

## 論文の内容の要旨

論文題目 設計における解析モデリング過程の理論化に関する研究

氏 名 関谷 貴之

設計過程では、対象を様々な観点から捉えたモデルを構築して、得られた解が仕様を満足するか否かを調べる作業が非常に重要である。

このモデリング作業とは、要求に応じて問題の構造を理解して原因を推定し、その原因を処理可能なツールを用いて、適切な条件を付加して構築するという一連の作業である。例えば、自動車の振動解析の場合、乗り心地の良さという要求に対して、それに影響をおよぼす周波数領域での振動のメカニズムを理解し、揺れの大きさを知るためにバネ・マス系のモデルを用い、質量・バネ定数等の値や路面の状態から決まる外部入力を想定して解析するという大まかな手順になる。これは単に解析に必要な情報を抽出するという簡単なものではなく、非常に高度な知的作業である。

我々は知識集約型工学環境 [4] の枠組を提唱し、それに基づく計算機上のツール、KIEF (Knowledge Intensive Engineering Framework) を開発している。知識集約型工学環境では物理世界に関する知識や、設計者や技術者の経験的知識を収集し、それらの知識を製品のモデルの操作として表現することで、知識や情報の共有を図り、製品ライフサイクル全般で、製品に関わる設計者や技術者の作業を支援する。この環境の実現には多種多様な製品のモデルを作る過程を明らかにする必要がある。

本研究では、物理世界の基本的な知識に基づいて、設計者が設計対象の性質や挙動の解析や評価を目的として、設計対象のモデルを構築する作業を支援するシステムを構築することを目標とする。そこで、モデリングに必要な知識、モデリング過程を分析して定式化した。更に定式化に基づいて、計算機上に各種のツールを用いてモデリング作業を支援する試作システムを構築した。

第1章「序論」では、問題の提起、本論文の目的および構成について述べている。

第2章「計算機によるモデリング支援」では、最初に計算機を用いて物理システムの挙動を説明する適切なモデルを計算機で自動的に構築する自動モデリング (Automated Modeling) について考察した。工学現場で設計対象の挙動解析等に用いるモデルを構築する際には、予め条件を記述するのが困難であり、また作業過程の完全な自動化は対象の理解を妨げる。従って、自動モデリングの研究成果を完全には応用出来ないが、例えばモデルを要素の組み合わせ (Compositional Modeling[2]) と捉える等の基本的な技術は利用できる。

また、既存の CAD・CAE の現状について概観した。近年、統合型 CAD・CAE システムや、PDM(Product Data Management)[3] システムが多くの CAD メーカーで開発されている。しかし、個々のツール上での作業を支援する機構は実現されていない。

次に、KIEF システムについて述べた。KIEF は、種々の計算機ツール上の設計対象モデルを統合し、かつツール上でのモデリング作業を支援するプラグابل・メタモデル機構と、メタモデルを構成する概念や、KIEF で用いる知識を提供する知識ベースから構成される (図 1)。KIEF では、設計対象に関する知識を表現する物理的知識、様々なツールを管理する機構等の、基盤的技術の構築を主な目的とした。従って、モデル作成の支援についても、作業に必要な製品の情報を提供するが、そこから特定の情報を用いて作業を進める際の判断基準を提供して、モデル作成作業を知的に支援する環境ではないと結論づけた。

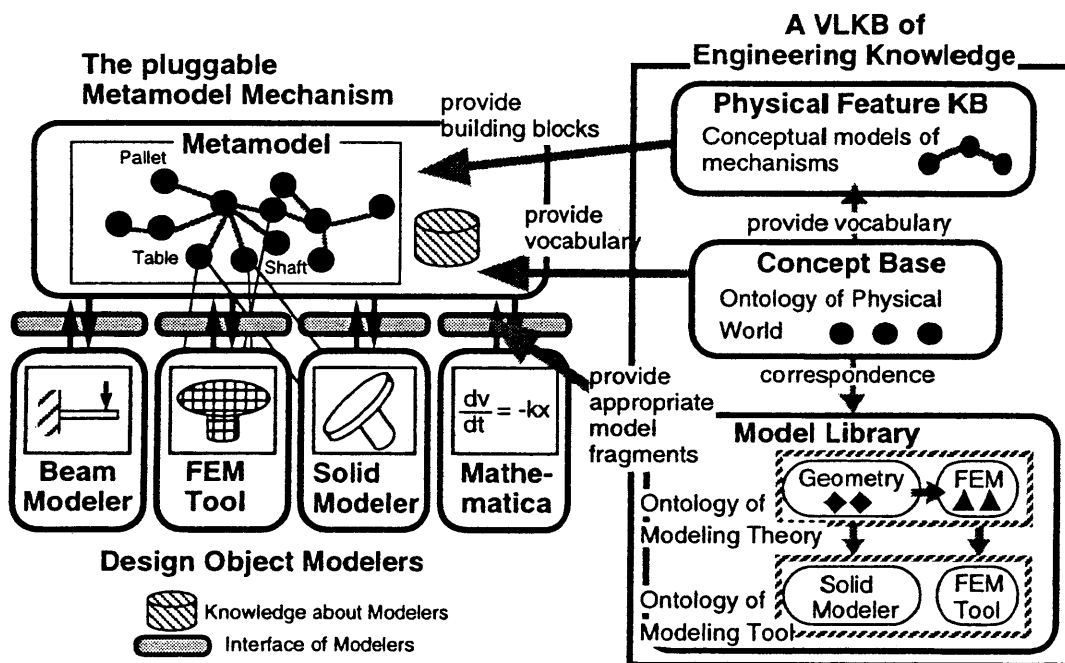


図 1: KIEF のアーキテクチャ

第3章「設計における解析のためのモデリング」では、モデリング過程に関する既存の幾つかの考え方 (モデリングの自動化の研究を一般化したモデル [1]、振動解析における解析過程の流れ、富山らの提案するアナリシス・シンセシス過程のモデル [5]) を分析した上で、下記の条件を満たすモデリング過程の構造を提案した。

- モデル構築のためのモデリング理論の記述、選択
- モデリング理論に関する知識と理論に基づくツールに関する知識の分離

- 解析のための方程式やデータの構築以前に、対象の定性的なモデルの扱い

そこで、図2の(b)に示すモデリング過程の構造を提案した。尚、比較のために、富山らの提唱するアナリス指向の思考過程のモデルを図2の(a)として、Choueiryのモデルを同図の(c)として提示する。

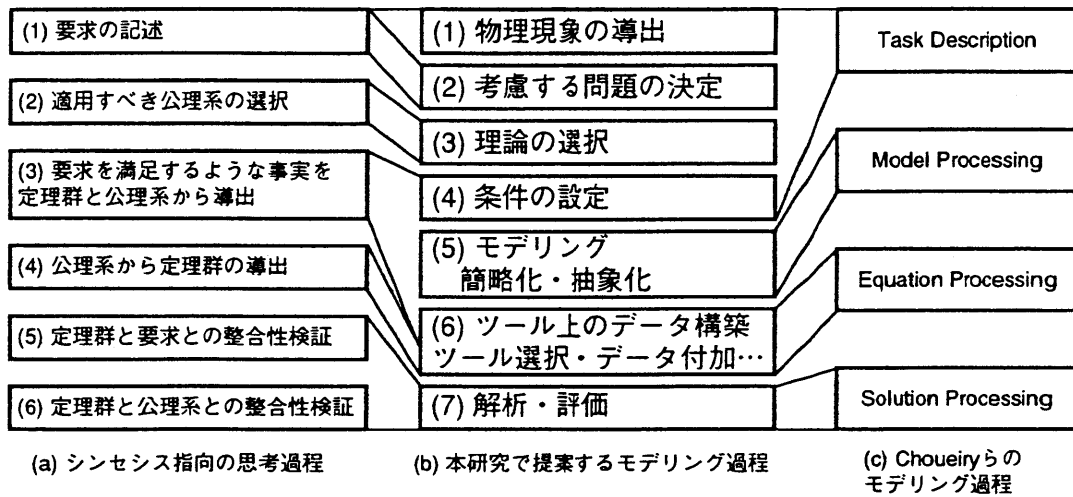


図2: モデリング過程

第4章では、先に提案した「モデリング過程のモデル」の述語を用いた定式化について述べた。

まずモデリングの対象  $M$  と基本的なオントロジー  $O$  を定義した(式1, 式2)。尚、 $O_{entity}$ ,  $O_{relation}$ ,  $O_{attribute}$ ,  $O_{phenomenon}$ ,  $O_{rule}$ ,  $O_{property}$  は各々実体、(実体同士の)関係、属性、物理現象、物理法則、物理特性を表す。

$$M = (E_M, P_M) \tag{1}$$

$$\text{但し } E_M = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} = \text{Element}(M)$$

$$P_M = \{l_1(x_a, x_b, \dots), \dots, l_m(x_p, x_q, \dots)\} = \text{Predicate}(M)$$

$$O_{real} = O_{entity} \cup O_{relation} \cup O_{attribute} \cup O_{phenomenon} \cup O_{rule} \cup O_{property} \tag{2}$$

また、概念間の関係を表す構造述語(式3)として下に示す6つの述語を定義した。物理世界の概念はこの述語を用いて相互に関連づける(図3)。

$$S = \{HasRelation, OccurTo, \dots\} \tag{3}$$

$OccurTo(ph, e_1, e_2, \dots)$  実体  $e_1, e_2, \dots$  について、現象  $ph$  が生じることを意味する。

$HasRelation(r, e_1, e_2, \dots)$  実体  $e_1, e_2, \dots$  について、関係  $r$  が成立することを意味する。

$Causality(ph_{cause}, ph_{result})$  現象  $ph_{cause}$  を原因として、現象  $ph_{result}$  が生じることを意味する。

$HasAttribute(a, e)$  実体  $e$  が属性  $a$  を持つことを意味する。

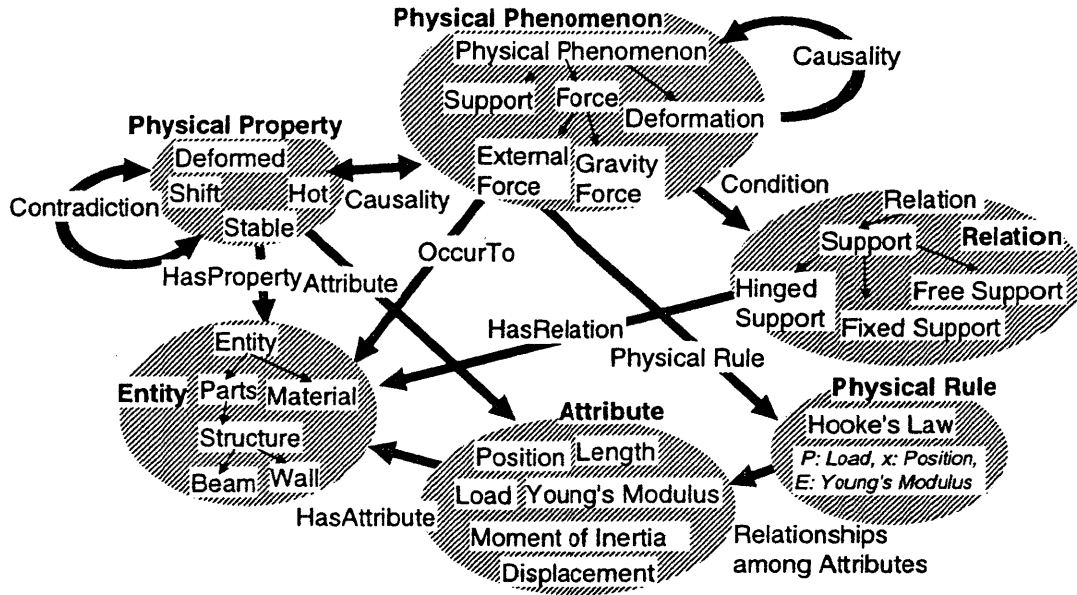


図 3: 物理世界のオントロジー

$HasProperty(pr, e)$  実体  $e$  が物理特性  $pr$  を持つことを意味する。

$SimulatedBy(rule, a_1, a_2, \dots)$  属性  $a_1, a_2, \dots$  が物理法則  $rule$  で表現される関係を持つことを意味する。

次にモデリングの理論を定式化した。これは、特定のモデルを構築・操作・推論・評価する際に用いる知識の体系である。モデルの構築時にはモデリングの理論に従って、対象の持つ情報を取捨選択し、その理論で取り扱い可能な形式に写像変換する。この時、モデリング理論  $T$  のオントロジー  $O_{model}^T$  は、「モデルを用いて解析が可能な対象の挙動や性質」である Related Concept  $O_{rl}^T$ 、「モデルの解析や作成において成り立つ法則、定理等の理論体系」である Available Concept  $O_{av}^T$ 、と「モデル上で表現可能な対象の性質・構造」である Reasonable Concept  $O_{rs}^T$  で構成される (式 4)。

$$\begin{aligned}
 O_{model}^T &= O_{rl}^T \cup O_{av}^T \cup O_{rs}^T \\
 &= Ontology(T)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

上記の準備の下で 3 章で示したモデリング過程を以下のように定式化した。

### (1) 物理現象の導出

モデリング対象  $M$  に生じうる現象を導出する。モデルの部分構造であるフィジカル・フィーチャをルールとして用いる。具体的には図 4 に示したアルゴリズムに従う現象導出の操作  $PhenomenonDerivation$  を  $M$  に適用することで  $M_{drv}$  を得る (式 5)。尚、 $F_{drv}$  はフィジカル・フィーチャの集合である。

$$M_{drv} = PhenomenonDerivation(M, F_{drv}) \tag{5}$$

### (2) 問題の設定

```

function PhenomenonDerivation(M, pfCol)
  /* reasoning out by several features. */
  M, M1, M2: model;
  pf: physical feature;      pfCol: A collection of all physical features;
begin
  M2 = M;
  repeat
    foreach pf in pfCol do ..... 2
    begin
      M1 = M2;
      M2 = FeatureReasoning(M1, pf);
    end;
  do not(M1 = M2);
return M2;
end;

```

図 4: Physical Feature Reasoning

物理現象を導出した上で、構築するモデルに対する要求仕様を設定する。要求仕様  $R_{req}$  とは、1. モデルを用いて明らかにすべき現象と、2. 値を求めたい属性の二点である。

### (3) モデリング理論の選択

モデル構築の仕様である物理現象や属性を取り扱い可能なモデリングの理論として、式 6 を満たすモデリング理論  $T$  を選択する。

$$(Predicate(R_{req}) \subset (O_{attribute} \cup O_{phenomenon})) \wedge (Element(R_{req}) \subset Element(M)) \quad (6)$$

### (4) 条件の設定

選択した理論  $T$  のオントロジーに基づいたモデリングの仮定条件  $R_{assm}$  を設定する。条件設定の操作  $ApplyCondition$  を  $M_{drv}$  に適用することで、モデル  $M_{cnd}$  を得る (式 7)。

$$\begin{aligned}
M_{cnd} &= ApplyCondition(M_{drv}, R_{assm}) \Leftrightarrow \\
&\forall l_1, l_2 \dots \in Predicate(R_{assm}) [\neg(l_i \in Predicate(M_{drv})) \rightarrow \\
&M_{cnd} = AddPredicate(M_{drv}, l_1, l_2 \dots)] \quad (7)
\end{aligned}$$

### (5) モデリング

#### a. 簡略化

モデル  $M_{cnd}$  に対して特定の部分に注目する操作として、式 8 を満たす簡略化の操作  $Simplify$  を実行する。これは選択した理論  $T$  で扱える概念のみを抽出する操作である。

$$M_{si} = Simplify(M_{cnd}) \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}
& (\text{Predicate}(M_{si}) \subseteq \text{Predicate}(M_{cnd})) \wedge \\
& (\text{Element}(M_{si}) \subseteq \text{Element}(M_{cnd})) \\
& \forall l \in \text{Predicate}(M_{si}) [l \in (O_{rl}^T \cup O_{av}^T \cup S)]
\end{aligned} \tag{8}$$

## b. 抽象化

個々の概念を理論固有の概念に抽象化する操作 *Abstraction* を適用して、当該理論に基づくモデル  $M_{ab}$  を構築する。この時、抽象化によって変換したモデル固有の概念を  $o_{av1}^T, o_{av2}^T, \dots, o_{avp}^T$  とすると、各々の概念の定義が少なくとも一つは存在し、それらを  $f_{av1}, f_{av2}, \dots, f_{avq} (q \geq p)$  とすると、式 9 が成立する。

$$\begin{aligned}
M_{ab} = \text{Abstraction}(M_{si}, f_{av1}, f_{av2}, \dots, f_{avq}) & \Leftrightarrow \\
& \exists M_1, M_2, \dots, M_{q-1} [M_1 = \text{FeatureMatching}(M_{si}, f_{av1}) \wedge \\
& M_2 = \text{FeatureMatching}(M_1, f_{av1}) \wedge \dots \\
& M_{ab} = \text{FeatureMatching}(M_{q-1}, f_{avq-1})]
\end{aligned} \tag{9}$$

### (6) ツール上でのデータ構築

モデル  $M_{ab}$  に対してツール固有のデータ構造、解析に必要な定量データ等を付加して解析モデル  $M_{an}$  を構築する。

### (7) 解析・評価

解析モデル  $M_{an}$  について、評価方法  $\Phi_{ev}$  (例えば当該モデリング理論に基づく解析ツール・解析システムでシミュレーションを実行する等) を適用した結果である  $\Phi_{ev}(M_{an})$  が要求仕様  $R_{req}$  を含む、つまり、式 10 が成立すれば適切なモデルが構築出来たとする。

$$\text{Predicate}(R_{req}) \subset \Phi_{ev}(M_{an}) \tag{10}$$

また、理論  $T$  における典型例  $M_{ty}$  として、解析モデルに対する要求仕様や制約条件を満たし、理論  $T$  に従って解析可能な典型的モデルを提供し、それに基づいたモデリング支援の過程を定式化した。この際、理論  $T$  のオントロジーに基づいて典型例を体系化してモデルの選択を支援する。

第 5 章では 4 章の定式化に基づいて試作したシステムにおいて、材料力学の梁のモデルを構築する過程を示した。図 5 に、モデル構築のワークスペースのハードコピーを示す。

第 6 章では、定式化したモデリングの知識、モデリング過程について考察した。まず知識の体系化の方法として、既存のツールやツールの背景に存在するモデリングの理論と対応づけて知識を整理することが有効であり、計算機上の語彙はツール上のデータと関連づけることで「対象世界の概念化」が可能である。一方、モデリング過程の基本的な作業手順を定式化することで、本研究で示した典型例の利用以外にも、各段階を支援する技術の必要性が分った。

第 7 章では本研究の結論と展望について述べた。本研究ではモデリングに必要な知識とモデリング過程を定式化することで、基本的なモデリング作業を支援する計算機システム構築の可能性を示すと共に、モデリング過程の各段階において、それを支援する技術が必要なが分った。今後の展望としてオントロジーを含めた知識収集方法の確立が必要である。

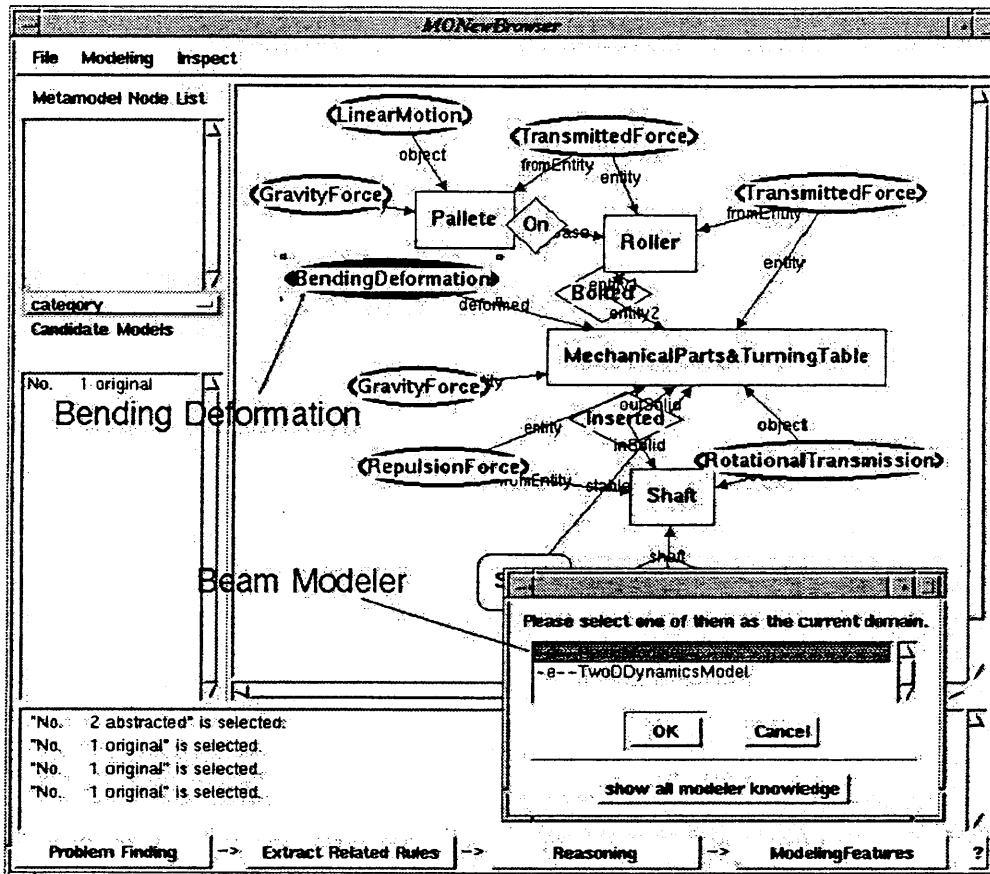


図 5: モデリングの理論の選択

## 参考文献

- [1] B. Y. Choueiry, S. McIlraith, Y. Iwasaki, T. Loeser, T. Neller, R. S. Engelmore, and R. Fikes. Thoughts towards a practical theory of reformulation for reasoning about physical systems. In *Working notes of the Symposium on Abstraction, Reformulation, and Approximation (SARA '98)*, pp. 25–36, CA, USA, 1998. Pacific Grove.
- [2] B. Falkenhainer and K.D. Forbus. Compositional modeling: finding the right model for the job. *Artificial Intelligence*, Vol. 51, No. 1-3, pp. 95–143, 1991.
- [3] PDM Infomation Center. Introduction to product data management, 1995. <http://www.pdmic.com/>.
- [4] T. Tomiyama, Y. Umeda, M. Ishii, and M. Yoshioka. Knowledge systematization for a knowledge intensive engineering framework. In T. Tomiyama, M. Mäntylä, and S. Finger, editors, *Knowledge Intensive CAD Volume 1*, pp. 33–52. Chapman & Hall, 1996.
- [5] 富山哲男, 鷺尾隆, 村上存, 武田英明. 「シンセシスのモデル論」プロジェクトについて. 日本機械学会第7回設計工学・システム部門講演会講演論文集, pp. 101–104, 1997.