

Social Force Modelを用いた コンビニエンスストアの混雑シミュレーション

東京理科大学 理工学部 経営工学科

田島 絵里佳

大島 寛生

指導教員 石垣綾

1. 背景

(1) コンビニエンスストアの特徴

コンビニエンスストア

日常的に多く利用される施設であり、人々の生活に欠かせない存在



スーパーマーケットと比較して...

面積が小さい (250平方メートル未満)

→ 商品数が少なくなる

平均客単価が低い (¥630)

→ スーパーは ¥1,835

宣伝はTVCM等...

→ 時間帯によるセールは難しい

売上を増加させるためには...

➡ 来客数を増加させる必要がある

1. 背景

(2) 繁忙時間帯と閑散時間帯

そもそも、小売店の営業時間には...

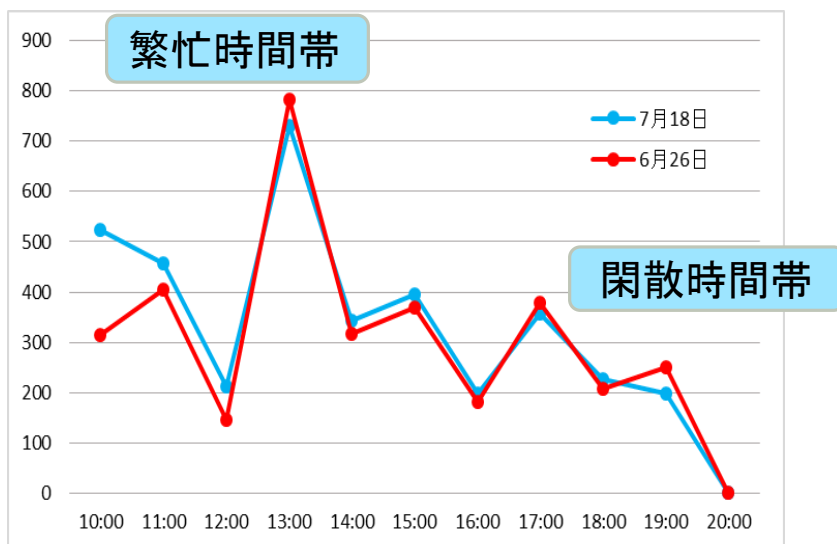


図1. ある店舗の時間帯別の来客数



閑散時間帯における対策

イベントを開催することで
繁忙時間帯に来店している客を分散させる

But! コンビニでは効果は期待できない

本研究では繁忙時間帯に着目する

1. 背景

(3) 繁忙時間帯における問題点

繁忙時間帯の店内は混雑している



💡 一度他店舗へ逃げた客を取り戻すことはできない

→ 行きたいときに気軽に行けるのがコンビニエンスストアの特徴

店内の混雑を緩和することで来客数を増加させたい

1. 背景

(4) 店内が混雑してしまう原因



図2. コンビニエンスストアの店内例

売り場面積が小さい

レジと売り場の距離が近い

etc...



会計待ちの際に、商品棚に沿って並ぶ傾向がある



レジに並ぶ客と商品を選んでいる客が混在する

導線が乱れ、店内に混雑が生じる

1. 背景

(5)店内の混雑により起こる現象

? このとき、客はどのレジを選ぶのか...?

- (i) レジ1に並んでいる客はいない
- (ii) レジ2, 3には客が並んでいる
- (iii) レジ4の周りには他のイベントの影響で混雑している



このような現象が起こる店舗で観察したところ

レジ2,3に並ぶ客が多く、
レジ1,4が稼働しない状況が観察できた

➡ 列が生成されているレジと生成されないレジが存在する
店内の混雑が直接列に影響を与えている

他の客の位置や行動、周囲の状況によって次に取る行動が変わってくる

2. 先行研究



コンビニのレジの状態

① 列が生成される (閑散時)

マルチエージェントモデル, 待ち行列理論

Zhang Qi (2008), Nafees, Azmat (2007), Ju,Wange (2010)



② 列が生成されない (混雑時)

Social Force Model (SFM)

福岡 由惟 (2016)



💡 先行研究ではどちらか一方のみに着目している

本研究では①, ②の共存モデルを考えたい

ソーシャルフォースモデルを改良して閑散時, 混雑時の両方を表現する

3. 目的

コンビニエンスストアにおける売上増加には来客数を増加させる必要があり、
そのためには店内の混雑を緩和する方法の検討が必要である

本研究

列が生成される場合と生成されない場合の**共存モデル**
店内の**混雑が直接列に影響**を与える



このような特徴を持つ店舗のモデル化を行い、実装する

歩行者現象を分析し、混雑を緩和するための方法を検討したい

目的

Social Force Modelを用いて
コンビニエンスストアの混雑シミュレーションを行う


4. 評価方法

店内の混雑現象をモデル化する


混雑現象の評価方法

 待ち行列理論 or シミュレーション 

待ち行列理論：混雑現象を数理モデルを用いて解析することを目的とした理論

 計算に時間がかかり、現実のすべての状況を再現できない

シミュレーション：複雑な事象、機構を定式化して模擬実験すること

 計算時間が比較的短く、複雑な状況に対応可能

シミュレーションによる店内のモデル化を行う

5. シミュレーションについて

(1)シミュレーションとは

現実のシステムをモデル化(模擬)して, 実行することで
その振る舞いを分析・予測する問題解決手法

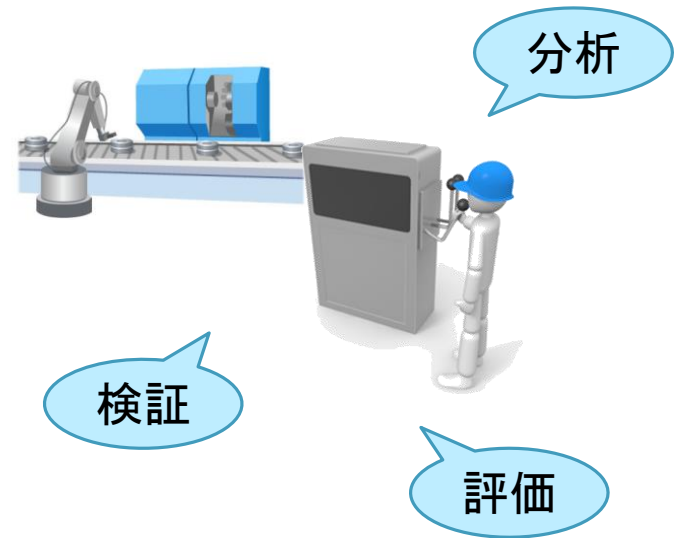
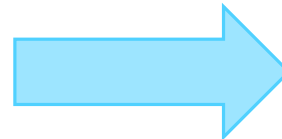
現実の複雑なシステム



図3. 現実のシステム

モデル化

目的により特徴を
抽出し, 簡略化



5. シミュレーションについて

(2) マクロとミクロ

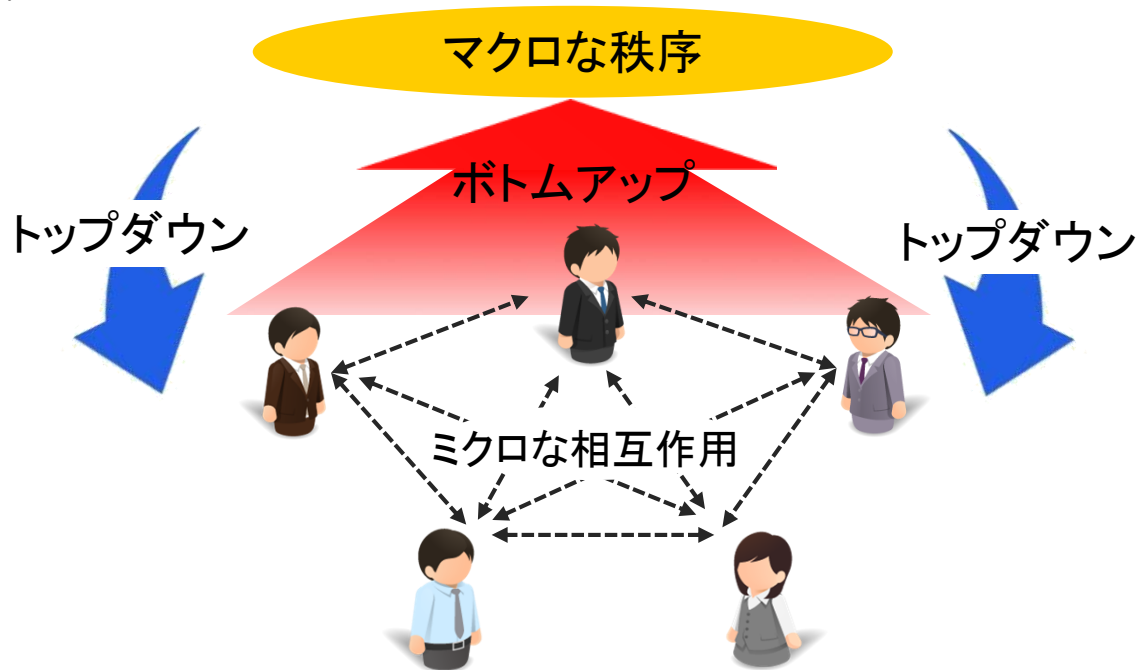
マクロシミュレーション

↳ 大域的な動きを再現

ex) 避難シミュレーション

ミクロシミュレーション

↳ 局所的な動きを再現



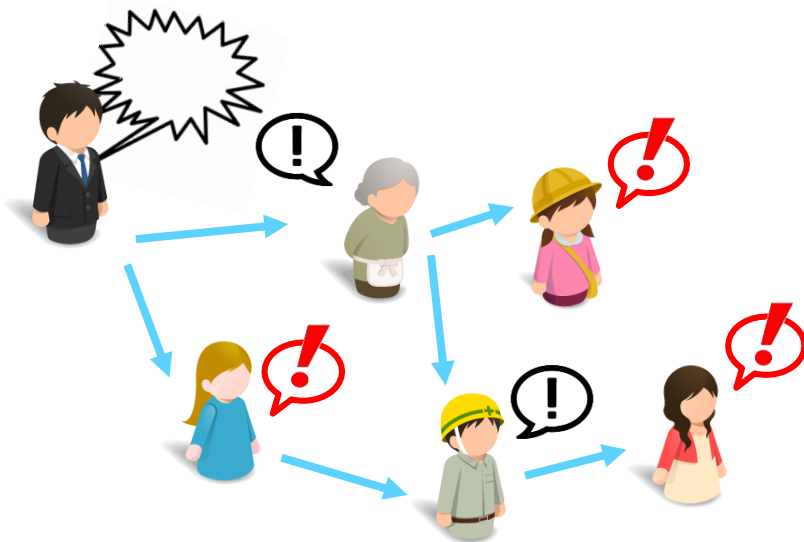
本研究ではミクロな視点からシミュレーションを行う

5. シミュレーションについて

(3) ミクロシミュレーション

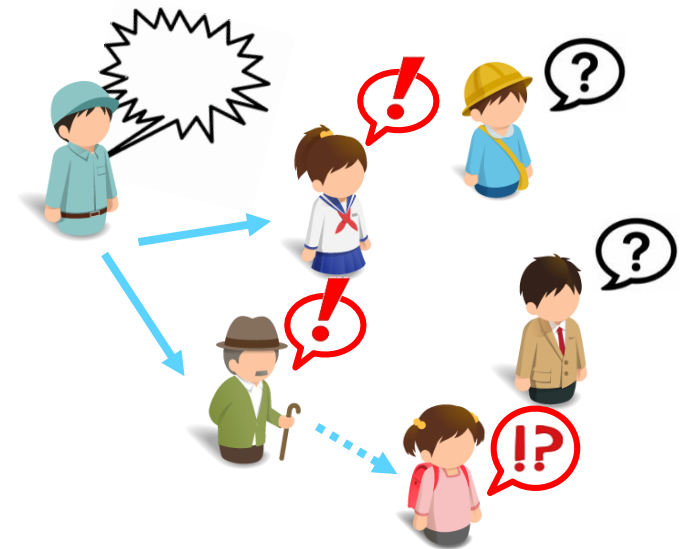
一般的なシミュレーション

情報は全体に一瞬かつ均一に伝わる



マルチエージェントシステム

情報は局所的かつ不均一に伝わる



複雑な条件下においてはマルチエージェントシステムが適している

5. シミュレーションについて

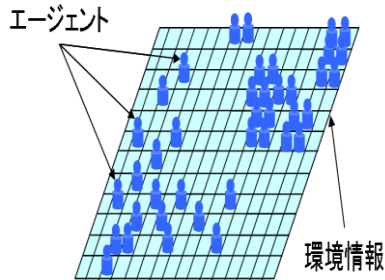
(4) マルチエージェントシステム

自律した個々のエージェントが多数集まって相互に依存しあっているシステム

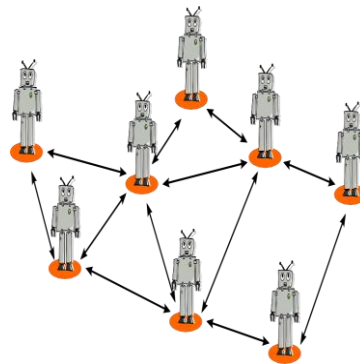


システム全体よりも個々の自律的なエージェント間の相互作用に着目

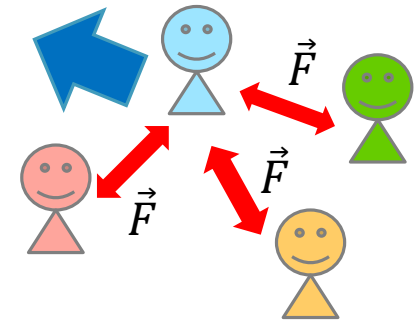
① セルオートマトン



② ネットワークモデル



③ Social Force Model



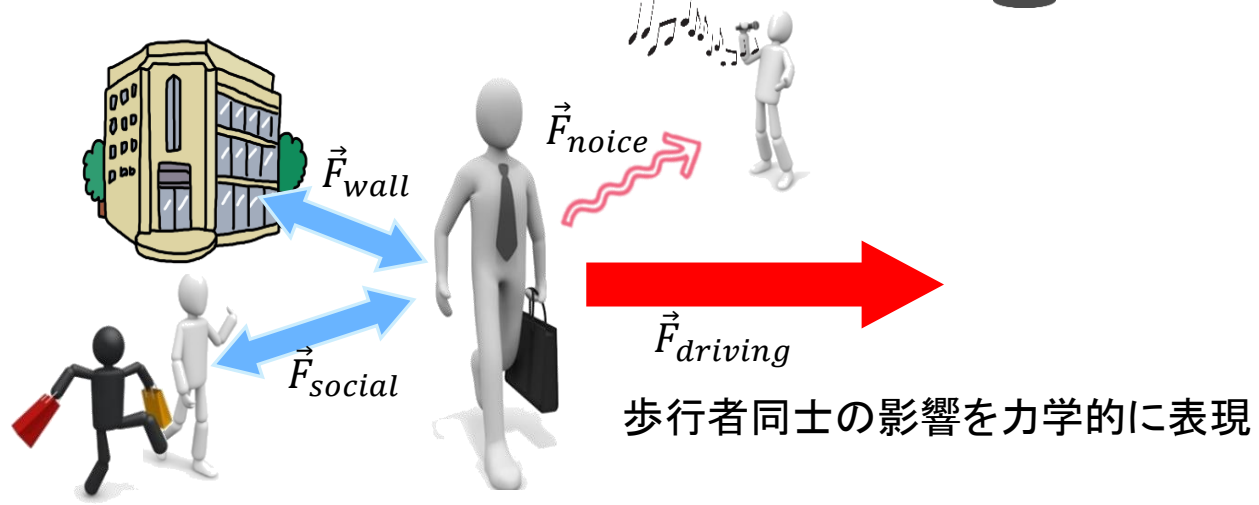
先行研究

Social Force Modelは局所的かつ歩行者密集という条件下で再現性が高い

5. シミュレーションについて

(4) Social Force Model

群衆行動の力学ベースモデル (Dirk Helbing, Peter Molnar 提唱)



避難シミュレーションで多く利用されている

Social force model を基にした歩行者の避難シミュレーションモデルに関する研究 (Shogo Isozaki)



歩行者密集という条件は店舗内混雑と同様であるといえる

ソフトウェア S⁴ simulation System を用いて

Social Force Model を基にしたシミュレーションを行う

6. Social Force Model理論

(1)モデル内における歩行者


歩行者*i*は質量*m*を持つ質点として表し、
平面内で運動する粒子とみなす

$$\vec{F}_i = m_i \vec{a}_i \quad (1)$$

$$\vec{F} = \vec{F}_{driving} + \vec{F}_{social} + \vec{F}_{wall} \quad (2)$$



歩行者*i*

 ある時刻から次の時刻に進む方向, 歩行者速度が算出できる

運動方程式における外力*F*

- (i) 目的地へ進もうとする力
- (ii) 他者, 障害物から受ける反発力

6. Social Force Model理論

(2) 目的地へ進もうとする力

歩行者*i*が目的地へ進もうとする力

$$F_i^0(t) = \frac{v_i^0(t)\vec{e}_i^0(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} \quad (2)$$

➡ 当初考えていたコースから外れてしまった際に
目的地の方向へ進行方向を曲げるように発生する

$v_i^0(t)$: 歩行者最適速度,
 $\vec{e}_i^0(t)$: 目的地に向かうベクトル,
 $\vec{v}_i(t)$: 現在の速度ベクトル, τ_i : 加速時間

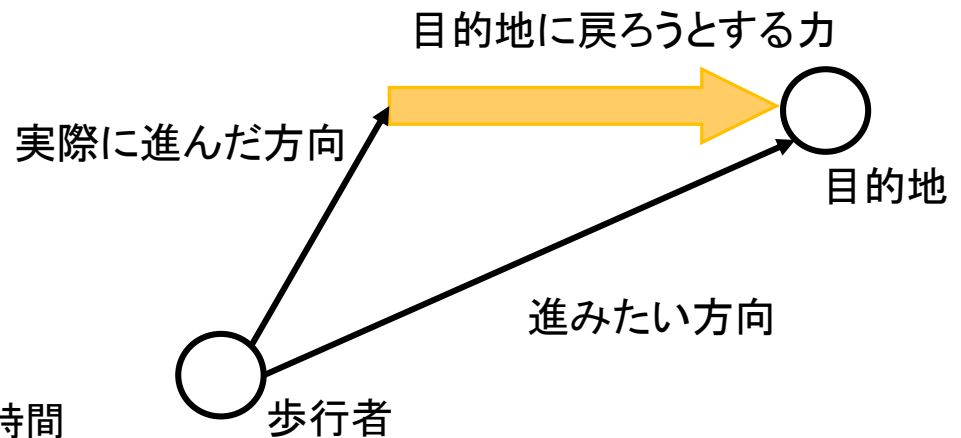


図4. 目的地へ進もうとする力

6. Social Force Model理論

(3)他者, 障害物から受ける反発力

歩行者*i*が歩行者*j*, 壁*W*から受ける力

$$f_i(t) = \sum_{j(\neq i)} [f_{ij}^{soc}(t) + f_{ij}^{alt}(t)] \quad (3)$$

衝突を避ける力

$$f_{ij} = A_i \exp\left(-\frac{d_{ij}}{B_i}\right) n_{ij}$$

$$f_{iW} = A_i \exp\left(-\frac{d_{iW}}{B_i}\right) n_{iW}$$

衝突した際に受ける力

$$f_{ij} = \left\{ A_i \exp\left[\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}\right] + k\theta(r_{ij} - d_{ij}) \right\} n_{ij} + K\theta(r_{ij} - d_{ij})(v_i \cdot t_{ij}) t_{ij}$$

$$f_{iW} = \left\{ A_i \exp\left[\frac{r_i - d_{iW}}{B_i}\right] + k\theta(r_i - d_{iW}) \right\} n_{iW} + K\theta(r_i - d_{iW})(v_i \cdot t_{iW}) t_{iW}$$

A_i, B_i : 相互作用の強さと範囲, $d_{ij} = |\vec{d}_i - \vec{d}_j|$: 歩行者間距離,
 n_{ij} : i から j 方向の単位ベクトル, t_{ij} : 接線方向成分,
 r_{ij} : i と j の影響範囲の和, k : 弾性係数, K : 散逸係数, θ : ランプ関数

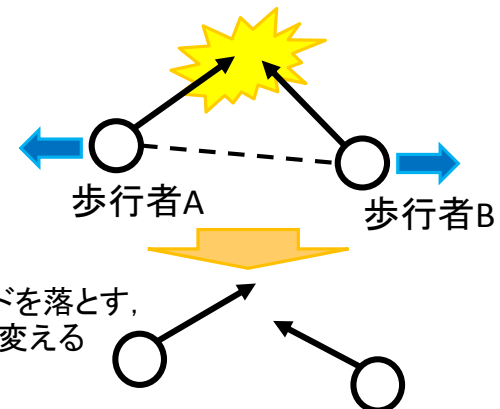


図5. 衝突を避ける力

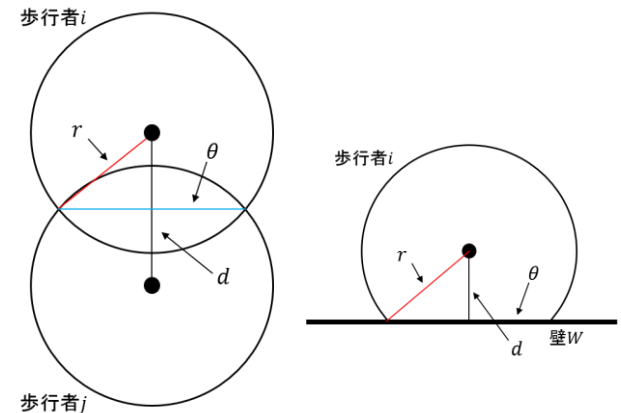


図6. 衝突した際に受ける力

7. Social Force Modelの特徴

(1)一般的な特徴



Social Force Modelは歩行者同士の相互作用に主眼を置いている

➡ 密集した歩行者現象の再現性が高い

But! レジの列に並ぶような行動の再現が難しい (反発してしまうため)



歩行者はレジに一列に並ぶ

店内の混雑により列が生成されないレジが存在

- 1) 歩行者がレジに並ぶ行動の再現
- 2) 店内の混雑による歩行者行動の変化を再現

この2つを実装できるか検証する

Social Force Model を用いることの妥当性について検討する

7. Social Force Modelの特徴

(2)S⁴ Simulation System

💡 S⁴ Simulation System の特徴

① 経路地点を設定する

エージェントが通過する可能性のある地点

② 経路グラフが自動設定される

視覚可能な経路地点同士を中心を結ぶ

歩行者は経路地点を通過して目的地に進む

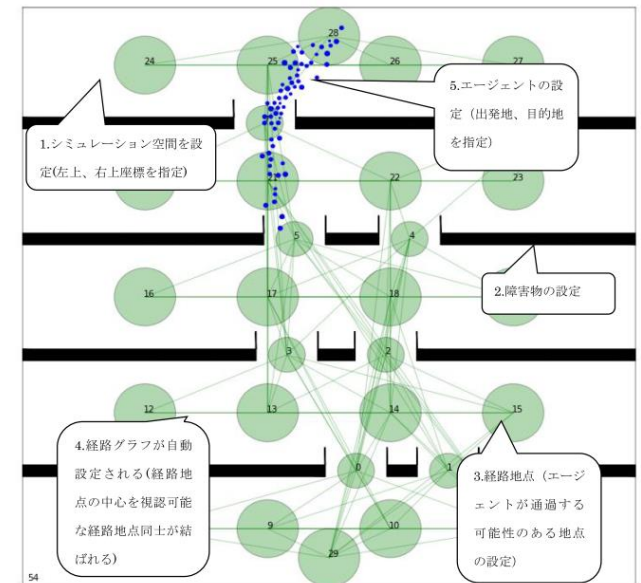


図7. S⁴ Simulation における環境部品の設定

経路地点を工夫することで一列に並ぶ歩行者を表現できるかもしれない

8. Social Force Modelの改良

(1)簡易モデルによる検証方法

① レジに並ぶ歩行者の再現

歩行者が一行に並ぶように進む経路を設定

既存モデル

売り場ルートを経て全ての客はレジまで自由な経路を通過して行動

全ての客のレジまでの経路を指定

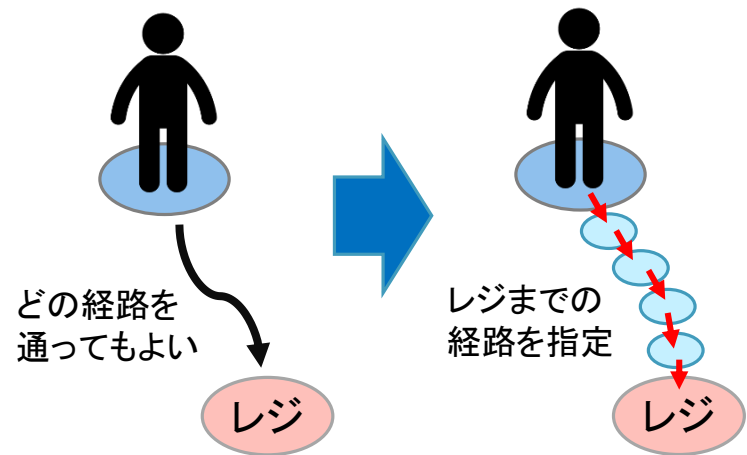


図8. レジに並ぶ歩行者の設定

② 店内混雑による歩行者行動の変化

(a) 到着後、売り場を巡回してレジに並ぶ

(b) 到着後、売り場に最も近いレジ付近を巡回 (レジ付近の混雑を表現)

の2種類の歩行者を考える

➡ (a)のみ, (a)と(b)両方の歩行者を生成した場合のモデルを実行する

2つのモデルを比較し、売り場に最も近いレジ付近の歩行者行動を観察



8. Social Force Modelの改良

(2)レジに並ぶ歩行者

次の2つのモデルを比較することで検討を行う

- (a)売り場からレジまでの経路は設定しない
- (b)売り場からレジまでの経路を細かく設定

出入口:経路ポイント36
レジ:経路ポイント34

① 出入口からランダムに到着

② 売り場を經由してレジに向かう

ルート1: 0 → 2 → 4 → 12 → 20 → 28

ルート2: 24 → 2 → 4 → 12 → 20 → 28

③ 出入口から退店する

➡ (a)では列が生成されず,
(b)では列が生成された

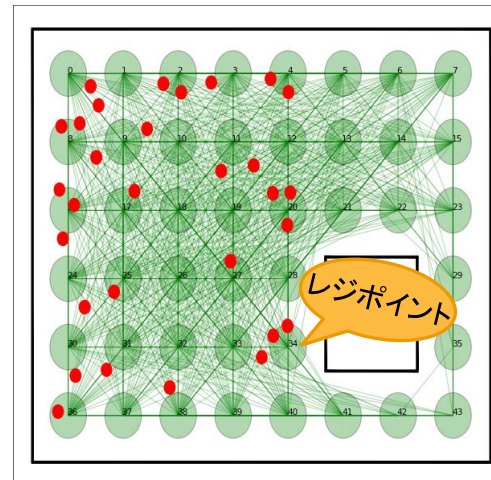


図9. 簡易モデル(a)

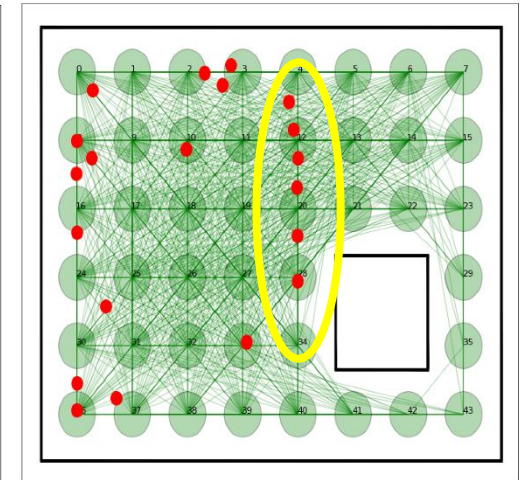


図10. 簡易モデル(b)

レジに並ぶ歩行者現象を再現できた

8. Social Force Modelの改良

(3)店内混雑による行動の変化

レジ付近の混雑がある場合とない場合における各レジの通過人数を出力した

表2. 歩行者の各レジ通過数(人)

レジ	混雑なし	混雑あり
1	9	3
2	5	8
3	1	5

ポイント94を
必ず経由



出入口: 経路ポイント250
レジ: 経路ポイント124, 126, 128

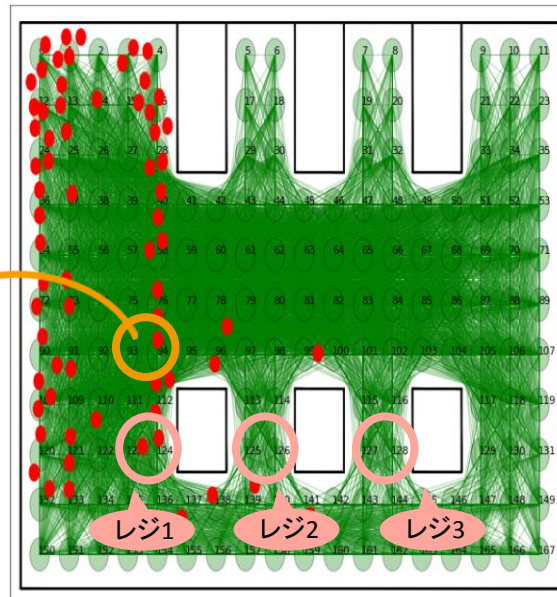


図11. 店内混雑によるレジ選択の変化(混雑なし)

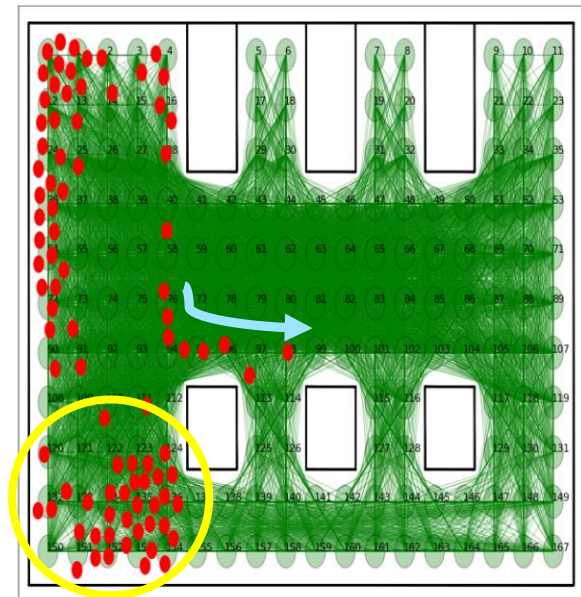


図12. 店内混雑によるレジ選択の変化(混雑あり)

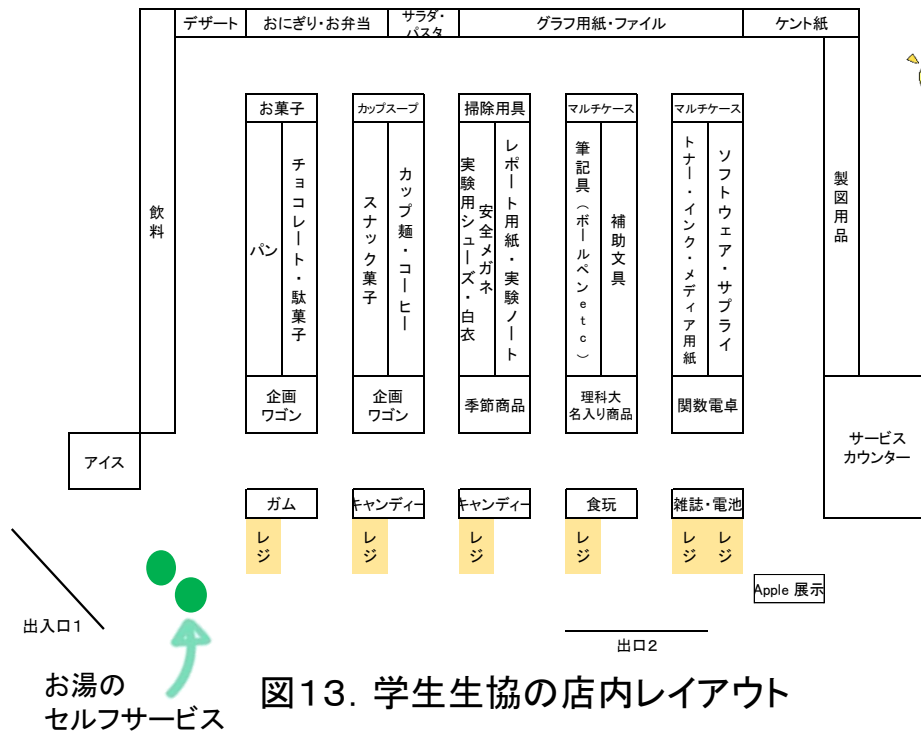


衝突を回避しようとした歩行者が遠くのレジを選択していることがわかる

店内の混雑が歩行者のレジ選択に影響を与える現象を再現できた

9. 対象店舗のモデル化

Social Force Modelを用いることの妥当性が証明されたため、
実際に対象店舗(学生生協)のモデルを作成する



学生生協の特徴

- 多段階のイベントが存在する
- 客の密集する場所に偏りがある
- 店内の混雑が列に影響を与える

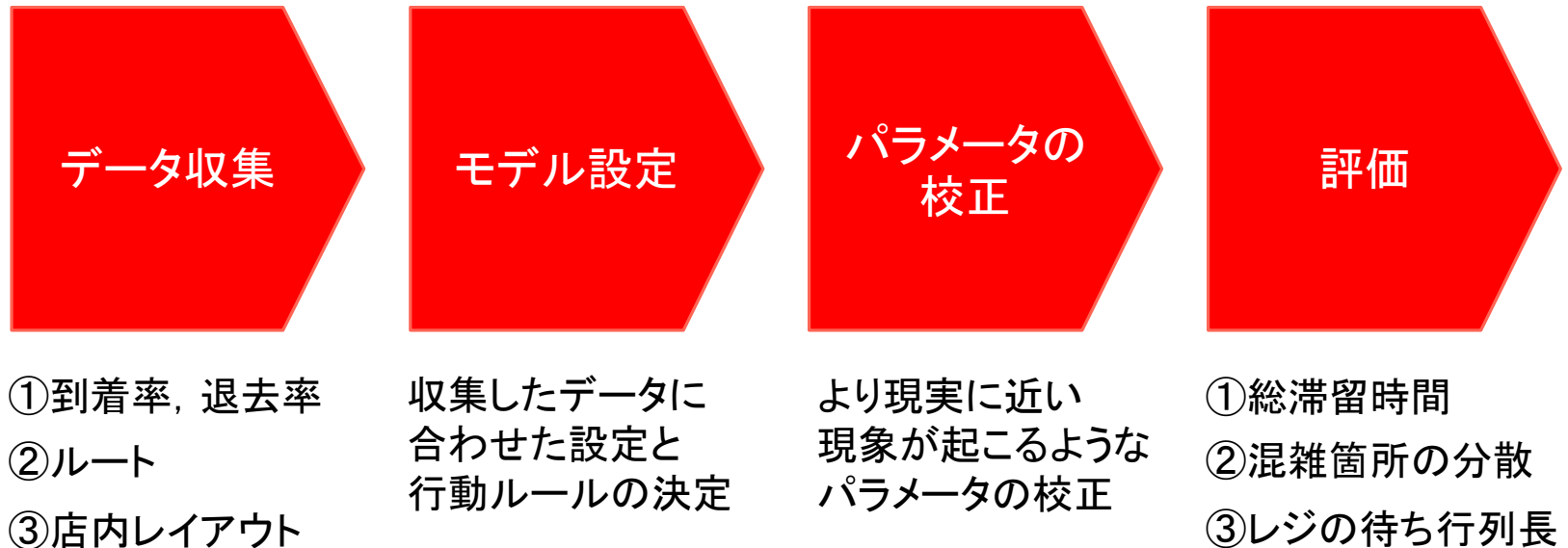
店内の混雑により、稼動しないレジが存在する

図13. 学生生協の店内レイアウト

実際に店内混雑が影響して客を逃がしている店舗のモデル化を行う

10. 対象店舗のモデル作成

モデルの作成手順



このような手順で学生生協のモデルを作成する



11. データ収集

(1)歩行者到着率, 退去率

出入口1での到着・退去, 出入口2での退去について実際に対象店舗で調査を行った

到着率

表4. 出入口1の平均到着数

	平均歩行者数	
11:30-11:40	0.8	1.0
11:41-11:50	4.2	4.5
11:51-12:00	5.9	5.9
12:01-12:10	12.2	12
12:11-12:20	20.4	19.8
12:21-12:30	14.7	14.9
12:31-12:40	8	8.3
12:41-12:50	10.4	10.4
12:51-13:00	13	12.3
13:01-13:00	11	10.9

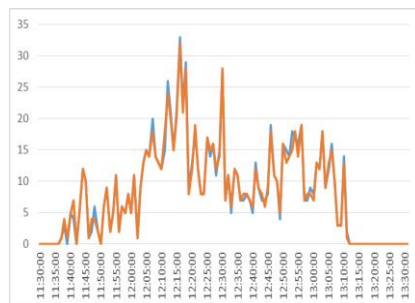


図14. 出入口1の歩行者到着数

退去率

表5. 出入口1の平均退去数

	平均歩行者数	
11:30-11:40	0.0	0.0
11:41-11:50	2.3	3
11:51-12:00	5.2	4.9
12:01-12:10	7	6.8
12:11-12:20	11.9	11.7
12:21-12:30	12.7	12.3
12:31-12:40	12	12.4
12:41-12:50	10.5	10.2
12:51-13:00	12.1	12
13:01-13:00	12.4	11.7

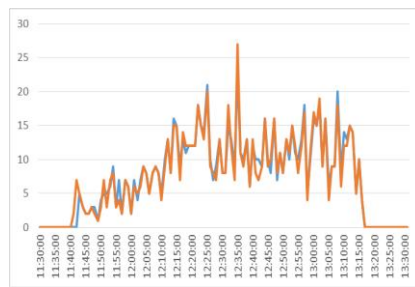


図16. 出入口1の歩行者退去数



図15. 学生生協のレイアウト

表6. 出入口2の平均退去数

	平均歩行者数	
11:30-11:40	0.0	0.0
11:41-11:50	0.1	0.1
11:51-12:00	0.5	0.5
12:01-12:10	0.4	0.4
12:11-12:20	4.4	4.4
12:21-12:30	6.5	6.5
12:31-12:40	5.2	5.2
12:41-12:50	2.4	2.4
12:51-13:00	2	2
13:01-13:00	2.3	2.3

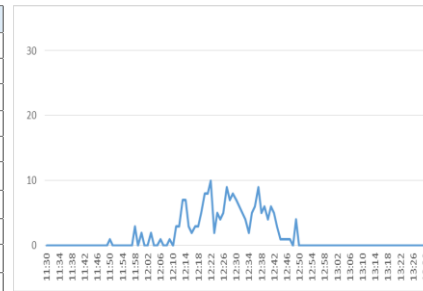


図17. 出入口2の歩行者退去数

実データを元に10分ごとの到着率, 退去率を設定する

11. データ収集

(2) 経路パターン

対象店舗の繁忙時間帯である12:00～13:00のデータを用いる

利用データ：1日の売上データ(全体, 品目ごと) × 9日分, 客数

食べ物



おにぎり, 三角サンド, 弁当, カップ麺, パン

飲み物



中型PET

デザート



チルドデザート, 菓子

文具



文具

➡ 商品を4つに分類分けし, それぞれの相関関係を分析し, 経路パターンを決定した

ルート1: 出入口202→119→98→149

ルート2: 出入口202→92→116→144

ルート3: 出入口202→2→144

ルート4: 出入口202→6→119→145

ルート5: 出入口202→116→69→147

ルート6: 出入口215→116→0→144

ルート7: 出入口215→3→116→144

ルート8: 出入口215→2→69→147

ルート9: 出入口215→92→119→145

ルート10: 出入口215→3→147

⚠ 特定の商品(経路ポイント69)を通る経路を選択した歩行者はレジ通過後, 二次イベントへ

11. データ収集

(3) 店舗レイアウト

実際の学生生協のレイアウトをもとに、以下のような店舗マップを作成した

- 出入口
- レジ1~6
- レジ判断ポイント
- お湯セルフサービス
(二次イベント)

売り場代表点

おにぎり, 三角サンド, 弁当,
カップ麺, パン, チルドデザート,
菓子, 中型PET, 文具

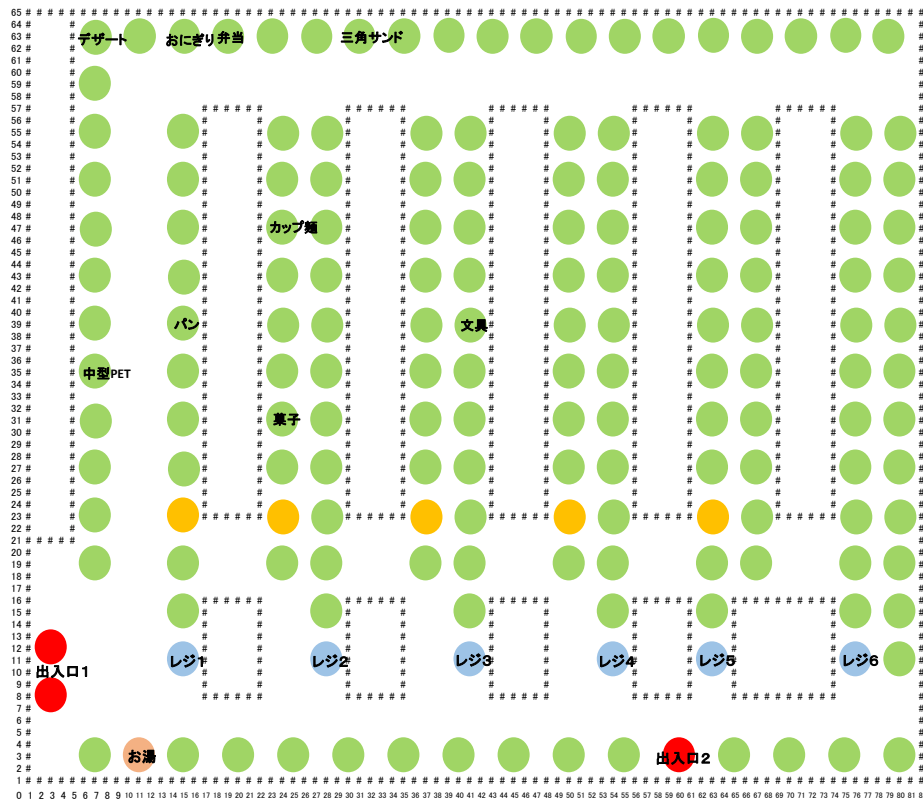


図18. モデルの店舗マップ

12. モデル設定

(1) 歩行者の移動ルール



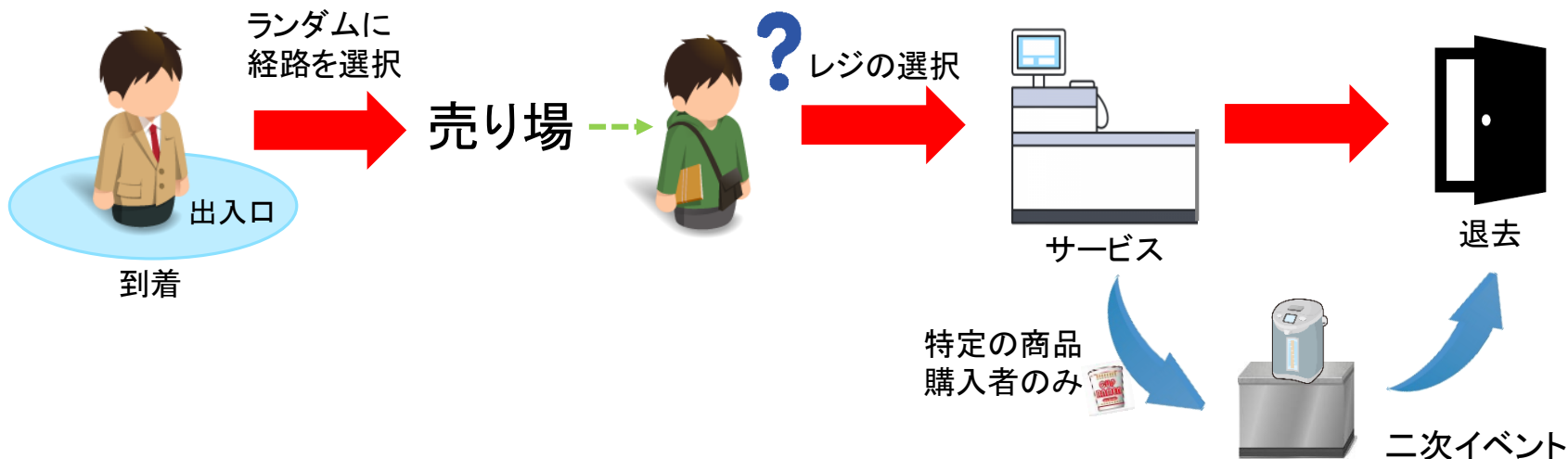
到着率に応じて
出入口1から
一人ずつ到着

売り場を經由して
レジ判断ポイントへ

最も空いている
レジを選択して移動

処理時間分だけ
滞在し、先着順に
レジから退去

特定の商品を經由
した歩行者のみ、
二次イベントへ



12. モデル設定

(2)空いているレジの選択

空いているレジを選択する行動は次のように設定する

①レジ判断ポイント Pr_0 を設定

② Pr_0 を通過した歩行者は各レジポイント Pr にいる歩行者の数が最小の Pr を選択する

③ Pr に滞在する時間 T は指数分布で決定

④ Pr に到着した歩行者は T ステップだけ Pr を次の目的地に設定



到着した順に歩行者は退去する

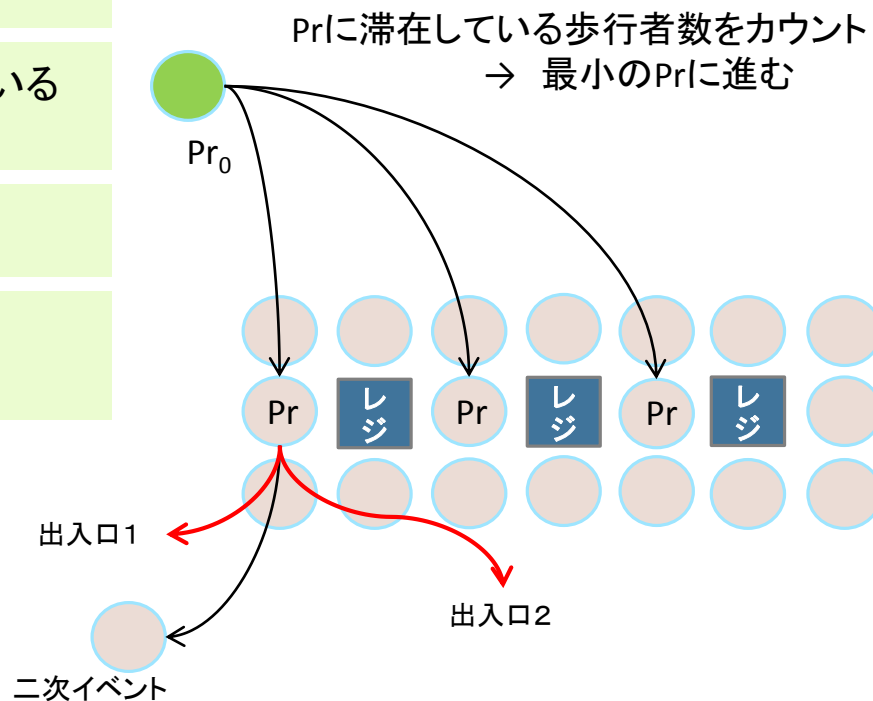


図16. 空いているレジを選択する設定

13. パラメータの校正



作成したモデルが現実により近い状態にするため、
本研究で用いるパラメータを校正した

表3. 校正したパラメータ

パラメータ	定義	初期値	校正值
A_i	相互作用の強さ(N)	2000.0	1000.0
B_i	相互作用の範囲(m)	0.08	0.08
k	弾性係数(kg/s ²)	120000.0	100000.0
K	散逸係数(kg/ms)	240000.0	200000.0
r	最大影響半径(s)	3.0	2.5
$v_i^0(t)$	最適速度(m/s)	0.6	0.6
$v_i^1(t)$	最高速度(m/s)	1.5	1.7
τ_i	加速時間(s)	0.5	0.5
m	質量(kg)	50.0	55.0
T	経路再探索間隔(s)	15.0	10.0
R	歩行者の半径(m)	0.1	0.3

この条件でモデルを実行し、総滞留時間、歩行者の経由地点、待ち行列長の結果を示す

その結果がどのように変化すると、店内の混雑が緩和されたといえるかについて考える



14. 結果

(1) 総滞留時間

客の総滞留時間を出力した

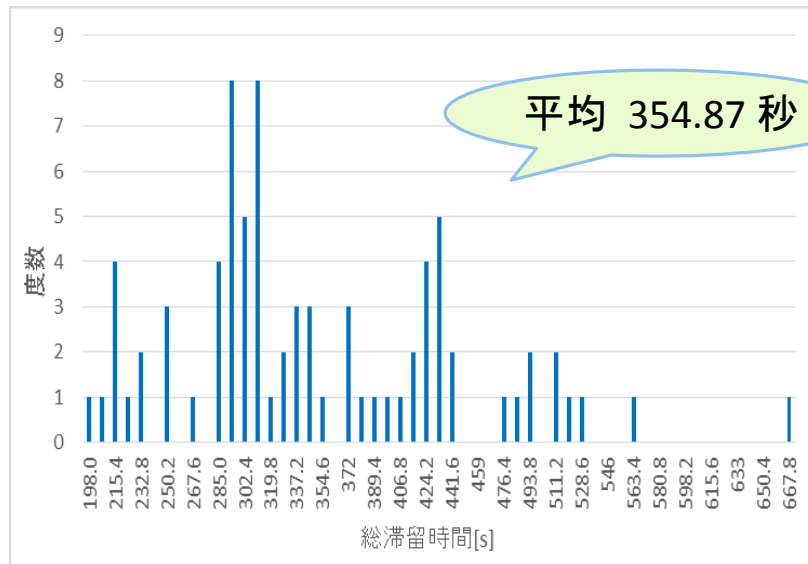


図19. 総滞留時間

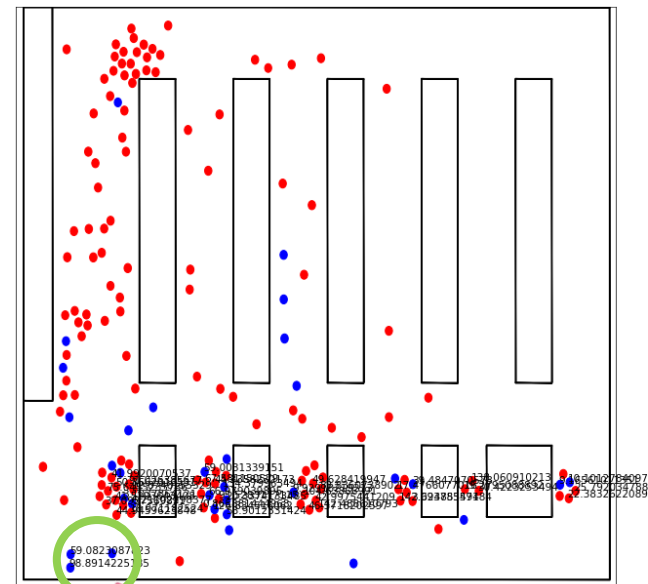



図20. シミュレーションモデル
お湯待ちポイント



総滞留時間が減少することで、混雑は緩和されたといえる

14. 結果

(2) 経由地点

 各経路ポイントを通じた客の数を出力した

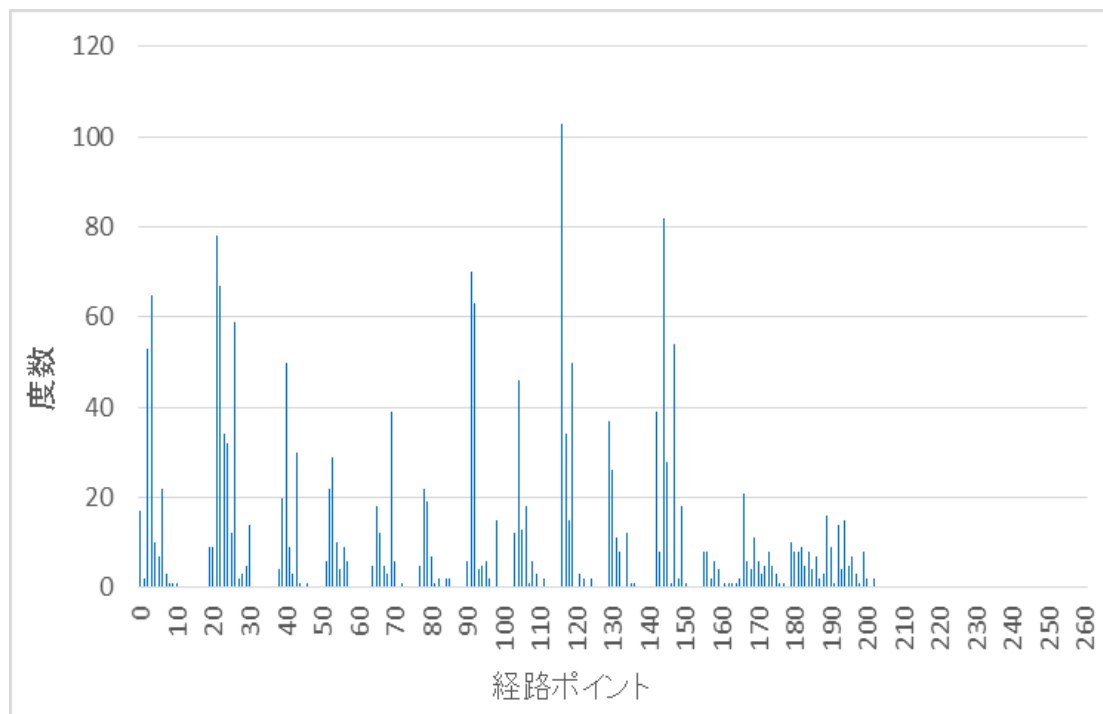


図21. 客の経由地点

 客が多く密集する箇所には偏りがある

14. 結果

(3)客の密集地点の分析

客の経路地点データから20人以上の通過があった地点について考える

表7. 密集地点

経路地点	度数	経路地点	度数
2	53	91	70
3	65	92	63
6	22	104	46
21	78	116	103
22	67	117	34
23	34	119	50
24	32	129	37
26	59	130	26
39	20	142	39
40	50	144	82
43	30	145	28
52	22	147	54
53	29	166	21
69	39	202	63
78	22	215	59

結果

経路ポイントとして設定した箇所以外にも客が多く密集する場所がある

曲がり角となる地点にも客が多く密集している

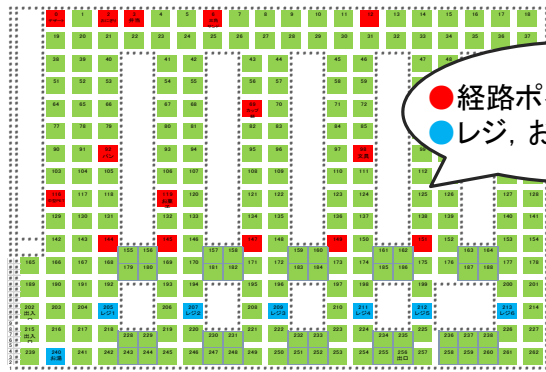


図22. 経路ポイント設定箇所



図23. 客の密集箇所

各経路ポイントの通過数が分散されれば、混雑箇所が分散されたといえる

14. 結果

(4)待ち行列長



各レジにおける客の数を出力した

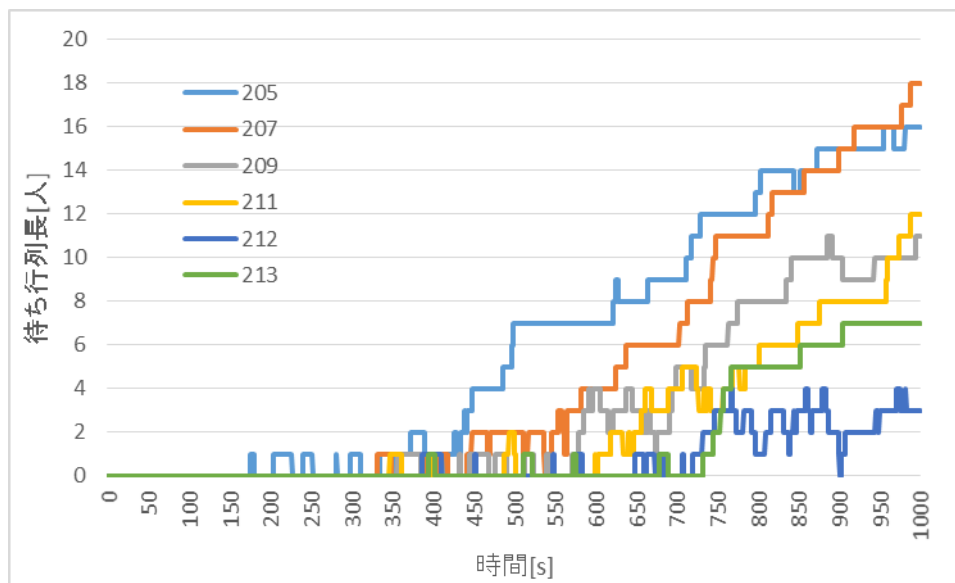


図24. 待ち行列長

待ち行列長が短くなることで、効率の良いサービスが提供できているといえる

💡 これらのデータを用いることで様々な条件における混雑現象について分析することができる

15. まとめ

目的


多段階のイベントにより、店内の混雑が列に直接影響を与えるような店舗のモデル化を行い、実装する

①簡易モデルの実装により、本研究におけるSocial Force Modelの妥当性を検証した

②収集したデータを元に、学生生協で実際に起きている現象を再現した

シミュレーション結果から

客の総滞留時間、店内の混雑箇所、レジの待ち行列長

のデータが得られた 

実装したモデルを用いることで混雑を緩和するための方法を検討することができる

今後の展望

- より複雑な客の行動を再現(視野範囲の設定etc...)
- 実装したモデルにより店内の混雑を緩和するための方法の検討を行う