

統合的設計管理手法に関する研究

Study on Methodology for Total Design Management

呉 宏 堯 技術開発本部基盤技術研究所解析技術部 主査
森 初 男 技術開発本部基盤技術研究所解析技術部 主幹
渡 邊 修 技術開発本部基盤技術研究所解析技術部 主査

本研究では、設計現場や顧客の要望にこたえて、実用性と設計透明性を確保しながら、多目的トレードオフ設計およびロバスト設計などの設計手法とリスク管理手法を統合した統合的設計管理手法 (TDM: Total Design Management) を構築する。本稿では TDM の手順を示すほか、片持ち梁問題の解法をとおして、製品開発で遭遇するさまざまな誤差およびリスク要因に対して、設計段階でのフロントローディングな対応が可能であることを述べる。設計適用事例として、インペラのラインナップの全形状について、共振離調率設計が短時間で効果的に実施できたことも述べる。

We suggest a new design methodology for a multipurpose trade-off design and a risk management, called Total Design Management (TDM). TDM has two important concepts: "Set Based Design (SBD)" and "Model based Risk management (MBR)." In SBD, designers firstly calculate the total set of design solutions and then narrow down the solutions complying with the design requirements or constraint conditions by a filtering method. SBD is very simple, transparent and practical process. In MBR, designers manage a design risk based on designers' non-confidence of the mathematical models which they make or calculate. In this paper, we also indicate effectiveness of this methodology with two examples: cantilever problem and impeller design.

1. 緒 言

性能、コストおよびロバスト性をはじめとする複数の指標を評価でき、かつ設計透明性を確保できる実用的な設計手法が望まれている。

本研究では、設計現場や顧客の要望にこたえるため、実用性と設計透明性を確保しながら、多目的トレードオフ設計およびロバスト設計を含めたいろいろな設計手法とリスク管理手法の統合を目指した統合的設計管理手法 (TDM: Total Design Management) を構築する。

2. 現場の設計者が求める設計手法

設計者はさまざまな局面において、多くの条件を満たしつつ、向上させたい特性間のバランスがとれた製品となるように、各種寸法を決定していかなくてはならない。このような多入力・多出力対象の設計は、数理計画問題として研究されてきた。しかし、数学的に掘り下げれば掘り下げるほど、一般設計者からは縁遠いものとなり、設計現場において、高度な理論は敬遠されがちであることも事実である。

一方、良い製品を確実に開発するには、できるだけ多く

の知識を集めることが不可欠なため、顧客・設計者・専門家が全員参加できるような設計手法を現場は求めている。設計現場や顧客から見た設計手法に関する要望を以下に示す。なお、分類は文献⁽¹⁾から引用した。

2.1 システム設計技術

- (1) 複数の設計変数 (設計入力) をもつシステムで、評価指標 (設計出力) である性能、コストおよび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。
- (2) 計算時間が掛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。
- (3) 設計と連携したリスク管理をしたい。
- (4) 開発試験は最小限にしたい。

2.2 設計基盤技術

- (1) 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)。
- (2) 要求条件や制約条件の変更が生じたとき設計時の後戻り作業を最小にしたい。
- (3) 設計自由度が高い設計初期段階から適用したい。
- (4) 設計解の探索は短時間で行いたい。

(5) 設計手法は分かりやすい方が良い。

2.3 設計知識

(1) 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（設計透明性を確保したい）。

(2) ナレッジ（形式知）を残したい。

本研究では、これらの設計者の要望を実現するため、できるだけ平易な考え方で、十分実用に耐え得る設計手法を目指して、統合的設計管理手法（TDM）を構築する。

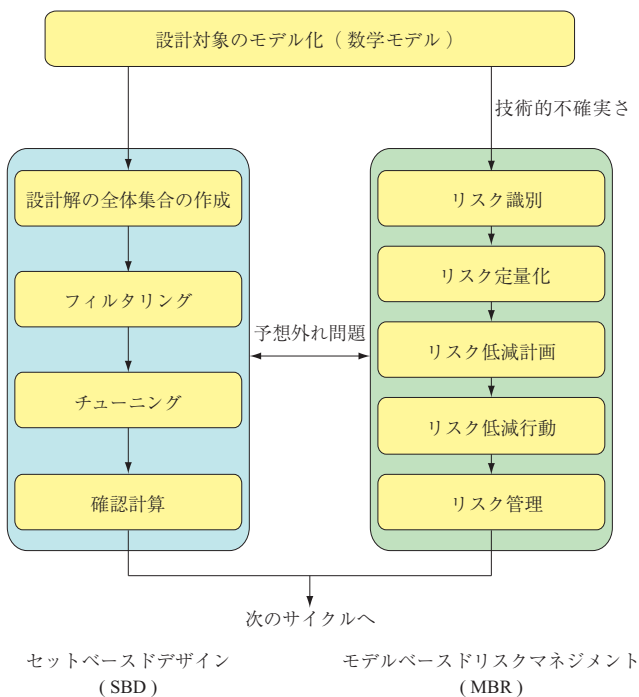
3. 統合的設計管理手法（TDM）⁽²⁾

2章で述べた設計現場の要望を反映し、本研究で提案する設計手法は、①多目的トレードオフ設計②ロバスト設計③リスク管理④設計透明性⑤実用性、の実現を念頭に置いている。

本手法の基本となるコンセプトは、第1図に示すように、共通の数学モデルを起点として、設計解の全体からトレードオフ設計を行うセットベースドデザイン（Set Based Design）と、適用した数学モデルに対する設計者の自信度を定量的に示し、開発管理を行うモデルベースドリスクマネジメントから成る。

3.1 数学モデル

実際の設計現場では、予測精度に差はあるものの、既存の技術から性能指標、コスト指標およびロバスト性指標を推算できる何らかの関係式、すなわち数学モデルを



第1図 統合的設計管理手法（TDM）
Fig. 1 Flowchart of total design management

事前に用意する。TDMではこの数学モデルが起点となる。なおここでいう数学モデルは、設計変数を評価指標に変換する数式群を広く指し、物理方程式のほかに、CAE（Computer-Aided Engineering）コード、実験式、文献式、経験式も含める。

3.2 セットベースドデザイン

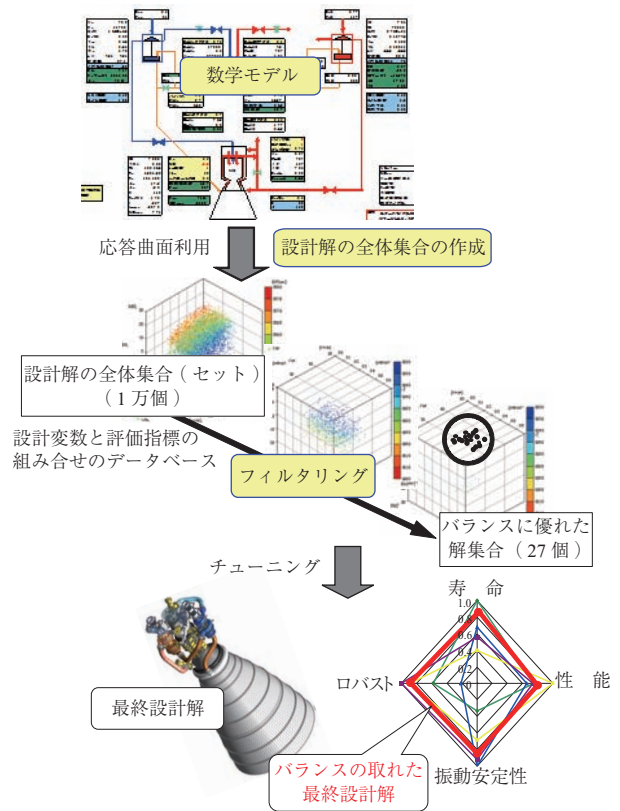
セットベースドデザイン（以下、SBDと呼ぶ）とは、設計変数と評価指標の両方を属性値にもつ設計解の全体集合（セット）のなかから、望ましい設計解を設計者と顧客の意志で選択する設計手法である。

第2図にロケットエンジンへの適用事例を示す。SBDの具体的な手順を以下に述べる。

3.2.1 手順

(1) 設計解の全体集合の作成

最初に数学モデルを用いて、設計変数が取り得る全範囲について設計解の全体集合を作成する。数学モデルの計算時間が非常に短い場合は、モンテカルロ法を直接数学モデルに適用できる。一方、大規模シミュレーションのように数学モデルの計算時間が長い場合は、応答曲面法（近似手法）を併用するとよい。



第2図 ロケットエンジンにおけるセットベースドデザインの適用事例
Fig. 2 Case of set based design (System design of rocket engine)

(2) フィルタリング

設計解の全体集合のなかから、要求条件や制約条件を満たす設計解を検索する。これをフィルタリングと呼ぶことにする。フィルタリングは SBD の特徴的な手法である。フィルタリング操作によって、設計解が絞り込まれる過程は、散布図を用いて容易に視覚化できる。

(3) チューニングと確認計算

フィルタリングで残った設計解をリスト化し、設計者が設計解に共通する特長を考察する。そのうえで、必要に応じて数値の丸め込みなどを行い、最終設計解の設計変数値の組み合わせを決定する。数学モデルを近似化した場合は、最初の数学モデルを用いて評価指標の再現性の確認計算を行う。

3.2.2 メリット

SBD は、設計解の良し悪しにかか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である。メリットを以下に示す。

(1) 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。評価指標の数が増えてもフィルタリングの探索時間はほとんど同じである（2.1 節(1)の実現）。

(2) 設計空間全体探索

要求条件や制約条件の成立性にかかわらず、選択可能なすべての設計可能解をデータベース化することが SBD の大きな特長である。このデータベースを用いることで、設計空間全体を把握しながら顧客の要求に近い設計解を迅速に提示できる。一方、顧客の要求が既存技術を超えることが分かれば、要求自体を見直すことや新技術の導入など、設計の上位方針の転換を早い段階で判断できる（2.2 節(1)の実現）。

(3) 後戻り作業の最小化

設計空間全体はデータベース化されているので、顧客の要求条件や制約条件の変更が生じたときには、数学モデルによる再計算は必要ない。フィルタリングからやり直せばよいので設計時の後戻りが少ない（2.2 節(2)、(3)の実現）。

(4) 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（2.3 節(1)、(2)の実現）。

(5) 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であり誰でも実施可能である。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（2.2 節(4)、(5)の実現）。

3.2.3 既存設計手法との比較

第 3 図に、SBD と既存設計手法との比較を示す。従来の典型的な最適設計フローと比較して SBD の設計フローは、要求条件と制約条件を満たす設計解の探索に数学モデルを介したフィードバックが含まれないことが大きな特長である。このような一方設計フローによって、要求条件や制約条件の変更が生じても、設計時の後戻り作業は最小となる。またパラメータ計算の並列化も容易になるので、並列計算機の数に反比例して計算時間を短縮できる。

SBD は、各ステップにおいて設計者が個別の設計手法を選択できる自由度があるので、設計者の工夫次第で適用・応用範囲が広がる手法である。設計者の技量に依存する部分を補うために、デザインレビューの実施を重視しており、3.3 節で述べるモデルベースドリスクマネジメントと関係している。

3.3 モデルベースドリスクマネジメント

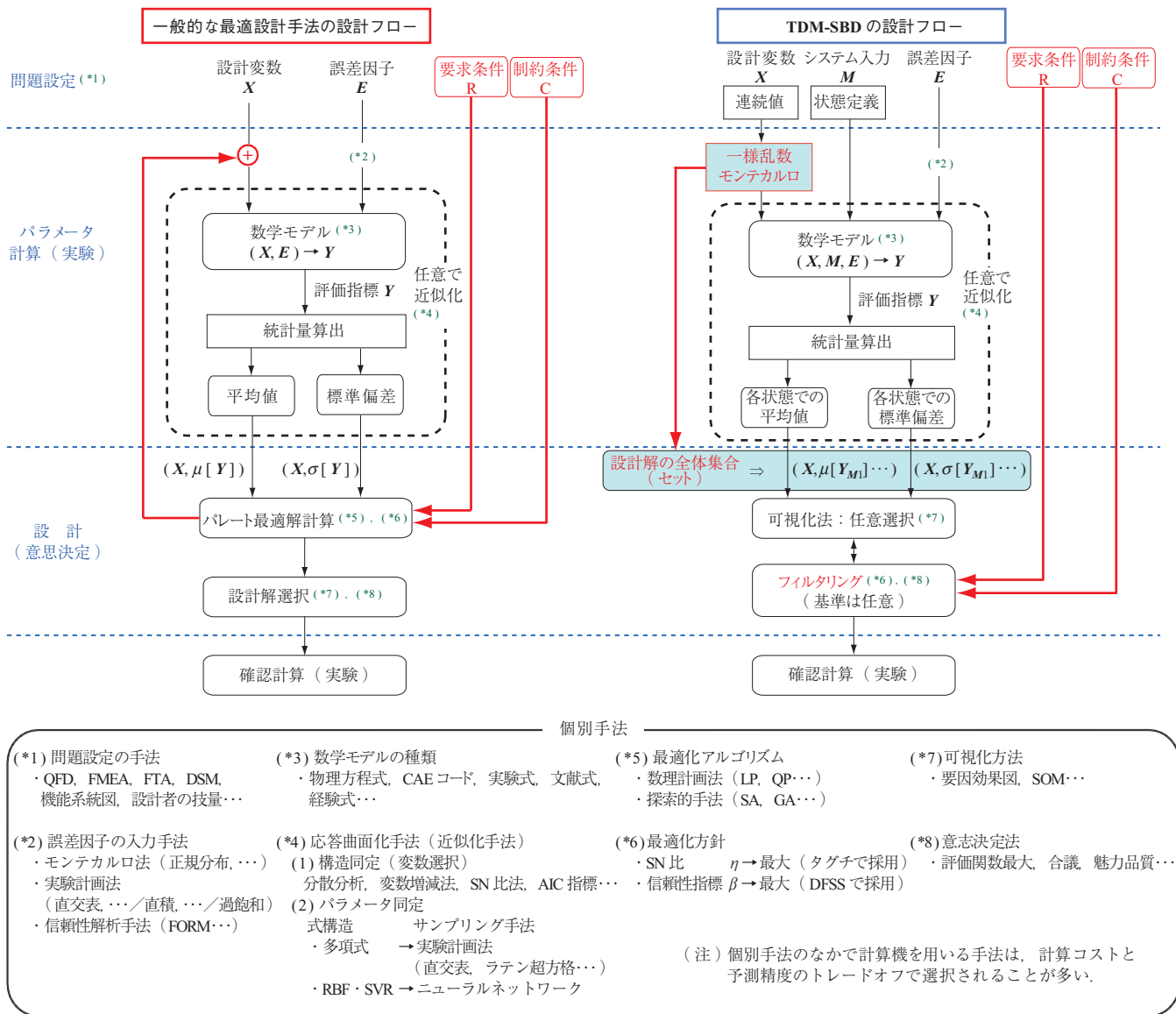
モデルベースドリスクマネジメント（Model Based Risk management：以下、MBR と呼ぶ）とは、設計者が使用する数学モデルの式・係数・入力値の技術的理解の低さをリスクとして識別し、技術理解度×影響度で定義されたリスクの大きさを許容可能なレベル以下にするリスク低減策を実施するリスク管理手法である。

3.3.1 手 順

(1) リスク識別

SBD は、数学モデルを用いて設計解の全体集合を求める。本来は実験で得るべき特性値を数学モデルの計算値に置き換えているので、両者の差が技術リスクになる。MBR では以下の考え方で、抽出する技術リスクの漏れを最小にする。

設計者が数学モデルを作成するとき、特に新規設計や設計初期段階では、その式の形・係数・入力値は、技術的根拠が十分ではないことが多い。しかし、数学モデルを確定してから SBD を行うのでは、プ



第3図 設計フローの比較と個別手法の位置づけ
Fig. 3 Comparison of set based design with typical optimization method

プロジェクトの計画が成り立たない。この場合 TDM では $y = ax + b$ のような単純な式でもよいので、とにかく数学モデルを作成することを促す。この検討の過程で、設計者が自信をもてない技術項目が自然と顕在化する。MBR では、これをリスクとして識別し、その都度記録する。一方 SBD では、リスクの存在を認識したうえで設計解探索を実施する。

(2) リスク定量化

識別したリスクの大きさは、技術理解度 × 影響度を用いて定量化する。リスクの大きさは発生確率 × 影響度で定義することが一般的である。しかし、これからの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の考えから、設計者の自

信を定量的に表す方法として、技術理解度という指標を MBR では導入した。技術理解度は主観的評価対象であるので、さらに以下の内部構造をもたせ、なるべく一般化する。

技術理解度

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

CAE に例えると、現象は物理モデル、環境条件は境界条件、実証度はコリレーションデータの有無に相当し、現象の物理メカニズムが把握できていないと現象理解度のリスクが高くなる。

(3) リスク低減計画

識別した各リスクについて、納入までに許容レベル以下とするような要素試験を立案する。このようなス

トップを経ることで、追加試験の位置づけを、顧客を含むプロジェクト関係者が共有できるようになる。

(4) リスク低減行動

リスク低減計画に従いリスク低減行動を行う。かりにリスクが低減されない場合に備えて、予測外れ問題というケーススタディを実施しておく。予測外れ問題については、4.3節で述べる。

(5) リスク管理

MBR では、リスクはリスクマトリックス表に集約し一元管理する。(1) リスク識別と(2) リスク定量化は、設計者がリスクマトリックス表に登録する。一方、(3) リスク低減計画はプロジェクト全体で立案する。システム設計では、リスクを一度集約し、低減計画段階で再配分することが特に重要となる(第4図)。

3.3.2 メリット

MBR は、設計者がも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である。メリットを以下に示す。

(1) 数学モデルに基づいた要素試験

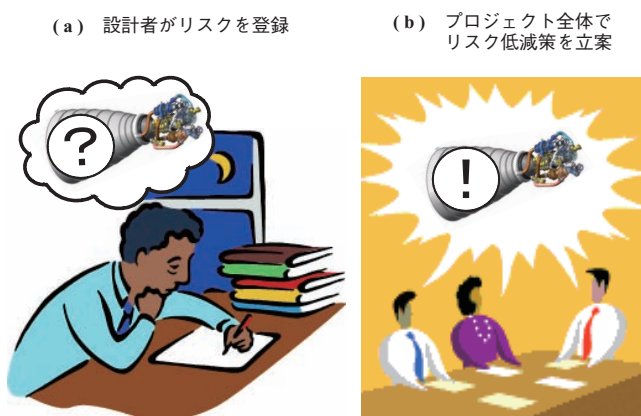
リスク低減計画に基づいて要素試験から得られるデータは、数学モデルの反映先が明確なので、要素試験の重要度が数学モデルに基づいて技術的に決められる(2.1節(3)、(4)の実現)。

(2) 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でにくく、リスク識別のためだけの別の作業も発生しない(2.1節(3)の実現)。

(3) 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



第4図 MBRのリスク管理
Fig. 4 Risk management in MBR

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(2.2節(3)の実現)。

(4) 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登録されたリスク、低減計画および結果は技術的位置づけが明確なので、顧客との共有や社内ナレッジ化に活用できる(2.3節(1)、(2)の実現)

4. 片持ち梁問題を使った多目的トレードオフ設計の事例(3)

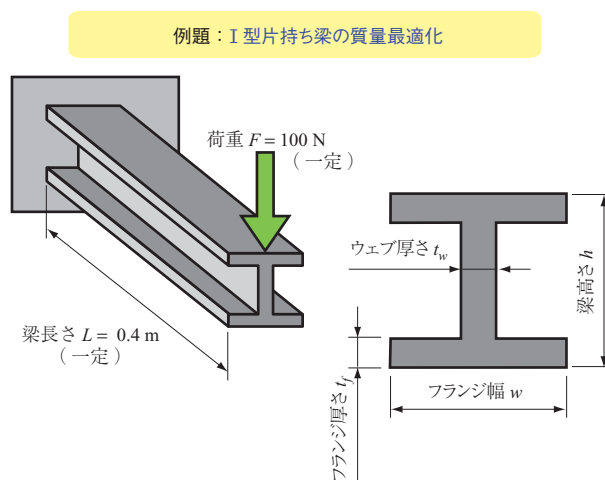
本章では、主にSBDの流れを片持ち梁の設計を例に述べる。

4.1 強度、重量およびロバスト性のトレードオフ設計

典型的なロバスト設計問題として、製造誤差や運用誤差などを誤差因子とした梁の強度と重量のトレードオフ設計の解法を示す。

第5図に片持ち梁の問題を示す。この問題を考えるに当たって、① 評価指標 ② 数学モデル ③ 設計パラメータ ④ 誤差、の順で考える。評価指標は、系の良し悪しを判断する項目であり、本例では設問から質量、たわみ量が挙げられる。TDMでは評価指標数に制限はないので、ここではせん断応力も加えることにする。

数学モデルは上記評価指標を導出するための関数である。本例は材料力学で数式が明らかになっているため、これを利用するが、現実の設計および開発現場では必ずしも分かっていないことが多い。数式に自信がない場合はMBR手順で要素試験などを実施し、数式精度を上げるた



(注) 問題：たわみ量を制約として、質量とロバスト性のバランスの良い解を求める。

第5図 片持ち梁の問題
Fig. 5 Cantilever beam problem

めのリスク低減活動を行う。

数式に含まれる引数を、設計者が直接的に関与できるもの（設計パラメータ）とそうでないもの（固定値）に分類し、また同時に設計者の意図にかかわらず変動する成分を集めて誤差とする。このように問題設定を行った結果を第6図に示す。設計者が意図的に決定できるパラメータは、断面形状にかかわる四つの寸法である。また、これらは製造時に加工公差を伴うため、誤差源でもある。なお、ここでは素材の品質や運用の品質についても適当な誤差を設定している。

次に現実の加工能力や適用先をよく検討し、設計パラメータの範囲を決める。SBDの手順に従い設計解の全体集合を算出する。ここでは数学モデルの計算に時間が掛かるという前提で応答曲面法を併用する。すなわち、最も簡単なサンプリング手法であるL9直交表に四つの設計パラメータを割り付け、9種類のサンプル形状を作成する。さらに各モデルに対し、ノイズを加味した仮想試作を行い評価指標の平均とばらつきを求める（第7図）。

四つの設計パラメータを組み合わせた9種類の梁の各評価指標の平均値とばらつきが得られたので、重回帰分析の簡単なスキームで、四つの設計パラメータを引数にもつ応答曲面式（2次多項式）を得ることができる⁽⁴⁾（第8

図）。平均とばらつきから、次のようなロバスト指標も導入できる。

$$\cdot \text{SN比} = 20 \log (\text{平均} / \text{ばらつき})$$

$$\cdot \text{信頼性指標 } \beta = (\text{平均} - \text{クライテリア}) / \text{ばらつき}$$

この応答曲面式を用いれば、任意の設計点で製造した際の評価指標の平均とばらつき、あるいはこれらを組み合わせたロバスト指標が瞬時に求められるので、モンテカルロ法を適用し、さまざまな設計パラメータを組み合わせて、設計解の全体集合を取得する。応答曲面式を用いる場合、一般にこの作業は1万点のデータベース作成でもほとんど時間を費やさない。

1万点のデータベースから適当な4軸を決めプロットすると第9図右上のグラフとなる。今回の梁問題設定では、ここに示された空間が全解空間である。この集合中、最も軽量となる解や最もたわみの小さい解などを抽出しレーダチャートに記したものを併せて示す。例えば、最軽量となる解は、たわみや応力が大きく、余裕がない設計となっていることが分かる。ここでは発生応力に対してロバスト指標である β を設定し、外乱に対して強靱になるよう留意しながらフィルタリングしていく。この一連のフィルタリングルールが設計思想そのものとなっているため、実用レベルでの解の再現性をもつことになる。

(a) 設計パラメータ

（評価指標の感度が高い変数
かつ、設計者が任意に決められる変数）

変数名	単位	初期値
フランジ幅 : w	m	0.030
梁高さ : h	m	0.070
フランジ厚さ : t_f	m	0.005
ウェブ厚さ : t_w	m	0.004



(b) 数学モデル

$$m = \rho L \{2(w t_f) + t_w (h - 2 t_f)\}$$

$$I = \frac{w h^3 - (w - t_w)(h - 2 t_f)^3}{12}$$

$$v = \frac{F L^3}{3 E I}, \quad \sigma = \frac{F L}{I} \left(\frac{h}{2} \right)$$



(c) 誤差

（外乱=ノイズ因子）

変数名	単位	σ	最適化方針
フランジ幅 : w	m	1.67E-04	一般製造公差/3
梁高さ : h	m	2.33E-04	同上
フランジ厚さ : t_f	m	8.33E-05	同上
ウェブ厚さ : t_w	m	8.33E-05	同上
梁のヤング率 : E	Pa	5%	素材品質
荷重 : F	N	5%	運用品質



(d) 評価指標

（要求や故障モードを表現する数値
（最初に考える））

変数名	単位	最適化方針
質量 : m	kg	望小
最大たわみ量 : v	mm	望小 (≤ 0.012)
最大せん断応力 : σ	MPa	5.0

（注） ρ ：密度 (kg/m^3)

L ：梁長さ (m)

I ：断面2次モーメント (m^4)

第6図 問題設定

Fig. 6 Definition of cantilever beam problem

再配分することで、実製品として優れた解を選定したものと解釈できる。

4.2 製造公差とコストのトレードオフ設計

性能設計的には加工公差は小さいほど望ましいが、製造サイドからの要求はラフな公差ほど造りやすい場合が一般的である。したがって、公差要求と加工コストのトレードオフは実設計現場では頻繁に行われる。通常は、製造能力の限界に対して設計側がどの程度譲歩できるかという局所的な妥協点探しとなっていることが多い。ここでは、製造公差と加工コストの仮想的な感度を用いて、品質（ばらつき）を維持しながらコストと製造公差（誤差因子の大きさ）のバランスをとるトレードオフ設計の手順を述べる。

加工コストは、公差要求が厳しくなるほど加工速度低下や製品のスクリーニングなどによって、増加することになる。この曲線が実際にどのような形状になるかは、まさにメーカーのノウハウである（第10図）。公差を厳しくすることで、製品の品質が向上すると考えられる。品質の向上分を市場損失あるいは利益といった金銭の単位をもつ指標と結びつけることができれば、加工コストと合せて適切な公差設定が期待できる。

今、 δx_i を加工寸法 x_i （＝梁高さ、フランジ厚さ、フランジ幅、ウェブ厚さ）に対する公差とする。

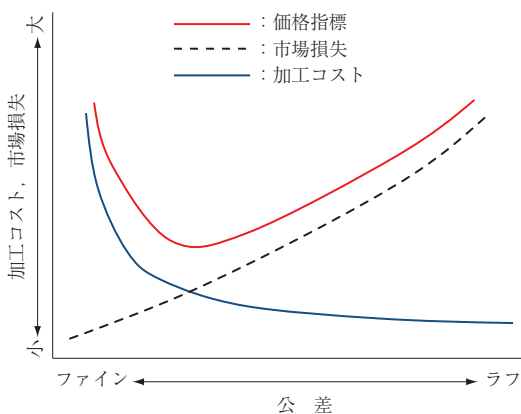
加工コスト C と市場損失 L は、これら公差設定で決まるとすれば、

$$C = C(\delta x_1, \dots, \delta x_4) \dots\dots\dots (1)$$

$$L = L(\delta x_1, \dots, \delta x_4) \dots\dots\dots (2)$$

である。特に市場損失の感度は、いったん評価指標の信頼性指標 β （製品品質）に置き換えれば、

$$\frac{\Delta L}{\Delta \delta x} = \frac{\partial L}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \delta x} \dots\dots\dots (3)$$



第10図 公差と設計点

Fig.10 Relationship between tolerance and design point

と表される。

(4) 式は製品品質感度（品質管理情報）を、(5) 式は品質公差感度（設計情報）を表す。

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \delta x} \dots\dots\dots (5)$$

これに、加工コスト C も加えると、製造コスト感度（製造情報）は次の(6)式のとおりになる。

$$\frac{\partial C}{\partial \delta x} \dots\dots\dots (6)$$

また、量産品であれば販売台数 N も製品品質の影響を受け、市場感度（営業情報）は(7)式で表される。

$$\frac{\partial N}{\partial \beta} \dots\dots\dots (7)$$

このように、公差設計にコストを取り込んだ場合、設計と製造間の調整だけでなく、品質管理部、営業部からの情報も取り込んだうえで設計点を設定すべきことが分かる。第6図で示した問題設定に書き足せば第11図のようになる。加工コストと市場損失の情報を定式化できれば、4.1節と全く同一の手順で公差を寸法設計に反映できることが分かる。

4.3 調整代を考慮した設計（予測外れ問題）

短期開発では、設計計算（あるいは製作図作成）と要素試験が並行することがよくある。この場合、後に実施した要素試験が、設計に用いた数学モデルの当初予測値より大きく外れることが開発リスク（プロジェクトリスク）となる。TDMではこれを予測外れ問題と称している。特に航空機や宇宙機のような大型で長期の開発では、外れ量を調整できる部位をあらかじめ製品に組み込むことができれば、開発リスクに対してロバストな設計が可能となる。

身近な例では、自動車タイヤに装着される小さなバランスもこの設計の範ちゅうに含まれる。軸やホイールおよびゴムの公差を厳しく設計し、無調整でバランスのとれたタイヤにするよりも、あるいは、軸径そのものを太くし、振動に強いタイヤにするよりも、適当な公差を設定した後、バランスで調整する方が合理的な場合も多い。調整代の大きさとほかの評価指標（強度、質量、ばらつきおよびコストなど）のバランスをとることになる。

4.1節のI型梁の事例では、要求は第一に質量とたわみである。ここでは、何らかの事情によって質量が想定よりも重かったとする。重くできてしまった梁を廃却せずに使用するためには、

(a) 設計パラメータ

変数名	単位	下限1	中心2	上限3
フランジ幅 : w	m	0.03	0.04	0.05
梁高さ : h	m	0.06	0.07	0.08
フランジ厚さ : t_f	m	0.001	0.003	0.005
ウェブ厚さ : t_w	m	0.001	0.0025	0.004
フランジ幅公差 : δ_w	m	0.0005	0.00275	0.005
梁高さ公差 : δ_h	m	0.0005	0.00275	0.005
フランジ厚さ公差 : δt_f	m	0.0005	0.00275	0.005
ウェブ厚さ公差 : δt_w	m	0.0005	0.00275	0.005



(b) 計算式

$$m = \rho L \{2(w t_f) + t_w (h - 2 t_f)\}$$

$$I = \frac{w h^3 - (w - t_w)(h - 2 t_f)^3}{12}$$

$$v = \frac{FL^3}{3EI}, \quad \sigma = \frac{FL}{I} \left(\frac{h}{2}\right)$$

$$C + L = C(\delta_w, \delta_h, \delta t_f, \delta t_w) + L(\delta_w, \delta_h, \delta t_f, \delta t_w)$$



(c) 誤差

変数名	単位	σ	最適化方針
フランジ幅 : w	m	δ_w	一般製造公差/3
梁高さ : h	m	δ_h	同上
フランジ厚さ : t_f	m	δt_f	同上
ウェブ厚さ : t_w	m	δt_w	同上
梁のヤング率 : E	Pa	5%	素材品質
荷重 : F	N	5%	運用品質



(d) 評価指標

変数名	単位	最適化方針
質量 : m	kg	望小
最大たわみ量 : v	mm	望小 (≤ 0.012)
最大せん断応力 : σ	MPa	5.0
全体損失 : $C + L$	Yen	望小

(注) ρ : 密度 (kg/m^3)
 L : 梁長さ (m)
 I : 断面2次モーメント (m^4)

第 11 図 公差を考慮した問題設定

Fig. 11 Definition of cantilever beam problem in consideration of tolerance

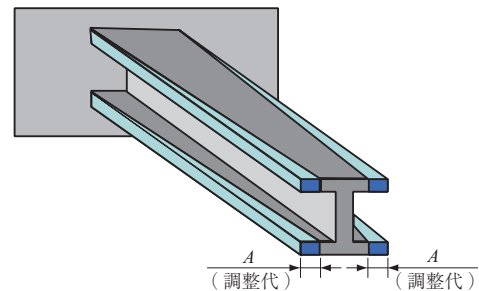
① 上位システム（この梁を用いて組み立てられるシステム）が、軽くできてしまった梁と組み合わせるなどの手順をもつ

② 質量を調整できる部分を部品レベルでもつ

が考えられる。前者のシステムで吸収することが望ましいが、本例では部品レベルで考える。

最適化されて、全く調整の余地がない場合は難しいが、一般には製造性やコストから、いつも最適な形状となっているとは限らない。この梁では、最初に I 型断面を仮定している時点で調整の余地があることになる。荷重分布を考えれば先細形状の方が良いが、加工コスト的には最初から先細を前提とすべきではない。したがって、問題を起こした部品に対する個別処置として、調整代（この場合は削り代）を前もって求めておく訳である（第 12 図）。当然追加コストが発生することはいうまでもない。

TDM では、寸法 A を調整代として設計パラメータの中に取り込む。評価は、 A の値に応じて質量差分とたわみ量差分とする。調整代が A である条件を一意に求めることは今のところできない。対象とする問題に応じて、FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) や故障シナリオを検討し、最も適切な方法を選定することになる。第 13 図に示すように、軽量化効果とたわみ量増加、および



第 12 図 調整代を考慮した片持ち問題

Fig. 12 Cantilever beam problem in consideration of adjusted factor

追加加工に伴うコスト増を取り込むことで、あらかじめどの程度の寸法を調整代としてもっておけばよいかを求める。

調整代を考慮した場合でも、問題は最初の寸法設計と同じであるため、同一の手順で解を求めることができる。

5. 実製品の適用事例（インペラの共振回避設計）⁽⁵⁾

圧縮機インペラの振動設計では、流体性能を保ちつつ、インペラ自身のもつ固有振動数が回転に起因する周波数と一致しないように、インペラ形状をチューニングしている。インペラはニーズに合わせて大きさの若干異なるラインナップが存在するので、従来は設計者がそれぞれについて多くの検討を実施し、チューニングする形状を決定していた。

本章では、SBD 手法を用いることで、チューニングの

(a) 設計パラメータ

変数名	単位	下限1	中心2	上限3
フランジ幅 : w	m	0.03	0.04	0.05
梁高さ : h	m	0.06	0.07	0.08
フランジ厚さ : t_f	m	0.001	0.003	0.005
ウェブ厚さ : t_w	m	0.001	0.0025	0.004
フランジ幅公差 : δ_w	m	0.0005	0.00275	0.005
梁高さ公差 : δ_h	m	0.0005	0.00275	0.005
フランジ厚さ公差 : δ_{t_f}	m	0.0005	0.00275	0.005
ウェブ厚さ公差 : δ_{t_w}	m	0.0005	0.00275	0.005
削り代 : A	m	0	1.5	3



(b) 計算式

$$m = \rho L \{2(w t_f) + t_w (h - 2t_f)\}$$

$$I = \frac{w h^3 - (w - t_w)(h - 2t_f)^3}{12}$$

$$v = \frac{FL^3}{3EI}, \quad \sigma = \frac{FL}{I} \left(\frac{h}{2} \right)$$

$$C + L = C(\delta_w, \delta_h, \delta_{t_f}, \delta_{t_w}) + L(\delta_w, \delta_h, \delta_{t_f}, \delta_{t_w}) + Ca(A)$$

$$\Delta m = 0.8 t_f A \rho$$

$$\Delta v = \text{func}(v, A)$$



(c) 誤差

変数名	単位	σ	最適化方針
フランジ幅 : w	m	δ_w	一般製造公差/3
梁高さ : h	m	δ_h	同上
フランジ厚さ : t_f	m	δ_{t_f}	同上
ウェブ厚さ : t_w	m	δ_{t_w}	同上
梁のヤング率 : E	Pa	5%	素材品質
荷重 : F	N	5%	運用品質



(d) 評価指標

変数名	単位	最適化方針
質量 : m	kg	望小
最大たわみ量 : v	mm	望小 (≤ 0.012)
最大せん断応力 : σ	MPa	5.0
全体損失 : $C + L$	Yen	望小
軽量化効果 : Δm	kg	望大
たわみ量増加 : Δv	m	望小

(注) ρ : 密度 (kg/m³)
 L : 梁長さ (m)
 I : 断面2次モーメント (m⁴)
 Ca : 調整によって発生するコスト

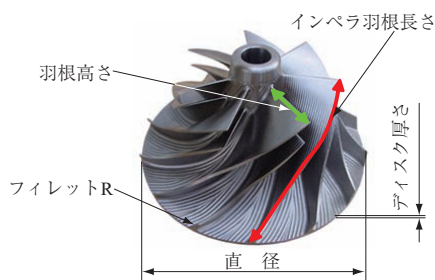
第13図 調整代を考慮した問題設定 MBR のリスク管理

Fig. 13 Definition of cantilever beam problem in consideration of adjusted factor

都度、設計を実施することなく所定の対策形状が得られたことを述べる。

5.1 問題の設定

本インペラは直径と羽根高さの二つの設計パラメータをもつラインナップとなっており、各ラインナップの一つ一つにおいて共振を避けることが求められている。そこで、共振を避けるための設計パラメータとして第14図に示すように、インペラ羽根長さ、フィレットR、ディスク厚さの三つの新たな設計パラメータ（チューニングパラメータ）を設定し、共振を回避する形状を求める。評価指標は以下の式に示す離調率であり、共振を起こさないあ



第14図 設計パラメータ
 Fig. 14 Design parameters

るしきい値よりも大きくなるようにする。

$$\text{離調率} = \frac{\text{固有振動数}}{\text{回転振動数}} - 1 \dots\dots\dots (8)$$

インペラの固有振動数を設計パラメータの全範囲で求める数学モデルを作成するため、実験計画を利用した FEM (Finite Element Method) 計算を実施し、応答曲面法によって求めた。5.2 節以下で述べる検討のフローチャートを第15図に示す。

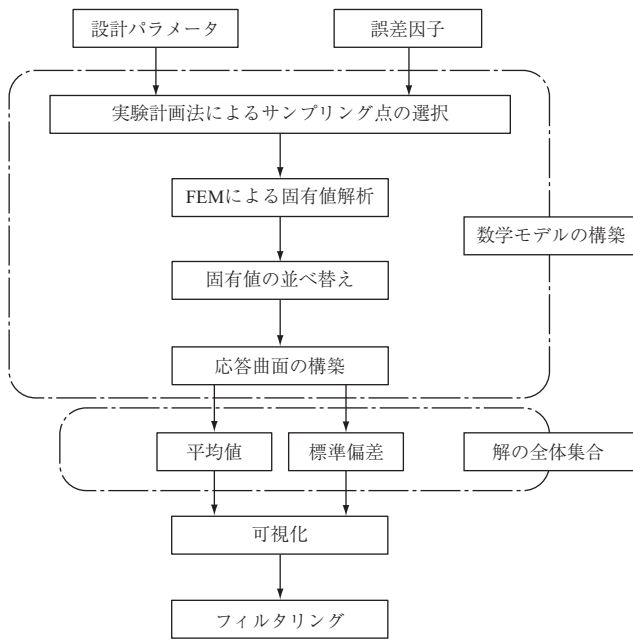
5.2 数学モデルの構築

応答曲面を作成するための計算点を求めるために、設計パラメータ二つ、共振を避けるための設計パラメータ三つの計五つの設計パラメータを、L27の直交表に割り付けた。次にこの直交表の割り付けに従い、商用の FEM 解析ソフトを用いて、10～80 次の固有振動数を求めた。

さらに各次数について応答曲面を作成した。応答曲面は次式のような 2 次の多項式とした。

$$f = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j \dots\dots (9)$$

ここで f は固有振動数、 x は設計パラメータ、 β は応答曲面の係数である。ただし、最終項の交互作用項について



第 15 図 インペラ共振回避設計のフローチャート
Fig. 15 Flowchart of impeller design

は必要な場合のみ取り入れた。

5.3 設計解の全体集合の作成

応答曲面を利用して、各設計パラメータの全範囲にわたり離調率の全体集合を求めた。設計解集合を求める際には、各設計パラメータの範囲を 100 程度に分割し、全領域を網羅的に計算した。

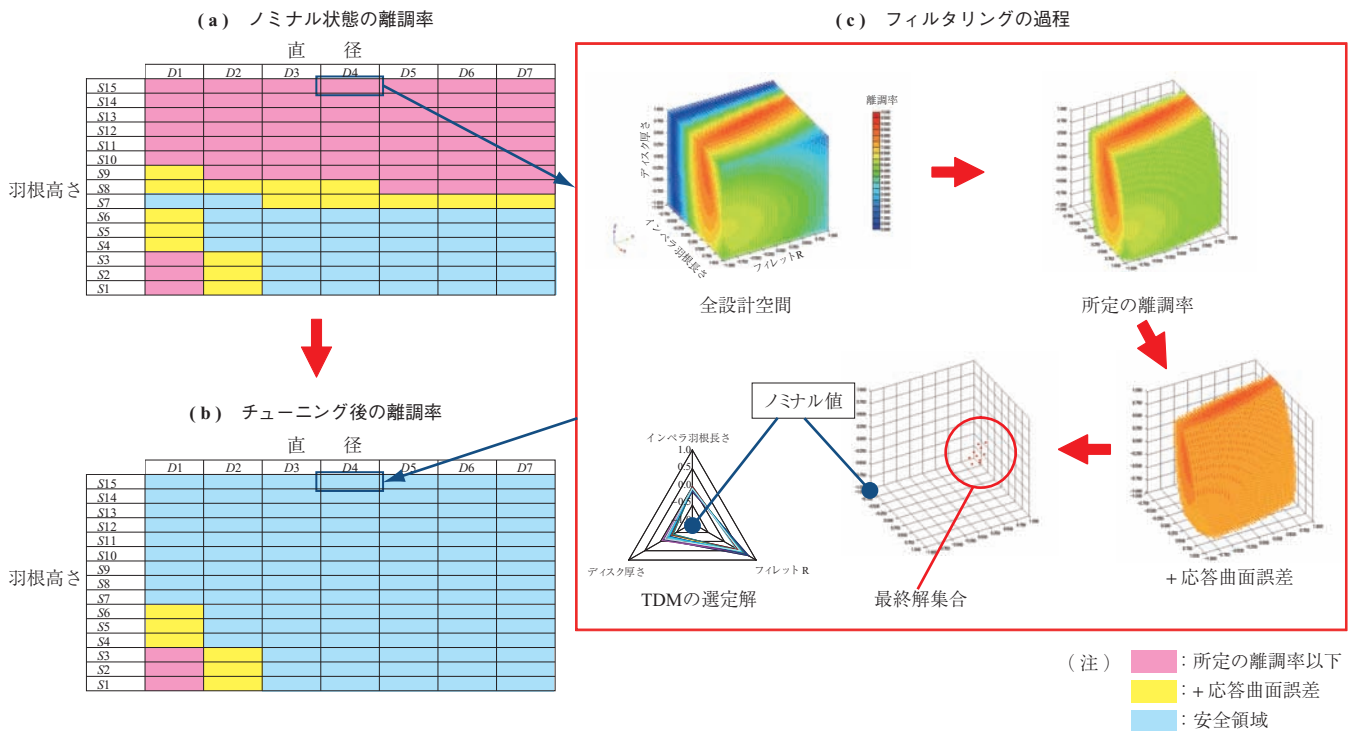
本事例で取り上げる五つの設計パラメータは形状にかかわる寸法で、これらは製造誤差を伴う。したがって、離調率は図面公差による変動を考慮した最悪値で評価した。

5.4 フィルタリング

ノミナル状態（チューニングをする前のベース形状）、およびチューニングを施している場合のケースを第 16 図に示す。ノミナル状態の場合は、直径および羽根高さを各ラインナップの形状にし、三つのチューニングパラメータはノミナル状態に固定して、離調率を求めた。チューニングを施している場合のケースについては、各ラインナップの形状における設計解全体集合から、必要な離調率が得られるようなフィルタリングを実施した。

5.5 設計結果

第 16 図 - (a) にノミナル状態での離調率、- (b) にチューニング後の離調率、また - (c) に直径 $D4$ 、羽根高さ $S15$ を組み合わせたインペラ形状におけるフィルタリングの過程を示す。表の赤い部分は離調率が十分でない箇所を示し、青い部分は十分な部分を示す。黄色い部分は応答曲面の精度にかかわるマージンを示す。フィルタリングは表の各セルで独立に実施しており（例えば、直径 $D4$ 、羽根高さ $S15$ のセルで一つのフィルタリング過程を実施）、本事例の場合は 105 種類のインペラに対して実施しているが、簡単なマクロによってフィルタリングは瞬時にできる。



第 16 図 インペラ共振回避設計の設計結果
Fig. 16 Example of results of impeller design

第 16 図 - (c) の右図でフィルタリングの結果、選択されたチューニングパラメータの形状はレーダチャートに示す解となった。最終解集合はこのケースの場合はフィレット R 因子を大きくとることを示唆している。

第 16 図 - (b) のようにチューニングを実施することで基準の離調率を超える部分が増えることが分かる。第 16 図 - (b) の左下部分（赤および黄色のセル）ではチューニングパラメータを現状の範囲内で振ったとしても、対策の効果がないことを示している。ここの範囲については、パラメータの範囲の拡大や、ほかの対策を講じる必要があることを明示している。

以上のように、従来は各ラインナップの対策は個々に FEM 計算を実施し、設計者の試行錯誤的に検討していたが、SBD 手法を用いて設計プロセスを改善した本事例では 27 回の FEM 計算を計画的に実施するだけで、ラインナップ全体に対して、離調率改善対策を得られた。

6. 結 言

本研究では、多目的トレードオフ設計、ロバスト設計、リスク管理、設計透明性および実用性の実現を目指し、平易でありながら設計現場の実用に耐え得る体系的な設計手法を示した。

本設計手法は、セットベースデザイン (SBD) とモデルベースドリスクマネジメント (MBR) から構成される。

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はなく、共通言語のように機能することで、プロジェクト全体の円滑な意志決定を支援する設計支援システムに近いものである。

二つの適応事例でも示したとおり、セットベースデザインを用いた設計プロセスは、従来の設計プロセスとは大きく異なるものである。すなわち、設計要求を満たす設計解はその都度“求める”のではなく、“検索する”こと

で、大幅な設計時間の短縮を実現している。近年、加速する設計ツールの IT 自動化技術と組み合わせれば、本手法の効果はさらに大きくなるものと考えている。

また、設計の質を向上するには、設計自由度が高い設計初期段階での衆知を集約することが重要である。モデルベースドリスクマネジメントは、設計者の誰もが抱える技術的曖昧さを前向きにとらえることで、設計開発のフロントローディング化を図るものである。

今後本研究は、製品の価値創り込み技術の向上を目指し、より上流設計に当たる形態設計・企画設計の領域に拡大する予定である。

参 考 文 献

- (1) 大富浩一：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 2007 年 5 月 pp.36 - 37
- (2) 呉, 森, 渡邊ほか：統合的設計管理手法の開発と応用（その 1）－「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」－日本機械学会第 19 回設計工学・システム部門講演会 2009 年 10 月 pp.101 - 106
- (3) 森, 呉ほか：統合的設計管理手法の研究（その 2）－片持ち梁問題による多目的トレードオフ設計法の解説－第 39 回信頼性・安全性シンポジウム 2009 年 7 月 pp.261 - 266
- (4) 柏村孝義, 白鳥正樹, 于 強：実験計画法による非線形問題の最適化－統計的設計支援システム－朝倉書店 1998 年 10 月 pp.25 - 26
- (5) 渡邊, 呉, 森：統合的設計管理手法の開発と応用（その 2）－圧縮機インペラにおける振動設計の一手法－日本機械学会第 19 回設計工学・システム部門講演会 2009 年 10 月 pp.107 - 109