

建築計画における行動を測る技術と予測する技術

Behavioral Investigation and Simulation Technology in Architectural Planning

金子 弘 幸 天 野 和 洋
福 井 三 穂 田 中 重 良¹⁾

I. はじめに

近年、メガオフィスや複合用途建物などの多様な建築形態が登場し、従来の想定範囲を超えた複雑な利用形態を持つ建築が見られるようになったことを受けて、顧客に対して設計上の意図や根拠を伝えるコミュニケーション力や現場の事実を起点に考える姿勢の重要性が高まりを見せている。また、EBD (Evidence-Based Design) と呼ばれる説明力のある設計、根拠に基づく設計も注目を集めている。EBM (Evidence-Based Medicine) という医療分野から広まった概念で、問題解決のための方法・方策に、その根拠の確かさを求めようとする考え方である。従来の基準や規格、指針などに盲目的に従う設計ではなく、丁寧な問題把握と確かな推論により、最高の効果を期待できるデザインを目指している¹⁾。

こうしたことから、当社では、設計段階において顧客との合意形成をスムーズにすることを目的として、利用者の視点に立った行動可視化による設計支援技術の研究開発を行ってきた。対応する建築計画における課題は多岐にわたるが、規模計画 (Fig. 1) や動線計画 (Fig. 2) における定量化の議論が一般的である。

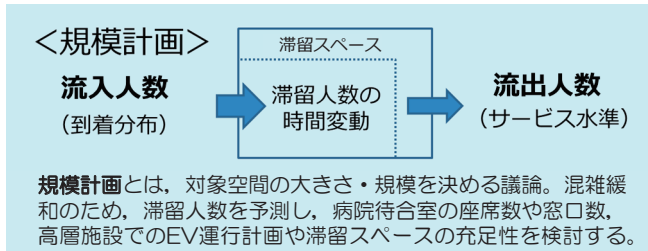


Fig. 1 規模計画
(Planning of Capacity)

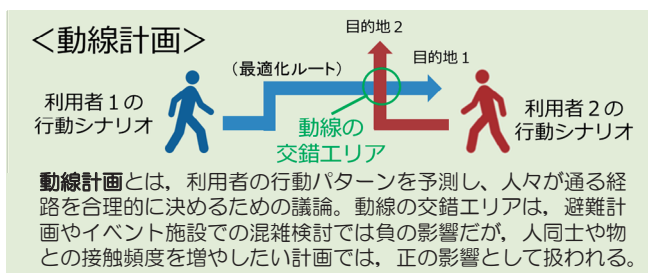


Fig2. 動線計画
(Planning of Pedestrian Paths)

行動可視化による設計支援技術は、既存施設での現状理解のための「行動を測る技術」と計画施設での設計意図の実現性を検証するために「行動を予測する技術」の2つの技術で構成される。

前者には、目視計測や行動モニタリング技術があり、後者には、

マルチエージェント^{注1)}によるシミュレーション技術がある。本報告では、これら2つの技術の現状と今後の展望について報告する。

II. 行動を測る技術

混雑や利用者の行動などに着目して様々な施設のフィールド調査を行い、人と建築空間の関係性について考え、設計に必要な情報を収集する活動が行動計測である。行動計測は、(調査員による)目視計測とセンサ類を用いた機械計測に大別できる。

1. 目視計測

設計に必要な情報を得る活動として実際の施設で行うフィールド調査では、調査員による目視計測でデータ収集を行うことが現状では多い。以下に、当社がこれまでに実施してきた調査手法と分析事例を紹介する。

(1) 利用者の滞在人数の把握

病院待合室、食堂、広場などで(不特定多数者の)滞在人数を時系列的に把握するには、複数の調査員を配置し、定点観測しながら対象エリアの占有状況を記録する調査方法がある。例えば、利用者の滞り場所を、一定時間(5分間など)ごとに調査用紙にプロットしながら時系列的な利用状況を調査する(Fig. 3-上)ことで、最大待ち人数が把握でき、病院待合室での必要座席数の算定に活用できる²⁾。利用者の選好順序を調べることで、座席選択行動として、選ばれやすい座席の特性を分析した事例もある³⁾。

(2) 利用者数の流入・流出人数の把握

対象エリアへの流入・流出分布を把握するには、タブレット PC の交差カウンタ(数取機)を用いて断面交差量を計測する調査方法がある。例えば、対象施設のエレベータ(EV)の利用状況を調べるため、1階エレベータホールで、出勤者の到着分布、EVの到着時間や乗車人数などを計測することで対象施設におけるEV輸送能力が把握できる。また、病院窓口の回転状況を把握するには、窓口対応の開始時間、終了時間を記録することで平均対応時間を把握し、必要窓口数を評価することもできる。来院者の到着分布の観察データから、シミュレーションにより病院・診療室(透析室)の人々の動き方を可視化し、顧客との合意形成に活用することもできる。

(3) 施設内OD交通量の把握

施設内で人々が移動する起点(Origin)から終点(Destination)の情報を含んだ情報(OD交通量)を把握したい場合がある。追跡調査が確実だが、これができない場合は、起点-終点の断面交通量と移動コスト(主に距離)を基に、情報エントロピーモデルを用いてOD交通量を統計的に推定する分析方法がある。例えば、高層型の大学キャンパスの授業間移動での階移動量を把握する案件では、すべての階のEVと階段の前で交通量調査を行い、EVと階段を併用して運

1) 建築設計本部 Architectural Design Division

用する施設での上り・下りにおいて、何階程度の移動であれば EV より階段を優先するかの行動モデルを検討した (Fig. 3-中)。

(4) 追跡調査

終日レベルでどのように移動・行動したかを把握するため、対象者を長時間追跡し、移動軌跡や行動内容を記録する調査方法がある。例えば、病棟看護師の一日の動きを把握すべく、1人の看護師に1人の調査員がつき、行為が変わる度に、内容・場所・時刻等を調査用紙に記録する。看護師の移動領域を可視化することで、それぞれの担当者の分担状況を把握することができる (Fig. 3-下)。

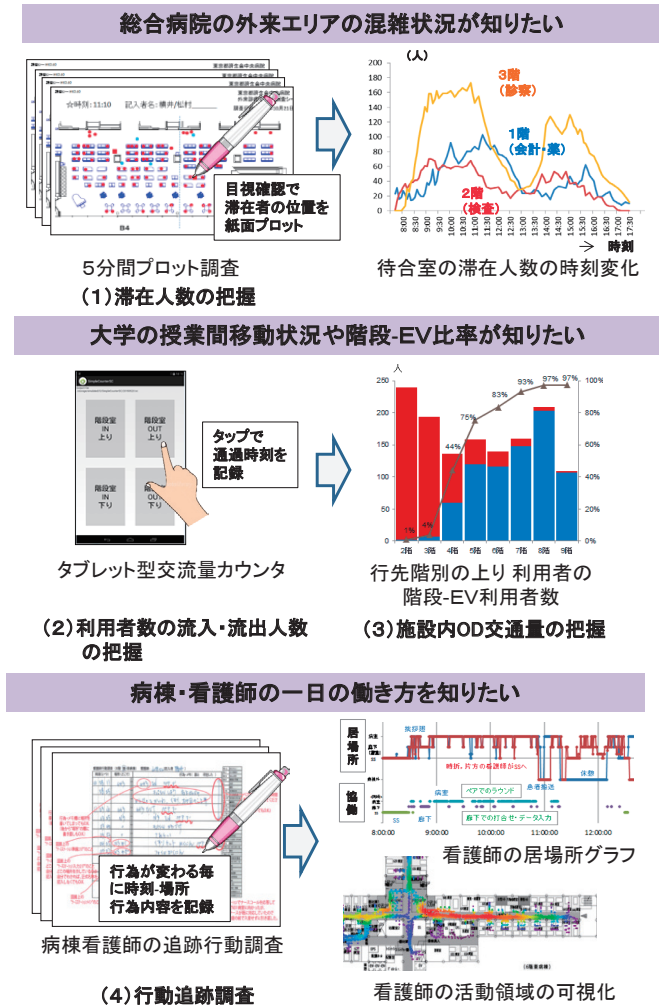


Fig. 3 目視計測の事例

(Cases on Visual Surveillance)

2. センサを用いた機械計測

近年の多様なセンサの発展・高性能化に伴い、歩行者の位置測位技術は、この数年間で飛躍的に進展した。こうした計測技術は、大別すると、デバイス (端末) の有無で分類できる。デバイス有の代表例には、BLE 測位 (Bluetooth Low Energy), Wi-Fi 測位, UWB 測位 (超広帯域無線: Ultra-Wide Band), 超音波測位, PDR (歩行者自律航法: Pedestrian Dead Reckoning) などの無線計測技術があり、デバイス無の代表例には、画像解析技術やレーザ計測技術がある。それぞれの技術には一長一短があり、定番技術が確立したとは言え

ないので、運用面におけるそれぞれの課題 (計測精度や計測上の制限等) を理解した上で、適切に使い分ける必要がある。

当社では、測位精度が高い、プライバシー保護に優れている、といった理由から、主に、レーザ計測技術に着目して行動計測の技法を深化させてきた。以下に、レーザ計測技術の概要を紹介する。

(1) レーザ計測技術の概要

レーザセンサ (Fig. 4-a) は、無色の近赤外線 (NIR) のレーザ光を、高速かつ広範囲に照射することで、レーザ光のパルスの伝播時間により距離を測定するセンサである。ほかの技術と比較して、高精度 (誤差: 4~5cm), 広角, 高角度分解能であり、比較的、長い距離でも計測が可能という特徴がある。水平断面方向にレーザ光を照射しながら計測する仕組みであるが、遮蔽物があるとその先は計測できないので、運用上は、着座者やパーティションなどの遮蔽物を避け、約 140cm の高さで計測することが多い。常に 2 台以上のセンサで検知できるように複数台のセンサをバランスよく配置する必要がある。センサから送られてくるのは、角度別の距離データであるが、各データがサーバー PC に集積され、幾つかの解析プロセスを経ることで、歩行者の軌跡データとして出力される。

計測結果は、動画で表示されたり、紙面の場合には、軌跡図や密度分布図として表示される (Fig. 4-b, c)。例えば、オフィスエントランスの待ち空間であれば、来客者らの軌跡図を可視化することで、待ち席の利用状況や中庭に面したガラス面へのアクセス状況が確認できる。また、オフィス空間であれば、移動・滞留の密度分布図を作成することで、移動量の多い経路や交流発生しやすい滞留場所を発見することができる。このように、特別なデバイスを持たない不特定多数の人でも、その活動内容をわかりやすく表現できることが、レーザ計測技術の最大の利点である。

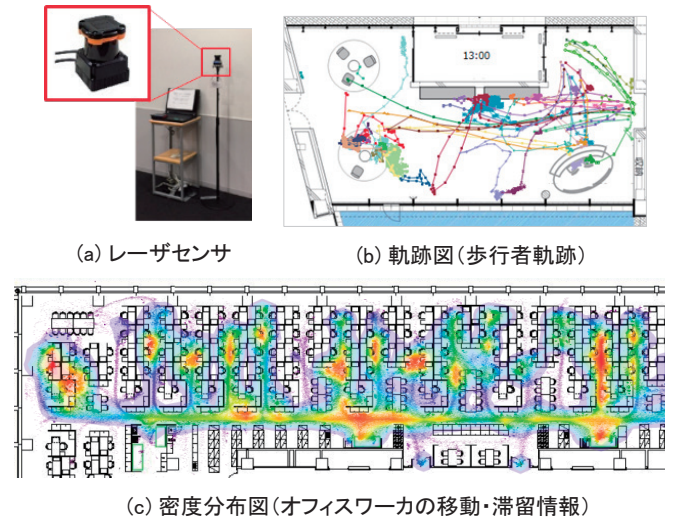


Fig. 4 レーザ計測を用いた行動モニタリング (The People Tracking System Using Laser Scanners)

(2) 軌跡データの表現技術

センサによる計測は、大規模データの収集が容易な反面、対象空間の時空間的な利用特性を俯瞰する作業には専門的なスキルや多大な労力を要することがある。そのため、実際の現場では、集めたデータから特徴量を抽出したり、要約・分類するなどしてわかりやす

く見せる表現技術、いわゆる、軌跡データのマイニング技術が必要となる。以下に、実際にデータ集計時に悩んだ経験をもとに当社で開発した幾つかの軌跡データの分析技術を紹介する。

(a) 時間帯別の特徴把握のための表現手法⁵⁾

オフィス内の時系列な活動量(軌跡量)を時刻ヒストグラムで表現する場合、区分数を削減してコンパクトにした方がわかりやすい表現となるが、時間帯によっては活動量の粗密があるため、必ずしも等しい時間間隔(例えば2時間間隔)で集計することが適切とは限らない。そこで、この粗密感を情報理論の平均情報量(エントロピー)で表現し、原データに備わる平均情報量をなるべく損なわないように時間帯区分の境界線を変更する計算法により、時間帯別の特徴把握を行う分析手法を開発した。歩行速度と時刻の同時生起性に着目することで、朝礼・夕礼などの集団行動や日中と夜間の活動など、同じ活動特性を示す時間帯の抽出が可能となった(Fig. 5)。

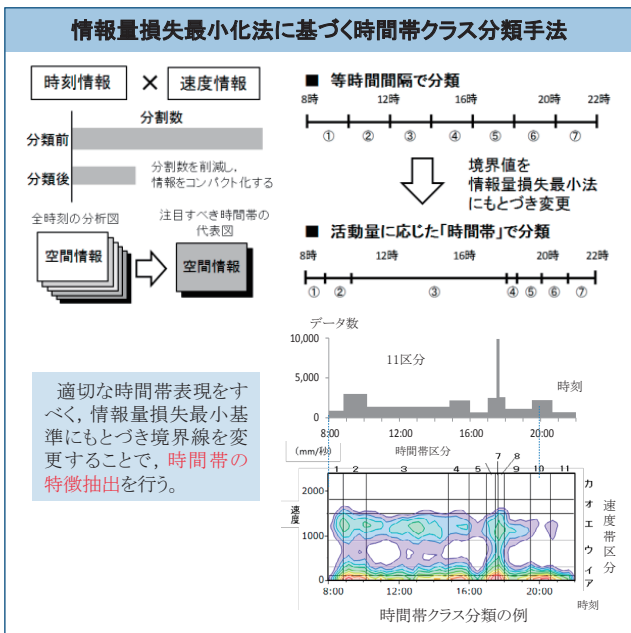


Fig. 5 時間帯抽出手法

(Time Zone Extraction Method)

(b) 時間-空間の関係把握のためのシーン抽出手法⁵⁾

密度分布図を10分単位で作成すると終日活動で84枚となり、「いつ、どこで」といった全体像を膨大な枚数の分布図から把握するのは大変な作業であったため、時刻と空間を同時分類したいと考えた。そこで、自然言語処理分野で用いられる文書と単語を同時分類し、トピック(概念)として表現する分析手法(確率的潜在意味分析)を活用することで、時空間クラスタリングの結果である「シーン」を抽出する手法を開発した。文書=時刻情報、単語=空間情報、概念=シーンというアナロジーから発想した分析法であり、ある特定の時間帯で、特定の場所で発生した「立ち話シーン」や、通路やコピー機などで終日繰り返し見られる「移動(終日)シーン」など、時間-空間の各成分の特徴を表現する各シーンが抽出できている(Fig. 6)。

(c) 大量の軌跡データを分類する軌跡パターン分類手法⁶⁾

それぞれの軌跡データを詳しく見ていると、「どこから来てどこに

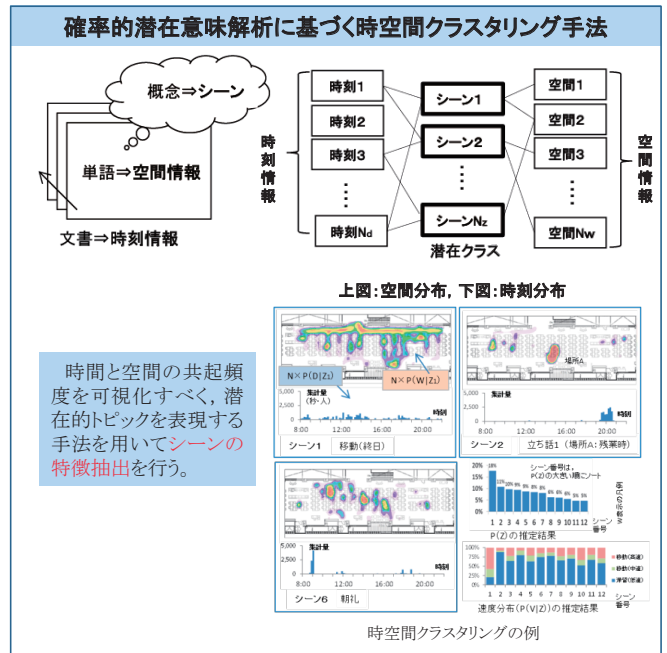


Fig. 6 シーン抽出手法

(Day Scene Extraction Method)

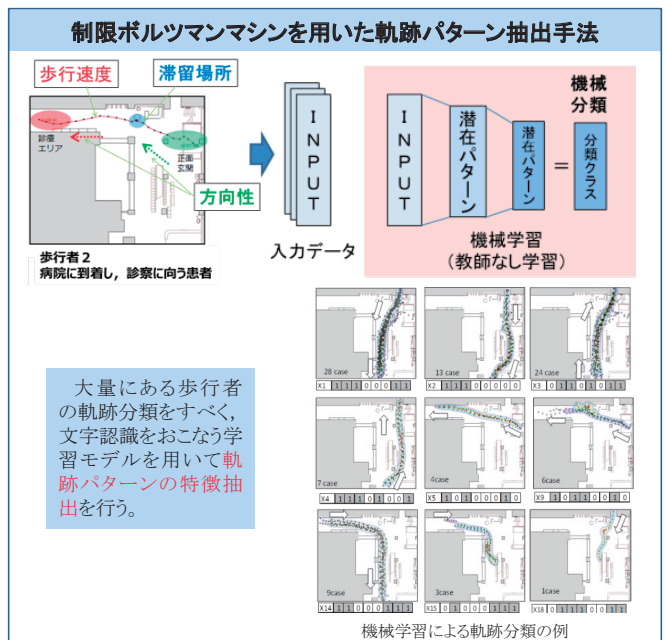


Fig. 7 軌跡パターン分類手法

(Trajectory Pattern Classification Method)

向かうのか」、「受付機の前で数秒間、滞留していた」、「歩行速度が遅い」といった情報を手掛かりに、歩行者属性を推測できる。この情報は、行動シミュレーションのエージェント作成に有益だが、一方で、大量の軌跡データを目視作業でひとつひとつ分類するのは大変な労力であった。そこで、機械学習のひとつである制限付きボルツマンマシンを用いて、自動的に軌跡パターンを分類する手法を開発した。移動方向・滞留場所を表現するメッシュデータから教師なし学習により、潜在パターンを抽出するものである。病院の外来エ

リアに適用してみると、「入口から入り、再来機で受付をしてから診察エリアに向かう人々」、「別館から来てエスカレータで2階に向かう人々」など、行動パターンに意味づけ可能な軌跡パターンの分類ができています (Fig. 7)。

Ⅲ. 行動を予測する技術

1. 人流シミュレーションによる空間評価

不特定多数の人が往来する施設では、歩行者の行動特性を様々な観点からモデル化し、火災時の避難状況や通常時の混雑状況を可視化・確認することが一般的となりつつある。壁・扉などの建築要素に加え、諸室や通路情報を設定した後、利用者の初期位置（スタート地点）と目的地（ゴール地点）を指定することで、利用者が一斉に移動を開始した場合の流動性（歩行空間の群衆密度が高まると移動効率が悪くなる様子）をシミュレーションできるのが特徴である。目的地までの複数ルートが考えられる空間では、経路情報をネットワークとして記述することで、カーナビの経路探索でも利用されるダイクストラ法により最短経路を求めることができる。移動距離と混雑状況に応じて実際の利用者が選択する可能性の高いルートを選択する判断ロジックを組み込んだ事例もある。

当社では、これまで様々なタイプの人流シミュレーションを開発してきている。火災時の避難シミュレーションに始まり、不特定多数者の集まる駅構内やイベントスペースでの退出時の出口扉の流動性評価を行うことで、群衆の混雑状況の可視化を試みてきた。最近では、高層施設における出勤時のエレベータホールでの混雑状況をEV 1台ずつの動きを再現するEVシミュレーション(最大待ち人数を推定し、当該スペースの広さを検証)と連動することで、EVホールの人々の流れや混雑具合を可視化・検証できるシステムも開発している (Fig. 8)。

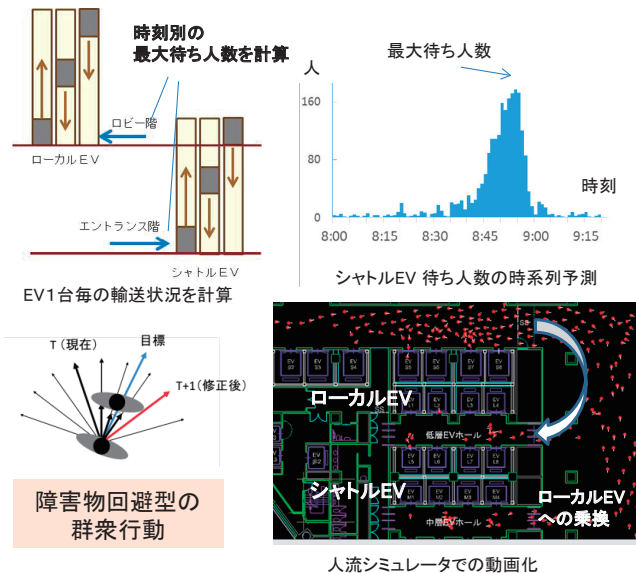


Fig. 8 EV計算と連動する人流シミュレータ

(Pedestrian Flow Simulation Linked with EV Calculation)

2. オフィスシミュレーションの概要

人流シミュレーションが動線交錯の負の影響を検証するものだと

すれば、人々の接触頻度を積極的に増やすことで動線交錯の正の影響を検証するものとして、オフィスシミュレーションを開発した。このシミュレーションは、オフィスワーカーの生産性向上を目指して、家具レイアウトや動線をどのように改善すべきかを、検証することを目的としたものである⁷⁾。オフィスワーカーのモデル化に当たっては、「組織の部門を超えたコミュニケーションが活発であるほど職場の生産性は向上する」という仮説を立て、プランの違いによる交流活動の活発さの違いを評価する。背景には、「知識労働者は、同種の人間だけで革新的なアイデアを出すには限界があることがわかってきた一方で、革新的なイノベーションの多くが、異なる分野間のアイデアを足し算したり、転用したりすることにより生まれる。デスクが30m以上離れた同僚とは交流頻度が低減する傾向にある」といった関連研究の知見に基づいている。入力データは、時間帯別利用場所調査(典型的な一日の活動内容と滞在場所)、部門間ソーシャルネットワーク調査(どの部署とどの部署が頻繁に交流するか)などの対象組織のアンケート情報を用いる。具体的なシミュレーション計算では、対象プラン上で仮想オフィスワーカーの出社から退社までの終日活動を確率モデルにより再現し、各プランでの交流活動の発生頻度や発生場所を定量的に相対比較する。会議室や実験室への往来、ほかの階からの訪問、コピー機や休憩コーナーの利用など、日々の人々の移動状況を可視化しながら「互いの姿が確認できる開放性/主動線上での接触機会/部門間の適正配置/コミュニケーションを継続させやすい環境」などを評価する (Fig. 9)。

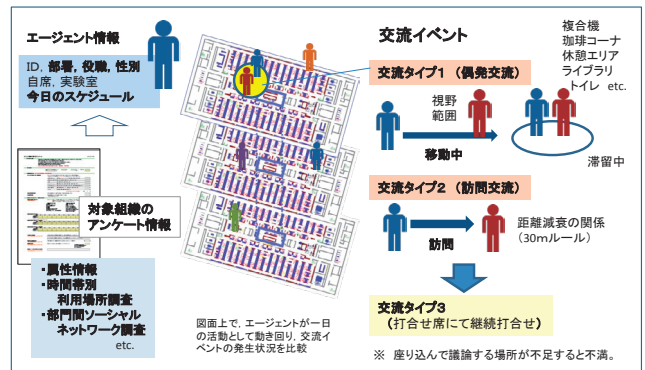


Fig.9 オフィスシミュレーションの概要
(Overview of Office Simulation)

実際のプロジェクトでは、オフィスワーカーの終日の活動予測からどこに主要動線が発生しやすいかを検証した上で、その動線に沿った場所に、組織内の情報伝達のキーマンや管理者の座席を配置することで、交流機会を増やす計画案の有効性を議論した事例 (Fig.10) や、フロアを縦方向に積層化して組織配置をコンパクトにすることで、部門間の緊密度を高める計画案の効用を議論した事例 (Fig.11) などがある。空間利用の予測結果の可視化分析を通じて、設計者が発想してプランに込めたコンセプトを施主にわかりやすく説明する一助となっている。

Ⅳ. おわりに

本報では、「行動を測る技術」と「行動を予測する技術」の現状を概説しながら、空間の使われ方を「見える化」することで顧客に対する説得力・提案力を向上させる設計支援技術について報告した。

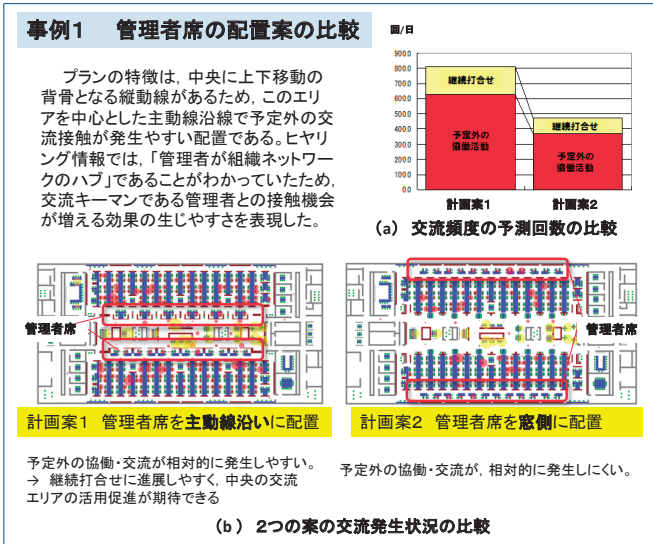


Fig. 10 オフィスシミュレーションの活用事例1
(Case #1 of Office Simulation)



Fig. 11 オフィスシミュレーションの活用事例2
(Case #2 of Office Simulation)

行動を測る技術は、目視調査によるフィールドワークが主体ではあるものの、センサ類の技術的な発展・高性能化により、人々の流れや行動データを大規模・高精度に集めることが可能となり、行動特性や空間機能の理解促進に役立つツールになりつつある。

また、行動を予測する技術も、シミュレーション技術における技術的な進展により、設計段階の合意形成ツールとして、なくてはならないバリューエンジニアリングになろうとしている。

今後は、実践的な運用と地道なデータ蓄積を重ねるとともに、膨大に収集したデータの中から貴重な情報・新しい知識を効率的に獲得するための技術開発を促進したり、レーザ計測と歩行者シミュレーションのハイブリッド化を進めることでより豊富な表現力のある分析技術の開発を目指す予定である。

謝 辞

軌跡データの分析技術の構築にご指導を頂きました東京工業大学の 大佛俊泰教授に感謝致します。また、オフィスシミュレーションの構築にご協力頂いた産業技術総合研究所の和泉憲明氏、山下倫央氏(現・北海道大学)、橋田浩一氏(現・東京大学)に感謝致します。

注

注1) 行動ルールに基づき自律的に振る舞う行動主体を「エージェント」と呼び、相互に影響しあう一見予測不可能な事象をモデル化し、できるだけ実際に起こりうる状況として再現するシミュレーション環境を「マルチエージェントシステム」と呼ぶ。

参考文献

- 1) 日本建築学会 Evidence-Based Design 小委員会主催・公開研究会；エビデンスに基づく空間計画の実践，2016. 12.
- 2) 金子弘幸，原利明，鮫島泰明；レーザセンサによる行動可視化と病院待合室の計画—西葛西・井上眼科病院のユニバーサルデザインの新たな取り組み(その1)—，病院設備特集「医療・副詞とユニバーサルデザイン」，日本医療福祉設備学会，Vol. 57，No. 52，325号，2015. 9.
- 3) 青山宙和，大佛俊泰，金子弘幸；病院外来待合エリアにおける患者の座席選択行動モデル，日本建築学会大会学術講演梗概集，2016. 8，pp. 471-472.
- 4) 金子弘幸，大佛俊泰；レーザセンサによる行動モニタリングデータを用いたオフィスワーカーの着座状態と交流状態の推定，日本建築学会環境系論文集，第79巻 第706号，2014. 12，pp. 1083-1092.
- 5) 金子弘幸，大佛俊泰；レーザセンサによる行動モニタリングデータを用いた時空間活動パターンの抽出，日本建築学会環境系論文集，第80巻 第712号，2015. 6，pp. 559-566.
- 6) 金子弘幸，大佛俊泰；レーザセンサによる行動モニタリングデータを用いた機械学習による歩行者軌跡分類法，日本建築学会環境系論文集，第82巻 第742号，2017. 12.
- 7) 金子弘幸，山下倫央他；知識労働オフィスの設計のための統合フレームワーク，日本建築学会大会学術講演梗概集，2009. 7，pp. 915-916.