

また、その対応度は、各機構知識に記述されている対応度を利用する。また、一つの品質要素と要求品質の組に対して複数の対応度が記述されている場合には、一番大きい数を採用する。

ライターの例では、最初に与えられた相対重要度にライター石による発火装置の展開表(ハッチングで表示)とガス貯蔵機構の展開表(白抜きで表示)を組み合わせている。

2. FBS+QFDシステムは、FBS モデラ上に表現されている機能とフィジカル・フィーチャの関係に基づき機能\*機構展開表(FMM)を作成する。まずシステムは、FBS モデラにおいてフィジカル・フィーチャと対応付けられている最下層の機能と、これらの機能に対応する機構であるフィジカル・フィーチャーを展開表の要素とする。また、その対応度は、FBS モデラから獲得した機能と実現構造の関係をもとに、機能とその実現構造に対し、強い関係があることを示す対応度である5を設定する。

ライターの例では、発火装置はlight(object)という機能の実現挙動であり、ガス貯蔵機構はstore(gas)の実現挙動であるので、各々の対応度を5とする。

3. 最後に、FBS+QFDシステムは品質要素\*機能展開表(QFM)を作成する。この展開表には要求品質\*品質要素展開表(HQM)に記述されている全ての品質要素と、機能\*機構展開表(FMM)に記述されている全ての機能が記述される。また、その対応度であるが、対応度の強さに関する情報が存在しないので、システムは対応関係の存在のみを示すこととする。システムはまず、機能\*機構展開表(FMM)に記述されている各々の機能に対し、対応する機構の機構知識(HQM)を検索する。ここで、機能を実現する機構に関連する品質要素(機構知識のHQMに記述されている品質要素)と、機能の間に関連があることを仮定し、展開表の上では、その対応関係をXで示す。システムが作成したFMMを基に、ユーザーが対応度を入力し、FMMが完成することになる。

ライターの例において、着火性という品質要素は着火機構に対する要求品質\*品質要素展開表に含まれているので、light(object)機能と着火性という品質要素の間に関係があることがわかる。この後で、ユーザーがXに対して対応度の強さを入力することにより、FMMが完成する。

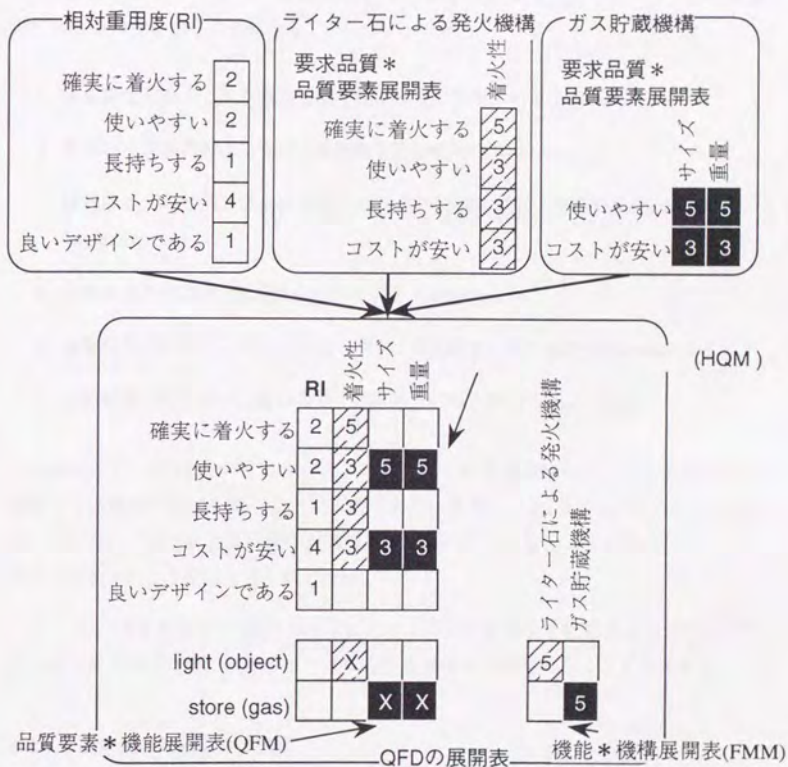


図 4.5: QFD 展開表の作成



### 4.3 FBS モデリングの拡張

本研究ではFBSモデリングおよびQFDを設計対象の機能表現に利用する。そこで、これらの枠組を用いて、3.1節で分析した設計知識操作の内の次の6つの機能概念に対する操作を扱うことになる。

1. 実体概念を媒介とした機能分解 (機能概念位相空間の Refinement)
2. 機能の実体概念による実現 (属性概念位相空間の Refinement)
3. 機能の制約の緩和と機能統合時の補完的な機能の発見 (機能概念位相空間の Refinement)
4. 実体概念の詳細化 (属性概念位相空間の Refinement)
5. 実体概念の比較による設計仕様の補完 (機能概念位相空間の Refinement)
6. 設計解選択のための仕様の変更 (機能概念位相空間の Refinement)

これに対し、FBS モデラ単体では、上記の6つの機能操作の内、1の機能分解の操作と2の機能の実現を扱うことが可能であり、また、4.2.1項で述べたFBS+QFDツールにおいては、5と6の操作が実現可能である。しかし、3.4.の操作に関しては現在の枠組そのままでうまく扱えない。

そこで、FBS モデラ+QFD ツールにおける設計対象表現を拡張することにより上記の操作をFBS モデラ+QFD ツールに対する操作と対応付けることを提案する。

#### 4.3.1 機能間の制約条件の表現

FBS モデラにおいては、機能プロトタイプ知識を用いて機能分解の支援や機能と実現挙動の関係付けを支援している。しかし、この機能プロトタイプ知識は、経験に基づいた知識であり、知識を記述する明確な基準が存在しないために、知識の切り分け方や知識記述者に依存する。例えば、ドライブシャフトを回転させる機構に対する機能プロトタイプ知識を記述する際に、機能の対象となる実体をドライブシャフ

トに限定して、ドライブシャフトを回転させる機能として記述することも、もっと対象となる実体を一般化し、軸を回転させる機能として記述することもできる。すなわち、一つの機能プロトタイプ知識が対象とする範囲の決定は知識記述者に依存している。

一つの機能プロトタイプ知識が対象とする範囲を広げて知識を書きおくと、3.1.3項で述べた機能の制約があらかじめ緩和されていることになり、その知識を基に網羅的に多くの実現機構を考えることが可能になるという利点がある。しかし、実際にその知識を利用する際に、分解したサブ問題である各サブ機能間の制約が弱められているために対応する機構が見つからないという問題を起こす可能性がある。また、知識を記述する立場から考えると、どこまで範囲を広げれば良いかという基準がないという問題もある。逆に、実際の設計対象に依存して知識を書くと、知識は記述しやすくなり、機構が見つからないという問題はなくなるが、似たような知識がたくさん存在するという問題や、以前に作ったものと同じものしかできなくなり、機能という抽象概念を導入するメリットがなくなるという問題点がある。

そこで、実際に機能プロトタイプ知識を利用する際に一つの機能が対象とする範囲を広げる操作を含めることにより、実際の設計対象に依存したような範囲を狭めた知識の場合においても網羅的に実現機構を検討できるようにする枠組を提案する。また、機能間の制約を明示化することにより、サブ機能間の制約のチェックを支援し、補完的な機能が必要な場合の操作を支援する。

まず機能知識における機能が対象とする範囲を広げる手法について考える。FBSモデラにおける機能の表現である機能プロトタイプにおいて機能の名前は動詞＋目的語の形で表現されていた。これは、目的語によって機能を発現する対象を述べ、動詞によりその対象の挙動を述べていると考えられる。そこで、FBSモデラにおいて表現されている機能が対象とする範囲を広げる操作を、対象となる機能に対し、FBSモデラが検索した共通な動詞を使っている他の機能に置き換えることと定義する。この方法では、目的語の種類が大きく異なる様な機能もその置換えの候補として出てくることになるが、どの様に機能を置き換えるかはユーザーの判断にまかせることになる。また、このユーザーの判断は、上位の機能の発現の成否を調べる挙動シミュレーションにより検証されることになる。



次に、機能間の制約条件の記述について考える。現在のFBSモデルにおいて各サブ機能間の制約条件は機能のレベルの知識として、次のような機能分解方法における目的語の共有によって行なわれている(図4.6)。例えば、機能分解の結果として得られた「重さを変位に変換する」という機能と「変位を表示する」という2つの機能において、前者の機能における「変位」と後者の機能における「変位」が同じものであるということが宣言できるようになっている。しかし、これはあくまでも機能のレベルの記述であり、その制約条件が挙動や挙動を実現する機構に対しては何の効力も持っていなかった。

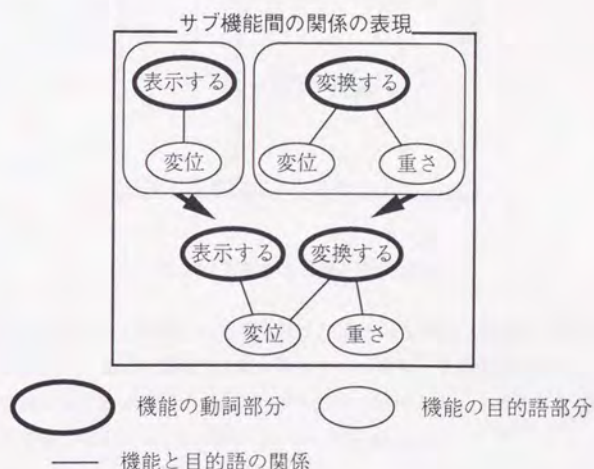


図 4.6: 機能間の制約条件の表現

そこで、この機能レベルに記述されている制約条件を実現挙動に対応するフィジカル・フィーチャの組合せの際に利用する方法を提案する。つまり、機能に対して実現挙動が決まる段階においては、フィジカル・フィーチャのどの部分が機能記述における目的語に対応するかを記述することにより、機能レベルの制約を挙動・状態レベルの制約として利用する。FBS モデラの機能記述における目的語には先の例に上げた「変位」といった実体を持つパラメータに対応するものと「軸」といった実体に対応

するものが存在する。そこで目的語とフィジカル・フィーチャの一部の対応付け方を考えると、前者のような実体に対応する目的語に対しては単純にその実体と対応付けることとし、実体を持つパラメータに対応する目的語に対しては、そのパラメータを考慮する実体と対応付けることとする。図4.7は機能の目的語とフィジカルフィーチャ中の実体の対応関係を記述するツールである。

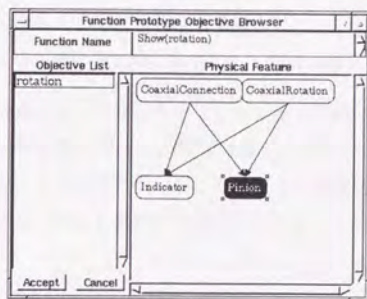


図 4.7: 目的語と機構の対応付け

このように考えると、機能レベルで記述されている目的語の共有は、機構レベルにおいては実体の共有として実現されることになる。また、制約条件のチェックは、各サブ機能に対応付けられたフィジカル・フィーチャに対して、共有された目的語に対する実体が共有可能かどうかを判断することに対応する。

この制約条件のチェックを支援するために、FBS モデラは、目的語を共有している複数の機能に対して新しいフィジカル・フィーチャーを対応付ける毎に、目的語に対応する実体の共有が可能であるか否かをユーザーに尋ねる。ここで、先に述べた機能に対応する範囲を広げる操作をしていた場合などには、共有が不可能な状況になり、制約条件が満たされないことになる。このような場合に FBS モデラは、ユーザーに、3.1.3項で述べたサブ機能間の制約条件を緩和するための補完的な機能の付加を要求する。次に、制約条件を満たしていない目的語を、ユーザーが選択した機能の目的語と対応付けることにより、選択した機能を各々の目的語間を補完する機能とする。



図4.8は先の図4.6に表現した「変位を表示する」機能を緩和した例である。この場合、制約の緩和により「回転を表示する」機能と「重さを変位に変換する」機能において、「回転」と「変位」の目的語が共有されることになる。この時、各々の実現挙動において「回転」に対して「軸」、「変位」に対して「板」という実体が対応付けられる。ここでシステムはユーザにこの「板」と「軸」の各々の属性を共有した実体を考えるか否かを問い合わせ、共有できない場合にはユーザが補完的な機能を入力する。この場合は、共有されている目的語を「変位」「回転」に分離し、この2つの目的語と目的語を共有する「変位を回転に変更する」機能を補完する。

また、機能間の制約条件がどのようなものであったかを明確にするために、知識記述者が実際にその機能分解知識を作成した際に考慮した実体のFBSモデルを知識として記述する。ユーザはこの知識を用いることにより、設計解を詳細化することができ、また、知識記述者がどのような機能間の制約条件を考えていたかを知ることができる。

#### 4.3.2 階層的なFBSモデリング

3.1.1項で述べたように、設計者は実体を段階的に詳細化していく。しかし、現在のFBSモデルにおいては、設計仕様として与えられた機能をサブ機能へと分解し、サブ機能が実現挙動である物理現象および物理現象を起こす機構にに対応付けられるまで詳細化された段階でのみ、機能と実現挙動の対応付けを行っており、実体の段階的な詳細化を扱うことができない。

そこで、FBSモデルを階層的に利用することを提案する。すなわち、従来のFBSモデルにおける設計が終った段階から、各サブ機能を新たな設計仕様と考えて機能設計を行ない、階層的にFBSモデルを管理する(図4.9)。この時、階層の異なるFBSモデルは共有されている機能を通じて管理される。つまり、下位階層のFBSモデルにおける機能概念で与えられた設計仕様が満たされていると、上位階層のFBSモデルにおけるその機能に対応するサブ機能が満たされていると考える。また、各々の下位階層のFBSモデルを組み合わせ、各々のFBSモデルの実現構造間の関係を付けることにより、最終的な全体の機械の構造を見ることができる。

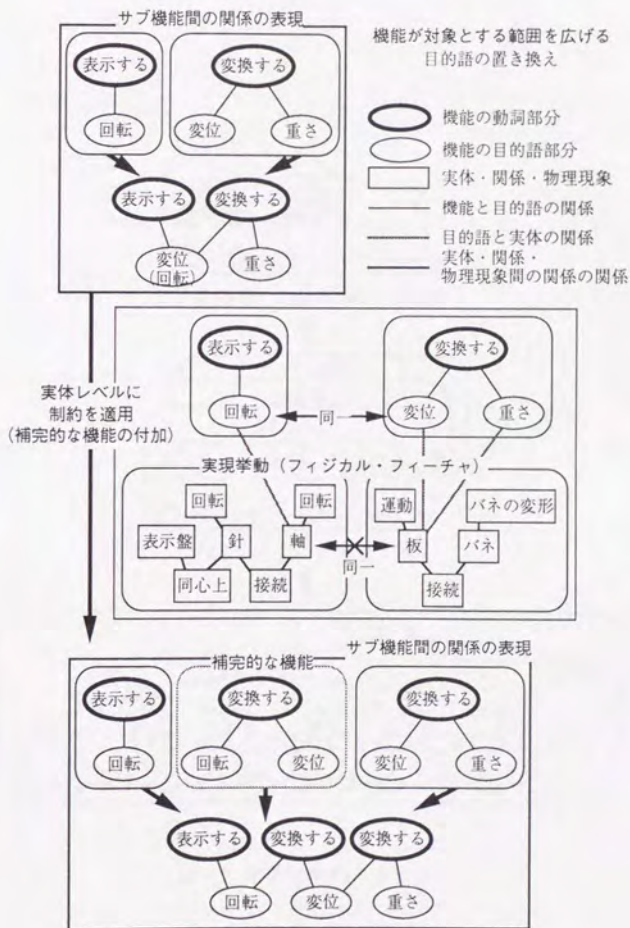


図 4.8: 機能間の制約のチェックと補完の機能の付加



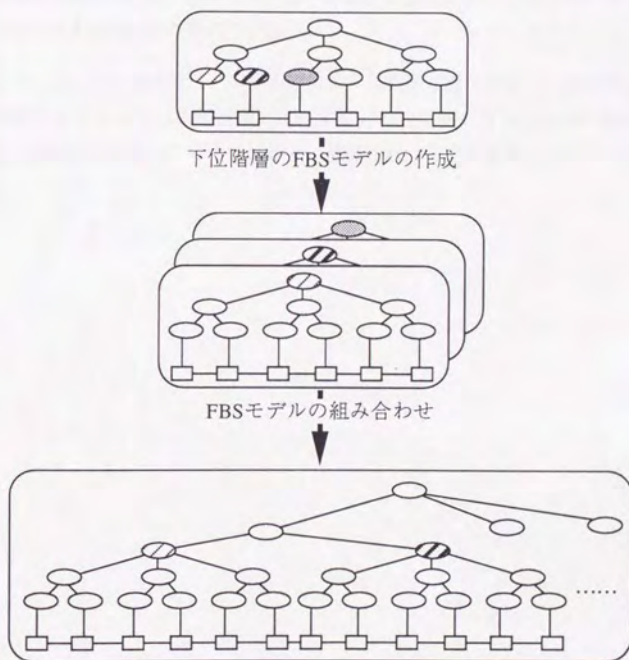


図 4.9: 階層的な FBS モデル

### 4.3.3 解候補の比較

4.3.1項で述べた機能の補完の過程を考えると、一つの機能に対する実現構造が、一つのフィジカル・フィーチャにより実現される場合と、補完機能に対するフィジカル・フィーチャとの組合せにより実現される場合とが存在する。よって、このような機能の補完を行なった場合の解候補を他の解候補と比較する際には、4.2.1項で述べた方法をそのまま適用することができない。

そこで、このような場合は、本来の機能の実現機構だけではなく、補完的な機能の実現機構を加えた形で他の解候補と比較する。この機構の組み合わせに対する評価を行なうための満足度については、各々の機構に対する満足度を基にユーザが設定する。



#### 4.4 4章のまとめ

本章では、3章で述べた設計者の機能概念に対する知識操作に関する分析を基に設計対象に関する機能表現について考察した。本研究では、3章で述べた機能概念に対する知識操作を、拡張したFBSモデリングに対する操作と対応付けた。また、市場の要求を表現できる品質機能展開(QFD)をFBSモデリングに応用することにより、設計者が複数の解候補の中から一つの設計解を選んだ根拠を記述する枠組を提案した。また、この枠組はQFDで用いる展開表の作成支援が可能であり、QFDの手法を適用することにより、設計対象を価値の側面から分析する支援を行なうことができる。また、3章で述べた設計者の機能概念に対する知識操作を行なうためのFBSモデリングの拡張手法について述べた。

## 第 5 章

# 設計知識操作論に基づく CAD システム



本章では3章で述べた設計知識操作論および4章で述べた設計者が作り出した情報の表現の議論を踏まえたCADシステムの構築を行なう。まず、最初にシステム全体の構成を述べた後に、既に存在する設計対象モデルを外部モデルとして利用可能な複数のモデルを統合するブラガブル・メタモデル機構について述べる。さらに、これらの設計対象モデルを管理する設計過程管理システム、多重世界管理機構について述べる。

## 5.1 システムの構成

前章までに述べた設計知識操作に関する議論および設計者の意図の記述に関する議論に基づき、設計知識操作論に基づくCADシステムを提案する。このシステムは、2.2.1項で述べた計算可能な設計過程モデル [Takeda91] と同様に、行為レベル・対象レベル・多重世界管理機構の3つの部分から構成する (図 5.1)。

このシステムの対象レベルは、前章で述べたFBSモデラとQFDを統合した枠組 (以降ではFBS + QFD ツールと呼ぶ)、複数の設計対象モデルを管理するメタモデル機構およびそのメタモデル機構に接続される複数の設計対象モデラから構成されている。また、3章で述べた設計知識操作論で述べた設計知識の操作は、計算機上のツールに対する操作として実現される。さらに、行為レベルは、3.2節で述べた設計過程モデルに基づいた設計過程管理システムであり、対象レベルのツールを操作する。多重世界管理機構は、設計過程における履歴を記録し、設計過程において行なわれる後戻りや分岐といった操作を扱うための機構である。また、このプロトタイプシステムの内、メタモデル機構に接続する複数の設計対象モデラ以外は全て、Sun Workstation 上の Objectworks\Smalltalk<sup>1</sup>上に実現した。

以降の節では、各々の計算機上のツールと3章で述べた設計知識操作を対応付けるための拡張に関する議論と、これらの操作を管理する設計過程管理システム、多重世界管理機構について述べる。

<sup>1</sup>Objectworks\Smalltalk は、ParcPlace Systems の登録商標である。

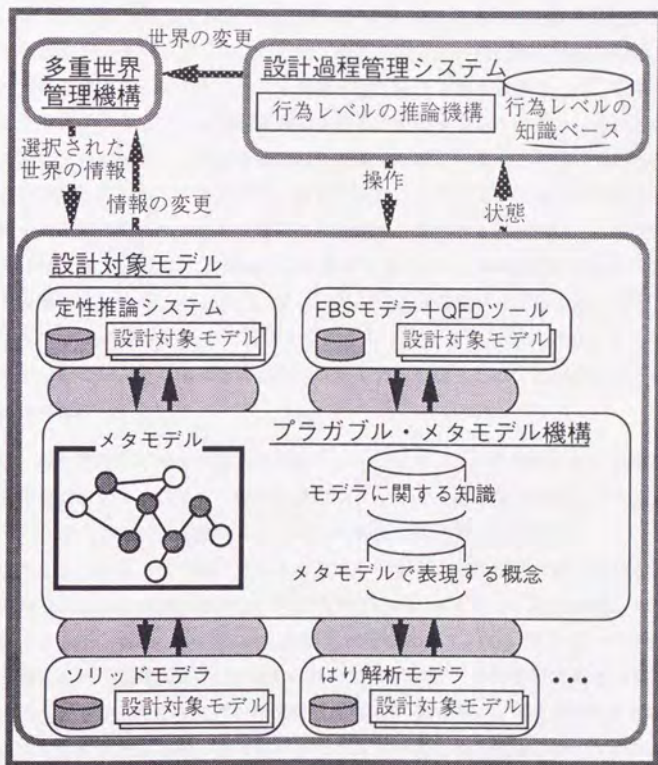


図 5.1: CAD システムの構成



## 5.2 複数の設計対象モデルの統合

### 5.2.1 設計対象表現の統合化

3.1.4項で述べたように、設計者は実際の設計過程において、設計者は設計対象物を様々な観点からモデル化する。例えば、熱の流れを知りたい時には設計対象物を発熱体と伝熱体とみなしてモデル化し、機構学的な動きを考える場合には、設計対象物をリンクやスライダといった機構要素としてモデル化することにより、その振舞いを確認し評価する。一方、この過程で作られる様々な設計対象モデルは、もともと一つの設計対象から作られているので各々独立ではない。そこで、これらの作成された設計対象モデル間の情報の一貫性を管理する枠組が必要である。桐山は、この枠組を実現する手法としてメタモデル機構による設計対象モデルの統合およびモデル生成の支援を提案している [Kiriya91]。また、この枠組を構築するための第一歩として、定性的なモデルの生成とその一貫性を管理するメタモデル機構のプロトタイプシステムの開発および、定量情報を含む設計対象モデルを扱うための拡張を行なっている [Kiriya95]。

また、現在の設計では3次元形状を扱うソリッドモデル・熱解析や応力の解析を行なう有限要素解析のシステム・電気回路のシミュレータなど様々な観点から設計対象をモデリングするツール(以降では、設計対象モデラと呼ぶ)が利用されている。また、様々な設計対象モデラ間でデータの交換を行なうための標準であるIGES(Initial Graphics Exchange Specification)やSTEP(STandard for the Exchange of Product model data) [Seimitsu93] などの研究が行なわれている。例えば、STEPの自動車業界における標準であるAP214においては、ソリッドや製図情報といった形状情報に加え、FEM解析のモデルや機構解析のモデルで用いるデータの標準化などが行なわれている [Tanaka96]。さらに、各モデラで利用される知識のレベルで様々な設計対象モデラを統合する枠組として、PACT [Cutkosky93]がある。この枠組では、各設計対象モデラに表現されている知識をKIF (Knowledge Interchange Format) [Genesereth92] と Ontolingua [Gruber92] という2つの標準形式を用いて変換することにより、モデラの統合化をはかっている。しかし、これらの設計対象モデルの統合化はある決まった形式で表現されたデータを共有化することはできるが、モデルを作

るという過程を明に扱っていない。

### 5.2.2 メタモデル機構

メタモデル機構とは、2.1項で述べた一般設計学の概念であるメタモデルを計算機上に実現したものである。一般設計学においてメタモデルは「属性概念の集合」として定義されていたが、このメタモデルを計算機上に表現するにあたり、メタモデルを「様々な設計対象モデルに表現される概念間の関係を属性概念および属性概念の部分基である物理法則概念を含む概念間の関係をネットワークとして表現したモデル」として再定義した(図5.2)。

メタモデル機構とは、このメタモデルを利用することにより、熱力学・材料力学といった様々な観点からの設計対象モデルの作成を支援し、作成された設計対象モデル間の一貫性を管理する機構である。このメタモデル機構において、一つの観点(アスペクト)を設定することにより作成された設計対象モデルをアスペクト・モデルと呼ぶ。

桐山は、このメタモデル機構のプロトタイプシステムとして、定性プロセス理論[Forbus84]に基づくメタモデル機構を作成した[Kiriyama91]。このメタモデル機構では、4.1.2項で述べたFBSモデルで用いているものと同じ定性推論システムを利用している。

また、メタモデル機構はメタモデルに表現されている設計対象について、電磁気学や機構学といった様々な背景理論に基づいたアスペクト・モデルの作成を支援することができる。このメタモデル機構において、背景理論は計算機上では計算可能なモデルおよび推論機構として表現されていると考える。この時、背景理論はアスペクト・モデルを作成する設計対象モデルによって扱える概念およびその設計対象モデルに記述されている知識によって表現されていると考えられる。よって、各モデルについてそこで解釈することができる概念の集合を定めることにより背景理論とメタモデルの関係を定義する。この概念の集合をアスペクト・モデルで扱える語集の定義と呼ぶ。

このメタモデル機構を利用した設計対象の評価は次のような手順で行なわれる。



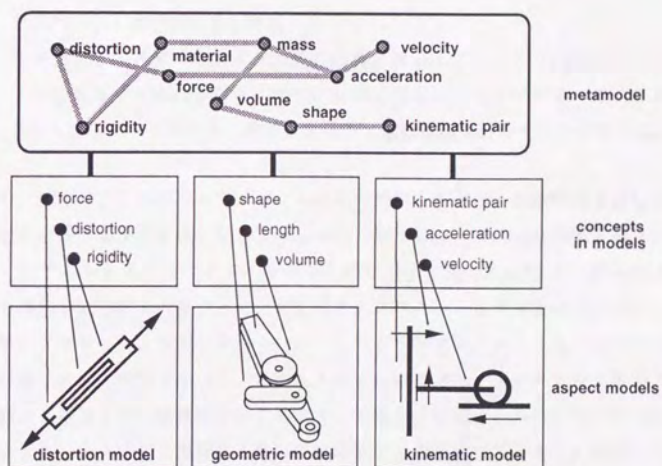


図 5.2: メタモデル機構 [Kiryama91]



### 1. 一次モデルの作成

ユーザーは設計対象を構成する実体およびその関係および起こしたい物理現象を記述した一次モデルを作成する。

### 2. 定性推論システムによる起こりうる物理現象の導出

次に、定性推論システムが物理法則に関する知識を用いて、一次モデルに表現された設計対象の上に起こる可能性のある物理現象を導出しメタモデルを作成する。

### 3. アスペクト・モデルによる評価

アスペクト・モデルで扱える語彙の定義を用いることにより、設定したアスペクトに関連する概念のみをメタモデルから抽出し、アスペクト・モデルが作成される。このアスペクト・モデルを用いて挙動推論を行なうことができる。

また、桐山は、このプロトタイプシステムの枠組をもとに、定量情報を含む設計対象モデルを扱うように拡張した[Kiriyama95]。以下では、この定量情報を扱うアスペクト・モデルを定量アスペクト・モデルと呼び、先に述べた定性プロセス理論に基づいて表現されるアスペクト・モデルを定性アスペクト・モデルと呼ぶ。また、以降で、単に「モデラ」と表現した場合には、このようなアスペクト・モデルを作成する設計対象モデラの意味で用いる。このメタモデル機構では、メタモデルに表現されている概念と接続する定量情報を扱うモデラに表現される概念との対応づけを記述することにより、メタモデル機構をこれらの定量モデルが利用できるように拡張した。このメタモデル機構では外部モデラの操作に関する手続きやモデラ間のデータ交換の手続きを全てメタモデル機構に記述することにより定量アスペクト・モデルが利用可能になっている。

### 5.3 プラガブル・メタモデル機構の提案

5.2.2節で概観した従来のメタモデル機構では、定量アスペクト・モデル間における定量情報の交換時において、どの値をどのモデルに問い合わせれば良いのかといった情報や、概念間の変換の方法などが、接続するモデラ間の1対1の関係で、全てメタモデル機構自体に記述してあった(図5.3)。しかし、この方法には次に挙げるような問題点がある。例えば、既にソリッドモデラが一つ接続されている段階で、新しいソリッドモデラを一つ接続する場合を考える。この時、この新しいソリッドモデラに表現される情報を他のモデラで利用するためには、既に存在するソリッドモデラと他のモデラとの情報交換の手続きと同様な手続きを全て記述しなければならない。すなわち、そのモデラの定量情報を他のモデラで変換し利用することを考える場合には、他のどのモデラで利用できるかを検討しなければならない。逆に、このようにソリッドモデラが複数存在した場合には、新たに形状情報を用いるモデラを接続する際に、全てのソリッドモデラとの間でデータ変換の手法を記述しなければならない。つまり、この方法では、様々なモデラで表現可能な同じ種類の定量情報の変換手法を記述する場合、全てのモデラとの間で情報の変換方式を記述しなければならない。これらの事項はシステムを拡張する際に大きな問題になると考えられる。

そこで、メタモデル機構に、これらの設計対象モデラを接続し利用するための枠組の組み込み、すなわち、接続する設計対象モデラに関する知識の記述およびその利用方法の共通的な定式化を行なう。本研究では、「接続する設計対象モデラで用いる概念と、メタモデル上で表現される概念との関係(変換の方法など)を記述することにより、メタモデル機構自体の変更を伴わずに、設計対象モデラの組み込みが可能であるメタモデル機構」をプラガブル・メタモデル機構と呼ぶ(図5.3)。

そこで、以下では設計対象モデラを接続するために必要なモデラに関する記述および接続方法、この記述の基礎になるメタモデルにおける概念の表現形式について述べる。

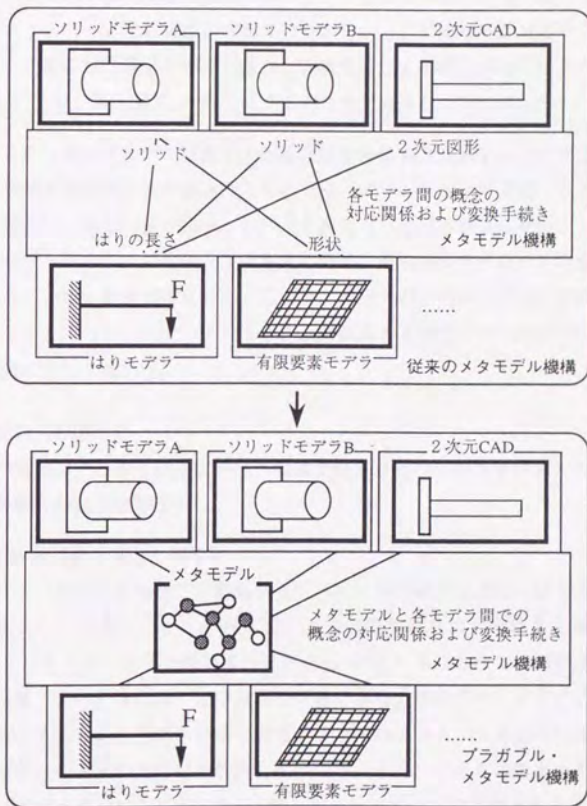


図 5.3: 概念間の対応関係の表現



### 5.3.1 メタモデルにおける属性概念の表現

従来のメタモデルでは、設計対象に関する概念の内、設計対象物の構造、そこに生起する可能性のある物理現象の依存関係、および設計対象に付けられるパラメータ間の関係がネットワークとして記述されていた。しかし、様々な設計対象モデラを接続し利用するためには、構造や物理現象などの概念に加えて構造や物理現象を持つ様々な属性概念(形状・線・質量など)をメタモデル上で表現しなければならない。

また、これらのメタモデルに表現する属性概念の情報と接続するモデラで用いる属性概念の情報との変換方法を記述するためには、メタモデル上で表現される属性概念に関する情報は、ある一定の決まった形式で表現されなければならない。しかし、自由曲面やソリッドのように複雑な表現形式を持ち、その表現形式自体も完全な標準化が行われていない概念が存在する。ここで、本研究の目的はこの様な標準化の体系を提案することではないので、メタモデル上で表現する概念に関する情報の標準化を次の2種類に分けて行なう。

#### 1. 表現形式の標準化

点や直線のデータといったデータ構造が簡単な属性に関する情報については、表現形式の標準化を行なう。

#### 2. データ獲得の手続きの標準化

ソリッドや自由曲面などの複雑な表現形式を持つ概念は設計対象モデラ固有の概念として定義し、そこから必要な属性情報を取り出す手続きを標準化する(例:ソリッドから頂点や面を取り出す)。すなわち、これらの概念はその概念を定義したモデラにおいてのみ利用可能であり、他のモデリングに必要な属性情報は決められた手続きに従い各モデラ上で加工され、1で述べた標準化された表現形式を用いて情報の受渡しを行なう。また、これらの概念をそのままの形で情報の受渡しを行なう場合(例:AというソリッドモデラからBというソリッドモデラへソリッドの情報を流す場合)は、IGESなどの標準データ形式に変換して情報の受渡しを行なう。

また、これらの属性概念は設計対象の構造を示す実体や実体間の関係および物理現象を持つ概念であるので、対応する実体や物理現象などの概念と関連付けられ、メタ

モデル上に表現される。

### 5.3.2 設計対象モデラの接続

この枠組で接続する設計対象モデラとは、ある一定の背景理論に基づいた概念体系に基づき設計対象を表現することにより設計対象をモデル化する枠組と定義する。つまり、数式を扱うモデラなどは、数式の持つ記号の意味がメタモデル上の概念と対応付けられないのでその記号の意味が定義されない限り接続することはできない。このような、新たに設計対象モデラを接続するためには、接続するモデラに関する記述およびその記述に基づきメタモデルと情報のやり取りをするインターフェースが必要である(図5.4)。ここでは、モデリングの際に行なう操作に関連付けて、このモデラに関する記述の枠組について述べる。

3.3.2項で述べたように、ある設計対象モデラを用いてモデリングを行なうことは、設計対象モデラがその基礎をおく背景理論に基づいた形式的な表現に変換することである。よって、このモデル生成を支援するためには、外部モデラが基礎をおく背景理論の記述すなわち、外部モデラで用いる概念体系に関する記述が必要である。

また、メタモデル上からモデリングに関連する属性の情報を取り出す際に、必要な情報が存在しない場合が考えられる(例えば、複数の物体の形状情報は存在するが、その接続関係の情報がメタモデルに表現されていない)。このような問題に対処する方法は2通り考えられる。一つは単純に各モデラにおいて作成したモデルから分かる範囲全てのことを導きだし、その全てをメタモデルに表現する方法であり、もう一つは、必要に応じて既に作成したモデルを利用し、必要とされている概念を導き出す方法である。前者の方法では、メタモデルに必要なかどうか分からない膨大な情報を記述することになり効率が悪いと考えられる。そこで、本研究では後者の方法をとる。よって、必要に応じて既に作成したモデルを利用して新たな概念を導き出すためには、あらかじめ、作成したモデルではどのような概念がモデルを利用した結果得られるのかを記述しておく必要がある。

また、外部モデラでモデリングを行なうためには、メタモデルから必要な情報を獲得した後に、その外部モデラ固有のデータ形式に変換しなければならない。また、外



部モデラを利用して導き出された結果は5.3.1項で述べたメタモデル機構の標準化したデータ形式を用いてメタモデルに表現されなければならない。よって、これらの手続きを定義する必要がある。

以上の考察を踏まえ、この外部モデラに関する記述としては次の3点が必要である(図5.4)。

1. 外部モデラでモデル作成の際に利用される概念
2. 作成したモデルを利用した結果得られる概念
3. メタモデル上で表現される概念と外部モデラで利用する概念の対応関係および変換手続き

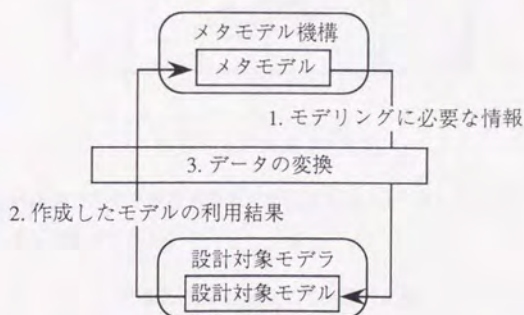


図 5.4: 設計対象モデラとメタモデルの接続

### 5.3.3 プラガブル・メタモデル機構の実現

今までの議論を踏まえ、プラガブル・メタモデル機構を実現するために必要な知識を記述する枠組みについて述べる。

データ形式の標準化を行うために次のように属性を定義する。属性は階層的に定義され、データ構造が標準化されている場合にはデータ構造が記述される。また、デー



タ構造が標準化されていない場合は、各モデラに対するインターフェースにおいて実行される Smalltalk で記述された手続きの名前が記述される (図 5.5)。

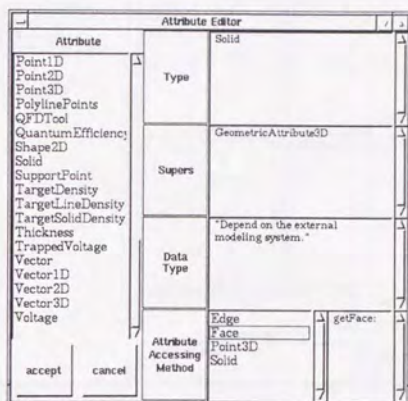


図 5.5: 属性知識ブラウザ

また、前項の議論に基づき設計対象モデラ知識を表 5.1 のように定義し、図 5.6 に示すブラウザを用いて記述される。

表 5.1: 設計対象モデラ知識の定義

項目	内容
name	名前
modeling concept	モデリングの際に利用する概念
available concept	モデリングの結果として得られる概念
interface	メタモデルとのインターフェース名
modeling viewer	モデリングの手続きをするインターフェース名
translating method	メタモデルからモデリングに必要な 属性のデータを獲得する手続き

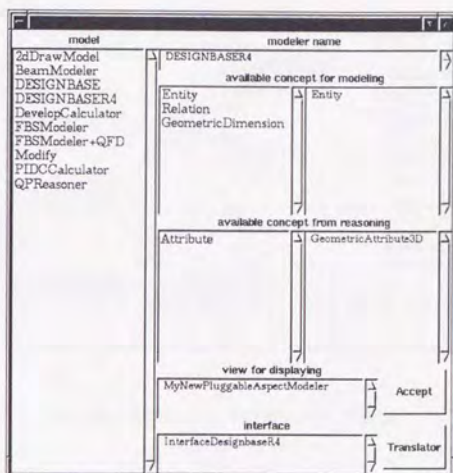


図 5.6: 設計対象モデラ知識ブラウザ

モデリングの際に定量情報を必要とする各属性については、メタモデル上で表現される他の概念に関する情報から必要な情報を得る手続きを記述する。この知識は図 5.7に示すブラウザを用いて記述される。

この図の左上のリストはモデリングの際に用いる属性概念であり、この場合は、分散加重の分散している範囲が選ばれている。右上のグラフが、データ交換に必要なメタモデル上の概念を示している。ハッチングされたノードはその属性を設定する概念(この場合は力)を示している。その他のノードがデータを交換する際に必要な概念であり、リンクはノード間の関係を示している。この場合、力がかかっている物体のソリッドの情報が必要であることを示している。さらに、右下には、実際にデータ変換を行なうために必要な手続きの名前が記述されている。この手続きはメタモデル機構と外部モデラのインターフェースに Smalltalk の手続きとして記述される。

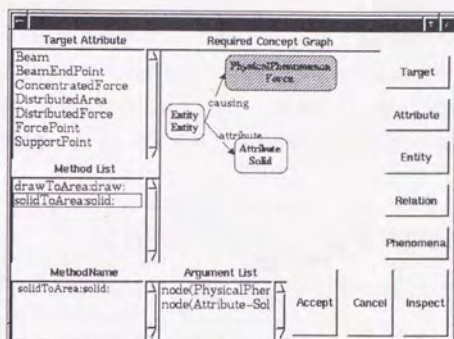


図 5.7: 属性のデータ交換のための知識

### 5.3.4 モデリングの支援

ここでは、このプラグابل・メタモデル機構を利用したモデリングの手順について述べる。このモデリングの手順においては、3.3.2項で述べた次の設計対象モデルに対する操作を扱う必要がある。

- モデルの粒度の決定  
設計対象を構成する要素の最小単位を設定する操作
- モデルの抽象化  
設計対象にそのモデルに固有の見方を付加する操作 (例：材料力学のモデルにおいて、棒をはりとしみなす)
- モデルの簡略化  
モデルを作成する際に、計算コストなどを考慮し、モデルの情報量を減らす操作 (例：ある物体に、自重と比べて大きな力がかかっている場合に自重を無視)
- データの交換  
モデルを作成する際に、他のモデルに表現されている情報を変換する操作 (例：座標系の変換や表現形式の変換)



そこで、接続した設計対象モデルを用いて定量モデルを生成する場合にも、まず、そのモデルの依存する背景理論特有の概念を用いて対象を表現するという作業を行なう。したがって、本研究では、定量アスペクト・モデルの生成を行なう場合にも、まず、対象を定性的に表現した定性アスペクト・モデルを作成し、さらに定量情報を考慮して定量アスペクト・モデルの生成を行なうという手法をとる(図5.8)。

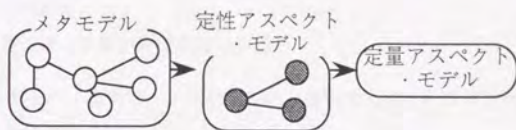


図 5.8: モデリングの手順

この定性アスペクト・モデルを作成するためには、先に述べたモデリングの手順の内、モデルの粒度の設定、モデルの抽象化、モデルの簡略化の操作を抜くわけにはいかない。ここで、モデルの粒度の設定は、実体概念に対する詳細度の情報を設定することであると考えられる。よってモデルの粒度の設定は、4.3節で述べた階層的なFBSモデルにおける階層の選択に対応すると考える。つまり、メタモデル機構は、ユーザーが選択した階層に応じた詳細度に対応する概念のみを、設計対象モデルを構築する際の基本となる概念として利用することになる。

また、次の2つの定性モデルを得るためのモデル操作をメタモデルに対する操作として定式化する(図5.9)。

#### ● モデルの抽象化

設計対象の持つ様々な属性から背景理論に関連する属性のみに注目して設計対象を表現することにより、設計対象を背景理論で用いられる概念体系に変換する操作

1. メタモデル機構は、メタモデルから実体およびその関係を表現している概念を抽出する。
2. ユーザーは抽出した概念の内、解析したい実体およびその関係について、メタモデル機構が提示する設計対象モデルで利用可能な概念に対

応づける。この対応づけは、抽象化する対象の概念とアスペクト・モデルで用いる概念の各々を上位階層として持つ実体概念をデリゲーション [Lieberman86] により作成することによって実現される。

図5.9の例では、棒をはりとして、棒と壁との接続を固定端として抽象化している。

#### ● モデルの簡略化

設計対象の持つ情報を取捨選択する操作

1. メタモデル機構は、メタモデルから解析する設計対象モデルに関連する概念を獲得する。
2. ユーザーは獲得した概念の内、定量アスペクト・モデルの作成時に考慮しない概念を選択する。

図5.9の例でははりにかかる重力はモデル作成時に考慮しないことを宣言している。

3. メタモデル機構は、ここで選択された物理現象および、先ほどのモデルの抽象化の過程でモデルで利用する概念に抽象化されていない実体とその関係およびこれらの実体とのみ関連している物理現象を無視する。

図5.9の例では、壁や重りといった実体や、重りにかかる重力は定性アスペクト・モデルを作る際に無視される。

さらに、定量アスペクト・モデルの生成の際に必要な定量的な属性情報は設計対象モデル知識に基づき次のような手順で生成する (図5.10)。

1. メタモデル機構は、設計対象モデル知識に記述されている概念間の対応関係のグラフに基づき、メタモデル上からモデリングに必要な属性概念を検索する。
2. 必要となる概念の組合せがメタモデル上に複数存在している場合には、ユーザーがその中から一つの組合せを選択する。交換するための情報が存在していない場合には、
  - (a) メタモデル機構は、検索された必要とされている概念に関する情報を扱うことができる別の設計対象モデルを検索する。

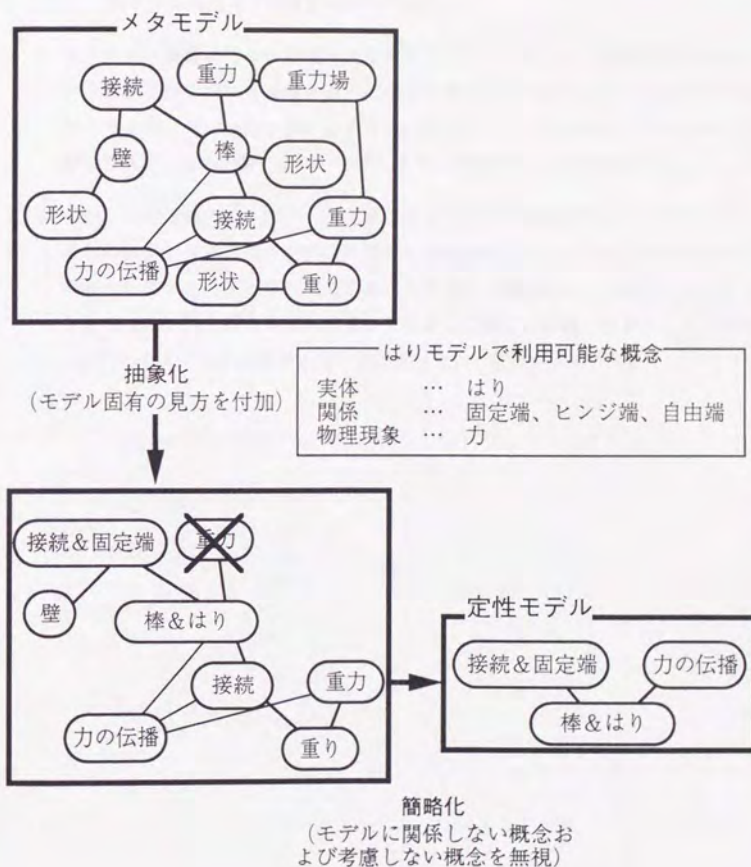


図 5.9: モデルの抽象化と簡略化



- (b) ユーザーは、設計対象モデラを使わずに、その情報自体を直接入力するか、検索された設計対象モデラの一つを選択してその設計対象モデラを利用することにより情報を入力を行なう。
3. メタモデル機構は得られた属性概念の情報を設計対象モデラ知識に記述されている変換手法を用いて変換する。この属性間の変換の際に「はりの長さ方向をどうとるか」といった一意に定まらない関係については、ユーザーに変換の指針を要求し、その指針に基づいてメタモデル機構がデータ変換を行なう。
4. また、設計対象モデルのデータ変更に伴う一貫性の管理のために、どのモデルのどの概念からどのような変換指針で概念の変換を行なったかを、属性概念間の関係としてメタモデル上に記述する。メタモデル機構が、この関係を利用することにより、例えばある実体の形状を変更した際に、以前の形状データを利用して作られたデータは無効となり全体としての一貫性が保たれる。

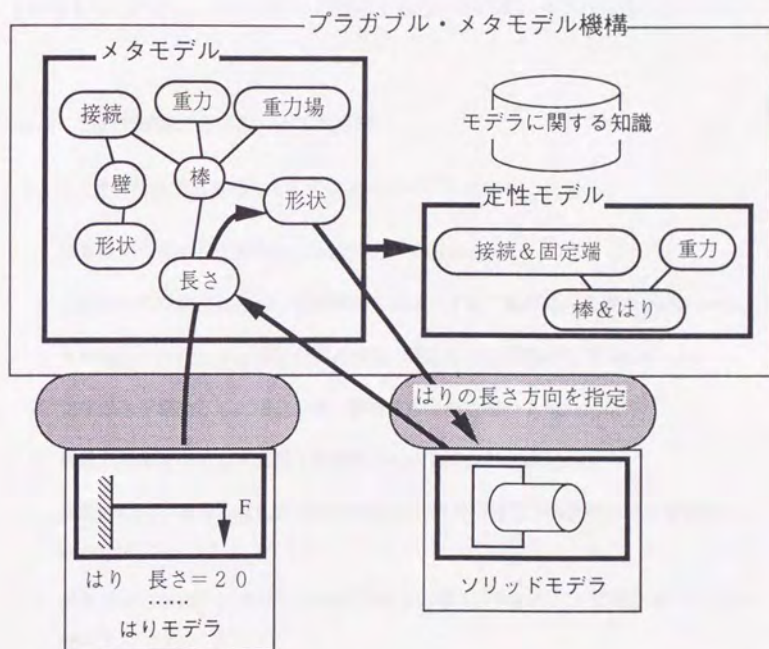


図 5.10: 定量的な属性情報の獲得

## 5.4 設計知識操作論に基づく設計過程管理システム

3.2節では、設計実験の結果の分析に基づく設計知識操作を認知的な設計過程モデルと対応付けることにより、設計知識論に基づく設計過程モデルを提案した。本節では、これらの設計知識操作を本CADシステムで利用する対象レベルのツールに対する操作と対応づけ、これらの操作を制御するための行為レベルの知識について述べる。

### 5.4.1 設計知識操作と対象レベルの操作

3.1節で述べた設計知識操作としては次の9つが存在する。

1. 実体概念の詳細化 (属性概念位相空間の Refinement)
2. 実体概念の詳細化に基づく設計仕様の明確化 (属性概念位相空間の Refinement)
3. 実体概念の比較による設計仕様の補完 (機能概念位相空間の Refinement)
4. 実体概念を媒介とした機能分解 (機能概念位相空間の Refinement)
5. 機能の実体概念による実現 (属性概念位相空間の Refinement)
6. 機能の制約の緩和と機能統合時の補完的な機能の発見 (機能概念位相空間の Refinement)
7. 実体概念の詳細化に基づく物理法則概念の導入 (メタモデル位相空間の Refinement)
8. 特定問題に対する設計方法論の利用 (属性概念位相空間の Refinement)
9. 設計解選択のための仕様の変更 (機能概念位相空間の Refinement)

ここでは、設計対象レベルを表現する計算機ツールを FBS モデラ + QFD ツール、メタモデル機構および FBS モデラの挙動を管理する定性推論システム、メタモデル機構に接続するその他の外部設計対象モデラの3種類にわけ、その各々のツールと上記の知識操作間の関係を考える。



4.3節で述べたように、FBS モデラ+ QFD ツールでは機能概念に対する操作 (1,3 ~ 6,9) を行なうことができる。また、2. で扱う機能以外の設計仕様は、要求品質と関連付けられるものについては、要求品質と関連付けて QFD ツールで表現する。また、7. の知識の導入の操作を行なうためには、設計対象の持つ属性間の関係である物理知識を導入するためには、幅広い物理知識に関する推論を行なわなければならない。そこで、FBS モデラおよびメタモデル機構で利用している定性推論システムを用いてこの関連付けを行なう。さらに、プラグブル・メタモデル機構に接続する外部設計対象モデラを利用することにより、領域に特化した知識の導入や、8. の特定の設計方法論の利用を行なう。この対応関係を表 5.2 に示す。

ツールの種類	1	2	3	4	5	6	7	8	9
FBS モデラ+ QFD ツール	○	○	○	○	○	○			○
定性推論システム							○		
外部設計対象モデラ							○	○	

表 5.2: 設計知識と対象レベルのツールに対する操作の対応関係

#### 5.4.2 設計過程知識の表現

本システムでは、設計過程知識を設計過程モデルの行為レベルの手続き的知識として表現する。これらの知識は一般的なものであり、特定の設計対象に依存するものではない。この手続き的知識であるルールは「if 条件部 then 作業列」の形式で記述されている。

このルールの条件部には対象レベルの設計対象の状態を評価するための操作が記述され、作業列には 3.1 節で述べた設計知識操作に対応する対象レベルへの操作が順番に記述されている。この設計過程管理システムでは、先に述べた設計知識操作に対応する操作に加え、仕様の入力に関する操作と多重世界管理機構を操作するための操作を加えた以下の 8 つのルールを用いて設計対象レベルの操作を制御する。

##### 1. 仕様の入力

if 仕様が入力されていない then 仕様の入力を求める。

## 2. 世界情報の更新

if 新しく情報が付け加えられ、評価が行なわれた then 新しく付け加えられた情報を多重世界管理機構に通知

## 3. 解候補の評価 (設計知識操作 2,3,7,9 に対応)

if 属性情報が詳細化され、関連する知識が導入された then 評価を行なうための設計対象モデルを選択し、評価を行なう。

## 4. 知識の導入による展開 (設計知識操作 7 に対応)

if 属性情報が詳細化された then 詳細化された属性情報を基に起こりうる物理現象に関する知識を導入する。

## 5. 世界情報の更新

if 新しく情報が付け加えられた then 新しく付け加えられた情報を多重世界管理機構に通知

## 6. 設計解の詳細化方法の提案 (設計知識操作 1,4,5,8 に対応)

if 詳細化されていない問題点が存在する then 問題点を詳細化

## 7. 機能の制約の緩和 (設計知識操作 6 に対応)

if 詳細化されていない機能が存在する then 機能の制約の緩和

## 8. 仕様の追加

if 仕様が入力されている then 仕様の入力を求める。

また、これらの知識に対し、この順番通りに優先順位を付ける。そして、その優先度に応じて利用することにより、図 5.11 に示す手順で設計が進行する。また、図に含まれていない「機能の制約の緩和」と「仕様の追加」は設計者が必要に応じて、実行するものとする。

知識の導入による展開に関する設計過程知識を例に、実際のルールの記述形式を説明する。

```
if (attributeRefined) ; 属性位相空間が Refine されたら  
then (getNewAssumption: NA) ; 設計解を変更した点を確認する。
```

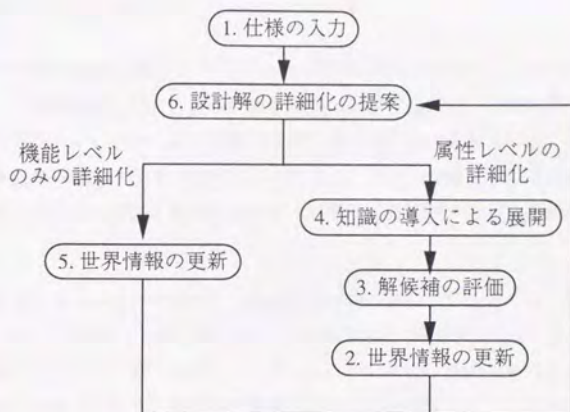


図 5.11: 基本的な設計対象操作の流れ

```
(interactive (selectModeler:argument: development NA))
```

; 変更した点について展開を行なうための適切な  
; モデラを選択する。

```
(developDesignObject: Selection1)
```

; 選択されたモデラで新たに起こる可能性のある  
; 大まかな挙動を導出する。

各ルールは、設計対象の状態を調べる操作の組み合わせである条件判断部および設計対象に対する各操作は操作を行なうためのコマンド名と引数からなっている。また、引数には大文字で始まる変数と、小文字で始まる記号がある。大文字で始まる変数に対しては、設計対象に対する操作の結果として値を代入することができる。また、ユーザーに選択を行なわせる操作については、(interactive (操作)) という形式で記述し、その結果を変数に保存する。この操作により得られた変数の名前は Selection に操作の回数を加えた Selection1, Selection2, ... という名前を用いる。



### 5.4.3 設計対象モデラの選択

先に述べた設計過程管理システムにおける設計過程知識の内、「知識の導入による展開」、「解候補の評価」、「設計解の詳細化方法の提案」、「機能間の制約の緩和」の4つのルールについては、設計知識操作論と対応付けられている。一方、本システムは多数の外部モデラを接続することにより、様々な知識を利用可能にする枠組であるので、これらの知識を利用するためには設計対象モデラ選択の支援が必要となる。

ここで述べた4つのルールの内、「機能間の制約の緩和」については、現在のところFBSモデラを利用した方法以外に扱う方法が存在しないので、設計対象モデラ選択の操作は行なわれないが、他の3つのルールについては、設計対象の状況に応じたモデラ選択の支援を行なう。設計過程管理システムにおけるルールにおいて、モデラ選択は、設計サイクルの段階と、その段階に応じた設計対象の状況を引数にとる操作として表現される。また、この設計対象モデラの選択は表5.2に示した設計知識操作と設計対象モデラの関係に基づいて行なう。

#### 知識の導入による展開

この操作は、設計知識操作論における実体概念の詳細化に基づく設計対象知識の導入に対応する。この操作は、実体概念の詳細化により得られた属性情報から、幅広い物理現象の知識を用いて関連する知識を導入する操作である。そこで、この操作を支援するためには、設計対象に新たに加えられた属性が設計対象に関する情報として利用される。また、この操作で用いられる設計対象モデラにはできる限り広範囲の物理現象に関する知識が扱える必要がある。そこで、ブラガブル・メタモデル機構で用いるモデラの定義に関する知識を利用し、物理現象概念をもっとも幅広く利用できる設計対象モデラを利用する。現在のシステムにおいては、定性推論システムが一番広く物理現象を扱うことができるシステムであるために、これを利用する。

### 解候補の評価

この操作は、先に述べた展開の操作を受け、より詳細な知識を用いることにより評価を行なうための情報を集め、その結果として評価を行なう操作である。そこで、この評価を行なうための設計対象モデルは、展開段階で得られた新たな情報に基づいて選択することにする。そこで、この操作を支援するためには、設計対象において展開段階の操作により新たに導入された物理現象が設計対象に関する情報として利用される。つまり、展開段階の操作により新たに導出された物理現象などについてより詳細に解析することのできる設計対象モデルを設計対象モデルに関する知識を用いて選択し、その結果を機構の満足度として表現することにより、「設計仕様の明確化」および「設計解選択のための仕様の変更」の操作を実現する。

### 設計解の詳細化

この段階は、設計サイクルにおける提案の段階に対応し、設計知識操作としては、「実体概念の詳細化」「機能分解」「特定問題に対する設計方法論の利用」の3つの操作が行なわれることになる。この内最初の2つの操作は機能レベルの操作であるのでFBSモデルで行なうこととする。最後の特定問題に対する設計方法論を利用するために、先ほどの解候補の評価と同様に設計対象モデルに関する知識を用いて選択する。

## 5.5 多重世界管理機構

2.2.1項で述べたように設計過程には様々な分岐や後戻りの操作が見受けられる。そこで、これらの設計者の操作を扱うために多重世界管理機構を利用する。この多重世界管理機構において、一つの世界は、設計過程のある時点を示している(図5.12)。また、そのある時点から設計対象を詳細化した結果得られた世界を子供の世界として表現する。また、複数の設計候補を考慮することは分岐として表現される。

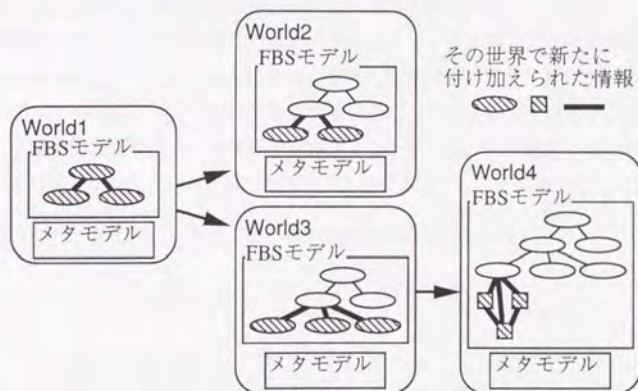


図 5.12: 多重世界

この多重世界管理機構は、FBS モデラ + QFD ツールに関する情報とブラガブル・メタモデル機構に表現されている定性推論システムの情報および外部モデラの情報を取り扱う。各世界には、その世界で新たに追加された情報と取り除かれた情報を記述する(図5.12)。後戻りなどのために世界を移動する場合には、その世界の全ての先祖の世界(親の世界・親の親の世界…)において追加された情報および取り除かれた情報を収集し、その結果に基づいてその世界の情報に基づいて対象レベルである FBS モデラ + QFD ツールとブラガブル・メタモデル機構に表現されている定性推論システムの情報および外部モデラのデータを変更する。



## 5.6 5章のまとめ

本章では、3章、4章で述べた設計知識操作論に基づいたCADシステムの構成とその実現手法について述べた。ここで提案したプロトタイプ・システムは、設計対象を表現する対象レベル、対象レベルを操作する行為レベル、多重世界管理機構から構成されている。

また、対象レベルは、4章で述べたFBSモデラ+QFDツールを用いて設計者の機能概念に操作を扱い、既存の複数の設計対象モデラを統合するブラガブル・メタモデル機構を用いることにより、複数の設計対象モデラに表現される様々な種類の知識を扱うことができる。また、行為レベルは、設計知識操作論に基づく設計過程モデルに基づいて、この対象レベルの操作を制御する。また、多重世界管理機構を用いることにより、その設計過程における履歴を記録することができ、設計過程においてよく行なわれる後戻りや分岐といった操作を扱うことができる。

また、システム全体としては、図5.13の様な外観になっている。



図 5.13: システムの外観

## 第 6 章

# CAD システムの設計事例への適用



本章では、前章で述べた CAD システムの妥当性を2つの例題を用いて検証する。一つめの例題は体重計の設計実験のプロトコルデータを用いた設計シミュレーションである。この例題では、実際の設計実験の中で設計者が行なった知識操作を本 CAD システム上で表現できるかを検証する。2つ目の例題はコピー機の設計の例であり、この例題では、ブラガブル・メタモデル機構による複数の設計対象モデルの管理および、設計者の意図記述システムの妥当性を検証する。最後に、これらの例題から得られた結果を基に本システムに対する考察を行なう。

## 6.1 設計シミュレーション

設計シミュレーションとは、計算機上に表現された設計過程モデルと実際の設計過程で用いられた知識に基づく知識ベースを用いて、その設計過程を計算機上に再現することである [Takeda91]。このシミュレーションの結果得られた設計過程と実際の設計実験の結果として得られたプロトコルを比較することにより、計算機上に構築した設計過程モデルの妥当性を検証する。

ここでは、3章で利用した体重計に関する設計実験の結果得られた設計プロトコル (図 6.1) をもとに設計シミュレーションを行なう。

### 6.1.1 設計シミュレーションに用いる設計対象知識

また、このプロトコルデータを基に FBS モデラのための機能プロトタイプの知識、FBS モデラ + QFD ツールで利用する機構知識、定性推論で利用する物理法則に関する知識を作成した。

機能プロトタイプの知識としては、次の6つの機能を定義した。

- 重さをはかる (scale(weight))
- 重さを支える (support(weight))
- 縦方向の力を縦方向の変位に変換する (translate(verticalForce) to (verticalDisplacement))
- 縦方向の変位を回転に変換する (translate(verticalDisplacement) to (rotation))
- 回転を表示する (display(rotation))
- 重さを横方向の変位に変換する (translate(horizontalForce) to (horizontalDisplacement))
- 横方向の変位を縦方向の変位に変換する (translate(horizontalDisplacement) to (verticalDisplacement))

1	まず、これはバネを選択しなくてはいけない。
2	これはかなりのバネだ。
3	スプリング・バネ以外に使えるものは
4	板バネ
5	しかし板バネは精度が悪い。こういうものの精度はバネ精度一つにかかっているから、これはまずい。
6	だからコイルバネ、圧縮バネだ。
7	バネは一個で済まないだろう。
8	4 隅に一個ずつというくらいではないかな。
9	しかし 4 隅に一個ずつおくと足の置き方によってそれぞれのバネの置き方が変わってくる。
10	だからガイドカレールみたいなものがある。
11	普通のバネばかりの構造はこう (下図)。
12	まあバネは縦でなく横に置いてもいい。運動を横に変換するわけか。
13	一つバネを横に置く場合を考えてみよう。
14	90 度運動を変換するわけだからリンクか何かを使うのだろう。
15	しかしなぜバネを横におくのか？その方がストロークを大きくとれるから。
16	いやバネは縦においた方がいい。運動の方向を変換する機構に抵抗があるから良くない。それでは精度が出ない。

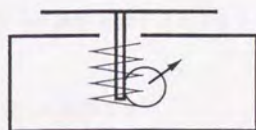


図 6.1: 設計シミュレーションに用いる体重計の設計に関するプロトコルデータ



また、発話 11 における実際の機械による分析から「重さをはかる」機能が「重さを支える」「力を縦方向の変位に変換する」「縦方向の変位を回転に変換する」「回転を表示する」の 4 つの機能に分解されるという知識を記述した。

次に、機能と実現挙動の関係について述べると、次の 6 つの機能については実現挙動を対応付けた。

- 縦方向の力を縦方向の変位に変換する

発話 2～4 で述べられているスプリング・バネ (コイル・バネ) を用いた機構と板バネを用いた機構、発話 8 で述べられているコイル・バネを 4 つ用いた機構、発話 10 で述べられている 4 つのコイル・バネとガイド装置を用いた機構について、各々の機構を表すフィジカル・フィーチャを実現挙動とする。

- 重さを支える

発話 11 で描かれた天板を用いた機構を表すフィジカル・フィーチャを実現挙動とする。

- 縦方向の変位を回転に変換する

発話 11 で描かれたラックとピニオンを用いた機構を表すフィジカル・フィーチャを実現挙動とする。

- 回転を表示する

発話 11 で描かれたギアに直結した軸で回転を表示する機構を表すフィジカル・フィーチャを実現挙動とする。

- 横方向の変位を縦方向の変位に変換する

発話 14 で述べられたリンク機構を表すフィジカル・フィーチャを実現挙動とする。

- 横方向の力を横方向の変位に変換する

発話 12～13 で述べられたバネを横においた機構を表すフィジカル・フィーチャを実現挙動とする。

さらに、機構知識として、以下の 5 つの機構に対して評価基準およびその満足度を設定した。

- スプリング・バネ (コイル・バネ) を用いた機構

精度 5

- 板バネを用いた機構

精度 3

- コイル・バネを 4 つ用いた機構

精度 3 コンパクト 3

- 4 つのコイル・バネとガイド装置を用いた機構

精度 5 コンパクト 3

- バネを横においた機構

精度 5 コンパクト 5

- リンク機構

精度 3

また、物理法則としてはバネのフックの法則、重力、回転、同軸につながった物体の回転、リンクの運動に関する知識が記述されている。

## 6.1.2 設計シミュレーションの実行例

まず最初に、システムはユーザに設計仕様の入力を求める。ユーザは機能的仕様である「重さをはかる」機能をFBS モデラに、大きさに関する制約条件を踏まえ「コンパクト」という要求品質をQFD ツールに入力する(図6.2)。

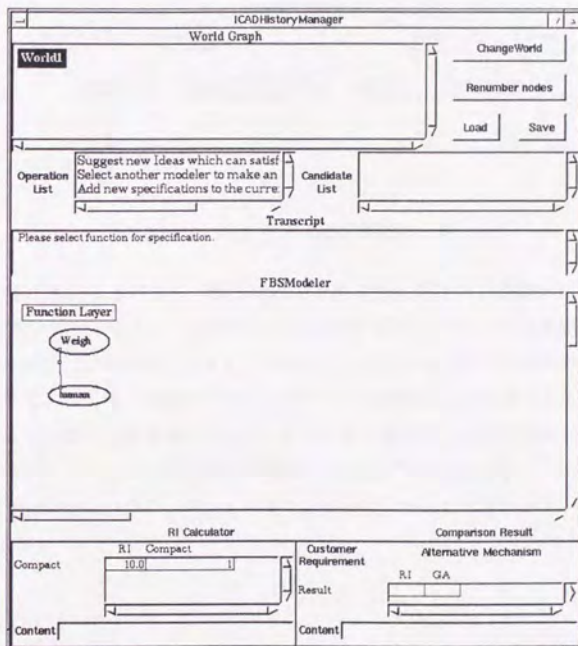


図 6.2: 仕様の入力

## 発話 1 ～ 6

次に、システムは詳細化されていない「重さをはかる」機能を問題点として機能分解を行ない、「重さを支える」「縦方向の力を縦方向の変位に変換する」「縦方



向の変位を回転に変換する」「回転を表示する」の4つのサブ機能が提案された(図6.3)。

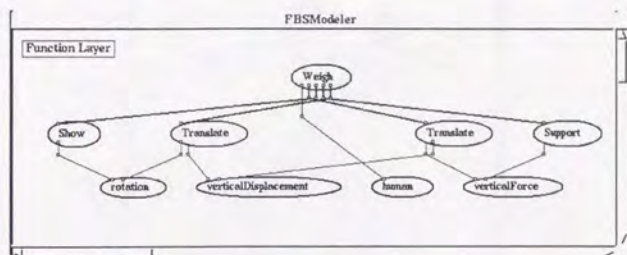


図 6.3: FBS モデラによる機能分解

次に分解された機能のうち「縦方向の力を変位に変換する」機能に注目する。この機能を実現する方法としては先の4つの方法がFBS モデラにより提案される。ここで、コイル・バネを実現方法として選択すると、図6.4の様にFBS モデラが詳細化される。また、この時、FBS モデラ+QFD ツールの機構知識を用いることにより、「精度」という要求品質が導入される。また、同じ機能を実現する機能として板バネを選択すると、コイル・バネを用いた機構との比較が可能になる。この時、コイル・バネの方が精度が良いので、コイルバネのほうが設計解として評価が高いことが示される(図6.5)。

#### 発話 7 ~ 10

さらに、コイル・バネを4つ用いた機構・4つのコイル・バネとガイド装置を用いた機構を各々実現機構として考えることにより、実現機構の比較を行なった。この時、板バネおよびコイル・バネの機構についてコンパクトという評価基準に対する満足度の知識が存在しないために、発話7を受けてユーザーが各々について1を入力した。この結果4つのコイル・バネとガイド装置を用いた機構が解候補として選択される(図6.6)。

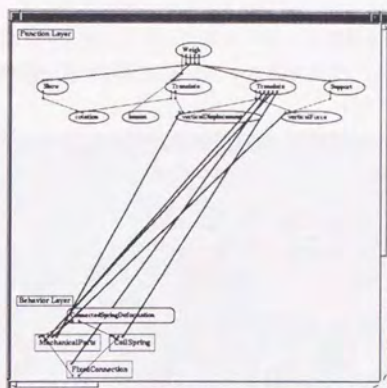


図 6.4: 実現方法の選択

Comparison Table				
Customer Requirement	Alternative Mechanism			
	R1	GA	CoilSpring	PlateSpring
Accuracy	5.0		5	
Result			20.0	15.0

図 6.5: 実現機構の比較 (発話 6)

Comparison Table					
Customer Requirement	Alternative Mechanism				
	R1	GA	CoilSpring	PlateSpring	FourCoilSpring Guide
Accuracy	5.0		5	3	5
Compact	5.0	1		3	3
Result			30.0	20.0	40.0

図 6.6: 実現機構の比較 (発話 10)

## 発話 11 ~ 16

さらに、この機能分解の知識を作成した実体に関する知識を検索することにより、実際のバネばかりの構造に基づいた FBS モデルを作成することができる (図 6.7)。

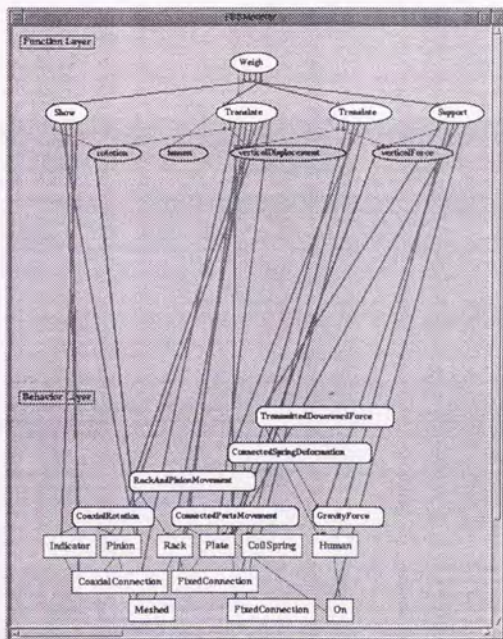


図 6.7: 実際のバネばかりの FBS モデル

この時、ユーザーが「縦方向の力を縦方向の変位に変換する」機能に関する実現構造を網羅的に探索するために「横方向の力を横方向の変位に変換する」機能に緩和する。この時、機能間の制約条件としては、「横方向の力を横方向の変位に変換する」機能の「横方向の力」は「重さを支える」の「重さ」と目的語を共有しており、「横方向の変位」は「縦方向の変位を回転に変換する」の「縦方向の変位」と目的語を共



有している。ここで、「横方向の力を横方向の変位に変換する」機能の実現方法を考えると、バネを横においた機構が提案される。この時、先に述べた機能間の制約条件を考えると「横方向の力」に対応する実体が「天板」と「横方向の変位」に対応する実体が「機械部品」と対応することになる。ここでユーザーが天板の移動方向を考慮することにより、「天板」という実体が共有できないと判断することにより、補完機能が必要となり、ユーザーが「縦方向の変位を横方向の変位に変換する」機能を追加する。

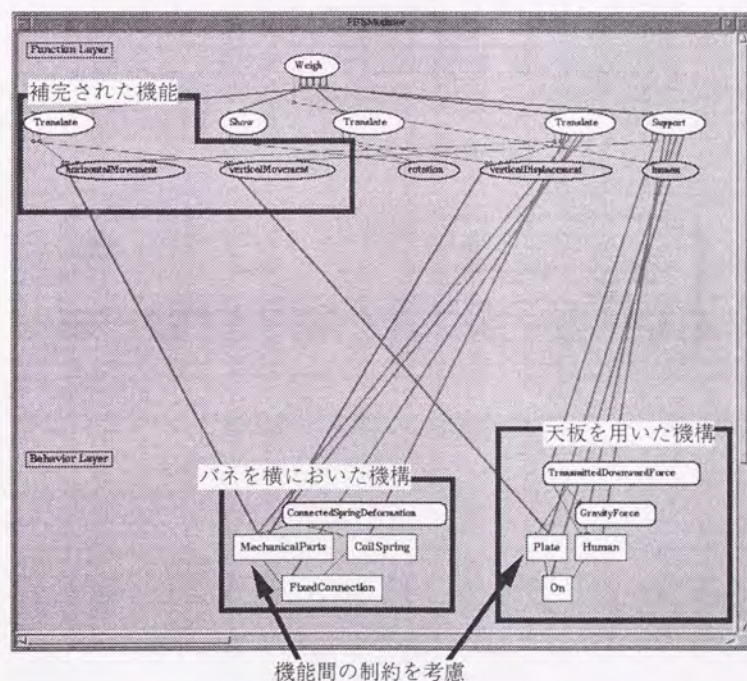


図 6.8: 機能間の制約の緩和と機能の補完

さらに、「縦方向の変位を横方向の変位に変換する」機能に対する実現機構を問題

とすると、FBS モデラによりリンク機構が提案される。ここで、ユーザーがリンク機構とバネを横においた機構の組合せを他の設計候補と比較することになる。この時、ユーザーはリンク機構の満足度とバネを横においた機構の満足度に関する機構知識を用いて、この2つの組合せの満足度を「コンパクト…5 精度…3」と設定する。また、ここで要求品質の内、精度がコンパクトよりも優先することを相対重要度として表現することにより(図6.9)、4つのバネとガイドを用いた機構が設計解として選択される(図6.10)。

RI Calculator			
	RI	Compact	Accuracy
Compact	2.5	1	(1/2)
Accuracy	7.5	3	1

図 6.9: 要求品質の相対重要度の計算

Comparison Table							
Customer Requirement	Alternative Mechanism						
	RI	GA	CoilSpring	PlateSpring	FourCoilSpring	FourCoilSpring Guide	HorizontalCoilSpring+LinkTransmission
Accuracy	7.5		5	3	3	3	3
Compact	2.5		1	1	1	1	1
Result			40.0	25.0	30.0	45.0	35.0

図 6.10: 実現機構の比較(発話 16)



## 6.2 コピー機的设计への適用

次に、コピー機的设计を例にとり、ブラガブル・メタモデル機構による複数の設計対象モデルの管理および、設計者の意図記述システムの妥当性を検証する。このコピー機的设计例に利用した知識を記述するための情報は、三田工業(株)の技術者から提供して頂いた。

本例題においては、ブラガブル・メタモデル機構に接続する外部モデラとして、FBS モデラ + QFD ツール、定性推論システムに加え、ソリッドモデラである DESIGNBASE<sup>1</sup>、2 次元作図システム、はり解析モデラ、コピー機のシステム设计の方法論 [Scharfe84] に基づいた感光体の露光量計算システム、現像装置の最適バイアス電圧計算システムが接続されている。

### 6.2.1 コピー機的设计

#### 機能设计

まず最初に、このコピー機的设计を始めるにあたり、機能的仕様(図 6.11)および市場の要求である要求品質とその相対重要度を計算し(図 6.12)、表 6.1 に示す相対重要度を得た。

次に、FBS モデラ上で機能分解を行ない要求機能をサブ機能群へと分解する。さらに、各サブ機能に対し設計候補を提案し、QFD ツール上で評価する。図 6.13 は異なる現像機構に対する評価である。ここでは 2 つの現像機構を考えているが、各々の現像機構についての詳しい説明は [Scharfe84] 等のコピー機的设计に関する文献に譲ることにする。ここでは各々の利点欠点を記述した機構知識を用いた結果、図の右側にある磁気ブラシ現像機構がカスケード現像機構よりも評価が高くなり、磁気ブラシ現像機構を実現機構として選択する。

この様にして各サブ機能に付いて実現構造を対応付けることにより、コピー機の大まかな構造が決定される。また、定性推論システムを利用することにより、必要とさ

<sup>1</sup>DESIGNBASE は (株) リコーの登録商標である。



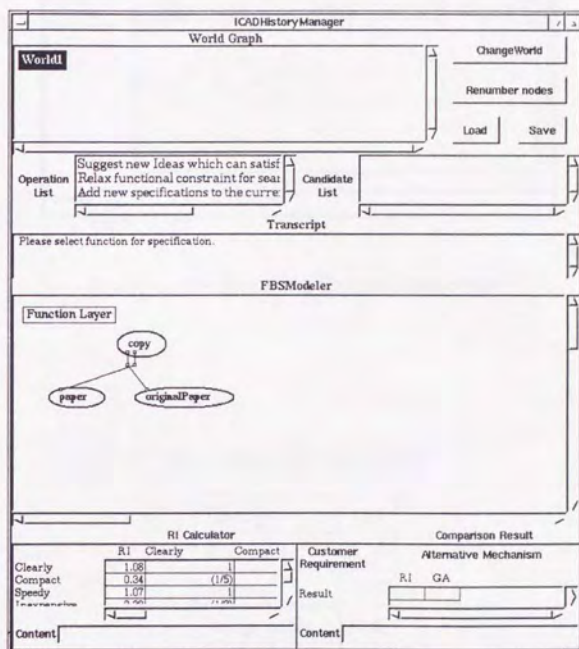


図 6.11: コピー機の機能的仕様

	RI	Clearly	Compact	Speedy	Inexpensive
Clearly	1.08	1	5	1	3
Compact	0.34	(1/5)	1	(1/5)	1
Speedy	1.07	1	5	1	3
Inexpensive	0.39	(1/3)	1	(1/3)	1
EasyToControl	0.56	(1/3)	3	(1/5)	1
LongLasting	0.3	(1/3)	(1/3)	(1/3)	1
Contrast	1.63	3	5	3	5
Uniformly	1.84	1	5	3	5
Reproduction	2.81	5	5	3	5

図 6.12: コピー機に対する要求品質と相対重要度

表 6.1: 要求品質の相対重要度

Clearly	1.08
Compact	0.35
Speedy	1.07
Inexpensive	0.39
Easy to use	0.56
Long Lasting	0.3
Contrast	1.62
Uniformly	1.84
Reproduction	2.8

Customer Requirement	Comparison Table			
	Alternative Mechanism			
	RI	GA	CascadeDevelop	MagnetBrushD
Clearly	1.08		3	3
Reproduction	2.81		5	5
Compact	0.34		1	1
Contrast	1.63		3	3
Uniformity	1.84		3	3
EasyToControl	0.55		3	1
Speedy	1.07		1	1
Result			30.78	36.6

図 6.13: 現像機能に対する解候補の比較

れる物理現象の成否が検証される。

#### コピー機のシステムとしての設計

また、この様にコピー機の大まかな構造が決定されると、コピー機のシステムとしての設計が可能になる。ここでは、文献 [Scharfe84] に基づいたシステムを利用した設計を行う。

このシステムでは、感光体の材質、現像装置の特性、最もコントラストを付けたい線画の濃さ、画像に移したくない汚れの濃さを基に、現像装置のバイアス電圧や感光体に照射する光量の設計を支援するシステムである。ここで、感光体の材質や現像装置の特性のデータについては [Scharfe84] に記述されている基本的なデータをデータベースの形で整理している。

まず、感光体に照射する光量を決めるためのシステム (図 6.14) では、感光体の材質の情報と最もコントラストを付けたい線画の濃さを入力とする。ユーザーが材質の情報をデータベースから入力するとシステムはこのデータを基に光量と帯電量の関係 (放電曲線) を計算する。さらに、最もコントラストを付けたい線画の濃さをユーザーが入力することにより、その線画に反射してくる光量による帯電量と紙の白い部分から反射してくる光量 (バックグラウンド露光量) による帯電量の差を示すコントラスト電位曲線を計算する。さらに、コントラスト電位が最大になるように感光体に照射する最適バックグラウンド露光量を決定する。

ここでは、初期帯電を 800V、感光体として  $60\mu\text{m}$  の厚みのあるアモルファスセレ



図 6.14: 感光体の露光量計算システム

ン(a-Se)を利用し、線画の濃度を0.3という条件を設定した。この時、感光体の放電曲線は図6.15のようになり、線画の濃度0.3に対応するコントラスト電位曲線は図6.16のようになる。この時、コントラスト電位を最大にするバックグラウンド露光量は $3.43884(\text{erg}/\text{cm}^2)$ となる( $1\text{erg} = 10^{-7}\text{J}$ )。

次に、現像装置のバイアス電圧を決めるシステムでは、先の感光体に照射する光量を決めるためのシステムのデータに加え、現像装置の特性、画像に移したくない汚れの濃さを入力とする。システムはブラガブル・メタモデル機構を通じ先の光量を求めるためのシステムから必要なデータを獲得し、現像装置の特性についてはデータベースからユーザーが入力する。現像装置では、線画と塗りつぶし領域で画像の再現性が異なる。そこで、画像に再現したくない汚れ(塗りつぶし領域)の濃さを基に、その汚れの濃さから反射してくる光量による帯電を打ち消す様にバイアス電圧を設定する。

ここでは、現像装置として磁気ブラシ現像法を利用しているので、磁気ブラシ現像法の代表的な特性値を利用する。また、画像に再現したくない汚れの濃度を0.3に設定すると、0.3の塗りつぶし領域からの露光に対応する出力濃度が0になるバイアス電圧である358.3(V)を最適バイアス電圧とする。また、これらの情報を基に入力の画像の濃さと再現性の関係(調子再現曲線)は図6.18のようになる。

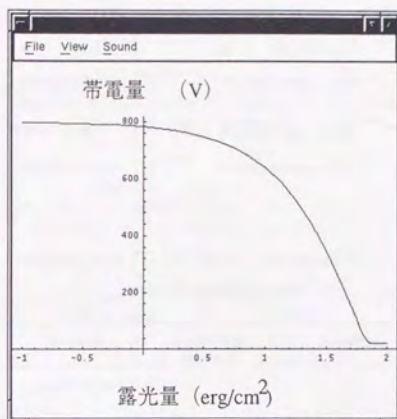


図 6.15: 感光体の光放電曲線

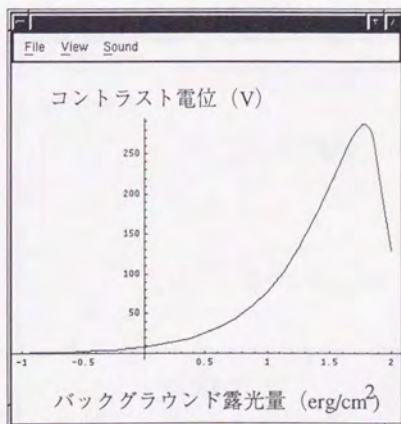


図 6.16: コントラスト電位曲線

Develop Calculator			
%	0.0025	%	0.00561798
Target Line Density	0.3	Min Solid Density	0.3
PIDC			
Initial Voltage	800 V	Thickness of photo conductor	60 $\mu$ m
Dielectric rate	6.6	Quantum efficiency	0.36
F	0.02e-0	W	22 V
Background expose	3.43884 erg/cm <sup>2</sup>	Bias voltage	358.3 V
Calculate appropriate bias voltage			
Plot output density		Plot TRC	
Open Math	Release Math	Inspect	
Transcript			
Appropriate bias voltage = 358.3 (V)			

図 6.17: 現像装置の最適バイアス電圧計算システム

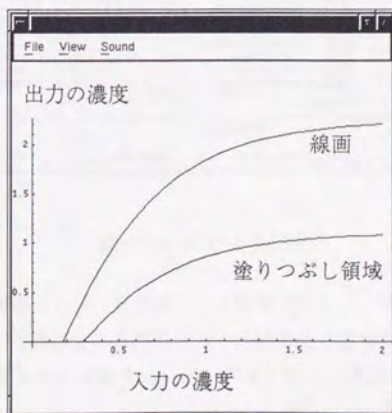


図 6.18: コピー機の調子再現曲線



## QFD による設計解の検討

さらに、選択された設計解候補の機構知識を用いて QFD で用いる要求品質\*品質要素展開表、品質要素\*機能展開表、機能\*機構展開表を作成した後(図 6.19)、この展開表を用いて品質要素、機能、機構の各々の重要度を計算する。

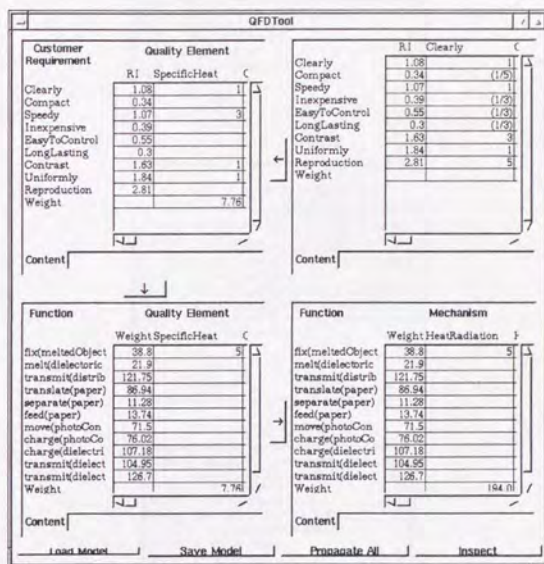
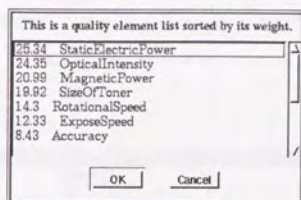
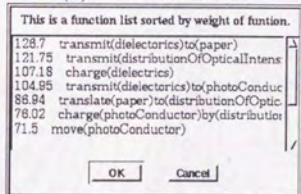


図 6.19: QFD の展開表

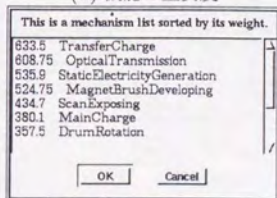
この結果、品質要素として「光強度」・「静電気力」が、機能として「光強度の分布を伝達する」・「原稿全面を照らす」・「感光体の電荷分布に誘電体を付着させる」・「用紙に誘電体を移動する」が、機構として「光伝達機構」・「JC ランプ」・「主帯電チャージャ」・「転写チャージャ」が各々比較的高いウェイトを持っているので、重要であると認識される。



(a) 品質要素の重要度



(b) 機能の重要度



(c) 機構の重要度

図 6.20: 品質機能展開の各要素の重要度

## 露光機構に関する詳細設計

さらに、露光機構について詳細に設計を進める場合を考える。ここでは、コピー機全体に対する設計と同様に、露光機能を実現するための FBS モデルを作成する(図 6.21)。この時、定性推論システムを用いてこのスキャン機構に体して起こる物理現象を導出すると、スキャンするランプを支えるケーシングに重力がかかることが判明する(図 6.22)。そこで、ここでは、このケーシングにかかる応力をはりモデルを用いて解析することを考える。

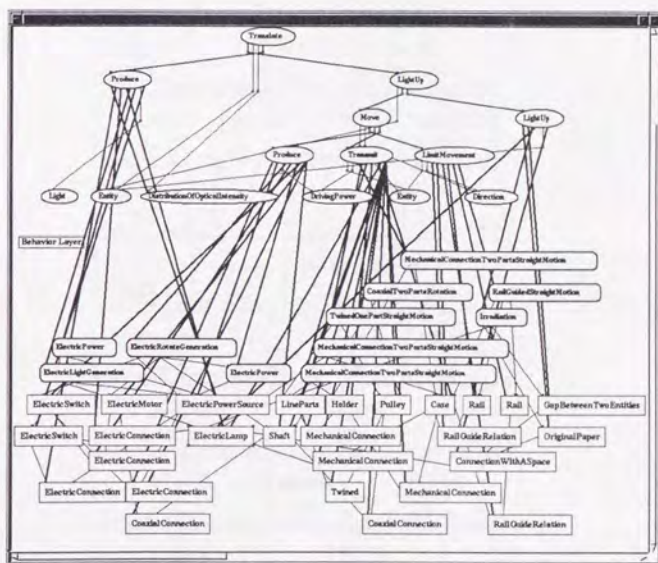


図 6.21: スキャン露光機構の FBS モデル

そこで、まず最初に定量アスペクト・モデルであるはりモデルを作るための定性アスペクト・モデルを作成する手順について述べる。まず、ユーザーが解析する設計対象モデルとしてはりモデルを選択すると、メタモデル機構に表現されている情報の内、その粒度にあった実体およびその関係、およびはりモデルで扱うことのできる力





に関する物理現象が選択される (図 6.23)。

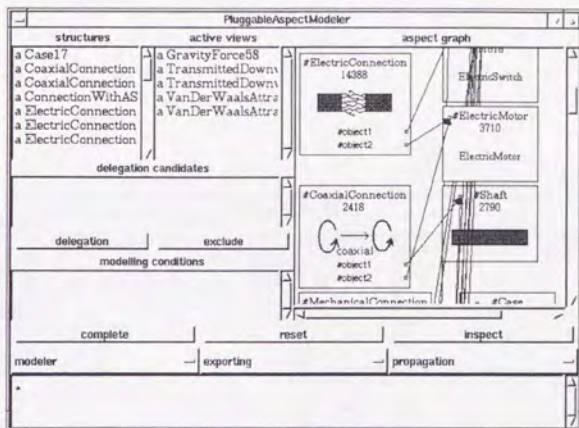


図 6.23: メタモデルからはりモデルに関連する概念を切り出したモデル

次に、このメタモデルから切り出したモデル上の実体およびその構造について、はりモデルにおいて利用可能な概念 (はり、固定端、自由端、ヒンジ端) を用いて抽象化する。ここで解析したい対象はライトのケーシングであるので、ライトのケーシングをはりとして抽象化する。また、ケーシングとレールの接続関係を各々ヒンジ端・自由端として抽象化を行う。また、ケーシングからレールにかかる力は重力の反力なので、ここではこれらの力を無視してモデルを簡略化する。また、この抽象化および簡略化を行った後、外部モデルであるはりモデルで扱える概念のみを表示すると、ケーシングとその接続関係およびケーシングに起きている物理現象以外は全て簡略化されることになり、定性アスペクト・モデルが作成される。

次に、定性アスペクト・モデルからブラガブル・メタモデル機構を通じてデータ交換を行うことになる。ただし、この時点では定量情報を入力していないために、交換するデータが存在しない。そこで、メタモデル機構は、属性のデータ交換のための知識を利用して、はりの長さのデータを得るために必要な属性を検索し (ソリッドもしくは 2次元図形)、これらのデータを扱うことのできるソリッドモデル、2次元作図シ

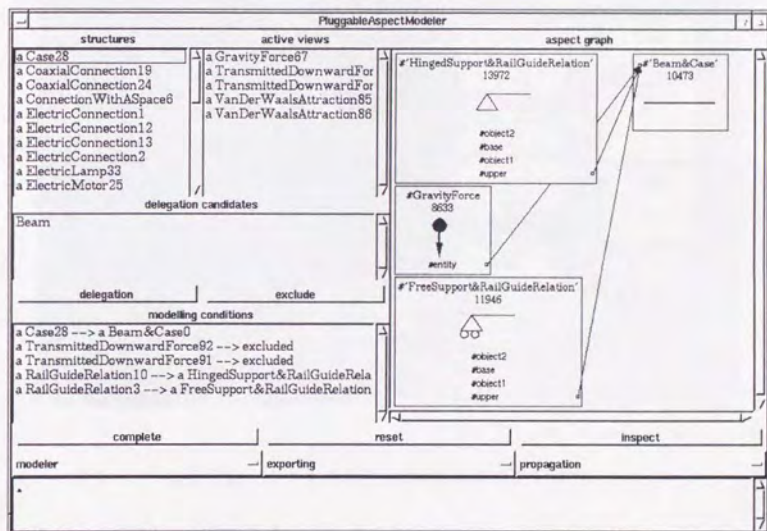


図 6.24: はりモデラで解析するための定性アスペクト・モデル



システムを用いた入力を求める。

ここでは、ユーザがソリッドモデラを選択した場合について説明を行なう。まず、ユーザはメタモデル機構に記述されている概念に対応するソリッドをソリッドモデラ上に作成する。さらに、ソリッドモデラ上のソリッドと概念ネットワーク上の実体との関係を設定する。

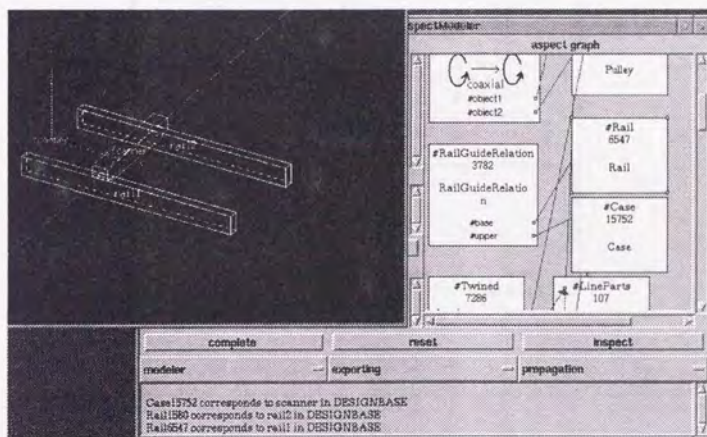


図 6.25: ソリッドモデルと実体概念の対応付け

次に、このソリッドモデルから基にはりモデラへデータ交換を行なう。このデータ交換を行なうためには、まず、はりの方向の情報をソリッドモデル上で指定する。この後、はりの端点に関する情報や、接続の位置を指定することにより、形状情報がはりモデルへと受け渡される。さらに、重力の大きさなどの情報をユーザが入力することにより定量アスペクト・モデルであるはりモデルが作成される。

さらに、このはりモデルを利用することにより、図 6.27 に示すせん断応力ダイアグラムや図 6.28 に示す曲げモーメントダイアグラムが計算される。

このソリッドモデルを利用した場合と同様に 2 次元作図システムを利用した場合も同様の結果が得られる。

Beams	Support Point	Force
Beam10473	Support11948 Support13972	Force8833

Name	Name	Name
Beam10473	Support11948	Force8833
Start Point	Type	Type
3.5	Free	Distributed
End Point	Point	Position
36.5	3.5	( 3.5 36.5 )
		Value
		200

Transcript

Evaluate    Open Model    Release    Inspect

図 6.26: ケーシングのはりモデル

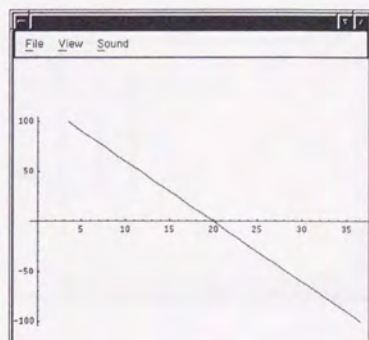


図 6.27: せん断応力ダイアグラム

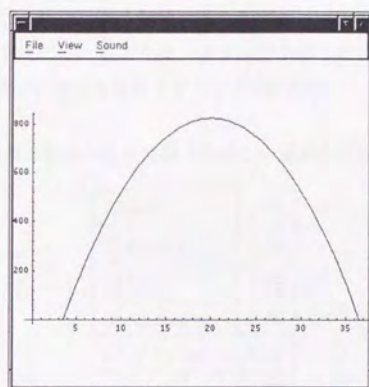


図 6.28: 曲げモーメントダイアグラム

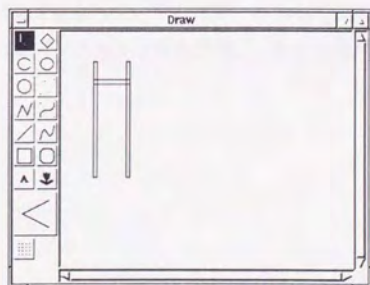


図 6.29: 2次元作図システムによる作図



## 6.2.2 市場の要求の変化に伴う設計変更

次に、先ほどのコピー機に対する設計結果を利用し、市場の要求が変化した場合の設計変更の支援について述べる。ここでは、多少画質が悪くなっても速くコピーがとりたいという市場の要求が存在する場合を想定する(表6.2)。

表 6.2: 市場の要求の変化に伴った新しい要求品質の相対重要度

Clearly	0.94
Compact	0.34
Speedy	1.92
Inexpensive	0.36
Easy to use	0.55
Long Lasting	0.28
Contrast	1.25
Uniformly	1.6
Reproduction	2.76

この市場の要求の変化に基づき、先ほどのコピー機の設計結果の中で考慮された全ての設計候補の再評価を行なった。その結果、図 6.30の様に、2つの露光機構に関する評価が逆転し、左側のフラッシュ露光機構がスキャン露光機構に代わって選択された。

Comparison Table				
Customer Requirement	Alternative Mechanism			
	RI	GA	FlushExposing	ScanExposing
Clearly	1.08		5	5
Reproduction	2.81		5	5
Compact	0.34		1	3
Contrast	1.63		3	5
Uniformly	1.84		3	5
Speedy	1.07		5	1
Result			35.55	38.89

(a) 以前の設計における解候補の評価

Comparison Table				
Customer Requirement	Alternative Mechanism			
	RI	GA	FlushExposing	ScanExposing
Clearly	0.84		5	5
Reproduction	2.76		5	5
Compact	0.34		1	3
Contrast	1.28		3	5
Uniformly	1.5		3	5
Speedy	1.62		5	1
Result			37.02	35.74

(b) 新しい設計における解候補の評価

図 6.30: 露光機能に対する解候補の比較

### 6.3 システムの考察

本節では、先に述べた2つの設計事例へのシステムの適用例を基に本システムの有効性について考察する。

#### 6.3.1 設計シミュレーションの結果に基づくシステムの考察

まず、体重計の設計実験を再現する設計シミュレーションの結果に基づき、3.1節で述べた設計知識操作の再現性について検討する。この設計プロトコルの過程では、設計知識操作の内、「設計仕様の明確化」、「特定問題に対する設計法の利用」以外の7つの知識操作が行われている。まず、「実体概念の詳細化」についてであるが、この設計シミュレーションでは、実際の設計過程で考えられた設計解候補が全て表現されている。また、「実体概念の比較による設計仕様の補完」としては、設計過程で考えられた評価基準である「精度」などの要求品質がQFDツールの機構知識を利用することにより詳細化されている。また、「機能分解」、「機能の実現」および「機能の制約の緩和と機能統合時の補完的な機能の発見」の操作はFBSモデラに対する操作として実現されている。さらに、「設計対象知識の導入」は定性推論システムにより実現され、「設計解選択のための仕様の変更」はFBSモデラ+QFDツールにおける要求品質間の重み付けとして実現された。このことから、本システムは3.1節で述べた知識操作が実現可能であると考えられる。

また、実際の設計プロトコルの再現性という点から考えると、そのプロトコル中で行われた操作がシステム上の操作として実現されているか否か、また、プロトコル中で考慮された設計対象が全て表現されているか否かが問題となる。プロトコル中に行われた操作としては、先の設計知識操作に対する考察からもわかるように、システム上の操作として実現されている。また、プロトコル中で考えられた設計対象についても、全ての解候補が表現され、解候補選択の理由も記述することができている。

しかし、この例題から次に挙げる2つの問題点が存在することが判った。

1. 解候補を考え出した操作が正確に記述できない。

実際の設計プロトコルでは、4つのコイル・バネの機構を分析することによ



り、ガイド装置が必要であることを考え出したように、それまでに考え出された解候補を分析することにより解候補を考え出す場合がある。それに対し、本システムでは、一つの機能を実現する様々な解候補を同等に扱っているために、このような操作が正確に実現できない。

2. 機能概念で与えられた仕様以外の仕様が明示的に扱うことができない。

実際の設計プロトコルにおいては、パネのストロークなどについて考慮する際に、縦300mm、横250mm、厚さ50mmという大きさに関する仕様が設計者の頭の中にあつたと考えられるが、本システムではコンパクトという要求品質としてしか扱えていない。

解候補を考え出した操作を記述するためには、機能間の関係や、機能と要求品質などの関係を記述する必要がある。このような研究としては、[Shimomura95]などがあり、これらの研究の成果を取り込んでいく必要があると考えられる。

また、大きさなどの仕様を扱うためには、属性間の制約条件の取扱および、実体の詳細化に伴って属性間の制約条件を適応する操作を扱う必要がある。

### 6.3.2 コピー機の設計事例に基づくシステムの考察

コピー機の設計事例に基づき、ブラガブル・メタモデル機構による複数の設計対象モデルの管理と設計者の意思決定情報の記録システムの妥当性を検証する。

まず、ブラガブル・メタモデル機構について考えると、ソリッドモデラ、2次元作図システム、はりモデル、コピー機のシステム設計を行うモデラが利用されている。各モデラにおいてアスペクト・モデルを作成する操作の支援および複数のアスペクト・モデル間のデータ交換が実現されている。また、このブラガブル・メタモデル機構を用いることにより様々な分野の知識を統合的に利用可能となっている。

次に設計者の意思決定情報の記録システムについて考える。設計者が考慮した意思決定情報については、先の設計シミュレーションに述べたように記録することが可能である。また、6.2.2節の例から、システムにより記録された情報が再利用可能であることが示された。このことは、機能設計のための知識や市場調査のための知識などの

様々な分野の知識を統合的に利用する知識集約型工学の利点を示している。

一方、この例題から本システムには次の5つの問題が存在することがわかった。

1. 定量情報の一貫性管理が不十分である。

2次元作図システムにおける形状情報とソリッドモデラにおける形状情報の様に本来関連する情報間の関係や、粒度が違う実体の属性情報間の関係など、明示的に関係を示されていない属性情報間の一貫性が管理されていない。

2. 挙動シミュレーションの能力に限界がある。

FBS モデラでは機能の発現を望まれた物理現象がの成否および望まれた状態遷移の成否で判断する。しかし、定性推論システムの能力に限界があるために複雑な設計対象の挙動シミュレーションが十分に行うことができない。

3. FBS モデラ + QFD ツールで利用する機構知識が固定的である。

機構知識の満足度はシミュレーションの結果などに基いて相対的に決まるべきであるが、あらかじめ固定された形で記述されている。

4. ローカルな情報と全体の情報の関係がうまく扱えていない。

設計者の意思決定情報の記録システムではローカルな各機能についての評価のみを記述しており、全体の機能からみた情報が不足している。また、QFD で用いる展開表も、全体のバランスを考慮する必要がある。

5. 知識記述の規範が存在しない。

知識の切り分け方などの規範が存在しないために、三田工業(株)の技術者が実際に知識を記述する際に問題となった。

定量情報の一貫性管理をより進めるするためには、明示的に表現されていない属性間の関係を明らかにしていく必要がある。また、設計対象の粒度が違う属性間の情報などは、制約などとして扱う必要性がある。

また、FBS モデラにおける挙動シミュレーションについては、プラガブル・メタモデル機構に接続した様々な外部モデラの利用結果を反映することができるようにする必要がある。



また、機構知識の満足度については、アスペクト・モデルを利用した結果が反映できるようにする必要がある。そのためには、アスペクト・モデルの結果を満足度に対応付ける知識が必要である。このような研究としては [Shimomura93] の機能量の研究があり、このような枠組みを取り込むことにより、アスペクト・モデルの結果を反映できるようにする必要がある。

また、機械全体としての情報をローカルな情報と関係付けることは現状では困難である。満足度などの評価については、アスペクト・モデルの結果などを利用することによりある程度の支援はできると考えられるが、QFD 展開表の全体のバランスは人間に任せるしかないと考えられる。

また、知識記述の問題については、機能に関する知識と物理現象に関する知識の2点に分けて考察する。

まず、機能に関する知識であるが、4.3節でも述べたように、知識記述者の思ったことをどんなことでも書けることを狙ったために、知識記述の汎用性などが知識記述者の自由裁量にまかされている。このことは逆に、初めて知識を書こうと思った人に対して、どの様に書けば良いかがわからないという問題を引き起こす。これらの問題に対しては、記述の自由裁量部分を残す一方で、VE(Value Engineering)などで行なわれているような機能で使う言葉の整理などが必要であると考えられる。

また、物理現象の知識については、その知識記述の形式として、物理現象が成立する条件と物理現象に関する影響を、同じ枠組に記述しているために、類似した知識を複数記述する問題があった。また、物理現象についても知識の切り分け方の規範が存在しないために、複数の物理現象をひとまとめにしたような複雑で汎用性のない現象を記述する場合があった。この問題を解決するためには、汎用的な知識である物理現象に関する影響である物理法則に関する知識と物理現象が成立する条件に関する知識を分離し、知識ベースの構成を整理する必要がある。このような研究としては、[Ishii95, Sekiya95] の研究があり、知識ベースの汎用性を高めるためにも、これらの成果を取り込んでいく必要があると考えられる。



### 6.3.3 本システムの適用範囲に対する考察

最後に、本システムがどのような人を対象にどのような設計支援を行なえるかという点について考察する。ここで、まず本システムの特徴について考えると、次の3つに分類することができる。

#### 1. 設計知識の提供

本システムは、単に設計対象に関する知識を提供するだけでなく、設計対象に関する知識を設計の状況に応じて必要な部分を提供することができる。

#### 2. 複数の設計対象モデルの管理

本システムは複数の設計対象モデルに表現される概念間の関係を管理することにより、複数の設計対象モデルに表現される情報を一貫して管理するための枠組となる。

#### 3. 設計者が設計過程で生み出した情報を記録

設計者が設計解で実現しようと考えたことである設計者の意図を、機能表現および設計解選択の根拠の形で記述することができる。

次に、このシステムの特徴を踏まえた、本システムの適用範囲を考える。ここでは、まずシステムが設計支援をする対象となる設計者を新人設計者とベテラン設計者の2つに分類して考察を行なう。

まず、設計を行なう分野に関する知識が不足している新人設計者が本システムを利用する場合を想定する。このような設計者に対して、本システムは品質保証、設計教育という観点から次のような支援を行なえると考えられる。

#### 1. 設計知識の提供

- 設計者に不足している知識およびその知識を利用する設計対象モデルをシステムが提供することにより、知識不足から来るミスを防ぐことができる。

#### 2. 複数の設計対象モデルの管理

## 3. 設計者が設計過程で生み出した情報を記録

## ● ベテラン設計者が持つ設計知識の伝承

設計解選択の根拠や、概念間の因果関係が明確に記述されているので、既存の設計解の設計履歴を参照することにより、設計解の選択根拠や設計解の動作原理などを理解する手助けになる。

また、これに対し、設計を行なう分野に関する知識を豊富に持っているベテラン設計者が利用する場合を想定する。このような設計者に足して、本システムは最新技術情報の提供、複数の設計対象モデルの管理、技術者間のコミュニケーションの支援が行なえと考えられる。

## 1. 設計知識の提供

## ● 最新技術情報の提供

知識ベースをアップデートして最新の技術情報を取り込むことにより、設計に関連する最新の技術情報を提供することができる。

## 2. 複数の設計対象モデルの管理

## 3. 設計者が設計過程で生み出した情報を記録

## ● コミュニケーションの支援

設計解選択の根拠や、概念間の因果関係を明確に記述することにより、自分の考えを表現することができ、他の技術者とコミュニケーションをする際の手助けとなる。

## 第 7 章

### 結言



## 7.1 本論文の結論

本研究では設計過程において設計者が作り出す情報を、設計知識の操作という観点から考察を行うことにより、設計者が設計過程において行なう設計知識操作の定式化およびその結果として得られる情報を記述するための枠組の作成を目標としていた。

この目的に対し、まず設計知識の操作としては、9つの設計知識操作を定式化し、設計知識操作論に基づく設計過程モデルを提案した。さらに、設計過程で設計者が作り出す情報については、FBS モデラ + QFD ツールによる設計者の意志決定情報記録システムにより、その一部が記述できるようになり、これらの成果を踏まえた知識操作論に基づく CAD システムを提案した。

この CAD システムには、意志決定情報記録システムに加え、設計知識操作論に基づく設計過程管理システム、複数の設計対象モデルを統合するプラグブル・メタモデル機構が含まれている。また、この CAD システムでは、設計過程で分析した9つの設計知識操作が設計対象モデラの選択およびその操作により実現でき、さらに、また、このシステムを設計事例に適用することにより、システムにより記録された設計結果が設計変更の際に再利用可能であることが示された。また、このような利点とは逆に、本システムで記述できない設計者が作り出した情報や現状の知識ベースの問題点が明らかになった。また、これらの未解決の問題点に対しては解決指針を提案した。

## 7.2 設計知識操作論に基づく CAD システムの拡張性に関する考察

6.3節では、本研究で提案した設計知識操作論に基づく CAD システムに関する利点や問題点に関する考察を行なった。ここでは、この考察に基づいて本 CAD システムを拡張する方針および拡張をするために必要となる課題について議論する。

現在の本システムは、6.3節で述べたように、設計知識の提供とコミュニケーションの支援のみが行なえるだけである。そこで、本システムの拡張性の方針として次の3つを考える。

### 1. 設計者の発想の支援

- ポンチ絵などのビジュアル情報の活用
- 設計対象の問題領域に依存した情報の活用

### 2. 機能冗長 [Umeda92] や Suh[Suh90] の設計公理などの設計方針を取り込む枠組の構築

### 3. 設計知識獲得のための枠組の構築

#### 7.2.1 設計者の発想の支援

まず最初に、設計者の発想の支援という観点からの拡張を考える。実際の設計過程において設計者が新しい設計解を発想する過程において、設計者は多くのポンチ絵と呼ばれるラフスケッチを描くことが観察される。そこで、ポンチ絵などのビジュアル情報の活用について考察する。

このポンチ絵の役割は幾つかあると考えられるが、ここでは、設計者の発想という観点からの利用を考える。畑村 [Hatamura88] らは、設計の初期段階におけるポンチ絵は、設計者の頭の中にあるアイデアを絵にしたものであり、その行為によって自分の考えをまとめるために利用されると述べている。つまり、設計者はポンチ絵を描くことにより、アイデアの不正確な部分を明らかにし、その不正確な部分を解決していくことによりアイデアをまとめていると述べている。

次に、これらの操作と本研究で提案した設計知識操作の対応関係を考える。まず、アイデアを絵として書いていく操作は、設計仕様を実体の情報へと変換する操作であり、本研究における設計知識操作の機能分解・機能実現という操作に対応し、アイデアの不正確な部分を明らかにしていく過程は補完的な機能の導入といった操作に対応すると考えられる。そこで、このようなボンチ絵を扱う設計対象モデラを利用する際には、本CADシステムが利用しているFBSモデラと協調した機能に対する操作ができるようにする必要がある。

また、設計者の発想を支援するためには、問題領域指向の設計環境の優位性が指摘されている[Fischer92]。これに対し、本研究で提案したCADシステム単体では、特に問題領域を定めずに作られたシステムである。そこで、問題領域指向のシステムを取り込む必要があると考えられる。

このような問題領域指向のシステムを取り込む方法としては、本CADシステムのプラグブル・メタモデル機構が利用可能であると考えられる。つまり、問題領域指向のシステムにおいて使われる概念を問題領域に特有の概念と一般性のある概念に分けて考え、一般性のある概念を通して他の問題領域の概念と対応付けることが可能であるとする。また、このように問題領域から一般性のある部分を通して知識を整理するという操作は、設計知識を体系的に整理するために必要であり、これらの操作を円滑に進めるための方法論に対する考察が必要である。

### 7.2.2 様々な設計方針の取り込み

また、設計解の良さを判断する基準には様々なものが存在する。例えば、Suhの公理的設計方法論における良い設計解とは、設計に関する次の2つの公理を満たすものである。

独立公理 必要機能の独立性を保て

情報公理 情報量を最小化せよ

また、畑村らは[Hatamura88]の中で、設計解に対する幾つかの評価の方針を述べている。



ここで、設計者がこのような設計方針を認めた場合の、本CADシステムへの適用可能性について考える。まず、本システムが持つ情報について考察すると、本システムは設計対象に関する全ての属性および機能に関する情報を持っており、これらの評価をするための十分な情報を持っていると考えられる。そこで、これらの方針を評価する枠組を外部設計対象モデラとして組み込み、その情報をFBS+QFDシステムの情報と同様に設計解候補選択の根拠として記述可能にすることにより、これらの設計方針を取り込んでいくことが可能だと考えられる。

また、機能冗長[Umeda92](機械の機能を保全する方法の一つであり、機械の一つの部品が壊れた時に、別の部品が壊れた部品の機能を代替することにより全体の機能を維持する)などの新しい設計に対する考え方に対しても、設計方針の取り込みと同様に、これらの考え方を実現する枠組を外部設計対象モデラとして組み込むことにより利用可能になると考えられる。

### 7.2.3 設計知識獲得の枠組

本CADシステムでは、あらかじめ与えられた設計知識を用いた設計の支援を行なっている。しかし、実際には設計という作業を行なっていく過程において、新たに設計知識を生み出すという操作が行なわれている。特に、先ほど述べた発想支援などのシステムを統合すると、そのシステム上では多くの設計知識が生み出される場合があると考えられる。この設計知識の獲得を行なうためには、実際にシステムを使っている人が得た新しい設計知識を簡単にシステムに入力できる枠組および、新しく得られた知識を一般性のある形で整理するための枠組などが必要になると考えられる。

### 7.3 知識集約型工学への展望

現在では、技術者の高度の専門化のために、製造作業の知識は主に製造分野の技術者に、保全作業の知識は主に保全分野の技術者にのみ利用されており、ライフサイクル全体を通じた知識を設計者が利用することは困難である。この問題に対し、製品のライフサイクル全体を通じた知識を集約することにより、各々の知識が持っている力を引き出し、製品のライフサイクル全般に関わる作業の支援を行う知識集約型工学が提案されている [Tomiyama94]。また、この知識集約型工学の有効性は、本システムの例題として用いたコピー機の設計事例における複数の分野において利用される知識 (QFD による市場調査に関する知識、FBS モデルにおける機能設計のための知識、ブラガブル・メタモデル機構で利用される物理現象に関する知識) の統合的な利用の成果からも検証することができる。

つぎに、この知識集約型工学を実現するために必要な知識の量について考察する。大規模知識ベースの研究において、人間が新聞を読んだりするために用いる知識が  $10^6$  程度以上の規模 [Lenat89] になることが予想されている。ものを作るという行為は、新聞を読むというような理解のための思考に加えて何かを生み出すための思考を行なう行為であり、人間の行為の中で、もっとも知的な行為の一つであると考えられる。このことから、このものを作る行為に関する知識は  $10^6$  程度もしくはそれ以上の規模の知識が必要になると思われる。

既に、このものを作るための知識の中で、機能や物理現象に関する知識などの純粋に設計作業に関する部分についての知識を収集する研究は始められており [Tomiyama92a]、その結果として知識が体系化されていないと収集することさえ不可能であることが分かっている。また、やみくもに個別の製品の事例から事実に知識を多数収集しても、これらの知識から推論などにより有益な結論を導き出すことは困難である [Nagao88]。よって、知識集約型工学を実現するためには、製品のライフサイクルにかかわる様々な知識を体系化し、獲得することが必要である [Tomiyama92b]。

このように知識を体系的に収集する試みの一つの結果は領域工学である。領域工学とは問題を限定することにより、その問題に関連する知識を体系的に収集することができ、その結果を整理した学問である。しかし、この領域工学の問題点としては、扱



う問題が限定されているために、現在の人工物のような複雑なものを設計する問題の全てを扱うことができない事があげられる。

一方、この知識集約型工学を実現するためには、当然の事ながら製品のライフサイクル全般に関わる様々な分野で用いられる知識の収集が必要であるが、それだけでは充分ではない。5.3節でも述べたように、複数の分野で利用される知識を統合的に扱うこの枠組を実現するためには、これらの様々な知識を記述するために用いられている概念間の関係を明確にすることが必要である。

そこで、この知識集約型工学では、領域工学のように特定の分野の知識を体系化し、さらに様々な特定の分野で用いられる概念間の関係を整理し体系化することにより、これらの知識を横断的に利用できる枠組にすることが求められる。これに対し、本論文で提案した設計知識操作論に基づくCADシステムは、プラグブル・メタモデル機構を利用し、様々な背景理論間の関係を知識として記述することにより複数の設計対象モデルを統合的に利用できる。よって、このCADシステムは知識集約型工学のための枠組(Knowledge Intensive Engineering Framework)のプロトタイプとしても利用できると考えられる。

また、この知識集約型工学のための枠組は、現在の複雑な人工物を作成するために必要な様々な知識をツールの形で提供することにより、人工物のライフサイクルに関わる膨大な知識を利用可能にする枠組である。しかし、現実には、様々な技術者が持っている知識を全て計算機上に表現することが難しいために、このような枠組を全て計算機上に実現することは困難である。そこで、このようなツールに様々な技術者が対応すると考えると、この知識集約型工学のための枠組は一種のコミュニケーションのツールとなると考えられる。

この時、本論文で示したプロトタイプシステムの様に、各技術者の作り出す情報を同様に記録することにより、本枠組は様々な技術者の思考過程を統一的な枠組みで表現できることになる。また、モデリング手順が難しい有限要素解析モデルなどを作成する際には、そのモデリングの手順を記録しておくことにより、モデリング手順の再利用、専門家によるモデリングの妥当性の検証などが可能になると考えられる。また、このようなコミュニケーションによってのみ様々な分野の技術者が思い描いている概念間の関係が明確にされると考えるので、このようなコミュニケーションをサ



ポートしながら知識を獲得するような枠組の実現が求められる。

## 謝辞

本研究の指導教官であられる富山哲男助教授には、本研究を進めるにあたり、あたたかい御指導をたまわりました。ここに、深く感謝致します。

また、吉川弘之教授には、本研究を進めるにあたり、有難い御指導をいただきました。ここに深く感謝致します。

また、武田英明氏には、研究のやり方もわからない卒論生の頃から研究のやり方も含め、様々な助言を頂きました。また、設計過程モデルなどについての議論にもつきあって頂きました。ここに深く感謝致します。

また、桐山孝司氏には、メタモデル機構について様々な助言を頂き、梅田靖氏には、FBS モデラおよび設計における機能の役割などについて様々な助言を頂きました。またお二人には様々な議論にもつきあって頂きました。ここに深く感謝致します。

また、東京大学工学部の木村文彦教授、久保田見弘助教授、鈴木宏正助教授、堀浩一助教授には、本論文をまとめるにあたり貴重なコメントを頂きました。ここに深く感謝致します。

また、三田工業(株)の下村芳樹氏との機能や設計過程の議論は3章の設計知識操作論をまとめるために大変役立ちました。また、氏には6章で使うコピー機の設計事例を作成するためのデータを提供して頂きました。ここに深く感謝の意を表します。また、西野博文氏をはじめとする三田工業(株)の知的制御部の皆様には、5章に示したCADシステムを利用して頂き、6章で利用したコピー機の例題に関する知識の入力および、システムを使った意見などを頂きました。このように実際にシステムを利用したフィードバックが得られたことは、システムを作る上で非常に参考になりました。

た。ここに深く感謝の意を表します。

また、卒業論文の時から一緒に研究を続けてきた同輩の故石井理貴君との議論がなければ、本研究を進めることはできなかったと思います。彼の残してくれたものに感謝の意を表すると共に、彼の早過ぎる死に対して深い哀悼の意を捧げます。また、同輩の松本幹雄君および中村雅彦君との議論を通して、彼らの様々なものの見方に刺激されたことが、本論文に反映されていると思っています。お二人にここに深く感謝の意を表します。

また、同じグループの河合浩之氏、志田篤君、溝手裕二君、小川康雄君、山崎宏二君、大崎雅典君には設計過程の研究に関して様々な助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

また、辻口るみ秘書、野萱和子秘書、岡庭美樹秘書、片野富美子秘書、塩田恭子秘書、荒武由香秘書、高井正子秘書、碓山みち子技官には、研究室生活全般に渡って大変お世話になりました。本当に有難うございました。

この他、富山研究室の方々をはじめとする多くの方々のおかげで本論文を書き上げることができました。本当に有難うございました。



## 参考文献

- [Akao90] 赤尾洋二: 品質展開入門, 日科技連 (1990).
- [Cutkosky93] M. R. Cutkosky, R. S. Engelmores, R. E. Fikes, M. R. Genesereth, T. R. Gruber, W. S. Mark, J. M. Tenenbaum, and J. C. Weber: PACT: An Experiment in Integrating Concurrent Engineering Systems, *IEEE COMPUTER*, Vol. 26, No. 1, pp.28-37 (1993).
- [Drost96] K. Drost, H. Christiaans, and N. Cross(eds.): *Analysing Design Activity*, Wiley, Chichester, UK (1996) forthcoming.
- [Fischer92] G. Fischer, A. Girgensohn, K. Nakakoji, and D. Redmiles: Supporting Software Designers with Integrated, Domain-Oriented Design Environments, *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. 18, No. 6, pp.511-522 (1992).
- [Forbus84] K. Forbus: Qualitative Process Theory, *Artificial Intelligence*, Vol. 24, No. 3, pp.85-168 (1984).
- [Fujimoto94] 藤本隆宏, 武石彰: 自動車産業, 吉川弘之(編): メイド・イン ジャパン, pp. 103-131, ダイアモンド社 (1994).
- [Fujimoto95] 藤本隆宏: 自動車産業の新製品開発: 過去・現状・今後, *D&C Newsletter*, Vol. 52, pp.16-50 (1995).
- [Fukuda93] 福田収一: コンカレントエンジニアリング(計算力学と CAE シリーズ 8), 培風館 (1993).

- [Genesereth92] M. Genesereth: Knowledge Interchange Format, In J. Allen, R. Fikes, and E. Sandwall(eds.): *Proceedings of the Conference of the Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, Morgan Kaufmann Publishers (1992).
- [Grabowski95] H. Grabowski, R. Lossack, and C. Weis: A design process model based on design working spaces, In T. Tomiyama, M. Mäntylä, and S. Finger(eds.): *Knowledge Intensive CAD-1, Preprints of the first IFIP WG 5.2 Workshop on Knowledge Intensive CAD-1*, pp. 345-366, Chapman & Hall (1995).
- [Gruber92] T. R. Gruber: Ontolingua: A mechanism to support portable ontologies, Technical report KSL91-66, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, Stanford (1992).
- [Hatamura88] 畑村洋太郎: 実際の設計 機械設計の考え方と方法, 日刊工業新聞社 (1988).
- [Hattori92] 服部雅一, 田中利一, 末田直道: 事例ベース推論による機械設計, 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 4, pp.597-602 (1992).
- [Inoue92] 井上克巳: アブダクションの原理, 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 1, pp.48-59 (1992).
- [Ishii95] 石井理貴, 関谷貴之, 吉岡真治, 富山哲男: 知識集約型エンジニアリング環境の構築(第1報) - 基本構成 -, 1995年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 9-10 (1995).
- [Kiriyaama91] 桐山孝司, 富山哲男, 吉川弘之: 設計対象モデルの統合化のためのメタモデルの研究, 人工知能学会誌, Vol. 6, No. 3, pp.426-434 (1991).
- [Kiriyaama95] 桐山孝司, 富山哲男: 定性物理を用いた設計対象モデル統合化の研究, 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 4, pp.601-607 (1995).
- [Lenat89] D. Lenat and R. Guha: *Building Large Knowledge-Based Systems*, Addison-Wesley, Reading, MA (1989).

- [Lieberman86] H. Lieberman: Using Prototypical Objects to Implement Shared Behavior in Object Oriented Systems, In *Object Oriented Computing 1986*, pp. 189-198 (1986).
- [McCarthy80] J. McCarthy: Circumscription — A Form of Non-Monotonic Reasoning, *Artificial Intelligence*, Vol. 13, pp.27-39 (1980).
- [Nagao88] 長尾真: 知識と推論, 岩波書店 (1988).
- [Nagasawa88] 長澤勲: 設計エキスパートシステム, 上野晴樹, 小山照夫 (編): エキスパートシステム (知識工学講座 5), pp. 103-130, オーム社 (1988).
- [Nakatani92] 仲谷善雄, 築山誠, 福田豊生: 事例ベース推論によるエレベータの設計支援, 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 4, pp.587-591 (1992).
- [Oda95] 尾田十八, 劉江林: 多次元染色体を用いた GA による薄板補強リブの形態決定法, 1995 年度日本機械学会第 5 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, pp. 54-57 (1995).
- [Oono90] 大野正, 小野道照, 赤尾洋二: 品質展開法 (1), 日科技連 (1990).
- [Oono94] 大野正, 小野道照, 赤尾洋二: 品質展開法 (2), 日科技連 (1994).
- [Pahl88] G. Pahl and W. Beitz: *Engineering Design: Systematic Approach*, Springer-Verlag, Berlin (1988) (設計工学研究グループ訳, 『工学設計 - 体系的アプローチ -』, 培風館, 1995 年).
- [Pugh90] S. Pugh: *Total Design*, Addison-Wesley Publishing Company, Wokingham, England (1990).
- [Reich95] Y. Reich: A critical review of General Design Theory, *Research in Engineering Design*, Vol. 7, No. 1, pp.1-18 (1995).
- [Rodenacker70] W. Rodenacker: *Methodisches Konstruieren*, Springer, Berlin (1970).



- [Roth82] K. Roth: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (1982).
- [Sannou86] 産能大学総合研究所 VM センター: VE の基本, 産能大学出版部 (1986).
- [Scharfe84] M. Scharfe: *Electrophotography Principles and Optimization*, Research Studies Press, Letchworth, Herts. England (1984) (富士ゼロックス株式会社 総合研究所 訳, 『ゼログラフィーの原理と最適化』, コロナ社, 1987 年).
- [Seimitsu93] 精密工学会: 特集 プロダクトモデルと CAD データ交換国際標準 STEP, 精密工学会誌, Vol. 59, No. 12, (1993).
- [Sekiya95] 関谷貴之, 石井理貴, 富山哲男: 知識集約型エンジニアリング環境の構築 (第 2 報) - 知識ベースの構成の提案 -, 1995 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 11-12 (1995).
- [Shimomura93] 下村芳樹, 森幸広, 谷川貞夫, 梅田靖, 富山哲男: 機能量に基づく機能表現 (第一報) - 主観性確率を用いた統計的アプローチ -, 1993 年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 159-160 (1993).
- [Shimomura95] Y. Shimomura, H. Takeda, M. Yoshioka, Y. Umeda, and T. Tomiyama: Representation of design object based on the functional evolution process model, In *1995 Design Engineering Technical Conferences Vol. 2*, pp. 351-360, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), New York (1995).
- [Suematsu95] 末松千尋: CALS の世界, ダイアモンド社 (1995).
- [Suh90] N. Suh: *The Principles of Design*, Oxford University Press, New York, Oxford (1990) (畑村洋太郎監訳, 『設計の原理 - 創造的機械設計論 -』, 朝倉書店, 1992 年).

- [Suzuki91] 鈴木宏正: プロダクトモデリングとインテリジェントCAD, 吉川弘之, 富山哲男(編): インテリジェントCAD(下), pp. 7-30, 朝倉書店(1991).
- [Takeda91] 武田英明: 設計過程表現論, 博士論文, 東京大学工学部(1991).
- [Tanaka96] 田中敬昌: 自動車工業会におけるSTEPの未来, *D&C Newsletter*, Vol. 54, (1996) (印刷中).
- [Taura91] 田浦俊春: 機能空間への距離の導入による知的設計支援方法論, 博士論文, 東京大学工学部(1991).
- [Tomiya85a] 富山哲男: CAD構成論, 博士論文, 東京大学工学部(1985).
- [Tomiya85b] 富山哲男, 吉川弘之: 一般設計学の展開(第1報) — 概念空間のコンバクト化 —, 精密機械, Vol. 51, No. 4, pp.809-815 (1985).
- [Tomiya85c] 富山哲男, 吉川弘之: 設計過程モデル論 — 一般設計学における機械設計へのバインパの応用 —, 精密機械, Vol. 49, No. 4, pp.441-446 (1985).
- [Tomiya92a] T. Tomiyama, D. Xue, Y. Umeda, H. Takeda, T. Kiriya, and H. Yoshikawa: Systematizing Design Knowledge for Intelligent CAD Systems, In G. Olling and F. Kimura(eds.): *Human Aspects in Computer Integrated Manufacturing, IFIP Transactions B-3*, North-Holland, Amsterdam (1992).
- [Tomiya92b] 富山哲男, 吉岡真治, 吉川弘之: 設計過程知識の体系化(第1報) — 基本方針 —, 1992年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 59-60 (1992).
- [Tomiya94] T. Tomiyama: From general design theory to knowledge-intensive engineering, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing (AI EDAM)*, Vol. 8, No. 4, pp.319-333 (1994).

- [Tomiyama95] T. Tomiyama: A design process model that unifies general design theory and empirical findings, In *1995 Design Engineering Technical Conferences Vol. 2*, pp. 329-340, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), New York (1995).
- [Tone86] 刀根薫: ゲーム感覚意思決定法 - AHP 入門 -, 日科技連出版社 (1986).
- [Tsujii87] 辻井潤一: 知識の表現と利用, 昭晃堂 (1987).
- [Umeda92] 梅田靖: 自己修復機械設計方法論, 博士論文, 東京大学工学部 (1992).
- [VDI69] VDI: *VDI-Richtlinie 2225, Technisch-wirtschaftliches Konstruieren*, VDI-Verlag, Düsseldorf (1969).
- [Yamakawa94] H. Yamakawa: A unified multidisciplinary optimum design method using genetic algorithms, In *Advance in Design Automation-1994 DE-Vol. 69-2*, volume 2, pp. 329-334, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), New York (1994).
- [Yoshikawa79] 吉川弘之: 一般設計学序説 — 一般設計学のための公理的方法 —, 精密機械, Vol. 45, No. 8, pp.906-912 (1979).
- [Yoshikawa81a] 吉川弘之: 一般設計過程, 精密機械, Vol. 47, No. 4, pp.405-410 (1981).
- [Yoshikawa81b] 吉川弘之, 荒井栄司, 後藤敏彦: 実験設計学 — 一般設計学のための実験的方法 —, 精密機械, Vol. 47, No. 7, pp.46-51 (1981).
- [Yoshikawa93] 吉川弘之: テクノグローブ, 工業調査会 (1993).
- [Yoshioka91] 吉岡真治: 計算可能な設計過程モデルに基づく設計シミュレーションの研究, 東京大学工学部精密機械工学科卒業論文 (1991).



## 発表論文

### 投稿論文他 (査読付)

- [1] M. Yoshioka, M. Nakamura, T. Tomiyama, and H. Yoshikawa. A design process model with multiple design object models. In *Design Theory and Methodology (DTM '93)*, pp. 7-14, New York, 1993. The American Society of Mechanical Engineers (ASME).
- [2] 吉岡真治, 中村雅彦, 富山哲男, 吉川弘之. 複数の設計対象モデルを扱う設計過程モデル. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 61, No. 581, pp. 330-337, 1995.
- [3] M. Yoshioka, M. Oosaki, and T. Tomiyama. An application of quality function deployment to functional modeling in a knowledge intensive design environment. In T. Tomiyama, M. Mäntylä, and S. Finger, editors, *Knowledge Intensive CAD-1, Preprints of the first IFIP WG 5.2 Workshop on Knowledge Intensive CAD-1*, pp. 383-399. Chapman & Hall, 1995.
- [4] T. Tomiyama, Y. Umeda, M. Ishii, M. Yoshioka, and T. Kiriya. Knowledge systematization for a knowledge intensive engineering framework. In T. Tomiyama, M. Mäntylä, and S. Finger, editors, *Knowledge Intensive CAD-1, Preprints of the first IFIP WG 5.2 Workshop on Knowledge Intensive CAD-1*, pp. 55-80. Chapman & Hall, 1995.
- [5] H. Takeda, Y. Shimomura, M. Yoshioka, and T. Tomiyama. Analysis of design protocol by functional evolution process model. In Kees Drost, Herin Christiaans,

and Nigel Cross, editors, *Analysing Design Activity*. Wiley, Chichester, UK, 1996. forthcoming.

## 講演論文

- [1] 吉岡真治, 河合浩之, 武田英明, 富山哲男, 吉川弘之. 多重世界を用いた設計過程のシミュレーション. 1991 年度精密工学会春季大会講演論文集, pp. 29-30, 1993.
- [2] 溝手裕二, 吉岡真治, 富山哲男, 吉川弘之. 設計過程モデルにおける「提案」について. 1991 年度精密工学会春季大会講演論文集, pp. 111-112, 1991.
- [3] 吉岡真治, 溝手富山 哲男, 吉川弘之. 設計候補提案のための機能概念を用いた設計知識表現. 1992 年度人工知能学会全国大会講演論文集, pp. 415-418, 1992.
- [4] 富山哲男, 吉岡真治, 吉川弘之. 設計過程知識の体系化 (第 1 報) - 基本方針 -. 1992 年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 59-60, 1992.
- [5] 吉岡真治, 富山哲男, 吉川弘之. 設計過程知識の体系化 (第 2 報) - 設計知識の獲得 -. 1992 年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 61-62, 1992.
- [6] 吉岡真治, 小川康雄, 富山哲男, 吉川弘之. 設計過程知識の体系化 (第 3 報) - 獲得した設計知識の分類 -. 1993 年度精密工学会春季大会講演論文集, pp. 281-282, 1993.
- [7] 吉岡真治, 石井理貴, 梅田靖, 富山哲男. FBS ダイアグラムに基づく概念設計支援 (第 1 報) - 挙動の表現 -. 1993 年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 25-26, 1993.
- [8] 梅田靖, 吉岡真治, 富山哲男, 吉川弘之. FBS ダイアグラムに基づく概念設計支援手法の提案. 1993 年度精密工学会春季大会講演論文集, pp. 291-292, 1993.
- [9] 吉岡真治, 富山哲男, 吉川弘之. 複数の設計対象モデルを扱う設計過程モデル. 第 11 回設計シンポジウム講演論文集, pp. 32-39, 1993.
- [10] 吉岡真治, 石井理貴, 桐山孝司, 富山哲男. メタモデル機構による設計対象モデリング支援. 人工知能学会研究会資料 SIG-KBS-9303, pp. 77-84. 人工知能学会, 1993.

- [11] 吉岡真治, 石井理貴, 富山哲男, 桐山孝司. 設計知識表現のためのメタモデルの研究 (第12報) - プラガブル・メタモデルの研究 -. 1994年度精密工学会春季大会講演論文集, pp. 233-234, 1994.
- [12] 吉岡真治, 石井理貴, 富山哲男. 設計支援のための統合モデリング環境の研究 (第1報) - プラガブル・メタモデル機構の提案 -. 1994年度人工知能学会全国大会講演論文集, pp. 335-338, 1994.
- [13] 石井理貴, 吉岡真治, 富山哲男. 設計支援のための統合モデリング環境の研究 (第2報) - パワーの伝達に関するモデルの組み込み -. 1994年度人工知能学会全国大会講演論文集, pp. 339-342, 1994.
- [14] 梅田靖, 吉岡真治, 石井理貴, 富山哲男. FBSダイアグラムに基づく概念設計支援 (第2報) - FBSモデラーの設計者による評価 -. 1994年度精密工学会秋季大会講演論文集, 1994.
- [15] 吉岡真治, 石井理貴, 梅田靖, 富山哲男. FBSダイアグラムに基づく概念設計支援 (第3報) - 機能分解方法の分類 -. 1994年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 373-374, 1994.
- [16] 吉岡真治, 富山哲男. 設計過程知識の体系化 (第4報) - 設計過程における実体概念の活用 -. 1995年度精密工学会春季大会講演論文集, pp. 5-6, 1995.
- [17] 大崎雅典, 吉岡真治, 富山哲男. FBSダイアグラムに基づく概念設計支援 (第4報) - 品質機能展開法との接続 -. 1995年度精密工学会春季大会講演論文集, pp. 17-18, 1995.
- [18] 石井理貴, 関谷貴之, 吉岡真治, 富山哲男. 知識集約型エンジニアリング環境の構築 (第1報) - 基本構成 -. 1995年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 9-10, 1995.
- [19] 吉岡真治, 富山哲男. 複数の設計対象モデルを扱う設計過程モデル. 東京大学工学部総合試験所年報第52巻, pp. 177-182, 1993, 東京大学工学部総合試験所.



