思考過程の思考展開図表現に基づく機械設計支援システム

Mechanical Design Support System Based on Thinking Process Development Diagram

間瀬 久雄

Hisao Mase

(株)日立製作所システム開発研究所

Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.
mase@sdl.hitachi.co.jp, <http://www.sdl.hitachi.co.jp/>

絹川 博之

Hiroshi Kinukawa

東京電機大学工学部情報通信工学科

School of Engineering, Tokyo Denki University
kinukawa@im.dendai.ac.jp, <http://www.cl.im.dendai.ac.jp/>

森井 洋

Hiroshi Morii

東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻

Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
morii@hnl.t.u-tokyo.ac.jp, <http://hockey.t.u-tokyo.ac.jp/>

中尾 政之

Masayuki Nakao

東京大学工学部附属総合試験所

Engineering Research Institute, School of Engineering, The University of Tokyo
nakao@hnl.t.u-tokyo.ac.jp, <http://hockey.t.u-tokyo.ac.jp/>

畑村 洋太郎

Yotaro Hatamura

工学院大学国際基礎工学科

Department of Basic Engineering in Global Environment, Kogakuin University
hatamura@hnl.t.u-tokyo.ac.jp, <http://www.mech.kogakuin.ac.jp/global/globalhp/>

Keywords: design system, knowledge management, design process, technology transfer, natural language processing.

Summary

This paper describes a system that directly supports a design process in a mechanical domain. This system is based on a thinking process development diagram that draws distinctions between requirement, tasks, solutions, and implementation, which enables designers to expand and deepen their thoughts of design. The system provides five main functions that designers require in each phase of the proposed design process: (1) thinking process description support which enables designers to describe their thoughts, (2) creativity support by term association with thesauri, (3) timely display of design knowledge including know-how obtained through earlier failures, general design theories, standard-parts data, and past designs, (4) design problem solving support using 46 kinds of thinking operations, and (5) proper technology transfer support which accumulates not only design conclusions but also the design process. Though this system is applied to mechanical engineering as the first target domain, it can be easily expanded to many other domains such as architecture and electricity.

1. ま え が き

企業活動の国際化が急速に進む中で企業を存続させるためには、より強い製品競争力を持つことが不可欠である。強い製品競争力を持つためには、設計作業の能率向上だけでなく、設計そのものの質の向上が必須である。そのためには、(1)設計者の思考を刺激し、競争力の強い製品開発につながる独創的なアイデアを発想させること、(2)同じ失敗を繰り返さないように他の設計者に技術を正しく伝承し、設計ノウハウの再利用を促進すること、という設計知識管理に関わる二つの設計課題の解決が急務である。

上記設計課題を解決すべく、機械設計作業における設計者の思考を直接支援する新しいシステムの開発につい

て検討してきた[Mase 01]。本システムでは以下の3点を基本理念としている。すなわち、(a)設計者が機械設計を行う際に迎える思考過程を、「要求/機能」(何をすべきか、何をしたいか)、「機構」(要求/機能をどのように実現するか)、「構造」(具体的にどう実現するか)の間の脈絡付けを記述する「思考展開図」として表現すること、(b)前記脈絡付けをする際に設計者が欲しくなる外部支援を明確にし、それらに対応する支援機能を基本機能として提供すること、(c)設計の結論だけでなくその思考過程をも記録して技術を正しく伝承するための枠組みを提供すること、の3点である。

本論文では、設計者の思考過程の表出化という観点から思考展開図の作成意義および特徴について述べる。また、思考展開図による思考過程の表出化を前提とした機

械設計支援システムにおいて不可欠な5種類の支援機能を提案し、各機能の役割およびシステム実装方法について詳述する。さらに、機械設計者による本システムの試用評価によって得られた知見を踏まえて上記支援機能の有効性についてそれぞれ考察する。

機能分解や設計解の導出、思考内容の記述に関してはこれまでに多くの研究がなされている。[Pahl and Beitz 88]では、機能をエネルギー、物質、情報の「入出力関係」と定義して機能分解を行う機能モデルについて述べている。また[梅田 97]では、実体、実体間の関連、物理現象からなり、状態の時間的遷移を表す「挙動」を機能と関連付けて表現するFBSモデリングを提案している。どちらも要求機能を下位機能に分解し、下位機能を実現する設計解を導出し、設計解を具体化し、元の機能を実現しているかを検証するという設計の流れに沿ってモデリングをしており、この設計の流れは我々の考え方と類似している。しかし、本論文で提案する思考展開図表現に基づく方式では、機能を言語（動詞）として表現される「作用」として捉えている。また、設計者が発想した設計内容を思考展開図上に記述していく中で、要求/機能、機構、構造の脈絡付けが思考展開図記述の理想形（2章参照）に近づくように、思考展開図を作成していくことで質の高い設計を実現することを目指している。

また、[梅田 97]では、FBSモデリングに基づいて機能分解や挙動との対応付け等を支援する機能設計ツール「FBSモデラ」を実装している。FBSモデラは、定性推論システムによる挙動シミュレーションによって非生起現象や副作用を設計者に提示する機能など、設計作業支援に有効な機能を備えた実用的なツールであるが、以下の4点において我々の提案するシステムとは異なる。

(1) FBSモデラでは、機能分解（アナリシス）の領域と、挙動の対応付けおよびその統合（シンセシス）の領域に分けて設計内容を記述しているが、多くの情報が一つの図の中に記述されており、図の一覧性を損なっていると考える。これに対して本論文で述べる思考展開図では、機能分解から構造展開/組立に至るまでの設計内容および思考過程を、要求、機能、機構、構造という構成により、左から右に一気通貫に記述しており、設計内容の整理度を一覧できるようにしている。

(2) 機械設計では、要求機能からいきなり具体物（思考展開図では機構・構造に相当）を発想し、後にその機能を対応付けるといった思考パターンがしばしば使われるが、FBSモデラはこの種の思考パターンに対応していないと思われる。これに対して我々のシステムでは、思考展開図に基づいて設計を進める際に、機能、機構、構造のどこからでも思考を始められるという柔軟性を有している。

(3) FBSモデラでは具体的に決まっていない対象の機能分解支援が難しいが、我々のシステムでは要求に

対して機能を分析・分解するためのヒントを与える枠組みとして、各種シソーラスや思考探索法則、過去の設計ノウハウを提示する機能を提供している。

(4) FBSモデラでは設計者の思考過程の記録について支援していないが、我々のシステムでは思考展開図を作成するなかで、思考順序や各種のメモ情報を設計内容とともに記録する仕掛けを提供している。

独創的なアイデアを発想させて設計上の問題解決を支援する手法としてTRIZがある[Fey 97]。TRIZは大量の特許文書を分析して、人間が発明をする際に辿る思考過程を客観的に抽出して法則化したものである。TRIZでは、問題点を整理するために、対立概念を選択させたり、物質と場からなるサフィールドを記述させたりする。これらにより設計者の抱える問題がTRIZの法則を適用可能なレベルにまで抽象化できれば非常に有効であるが、実際の設計ではそのレベルまで設計者自身が問題を分析・整理・抽象化できないことが多い。これに対して我々の提案する方式では、要求/機能、機構、構造に沿って設計者の思考を整理して問題を分析・整理・分解することにより、問題の本質を明確にしている。また、TRIZが解として提示する解決法は非常に抽象的であり、設計者の抱える問題のレベルにまで具体化してあてはめることが難しい。これに対して本システムでは、実際の設計業務から経験的に得た46種類の客観的問題解決手法（TRIZの法則と区別すべく、以下「思考探索法則」と呼ぶ）を機械分野における具体的適用事例とともに提示するので、提示された解決法を設計者の抱える問題に適用しやすい。

TRIZは冷戦終了後に欧米に流れ、その後日本に紹介された手法であるが、我々のシステムで扱う思考探索法則は、1980年代後半から実際の設計現場において設計者の頭の中を観察する中で獲得してきたものであり[畑村 88]、両者は法則の収集経緯および収集方法が全く異なる。しかし、両者を比較すると共通の法則が多く見られることから、設計者の頭の中の動き方とその利用に対する考え方自体は非常に類似していると考えられる。

機械分野において質の高い設計を支援する研究として、設計公理という理論が提案されている[Suh 90]。これは、要求/機能と機構との間の相互干渉パターンから設計の矛盾や冗長性を発見するものである。本理論によれば、要求/機能と機構が互いに独立である場合、その設計は良い設計であるとみなされる。本理論は設計の矛盾や冗長な部分を発見する手法としては非常に有効な手法であるが、発見された矛盾の解決を支援する方法は提供していない。これに対して本システムでは、設計知識の提示や思考探索法則の適用など、矛盾や冗長を排除する解決法の発見を支援する機能を提供している。

市場で要求される設計品質の設定を目的とした技法としてQFD（Quality Function Deployment, 品質機能展開）がある[水野・赤尾 78]。まず市場ニーズを収

図1 機械設計時の設計者の思考過程と思考展開図（[畑村・中尾 00] の図を一部修正）

集して各々に重要度を設定し、次に各ニーズの実現に必要な技術特性を対応付け、さらに各技術特性を製品部品に対応付ける。そして市場ニーズから見た製品部品の重要度を算出して比較し、適切な設計指針を得る。思考展開図とQFDとは互いに補完的な役割を示すと考えている。すなわち、QFDによって重要であると算出されたニーズを機能・機構・構造に展開し、設計を具体化するという連携方法が考えられる。

設計に限らず人間の思考内容を整理する従来手法としてKJ法が有名である[川喜田 67]。KJ法は発想した内容を次々に書き並べていき、類似する内容をグループ化してラベル付けし、グループ間に脈絡を付けていくことにより思考を整理する手法であり、この手法を前提とした発想支援ソフトウェアも数多く市販されている。発想内容を書き並べて互いに脈絡を付けるという点で、思考展開図の記述方法はKJ法と類似しているが、思考展開図では要求/機能・機構・構造という思考の基本過程に沿って発想内容を明確に区別して記述させ、その間の脈絡付けを促しており、これにより設計者の頭の中の思考整理をより一層促進している点が大きな特徴である。

以下、2章ではまず本システムの前提となる設計者の思考の基本過程および思考展開図について述べ、次に思考の各フェーズにおいて設計者が必要とする外部支援をマッピングする。3章ではこれらの外部支援を実現する設計支援システムの特長機能について述べる。4章では本システムの有効性について考察する。

2. 機械設計における設計者の思考過程と思考展開図

機械設計における設計者の思考の流れを図1(a)のように記述できる[畑村・中尾 00]。ここでは、「機械設計とは、要求/機能・機構・構造の間の脈絡付けである」としている。「要求/機能」とは、何をすべきか、何

をしたいかという課題に相当する。「機構」とは、要求/機能をどのように実現するかという解決法に相当する。「構造」とは、具体的にどう実現するかという具体策に相当する。実際の設計では、図1(b)に示すように、要求/機能・機構・構造の間を行きつ戻りつスパイラルに進むことにより、設計内容が深化・発展する[畑村・中尾 00]。

この思考の流れに基づいて思考過程を二次元平面上に表現したものを「思考展開図」と呼ぶ。思考展開図では図1(c)に示すように、要求/機能・機構・構造の脈絡付けをノードとリンクを用いて言葉で記述する。

実際の設計では、市場分析やコンセプトの明確化、開発コストの見積りなどを検討する「企画」段階がある。また、設計結果に基づいて実際に製作したり、製作されたものを実際に使用する「実行」段階がある。思考展開図を作成する作業は「企画」と「実行」の間の（狭義の）設計段階における作業として位置付けることができる。

機械設計において思考展開図を作成する場合、まず、設計対象に課せられた要求/機能を分析し、要素機能に分解する。次に、個々の要素機能を実現する機構を1対1にマッピングする。複数の機構で一つの要素機能を実現するのは干渉設計と呼ばれる悪い設計である。この場合、要素機能をさらに細かく分解する必要がある。次に、個々の機構を構造に具体展開し、それらを組み合わせて一つの製品を組み立てる。実際の設計ではこれらのフェーズを試行錯誤的に繰り返す。図1(a)(c)の横軸は時間軸ではなく抽象度であり、図の左から右へ進むにつれて設計内容が具体化する。

思考展開図の作成は機能、機構、構造の順で進むのが理想であるが、実際の設計では設計者の思考は必ずしもこの順序で進行しない。課せられた要求からいきなり機構や構造にジャンプ（図1(a)点線矢印）したり、機構からその機能に遡ったりすることがしばしばある。機能、機構、構造の順で思考展開図を作成することを設計

者に強要すると、思考そのものが停滞してしまう。従って、思考展開図を作成する際には、思考順序のバリエーションを許容し、機能、機構、構造のどこから考えても良いということを認めるべきである。ただし、思考展開図の最終形態は、図1(c)に示すような理想形になっているべきである。すなわち、機能が要素機能に分解されており、各要素機能が機構と1対1に対応しており、各機構が構造に展開されている思考展開図は質の高い設計内容であるとみなすことができる。ある機構に対応する機能が記述されていない場合にその機能を考えさせたり、複数の機構が一つの要素機能を実現している場合にその要素機能をさらに分解させたりすることによって理想形の思考展開図に近づけることにより、高品質の設計に辿り着くことができる。

図1(c)に示すように、思考展開図は「抽象化・具体化」の軸に沿って思考過程を記述・記録するものであるが、思考順序という時間軸に沿って思考過程を記録することも可能である。図1(c)の思考展開図を構成する各ノードにその生成順序を表す番号(図1(c)では変数 Ta, Tb, ...を用いて記述している)を付与することにより、設計者がどのような順序で思考を進めたのかを容易に理解できる。

このように、「抽象化・具体化」の軸と時間軸に沿って設計の思考過程を思考展開図として表現することにより、機能・機構・構造の間の脈絡付けが適切に行われているかを容易にチェックできるとともに、他の設計者に設計内容および思考過程を正しく伝達することができる。

次に、思考展開図に基づいて機械設計を進めるときに、図1(c)にも示すように、以下の5種類の設計者支援が必要であると考える。

(1) 設計者の思考整理

設計全体にわたって設計者が頭の中で思考した内容を記述整理する作業を支援する。そのためには、思い浮かんだ事柄を言葉や絵で自由に記述し、記述内容に脈絡を付けて整理する作業場が必要となる。

(2) 設計者の発想支援

発想した概念から別の概念を連想させることにより設計者の思考を刺激し、柔軟な発想を支援する。そのためには、言葉(概念)の関連を記述したシソーラスが必要となる。本論文では、「シソーラス」という言葉を広い意味で使用している。すなわち、言葉間の関連として上位/下位関連だけでなく、同意/類義関連や共起関連(3章参照)などを含むものとしてシソーラスを定義する。

(3) 設計知識の提示

過去の失敗事例から得られる教訓、設計の定石、部品の規格や、関連特許、過去の設計事例等を知識データベース化し、設計者が「必要なときに必要な形で」参照することを支援する。そのためには、設計者が検索・参照・理解しやすいように、データを知識化しておく必要がある。また、機械分野では要求/機能を記述する際に使わ

れる動詞をキーワードとした検索が必須である。さらに、設計者や設計部署、設計分野の違いにより、同じ概念を異なる言葉で表現することが多いので、言葉の表記を統一するシソーラスが検索精度向上には不可欠となる。

(4) 問題解決支援

ある要求/機能を実現する機構、構造に対して、その機構、構造に付随する「制約条件」(「負の機能」とも呼ばれている)がしばしば発生する。制約条件を解消できない場合、全く別の機構、構造を検討しなければならない。そのため、制約条件を回避しつつ要求/機能を満たす機構、構造の発見を支援する仕掛けが必要となる。

(5) 技術伝承支援

設計内容を保存して再利用することは設計の効率化につながる。しかし、設計の結論(採用した設計内容)だけを残しておくだけでは設計の再利用はなされない。なぜその結論に至ったのかに関する思考過程や、途中で棄却された設計案が記録されていないからである。そこで、どのような思考過程に基づいてその設計が行われたのか、どのような根拠/裏付けによって設計内容を決定したのかを設計結果に明記して伝承する仕掛けが必要となる。

3. 機械設計支援システムの特長機能

我々は図1の思考展開図に基づき、2章で述べた5種類の外部支援を基本機能として搭載した設計支援システムを開発している。本システムは機械分野を対象としているが、建築、情報処理など他分野における設計や、番組やイベントの企画、日常生活におけるありふれたテーマに対しても大筋において適用可能である。ただし、後述する各種データベースについては分野に応じて最適なコンテンツを用意して置き換える必要がある。

以下、本システムの5種類の基本機能の詳細を述べる。

(1) 設計者の思考整理機能

本システムでは、設計者の思考内容を図2に示す画面上に思考展開図として整理するエディタを提供する。思考展開図を記述する形式として、視覚的理解が比較的容易な、ノードとリンクからなるグラフ構造を採用する。ノードは概念を表し、リンクで結ばれたノード同士は互いに脈絡(意味的関連)があるとする。また、ノードの形によってノードの種別を区別する。要求/機能は角丸四角形、機構は長方形、構造は二重四角形、制約条件は二重角丸四角形、思考探索法則は六角形、その他はノード枠なしで表す。ノード/リンクは自由に生成・移動・複写・削除・修正することができる。

図2は思考展開図の作図例を示す。ここで、ノード右下の番号はノードの生成順序を表している。この番号順に思考展開図を辿ることにより、設計者の思考順序をより正確に理解できる。太線のノード/リンクはその設計内容を最終的に採用したことを示している。ノード/リ

図2 本システムのメイン画面構成および思考展開図作成例（ノード6を選択した状態）

ンクにはメモ情報（役に立った情報のアドレス、ポンチ絵（イメージデータ）、文章メモ）を貼り付けられ、ノード左下の四角（ ）はポンチ絵の貼付を、ノード/リンクに刺さったピンマークは文章メモや役に立った情報のアドレスの貼付を示す。

（2）設計者の発想支援機能

設計者の発想を分散／収束すべく、シソーラスを検索する機能を提供する（図3）。最初にトリガとなる言葉を画面左上のフリーワード欄に入力すると、その言葉から連想される言葉が画面下部に表示される。表示された言葉を次々に選択することにより、シソーラスを連続して検索できる。

本システムでは、機械分野に関する以下の4種類のシソーラスデータを収録している（表1）。

（a）技術用語シソーラス

ある言葉に対して多くの設計者が共通して連想する言葉を集めたシソーラスである。40人の機械設計の専門家によって手作業で作成された10,276語、25,548リンクのデータから構成される。それぞれの言葉は要求／機能、機構、構造、その他のどれか一つに分類されているので、機能から機能、機能から機構・構造、機構・構造から機能というような言葉の連想が可能である。

（b）特許共起語／記事共起語シソーラス

専門家の手作業による技術用語シソーラスの語数およびリンク数を補い、幅広い連想を可能とすべく、計算機によって関連の強い言葉対を自動抽出して補完している。ここでは、機械設計に関連するテキスト文書から、

ある言葉と対になって出現する傾向の強い言葉（以下、共起語と呼ぶ）を自動抽出し〔間瀬 97〕、人手チェックを経てシソーラスとして追加格納している。テキスト文書として、特許公開公報 21,594 件と、新聞記事データ 17,337 件を用意し、特許公開公報からは 33,403 語、552,617 リンク、新聞記事データからは 17,155 語、386,679 リンクの共起語データを抽出し、検索可能としている。

（c）機能表現語シソーラス；機能の連想

機械分野において要求／機能を記述する際に使われる動詞を収集し、階層木構造として体系的に纏め上げたシソーラスである。表現は異なるが共通の意味を持つ言葉群が一つの下位グループを形成し、各下位グループにはそのグループを代表する標準語が定義されている。そして、概念的に類似するいくつかの下位グループがまとまって中位グループを形成し、中位グループがさらにまとまって上位グループを形成している。本データは40人の機械設計の専門家によって手作業で作成された2,084語（6上位グループ、72中位グループ、598下位グループ）の動詞データで構成される。

機械設計では、ある機構・構造の代替案を検討するとき、その機構・構造の機能はそもそも何か（何をしたいのか）について再考し、その機能から上位機能に上がってみる（抽象化する）ことが代替案を発想する有効な手段の一つである。そこで本シソーラスを用いることにより、機能のレベルで発想を抽象化／具体化することを支援している。例えば図3では、「注射針」という機構から

図3 シソーラス検索による発想支援

連想された「吸引する」という動詞について、機能表現語シソーラスを検索することにより中位グループ「排出する」を検索し、その下位グループをさらに検索することにより、「吸引する」と概念的に類似する動詞「汲む」、「攪拌(すく)う」等を連想している。

このように、図3の画面では技術用語シソーラスや共起語シソーラスを検索対象とした「ざっくりばらんな言葉の連想」と、機能表現語シソーラスを検索対象とした「機能の連想」を選択的に使い分けることにより、設計者の意図に合致した言葉の連想を支援している。

(3) 設計知識の提示機能

設計者が必要とする設計知識をタイムリーに提示する機能を提供する。図4左下は設計知識検索を行う画面である。本システムでは、電機、自動車、鉄鋼、精密機器などに属する日本企業10社から収集した定石、失敗事例を含む800件の設計知識データを収録している。

本システムに収録されている設計知識データはすべて知識化が施されている。第一に、各設計知識の中でノウハウとして伝えたいことを「設計のアドバイス」として簡潔に記述している。第二に、その設計知識を必要とするのはどんな設計者が、どんなときにその設計知識が欲しくなるかを考慮して、各設計知識に複数の知識キーワードを付与している。これらは「～で～を～する」「～

が～する」といった簡潔な文で記述定義している。

図4右上に設計知識の一例を示す。設計知識データは以下の構成要素からなり、XML (Extensible Markup Language) で記述されている。

- (a) 知識名称：設計知識の内容を端的に記述。主タイトルと副タイトルからなる。
- (b) 知識種別：知識内容の種別(定石・失敗・規格・特許)と、思考展開図における段階(機能・機構・構造)と知識内容との対応情報を記述(企画段階や実行段階の知識も収録)。
- (c) 入力日：設計知識データの作成日を記述。
- (d) 知識キーワード：知識内容を短文で簡潔記述。
- (e) 知識レベル：内容の難しさを5段階で記述。
- (f) 思考探索種別：思考探索法則の分類を記述。
- (g) 関連設計知識ファイル名称：関連設計知識のアドレスを記述。
- (h) 説明文：設計知識の内容を文章で記述。
- (i) 図表種別：挿入する図面が図か表かを記述。
- (j) 図表タイトル：図表のタイトルを記述。
- (k) 図表ファイル名称：図表のファイル名を記述。
- (l) 図表説明：図表に対する補足説明を記述。
- (m) 設計のアドバイス：得られる教訓、設計者が注意すべきことを記述。

表1 本システムが提供するシソーラスデータ一覧

#	名称	提供の目的	データ内容	データ規模	作成者
1	技術用語シソーラス	機械技術用語の連想支援	ある技術用語から連想される技術用語群 (各用語は、機能/機構/構造の属性を持つ)	10,276 語 25,548 リンク	機械設計者 40名
2	特許共起語シソーラス	機械技術用語の連想支援 (技術用語シソーラスを補完)	ある言葉と対になって出現しやすい (共起する)言葉群	33,403 語 552,617 リンク	計算機 +人間チェック
3	記事共起語シソーラス	機械技術用語の連想支援 (技術用語シソーラスを補完)	ある言葉と対になって出現しやすい (共起する)言葉群	17,155 語 386,679 リンク	計算機 +人間チェック
4	機能表現語シソーラス	機能を表す動詞の連想支援 設計知識検索において動詞 キーワードを標準語に変換	・機能を表す動詞の上位/下位機能を表す動詞群 ・機能を表す動詞と共通の概念を持つ動詞群及び その動詞群を代表する標準語	2,084 語	機械設計者 40名

図5 問題解決支援画面（思考探索法則の適用）

表2 思考探索法則（一部抜粋）

大分類	小分類	関連の深い 動詞上位 グループ
空間	【分割, 分散, 除去, 減算】	動かす
	【合体, 集合, 一体化, 加算】	
	など8種類	
物質	【相変化・蒸発・消失】	強くする
	【集合・セルフアセンブリ・凝集】	
	など7種類	
時間	【直列・順次・シーケンス・分割】	測る
	【バイパス・分流・分割・並列】	
	など8種類	
作用	【分割除去・除算・副次排除】	作る
	【合体・乗算・付加・相乗効果】	
	など8種類	
現象	【再生・バイオ・生体】	状態変化 する
	【光波・レーザ・液晶】	
	など7種類	
制約	【組織・会社・人事・家庭】	考える
	【環境・地球・公害・リサイクル】	
	など8種類	

目する。すなわち、表2に示すように、思考探索法則の大分類6種類は、機能シソーラスの上位グループ6種類とほぼ1対1に対応する傾向にあるという事実を利用して、適用可能な思考探索法則を絞り込む。例えば、図2の思考展開図では、「ねじポンプ」という機構を記述したノード6と、「細いねじを加工できない」という制約条件を記述したノード7との間で設計上の対立が起こっているが、両ノード中に出現する動詞に着目すると、「加工できない」という動詞が使われている。機能表現語シソーラスを検索することにより、この動詞が「作る」という上位グループに属することが分かるので、表2より上記対立関係を解決するためには「作用」に属する思考探索法則が有効であると判定し、「作用」に属する8種類の思

考探索法則だけを設計者に提示する。設計者は各法則の定義とその法則を適用した事例を参照することにより、その法則を自分の問題にあてはめ、解決策を模索する。

図5に問題解決支援画面を示す。画面左側のリストの一行が一つの法則を示している。法則を一つ選択すると、その法則の意味を端的に表すポンチ絵が画面左下に表示される。また、「検索」ボタンを押すとその法則に対応する適用事例一覧が画面右側に表示される。適用事例の記述フォーマットは、本章(3)で述べた設計知識データと同一である。

(5) 技術伝承支援機能

技術伝承に関する情報の入力にはなるべく設計者の手間をかけないようにすることが肝要である。本システムでは図2に示すように、ノード生成時に各ノードの右下にそのノードの生成順序を示す番号を自動付与する。この番号を辿ることにより、設計者がどのような順序で思考を展開したのかをより正確に理解できる。また、任意のノードやリンクに対してメモやポンチ絵、意思決定に影響を及ぼした設計知識アドレス(URL)などの貼付をアイコンで示しているため、他の設計者が作成した思考展開図でも、設計内容および思考過程を漏れなく効率良くチェックできる。

4. 本システムの有効性に関する評価・考察

本システム開発の初期段階から、東京大学、金沢大学、東海大学の機械系学生と、企業設計者40名による実適用評価を行ってきた。以下、本システムの五つの基本機能の有効性を、被験者の意見を織り交ぜながら考察する。

(1) 設計者の思考整理機能

本システムを用いて思考を中断させずに思考内容を記述できるかを考察する。被験者からは、「編集しやす

い」、「きれいな形で残せる」、「ノード移動やリンク付け替えが容易で、発想の組立が簡単にできる」などの肯定的意見を得た。一方、「ある程度思考がまとまった時点でそれを整理する道具として有効」、「構造のレベルでは言葉より絵の方が理解しやすい」という意見も得た。本システムでは、ポンチ絵データの作成は別のアプリケーションに委ねており、作成された電子データを思考展開図にリンク付けする機能のみを提供しているが、より気軽に絵を描ける環境の提供は今後の課題である。

思考整理機能に関する被験者の反応は概ね良好であったが、被験者は機械設計者の思考過程や思考展開図について理解している、または事前に説明を受けている設計者である。事前知識の全くない設計者が本システムを使いこなすためには、思考展開図の意義および作成方法などに関する事前導入教育の実施が必要であり、その教育カリキュラムの早期確立が急務である。

(2) 設計者の発想支援機能

シソーラスについては、その内容が設計者の設計分野と合致している必要があるため、評価が難しい。ここでは言葉の連想による発想支援の有効性について考察する。被験者からは、「シソーラスの探索により思考が楽しくできる」、「言葉を考える負担が少なく思考のスピードが速くなる」という肯定的意見を得た。一方、「言葉の連想が発散してしまい収束しない」、「網羅する分野が狭い」、「有用なヒントとなる言葉がなかなか出ない」という否定的意見も得た。本システムでは選択した一つの言葉のみから連想される言葉を検索しているため、どちらかという連想を発散させる傾向が強い。共起語についてはその傾向が特に強い。連想を収束させるためには、過去の言葉の連想の流れを考慮して複数の言葉から連想される言葉を絞り込むなど、アルゴリズム上の工夫が必要である。また、シソーラスデータそのものについても、連想の発散、収束を考慮して体系化する必要がある。

(3) 設計知識の提示機能

被験者からは、「共通する考え方を理解するのに有効」、「背景知識を習得するのに便利」という意見を得た。一方、「見積資料や業務手順などのデータベースとの連携が必要」、「Web ページやフリー特許検索サイトとリンクした強力な検索機能が欲しい」という要望もあった。また、本システムでは知識キーワードのみを検索対象としているため低ノイズの検索結果が得られるが、その反面、「有効な知識がなかなかヒットしない」という意見があった。これは知識キーワードの質の問題よりも、設計分野の相違と設計知識が十分に網羅されていないこと、名詞のシソーラスの未装備による検索アンマッチの三つが大きな原因であると考えている。設計知識に記述されている知識キーワードは誰にでも付与できるものではなく、設計経験の豊富なマネージャクラスの人が作成することを前提としている。どのような観点から知識キーワードを付与すると検索に有効であるかについて整理し、

設計知識作成時にガイダンスする機能が必要であろう。

(4) 問題解決支援機能

本機能は、機構・構造とそこから派生する制約条件の間に起こる設計上の対立や矛盾のうち、発想を転換しないと解決策を発見することが困難な問題の解決を支援する機能であるため、本格的な設計業務の中で実際に問題に直面したときでないと使われない機能である。これまでの評価では、解決が困難な問題を扱うような設計テーマで行っていないため、本機能に関する有益な意見は得られていない。今後、実際の設計業務に本システムを適用し、その中で発生した問題を本機能で解決できるかを評価していく予定であるが、個々の思考探索法則の意義やイメージを体系的に説明し、各法則に対する設計者の理解をより促進するガイダンス機能の拡充が必須であると考えている。

(5) 技術伝承支援機能

思考展開図のノードに番号付けをしたり、種々のメモを付けられるという機能は、「技術伝承に有効である」という意見が大半であった。一方で、「複数の人の間で思考を共有したい」、「整理した内容を他人に説明するのに便利」など、思考結果を複数の設計者で共有していくための仕掛け作りが必要であるという意見を得た。本システムで作成された一つの思考展開図をベースに、先生と学生、あるいは設計者グループの間で設計レビューができるような機能拡張が有効であると考ええる。また、CAD データと思考展開図データとを結び付け、CAD 図面から関連する思考展開図を呼び出すことにより、設計レビューや技術伝承をより促進できると考える。

本システムは上記五つの機能によって設計者の思考を支援するが、これらの機能を複合させることによって、より高度な設計支援を実現できる。例えば、シソーラスによる連想によって獲得した言葉で設計知識データベースを検索したり、設計知識に記述されている言葉から新たな連想を始めたり、思考探索法則を用いて問題解決を行う際に、機能表現語シソーラスを検索して問題点を整理・分析したりするなど、複数の機能を必要に応じて組み合わせることにより、設計者の発想をより高め、質のより高い設計結果を得ることができると考える。

5. む す び

本論文では、設計の思考過程の記述による思考整理および設計の正しい伝承を支援する機械設計支援システムについて述べた。まず、機械設計において設計者が要求 / 機能 - 機構 - 構造という思考過程に沿って思考を整理する枠組みである思考展開図について述べた。次に、思考展開図作成を前提とした機械設計において設計者が欲しくなる支援として、(1) 設計者の思考整理、(2) 設計者の発想支援、(3) 設計知識の提示、(4) 問題解決支援、(5) 技術伝承支援、の五つを提案した。また、こ

これらの支援機能を搭載した具体的な機械設計支援システムを開発した。さらに、異企業の機械設計者40名による実適用評価と機械系学生の実習での使用により、機械設計時において、上記(4)を除く本システムの四つの支援機能についてその有効性を確認した。現在も、機械分野の大学・企業において、上記支援機能(4)の有効性の検証を含めた本システムの評価を広く推進している。また、本システムを機械設計以外の分野において適用すべく、システムの汎用化についても今後検討していく予定である。

本システムは、設計者個人の思考整理に有効であるほか、大学や企業における教育支援ツールとしても有効であると考えている。生徒がある設計テーマについてどのような発想で取り組んでいるか、どこまで理解できているどこで悩んでいるのかを、講師は思考展開図から読み取り、適切なアドバイスを生徒に与えるといった教育スタイルが可能となる。ただし、本システムを使えば誰でも必ず設計の質が向上するわけではない。設計の本質を体得させるために、本システムを核とした導入教育方法を確立することも今後の大きな課題である。

なお、本プロジェクトは日本自転車振興会の支援を頂き、平成10年10月から平成13年6月まで行われた。また、本システムの開発を支援頂いた経済産業省、(財)機械システム振興協会、(社)電子情報技術産業協会の関係者、そして本システムに収録されている各種データの収集および編集に携わった諸氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- [Fey 97] Fey, R. V. and Rivin, I. E.: T R I Z 入門, 日刊工業新聞社 (1999)。
- [畑村 88] 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)。
- [畑村 92] 畑村洋太郎編著: 続・実際の設計 - 機械設計に必要な知識とデータ -, 日刊工業新聞社 (1992)。
- [畑村 96] 畑村洋太郎編著: 続々・実際の設計 - 失敗に学ぶ -, 日刊工業新聞社 (1996)。
- [畑村・中尾 00] 畑村洋太郎, 中尾政之: 設計者が欲しい設計支援システムの開発, 情報処理学会誌 Vol.41, No.7, pp.862-867 (1999)。
- [川喜田 67] 川喜田二郎: 発想法, 中公新書 136, 中央公論社 (1967)。
- [Mase 01] Mase, H., Kinukawa, H., Morii, H., Nakao, M. and Hatamura Y.: Creative Design Support System Based on Designer-Thinking-Process Model, Proceedings on 8th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems (2001)。
- [間瀬 97] 間瀬久雄, 徳田圭世, 森本由起子, 辻洋, 丹羽芳樹: WWWホームページからの共起語自動抽出実験, 情報処理学会第55回全国大会講演論文集 3-72, 73 (1997)。
- [水野・赤尾 78] 水野滋, 赤尾洋二: 品質機能展開, 日科技連出版社 (1978)。
- [中尾 99] 中尾政之: 設計のナレッジマネジメント, 日刊工業新聞社 (1999)。
- [Pahl and Beitz 98] Pahl, G. and Beitz, W.: Engineering Design: Systematic Approach, Springer-Verlag, Berlin

(1988)。

[Suh 90] Suh, N. P.: The Principles of Design. Oxford University Press (1990)。

[梅田 97] 梅田靖, 富山哲男, 吉川弘之: 機械設計支援のためのFBSモデリングの提案, 精密工学会誌, Vol.63, No.6, pp.795-800 (1997)。

〔担当委員: 富山哲男〕

2001年8月3日 受理

著 者 紹 介

間瀬 久雄

1965年生。1990年名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻修了。同年(株)日立製作所システム開発研究所入社、現在に至る。1997年スタンフォード大学客員研究員。専門は自然言語処理、文書分類、文書要約、知識管理。情報処理学会会員。

編川 博之

1947年生。1970年東京大学理学部数学科卒業。同年(株)日立製作所入社。同社システム開発研究所研究主幹。1999年4月より、東京電機大学工学部情報通信工学科教授、理学博士。2000年11月より、国立情報学研究所客員教授を併任。専門は自然言語処理、情報学、知識管理。ACL、情報処理学会、各会員。

森井 洋

1975年生。1999年東京大学工学部機械情報工学科卒業。2001年同大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻修士課程修了。同年同専攻博士課程進学、現在に至る。

中尾 政之

東京大学工学部総合試験所教授。現在はナノ・マイクロ加工、加工の知能化、科学器械の微細化などの研究に従事。著書「実際の情報機器技術」(日刊工業新聞社, 1998)、「設計のナレッジマネジメント」(日刊工業新聞社, 1999)。

畑村 洋太郎

工学院大学国際基礎工学科教授。ナノ・マイクロ加工、力センサ、加工の知能化、医学支援工学、技術の伝承と教育の方法論を研究し、実際の設計研究会を主宰し創造設計原理の研究を行っている。主な編・著・訳書「続々・実際の設計・失敗に学ぶ」、「実際の情報機器技術」(以上、日刊工業新聞社)、「設計の原理」(岩波書店)、「失敗学のすすめ」(講談社)。