

地下空間の形状評価における感性と力学解析の融合について

Shape design of underground space using human perception and rock mechanics approaches

今泉暁音*, 清水則一**, 櫻井春輔***

Akane IMAIZUMI, Norikazu SHIMIZU and Shunsuke SAKURAI

This paper discusses a procedure for shape design of underground space considering both human perception (Kansei) and rock mechanics. The SD method is adopted for perceptive evaluation of the shape. Mechanical analysis is also conducted for determining an index representing the stability of underground caverns. An equation is proposed for evaluating the results obtained from perceptive and mechanical approaches. One example is shown to demonstrate the method, and a reasonable result is derived.

Key words : underground space, perception, amenity, SD method, mechanics, safety

1. はじめに

都市周辺の人口増加や地上の環境保全等に関連して地下の有効利用が注目され、“ジオフロント”や“大深度地下利用”の名のもとに種々の地下利用に関するプロジェクトが検討されている¹⁾。人口対策や都市化対策などの目的のために鉄道、道路、駐車場などの施設を地下に建設するだけでなく、生活や文化の場として、地下空間を積極的に利用しようという試みがある^{2), 3)}。しかし、地下には汚いもの、危険なもの、地上では障害になるものなどを“入れる”という考え方が主流のように思われる。しかし、地下空間のもつ機密性・遮音性・恒温恒湿性、さらに神秘性・幻想性・未知性などの特徴を考えると、地下空間の利用はさらに多方面に広がるものと思われる。例えば、地下空間をアートあるいはアミューズメント空間として利用することが考えられている^{4), 5)}。

また、地下に対するイメージの理解を目的として様々な調査・研究が行われている^{6), 7)}。今後は、それらの成果をさらに発展させ、人々の持つ地下に関する感性的なイメージや評価を積極的に取り入れ、安全性はもちろんのこと、快適で魅力ある地下空間を設計する手法を検討することが課題と考える^{8) -10)}。

本研究では、感性と力学をそれぞれ独立したものとして扱うのではなく、地下空間の形状を題材として、感性と力学を融合した設計の可能性を検討することを目的とする。そこで、まず、地下空間の形状の感性評価を行う。次に、感性評価に用いた形状の空洞について、力学解析に基づく安全性評価を行い、最後に、両者の結果を用いて地下空間の総合評価を試みる。

2. 地下空間形状の感性評価

設計案の地下空間に対する感性に基づく快適性評価には、情緒的イメージを数値化することが必要である。そこで、本研究では、ある刺激に対して人が抱くイメージや心理的意味を数量的に測定する「意味の測定方法」のSD法 (Semantic Differential method)^{11), 12)}を用いた。これは、複数の概念を同じ形容詞対の尺度で評定し、その反応の背後にある共通性を取り出し、情緒的意味の認識枠を明らかにする方法である。2・1では、人々の地下空間に対する情緒的イメージを把握するために最適な形容詞を選定し、2・2では、それを用いて地下空間形状の快適

キーワード：地下空間，感性，SD法，力学，安全性

* 学生会員 山口大学大学院理工学研究科 社会建設工学専攻

** 正会員 山口大学工学部 社会建設工学科 教授

*** 正会員 広島工業大学 学長

性について、人々は何を重要視するかを調べ、地下空間形状について快適性の順位を付ける。

2・1 地下空間評価尺度の抽出

地下空間を感性的に評価するために、適当な形容詞を多数挙げ、図1に示す写真に対してアンケート(表1参照)を実施する。形容詞は表2の尺度欄に示す25種の対を用い、それぞれ「非常に」「かなり」「少し」「どちらでもない」という7段階で回答できるようにした(図3参照)。また、このアンケートの被験者に見せたスライドは、図1を基準に、形状を変化させたもの7種、色彩を変化させたもの7種、照明を変化させたもの7種の計21枚である。図2に例として照明を変化されたスライドを示す。なお、実際に示したスライドはカラーである。

表2にアンケート回答に対する因子分析結果を示す。因子負荷量の値の絶対値が大きいものを中心に地下空間のイメージを形状や色、照明に限定されず、空間全体を総合評価に適切だと考えられる形容詞尺度を8種類(備考欄に*の付けたもの)抽出した。

表1 地下空間評価尺度抽出アンケートの構成

被験者	38名
評価対象	スライド21枚(図2を原画とする形状・色彩・照明の変化、各7枚)
評価尺度	25尺度(表2参照)、7段階(図3参照)

表2 アンケート結果に対する因子分析結果

		因子負荷量			共通性	備考		
		因子1	因子2	因子3				
因子1	n	バランスの良い - バランスの悪い	0.9791	0.0587	0.0937	0.9708	*	
	h	極になる - 不格好な	0.9690	-0.0619	0.1912	0.9794	*	
	l	使いやすい - 使いにくい	0.9630	-0.0666	0.1614	0.9576	*	
	u	調和した - 不調和な	0.9618	0.0826	0.1995	0.9734	*	
	m	親しみのある - 親しみのない	0.9559	-0.2247	0.0887	0.9721		
	g	安らぎを与える - 安らぎを与えない	0.9450	0.2123	0.1893	0.9740		
	d	居心地の良い - 居心地の悪い	0.9407	-0.0597	0.2803	0.9670		
	e	好き - 嫌い	0.9380	-0.0778	0.2386	0.9429		
	k	楽しい - いらいらさせる	0.8932	-0.2620	0.1307	0.8835		
	b	清潔な - 汚い	0.8098	-0.4016	0.1435	0.8376		
因子2	j	安全な - 危険な	0.7999	-0.2252	0.2424	0.7493		
	x	まぶしい - まぶしくない	-0.0639	-0.9815	0.1126	0.9800		
	s	にぎやかな - 落ち着いた	-0.0996	-0.9759	-0.0009	0.9624	*	
	i	動的な - 静的な	0.0693	-0.9691	-0.0359	0.9452	*	
	y	大変装な - 地味な	-0.0538	-0.9564	0.1921	0.9545	*	
	v	明るい - 暗い	0.1976	-0.9490	0.2078	0.9828		
	r	軽やかな - くすんだ	0.2025	-0.9420	0.2094	0.9722		
	a	活動的 - 消極的	0.2743	-0.9211	0.0796	0.9300		
	t	表情豊かな - 無表情な	0.3909	-0.8719	0.1406	0.9329		
	w	柔らかな照明 - どぎつい照明	0.4527	0.8588	0.0881	0.9503		
因子3	c	開放的 - 閉鎖的	0.4881	-0.7216	0.4067	0.9244		
	f	重い - 軽い	-0.4782	0.6267	-0.3013	0.7122		
	q	大きい - 小さい	0.4158	-0.2361	0.8444	0.9417		
	p	広がりがある - 広がりのない	0.6351	-0.2181	0.6995	0.9403	*	
	o	高い - 低い	0.4915	-0.2634	0.5482	0.6114		
		因子寄与度		11.2344	9.3960	2.3176	22.9480	—
		因子寄与率(percent of communality %)		48.9559	40.9449	10.0992	100.0000	—

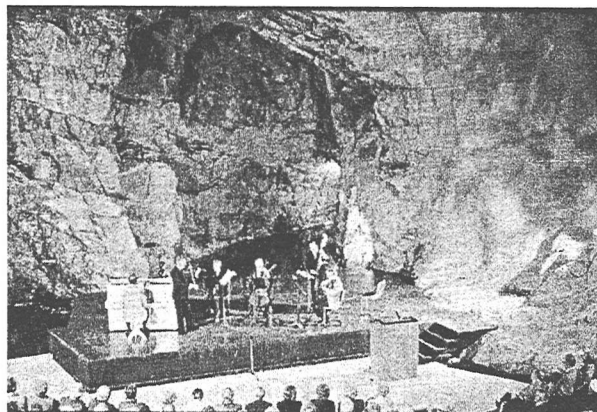


図1 アンケートに用いた写真の原画¹³⁾(レトレッティ・コンサートホール, フィンランド)

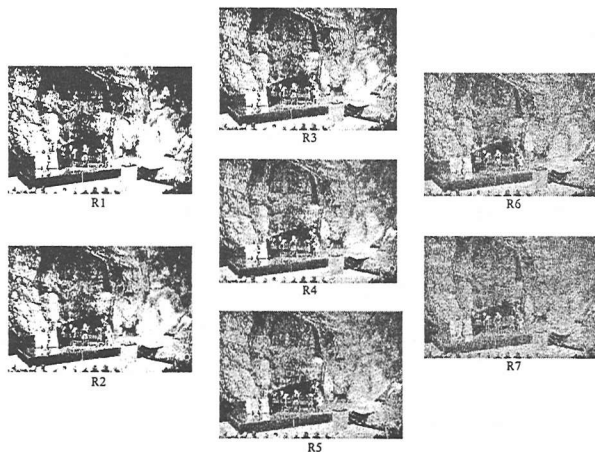


図2 照明を変化させたスライド7枚

2・2 地下空間形状の快適性評価

(a) 快適性評価アンケートの実施

アンケートに使用した形容詞は、2, で被験者の情緒的側面を知るのに適当と判断した8種類の形容詞群に、地下空間の総合的な評価を行うための「快適－不快」の項目を加えたものである。アンケート中の形容詞の対は左右無作為に入れ替えて配置した。使用したアンケート用紙を図3に示す。地下空間の実写真画像処理して、8種類のスライドを作成して評価対象とした。そして、表3に示すアンケート調査を実施した。

表3 快適性評価アンケートの構成

被験者	山口大学工学部3年生 247名
評価対象	スライド8枚(図4)
評価尺度	9尺度, 7段階(図3参照)

[A]

非常に 使いやすい	かなり 使いやすい	少し 使いやすい	どちらでもない	少し 使いにくい	かなり 使いにくい	非常に 使いにくい	
1	2	3	4	5	6	7	
不恰好な	1	2	3	4	5	6	様になってる
動的な	1	2	3	4	5	6	静的な
バランスの良い	1	2	3	4	5	6	バランスの悪い
落ち着いた	1	2	3	4	5	6	にぎやかな
不調和な	1	2	3	4	5	6	調和した
地味な	1	2	3	4	5	6	大袈裟な
広がりがない	1	2	3	4	5	6	広がりがある
総合的に							
快適な	1	2	3	4	5	6	不快な

図3 快適性評価アンケート用紙

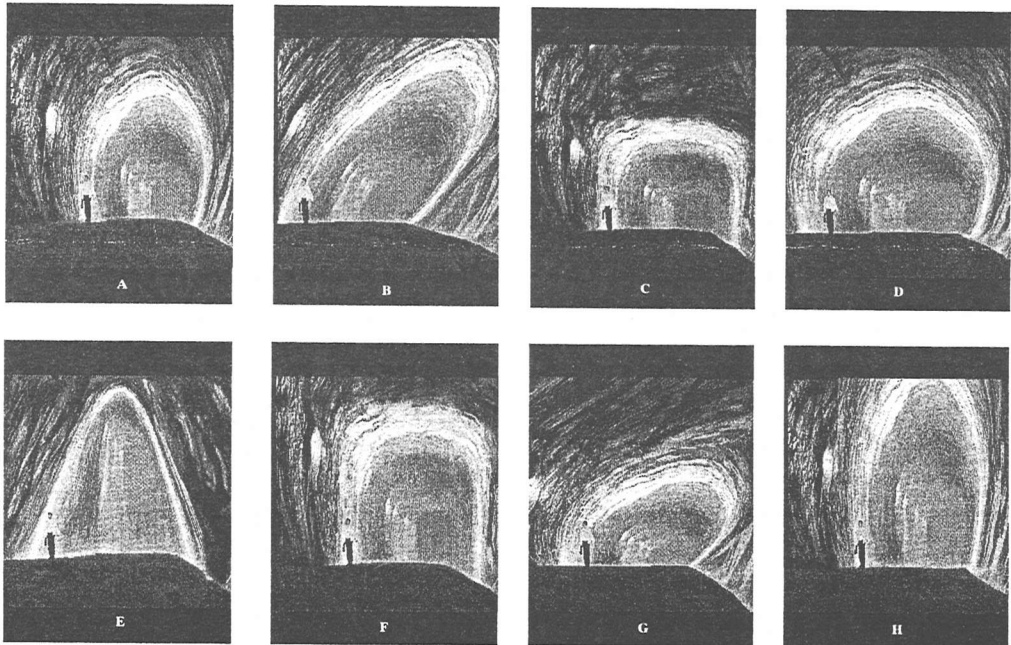


図4 快適性評価アンケートに用いたスライド

(b) 快適性評価アンケートの結果

得られたアンケート結果から各尺度上で良いイメージで捉えられる側を7, 悪いイメージで捉えられる側を1とし、被験者247名の平均値を求め、それらを評価値とした(表4参照)。図5は快適性に対する評価値の高い順に右から空洞を並べたものである。上半円形断面D, 矩形断面F・C, たまご形断面Aが快適性の値が高く、斜めにゆがんだ形状の断面G・Bの値は小さくなっている。

表4 快適性評価アンケート結果

	1	←	→	7	A	B	C	D	E	F	G	H
x ₁	使いにくい - 使いやすい				3.91	2.30	4.88	5.14	2.51	4.85	2.13	3.91
x ₂	不恰好な - 様になってる				4.57	2.37	4.63	5.20	3.54	4.45	2.39	4.07
x ₃	動的な - 静的な				4.83	3.06	4.81	3.91	3.58	4.54	2.70	3.68
x ₄	バランスの悪い - バランスの良い				4.37	2.17	5.08	5.21	3.72	4.96	2.18	4.30
x ₅	にぎやかな - 落ち着いた				5.32	3.40	5.25	4.55	3.49	5.00	2.91	3.81
x ₆	不調和な - 調和した				4.47	2.60	4.78	5.13	3.46	4.55	2.61	4.25
x ₇	大袈裟な - 地味な				4.83	3.30	4.98	3.85	3.23	4.68	2.78	3.32
x ₈	広がりがない - 広がりがある				4.66	4.17	3.60	5.42	2.91	4.57	3.43	4.84
y	不快な - 快適な				4.36	2.79	4.61	5.21	3.25	4.71	2.51	4.35

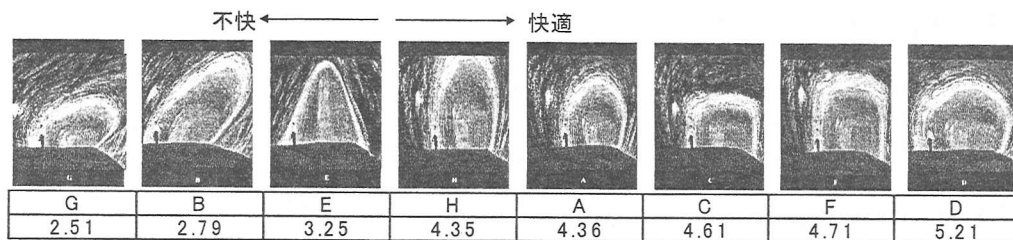


図5 快適性評価結果

(c) 重回帰分析によるアンケート結果の考察

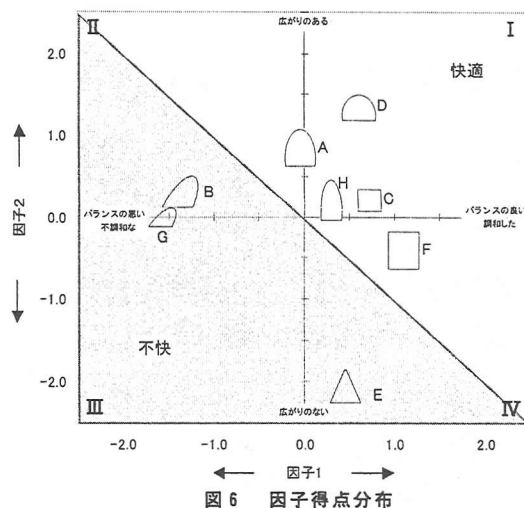
表4に示す $x_1 \sim x_8$ を説明変数、 y を目的変数として、重回帰分析¹⁴⁾を行った。

$$y = -0.04028 + 0.38314x_4 + 0.25276x_8 + 0.21382x_6 + 0.15366x_1 \quad (1)$$

式(1)から、地下空間の快適性には、空間のバランス(x_4)が最も影響が大きいことが分かる。式にとりこまなかった尺度(x_2, x_3, x_5, x_7)は空間全体のイメージの表現には有効だが、空間の快適性評価においては影響が小さいといえる。よって、地下空間の”バランス”, ”広がり”, ”調和”, ”使いやすさ”に重点をおき設計すると、より快適な地下空間が創造できると考えられる。

(d) 因子分析によるアンケート結果の考察

(c)では、尺度(x_2, x_3, x_5, x_7)は、重回帰式に取り込まれなかった。そこで、これらの尺度は空間の快適性を評価するには影響は小さいと考え、尺度(x_2, x_3, x_5, x_7)を除き、因子分析を行った。その結果を表5に示す。また、因子得点分布を図6に示す。「バランスが良く、広がりのある」という第I象限に快適な領域を示すことができた。



3. 地下空間形状の安全性評価

図4に示す地下空間に対し、2次元平面ひずみ条件で弾性解析を行った。解析のための入力パラメーターを表6に示す。初期応力は鉛直方向成分を土被り200m程度に相当する5MPaとし、また、側圧係数は1.50とする。ここで想定する安全性の評価は、せん断破壊と引張破壊に対して考え、それぞれ最大せん断ひずみ分布の広がり、引張応力の生じる領域の大きさに基き評価する。岩盤の限界せん断ひずみ γ_c を0.4%とし、最大せん断ひずみがこの値を超える領域を不安定領域とみなす。解析結果から(図7参照)、掘削面積 A_0 、最大せん断ひずみが限界せん断ひずみを超える領域の面積 A_{ss} 、さらに引張応力が

表5 快適性評価のための因子分析結果

	尺度	因子負荷量		
		因子1	因子2	共通性
因子1	x_4 バランスの悪い - バランスの良い	0.9767	0.2495	1.0162
	x_6 不調和な - 調和した	0.9010	0.4160	0.9848
	x_1 使いにくい - 使いやすい	0.8402	0.4911	0.9471
因子2	x_8 広がりがない - 広がりがある	0.2804	0.7870	0.6979
寄与度		2.5504	1.0957	3.6461
因子寄与率 (percent of communality)(%)		69.9481	30.0519	100.0000

表6 解析条件

解析領域: 100 × 100(m ²)	
弾性係数 E (GPa)	1
ポアソン比 ν	0.25
単位体積重量 ρ (kN/m ³)	25
初期応力 鉛直方向成分 (MPa)	5
側圧係数	1.50

生じた領域の面積 A_{st} とし、空洞の掘削面積 A_0 との比をそれぞれ以下のように求める。

せん断破壊に対する指標： $M_{ss0}=A_{ss}/A_0$ (2)

引張破壊に対する指標： $M_{st0}=A_{st}/A_0$ (3)

そして、

空洞の危険指標： $M_{s0}=M_{ss0}+M_{st0}$ (4)

とし各形状に対する安全性を M_{s0} を用いて表すこととする (表 7)。

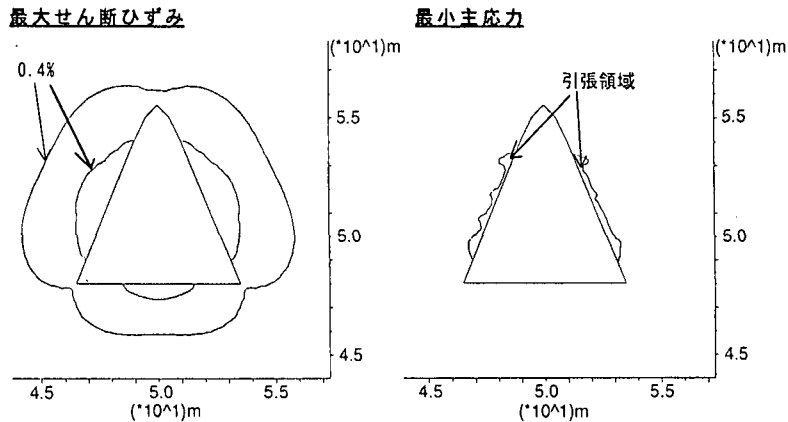


図 7 解析例 (形状 E)

表 7 力学解析に基づく安全性評価

	A	B	C	D	E	F	G	H
A_0 (m ²)	19.880	26.370	13.750	32.000	28.750	27.250	19.000	30.000
A_{ss} (m ²)	30.530	34.070	18.390	40.730	54.900	39.230	19.110	50.770
A_{st} (m ²)	0.000	0.000	0.000	0.000	2.490	0.000	0.000	0.650
M_{ss}	1.536	1.292	1.337	1.273	1.910	1.440	1.006	1.692
M_{st}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.087	0.000	0.000	0.022
M_{s0}	1.536	1.292	1.337	1.273	1.996	1.440	1.006	1.714

4. 感性と力学を融合した地下空間形状の評価例

4.1 快適性と安全性の関係

2. で求めた快適性の評価値を M_p とする。 M_p を 1～7 の値で評価したので、安全性に対しても、同様に安全側を 7 とし、1～7 の値で表す。すなわち、式 (4) で求めた危険指標 M_{s0} の最大値 (対象とする空洞に対して相対的最も危険) を 1、最小値 (対象とする空洞に対して相対的最も安全) を 7 とし、その間は比例的に値を与え、安全性の評価値 M_s を導く。図 8 に、快適性と安全性に対する指標の関係を示す。

この図から、快適性と安全性の間には、正あるいは負の相関といった単純な関係はないようである。図中の実線は、両者の関係に 3 次曲線をあてはめたものである。

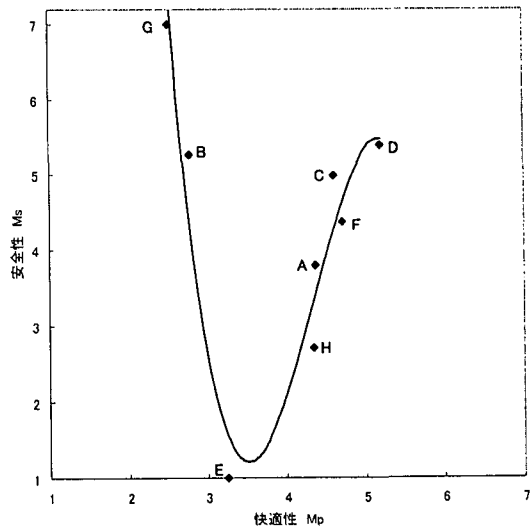


図 8 快適性 M_p と安全性 M_s の関係

表 8 快適性 M_p と安全性 M_s

	A	B	C	D	E	F	G	H
快適性 M_p	4.36	2.79	4.61	5.21	3.25	4.71	2.51	4.35
安全性 M_s	3.79	5.27	4.99	5.38	1.00	4.37	7.00	2.71

4・2 評価の例

感性評価と力学評価を融合するために、ここでは、両指標の一次結合の式を考える。

$$M = \alpha_p M_p + \alpha_s M_s \quad (\alpha_p = \alpha_s = \frac{1}{2}) \quad (5)$$

式(5)では、単純に感性と力学による評価結果を同じ重みで加えたが、実際には、重み(α_p , α_s)は、対象構造物の用途や目的などによって決定されるべきと考えられる。例えば、人の楽しむ空間である地下街やコンサートホールなどでは快適性に、より重みがおかれるべきであろう。もちろん、形状の快適性を重視することによって、力学的な安全性が損なわれる場合は、岩盤力学の知識によって適切な支保構造を施し、空洞の安全性を向上させる必要がある。

式(5)に従い、感性及び力学の両面から評価した優れた空洞形状は図9に示す順位(左から右に順位が高い)となる。

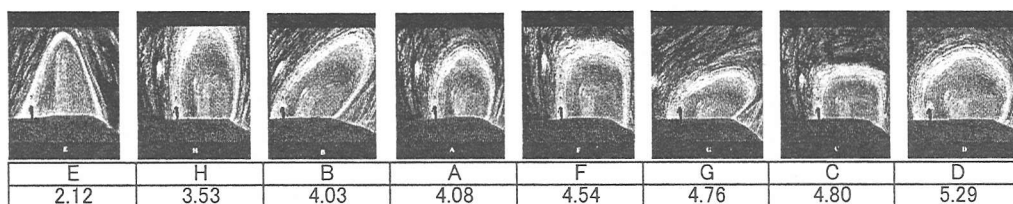


図9 感性と力学解析による総合評価結果

5. むすび

本研究では、感性的快適性と力学的安全性を融合して地下空間形状の評価を行う方法を検討し、その一例を示した。この方法においては、感性評価における形容詞尺度の内容、力学解析による安全性指標、感性と力学に基づく融合評価式の定義など、個々の要素について検討すべき課題はあるが、本研究の当初の目的である感性と力学の融合による評価の可能性は示されたと考える。今後は、評価対象の表現手法の改善(本研究では、画像処理した写真を用いたが、さらに3DやVR化すること)も含めて、上記の課題に取り組む必要がある。

<参考文献>

- 1) 国土庁大深度地下利用研究会(編著):大深度地下利用課題と展望,ぎょうせい,1998.
- 2) 渡辺与四郎:地下建築物のデザイン手法,丸善株式会社,1987.
- 3) 地下開発利用センター:地下空間の利用における空間デザインに関する調査・研究報告書,(財)エンジニアリング振興協会,1995.3
- 4) 櫻井春輔:地下空間におけるアート創造の可能性,平成12年土木学会中国支部研究発表会特別講演会資料,2000.6.2
- 5) 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,トンネルと地下,第2巻,pp.219~225,土木工学社,1996.3
- 6) 細橋由彦,佐藤貴文,花田里美:SD法に基づく地下施設のデザイン評価,地下空間シンポジウム論文・報告集,第4巻,pp.47~54,1999.1
- 7) 朝倉万理:視聴覚からの情報が空間認知に及ぼす影響について,地下空間シンポジウム論文・報告集,第5巻,pp.251~257,2000.1
- 8) 山本伸二:地下空間の力学的挙動を考慮した意匠設計に関する基礎的研究,神戸大学工学部建設学科 卒業論文,1997.2
- 9) 今泉晁音,清水則一,櫻井春輔:SD法に基づく地下空間の快適性評価に関する研究,平成13年土木学会中国支部研究発表会発表概要集,pp.401~402,2001.6
- 10) 今泉晁音,清水則一,櫻井春輔:地下空間設計における感性評価と力学解析の融合の試み,平成13年土木学会全国大会発表会,2001.10
- 11) 岩下豊彦:SD法によるイメージの測定,川島書店,1983.
- 12) 鈴木浩明:快適さを測るーその心理・行動・生理的影響の評価ー,日本出版サービス,1999.
- 13) 川本眺万(監修):ロックエンジニアリングと地下空間,鹿島出版会,1990.
- 14) 川口至商:多変量解析入門I,森北出版,pp.3~33,1973.