OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	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
Author(s)	野間口, 大; 田口, 智祥; 藤田, 喜久雄
Citation	日本機械学会論文集 C編. 2009, 75(756), p. 2181-2190
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/3149
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

日本機械学会論文集(C編)
75巻756号(2009-8)

論文 No. 09-0054

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*

野間口 大*1, 田口 智祥*2, 藤田 喜久雄*1

Research on Knowledge Management Framework for Engineering Analysis Modeling

Yutaka NOMAGUCHI*3, Tomohiro TAGUCHI and Kikuo FUJITA

*3 Department of Mechanical Engineering, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

Any engineering analysis model is indispensable to predict the behavior of a product for its rational evaluation and optimization. In the process of modeling engineering analysis, an engineer makes model idealizations, which depend on a various factors of design such as the kinds or types of products, the objectives of the engineering analysis, and design leadtime constraints. Because the knowledge of engineering analysis exists in modeling process, it is important to capture and manage the modeling process for enhancement of rationality and reusability of engineering analysis models. This research aims to develop the knowledge management framework for engineering analysis modeling. This paper proposes a concise and comprehensive description format of modeling process called Engineering Analysis Modeling Matrix (EAMM). Three modeling levels, i.e., conceptual model, mathematical model and computational model, three modeling aspects, i.e., target objects, governing principles and behavior, and seven modeling operations are defined as fundamental terms of modeling process. A modeling example of heater analysis shows the EAMM's capability as a foundation of the management framework of engineering analysis modeling knowledge.

Key Words: Design Engineering, Modeling, Knowledge Engineering, Engineering Analysis Model, Knowledge Management

1. はじめに

製品設計開発においては，設計案を検討したり，製品性能を評価したりする際に，物理現象に基づく数理的な解析モデルを構築し，製品の物理的な挙動についてのシミュレーションと検証を行うことが不可欠である．その過程で，設計者や解析技術者は，本質的ではない細部の形状や物理現象の省略，1次元や2次元に縮約した空間でのモデル化など，多くの簡略化を行っている(1)．この簡略化とそれを正当化する根拠こそが工学解析モデリング知識の核心である(2)．

どのような簡略化が行われるかは，解析の目的や目標，解析時間，解析コスト，解析結果に許容される誤差などの様々な因子に依存している(3)．これらの因子は設計開発の段階に応じて異なるため，モデリング知識は個々の状況に依存した動的なものであり，その明示的な獲得は，工学解析モデリングの再利用やモデリングの検証および妥当性確認のための重要な課題である．しかしながら，現状では，モデリング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おり，明示的に扱うための考え方やフレームワークは確立されていない．

本研究では，工学解析モデリングの知識を獲得，管理するためのフレームワークの構築を目的とし，設計者や解析技術者が解析の実行と並行して，モデリングの検証やその妥当性を検討できるように，工学解析モデリングプロセスの各局面の内容を網羅し，かつそれらをマトリクスのセル上に図式的に配置して簡潔に記述するための書式について考察する．具体的には，解析の過程で設定した条件や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のようなモデリング知識の構成内容を明らかにし，それらを記入するための欄をマトリクス上に配した工学解析モデリングマトリクス (EAMM; Engineering Analysis Modeling Matrix) を提案する．EAMMの各欄に該当する内容を書き入れることにより，工学解析モデリングの知識を明示的に抽出し，EAMMの書式の下で管理することができる．

* 原稿受付 2009年1月15日.
*1 正員，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).
*2 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻.
E-mail: noma@mech.eng.osaka-u.ac.jp

2. 工学解析モデリングとその課題

2·1 設計における解析モデリング 設計における工学解析は，ある設計案が要求機能を満たすような挙動を示すであろうという設計者の推定を解析モデルのもとでのシミュレーションによって裏付ける作業である．

本来，製品の挙動には様々な物理現象が複雑に関連しているが，解析を行う際には製品の挙動のうちの特定の部分に着目して簡略化した解析モデルを構築する．つまり，シミュレーションによって製品に関連する現象自体が明らかになるわけではなく，あくまでも解析モデルを構築する際に想定した物理現象の程度を定量的に提示するに留まる[4]．このため，解析対象の挙動をシミュレーションする上でどのような物理現象を考慮するのか，またその数理モデルを構築する際にどのような簡略化を行うのか，といった種々の前提条件を適切に判断したり管理したりすることが重要となる．それらの判断や管理が十分でないと，解析結果の妥当性が損なわれることになる．この一連の内容こそがモデリングの知識である．

2·2 設計における知識獲得プロセス 一方でそもそも設計は悪構造問題であり，問題そのものを明確にしていきながら同時にその解を構築していくプロセスである．そのプロセスにおいては，仮説の設定とその下での代替案の具体化による仮説の検証を通じ，必要に応じて仮説を切り替えながら問題に対する知識を得て，解くべき問題とその解を徐々に具体化していくある種の試行錯誤のプロセスが必要である[5]．

このことは設計における解析モデリングにおいても同様である．解析モデリングにおいて物理現象に関する体系的な知識が必要となることはもちろんであるが，その上で，モデリングにおける視点の設定や境界条件の設定，設計の段階に応じた簡略化の程度を判断するためにある程度の試行錯誤は不可欠であり，モデリングに関する知識はこの過程で獲得されるものである．

2·3 モデリング知識の明示的な管理に向けた課題 以上の内容を踏まえて，工学解析モデリングのための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をまとめると次の2点に集約される．

(i) **プロセスの明示的な記述のための書式の導入**：解析モデリングの過程では解析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，条件設定など様々な内容が取り扱われている．これらを明示的に記述するためには，特定の解析モデルや計算手法に依存しない書式が必要である．

(ii) **仮説生成・検証プロセスの管理**：設計のための工学解析モデリングでは，試行錯誤的な仮説生成・検証が不可欠である．その過程で生成される複数の案を管理し，必要に応じてモデルを切り替えて比較検討を行えるようにしておく必要がある．

3. 工学解析モデリングプロセスのモデル

本章で，まず，工学解析モデリングプロセスについて記述すべき内容を考察する．

3·1 解析モデリングの視点 設計対象の挙動を調べる際に設計者は，まず，その挙動を調べる領域である対象空間を決め，その空間に働く支配則を決定し，その下で何らかの計算を行うことにより対象の振舞いを推定する．このことを踏まえ，解析モデリングには，対象空間，支配則，挙動の3つの視点が関与していると考える．

(i) **対象空間 (target objects)**
設計案は，設計対象を構成する部品やサブシステム，およびそれらの形状などの属性情報によって記述される．解析モデリングにおいては，まず，これらの情報を取捨選択して，設計対象の中で解析に関連する部分を決定する必要がある．本研究では，解析の対象となっている設計対象の特定の部分とその属性情報を対象空間と呼ぶ．

(ii) **支配則 (governing principles)**
実際の設計対象の挙動は様々な物理現象の複合的な作用の結果として現れるものであるが，実際にはそれらを全て考慮して解析を行うことは不可能である．このため，設計対象に関連する物理現象のうち支配的なものを取捨選択することが必要である．本研究では，対象空間の中で支配的であると推定され，解析の対象として選択された物理現象を，対象空間における支配則と呼ぶ．

(iii) **挙動 (behavior)**
上述の対象空間と支配則の設定のもとで推定される設計対象の振舞いを挙動と呼ぶ．

3·2 解析モデルのレベル 2·1項で述べたように，設計における工学解析は，ある設計案が要求機能を満たすような挙動を示すであろうという設計者の推定を，解析モデルのもとでのシミュレーション結果によって裏付ける作業である．つまり解析には，数学的なモデルの構築に先立ち，設計者がモデリングの対象空間や支配則を定性的に理解して，対象の挙動を推定する段階が存在する[6][7]．また，解析的な解が求められない場合には，数値解を求めるための離散的なモデルを構築する段階も存在する．これらを踏まえ本研究では，

解析モデルの抽象レベルとして概念モデル，数理モデル，計算モデルの3つを定義する．

(i) **概念モデル (conceptual model)**
数学的なモデルの構築に先立ち，設計者がモデリングの対象空間や支配則を定性的に理解して，対象の挙動を推定するためのモデルを概念モデルと呼ぶ．概念モデルレベルの記述は数式ではなく，自然言語やポンチ絵によって行う．

(ii) **数理モデル (mathematical model)**
物理現象は多くの場合，力学や電磁気学等の理論に基づいて，常微分方程式や偏微分方程式など，解析対象の空間や時間に関する数学的な表現を用いて記述される．そのような各種の理論に基づいて，概念モデルの記述内容を，対象空間の形状情報や物理現象の数学的表現によって記述したものを数理モデルと呼ぶ．

(iii) **計算モデル (computational model)**
非線形の偏微分方程式など，数理モデルの多くは解析的に解くことができないものであるため，その解を求めるためには対象の空間や時間を有限な幅で離散化して離散化方程式を導く必要がある．そのような，数理モデルの解を数値的に求めるための離散的なモデルを，計算モデルと呼ぶ．

なお，これらは米国機械学会が定める「計算固体力学における検証と妥当性確認のための指針」[8]におけるモデリングレベルの定義とも対応するものである．

3·3 工学解析モデリングマトリクス　前項までの考察に基づき，工学解析モデリングプロセスの書式として，EAMMを提案する．これは，3·1項で述べた解析モデリングの3つの視点を横軸に，3·2項で述べた3つの抽象レベルを縦軸にとって，モデリングプロセスをマトリクス状に配置したセル群に形式化したものである．図1にEAMMの概要を示す．EAMMには，視点とレベルの各軸の組合せによる9個のセル欄が構成され，さらにセル間に7個の操作欄を設定する．ただし，対象空間と支配則の内容は一般に同時に記述されるので，これらのセルの間には操作欄を設けていない．それぞれの欄には対応する内容を記述することとして，それらの連携によりマトリクス全体でモデリングプロセスを構成する．

本研究では，以上のように提案するEAMMに従うことにより，特定のモデルや計算方法に依存しないレベルで工学解析における設計者の思考プロセスの明示的な記述が可能であることを示す．また，仮説生成・検証の過程で生成される複数の解析モデルを，複数のEAMMによる記述の切り替えによって管理することを提案する．

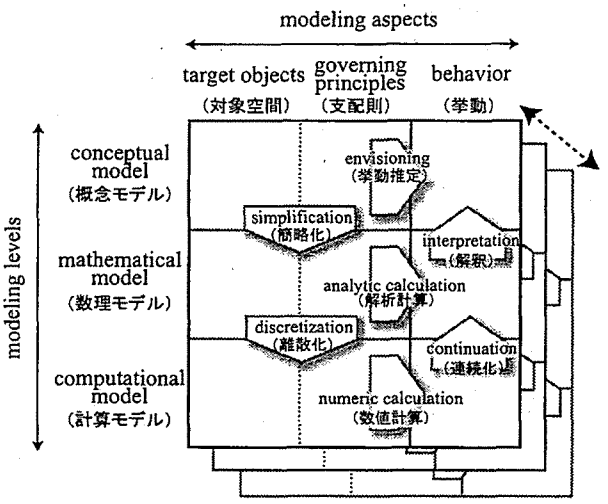


Fig. 1　Engineering Analysis Modeling Matrix (EAMM)

4. 工学解析モデリングマトリクスの記述内容

本章では，EAMMの9個のセルに対応する記述内容を，簡単な解析モデルの例を交えて，説明する．

4·1 対象空間の概念モデル　対象空間における物理現象に関連する実体やそれらの間の関係の定性的な表現が，対象空間の概念モデルである．「複数の穴が並んでいる」「突起がある」などのように自然言語やポンチ絵で記述される．

4·2 対象空間の数理モデル　解析対象の数理モデルを構築する際には，実際の形状を簡略化したモデルが用いられる．例えば構造解析や振動解析では，力学的に重要でない細部の形状を無視したり，比較的薄い板厚のものを「シェル」として扱ったり，あるいは，その長さが太さに対して十分大きな棒状の形状を「はり」として扱ったりする[1][9]．このように簡略化された形状モデルが対象空間の数理モデルである．

4·3 対象空間の計算モデル　解析対象の空間および時間を離散化したものが対象空間の計算モデルである．基本的には，数理モデルにおいて連続的に表現されていた対象空間を，格子や有限要素によって分割し離散表現としたものである．その具体的な内容は，支配則の数理モデルから計算モデルを構築する際に行う離散化の手法に応じて異なる．例えば，差分法では，未知関数の値を定める格子点(差分点)によって対象空間を表現する．また，有限要素法では，対象空間を単純形状の要素(有限要素)に分割し，その要素の形状，および要素の節点によって対象空間を表現する[10]．

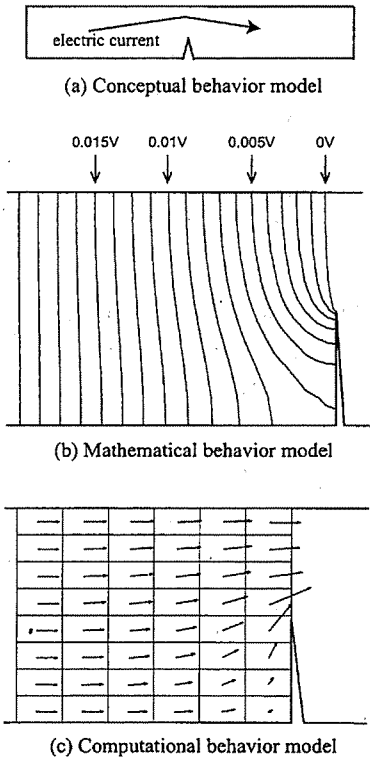
4-4　支配則の概念モデル　　解析対象の振舞いを支配する物理法則を定性的に記述するモデルである．例えば，熱膨張現象に関する支配則の概念モデルは，「金属材料や複合材料などのほぼすべての材料は温度変化が生じると膨張あるいは収縮し，その伸びは温度上昇量に比例する」となる．また，熱伝導現象を取り上げた場合，その支配法則であるフーリエの法則の概念モデルは，「ある位置の断面に単位時間当たり流入する熱量は，その点における温度勾配に比例する」などのように記述できる．

4-5　支配則の数理モデル　　支配則の数理モデルは物理現象を支配する物理法則の数学的表現であり，解析の対象となる空間内で成立する支配方程式，その領域の境界上で未知関数が満足すべき境界条件および初期条件から構成される．

前述のフーリエの法則の概念モデル「ある位置の断面に単位時間当たり流入する熱量は，その点における温度勾配に比例する」の数理モデルは，位置を x，単位時間当たりに流入する熱量を $q(x,t)$，温度勾配を $\frac{\partial u}{\partial x}$ として，$q(x,t)=-\lambda\frac{\partial u}{\partial x}$ と書け，これを用いると熱伝導方程式 $\frac{\partial u}{\partial t}=\lambda\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ を得る[11]．これに初期条件や，境界上の温度を規定するディリクレ条件などの境界条件を与えることで熱伝導現象の数理モデルが得られる構図になる[12]．

4-6　支配則の計算モデル　　支配則の計算モデルは物理法則の数理モデルの数値解を得るための離散的近似表現である．今日の数値解法としては，差分法，有限要素法，境界要素法の３つが代表的であり，用いる手法によってモデルの具体的な内容が異なる．例えば差分法においては，数理モデルを差分近似して支配方程式を書き替えて近似を行う．前述の熱伝導方程式は，空間の離散化によって $\frac{du}{dx}(x)\approx\frac{u(x+h)-u(x)}{h}$ のように十分小さい h に対して平均変化率で近似され，さらに $t_k=t_{k-1}+\Delta t,(k=1,2,3,\ldots)$ のように時間を離散化することで $\frac{u_j^{k+1}-u_j^k}{\Delta t}=\lambda\frac{u_{j+1}^k-2u_j^k+u_{j-1}^k}{h^2}$ のような差分方程式が導かれる[11]．この差分方程式が熱伝導現象の計算モデルの一例である．

4-7　挙動の概念モデル　　挙動の概念モデルは解析対象の振る舞いの定性的表現である．例として，図２に示すような片側き裂つき平板を流れる定常電流[13]の解析を考える．解析に先立って設計者は「平板の中を電流は亀裂を回り込むように流れ，亀裂先端に近づくほど電流密度の値が大きくなる」などのように振舞いを推測している (図 2(a))．このような推測が振舞いの概念モデルである．このモデルは振舞いの数理モデルの計算結果との整合性を確認することによって検証され，必要に応じて更新される．



(a) Conceptual behavior model

(b) Mathematical behavior model

(c) Computational behavior model

Fig. 2　Behavior models of electric current[13]

4-8　挙動の数理モデル　　挙動の数理モデルは支配則の数理モデルの解である．平板内の定常電流の解析の例では，図 2(b) のような等電位線として与えられる電圧値分布が挙動の数理モデルとなる．数理モデルの解析解が求められない場合には，計算モデルの数値解に対してポストプロセッシングを行い，離散的な値を連続なものとして解釈を加えることによって求める．

4-9　挙動の計算モデル　　挙動の計算モデルは支配則の計算モデルの解である．図 2(c) に示すように平板を要素分割して得られた電流密度のベクトル分布がこれに対応する．

5. モデリング操作の形式

EAMM 上の各セル間には，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個の操作が定義される．以下の各項で，これらの内容と，４章で述べたそれぞれのセルの記述内容との連携を示す．

5-1　簡略化　　簡略化は，必要な精度や計算時間の制約などに応じて，複数の現象が複雑に絡み合う実際の問題を，その本質を損なわない範囲でできるだけ簡単なモデルにする操作である．数理モデルの解を解析的に求める場合だけでなく，有限要素法などによる

数値解を求める場合でも，設計対象の形状をそのまま要素分割するのではなく，単純化したり，近似によって得られるモデルが用いられる．

この操作は，EAMM 上では，概念モデルの対象空間と支配則の記述に基づいて数理モデルの対象空間と支配則の記述を行う操作として表現される．対象空間に対する操作には，例えば，次元の縮小，対称性の利用，領域の切り出し，省略単純化，構造置換など[14]が，支配則に対する操作には，微小効果要素の無視，領域の限定，焦点化，環境との絶縁，集中要素近似，集中定数化，線形化，変動が小さい変数の定数化など[1]がある．

5·2 離散化 離散化は，非線形の偏微分方程式など解析的に解くことができない数理モデルの解を数値的に求めるために，数値解法を前提として対象問題の空間および時間の変数を離散化する操作である．この操作は，EAMM 上では，数理モデルの対象空間および支配則の記述に基づいて，計算モデルの対象空間および支配則の記述を行う操作として位置づけられる．離散化操作には，メッシュパターンやメッシュの分割粗さの決定，時間の離散化の手法の決定など[14]が含まれる．

5·3 挙動推定 設計においては，対象の持つ情報に未定の部分が多く，設計対象の評価を行う際には限られた情報から挙動の概略を推定しながら進められる．設計者は解析に先立って，まず解析対象の全体像を思い浮かべてその可能な振舞いを定性的に推定しておくことが重要である．定性推論の分野では，その挙動の推定の際には，まず挙動の全体像を思い浮かべて対象がとりうる可能な挙動のパターンを挙げることが重要であるとして，これを挙動推定 (envisioning) と呼んでいる[15]．本研究では，数理モデルを用いずに定性的に設計対象の挙動を推定する行為としてこの呼称を採用することにする．

EAMM 上では，挙動推定は，概念モデルの対象空間と支配則の内容に基づいて概念モデルの挙動を記述する操作に対応する．

5·4 解析計算 数理モデルにおいて，対象空間と支配則の記述内容から挙動を導出する操作を解析計算と呼ぶ．これは支配則に記述された各種の方程式の解を解析的に求める操作に対応する．

5·5 数値計算 計算モデルにおいて，対象空間と支配則の記述内容から挙動を導出する操作を数値計算と呼ぶ．これは，支配則に記述された離散化方程式の解を数値的に求める操作に対応する．

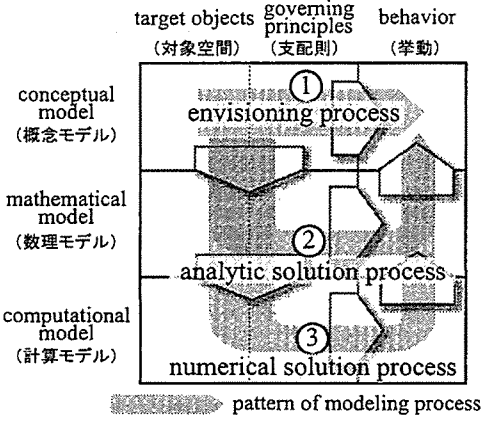


Fig. 3 Patterns of modeling process

5·6 連続化 挙動の計算モデルは離散化方程式の解として表現されるが，これを補間して空間的連続性の特徴を与え，数理モデルの解とする操作を，形式的に連続化と呼ぶ．この操作は CAE システムにおいては一般にポストプロセッシングと呼ばれ，その結果はコンター図などの形式をとる．

5·7 解釈 挙動の数理モデルの内容から挙動の概念モデルの内容を記述する操作を，解釈と呼ぶ．解釈は，数理モデルの計算結果が，概念モデルにおいて推定した挙動と適合しているかどうかを確認する操作に対応する．適合していなかった場合，概念モデルにおける挙動推定が間違っていたと判断して設計案を変更するか，解析結果が間違っていると判断して数理モデルおよび計算モデルを構築し直すことになる．この判断は設計においては極めて重要であり，いわば設計のノウハウ的な知識である．EAMM を用いて解析モデリングプロセスを記述することで，モデリングの様々な情報とともにその判断の履歴を記録しておくことができる．

6. 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，下記の 3 つが挙げられる．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．

(i) **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 3-① 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．

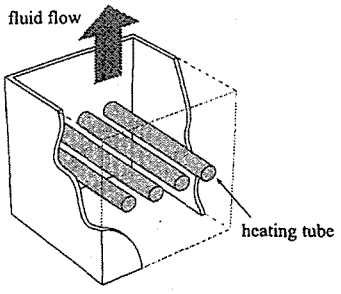


Fig. 4　Schematic view of heater

(ii) **解析解を用いるプロセス**

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3-②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検証するプロセスとなる．

(iii) **数値解を用いるプロセス**

計算モデルを構築して数値解を求める場合，図3-③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検証するプロセスとなる．

7. EAMM の記述例

EAMM の書式の記述能力について，仮想的な設計例題を踏まえながらそこでの解析モデリングを実際にEAMM に記述し，具体的に検証する．

7·1　設計例題の概要　　本章では，対象として加熱器を想定し，2·1節，および2·2節で指摘した工学解析モデリングの特徴に対応させることを意図して，設計案に期待されている挙動をシミュレーションによって確認する作業を含み，またモデリングプロセスに試行錯誤を含む設計過程を取り上げる．

対象とする加熱器は，図4に示すように，内部に配置された加熱管によって，下部の入口から上部の出口に向かって流れる水を加熱するものである．入口部での水の平均温度は293Kで，出口部の平均温度を320K以上とすることが仕様として与えられている．

設計の過程で，図5に示すように，加熱管の本数および配置方法に関する3つの代替案((1),(2),(3))，および設計の評価を行うための解析モデルに関する2つの代替案((A),(B))が生成され，以下のように検討が進められた．

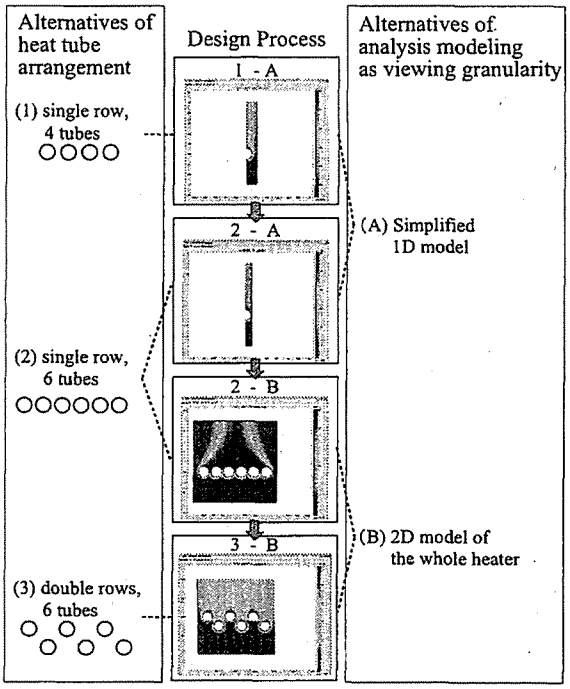


Fig. 5　Alternatives and process of the heater design

(i) 加熱管の軸方向で流れ特性に変化がないことを仮定し，加熱管周りの対象性を考慮し，1本の加熱管のみを対象空間に含む簡単な解析モデルを構築した(図5の1-Aおよび2-A)．

(ii) 加熱管が4本の場合(1-A)と6本の場合(2-A)で，それぞれの加熱性能を(i)の解析モデルによって調べると，4本の場合は仕様を満たさないが6本の場合は仕様を満たすことが確認された．

(iii) より詳細に検討を行うため，加熱容器全体の2次元モデルを作成して6本案の評価を行った(2-B)．

(iv) 解析の結果，出口温度が仕様を満たしていないことが分かった．原因は，加熱管の間隔が狭いために水が流れず，熱せられた水が加熱管周辺に留まってしまい，熱伝達が十分に行われていないためであった．これは，(ii)で構築した対称性を考慮したモデルでは予期できない現象である．

(v) 管の間隔を確保するために，管の配置を検討することになった．6本の管を1列に配置した場合と2列に配置した場合とを比較し，管の間を流れる水の流速が十分に得られ，仕様を満たすための熱伝達が十分に行われる2列配置案(3-B)を採用することとなった．

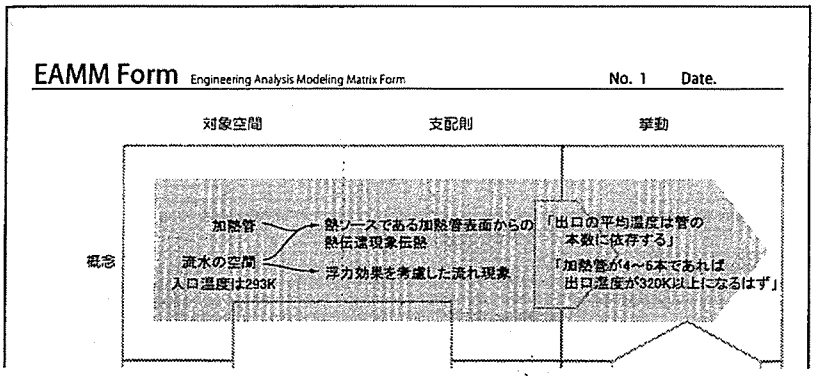


Fig. 6 Conceptual model of a heater analysis

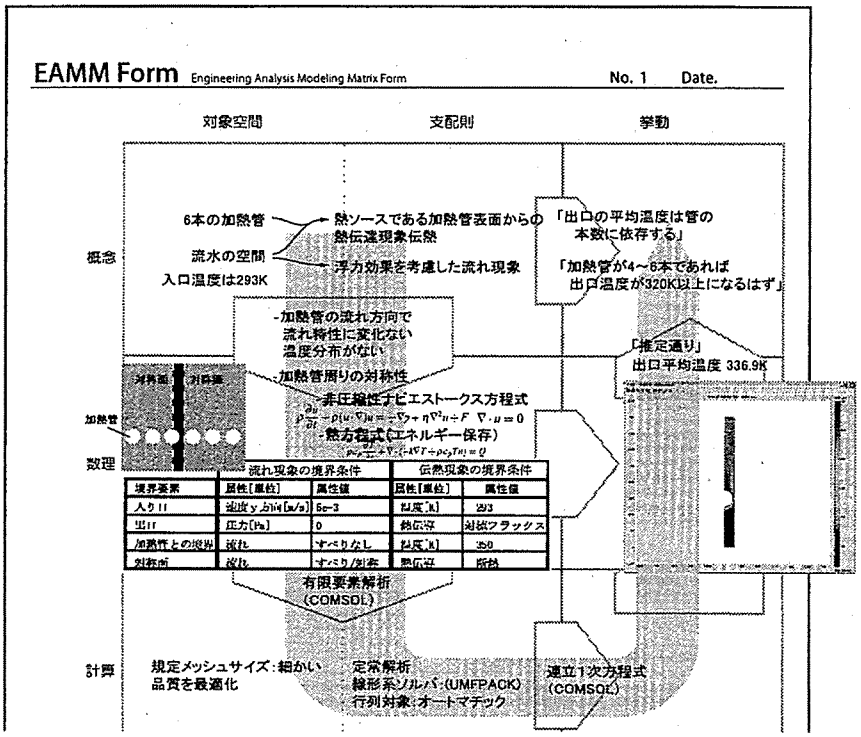


Fig. 7 Modeling process of analysing a heater by considering symmetry of heat pipe arrangement

7·2 EAMMによる解析モデリングの記述 加熱器設計で用いられた解析モデルの構築過程をEAMMの書式に従って記述した例を示す.

7·2·1 挙動推定 解析に先立ち,設計者は解析対象の振舞いを概念的に理解する.本設計例の場合,解析の対象となるのは加熱管および流水が存在している空間であり,支配則として,熱源である加熱管表面からの熱伝達現象,および浮力効果を考慮した流れ現象を考える.これらの内容を考えた上で,設計者は「出口の平均温度は管の本数に依存する」と考え,経験則や過去の類似設計から「4~6本なら出口温度が320K以上になるはずだ」と推定した.このプロセスは図6のようにEAMMにおける概念モデルの各欄に記述することができる.ここで記述した概念モデルに基づいて数理モデルを構築する.

7·2·2 対称性を考慮した解析モデル 図7は加熱管の対称性を考慮した簡単な解析モデル(図5の1-Aおよび2-A)のモデリングプロセスの記述例である.このシートには,簡略化操作欄に「加熱管の流れ方向で流水の流れ特性に変化がないこと」「加熱管の流れ方向で温度分布がないこと」および「対称性を利用すること」が明記され,その下で設定される対象空間や境界条件,支配方程式が数理モデルの各欄に記述された.さらに,数理モデルの数値解を求めるため,汎

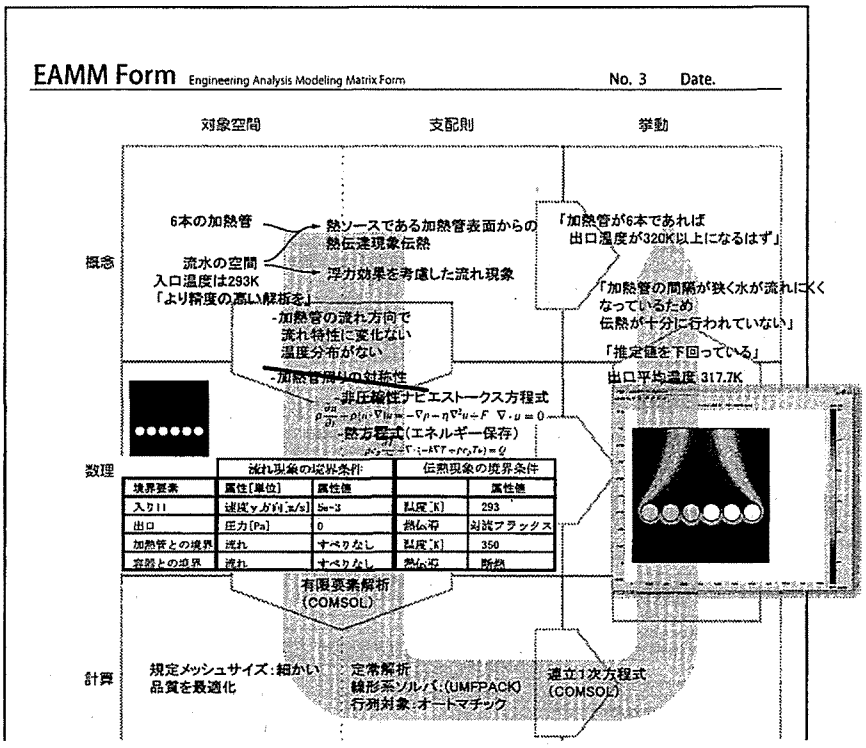


Fig. 8 Modeling process of analysing a heater on the whole

用連成解析有限要素法 ソフトウェアである COMSOL Multiphysics [1]を用いること，およびそこでの規定メッシュサイズや線形系ソルバとして「UMFPACK」を用いることなど各種パラメータ設定が計算モデルの各欄に記述された．

計算結果は本来離散化された各要素に割り当てられた数値の集合となっているが，解析ソフトウェアのポストプロセッシングによりコンター図を得て，数理モデルの挙動のセルに添付した．設計者は，この結果を解釈して，設計案の出口平均温度が 推定した値と適合しているかどうかを判断する．この例では，加熱管が 6 本の時に「 推定通り」と判断できることが，解釈欄に記述された．

7.2.3 より詳細な解析モデル 加熱管を 6 本とする案 (図 5 の 2-B) に対して行われたモデリングの記述例を図 8 に示す．このシートには，対象空間，支配則の内容は図 7 のモデルと同じであるが，「加熱管全体のモデルで解析すればより詳細な検討が行える」という推定に基づいた解析であるという意図が記述され，簡略化欄では「加熱管周りの 対 称性」を考慮しないことが明記された．計算を行った結果，「出口平均温度が 推定値を下回っていること」，その理由として，「加熱管の間隔が狭すぎて水が流れにくくなっており加熱管からの伝熱がうまく行われていない」ことが，解釈欄に記述された．

最後に，加熱管を 2 列配置とする設計変更を行った案 (図 5 の 3-B) の解析モデリングの記述例を図 9 に示す．このシートには，対象空間の各欄に加熱管を 2 列配置とする設計変更を行ったことが記述され，計算を行った結果， 推定が裏付けられたことが記述された．

8. 関 連 研 究

本章では，知識管理に限らず広く既存の関連する研究との比較を行うことにより，EAMM の意義と新規性について考察する．

一般に知識管理の取り組みは，計算機による問題解決支援を目指すものと，人間が問題解決の中で知識を記述し，操作するための枠組みを目指すものとに大別することができる．解析モデリング知識に関するものについて言えば，前者には，モデリングの自動化あるいは半自動化を行う知識ベースシステム[16)~(18)]，解析モデルとモデリング知識のオブジェクト指向データベースシステム[19) (20)]などの研究がある．これらのシステムでは，多数のヒューリスティックなルールや，過去に行われた解析データを用いることにより，解析の専門家と同じように，与えられた問題に対する解析戦略や可能な選択肢を推薦することができる．しかし，

[1]COMSOL Multiphysics は COMSOL 社の登録商標である．

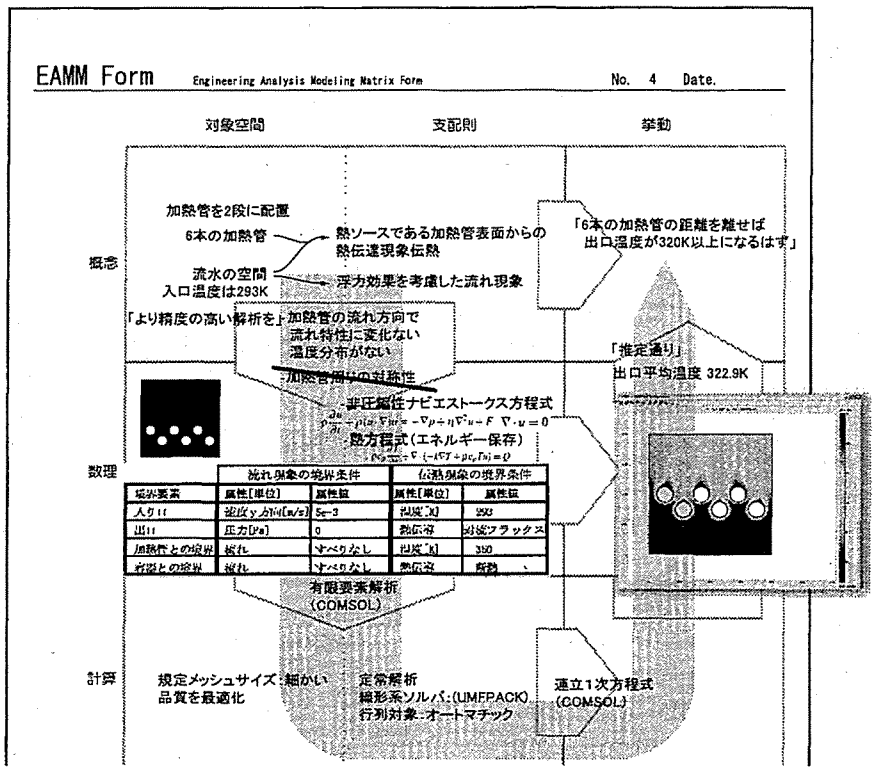


Fig. 9 Modeling process of analysing alternative solution of heat pipe arrangement

知識ベースの中に蓄えられたモデリングの知識は，基本的には計算機が推論や検索を行うために用意されたものであり，人間がそれを読んで理解することは考慮されていない．

一方で，解析の目的，精度の要求，簡略化の内容，モデル利用の条件，などといったモデリング知識を構成する概念とそれらの間の関係，いわゆるオントロジーを明示的に定義することで，計算機だけでなく人間にとっても知識の取り扱いを容易にする試みも行われている[2]．また，米国機械学会の PTC (Perfomance Test Code) 60 委員会は，解析モデルの信頼性を評価し，モデリングの系統だった検証および妥当性確認 (V & V; Verification and Validation) を行うための論理的な枠組みを提供することを目的として，モデリング知識を記述するための用語を定義している[8]．こうした取り組みは，モデリング知識を管理するための基盤となる重要なものである．しかしながら，これらは，どちらかと言えば，解析が終了した後に，解析結果とそのプロセスを記録することを想定としたものであり，設計の過程で知識を記述しやすくするための書式にまで踏み込んだものではない．

あくまでも設計の主体に人間を捉え，設計行為の中で知識を記述し，操作するための枠組みは，いわゆる DFX (Design For X) 手法[21]と呼ばれる各種の概念設計支援手法に見ることができる．これらの手法においては，知識の記述書式としてグラフ表現やマトリクスが採用されている．例えば，FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)[22]は，設計対象の故障モードとその原因や緊急度，重要度などをマトリクスにまとめ，対策が必要な故障を検討するための手法である．実際の設計現場において，これらの DFX 手法により設計におけるあいまいな概念が明示的に記述でき，情報共有とその上での議論の手段として効果があるという指摘がある[23]．本研究で提案した EAMM の新規性は，DFX 手法で一般に用いられているマトリクス表現を利用し，解析モデリングにおけるモデリング知識の記述書式として定式化した点にある．

9. まとめと展望

本研究では，工学解析モデリングの知識を獲得，管理するためのフレームワークの構築を目的とし，設計者や解析技術者が解析の実行と並行して，モデリングの検証やその妥当性を検討できるように，工学解析モデリングプロセスの各局面の内容を網羅し，それらをマトリクスのセル上に図式的に配置して簡潔に記述できる書式として EAMM を提案した．7.2 節で示し

た加熱管設計における解析プロセスの例により，その書式の記述能力を検証した．EAMMは，人間が設計行為の中で知識を記述し，操作するための枠組みとして有効である．ただし，より大規模な対象の解析プロセスに対する記述が妥当に行えるかどうかなどは未検証であり，今後の課題として取り組んでいく必要がある．

本研究で提案する知識管理の枠組みは，人間の思考をあいまいな概念を明示的に記述することを通じて補助するためのものであり，各セルの記述内容の量や詳細度は設計者の思考に依存する．個々の設計者への依存性を低減し記述の確実性を向上させる上では，セルの記述に用いる語彙や記述パターンを形式化することなどが今後の検討課題である．

設計の過程に伴う試行錯誤の結果構築される複数のモデルを効率的に管理するためには，計算機による支援の枠組みが別途必要となる．このような枠組みとして，著者らのグループではDRIFT (Design Rationale Integration Framework with Three layers) と呼ぶシステム [24][25]を開発しており，EAMMをツール化し，DRIFTに統合することによって解析モデリングプロセスにおける試行錯誤の過程を管理することが可能となる．これについても今後の課題である．

文　献

(1) Tanaka, K. and Saegusa, S., *Vibration Model and Simulation (in Japanese)*, (1984), Ouyou Gijutsu Shuppan.

(2) 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*, Vol. 19, No. 1 (2005), pp. 1–18.

(3) Doraiswamy, S., Krishnamurty, S., and Grosse, I., Decision Making in Finite Element Analysis, *Proceedings of Design Technical Conf. (DETC99)* (1999), CIE-9058.

(4) Ohtomi, K., *Learning of Design Engineering Based on Elementary Approach*, (2007), Kogyo Chosakai Publishing, Inc.

(5) Schön, D. A., *The Reflective Practitioner – How Professionals Think in Action*, (1982), Basic Books Inc.

(6) Nishida, T., *Aspects of Qualitative Reasoning (in Japanese)*, (1993), Asakura Publishing Co., Ltd..

(7) Kishi, M., *Mechanical System Introduction Vol. 6 – Systems Engineering – (in Japanese)*, (1995), Kyoritsu Shuppan.

(8) ASME V&V 10-2006, ed., *Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*, (2006), PTC 60 Committee on Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, The American Society of Mechanical Engineers.

(9) Koibuchi, K. and Kokubo, K., *Mechanics of Material and Know-how of Strength Design for Product Development (in Japanese)*, (2002), Nikkan Kogyo Shimbun Ltd..

(10) Kishi, M., *Handbook of Finite Element Method for Structure Analysis (in Japanese)*, (2006), Morikita Shuppan.

(11) The Japan Society of Mechanical Engineers, ed., *JSME Mechanical Engineers' Handbook Fundamentals α5 : Thermal Engineering*, (2006), The Japan Society of Mechanical Engineers.

(12) The Japan Society of Mechanical Engineers, ed., *JSME Textbook Series : Heat Transfer*, (2005), The Japan Society of Mechanical Engineers.

(13) Yagawa, M. and Yoshimura, S., *Finite Element Method (in Japanese)*, (1991), Baifukan Co., Ltd.

(14) Higashimachi, T., *Know-how of Finite Element Method (in Japanese)*, (1993), Morikita Shuppan.

(15) Nishida, T., Qualitative Reasoning, *Japan Society for Artificial Intelligence*, Vol. 2, No. 3 (1987), p. 381.

(16) Dym, C. and Levitt, R., Toward the Integration of Knowledge for Engineering Modeling and Computation, *Engineering with Computers*, Vol. 7, No. 4 (1991), pp. 209–224.

(17) Turkiyyah, G. M. and Fenves, S. J., Knowledge-based Assistance for Finite Element Modeling, *AI Applications in Civil and Structural Engineering*, Vol. 11, No. 3 (1996), pp. 23–32.

(18) Sekiya, T., Yoshioka, M., and Tomiyama, T., The Development of Knowledge Integrated Engineering Framework Based on Ontology, *Journal of Japanese Society for Artificial Intelligence*, Vol. 14, No. 6 (1999), pp. 1051–1060.

(19) Mackie, R. I., Object Oriented Programming of the Finite Element Method, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 35, No. 2 (1992), pp. 425–436.

(20) Dubois-Perlerin, Y. and Zimmermann, T., Object-oriented Finite Element Programming: III. An Efficient Implementation in C++, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 108, No. 1-2 (1993), pp. 165–183.

(21) Gatenby, D. A. and Foo, G., Design For X (DFX) – Key to Competitive, Profitable Products, *AT&T Technical Journal*, Vol. 69, No. 3 (1990), pp. 2–13.

(22) Sturges, R. H. and Lilani, M., Toward an Integrated Design for an Assembly Evaluation and Reasoning System, *Computer Aided Design*, Vol. 24, No. 2 (1992), pp. 67–79.

(23) Ohfuji, T., Ono, M., and Akao, Y., *Quality Function Deployment (1) (in Japanese)*, (1990), JUSE Press. Ltd..

(24) Nomaguchi, Y., Taguchi, T., and Fujita, K., Knowledge Model for Managing Product Variety and its Reflective Design Process, *Proceedings of the 2006 ASME Design Engineering Technical Conf. & Computers and Information in Engineering Conf.* (2006), DETC2006-99360.

(25) Nomaguchi, Y. and Fujita, K., An Integration Framework for Advanced Knowledge-based Design Supports - A Viewpoint of DRIFT Paradigm -, *Proceedings of Design Engineering Workshop 2007 (7th IJCC Japan-Korea CAD/CAM Workshop)* (2007), pp. 70–75.