

パレート解分析に関する技術動向

Shinya Watanabe
渡邊 真也

Muroran Institute of Technology, Japan
室蘭工業大学

発表の流れ

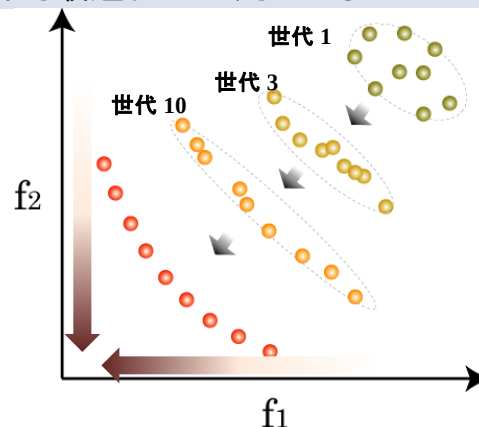
- 非劣解集合とは
- 非劣解分析の困難性
- 非劣解集合の特性分析
- クラスタリングを行うことのメリットとデメリット
- 論理分析に基づく分析アプローチ
- オンデマンド対応化

進化型多目的最適化アルゴリズム

Evolutionary Multi-criterion Optimization (EMO)

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA),
粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization, PSO) と
いった進化的手法を多目的最適化へ応用したもの

一度の探索により
複数のパレート最適解
を探索可能



非劣解集合

非劣解集合の定義

– 現在入手できている解集合の中でどの解と比較
しても優越関係を満たさない解候補) のこと

k 目的最小化問題において

$$f_i(x) \not\leq f_i(x^*) \quad (\forall i \in \{1, \dots, k\})$$

非劣解集合

$$f_i(x) \not\leq f_i(x^*) \quad (\exists i \in \{1, \dots, k\})$$

可能領域
Pareto region
Sweet spot for design

「他の解と比較して一意に劣っていない」という
特徴を有する設計に有益な情報のエッセンス

➡ 非劣解の分析を通して問題の特性が見える
(設計の効率化, 高速化, 高品質化へ)

■ 非劣解を設計に活用

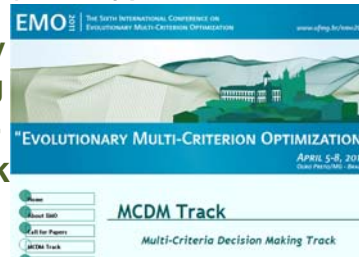
「Innovative Design」(Debが2003年から提唱)

- コンセプト

「EMOにより得られた非劣解から設計に有益な情報を取り出しましょう」

- 設計では特徴の異なる複数種類の候補解が求められている。
- 単一目的では複数種類の解集合が得られない。

EMO2011ではInternational Society on Multiple Criteria Decision Makingとのジョイントの形でMCDM(Multi-Criteria Decision Making) Trackが目玉としてプログラム



■ MCDMとの関係

- MCDM(Multiple Criteria Decision Making)
 - 複数の基準を選考者の意思により優越付け, 選考解を選択する方法

効用関数を利用してユーザーの価値観を単一目的化

- Innovative Design

- 得られた非劣解集合から有益な情報抽出を試みる

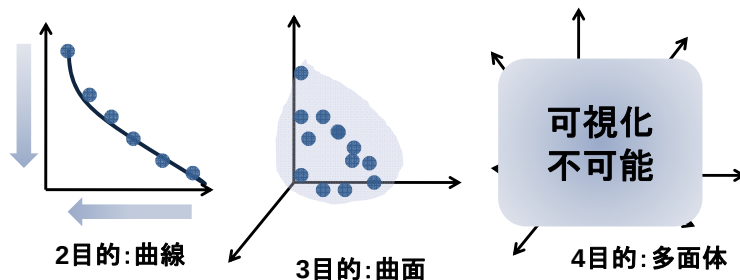
- 非劣解集合フロント可視化による目的関数間トレードオフの把握
- 設計変数空間と目的関数空間の関係分析

➡ 問題構造そのものを分析しようとする野心的試み

■ 非劣解分析の困難性(1)

- 可視化の問題

(トレードオフの関係が把握できない)



- 非劣解集合の数の問題

(そもそも必要となる数が膨大)

数100以上の解候補を細かく分析することは不可能

■ 非劣解分析の困難性(2)

- 含まれる情報量が膨大

- 多数目的, 多数変数ではその組み合わせは膨大. 様々な粒度の異なる情報が内在している.

何らかの分析支援が必要

考慮すべきPoint

- 何らかの情報可視化が必要
- マクロからミクロまで多粒度な視点での分析が必要
- Too Rich な情報を持つ非劣解集合の特性/傾向をユーザーにとって利便性が高いように情報整理する必要

非劣解集合の分析におけるキーワード

可視化

- 3目的以上の目的関数空間をどのように視覚化(低次元化)するか
- 「見える化」によって設計案を視える化
(By 東北大 大林先生グループ)

PCA(主成分分析), SOM(自己組織化マップ),
FMDA(ファジィ多順判別分析), KDR(カーネル次元削減法), ISOMAP

統計分析/データマイニング

- 結果の検証, 問題分析を行う

相関分析, クラスタ分析, 感度分析, ラフ集合

非劣解集合の可視化に求められること

下記の非劣解集合の特徴を保持したまま低次元化

- 目的関数空間での分布(ベクトルの配置)
- パレートフロントの形状
 - Knee pointの把握や非連続性等
- 解集合の支配関係
 - 高次元空間での支配関係が維持されている必要がある
- 参照点との近さ

+ 目的数(次元数)への柔軟な対応

単に高次元空間を低次元に可視化するだけではダメ

高次元データの低次元化

情報の欠損なく低次元化は(ほぼ)不可能

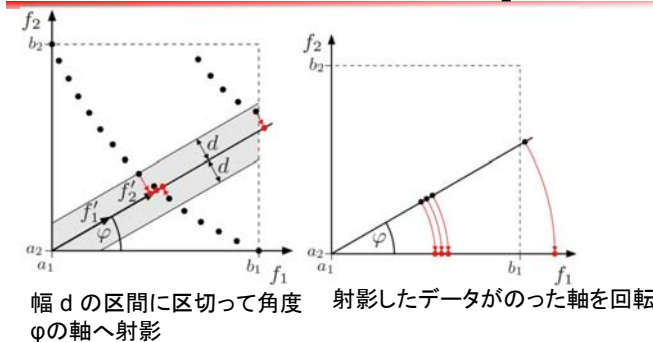
- 解に含まれている情報の取捨選択が必要

- 解同士の優越関係
- 解のもつ傾向
- 解分布の形状
- 参照点との絶対的位置関係

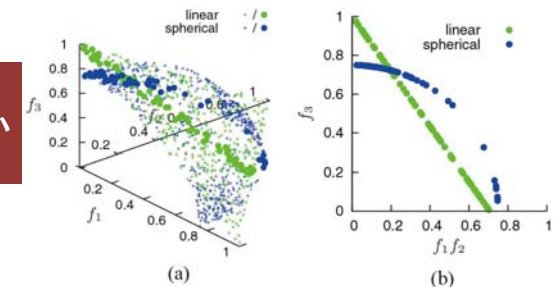
- 解集合を幾つかの部分に分割して, 部分ごとに分けて低次元可視化

- Prosection method [Tusar 2015]

Prosection method [Tusar 2015]



空間を区切って低次元化することで情報損失を最小限に抑えている



目的により可視化・分析に求める事は異なる

- 目的関数空間における解の質を評価したい
 - 複数の非劣解集合の比較など
 - そのためのテスト集合も提案BAS(Benchmark approximations sets) [Tusar 2015]

分布形状・分布位置を重視

- 非劣解集合から問題の特性(目的関数間の関係, 設計変数と目的関数の関係, 傾向)を導出したい

特性・内在する傾向を重視

目的により可視化・分析に求める事は異なる

- 目的関数空間における解の質を評価したい
 - 複数の非劣解集合の比較など
 - そのためのテスト集合も提案BAS(Benchmark approximations sets) [Tusar 2015]

分布形状・分布位置を重視

- 非劣解集合から問題の特性(目的関数間の関係, 設計変数と目的関数の関係, 傾向)を導出したい

特性・内在する傾向を重視

非劣解集合の特性分析

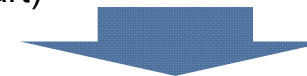
- 代表的な分析アプローチ
 - SOM(自己組織化マップの例)による可視化およびクラスタリング[大林03]
 - HeatMap[Pryke 2007]
 - 平行座標プロット(Parallel coordinates or Profile Chart)



- マクロな傾向は把握できてもミクロな部分の傾向が分からない.
- 分析が主観に基づいており客観性に欠ける
- 抽出された情報が構造化されておらずユーザ側にとって理解が容易ではない

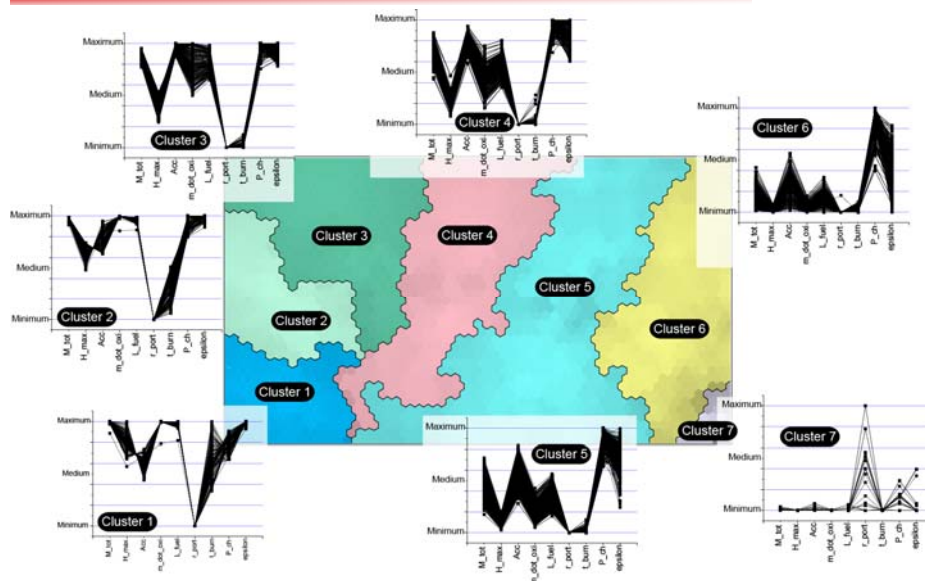
非劣解集合の特性分析

- 代表的な分析アプローチ
 - SOM(自己組織化マップの例)による可視化およびクラスタリング[大林03]
 - HeatMap[Pryke 2007]
 - 平行座標プロット(Parallel coordinates or Profile Chart)



- マクロな傾向は把握できてもミクロな部分の傾向が分からない.
- 分析がクラスタリングなどにより部分集合化すること
抽出された情報が構造化されておらずユーザ側にとって理解が容易ではない

SOMとParallel coordinatesの組み合わせ



クラスタリングのメリットとデメリット

・クラスタリングを行うメリット

- － 低次元化した際に情報損失が少ない(ある次元が完全に共通している場合には次元が1つ減る)
- － 設計者の興味および意図を反映させたクラスタリングを実現することで設計者側の要求する情報分析が可能
- － クラスタ間比較に基づく分析が可能

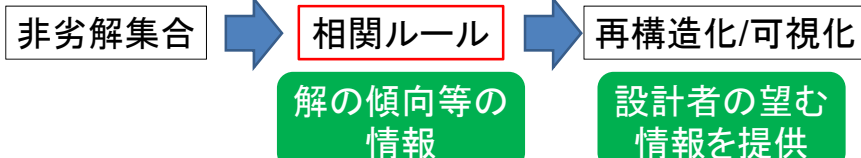
・クラスタリングによるデメリット

- － クラスタリング結果に依存した傾向しか読み取れない
- － クラスタリングにより得られたクラスタ内の類似度が必ずしも客観的に計れない
- － 多粒度への対応が難しい
(クラスタリングにより得られたグループをさらに細かくクラスタリングし分析することは困難)

論理分析に基づく分析アプローチ

提案手法

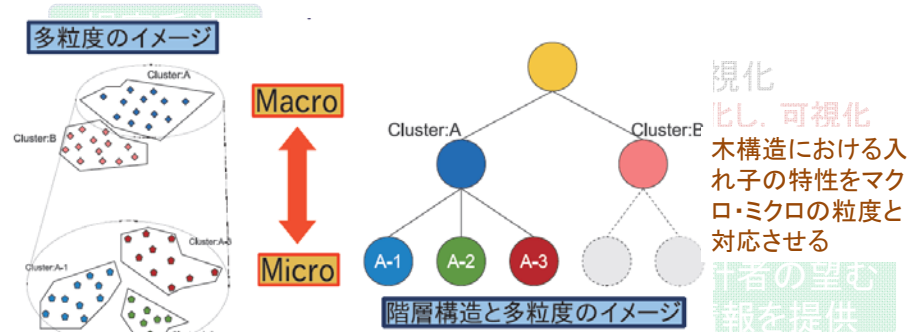
■ 論理分析に基づく分析, データ集合の可視化
非劣解集合全体を相関ルールに基づき部分データ化し, 可視化するという発想



再構造化を実現する際のポイント

- ・ 多粒度な可視化/分析を実現するためデータ集合を階層構造(木構造)で表現
- ・ 集合(各ノード)に客観的な共通性を持たせ意味解釈を容易にする

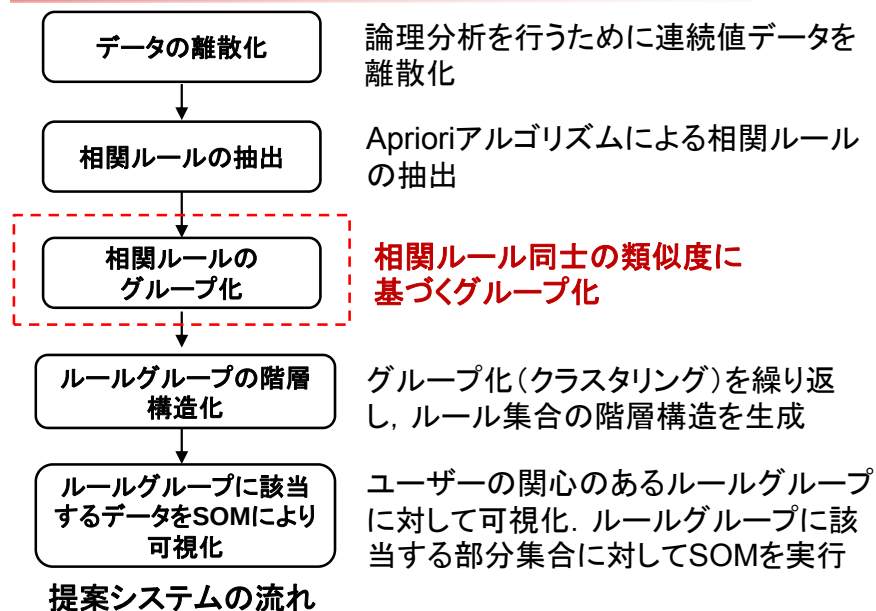
論理分析に基づく分析アプローチ



再構造化を実現する際のポイント

- ・ 多粒度な可視化/分析を実現するためデータ集合を階層構造(木構造)で表現
- ・ 集合(各ノード)に客観的な共通性を持たせ意味解釈を容易にする

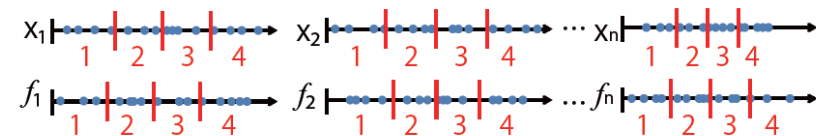
提案する分析支援システム(1)



提案する分析支援システム(2)

Step1 非劣解集合の離散化

方法と分割数を決定し各変数, 各目的関数に対してそれぞれ離散化



Step2 関連ルールの抽出

離散化したデータからルールを抽出

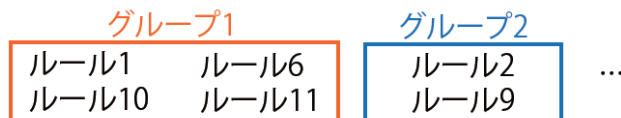
- ルール1: x_1 が1かつ x_4 が3ならば f_1 が4
- ルール2: x_5 が2ならば x_3 が2
- ⋮

提案する分析支援システム(3)

Step3 関連ルールの分析・グループ化

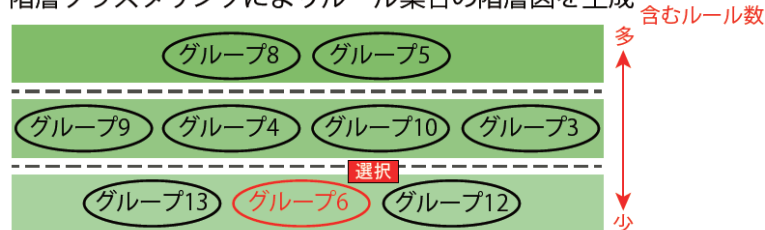
- 抽出したルールに対して, 相関係数を求める等の分析
- 類似するルールごとにグループ化

ルールが複数のグループと共通がある場合は複数のグループに所属



Step4 階層構造化

階層クラスタリングによりルール集合の階層図を生成



提案する分析支援システム(4)

Step5 可視化/分析

選択した任意の階層の任意のグループ (ルール集合) に該当するデータをSOM等を利用して可視化/分析

共通の関連ルールに該当するデータ集合であるため可視化結果の意味解釈や分析が容易

期待される結果

- 非劣解に含まれる傾向(特徴)を客観的かつ網羅的に抽出
- 階層構造化されているため多粒度に対応した分析が可能
- ノードごとに関連ルールの共通部分があるため意味解釈が容易
- 関心のある共通性を持つノードを効率よく分析可能

■ 相関ルール結果に基づく(木)構造化手順(1)

- **Step1**
 - Extracting the association rules from NDSs
- **Step2**
 - Sorting out every discrete-variable value and discrete-objective value contained within extracted association rules.
- **Step3**
 - Searching the extracted association rules which have the same discrete values at antecedent or consequent for those of Step2.
- **Step4**
 - Hierarchizing group sets of Step3 based on inclusion relations between combinations of discrete-variable and discrete-objective values.

25

■ 相関ルール結果に基づく(木)構造化手順(2)

- **Step1**
 - Extracting association rules from NDSs
- **Step2** Step1: Detection of all appearance parameters
 - Sorting out every discrete-variable value and discrete-objective value contained within extracted association rules.
- **Step3**
 - Searching the extracted association rules which have the same discrete values at antecedent or consequent for those of Step2.
- **Step4**
 - Hierarchizing group sets of Step3 based on inclusion relations between combinations of discrete-variable and discrete-objective values.

Rule1 A1 and B4 → C2
Rule2 A2 and B4 → D1
Rule3 A2 and C2 → D1
Rule4 A1 and B4 and D1 → C2
Rule5 A2 → D1

➡ A1, A2, B4, C2, D1

A1 means first category of discretized variable A and B4 also means forth category of discretized variable B

26

■ 相関ルール結果に基づく(木)構造化手順(3)

- **Step1**
 - Extracting the association rules from NDSs
- **Step2**
 - Sorting out every discrete-variable value and discrete-objective value contained within extracted association rules.

• Step2: Detection of all combination

A1, A2, B4, C2 and D1

1	2	3	4	5
A1	A1A2 A1B4 A1C2 A1D1	A1A2B4 A1A2C2 A1A2D1 A1B4C2 A1B4D1 A1C2D1	A1A2B4C2 A1A2B4D1 A1B4C2D1	A1A2B4C2D1
A2	A2B4 A2C2 A2D1	A2B4C2 A2B4D1 A2C2D1	A2B4C2D1	
B4	B4C2 B4D1	B4C2D1		
C2	C2D1			
D1				

27

■ 相関ルール結果に基づく(木)構造化手順(4)

Step3: Grouping Rule

(the assignment of Rule of Step1 to combinations of Step2)

A1 Rule1,4	A1B4 Rule1,4	A1C2 Rule1,4	A1D1 Rule4	A1B4C2 Rule1,4	A1B4D1 Rule4	A1B4C2D1 Rule4
A2 Rule2,3,5	A2B4 Rule2	A2C2 Rule3	A2D1 Rule2,5	A2B4C2 Rule2	A2C2D1 Rule3	
B4 Rule1,2,4	B4C2 Rule1,4	B4D1 Rule2,4		B4C2D1 Rule4		
C2 Rule1,3,4	C2D1 Rule3,4					
D1 Rule2,3,4,5						

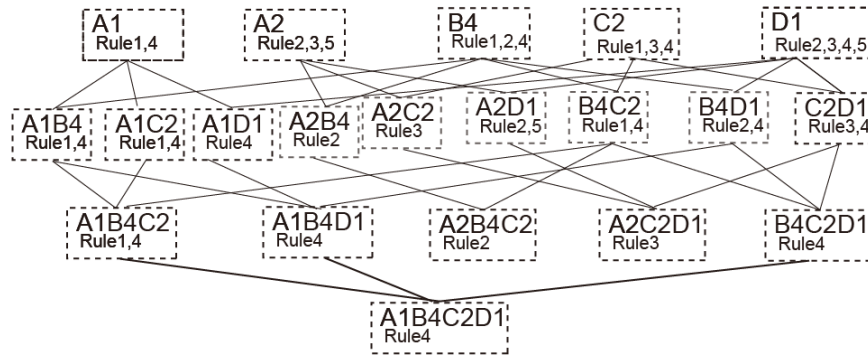
Rule1 A1 and B4 → C2
Rule2 A2 and B4 → D1
Rule3 A2 and C2 → D1
Rule4 A1 and B4 and D1 → C2
Rule5 A2 → D1

- **Step3**
 - Searching the extracted association rules which have the same discrete values at antecedent or consequent for those of Step2.

28

相関ルール結果に基づく(木)構造化手順(5)

Step4: Hierarchization of group

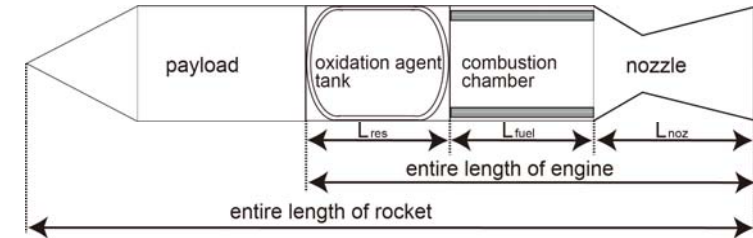


Step4

- Hierarchizing group sets of Step3 based on inclusion relations between combinations of parameters.

29

The concept design problem of hybrid rocket engine



- HRE separately stores two different types of thrust propellant unlike usual rockets.
- Two-objectives and six-design variables

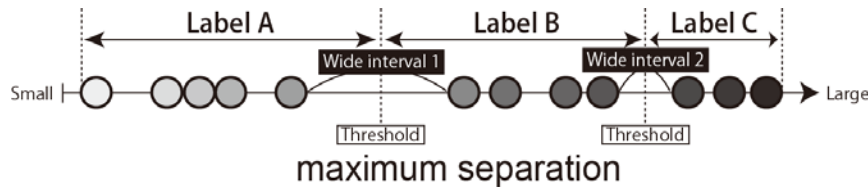
The objectives of HRE

Minimize M_{tot}
Initial total working weight [kg]
Maximize H_{max}
Highest attainment altitude [km]

Design variable	Range of design
Oxidant flow rate [kg/sec]	$1.0 \leq \dot{m}_{oxi} \leq 30.0$
Length of fuel room [m]	$1.0 \leq L_{fuel} \leq 10.0$
Initial port radius [mm]	$1.0 \leq r_{port} \leq 200.0$
Combustion time [sec]	$15.0 \leq t_{burn} \leq 35.0$
Fuel room pressure [MPa]	$3.0 \leq P_{ch} \leq 4.0$
Open area ratio [-]	$5.0 \leq \epsilon \leq 7.0$

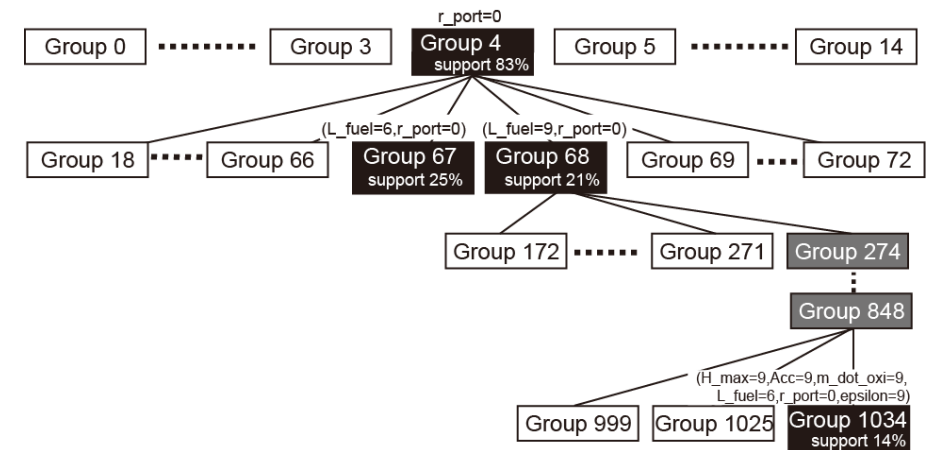
Numerical experiment

- 504 non-dominated solutions (NDSs) obtained by EMO
- All continuous attributes of NDSs were discretized into ten interval.



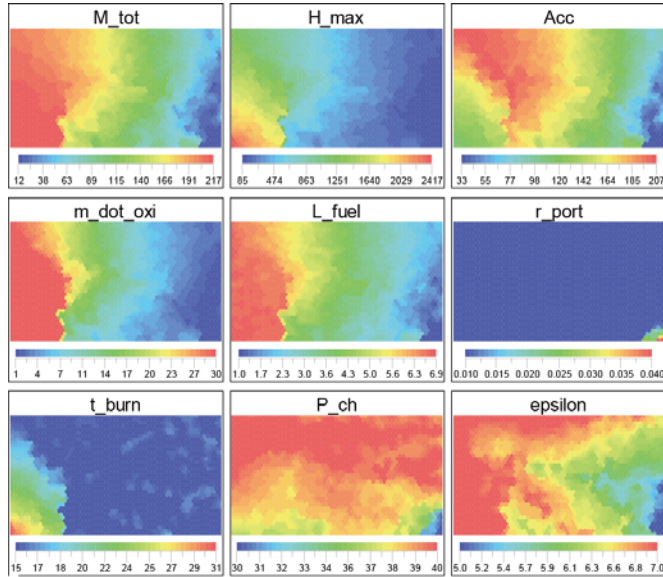
- Minimum support rating and minimum confidence rating were over 0.1 and 0.9

The hierarchical grouping of the proposed system



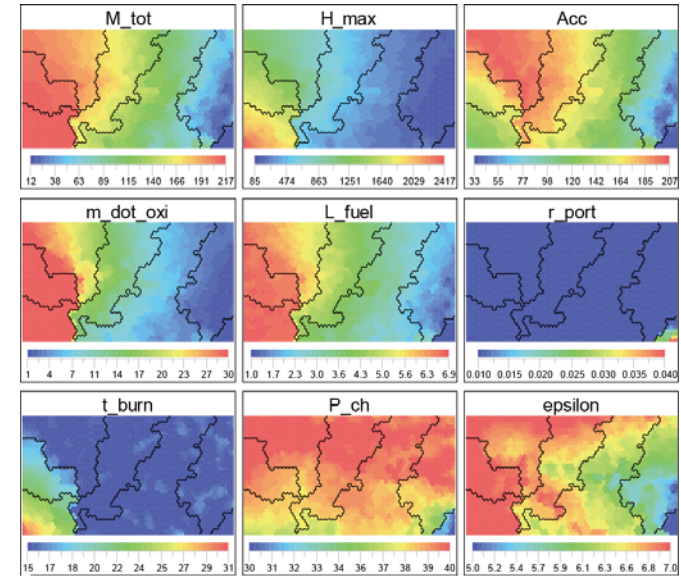
1171 association rules
1111 groups of association rules

SOM map of the whole NDSs



33

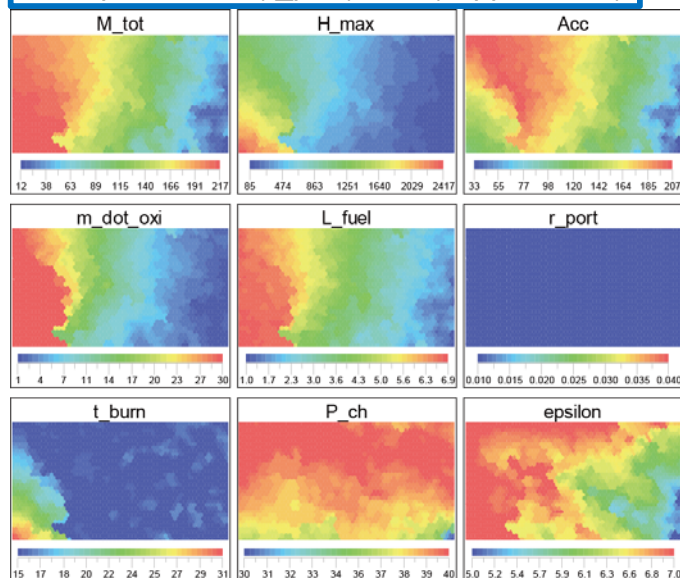
SOM map of the whole NDSs



34

SOM map of Group4 (Top layer group)

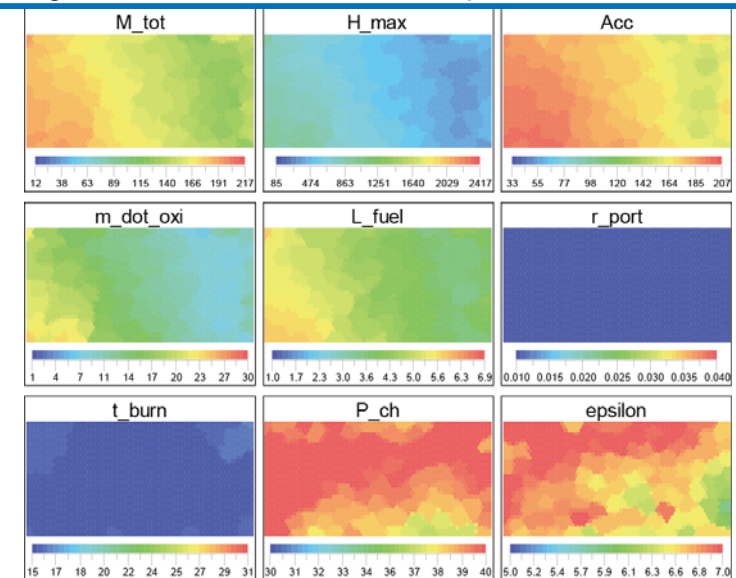
Initial port radius (r_{port}) is 0. (support 83%)



35

SOM map of group 67 (Medium layer group)

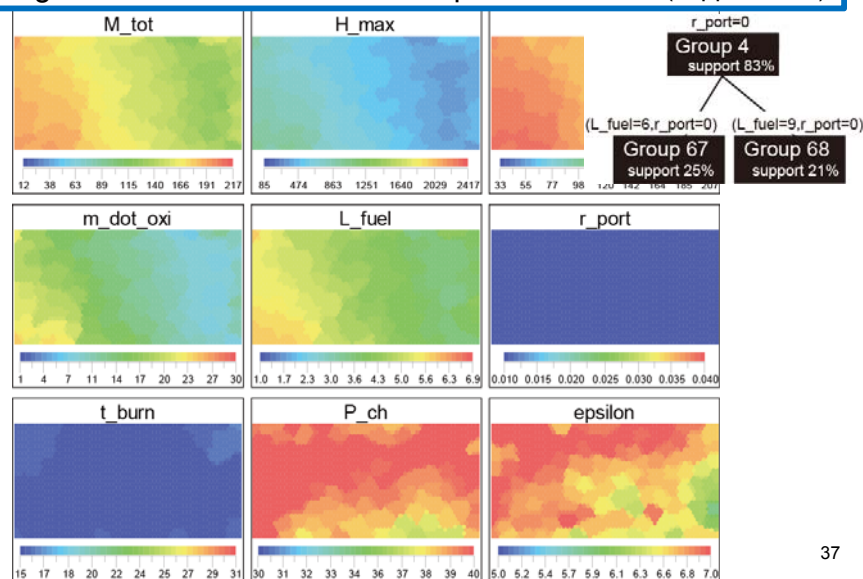
Length of fuel room is 6 and initial port radius is 0. (support 25%)



36

SOM map of group 67 (Medium layer group)

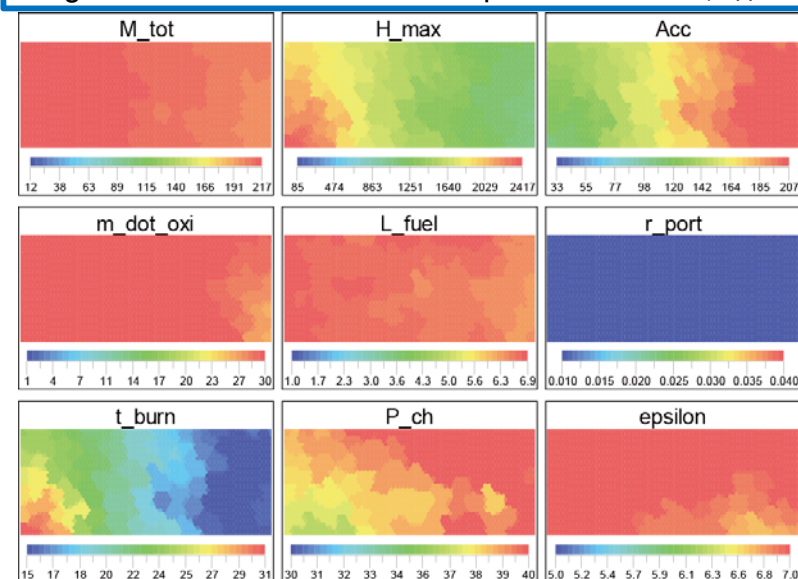
Length of fuel room is 6 and initial port radius is 0.(support 25%)



37

SOM map of group 68 (Medium layer group)

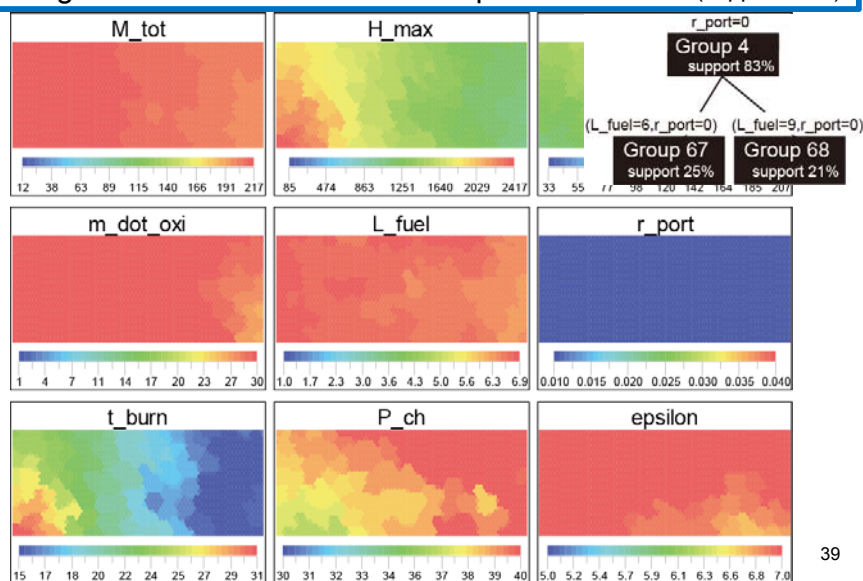
Length of fuel room is 9 and initial port radius is 0. (support 21%)



38

SOM map of group 68 (Medium layer group)

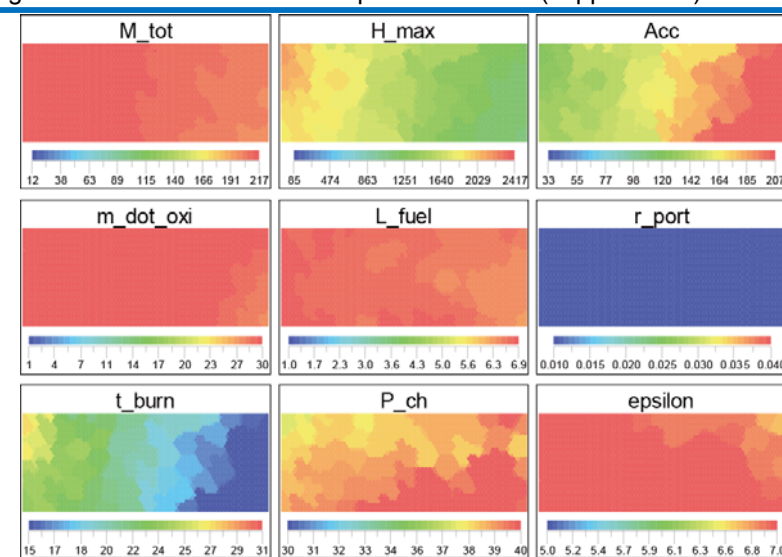
Length of fuel room is 9 and initial port radius is 0. (support 21%)



39

SOM map of group 1034

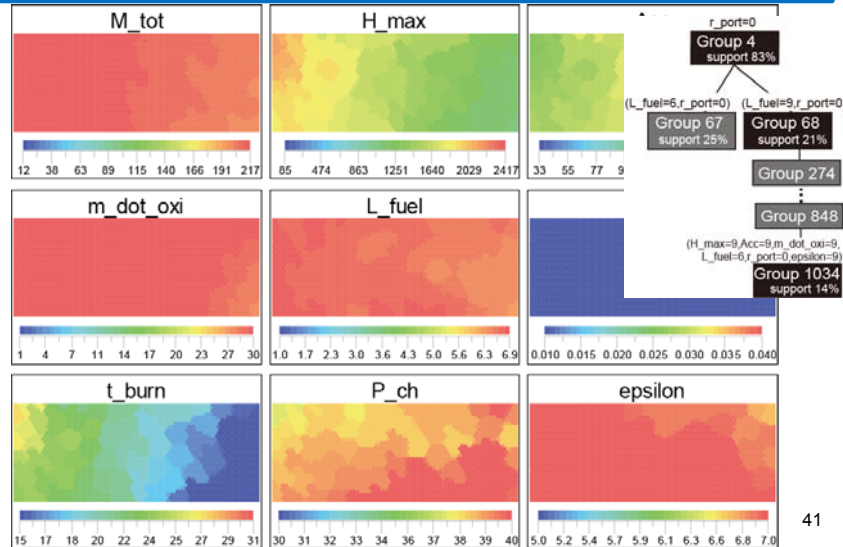
Initial total working weight is 9, oxidant flow rate is 9, open area ratio is 9, length of fuel room is 9 and initial port radius is 0. (support 14%)



40

SOM map of group 1034

Initial total working weight is 9, oxidant flow rate is 9, open area ratio is 9, length of fuel room is 9 and initial port radius is 0. (support 14%)



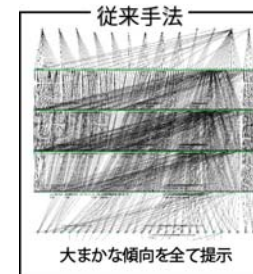
オンデマンド対応へ

問題点

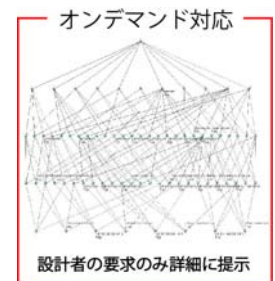
- 設計者が欲しい情報が必ずしも相関ルールとして抽出されなかった場合に情報提供できない



事前に設計者の要求を指定してもらい、その要求に関連する情報について徹底してルール抽出を行う



オンデマンド対応



まとめ

- 非劣解集合分析の有用性, 困難性について考察
 - 非劣解集合に含まれる膨大な情報量をどのように設計者に分かりやすく提示するか

相関ルール分析に基づく分析アプローチ

- 相関ルールにより抽出された情報を分かりやすく再構造化して提示
 - 多粒度対応
 - 客観性・意味解釈のしやすさに優れる
 - オンデマンド対応化により要求された傾向分析をより確実に提示可能