

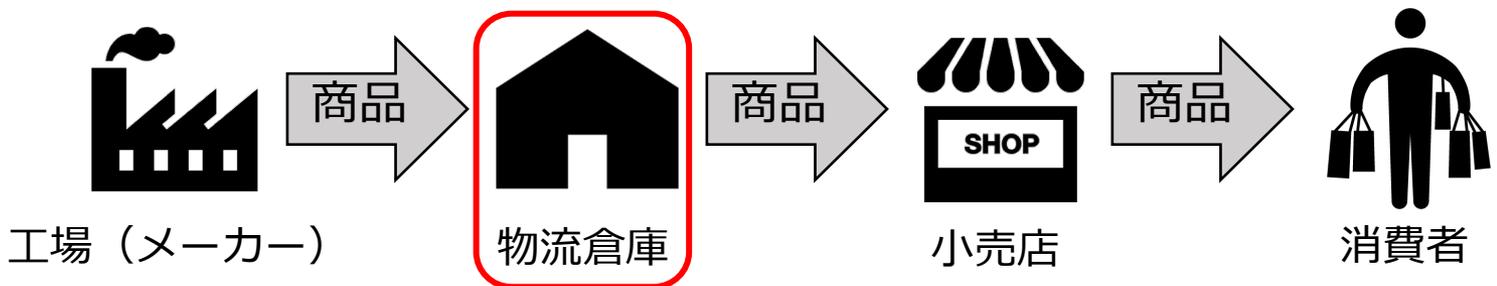
物流倉庫における作業時間と作業者の心理的ストレスを 考慮したゾーニングを用いた動的保管割当変更法

東京理科大学大学院 理工学研究科経営工学専攻

市川聖也, 石垣綾

1. 背景

< サプライチェーン >



- ・顧客ニーズの多様化
- ・他社との競合の激化



需要が変動する中で
多種多様な商品を素早く
顧客に届ける必要がある



 物流倉庫 : メーカーと小売店の間に位置、サプライチェーンの中核

サプライチェーンの効率化を実現するには物流倉庫内の作業効率化が重要

1. 背景



物流倉庫内の作業

- ・ 入荷
- ・ 保管
- ・ **オーダーピッキング**
- ・ 出荷

オーダーピッキング：顧客のオーダーを満たすために
保管棚から商品を回収する作業

物流倉庫内の作業において、最も時間/コストがかかる作業
(Le-Ducら 2005, Kosterら 2007)

物流倉庫の自動化は進んでいるが、特に小規模倉庫では手作業が主流

- ・ 手作業の方が急な変更（棚の配置変更など）に柔軟に対応可能
- ・ 機会の導入コストが高額・・・

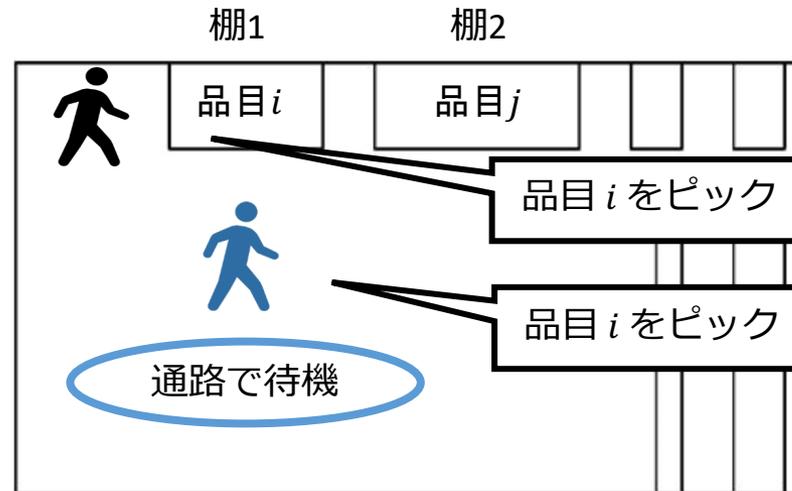
物流倉庫の作業効率化には、手動オーダーピッキングの作業効率化が重要

1. 背景

作業者が複数存在する場合の待ち時間

ある棚で他の作業者がピッキングしている場合、同じ棚で複数人がピッキングを行うことはできない (Gilsら 2019)

→他の作業者のピッキングが終了するまでの待ち時間が発生



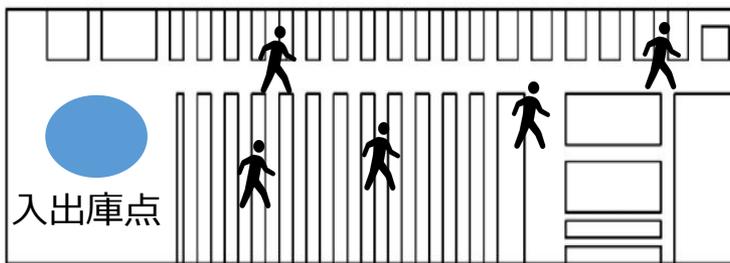
作業者が複数存在する場合、混雑により待ち時間が発生

1. 背景

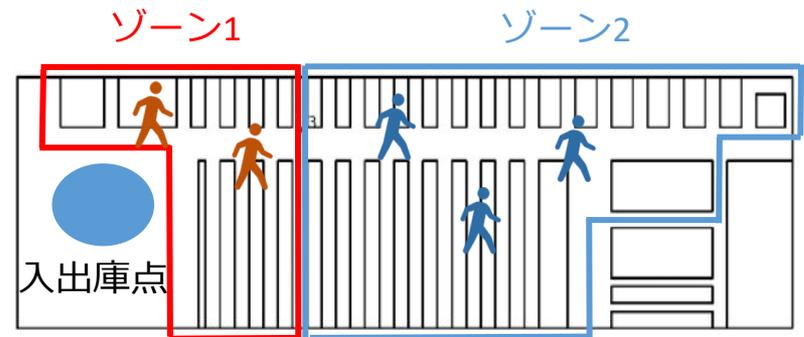
ゾーニング

オーダーピッキングにおけるゾーニング (Kosterら 2007, Parikhら 2008)

- 物流倉庫内をいくつかのゾーンに分割し、エリアごとに作業者を割り当てる
- 作業者同士の混雑を減少
- 棚や商品の位置を覚えるなど、学習効果の向上



ゾーニング考慮なし (ランダムにピッキング)



ゾーニング

複数の作業者が同時に作業を行うと混雑が発生・・・

→ ゾーニングを行うことで、作業者の混雑を削減可能

1. 背景

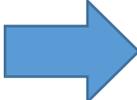
作業者のストレス

身体的ストレス（作業者単独）

- ・ 複数の棚レイアウトにおいて、作業時間および疲労を評価可能なモデルの提案 (Calzavaraら 2017)
→ オーダーピッキングの際、作業者が商品を運び続けることにより疲労が蓄積

心理的ストレス（作業者複数）

- ・ 心拍変動を用いたストレス計測に関する研究 (石田ら 2016)
→ 自分のパーソナルスペースに侵入した人数が増加すると心拍間隔が短くなり、心理的ストレスが増加
- ・ 「不用意な時間待ちを強いられる」事態は、心理的ストレスをもたらす (岩田 1994)
→ 作業が終了するまでの心理的待ちストレスが発生

作業者のストレス増加  作業者の怪我
作業効率の低下

ストレスを考慮したオーダーピッキングの作業効率化が必要

1.背景

オーダーピッキングに関する研究

< 評価項目 >

< 作業効率のために考慮すべき要素 >

	特徴	作業時間	身体的ストレス	心理的ストレス	倉庫レイアウト	保管割当	オーダーバッチング	ルーティング
Battiniら (2016)	需要変動下において、作業時間とストレスを評価可能な保管割当変更を提案	○	○	×	×	○	×	×
Calzavaraら (2017)	棚の形状が作業時間と作業者のストレスにどのように影響を及ぼすかを評価	○	○	×	○	×	×	×
本研究	需要変動下において複数人の作業者が存在する場合、作業時間と心理的ストレスを評価可能な保管割当変更法を提案	○	×	○	×	○	×	×

従来研究の問題点

オーダーピッキングにおいて、複数の作業者を考慮した心理的ストレスを考慮していない

2.目的

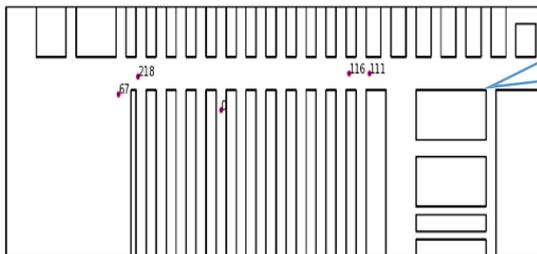
目的

商品の需要変動環境下において、作業時間および心理的ストレスを評価可能な、ゾーニングを用いた保管割当変更モデルの提案

- ・ マルチエージェントシミュレーションの概要
- ・ 提案モデルに必要な要素の説明
- ・ ゾーニングを用いた保管割当変更モデルの提案、数値実験

----- 提案手法をシミュレーションに実装 -----

< マルチエージェントシミュレーション >



< 保管割当変更 >

保管割当変更 → ピッキング→ゾーニング
考慮する項目：作業時間、心理的ストレス

3. マルチエージェントシミュレーション

本研究の特徴

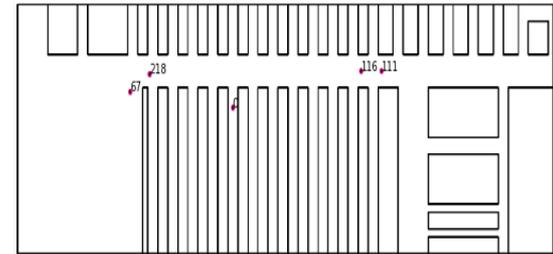
< 作業時間と心理的ストレスを考慮 >

- 複数の作業者が同時に作業
- 作業者が近づくことで心理的ストレス増加
- 作業の待ち時間により心理的ストレス増加

評価手法

< マルチエージェントシミュレーション >

- 複数の作業者を考慮可能
- 他の作業者や障害物からの外力を考慮して移動
- 複数の作業者の競合/混雑を表現可能



複数の作業者を考慮する場合、マルチエージェントシミュレーションが適切

(数理モデルは対象モデルに対して限定的かつ心理的ストレスの評価が困難)

3. マルチエージェントシミュレーション

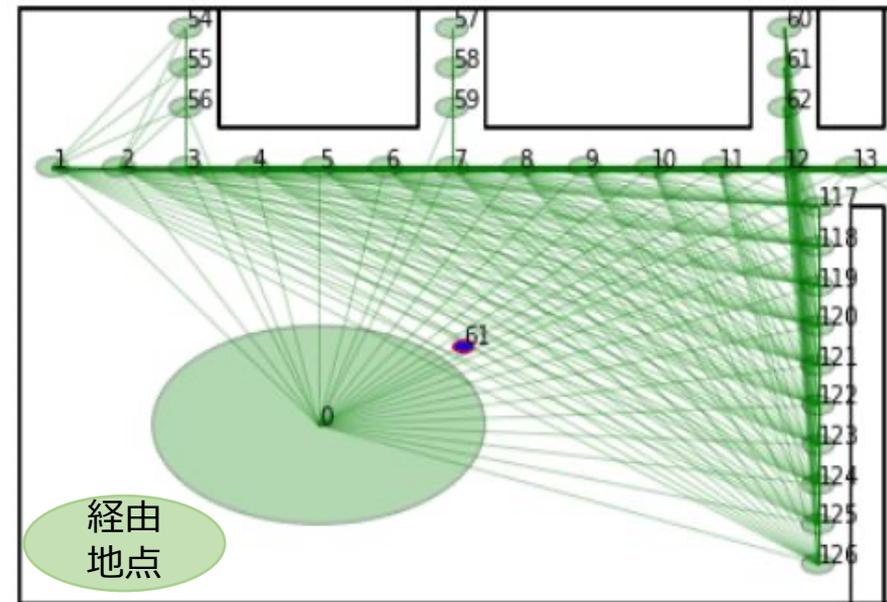
S4 simulation system

- 作業者の動き方（進行方向、速度）を決定する力学的モデル
- 作業者を平面内で移動する粒子とみなす
- 他の作業者や障害物から外力が与えられる
- 作業者は目的地として与えられた経路地点の方向へ移動する

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = m_i \frac{v_{0i}\vec{e}_i(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \vec{f}_{ij} + \sum_W \vec{f}_{iW} \quad (1)$$

作業者が従う運動方程式(SFM)

- \vec{e}_i : 目的地に向かうベクトル
- $\vec{v}_i(t)$: 現在の速度
- \vec{f}_{iW} : 障害物 W から歩行者 i に与える外力
- v_{0i} : 歩行者の最適速度
- \vec{f}_{ij} : 歩行者 j から歩行者 i に与える外力
- τ_i : 目的地への推進力（係数）



経路地点の例

作業者の経路地点への移動をピッキング作業と表現

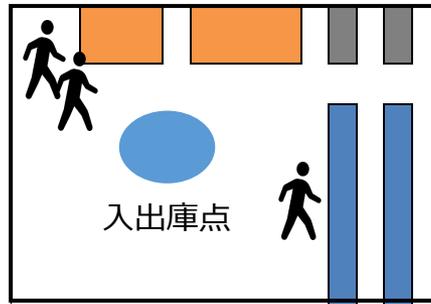
4.提案モデルに必要な要素

4.1.モデルの流れ

入力データ
(ExcelからS4へ入力)

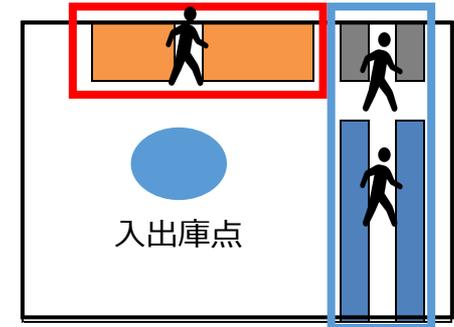
- ・保管割当パターン
- ・需要
- ・ゾーニングパターン

ピッキング



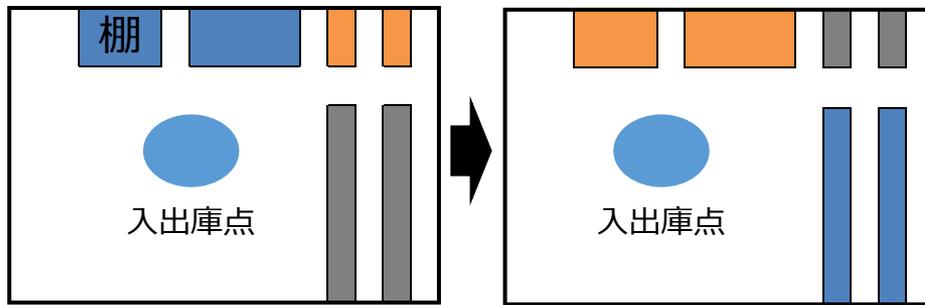
- ・ピッキング時間/ストレスの計算

ゾーニング



- ・通常/動的ゾーニング
- ・ピッキング時間/ストレスの計算

保管割当変更



- ・保管割当変更時間/ストレスの計算

S4上でシミュレーションを行う部分



- ・提案モデルに必要な要素

4.提案モデルに必要な要素

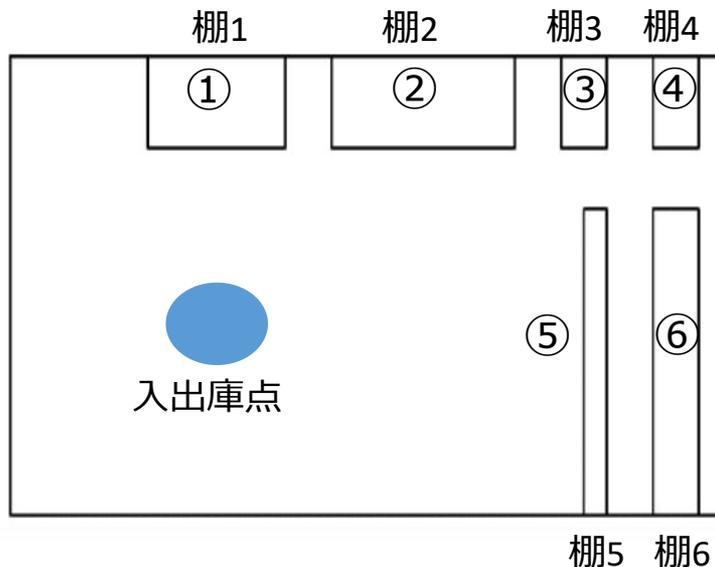
4.2.モデルに必要な要素(保管割当パターン)

保管割当パターン

- ・ 保管割当：商品をどの保管棚に割り当てるか
- ・ 需要の多い商品を入出庫点付近に割り当てると作業時間の短縮が可能

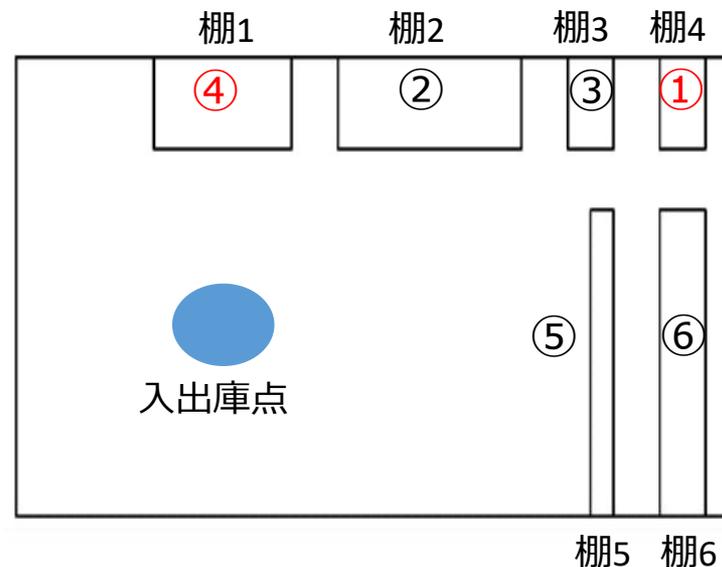
(例) 保管割当パターン1

棚1	棚2	棚3	棚4	棚5	棚6
商品①	商品②	商品③	商品④	商品⑤	商品⑥



(例) 保管割当パターン2

棚1	棚2	棚3	棚4	棚5	棚6
商品④	商品②	商品③	商品①	商品⑤	商品⑥

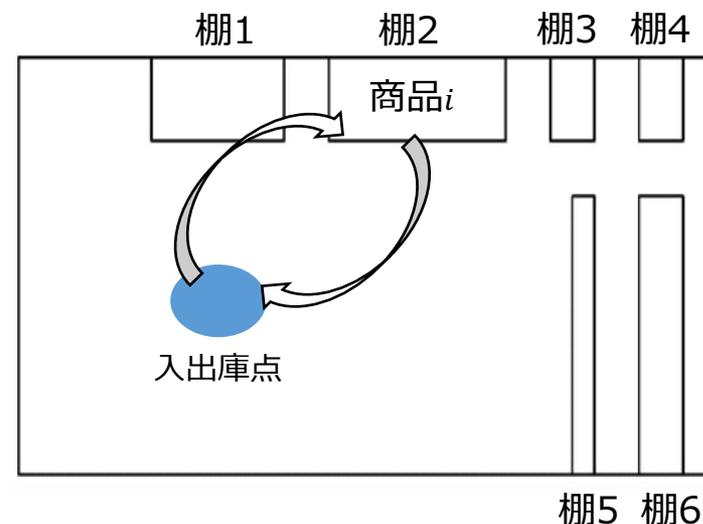
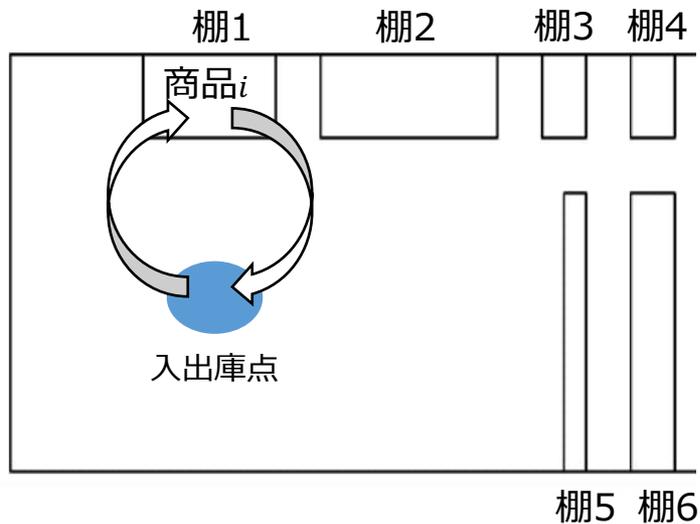


4.提案モデルに必要な要素

4.2.モデルに必要な要素(保管割当変更)

保管割当変更

- ・ 保管割当変更：ある棚に保管されている商品を別の棚に移動し、保管する
- ・ 商品 i を棚1から棚2に変更するとき入出庫点から棚1までの往復と入出庫点から棚2までの往復が必要
- ・ 保管割当変更時に時間/ストレスが発生し、必ずしも保管割当変更が有効とは限らない



保管割当変更作業時に、保管割当変更時間と保管割当変更ストレスが発生

4.提案モデルに必要な要素

4.2.モデルに必要な要素(需要)

需要

- ・ 需要：ピッキングすべき各商品の合計
- ・ 作業者は、 t 日目の需要 D_t をすべてピッキングするまで作業を行う
- ・ 作業者が N 人存在する場合、作業者1人当たりのピッキング数を以下のように定義

$$\text{作業者1人当たりのピッキング数} = \frac{D_t}{N} \quad (2)$$

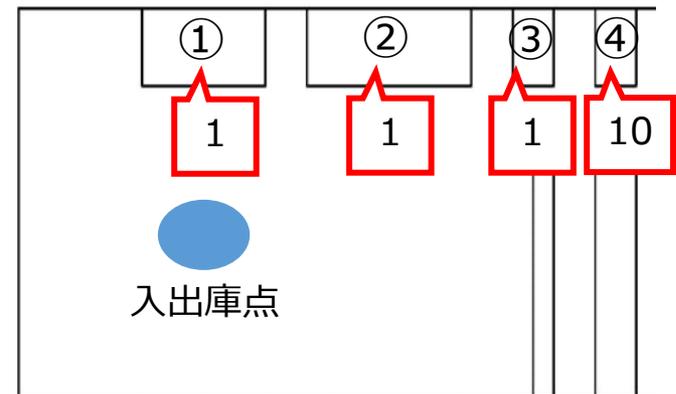
$$\left(\begin{array}{l} D_t : t\text{日目の需要} \\ N : \text{作業者の人数} \end{array} \right)$$

< t 日目の需要 D_t >

	商品①	商品②	商品③	商品④
需要 D_t	1個	1個	1個	10個



< ピッキング >
棚1 棚2 棚3 棚4



ピッキング作業時に
ピッキング時間とピッキングストレスが発生

各商品のピッキング数

棚5 棚6
15

4.提案モデルに必要な要素

4.2.モデルに必要な要素(総作業時間)

$$\text{総作業時間 (秒)} = \text{保管割当変更時間} + \text{ピッキング時間} \quad (3)$$

保管割当変更時間

$$\text{保管割当変更時間} = (\text{保管割当変更にかかる時間}) + (\text{待ち時間})$$

ピッキング時間

$$\text{ピッキング時間} = (\text{ピッキングにかかる時間}) + (\text{待ち時間})$$

※待ち時間：同じ棚において他の作業者のピッキングが終了するまでの待ち時間

< t日目のピッキング作業 >

保管割当変更

t-1日目の割当パターンと異なる場合、保管割当を変更

保管割当変更時間

ピッキング

t日目の需要 D_t をすべて処理するまでピッキングを行う

ピッキング時間

$$\text{t日目の総作業時間} = (\text{t-1日目の割当パターンからt日目の割当パターンへの保管割当変更時間}) + (\text{t日目のピッキング時間})$$

4.提案モデルに必要な要素

4.2.モデルに必要な要素(心理的ストレス)

ピッキングにおいて、様々なストレスが存在する

- ・商品を棚から取り出す/持ち運ぶ際に発生する身体的ストレス
- ・棚の圧迫感による心理的ストレス
- ・周囲に人が存在することによる心理的ストレス
- ・待ち時間が発生することによる心理的待ちストレス

など・・・

本研究では、例として2つの心理的ストレスを考慮

4.提案モデルに必要な要素

4.2.モデルに必要な要素(心理的ストレス)

作業者が複数存在する場合の心理的ストレス

- ・視野内に作業者が存在するストレス
- ・待ちストレス

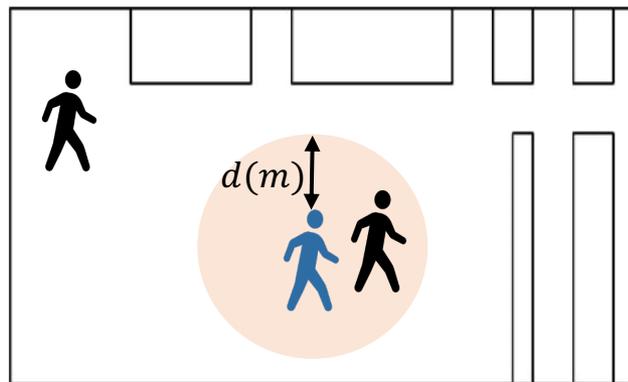
視野内に作業者が存在するストレス

移動時に自分の視野内（半径 $d(m)$ ）に存在する作業者の数（回）

※視野 = 作業者の通常作業域

待ちストレス

同じ棚において他の作業者のピッキングが終了するまでの待ち回数（回）



作業者の視野
(視野内に作業者が存在するストレス=1 (回))



待ちストレス
(待ちストレス=1 (回))

4.提案モデルに必要な要素

4.2.モデルに必要な要素(総ストレス)

$$\text{総ストレス (回)} = \text{保管割当変更ストレス} + \text{ピッキングストレス} \quad (4)$$

保管割当変更ストレス

$$\text{保管割当変更ストレス} = (\text{視野内に作業者が存在するストレス}) + (\text{待ちストレス})$$

ピッキングストレス

$$\text{ピッキングストレス} = (\text{視野内に作業者が存在するストレス}) + (\text{待ちストレス})$$

< t日目のピッキング作業 >

保管割当変更

t-1日目の割当パターンと異なる場合、保管割当を変更

保管割当変更ストレス

ピッキング

t日目の需要 D_t をすべて処理するまでピッキングを行う

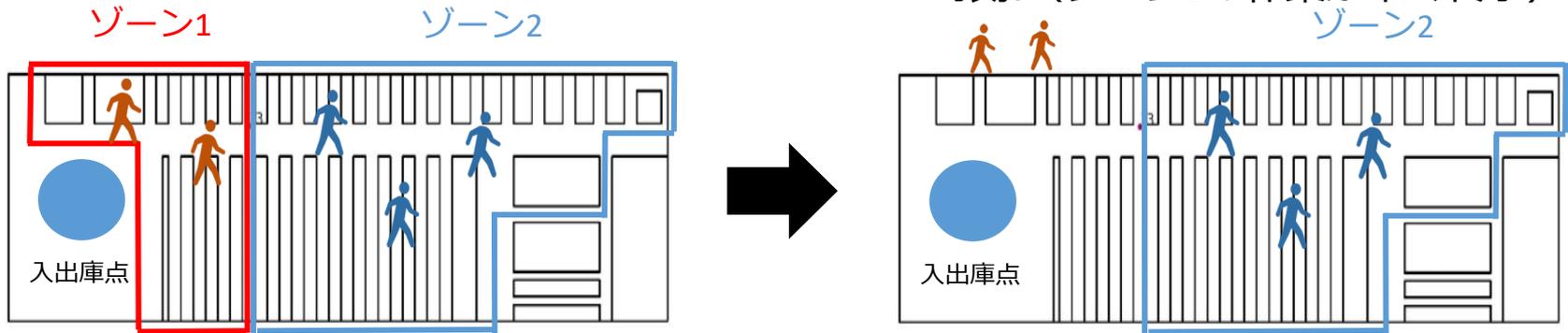
ピッキングストレス

$$t\text{日目の総ストレス} = (t-1日目の割当パターンからt日目の割当パターンへの保管割当変更ストレス) + (t日目のピッキングストレス)$$

4. 提案モデルに必要な要素

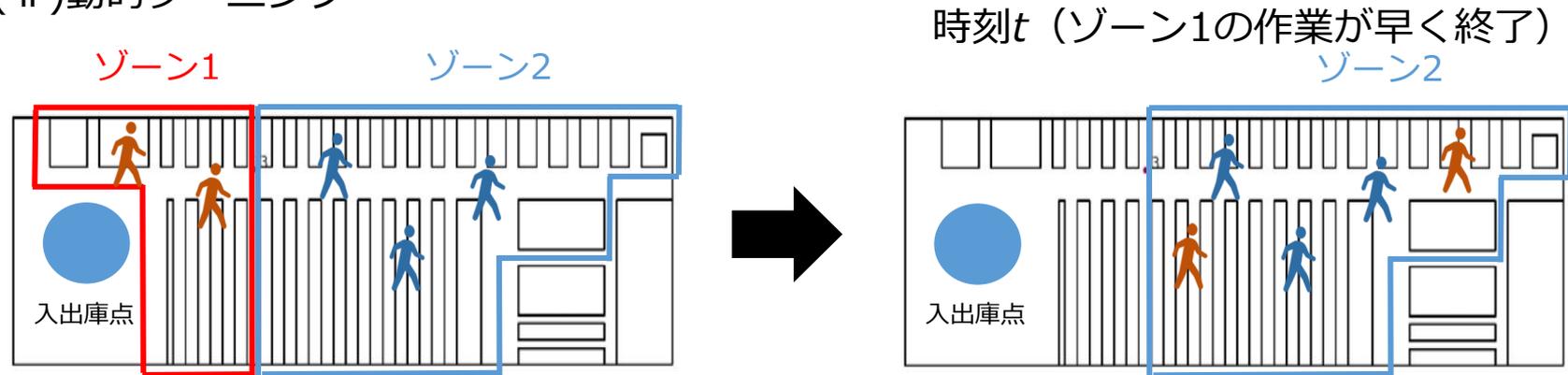
4.2. モデルに必要な要素(ゾーニング)

(i) 通常ゾーニング



- ・ 作業者は割り当てられたゾーンのピッキングが終了したら、作業終了

(ii) 動的ゾーニング



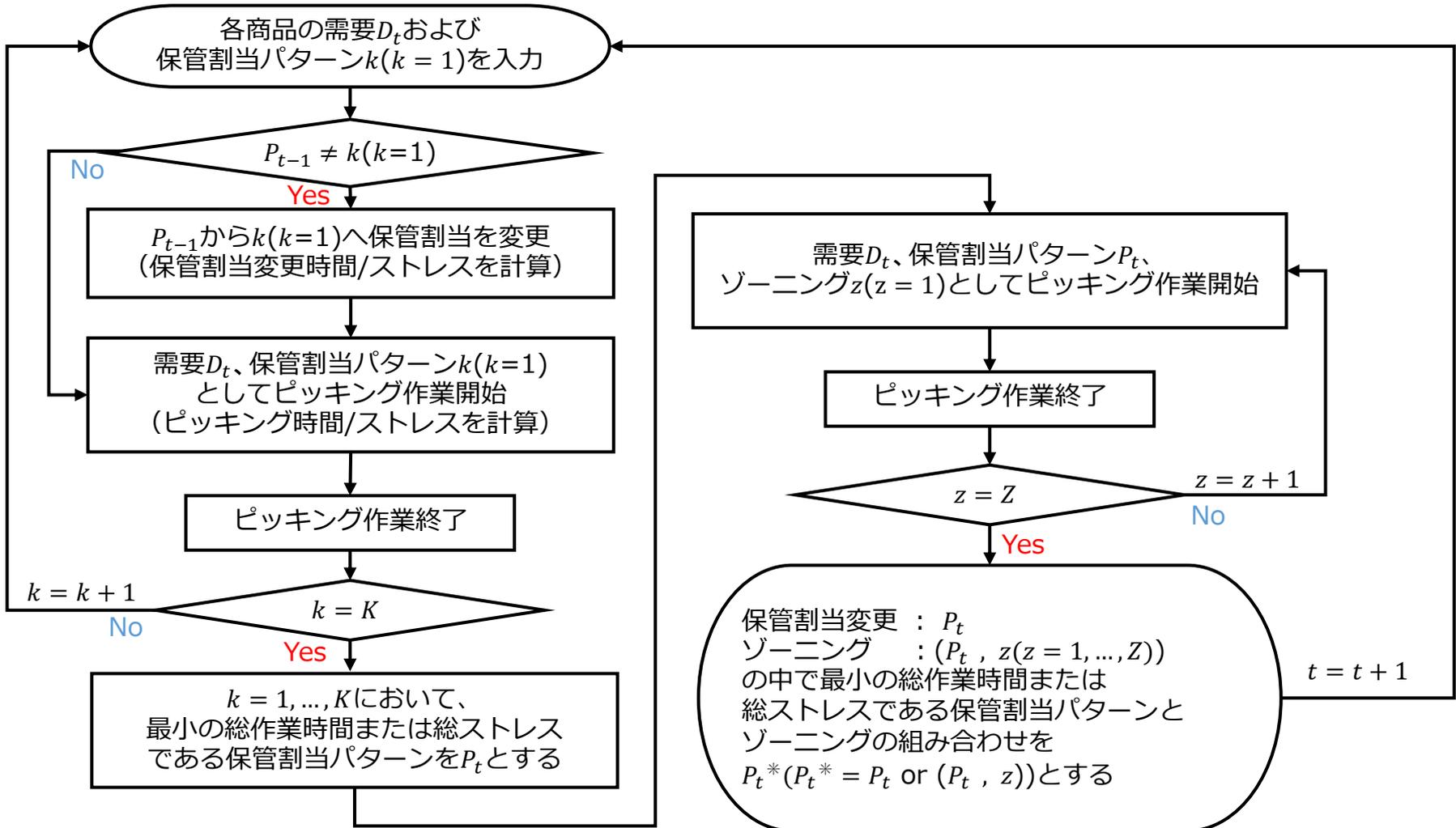
- ・ どちらかのゾーンの作業が早く終了した場合、他ゾーンの作業を作業者全員で分配

ゾーニングパターン：各作業者が担当するゾーンの範囲をどのように設定するか

5.提案するシミュレーションモデル

総作業時間または総ストレスが最小となる、最適保管割当パターン P_t とゾーニングパターン z の組み合わせ P_t^* を算出

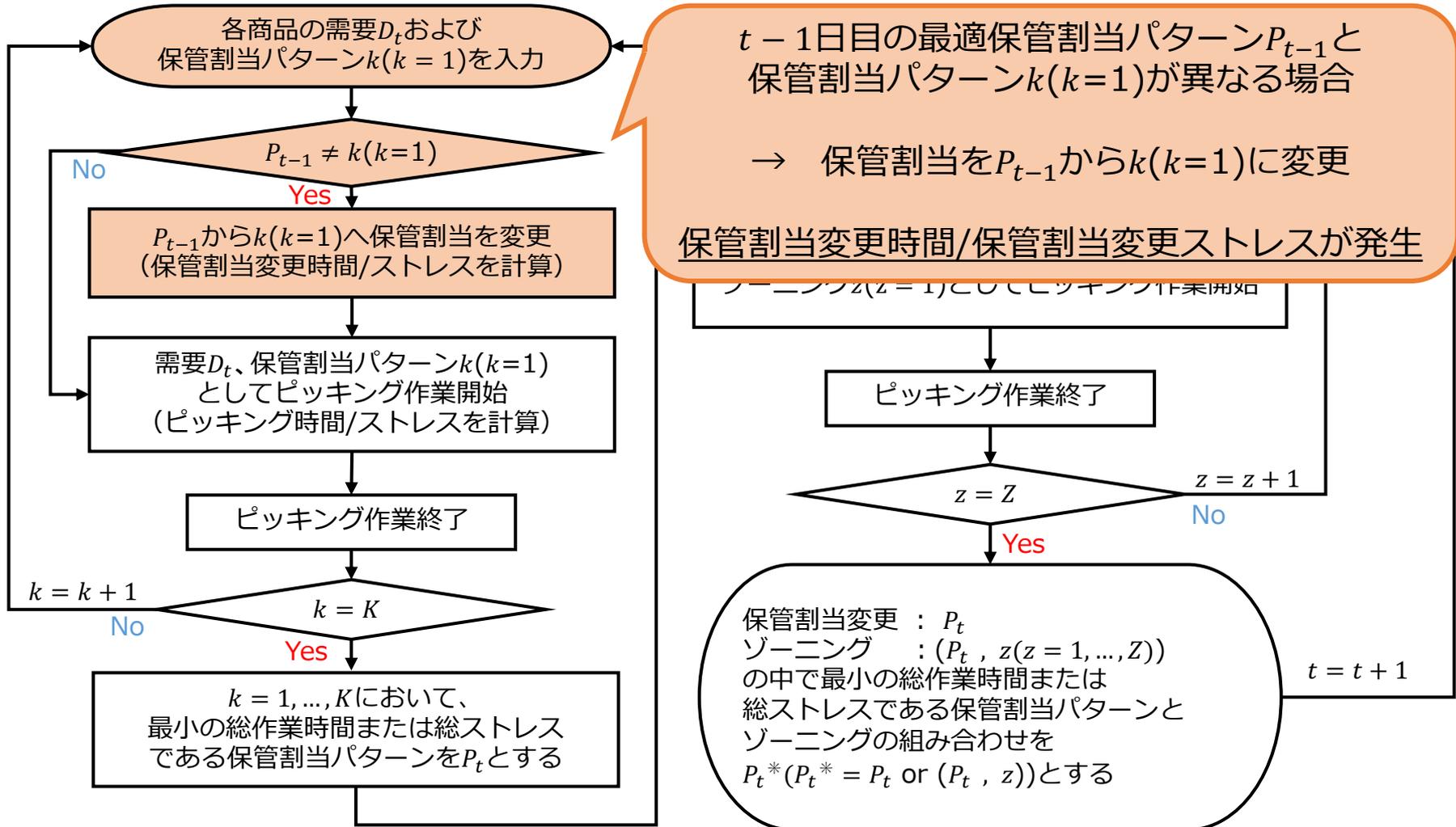
t 日目



5. 提案するシミュレーションモデル

総作業時間または総ストレスが最小となる、最適保管割当パターン P_t とゾーニングパターン z の組み合わせ P_t^* を算出

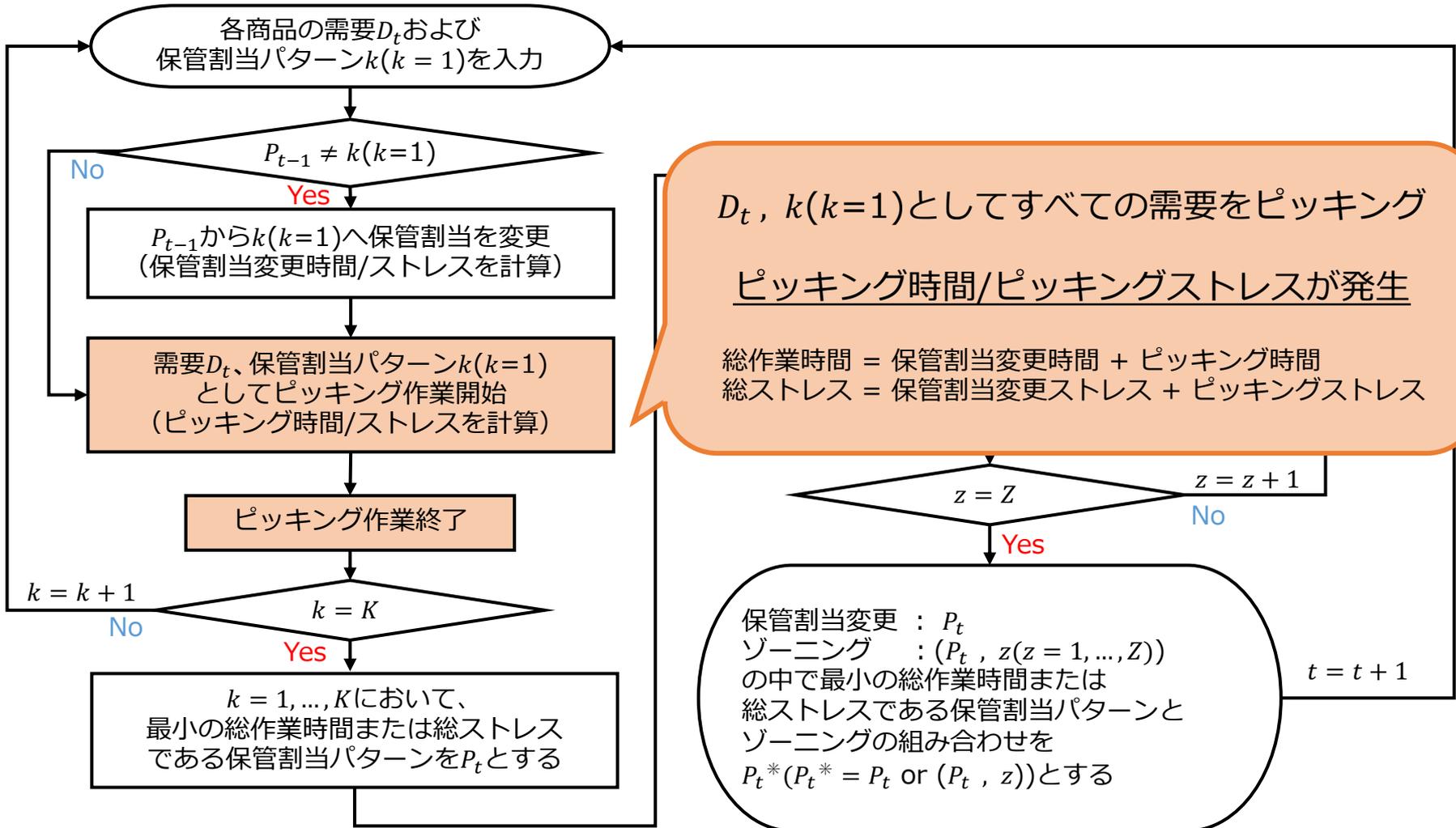
t 日目



5. 提案するシミュレーションモデル

総作業時間または総ストレスが最小となる、最適保管割当パターン P_t とゾーニングパターン z の組み合わせ P_t^* を算出

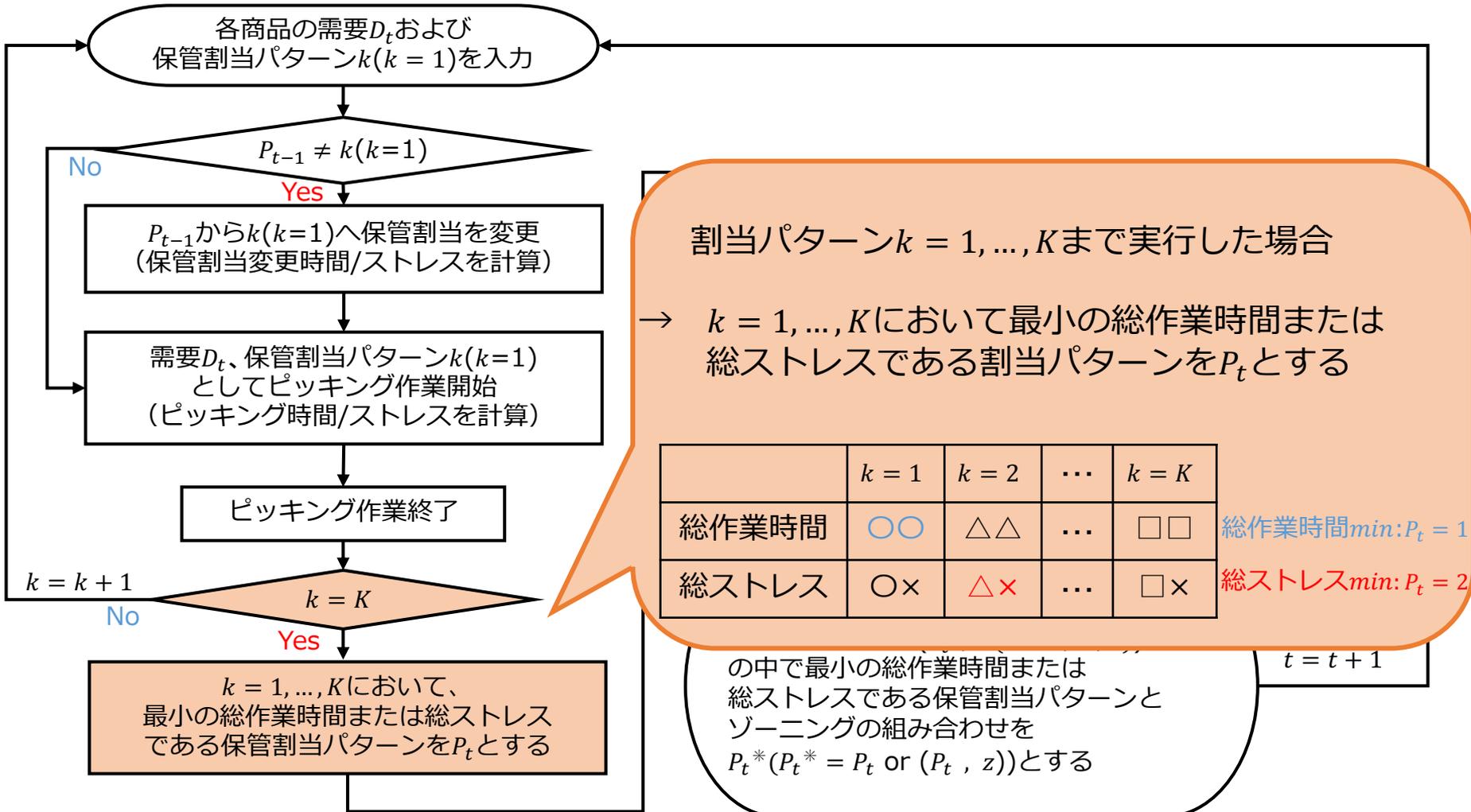
t 日目



5.提案するシミュレーションモデル

総作業時間または総ストレスが最小となる、最適保管割当パターン P_t とゾーニングパターン z の組み合わせ P_t^* を算出

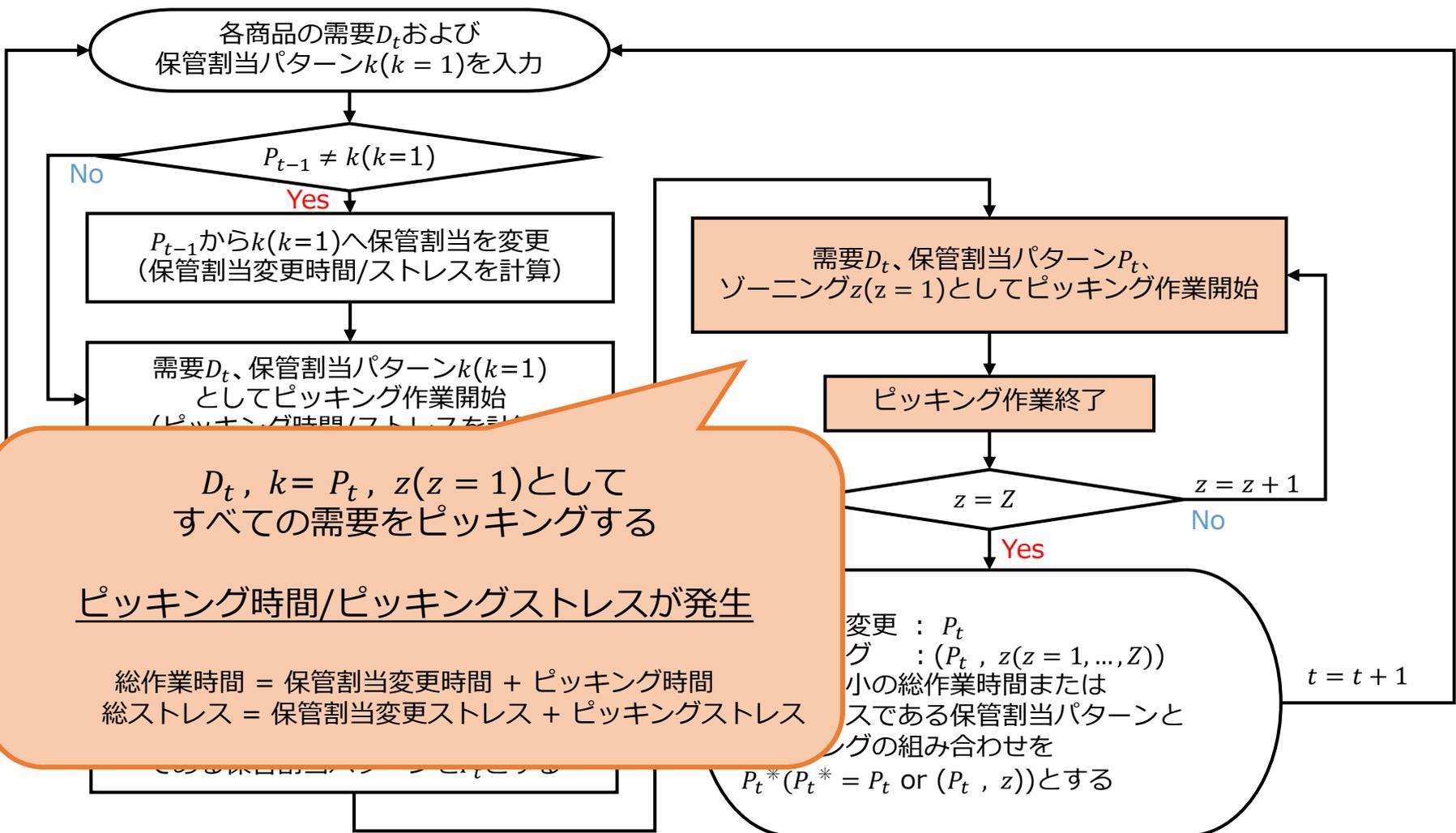
t 日目



5.提案するシミュレーションモデル

総作業時間または総ストレスが最小となる、最適保管割当パターン P_t とゾーニングパターン z の組み合わせ P_t^* を算出

t 日目



$D_t, k = P_t, z(z = 1)$ として
すべての需要をピッキングする

ピッキング時間/ピッキングストレスが発生

総作業時間 = 保管割当変更時間 + ピッキング時間
総ストレス = 保管割当変更ストレス + ピッキングストレス

変更 : P_t
ゾーニング : $(P_t, z(z = 1, \dots, Z))$
最小の総作業時間または
最小の総ストレスである保管割当パターンと
ゾーニングの組み合わせを
 $P_t^*(P_t^* = P_t \text{ or } (P_t, z))$ とする

$t = t + 1$

5.提案するシミュレーションモデル

総作業時間または総ストレスが最小となる、最適保管割当パターン P_t とゾーニングパターン z の組み合わせ P_t^* を算出

t 日目

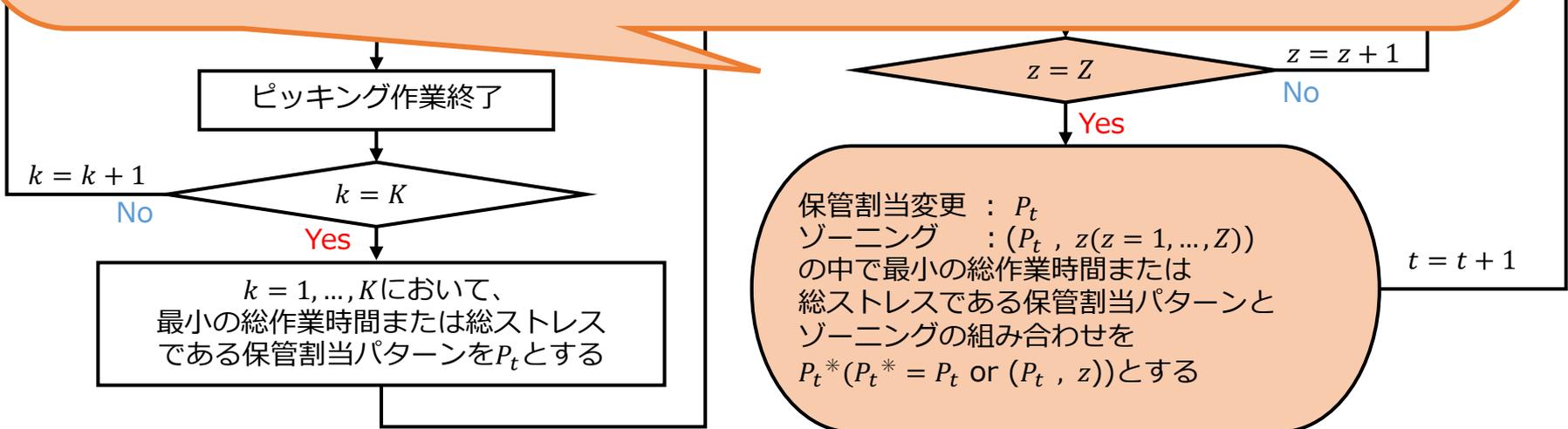
ゾーニングパターン $z = 1, \dots, Z$ まで実行した場合

→ 「 $k = P_t$ 」または「 $k = P_t$, かつ, $z = 1, \dots, Z$ 」において、最小の総作業時間または総ストレスである保管割当パターンとゾーニングの組み合わせを P_t^* とする

	$k = P_t$	$k = P_t$			
		$z = 1$	$z = 2$...	$z = Z$
総作業時間	○△	○○	△△	...	□□
総ストレス	××	○×	△×	...	□×

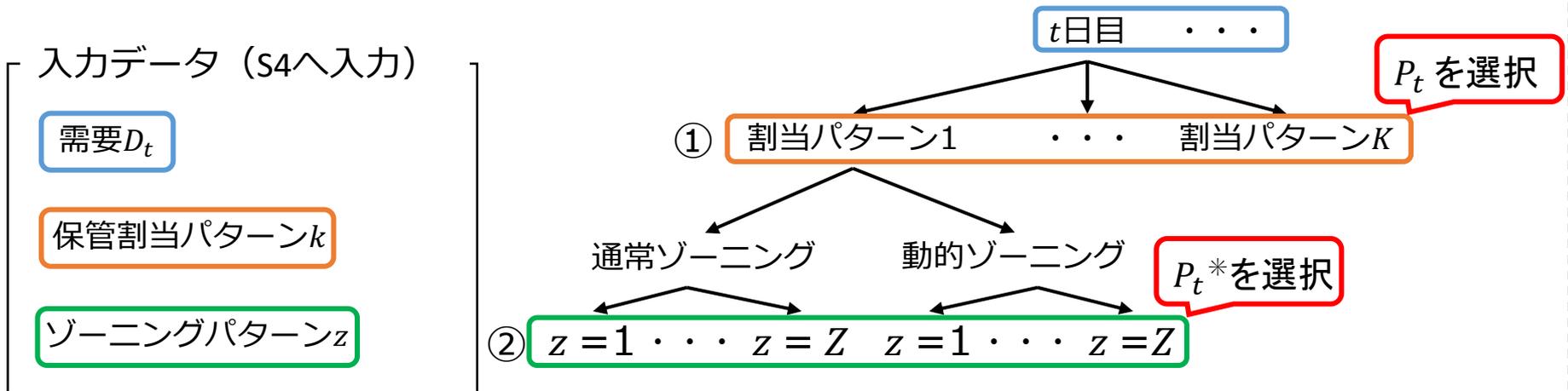
総作業時間 $min: P_t^* = (P_t, z = 1)$

総ストレス $min: P_t^* = (P_t, z = 2)$



5.提案するシミュレーションモデル

入力データの関係（割当パターン1が P_t の場合）



P_t : t 日目の最適保管割当パターン

z : ゾーニングパターン

P_t^* : t 日目の最適保管割当パターン P_t とゾーニングパターン z の組み合わせ

① $t-1$ 日目の最適保管割当パターン P_{t-1} と保管割当パターン k が異なる場合、保管割当変更を行うその後ピッキングを行い P_t を選択

② P_t を基にゾーニングを行い、 P_t と z の組み合わせ P_t^* を選択

5.提案するシミュレーションモデル

S4上での心理的ストレスの計算方法 {
・視野内に作業者が存在するストレス
・待ちストレス

■ findNeighborAgentsを用いて、視野内に作業者が存在するストレスを表現



①

```
import re
num=re.sub("\\D","",str(self.findNeighborAgents(d = 0.4, weight = None, withDistance = False)))
num=int(num)
```

②

```
if self.agentid ==0:
    if num ==1 or num==2 or num==3 or num==4:
        self.stress.append(1)
    .....
if self.agentid ==1:
    if num ==0 or num==2 or num==3 or num==4:
        self.stress.append(1)
    .....
if self.agentid ==2:
    if num ==0 or num==1 or num==3 or num==4:
        self.stress.append(1)
    .....
if self.agentid ==3:
    if num ==0 or num==1 or num==2 or num==4:
        self.stress.append(1)
    .....
if self.agentid ==4:
    if num ==0 or num==1 or num==2 or num==3:
        self.stress.append(1)
    .....
```

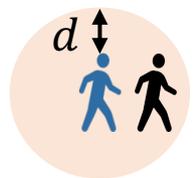
①自分の周囲 $d(m)$ 以内に他の作業者が存在する場合、その作業者のエージェントIDをnumに格納

②周囲に作業者が存在するストレス (self.stress) に1を追加

→self.stressの合計を、周囲に作業者が存在するストレスとする

※self.findNeighborAgents : 自身からの距離が $d(m)$ 以内のエージェントのリストを返す

self.stress : 周囲に作業者が存在するストレスの発生回数を格納するリスト



視野内に作業者が存在するストレス

5.提案するシミュレーションモデル

S4上での心理的ストレスの計算方法 {
・視野内に作業者が存在するストレス
・待ちストレス

■各作業者の経路地点を基に、待ちストレス/時間を表現 (1/4)



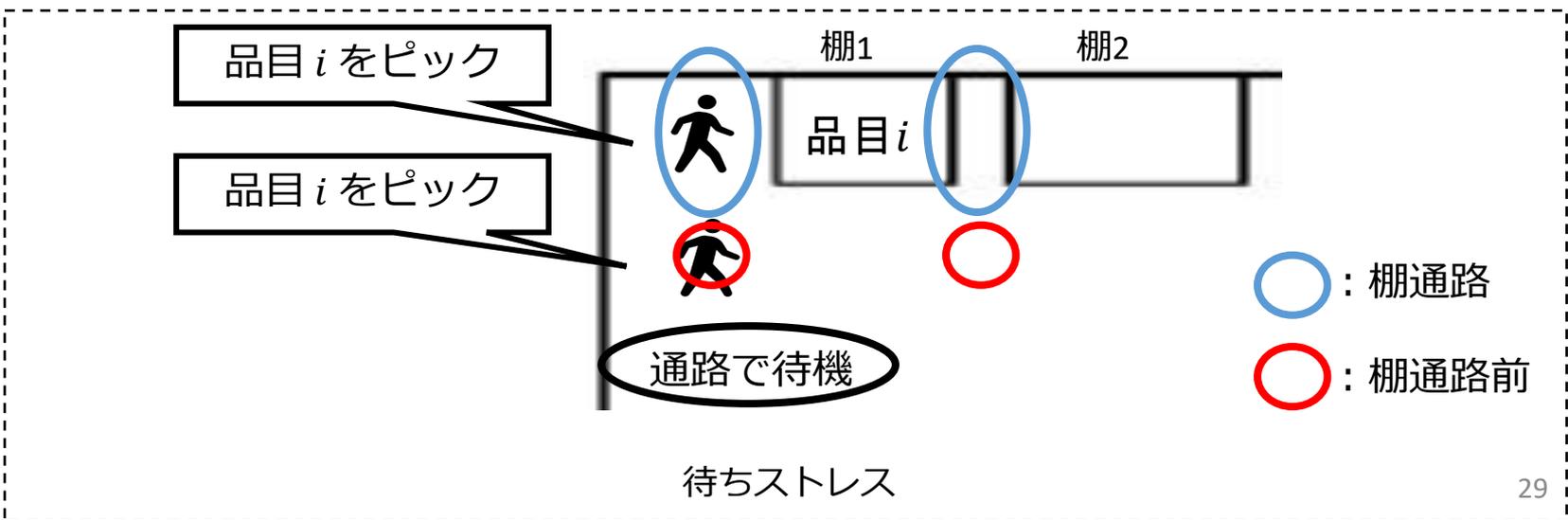
プログラムのイメージ

各作業者の経路地点を随時取得し、棚通路前に存在する場合

→他の作業者が棚通路に存在する場合、その際の時間 (self.L_in) を取得

→他の作業者が棚通路から出た場合、その際の時間 (self.L_out) を取得

※ self.L_in : 待ち開始時間を格納するリスト
self.L_out : 待ち終了時間を格納するリスト



5.提案するシミュレーションモデル

S4上での心理的ストレスの計算方法 {
・視野内に作業者が存在するストレス
・待ちストレス

■各作業者の経路地点を基に、待ちストレス/時間を表現 (2/4)



```
if len(self.agents)>=5 :  
    ① self.agent1=self.agents[0]  
       self.agent2=self.agents[1]  
       self.agent3=self.agents[2]  
       self.agent4=self.agents[3]  
       self.agent5=self.agents[4]  
    ② vs=self.env.pathgraph.nodes()  
    ③ for v in range(len(vs)):  
        if self.agent1.inArea(v):  
            v1=v  
        if self.agent2.inArea(v):  
            v2=v  
        if self.agent3.inArea(v):  
            v3=v  
        if self.agent4.inArea(v):  
            v4=v  
        if self.agent5.inArea(v):  
            v5=v
```

①エージェント集合から、各作業者の番号を決定

②SFM環境で作成した経路地点の集合を取得

③各作業者が存在する経路地点を取得

※v1, ~, v5 : 各作業者が存在する経路地点
ステップ間隔 (0.25秒) ごとに更新



(例) 各作業者の経路地点の取得

5.提案するシミュレーションモデル

S4上での心理的ストレスの計算方法 { ・視野内に作業者が存在するストレス
・待ちストレス

■各作業者の経路地点を基に、待ちストレス/時間を表現 (3/4)



```
① if v1==16 or v2==16 or v3==16 or v4==16 or v5==16:  
    for i in range(0,3):  
        vv=66+i  
        sight1=len(self.agent1.findVisibleAgents(p = None, visDir = 90, visR = 7, visTheta = 30, r = 1.0e-8, strict = True, withDistance = False))  
        sight2=len(self.agent2.findVisibleAgents(p = None, visDir = 90, visR = 7, visTheta = 30, r = 1.0e-8, strict = True, withDistance = False))  
        sight3=len(self.agent3.findVisibleAgents(p = None, visDir = 90, visR = 7, visTheta = 30, r = 1.0e-8, strict = True, withDistance = False))  
        sight4=len(self.agent4.findVisibleAgents(p = None, visDir = 90, visR = 7, visTheta = 30, r = 1.0e-8, strict = True, withDistance = False))  
        sight5=len(self.agent5.findVisibleAgents(p = None, visDir = 90, visR = 7, visTheta = 30, r = 1.0e-8, strict = True, withDistance = False))  
        if v1==16 and self.m1==0 and sight1>0:  
            if v2==vv or v3==vv or v4==vv or v5==vv:  
                self.m1=1  
                self.L_in.append(now())
```



- : 棚通路
- : 棚通路前
- > : 棚通路を確認

①各作業者が棚通路前に存在する場合 (例：経路地点16)

②各作業者が棚通路前に存在する場合、findVisibleAgentsを用いて他の作業者が棚通路に存在するか確認 (例：経路地点66,67,68)

※findVisibleAgents : 指定した方向、視野制限距離、視野角を設定し条件内に作業者が存在する場合、エージェント集合を返す

5.提案するシミュレーションモデル

S4上での心理的ストレスの計算方法 { ・視野内に作業者が存在するストレス
・待ちストレス

■各作業者の経路地点を基に、待ちストレス/時間を表現 (4/4)



```
① if v1==16 and self.m1==0 and sight1>0:
    if v2==vv or v3==vv or v4==vv or v5==vv:
        self.m1=1
        self.L_in.append(now())
    if v2==16 and self.m2==0 and sight2>0:
    if v3==16 and self.m3==0 and sight3>0:
    if v4==16 and self.m4==0 and sight4>0:
    if v5==16 and self.m5==0 and sight5>0:

② if self.m1==1:
    if v2==16 or v3==16 or v4==16 or v5==16:
        self.L_out.append(now())
        self.m1=0
    if self.m2==1:
    if self.m3==1:
    if self.m4==1:
    if self.m5==1:
```

①作業者が棚通路前に存在し、他の作業者が棚通路vvに存在する場合、待ち開始時間を (self.L_in) に追加

②他の作業者が棚通路から出た場合 (他の作業者の経路地点：16)

→待ち終了時間を (self.L_out) に追加

・ (self.L_in) または (self.L_out) のリストの大きさを待ちストレスとする

・ (self.L_in) と (self.L_out) の各要素の差を待ち時間とする

※ vv : 棚通路
self.L_in : 待ち開始時間を格納するリスト
self.L_out : 待ち終了時間を格納するリスト



○ : 棚通路

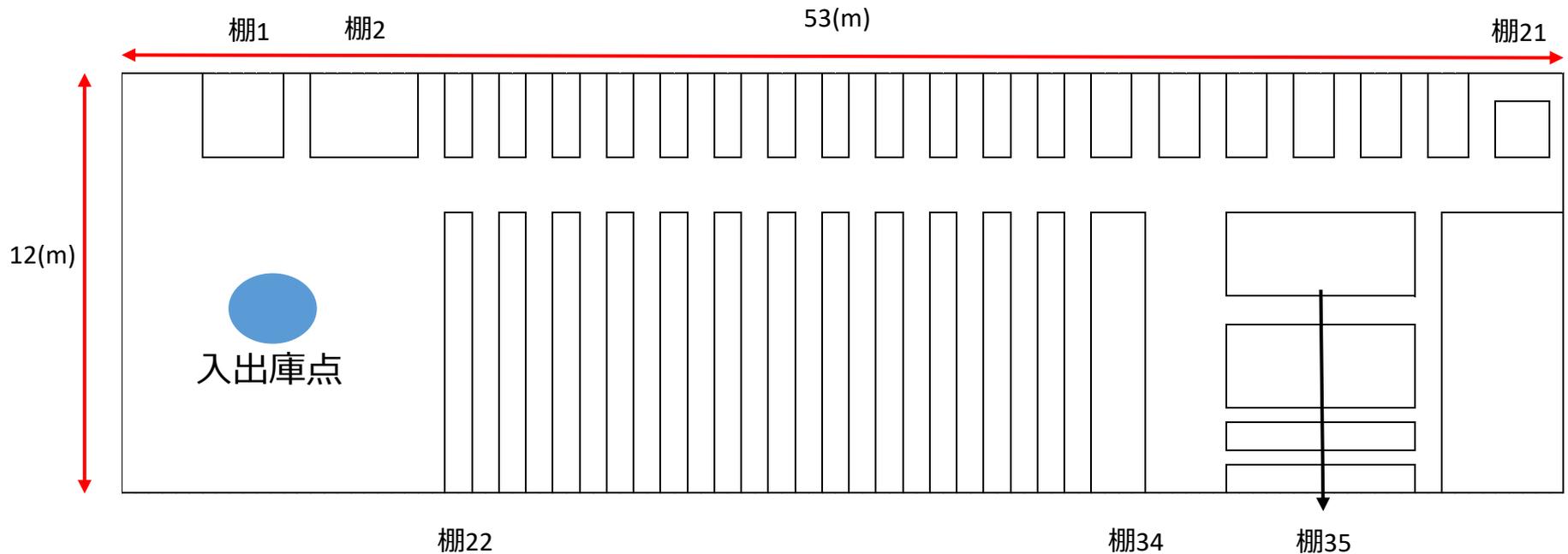
○ : 棚通路前

→ : 他の作業者が棚通路から出る

6. 数値実験

6.1. 条件設定

対象とする倉庫



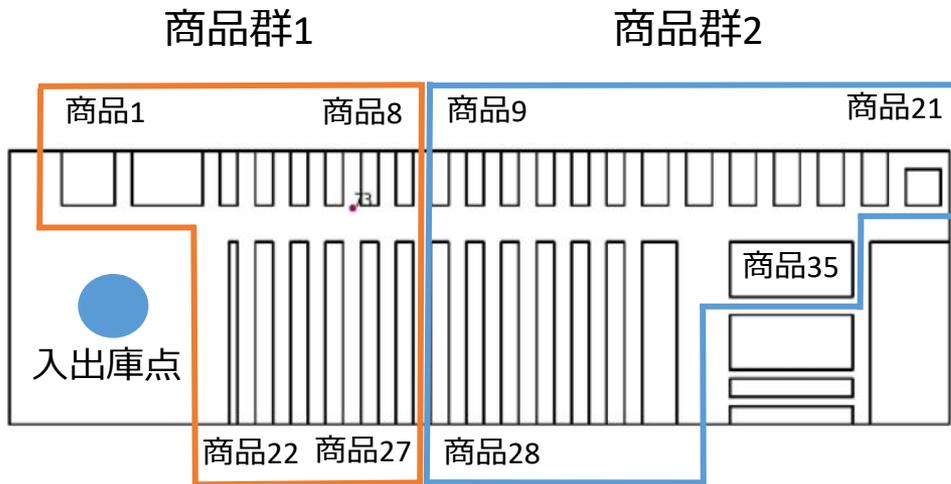
対象とする倉庫図

- 小規模であり、自動化されていないお菓子卸業者の倉庫
- 作業者は手作業でピッキングを行う
- 35個の棚が存在
- 各棚に商品が1種類ずつ収納される（全35種類の商品が収納される）

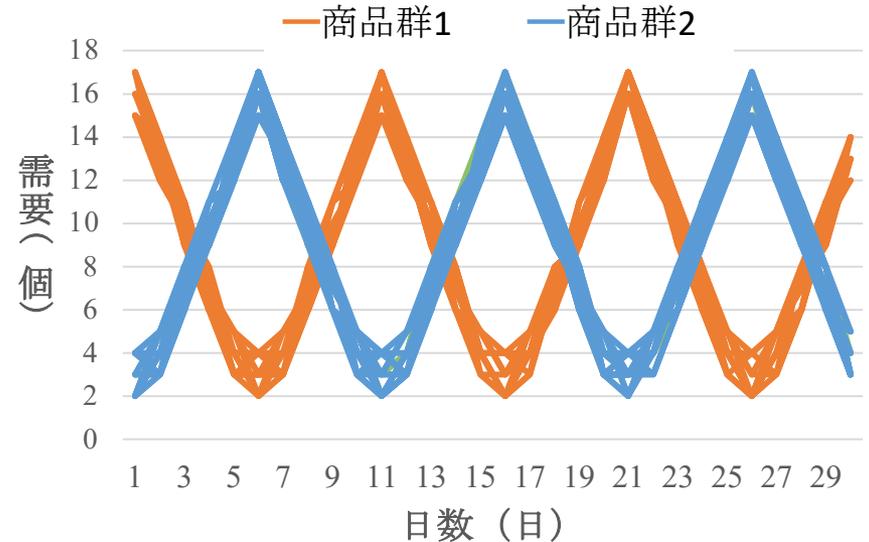
6. 数値実験

6.1. 条件設定

需要



商品群1と商品群2



各商品の需要変動

- 各商品の需要は最小2個, 最大17個
- 2種類の需要変動を仮定
 - 「商品群1 (商品1~商品8, 商品22~商品27)」
 - 「商品群2 (商品9~商品21, 商品28~商品35)」
- 各作業者がピッキングする商品の種類はランダムに決定

6. 数値実験

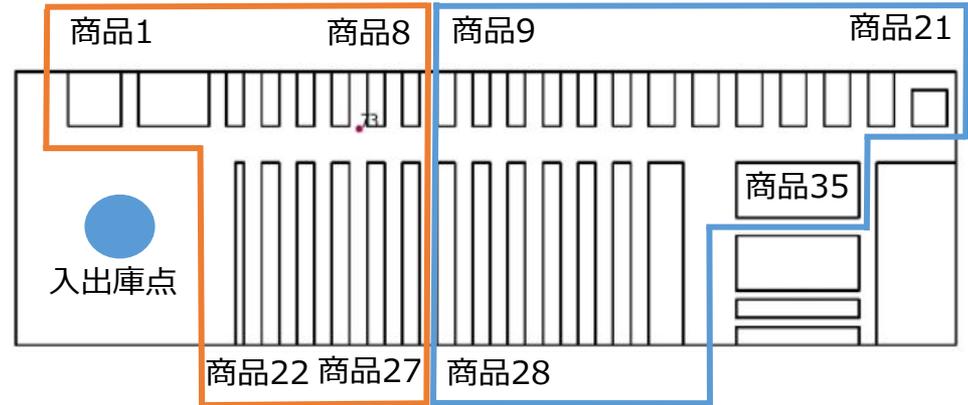
6.1. 条件設定

保管割当パターン

	棚1	棚2	棚3	...	棚33	棚34	棚35
$k=1$	商品3	商品2	商品1	...	商品33	商品34	商品35
$k=2$	商品1	商品2	商品3	...	商品33	商品34	商品35
$k=3$	商品1	商品2	商品3	...	商品33	商品34	商品35
$k=4$	商品1	商品2	商品6	...	商品33	商品34	商品35
$k=5$	商品7	商品2	商品3	...	商品33	商品34	商品35
$k=6$	商品1	商品2	商品3	...	商品33	商品34	商品35
$k=7$	商品4	商品2	商品3	...	商品33	商品34	商品35
$k=8$	商品1	商品4	商品3	...	商品33	商品34	商品35
$k=9$	商品1	商品5	商品3	...	商品33	商品34	商品35
$k=10$	商品1	商品2	商品3	...	商品33	商品34	商品35
$k=11$	商品12	商品13	商品14	...	商品25	商品26	商品27
$k=12$	商品13	商品14	商品15	...	商品25	商品26	商品27
$k=13$	商品14	商品15	商品16	...	商品25	商品26	商品27
$k=14$	商品14	商品15	商品16	...	商品25	商品26	商品27
$k=15$	商品14	商品15	商品16	...	商品25	商品26	商品27
$k=16$	商品14	商品15	商品16	...	商品25	商品26	商品27
$k=17$	商品14	商品15	商品16	...	商品25	商品26	商品27
$k=18$	商品14	商品15	商品16	...	商品25	商品26	商品27
$k=19$	商品14	商品15	商品16	...	商品22	商品26	商品27
$k=20$	商品14	商品15	商品16	...	商品25	商品26	商品27
$k=21$	商品9	商品10	商品11	...	商品33	商品34	商品35
$k=22$	商品10	商品11	商品12	...	商品33	商品34	商品35
$k=23$	商品10	商品11	商品12	...	商品33	商品34	商品35
$k=24$	商品10	商品11	商品12	...	商品33	商品34	商品35
$k=25$	商品10	商品11	商品12	...	商品33	商品34	商品35
$k=26$	商品10	商品11	商品12	...	商品33	商品34	商品35
$k=27$	商品10	商品11	商品12	...	商品33	商品34	商品35
$k=28$	商品10	商品11	商品12	...	商品33	商品34	商品35
$k=29$	商品10	商品11	商品12	...	商品33	商品34	商品35
$k=30$	商品10	商品11	商品12	...	商品33	商品34	商品35

商品群1

商品群2



- 30通りの保管割当パターンを仮定

「商品群1(商品1~8,22~27)を入出庫点付近に割当
($k=1\sim10$)」

「商品群2(商品9~21,28~35)を入出庫点付近に割当
($k=11\sim20$)」

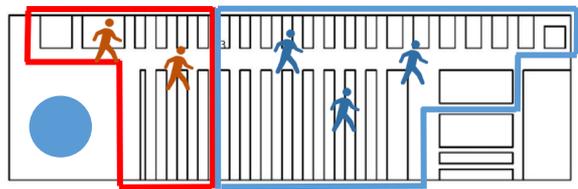
「商品群1,2が混合するように割当 ($k=21\sim30$)」

6. 数値実験

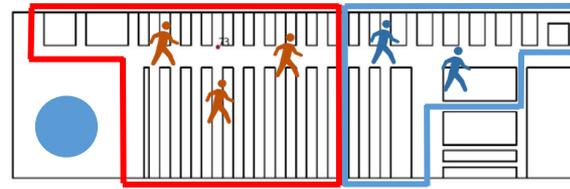
6.1. 条件設定

作業員5人の作業範囲をゾーン1 (z_1) とゾーン2 (z_2) に分配
(z_1 (%), z_2 (%)) : 全棚に対する各ゾーンの範囲

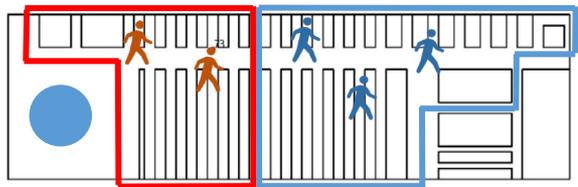
z : ゾーニングパターン
($z = 1, \dots, 6$)



$z = 1: (30\%, 70\%)$



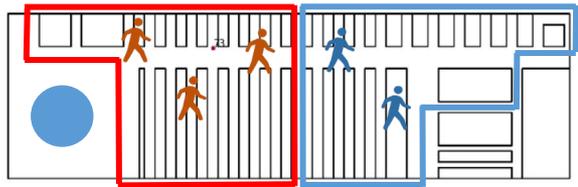
$z = 4: (60\%, 40\%)$



$z = 2: (40\%, 60\%)$



$z = 5: (70\%, 30\%)$



$z = 3: (50\%, 50\%)$



$z = 6: (80\%, 20\%)$

6. 数値実験

6.1. 条件設定

その他の入力値, 条件

実行期間 (日)	30
作業者の視野 $d(m)$	0.4
作業者の歩行速度 (m/s)	0.8
各商品の在庫数 (個)	5
作業者数 (人)	5

その他の条件

- ・ 1回のピッキングで, 商品を1つ収集する
(入出庫点→棚 (商品を1つ収集)
→入出庫点→棚)
- ・ 保管割当変更の際、1品目の商品を1度に移動できるものとする (各商品の在庫数=5)
- ・ ピッキング作業/保管割当変更作業において、作業者はSFMに従って行動する

以上の条件を用いて、作業者数が5人の場合の実験を行う

評価



- ・ 保管割当変更法が及ぼす、総作業時間と総ストレスへの影響
- ・ 通常ゾーニングを用いた保管割当変更法が及ぼす、総作業時間と総ストレスへの影響
- ・ 動的ゾーニングを用いた保管割当変更法が及ぼす、総作業時間と総ストレスへの影響

6. 数値実験

6.2. 保管割当変更法(ゾーニングなし)

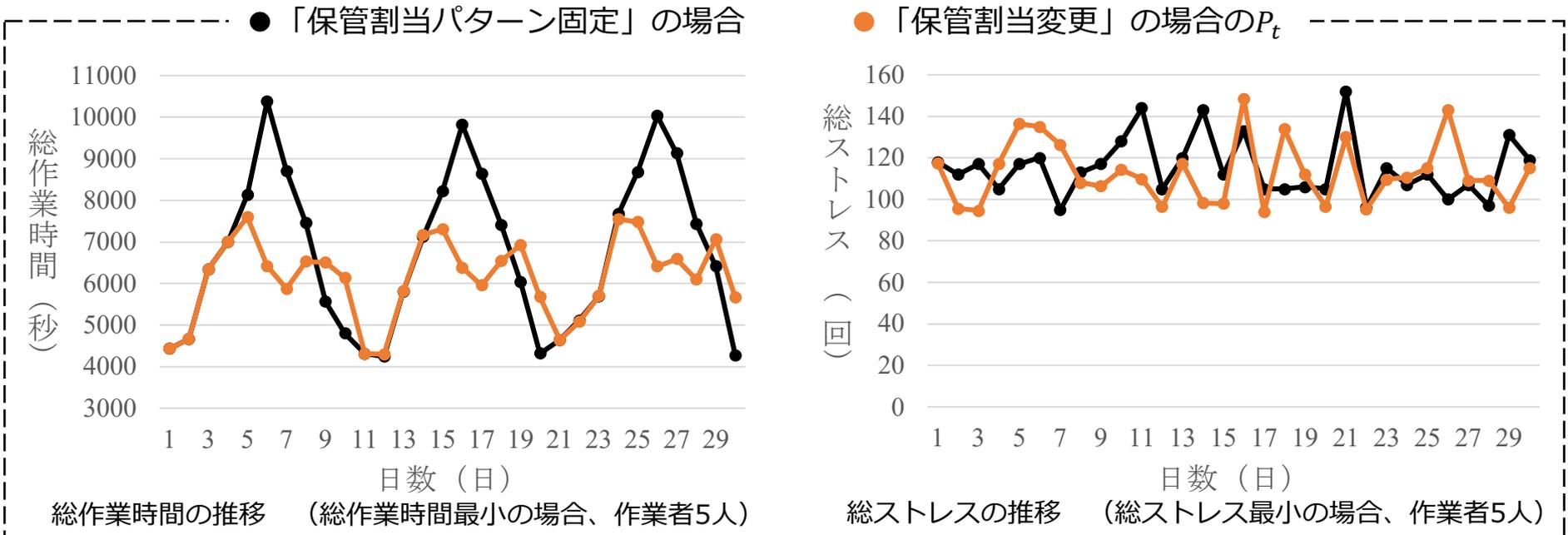
評価

- ・ 保管割当変更法が及ぼす、総作業時間と総ストレスへの影響
- ・ 通常ゾーニングを用いた保管割当変更法が及ぼす、総作業時間と総ストレスへの影響
- ・ 動的ゾーニングを用いた保管割当変更法が及ぼす、総作業時間と総ストレスへの影響

需要変動に応じた保管割当変更（ゾーニングなし、需要の多い商品を入出庫点付近に割り当てる）を行うことで、どのように総作業時間と総ストレスに影響を及ぼすかを評価

6. 数値実験

6.2. 保管割当変更法(ゾーニングなし)



保管割当変更を考慮した場合の総作業時間と総ストレス削減率 (保管割当パターン固定を基準)

● 保管割当変更 (保管割当パターン固定を基準)			
総作業時間		総ストレス	
平均値	最大値	平均値	最大値
9.04%	26.78%	1.97%	2.37%

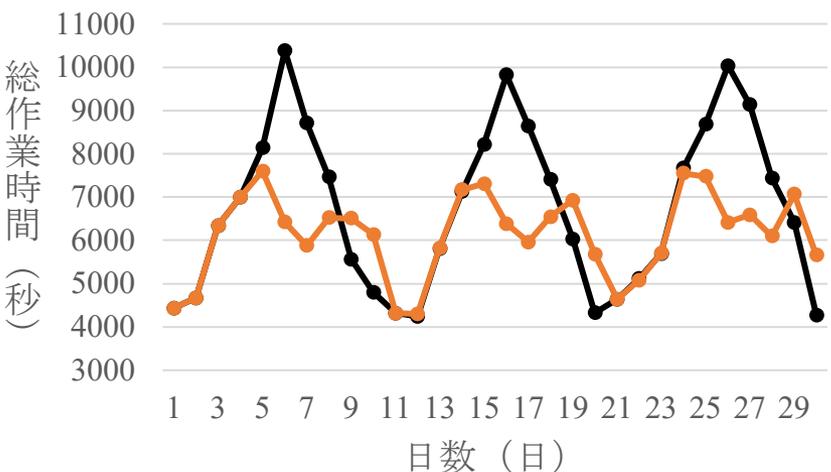
保管割当変更を行うことで総作業時間と総ストレスを削減可能

6. 数値実験

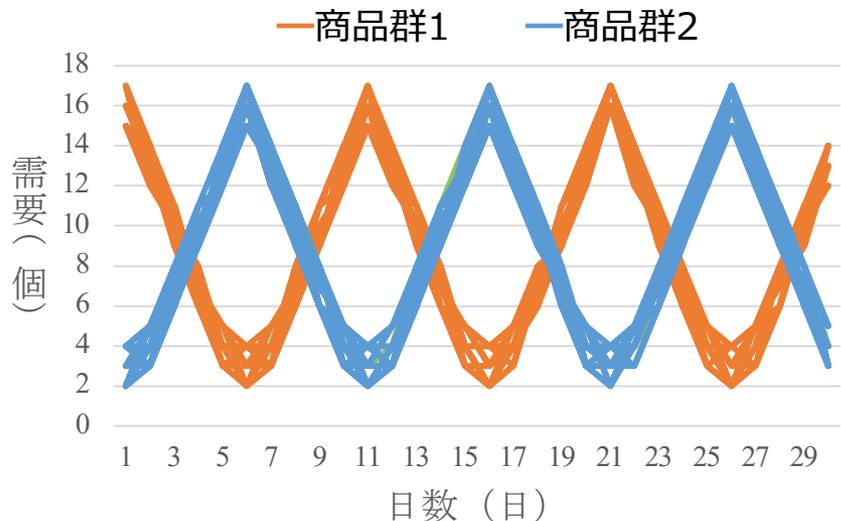
6.2. 保管割当変更法(ゾーニングなし)

- 「保管割当パターン固定」の場合の P_t
- 「保管割当変更」の場合の P_t

「商品群1を入出庫点付近に割当て ($k=1\sim 10$)」
 「商品群2を入出庫点付近に割当て ($k=11\sim 20$)」
 「商品群1,2が混合するように割当て ($k=21\sim 30$)」



総作業時間の推移 (総作業時間最適の場合、作業者5人)



各商品の需要変動

最適保管割当パターン P_t の推移

日数 (日)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
パターン固定	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
保管割当変更	1	1	1	1	18	18	18	18	18	5	5	5	5	5	19	19	19	19	19	4	4	4	4	22	18	18	18	18	18	1

商品群1の需要が多い場合、 $k=1\sim 10$ が選択

商品群2の需要が多い場合、 $k=11\sim 20$ が選択

需要変動に応じて最適な保管割当パターンを選択することで総作業時間を削減

6. 数値実験

6.2. 保管割当変更法(ゾーニングなし)

P_t の推移

日数(日)	1	2	3	4	5
パターン固定	1	1	1	1	1
保管割当変更	1	1	1	1	18

	保管割当パターン	R(%)	保管割当変更時間(秒)	ピッキング時間(秒)	総作業時間(秒)
4日目	$k=1$	31.52	0.00	7002.31	7002.31
	$k=18$	46.03	1391.17	6015.73	7406.90
5日目	$k=1$	17.12	0.00	8132.12	8132.12
	$k=18$	55.54	1391.17	6209.22	7600.39

●5日目 ($k=1$ から $k=18$ に保管割当変更)

- $k=1, R=17.12(\%)$

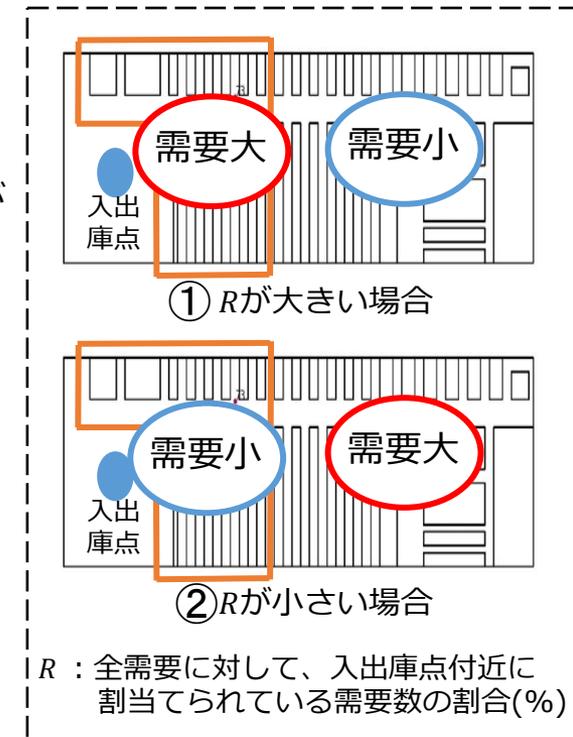
保管割当変更時間は発生しないが、 R は小さく作業者は倉庫奥への移動が多くなるため(右図②)、ピッキング時間(8132.12(秒))は大きい

- $k=18, R=55.54(\%)$

保管割当変更時間は発生するが($k=1 \rightarrow 18, 1391.17$ (秒))
 R は大きいため(右図①)、ピッキング時間(6209.22(秒))は小さい

保管割当変更時間は発生するが、
 R を大きくすることでピッキング時間を削減可能

→総作業時間を削減可能な場合がある



6. 数値実験

6.3. 保管割当変更法(通常ゾーニング)

評価

- ・ 保管割当変更法が及ぼす、総作業時間と総ストレスへの影響
- ・ 通常ゾーニングを用いた保管割当変更法が及ぼす、総作業時間と総ストレスへの影響
- ・ 動的ゾーニングを用いた保管割当変更法が及ぼす、総作業時間と総ストレスへの影響

保管割当変更 (ゾーニングなし)

総作業時間と総ストレス削減率

● 保管割当変更 (保管割当パターン固定を基準)

総作業時間		総ストレス	
平均値	最大値	平均値	最大値
9.04%	26.78%	1.97%	2.37%

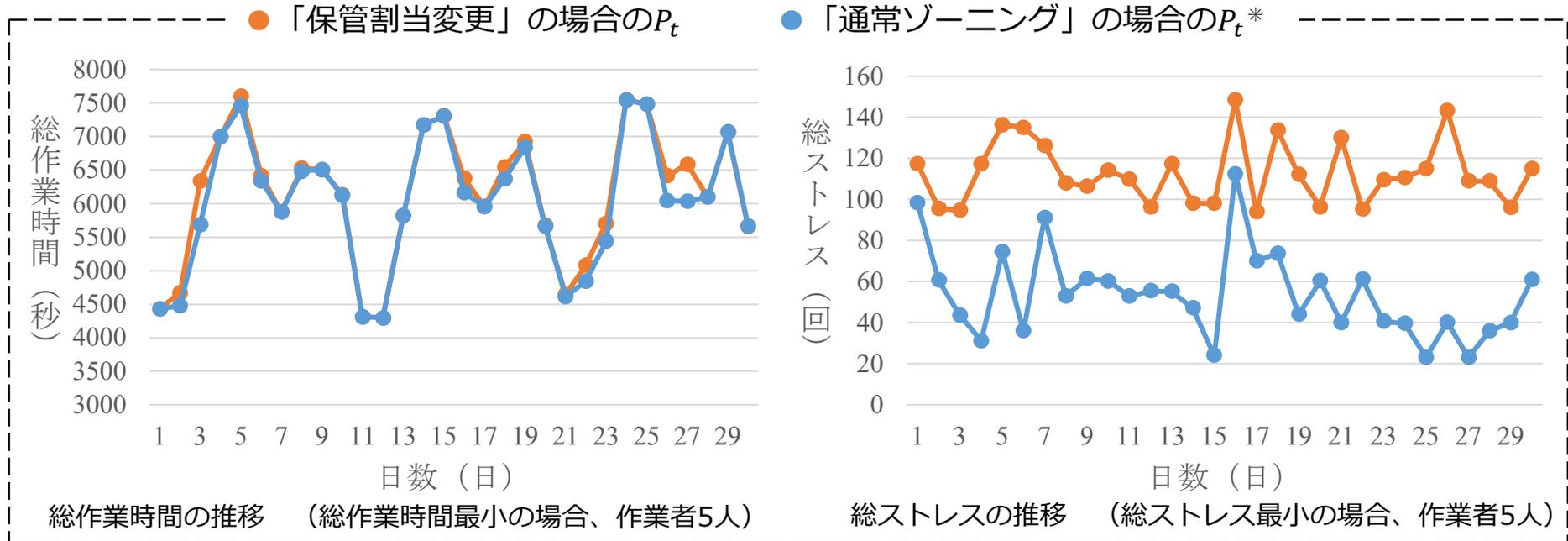
保管割当変更により総作業時間を大幅に削減できたが、総ストレスの削減率は低い・・・



混雑を緩和し総ストレスを削減するため、通常ゾーニング (作業者は割り当てられたゾーンの作業が終了するまでピッキング) を用いる

6. 数値実験

6.3. 保管割当変更法(通常ゾーニング)



通常ゾーニングを考慮した場合の総作業時間と総ストレス削減率 (保管割当変更を基準)

● 通常ゾーニング (保管割当変更を基準)			
総作業時間		総ストレス	
平均値	最大値	平均値	最大値
1.67%	0.66%	52.48%	24.26%

保管割当変更と比較し、通常ゾーニングを行うことで総ストレスを大幅に削減可能

6. 数値実験

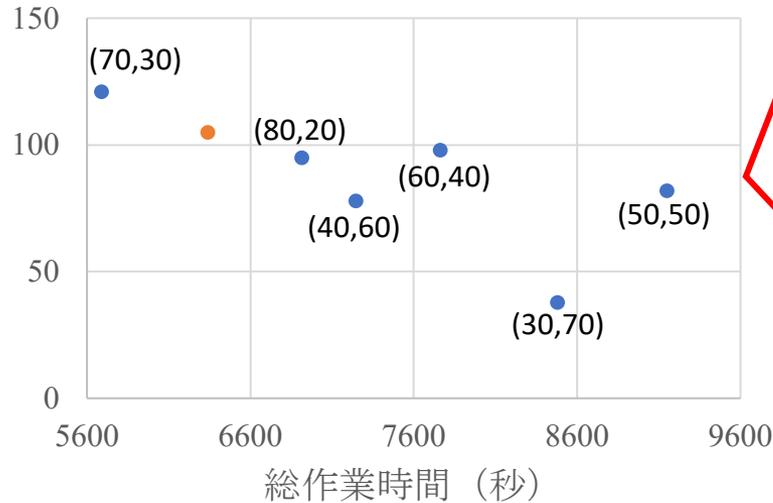
6.3. 保管割当変更法(通常ゾーニング)

通常ゾーニングにおける V 、総作業時間、総ストレスの平均（総作業時間最小の場合、3日目）

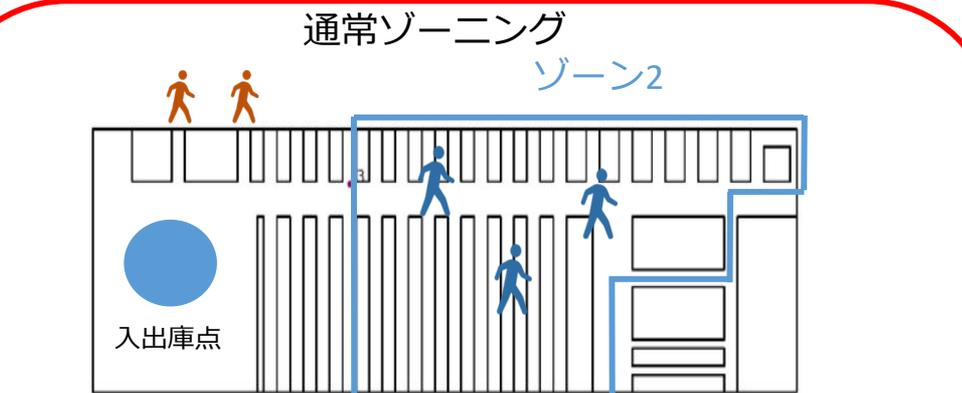
	V の平均（秒）	総作業時間の平均（秒）	総ストレスの平均（回）
● 通常ゾーニング	3,865.04	7,540.50	85.33

V : 5人の作業員の中で最も早く作業終了した作業員と、最も遅く作業終了した作業員のピッキング時間の差

- 「保管割当変更」の場合の P_t
- 「通常ゾーニング」の場合の、 P_t と z の組み合わせ
(z 1(%), z 2(%)) : ゾーン1とゾーン2の範囲



総作業時間と総ストレスの関係
(総作業時間最小の場合、3日目)



(例) ゾーン1の作業が早く終了した場合、作業員  は作業終了、ゾーン2の作業員はピッキング中

- 各ゾーンでの作業員数が削減されるため、総ストレスは減少傾向
- 各ゾーンのピッキング時間に差が発生し V は増加するため、総作業時間は増加傾向

6. 数値実験

6.4. 保管割当変更法(動的ゾーニング)

評価

- ・ 保管割当変更法が及ぼす、総作業時間と総ストレスへの影響
- ・ 通常ゾーニングを用いた保管割当変更法が及ぼす、総作業時間と総ストレスへの影響
- ・ 動的ゾーニングを用いた保管割当変更法が及ぼす、総作業時間と総ストレスへの影響

通常ゾーニング

通常ゾーニングにおけるV、総作業時間、総ストレスの平均（総作業時間最小の場合、3日目）

	Vの平均 (秒)	総作業時間の平均 (秒)	総ストレスの平均 (回)
● 通常ゾーニング	3,865.04	7,540.50	85.33

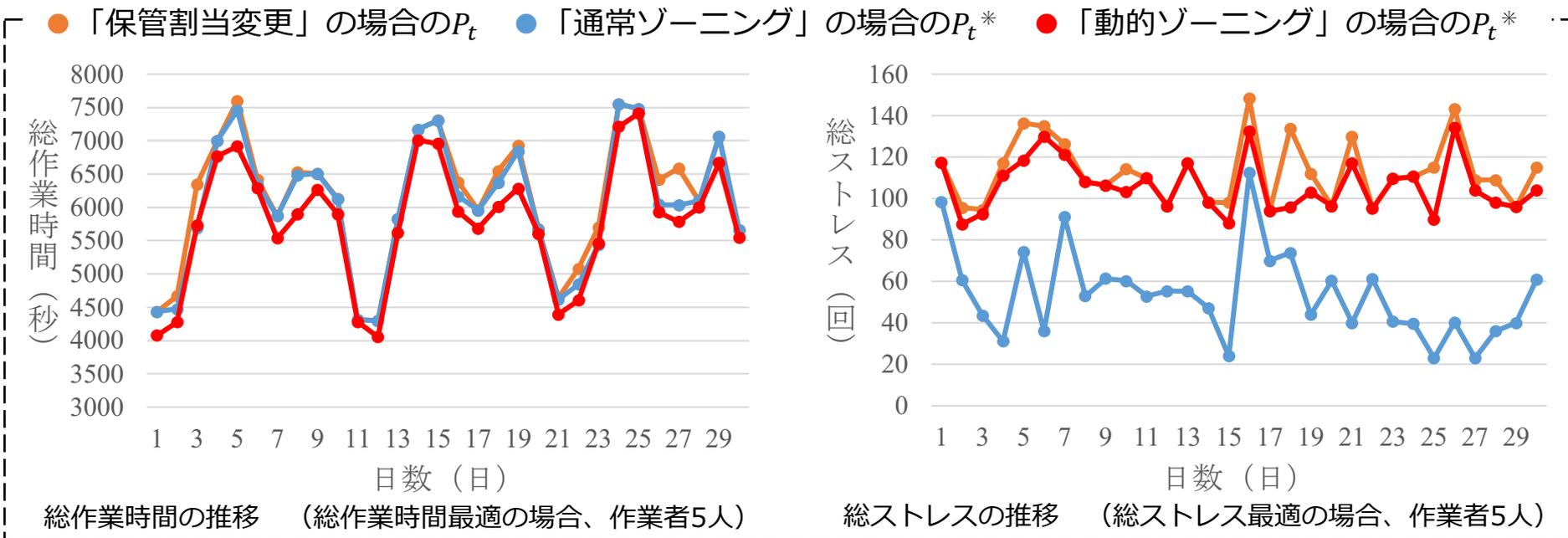
通常ゾーニングの場合、各ゾーンで作業量の差が発生するため、総作業時間は増加傾向



各ゾーンの作業量の差を削減し総作業時間を削減するため、動的ゾーニング（どちらかのゾーンの作業が早く終了した場合、他のゾーンの作業を作業員全員で分配）を用いる⁴⁵

6. 数値実験

6.4. 保管割当変更法(動的ゾーニング)



動的ゾーニングを考慮した場合の総作業時間と総ストレス削減率 (保管割当変更時間を基準)

● 動的ゾーニング (保管割当変更を基準)			
総作業時間		総ストレス	
平均値	最大値	平均値	最大値
5.47%	2.45%	5.96%	9.57%

保管割当変更/通常ゾーニングと比較し、動的ゾーニングを行うことで総作業時間をさらに削減可能

6. 数値実験

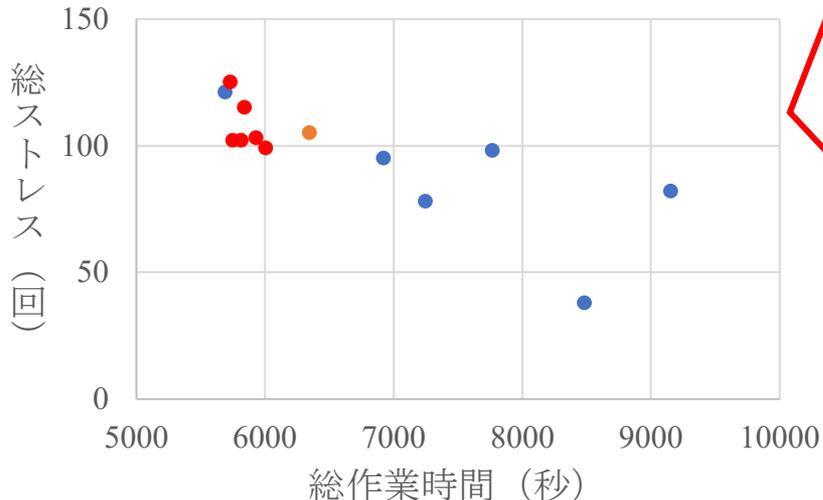
6.4. 保管割当変更法(動的ゾーニング)

動的ゾーニングにおける V 、総作業時間、総ストレスの平均（総作業時間最小の場合、3日目）

	V の平均 (秒)	総作業時間の平均 (秒)	総ストレスの平均 (回)
● 通常ゾーニング	3,865.04	7,540.50	85.33
● 動的ゾーニング	557.58	5,842.33	107.67

V : 5人の作業員の中で最も早く作業終了した作業員と、最も遅く作業終了した作業員のピッキング時間の差

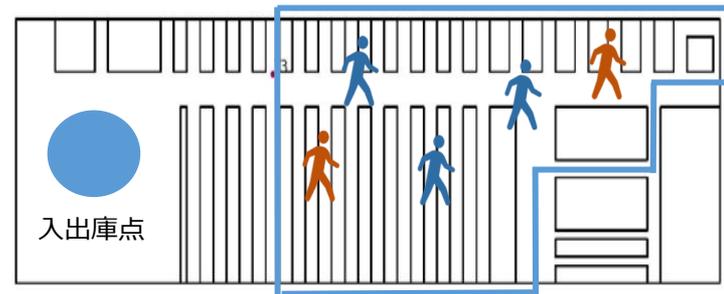
- 「保管割当変更」の場合の P_t
- 「通常ゾーニング」の場合の、 P_t と z の組み合わせ
- 「動的ゾーニング」の場合の、 P_t と z の組み合わせ



総作業時間と総ストレスの関係
(総作業時間最小の場合、3日目)

動的ゾーニング

ゾーン2



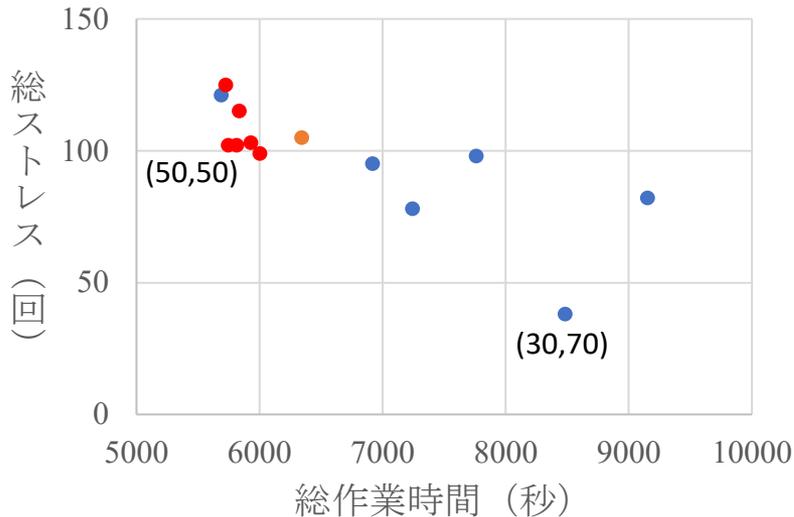
(例) ゾーン1の作業が早く終了した場合、ゾーン2の残りを作業員全員でピッキング

-
- ・ どちらかのゾーンで作業員全員で作業するため、総ストレスは増加傾向
 - ・ 作業量の差は削減し V は減少するため、総作業時間は減少傾向

6. 数値実験

6.4. 保管割当変更法(動的ゾーニング)

- 「保管割当変更」の場合の P_t
- 「通常ゾーニング」の場合の、 P_t と z の組み合わせ
- 「動的ゾーニング」の場合の、 P_t と z の組み合わせ
(z 1(%), z 2(%)) : ゾーン1とゾーン2の範囲



● 通常ゾーニング

- ・作業量に差が出るため、 V は増加し総作業時間は増加
- ・各ゾーンでの作業員数が削減されるため総ストレスは減少

● 動的ゾーニング

- ・作業量の差は削減されるため、 V は減少し総作業時間は減少
- ・どちらかのゾーンで作業員全員が作業する状態となるため総ストレスは増加

保管割当パターン P_t とゾーニングパターン z を選択することで、日々の状況に応じて適切なピッキング作業が可能

(例)

- ・総作業時間を削減したい場合 → 「動的ゾーニングの(50,50)」を選択
- ・総ストレスを削減したい場合 → 「通常ゾーニングの(30,70)」を選択

7.まとめ

目的

商品の需要変動環境下において、作業時間および心理的ストレスを評価可能なゾーニングを用いた保管割当変更モデルの提案

提案手法

マルチエージェントシミュレーションを用いて、作業時間および心理的ストレスを評価可能なゾーニングを用いた保管割当変更法を提案した

結果

- ・ 保管割当変更により総作業時間および総ストレスの削減が可能
- ・ 通常ゾーニングにより、各ゾーンでの作業員数が削減されるため総ストレスは減少傾向
- ・ 動的ゾーニングにより、各ゾーンの作業量の差は削減されるため総作業時間は減少傾向
- ・ 保管割当パターンとゾーニングパターンを選択することで、日々の状況に応じて適切なピッキング作業が可能

今後の展望

- ・ 身体的ストレスと心理的ストレスを同時に評価可能なモデルの提案
- ・ 今回はストレスの指標を「回数」としたが、対人距離 $d(m)$ とストレス強度の関係などの調査を行い、モデルに適用する必要がある

参考文献

- ・経済産業省、電子商取引に関する市場調査(2020)
- ・Le-Duc, T., De Koster, R.: Travel distance estimation and storage zone optimization in a 2-block class-based storage strategy warehouse, *International Journal of Production Research*, Vol. 43, No. 17, pp.3561-3581 (2005)
- ・René de Koster, Tho Le-Duc, 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)
- ・Teun van Gils, An Caris, Katrien Ramaekers, Kris Braekers, René B.M. de Koster: Designing efficient order picking systems: The effect of real-life features on the relationship among planning problems, *Transportation Research Part E*, Vol. 125, pp. 47-73 (2019)
- ・Pratik J. Parikh, Russell D. Meller: Selecting between batch and zone order picking strategies in a distribution center, *Transportation Research Part E*, Vol. 44, pp.696-719 (2008)
- ・Daria Battini, Christoph H. Glock, Eric H. Grosse, Alessandro Persona, Fabio Sgarbossa: Human energy expenditure in order picking storage assignment: A bi-object method, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 94, pp. 147-157 (2016)
- ・Martina Calzavara, Christoph H. Glock, Eric H. Groose, Alessandro Persona, Fabio Sgarbossa: Analysis of economic and ergonomic performance measures of different rack layout in an order picking warehouse, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 111, pp. 527-536 (2017)
- ・鈴木庸介, 西尾尚子, 伊藤史子, 都市部における心拍変動を用いた歩行時ストレスの評価方法の提案と適用, 公益社団法人日本都市計画学会 都市計画論文集, Vol. 54, No. 3, pp. 811-817 (2019)
- ・岩田紀, 時間待ちストレス不耐性に関する基礎的研究, 徳島大学総合科学 人間科学研究, Vol. 2, pp. 27-34 (1994)