

バーチャルリアリティ空間を利用した市街地の総合環境評価システム

地下街防災の安全性評価支援システム

渡辺 眞知子 土井 暁 本間 正彦
吉野 摂津子 小宮 英孝

Comprehensive Environmental Assessment System for a City using VR Safety Evaluation Support System for Disaster Prevention in Underground Shopping Center

Machiko Watanabe Satoru Doi Masahiko Honma
Setsuko Yoshino Hidetaka Komiya

Abstract

This report presents the results of studies on fire prevention that are a part of a project entitled, "Studies of Urban Environment Human Media". This project was commissioned by the Ministry of International Trade and Industry, was conducted by the NEDO over five years. It comprised the following parts.: (1) A full-scale model of an underground shopping mall with was made, including general design and equipment. (2) Based on hydrodynamics, a smoke diffusion simulation was developed that simultaneously calculated smoke flow and diffusion of chemical substances, and the ways were developed to display these results in virtual reality (VR). (3) Ways were developed to present in VR changes of fire forms in shops where fire originated. (4) An evacuation simulation was developed to calculate an individual's movement considering the architectural design and smoke. Furthermore, we developed ways of presentation on VR to inform subjects of smoke risk.

概要

本報告は、5年間にわたり経済産業省からNEDOへの委託研究の中で実施してきた都市環境ヒューマンメディアの研究の内、防災テーマに関する集大成である。主な成果は次の通りである。(1)一般的な地下街を対象とした建築・設備を考慮した実寸大規模の設計を行った。(2)流体力学をベースとし、煙流動、化学物質の拡散を同時に解析できる煙拡散シミュレーションを開発した。また、これらの結果をバーチャルリアリティー（以下VRとする）上でリアルに表現できる手法を開発した。(3)出火店舗に応じた火災形状の変化をVR上に表現できる手法を開発した。(4)建築空間、煙を考慮して避難者個々の動きを算出する避難シミュレーションを開発した。さらに、煙の濃度と滞在時間から煙りの危険性を定量的に把握し、その情報をVR上で被験者に提示できるようにした。

1. はじめに

本研究は、経済産業省からの再委託研究である「都市環境ヒューマンメディアの開発」の一環として行ったものである。同プロジェクトでは、都市開発、街路設計、防災計画等のために仮想都市を表示し、一般市民の同時体験や複数の専門家による設計等の評価・見直しを可能とするシステムを構築することを目的としている。本報では、特に安全性の面から防災を取上げ、地下街火災による煙流動、避難をVR上で体験・評価できるシステム開発について示した。これにより、実空間では非常に困難であった火災現象をVR上で体験し評価できるようにした。

2. 防災要素技術の開発

2.1 概要

地下街火災VRシミュレータの開発の最終的な目的は、地下街避難を体験することを可能とすることのみではなく、その空間に潜在する危険要素を把握し、それに対応する各防災技術の開発に役立てることにある。そのため被験者が、リアルに構築された地下街の火災による避難の体験を可能とするシミュレータの構築を目指した。シミュレータ映像はネットワークに繋がれた多数の端末と立体視可能な大きなドーム上に表示され、多数の被験者が同時に避難を体験する事が出来るシステムである。地下街火災シミュレータの開発に必要な要素技術とその関係をFig. 1に示す。シミュレータ構築に関わる要素技術として大きく4つの要素技術が存在する。第1は地下街の設計である。設計した地下街の概要をTable 1に、地下街モデルのCAD図をFig. 2に示す。第2に煙やCOx等の拡散を解析する煙拡散シミュレーションであり、

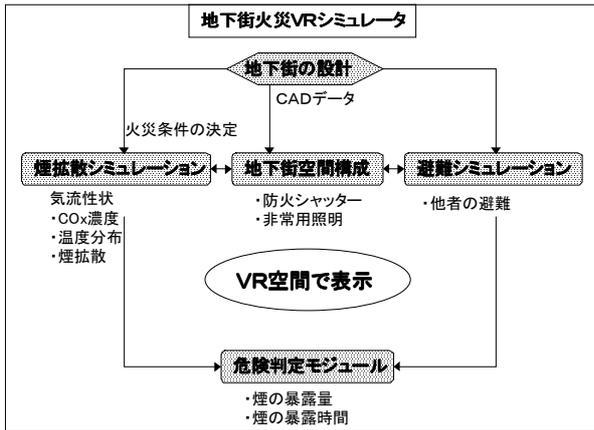


Fig. 1 システム構成図
Component of the system

Table 1 地下街概要

Outline of the underground shopping center

建物概要	延べ床面積	13,800 m ²
	天井高さ	3m
	通路幅	5m, 6m, 8m
	建物用途	店舗等
	広場	7箇所
	階段	26箇所
設備概要	照明器具	
	避難誘導設備	誘導灯設備、非常照明設備
	警報設備	手動火災報知器
		防火扉、防火シャッター

第3は避難者の避難経路を予測する避難シミュレーション、第4は避難経路情報と危険物質拡散とを関連させ、その危険度を表示する危険判定モジュールである。

2.2 煙流動シミュレーション

本シミュレータの要素技術の一つである煙拡散シミュレーションとは、設計された地下街に対して火災発生条件を設定し、その条件によって発生する煙や危険物質等の拡散状況を解析し、VR上で表現するモジュールのことをいう。

2.2.1 解析手法 地下街の煙拡散を把握してVR上でよりリアルに表現することを考慮した場合、防災計画で広く利用されているゾーンモデルを用いた手法では、時々刻々の煙拡散の様子を把握することは難しいため、その解析手法としてはフィールドモデルを用いる必要が生じる。このような状況を背景として、新たにフィールドモデルの1種として火災によって誘起される煙流動の数値解析手法の開発を行った。まず、地下街のような複雑な場をCFD(計算流体力学)を利用して解くために、マルチブロック法¹⁾を導入した。これは単純な解析格子を繋げることにより複雑な形状に対応する手法である。また、低マッハ数近似²⁾による圧縮性流体解析手法³⁾を用いることにより計算効率を向上させ、化学反応を

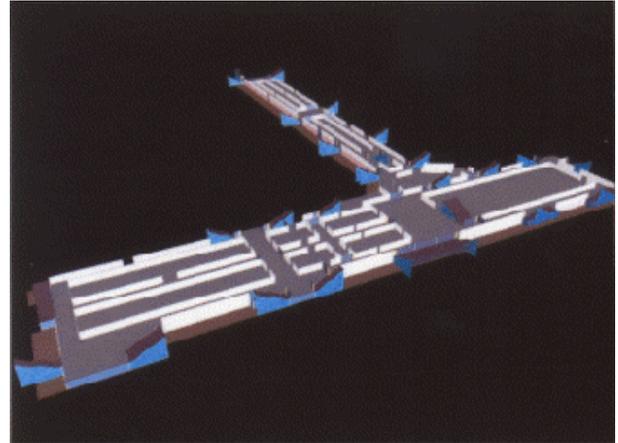


Fig. 2 地下街のCADデータ
CAD data of the underground shopping mall

Table 2 火災設定
Conditions of fire

火災室	物販店舗
燃焼物	衣料商品を木造相当に換算
発熱速度	最大25,000kW

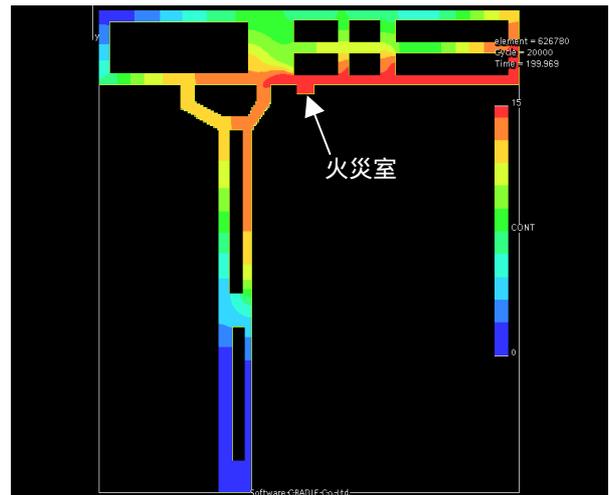


Fig. 3 煙拡散シミュレーション結果(一例)
An example of the result of smoke diffusion simulation

同時に解析可能としている。これにより本解析手法は、気流、温度、煙流動、化学反応を同時に解析可能であり、また複雑な形状への適用性も優れている。火災発生条件をTable 2に、解析結果の一例をFig. 3に示す。解析には、スーパーコンピュータSX-4を用いている。なお、火災の条件として、消火設備が作動せず、通路の防火シャッター、排煙設備が作動しない、最悪のシナリオを想定している。

2.2.2 可視化手法 煙拡散の可視化法として、煙の水平方向への展開速度と垂直方向への下降速度とを画像表

現した。ただし、煙の色、及び濃度に関しては試験的な画像生成にとどまっているがスーパーコンピュータによって解かれた煙拡散の情報をVRシステム上に反映することにより、従来にない細かな煙拡散の状況を表示することができ、より臨場感あふれる避難体験が可能となっている。Fig. 4 にVR上で表示した煙拡散状況の一例を示す。

2.3 避難性状シミュレーション

避難シミュレーションは人間、空間、煙それぞれの特性に基づく避難性状を予測するものである。この避難性状は、複雑な空間構成、避難誘導設備等と同様に被験者の心理に影響を与える要因として位置づけられる。

2.3.1 避難性状シミュレーション手法 避難性状をVR上でよりリアルに表現することを考慮した場合、現在、防災計画で広く利用されている群集を対象とした計算手法⁴⁾では、時々刻々変化する避難者個々の経路を把握することは不可能である。そこで、本シミュレーションでは人間、空間、火災による煙の要素をオブジェクトとして捉え、これらのオブジェクト相互に働く力により避難者個々の動きを算出する手法を用いた。人間については身体の大きさを持つ受動的なオブジェクトとして設定した。個々の人間に初期速度、避難開始時間を設定することも可能である。また、避難対象人数は、この地下街の場合、通路部分の人口密度を0.25人/m²とすると、約2000人となる。空間については地下街を避難性状が異なると思われる場ごと(広場、通路、交差点、出口)に分割し、それぞれの場の境界に均一あるいは放射状に引力が働くオブジェクトを配置した。煙については、煙拡散シミュレーションの結果から、煙の先端部の移動を読み取り、この先端部を斥力が働くオブジェクトとした。また、現在一般的な避難計算に用いられている歩行速度(1.0m/s)、開口部の流動係数(1.5人/m²・s)については、これに近い値を取るよう設定値の調整を行った。

2.3.2 避難性状シミュレーション手法 避難シミュレーションの結果の一例をFig. 5に、また、経路データを表示させた例をFig. 6に示す。Fig. 5は地下街の一つの広場の状況を上部から見下ろしたものである。避難者が出火室からの煙の拡散の影響を受け、火災室から遠ざかるように移動している様子が分かる。また、出口前では歩行の制限による、滞留現象も再現できた。

Fig. 6は避難者個々の避難経路を結んだ線の一部を表示させたものである。白い線が避難者個々の避難経路である。経路データはこれを分析することで局所的な潜在的危険要素の抽出等、詳細な検討に利用できる。

2.3.3 VRシミュレータシステム ここでは、被験者に提示するVR空間の一例を紹介する。地下街で火災が発生した場合、各所に設置される防火シャッターが降下し、日常時とは状況が一変するとともに煙による視界の悪化あるいは停電といった避難に悪影響を及ぼす要因が働く。そこで、被験者に提示するVR空間は比較のため日常時



Fig. 4 VR上での煙拡散表示例
Presentation of smoke diffusion on VR

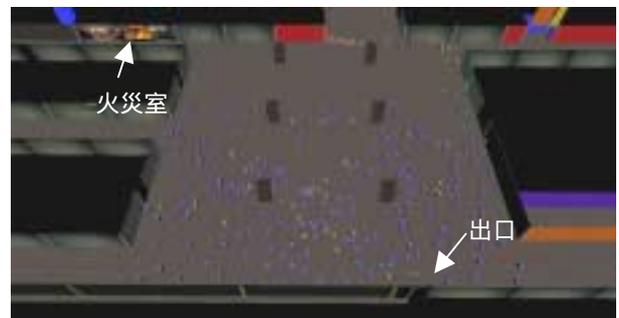


Fig. 5 避難シミュレーション結果
A result of evacuation simulation

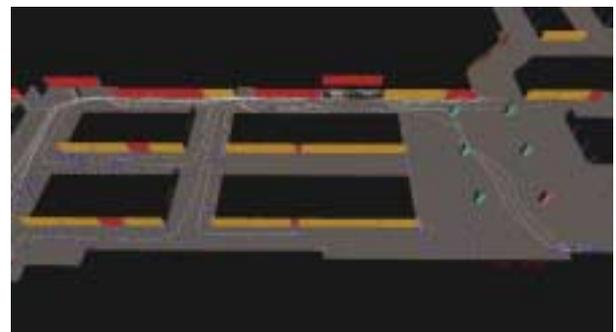


Fig. 6 経路データの表示
Presentation of the path data

と火災時の2ケースとしている。火災時には、スプリンクラー等の防火設備、排煙設備が作動せず、また出火店舗の防火シャッターも降下しないという最悪の状態を想定している。

Fig. 7に日常時の地下街の状況を示す。Fig. 8に火災時の地下街の状況を示す。日常時の状況ではリアリティと最適な描画速度を同時に実現している。日常時、火災時共にドーム状スクリーンでの立体視が可能であり、ジョイスティック等のインターフェイスを用いて、VR空間を自由に移動が出来る。火災時には空間、煙拡散性状、避



Fig. 7 日常時のVR地下街の状況
Normal condition of the underground shopping center on VR



Fig. 8 火災時のVR地下街の状況
Fire condition of the underground shopping center

難性状を同時に表示させることにより実空間では経験できない火災体験が可能となった。従来の防災計画は専門家の知識に頼っていたが、今後は、このVRシミュレーションシステムにより、その空間を利用する一般市民でも直感的な判断による安全性の評価が可能となった。

2.4 CO濃度判定システム

従来の火災安全設計では、一般的に空間内の煙を一様と仮定するゾーンモデルにより煙降下高さや温度の解析を行い、煙の高さが避難の間に人間の居住部分へ降下してこないことを検証し、また、降下したとしても煙の温度が人体に悪影響を及ぼす温度まで達していないことを検証している。この場合、一つの空間内では空間のどこでも同一の評価になり、一酸化炭素などのガス濃度による評価も行えない。したがって、局所的な部分を取りだすと実際には過剰な設計になっている、あるいは十分な安全性が確保できていないといったことが起こり得る。また、検証は数値データや図表を用いて専門家が行うことが多く、誰もが直感的に危険性を認識できる評価手法は確立されていないのが現状である。そこで、誰もが直感的に危険性を把握できるツールとして、煙拡散シミュレーションによる一酸化炭素濃度の解析結果を利用し、体験者位置における滞在可能時間を提示する危険性判定システムを開発した

2.4.1 一酸化炭素濃度と滞在限界時間 既往の一酸化炭素濃度と人体ダメージに関する文献調査を行った。本来一酸化炭素と人体ダメージは暴露される時間が大きく関係し、ダメージの蓄積量により危険性が判断されるべきである。しかし、これを行うための十分なデータをそろえることができなかったため、本研究開発では、体験者がいる位置での一酸化炭素濃度に対する滞在可能時間を提示することとした。文献調査結果を整理した一酸化炭素濃度と滞在限界時間の関係をFig. 9に示す。図からも読みとれるように体験者位置の一酸化炭素濃度が1%を超えると死の危険性があることとした。

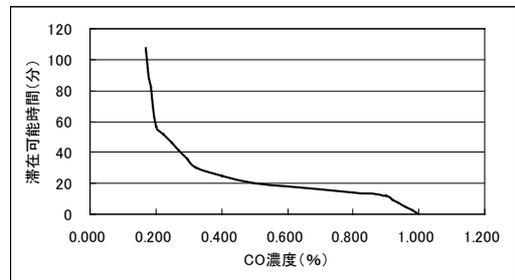


Fig. 9 CO濃度と滞在時間
CO concentration and duration of human alive



Fig. 10 危険性判定システムのイメージ
An image of the risk judgement system

2.4.2 危険性判定システムの構成 当システムは地下街災害時の避難行動を通じ、被験者の位置座標と火災発生からの経過時刻を踏まえ、煙拡散シミュレーション結果による一酸化炭素濃度分布に応じた火災の危険性判定を行うものである。

2.4.5 開発成果 クライアントへの滞在可能時間の表示としては、Fig 10左上のように画面の中にインジケータを配置し、体験者のダメージの状況を表示することと

した。

3. 地下街火災体験評価システムの開発

3.1 避難安全評価システムの概要

火災現象、避難性状を同一空間に提示し、建築物の避難安全性の分析・評価・検証が行えるツールとしてVRを利用した評価システムの開発を試みた。本システムの概要をFig. 11に示す。避難の安全性は、人・空間・煙の3つの要素の相互関係、および出火した時間帯を考慮して評価される。ここでは、建築物の一例として地下街を取り上げ、火災時の様子をVRで表現することにより、仮想地下街での火災体験にとどまらず、その空間に潜在する危険要素を抽出し、それに対応する各防災技術の開発や空間の避難安全性の評価を可能とすることを目的としている。この評価システムには、被験者がよりリアルに構築された地下街において、火災による避難体験ができる火災シミュレータと、そこから得られる結果を分析・評価する評価システムが必要となる。

避難安全評価システムは遠隔地からの同時参加、一般市民の設計参加等の分散強調設計のため、立体視可能な大きなドーム上に提示するだけでなく、多数の端末からでも同時にアクセスできようネットワークを構成している。このため、目的に応じて使い分けることが出来る。例えば、デザイナー個人のイメージを具現化する場合は小型ドームシステムで確認でき、また、具現化したイメージを共有したい場合は、リアルな大型ドームで同時多数により体験できる。また映像は、ネット上の端末のモニター画面にも表示できるため、一般市民も気軽に体験、参加できるシステムとなっている。

3.3 避難安全評価手法

避難計画においては、建物利用者に対し、心理的負荷の少ない、スムーズな避難を誘導することが重要である。そこで、心理的側面を考慮した安全性評価システムを開発した。評価の項目として、建築空間、設備、時間帯等について検討を行った。評価は体験者へのアンケートによる主観的なデータに加え、避難行動経路データおよび危険性判定結果といった定量的なデータを総合的に扱い、客観的な判断を行える手法とした。

3.3.1 評価のフロー 非常時の地下街の状況（建築空間、設備、煙・火災、時間帯等）およびユーザーの個人属性が避難行動にどのような影響を与えるかを、ユーザーがVR上の地下街空間で避難体験した後アンケートに回答する。この主観的評価と同時に避難行動経路や危険性判定結果といった客観的な評価とともに避難行動に影響を及ぼす要因を特定する。フロー概略図をFig. 12に示す。

3.3.2 評価の一例 シミュレーション条件、ここではTable 3に示す建築的要因がそれぞれ異なる地下街を体験者がVR上で避難した場合、避難時間にどのように影

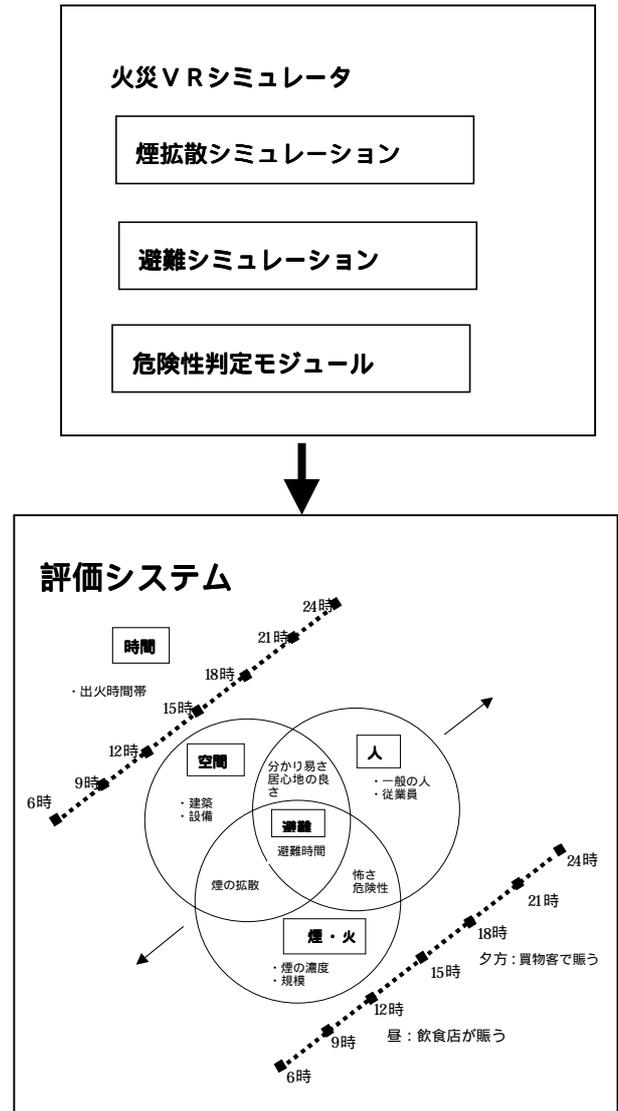


Fig. 11 避難安全評価システム
Evaluation system of safety evacuation

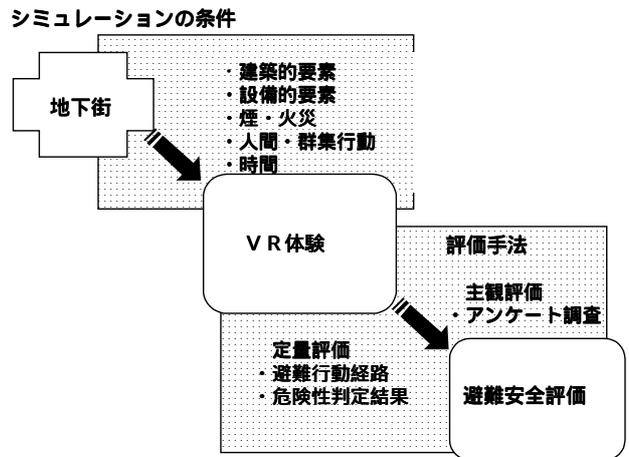


Fig. 12 評価のフロー
Evaluation flow

響を与えるかについての評価例をFig. 13に示す。

4. システムの総合評価

4.1 開発したシステムのユーザー評価

ここでは、開発したシステムの興味の度合い、評価項目の理解度等について、防災の専門家や一般ユーザーを対象としてヒアリングやアンケートを実施した。外部の専門家等の方々からは、これらのシステムが感覚特性を解明する実験研究、避難訓練シミュレータへの応用などに有効であるとの意見をいただき、本システムに対する関心の高さが伺えた。社内については、土木、建築を含む20名を対象にしてアンケートを行なった。各要素ごとの出来栄等を5段階（最も良い段階への回答に5点、やや良いものに4点、中間のものに3点、やや悪いものに2点、悪いものに1点を与える）で評価してもらい、その評価平均結果をTable 4に示した。これより、各要素がVR上にほぼ効果的に表示されていたこと、システムの利用先として、施主へのプレゼンテーション、教育などが示された。また、視覚、聴覚以外に嗅覚も加えた方が良いとの意見が挙げられた。

5. まとめ

本研究により、VRを利用した避難安全評価システムは、これを利用する人に対して直感的な理解を促し、局所的かつ心理的側面からの安全性評価を可能とするなど、将来性のあるシステムであることが確認できた。評価システムを除く火災シミュレータは教育訓練ツールとしての利用も有効である。またネットワークシステムの構築により、設計者だけでなく、一般市民もそれぞれが同時に様々な所から避難体験、評価することが可能となった。

謝辞

本研究は経済産業省産業科学研究開発制度の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から財団法人イメージ情報科学研究所(LIST)を通じて委託された「ヒューマンメディア研究開発」の成果である。なお、Fig. 8は、同プロジェクトグループの松下電工株式会社の柴野主任から提供していただいた。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 保原充他：数値流体力学 基礎と応用，東京大学出版会
- 2) McGrattan,K.B.,Rehm,R.G.andBaum,H.R. : J.Comput.Phys

Table 3 建築的要因
Architectural-factor

	通路幅	天井高	非常口	照明	時間帯
地下街タイプA	5m	3.5m	20	パターン1	昼
地下街タイプB	8m	3.5m	26	パターン2	夕方
地下街タイプC	6m	3m	24	パターン3	昼

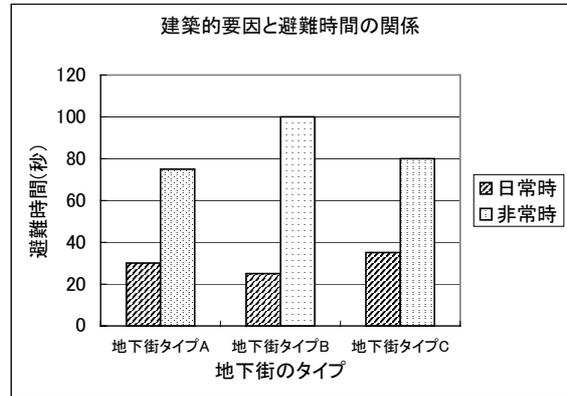


Fig. 13 評価の一例
An example of the evaluation

Table 4 アンケート結果
Results of questionnaire survey

評価項目	評価平均値
効果的な表示がされていたかどうか	
地下街空間の建物データ	4.6
時々刻々と変化するの火炎の様子	4.2
時々刻々と変化する煙の様子	4.6
全体的な地下街の状況	4.1
本システムに対する興味の度合い	
本システムを利用したいか	3.9
本システムを利用したい場所 (複数回答)	
設計時	5名
施主へのプレゼンテーション	8名
教育	6名
科学館、博物館	6名
役所	1名

- 3) 岩津 他：火災シミュレーションのための数値解析法 その1 第73回日本機会学会総会講演会講演論文集 (1), pp39-40, (1996)
田中哮義, 建築火災安全工学入門, 日本建築センター
- 4) 土井他：地下街火災VRシミュレータの開発 その1 シミュレータの概要と煙拡散シミュレーション, 日本建築学会大会梗概集,
- 5) 本間他：地下街火災VRシミュレータの開発 その2 避難シミュレーションとVRシミュレータシステム, 日本建築学会大会梗概集,