九州大学 工学部地球環境工学科
船舶海洋システム工学コース

# システム設計工学 （担当：木村）

## （１）システム設計とは？

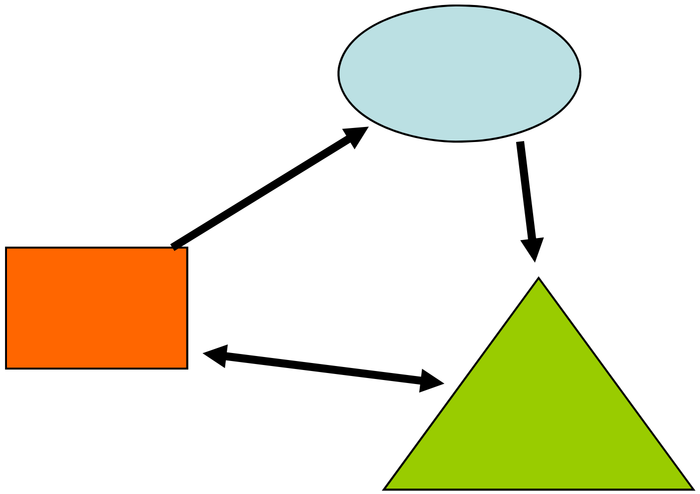
金曜1-2限（8：40～12：00)
場所：船１講義室

# システム工学

## システムとは？

「組織」「系」「制度」「方法」などと訳される

（1）　2つ以上の要素を持つ
（2）　要素間に相互作用がある
（3）　全体として、ある**目的を持つ**
（4）　時間的に状態が変化する



工学的に扱う場合

## 工学とは？

科学知識を応用して、ある物を作り出したり、ある事を実現させたりするための方法・学問の総称。

---

### 【新しいシステム作りのステップ】

1）　**システムの計画**：　システムの入出力や目的を定義する

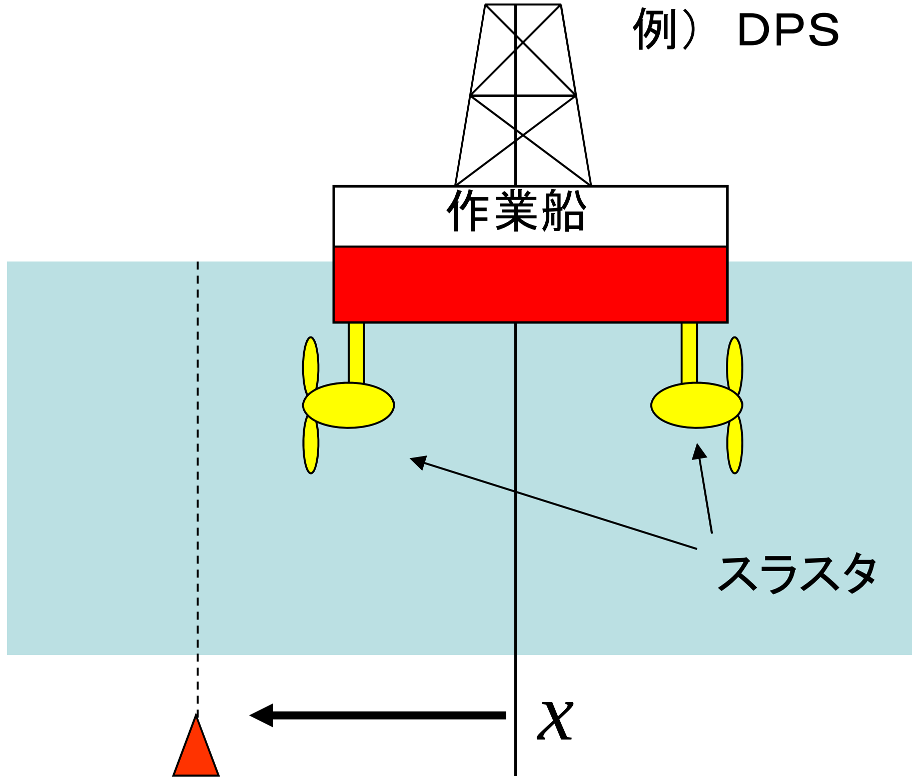
2）　**システムの設計**：　「計画」を実現する構造の考案・最適化　＝　OR

3）　**システムの運用管理・保守体制の構築**

# システムの計画：　入出力や目的を定義する

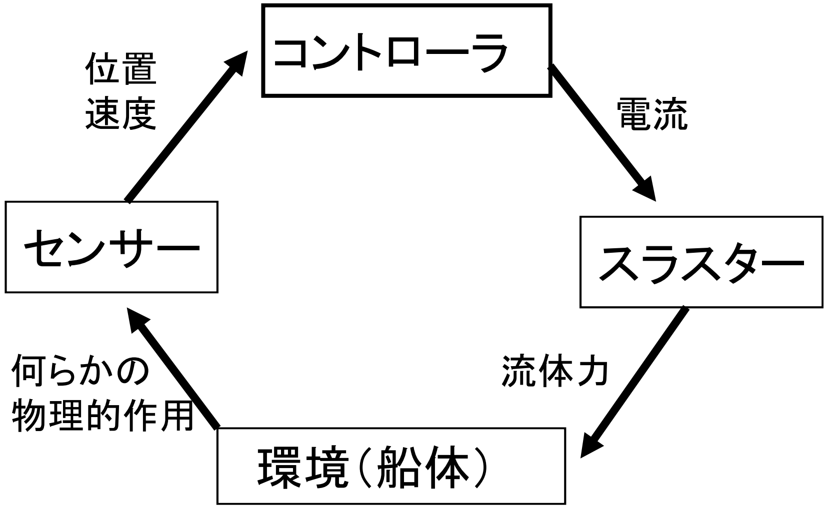
何をするためにシステムを作るのか？

例）　DPS



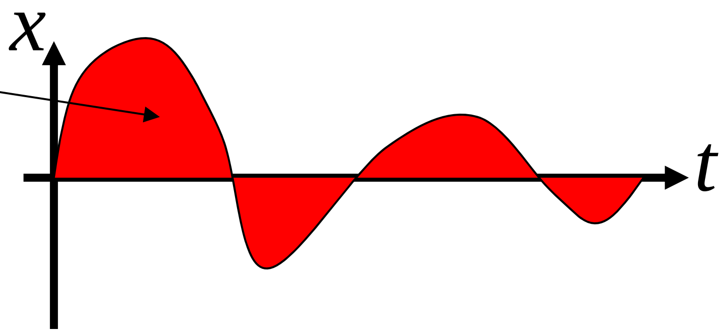

目標位置まで移動して、
そこでふんばるためのシステム

## ●システム構成要素と入出力関係




## ●システムの目的

1）　目標位置と船の位置との差の時間積分を最小化



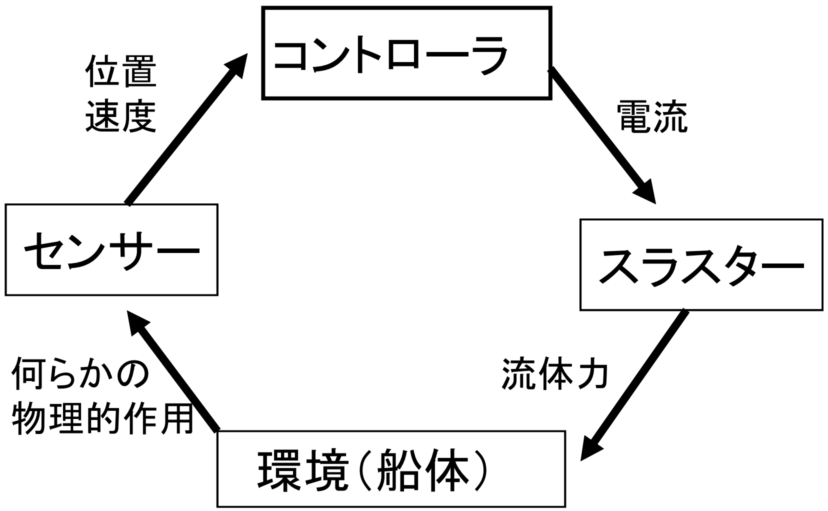

本当にこれだけを最小化すれば良いのか？

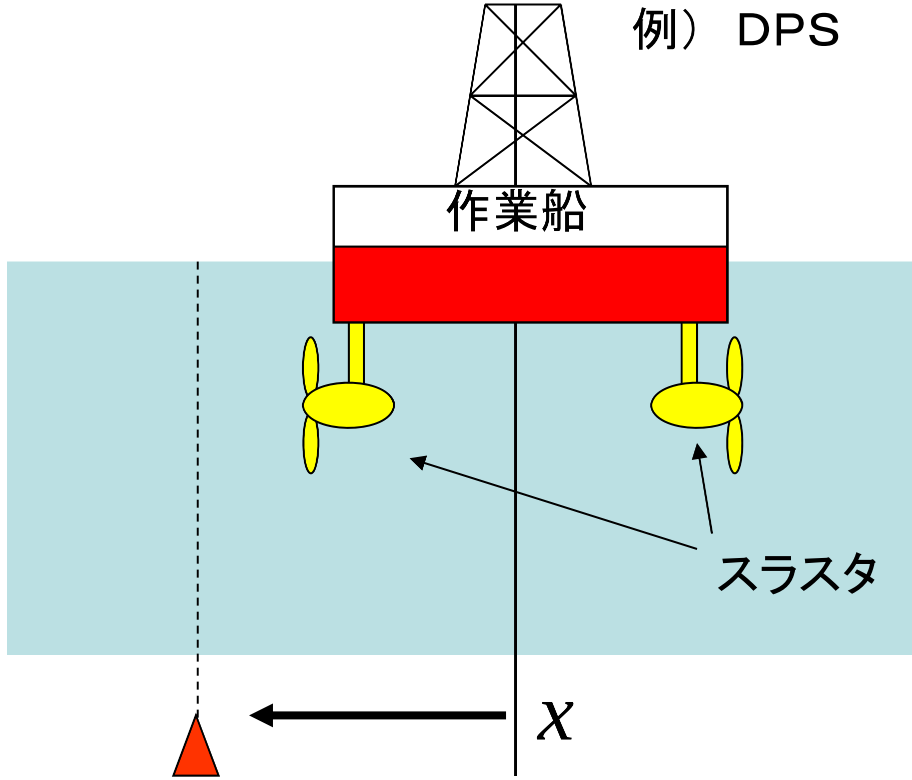
# システムの計画：　入出力や目的を定義する

何をするためにシステムを作るのか？

例）　DPS

●システム構成要素と入出力関係

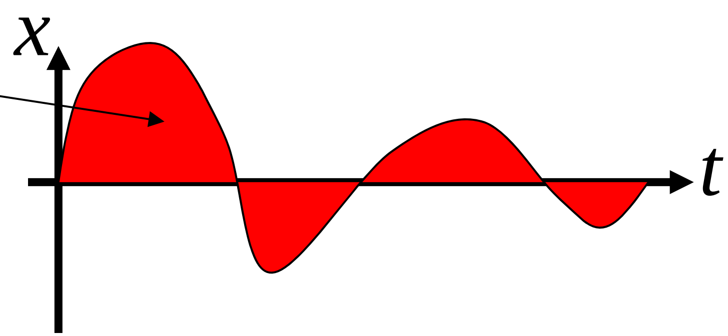



目標位置まで移動して、
そこでふんばるためのシステム

●システムの目的

1）　目標位置と船の位置との差の時間積分を最小化




本当にこれだけを最小化すれば良いのか？

2）　消費エネルギーをなるべく少なく

# システムの計画： 単目的･多目的最適化

DPSの例題：

目的関数1＝誤差の時間積分 $e$

目的関数2＝消費エネルギーコスト $c$

適当な係数 $\alpha$ を定義して、システム全体の目的関数 $f$ を以下のように定式化

トレードオフ比

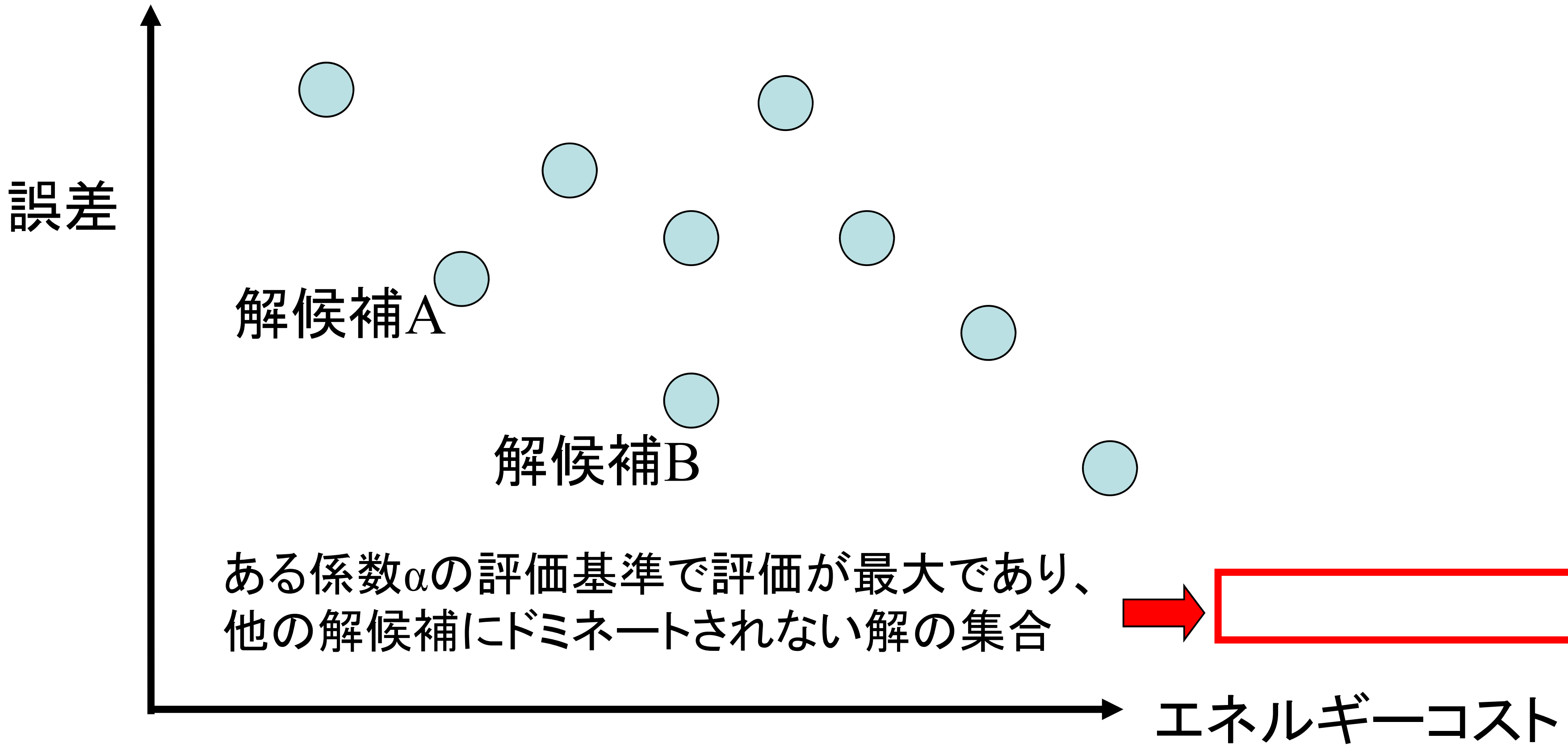
$$f = \alpha e + c$$

この $f$ が最小になるように計画する

→ **単目的最適化**

**パレート解**のどれか、あるいは全部を求める

→ **多目的最適化**



# システムの計画：　単目的･多目的最適化

トレードオフ比

DPSの例題：

目的関数1＝誤差の時間積分　$e$

目的関数2＝消費エネルギーコスト　$c$

適当な係数 $\alpha$ を定義して、システム全体の目的関数 $f$ を以下のように定式化

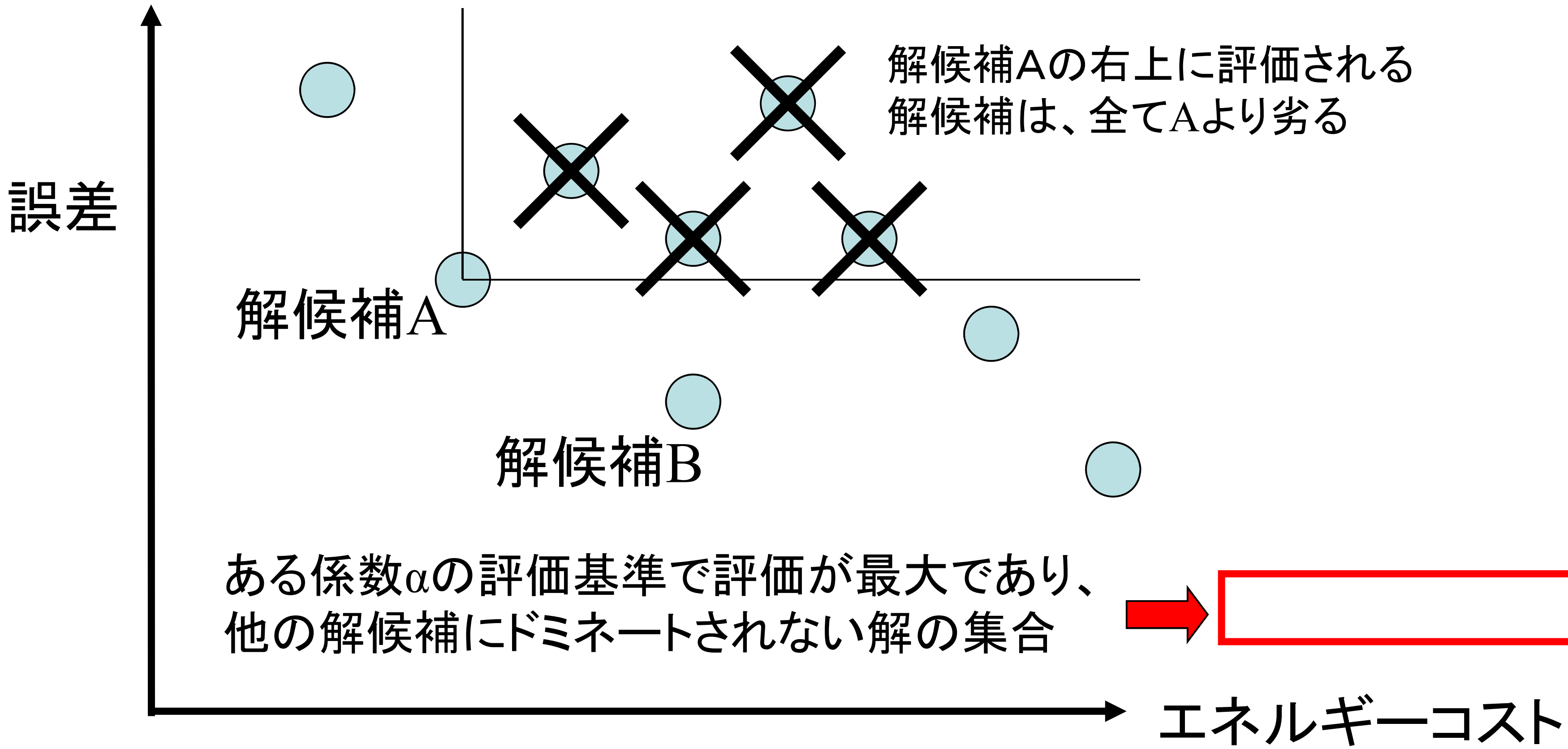
$$f = \alpha e + c$$

この $f$ が最小になるように計画する

→ **単目的最適化**

**パレート解**のどれか、あるいは全部を求める

→ **多目的最適化**




ある係数αの評価基準で評価が最大であり、他の解候補にドミネートされない解の集合

# システムの計画： 単目的・多目的最適化

トレードオフ比

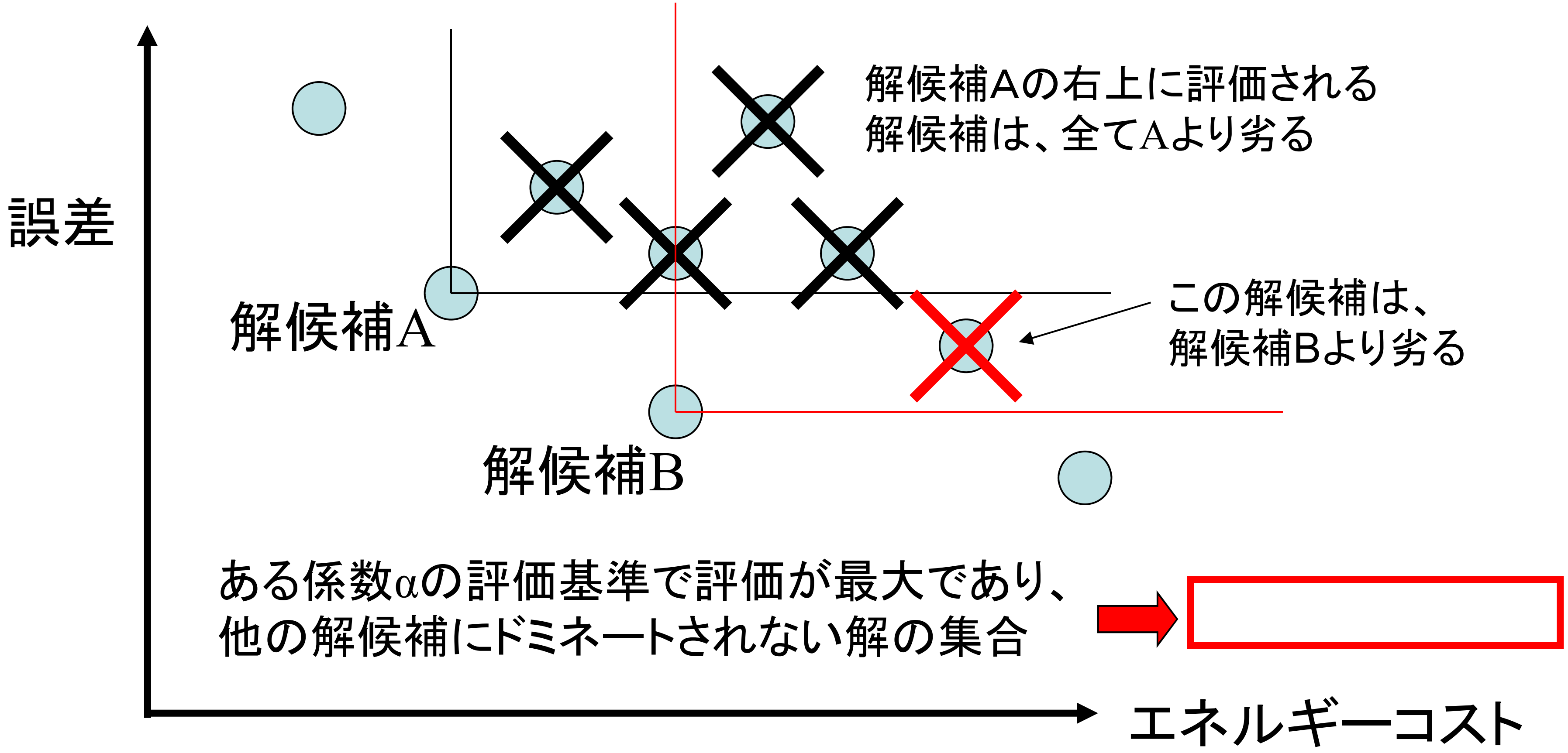
DPSの例題：
目的関数1＝誤差の時間積分 $e$
目的関数2＝消費エネルギーコスト $c$

適当な係数 $\alpha$ を定義して、システム全体の目的関数 $f$ を以下のように定式化

$$f = \alpha e + c$$

この $f$ が最小になるように計画する
→ 単目的最適化

パレート解のどれか、あるいは全部を求める
→ 多目的最適化



# システムの計画：　単目的･多目的最適化

トレードオフ比

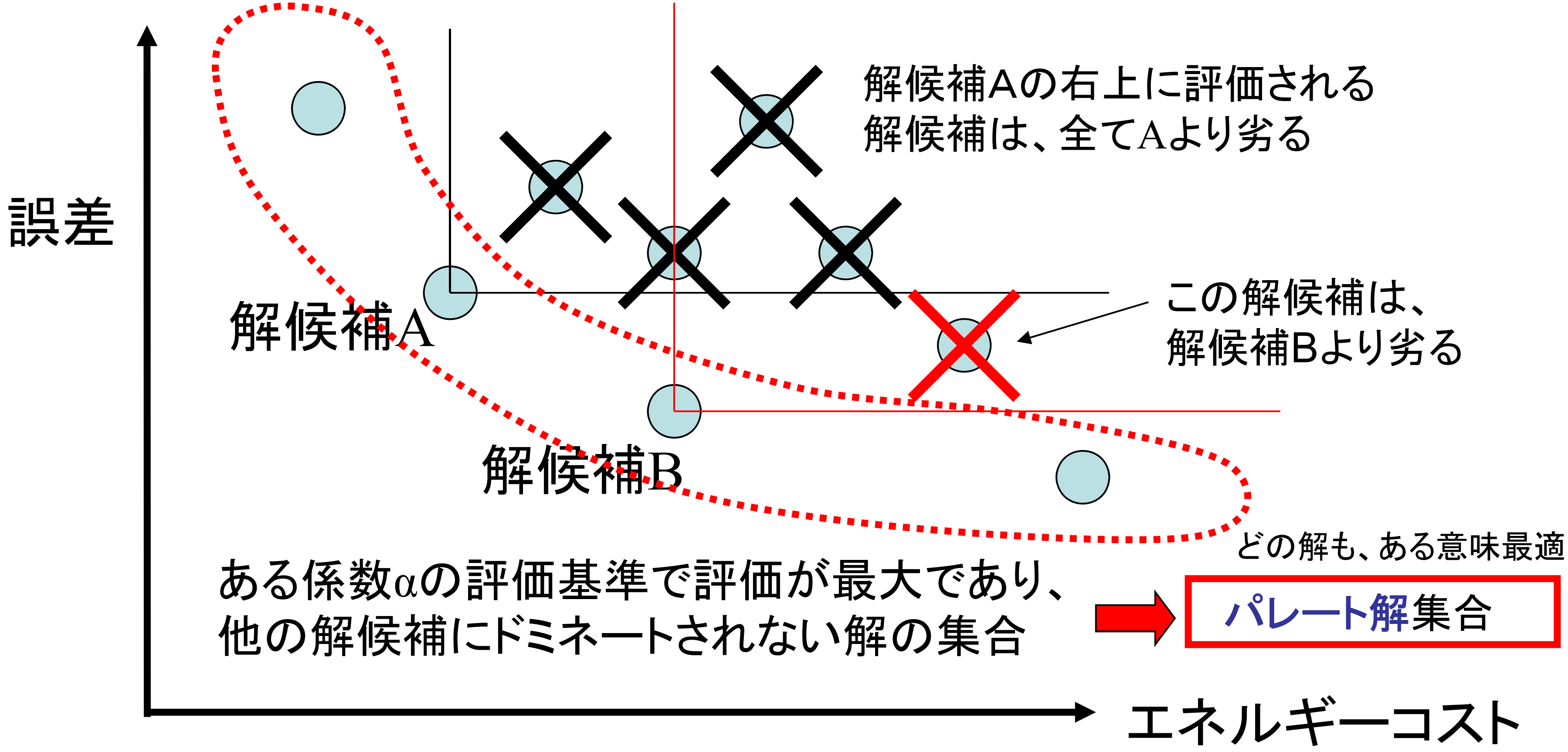
DPSの例題：
目的関数1＝誤差の時間積分　$e$
目的関数2＝消費エネルギーコスト　$c$

適当な係数 $\alpha$ を定義して、システム全体の目的関数 $f$ を以下のように定式化

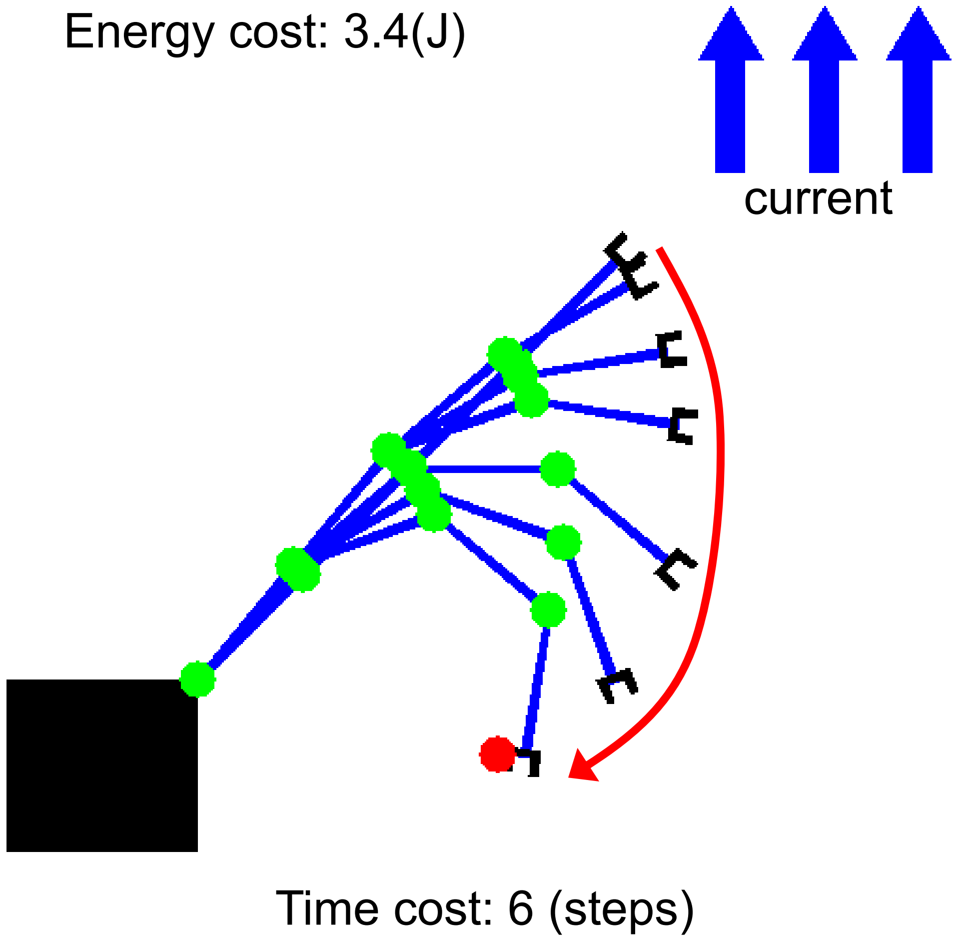
$$f = \alpha e + c$$

この $f$ が最小になるように計画する
→ **単目的最適化**

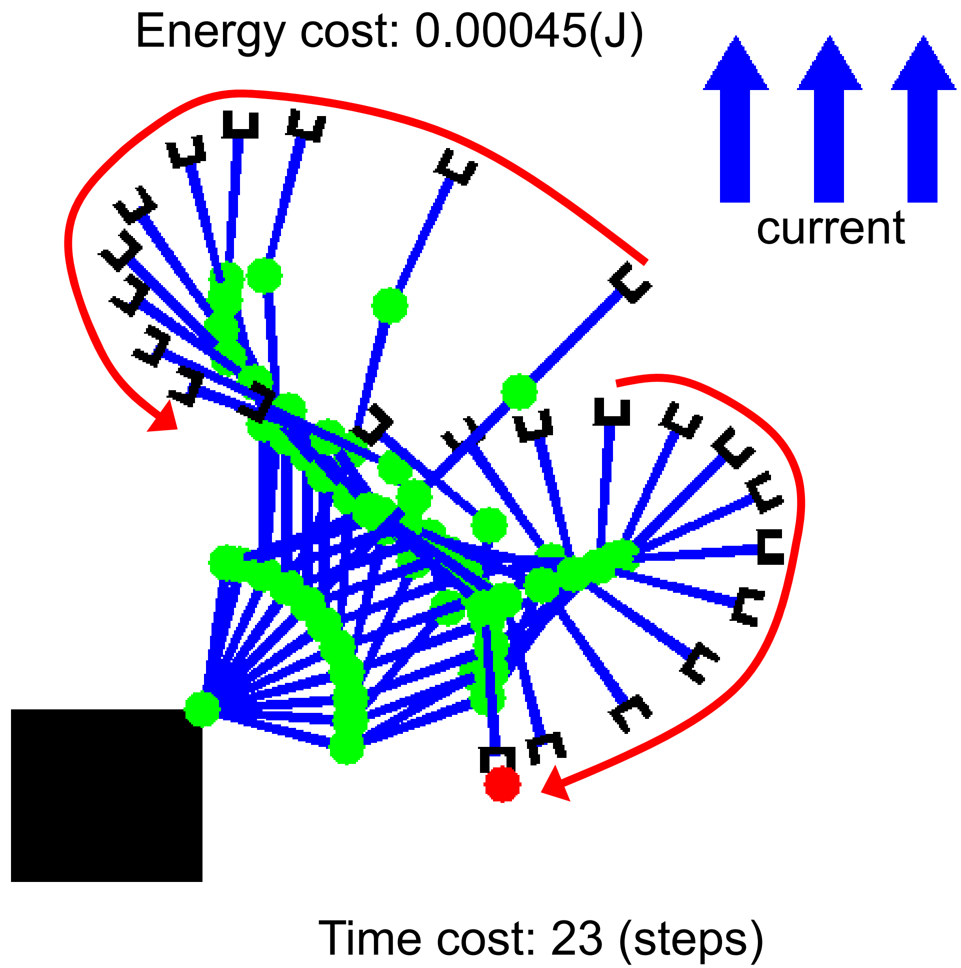
**パレート解**のどれか、あるいは全部を求める
→ **多目的最適化**



# 多目的最適化の例：水中アームの経路計画問題



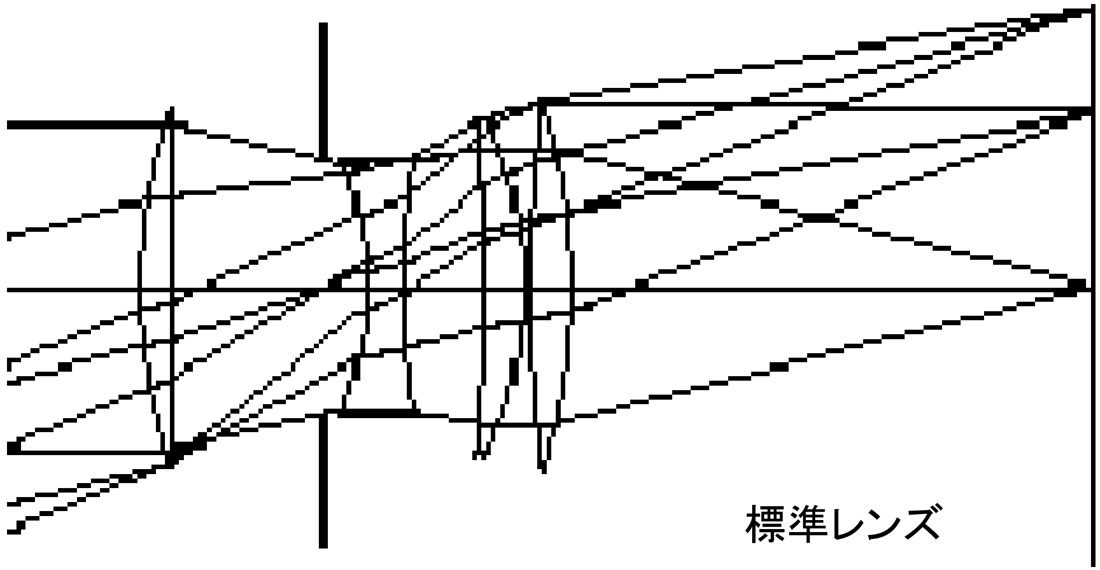

最短時間の経路




最小エネルギーの経路

# 多目的最適化の例:レンズ系設計問題

例)4枚組み
レンズ系



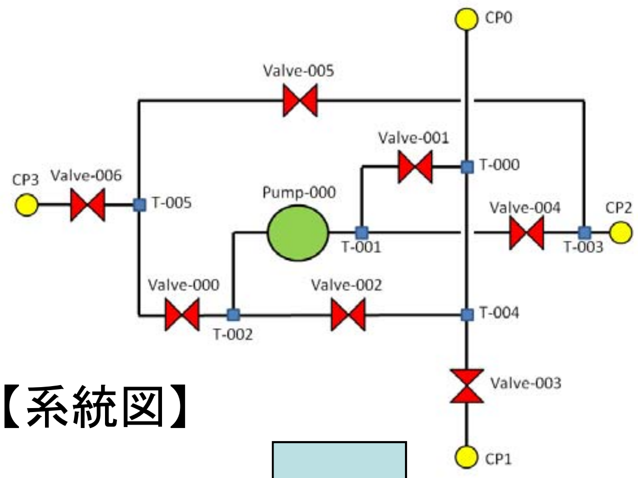

●レンズ系を特徴付けるパラメータ:
各レンズの**曲率**、**レンズ間距離**など(数十個) → **設計変数 x**

●レンズ系の評価:
(1)歪曲(distortion) $f_1$
(2)焦点(focus) $f_2$
(3)色収差(色のにじみ) $f_3$
(4)その他(像の明るさ、製造コスト、丈夫さなど)

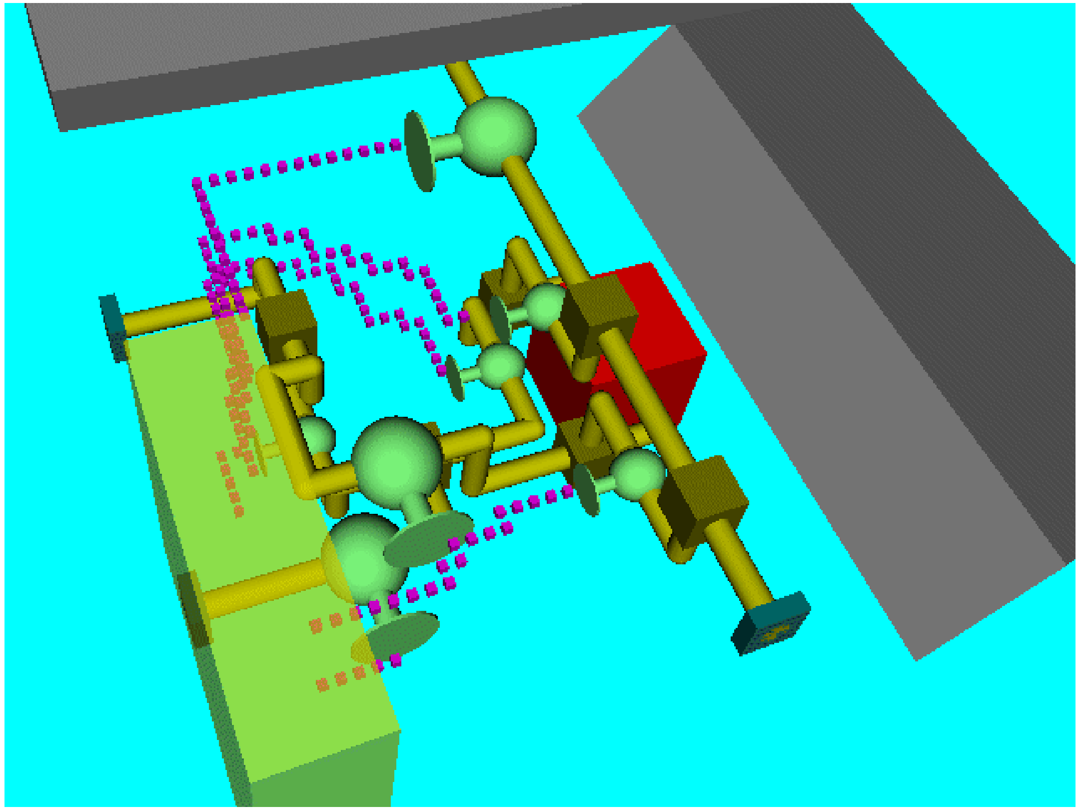
同時に多様な評価を満足させなければならない

**多目的**

# 多目的最適化の例：配管設計問題




【系統図】



●最適化すべきパラメータ：
各パイプの位置・長さなど（数十個） → **設計変数 x**

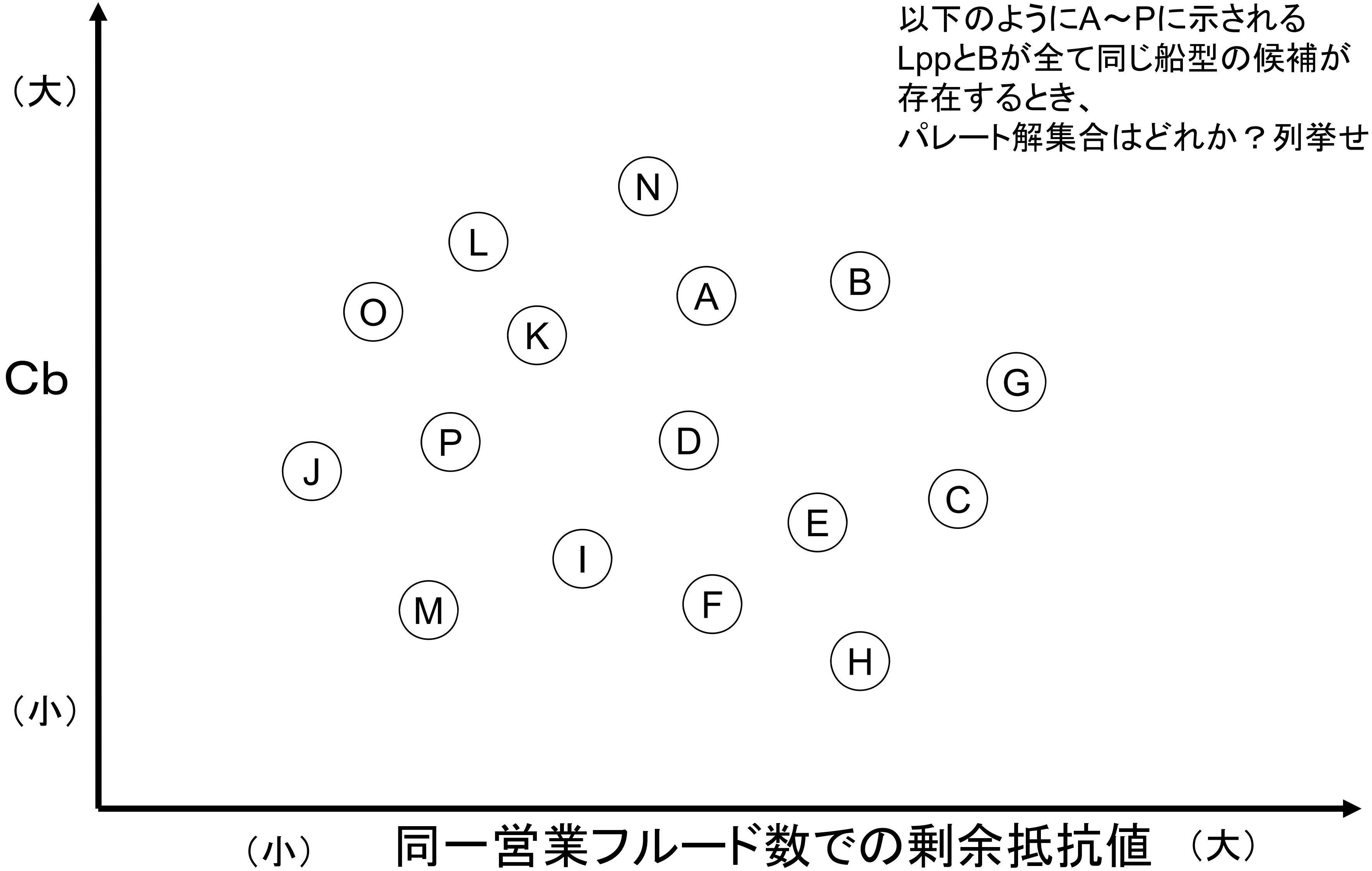
●配管設計案の評価：
（1）製造コスト（管路径×管路長の合計） $f_1$
（2）バルブの操作性 $f_2$
（3）パイプのメンテナンス性 $f_3$

同時に多様な評価を満足させなければならない → **多目的**

【システム設計工学演習問題】 2018.11.30

学籍番号
氏　名

以下のようにA～Pに示される
LppとBが全て同じ船型の候補が
存在するとき、
パレート解集合はどれか？列挙せよ



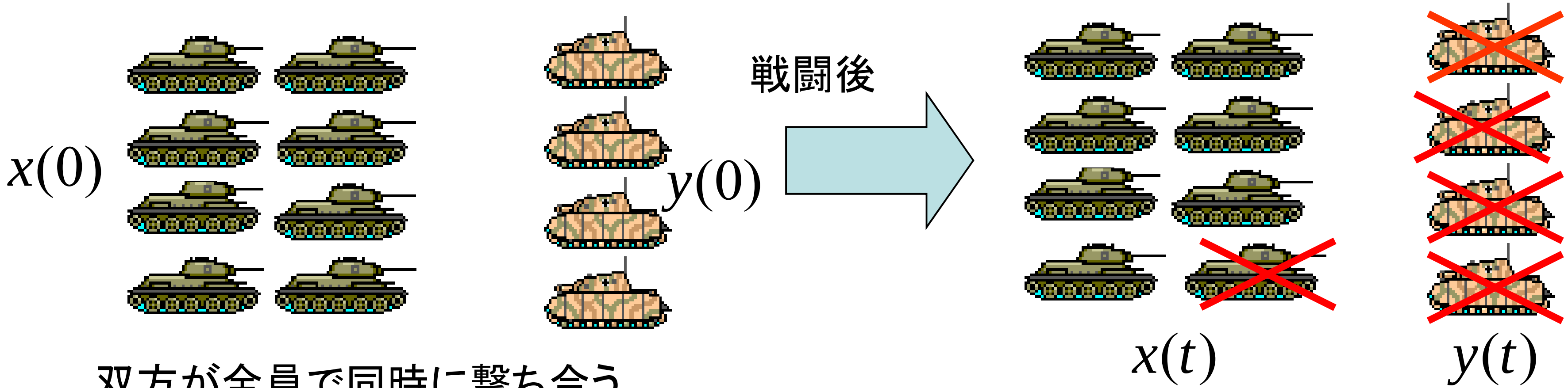
# システムの設計：「計画」を実現する構造の考案・最適化

**方法論：オペレーションズリサーチ（OR：作戦研究）**

１）対象とする問題の因果関係・量的な関係を把握（データ取得）
２）対象とする問題を数学的に表現する（数理モデル化）
３）方程式などで表された数学的関係を解く
４）解の意味を考え、最も良い方策を立てて実施する

} **最適化**

例） ランチェスターの法則




双方が全員で同時に撃ち合う
→ 自軍の単位時間あたりの損害は敵の残数に比例

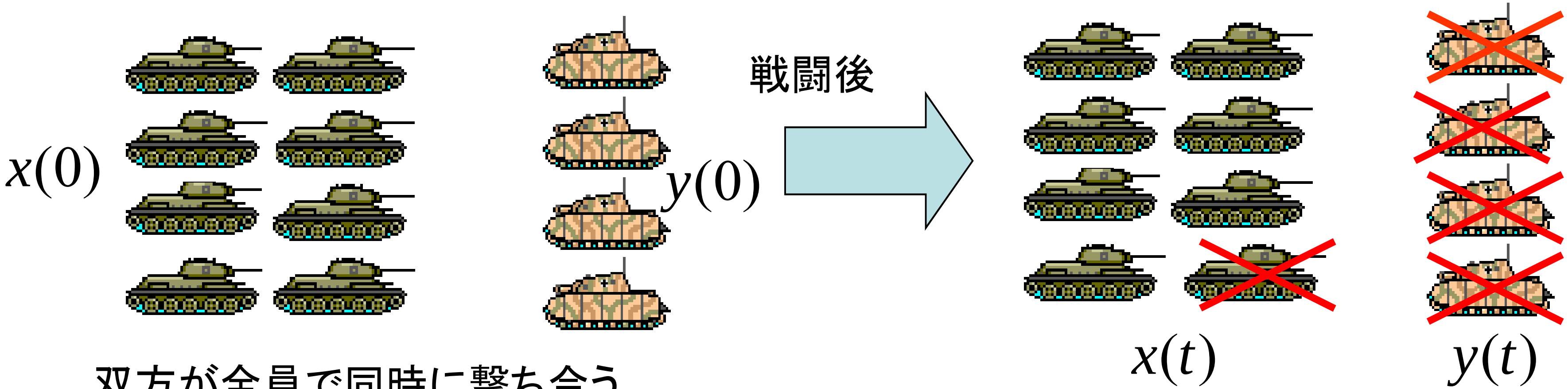
$$
\begin{cases}
\dfrac{d}{dt} x(t) = -k\, y(t) \\
\dfrac{d}{dt} y(t) = -k\, x(t)
\end{cases}
$$

# システムの設計：「計画」を実現する構造の考案・最適化

**方法論：オペレーションズリサーチ（OR：作戦研究）**

１）対象とする問題の因果関係・量的な関係を把握（データ取得）
２）対象とする問題を数学的に表現する（数理モデル化）
$\left.\begin{array}{l}\text{３）方程式などで表された数学的関係を解く}\\ \text{４）解の意味を考え、最も良い方策を立てて実施する}\end{array}\right\}$ 最適化

例）　ランチェスターの法則




双方が全員で同時に撃ち合う
→　自軍の単位時間あたりの損害は敵の残数に比例

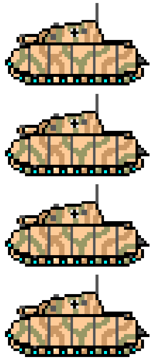
$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}x(t) = -k\,y(t) \\ \dfrac{d}{dt}y(t) = -k\,x(t) \end{cases}$$

$t$ を消去し
時刻0での数量を入れて
微分方程式を解くと

$$x(t)^2 - x(0)^2 = y(t)^2 - y(0)^2$$

戦闘開始時（t＝0）においてそれぞれ

$x(0)=100$　　$y(0)=50$



とおき、$y(t)$ が全滅したとき、すなわち

$$y(t)=0$$

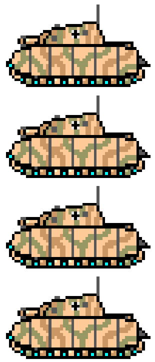
のとき $x(t)$ はどれだけ残っているか？

よってドイツ軍に勝ち目は無い。
諸君がドイツ軍の司令官だったらどうする？

その他、レーダーの配置問題や
潜水艦による商船攻撃被害を最小限にするための護衛方法など

戦闘開始時(t＝0)においてそれぞれ

$x(0) = 100$　　　　$y(0) = 50$



とおき、$y(t)$ が全滅したとき、すなわち

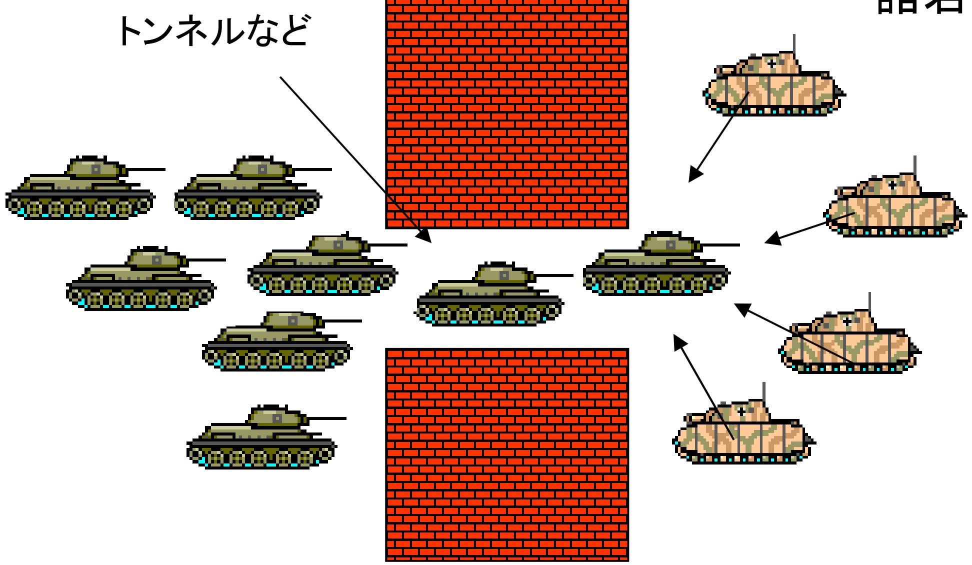
$$y(t) = 0$$

のとき $x(t)$ はどれだけ残っているか？

$$x(t)^2 - 100^2 = 0^2 - 50^2$$

$$x(t) = \sqrt{100^2 - 50^2} = 86.6$$

よってドイツ軍に勝ち目は無い。
諸君がドイツ軍の司令官だったらどうする？




## 対処方法:
## 問題設定を変える

例）　敵の全てが同時には攻撃
　　　できない場所へ誘い込む

ウォーゲームは軍隊の戦闘の
数理モデル化の一種

その他、レーダーの配置問題や
潜水艦による商船攻撃被害を最小限にするための護衛方法など

# システム論の実践

| 実際の具体的な問題 | モデル化（単純化） | 数理モデル |
| --- | --- | --- |
| 在庫管理問題<br>生産工程管理問題 | → | **確率モデル**<br>（本講義で扱う） |
| 船の安定制御問題<br>クレーンの振れ止め制御問題 | → | 微分方程式モデル |
| パイプの配管問題<br>船舶用機器の配置問題 | → | 幾何的モデル |

膨大な科学的知見の蓄積を
利用して問題を解く

# システム論の実践

ある造船所の
生産工程管理問題

モデル化
（単純化）

数理モデル

数学的に、
ある特殊な遷移
パターンを有する
確率過程モデル

この特殊な遷移
パターンを有する
確率過程モデルの
問題を効率良く
解く方法を開発

# システム論の実践

ある造船所の
生産工程管理問題

モデル化
（単純化）

**数理モデル**

数学的に、
ある特殊な遷移
パターンを有する
確率過程モデル

モデル化すると
同じ数理モデル

運送業者の
配送計画問題

この特殊な遷移
パターンを有する
確率過程モデルの
問題を効率良く
解く方法を開発

この知見が
そのまま利用できる

# システム設計の概要

1）「モデル化」:　問題の本質を正しく捉えて、うまく表現する

2）「最適化」:　モデルを用いて、何らかの設計指標の意味で
最も好ましい設計パラメータを見つける

扱うシステム：　本講義では特に確率モデルを扱う
機械／物流／通信／人工知能など

●どのような設計問題でも、「モデル化」と「最適化」を適切に行う
ことにより、同様に扱うことが可能

●「最適化」では、コンピュータを利用しよう

# 【最適化とは？】

「最も**良い状態**になるように、**手段や方法**を考えて行動すること」

**解候補**－－－**評価値**

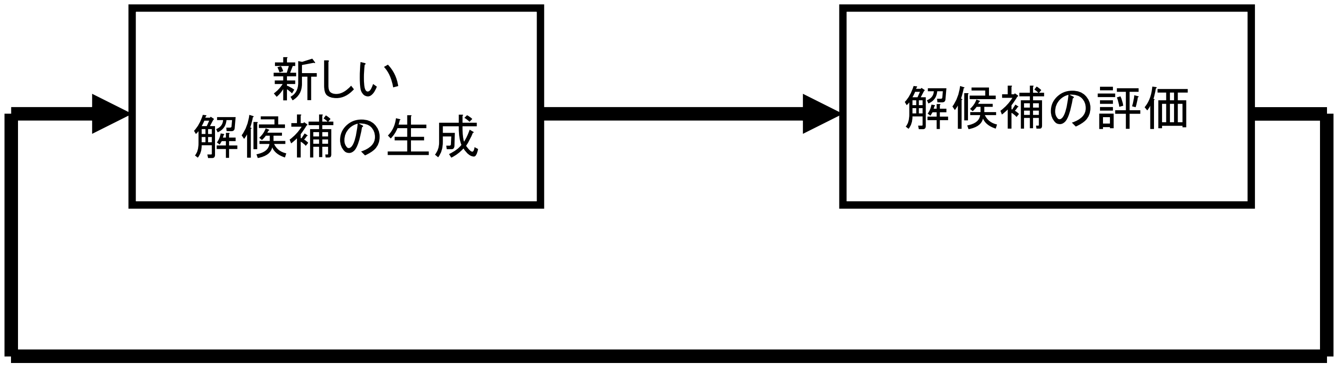
例）　製品のデザイン－－－売上げ高
　　　船の形状－－－推進抵抗

最適化以前に、
その目的である
**「評価」を定義**
することが重要

**モデル化**に関連

---

一般的な最適化のプロセス：



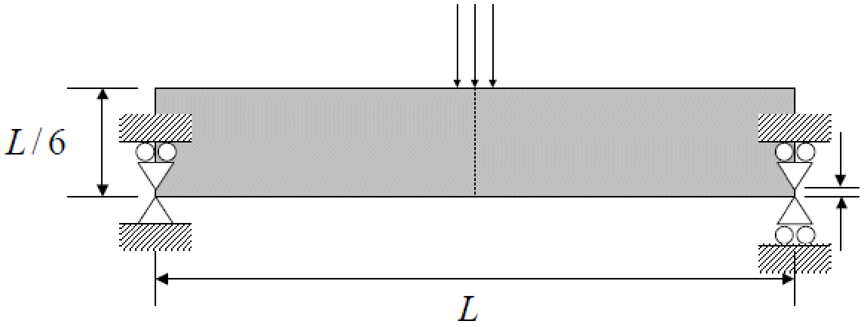

以前の解候補の評価値を参考にして、より有望な解候補を生成することで
解候補を改善していく

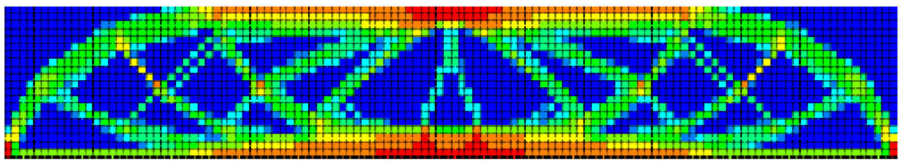
# 自己組織化とは？　～「保守性」に優れたシステム～

『 **要素間の相互作用のみ**によって自発的に進行する組織化 』

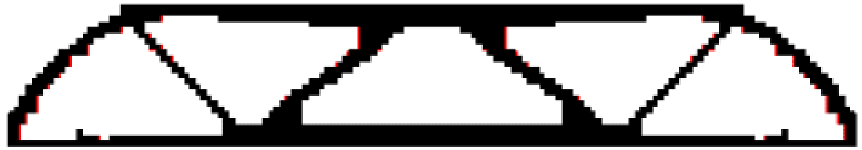
## 自己組織化の例:　**骨のリモデリング**

骨は、応力が繰り返しかかる部分では
骨細胞が骨を強化していき、応力が
あまりかからない部分では消えていく
→ **トポロジー最適化**

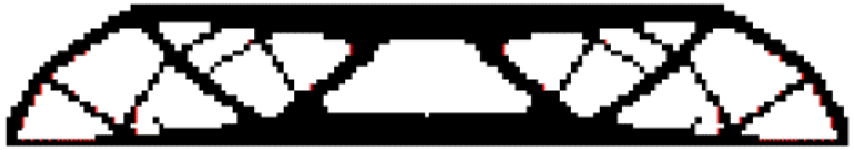


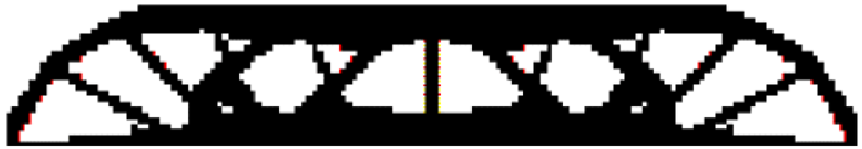
畔上秀幸：形状最適化問題の解法，計算工学Vol.2 No.4(1997)



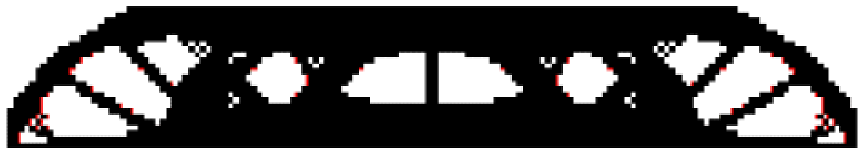
(a)　$\bar{m}_S = 0.3$,　$\bar{m} = 0.30$,　$\bar{G} = 0.9$,　$G = 0.89$,　$C/C_0 = 1.49$



(b)　$\bar{m}_S = 0.4$,　$\bar{m} = 0.40$,　$\bar{G} = 0.80$,　$G = 0.86$,　$C/C_0 = 1.10$



(c)　$\bar{m}_S = 0.5$,　$\bar{m} = 0.50$,　$\bar{G} = 0.75$,　$G = 0.84$,　$C/C_0 = 1.04$



(d)　$\bar{m}_S = 0.6$,　$\bar{m} = 0.60$,　$\bar{G} = 0.75$,　$G = 0.84$,　$C/C_0 = 1.02$

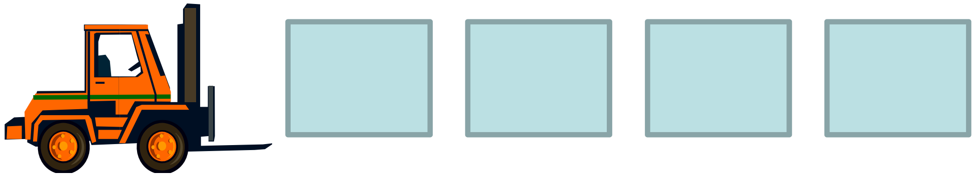
東京大学　藤井大地教授のPPT資料より引用

# 自己組織化を用いたシステム

・倉庫内の物品の配置の最適化

大きな倉庫から必要な物品を短時間で取り出せるようにしたい

→　物品が使用される毎に、その品の置場を一定距離だけ入口近くへ移動

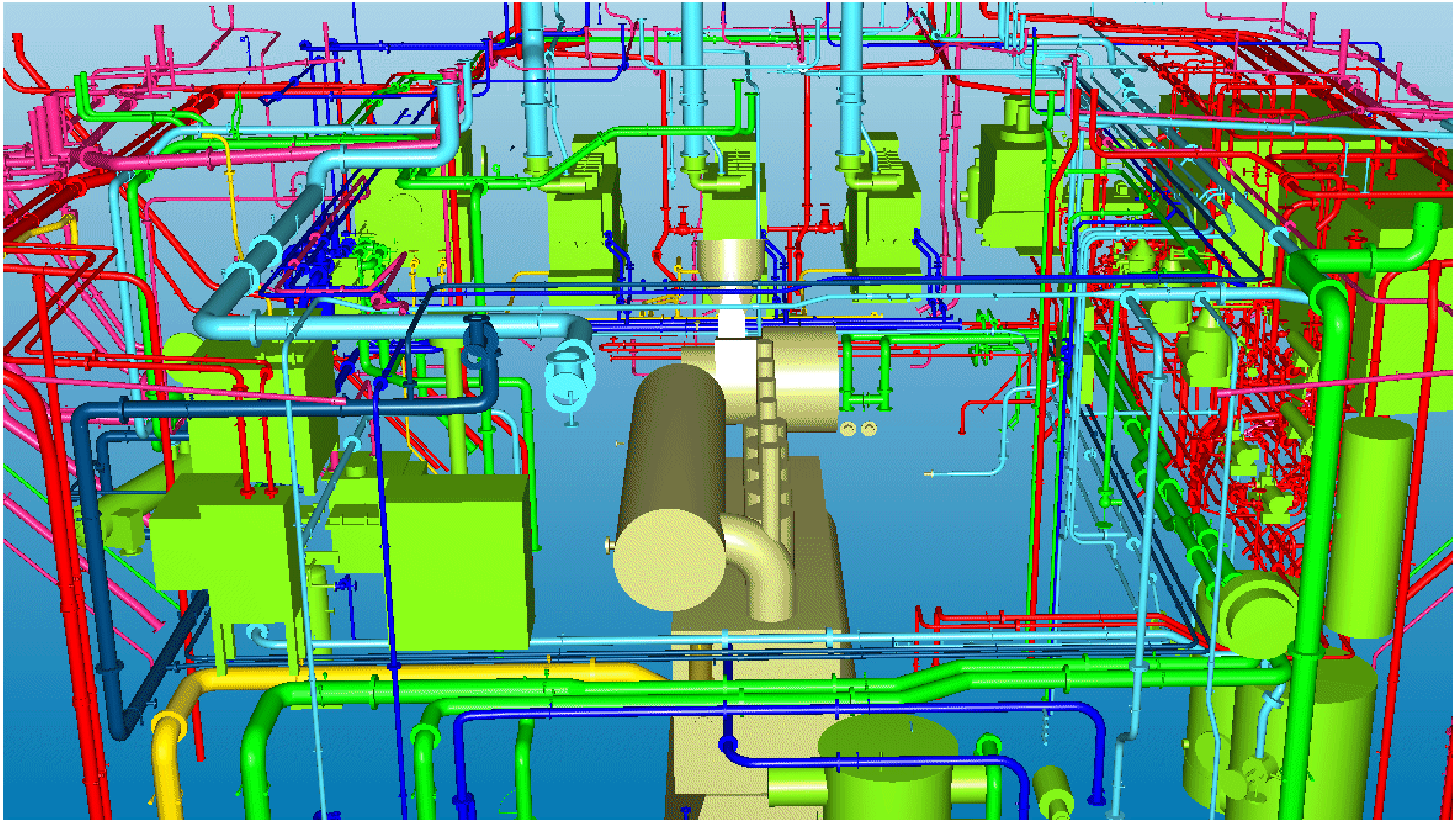


この操作を繰り返すと、使用頻度の高い順に物品がソートされ、使用頻度の高い物品ほど入口近く（取出し時間が短い場所）へ

これはデータベースにおいて検索時間を減らすようなデータの格納方法としても使用される

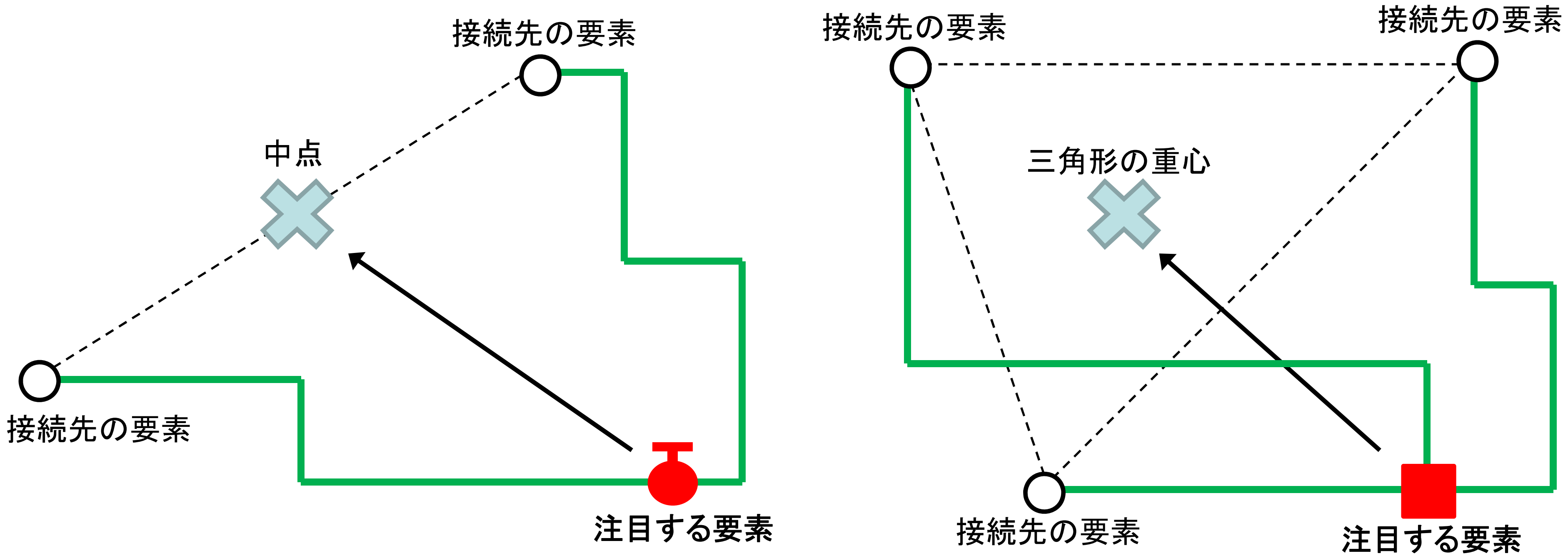
類似例：不要書類の整理法（超整理法）
新しい書類が発生する度にファイルして時間順に並べていき、使用したら、また先頭に戻すという方法。デメリットはめったに使わないファイルはひたすら探すしかない点

機器の配置は、それらを繋ぐパイプのコストを大きく左右



機器配置問題はどのように扱うべきか？

# 自己組織化を利用した解決法



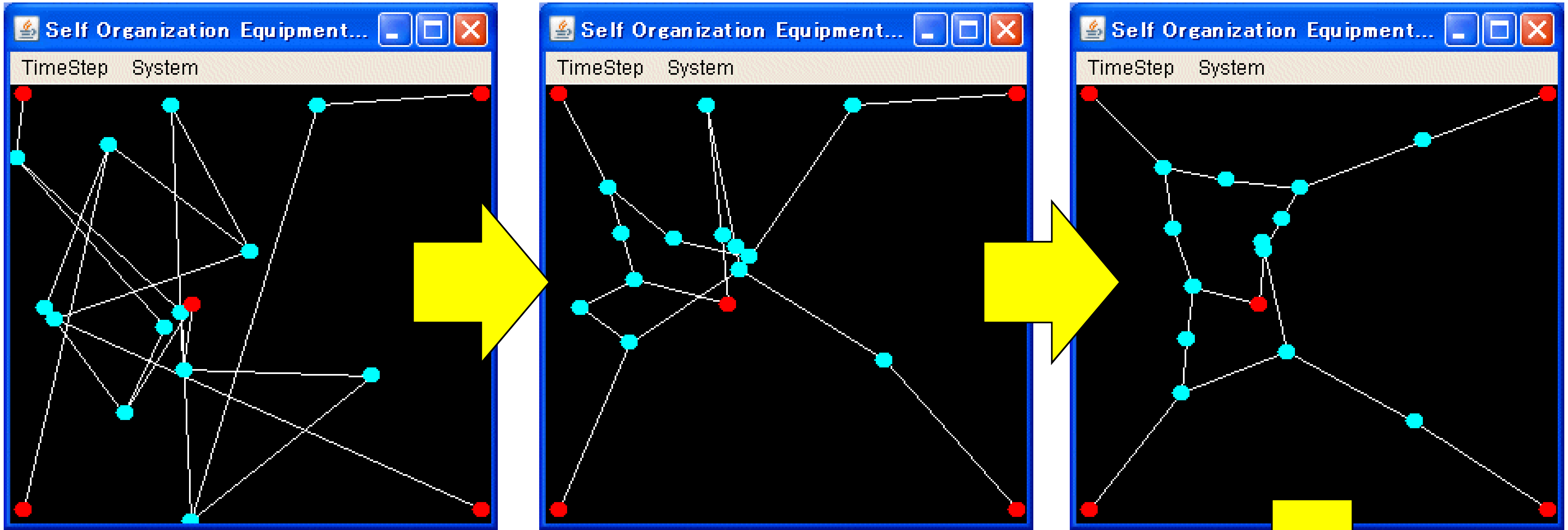

(a) 注目する要素の接続先が2箇所の場合　　(b) 注目する要素の接続先が3箇所の場合

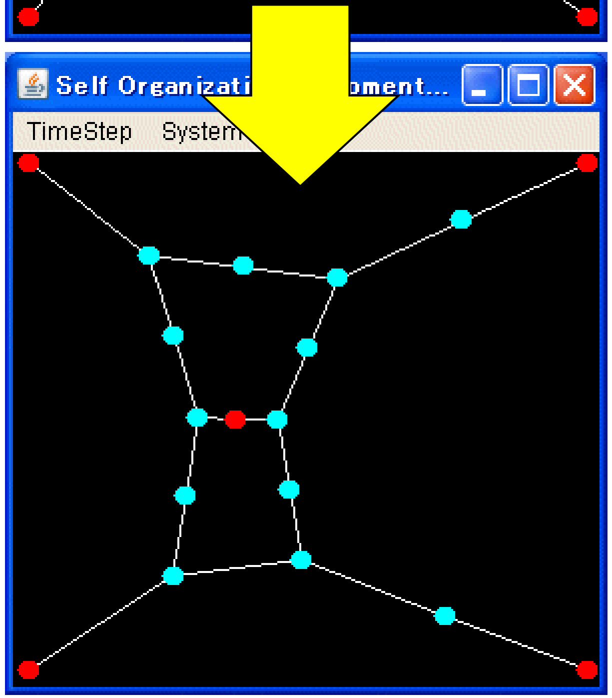
上記の操作を全ての要素についてランダムな順序で繰り返す

→　こんがらがっていた要素が整然と並ぶ

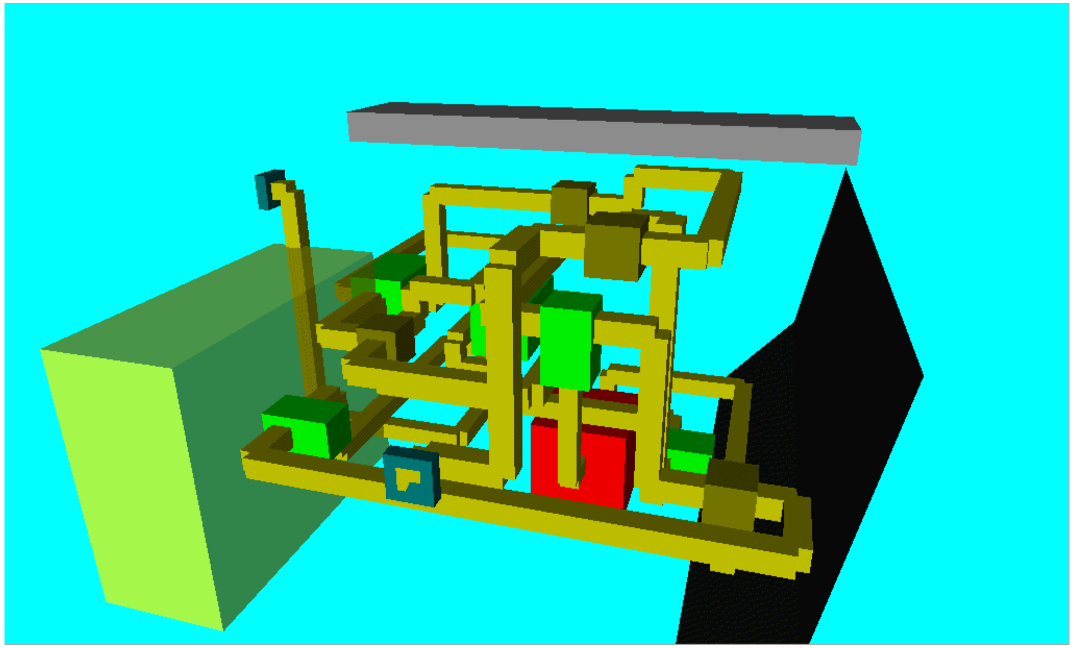
自己組織化

# Demo

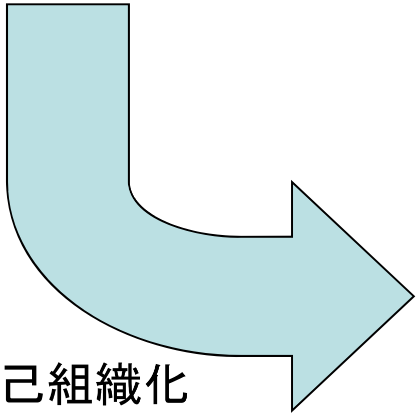


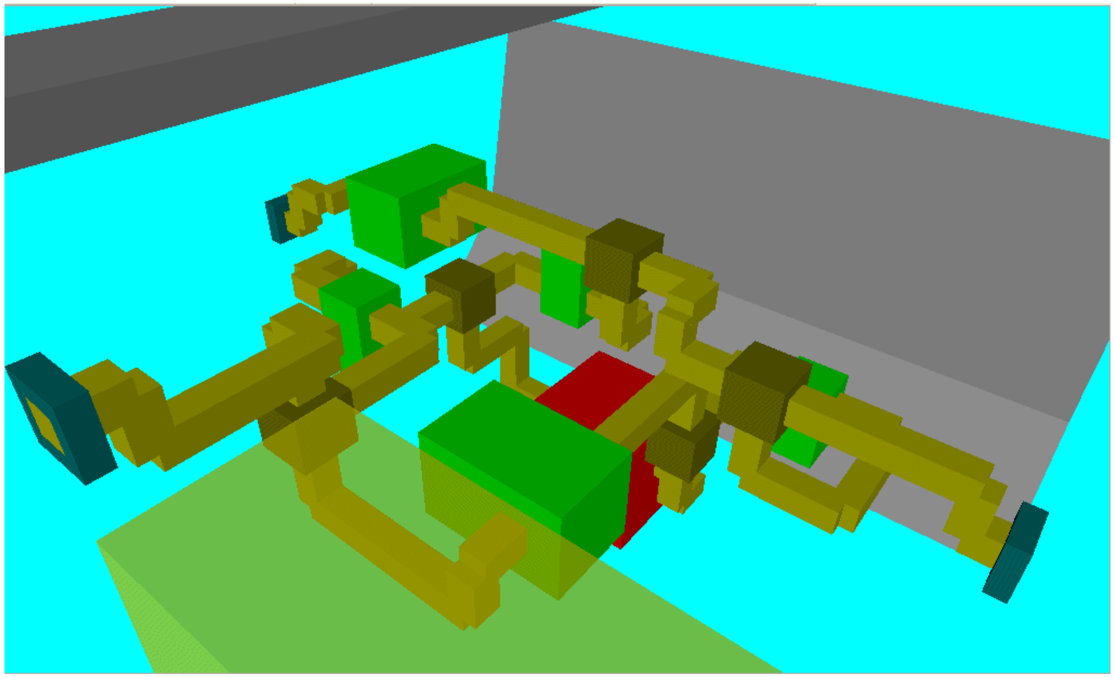

13 floating equipments
5 fixed equipments
19 pipes



ランダム配置

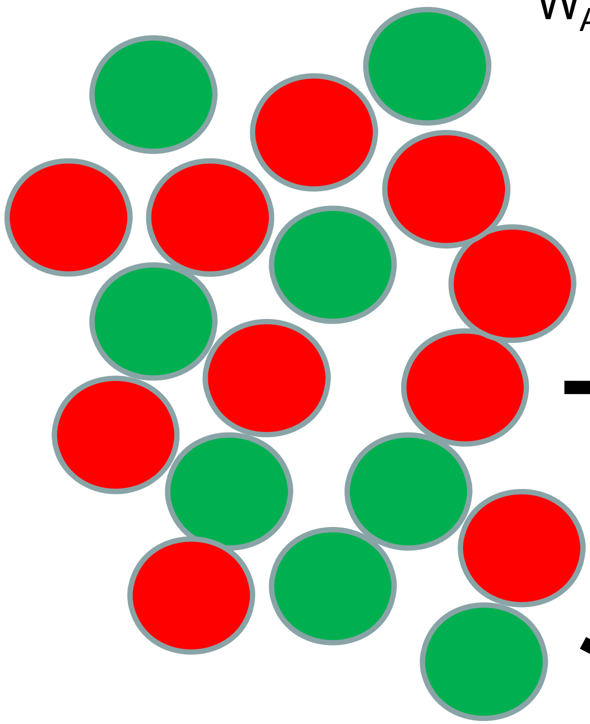


自己組織化
オペレーション
適用後

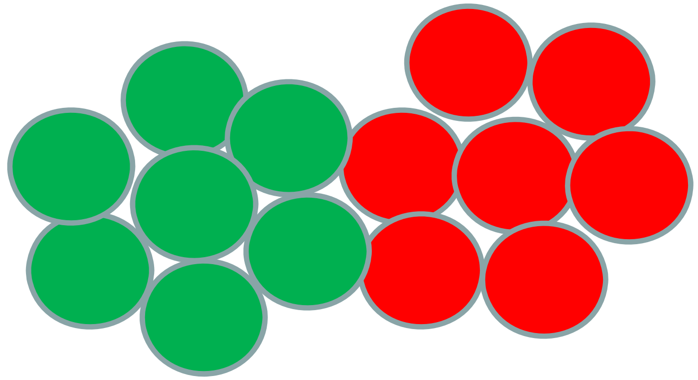


# 自己組織化の例：細胞群の形態生成

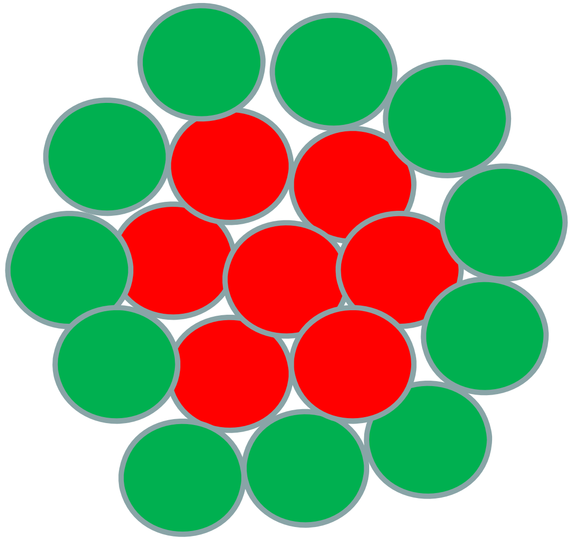
個々の細胞が膨らんだり
しぼんだりして互いにくっついたり
離れたりを繰り返す



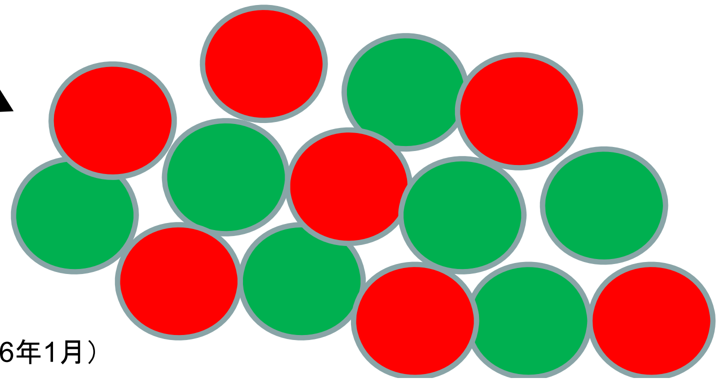
$W_{AA} = W_{BB} > W_{AB}$



$W_{AA} > W_{AB} > W_{BB}$



$W_{AB} > W_{AA} = W_{BB}$



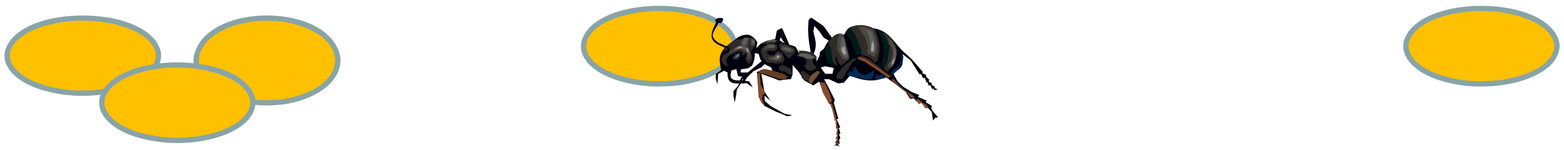
$W_{AA}$: A細胞同士の接着力
$W_{BB}$: B細胞同士の接着力
$W_{AB}$: AとBとの間の接着力

## 単純なルールで複雑な形態を生成

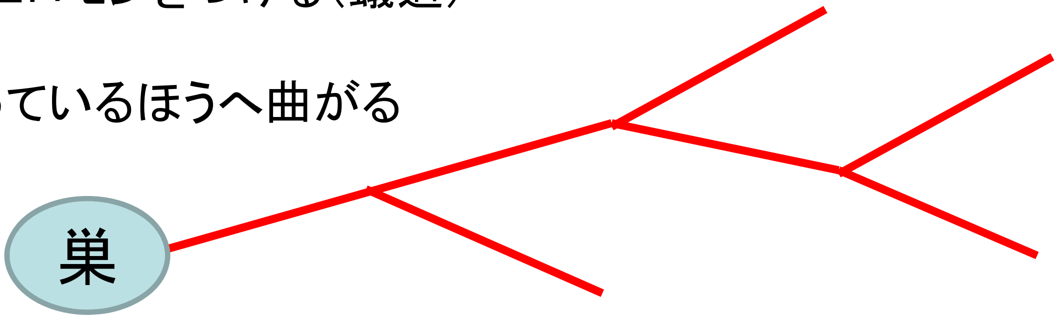
松場弘明, 前川知毅, 清水正宏, 石黒章夫:
制御系-機構系間の有機的連関を通した自己組み立て・自己修復
計測自動制御学会 第18回SICE自律分散システムシンポジウム, pp.61--66（2006年1月）

# 自己組織化の例： アリの行動

アリが巣穴の中で物をきれいに(1か所に)格納する仕組み
1） 何も持っていない状態で物にぶつかったら、その物をつかむ
2） 物をつかんだ状態で他の物にぶつかったら、持っている物を放す
3） 上記以外の場合、ランダムに動き回る

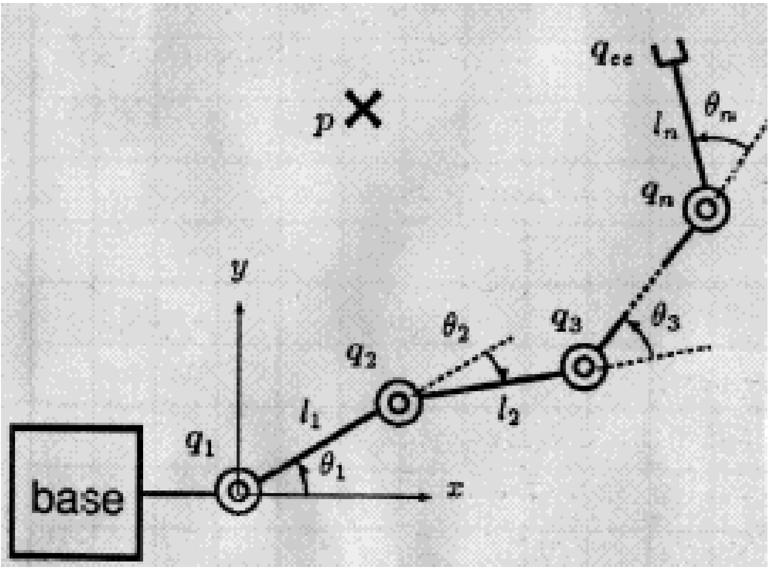


エサを持ったアリがエサ場から一直線に巣へ戻れる仕組み
1） エサを見つけたアリは地面にフェロモンをつける(蟻道)
2） アリはフェロモンをたどって歩く
3） 分岐点では、必ず鈍角に曲がっているほうへ曲がる




このような単純な制御ルールをいくつか組み合わせるだけで、複雑な動きが可能で、
しかも故障などのトラブルに強い頑健(ロバストと呼ばれる)なシステムを構築することが
可能な場合がある。トヨタのカンバン方式はこれに類似。
このような分散システムのパフォーマンスは一般に「最適」では無いが、時に非常に強力である

# 自己組織化の例： 冗長多関節アームの分散制御




ステッピング制御則：

各関節が、自分の位置とハンドの位置を結んだ線分に対して、目標位置がどちら側にあるかを判定し、線分が目標位置に近づくように関節を回転する。

関節毎の自律分散

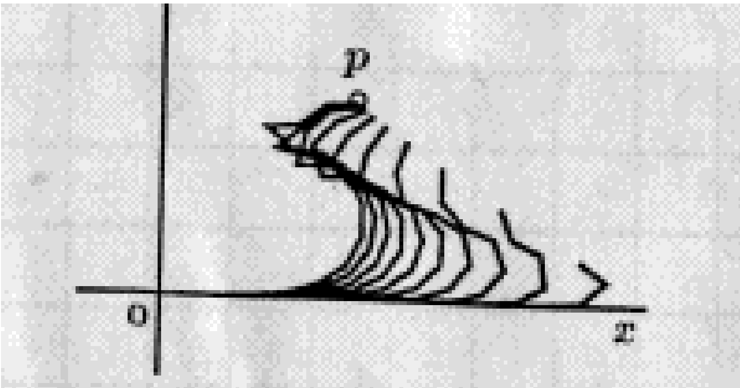
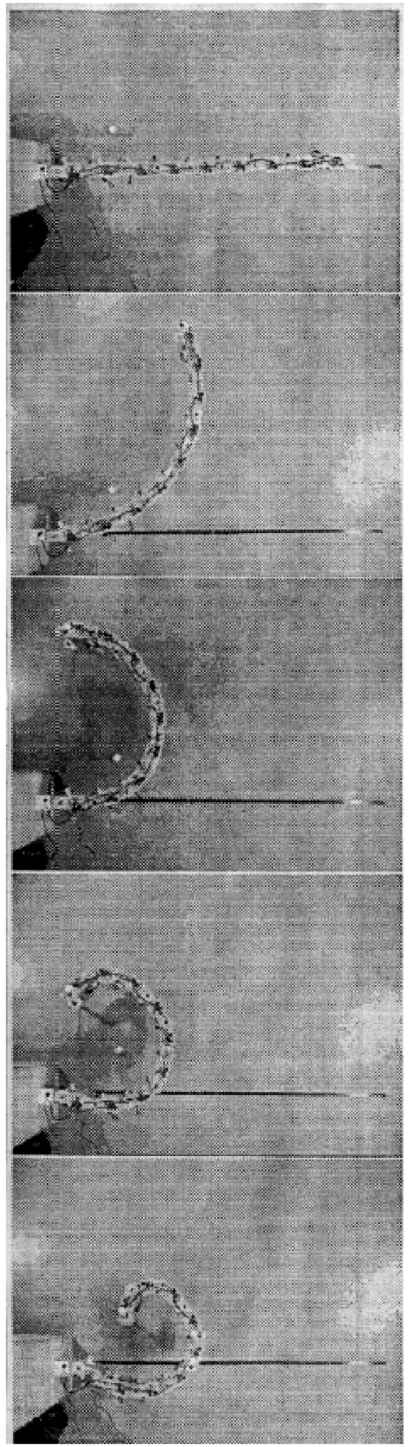



Fig. 4: Result of Simulation (n=12)

他の関節が何個か故障しても、制御規則を全く変えることなく目標へ到達できる。

優れた保守性



# まとめ

(1) 新しいシステム作りのステップ

1) 計画: システムの**目的**と**入出力**を定める

2) 設計: 上記の**システムを実現する構造**の考案・最適化

3) システムの運用管理・保守体制の構築

(2) 単目的・多目的最適化

・トレードオフ比

・パレート解集合

(3) オペレーションズリサーチ（OR:作戦研究）

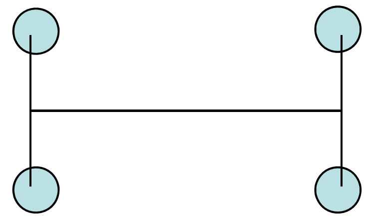
1) データ取得

2) 数理モデル化

3) 最適化　　例として**自己組織化**を紹介

【レポート課題】 2018.11.30


(1) 短辺の長さが a, 長辺 の長さが2aの長方形の
各頂点にプラントが配置されており、これら全てを
接続する道路を計画する。
道路は、斜めでも途中から分岐しても良いものとし、
平原であるため障害物の回避は必要ないとする。



例） 道路長 4a の設計案
（もっと短くなる余地あり）

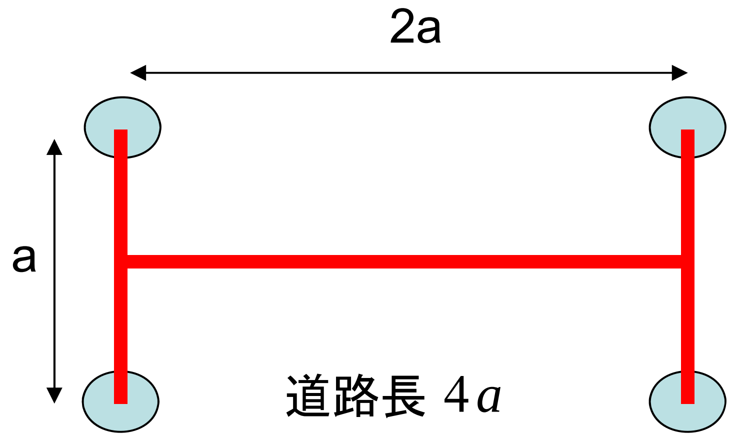
(2) また上記のプラントのうち、右下のものが無く、
３箇所だけを接続する場合はどうか？

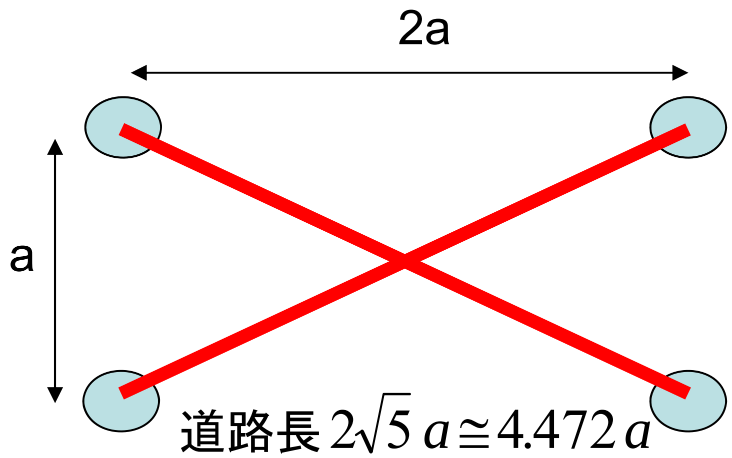

道路長が最も少なくて済む道路配置方法について
(1)と(2)を検討し、そのときの道路の長さを求めよ。
レポートには検討の過程について記載せよ。

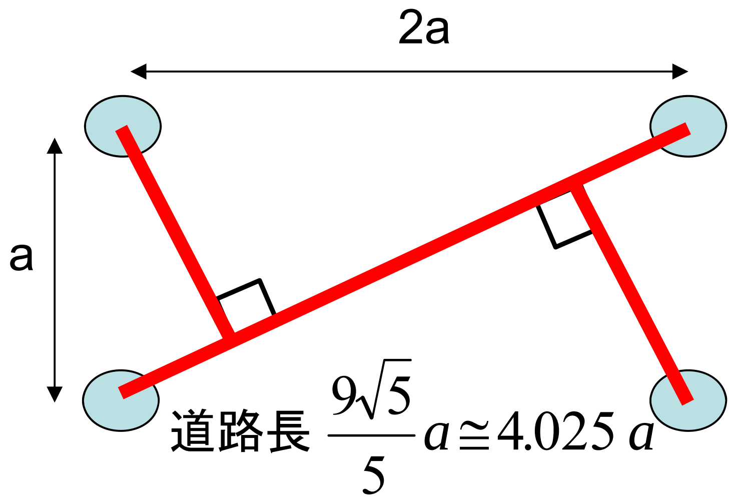
問題を適切にモデル化し、最適化問題として
解くことが望ましい。

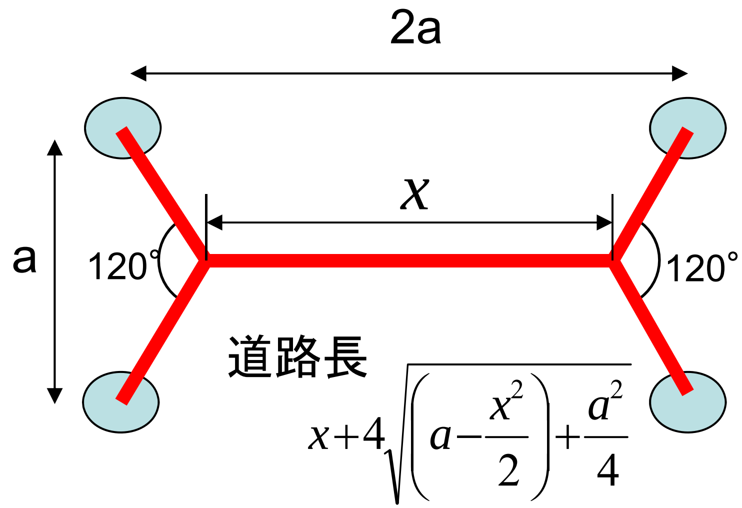
【提出期限】 １２月７日（金）午後4時半まで
【提出先】 講義後直接提出
または Ｗ2号館6階６３４号室のポスト

Subseaプロダクションシステム




# 最短ネットワーク問題
# Steiner最小木問題

$x=\left(2-\frac{\sqrt{3}}{3}\right)a$ のとき最小値

$(2+\sqrt{3})\,a \cong 3.737a$

## 【この問題の厳密な解き方】**変分法**

値を極大または極小(注:最適とは限らない)にする**関数**を求める方法:
例1)最速降下曲線(重力下で2点間を通過する物体の時間が極小になる軌道)
例2)ワイヤーフレームに張られた石鹸膜の形状(面積極小の曲面)
しかし、誰もが何にでも利用できるような解法とは言い難い

## 【工学的な解き方】

ありとあらゆるケースについて考案・検討し、必要なら計算機等を利用して探索

これがエンジニアの重要な能力

本レポート課題では、
これを体験してほしいという意図がある

本講義で今後説明していく知識

2015年度:「三角形の**フェルマー点**」を利用する方法を考案した者がいた!

<u>三角形</u>の3つの<u>頂点</u>からの距離の合計が最小になる点(Steiner点とも呼ばれる)
三角形が120度以上の角度を持たない場合、三角形内部で120度ずつ交わる点になる