

数理モデリングプロジェクト

Mathematical Modeling Project

プロジェクトリーダー：菊地皓太 / Kota Kikuchi

1 はじめに

本プロジェクトでは、数理モデルを用いた人流シミュレータの作成により、公立はこだて未来大学の食堂における混雑緩和策の検証および提案を行った。現在、食堂内ではピーク時における混雑の集中や、待ち行列の長大化による動線の交錯といった人流に関わる課題が表面化している。これらの課題は利用者の待ち時間増加や移動の制約など、利便性を低下させる要因となっている。「食堂における混雑の発生要因を人流モデルによって明らかにし、混雑緩和のための具体的な改善案を提案すること」を主目的とした。

2 先行研究および技術・知識の習得

本プロジェクトの根幹には、数理モデリングを用いて、函館市や公立はこだて未来大学に関わる人々にとって有益な成果物を作成するという目標が置かれており、数理モデルの構築は活動全体を支える中核的要素である。しかし、プロジェクト開始当初において、多くのメンバーは数理モデル構築の経験が乏しかったため、先行研究についての調査と輪講会を行った。

2.1 Social Force Model と待ち行列理論

Social Force Model は、Helbing らによって提案された歩行者挙動の数理モデルであり [1]、歩行者が目的地に向けて進もうとする「希望推進力」、他者や障害物との接近・衝突を避けようとする「反発力」など、複数の仮想的な力の合成によって進行方向と速度が決定されると考える。

待ち行列理論は、利用者がサービスを受ける際に形成される行列の挙動を、確率論と統計学の枠組みに基づいて解析する理論である。到着率やサービス時間、窓口数などをパラメータとし、平均待ち時間、行列長、

システム混雑度といった指標を定量的に評価することで、サービス提供システム全体の効率を分析できる。

先行研究では、最も基本的な M/M/1 型モデルから、複数窓口モデル (M/M/c 型)、優先度・予約・バッチ処理などを考慮した拡張モデル、さらに時間帯ごとの到着率変動を取り入れた非定常モデルなど、多様な応用が議論されている [2]。これらの研究により、「窓口数の増減が待ち時間に与える影響」、「サービス設計の違いによる行列長の変化」、「誘導方式や案内情報の提示が利用者行動に与える心理的影響」などが理論的に整理されてきた。

2.2 輪講会

本プロジェクトでは数理モデルの基本的な知識を得るために輪講会を行った。輪講会では、森北出版の『Python による数値計算法の基礎』を用いて行った。同書籍には、ニュートン法・オイラー法・スプライン補間・常微分方程式の数値解法など、数値計算法に関連することが体系的にまとめられている。特に、本プロジェクトで採用した Social Force Model に内在する微分方程式の数値的取り扱い、および離散ステップによる時間発展の再現に適用できる内容が多く含まれており、学習と実務が密接に接続する形で活用することができた。

3 現地調査

現状把握の手段として、レイアウト測量、人流計測、観察、利用者アンケート・従業員インタビューといった調査を行った。また、レイアウト測量に関しては現実の食堂をモデル化することを目的に、壁面や出入口といった空間概形といった部分やレジ、ウォーターサーバー、食器返却口といったポイント、テーブルや椅子などの稼働物体の配置や周辺の通路幅について調べた。

3.1 食堂計測

食堂計測は、人流の増減傾向や行動特性を定量的に取得し、モデル構築及びシミュレーション検証の基礎データとする。本調査の目的は、食堂利用者の入退場状況および食堂内の行動特性を把握し、混雑がどの時間帯・どの場所で発生しやすいのかを明らかにすることである。特に以下の観点を重視した。

- 利用者数の時間変化を定量的に把握すること
- 利用者行動と混雑要因の関連を確認すること
- 数理モデル化を行う上で考慮すべき条件を抽出すること

本調査は、単なる人数の把握に留まらず、「混雑が発生しうる構造的要因の抽出」を目的として実施した点に特徴がある。調査の結果、本学食堂には特定の時間帯に混雑し始める傾向があることが確認できた。とくに混雑が顕著であったのは食堂解放直後と2限終了時刻前後である。また、最も混雑する時間帯には、食堂で非常に長い行列が形成される。行列による動線の遮断も確認された。図1のように出入口付近をほぼ完全にふさいでしまうことがあり、食堂に入ろうとする利用者と退場しようとする利用者の動線が交錯し、互いに行き違ふことが困難になる場面が存在する。

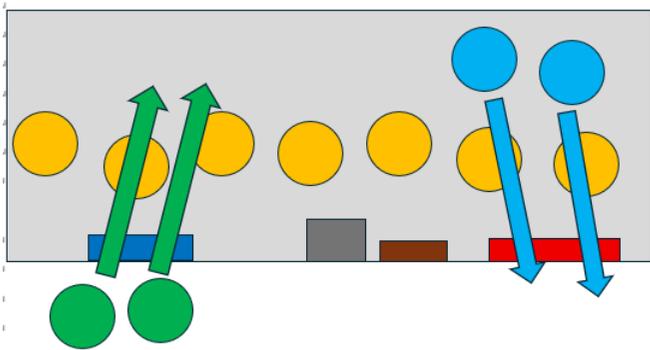


図1: 入口・出口付近の様子図

3.2 利用者アンケート

本プロジェクトはの本学の生徒100名を対象に、アンケートを実施した。「どれが一番ストレスに感じますか?」という問いに対して、次の4つから選択してもらった形である。

- 「食事提供の行列・待ち時間」
- 「レジの行列・待ち時間」

- 「着席場所の確保」
- 「食器の返却待ち」

アンケートの結果「食事提供の行列・待ち時間」の回答が51%、「レジの行列・待ち時間」の回答が13%、「着席場所の確保」の回答が30%、「食器の返却待ち」の回答が6%であった。

3.3 従業員インタビュー

利用者アンケートに加え、従業員視点での知見を得るためにインタビューを行った。以下に主要な質問と回答を示す。

- 営業時に「ここがスムーズになれば助かる」と感じる点
→ 『どうぞ』と声をかける前に、あらかじめ注文内容を決めておいてほしい
- 学生利用者への要望
→ 生協マネーのチャージおよびスマートフォン画面の準備を事前に済ませてほしい

4 数理モデリング・シミュレータ作成

本プロジェクトは提案する混雑緩和策を検証する必要がある。本プロジェクトが提案する混雑緩和策の有用性を可視化するために本学の食堂を再現したシミュレータを作成する。

4.1 シミュレータの概要

作成したシミュレータはエージェントが入場してから食事提供、会計、食事準備、着席、食器返却、退場といった流れに沿って行動し、その過程における待ち行列、斥力の発生を可視化したものである。

本プロジェクトのシミュレーションにおいて、食堂内の歩行者の運動方程式は(1)のように表した。

$$\vec{F}_{\text{total}} = \vec{F}_{\text{drive}} + \sum \vec{F}_{\text{rep, person}} + \sum \vec{F}_{\text{rep, wall}} \quad (1)$$

\vec{F}_{total}	合力
\vec{F}_{drive}	希望推進力
$\vec{F}_{\text{rep, person}}$	人の反発力
$\vec{F}_{\text{rep, wall}}$	壁の反発力

また、食堂内で形成される待ち行列モデルは図2のようにエージェントが何番目に並ぶかによって、並ぶ

位置を設定している。設定したポイントに入ったら立ち止まるようになっている。

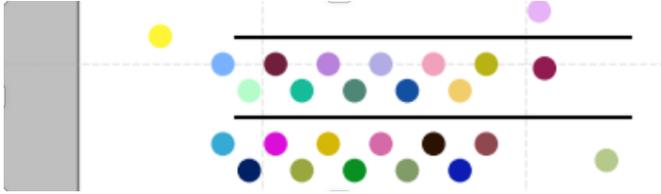


図 2: 待ち行列モデル

また、エージェントは設定された中継点を通るようになっている。

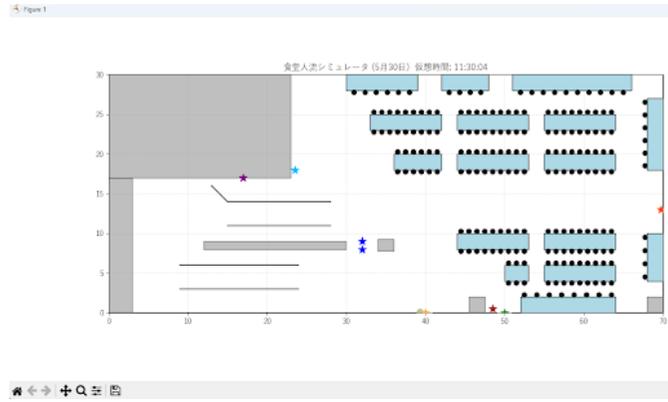


図 3: 現在の食堂のレイアウト

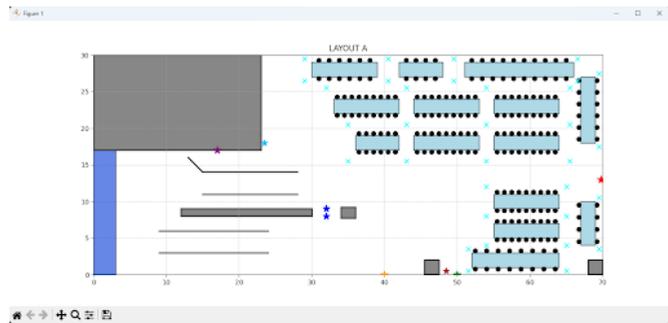


図 4: Layout A

4.2 混雑緩和策の提案

混雑緩和策提案の一つとして本プロジェクトが検証したのがレイアウトの変更である。評価指標として出入口付近の人口密度とレイアウト全体の衝突回数を検証する。検証条件として対象時間帯は 12:00~12:30 に限定し、入力データには検証用データを用いた。検証用データは、計測データのうち金曜日のデータのみを抽出し、その平均をとって作成した。検証対象となるのは元のレイアウトと本プロジェクトで作成した Layout_A, Layout_B と待ち行列形状 2 種類 (1 列, 2 列) の組み合わせからなる 6 通りである。

- **現在の食堂**: 図 3 に示すように (40,0) の位置に入口があり, (50,0) の位置に出口がある。
- **Layout_A**: 図 4 に示すように現在の食堂にて壁に接している机を離し座れる席を確保し出口近くの 2 つの机の撤去を行ったレイアウトである。
- **Layout_B**: 図 5 に示すように Layout_A にて撤去した出口近くの机を再配置したレイアウトである。

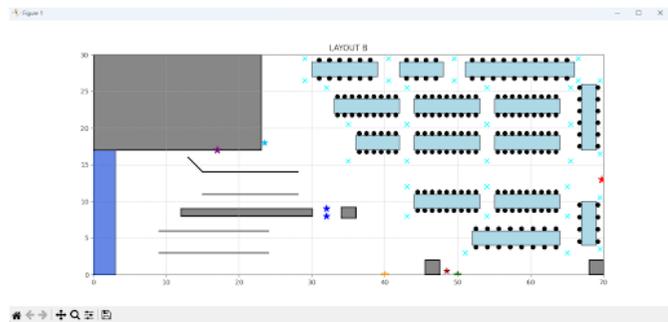


図 5: Layout B

5 結果と考察

5.1 検証結果

各条件の結果を比較したところ、図 6 より、待ち行列を 1 列から 2 列に変更すると、多くのレイアウトで衝突回数が減少した。さらに、2 列条件では衝突発生位置が出入口付近に集中する傾向が確認された。一方で、人口密度については、図 7 より、レイアウト間で顕著な差は確認されず、レイアウト変更による人口密度の大きな変化は見られなかった。

表8.1 衝突回数の比較

衝突回数	一列	二列
Layout_original	194	165
Layout_A	237	172
Layout_B	151	179

図 6: 衝突回数の比較

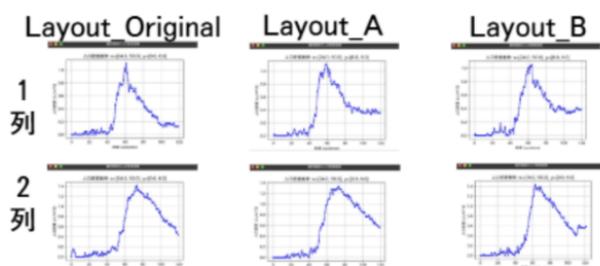


図 7: 人口密度比較

5.2 考察

本検証において注目すべき点は、待ち行列を 1 列から 2 列へ変更した場合に、出入口付近の人口密度が増加した理由である。待ち行列を 2 列化すると、行列自体は出入口付近に集約され、利用者が一定時間その場に滞留する結果となった。つまり、2 列化が内部空間の混雑抑制に寄与する一方で、その代償として出入口付近での混雑を増幅させる構造が生まれたと推察される。2 列条件における各レイアウト間の衝突回数には大きな差が見られなかった点に関して、2 列化によって衝突発生領域が出入口付近に限定され、レイアウトの違いが影響を及ぼしやすい食堂内部の動線、すなわちテーブル間の通行幅や回遊経路といった要素の寄与が相対的に小さくなったことが原因と推測される。待ち行列が 2 列で運用される状況下では、レイアウトによる改善効果は限定的となり、根本的課題は内部空間よりも出入口付近に存在していると考えられる。

5.3 今後に向けての提案

考察を踏まえて単にレイアウトを変更するだけでなく、行列の起点位置の調整、入退場動線の明確化、立ち位置の視覚誘導といった運用面での対策を併用する必要がある。したがって、今後の改善案としては、レイアウトと運用対策の両面からアプローチすることが望ましい。このような改善策は、混雑の偏在を抑制しながら歩行快適性の向上を図る取り組みとして妥当であ

ると考えられる。

6 まとめ

6.1 活動の総括

本プロジェクトでは、未来大学の食堂における混雑状況を対象とし、混雑の可視化および混雑緩和策の提案と検証を目的として活動を行った。そのために、実地調査による現状把握から数理モデルに基づくシミュレーションの構築、ならびに条件を変えた検証までを一連の流れとして実施した。シミュレータでは、来店者をエージェントとして行動を時間発展的に再現できるように設計した。数理モデルとしては、歩行者の相互作用を表現する Social Force Model およびシミュレータ用に設計した待ち行列モデルを採用した。検証の結果、二列の待ち行列では行列長が短縮され、衝突回数が減少するとともに、衝突の発生位置が出入口付近に集中する傾向が確認された。一方で、人口密度についてはレイアウトによる大きな差は見られなかった。

6.2 今後の展望

本プロジェクトでは、主に現状把握と基礎的な影響検証に留まったが、今後の展望として行列制御と動線管理の最適化、提供フロー・会計処理の効率化、モデル精度の向上とシステム化の 3 点が考えられる。本プロジェクトで示された改善案を基盤とし、実験的な現場導入とシミュレーション結果の照合を反復することで、食堂運営にとって実装可能性の高い施策を検討していきたい。本成果が、大学施設運用における混雑緩和の一助となり、同様の課題を抱える他施設への応用展開につながることを期待する。本プロジェクトの成果は、公立はこだて未来大学の食堂における混雑緩和ならびに利便性向上に寄与する有意義な知見を提供するものである。

参考文献

- [1]Helbing, D. and Molnár, P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 1995.
- [2] 長山雅晴. 数理モデリングとは何か. *数学通信* (日本数学会), Vol. 28, No. 1, 2023. <https://www.matsoc.jp/publications/tushin/backnumber/index23-4.html>.