

地下空間の音響特性と岩盤ホールの音響計画について

Acoustic Characteristics in an Underground Space and Acoustic Planning of Rocky Cave Halls

荒木邦彦、松本敏郎、上垣千絵、莊大作..

Kunihiko Araki Toshirou Matumoto Chie Uegaki Daisaku Syou

Major acoustic characteristics were measured including reflected sound response, reverberation time, sound pressure distribution, and distance attenuation in underground spaces, mine tunnels, and rocky caves at Minetopia Besshi, abandoned Sazare Mine, and Inada Quarry. From the measurements the reflected sound characteristics and percent sound absorption were obtained. The distance attenuation of sound was measured in a tunnel finished with concrete floor and another floored with small pebbles left untreated. As a result of calculating percent attenuation per 100 m, it turned out that the higher the frequency, the higher the percent attenuation in the tunnel with concrete floor whereas the pebbled floor had a peak in the intermediate frequency range. Hearing the echo and reflected sound in the cave revealed that the cave space has peculiar acoustic characteristics that enhance the sense of serenity, heightening bright intermediate to low tone and transparent, mystical high tone and thus making it easier for the audience to distinguish subtle nuance of sound. Based on these findings we examined points to consider in acoustic planning of halls and the like gathering facilities.

1. まえがき

近年、我が国においては都市環境や景観の保全、土地有効利用の観点から地下空間の積極的利用が考えられているが、一般者が集会や震災時などの避難場所として岩盤空洞を利用する大空間の設計例もなく、地下構造、設備、避難等解決しなければならない技術的問題点が多数ある。一方、海外では地下空間を利用したミュージアムやコンサートホールの実施例もあり、一般者が使用できる施設が増えてきている。その影響もあって、国内でも同様な施設を計画する動きがあり、設計データが必要となってきた。本報告は鉱山の地下空間や坑道における反射音応答や残響時間など主要な音響特性を調査し、岩盤空間の利用施設を計画するために必要な音響基礎データを抽出して、音響計画に生かせる岩盤の特性についてまとめたものである。

2. 地下空間の音響調査

2.1 調査場所の概要

(1) マイントピア別子

愛媛県新居浜市にある住友金属鉱山にあった火薬庫および坑道跡地を利用した展示スペースである。岩盤は泥質・珪質・塩基性の結晶片岩類が露出しており、天井の一部はロックボルトと金網にて養生され、地下水が漏水している部分はビニールシートにて防水している部分も見られた。図-2.1に示す平面図でわかるように、4室の火薬庫跡を鉱山のしくみや地下資源などの展示室にして、一般公開している。

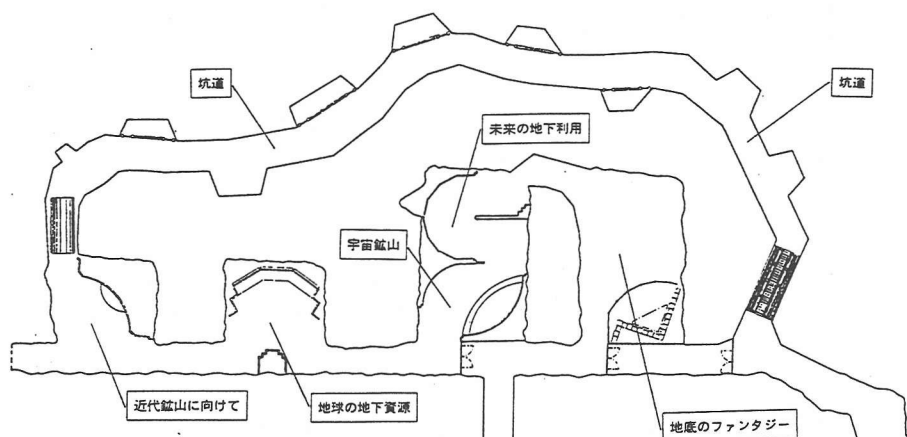


図-2.1 住友金属鉱山・マイントピア別子展示スペース平面図

(2) 住友金属鉱山 佐々連鉱山跡地

愛媛県伊予三島市にある住友金属佐々連鉱山の水平坑道跡を利用して坑口より228m地点より奥に300m間にて距離減衰を測定した。図-2.2に示す水平坑道はほぼ直線で、その断面は2.9m×2.9mの正方形である。床は細かく砕かれた採石がそのまま現存してその上にトロッキのレールが伸びている。坑道の壁面と天井は結晶片岩類のうちの泥質片岩、塩基性片岩、石英片岩が露出している状態であった。

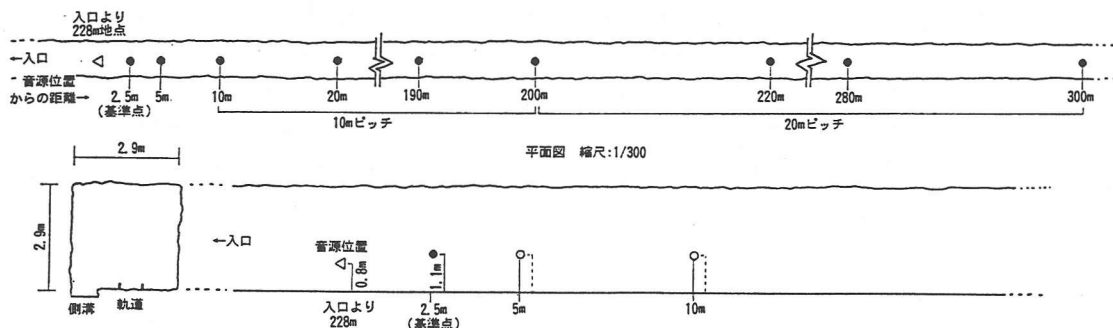


図-2.2 住友金属鉱山 佐々連鉱山坑道平面・断面図

(3) 稲田採石場

茨城県笠間市にある(株)タカタの稲田採石場は採石する花崗岩が露出した壁面が5～6mの高さとなって階段状に上へ何段もつながっている。写真-2.1示すように採石の方法で違った岩肌があり、スロットドリルを用いた採石部分など3種類の岩盤壁面で反射音特性を調査した。

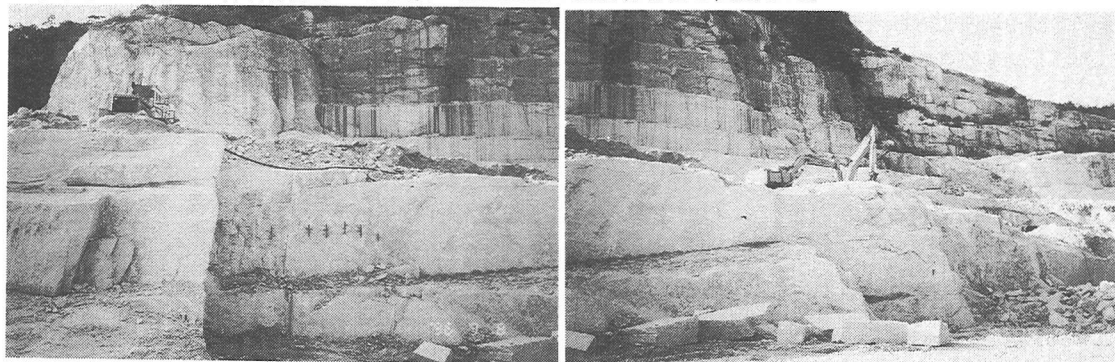


写真-2.1 (株)タカタの稲田採石場

2.2 調査概要及び結果

(1) 残響時間と岩盤壁面吸音率

図-2.1 に示したマイントピアの展示室の中で壁、天井の広い面積が岩盤のまま使われている「地底のファンタジー」にて残響時間を測定し、この結果より岩盤面の吸音率を求めた。音源は無指向性スピーカより発生させたピンクノイズの断続音を使用し、図-2.6 に示した位置にて測定した。

残響時間は図-2.3 に示したように低音域が長く、中高音域は比較的平坦な特性であった。また、岩盤面のみかけの吸音率計算結果は図-2.4 に示し、比較のために図-2.5 に他の調査結果を示した。

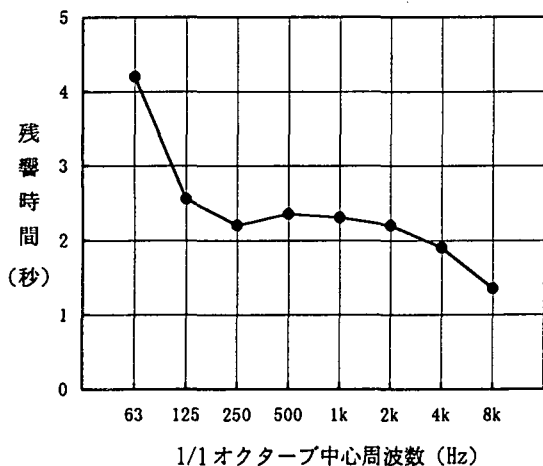


図-2.3 残響時間測定結果

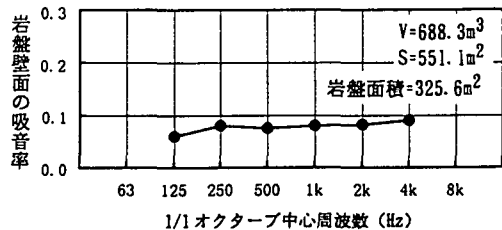


図-2.4 岩盤壁面の吸音率計算結果

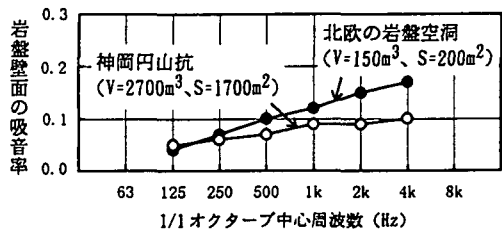


図-2.5 他の岩盤壁面吸音率

(2) 距離減衰

調査は天井と壁が岩盤で床はコンクリートで仕上げられているマイントピア別子の展示施設の坑道と、床は細かな碎石がそのまま現存する佐々連鉱山跡地の水平坑道の2箇所で行った。測定は音源位置に設置したスピーカよりピンクノイズを発生させ、各受音位置における63Hzから8kHzの音圧レベルを計測し、1m点を基準として相対レベルを求めた。この結果を図-2.7～10に示す。100m当たりの距離減衰率を算定すると、床がコンクリートの坑道では高音域ほど減衰率が高い特性であった。また、床が採石の坑道では減衰率が500Hz付近の中音域にピークがあり、120m付近から減衰率が変化するが判明した。

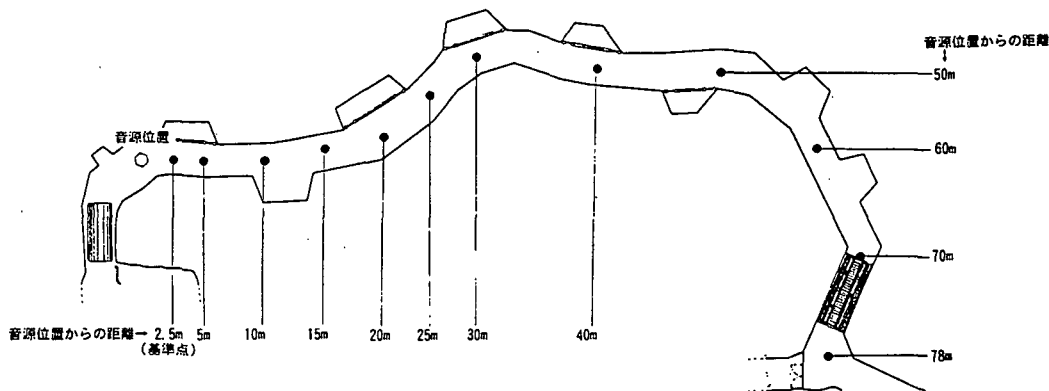


図-2.6 マイントピア別子 距離減衰測定位置

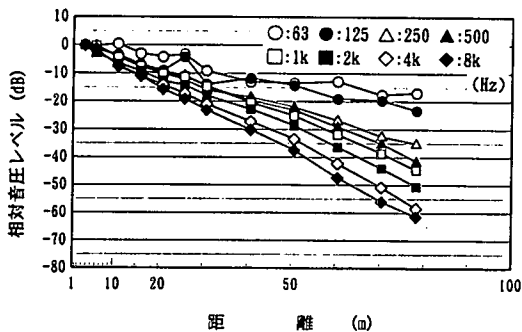


図-2.7 マイントピア別子坑道距離減衰測定結果

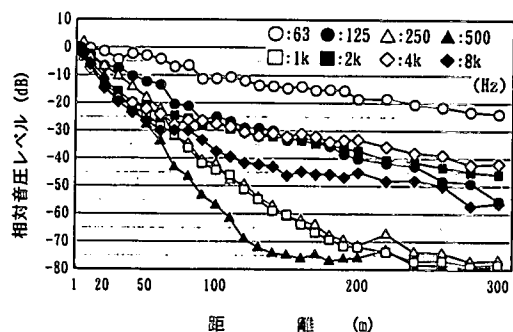


図-2.8 佐々連坑道距離減衰測定結果

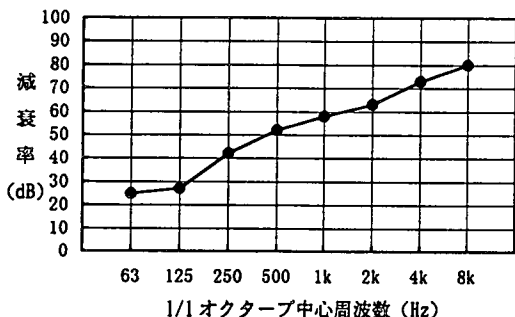


図-2.9 マイントピア別子坑道の100m当りの減衰率

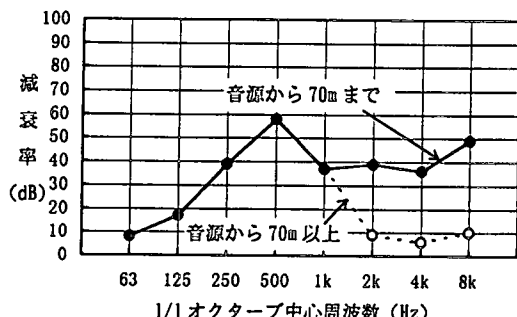


図-2.10 佐々連坑道の100m当りの減衰率

(3) インパルス応答

調査は図-2.11 に示すマイントピア別子の「地底のファンタジー」(W8m×D15m×H5.7m)にて行った。音源は無指向性スピーカから発生させた5kHzの正弦半波を用いてインパルス応答を測定し、エコータイムパターンおよびT-15、T-30、C値、STIなどの音響物理指標を算出した。結果は図-2.12に示した。

中高音域のエコータイムパターンは直接音に続く反射音が豊かで、残響の減衰カーブも自然である。数センチから数十センチ単位の岩盤壁面の凹凸が拡散に有効に働き、初期残響時間T-15と残響時間T-30に大きな差がなく、平行壁面であるがフラッター等の現象もない。音楽の明瞭性をあらわすC値も±2.0dB以内であり、響きの明瞭性が良好である。また、STIも空席で0.45～0.55であった。

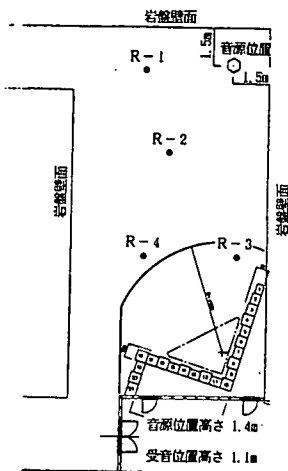
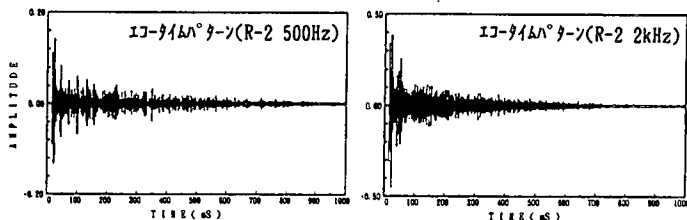


図-2.11 地底のファンタジー平面図



	1/1 オクターブバンド中心周波数 (Hz)					
	125	250	500	1k	2k	4k
T-15	2.03	2.19	2.40	2.32	2.08	1.70
T-30	2.39	2.30	2.37	2.35	2.18	2.00
C	1.04	-1.34	-1.33	-1.40	-0.44	0.66
STI	BAD POOR FAIR GOOD EXCELLENT 00.100.200.300.400.500.600.700.800.901.00					

図-2.12 インパルス応答測定結果

(4) 岩盤壁面の反射音特性

調査はマイントピアの岩盤側壁と稲田採石場の3タイプの採石方法で行った。音源は岩盤壁面の正面90°と水平方向に45°振った位置に設置したスピーカより発生させたパルス(5kHz 半波)を用いた。マイントピアの受信点は水平方向に45°、90°、135°の3点、稲田の場合は22.5°～157.5°の範囲で22.5°毎に7点とした。分析は直接音と岩盤からの反射音を分離してFFT処理にて1/3オクターブバンド音圧レベルを算出し、式-2.1にて距離補正し、反射音の相対音圧レベルを求めた。測定点図-2.13、2.14に示す。

$$L = L_r - L_D + 20 \log(r_r / r_D) \quad (\text{式}-2.1)$$

L : 反射音の相対音圧レベル (dB)
 L_r : 受信位置の反射音音圧レベル (dB)
 r_r : 受信位置の反射音の距離 (m)

L_D : 基準点の直接音音圧レベル (dB)
 r_D : 基準点の直接音の距離 (m)

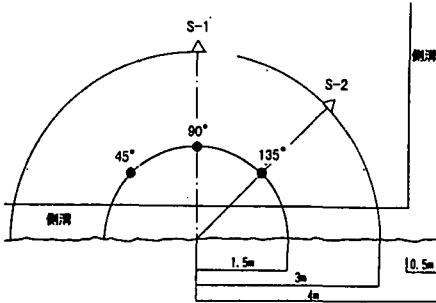


図-2.13 マイントピア反射音特性測定点

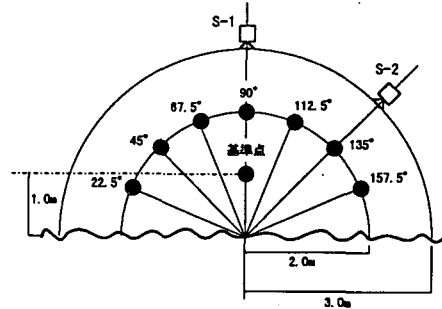


図-2.14 稲田採石場の反射音特定測定点

(マイントピア) 図-2.15に示した岩盤側壁の反射率をみると、壁正面から入射するパルスに対しては45°～135°の反射特性に大きな差はなく、800～1kHz付近で反射音にレベル差がある。135°斜め入射の条件では45°の反射方向に800Hz前後に大きな差がみられる。

(稲田採石場) 図-2.16のA,B,C3タイプの壁面における反射特性は音源を90°正面から入射し、受信点も90°基準点位置で測定した。各タイプともに同一壁面で場所を約2m間隔で3ポイント移動して調査した。この結果を比較すると以下のことがいえる。

- ① Aタイプは岩盤の割れ目に沿って割った状態で、凹凸が激しい。このため、正面への反射特性も位置によってバラツキが大きく、壁面の凹凸の影響がでている。
- ② Bタイプは75mmと65mmのスロットドリルを交互に使用して垂直穴をあけて割った状態で、3タイプの中で一番平面に近い。反射特性は位置の違いによる差が少なく、高音域でわずかにバラツキがある。
- ③ Cタイプは75mmのスロットドリルの間隔が400ピッチ程度あり凹凸はA,Bの中間である。反射特性も中音域以上でバラツキがあり、4kHz付近が特に大きい。

図-2.17に示した壁面AとBの正面入射に対する水平面内の22.5°～157.5°の反射特性を比較してもBタイプは全方向に安定した反射音を返している。

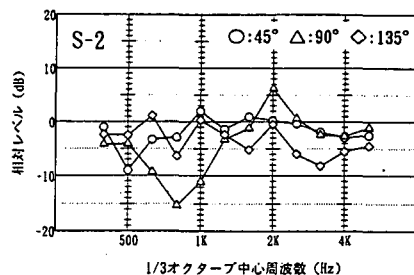
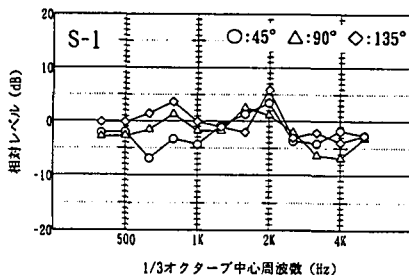


図-2.15 マイントピア岩盤面反射率

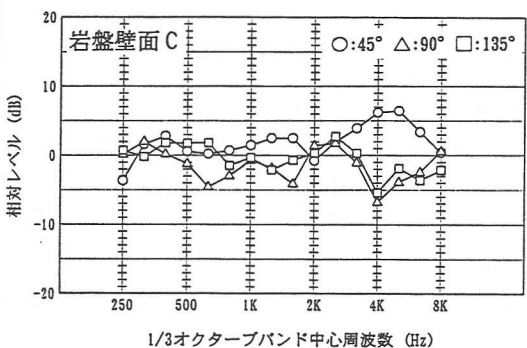
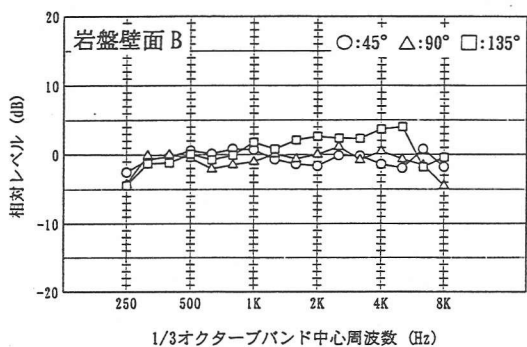
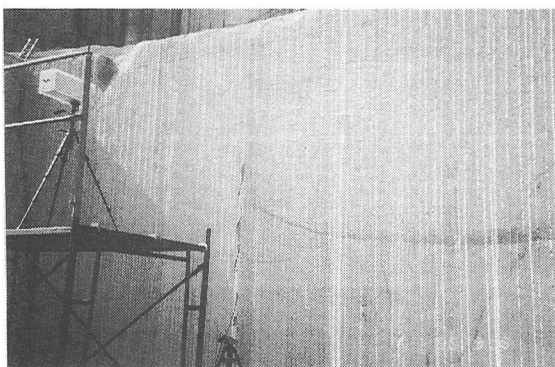
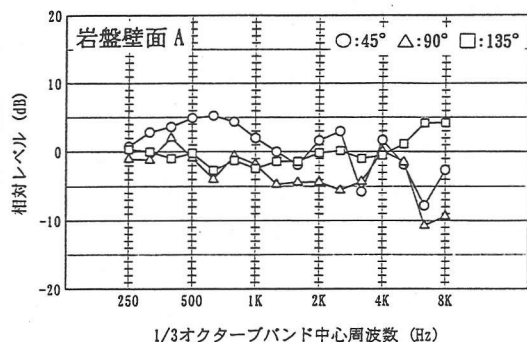
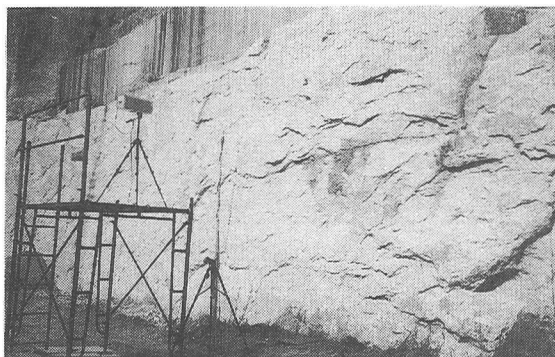


図-2.16 稲田採石場 ABC 壁面の 90° 入射による反射音特性

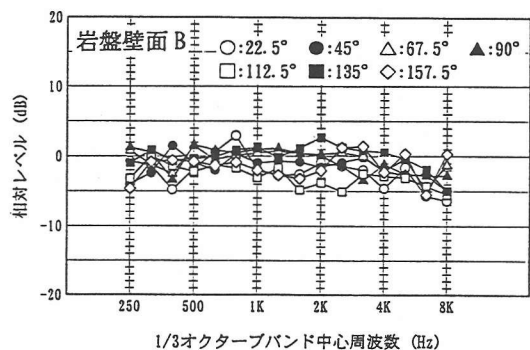
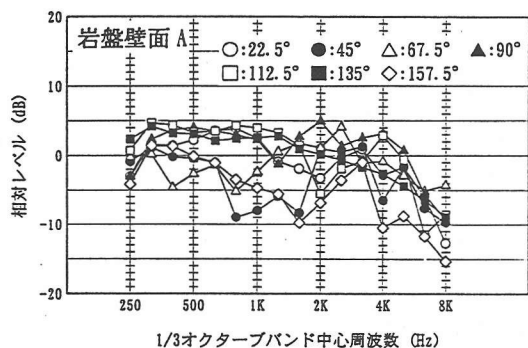


図-2.17 稲田採石場 A、B 壁面の正面入射による 22.5~157.5° の受音点における反射音特性

(5) 響きの試聴結果

岩盤空間内の響きについて

釜石鉱山の白色石灰岩採掘跡地のマールホルの視察の機会があり、岩盤内での響きを聴く貴重な体験をした。その際の音響印象はまず第一に、今まで経験したことがないほどの静けさであった。音楽を聴くことはできなかったが、手をたたいたり話声などから判断すると、伸びのある細やかな響きで、中高音域に透明感があり神秘的な音響特性であった。低音の残響は長いがこもった感じはなかった。

岩盤壁面の反射音について

稲田碎石場の反射特性調査は屋外のためにその他の反射音が少なく、岩盤からの反射音をうまく分離して聴くことができた。図-2.16 に示した壁面 A、B、C の反射音は以下のような興味深い違いを感じた。

- ① 壁面 A の反射音は暖かくて、伸びがあり、やわらかくて豊かな響であり、高音域と低音域とのバランスがとれている。
- ② 壁面 B の反射音は固くてしまった響きで、冷たさや、静けさを感じさせる。また、音のディテールを良く伝える。
- ③ 壁面 C は反射音は固くてしまった響きで、音のディテールも良く伝えるが、B のような冷たさや静けさは感じられなかった。

3. 岩盤ホルの音響計画

今回調査した鉱山地下空間や坑道などの岩盤空間内における反射音、残響時間、距離減衰などの主要な音響特性や響きの試聴結果からコンサートホルの音響計画について以下に記述する。

3.1 音響計画について

岩盤を露出したままの空間は神秘的で伸びのある細やかな響きである。残響は全体的に長く、中高音域の響きに透明感があり現存するホルの響きと違う特徴をもっている。音響計画ではこの特徴を生かしたホルの響きを実現することが重要なポイントとなる。この響きにあったジャンルの音楽を演奏することになるが、クラシックコンサートに最適なホル音響に可変して使えるようにすることが必要である。また、地下空間の公共性のために多目的な利用が必要とされ、このための可変も考える必要がある。

3.2 形状の考え方

地下空間は断面がドーム形状になる場合が多い。今回の調査対象になった空間は比較的容積が小さく、天井ドーム形状の曲率も小さいために低音の響きに悪影響は出ていなかったが、大空間となると構造上の安定性を考えてドームの曲率が大きくなるので、音の集中やフラッタエコーなどの音響障害に注意が必要である。音響障害をふせぎ、低音を吸音するために天井は幕かボード仕上として形状を設計する。

3.3 岩盤壁面の処理

上述したように天井は岩盤以外の仕上になるため、壁の大部分を岩盤壁面で計画してホルの音響に特徴を持たせることになる。パターン A、B、C の岩盤壁面の反射特性調査と試聴結果は岩盤壁面の掘削形状を工夫することで響きを造ることができることを示唆しており、音響設計の自由度が増したと考えている。

3.4 残響時間の設計

岩盤空間は、天井で低音を調整し、中高音は椅子と岩盤壁面にて調整することがポイントである。残響可変は天井を昇降式の容積可変方式を採用して、多目的利用に対応する。残響が長めの特性になるので、舞台床は木製として楽器の音色を際立たせる納まりを考え、明瞭性をあげる設計をする。

4. あとがき

新しい岩盤ホルの音響計画の基礎資料とするために、地下空間の音響について調査し、岩盤内の響きや反射音を試聴した結果をまとめた。また、岩盤壁面の反射音特性の比較とその試聴により、表面形状の違いによる響きの差を明らかにした。このことは、形状の違う岩盤壁面を用いてホルの響きを造ることができることを示唆しており、今後の設計に自由度を与えることになった。

5. 参考文献

- 1) 山口昌一、中川 悟：北欧地下ホールの音響特性、 日本音響学会建築音響研究会資料 AA93-12
- 2) 赤尾伸一、安岡博人、岩本毅
：神岡における岩盤地下空洞の音響特性、 日本音響学会建築音響研究会資料 AA93-11
- 3) 滑裕美、堤文子、中川 博 他：釜石鉾山（マーブルホール）の音響特性、
日本音響学会建築音響研究会資料 AA93-13