

熱環境を考慮した大谷石採石地下空間 の有効利用に関する検討

清木 隆文^{1*}・阿部 友哉²

¹正会員 宇都宮大学 大学院工学研究科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

*E-mail:tseiki@cc.utsunomiya-u.ac.jp

²宇都宮市役所 建設部 (〒321-0004 栃木県宇都宮市旭1丁目1-5)

近年，大深度地下空間の有効利用が注目を集めている．これは地下空間の特徴を生かして，地上景観の保全や環境負荷の低減などが期待されるものである．宇都宮市大谷地域に点在する採石地下空間は，この地下空間の特徴を生かして有効利用することが期待される．本研究では，大谷石採石地下空間の熱交換特性を推定し，精密機械工場や地下倉庫を建設した場合の有効性を検討した．大谷石を用いた小型熱伝達試験を行い，FLAC3Dによる熱流解析と概ね整合することを確認した．また，数値解析で，先に示した地下施設を運用することに伴う熱の広がりを数値解析で推定し，環境負荷の計算に必要な大谷石壁面の厚さを特定した．また，電力負荷計算値を地上施設と地下施設で比較することで，地下空間利用に適当であるのは，倉庫施設で貯蔵温度が低い施設であるとの結果を得た．

Key Words : *Oya tuff underground quarries, effective utilization, heat flow analysis, environmental load*

1. はじめに

(1) 研究背景

近年，大深度地下をはじめとする地下空間の利用が注目されている．この理由としては，都市部の土地不足があげられる．先進諸国が現在の速度で発展を維持すれば，都市部の過密化が進行し，深刻な問題となることは明らかである．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や維持に要する環境負荷を低減し，環境にも配慮することができる．既存地下空間を貴重な空間資源として捉え，種々の用途への利用が求められている．

(2) 研究目的

栃木県宇都宮市大谷地区では，古くから建築資材として広く使われてきた大谷石の採石が盛んに行われてきた．しかしながら，採石跡地下空間は観光用として一般に公開されているもの(大谷資料館)のように，再利用されているのはごく一部であり，ほとんどの採石跡地は放置され荒廃の一途をたどっている．これらの採石跡地は貴重な空間資源であり，地下空間の特性をうまく利用することで，地上施設よりも環境負荷を低減することが可能で

あると考えられる．そこで，本研究では，環境負荷に影響を与える大谷石の熱特性に着目し，大谷石採石地下空間での熱交換特性を推定することを目的とする．そして，地下空間に建設可能な設備について検討する．

2. 大谷石採石地下空間概要

大谷地区は，宇都宮市の中心から北西約 7 km に位置している．大谷石採石地下空間は，太平洋戦争時，米軍爆撃を避けるために，中島飛行機(現 富士重工)地下工場として利用された²⁾．現在では，ハム製造工場や食糧，飲料の貯蔵施設などとして利用されている．地下空間の有効利用を検討するにあたり，現在も採石を行っている大谷地域の採石地下空間をモデルとして設定する．

3. 有効利用を検討する施設

(1) 生産施設

生産施設³⁾の具体的な例として，精密加工工場(延床面積 2,000 m²，一部 2 階建)の建設を想定する．生産施設には，植物工場や印刷工場など種々あるが，特に正確な温

湿度の管理が要求され、大型の機械を使用する精密加工工場の評価を行うことで、他の生産施設の有利、不利の判断を行うことも可能と考え、選定した。精密加工工場は、主に金属などの素材の高精度な加工・組み立てを行う施設である。加工に用いる機械の運転および素材の変形を防ぐ目的から、工場内の温度、湿度の厳密な管理が必要となる。

(2) 貯蔵施設

貯蔵施設には、食料、石油、緊急水備蓄など貯蔵するものにより様々な施設がある。また、これまでに、地下空間が持つ恒温、恒湿性を活かしつつ、地下空間を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されている^{4),5)}。また、貯蔵施設の検討は既往の研究でもなされている。そこで、本研究では、貯蔵するものとして、魚(冷凍)、ハウレンソウ、グレープフルーツの3種類⁹⁾を想定し、地下空間を食糧貯蔵に利用することを再検討する。

4. 熱流解析

(1) 解析概要

解析ソフト(FLAC3D, Itasca 社製)の熱流解析オプションを用いて、非定常熱伝導解析を行った。解析対象は、大谷石壁体(一次元)と精密加工工場である。解析を行う上での仮定を①～③の通り設定する。①地下空間の大谷石壁体には、地下水面が存在するが、解析では、湿潤状態の物性値を用い、地下水面を考慮しない。②大谷石壁体の初期温度は、地下空間内の気温と等しい。③解析には空気の状態を考慮するが、FLAC3Dでは、圧縮性流体である空気そのものを表現することができない。そのため、非常に弱く、熱が伝わりにくい構造を持ち、透水係数の高い材料の空隙中が、空気の物性値を持つ流体で満たされているという考え方で、疑似的に空気をモデル化して、解析を行った。

(2) 解析条件

a) 大谷石壁体

図-1に示した棒状の一次元モデルで大谷石壁体を表現し、非定常熱伝導解析を行う。各要素はすべて10cm四方で、全長は、1m, 5m, 10m, 15m, 20mの5種類とし、順に地下施設A, B, C, D, Eとする。なお、解析領域の外側は断熱境界となっている。モデル全体の初期温度は、地下空間の気温と等しいと仮定し、モデルの左端を、建設を想定する施設内部の温度、モデルの右端を地下空間の気温で固定した。解析で1年後の温度分

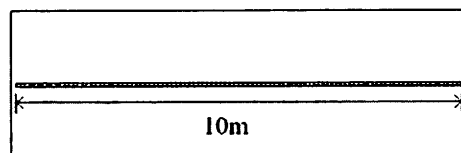


図-1 一次元解析モデル

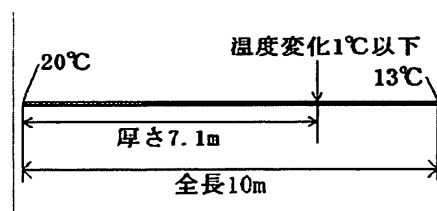


図-2 一次元解析モデルの1年後温度分布

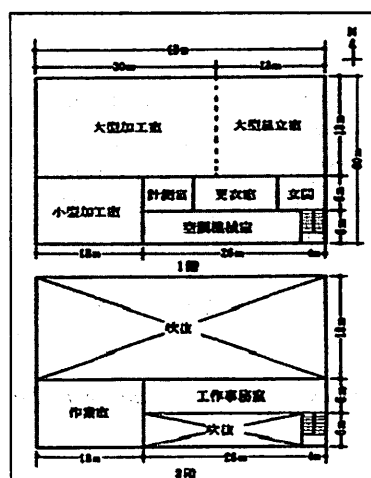


図-3 精密加工工場平面図(地上)⁹⁾

布(図-2)を求め、初期温度からの温度変化が1°C以下である施設の温度を設定した端面からの厚さを、大谷石壁体の想定厚さとして負荷計算に用いた。ただ、貯蔵温度と地下空間の気温の差が1°Cであるグレープフルーツ貯蔵(冬季)だけは、施設の温度を設定した端面からの温度変化が0.5°C以下までの厚さを想定厚さと定義した。

b) 精密加工工場

夏季、冬季の環境条件を想定した精密加工工場の熱流解析を行った。地上に建設する場合の精密加工工場の平面図を図-3に示す。工場の床面積および容積は地上・地下施設ともに同じであるが、地下空間の大きさの制約から地下施設では1階建てとする。地下に建設する工場の平面図を図-4に示す。また、解析モデル俯瞰図を図-5に示す。各要素は一辺が1mの立方体で、解析領域は縦94m, 横93m, 高さ53mとし、全要素数(ゾーン数)は463,326個である。この解析では、施設が建設されない空間は空気で満たされているとし、移流熱拡散を起こす流体として扱った。また、大谷石壁体の解析モデルは等方性熱伝導体であり、地下空間の空洞に存在する空気は移流伝熱体としたため、自由度は526,308個である。なお、解析領域外側の面は、境界条件を除き、断熱境界

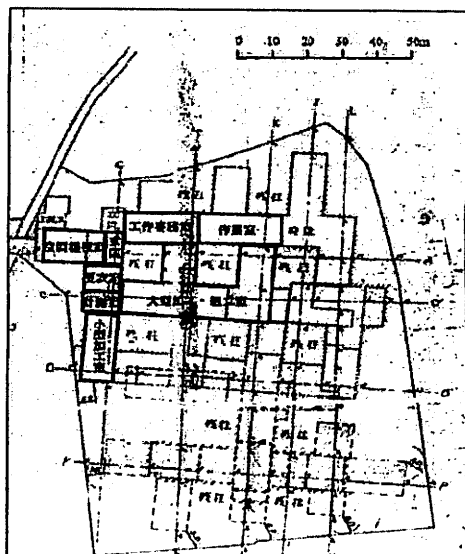


図-4 精密加工工場平面図(地下)

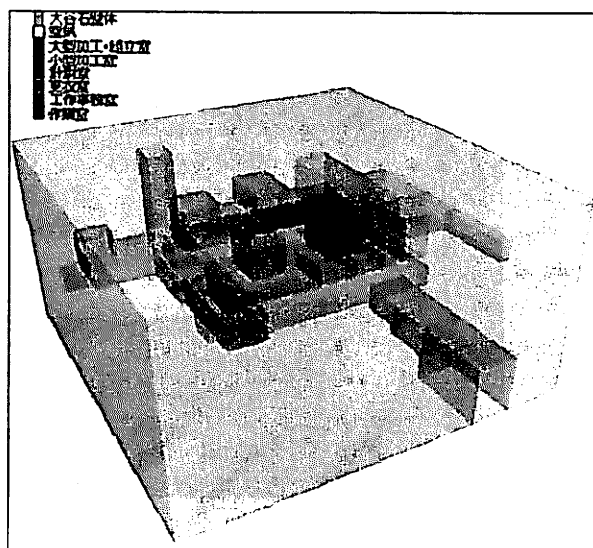


図-5 精密加工工場解析モデル俯瞰図

表-1 大谷石壁体解析結果

施設	季節 (夏季: 13℃, 冬季: 11℃)	モデル全長ごとの大谷石壁体想定厚さ [m]
大型加工・組立室	夏季	A:0.9 B:4.9 C:8.4 D:9.0 E:9.0
	冬季	A:0.9 B:4.2 C:7.1 D:7.3 E:7.3
小型加工室	夏季	A:0.9 B:4.9 C:8.4 D:9.0 E:9.0
	冬季	A:0.9 B:4.2 C:7.1 D:7.3 E:7.3
計測室	夏季	A:0.9 B:4.2 C:7.1 D:7.3 E:7.3
	冬季	A:0.9 B:4.4 C:7.7 D:7.9 E:7.9
更衣室・玄関	夏季	A:0.9 B:4.9 C:8.4 D:9.0 E:9.0
	冬季	A:0.9 B:4.4 C:7.7 D:7.9 E:7.9
作業室	夏季	A:0.9 B:4.9 C:8.4 D:9.0 E:9.0
	冬季	A:0.9 B:4.4 C:7.7 D:7.9 E:7.9
工作事務室	夏季	A:0.9 B:4.9 C:8.4 D:9.0 E:9.0
	冬季	A:0.9 B:4.4 C:7.7 D:7.9 E:7.9
魚(冷凍)貯蔵	夏季	A:0.9 B:4.9 C:9.4 D:11.2 E:11.2
	冬季	A:0.9 B:4.8 C:9.4 D:11.1 E:11.1
ホウレンソウ貯蔵	夏季	A:0.9 B:4.6 C:8.3 D:8.8 E:8.8
	冬季	A:0.9 B:4.5 C:8.0 D:8.3 E:8.3
グレープフルーツ貯蔵	夏季	A:0.9 B:3.3 C:4.8 D:4.9 E:4.9
	冬季	A:0.5 B:2.5 C:3.3 D:3.4 E:3.4

となっている。

本解析では、解析領域内にある施設が、操業することに伴って、発熱することを想定した。操業開始後1年後に領域内の温度分布がどのようになっているのかを確認する。地大谷石壁体の初期温度は、地下空間の気温(夏季: 13℃, 冬季11℃)と設定し、境界条件として解析領域の表面の温度は初期温度に固定する。施設の規模は、負荷計算を行う施設と同規模とする。以上の条件で、1年後の地下空間の温度分布を求めた。

(3) 解析結果及び考察

a) 大谷石壁体

解析結果を表-1に示す。この値を負荷計算に用いた。表-1をみると、精密加工工場、貯蔵施設ともに地下施設D、E(モデル厚さが15m, 20m)は結果が等しくなった。このことから、検討する施設と大谷石壁体の温度差

は、地下施設Dの値が各施設の想定厚さの最大値をとる。また、想定厚さは、施設と地下空間の温度差が大きいほど厚くなる。地下施設Aが、冬季のグレープフルーツ貯蔵を除いて同じ値をとるのは、モデル長が短かく、1年間で定常状態に達したためであり、結果として左端から0.9mの位置まで1℃以上の温度変化が生じたためである。

b) 精密加工工場

解析結果を図-6、図-7に示す。図-6、図-7は、施設高さ2mの位置における温度の平面分布を表している。温度はK(ケルビン)で示されている。

図-6より、施設内部からの熱が1年間で熱が伝達するのは、大谷石壁体表面から6m程度までである。しかし、残柱の中心部の温度は2℃から3℃の上昇が生じていることから、残柱を通じて熱が逃げていることが分かった。このため、負荷計算を行う際には、残柱に熱が見

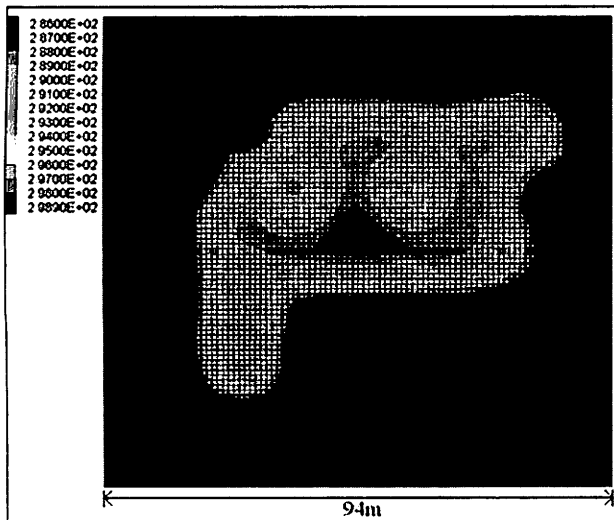


図-6 精密加工工場 1年後温度分布(夏季)(単位 K)

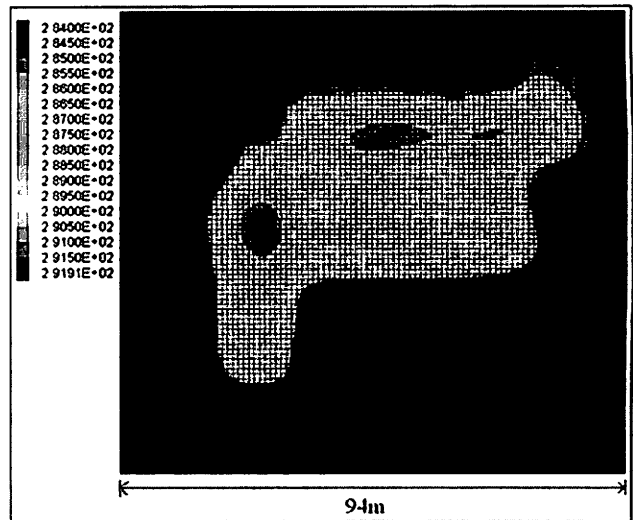


図-7 精密加工工場 1年後温度分布(冬季)(単位 K)

かけ上蓄積されることも考慮する必要がある。

図-7より、内部において1年間で熱が伝達するのは、大谷石壁体においては4 m程度である。しかし、残柱の中心部は1℃程度温度上昇が生じていることから、残柱内部に熱が蓄積される。そのため、負荷計算を行う際には、残柱に熱が蓄積されることも考慮する必要がある。全体的に、夏季に比べて温度が低いのは、各部屋の設定温度が低いため、部屋からの発熱が夏季よりも小さいためである。

5. 採石地下空間有効利用の検討

(1) 算出方法

a) 生産施設

比較項目は、電力消費量(冷暖房、昇降設備)と建設コスト^{7),8)}の2項目である。算出条件としては、①～⑤に示す通りである。①地上施設は2階建となるが、地下に施設を建設する場合、2階建構造は強度や空間的制約があるため現実的でない。そこで、地下空間の構造的制約を考慮して、地上および対象地下空間に精密加工工場を建設する。ただし、工場の床面積および容積は地上・地下施設ともに同じである。②精密加工工場の空調運転時間を、地上施設は8:00～20:00(12時間)とし、地下施設は除湿などのために、常時空調を稼働する必要があるため、24時間とする。③精密加工工場の解析結果を反映させる。④施設運用における電力消費量を算出するには、空調設備(空調熱源、二次ポンプ、空調機ファン)、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、同じ床面積、運転時間の地上・地下工場施設において比較を行うため、照明、コンセント、換気設備、衛生設備の熱負荷および電力消費量は、地上と地下施設ともに同値とする。⑤地

上・地下施設の建設コストを算出するには、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、空調換気設備の建設コストを求める必要がある。しかし、本研究では、昇降設備を除き、地上と地下施設の建設コストは同値とする。ただし、昇降設備については地下施設のみに設置するものとする。

b) 貯蔵施設

地上施設と地下施設の比較を行うために倉庫施設の建設を想定する。地下倉庫の壁面は大谷石壁体を利用するものとし、倉庫寸法は、縦44 m×横44 m×高さ7 m、建設面積1,936 m²とする。ここでは、貯蔵するものを食糧に限定し、貯蔵温度の違いにより、魚(冷凍)、ハウレンソウ、グレープフルーツの3種類の食料を選定した。これらを貯蔵する場合について検討する。比較項目は、電力消費量(冷暖房、昇降設備)と建設コストの2項目である。算出条件としては、①～③に示す通りである。①地上および対象地下空間に倉庫を建設する。施設は、地上、地下施設ともに1階建とし、床面積および容積は同値とする。②倉庫の空調運転時間を、地上、地下施設ともに24時間とする。③大谷石壁体の解析結果を反映させる。

(2) 計算結果及び考察

a) 生産施設

電力消費量と建設コストの計算結果を表-2、図-8、表-3、図-9に示す。年間電力消費量の比較においては、冷暖房電力消費量が、地下施設が大幅に有利な結果となった。この理由としては、夏季においては、日射の影響がないため、外気の過度の温度上昇が起きないこと、地下施設では夏季であっても暖房のため、設備機械が生み出す熱が不利に働かないことが挙げられる。冬季には、地下空間の環境条件が施設の運用に適している。特に、施設から発せられる熱が大谷石壁体を暖め、大谷石壁体

表-2 精密加工工場の電力消費量

	地上施設	地下施設
年間冷暖房電力消費量(夏季) [kWh/年]	26139	2732
年間冷暖房電力消費量(冬季) [kWh/年]	5624	1393
年間冷暖房電力消費量 (夏季+冬季)[kWh/年]	31762	4125

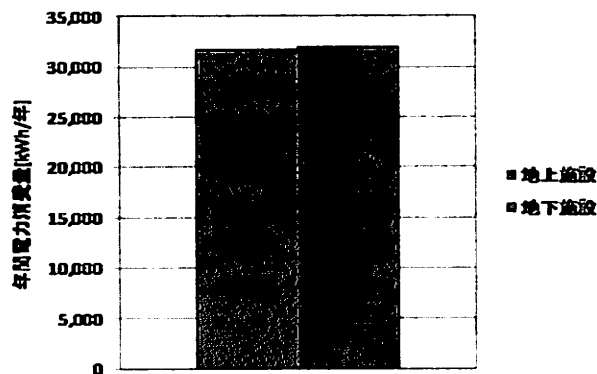


図-8 精密加工工場の電力消費量

表-3 精密加工工場の建設コスト

	地上施設	地下施設
S 構造[万円]	11437	12027
SRC 構造[万円]	27748	28567

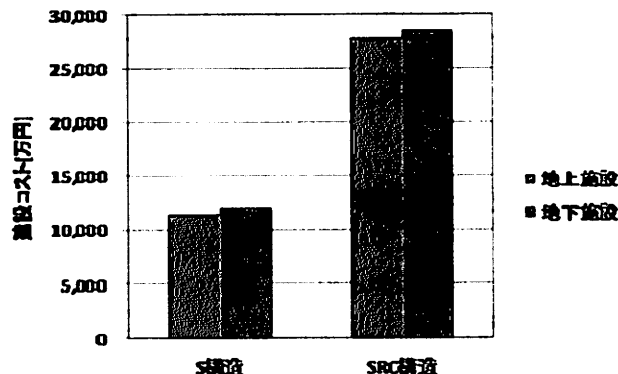


図-9 精密加工工場の建設コスト

表-4 魚(冷凍)貯蔵の電力消費量

	地上施設	地下施設 A	地下施設 B	地下施設 C	地下施設 D
年間冷暖房電力消費量 (夏季+冬季)[kWh/年]	218276	306247	122502	99495	95582
昇降設備年間電力消費量 [kWh/年]	0	27907	27907	27907	27907
年間電力消費量 [kWh/年]	218276	334154	150409	127402	123488

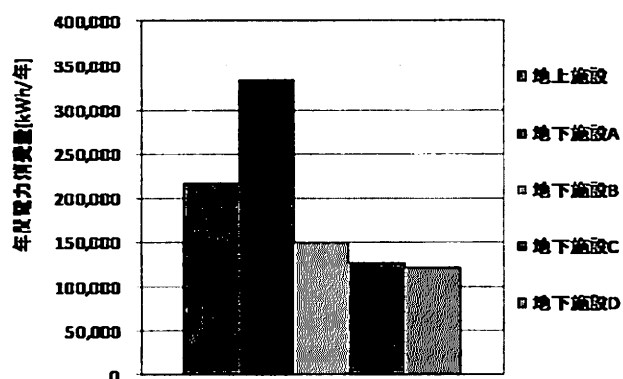


図-10 魚(冷凍)貯蔵の電力消費量

表-5 倉庫施設の建設コスト

	地上施設	地下施設
S構造[万円]	10496	1941
SRC構造[万円]	14469	753

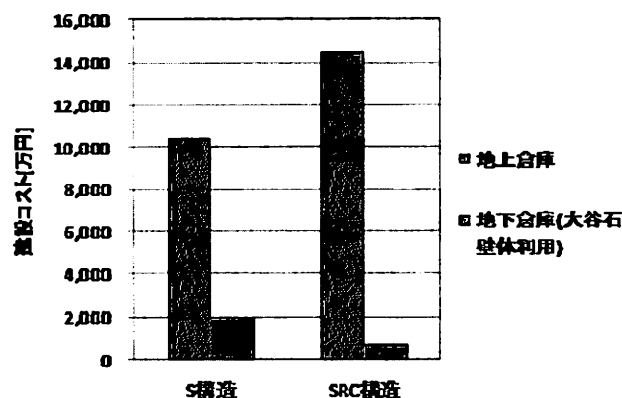


図-11 倉庫施設の建設コスト

の温度が施設の設定温度に近づいていくことは、冷暖房負荷と冷暖房電力消費量の削減に大きな影響を及ぼした。しかし、昇降設備による電力消費量が相対的に大きいため、わずかに地下施設が不利という結果となった。建設コストの比較では、昇降設備を建設することや、地下施設では、1階建てとする都合上、外壁、屋根の面積が大きくなることから地下施設が不利である(表-3)。

b) 貯蔵施設(魚(冷凍)貯蔵)

電力消費量と建設コストの計算結果を表-4、図-10、表-5、図-11に示す。魚(冷凍)貯蔵は、冷暖房負荷が

小さいため、昇降設備による電力消費量を考慮しても、地下施設 A 以外は有利という結果になった。地下施設 A が不利となったのは、大谷石の壁体厚さが薄いために、冷暖房電力消費量が大きく、その上に昇降設備電力消費量を加算したため、地上施設の電力消費量の約 1.5 倍もの電力消費量となった。

建設コストに関して、地下施設は大谷石壁体を利用して建設するため、昇降設備のみの建設コストが計上されることになる。このため、地下施設の建設コストは、地上施設の建設コストよりも非常に小さい。コストの面か

表-6 地下施設の有効利用検討結果

	精密 加工工場	貯蔵施設											
		魚(冷凍)				ホウレンソウ				グレープフルーツ			
		貯蔵				貯蔵				貯蔵			
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
年間電力消費量	×	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
建設コスト	×	○											
総合	△	△	◎	◎	◎	△	△	△	△	△	△	△	△

ら比較すると、地下施設が非常に有利である。

6. まとめ及び今後の課題

(1) 熱流解析に関するまとめ

a) 大谷石壁体

解析結果から、1年間で大谷石壁体に熱が伝わる深さは、施設と地下空間の温度差と、大谷石の厚さによって変化する。モデル壁面の厚さが15mと20mでは温度が乱れると想定される壁厚は一定で、最大11.1mとなった。

b) 精密加工工場

精密加工工場の解析を行った。地下空間全体では、1年間で熱が伝達するのは、夏季においては6m程度、冬季においては4m程度であることを読み取ることができた。各部屋の温度も、設定温度に近い値となったが、全体的に温度が低い。これは与えた発熱量が小さいためであると考えられ、計算条件の再考が必要となる。また、残柱の中心部でも温度が上昇するため、残柱部は熱を見かけ上蓄積されることが考えられる。

(2) 地下空間有効利用に関するまとめ

a) 精密加工工場

年間電力消費量の比較においては、冷暖房電力消費量は、地下施設が大幅に有利な結果となったが、昇降設備による電力消費量が大きいため、わずかに地下施設が不利という結果となった。建設コストの比較では、昇降設備を建設することや、地下施設では、1階建てとする都合上、外壁、屋根の面積が大きくなることから地下施設が不利である。

b) 貯蔵施設(魚(冷凍)貯蔵)

倉庫施設では、魚(冷凍)貯蔵の場合は、地下施設A(大谷石壁体想定厚さ0.9mとした場合)を除いて、地上施設に比べて地下施設が有利となった。これは、大谷採石地下空間の断熱性能が優れているためである。また、建設コストの比較では、地下施設は大谷石壁面を利用することから、地上に比べ、大幅に小さくなった。このことから、魚(冷凍)貯蔵の場合は、地下利用の価値が十分にある。

表-6に、本研究における大谷石採石地下空間の有効

利用検討結果を示す。評価項目は、年間電力消費量と建設コストである。評価基準としては、各評価項目が地上施設に対する大きさが0%以上、100%未満である場合は○、100%以上であるなら×とした。これらの評価結果をもとにして総合的に判断し、地下空間を利用するメリットがある場合は◎、メリットがあるとはいえない場合は△として評価した。

(3) 今後の課題

解析を行ったところ、大谷石は、実験結果よりも熱を伝えない結果となった。つまり、現実よりも地下空間が有利となる結果が得られていると推測される。そのため、解析結果を用いて負荷計算を行う際には、地下施設にとって不利な条件を設定するなど、計算条件に注意する必要がある。精密加工工場の負荷計算では、昇降設備による電力消費量が大きいため、地下施設が不利となった。そのため、昇降設備の電力消費量を大きく見積もっていないか再検討を行う必要がある。特に、運転時間はオフィスを想定した値を参考にしているの、倉庫の場合の昇降設備運転時間を検討する必要がある。倉庫施設では、内部負荷が不利に働くために地下施設では有利とならなかった。内部負荷の再検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 全国地球温暖化防止活動推進センター URL: <http://www.jccca.org> (2010/9/30 参照)。
- 2) 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.oya909.co.jp/museum/index.html> (2010/9/30参照)。
- 3) 空気調和・衛生工学会：建築設備集成12 生産施設(I)、オーム社出版 1995。
- 4) 柴田正史：地上施設との比較に基づいた大谷採石地下空間の有効利用に関する研究、平成18年度 宇都宮大学卒業論文、2006。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 清木隆文、高橋京：大谷石採石地下空間における施設の環境負荷及び寿命の検討、第64回土木学会年次講演会、2ps、CS10-001、CD-ROM、Disc2、土木学会、2009。
- 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。