

ウォーカブルシティの歩行空間設計に向けた市民の合意形成のための 歩行者シミュレーション

堀千咲^{†1}

東京大学大学院学際情報学府

濱田健夫^{†2}

東京大学大学院情報学環

横窪安奈^{†3}

東京大学大学院情報学環

道方孝志^{†4}

東京大学大学院情報学環

越塚登^{†5}

東京大学大学院情報学環

1. はじめに

現在の日本社会において、大都市では人口過密が原因で交通渋滞、交通事故、そして環境問題が発生している。一方で、社会全体が少子高齢化に向かっており、特に地方都市では高齢化率が約 40 パーセントにも達し [1], 深刻な問題となっている。こうした課題に対応する持続可能な都市が求められており、その実現には、テクノロジー先行ではない、人を主体に据えたアーバンプランニングが必要である。アーバンプランニングは都市設計に関するあらゆる事柄を含み、将来の都市を様々な観点から考慮し、持続可能性や安全性などを踏まえて設計していくプロセスである [2]。

近年では、人を主体に据えたアーバンプランニングの一環として、とりわけウォーカブルシティへの注目が高まっている。ウォーカブルシティとは、居心地が良く、歩きたくなる環境が整備された都市を指し [3], その実現には歩行者の居心地の良さの向上、まちの活気の創出、それに伴う経済の活性化、車の減少による環境負荷の削減、歩行者増加による健康増進などが求められる。

日本国内には、人口規模の大小等に関わらず、「居心地が良く歩きたくなるまちなか」づくりに、賛同する地方公共団体、ウォーカブル推進都市が 300 以上の存在する [4]。例えば愛媛県松山市花園町通りでは、賑わいと交流の場を創出するために、道路の総幅員はそのまま、6 車線あった車道を 2 車線に減らし、5 メートルだった歩道幅を最大 10 メートルに広げた [5]。ウォーカブルな空間へと道路空間を

再構築したことで、歩行者数が約 2 倍になり、地価も上昇傾向が見られている [6]。このように、目覚ましい効果を挙げた都市も多く、これに続くべく、ウォーカブルシティの実現に向けた様々な取り組みが行われている。

実世界でウォーカブルシティの実装に向けた空間再編を行うプロセスは複雑であり、障壁が多くある。ウォーカブルシティに向けたまちづくりを進める中で、当該自治体やデベロッパー、地域住民など多岐に渡るステークホルダーとの議論を通じて合意を得ることが必要となる [7] が、それは容易なことではない。議論を進める上で、社会実験を実施しその効果を実際に確認することは有効な手段ではあるが、構想計画の立案、適切な実施場所の検討から道路の許可、地元のまちづくり協議会や警察との調整、効果検証など大掛りになってしまう。また各ステークホルダーの立場によってその空間の持つ価値は異なり、自身とは別の立場を肌感覚として理解することは困難といえる。

そこで、本研究ではデジタルツインに着目する。デジタルツインとは現実空間の情報を取得し、サイバー空間内に現実の環境を再現するものである。デジタルツインによる、サイバー空間上での分析・シミュレーション、現実世界へのフィードバックが近年ますます進んでいる [8]。日本の大都市の 3D 都市モデル [9] や高性能なゲームエンジンが無料で簡単に扱える状況から、開発、工数、コストは大幅に減少している [10]。ステークホルダーとの調整を円滑に進め、将来の都市像を共有する上で、検討の対象となる空間をあらかじめサイバー空間上で再現し、物理空間での実現可能性を考えるプロセスは、様々な条件を再現・考慮し、空間再編の効果検証にかかるコストを下げるができるのものと考えられる。

本論文では、ウォーカブルシティに向けた快適性をサイバー空間上で事前に評価する、歩行者シミュレーションを提案する。

Pedestrian simulation for building consensus among citizens for pedestrian space design in walkable cities

^{†1} CHISAKI HORI, Graduate School of Interdisciplinary Information Studies The University of Tokyo, Japan

^{†2} TAKEO HAMADA, Interfaculty Initiative in Information Studies The University of Tokyo, Japan

^{†3} ANNA YOKOKUBO, Interfaculty Initiative in Information Studies The University of Tokyo, Japan

^{†4} TAKASHI MICHIKATA, Interfaculty Initiative in Information Studies The University of Tokyo, Japan

^{†5} NOBORU KOSHIZUKA, Interfaculty Initiative in Information Studies The University of Tokyo, Japan

2. 関連研究

2.1. ウォーカブルシティの評価手法

世界各国または都市で歩行空間の評価が数多く行われている。米国 [11] やロンドン [12], メルボルン [13] では、それぞれ道路空間を評価する指標が存在している。

日本では、国土交通省は空間の居心地の良さについて、4つの要素にグルーピングし、それぞれ8項目の指標を計測するための「まちなかの居心地の良さを測る指標」[14] を使用して、現状を分析し、課題を抽出しようと試みており、この分析項目の中には通行量や通行者、滞在人数、主観的項目といった、歩行者を含めた様々な視点が入り入れられている。

2.2. 歩行空間における快適性

諸外国では、歩行空間における快適性に関する研究が行われており、その中では、歩いて目的地に到達することができるのか、交通機関同士の連携はどうか、歩道のデザインはどうかという視点から歩行空間の快適性を評価している [15, 16, 17]。また、森本ら [18] が指摘するように、国や都市ごとに政策が違い、他国と比較し、居心地の良さを重視したウォーカブルな空間の推進がなされていることが特徴的である。

そして、日本では英国の Link and Place 理論を参考に歩行空間の機能を定義し、分類評価することが多い。Link and Place 理論は、Peter Jones が提唱した理論 [19] で、街路を Link と Place の2つの軸から街路を分類し、都市街路を計画、設計するアプローチをとっている。街路を通行機能を表す Link と滞在機能を表す Place の2つの側面から道路空間の再配分を検討する。通行機能とは、人や物が移動するための機能で、公共交通・乗用車・徒歩等で目的地までの移動が行われる機能を指す。滞在機能とは、多様な活動を繰り広げる場として機能し、食べる・座るパフォーマンスを行う等の活動が行われることを指す [20]。

2.3. 空間再編シミュレーション

国土交通省の提供する3D都市モデルの PLATEAU[9] を用いた、空間再編シミュレーションの事例が存在する。例えば、渋谷区道玄坂の空間再編のイメージをVRで構築し、空間再編後の訪問意向の変化を調査した事例 [21] や、西新宿エリアを対象に歩行者行動シミュレーションを実施し、街の賑わい創出のための施策の検討や検証を支援するツールを開発した事例 [22] がある。同様の事例は他にも存在するが、歩道幅の変化によって、快適性がどの程度変化するのか評価した研究は不足している。

3. 歩行者シミュレーション

本論文では、Link and Place 理論で言及されている歩行空間の機能のうち、通行機能に着目する。歩道幅を広げることで、快適性の変化を明らかにするために2Dと3Dの2つの歩行者シミュレーションを用いる。

まず、2Dの歩行者シミュレーションでは、歩道幅の変化が歩行の自由度に与える影響を評価する。ある1つのエージェントの近傍のエージェント数が多いほど、自由に歩きづらく、歩行の快適性が低くなり、近傍のエージェント数が少ないほど、自由に歩きやすく、歩行の快適性が高くなると考えられる。次に、3DでVRヘッドセット (Meta Quest 2) を使用して、歩道幅の広さや目線の違いによって通行機能における歩行者の感じる快適性を評価する。

3.1. 実装する道路空間

歩道幅は、国土交通省の道路の移動円滑化整備ガイドライン [23] によると、「歩道等の有効幅員は、道路構造令に準じ、歩道においては、3.5メートル (歩行者交通量の多い道路) 又は2メートル (その他の道路) 以上確保すること」としている。また、道路構造令 [24] では、車道の区分にもよるが、車線の幅員は、特例を除き、2.75メートルから3.5メートルと決められている。本実験では、歩道幅が3.5メートルで車道幅が3.5メートルのときを仮定し、車道を1車線減らし、歩道幅を広げるよう道路空間の再編が行われた時、どのようなかを考える。

3.2. 歩行者

歩行者の人数密度に対して、人々がどのように感じるかの評価基準としてフルーインのサービス水準 [25] (表1) がある。この水準に基づくと、例えば東京都の大規模エリアの歩行空間の一例である池袋のサンシャイン60通りは平成29年11月25日の測定では、サービス水準Cと評価されている [26]。本実験も同様にサービス水準Cを基準として設定し、東京都の大規模都市から地方都市における空間開発および再編を想定し、基準からの現状分析と空間再編後の予測を行う。なおサービス水準Cは、歩道幅3.5メートルで長さ100メートルの歩道の場合、140人から234人が存在する状態であるが、歩道幅7メートルの幅にすることで、サービス水準は、Aに改善し得る。

表 1 歩行路のサービス水準の評価基準 [25] より引用

Table 1 Evaluation criteria for walking path service level quoted from [25]

サービス 水準	密度 (人/m ²)	歩行状況
A	0.2857	遅い人を追い抜いたり, 好きな歩行速度を自由に選択できる
B	0.2857 ~ 0.4	衝突の可能性がわずかにあり, 歩行速度やがわずかに減少する
C	0.4 ~ 0.6666	歩行速度や追い抜きなど自由度がかなり制限される 交差流や対交流の存在するところでは衝突する確率が高い
D	0.6666 ~ 1	大部分の人の歩行速度が制限され, 低下する 流れが一瞬停止してしまうこともありうる
E	1 ~ 2	すべての歩行者が自分の通常で歩けない 流れが頻繁に停止したり, 中断したりする
F	2 ~	全ての歩行者が極度に制約を受け, 前進は足でしかできない 歩行者相互の接触は頻繁に起こり避けられず交通の麻痺状態と言える

4. 実験

4.1. マルチエージェントシステムを用いた空間再編歩行者シミュレーション

4.1.1 手法

歩道幅の変化により, 近傍のエージェント数の合計を計数することにより, 歩きやすさなどの程度変化するかを定量的に評価する.

複数のエージェントが各々に適用されるルールの下, 相互作用を及ぼしあう, マルチエージェントシステム [27] を用いた. 橋本ら [28] の歩行者シミュレーションを参考に, エージェントの歩行アルゴリズムを以下のように作成し, 各フレームにおける, 各エージェントの近傍における, 進行方向別のエージェント数の合計値を定量的に評価した.

- 左右に広がる 100 メートルの一本の通路があり, 多数のエージェントがそれぞれ右もしくは左へと移動する
- エージェント同士が 1.5 メートルの距離まで近づくと方向を変え, 衝突しないように移動する

実験は, 表 2 に示した条件の下で行い, それぞれの延べエージェント数を計数した. 本実験での追従行動とは, 同じ方向に進んでいる他のエージェントに寄るということである.

4.1.2 結果

シミュレーションをした結果を図 1 に示す. あるエージェントの, 同じ方向に進む近傍の延べエージェント数は追従行動を取ると少なくなる. 同じように, あるエージェントの反対方向に進む近傍の延べエージェント数は追従行動を取ると, 少なくなる. 追従することにより近傍の延べエージェント数は減少し, スムーズな歩行が可能であるこ

表 2 マルチエージェントシステムを用いた空間再編歩行者シミュレーションの条件

Table 2 Conditions for spatial reorganization walking simulation using multi-agent system

	歩道幅	追従行動	人数	サービス水準
実験 A	3.5m	なし	150	C
実験 B	3.5m	あり	150	C
実験 C	7m	なし	150	A
実験 D	7m	あり	150	A

とが示唆された.

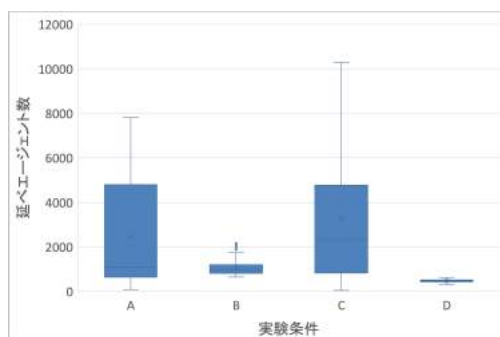
4.2. VR を用いた一人称視点での空間再編歩行者シミュレーション

4.2.1 手法

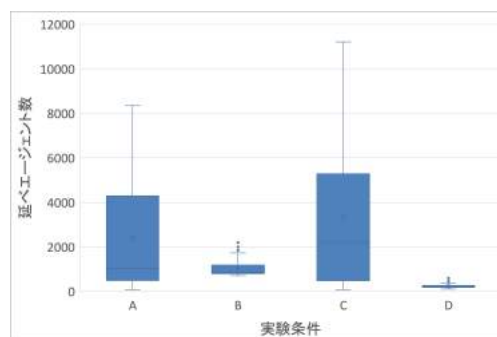
複数の条件の歩行環境を VR 上で再現し, 体験してもらうことによって, 複数の歩行環境での一人称視点での歩道空間における快適性を評価する. ゲームエンジンの Unity を用いて歩道環境を作成し, 以下のようにエージェントの歩行ルールを設定した.

- 左右に広がる 100 メートルの一本の通路があり, 多数のエージェントがそれぞれ右もしくは左へと移動する.
- Unity に搭載されているエージェントシステムである NavMeshAgent に基づき歩行する.
- 一定時間設定した範囲よりも進んでいないエージェントは, 壁と逆方向にランダムな時間移動する.

150 人のエージェントの属性の内訳は表 3 の通りである.



(a) 同じ方向に進むエージェント数の合計
(a) Total number of agents moving in the same direction



(b) 反対方向に進むエージェント数の合計
(b) Total number of agents going in the opposite direction

図1 各フレームにおける、各エージェントの近傍における、進行方向別のエージェント数の合計

Figure 1 Total number of agents in each moving direction in the vicinity of each agent in each frame

表3 VRを用いた一人称視点での空間再編歩行者の歩行者エージェントの属性

Table3 Attributes of pedestrian agents in spatial reorganization walking simulation from a first-person perspective using VR

属性	性別	割合	歩行速度 [m/s]
子供		0.064	1.21
10代	男性	0.114	1.47
	女性	0.104	1.28
20代	男性	0.114	1.5
	女性	0.104	1.35
30代	男性	0.104	1.48
	女性	0.082	1.34
40代	男性	0.095	1.46
	女性	0.058	1.33
50代	男性	0.054	1.39
	女性	0.033	1.33
60代	男性	0.032	1.28
	女性	0.017	1.20
70代以上	男性	0.009	1.28
	女性	0.014	1.2

これは、渋谷駅周辺の歩行者人口データ [29] と渋谷区の住民基本台帳人口 [30] を参考に作成した。体験の様子を図2に示す。

作成した歩道環境を表4の条件で被験者に体験してもらい、7段階評価の事後アンケートを実施した。質問項目は「気持ちよく過ごせると感じる」、「他の人との距離が不快ではないと感じる」、「自分のペースで歩ける場所だと感じる」、

表4 VRを用いた一人称視点での空間再編歩行者シミュレーションの条件

Table4 Conditions for spatial reorganization walking simulation from first-person perspective using VR

	歩道幅	目線	人数	サービス水準
実験 A	3.5m	子供	150	C
実験 B	3.5m	大人	150	C
実験 C	7m	子供	150	A
実験 D	7m	大人	150	A

「安全だと思うか」の4問であった。被験者は5人で、うち1人が30代女性、その他は20代男性である。

4.2.2 結果

アンケートの結果を図3に示す。グラフ内の色は、各項目ごとの各被験者の評価を表している。目線が大人であり、歩道幅が広くなるほどそれぞれの質問項目に対し、評価が高くなった。

共通していた感想、歩行の快適性を議論する上で特筆すべき感想を以下に示す。

- 人が周りに多い状況でも同じ方向に向かう人の列ができており、後ろについてスムーズに歩行できる場合、不快感は軽減した (5人/5人)
- 同じ歩道幅、目線の高さの違いで、歩道にいる人数の変化を感じた (4人/5人)
- 視覚的な混雑度よりも、目的地に向かってどの程度スムーズに歩行できるかが大切であると感じた (2人/5人)
- 視点が高いと、同じ距離を短く感じた
- 歩道幅が広い状況では、人々がさまざまな方向で対向

するので不快に感じるがあった

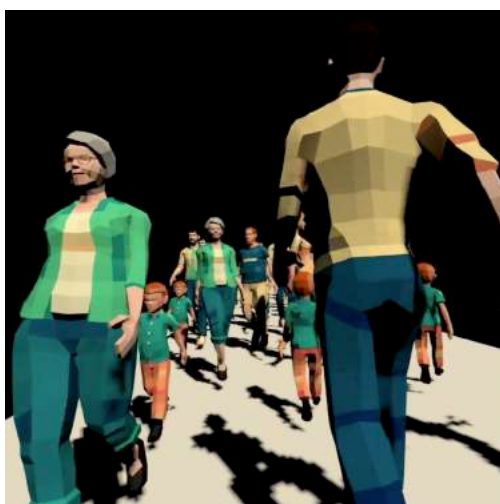
- 自分が次に歩くルート, 対抗する相手が次に歩くルートを予測しづらい時不快感を感じた

4 パターンの実験条件があり, 歩行するエージェントの数は全て同じにもかかわらず, 複数の被験者がインタビューで, 人数が変化しているように感じると答えた. これにより, 目線の違い, 歩道幅の違いにより, 同じ歩行者数でも, 視界に映る歩道の余白や人間が占める面積の違いから, このような結果となると考えられる. 体感の人数の違いは, 自由な歩行の選択や圧迫感の軽減につながると考えられるの

で, 同じ環境でも, 子供は大人よりも不快に感じる可能性があることが示唆された. インタビューの中では, そのほかに「考えずに歩きたい」という意見も見られ, エージェントの変化へ注意を配りながらの歩行にはストレスが伴うものであるということが示唆される.

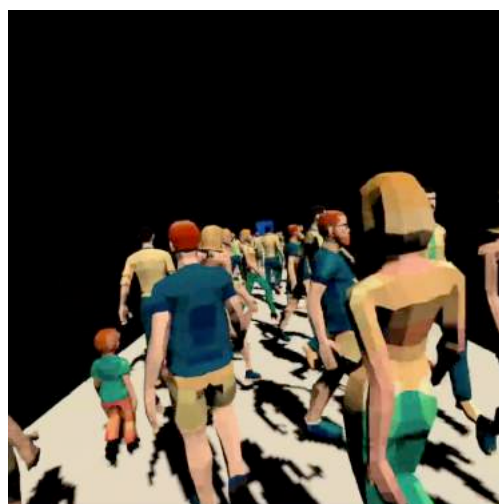
5. 考察

実験 1 より, 追従行動をとり歩道幅が広いと, 近傍するエージェントの延べ人数が実験条件の中では最も少なくなることがわかった. これにより, 歩道幅が拡張し, 追従行動



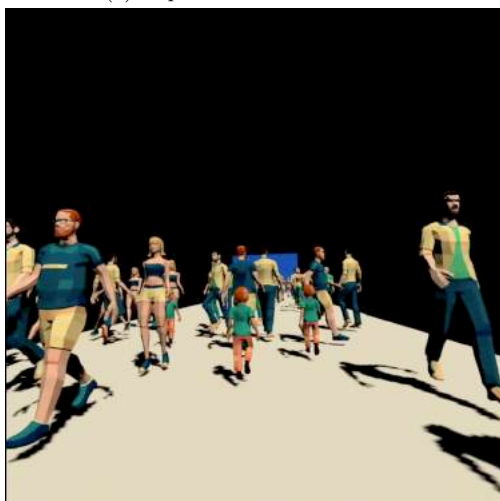
(a) 実験条件 A

(a) Experimental conditions A



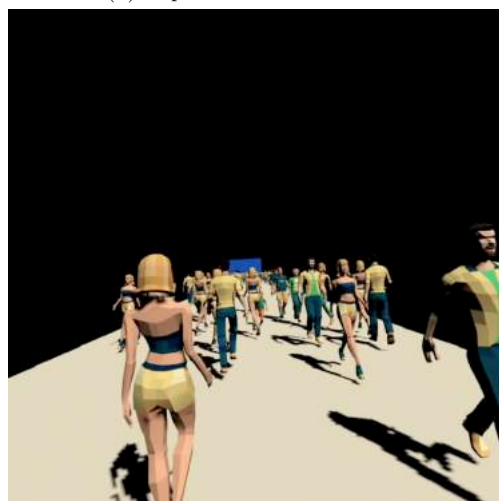
(b) 実験条件 B

(b) Experimental conditions B



(c) 実験条件 C

(c) Experimental conditions C



(d) 実験条件 D

(d) Experimental conditions D

図 2 体験の様子

Figure 2 The experience

をとるとより自由に歩行できる可能性が示唆された。また、実験2では、歩道幅が広い方が快適性に関する各質問項目に対する評価が高くなっていることから、一人称視点においても、歩道幅が広い方が歩行時の快適性が高いということが言える。これは、インタビューの結果を踏まえ、自分の歩行するルートが十分に確保されていること、他者と接触する機会が少なく、圧迫される感じが低減しているという、通行機能の向上と視覚効果によるものであると考えられる。

6. おわりに

本研究では、歩道での歩行者行動をマルチエージェントシステムを用いて、シミュレーションを作成し、VRを用いた一人称視点での空間再編歩行者シミュレーションを実施後被験者にアンケート調査を行い歩行環境を評価した。マ

ルチエージェントシステムを用いたシミュレーションでは、近傍の延べエージェント数は追従行動を取ると、少なくなり、快適性が向上することが示唆された。今後は追従行動や歩道幅の変化だけでなく、通行手段、個人のみならず集団、天候等を考慮した条件下での実験を実施したい。また、VRを用いた一人称視点での空間再編歩行者シミュレーションでは、歩道幅が広がるほど、目線が高くなるほど歩行の快適性が高く評価された。今後は、音や風景、都市モデル等を追加することにより、現実世界に近い状態を作成することを目指とする。これにより、持続可能な都市開発に向けて空間再編の際に、ステークホルダーを巻き込んだ、様々な観点からサイバー上での都市空間設計から合意形成を進め、都市の未来に対する可能性を検討できる。

謝辞 本研究の一部は日立東大ラボの支援を受けて実施

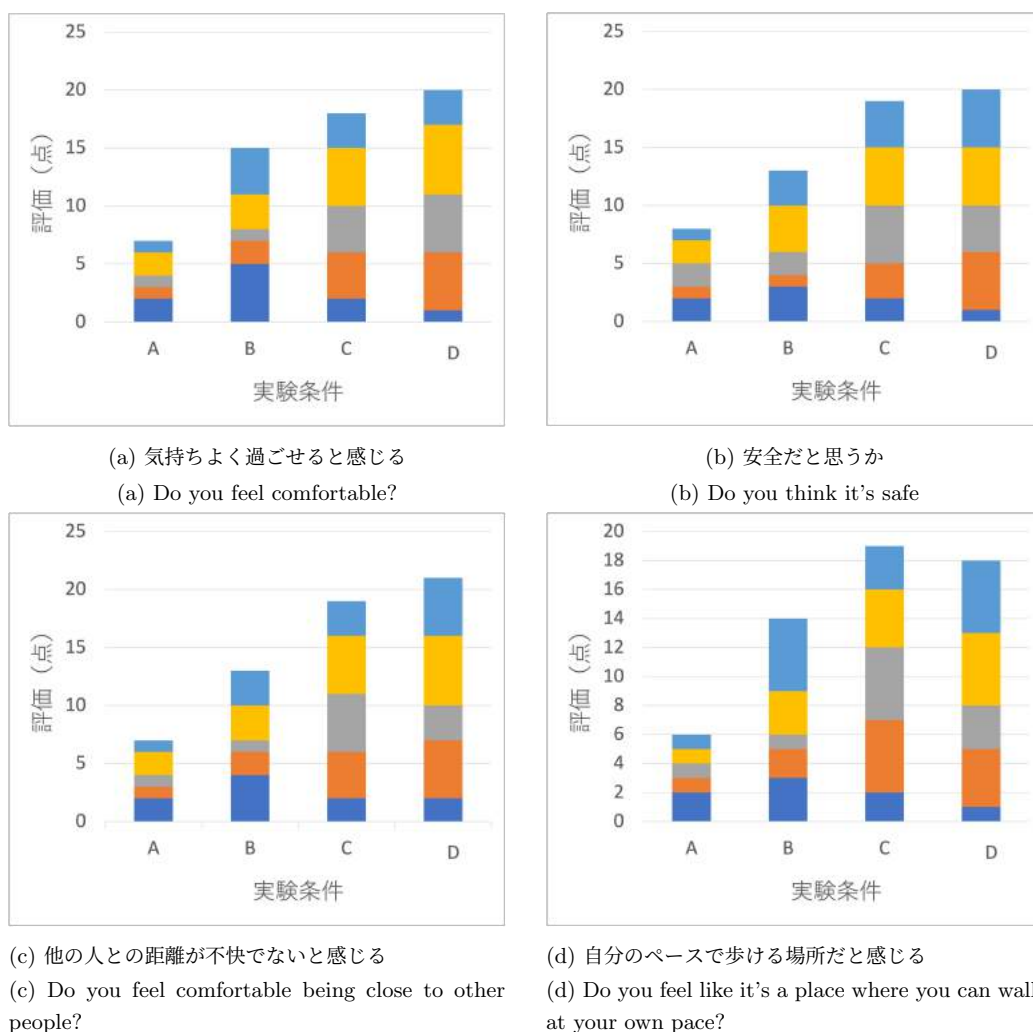


図3 アンケート結果

Figure 3 Questionnaire results

した.

参考文献

- [1] 内閣府:令和 4 年版高齢社会白書(全体版)(2022). https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2022/zenbun/pdf/1s1s_04.pdf.
- [2] MAGAZINE, C. I. S.: あなたの街が好きですか?アーバンランニング(都市計画)の学士を取ろう!(2019). <https://www.mycism.jp/2019/10/11603/>.
- [3] 国土交通省都市局街路交通施設課:「居心地が良く歩きたくなるまちなか」からはじまる都市の再生~産学官の懇談会から石井大臣へ提言がなされました~(2019). https://www.mlit.go.jp/report/press/toshi05_hh_000249.html.
- [4] 国土交通省:WALKABLE POTAL ウォーカブルポータルサイト. <https://www.mlit.go.jp/toshi/walkable/>.
- [5] ソトノバ:車より人を主役に!地域のコモンスペースとして再生した道路「松山・花園町通り」(2019). <https://sotonoba.place/hanazonomachi-matsuyama>.
- [6] 国土交通省都市局街路交通施設課:ウォーカブルなまちづくり(2020). <https://www.mlit.go.jp/toshi/content/001326427.pdf>.
- [7] 国土交通省都市局街路交通施設課:官民連携による街路空間再構築・利活用の事例集~課題解決のプロセスを中心とした事例紹介~(2018). <https://www.mlit.go.jp/common/001230088.pdf>.
- [8] 総務省:デジタルツインって何? https://www.soumu.go.jp/hakusho-kids/use/economy/economy_11.html.
- [9] 国土交通省:PLATEAU, <https://www.mlit.go.jp/plateau/>(2020).
- [10] CGWORLD: なにからはじめる? デジタルツイン Powered by シリコンスタジオ 第1回: ゲームの技術が産業へもたらすインパクトと導入課題は?(2023). <https://cgworld.jp/regular/siliconstudio-1.html>.
- [11] for Transportation, I. and Policy, D.: Pedestrians First(2020). <https://pedestriansfirst.itdp.org/>.
- [12] the Roads Task Force: London's street family: Theory and case studies(2013). <https://content.tfl.gov.uk/londons-street-family-chapters-1-2.pdf>.
- [13] MELBOURNE, C. O.: WALKING PLAN 2014-2017(2014). <https://www.melbourne.vic.gov.au/SiteCollectionDocuments/walking-plan-2014-17.pdf>.
- [14] 国土交通省都市局まちづくり推進課: まちなかの居心地の良さを測る指標(案)・概要(2020). <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001336041.pdf>.
- [15] Lab, C. F.: URBAN DESIGN PERFORMANCE INDICATORS(2020). https://www.dropbox.com/s/tod4afhnfjykvsq/workshop_cityform_20sep.pdf.
- [16] Southworth, M.: Designing the Walkable City, *Journal of Urban Planning and Development*, Vol. 131, No. 4, pp. 246-257 (online), DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9488(2005)131:4(246)(2005).
- [17] Isaacs, R.: The Urban Picturesque: An Aesthetic Experience of Urban Pedestrian Places, *Journal of Urban Design*, Vol. 5, No. 2, pp. 145-180 (online), DOI: 10.1080/713683961(2000).
- [18] 森本あんな, 薄井まどか, 泉山壘威, 宇崎崎勝也:ウォーカブル推進に向けた計画・事業及び指標に関する傾向, 都市計画論文集, Vol. 57, No. 3, pp. 606-613 (オンライン), DOI: 10.11361/journalcpj.57.606(2022).
- [19] Peter, J. and Boujenko, N.: 'Link' and 'Place': A new approach to street planning and design, *Road and Transport Research*, Vol. 18, pp. 38-48(2009).
- [20] 国土交通省:ストリートガイドライン 第2章 人中心のストリートを構成する要素(2020). <https://www.mlit.go.jp/toshi/content/001403589.pdf>.
- [21] パシフィックコンサルタンツ株式会社/株式会社フォーラムエイ:ウォーカブルな空間設計のためのスマート・ブランニング(2022). <https://www.mlit.go.jp/plateau/use-case/uc22-040/>.
- [22] 株式会社構造計画研究所/大成建設株式会社:歩行者移動・回遊行動シミュレーション(2022). <https://www.mlit.go.jp/plateau/use-case/uc22-023/>.
- [23] 国土交通省:国土交通省の道路の移動円滑化整備ガイドライン. <https://www.mlit.go.jp/road/sign/data/chap2.pdf>.
- [24] GOV 法令検索:昭和四十五年政令第三百二十号道路構造令(2020). <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=345C00000000320>.
- [25] J.J. フルーン:歩行の空間=理論とデザイン=, 鹿島研究所出版会(1974).
- [26] 豊島区 都市整備部都市計画課:第5回交通検討部会資料【池袋副都心交通戦略の更新】(2020). <https://www.city.toshima.lg.jp/550/documents/senryakukoushin01.pdf>.
- [27] 構造計画研究所:MAS とは? <https://mas.kke.co.jp/about/>.
- [28] 橋本洋志, 牧野浩二, 佐々木智典:Python 意思決定の数理入門, オーム社(2022).
- [29] AMBL 株式会社:駅レポート-駅周辺「歩行者」レポート-. <https://lan1.jp/assets/img/sample.pdf>.
- [30] 渋谷区:年齢(5歳階級)別男女別人口(平成4年~令和5年). https://www.city.shibuya.tokyo.jp/kusei/tokei_shibuya/nemrei_danjyo_betsu_jimko/renrei_danjyo_betsu_jimko.html.