

地下空間デザインの新しいデザイン手法に関する研究 ～感性と力学のフュージョン～

A NEW PROCEDURE FOR UNDERGROUND SPACE DESIGN - FUSION OF HUMAN SENSIBILITY AND KNOWLEDGE OF MECHANICS -

今泉暁音^{*}・竹尾早代^{**}・清水則一^{***}・櫻井春輔^{****}

Akane IMAIZUMI, Sayo TAKEO, Norikazu SHIMIZU, Shunsuke SAKURAI

Underground space is presently being used for recreation, shopping, restaurants, sports, art, and amusement, which enrich our lives, as well as for tunnels, powerhouses, and mining resources in the field of rock mechanics. Civil engineers usually design such facilities in underground space from conventional engineering points of view, i.e., mechanics. During this new century, public facilities should be designed so that people anticipate feeling great pleasure from the facilities and desire to revisit them. In order to address such anticipation during the design stage, it may be effective to employ the idea of human sensibility. This paper discusses an approach for using human sensibility, together with knowledge of mechanics, to design shapes for underground space.

Key words: underground space design, human sensibility, mechanical sensitivity, fractal theory

1. はじめに

地下空間は、トンネル、発電所、貯蔵、などの社会基盤施設や産業用途目的だけでなく、ショッピング・モール、レストラン、コンサートホール、屋内プールといった人々が集う公共施設としても利用されている¹⁾²⁾。人々の集まるような地下空間の多様な利用は海外において多く見られる。一方、我が国においても、地下空間利用に関する多くの検討や研究があり、法的整備も行われ、新たな展開が模索されている³⁾⁶⁾。一般に人々は地下空間に対して、暗い、狭い、怖いなどのネガティブなイメージを抱いている。その一方で、静寂さ、崇高さ、幻想性、神秘性など、ポジティブなイメージもまた抱いている。そこで、ネガティブなイメージを克服し、ポジティブな側面を生かし、さらに、地下に対する特徴的なイメージを取り入れることができれば、地下空間は、人々を魅きつけ、より多様に、より快適に利用されることが期待できる。

従来、土木技術者は地下空間を、主に力学的安定性、施工性、経済性、安全性などの観点から設計してきた。しかし、上に述べたように、人々がより快適と感じる空間として地下空間を利用する場合、このような従来の観点からだけでなく、心理的あるいは感性的な観点と複合した地下空間設計法を検討することが必要と思われる。

筆者らは、感性的評価と力学的評価を個々に論じるのではなく、両者を総合した新しい地下空間の形状デザイン手法を検討している⁷⁾。すなわち、それらは地下空間形状に対し、感性的な側面として快適性を取り上げ評価し、力学的解析による安全性の評価を行い、それらの結果を用いて地下空間形状の総合的な評価を検討するものである。さらに、力学的評価と感性的評価の関係を調べている⁸⁾¹⁰⁾。

本報告では、地下空間形状に対して、力学的な評価と感性的な評価の関係を示し、両者を融合した空間形状評価を行う。そしてさらに、新しい試みとして、フラクタル解析を利用して、アンケートによらない感性評価の可能性を検討する。

^{*} 正会員 修士 (工学) 中央復建コンサルタンツ (株)

^{**} 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 博士 (工学) 山口大学工学部 社会建設工学科 教授

^{****} 正会員 工学博士 (財) 建設工学研究所 理事長

2. 形状の力学的評価

人々は、地下空間に入って、「危険だ」、「怖い」、あるいは、「ほっとする」、「落ち着く」といった感覚を持った経験があり、それが空間形状の力学的性質に関係している可能性があるように思える。例えば、「怖い」と感じる空間は力学的に不安定であるかも知れない。ここでは、感性与力学の関係を検討するため、できるだけ空間形状にのみ影響を受ける力学的な指標を次のように定義する。

まず、岩盤を等方質の弾性体(平面ひずみ問題)とすると掘削による変位は次のように表せる¹¹⁾。

$$u(x,y) = f_1 \cdot \left(\frac{\sigma_x^0}{E} \right) + f_2 \cdot \left(\frac{\sigma_y^0}{E} \right) + f_3 \cdot \left(\frac{\tau_{xy}^0}{E} \right) \quad (1)$$

ただし、 $u(x,y)$ は座標における変位、 σ_x^0 、 σ_y^0 、 τ_{xy}^0 は初期応力、 E は弾性係数、 f_1, f_2, f_3 は空洞形状とポアソン比から得られる係数である。なお、 σ_x^0/E 、 σ_y^0/E 、 τ_{xy}^0/E を初期応力パラメータと呼ぶ。

ここでは、空間内空の変形を表す指標として、掘削による断面の平均的なひずみを考える。壁面の3点*i, j, k*(図-1)の変位を、 $\{u\} = \{u^i \ v^i \ u^j \ v^j \ u^k \ v^k\}^T$ として、次の式で断面の平均的なひずみを求める。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\} \quad (2)$$

ただし、 $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}\}^T$ 、 $[B]$ は三角形*ijk*を有限要素と考えたときのひずみ-変位マトリックスである。

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad (3)$$

ひずみは式(8)では定義されるので、式(6)及び式(7)より次式を得る。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x1} \\ \varepsilon_{y1} \\ \gamma_{xy1} \end{Bmatrix} \cdot \left(\frac{\sigma_x^0}{E} \right) + \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x2} \\ \varepsilon_{y2} \\ \gamma_{xy2} \end{Bmatrix} \cdot \left(\frac{\sigma_y^0}{E} \right) + \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x3} \\ \varepsilon_{y3} \\ \gamma_{xy3} \end{Bmatrix} \cdot \left(\frac{\tau_{xy}^0}{E} \right) \quad (4)$$

$\{\varepsilon_i\} = \{\varepsilon_{xi} \ \varepsilon_{yi} \ \gamma_{xyi}\}^T$ は、ひずみ-変位マトリックス $[B]$ と f_1, f_2, f_3 で構成され初期応力パラメータに対する感度となる。これは、初期応力と弾性係数によらない特性がある。

次に、形全体の総合的な評価値を考え、せん断ひずみの感度 γ 、および、体積ひずみの感度 e を次のように定義し、評価値とした。

$$\gamma_i = \sqrt{(\varepsilon_{xi} - \varepsilon_{yi})^2 + \gamma_{xyi}^2} \quad (5) \quad \gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2} \quad (6)$$

$$e_i = \varepsilon_{xi} + \varepsilon_{yi} \quad (7) \quad e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2} \quad (8)$$

これを用いると、初期応力と弾性係数に無関係、つまり形状の特徴によって変化する値として扱うことが可能となる。

3. 形状の感性評価

形容詞対(尺度)を用いたアンケートによって感性的な評価を行う。図-2に示すアンケート用紙を用いて、図-3に示す形状に対してアンケートを行った。図-3(a)は様々な地下空間の形状、図-3(b)は空間の高さを一定にして、5段階で空間を斜めにした形状、図-3(c)、(e)は幅を一定にして高さを変化させた形状、図-3(d)、(f)は高さを一定にして幅を変化させた形状である。アンケートでは、図-3(a)、図-3(b)、図-3(c)、図-3(d)、図-3(e)、図-3(f)に対してそれぞれ別々に実施した。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、被験者の回答の平均値を求め、それらを評価値とした。

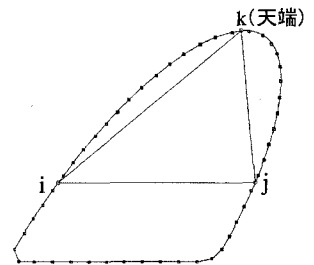
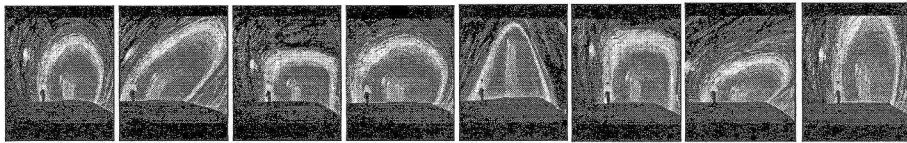


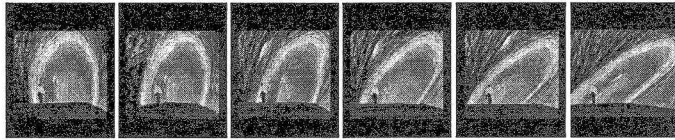
図-1 力学的感度について

[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 でもよい	少し 不便な	かなり 不便な	非常に 不便な	
使いやすい	1	2	3	4	5	6	使いにくい
不愉快な	1	2	3	4	5	6	極 becoming
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	大げさな
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

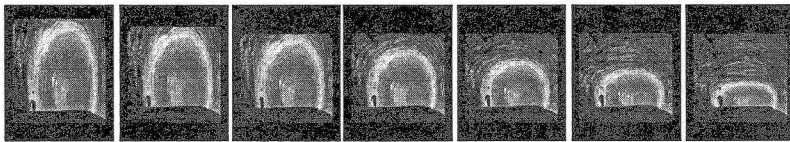
図-2 アンケート用紙



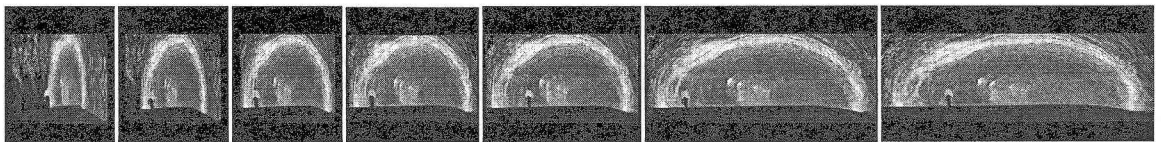
(a) 傾き・変形を任意に変化させたスライド 8 枚



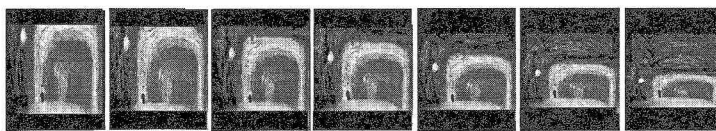
(b) 傾きを変化させたスライド 6 枚



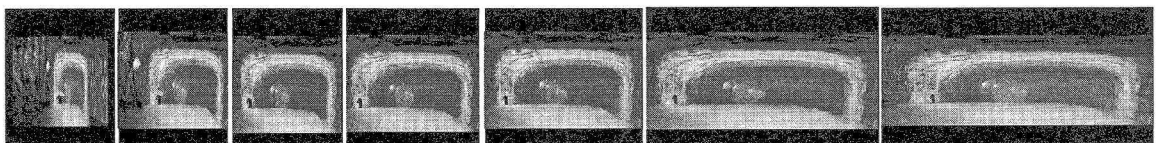
(c) 半円形上の天端高さを変化させたスライド 7 枚



(d) 半円形上の幅を変化させたスライド 7 枚



(e) 矩形上の天端高さを変化させたスライド 7 枚



(f) 矩形上の幅を変化させたスライド 7 枚

図-3 快適性評価と力学的感度を求めた形状のスライド

4. 形状の力学・感性的評価

2, 3 で求めた, 評価値, および力学的評価を用いて両者の相関性を調べ, また図-3(b)の斜め空間形状に対して, 感性と力学を融合した立場から, どの角度が最適であるかについて考察する.

(1) 相関性

図-4(a)に図-3(b)を用いたアンケート結果の快適性の評価結果を形状の傾き角度に対して示す. 快適性に関して形状が少しでも傾くと不快側の評価となり, 単調に快適性が減少し, 傾きが 40° を超えると更に不快に感じられる. また, 図-3(b)に示す形状に対して, それぞれの感度(せん断ひずみ感度 γ , 体積ひずみ感度 e)を(6), (8)式より求め, その結果と形状の傾き角度の関係を図-4(b)に示す. これより, 斜めに傾くほど両感度は大きくなる. すなわち, 傾いた空間ほど変形しやすくなり, 力学的な良好性は低いものとなる. 図-4(a)および図-4(b)から, 快適性と力学的感度の関係を求め, 図-4(c)に示す. また, 図-3のすべての形状に対するそれぞれの感度(せん断ひずみ感度 γ , 体積ひずみ感度 e)を求め, 快適性の評価値 M_p との関係を図-5に示す.

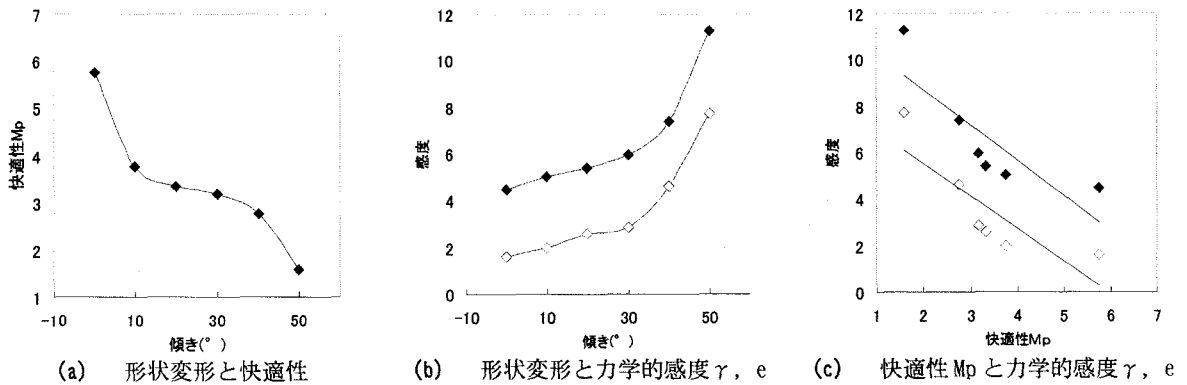


図-4 斜め形状空間の評価結果

この結果から、快適性と物理的感覚の「せん断ひずみ感覚 γ 」および「体積ひずみ感覚 e 」には、負の相関があることが分かる。また、体積ひずみ感覚の方がより相関関係が強いようである。すなわち、変形しやすい空間形状よりも、変形しにくい空間形状に対して人々は快適性を感じるという結果となった。逆に、変形しやすい空間形状に対して、不快感が生まれるともいえる。

感性的な評価と力学的な評価は本来、独立していると思われるが、本研究における調査および解析によって、両者に何らかの関係があることが示唆される。

(2) 最適性

ここでは、図-3(b)に示す、斜め空間に対して感性和力学を融合した立場から評価を行う。斜め空間の特徴は、形状に関する力量性は低くなるが、活動性は高くなることである。この活動性に着目した空間をデザインするならば、斜め空間は一つの選択肢となる。しかしながら、(1)で得られたように、斜めに傾く角度が大きくなるほど、不快、あるいは力学的な良好性は低くなるため、適切な角度を見つける必要がある。(1)の結果から、快適性と力学的良好性は相関があるため、どちらか一方を考慮すればよい。ここでは、物理的感覚のうち、「体積ひずみ感覚」と、感性評価のうち力量性の尺度「動的-静的」を用いて空間形状の適切な角度を求める。ここで、安全性が高いと数値が大きくなる指標を用いると評価に便利であるので、「体積ひずみ感覚」の逆数を力学的評価値として用いる。また、「動的-静的」に対するアンケート結果を動的性評価値とし、さらに、力学的評価値と動的性評価値に対してそれぞれ最大値で基準化する。

図-6は、基準化した力学的評価値（良好性）と動的性評価値（感性評価）を示したものである。両者はトレードオフの関係にある。両評価値を総合して適切な空間の傾き角度を求めるために、それらの平均値を総合評価値とする。図-6から総合評価は、傾き 10° で最大値を取り、図-3(b)の形状において動的でかつ安全な空間形状は傾き 10° の空間であることが得られる。

(3) 斜め形状の例

次に、斜め空間の活用性としていくつかの例を示す。活動性の高い空間として、公園、空間と空間を結ぶ通路、待合室などが挙げられる。図-7(a)はガウディが設計したグエル公園の斜め形状の回廊である。また、図-7(b)は建築家F.L. ライトが設計し、建て、暮らした、タリアセン・ウエストで、図-7(c)は、スペインの博物館である。これらのように、斜め空間の例は多くある。ただし、これらの例は地下空間ではなく、地上の光溢れる空間であるので、地下における具体的な利用については、さらに別の視点が必要と思われる。

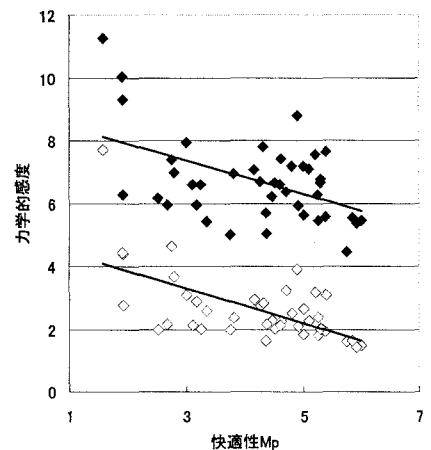


図-5 快適性と感覚の関係

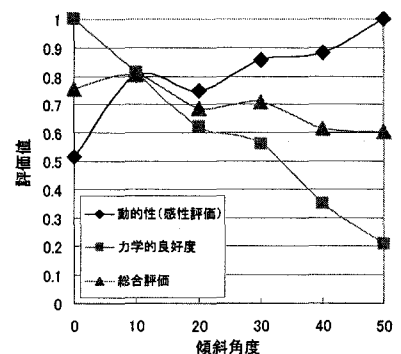
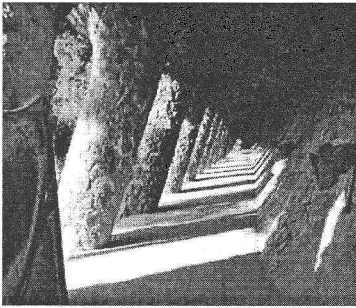


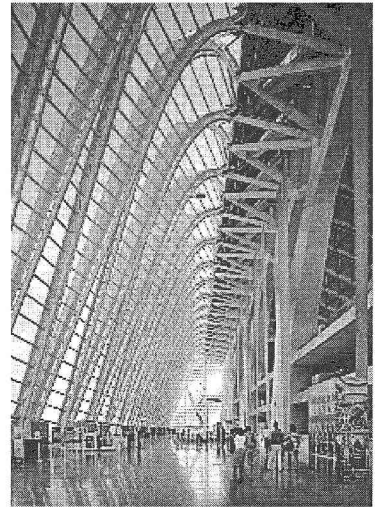
図-6 斜め形状空間の総合評価



(a) グエル公園 (スペイン) ¹²⁾



(b) タリアセン・ウェスト ¹³⁾



(c) 科学博物館 (芸術科学都市, ヴァレンシア, スペイン) ¹⁴⁾

図-7 斜め形状空間の例

5. フラクタル解析の利用 ¹⁵⁾

これまで、形状に対する感性的な評価方法として、アンケートを用いたSD法を用いてきた。SD法を用いたアンケートでは、形容詞尺度により様々な形容詞に対する評価値(良い-悪い)を得ることが出来る反面、被験者によって結果が異なることや、代替案の度にアンケートを実施しなければならないことなどが考えられる。そこで、フラクタル理論を用いて、感性的な評価を定量的に評価した。フラクタル理論を用いて、直接感性的な評価値が出るのではないので、快適性とフラクタル解析結果の関係に着目して、関係性を見た。ここでは、色彩のフラクタル解析を行っているが、色彩の変化で形状を捉えている。つまり、はっきりとした形状ではなく、光の当たり具合で、実際目で見ているような感覚で形状を捉えている。

フラクタル解析の詳細については各種の文献があるのでそちらを参照してもらうこととし、ここでは、本検討で用いた色彩の解析に関するスケール変換解析法について述べる。色彩の解析にあたっては、コンピュータ上で取得されている画像のRGB座標値を、人間の色の感覚に近いとされているCIE座標系(図-8参照)のxyzの値に変換したものをを用いる¹⁶⁾。スケール変換解析法は、以下の方法である。まず、画像全体のCIE座標系において、3つの原点(それぞれ赤色、緑色、青色を原点とする)から各ピクセルの持つ色までの距離を求める。そして、スケール $S(1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64)$ を定め、そのスケールにおいてそれぞれの原点からの距離の最大値と最小値の差(原点距離の差)を算出する。最後に、この3種類の原点距離の差の中で、最大の値を最大変動値とし、あるスケール S での最大変動値の平均 $\bar{L}$ が、

$$\bar{L} \propto S^{(2-D_{cs})} \quad (9)$$

の関係になった時の D_{cs} を「色彩のスケールのフラクタル次元(ここではスケール次元と呼ぶ)」とする。

ここでは、図-3(d), (f)の高さを一定にして幅を変化させた形状につ

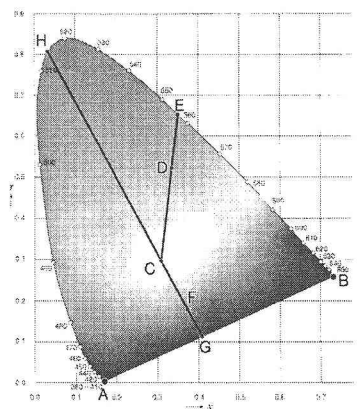


図-8 CIE色度図

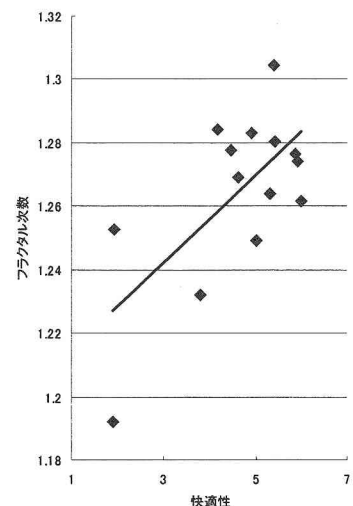


図-9 快適性とフラクタル次元の関係

いて見る。フラクタル解析は図-3(d),(f)の色彩に対し行い、色彩のばらつき度合いから、感性的評価を行う。図-9にフラクタル解析と快適性の評価値の関係を示す。これより、フラクタル次数が低いほど、つまり、色彩のばらつきが小さいほど快適であることがわかる(この場合、形状が横長くなるほど、色彩のばらつきが大きくなっている)。

これより、感性的評価について今までのように、代替案の度にアンケートを実施しなくても、フラクタル解析を行うことにより、快適な空間であるかどうか(この場合、フラクタル解析の結果としてフラクタル次元が低くなる)評価できる可能性があると思われる。

6. むすび

本報告では、地下空間形状を対象に、快適性の評価結果と力学的評価結果との関係を、アンケートと数値解析によって調べ、快適性と力学的感度の間に負の相関関係があることが示された。すなわち、人は、変形しやすい空間形状に比較して、変形しにくい空間形状に対してより快適性を感じるのではないと思われる。また、形状に対する動性的性の評価に着目し、これと力学的な評価と感性を総合して、斜め空間断面形状を持つ地下空間について評価し、さらに、感性を定量的に評価する一つの方法として、フラクタル解析を用いて関係性を評価し、その結果フラクタル次数が低いほど、すなわち、色彩のばらつきが小さいほど快適である傾向が示された。これらの結果の妥当性については今後、さらに調査と検討が必要である。

参考文献：

- 1) 三井康司, 藤川富夫, 亀井紀幸(共著), 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.
- 2) Carmondy, J. and R. Sterling :Underground space design, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- 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) 土木学会誌, Vol.72, No.3, 1987; Vol.74, No.2, 1989; Vol. 87, No.8, 2002; 地下空間利用に関するシンポジウムテキスト, 1988; 地下空間シンポジウム論文・報告集, 1989年-2002年. いずれも土木学会.
- 5) 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.
- 6) 櫻井春輔: 土木工学の新しい挑戦-地下空間におけるアート創造の可能性-, 土木学会誌, vol.87, No.3, pp.74-73, 2002.
- 7) 今泉暁音, 清水則一, 櫻井春輔: 感性と力学を総合した地下空間形状のデザインに関する研究, 土木学会論文集, No.742/IV-60, pp.159-168, 2003.9.
- 8) 今泉暁音, 清水則一, 櫻井春輔: 地下空間における感性的評価と力学評価の関係に関する考察, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.299-304, 2003.1.
- 9) 今泉暁音, 清水則一, 櫻井春輔: 地下空間形状における感性評価と力学的評価の関係について, 第8回地下空間シンポジウム論文・報告書, 第8巻, pp.179-186, 2003.1
- 10) 今泉暁音, 清水則一: 感性と力学に基づく地下空間形状の評価~斜め空間形状を例として~, 土木学会第58回年次学術講演会概要集(CD-ROM), 部門CS, Cs12-009, 2003.9
- 11) 桜井春輔, 清水則一: 現場実験結果の逆解析による岩盤の力学定数の推定, 土と基礎, 35-3(350), pp.17-21, 1987.
- 12) <http://izmreise.hp.infoseek.co.jp/Espana/056.htm>
- 13) 吉家千絵子(編): 誰にでもわかる20世紀建築の3大巨匠・ル・コルジュ・ミース・ファン・デル・ローエ, F.L. ライト, BRUTUS Casa 特別編集, pp.170.2002.12
- 14) 二川由夫(編): GA DOCUMENTO 72, エーディーエー・エディタ・トーキョー, pp.88, 2002.11
- 15) 竹尾早代, 清水則一: 地下空間デザインにおける空間構成評価に対するフラクタル理論の応用, 第55回土木学会中国支部研究会発表会発表概要集, IV-3, pp.351-352.2003.5
- 16) 大野研: 美しい農村構造物のための研究, 平成11年度~平成12年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(1)), 平成13年5月