

解説

設計検証のための工学解析モデリングプロセスの知識管理に向けて*

Toward Knowledge Management of Engineering Analysis Modeling Process for Design Verification

野間口 大**

(Yutaka NOMAGUCHI)

1. はじめに

解析計算技術の発達に伴って、製品やシステムの設計の検証の際に解析シミュレーションが利用されることが多くなってきている。その効果は、利用する計算手法や計算機のスペックだけでなく、計算の前提となるモデルや条件の与え方に依存する。前者については各種の標準的な考え方が存在するものの、後者については一般に、設計対象の物理的な特徴を考慮しながら、設計の要求に応じて個別の問題ごとに調整されることになる。後者のモデリングのプロセスは工学解析の核心である¹⁾が、現状では、それに関する知識は設計者の暗黙的な判断に依存する状態に留まっている。その内容を明示化して管理できれば、設計検証の質の保証だけでなく、工学解析に関する知識の共有、再利用にも大きな効果が期待できる。

上記の問題意識のもと、著者らのグループでは、設計検証のために行われる解析モデリングプロセスの内容を、設計検証の進行と同時に可視化して整理するためのフレームワークについて研究を行っている。本報ではその概要を紹介する。このフレームワークでは、解析モデリングの過程で設定した簡略化の内容や各種の条件、対応する数学的表現、およびそれらに基づいて導出された解析結果など、工学解析モデリングを構成する各種の内容を図式化し、明示的に把握するために工学解析モデリングマトリクス(EAMM; Engineering Analysis Modeling Matrix)²⁾を導入する。さらに設計における仮説生成・検証に伴う工学解析モデルの変遷とその背後にある議論を図式化して表現するために、代表的な議論モデルで

あるgIBIS(Issue-based Information System)³⁾をEAMMと連携して利用する。

2. 設計検証のための工学解析モデリングとその知識管理に向けた課題

2.1 設計検証のための工学解析

設計プロセスは一般に、設計要求に対する設計候補の「提案」、提案した候補が要求を満たしているかどうかを確かめる「検証」、検証の結果を受けてその他の候補と比較検討を行う「批評」、より良い解へと変更する「修正」の4つのタスクのサイクルとして理解することができる⁴⁾。解析シミュレーションは、このうちの検証を行うための一つの手段として用いられる。設計者は、設計候補の物理的な挙動を解析シミュレーションを用いて予測し、それが要求を満たしているかどうかを判断する。要求を満たしていない場合には、その原因を考察して設計解を変更することになる。

解析シミュレーションにおいて製品に関連する現象を厳密に解明することは重要である。しかしながら、設計検証の観点から考えれば、その目的は設計者が想定した空間、支配則、境界条件といった環境における振る舞いを定量的に調べることにある。本来、製品やシステムの挙動には様々な物理現象が複雑に関連している。設計検証に求められる精度や利用可能な計算機資源など様々な制約があることを踏まえれば、設計検証を行う際には、設計対象の物理的な特徴を捉えて、主要な要因に着目し、簡略化された解析モデルを構築することになる。そのため、モデリングの内容の妥当性に関して設計者が適切に判断することが重要となる。

2.2 設計における仮説生成・検証プロセス

そもそも設計は典型的な悪構造問題であり、設計解に到達するまでの道筋が明確でないだけでなく、

* 原稿受付 2010年2月4日

** 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻
(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

設計解を評価する際にも、与条件であるべき要求が不明確であり、何が良い解であるかどうか不明でない⁵⁾。このため、設計解だけでなく解くべき問題自体もある種の試行錯誤的なプロセスを通じて具体化していくことになる⁶⁾。すなわち、複数の代替案の比較検討や、必要なら以前の案に立ち戻って検討しなおすことが不可避である。

工学解析を用いた設計検証プロセスにも同様のことが言える。設計案の検証のために解析を行い、その結果を解釈して設計に修正するプロセスを何度も繰り返して設計を具体化していくと同時に、解析モデリングに関しても、妥当なモデルを構築するためにはある程度の試行錯誤が不可欠である。

2.3 課題とアプローチ

以上の内容を踏まえて、知識管理フレームワークを構築するために取り組むべき課題として、以下の2点を挙げる。

(a) 工学解析モデリングプロセスの内容の明示的記述の枠組み

2.1節で述べたように、工学解析モデリングの過程では、解析の対象となる箇所やその範囲、推定される挙動、考慮する物理現象、解析条件など様々な内容を設計者が設定している。これらを明示的に記述するための、特定の解析モデルや計算手法に依存しない枠組みを用意する必要がある。

(b) 仮説生成・検証プロセスの内容の明示的記述の枠組み

2.2節で述べたように、設計案の検証と同様に、設計検証のための工学解析モデリングの内容の妥当性確認においても仮説生成・検証のサイクルを繰り返す試行錯誤が不可欠である。その過程で生成される複数の案や、比較検討した際の判断の根拠を記述するための枠組みが必要である。

これらに対して本研究では次のように取り組んでいる。まず(a)の課題に対して著者らのグループが提案している工学解析モデリングマトリクス(EAMM)²⁾を利用する。その上で(b)の課題に対して、代表的な議論モデルであるgIBIS³⁾を利用して、EAMMとの連携により設計解と解析モデリングの両者についての試行錯誤の内容を表現する。

3. 工学解析モデリングマトリクス

本章では、工学解析モデリングの内容を系統的に記述、整理する枠組みである工学解析モデリングマ

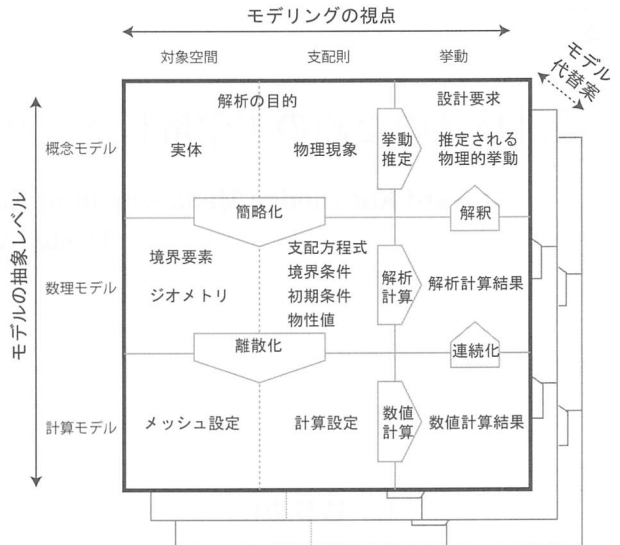


図1 工学解析モデリングマトリクス

トリクス(EAMM)の概要を述べる。

3.1 工学解析モデリングマトリクス

EAMMは、図1に示すように、解析モデリングを行う際の3つの視点を横軸に、3つのモデルの抽象レベルを縦軸にとり、モデリングプロセスをマトリクス上に図式化したものである。3つの視点とは、設計対象の解析を行う際に考慮する部品や空間、およびそれらの属性情報である「対象空間」、解析対象に働く物理現象や物理法則である「支配則」、対象空間と支配則の設定のもとで予測される設計対象の振舞いである「挙動」である。3つの抽象レベルとは、設計者が設計対象を定性的に理解して対象の挙動を予測するための「概念モデル」、解析対象の空間や時間に関する数学的な記述を用いて表現される「数理モデル」、解析的に解くことができない数理モデルに対して、数値的に計算を行うための「離散モデル」である。これらの組み合わせにより9個のセルが構成される。

また各セル間には、舟状の形によりモデリングプロセスを示す「操作欄」が配置されている。図1に示すように、簡略化、離散化、挙動推定、解析計算、数値計算、連続化、解釈の7個の操作欄がある。

以上のように定義されるセルおよび操作欄のそれぞれに、対応する内容を図1に示すように記述する。これによりEAMM全体で、特定のモデルや計算方法に依存せず、工学解析モデリングプロセスの内容を系統的に表現することができる。なお、仮説生成・検証の過程で生成される複数の解析モデルは、複数のEAMMによる記述の切り替えによって管理

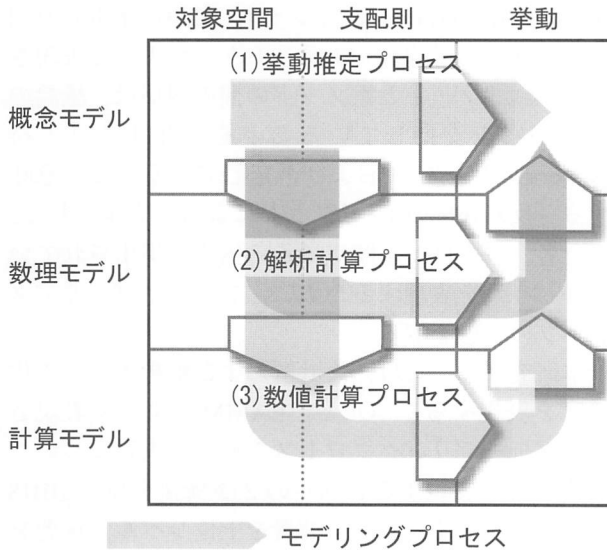


図2 工学解析モデリングプロセスのパターン

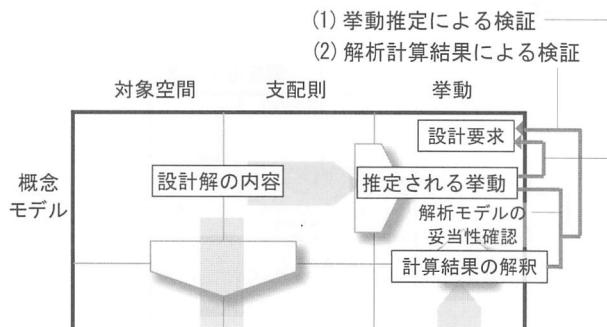


図3 設計検証プロセスの表現

する。

3.2 工学解析モデリングプロセスのパターン

EAMM上の各欄の記述順序は工学解析モデリングの種類に応じて異なる。そのパターンを大別すると、図2に示す3つが想定される。ただし、実際のモデリングプロセスにおいては、これらのパターンが複合的に繰り返されることになる。

(1) 挙動推定を行うプロセス

設計者は、数理的な解析を行う前に、モデリング対象の構造や働きを頭の中である程度理解して対象の挙動を推論する。このプロセスでは、図2-(1)のように、概念モデルのセルにのみ記述されることになる。

(2) 解析計算を行うプロセス

設計対象物の具体的な形状が明確に定まっていない、設計の上流段階においては、解の精度よりも複数の解の網羅的な検討が求められるため、設計のおおよそのあたりを付けるという意

味で、解析解を求めることが可能な簡単な数理モデルによる解析が有効である。この場合、図2-(2)のように、概念モデルの記述をもとに数理モデルを記述し、その計算結果と概念モデルの推定との整合性を確認するプロセスとなる。

(3) 数値計算を行うプロセス

計算モデルを構築して数値解を求める場合、図2-(3)のように、数理モデルをもとに計算モデルを構築し、計算モデルの計算結果に基づいて数理モデルの計算結果を求め、概念モデルの推定との整合性を確認するプロセスとなる。

3.3 設計検証プロセスの表現

計算機による解析シミュレーションの実行は、正確な設計検証の有力な手段ではあるが、いわゆる設計のあたりをつける段階においては、設計者はしばしば過去の経験をもとに設計対象の物理的な挙動を定性的に推測することにより設計検証を行っている。このことを踏まえて、設計検証のプロセスとして以下の2つのパターンを想定する。

(1) 挙動推定に基づいた検証

この場合は数学モデルや解析モデルのような計算を行うためのモデルは構築されず、3.2節(1)で述べた挙動推定プロセスのみが行われる。設計者は、設計解に関して推定される物理的挙動が、与えられた設計要求を満たしているかを確認する。

(2) 解析シミュレーション結果に基づいた検証

この場合は、3.2節(2)または(3)のプロセスが行われる。設計者は解析モデルの妥当性を確認した上で、解析シミュレーション結果の解釈を踏まえて、設計要求を満たしているかどうかを確認する。

EAMM上では、以上のプロセスの内容は、いずれも概念モデルの各セルにおいて図3のように表現される。ただし、設計解の内容に関して、設計対象を構成する部品などの実体要素は対象空間のセルに、実体要素に作用する物理現象は支配則のセルに記述することとする。また設計要求と挙動推定の結果の内容は、挙動のセルに記述することとする。

4. 議論モデルの導入

設計検証プロセスでは設計解及び解析モデルの両方に対して複数の代替案が取り扱われる。本研究では、gIBISに基づいた議論モデルを導入して複数の代替案を扱うプロセスを表現し、EAMMによる個々の代替案の表現と連携させることとする。

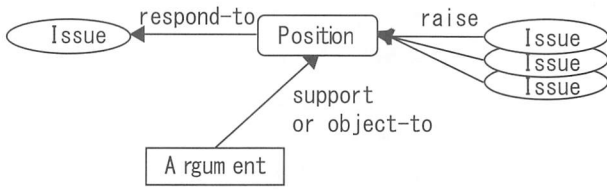


図4 gIBISによる議論構造モデル

gIBISは、議論のプロセスをハイパーテキストで表現するモデルであり、基本的には図4に示すように3種類のテキストノードとそれらの間を結ぶ4種類のリンクによって構成される。3種類のノードとは、議論の対象となる「問題(Issue)」, 問題に対する代替案を表す「案(Position)」, 複数の代替案を批評する際の「議論(Argument)」である。問題ノードと案ノードの間には、問題と案の対応関係を意味

する「対応(respond-to)リンク」、案から派生した問題を意味する「提起(raise)リンク」によって表現される。議論ノードと案ノードの間には、議論の内容が案を支持していることを意味する「支持(support)リンク」、および否定していることを意味する「反対(object-to)リンク」によって表現される。また各ノードは、現時点でその内容が採用されているかどうかを表現するために、アクティブ、非アクティブの状態を取る。

本研究においては、設計解および解析モデルの代替案を表現するレベルと、EAMMによって表現される解析モデリングプロセスの個別の内容についての代替案を表現するレベルの2層構造を持つgIBIS表現を導入する。なお、前者を上位レベル、後者を下位レベルと呼ぶ。

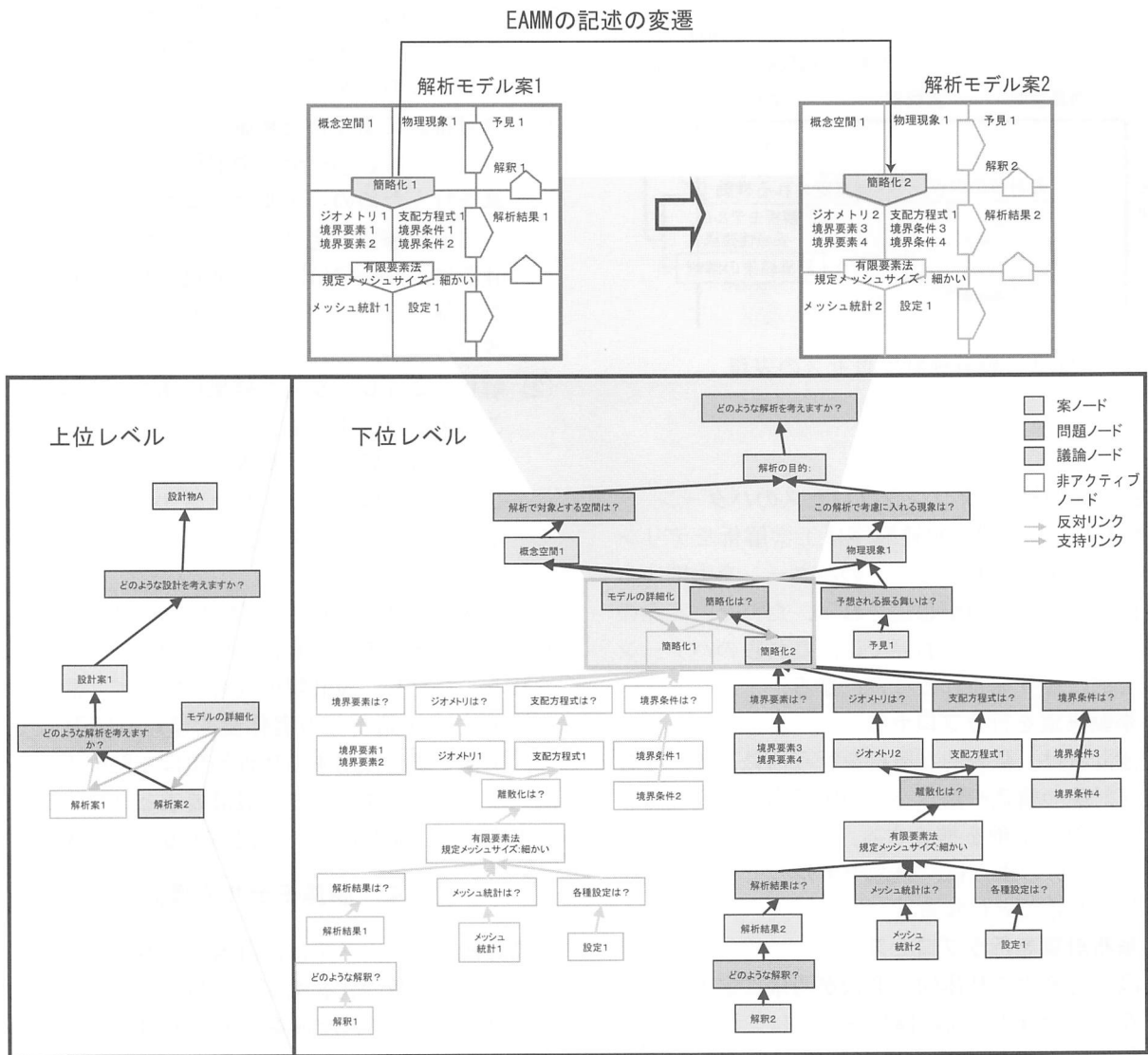


図5 EAMMとgIBISの連携による表現例

図5に、解析モデル案1から案2に切り替えたプロセスを、EAMMとgIBISの連携により表現した例を示す。この例では、図5上に示しているように、解析モデル案1での簡略化1が、解析モデル案2では簡略化2に変更されたことを想定している。上位レベルでは、ある設計対象Aに対して1つの設計案が採用されており、その設計案を検証するために2つの解析モデル案が検討されたことが示されている。一方下位レベルでは、簡略化に関して2つの案「簡略化1」「簡略化2」が検討されたことが示されている。また議論ノードにより、モデルの詳細度の観点から後者の案が支持されていることが示されている。

5. 設計例題

本章では、提案したフレームワークによる設計検証プロセスの表現例を示す。

5.1 設計例題の概要

本報では例題として $160\mu\text{m} \times 320\mu\text{m}$ 内のチップ上で動作する μTAS (Micro Total Analysis System)における流体の混合促進装置の設計を取り上げる。 μTAS とはポンプ、バブル、センサなどを小型化、集積化した化学分析システムのことであり、特に、医療や環境測定、化学合成などの分野においてよく用いられている⁷⁾。図6に示すようにこの装置は、等しい粘度、密度を持ち濃度の異なる2流体を混合させることを目的とするものである。このスケールにおいてはレイノルズ数が非常に小さいため、乱流による混合が期待できず、何らかの混合促進機構が必要である。機構には、できるだけ小さなエネルギーで十分な混合能力を発揮することが要求される。

以下に、設計検証プロセスの概要を示す。本例では、12個の設計案とそれらに対する15個の解析モデル案が検討された。下記の記述における設計案および解析モデル案の通し番号は、図7内の記述に対応するものである。なお本例では、解析シミュレーションを行うために汎用連成解析FEMソフトウェアであるCOMSOL Multiphysics^{†1)}を用いた。

- (1) 混合促進機構の設計案として、磁性流体と変動磁場による混合促進(設計案1)、攪拌棒の回転による混合促進(設計案2)、加熱壁面を用いた対流による混合促進(設計案3)が検討された。設計案1および設計案2は、概念レベルでの検証の結果、機構の信頼性が不足していると判断

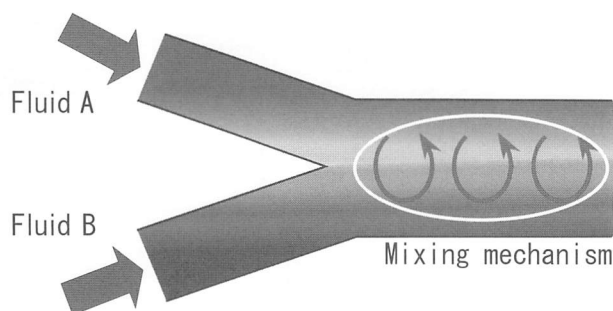


図6 流体攪拌装置の概略

された(解析案1,2)。設計案3については各種条件を設定し、レイリー数を見積もると臨界レイリー数を大きく下回る値となったため、対流は生じないであろうと判断された(解析案3)。他の設計案を検討した結果、羽根付きの回転体に光を照射させて、光圧によって回転体を回転させる光ミキサーによる混合促進案(設計案4)が提案された。

- (2) どの程度の精度でモデリングを行うかというあたりをつけるために、複雑な系の解析を行う前に簡単な系での解析が行われた(解析案5)。流体は非圧縮条件、管内流れなし、濃度拡散なしの条件下で、移動境界メッシュを用いて解析が行われたが、計算コストが大きく、計算が発散してしまっ
- (3) 計算コストを削減するために、より簡略化したモデルで解析を行うこととした。具体的には光ミキサーを、すべりなし表面を持つ回転円柱で近似したモデルが構築された(解析案6)。
- (4) 光ミキサーの効果を調べるため、光ミキサーを用いない場合を考え(設計案5)、その場合の混合効果を確認した(解析案7)。また、光ミキサーの回転させなくても十分な攪拌能力があることも考えられるため、光ミキサー回転しない場合を考え(設計案6)、その場合の混合効果を確認した(解析案8)。それぞれを(3)で得られた結果と比較しところ、光ミキサーの回転によってその周りに引き込む流れができ、混合効果を発揮できることが確認された。
- (5) 光ミキサーの数を2個、3個、4個とした場合のそれぞれについて、光ミキサーの回転が有る場合、無い場合を考え(設計案7-12)、混合効果を調べた(解析案9-14)。その結果、光ミキサーの数を増やせば混合効果は上がるが、光ミキサーを4個にすると、光ミキサー間の距離が

^{†1)} COMSOL MultiphysicsはCOMSOL AB社の登録商標である。

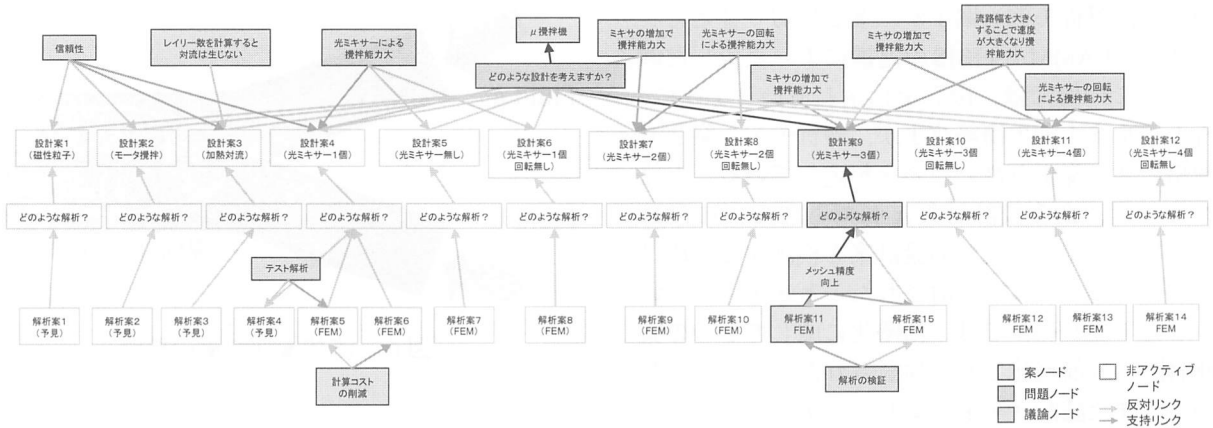


図7 マイクロ攪拌装置の設計検証プロセスのgIBISによる表現

小さくなって流体が流れにくくなり、混合効果が小さくなることが分かった。よって光ミキサー3個案(設計案9)を採用することとした。

- (6) 設計案9を検証する際に用いた解析案11の計算精度を確認するため、より細かいメッシュを持つ解析案15が構築された。両者の結果を比較すると差がなかったため、解析案11が十分な精度を持っていることが確認された。よって最終的に、設計案として設計案9が採用された。

5.2 EAMMによる表現：挙動推定による設計検証

設計案1から設計案4の検証は挙動推定によって行われている。それぞれの挙動推定のプロセスを図8に示す。設計案1は磁性粒子を用いて変動磁場を与えることで流体を攪拌する案であり、設計者は、この案に関して設計対象を構成する実体として、流路、流体1、流体2、磁性粒子、変動磁場を概念モデルの対象空間のセルに記述した。また、これらの実体に作用する現象として、流体の流れ現象、変動磁場による粒子の運動、それによって引き起こされる流れ場の攪拌、濃度の分布による拡散、対流現象を概念モデルの支配則のセルに記述した。これらの内容から設計者は、粒子によって流路がつまる可能性や混合して流路から出た流体に粒子が混ざる可能性を予見し、その結果を概念モデルの挙動に記述した。また、信頼性の観点から設計要求を満たさないと判断されたことを記述した。その他の案についても同様に、挙動推定による設計検証の内容が記述されている。

5.3 EAMMによる表現：妥当でない解析モデリング

設計者は、設計案4に対しては挙動推定による検

証を行った結果、設計要求を満たしそうだと判断した。そしてさらに詳細な検討を行うために、解析案5で解析シミュレーションを用いた検証を行った。図9に解析案5のモデリングプロセスの内容をEAMMに記述した例を示す。ここでは、初期流れや拡散現象を考慮しないこと、流路の奥行き方向の特性変化を考慮しないこと、などが簡略化欄に記述されている。また、移動境界メッシュを用いて計算を行うことが、計算モデルの対象空間セルに記述されている。この解析モデル用いて計算を行ったところ、解析計算結果が収束しなかったことが解釈欄に記述されている。

5.4 EAMMによる表現：解析シミュレーション結果による設計検証

図10に、解析案6のモデリングプロセスの内容をEAMMに記述した例を示す。解析案5の計算コストを削減するために、光ミキサーを表面滑りの無い円柱に近似すること、流れ現象から濃度拡散現象への一方向連成で計算を行うことが、簡略化欄に記述されている。また、これらの数理表現として、円柱の壁面をスライディング壁として接線方向に速度ベクトルを与えること、拡散方程式に含まれる流速に流れ現象の流速を代入することが数理モデルの各セルに記述されている。解釈欄には、計算が収束し、光ミキサーによる攪拌が確認できたことが記述されている。

5.5 複数の代替案と設計者の意図の表現

図7に、マイクロ攪拌装置の設計検証プロセスにおける、上位レベルのgIBIS表現を示す。ここでは全ての設計案とそれに対応する解析モデル案がIBISモデルの問題、案ノードを用いて、また、設計者の判断の根拠が議論ノードを用いて表現されて

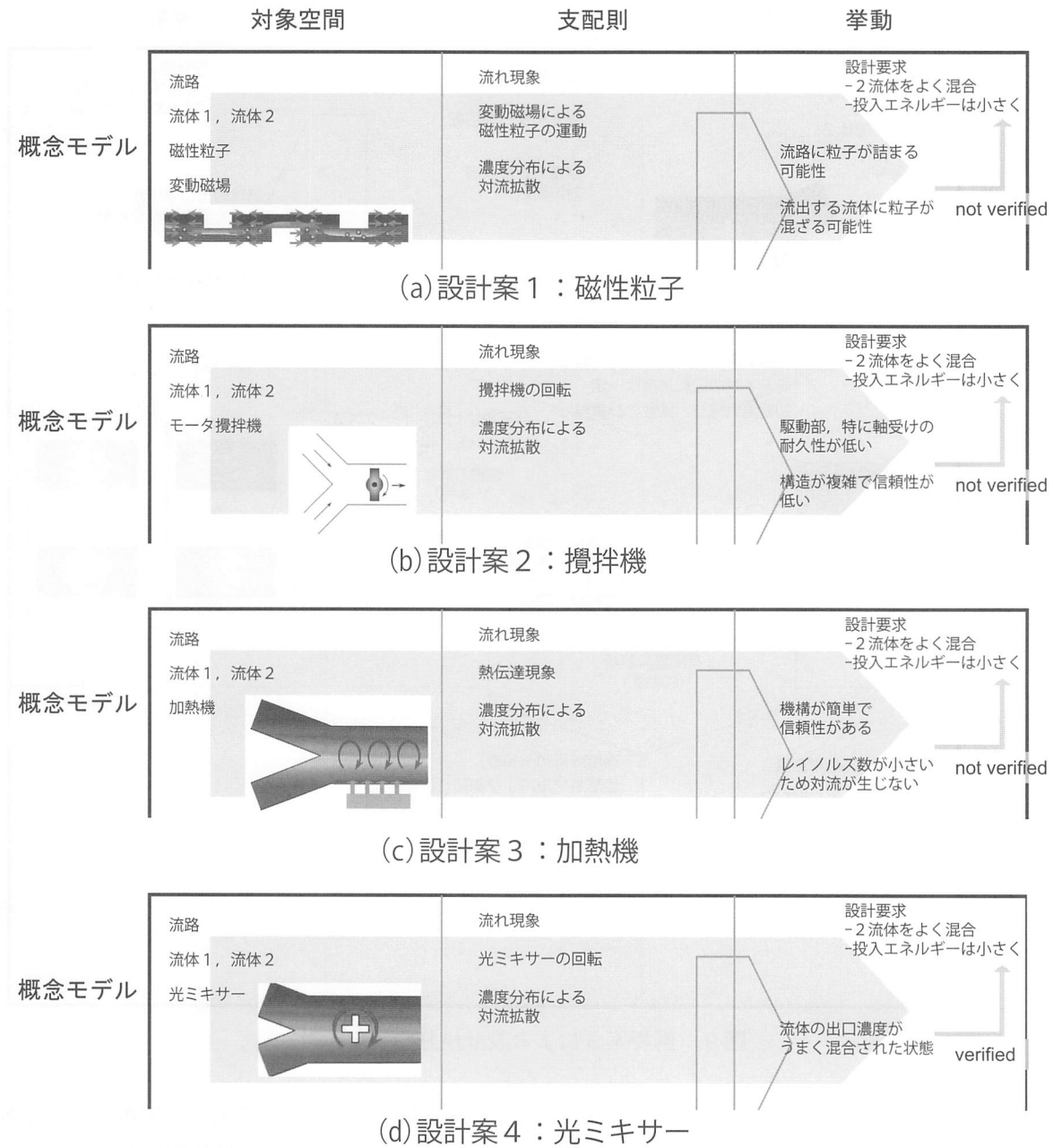


図 8 挙動推定による設計検証の表現

いる。

これによれば、最終的に採用したのは設計案 9 であるが、さらに大きな攪拌効果を狙って光ミキサーを 4 個配置した設計案 11 の検討を行ったこと、しかし流路幅が狭くなるためミキサー間を流れる流量が少なくなり、結果的に攪拌能力の向上がほとんどなかったため、設計案 9 を選択したこと、などがわかる。また、設計案 9 の検証のために解析案 11 と 15 による計算が行われ、これらの解析結果によって解析案 11 のモデルの精度が検証されていることがわかる。

6. 結言

本報では、設計検証のために行われる解析モデリングプロセスの内容を、設計検証の進行と同時に可視化して整理するためのフレームワークの概要を解説した。このフレームワークでは、解析モデリングの過程で設定した簡略化の内容や各種の条件、対応する数学的表現、およびそれらに基づいて導出された解析結果など、工学解析モデリングを構成する各種の内容を図式化し、明示的に把握するための EAMM と、複数の案の変遷とその背後にある議論

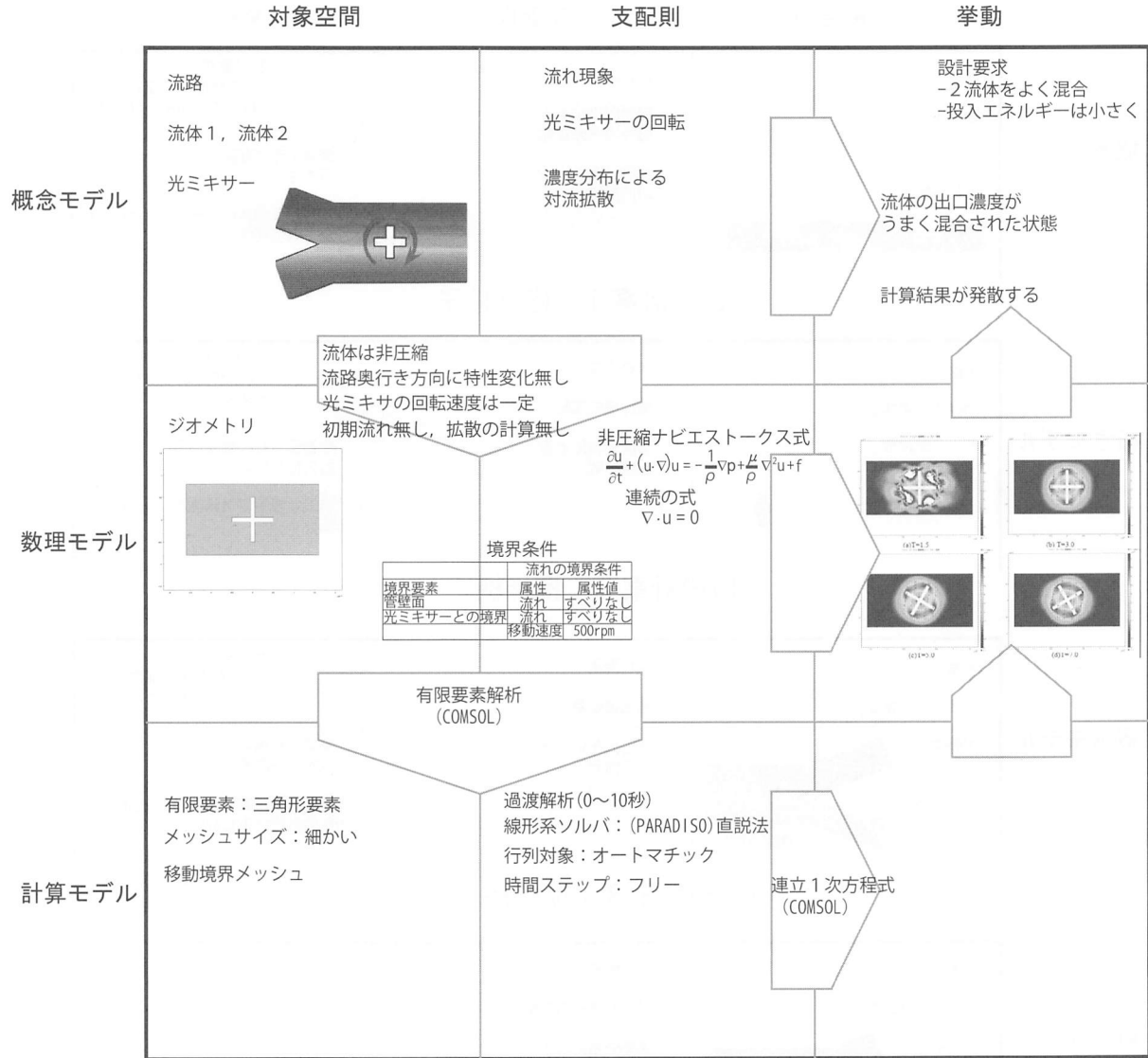


図9 解析案5による設計検証の表現

を図式化して表現するためのgIBISを連携して利用する。μTASにおける流体の混合促進装置の設計検証プロセスを例題として取り上げ、提案した枠組みによる記述例を紹介した。

設計者が一連のプロセスの記述を柔軟に行えるようにするために、提案したフレームワークを支援システムとして実装することが今後の課題である。これに関しては、著者らのグループでは設計プロセスにおける仮説生成検証の動的展開に着目した設計支援フレームワーク⁸⁾を開発している。これに本研究で提案した知識管理の枠組みを統合することで、設計検証プロセスを効率的に獲得、管理する設計支援システムの構築ができると考えられる。

なお、本報の執筆にあたり、大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻の藤田喜久雄教授から多くの助

言を頂いた。また、5章で示した例題の作成にあたり、同専攻(当時)の中島幸祐氏の協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Grosse, I. R., Milton-Benoit, J. M., and Wileden, J. C. : Ontologies for Supporting Engineering Analysis Models, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 19, 1 (2005), 1.
- 2) 野間口大, 田口智祥, 藤田喜久雄: 工学解析モデリングのための知識管理フレームワークについての考察, 日本機械学会論文集 C編, 75, 756 (2009), 2181.
- 3) Conklin, J. and Begeman, M. L. : gIBIS: A Hypertext Tool for Exploratory Policy Discussion, ACM

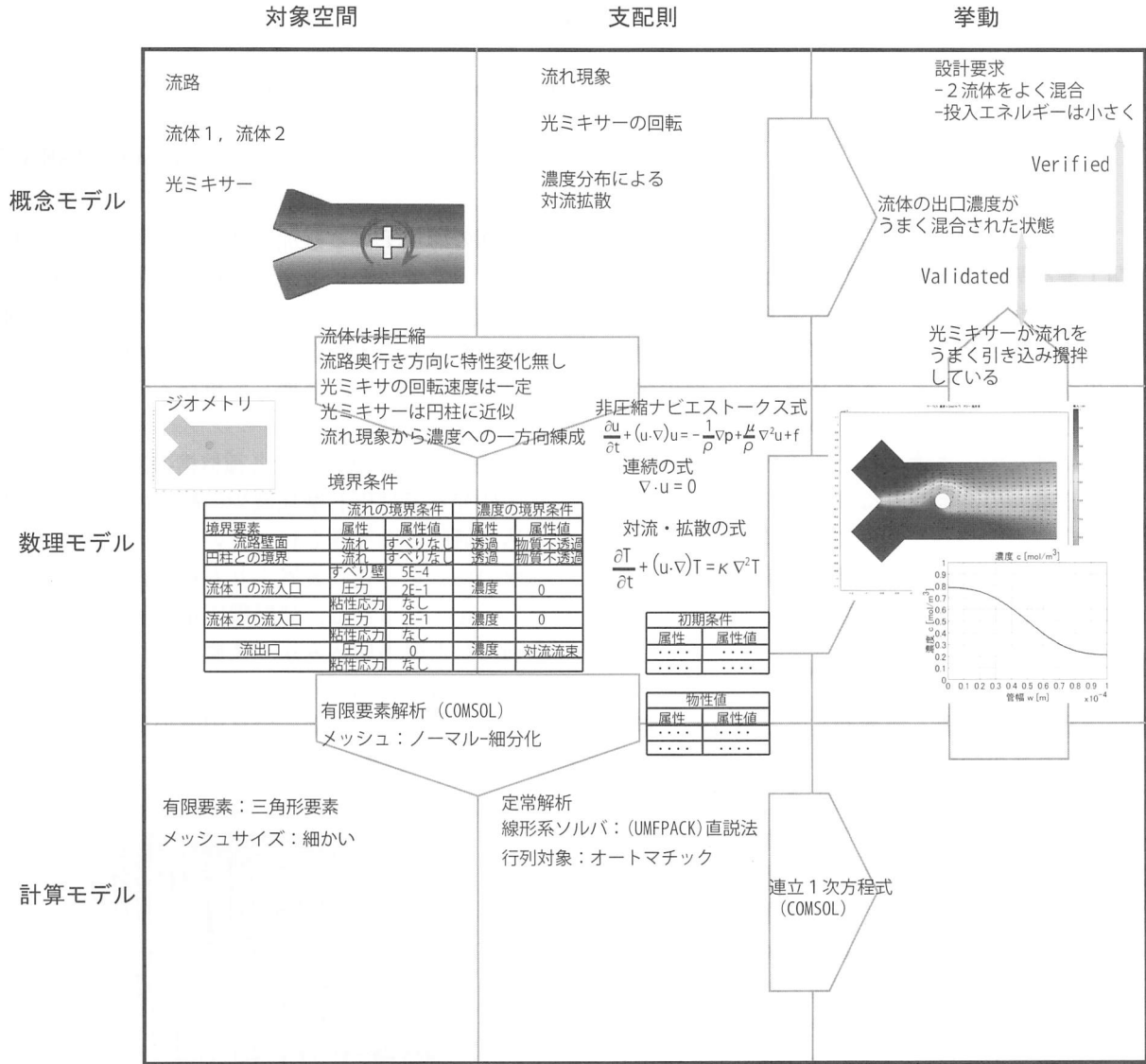


図 10 解析案 6 による設計検証の表現

Transactions on Office Information Systems, 6, 4 (1988), 303.

4) Dym, C. : Engineering Design : A Synthesis of View, Cambridge University Press, (1994).


5) 富山哲男: 設計の理論, 岩波書店, (2002).

6) Shön, D. A.: The Reflective Practitioner - How Professionals Think in Action, Basic Books Inc., (1982). (邦訳: 省察的実践とは何か - プロフェッショナルの行為と思考 -, 柳沢昌一, 三輪建二監訳, 鳳書房, (2007))

7) 小寺秀俊: MEMS と μ TAS における表面の利用と表面処理, 表面技術, 56, 10(2005), 572.

8) 野間口大, 藤田喜久雄: 設計プロセスにおける仮説生成検証の動的展開に着目した設計支援フレームワーク, 人工知能学会論文誌, 25, 3 (2010), 514.

野間口 大



2002年3月, 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了. 2003年4月, 大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻助手. 現在, 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻助教. 設計支援のための知識管理手法, 設計プロセスのモデリング手法, および設計支援システムの構築に関する研究に従事.