

博 士 論 文

感性と力学を融合した  
地下空間形状のデザイン手法に関する基礎的研究

*A method for the design of underground space shapes by coupling human sensibility and mechanics*

平成 22 年 9 月

今泉 暁音

*Akane Imaizumi*

山口大学大学院 理工学研究科



## 要旨

地下空間は、トンネル、発電所、貯蔵、採鉱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。このような地下空間の多様な利用は海外に特に多く見られるが、日本においても地下空間の有効活用のための法的整備が行われ、多様な利用が展開されてきている。さらに、地球環境問題や景観保全、メガ都市の空間利用、および、低酸素社会の実現などの今日的な課題解決の枠組みの中で新たな活用が考えられ、今後の多角的利用に関する検討が進められている。

一般的に、人々は、地下に対して、暗い、狭い、怖い、ジメジメしているなど、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、神秘性などのポジティブなイメージもまた抱いているようである。このような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すことが多様な地下空間の利用に不可欠である。

これまで土木技術者は地下空間を、主に力学的安定性、施工性、経済性などの観点から設計してきた。しかし、ネガティブなイメージを克服し、人々がより快適と感じる空間として地下を利用しようとする場合、従来の土木工学的観点からだけではなく、心理的、あるいは、感性的な観点を取り入れる必要がある。地下空間の利用において、心理的な側面を考慮する必要があることは以前から指摘されている。しかし、これまでの地下空間の設計・デザインでは、土木工学的な立場と心理的、あるいは、感性的な立場から別々に研究を進めてきたように思われる。今後の地下空間利用の展開を図るためには、土木工学の観点と心理的、感性的な観点を計画の初期の段階から融合して検討することが、地下空間設計の新しい方向になるのではないかと考えられる。

そこで、従来の観点のなかから特に安全評価の基本となる力学的な立場を取り上げ、力学的観点と快適性や魅力などの感性的な観点を総合したデザイン手法を確立することを最終的な目的として、本研究では地下空間形状に対する具体的なデザイン手法の構築を試みた。

各章の概要は以下のものである。

まず、第1章では、本研究の背景と目的、ならびに、論文の構成を記述した。

第2章では、古代から現在に至る地下空間の利用の概要と今後の展望を整理するとともに、これまでの地下空間デザインに関する研究を取りまとめた。また、人の感性を製品開発や工業デザインなどに生かそうとする感性工学の概要とその土木工学分野への適用事例を示した。

第3章では、地下空間形状に対する感性的評価と力学解析の結果を総合する評価方法を示し、評価結果について考察した。まず、地下空間形状を感性的に評価するための尺度を、予備アンケートを実施して多数の言語表現（形容詞対）から因子分析の結果に基づき構成した。その尺度を用いて8種の地下空間形状に対してアンケートを実施し、SD法などによってその結果を分析する

と、地下空間形状は、快適と感じる形状のグループと不快と感じる形状のグループに分けられ、また、快適性に影響を与える尺度は形状特性（「バランスの良い」、「調和した」、「使いやすい」）と空間特性（「広がりのある」）であることが示された。力学的な評価では、感性評価に用いた地下空間形状に対して力学解析を行い、解析結果に基づき力学的な安全性を評価する指標（安全性評価値）を与えた。これとアンケートから得られる快適性評価値とを総合する評価式を定義した。そして、具体的な例を通して、地下空間形状の総合的な評価を行い、感性と力学による評価結果を個々に論じるのではなく、総合して議論できることを示した。

第4章では、第3章で検討した方法をさらに発展させ、地下空間形状をデザインする新しい方法を提案した。まず、最初に、力学的評価の一般性を高めることを考え、新たな力学的評価指標として、形状の変形しやすさを示す「力学的感度」を定義した。そして、系統立てて設定した地下空間形状に対して、力学的評価として力学解析により力学的感度を求め、感性的評価としてアンケートを実施し、各形状の評価結果の特徴、および、力学的評価と感性的評価の関係を考察した。特に、変形しにくい（力学的感度が小さい）形状ほど「快適性」を感じ、また、変形しやすい（力学的感度が大きい）形状ほど「動的性」を感じる傾向があり、人の持つ感性と力学的な特徴には何らかの関係がある可能性が示された。次に、それらの結果に基づき、感性と力学を総合した地下空間形状の新しい評価方法を提案し、様々な形状に対する評価を行った。その結果、「快適性」評価と力学的評価を総合すると、天端がアーチ形状で高さと同程度の地下空間形状が最もよい空間として評価された。また、「動的性」評価と力学的評価を総合した場合には、やや斜めに傾く空間形状の評価が高くなるという特徴が得られた。最後に、地下空間形状のデザイン例として、幅を一定とし、高さを変化させた地下空間形状に対して、「快適性」と力学的評価の総合評価が高い形状の高さ幅比  $H/W$  が導かれる事例を示した。また、斜めに傾く形状に対して、「動的性」と力学的評価の総合評価の高い空間形状の傾きが導かれる事例を示した。

第5章では、本研究で得られた結論をまとめると共に今後の展望を述べた。

## Abstract

Underground space is presently being employed for public facilities where people gather, i.e., shopping malls, restaurants, concert halls, indoor pools, etc., as well as for infrastructure institutions and industrial use, i.e., tunnels, powerhouses, and energy storage, and for developing mining resources. In Europe and North America, in particular, underground space is utilized in various ways. In order to develop underground space more extensively for public facilities, some laws for subsurface utilization have been established in Japan. Many plans are now being proposed in relation to global environmental issues, the effective use of space in mega-cities with high population densities, environmental preservation, etc.

Although there are numerous practical benefits to utilizing underground space for a variety of purposes, people generally have negative impressions when they think of being underground, namely, darkness, isolation, fear, etc. On the other hand, people also often find they have a sense of wonder, adventure, beauty, sublimity, and other potentially positive impressions when they visit the underground. If such positive impressions could be used to overcome the negative ones, the underground would become a more appealing and impressive place.

Civil engineers usually design facilities in underground spaces from mainly conventional engineering points of view, i.e., mechanics, safety, and costs. In order to succeed in creating attractive underground spaces, however, it may be effective to employ the idea of human sensibility (*kansei*) during the design stage in addition to the above conventional engineering points of view. Although psychological problems related to placing people in underground environments have often been discussed, they seem to be treated separately from the engineering design. As an alternative perspective for the design of underground spaces, it is possible to use psychological effects or human sensibility together with conventional engineering points of view.

In this research, the mechanical viewpoint related to assessing the stability of underground space is taken from the engineering points of view, and a method which couples human sensibility and rock mechanics when designing the shapes of underground spaces is proposed.

The thesis is summarized as follows:

In Chapter 1, the background and the purpose of this research are described, and an outline of the thesis is presented.

In Chapter 2, the developments in underground space utilization and the studies on underground space design are reviewed. An outline of *Kansei* Engineering and its application to topics in the field of Civil Engineering are summarized.

In Chapter 3, the preliminary method used to couple human sensibility and mechanics is discussed. The approach is composed of three steps, namely, (1) assessing the preferable shape for an underground space from the viewpoint of human sensibility, (2) assessing the stability of the underground space from the standpoint of mechanics, and (3) coupling the results of (1) and (2), and evaluating the possible shapes for

the underground space.

The scales of measure for evaluating underground space shapes by human sensitivity were extracted from 25 linguistic expressions (pairs of adjectives) based on the results of a factor analysis. The questionnaire was carried out for 8 different underground space shapes using these measures. The results of the questionnaire were analyzed by the Semantic Differential Method, a multiple regression analysis, etc. As a result, the shapes were placed in a "pleasant group" or an "unpleasant group". It was recognized that the shape of an underground space should be designed to be more "balanced", "harmonious", and "expansive".

Numerical analyses were conducted for the same underground space shapes as those used in the questionnaire, and a safety index was calculated for each underground space shape.

The equation for the assessment that couples the index of "pleasantness" and the safety index was defined. Through illustrative examples, it was shown that it is possible to design shapes for underground spaces by coupling human sensibility and mechanics.

In Chapter 4, the method described in Chapter 3 is improved by defining a new index for the mechanical points of view, and a new approach to underground space design is proposed.

An index called "mechanical sensitivity" is defined. This index depends on the shape of the underground space, but it is independent of the initial stress and the elastic modulus of the rock. Sensitivity can be used to represent the preferable shapes from the viewpoint of mechanics. High sensitivity means that the shape is flexible and possibly unstable.

The questionnaire was conducted for 35 different shapes that were selected systematically, i.e., arch roof shapes and rectangular and skew shapes with different ratios of height to width. Numerical analyses were also conducted for the same shapes to obtain the mechanical sensitivity. The characteristics of each shape are discussed using the results of both the questionnaire and the numerical analysis. Furthermore, the relationship between human sensibility and mechanical sensitivity is investigated. It is found that people tend to feel that a shape which has the potential for a small deformation is pleasant, and a shape that has the potential for a large deformation is dynamic.

A new method is proposed on the basis of the above-mentioned relationship, and it is applied to evaluate preferable shapes. The results tell us that a shape whose height is almost the same as its width is most preferable due to coupling a "pleasant" feeling and mechanics, and that a slightly skew shape is preferable due to a "dynamic" feeling and mechanics.

Finally, in order to verify the proposed method, two examples of shape designs for underground spaces are illustrated.

In Chapter 5, the conclusions of this research are summarized, and future topics and their applications are described.

## 目次

|  |    |
|--|----|
| <b>第1章 序論</b> .....                          | 1  |
| 1.1 背景 .....                                 | 1  |
| 1.2 本研究の目的と論文の構成 .....                       | 2  |
| 参考文献 .....                                   | 4  |
| <b>第2章 地下空間利用の概要と地下空間デザインに関する研究</b> .....    | 5  |
| 2.1 地下空間利用の概要 .....                          | 5  |
| 2.2 心理・感性を考慮した地下空間デザインに関するこれまでの研究 .....      | 10 |
| 2.2.1 地下空間の利用やデザインに関する研究 .....               | 10 |
| 2.2.2 土木学会地下空間委員会心理小委員会の活動 .....             | 16 |
| 2.3 感性工学と土木工学分野への応用 .....                    | 17 |
| 2.3.1 感性工学について .....                         | 17 |
| 2.3.2 土木工学分野における感性工学手法の適用事例 .....            | 17 |
| 参考文献 .....                                   | 20 |
| <b>第3章 感性的評価と力学解析結果を総合した地下空間形状の評価</b> .....  | 23 |
| 3.1 地下空間の感性的評価 .....                         | 23 |
| 3.1.1 感性評価尺度の構成 .....                        | 23 |
| 3.1.2 地下空間形状の快適性評価 .....                     | 28 |
| 3.2 地下空間形状の力学解析による評価 .....                   | 33 |
| 3.3 感性的評価と力学解析結果を総合した地下空間形状の評価 .....         | 35 |
| 3.4 まとめ .....                                | 38 |
| 参考文献 .....                                   | 39 |
| 用語の説明 .....                                  | 40 |
| <b>第4章 力学的感度と感性アンケートによる地下空間形状のデザイン</b> ..... | 41 |
| 4.1 地下空間形状の評価指標の定義 .....                     | 41 |
| 4.1.1 力学的指標 ～力学的感度の定義～ .....                 | 41 |
| 4.1.2 感性的指標 .....                            | 44 |
| 4.2 地下空間形状に対する感性的評価と力学的評価 .....              | 45 |
| 4.2.1 因子分析による感性的評価の考察 .....                  | 47 |
| 4.2.2 斜めに傾いた形状 .....                         | 48 |
| 4.2.3 天端がアーチ形状 .....                         | 50 |
| 4.2.4 天端が平坦な形状 .....                         | 54 |
| 4.2.5 力学的感度と感性的評価値との関係 .....                 | 58 |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 4.3 感性と力学を総合した地下空間形状の評価 ..... | 59        |
| 4.3.1 総合評価指標の定義 .....         | 59        |
| 4.3.2 総合評価結果の考察 .....         | 60        |
| 4.3.3 最適な地下空間形状のデザイン例 .....   | 64        |
| 4.4 まとめ .....                 | 68        |
| 参考文献 .....                    | 69        |
| 用語の説明 .....                   | 70        |
| <br>                          |           |
| <b>第5章 結論</b> .....           | <b>71</b> |
| 5.1 まとめ .....                 | 71        |
| 5.2 課題と展望 .....               | 72        |
| 参考文献 .....                    | 74        |
| <br>                          |           |
| <b>謝辞</b> .....               | <b>75</b> |
| <br>                          |           |
| <b>関連論文</b> .....             | <b>76</b> |

# 第1章

## 序論

### 1.1 背景

地下空間は、トンネル、発電所、貯蔵、採鉱などの社会基盤施設や産業用途目的だけではなく、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<sup>1),2)</sup>。地下空間の多様な利用は海外に先進的に見られるが、日本においても都市の地上空間の有効活用の観点から地下空間利用のための法的整備が行われ、幅広い活用とともに快適な空間として建設されることが期待されている。さらに、近年では、従来の社会基盤施設や公共施設等の用途はもちろん、地下の持つ機密性、遮音性、恒温恒湿性、隔離性などの特徴を生かし、地球環境問題や景観保全、メガ都市の空間利用、および、低酸素社会の実現などの今日的な課題解決の枠組みの中で有効活用が考えられ、多角的な検討が進められている<sup>3)-8)</sup>。

ところが、一般的に人々は地下に対して、暗い、狭い、怖い、ジメジメしているなど、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、神秘性などのポジティブなイメージもまた抱いているようである。このような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すことが多様な地下空間の利用に不可欠である。

これまで土木技術者は地下空間を、主に力学的安定性、施工性、経済性などの観点から設計してきた。しかし、ネガティブなイメージを克服し、人々がより快適と感じる空間として地下を利用しようとする場合、従来の土木工学的観点からだけではなく、心理的、あるいは、感性的な観点を取り入れる必要がある。地下空間の利用において、心理的な側面を考慮する必要があることは以前から指摘されているが、これまでの地下空間の設計・デザインでは、土木工学的な立場と心理的、あるいは、感性的な立場から別々に研究を進めてきたように思われる。そこで、今後の地下空間利用に展開を図るためには、土木工学の観点と心理的、感性的な観点を個々に論じるのではなく、計画の初期の段階から両者を合わせ融合して検討することが、地下空間設計の新しい方向になるのではないかと考えられる。

## 1.2 本研究の目的と論文の構成

感性と従来の土木工学の観点を融合した新しいデザイン手法を研究するために、従来の観点のなかから特に地下空間の安全評価の基本となる力学的な立場を取り上げ、感性的評価と総合した地下空間デザイン手法を確立することを最終的な目的として、本研究では地下空間形状に対する具体的なデザイン手法を構築する。

本論文の構成は次のとおりである。

まず、第1章では本研究の背景および目的を述べる。

次に、第2章では、古代から現在に至る地下空間の利用の歴史と今後の利用の概要を述べ、地下空間デザインに関するこれまでの研究を取りまとめる。また、人の持つ感性を活用する感性工学の概要と、その土木工学分野への適用事例を示す。

第3章では、地下空間形状に対し、感性的な快適性評価と、力学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試みる。感性的評価では、まず、地下空間形状を感性的に評価するための尺度を、予備アンケートを実施して多数の言語表現（形容詞対）から因子分析の結果に基づき構成する。そして、その尺度を用いて種々の地下空間形状に対する快適性についてアンケートを実施する。力学的な評価では、力学解析結果より最大せん断ひずみ分布の広がり、引張応力の生じる領域に基づき評価する。最後に、感性的評価と力学的評価の結果を用いて総合評価を行う。

第4章では、第3章の方法をさらに発展させるため、特に力学的評価の一般性を高めることを目的に、新たな力学的評価指標として形状の変形しやすさを示す「力学的感度」を定義する。そして、系統立てて設定した地下空間形状に対して、力学的評価として力学解析により力学的感度を求め、感性的評価としてアンケートを実施し、各形状の評価結果の特徴、および、力学的評価と感性的評価の関係を考察する。さらに、それらの結果に基づき感性と力学を総合した地下空間形状の評価手法を提案し、様々な形状に対する評価事例、および、形状デザイン例を示す。

第5章では、本研究で得られた結論をまとめると共に、今後の展望を述べる。

図-1.1 に本論文の構成フロー図を示す。

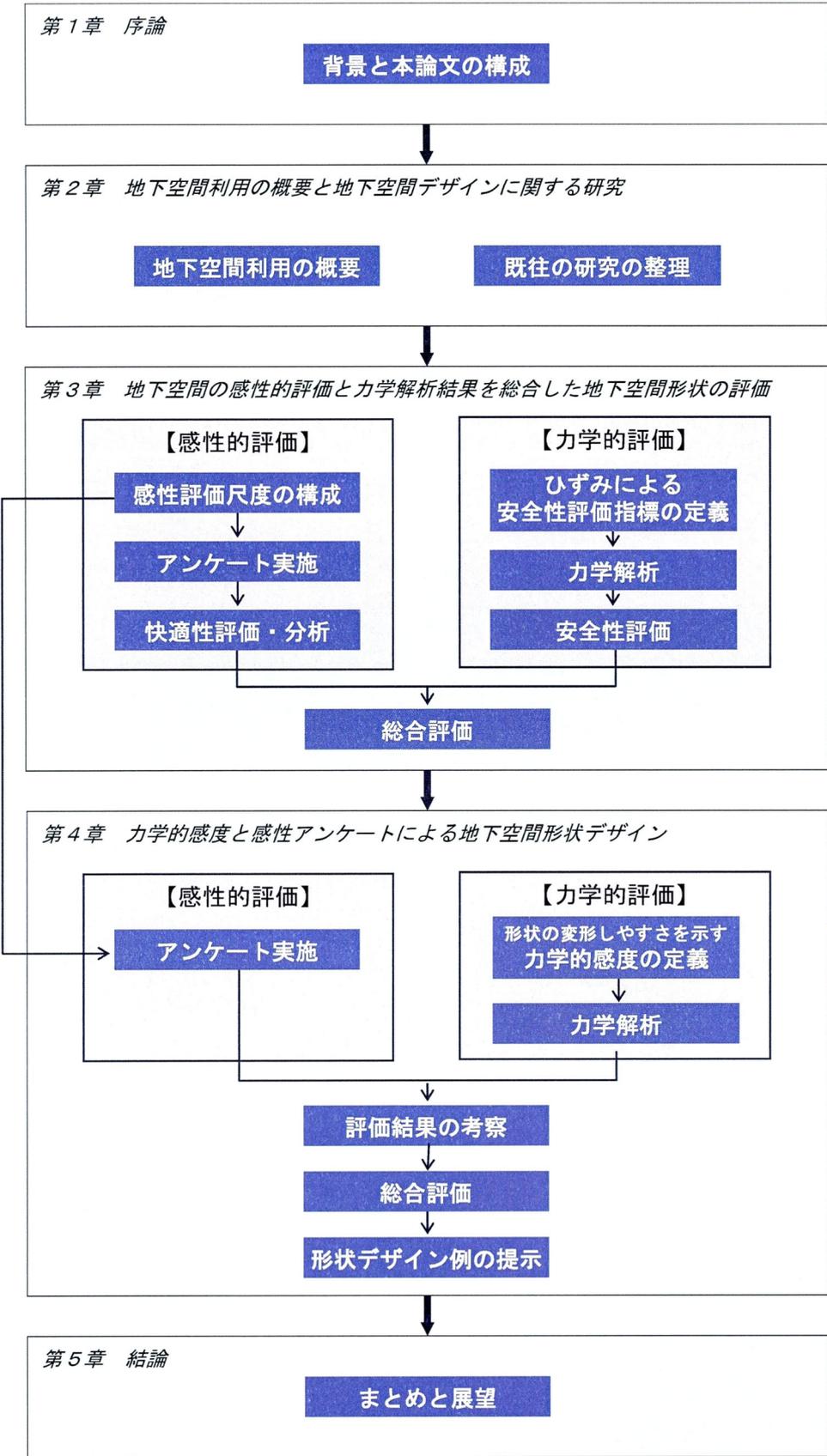


図-1.1 本論文の構成

## 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, 1990.
- 2) Carmondy, J. and Sterling, R.: *Underground Space Design*, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- 3) (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, <http://www.ena.or.jp/GEC/index.html>, 2010.
- 4) 中田金太, 近久博志, 岩元 洋, 小林 薫: 国内初岩盤地下美術館, トンネルと地下, 第 2 巻, pp.219-225, 1996.
- 5) 東京都地下鉄建設株式会社 (編, 発行): 大江戸線 26 駅写真集, 駅舎デザインとパブリックアート—21 世紀の地下鉄駅を目指して—, 2000.
- 6) 東京大学宇宙線研究所: スーパーカミオカンデ, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/index.html>, 2010.
- 7) (財) エンジニアリング振興協会: Engineering, 地下開発利用センター 設立 20 周年記念号, No.121, pp.19-22, 2009.
- 8) 先端加速器科学技術推進協議会: ILC リニアコライダー計画, <http://aaa-sentan.org/ILC/index.html>, 2010.

## 第2章

### 地下空間利用の概要と地下空間デザインに関する研究

#### 2.1 地下空間利用の概要

##### (1) 古代からの地下空間利用<sup>1)-3)</sup>

地下と人間との関わりは原始時代からはじまり、今から50万年前までにさかのぼる。旧石器時代の主要な住居は洞窟住居であったといわれ、風雨や厳しい気候を避けるための居住空間として自然洞窟が利用されていた。

新石器時代以後、中世ごろまでは、世界各地で洞窟が人工的に手を加えられながら、墳墓、住居、神殿、寺院などの多くの目的で利用された。住居の例としては、中国のヤオトン住居、トルコの Cappadocia 等が挙げられる。また、地下の断熱性・恒温性・耐候性、および、隔離性などといった特性を生かし、貯蔵・交通輸送・上下水貯蔵等にも地下空間が利用されてきた。水源・水路の確保は古代の人々にとっても重要なものであり、紀元前二千年以前から、井戸、地下貯水池、地下水路、カナート、水路トンネルなどが世界各地で建設されており、現在でも実際に使用されているものも少なくない。

しかし、地下が積極的に利用されはじめたのは19世紀以降であり、都市施設としての地下利用が進んだ。たとえば、1837年にイギリスのリバプール地区で史上最初の鉄道トンネルが構築され、1863年には、ロンドンで開削埋設工法によって世界最初の地下鉄道の建設が行われた。

近代から現代になり、都市部を中心として、主に社会資本の整備の一環で、都市交通、エネルギー、通信、上下水道など様々なニーズに応じ、多様な新しい技術に支えられ地下空間の利用が広がっている。大規模な岩盤空洞（石油備蓄、地下発電所等）が建設され、長大トンネルも掘られるようになった。また、都市空間の不足等から、地下鉄網の拡充とも関連し地下街の開発も進展していった。

図-2.1に、地下空間の歴史的な利用経緯を示す<sup>4)</sup>。

##### (2) 近年の地下空間利用

経済協力開発機構（OECD）の提言「21世紀の都市は、地上の使用を住宅、公園、広場に限定し、運輸・交通・通信・電力・水道・ガスなどの建設はもとより、駐車場、倉庫、廃棄物、下水の処理施設もすべて地下に収容することを理想とする」（1970）を契機に、各国において、地下空間利用のあり方が再認識され、これを活用しようとする運気が高まった<sup>2)</sup>。日本においても、1980年半ばごろから、宇宙、海洋に続く第3のフロンティアとして「地下」が注目された。

2000年5月には「大深度地下の公的使用に関する特別措置法」（平成12年法律第87号）が成立し、2001年4月より施行された。この法律は、首都圏、近畿圏、中部圏の大都市圏を対象に「通常の利用が行われない地下」（建築物としての地下利用を「通常の利用」としている）と定義され

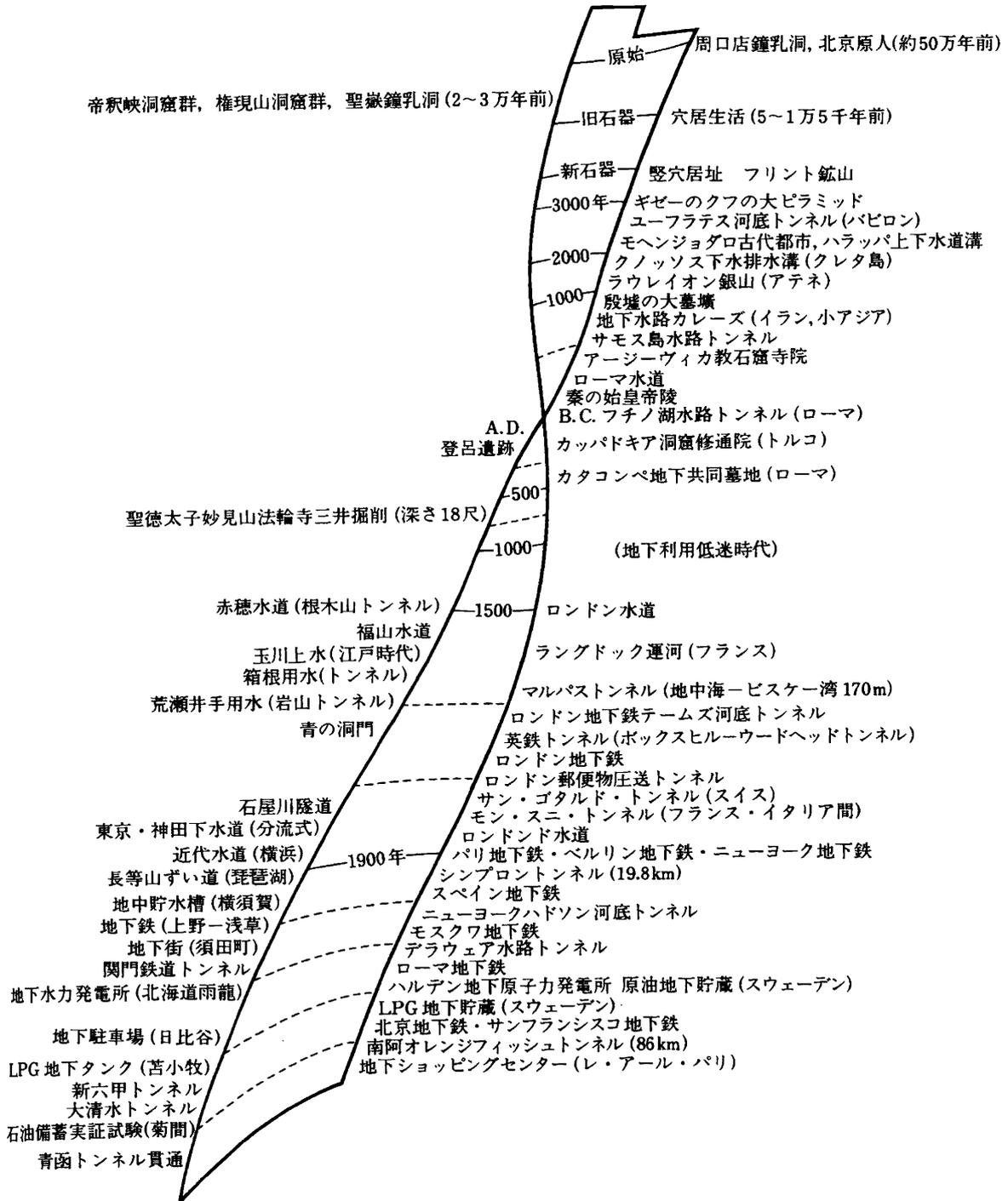


図-2.1 地下空間利用の歴史<sup>4)</sup>

た「大深度地下」について、原則として事前に補償を行うことなく、公共的な事業のために使用权が設定できる特別な手続きを定めたものである。

上記の流れの中で、近年の地下空間利用は、都市機能の向上を目的に展開されたものが多い。たとえば、パリでは、50年ほど前から都市計画の一環として地下ネットワークを構築し、電力・ガス・熱等の供給を行っている。パリ市内の地上部分は、文化財の宝庫であり自由な再開発が難しいことから、地下に新しい都市機能の展開を図った<sup>3)</sup>。日本においては、都市の洪水対策として、神田川・環状7号線地下調整池や首都圏外郭放水路などが建設されている。

また、ショッピング・モールやレストラン、コンサートホール、美術館、屋内プールといった商業施設、エンターテイメント、観光などの人々が集う公共施設としても地下空間が利用されている。たとえば、冬季には-30℃にも達するカナダのモントリオールやトロントでは、地上よりも地下の方が気温が安定していることに注目し、大規模な商業複合文化施設を整備し、快適な地下空間を生み出している<sup>3)</sup> (図-2.2)。北欧では、フィンランドのテンペリアウキオ教会やレトレッティ・コンサートホール (図-2.3) をはじめ、スウェーデンのストックホルムの天井に壁画が描かれた地下鉄駅などが挙げられる。このような人々が集う公共空間としての利用は海外に多く見られたが、近年は日本でも一般的な地下街以外の利用も増えてきている<sup>6)</sup>。大谷石採掘跡の地下空洞を利用した「大谷資料館」 (図-2.4)、日本国内初の岩盤地中式美術館である「ジオドーム高山祭りミュージアム」<sup>7)</sup> (図-2.5)、地下農園の「PASONA O2 (パソナオーツー)」 (図-2.6)、地下鉄関連の新しい取り組みとして、各駅に独自のコンセプトを持たせてデザインされた「大江戸線」<sup>8)</sup> や、地中にある宇宙船 (地宙船) をデザインコンセプトとした「渋谷駅」 (図-2.7) などがその例として挙げられる。

一方、地下空間の持つ特徴、および、優位性に着目し、科学実験施設として地下が利用されている。日本でも、ニュートリノの発見につながったカミオカンデやスーパーカミオカンデ<sup>9)</sup>、大強度加速器施設 J-PARC が地下に建設されている。また、欧州原子核研究機構 CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, 英語名称 European Organization for Nuclear Research) はスイス・ジュネーブ郊外のフランス国境の地下 100m に周長 27km のトンネルを建設し、大型円形加速器を設置した<sup>10)</sup>。さらに、米国の DUSEL (Deep Underground Science and Engineering Laboratory : 大深度地下空間を利用した自然科学、および、工学に関する実験施設)<sup>11)</sup> 計画も挙げられる。

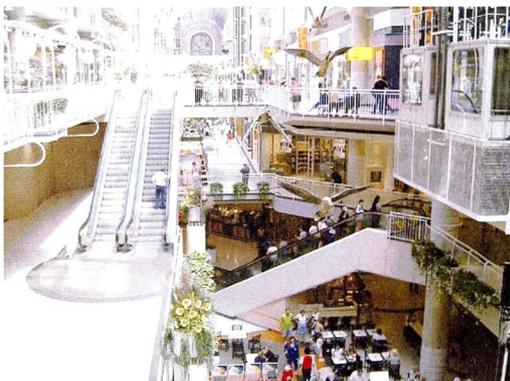


図-2.2 イートンセンター  
(カナダ、トロント。撮影：清水)

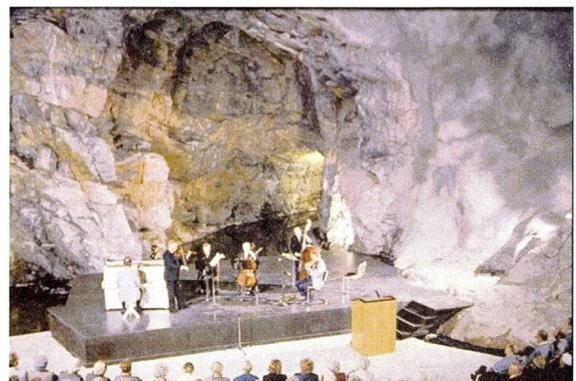


図-2.3 レトレッティ・コンサートホール<sup>5)</sup>  
(フィンランド、ヘルシンキ)

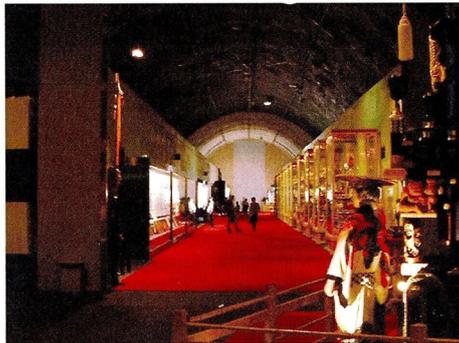


(a)回廊部



(b)天井からの光

図-2.4 大谷資料館（栃木県、撮影：今泉）



(a)導入部

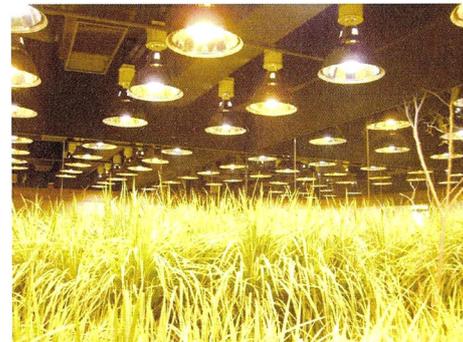


(b)内部

図-2.5 ジオドーム高山祭りミュージアム（岐阜県、撮影：今泉）



(a)Room2 バラ・ハーブ畑

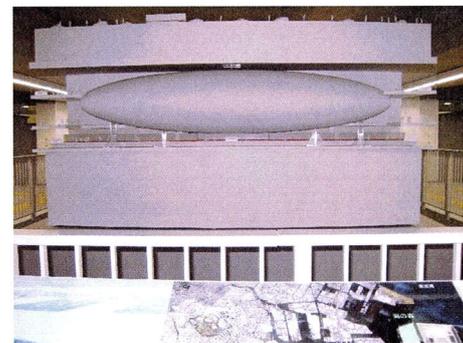


(b)Room3 稲

図-2.6 PASONA O2（東京都、撮影：増田）



(a)副都心線入り口



(b)駅全体の模型

図-2.7 東急東横線・東京メトロ副都心線 渋谷駅（東京都、撮影：増田）

### (3) 現在の動向と今後の利用<sup>2), 12)</sup>

地球環境や人口問題などが大きな課題となっている現在、その解決のために地下空間を有効活用することが考えられている。特に地下空間の優位性の活用が期待されるものとして、世界の人口増加と都市化、環境保全、地上の景観保全などが挙げられる。

まず、世界の人口増加や都市化による都市過密問題の解消案として、自動車交通問題をはじめ、水、エネルギーの供給、下水処理などのインフラ拡充や洪水・地震などの都市内災害の被害軽減のための地下空間利用が考えられる<sup>12)</sup>。環境保全の面からは、地下空間利用が地球規模の環境保全に対しても大きな役割を果たすと期待されており、CO<sub>2</sub>削減（地中貯留、地下水・再生水の利用）や核廃棄物の地下貯蔵などが検討されている。また、地上景観保全については、地下化できるものはさらに積極的に地下化することにより、地上のオープンスペースの増加や混雑緩和、歴史的建築物や自然景観の保全などが期待される。

実際のプロジェクトとしても都市機能の高度化を中心に、地下空間利用の開発が進んでいる。欧州を筆頭に新幹線型の高速度鉄道（HSR：High Speed Rail）網の整備が続いており、イタリアと欧州北部を結ぶアルプスを横断する長大トンネルの建設が最盛期を迎えている。大量輸送機関である地下鉄は大都市の不可欠な交通手段となり、CO<sub>2</sub>削減の観点からも、自動車から鉄道への移行促進が進むと考えられ、アジア（特に中国、インド）をはじめ、世界の都市部で地下鉄建設が活発化している。道路トンネルは、高架高速道路を地下に移し変え、渋滞緩和や地上空間の開放等を目的に世界の大都市部で建設が行われている。インフラ設備の地中化も大規模化、大深度化が進み、ロンドンでは、オリンピック用に全長 30km のケーブルトンネルが建設中である。日本においても、「大深度地下の公的使用に関する特別措置法」が成立し 10 年が経とうとしている中、実際にこの法律に沿ったプロジェクトとして、神戸の送水管建設や東京の外郭環状道路計画が進んでいる。成田・羽田空港間を 30 分で結ぶ鉄道案も提案されている。

また、先端科学地下実験施設としては、40km の直線トンネルと大規模地下空洞からなる国際リニアコライダー施設が基本設計段階から実施に向けて動き出している<sup>13)</sup>。

## 2.2 心理・感性を考慮した地下空間デザインに関するこれまでの研究

### 2.2.1 地下空間の利用やデザインに関する研究

地下空間の利用において心理的な側面を考慮する必要があることは、以前から指摘されており、地下空間デザインに関連して、心理学やデザイン評価の手法を用いたアプローチがなされている。ここでは、地下空間の利用やデザインに関するものに絞り、研究事例を整理する。

#### (1) 地下空間の心理的、生理的要素の観点の必要性の指摘<sup>14)</sup>

J・C・カーモディらは、地下空間が人間の生きる空間として利用される場合には、人々の最初の反応は一般にネガティブなものであり、多くの懸念や疑問が示されることが多いと指摘している。そして、地下空間において人々に生じるかもしれない心理的、生理的な問題を可能な限り明らかにすることを目的として、これまで進められてきた研究や、地下空間について一般に共有されているイメージや連想から判断し、図-2.8のように、心理や生理に否定的な影響を及ぼす可能性のある問題のリストを作成している。そこでは、地下空間に対するネガティブな影響はすべて、①外からは見えない、②無窓である、③地下である、という地下空間の3つの基本的特徴の1つに関係しているとしている。

#### ◆地下空間に潜在的に付随する心理的問題◆

1. 地下建造物はほとんど目に触れないため、明確な実像に欠けるきらいがある。
2. 建造物の実体がないためにエントランスを見つけることが難しく、まごついてしまう。
3. エントランスでは、一般に下方向に移動することになるが、それはネガティブな連想や恐怖を潜在意識にもたらし。
4. 建造物の全体的な容積や形状が見えず、また窓がなくて外界との接触がないために、地下建造物の中では方向感覚を喪失してしまう可能性がある。
5. 地下建造物には窓がないために、自然や地上の人造の環境との接触や刺激が失われてしまう。
6. 外界と接触できる窓がないために、拘束感や閉所恐怖症にとらわれる可能性がある。
7. 地下空間には、暗黒、冷氣、湿気といった連想がつきまとっている。
8. 地下空間はしばしば、希望に乏しいおとしめられた状態にある空間とみなされてきた。
9. 地下空間でしばしば連想されてしまうのは、火災、洪水、地震などによる崩壊の恐怖、逃げ道を失う恐怖である。

#### ◆地下空間に潜在的に付随する生理的問題◆

1. 日光が生命に対して持つ重要な特徴を人工照明はほとんど持っていないために、自然光のない環境が与える心理的な影響への懸念を引き起こす。
2. 地下空間はしばしば通気システムが貧弱で、空気の質が悪いことがある。
3. 管理の不適切な地下空間は湿度が高く、健康に影響を及ぼす可能性がある。

図-2.8 地下空間に潜在的に付随する心理的問題、および、生理的問題<sup>14)</sup>

**(2) 地下の心理的なイメージに関する調査・研究<sup>15)</sup>**

羽根らは、地下のイメージを知覚的なイメージとコンテキスト系のイメージに分け、調査・研究している。知覚的なイメージとは、人間の五感（視覚、聴覚、臭覚、味覚、触覚）を通して心に知覚されるイメージであり、コンテキスト系のイメージとは、地下に対する人々の深層意識や無意識のイメージを意味し、たとえば、「地下は闇のようだ」というとき、必ずしも実際に真っ暗な闇を体験した結果ではなく、「何となく地下は闇のように暗いのではないか」という漠然としたイメージによって生まれているものをいう。

コンテキスト系のイメージに対しては、「言葉」によって深層意識にあるイメージの抽出を試みている。地下空間の「快 - 不快」については、「快適」のイメージは「静かな」「新しい」「壮大な」「安定した」、 「不快」のイメージは「閉ざされた」「閉鎖的な」「暗い」「薄暗い」「湿っぽい」「圧迫感がある」「危うい」で表されるとし、圧倒的に地下は「不快」なイメージとして捉えられていることが示されている。また、「快 - 不快」とは異なる「冒険的な」「変化する」「思いがけない」「予想外の」「意外な」といったイメージが抽出されている。これは、非日常性を示すイメージで、地下に対するポジティブなイメージにつながるものとして興味深い。

**(3) 地下空間デザインの調査<sup>16)</sup>**

より質の高い空間デザインを模索するために、地下開発利用研究センター（(財) エンジニアリング振興協会）では、利便性、快適性、安全性の観点から、デザインを「構造系デザイン」「計画系デザイン」「意匠系デザイン」の3つに分け検討を行った。そこでは、文献、および、事例を中心にデザイン手法の分析を行った後、各デザイン系について、より深く掘り下げて分析を行うとともに、地下歩行者通路や地下広場のような公共性の強い地下空間モデルを想定し、具体的なデザイン要素についてケーススタディを試みている。意匠系デザインでは、「広場」「柱」「天井」「階段」「素材」「光」「水」、および、「自然／文化」を抽出して、空間におけるこれらの要素の形態と、それらが与える効果の可能性について基本的な分析を行っている。たとえば、「天井」は内部空間としての要素であり、形態として分類した場合、「フラット」「ビーム」「トラス」「アーチ」「ヴォールト」「ドーム」に分けられるとし、不特定多数の人々が利用する空間という観点から見れば、柔らかさを感じさせる曲面／曲線で構成される「アーチ」「ヴォールト」「ドーム」形態が適しているとしている。

**(4) 地下景観の快適性の分析<sup>17)</sup>**

田中らは、地下景観を定量的に評価するためにSD法 (Semantic Differential Method) を適用し、地下19枚、地上11枚、計30枚（通路、広場、商店街、出入り口、駅）のスライドを刺激として、アンケートを実施している。その結果、景観のイメージは、視覚、触（感）覚、聴覚の3つの因子で9割の説明がつくことが分かり、これらの3つの因子のうち地下・地上を説明する因子は、触（感）覚、聴覚因子であることが示されている。また、地下を説明する言葉は、「人工的な、硬い、静かな、寂しい」であり、地上を説明する言葉は、「自然な、柔らかい、騒々しい、賑やか」であるとしている。さらに、快適性は視覚因子の重みが非常に強いことが示されている。

**(5) 地下景観の評価構造モデルの分析<sup>18), 19)</sup>**

関口らは、各種の分析手法を用いて、地下街路景観の様式や評価構造モデルを分析・検討している。

文献18)では、多次元尺度構成法（MDS ; Multi-Dimension Scaling Method）を用いて、地下景観タイプの抽出を行っている。既存地下空間の写真に対する分析結果から、「エレガント景観」「ダイナミック景観」「ブリリアント景観」「ファンタジー景観」「ゴースト景観」の5つの景観タイプを抽出している。

文献19)では、レパートリー・グリッド発展手法を応用して、地下景観の評価構造モデルの構築を試みている。レパートリー・グリッド発展手法とは、写真等の複数の評価対象に対する被験者の類似点・相違点・優劣等の判断を被験者の自由な表現（単語・文章のいずれでもよいとしている）から言語化して抽出し、判断理由の階層化を図り、表示された「ツリー図」を空間評価構造モデルとする手法である。構築されたモデルでは、好ましいという評価構造を左端の“好ましい”を始点に、好ましくないという評価構造を右端の“好ましくない”を始点として、相対する2方向からそれぞれ中央に向かって評価語句を配置している。このモデルでは、たとえば、好ましい、好ましくないという評価は、上位階層のイメージレベルでは、“地下意識、安全性、衛生的、楽しさ、人間味”など比較的共通の評価構造として現れるという特徴が見られた。また、構築された評価構造モデルは、地下空間を開発する場合のイメージアセスメント、および、設計シミュレーション評価に、また、評価語句の分析からは利用者の年齢ターゲットを絞った場合の景観設計に応用できると将来ビジョンが述べられている。

**(6) 地下施設のデザイン評価<sup>20)</sup>**

棚橋らは、意匠系デザインの面から「地下空間デザイン」に検討を加えることを目的とし、地下施設の代表として、地下街、地下鉄駅舎部とコンコース、道路トンネル坑口の3施設を対象とし、3施設の写真群をSD法に基づき分析し、今後の地下空間デザインの方向性を検討している。

地下街に対して、因子分析の結果から、地下景観判断に影響を与える要因として、休息感因子、安定感因子の2つの因子が考えられ、快適な地下景観とするにはこの2つの因子を満たすデザインが必要だと示している。また、デザイン評価の高い地下街に見られるように3つの要素（形態、環境、構成）が調和し、かつ、独自のコンセプトを持ったデザインが必要であるとしている。

地下鉄に関しては、因子分析により、美的因子、休息因子、利便性因子が抽出され、構造的な利便性を考慮し、壁・床・天井などの要素は、快適性、美感を備えることで、より良い空間へと導くことが可能であるとしている。

トンネル坑口では、坑口面のほぼ全体がコンクリートで覆われた形式（面壁型）では、デザイン評価の高い例は少なく、コンクリート一色の面壁にするのではなく、いかに自然環境と調和したものにすることが重要となるだろうと述べている。

**(7) 視聴覚による空間認知<sup>21)</sup>**

朝倉は、日常生活空間である都市景観の画像、および、街頭音を刺激とし、人がその環境をいかに知覚し、印象、および、行動に結び付けているかを検討するために印象評価実験を行い、地

上および地下空間において、人が困惑せずに行動するために適切な視聴覚情報について考察している。

視覚情報と聴覚情報を組み合わせることにより、現実場面に近い知覚環境で空間認知に影響する要素を見出すことができ、見た目の印象だけではなく喚起される行動や行きたさの程度に関する印象を評価するには、多感覚からの情報を刺激として用いることが有効だとしている。また、景観機能が曖昧な場所（ブティックや喫茶店、なお、景観機能が明瞭な場所としては、下町の露店や繁華街）は、視聴覚情報の相互の作用が強く見られることから、その場所に適切な知覚環境を構成することが人の行動を喚起するために必要であるとしている。さらに迷路性・不安感の高い地下空間における避難行動、迷いにくい空間形成に応用できるのではないかと考察している。

#### (8) 地下街形状の評価<sup>22)</sup>

櫻井らは、地下街を対象としたCGモデルの有効性について検証し、その結果を用いて既存地下街の空間計画についてモデルシミュレーションを行っている。その中で、断面形状の快適性評価にも着目し、縦長、横長、アーチ、台形の4つのCGを作成し、SD法に基づきイメージ評価を実施している。その結果、地下街通路の断面形状で最適な形は、“アーチ”、次に“台形”であった。また、名古屋駅前地下街サンロードの空間計画（リニューアル計画）についてモデルシミュレーションを行ったところ、通路部は天井を高くし、天井の形状をアーチ状にし、そして吹き抜けを設けることで、改善前より快適性が高くなったことが示されている。

#### (9) 地下街景観の評価<sup>23)</sup>

棚橋らは、形状、色彩、模様などの結合による装飾的な考案である意匠系デザインの観点から、地下街歩行者の視点から撮影したビデオ画像、および、写真による静止画像を用いてイメージ・アンケート調査を実施し、SD法に基づき、静的デザイン、および、動的デザインの評価を行っている。空間を印象づける要素として、空間の大きさや形を表す「形態要素」、光や音など人を取り巻く「環境要素」、床や壁など地下空間を構成している「構成要素」の3つを考え、さらに、形態要素と環境要素を総合し「空間領域要素」、構成要素を「空間構成要素」と名付けた。また、歩行中に評価できる空間領域要素については「動的デザイン評価」を行い、静止して評価する空間構成要素については「静的デザイン評価」を行うものとしている。

20代前半の学生を被験者として調査した結果、空間領域要素においては、“快適美的因子”、“安定感因子”、“広さ要素”の3因子、空間構成要素については、“休息美的因子”、“安定感因子”の2因子が存在することが分かり、快適な地下街空間を創出するには、これらの因子を全て満たす必要があると考察している。また、“快適美的因子”、“休息美的因子”の寄与率が高いことから、これらは特に影響が大きく、地下街空間は、利用者に比較的強い心理的影響を与える快適性、美感、休息感を総合的に考慮したデザインとする必要があるとしている。

#### (10) 地下空間内移動時の期待感に関する研究<sup>24)</sup>

松本らは、地下空間を魅力的にするための空間概念として「期待感」を導入し、連続する地下空間が途中で広がって拡大した場合における、①期待感を感じる位置、②期待感強さと物的条件

の関係を明確化することを目的とし、地下空間での現地調査を行い、期待感が最も強くなる位置の存在を確認し、VTR映像を用いた期待感評価実験を行っている。その結果、期待感最大位置とその位置での期待感強さ、および、位置と強さを決定する空間要因を抽出した。さらに、空間ボリューム変化を示すCGモデル映像実験を行い、空間拡大時の期待感最大位置が断面不可視領域により決定されることを明確化し、期待感最大位置とその位置における期待感最大強さについて予測式を求めている。面積不可視領域率と断面不可視領域という2つの変数変化に影響を受ける断面型期待感強さは、通路幅員が狭い方が期待感強くなり、体積不可視領域率の変数変化に影響を受ける体積型期待感強さは、通路高さ幅員比が0.8程度で弱くなる。また、通路空間に対し、目的空間半径が大きいほうが期待感強くなることを導いた。

#### (11) 日韓、インドネシアを対象とした地下イメージの国際調査<sup>25), 26)</sup>

地下空間における避難に対する考え方の国際比較のために、地下空間委員会心理小委員会（土木学会）では、2003年に日本と韓国、そして、2005年にインドネシアで地下空間についての利用者の意識について調査を行っている。その結果、日本と韓国では、地下空間に負のイメージを持っているが、インドネシアでは肯定的なイメージが高いことが示されている。インドネシアでは、調査対象とした地下空間が民間の建物地下階であることから、セキュリティチェックによって安全性が高いことが理解されており、安心感を与えているのではないかと指摘している。

#### (12) 地下空間景観の概念の提唱と分類<sup>27)</sup>

関口は、地下空間は完全な閉鎖空間ではないものの、地上空間と異なり意識的に閉鎖感を感じる“閉鎖空間”であるとし、地下空間における景観を、「地下景観は、地下空間から喚起される意味（あるいはイメージ）によって心理的影響を受ける意識的閉鎖地下空間内の眺めである」と定義している。

地下街路におけるエレメントをi)通路、ii)交差、iii)広場、iv)昇降、v)シンボル、vi)地下鉄道、vii)地下街、viii)地下駅として挙げ、地下街路空間における景観の基本形を46種類に体系的に整理・分類している。また、地下街路景観の様式は、景観の類似性に関する多次元尺度構成法(MDS)分析によって、「ブリリアント景観」「サイレント景観」「ファンタジー景観」「ダイナミック景観」に大別でき、さらに類型化し、「サンシャイン景観」「スターライト景観」「ロンリネス景観」「エレガンス景観」「スウィート景観」「ゴースト景観」「ダイナミック景観」の7景観となるという。

以上の研究内容と特徴を表-2.1に整理する。これらの研究は、主に地下街などすでに建設された施設に対して、心理的あるいは感性的な立場から地下空間デザインに必要な知見を導くことを目的としている。今後は、これらの成果を基に、地下空間の計画、設計の段階から心理・感性的な観点を考慮できるデザイン手法を構築することが新しい一つの方向になると考える。

表-2.1 地下空間の利用やデザインに関する研究

| No. <sup>※1</sup> | 文献         | 研究対象               | 目的                                | 研究、および、実験の方法                                     |   | 掲載年          |
|-------------------|------------|--------------------|-----------------------------------|--|---|--------------|
|                   |            |                    |                                   | 評価対象の仕様  | 調査・実験手法 <sup>※2</sup><br>主な分析手法など <sup>※3</sup> |              |
| (1)               | 14)        | 地下空間の全般            | 心理的、生理的要素のリスト作成                   | 過去の研究<br>・一般的なイメージや連想                            | ・リスト作成  | 1993         |
| (2)               | 15)        | 地下のイメージ            | 地下イメージの調査・研究                      | 一般的なイメージや連想                                      | ・多数の提示語からの抽出                                    | 1990         |
| (3)               | 16)        | 地下空間の全般            | 地下空間デザインの調査・分析                    | 文献<br>・事例  | ・文献、事例の分析<br>・ケーススタディ                           | 1995         |
| (4)               | 17)        | 地下景観（都市部）          | 地下景観の定量的評価                        | 写真   | ・SD法  | 1997         |
| (5)               | 18)        | 地下街路景観             | 地下街路景観のタイプ抽出                      | 写真   | ・被験者による分類・評価<br>（被験者自身の言葉で回答）                   | 1998         |
| "                 | 19)        | 地下街路景観             | 地下街路景観の評価構造モデルの構築                 | 写真   | ・レバートリー・グリッド発展手法                                | 1999         |
| (6)               | 20)        | 地下施設の意匠デザイン        | 意匠デザイン面からの地下空間デザインの検討             | 写真   | ・SD法  | 1999         |
| (7)               | 21)        | 地下街路の認知            | 視覚による地下空間認知の検討                    | 写真（画像処理で彩度を変化）<br>・街頭言                           | ・SD法（ここでは、主観的評価法としてい<br>る）<br>・選択版に対する回答<br>など  | 2000         |
| (8)               | 22)        | 地下断面形状             | CGモデルの右効性の検証、および、<br>モデルシミュレーション  | 写真<br>・CG（静止画）                                   | ・SD法  | 2002         |
| (9)               | 23)        | 地下街路景観の意匠デザイン      | 地下街路景観の評価・分析                      | 写真（静止画）<br>・ビデオ画像（動画）                            | ・SD法  | 2004         |
| (10)              | 24)        | 地下空間移動時の期待感        | 地下空間移動時の期待感の位置や物<br>的条件的明確化       | 現地調査<br>・VTR映像<br>・CGモデル（動画）                     | ・M.E法（標準刺激映像と評価映像との比<br>較）<br>・調整法による期待感位置の評価   | 2004         |
| (11)              | 25)<br>26) | 地下空間のイメージ<br>（非難時） | 日韓・インドネシアにおける地下イ<br>メージの把握（特に非難時） | 一般的なイメージや連想                                      | ・アンケート用紙を利用した留置法（郵<br>送）<br>・SD法                | 2005<br>2007 |
| (12)              | 27)        | 地下空間景観の概念          | 地下空間景観の概念の提唱と分類                   | 提唱：既存地下空間の構成要素<br>（通路、交差、広場、など）<br>・分類：既存地下空間の様式 | ---   | 2008         |

※1：2.2.1における項

※2：調査時に形容詞対尺度を用いているものは、ここではSD法と総称している。

※3：集計結果（合計値、平均、割合等）の考察ほか、各種分析を行っている場合にその分析手法を挙げた。

### 2.2.2 土木学会地下空間委員会心理小委員会の活動

土木学会では、大深度地下の活用の機運が高まった1987年から研究活動を始め、その成果を図書として出版している<sup>28)</sup>。また、同学会では1994年に地下空間委員会を常設し、地下空間利用における人間中心の視点に立ち、“地下空間学”の創造を目指す研究活動を行っている<sup>29)</sup>。活動領域は、土木工学のみならず、都市計画、建築、法律、医学、心理学、福祉さらに芸術の分野にまで及んでいる。この委員会には、現在、「計画」、「防災」、「心理」、「維持管理」、「普及」の5つの小委員会が設置されており、各々のテーマに基づき研究活動を行うとともに、定期開催される地下空間シンポジウムや土木学会年次学術講演会での研究討論会、共通セッションにおける研究発表などを通じて、当該研究分野の発展を図っている。

5つの小委員会の1つである「心理小委員会」では、「公共的地下空間の知覚環境に関する研究」を主テーマとし、公共的地下空間の多様な利用者の知覚環境、災害時行動などに重点を置き、心理学観点から地下空間における人間の行動について研究し、その成果を実際の地下施設への適用とその課題について検討している。また、地下空間行動、地下空間の景観、地下の生理的・心理的負荷、空間構成と地下への誘導、筆者らの感性と力学の融合など、関連ある研究話題を収集し、心理学を含む学際的なアプローチを構築して、地下空間を利用する人間の立場に立った研究分野の確立を目指している<sup>30)</sup>。

## 2.3 感性工学と土木工学分野への応用

### 2.3.1 感性工学について<sup>31), 32)</sup>

人間の感じ方、嗜好、個人差などを製品設計に活かし、そうした機能を製品に組み込もうとする動きも多方面で活発となっている。ユーザーの感性の把握や分析を行い、機能や仕様をそれに合わせる設計方法が採用されるようになってきた。このための方法として、感性工学が発展してきた。

「感性」という言葉の定義や捉え方は1つではなく、人によって異なり、辞書上、哲学、認識論、心理学などというそれぞれの分野により多様である。工学やビジネスの分野においては、外界の刺激が感覚感受器に伝えられた後に発生する「感覚→知覚・認知→感情・情動→言語などに表現」間での一連の情報の流れという心理学的な定義で捉えるか、もっと割り切って、感覚から心理までの反応、あるいは単に感覚と感情と解するという意見もある<sup>31)</sup>。このような多様な捉え方ができる「感性」に注目し、生活者の感性を設計に盛り込んで、「生活者のニーズにフィットした新製品を創造することにより、それをモノの設計に写像して生活者に喜ばれる製品づくりをする開発技術」が感性工学 (Kansei Engineering あるいは Kansei Ergonomics) と呼ばれている。感性工学の最も基本的な手法は、「感性評価→製品設計」という流れをとる。感性評価ではSD法がよく用いられており、評価結果の分析においては、因子分析をはじめ、主成分分析、多次元尺度構成法、数量化理論など様々な分析方法が用いられている<sup>29)</sup>。現在では、様々な分野で感性工学を活用し製品開発が行われている<sup>32), 33)</sup>。

### 2.3.2 土木工学分野における感性工学手法の適用事例

これまで土木工学の分野においても、数は少ないものの、橋・河川・ダムなどを対象に感性工学の手法が適用されている。数年程度しか利用されない工業製品に比べ、土木構造物は数10年以上利用されるので心理や感性的評価を尊重することは重要と考えられる。

土木分野で「感性」を取り扱っている事例を整理すると、対象は異なっても、図-2.8に示すように3つの観点、すなわち、「景観」、「利用時の安全性・快適性」、「住民の意識」に大別することができる。また、対象構造物に着目すると、橋梁におけるものが比較的多く見られ、海岸や河川を対象としたものもある。このほかにも「感性」という言葉を用いていなくても、心に浮かんだイメージを数値化して定量的に表すために、SD法や因子分析、フラクタルなどを用いた研究も見られる。

保田らは、橋梁景観評価に感性工学手法を適用し、橋梁景観設計へ応用することを検討している<sup>34)-37)</sup>。文献34)では、特に桁橋に焦点をあて、橋梁のデザイン要素をアイテム(橋種や橋梁の色、背景、下部構造などの桁橋の景観美に影響するデザイン要素) / カテゴリー(下部工形式ならば張り出し式や壁式といったデザイン要素項目)として細分化して抽出し、SD尺度を用いた感性評価、因子分析、数量化理論などによってイメージ形容詞との関係を明確にし、デザイン要素と「美しさ」や「親しみやすさ」などの人々の感性との関係を合理的に結び付ける方法を検討している。文献35), 36)では、フラクタル次元を取り入れ、アンケートによる感性評価との比較・検討を行っている。また、文献37)では、桁橋において住民参加による合意形成の場で提示する代

替案を効率的に作成するための方法を検討している。

吉田らは、橋梁照明における足元灯のシミュレーションを行い、輝度やグレアなどの数的評価とSD法による感性評価を行い<sup>38)</sup>、勇らは、橋梁景観のカラーイメージスケールの作成を目指し<sup>39)</sup>、近田らは、斜張橋に対する感性について性別や年齢別にその相違を調査している<sup>40)</sup>。

小栗らは、1/fゆらぎ理論を導入して歩道の快適性向上効果の検討<sup>41)</sup>を、また、高速道路の実車走行映像を使用し、アイマークレコーダーと脳波の感性スペクトル解析を組み合わせた感性影響計測システムを作成してシステムの性能を検証するための計測実験を行っている<sup>42)</sup>。

熊谷らは、海岸景観の構成要素と住民評価の因果関係について、感性工学ならびに経済学手法による検証を試み、受益者が感じる消費者余韻と海岸景観の構成要素の因果関係を検討している<sup>43)</sup>。竹林らは、河川景観<sup>44)</sup>、ダム・水源地イメージ<sup>45)</sup>の評価に感性工学手法を適用し、細分化したイメージ要素（河川景観では、川幅、砂州、護岸など）と人の感性との関係を把握することによって、人の感性を生かした設計について検討している。大野らは、フラクタル理論を基に、自然環境と調和した構造物の景観の評価法を色彩と形状の観点から検討し、自然な景観と人工的な景観とでは、形状と色彩のフラクタル性やフラクタル次元が異なることを明らかにし、自然と調和した景観を作り出すための一つの指針としてフラクタル特性が利用できることを示している<sup>46)</sup>。河川景観の色彩を対象とした景観評価を、アンケート、景観チェックリスト、フラクタル解析などによって行い、従来の河川景観では色彩が十分に考慮されておらず、実際の人間の感覚と異なる結果を導き出す可能性があること、また、色彩を含んだ景観の良否の観点を検討する場合にはフラクタル解析が人間の感覚にも近いことを示した<sup>47)</sup>。

澤田らは、車椅子の構造的長を明らかにするために、車椅子の振動特性・操作性・乗り心地に対し、SD法によるアンケートを実施し、感性工学的に検討を行っている<sup>48)</sup>。白木らは、住環境音に対し、感性工学手法を用いて、音に関する種々の物理パラメータ（大きさ、高さ、粗さなど）と人が音に対して持つイメージの関係を調査・分析している<sup>49)</sup>。

谷本らは、公共事業における住民の合意形成の一助のために、心理要素（感性、風土など）と物理要素（材料、形状、環境など）との対応を基礎とし、評価、解析、および、推論にいたる住民参加支援システムを開発している<sup>50)</sup>。

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <p>■景観<br/>(形, 色彩, 照明)</p> | └ 橋梁 <sup>34), 35), 36), 37), 38), 39), 40)</sup>                    |
|                            | └ 街路 <sup>41)</sup> , 道路 <sup>42)</sup>                              |
|                            | └ 海岸 <sup>43)</sup> , 河川 <sup>44), 46, 47)</sup> , ダム <sup>45)</sup> |
|                            | └ 地下空間   |
| <p>■利用時の安全性・快適性</p>        | └ 車椅子 (振動・操作・乗り心地) <sup>48)</sup>                                    |
|                            | └ 音 <sup>49)</sup>   |
| <p>■住民の意識</p>              | └ 住民との合意形成 <sup>37), 50)</sup>                                       |
|                            | └ 事業便益の把握 <sup>43)</sup>   |

- ・○) は、末尾の参考文献No.を示す。
- ・地下空間については、2.2.1を参照。

図-2.9 土木工学分野での感性の適用

本章では、地下空間利用の歴史と現状、および、心理・感性を考慮した地下空間デザインの研究を取りまとめた。また、人々の感性を活用する感性工学の概要とその土木工学分野への適用例を示した。人々の暮らしを豊かにする立場からも地下空間の利用が期待され、従来の設計、施工の観点だけではなく、心理や感性の観点からの新しい取り組みもなされている。一方、土木工学分野における感性工学の研究もまだ緒についたばかりであり、魅力的な地下空間を創造するために、感性を活用したデザイン手法を構築することはこれからの研究課題である。

## 参考文献

- 1) 地下空間利用技術に関する研究小委員会：21世紀の新しい地下空間利用に向けて，土木学会論文集，No.403/VI-10，pp.25-27，1989.
- 2) 西 淳二，佐藤邦明：地下空間-21世紀に向けて-，2.地下空間利用の歴史的背景．土と基礎，38-4(387)，1990.
- 3) 土木学会地下空間研究小委員会（編集者：日比野敏）：地下空間と人間 3，地下空間の環境アセスメントと環境設計，土木学会，1995.
- 4) 文献1)，図-1 地下（空間）利用の歴史，pp.26，1989.
- 5) 三井康司，藤川富夫，亀井紀幸（共著），川本眺万（監督）：ロックエンジニアリングと地下空間，鹿島出版，1990.
- 6) （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，<http://www.ena.or.jp/GEC/index.html>，2010.
- 7) 中田金太，近久博志，岩元 洋，小林 薫：国内初岩盤地下美術館，トンネルと地下，第2巻，pp.219-225，1996.
- 8) 東京都地下鉄建設株式会社（編，発行）：大江戸線 26 駅写真集，駅舎デザインとパブリックアート—21世紀の地下鉄駅を目指して—，2000.
- 9) 東京大学宇宙線研究所：スーパーカミオカンデ，<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/index.html>，2010.
- 10) European Organization for Nuclear Research：The Large Hadron Collider，<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHC-en.html>，2010.
- 11) Deep Underground Science and Engineering Laboratory，<http://www.int.washington.edu/DUSEL/>，2020.
- 12) （財）エンジニアリング振興協会：Engineering，地下開発利用センター 設立20周年記念号，No.121，pp.19-22，2009.
- 13) 先端加速器科学技術推進協議会：ILC リニアコライダー計画，<http://aaa-sentan.org/ILC/index.html>，2010.
- 14) Carmondy, J. and Sterling, R.: *Underground Space Design*, Van Nostrand Reinhold, chapter 5: psychological and physiological effects in underground space, pp.137-152, 1993.
- 15) 羽根 義，室 恵子，沢田栄一，富倉まり繪子，北澤 節：地下文化の様相，テクネット，1990.
- 16) 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.
- 17) 田中 正，西 淳二：地下空間デザインの快適性評価について，土木計画学・論文集，No.14，pp.121-131，1997.
- 18) 関口佳司，北村眞一：多次元尺度構成法を用いた地下景観に関する研究，地下空間シンポジウム論文・報告集，第3巻，pp.17-24，1998.
- 19) 関口佳司，北村眞一：レパートリー・グリッド発展手法を応用した地下空間評価構造モデルに関する研究，地下空間シンポジウム論文・報告集，第4巻，pp.55-64，1999.

- 20) 棚橋由彦, 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.
- 21) 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.
- 22) 櫻井昭夫, 新美政光, 西 淳二, 田中 正: 視仮想シミュレーションによる地下街形状の評価に関する研究, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第7巻, pp.109-118, 2002.
- 23) 棚橋由彦, 蔣 宇静, 永浴順子: SD法を用いた地下街景観の静的・動的デザイン評価, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第9巻, pp.9-18, 2004.
- 24) 松本直司, 近久博志, 加藤 毅, 勝崎香奈: 地下空間における期待感—空間拡大時における期待感位置とその強さ—, 土木学会論文集, No.777/VI-65, pp.139-147, 2004.
- 25) 西田幸夫, 趙 倬徳, 市原 茂, 神作 博: 日韓アンケート調査による地下空間利用に関する研究, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第10巻, pp.125-132, 2005.
- 26) ハリス ファビラー, 西 淳二, 市原 茂, 西田幸男: アンケート調査から見たインドネシアにおける地下空間の意識に関する研究, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第12巻, pp.1-8, 2007.
- 27) 関口佳司: 地下空間の景観とは, 土木学会地下空間研究委員会心理小委員会活動報告書, 4.4, pp.4-46-4-63, 2008.
- 28) 土木学会地下空間研究小委員会: 地下空間と人間, 1~4, 土木学会, 1995.
- 29) 土木学会地下空間研究委員会: 研究成果報告書, 2002, 2005, 2008.
- 30) 土木学会地下空間研究委員会心理小委員会: 心理小委員会活動報告書, 2005, 2008.
- 31) 長沢伸也: 感性工学とビジネス, 特集: 感性工学とは, 日本感性工学会誌, Vol.1, No.1, pp.37-48, 1999.
- 32) 長町三生: 商品開発と感性, 海文堂出版株式会社, 2005.
- 33) 日本感性工学会: <http://www.jske.org/>, 2010.4.
- 34) 保田敬一, 白木 渡, 堂垣正博, 河津圭次郎, 安達 誠: 桁橋の景観評価・設計への感性工学手法の適用に関する研究, 構造工学論文集 Vol.45-A2, pp.543-552, 1999.
- 35) 保田敬一, 白木 渡, 角野大樹, 堂垣正博, 安達 誠: 桁橋の景観設計における感性評価とフラクタル次元の適用に関する研究, 構造工学論文集 Vol.47-AII, pp.327-334, 2001.
- 36) 安達誠, 白木 渡, 近田康夫, 保田敬一, 堂垣正博: フラクタル次元と色彩を考慮した橋梁景観の感性評価に関する研究, 構造工学論文集 Vol.48A, pp.299-306, 2002.
- 37) 保田敬一, 白木 渡, 堂垣正博: 桁橋の景観設計における合意形成用代替案作成時の留意事項, 構造工学論文集 I Vol.50, pp.287-294, 2004.
- 38) 吉田雄司, 足立一郎: 橋梁照明においての足元灯利用に関する一考察, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部(A) Vol.55, pp.378-379, 2000.
- 39) 勇 秀憲, 安岡 鮎: 橋梁景観のカラーイメージスケールに関する基礎的研究, 土木情報利用技術論文集 Vol.12巻, pp.21-32, 2003.
- 40) 近田康夫, 宮崎 洋, 城戸隆良: 斜張橋に対する視点場嗜好の世代依存性に関する研究, 構造工学論文集 I Vol.50, pp.199-206, 2004.

- 41) 小栗ひとみ, 安田佳哉: 1/f ゆらぎ理論の導入による快適な歩行空間の整備に関する研究, 土木計画学研究・講演集 Vol.22-1, pp.267-270, 1999.
- 42) 小栗ひとみ, 寺川 陽: 景観が人間の感性に与える影響の定量的な評価に関する研究, 土木計画学研究・講演集 Vol.20-2, pp.671-674, 1997.
- 43) 熊谷健蔵, 松原雄平: 感性工学的手法を用いた海岸事業の便益推計に関する研究, 海岸工学論文集 Vol.49, pp.1381-1385, 2002.
- 44) 長町三生, 竹林征三, 伝田正利, 松原行宏: 感性工学の河川景観評価への応用, 土木計画学研究・講演集 Vol.19(1), pp.297-300, 1996.
- 45) 竹林征三, 森国康夫, 野村康彦, 鈴木義康: ダム・水源地の感性評価に関する分析, 土木計画学研究・講演集 Vol.19(1), pp.277-280, 1996.
- 46) 大野研, 大野博之, 鈴木勝士, 葛西紀巳子: 色彩・形状の観点からみた数値的景観評価の試み, 土木学会論文集, No.695/ IV-54, pp.31-44, 2002.
- 47) 大野研, 大野博之, 工藤庸介, 葛西紀巳子: 色彩のフラクタル解析を用いた河川景観の評価手法, 土木学会論文集, No.779/IV-66, pp.119-129, 2005.
- 48) 澤田知之, 近藤 崇, 小島洋一郎, 岩口純子: 車椅子に関する構造上の振動特性及び操作と乗り心地の感性工学的評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部 Vol.59, pp.1-030, 2004.
- 49) 白木 渡, 井面仁志, 壇上稀代子, 伊藤典夫: 感性工学および自己組織化マップ(SOM)を用いた住環境音の感性性能評価, 構造工学論文集 I Vol.50, pp.239-246, 2004.
- 50) 市坪 誠, 小松孝二, 長町三生, 今田寛典, 加藤文教, 谷本泰雄: 公共事業における合意形成のための住民参加支援システムの開発について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第6部 Vol.57, pp.785-786, 2002.

## 第3章

### 感性的評価と力学解析結果を総合した地下空間形状の評価<sup>1)</sup>

地下に対して、人々は一般に、暗い、狭い、怖いなどといった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、幻想的、神秘性などの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すことができると、地下空間は魅力的となり、より多様に、より快適に利用されることが期待できる。

これまで、土木技術者は地下空間を、力学的な安定性、施工性、経済性などの観点から設計してきた。人々がより魅力的な空間として地下空間を理解するためには、このような従来の観点に加えて、心理的あるいは感性的な観点も取り入れる新しいデザイン手法を考える必要がある。ここでは、特に従来の観点の中から力学を取り上げ、感性的な観点と複合して地下空間形状を評価する。

本章では、まず、最初に、地下空間形状を感性的に評価する方法を検討し、実際にアンケートを実施しその結果を分析する。次に、感性的評価に用いた同じ形状の地下空間について、力学解析に基づいて安全性の評価を行う。そして、両者の結果を用いて地下空間形状の総合評価を試み、結果について考察する。

#### 3.1 地下空間の感性的評価

設計案の地下空間に対する感性的評価においては、心に浮かんだイメージを数値化して定量的に表すことが必要である。なお、「感性」という言葉の定義は多様であるが<sup>2)</sup>、本研究では、外界からの刺激に対して感覚的に捉える働きあるいは能力のことをいうものとする。

本研究では、感性的な評価にしばしば用いられるSD法 (Semantic Differential Method)<sup>3), 4)</sup>を利用する。SD法は、ある刺激に対して人が抱くイメージや心理的意味を定量的に測定する「意味の測定方法」として提案されたもので<sup>3)</sup>、複数の概念を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<sup>4)</sup>。

以下、3.1.1 では、実際の評価に入る前に、地下空間に対して、人々が心に浮かべるイメージを把握するために適切な尺度 (形容詞対) を構成する。3.1.2 では、それを用いて地下空間形状の快適性を評価するためのアンケート調査を行い、地下空間形状の快適性に対して人々は何を重要視するかを分析するとともに、快適性の順位を付ける。

##### 3.1.1 感性評価尺度の構成

地下空間を感性的に評価するための尺度を選ぶためのアンケートを行う。これは、後に3.1.2で述べる評価のための予備調査である。この調査では、地下空間画像のサンプルを被験者に見せ

て、アンケート用紙に示された形容詞（尺度）に基づき、感じたままに回答してもらおう。本研究では、表-3.1に示す25種の形容詞対を用いた。ここに示した形容詞対は、過去に地下街のアンケートに用いられたKasmerの環境評価尺度<sup>5)</sup>と呼ばれる形容詞対のなかから、筆者らが適切と考えて選んだものである。それぞれ、後に示す図-3.3のように、「非常に」「かなり」「少し」「どちらでもない」で表現される7段階のスケールを与えている。被験者は、画像を見たあと、心に感じたまま、各形容詞対のスケールに印を入れ、その際、前後の回答に矛盾を感じたとしても、気に留めず回答するようあらかじめ注意を与えられた。

アンケートに使用したスライドは、図-3.1を基準に、形状を変化させたもの7種（図-3.2(a)）、色相（具体的には、カラーバランス）を変化させたもの7種（図-3.2(b)）、照明（具体的には、コントラスト）を変化させたもの7種（図-3.2(c)）の計21枚である。なお、アンケートの被験者は、技術者、大学教官、学生から構成される38名である。

表-3.1 使用した形容詞対

|   | 尺度                 |
|---|--------------------|
| a | 活動的 - 消極的          |
| b | 清潔な - 汚い           |
| c | 開放的 - 閉鎖的          |
| d | 居心地の良い - 居心地の悪い    |
| e | 好き - 嫌い            |
| f | 重い - 軽い            |
| g | 安らぎを与える - 安らぎを与えない |
| h | 様になってる - 不格好な      |
| i | 使いやすい - 使いにくい      |
| j | 安全な - 危険な          |
| k | 楽しい - いらいらさせる      |
| l | 動的な - 静的な          |
| m | 親しみのある - 親しみのない    |
| n | バランスの良い - バランスの悪い  |
| o | 高い - 低い            |
| p | 広がりがある - 広がりのない    |
| q | 大きい - 小さい          |
| r | 鮮やかな - くすんだ        |
| s | にぎやかな - 落ち着いた      |
| t | 表情豊かな - 無表情な       |
| u | 調和した - 不調和な        |
| v | 明るい - 暗い           |
| w | 柔らかい照明 - どぎつい照明    |
| x | まぶしい - まぶしくない      |
| y | 大袈裟な - 地味な         |

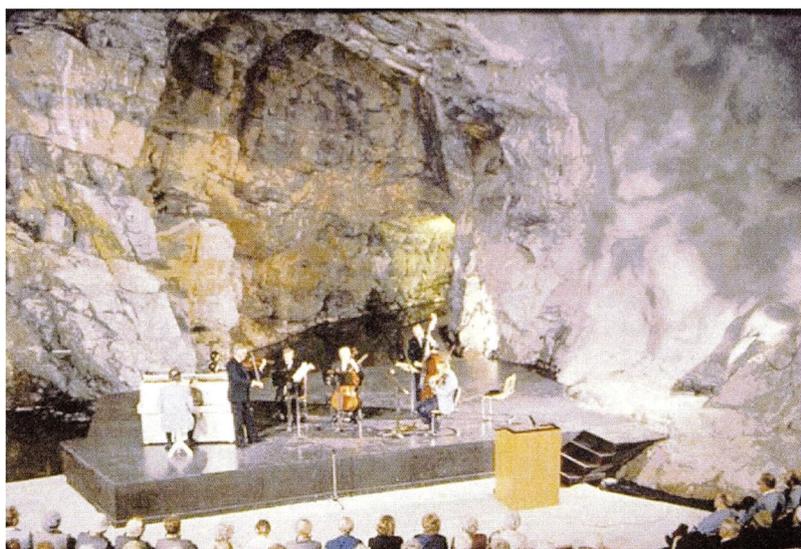
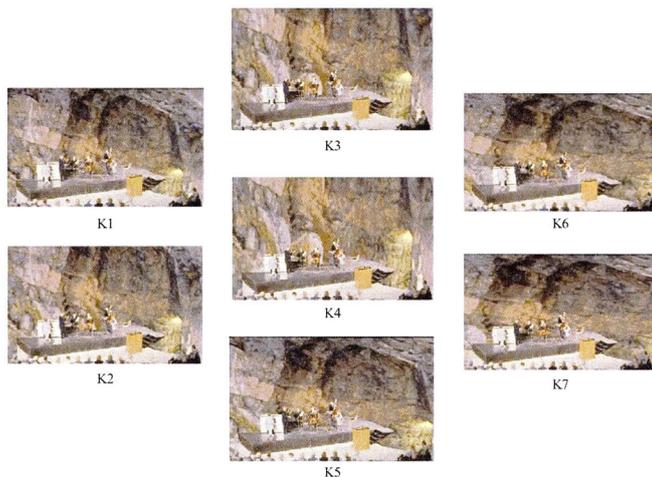


図-3.1 アンケートに用いた写真の原画<sup>6)</sup>

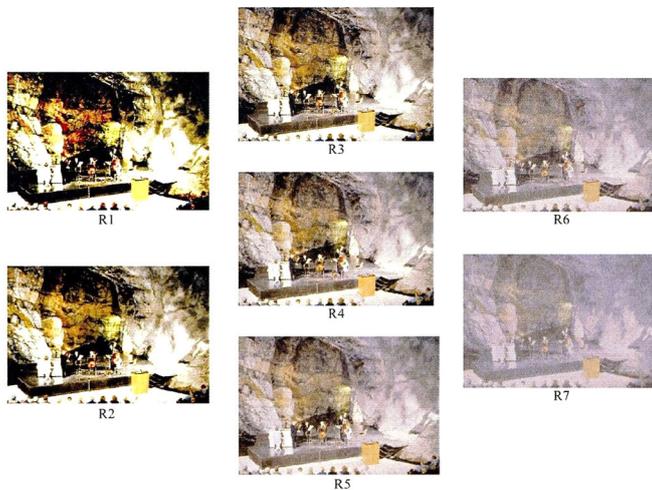
(レトレッティ・コンサーホール, フィンランド)



(a) 形状を変化させた画像



(b) 色相（カラーバランス）を変化させた画像



(c) 照明（コントラスト）を変化させた画像

図-3.2 尺度構成に用いた画像

ここでは、SD法の一連の手順<sup>3), 4)</sup>における、因子分析による評価法を利用する。すなわち、アンケート結果を因子分析し、形容詞対の背後にある共通因子を見出す。共通因子がそれぞれの形容詞対に寄与する割合（因子負荷量と呼ぶ）が大きいもの同士で、形容詞対を分類し、グループ分けを行う。形容詞対の各グループの中から、3.1.2における地下空間形状の評価にふさわしいと思われる代表的な形容詞対をいくつか選び、尺度を構成する。

表-3.2にアンケート回答に対する因子分析結果を示す。ここでは、因子1,2,3が共通因子として見出され、それぞれの因子負荷量の大きい形容詞対ごとに3つのグループ (I, II, III) に分類することができる。各因子の寄与度の関係を考慮し、因子1から4対、因子2から3対、因子3から1対の計8種類の形容詞対を選定する。因子負荷量の値の絶対値が大きいものを中心に、形状や色、照明に限定されず、空間全体を総合評価するために適切と考えられる形容詞対とする。

具体的には、因子1からは、因子負荷量の絶対値の大きい順に「n：バランスのよい-バランスの悪い」, 「h：様になっている - 不恰好な」, 「j：使いやすい - 使いにくい」, 「u：調和した - 不調和な」の4つの形容詞対を選定した。因子2においては、「x：まぶしい-まぶしくない」という尺度は照明に限定して評価される傾向が強く、総合的に空間イメージを評価するにはふさわしくないと考えられるので、ここでは用いないものとする。したがって、因子2からは、「x：まぶしい-まぶしくない」を除き、因子負荷量の絶対値の大きい順に「s：にぎやかな - 落ち着いた」, 「r：動的な - 静的な」, 「y：大袈裟な - 地味な」の3つの形容詞対を選定した。因子3では、「q：大きい-小さい」よりも「p：広がりのある-広がりがない」の方が、空間イメージの表現として適切であると考え、「p：広がりのある-広がりがない」を選定した。

以上のように、本研究では、地下空間の感性評価のための尺度を既往の研究における例示<sup>5), 7)</sup>, および、本研究で実施したアンケートの分析結果に基づき選定した。

表-3.2 アンケート結果に対する因子分析結果

| 尺度                                |      | 因子負荷量              |               |       | 共通性    |       |      |
|-----------------------------------|------|--------------------|---------------|-------|--------|-------|------|
|                                   |      | 因子1                | 因子2           | 因子3   |        |       |      |
| I                                 | n    | バランスの良い - バランスの悪い  | 0.98          | 0.06  | 0.09   | 0.97  |      |
|                                   | h    | 様になってる - 不恰好な      | 0.97          | -0.06 | 0.19   | 0.98  |      |
|                                   | i    | 使いやすい - 使いにくい      | 0.96          | -0.07 | 0.16   | 0.96  |      |
|                                   | u    | 調和した - 不調和な        | 0.96          | 0.09  | 0.20   | 0.97  |      |
|                                   | m    | 親しみのある - 親しみのない    | 0.96          | -0.22 | 0.09   | 0.97  |      |
|                                   | g    | 安らぎを与える - 安らぎを与えない | 0.95          | 0.21  | 0.19   | 0.97  |      |
|                                   | d    | 居心地の良い - 居心地の悪い    | 0.94          | -0.06 | 0.28   | 0.97  |      |
|                                   | e    | 好き - 嫌い            | 0.94          | -0.08 | 0.24   | 0.94  |      |
|                                   | k    | 楽しい - いらいらさせる      | 0.89          | -0.26 | 0.13   | 0.88  |      |
|                                   | b    | 清潔な - 汚い           | 0.81          | -0.40 | 0.14   | 0.84  |      |
|                                   | j    | 安全な - 危険な          | 0.80          | -0.23 | 0.24   | 0.75  |      |
|                                   | II   | x                  | まぶしい - まぶしくない | -0.06 | -0.98  | 0.11  | 0.98 |
|                                   |      | s                  | にぎやかな - 落ち着いた | -0.10 | -0.98  | 0.00  | 0.96 |
|                                   |      | l                  | 動的な - 静的な     | 0.07  | -0.97  | -0.04 | 0.95 |
| y                                 |      | 大袈裟な - 地味な         | -0.05         | -0.96 | 0.19   | 0.95  |      |
| v                                 |      | 明るい - 暗い           | 0.20          | -0.95 | 0.21   | 0.98  |      |
| r                                 |      | 鮮やかな - くすんだ        | 0.20          | -0.94 | 0.21   | 0.97  |      |
| a                                 |      | 活動的 - 消極的          | 0.27          | -0.92 | 0.08   | 0.93  |      |
| t                                 |      | 表情豊かな - 無表情な       | 0.39          | -0.87 | 0.14   | 0.93  |      |
| w                                 |      | 柔らかい照明 - どぎつい照明    | 0.45          | 0.86  | 0.09   | 0.95  |      |
| c                                 |      | 開放的 - 閉鎖的          | 0.49          | -0.72 | 0.41   | 0.92  |      |
| f                                 |      | 重い - 軽い            | -0.48         | 0.63  | -0.30  | 0.71  |      |
| III                               | q    | 大きい - 小さい          | 0.42          | -0.24 | 0.84   | 0.94  |      |
|                                   | p    | 広がりがある - 広がりがない    | 0.64          | -0.22 | 0.70   | 0.94  |      |
|                                   | o    | 高い - 低い            | 0.49          | -0.26 | 0.55   | 0.61  |      |
|                                   | 因子寄与 |                    | 11.23         | 9.40  | 2.32   | 22.95 |      |
| 因子寄与率 (percent of communality)(%) |      | 48.96              | 40.94         | 10.10 | 100.00 |       |      |

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

図-3.3 快適性評価アンケート用紙

### 3.1.2 地下空間形状の快適性評価

#### (1) 快適性評価アンケートの実施

快適性評価のアンケートは、3.1.1 で選んだ 8 種類の尺度と、地下空間の総合的な評価を行うための「快適-不快」の尺度を加えて行った。

評価に用いる画像は、図-3.4 に示す石油備蓄空洞の写真を基に作成した、図-3.5 に示す 8 種類の画像である。画像 A の形状をオリジナルとし、コンピュータで処理して作成した。なお、各空間の大きさが直感的に理解できるように、人物 (175cm) の写真をはめ込んだ。

写真画像によるアンケート調査は、これまでも多く行われているが<sup>8)-14)</sup>、既存地下街などの写真によるものがほとんどである。本研究では、地下の持つ独特の雰囲気や空間の形状を明確に示すために、実際の地下空洞の画像を用いた点に特徴がある。

画像は、液晶プロジェクターによって、1 枚ずつ被験者に約 1 分間提示し、その間にアンケート用紙 (図-3.3) に回答してもらう。なお、尺度として用いる形容詞対が、たとえば、右側にポジティブな意味ばかり並ばないように、アンケート用紙上に無作為に配置した。247 名の被験者 (山口大学工学部の 7 学科から集めた学生) に対し、アンケート調査を実施した。

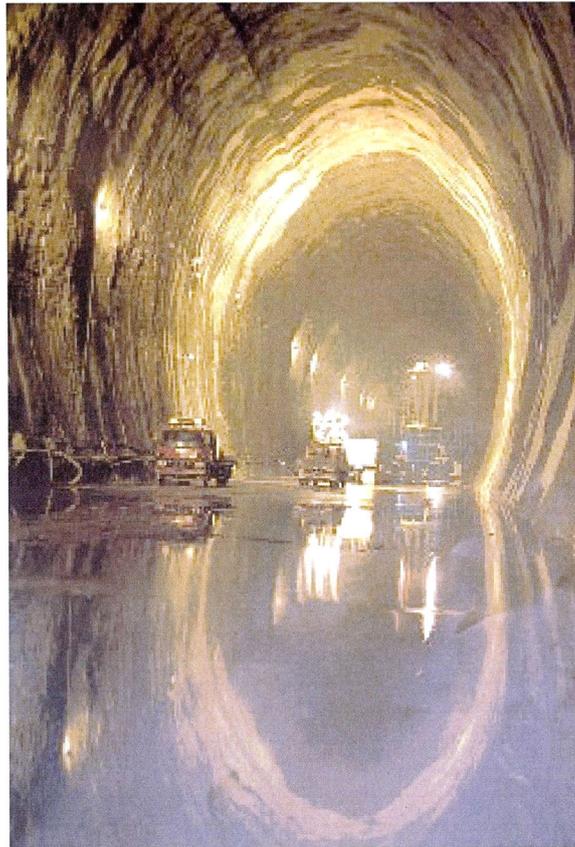


図-3.4 地下空洞の写真（石油地下備蓄空洞）（鹿島建設）

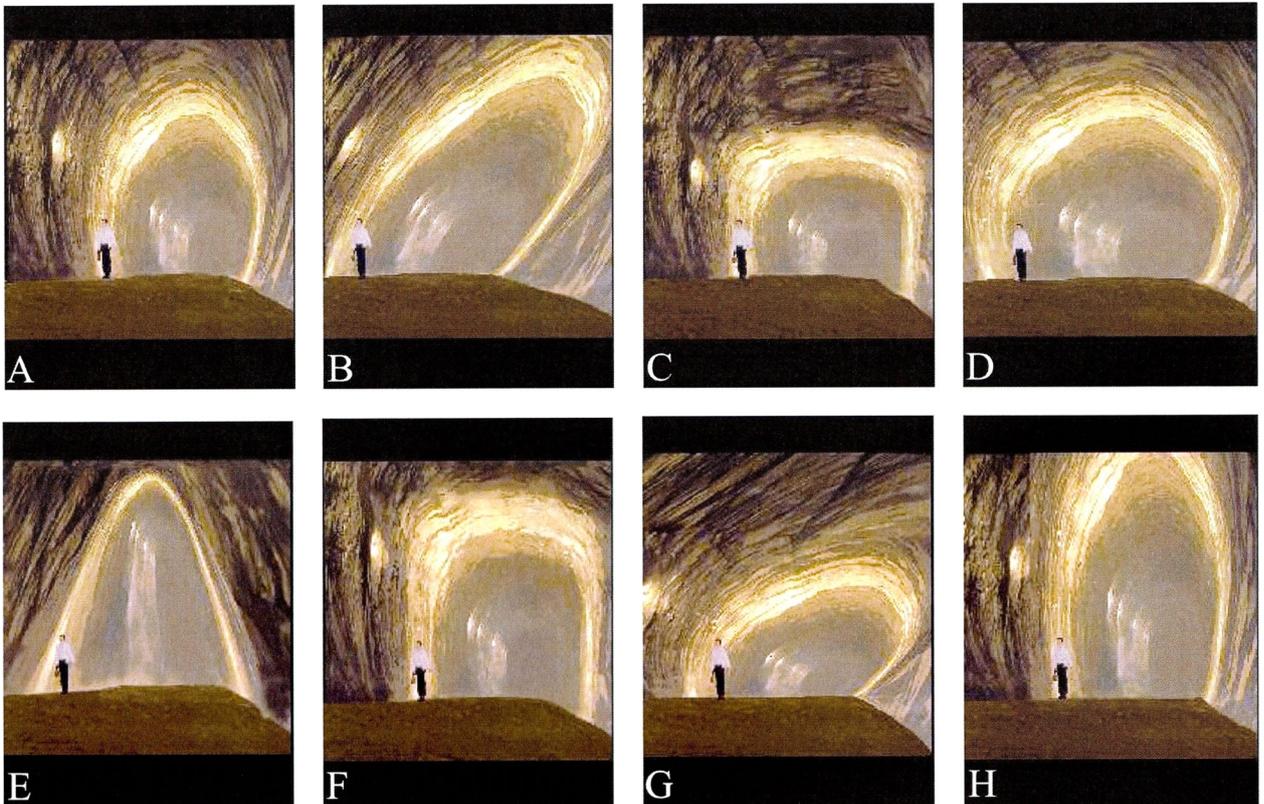


図-3.5 快適性評価に使用した画像

(2) 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（たとえば、「非常に調和した」を7、「少し調和した」は5、「非常に不調和な」は1とする）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（表-3.3 参照）。

図-3.6 は快適性に対する評価値の高い順に右から地下空間形状を並べたものである。ここで、この値を快適性評価値  $M_p$  とする。上半円形断面 D、矩形断面 F、および、C、たまご形断面 A に対して快適性評価の値が高く、斜めに傾いた形状の断面 G および B の快適性は低く評価されている。D は道路トンネルの形状、F、C は建物内部や通路の形状に近く、一方、斜めの形状は日常あまり見かけない形であり、被験者は見慣れた形状に快適性を感じているとも解釈できる。次に、快適性の要因をさらに分析する。

表-3.3 快適性評価アンケート結果（回答の平均値）

|       | (min.rate) 1 ← → 7 (max.rate) | 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 |

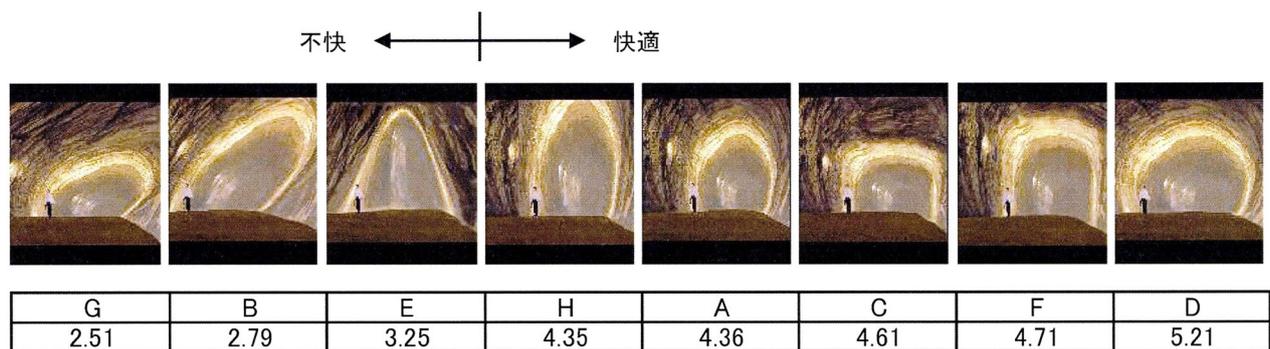


図-3.6 快適性評価結果

(3) 因子分析によるアンケート結果の考察

まず、因子分析に先立ち、「快適性」に強く関係する尺度を抽出するために、「快適性：y」を目的変数として、形容詞尺度  $x_1 \sim x_8$  を説明変数とした線形モデルを用いた重回帰分析を行った。その結果を次式に示す。

$$y = -0.040 + 0.383x_4 + 0.253x_8 + 0.214x_6 + 0.154x_1 \quad (3.1)$$

ただし、式(3.1)の重相関係数は0.9997である。

この結果から、「バランス： $x_4$ 」, 「広がり： $x_8$ 」, 「調和： $x_6$ 」, 「使いやすさ： $x_1$ 」が快適性に比較的強い影響を与えていると考えられる。なお、他の尺度については、目的変数への影響が小さいため、モデルに取り込まれなかった。

以上のことから、「バランス： $x_4$ 」, 「広がり： $x_8$ 」, 「調和： $x_6$ 」, 「使いやすさ： $x_1$ 」に対して3.1.2(b)のアンケート結果を用いて因子分析を行った。その結果を表-3.4に示す。

表-3.4から、快適性に影響を与える尺度は2つのグループに分類され、それぞれ、形状特性(尺度「バランス： $x_4$ 」, 「調和： $x_6$ 」, 「使いやすさ： $x_1$ 」), および、空間性(「広がり： $x_8$ 」)を表すものと解釈される。

さらに、因子得点分布を図-3.7に示す。図-3.7から、快適性の高い形状と低い形状は、因子1, および、因子2の組み合わせによってグループ分けができることが分かる。つまり、形状特性の尺度である「バランス」, 「調和」, 「使いやすさ」に優れ、空間に「広がり」の感じる形状が快適性の高い空間といえる。

本項では、地下空間形状の快適性評価のための手順を示し、評価のための尺度、アンケート結果、その結果の分析について具体的な例を通して述べた、ここに示した結果は、対象とする地下空間の用途やアンケートの被験者の属性によって異なるものと考えられ、結果の一般性やより深い議論は個別の地下空間のデザイン事例ごとに行うことになる。

表-3.4 因子分析結果

|                                  | 尺度    |                   | 因子負荷量 |       | 共通性    |
|----------------------------------|-------|-------------------|-------|-------|--------|
|                                  |       |                   | 因子1   | 因子2   |        |
| I (形状特性)                         | $x_4$ | バランスの悪い - バランスの良い | 0.98  | 0.25  | 1.02   |
|                                  | $x_6$ | 不調和な - 調和した       | 0.90  | 0.42  | 0.98   |
|                                  | $x_1$ | 使いにくい - 使いやすい     | 0.84  | 0.49  | 0.95   |
| II (空間性)                         | $x_8$ | 広がりのない - 広がりがある   | 0.28  | 0.79  | 0.70   |
| 因子寄与度                            |       |                   | 2.55  | 1.10  | 3.65   |
| 因子寄与率(percent of communality)(%) |       |                   | 69.95 | 30.05 | 100.00 |

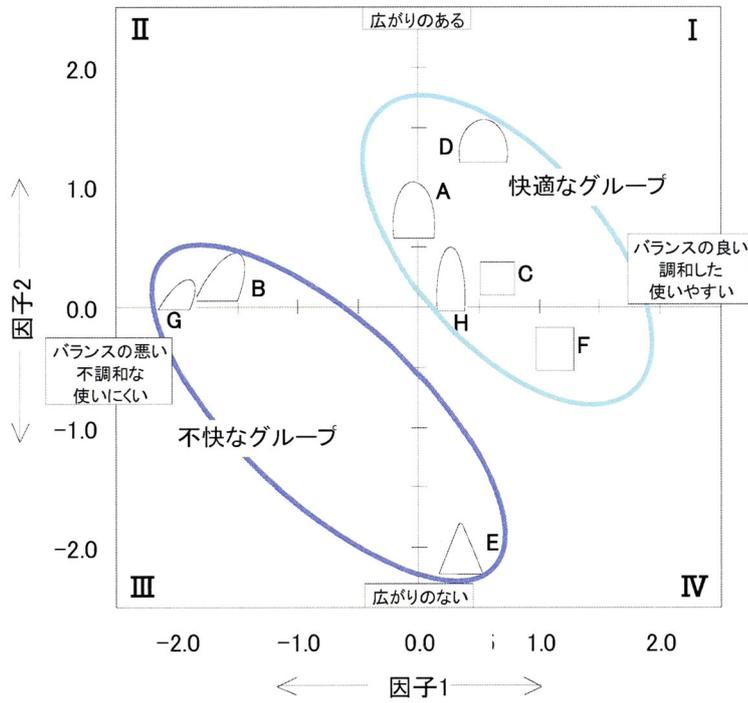


図-3.7 因子得点分布

### 3.2 地下空間形状の力学解析による評価

快適性を評価した8種類の形状(図-3.5)の地下空間に対し、安全性の評価を行う。本研究では、地下空間周辺の岩盤を等方等質弾性体(2次元平面ひずみ状態)と仮定し、ひずみによる安全性評価法を援用する<sup>15)</sup>。すなわち、安全性の評価は、最大せん断ひずみ分布の広がり、引張応力の生じる領域に基づき評価する。なお、解析ツールは、FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua, ITASCA社製, Ver.3.3)を用いる。

まず、最大せん断ひずみが限界せん断ひずみを超える領域と、引張応力が生じる領域を不安定領域とみなし、次のような指標を定義する。

$$M_{ss0} = A_{ss} / A_0 \quad (3.2)$$

$$M_{st0} = A_{st} / A_0 \quad (3.3)$$

ただし、 $A_{ss}$ は最大せん断ひずみが限界せん断ひずみを超える領域、 $A_{st}$ は引張ひずみが生じる領域の面積である。 $M_{ss0}$ 、および、 $M_{st0}$ は、それらの領域の面積を地下空間の内空断面積  $A_0$  で基準化した指標である。

次に、上の2つの指標の和をとり、地下空間に対する力学的な不安定さを表す指標として  $M_{s0}$  を定める。

$$M_{s0} = M_{ss0} + M_{st0} \quad (3.4)$$

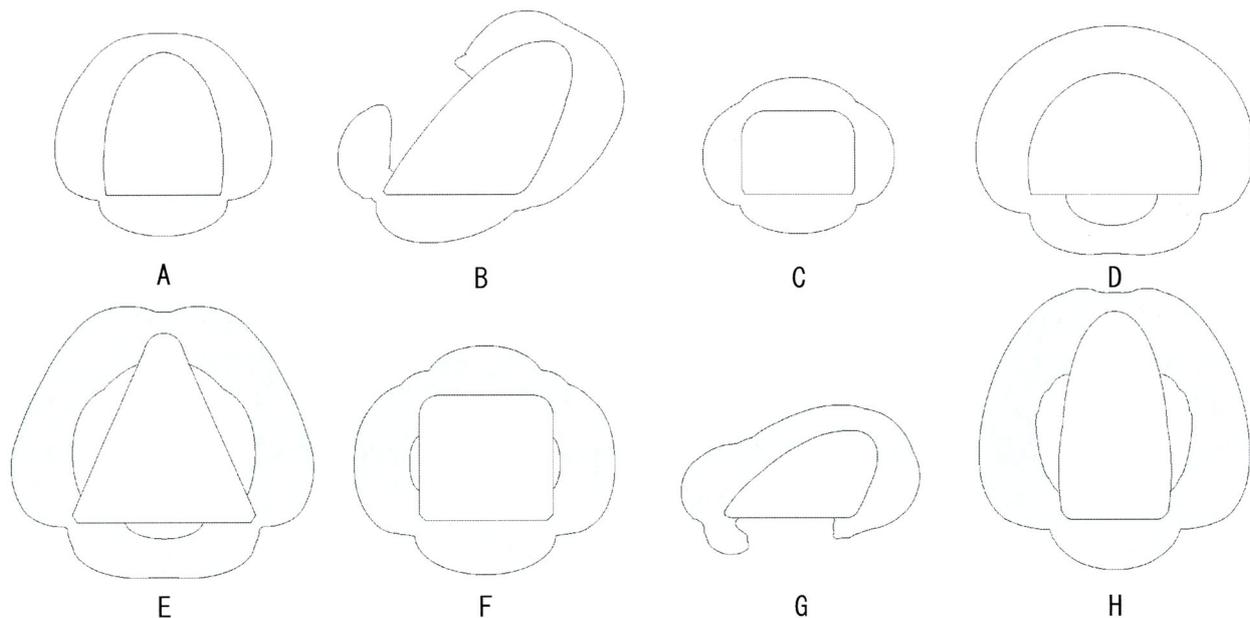
そして最後に、指標  $M_{s0}$  から地下空間の力学的な安全性の評価値  $M_s$  を次のように定義する。すなわち、式(3.4)で得られた危険指標  $M_{s0}$  の最大値に対して安全性の評価値  $M_s$  を1、また、危険指標の最小値に対して安全性の評価値を7とし、その間の  $M_{s0}$  に対しては  $M_s$  の値を比例的に与え、安全性の評価値  $M_s$  を定める。なお、 $M_s$  として数値1~7を与えるのは、快適性の評価値を1~7としたことと合わせるためである。

ここでは、一例として、岩盤の弾性係数1GPa、ポアソン比0.25、鉛直方向初期応力5MPa、側圧係数1.5、さらに、限界せん断ひずみ0.4%とした場合の解析結果を図-3.8に示す。図-3.8(a)は、最大せん断ひずみが限界せん断ひずみを超える領域、図-3.8(b)は引張り応力が生じる領域を示す。なお、E、および、H以外の形状において引張り応力は生じていない。

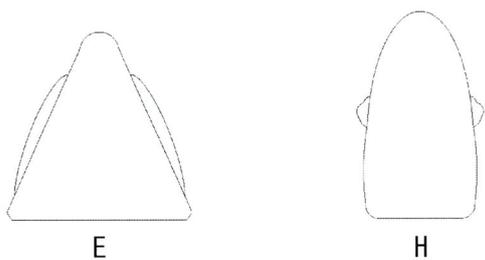
表-3.5に解析結果から求めた、各領域の面積と安全性の評価値  $M_s$  の計算結果を示す。安全性の評価値が高い順に空間形状を並べると図-3.8のようになる。水平方向の初期応力が卓越しているので、縦長の形状が不利であることが分かる。

表-3.5 安全性の評価値 $M_s$

|                            | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $A_0$ (m <sup>2</sup> )    | 19.88 | 26.37 | 13.75 | 32.00 | 28.75 | 27.25 | 19.00 | 30.00 |
| $A_{ss}$ (m <sup>2</sup> ) | 30.53 | 34.07 | 18.39 | 40.73 | 54.90 | 39.23 | 19.11 | 50.77 |
| $A_{st}$ (m <sup>2</sup> ) | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 2.49  | 0.00  | 0.00  | 0.65  |
| $M_{ss}$                   | 1.54  | 1.29  | 1.34  | 1.27  | 1.91  | 1.44  | 1.01  | 1.69  |
| $M_{st}$                   | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.09  | 0.00  | 0.00  | 0.02  |
| $M_{s0}$                   | 1.54  | 1.29  | 1.34  | 1.27  | 2.00  | 1.44  | 1.01  | 1.71  |
| $M_s$                      | 3.79  | 5.27  | 4.99  | 5.38  | 1.00  | 4.37  | 7.00  | 2.71  |



(a)最大せん断ひずみが限界せん断ひずみ (0.4%) を越える領域



(b)引張り応力が生じる領域

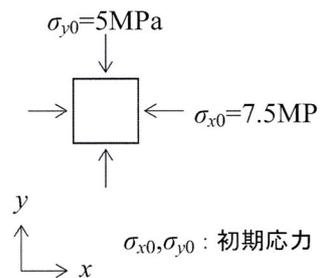


図-3.8 解析例

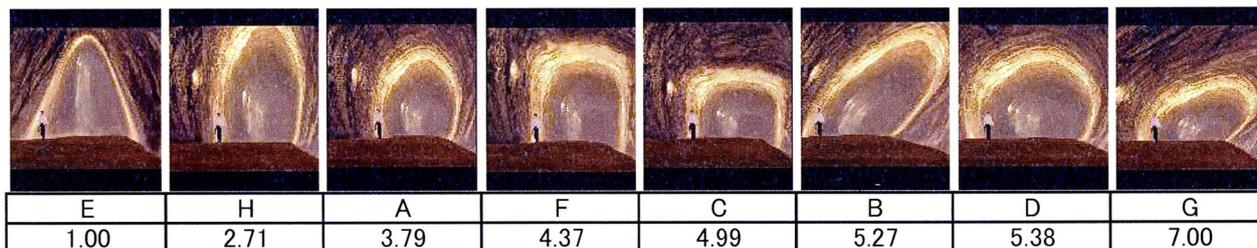


図-3.9 安全性評価結果

### 3.3 感性的評価と力学解析結果を総合した地下空間形状の評価

感性的評価結果として快適性評価値を用い、また、力学解析結果から求めた安全性評価値を用いて、総合的に地下空間形状の評価を行うために、本研究では、次に示す評価式を与える。

$$M = \alpha_p M_p + \alpha_s M_s \quad (3.5)$$

ただし、 $\alpha_p$ 、および、 $\alpha_s$  ( $\alpha_p + \alpha_s = 1$ ) は、それぞれ、感性評価、および、力学評価に対する重みであり、これらは対象構造物の用途や目的などによって決定されるものである。たとえば、人が楽しみを期待して利用するコンサートホールやミュージアムなどにおいては、一般的な社会基盤施設やエネルギー関連施設などよりも快適性が求められる。そのような場合、後者の施設よりも快適性に重みがおかれるものと考えられる。

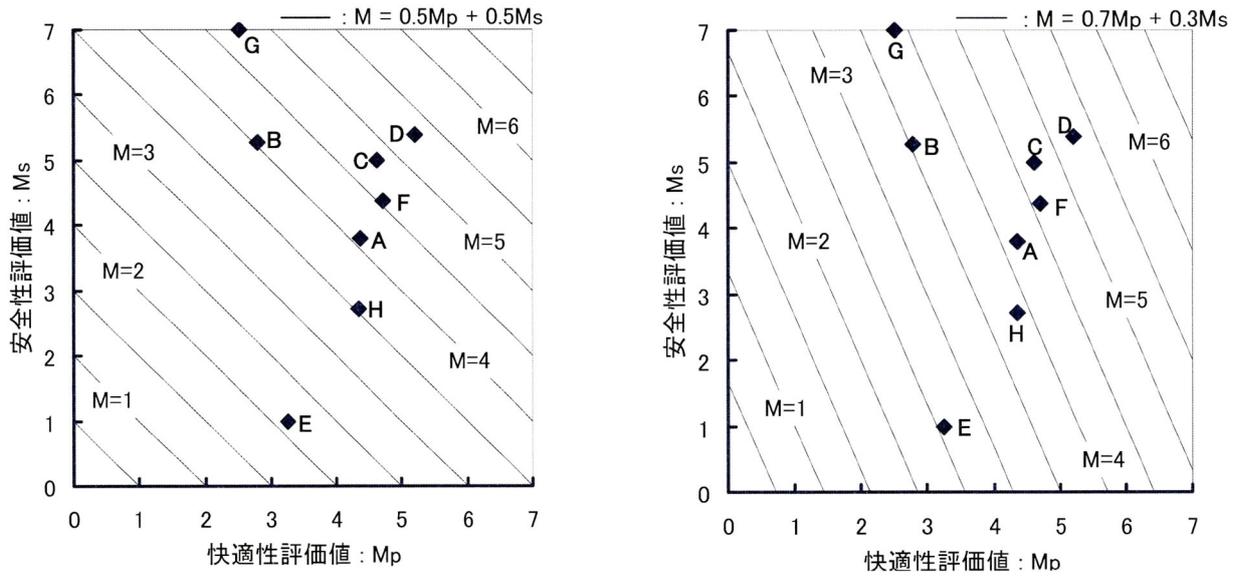
図-3.10(a)に3.1のアンケートから得られた快適性評価値 $M_p$ (表-3.3の「不快な-快適な」の値)、および、3.2で解析に基づいて得られた安全性評価値 $M_s$ をプロットする。同図には、感性和力学評価の重みを同じとした場合 ( $\alpha_p = \alpha_s = 0.5$ ) の総合評価式(3.5)を実線で図示している。この図から、感性、および、力学によって総合評価した地下空間形状の順位を $M$ の値の大小によって示すことができる。図-3.11(a)において、右から左に総合評価値 $M$ が高い順に空間形状を示す。形状D(上部断面円形)が総合的に最も良い形で、形状E(三角形)が最も順位が低い。また、空間幅に比べて背の高い空間の順位が低い。

次に、感性の評価の重みを大きくした場合 ( $\alpha_p = 0.7, \alpha_s = 0.3$ ) の総合評価式(3.5)と、快適性 $M_p$ と安全性 $M_s$ との関係を図-3.10(b)に示す。図-3.10(a)に比べると評価式( $M$ の等値線)の傾きは、重みによって変わり、それによって形状の評価順位も変わることが分かる。図-3.11(b)にこのケースの空間の順位を示す。感性的評価の重みを大きくしたので、快適性の評価の低かった斜めの形状Gの順位が下がる。一方、水平方向の初期応力成分が大きい場合に不利ではあるが、快適性の高い形状Hの順位が上がる事が分かる。

図-3.12に感性和力学の組み合わせに対する、空間形状の総合評価結果(順位)を示す。上部断面が円形アーチである空間形状Dは、いずれの重みの組み合わせに対しても上位にあり、感性的にも力学的にも優れた形状といえる。逆に、形状E(三角形)は、いずれの重みの組み合わせに対しても下位にある。

一方、斜めの形状B、および、Gは、重みの与え方によって順位の変動が大きい。これは、感性による評価と力学による評価が大きく異なり、どちらを重視するかで $M$ の値が大きく異なるためである。

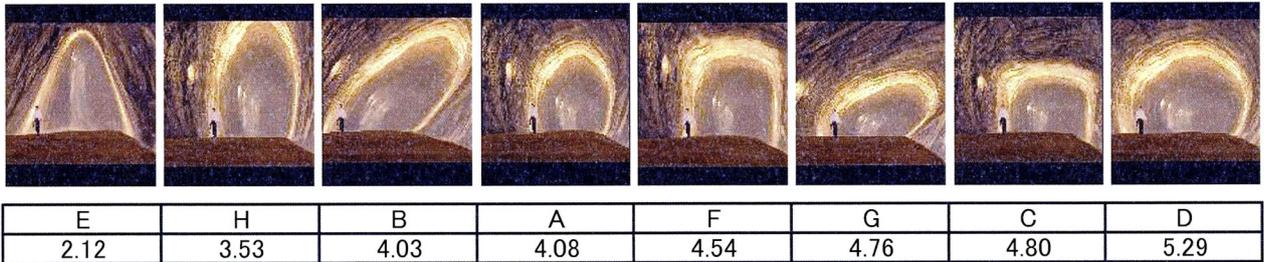
以上のように、感性評価では形容詞対の尺度を用いたアンケートによって評価し、さらに力学解析によって安定評価を行った結果と総合することで、これまでとは異なった地下空間形状評価が検討できることが示された。



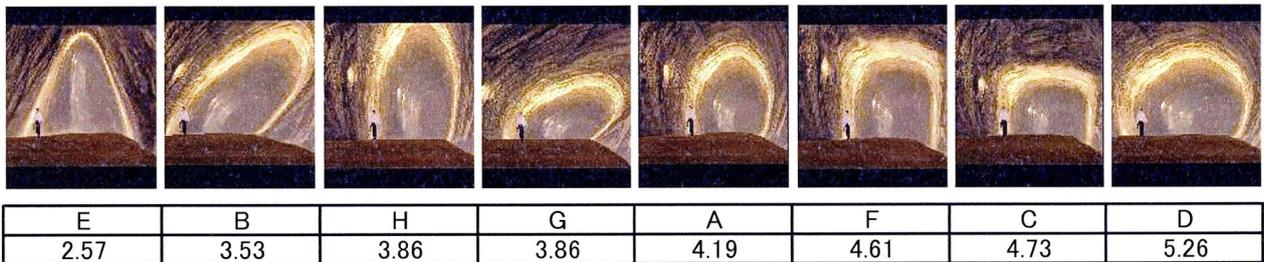
(a)感性評価と力学評価の重みが等しい場合  
( $\alpha_p = \alpha_s = 0.5$ の場合)

(b)感性評価の重みが大きい場合  
( $\alpha_p = 0.7, \alpha_s = 0.3$ の場合)

図-3.10 快適性 $M_p$ と安全性 $M_s$ との総合評価



(a)感性評価と力学評価の重みが等しい場合 ( $\alpha_p = \alpha_s = 0.5$ の場合)



(b)感性評価の重みが大きい場合 ( $\alpha_p = 0.7, \alpha_s = 0.3$ の場合)

図-3.11 感性と力学解析による総合評価結果

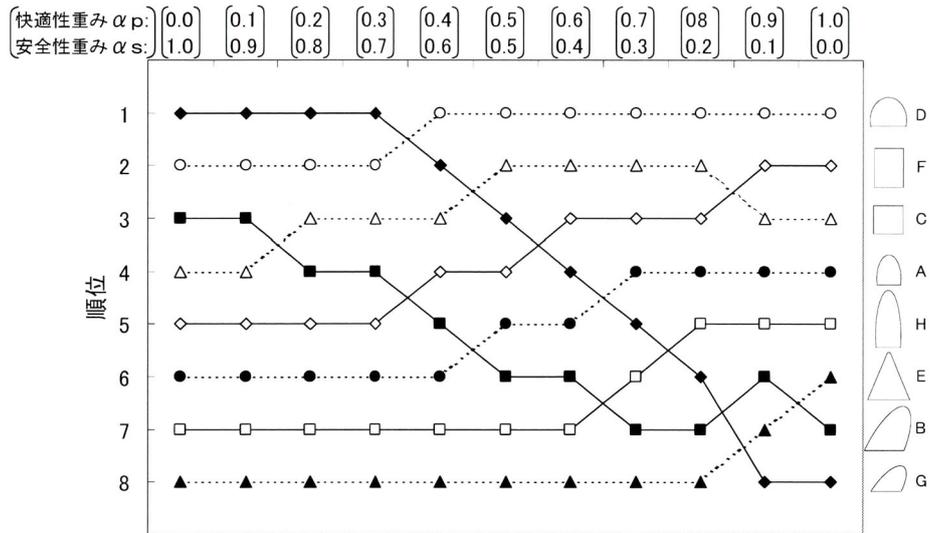


図-3.12 重みの組み合わせ ( $\alpha_p, \alpha_s$ ) による空間形状の総合評価

### 3.4 まとめ

本章では、感性と力学を総合して地下空間形状をデザインするという考え方にに基づき、地下空間形状に対する感性的評価と力学評価を総合する1つの評価方法を示した。その成果をまとめると次のようになる。

#### (1) 感性評価について

感性評価においては、地下空間の評価に適した形容詞対による尺度を因子分析によって選び、その尺度を用いてアンケートを行い、地下空間形状の快適性と尺度（形容詞対）との関係について分析した。

#### (2) 快適さを感じる形状

快適性評価アンケートを実施した結果、提示した8種類の形状において、上半円形、矩形（縦長辺）、正方形、たまご型の順に快適性が高かった。また、非対称（斜め）の空洞は快適性が低い結果となった。アンケートの被験者は、日常見慣れた形状を快適と感じるようである。

#### (3) 地下空間形状に対する快適性に関する分析

地下空間形状に対する快適性について、因子分析、および、重回帰分析による検討を行った結果、使いやすく、バランス、調和のよい、広がりを感じる空間が、より快適な空間になることが示された。

#### (4) 力学的な安全性の評価

力学的な安全性の評価法として、せん断ひずみと引張り応力に基づき、力学的な安全性を評価する指標を与えた。

#### (5) 感性と力学による総合評価

感性的快適性評価値と力学的安全性評価値を総合評価する評価式を示した。そして、具体的な例を通して、地下空間形状の総合的な評価を行い、感性と力学による評価結果を個々に論じるのではなく、総合して議論することが可能となることを示した。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 長沢伸也: 感性工学とビジネス, 特集: 感性工学とは, 日本感性工学会誌, Vol.1, No.1, pp.37-48, 1999.
- 3) Osgood, C. E., Suci, G. J. and Tannenbaum, P. H. : *The Measurement of Meaning*, University of Illinois Press, 1957.
- 4) 岩下豊彦: SD法によるイメージの測定, 川島書店, 1983.
- 5) 土木学会地下空間研究小委員会 (編集者, 日比野敏): 地下空間とデザイン (地下空間と人間4), pp.62-64, 1995.
- 6) 三井康司, 藤川富夫, 亀井紀幸 (共著), 川本眺万 (監督): ロックエンジニアリングと地下空間, 鹿島出版, 1990.
- 7) 羽根 義, 室 恵子, 沢田栄一, 富倉まり繪子, 北澤 節: 地下文化の様相, テクネット, 1990.
- 8) 田中正, 西淳二: 地下空間デザインの快適性評価について, 土木計画学・論文集, No.14, pp.121-131, 1997.
- 9) 関口佳司, 北村眞一: 多次元尺度構成法を用いた地下景観に関する研究, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第3巻, pp.17-24, 1998.
- 10) 関口佳司, 北村眞一: レポートリー・グリッド発展手法を応用した地下空間評価構造モデルに関する研究, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第4巻, pp.55-64, 1999.
- 11) 棚橋由彦, 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.
- 12) 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.
- 13) 櫻井昭夫, 新美政光, 西 淳二, 田中 正: 視仮想シミュレーションによる地下街形状の評価に関する研究, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第7巻, pp.109-118, 2002.
- 14) 文献5), pp.60-77, 1995.
- 15) 櫻井春輔: トンネル工事における変位計測結果の評価法, 土木学会論文報告集, No.317, pp.99-100, 1982.

## 用語の説明

本章で定義した用語を説明する。

### 感性：

外界からの刺激に対して感覚的に捉える働きあるいは能力。

### SD法 (Semantic Differential Method)：

ある刺激に対して人が抱くイメージや心理的意味を定量的に測定する「意味の測定方法」として提案されたもので、複数の概念を「快適な-不快な」などの形容詞対の尺度で評定し、因子分析等により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。

### 感性評価尺度：

対象を感性的に評価するための尺度。本研究では、アンケートに用いる「快適な-不快な」のように対になった形容詞対を用いる。地下空間を感性的に評価するために予備アンケート調査を行い、多数の形容詞対から8種類を選定した。

### 感性的評価値：

形容詞対を用いて実施したアンケート結果から得られる評価値。アンケート結果（「非常に」「かなり」「少し」「どちらでもない」など）に対する7段階のスケールに整数値1,2…7を対応させて各形容詞対における全回答者の平均値とするもので、その値は1～7である。たとえば、「快適な-不快な」の形容詞対では、「かなり快適な」という評価は“評価値7”，「かなり不快な」という評価は“評価値1”となる。

### 快適性評価値 $M_p$ ：

感性的評価値のうち、特に、快適性（「快適な-不快な」の形容詞対）に対する値。快適性が最も大きい場合、その値は7となる。

### 安全性評価値 $M_s$ ：

地下空間周辺の岩盤を等方等質弾性体（2次元平面ひずみ状態）と仮定して、ひずみによる安全性評価法を援用して定義した地下空間の安全性を評価する値。掘削面積に対する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面積から求める。値は1～7で、安全性が最も高い場合、7となる。

### 総合評価値 $M$ ：

快適性評価値  $M_p$  と安全性評価値  $M_s$  から求められる快適性と安全性の総合的な評価値。両評価値の重み付き平均と定義した。

## 第4章

### 力学的感度と感性アンケートによる地下空間形状のデザイン<sup>1)</sup>

本章では、第3章で検討した方法をさらに発展させるため、まず最初に、力学的評価の一般性を高めることを考え、新たな力学的評価指標を定義する。次に、系統立てて設定した種々の地下空間形状に対して、解析による力学的評価とアンケートによる感性的評価を行い、各形状の評価結果の特徴、および、力学的評価と感性的評価の関係を考察する。そして、それらの結果に基づき、感性と力学を総合した新しい地下空間形状の評価手法を提案し、様々な形状に対する評価を行い、最後に、地下空間形状デザインの例を示す。

#### 4.1 地下空間形状の評価指標の定義

まず、力学と感性の両立場から地下空間形状を評価するための力学的指標と感性的指標を定義する。

##### 4.1.1 力学的指標 ～力学的感度の定義～

地下空間の形状の良い悪いを力学的な立場から評価する解析的な指標は、著者らの知る限りこれまで示されたことはないようである。本研究では空間形状の変形の“しやすさ”（あるいは、“しにくさ”）の観点から新しい力学的評価指標を定義する。

岩盤を等方等質の弾性体、また、岩盤の初期応力を一定と仮定すると、2次元平面ひずみ問題の場合、地下空間掘削による岩盤の変位は次のように表せる<sup>2)</sup>。

$$u_m(p) = f_{m1}(p) \cdot \sigma_{x0} / E + f_{m2}(p) \cdot \sigma_{y0} / E + f_{m3}(p) \cdot \tau_{xy0} / E \quad (4.1)$$

ただし、 $u_m(p)$  ( $m=x, y$ ) は任意の点  $p$  における変位、 $\sigma_{x0}$ ,  $\sigma_{y0}$ ,  $\tau_{xy0}$  は初期応力、ならびに、 $E$  は岩盤の弾性係数である。なお、初期応力と弾性係数の比  $\sigma_{x0}/E$ ,  $\sigma_{y0}/E$ ,  $\tau_{xy0}/E$  のことを初期応力パラメーターと呼ぶ。また、 $f_{m1}(p)$ ,  $f_{m2}(p)$ ,  $f_{m3}(p)$  はポアソン比が一定の場合に、地下空間の形状のみによって定まる係数で、初期応力パラメーターに対する変位の“感度”の一種である。すなわち、係数  $f_{m1}(p)$ ,  $f_{m2}(p)$ ,  $f_{m3}(p)$  の値が大きい地下空間形状ほど、掘削による岩盤変位は大きくなる傾向にある。本研究では、この係数を境界要素法によって求めることにする<sup>3)</sup>。境界要素法では、解析領域全体を離散化する必要がなく、境界のみ要素分割すればよいので、様々な形状に対して効率よく係数が求められる。

さらに、上記の変位の感度を用い、対象とする地下空間形状の変形のしやすさを表す無次元の指標として、空間形状の平均的なひずみを考える。

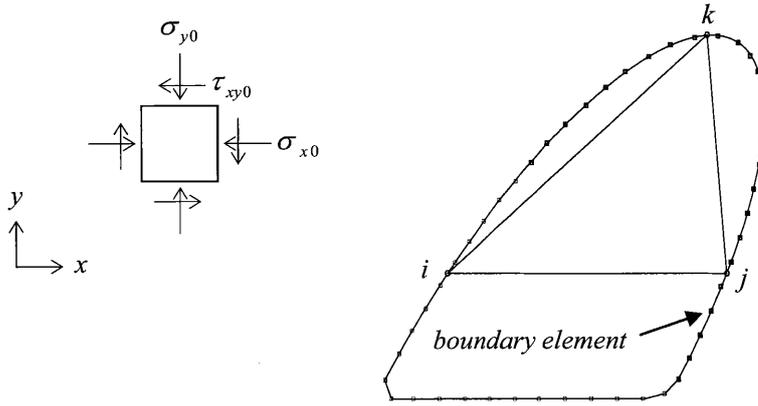


図-4.1 地下空間形状と平均ひずみ

図-4.1において、地下空間の壁面上に3点*i, j, k* を取り、空間が変形した際の三角形 *ijk* のひずみによって、掘削による地下空間形状の平均的なひずみを表すことにする。ここで、3点*i, j, k*の変位で構成するベクトルを  $\{u\} = \{u_x(i) \ u_y(i) \ u_x(j) \ u_y(j) \ u_x(k) \ u_y(k)\}^T$  とすると、三角形 *ijk* の平均的なひずみ  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$  は次の式で表される。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\} \quad (4.2)$$

ただし、 $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}\}^T$ 、 $[B]$ は、三角形 *ijk* を有限要素として考えたときの“ひずみ-変位マトリックス”で、3点*i, j, k* の座標を  $x_i, y_i, x_j, y_j, x_k, y_k$  とすると、次のように表される<sup>4)</sup>。

$$[B] = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} y_i - y_k & y_k - y_i & y_i - y_j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_k - x_j & x_i - x_k & x_j - x_i \\ x_k - x_j & x_i - x_k & x_j - x_i & y_i - y_k & y_k - y_i & y_i - y_j \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

ただし、 $\Delta$ は三角形 *ijk* の面積である。壁面上の3点*i, j, k* の変位  $\{u\} = \{u_x(i) \ u_y(i) \ u_x(j) \ u_y(j) \ u_x(k) \ u_y(k)\}^T$  を式(4.1)から求め、式(4.2)を整理すると次のように表せる。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x1} \\ \varepsilon_{y1} \\ \gamma_{xy1} \end{Bmatrix} \cdot \left( \sigma_x^0 / E \right) + \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x2} \\ \varepsilon_{y2} \\ \gamma_{xy2} \end{Bmatrix} \cdot \left( \sigma_y^0 / E \right) + \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x3} \\ \varepsilon_{y3} \\ \gamma_{xy3} \end{Bmatrix} \cdot \left( \tau_{xy}^0 / E \right) \quad (4.4)$$

ここで、係数  $\varepsilon_{xn}, \varepsilon_{yn}, \gamma_{xyn}$  ( $n=1, 2, 3$ ) は、 $[B]$ の成分、および、 $f_{m1}(p), f_{m2}(p), f_{m3}(p)$  ( $m=x, y$ ) で構成され、初期応力パラメーターに対する地下空間形状の平均的なひずみの感度となる。

さらに、 $\varepsilon_{xn}, \varepsilon_{yn}, \gamma_{xyn}$  を用いて、地下空間形状の力学的な指標を次のように定義する。

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2}, \quad \gamma_n = \sqrt{(\varepsilon_{xn} - \varepsilon_{yn})^2 + \gamma_{xyn}^2} \quad (4.5)$$

$$e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2}, \quad e_n = \varepsilon_{xn} + \varepsilon_{yn} \quad (4.6)$$

ここで、 $\gamma_n$ 、および、 $e_n$ の各成分 ( $n=1, 2, 3$ )は、初期応力パラメータの各成分が単位で他の成分が0の場合、すなわち、 $\sigma_{x0}/E=1, \sigma_{y0}/E=0, \tau_{xy0}/E=0$ 、および、 $\sigma_{x0}/E=0, \sigma_{y0}/E=1, \tau_{xy0}/E=0$ 、ならびに、 $\sigma_{x0}/E=0, \sigma_{y0}/E=0, \tau_{xy0}/E=1$ に対する最大せん断ひずみ、および、体積ひずみの感度である。そして、 $\gamma$ 、および、 $e$ は、それらの感度の総合的な大きさを表す指標として定義した。

このようにして得られた  $\gamma$ 、および、 $e$ は、誘導過程から明らかのように、初期応力と弾性係数に無関係な空間の変形しやすさを表す指標であり、ポアソン比を一定と仮定すると、その値は空間の形状のみに影響を受ける。すなわち、これらの値が大きい地下空間形状ほど、せん断ひずみ、および、体積ひずみが生じやすい形状と評価される。なお、 $\gamma$ 、および、 $e$ をそれぞれ、地下空間形状の初期応力パラメータに対するせん断ひずみ感度、および、体積ひずみ感度、また、両者をまとめて力学的感度と呼ぶことにする。

本研究では、力学的な立場から地下空間形状の良い悪いを評価するために、変形しにくい、また、変形しやすいことを表すことのできる力学的感度  $\gamma$ 、および、 $e$ を地下空間形状の力学的指標とする。

### 4.1.2 感性的指標

感性的な評価のために、第3章と同様に、SD法（Semantic Differential Method）<sup>5),6)</sup>に基づき、アンケート調査を行う。アンケートは地下空間の画像を被験者に提示し、形容詞対の評価尺度を用いて回答を得るものである。

評価尺度は、第3章において、Kasmerの環境評価尺度<sup>7)</sup>と呼ばれる形容詞対の中から地下空間形状を評価するために予備調査を行い、筆者らによって選定されたものを用いる。アンケート用紙を図-4.2に再掲する。「使いやすい-使いにくい」、「バランスの良い-バランスの悪い」などの地下空間形状を評価するための8種類の形容詞対による尺度と、総合的な評価を行うための形容詞尺度「快適な-不快な」に対して、「非常に」「かなり」「少し」「どちらでもない」で表現される7段階のスケールを与えている。地下空間の画像は液晶プロジェクターによってスクリーン上に、一枚ずつ約1分間提示し、その間にアンケート用紙（図-4.2）に回答してもらう。被験者には、画像を見て心に感じたまま、各形容詞対のスケールに印を入れ、前後の回答に矛盾を感じたとしても、気に留めず回答するようにあらかじめ注意を与える。

感性的指標には、アンケートの形容詞尺度を用い、アンケート結果（「非常に」「かなり」「少し」「どちらでもない」など）に対する7段階のスケールに整数値1,2…7を対応させて全回答の平均値を求め、その値を「感性的評価値」として用いることとする。

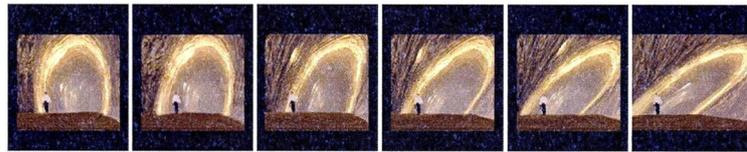
|               |   | 非常に | かなり | 少し | どちらでもない | 少し | かなり | 非常に     |  |  |
|---------------|---|-----|-----|----|---------|----|-----|---------|--|--|
| 使いやすい         | 1 | 2   | 3   | 4  | 5       | 6  | 7   | 使いにくい   |  |  |
| 不恰好な          | 1 | 2   | 3   | 4  | 5       | 6  | 7   | 様になっている |  |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

図-4.2 アンケート用紙

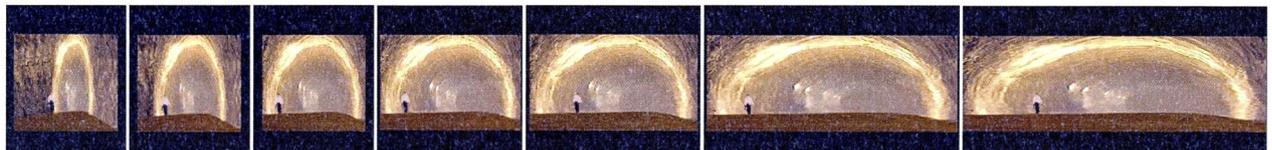
## 4.2 地下空間形状に対する感性的評価と力学的評価

図-4.3は本研究で用いる画像である。これらは、実際の地下空間の写真を画像処理して34種類作成した。形状の変化に対する人々の感じ方の違いを調査するために、高さや幅、傾きを以下の(a)~(e)に示すように系統立てて変化させた。なお、各空間の大きさが直感的に理解できるように、人物(身長175cm)の写真をはめ込んでいる。

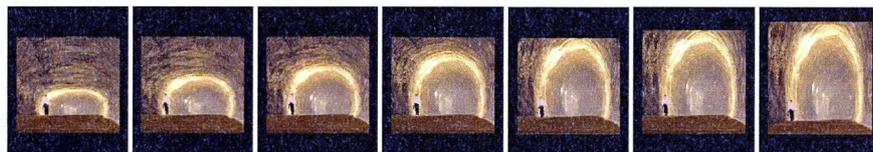
- (a) : 天端をアーチ形状、高さ(6.0m)と底面幅(5.0m)を一定として、天端と底盤中央を結ぶ線を $0^{\circ}$ から $50^{\circ}$ まで $10^{\circ}$ ずつ変化させた形状。
- (b) : 天端をアーチ形状、高さを一定(6.0m)として、幅を $2.4\text{m} \times n$  ( $n=1, 2, 3, 4, 5, 7, 9$ )とした形状。
- (c) : 天端をアーチ形状、幅を一定(5.0m)として、高さを $2.0\text{m} \sim 8.0\text{m}$ まで $1.0\text{m}$ ずつ変化させた形状。
- (d) : 天端を平坦、高さを一定(6.0m)として、幅を $2.4\text{m} \times n$  ( $n=1, 2, 3, 4, 5, 7, 9$ )とした形状。
- (e) : 天端を平坦、幅を一定(5.0m)として、高さを $2.0\text{m} \sim 8.0\text{m}$ まで $1.0\text{m}$ ずつ変化させた形状。



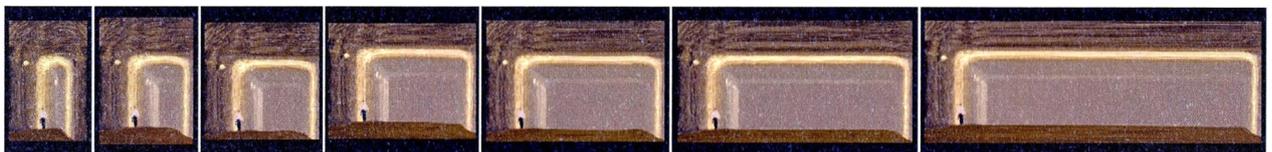
(a)傾きを変化させた形状



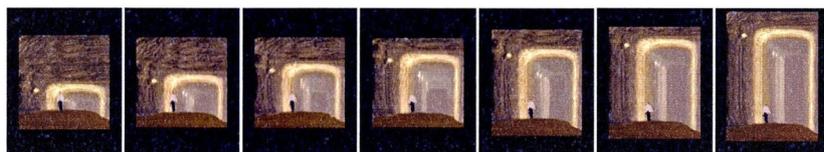
(b)幅を変化させた形状(天端がアーチ)



(c)高さを変化させた形状(天端がアーチ)



(d)幅を変化させた形状(天端が平坦)



(e)高さを変化させた形状(天端が平坦)

図-4.3 評価画像

4.1.2 で定義した「感性的指標（感性的評価値）」を求めるために、アンケートを図-4.3 の(a)～(e)の形状について、それぞれ実施した。感性的評価値は、表-4.1 の各尺度の右側のイメージ（i「快適な」、c「動的な」など）の評価値が高くなるように、すなわち、「かなり快適な」、「かなり動的な」という評価が“評価値7”となるように、逆に、「かなり不快な」、「かなり静的な」という評価は“評価値1”となるように、整数値1,2,…,7を与え集計を行う。また、アンケートは、傾きを変化させた形状（図-4.3(a)）、天端がアーチの形状（図-4.3(b)）、および、図-4.3(c)）、天端が平坦な形状（図-4.3(d)）、および、図-4.3(e)）の3ケースに分けて実施し、各ケース内で形状はランダムに提示した。なお、被験者は各ケースについて、スクリーン（70インチ）から約2～4m 離れて座って画像を見ることとした。被験者は、いずれのケースも筆者らの研究室の学生約10名で、全員一緒にアンケートを実施した。

次に、4.1.1で定義した「力学的指標（力学的感度）」を求める。各形状に対し、力学的感度の定義式(4.5)、および、式(4.6)を用いて、境界要素法による数値計算によって求める。なお、ここでは、いずれの空間形状に対しても48の境界要素に分割して解析する。

以下では、まず最初に、アンケート結果をSD法に基づき因子分析によって考察する。次に、各形状に対する力学的感度と感性的評価値、および、両者の関係について考察する。

## 4.2.1 因子分析による感性的評価の考察

アンケートのすべての回答をまとめて因子分析を行った結果を表-4.1に示す。因子分析の結果から、因子1、および、因子2が共通因子として見出され、それぞれの因子負荷量の大きい形容詞対尺度ごとに2つのグループ (I, II) に分類される。グループIは、i「不快な-快適な」、a「使いにくい-使いやすい」、h「広がりがない-広がりがある」、d「バランスの悪い-バランスのよい」、b「不格好な-様になっている」、および、f「不調和な-調和した」で構成され、グループIIは、g「地味な-大袈裟な」、d「落ち着いた-にぎやかな」、および、c「動的な-静的な」で構成されている。このことから、グループIは「評価性」、グループIIは「活動性」を表すものと解釈する。

各グループに属する尺度は互いに強い相関性があることから、地下空間形状の感性的評価を考察するために、それぞれから代表的な尺度を一つずつ採り上げることとする。本研究では、グループIからi「不快な-快適な」(以下、「快適性」と呼ぶ)、グループIIからc「静的な-動的な」(以下、「動的性」と呼ぶ)を用いる。なお、「快適性」は感性評価ではよく用いられ意味がわかりやすいこと、「動的性」はデザインの代表的な構成要素と考えられていることからこれらの尺度を採り上げる。

表-4.1 因子分析結果

|                                    | 尺度                  | 因子負荷量 |       | 共通性    |
|------------------------------------|---------------------|-------|-------|--------|
|                                    |                     | 因子1   | 因子2   |        |
| I<br>(評価性)                         | i 不快な - 快適な         | 0.93  | -0.35 | 0.98   |
|                                    | a 使いにくい - 使いやすい     | 0.91  | -0.36 | 0.95   |
|                                    | h 広がりがない - 広がりがある   | 0.84  | 0.24  | 0.76   |
|                                    | d バランスの悪い - バランスのよい | 0.80  | -0.56 | 0.95   |
|                                    | b 不格好な - 様になっている    | 0.80  | -0.55 | 0.93   |
|                                    | f 不調和な - 調和した       | 0.77  | -0.55 | 0.89   |
| II<br>(活動性)                        | g 地味な - 大袈裟な        | -0.05 | 0.93  | 0.87   |
|                                    | e 落ち着いた - にぎやかな     | -0.29 | 0.84  | 0.80   |
|                                    | c 静的な - 動的な         | -0.27 | 0.81  | 0.73   |
| 因子寄与度                              |                     | 4.43  | 3.44  | 7.87   |
| 因子寄与率 (percent of communality) (%) |                     | 56.29 | 43.71 | 100.00 |

#### 4.2.2 斜めに傾いた形状

図-4.3(a)に示す傾きを変化させた形状(図-4.4)について検討する。図-4.5に、各角度に対する感性的指標(感性的評価値)、および、力学的指標(力学的感度)の値を求めた結果を示す。

図-4.5(a)は、「快適性」を感性的指標とし、空間の傾きとの関係を示したものである。傾き $0^{\circ}$ の場合、評価値が約6であり、「かなり快適」と感じているが、傾きが $10^{\circ}$ となると、「どちらでもない(評価値が約4)」となり、その後、傾きが増すにつれて評価値が下がり、傾き $50^{\circ}$ では「かなり～非常に不快」と評価されていることが分かる。また、図-4.5(b)は「動的性」を感性的指標とした場合の空間の傾きとの関係を示すものである。傾き $0^{\circ}$ の場合、評価値は約3であり、「少し静かな」という評価であるが、傾きが $10^{\circ}$ になると「動的な」という感覚が生じ、傾きが増すほど「動的な」という感覚は増すようである。

一方、力学的感度は図-4.5(c)に示すように、傾きが増すほど大きくなり、地下空間は変形しやすくなる。変形しやすいということは、力学的には不利な形状といえよう。

次に、力学的感度と感性的評価値(「快適性」、および、「動的性」に対する値、以下同様)との相関を求めてみると、図-4.5(d)、および、図-4.5(e)のようになる。図-4.5(d)では、力学的感度が小さくなるほど感性的評価値が大きくなる傾向にある。一方、図-4.5(e)では、力学的感度が大きくなるほど感性的評価値も大きくなる傾向にある。このことは、変形しにくい(力学的感度が小さい)形状に対してはより「快適性」を、変形しやすい(力学的感度が大きい)形状に対してはより「動的性」を感じる傾向にあることを示している。

このような感性的評価結果と力学的評価結果の関係については、後の4.2.3、4.2.4の結果を含め、図-4.3に示されるすべての形状に対して、4.2.5において取りまとめる。

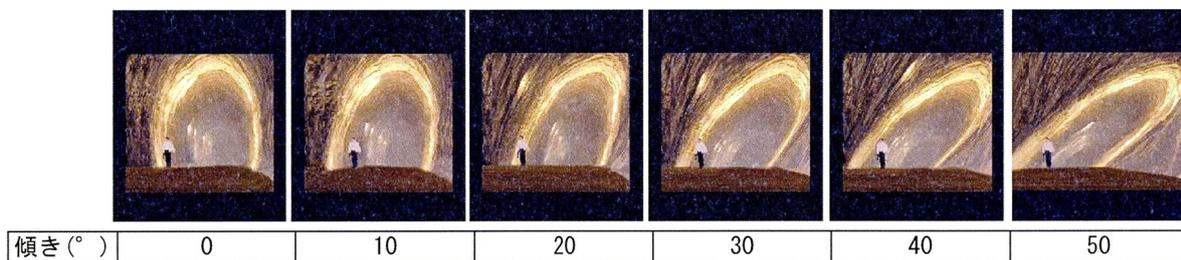
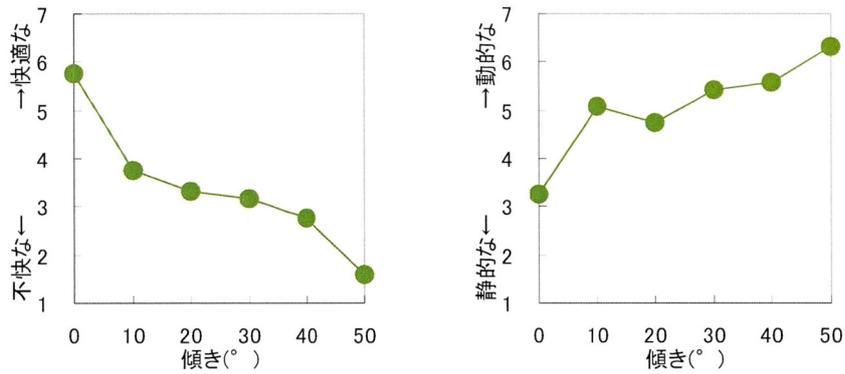
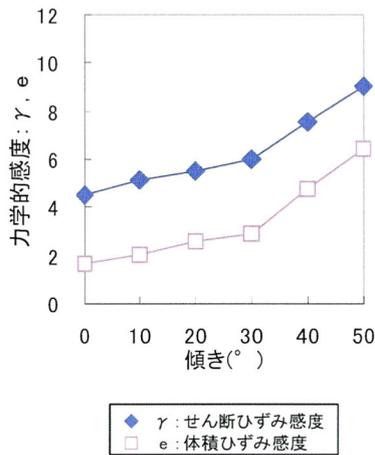


図-4.4 傾きを変化させた形状

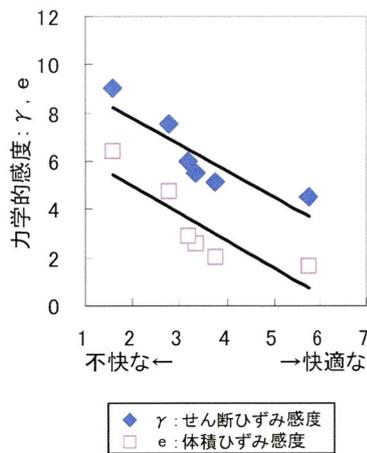


(a)傾きと「快適性」

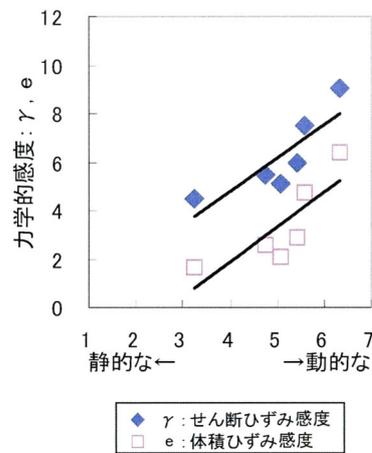
(b)傾きと「動的性」



(c)傾きと力学的感度



(d)「快適性」と力学的感度



(e)「動的性」と力学的感度

図-4.5 傾きを変化させた形状における各指標の関係

### 4.2.3 天端がアーチ形状

(1) 幅の変化 (高さ : 6.0m, 幅 : 2.40~21.6m, H/W : 0.28~2.50)

図-4.3(b)に示す天端がアーチ状で幅を変化させた形状(図-4.6)について、図-4.7に各幅に対する感性的評価値、および、力学的感度を求めた結果を示す。

図-4.7(a)は「快適性」と空間の幅との関係を示したものである。幅が4.8~12.0m(高さ幅比 : H/W=1.25~0.50)では、評価値は5~6であり、「かなり快適」と感じている。幅が16.8m(H/W=0.36)以上に大きくなると快適性はやや低下し、「どちらでもない~少し快適」となり、幅が小さく2.4mになると「かなり不快」へ転じる。また、図-4.7(b)は「動的性」と空間の幅との関係を示したものである。幅が4.8~12.0m(H/W=1.25~0.50)のとき、評価値は3~4で「やや静的な」と評価され、幅が2.4m, また、16.8m以上となると「やや動的な」と評価されているものの、全般に空間幅の変化に対して「動的性」の評価値の変化は「快適性」の変化に比べると小さい。これは、後述する他の形状においても同様で、左右対称の形状に対して、幅や高さを変化させても「動的性」の変化をあまり感じないようである。

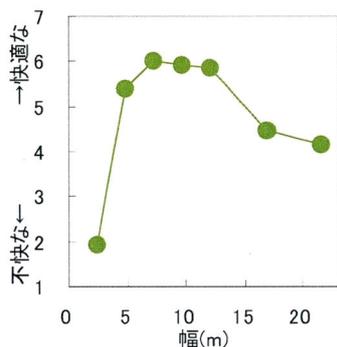
一方、力学的感度は図-4.7(c)に示すように、幅が4.8~12.0m(H/W=1.25~0.50)で体積ひずみ感度、および、せん断ひずみ感度とも値が概ね小さく、この範囲において、相対的に空間は変形しにくく、力学的に有利であることが分かる。

次に、力学的感度と感性的評価値との相関を求めてみると、図-4.7(d), および、図-4.7(e)のようになる。図-4.7(d)では、力学的感度が小さくなるほど感性的評価値が大きくなる傾向にある。一方、図-4.7(e)では、力学的感度が大きくなるほど感性的評価値も大きくなる傾向にある。つまり、変形しにくい形状に対してはより「快適性」を、また、変形しやすい形状に対してはより「動的性」を感じる傾向にある。この傾向は、(2)の斜めに傾いた形状と同様である。

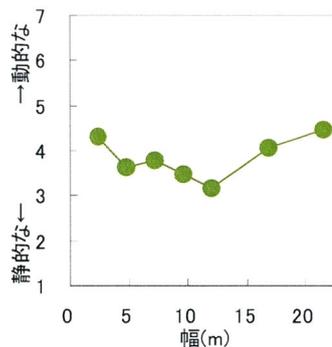


|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| H(m) | 6.0  | 6.0  | 6.0  | 6.0  | 6.0  | 6.0  | 6.0  |
| W(m) | 2.4  | 4.8  | 7.2  | 9.6  | 12.0 | 16.8 | 21.6 |
| H/W  | 2.50 | 1.25 | 0.83 | 0.63 | 0.50 | 0.36 | 0.28 |

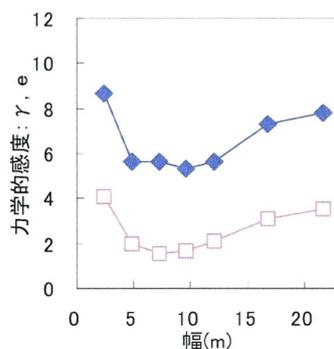
図-4.6 幅を変化させた形状(天端がアーチ形状)



(a)幅と「快適性」

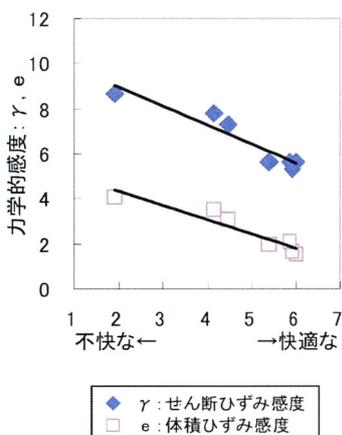


(b)幅と「動活性」



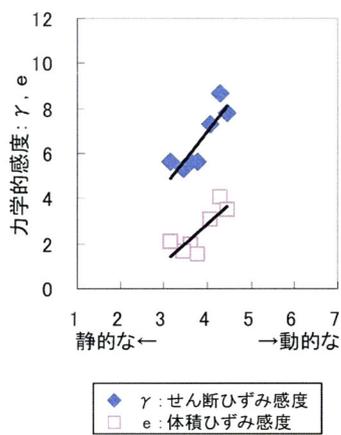
◆  $\gamma$ :せん断ひずみ感度  
□ e:体積ひずみ感度

(c)幅と力学的感度



◆  $\gamma$ :せん断ひずみ感度  
□ e:体積ひずみ感度

(d)「快適性」と力学的感度



◆  $\gamma$ :せん断ひずみ感度  
□ e:体積ひずみ感度

(e)「動活性」と力学的感度

図-4.7 幅を変化させた形状（天端がアーチ形状）における各指標の関係

(2) 高さの変化 (幅 : 5.0m, 高さ : 2.0~8.0m, H/W : 0.40~1.60)

図-4.3(c)に示す天端がアーチ状で高さを変化させた形状(図-4.8)について、図-4.9に各高さに対する感性的評価値、および、力学的感度を求めた結果を示す。

図-4.9(a)は、「快適性」と空間の高さとの関係を示したものである。まず、高さが2.0~3.0m(H/W=0.40~0.60)では評価値が2~3であり、「少し~かなり不快」と感じているが、高さが4.0m~7.0m(H/W=0.80~1.40)では「少し快適(評価値が約5)」となり、さらに高さが増し8.0m(H/W=1.60)となるとやや快適性が損なわれ「どちらでもない(評価値が約4)」と評価されている。全般的にみれば、高さが4.0~7.0m(H/W=0.8~1.40)の間にピークがあり、この辺りで他の高さに対して相対的に快適であるという印象を持つようである。また、図-4.9(b)に、「動的性」と空間の高さとの関係を示す。高さが2.0m(H/W=0.40)では評価値が約4であり「どちらでもない」と感じているが、高さが3.0m~5.0m(H/W=0.60~1.00)では、高さが増すにつれて評価値が少しずつ低下し、つまり「動的性」が失われ、「静的な」という感覚が生じ、高さが5.0mでは「少し静的(評価値が約3)」と評価されている。さらに高さが6.0m(H/W=1.20)となると再び動的性が増し、高さ6.0~8.0m(H/W=1.20~1.60)では「どちらでもない(評価値が約4)」から「少し動的(評価値が約5)」と感じている。このケースでは、高さが5.0m(H/W=1.00)のとき評価値は最小となり、この高さで最も静的性を感じているようである。

一方、力学的感度は図-4.9(c)に示すように、幅が5.0m(H/W=1.0)前後でやや小さく、他の高さの空間と比べてやや変形しにくい、全体として力学的感度の変化は小さい結果となっている。

次に、力学的感度と感性的評価値との相関を求めてみると、図-4.9(d)、および、図-4.9(e)のようになる。両図において、力学的感度と感性的評価値の相関性は、幅を変化させた場合(図-4.7(d)、および、図-4.7(e))と比べ小さい。これは、幅を変化させた形状のH/Wが“0.28~2.50”であるのに対し、高さを変化させた形状のH/Wが“0.40~1.60”とH/Wの=1.0を中心とした比較的狭い範囲にあり、力学的感度の変化が小さいためと考えられる(図-4.9(c)参照)。

図-4.9(d)では、力学的感度の変化が小さいため、図-4.7(d)の幅を変化させた場合ほど明瞭ではないが、力学的感度が小さければ「快適性」がやや大きく、また、図-4.9(e)では、力学的感度が大きければ「動的性」が大きくなる傾向がみられる。

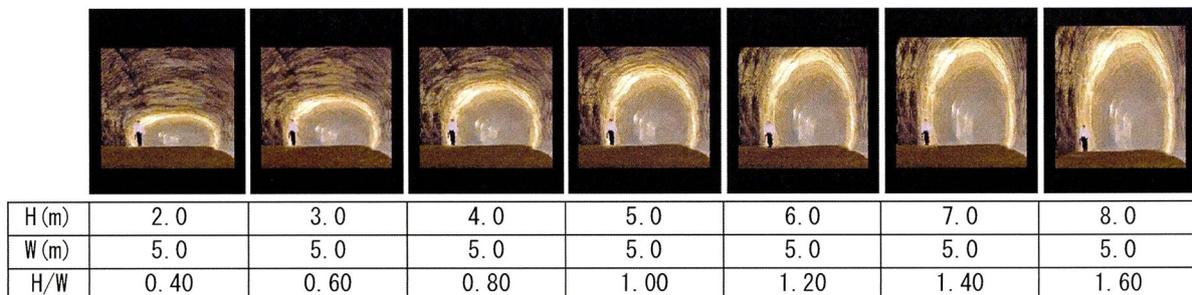
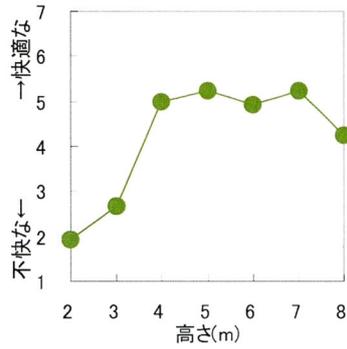
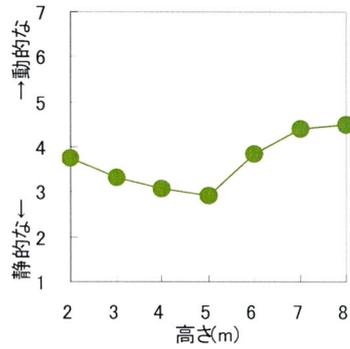


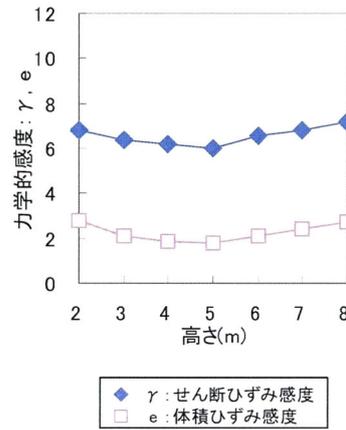
図-4.8 高さを変化させた形状(天端がアーチ形状)



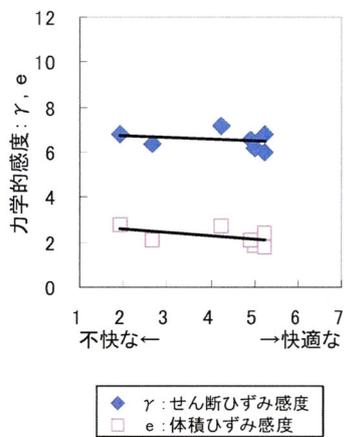
(a)高さと「快適性」



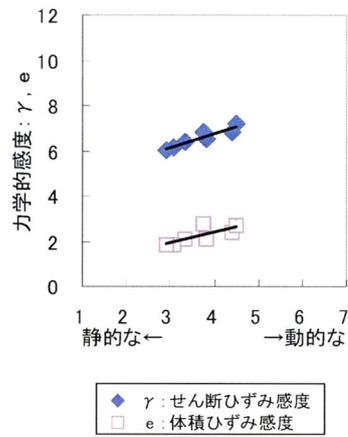
(b)高さと「動活性」



(c)高さと力学的感度



(d)「快適性」と力学的感度



(e)「動活性」と力学的感度

図-4.9 高さを変化させた形状（天端がアーチ形状）における各指標の関係

#### 4.2.4 天端が平坦な形状

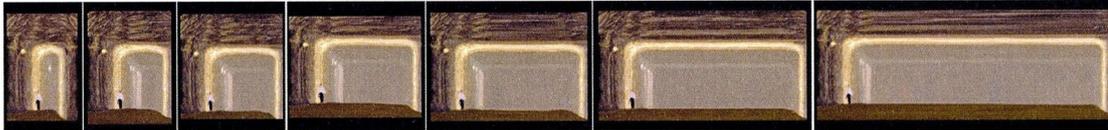
(1) 幅の変化 (高さ : 6.0m, 幅 : 2.40~21.6m, H/W : 0.28~2.50)

図-4.3(d)に示す天端が平坦で幅を変化させた形状(図-4.10)について、図-4.11に、それぞれ、各幅に対する感性的評価値、および、力学的感度を求めた結果を示す。

図-4.11(a)は「快適性」と空間の幅との関係を示したものである。図-4.11(a)において、高さが2.4m(H/W=2.50)では評価値が約2であり、「かなり不快」と感じているが、幅が4.8m(H/W=1.25)になると「どちらでもない(評価値が約4)」, また、幅が7.2m(H/W=0.83)となると「少し快適(評価値が約5)」と感じている。さらに幅が増し、9.6m(H/W=0.63)以上となると、快適性は緩やかに損なわれていくことが分かる。また、図-4.11(b)は「動的性」と空間の幅との関係を示したものである。まず、幅が2.4m(H/W=2.50)では評価値が約4であり、「どちらでもない」と感じているが、幅が4.8~12.0m(H/W=1.25~0.50)では幅が増すに伴い動的性が低下し、静的なという感覚が生じ、幅が9.6m(H/W=0.50)では「少し静的な(評価値が約3)」と感じ、さらに幅が大きくなり12.0~21.6m(H/W=0.50~0.28)となると、静的なという感覚が低下し「少し静的~どちらでもない(評価値が約3~4)」と感じていることが分かる。全般的にみれば、幅が9.6m(H/W=0.63)で評価値が最も小さく、この幅のとき最も静的と感じるようである。

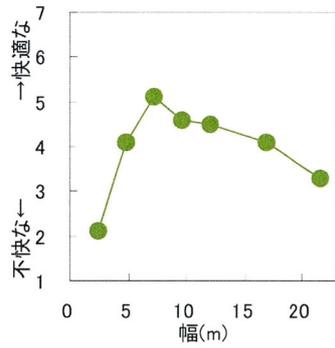
一方、力学的感度は図-4.11(c)に示すように、幅が4.8~9.6m(H/W=1.25~0.63)で概ね小さく、この辺りで他の幅に対して相対的に空間は変形しにくいことが分かる。

次に、力学的感度と感性的評価値との相関を求めてみると、図-4.11(d)、および、図-4.11(e)のようになる。図-4.11(d)では、ばらつきがややあるものの力学的感度は小さくなるほど感性的評価値が大きくなる傾向にある。一方、図-4.11(e)では、力学的感度は大きくなるほど感性的評価値も大きくなる傾向にある。このことは、変形しにくい形状に対してはより「快適性」を、変形しやすい形状に対してはより「動的性」を感じる傾向にあることを示している。これは、先に述べた(2)の斜めに傾いた形状や(3)の天端がアーチ状の形状と同様の傾向である。

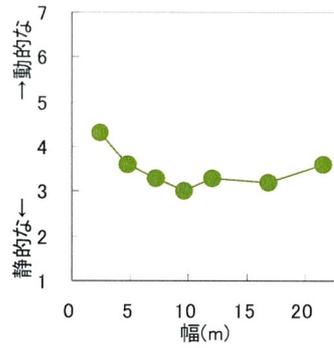


|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| H(m) | 6.0  | 6.0  | 6.0  | 6.0  | 6.0  | 6.0  | 6.0  |
| W(m) | 2.4  | 4.8  | 7.2  | 9.6  | 12.0 | 16.8 | 21.6 |
| H/W  | 2.50 | 1.25 | 0.83 | 0.63 | 0.50 | 0.36 | 0.28 |

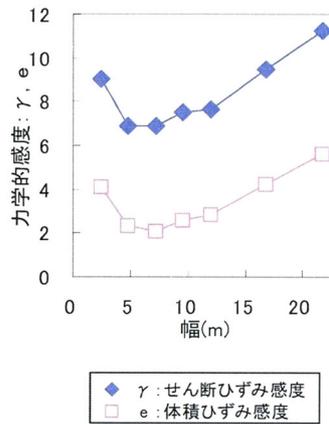
図-4.10 高さを変化させた形状(天端が平坦)



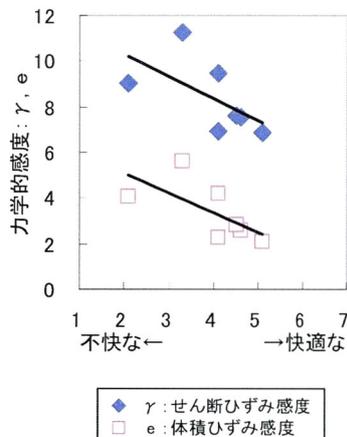
(a)幅と「快適性」



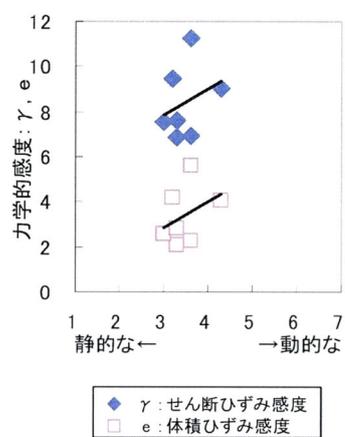
(b)幅と「動活性」



(c)幅と力学的感度



(d)「快適性」と力学的感度



(e)「動活性」と力学的感度

図-4.11 幅を変化させた形状（天端が平坦）における各指標の関係

(2) 高さの変化（幅：5.0m，高さ：2.0～8.0m，H/W：0.40～1.60）

図-4.3(e)に示す天端が平坦で高さを変化させた形状（図-4.12）について、図-4.13に各高さに対する感性的評価値、および、力学的感度を求めた結果を示す。

図-4.13(a)は、「快適性」と空間の高さとの関係を示したものである。高さが2.4m（H/W=0.40）では評価値が約2であり、「かなり不快」と感じているが、高さが4.0m（H/W=0.60）になると「どちらでもない（評価値が約4）」、高さが4.0～6.0m（H/W=0.80～1.20）となると「少し快適（評価値が約5）」と感じていることが分かる。さらに高さが増し、7.0m（H/W=0.63）以上となると、快適性は緩やかに損なわれ、高さが8.0m（H/W=1.60）では「どちらでもない（評価値が約4）」と感じているようである。また、図-4.13(b)は「動的性」と空間の高さとの関係を示したものである。全体の評価値が2.9～3.5であり、「少し静的」と評価されており、高さを変化しても「動的性」は変化しにくい傾向にある。なお、変化は小さいものの高さが5.0m（H/W=1.00）で評価値が概ね小さく、この高さのときにより静的と感じているようである。

一方、力学的感度は図-4.13(c)に示すように、高さが4.0～6.0m（H/W=0.80～1.20）でやや小さい値をとり、他の高さの空間と比べてやや変形しにくい、全体として力学的感度の変化は小さい結果となっている。これは、(3)bの高さを変化させた天端がアーチ形状の場合と同様、H/Wが1.0前後を中心とした比較的狭い範囲にあり、力学的感度の変化が小さいためである。

次に、力学的感度と感性的評価値との関係を図-4.13(d)、および、図-4.13(e)に示す。図-4.13(d)では、力学的感度は小さくなるほど感性的評価値が大きくなる傾向にある。一方、図-4.13(e)では、感性的評価値の変化が小さいものの、力学的感度が大きいほど感性的評価値も大きくなる傾向にある。このことは、変形しにくい形状に対してはより「快適性」を、変形しやすい形状に対してはより「動的性」を感じる傾向を示している。これは、先に示したいずれの形状とも同様の傾向である。

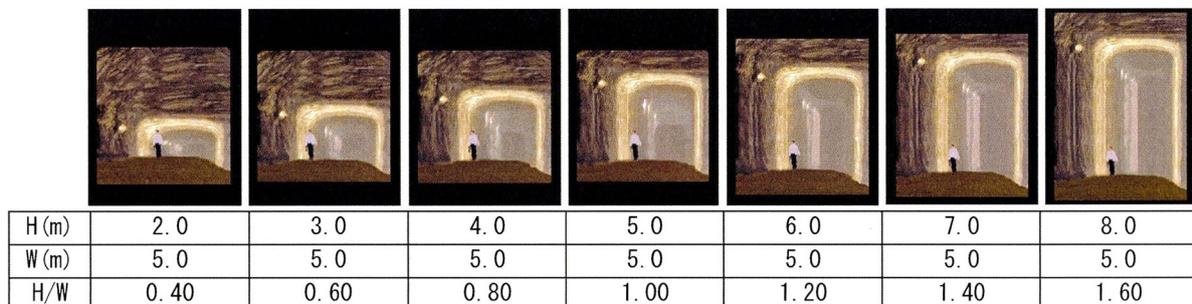
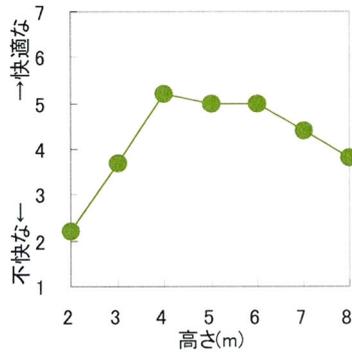
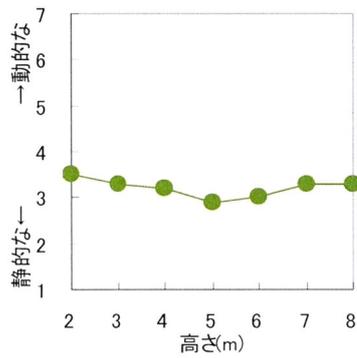


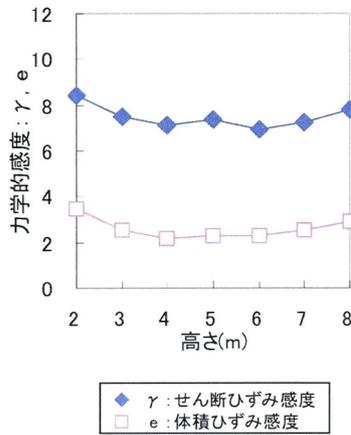
図-4.12 高さを変化させた形状（天端が平坦）



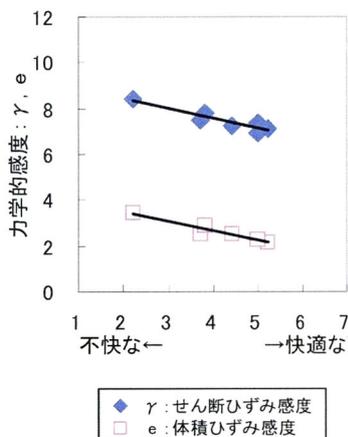
(a)高さと「快適性」



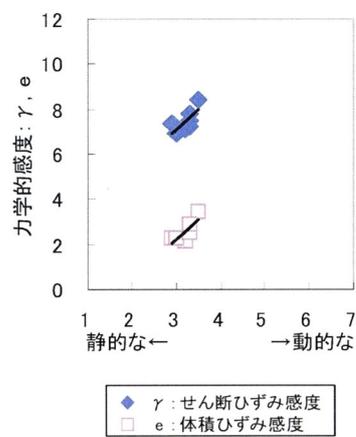
(b)高さと「動的性」



(c)高さと力学的感度



(d)「快適性」と力学的感度



(e)「動的性」と力学的感度

図-4.13 高さを変化させた形状(天端が平坦)における各指標の関係

4.2.5 力学的感度と感性的評価値との関係

図-4.3のすべての形状（計34形状）に対する力学的感度と感性的評価値（「快適性」、および、「動的性」）の相関を求め、図-4.14(a)、および、図-4.14(b)に示す。

4.2.2~4.2.4で個々に考察したように、図-4.14(a)のようにすべての形状を取りまとめても、「快適性」と力学的感度の間には負の相関関係にあると考えられる。そこで、相関係数を求めたところ、「快適性」とせん断ひずみ感度の相関係数は-0.545、「快適性」と体積ひずみ感度の相関係数は、-0.707であり、強い負の相関がみられた。どちらも、検定の結果1%有意で相関が認められる。すなわち、力学的感度が小さくて変形しにくい形状に対して、快適性を感じる傾向にあると考えられる。逆に、力学的感度が大きくて変形しやすい形状に対しては、不快感が生まれるようである。

また、図-4.14(b)の「動的性」については、せん断ひずみ感度との相関係数は0.089となり、有意な相関は認められないものの相関係数は正となる傾向がみられる。「動的性」と体積ひずみ感度の相関係数は0.552となり、1%有意で正の相関が認められる。せん断ひずみ感度、および、体積ひずみ感度で相関やその有意性については差があるものの、力学的感度が大きくて変形しやすい形状に対して、動的性を感じる傾向にあり、力学的感度が小さくて変形しにくい形状に対して静的性を感じる傾向にある。

先に述べたように、アンケートに基づく感性的評価と数値計算に基づく力学的評価は、もともと両者は独立した評価である。現時点では、限られた形状、および、限られたアンケート結果に基づくものであるが、感性と力学評価の間に図-4.14に示すような相関関係が示されることは興味深い。

この関係に基づくと、地下空間を力学的に変形しにくい形状となるよう設計すれば、同時に快適性の高い地下空間となる。一方、そのような空間は、「静的な」空間となり、落ち着きがある一方、地味な感じとなり活動性が低く、わくわくするような躍動感の少ない空間ともいえる。

次項では、本章で得られた力学的評価と感性的評価を用い、両者を総合して地下空間形状を評価する。

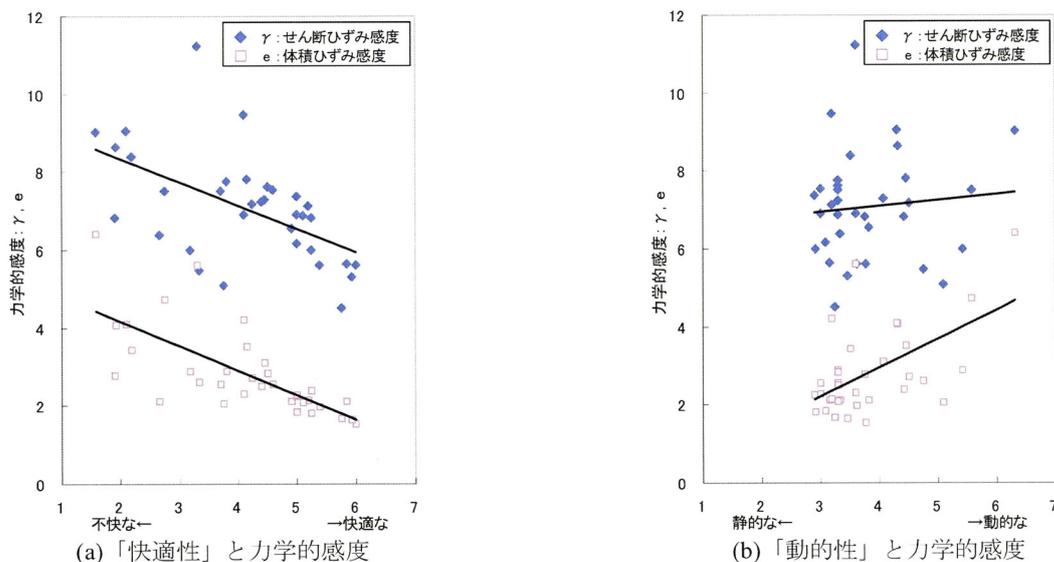


図-4.14 感性的評価値と力学的感度の関係

### 4.3 感性と力学を総合した地下空間形状の評価

まず最初に、力学と感性を総合して評価するための指標を定義する。そして、その指標を用いて4.2で示した地下空間形状について総合評価し、最後に、感性と力学を総合したデザイン例を示す。

#### 4.3.1 総合評価指標の定義

力学的評価と感性的評価を総合するために、力学的感度とアンケート結果を用いた総合評価指標を定義する。

まず、値が大きいほど力学的に評価の高い形状となるような指標を考える。4.1.1において定義した力学的感度は変形のしやすさを表すために、この値が大きいと力学的には不利となる。そこで、力学的感度の定義式(4.5)、および、式(4.6)の  $\gamma$ ,  $e$  の逆数  $1/\gamma$ ,  $1/e$  を取り、それらを形状の良好さを力学的に評価する指標とする。また、評価の対象とする地下空間形状に対して、最も値の大きい  $(1/\gamma)_{\max}$ ,  $(1/e)_{\max}$  で、それぞれの値を除して基準化し、力学的良好度  $(1/\gamma)/(1/\gamma)_{\max}$ ,  $(1/e)/(1/e)_{\max}$  とする。

次に、感性的評価として、4.1.2で定義した感性的評価値 ( $Q_i$ とする) を、アンケートにおける評価値の中で最も大きい値 ( $(Q_i)_{\max}$ とする) で除して基準化した値  $Q_i/(Q_i)_{\max}$  を感性的良好度とする。

最後に、式(4.7)、および、式(4.8)のように、力学的良好度と感性的良好度の算術平均を総合評価指標とする。

$$I_e = \frac{1}{2} \left\{ \frac{Q_i}{(Q_i)_{\max}} + \frac{1/e}{(1/e)_{\max}} \right\} \quad (4.7)$$

$$I_\gamma = \frac{1}{2} \left\{ \frac{Q_i}{(Q_i)_{\max}} + \frac{1/\gamma}{(1/\gamma)_{\max}} \right\} \quad (4.8)$$

### 4.3.2 総合評価結果の考察

#### (1) 力学的良好度

図-4.15は、図-4.3 に示した形状に対して、体積ひずみ感度に基づく力学的良好度の高い順にプロットしたものである。4.2.2～4.2.4でみたように、H/Wが1.0前後、左右対称の形状、また、天端がアーチ形状のものが力学的良好度が高いことが分かる。

#### (2) 感性的良好度

図-4.16(a)、および、図-4.16(b)は、それぞれ、「快適性」、および、「動的性」を感性的良好度とした場合について、図-4.3の形状を感性的良好度の高い順に図示したものである。図-4.16(a)より、天端がアーチ形状、H/Wが1.0前後、左右対称の形状が「快適性」が高いと評価されることが分かる。また、図-4.16(b)より、斜めに傾く形状、H/Wが大きい、あるいは、小さい形状が「動的性」が高いと評価されることが分かる。

#### (3) 「快適性」と力学の組み合わせによる総合評価

総合評価指標として、体積ひずみ感度に対する力学的良好度と「快適性」に対する感性的良好度とを用いる評価値 $I_e$ を式(4.7)により求める。図-4.17(a)は、評価値 $I_e$ の高い順に地下空間形状を図示したものである。

図-4.15、および、図-4.16(a)では、良好度の高い形状は、いずれも、天端がアーチ形状でH/W=1.0前後の左右対称形状であるので、図-4.17(a)に示す総合評価においても同様の結果となっている。

#### (4) 「動的性」と力学の組み合わせによる総合評価

力学と「動的性」の総合評価指標として、式(4.7)を用いて求めた評価値 $I_e$ の高い順に地下空間形状を図示すると図-4.17(b)のようになる。

力学と「快適性」の総合評価結果(図-4.17(a))と比べると、天端がアーチ形状でH/W=1.0前後の左右対称形状上位にあるのは同様だが、斜めに傾く空間の評価が高いのが特徴である。

#### (5) 力学的良好度と感性的良好度の関係

図-4.18(a)、および、図-4.18(b)は、それぞれ、「快適性」、および、「動的性」を感性的良好度とした場合について、体積ひずみ感度に基づく力学的良好度との関係を示したものである。なお、図-4.15～図-4.17と異なり、横軸の感性的良好度は、右ほど大きくなり、よい評価となるように配置している。

図-4.18(a)において、力学的良好度が大きい形状ほど「快適性」が高くなる、すなわち、変形しにくい形状ほど「快適性」が高くなるという傾向が、全体的な特徴としてはもちろん、特に系統別の形状群で現れていることが分かる。図-4.18(b)においても、力学的良好度が小さい形状ほど「動的性」が高くなる、すなわち、変形しやすい形状ほど「動的性」が高くなるという傾向が、特に系統別の形状群で表れていることが分かる。

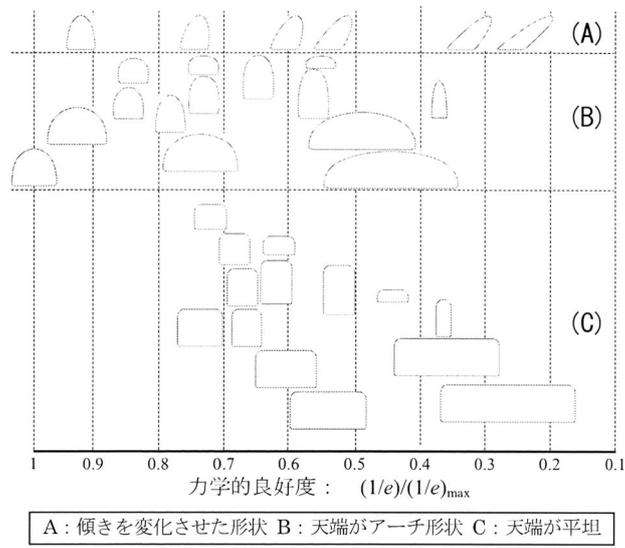


図-4.15 力学的良好度 :  $(1/e)/(1/e)_{\max}$

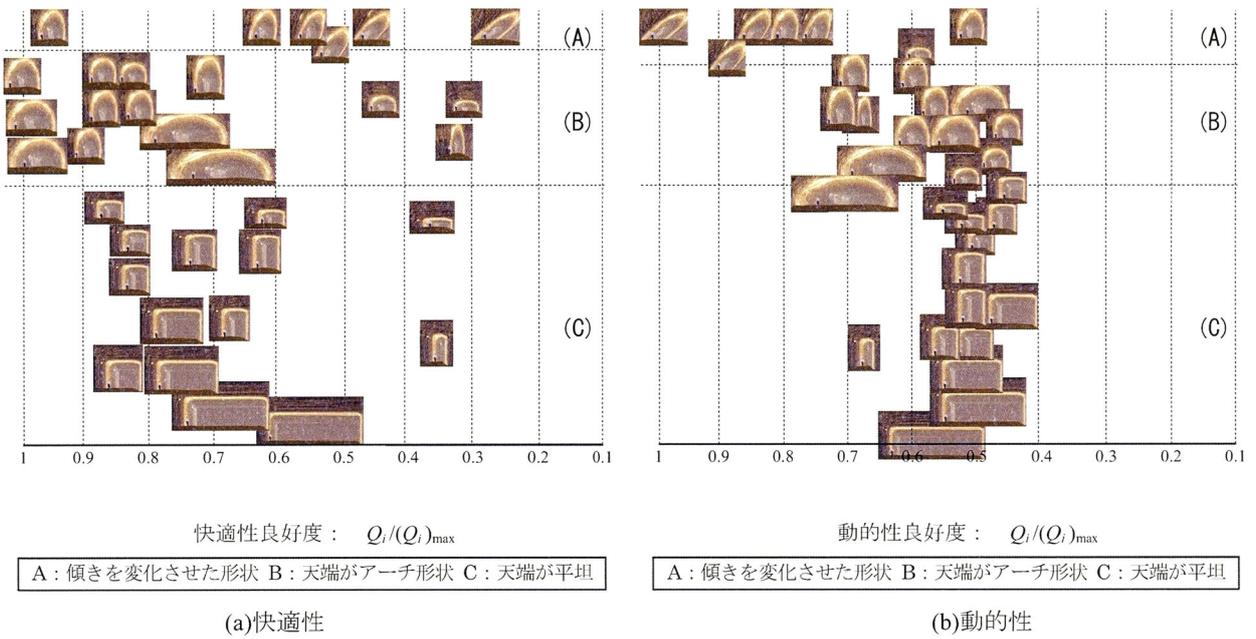


図-4.16 感性的良好度 :  $Q_i/(Q_i)_{\max}$

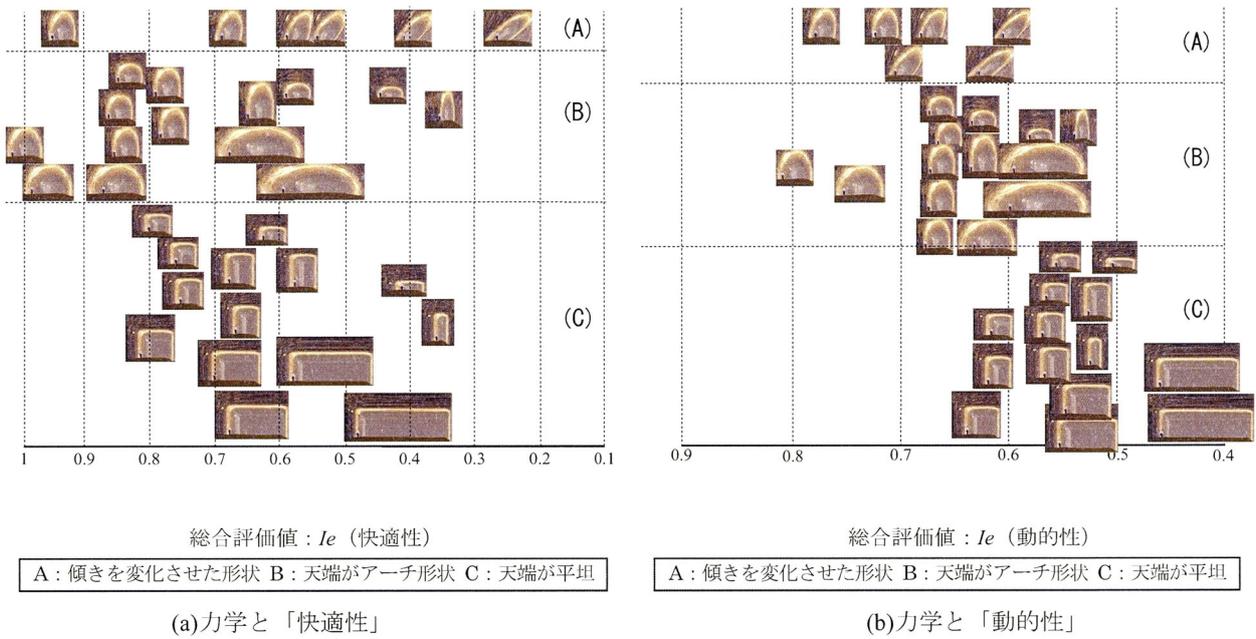
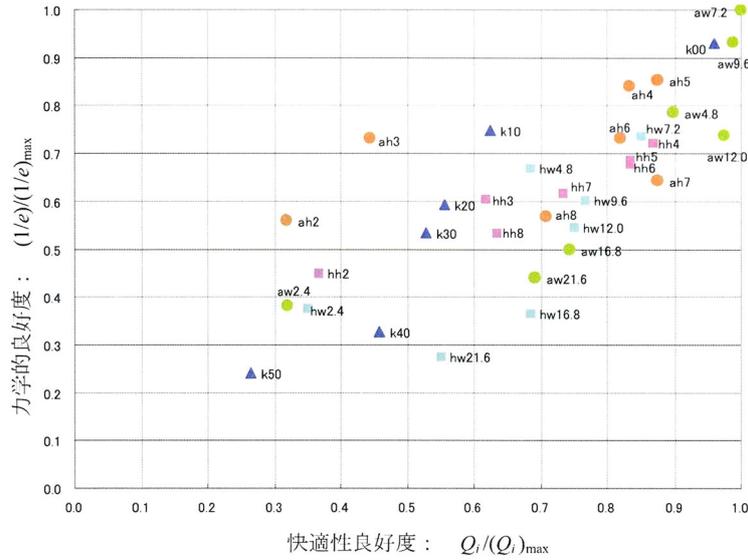
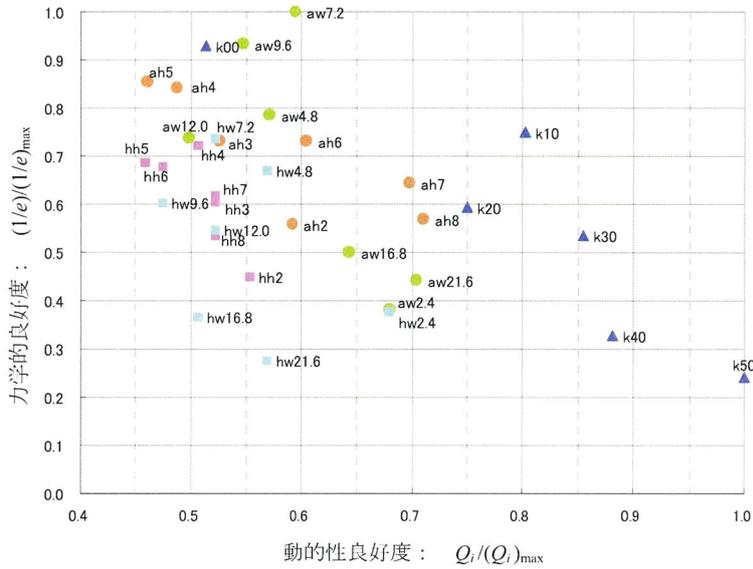


図-4.17 総合評価 :  $I_e$



(a)力学と「快適性」



(b)力学と「動的性」

— 図中記号凡例 —

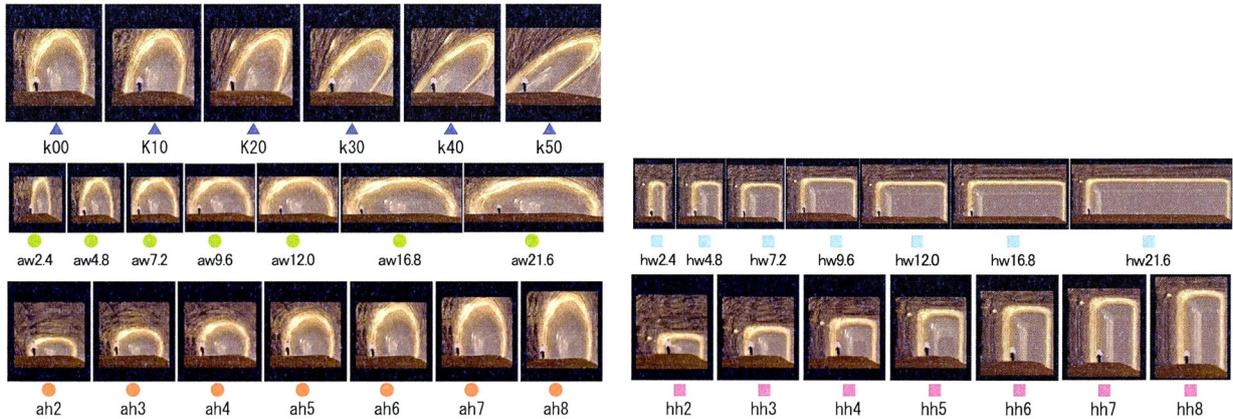


図-4.18 感性的良好度 :  $Q_i/(Q_i)_{max}$  と力学的良好度 :  $(1/e)/(1/e)_{max}$

### 4.3.3 最適な地下空間形状のデザイン例

#### (1) 「快適性」と力学を総合した空間

天端がアーチ形状で左右対称の形状において、「快適」かつ「力学的に有利」となる形状のH/Wの値を導く。

設定条件を表-4.2に示す。交通量や立地条件から幅員が決定されていると仮定し、高さを変化させた形状を題材とする。また、図-4.17(a)に示すように天端がアーチ形状の方が平坦な形状よりも総合評価が高くなっていることから、天端がアーチ形状でH/Wを変化させた形状(図-4.3(c))とする。感性的指標は「快適性」に対する感性的良好度、力学的指標は「体積ひずみ感度」に対する力学的良好度を用いる。

図-4.19に、力学的良好度、および、「快適性」に対する感性的良好度とH/Wの関係を示す。力学的良好度、および、感性的良好度の和である総合評価値は、H/W=1.0のとき最大となり、H/W=1.0が快適でかつ力学的に有利な空間のH/Wとなる。

また、図-4.3(b)のように高さを一定とし幅を変化させた形状に対して検討を行った誘導条件、および、結果を、表-4.3、および、図-4.20に示す。上記の例と同様、総合評価値はH/Wが1.0付近で最大という結果となる。

以上の結果から、長時間過ごし居住性を要求される空間や不特定多数の人々が利用する空間など、快適性を重視する空間においてはH/W=1.0のアーチ形状が推奨される。また、たとえば、地下通路のような空間では、一般に内空高さを建築限界の最低基準(2.5m)<sup>8)</sup>とすることが多く、歩行量等を考慮し幅員を大きく取るとH/W=1.0よりも小さくなるが、快適性と力学的良好度を総合して評価する観点からは、歩行量に対応して幅員を増すとともに高さも大きくとりH/W=1.0に近づける案が提案できる。

また、空間のD/H(D:街路や川の幅、H:建物や並木の高さ)の値によって、空間の感じ方の定性的な考察が数多くなされている。たとえば、街路空間において、芦原はD/H=1のとき、高さとの間に均整があり、D/Hが1より小さくなると近接し狭苦しい感じ、D/Hが2より大きくなると広々とした感じとなるとしている<sup>9)</sup>。また、レオナルド・ダ・ヴィンチはD/H=1.0であることが理想であると考えていたと紹介している<sup>9)</sup>。河川空間においては、D/Hが1~2程度であると、河川空間がまとまった印象となり、3を超えると、茫洋とした感じになりやすいとされている<sup>10)</sup>。他にも、カミロ・ジッテは良い広場のD/Hを1~2としている等の多数の考察がある<sup>11)</sup>。本研究においても、高さとの比がほぼ等しい、H/W=1.0近傍の形状が快適性と力学を総合した評価が高い形状として導き出されたことは興味深い。従来の街路空間や河川空間は開放されているが、地下空間では四方が閉じられているので、閉空間のD/Hの議論は新たな視点と考えられる。

表-4.2 「快適性」と力学を総合した空間の誘導条件1 (高さを変化させた形状)

| 項目        | 条件                                     |
|-----------|--|
| (1) 形状    | 天端がアーチ形状で高さを変化させた形状 (図-4.3(c))         |
| (2) 感性的指標 | 快適性に対する感性的良好度: $Q_i/Q_{imax}$          |
| (3) 力学的指標 | 体積ひずみ感度に対する力学的良好度: $(1/e)/(1/e)_{max}$ |

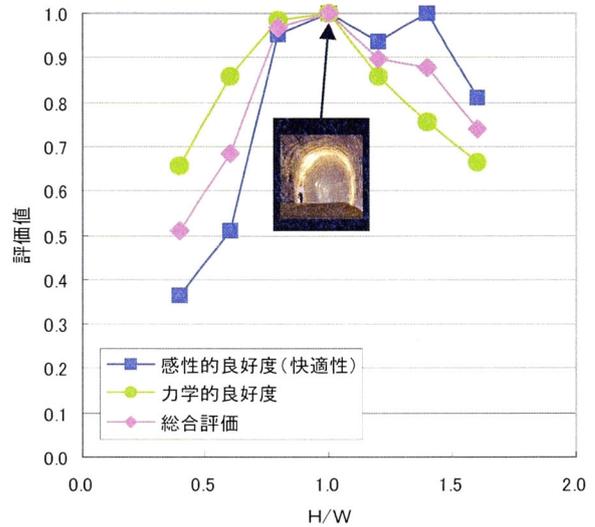
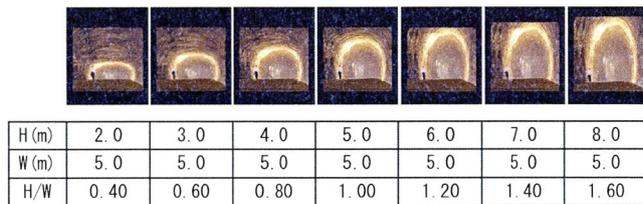


図-4.19 「快適性」と力学を総合した空間の総合評価結果1 (高さを変化させた形状)

表-4.3 「快適性」と力学を総合した空間の誘導条件2 (幅を変化させた形状)

| 項目        | 条件                                     |
|-----------|--|
| (1) 形状    | 天端がアーチ形状で高さを変化させた形状 (図-4.3(b))         |
| (2) 感性的指標 | 快適性に対する感性的良好度: $Q_i/Q_{imax}$          |
| (3) 力学的指標 | 体積ひずみ感度に対する力学的良好度: $(1/e)/(1/e)_{max}$ |

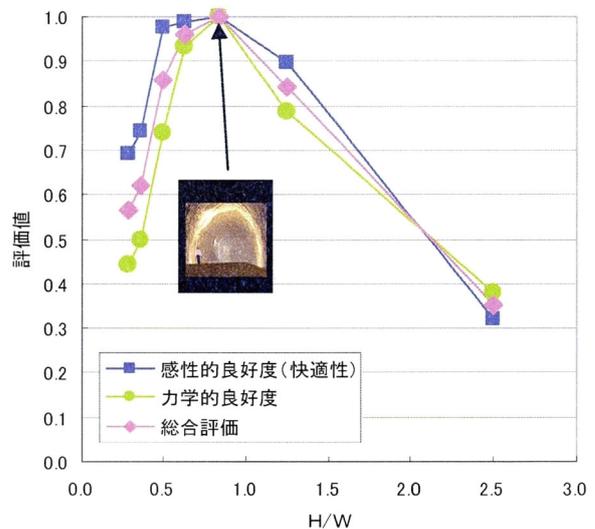
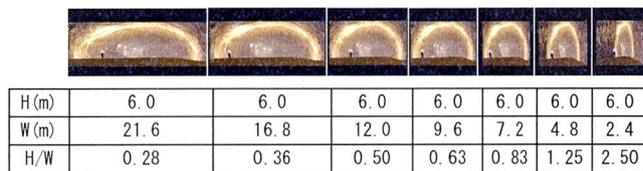


図-4.20 「快適性」と力学を総合した空間の総合評価結果2 (幅を変化させた形状)

## (2) 「動的性」と力学を総合した空間

次に、「動的性」に特徴のある斜めに傾く空間に対して、「動的」かつ「力学的に有利」となる形状の傾き（角度の値）を導く。

設定条件を表-4.4に示す。形状は斜めに傾けた形状（図-4.3(a)）とし、感性的指標は「動的性」に対する感性的良好度、力学的指標は「体積ひずみ感度」に対する力学的良好度とする。

図-4.21は、力学的良好度、および、「動的性」に対する感性的良好度と空間の傾きとの関係を示す。力学的良好度、および、感性的良好度の和である総合評価値は、傾き $10^\circ$ で最大となり、この傾きを持つ空間が、動的性と力学的な良好さのバランスが取れた空間形状であることが導かれる。

「動的性」は、4.2.1で述べたように「活動性」を表す尺度の一つであり、わくわくするような躍動感を与える効果、あるいは、気持ちを高揚させる効果があると考え、アミューズメントパークなどの遊びを楽しむ空間、また、多くの人々が活発に行き交う空港や駅などの空間の断面を斜めに傾けるのも一つの利用法と考えられる。

図-4.22はガウディの設計したグエル公園（スペイン、バルセロナ）の「洗濯女の回廊」と呼ばれている回廊であり、断面は斜めに傾斜している。実際のところ、ガウディは波の形状を模してデザインしたといわれているが、上記のように感性と力学を総合して得られた形状とよく似ていることは興味深い。このほかにも、地下通路へのエントランス（シンガポール）（図-4.23）、空港のロビー、F.L.ライト設計のタリアセン・ウェストはじめ斜めに傾いた断面の空間例は数多く挙げられる。これらは地下空間ではなく、地上の光あふれる空間であり、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が、地下においても、「動的性」、すなわち、動きを生かした空間づくりの可能性が期待できる。

なお、傾きに関する考察は先に述べたD/Hほど多くはないが、浮世絵の風景画においては、長方形画面の横線に対する河川の傾きが $10^\circ$ 付近のものが多く、空間をやや斜めに構えて見る（描く）ということが美しいものとして捉えられているとの指摘がある<sup>12)</sup>。また、古くからの日本の庭園や建物においては、やや斜めに重心を置くことにより、何ともいえない優美さをかもし出していたりする。このようなことと本研究の結果を合わせて考えると、やや斜めに傾く空間は、空間構成において魅力ある特徴を引き出すのではないかと考えられる。

以上のように、異なる感性的評価尺度に応じて、特徴ある空間形状が選択される例を示した。このことは、力学的評価に対し、表現したい空間イメージに適した感性的評価を加えることで、人の感性と力学の両面を考慮した新しい地下空間形状デザインの可能性が広がると考えられる。

表-4.4 「動的性」と力学を総合した空間の誘導条件

| 項目        | 条件                                     |
|-----------|--|
| (1) 形状    | 斜めに傾いた形状 (図-3(a))                      |
| (2) 感性的指標 | 動的性に対する感性的良好度: $Q_i/Q_{imax}$          |
| (3) 力学的指標 | 体積ひずみ感度に対する力学的良好度: $(1/e)/(1/e)_{max}$ |

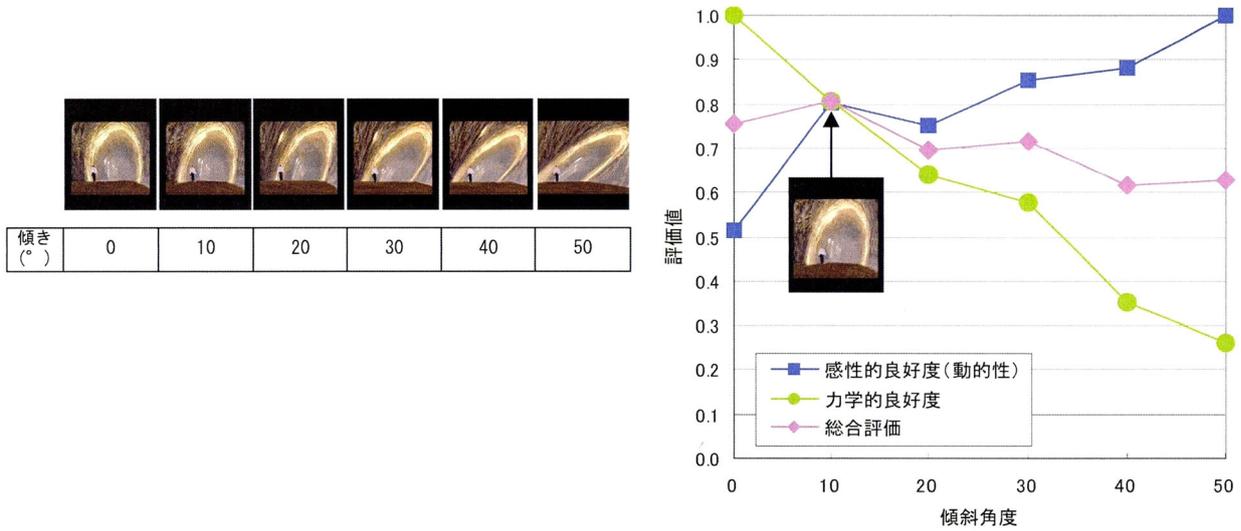


図-4.21 「動的性」と力学を総合した空間の総合評価結果

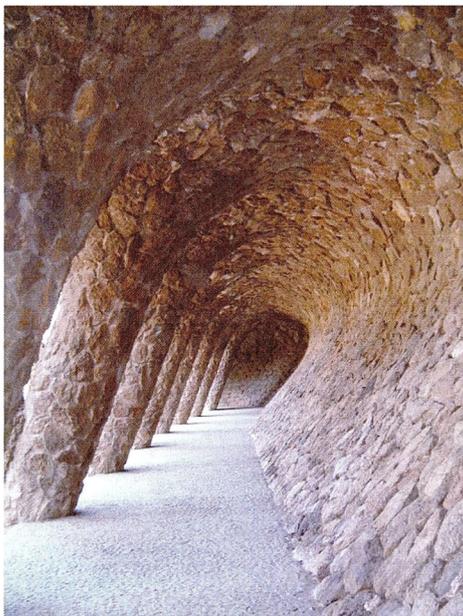


図-4.22 ガウディのグエル公園の回廊 (バルセロナ, スペイン. 撮影: 清水)



図-4.23 地下通路のエントランス (シンガポール. 撮影: 清水)

## 4.4 まとめ

本章では、魅力的な地下空間を創造するために、人々の持つ感性を活用し、力学的評価と総合して地下空間形状をデザインするという、新しい着想に基づく研究を行った。その成果をまとめると次のようになる。

### (1) 地下空間形状の評価指標の定義

地下空間形状の良好さを評価するための指標として、力学的評価指標、および、感性的評価指標を定義した。力学的評価指標としては、地下空間形状の「変形しやすさ」を表す力学的感度を新しく定義した。感性的指標としては、地下空間の印象を表す形容詞尺度を用い、アンケート結果を評価値とした。

### (2) 評価の実施と結果の考察

高さや幅、傾きなどを系統立てて変化させた34種類の形状に対して、「快適性」と「動的性」に対する感性的評価値、および、「体積ひずみ」と「せん断ひずみ」に対する力学的感度を求め、それぞれの形状に対して評価結果を考察した。

### (3) 感性的評価値と力学的感度の関係

感性的評価値と力学的感度の関係を調べると、変形しやすい（力学的感度が大きい）形状よりも変形しにくい（力学的感度が小さい）形状に対して人々は「快適性」を感じるという傾向がみられた。反対に、変形しにくい形状よりも変形しやすい形状に対して「動的性」を感じる傾向が示された。

### (4) 力学と感性の総合評価

感性的評価と力学的評価の両者を総合する指標を定義し、34種類の地下空間形状に対して総合評価を行った。「快適性」評価と力学的評価を総合すると、天端がアーチ形状で高さ幅比 $H/W$ が1.0前後の地下空間形状が最もよい空間として評価された。「動的性」評価と力学的評価を総合した場合には、斜めに傾く空間形状の評価が高くなるという特徴が得られた。

### (5) 感性と力学を総合したデザイン例の提示

デザイン例として、幅を一定として、高さを変化させた地下空間形状に対して、「快適性」と「力学的良好度」の総合評価値が高い形状の高さ幅比 $H/W$ が導かれる事例を示した。また、斜めに傾く空間に対して、「動的性」と「力学的良好度」の総合評価値の高い空間形状の傾きが導かれる事例を示した。

## 参考文献

- 1) 今泉暁音, 清水則一, 櫻井春輔: 力学的感度と感性アンケートに基づく地下空間の形状デザインに関する研究, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.2, pp.237-250, 2010.
- 2) 櫻井春輔, 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.
- 3) Shimizu, N. and Sakurai, S. : Application of boundary element method for back analysis associated with tunneling problems, *Proc. 5th Int. Conf. Boundary Elements*, pp.645-654, 1983.
- 4) 三好俊郎: 有限要素法入門, 培風館, 1994.
- 5) Osgood, C. E., Suci, G. J. and Tannenbaum, P. H. : *The Measurement of Meaning*, University of Illinois Press, 1957.
- 6) 岩下豊彦: SD 法によるイメージの測定, 川島書店, 1983.
- 7) 土木学会地下空間研究小委員会 (編集者, 日比野敏): 地下空間とデザイン (地下空間と人間 4), pp.62-64, 1995.
- 8) (社) 日本道路協会: 立体横断施設技術基準・同解説, 丸善, pp.70-73, 2006.
- 9) 芦原義信: 町並みの美学, 岩波書店, pp.74-79, 2001.
- 10) (社) 土木学会: 水辺の景観設計, 技法堂, pp.123-125, 1988.
- 11) 高橋研究室(編): かたちのデータファイルーデザインにおける発想の道具箱ー, 彰国社, p.51, 1984.
- 12) 萩島 哲, 坂井 猛, 鶴 心治: 広重の浮世絵風景画と景観デザインー東海道五十三次と木曾街道六十九次の景観ー, 九州大学出版会, 2004.

## 用語の説明

本章で定義した用語を説明する。

### 力学的感度 $\gamma$ , $e$ :

空間形状の変形のしやすさを初期応力と弾性係数に無関係に表す指標。ポアソン比を一定とするとその値は空間の形状にのみに影響を受け、この値が大きいほど空間形状が変形しやすい。せん断ひずみに対する感度  $\gamma$  と体積ひずみに対する感度  $e$  の2つを定義した。

### 力学的指標 :

力学的な指標の総称。力学的感度  $\gamma$ ,  $e$ , 力学的良好度（後述）など。

### 感性的指標 :

感性的な指標の総称。感性的評価値, 感性的良好度（後述）など。

### 感性的評価値 :

第3章と同じ定義であり、第3章の「用語の説明」において説明した。なお、本章では、 $Q_i$  で表す。

### 力学的良好度 :

力学的感度を用いて求められる評価値。本研究では、力学的感度  $\gamma$ ,  $e$  の逆数  $1/\gamma$ ,  $1/e$  を取り、評価の対象とする地下空間形状に対して、最も値の大きい  $(1/\gamma)_{\max}$ ,  $(1/e)_{\max}$  で、それぞれの値を除いて基準化した値  $(1/\gamma)/(1/\gamma)_{\max}$ ,  $(1/e)/(1/e)_{\max}$  のことをいう。この値が大きいほど変形しにくく、力学的評価は高い。

### 感性的良好度 :

感性的評価値  $Q_i$  を、アンケートにおける評価値の中で最も大きい値  $(Q_i)_{\max}$  で除して得た基準化した値  $Q_i/(Q_i)_{\max}$  のことをいう。この値が大きいほど、感性的評価は高い。

### 総合評価指標 :

力学的評価と感性的評価を総合した指標。本章では、力学的良好度と感性的良好度の算術平均と定義した。

## 第5章

### 結論

#### 5.1 まとめ

本研究では、魅力的な地下空間を創造するために、人々の持つ感性を活用し、感性的評価と力学的評価を総合して地下空間の形状をデザインするという新しい着想に基づく研究を行った。その成果をまとめると次のようになる。

第1章では、本研究の背景と目的、ならびに、論文の構成を示した。

地下空間はこれまでの社会基盤施設としてだけでなく、人々が快適に安心して集う空間として、また、地球環境や景観に関わる新たな課題を解決する空間として多様な利用が期待されており、本研究は、より魅力的な地下空間を創生するための新しいデザイン手法の構築を目指したものであることを述べた。

第2章では、古代から現在に至る地下空間の利用の概要と今後の展望を整理するとともに、これまでの地下空間デザインに関する研究を取りまとめた。また、人の感性を製品開発や工業デザインなどに生かそうとする感性工学の概要とその土木工学分野への適用事例を示した。

第3章では、地下空間形状に対する感性的評価と力学解析の結果を総合する評価方法を示し、評価結果について考察した。

まず、地下空間形状を感性的に評価するための尺度を、予備アンケートを実施して多数の言語表現（形容詞対）から因子分析の結果に基づき構成した。その尺度を用いて8種の地下空間形状に対してアンケートを実施し、SD法などによってその結果を分析すると、地下空間形状は、快適と感じる形状のグループと不快と感じる形状のグループに分けられ、また、快適性に影響を与える尺度は形状特性（「バランスの良い」、「調和した」、「使いやすい」）と空間特性（「広がりがある」）であることが示された。

感性評価に用いた形状の地下空間に対して力学解析を行い、解析結果から地下空間の力学的な安全性を評価する指標（安全性評価値）を与え、これとアンケートから得られる快適性評価値とを総合する評価式を定義した。そして、具体的な例を通して、地下空間形状の総合的な評価を行い、感性と力学による評価結果を個々に論じるのではなく、総合して議論できることを示した。

第4章では、第3章で検討した方法をさらに発展させ、新しい地下空間形状をデザインする方法を提案した。

まず、最初に、力学的評価の一般性を高めることを考え、新たな力学的評価指標として、形状

の変形しやすさを示す「力学的感度」を定義した。そして、系統立てて設定した地下空間形状に対して、力学解析による力学的評価とアンケートによる感性的評価を行い、各形状の評価結果の特徴、および、力学的評価と感性的評価の関係を考察した。特に、変形しにくい（力学的感度が小さい）形状ほど「快適性」を感じ、また、変形しやすい（力学的感度が大きい）形状ほど「動的性」を感じる傾向があり、人の持つ感性と力学的な特徴には何らかの関係がある可能性が示された。

次に、それらの結果に基づき、感性と力学を総合した新しい地下空間形状の評価手法を提案し、様々な形状に対する評価を行った。その結果、「快適性」評価と力学的評価を総合すると、天端がアーチ形状で高さと同程度の地下空間形状が最もよい空間として評価された。また、「動的性」評価と力学的評価を総合した場合には、やや斜めに傾く空間形状の評価が高くなるという特徴が得られた。

最後に、地下空間形状デザインの例として、幅を一定とし、高さを変化させた地下空間形状に対して、「快適性」と「力学的良好度」の総合評価値が高い形状の高さ幅比  $H/W$  が導かれる事例を示した。また、斜めに傾く空間に対して、「動的性」と「力学的良好度」の総合評価値の高い空間形状の傾きが導かれる事例を示した。

## 5.2 課題と展望

本研究では、新しい考え方による地下空間デザインの方法を構築して、その適用の可能性を検討することに主眼をおいたため、研究としてはまだ基礎的な段階にあり、今後さらに検討すべき課題があると考えている。

たとえば、感性評価において個々に得られた結果は、限られた地下空間形状、および、限られた被験者集団と数に対するアンケートに基づいており、アンケート対象者をどのように設定するのか、また、感性評価の結果の一般性を検討することは今後の課題である。

感性評価における評価対象の地下空間として、本研究では、装飾などによって形状評価に先入観が入らぬようにできるだけ自然な状況の地下空間の写真を用いたが、ここで得られた断面形状変化に対するイメージの変化は、一般の都市地下通路等でも同様に見られるのか、さらに、本研究では、被験者集団は学生が中心であったが、年齢層、職種、性別、地域、国籍などの差異が、評価結果にどの程度影響を及ぼすかについても調査、検討することは重要である。

もちろん、被験者によって結果に差異があることは当然であり、地下空間の使用目的に応じて被験者（たとえば、伝統的な街の風土を生かしたい場合にはその土地で生まれ育った人、主に若い人が利用する施設では若い人、年配の方が利用する施設では年配の人、など）を選び、利用者の感性の特徴をデザインに取り入れることが必要であろう。そのためにも、適切な評価対象の表現（3次元画像、動画など）、評価尺度、評価手法などを確立することは課題である。

また、力学的評価においても、本研究で定義した力学的感度について、体積ひずみ感度とせん断ひずみ感度のどちらを用いることがより有効であるか、また、より複雑な地質、力学的性状を持つ岩盤に対しての取り扱いも検討する必要がある。さらに、感性的評価と力学的評価の融合の

方法について、本研究では両者の結果を数値化し算術的に加算（平均）して総合評価をしたが、より合理的かつ効果的な方法を検討することも課題となる。

本研究では地下空間の「形状」に対するイメージに絞って検討を行ったが、デザインにおいて「色」が与える影響は極めて大きい。人は外からの刺激に対して情報の85%以上を視覚を通して得ているといわれ、対象の認識は、色→形→テクスチャーの順に行われていることが明らかになっている<sup>1)</sup>。したがって、「色」は地下空間のイメージを考える際に無視できないものであり、「色」が与える影響を分析し、地下空間デザインにどのように取り入れるかに関する研究は進めるべき一つの方向と考えられる。実際、同じ形状であっても色が異なると快適性や動的性のイメージが変化することを明らかにしつつある<sup>2)</sup>。このような成果に基づき、たとえば、施工性や力学的な観点から断面形状の設計が制約を受ける場合でも、「色」の持つ効果によって地下空間のイメージを意図に合わせてデザインできる可能性を期待することができよう。

20世紀における建設技術は、機能性や合理性、また、経済性を重視して発展してきた。その成果によって、豊かな社会を築くことができたことはいままでもない。今日のような成熟社会においては、豊かさや心のゆとり、快適性や楽しさをより一層感じるような環境を整備するため、これまで培ってきた技術と感性をいかに融合するかが建設分野全体の課題と考える。

本研究で検討した感性と従来技術（特に力学）の融合による手法が、実際の地下空間のデザインに適用されるとともに、他の建設分野においてもこのようなデザインコンセプトが展開されることを望む。

参考文献

- 1) 東京商工会議所（編）：カラーコーディネーション，中央経済社，pp.99，2001.
- 2) M. Masuda, A. Imaizumi and N. Shimizu: Underground space design - an alternative approach, Proc. The 12th Japan Symposium on Rock Mechanics, pp.437-441, 2008.

## 謝辞

本研究の遂行，本論文の作成にあたり，多数の方々にご指導，ご支援を受けたことに感謝の意を表します。

山口大学大学院理工学研究科システム設計工学系専攻 清水則一教授には，学部の4年生の頃から今日までの間，熱心なご指導とご教授を賜りました。また，地下空間の見学や学会参加など多くの貴重な体験の機会を与えていただきました。そして，博士前期課程を修了後，一旦就職してから博士後期課程に入学するまでの間も，温かく見守っていただき，研究を継続することができました。本論文を書き上げるということは，先生の様々なご助力がなくしては達成できませんでした。心から深く感謝の意を表します。

本論文の副査をして頂き，論文をまとめるためのご指導と有益なご助言を賜りました山口大学大学院理工学研究科の三浦房紀教授（環境共生系専攻），進士正人教授（システム設計工学系専攻），嶋心治教授（情報・デザイン工学系専攻），榊原弘之准教授（システム設計工学系専攻）に深く感謝いたします。

財団法人 建設工学研究所 櫻井春輔 理事長（神戸大学名誉教授）には，本研究を始める契機となる基本的なアイデアを示して頂くとともに，適切なご助言と暖かい励ましを賜りました。心から深く感謝申し上げます。

著者が博士前期課程を修了後，研究を引継ぎ，遂行して頂きました，越智早代さん（旧姓 竹尾），桐山由美子さん，増田美佳さん，向井かおりさんに心から深く感謝の意を表します。彼女たちの継続・協力なしには，本論文をまとめるに至らなかったに違いありません。

最後に，アンケートに協力して頂いた多くの方々に感謝の意を表します。

## 関連論文

(a) 査読のある雑誌等

- (1) 著者氏名 : 今泉暁音, 清水則一, 櫻井春輔  
 論文題目 : 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  
 学術雑誌名 : 土木学会論文集  
 巻, 号, 頁 : No.742/IV-60, pp.159-168  
 発行年月日 : 平成 15 年 9 月発行  
 (本文との関係 : 第 3 章)
- (2) 著者氏名 : 今泉暁音, 清水則一, 櫻井春輔  
 論文題目 : 力学的感度と感性アンケートによる地下空間の形状デザインに関する研究  
 学術雑誌名 : 土木学会論文集  
 巻, 号, 頁 : F, Vol.66 No.2, pp.237-250  
 発行年月日 : 平成 22 年 4 月発行  
 (本文との関係 : 第 4 章)

(b) 査読のある国際会議の会議録や国内の雑誌等

- (1) 著者氏名 : N. Shimizu, A. Imaizumi and S. Sakurai  
 論文題目 : An approach using human perception together with rock mechanics to design the shape of underground space  
 学術雑誌名 : Proceedings of 5<sup>th</sup> North American Rock Mechanics Symposium, NARMS-TAC2002  
 巻, 号, 頁 : Vol.2, pp.1333-1338  
 発行年月日 : 平成 14 年 7 月発行  
 (本文との関係 : 第 3 章)
- (2) 著者氏名 : N. Shimizu, A. Imaizumi and S. Sakurai  
 論文題目 : Fusion of human sensibility and rock mechanics in the design of underground spaces  
 学術雑誌名 : Proceedings of the 30th ITA-AITES World Tunnel Congress  
 巻, 号, 頁 : Vol.1, pp.411-418  
 発行年月日 : 平成 16 年 5 月発行  
 (本文との関連 : 第 3,4 章)

- (3) 著者氏名 : A. Imaizumi, N. Shimizu and S. Sakurai  
論文題目 : A new approach for underground space design with fusion of human sensibility and knowledge of rock mechanics  
学術雑誌名 : Proceedings of the ISRM International Symposium: 3rd Asian Rock Mechanics Symposium  
巻, 号, 頁 : Vol. 1, pp.209-212  
発行年月日 : 平成 16 年 11 月発行  
(本文との関係 : 第 4 章)
- (4) 著者氏名 : N. Shimizu, A. Imaizumi, S. Takeo and S. Sakurai  
論文題目 : Toward the design of attractive underground space: Coupling human sensibility and rock mechanics  
学術雑誌名 : Proceedings of the 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics  
巻, 号, 頁 : pp.1083-1087  
発行年月日 : 平成 19 年 7 月発行  
(本文との関係 : 第 4 章)