

**エージェントベースシミュレーションを用いた  
高年齢労働者の身体的特性を考慮した  
オーダーピッキング作業の効率化**

---

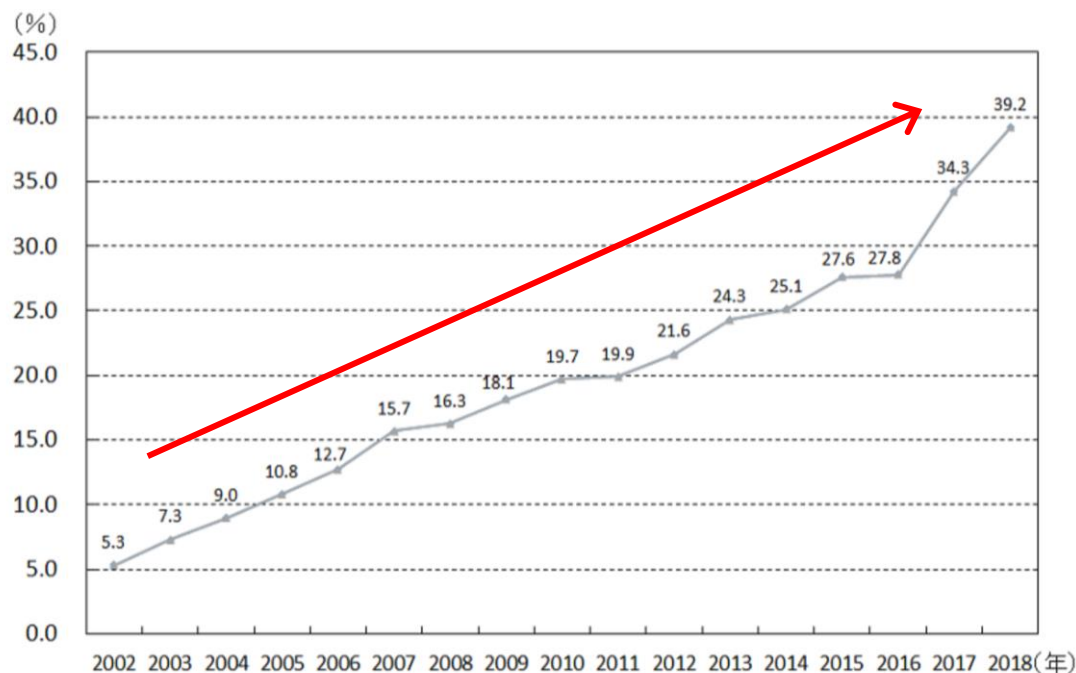
NTTデータ数理システム学生研究奨励賞

2021年12月3日

東京理科大学 松田樹梨佳

指導教員 石垣綾

1. 背景
2. 先行研究と目的
3. エージェントベースシミュレーション
4. モデル設計
5. 実験条件
6. 実験計画
7. 実験結果
8. 本研究のまとめ
9. 参考文献



近年、ネットショッピング市場は急速に拡大している[1]

→企業間の競争の激化

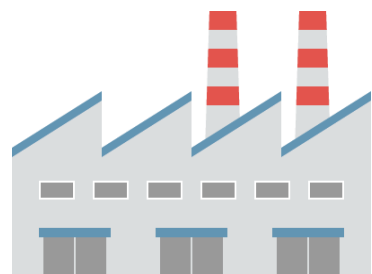
→消費者ニーズの多様化

ネットショッピング利用世帯割合の推移

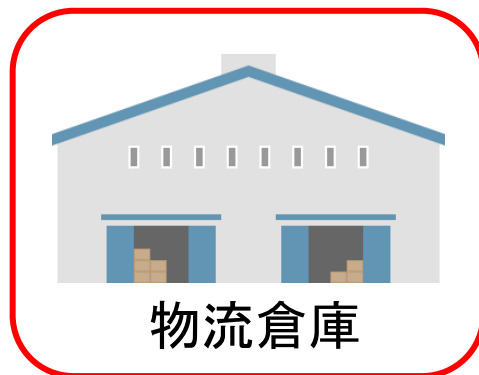
出典：総務省統計局

多種多様な商品を消費者のもとへ迅速に届ける必要がある

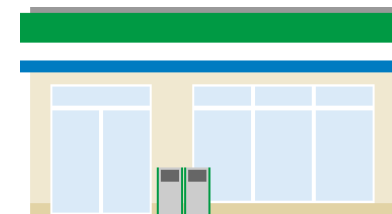
<サプライチェーン>



工場(メーカー)



物流倉庫



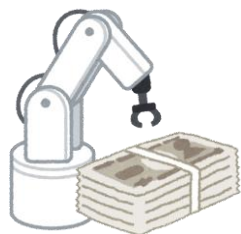
小売店

サプライチェーンの中核である物流倉庫での活動の効率化は重要になっている

## < 物流倉庫内の作業 >



オーダーピッキング: オーダーに従って商品を保管棚から1つ1つ回収する作業  
オーダーピッキングは全作業時間の**55%**を占めている[2]

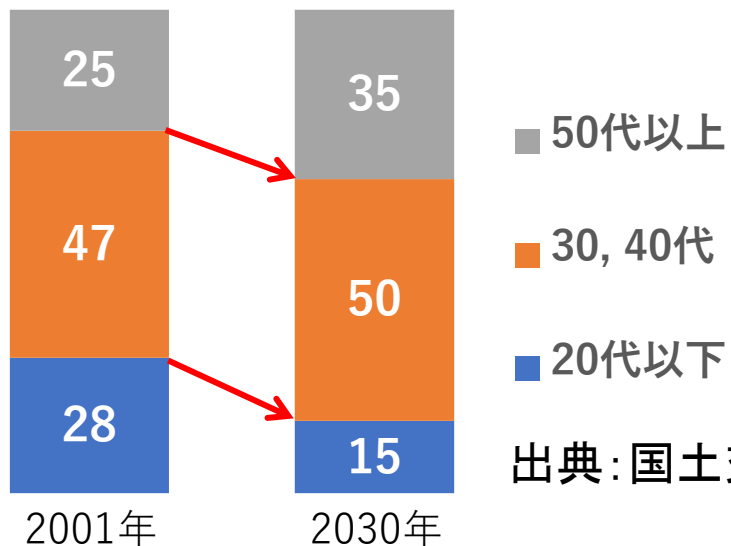


オーダーピッキング作業には自動倉庫やピッキングロボットを用いたピッキングがあるが、これらは作業効率化に大きく貢献できる一方で、高額な費用がかかるため導入が難しい。

物流倉庫全体の作業時間短縮には手動オーダーピッキング作業の効率化が不可欠

## <物流倉庫の現状>

倉庫業界における年代別従業員数の割合



出典：国土交通省

一方で、物流倉庫では効率化も重要だが、労働力の不足も問題になっている[3]

→物流倉庫における**高齢化 & 若手不足**

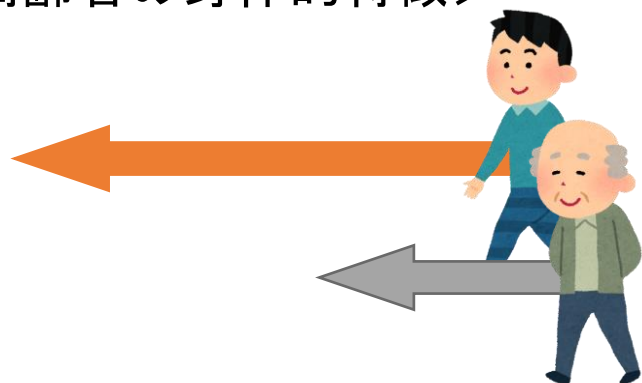


物流施設では労働力の確保のために**女性・高齢者・熟練社員**の**シニア社員**としての再雇用を掲げている[3]

女性や高齢者の身体的特徴を考慮した労働環境を実現する必要がある

# 1. 背景

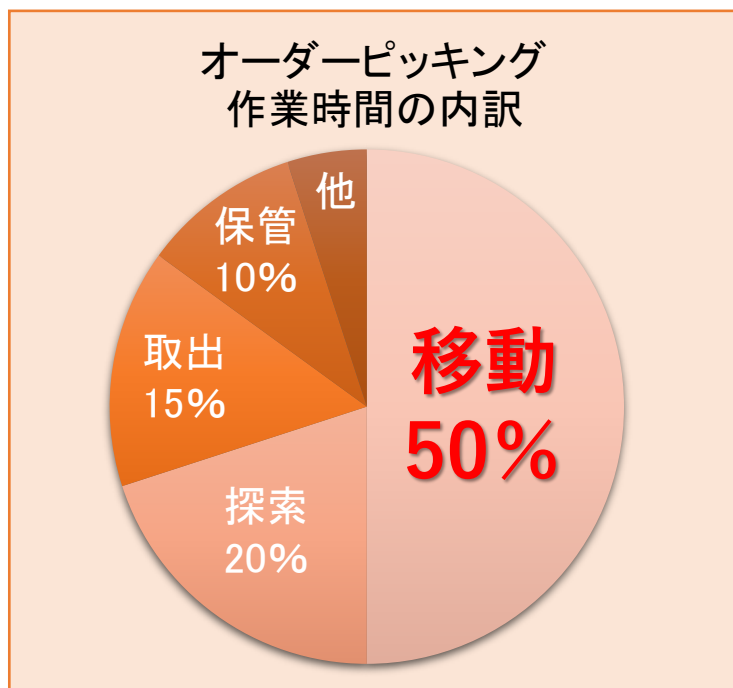
本研究では高齢者に着目する  
 <高齢者の身体的特徴>



高齢者の身体的特徴として、

- ・筋肉量の減少
- ・作業ミス
- ・しゃがみ作業の負担
- ・歩行速度の低下  
などが挙げられる

<オーダーピッキング作業の特徴>



一方で、実際の物流倉庫では複数のピッカーが同時に作業を行っており、通路幅が狭い場合に**ピッカー同士の混雑**が発生し、作業時間の遅延が発生！

・Fuら(2015)は、避難誘導の研究においてシミュレーションを用いて**歩行速度の異なる歩行者がいる場合に混雑が発生し、移動時間に影響を及ぼす**ことを明らかにした[4]

・Tompkinsら(2007)は、オーダーピッキング作業時間では**移動が作業時間の大半**を占めていると示した[5]

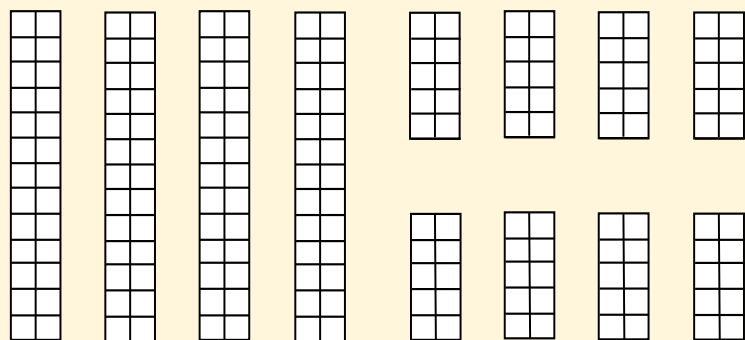
作業現場においても、歩行速度の低下は作業効率に影響を与える可能性がある

## <オーダーピッキング作業の効率化のための手法[2]>

### 倉庫の設計

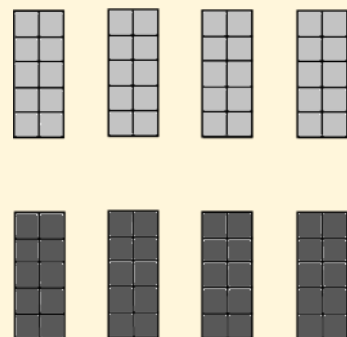
#### レイアウト

通路数や棚の配置などの倉庫自体の設計



#### 保管割当

商品の需要頻度や重量制約などに応じた保管場所の変更



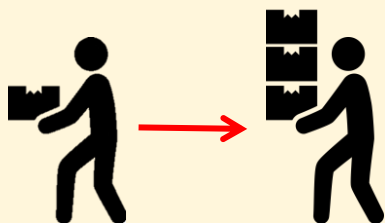
通常商品

人気商品

### ピッカーの動き

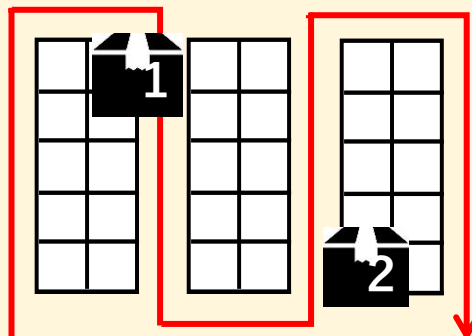
#### オーダーバッチング

一度のピッキングで回収する商品やオーダーの数の変更



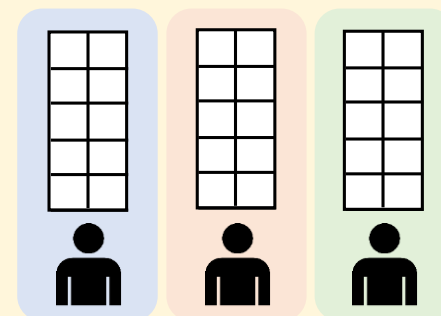
#### ルーティング

ピッカーのピッキング順序の変更



#### ゾーニング

各ピッカーに応じたピッキング範囲の変更

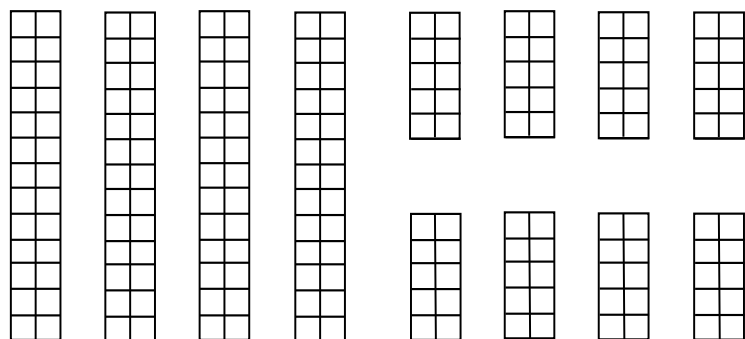


## <オーダーピッキング作業の効率化のための手法[2]>

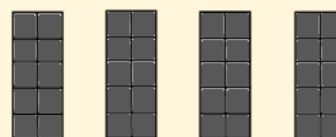
### 倉庫の設計

#### レイアウト

通路数や棚の配置などの倉庫自体の設計



本研究ではレイアウトとゾーニングを用いて混雑緩和を行う

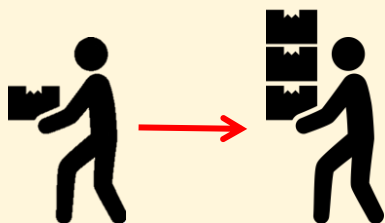


人気商品

### ピッカーの動き

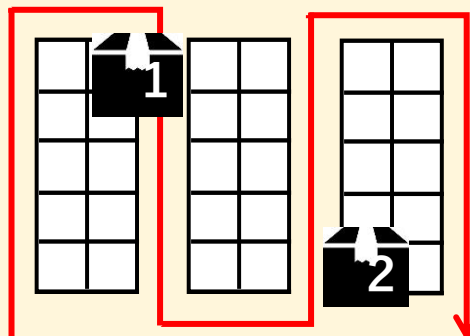
#### オーダーバッチング

一度のピッキングで回収する商品やオーダーの数の変更



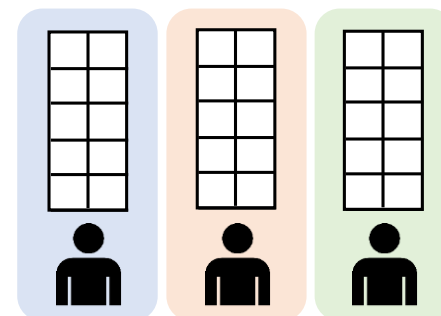
### ルーティング

ピッカーのピッキング順序の変更



### ゾーニング

各ピッカーに応じたピッキング範囲の変更





## 2. 先行研究と目的

### <文献調査の結果>

	レイアウト	ゾーニング	ピッカーの混雑	高齢者
Pohlら(2011)[6]	○	×	×	×
Yuら(2009)[7]	×	○	×	×
Tajimaら(2020)[8]	○	×	○	×
本研究	○	○	○	○

※ピッカー…ピッキングの作業者

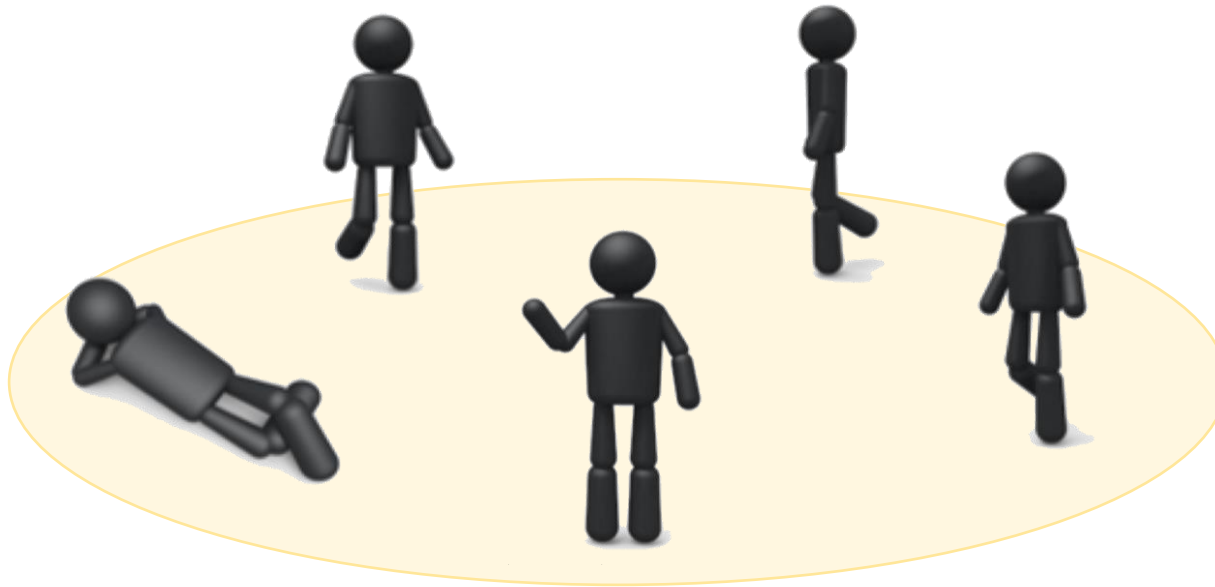
### 目的

オーダーピッキング作業において高齢者の身体的特徴のうち歩行速度の低下を考慮した上で、混雑緩和に対するレイアウトとゾーニングの効果エージェントベースシミュレーションを用いて調査する

## マルチエージェントシステム(以下、MAS)

各々特徴の異なる内部状態と行動ルールをもつ、多数のエージェントが集まったシミュレーションモデル

💡 高齢者のような身体的特徴の異なる作業者が表現できる！



## ソーシャルフォースモデル

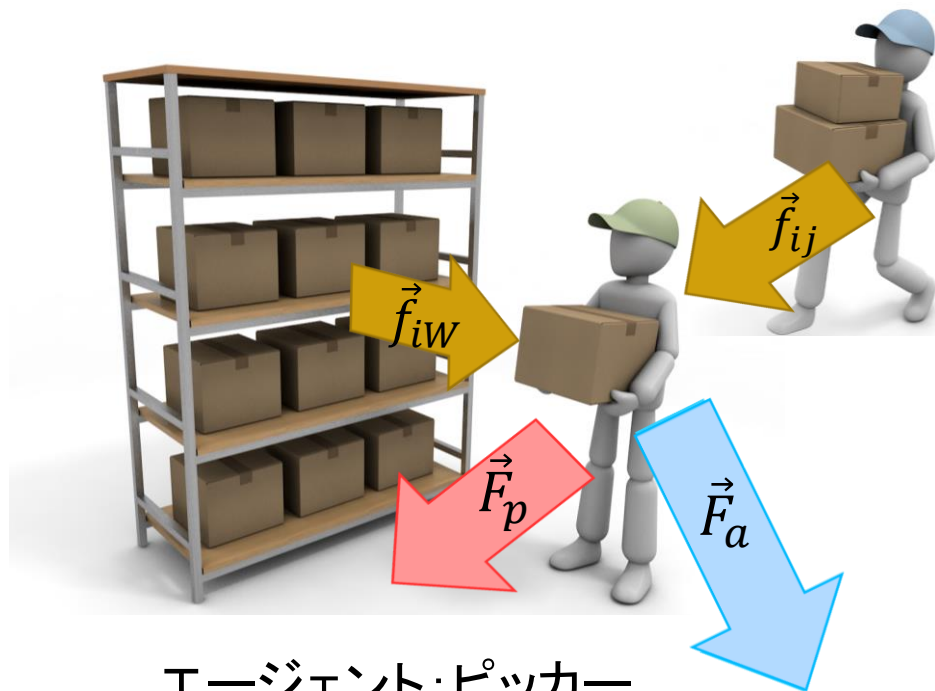
エージェントが他のエージェントや障害物から受ける力やそれにより生じる速度変化を力学ベースで表現したモデル

💡 オーダーピッキング作業における混雑が表現できる！

MASのうち、ソーシャルフォースモデルを用いてモデル化を行う

## ソーシャルフォースモデル

各エージェント  $i$  は質量  $m_i$  を持つ質点として表され、周囲の環境から様々な力を受けながら目的地へと進む。エージェント  $i$  は下記の運動方程式に基づいて行動する。



エージェント:ピッカー  
環境:倉庫内の壁や保管棚

エージェントが目的地へ戻ろうとする力

$$\vec{F}_p = m_i \frac{(v_{0i}\vec{e}_i(t) - \vec{v}_i(t))}{\tau_i}$$

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{F}_a = \vec{F}_p + \vec{F}_{int}$$

周囲の環境から受ける相互作用力

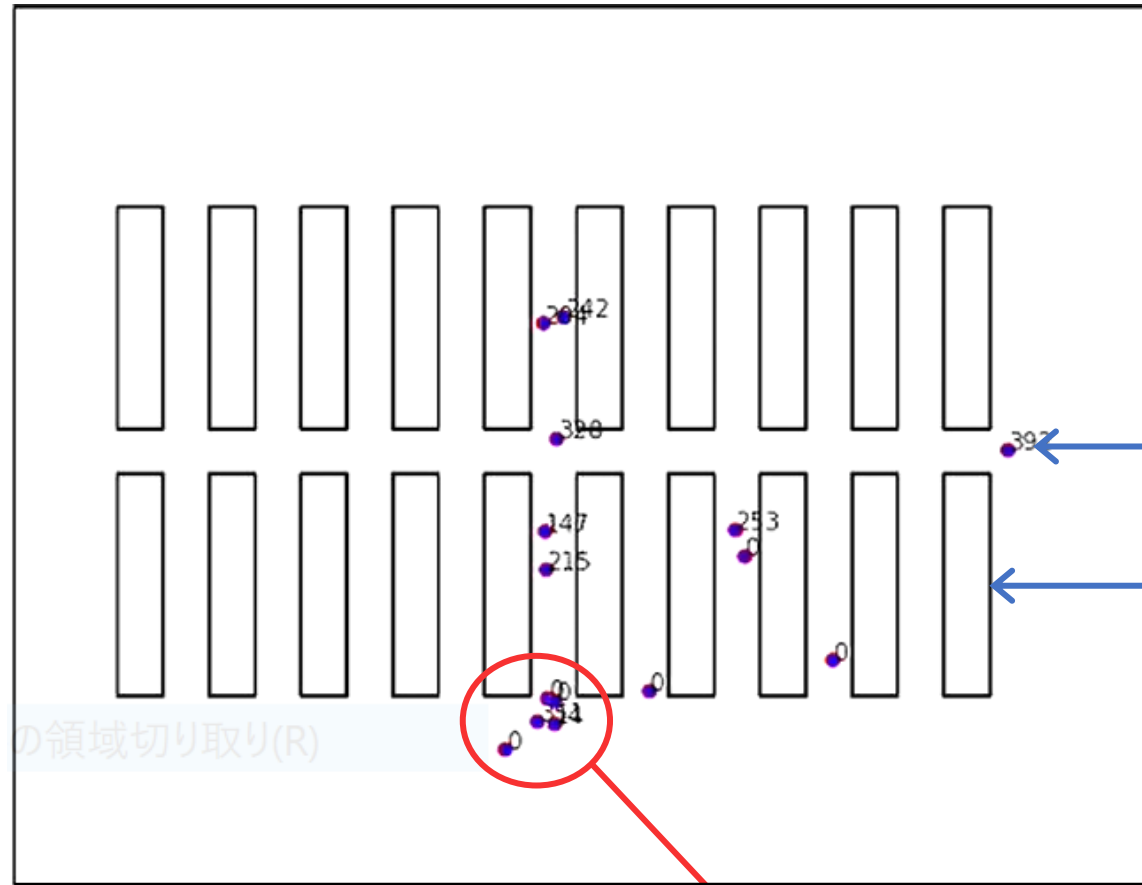
$$\vec{F}_{int} = \sum_{j(\neq i)} \vec{f}_{ij} + \sum_W \vec{f}_{iW}$$

- $v_{0i}$ : エージェント  $i$  の最適な速度
- $\vec{e}_i$ : 目的地に向かうベクトル
- $\vec{v}_i(t)$ : 現在の速度
- $\tau_i$ : 目的地への推進力(係数)
- $\vec{f}_{ij}$ : エージェント  $j$  からエージェント  $i$  に与える外力
- $\vec{f}_{iW}$ : 障害物  $W$  からエージェント  $i$  に与える外力

ピッカー同士の混雑の表現に適したソーシャルフォースモデルを用いて、  
オーダーピッキング作業をモデル化する

# 3. エージェントベースシミュレーション

<実際のソーシャルフォースモデルのキャプチャ画面>



入出庫点でピッカー同士の衝突や追い越しにより混雑が起きている様子

# 4. モデル設計 ピッカーの歩行速度の設定

## [文献調査]

若年の通常成人(男性)・・・1.19～1.59m/s

若年の通常成人(女性)・・・ 1.12～1.54m/s [9]

高齢者の歩行速度・・・[10]

年代別	性別	歩行速度[m/s]
65～69	男	1.21
	女	1.14
70～74	男	1.17
	女	0.95
75～79	男	1.08
	女	0.95
80～	男	0.88
	女	0.87

「物を運んでいる状態」の歩行速度のデータは見つからなかったため、自分で測定した。

## [歩行速度の設定]

文献調査の歩行速度に対して、自分で測定したデータを参考に「物を運んでいる状態」での歩行速度の低下を考慮して歩行速度を計算する。

成人の歩行速度を1.34m/sと仮定。**2割減→1.0m/sと設定**

高齢者の歩行速度を0.87～1.21m/sと仮定。筋肉量の減少などを考慮して**3割減→0.6～0.8m/sと設定**

## [自分で測定したデータ]

10m歩行テストを参考にして、実際に歩行速度を測定

台車・・・約15kg  
荷物・・・約60kg

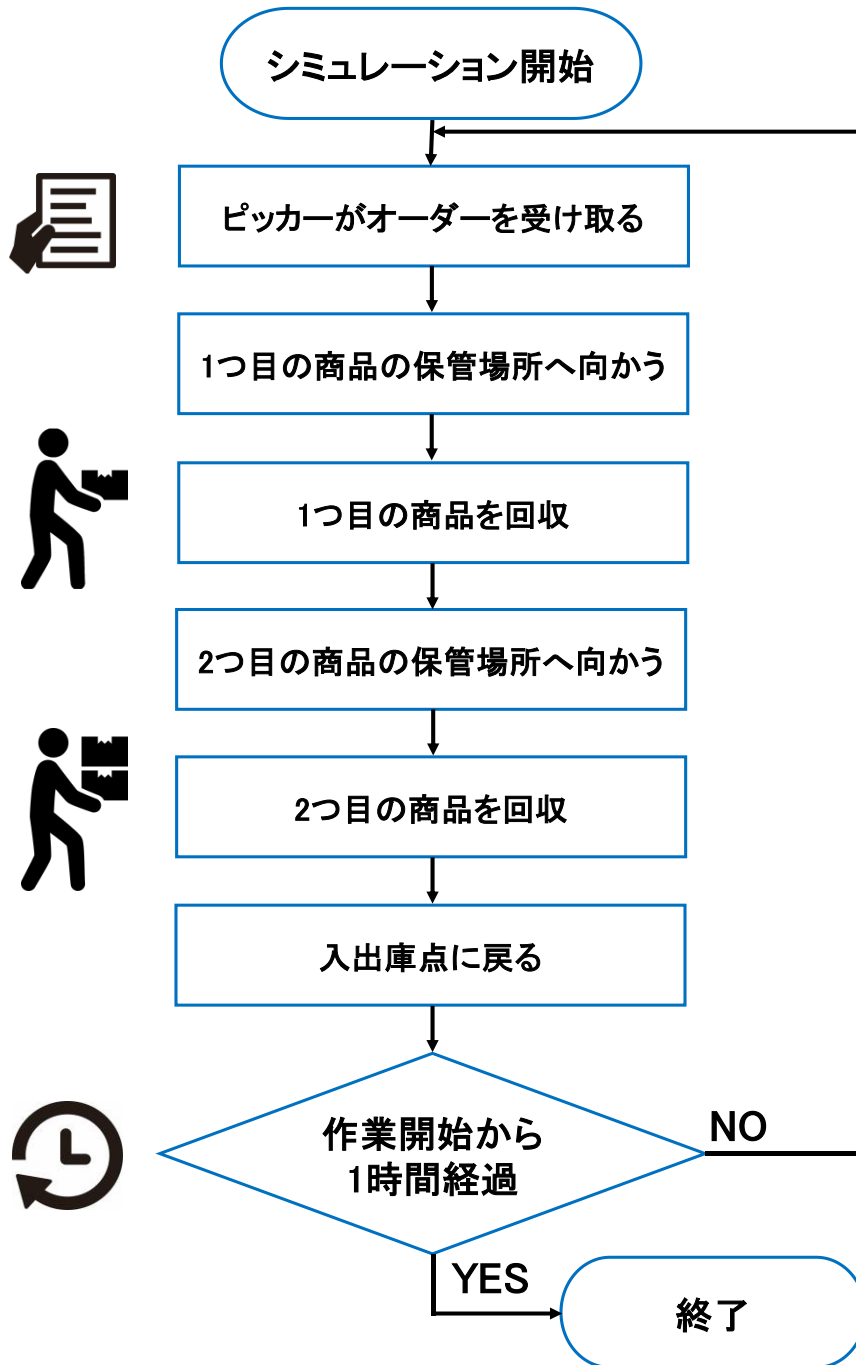


荷物なし	台車あり	台車+荷物
0.92	0.81	0.73

[m/s]

**荷物を運ぶと約2割減速**

# 4. モデル設計 ピッカーの設計

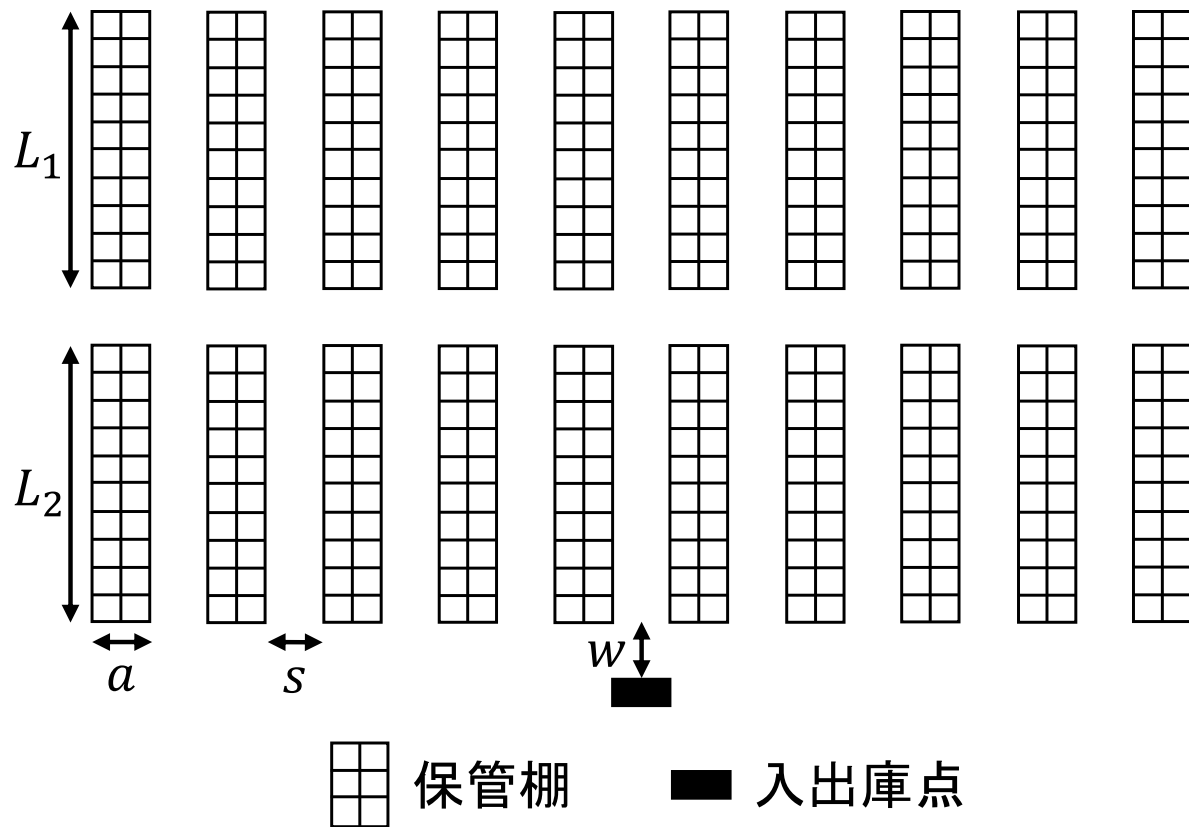


- ピッカーの1人当たりの体重  $m_i = 50\text{kg}$
- ピッカーの歩行速度  $v_i^p = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0\text{m/s}$

複数人によるオーダーピッキング作業を再現するためにピッカーグループを作成する。

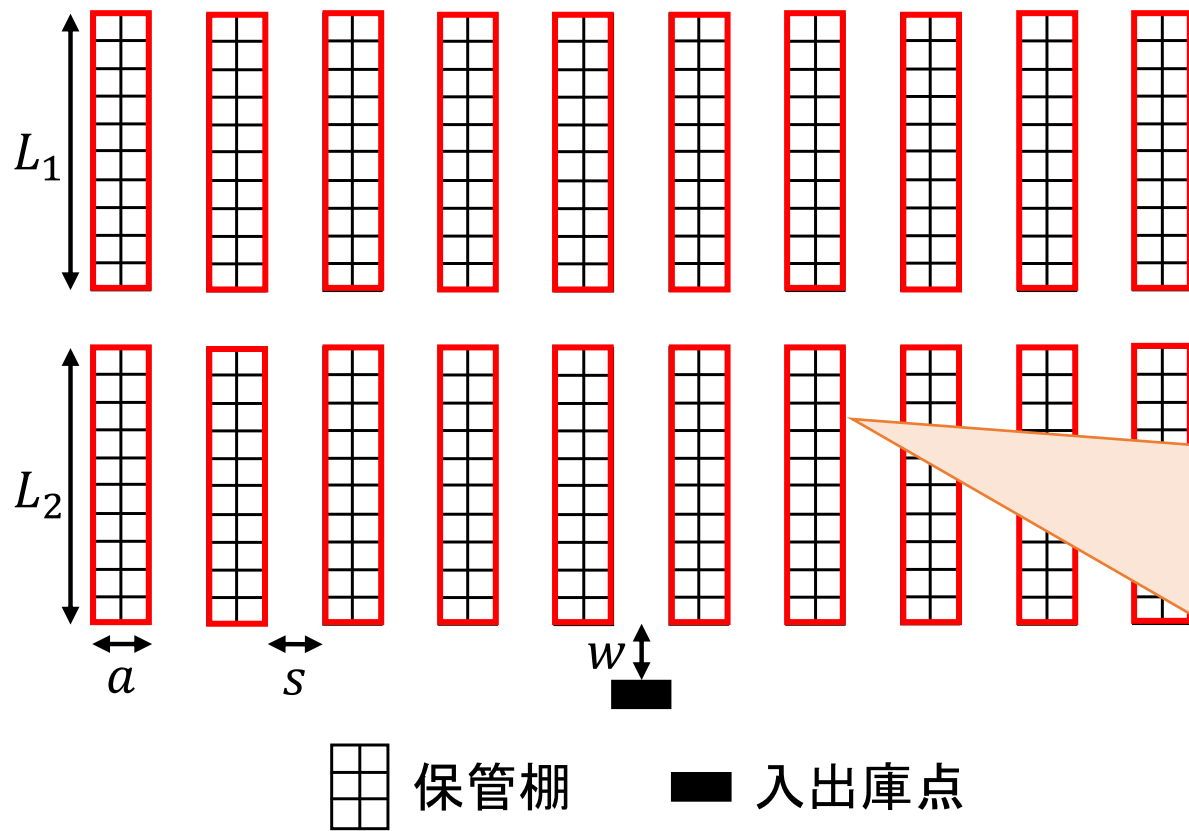
ここで歩行速度  $0.5\text{m/s}$  のピッカーをピッカーA、歩行速度  $1.0\text{m/s}$  のピッカーをピッカーBとする。

- ピッカーグループ
  - Aグループ：ピッカーA20人
  - Bグループ：ピッカーB20人
  - Cグループ：ピッカーA10人 + ピッカーB10人



$L_1, L_2$ : 保管棚1つあたりの長さ  
 $a$ : 保管棚1つあたりの幅  
 $s$ : 隣り合うピッキング通路間の距離  
 $w$ : 入出庫点から棚までの距離  
 $n$ : 通路数

- 通路幅が非常に狭い倉庫
- 横断通路の本数は1本
- 基本設計は  $L_1, L_2 = 4.0\text{m}$ ,  $s = 0.8\text{m}$ ,  $a = 0.8\text{m}$ ,  $w = 0.8\text{m}$ ,  $n = 10$  とする。
- 横断通路の位置が上の場合  $L_1 = 2.0\text{m}$ ,  $L_2 = 6.0\text{m}$ , 下の場合  $L_1 = 6.0\text{m}$ ,  $L_2 = 2.0\text{m}$  とする。
- 保管割当はランダム保管(各保管棚に対して一様な確率で回収を行う)とする



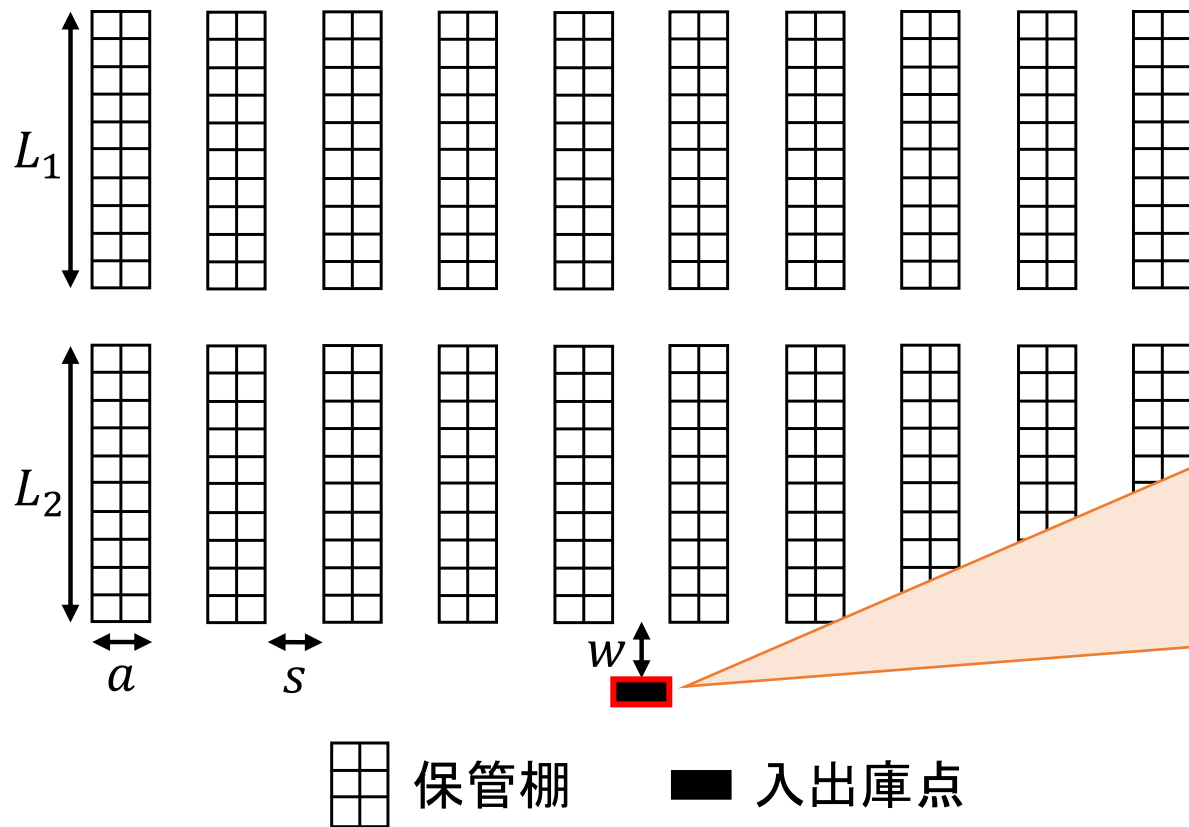
```
lines = [(1, 1, n*8+16, 1),  
         (1, L*2+28+ca*4, n*8 + 16, L*2-  
         ]  
  
for i in range(n):  
    lines.append((10+i*8, 14, 14+i*8, 1  
    lines.append((10+i*8, 14+L*2, 14+i  
  
for (x0, y0, x1, y1) in lines:  
    self.addObstacle(Polygon.Polygon(  
    )
```

※プログラム一部抜粋

lines(リスト), self.addObstacleを用いて  
壁や保管棚となるオブジェクトを作成

- 通路幅が非常に狭い倉庫
- 横断通路の本数は1本
- 基本設計は $L_1, L_2 = 4.0\text{m}$ ,  $s = 0.8\text{m}$ ,  $a = 0.8\text{m}$ ,  $w = 0.8\text{m}$ ,  $n = 10$ とする。
- 横断通路の位置が上の場合  $L_1 = 2.0\text{m}$ ,  $L_2 = 6.0\text{m}$ , 下の場合  $L_1 = 6.0\text{m}$ ,  $L_2 = 2.0\text{m}$  とする。
- 保管割当はランダム保管(各保管棚に対して一様な確率で回収を行う)とする

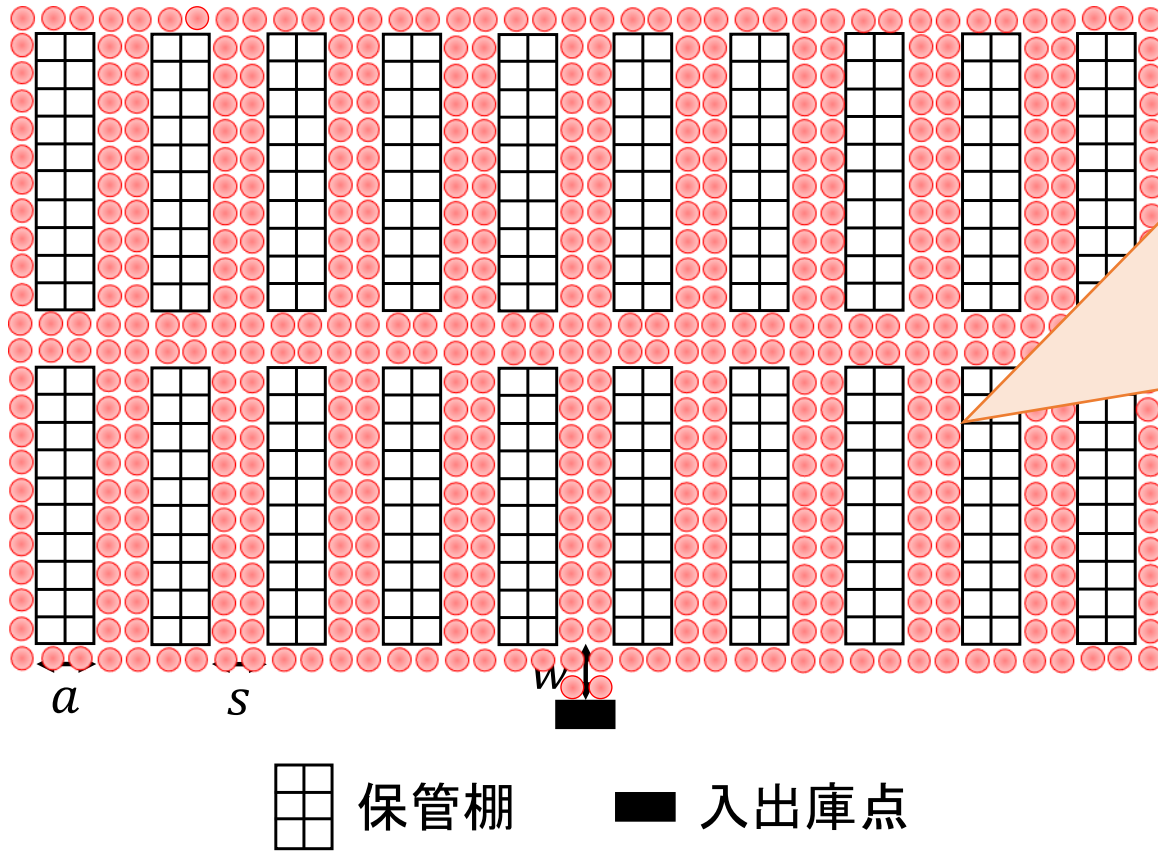




```
# 入出庫点経路ID  
self.gate = [0]
```

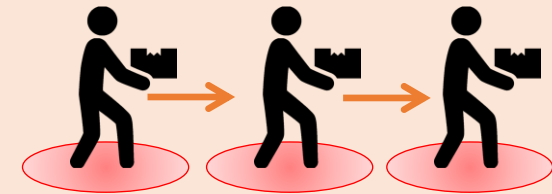
self.gateを用いてピッカーの出発地点である入出庫点を作成  
この点からピッカーは生成され、商品を回収したピッカーは入出庫点に戻ってくる。

- 通路幅が非常に狭い倉庫
- 横断通路の本数は1本
- 基本設計は $L_1, L_2 = 4.0\text{m}$ ,  $s = 0.8\text{m}$ ,  $a = 0.8\text{m}$ ,  $w = 0.8\text{m}$ ,  $n = 10$ とする。
- 横断通路の位置が上の場合  $L_1 = 2.0\text{m}$ ,  $L_2 = 6.0\text{m}$ , 下の場合  $L_1 = 6.0\text{m}$ ,  $L_2 = 2.0\text{m}$  とする。
- 保管割当はランダム保管(各保管棚に対して一様な確率で回収を行う)とする



```
# 経路ポイント作成  
self.addPathPoint(4*n+8, 8, 2)  
  
for i in range(L):  
    self.addPathPoint(9, 13+L*2 - i*2, 0.95)
```

self.addPathPointを用いて各保管棚前と通路上に経路ポイントを作成  
ステップ毎に経路ポイント間を進むことでピッカーの移動行動を再現する。

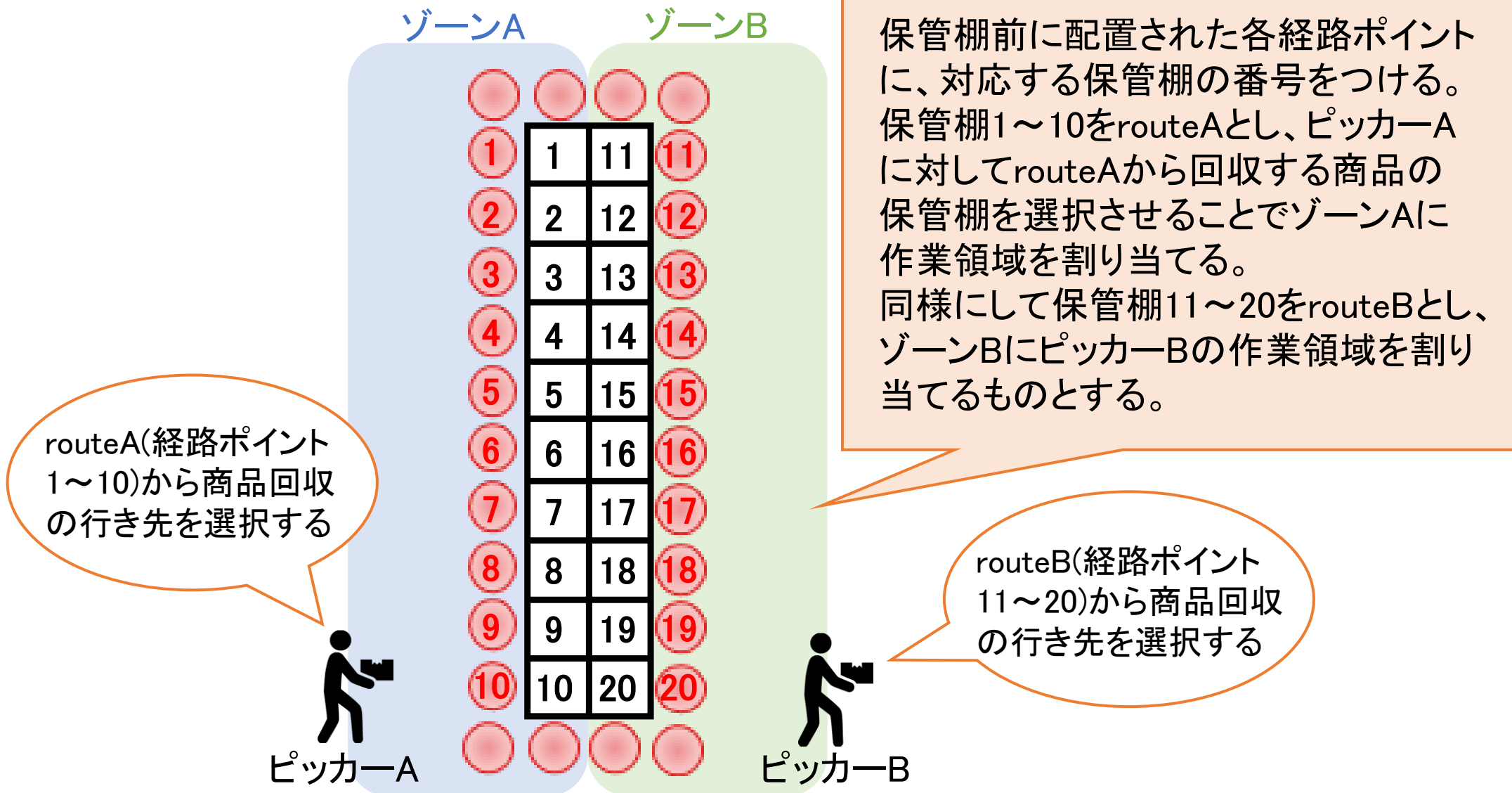


- 通路幅が非常に狭い倉庫
- 横断通路の本数は1本
- 基本設計は $L_1, L_2 = 4.0\text{m}$ ,  $s = 0.8\text{m}$ ,  $a = 0.8\text{m}$ ,  $w = 0.8\text{m}$ ,  $n = 10$ とする。
- 横断通路の位置が上の場合  $L_1 = 2.0\text{m}$ ,  $L_2 = 6.0\text{m}$ , 下の場合  $L_1 = 6.0\text{m}$ ,  $L_2 = 2.0\text{m}$  とする。
- 保管割当はランダム保管(各保管棚に対して一様な確率で回収を行う)とする

# 4. モデル設計 ゾーニングの設計

## <ゾーニング>

各ピッカーに応じたピッキング範囲の割り当て…ゾーンAにピッカーA、ゾーンBにピッカーBの作業領域を割り当てる

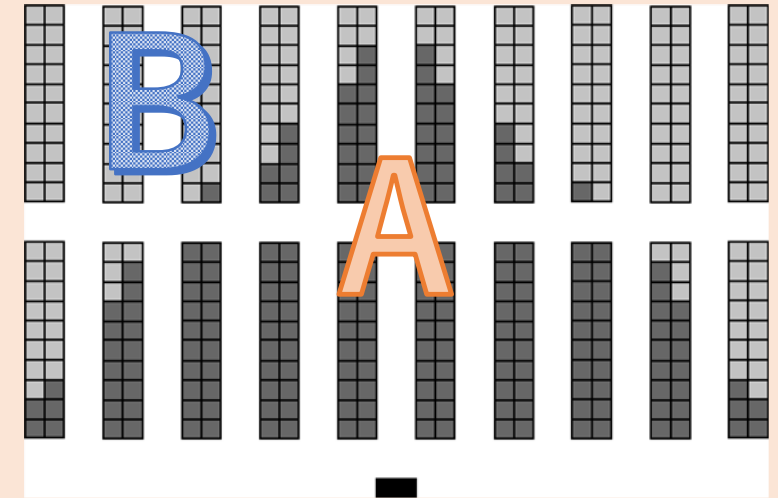
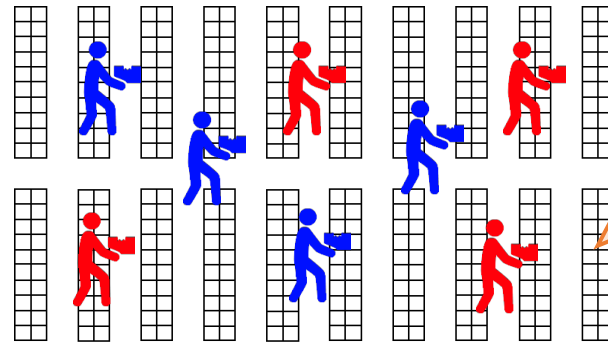


# 5. 実験条件 ゾーニングの設定

## <ゾーニング>

ピッカーA  
(歩行速度0.5m/s)

ピッカーB  
(歩行速度1.0m/s)



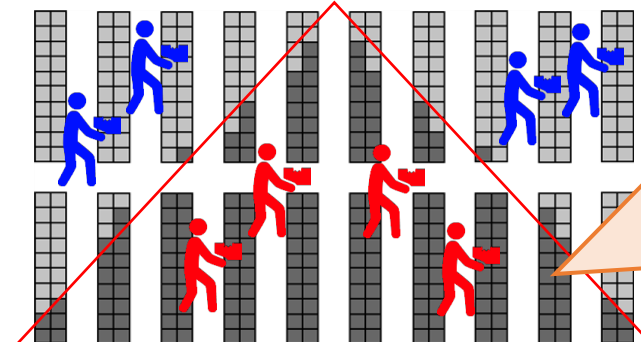
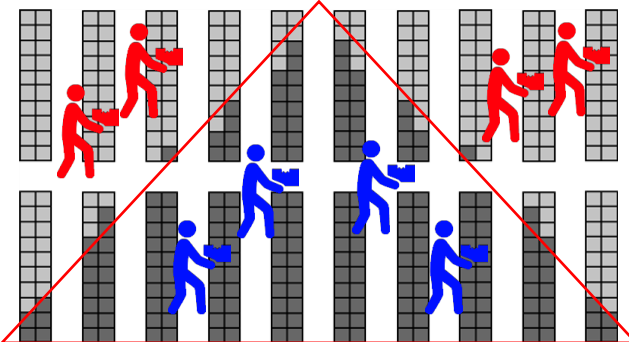
倉庫内の保管場所を保管棚の数が等しくなるようにゾーンA、Bに二分割

ピッカーグループ(20人)を各ゾーンに10人ずつ割り当てる。

異なる歩行速度のピッカーが混合したピッカーグループに対するゾーニングは2種類あり、パターン①とパターン②を設定する。

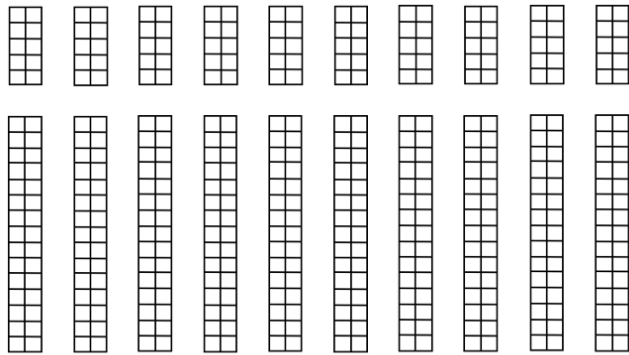
パターン①

パターン②

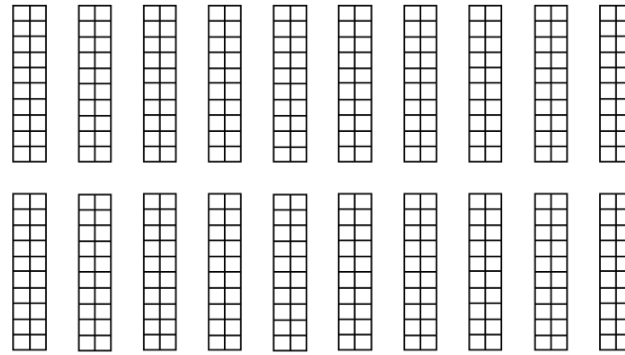


# 5. 実験条件

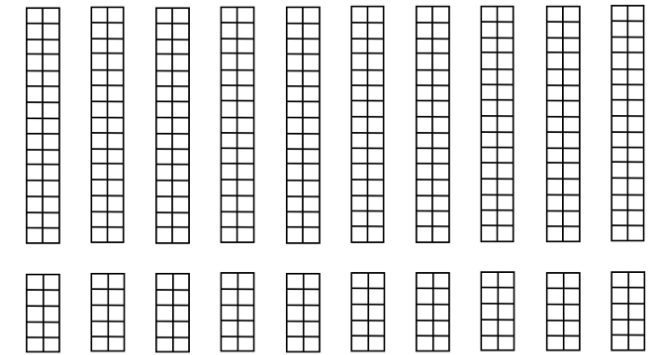
## レイアウト変更後の倉庫の図



横断通路の位置: 上

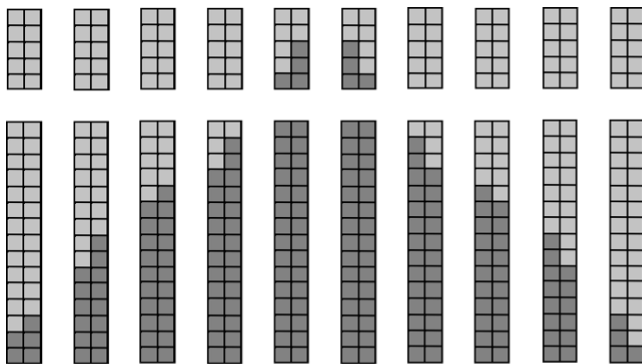


横断通路の位置: 真ん中  
(基本設計)

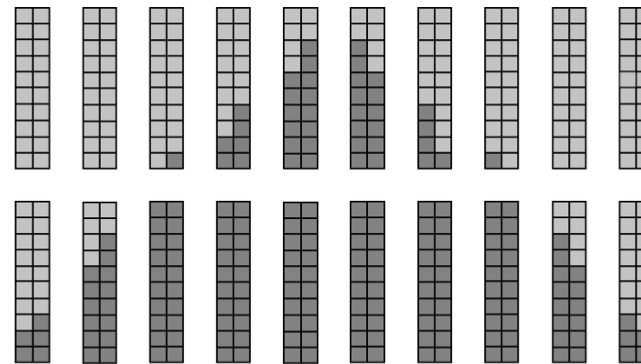


横断通路の位置: 下

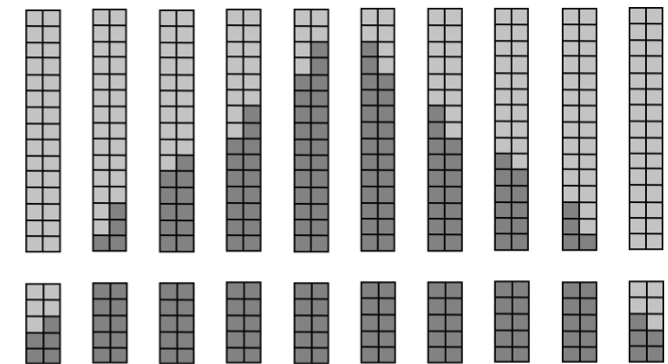
## ゾーニング後の倉庫の図



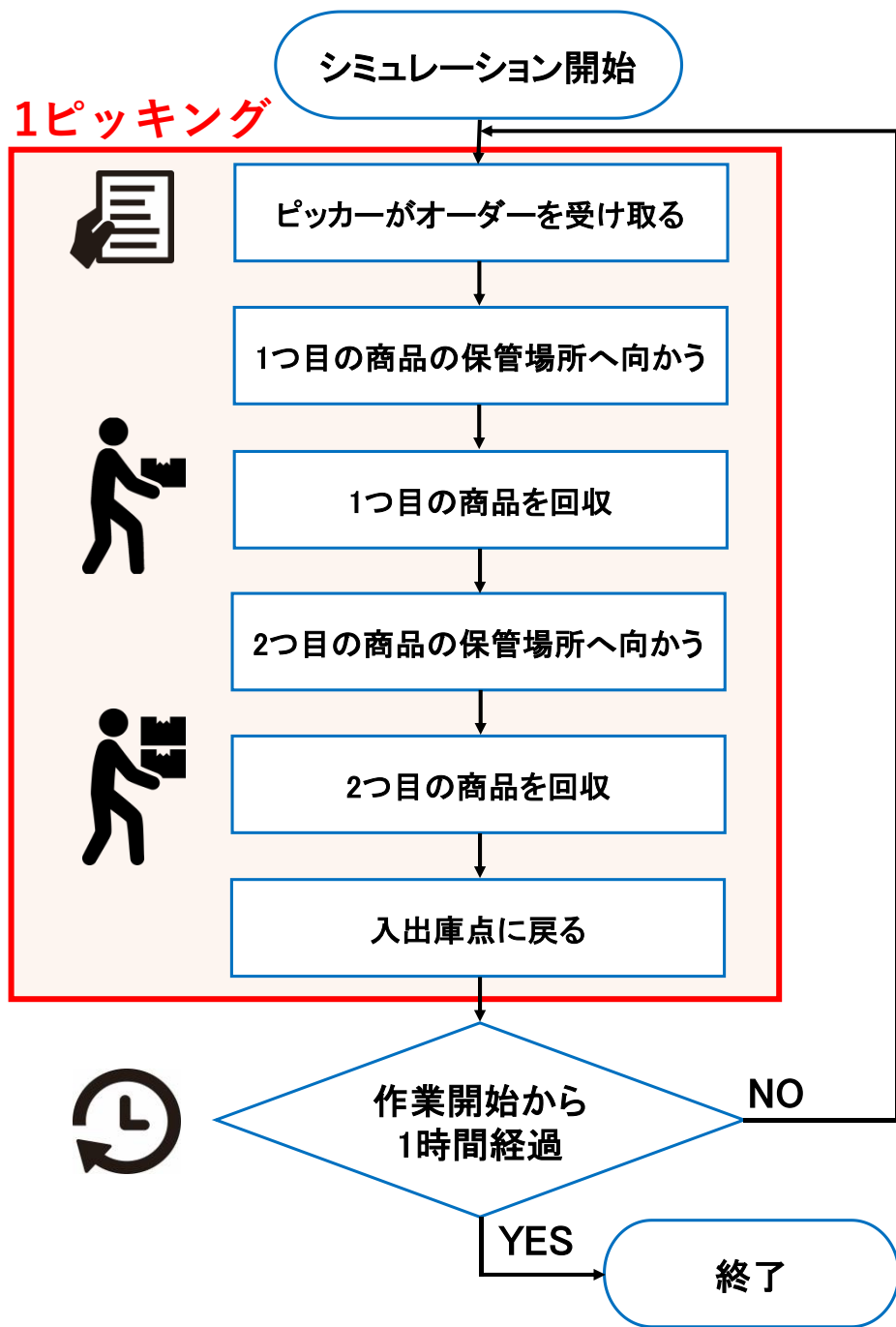
横断通路の位置: 上



横断通路の位置: 真ん中  
(基本設計)



横断通路の位置: 下



## 時間設定

1時間のオーダーピッキング作業を想定

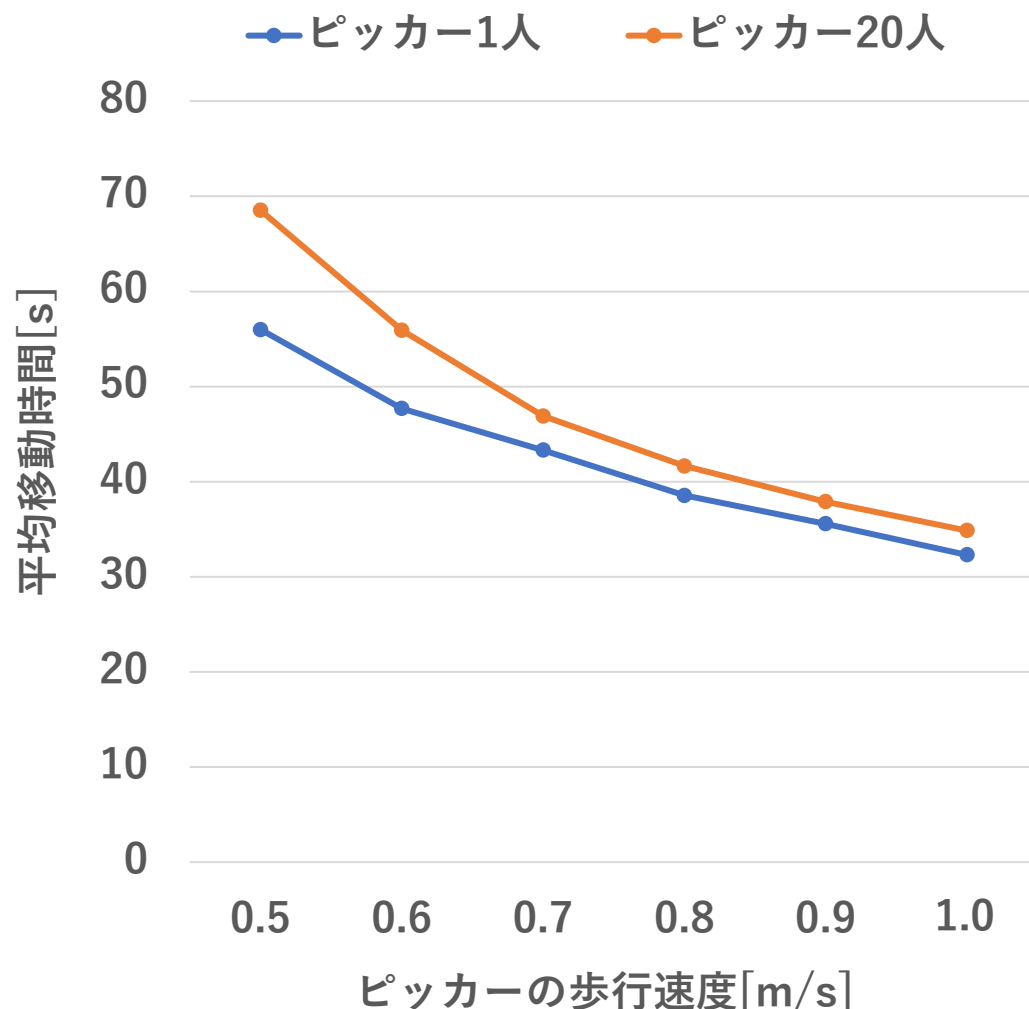
## 実験計画

①ピッカー1人/ピッカーグループの作業を比較  
→歩行速度の異なる作業者による混雑の影響を調査

②一定の歩行速度のピッカーグループ/異なる歩行速度のピッカーが混合したピッカーグループに対してレイアウト変更とゾーニングを行う  
→混雑緩和のためのレイアウトとゾーニングの効果を調査

## 評価指標

ピッカー1人当たりの1ピッキングにかかる時間の平均値を用いて評価



- ・レイアウト…基本設計の固定
- ・ゾーニングなし
- ・ピッカーの歩行速度と人数を変更

**考察：**ピッカー1人よりピッカー20人の平均移動時間が長い。これはMASを用いて複数人によるオーダーピッキング作業において発生する混雑を表現できたため、作業時間が遅延したことが要因と考えられる。

また、ピッカーの歩行速度が遅くなるほど、ピッカー1人と20人の間に生じる平均移動時間の差が大きい。ここから、歩行速度の遅いピッカー同士による混雑は悪化するとわかる。

MASを用いて複数ピッカーによる混雑を表現できている→MASの分析の有効性が高い  
歩行速度の異なるピッカーによって混雑悪化→混雑緩和のためにレイアウトとゾーニングを行う

# 7. 実験結果

ピッカーA: 歩行速度0.5m/s  
 ピッカーB: 歩行速度1.0m/s  
 Aグループ: ピッカーA20人  
 Bグループ: ピッカーB20人  
 Cグループ: ピッカーA10人+ピッカーB10人

- ・レイアウト…横断通路の位置変更
- ・ゾーニングなし
- ・ピッカー複数人…グループ変更有

1ピッキングにかかる平均移動時間[s]

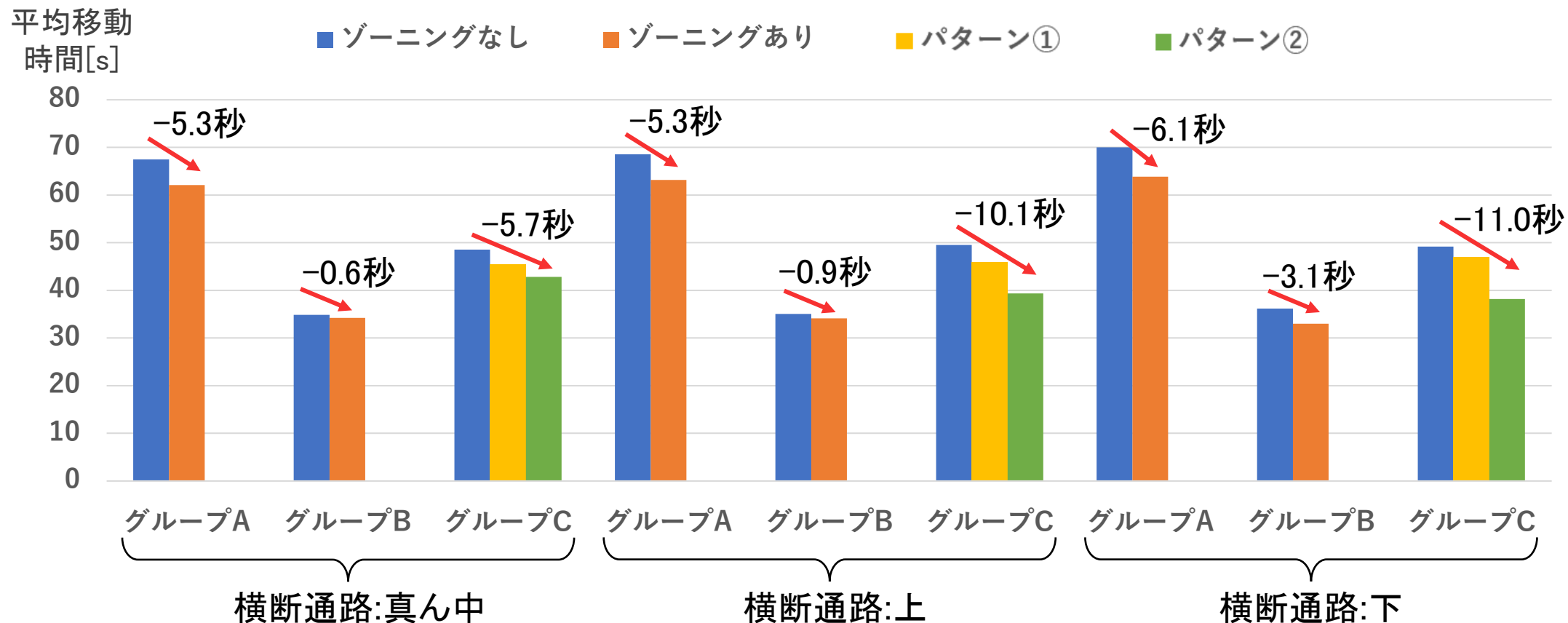
	横断通路の位置		
	上	真ん中	下
グループA	68.54	67.48	70.01
グループB	35.08	34.87	36.16
グループC	49.52	48.54	49.20

**考察:** 全てのピッカーグループにおいて横断通路の位置が真ん中の場合の平均移動時間が最も短い。これは、横断通路を上/下に配置すると倉庫下/上の通路を利用する際の移動距離が長くなるため、作業効率が悪化すると考えられる。

ピッカーグループにおいてゾーニングなしの場合、横断通路の位置は真ん中が最適



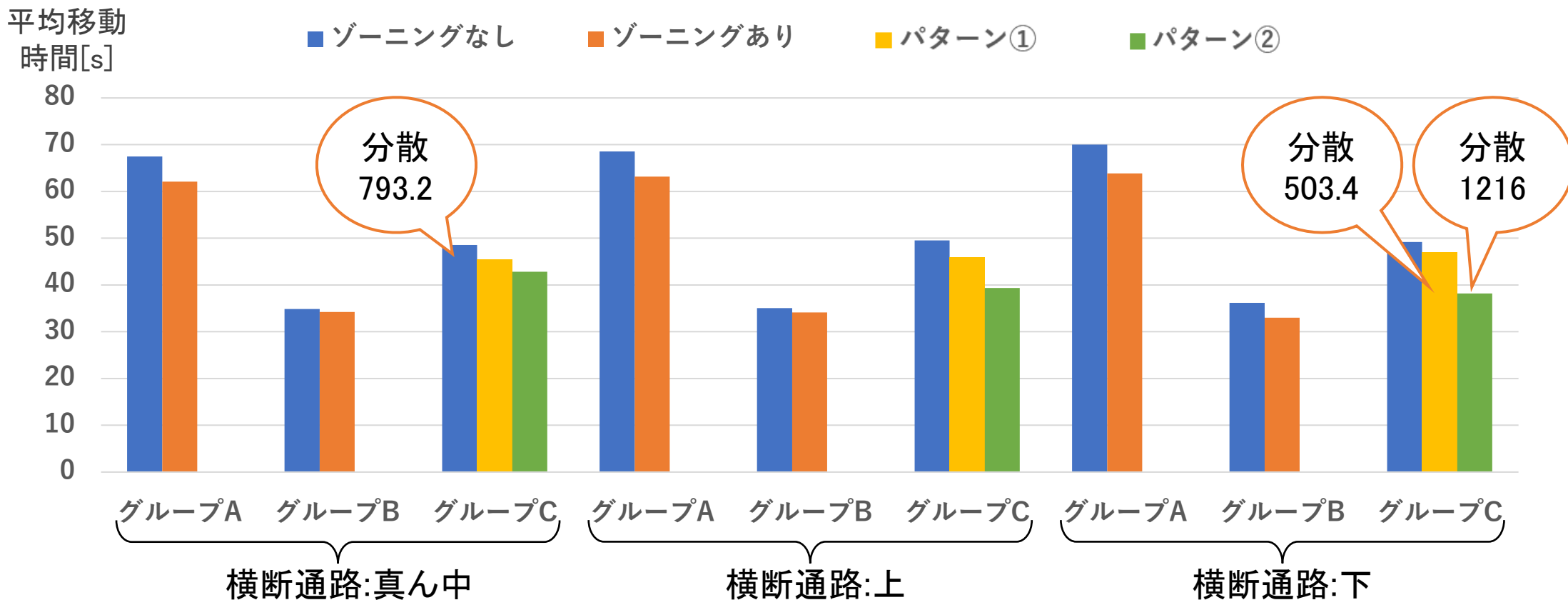
# 7. 実験結果



**考察：**ピッカーグループや横断通路の位置に依らず、ゾーニングを行うと平均移動時間が短縮され、グループB,グループA,グループCの順に平均移動時間が短縮された。このことから、ゾーニングによりピッカー同士による混雑が緩和され、さらに歩行速度の異なるピッカーの混合したピッカーグループに対するゾーニング(パターン②)がとりわけ効果的であるとわかった。

作業者の歩行速度や横断通路の位置に依らず、ゾーニングは効果的

# 7. 実験結果



グループCに着目し、基本設計(ゾーニングなし)と平均移動時間が短縮された結果の分散を示す。分散が小さい場合は各ピッカーのピックアップにかかる時間が安定していることを示す。

**考察：**パターン②では、歩行速度の遅いピッカーAがゾーンBに割り当てられており、ピックアップにかかる平均移動距離が長くなるため、平均移動時間がさらに長くなる。一方でピッカーBはゾーンAに割り当てられ、平均移動時間がさらに短くなるため、分散が大きくなっている。パターン②は最も平均移動時間が短縮されたが、1ピックアップにかかる時間のばらつきが大きく、ピッカーAとピッカーBの処理する仕事量に差が生じるという問題が発生している。

今回のゾーニングでは作業効率と仕事量の偏りがトレードオフの関係になっている

## 目的

エージェントベースシミュレーションを用いてオーダーピッキング作業における高齢者の身体的特徴のうち歩行速度の低下を考慮したレイアウト・ゾーニングの効果を調査する。

## 提案手法

エージェントベースシミュレーションを用いて高齢者の歩行速度の低下を考慮し、横断通路の位置やゾーニングの有無を変更し、オーダーピッキング作業における歩行速度の異なるピッカー/ピッカーグループの平均移動時間を評価する。

## 結論

オーダーピッキング作業において歩行速度の低下の考慮が必要であり、複数人の作業員による混雑に対するMASによる分析の有効性が高い。ゾーニングにより混雑が緩和され、特に高齢者の混合した作業員グループに対するゾーニングは効果的であったが、作業効率と仕事量の偏りにトレードオフの関係が見られた。

## 今後の課題

高齢者の身体的特徴として作業ミスや筋肉量の減少、しゃがみ作業による身体的負担などを考慮する必要がある。また、運動方程式においても筋肉量の減少に伴うカートや床に対する抵抗力の項を追加する。また、歩行速度の設定において実際の倉庫で測定したデータを参考にし、個人の身体的特徴と歩行速度の関係をより詳細に分析する必要がある。さらには、女性や障がいを持った方の身体的特徴を調査し、様々なエージェントによる作業を再現し、多様な人材が活躍できる作業現場を目標とした統合モデルを作成することも今後の課題である。

## 9. 参考文献

- [1]総務省統計局「統計Today No.141 急拡大するネットショッピングと電子マネーの利用 一家計消費状況調査 2018年の結果から—」2019年4月10日, <https://www.stat.go.jp/info/today/141.html> (2021年12月2日閲覧)
- [2]De Koster, René, Tho Le-Duc, and Kees Jan Roodbergen.: Design and control of warehouse order picking: A literature review, *European journal of operational research* Vol.182, No.2, pp.481–501(2007)
- [3]国土交通省「物流倉庫における労働力調査 調査報告書」<https://www.milt.go.jp/common/000043954.pdf> (2021年12月2日閲覧)
- [4] Fu, Zhijian, et al. “A floor field cellular automaton for crowd evacuation considering different walking abilities.” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 420 pp.294–303 (2015)
- [5]Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., and Tanchoco, J. M. A.: *Facilities planning*, John Wiley & Sons,(2010)
- [6]Pohl, Letitia M., Russell D. Meller, and Kevin R. Gue.: Turnover-based storage in non-traditional unit-load warehouse designs, *IIE Transactions* Vol.43, No.10, pp.703–720 (2011)
- [7]Yu, Mengfei, and René BM De Koster. “The impact of order batching and picking area zoning on order picking system performance.” *European Journal of Operational Research* Vol198, No.2 pp.480–490 (2009)
- [8]Tajima, E., Suzuki, M., Ishigaki, A., Hamada, M., and Kawai, W.: Effect of picker congestion on travel time in an order picking operation, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol.14, No.5, (2020),
- [9]牧浦大祐, et al. “歩行の安定性に性差は存在するのか?— 加速度計を用いた歩行解析による検討—.” *理学療法科学* Vol.25, No.6, pp.923–928, (2010)
- [10]齋藤宏, 長崎浩「臨床運動学」第3版, 医歯薬出版株式会社(2008)
- NTT DATA, S4(S-Quattro Simulation System) <https://www.msi.co.jp/s4/>