

「数理科学の総合格闘技？」 ～現実に真正面から向き合う シミュレーション技術の広がり～

2025年10月24日
株式会社NTTデータ数理システム

概要

シミュレーションは最適化のためのモデリングツール

数理最適化が使えないときはシミュレーションの出番

シミュレーションは数理科学の総合格闘技

想定する聴衆層

「シミュレーション」は何となくわかるが、

- ・ 「シミュレーションによる問題解決」はピンとこない
- ・ 「数理最適化」「機械学習」「シミュレーション」の棲み分けがしつくりきていない
という方

自己紹介

豊岡祥 株式会社NTTデータ数理システム
シミュレーション＆マイニング部 グループリーダー



「シミュレーション・数理最適化・機械学習」を活用した受託開発

広告配信の効果予測と最適化、配送経路最適化(ラストワンマイル)

ECサイトのレコメンデーションモデル構築、法人営業データ分析

製造ラインシミュレーション、交通シミュレーション、感染症シミュレーション

S⁴ Simulation System の開発

2D人流シミュレーションに適した移動経路計算アルゴリズム

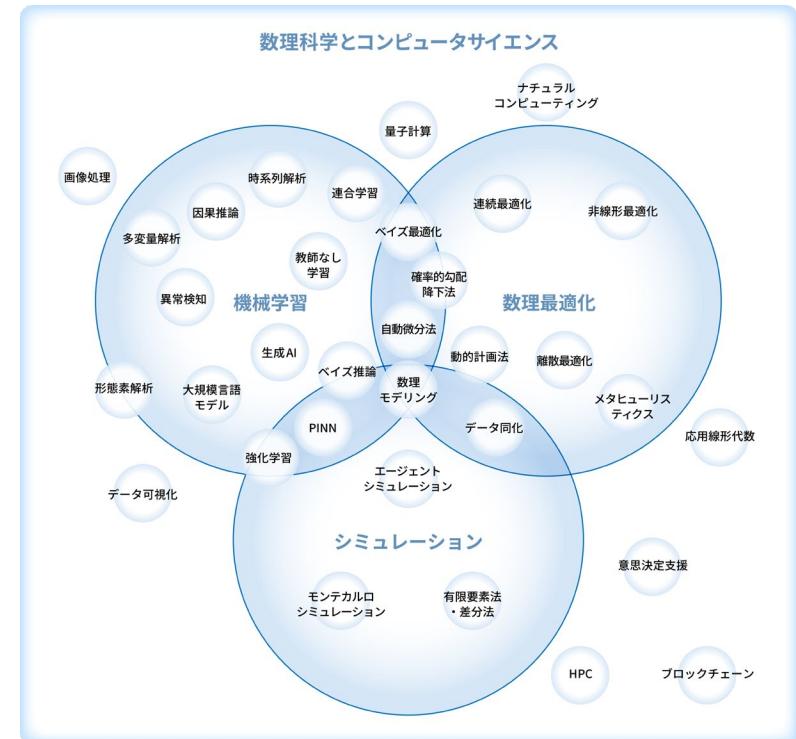
可視化ダッシュボード、シミュレータと強化学習との接合

執筆

Python 講座 <https://www.msiism.jp/column/python-code-reading/>

XAI(説明可能なAI)——そのとき人工知能はどう考えたのか？

Python入門 AtCoder Programming Guide for beginners



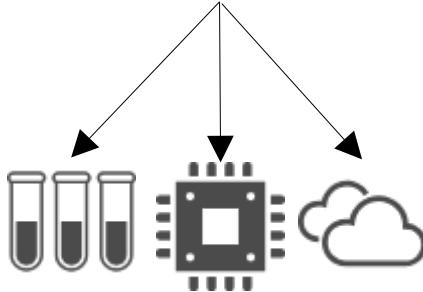


01

シミュレーションとは？

本講演で念頭に置くシミュレーション

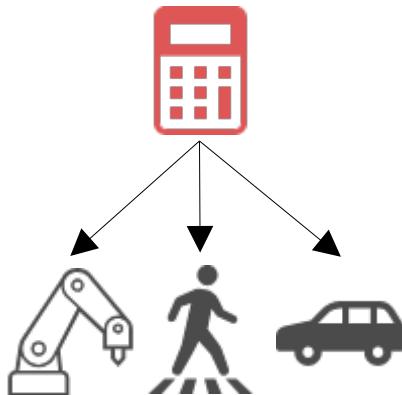
シミュレーション = 計算機上で現実を再現する技術



特化型シミュレーション:

扱いたい対象ごとに特化したシミュレータを構築する

- ・ 化学プラントの制御シミュレーション
- ・ 半導体製造加工シミュレーション
- ・ 気象予測シミュレーション…



汎用シミュレーション:

シミュレーションの汎用部品を準備しておき、組み合わせる

- ・ 離散イベントシミュレーション（製造・物流）
- ・ エージェントシミュレーション（人流・交通）



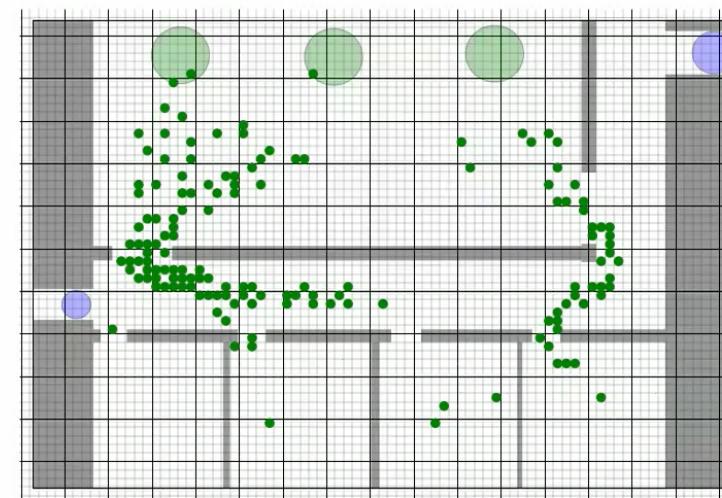
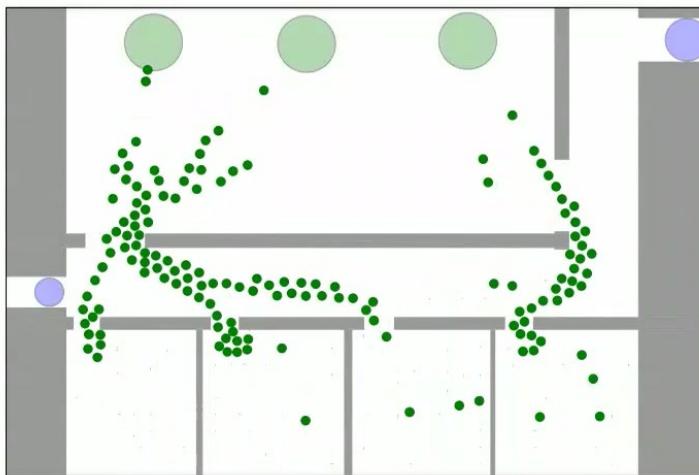
S⁴ Simulation System

次ページから紹介します

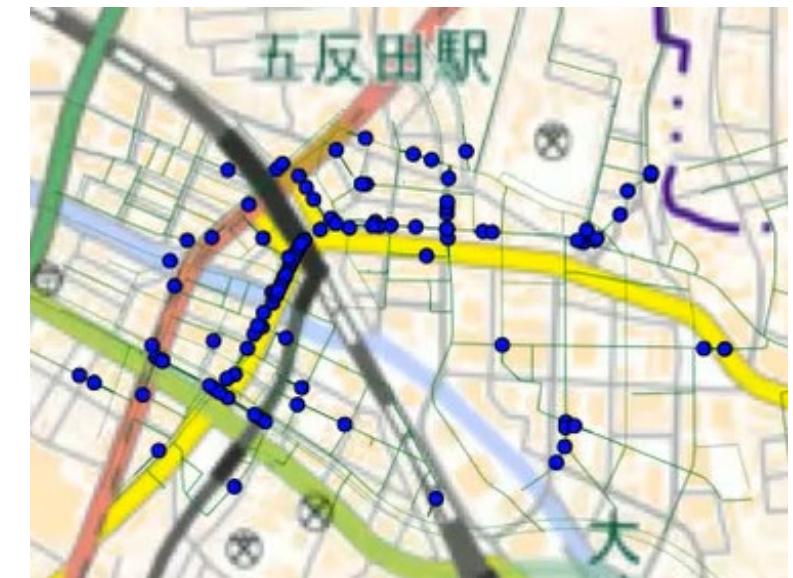
人流・交通シミュレーション

人や車の流れを再現する技術

人流シミュレーション



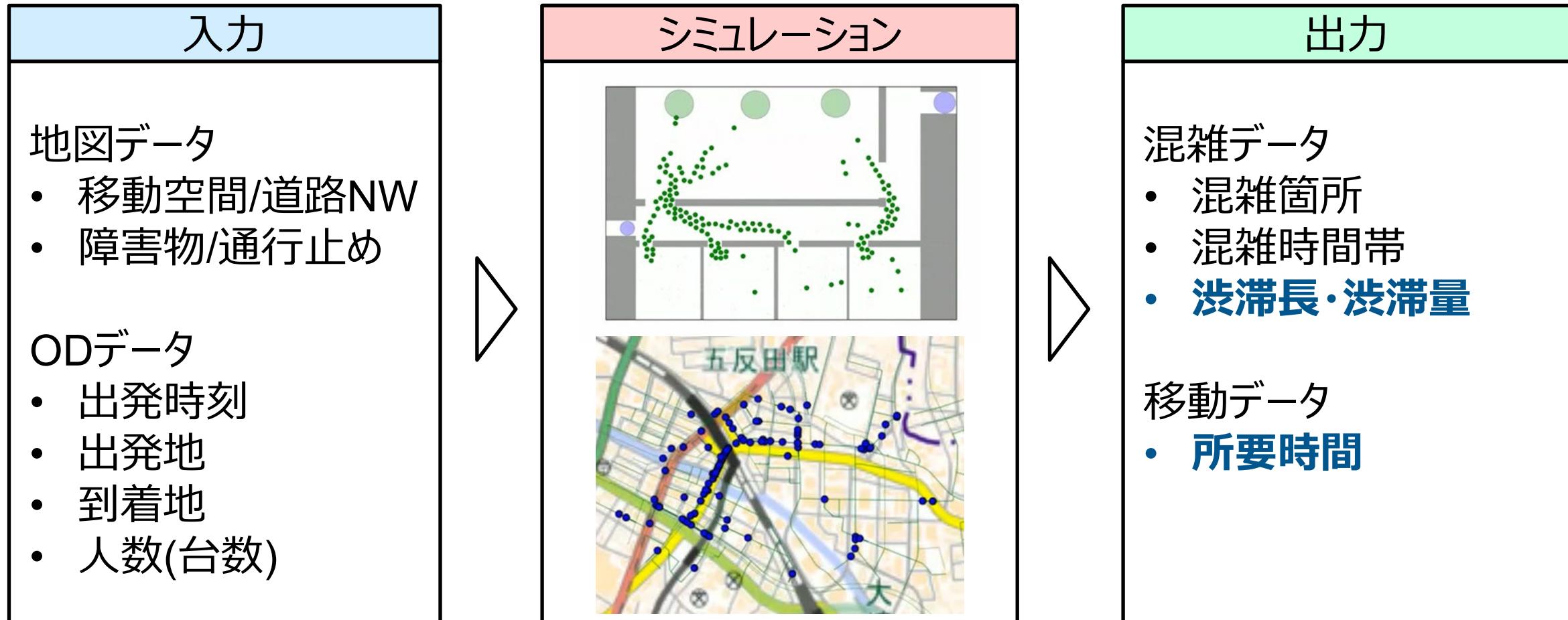
交通シミュレーション



出典：国土地理院ウェブサイト

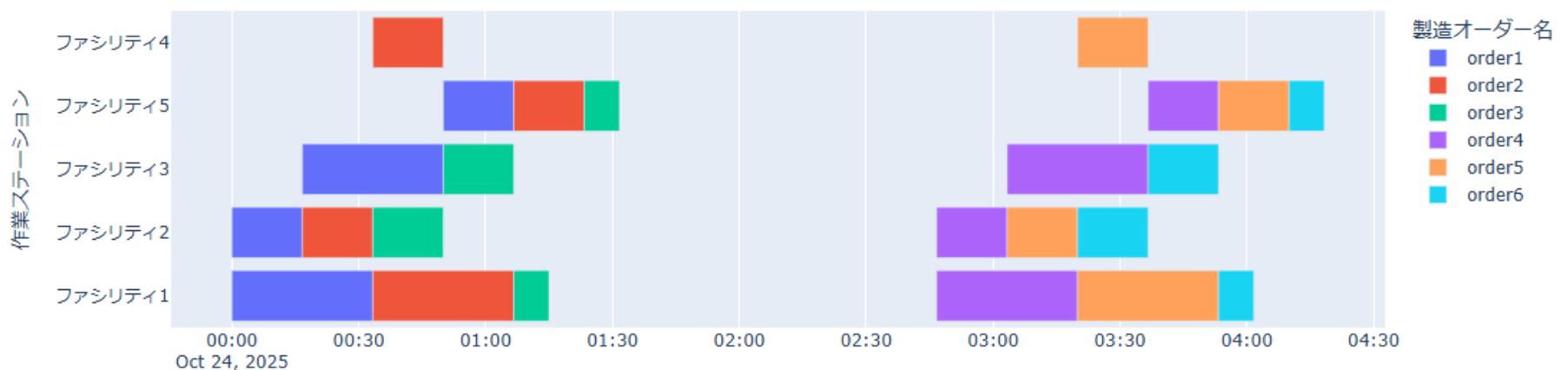
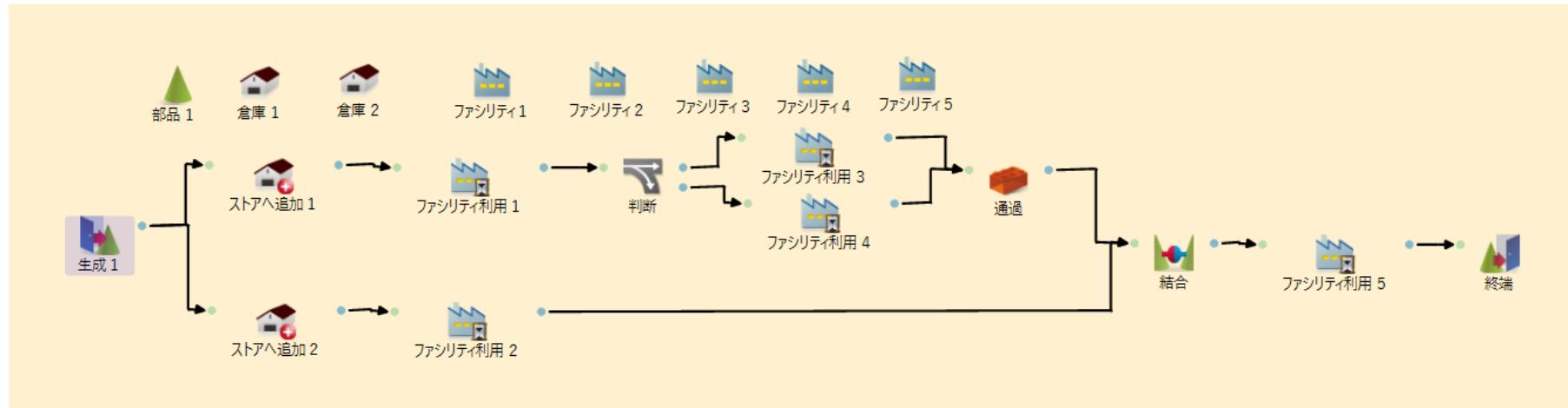
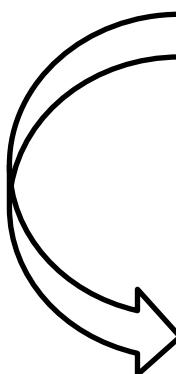
人流・交通シミュレーション

人や車の流れを再現する技術



製造ラインシミュレーション

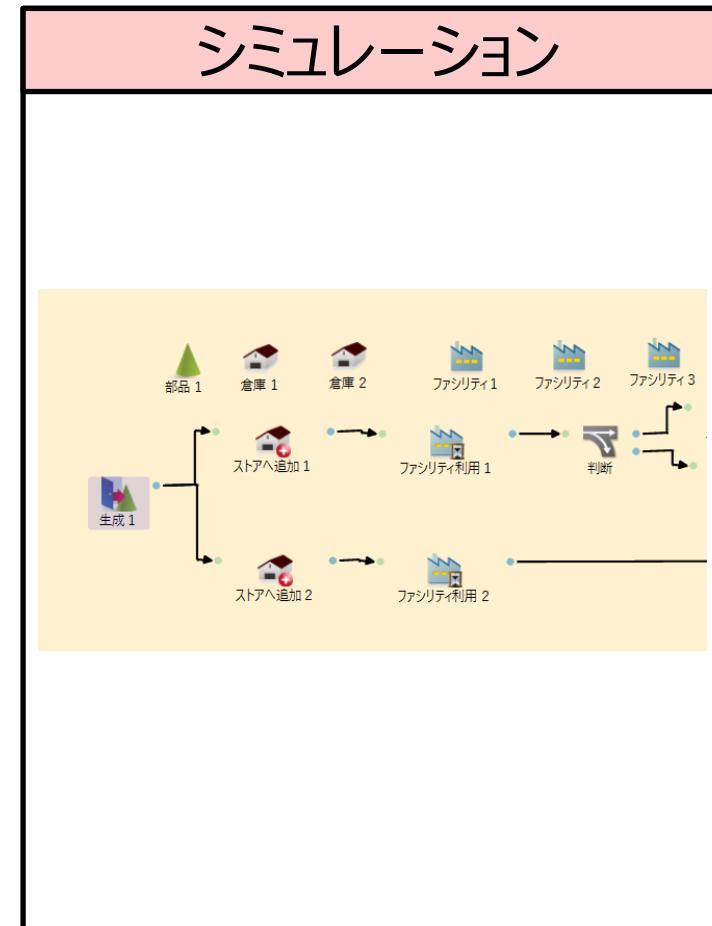
工場の製造ラインにおける機械の動作や部品の流れを再現する技術



製造ラインシミュレーション

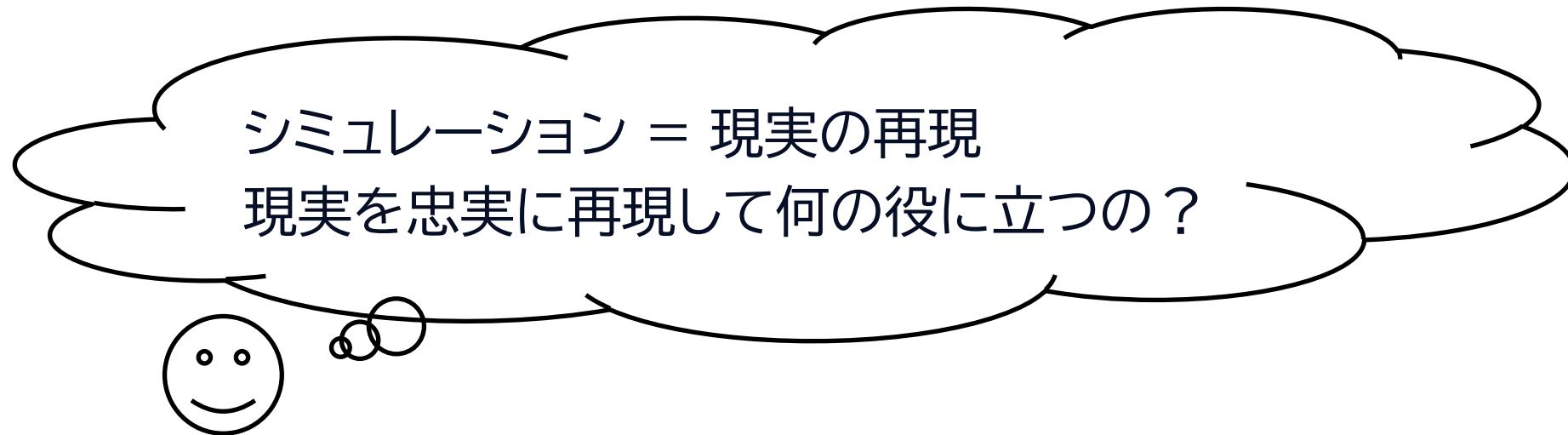
工場の製造ラインにおける機械の動作や部品の流れを再現する技術

入力
設備データ • 作業機械 • シフト • 処理時間
生産計画 • 投入順序 • 分岐・合流条件 ...

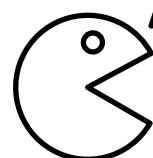


出力
製造結果 • 生産効率 • ガントチャート
分析 • 機械の稼働率 • 滞留数・待ち時間 • ボトルネック可視化

よくある(?)誤解 その1



シミュレーションは役に立つ！
意思決定につながる予測や最適化のためのモデリングツール！





02

シミュレーションを活用した 最適化技術

シミュレーションの活用パターン

予測

What-If 分析

最適化

シミュレーションの活用パターン

予測: 所定の入力に対する出力を知りたい

What-If 分析

最適化

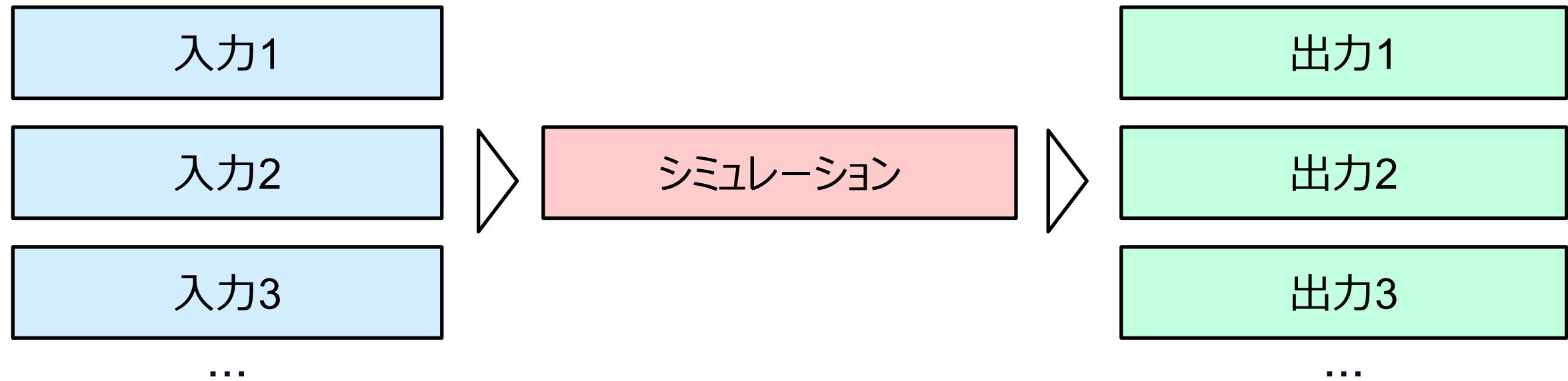


シミュレーションの活用パターン

予測: 所定の入力に対する出力を知りたい

What-If 分析: 入力が変化したときの出力の変化を知りたい

最適化

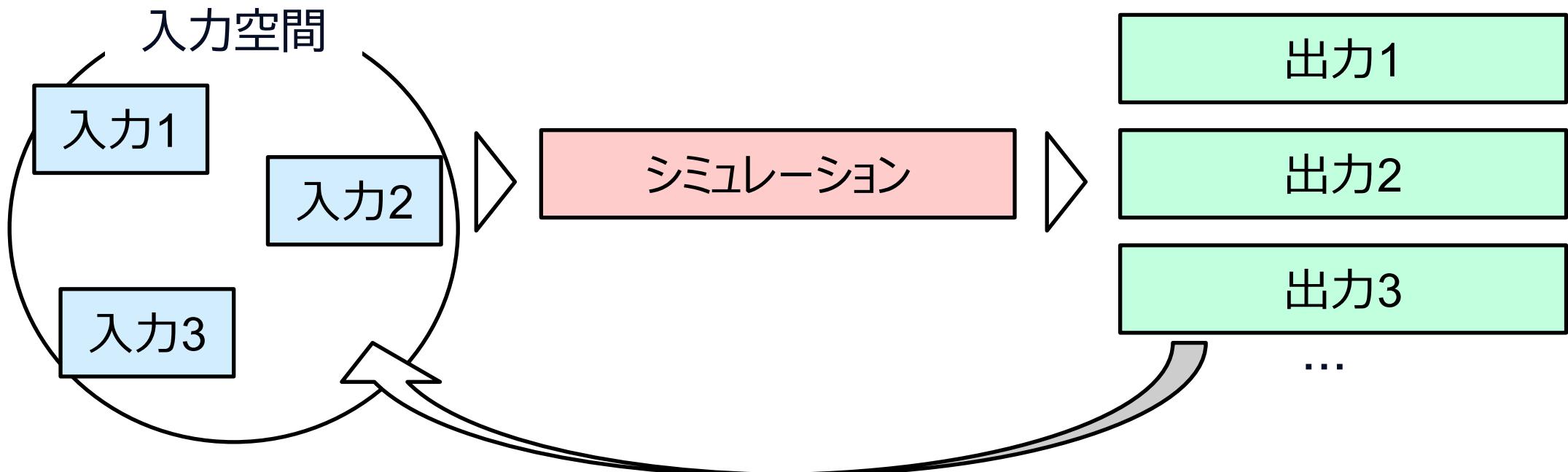


シミュレーションの活用パターン

予測: 所定の入力に対する出力を知りたい

What-If 分析: 入力が変化したときの出力の変化を知りたい

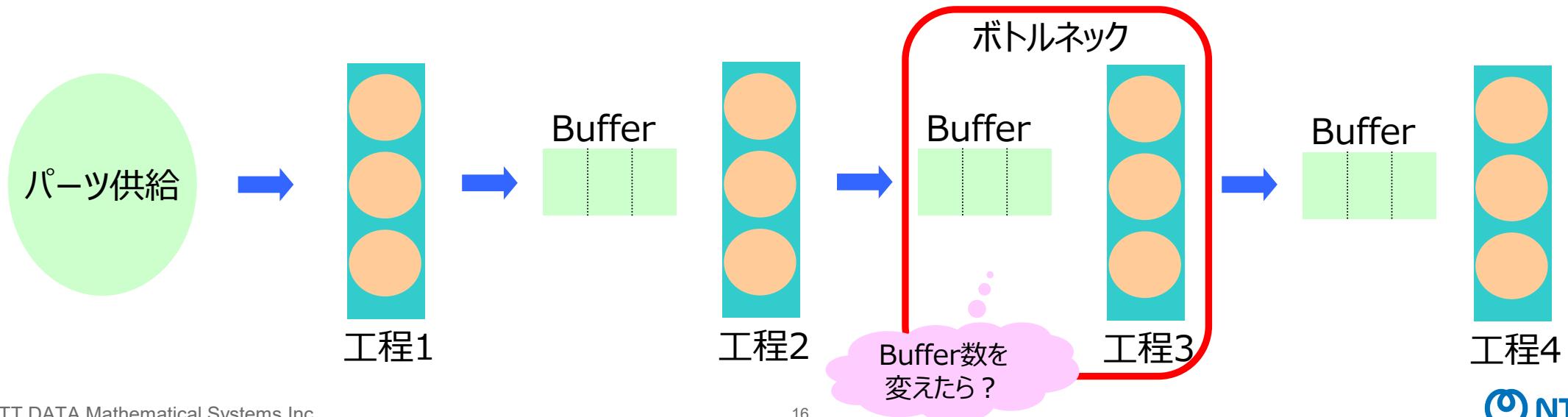
最適化: 出力を最適にする入力を知りたい



ケース① 半導体生産シミュレーション→設備投資最適化

背景:

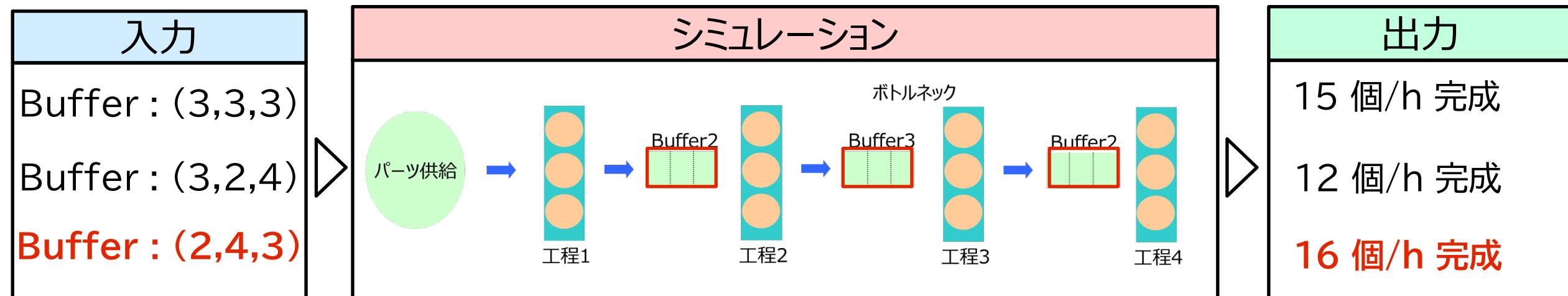
- 生産工程において特定の工程がボトルネックになっている
- 仕掛品を配置する Buffer を設けて効率を上げたいが、施設の面積に限りがある。



ケース① 半導体生産シミュレーション→設備投資最適化

取り組み:

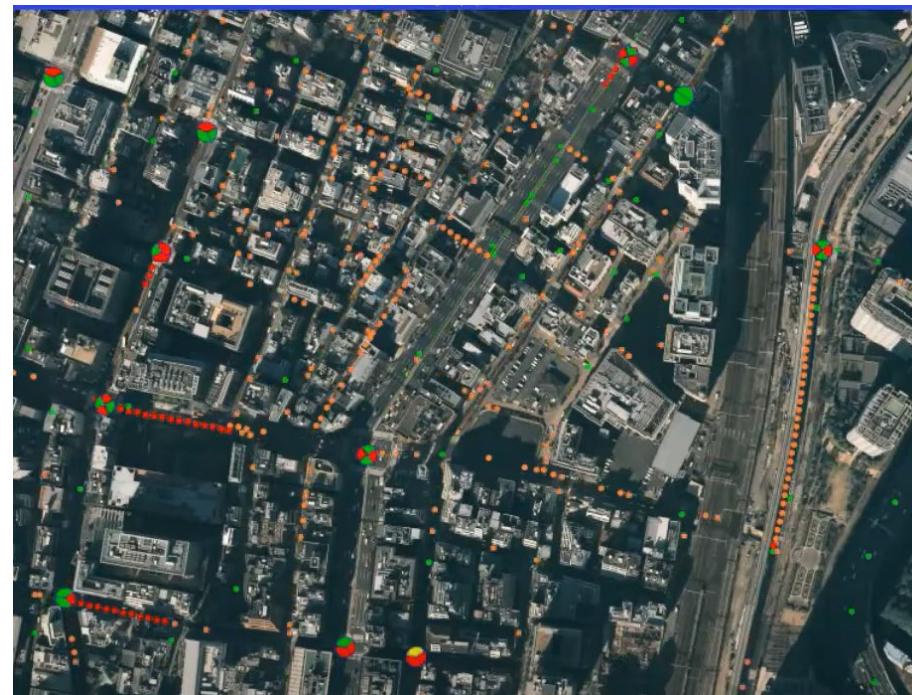
1. シミュレーション上に生産ラインを構築 → ボトルネックを再現
2. 製造効率を最大化する Buffer の割当を求める
 - ✓ 割当の組み合わせ数が膨大のため、最適化手法の選定が重要
 - GA(遺伝的アルゴリズム), 焼きなまし法などのメタヒューリスティック最適化
 - ベイズ最適化などの統計モデルにもとづく最適化手法



ケース② 交通シミュレーション→信号制御効率化

背景:

- ・ 海外の大都市において渋滞が常態化している
- ・ 現在起きている渋滞だけでなく、GPSデータと連携し今後生じるであろう渋滞も考慮したリアルタイムな交通信号による制御を行いたい



ケース② 交通シミュレーション→信号制御効率化

取り組み:

1. 市街地の交通シミュレーションを構築

2. 複数の**信号制御方式の比較**

- ・ 時間式：あらかじめ決められた周期
- ・ 動的制御：車両が多くなりそうな方向を予測し、その方向の青時間を長くする

色々な施策を評価可能

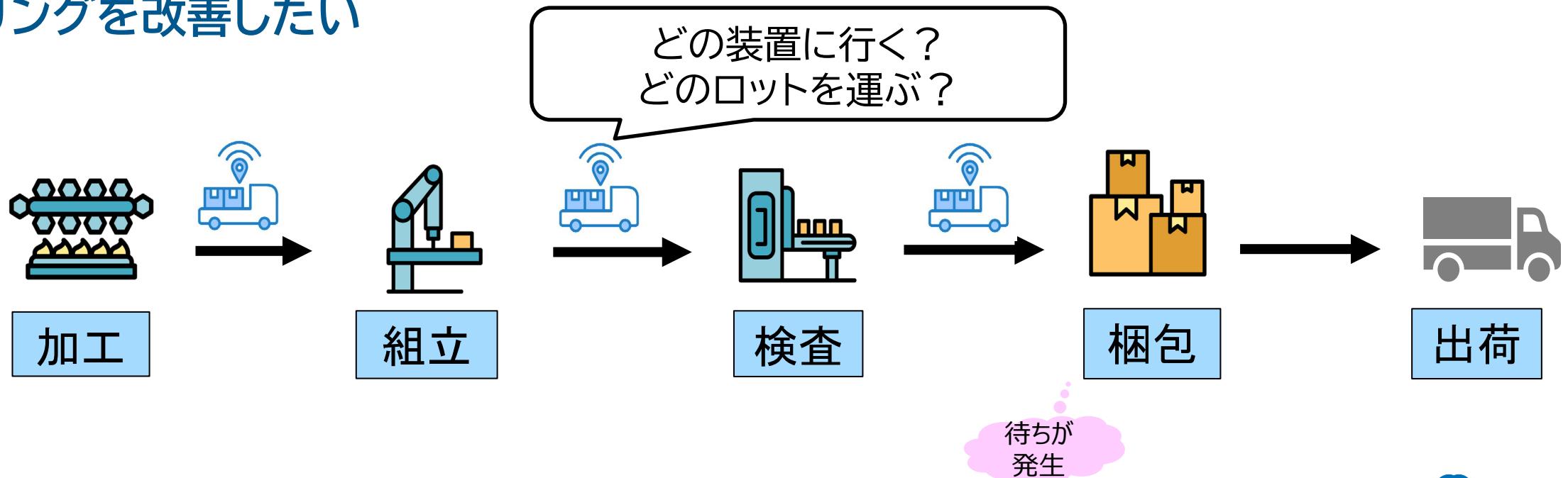
- ・通行止め
- ・速度規制
- ・公共交通誘導



ケース③ 構内物流シミュレーション→ AGVの運用最適化

背景:

- 生産ラインにおいてAGV(無人搬送車)が工程間のロット輸送を行う
 - 固定巡回方式：決まった経路を巡回する
 - 動的スケジューリング方式：運ぶロットをリアルタイムに決める
- 輸送がボトルネックとなり全体のスループットが上げられないため、**動的スケジューリングを改善したい**



ケース③ 構内物流シミュレーション→ AGVの運用最適化

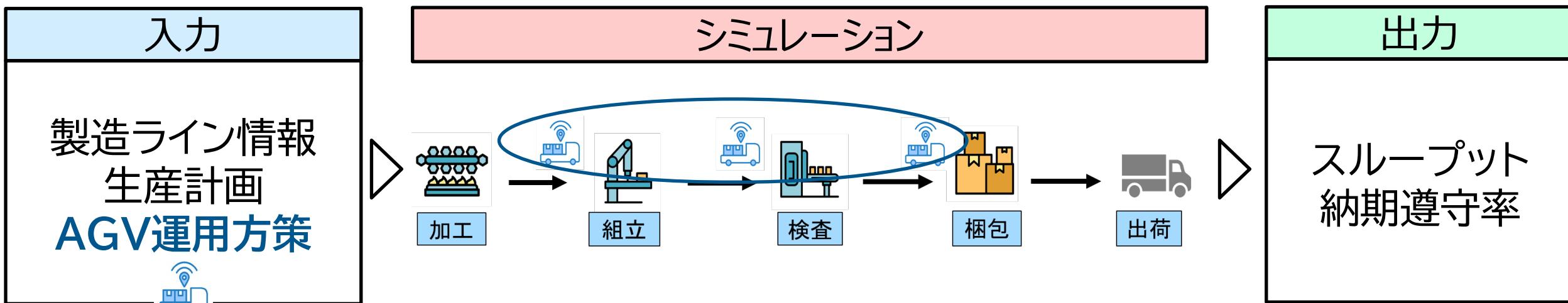
取り組み:

1. AGV を含む工場のプロセスをシミュレーション
2. AGV を効率よく運用する方策を強化学習により構築



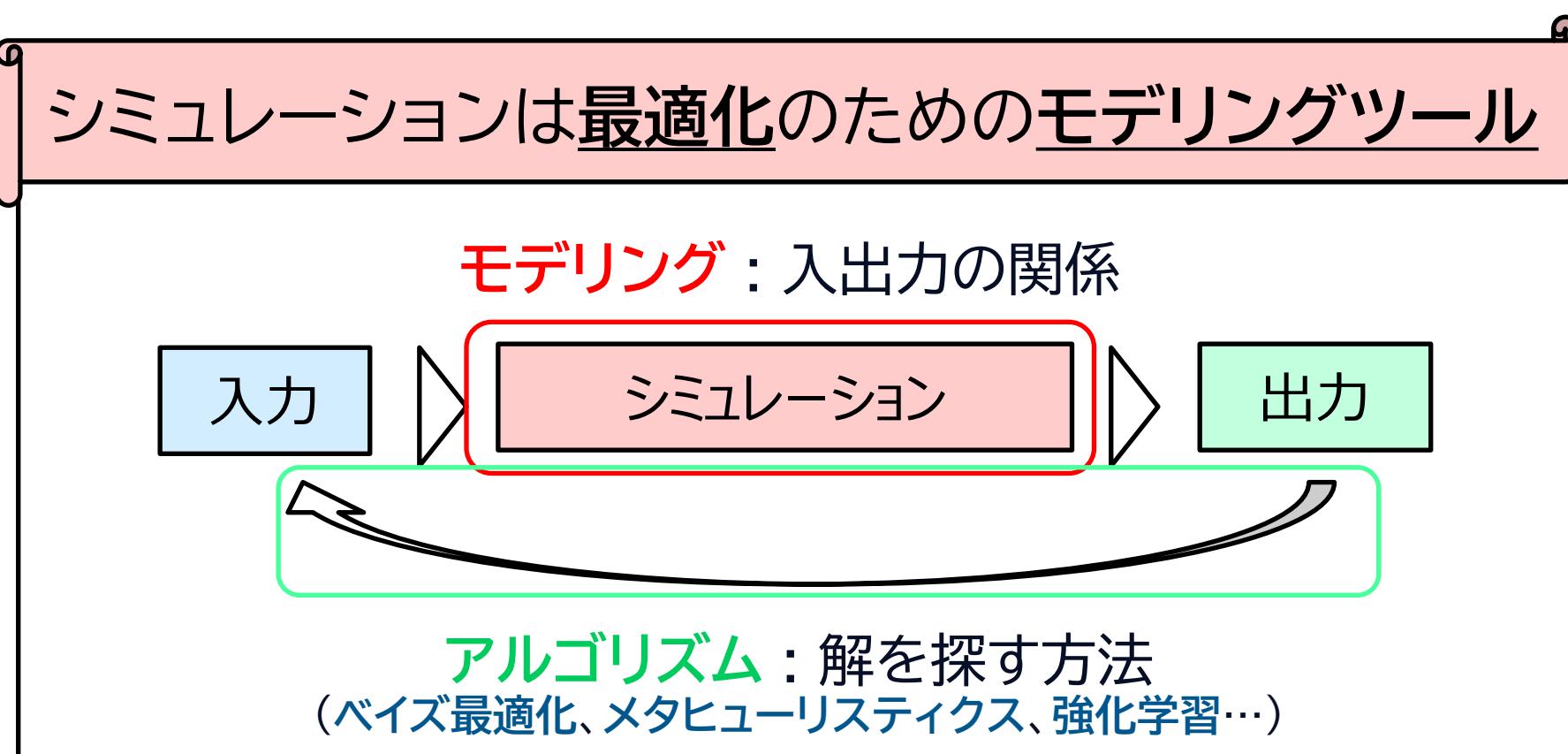
納期の近いロットから運ぶ
空いている装置に運ぶ
...

シミュレーションで試行錯誤しながら
うまくいく方策を自動で学習させる方法

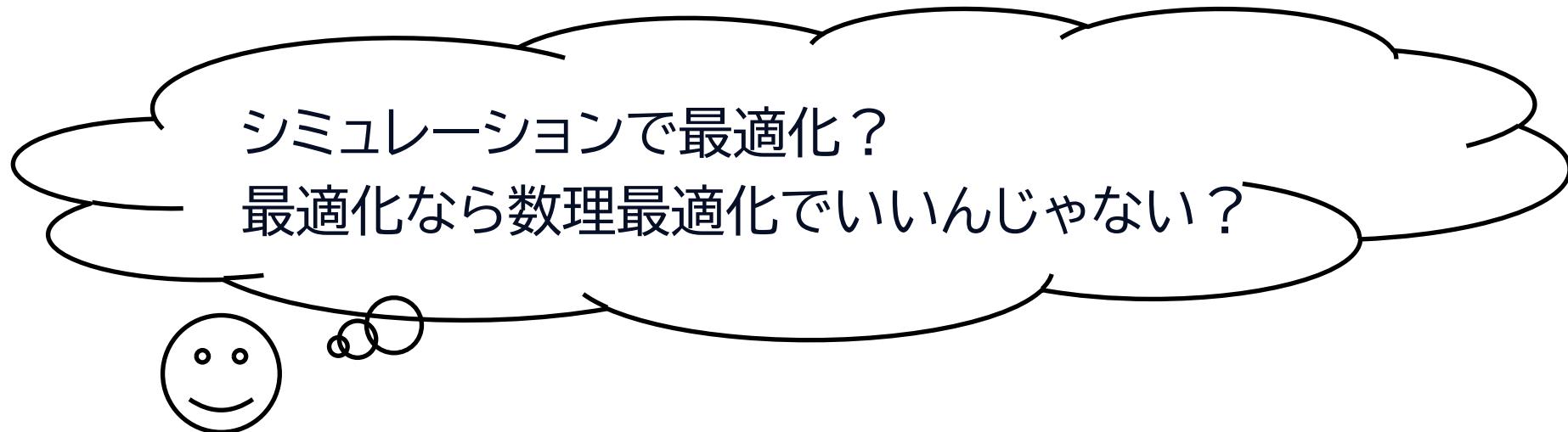


ここまでまとめ

複雑な現実をシミュレータで再現することで、**現実を最適化するソルバー**を構築することが可能。



よくある(?)誤解 その2



数理最適化の枠組みで表現できない最適化タスクが多く存在する！
シミュレーションなら数式で表現できない対象のモデリングが可能





03

最適化のための 数理科学技術

最適化問題の分類

「最適化問題」を思いつく限り列挙してみて。結果だけ表示

- 線形計画問題（LP）
 - 整数計画問題（IP）
 - 混合整数線形計画問題（MILP）
 - 非線形計画問題（NLP）
 - 二次計画問題（QP）
 - 二次制約付き二次計画問題（QCQP）
 - 凸最適化問題
 - 非凸最適化問題
 - 制約なし最適化問題
 - 多目的最適化問題
 - 確率的最適化問題
 - ロバスト最適化問題
 - 動的最適化問題
 - 離散最適化問題
 - 組合せ最適化問題
 - ネットワークフロー最適化問題
 - 最短経路問題
 - 最小費用流問題
 - 最大流問題
 - 巡回セールスマン問題（TSP）
 - ナップサック問題
 - 割当問題
-



最適化問題の分類

「最適化問題」を思いつく限り列举してみて。結果だけ表示

線形 or 非線形

制約なし or あり

離散 or 連続

単目的 or 多目的

確率的 or 確定的

...

↑数理最適化問題の性質による分類。

線形計画問題 (LP)

整数計画問題 (IP)

混合整数線形計画問題 (MILP)

非線形計画問題 (NLP)

二次計画問題 (QP)

二次制約付き二次計画問題 (QCQP)

凸最適化問題

非凸最適化問題

制約なし最適化問題

多目的最適化問題

確率的最適化問題

ロバスト最適化問題

動的最適化問題

離散最適化問題

組合せ最適化問題

ネットワークフロー最適化問題

最短経路問題

最小費用流問題

最大流問題

巡回セールスマン問題 (TSP)

ナップサック問題

割当問題



最適化問題の分類

「最適化問題」を思いつく限り列举してみて。結果だけ表示

ナップサック問題

最小費用流問題

最短経路問題

ネットワークフロー問題

巡回セールスマントロード問題(TSP)

...

↑ 代表的な組合せ最適化問題の数々

線形計画問題 (LP)

整数計画問題 (IP)

混合整数線形計画問題 (MILP)

非線形計画問題 (NLP)

二次計画問題 (QP)

二次制約付き二次計画問題 (QCQP)

凸最適化問題

非凸最適化問題

制約なし最適化問題

多目的最適化問題

確率的最適化問題

ロバスト最適化問題

動的最適化問題

離散最適化問題

組合せ最適化問題

ネットワークフロー最適化問題

最短経路問題

最小費用流問題

最大流問題

巡回セールスマントロード問題 (TSP)

ナップサック問題

割当問題



「最適化問題」の分類

最適化問題

信号制御最適化
プラント運転最適化
エネルギー管理最適化
避難経路最適化
動的配送計画問題
囲碁・チェス
...

施設配置問題
配送計画問題
生産計画最適化
スケジューリング問題
最適輸送問題
機械学習モデル訓練
(損失最小化)
...

ポートフォリオ最適化
広告配分最適化
在庫最適化
株式のアルゴリズム取引
価格最適化(Dynamic Pricing)
顧客満足度最大化
...

「最適化問題」の分類

入力 ⇒ 出力の関係が既知かつ単純 (数式で表現可能)

エイリアン 合理最適化

避難経路最適化

動的配送計画問題

囲碁・チェス

...

最適化問題

施設配置問題
配送計画問題
生産計画最適化
スケジューリング問題
最適輸送問題
機械学習モデル訓練
(損失最小化)
...

ポートフォリオ最適化
広告配分最適化
在庫最適化
株式のアルゴリズム取引
価格最適化(Dynamic Pricing)
顧客満足度最大化
...

「最適化問題」の分類

信号制御最適化
プラント運転最適化
エネルギー管理最適化
避難経路最適化
動的配送計画問題
囲碁・チェス
...

最適化問題

入力 ⇒ 出力の関係が未知

配送計画問題
生産計画最適化
スケジューリング問題
最適輸送問題
機械学習モデル訓練
(損失最小化)
...

ポートフォリオ最適化
広告配分最適化
在庫最適化
株式のアルゴリズム取引
価格最適化(Dynamic Pricing)
顧客満足度最大化
...

「最適化問題」の分類

最適化問題

信号制御最適化
プラント運転最適化
エネルギー管理最適化
避難経路最適化
動的配送計画問題
囲碁・チェス
...

入力 ⇒ 出力の関係は既知だが、
複雑(数式で表現不可能)
あるいは行動とともに変化する

最適輸送問題
機械学習モデル訓練
(損失最小化)

オリオ最適化
分最適化
適化
アルゴリズム取引
価格最適化(Dynamic Pricing)
顧客満足度最大化
...

「最適化問題」の分類

モデル既知

環境が変化する

- 信号制御最適化
- プラント運転最適化
- エネルギー管理最適化
- 避難経路最適化
- 動的配送計画問題
- 囲碁・チェス

環境が変化しない

- 施設配置問題
- 配送計画問題
- 生産計画最適化
- スケジューリング問題
- 最適輸送問題
- 機械学習モデル訓練
(損失最小化)

モデル未知

- ポートフォリオ最適化
- 広告配分最適化
- 在庫最適化
- 株式のアルゴリズム取引
- 価格最適化(Dynamic Pricing)
- 顧客満足度最大化

最適化のための数理科学技術

モデル既知・環境が変化しない

⇒ (対処例) 数理最適化で定式化して解く

- ✓ MIPによるスケジュール最適化
- ✓ 巨大近傍法による配送計画最適化
- ✓ 貪欲法による資源配分最適化



最適性の保証のある解、最適に近い解が期待できる



複雑な設定に適用できない

最適化のための数理科学技術

モデル未知

⇒ (対処例) 機械学習でモデルを推定してから数理最適化を適用する

- ✓ 株式の価格変動を予測し、予測に基づいて最適な取引アルゴリズムを構築
- ✓ 価格-需要関係を予測し、最適な価格設定を動的計画法で求める
- ✓ 広告出稿の視聴数を予測し、リーチを最大化する予算配分を求める



データ活用により将来の不確実性を考慮できる



学習に時間がかかったり、予測が失敗することがある

最適化のための数理科学技術

モデル既知・環境が変化する

⇒ (対処例) 環境を再現するシミュレータを構築し、その上で行動を最適化する

- ✓ 運転シミュレータ上で強化学習することで自動運転
- ✓ 交通シミュレータ上で信号制御のポリシーを最適化
- ✓ 配送シミュレータ上でオンライン注文をモンテカルロシミュレーションして割り当て車両を選択



モデルの表現力が高い



モデルの構築が手間。計算コストが問題になることがある※。

※ シミュレーションモデルを機械学習モデルで代用して高速化する方法もある

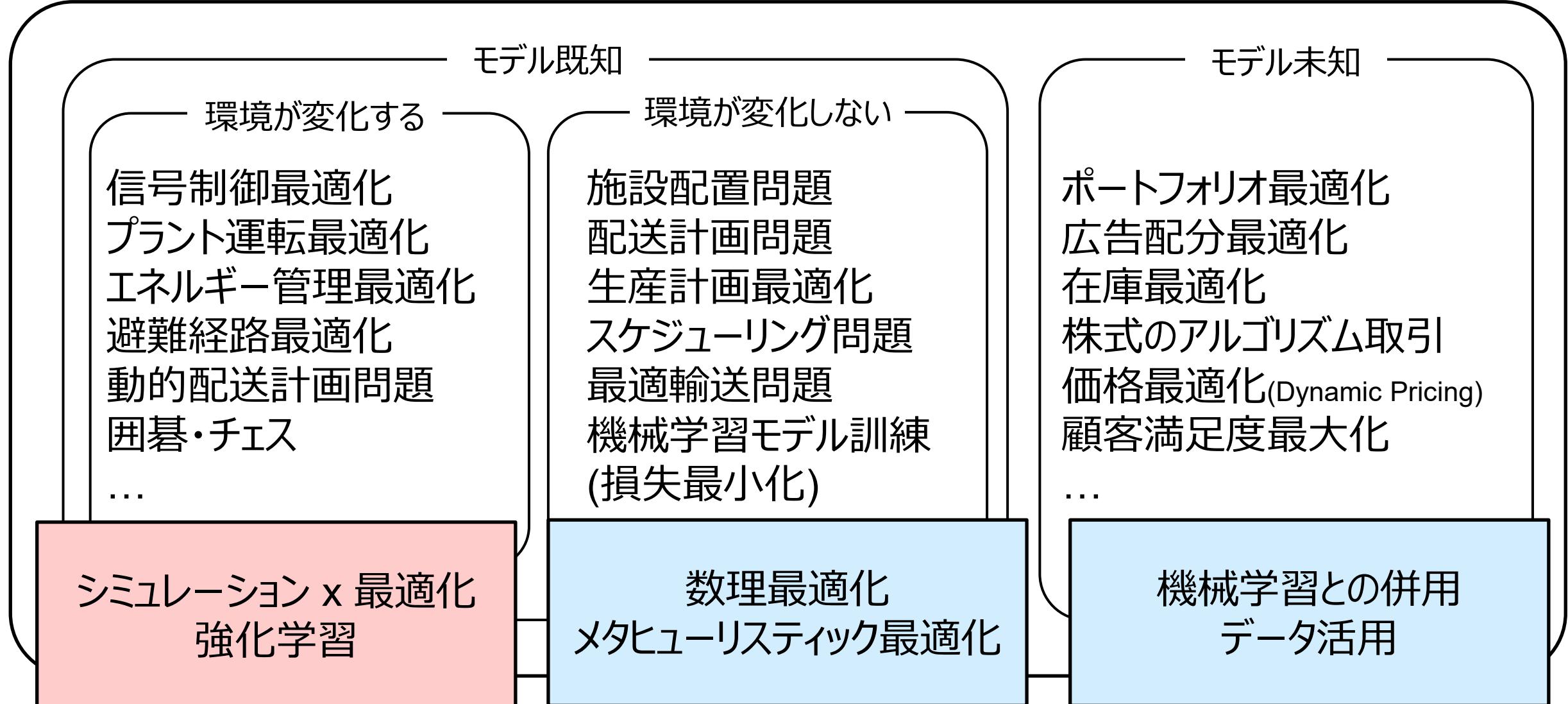
PIML の概説 - 物理法則を組み込んだ深層学習技術（1） | NTTデータ数理システム

<https://www.msiism.jp/article/physics-informed-machine-learning1.html>



PIML 数理

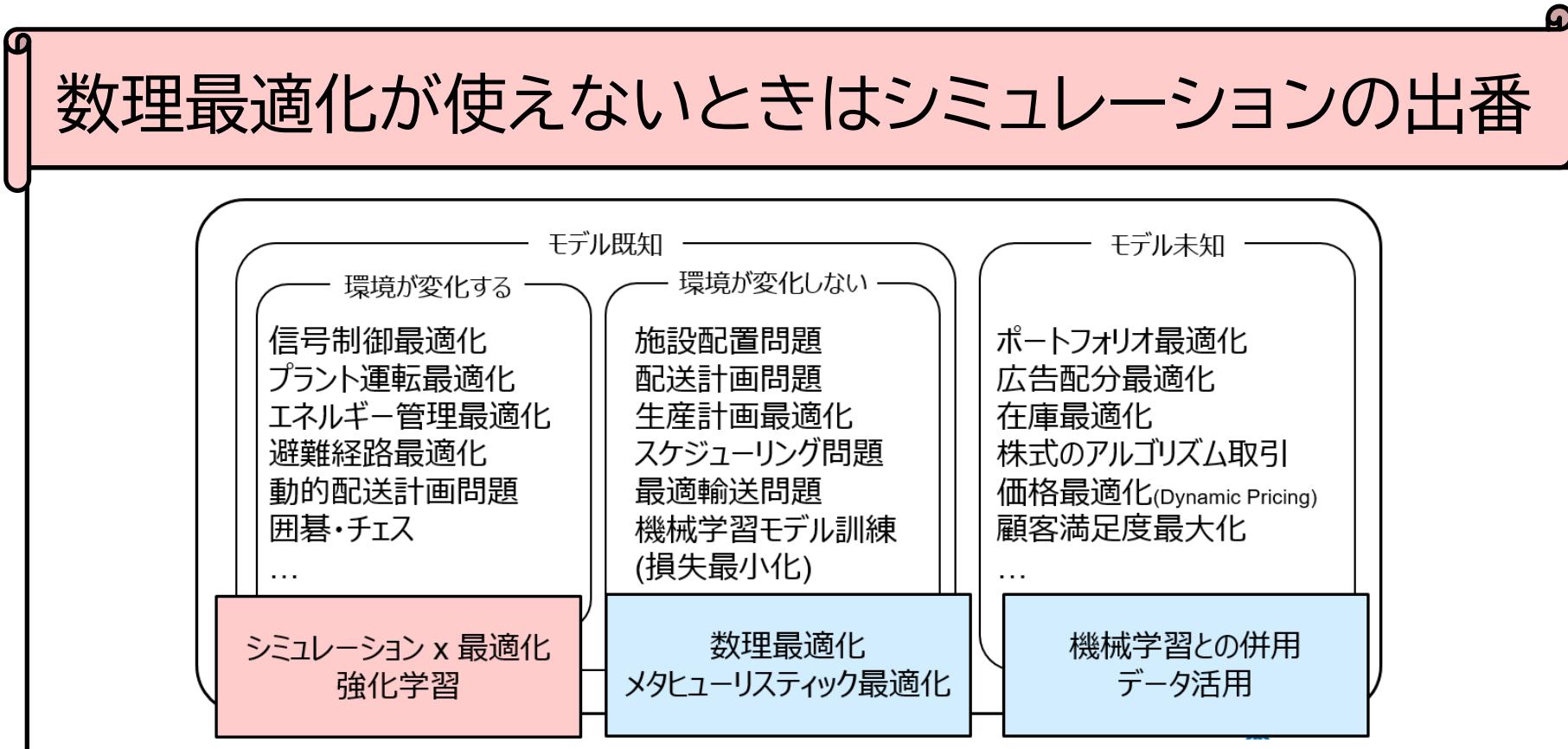
「最適化問題」の分類



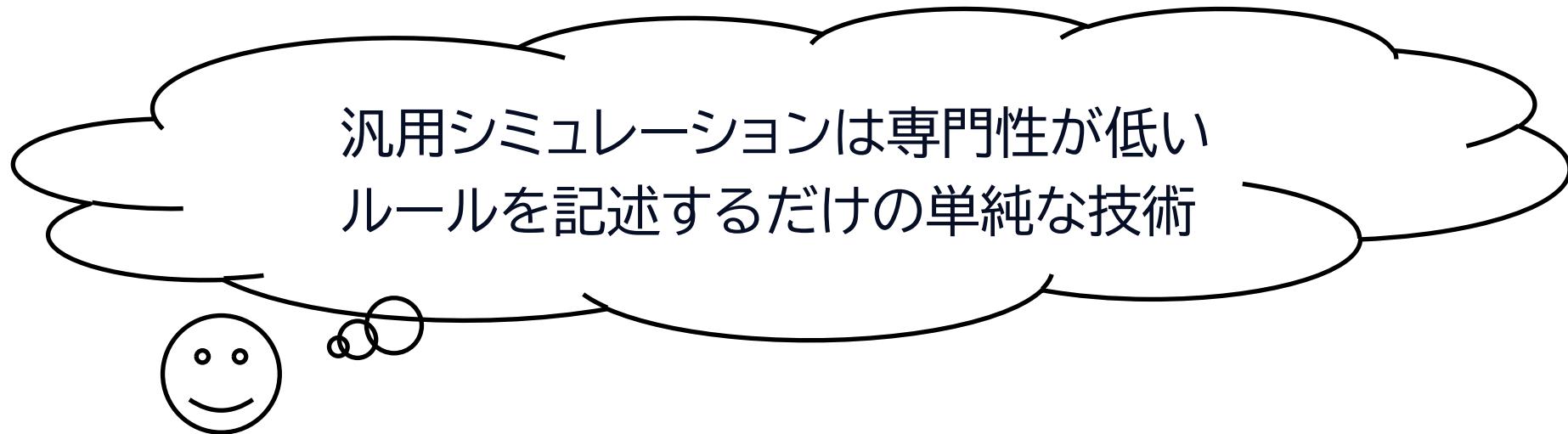
ここまでまとめ

課題が持つ性質に応じて適した数理科学の手法を選択すべき。

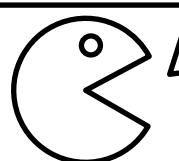
(モデルの複雑さや不確実性、リアルタイム性の有無、許される計算コスト…)



よくある(?)誤解 その3



No!!
多様な数理科学技術の集積体がシミュレーション!!
次スライドからシミュレーションを支える数理科学技術を紹介します





04

シミュレーションを支える 数理科学技術

エージェントの相互作用の数理モデル

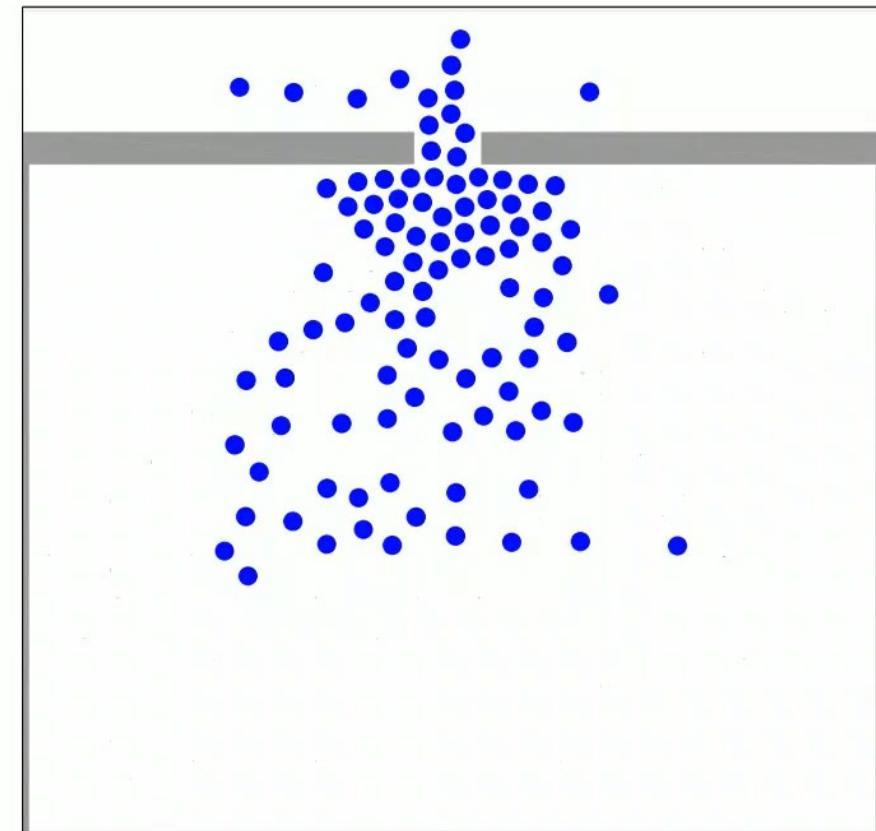
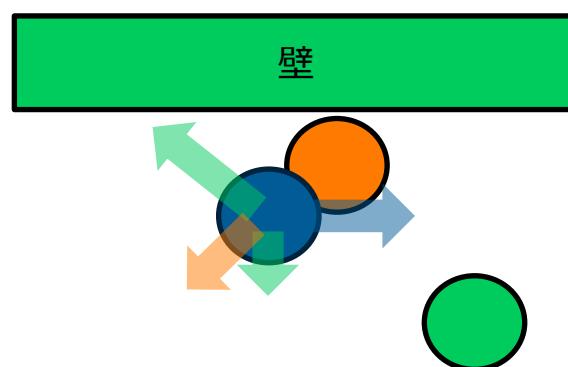
人流シミュレーション

SFM(Social Force Model) :

進行方向への引力 + 他の歩行者や障害物からの斥力の微分方程式を
数値計算によって逐次的に解く

$$m \frac{d\nu}{dt} = F_D + \sum F_S + \sum F_R$$

加速度 目的地に向かう力 他の歩行者・障害物から受ける力 接触したときに反発する力



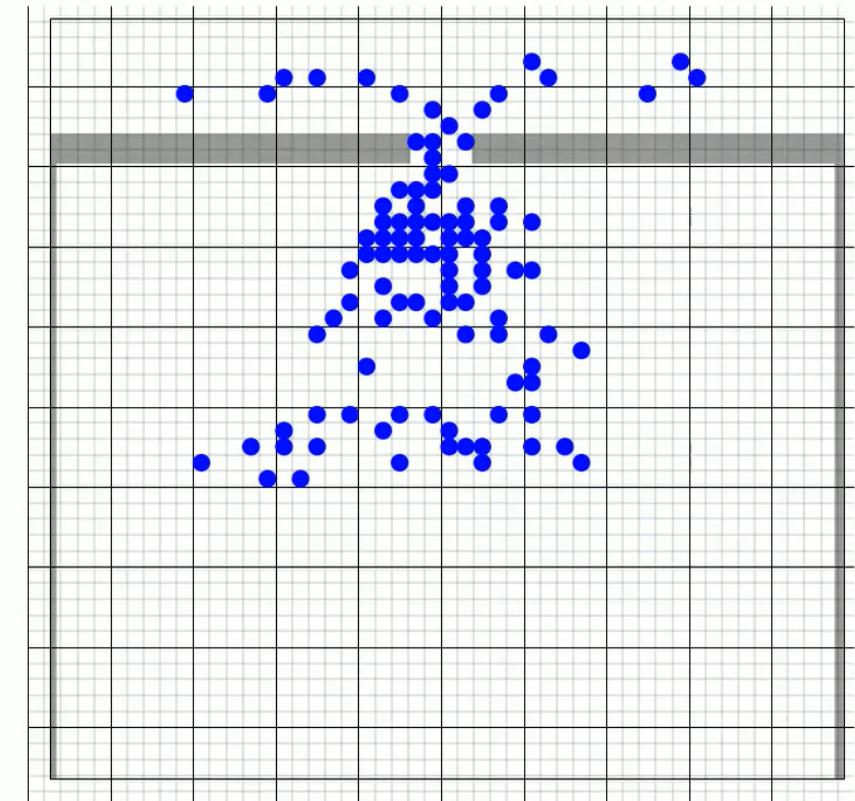
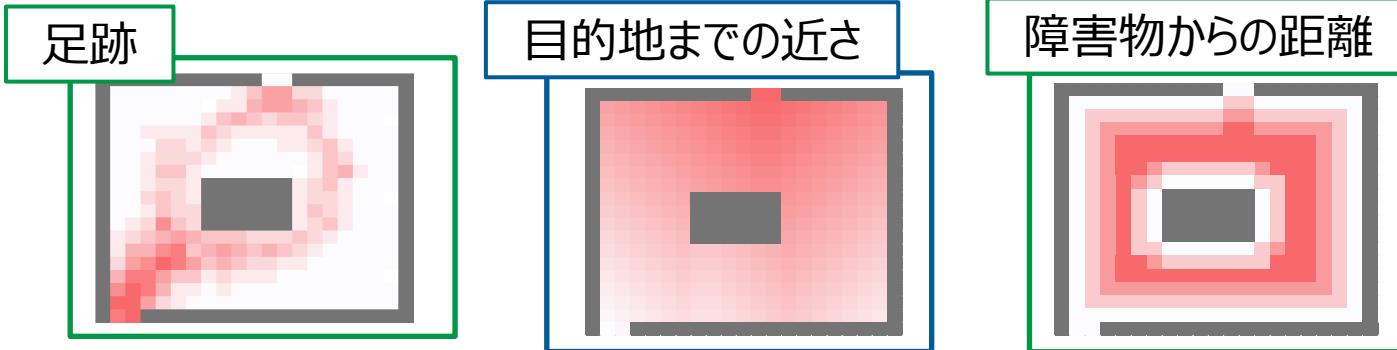
エージェントの相互作用の数理モデル

人流シミュレーション

FFM (Floor Field Model):

他の歩行者の足跡・障害物・目的地までの距離などからセルの魅力度を計算
どのセルに歩行者が進むかを確率的に決定する、セルオートマトンの一種

$$\text{セルの魅力度} : F = k_D D + k_S S + k_W W$$



車両移動の数理モデル

マクロ交通シミュレーション

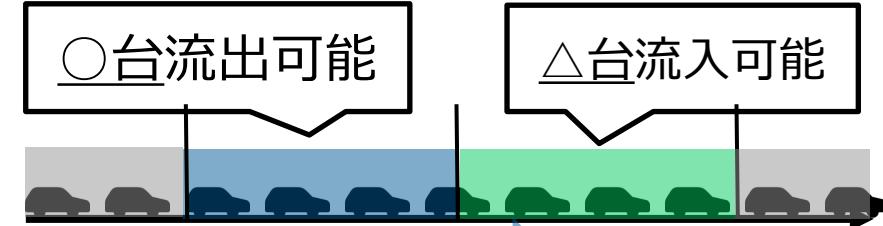
一次元交通流の偏微分方程式を解くことで車両の流れを計算

交通流保存則

車両は突然発生/消滅しない

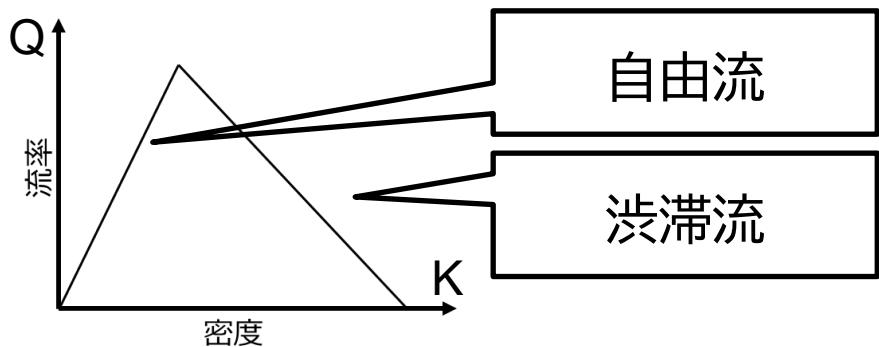


1台通過
→ 存在台数が1台減る



FD (Fundamental Diagram)

密度・交通流率の関係式

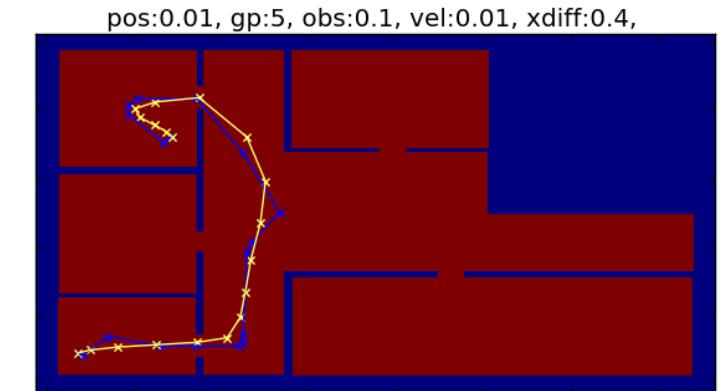
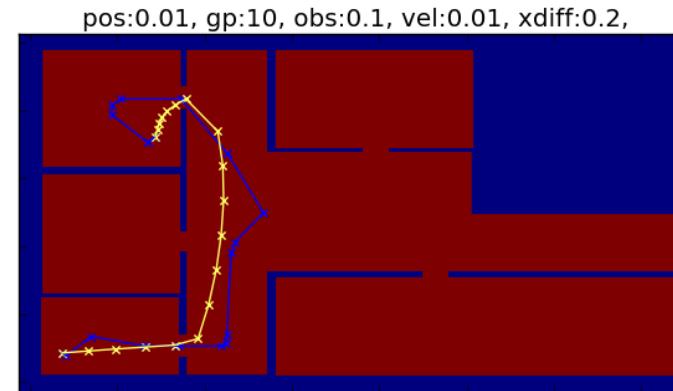


ポリゴン上の経路構築アルゴリズム

人流シミュレーション

障害物を避け目的地に向かう経路を構築する必要がある

- 計算幾何的な方法(青)：ボロノイ図 (voronoi diagram) により障害物から最も離れる経路を構築
- 連続最適化による改善(黄)：障害物からの距離を大きくしつつ、滑らかで短い経路を最適化計算により構築。パラメータにより障害物までの距離を制御可能。



確率的な経路選択

交通シミュレーション

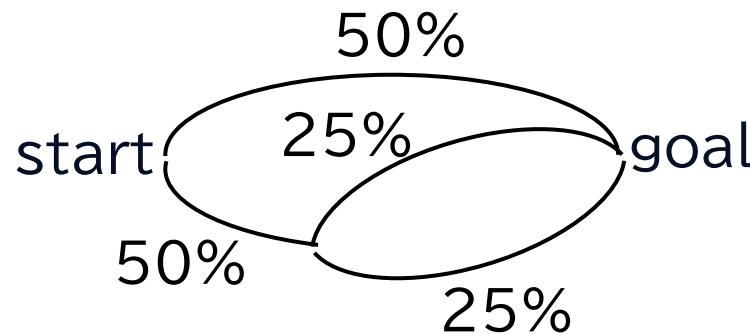
利用者は最短経路を志向するが、確率的なばらつきは存在する。

この経路選択のやり方が精度に大きく影響する。

- 適切な**経路選択ロジック**を構築することが重要
- 場合によっては利用確率を予測するための**機械学習モデル**を構築することも？

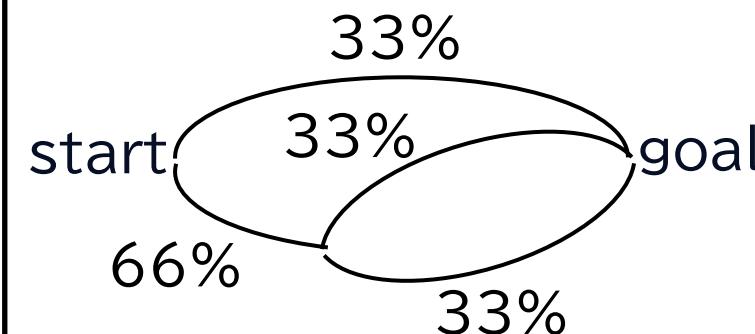
ロジット選択モデル

交差点ごとに短い経路を選択



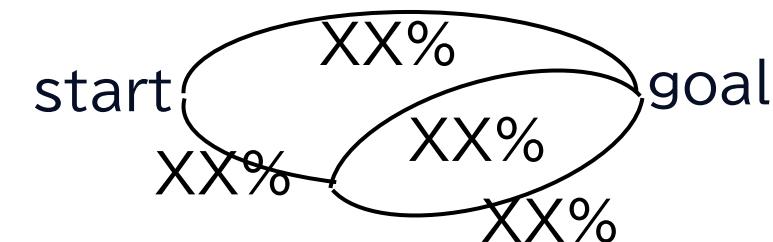
Dial配分モデル

全経路長が短い経路を志向



機械学習モデル

過去データ+現在の混雑度から
利用確率を予測



GPSデータ分析による OD 表生成

人流・交通シミュレーション

人流/交通シミュレーションには OD 表（どこから/どこに/何人）が必要。
GPSデータがあればデータ分析や数理最適化により生成可能：

GPSデータからの推定

過去の移動を分析・集計

	Latitude	Longitude	Time
P1:	Lat1,	Lngt1,	T1
P2:	Lat2,	Lngt2,	T2
.....			
Pn:	Latn,	Lngtn,	Tn

Fig. 2 GPS log and stay points

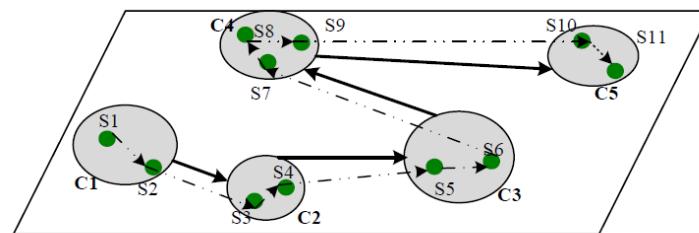


Fig. 5 Clustering stay points

Y. Zheng Trajectory Data Mining: An Overview

分布交通量からの推定

出発/到着台数の予測値と 現在ODから将来ODを推定 (Fratar 法など)

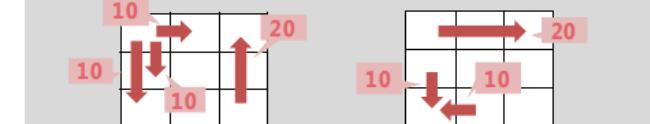
<https://strep.main.jp/uploads/class/trans09A03.pdf>

エリア別存在数からの推定

各エリアの存在台数の時間変化 からODを推定する

Input: Population of Each Grid Cell at Each Time		
7:00 am	8:00 am	9:00 am
90	60	40
10	20	40
30	40	80

Output: # of People Who Moved Between Cells



Akagi et al. A Fast and Accurate Method for Estimating People Flow from Spatiotemporal Population Data

ここまでまとめ

シミュレーションは入力データの準備や内部ロジックの構築において多くの数理科学技術に立脚している。

シミュレーションは数理科学の総合格闘技！

グラファルゴリズム

数理モデル

計算幾何

数値計算

データ分析

機械学習

まとめ

シミュレーションは最適化のためのモデリングツール

シミュレーションに限らず幅広い数理技術に関する相談をお待ちしております
(総合格闘家なので)

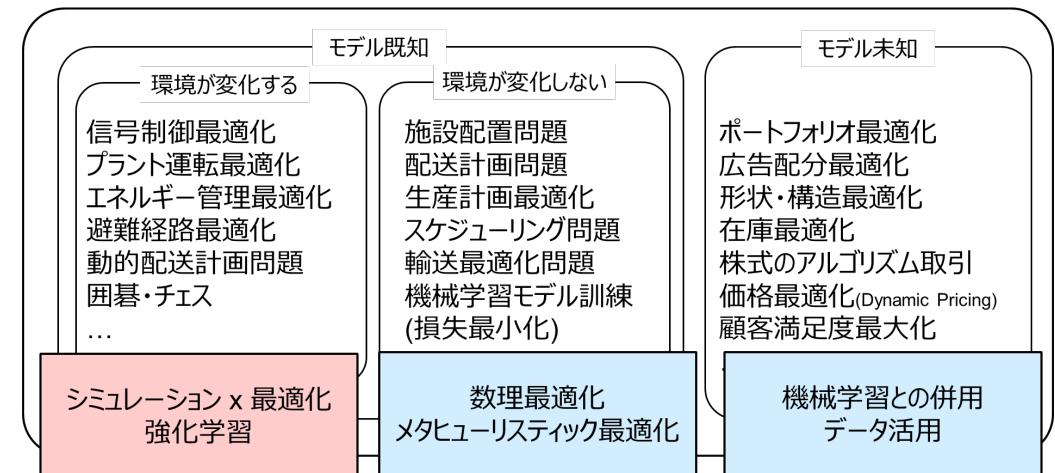
懇親会にお話できますと幸いです

シミュレーションは数理科学の総合格闘技

モデリング：入出力の関係



アルゴリズム：解を探す方法



The logo for NTT Data is displayed in white text against a dark, blurred background of skyscrapers. The logo consists of a stylized 'O' symbol followed by the word 'NTT data' in a bold, sans-serif font.

NTT data