

IHI

JGM1-090288

第28回 日本機械学会 設計研究会 発表

統合的設計管理手法 (TDM) の構築と適用事例の紹介

「セット・ベースド・デザイン」と

「モデル・ベースド・リスクマネジメント」

2009.5.20

株式会社 IHI

航空宇宙事業本部

宇宙開発事業推進部 プロジェクトグループ 森 初男

技術開発センター 宇宙技術グループ 吳 宏堯

1. 統合的設計管理手法(TDM) 概要

2つのコンセプト

(1) セット・ベースド・デザイン(SBD)

(2) モデル・ベースド・リスクマネジメント(MBR)

2. ロケットエンジンを題材した手順説明

3. 他手法との比較

4. TDMの適用効果が高い領域

5. 適用に必要な準備

6. 形態設計への発展

7. これまでの手応えと今後の研究課題

1 . TDM概要

1.0 Introduction

理想(究極)のトレードオフ設計とは・・・

【確実な方法】

考えられる全ての実物の製作・試験し, この中から最善の設計解を設計関係者が選択する設計



しかし・・・

【問題点】

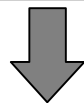
有限時間, 有限コスト内で, 全ての実物を製作・評価することは, 現実には実施不可能。



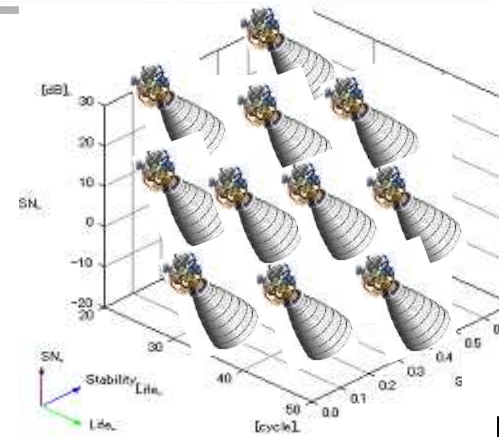
ではどうする・・・

【Answer】

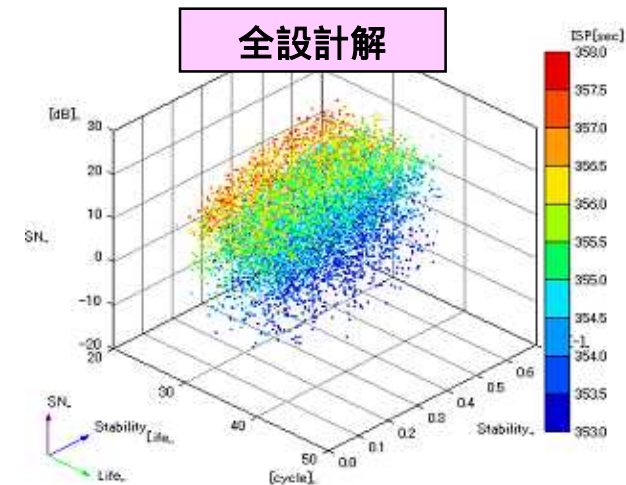
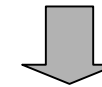
シミュレーション技術を最大限活用し, 何とかして全設計解を求めることを考える。その代わり個々の精度が下がることは許容する。



「TDM / セット・ベースド・デザイン」コンセプト



確実な
トレードオフ設計手法



TDM / セットベースドデザイン

1.0 Introduction

全設計解から、どうやって、最終設計解を選ぶ？

【案】

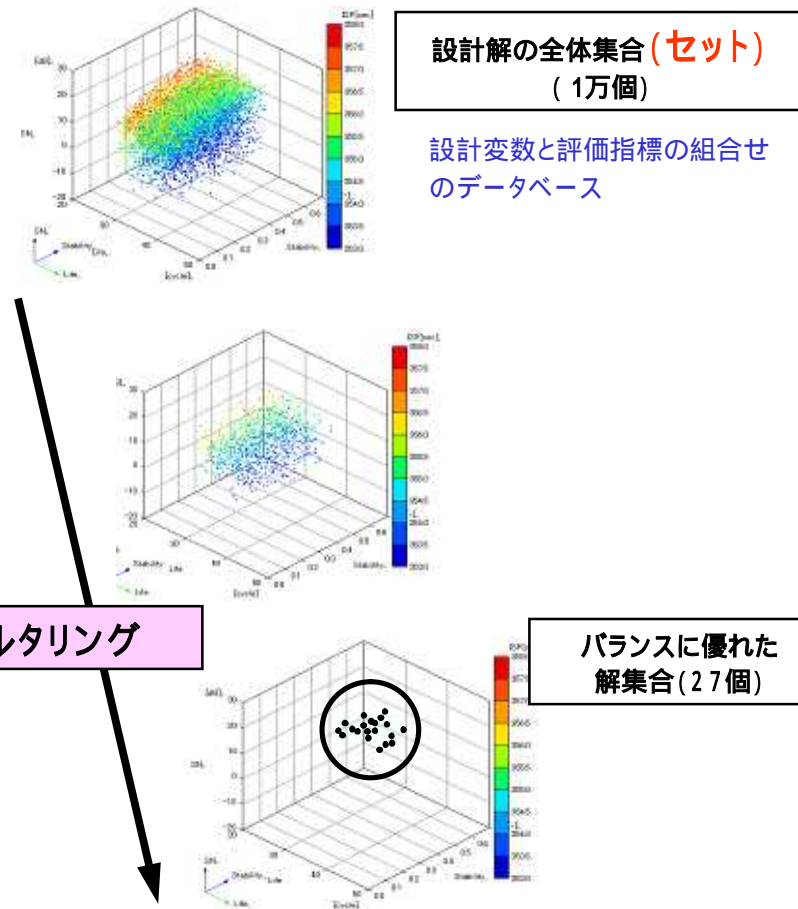
- ・1個1個設計者が人が評価 大変そう
- ・よくある最適化手法 難しそう



TDMのAnswer

【Answer】

フィルタリング 手法を使う。



1.0 Introduction

TDMの特徴をまとめると・・・

特徴 : TDMは、設計とリスク管理の2本柱

統合的設計手法は数多く提案されているが、リスクを統合する考え方はTDMの特徴。

特徴 : 最初に設計解全体集合を計算

最初は設計条件(要求・制約)の成立性を判定しないで、とにかく解を求める。

特徴 : フィルタリングで最終設計解を選択

可視化しながら最終設計解の合意形成するフィルタリング手法はTDMの特徴
これにより多目的トレードオフが可能になる。(性能・コスト・ロバスト)。

特徴 : 数学モデルの自信度(曖昧さ)を起点にリスク管理

こうすることで、設計作業が先に進める。

システム設計技術に関する要望

複数の設計変数(設計入力)を持つシステムで、評価指標(設計出力)である性能・コスト・ロバスト性のバランスをとる多目的トレードオフ設計をしたい。

計算時間がかかる大規模シミュレーションでも、できるだけ少ない計算回数でロバスト設計をしたい。

設計と連携したリスク管理をしたい。

開発試験は最小限にしたい。

設計基盤技術に関する要望

設計空間全体から設計解を探したい。(経験に頼ったピンポイント設計から脱却したい)

要求条件や制約条件の変更が生じた時の後戻りを最小にしたい。

設計自由度が高い設計初期段階から適用したい。

設計解の探索は短時間で行いたい。

設計手法は分かりやすい方が良い。

これらの実現を目指し、
設計とリスク管理を統合した設計手法
の構築を行う。

設計知識に関する要望

その設計解を選択した根拠とリスクを設計者と顧客で共有したい(設計透明性の確保したい)

ナレッジ(形式知)を残したい。

TDMの概要

TDM(統合的設計管理手法)は、高信頼設計と現場の要望を具体化した方法です。

- ・多目的トレードオフ
- ・リスク管理
- ・設計透明性
- ・ロバスト設計
- ・実用性

➤ 提案する統合的設計管理手法(TDM: Total Design Management)の軸は2つ。

セット・ベースド・デザイン(SBD)

モデル・ベースド・リスクマネジメント(MBR)

➤ 本手法は、一人の設計者がボタン一つで設計できる自動設計ツールを目指したものでなく、プロジェクト全体の円滑な意思決定を支援する設計支援システムに近いものである。

➤ 本手法は、設計解の最適性の厳密な数学的証明より、顧客と合意しながらバランスの良い設計解の中りを早期に得ることを優先した方法。

2つのコンセプト

「セット・ベースド・デザイン」と「モデル・ベースド・リスクマネジメント」



セット・ベースド・デザイン(SBD)

設計変数と評価指標の両方を属性値に持つ設計解の全体集合(セット)の中から、望ましい設計解を設計者と顧客の意志で選択する設計手法

モデル・ベースド・リスクマネジメント(MBR)

数学モデルの式・係数・入力値の技術的理解の低さをリスクとして識別し、「技術理解度×影響度」で定義されたリスクの大きさを許容可能なレベル以下にするリスク低減策を実施するリスク管理手法

数学モデル

設計変数を評価指標に変換する数式全般
(例) 物理方程式・CAEコード・実験式・文献式・経験式...

TDMの2つのコンセプト

「セット・ベースド・デザイン」と「モデル・ベースド・リスクマネジメント」

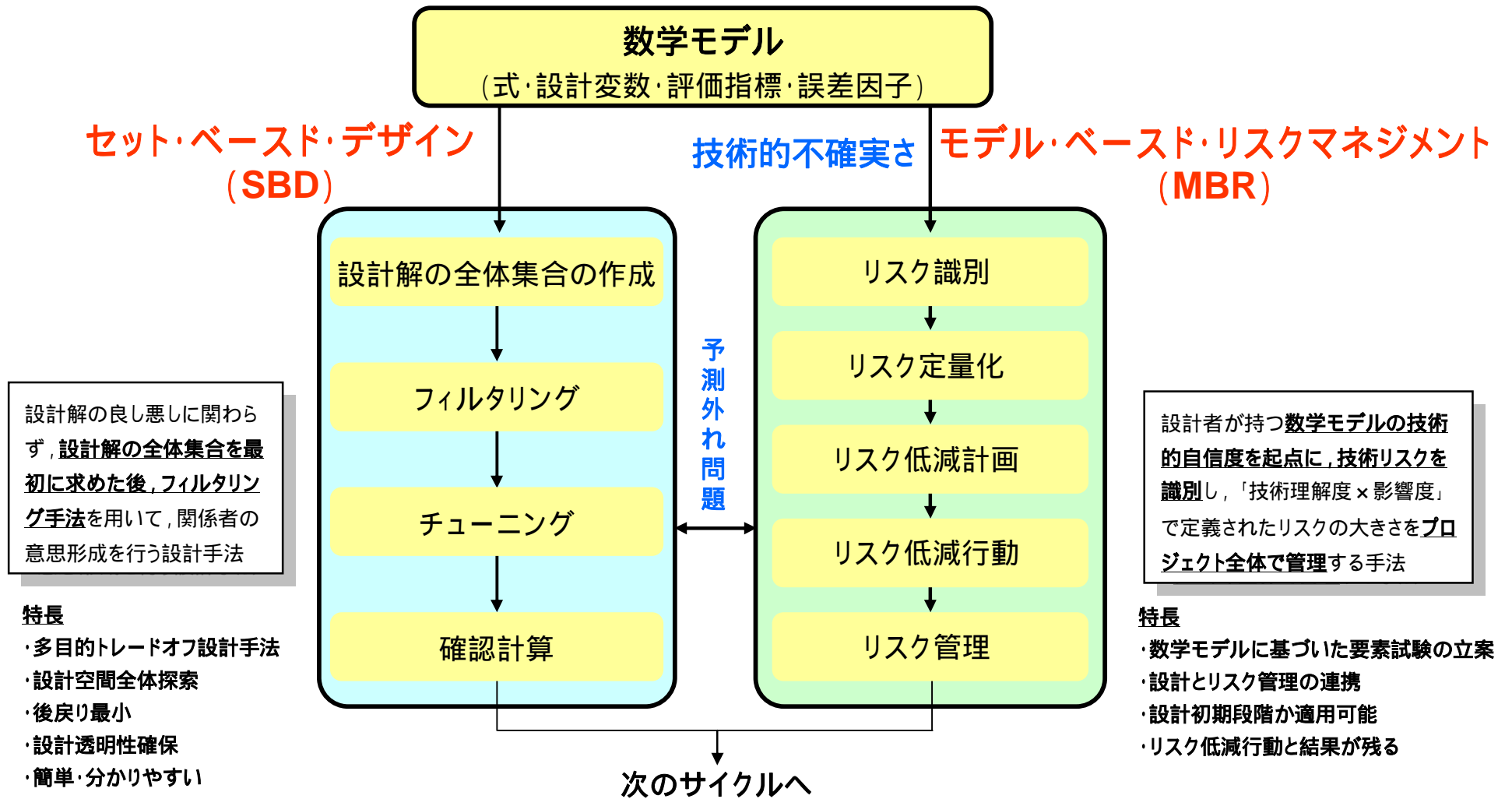


図 統合的設計管理手法 (TDM) 概観

セット・ベースド・デザイン(SBD)

はレビューポイント

IHI

図面寸法など

性能・コスト・ロバスト性など

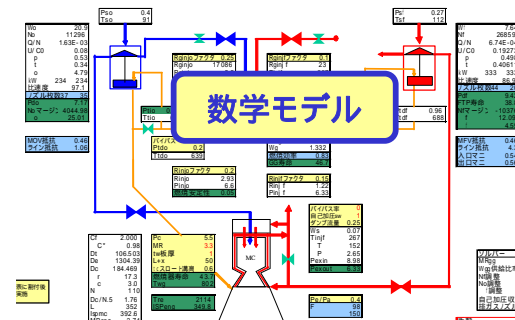
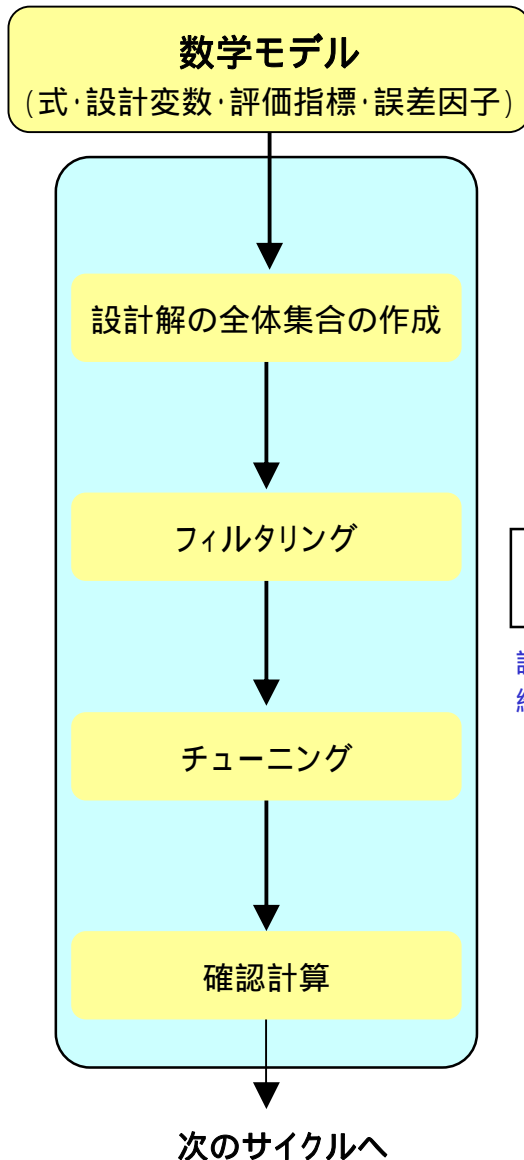
- ・ 設計変数を評価指標に変換する数式全般
- ・ とにかく作る。y=ax+b でもよい。
専門家の技術を取り入れる
- ・ 曖昧さは、リスクに登録(次頁)

設計変数(と誤差因子)の範囲を設定

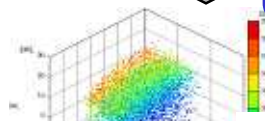
- ・ 設計変数に一様乱数を入力
+ モンテカルロシミュレーション
- ・ 応答曲面利用可

要求条件・制約条件に基づいて、
設計者と顧客がフィルタリング
条件を設定(合意形成)

- ・ 残った設計解から、
設計者がチューニング
確認計算(再現性確認)
結果をレビュー



設計解の全体集合の作成



設計解の全体集合(セット)
(1万個)

設計変数と評価指標の
組合せのデータベース

フィルタリング

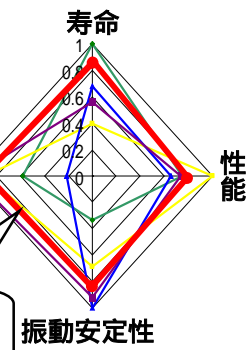
バランスに優れた
解集合(27個)

チューニング

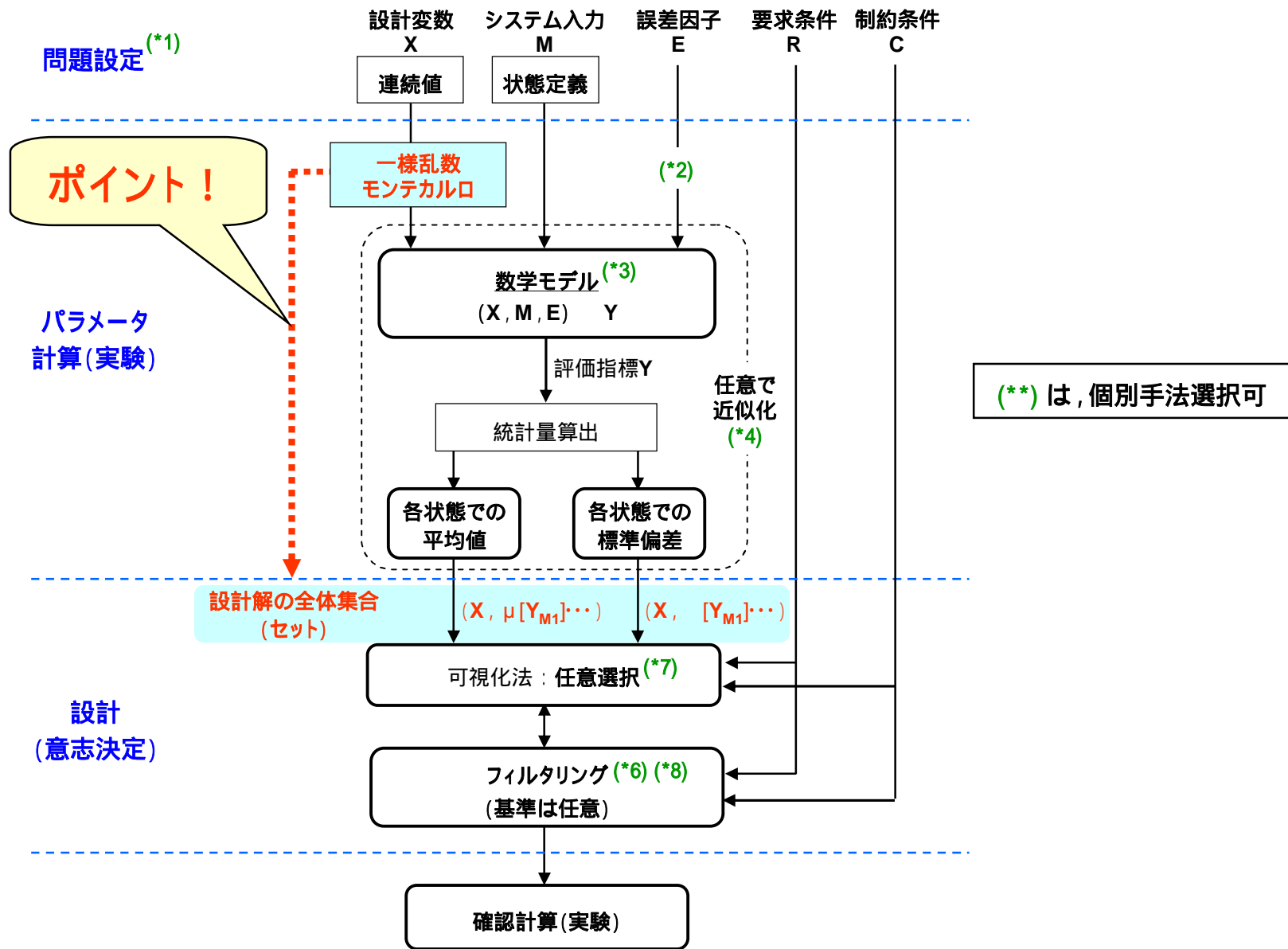


最終設計解

バランスの取れた
最終設計解



セット・ベースド・デザイン(SBD) フロー



セット・ベースド・デザイン(SBD) メリット

設計解の良し悪しに関わらず、**設計解の全情報を事前に設計者や顧客に与える**ことで、
両者の意志決定を最大限に尊重する設計手法

多目的トレードオフ設計

フィルタリング手法を採用することで、複数の設計変数と評価指標を同時に評価・決定できる。
評価指標の数に制限はない。(要望 の実現)

設計空間全体探索

最初に要求条件や制約条件の成立性の判定をせずに全ての設計解を求めてデータベース化することで、
設計空間全体の探索ができる。(要望 の実現)

後戻り最小

要求条件や制約条件の変更が生じたときには、数学モデルの再計算は必要なく、フィルタリングからやり直せば良いので、
設計作業の後戻りが少ない。(要望 の実現)

設計透明性

フィルタリングの検索条件は、最終設計解を選択した設計思想そのものであり、設計解の絞り込みに使用した検索条件を
順に示すことで、設計透明性が確保できる。(要望 の実現)

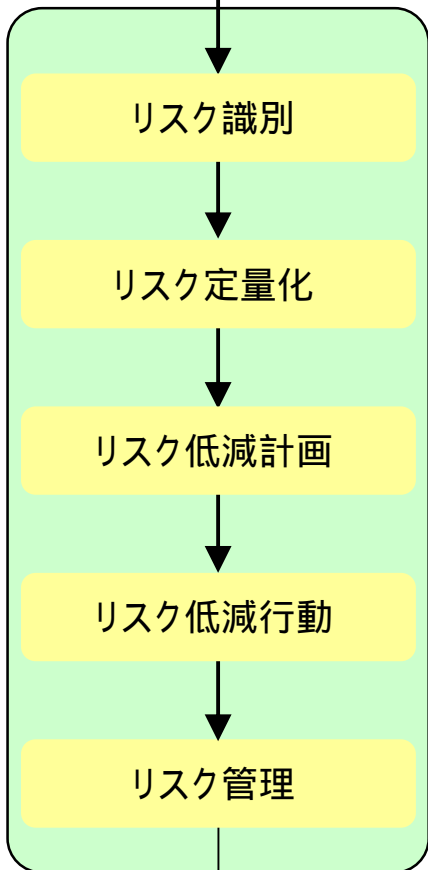
簡単・分かりやすい

設計解の探索に高度な数学計算や最適化アルゴリズムを必要とせず、設計者の思考に沿った直感的に分かりやすい手順
なので誰でも実施可能。EXCEL®のオートフィルタ機能が使用できるので、探索時間は短い。(要望 の実現)

モデル・ベースド・リスクマネジメント (MBR)

数学モデル
(式・設計変数・評価指標・誤差因子)

技術的不確実さ



次のサイクルへ

$$\Delta P = 0.299246 + 1.578061 - 0.807 - 1.9491 + 1.080442 + 16.83318 + -0.05$$

$$\frac{\partial \Delta Td}{\partial Texin} + \frac{\partial \Delta Ta}{\partial Texin} + \frac{\partial \Delta Td}{\partial tw} + \frac{\partial \Delta Td}{\partial \mu}$$

リスク識別



・数学モデルの式・係数の曖昧さを設計者が、リスク識別・登録

リスク定量化

		技術的理解度				
		極低	低	中	高	
発	大	8	64	32	16	8

リスクの大きさ = 技術理解度 × 影響度

・リスクの大きさを、
技術理解度 × 影響度
で定量化

リスク低減計画

リスクID	リスク名	リスク発生	リスク発生
1	設計ミス	設計ミス	設計ミス
2	材料欠陥	材料欠陥	材料欠陥
3	製造ミス	製造ミス	製造ミス
4	検査ミス	検査ミス	検査ミス
5	納品遅延	納品遅延	納品遅延
6	コスト超過	コスト超過	コスト超過
7	品質低下	品質低下	品質低下
8	顧客満足度の低下	顧客満足度の低下	顧客満足度の低下
9	環境負荷の増加	環境負荷の増加	環境負荷の増加
10	安全上のリスク	安全上のリスク	安全上のリスク



リスク管理表

リスクID	リスク名	リスク発生	リスク発生	リスク発生	リスク発生
1	設計ミス	設計ミス	設計ミス	設計ミス	設計ミス
2	材料欠陥	材料欠陥	材料欠陥	材料欠陥	材料欠陥
3	製造ミス	製造ミス	製造ミス	製造ミス	製造ミス
4	検査ミス	検査ミス	検査ミス	検査ミス	検査ミス
5	納品遅延	納品遅延	納品遅延	納品遅延	納品遅延
6	コスト超過	コスト超過	コスト超過	コスト超過	コスト超過
7	品質低下	品質低下	品質低下	品質低下	品質低下
8	顧客満足度の低下	顧客満足度の低下	顧客満足度の低下	顧客満足度の低下	顧客満足度の低下
9	環境負荷の増加	環境負荷の増加	環境負荷の増加	環境負荷の増加	環境負荷の増加
10	安全上のリスク	安全上のリスク	安全上のリスク	安全上のリスク	安全上のリスク

・納入までに、リスクが許容レベル以下となるような低減計画を、プロジェクト全体で立案。
・追加試験提案の根拠になる。

TDM のリスク定量化

- 発生可能性と影響度の積で考える方法が一般的であるが、これから開発を行うものに対して、発生確率を議論することは適当ではないと考え、設計者の自信を定量的に表す方法として、技術的理解度を導入。
- 技術的理解度：主観的評価対象であるが、内部構造を持たせ、なるべく一般化する。

$$\text{技術理解度} = (\text{現象の理解度}) \times (\text{環境条件の理解度}) \times (\text{実証度})$$

現象の理解度

格付け	メカニズム・支配的パラメータの把握 (環境条件の把握含む)	スコア
a	メカニズム・支配的パラメータともに把握できている。 (モデル化が可能なレベル)	1
b	モデル化まではできないが、根拠に基づき定性的なメカニズムが把握できている。	2
c	把握できていない ただし、過去号機の類似性、文献などから仕様を設定。	4
d	把握できていない 仕様設定の根拠なし	8

環境条件の理解度

格付け	内容	スコア
a	十分なデータ・根拠に基づき設定している。	1
b	データ・根拠ともに十分でなく、類似性、文献などから類推により環境条件を設定している	2
c	理解できていない。根拠なく環境条件を設定。	4

実証度

格付け	実証度	スコア
a	限界の実証	0.5
b	QTレベルの実証	1
c	なし	1.5

技術的理解度のポイント

	トータルスコア	ポイント
極低	24以上	8 POINT
低	12 ~ 18	4 POINT
中	4 ~ 8	2 POINT
高	2以下	1 POINT

発生時の影響

格付け	発生時の影響		リスクポイント
	ミッションへの影響	開発への影響	
大	即ミッション不達成	2年以上の遅延	8
中	コンポーネントの機能損失など、場合によってはミッションの不達成に繋がる可能性がある。	半年の遅延	4
小	コンポーネントの機能損失に繋がるがミッション達成への影響はない。	2ヶ月の遅延	2
極小	ミッション不達成、コンポーネントの機能損失の可能性は極めて小さい	ほとんど影響なし	1

TDMリスク定量化の変遷： 発生可能性 設計自信度 技術理解度

TDM のリスクマトリクス

- リスクの大きさは、技術理解度と発生時の影響で決まる
- 色によりおよその目安がつくようにした。

		技術的理解度				
		極低	低	中	高	
		8	4	2	1	
発生時の影響	大	8	64	32	16	8
	中	4	32	16	8	4
	小	2	16	8	4	2
	極小	1	8	4	2	1

レベル	分類	
危険	大	慎重な対策が必要
注意	中	継続的な対策が必要
許容可能	小	対策不要

赤い部分を放置すると大変なことになる・・・かもしれない

対処方針

対処方針	内容	例
除去	原因をなくす	相変化 Pc超臨界運用
安全化	発現しないように措置を施す	高周波 アコースティックキャビティ装着
回避	マージンをとる	チャグ インジェクター圧損を大きくとる

除去

リスクマトリクスを適用除外にする

		技術的理解度				
		極低	低	中	高	
		8	4	2	1	
発生時の影響	大	8	64	32	16	8
	中	4	32	16	8	4
	小	2	16	8	4	2
	極小	1	8	4	2	1

回避

理解度を上げて確実なマージンを確保

安全化 発生時の影響を減らす

設計者が持つ**技術的曖昧さを起点に数学モデルに基づいた技術リスクを識別し、**
プロジェクト全体で管理する手法

数学モデルに基づいた要素試験

リスク低減計画に基づいて要素試験から得られるデータは、数学モデルの反映先が明確なので、要素試験の重要度が数学モデルに基づいて技術的に決められる。(1.2項 の実現)

設計とリスク管理の連携

設計作業とオンラインでリスクが識別されるので漏れが出にくく、
リスク識別のためだけの別の作業も発生しない。(1.2項 の実現)

設計初期段階からSBDが始められる

設計初期段階の数学モデルの技術的不確実さがあっても、MBRのリスクに登録することで、
設計(SBD)が始められる。(1.2項 の実現)

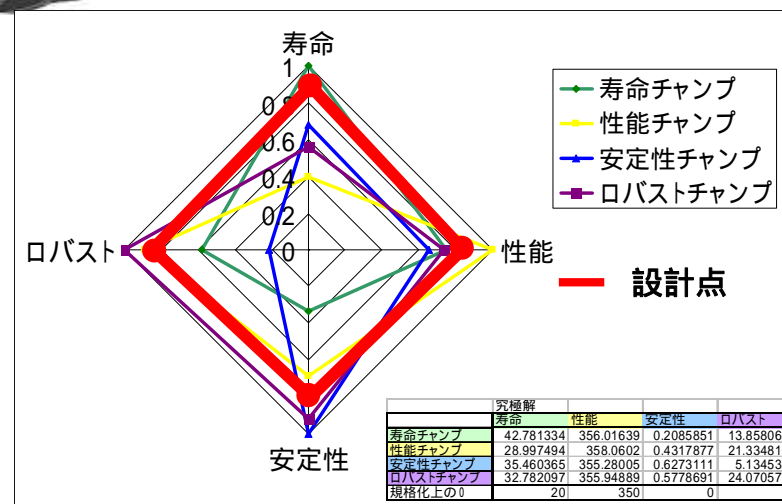
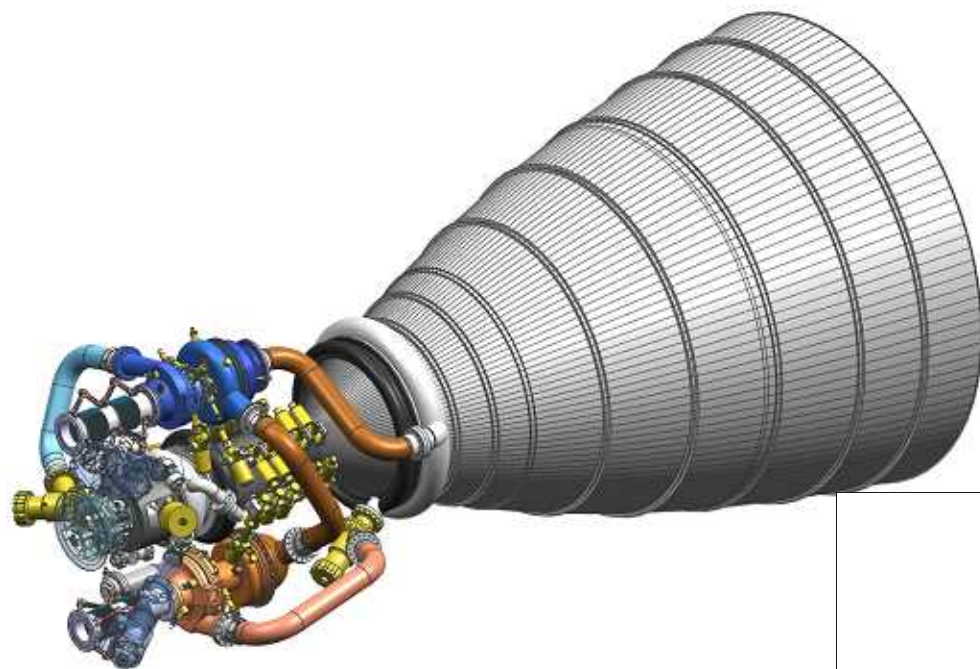
リスク低減行動と結果が形式知になる

リスクマトリックスに記録されたリスク、低減計画および結果は技術的位置付けが明確なので、
顧客との共有や社内ナレッジ化に活用できる。(1.2項 の実現)

2. ロケットエンジンを題材にした手順説明

本手法による設計結果

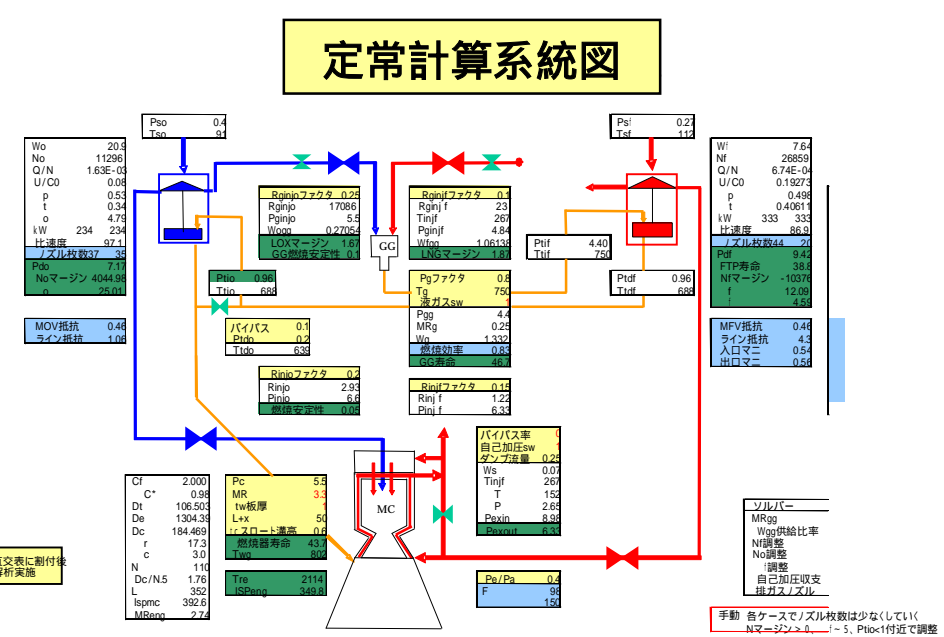
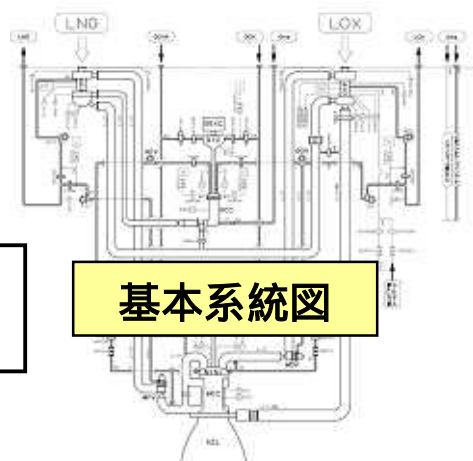
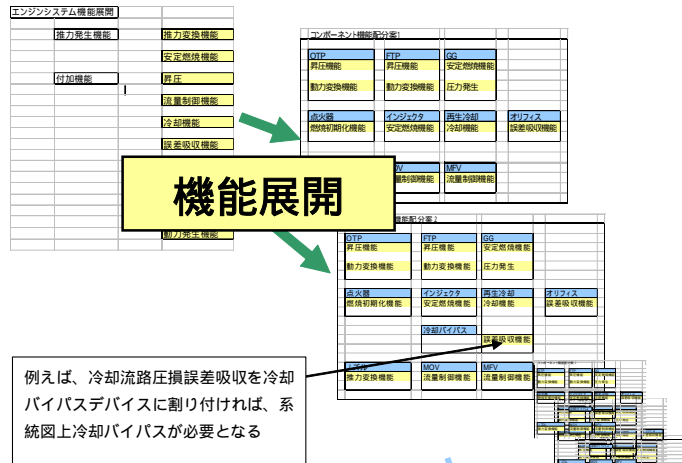
ロケット2段に用いられるLOX/LNGを推進薬とする推力10トン級再生冷却エンジン



バランスに優れた設計点を選択することができた

ステップ1: システム分析

➤ 今回は、ロケット燃焼時間の98%を占める定常運転での設計を実施した。

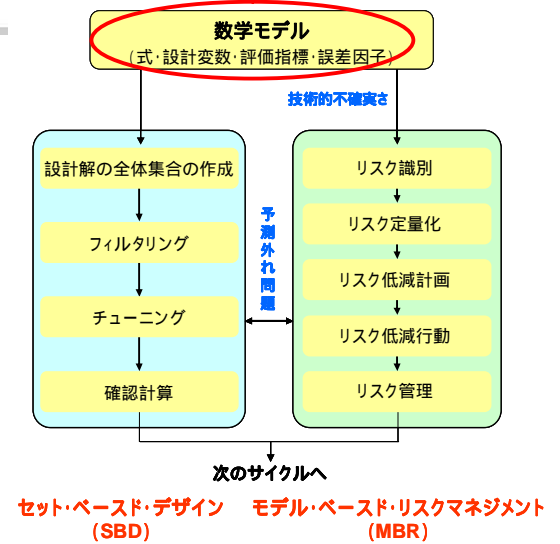


機能を機器に割り付け

設計のベースラインができた

ステップ2：評価指標と設計変数の明確化

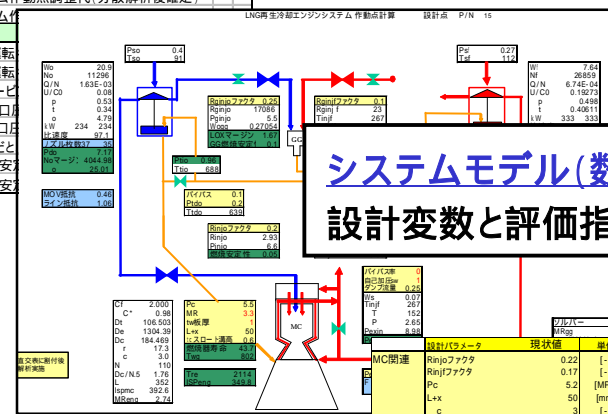
- 評価指標と設計変数を明確にする。
- 評価指標から考えることが重要。



評価指標	単位	クリテリア値	評価特性	内容
寿命関連				
燃焼器寿命	[回]	20	望大	作動保障回数
FTP寿命	[回]	20	望大	作動保障回数
性能関連				
ISPena	[sec]	340	望大	ISP3.5 0sec以上目標
燃焼安定性				
				安定性判別式非負
				安定性判別式非負
				システム作動点調整代(分散解析後確定)
				システム作
				LE5B運転
				FTPタービ
				OTP出口圧
				1以上だと
				高周波安
				高周波安

評価指標
要求される機能・故障モードを定量的に評価できる指標。

考え方の流れ



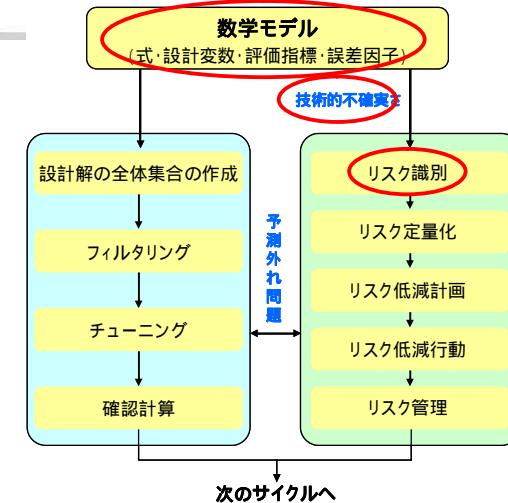
システムモデル(数学モデル)
設計変数と評価指標の関係式群

設計変数	現状値	単位	範囲	水準1	水準2	水準3	水準4	内容
MC関連								
Rinj1ファクタ	0.22	[-]	0.2-0.3	0.2	0.25	0.3		インジェクタ圧損をP _{inj} の割合にすることを設定する
Rinj2ファクタ	0.17	[-]	0.15-0.25	0.15	0.2	0.25		インジェクタ圧損をP _{inj} の割合にすることを設定する
Pc	5.2	[MPa]	4.5-5.5	4.5	5	5.5		燃焼圧
Lxx	50	[mm]	0-200	0	150	300		再生冷却ガス温度安定化
t	3	[-]	2.5-3.5	2.5	3	3.5		収縮比
Tinj	550	[K]	550-650	550	600	650		燃焼室内燃焼温度
排ガス								
P _{inj} 1	0.25	[MPa]	0.2-0.3	0.2	0.25	0.3		OTPタービン出口圧条件
G/G								
Rinj2ファクタ	0.25	[-]	0.2-0.3	0.2	0.25	0.3		インジェクタ圧損をP _{inj} の割合にすることを設定する
Pgファクタ								
Ta								
ダミー								
ダミー-項1		D1						
ダミー-項2		D2						
予備								
自己加圧スイッチ								
ダンパ流量								
減圧スイッチ								
再生冷却バイパス率								
MR								
Pe/Pa								
OTPバイパス								

設計変数
評価指標を求める数式の引数の中で、要求される機能、性能を満足させるために、設計者が意図的に決定でき、かつシステムに対する影響が大きいもの。残りは固定値となる。

ステップ3：システムモデルの作成

- 各コンポーネント特性は、ポイントを押さえてモデル化すること。
- その上で、状況に応じて応答曲面を作成し、設計効率の向上を図る。
(コンポーネントレベルでは詳細モデルを作るが、システムに引き渡す情報は応答曲面モデルで充分であり凝る必要はない)



数学モデル

$$D = \frac{\pi - \tan^{-1} \sqrt{\Pi^2 - 1}}{\sqrt{\Pi^2 - 1}} - \frac{0.510897}{L^*}$$

$$Pc^2 = \frac{MR}{2(MR + 1)} \left(\frac{1}{\Delta pinjo} + \frac{1}{\Delta pinjf} \right) + \frac{MR}{4Tc} \cdot \frac{\partial Tc}{\partial MR} \left(\frac{1}{\Delta pinjo} - \frac{1}{\Delta pinjf} \right)$$

$$5 \cdot Twg^2 = -0.1314m^2 + 1.6761m - 4.6805 - 0.5344 + 0.0423\epsilon^2 - 0.3203\epsilon + 1.1148 - 0.5344 + \frac{\partial \Delta Td}{\partial tw} \delta tw + \frac{\partial \Delta Td}{\partial \mu} \delta \mu$$

$$\frac{Td}{Tc} \delta Tc + \frac{\partial \Delta Td}{\partial tp} \delta tp + \frac{\partial \Delta Td}{\partial tc} \delta tc$$

**数学モデルで
仮定した部分・自信の無い部分は
リスクとして識別・登録**

- ターボポンプ改修コストモデル**
- ージンを採用したが、設計パラメータの組み合わせ改修の必要が生じる場合がある。その際に、以下の番号が大きいほうから改修を施すリスクを段階的に上げていくことが可能である。この部分は、P/Nごとにあわせこんでいくものとする。
- 軸受DN値 (回転数上限)
軸受変更はロータ系すべてに変更の必要が生じ、ターボポンプ全体に影響があるため、DN値による制限を最優先とする (改修リスク大)
 - FTP インペラ外径 (回転数下限)
FTPのインペラ径変更はポリユートケーシングにとどまらずNo.1オリフィス以下、中間ケー...
 - ...
 - 軸封シールPV値

応答曲面とは、詳細な計算結果を単純な関数(陽関数)で近似したものであり、内部構造までは議論の対象としない。

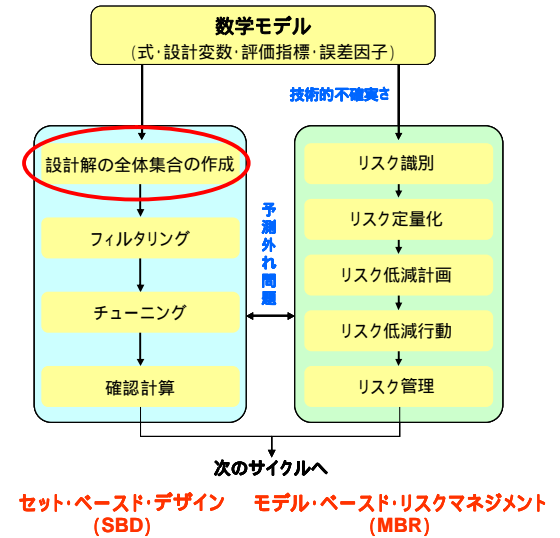
ステップ4：数学モデルの応答曲面化(近似化)のためのサンプル計算

- 設計解の全体集合計算を高速化するため、設計変数と評価指標の関係を応答曲面化(多項式回帰)する。
- そのサンプルデータ取得に、直交表を用いる。
- 今回は、L27直交表を用いて27種類の異なった設計解を求めた。

(入力) 設計圧力・設計推力 (出力) スロート径

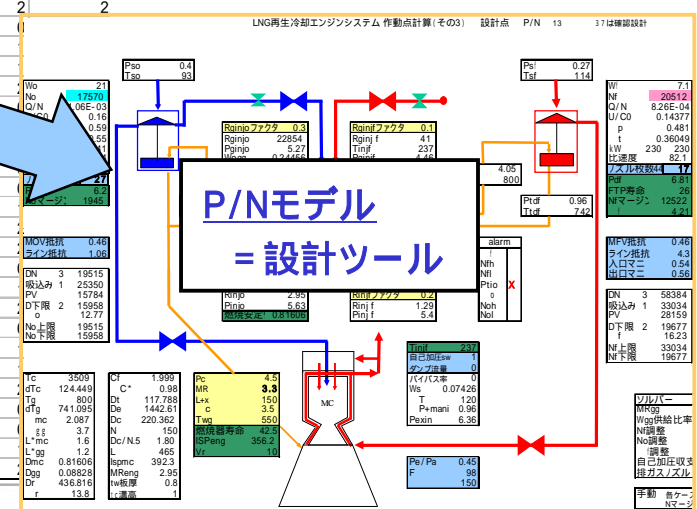
P/N(パーツナンバー)モデル

図面に書ける情報(寸法など)を求める数学モデル。
 一般には、「設計ツール」と呼ばれる数学モデル



No	Rinjoファクタ	Rinjifファクタ	Pc	L+x	c	Twg	Ptdo	Rainjoファクタ	Rainjifファクタ	Pqファクタ	Tq	ダミー項1	ダミー項2
1	0.2	0.15	4.5	0	2.5	550	0.2	0.2	0.1	0.8	700	0	0
2	0.2	0.15	5	150	3	600	0.25	0.2	0.1	0.9	750	1	1
3	0.2	0.15	5.5	300	3.5	650	0.3	0.2	0.1	1	800	2	2
4	0.2	0.2	4.5	150	3	600	0.3	0.25	0.15	0.8	700	2	2
5	0.2	0.2	5	300	3.5	650	0.2	0.25	0.15	0.9	750	1	1
6	0.2	0.2	5.5	0	2.5	550	0.25	0.25	0.15	1	800	1	1
7	0.2	0.25	4.5	300	3.5	650	0.25	0.3	0.2	1	700	1	1
8	0.2	0.25	5	0	2.5	550	0.3	0.3	0.2	1	700	1	1
9	0.2	0.25	5.5	150	3	600	0.2	0.3	0.2	1	700	1	1
10	0.25	0.15	4.5	0	3	650	0.2	0.25	0.2	0.9	700	1	1
11	0.25	0.15	5	150	3.5	550	0.25	0.25	0.2	1	700	1	1
12	0.25	0.15	5.5	300	2.5	600	0.3	0.25	0.2	0.8	750	1	1
13	0.25	0.2	4.5	150	3.5	550	0.3	0.3	0.1	0.9	800	1	1
14	0.25	0.2	5	300	2.5	600	0.2	0.3	0.1	1	700	1	1
15	0.1	0.8	750	1	1	700	1	1	1	700	1	1	
16	0.15	0.9	800	1	1	700	1	1	1	700	1	1	
17	0.15	1	700	1	1	700	1	1	1	700	1	1	
18	0.15	0.8	750	1	1	750	1	1	1	750	1	1	
19	0.15	1	750	1	1	750	1	1	1	750	1	1	
20	0.15	0.8	800	1	1	800	1	1	1	800	1	1	
21	0.15	0.9	700	1	1	700	1	1	1	700	1	1	
22	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
23	0.3	0.2	5	300	3	550	0.2	0.2	0.2	0.8	800	1	1
24	0.3	0.2	5.5	0	3.5	600	0.25	0.2	0.2	0.9	700	1	1
25	0.3	0.25	4.5	300	3	550	0.25	0.25	0.1	1	750	1	1
26	0.3	0.25	5	0	3.5	600	0.3	0.25	0.1	0.8	800	1	1
27	0.3	0.25	5.5	150	2.5	650	0.2	0.25	0.1	0.9	700	1	1

27種類のパーツナンバー(P/N)の図面を作成したことと同等。



ステップ5：ロバスト評価に必要な分散(標準偏差)のサンプル計算

- 評価指標の分散(標準偏差)も, 直交表を用いてサンプル取得を行う。
- 誤差因子を入力のために, P/Nモデルとは入出力が異なる数学モデルを用意する。
- 27種類のエンジンシステムに対して, 製造や性能上の分散を考慮し, 仮想的に多数回試作した。

(入力) スロート径 + 製造誤差 (出力) 発生推力

S/N(シリアルナンバー)モデル

実際に作動した時の機械の状態を求める数学モデル。

一般には, 「シミュレータ」と呼ばれるモデル

項目	タグ	単位	年産個数	分類	分布	3
スロート径	Dt	(mm)	0.018082338	数値	1補正正規	± 0.25
ノズル出口径	De	(mm)	0.495835482	数値	1補正正規	± 0.1
C*効率	C*	(%)	0.000143699	数値	0正規	± 0.01
燃焼室内壁厚	tw	(mm)	-0.007318046	数値	1補正正規	± 0.05
スロート溝高さ	tc	(mm)	0.046654856	数値	1補正正規	± 0.05
溝幅	tp	(mm)				± 0.05
表面粗さ	U	(μm)				± 10
G効率	Cf	(%)				± 0.01
再生冷却出口内径	Df	(mm)				± 0.5
燃焼室内径	Dc	(mm)				± 0.5
燃焼室長さ設定値	L	(mm)				± 1
LOX一般シフト抵抗	Rlo	(M/m4)				± 0.2
MOV内部抵抗	Rmov	(M/m4)				± 0.05
LOXインジェクタ抵抗	Rinj	(M/m4)				± 0.3
LNG一般シフト抵抗	Rl	(M/m4)				± 0.2
MFV内部抵抗	Rmiv	(M/m4)				± 0.2
再生冷却入口マニフールド	Rexin	(M/m4)				± 0.2
再生冷却出口マニフールド	Rexout	(M/m4)				± 0.2
LNGインジェクタ抵抗	Rinj	(M/m4)				± 0.2
GGインジェクタ抵抗LOX	Rgijlo	(M/m4)				± 0.2
GGインジェクタ抵抗LNG	Rgijln	(M/m4)				± 0.2
GG燃焼効率	ε	(%)	0.370003054	%	0正規	± 2
再生冷却効率	ε _レ	(%)	-1.6312503	数値	0正規	± 10
再生冷却圧損	Pex	(MPa)	1.395413974	%	0正規	± 6
FTP推程	Mpa/rpm2		-1.028930239	%	0正規	± 3
FTPポンプ効率	η _p	(%)	0.33620772	%	0正規	± 3
FTP空力面積係数	κ	(-)	1.708593902	%	0正規	± 3

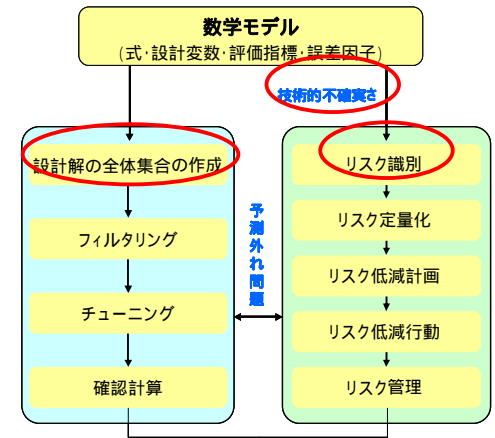
誤差因子
・製造誤差
・運用誤差

S/Nモデル = シミュレータ

各PN毎に誤差を与えて評価指標の分布を求める。
誤差の設定に自信がなければ, リスク登録

	寿命関連		性能関連		燃焼安定性		作動点調整代		評価指標								
	燃焼機 [回]	FTP寿命 [回]	ISP寿命 [sec]	燃焼安定 [-]	GG安定性 [-]	LOXマ [MPa]	LNGマ [MPa]	Noマージ [RPM]	Nマージ [RPM]	Pto [MPa]	Vr [-]	Tinif [K]					
平均mean	30.023	57.789	352.41	1.0882	0.0492	1.4977	1.7336	-26.53	11325	4.9917	9912	10.371	250				
偏差	1.3459	3.1689	1.3615	0.0611	0.0188	0.057	0.0511	163.45	185.77	0.0798	0.0745	0.0128	0.3648	3.6716			
SN dB	26.969	25.221	48.26	25.018	8.3721	28.391	30.612	-16.13	35.701	35.924	37.659	40.508	37.754	29.075	36.662		
試行																	
1	29.176	57.296	352.19	1.1237	0.0523	1.5261	1.7355	-162	11397	4.879	7.6874	7.8837	1.0114	10.077	250.45		
2	30.843	57.113	351.02	1.1681	0.0454	1.5153	1.7086	-56.26	11575	4.9304	7.6749	7.8486	1.0012	10.475	249.14		
3	27.177	57.739	355.72	1.0278	0.0147	1.3886	1.6544	180.71	11598	5.0605	7.4737	7.8266	0.9821	10.446	249.72		
4	32.577	54.78	350.2	1.0668	0.0105	1.3894	1.6472	258.54	11299	5.1676	7.4924	7.8938	0.9655	11.329	252.34		

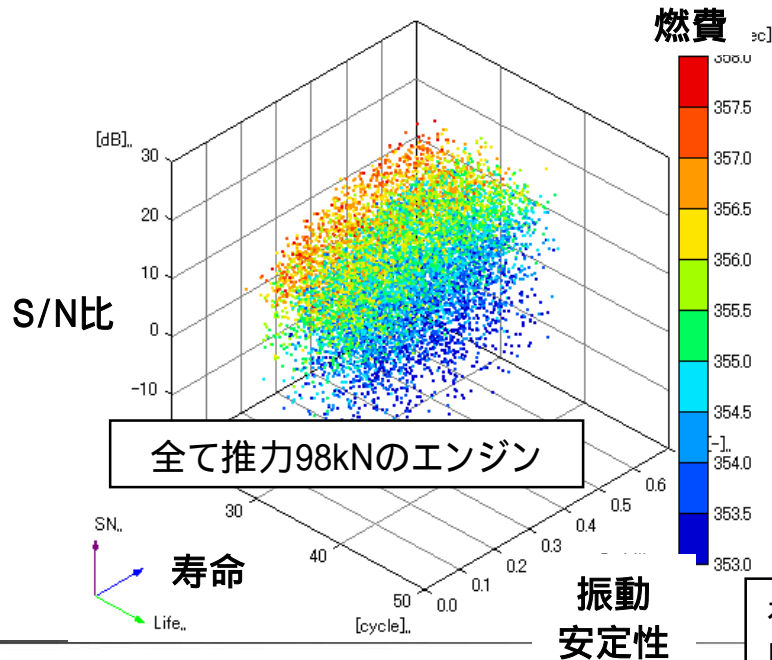
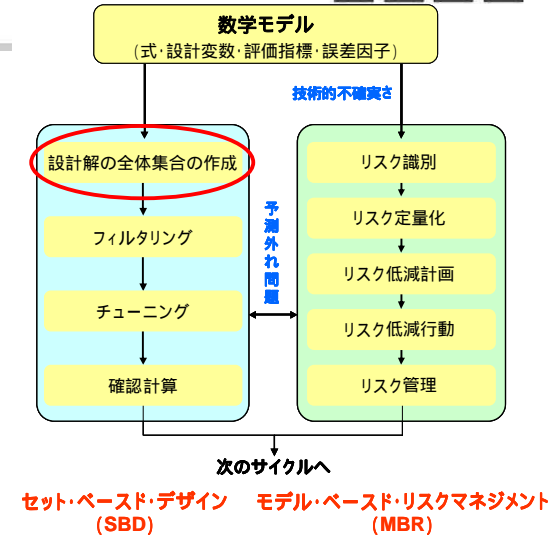
各P/N毎に, S/N 001 ~ 100を仮想試作した結果,
各P/N毎に評価指標の平均値と分散(標準偏差)が得られた



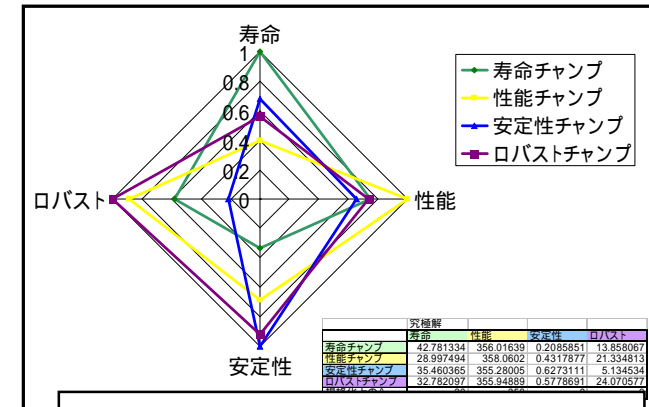
セット・ベースド・デザイン (SBD) モデル・ベースド・リスクマネジメント (MBR)

ステップ6：数学モデルの近似化と設計解の全体集合の計算

- 27種類のエンジンシステムの計算から、数学モデルの近似化を行う。
- ここでは近似化法として、応答曲面法(二次多項式回帰)を用いた。
(入力)設計変数 (出力)評価指標の平均値 および 分散
- 応答曲面化することで、任意の設計変数の組み合わせに対して、
 - 評価指標の平均と分散が瞬時に得られるようになる。
- その上で全設計変数に一様乱数を与えて、10000台のエンジンを仮想試作し、設計解の全体集合を得た。(10000ケース/1時間)



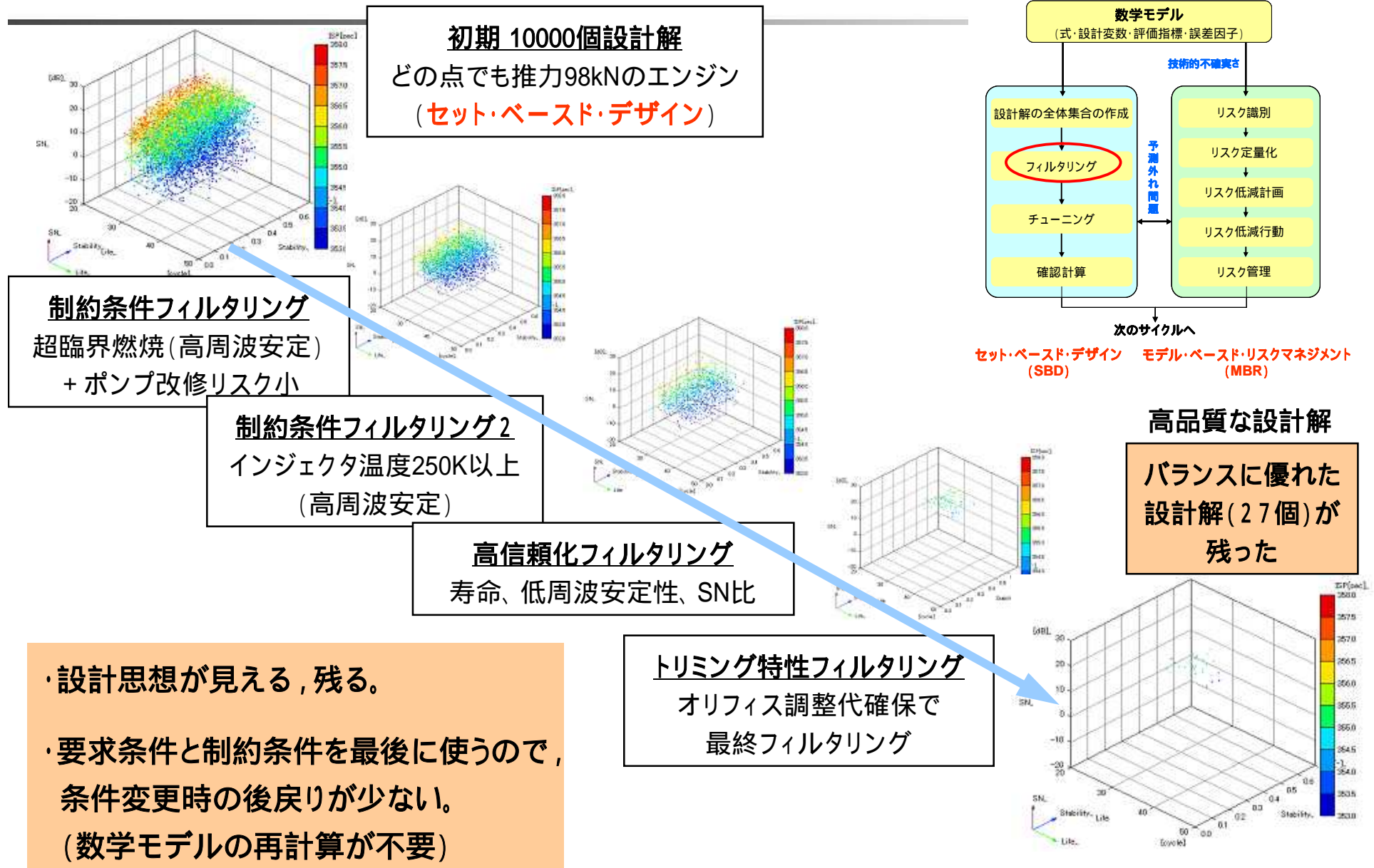
寿命 平均寿命minimax	
燃焼器寿命	34.1
FTP寿命	47.5
mini	34.1
性能 平均ISPmax	
ISPeng	355.645
安定性 平均安定性minimax	
燃焼安定性	0.67
GG燃焼安定性	0.18
mini	0.18
ロバスト SNminimax	
燃焼器寿命	28.9
FTP寿命	22.9
燃焼安定性	23.1
GG燃焼安定性	15.3
LOXマージン	27.5
LNGマージン	28
ISPeng	48.3
Nfマージン	38.4
Noマージン	21.3
Vr	23.9



10000台の中から特定の評価指標が最良の設計を表示(究極解)
しかし、このようなチャンピオンケースは採用できない

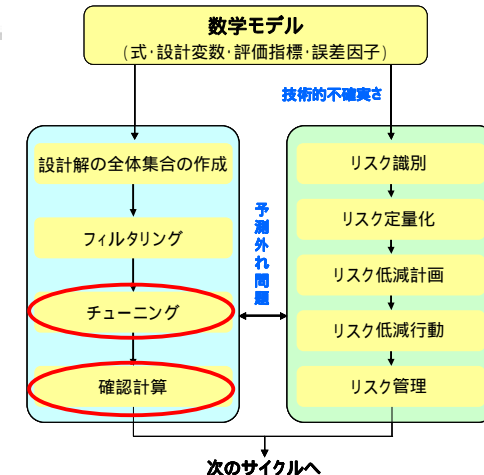
複数の評価指標をグループ化し、同時に扱っている。

ステップ7: フィルタリングによる設計解の選択



ステップ8：チューニングと確認計算

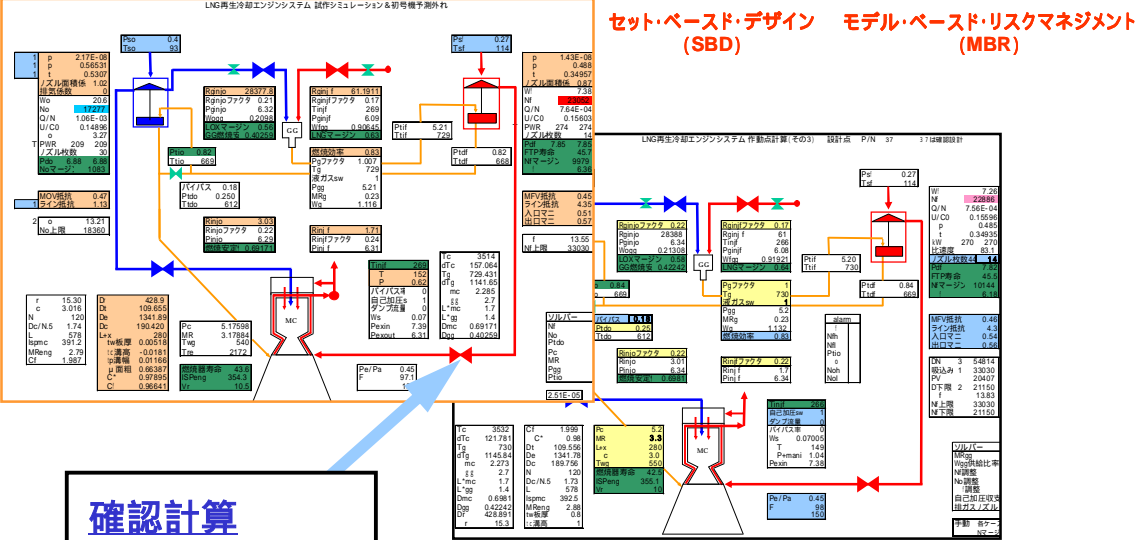
- 最終選考に残った設計解の設計変数の共通点を吟味し、設計変数の組合せをチューニングする。
- 最後に、元の数学モデルで評価指標の再現性を確認する。



主カテゴリ	試行NO	寿命	性能	安定性	ロバスト	
	1	41	35.845771	355.32211	0.3396328	19.321766
	2	285	31.873145	354.08568	0.3205499	19.482026
	3	1420	33.86511	354.72117	0.3638104	19.694679
	4	2511	34.259541	354.55759	0.4485382	16.367717
	5	2513	33.858748	354.79878	0.4964437	15.375799
	6	3102	32.282014	355.32638	0.478341	15.612145
	7	3776	33.702386	354.02033	0.3794621	17.074801
	8	3980	31.254632	355.61918	0.300742	15.653674
	9	3993	31.957114	354.25964	0.4493543	17.603314
	10	4260	40.794979	353.48284	0.3618831	18.094609
	11	4453	36.107139	355.17356	0.3811385	17.00087
	12	4586	34.754446	355.08005	0.4154595	15.850126
	13					
	14					
	15					
	16					
	17					
	18					
	19	6817	31.089684	353.83432	0.3192295	20.358404
	20	7034	33.422073	355.20438	0.3410067	18.357751
	21	7309	32.191155	354.9259	0.4306445	17.836863
	22	7463	32.138346	355.60225	0.5221704	18.00087
	23	7810	36.485548	355.4141	0.3321302	18.53226
	24	8350	39.4711	353.71422	0.3206149	16.01977
	25	8468	30.61879	355.46923	0.3054536	16.613157
	26	8638	32.266493	355.58471	0.4164602	19.975468
	27					18.7944

残った設計解の設計変数
27組

チューニング
値の丸め込み等



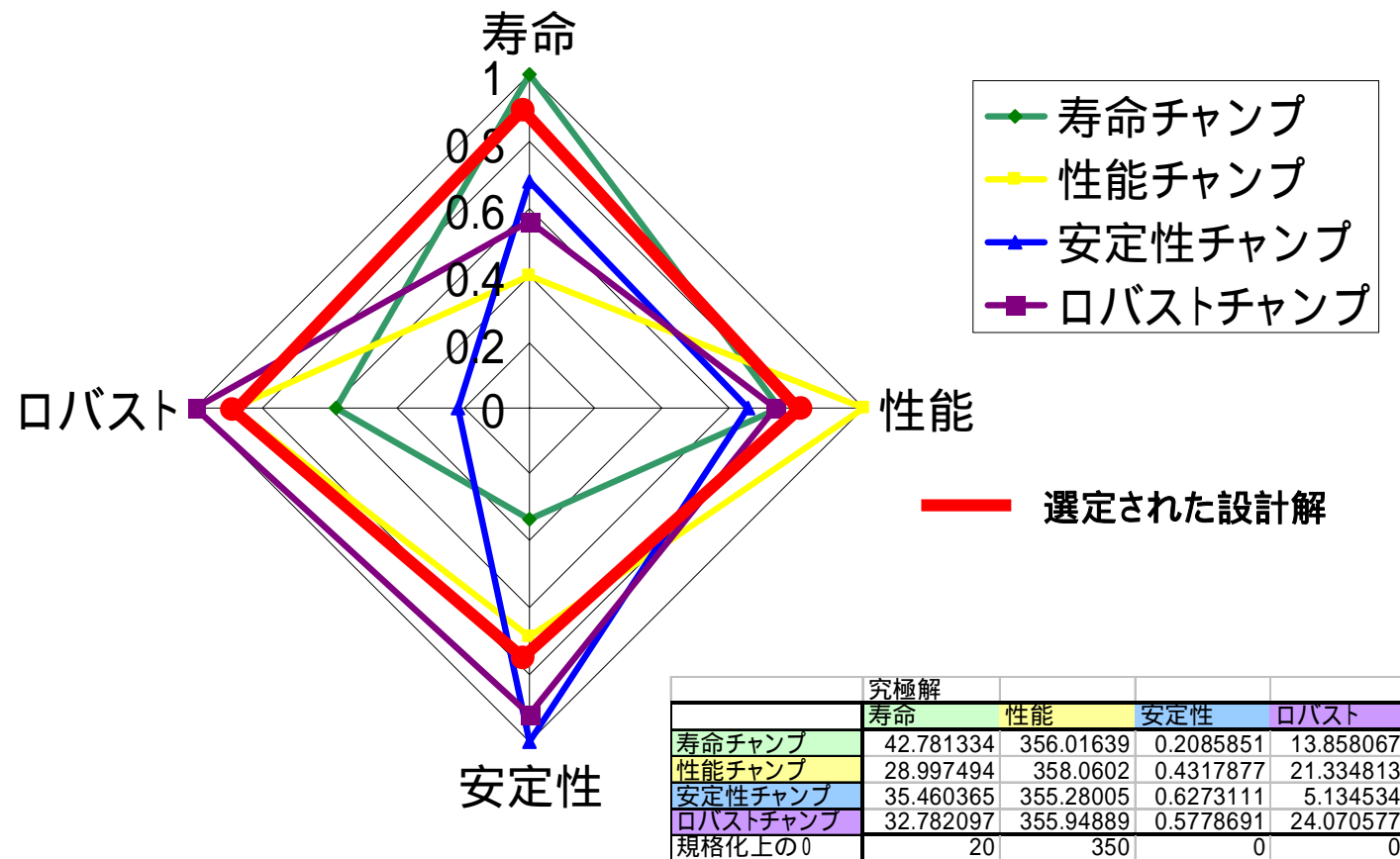
確認計算
再現性を確認

Rinjofファクタ	Rinjifファクタ	Pc	L+x	c	Twg	Ptdo	Rqinjofファクタ	Rqinjifファクタ	Pqファクタ	Tg
0.22	0.22	5.2				0.25	0.22	0.17	1	730

最終設計解を決定！

選定された設計解の特長

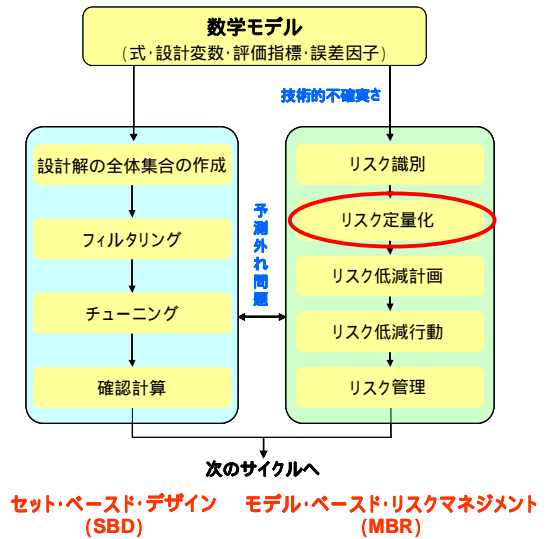
- 性能最大ではないが全体のバランスはよい。
- 言い換えれば、性能を少し削ってそれを他の特性向上へ再配分したことになる。



ステップ9: リスクの登録・定量化

設計者が持つ曖昧さ

- 数学モデル作成時に仮定した係数等の**不確実さ**について内容を分析の上リスクとして登録
- 同時にリスクレベルも登録 (現象理解度) × (影響度)
- 気づいた人がリスク登録。この時低減計画までは考えなくてよい。
- ACCESSでリレーショナルデータベース化することで、リスクを一元的に管理できる。



リスク登録

Risk_ID: Risk0011 登録日: 2007/01/30 No: S1 公開フラグ:

大分類: システム 中分類: 設計 小分類: 性能

リスク抽出: マイン燃焼室チャグ安定性 根拠文書: JGM1-070105

理由: モデル精度の限界 LL:

対処方針: 回避 現象理解度: 4 環境理解度: 2 実証理解度: 1.5 技術理解度: 4 影響度: 8

初期リスク: 32 具体案: ΔPC設定 リスク分散: ロバスト設計によりΔPC変動を押さえる

内容: LNGでチャグが発生するΔPC(Tin)等の不明
最悪シナリオ: 飛行中に生じた場合はミッションフェイル

技術理解度	4	影響度	8
1	ミッション不達の可能性はほとんど影響なし	0.1億	
2	コンポーネント機能喪失、ミ2ヶ月	1億	
4	コンポーネント機能損失等、半年	10億	
8	即ミッション不達	2年以上	100億

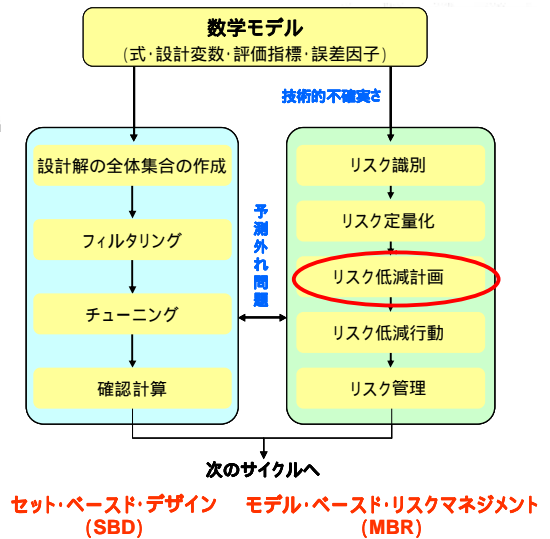
現象理解度	4	環境理解度	2	実証理解度	1.5	技術理解度	4	影響度	8
1	メカニズム・支配的パラメータともに把握できている(モデル化が可能なレベル)								
2	モデル化までできないが、根拠に基づき定性的なメカニズムが把握できている								
4	把握できていない。ただし、過去号機の類似性、文献などから仕様を設定								
8	把握できていない。仕様設定の根拠なし								

リスクレベルはプルダウンから選択

初期リスク:
納入までに許容レベルまで減らしていく

ステップ10: リスク低減計画の立案 (1/2)

- 各設計フェーズ毎にリスク低減計画を立案する。
- リスク低減行動のみがリスクレベルを下げる手段とする。
- リスク低減計画は、プロジェクト全員で考える。
リスクの集約と対策箇所の再配分



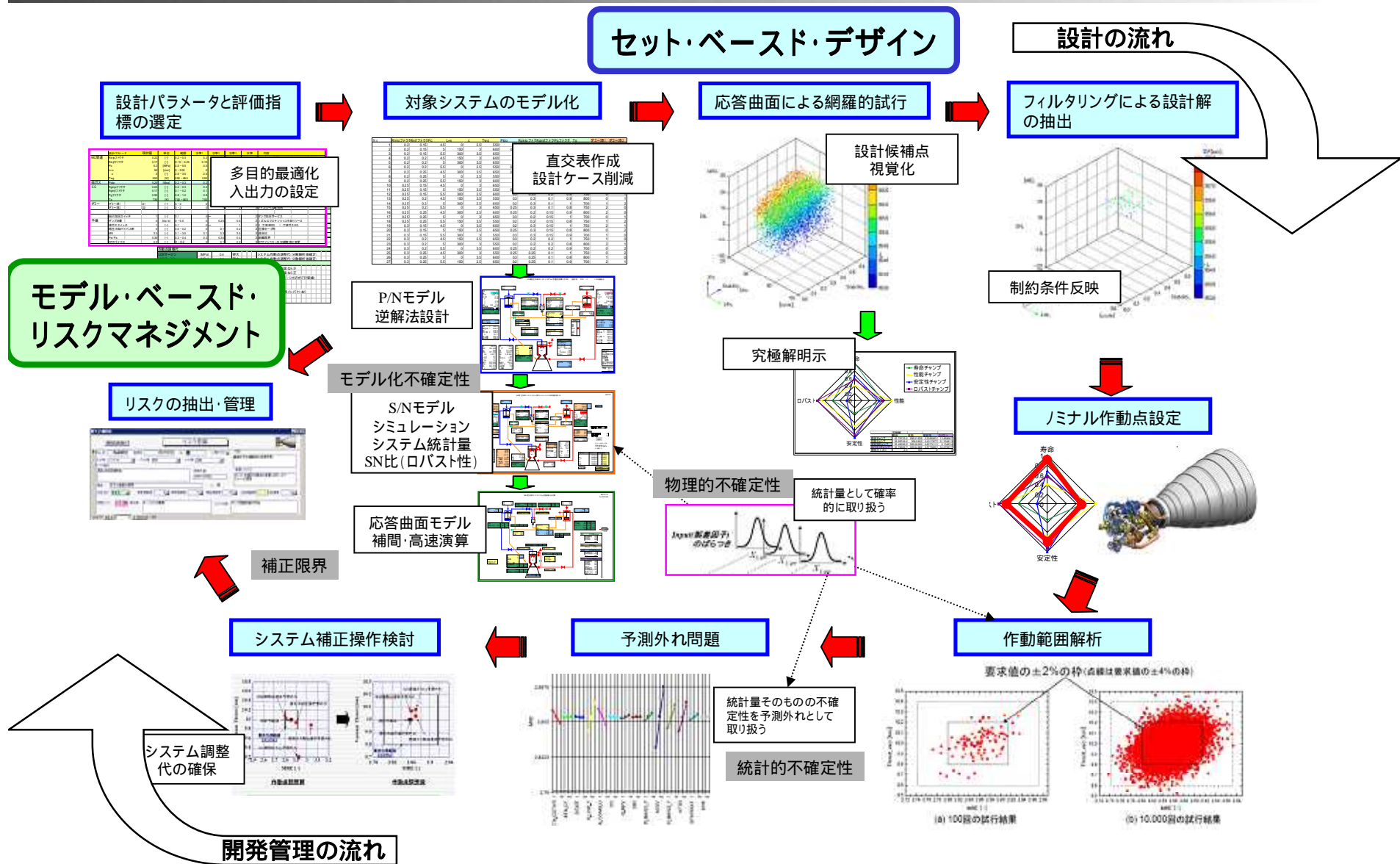
設計フェーズ

ID	アクティビティ	実アクション							
Risk ID	時期	現象	環境	実証	技術	影響	リスク	試験WBS番号	完了
Risk_Plan00002	概念設計途中	文献調査・理論モデル							
Risk 0011	2007/01/30	2	2	1.5	2	8	16	NA	<input checked="" type="checkbox"/>
Risk_Plan00003	概念設計終了	同上							
Risk 0011	2007/03/30	2	2	1.5	2	8	16	NA	<input checked="" type="checkbox"/>
Risk_Plan00004	要素試験	エレメント噴霧試験							
Risk 0011	2007/06/15	1	2	1	1	8	8	10210	<input type="checkbox"/>
Risk_Plan00476	要素試験	エレメント燃焼試験							
Risk 0011	2007/06/30	1	2	1	1	8	8	10220	<input type="checkbox"/>
Risk_Plan00005	原型エンジン	原型エンジン燃焼試験							
Risk 0011	2008/08/10	1	1	1	1	8	8	10230	<input type="checkbox"/>
Risk_Plan00006	EM	エンジンEM燃焼試験							
Risk 0011	2009/06/30	1	1	1	1	8	8	10270	<input type="checkbox"/>

リスクレベルは最後に許容可能レベルになるような計画とする。

各フェーズ毎にリスク低減計画を立案する

TDMによるエンジンシステム設計全体



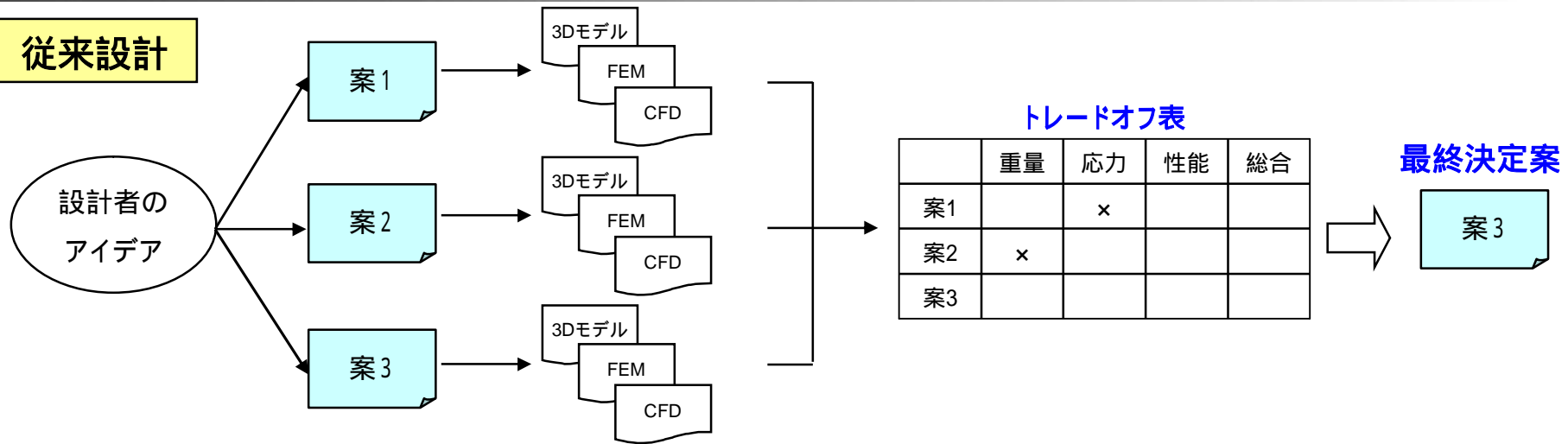
3. 他手法との比較

従来の設計開発手法の問題分析

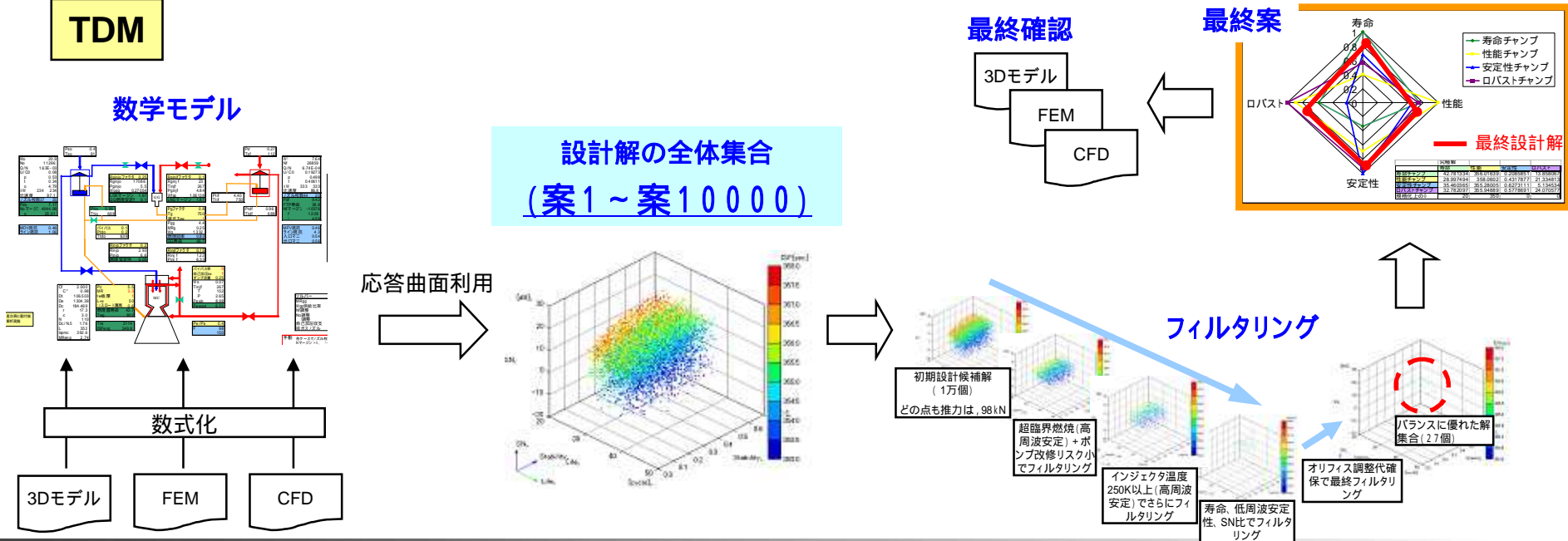
		TDM	従来
全体		多目的設計・ロバスト設計・リスク管理法の個別手順とI/F関係が明確なので、プロジェクト開発全体を最適化できる。	多目的設計法・ロバスト設計法の方法論が明確でないので、安易なピンポイント設計に走りがち。そのツケとして、ハードが出来てから局所的なモグラたたきを行う。
設計	問題設定	評価指標、設計パラメータを明確化することから始める。	現有ツールの入出力フォーマットに引きずられがち。
	モデル	全ての設計の基本(起点)は数学モデルであるとする。	ツールベースであることが多く、評価対象により設計の質の差が激しい。
	ロバスト設計	ロバスト性を考慮する手順が明確。	ロバスト設計を考慮したくても、手順が分からない。
	意志決定	多目的最適解となっている。	性能や重量といった一つの指標に対するチャンピオン設計となっていることが多い。
	合意形成	全てのプロセスが非常に透明である。	不透明な部分が多く、これらを説明するための二次的資料作成行為が増大する傾向にある。
開発	リスク位置づけ	リスクを開発行為の評価対象と位置づける。	リスク評価結果の使われ方が不明確。安心量拡大のためのルーチンワークであることが多い。
	リスク抽出	FMEA,L&Lに加え数学モデルの自信度に基づくリスク定量評価による。	担当者の思いつきの寄せ集め。抜けが多いため審査会では次々に指摘が挙がる。
	リスク低減計画	除去・安全化・回避の方針別リスク低減計画こそが開発と認識する。	定性的計画。最初から問題なしと判断されることも多い。
	方向性	要素試験重視	システムデモンストレーション重視の傾向
	バックアップ	予測外れ問題として常に最悪の状況に対する対策案をシミュレートしながら進める。	サクセスストーリーベースであるため、途中からモグラたたき行為に陥りやすい。
運用	運用情報は設計時にバラツキ込み取り込まれ、予測外れ問題によりIF変動に対処しておく。	ノミナル運用情報またはワースト運用情報が取り込まれ、IF変動に弱い。	
戦略性	即時性	要素試験を重視するため、フロントローディングが必要であるが、結果的に後戻りは少ない。	スケールアップ開発・デモンストレーション開発に走りがちであり、本格的開発移行時に不具合が生じやすい。
	独自性	解の多様性が保証されているため、意図的に独自色を出すことが得意である。	最適化という名の下に、リスクな選択をしてしまうことがある。はっきりしたカラーを打ち出せない。
	事業性	様々なフェーズの指標(コスト、性能、運用性...)を設計段階で多目的評価でき、採算、不採算をバラツキ込みで知ることができる	各担当のサクセスストーリー+責任者リスクマネジメントによる。見誤ることもある。

従来トレードオフ設計との比較

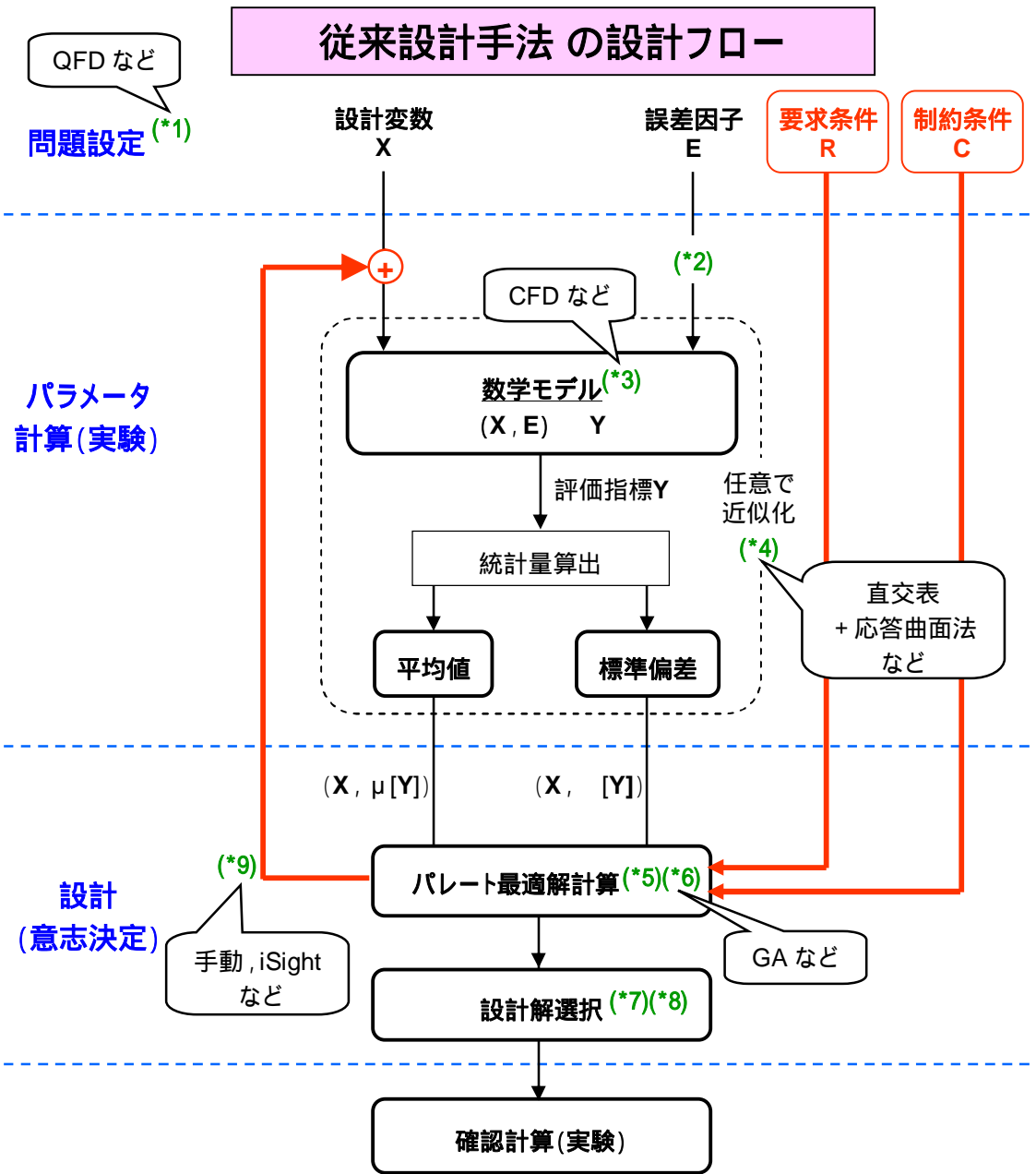
従来設計



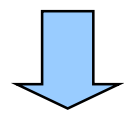
TDM



従来設計手法のフロー

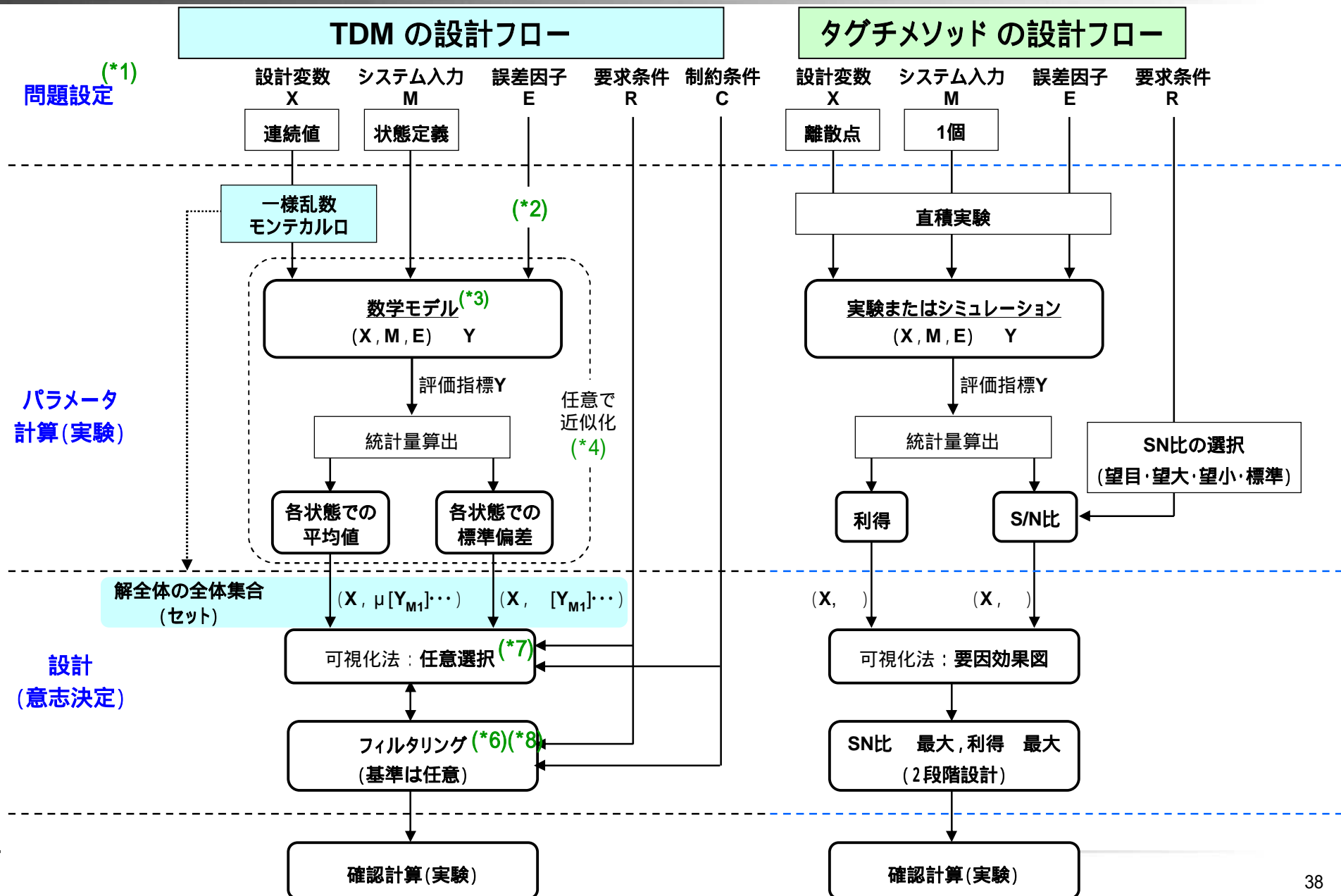


要求条件や制約条件がフィードバックされる従来設計アルゴリズムでは、設計条件(要求・制約)が変わる度に、パラメータ計算を再実行する。

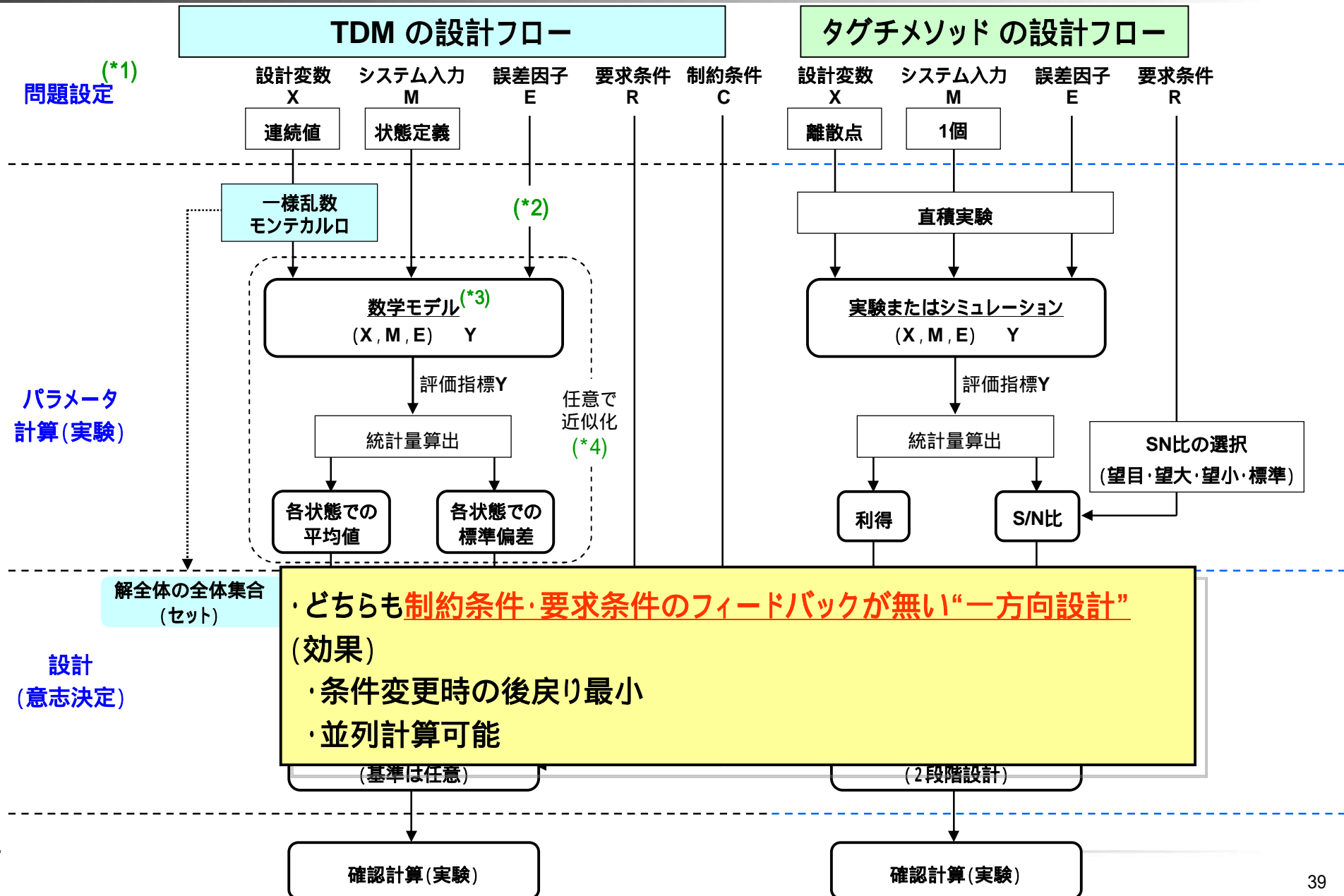


設計初期段階の後戻りの原因

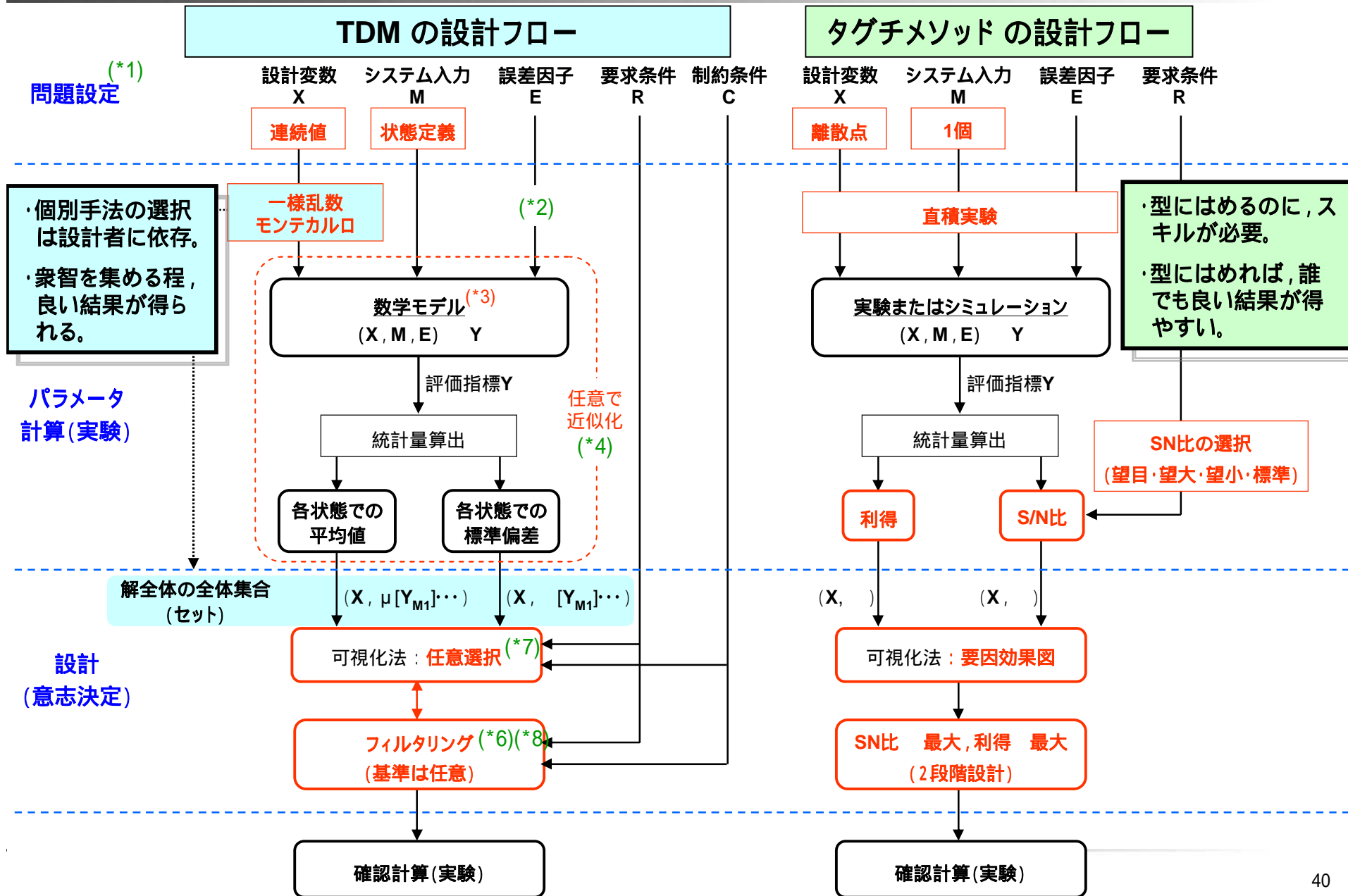
TDMとタグチメソッドとの比較



TDMとタグチメソッドとの比較



TDMとタグチメソッドとの比較



TDMとタグチメソッドとの比較

TDM の設計フロー

タグチメソッド の設計フロー

(*1)
問題設定

設計変数 X システム入力 M 誤差因子 E 要求条件 R 制約条件 C

設計変数 X システム入力 M 誤差因子 E 要求条件 R

- 多目的設計問題を前提にした手法であるので、特にシステム設計に有効。
- 設計者に自由度を与えた設計手法であるので、成果は設計者の経験・技量に依存する。
- 既存あるいはオリジナルの個別手法を設計者が任意に組み合わせることができるので、設計者の工夫次第で適用・応用範囲が広がる手法。
(主に、全体集合計算方法とフィルタリング)

- 問題設定から設計解導出までの個別手法と決定指針が明確なので、適用する設計者の迷いが少ない。
- 一方で評価指標が多くなると設計変数の最適水準を選択することが難しくなる。

パラメータ
計算(実験)

統計量算出

SN比の選択
(望目・望大・望小・標準)

利得

S/N比

(X,)

(X,)

可視化法：要因効果図

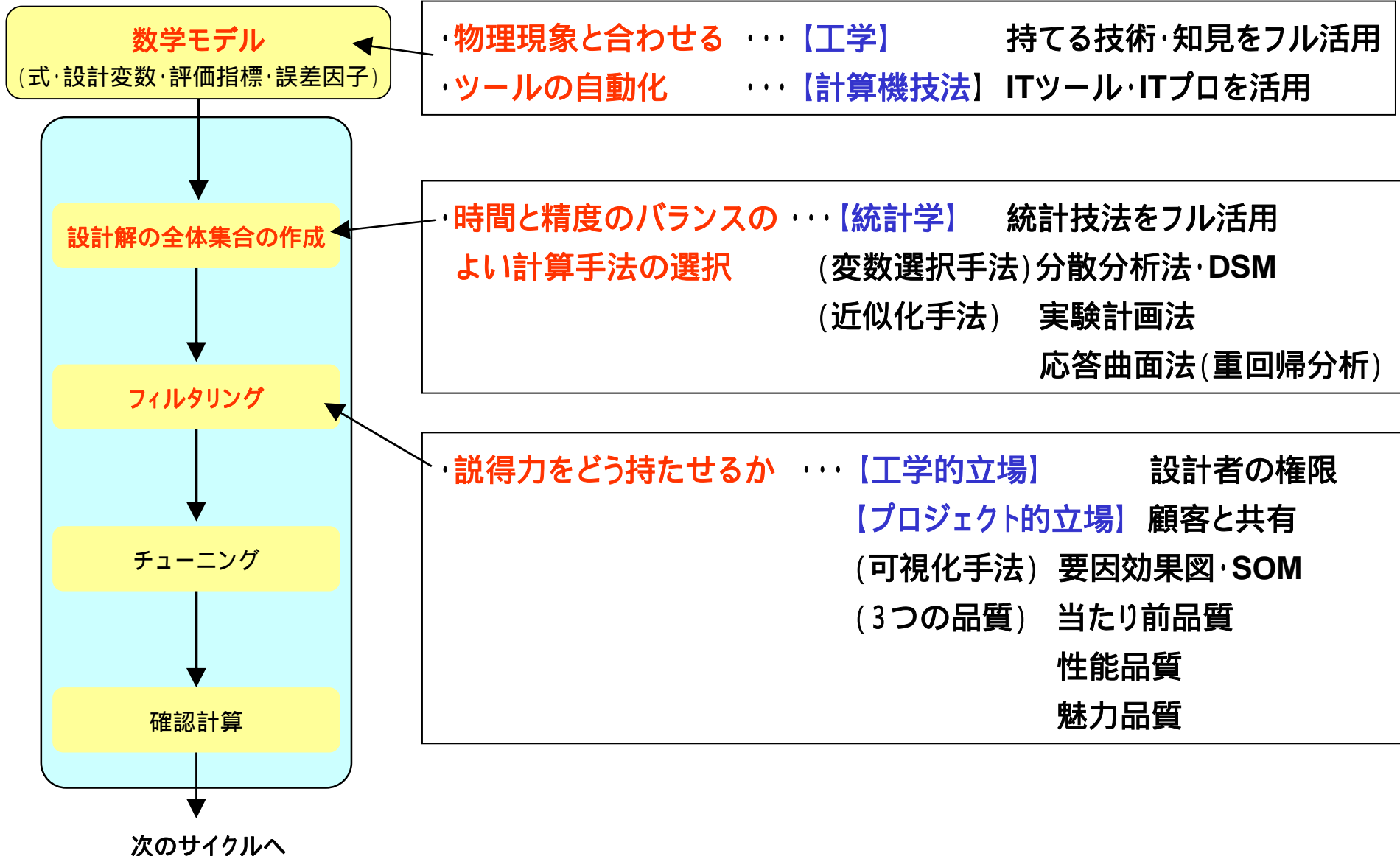
SN比 最大, 利得 最大
(2段階設計)

設計
(意志決定)

- 設計者の技量に依存する部分を補うために、有識者が参加するデザインレビューが実施できるように、SBDの設計透明性の確保とMBRで補っている。

確認計算(実験)

確認計算(実験)



4 . TDMの適用効果が高い領域

5. 適用領域 (開発プロセス)

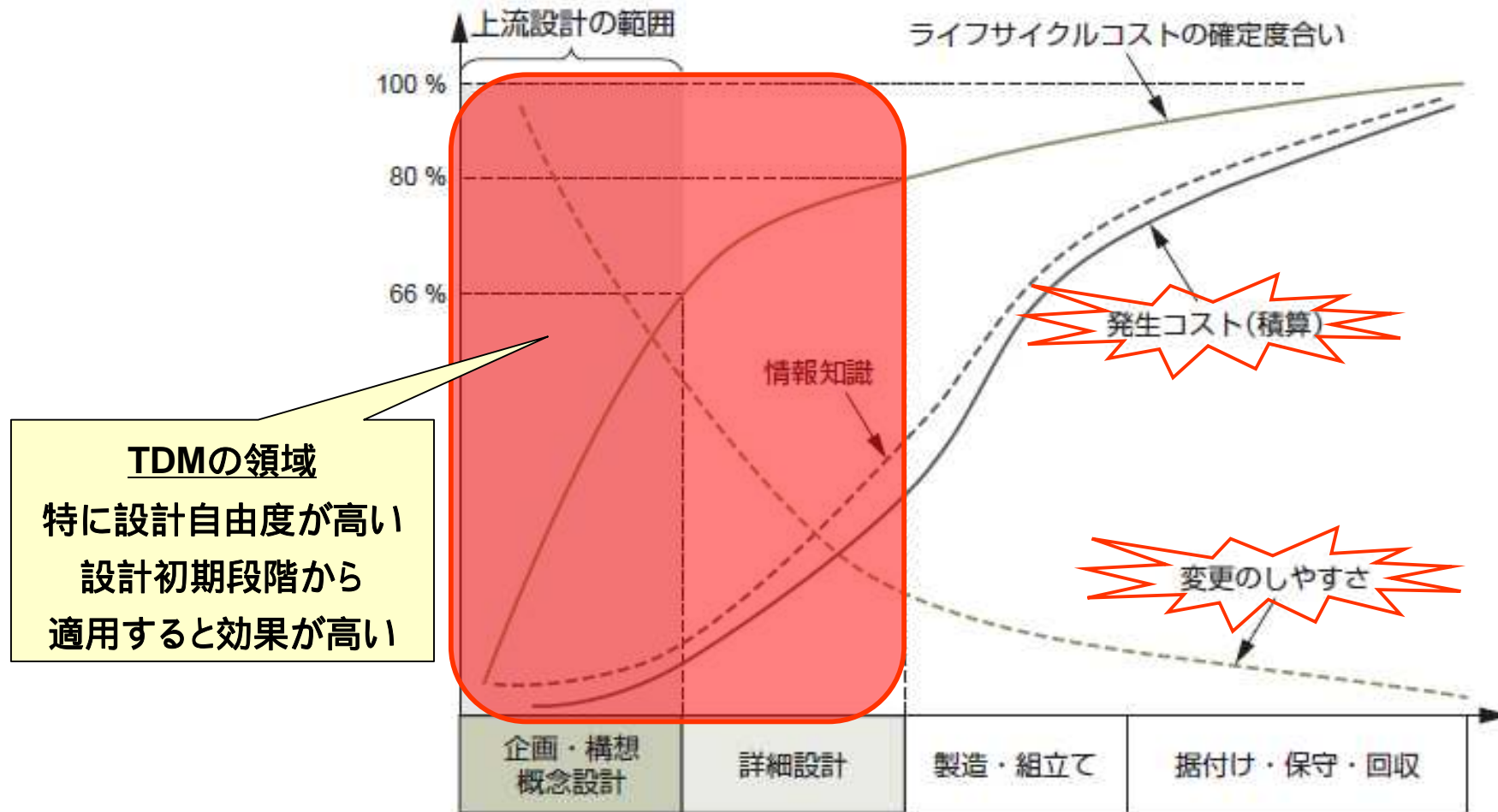
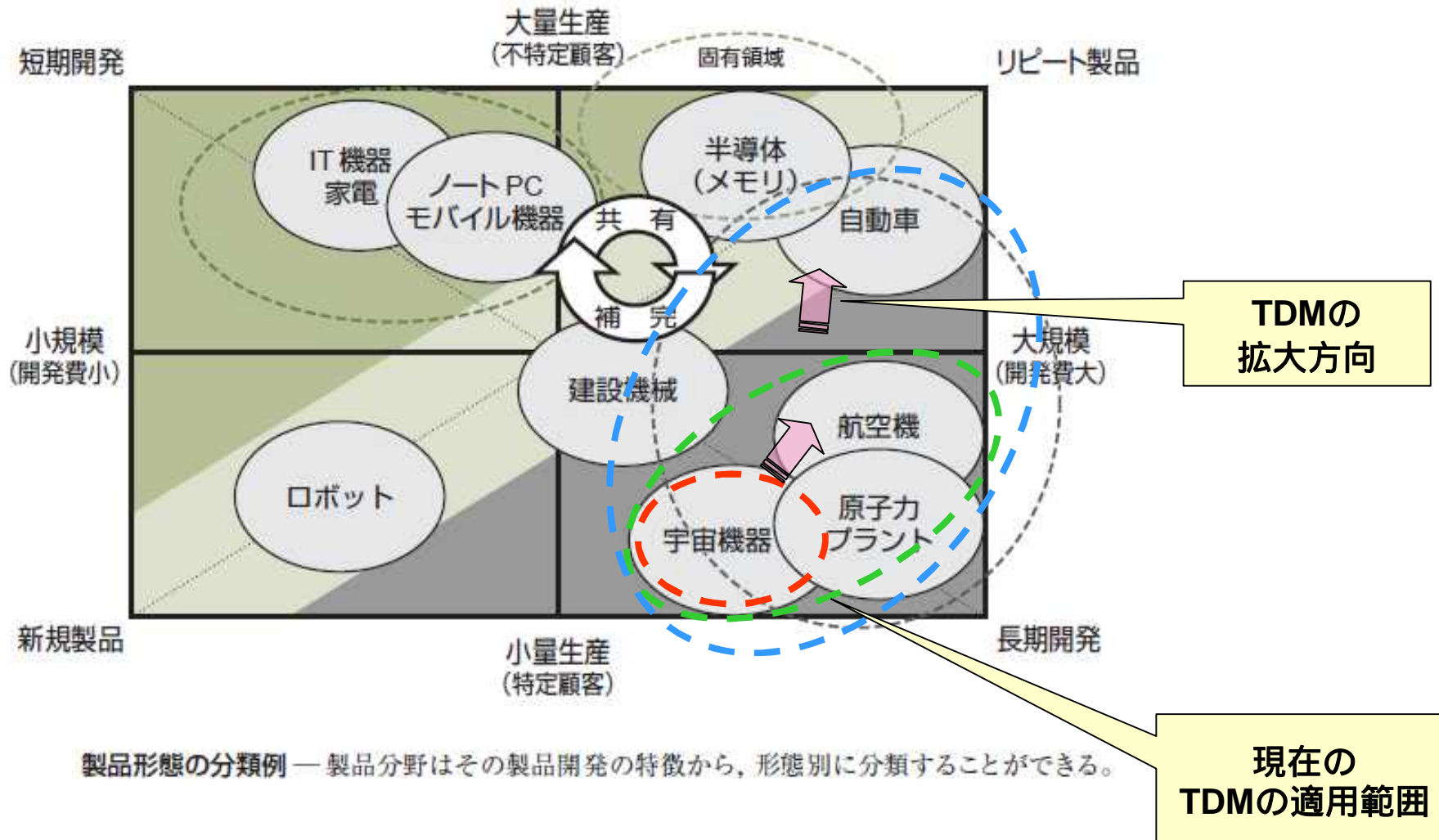


図4. 製品開発における設計の重要性 — 製品の全ライフサイクルコストの80%が設計段階までで決まってしまう(文献(3))。

大富浩一 (2007), "初歩から学ぶ設計手法 - 多彩なツールにふり回されないための戦略的設計開発の考え方 -", 工業調査会

5. 適用領域(製品形態)



大富浩一 (2007), "初歩から学ぶ設計手法 - 多彩なツールに振り回されないための戦略的設計開発の考え方 -", 工業調査会

5 . 適用に必要な準備

TDM適用に必要な期間

手法の概念理解 …… OFF - JTで, 1 ~ 2日

設計ツール・シミュレーションツールの作成・自動化

- フローの理解と入出力関係の明確化
- 設計変数・評価指標・ばらつき指標の項目と範囲の設定
- 設計ツールやシミュレーションツールが無いなら作成, あるなら

自動化

OJTで2 ~ 4週間

設計作業

- 応答曲面作成
- フィルタリング設計作業

(数サイクル回して) OJTで2 ~ 4週間

リスク抽出・低減計画 …… OJTで, 2 ~ 4週間

設計手法がある程度確立しているなら, 1.5 ~ 3ヶ月で成果が出ると考えます。

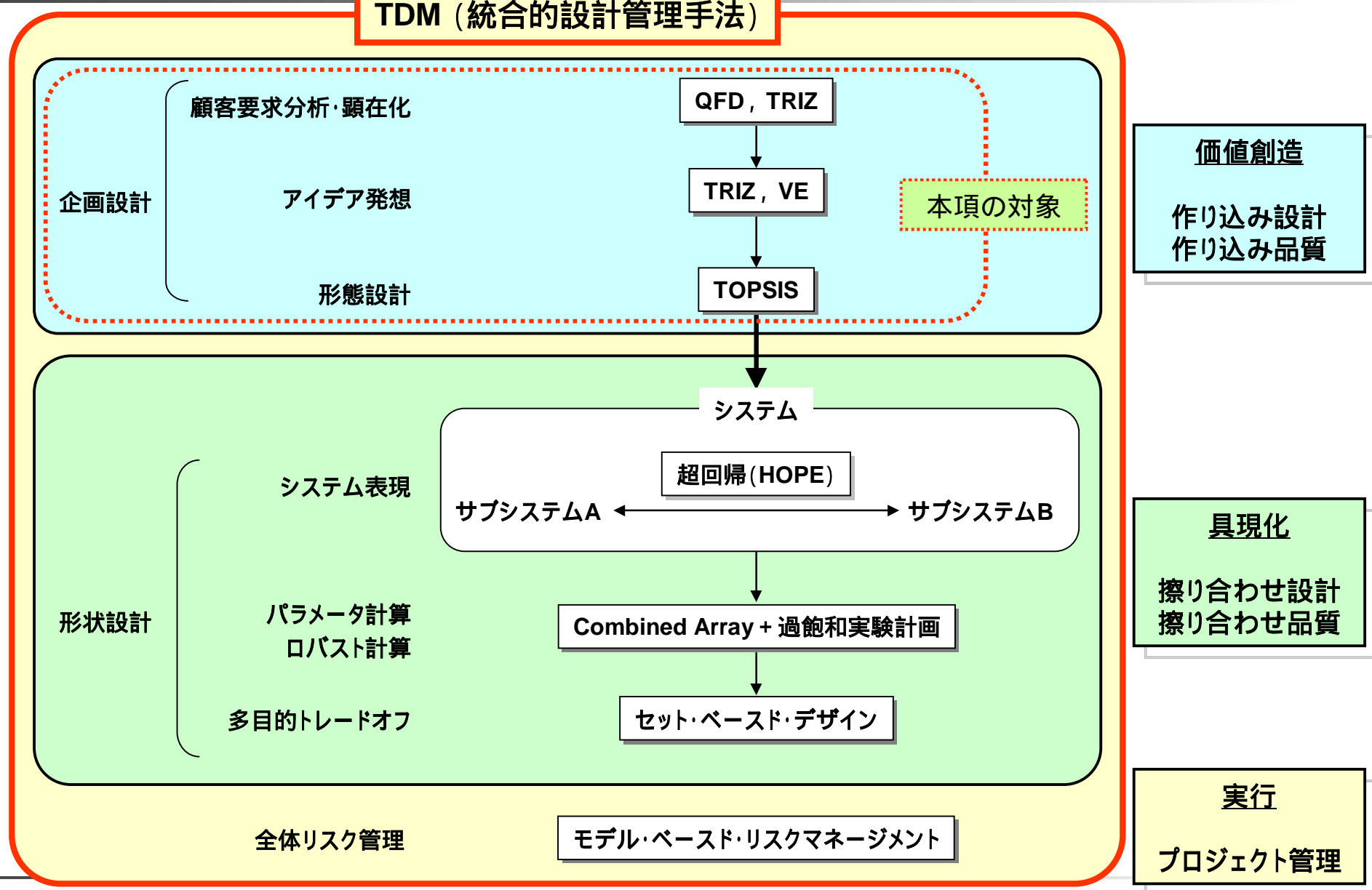
6. 形態設計への発展

宇宙有人弾道往還機の機体概念設計の事例

- QFD法を用いた顧客要求分析法とTOPSIS法を用いた形態トレードオフ法 -

0. 発展型TDM全体フロー

TDM (統合的設計管理手法)



価値創造

作り込み設計
作り込み品質

具現化

擦り合わせ設計
擦り合わせ品質

実行

プロジェクト管理

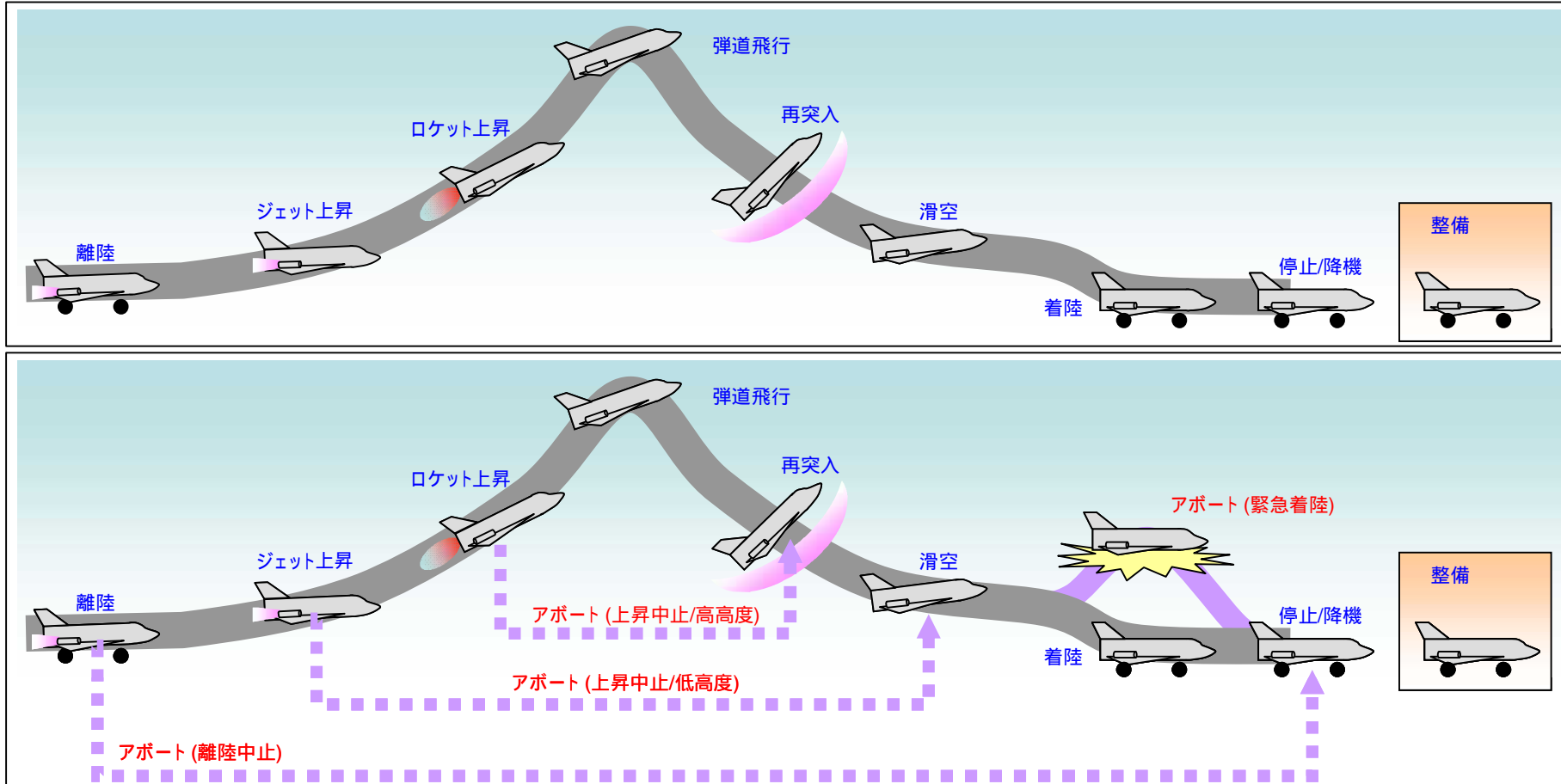
1. QFDを用いた要求検討 (1/6)

設計初期段階ではシステムに対する具体的要求は不明確
そこで品質機能展開(QFD)を軸とした要求検討を実施

- まず、事業として有人宇宙旅行を行う機体に対し、想定されるRFP (Request For Proposal) 項目は以下である。これらはX-Prizeや宇宙旅行としての条件や、民間観光事業としての目標や観点から定めた。
 - 高度100[km]への到達
 - 乗員乗客6名
 - 乗客への負荷軽減 (最大荷重3G以下)
 - 滑走距離3000[m]以下 (下地島空港を想定)
 - 低価格化
- 他の要求は後述の要求検討ベースで整理する。

1. QFDを用いた要求検討 (2/6)

- 続いてRFP項目からイベント展開図を作成。”システム全体が何であるのか？どうあるべきか？”を明確化。



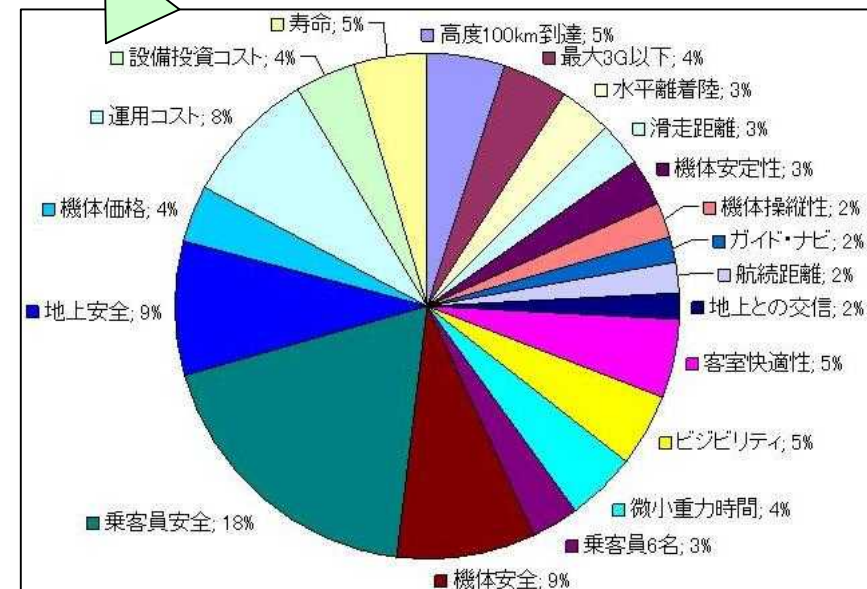
イベント展開図
「システムの姿とは？」

1. QFDを用いた要求検討 (3/6)

- 次に、イベント展開図から顧客(機体運用会社)要求の整理。これら要求項目に対し意思決定法の一つであるAHP*と一対比較法によるロールプレイングアンケートにより重要度を価値付け。

評価項目	説明
ミッション要求	1 高度100km到達 高度100kmに到達すること
	2 最大3G以下 最大体感加速度が3G以下であること
	3 水平離着陸 水平に離着陸できること
	4 滑走距離 滑走距離が3000m以下であること
機体要求	5 機体安定性 飛行中の安定性が高いこと
	6 機体操縦性 飛行中の操縦・制御性が高いこと
	7 ガイド・ナビ ガイダンス/ナビゲーション機能が高いこと
	8 航続距離 航続距離が長いこと
サービス要求	9 地上との交信 地上局との通信機能が高いこと(音声、テレメトリ)
	10 客室快適性 客室が快適(広さ、与圧、温度、防音他)であること
	11 ビジビリティ 客室からの眺望が保たれること
	12 微小重力時間 微小重力時間が長いこと
安全要求	13 乗客員6名 乗員乗客合計6名であること
	14 機体安全 機体がより安全に運用できること
	15 乗客員安全 乗客員がより安全であること
事業要求	16 地上安全 地上での運用がより安全であること
	17 機体価格 機体購入価格が低いこと
	18 運用コスト 運用コストが低いこと
	19 設備投資コスト 事業のための設備投資コストが低いこと
	20 寿命 機体寿命が長いこと

有識者に対するアンケート調査(抜粋)



顧客要求の整理
「顧客の求めるものは？」

顧客要求の重要度価値付け

1. QFDを用いた要求検討 (4/6)

- 続いてイベント展開図と顧客要求からシステムに必要な機能を機能展開を用いて洗い出し。



システム名称	イベントフェーズ	機能展開 0次元	1次元	2次元
AstroBird	準備	機体を準備する	機体の状態を知る	機体の状態を知る/知らせる
			リソースを補充する	電気を補充する ジェット燃料を補充する ロケット燃料を補充する RCS用推進を補充する その他消耗品を補充する
			システムを始動させる	ジェットエンジンを始動させる
	乗機	乗客員を搭乗させる	機体の状態を知る	機体の状態を知る/知らせる
			機体を駐機させる	機体を停止させる
			乗客員を機体に乗せる	乗客員を搭乗口まで導く 搭乗口を開閉する 乗客員を機体に固定する
	離陸	機体を離陸させる	機体の状態を知る	機体の状態を知る/知らせる
			揚力を発生させる	揚力を発生させる
				推力を発生させる
				揚力を制御する
				機体を滑走させる
			機体を制御する	機体を操縦する
機体を保持する			機体を安定させる	
コンポーネントを保持する			機体を荷重に耐えさせる ジェットエンジンを荷重に耐え ジェットエンジンを温度に耐え 燃料を貯蔵する/供給する	
キャビン快適に保つ			キャビンを与圧する キャビンを空調する	
	機体を停止させる	機体を制動する		
	機体損傷時の乗客員安全を確保	乗客員を脱出させる 乗客員を生かさせる	乗客員を脱出させる 乗客員を環境から守る	

機能展開 (抜粋)

「各イベントフェーズでミッションを達成するのに必要となる機能は？」

1. QFDを用いた要求検討 (5/6)

- これらシステムに必要な機能・性能を整理してQFDの評価対象に。
- 同時に形態設計で決定すべき項目か、形状設計で決定すべき項目かも明確にしておく(両方で評価されるべき項目もあり)。

要求機能項目		説明	設計における反映先		要求性能項目		特性	設計における反映先	
			形態設計					形状設計	
1	製品品質	開発コスト	開発コストが低いこと	QFD結果を指標とし TOPSISで判定	1	フィルタ	全備重量	望小	QFD結果を 優先度とし 統合モデル パレート解集合より フィルタリング
2		生産コスト	生産コストが低いこと		2		到達高度	望大	
5		全備重量	全備重量が少ないこと		3		最大加速度	望目	
6	離着陸滑走機能	機能展開参照 (TDMマトリクス)	ギア種類		4		最大温度	望小	
7	揚力発生機能		主翼種類、位置		5		μG時間	望大	
8	空力安定機能		尾翼、カナード形態、位置		6		航続距離	望目	
9	機体操縦機能		操縦系種類、RCS位置		7		滑走距離	望目	
10	機体計測機能		計測系構成、種類、数量		8		窓視界	望大	
11	ナビ機能		GN系構成、種類、数量		9		最大動圧	望目	
12	通信機能		通信系構成、種類、数量		10		離陸速度	望大	
13	制動機能		制動機器種類		11		冗長数	望目	
14	キャビン機能		キャビン構成、位置		12		Jエンジン機数	望目	
15	眺望能力		窓位置、眺望機器種類		13		Rエンジン機数	望目	
16	機体アクセス性		ドア位置、数量		14		安全率	望大	
17	ロケットエンジン		基本構成、数量		15		ロバスト	望大	
18	ジェットエンジン		基本構成、数量		16		LCC	望小	
19	燃料貯蔵供給機能		タンク種類、位置、数量		17		NPV	望小	
20	耐荷重		各種形態、構成		18		開発コスト	望小	
21	耐熱		TPS種類		19		製造コスト	望小	
22	冗長機能		各種機器数量						
23	脱出機能		脱出機器種類						
24	補給機能		補給系構成、種類等						
25	機器モジュール化	各種構成、配置							
26	輸送機能	輸送方法、機体ポイント							

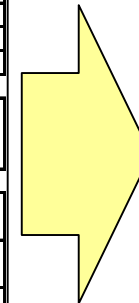
機体に求められる機能・性能
「顧客要求を満たすための機能・性能とは？」

2. 機能展開・形態要素抽出 (1/3)

明確となった必要機能・性能を実現するシステム形態を検討

- まず、必要機能・性能を実現するサブシステム・コンポーネントなど考える限りの必要機器(形態要素)を抽出。

システム名称	イベントフェーズ	機能展開	1次元	2次元
AstroBird	準備	機体を準備する	機体の状態を知る	機体の状態を知る/知らせる
			リソースを補充する	電気を補充する ジェット燃料を補充する ロケット燃料を補充する RCS用推進剤を補充する その他消耗品を補充する
	乗機	乗客員を搭乗させる	システムを始動させる	システムを始動させる
			機体の状態を知る	機体の状態を知る/知らせる
			機体を駐機させる	機体を停止させる
	離陸	機体を離陸させる	乗客員を機体に乗せる	乗客員を搭乗口まで導く 搭乗口を閉閉する 乗客員を機体に固定する
			機体の状態を知る	機体の状態を知る/知らせる
			揚力を発生させる	揚力を発生させる
				推力を発生させる
				揚力を制御する
				機体を滑走させる
			機体を制御する	機体を操縦する
機体を保持する			機体を安定させる	
コンポーネントを保持する			機体を荷重に耐えさせる ジェットエンジンを荷重に耐え ジェットエンジンを温度に耐え 燃料を貯蔵する/供給する	
キャビン快適に保つ			キャビンを与圧する キャビンを空調する	
機体をアポートに対応させる	機体を停止させる	機体を制動する		
機体損傷時の乗客員安全を確保	乗客員を脱出させる	乗客員を脱出させる		
	乗客員を生存させる	乗客員を環境から守る		



必要機器
センサ類, モニタ類, 送受信装置
バッテリー系
ジェット燃料タンク配管系
ロケット燃料タンク配管系
RCS用推進剤タンク配管系
気蓄器系, 油圧配管系
エンジンスタータ
センサ類, モニタ類, 送受信装置
パーキングブレーキ
タラップ
ドア
座席, シートベルト
センサ類, モニタ類, 送受信装置
主翼
ジェットエンジン/ロケットエンジン, カタパルト/リニアモータ/ホバークラフト, 制御系, スラストレバー
フラップ, 制御系, 操縦桿
ギア/レール/カタパルト/リニアモータ/ホバークラフト
エレベータ, ラダー, エルロン制御系, 操縦桿
水平尾翼, 垂直尾翼, カナード
機体外殻
ジェットエンジン, スラストストラクチャ
ジェットエンジン, ナセル, 耐熱材, 冷却
ジェット燃料タンク
与圧
空調
ジェットエンジン, ブレーキ/スラストリパーサー/エアブレーキ/ドラッグシュート, 制御系, スラストレバー
射出装置/スライダ, 非常口
エアバッグ, フロート, ライフジャケット

機能展開に対し機能を満たす必要機器(形態要素)を洗い出し(抜粋)

2. 機能展開・形態要素抽出 (2/3) - Morphological Matrix I

- 必要機器の他、機体配置や構成についても抽出し、選択の可能性のある形態要素一覧を整理(Morphological Matrix I)。

形態要素	1	2	3	4	5 …	備考
離陸滑走装置	ギア	フロート	スキッド	カタパルト	リニアモータ	
降着滑走装置	ギア	フロート	スキッド	エアバック	胴体着陸	
主翼種類	テーパ	楕円	後退	デルタ	オージ	詳細形状は形状設計で設定
主翼位置	低翼	中翼	中央	後方	…	
水平尾翼種類	従来型	カナード	Tテール	Vテール	…	詳細形状は形状設計で設定
垂直尾翼種類	従来型	ウイングチップ	ツインテール	Hテール	…	詳細形状は形状設計で設定
姿勢制御装置	ラダー	エルロン	エレベータ	エルボン	RCS	
操縦系構成	AVIO TYPE 1~3 (別表をみよ)					
計測系構成	AVIO TYPE 1~3 (別表をみよ)					
GN系構成	GPS	地上トレース				
通信系構成	AVIO TYPE 1~3 (別表をみよ)					
空中制動機器種類	ドラッグシュート	エアブレーキ				
地上制動機器種類	ドラッグシュート	エアブレーキ	ギアブレーキ	ストラスリバーサ		
キャビン構成	シート	遊泳空間	与圧	空調		
キャビン位置	機体前方	機体中央	機体後方			
眺望窓位置	下方	側面	上方	天井	船外カメラ	
ドア位置	前方下面	前方側面	前方上面	中央側面	…	
ロケットエンジン数	1	2	3	4		性能は形状設計で選定
ロケットエンジン推薬	LOX/LH2	LOX/LNG	LOX/ケロシン			
ジェットエンジン数	1	2	3	4		性能は形状設計で選定
ジェットエンジン位置	胴体内部	胴体側面	胴体上	主翼上	…	
ジェット燃料タンク構成	主翼内部	胴体内部				
TPS構成	耐熱金属	耐熱タイル	アプレータ			
脱出機器構成	非常口	スライダ	射出座席	カプセルキャビン		
補給系構成	機体内臓	外部機器(移動)	外部機器(設備)			
運用中輸送方法	自走(自飛行)	分割空輸	全体空輸	分割輸送	全体航送	

Morphological Matrix I
「機体を取り得る形態の要素とは?」

2. 機能展開・形態要素抽出 (3/3) - Morphological Matrix II

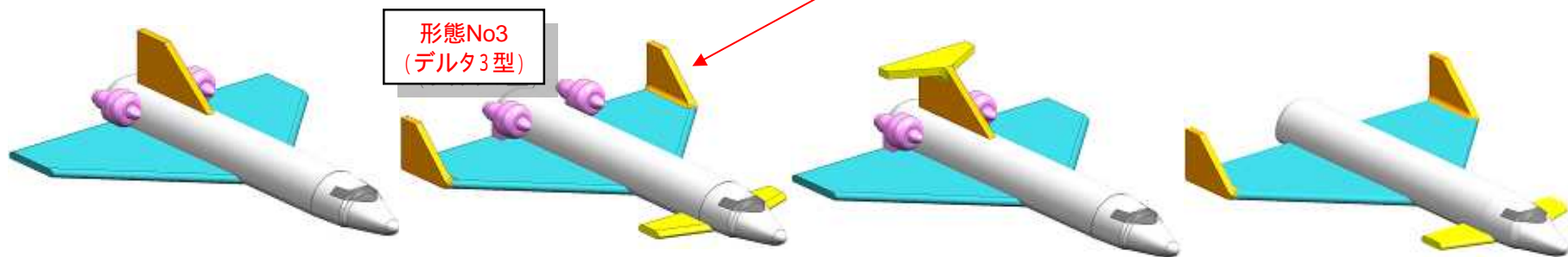
- その中から、要素単体で優劣がつけられるものを評価して絞り込み、残った要素から適用性の高い機体候補の組合せを複数生成。

形態要素	1	2	3	4	5 ...	備考
離陸滑走装置	ギア	フロント	スキッド	カタバルト	リニアモータ	
降着滑走装置	ギア	フロント	スキッド	エアバック	胴体着陸	
主翼種類	デルタ	橋口	後浪	デルタ	オージ	詳細形状は形状設計で設定
主翼位置	低翼	中翼	中央	後方		
水平尾翼種類	従来型	カナード	Tテール	Vテール	なし	詳細形状は形状設計で設定
垂直尾翼種類	従来型	ウイングチップ	ツインテール	Hテール	...	詳細形状は形状設計で設定
姿勢制御装置	ラダー	エルロン	エレベータ	エルボン	RCS	
操縦系構成		AVIO TYPE 1~3 (別表をみよ)				
計測系構成		AVIO TYPE 1~3 (別表をみよ)				
GN系構成	GPS	地上レーズ				
通信系構成		AVIO TYPE 1~3 (別表をみよ)				
空中制動機器種類	ドラッグシュート	エアブレーキ				
地上制動機器種類	ドラッグシュート	エアブレーキ	ギアブレーキ	ストラスリパーサ		
キャビン構成	シート	遊泳空間	与圧	空調		
キャビン位置	機体前方	機体中央	機体後方			
眺望窓位置	下方	側面	上方	天井	船外カスラ	
ドア位置	前方下面	前方側面	前方上面	中央側面	...	
ロケットエンジン数	1	2	3	4		性能は形状設計で選定
ロケットエンジン推進	LOX/LH2	LOX/LNG	LOX/ケロシン			
ジェットエンジン数	1	2	3	4		性能は形状設計で選定
ジェットエンジン位置	胴体内部	胴体側面	胴体上	主翼上	...	
ジェット燃料タンク構成	主翼内部	胴体内部				
TPS構成	耐熱金属	耐熱タイル	アブレータ			
脱出機器構成	非常口	スライダ	射出座席	カプセル	キャビン	
補給系構成	機体内蔵	外部機器(移動)	外部機器(設備)			
運用中輸送方法	自走(自飛行)	分割空輸	全体空輸	分割輸送	全体航送	

候補No	1	2	3	4	5	6 ...
水平尾翼種類	従来型	なし	カナードTテール			...
垂直尾翼種類	従来型	ウイングチップ	従来型			...
ロケット燃料		LNG				LH2...
低高度上昇		搭載ジェットエンジン				母機...
ジェットエンジン位置		翼上				胴体横...

Morphological Matrix II (抜粋)
単体で評価できる形態要素を絞り込み

Morphological Matrix I



適用性の高い機体候補を組合せ生成(一例)

3. TOPSIS法を用いた形態トレードオフ (1/8)

- Pugh Evaluation Matrix (Decision Matrix)

- 複数の機体候補に対し、QFDで抽出された要求機能(クライテリア)毎に優劣を判定する

Pugh Evaluation Matrix

要求特性	技術特性	重要度									
		開発コスト	運用コスト	全備重量	離着陸滑走性能	揚力発生性能	空力安定性能	機体構造性能	機体操縦性能	機体計測性能	機体耐熱性能
ミッション要求	離着陸1000m距離	4.3	3.1	3.9	3.2	3.9	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
機体要求	開発コスト	4.3	3.1	3.9	3.2	3.9	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
	運用コスト	3.65	3.1	3.9	3.2	3.9	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
	全備重量	2.5	3.1	3.9	3.2	3.9	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
サービス要求	離着陸滑走性能	4.3	3.1	3.9	3.2	3.9	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
	揚力発生性能	3.9	3.1	3.9	3.2	3.9	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
	空力安定性能	3.7	3.1	3.9	3.2	3.9	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
	機体構造性能	3.7	3.1	3.9	3.2	3.9	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7

Pugh Concept Selection		Design Concepts													
		デルタ1	デルタ2	デルタ3	デルタ4	カナード1	カナード2	カナード3	カナード4	コンベンショナル1	コンベンショナル3	コンベンショナル2	Tタイプ1	Tタイプ2	
形態	番号	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
開発コスト	2.9	S	S	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
生産コスト	3.2	S	S	S	S	S	S	S	S	-	-	-	-	S	
全備重量	2.5	S	-	-	S	S	S	S	-	-	-	-	-	-	
離着陸滑走機能	4.3	S	S	S	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
揚力発生機能	3.9	+	S	+	S	+	S	+	S	+	S	+	S	+	
空力安定機能	3.7	S	S	S	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
機体操縦機能	4.0	S	+	+	S	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
機体計測機能	3.8	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
ナビ機能	0.5	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
通信機能	1.5	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
制動機能	3.7	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	+	
キャビン機能	2.8	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
眺望能力	1.3	S	S	S	+	+	+	+	-	-	-	-	-	S	
機体アクセス性	1.9	S	S	S	S	S	S	S	-	-	-	-	-	S	
ロケットエンジン	2.9	S	+	+	S	S	+	+	-	-	-	-	-	-	
ジェットエンジン	2.8	+	S	+	S	+	S	+	S	-	S	-	S	-	
燃料貯蔵供給機能	2.5	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
耐荷重	3.9	S	-	-	S	S	-	-	S	S	-	-	S	-	
耐熱	3.2	+	S	+	S	+	S	+	-	S	-	S	S	+	
冗長機能	3.7	S	+	+	S	S	+	+	S	S	+	+	S	S	
脱出機能	1.9	S	+	S	+	+	+	+	-	-	-	-	-	S	
補給機能	0.5	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	
機器モジュール化	0.9	+	S	+	S	+	S	+	S	+	S	+	S	+	
輸送機能	1.0	S	S	S	S	S	S	S	-	-	-	-	-	-	
+ (plus) Pugh Sums		0	4	4	7	4	8	7	11	3	5	4	6	4	8
- (minus) Pugh Sums		0	0	2	2	1	1	2	2	9	9	10	10	4	5
Concept Rating (+) - (-)		0	4	2	5	3	7	5	9	-6	-4	-6	-4	0	3

候補No	1	2	3	4	5	6...
水平尾翼種類	従来型	なし	カナードTテール	...	...	...
垂直尾翼種類	従来型	ウイングチップ	従来型	...	...	...
ロケット燃料	LNG	...	...	...	LH2...	...
低高度上昇	搭載ジェットエンジン	...	...	...	母機...	...
ジェットエンジン位置	翼上	...	...	...	胴体構...	...

機体候補

基準形態

QFDの重要度

QFDの要求機能

クライテリアに対し、基準機体よりもその項目が優れていれば (+)、劣っていれば (-)、差異が無ければ (s) の価値付けをする。

3 . TOPSIS法を用いた形態トレードオフ (2/8) - 定量化(1/3) - スコアリング

- Pugh Evaluation Matrixの結果に数値を当てはめる。

Pugh Concept Selection		重要度(QFDより)	Design Concepts														
			デルタ1	デルタ2	デルタ3	デルタ4	カナード1	カナード2	カナード3	カナード4	コンベンショナル1	コンベンショナル2	コンベンショナル3	コンベンショナル4	Tタイプ1	Tタイプ2	
形態	番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
ク ラ イ テ リ ア	開発コスト	2.9	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	生産コスト	3.2	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	1	1	5	5	
	全備重量	2.5	5	5	1	1	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	
	離着陸滑走機能	4.3	5	5	5	5	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
	揚力発生機能	3.9	5	9	5	9	5	9	5	9	5	9	5	5	5	5	
	空力安定機能	3.7	5	5	5	5	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
	機体操縦機能	4.0	5	5	9	9	5	5	9	9	9	9	9	9	9	9	
	機体計測機能	3.8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	ナビ機能	0.5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	通信機能	1.5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	制動機能	3.7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	キャビン機能	2.8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	眺望能力	1.3	5	5	5	5	9	9	9	9	1	1	1	1	1	1	
	機体アクセス性	1.9	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	
	ロケットエンジン	2.9	5	5	9	9	5	5	9	9	1	1	1	1	1	1	
	ジェットエンジン	2.8	5	9	5	9	5	9	5	9	5	1	5	5	5	5	
	燃料貯蔵供給機能	2.5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	耐荷重	3.9	5	5	1	1	5	5	1	1	5	5	1	1	1	1	
	耐熱	3.2	5	9	5	9	5	9	5	9	1	5	1	5	5	9	
	冗長機能	3.7	5	5	9	9	5	5	9	9	5	5	9	9	5	5	
	脱出機能	1.9	9	5	9	5	9	9	9	9	1	1	1	1	5	5	
	補給機能	0.5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	機器モジュール化	0.9	5	9	5	9	5	9	5	9	5	9	5	9	5	9	
	輸送機能	1.0	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	
	+ (plus) Pugh Sums			1	4	4	7	4	8	7	11	3	5	4	6	4	8
	- (minus) Pugh Sums			0	0	2	2	1	1	2	2	9	9	10	10	4	5
Concept Rating (+) - (-)			1	4	2	5	3	7	5	9	-6	-4	-6	-4	0	3	

ク
ラ
イ
テ
リ
ア

ク
ラ
イ
テ
リ
ア
に
対
し、
基
準
機
体
よ
り
も
そ
の
項
目
が

優れていれば (+) 9
差異が無ければ(-) 5
劣っていれば (s) 1

をスコアとして割り当てる。

3. TOPSIS法を用いた形態トレードオフ (3/8) - 定量化(2/3) - 正規化

- ・ クライテリア毎に, スコアの2乗和で正規化する

形態 番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
開発コスト	2.9	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
生産コスト	3.2	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	1	1	5	5
全備重量	2.5	5	5	1	1	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1

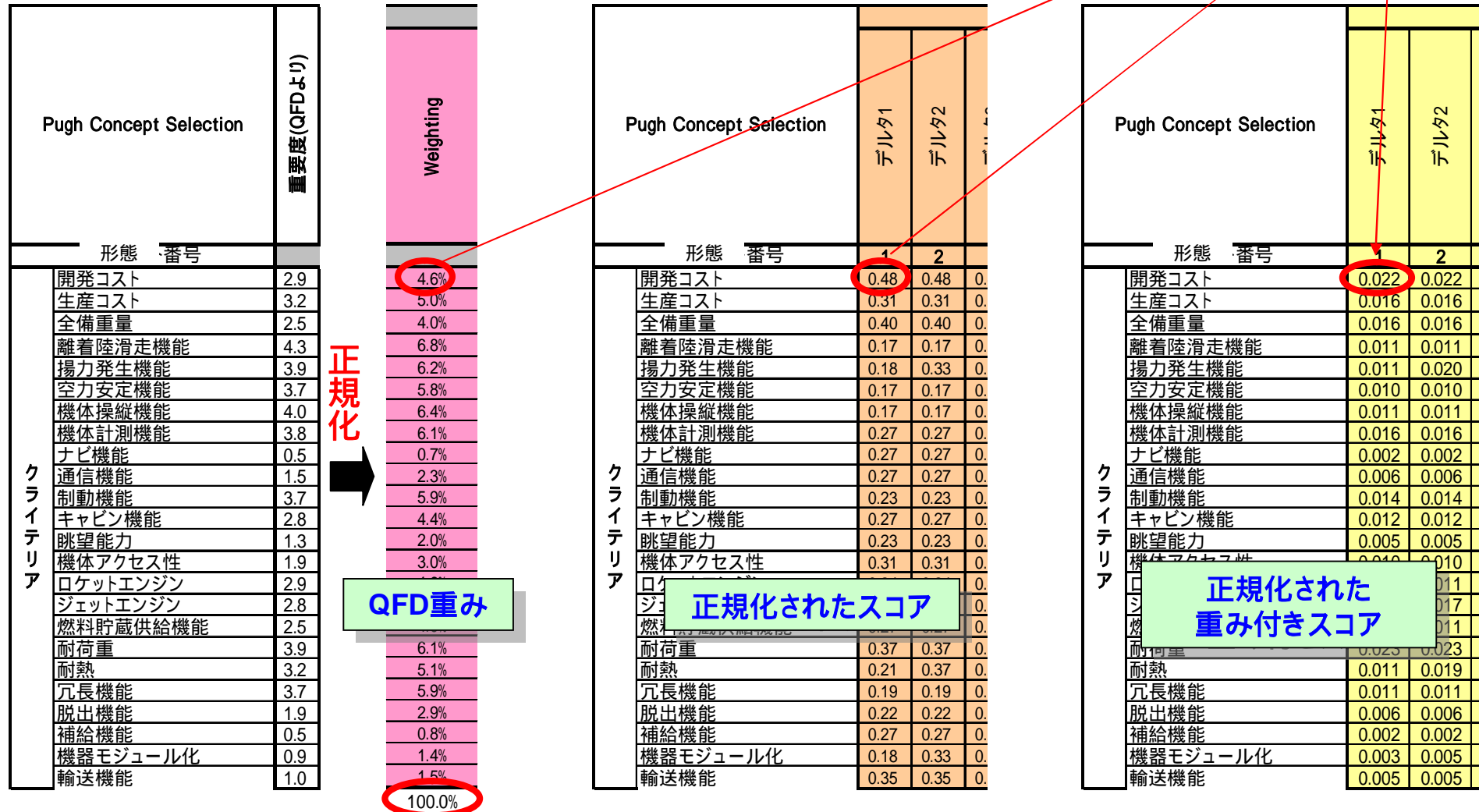
$$0.48 = \frac{5}{\sqrt{5^2 + 5^2 + 5^2 + 5^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2}}$$

Pugh Concept Selection		重要度(QFDより)	Table 3													
			デルタ1	デルタ2	デルタ3	デルタ4	カナード1	カナード2	カナード3	カナード4	コンベンションナル1	コンベンションナル2	コンベンションナル3	コンベンションナル4	Tタイプ1	Tタイプ2
形態	番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
クライテリア	開発コスト	2.9	0.48	0.48	0.48	0.48	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	生産コスト	3.2	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.06	0.06	0.06	0.06	0.31	0.31
	全備重量	2.5	0.40	0.40	0.08	0.08	0.40	0.40	0.40	0.40	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
	離着陸滑走機能	4.3	0.17	0.17	0.17	0.17	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
	揚力発生機能	3.9	0.18	0.33	0.18	0.33	0.18	0.33	0.18	0.33	0.18	0.33	0.18	0.33	0.18	0.33
	空力安定機能	3.7	0.17	0.17	0.17	0.17	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
	機体操縦機能	4.0	0.17	0.17	0.30	0.30	0.17	0.17	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
	機体計測機能	3.8	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
	ナビ機能	0.5	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
	通信機能	1.5	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
	制動機能	3.7	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.42	0.42
	キャビン機能	2.8	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
	眺望能力	1.3	0.23	0.23	0.23	0.23	0.41	0.41	0.41	0.41	0.05	0.05	0.05	0.05	0.23	0.23
	機体アクセス性	1.9	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.06	0.06	0.06	0.06	0.31	0.31
	ロケットエンジン	2.9	0.24	0.24	0.43	0.43	0.24	0.24	0.43	0.43	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	ジェットエンジン	2.8	0.21	0.37	0.21	0.37	0.21	0.37	0.21	0.37	0.21	0.04	0.21	0.04	0.21	0.37
	燃料貯蔵供給機能	2.5	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
	耐荷重	3.9	0.37	0.37	0.07	0.07	0.37	0.37	0.07	0.07	0.37	0.37	0.07	0.07	0.37	0.07
	耐熱	3.2	0.21	0.37	0.21	0.37	0.21	0.37	0.21	0.37	0.04	0.21	0.04	0.21	0.21	0.37
	冗長機能	3.7	0.19	0.19	0.34	0.34	0.19	0.19	0.34	0.34	0.19	0.19	0.34	0.34	0.19	0.19
脱出機能	1.9	0.22	0.22	0.39	0.22	0.39	0.39	0.39	0.39	0.04	0.04	0.04	0.04	0.22	0.22	
補給機能	0.5	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	
機器モジュール化	0.9	0.18	0.33	0.18	0.33	0.18	0.33	0.18	0.33	0.18	0.33	0.18	0.33	0.18	0.33	
輸送機能	1.0	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	

3. TOPSIS法を用いた形態トレードオフ (4/8) - 定量化(3/3) - 重要度付け

- 正規化されたスコアにQFDの重要度をかける

$$0.46 \times 0.48 = 0.022$$



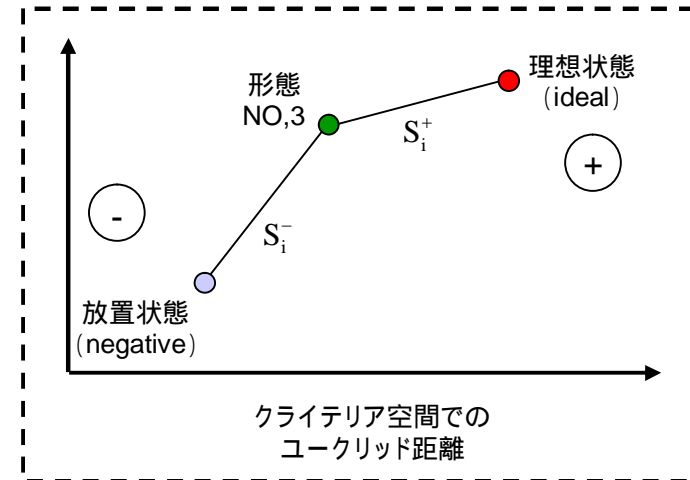
3. TOPSIS法を用いた形態トレードオフ (6/8)

- 理想状態からの距離・放置状態からの距離の算出

- 正規化された重み付きスコアを用いて、各形態の「理想状態からの距離」と「放置状態からの距離」を算出。

理想状態からの距離: $S_i^+ = \sqrt{\sum (v_i - v_{ideal})^2}$

放置状態からの距離: $S_i^- = \sqrt{\sum (v_i - v_{negative})^2}$



Pugh Concept Selection				
	デルタ1	デルタ2	デルタ3	デルタ4
形態番号	1	2	3	4
開発コスト	0.022	0.022	0.022	0.02
生産コスト	0.016	0.016	0.016	0.01
全備重量	0.016	0.016	0.003	0.00
離着陸滑走機能	0.011	0.011	0.011	0.01
揚力発生機能	0.011	0.020	0.011	0.02
空力安定機能	0.010	0.010	0.010	0.01
機体操縦機能	0.011	0.011	0.019	0.01
機体計測機能	0.016	0.016	0.016	0.01
ナビ機能	0.002	0.002	0.002	0.00
通信機能	0.006	0.006	0.006	0.00
制動機能	0.014	0.014	0.014	0.01
キャビン機能	0.012	0.012	0.012	0.01
眺望能力	0.005	0.005	0.005	0.00
機体アクセス性	0.010	0.010	0.010	0.01
ロケットエンジン	0.011	0.011	0.020	0.02
ジェットエンジン	0.009	0.017	0.009	0.01
燃料貯蔵供給機能	0.011	0.011	0.011	0.01
耐荷重	0.023	0.023	0.005	0.00
耐熱	0.011	0.019	0.011	0.01
冗長機能	0.011	0.011	0.020	0.02
脱出機能	0.006	0.006	0.011	0.00
補給機能	0.002	0.002	0.002	0.00
機器モジュール化	0.003	0.005	0.003	0.00
輸送機能	0.005	0.005	0.005	0.00

Table 5	
A+	A-
0.022	0.004
0.016	0.003
0.016	0.003
0.020	0.011
0.020	0.011
0.017	0.010
0.019	0.011
0.016	0.016
0.002	0.002
0.006	0.006
0.025	0.014
0.012	0.012
0.008	0.001
0.010	0.002
0.020	0.002
0.017	0.002
0.011	0.011
0.023	0.005
0.019	0.002
0.020	0.011
0.011	0.001
0.002	0.002
0.005	0.003
0.005	0.001

$$\sqrt{\sum (v_i - v_{ideal})^2} = S_i^+$$

$$\sqrt{\sum (v_i - v_{negative})^2} = S_i^-$$

	デルタ1	デルタ2	デルタ3	デルタ4
コンセプト番号	1	2	3	4
(S+) 距離	0.027	0.023	0.031	0.028
(S-) 距離	0.037	0.042	0.035	0.040

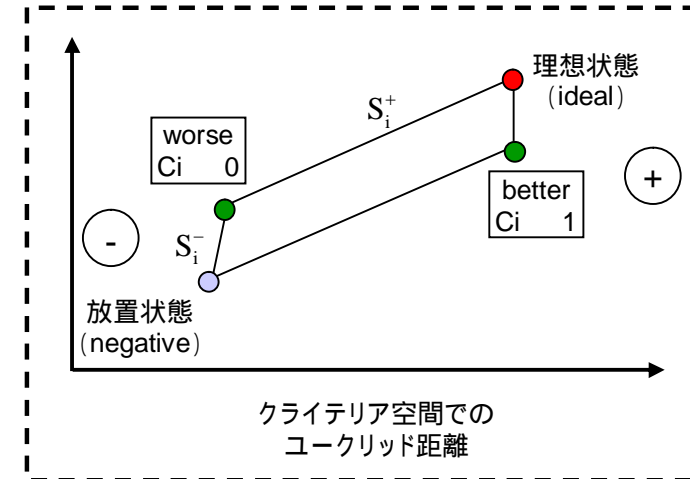
$$V_i - V_{ideal} - V_{negative}$$

3. TOPSIS法を用いた形態トレードオフ (7/8) - 形態案の順位付け

- TOPSISの「最適な形態は、理想状態に最も近く、かつ放置状態に最も遠いところにある」という視点から、形態案の順位付け。

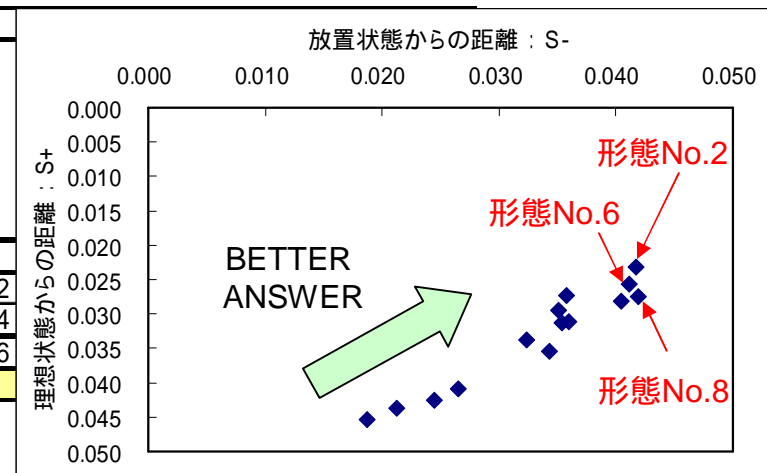
相対距離:
$$C_i = \frac{S_i^-}{(S_i^* + S_i^-)}$$

C_i は、0 ~ 1を取る
0: 最悪
1: 最善



TOPSIS Result - 1st Trial									
	デルタ1	デルタ2	デルタ3	デルタ4	カード1	カード2	カード3	カード4	コンベンショナル
コンセプト番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
(S+) 距離	0.027	0.023	0.031	0.028	0.029	0.026	0.031	0.028	0.042
(S-) 距離	0.037	0.042	0.035	0.040	0.035	0.041	0.036	0.042	0.024
相対距離	0.578	0.643	0.530	0.589	0.543	0.615	0.535	0.603	0.366
順位	5	1	8	4	6	2	7	3	12

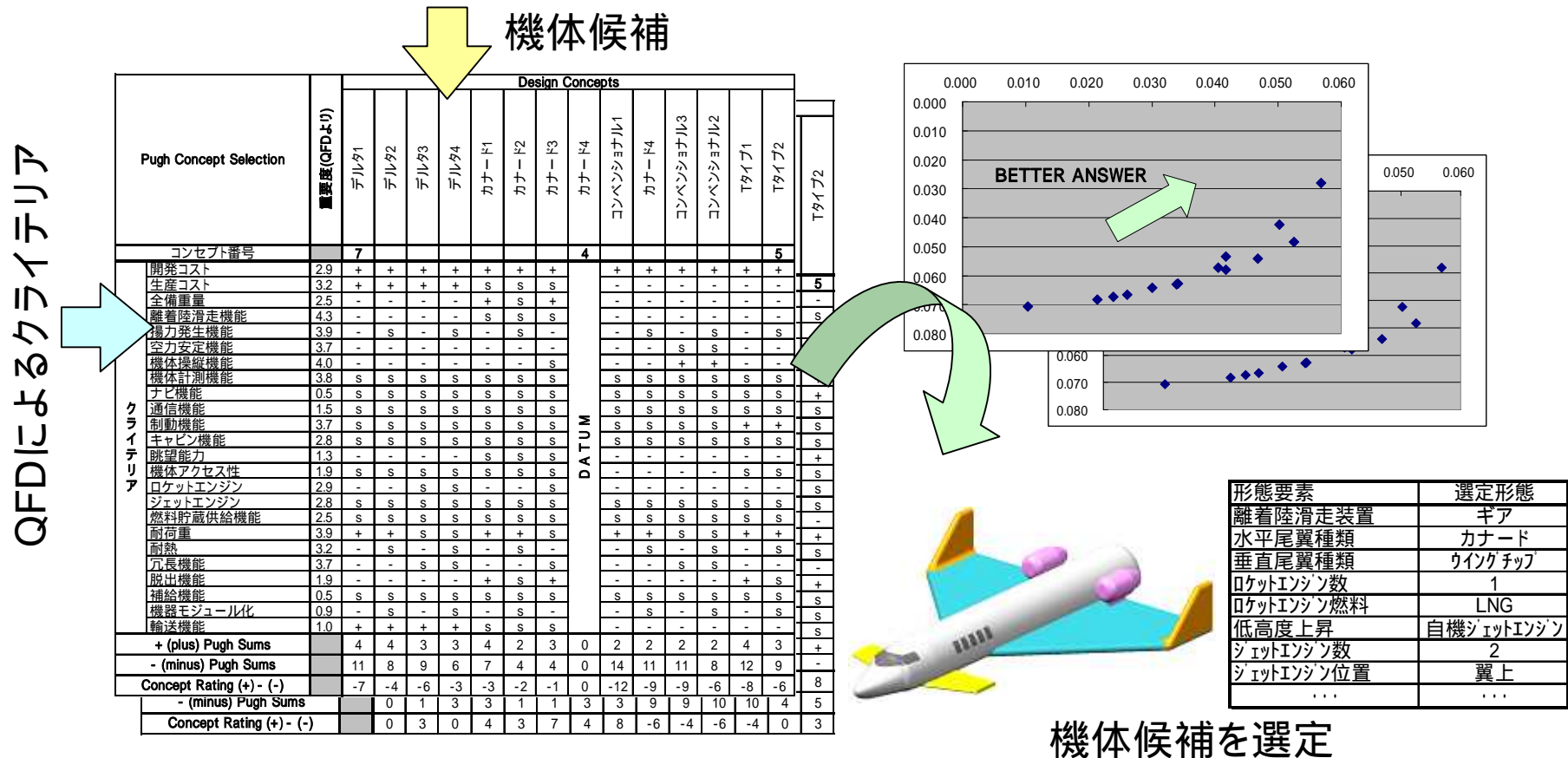
この場合、「*コンセプト1を基準(DATUM)とした場合には、No.2が最良。ただし、No.6、No.8なども近い位置」という結果。



3. TOPSIS法を用いた形態トレードオフ (8/8)

- 繰り返し

- TOPSIS結果はDATUMをどこに取るかに寄る。よって他の候補も基準に取り、TOPSISを複数回繰り返し返すことで最適形態を勘案・判断し、決定。



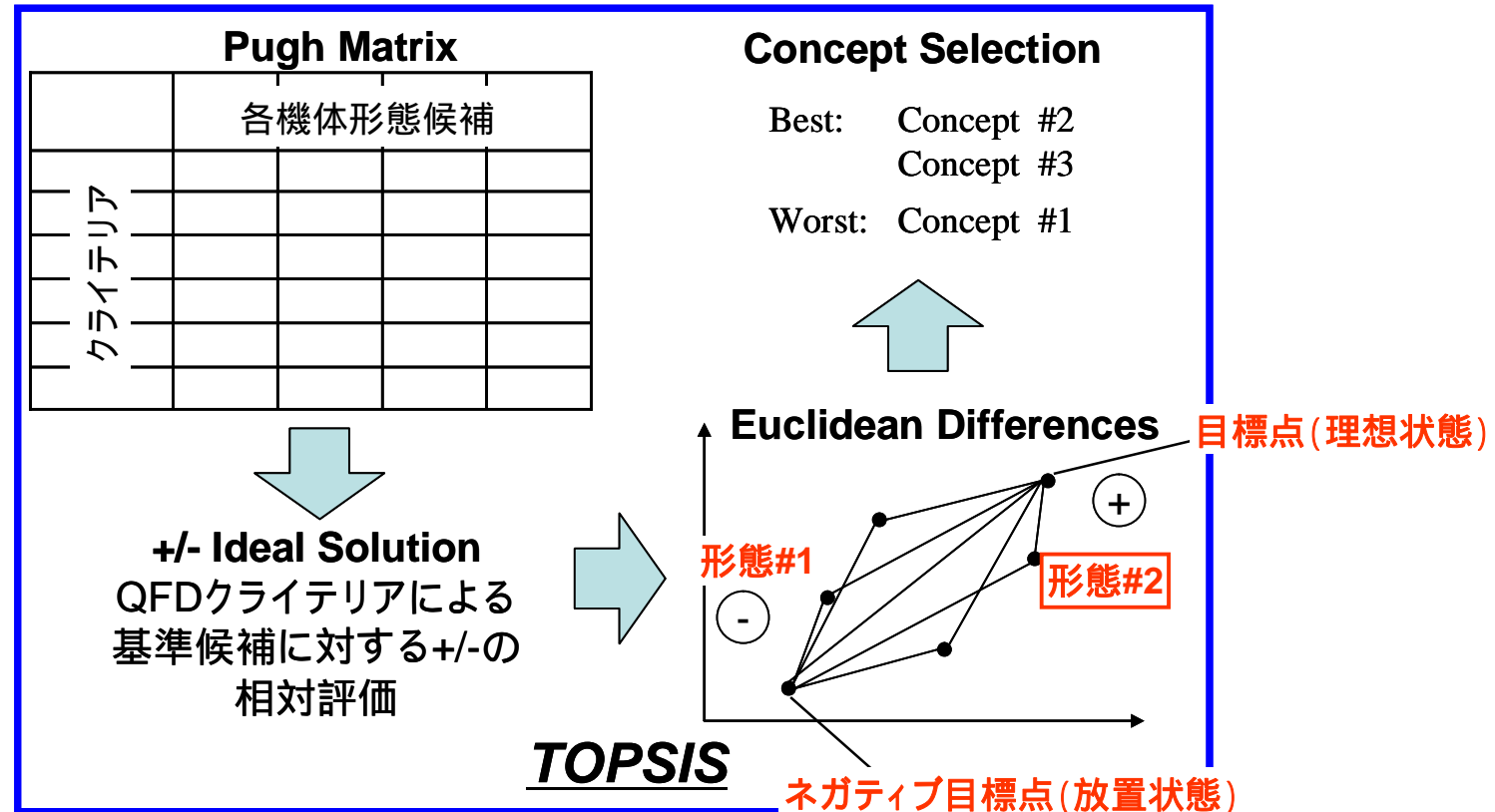
機体候補を選定

顧客要求を良く満たすベースライン形態を選定

補足:TOPSIS法とは

Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

- 多目的形態トレードオフ法の中の目標点法の発展版。
- 最適な形態は目標点に最も近く、かつネガティブ目標点から最も遠いものであるという仮説に基づき、算出を行う方法。
(ここで、ネガティブ目標点とは「現状のまま放置すると到達してしまう状態」)。



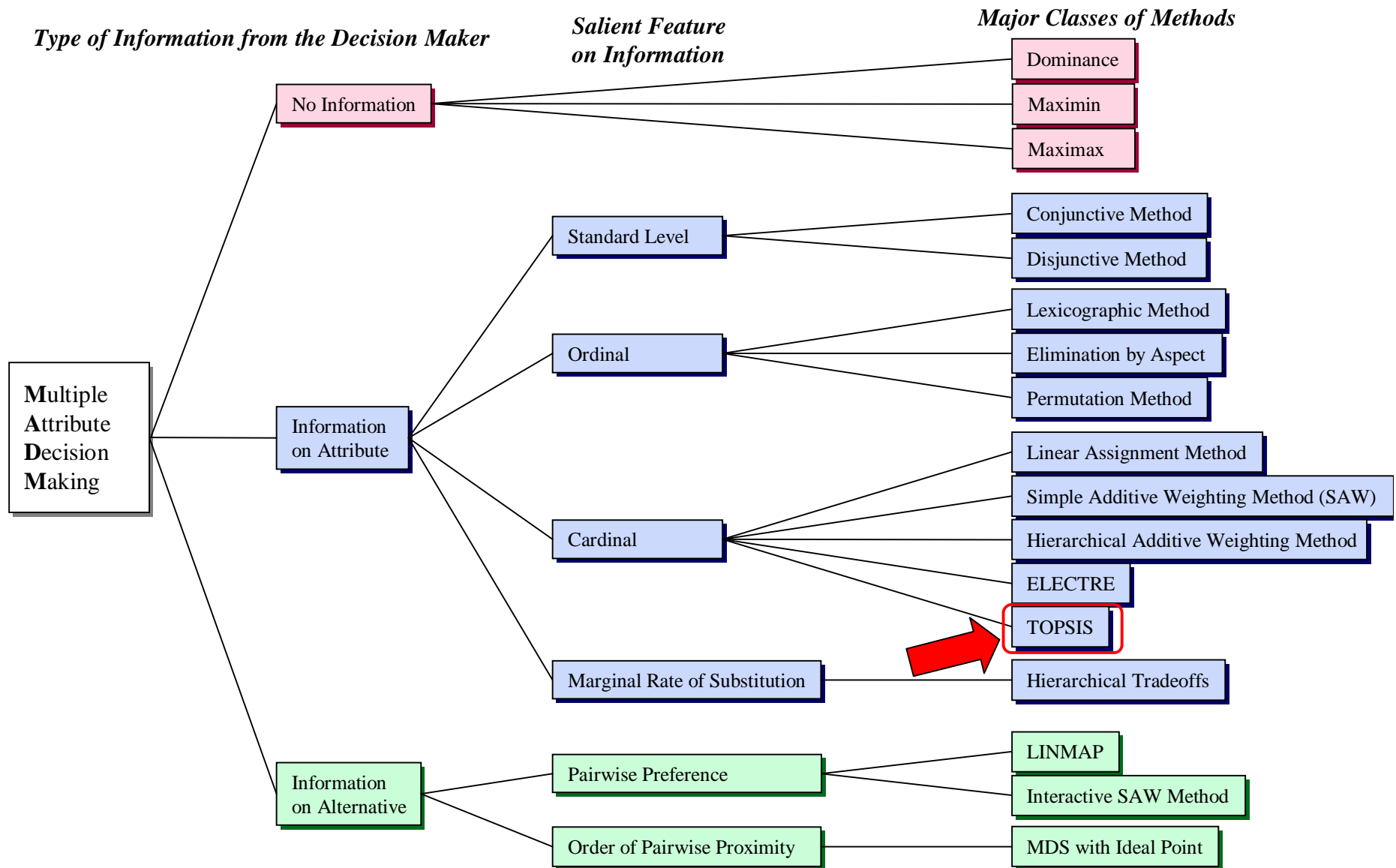
【参考】形態トレードオフ法の分類

社会基盤投資における多基準分析手法に関する調査
報告書 (2003), 国交省委託民間コンサル会社作成



表 19 多基準分析手法の一覧

多基準分析手法	種類	手法の概要	最終成果物	優れている点	主な難点
トレード・オフ分析	広義	あらかじめ設定された同一の目標集合を達成するための代替案を比較する手法。	複数代替案への資源配分量	代替案への資源配分が検討可能	目標を一点に定める必要がある
目標達成マトリックス	広義	各プロジェクトが多数の項目に対して与える影響に関する一連の情報をマトリックスにまとめる手法。	マトリックス	有用な情報が整理される	整理するだけであり、更なる分析が必要
加重総和	狭義	各クライテリアにウェイトを設定、各クライテリアに対するスコアの値をそのクライテリアのウェイトと乗じ、すべてのウェイト付けされたスコアを加算し、代替案の価値を算出する手法。	代替案ごとの評価指標	手法が単純でわかりやすい	ウェイト付けの恣意性
目標達成法	狭義	代替案の目標を定量的尺度に変換することにより、プロジェクトの目標に関する各代替案の達成度を計算し、最も望ましい代替案を選択する手法。	代替案ごとの評価指標、マトリックス	標準化数値に明確な意味がある	目標を一点に定める必要がある
TOPSIS 目標点法	狭義	クライテリアの目標レベルを設定し、どれだけ目標に近い状態に到達したかという観点で分析する手法。	代替案ごとの評価指標	手法が図で直観的に理解可能	算出手順が若干複雑
価値・効用関数	狭義	加重総和と異なり、関数を各クライテリアに応じて、個別に設定し、価値・効用の分析を行う手法。	代替案ごとの評価指標	理論的に洗練されている	一般に関数の推定が困難
レジーム法	狭義	代替案の対比較を行う。各クライテリアについて、代替案同士のペアをすべて比較し、クライテリアのウェイトの総和を算出することで、代替案間の優先順位を決める手法。	対の代替案間の評価指標	定性に対応可能	量的な違いの評価値への影響を無視
置換法	狭義	代替案を対比較して並べ替えることにより優越代替案を選別する手法。	順序ごとの評価指標	順序ごとに指標を出す	*指標の算出方法に依存
エバミックス法	狭義	クライテリアを定量的クライテリアと定性的クライテリアに分け、両者のスコアを標準化し統合することで、すべての代替案について完全な順序付けを可能にする手法。	対の代替案間の評価指標	定性・定量別の指標が中間成果物	*指標の算出方法に依存
階層分析法 (AHP)	狭義	プロジェクトの最終目標、クライテリア、代替案の関係をあらかじめ階層構造化し、上位項目に対する下位項目に関する対比較を行うことで、各階層の要素間のウェイトを算定、さらに階層全体の総合ウェイトを算定することで、代替案の優先順位を決定する手法。	代替案ごとの評価指標	対比較の精度が高い 定性対応可能	対比較が多く、作業量大
コンコーダンス分析	狭義	代替案の対比較を、プロジェクト効果や選好ウェイトが代替案間の対の優先関係を承認するか、または否定する度合いによって行われる手法。	代替案ごとの評価指標	順序を、調和、不調和の両面から検証	手続きが複雑
アウトランキング法	狭義	コンコーダンス分析で作成する指標を用いて、代替案間の順序付けを行う手法。	順序付け	優越性の意味を緩めた順序付け	「比較不能」のケースがある 閾値の恣意性



7.まとめ

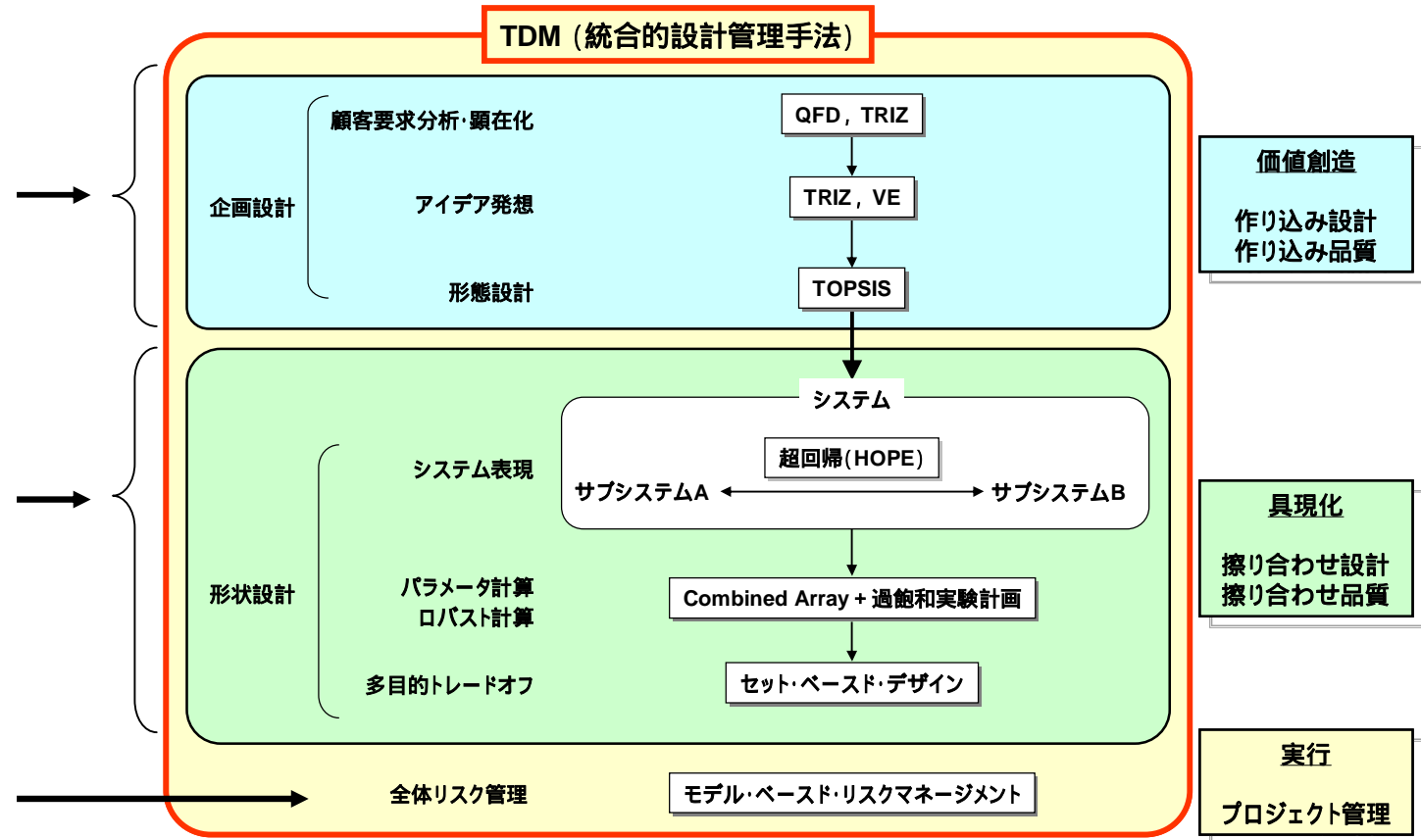
発展型TDM設計フロー

価値を作り込むには、
形態設計への拡張が
必要であることに気づ
いた。

形態が与えられれば、
形状の多目的トレード
オフ設計が出来るよう
になった。



リスクを取り入れること
で実際の開発で使える
ようになった。



TDM の今後の課題・研究テーマ

価値設計・形態設計への拡張

価値創造・アイデア発想の取り込み

リスク管理表の拡張

開発管理方法。開発全体コスト(ライフサイクルコスト)の最小化。

入出力関係 / FMEA / FTA / 部品構成 / コスト / スケジュール等の設計上で必要となる様々な情報を一元管理する手法を検討する。

理論化

全設計解集合の稠密度の指標化

大規模シミュレーションのロバスト設計手法

少ない計算回数でロバスト設計を実現するために、より少ない回数の実験計画が必要。

過飽和実験計画・Combined Arrayの適用を検討中

予測外れ問題

リスクマネジメントで数学モデルの曖昧さ(リスク)が低減できない場合に備えて、上位システムで調整余裕をできるだけ確保する設計手法を検討する。

実設計への適用

実設計へ積極的な適用を通し、本手法の適用ノウハウの蓄積および改善を行う。

ツール化

- ー サブルーチン集の作成。

これまでの活動を通した手ごたえ

- 各担当・各部門で、高度化・専門化・分業化された個別設計技術を、プロジェクト全体で科学的に統合・管理する手法として有効。
- IHIの多くの製品に適用できた。評価指標にコストを入れる必要がある。
- TDMプロセス自体が高信頼性設計・科学的設計のコミュニケーションツールになっており、グループ内の底上げに貢献しつつあると実感。
(「評価指標は何?」「設計変数は?」「誤差因子は?」「数学モデルは?」「ロバスト」「直交表」「感度」という会話が日常的に出てくるようになった)
「全員が高信頼性設計・科学的設計の担当」になることが目標



ソフト大部屋開発の実現