



東北大学

# 多目的設計探査とMRJ



流体科学研究所  
大林 茂

流体研ゆるキャラ「リゅうたん」

# OUTLINE

- 東北大学流体科学研究所
- 日本における最近の航空機開発
- MRJと多目的設計探査
- 航空機設計におけるトレードオフと設計結果のマッピング化技術
- MRJ推進系統合主翼最適化適用事例
- 多目的設計探査と狙い

エアロスペース、エネルギー、ライフサイエンス、ナノ・マイクロに関する流体力学研究を推進

歴史	1943	高速力学研究所設置
	1989	流体科学研究所に改組
	1998	大部門制に改組
	2013	新組織に改組



キャビテーション研究



日本初の国産ジェットエンジン  
ネ-20

## 次世代流動実験研究センターの大型共用設備

### 低乱熱伝達風洞

(世界最高低乱性能)

- ・ 速度レンジ  
(5m/s~80m/s)
- ・ 乱れ強さ 0.02%
- ・ 1m級磁力支持天秤  
(H26完成、世界最大)

### 弾道飛行装置

-超音速飛行体射出装置

(世界最高性能)

- ・ 幅広い速度レンジ  
(100m/s~7000m/s)
- ・ 高再現性
- ・ 高速衝突大型測定部



低乱熱伝達風洞  
(開放型測定部)



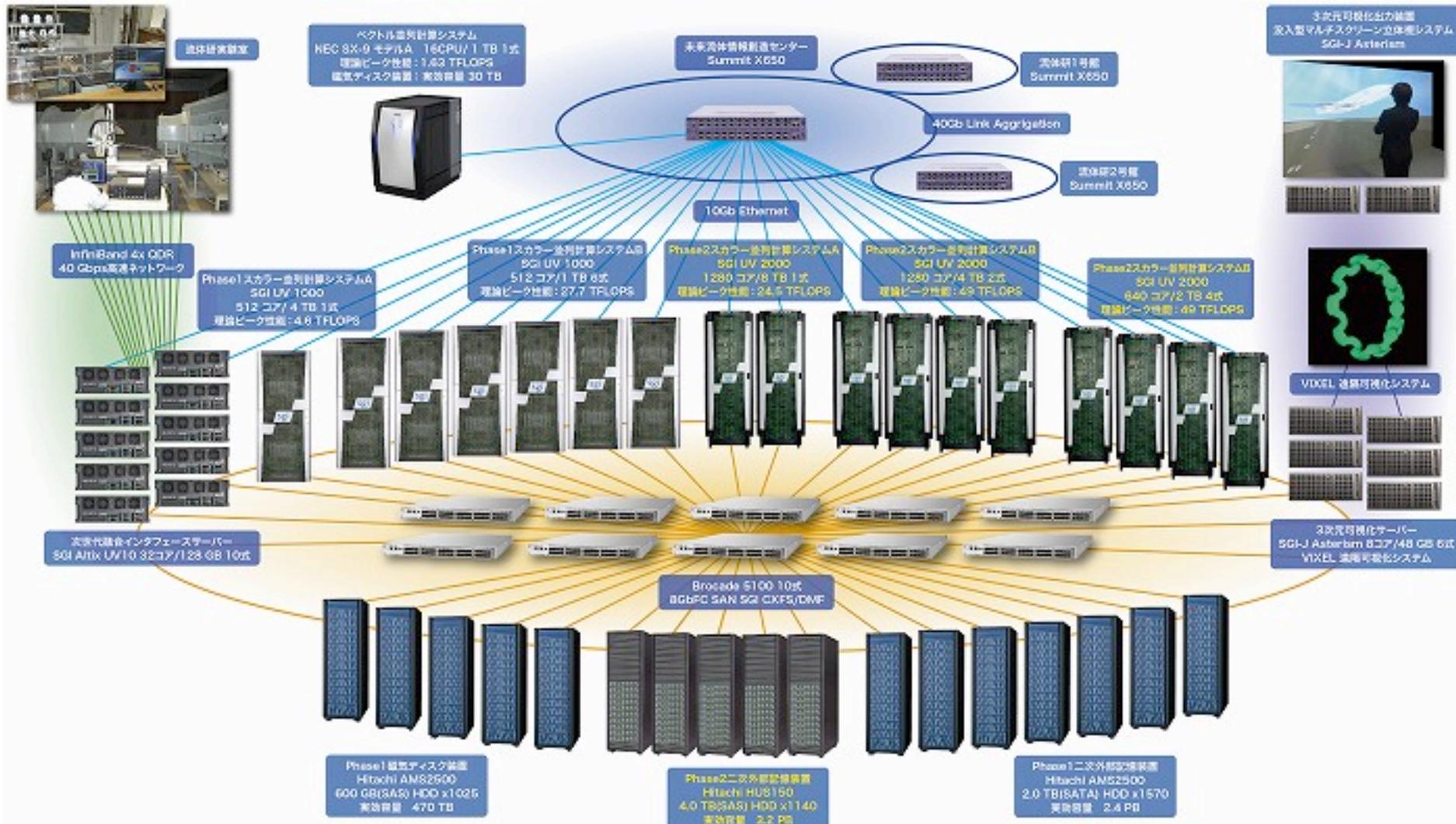
磁力支持天秤  
(H26完成)



弾道飛行装置  
(直径51mmガス銃モード)

「次世代環境適合技術流体実験共用促進事業」により  
地元企業を含む民間利用を  
支援・促進

# 次世代融合研究システム



# 日本における最近の航空機開発

2003	救難飛行艇US-2が初飛行
	Hondajet初飛行
2007	国産旅客機MRJ事業化決定
	P-X初飛行 (P-1)
2010	C-X初飛行 (XC-2)
2015	MRJ初飛行、Hondajet初号機納入



US-2



P-X



C-X



<http://www.hondajet.com/gallery-and-downloads/#9>



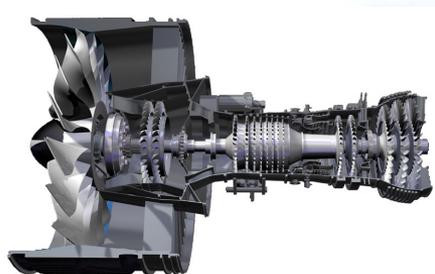
三菱航空機(株)提供

# MRJ State-of-the Art Technologies

- Designed for lower fuel burn, noise and emission with state-of-the art technologies available

Engine

PurePower® PW1000G



Cabin



Slim & Comfortable Seat

Structure  
&  
Materials

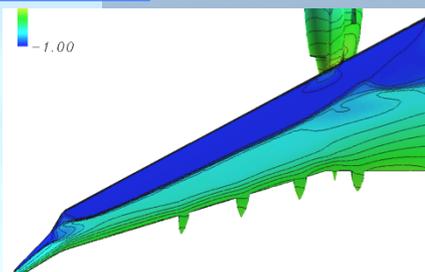


Composite



Aerodynamics

Advanced CFD Design



Systems

FBW Technology



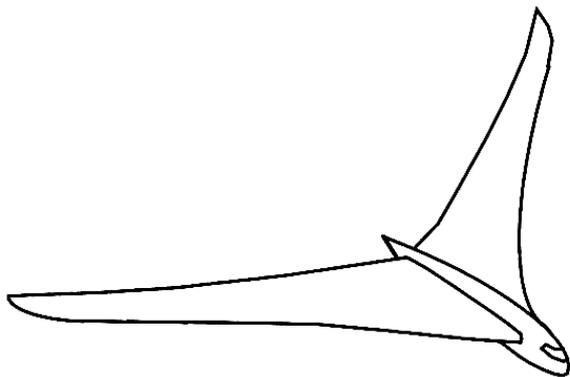
# MRJと多目的設計探査

三菱重工/三菱航空機との共同研究により  
多目的設計探査を開発、MRJの設計に適用

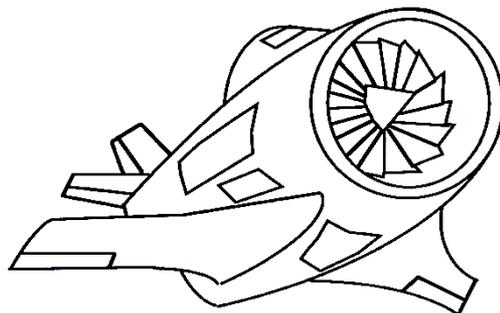




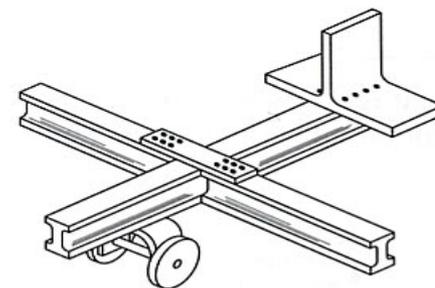
# 航空機設計におけるトレードオフと 設計結果のマップ化技術



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

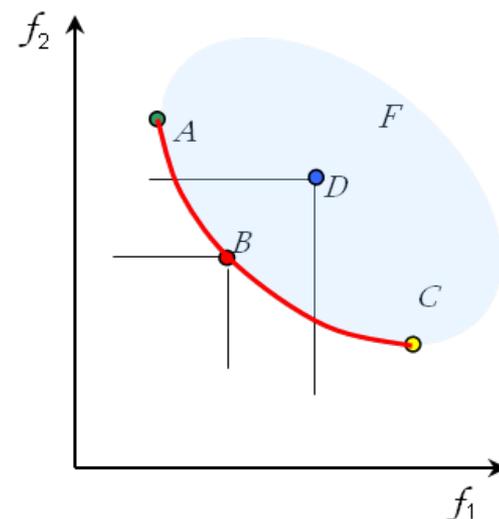
# 通常的设计改善のアプローチ(続き)

- 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

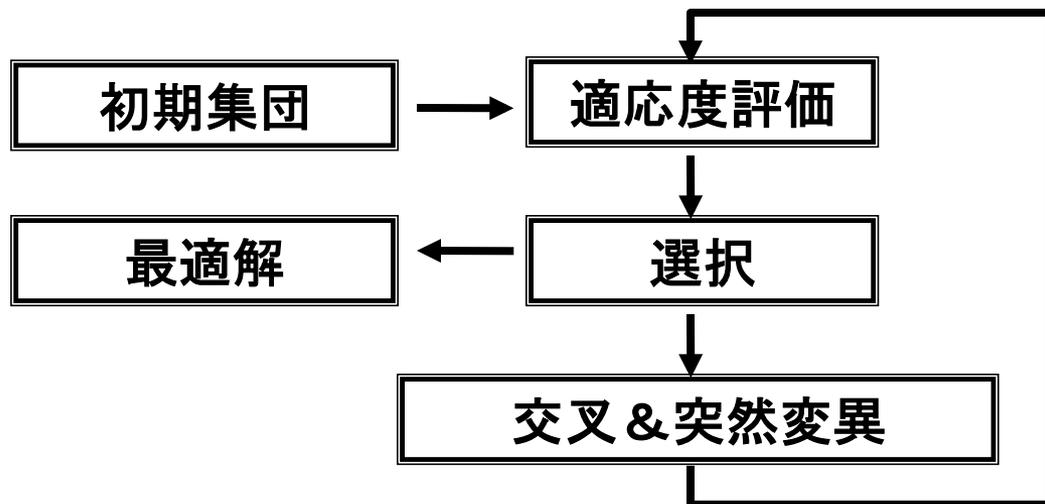


パレート(1848-1923)  
イタリアの経済学者  
パレート最適性の概念を提起  
厚生経済学のパイオニア

# 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)



- ✓ 勾配情報を必要としない

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

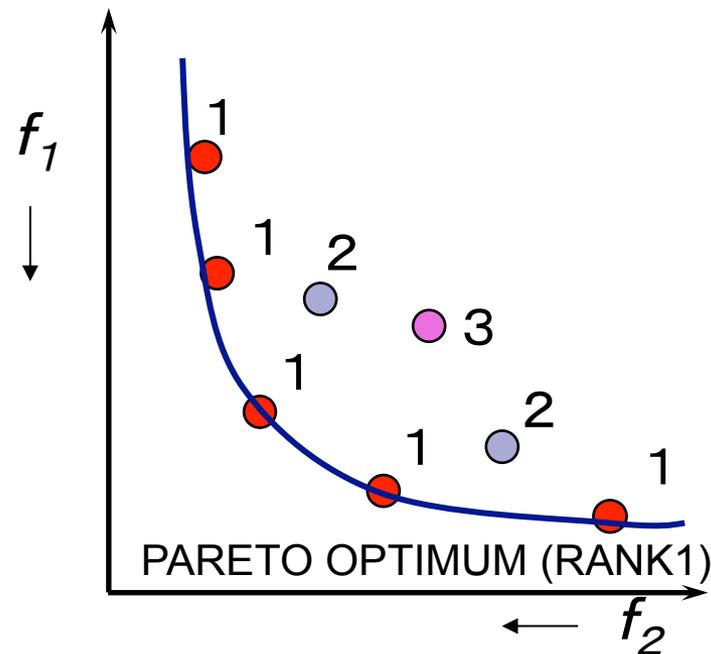
# 多目的遺伝的アルゴリズム (MOGA)

- 適応度評価: パレート・ランキング法  
( by Fonseca and Fleming )

全体として最適な方向へ進化

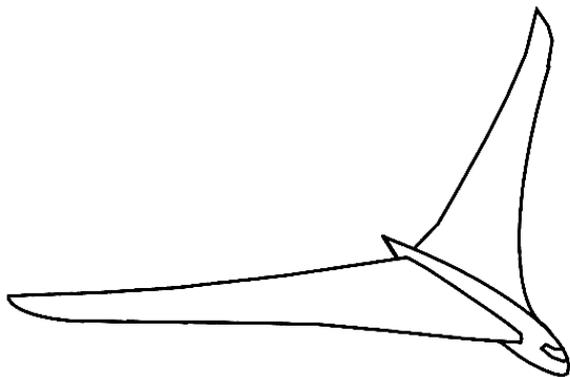


パレート最適解の集合

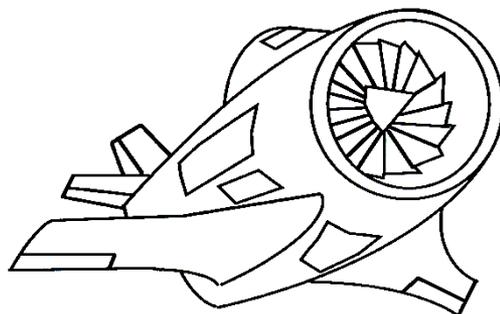


- 多目的最適化の最前線
  - (1) 多数目的 (パレートランキングでは3~4目的で限界)
  - (2) 多数制約
  - (3) 設計空間特徴抽出

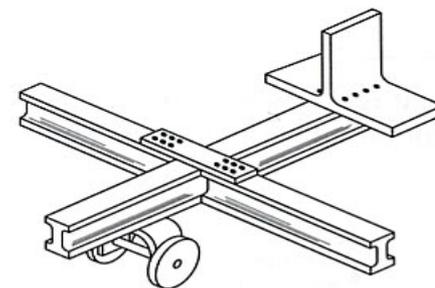
# 航空機設計におけるトレードオフ



Aerodynamics



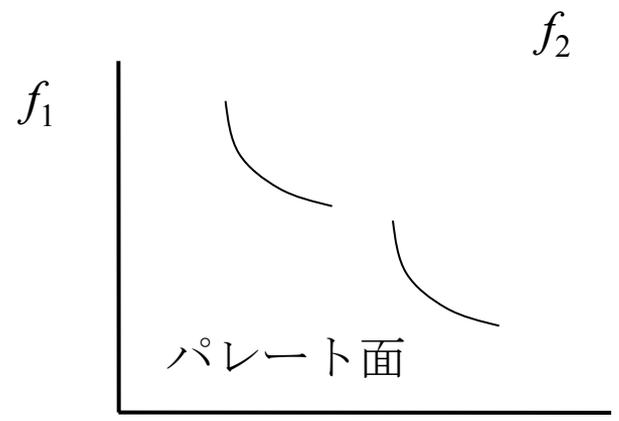
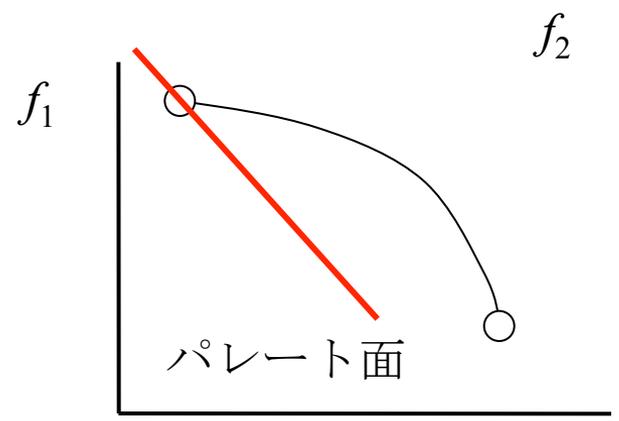
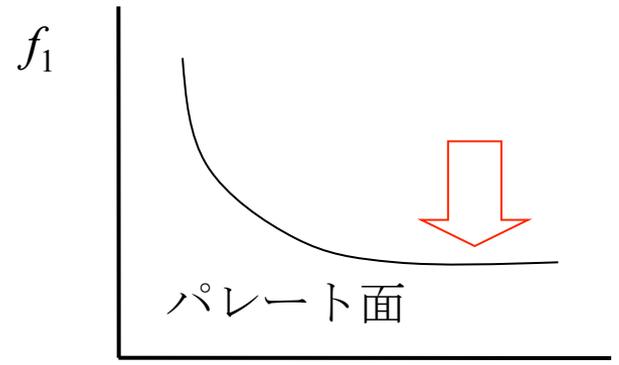
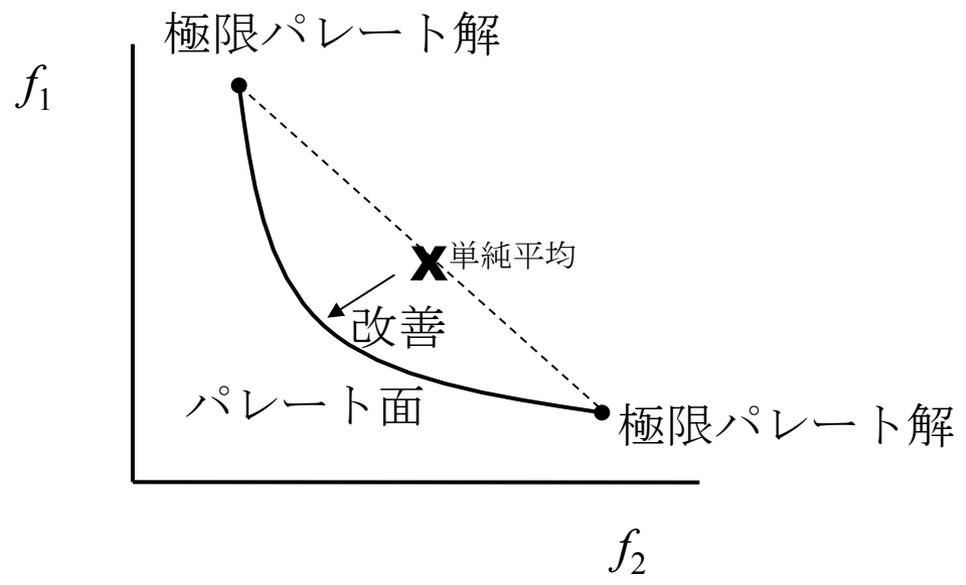
Propulsion



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

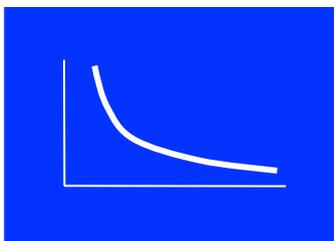


$f_2$

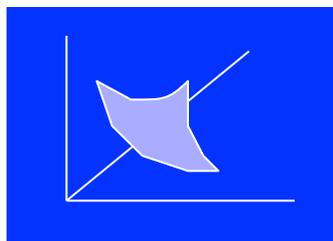
# 最適化結果の可視化データマイニング

## ■ トレードオフの可視化

2 objectives



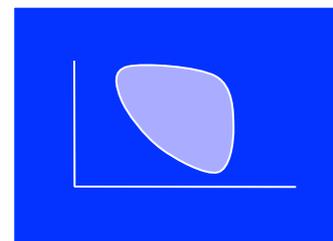
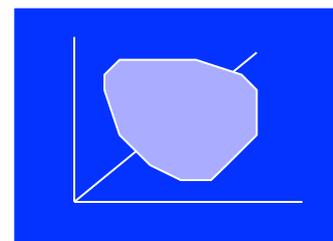
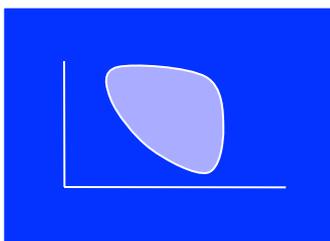
3 objectives



4 objectives



Minimization problems



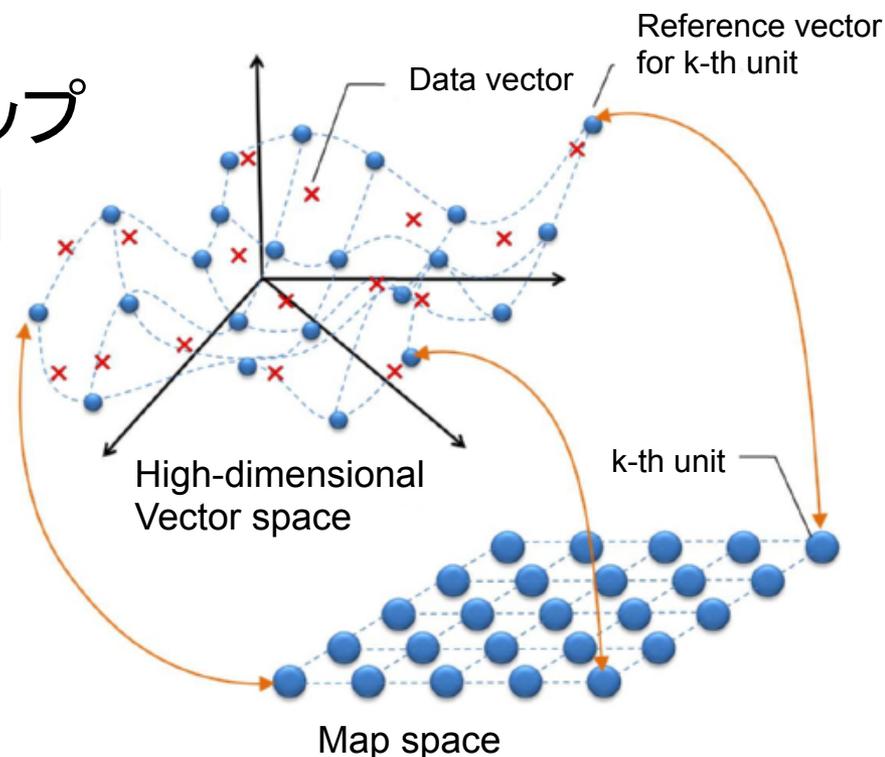
# 自己組織化マップ(SOM)

## ■ 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

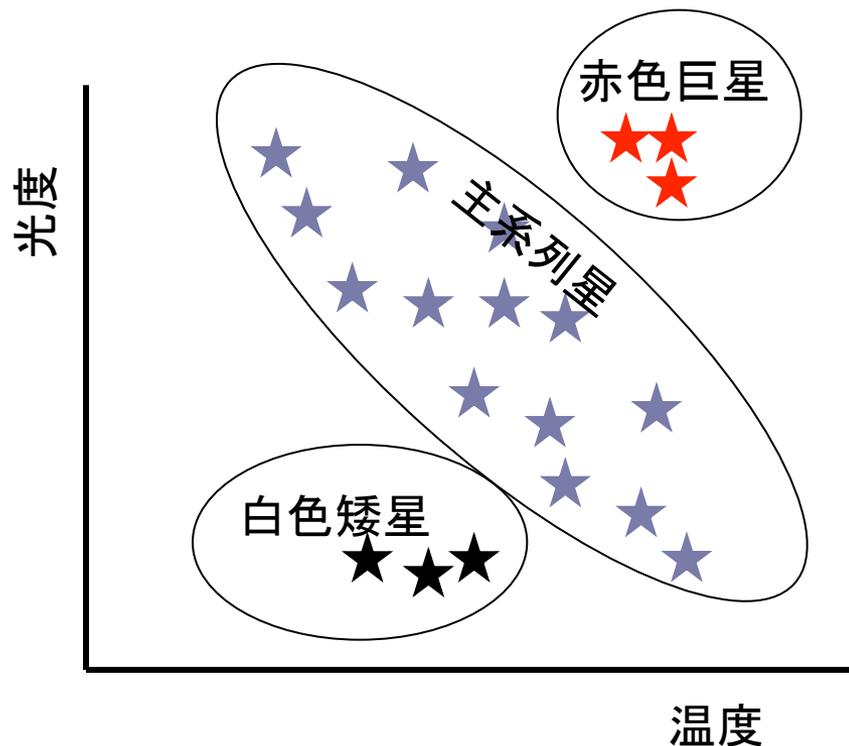


# クラスタ分析

- 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

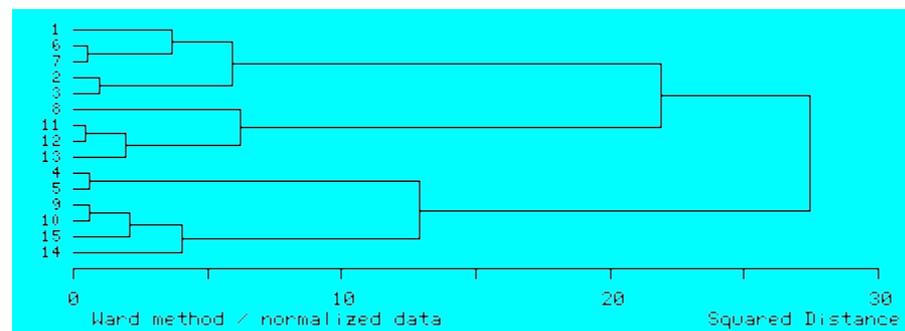
星のHRダイアグラム



# SOMとクラスタ分析

- 凝集法: 距離の近いものから順にクラスタを融合していく方法、最終的には一つのクラスタに融合する樹状図を得る
- SOM-Ward距離: SOMのニューロンが持つベクトル値とマップ上の位置から定義、隣り合うものから融合していく
  - クラスタ内では分散を減らし、クラスタ間では分散が大きくなるように融合
- SOMのクラスタ: 生のデータからクラスタ分析するより、計算・可視化が容易

デンドログラム(樹状図)



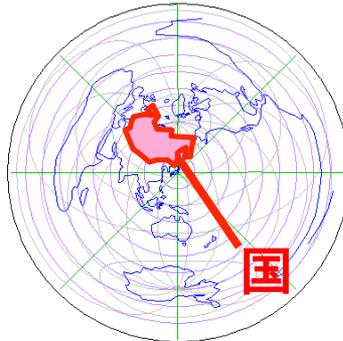
# 設計結果のマップ化技術

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



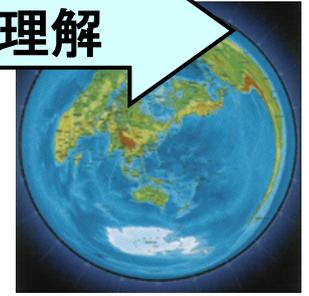
地球表面(3D)



地図(2D)



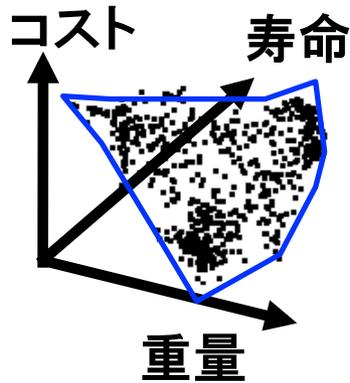
人口で色づけ



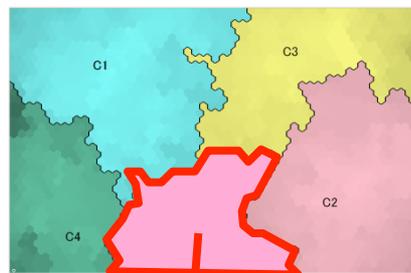
標高で色づけ

特徴を理解

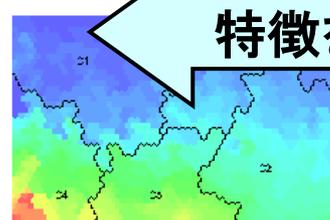
設計マップ



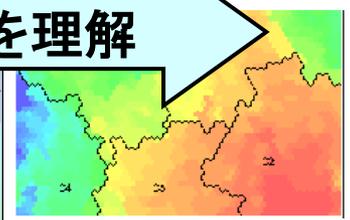
パレート面(多次元)



類似設計案



寿命で色づけ



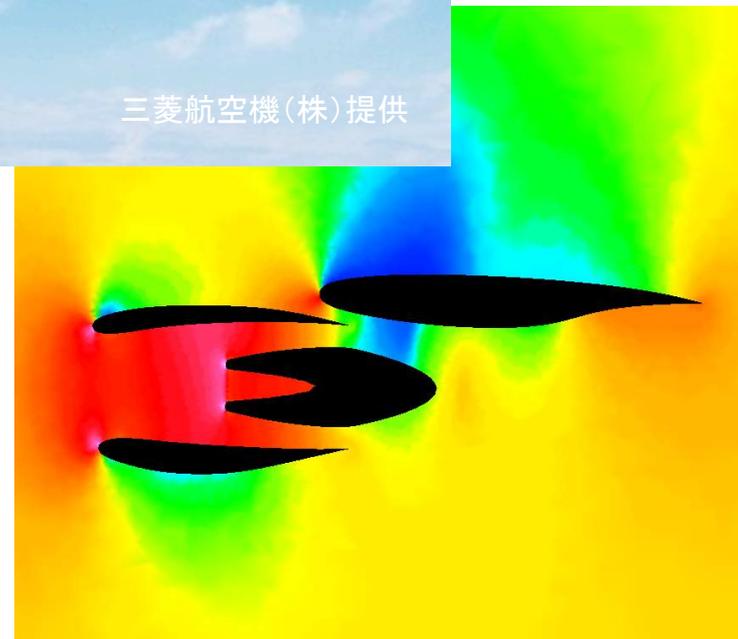
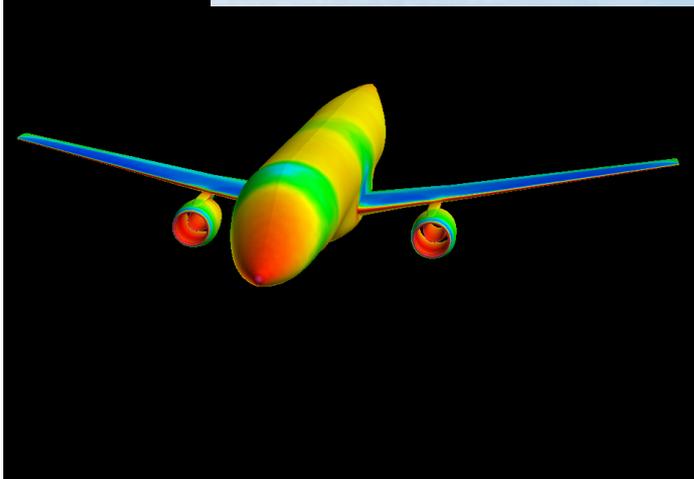
コストで色づけ

特徴を理解



- 設計案の理解
- 次設計に利用
- 新設計に展開

# MRJ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

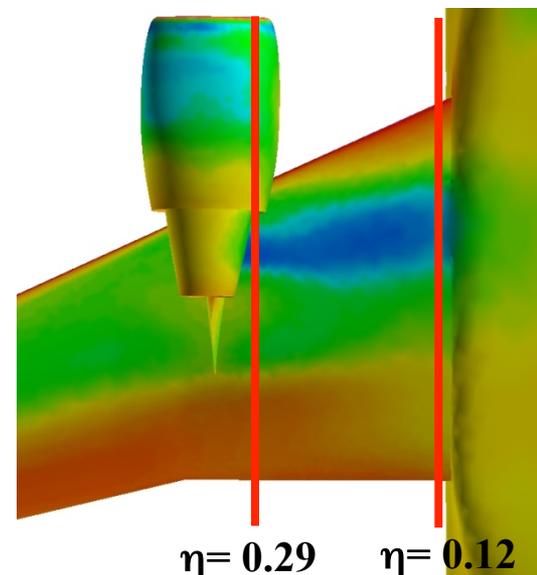
最小化

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 ( $\eta = 0.12, 0.29$ )  
→ 13 変数 (NURBS)  $\times$  2 断面 = 26
- ・ 翼振り角            4 断面

合計    30 設計変数



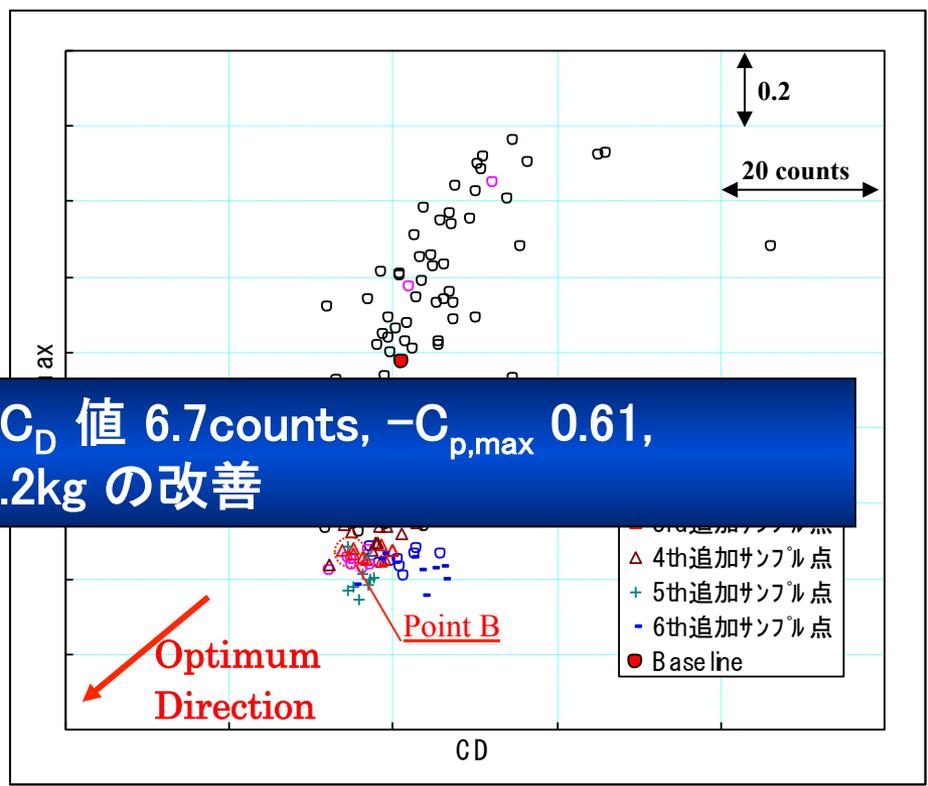
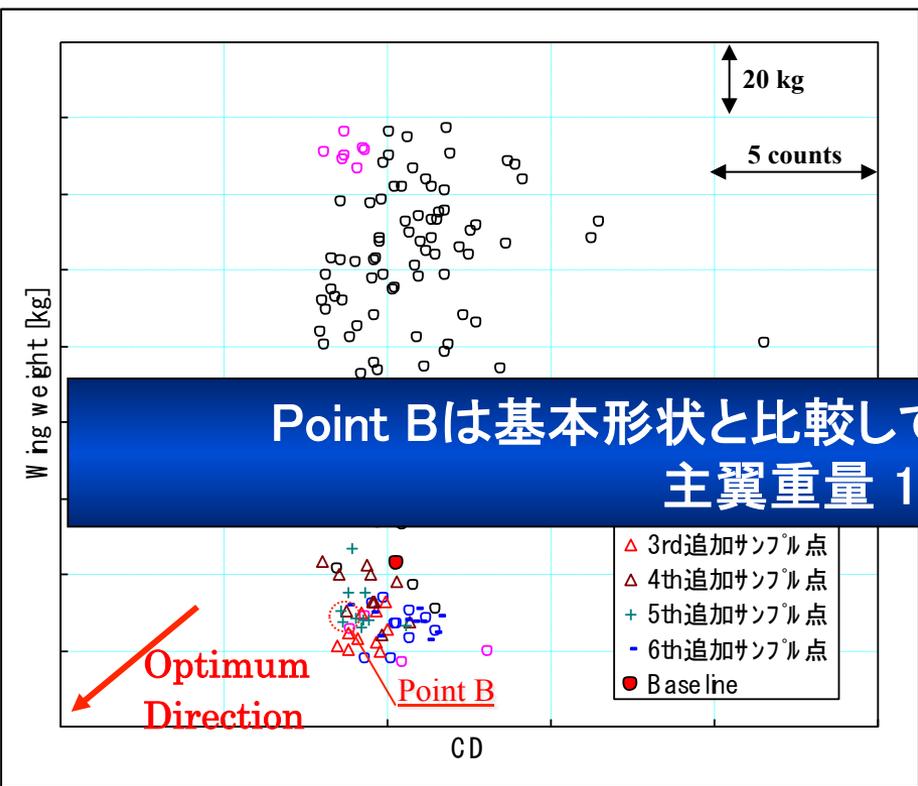
## 解析ツール

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

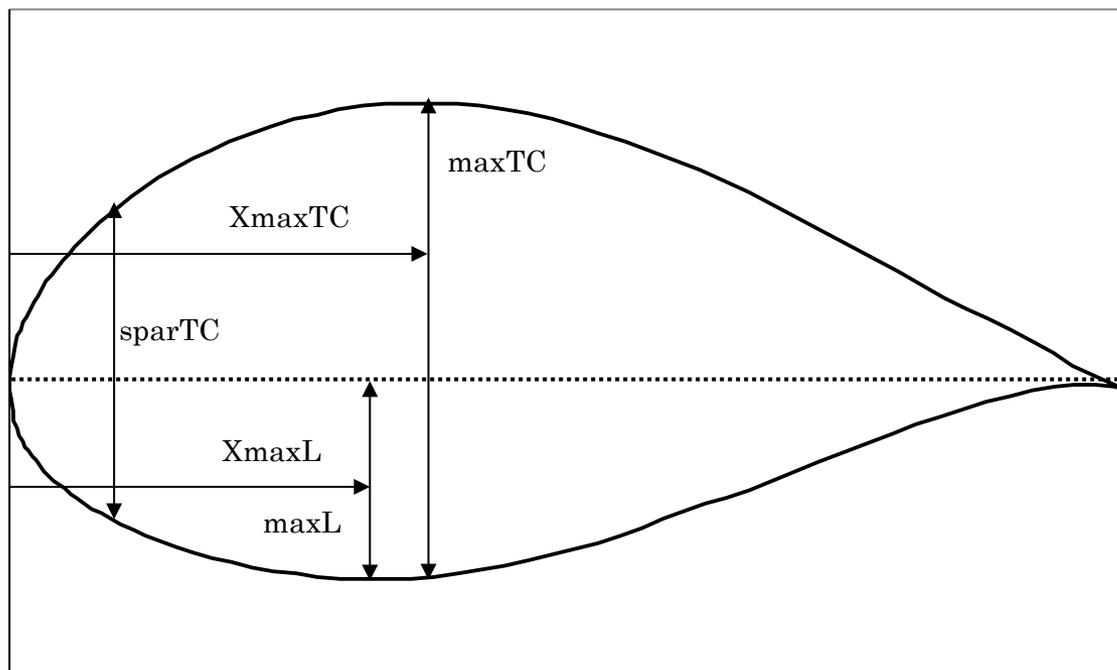


# 結果

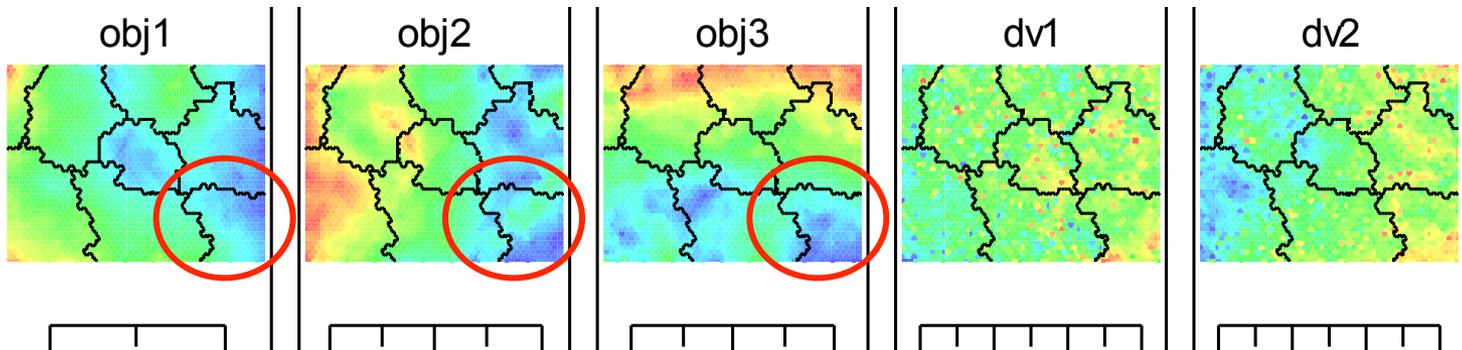
## - 基本形状とサンプル点の性能 (Euler) -



# 空力形状パラメータ

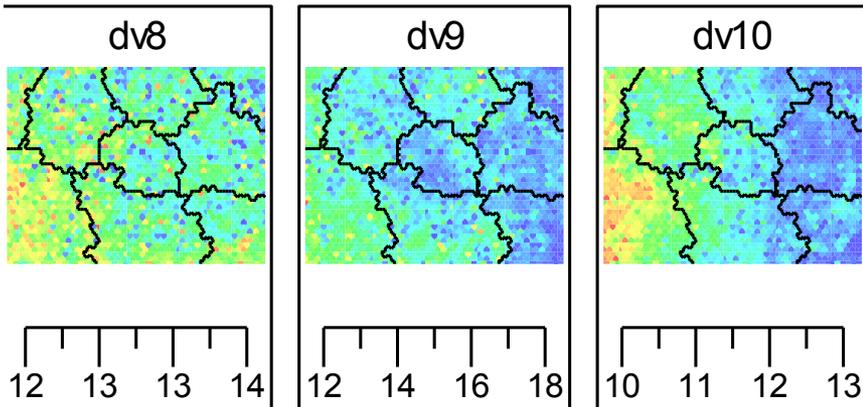
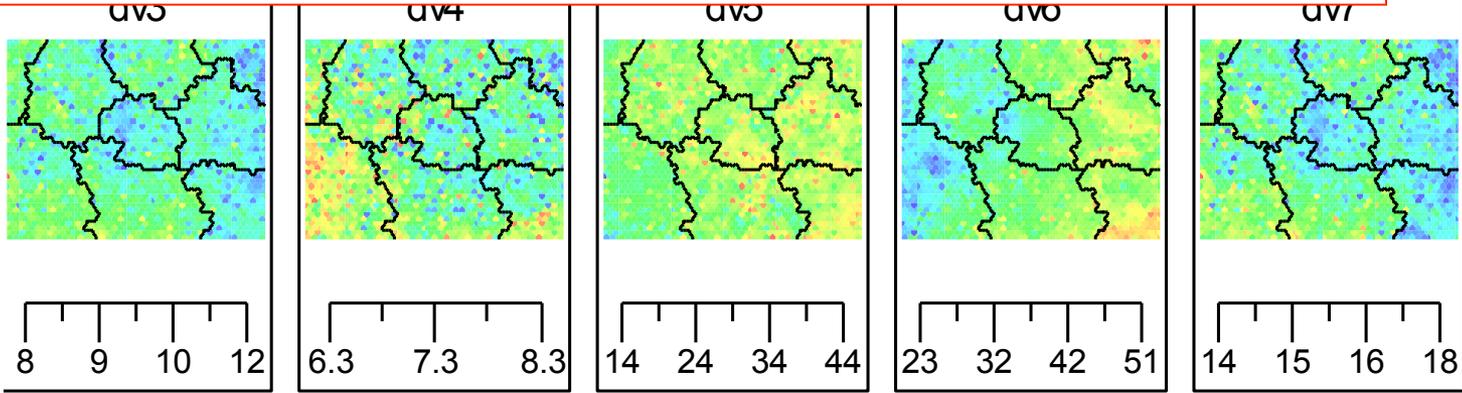


Number	Airfoil parameters
dv1	$X_{\max L} @ \eta = 0.12$
dv2	$X_{\max L} @ \eta = 0.29$
dv3	$\max L @ \eta = 0.12$
dv4	$\max L @ \eta = 0.29$
dv5	$X_{\max TC} @ \eta = 0.12$
dv6	$X_{\max TC} @ \eta = 0.29$
dv7	$\max TC @ \eta = 0.12$
dv8	$\max TC @ \eta = 0.29$
dv9	$\text{sparTC} @ \eta = 0.12$
dv10	$\text{sparTC} @ \eta = 0.29$



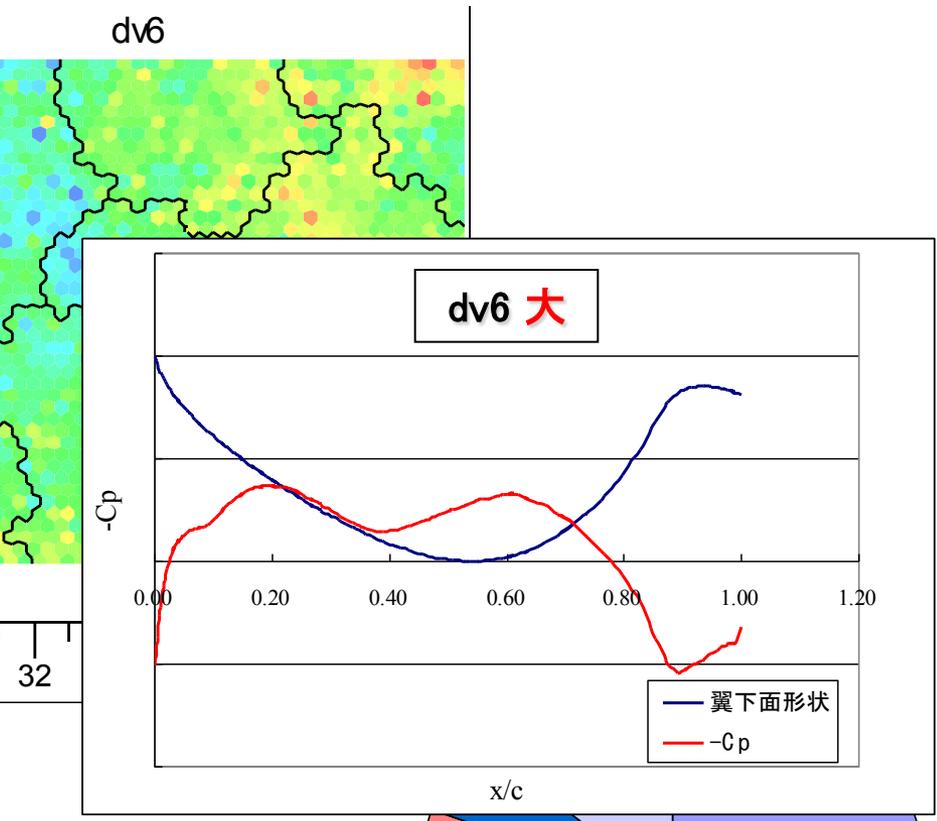
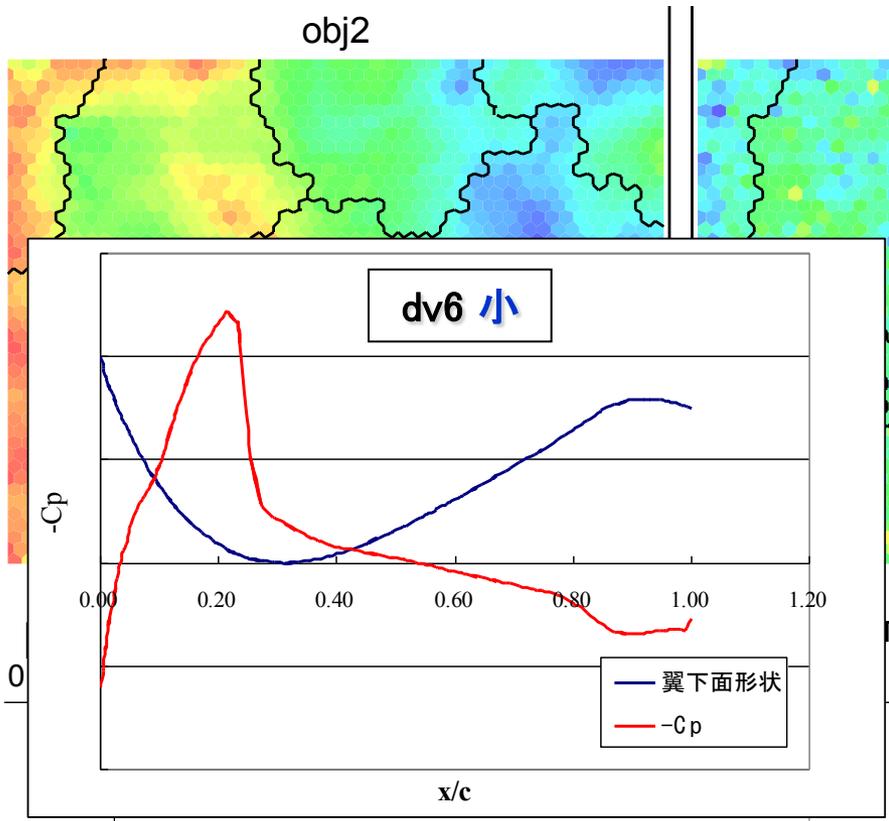
すべて青→設計空間のスイートスポット

56

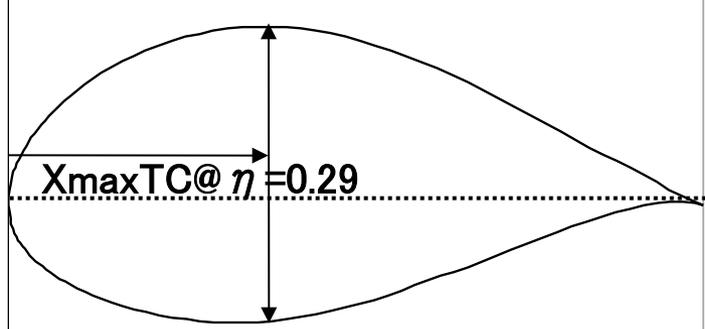


SOMによる可視化

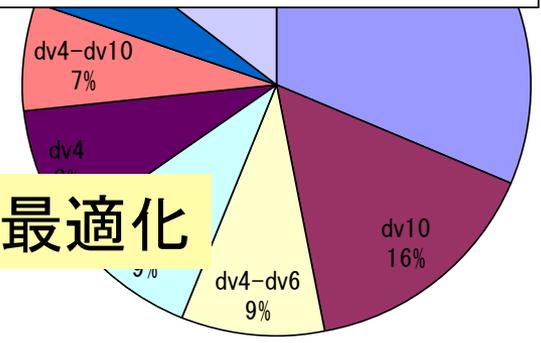
# $-C_{p,max}$ 値と設計変数の関係



32



## ナセル流路の最適化



# 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
    - クラスタ分析
- さらに理解を深めるには
  - ルール生成
    - ラフ集合
    - ルールの傾向を分析
    - 翼型パラメータの傾向を把握

多目的設計探査 = 多目的最適化 + データマイニング

## ACTION

設計知識、  
想定外気づき

工学システムの  
創案・改善

## PLAN

問題の設定

統計分析  
データマイニング

俯瞰的視点

多目的最適化  
(好適化、優化)

## CHECK

検証、分析

## Do

作り込み

# ものづくり・環境技術へ

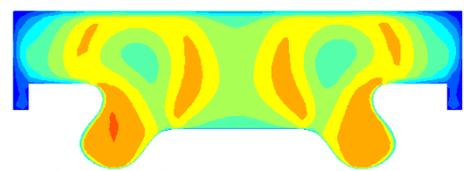
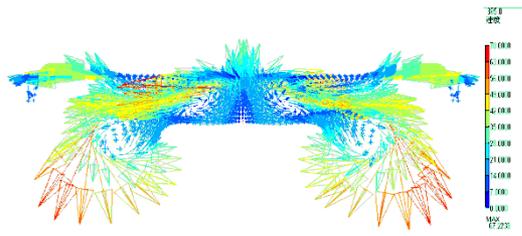
- コンピュータ支援設計技術はあらゆる分野にインパクト
  - ものづくり技術の情報化・高度化に貢献
  - 設計の「見える化」が可能
  - 高度なトレードオフに基づく優れた環境技術の開発に貢献



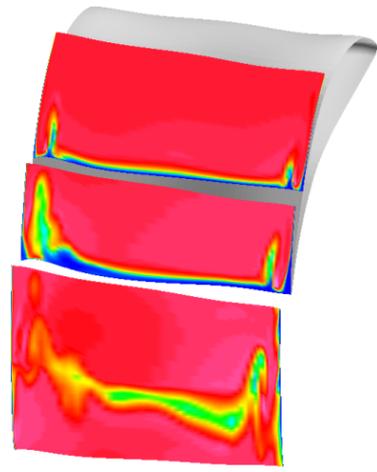
エコタイヤの設計



ブルーアース1  
EF20  
YOKOHAMA



低排出ディーゼルエンジン燃焼室の設計  
(自動車)



高効率蒸気タービン静翼の設計(発電)



省エネ洗濯乾燥機的设计(家電)

HITACHI  
Inspire the Next

共同研究による設計例

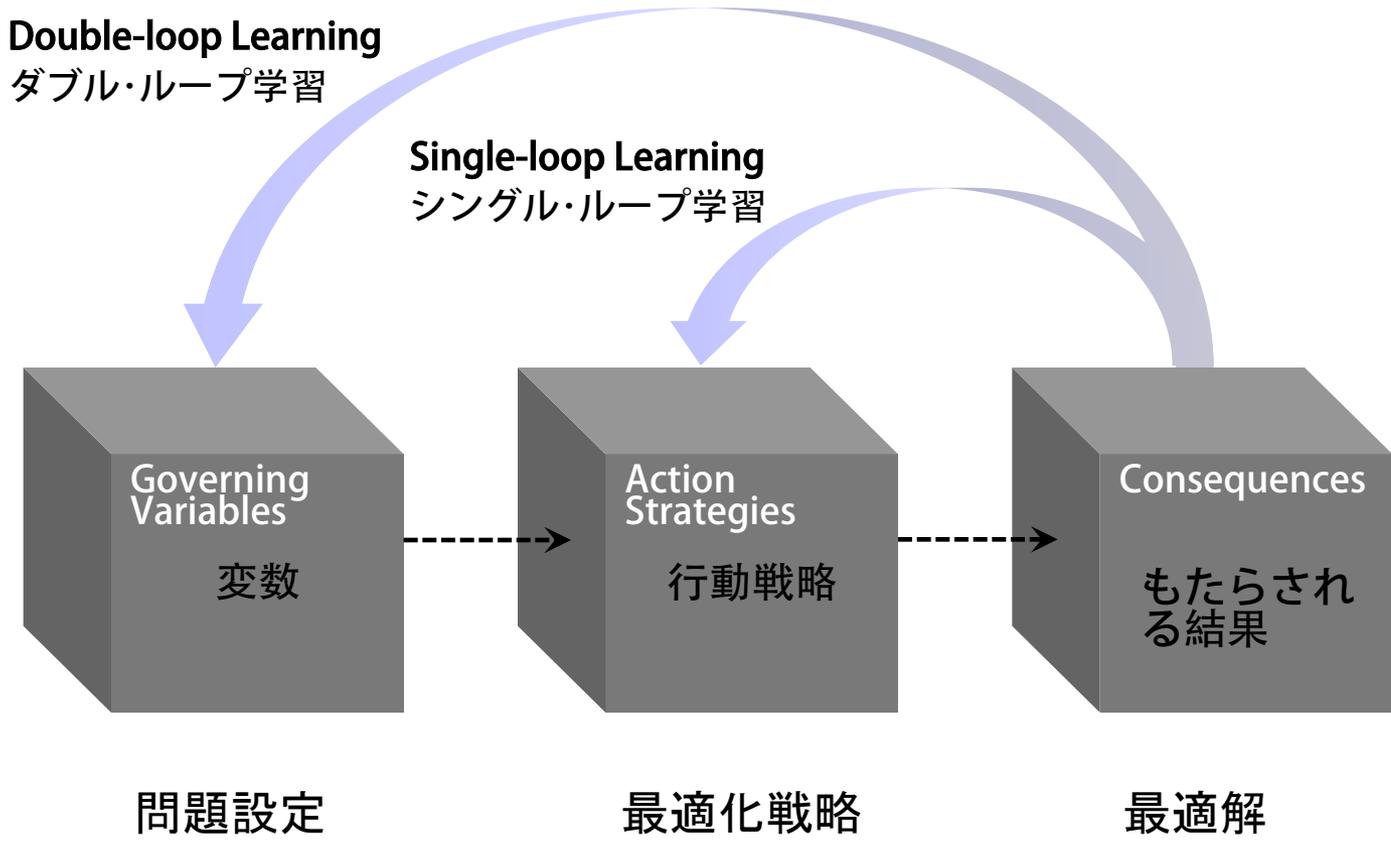
# 計算が設計に役立つためには？

- 設計とは、要求を実現する形状を探す一種の逆問題  
(富山哲男, 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**

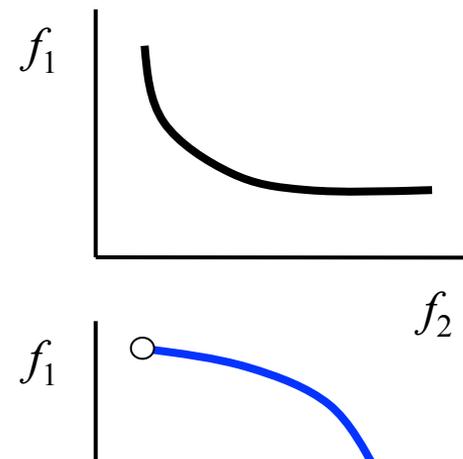
# ダブル・ループ学習



# 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(目的関数空間)の俯瞰的可視化を行う
  - そこに注目すべき領域を見いだす
  - 注目領域と設計変数との関係を見いだす
- **ダブル・ループ学習で新しい設計目標を考える**



- 設計空間の構造化と可視化
- 設計空間の「見える化」で設計者を支援
- 俯瞰的な「見える化」がダブル・ループ学習を促進



# 計算が設計に役立つために一哲学！

- 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
  - 設計空間の構造化と可視化
  - 「見える化」とダブル・ループ学習

# がんばれMRJ!

