

# レンズ設計エキスパートシステム

菊地一成，飛井島正道，加藤英二，佐々木貴幸，浅野俊昭  
キャノン（株） 中央研究所

## 1. はじめに

設計に知識工学を適用した、いわゆる設計型エキスパートシステムの報告例は診断型のものに比較して少ない。このため、確たる設計型エキスパートシステム構築の方法論もないのが実状である。この原因については色々と考えられるが、例えば、設計というプロセスが、まだメカニズムのわかっていない創造・決断といった能力が大きな役割を占めていることや、実用的なシステムを構築していく上で、多くの設計分野で必須のツールとなっている大規模なCADの存在を無視出来ないこと、などといった問題があるためと思われる。

この様な実状を踏まえて、本報ではレンズ設計という特殊な分野への応用ではあるが、

- (1) 設計作業において、エキスパートシステムに期待される機能の分析
- (2) 上記分析に基づき、実際に構築されたエキスパートシステムの1例の機能と効果

などについて述べる。

## 2. レンズ設計について

本節では、レンズ設計という分野について一応の紹介をしておく。レンズ設計の目的とは、簡単に、与えられた要求仕様を満足しうるレンズシステムの形状を決定することである。図1の様に、この要求仕様には、機能・形状寸法・コスト・性能などに関する様々なパラメータ値への制約が与えられる。一方、レンズシステムの形状を規定するパラメータは、各レンズの面の曲率・ガラスの種類・厚みおよび各レンズ間の間隔から成る50~100個程度の構成パラメータと呼ばれるものである。

この様な設計を進める上での根本的原理は、電気回路設計でオームの法則があるように、レンズ設計ではスネルの法則というものがある。これは、2つの屈折率の異なる媒体間の境界面に、光線が入射したときの屈折の様子が、その光線の入射角と屈折率の比によって決まるというものである。この法則に基づいて、被写体の一点から発生する無数の光線がレンズシステムを通過し像面（フィルム面）に、どの状態で結像するかを知ることが出来る。実際の設計では、設計途上のレンズシステムの性能等を把握するために、頻りにCADによってこの法則によるシミュレーションを行い、その結果に基づく設計変更作業を行うことによ

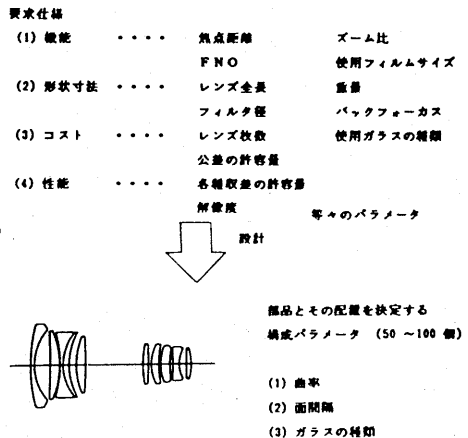


図1. レンズ設計の目的

### 3. 知識獲得作業

この様なレンズ設計分野において、実用的なエキスパートシステムを構築するに際し、次の目的をもった知識獲得作業が行われた。

- (1) 設計におけるエキスパートシステムの機能の分析のために、レンズ設計全プロセスを網羅すること。
- (2) 獲得された設計知識が実践的かつ一貫性のあること。

以上の目的から、設計業務でニーズの高い2種類の要求仕様を設定し、その実現に至るまでの全設計過程をフォローすることによって、知識獲得を行った。

しかしながら、知識獲得作業にあたっては一般的な方法が存在しないので、以下の2つの方法を検討し、試みた。

#### (1) インタビュー方式

これは実際の設計作業に先立って、要求仕様から想定しうる設計の進行と、そこで利用される可能性のある知識を専門家から、H.ペニー・ニイらのインタビュー方式にて獲得しようとするものである。

#### (2) 知識工学者の弟子入り方式

すでに述べたように、レンズ設計において専門家はCADを頻繁に使用する。この設計作業の様態を、図2に示す。専門家はCADに対して、性能シミュレーション等のために、LINEコマンド群を端末から入力し、その結果によって次回以降の設計プランを検討している。この様な設計作業形態の中に、知識工学者が積極的に介入する方法として考えられた方式である。図3の通り、

- a. 知識工学者は専門家に代って、CADを操作し、その結果を専門家に提示する。
- b. 専門家はその結果を評価し、次にとるべきCADへのシミュレーションの指示を行う。
- c. このとき知識工学者は専門家の指示した内容の背景や理由を尋ねることで、設計プロセス中において専門家の内部でなされている情報処理、およびそこで用いられている経験的知識の抽出を行う。

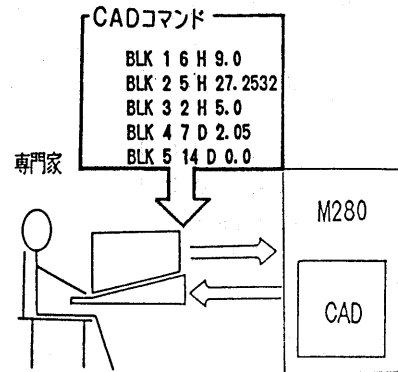


図2. レンズ設計の様子

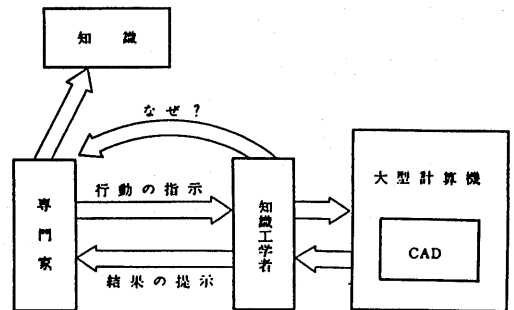


図3. 知識工学者の弟子入り方式

この様な知識獲得を行った結果、これらの方法論について以下の所見が得られた。インタビュー方式では、設計プロセスの全体的な流れが把握しやすいが、得られた設計知識は設計プロセスの中で、比較的設計PLANが明確かつシミュレーション結果が予測可能な場合しか一貫性・正当性が保たれなかった。これに対

して、弟子入り方式で得られた設計知識は実践性・一貫性という面で有効な手段であった。しかしながら弟子入り方式の場合でも、知識工学者にとっては、設計その場その場での知識獲得となるために、設計プロセス全体的な流れが把握しにくいこと、知識獲得作業に時間がかかること、CADの基本操作を知らなければならないこと、などといった問題がある。したがって、以上の知識獲得の経験から、これらの方法は相補的な性格を持っているものと考えている。

なお、これらの方法は、ある領域に知識工学を導入するための検討段階に有効なものである。システムが稼動に近づいて来た段階では、現場の専門家自身にその主体を移行していき、スムーズな知識ベースの拡張が図れる様にするべきであろう。

#### 4. 設計知識の分析

こうして獲得された設計知識をもとに、設計といわれる分野の中へどのように知識工学を適用していくかについて検討した。一般に、設計の基本的なプロセスは、PLAN・DO・SEEといったサイクルで表現出来る。これらを設計作業に換言するならば、ある設計時点での設計対象を要求仕様へ満足させるための、設計PLAN作成・設計変更・性能等の評価といった作業に対応させることが出来よう。更に、レンズ設計プロセスにおいては、過去の設計事例を参照することも多く見うけられるので、ここではこのような検索の作業も別途加えるものとする。

さて、以上の設計の基本プロセスの各作業内容に対して、先に得られた設計知識を分類してみると、レンズ設計の進行にともなって、重点となる作業やその質が異なってくることがわかる。このため、設計を効果的に支援するエキスパートシステムを考えた場合、機能や役割がその差によって影響をうけることがわかった。このエキスパートシステムがもつべき機能に着目し、レンズ設計全プロセスを眺ると、それはおよそ3つの設計段階に分類出来ることがわかる。これらの各段階をここでは、初期設計・中期設計・後期設計と呼ぶことにする。それぞれの設計段階でエキスパートシステムがもつべき機能とその設計段階の特徴については、以下の通りである。

##### (1) 初期設計

方式・機能設計の段階である。電気回路においては種々の等価変換が知られているが、レンズシステムでもこうした等価変換によって骨組構造を考えることが出来る。要求仕様内の機能や形状寸法等の制約から、この骨組のパラメータの値を決めることが、この段階の目的である。通常、この決定のためには、過去の設計事例のレンズシステム中から、設計変更することによって要求仕様を満足しそうなものの値を初期値として参考にすることが多い。

まず、この過去の設計事例の参照にあたっては要求仕様の与え方によって幅があるため、この値を正しく決定するための設計知識を用いて、見落としのない検索を行う機能を有するエキスパートシステムが考えられる。次に、この骨組を要求仕様の機能や形状寸法に適合する様に、設計変更する作業がなされる。このときの設計PLANは、選ばれた過去の設計事例や要求仕様のパラメータの与え方で決定しうる比較的明示的なものである。この理由は、骨組に関するパラメータ

の数が少ないので、その決定手順を容易にさだめうるからである。更に、設計対象に対しての評価作業も、主として機能・形状寸法といった、評価基準が単純明快なものを取り扱う段階である。しかしながら、実際の設計作業あたっては、骨組の最適なパラメータ値の探索のために、多くの繰り返し作業が発生する。したがって、設計PLANや評価方法などの設計知識を与えることにより、この設計を代行する機能を有するエキスパートシステムは省力化の有効な手段として考えられるのである。

### (2) 中期設計

詳細設計の段階である。初期設計にて得られた機能・形状寸法を満足するレンズシステムに対して、要求仕様内の性能・コストなどの制約条件に適合するような実際の形状に設計変更することが目的である。すなわち、この段階で各構成パラメータの値が決定される。

設計PLANは、初期設計で得られたレンズシステムが持つ各種収差などの、性能の主観的な傾向予測に基づいて決定される。このため、設計途中では実際の性能との予測のずれが発生するために、そのつど見直しが必要とされる。この様に設計PLANは、過去の設計経験から推測されるものであるために、その推測に合わない局面では、まったく新しい問題解決が要求されることがある。この時には、理論的な設計知識などをたよりに、新規な設計知識を構築していかなければならないといった創造力も要求される。また、評価作業にあたっては、各種収差を中心として、性能を規定するパラメータは数多く存在し、それらは単に要求仕様を満たすというだけでなく、それぞれの残存量の適切なバランスを持つことが必要とされている。このバランスについては、設計対象ごとによる違い、ユーザによる意見の違い等があるため、これをどの様に設定するかはそれぞれの専門家の判断力や決断力によるところも多い。

以上の様にこの段階では、設計PLANや評価に、創造力・決断力といった高度な能力が要求されており、これによって設計の期間や質が大幅に左右されるところでもある。現在のところ、これらの能力を知識工学によって実現し、設計を代行させることは困難であろうと思われる。しかしながら、指示された性能パラメータの劣化の原因追求、この原因の除去方法提示、更には指示された原因除去方法による設計作業の一部代行などといった、コンサルテーションを主体とした設計者中心のシステムを作ることで、設計者の誤謬や、見落とし等といった人間的側面から発生する種々の問題点を回避することが出来よう。

### (3) 後期設計

生産設計の段階である。各種の製作上の標準に適合するように、レンズシステムの軽微な設計変更が目的である。この段階の調査はいまだ充分とはいえないものの、これらの標準に合わせるための設計においては、設計PLANが明確で、実際の設計作業に多くの時間と繰り返しが必要とされ、かつ評価方法も単純であるような設計も存在する。このため、初期設計と同様に、この段階の設計を代行するエキスパートシステムによる省力化が可能である。

## 5. 知識工学の適用方法のまとめ

以上述べてきた様に、設計には様々な能力が必要とされている。現在の知識工学では、これら全ての能力を包含することは望むべくもないことである。したが

って、知識工学の適用にあたっては、全設計プロセスを見渡し知識工学の適用出来そうな部分や、その適用方法について十分な考察が必要であると思われる。特に、レンズ設計においては、代行・検索・コンサルテーションといった機能を持ったエキスパートシステムの実現により、設計の効率化が期待できることがわかった。

更に、実際の知識獲得の作業によって感じることは、現場の専門家との協力体制が不可欠であるということである。このような環境作りには、知識工学に対する啓蒙活動や、知識獲得の結果の分析に基づくエキスパートシステムの効果についてのすみやかなフィードバックを通して、現場の理解をうることも重要なことであった。この様に知識獲得の作業にあたっては、技術的側面だけでなく、人間的側面も決して見落とすことが出来ないのである。

## 6. エキスパートシステムの構築例

ここでは、先のレンズ設計への知識工学の適用方法の分析結果に基づき構築されたエキスパートシステムの一部を紹介する。このシステムは、初期設計段階の設計作業を代行しようとするものである。多くの場合、初期設計段階での設計PLANが、選ばれた過去の設計事例や要求仕様のパラメータの与え方で決定しうる比較的明示的なものであることは、すでに述べた通りである。これはこの段階の設計が、過去の設計経験から手続きの比較的良くわかっている、いわゆる類型設計が多いことによる。したがって、この類型設計の設計PLANを記述することにより、専門家の代行をしようとするのが、本システムの機能である。例えば、図4の通りに、設計者がレンズシステムの仕様や骨組のパラメータの値の変更を指示すると、システムは記述されている設計PLANや、CADの使用法、CADのエラー回復といった知識によって、新しいレンズシステムを自動的に生成する。このシステムを構築するために、使用した方法論について以下に述べる。

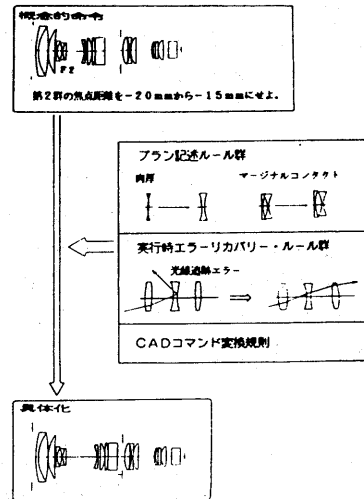


図4. エキスパートシステムの例

### 6.1 知識表現

設計PLANの記述が容易であるためには、専門家の思考する概念的表現と計算機上の知識表現の間のへだたりを、極力少なくすべきである。これを実現するために、設計対象を表わすデータ構造や設計知識表現の検討を行った。

#### 6.1.1 設計対象のデータ表現法

専門家は、設計途上において、設計対象を様々な概念レベルで取扱う。これを表現するためには、以下の様な設計知識を実現しうるデータ構造が、定義出来なければならない。

(1) 各概念レベルにおける設計対象の操作の知識。例えば、構成パラメータ・構成部品・骨組・レンズシステム等の、各レベルで削除・追加・変更等の操作の知識の記述が可能となること。

(2) より上位概念レベルのパラメータによる制約や継承の条件の知識。例えば、設計は、レンズシステムの仕様のパラメータから骨組パラメータ、構成パラメータへの詳細化のプロセスとも見ることが出来る。したがって、一般的に上位概念のパラメータ値は、より下位概念のパラメータ値の存在範囲を制約する。この関係の知識の記述が可能となること。

以上の条件を満足する設計対象表現としては、フレームによるデータ表現が最も適切である。設計対象の概念レベルにより作られるフレームの階層構造は、知識獲得の結果えられた設計知識が容易に表現出来るように、図5の通りとした。

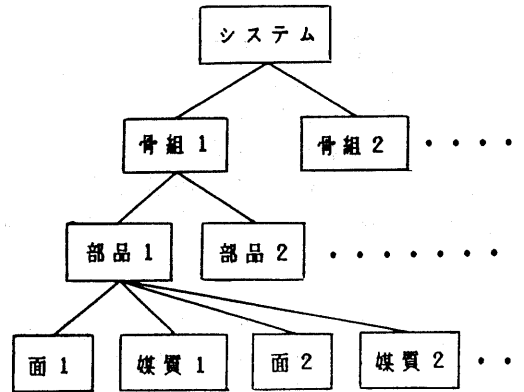


図5 . 設計対象の表現

### 6 . 1 . 2 設計知識の表現

設計PLAN等の設計知識の表現には、ルール表現を採用した。この理由は、ルール表現が、モジュール性・一様性に加え、専門家が自分の知識を説明する自然な方法と一致するという特徴を持っているからである [7]。

ところで、知識獲得の際に専門家は、知識工学者に対しある設計知識の理解の前提のもとで、新たな設計知識を述べる。更に、この前提となる設計知識の実現にあたっては、その方法論は必ずしも重要ではなく、その結果が等価な機能を実現すれば良いという場合が多い。こうした表現を可能とするために、具体的な設計者・設計対象などによって実現方法に任意性を持つ設計知識群より構成される、機能単位ごとの設計知識の取扱いが実現されるべきである。この様に専門家が設計対象を様々な概念レベルで思考するのと同様に、設計知識においても機能概念による階層性が存在する。したがって、これらの機能単位に知識をモジュール化し、この呼び出しが出来る

(Ruleset ADJUST-KOBA&NIKU

```
(Rule ADJUST-KOBA-GLASS
(variable d)
(class MATER)
(IF
(AND (= (totsu-ou? instance) 1)
(<= (? instance 'g-data) 1)
(<- d:delad (- 1.0 (koba-cal instance 'PRESS)))
(> d:delad 0.0)))
(THEN
(! instance 'd (+ (? instance 'd) d:delad))))

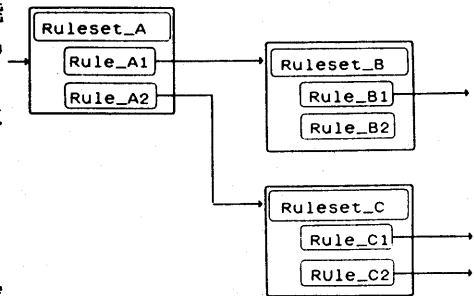
(Rule ADJUST-KOBA-AIR
(variable d)
(class MATER)
(IF
(AND (= (totsu-ou? instance) 1)
(= (? instance 'g-data) 1)
(<- d:delad (- 0.0 (koba-cal instance 'EA 1.0 'MIN)))
(> d:delad 0.0)))
(THEN
(! instance 'd (+ (? instance 'd) d:delad))))

(Rule ADJUST-NIKU-GLASS
(variable d)
(class MATER)
(IF
(AND (= (totsu-ou? instance) -1)
(<= (? instance 'g-data) 1)
(<- d:delad (- 0.1 (? instance 'd)))
(> d:delad 0.0)))
(THEN
(! instance 'd (+ (? instance 'd) d:delad))))

(Rule ADJUST-NIKU-AIR
(variable d)
(class MATER)
(IF
(AND (= (totsu-ou? instance) -1)
(= (? instance 'g-data) 1)
(<- d:delad (- 0.1 (? instance 'd)))
(> d:delad 0.0)
(<= (? instance 'parent) 'class) 'BMTR)))
(THEN
(! instance 'd (+ (? instance 'd) d:delad))))
)
```

図6 . 設計知識の例

ようにすることで、設計知識の表現を容易にした。この知識群をルールセット、その機能を実現する個々の知識をルールと呼ぶ。このようにして書かれた実際の設計知識例を図6に、ある設計知識が下位の設計知識群を呼ぶ様子を図7に示す。



## 6.2 知識利用

ここでは、推論の方法論というよりも、設計型エキスパートシステムという面から生じるシステム構成上の特徴に関して述べる。

図7. RULESETの呼出し

知識獲得作業によって得られた設計知識の中には、従来専門家の必須のツールであるCADの使用による、発見的な設計手法のための知識や、設計対象の評価方法についての知識も多い。したがって、このような設計知識を利用していく上で、このCADの機能もエキスパートシステムに要求される。しかしながら、一般的に、CADの使用が浸透している他の設計分野でも同様であろうが、レンズ設計におけるこのCADの規模も、FORTRANで約30万ステップと膨大である。そこで、この様なCADを極力再利用する立場から、このCADとの間に以下の知識を持ったインターフェースが必要とされる。

- (1) CADの種々の制約条件に関する知識。例えば、コマンドやパラメータの順序の知識
- (2) CADとエキスパートシステム間のデータ表現の整合に関する知識。
- (3) CADの実行エラーの回復の知識。

この様な知識は、設計PLANの知識の記述において意識される必要がなく、かつ実行においては必要に応じて暗黙的に使用されるべきである。このために、(1)(2)はCADの使用法の知識として、(3)はエラーリカバリの知識として、設計PLAN等とは別の知識ベースとされている。この様な機能を持った設計型エキスパートシステムの構成を図8に示す。

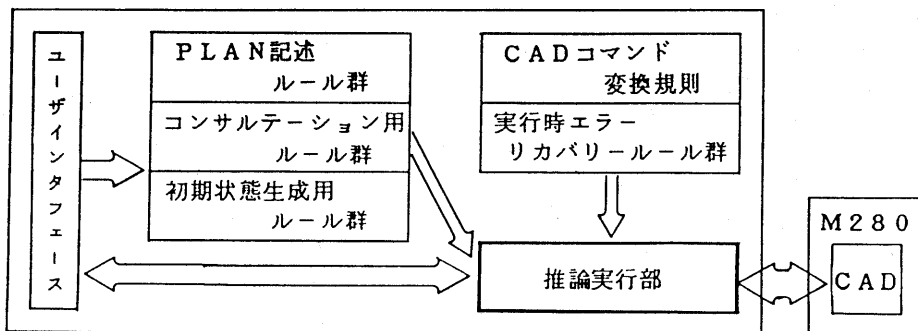


図8. 設計型エキスパートシステムの構成

### 6.3 実行結果

図9に、本システムによって得られた結果をしめす。これはある2つの骨組パラメータを変化することで得られる16本のレンズシステムを、実際に類型設計させ、その全長の変化をみたものである。明らかに、全長に対する最適骨組パラメータ値が存在することがわかる。

現在本システムは、設計現場でフィールドテスト中であるが、こうした設計検討に飛躍的な時間短縮を実現している。

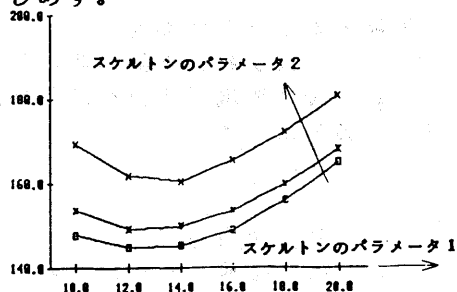


図9. 実行例

### 7. おわりに

本報では、レンズ設計への知識工学の適用の方法論を述べ、その検討によって実現されたエキスパートシステムの一例を紹介した。このような開発経験を通して、知識工学が設計に及ぼす影響について次のような見解を持つに至っている。それは、エキスパートシステムが単に設計時間の短縮をもたらすだけでなく、そのことにより網羅的探索が可能となることで、設計自体の質の向上をも、もたらすということである。

レンズ設計の世界では、年々要求仕様が困難さを増しつつあるといわれる。このような状況において、この壁をブレイクスルーするための技術が待望されている。知識工学が、この様な技術の一つとして、今後もこの分野に積極的に応用されていくに違いない。

### 8. 謝辞

本研究をまとめるに際しては、レンズ設計やそのCADの専門家の方々の協力が不可欠であった。労をいとわず本研究に参加していただいた、キャノン(株)カメラ開発センター・電子映像開発センターおよび技術システム部の諸氏に深謝する次第である。

### 9. 参考文献

- [1] 浅野 他：光学設計エキスパートシステムの構想(その1)，情報処理学会第27回全国大会予稿集6D-6，1983
- [2] 飛鳥井 他：レンズ設計エキスパートシステム(その2)，情報処理学会第30回全国大会予稿集6D-3，1985
- [3] 菊地 他：レンズ設計エキスパートシステム(その3)，情報処理学会第30回全国大会予稿集6D-4，1985
- [4] 加藤 他：レンズ設計エキスパートシステム(その4)，情報処理学会第31回全国大会予稿集1M-5，1985
- [5] 浅野 他：レンズ設計エキスパートシステム，昭和60年度電子通信学会情報・システム部門全国大会予稿集S2-7，1985
- [6] 溝口 編：「AIテクノロジー」第3章 レンズ設計 オーム社 (近刊)
- [7] Barr, A. Feigenbaum, E. A. 編：「人工知能ハンドブック」(第1巻) 第3章 知識表現、C4 プロダクションシステム、共立出版