

大谷採石地下空間の有効利用のための温度環境の推定

宇都宮大学 学生会員 ○井上 達也
 宇都宮市役所 阿部 友哉
 宇都宮大学院 正会員 清木 隆文

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。地下空間の利用によって、都市の規模を現在のままとし、かつ、都市機能の向上を図ることが期待される。さらに、近年、地球温暖化が進行しており、CO₂の削減をはじめとする環境負荷の低減が求められている。そこで、地下空間が有する特性を活かすことで、施設の建設や運用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。既存の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^{1) 2)}。

(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用いられてきた大谷石の採石が盛んに行われて来た。しかしながら、大谷石採石後の採石跡地下空間の多くは放置され荒廃している。再利用されているのは、観光用に公開されているもの(大谷資料館)などのごく一部であり、大谷地区には利用されていない地下空間が多数存在している。これらの採石跡地下空間は貴重な空間資源であり、地下空間の有する特性をうまく利用することで、地上施設よりも環境負荷の低減を図ることが出来る。そこで、本研究では大谷採石地下空間を空間資源として有効に利用することを前提とし、長期利用時に熱が大谷石に与える影響を踏まえて、地下空間の温度環境を推定し、その上で大谷採石地下空間の有効利用を検討することを目的とする。

(3) 対象とした採石地下空間の概要

大谷地区は、宇都宮市の中心から北西約 7km に位置している。大谷石採石地下空間の中には、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)の地下工場として利用された。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たものもある。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。

2. 有効利用の検討

大谷採石地下空間を有効利用するにあたって、表-1に示す施設の分類に基づいて検討を行う。既往の研究によって採石地下空間を研究・実験施設として利用すると最もメリットがあるとされている²⁾。また、同様に既往の研究によって解析ソフトFLAC3D(Itasca 社製)を用いた生産施設並びに貯蔵施設の熱伝導解析の結果をもとに、環境負荷の観点から有効利用の検討がなされ、貯蔵施設(冷凍貯蔵)においてメリットがあることが確認されている¹⁾。

しかしながら、熱伝導解析結果と実験値との比較を行うと、解析結果が安全側の値を示すことから、解析に用いた諸条件の再検討が必要であると考えられる。また、貯蔵施設においては空気の移流を考慮した熱伝導解析が行われておらず、空気の移流を考慮した熱伝導解析のケース数が少ないのが現状である。本研究では、解析に用いる諸条件の再検討を行い、対象とする

すべての施設(表-1)において空気の移流を考慮した熱伝導解析を行う。その上で解析結果を用いた環境負荷計算を行い、その観点から大谷採石地下空間の有効利用の検討を行う。

表-1 施設分類と想定内容

施設分類	
生産施設	研究・実験施設
正確な温湿度の管理が要求される精密加工工場を想定	大きな温度変化を伴う人工気象室を想定
貯蔵施設	都市施設
温度環境の異なる食糧・飲料貯蔵庫を想定	サーバーを収容するデータセンターを想定

キーワード 地下空間 有効利用 環境負荷

連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学陽東キャンパス 10 号館 6 階 岩盤工学研究室

E-mail : t072805@cc.utsunomiya-u.ac.jp

3. FLAC3D による熱伝導解析の再検討

(1) 物性値の再検討について

解析に用いた大谷石の熱伝導率を乾燥状態の値から湿潤状態の値に変更した。これによって、解析をより厳しい条件のもとで行うことが出来る。

(2) 空気層の再現

FLAC3D では、空気そのものを表現することができない。このため、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中に、空気の物性値を持つ流体が存在していると仮定して、疑似的に空気の流れをモデル化し、解析を試みた。本来、空気は水と異なり、圧縮性流体であるが、本研究では、空気の流れは非常にゆっくりで、極端な圧力変化は起こらないと仮定し、非圧縮性流体の解析ツールで計算を行った。

4. 実験と解析の比較

(1) 大谷石加熱実験の概要

今研究では、伝熱負荷値の比較を目的として行った大谷石の加熱実験を、FLAC3D による熱伝導解析によって再現し、空気層に熱源を与えた際の空気層の温度環境・伝熱の程度を、解析によってどの程度再現できるかを確認する。

(2) 実験概要

実験模型は、縦 45cm、横 25cm、厚さ 5cm の大谷石の板 4 枚を側板とし、縦横 30cm、厚さ 5cm の大谷石の板 2 枚を上板、下板とし、目地をコーキング剤によって埋めて作成されたものであり、その様子を図-1 に、模型寸法を図-2 に示す。

実験模型内部に設置した局部加熱用のスポットヒーターによって、48 時間の加熱を行い、温度計によって内部温度の変化を自動記録した。また、ワットチェッカーを用いてスポットヒーターの消費電力量を計測した。

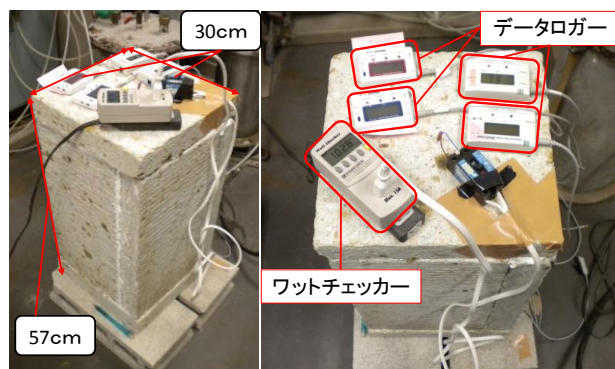


図-1 実験模型全体:左 計測機器:右

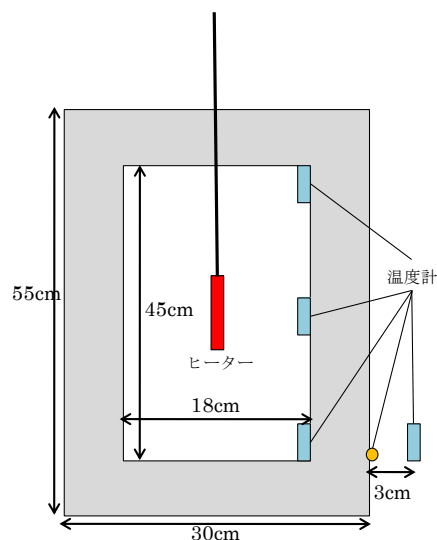


図-2 実験模型寸法 (縦断面図)

(3) 解析概要

図-3 に示す実験模型の 1/4 の部分をモデル化した (図-4)。熱伝達を表わす解析モデルは、熱伝導移流モデルとし、解析モデルの初期温度は 15.0℃とした。また、模型の側面並びに上面を 15℃に、下面を 13.76℃に固定し、熱源 (スポットヒーター) に 20.5MW/m³ の熱量を設定して、48 時間の加熱を再現し観測点の温度を計測した。

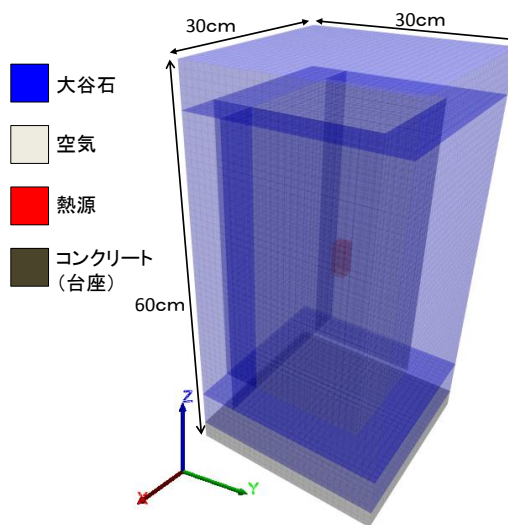


図-3 実験模型の 3 次元モデル化

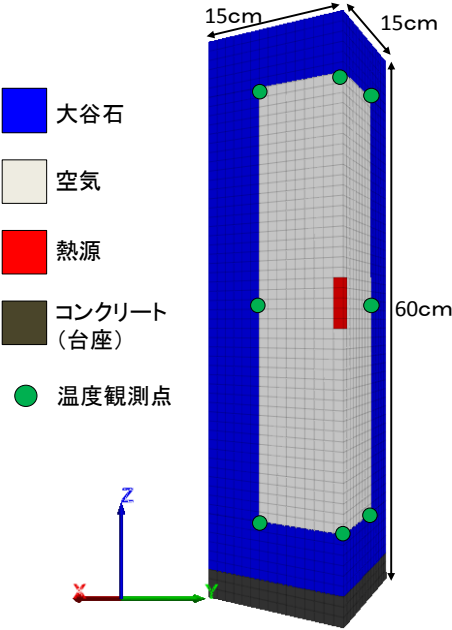


図-4 解析モデル

(4) 熱伝導負荷に基づく実験と解析の比較

実験で観測した内部温度と、解析によって得られた温度観測点の温度を用いて伝熱負荷計算を行った^{3) 4)}。また、実験時に計測したスポットヒーターの消費電力量を真の値として、実験値・解析値それぞれによる伝熱負荷との比較を行い、誤差を計算した。伝熱負荷の計算結果と誤差計算の結果を表-2に示す。

表-2 伝熱負荷計算と誤差計算

誤差計算			
真の値		30.485	kJ/h
解析	伝熱負荷	45.211	kJ/h
	絶対誤差	14.726	kJ/h
	相対誤差	48.304	%
実験	伝熱負荷	31.460	kJ/h
	絶対誤差	0.975	kJ/h
	相対誤差	3.198	%

5. 地下空間の有効利用の検討

(1) 地下空間の再現

測量データをもとに有効利用の検討対象である、大谷地域の採石地下空間をFLAC3Dによってモデル化した(図-6)。対象地下空間は深さ22.5m、4.5m×4.5mの正方形断面の縦坑を持ち、最大深度は地上から43m、最大天端高さは約22mである。また、対象地下空間では僅かな湧水が見られ、地上からの雨水を貯める沈殿池を持つ。以上の対象地下空間を、検討対象施設(表-1)ごとに条件を変更して環境負荷の計算を行った。本報文では、貯蔵施設についての結果を報告する。

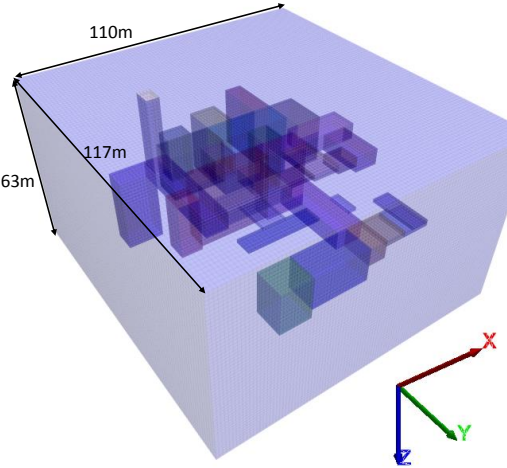


図-6 地下空間モデル

(2) 貯蔵施設の解析

モデル化した対象地下空間から、貯蔵施設として利用可能な空間を選定し(図-7)、境界条件として温度を設定した。その後、1年後の温度状態になるまで熱伝導解析を行った。解析結果をもとに伝熱負荷計算を行い^{3) 4)}、地下に貯蔵施設を設置した場合と、同規模の地貯蔵施設を上を設置した場合とで比較を行う。想定した貯蔵物と貯蔵温度を表-3に示す。本報文では、魚(冷凍)の貯蔵について報告する。

表-3 貯蔵物と貯蔵温度⁽¹⁾

貯蔵物	貯蔵温度(℃)
魚(冷凍)	-29
ハウレンソウ	0
グレープフルーツ	10

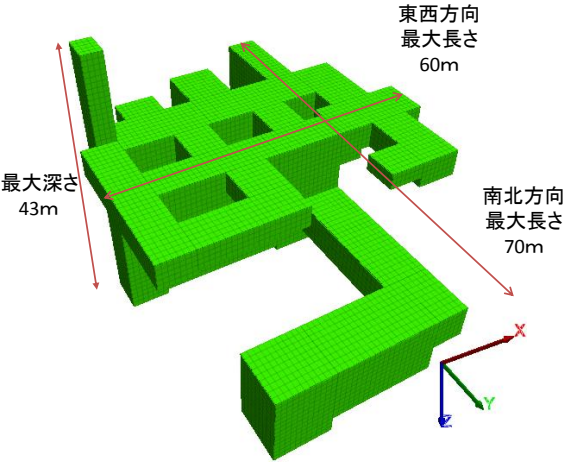
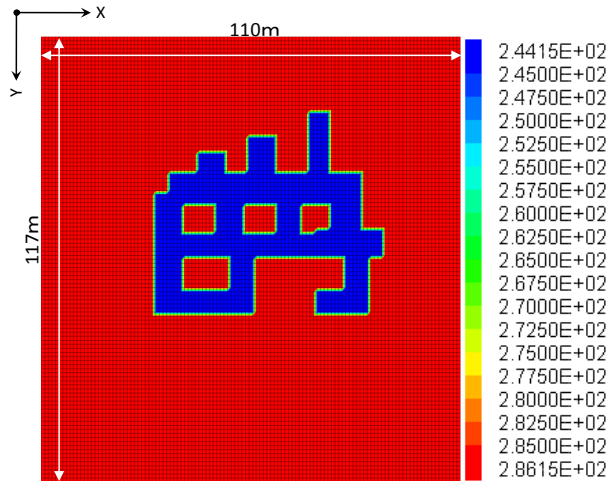
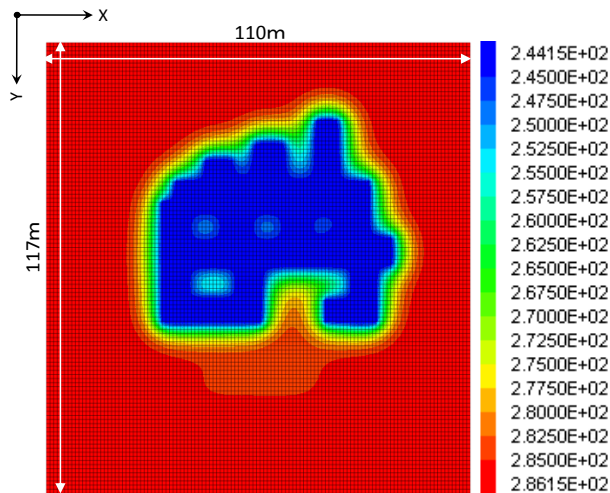


図-7 貯蔵施設として選定した空間

魚（冷凍）の貯蔵における境界条件として、地下空間モデル（図－6）の最外面を 286.15K（13℃）に固定した。その後、大谷石部分の温度を 286.15K（13℃）に、図－7に示す空間の温度を－244.15K（－29℃）に設定し、1年間分の熱伝導解析を行った。地表面から深さ 20m地点の解析前の設定温度を図－8に、同地点の1年後の温度分布を図－9に示す。



図－8 設定温度（解析前）（Z=20m）



図－9 1年後の温度分布（Z=20m）

6. まとめ及び今後の課題

(1) まとめ

実験と解析の比較において、実験結果を用いた伝熱負荷計算は絶対誤差 0.975kJ/h、相対誤差 3.198%と、実験をよく表わしていると言える。一方、解析結果を用いた伝熱負荷計算は絶対誤差 14.726kJ/h、相対誤差 48.304%と大きな誤差が出た。

この原因の一つとして、モデル化した空気の温度変化による密度変化をうまく再現できなかった

ことが挙げられる。この結果、移流による熱の移動が十分に再現できず、模型内部の温度環境を再現できなかったと思われる。

この問題の原因として、非圧縮性流体の解析ツールで計算を行ったため、圧縮流体である空気の密度変化を表現しきれなかったこと、また、非圧縮性流体における密度変化の計算式に用いる入力パラメータの桁のバランスが悪かったことが予想される。

今後、大谷採石地下空間の有効利用を検討するにあたって、対象施設として生産施設などを想定し、作業時の発熱による地下空間の温度環境の推定を行う場合、以上の結果を考慮する必要がある。

地下空間の有効利用の検討においては、魚（冷凍）の貯蔵施設を想定して、1年後の温度分布を推定した。1年後、地表から深さ 20mの地点における大谷石壁体への施設内温度の影響は、x方向に最大で 10m 程度、y方向に最大で 33m 程度となった。ここで、深さ 20mの地点におけるx方向への熱の影響に比べ、y方向への熱の影響が大きいのは、地表から深さ約 30mの地点に存在する空間の影響が出たためである。

(2) 今後の課題

空気に熱量を与える解析においては、密度変化の計算式に用いる入力パラメータの桁のバランスを調節することで、解析結果を現実に近づけることが可能であると思われる。

また、採石地下空間の有効利用の検討は、本研究の解析によって得られた温度データをもとに環境負荷計算を行い、地上施設と比較を行う。

参考文献

- 1) 清木隆文，阿部友哉，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，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 16 巻，土木学会[投稿論文]，pp.7-12，2011.
- 2) 舟山雅史，清木隆文，西田幸夫，西 淳二：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，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 14 巻，土木学会 [審査付論文]，pp.1-10，2009.
- 3) 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.
- 4) 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 空気調和設備設計編，社団法人 空気調和・衛生工学会出版，1997.