東北大学

多目的設計探査の考え方

流体科学研究所

大林　茂

Institute of Fluid Science
Tohoku University
IFS

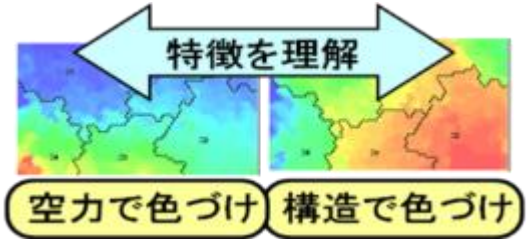
OUTLINE

- MRJと多目的設計探査
- 航空機設計におけるトレードオフ
- 多目的最適化と遺伝的アルゴリズム
- 多目的最適化とデータマイニング
- 推進系統合主翼最適化適用事例
- 計算が設計に役立つために
  - 多目的設計探査MODEとは

MRJに実用化された独自技術

多目的設計探査

- コンピュータを高度利用する新しい設計法の研究
- 本研究に関する国内外の招待講演２０件
- 本研究に関する受賞4件



ボーイング社でも！

自己組織化マップで設計空間を可視化する

読売新聞宮城版 2008 年 4 月 13 日掲載

国産の翼に東北大が貢献

三菱重工「MRJ」

約40年ぶりの国産旅客機として、2013年の就航を目指すMRJ（三菱重工業提供）

三菱重工業の「MRJ」（三菱リージョナルジェット）が、名プロペラ機「YS－11」以来、約40年ぶりの国産旅客機として事業化されることが決まった。目玉は、従来の小型ジェット機に比べ、約3割も燃費がよい点。実は東北大の二つの研究チームが、主翼の設計に参加し、燃費向上に大きく貢献した。

2研究チーム参加

2013年の就航を目指すMRJは70～90人乗りで、航続距離は最大約3600キロ。こうした小型ジェット機市場は現在、カナダとブラジルの2社がほぼ独占するが、世界中で今後20年間に5000機の新規需要が見込まれ、有望な市場に切り込もうと、官民一体でMRJを開発した。

大流体科学研究所の大林茂教授と、大学院工学研究科の橋和博教授の研究チームがこれに参加した。

大林教授のチームは、主翼の新しい設計法を開発した。主翼は、安定飛行のための重要な空気力学的条件を満たしながら、十分な強度と軽さが要求される。従来は、これらの条件を満たすための主翼の形状を試行錯誤的に決めていたが、構造的に軽量化という手法が一般的だった。

これに対し、大林教授らは「多目的最適化」と呼ぶ設計法で、翼の形状と構造の組み合わせの中から、最も軽量に近い組み合わせの中から、最も燃費的にすぐれた組み合わせを抽出した。最適な形状と最良の構造を組み合わせても、燃費的には必ずしも

機械が“突然変異”するとき

旅客機や新幹線にも利用された，形を「進化させる技術」にせまる

より速く，より効率よく，より多くの人を。飛行機や新幹線は，さまざまな要望に合わせて進歩しつづけてきた。その精密な形は，これまで技術者の経験と勘によって生みだされてきた。しかし近年，まるで生物が進化するように，コンピューター上で「機械の形」が世代交代をくりかえし，“子供”を生みだす手法が導入されつつある。機械のさらなる進歩を支える「遺伝的アルゴリズム」を紹介しよう。

大林 茂　下山幸治　熊野孝保　JR東海

人間はどんなふうに設計する？

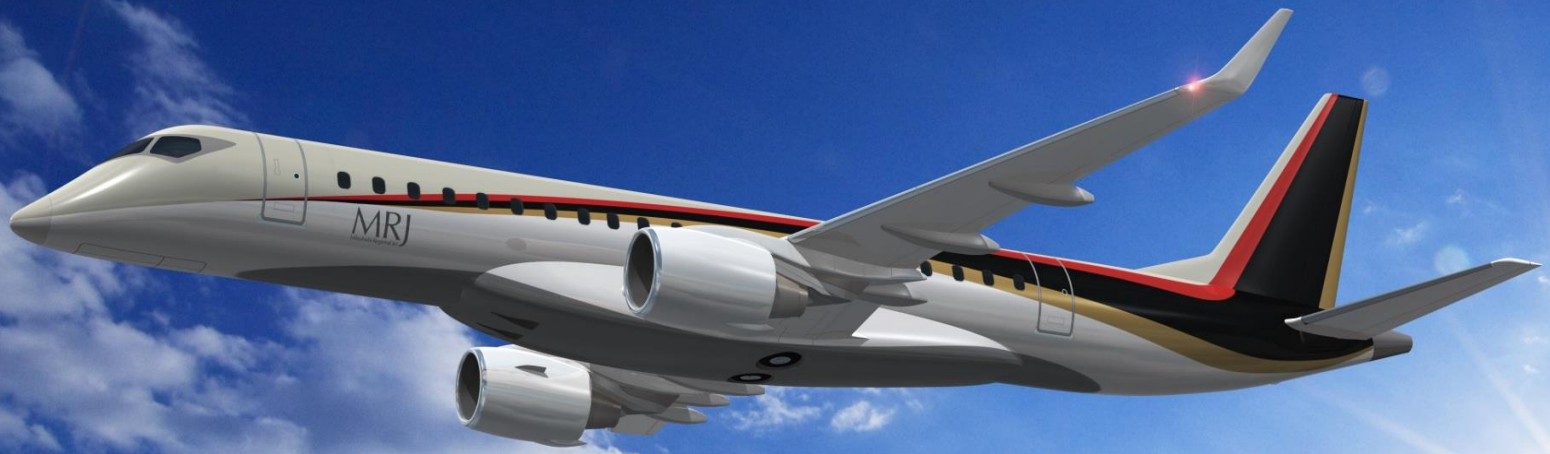
Newton

虚数 はなはだよくわかる

科学雑誌ニュートン2008年12月号

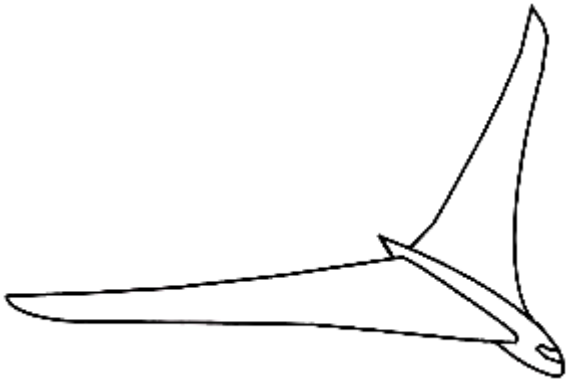
MRJ適用例

三菱重工/三菱航空機との共同研究により
多目的設計探査をMRJの設計に適用

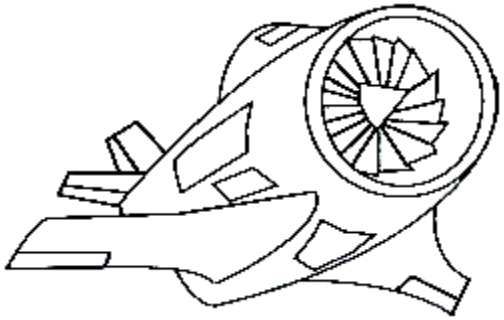


- 適用事例
  - 翼胴形態のMDO
  - 翼胴推進系統合形態のMDO
  - ウイングレットのMDO
  - 水平尾翼の構造設計

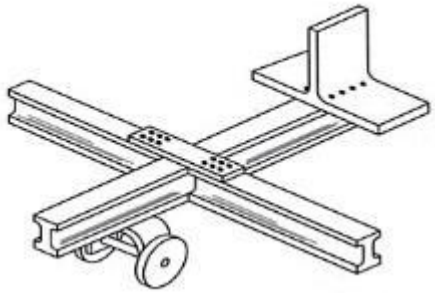
航空機設計におけるトレードオフ



Aerodynamics



Propulsion



Structure

Compromise of all disciplines

複合最適化（連成問題の最適化）

Multidisciplinary Design Optimization, MDO

通常の設計改善のアプローチ

- 設計の良さを比較→1つの指標が必要
  - 最大離陸重量などのモデル化が必要
- 航空機の性能
  - 空力の設計変数（翼の形など）と性能（抵抗）
  - 構造の設計変数（板厚、補強材など）と性能（強度、重量）
  - さまざまな性能→1つの指標ではない
  - 性能の影響度をモデル化→1つの指標に統合

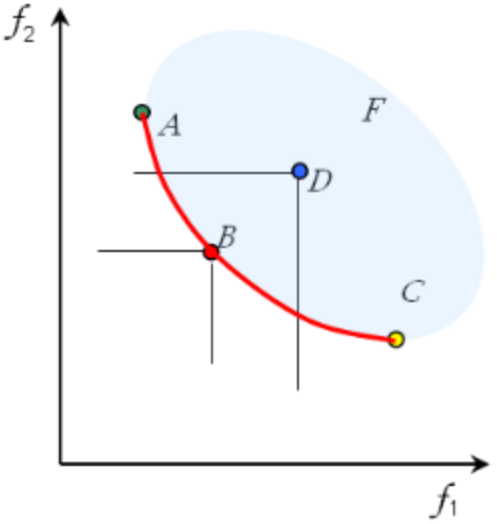
通常の設計改善のアプローチ（続き）

- 統合された指標の利点
  - 改善の方向が決まる
  - 最適化できる
- 統合された指標の欠点
  - 影響度が与えられている
  - トレードオフが決められている

  指標の作り方でどんな航空機かが決まってしまうが、それがどんなものかはあらかじめ分からない

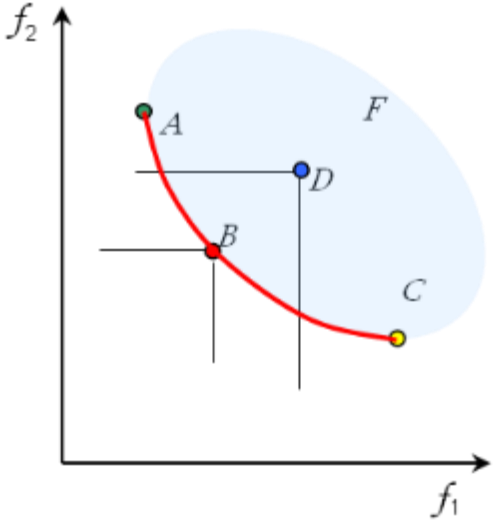
多目的最適化とパレート最適解

- 目的関数を1つの指標にまとめない
  - 順序を決められる場合
  - 順序を決められない場合
- 他より劣っていない解（非劣解）
  - パレート最適解

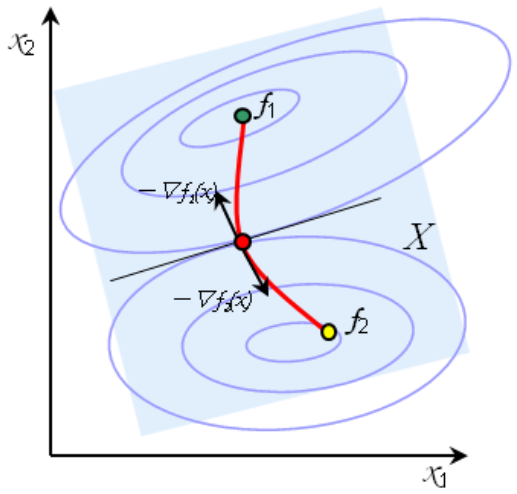


パレート（1848-1923）
イタリアの経済学者
パレート最適性の概念を提起
厚生経済学のパイオニア

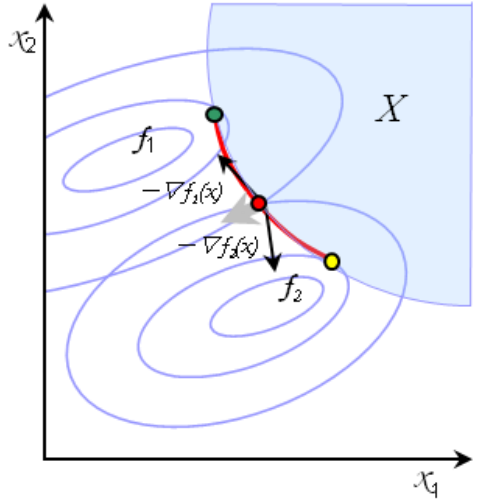
多目的最適化とパレート最適解（続き）



目的空間におけるパレート最適解：実行可能領域Fの左下の境界上の点A, B, Cは互いに優越されない(non-dominated)関係にある.



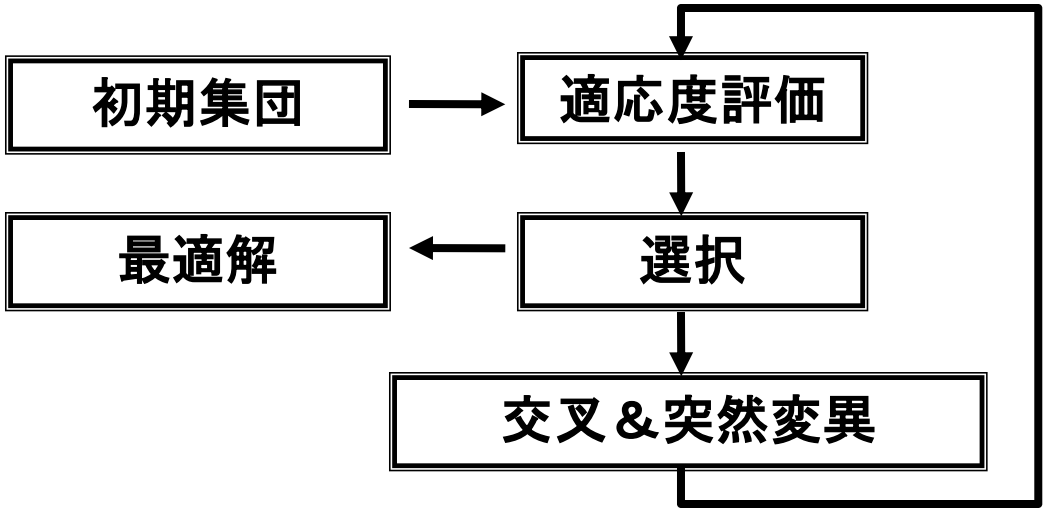
変数空間におけるパレード最適解（実行可能領域X の内部に存在する場合）：2つの目的に共通する改善方向は存在しない.



変数空間におけるパレート最適解（実行可能領域X の境界に存在する場合）：2つの目的に共通する実行可能な改善方向は存在しない.

遺伝的アルゴリズム

- 進化のシミュレーション
- 遺伝と自然選択（淘汰）
  - 遺伝子（設計変数）
  - 適応度評価
  - 選択
  - 交叉
  - 突然変異
  - 世代交代（エリート選択）



進化的アルゴリズム
(Evolutionary Algorithm)
と総称される。

✓ 勾配情報を必要としない

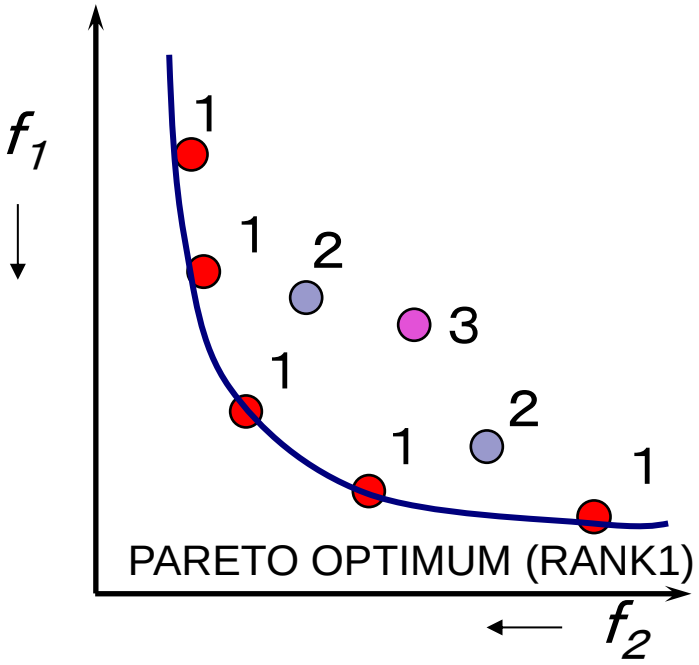
多目的遺伝的アルゴリズム（MOGA）

○ 適応度評価：パレート・ランキング法

（ by Fonceca and Fleming ）

全体として最適な方向へ進化

パレート最適解の集合



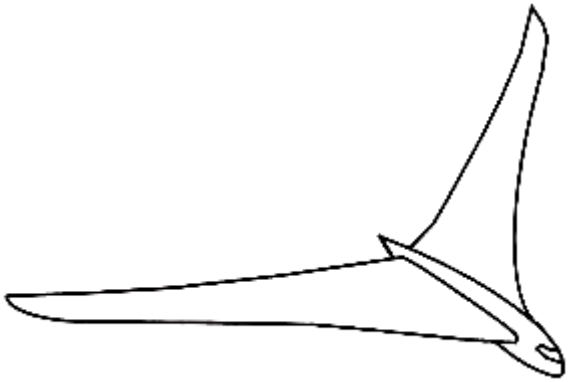
○ MOGAの特徴

（1）ロバストであること（勾配を必要としない，不連続でも良い）

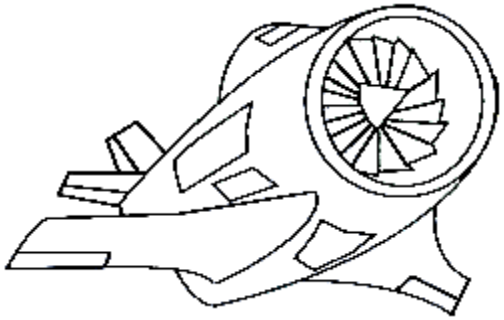
（2）並列計算に適していること

（3）パレート最適解を得られること

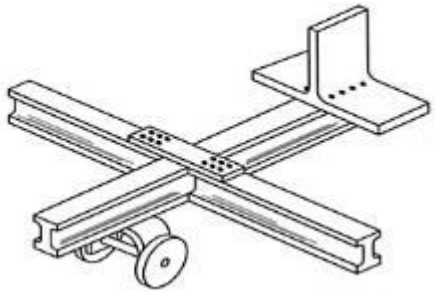
航空機設計におけるトレードオフ



Aerodynamics



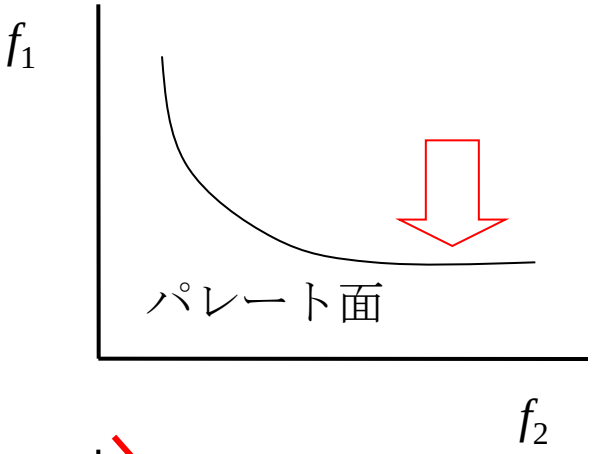
Propulsion

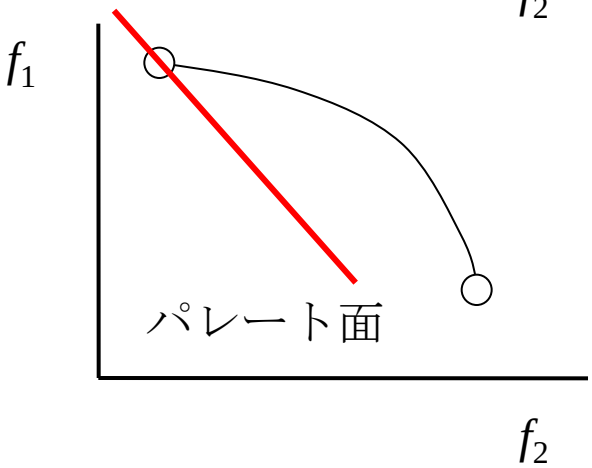


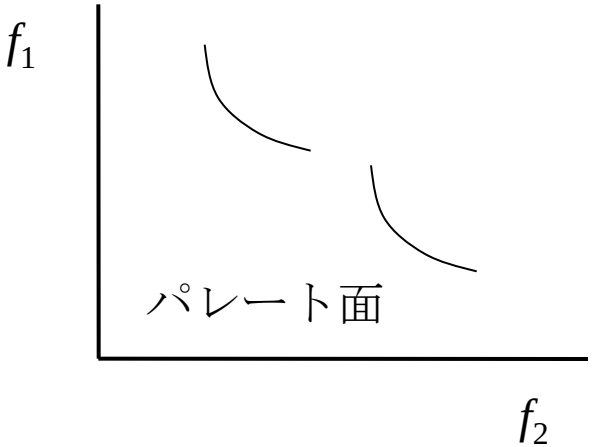
Structure

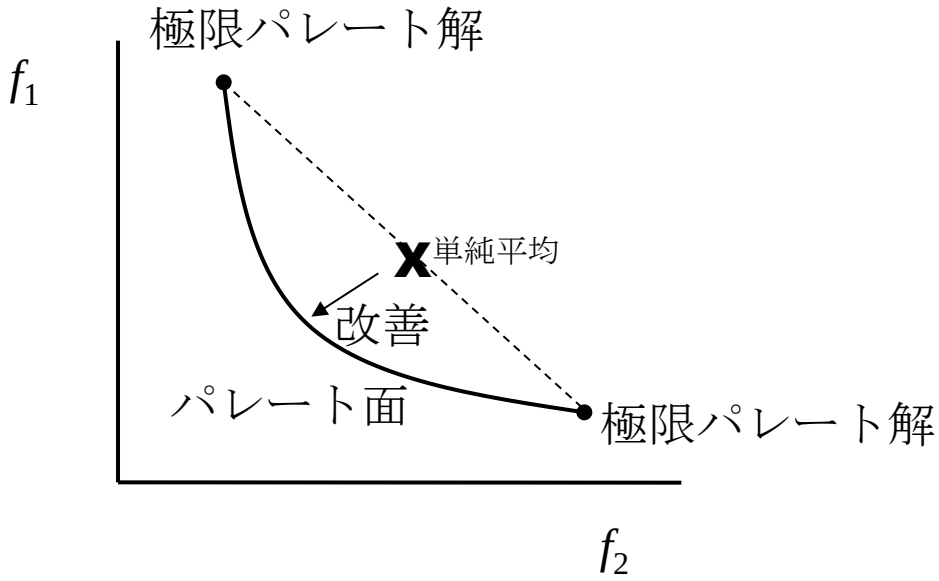
- 多目的遺伝的アルゴリズムを用いると、航空機の性能を1つの指標にモデル化する必要がない
- トレードオフをあらかじめ決めずに、パレート解からトレードオフの知識を得ることができる

パレート面の形状


f_1
パレート面
f_2


f_1
パレート面
f_2

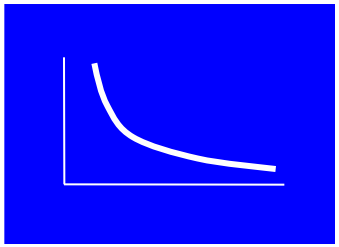

f_1
パレート面
f_2


極限パレート解
f_1
単純平均
改善
パレート面
極限パレート解
f_2

最適化結果の可視化データマイニング

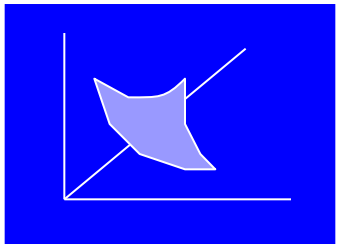
- トレードオフの可視化

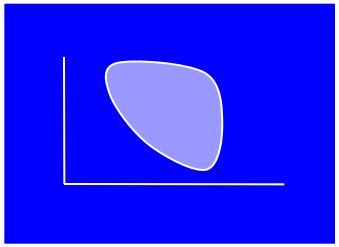
2 objectives



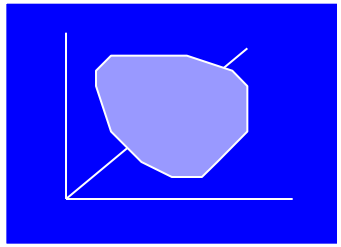
Minimization problems

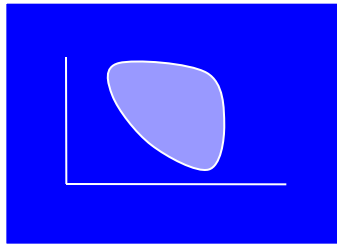
3 objectives

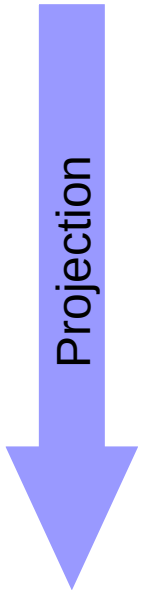




4 objectives

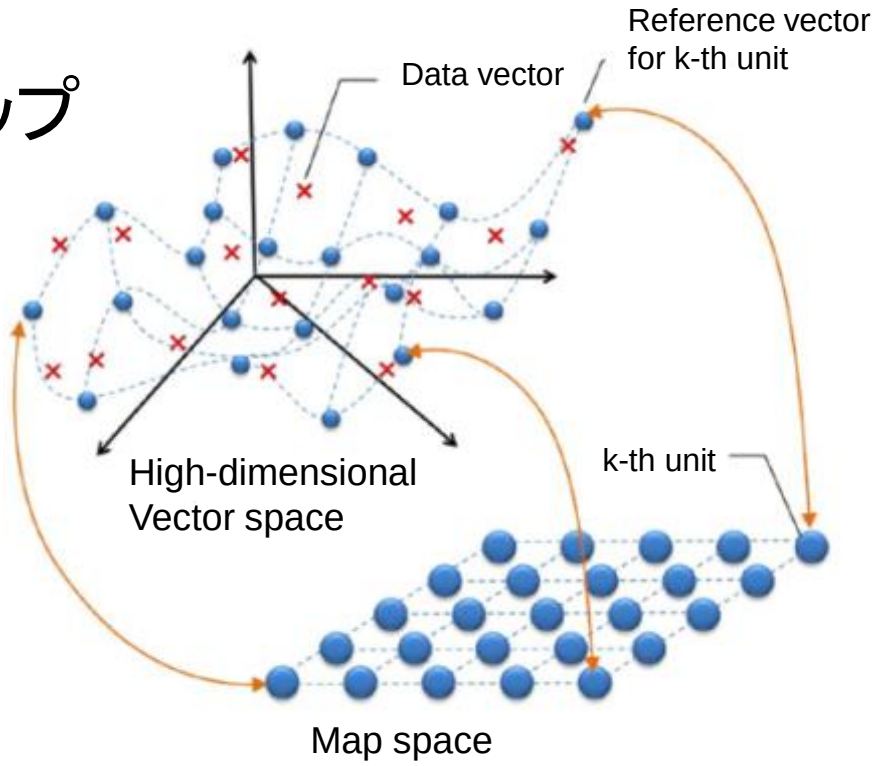






自己組織化マップ（SOM）

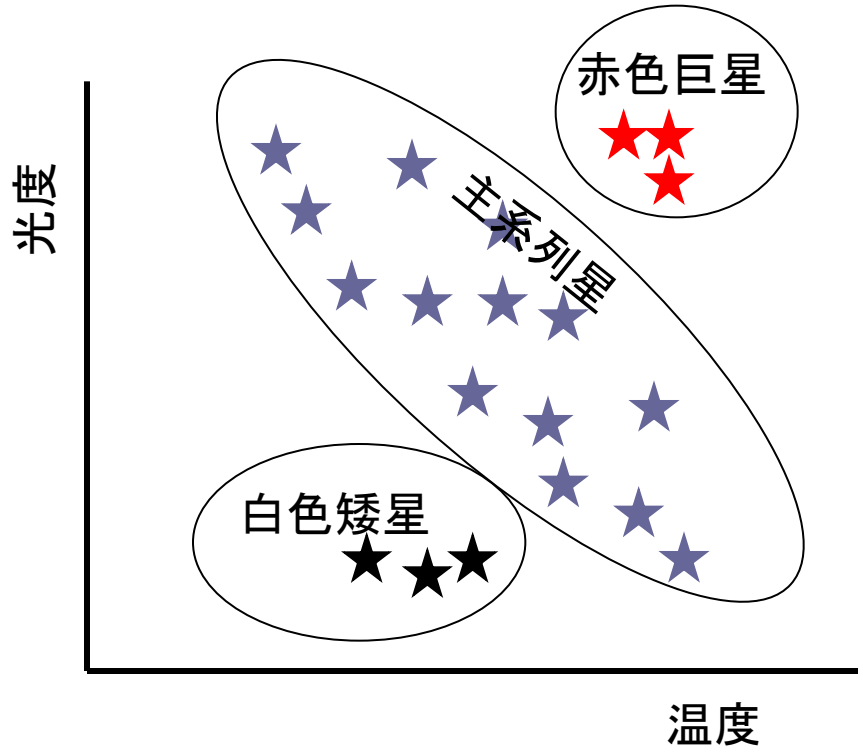
- コホネンによる記憶モデル
  - フィードフォーワード型のニューラルネットモデル
  - 教師なし学習のアルゴリズム
- 高次元データ　→　２次元マップ
  - 通常の座標や距離のない地図
  - データのクラスタリング



http://www.brain.kyutech.ac.jp/~furukawa/index.html

クラスタ分析

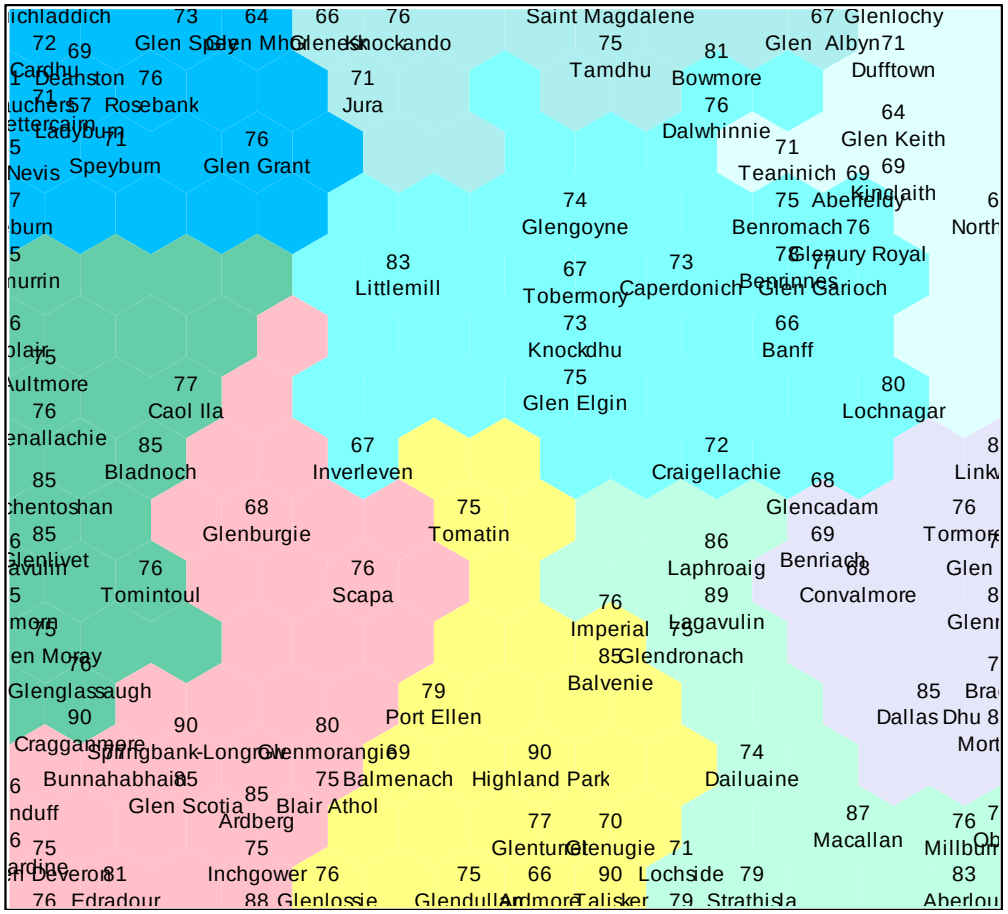
- 互いに類似するデータのグループ（クラスタ）を探索
  - K-means法
  - 凝集法
  - 自己組織化マップ



星のHRダイアグラム

自己組織化マップの例

- Lapointe, F.-J. and P. Legendre. 1994. A classification of pure malt Scotch whiskies. Applied Statistics 43: 237-257.



Based on
- Region
- Distiller
- Taste
- Color
- Etc.

Viscovery SOMine
SOM-Ward-Clustering
(Free software is also available on internet)

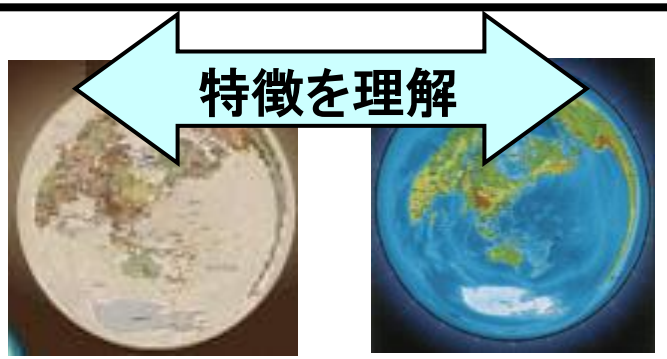
設計結果のマップ化技術

設計図は形状を可視化⇔自己組織化マップは機能を可視化

地図

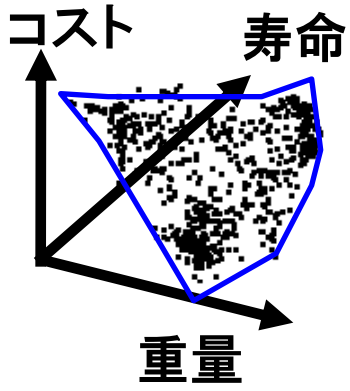
地球表面(3D)

地図(2D)

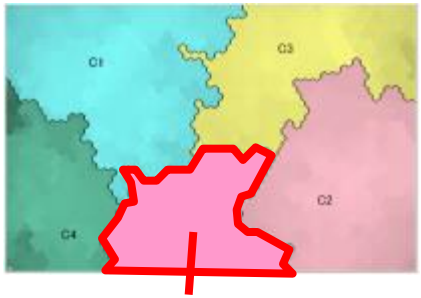


人口で色づけ　標高で色づけ

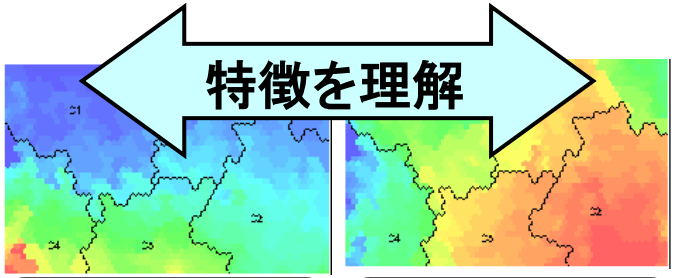
設計マップ



パレート面(多次元)



自己組織化マップ(2D)

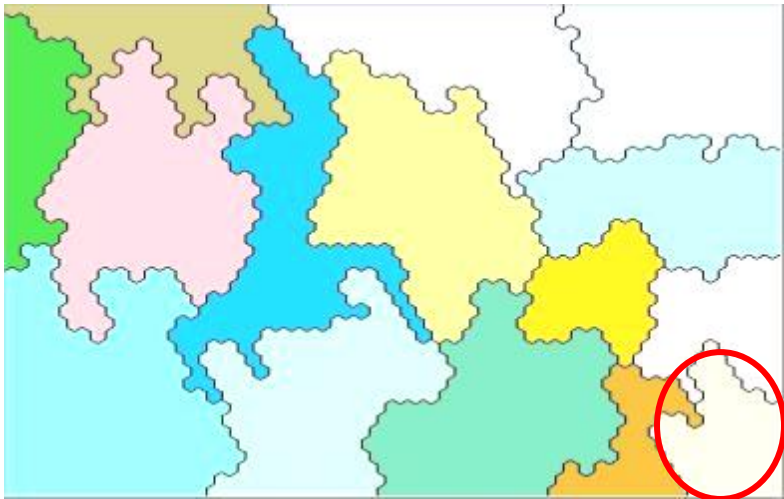


寿命で色づけ　コストで色づけ

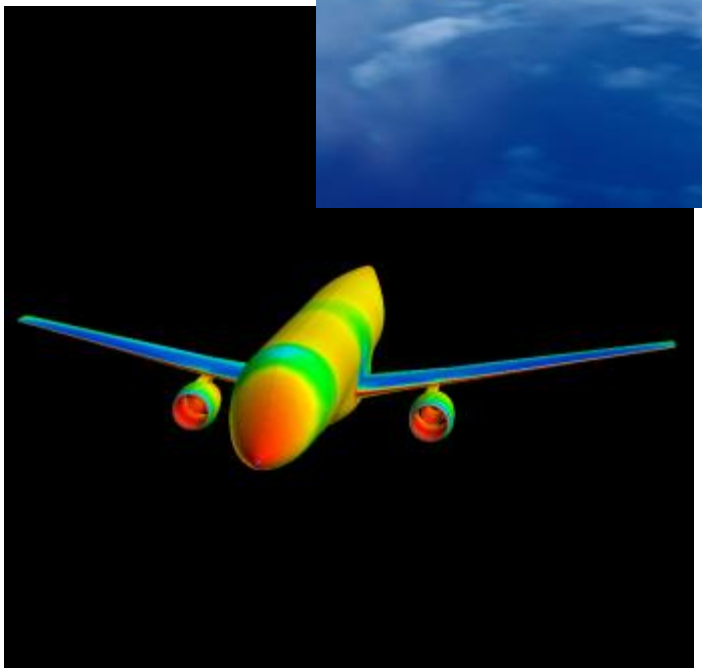
- 設計案の理解
- 次設計に利用

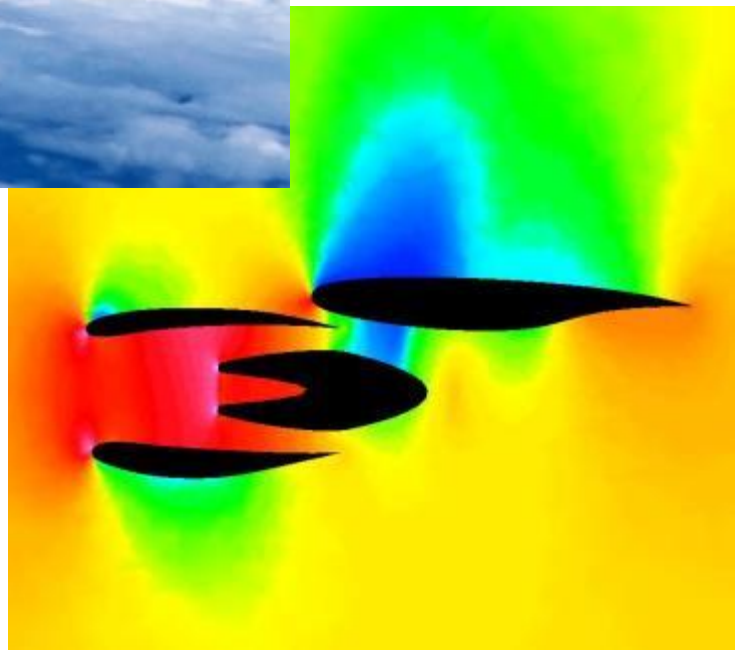
SOMをよりよく理解するには？

- SOMは機能をマップ化
- カラーマップが大域的な構造を可視化
- クラスターが設計解を分類
  - すべての目的関数が改善される領域あれば、そこが設計空間のスイートスポット
  - 注目すべきクラスターがあればさらに詳細に解析
    - 設計変数の分布を可視化
    - データマイニングを実施
      - 決定木
      - ラフ集合



推進系統合主翼最適化問題への適用



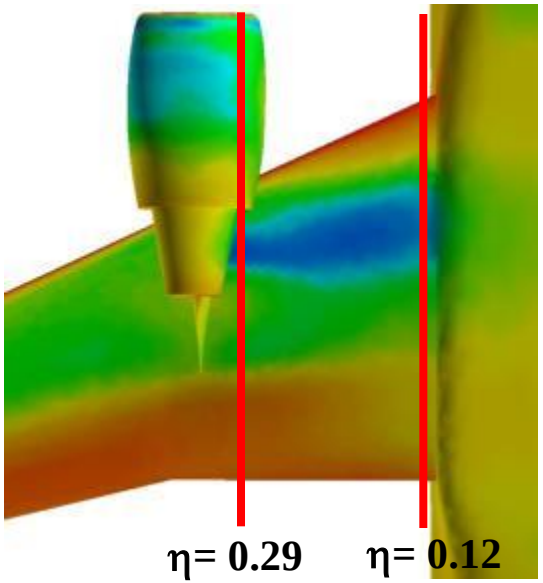


最適化問題定義&解析手法

目的関数

最小化

1. 巡航抵抗
2. パイロン取り付け位置での$-C_{p,max}$
3. 主翼構造重量



設計変数

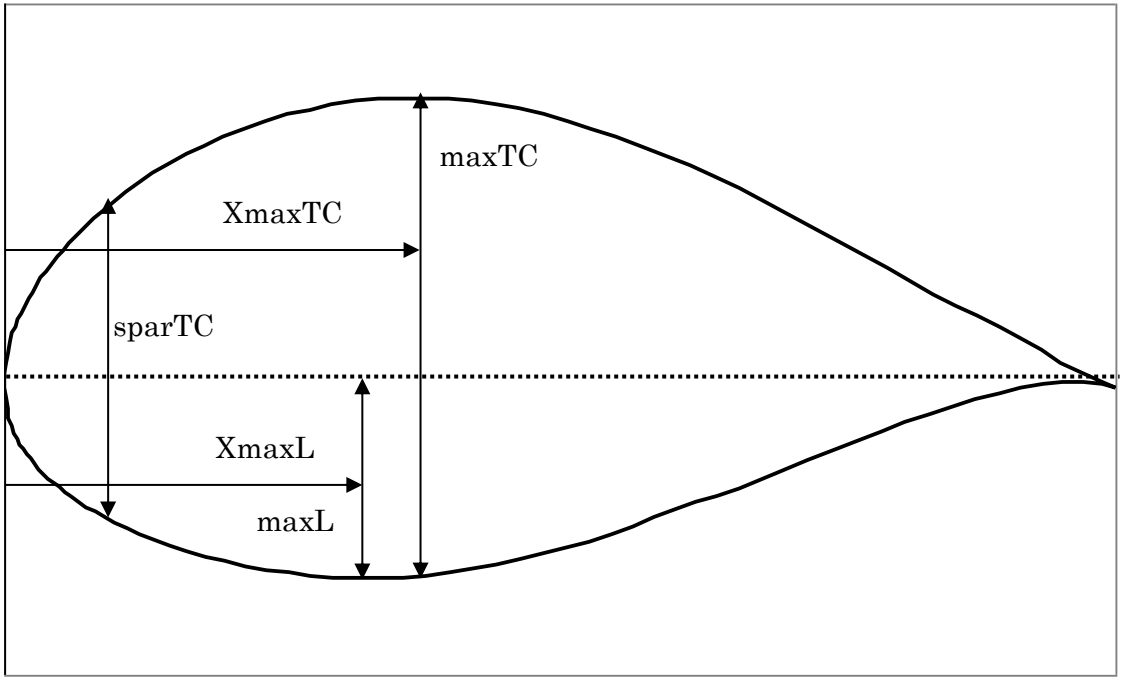
- スパン方向2断面における下面翼型 （η = 0.12, 0.29）
  → 13 変数 (NURBS) × 2 断面 = 26
- 翼捩り角　　4 断面

合計　　30 設計変数

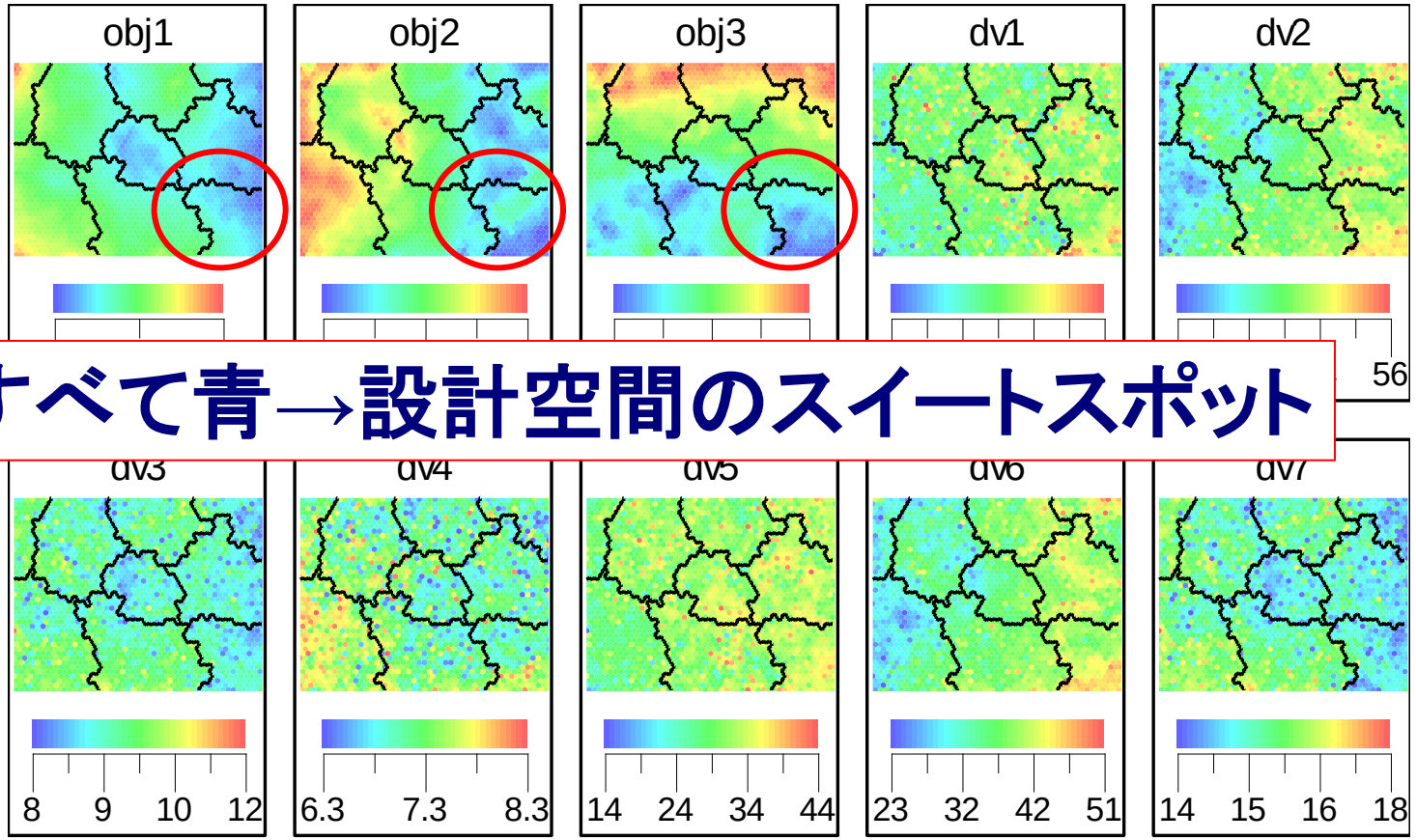
解析ツール

- CFD:　Euler code (TAS-code)
- CSD/Flutter analysis:　　MSC.NASTRAN

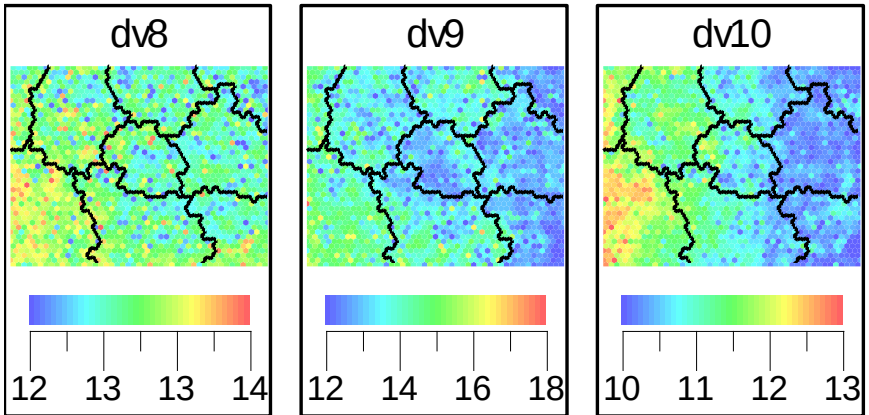
空力形状パラメータによるデータマイニング



Number	Airfoil parameters
dv1	XmaxL @ η= 0.12
dv2	XmaxL @ η= 0.29
dv3	maxL @ η= 0.12
dv4	maxL @ η= 0.29
dv5	XmaxTC @ η= 0.12
dv6	XmaxTC @ η= 0.29
dv7	maxTC @ η= 0.12
dv8	maxTC @ η= 0.29
dv9	sparTC @ η= 0.12
dv10	sparTC @ η= 0.29

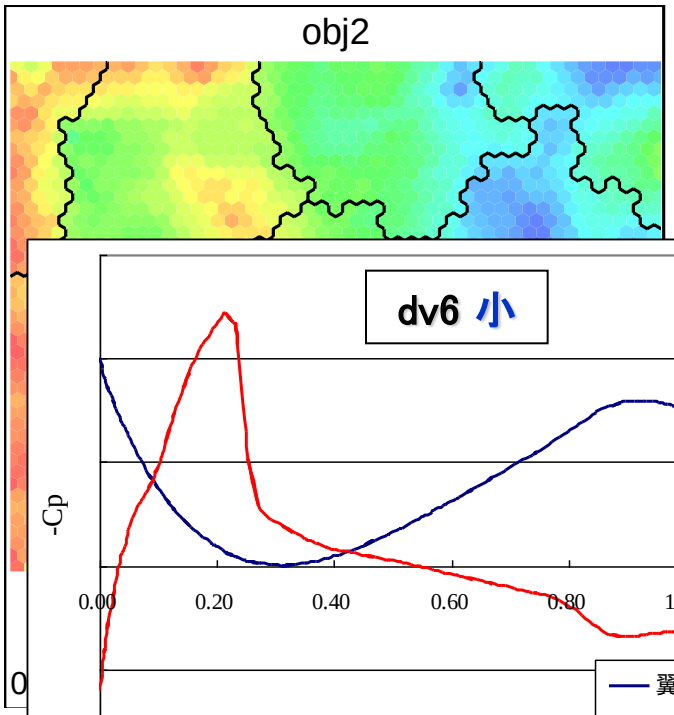


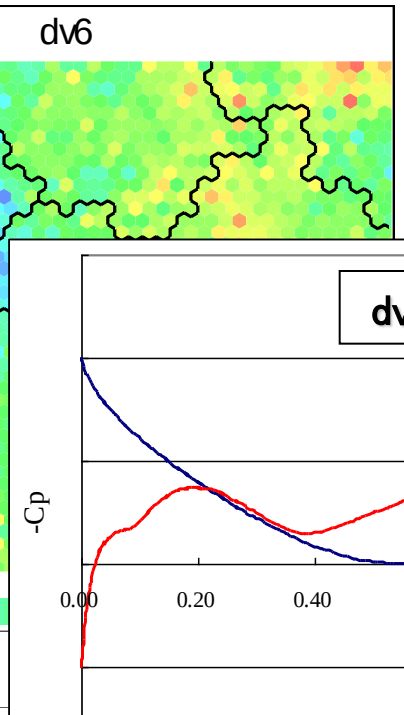
すべて青→設計空間のスイートスポット

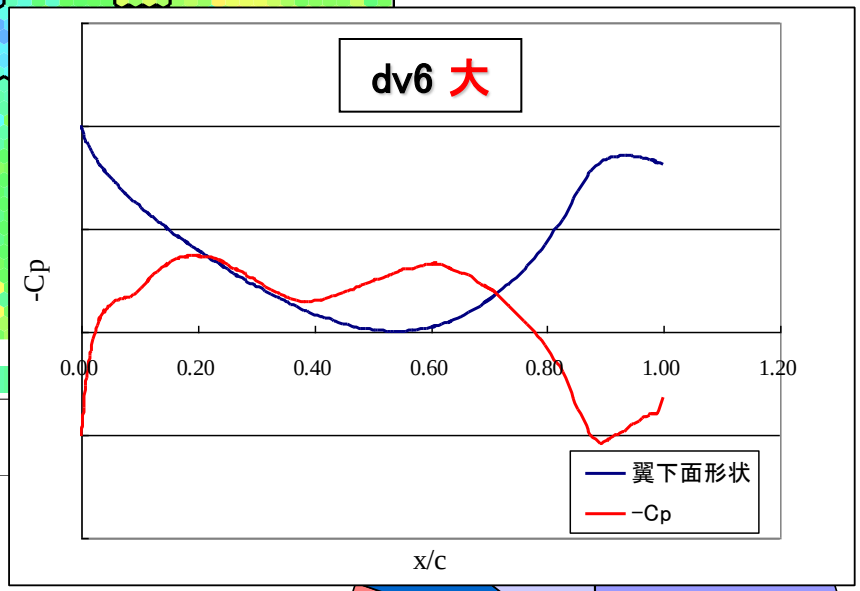


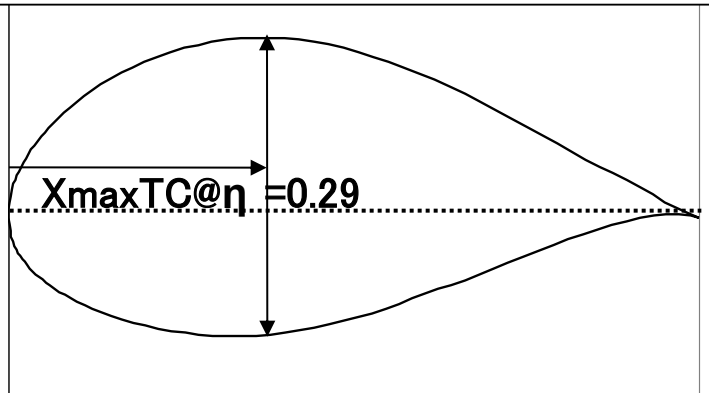
SOMによる可視化

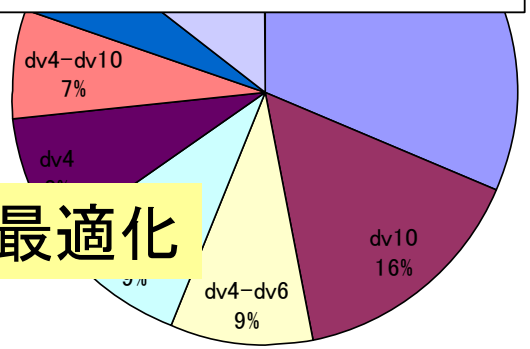
$-C_{p,max}$値と設計変数の関係



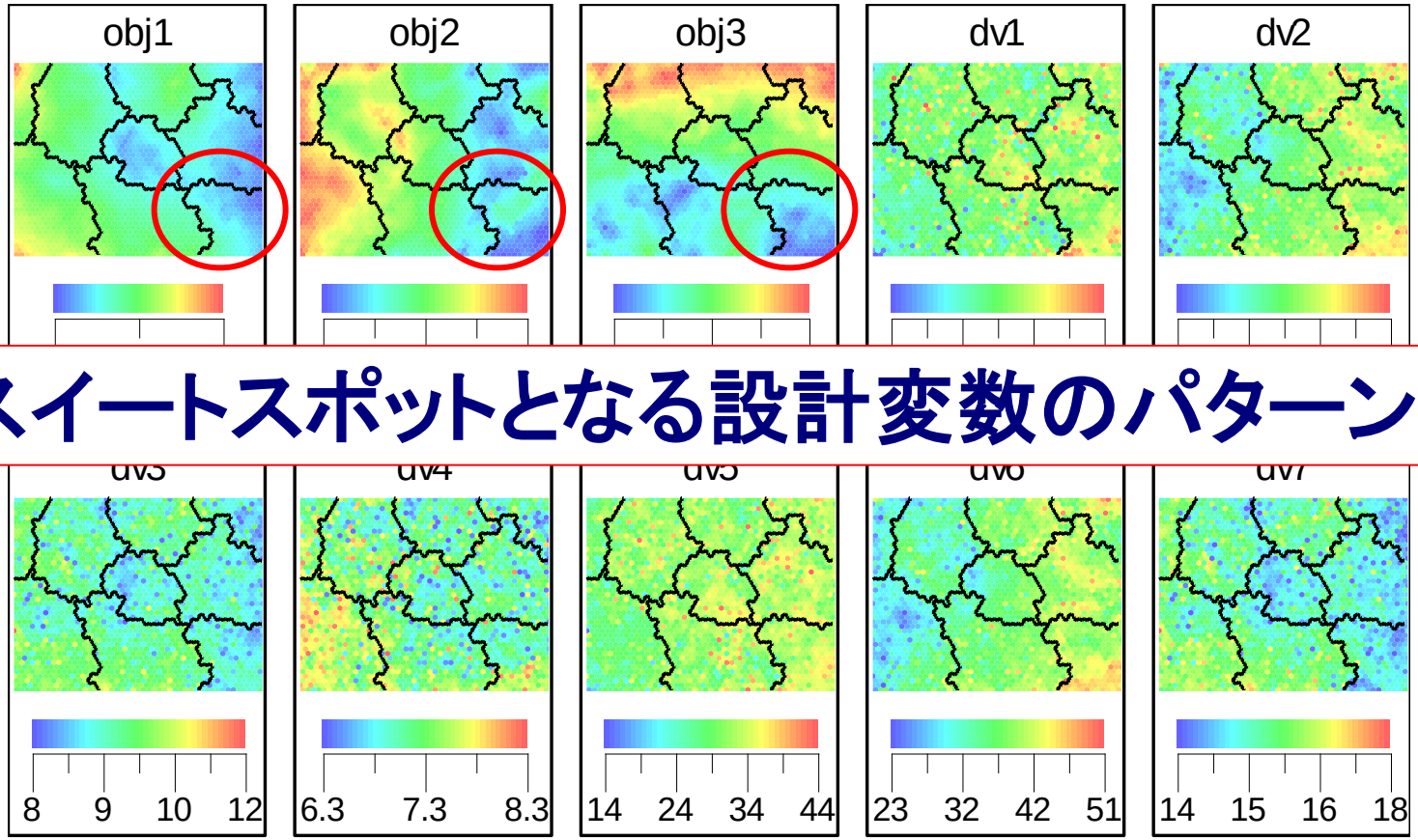




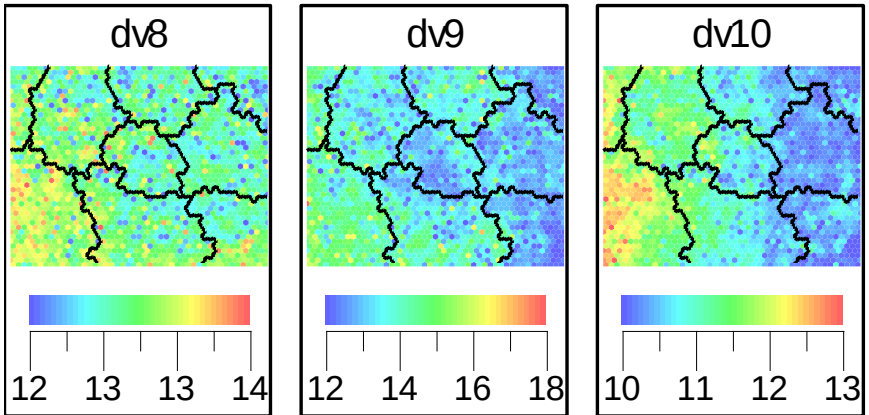




ナセル流路の最適化

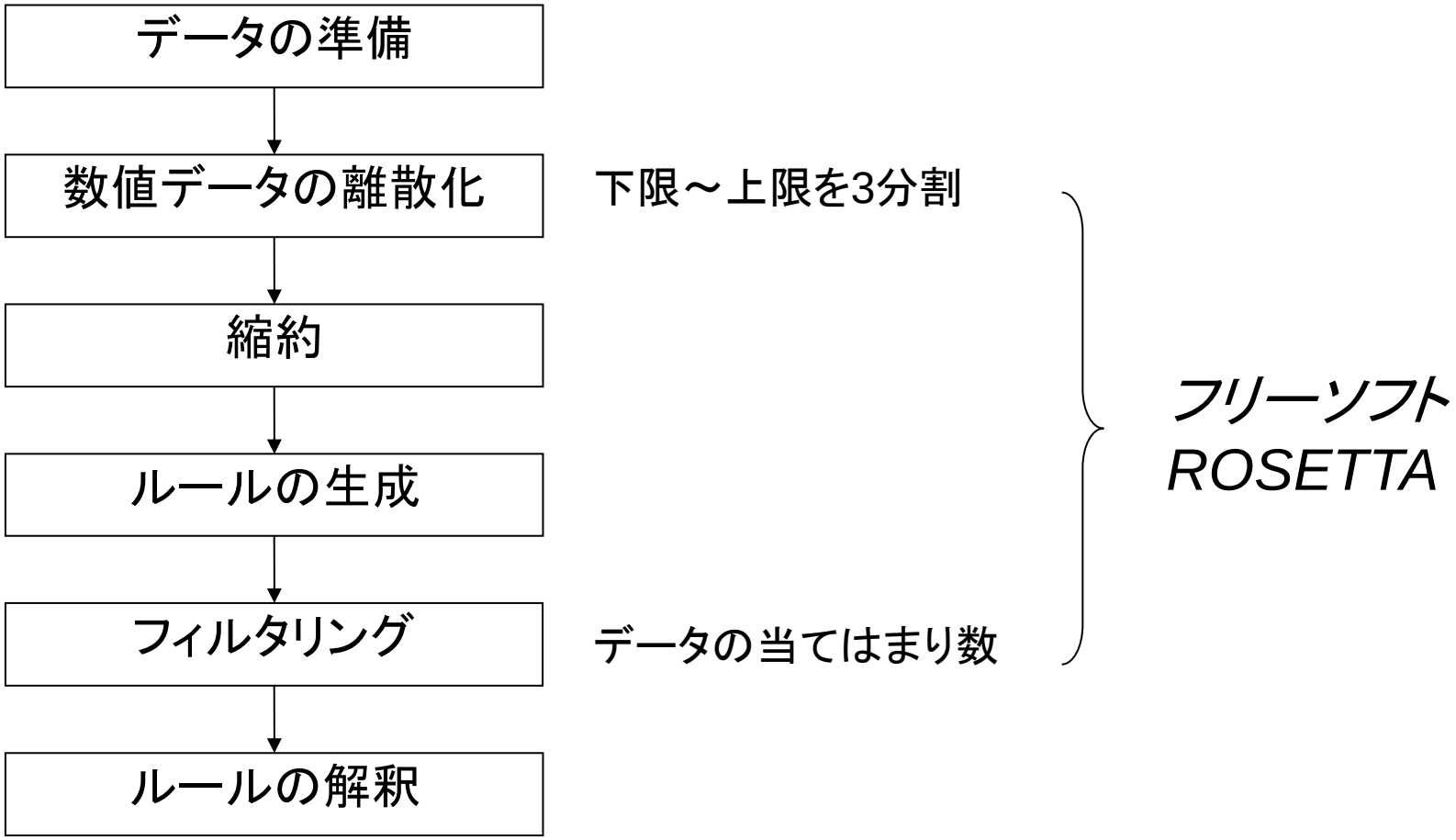


スイートスポットとなる設計変数のパターンは?



SOMによる可視化

ラフ集合によるマイニングの流れ



スイートスポット決定属性に対するデータの当てはまり数が8までのルール

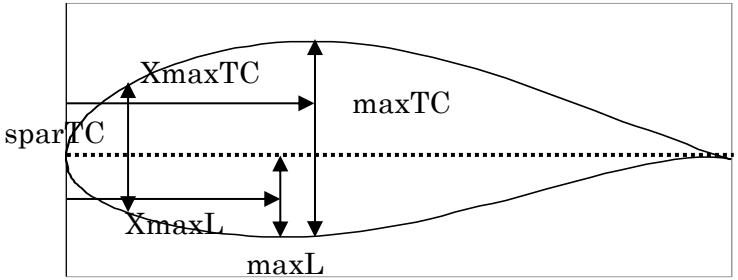
ルール	数
dv1([33.08, 39.30)) AND dv2([40.69, *)) AND dv5([29.65, 33.61)) AND dv7([15.09, 15.83)) AND dv9([*, 12.62)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	10
dv1([33.08, 39.30)) AND dv2([40.69, *)) AND dv3([8.88, 9.57)) AND dv5([29.65, 33.61)) AND dv9([*, 12.62)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	10
dv1([33.08, 39.30)) AND dv3([8.88, 9.57)) AND dv5([29.65, 33.61)) AND dv6([39.25, *)) AND dv9([*, 12.62)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	10
dv1([33.08, 39.30)) AND dv5([29.65, 33.61)) AND dv6([39.25, *)) AND dv7([15.09, 15.83)) AND dv9([*, 12.62)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	10
dv1([33.08, 39.30)) AND dv2([40.69, *)) AND dv5([29.65, 33.61)) AND dv6([39.25, *)) AND dv7([15.09, 15.83)) AND dv9([*, 12.62)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	10
dv1([33.08, 39.30)) AND dv3([8.88, 9.57)) AND dv4([7.54, *)) AND dv6([39.25, *)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	9
dv1([33.08, 39.30)) AND dv2([40.69, *)) AND dv3([8.88, 9.57)) AND dv4([7.54, *)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	9
dv3([8.88, 9.57)) AND dv4([7.54, *)) AND dv5([29.65, 33.61)) AND dv6([39.25, *)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	8
dv2([40.69, *)) AND dv3([8.88, 9.57)) AND dv5([29.65, 33.61)) AND dv8([12.82, 13.32)) AND dv9([*, 12.62)) => Cluster(C6)	8
dv2([40.69, *)) AND dv5([29.65, 33.61)) AND dv7([15.09, 15.83)) AND dv8([12.82, 13.32)) AND dv9([*, 12.62)) => Cluster(C6)	8
dv1([33.08, 39.30)) AND dv4([7.54, *)) AND dv5([29.65, 33.61)) AND dv7([15.09, 15.83)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	8
dv1([33.08, 39.30)) AND dv3([8.88, 9.57)) AND dv4([7.54, *)) AND dv5([29.65, 33.61)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	8
dv1([33.08, 39.30)) AND dv4([7.54, *)) AND dv6([39.25, *)) AND dv7([15.09, 15.83)) AND dv9([*, 12.62)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	8
dv1([33.08, 39.30)) AND dv2([40.69, *)) AND dv4([7.54, *)) AND dv7([15.09, 15.83)) AND dv9([*, 12.62)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	8
dv2([40.69, *)) AND dv3([8.88, 9.57)) AND dv4([7.54, *)) AND dv5([29.65, 33.61)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	8
dv2([40.69, *)) AND dv4([7.54, *)) AND dv5([29.65, 33.61)) AND dv7([15.09, 15.83)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	8
dv4([7.54, *)) AND dv5([29.65, 33.61)) AND dv6([39.25, *)) AND dv7([15.09, 15.83)) AND dv10([*, 10.58)) => Cluster(C6)	8

ラフ集合により生成されたルールの傾向

	Sweet	Cd	Cp	WW
dv1	11	1	1	5
dv2	9	2	6	3
dv3	8	5	6	4
dv4	10	3	5	11
dv5	13	8	1	7
dv6	7	6	3	3
dv7	9	5	6	5
dv8	2	4	3	2
dv9	9	2	2	3
dv10	14	9	8	8

大
小
dv10大は×

Number	Airfoil parameters
dv1	XmaxL @ η= 0.12
dv2	XmaxL @ η= 0.29
dv3	maxL @ η= 0.12
dv4	maxL @ η= 0.29
dv5	XmaxTC @ η= 0.12
dv6	XmaxTC @ η= 0.29
dv7	maxTC @ η= 0.12
dv8	maxTC @ η= 0.29
dv9	sparTC @ η= 0.12
dv10	sparTC @ η= 0.29



ここまでのまとめ

- 多目的設計
- 設計空間のデータマイニング
  - 可視化
    - 自己組織化マップ
  - ルール生成
    - ラフ集合
      - 情報の粒子化
      - 情報の縮約
      - 情報のルール化
- ルールの傾向を分析
  - 翼型パラメータの傾向を把握

計算が設計に役立つためには？

- 設計とは、要求を実現する形状を探す一種の逆問題
  （冨山哲男，設計の理論，現代工学の基礎15，岩波書店，2002）
  - 不完全な知識からの推論： 限られた知識から要求を満たす形状を予想
  - パースのアブダクション（abduction）
    - 説明的な仮説を形成する過程（創造的洞察）
    - 設計という行為の核心部分

- 設計に役立つ： 設計者のアブダクションに役立つ
  - さまざまな設計案（仮説）を思いつくような「仕掛け」が必要
  - 仮説とは、さまざまな観察結果にある「パターン」を見出すこと
  - アブダクションの「仕掛け」としての「設計空間の構造化と可視化」

単なる最適設計（最適解の提供）では役に立たない？

MODE(Multi-Objective Design Exploration)というコンセプトの提案

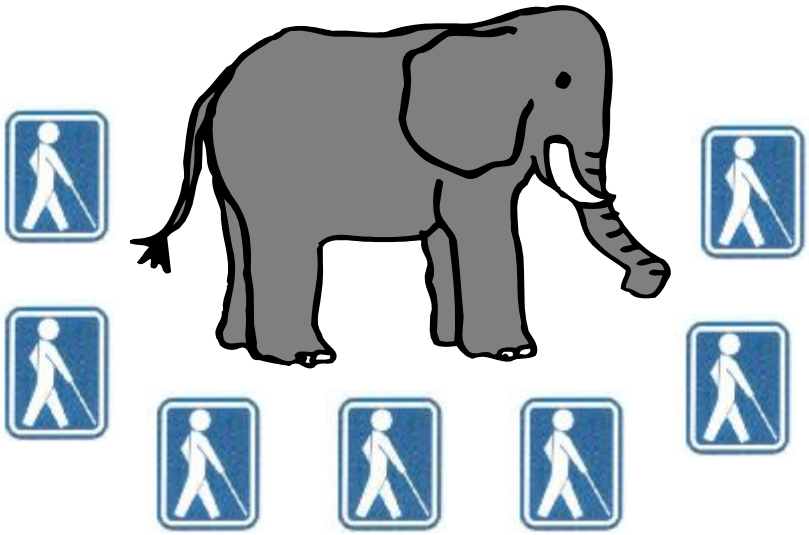
アブダクション（Abduction）

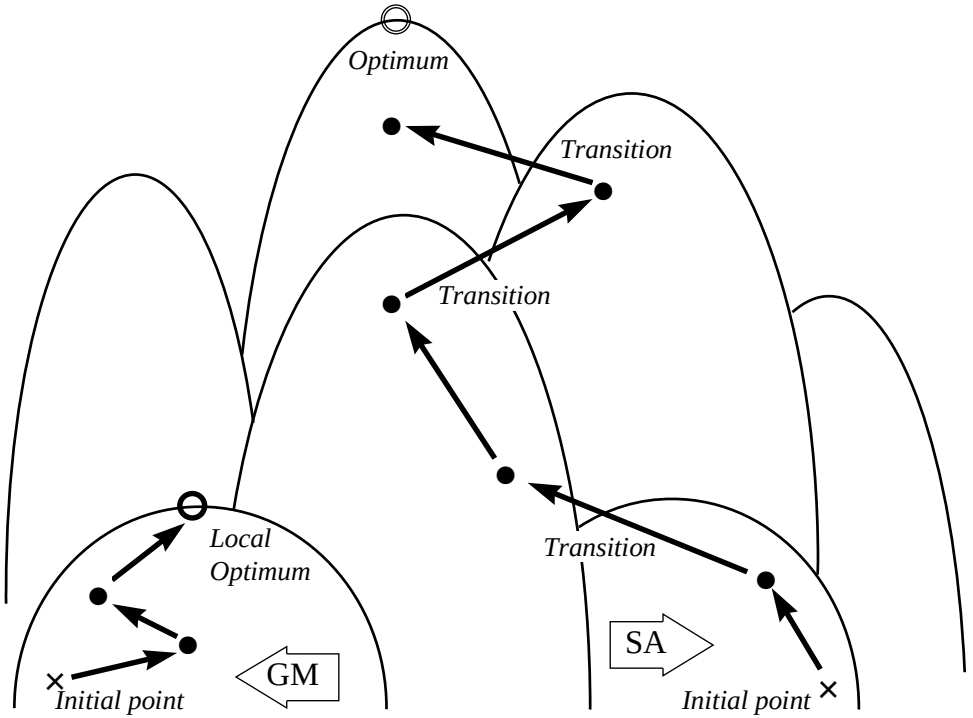
- 演繹・帰納・アブダクション
  - アメリカの哲学者パースのいう3つの推論の型
- 説明的な仮説を形成する過程
  - 創造的洞察－誤りと修正を含む
  - 最後にわかったと叫ぶあの状況
    - 不確実な連関のない状況を調和的に理解
    - 現象に働く原理・法則の把握
- 科学の思考はアブダクション
  - 自然現象の法則や原理を見抜くこと
  - 仮説とはパターンを見抜くこと
    - リンゴの落下・潮の干満・月の運動－ニュートン以前から
    - ニュートンは誰も見なかったパターンを発見

設計学とアブダクション

- 演繹：屋根がある　→　雨をしのぐ
  - もととなる知識：屋根があると雨をしのぐ
- 帰納：屋根があると雨をしのぐ
  - 雨をしのぐ建物1→屋根がある
  - 雨をしのぐ建物2→屋根がある　・・・
- アブダクション　←　設計要求：雨をしのげる建物
  - 設計解の候補（仮説）：屋根、傘、テント、木陰、・・・
    - 設計解の確定（間違い・修正を含む）
      - 天候、材質、工法、コスト、・・・
        - 設計仕様以外の要求
        - 経験に基づく設計知識や暗黙知も必要
        - 手持ちの代替え案が多いほど修正も容易

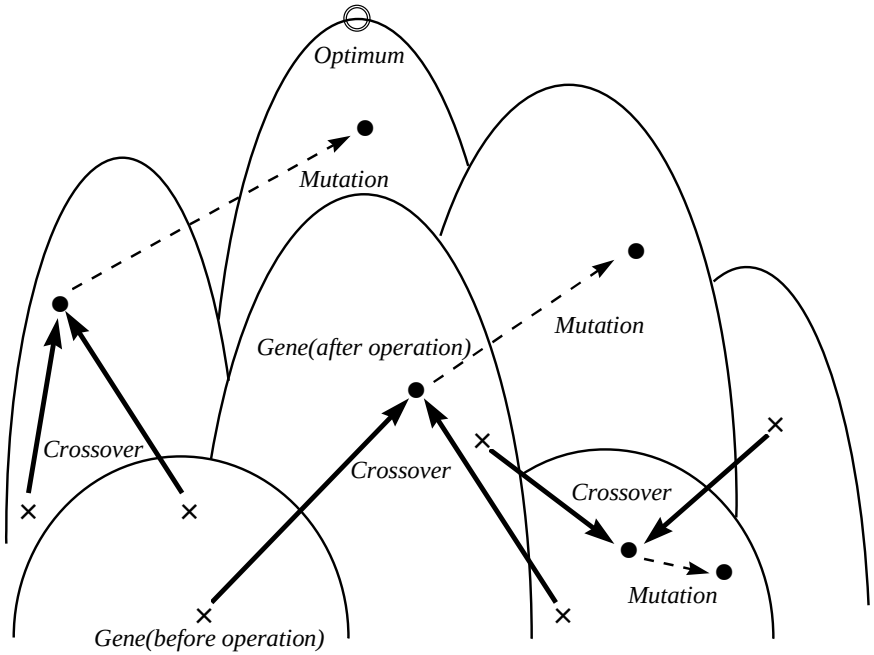
最適化、象を撫でる？

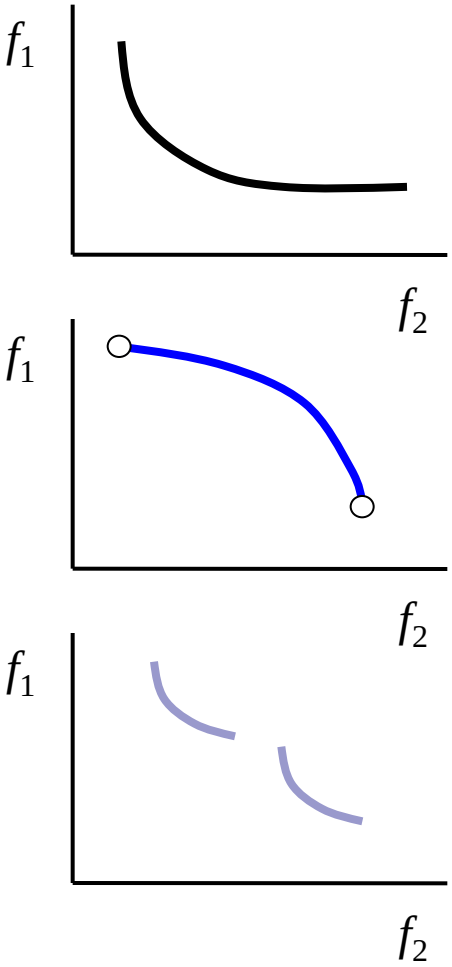



Optimum
Transition
Transition
Transition
Local
Optimum
GM
SA
Initial point
Initial point

MODE とは？ ー「設計空間の構造化と可視化」

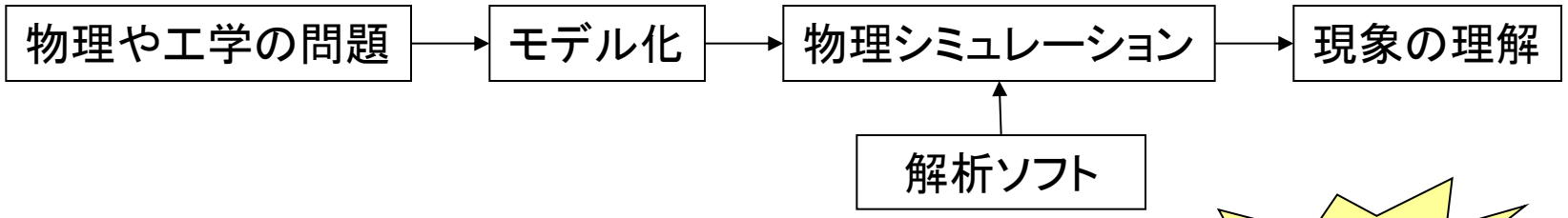
- Multi-Objective Design Exploration (MODE、多目的設計探査)
  - 多目的最適化（トレードオフ情報）から設計空間の構造を探る
  - 高次元設計空間の俯瞰的可視化を行う
  - 設計空間に注目すべき領域（スイートスポット）を見いだす



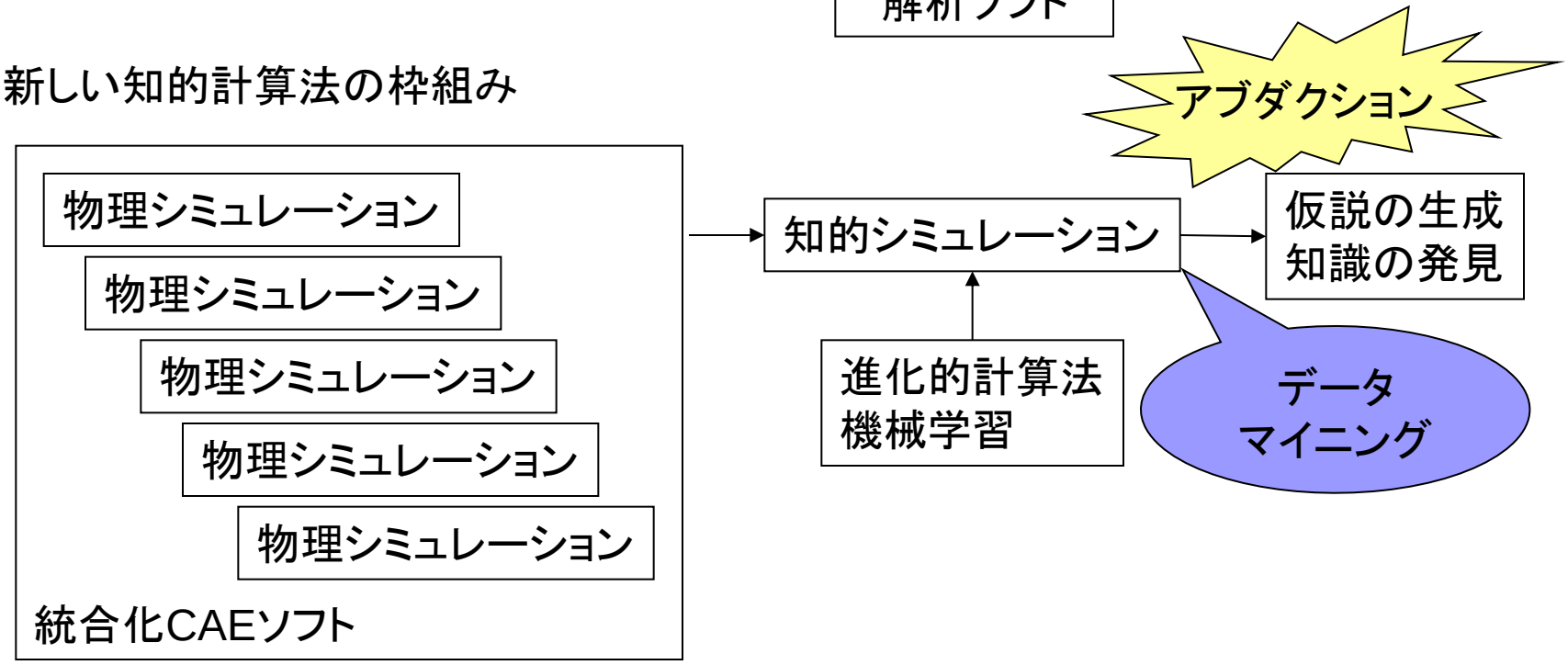


計算科学の新展開

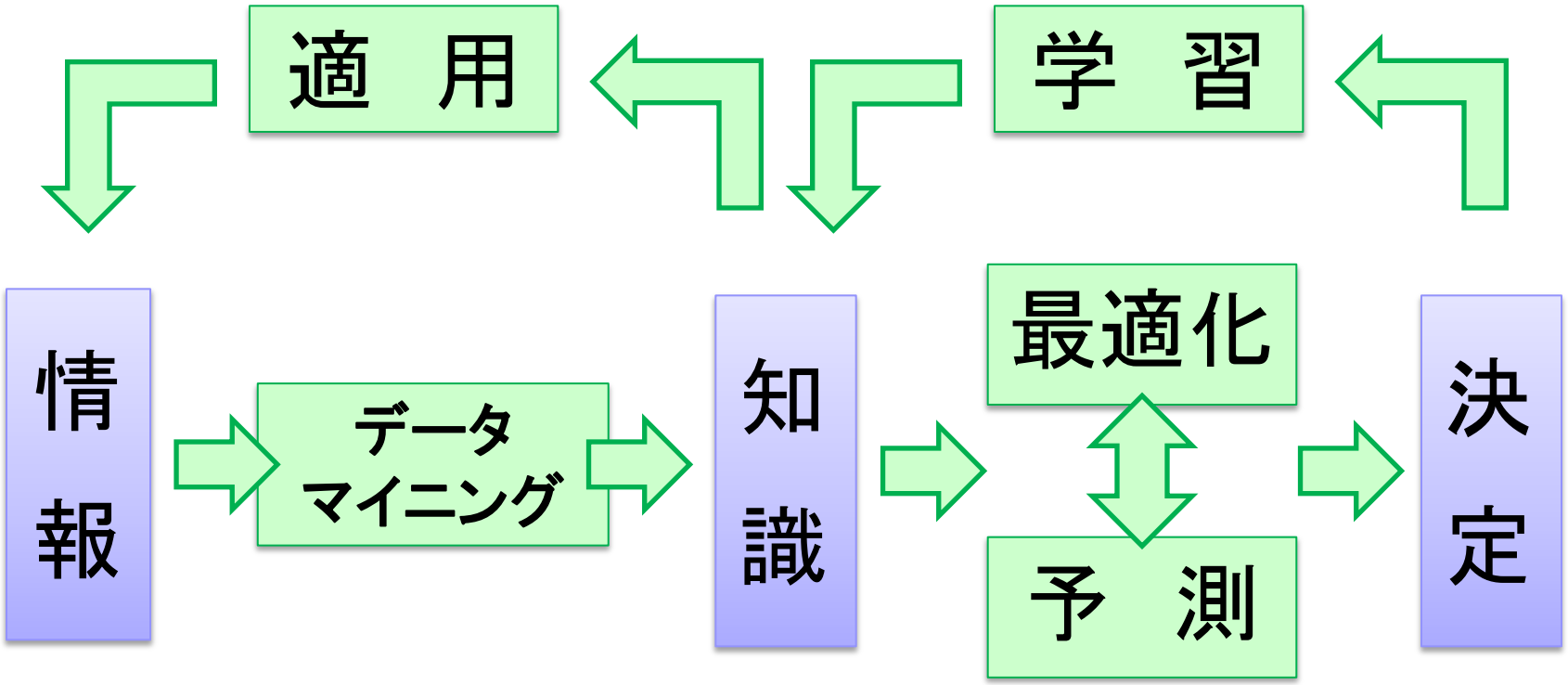
従来の計算シミュレーション



新しい知的計算法の枠組み

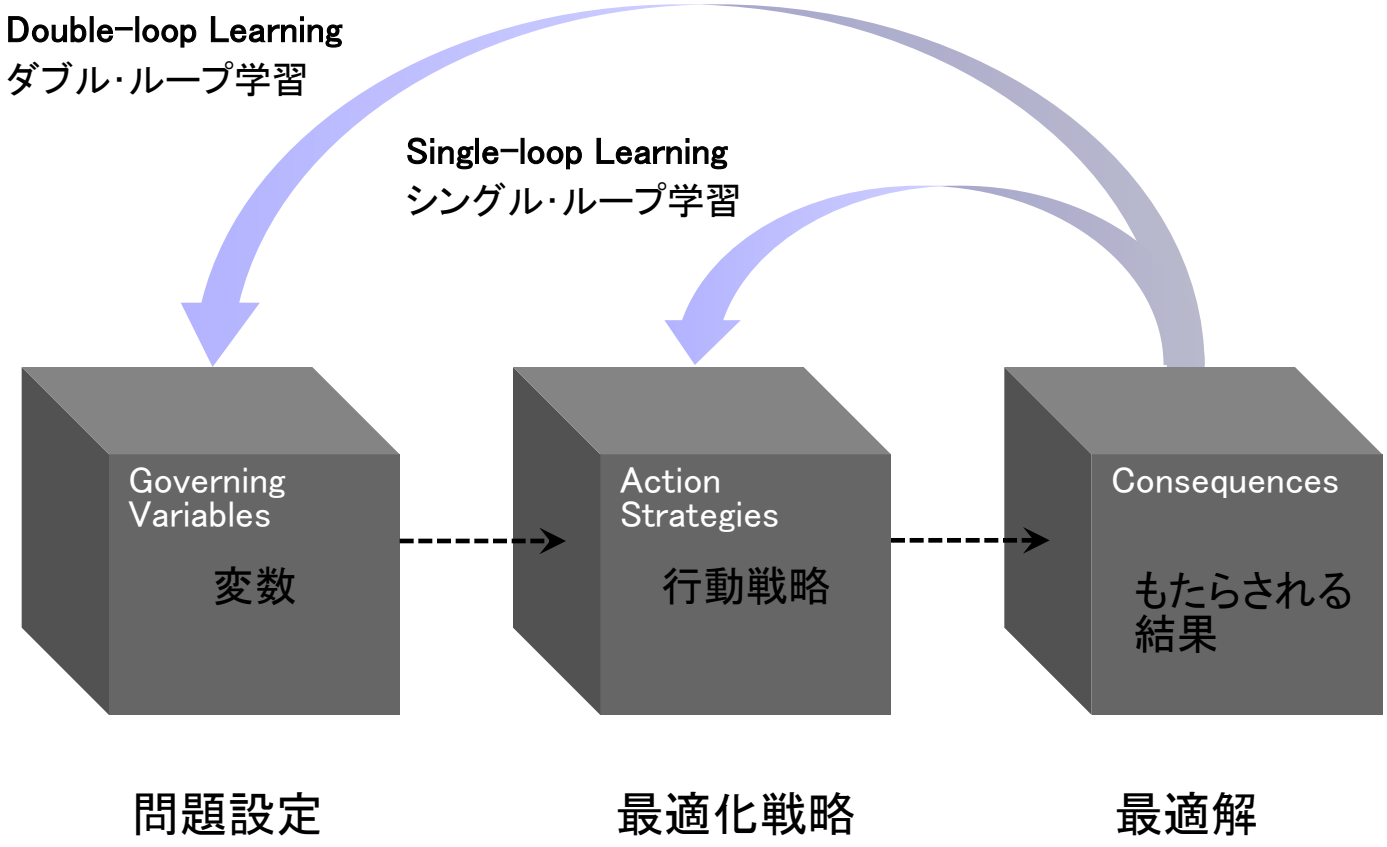


設計とは意志決定の連続



Michalewicz, Schmidt, Michalewicz, Chiriac, *Adaptive Business Intelligence*, Springer 2006.

ダブル・ループ学習



組織能力の経営論　DIAMONDハーバード・ビジネス・レビュー編集部：編訳　ダイヤモンド社

「見える化」とは？

- 4つの「見える化」（＝「可視化」）
  - 見える化（目に飛び込んでくる）
  - 視える化（掘り下げてより深く見る）
  - 診える化（さらに細部を見る）
  - 観える化（全体を俯瞰する）
- 4つの「見える化」による育み
  - 気づき
  - 思考
  - 対話
  - 行動

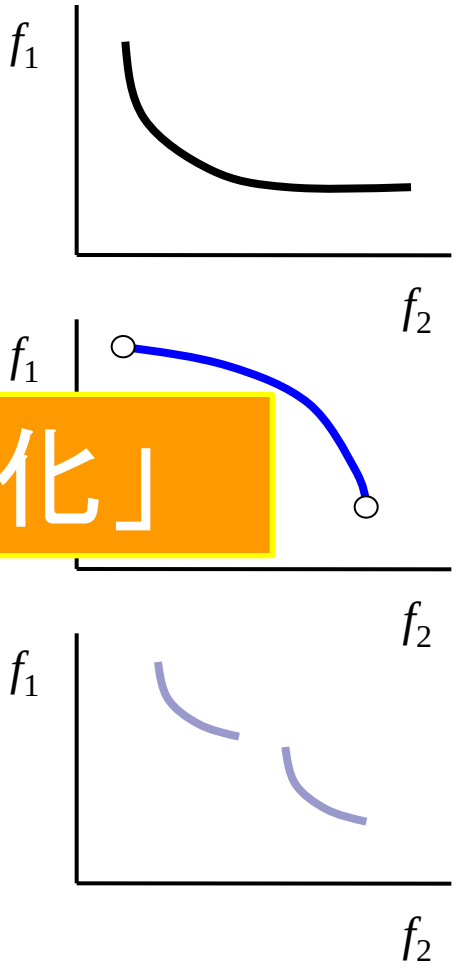
「見える化」は意志決定に役立つ！

・[illegible]社、2005.

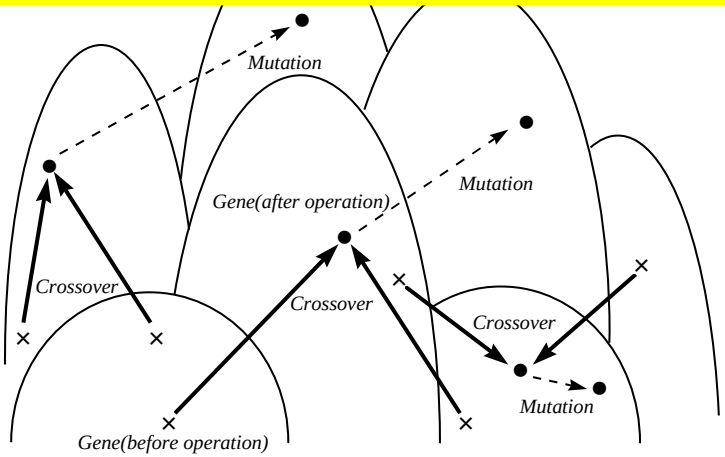
・可視化情報[illegible]み[illegible]化研究[illegible]」
http://www.visualization.jp/workshop/mieru/

MODEとは？

- Multi-Objective Design Exploration (MODE、多目的設計探査)
  - 多目的最適化（トレードオフ情報）から設計空間の構造を探る
  - 高次元設計空間の俯瞰的可視化を行う
  - 設計空間に注目すべき領域を見いだす
  - ダブル・ループ学習で新しい設計目標を考える



設計空間の「見える化」



計算が設計に役立つために―哲学！

- 解析から設計へ
  - 最適化問題への適用
- 設計学から
  - アブダクション
  - 設計者に役立つための仕掛け
- 多目的設計探査MODE
  - 設計トレードオフの構造化と可視化
  - 自然の模擬から知識の発見へ
  - 「見える化」とダブル・ループ学習