

(69) 地下空間の利用に関する音響と熱環境調査

三機工業株式会社 〇助飛羅 力 株式会社OTO技術研究所 中川 悟
株式会社AZ環境計画研究所 幸田 庄二 神戸大学工学部 桜井 春輔

Field Measurements of Accoustic and Thermal Characteristics of an Underground Cavern

Chikara SUKEHIRA, Satoru NAKAGAWA, Shoji KODA and Shunsuke SAKURAI

Abstract

Great attention has been paid to the utility of underground space, not only on transportation and the life line system, but also on the underground power house, oil and gas storage, and the treatment of nuclear waste disposal.

Recently, there has been a proposal put forward for an underground symphony hall excavated in a rocky mountain. In such a project accoustic and thermal characteristics of rock cavern must first be investigated.

In this study field measurements have been carried out in an abandoned metal mine to obtain accoustic and thermal characteristics of an underground cavern. The results obtained in this study provide fundamental information for the construction of an underground symphony hall.

1. はじめに

地下空間は従来から地下鉄道、上水道、ライフライン、道路・鉄道トンネル、さらには、地下発電所、石油備蓄など、その利用は活発である。また、最近では地下空間を生活空間やレジャーのための空間として利用することが真剣に検討されている。筆者らは地下にシンフォニーホールを建設することを提案し、実現に向けて種々の問題を検討している。ここでは、その中でも特に重要な音響と熱環境の問題を取り上げ、現場計測によって岩盤内空洞におけるそれらの特性を求めたものである。

計測を行ったのは兵庫県生野銀山跡地であり、坑道内での温湿度測定および坑道内の比較的大きな空洞での音響特性の測定を実施した。生野銀山は中国山脈系の岡山県内に立地する鉱山であり、現在は採掘は行っていないが坑道の入り口部を観光用の見学ルートとしている。鉱山にはほぼ水平に網の目状に坑道があり、更に上部に向かって立坑・換気坑が無数にあいている。

2. 熱環境調査

(1) 目的

夏期及び冬期の坑道内部の温度・湿度を測定し、同時に測定した外気との相関関係を検討する。

(2) 測定条件

a)測定場所 : 坑道内の外気の影響をほとんど受けない地点、坑道入り口に比較的近い地点、外気の3カ所を対象とした。図-1に今回測定した地点のプロットを示す。

測定点 No. 1 : 外気の影響をほとんど受けない地点 (坑道奥)

No. 2 : 坑道の入り口に比較的近く、外気の影響を受けることが予想される地点 (坑道入口)

No. 3 : 外気 (但し、管理事務所の裏側の底下部であり通風状態は余りよくない)

b)測定期間 : 平成3年4月23日 ~ 平成3年12月28日、30分間隔で連続測定

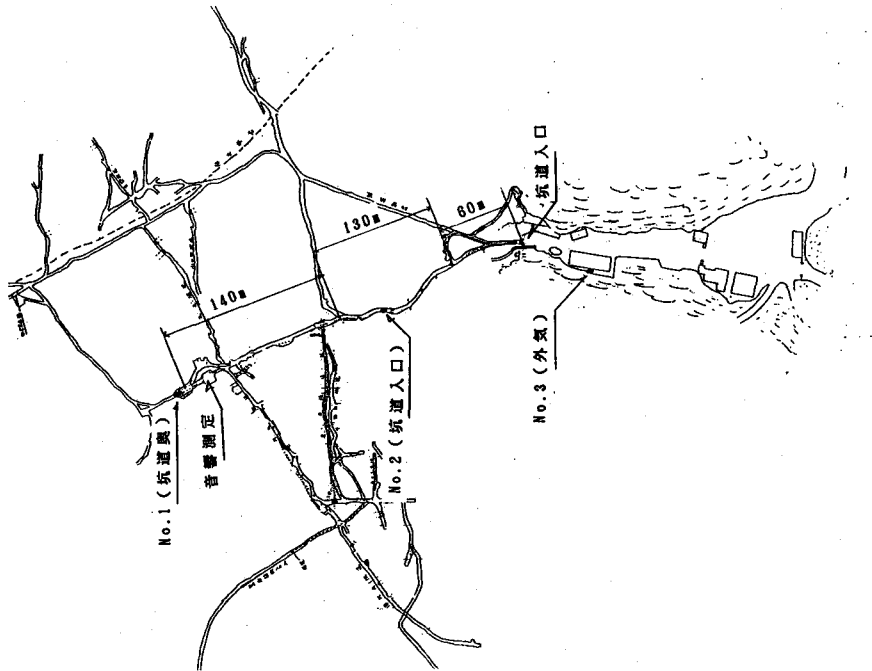


図-1 生野銀山跡地平面及び測定位置

c)測定機器 : 超小型データロガー XT-102 (ジェイ・エム・エス)

測定精度 温度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C} / 25^{\circ}\text{C}$

湿度 $\pm 3.5\% \text{RH (F. S.)}$

(3) 測定結果

測定したデータの各月の乾球温度・相対湿度・絶対湿度の平均値を表-1に示す。乾球温度と相対湿度より絶対湿度への変換は Goff-Gratch の式を用いた。乾球温度・絶対湿度の坑道内部の測定値と外気との相関関係を図-2～図-5に示す。坑道内部の換気については実測していないが、夏期は坑道上部(奥)より坑道入口へ、冬期は逆に坑道入り口から坑道奥へ風は抜けている。坑道奥の外気の影響を受けない地点に於いても、常時微風ではあるが空氣の流動は存在している。

a)温度 : 坑道奥の乾球温度は外気に無関係に一定値(約 16°C)である。坑道奥の温度が坑道入り口付近の温度に較べて約 1°C 高いのは、設置した付近に結露防止用の照明器具(白熱灯が合計約 300W 程度)の影響と考えられる。坑道入り口の乾球温度は外気温度が高いときにはほぼ一定値以上の値(15°C)であるが、外気温度の低下にともなってほぼ外気に比例する形で低下している。これは、外気温度が約 15°C 以上の場合には外気が坑道上部の無数の堅抗、換気抗より坑道内に侵入し、地中の平均温度と推定される一定値になるまで冷却されている。一方外気温度が 15°C 以下の場合には逆に水平面状の坑道入り口より外気が侵入し坑道入り口付近では外気が坑道壁面によって十分加熱されないうで、坑道奥に至ってはじめて外気が地中の平均温度と推察される温度まで加熱されている。立抗部分の壁面表面積は坑道入り口よりの壁面面積に較べてかなり大きく、この接触面積の差が夏冬の温度傾向の差となっていると推定される。

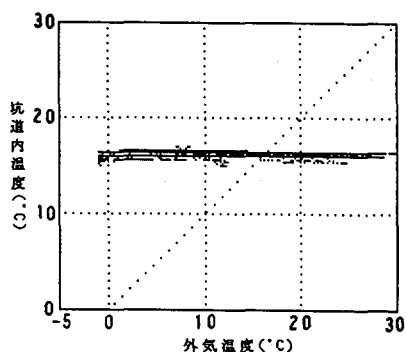
b)湿度 : 湿度と同様に坑道奥では外気湿度に無関係に一定であり、坑道入り口付近では外気の侵入ルートによって冬期では湿度は外気に近くなっている。温度の項で述べた坑道奥の結露防止用の照明器具の影響は、坑道奥と坑道入り口の絶対湿度の値が夏期(外気が坑道奥より坑道入り口に流れている場合)において温度の差があるにも関わらず同じ値を示していることでも解る。

(4) 考察

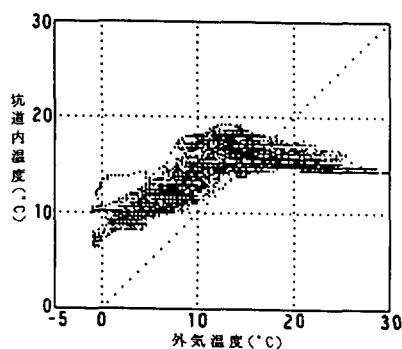
水平方向・垂直方向に外気との大小無数の坑道を有する鉱山においては、冬期と夏期で換気の方法（坑道内の気流方向）が逆転し、更に侵入外気と坑道壁面の接触面積によってその地点での外気の影響を受ける程度が異なっていた。接触面積が十分にある場合の坑内温度は地中の平均温度と推察される温度に近くなり、年間ほぼ一定値になっている。湿度についても、はほぼ飽和状態に近くなるまで加湿・除湿されている。

表一 1 各月の温湿度平均値

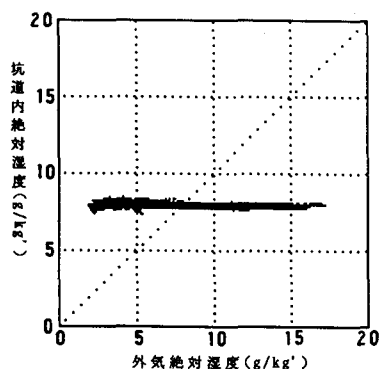
月	乾球温度 (°C)			相対湿度 (%)			絶対湿度 (g/kg')		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
4月	16.1	14.6	12.3	87.2	96.9	80.5	10.1	10.0	7.2
5月	16.1	15.8	13.5	88.7	96.0	84.9	10.1	10.8	8.4
6月	16.2	15.0	19.1	89.2	96.8	92.5	10.2	10.3	13.0
7月	16.2	14.8	21.7	88.9	96.8	92.0	10.2	10.2	15.1
8月	16.2	14.9	21.9	89.2	96.8	89.4	10.2	10.2	14.8
9月	16.2	15.3	19.8	89.9	96.7	87.6	10.3	10.5	12.8
10月	16.3	16.3	12.8	89.9	96.2	88.9	10.4	11.2	8.4
11月	16.4	11.8	6.9	89.9	93.5	86.5	10.5	8.2	5.4
12月	16.2	10.5	4.6	90.1	92.9	88.5	10.4	7.4	4.7



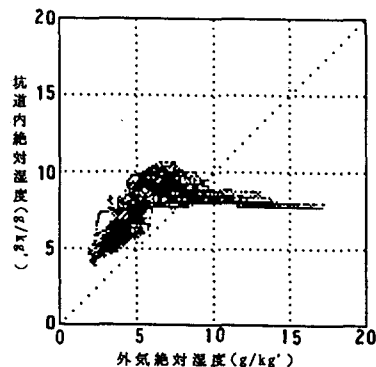
図一 2 外気温度と坑道奥温度の相関



図一 3 外気温度と坑道入口温度の相関



図一 4 外気絶対湿度と坑道奥絶対湿度の相関



図一 5 外気絶対湿度と坑道入口絶対湿度の相関

ここでは、坑道内での熱水分の収支の数式モデルをたてて検証するには至らなかったが、今後この熱水分収支モデルをを検討すれば、地下空間における外気の処理方法を外気のダクトを地中坑道とし外気を強制的に接触させることにより、省エネルギー的に行うことが可能と考えられる。

3. 音響調査

(1) 目的

当坑道の奥に位置する旧立坑捲機械室（約 100 m^2 、図-1 参照）を 小規模音楽ホールとして利用すべく、音響計画のもっとも基本的な残響時間を実測した。また、当該空洞に対し幾何音響による虚像法音線シミュレーションを行った。

(2) 残響時間測定

a)測定場所 : 坑道内旧立坑捲機械室（図-6）

壁、天井：コンクリート打放し（壁面開口 約 21 m^2 ）

床 : コンクリート打放し（中央部水溜、旧捲機ドラム未撤去、廃材散乱）

b)測定方法 : 簡便な方法として、空洞の室隅でゴム風船の破裂音を音源とし、室内3ヶ所の受音点で音の減衰性状を録音した。

c)測定結果 : 残響時間の測定結果を図-7に示す。

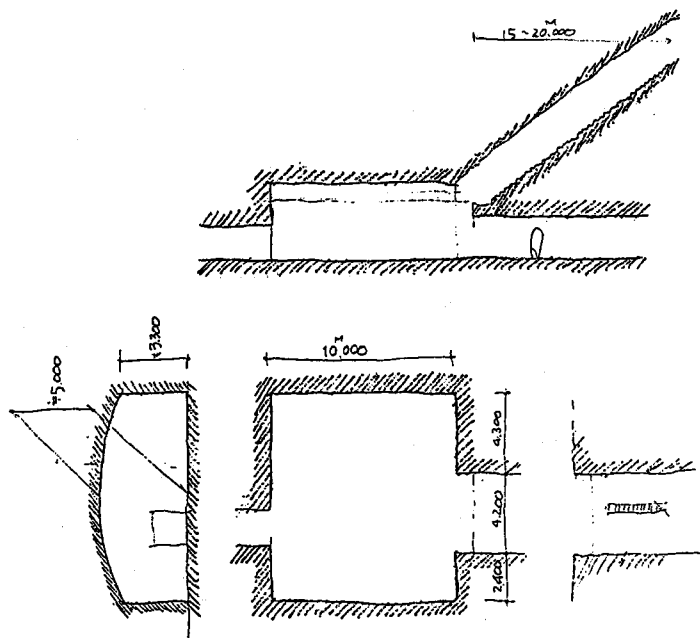
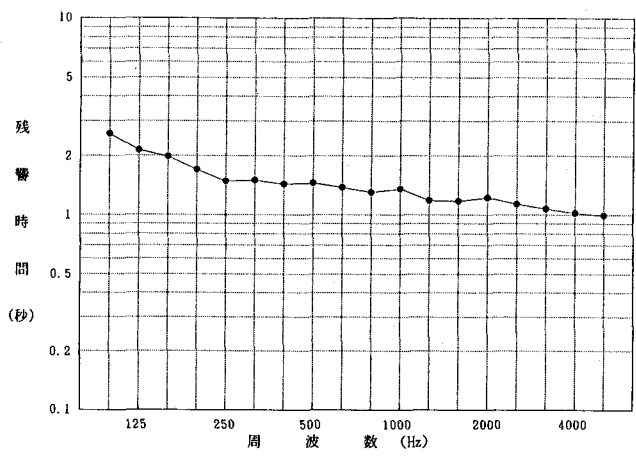


図-6 旧立坑捲機械室

d)考察 : 低音域が長く、高音域の短い特性となっているが、これは開口部の吸音が大きく、機械、廃材等による高音域での吸音も大きいことが原因と考えられる。なお、現状に於いて音楽ホールとしての一般的な最適残響推奨値（1.2~15 秒）に近く、音楽ホールとしての利用が可能と考えられる。

(3) 音響シミュレーション

ホールの音質を決定する要因として、初期反射音の時間配列とその到来方向が非常に重要であることが認められており、これらを知る目的でコンピュータシミュレーションを行った。厳密には室内音場を波動的に



周波数 (Hz)	残響時間
100	2.58
125	2.13
160	1.98
200	1.70
250	1.48
315	1.50
400	1.43
500	1.45
630	1.38
800	1.30
1000	1.35
1250	1.18
1600	1.17
2000	1.22
2500	1.13
3150	1.07
4000	1.02
5000	0.99

図-7 残響時間測定結果

扱う必要があるが、実際的な方法として幾何音響学による虚像法を用いて行った。シミュレーション結果の一例を図-8に示す。

天井の凹形状および平行壁による音の集中反復が生じており、エコータイムパターンも良いとされる樫の木状の時間減衰性状となっていない。改良案として拡散天井の設置、壁の凸凹による音の拡散を図る必要があると考えられる。

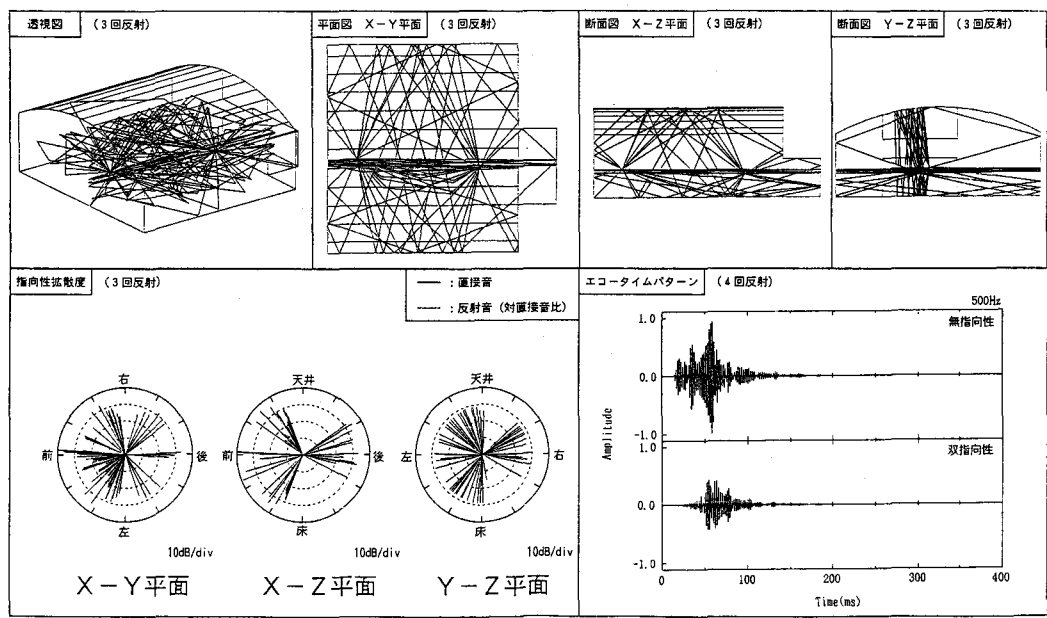


図-8 音響シミュレーションの一例

4. むすび

岩盤内にシンフォニーホールを建設するためには多くの事項について検討を行わなければならない。本研究は其中でも特に音響と熱環境問題について、現場計測を通して検討を加えた。今後このような調査研究を続けて行くことが、地下シンフォニーホール実現のために重要であろう。