

# 諸外国における地下大空洞

## Large Rock Caverns in Foreign Countries

山地宏志 (やまち ひろし)

三井建設(株)技術研究所

芥川真一 (あくたがわ しんいち)

神戸大学助教授 工学部建設工学科

### 1. はじめに

ことさらに意匠に配慮することはなくとも、構造的に安定な土木構造物には格別な美しさがある。中でも地下大空洞が持つ圧倒的な迫力と、不思議な心理空間は独特で、土木構造物の白眉と呼ぶに足るものがある。本稿はこのような魅力あふれる世界の地下大空洞を紹介し、そのメカニズムの一端に触れていただこうとするものである。ところが、地下大空洞という用語自体明確な定義が与えられておらず、読者によって思い浮かべるイメージは様々であろう。以下では、数万 m<sup>3</sup> 以上の容積を持つ単一空洞で断面積が500~1 000 m<sup>2</sup> 以上の空洞を地下大空洞と呼ぶことにする。

### 2. 土木構造物における地下大空洞

土木構造物において地下大空洞はどのような位置付けにあるのだろうか。表一は種々の土地下構造物を利用形態ごとに筆者らが整理したものである。当然のことながら、構造物の地下立地は地表に比べ建設コストの面で大きく劣るため、これを許容するだけのメリットが要求される。このような地下立地のメリットを遮蔽、耐圧、立地、遮音、恒温、ならびに隔離の六つに分類し、既存地下構造物とこれらの特性との相関を評価した。

表一 地下空洞利用形態の分類

分野	用途	施設	代表事例 名称	地下の特性					
				遮蔽性	耐圧性	立地性	遮音性	恒温性	隔離性
エネルギー	発電所	地下揚水発電所	マウンホフ地下揚水発電所	○	○	○	○	○	○
		地下原子力発電所	ジョス地下原子力発電所	○	○	○	○	○	○
		地下水力発電所	チリ地下発電所	○	○	○	○	○	○
	貯蔵施設	圧縮空気貯蔵	アムル空気が貯蔵ガスタービン発電所	○	○	○	○	○	○
		高圧ガス貯蔵	クレンゲスベルク貯蔵実験場	○	○	○	○	○	○
		LNG地中タンク	ソトワツLNG地中タンク	○	○	○	○	○	○
		石油貯蔵	Sutro Terminal	○	○	○	○	○	○
処分場	石炭貯蔵	フェルチン石炭貯蔵所	○	○	○	○	○	○	
	放射性廃棄物処分場	アラウソハイク	○	○	○	○	○	○	
インフラ	工場	砕石工場	ケミ砕石工場	○	○	○	○	○	○
		組立工場	ハレマツ組立工場	○	○	○	○	○	○
		造船ドック		○	○	○	○	○	○
	生活関連施設	アイスクリム工場		○	○	○	○	○	○
		上水道処理施設	オセト上水道処理施設	○	○	○	○	○	○
		下水処理場	ヘリックスタール地下下水処理場	○	○	○	○	○	○
		ゴミ処理場	ストックホルムゴミ処理場	○	○	○	○	○	○
	貯蔵施設	駐車場	モフラン駐車場	○	○	○	○	○	○
		冷凍貯蔵庫	ヘルグア冷凍岩盤貯蔵庫	○	○	○	○	○	○
		産業廃棄物貯蔵	オガ産業廃棄物貯蔵庫	○	○	○	○	○	○
アメニティ	文化施設	養魚庫	クレヒストウエスト・アンダーグラウンド	○	○	○	○	○	○
		精製貯蔵	Stavanger 精製貯蔵庫	○	○	○	○	○	○
		宗教施設	ヘンゲル教会地下聖堂	○	○	○	○	○	○
	スポーツ施設	研究施設	フィンランド技術センター(VIT)	○	○	○	○	○	○
		地下展示場	レドレイアートセンター	○	○	○	○	○	○
軍事	地下シェルター	コンサートホール	ヘルマド・ホール	○	○	○	○	○	○
		アイスホッケー場	ウァリスオアイスホッケー場	○	○	○	○	○	○
		プール	オーヒック・スイミング・プール	○	○	○	○	○	○
		スポーツセンター	ヘルムリ地下スポーツセンター	○	○	○	○	○	○
			クラウ教会地下シェルター	○	○	○	○	○	○

遮蔽性：石油備蓄のように貯蔵物質の漏出を周辺岩盤で遮蔽する特性をさす  
 耐圧性：地下大空洞を形成し得る岩盤強度、もしくは巨大な貯蔵圧を指示し得る岩盤強度をさす  
 立地性：地下立地による地表面の有効利用や景観保護等の利点をさす  
 遮音性：静穏な空間雰囲気を利用し得る利点をさす  
 恒温性：周辺岩盤の巨大な熱容量により一定温度が保持される特性をさす  
 隔離性：有害物質を人間の生活圏より隔離することの利点をさす

例えば、地下下水処理場や冷凍貯蔵庫などは地下の持つ恒温性を利用した構造物であり、1年を通して恒常な温度雰囲気維持されることで、エアレーションや冷凍の効率が向上し、ランニングコストが大きく低減される。また、廃棄物処分場等はその遮蔽・隔離性を利用したものであり、有害物を人間の生活圏から隔離・遮蔽することで、信頼性の高い生活環境が維持される。さらに、レドレイ・アート・センター等の文化施設ではこれらのメリットに加え、地下の特異な雰囲気が信仰や芸術の場に調和し、効果的な空間が演出されたとも言えよう。

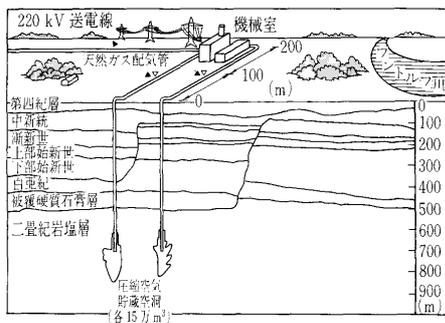
地下大空洞も、このような地下の特性を生かした構造物の一つととらえることができる。すなわち、空洞周辺岩盤のアーチアクションを有効に利用することにより、数万 m<sup>3</sup> 以上の無柱で単一な空間を構築することが可能となり、しかも耐震性を見た場合、地下空間は最も耐震性に優れた構造物の一つである。

筆者らは、表一中でこのような地下の特性を耐圧性という用語で表した。表で見ると、この耐圧性が要求される地下構造物は主としてエネルギー関連施設の発電所や貯蔵施設に限定されている。さらに、発電所空洞と貯蔵空洞の間では、その使用目的によって形状や寸法が若干異なっているようである。すなわち、発電所空洞では、そこで発電機を組み立て、これを収めるだけの断面積が必要とされるのに対し、貯蔵空洞では貯蔵容量が確保されればよいために、空洞断面積を小さくし、空洞延長を長くすることが一般的であるようだ。例えば、フィンランドのボルボ精油所備蓄空洞はその延長が2 190 mにも達する(幅18 m、高さ32 m)<sup>1)</sup>。

一方、貯蔵空洞に関しては必ずしも地下大空洞を必要としないこともある。例えば、現存するCAES (Compressed Air Energy Storage System) の貯蔵空洞はいずれも図一に示すように、地表から岩塩層中にうがったボーリング孔より高圧水を噴出し、岩塩を溶解し、溶解した塩水を回収して地下大空洞を構築するソリューション・マイニング工法が採用され、安価な施工を可能としている<sup>2)</sup>。しかし、このような岩塩層を探すことの困難な我が国では、現在、直径6 mの円形坑道形式の貯蔵空洞が計画されている<sup>3)</sup>。これは、貯蔵空洞を大空洞とするまでもなく、坑道形式で必要な貯蔵容量が確保され、しかも経済的できえあるためである。

結局、単一で大断面・大容量の地下空洞が必要とされる土木構造物は地下発電所空洞や地下石油備蓄基地等に限定されるのが実状であり、その規模は断面積800 m<sup>2</sup>

事例報告



図一 1 フントルフ圧縮空気貯蔵発電所空洞の模式図<sup>3)</sup>

程度、空洞容積50万 m<sup>3</sup> 程度を上限とするようである<sup>4)</sup>。ところが、対象範囲を土木分野から鉱山分野まで広げ、世界的に見れば、土木空洞では及びもつかないような規模の空洞を見つけることができる。以下では、このような鉱山の地下大空洞を主として紹介したい。

3. 鉱山地下大空洞の世界

鉱山において地下大空洞が形成されるには、それに匹敵する規模の鉱脈が、商業的に採算の取れる品位で存在する必要がある。土木技術者にとってはこのような巨大鉱脈の存在自体が信じがたいかもしれない。しかし、我が国でも地下発電所相当の鉱山大空洞は存在する。表一2は、代表的な地下発電所空洞と神岡鉱山柵洞坑内にある#9\_30号鉱床採掘跡とを示したものである<sup>5)</sup>。表に示すように柵洞坑#9\_30号鉱床採掘跡の容積35万 m<sup>3</sup> は現存する日本最大の新高瀬発電所空洞を大きく凌駕し、世界屈指のチラタ発電所空洞にはほぼ匹敵しており、鉱山地下大空洞の巨大さが知れよう。

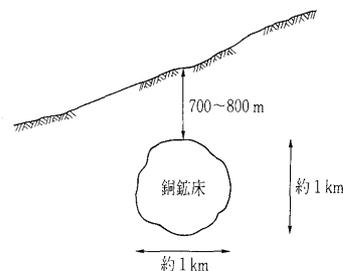
ところが海外では、これを越え、呆れるほど巨大な鉱床が存在する。筆者らの1人がかつて携わったチリのエル・テニエンテ鉱山には最大直径1 000 m、高さ1 000 mの巨大鉱床が球状で図一2のように存在する。もし、これをすべて掘り尽くすならば、その跡には5 000万 m<sup>3</sup> を越える超巨大空洞が現出することとなる。もっとも採掘過程における埋戻しや地表面陥没によって実際に形成される空洞規模は数百万 m<sup>3</sup> にとどまるのだが、それでも地下発電所空洞よりも1 オーダー以上大きい。

1991年度時点では鉱床上部を2工区に分け採掘が進められているが、既に多くの岩盤力学上の問題が発生しており、特に山はねの問題は深刻とされている。我が国でも幾つかの金属鉱山や新幹線トンネルなどで山はねの事例が紹介されている<sup>6)</sup>が、その規模は畳1枚程度の岩片の剝離に収まっている。しかしながら、当該のエル・テニエンテ鉱山で発生した山はねは数百 m<sup>2</sup> 範囲の岩塊が一気に跳ね上がるすさまじさで、山はねによる人的・物的被害は甚大なものとなっている。

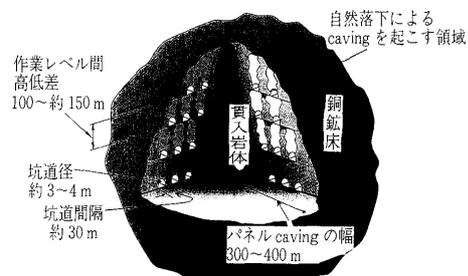
現在の掘削レベルは1 000 m以上の潜在的な土被り荷重を受け、岩質は硬健で、しかも割れ目が少ない。したがって、岩盤には巨大なエネルギーが蓄積されているものと推測され、山はねの発生は不可避なものと考えざるを得ない。このような場合、蓄積エネルギーを少しずつ逸

表一 2 代表的な現存地下空洞規模の比較

発電所名	総出力 ×千 kW	空洞形状	掘削量 m <sup>3</sup>	高さ m	幅 m	長さ m	土被り m
新高瀬川発電所	1 280	きのこ型	211 700	54.5	27.0	165.0	250.0
今市発電所	1 050	卵型	197 400	51.0	33.5	160.0	400.0
チラタ発電所	1 000	卵型	320 000	49.5	35.0	253.0	108.0
柵洞坑#9_30号鉱床採掘跡	—	楕円形	350 000	100.0	25.0	150.0	240.0



(a) エル・テニエンテ銅床位置模式図



(b) エル・テニエンテにおける採掘状況模式図

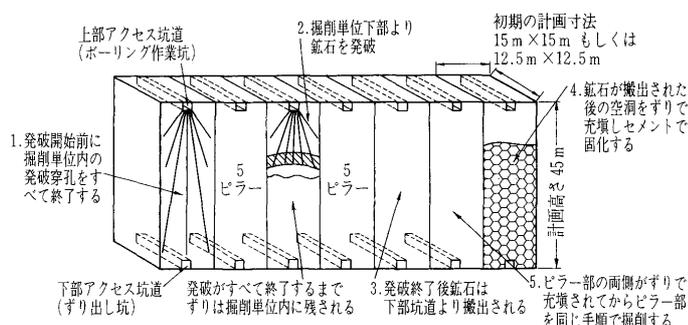
図一 2 エル・テニエンテにおける採掘状況模式図

散させることで山はねの発生を防ぐ、もしくはロックボルトやPS アンカー等によって山はねを拘束するなどの対策が考えられよう。しかしながら、現在のところ蓄積エネルギーを制御し得る工法は存在し得ず、またこのように巨大なエネルギーがロックボルト等の打設によって抑止されるとは考えがたい(実際、抑止されなかったのだが)。結局、唯一可能な対抗手段はこれを事前に予知し、避難することだけである。現在は予知手段としてAE測定等が用いられているが、AE事象の発生が必ずしも山はねの発生を示すものではなく、さらなる研究が望まれている。なお、南アフリカのウェストドリーフォンテン鉱山では、山はねのメカニズムを解明することで、地震予知につなげようとする研究が日本と南アフリカの共同チームで実施されている<sup>7)</sup>。この研究においてもAE測定は重要な測定項目として挙げられているようだ。

このような事例は、高レベル廃棄物処分等の超大深度開発において、今後、我々が出会うであろう大規模山はねに有用な知見を与えてくれよう。

4. 鉱山における地下大空洞施工

このように、鉱山の地下空洞は土木空洞では及びもつかない規模となることがあり、自ずとその施工法も異なってくる。ここでは、その一つとして Choke Mass Blast Caving を紹介しよう。この工法は、比較的知られ



図—3 Choke Mass Blast Caving の模式図 (文献8) による)

た採鉱方法であるルーム・アンド・ピラー工法を拡張したものであり、大規模なルーム・アンド・ピラーを効率よく形成するためステージ・ブラスティングを積極的に採用した点に特徴がある。図—3は南アフリカのCarolusberg 鉱山の Choke Mass Blast Caving の概要を示したものである<sup>8)</sup>。この事例では幅15 m×長さ15 mのエリアを一つの採掘単位とし、この採掘エリアを一つ置きに採掘している。ここでは、鉱体の深さ45 mまでを掘り進むものとしているから、一つの採掘単位の断面積は675 m<sup>2</sup>、また掘削体積は約1万 m<sup>3</sup>となる。

掘削方法も特徴的で、以下のような手順で施工される。まず採掘単位上部に設けられたアクセストンネルより発破孔を採掘単位全域に削孔し、ついで採掘単位下方から順にステージ・ブラスティングにより破碎して行く。破碎された鉱石は採掘単位底部に設けられた搬出トンネルより順次搬出され、一つの空洞が形成される。このようにして、ルーム部の掘削がすべて終了すると、そのルーム部に掘削した土砂(金属鉱山では鉱石以外の掘削された岩塊を硬さにかかわらず‘土砂’と呼ぶ)をセメントで固化しながら充填し、新たな人工ピラーを形成した後、掘削し残したピラー部の掘削を開始する。もちろん、実際の採掘工程は空間と時間的な広がりの中で複雑な様相を呈する。

結局、このルーム・アンド・ピラー工法では単一空洞規模が採掘単位に限定されてしまい、地下大空洞と呼ぶにはいささか難しいかもしれないが、その安定メカニズムや施工方法には多くの知見を与えてくれるものと思われる。土木技術者のセンスからすれば、採掘単位形状を直方体とした場合、1 000 m<sup>2</sup>を越える平坦で鉛直な壁が形成され、空洞壁面の安定性が著しく懸念され、採掘単位形状を円筒形とすることを考えるだろう。これは掘削時の二次応力によるアーチ・アクションを期待し、空洞壁面の安定性を確保しようとするものであるが、鉱山技術者の立場からは必ずしもうなずけるものではなかろう。すなわち、彼らの目的は存在する鉱脈を無駄無く、効率的に採掘することにあり、地下空洞の安定性を確保することに有るのではない。したがって、多少の空洞壁面崩落等は人的災害につながらず、採鉱の支障にならない限り許容されてしかるべきものである。

しかし、その根源的な工学的発想は土木分野においても有用であり、その類似の事例を土木構造物の中に見つ

けることもできる。例えば、大規模地下発電所では空洞中央部にしばしばロック・ストラットを設けることが多い。このロック・ストラット工法の原理は、ルーム・アンド・ピラー工法とほぼ共通の発想に起因する。また、今後の地下空洞施工の省力化・自動化を考えて行く上でステージ・ブラスティングによる掘削工法は一つの方向性を与えてくれるものであると思われる。事実、小規模なステージ・ブラスティングは土木分野でも大深度立坑で急速施工を目的として実施されている。

なお、筆者らの1人がかつて訪れたオーストラリアのマウント・アイサ鉱山では、幅40 m×長さ40 mのエリアを一つの採掘単位とした Choke Mass Blast Caving が深さ150~200 mの範囲で行われていた。この採掘単位は断面積が8 000 m<sup>2</sup>にも達し、空洞容積は30万 m<sup>3</sup>を越える。これは世界最大級のチラタ発電所に匹敵する空洞容積であるが、同鉱山ではこのような採掘単位が同時に数十個存在すると言う。

このほかにも、鉱山技術にはサブ・レベル・ストーピングや、Vertical Crater Retreat 等の大空洞施工法があり、我々土木技術者に新たな知見を与えてくれよう。これらの詳細は文献8)等にあたられたい。

## 5. おわりに

今回は諸外国における鉱山地下大空洞を主として紹介した。大空洞という制限があったためにまだまだ言及したい鉱山技術も数多く、また大空洞技術に関してもほんのわずかな事例に触れたのとどまった。この小文が土木技術者の皆様に鉱山技術への興味を誘ったならば幸いである。

最後に、本文を執筆するに当たり種々の御助力を賜りました、神戸大学桜井春輔教授、神岡鉱業(株)藤井伸一郎氏、飛鳥建設(株)筒井雅行氏の各位に深甚のお礼を述べ本小論の結びとさせていただきます。

## 参考文献

- 1) 建設省土木研究所：地下空間利用の現状に関する調査報告書，土木研究所資料，1989。
- 2) Pressen Electra Aktiengesellschaft: Luftspeicher-Gasturbinenkraftwerk Huntorf (フントルフ圧縮空気発電所のパンフレット)，1964。
- 3) 石畑 徹：CAES-G/T 発電パイロットプラントの現況，第7回圧縮空気エネルギー貯蔵発電セミナー—CAES-G/T 発電の研究動向と地下空洞開発技術—，(財)新エネルギー財団編，pp. 71~88，1997。
- 4) 伊藤 滋ほか：「地下空間」利用ガイドブック，(財)エンジニアリング振興協会，地下開発利用研究センター，ガイドブック研究会編，1994。
- 5) 山縣 守ほか：岩盤構造物の設計法に関する研究報告書，地盤工学会岩盤構造物の設計法に関する研究委員会編，1997。
- 6) 宮崎政三・高橋彦治：土质地質学，共立出版，pp. 371~372，1970。
- 7) 長 秋雄：南アフリカ鉱山における地震観測，岩の力学ニュース，岩の力学連合会編，No. 44，pp. 3~6，1997。
- 8) Ferguson, G. A.: Caving Geomechanics, Comprehensive Rock Engineering, edited by J. A. Hadson, Vol. 5, pp. 359~392, 1996。

(原稿受理 1998.2.26)