握するために、現地調査を実施した。まず現地調査は、石材会社から提供して頂いた平面図をもとに、空間規模の確認を行い、その後現場において目視による湧水および生傷と言われる節理の有無、配置などを調査した。これに加えて、環境条件を把握するために、対象地下空間の温度、湿度の測定を行った。この測定は、対象地下空間 A のみを対象に、2007 年 10 月 26 日～2008 年 1 月 22 日の期間実施した(図-1～3)。対象と測定箇所は、横坑入口から奥行方向へ可能な限り等間隔(約 15～25 m)で 4 箇所、立坑の上に 1 箇所である。対象地下空間 B については、2003 年 10 月から 2005 年 3 月まで地上、立坑部、坑内の温度および湿度の既存データを対象とした。

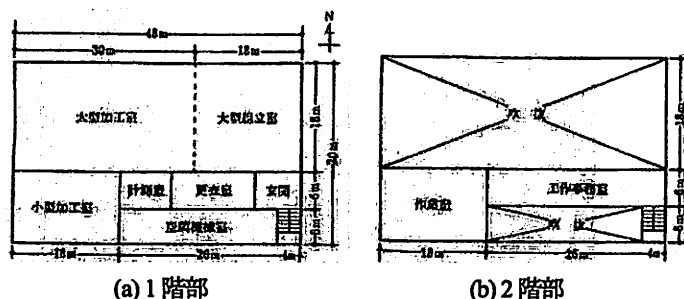


図-9 精密加工工場平面図⁹⁾

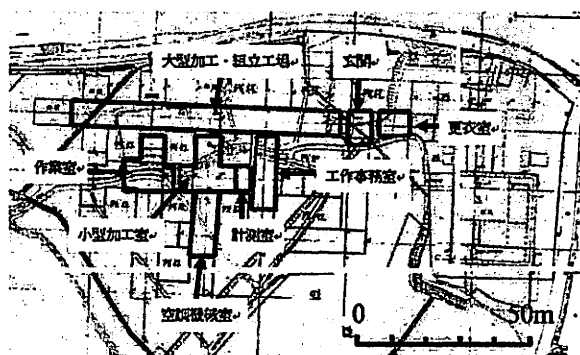


図-10 精密加工工場関連施設の平面配置図
(採石地下空間 A)

(2) 対象地下空間 A

対象地下空間 A(図-4～図-6)は、残柱方式により採掘された地下空間で、湧水はほとんど見られない。空間の規模は、最大で幅 80 m×奥行き 140 m×高さ 30 m、縦 40 m×横 17 m、横坑までの深さ 60 m の立坑を有している。現地調査を行った結果、温度は夏季 13℃、冬季 3℃で、湿度は年間を通して 80 %以上の高湿度である。年間で約 10℃の温度差があると思われ、地下空間特有の恒温性はやや低い。これは、対象地下空間 A の立坑が他の採石地下空間に比べて大きく、外気の影響が大きいためであると考えられる。特に、地上の温度が地下空間の温度よりも低くなると、地下空間の空気との間にわずかな密度差で対流が起こり、地下空間の気温が外気の影響を受けて低下すると推測される。

(3) 対象地下空間 B

対象地下空間 B(図-7～8)も同様に、残柱方式により採掘された地下の採石場で、湧水はほとんど見られない(図-7、8)。地下空間の規模は、幅 80 m×奥行き 164 m×高さ 25 m、縦 4.5 m×横 5.0 m、深さ 22.5 m の立坑を有している。過去に行われた調査の結果より、温度は夏季 13℃、冬季 11℃で、湿度は年間を通して 80 %以上の高い湿度環境であることがわかっている。立坑の規模が、大谷地域にある採石地下空間の標準的な大きさのため、立坑付近でのみ温度変化が起こり、坑内の年間を通して温度変化が対象地下空間 A に比べて非常に小さく、高い恒温性を有する。

5. 対象地下空間における地上と地下の比較による再生用途の検討

(1) 検討を行う用途の選定と評価指標

本研究では、国内における利用事例のある施設、および今後、地下空間における利用が期待される施設を調査し、それらを、特定の人の利用が見込まれる施設と、不特定多数の人の利用が見込まれる施設に分類した。これは、地下施設において不特定多数の人の利用が見込まれる場合、災害時の避難などの制約があり、運営が困難と考えたため、本研究ではこれらの施設についての検討は行わない。次に、作業従事者など、特定の人の利用が見込まれる施設のみを対象に、5つの用途(生産施設、研究・実験施設、貯蔵施設、都市施設、生活施設)に分類した。ここで、生活施設は、主に個人の地下室などで今回対象としている空間の規模を考えると大きすぎることから、研究の趣旨に合わないため検討は行わないものとした。本研究では結果として、残りの4つの用途(生産施設、研究・実験施設、貯蔵施設、都市施設)について検討を行う。地下空間の恒温、恒湿性を生かした特性を評価するために、各用途について、施設の建設コスト、施設運用におけるエネルギー消費量を指標として検討した。建設コストを考慮する際、仮設、基礎、防水、電気設備、給排水、消火設備、空調換気設備を設置する建設コストは地上施設と地下施設と共通であり、同額であると仮定し、考慮しないものとした。従って、建設コストは、躯体、仕上げ、昇降設備のみ計上している。次に、施設運用におけるエネルギー消費量は、特に影響の大きいと思われる、伝熱負荷、内部負荷、外気負荷の負荷計算⁹⁾を行い、二次ポンプ、空調機ファン、昇降設備を考慮し、年負荷を算出して評価した。

(2) 生産施設

生産施設には、植物工場や印刷工場など種々の施設があるが、本研究では、生産過程での温度や湿度の条件設定が明確で、生産施設の中でも、特に条件の厳しい施設として、精密加工工場(図-9)を選択し、またこの施設を評価することでその他の生産施設についても有利、不利の判断が可能と考えた。精密加工工場は、高精度な金属の加工、組立を行うため、正確な温度、湿度の管理が必要である。そこで、例えば、大型加工室では夏季に $27 \pm 2^\circ\text{C}$ 、冬季に $18 \pm 2^\circ\text{C}$ の設定温度となり、観測室では、年間を通して $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の設定となっている⁷⁾。相対湿度は 50 % に維持することを想定した。生産施設は、建設コストと、施設運営に伴う環境負荷により評価を行う。本来 2 階建て設備配置を地下空間内では平面的な配置(図-10)にして、諸条件については参考文献⁹⁾を参考にした。

a) 伝熱負荷と熱通過率の算出

室内温度と外気温度の差による、壁体の伝熱負荷を算出する。伝熱負荷は、使用する壁体の熱伝達率に比例し、熱通過率 K ($\text{kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$) は、壁体材料の熱伝導率と壁面表面の熱伝達率をもとに、式(1)⁵⁾で算出した。室内の温度は季節、部屋により変化するが $18^\circ\text{C} \sim 27^\circ\text{C}$ の範囲、地上(宇都宮市)の外気温度は夏季 33°C 、冬季 3.1°C 、地下空間の温度は 4 節の環境条件に従うものとする。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_o} \quad (1)$$

ここに、 α_i は室内側壁表面における熱伝達率($9 \text{ W/m}^2\text{C}$)、 α_o は屋外側壁表面での表面熱伝達率($23 \text{ W/m}^2\text{C}$)、 λ_i は全部で n 層から成る i 番目の材料の熱伝導率($\text{kJ/mh}^\circ\text{C}$)、 d_i は i 番目の材料層の厚さ(m)である。

b) 内部負荷

内部負荷は、室内における発熱によるもので、照明、電動機、人体の各負荷を考慮した。電動機は、精密加工工場内で金属などの加工に用いる機械のことで、この機械の使用による発熱を考慮している。また、暖房負荷は冷房負荷の 2 分の 1 とするが、全負荷算出時、暖房は地下空間で有利に働くので無視した。照明は、 20 W/m^2 を基準量とし、工場内の電動機の負荷は、一般工場内の機械を参考⁷⁾にして、(2)式をもとに算出した。

$$\phi_1 \phi_2 P / \eta_m \times 3.6 \quad (2)$$

ここに、 P は電動機定格出力(kJ/sec.)、 ϕ_1 、 ϕ_2 、 η_m はそれぞれ、電動機の稼働率、所要動力と定格出力の比、電動機効率である。所要動力/定格出力は 1.0 と仮定し、電動機効率は、電動機定格出力(kW)に応じて、0.60～0.90 の値を選択した。人体の潜熱負荷および顕熱負荷は、 24.7 kJ/h m^2 人、 22.6 kJ/h m^2 人の値をもとにした。

c) 外気負荷

外気負荷は、従業員 1 人当たりの外気導入量 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 人に、各設備に充てる従業員人数を乗じ、熱交換率を顕熱時 0.6、潜熱時 0.35 とした。また、湿り空気 h - x 線図⁹⁾より絶対湿度を読み取り計算に用いた。

d) ピーク負荷

項目 a)～c)の負荷を合計し、ダクト損失、配管損失、ファンの再熱取得を考慮し、冷房は 1.2 倍、暖房は 1.18 倍として計算した。

e) 湿度の調節

地下空間内は湿度が 80 %～100 % と高いため、調湿は冷却減湿および再加熱によって行う必要がある。そこで、冷却コイルを使用して空気中の水分を除去し、設定温度まで過熱する手順を再現した。これを地上部では作業時間の 12 時間、地下空間は、湿度が高いため、24 時間行うことを想定した。

f) 日負荷および年負荷

ピーク負荷を基本として、全負荷相当時間(地上：冷房 10.4 h/日 、暖房 7.7 h/日 、地下：冷暖房 12 h/日)⁵⁾、日冷暖房運転時間(12 h/日)を乗じ、更に、二次ポンプ、空調機ファン、昇降設備(地下施設)の稼働を考慮し日負荷を算出した。また、日負荷を基本として、空調は、春季、秋季を除き、設備内の温度調節が特に必要な夏季 66 日、冬季 60 日の間稼働を想定し、年負荷を算出した。

g) 消費電力量および CO_2 負荷量の計算

日電力消費量を指標に、熱負荷計算と同様に地下施設の日電力消費量を算出し、地上施設と比較を行う。空調機器としては、工場で一般的に用いられている中央式ヒートポンプチラーを空調機器として採用し、中央式ヒートポンプチラーによる日消費電力量から算出した。この途中段階として日冷暖房電力消費量(kWh/

表-1 人工気象室の規模および条件設定⁷⁾

	a 室	b 室	c 室	d 室
温度制御範囲 (°C)	15~35	15~35	-5~25	15~25
温度最大変化速度 (°C/h)	2	2	2	2
収容家畜	ウシ 6 頭	ヤギ 6 頭	ヤギ 6 頭	ブタ 6 頭
床面積 (m ²)	148.2	57.0	57.0	52.5

日)を計算する際、冷暖房エネルギー消費率は、冷房で2.89、暖房で3.53とした。また地区係数は、地上は宇都宮のデータをもとに冷房1.00、暖房1.06とし、地下空間では、冷暖房ともに地

上に比べて負荷が増える値として、冷房1.09(名古屋)、暖房1.31(旭川)を選択した。消費電力量は、日本における電力のCO₂排出原単位を0.39 kg-CO₂/kWh⁶⁾を掛けることで、電力量(kWh)から換算する。

h) 建設コストおよびCO₂排出量

建設コストは、参考文献⁸⁾の建設コストをベースにして、床面積当たりの工事原価に、精密加工工場の床面積を乗じて算出した。構造の種類は、S 構造(steel structure; 主体を鉄骨で建設する構造)と SRC 構造(steel-reinforced concrete structure; 主体を鉄骨鉄筋コンクリートで建設する構造)の2種類について検討した。また、延べ床面積当たりの主要資材数量⁷⁾と個々の資材1単位当たりのCO₂排出量⁶⁾を使用して、施設の躯体工事により排出されるCO₂の量を算出した。この際、屋根、外壁、内壁、天井工事については、CO₂排出量の少ない建材を基本的を選び、必要に応じて、屋根と外壁には断熱材を設置した。なお、地下空間の昇降設備の環境負荷量は、一般的な建物の数値から立坑の深さに応じて換算³⁾した。

(3) 研究・実験施設

研究・実験施設には、大型風洞実験施設や放射線照射施設など種々あるが、本研究では特に厳しい温度条件が想定される人工気象室について検討を行った。ここに、人工気象室⁹⁾とは、ある特定の気象条件や環境条件を人工的に再現し、工業的、医学的、農業的な分野の研究に利用するものである。本研究では室内の熱源として、特に家畜を収容する場合の人工気象室を検討した。この目的のため、施設内は急激な温度変化を伴うので、非常負荷を考慮する必要がある。定常負荷は、精密加工工場の場合と同様である。非常負荷は、内部負荷との合計で評価する。非常負荷 Q (kJ)は、式(3)の簡易式⁹⁾を用い、最大温度変化速度が2°C/hのもとで、温度制御範囲のうち最も厳しい条件をa室~d室の4つの実験空間(図-11)で設定し、季節毎に算出した。この中の最も厳しい温度設定条件はc室で、制御範囲が-5°C~25°Cで、家畜であるヤギを6頭収容する条件の設定となっている(表-1)。在室人員は1人とし、家畜の顕熱および潜熱負荷は、文献¹⁰⁾をもとにした。日負荷及び年負荷の算出などの手順は、精密加工工場と同様である。

$$Q = \frac{\{\theta - \theta_0 + (\theta_0 - \theta_i)e^{-\delta t}\} \cdot \delta \cdot H}{e^{-\delta t}}, \quad \delta = \frac{A \times K}{H} \quad (3)$$

ここに、 θ は到達温度(°C)、 θ_0 は外気温度(°C)、 θ_i は初期温度(°C)、 t は室内の温度変化に要する時間(h)、 δ は室内変動係数(1/h)、 A は室内表面積(m²)、 H は室内熱容量(kJ/°C)である。また、人工気象室に用いる壁体の熱通過率 K は1.526 kJ/m²h°Cである。

(4) 貯蔵施設

大谷の採石地下空間は、貯蔵施設として利用することで、地上施設よりも施設運営の環境負荷を低減できる点で有利である³⁾。そこで、本研究では、地下空間の恒湿性を活かすことができる食料の貯蔵に限定し、貯蔵する食料を具体的に絞り検討を行った。倉庫施設の躯体寸法は、対象地下空間Aの倉庫施設(以下、倉庫A、図-12、幅39.4m×奥行き75m×高さ18m)、対象地下空間Bの倉庫施設(以下、倉庫B、幅34m×奥行き52m×高さ7m)で、地下施設の躯体は大谷石壁体を利用するものとする。貯蔵する食料は貯蔵温度により、グループ(i): -18°C以下

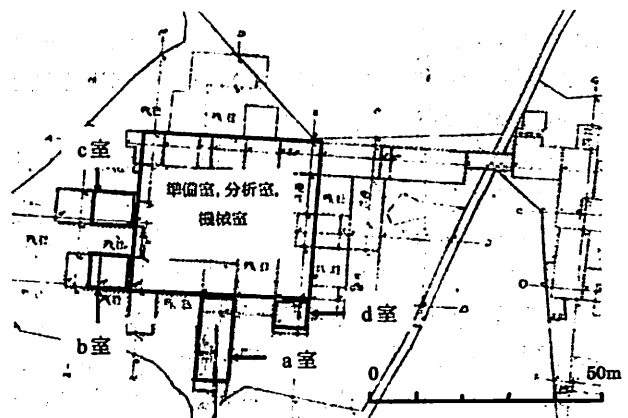


図-11 人工気象室配置(対象地下空間B)

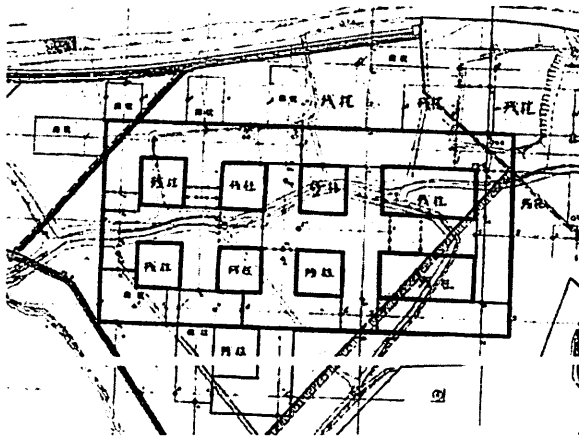


図-12 倉庫施設の配置(対象地下空間 A)

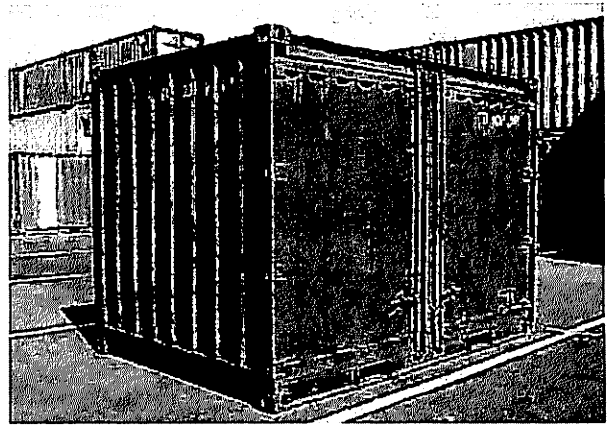


図-13 12 フィートコンテナ¹²⁾

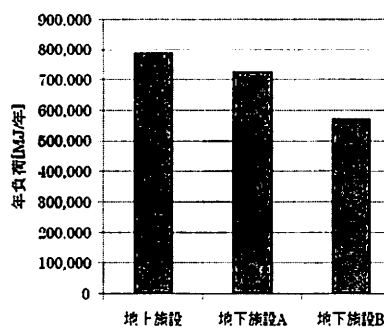


図-14 精密加工工場年負荷

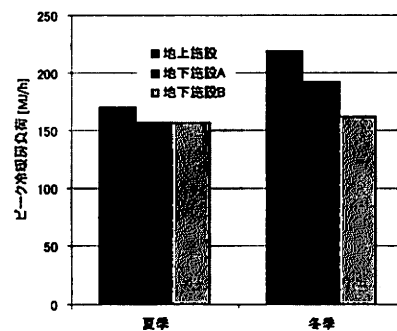


図-15 人工気象室の非定常負荷

で貯蔵する食料の代表として魚(冷凍), グループ(ii): 0℃程度で貯蔵する食料の代表としてハウレンソウ, グループ(iii): 10℃以上で貯蔵する食品の代表としてグレープフルーツに分類した¹¹⁾。熱負荷の算出方法は先述の(2)生産施設と同様であるが, 倉庫設備に関連した電動機の発熱は考慮しない。建設コストは, 地下施設の躯体を, 大谷石壁体を利用した場合と, 地上と地下に同様の施設を建設した場合について算出し, 比較を行った。

(5) 都市施設

都市施設は, 主に上下水道やガス導管などの線の設備であるため, 地下空間において利用可能な施設としてデータセンターについて検討を行う。ここでは, コンテナ内にデータサーバーが収容されているパッケージを, 地上及び地下に設置することを想定した。コンテナは, 一般的な輸送に用いられるスチール製ドライコンテナ, 保冷コンテナ(JIS 規格 1 級, 2 級)であり, コンテナの大きさは立坑降ろし, 地下空間への搬入が可能なものとして, 20 フィート型と 12 フィート型(図-13)を想定する¹²⁾。ここに, ドライコンテナ(スチール厚さ 4 mm)の熱伝達率 K を $23.725 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$, JIS 規格 1 級, 2 級のものをそれぞれ, $2.512 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$, $1.256 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ と構成材料をもとに(1)式をもとに算出した。また, 熱負荷の算出においては, コンテナ壁体からの伝熱負荷と, 照明, コンセント, サーバーの発熱による内部負荷を算出する。サーバーは, 1 台当たり 437 W とし, 20 フィートコンテナにおいて 42U の 19 インチラックを 8 台(146,395 W), 12 フィートコンテナにおいては, 同様のラックを 4 台(73,416 W)収容し, 消費エネルギーがすべて熱に変換されるものとする。コンテナ内は 24℃に維持するものとし, 空調は地上, 地下ともに 24 時間稼働させるものとした。

6. 再生用途の検討

前章で示した採石地下空間の用途案について, 消費電力の年負荷量, CO₂の排出環境負荷量などをもとに向き, 不向きを検討するために, 地上施設に比べて地下施設とする場合のメリット, デメリットについて検討する。

(1) 生産施設

生産施設の建設を想定し, 地上施設と地下施設の年負荷を用いて比較を行うと, 地下施設 A は地上施設の 92 %,

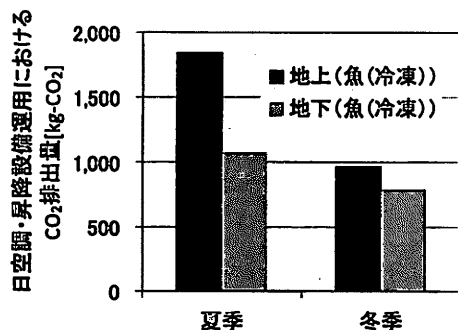


図-16 日空調・昇降設備運用による
CO₂排出量 (倉庫 A)

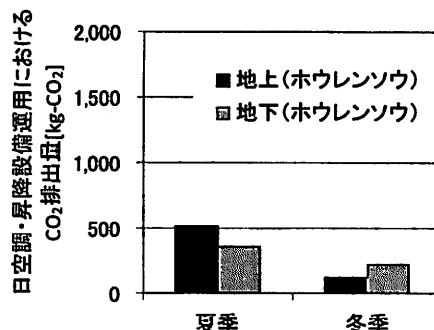


図-17 日空調・昇降設備運用による
CO₂排出量 (倉庫 B)

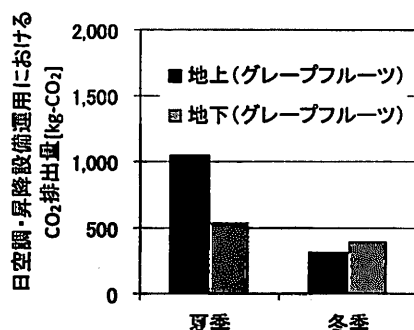


図-18 日空調・昇降設備運用による
CO₂排出量 (倉庫 A)

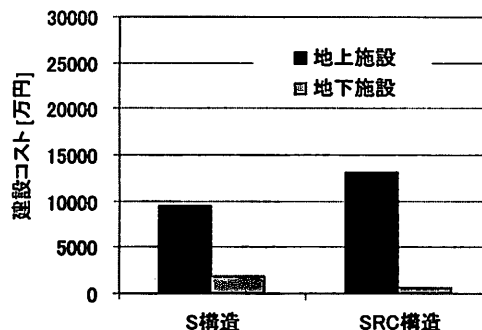


図-19 貯蔵施設の建設コスト (倉庫 B)

地下施設Bは地上施設の73%に抑えられる(図-14)。また、建設コストは、地上と地下に同規模の施設の建設を想定しているため、地下施設は、昇降設備の分不利である。精密加工工場においては、湿度の管理も必要であるため、除湿と除湿後の再加熱に要する熱量を検討した。地下施設A、Bともに地上施設と比較して、除湿に要する熱量を低く抑えられる。除湿のために必要な熱量が最も大きいのは、夏季の地上施設である。一方、地下空間では、生産活動に伴って室温が18℃以上となるので、相対湿度が50%以下となり、恒湿性が除湿に与える影響は地上ほどではない。

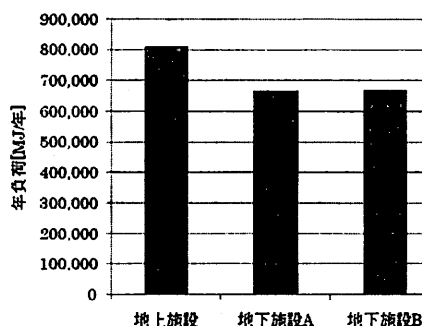


図-20 データセンターの年負荷

(2) 研究・実験施設

地下人工気象施設における準備室、分析室、機械室の定常負荷は、生産施設の検討結果(図-14)で示される結果と同様の傾向を示し、同規模の地上施設と比較して61～65%に抑えられた。また、人工気象室の温度変化に伴う非定常負荷は、b室の夏季(例：地下施設A 地上26,051 kJ/h、地下27,370 kJ/h)を除き、すべての条件で地下施設が有利となり、地上施設と比較して、負荷が74～85%に抑えられた(図-15)。以上の結果は、研究・実験施設として地下空間を利用することで、非定常負荷も削減できる可能性を示す。

(3) 貯蔵施設

貯蔵施設としての倉庫における施設運営に伴う環境負荷は、貯蔵する食料グループ(i)～グループ(iii)すべてにおいて地下施設が有利であった(図-16～図-18)。特にグループ(iii)のグレープフルーツで代表させた柑橘類を貯蔵する場合が有利で、年間で最大67%に抑えられる(図-18)。過去に大谷地域で柑橘類の保存が試みられ、果実の品質の観点から保存に適していることが確かめられている¹³⁾が、環境負荷の観点からも有効であることが明確となった。また、建設コストでは、地上と地下に同規模の施設を建設する場合、地下施設は昇降設備の設置が必要な分不利となる。一方で、地下施設の躯体に大谷石を壁体を利用することを想定した場合は、地下施設の建設コストは昇降設備のみ計上され、最大で地上施設の5.8%に抑えられる(図-19)。大谷石の熱伝導率3.128 kJ/mh℃として、非定常の熱伝導問題の解析解を用いて、壁厚を検討¹⁰⁾し、地上部の構造物が不利にならないように、大谷石の壁



図-21 採石地下空間 B 内の
大谷地下小型倉庫全景

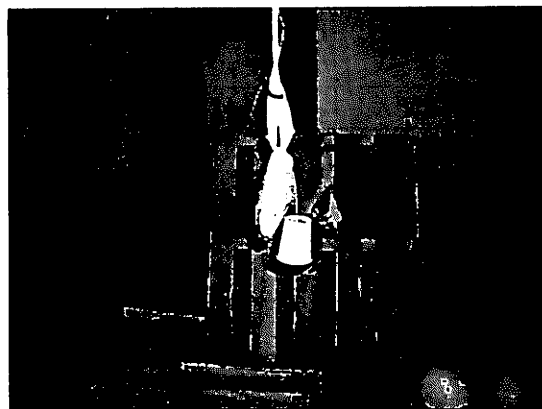


図-22 地下小型倉庫の内部および
温度湿度測定状況

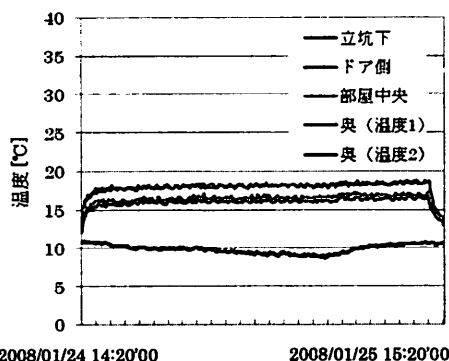


図-23 ヒーターによる減湿実験の温度変化

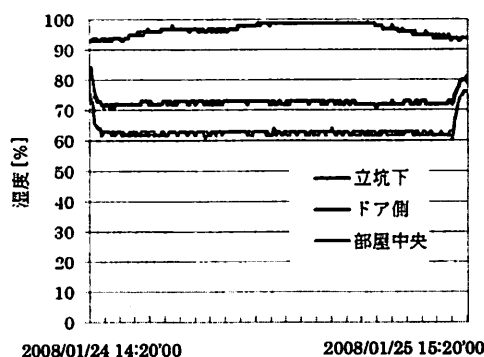


図-24 ヒーターを用いた減湿実験の湿度変化

体厚を 1.0 m として検討を進めた。

(4) 都市施設

データセンターの運営における環境負荷は、地下施設を不利に見積もるため、すべての条件における内部負荷を考慮した場合において、地下施設の負荷は、最大で地上施設の約 82 % に抑えられる(図-20)。また、コンテナの種類(スチール製ドライコンテナ、保冷コンテナ(JIS 規格 1 級, 2 級))による負荷の違いは、地上施設と地下施設の負荷値の傾向に差を与えるほど大きくない。

7. 対象地下空間における除湿の実験

対象地下空間 B 内にある、大谷石造りの倉庫施設(以下、大谷小型地下倉庫、内寸幅 2.3 m、奥行き 2.9 m、高さ 2.3 m、図-21)を、小規模な大谷石地下空間として捉え、小型の除湿器を用いた除湿の実験と、ポータブルヒーターの加熱に伴う除湿の実験によって得られる環境負荷量の実測値と計算値の比較を行なうために実施した(図-21 ~ 図-24)。実験を行った大谷地下倉庫は、そば粉を恒温状態で保存することを目的として建てられたもので、3 種類の材料の外壁から構成されている。側壁のうち 3 面が大谷石(厚さ 15 cm)+ベニヤ板の熱通過率 $K = 9.19 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、側壁の 1 面と床が大谷石岩塊+ベニヤ板の熱通過率 $K = 2.15 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、天井がコンクリート(厚さ 7cm)+ベニヤ板の熱通過率 $K = 13.74 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ である。また、大谷地下倉庫にはスチール製のドアが 1 箇所設けられている。本節では、加熱に伴う除湿の実験について述べる。加熱に用いたヒーターの電力消費量は 600 W で、サーモスタット機能が付いている。このヒーターを小型地下倉庫内で 24 時間稼働させ、温度(図-23)、湿度(図-24)、積算電力量、積算時間を測定した。この実験で測定された積算電力量をもとに、ヒーターの熱負荷は 1,384 kJ/h で、小型地下倉庫内の温度は $4^\circ\text{C} \sim 6^\circ\text{C}$ 上昇した。また、大谷地下倉庫の壁体の熱通過率 K を推定した結果をもとに、小型地下倉庫内と地下空間の温度差から算出した負荷は、2,134 kJ/h ~ 2,368 kJ/h であり、測定値よりも 1.5 倍から 1.7 倍の熱負荷となった。これは、解析条件を設定する熱通過率に直すと、59% ~ 67% に相当する負荷である。計算結果が、実測結果よりも大きく負荷を見積もる傾向がある。

表-2 対象地下空間と用途の対応

空間 \ 施設	生産施設 (精密加工工場)	実験研究施設 (人工気象室)	貯蔵施設 (倉庫)	都市施設 (データセンター)
対象地下空間 A	△	○	○	△
対象地下空間 B	○	○	△	△

地上施設における年間環境負荷の 80%以下の場合”○”，81 ～ 99 %”△”，100 %以上 : ”×”

8. まとめ及び今後の展望

本研究は、対象地下空間 A、B に、生産施設、実験研究施設、貯蔵施設、都市施設の設備を新設することを想定し、建設コストと環境負荷に着目して、同規模の地上施設の場合と比較して、用途毎に再生利用する可能性を考察した。また、採石地下空間 B にある大谷石造りの小型倉庫を対象として、実測値をもとに計算負荷値を検証するために、加熱試験および除湿試験を実施した。

地上施設の環境負荷値を基準にした対象地下空間の用途毎の評価を表-2 にまとめた。実験研究施設は、両地下空間を通して、地下の特性を生かして再生用途としては有望となったが、生産施設は、恒温性が高く、立坑の浅い一般的な規模の大谷採石地下空間(対象地下空間 B)での用途として有望である結果となった。一方貯蔵施設は、最も効率が良いグレープフルーツの貯蔵を想定して評価を行った結果、規模の大きな対象地下空間 A では、冬季の坑内温度が低いので、逆に地上施設に比べて環境負荷量が大きい。夏季も含めた年間で比べると、地下に貯蔵した方がかなり有利な結果となった。また、都市施設は、両地下空間ともに、再生用途として有利とはいえない評価となったが、地上施設との年負荷量の比(図-20)の観点から見ると、地上設備に比べて有利と考えられる。

計算結果の有効性を確認するために、地下小型倉庫における加熱及び除湿試験に要した電力量から換算した環境負荷量と計算値とを比較した。この結果計算値は、実測値よりも負荷を大きく安全側に評価する傾向となった。

本研究では、個々の地下設備について、同規模の地上施設との年負荷量の比で評価したが、環境負荷量の大小で比較するためには、建設時の設備だけでなく、供用時の維持管理過程も念頭においた検討が今後必要である。また、地下空間の環境実験を重ね、環境負荷計算の結果の再現性についても検討を進める。

参考文献

- 例えば、全国地球温暖化防止活動推進センター、URL : <http://www.jccca.org/>.
- 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.
- 柴田正史、清木隆文、横尾昇剛、西田幸夫: 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、地下空間シンポジウム論文・報告集、第13巻、土木学会 (審査付論文), pp.13-22, 2008.
- 中村洋一、松居誠一郎、鈴木陽雄(1981): 宇都宮市大谷付近の地質、宇都宮大学教育学部紀要 第2部、31, pp.105-116, 宇都宮大学教育学部、1981.
- 千葉俊彦、森 隆広、関口佳司、芳賀幸雄: 地下空間の利用効果とその評価について、地下空間シンポジウム論文・報告集、第4巻、土木学会 (一般投稿論文), pp.243-250, 1999.
- 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.
- 空気調和・衛生学会: 建築設備集成 13 生産施設、オーム社出版、1991.
- 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.
- 社団法人 空気調和・衛生工学会、第12版 空気調和・衛生工学便覧 3 空気調和設備設計篇、財団法人 空気調和・衛生工学会出版、1997.
- 空気調和・衛生学会: 建築設備集成 12 研究・実験施設、オーム社出版、1991.
- 田中芳一、丸山務、横山理雄: 食品の低温流通ハンドブック、株式会社サイエンスフォーラム出版、2001.
- 例えば、コンテナ販売 S-cube、URL : <http://www.s-container.com/>.
- 伊庭慶昭、福田博之、垣内典夫、荒木忠治: 果実の成熟と貯蔵、株式会社 養賢堂発行、1985.

(2008. 10. 6受付)