

Title	設計におけるコンピュータ利用とシンセシス
Author(s)	赤木, 新介; 藤田, 喜久雄
Citation	日本機械学会論文集 C編. 1994, 60(579), p. 3591-3601
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/2974">https://hdl.handle.net/11094/2974</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

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

Osaka University



## 設計におけるコンピュータ利用とシンセシス\*

赤木新介\*<sup>1</sup>, 藤田喜久雄\*<sup>1</sup>

### Computer-Based Approaches for Engineering Design Synthesis

Shinsuke AKAGI and Kikuo FUJITA

**Key Words:** Design Engineering, Computer-Based Approach, Synthesis, Methodology, Modeling, Computer-Aided Design

#### 1. はじめに

設計におけるコンピュータの利用は、古くから継続して行われてきており、最近では、欠くことのできないツールとなっている<sup>(1)(2)</sup>。しかし、CADのDがDesignではなく、Drawingであるといわれたり、また、CAEなどの設計支援技術についても、設計に伴う試作や実験をコンピュータ上で仮想的に置換えることによって、設計の効率化をはかることを可能にしているものの、設計において本質的なシンセシスをコンピュータ上で自動化したりするものとはなっていない。

設計は、現象の解明を目的とする理学研究とは異なり、最終的には何らかの人工物の創造を目的とする工学研究において根源的なものであると考えられる<sup>(3)</sup>が、旧来より、設計研究が工学の中核的課題として認識されることは少なかったように思われる。これに対して、吉川の提唱<sup>(4)</sup>による「人工物工学<sup>(5)</sup>」に象徴されるように、近年、設計や生産にかかわる研究の必要性が広く認識されるようになってきており、シンセシスとしての設計に関する研究も多方面で広く活性化しつつあるように見受けられる<sup>(6)-(10)</sup>。

このような背景には、各種データベース技術、形状モデリング技術<sup>(11)(12)</sup>、数理計画法を用いた設計最適化<sup>(13)(14)</sup>、さらには、人工知能(AI)の成果をとり入れたインテリジェントCADなど<sup>(15)-(21)</sup>の研究成果により、設計の本質であるシンセシスの作業をコンピュータを用いて、自動化したり支援したりすることの可能性が見えてきたこと、一方では、各種製品の複雑化や多様化、さらには、製造物責任や環境問題との関連に

おいて設計に係わる要求が厳しくなっている<sup>(4)</sup>ことなども挙げられる。また、マイクロマシンなどの未知領域においても設計の重要性が指摘されている<sup>(22)</sup>。しかし、具体的な設計研究における内容については、広い一般性を指向すれば、実用性のない不毛なものとなりがちであり、実用性を重んじれば、ad hocで個別的なものとなるなど、統一的な理論、あるいは方法論が形成されるには至っていない状況にある<sup>(23)</sup>。

本稿では、以上の諸点を踏まえた上で、設計研究における視点を類別し、コンピュータの利用を前提とした場合におけるモデリングの問題を中心として、設計シンセシスに関する最近の研究展開について述べる。さらに、そのような研究を成果あるものとしていく上で、実問題を取上げることの意義についても述べる。

#### 2. 設計研究とコンピュータ利用

**2.1 設計研究における視点** 設計に関する研究そのものは、コンピュータの利用とは関係なく、古くから行われてきており、DixonとFinger<sup>(23)-(25)</sup>は、それらを含めた上で設計研究の視点を、特にどのようなモデルを基盤としているかの点から、以下のように分類している。

- Prescriptive…実際の設計をどのように行うべきかについての指針を系統的な分析から導出したものであり<sup>(26)-(29)</sup>、有効な指針を与えることができるなど、教育上のメリットも大きい。

- Cognitive…設計という作業なり行為を人間がどのように行っているかを解明することを目的としたものである。コンピュータによる設計システムも、このような成果に基づくべきであるとする旨もある。

- Computational/Computer-Based…設計という

\* 原稿受付 平成6年6月29日。

\*<sup>1</sup> 正員, 大阪大学工学部(〒565 吹田市山田丘2-1)。

行為をコンピュータを用いて行ったり、高度化することを目的としたものであり、詳細については次章以降で述べるが、形状モデリングやプロダクトモデル、設計最適化、…などはこの範疇に含まれる。

**2.2 コンピュータ利用のためのモデル** 上記の各視点のうち、主に本稿で取上げる Computational な立場においては、その際にどのような“モデル”が用いられるかが中心的課題となる。図1は、そのような内容に対して、設計におけるコンピュータ利用技術とモデルとの関連を示したものである。

前述のように、設計そのものの内容は十分に解明されるには至っていないが、設計は、与えられた設計要求に対して、そのような機能を有する対象物の像である設計解を導き出す過程であり、「概念設計」「基本設計」「詳細設計」「生産設計」というように分けられることが一般的である。

これらに対して、コンピュータによる設計を進めるためには、それらのそれぞれに対して、設計対象をどのように表現するかにかかわる“設計対象モデル”，そのような対象をどのようにして作り出すかにかかわる“設計プロセスモデル”，作り出された対象の可否や優劣を評価するための“設計評価モデル”の各モデルを形成することが必要である。さらに、設計対象モデルについては、対象そのものをどのように表現するかについての“実体モデル”と、そのような対象が物理的なシステムとしてどのような振舞いを出現するかについての“振舞いモデル”とに分けることができる。また、設計プロセスモデルについても、実際の設計問題は一般に複雑であり、多段階から構成されるプロセスを経ることにより、最終的な設計解が導出されることから、個々の設計段階において設計対象をどの

ように操作するかについての“設計操作モデル”と、全体の問題をどのように分割し、また、そのような個別の問題をどのように統合的に管理して設計問題を組織化するかに分ける“プロセス管理モデル”に分けることができる。

以下の各章では、以上の各モデルのそれぞれについて述べることにする。

### 3. 設計対象モデル

対象モデルは、設計で処理される対象の内容についてのモデルであり、上述のように“実体モデル”と“振舞いモデル”とに分けることができる。前者については、設計プロセスで行われるさまざまな操作が記述できることが必要であり、後者については、設計解の評価を行う上で必要となる内容を確認できることが必要となる。

**3.1 実体モデル** 設計対象の実体を表現する方法については、例えば、単なる設計変数の組も、そのようなモデルの最もシンプルなものであり、また、いわゆる CAD で用いられる形状モデル<sup>(11)</sup>もその典型的なものである。設計シンセシスにおけるさまざまな処理を行うためには、それらの個々の内容に応じた形式や抽象度のモデルを用いる必要があり、以下に、その代表的なものを列挙する。

(1) 構造モデル 設計対象システムとして見た場合、実体は要素から構成され、そのような要素が互いに関連をもちつつ、いろいろな属性を保持しているものとして把握することができる。このようなモデルは、設計対象の機能を抽出したり検査したりする上で有効である<sup>(30)</sup>。

(2) 形状モデル 設計対象を三次元空間上の“もの”として表現するためには、その形状を表現する必要があり、いわゆるワイヤフレーム・サーフェイス・ソリッドなどの各モデル<sup>(11)(12)</sup>が提案され、各種の CAD システムにおいて中核的な役割を果たしている。後述の“振舞いモデル”の点からは、可視化のためのグラフィクス処理などとの関連も深い。

また、このような形状モデルに対して、精度や公差などのさまざまな情報を付加したものがプロダクトモデルであり、STEP<sup>(31)</sup>などの標準化が進められつつあることも周知のとおりである。一方、設計操作における形状の取扱いを柔軟にするためには、形状生成にかかわる因果関係を管理することが重要であり、ATMS(Assumption-based Truth Maintenance System)<sup>(32)</sup>などの応用も試みられている<sup>(33)(34)</sup>。

(3) フィーチャモデル 上記の形状モデルは、

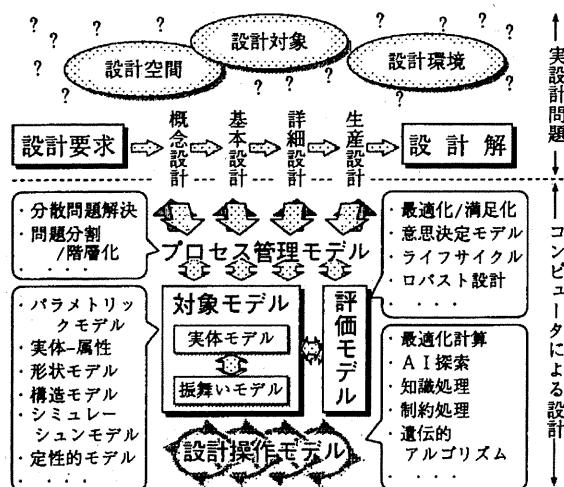


図1 設計におけるコンピュータ利用とモデル

幾何学的な情報の表現を主体としたものに過ぎず、形状パターンに含まれる意味を処理することはできない。そこで、例えば、形状については、穴や溝などの利用者に馴染みのある語彙(フィーチャ)を用いて定義・操作できるようにすることにより、操作性が向上するほか、加工性や組立性などについての情報をも表現できるようにする<sup>(35)</sup>。なお、このようなフィーチャについての具体的な操作(例えば、設計フィーチャと生産フィーチャとの相互変換)を行う場合には、グラフ構造が用いられる場合が多い<sup>(36)(37)</sup>。一方、広く設計問題をとらえる場合には、形状情報のみならず、機能との関連付けを行って、相互に連動した処理を実現することも必要である<sup>(38)</sup>。

なお、ICAD(日本名:IMPACT)やPro/Engineer, I-DEAS Master Seriesなどの商用システムは、形状などについてのフィーチャモデルをパラメトリックに操作できるようにして、モデルの操作性を向上させたものといえる<sup>(39)~(42)</sup>。

(4) 形態モデル 図1にも示したように、設計過程はいくつかの段階に分けることができ、それらのうち上流にある「概念設計」などの段階では、上述のような形状を具体的に定義することが困難であり、より抽象度の高い形態を表現して処理する必要がある。このような形態処理については、福田が信頼性設計に用いた符合化形態表現法<sup>(43)</sup>をはじめとして、最近、研究の展開されつつある領域である<sup>(44)</sup>。

**3・2 振舞いモデル** 3・1節の実体モデルの有する機能が評価できるようにするためには、その振舞いを処理できるモデルを融合する必要がある。そのような内容には、設計固有の機能構造に関するものや、設計対象物の実現するであろう物理現象に関するものなどがある。以下に、その類別と代表的なものを示す。

(1) 機能構造によるモデル 3・1節において“構造モデル”や“形態モデル”にも関連して述べたように、設計対象物のもつべき機能には、その構造に従って決定されるものも多い。したがって、そのような内容に関する振舞いを求めるためには、それらの実体モデルを基にした機能構造を表すモデルによって処理が行われる。このような例としては、製品の組立性に関するもの<sup>(45)</sup>や伝達機構の機能に関するもの<sup>(46)</sup>などが挙げられる。

(2) 物理シミュレーションモデル 設計対象における物理的な現象をコンピュータ上で解析するための方法は、計算力学における中心課題であり、さまざまな現象のシミュレーションが可能になっている。その内容については、本稿の対象とするところではない

ので割愛するが、有限要素法による構造解析は、前出の形状モデリングとの統合化により、CAEの中核をなすものである。

(3) 定性的な振舞いモデル 実体モデルにおける“形状モデル”と“形態モデル”との関係に対応するように、対象の振舞いについてのモデルにおいても、概念設計の過程などでは、具体的な物理シミュレーションではなく、より抽象度の高い実体モデルをもとにしてその振舞いを求める必要がある。例えば、定性推論<sup>(47)(48)</sup>は、そのような振舞いモデルとして用いられる。

富山らは、概念設計における設計対象の振舞いを取扱うために定性プロセス理論<sup>(49)</sup>を適用した上で、さまざまな現象領域における個別のモデルを統合的に関連付けるための枠組としてメタモデルを提案している<sup>(50)</sup>。また、そのようなモデルに基づいて、対象システムにおける機能の冗長性を検出することによる自己修復機械のための設計方法論を示している<sup>(51)</sup>。

一方、UlrichとSeeringは、設計対象を構成する機能要素のグラフ構造をもとに設計対象のschematicな構造と振舞いとの関係を処理する方法を示し、それをもとにしたシンセシスの方法論を示している<sup>(52)(53)</sup>。

このほか、機構の振舞いについては、Joskowiczらの計算運動学についての研究<sup>(54)(55)</sup>がある。また、油圧回路の概念設計についても因果関係による定性的な取扱いが行われている<sup>(56)~(58)</sup>。

#### 4. 設計操作モデル

設計における操作は、ある種の逆問題に対する問題解決過程であり、それぞれの問題の内容と種類に応じた方法が存在するものと考えられる。以下では、まず、設計問題の分類を設定した上で、操作モデルの具体的な内容について示すことにする。

**4・1 設計問題のタイプ** Fingerら<sup>(24)</sup>は、設計プロセスにおける操作のモデルを分類する目的で、設計問題のタイプを‘parametric’, ‘configuration’, ‘conceptual’の三つに分類しているが、その着眼点は、設計対象の構造がどの程度想定されているか、また、想定された構造において各属性の取得値がどのような範囲に想定されるかに置かれている。このような分類は、具体的な種々の設計問題に照らし合せて見ても、よく当てはまるものである<sup>(17)(18)</sup>。

**4・2 操作モデルのクラス** 逆問題に対する基本的なパラダイムは、問題に対する解を仮説的に生成しては、それを満足すべき条件などに照らして検査し、

必要に応じて仮定した解に修正を加えたり、新たに解を生成し直したりするという「生成・検査・修正」のパラダイムであり、設計問題に対する操作モデルもその枠組に従う。そのもとで、上述の問題のタイプや具体的な内容によっては、その繰返し過程をコンピュータ上で自動化することができたり、有効な指針を与えながら設計者を支援することもできるようになったりする。

(1) 数理計画法 設計問題のタイプが'parametric'なもの、すなわち、設計対象の構造が確定しており、決定すべき属性値の内容も数量的なものに限定されている場合で、さらに、設計条件などが明確な形式で数量化でき、解析的な性質が良好なものについては、数理計画法の適用は強力かつ効果的である<sup>(13)(14)(59)</sup>。しかし、一方では、数理計画法を適用するための数学的なモデルを導出することそのものもある種の設計問題であることから、そのような数学モデルを導出するための機能も重要となる。

数理計画法そのものについては、線形計画法などの古典的な方法に対して、シミュレーテッド・アニーリング(SA)<sup>(60)(61)</sup>や遺伝的アルゴリズム(GA)<sup>(62)~(64)</sup>などの新しい方法は、設計においても有効な方法である。これらの方法では、探索過程に確率的な要因を取入れたり、問題の潜在的な構造を利用した上で、設計解の集団による探索を行ったりすることにより、旧来の方法では取扱いの困難であった組合せを含んだ設計問題などにも適用することができる(ただし、個別の問題の性質に適合した適用を行う必要はある)。なお、SAについては、多段歯車減速機の歯数決定問題<sup>(65)</sup>のほか、さまざまな配置問題<sup>(66)~(69)</sup>などへの適用がある。また、GAについては、概念設計<sup>(70)(71)</sup>、板取り問題<sup>(72)</sup>、構造設計<sup>(73)</sup>などへの適用がある。

(2) ネットワーク処理 上記の数理計画法を設計問題に適用する際の問題点の一つとして、“堅さ”、つまり、モデルとその評価における硬直性がある。これを避ける方法としては、例えば、MacCallumは、船舶の基本設計の例を取上げて、設計変数間の依存関係をネットワークとしてとらえ、それらをコンピュータ上で操作できるようにする一方、設計項目間のトレードオフや影響感度などを評価できるようにすることにより、設計者に対する柔軟な支援が可能であるとの考え方を示している<sup>(74)</sup>。

このような考え方はオブジェクト指向との親和性がよいことから、著者らは、各種の設計項目、設計変数や設計実体の属性などの要素をオブジェクトとして表現した上で、それらの依存関係を自動的に操作したり、

影響感度を評価したりしながら、インタラクティブに設計の行えるシステムを構築している<sup>(75)(76)(38)(18)</sup>。なお、このようなモデルは、船舶の基本設計のみならず、航空機的设计などにも適用可能である<sup>(77)</sup>。

(3) 制約処理 数理計画法の堅さに対するもう一つの対応として制約指向を挙げることができる。制約指向は、複数の変数間の関係を制約条件として宣言的に記述するとともに、ある変数を指定したときに関連する他の変数を制約条件に従って決定しようとするものであり、その特徴とするところは、与えられた制約条件に対して決定処理が双方向的に行われることや、関係の受動的なチェックも行えるという点にある<sup>(78)</sup>。そのような制約処理のパラダイムは、設計における処理内容とも馴染みやすく<sup>(79)</sup>、'parametric'な問題に対しては、広く適用することができ、インタラクティブで柔軟な処理を実現することができる<sup>(80)~(82)</sup>。一方では、扱える制約の種類に制限があることや、比較的小規模の問題に適用が限られるなどの問題点もある。

なお、設計にかかわる諸条件をその処理アルゴリズムから分離して記述することは、'parametric'な問題に限らず有効であり、例えば、プラント配置設計問題での適用例<sup>(83)~(86)</sup>がある。

(4) 知識の利用 以上の数理計画法や制約処理による操作は、問題の表現に対しては汎用的な操作を実現しようとするものであったが、操作すべき問題の内容に依存した経験的な知識が存在する場合には、それによって直接的に設計を行うこともでき、知識の内容をフレームやルールなどの方法により記述して、エキスパートシステムを構成することもできる。しかし、そのような試みも一時は、数多くなされたが、設計に内在する処理・操作の内容は多様であり、エキスパートシステムにおける単一的な枠組でそれらのすべてを取扱うことは困難であるため、最近では、あまり見られなくなっており、むしろ、知識そのものを個別的に操作モデルの中に埋込むことにより利用するようになってきている。このような背景には、知識システムにおけるはん化タスクの立場から、Chandrasekaranらも指摘しているように<sup>(87)</sup>、知識の表現・利用方法においては、個別の問題の内容や性質への依存が本質的であり、個別の問題内容を十分に反映した知識の利用が必要であることが考えられる。

(5) 探索などのAI手法 'conceptual'な、あるいは、'configuration'な設計問題は、基本的にAIでいうところの探索処理を必要とする。そのような探索において重要な点は、探索の効率や論理的な合理性

などもさることながら、前述の設計対象モデルにおける実体や振舞いの中からコンピュータで処理可能な探索としての性質をどのように切出すかにある。その代表的なものを以下に示す。

UlrichとSeeringは、締結要素の創成を対象として、既存の締結要素をそれぞれに機能要素に分解しておいた上で、与えられる設計要求に対して、機能要素を組合せることにより、新しい締結要素を自動的に合成する試みを行っている<sup>(86)</sup>。さらに、3・2節で述べたschematicな表現を基に、そのような考え方を動的なシステムの合成へと展開している<sup>(52)(53)</sup>。実際に合成が可能なシステムはごく単純なものに過ぎないが、方法論としては面白いものである。このような考え方は、システムとしての構造が明確な設計対象については、同様に適用できる可能性があり、油圧回路の合成についても類似した考え方で対応することができる<sup>(58)</sup>。

また、エネルギープラントなどの機器構成設計なども、探索問題としての性質が強く、プラントそのものの構成を定めながら、一方では、カタログデータの中から個々の機器を検索することが必要である。著者らは、このような問題に対して、設計知識を基に機器の候補やプラント構成を絞り込みつつ、機器の検索を行う一方、機器の台数や運転状態におけるオン・オフ条件などの数理計画法により絞り込むことによって、知的検索形のシステムを構築している<sup>(89)(90)</sup>。

村上らは、機構設計に対して、ロボットの動作計画などで用いられるコンフィギュレーションスペース<sup>(91)</sup>の考え方を導入することにより、機構動作における運動パターンを操作できるようにし、既存の機構原理をデータベースに蓄えておいた上で、要求仕様とのマッチング操作により、適切な機構を検索することのできるシステムを構築している<sup>(92)</sup>。

このほか、設計においては、一般に、過去の設計事例が多数存在し、設計実務においても、そのような設計例を新たな問題に対して適合させたり修正したりすることによって設計を行う場合が多いため、事例ベース推論<sup>(93)</sup>の設計問題への適用にも期待がもたれており<sup>(94)</sup>、モータ設計<sup>(95)</sup>や建築設計<sup>(96)</sup>での適用が試みられている。また、機械学習などについても設計問題への応用が期待されている<sup>(97)</sup>。

(6) 創発的手法 以上の各方法のほか、遺伝的アルゴリズム(GA)<sup>(62)~(64)</sup>や人工生命(A-Life)<sup>(98)(99)</sup>などに関連して、「創発的(emergent)」な計算手法が注目されつつあり、概念設計を中心として、設計での展開にも期待が持たれるが、3章で述べたような設計対象モデルをそれらの計算方法のなかにどのようにし

て埋込むかが、問題になるように思われる。

一方、構造設計における位相最適化<sup>(100)(101)</sup>は、最適化手法の応用ではあるものの、形態に関してある種の“創発”を実現しているとみることできる。

## 5. 設計プロセス管理モデル

設計過程で取扱われる情報については、その量も多く、内容も複雑であることから、対象とするシステムがサブシステムや要素なりに分割できることに基づいて、分散された状況のもとで設計が行われる場合が多い。これは、多数の設計者から構成される組織によって実際に設計を行う場合に限ったことではなく、コンピュータを用いて設計支援を行う場合や設計自動化を行う場合においても、具体的な設計問題を扱おうとした時に、本質的に避けることのできない問題となる。本稿では、このような分散状況の構成と管理にかかわるモデルを“プロセス管理モデル”と呼んでいるが、そのような内容をとらえた研究についても徐々に行われつつあり、以下に、いくつかの具体例を示すことにする。

Whitneyらは、設計作業、特に設計過程で行われる意思決定の依存関係に着目し、マトリックス表現を基に、設計作業を協調的かつ同時的に行う上での順序の構成方法を示している<sup>(102)</sup>。さらに、そのような順序の設計そのものに与える影響についての評価方法を示している<sup>(103)</sup>。

Sriramらは、分散環境下で協調的に製品の設計を行うためには、設計者間の情報交換や調整作業をコンピュータ上に支援できるような、さまざまな種類とレベルの情報を内包した統合的な設計支援環境が必要であるとして、建築設計における建築設計者と構造設計者との協調的な設計を例に引きながら、SHAREDという情報モデルを提案している<sup>(104)</sup>。また、具体的なシステムも、オブジェクト指向データベースを核として、形状モデリングシステムや知識システムを統合化することにより構築している。

以上の二例は、いずれも、コンカレントエンジニアリングとの関連において、設計者を中心とした支援環境下での設計を対象としたものであったが、設計の自動化を行おうとする場合においても、同様の分散化を考慮する必要が生じる。例えば、設計最適化においては、より具体的な実際の問題を扱おうとした場合には、数学的なモデルに含まれる設計変数や制約条件式などの数が多くなり、直ちに数理計画法を適用しても設計解を求めることが容易ではなくなる。そのため、問題の構造に従って分割された部分問題の最適化と、感度

解析に基づいた全体問題の最適化を統合的に行うことによって、より規模の大きい問題を解こうとする Decomposition についての研究が活性化しつつある<sup>(105)~(107)</sup>。

## 6. 設計評価モデルとその内容の多様化

評価は設計問題において本質的な因子の一つであり、代替案のすべてを評価することは現実には不可能であることや、設計対象のさまざまな振舞いに対する総合的な評価そのものもある種の予測を含んでいることなどの点で、設計問題は複数の項目に対する満足化形の問題であるとされる<sup>(3)</sup>。このため、多様な項目をどのようにバランスさせて評価するか、また、どこまでの内容を評価に含めるかなども重要であり、さらに、それらは設計におけるモデリングの枠組にも影響を及ぼす。これらの問題は、5章で述べたプロセス管理モデルの場合と同様、設計問題が実際的になればなるほど、深刻度を増すものと考えられるが、現在の設計研究がおもに対象としている程度の問題サイズにおいては、それほど現実味を帯びていないように思われる。

**6・1 評価モデル** 上述のような多目的満足化の性質に対して、例えば、数理計画法による設計最適化が“堅過ぎる”ことは、4・2節でも述べたとおりである。これに対して、パレート最適化やゴールプログラミングなどの様々な方法も古くから提案されており<sup>(108)</sup>、例えば、船舶設計への適用も試みられている<sup>(109)</sup>が、それでもなお、いわゆる“堅さ”が残っているように思われる。このような堅さに対して、しなやかな評価を実現するための方法として、ファジィ推論や定性的なモデルとの統合化<sup>(110)</sup>、ニューラルネットワークの適用<sup>(111)</sup>なども試みられている。

**6・2 評価内容の多様化** 設計における評価の内容は、対象の振舞いにおける性能値や対象そのもののコストにかかわる要因がおもなものであるが、最近では、さまざまな設計環境の変化に伴って、そのような内容も多様化してきている。例えば、Design for X (X=Manufacturing, Maintenance, Assembly, Disassembly, Recycling など)やコンカレントエンジニアリング<sup>(112)</sup>、田口の方法<sup>(113)</sup>に基づいた製造などに起因して生じるばらつきの製品性能への影響を最小化しようとするロバスト設計<sup>(114)(115)</sup>などはその典型的なものである。このような内容をも含めた設計を行うためには、個別の内容を評価するための対象モデルをそれぞれに導入するとともに、全体としての評価をどのように行うかを考える必要も生じてくる。

なお、設計最適化における多領域最適化(Multi-

Disciplinary Optimization)<sup>(116)</sup>も、このような評価内容の多様化に対応して、複数の領域に渡る設計項目を同時に取扱おうとするものである。

## 7. 設計モデルの融合化方法

本章では、以上の各 Computational なモデルが具体的な設計支援システムにおいてどのように融合化されるかについての典型的なものを示すことにする。

**7・1 インタラクティブ処理** 設計問題においては、6章でも述べた設計解の評価の問題をはじめとして、設計者に依存せざるを得ない部分も多いことから、コンピュータ化が可能な部分については自動化を進める一方、必要不可欠な箇所では設計者が介在できるようなインタラクティブな設計支援システムを構築することが重要である<sup>(74)</sup>。4章で述べたネットワークモデルや制約処理は、そのようなものの典型であるが、実際に設計支援を行うためには、さまざまな Computational な方法をベースとして、同様の考え方を導入した柔軟なシステムを構築する<sup>(75)(76)</sup>ことが必須であると思われる。

**7・2 モデルインタフェース機能** コンピュータによる設計ではさまざまなモデルが用いられるが、それらを互いに交換することにより、効果的な設計が可能になる場合もある。

(1) 設計におけるライブラリ機能 歯車や軸などの機械要素やアクチュエータなどから構成される機械の設計を行う場合には、用いられる要素部品が標準化されていることもあって、設計対象の構成が決定されると、それらの属性値を具体的に定めるためのパラメトリック設計のためのモデルをあらかじめ蓄えておいたライブラリを用いて自動的に生成することができる。

そのようなシステムの例としては、Ward らによる Mechanical Design 'Compiler' があり、モータやポンプ、バルブなどからなる機械の schematic な表現から、設計を行うことができる<sup>(117)(118)</sup>。また、著者らは、配管系の設計問題<sup>(119)(120)</sup>や歯車伝達装置の設計問題<sup>(121)</sup>を対象にして、同様のライブラリ機能を用いた支援システムを構築している。

(2) 最適設計の自動化 前述のように、数理計画法は設計問題の数学的な定式化が与えられたならば、そのもとの強力なツールとなり得るが、一般にそのような数学的なモデルを導出することは容易ではない。したがって、上記のライブラリ機能と同様に、最適化すべき対象システムの構成を基に、計算量の面でも効率的で合理的な数学モデルを自動的に生成して、最

適化計算の過程を自動化することが必要である。このような効率的なモデルを生成する方法には、対象領域における経験則や記号処理、数式処理を用いる<sup>(122)(123)</sup>ことのほか、数学モデルそのものの性質を monotonicity analysis<sup>(124)</sup>などによって分析することにより、効率化をはかろうとする<sup>(125)</sup>ものもある。

以上のほか、形状モデルと有限要素法などの解析モデルとのインタフェース<sup>(126)</sup>なども、設計においては重要な課題である。

**7.3 ハイブリッド化・統合化** 設計は多様な内容を含んだ複数のステップから構成される詳細化の過程であり、各局面で用いられるさまざまなモデルを組み合わせることにより、より広範な設計を処理することができるようになる。

(1) 垂直ハイブリッド化 設計が複数のステップから構成されるという面からは、それぞれのステップにおけるモデルを段階的にハイブリッド化する必要がある。

例えば、プラントの配置設計では、機器構成設計の結果より与えられるプラント構成を基にして、配置に求められる条件を定めた上で、配置すべき機器の間の位相的な位置関係を定めた後、最終的な配置位置寸法を定める、という具合に設計を段階的にとらえることが有効である。著者らは、このような設計過程に対して、配置にかかわる条件を制約として取扱い、配置空間を格子を用いて表現するものとした上で、まず、プロダクションシステムにより機器構成から制約を導出し、次に、制約指向探索を用いて概略配置を定め、最後に数理計画法を適用して具体的な配置を決定する、ハイブリッド化手法を開発しており<sup>(83)~(86)</sup>、設計を段階的に具体化していくことができるようになっていく。

(2) 水平統合化 設計が多様な内容を含んでいるという面からは、それぞれの内容に対するモデルを相互に関連付けながら、統合化を行う必要がある。

例えば、機械製品などの設計では、製品のパッケージ内に各要素を配置する一方、それらの中で配管や配線の処理を行う必要がある。その際には、機器や管などの間において干渉などを生じないことはもちろんのこと、製品の組立性やメンテナンス性などの条件を同時かつ総合的に考慮する必要がある。著者らは、このような問題に対して、配置処理のための二次元モデル、配管処理のためのスケルトンモデル、種々の評価処理のためのソリッドモデルなどを相互に関連付け、それらを個々の処理内容に応じて切替えながら、設計を進めていく試みを行っており<sup>(127)</sup>、多様な内容を統

合的に扱うことができるようになっている。

## 8. 設計シンセシス研究の新展開に向けて

本章では、以上の各内容を踏まえた上で、今後の設計研究についての展望を述べる。

**8.1 シンセシス研究のためのインフラストラクチャ** 前述のように、設計シンセシスに関する研究が進展を始めつつある背景には多方面でのコンピュータおよびその利用技術の発展があり、それらによってはじめて、さまざまな試みが可能になってきたように思える。具体的には、EWSの高性能低価格化や、種々のモデリング技術やシミュレーション技術が一般化したことが大きく、例えば、形状モデルについては、ソリッドモデリングカーネルなるものが商品化され<sup>(128)</sup>、それらをツールとして用いることにより、形状処理を組込んだアプリケーションを開発することもできるようになりつつある。一方では、超並列計算、大規模データベースなどを中心としてコンピュータ利用にかかわるパラダイムも大きく変貌する可能性も見えてきており<sup>(129)(130)</sup>、設計における展開にも興味のもたれるところである。

**8.2 実際の設計問題と設計研究** 以下では、私見として、設計研究において実際の問題を取上げることの重要性を述べる。

本稿で述べてきたさまざまなモデルは、個々にコンピュータで処理しやすい局面を抽出したものであり、それが故に、何らかの有用な内容を含んだものとなっている。しかし、実際の設計は、図2のデザインパイラル<sup>(131)(28)</sup>にも示されるように、非常に多様な内容を含んだ、繰返しを伴う過程であり、扱われる情報は複雑で極めて量の多いものとなっている。このため、適切な分割を必要とする一方、そのような分割の帰結として統合を行うことも必要となる。このような分割と統合は、設計において本質的なものであり、研究対象として取り扱いの容易な単純な問題を想定することは、そのような設計本来の本質にかかわる問題を見逃してしまう可能性を秘めているように思われる。とはいうものの、実際に研究を行うためには、何らかの抽象化は不可欠であり、単純化や抽象化を指向しつつ、常に具体的な実問題なり、事例なりとの照らし合せを行うことが重要であり、実際的な問題を扱うことと、単純化された問題に対する研究とが相互にフィードバックをもたらすことが望ましいように思われる。

かつてのAI研究においては、その研究対象のわい小さから‘toy problem’なる批判もあり、現在では“冬の時代”などともいわれているが、古くからの研究成





- (26) 吉川, 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, 45-8(1979), 906.
- (27) Pahl, G. and Beitz, W., *Engineering Design—a systematic approach*, (1988), Springer-Verlag.
- (28) 赤木, エンジニアリングシステム設計工学, (1982), 共立出版.
- (29) Suh, N. P., *The Principles of Design*, (1990), Oxford University Press (邦訳: 畑村(監訳), 設計の原理-創造的機械設計論, (1992), 朝倉書店).
- (30) 吉川, 機械のトポロジ, 精密機械, 38-12(1972), 30.
- (31) 木村・ほか6名, 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, 59-12(1993), 1917.
- (32) de Kleer, J., An Assumption-based TMS, *Artificial Intelligence*, 28(1986), 127.
- (33) Inui, M. and Kimura, F., Using a truth-maintenance system to assist product-model construction for design process planning, *Computer-Aided Design*, 25-1(1993), 59.
- (34) 清水・沼尾, 幾何制約に基づく3次元形状の設計, 人工知能学会誌, 9-1(1994), 129.
- (35) Drake, S. and Sela, S., A Foundation for Features, *Mechanical Engineering*, (1989-Jan), 66, ASME.
- (36) Finger, S. and Safier, S. A., Representing and Recognizing Features in Mechanical Design, *Design Theory and Methodology -DTM'90-*, DE-27(1990), 19, ASME.
- (37) Rosen, D. W., Efficient Converters for Feature-Based Mechanical Component Representations. *Advances in Design Automation -1993-*, DE-65-2(1993), 253, ASME.
- (38) 藤田・赤木, 機能設計における設計対象のモデリングと形状モデルとの融合, 機論, 57-535, C(1991), 1058.
- (39) Deitz, D., The Power of Parametrics, *Mechanical Engineering*, (1989-Jan), 58, ASME.
- (40) I-DEAS Master Series, *SDRC working ideas*, (1993), SDRC.
- (41) 酒井・ほか4名, プロダクトモデルに基づく鉄道台車CADシステムの開発, 精密工学会誌, 58-6(1992), 967.
- (42) 前田・中山・古館, 家電製品デザインにおけるフィーチャーベースパラメトリックCADの応用, 第2回設計工学・システム部門講演会 講演論文集, No. 920-103(1992), 154.
- (43) 福田, 信頼性設計エキスパートシステム-形態の処理とその応用, (1990), 丸善.
- (44) 日本機械学会(編), 形態とデザイン, (1993), 培風館.
- (45) 山田・安部・辻, 電気ドリルの分解・組立てコンサルタン・システム, 人工知能学会誌, 1-1(1986), 116.
- (46) 村上・中島, フィーチャー・ディスクリプションに基づく機械診断に関する研究(機械の構造と機能の関係規則を用いた設計診断方法), 第5回設計自動化学講演会講演論文集, (1987), 37.
- (47) Bobrow, D. G. (ed.), Special Volume of Qualitative Reasoning about Physical Systems, *Artificial Intelligence*, 24 (1984), 1.
- (48) 西田, 定性推論の諸相, (1993), 朝倉書店.
- (49) Forbus, K., Qualitative Process Theory, *Artificial Intelligence*, 24(1984), 85.
- (50) Tomiyama, T., Yoshikawa, H. and Kiriyama, T., Conceptual Design of Mechanisms: A Qualitative Physics Approach, Kusiak, A. (ed.), *Concurrent Engineering: Automation, Tools, and Techniques*, (1993), 131, John Wiley & Sons.
- (51) 梅田・富山・吉川, 機能冗長に基づく自己修復機械設計方法論, 第10回設計シンポジウム講演論文集, (1992), 155.
- (52) Ulrich, K. and Seering, W., Function Sharing in Mechanical Design, *Design Studies*, 11-4(1990), 223.
- (53) Ulrich, K. and Seering, W., Synthesis of Schematic Description in Mechanical Design, *Research in Engineering Design*, 1-1(1989), 3.
- (54) Joskowicz, L. and Addanki, S., From Kinematics to Shape: An Approach to Innovative Design, *Proceedings of the Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88)*, (1988), 347.
- (55) Joskowicz, L. and Sacks, E. P., Computational kinematics, *Artificial Intelligence*, 51(1991), 381.
- (56) 中島・馬場, 油圧回路設計支援エキスパートシステムOHCS, コンピュータロー, 25, (1989), 106, コロナ社.
- (57) 松田・新名・溝口, 設計例の理解に基づく知識獲得インタビュシステム, 人工知能学会誌, 7-6(1992), 1038.
- (58) 藤田・赤木・上平, 記号ベース動作シミュレーションを用いた油圧回路の合成手法に関する研究, 第11回設計シンポジウム講演論文集, (1993), 154.
- (59) 中山(編), 最適化技法の応用特集号, システム/制御/情報, 37-4(1993), 191.
- (60) van Laarhoven, P. J. M. and Aarts, E. H. L., *Simulated Annealing: Theory and Applications*, (1987), D. Reidel Publishing.
- (61) Rosen・中野, シミュレーテッドアールンギン基礎と最新技術一, 人工知能学会誌, 9-3(1994), 365.
- (62) Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, (1989), Addison-Wesley.
- (63) 寺野(編), 特集: 遺伝的アルゴリズム, 計測と制御, 32-1(1993), 1.
- (64) 亀井(編), 遺伝アルゴリズム特集号, システム/制御/情報, 37-8(1993), 445.
- (65) Jain, P. and Agogino, A. M., Optimal design of mechanisms using simulated annealing: theory and applications, *Advances in Design Automation - 1988 -*, DE-14(1988), 233, ASME.
- (66) Jain, P., Fenyves, P. and Richter, R., Optimal blank nesting using simulated annealing, *Advances in Design Automation - 1990 -*, DE-23-2(1990), 109, ASME.
- (67) 杉浦・張・中島, アニーリング法の3次元レイアウト設計への適用-潜水艇3次元レイアウト設計への適用, 機論, 58-546, C(1992), 352.
- (68) Szykman, S. and Cagan, J., Automated generation of optimally directed three dimensional component layouts, *Advances in Design Automation - 1993 -*, DE-65-1(1993), 527, ASME.
- (69) 藤田・赤木・島崎, 矩形双対グラフを用いた最適区画配置手法に関する研究, 機論, 60-579, C(1994), 3662.
- (70) 窪田・田浦・吉川, 機能空間の距離に着目した概念設計モデル(GAによる内部機能構造の操作), 第2回設計工学・システム部門講演会講演論文集, No. 920-103(1992), 74.
- (71) 勝山・山川, 遺伝的アルゴリズムによる感性を考慮した設計の遺伝と進化に関する研究, 第3回設計工学・システム部門講演会講演論文集, No. 930-27(1993), 43.
- (72) 藤田・赤木・廣川, 遺伝的アルゴリズムと極小値探索アルゴリズムとのハイブリッド化による板取り問題の一解法, 機論, 59-564, C(1993), 2576.
- (73) 尾田・ほか2名, 遺伝的アルゴリズムを用いた適応トラス構造物の設計法, 第5回計算力学講演会講演論文集, No. 920-92(1992), 293.
- (74) MacCallum, K. J., Understanding Relations in Marine System Design, *Proceedings of MSDC 82*, (1982), 1.
- (75) 赤木・藤田, オブジェクト指向に基づく設計エキスパートシステムの研究, 機論, 54-500, C(1988), 1017.
- (76) 赤木・藤田, ネットワークモデルによる設計過程の支援-エキスパートCADシステムにおける設計処理の機能一, 機論, 54-505, C(1988), 2300.

- (77) 赤木・藤田・原島, 航空機の基本設計に対する統合化支援システムの研究, 日本航空宇宙学会誌, 41-468(1993), 27.
- (78) 淵(監修), 制約論理プログラミング, (1989), 共立出版.
- (79) Serrano, D. and Gossard, D., Constraint management in MCAE, Gero, J. S. (ed.), *Artificial Intelligence in Engineering: Design*, (1988), 217, Computational Mechanics Publications.
- (80) 長澤・古川・荒巻, 論理プログラミングを基礎とした設計システム記述言語ADL, 情報処理学会論文誌, 25-4(1984), 606.
- (81) Lakmazaheri, S. and Rasdorf, W. J., Constraint Logic Programming for the Analysis and Partial Synthesis of Truss Structures, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 3-3(1989), 157.
- (82) 車・横山・岡部, 機械系CADのための設計変数・制約ネットワークにおける制約充足の一方式, 機論, 59-568, C(1993), 394.
- (83) 赤木・藤田, 制約指向に基づく基本配置設計支援システムの研究(第1報, 制約指向による基本配置アルゴリズム), 機論, 56-528, C(1990), 2286.
- (84) 赤木・藤田・仲戸川・井上, 制約指向に基づく基本配置設計支援システムの研究(第2報, オブジェクト指向によるシステム構築), 機論, 56-528, C(1990), 2294.
- (85) 藤田・ほか4名, 制約指向探索と最適化法とのハイブリッド化によるプラントの配置設計手法, 機論, 58-547, C(1992), 967.
- (86) 藤田・赤木・土居, プラント配置設計における配置制約の自動生成, 機論, 58-555, C(1992), 3449.
- (87) Brown, D. C. and Chandrasekaran, B., *Design Problem Solving - Knowledge Structures and Control Strategies*, (1989), Morgan Kaufmann.
- (88) Ulrich, K. and Seering, W., Conceptual Design as Novel Combination of Existing Device Features, *Advances in Design Automation - 1987*, DE-10-1(1987), 295.
- (89) 赤木・藤田・窪西, プラント設計におけるエキスパートCADシステムの研究, 機論, 54-497, C(1988), 228.
- (90) 藤田・赤木, AI手法によるエネルギープラントの設計法—船用プラントおよび陸用コー・ジェネレーションプラント設計への適用—, 日本船用機関学会誌, 27-5(1992), 390.
- (91) Lozano-Pérez, T., Spatial Planning: A Configuration Space Approach, *IEEE Trans. Computers*, C-32-2(1983), 108.
- (92) 村上・木村・中島, コンフィグレーション空間を用いた機構原理検索システム, 第11回設計シンポジウム講演論文集, (1993), 25.
- (93) 戸沢(編), 特集: 事例ベース推論, 人工知能学会誌, 7-4(1992), 558.
- (94) Pu, P. (ed.), Special Issue: Cased based reasoning in design, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 7-2(1993), 79.
- (95) 服部・田中・末田, 事例ベースによる機械設計, 人工知能学会誌, 7-4(1992), 597.
- (96) Pearce, M., et al, Case-Based Design Support - A Case Study in Architectural Design, *IEEE Expert*, 7-5(1992), 14.
- (97) Duffy, A. H. B. (ed.), Special Issue of Machine Learning in Design, *Artificial Intelligence in Engineering*, 8-3, (1993), 157.
- (98) 小川(編), 小特集: 人工生命, 電子情報通信学会誌, 77-2(1994), 99.
- (99) 上田・ほか4名(編), 特集: 生命, そして人工生命の可能性, 機誌, 97-906(1994), 383.
- (100) Chirehdast, M., Gea, H. C., Kikuchi, N. and Papalambros, P. Y., Structural Configuration Examples of An Integrated Optimal Design Process, *Advances in Design Automation*, DE-44-1(1992), 11, ASME.
- (101) 上田・チンモイ・萩原, 位相最適化に関する一考察, 第2回設計工学・システム部門講演会講演論文集, No. 920-103(1992), 447.
- (102) Eppinger, S. D., Whitney, D. E., Smith, R. P. and Gebala, D. A., Organizing the Tasks in Complex Design Projects, *Design Theory and Methodology - DTM '90*, DE-27(1990), 39, ASME.
- (103) Krishnan, V., Eppinger, S. D. and Whitney, D. E., Towards a Cooperative Design Methodology: Analysis of Sequential Decision Strategies, *Design Theory and Methodology - DTM '91*, DE-31(1991), 165, ASME.
- (104) Wong, A. and Sriram, D., SHARED: An Information Model for Cooperative Product Development, *Research in Engineering Design*, 5-1(1993), 21.
- (105) Renaud, J. E. and Gabriele, G. A., Sequential Global Approximation in Non-Hierarchic System Decomposition and Optimization, *Advances in Design Automation - 1991*, DE-32-1(1991), 191, ASME.
- (106) Wanger, T. C. and Papalambros, P. Y., A General Framework for Decomposition in Optimal Design, *Advances in Design Automation - 1993*, DE-65-2, (1993), 315, ASME.
- (107) Wanger, T. C. and Papalambros, P. Y., Implementation of Decomposition Analysis on Optimal Design, *Advances in Design Automation - 1993*, DE-65-2, (1993), 327, ASME.
- (108) Eschenauer, H., Koski, J. and Osyczka, A. (ed.), *Multicriteria Design Optimization - Procedures and Applications*, (1990), Springer-Verlag.
- (109) Lyon, T. D. and Mistree, F., A Computer-Based Method for the Preliminary Design of Ships, *J. Ship Research*, (1985), 251.
- (110) 荒川・山川, モデル事例ベースを用いた定性的多目的最適設計に関する研究, 人工知能学会誌, 9-1(1994), 100.
- (111) 花原・田中, 骨組構造設計における感覚的評価の表現と利用(階層形ニューラルネットによる試み), 第2回設計工学・システム部門講演会講演論文集, No. 920-103, (1992), 88.
- (112) Kusiak, A. (ed.), *Concurrent Engineering - Automation, Tools, and Techniques*, (1993), John Wiley & Sons, Inc.
- (113) 田口, 品質評価のためのSN比, (1988), 日本規格化協会.
- (114) Belegundu, A. D. and Zhang, S., Robust Mechanical Design Through Minimum Sensitivity, *Advances in Design Automation - 1989*, DE-19-2(1989), 233, ASME.
- (115) Beard, J. E. and Sutherland, J. W., Robust Suspension System Design, *Advances in Design Automation - 1993*, DE-65-1(1993), 387, ASME.
- (116) Consoli, R. D. and Sobieszcanski-Sobieski, J., Application of Advanced Multidisciplinary Analysis and Optimization Methods to Vehicle Design Synthesis, *J. Aircraft*, 29-5(1992), 811.
- (117) Ward, A. C. and Seering, W. P., Quantitative Interface in a Mechanical Design 'Compiler', *Trans. ASME, J. Mechanical Design*, 115-1, (1993), 29.
- (118) Ward, A. C. and Seering, W. P., The Performance of a Mechanical Design 'Compiler', *Trans. ASME, J. Mechanical Design*, 115-3(1993), 341.
- (119) 赤木・鷹津, オブジェクト指向言語による配管設計支援

- システムの研究, 機論, 54-499, C(1988), 787.
- (120) 赤木・鷹津, オブジェクト指向言語による配管設計支援システムの研究(第2報), 機論, 55-520, C(1989), 3087.
- (121) 藤田・赤木・天木, 機能モジュール統合化による歯車伝達装置の設計支援システムに関する研究, 機論, 60-579, C(1994), 3602.
- (122) 藤田・赤木・辻本, オブジェクト指向モデリングを用いたリング機構の最適形状設計支援システムの構築, 機論, 58-545, C(1992), 310.
- (123) 藤田・赤木・三木, リング機構設計における多領域最適化システムの研究, 機論, 60-579, C(1994), 3670.
- (124) Papalambros, P. Y. and Wilde, D. J., *Principles of optimal design - Modeling and computation*, (1988), Cambridge University Press.
- (125) Agogino, A. M. and Almgren, A. S., Symbolic Computation in Computer-Aided Optimal Design, Gero, J., (ed.), *Expert Systems in Computer-Aided Design*, (1987), 267, North-Holland.
- (126) 大坪, 次世代の計算力学システム, 第71期通常総会講演会講演論文集(I), No. 940-10(1994), 175.
- (127) 藤田・赤木・廣川, 製品設計における配置配管統合化のための対象モデリング, 第4回設計工学・システム部門講演会講演論文集, No. 940-22 (1994), 308.
- (128) 平田, 特別レポート: 3次元CAD普及の決め手, ソリッド・モデリング・カーネル, 日経CG, (1992-8), 14.
- (129) 北野, AIにおける科学革命, 人工知能学会誌, 8-6(1993), 744.
- (130) 北野(編著), グランドチャレンジャー人工知能の大いなる挑戦一, (1993), 共立出版.
- (131) Buxton, I. L., *Engineering Economics and Ship Design*, (1971), British Ship Research Association (BSRA) Report.
- (132) 橋田・松原, 知能の設計原理に対する試論一部分性・制約・フレーム問題一, 認知科学の発展, 7(1994), 159, 講談社サイエンティフィック.
- (133) McCarthy, D. and Hayes, P. J., Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence, *Machine Intelligence*, 4(1969), 463 (邦訳: 三浦, 人工知能の観点から見た哲学的諸問題, 人工知能になぜ哲学が必要かーフレーム問題の発端と展開, (1990), 哲学書房, 9.)
- (134) Dennet, D, Cognitive Wheels: the frame problem of AI, *Minds, Machine & Evolution*, (1984) Cambridge University Press (邦訳: 信原, コグニティブ・ホイールー人工知能におけるフレーム問題, 現代思想, 15-5(1987), 128).