

地下空間展示施設の空調エネルギーのコスト検討 —高山祭りミュージアムの調査事例—

Study on the air-conditioning energy cost of underground exhibition space
- Case of Takayama Matsuri museum -

河野 俊樹¹・近久 博志²・小林 薫²・二木 龍一郎⁴

Toshiki KOHNO・Hiroshi CHIKAHISA・Kaoru KOBAYASHI・Ryuichiro NIKI

An underground rock cavern as an architectural space has many advantages. Especially, the underground space has the character of the constant thermal environment, because the temperature and humidity are steady. Therefore, it is thought that the air-conditioning energy can be decreased.

In this paper, the air-conditioning energy costs of an underground rock cavern and the building were compared. The target of underground rock cavern is "Takayama Matsuri Museum". The air-conditioning energy cost of Takayama Matsuri Museum is about 50% compared to the same usage building. From the result, one of the advantages of an underground rock cavern was able to be confirmed.

Key Word : underground rock cavern, air-conditioning energy costs, Takayama Matsuri Museum

1. はじめに

国土の約7割を山間部で占められているわが国において、地下空洞構造物の活用は国土の有効利用や自然環境の保全などの観点から非常に有効である。特に、不特定多数の利用者が常時入場する文化・スポーツ施設などの建築構造物としての岩盤地下空洞の計画・建設^{1),2)}が近年積極的に進められようとしている。建築空間としての岩盤地下空洞は、防災上の利点の他、地上建築物に比べその遮蔽性からもたらされる遮音・遮熱等の負荷低減効果が高く、内部空間の環境維持に多くのメリットを持っている。特に遮熱効果による恒温・恒湿性は、一定の温熱環境を維持するために非常に有効であるとともに、環境維持に要するエネルギーの低減効果(省エネルギー)も考えられる。

本稿では、岩盤地下空洞を建築構造物(地下空間施設)として利用する際の重要な検討課題として、上記のエネルギー低減効果に着目し、岩盤地下空洞展示施設である「高山祭りミュージアム」を対象に、消費エネルギーの多くの割合を占める空調エネルギーについて地上構造物と比較した場合のコスト比較を行い、建築構造物としての地下空間利用施設の有効性を検証したので、その結果について報告する。

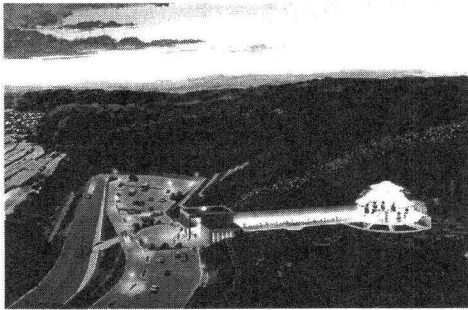
2. 高山祭りミュージアムの概要

高山祭りミュージアム^{3),4)}は、不特定多数の一般の人が入ることができる我が国初の大規模な岩盤地下空洞展示施設である。この施設が建設された高山市は、京都の祇園祭りや秩父の夜祭りとともに”日本三大美祭り”の一つとして知られている高山祭りが有名な町である。高山祭りミュージアムは、この高山祭りで使われる祭り屋台(山車)のうち、平成に入って制作された屋台を中心とする工芸品を収める展示館を、高山の美しい自然や景観などの保全をできる限り心掛けた建物にしたいという

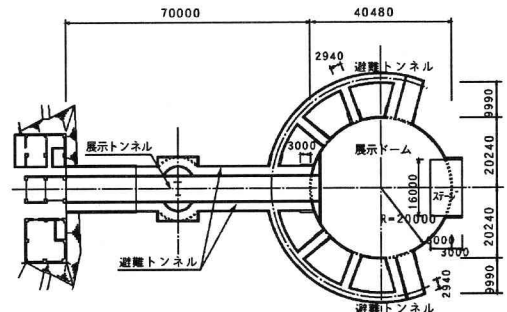
キーワード：岩盤地下空洞、空調エネルギーコスト、高山祭りミュージアム

- 1 飛鳥建設株式会社 防災R&Dセンター 技術研究所
- 2 正会員 飛鳥建設株式会社 防災R&Dセンター 技術研究所
- 3 飛鳥建設株式会社 名古屋支店 建築部

考えから、岩盤空洞を利用した地下式ミュージアムとして計画された（図－１）。この施設は、図－２のように地表部の管理施設、地表から水平に入る７０ｍのトンネル状の展示空間（以後、展示トンネルと呼ぶ）、直径４０．５ｍのドーム状の展示空間（以後、展示ドームと呼ぶ）および周辺の避難坑からなっている。



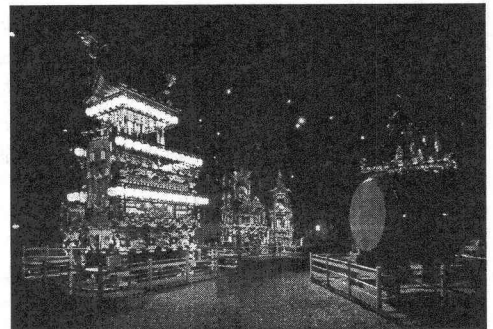
図－１ 高山祭りミュージアムのイメージ図



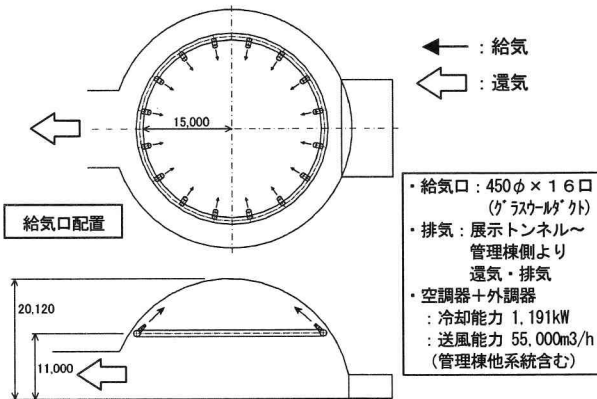
図－２ 高山祭りミュージアムの平面図

３．高山祭りミュージアムの空調計画

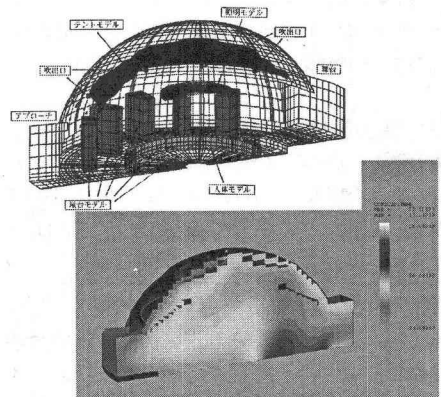
高山祭りミュージアムは、展示施設として計画された地下空間構造物であるが、大きな特長として、中心となる展示物である屋台を展示ケースなどの遮蔽物で隔てることなく施設内に設置することが当初から計画されていた（写真－１）。そのため、空調計画立案にあたっては、屋台に対しての保存環境と入場者に対しての居住環境を如何に地下空間の環境特性に合わせて両立させるかが大きな課題であったが、最終的には、屋台の保存施設としての機能維持を計画コンセプトの柱とし、屋台に使われる木材や漆の防腐・劣化防止に適した相対湿度 $60 \pm 5\%$ 維持を目標とした空調設計を行っている。また、空調計画にあたっては、温湿度の制御と合わせて展示物に過度の空調吹き出し気流が当たらない、入場者へ不快なドラフトを与えないなどの配慮が必要になる。高山祭りミュージアムでは、前述のように相対湿度を適正に保つことを前提とした空調運転を目的としておりと同時に、岩盤空洞が持つ自然の恒温・恒湿性を空調制御に活かし、エネルギー消費量の削減を図るため、温度設定に関しては非空調時の岩盤空洞内温度に近い 13°C を設定温度とし、湿度コントロール可能な風量から給気口配置・吹き出し風速を決定している。図－３に空調設備の概略を示す。なお、給気口配置の検討に当たっては、気流シミュレーション（３次元熱流体解析）を実施し、気流分布の形成について検証を行うとともに、竣工後の温湿度実測調査により、ほぼ均一な温度分布の形成等、適正な温湿度制御が実施されていることを確認している。図－４に気流シミュレーションの実施結果を、図－５および図－６に実測による温度測定結果を示す。



写真－１ 展示ドーム内の展示物



図－３ 空調設備の概略



図－４ 気流シミュレーション実施結果

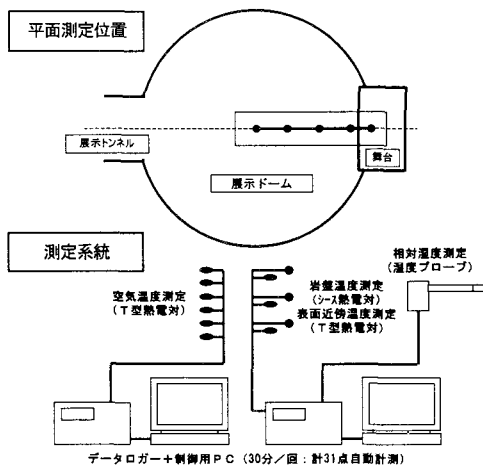


図-5 空気温度分布実測概略

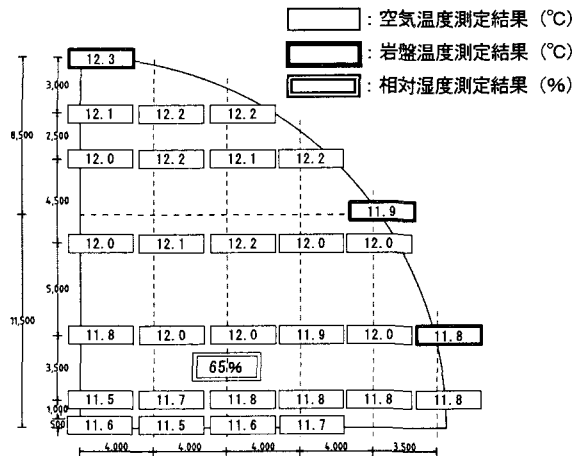


図-6 空気温度分布実測結果（垂直分布）

4. 空調エネルギーコストの算定

(1) コスト算定条件

空調エネルギーコストの算定に当たっては、人体負荷、照明負荷等、高山祭りミュージアムの単年度の稼働実績をもとに空調熱負荷を試算し、エネルギーコストへの換算を行った。さらに、比較のために高山祭りミュージアムと同等規模の地上建物を想定し、同様に空調エネルギーコストを算定した。表-1に算定に用いた高山祭りミュージアムの規模を、表-2に空調熱負荷の負荷算定条件を示す。ここで、人体負荷算定に関わる入館人員の設定値については、高山祭りミュージアムの年間入場者数を基にした1日当たりの平均入場者数（約700名）から、その50%（350名）を入館者数と想定した。

表-1 高山祭りミュージアムの規模

	展示ドーム	展示トンネル	計
延床面積	1,309 m ²	621 m ²	1,930 m ²
体積	16,747 m ³	4,460 m ³	21,207 m ³
表面積	3,768 m ²	2,440 m ²	6,208 m ²
室内最高高さ	20 m	8 m	

表-2 空調熱負荷算定条件

	①高山祭りミュージアム	②同等規模想定地上建物	備考
外気負荷	-51,051 ~ 75,075 W	12,243 ~ 75,075 W	表-4参照、表-5参照
外壁負荷	0 W	20,673 ~ 97,559 W	①は地中壁からの熱浸入なし
総空調熱負荷	20,249 ~ 146,375 W	32,916 ~ 243,934 W	表-4参照、表-5参照
開館時間対応運転	8 h/日	8 h/日	
開館前後外部負荷対応運転	0 h/日	2 h/日	①は開館時間前後は外壁負荷が低いため空調運転不要
夜間外部低負荷対応運転	0 h/日	2 h/日	②は夜間も外壁負荷が高いため空調運転を要す
立上げ運転・残置運転	2 h/日	2 h/日	

(2) コスト算定結果

高山祭りミュージアムと想定した地上建物の空調熱負荷試算結果と空調エネルギーコスト（年間当たりの総空調エネルギー使用料からもめた電力量料金）の比較結果を表-3に、各々の月別値を表-4および表-5に示す。

今回用いた稼働実績から求めた単年度の年間空調エネルギーコストを比較すると、岩盤地下空洞を利用した地下空間利用展示施設の空調エネルギーコストは、同規模の地上建物と比べ、約40%程度で済むとの算定結果となった。

表-3 空調エネルギーコスト比較結果

	年間総空調エネルギー使用量	年間電力量料金 (基本料金を除く)
① 高山祭りミュージアム	391,258 kWh/年	3,707,000 円/年
② 同等規模想定地上建物	1,008,807 kWh/年	9,523,000 円/年
差 (①-②)	-617,549 kWh/年	-5,816,000 円/年
率 (①÷②)		0.39

表-4 空調エネルギーコスト算定結果(高山祭りミュージアム)

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月
屋外条件	平均気温	℃	-1.6	-1.3	2.5	9.3	14.7	19.1	22.7
屋外条件	最高気温	℃	3.0	3.6	8.5	16.5	21.9	25.2	28.7
屋外条件	最低気温	℃	-5.5	-5.7	-2.5	2.9	8.4	14.3	18.5
屋外条件	相対湿度	%	81.1	77.9	72.9	68.3	69.0	75.1	78.1
屋外条件	絶対湿度	kg/kg	0.0027	0.0026	0.0033	0.0050	0.0071	0.0104	0.0136
屋外条件	比エンタルピー	kJ/kg	5.1	5.2	10.8	21.9	32.7	45.6	57.4
屋内条件	乾球温度	℃	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
屋内条件	相対湿度	%	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
屋内条件	絶対湿度	kg/kg	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056
屋内条件	比エンタルピー	kJ/kg	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2
冷暖房種別		冷房	冷房	冷房	冷房	冷房	冷房	冷房	冷房
在室人員	人	350	350	350	350	350	350	350	350
延床面積	m ²	1,930	1,930	1,930	1,930	1,930	1,930	1,930	1,930
外壁面積	m ²	6,208	6,208	6,208	6,208	6,208	6,208	6,208	6,208
実効温度差	℃	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
照明単位負荷	W/m ²	15	15	15	15	15	15	15	15
① 照明負荷	W	28,950	28,950	28,950	28,950	28,950	28,950	28,950	28,950
人体発生熱量 (顕熱SH)	W/人	93	93	93	93	93	93	93	93
人体発生熱量 (潜熱LH)	W/人	28	28	28	28	28	28	28	28
② 人員負荷 (顕熱SH)	W	32,550	32,550	32,550	32,550	32,550	32,550	32,550	32,550
③ 人員負荷 (潜熱LH)	W	9,800	9,800	9,800	9,800	9,800	9,800	9,800	9,800
1人当たりの外気導入量	m ³ /h・人	20	20	20	20	20	20	20	20
外気導入量	m ³ /h	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000
④ 外気負荷	W	-51,051	-50,820	-37,884	-12,243	12,705	42,504	69,762	75,075
外壁熱貫流率	W/m ² ・K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
⑤ 外壁負荷	W	0	0	0	0	0	0	0	0
総空調熱負荷 ((1)~(5))	W	20,249	20,480	33,416	59,057	84,005	113,804	141,062	146,375
1日運転時間	h/日	10	10	10	10	10	10	10	10
月間運転日数	日/月	31	28	31	30	31	30	31	31
月間運転時間	h/月	310	280	310	300	310	300	310	310
エネルギー効率		0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
総空調エネルギー使用量	kWh	8,967	8,192	14,799	25,310	37,202	48,773	62,470	64,823
電力量料金単価	円/kWh	9.16	9.16	9.16	9.16	9.16	9.16	9.85	9.85
電力量料金 (基本料金を除く)	円	82,000	75,000	136,000	232,000	341,000	447,000	615,000	639,000
		9月	10月	11月	12月	計	備考		
屋外条件	平均気温	℃	19.1	12.3	6.3	1.0	気象庁統計(1971~2000年)		
屋外条件	最高気温	℃	24.9	18.8	12.3	5.9	気象庁統計(1971~2000年)		
屋外条件	最低気温	℃	15.1	7.9	2.0	-2.7	気象庁統計(1971~2000年)		
屋外条件	相対湿度	%	80.0	80.6	80.9	82.4	気象庁統計(1971~2000年)		
屋外条件	絶対湿度	kg/kg	0.0111	0.0072	0.0048	0.0034	湿り空気線図より		
屋外条件	比エンタルピー	kJ/kg	47.3	30.5	18.4	9.5	湿り空気線図より		
屋内条件	乾球温度	℃	13.0	13.0	13.0	13.0	設計設定数値		
屋内条件	相対湿度	%	60.0	60.0	60.0	60.0	設計設定数値		
屋内条件	絶対湿度	kg/kg	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056	湿り空気線図より		
屋内条件	比エンタルピー	kJ/kg	27.2	27.2	27.2	27.2	湿り空気線図より		
冷暖房種別		冷房	冷房	冷房	冷房		通年冷房		
在室人員	人	350	350	350	350		概算実状値		
延床面積	m ²	1,930	1,930	1,930	1,930				
外壁面積	m ²	6,208	6,208	6,208	6,208				
実効温度差	℃	0.0	0.0	0.0	0.0		温度差なし		
照明単位負荷	W/m ²	15	15	15	15		概算実状値		
① 照明負荷	W	28,950	28,950	28,950	28,950	347,400	概算実状値		
人体発生熱量 (顕熱SH)	W/人	93	93	93	93		参考文献・5) より		
人体発生熱量 (潜熱LH)	W/人	28	28	28	28		参考文献・5) より		
② 人員負荷 (顕熱SH)	W	32,550	32,550	32,550	32,550	390,600			
③ 人員負荷 (潜熱LH)	W	9,800	9,800	9,800	9,800	117,600			
1人当たりの外気導入量	m ³ /h・人	20	20	20	20		建築基準法規定値		
外気導入量	m ³ /h	7,000	7,000	7,000	7,000				
④ 外気負荷	W	46,431	7,623	-20,328	-40,887	40,887	冬期は負荷軽減(負値)		
外壁熱貫流率	W/m ² ・K	0.00	0.00	0.00	0.00		地中壁からの熱浸入なし		
⑤ 外壁負荷	W	0	0	0	0	0			
総空調熱負荷 ((1)~(5))	W	117,731	78,923	50,972	30,413	896,487			
1日運転時間	h/日	10	10	10	10				
月間運転日数	日/月	30	31	30	31	365			
月間運転時間	h/月	300	310	300	310	3,650			
エネルギー効率		0.70	0.70	0.70	0.70				
総空調エネルギー使用量	kWh	50,456	34,952	21,845	13,469	391,258			
電力量料金単価	円/kWh	9.85	9.16	9.16	9.16		電力会社契約単価		
電力量料金 (基本料金を除く)	円	497,000	320,000	200,000	123,000	3,707,000			

表-5 空調エネルギーコスト算定結果 (同等規模想定地上建物)

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月
屋外条件	平均気温	℃	-1.6	-1.3	2.5	9.3	14.7	19.1	22.7
屋外条件	最高気温	℃	3.0	3.6	8.5	16.5	21.9	25.2	28.7
屋外条件	最低気温	℃	-5.5	-5.7	-2.5	2.9	8.4	14.3	18.5
屋外条件	相対湿度	%	81.1	77.9	72.9	68.3	69.0	75.1	78.1
屋外条件	絶対湿度	kg/kg	0.0027	0.0026	0.0033	0.0050	0.0071	0.0104	0.0136
屋外条件	比エンタルピー	kJ/kg	5.1	5.2	10.8	21.9	32.7	45.6	57.4
屋内条件	乾球温度	℃	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
屋内条件	相対湿度	%	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
屋内条件	絶対湿度	kg/kg	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056
屋内条件	比エンタルピー	kJ/kg	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2
冷暖房種別		暖房	暖房	暖房	暖房	冷房	冷房	冷房	冷房
在室人員	人	350	350	350	350	350	350	350	350
延床面積	m ²	1,930	1,930	1,930	1,930	1,930	1,930	1,930	1,930
外壁面積	m ²	6,208	6,208	6,208	6,208	6,208	6,208	6,208	6,208
実効温度差	℃	14.6	14.3	10.5	3.7	8.5	12.9	16.5	17.5
照明単位負荷	W/m ²	0	0	0	0	15	15	15	15
① 照明負荷	W	0	0	0	0	28,950	28,950	28,950	28,950
人体発生熱量 (顕熱SH)	W/人	0	0	0	0	93	93	93	93
人体発生熱量 (潜熱LH)	W/人	0	0	0	0	28	28	28	28
② 人員負荷 (顕熱SH)	W	0	0	0	0	32,550	32,550	32,550	32,550
③ 人員負荷 (潜熱LH)	W	0	0	0	0	9,800	9,800	9,800	9,800
1人当たりの外気導入量	m ³ /h・人	20	20	20	20	20	20	20	20
外気導入量	m ³ /h	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000
④ 外気負荷	W	51,051	50,820	37,884	12,243	12,705	42,504	69,762	75,075
外壁熱貫流率	W/m ² ・K	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
⑤ 外壁負荷	W	81,573	79,897	58,666	20,673	47,274	71,858	91,972	97,559
総空調熱負荷 (①~⑤)	W	132,624	130,717	96,550	32,916	131,279	185,662	233,034	243,934
1日運転時間	h/日	14	14	14	14	14	14	14	14
月間運転日数	日/月	31	28	31	30	31	30	31	31
月間運転時間	h/月	434	392	434	420	434	420	434	434
エネルギー効率		0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
総空調エネルギー使用量	kWh	82,227	73,202	59,861	19,750	81,393	111,397	144,481	151,239
電力量料金単価	円/kWh	9.16	9.16	9.16	9.16	9.16	9.16	9.85	9.85
電力量料金 (基本料金を除く)	円	753,000	671,000	548,000	181,000	746,000	1,020,000	1,423,000	1,490,000
		9月	10月	11月	12月	計	備考		
屋外条件	平均気温	℃	19.1	12.3	6.3	1.0	気象庁統計 (1971~2000年)		
屋外条件	最高気温	℃	24.9	18.8	12.3	5.9	気象庁統計 (1971~2000年)		
屋外条件	最低気温	℃	15.1	7.9	2.0	-2.7	気象庁統計 (1971~2000年)		
屋外条件	相対湿度	%	80.0	80.6	80.9	82.4	気象庁統計 (1971~2000年)		
屋外条件	絶対湿度	kg/kg	0.0111	0.0072	0.0048	0.0034	湿り空気線図より		
屋外条件	比エンタルピー	kJ/kg	47.3	30.5	18.4	9.5			
屋内条件	乾球温度	℃	13.0	13.0	13.0	13.0	設計設定数値		
屋内条件	相対湿度	%	60.0	60.0	60.0	60.0	設計設定数値		
屋内条件	絶対湿度	kg/kg	0.0056	0.0056	0.0056	0.0056	湿り空気線図より		
屋内条件	比エンタルピー	kJ/kg	27.2	27.2	27.2	27.2	湿り空気線図より		
冷暖房種別		冷房	冷房	暖房	暖房		外気温<室内温度 → 暖房 外気温>室内温度 → 冷房		
在室人員	人	350	350	350	350		概算実状値		
延床面積	m ²	1,930	1,930	1,930	1,930				
外壁面積	m ²	6,208	6,208	6,208	6,208				
実効温度差	℃	12.9	6.1	6.7	12.0		暖房時: 内外温度差		
照明単位負荷	W/m ²	15	15	0	0		概算実状値		
① 照明負荷	W	28,950	28,950	0	0	173,700	概算実状値・暖房時: 0		
人体発生熱量 (顕熱SH)	W/人	93	93	0	0		参考文献・5) より		
人体発生熱量 (潜熱LH)	W/人	28	28	0	0		参考文献・5) より		
② 人員負荷 (顕熱SH)	W	32,550	32,550	0	0	195,300	暖房時: 0		
③ 人員負荷 (潜熱LH)	W	9,800	9,800	0	0	58,800	暖房時: 0		
1人当たりの外気導入量	m ³ /h・人	20	20	20	20		建築基準法規定値		
外気導入量	m ³ /h	7,000	7,000	7,000	7,000				
④ 外気負荷	W	46,431	7,623	20,328	40,887	467,313			
外壁熱貫流率	W/m ² ・K	0.90	0.90	0.90	0.90		参考文献・6) より		
⑤ 外壁負荷	W	71,858	33,865	37,434	67,046	759,675			
総空調熱負荷 (①~⑤)	W	189,589	112,788	57,762	107,933	1,654,788			
1日運転時間	h/日	14	14	14	14				
月間運転日数	日/月	30	31	30	31	365			
月間運転時間	h/月	420	434	420	434	5,110			
エネルギー効率		0.70	0.70	0.70	0.70				
総空調エネルギー使用量	kWh	113,753	69,929	34,657	66,918	1,008,807			
電力量料金単価	円/kWh	9.85	9.16	9.16	9.16		電力会社契約単価		
電力量料金 (基本料金を除く)	円	1,120,000	641,000	317,000	613,000	9,523,000			

両者の差異の大きな要因としては、高山祭りミュージアムでは通常の居住空間と異なり、年間を通じて温度設定を13℃とした通年冷房運転を行っており、地上建物の場合には考慮すべき冬期外気負荷が冷房負荷の低減に利用できることや外気温・日射による熱取得である外壁負荷が発生しないことが挙げられる。さらに、外気温・日射による外壁の蓄熱の影響（外壁負荷）を受けないため、空調運転時間の短縮による電力使用量の削減にも有効であることも大きな利点である。人員負荷に関しては、通年冷房であるため、負荷の増加に繋がるが、外気負荷や外壁負荷低減効果に比べれば大きな影響にはならない。

高山祭りミュージアムを対象とした本検討は、特定用途の展示空間としての環境設定（室温13℃、相対湿度60%）を対象とした事例ではあるが、地下空間の特長である外壁（外郭）からの外気温・日射による熱貫流がなく、外壁からの取得熱負荷の影響を軽減できることを確認できたことは、建築構造物としての地下空間利用施設がエネルギー的にも十分有効であることを示していると考ええる。

5. おわりに

本稿では、岩盤地下空洞を利用するメリットとして恒温・恒湿性を活用した空調エネルギーコストの削減効果について報告した。建築構造物としての岩盤地下空洞には、このようなコスト削減に対してのメリットの他、防災効果、自然環境の保全、地上における立地難の解消効果、さらには地下の特殊環境がもたらす演出効果など様々な価値創造が期待できる。

反面、地上構造物で得られていたメリット（日射・大気などの受動的エネルギー利用、構造物自体の景観演出効果、外部空間との動線計画の自由度など）が利用できなくなる問題も生じる。しかしながら、国土の有効利用、環境保全の推進を今後より一層重視していかなければなくなるのは社会情勢からも明らかであり、地下空間利用のメリットを活かし今後もその実現に向けた取り組みを図っていくことが重要と考える。本稿での報告が参考事例としてその一助となれば幸いである。

謝辞：最後に本稿作成にあたり、貴重なデータ提供に快くご協力頂きました㈱飛騨庭石関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中剛：室蘭地下多目的アリーナ構想，地質と調査，第3号，pp.90-93，1993.
- 2) 近久博志，木村龍司，小林薫：岩盤の中に美術館を築く，NIKKEI ARCHITECTURE，pp.158-161，1995.
- 3) K.Nakada, H.Chikahisam, K.Kobayashi and S.Sakurai：Plan and Survey of an Underground Art Museum in Japan, Using a Large-Scale Rock Cavern, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol4-11, pp.16-23, 1996
- 4) 中田金太，近久博志，吉元洋，小林薫：国内初の岩盤地下美術館（高山祭り美術館の計画），トンネルと地下，Vol.27-3, pp.35-41，1996
- 5) 空気調和・衛生工学会編：空気調和・衛生工学便覧，第13版，3 空気調和設備設計篇，第5編第2章，pp.50，1995.
- 6) 空気調和・衛生工学会編：空気調和・衛生工学便覧，第13版，3 空気調和設備設計篇，第5編第2章，pp.34-36，1995.