

粒子群最適化

Particle Swarm Optimization (PSO)

- 最適化とは
- 最適化の難しさ
- 最適化手法の種類
- PSOの概要
- PSOの手順

最適化問題とは

変数や目的関数，制約条件などの要素を定義した上で

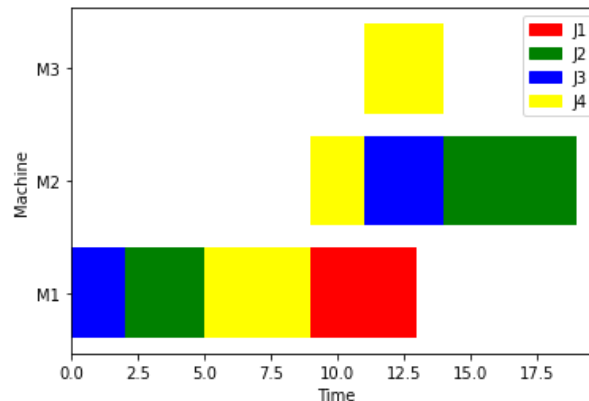
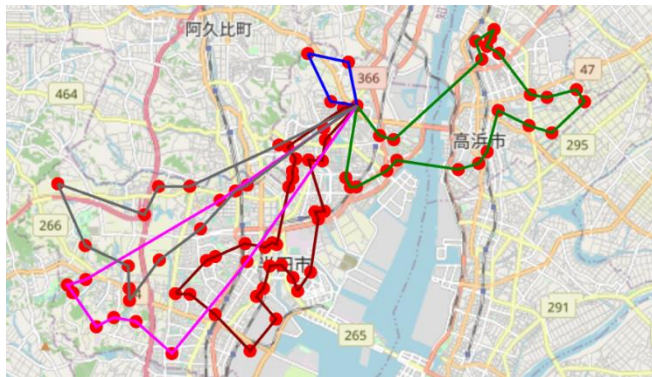
目的関数の値を最大化/最小化する解を求める問題

身の回りの最適化問題

- シフトスケジュールの作成
- 時間割の作成
- 配送，送迎の経路
- タスクの割り当て

膨大な組合せの中から
最も良い解を探す問題

最適解



熟練度	名前	1	2	3	4	5	6	7
ベテラン	n1	日		日	準		日	日
ベテラン	n2	準		日	日	準		
中堅	n3	日	日	準	準		日	
中堅	n4	深	準	深		深	準	日
新人	n5		日		深	準		準
新人	n6	準	深	準		日	深	
新人	n7				日			深
新人	n8	深	深	準		日	深	

最適化における目的



路線情報

<https://transit.yahoo.co.jp/> より引用

岐阜→博多



ほかに候補があります

出発地：岐阜駅

到着地：博多駅

再検索

早 到着時刻順	楽 乗換回数順	安 料金の安い順
↓ルート1 3時間10分	35,550円 乗換：3回	早
↓ルート2 3時間19分	34,770円 乗換：3回	
↓ルート3 3時間20分	34,820円 乗換：2回	

早 到着時刻順	楽 乗換回数順	安 料金の安い順
↓ルート1 ⚠ 6時間19分	18,160円 乗換：1回	楽
↓ルート2 12時間25分	14,480円 乗換：1回	楽 安
↓ルート3 3時間20分	34,820円 乗換：2回	

早 到着時刻順	楽 乗換回数順	安 料金の安い順
↓ルート1 12時間25分	14,480円 乗換：1回	楽 安
↓ルート2 ⚠ 6時間19分	18,160円 乗換：1回	楽
↓ルート3 ⚠ 6時間51分	20,420円 乗換：2回	

同じ出発地と目的地でも，利用者によって
「何を最適化したいか」は異なる

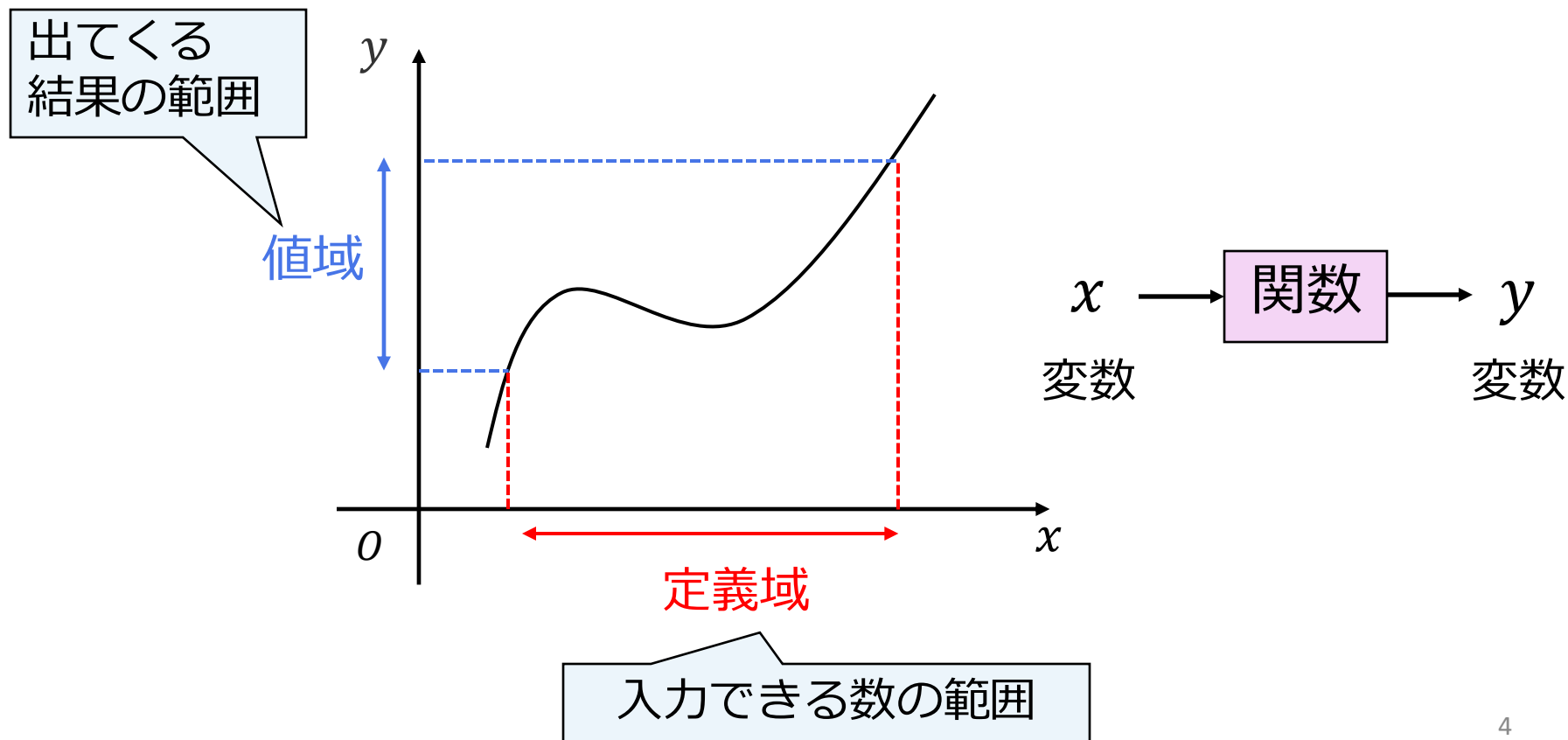
- 到着時刻を最優先する人
→ 最短時間ルートを選択
- 乗り換え回数を減らしたい人
→ 乗換が少ないルートを選択
- 料金を安くしたい人
→ 最安ルートを選択



全てを同時に最適化
できるプランは…？

関数とは

- 「入力と出力を結びつけるルール全般」を**写像**という
- その中でも、**数と数を結びつける特別な写像**を**関数**という
- 「入力1つにつき出力1つ」 = **関数のルール**



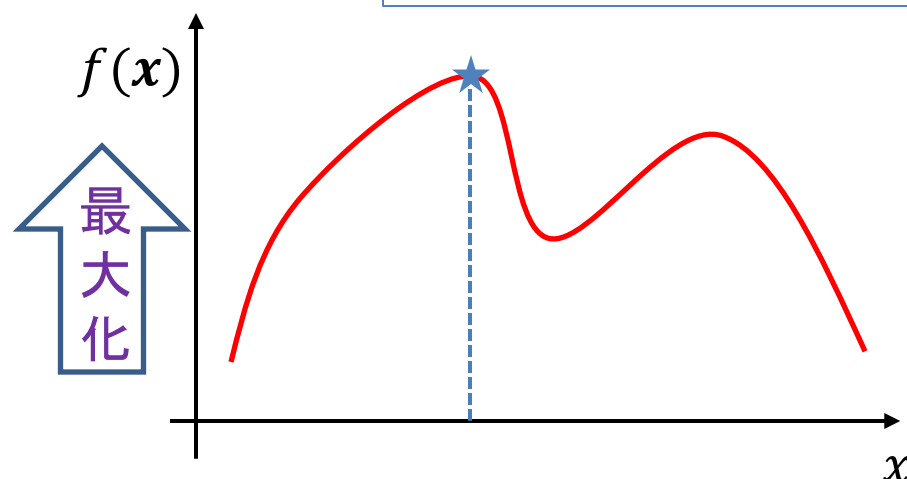
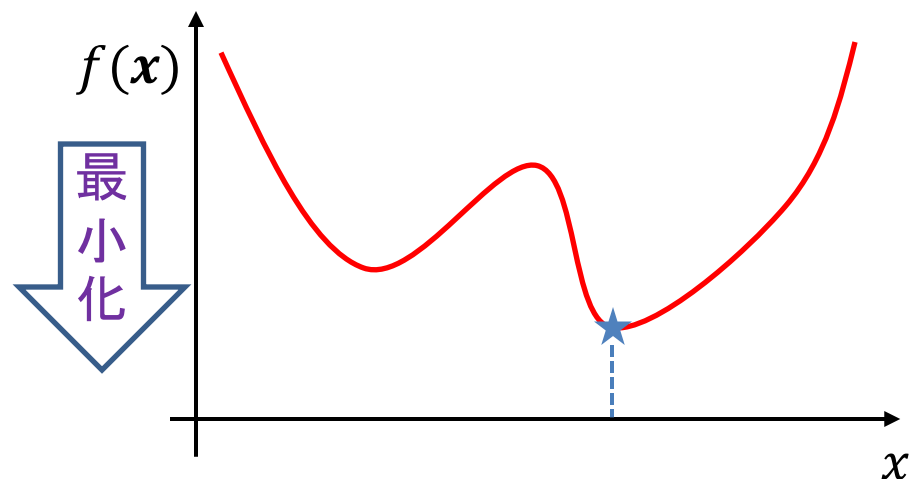
目的関数の最大化/最小化

最適化問題を解くということ:

=> 目的関数 $f(x)$ の値を最大化/最小化する解 x を求める

事前に決められる

増減表書けば(微分で)
わかる?



- 目的関数 $f(x)$ は, ある解 x がどれほど良いか, または悪いかを数値的に評価するための関数
- ある解 x は, 例えば,
 - 乗り換え問題: 利用する列車やバスの組み合わせと順序
 - 設計問題: 構造物を構成する部品の大きさや重さ

最適化問題の例：遠足におけるおやつの選び方

決まりごと：

- おやつは250円まで
- リストから1つずつ選択可
- ジュースはダメ
- バナナはダメ



持っていく
お菓子を選ぶ

制約条件

決まりごとを守ったうえで、
最も価値の合計が高い組合せは？

選べるおやつの一覧



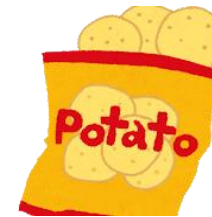
値段：100円
価値：50



値段：70円
価値：30



値段：90円
価値：30



値段：60円
価値：40



値段：30円
価値：20

それぞれ値段と価値は異なる

= 組合せ最適化問題

考え方

- 5種類のお菓子の情報を表にまとめる



	チョコ	ポッキー	ドーナッツ	ポテト	アメ
値段	100	70	90	60	30
価値	50	30	30	40	20

- 答えの表し方

	チョコ	ポッキー	ドーナッツ	ポテト	アメ
解の例	選ぶ	選ばない	選ぶ	選ばない	選ぶ

値段の合計: 220, 価値の合計: 100

答えの表現方法

チョコ	ポッキー	ドーナッツ	ポテト	アメ
選ぶ	選ばない	選ぶ	選ばない	選ぶ



チョコ	ポッキー	ドーナッツ	ポテト	アメ
1	0	1	0	1

ある解 x

- 選ぶ: 1
- 選ばない: 0

符号化: 答えを「0と1で表現」(2進数)

離散値で表現

- コンピュータの内部では, データを2進数で表現する
- 2進数の1桁が1ビット
- 解 x を5ビットで表現できる

ベクトルなのでボード(太字)

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_5)$$

00000
00001
00010
00011
⋮

何通りの組合せ?

$$2^5 = 32$$

ある解の値段と価値の合計

ある解 $x = (1, 0, 1, 0, 1)$

	チョコ	ポッキー	ドーナッツ	ポテト	アメ
値段	100	70	90	60	30
解 x	1	0	1	0	1
	100	+	90	+	30

値段の合計 = 220

	チョコ	ポッキー	ドーナッツ	ポテト	アメ
価値	50	30	30	40	20
解 x	1	0	1	0	1
	50		30		20

価値の合計 = 100

これは最適な答え(最適解)?
最適解を発見するためには?

->全ての組合せ(32通り)を調べてみる

Brute-force search (力まかせ探索)

おやつ選択の目的関数

- おやつ選択の目的は,
「できるだけ価値が高くなるようにおやつを選ぶこと」
- この「価値の合計」を計算する式が目的関数

0 or 1 を
決めること

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n v_i x_i$$

解 $\mathbf{x} = (1, 0, 1, 1, 0)$

$n = 5$

価値 $\mathbf{v} = (50, 30, 30, 40, 20)$

値段の制約がなければ... すべて選べば価値は最大

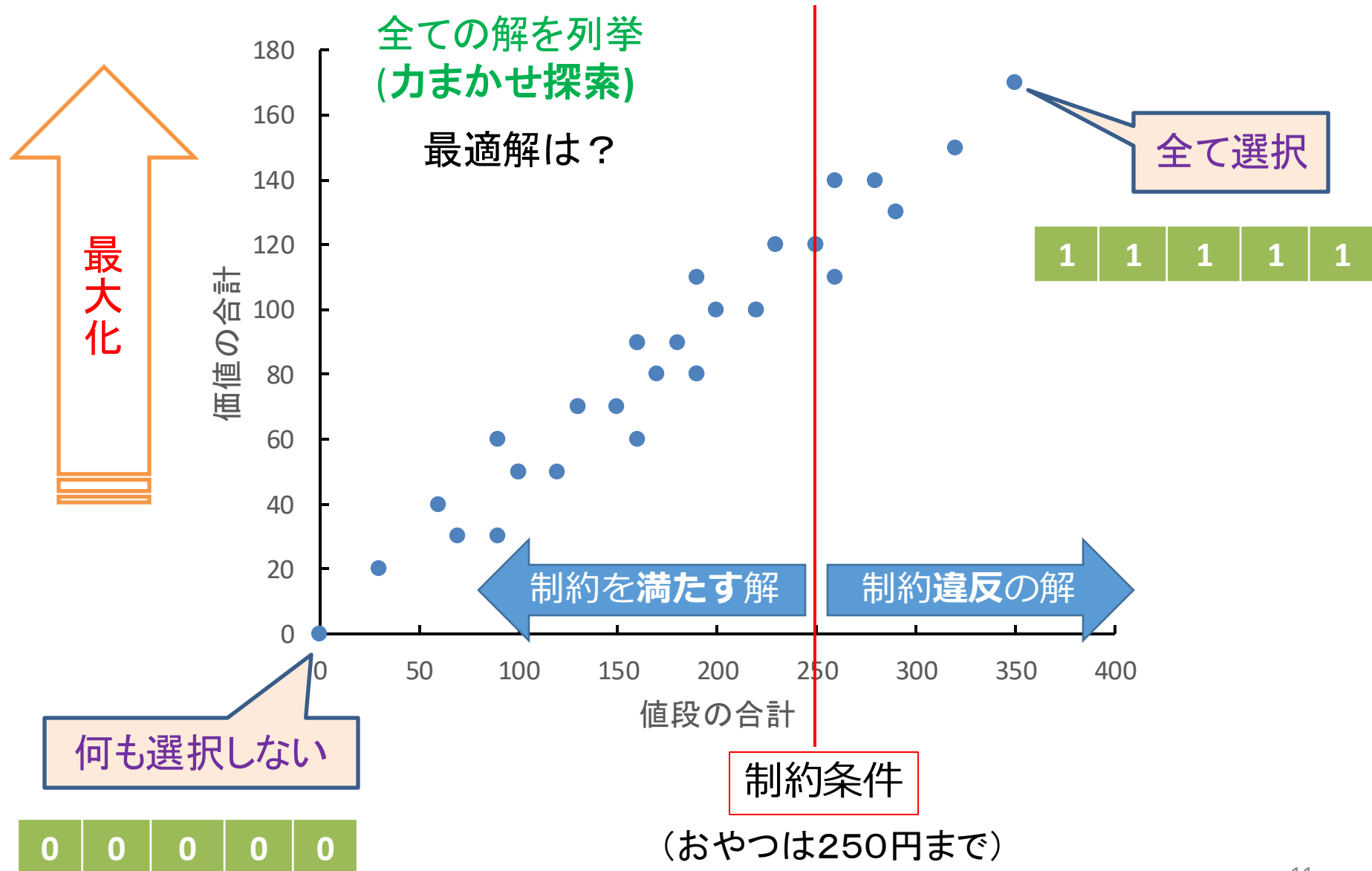
価値の合計を最大化したいが、値段の合計は上限(250円)以内にしなければならない(制約条件を満たす必要がある)

$$\sum_{i=1}^n w_i x_i \leq W$$

値段 $\mathbf{w} = (100, 70, 90, 60, 30)$
予算 $W = 250$

=> 制約ありなら、選び方に工夫が必要(問題の難しさ)

おやつ選択問題の32個の答えの分布



探索する範囲(解空間)

5個なら32通り. では, 50個なら何通り?

$$2^5 = 32$$

$$2^{10} = 1024$$

⋮

$$2^{50} = ?$$

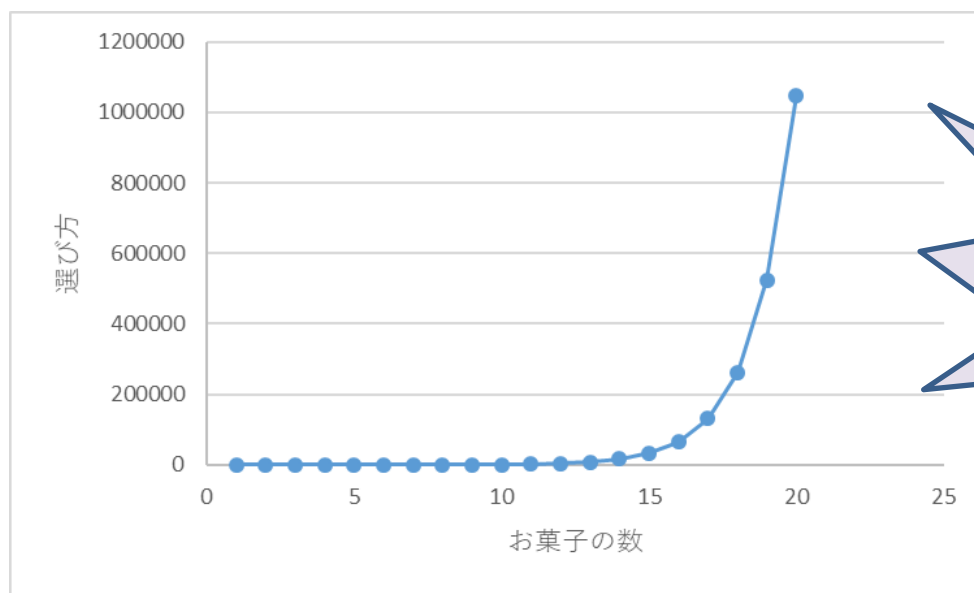
$y = 2^x$ のグラフは?

<https://www.geogebra.org/>



最適化問題の難しさ

組合せが多すぎて、全部試すのは無理！



組合せ爆発

- 課題

- 「全部試さないで、いい答えをどうやって探すか？」

- 解決策

- 最適化アルゴリズム(賢い探索方法)を使う
- 良さそうな解候補を**少しずつ改良**して、最適解に近づく

最適化アルゴリズムの2つのタイプ

1. 数理最適化(解析的・厳密解)

- 数式を使って理論的に最適解を導く方法
- 特徴:
 - 条件が単純なときに有効
 - 微分・方程式で解ける場合が多い
 - 例: [線形計画法](#), ラグランジュ乗数法

2. メタヒューリスティック(探索的・近似解)

- 自然界や経験則をヒントにした探索方法
- 特徴:
 - 複雑な問題にも使える
 - 厳密解でなくても「良い解」を見つけられる
 - 例: 遺伝的アルゴリズム(GA), [粒子群最適化\(PSO\)](#), 差分進化(DE)

JSAI 一般社団法人 **人工知能学会**
The Japanese Society for Artificial Intelligence

AIフロンティア

推論・知識・言語

- 数学基礎論
- 数理論理学
- 意味論
- 形式言語理論
- ソフトウェア工学
- オブジェクト指向
- ファジィ論理
- 論理プログラミング
- 帰納推論
- 演繹推論
- セマンティック Web
- Webインテリジェンス
- データ市場
- ベイズ推定
- プロダクションシステム
- ルールベースシステム
- エキスパートシステム
- 因果推論
- オントロジー
- 仮説推論
- 要約
- 意味理解
- 法律 AI
- 言語メディア処理
- 知識表現
- 知識グラフ
- 知識ベース
- 知識の利用と共有
- シンボलगラウンディング
- 転移学習
- 計算論的学習理論
- 概念学習
- 情報論的学習理論
- 表現学習 (エンベディング)
- クラスタリング
- 深層学習
- AI ライフサイクル
- 機械学習
- ニューラルネットワーク
- 統計的学習
- セグメンテーション
- 半教師あり学習
- 敵対的学習
- パターン認識
- 一般物体認識
- 異常検知
- 画像認識
- 予測
- 計算論的神経科学・脳科学
- コンピュータビジョン
- 触覚・味覚・嗅覚認識
- スパースモデリング
- 強化学習
- 音声認識
- 動画画像処理
- マルチモーダル処理
- 行動推定
- ジェスチャー認識
- ロボットと実世界
- ヒューマンロボットインタラクション
- 認知ロボティクス
- 身体性
- 記号創発ロボティクス
- 知能ロボティクス
- 身体生理学
- サイバーフィジカルシステム
- 知能ロボット
- 自動運転
- 知能メカトロニクス
- アフォーダンス
- スポーツ脳科学
- 運動学

発見・探索・創造

- 数理計画法
- グラフ理論
- ゲーム理論
- ビッグデータ解析
- データベース
- データマイニング
- ウェブマイニング
- マテリアルズ・インフォマティクス
- 人工生命
- 包摂アーキテクチャ
- エージェント
- マルチエージェント
- 認知アーキテクチャ
- 進化計算
- 数理最適化
- シミュレーション
- 遺伝的アルゴリズム
- 分散協調
- オペレーションズリサーチ
- 探索
- 制約充足問題・充足可能性問題 (CSP/SAT)
- ヒューリスティクス
- テキストマイニング
- プランニング
- スケジューリング
- 情報検索
- バイオインフォマティクス
- 敵対的生成ネットワーク (GAN)
- 画層生成
- 音声生成

学習・認識・予測

- 数理統計学
- データサイエンス
- 数値統計学
- 統計的学習
- セグメンテーション
- 半教師あり学習
- 敵対的学習
- パターン認識
- 一般物体認識
- 異常検知
- 画像認識
- 予測
- 計算論的神経科学・脳科学
- コンピュータビジョン
- 触覚・味覚・嗅覚認識
- スパースモデリング
- 強化学習
- 音声認識
- 動画画像処理
- マルチモーダル処理
- 行動推定
- ジェスチャー認識
- ロボットと実世界
- ヒューマンロボットインタラクション
- 認知ロボティクス
- 身体性
- 記号創発ロボティクス
- 知能ロボティクス
- 身体生理学
- サイバーフィジカルシステム
- 知能ロボット
- 自動運転
- 知能メカトロニクス
- アフォーダンス
- スポーツ脳科学
- 運動学

進化・生命・成長

- 人工生命
- 包摂アーキテクチャ
- エージェント
- マルチエージェント
- 認知アーキテクチャ
- 進化計算
- 数理最適化
- シミュレーション
- 遺伝的アルゴリズム
- 分散協調
- オペレーションズリサーチ
- 探索
- 制約充足問題・充足可能性問題 (CSP/SAT)
- ヒューリスティクス
- テキストマイニング
- プランニング
- スケジューリング
- 情報検索
- バイオインフォマティクス
- 敵対的生成ネットワーク (GAN)
- 画層生成
- 音声生成
- マテリアルズ・インフォマティクス
- 人工生命
- 包摂アーキテクチャ
- エージェント
- マルチエージェント
- 認知アーキテクチャ
- 進化計算
- 数理最適化
- シミュレーション
- 遺伝的アルゴリズム
- 分散協調
- オペレーションズリサーチ
- 探索
- 制約充足問題・充足可能性問題 (CSP/SAT)
- ヒューリスティクス
- テキストマイニング
- プランニング
- スケジューリング
- 情報検索
- バイオインフォマティクス
- 敵対的生成ネットワーク (GAN)
- 画層生成
- 音声生成
- マテリアルズ・インフォマティクス

身体・ロボット・運動

- 行動推定
- ジェスチャー認識
- ロボットと実世界
- ヒューマンロボットインタラクション
- 認知ロボティクス
- 身体性
- 記号創発ロボティクス
- 知能ロボティクス
- 身体生理学
- サイバーフィジカルシステム
- 知能ロボット
- 自動運転
- 知能メカトロニクス
- アフォーダンス
- スポーツ脳科学
- 運動学

人・対話・情動

- 意思決定・合意形成
- 知識獲得・発見
- 知識の利用と共有
- 知識共有・管理
- 知的教育システム (ITS)
- 集合知
- 計算社会科学
- 感性
- 人・対話・情動
- 意思決定・合意形成
- 知識獲得・発見
- 知識の利用と共有
- 知識共有・管理
- 知的教育システム (ITS)
- 集合知
- 計算社会科学
- 感性

人工知能とは「様々な技術の複合体の総称」

The mind map is centered on the theme **進化・生命・成長** (Evolution, Life, Growth), which is enclosed in a pink oval. The map branches out into several categories, each represented by a colored box:

- AI 倫理** (AI Ethics)
- プライバシー** (Privacy)
- 意思決定・合意形成** (Decision Making / Consensus Formation)
- 知識獲得・発見** (Knowledge Acquisition / Discovery)
- 知識の利用と共有** (Knowledge Utilization and Sharing)
- 知識共有・管理** (Knowledge Sharing and Management)
- 音声生成** (Voice Generation)
- マテリアルズ・インフォマティクス** (Materials Informatics)
- (GAN)** (Generative Adversarial Networks)
- 人工生命** (Artificial Life)
- 包摂アーキテクチャ** (Inclusive Architecture)
- エージェント** (Agents)
- マルチエージェント** (Multi-Agent)
- 認知アーキテクチャ** (Cognitive Architecture)
- 分散協調** (Distributed Coordination)
- 進化計算** (Evolutionary Computation)
- 遺伝的アルゴリズム** (Genetic Algorithms)
- 群知能** (Swarm Intelligence)
- ゲーム AI** (Game AI)
- オペレーションズリサーチ** (Operations Research)
- 数理最適化** (Mathematical Optimization)
- シミュレーション** (Simulation)
- 生物学** (Biology)
- 発達科学** (Developmental Science)

- ## 粒子群最適化

16

PSO(粒子群最適化)

- 1995 年に提案された群知能ベースの**最適化アルゴリズム**
- 鳥の群れや魚の群れの社会的行動をモデル化
- 複数の「粒子」が情報を共有しながら協調して最適解を探索



PSOが対象とする問題の領域

連続関数最適化問題(Continuous Optimization)

複数の連続変数を持つ関数の中で、
最も小さい値を与える入力を見つける

$$\min_{x \in \Omega \subseteq R^n} f(x)$$

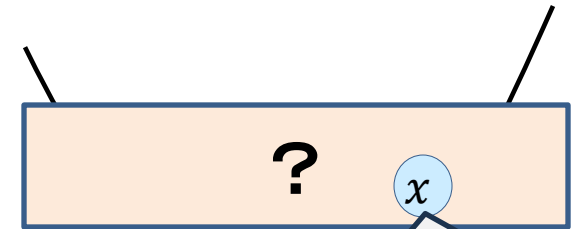
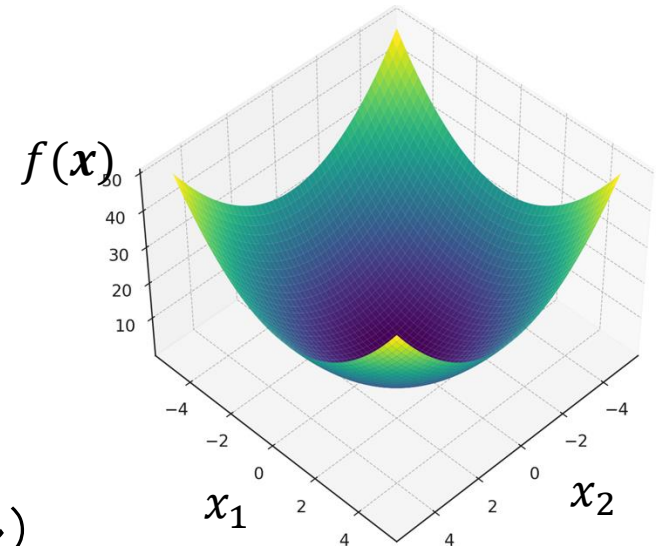
n は次元数, R は実数

ただし、変数 x は実数の制約内で動くものとする

- 決定変数: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ (実数ベクトル)
- 目的関数: $f(x)$ (連続的に評価可能)
- 制約領域: Ω (例: 範囲制約 $(l_i \leq x_i \leq u_i)$)

探索する関数の性質が分からなくても
(目的関数が不連続関数, 微分不可能関数であっても)

探索点 x に対し, 関数値 $f(x)$ を得ることができれば適用可能

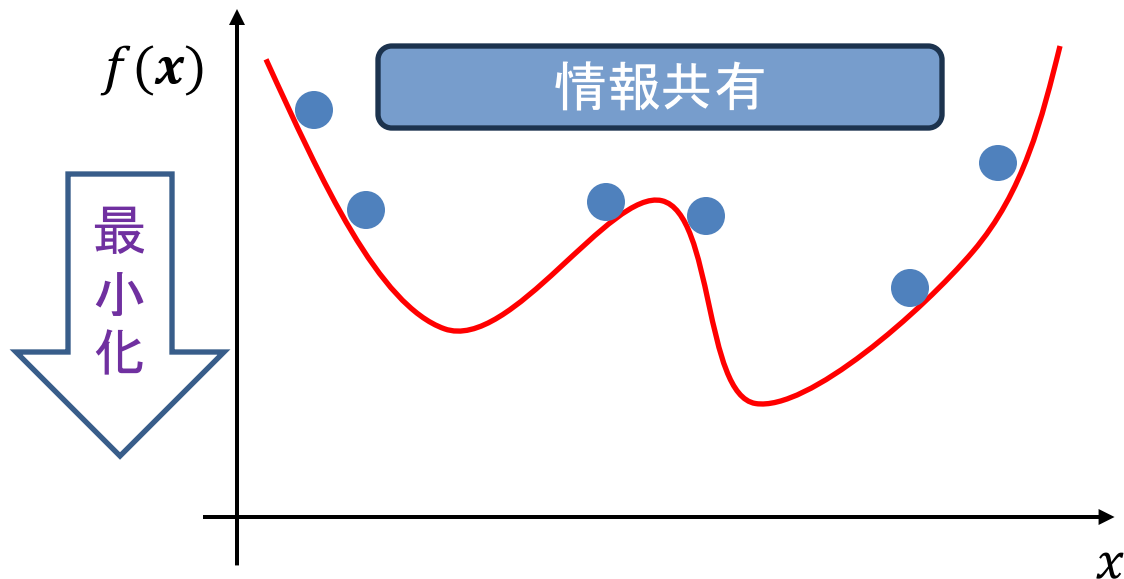


$x = (0.4, 1.3, 9.3, \dots)$
 $f(x) = 0.67$

PSOの特徴 (1/2)

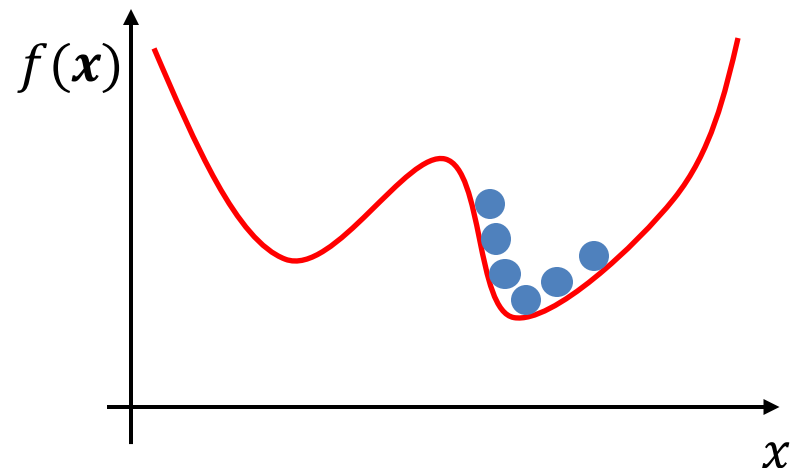
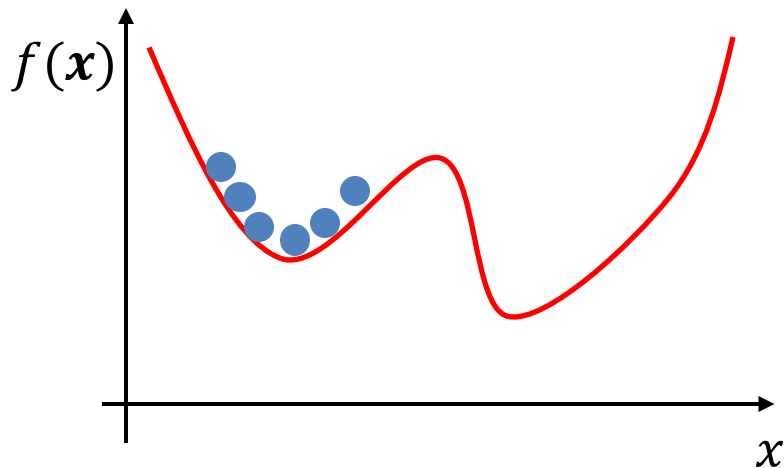
- 解集団を用いた**多点探索**, 解候補を実数値ベクトルで表す
- 探索過程は確率的(乱数パラメータを含む)
=> 実行するたびに違う結果
- 集団内では粒子(個体)間に**インタラクション**がある
- 複数の粒子が存在して一定の性能を示す

PSOシミュレータ



PSOの特徴 (2/2)

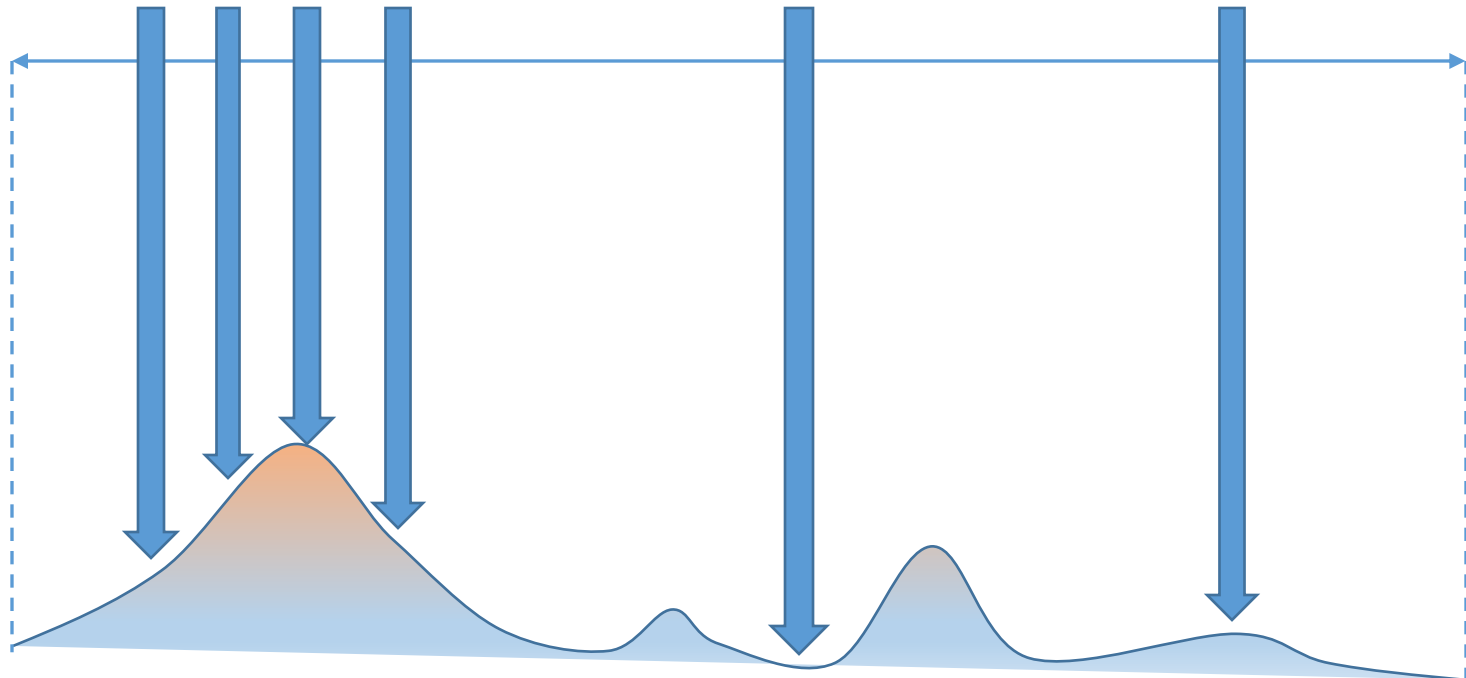
- いくつかの制御パラメータが存在
 - 粒子数 N
 - 慣性係数 w
 - 認知パラメータ c_1
 - 社会パラメータ c_2
- 制御パラメータの値により, 探索性能は大きく左右される
- 対象とする問題の性質により, 適するパラメータは異なる



解探索のイメージ

関数の最小値(最大値)を探す = 砂漠で最も石油が出る場所を探す

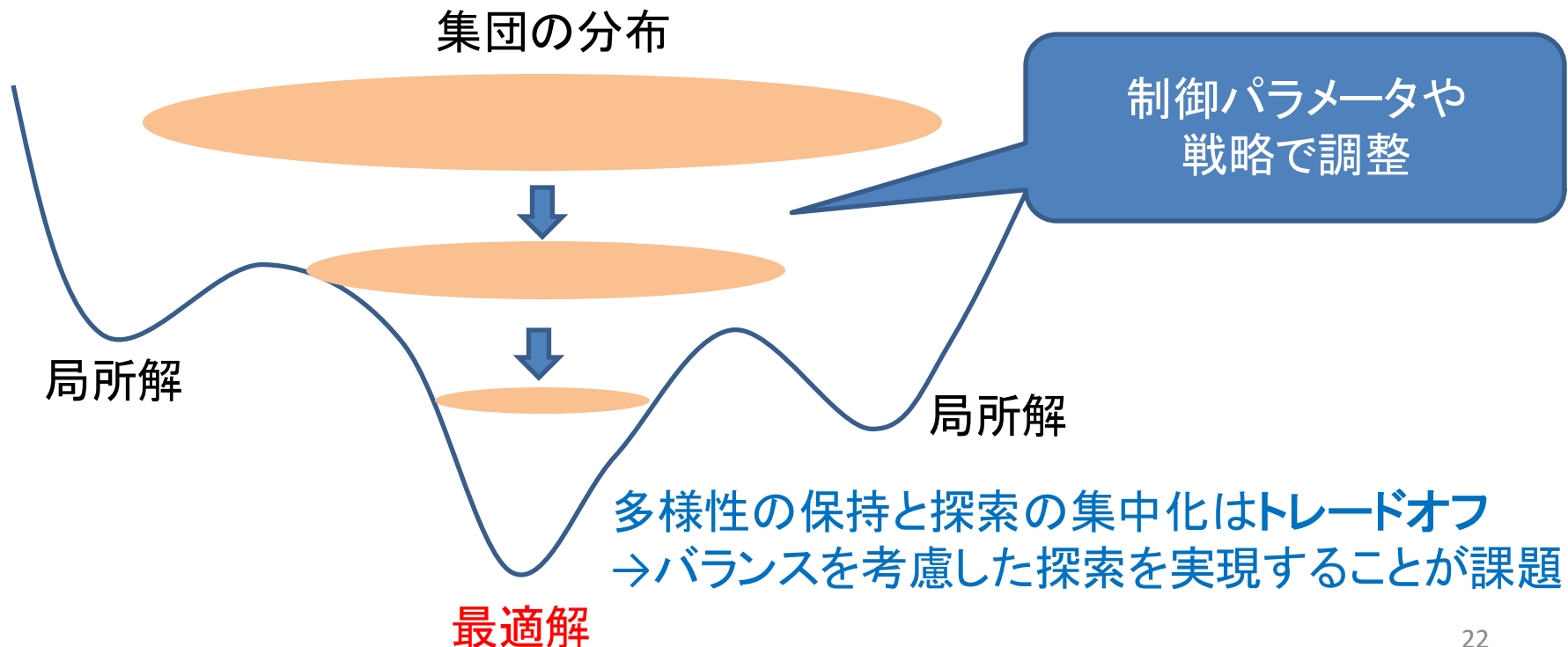
- 一回掘るとその場所の埋蔵量（良さ）が分かる
 - 掘ってみないとわからない！関数の形状は不明
- 何度も掘れば大体の埋蔵量が把握できるが，その分コストが掛かる
- なるべく少ない回数（コスト）で，最も埋蔵量が多い場所を見つけるには？



理想的な解探索

大域的な探索から、局所的な探索へシフトする探索

- 探索序盤は十分な多様性を保持し、網羅的に**広い範囲を探索**
- 探索終盤は集団を収束させ、優良な解周辺を**集中的に探索**



PSOの処理手順

1. 初期化

- 粒子群 $P = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ を定義, N は粒子数
- 各粒子 i の位置 x_i はランダムに生成

2. 評価

- 各粒子 i の位置 x_i を目的関数(適応度関数)に入力し, 良さ(適応度) $f(x_i)$ を計算

3. 最良位置の記録

- $pbest$: 粒子ごとに「これまでで一番良かった位置」
- $gbest$: 集団全体で「一番良かった位置」

4. 更新処理

- 速度更新: 粒子の進む方向を計算 ($pbest$ と $gbest$ を参考にする)
- 位置更新: 新しい位置に粒子を移動

5. 終了判定

- 最大ステップ数に達したら終了
- そうでなければステップを進めて再び評価へ (2へもどる)

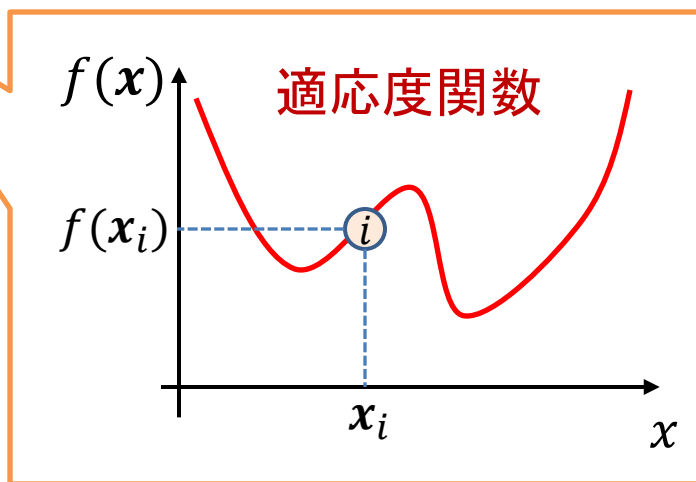
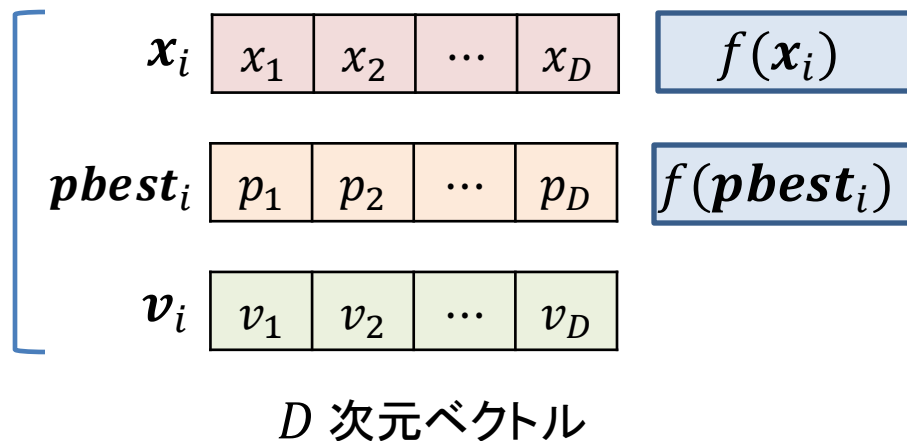
6. 結果出力

- 最終的な $gbest$ を解として出力

初期化時の処理: 粒子群の生成

各粒子 i の持つ情報 ($i = 1, \dots, N$):

N は粒子数
 D は問題の次元数



各粒子 i について,

- 位置 x_i と速度 v_i を, あらかじめ決めた範囲内でランダムに決定
- 適応度 $f(x_i)$ を計算
- 自身の最良位置 $pbest_i$ は x_i のコピーとする
- 自身の最良位置の適応度 $f(pbest_i)$ も $f(x_i)$ のコピーとする

$f(pbest_i)$ のうち最良のものを, 群れ全体の最良位置 $gbest$ とする

PSOの疑似コード

Algorithm of PSO

- ・初期個体の生成

```
for  $t = 1$  to  $T_{max}$  do
```

```
  for  $i = 1$  to  $N$  do
```

- ・速度と位置の更新

- ・粒子の評価

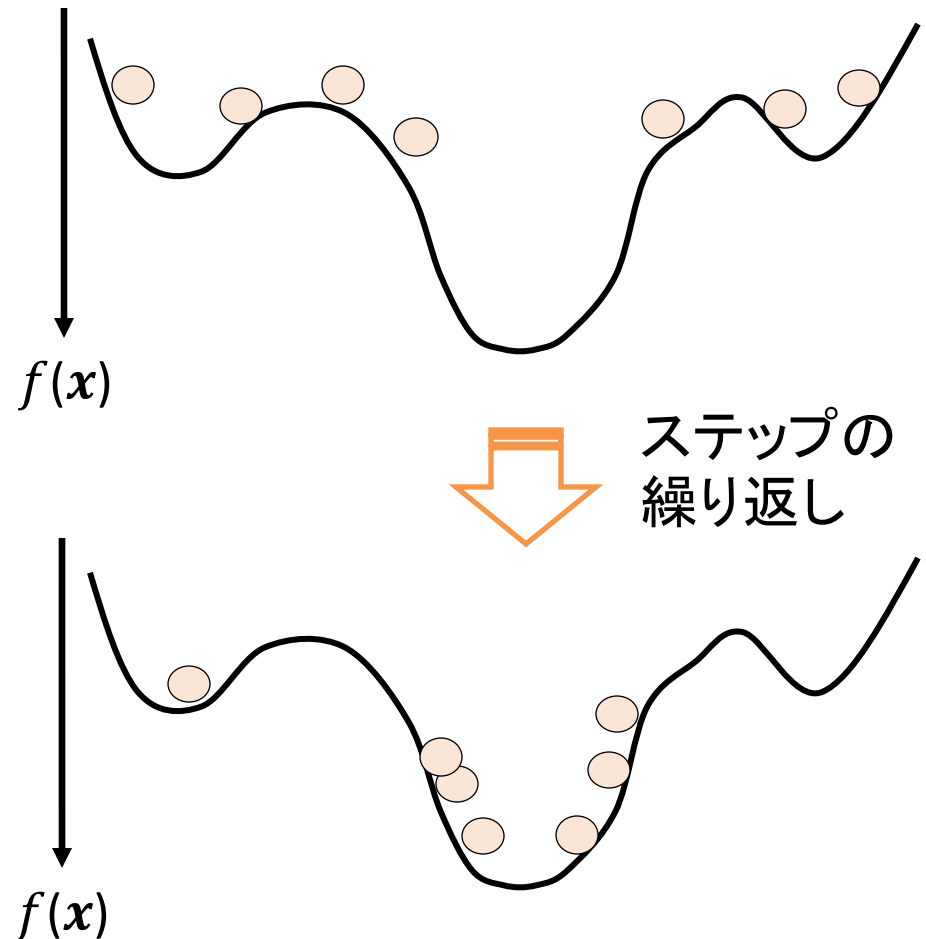
- ・p(g)best の更新

```
  end for
```

```
end for
```

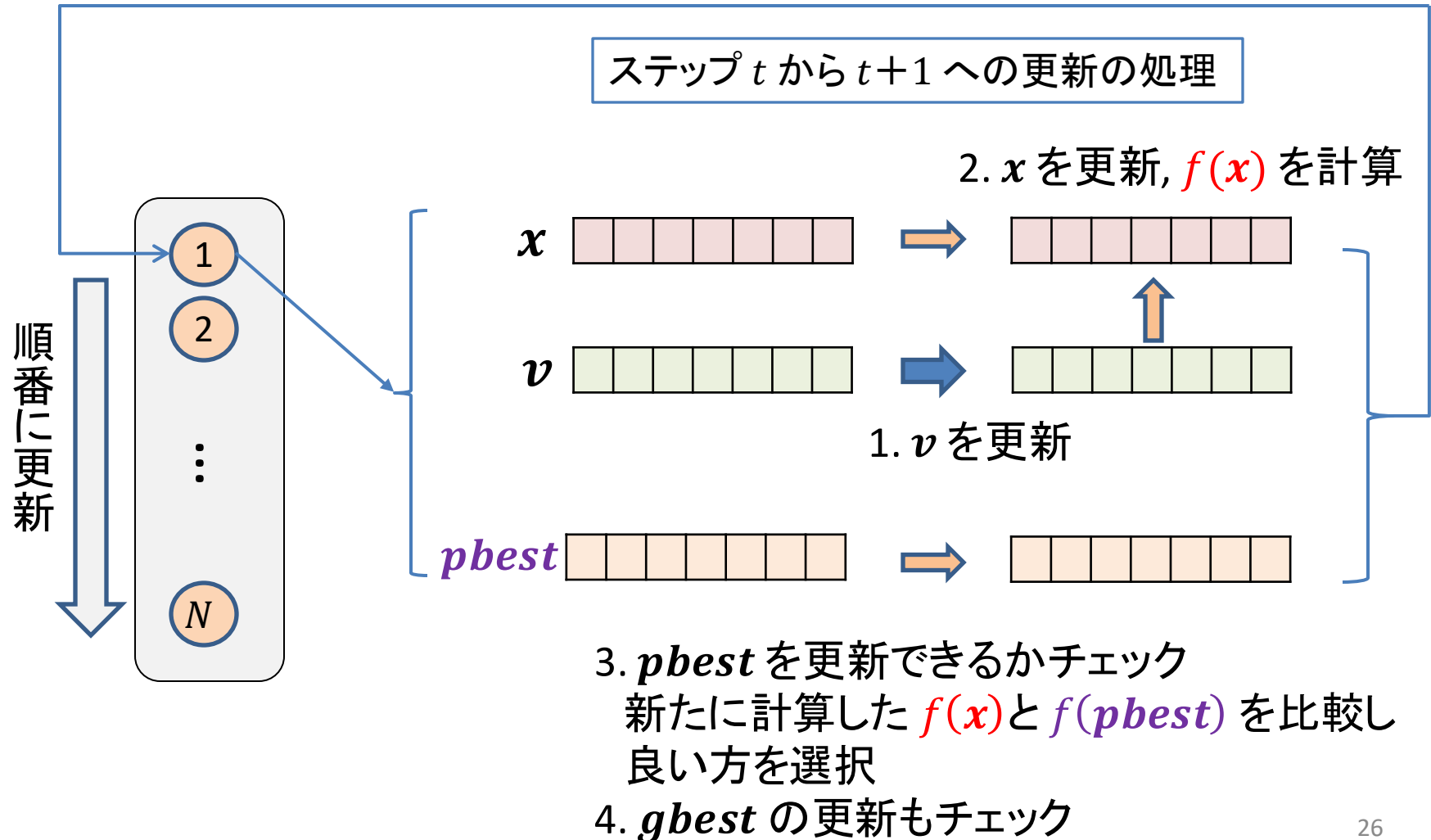
粒子のループ

ステップの
ループ

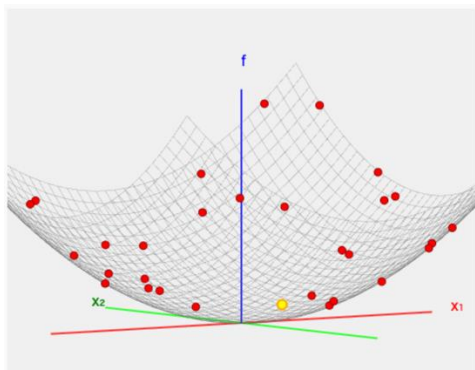
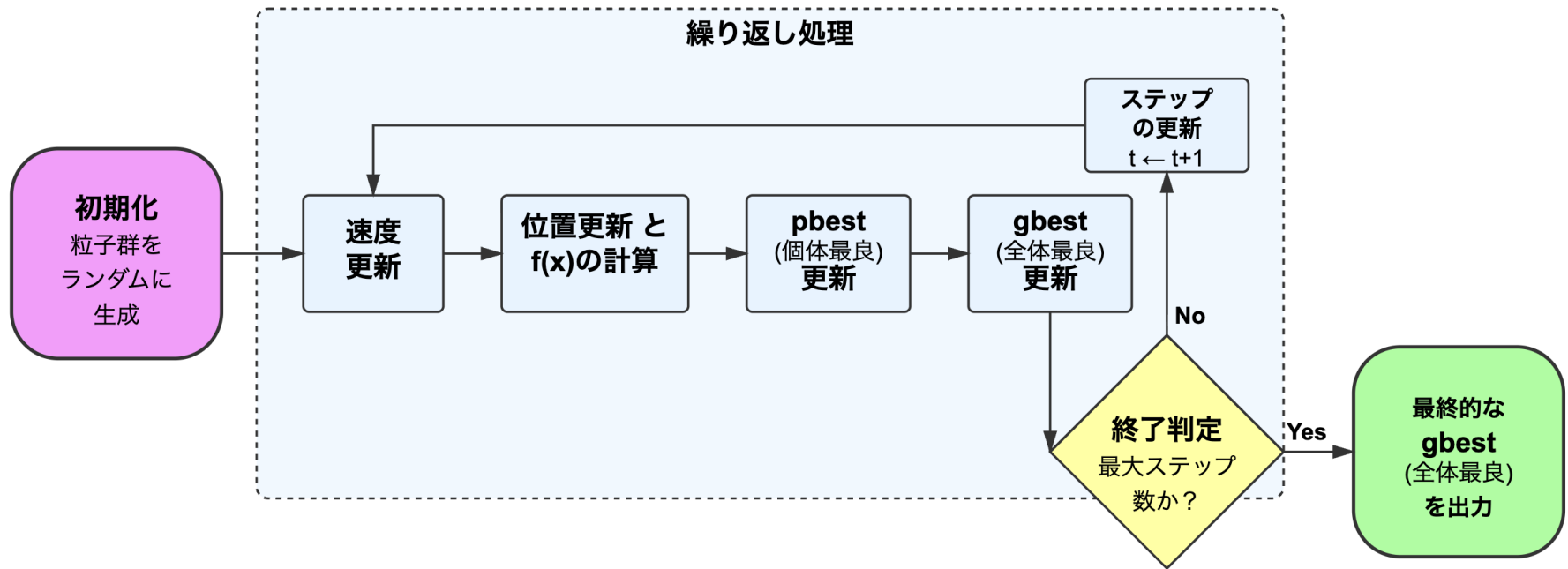


各ステップの処理

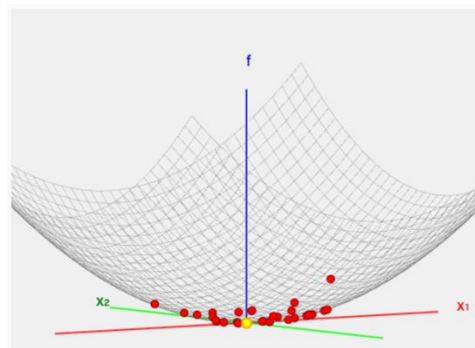
4. 個体の情報を更新



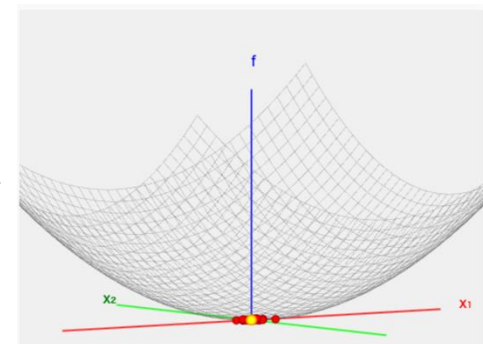
PSOの処理手順と探索のイメージ



初期化時



探索中盤



探索終盤

粒子の位置の更新 1/2

t ステップでの, 粒子 i の j 次元の成分の更新

$$v_{ij}^{t+1} = \omega v_{ij}^t + \underbrace{c_1 rand_{1ij}}_{\text{自己の最良位置に向かうベクトル}} (x_{ij}^* - x_{ij}^t) + \underbrace{c_2 rand_{2ij}}_{\text{群れの最良位置に向かうベクトル}} (x_{Gj}^* - x_{ij}^t)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1}$$

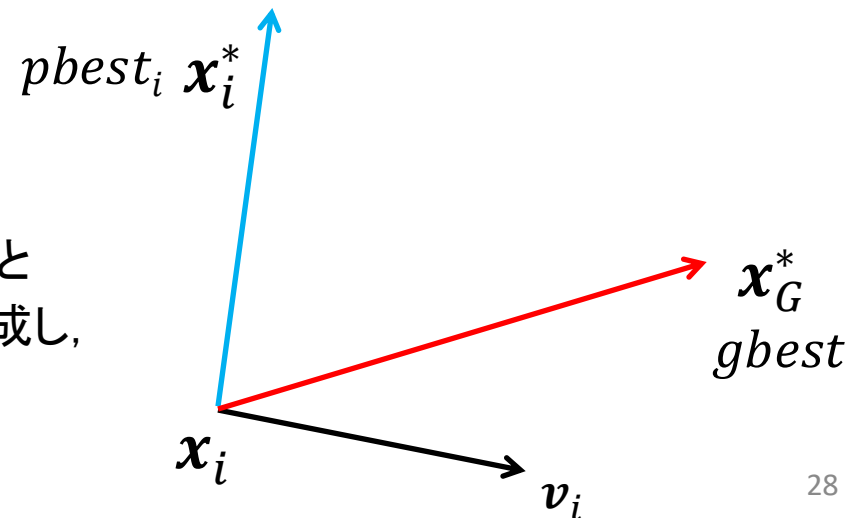
自己の最良位置に向かう
ベクトル

群れの最良位置に向かう
ベクトル

- $rand_{1ij}$ と $rand_{2ij}$: 各粒子の次元毎に生成される $[0,1]$ の一様乱数
- ω, c_1, c_2 は慣性係数, 認知パラメータ, 社会パラメータ

ω (小文字のオメガ) は
プログラムだと W

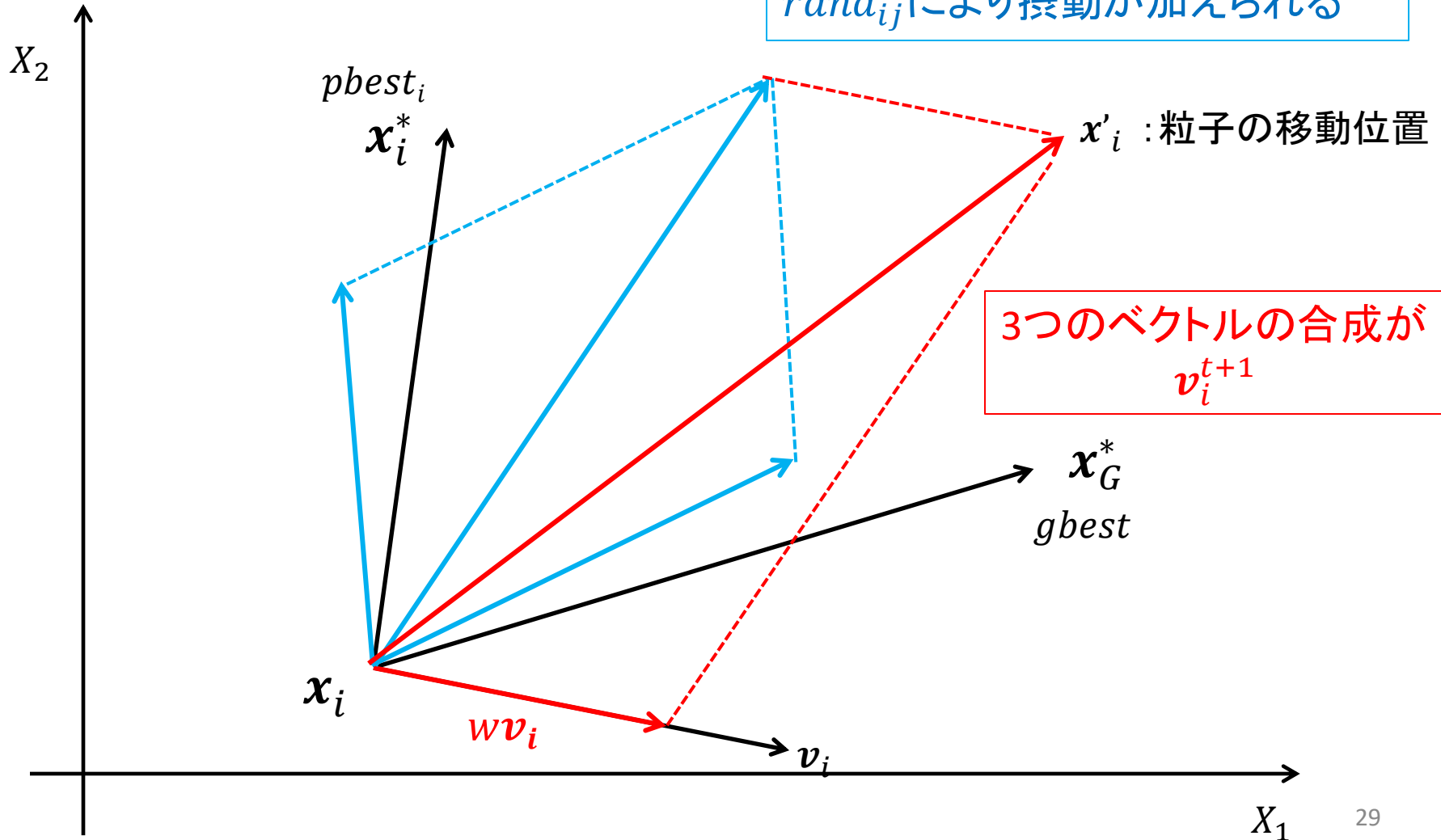
速度更新は「現在の進行方向」と「自己の経験」と
「仲間の経験」の3要素をランダム性を交えて合成し,
次の動きを決める仕組み



粒子の位置の更新 2/2

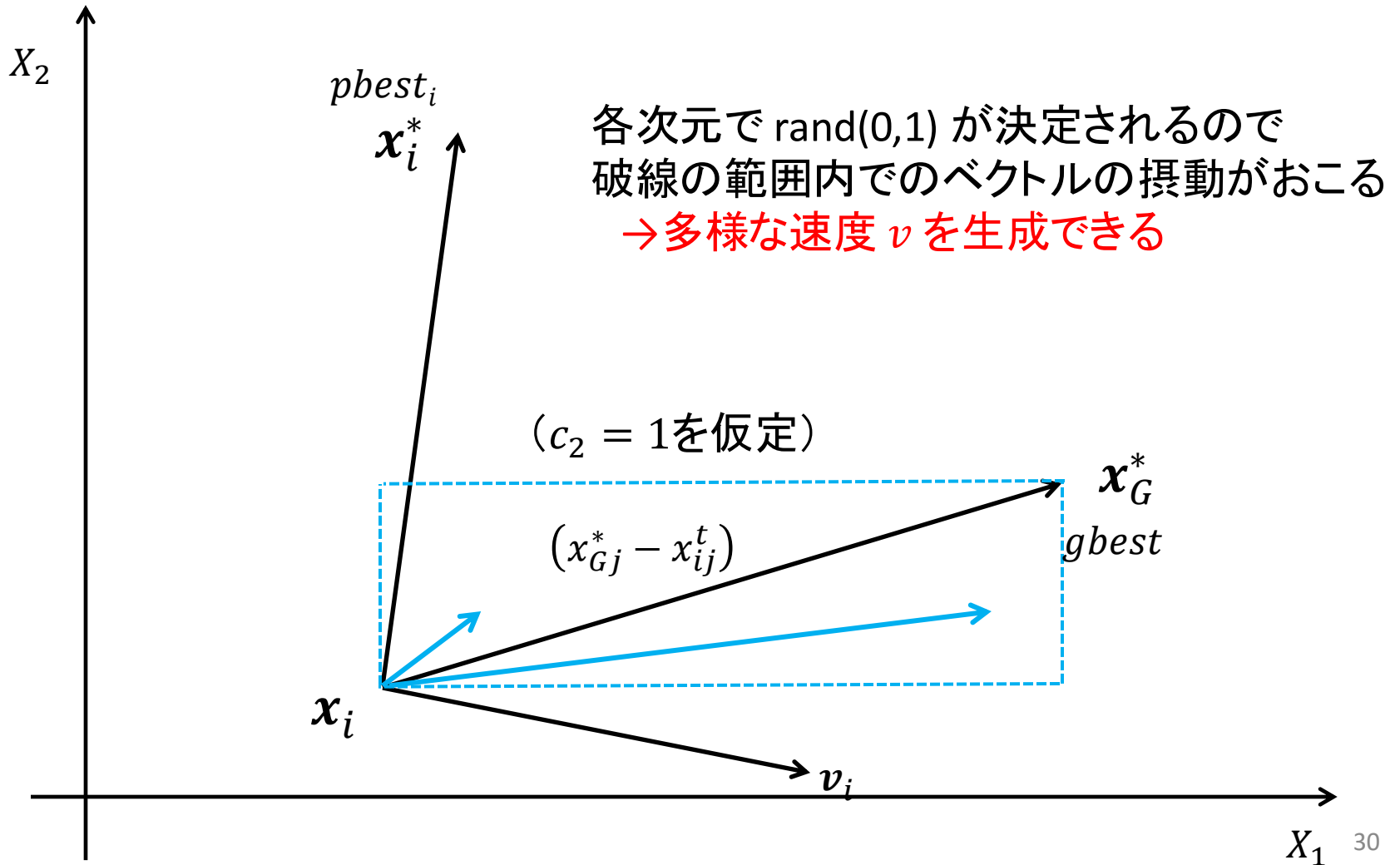
$$v_{ij}^{t+1} = \omega v_{ij}^t + c_1 rand_{1ij} (x_{ij}^* - x_{ij}^t) + c_2 rand_{2ij} (x_{Gj}^* - x_{ij}^t)$$

pbest と gbest へ向かうベクトルは
 $c_{\{1,2\}}$ 倍されて
 $rand_{ij}$ により摂動が加えられる

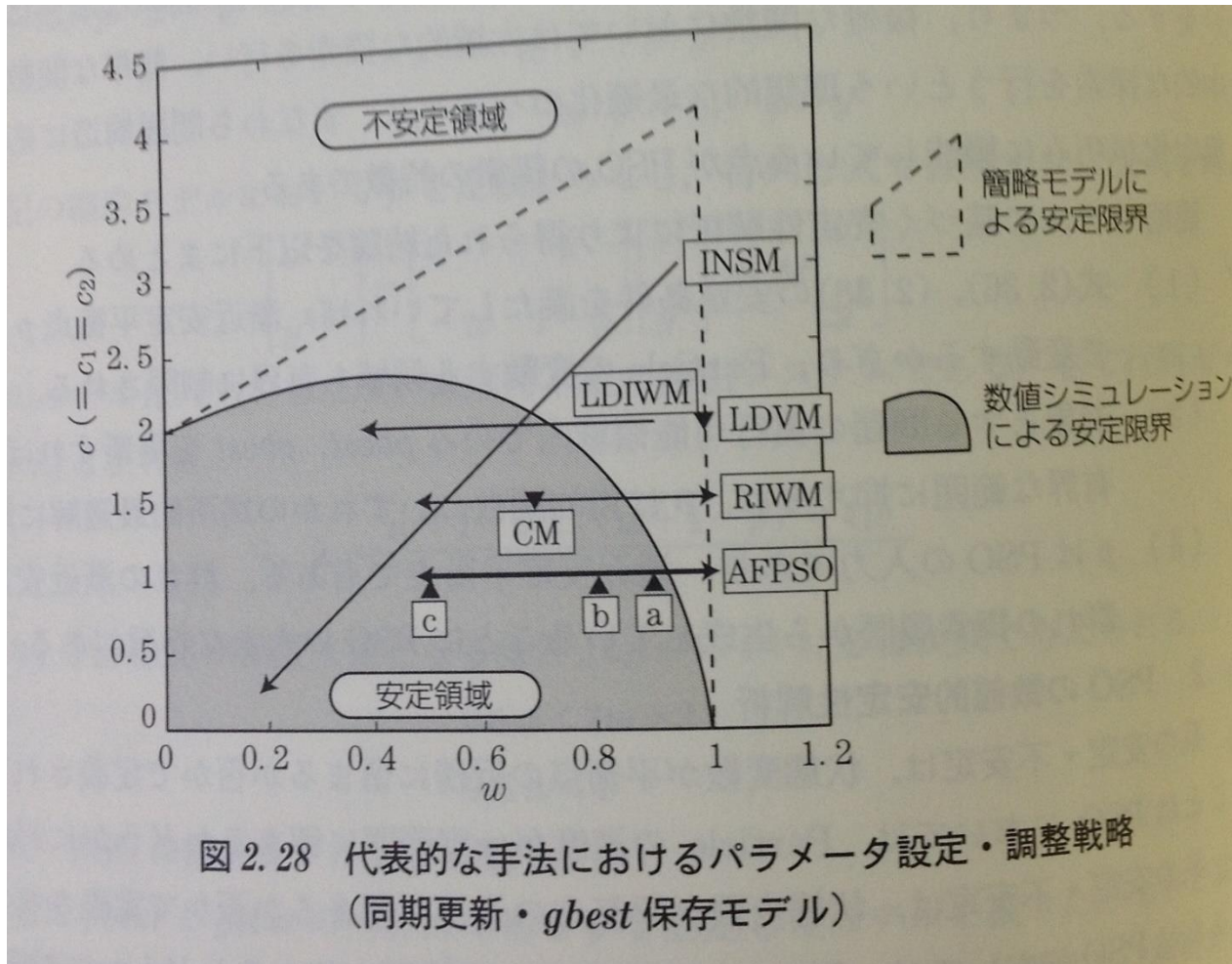


$rand$ の解探索への影響

$$v_{ij}^{t+1} = \omega v_{ij}^t + c_1 rand_{1ij} (x_{ij}^* - x_{ij}^t) + c_2 rand_{2ij} (x_{Gj}^* - x_{ij}^t)$$



粒子群の安定・不安定



メタヒューリスティクスと応用, 相吉&安田, 電気学会, 2007, (82Pより)