The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	事例に基づく構造物の概念設計支援に関する研究
Author(s)	平, 俊男
Citation	大阪大学, 2000, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3169554
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

工乙 7912

事例に基づく
構造物の概念設計支援に関する研究

平成 11 年 12 月

平　　俊　男

事例に基づく
構造物の概念設計支援に関する研究

平成 11 年 12 月

平　　俊　男

目　次

第1章 緒　論 **1**
1.1 研究の背景 1
1.1.1 コンピュータ援用設計と概念設計 2
1.1.2 概念設計における設計事例 6
1.1.3 概念設計におけるコンピュータの役割 8
1.2 研究の目的と本論文の構成 11

第2章 事例の感覚的評価と設計支援 **15**
2.1 はじめに 15
2.2 構造設計における感覚的側面 17
2.3 設計事例に対する感覚的評価 20
2.3.1 感覚量の主成分化による感覚的評価の整理 20
2.3.2 感覚量の定性的表現と事例頻度 27
2.3.3 感覚的評価と構造形態との関連の抽出 29
2.4 感覚的評価に基づく事例知識 35
2.4.1 概念設計における設計候補の競合 35
2.4.2 競合候補の生成 36
2.4.3 競合候補に対する評価 38
2.4.4 感覚的側面に関する事例知識による競合候補の評価 40
2.5 感覚的要求を考慮する設計支援 44
2.5.1 アーチ橋構造物の設計支援 44
2.5.2 競合候補の評価における指標の重み付け 49
2.5.3 感覚的要求に基づく設計候補 51
2.6 まとめ 56

第3章 構造物設計事例の遺伝子的事例ベース **59**
3.1 はじめに 59
3.2 構造物の概念設計における事例の利用とその表現 61
3.3 遺伝子的事例ベースの構成 64
3.3.1 遺伝子的表現の冗長性による設計空間の表現 64
3.3.2 構造物の遺伝子的表現 66
3.4 遺伝的操作による事例ベースの生成 72

3.4.1 事例頻度に基づく遺伝的操作 72
3.4.2 橋梁構造物遺伝子的事例ベースの生成例と機能評価 74
3.4.3 事例ベース生成における遺伝的操作の検討 76
3.5 遺伝的操作による候補生成 81
3.5.1 設計要求との類似度に基づく候補個体群 81
3.5.2 候補個体群からの子個体生成としての候補生成 81
3.5.3 遺伝的操作に基づく候補生成の例 83
3.6 まとめ 86
付録：遺伝子的事例ベース生成に用いた設計事例 88

第 4 章 概念設計の多様性の考慮 93
4.1 はじめに 93
4.2 概念設計における候補の多様性 95
4.3 知識ベース推論における候補提示のゆらぎ 97
4.3.1 候補評価の確率的表現 97
4.3.2 候補提示のゆらぎを許容するシステム 100
4.4 設計者の意思決定のゆらぎ 105
4.4.1 遺伝子的手法による設計事例との類似に基づくゆらぎ . . . 105
4.4.2 意思決定木の飛移りを許容するシステム 112
4.4.3 候補提示における飛移りの可能性の検討 122
4.5 まとめ 127

第 5 章 個別設計者を考慮する設計支援 129
5.1 はじめに 129
5.2 概念設計における設計者の主観的価値観 131
5.3 設計者との対話による設計支援システムの個性化 133
5.3.1 多価値規準からの候補評価 133
5.3.2 複数エージェントによる個性の表現 134
5.3.3 候補評価の遺伝子的表現 135
5.3.4 対話による主観的価値観の獲得と候補提示への反映 136
5.4 設計者別の構造物の概念設計支援 138
5.4.1 設計支援過程におけるエージェント個体群の推移 138
5.4.2 エージェントによる候補評価個体群と移住個体群の生成 . 148
5.4.3 遺伝的操作による潜在的な候補生成 150
5.4.4 獲得した個性を用いる設計支援 155

5.5 まとめ 162

第 6 章 結　論 **165**

参考文献 **169**

関連論文 **181**

謝　辞 **185**

第1章

緒　　論

1.1 研究の背景

設計は，与えられた要求に対して，それを満たす具体的な人工物を実現する過程であり，工学の本質ともいえる人間の知的活動である．この活動は，人間の価値観とも関連した複雑な過程であるので，工学を支える自然科学の枠組の中での系統的な取扱いには制約が多い．このため，設計工学においては経験主義的な側面が強調され，科学的な視点からの接近は限定されてきた．設計教育においても，設計対象である人工物を構成する要素に注目し，その挙動を個別に取扱う要素設計論の立場が主であった．

一方，コンピュータの出現は，設計作業に対して明らかに大きなインパクトを与えている．たとえば，有限要素法に代表される計算力学解析手法，画法幾何学や製図手法としての CAD 等は，工学設計を支援するコンピュータツールとして定着している．この意味で設計におけるコンピュータ援用工学の考え方は一つの方向付けを示している．また，設計に対するコンピュータ化の試みは，概念設計に代表される人間の創造的な知的活動としての側面にも向けられつつある．この流れにおいてコンピュータの役割は，設計の省力化・自動化のためのツールとしてだけではなく，設計者がその能力をより発揮するための知的支援であるととらえられている．しかしながら，具体的な概念設計支援の枠組への試みは，まだ緒についたところといえる．

本節では，これまでのコンピュータ援用設計の試みと概念設計への取組みの動向，概念設計における設計事例の利用，概念設計支援におけるコンピュータの役割について概観する．

1.1.1 コンピュータ援用設計と概念設計

与えられた要求から具体的な人工物を実現するまでの設計過程には，構造物の設計を例に挙げると一般に次のような時間的段階がみられる [Sriram 1986].

1. 概念設計 (Conceptual Design)/予備設計 (Preliminary Design): 設計要求といくつかの鍵となる制約とを満たす構造系を，全体として整合のとれるように要素を組合わせて求めるシンセシスと，望ましい構造系の選択.
2. 解析 (Analysis): 選択された構造系のモデル化と，荷重などに対する応答を求める過程.
3. 詳細設計 (Detailed Design): 制約の全てを満たす構造要素の選択と幾何形状の決定.
4. 生産設計 (Product Design): 生産のための工程決定.

これらは，必ずしも明確な逐次的過程ではなく，通常反復的な試行錯誤を伴うが，一般に上流側ほど定性的・非定型的，下流側にいくに従って定量的・定型的な側面が強くなる.

このような段階のそれぞれにおいて，コンピュータ支援の考え方が推進されている．図 1.1は，赤木と藤田 (1990) による設計のコンピュータ化の概観図である．図中の「検索」,「計算 (シミュレーション)」,「形状処理」,「最適化」といった範囲は，数理的な定式化が比較的容易で，一般にコンピュータ化しやすい部分である．たとえば，シミュレーションとしては，有限要素法に代表される離散的な数値解析法は理論的に確立されており [e.g. 鷲津ら 1981; Zienkiewicz and Morgan 1982]，機械要素設計における構造解析手法として広く定着している．最適化は，重量最小化などの明確な目標を目的関数として定式化し機械要素の形状を決定する形状最適化など，最急勾配法，線形計画法等の数理的手法の応用として定着しつつある [Haftka 1985; Kirsch 1993; 多田 1994a, 1994b; 山川 1994]．目的関数がスカラー関数とならない多目的最適化については，パレート最適性の利用 [Petrie *et al.* 1995; 荒川ら 1998] などがみられる．非線形性が強い問題や，多峰性等の悪条件により数理的手法の利用が容易でない最適化については，シミュレーティッド・アニーリング法の利用 [Kirkpatrik and Gelat Jr. 1983; Kincaid 1992] や，ニューラルネッ

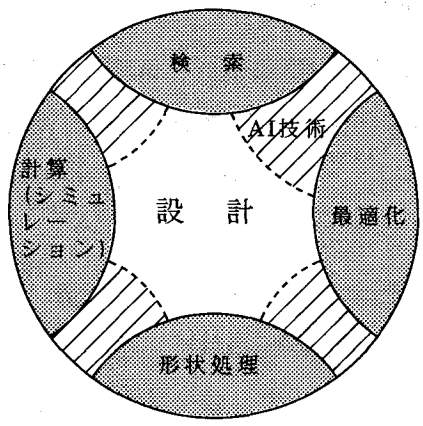


図 1.1 設計におけるコンピュータ化 [赤木，藤田 1990]

トワークの利用 [松田ら 1998]，遺伝的アルゴリズムの利用 [Goldberg 1989; Hajela and Lin 1992; 西川, 玉置 1993] などのヒューリスティックな手法がみられる．設計対象物形状の表現・操作の問題を取扱う形状処理は，1960 年代に提案されたコンピュータ援用設計 (Computer Aided Design) の枠組 [Elliot 1989] の中心的な研究分野であり[1]，製図を行うためのコンピュータソフトウェアが CAD アプリケーションと呼ばれ広く普及している．また，生産段階においては工程決定等に対するコンピュータの利用が幅広く行われており CAM (Computer Aided Manufacturing) と呼ばれる一分野をなしている [岩田ら 1987]．設計対象物の任意形状のコンピュータデータとしての表現は，設計から生産への加工情報の伝達手段としても幅広く浸透し，特に，設計と生産との連携においては，コンカレント・エンジニアリングの枠組など，情報の伝達・共有のためのツールとしてのコンピュータは必要不可欠なものとなっている [荒井ら 1998]．これらのツールは，解析，詳細設計，生産設計の段階で主に用いられており，人間の設計者に本来の創造行為に専念させるという意味で，コンピュータの有用な利用法である．

設計問題の数理的定式化の困難さに対しては，人間の持つ知識を if/then 形式のルールとして表現し，ルールベース推論によって人間の知的活動をモデル化す

[1]元来，FEM に代表される構造解析手法も含んだ概念として提案されたコンピュータ援用設計の略語 CAD が，ある時期には形状処理と同義語として認識されていた．1980 年代後半からは，形状処理を取扱う CAD は，Computer Aided Drawing，または Computer Aided Drafting と呼ばれるべきコンピュータ援用製図であると区別され，本来の Computer Aided Design は設計に関わる全ての側面を支援するものであるとされていた．しかしながら，今日ではこれらは Computer Aided Engineering としてとらえられており，単に CAD と呼ぶ場合には，再びコンピュータ援用製図を指すことが多い [Hauser and Scherer 1997].

る知識工学の利用が 1970 年代より行われてきた [Duffy 1987; Mark and Simpson 1991; Gero 1996]．しかしながら，知識ベースシステム構築の際に行われるインタビューと呼ばれる設計者からの聞取り作業のみでは，設計知識の獲得が不十分であり，知識獲得のボトルネックとなる [Reich and Fenves 1989; 溝口 1991]．なぜならば，設計知識に多く含まれるヒューリスティクス (発見的知識) や経験則は，明確な形式で表せないあいまいなものや，設計者に無意識的に取扱われるものも多く，ルールとしての表現が困難となるからである．また，たとえ設計知識が得られたとしても，その多くは断片的で，整合性の検証が必要となる．これらに対しては，インタビュー行為に関する考察 [尾形 1992] や，インタビュアーの知識獲得を支援するシステム [Kawaguchi *et al.* 1991] などがみられる．設計知識のあいまいさの取扱いについては，ファジー理論の応用 [Joshi *et al.* 1991; 大木ら 1992] や，定性推論の応用 [Soo and Wang 1992] がみられる．

設計問題に対する知識工学の応用には，構造解析に知識ベースシステムを統合した SACON [Bennett and Engelmore 1979] や，記号処理環境における構造解析 [Adeli and Paek 1986; 三木ら 1991]，最適化パッケージの選択に知識ベースシステムを用いる SELECT [Hartmann and Lehner 1992] や，知識ベースシステムへの最適化手法の導入 [Adeli and Balasubramanyam 1988]，構造形式の選定を行う知識ベースシステム [Leelawat *et al.* 1990; Nishido *et al.* 1990; Sabouni and Al-Mourad 1997] などがみられる．また，有限要素解析の前処理に対する知識ベース推論の利用 [Salgado *et al.* 1997] や，設計変数間の関係をルールとして記述することで設計対象物をモデル化する制約指向プログラミング [Stefik 1981] の利用 [赤木, 藤田 1988; Lakmazaheri and Rasdorf 1989] などがみられる．これらは，シンセシスは対象とせずに構造解析や最適化などの計算ツールの効率的な利用およびコンピュータが持つ検索能力の利用を目指すものであり，概念設計そのものを対象とするものではない．

設計の初期段階である概念設計では，設計主題 (モチーフ) や美観等に代表される設計者の意識的感覚的側面も重要な役割を果たしている．しかしながらこれらは，コンピュータによる設計支援システムの研究では，これまでの多くの場合，取扱われていない [Reich 1993]．たとえば，美観のような側面について考えれば，美しさが対象物そのものが持つ普遍的な性質なのか，観察者の主観に基づくものな

のかが明らかではなく，美的規準の取扱いが困難となることがその理由として挙げられる．美しさを対象物の普遍的性質であるとする前者の観点は秩序，黄金比率などの概念を示しており古典的に支持されてきた．しかしながら，実際に人が対象物から受ける印象のいくつかは個々の要素の印象として説明することができず，逆に要素ごとの属性を集約したところで対象物全体の属性を持たない．このため，対象物の形状の統一性やバランスに注目する考え方が最近では主となっている．すなわち，美的規準の普遍的・客観的な法則化は不可能であり，観察者の主観的な全体的評価のみが可能と考えられる [高梨 1997]．このような美的規準は，基本的に個別の設計者の価値観として陽には見えない形で保持されている．したがって，明確な設計知識としてルールを記述することは不十分となり，ルールベース推論のような論理による概念設計の取扱いには困難さが多い．

一方，コンピュータ援用設計の分野と並行して，設計という行為自体を客観的に記述し，科学として体系的に扱おうという試みが，設計論として行われてきている [Dixon 1987; Finger and Dixon 1989; Cross 1993; Goel 1994; Levitt 1998; 中沢ら 1999]．たとえば，システム工学的視点から，全体は部分から構成されるが全体の挙動は部分の挙動からは推しはかれない事があるので，全体的立場から対象を眺める必要性を説き，直感と経験に支配されてきた設計を，より合理的なものとして再構成しようとする立場 [瀬口ら 1987] や，実用可能なツールをできる限り論理的に算出し，その現実作業の有効性をもって仮説としての法則の有用性を検証することで体系化をはかる一般設計学 [吉川 1979; Takeda *et al.* 1990] がみられる．設計論的考察からは，設計者は必ずしも最適な設計を実現できているわけではないこと，すなわち設計過程は最適化ではなく反復的な「満足化」の過程であること [Dixon and Simmons 1983; Boyle 1989] や，単独の設計者の意思決定のみで行われているのではなく同僚や顧客など複数の意思決定者が関わる過程であり，自然科学だけではなく社会科学的な側面を含むこと [Subrahmanian *et al.* 1994; 仲ら 1997] などが指摘されている．

概念設計に対するコンピュータ利用の試みの多くは，人間の創造的問題解決モデルの同定によって発想法の体系化を試みる設計論的アプローチ [折原 1993] である．たとえば，数量化手法や多変量解析などの既存の手法の組合せにより概念設計における設計者の感覚的側面を体系化する試み [長町 1988; 森 1991] がみら

れる．また，知識工学的手法の援用により，機械設計における設計者の思考過程を明らかにしようとする試み [Ulrich and Seering 1989; Cagan and Agogino 1991; Spangler 1991; 岸 1992; 野口 1994] や，複数の意思決定者がかかわる過程として設計をモデル化する試み [Morse and Hendrickson 1990; Nagy *et al.* 1992; Bahler *et al.* 1995; Prasad *et al.* 1996] などがみられる．人間が行っているシンセシスの概念モデルには，認知心理学的な設計モデル [Adelson 1989; Kolodner and Wills 1996; Visser 1996]，人間が設計解を得る過程にみられる非論理的思考をアブダクション [Davis 1990] により説明する試み [山中 1994a; 柳生 1995] や，生物の進化過程や行動に観察される創発現象との対比による設計過程の解釈 [小林 1993; 池上 1993; Perkins 1994; Soufi and Edmonds 1996; Poon and Maher 1997] など多様な視点からのアプローチがみられる．このような設計論的立場からみた概念設計への興味は，人間の行っている知的活動に対するコンピュータ利用の可能性を探るものとして不可欠となっている．

1.1.2 概念設計における設計事例

設計者が新たな要求に対する設計を行う場合，全く白紙の状態から新たな設計解を創り出すのではなく，過去に実現された設計事例を利用し，その寸法等の一部の修正によって設計解を導き出す類似設計がしばしば行われる [赤木 1991]．また，概念設計段階では設計者による事例解の無意識的な検索によって，たいていの場合には少しの修正のみで殆どの設計制約を満たす設計解を得ている [Ramirez 1996]．すなわち，設計は多くの場合，過去の設計事例，経験が指針となっている．特に機械設計や構造設計では，VLSI などの論理回路の設計と比較して，機能と物理的要素間の対応が明確ではなく，ルールとして抽象化された論理に基づく推論だけでなく設計者の経験に基づく直感的な判断も大きな役割を果たしている [Navinchandra *et al.* 1991]．

また，知識ベースシステムの構築において問題となる知識獲得に対して，設計者からルールを獲得するよりは，具体的に実現されている設計事例を集める方が容易であるので，多数の事例から帰納的に知識を抽出することが提案されている [McLaughlin and Gero 1987; 辻野, 西田 1995]．同様の観点から，データベースに過去の設計事例を蓄えておき，与えられた設計要求に類似した設計事例を検索す

るアプローチもみられる [Maher 1987]. Maher は，検索された類似事例の件数をその形式の設計候補の優先度として表し，類似の形式のうちで過去によく実現されたものほど高く推薦するアプローチを示している．設計事例の再利用については，典型的な事例を蓄え，未知の問題を解決するときにはその問題に類似した既知の問題を検索し，その既知の問題に対する解事例を変形することによって当該問題の解を得ようとする事例ベース推論 [奥田，山崎 1990] の利用も多く見られる [Pu and Reschberger 1991; Pu 1993; Maher and Zhang 1993; Maher *et al.* 1997]. これらの事例に基づく設計は，人間が設計を学習する際には事例が教えられていることからみても自然なアプローチであると考えられる [Domeshek 1992]．また，前項に述べたように，美観等の感覚的側面に関する設計者の主観的価値観は陽に表すことが困難であり，設計者の具体的な意思決定の結果である設計事例に現われてくるので，この様な規準の取扱いに対しても設計事例を用いることが有効と考えられる [Reich 1993].

事例ベース推論は，知識をルールとして表現せずに問題解決を図ろうとすることが大きな特徴であるが，設計問題では，解事例を現問題へ適合するように変形する過程において必然的に知識が必要となる [寺野 1994]．また，経験を積んだ設計者ならば，ルールに基づく抽象的な推論過程のみによって設計を行うことはなく，以前の設計解を全て検索するようなこともしない [Howard *et al.* 1989]．したがって，設計問題に対する事例は，ルールベース推論と補完的に利用されるべきであるとの考えは重要である [Golding and Rosenbloom 1991; Bardasz and Zeid 1993]．特に，工学的設計では設計者の発見的知識や経験則だけではなく，領域理論に基づく客観的な深い知識も重要となるので，設計支援システムには客観的に記述しうるルールに基づく推論と事例に基づく推論とのバランスが重要となる．

一般に事例に基づく類似設計的アプローチは，過去に実現された設計事例が新たな設計に強く影響を及ぼすために，シンセシスが主となる概念設計では制約的にはたらくことが多い．しかしながら，過去の設計事例は，設計情報の再利用という観点だけでなく，新たなアイデアの糧としても有用である [Bennett 1996; 田浦 1997]．設計過程を観察すると，新規設計であっても全く新たな機械要素や構造を用いることはまずなく，既存の要素の組合せ方によって新規性が現れてくると考えられている [Hua 1992; 永田，畑村 1993; Verstijnen and Hennessey 1998].

概念設計の段階では，設計者は非常に広い設計空間を考慮しており，この空間中で設計対象物を表現するのに必要な属性は問題領域毎に異なる．設計行為の認知心理学的モデルからは，概念設計では，類推が大きな役割を果たしていることが明らかとなっており [Madanshetty 1995; Casakin and Goldschmidt 1999]，人間の設計者は，一見異なっているものに潜んでいる類似性を判断する能力 [野口 1994] や，問題領域を越えて事例を検索できる能力 [山口ら 1989] を備えている．したがって，一般的な事例ベース設計のアプローチ，設計事例を与えられた設計仕様とそれに対して実現された設計事例の属性値集合とによって固定的に表現することは，概念設計において取扱うべき事例の比較が困難となるために十分には機能しない．これに対しては，設計事例に現れている見かけ上の属性をそのまま記録するのではなく，機能空間などに抽象的な記号を用いて表現し，写像によって設計対象物を表すことで固定的な設計対象物表現の枠組を越え得ること [Welch and Dixon 1994; Gorti and Sriram 1996; Hauser and Scherer 1997] が指摘されている．たとえば，Wang と Gero (1997) は，橋梁構造物の概念設計を例にとり，最も最近のいくつかの類似の設計事例を用いて，新たな設計状況において最も最近の事例ほど古いものよりも強い影響を与えるようにした時系列に基づく設計解の予測を試みている．設計事例の時系列に隠されている事例知識は，問題領域の異なる設計事例の経験的な写像や，組合せと同様の役割を果たすことが示されている．

1.1.3 概念設計におけるコンピュータの役割

一般にコンピュータ援用設計において設計問題は，与えられた要求を満たす解を予め定義された閉じた状態空間内での検索により求めることととらえる見方が支配的である．コンピュータは有限の記憶容量の制約のもとに，閉じた空間を取扱うので，可能な設計解の全集合は不変の検索空間内に静的に存在していることになる．たとえば，設計対象物は，予め定義された属性と属性値とのペアがつくる固定的な集合で表現され，ルールや事例の記述に用いられる属性はいずれも固定的なものである．これに対して，シンセシスを中心とする設計活動は検索では

なく非定型な探索であり[2]，検索に基づく設計は，良定義されている詳細設計などの定型的な設計のモデルに過ぎず，概念設計の支援としては十分とはいえない [Smithers and Troxell 1990; Coyne and Snodgrass 1993]．シンセシスとしての設計の本質的目標は，これまでに存在しなかった新たな人工物を創り出し「世界を変えること」[Gero 1996] である．また，設計には，設計者が新たな事実や手順を知ることによって一貫性の欠ける意思決定を行ったり [Alcántara 1991]，より良い設計を目指して進化していく [Gorti and Sriram 1996] といった動的な特性がみられる．ただし，実際に人間が行っている創造的と呼ばれるような設計においても，人間の持つ能力が無限でない以上は，閉じた世界の制約は課せられている．すなわち，コンピュータによるシンセシスの取扱いの不十分さは，取扱う世界が閉じているかどうかによるものではなく，閉じた世界の記述に基づく知識と論理体系に依拠した従来のアプローチによるものであると考えられる [上田 1993; Ramirez 1996]．

人間の行う設計は，非常に大きな検索空間の一部に注目しており，注目領域が設計過程において不動ならば定型設計と呼ばれるが，設計の進行とともに，注目の焦点がシフトされていくことで，一見，動的な探索活動となると考えられる．すなわち，人間の創造性とは非常に大きな検索空間中で，注目領域を適切にシフトできる能力と定義できる [Schnier and Gero 1996]．一方，コンピュータによって取扱われる設計空間は，人間の設計者が意識的・無意識的に考慮しているそれに比べて遙かに小さく，生成される設計解の多くは設計者にとって容易に予想され得る類型的な設計へと設計者を導きがちとなる．したがって概念設計支援においては，コンピュータが設計過程を主導することは不適当といわざるをえない．設計者が設計過程を駆動すべきとの考え方に基づき，赤木と藤田 (1988) は，船舶の概念設計を例に，制約伝播に基づく設計支援システムを示している．これは，ある属性値の変更による他の属性値への波及を設計者が容易に把握可能とすることで，設計者の試行錯誤を柔軟に支援することをねらいとしたものである．また，設計者がシステムの想定する標準的な設計とは異なる設計案を採用した場合，その理由を設計者に質問することで新たな知識を獲得し知識ベースを充実していく試

[2]ここでは Smithers と Troxell (1990) の定義に倣い，検索 (search) を予め定められている状態空間 (検索空間) の中から解を選ぶ作業，探索 (exploration) を検索空間の外も含めて解を探しだす作業とする．

み [Garcia and Howard 1992] や，複数の解候補の中からの設計解の選択における設計者の意図に注目し，事例ベースの設計支援を行う試み [山岡, 西田 1995] がみられる．Moore ら (1997) は，与えられている設計問題に対してシステムは最も適していると信じる解を推薦する機能を持つが，人間の設計者が設計過程を主導し，システムが設計者を観察しながら，知識ベースに反する場合に設計者と対話を行うアプローチを示している．これらは，コンピュータが設計を駆動するのではなく，設計者を背後で見守り，必要な時のみに助言する姿勢 [Anumba and Watson 1992; 永田，畑村 1993] である．

一方，自然界の生命システムに観察される複雑な挙動に注目した人工生命のアプローチからは，局所的な要素の大域的な相互作用によって陽には記述していない新たな挙動を生じ得る創発現象が観察されており [上田 1995]，設計解の多様性に対しても同様の解釈が可能である [Poon and Maher 1997]．すなわち，設計空間が予め定義された閉じた世界であっても，その組合せパターンとしての設計解には，新たな性質が生じる場合がある．たとえば，既存の設計知識に存在する変数関係を互いに入れ替え，実際には存在しないかもしれない知識を組合せ的に創り出し，それらを用いた設計候補の生成 [池本ら 1996] が試みられている．提示される設計案には実現不可能な設計も含まれるが，既存の知識による推論とは異なる新たな設計案を導く可能性を持ち，現存の技術では実現不可能な解であっても，不可能な部分の解決という新たな設計への示唆を設計者に与えることができる．

人間の創造的活動を刺激するためのツールとしてのコンピュータのあり方を探る立場 [Dreyfus 1979; 堀 1993; Rodgers and Huxor 1998] からは，創造的活動としての設計過程では，コンピュータによる高度な判断は必要条件ではない [中島 1993] との主張や，Designer Amplifier としてのコンピュータの提案 [鷹合ら 1997] がみられる．このとき，実現が可能かどうかは厳密には問わず，不確かな情報も含む多くの設計案を生成することが求められ，設計者に多くの情報判断・取捨選択の機会を与えることが重要となる [Chakrabarti and Thomas 1996]．すなわち，コンピュータがブラックボックスとして設計過程を強く駆動するのではなく，個別の設計者の対話的なパートナーとしてふるまい，意思決定の主体を設計者におく設計アシスタント [Dybara *et al.* 1996; Hauser and Scherer 1997; Garrett Jr. 1998] としてのコンピュータ援用設計の枠組が注目されている．この枠組におい

ては，閉じてはいるが大きな設計空間の取扱いと，適切な組合せ的候補生成機能とが鍵となる．

1.2 研究の目的と本論文の構成

与えられた要求に対して，それを満たす具体的な人工物を実現する設計過程には，一般に概念設計，解析，詳細設計，生産設計の時間的段階がみられる．概念設計段階で与えられる設計仕様，制約条件は，詳細設計等でみられるような設計解を一意に定める強いものではなく，設計候補には多くの競合が生じる．このとき，設計者による競合候補の評価，選択にあたっては設計者自身の主観的価値観が大きく関わっており，そこで用いられる発見的，経験則的な設計知識の多くは明確な論理としての記述が困難である．また，概念設計段階では，設計過程の後の段階で考慮されることが少ない美観等に代表される感覚的側面からの評価が，大きな課題のひとつとなる．設計者が行っている設計候補の生成については，その多くは，全くの新規設計候補の生成ではなく，与えられた設計要求を鍵に，設計者が持つ知識・経験から無意識的に検索された事例解の修正による類似設計であるといえる．しかしながら，既存の設計事例に基づいていても，設計者による論理の飛躍や発想などの非定型な情報処理，たとえば問題領域の異なる設計事例の組合せといった操作によって，生成候補に新規性が生じ得ると考えられる．

このような定性的，非定型的な概念設計のコンピュータによる支援では，設計者の主観的価値観が大きな役割を果たしていることから，解析，詳細設計で行われるようにコンピュータが設計過程を強く駆動するのではなく，意思決定の主体を設計者本人におく設計アシスタントとしてのコンピュータシステムの実現を目指すアプローチが妥当であると考えられる．設計アシスタントシステムとしてのコンピュータの役割は，価値観を設計者に適応させながらも完全な一致を目的とはせず，異なる視点を持つ設計者からの候補提示を模擬することにより，支援対象とする設計者に刺激を与えることである．このようなシステムが支援の対象とする設計者は，自らの主観的価値観を持つ者であり，定型的作業者としての設計者ではない．したがって，このアプローチでは，設計過程の後の段階で可能な定量

的，定型的側面の支援による設計自動化，省力化のアプローチとは異なり，設計者の労力の直接的な軽減は期待できない．しかしながら，設計者とアシスタントシステムとの対話的設計過程において，異なる視点からの設計候補の提示は，設計者に多くの意思決定の機会を与えることで，たとえその候補が採用されなくとも，設計者の漠然としている自らの価値観の明確化や，設計者による新たな設計への示唆につながることが期待され，概念設計支援としてのひとつの可能性を示すものである．

本研究は，これらの基本的立場から，概念設計過程の考察および計算機モデルの提案，設計支援システムの構築と評価を通じて検証を行い，コンピュータを用いた概念設計支援のための方法論を提出することを目的とする．前節で概観したように概念設計では，設計者による設計候補の生成，評価にあたり設計事例が大きな役割を果たしていることから，設計支援システムの候補生成，評価においても設計事例に基づくアプローチをとるものとする．ただし，コンピュータが取扱う設計空間は人間が漠然と取扱っているそれに比べ遥かに小さく，類型的な設計へ設計者を導きがちとなるので，設計者に対して多様な設計候補を適切に示唆できることが重要となる．これに対しては，設計者による候補生成にみられる事例解の非定型的な組合せ操作のモデルとして，遺伝的アルゴリズムにおける遺伝子表現された個体群を設計事例群とし，それらに対する交叉，突然変異などの確率的操作による新規個体生成を用いることが有効であると考えられる．

本論文では，構造物の概念設計支援を対象に，対話的なパートナーとして設計者に多くの意思決定の機会を与える設計支援システムの実現のために，以下の課題について検討する．まず，デザイン性などの感覚的側面からの競合候補の評価に対しては，過去の設計事例の感覚的評価に基づく事例知識の獲得と利用について考察する．設計候補の多様性に対しては，与えられた設計要求から設計知識により論理的に定まる複数の設計候補をもとに，これらと類似の設計事例を組合せることによる候補生成を考える．ただし，事例データベースは，構造形態の見かけ上の属性ではなく遺伝子的表現された設計事例を保持することで，構造形態の異なるものについても組合せ的操作の対象とし，多様な候補生成と設計空間とを扱うことの可能な遺伝子的事例ベースの構築を試みる．また，システムによる設計評価値は定性的な意味合いしか持たないことと，収集される設計事例が限られ

たものであり，類型的な設計へ設計者を導きがちとなることを考慮し，候補提示に遺伝子的事例ベースをもとにした確率的なゆらぎを導入することで広い設計空間を設計者の考慮に上せる枠組について考察する．設計者が個別に持つ主観的価値観，すなわち個性の考慮に対しては，それぞれが単一の価値規準を持つ複数のエージェントの集団により，適応的ではあるが異なる価値観からの候補提示を可能とする機能について考察する．概念設計支援システム構築の例には，実際の設計活動において美観等の感覚的側面への注意が多く払われている橋梁構造物の 2 次元スケルトン設計をとりあげ，ケーススタディによって設計アシスタントシステムの評価を行う．

第 2 章では，概念設計における構造物の感覚的デザイン性などの主観的にしか取扱えない側面を考慮するために設計事例に対する感覚的評価を利用した設計支援の枠組を提案する．まず，設計者による過去の設計事例に対する感覚的評価を数量化手法を用いて取扱い，構造形態と感覚的評価との帰納的な関連付けを事例知識として整理・獲得するための手法を述べる．次に概念設計段階にみられる設計候補の多くの競合に対して，ルールベース推論に基づき競合候補を生成し，それらの評価を獲得された事例知識によって行い設計者へ提示するための手法を説明する．また，アーチ橋構造物を例にとり設計支援システムの構築を試み，客観的な設計規準に加え主観的な感覚的デザイン性に基づく設計要求を考慮する候補提示のケーススタディを行う．

第 3 章では，概念設計で必要となる多様な設計候補に比して，実際に実現，収集され得る設計事例が少数のサンプル集団に過ぎないことを考慮し，設計対象物を遺伝子的に表現することで広い設計空間を表す枠組を考える．まず，設計対象物である構造物の表現を考察し，見かけ上の構造形態を属性ととらえた単純な属性値集合として扱うのではなく，遺伝的アルゴリズムにおける表現型ととらえる．事例ベースでは，遺伝子型として抽象的に個体表現された設計事例を用い，構造形態の異なる事例に対しても構造機能性の類似を測ることが可能となる表現を考える．次に，設計事例群の特徴として事例頻度に注目し，頻度分布が事例群に類似の個体群を生成する手法を提案する．この個体群はサンプル集団である事例群の特徴を表すだけでなく，組合せ的な遺伝的操作によって多様な設計可能性を表現するための遺伝子プールとして取扱うことを可能とする．また，橋梁構造物の

設計事例を収集し，これらを表現する遺伝子的事例ベース個体群を生成することで多様な候補生成に対するケーススタディを行う．

第4章では，概念設計における設計候補の多様性に注目し，知識ベース推論における候補提示のゆらぎと設計者の意思決定過程のゆらぎについて考察を行う．感覚的側面からの評価をはじめとして概念設計での競合候補の評価は，定量的に行うことが困難であるので，その評価値を相対的な指標ととらえ，確率的な候補提示を試みる．設計者へは，評価値の低い候補であっても確率的に提示される可能性を持ち，多くの候補が提示されると考えられる．システム構築のケーススタディは，アーチ橋構造物の概念設計支援を例にとり行う．また第3章に示した遺伝子的事例ベースの考え方に基づき，設計事例をいったん遺伝子型として抽象的に表現しておくことで，みかけ上大きく異なるような構造形態についても設計候補として提示され得る枠組を示す．これにより知識に基づく推論の流れのみからは見いだせないが，構造機能性は類似している多様な設計候補を提示可能とし，知識に基づく推論の本質的な決定性を緩和することを目指す．システムの構築例には橋梁構造物の概念設計をとりあげる．

第5章では，概念設計における設計者の主観的意思決定と動的側面に注目し，設計者毎の個性を考慮する設計支援の枠組を提案する．ここでは，設計者への候補提示によって支援を図る設計アシスタントシステムが，設計支援の積重ねとに応じて，候補提示の傾向を個々の設計者に適応していく枠組を提案する．アシスタントシステムには，それぞれが独自の価値規準のもとに設計候補の評価を遺伝子的事例ベースに表現する複数の候補評価エージェントを持たせる．エージェントはシステムの持つ価値観によって選ばれ，それの持つ価値基準のもとに推薦する候補が設計者に提示される．この候補に対する設計者の採否の意思決定をもとに，アシスタントシステムは自らの価値観を更新していき，設計者への個性化を図る．ただし，エージェントによる候補評価の表現，候補提示を確率的に行うことで，個別の設計者に個性化されながらも多様な候補提示を可能と考えられる．システムの構築例には橋梁構造物の概念設計をとりあげる．

最後に第6章で，本論を総括する．

第2章

事例の感覚的評価と設計支援

2.1 はじめに

人間の行う設計活動には元来，工学理論に基づく理論的側面と設計者の直感に基づく感覚的側面とがみられる [Ferguson 1992; Reich 1993; 山中 1994b; Casakin and Goldshmidt 1999]．技術的水準が向上し工業製品の必要機能が十分満たされるようになってきた 1980 年代末には，製品に対する価値として機能性はもちろんのこと，美しさや快適さといった二次的な付加価値も求められており,「感性の時代」が到来したともいわれていた [長町 1988]．このような状況における工学設計には，従来とは異なる視点として，設計者の持つ感性を考慮することも重要となる．したがって，設計問題は従来重視されてきた工学理論などの客観的に支持され得る理論的な側面のみならず，設計者の感性や直感に基づき行われる意思決定などの主観的にしか支持され得ない感覚的側面をも有する二面性を持った活動となる [高梨 1991]．この感覚的側面は，設計者があるコンセプトのもとに設計案をまとめていく概念設計の段階において，特に重要となると考えられる．すなわちコンピュータを用いる概念設計支援のシステム化にあたっては，これらの 2 つの側面を同時に考慮する構造・感性設計としての統合的な枠組が必要となる．

一般に設計問題は，設計仕様として与えられる要求を満たす具体的な実体を求める過程とみなされる．この過程は，属性によりモデル化された設計対象物の属性値の仮定と，属性値が要求を満たすかどうかの評価，およびその評価に基づく修正といった反復的な満足化の過程により進められる [Dixon and Simmons 1983]．このとき，属性値は，陽に与えられる設計仕様のみからは一意に定め得ず，複数候補の競合が生じることが一般的である．これらに対して設計者は，習慣などの陽には表されていない条件に基づき，反復的に候補選択の意思決定を行っていく．

このような過程のコンピュータによる支援手法として，設計者の意思決定のもととなる設計知識に注目し，それらを整理したものを知識ベースとして記述する知識工学的手法がある程度定着されているといえる [赤木, 藤田 1990; Gero 1996]. 知識ベースに記述される設計知識は，インタビュー作業によって設計者から直接抽出されるものが主となるが，設計者の持つ設計知識の多くは経験や直感に基づいて形成されており，十分に体系化されているとは限らない．したがって，インタビューなどにより直接に獲得された設計知識のみでは，十分な設計支援が困難となる [溝口 1991]．特に，概念設計において重要となる感覚的側面に関する設計者の主観的な意思決定は，ほとんど意識されないままに行われるものも多く，その論理の獲得の困難さは顕著となる．これに対して，過去の設計事例は，設計者が陽には持たないものも含む設計知識の具体的な表現形態のひとつであるので，これを利用する事例指向のアプローチ [Reich and Fenves 1989; Howard *et al.* 1989; Pu 1993; Reich 1993] が有効であると考えられる．

本章では，構造物の概念設計を対象として，感覚的デザイン性などの主観的，定性的にしか取扱えない側面を考慮する構造・感性設計支援の枠組を議論し，ケーススタディにより有用性を検討する．2.2節では，構造物の感覚的側面を考慮した概念設計における設計事例の利用について議論し，2.3節では，設計事例の構造形態とそれに対する感覚的評価との関連を事例値のばらつきに基づき帰納的に抽出する手法について議論する．2.4節では，抽出された関連の強さをもとに事例知識として競合候補の評価に利用する手法を示す．2.5節では，構造物の設計における理論的側面に関しては標準的な知識ベースを用い，感覚的側面については設計事例より抽出された事例知識を用いる構造・感性設計支援の枠組を示し，アーチ橋構造物の2次元スケルトン設計を例にとり設計支援システムの構築を行う．システムの評価は，主観的な感覚的デザイン性に基づく設計要求を考慮した候補提示のケースタディにより行う．最後に2.6節でまとめを述べる．

2.2 構造設計における感覚的側面

工業製品の設計・生産における解析技術や生産技術などの技術水準の向上により，製品の必要機能が満たされるようになっている今日，製品に求められる価値として機能性のみが重視された時代も終り，人間の側からの要求である楽しさや快適さなどの付加価値が求められるようになっている．工業製品は，我々の日常生活と密接なかかわりを持ち，ときには我々の感情の対象ともなり，我々の新たな生活を創造するといった役割も求められている [下郷 1988].

このような時代的背景とは並行して，従来より橋梁構造物の設計においては，安全に障害物を越えられることといった機能性が求められるのはもちろんのこと，公共の利用の対象となるものであるから，美観などの感覚的な側面が社会的価値として考慮されるべきであるとされている [土木学会 構造工学委員会編 1982; 日本鋼構造協会 1985; Leonhardt 1982; Schlaich 1992]．しかしながら，過去においては，専ら経済的な要請により，多くの橋梁が画一的な特徴のないけた橋として架設されてきた．これらの反省を踏まえ，近年では，設計荷重の小さな橋梁を中心に，人々に対するモニュメントとしての機能などが，従来の橋梁工学の枠組を超え，都市工学や建築工学，心理学などの側面からも考慮され，設計計画の検討がなされるようになっている [関西道路研究会 道路橋調査研究委員会 1991; Bennett 1996; 長谷川 1996]．また，設計荷重として構造物自身の重力荷重が支配的となり，構造即形態となる純粋構造体である長支間橋梁においても，構造解析と施行性の観点のみからではなく，設計の初期段階から視覚を意識し，形態に注意を払った例もみられるようになっている [伊藤 1991; 村瀬ら 1992 など]．極端な例としては，イラストレータが，設計図のない状態で橋の図を描き，それをもとに構造解析を行った例 [近藤 1989] や，構造工学的に素養のない，華道の家元のデザイン構想に基づき人道橋の構造設計を行った例 [鴨野 1992] などもみられる．また，橋梁形態のバラエティを保つためには，力学的に多少不合理なものがあってもよいのではないかといった指摘もみられ [成田ら 1992],「形態は機能に従う」から「形態は感性に従う」時代であるともいわれる [高梨 1989].

このような状況における設計活動に対して,「人間が持つ願望としてのイメージや感性を，物理的なデザイン要素に翻訳し，具体的に設計を行う技術」として長町 (1989) の提唱する「感性工学」や，高梨 (1991) の「感性による主観的・不合理性のある要素を重視しながら，客観的・合理性のある理論体系をその手法とする」「設計美学」などの，従来の工学の範疇を超えたアプローチによりシステム化を図ろうとする試み [関口ら 1994] が注目されている．また，消費者からの感性的な要求を製品に反映させる製品開発の例は，家電製品，自動車などを中心に広く定着している [森 1991; 神藤 1992; 山口 1994]．これらは，工学的な設計においても人間の果たす役割が重視されてきていることの現われであると考えられる [山岡 1996].

しかしながら，提唱されている手法の多くは，その適用対象が，構造機能と形態とが比較的独立しており，形態の造形の自由度が高いものに限られている．橋梁構造物などの構造機能と形態とが密接に関連している対象に対しては，これらの手法は必ずしも適切とはいえない．一方，構造設計問題に対して，知識工学的手法を援用する設計システム [Bennet and Engelmore 1979; Paek and Adeli 1988] では，構造解析，最適化などに基づいた理論的な側面に着目しており，設計問題の感覚的な側面に関してはほとんど考慮されていない．工学設計問題のシステム化にあたっては，ここに述べたような視点を考慮する補完的なアプローチとして，客観的な工学理論により支持され得る理論的な解析的側面のみならず，設計過程を進捗させる主体としての設計者の役割を重視し [Dybara *et al.* 1996; Hauser and Scherer 1997]，人間の感性に基づく主観的な側面をも含んだ統合的な構造・感性設計の枠組が重要となると考えられる.

人間の行う主観的意思決定は，設計の理論的側面とは異なり，コンピュータによるシステム化が困難なものであるが，その論理は設計者自身の経験により形成されていくものであると考えられるので，設計事例の役割は大きい [Domeshek 1992; Maher and Zhang 1993; Kolodner and Wills 1996]．特に設計対象物の美観といった感覚的デザイン性を取扱うためには，過去に実現された設計事例の利用は有望と考えられる [Reich 1993]．ここでは，構造・感性設計支援のためのひとつの方向

として，客観的に支持され得る理論的な側面に関する支援としては知識工学的手法を用い，人間の感性に基づき主観的にしか支持され得ない側面の支援のためには，過去の設計事例に対する感覚的評価を利用する事例指向の手法を用いて，これらを統合する枠組を考える．

2.3 設計事例に対する感覚的評価

感覚的なデザイン性を考慮する設計支援では，設計者の過去の設計事例に対する感覚的評価が鍵となる．ここでは，構造物設計事例に対する感覚的評価の収集・整理と，それらと構造形態との関連付けを行い，設計支援システム構築の指針とする枠組について議論する．

2.3.1 感覚量の主成分化による感覚的評価の整理

構造物の有する感覚的なデザイン性は，適当な形容語と，それに対する帰属の度合いにより表現される．たとえば，橋梁構造物の美観を論じた文献 [関西道路協会 1991; 土木学会 1982] によれば，デザイン性を表現する形容語として表 2.1 に示されるようなものが挙げられている．このとき，構造物を表現するために用いられる形容語には，たとえば「近代的」であると評価される構造物には「合理的」な面も有するといったように，部分的に重複する概念をもつものが存在する．このため，感覚的なデザイン性の評価が，形容語を用いた場合には異なる表現をとるとしても，本質的には類似の評価となる場合がある．そこで，形容語とそれに対する帰属度として表現されている構造物の感覚的なデザイン性を，より少数の感覚主成分を用いて表現し，設計事例に対する感覚的評価を感覚主成分値により表すことを考える．ここでは，多数の変数値の変動の全体的な情報に対して，固有値解析を用いてより少数の数量的な概念を得る数量化 III 類 [林, 駒沢 1983] を用いる．この手法は，感覚量の取扱いにおいて標準的に用いられるものであり，以下に，ここで行う主成分化の概略を示しておく．

表 2.1 橋梁構造物に関する感覚的形容語の例

•Elegant (優美)	•Symbolic (象徴的)	•Rational (合理的)
•Light (軽快)	•Smart (スマート)	•Slender (スレンダ)
•Springy (躍動的)	•Rythmic (リズム感)	•Mighty (力強い)
•Modern (近代的)	•Sharp (シャープ)	

事例集合 (全事例数 M) における事例 c_m $(m = 1, \cdots, M)$ の，L 個の感覚的形容語 S_i $(i = 1, \cdots, L)$ に対する帰属の程度 s_i^m $(0 \leq s_i^m \leq 1,\ i = 1, \cdots, L,\ m = 1, \cdots, M)$ により，感覚的デザイン性を

$$\boldsymbol{S}^m = [s_1^m \cdots s_L^m]^T, \qquad m = 1, \cdots, M \tag{2.1}$$

として表現する．ただし，帰属度 s_i^m は，事例 c_m が S_i の示す概念により形容される度合が強いときに 1 に近づき，逆に弱いときに 0 に近づくものとする．数量化手法では，感覚主成分 F_k $(k = 1, \cdots, K,\ K \leq L)$ を仮定し，事例 c_m の感覚的デザイン性を表す感覚主成分値 f_k^m は，感覚的形容語 S_i の感覚主成分 F_k に対する重み w_{ik} を用いた s_i^m の重み付き線形和

$$f_k^m = \sum_{i=1}^{L} s_i^m w_{ik} \tag{2.2}$$

として表されると考える．全事例に関する感覚評価マトリックス $\boldsymbol{S}$ として，

$$\boldsymbol{S} = \begin{pmatrix} s_1^1 & \cdots & s_L^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_1^M & \cdots & s_L^M \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

と表せば，感覚主成分 F_k に関する事例値ベクトル $\boldsymbol{f}_k$ は，感覚評価マトリックス $\boldsymbol{S}$ に重みベクトル $\boldsymbol{w}_k$ を乗じた

$$\boldsymbol{f}_k = \boldsymbol{S}\boldsymbol{w}_k, \qquad k = 1, \cdots, K \tag{2.4}$$

と表せる．ただし，$\boldsymbol{f}_k = \left[f_k^1 \cdots f_k^M\right]^T$, $\boldsymbol{w}_k = [w_{1k} \cdots w_{Lk}]^T$ である．

式 (2.4) は，L 個の感覚的形容語で表される L 次元空間における M 個の感覚的評価 $\boldsymbol{S}$ を，K 個の成分で表される K 次元空間での感覚的評価 $\boldsymbol{f}_k$ $(k = 1, \cdots, K)$ に変換する座標変換である．K 次元空間における軸 F_k を，L 次元空間上の M 個の感覚事例値からの距離の自乗和が最小になるように選ぶとすると，式 (2.4) に

おける重みベクトル $\boldsymbol{w}_k$ は，全事例に対する帰属度から得られる共分散マトリックス

$$\boldsymbol{V} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \sigma_{1L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{sym.} & \cdots & \sigma_L^2 \end{pmatrix} \tag{2.5}$$

の固有値 λ_k に対する固有ベクトルとして得られる．ただし，

$$\begin{aligned} \overline{s_i} &= \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} s_i^m \\ \sigma_i^2 &= \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} (s_i^m - \overline{s_i})^2 \\ \sigma_{ij} &= \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} (s_i^m - \overline{s_i})(s_j^m - \overline{s_j}) \end{aligned}$$

であり，添え字 k は，固有値の大きなものから順につけるとする [林, 駒沢 1983].

一般に固有値 λ_k は L 個存在するが，固有値の小さな軸は全体的な感覚的評価 $\boldsymbol{S}$ の説明にはわずかにしか寄与しない．ここでは，全固有値の和に対する感覚成分 F_k の固有値 λ_k の比率を寄与率とし，第1成分から第 K 成分までの寄与率の和，累積寄与率 c_K を考え，これがあるしきい値 θ より大きくなるとき，すなわち

$$c_K = \sum_{k=1}^{K} \lambda_k / \sum_{k=1}^{L} \lambda_k > \theta \tag{2.6}$$

を満たす K 番目までの軸を感覚主成分 F_k $(k = 1, \cdots, K)$ とする．これらの固有値に対応する K 個の固有ベクトルを，感覚主成分 F_k に関する値 $\boldsymbol{f}_k$ として感覚的デザイン性を表現するための重みベクトル $\boldsymbol{w}_k$ とし，この重みベクトルと，感覚的形容語 S_i に対する事例 c_m の帰属度 s_i^m より得られる f_k^m (式 (2.2)) を事例 c_m の感覚的デザイン性の感覚主成分 F_k による評価値として用いる．なお，重みベクトル $\boldsymbol{w}_k$ は，数量化理論で標準的に用いられる手法に従い，感覚主成分値 f_k^m $(m = 1, \cdots, M)$ が各 k について平均0，分散1となるように正規化する．

ここで，橋梁構造物の設計事例集 [成岡，伊藤 1976; 日本道路協会 1990; 平井 1967] から得た 20 のアーチ橋設計事例に関する感覚的評価 (表 2.2) に対して，数量化により主成分化を行った例を示す．なお，本章では概念設計支援における感覚的側面の取扱いの妥当性を確認するためにアーチ橋構造物に関して収集した感覚的評価のみをとりあげるが，第 3 章以降では，他の橋梁形式を含む 93 の設計事例について収集した感覚的評価を用いている．累積寄与率 c_K (式 (2.6)) のしきい値 θ を 0.7 とすると，感覚主成分として 3 成分が得られる (表 2.3)．すなわち，ここで収集した 20 事例に関する 11 個の形容語による感覚的評価は，累積寄与率が 0.7 以上となる 3 つの主成分により説明が可能なことがわかる．図 2.1 は，感覚主成分 F_1, F_2, F_3 に対する各感覚的形容語の重みベクトル $\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2, \boldsymbol{w}_3$ の成分をプロットしたものである． この例では，形容語「象徴的」と「力強い」との間や，

表 2.2 収集されたアーチ橋設計事例に対する感覚的評価

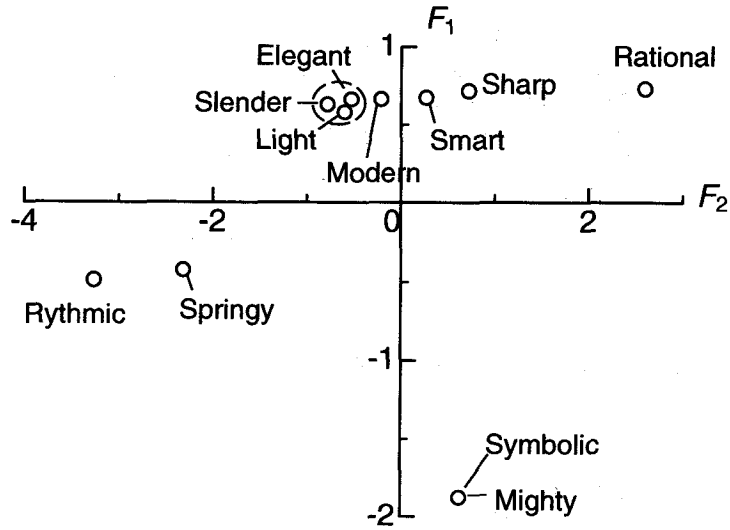
設計事例		優美 S_1	軽快 S_2	躍動的 S_3	近代的 S_4	象徴的 S_5	スマート S_6	リズム感 S_7	シャープ S_8	合理的 S_9	スレンダ S_{10}	力強い S_{11}
c_1	木津川新橋	1	1		1						1	
c_2	Rainbow									1		
c_3	三好橋	1										
c_4	大三島橋	1	1		1		1				1	
c_5	松島橋		1		1		1			1		
c_6	蔵前橋		1					1			1	
c_7	永代橋					1						1
c_8	Sydney Harbor					1						1
c_9	New River George					1		1				1
c_{10}	神戸大橋	1	1		1		1					
c_{11}	灘大橋		1	1				1				
c_{12}	音戸大橋		1				1				1	
c_{13}	弓の橋	1	1		1		1				1	
c_{14}	新浜寺大橋	1	1		1		1		1	1	1	
c_{15}	三坂橋		1							1		
c_{16}	Queenston Lewiston					1						1
c_{17}	Askeroefjord	1	1		1		1			1	1	
c_{18}	Fremont	1		1	1		1					
c_{19}	新淀川大橋						1			1		
c_{20}	西海橋			1		1						1

表 2.3 感覚的形容語に関する感覚主成分値 ($\theta = 0.7$)

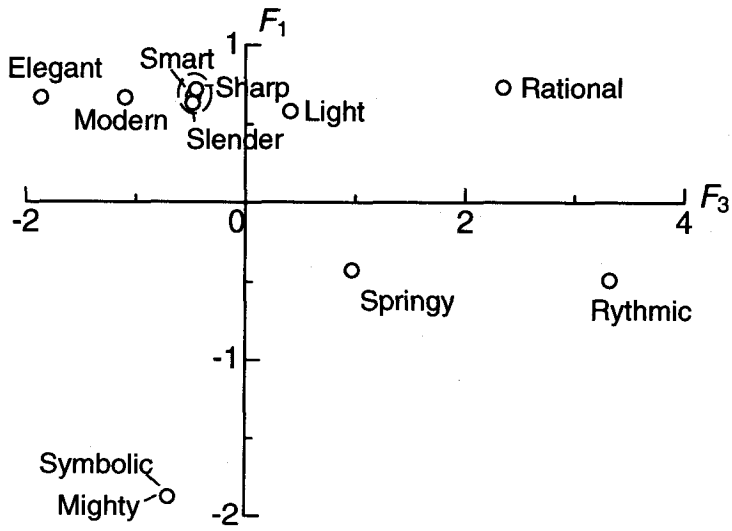
		感覚主成分		
		F_1(寄与率 0.39)	F_2(寄与率 0.17)	F_3 (寄与率 0.15)
感覚的形容語		$w_{\ell 1}$	$w_{\ell 2}$	$w_{\ell 3}$
優美	S_1	0.66	−0.53	−1.87
軽快	S_2	0.58	−0.60	0.41
躍動的	S_3	−0.42	−2.31	0.97
近代的	S_4	0.66	−0.21	−1.10
象徴的	S_5	−1.89	0.62	−0.70
スマート	S_6	0.67	0.27	−0.48
リズム感	S_7	−0.49	−3.26	3.33
シャープ	S_8	0.72	0.72	−0.45
合理的	S_9	0.73	2.60	2.34
スレンダ	S_{10}	0.63	−0.78	−0.48
力強い	S_{11}	−1.88	0.62	−0.70

「優美」,「軽快」,「スレンダ」などの間には重複した概念が含まれていると考えることができる．また，主成分 F_1 については「象徴的」「力強い」が負の大きな重み係数 $w_{\ell 1}$ を持つ形容語であり，これらに代表される重量感に関連した概念，F_2 軸については正の方向に「合理的」，負の方向に「リズム感」などの形容語がみられ，これらに関連する概念，F_3 軸については正の方向に「リズム感」，負の方向に「優美」などに関連する概念が表されていると考えられる．なお，ここでは形容語間の概念的重複をとりのぞくことが主目的であり，また，以降に述べる概念設計支援において主成分値を直接には取り扱わないことから，標準的な手法と同様に，各主成分軸の明確な意味付けは行わない．

図 2.2は，各事例 c_m を感覚主成分値 f_1^m, f_2^m, f_3^m についてプロットしたものである．これらの図より，たとえばアーチリブにトラス部材を用いたブレーストリブ形式の設計事例はすべて F_1 に関する感覚主成分値が負の大きな値をとっていることや，路面がアーチリブの中間に設けられている中路形式のものは F_3 に関する感覚主成分値が負の値をとっていることが分かる．このことから，構造形態が類似の設計事例は感覚主成分空間上で近接した場所に位置することが分かり，事例の構造形態と感覚主成分値により表される感覚的評価との間の関連を示唆していると考えられる．なお，ここで示した結果は，中立的な便覧等 [土木学会 1982;



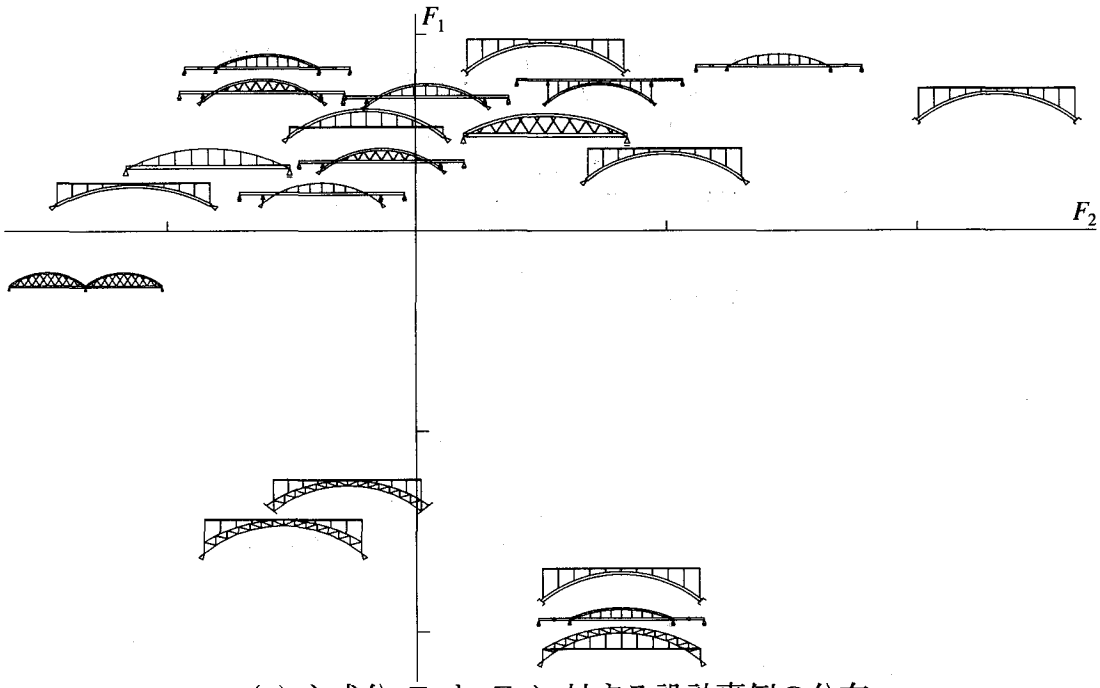
(a) 主成分 F_1 と F_2 に対する各感覚的形容語の重み



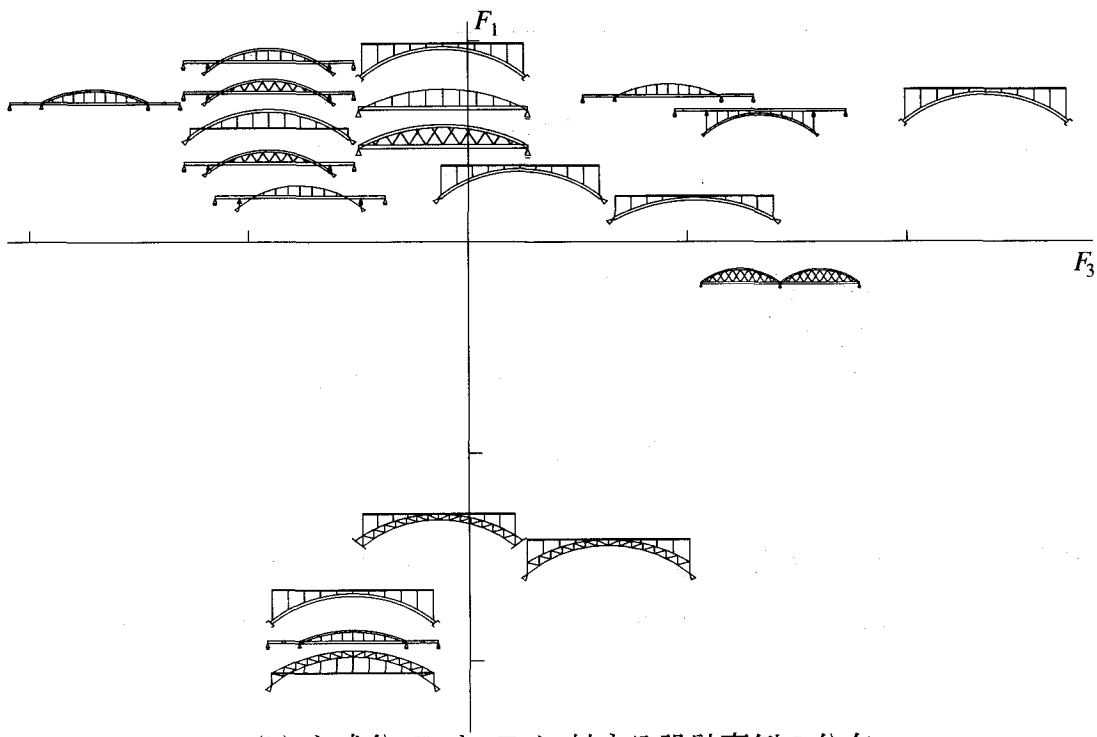
(b) 主成分 F_1 と F_3 に対する各感覚的形容語の重み

図 2.1 アーチ橋構造物設計事例に対する感覚的評価の数量化の例

関西道路協会 1991; 日本道路協会 1977] を参照した感覚的評価を用いていることから，個々の設計者に依存しない標準的な尺度を表していると考えられる．



(a) 主成分 F_1 と F_2 に対する設計事例の分布



(b) 主成分 F_1 と F_3 に対する設計事例の分布

図 2.2 事例の感覚主成分値

2.3.2 感覚量の定性的表現と事例頻度

前節で求めた構造物の事例に対する感覚主成分値 f_k は，感覚的形容語 S_i への帰属度 s_i より求めた．しかしながら，帰属度の値を明確に定めることは困難であるので，それから得られた感覚主成分値では詳細な値は意味を持たず，大きい，小さいといった定性的な特徴が重要となる．ここでは感覚主成分値 f_k の代表値 f_{kn} $(n = 1, \cdots, N_k)$ に対する帰属の度合 $\mu_{(F_k, f_{kn})}(f_k)$ を用いる．また設計項目 X_i の属性値 x_i に対しても同様に，代表値 x_{in} $(n = 1, \cdots, N_i)$ に対する帰属度 $\mu_{(X_i, x_{in})}(x_i)$ を用いるものとする．

設計事例 c_m ある設計項目 X_i の事例値 F_i^m について，しきい値 t_n $(n = 1, \cdots, N-1)$ を $x^m < t_n$ である事例数 m_n の，全事例数 M に対する比率が n/N $(n = 1, \cdots, N-1)$ と等しくなる様に決定し，$x^m = t_n$ のしきい値上では代表値 x_n, x_{n+1} への帰属度をそれぞれ 0.5 とする．すなわち，$\mu_{(X, x_n)}(t_n) = \mu_{(X, x_{n+1})}(t_n) = 0.5$ である．また帰属度関数 $\mu_{(X, x_n)}(x^m)(n = 2, \cdots, N-1)$ は，しきい値の中点 $x^m = (t_{n-1} + t_n)/2$ において 1 をとり，$\mu_{(X, x_1)}(x^m)$ は $x^m \ll t_1$ において 1, $\mu_{(X, x_N)}(x^m)$ は $x^m \gg t_{N-1}$において 1 をとるものとする．また x の値の範囲全てに対し

$$\sum_{n=1}^{N} \mu_{(X, x_n)}(x) = 1 \tag{2.7}$$

を満たすものとする．

たとえば，代表値として {small, medium, large} を考え，事例数 M の事例値が正規分布 $\mathrm{N}(\overline{x}, \sigma_x)$ に従うと仮定すれば，分布関数 $F(x) = 1/3$ および 2/3 となるしきい値はそれぞれ $t_1 = \overline{x} - 0.43\sigma_x$, $t_2 = \overline{x} + 0.43\sigma_x$ である．特性関数の満たす条件は $\mu_{(X,\mathrm{small})}(t_1) = \mu_{(X,\mathrm{medium})}(t_1) = 0.5$, $\mu_{(X,\mathrm{medium})}(t_2) = \mu_{(X,\mathrm{large})}(t_2) = 0.5$, $\mu_{(X,\mathrm{medium})}((t_1 + t_2)/2) = 1.0$ である．帰属度関数をガウス分布型の関数 $\mu = \exp(-r((x - \overline{x})/\sigma_x)^2)$ とすれば，$r = 3.71$ となる．また，式 (2.7) より，

$$\mu_{(X,\,\mathrm{medium})}(x^m) = \exp\left(-3.71\left(\frac{x^m - \overline{x}}{\sigma_x}\right)^2\right) \tag{2.8-a}$$

$$\mu_{(X,\,\mathrm{small})}(x^m) = \begin{cases} 1-\mu_{(X,\,\mathrm{medium})} & (x^m < \overline{x}) \\ 0 & (x^m \geq \overline{x}) \end{cases} \tag{2.8-b}$$

$$\mu_{(X,\,\mathrm{large})}(x^m) = \begin{cases} 0 & (x^m \leq \overline{x}) \\ 1-\mu_{(X,\,\mathrm{medium})} & (x^m > \overline{x}) \end{cases} \tag{2.8-c}$$

$$\text{ただし}\,\overline{x} = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} x^m \tag{2.8-d}$$

$$\sigma_x = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}(x^m-\overline{x})^2 \tag{2.8-e}$$

と表され，図 2.3 に示されるような曲線をとる．

離散値をとる設計項目については，帰属度関数 μ はクロネッカのデルタを用いて，

$$\mu_{(X_i,\,x_n)}(x^m) = \delta(x_n, x^m) \tag{2.9}$$

として表す．たとえば，代表値 $x_n \in \{\text{value1, value2, value3}\}$ に対して，事例値が value1 であれば

$$\boldsymbol{X}_{iq}^{m}(\text{value1}) = \begin{Bmatrix} \mu_{(X,\,\text{value1})}(\text{value1}) \\ \mu_{(X,\,\text{value2})}(\text{value1}) \\ \mu_{(X,\,\text{value3})}(\text{value1}) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{2.10}$$

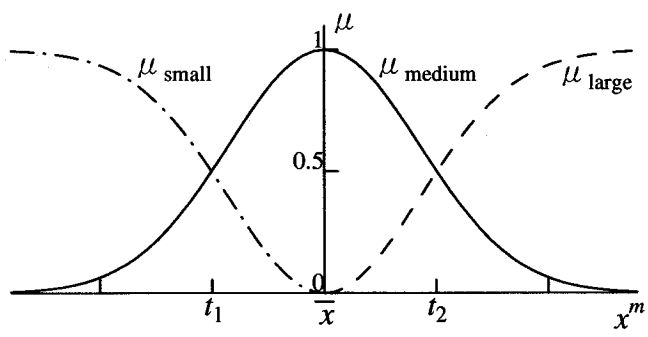


図 2.3 代表値に対する帰属度関数の例

となる．したがって，事例値 x^m は連続値，離散値ともに帰属度関数値がつくるベクトル

$$\boldsymbol{X}_q^m(x^m) = \begin{Bmatrix} \mu_{(X,x_1)}(x^m) \\ \vdots \\ \mu_{(X,x_N)}(x^m) \end{Bmatrix} \tag{2.11}$$

をもって統一的に表される．

2.3.3 感覚的評価と構造形態との関連の抽出

設計事例の構造形態はその感覚的評価を左右し，これらには相互に関連があると考えられ，そのことは 2.3.1 項に示した図 2.2 からも示唆されている．これらの関連の強さの評価は，感覚的な要求を反映する設計を行う際に，構造形態を定めるどの設計項目の決定が重要かを示す情報として利用可能であると考えられる．ただし，概念設計における設計項目には離散的な値をとるものも多く，関連の強さは相関係数として評価することはできない．ここでは，ある設計項目 X_i の事例値に注目し，感覚主成分 F_k の定性的代表値により事例を分類した後の部分事例集合における設計項目 X_i の事例値のばらつきの程度により関連強さの評価を試みる．分類後の部分事例集合において，設計項目 X_i の事例値のばらつきが減少しているならば，感覚主成分 F_k の値によって設計項目 X_i のとる値が条件づけられている度合いが強く，これらの関連が強いことを表している．逆に，事例の分類の前後において設計項目 X_i の値のばらつきに変化がないならば，X_i は F_k とは独立に定められた可能性が高いことを示している．

設計項目 X_i の事例値 x_i^m $(m = 1, \cdots, M)$ のばらつきの程度は，それの代表値 $x_{in} \in \{x_{i1} \cdots x_{iN_i}\}$ への帰属度から求める．情報理論では，ある情報源 X が発生する値 x_n の持つばらつきの尺度としてエントロピが用いられる [有本 1976]．エントロピは情報源 X が，値 $x_1, x_2, \cdots, x_N$ をそれぞれ $p_1, p_2, \cdots, p_N$ の確率で発生するときに，

$$H(X) = -\sum_{n=1}^{N} p_n \log_2 p_n \tag{2.12}$$

と定義される．この量は，$0 \leq p_i \leq 1$ より $H(X) \geq 0$ となる．X の発生する値が確定的な場合，すなわち $p_1, p_2, \cdots, p_N$ のうち，いずれか一つの値の発生確率のみが1をとり他が全て0となる場合には $H(X) = 0$ となる．また，$x_1, x_2, \cdots, x_N$ のいずれが得られるのかまったく分からない，すなわち等確率 $p_1 = p_2 = \cdots = p_N = 1/N$ の場合には，$H(X) = \log_2 N$ となり最大値をとる．ここでは，得られる値が確定的な場合に0，最もばらつくときに1をとるように正規化した値として

$$h(X) = \frac{H(X)}{\log_2 N} \tag{2.13}$$

を用いる．

したがって，設計項目 X_i の事例値 $x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{iN_i}$ のばらつきは，

$$h(X_i) = -\sum_{n=1}^{N_i} p_i(x_{in}) \log_{N_i} p_i(x_{in}) \tag{2.14}$$

を尺度として評価できる．ここで $p_i(x_{in})$ は，設計項目 X_i の値が代表値 x_{in} に属する事例数の，全事例に対する相対頻度を表す．事例値 x_i^m の代表値 x_{in} に対する帰属度は $\mu_{(X_i, x_{in})}(x_i^m)$ と表されるので相対頻度は，

$$p_i(x_{in}) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \mu_{(X_i, x_{in})}(x_i^m) \tag{2.15}$$

と算定される．エントロピ $h(X_i)$ は，全事例において設計項目 X_i の属性値 x_i^m が，帰属する代表値に強い偏りを持つほど0に近づき，ランダムにばらつくほど1に近づく．感覚主成分 F_k の事例値 f_k^m が特定の代表値 $f_{kn} \in \{f_{k1}, \cdots, f_{kN_k}\}$ に属する事例集合において，設計項目 X_i の事例値 x_i^m が，代表値 $x_{in} \in \{x_{i1} \cdots x_{iN_i}\}$ に属する事例頻度

$$p_{ik}(x_{in}|f_{k\ell}) = \frac{\sum_{m=1}^{M} \mu_{(F_k,f_{k\ell})}(f_k^m)\mu_{(X_i,x_{in})}(x_i^m)}{\sum_{m=1}^{M} \mu_{(F_k,f_{k\ell})}(f_k^m)} \tag{2.16}$$

を用いて，事例に対する感覚的評価と構造形態との関連を評価する．すなわち，設計項目 X_i の感覚主成分 F_k による条件つきエントロピ

$$h(X_i|F_k) = -\sum_{\ell=1}^{N_k}\left[p_k(f_{k\ell})\sum_{n=1}^{N_i}\left\{p_{ik}(x_{in}|f_{k\ell})\log_{N_i} p_{ik}(x_{in}|f_{k\ell})\right\}\right] \tag{2.17}$$

が尺度となる．このとき，$h(X_i|F_k) < h(X_i)$ ならば，感覚主成分 F_k の値により事例を分類した後には，設計項目 X_i の事例値のばらつきが減少していることを意味し，設計項目 X_i と感覚主成分 F_k の関連が強いことを表している．$h(X_i|F_k) \approx h(X_i)$ であれば，事例の分類の前後において設計項目 X_i の値のばらつきに変化がないことを表し，X_i は F_k との関連は弱いことを表している．したがって，これらの差

$$i(F_k, X_i) = h(X_i) - h(X_i|F_k) \tag{2.18}$$

を，事例に対する感覚的評価と設計項目の属性値として表される構造形態との相互関連の強さとして定義する．

ここで，属性値が連続値をとる設計項目についての代表値 x_{in} として {small, medium, large} の 3 値を考え，表 2.4 に示した 20 例のアーチ橋設計事例の構造形態とそれらの感覚的評価 (表 2.2) との関連付けを行う．ただし，感覚的評価には数量化された感覚主成分値 (表 2.3) を用いる．式 (2.18) によって評価した相互関連の強さ $i(F_k, X_i)$ を表 2.5 に示す．図 2.4 は，この相互関連の強さが 0.08 以上のものについて示したもので，線の太さが関連の強さを表している．このような整理によって，構造形態の感覚的評価に対して，各設計項目値の影響が推測できる．ここに示したアーチ橋構造物に対しては，図 2.2 に事例の分布として示したものを裏付ける結果が得られている．たとえば，構造物の設計項目のうち支間割 X_1 (Span assignment) は，優美さやリズム感と関連する感覚主成分 F_3 との関連

表 2.4 収集されたアーチ橋設計事例

名称	橋長	地盤	径間	支持	支間長	構造	けた高	リブ	リブ高	ライズ	路面	つり
1: 木津川新橋	495	P	3	C	305	Lo	4	S	150	5	H	N
2: Rainbow	290	G	1	S	290	F	2	S	75	6	D	V
3: 三好橋	138	P	3	G	136	Lo	2	S	80	7	T	V
4: 大三島橋	309	G	1	S	309	H	1	S	80	6	H	V
5: 松島橋	126	G	1	S	126	H	1	S	68	6	D	V
6: 蔵前橋	174	P	多	S	58	H	2	S	50	10	D	V
7: 永代橋	185	P	3	G	100	Lo	2	S	35	8	T	V
8: Sydney Harbor	508	G	1	S	508	H	3	B	28	5	H	V
9: New River George	554	G	1	S	554	H	6	B	50	5	D	V
10: 神戸大橋	319	P	3	C	217	Lo	3	S	70	5	H	V
11: 灘大橋	370	P	多	S	185	Lo	2	S	80	6	T	N
12: 音戸大橋	116	G	1	S	116	La	2	S	200	7	T	V
13: 弓の橋	83	G	3	C	67	Lo	1	S	45	6	H	N
14: 新浜寺大橋	254	G	1	S	254	Lo	3	S	80	7	T	N
15: 三坂橋	130	G	3	C	91	Lo	3	S	75	6	D	V
16: Queenston Lewiston	292	G	1	S	292	F	2	S	77	6	D	V
17: Askeroefjord	288	G	1	S	288	F	2	S	73	6	D	V
18: Fremont	658	G	3	C	383	La	6	S	300	3	H	V
19: 新淀川大橋	230	P	3	G	115	La	3	S	143	7	T	V
20: 西海橋	243	G	1	S	243	F	2	B	45	6	D	V

橋長，支間長，けた高はそれぞれ単位は m.
‘地盤’は橋梁建造地の地盤状態を表し，‘P’, ‘G’はそれぞれ軟弱地盤，堅固地盤を表す.
‘支間長’は最大支間長を用いた.
‘支持’は支持形式を表し，‘C’, ‘S’, ‘G’はそれぞれ連続支持，単純支持，Gerber 形式を示す.
‘構造’はアーチの構造形式を表し，‘H’, ‘F’, ‘Lo’, ‘La’はそれぞれヒンジ構造，固定構造，Lohse 形式，Langer 形式を示す.
‘リブ’はアーチリブ形式を表し，‘S’, ‘B’はそれぞれソリッドリブ，ブレーストリブを示す.
‘リブ高’はアーチリブ高に対する最大支間長の比率を示す.
‘ライズ’はアーチライズに対する最大支間長の比率を示す.
‘路面’は路面位置を表し，‘D’, ‘H’, ‘T’はそれぞれ上路，中路，下路を示す.
‘つり’は路面のつり形式を表し，‘V’, ‘N’はそれぞれ垂直つり，Nielsen 形式を示す.

表 2.5 感覚的デザイン性と構造物設計項目との関連強さ $i(F_k, X_i)$

設計項目		感覚的デザイン性 F_1	F_2	F_3
支間割	X_1	0.11	0.11	0.25
支持形式	X_2	0.09	0.12	0.17
支間長	X_3	0.04	0.01	0.02
アーチ形式	X_4	0.12	0.10	0.07
けた高	X_5	0.01	0.04	0.03
リブ形式	X_6	0.25	0.08	0.05
リブ高	X_7	0.12	0.06	0.05
アーチライズ	X_8	0.03	0.06	0.06
路面位置	X_9	0.05	0.24	0.12
つり形式	X_{10}	0.07	0.04	0.07

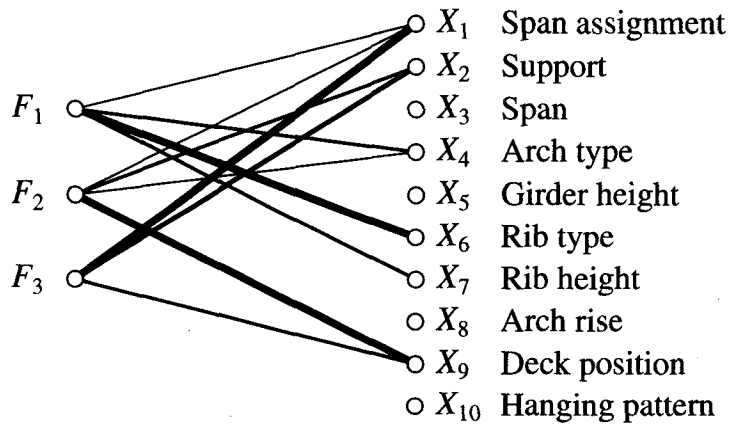


図 2.4 感覚的デザイン性と構造物設計項目との関連の評価例

が $i(F_3, X_1) = 0.25$ と他の $i(F_3, X_j)$ より強く，これは図 2.2(b) で左側に 3 支間のアーチ橋構造物が多く分布していることを定量的に示すものである．また同様に，リブ形式 X_6 (Rib type) は重量感と関連すると考えられる感覚主成分 F_1 と，路面位置 X_9 (Deck position) は合理性やリズム感と関連すると考えられる感覚主成分 F_2 と特に関連が強いことが分かる．これらの設計項目の属性値の決定は，感

覚的評価に大きく影響を及ぼすことになるので，アーチ橋構造物について感覚的要求を考慮する設計支援システムを構築する際には，これらの設計項目に関する意思決定に特に留意する必要性を示している．

2.4 感覚的評価に基づく事例知識

2.4.1 概念設計における設計候補の競合

設計問題は，設計対象を記述する設計項目の属性値を，与えられた仕様や陽には表されない様々な条件を考慮しながら，仮定，評価，修正の反復により決定する満足化の過程である [赤木 1988; Boyle 1989]．各設計項目属性値の決定は独立なものではなく，他の設計項目の属性値による制約 [Stefik 1981] に基づき行われる．アーチ橋構造物の概念設計を例にとると，図 2.5 に示すような設計項目間相互の関係として 設計モデルを表現することができる．全ての設計項目に対して，属性値を決定することができたならば，ひとつの設計候補が生成されたことになる．

このときに，要求を満足する属性値には競合する複数の候補が存在することが一般的である．特に設計の上流過程である概念設計の段階では，候補が一意に定まることはまれであり，設計者が競合候補に対して，陽には表されない様々な因子を考慮しながら選択を行う作業が主となる．このような候補選択における設計者の意思決定の負担を軽減するにあたっては，システムが各競合候補に対して何

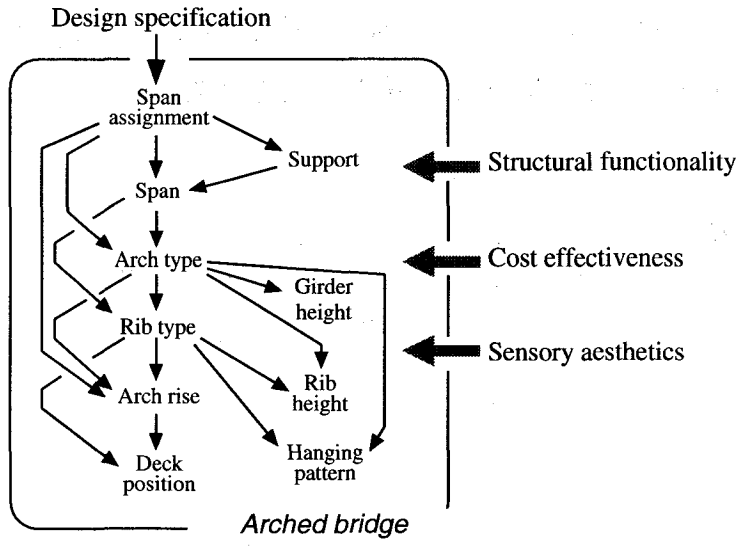


図 2.5 アーチ橋構造物の設計モデル

らかの評価指標に基づいた設計評価を行うことが考えられる．設計候補の評価にあたっては，構造的な側面からの評価はもちろんのことであるが，設計者の感性に基づく感覚的側面をも考慮する構造・感性設計の枠組においては，設計対象の感覚的側面に関する主観的評価もシステムに取込む必要がある．

2.4.2 競合候補の生成

設計対象物の各設計項目の属性値は，他の設計項目との関連として表されるルールに基づき推論される．ここでは，各設計項目の属性値の推論にあたり，幅方向優先の推論を用いて複数の競合候補を同時に生成する．設計項目 $X_j, X_{j+1}, \ldots$ に対して，設計項目 X_j に対する属性値の推論を行い，ひとつの可能な属性値が生成された後も，設計項目 X_j に関するルールが存在する限り，X_j に対する属性値の推論を続ける．たとえば，図 2.5 に示すアーチ橋構造物の場合，アーチ形式の決定に影響を及ぼす関与項目として支間割，支持形式が挙げられる．同様に支持形式の関与項目としては，支間割が挙げられる．したがって，まず支間割 X_1 が与えられた設計仕様に基づき推論され，次に支持形式 X_2，その次にアーチ形式 X_3 が推論可能となる．

設計仕様として，橋長 140m，支間長 80m，地盤状態が強固な場合を与えると，可能な支間割形式としては，単径間，側径間付き複径間があげられる (図 2.6)．支

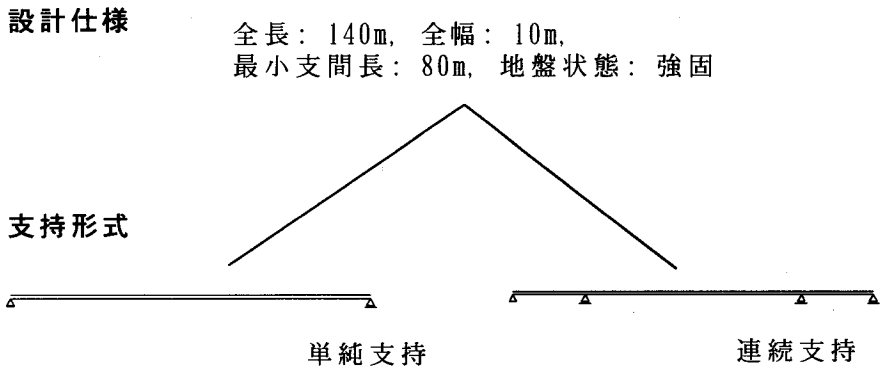


図 2.6 与えられた設計仕様に対して可能な支間割

持形式 X_2 に対しては，図 2.7 に示すようなルールより，単純支持，連続支持が生成可能な属性値として挙げられる．一般的なルールベース推論では，1 つの解に向けて推論を前向きに進めていくので，この場合，支持形式 X_2 に対する属性値としてひとつの候補，単純支持が生成された時点で，この属性値をもとに，アーチ形式 X_3 の属性値の推論へと進行することになるが，ここでは支持形式 X_2 に関する全てのルールを探索することで可能な候補全てが同時に生成される．この例では，2 つの可能候補，単純支持，連続支持を 2 つとも生成した後に，アーチ形式の推論を行うことになる．この結果，単純支持については 4 通りの候補，連続支持については 2 通りの候補が生成され，アーチ形式については図 2.8 に示すような合計 6 通りの競合設計候補が同時に得られることになる．

システムは，ある設計項目 X_j に対してひとつのルールを実行し，候補を生成した後にも，他の実行可能なルールを探索する．設計項目 X_j に関するルールを全て探索した後に初めて，次の設計項目 X_{j+1} の属性値の生成に進行する．この推論方法により，各設計項目についての複数の属性値が生成され，その結果，設計者の選択の幅が確保されることになる．一方で，この推論により属性値の生成を続けるならば，組合せ数の爆発が発生することは避けられない．これに対して，設計過程において重要と考えられる設計項目の属性値を決定する段階毎に区切り，これらを部分設計問題と考える．各段階で生成される競合候補に対して設計者が意思決定を行い候補を絞り込むことにより，組合せ数の爆発を防ぐものとする．設

```
if(支間割 = ‘単径間’)
then(支持形式 = ‘単純’).

if(支間割 = ‘複径間’)
then(支持形式 = ‘単純’).

if(支間割 = ‘側径間付き複径間’ and 地盤状態 = ‘強固’)
then(支持形式 = ‘連続’).
```

図 2.7 アーチ橋支持形式に関する設計ルールの例

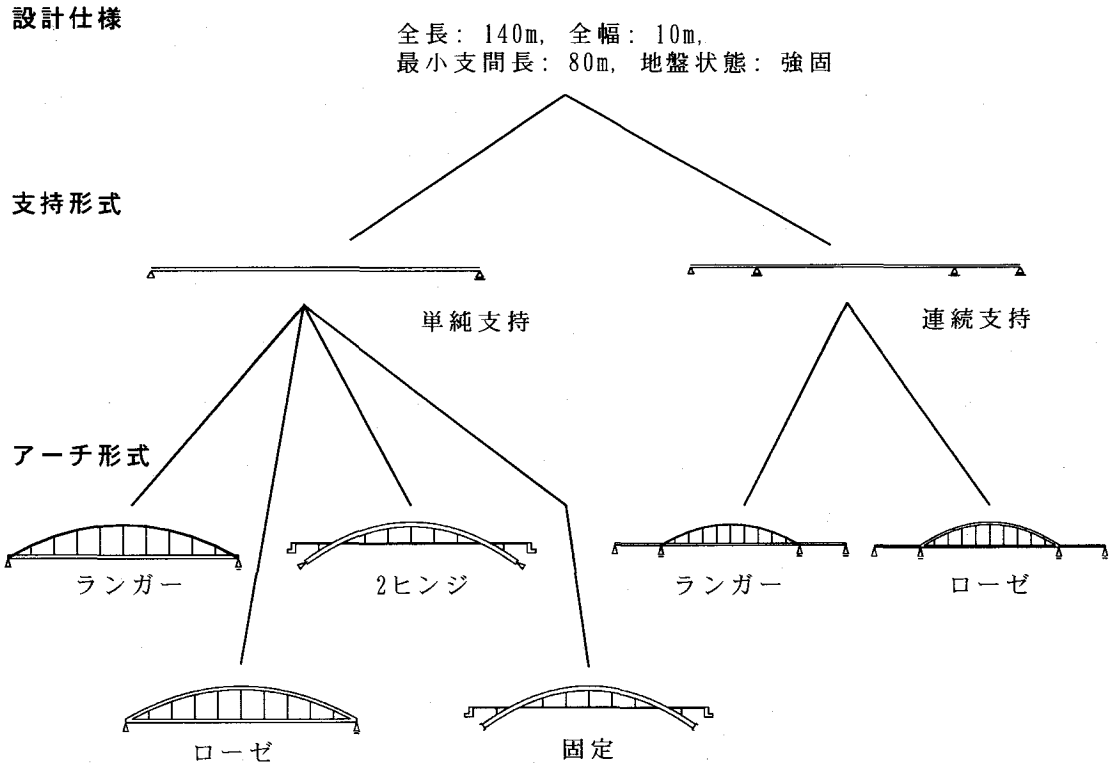


図 2.8 与えられた設計仕様に対して可能なアーチ形式

計支援システムは中間設計候補に対して，設計者の意思決定を求めることにより，設計を対話的に進め，設計者の意図を設計候補に反映させることが可能となる．

2.4.3 競合候補に対する評価

主要設計項目 X_i に関する競合候補を生成し，設計者の意思決定を求めるまでの過程を部分設計問題 P_J とする．各部分設計問題 P_J に含まれる設計項目 $X_i^{(J)}$ $(i = 1, \cdots, I_s)$ の属性値 $x_{in}^{(J)}$ $(n = 1, \cdots, N_i)$ の生成は，ルールに基づいた推論により行われ，設計者は各部分問題について生成される中間設計候補の選択に対する意思決定を行うものとする．最終的には，これらの中間設計候補の組合せによって，ひとつの設計候補が生成されることになる．

設計項目 X_i に関する部分設計問題では，属性値の候補 x_{in} $(n = 1, \cdots, N_i)$ に

競合が生じている．システムは，様々な側面から候補を評価し，評価値を各候補の優先度 v_{in} として競合中間候補に付加する．設計者はこれを意思決定の参考として考慮する．このとき，構造機能性などの理論的・客観的意味付けの存在する側面からの評価は，設計属性値の関数として優先度を表すことが可能である．たとえば，橋梁構造物の場合では，アーチ形式の中間候補 x_{in} に対する評価は，構造機能性に関する評価 v_{in}^{s}，経済性に関する評価 v_{in}^{c} ともに，それまでに決定されている設計属性値の関数として表現可能である (図 2.9)．しかしながら，概念設計の段階におけるこれらの評価値は，設計の下流に位置する基本設計，詳細設計の過程における候補のリファインにより変化する可能性を持ち，この段階では厳密な評価関数として表すことは困難である．したがって，ここでは相対的な目安付けとするにとどめ，構造物に関する解説書などから，一般的に有利とされている属性値に対しては 1 に近い値を与え，不利とされている場合には 0 に近い値を与えるものとする．客観的な尺度が存在しない感覚的デザイン性からの競合候補の評価には，設計事例とそれらに対する感覚的評価の利用によって求められる評価値 v_{in}^{a} を用いる．

設計項目 X_i の中間候補を求める部分設計問題 P_J に関するルールベース推論において，各設計項目属性値 $x_{in}^{(J)}$ が異なり，推論過程が異なる場合にも，結果的には見かけ上同じ中間候補 x_{in} が生成される場合があり得る．このような推論過程の異なる中間候補は，設計評価にあたっては区別して取扱われねばならないので，

```
if(地盤状態 = ‘強固’ and 支間長 < 300m)
then(アーチ形式 = ‘固　定’, 構造機能性 v^s(支間割, 支持形式, ...),
                            経済性       v^c(支間割, 支持形式, ...)).
if(支間長 < 200m)
then(アーチ形式 = ‘ローゼ’, 構造機能性 v^s(支間割, 支持形式, ...),
                            経済性       v^c(支間割, 支持形式, ...)).
                                  ⋮
```

図 2.9 橋梁構造物における設計ルールの例 (構造機能性，経済性に関する評価)

ここでは，X_i に関する部分設計問題 P_J に含まれる設計項目 $X_i^{(J)}$ $(i=1,\cdots,I^{(J)})$ の各属性値 $x_{in}^{(J)}$ をベクトル $\boldsymbol{x}_{in}=\{x_{1n}^{(J)},\ldots,x_{I^{(J)}n}^{(J)}\}$ として表現し，評価の際にはこれを中間候補として用いる．ここで，中間候補 $\boldsymbol{x}_{in}$ の優先度は，各評価指標ごとに設計項目 $X_i^{(J)}$ の属性値 $x_{in}^{(J)}$ の評価の最小値，$v_{in}^s=\min_i(v_{in}^{(J)s})$, $v_{in}^c=\min_i(v_{in}^{(J)c})$ を用いるものとする．候補 $\boldsymbol{x}_{in}$ の総合的な評価としては，$v_{in}=v_{in}(v_{in}^s,\ v_{in}^c,\ v_{in}^a)$ のように算出される．最も単純な形式では，中間候補 $\boldsymbol{x}_{in}$ に関する評価値，v_{in}^s, v_{in}^c, v_{in}^a に対し，設計者が設定する各指標についての重要度を重みとして用いた重み付き平均値を候補の優先度として考える．設計者がこの重みを調節することにより，自身の持つ価値観を候補の望ましさとして反映させることが可能である．

図2.8に示したアーチ形式の競合候補に対する評価の例を図2.10に示す．この例では，支持形式 X_2，アーチ形式 X_3 の競合候補それぞれについて，構造機能性，経済性，感覚的デザイン性の評価が行われ，アーチ形式に関する中間設計候補の評価値は，各設計指標についての最小値が用いられ，各候補の優先度は，各設計指標に対する重みを等しくした評価値の平均として算出している．

2.4.4 感覚的側面に関する事例知識による競合候補の評価

設計対象に対する感覚的デザイン性の要求 $\boldsymbol{S}^R$ を，各感覚的形容語 S_i に対する帰属度の要求値 s_i^R $(i=1,\cdots,L)$ により

$$\boldsymbol{S}^R=[s_1^R,\cdots,s_L^R]^T \tag{2.19}$$

として表現する．ただし，要求値 s_i^R は，重視する感覚的形容語に対しては1に近く，重視しない感覚的形容語に対しては零に近い値を与えるものとする．これらの感覚的形容語に対する帰属度の要求値 s_i^R と，感覚的評価の主成分化 (2.3.1項) により得られた重みベクトル $\boldsymbol{w}_k$ から，感覚的デザイン性の要求が感覚主成分値

$$f_k^R=\sum_{i=1}^{L}s_i^R w_{ik},\qquad k=1,\cdots,K \tag{2.20}$$

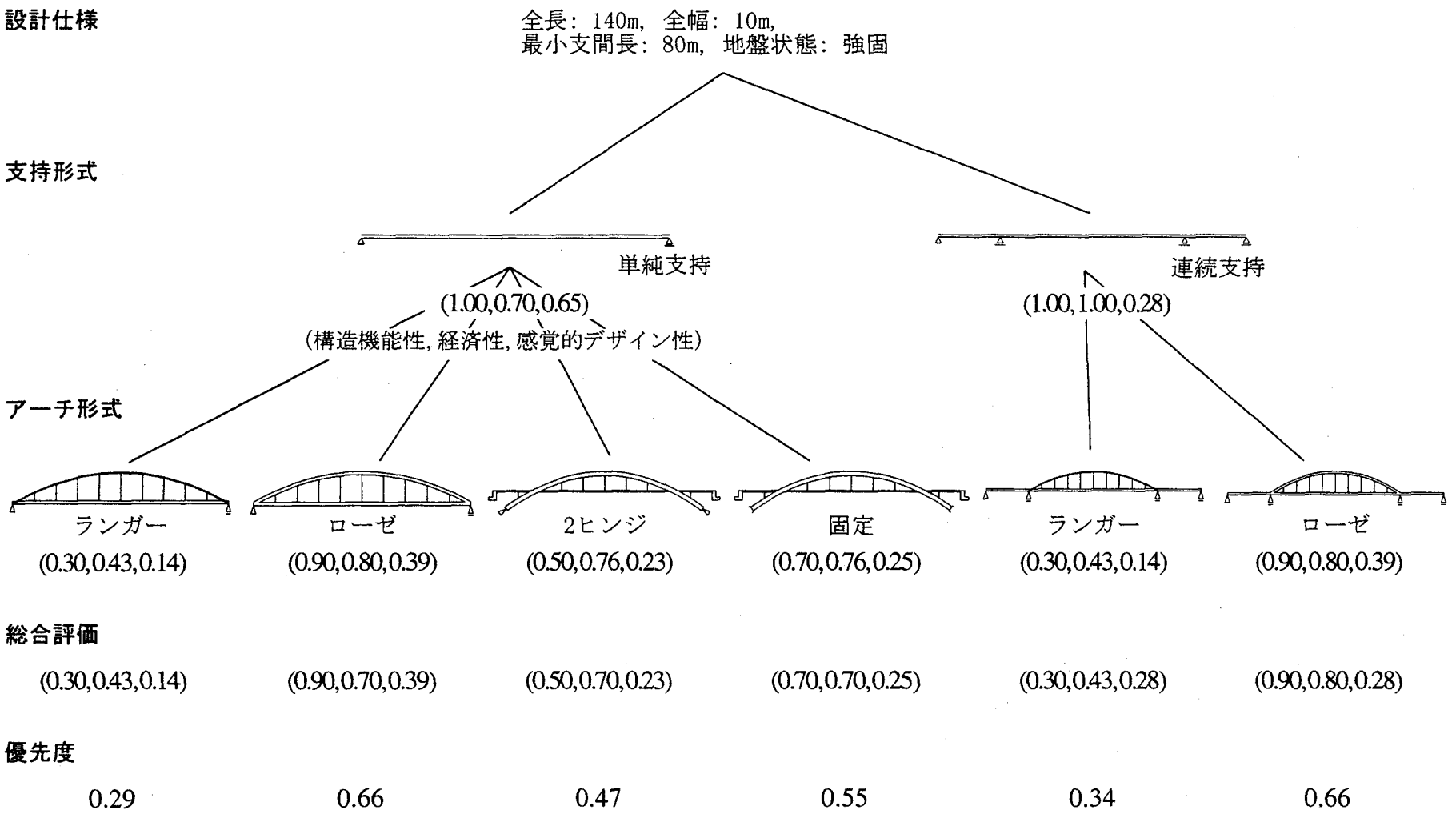


図2.10　アーチ形式の競合候補に対する評価

として表される．

この要求 $\boldsymbol{S}^R$ に対する設計項目 X_i の属性値 x_{in} $(n=1,\cdots,N_j)$ の優先度 v^a_{in} は，式 (2.16) で得られる事例頻度 $p_{ik}(x_{in}|f_{kn})$ を，要求感覚主成分値 f^R_k について平均化し，

$$v^a_{in} = \frac{\displaystyle\sum_{k=1}^{K}\left[|f^R_k|\sum_{n=1}^{N_k}\left\{\mu_{(F_k,f_{kn})}(f^R_k)p_{ik}(x_{in}|f_{kn})\right\}\right]}{\displaystyle\sum_{k=1}^{K}|f^R_k|} \tag{2.21}$$

として算定される．すなわち，構造物に対する感覚的デザイン性 $\boldsymbol{S}^R$ と設計項目 X_i に関する事例に基づく設計知識として，図 2.11 に示す形式が得られる．具体的な設計支援過程においては，2.3.1 項で収集した 20 事例のアーチ橋構造物に対する感覚的評価 (表 2.2) と構造形態 (表 2.4) との関連付けを基に競合候補に対する感覚的デザイン性の評価を求める．図 2.12 は，感覚的デザイン性の要求 $\boldsymbol{S}^R$ を「優美かつ軽快」($[1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0]^T$) とした場合に，アーチ形式 ($X_3$) に関

when($\boldsymbol{S}=\boldsymbol{S}^R$)
then($X_i = x_{i1}$, with sensory preference v^a_{i1};
$X_i = x_{i2}$, with sensory preference v^a_{i2};
$\vdots$
$X_i = x_{iN_i}$, with sensory preference $v^a_{iN_i}$).

図 2.11 感覚的デザイン性の評価を含む設計知識

when($\boldsymbol{S}=[1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0]^T$) 「優美かつ軽快」
then(X_3='ランガー', with sensory preference $v^a_{11}=0.15$;
X_3='ローゼ', with sensory preference $v^a_{12}=0.50$;
X_3='2 ヒンジ', with sensory preference $v^a_{13}=0.28$;
X_3='固定', with sensory preference $v^a_{14}=0.07$).

図 2.12 アーチ形式 (X_3) に関して感覚的デザイン性の評価を含む設計知識

する競合候補 (x_{31} = ‘ランガー’, x_{32} = ‘ローゼ’, x_{33} = ‘2 ヒンジ’, x_{34} = ‘固定’) に対して得られる事例からの設計知識を示している.

2.5 感覚的要求を考慮する設計支援

2.5.1 アーチ橋構造物の設計支援

アーチ橋構造物の概念設計をとりあげ，構造設計支援において，感覚的なデザイン性の要求を候補の生成に反映させる設計支援システムの構築を行う．設計モデルを記述する設計項目間関係はルールとして記述し，設計知識ベースとして設計支援システムに構築した．競合候補の評価のうち客観的に支持され得る構造機能性と経済性とに関する評価は，予め構築したルールベースによる推論から行う．主観的価値規準に基づく競合候補の感覚的なデザイン性の評価にあたっては，事例に対する感覚的評価から抽出した事例知識を用いるものとした (図 2.13).

ここで考えるアーチ橋の概念設計は，設計仕様として橋梁の全長，全幅，最小支間長，地盤の状態を与え，橋梁側面形状の 2 次元スケルトンモデルとして設計候補を生成するまでとし，設計モデル (図 2.5) に従い各設計項目の属性値を決定していく．設計項目には支間割，支持形式，アーチ形式，リブ形式，つり材形式および路面位置といったトポロジを表すものと，支間長，けた高，リブ高さおよびライズといったジオメトリを表すものからなる．このうち，設計者が直接に意

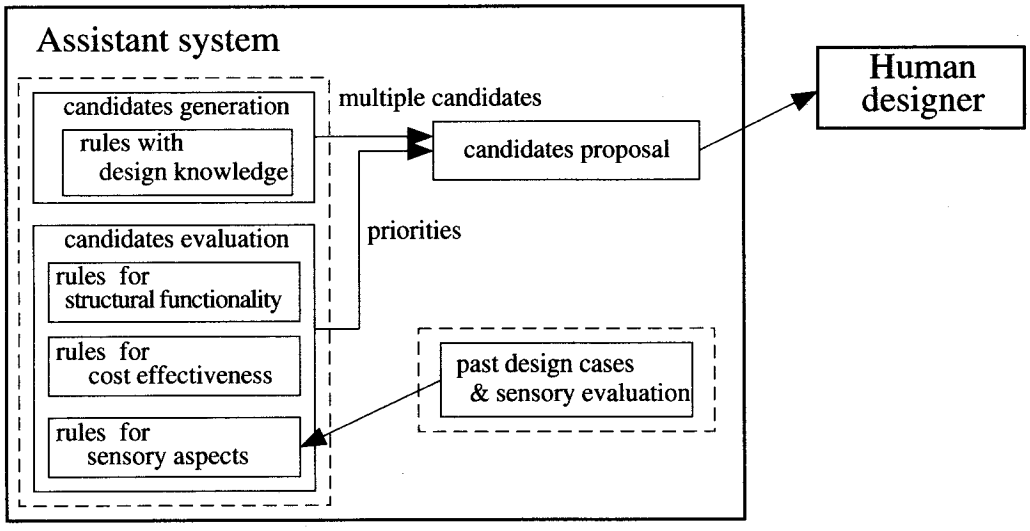


図 2.13 設計アシスタントシステム構成図

思決定を行う設計項目は，2.3.3 項に示した手法で明らかとなる感覚的デザイン性に強く影響を与えるものとする．ここで示すアーチ橋構造物の例では，表 2.5 より感覚主成分と強く関連のあった支持形式 X_2，アーチ形式 X_4，リブ形式 X_6，路面位置 X_9 の 4 項目に注目し，これらに関する 4 つの部分設計問題において設計者が直接に意思決定を行うものとする．

支間割の値としては，単径間，側径間付き複径間，複径間があり，支持形式としては，単純，連続，ゲルバ形式がある (図 2.14)．単純支持と比較し，連続支持では一般に，支間にかかる曲げモーメントが小さくなるので，けた高を小さくできるなどの利点があるが，支点の不等沈下に対しては主けたに大きな荷重が生じるなどの欠点がある．ゲルバ形式では連続形式のけたにヒンジを設けることにより外的静定構造となり不等沈下には対応可能となるが，ヒンジが構造上複雑となる欠点を持つ．

アーチ形式には，狭義のアーチ構造である 2 ヒンジアーチ，固定アーチと，補剛アーチであるローゼ，ランガーの形式がある (図 2.15)．狭義のアーチ構造では，支点において水平反力が生じるので強固な地盤が必要となるが，補剛アーチでは，剛性を分担するけたによってアーチリブからの水平反力をうけもつので，地盤状態が良好でなくとも架設が可能とされている．ランガ形式はアーチリブが曲げを

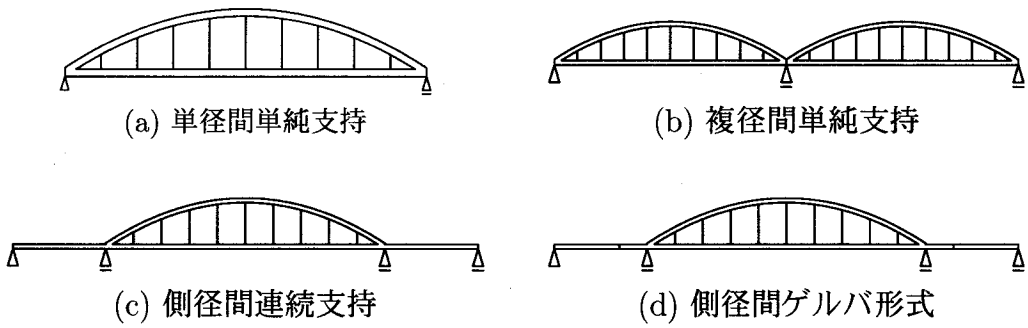


図 2.14 アーチ橋構造物の代表的な支間割・支持形式

負担しない単純圧縮部材として設計され，重量が軽くなるといった利点があるが，剛性が低いために振動しやすくなるといった欠点を持つ．

リブ形式には，ソリッドリブとブレーストリブの形式がある (図 2.16)．ソリッドリブは，スパンの増大に伴い重量も増加するので，コスト的に不利になるとされ，支間長 200m 以下のものに用いられている．一般にブレーストリブは，経済性と構造機能性においてソリッドリブに優るとされている．路面位置は，アーチ構造に対する通行路の位置を示し，上路，中路，下路形式があり (図 2.17)，美観を左右する重要な設計項目のひとつとされている．つり材形式には，垂直形式と，鋼棒またはケーブルを斜めに組んだニールセン形式とがある (図 2.18)．これらはアーチ橋構造物のトポロジを定める設計項目であるが，ジオメトリを定める支間長，けた高，リブ高さ，ライズなどの設計項目の値も，橋梁の剛性，重量，美観に影響を与えるものである．

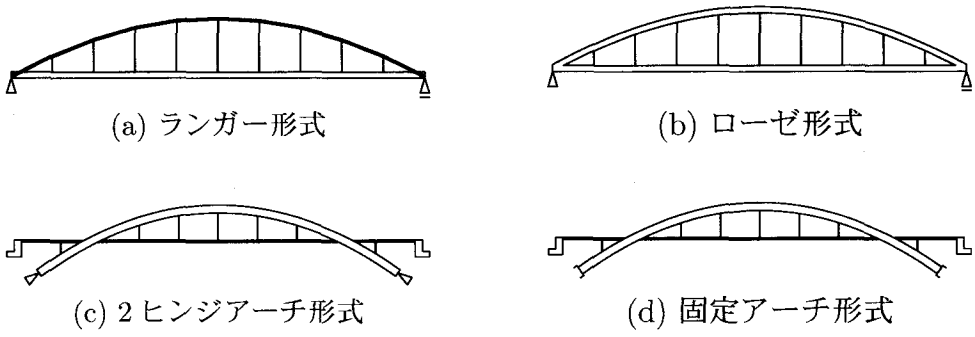


図 2.15 代表的なアーチ形式

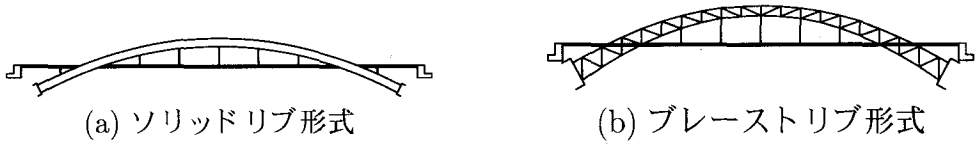


図 2.16 代表的なリブ形式

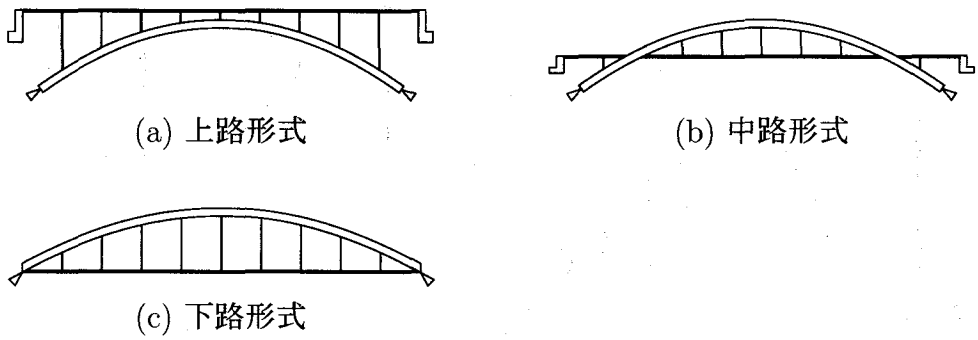


図 2.17 代表的な路面位置

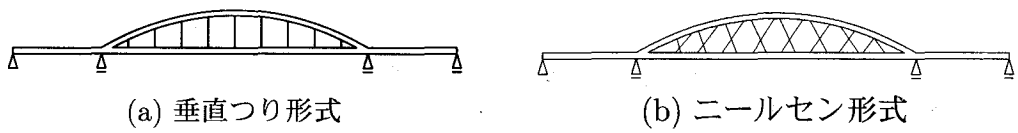


図 2.18 代表的なつり形式

これらの各設計項目の属性値の候補は，図 2.5 に示す設計項目間の関係として記述されたルールに従い生成される．システムは支間長，アーチ形式，リブ形式，路面位置の決定において図 2.19 に示すような中間候補を提示し，設計者の意思決定を促す．競合候補に対する設計評価指標としては，橋梁構造物に関する解説書 [平井 1967; 成瀬, 鈴木 1981; 日本鋼構造協会編 1985] より整理した構造機能性，経済性に関する設計知識に加え，前節に述べた手法により整理された感覚的要求に関する事例知識を用いる．これらの，設計項目 X_i の競合属性値 x_{in} に対する構造機能性に関する評価 v_{in}^s，経済性に関する評価 v_{in}^c は，それまでに決定した設計項目の属性値と x_{in} の関数，感覚的要求 $\boldsymbol{S}^R$ に関する評価 v_{in}^a は，式 (2.21) に示したように競合属性値 x_{in} および感覚的要求 $\boldsymbol{S}^R$ の関数として表される．

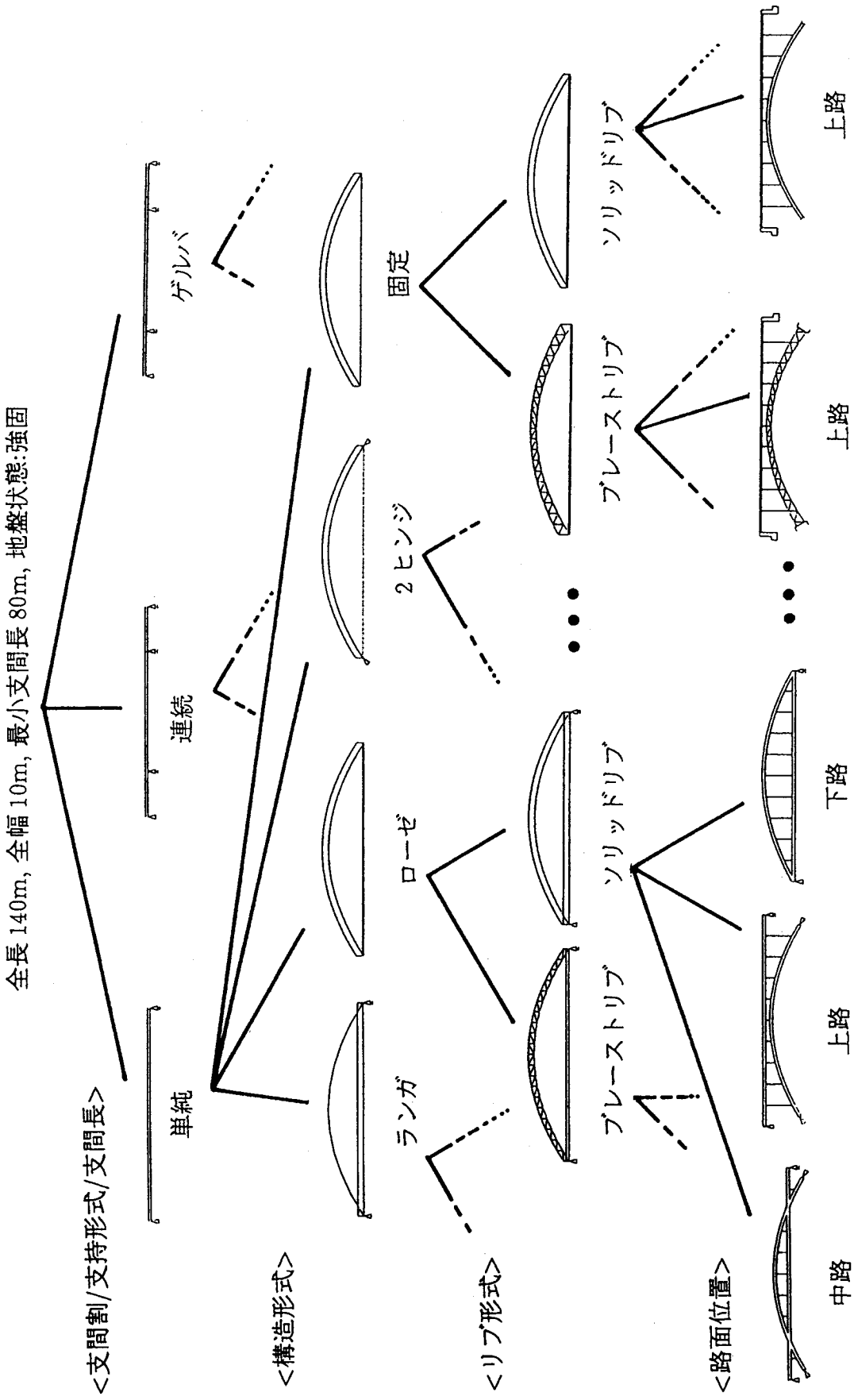


図 2.19 アーチ橋構造物の設計過程

2.5.2 競合候補の評価における指標の重み付け

競合候補に対する支援システムの総合的な評価には，最も単純な各設計指標に対する評価値の重み付け平均を用いる．アーチ橋構造物の概念設計の例として，感覚的デザイン性の評価が「優美」，「軽快」，「近代的」とされる中路式ローゼ橋[関西道路研究会 1991] と同様の設計仕様として，橋長が 83m，全幅が 6m，最小支間長が 60m，地盤状態が強固を与えた例を考える．

設計者は，設計支援システムによって生成される各設計項目の競合候補を，設計支援システムによる設計評価を参考とし，対話的に意思決定を行っていく．ここでは，設計者が支援システムの設計評価指標である構造機能性，経済性，感覚的デザイン性をそれぞれ重視すると想定し重み付けを行った 3 つの場合を考える．このとき，設計指標に対する重み付けの効果を明確にするため，設計者がシステムによりもっとも高く評価された第一候補のみを選択するものとする．表 2.6に代表的な設計項目，アーチ形式 X_4，路面位置 X_9 の競合候補に対する設計評価の例を示す．

表 2.6 競合候補に対する設計評価の例

(a) アーチ形式に対する評価

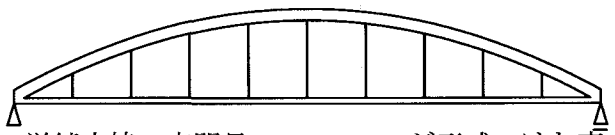
	競合候補			
重視する設計評価指標	ランガ	ローゼ	2ヒンジ	固定
構造機能性	0.14	<u>0.38</u>	0.21	0.27
経済性	<u>0.26</u>	0.25	0.24	0.24
感覚的デザイン性	0.20	<u>0.49</u>	0.18	0.14

(b) 路面位置に対する評価

		競合候補		
重視する設計評価指標	アーチ形式	下路	中路	上路
構造機能性	ローゼ	<u>0.35</u>	0.33	0.32
経済性	ランガ	<u>0.41</u>	0.34	0.24
感覚的デザイン性	ローゼ	0.31	<u>0.47</u>	0.21

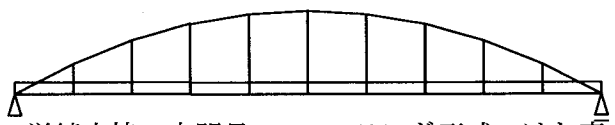
(1) 構造機能性を重視した場合

構造機能性，経済性，感覚的デザイン性に関する評価値 $v_{in}^{s}, v_{in}^{c}, v_{in}^{a}$ に対する重みを 10:1:1 とし，構造機能性を重視した場合を考える．この場合には，図 2.20(a) に示されるような，単純支持，ローゼ形式，ソリッドリブ，下路形式の補剛アーチが設計候補としてもっとも高く評価された．これは，ローゼ形式がアーチ・リブと橋げたにより曲げ荷重を分担するために，剛性に富んだアーチ橋となる点が反映されていると考えられる．



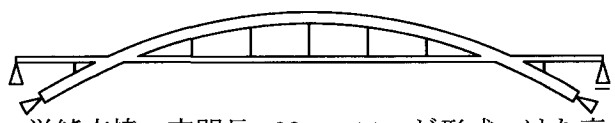
1 径間，単純支持，支間長: 83m，ローゼ形式，けた高: 1m，ソリッドリブ，リブ高: 2m, アーチライズ: 6，下路形式，垂直つり

(a) 構造機能性を重視した場合



1 径間，単純支持，支間長: 83m，ランガ形式，けた高: 1m，ソリッドリブ，リブ高: 0.5m, アーチライズ: 6，下路形式，垂直つり

(b) 経済性を重視した場合



1 径間，単純支持，支間長: 83m，ローゼ形式，けた高: 1m，ソリッドリブ，リブ高: 2m, アーチライズ: 6，中路形式，垂直つり

(c) 感覚的デザイン性を重視した場合

図 2.20 設計指標の重み付けによる生成候補の変化の例

(2) 経済性を重視した場合

構造機能性，経済性，感覚的デザイン性に関する評価値に対する重みを 1:10:1 とし，経済性を重視した設計を考えれば，図 2.20(b) に示されるような，単純支持，ランガけた，ソリッドリブ，下路形式の補剛アーチの評価がもっとも高くなる．これは，ランガ形式がアーチリブに曲げ荷重を分担しない細い軸圧縮部材を用いるので，使用鋼材量が減じられ，経済的となる点が反映されていると考えられる．

(3) 感覚的なデザイン性を重視した場合

感覚的デザイン性の要求として「優美」,「軽快」,「近代的」を重視し，それぞれの形容語に対応する s_i^R を 1，他を零として 2.4.4 節に述べた手法により各候補の評価を行う．構造機能性，経済性，感覚的デザイン性に関する評価値に対する重みを 1:1:10 とし，感覚的デザイン性を重視した場合，アーチ形式は構造機能性を重視した場合と同様にローゼけたの評価がもっとも高くなるが，路面位置の候補，下路形式，中路形式，上路形式に対する評価は異なり (表 2.6(b))，実際の設計事例と同様の，中路形式の補剛アーチ，図 2.20(c) の評価がもっとも高くなった．

このような各設計指標に関する評価値の重み付けによって，設計者の選好の反映が可能となることが分かる．また，最後に示したように，感覚的デザイン性を重視し，実事例に対する感覚的評価と同様の感覚的要求を与えた場合には，実事例と同様の設計候補が生成されることが確認された．

2.5.3 感覚的要求に基づく設計候補

設計事例に対する感覚的評価を 2.4.4 節に述べた手法により整理した事例知識が，設計候補の評価においてどのように反映されるかを検討する．ここでは，前項と異なり，支間長，支持形式に対しても競合候補が生じ，多くの設計候補生成の可能性を持つ設計仕様として，橋長が 140m，全幅が 10m，最小支間長が 80m，地盤状態が強固である例を与える．また，設計評価の指標として感覚的デザイン

性を重視し，その要求としては，図 2.1からほぼ対照的な概念であると考えられる「近代的かつ軽快」を重視する場合と「象徴的かつ力強い」を重視する場合とを考える．

(1) 感覚的デザイン性の要求「近代的かつ軽快」に対する候補の評価

感覚的形容語「近代的」および「軽快」を重視するとして，対応する s_4^R および s_2^R には 1 を，他の形容語に対しては零を与え，感覚的要求 $\boldsymbol{S}^R$ を表現する．式 (2.21) から，各設計項目の属性値に対する感覚的デザイン性の評価 v_{in}^a が求まる．表 2.7に，構造機能性，経済性，感覚的デザイン性に関する評価値に対する重みを 1:1:10 とした場合の競合候補に対する評価の例を示す．

表 2.7(a) は，最初の設計項目，支間長に関する競合候補の評価である．この場合，優先度が他の候補 (連続支持，支間長 80m) よりも高かった単純支持，支間長 140m を設計者が採用することで次の設計項目，アーチ形式の決定に設計過程が進行される．採用された形式，単純支持，支間長 140m に対して，ルールベース推論によって可能アーチ形式の競合候補が生成され，それらの設計評価 (表 2.7(b)) では，ローゼ形式がもっとも優先度が高くなった．設計者が，このアーチ形式を採用とすることで，ここまでに決定された設計項目値に基づくルールベース推論から，けた高の候補がシステムにより生成され，さらにリブ形式に対する競合候補は，ソリッドリブとブレーストリブになる．これらに対する評価は表 2.7(c) に示される値であった．設計者がリブ形式の属性値を評価の最も高いソリッドリブに決定すれば，システムはリブ高さ，つり形式，ライズ，および路面位置をルールベース推論に基づき生成し，路面位置の決定へと設計を進行させる．路面位置に関しては上路，中路，下路の競合候補がみられ，これらの評価値は表 2.7(d) に示すようになった．このとき，路面位置の候補としては同じ上路，下路であってもライズに異なる属性値を持つため，それぞれ別の中間候補として扱われ評価がなされている．ここで，設計者が評価値の高いライズ: 7，中路形式の候補を採用することで，図 2.21 に示されるようなローゼけたの中路補剛アーチが得られた．

表 2.7 感覚的要求「近代的かつ軽快」に対する競合候補の評価

(a) 支間長の競合候補に対する評価

	支間長に対する競合候補		
	単純支持	連続支持	重み
評価指標	140m	80m	
構造機能性	0.64	0.36	1
経済性	0.50	0.50	1
デザイン性	0.63	0.37	10
優先度	0.63	0.38	–

(b) アーチ形式の競合候補に対する評価

	アーチ形式に対する競合候補				
評価指標	ランガ	ローゼ	2ヒンジ	固定	重み
構造機能性	0.12	0.37	0.21	0.29	1
経済性	0.15	0.29	0.27	0.27	1
デザイン性	0.14	0.38	0.23	0.25	10
優先度	0.13	0.37	0.23	0.26	–

単純支持，支間長 140m

(c) リブ形式の競合候補に対する評価

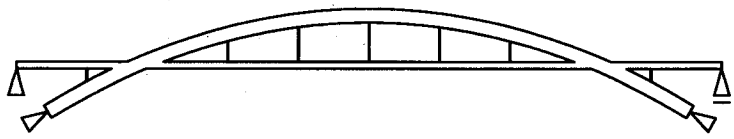
	リブ形式に対する競合候補		
評価指標	ソリッド	ブレースト	重み
構造機能性	0.44	0.56	1
経済性	0.91	0.09	1
デザイン性	0.86	0.14	10
優先度	0.83	0.17	–

単純支持，支間長 140m，ローゼ，けた高 2m

(d) 路面位置の競合候補に対する評価

	路面位置に対する競合候補					
	ライズ:7	ライズ:7	ライズ:7	ライズ:8	ライズ:8	
評価指標	上路	下路	中路	上路	下路	重み
構造機能性	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1
経済性	0.15	0.23	0.20	0.15	0.26	1
デザイン性	0.21	0.18	0.21	0.21	0.18	10
優先度	0.20	0.19	0.21	0.20	0.19	–

単純支持，支間長 140m，ローゼ，けた高 2m，ソリッドリブ，リブ高さ 2m，つり材：垂直



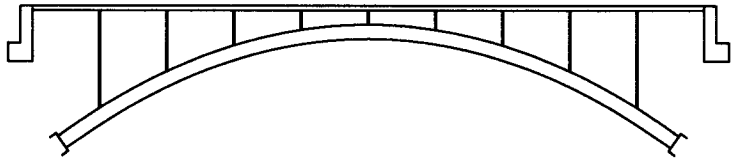
単純支持，支間長 140m，ローゼ，けた高 2m，ソリッドリブ，
リブ高さ 2m，垂直つり，中路形式，ライズ: 7

図 2.21 感覚的要求「近代的かつ軽快」を考慮した候補の生成

(2) 感覚的デザイン性の要求「象徴的かつ力強い」に対する候補の評価

感覚的形容語「象徴的」,「力強い」を重視するとして，対応する s_5^R, s_{11}^R には 1 を，他の形容語に対しては零を与え，感覚的デザイン性の要求を重視するとした場合を考える．前項と同様の過程における各中間候補の評価を表 2.8 に示す．この場合には，図 2.22 に示されるような上路固定アーチの設計候補が生成された．

これらの例は，同じ設計仕様を与えた場合にあっても，設計事例に対する感覚的評価と構造形態との関連から整理された事例知識を用いることにより，感覚的デザイン性の要求の差異により競合候補の評価が異なり，設計者の候補選択における感覚的要求の反映が可能であることを示すと考えられる．ここでは，説明を簡明にするために，設計支援システムの評価がもっとも高い候補のみを設計者が採用するとして示してきたが，もちろん，システムの評価の意味での次善の候補なども設計者からの候補の再提示の要求により生成可能でなければならない．



単純支持，支間長 140m，固定アーチ，けた高 1m，ソリッドリブ，
リブ高さ 3m，垂直つり，上路形式，ライズ: 7

図 2.22 感覚的要求「象徴的かつ力強い」を考慮した設計候補の生成

表 2.8 感覚的要求「象徴的かつ力強い」に対する競合候補の評価

(a) 支間長の競合候補に対する評価

	支間長に対する競合候補		
	単純支持	連続支持	重み
評価指標	140m	80m	
構造機能性	0.64	0.36	1
経済性	0.50	0.50	1
デザイン性	0.94	0.06	10
優先度	0.88	0.12	–

(b) アーチ形式の競合候補に対する評価

	アーチ形式に対する競合候補				
評価指標	ランガ	ローゼ	2ヒンジ	固定	重み
構造機能性	0.12	0.37	0.21	0.29	1
経済性	0.15	0.29	0.27	0.27	1
デザイン性	0.03	0.24	0.36	0.37	10
優先度	0.05	0.25	0.34	0.36	–

単純支持，支間長 140m

(c) リブ形式の競合候補に対する評価

	リブ形式に対する競合候補		
評価指標	ソリッド	ブレースト	
構造機能性	0.44	0.56	1
経済性	0.91	0.09	1
デザイン性	0.49	0.51	10
優先度	0.52	0.48	–

単純支持，支間長 140m，固定アーチ，けた高 1m

(d) 路面位置の競合候補に対する評価の例

	路面位置に対する競合候補					
	ライズ:7	ライズ:7	ライズ:7	ライズ:8	ライズ:8	
評価指標	上路	下路	中路	上路	下路	重み
構造機能性	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1
経済性	0.15	0.23	0.20	0.15	0.26	1
デザイン性	0.31	0.12	0.13	0.31	0.13	10
優先度	0.29	0.14	0.14	0.29	0.15	–

単純支持，支間長 140m，固定アーチ，けた高 1 m，リブ高さ 3m，つり材垂直

2.6 まとめ

工学設計に対する従来とは異なる視点として，工学理論などの客観的に支持され得る理論的な側面のみならず，感覚や直感などにより主観的にしか支持され得ない感覚的側面をも同時に考慮する構造・感性設計の枠組が必要となることを示した．設計問題に対するコンピュータを用いた支援では，設計者の持つ設計知識に注目する知識工学的手法が定着している．ところが，感覚的側面に関する設計者の意思決定は，その根拠をほとんど意識することなく行われており，設計知識として陽に記述することは困難となる．また，一般に美観に代表される感性的側面は，設計対象物そのものの持つ普遍的性質ではなく，客観的な設計知識としてルールの形式では記述できない．したがって，感覚的側面を考慮する設計支援においては，設計知識のみに基づく枠組は不十分となる．

本章では，構造物の概念設計において，感覚的デザイン性の要求といった主観的な側面も考慮するために，無意識的なものも含んだ設計者の意思決定の具体的表現である過去の設計事例に対する感覚的評価の利用に着目した．まず，設計事例に対する定性的な感覚的評価の取扱いについて考察を行い，感覚的評価と構造物の構造形態との関連の強さを情報量に基づき帰納的に抽出する手法を示した．次に，過去に実現された事例にみられる頻度を事例知識として整理し，感覚的要求を反映した設計候補の評価を行うための手法を提案した．また，構造・感性設計の枠組において，構造工学理論などに基づく客観的な側面に対する知識工学的な方法と，設計者の感性に基づいた主観的な側面に対する事例指向の方法とを組合せる設計支援システム構築の方法論を提案した．これは，設計問題においては知識と事例を補完的に用いるべきとの考え方 [Bardasz and Zeid 1993] に対する具体的な実装例である．

概念設計支援システム構築の例としてとりあげたアーチ橋構造物の2次元スケルトン設計の支援では，設計評価指標に対する重み付けを変更することで設計者の選好を反映できること，および感覚的デザイン性の要求を反映する設計候補の生成へ，提案した事例に基づく手法が利用可能なことをケーススタディにより示

した．ただし，概念設計の段階では感覚的評価を含め設計候補の評価には絶対的意味合いが強くないので，その評価に基づきシステムが設計過程を主導することは不適当となる．したがって，システムによる評価の意味で次善の候補も提示可能とすることが必要となる．

第3章

構造物設計事例の遺伝子的事例ベース

3.1 はじめに

設計問題に対するコンピュータ利用の一手法として知識工学的アプローチは既に定着し [Dixon and Simmons 1983; 赤木, 藤田 1990]，設計者からの知識獲得の困難さに対しても，過去に実現された設計事例を利用する事例指向のアプローチが試みられている [Howard *et al.* 1989; Navinchandra *et al.* 1991; Pu 1993]．前章では，客観的評価規準の存在しない感覚的側面について，設計事例への評価を帰納的に整理することで事例知識ベースを構築する手法を示した．

一般に，事例に基づく設計支援では，過去の設計事例を蓄えたデータベースから類似の事例を検索し，現在の設計仕様に適合するよう修正することが基本となる [奥田, 山崎 1990]．しかしながら，概念設計の段階では設計対象物の枠組すら明確には定まっておらず，設計事例を収集する際には多種多様の事例を扱う必要がでてくる [Smithers and Troxell 1990]．橋梁構造物を例にとると，ある橋梁形式では存在する構造属性が，異なる橋梁形式では存在しないなどの不統一のために，通常行われる属性値集合としての設計対象物の表現では，類似の比較が困難となる．また，設計事例を参照して得られる設計解は，類似設計的なアプローチとなることが多く過去の設計事例に強く影響を受けるので，設計者による多様な設計候補の検討が必要な概念設計の段階では候補生成の一様化が特に問題となる．

本章では，構造物の概念設計段階における事例ベースの構築および設計候補の生成に対して，遺伝的アルゴリズム [Goldberg 1989] の利用を提案し，ケーススタディにより有用性を検討する．ただし，ここでは客観的な評価関数の存在する最適化問題として概念設計を取扱うのではなく，集団に基づく確率的個体生成手法としての遺伝的アルゴリズムの側面に注目し，その考え方の利用を試みる．まず，

設計対象とする構造物を遺伝的アルゴリズムにおける個体ととらえ，その属性を，個体が染色体に保持する遺伝子情報の表現型であると考える．このとき，染色体上には必ずしも表現型へ発現されない冗長な遺伝子座を置くことで表現型における構造形態の差異を表現し，構造形態が異なる事例についても類似度の算定を行えるようにする．このことによって，構造形態の異なる設計事例の比較，組合せの操作が可能となり，構造物の多様性が表現される．ここでは，過去の設計事例群の特徴が，個体群に反映されるように遺伝的操作を行い，この集団を遺伝子的設計事例ベースととらえる．これは，個体が産み出される遺伝子プールに相当し，この事例ベースに対して設計要求に基づく遺伝的操作を行い，要求に適合した特徴を持つ個体が多く生き残っている候補個体群を生成する．設計候補は，この候補個体群から親個体ペアを選び出し，組合せ的に子個体を産み出すことで生成する．この個体は与えられた設計仕様と類似の過去の設計事例の特徴を持ちながらも，新たな形質の発現も期待されるので，設計者への多くの候補の検討の機会を与えることが期待される．提案する手法の有効性については，橋梁構造物の2次元スケルトン設計を例にとった概念設計支援システムを構築し，ケーススタディにより検討する．

3.2 構造物の概念設計における事例の利用とその表現

設計者が新たな設計を行う際には，全く白紙の状態から開始するのではなく，多くの場合には過去の設計事例，経験が指針となっている．たとえば設計実務を観察すると，過去に実現された設計事例を利用し，その寸法等の一部の修正によって新たな設計解を導き出す類似設計がしばしば行われる [赤木 1991]．また，概念設計の段階では無意識的に設計事例を検索することによって，たいていの場合には少しの修正のみで殆どの設計制約を満たす設計解を得ている [Ramirez 1996]．

設計は要求される機能を記述した仕様を満たすような人工物の記述を生成する過程であり，機能領域から物理領域への写像と見なせる．その写像のためには，設計者は機能から物理的挙動までの抽象度の異なったレベルで推論可能でなければならない．しかしながら，機械設計や構造設計では，VLSI などの論理回路の設計に見られるような要素の直線的な「分解，再構成」が可能ではなく，要素間の干渉が強く人工物の特定の機能要求とそれぞれの要素との間には単純で明快な対応は一般には無い．すなわち，機械システムの設計領域では機能と要素の写像が一対一に対応するような良特性をもたないために不明確なものとなっている．これに対して，過去に実現された設計事例に反映されている設計原理をいったんルールとして抽象化する事なくそのまま利用する，事例に基づく設計のアプローチが有効であると考えられる [Navinchandra *et al.* 1991]．事例ベース推論は，事例を蓄え，未知の問題を解決するときにはその問題に類似した既知の問題を検索し，その既知の問題に対する解事例を変形することによって当該問題の解を得ようとする枠組である [奥田，山崎 1990]．この種類の推論は，設計実務で観察される挙動に非常に近いが，設計事例の表現や事例ベースの構成についてはなお多くの検討が必要とされており [Bardasz 1992]，新たな設計問題と設計事例の類似性を測る適切な方法の定義と実際例へ以前の解を適応させる方法が鍵となる [Hauser and Scherer 1997]．

設計の初期段階にある概念設計では，構造形態の幾何と位相を同時に考慮する必要があり，位相が異なる構造ではその幾何を定めるに必要な設計変数は大きく

異なる．しかしながら，位相が異なる構造において異なる設計変数として表現されている属性でも，それぞれの構造物の中で類似した機能を果たすものも少なくない．このため，概念設計において事例を活用する場合，同じ属性における値の類似性と類似機能をもつ属性における類似性とを同時に考慮することが大切である [Welch and Dixon 1994; Gorti and Sriram 1996]．ここでは，遺伝子的に構造物をとらえ，構造属性は染色体として表した遺伝子情報が発現した表現型であると考える．染色体は固定長の記号列であるが，構造形態の位相および設計変数空間の差異を，形質発現の支配遺伝子および発現に際して参照される遺伝子座の差異として表現する．このように，構造属性を形質発現に関する情報も含んだ染色体として抽象的に表現することで，構造物間の類似度を記号列の単純なマッチングにより定義できる．

また，概念設計段階で規定される要求には解を一意に定める程の強い制約は少ないので，考慮すべき設計空間は広範囲である．これに比して，実際に実現されかつ収集された設計事例群は限られたものであるから，設計空間のごく一部を表わすサンプル集団に過ぎない．したがって，設計事例をそのままにまとめた事例ベースでは，考慮すべき広い設計空間での可能性を設計者に示唆することに困難がある．このような状況においては収集された設計事例はもちろんであるが，それらを含む多様な可能性を表現するように事例ベースを構築することが重要である．

そこで，まず，構造属性のある値が過去にどの程度実現されたかを表わす事例頻度を設計事例群の特徴量とし，これによって過去の実績を表現する．染色体に含まれる遺伝的情報の交換を行う交叉に代表される遺伝的操作は，親の特徴を部分的に持ちながらも新たな形質が生み出される可能性を有すると考えられる [Goldberg 1989]．ここでは，サンプル集団である設計事例群そのものだけではなく，事例の持つ属性を組合せとして持つ個体をも含めた個体群，すなわち設計事例群が占めるよりも広い設計空間に対応する個体群を遺伝的操作によって生成し，これを遺伝子的事例ベースと考える．この考え方は，過去の設計事例を遺伝的アルゴリズムにおける祖先ととらえ，組合せ的に新たなものを生み出すことでより広い設計可能性を表すものであり，既存要素の組合せによる新規設計候補の発現 [Hua *et*

al. 1992] を拡張し，集団として確率的に行うものである．これは過去の設計事例に囚われ過ぎることなく，多様な候補を設計者の検討に供するもととなり，この多様性の維持は，概念設計支援において特に重要となる機能 [Chakrabarti and Thomas 1996] である．以下では，このような遺伝子的事例ベースのための，構造物の遺伝子的表現と事例ベースの生成について述べる．

3.3 遺伝子的事例ベースの構成

3.3.1 遺伝子的表現の冗長性による設計空間の表現

設計対象となる構造物は，与えられた設計要求とそれに適合するように具体的に定められた構造変数の値とにより特徴づけられる [北郷 1972]．ここでは設計対象構造物の属性 $\boldsymbol{s}$ を，設計要求 R_i の条件 r_i, $(i = 1, \ldots, I_R)$ および設計変数 X_i の値 x_i, $(i = 1, \ldots, I_X)$ を用いて，$\boldsymbol{s} = \{r_1, \ldots, r_{I_R}, x_1, \ldots, x_{I_X}\}$ として表わす．設計変数 X_i には，構造形態の幾何的特徴のような数値変数や位相的特徴のような非数値変数を含むものとする．構造物属性 $\boldsymbol{s}$ は，固定長 L のビット列として表される染色体 $\boldsymbol{c} = \{c_1, \ldots, c_L\}(c_\ell \in \{0, 1\})$ から発現された表現型である $(\boldsymbol{s} \Leftarrow \boldsymbol{c})$ ととらえる．以後，染色体から構造形態への発現演算子を $\Leftarrow$ で記す．遺伝子 c_ℓ には，数値により構造物の幾何形状を表わすもの，構造への形態発現に関する位相を表わすものが混在するが，遺伝子並びの上では区別することはしない．ただし，構造形態の位相毎に従属的な構造属性が存在するので，染色体 $\boldsymbol{c}$ から構造形態 $\boldsymbol{s}$ への発現に際しては，位相を表わす遺伝子値の差異によって，染色体 $\boldsymbol{c}$ のうち表現型に現れる部分と現れない部分とが異なるような染色体表現としておく．表現型に現れていない情報は，みかけ上その世代では発現されなくとも，染色体上には保持されているので，後の世代では現われてくる可能性を持っている．すなわち，表現型と遺伝子型とは1対多の対応関係を持ち，構造属性 $\boldsymbol{s}$ に寄与しない表現型に現れなかった冗長な遺伝子情報が染色体に保持されている．また，位相の異なる構造形態で，みかけ上区別される構造属性であっても，構造物の力学的役割など，構造機能として類似のものは，同じ遺伝子座から発現されるものとし，染色体での類似性の評価を可能とする．このことによって，機能的には類似でありながらも一見異なる発現形態を持っているものの表現が可能となると考えられる．

設計事例群の特徴量として，構造属性が事例群にどの程度存在するかを示す事例頻度を用いる．ただし，頻度の算定では完全に一致する構造属性を持つ事例数を数え上げるのではなく，事例群中に類似の構造属性が存在する比率とする．ま

た，過去の設計事例として収集した構造物の染色体表現では，構造形態として表現型に発現されなかった構造属性に対応するビットは，未知 (‘unknown’) としておく．構造属性 $\boldsymbol{s}_i$, $\boldsymbol{s}_j$ を持つ個体間の類似性は，それぞれの染色体表現 $\boldsymbol{c}_i$, $\boldsymbol{c}_j$ をもとに比較し，共通する K 個の一致パターン $\boldsymbol{\pi}_k\,(k=1,\ldots,K)$ それぞれの長さ λ_k に着目し，類似度を

$$\rho(\boldsymbol{c}_i,\,\boldsymbol{c}_j,\,\beta)=\frac{1}{L^{\beta}}\sum_{k=1}^{K}{\lambda_k}^{\beta} \tag{3.1}$$

と定義する．ただし，一致パターンの算定では，値 ‘unknown’ をとるビットは除く．パラメータ $\beta(\geq 1)$ は，類似度の評価におけるパターン長の考慮の度合を調節するものであり，$\beta=1$ ではパターン長を考慮せずに，染色体間で一致したビット数のみからの評価，$\beta>1$ では一致パターンにおけるビットの連なりの長さをより強調した評価となる．また，一致パターン長の評価で，構造属性の染色体表現に対する遺伝子座位置の影響をなくすために，染色体をリング状と考え，先頭と最後尾の遺伝子座 c_1 および c_L は隣接していると考える．

図 3.1 に，それぞれ 14 ビットの染色体からなる個体 $\boldsymbol{c}_i$, $\boldsymbol{c}_j$ の類似度の算定の例を示す．ここで，個体 $\boldsymbol{c}_i$ は設計事例であり，遺伝子座 c_4, c_8, c_9には，構造形態として発現されなかった未知の属性値 ‘unknown’ を示すビット ‘?’ が含まれてい

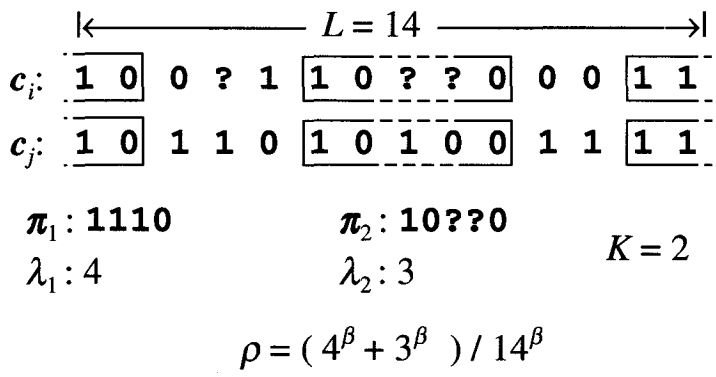


図 3.1 個体間の類似度算定の例

る．個体間には，一致パターン '1110' と '10??0' の2つがみられ，第1番目のパターン $\boldsymbol{\pi}_1$ '1110' は染色体末尾側から先頭へかけての遺伝子座 $\{c_{13}\ c_{14}\ c_1\ c_2\}$ 上，第2番目のパターン $\boldsymbol{\pi}_2$ '10??0' は，設計事例 $\boldsymbol{c}_i$ の未発現部分 'unknown' を含んだ遺伝子座 $\{c_6\ c_7 - - c_{10}\}$ 上の一致パターンの評価を示す．たとえば，パターン長強調パラメータ $\beta = 1$ とした場合，一致するビット数が7ならばいずれの場合も類似度 $\rho(\boldsymbol{c}_i, \boldsymbol{c}_j, 1) = 0.5$ となるが，$\beta = 2$ の場合には，2つのパターン $\boldsymbol{\pi}_1, \boldsymbol{\pi}_2$ の長さ λ_1, λ_2 がそれぞれ4と3ならば0.128であるのに対して，それぞれ長さ1のパターンが7つある場合には0.036となるので，一致パターンのビットの連なりの長さが強調される評価となることが分かる．

個体数 I_c の個体群 $\boldsymbol{C}$ $(= \{\boldsymbol{c}_1, \ldots, \boldsymbol{c}_{I_c}\})$ の染色体 $\boldsymbol{c}$ に関する特徴量として，個体群 $\boldsymbol{C}$ での染色体 $\boldsymbol{c}$ の頻度 $p(\boldsymbol{c}, \boldsymbol{C}, \beta)$ を考える．これは，式(3.1)に示した類似度 ρ の個体群全体に関する総和

$$p(\boldsymbol{c}, \boldsymbol{C}, \beta) = \frac{1}{I_c} \sum_{i=1}^{I_c} \rho(\boldsymbol{c}, \boldsymbol{c}_i, \beta) \tag{3.2}$$

とする．これは，類似度 ρ の範囲が $0 \leq \rho \leq 1$ であることから，拡張された頻度表現である．

3.3.2 構造物の遺伝子的表現

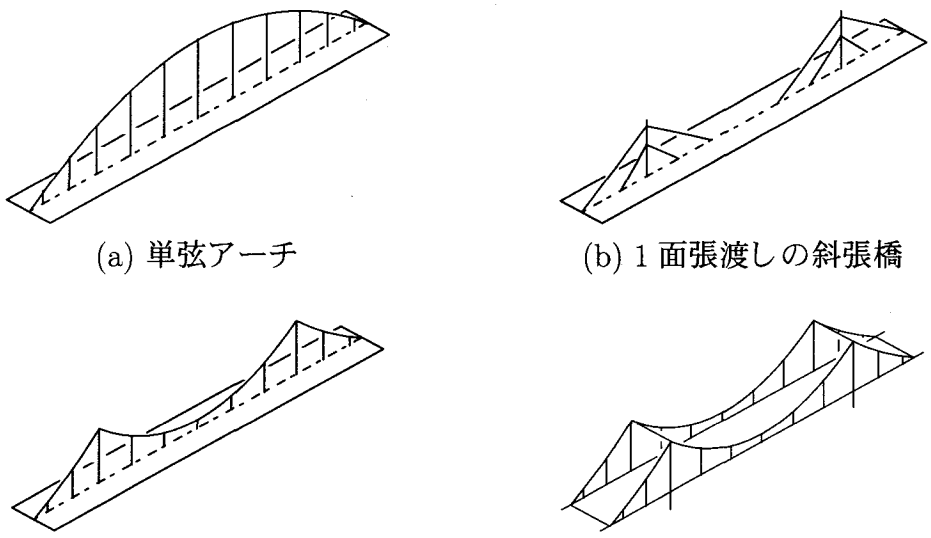
橋梁構造物の概念設計をとりあげ，事例に基づく候補生成を行った例を示す．橋梁構造物の設計に関する文献 [平井 1967; 小西 (編) 1977] を参照し，構造属性として表3.1に示す29属性を考えた．これらの属性のうち，橋長 (Length)，幅員 (Width)，用途 (Usage)，最大支間長 (Max. span)，路面位置 (Deck position)，支間割 (Span assignment)，支持形式 (Supporting pattern) の8つの構造属性を設計要求 $R_1, \ldots, R_8$ とした．橋長などの連続的な数値をとる構造属性は，それぞれ7つの区間を定め，どの区間に帰属するかを属性値とした．アーチリブ (Arch rib)，斜張ケーブル (Stays)，つりケーブル (Suspension cable) の属性は，橋梁けた部に対する補剛の形態の位相を表現するものであり，これらの構造要素の有無を表わ

表 3.1 橋梁構造物の構造属性

設計要求 R_i	設計変数 X_i	
橋長 (R_1)	けた形式 (X_1)	塔形状 [C/S] (X_{12})
幅員 (R_2)	けた形状 (X_2)	塔高 [C/S] (X_{13})
用途 (R_3)	最大けた高 (X_3)	ライズ [A/S] (X_{14})
材質 (R_4)	最小けた高 (X_4)	つりパターン [A/S] (X_{15})
最大支間長 (R_5)	ウエブ配置 [T] (X_5)	アーチ形式 [A] (X_{16})
路面位置 (R_6)	格間長 [T] (X_6)	アーチリブ形式 [A] (X_{17})
支間割 (R_7)	ガーダ形式 [G] (X_7)	最大リブ高さ [A] (X_{18})
支持形式 (R_8)	アーチリブ (X_8)	最小リブ高さ [A] (X_{19})
	斜張ケーブル (X_9)	つりケーブル定着形式 [S](X_{20})
	つりケーブル (X_{10})	斜張パターン [C] (X_{21})
	主構造数 [A/C/S] (X_{11})	

す．染色体から橋梁構造への形態発現の様相は，これらの属性値によって大きく異なり，それぞれアーチ橋，斜張橋，つり橋と分類される構造となる．

表中に [G]，[T]，[A]，[C], [S] と付記した属性はそれぞれけた橋 (Girder bridge)，トラス橋 (Truss bridge)，アーチ橋 (Arched bridge)，斜張橋 (Cable-stayed bridge)，つり橋 (Suspension bridge) の構造形態へ発現される場合のみに参照されることを示している．何も記されていない構造属性は全ての橋梁構造物に共通なものである．たとえば主構造数のように [A/C/S] と付記されているものは，アーチ橋，斜張橋，つり橋構造への発現に際して参照され，かつ類似の構造機能を持つ属性である．これは，実際の単弦アーチ (図 3.2(a))，1 面張渡しの斜張橋 (図 3.2(b))，1 面つりのつり橋 (図 3.2(c)) は，それぞれアーチ構造，ケーブル構造，つり構造とみかけ上は異なる主構造を持つが，図 3.2(d) のような 2 面構造とは異なり，けた部を 1 面構造で補剛するという機能的な類似を反映しているものであり，このような属性は染色体上の同一遺伝子座におくものとしている．



(a) 単弦アーチ　(b) 1面張渡しの斜張橋

(c) 1面つりのつり橋　(d) 2面つりのつり橋

図 3.2 主構造数 1, 2 を持つ個体の各構造形式への発現

表 3.2に，構造属性のとり得る値およびそれらを表現するビット列の構成を示す．橋長のように連続値をとる属性には 7 つの区間をもうけ，値がどの区間に属するかを属性値として用いる．けた高，格間長，塔高，リブ高さについては，支間長によって正規化することが標準的であるので，属性値の表現もそれに則っている．また，ライズは通常アーチ構造の縦横比を表すが，つり橋構造におけるサグ比も幾何的形状の意味としては同じであるので，アーチ橋構造物，つり橋構造物において用語が異なっているが，ここではライズに統一し，同じ構造属性として取扱っている．設計事例の遺伝子表現に用いられるビット列は，構造属性値を，それぞれの値を表現するのに必要なビット数からなるグレイコード (表 3.3) によって表し，これらを順に結合することで行う．したがって，染色体長は 29 の構造属性値に対して $L = 65$ となる．グレイコード表現の上で隣接している 2 値はハミング距離が必ず 1 であるので，遺伝子型において 1 つのビット値が変化した場合，表現型の構造属性値では必ず 1 だけ異なる．

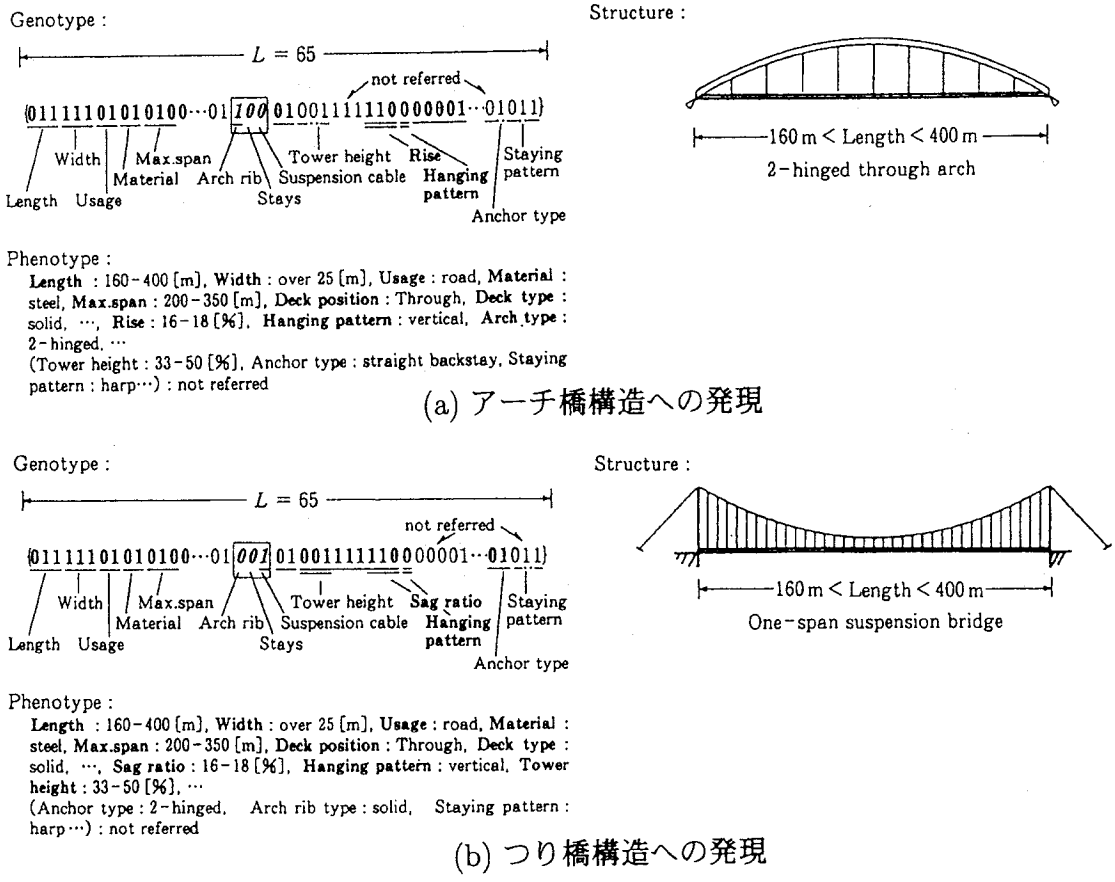
図 3.3に，ここで取扱う橋梁構造物の場合の遺伝子型 (染色体) から表現型 (構造形態) への発現の例を示す．アーチ・リブの有無を表わす遺伝子値が 1 をとる場

表 3.2 橋梁構造物の構造属性値

属性 (表現ビット長)	構造属性値
橋長 (3 ビット)	連続値 (区間: ~100, ~150, ~400, ~600, ~800, ~1800, 1800m 以上)
幅員 (3 ビット)	連続値 (区間: ～5, ～8, ～12, ～16, ～20, ～25, 25m 以上)
用途 (2 ビット)	歩行者，道路，鉄道，道路鉄道併用
材質 (2 ビット)	RC，鋼，PC，複合
支間長 (3 ビット)	連続値 (区間: ~50, ~100, ~200, ~350, ~600, ~1000, 1000m 以上)
路面位置 (2 ビット)	上路，中路，下路，2 層
支間割 (2 ビット)	1，2，3，多
支持形式 (2 ビット)	単純，連続，ゲルバ
けた形式 (1 ビット)	充腹，トラス
けた形状 (2 ビット)	直弦，下曲弦，上曲弦，両曲弦
最大けた高/支間長 (3 ビット)	連続値 (区間: ～0.5, ～1, ～2, ～3, ～5, ～8, 8%以上)
最小けた高/支間長 (3 ビット)	連続値 (区間: ～0.5, ～1, ～2, ～3, ～5, ～8, 8%以上)
ウエブ配置 (3 ビット)	Pratt 型，Warren 型 (1)，Warren 型 (2)，Warren 型 (3)，K 型，分格型，Howe 型
格間長/支間長 (3 ビット)	連続値 (区間: ～2, ～3, ～4, ～6, ～8, ～10, 10%以上)
ガーダ形式 (2 ビット)	箱，プレート，複合，T
・アーチリブ (1 ビット)	無，有
・斜張ケーブル (1 ビット)	無，有
・つりケーブル (1 ビット)	無，有
主構造数 (2 ビット)	1，2，3
塔形状 (3 ビット)	単，複，門型，A 型，H 型
塔高/支間長 (3 ビット)	連続値 (区間: ~10, ~14, ~20, ~25, ~33, ~50, 50%以上)
ライズ・サグ比 (3 ビット)	連続値 (区間: ~10, ~12, ~14, ~16, ~18, ~20, 20%以上)
つりパターン (1 ビット)	鉛直，斜
アーチ形式 (2 ビット)	ヒンジ，固定，ローゼ，ランガ
アーチリブ形式 (1 ビット)	充腹，トラス
最大リブ高さ/支間長 (3 ビット)	連続値 (区間: ～0.5, ～1, ～2, ～4, ～5, ～7, 7%以上)
最小リブ高さ/支間長 (3 ビット)	連続値 (区間: ～0.5, ～1, ～2, ～4, ～5, ～7, 7%以上)
つりケーブル定着形式 (2 ビット)	定着 1，定着 2，自碇式
斜張パターン (3 ビット)	単式，Büschel 型, Harfen 型, Facher 型, Viel Seil 型

表 3.3 グレイ・コードによる符号化 (3ビット)

10進数	0	1	2	3	4	5	6	7
グレイ・コード	000	001	011	010	110	111	101	100



(a) アーチ橋構造への発現

(b) つり橋構造への発現

図 3.3 橋梁構造物における染色体から構造形態への発現の例

合 (図 3.3(a)) には，構造形態としてアーチ・リブが発現されアーチ橋構造物となる．このときには，アーチ構造にかかわるライズ (Rise)，つりパターン (Hanging pattern) など表 3.1 で [A] が付記された属性に関する，染色体中に太字で示した遺伝子情報が参照される．塔高 (Tower height) などの，表 3.1 で [A] 以外のみが付記された属性に関する，染色体中に細字で示した遺伝子情報は，この染色体に保持されてはいるが，発現はされない．一方，アーチリブを表わす遺伝子の代りに，

つりケーブルの有無を表わす遺伝子値が 1 をとる図 3.3(b) に示す染色体では，つりケーブルによってけた部が補剛された構造形態を持つ，つり橋構造物として発現される．この構造物の橋長，幅員，路面位置などに関する属性は (a) のアーチ橋構造物と同様である．また，塔高やつりケーブル定着形式 (Anchor type) などアーチ橋構造物では隠されていた遺伝子情報が発現される．図 3.3(a) ではライズ，つり材パターンとして参照された遺伝子座の情報は，つり橋構造物において構造機能が類似するサグ比 (Sag ratio)，つりケーブルからのつりパターン (Hanging pattern) として参照される．表現型やそのスケルトン図より分かるように，これらの橋梁構造物 (a)(b) のみかけ上の構造形態としては大きく異なっているが，ライズ，サグ比に対する橋梁基部の水平分力の大きさ (正負は逆) や，つり材の鉛直，斜つりパターンに対する構造減衰性など，構造機能としては類似であると考えられる．このことは，染色体表現の上では，図 3.3のボックスで囲んだ 3 ビット中のアーチ・リブおよびつりケーブルの有無を表わす 2 ビットのみが異なり，類似度は $\beta = 2$ の場合 0.91 と大きくなっていることに反映されている．すなわち，見かけ上異なる構造形態であっても染色体表現に基づく類似度を用いることによって，表現型である構造物としての類似を測ることが可能であることを示している．なお，アーチ・リブ，つりケーブルを表わす遺伝子値がともに 0 をとる場合には，けた橋構造物が発現され，ともに 1 をとる場合にはアーチ・リブとつりケーブルを持つ構造形態が発現される．

3.4 遺伝的操作による事例ベースの生成

3.4.1 事例頻度に基づく遺伝的操作

過去に実現された M 個の設計事例からなる事例群 $\boldsymbol{C}^c$ $(=\{\boldsymbol{c}_1^c,\ldots,\boldsymbol{c}_M^c\})$ の特徴量として，構造属性が $\boldsymbol{s}$ $(\Leftarrow \boldsymbol{c})$ となる設計がどの程度実現されたかを表わす事例頻度 $p(\boldsymbol{c}, \boldsymbol{C}^c, \beta)$ を考える．まず，N 個 $(> M)$ の個体からなる初期操作対象個体群 $\boldsymbol{C}^{(0)}$ を準備し，これに交叉，突然変異，選択の遺伝的操作を繰り返し行う．初期操作対象個体群 $\boldsymbol{C}^{(0)}$ は，事例群 $\boldsymbol{C}^c$ からランダムに復元抽出，複写した染色体を持つ個体からなる．複写にあたって，設計事例で構造形態として発現されなかった 'unknown' をとる遺伝子に関しては，ランダムに 0 か 1 を与えておく．

第 t 世代の操作対象個体群 $\boldsymbol{C}^{(t)}$ に対する交叉の操作は，交叉率を γ として，個体群からランダムに抽出されたγN 個の染色体 $\boldsymbol{c}_i^{(t)}$ $(\in \boldsymbol{C}^{(t)})$ について親ペア $\boldsymbol{c}_i^{(t)}, \boldsymbol{c}_j^{(t)}$ $(i \neq j)$ をつくり，染色体部分列を交換する一点交叉とし，子染色体をもとの親染色体と置換する．突然変異の操作は，突然変異率を μ として，個体群からランダムに抽出されたμN 個の染色体 $\boldsymbol{c}_i^{(t)}$ $(\in \boldsymbol{C}^{(t)})$ において，それぞれランダムに選んだ 1 個の遺伝子のビット反転とし，もとの染色体と置き換える．これらの操作の結果，操作対象個体群 $\boldsymbol{C}^{(t)}$ は $\boldsymbol{C}^{(t')}$ に置き換えられる．

操作対象個体群における個体頻度が，設計事例群における事例頻度を表現するように世代更新を行うが，各個体は，自身の属する個体群での頻度がその構造属性の事例群における頻度と比べて大きい場合に淘汰の方向，小さい場合に増殖の方向で選択される．すなわち，個体群 $\boldsymbol{C}^{(t')}$ 中の各個体 $\boldsymbol{c}_n^{(t')}$ の適合度 f_n は，その個体の，設計事例群 $\boldsymbol{C}^c$ における事例頻度と自身の属する操作対象個体群 $\boldsymbol{C}^{(t')}$ における個体頻度との比

$$f_n(\boldsymbol{c}_n^{(t')}) = \frac{p(\boldsymbol{c}_n^{(t')}, \boldsymbol{C}^c, \beta)}{p(\boldsymbol{c}_n^{(t')}, \boldsymbol{C}^{(t')}, \beta)} \tag{3.3}$$

を用いる．ただし，表現型での属性値が，実現可能範囲を越える個体は致死遺伝子として適合度を 0 とする．たとえば，連続値をとる構造属性は 7 つに分割され

た区間 (0〜6) のどこに所属するかで属性値を表しているが，3 ビットでコーディングされている場合に '100' (10 進数表現の 7) となっている場合 (表 3.3) には，表現型の可能範囲を越えているのでその個体適合度は 0 となる．また，個体群にみられる形質の多様性を維持するために，個体群中において，表現型属性ごとに値の頻度分布を調べ，しきい値 ε ($\ll 1$) に対して，εN 個以下の少数個体にしか保持されていない値が生じた場合には，個体群中の形質の一様化を防ぐために，その表現型属性値を持つ個体は，式 (3.3) で与えられる適合度にかかわらず，次の世代 $t+1$ に生き残るものとして無条件に選択される．残りの個体に対して個体適合度の相対値 $f_n / \sum_{n=1}^{N} f_n$ を選択確率としたルーレット選択を行い，次世代 $\boldsymbol{C}^{(t+1)}$ へ世代を更新する．

操作対象個体群 $\boldsymbol{C}^{(t)}$ を構成する個体が，設計事例群の特徴量である事例頻度を十分に反映する場合，これは事例ベースとみなせる．ここでは，設計事例 $\boldsymbol{c}_m^c$ ($m = 1, \ldots, M$) それぞれに対して，事例群中における頻度 $p(\boldsymbol{c}_m^c, \boldsymbol{C}^c, \beta)$ と，操作対象個体群 $\boldsymbol{C}^{(t)}$ における頻度 $p(\boldsymbol{c}_m^c, \boldsymbol{C}^{(t)}, \beta)$ との相対差の平均，

$$\bar{e} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \frac{|\, p(\boldsymbol{c}_m^c, \boldsymbol{C}^c, \beta) - p(\boldsymbol{c}_m^c, \boldsymbol{C}^{(t)}, \beta) \,|}{p(\boldsymbol{c}_m^c, \boldsymbol{C}^c, \beta)} \tag{3.4}$$

を，操作対象個体群 $\boldsymbol{C}^{(t)}$ の，事例ベースとしての適合の尺度とする．ただし，3.2 節に述べたように，操作対象個体群は，収集された設計事例群そのものに一致させることを目的とするのではなく，本来の設計空間での事例頻度分布の反映を目的としている．したがって，個体頻度の平均差 $\bar{e}$ が零となるまでではなく，十分小さくなった時点で遺伝的操作を打切る．このとき，操作対象個体群 $\boldsymbol{C}^{(t)}$ には，設計事例として多く存在する形質に類似の個体ほど多く存在しているので，これを遺伝子的事例ベース $\boldsymbol{C}^b$ と呼ぶ．また，遺伝子的事例ベースを構成している染色体 $\boldsymbol{c}_i^b$ は，設計事例群にみられる特定の個体形質 $\boldsymbol{c}_m^c$ そのものと完全に一致するものではなく，式 (3.1) で評価の対象となる $\boldsymbol{c}_m^c$ ($m = 1, \ldots, M$) との間の遺伝子の一致パターンをビルディング・ブロックとして含むことで，事例個体 $\boldsymbol{c}_m^c$ の特徴を表すと考えられる．

3.4.2 橋梁構造物遺伝子的事例ベースの生成例と機能評価

橋梁構造物の事例集 [平井 1967; 小西 (編) 1977; 池田 (編) 1992〜1994; 日本道路協会 (編) 1990] からけた橋構造物 11，トラス橋構造物 50, アーチ橋構造物 50, 斜張橋構造物 50，つり橋構造物 50 の計 211 事例を収集し，表 3.1 に示した 29 属性に関する事例値を整理，個体表現し，この個体群を設計事例群 $\boldsymbol{C}^c$ とした (表 3.4, 全事例については章末，表 3.5〜表 3.9 に記載)．ただし，記号 '?' は設計事例に発現されていない属性および収集事例では不明な属性を表している．

遺伝子的事例ベースの構築にあたっては，個体数 $N = 5000$ の操作対象個体群 $\boldsymbol{C}^{(t)}$ を用意し，交叉，突然変異，増殖・淘汰の遺伝的操作を繰返し，世代交代を行った．ただし，式 (3.1) 中のパターン長評価の強調パラメータは $\beta = 2$ としている．交叉率 $\gamma = 0.8$，突然変異率 $\mu = 0.1$，次世代に無条件に生き残らせる少数個体の判定しきい値は，$\varepsilon = 5 \times 10^{-3}$ とし，式 (3.4) で定義した個体群 $\boldsymbol{C}^{(t)}$ の事例群 $\boldsymbol{C}^c$ に対する平均差 $\bar{e}$ が 0.1 以下になる世代で操作を打ち切るものとする．図 3.4 は平均差の推移を示している．第 16 世代目の個体群において平均差 $\bar{e} < 0.1$ となったので操作を打ち切り，この世代の個体群 $\boldsymbol{C}^{(16)}$ を遺伝子的事例ベース $\boldsymbol{C}^b$ とする．

図 3.5 は事例ベース個体群 $\boldsymbol{C}^b$ にもっとも多く存在した個体形質 $\hat{\boldsymbol{c}}$ (個体頻度 $p(\hat{\boldsymbol{c}}, \boldsymbol{C}^b, 2) = 0.069$，事例頻度 $p(\hat{\boldsymbol{c}}, \boldsymbol{C}^c, 2) = 0.061$) を示している．染色体 $\hat{\boldsymbol{c}}$ は，斜張橋として発現される形質を持ち，最も類似度の大きかった ($\rho(\hat{\boldsymbol{c}}, \boldsymbol{c}^c_{141}, 2) = 0.44$)

表 3.4 設計事例の遺伝子表現の例

事例	遺伝子型 ('?' は事例に発現されていない属性に関する値)
$\boldsymbol{c}^c_0$:	010???010101000100100101001 1?????00000???????????????????????????
$\boldsymbol{c}^c_1$:	110???011101100101100111001 0?????00000???????????????????????????
$\boldsymbol{c}^c_2$:	111???010101000100100011011 0?????00000???????????????????????????
$\boldsymbol{c}^c_3$:	010???010101100110100111001 0?????00000???????????????????????????
$\boldsymbol{c}^c_4$:	011111010100100111100111111 0?????01000???????????????????????????
$\boldsymbol{c}^c_5$:	011010010101100110100111001 0?????00000???????????????????????????
⋮	⋮
$\boldsymbol{c}^c_{208}$:	001001010101111000011111001001101 1??001010110010000?????????00??
$\boldsymbol{c}^c_{209}$:	011111010100111110100111001 0?????01001010110100100?????????11??
$\boldsymbol{c}^c_{210}$:	000011011100100110100001001 0?????01001010110110000?????????00??

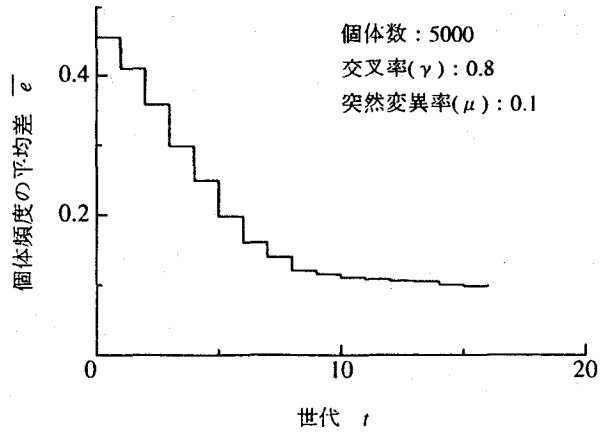


図 3.4 遺伝子的事例ベース生成における平均差 $\bar{e}$

An example of individual in case-base C^b

$\hat{c}$ 011101010101000110100001101101001000010000000110010100011011 00110 Cable stayed

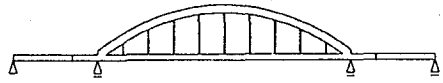
for Truss　　for Arched　　for Suspension

Length : 160-400 [m], **Width** : over 25 [m], **Usage** : road, **Material** : steel, **Max. span** : 200-350 [m], **Deck position** : deck, **Span Assignment** : 3, **Supporting pattern** : continuous, **Deck type** : solid, **Deck shape** : straight, **Max. deck height** : 1-2 [%], **Min. deck height** : 1-2 [%], **Girder type** : box, **Stays** : 1-plane, **Tower shape** : single, **Tower height.** : 14-20 [%], **Staying pattern** : multiple

Examples of past cases

c^c_{141} : 01 0 1010101010001101000011011 ?????? 00010 00000011 ?????????????? 110 Cable stayed

c^c_{103} : 011???0101010 1 01101000011011 ?????? 00100 0 1??????11 101 1 0011011 ????? Arched



c^c_{207} : 0010000101011 0100001000110110100 10 ??0010 1011001000 0 ????????? 00 ??? Suspension

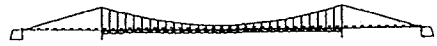


図 3.5 生成された遺伝子的事例ベースに含まれる代表的個体

実際の斜張橋設計事例 c^c_{141}(Friedrich-Ebert 橋 [小西 (編) 1977]) の特徴を主に保持している．なお，図中の設計事例を表わす個体において '?' と記されている遺伝子は，実際の設計事例には現れていない属性値 'unknown' を示す．図 3.5 中に示す網掛け部分の遺伝子が一致パターンである．

一方で，この染色体 $\hat{\boldsymbol{c}}$ は，ほぼ同程度の橋長，最大支間長を持つアーチ橋設計事例の染色体表現 $\boldsymbol{c}^c_{103}$ (永代橋 [伊東 1986]) や，つり橋設計事例の染色体表現 $\boldsymbol{c}^c_{207}$ (瀬戸橋 [平井 1967]) とも一致パターン (網掛け部) を有しており，類似度もそれぞれ $\rho(\hat{\boldsymbol{c}}, \boldsymbol{c}^c_{103}, 2) = 0.10$，$\rho(\hat{\boldsymbol{c}}, \boldsymbol{c}^c_{207}, 2) = 0.07$ である．すなわち染色体 $\hat{\boldsymbol{c}}$ は，設計事例 Friedrich-Ebert 橋 ($\boldsymbol{c}^c_{141}$) だけでなく，他の設計事例 ($\boldsymbol{c}^c_{103}$ と $\boldsymbol{c}^c_{207}$) の形質もビルディング・ブロックとして保持していることになる．遺伝子的事例ベースに含まれる個体はその染色体に個体群の特徴が部分的，多重的に保持されているとみなせ，1 つの個体であっても複数事例の特徴を潜在的に表現していることが分かり，多様な設計候補の表現のための基礎となるものである．

3.4.3 事例ベース生成における遺伝的操作の検討

ここでは，遺伝子的事例ベースを生成する際の遺伝的操作の役割について検討を行う．個体群中に設計事例群の特徴がどのように保持されているかの尺度として，個体形質分布の偏り v を考える．世代 t における個体群 $\boldsymbol{C}^{(t)}$ $(= \{\boldsymbol{c}^{(t)}_1, \ldots, \boldsymbol{c}^{(t)}_N\})$ 中の，事例 $\boldsymbol{c}^c_m$ に対する類似度の範囲，

$$d_m = \max_n(\rho(\boldsymbol{c}^c_m, \boldsymbol{c}^{(t)}_n, \beta)) - \min_n(\rho(\boldsymbol{c}^c_m, \boldsymbol{c}^{(t)}_n, \beta)) \tag{3.5}$$

を調べ，全事例 $(m = 1, \ldots, M)$ に関するばらつきを，分散

$$v = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}(d_m - \overline{d_m})^2 \tag{3.6}$$

$$\text{ただし} \quad \overline{d_m} = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} d_m \tag{3.7}$$

により測る．個体群が，特定の事例形質を偏って反映している場合，v は大きくなるので，これを個体群の個体形質の事例形質の偏りと定義する．

個体形質の偏り v，個体頻度の平均差 $\bar{e}$ の推移が，交叉パラメータ γ，突然変異パラメータ μ によってどのように変化したかを図 3.6，図 3.7 にそれぞれ示す．遺伝的操作の条件は，(a) 交叉・突然変異なし ($\gamma = 0$，$\mu = 0$), (b) 突然変異のみ

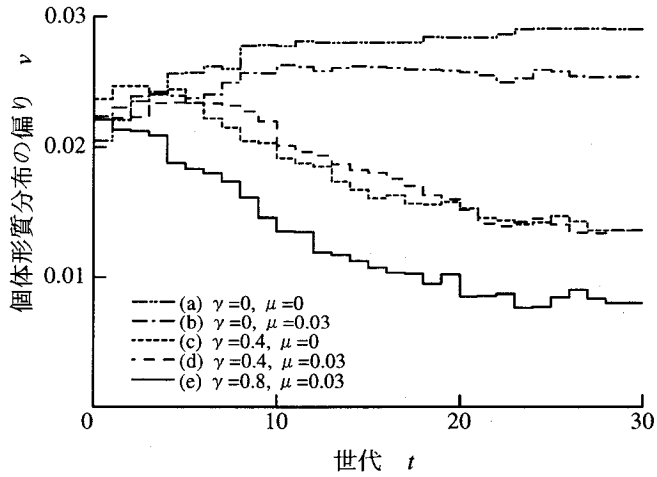
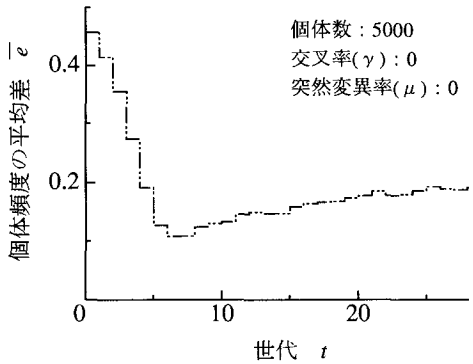


図 3.6 個体形質の偏り v

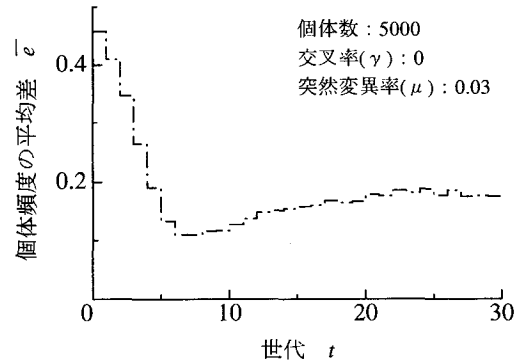
($\gamma = 0$, $\mu = 0.03$), (c) 交叉のみ ($\gamma = 0.4$, $\mu = 0$), (d) 交叉・突然変異 1 ($\gamma = 0.4$, $\mu = 0.03$), (e) 交叉・突然変異 2 ($\gamma = 0.8$, $\mu = 0.03$) とした.

交叉の操作を行わなかった場合 (条件 (a), (b)) には，平均差 $\bar{e}$ は途中までは減少の傾向を示すが，それ以降は増加の傾向を示す．これらでは，個体は個体頻度と事例頻度の比率を適合度とする増殖・淘汰の操作のみを受けるために事例個体群の特徴のある程度の反映は可能であるが，交叉による新たなビットパターンの生成がなされないため，式 (3.7) の個体形質の偏り v の増加 (図 3.6) にみられるように，一部の特定の事例形質へと収束していく．この場合，操作個体群 $\boldsymbol{C}^{(t)}$ から存在しなくなる事例形質の死滅が生じていると考えられる．一方，交叉，突然変異の操作を行った場合，個体頻度の平均差 $\bar{e}$ はほぼ単調に減少し，個体形質の偏り v も減少していき，分散的に事例特徴が保持されていくことが分かる．

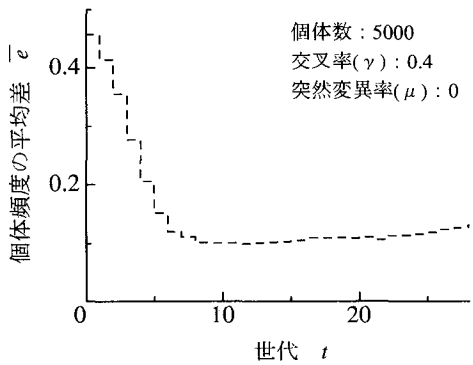
操作個体群 $\boldsymbol{C}^{(t)}$ $(= \{\boldsymbol{c}_1^{(t)}, \ldots, \boldsymbol{c}_N^{(t)}\})$ 中で，事例頻度 $p(\boldsymbol{c}_n^{(t)}, \boldsymbol{C}^c, \beta)$ の最も高い個体に注目した最大事例頻度 $p_{\max}$ $(= \max_n(p(\boldsymbol{c}_n^{(t)}, \boldsymbol{C}^c, \beta)))$ の推移を図 3.8 に示す．これは条件 (a) 以外の操作で増加していることから，交叉，突然変異の操作によるビットパターン生成によって，複数の事例特徴が混合され，多重的な特徴保持となっていくことが現われていると考えられる．これは初期操作個体群の生成に



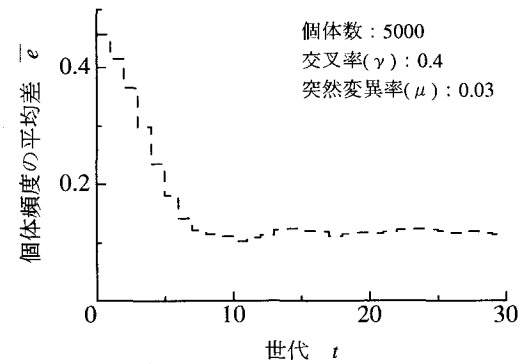
(a) 交叉・突然変異なし
($\gamma = 0$, $\mu = 0$)



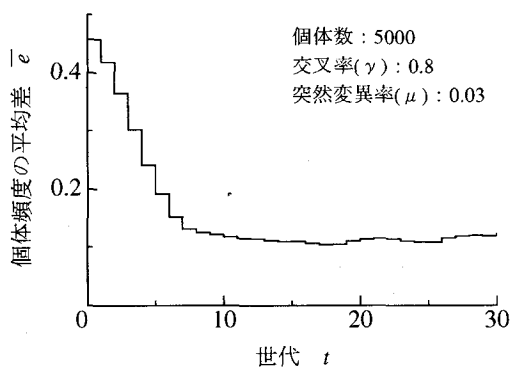
(b) 突然変異のみ
($\gamma = 0$, $\mu = 0.03$)



(c) 交叉のみ
($\gamma = 0.4$, $\mu = 0$)

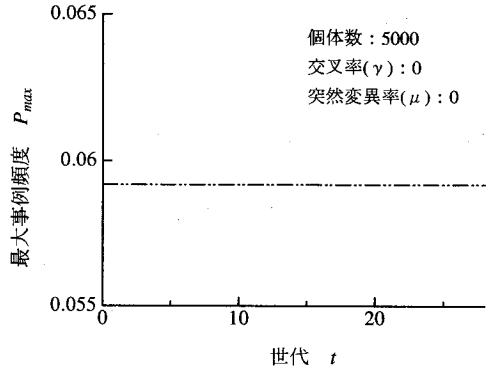


(d) 交叉・突然変異 1
($\gamma = 0.4$, $\mu = 0.03$)

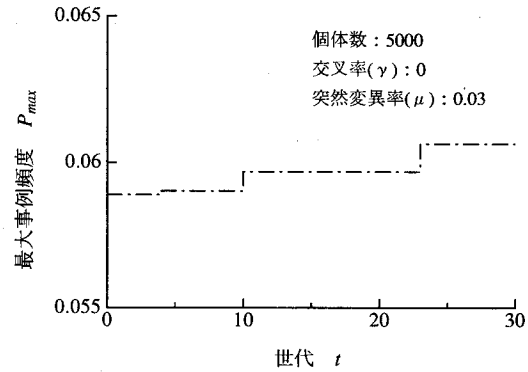


(e) 交叉・突然変異 2
($\gamma = 0.8$, $\mu = 0.03$)

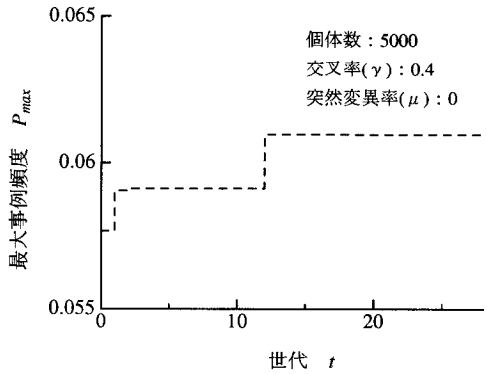
図 3.7 個体頻度の平均差 $\bar{e}$



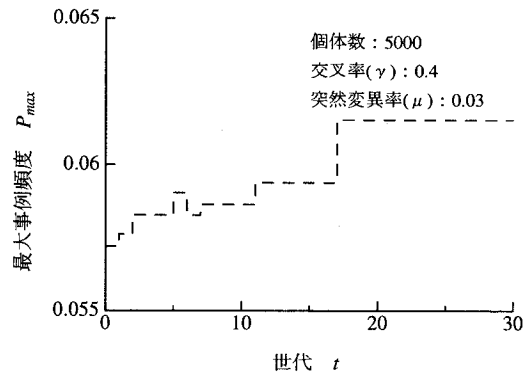
(a) 交叉・突然変異なし
($\gamma = 0$, $\mu = 0$)



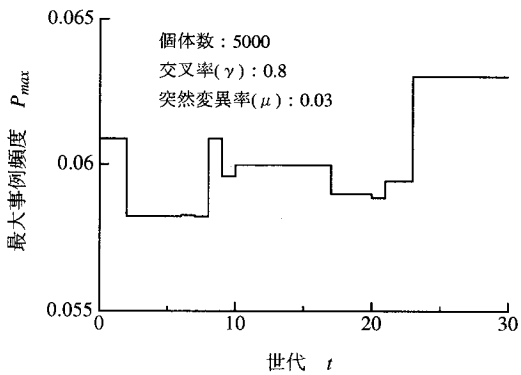
(b) 突然変異のみ
($\gamma = 0$, $\mu = 0.03$)



(c) 交叉のみ
($\gamma = 0.4$, $\mu = 0$)



(d) 交叉・突然変異 1
($\gamma = 0.4$, $\mu = 0.03$)



(e) 交叉・突然変異 2
($\gamma = 0.8$, $\mu = 0.03$)

図 3.8 最大事例頻度

おいて個体に事例を複写する時にランダムに値を定めたその事例に対して冗長なビット列を中心として，交叉によって他の事例の特徴が埋め込まれていくことで，事例頻度が増加するものと考えられる．

このような個体から構成される遺伝子的事例ベースは，設計事例群の特徴を，構造属性のある値が過去にどの程度実現されたかを表す事例頻度として反映するものであるが，多重的に事例特徴を表すことによって，サンプル集団である設計事例群そのものだけではなく，事例の持つ属性を組合せとして持つ個体をも含めた個体群，すなわち設計事例群が占めるよりも広い設計空間を表現することが可能となると考えられる．

3.5 遺伝的操作による候補生成

3.5.1 設計要求との類似度に基づく候補個体群

前節に示した手順により生成した遺伝子的事例ベース $\boldsymbol{C}^b$ を，候補生成における初期個体群 $\boldsymbol{C}_g{}^{[0]}$ $(= \{\boldsymbol{c}_1^{[0]}, \ldots, \boldsymbol{c}_N^{[0]}\})$ とする $(\boldsymbol{C}_g{}^{[0]} \equiv \boldsymbol{C}^b)$．現在の設計要求 $\boldsymbol{r}^R$ $(= \{r_1^R, \ldots, r_{I_R}^R\})$ を$\boldsymbol{c}^R$ $(= \{c_1^R, \ldots, c_{L'}^R\}, L' < L)$ として染色体表現する．すなわち，$\boldsymbol{r}^R \Leftarrow \boldsymbol{c}$ である．設計要求 $\boldsymbol{r}^R$ では，必ずしも全てに対して具体的な値を指定するのではなく，要求を特に指定しないといった値 'not specified' も認める．候補生成における操作対象個体群 $\boldsymbol{C}_g^{[t]}$ を構成する個体 $\boldsymbol{c}_n^{[t]}$ それぞれの適合度 g_n は，染色体表現に内包されている，過去の設計要求に関する属性値 $\boldsymbol{r}_n$ $(= \{r_{n1}, \ldots, r_{nI}\})$ の染色体表現 $\boldsymbol{c}_n^{r\,[t]}$ $(\subset \boldsymbol{c}_n{}^{[t]})$ と設計要求の染色体表現 $\boldsymbol{c}^R$ との類似度 $\rho(\boldsymbol{c}^R, \boldsymbol{c}_n^{r\,[t]}, \beta)$ を用いる．このとき，類似度 $\rho(\boldsymbol{c}^R, \boldsymbol{c}_n^{r\,[t]}, \beta)$ の算定は，式 (3.1) に示した一致パターン長に基づくものであるが，染色体長は設計要求 $\boldsymbol{r}^R$ の染色体表現に必要な L' ビットとする．また，遺伝子値 'not specified' を持つ遺伝子座は，3.3.1 節に示した 'unknown' と同様に染色体間の一致パターンの比較においてはスキップして考える．

個体群 $\boldsymbol{C}_g^{[t]}$ において，設計要求 $\boldsymbol{r}^R$ に対する個体 $\boldsymbol{c}_n^{[t]}$ の適合度 g_n を参照したルーレット選択により$\boldsymbol{C}_g^{[t+1]}$ を得る．この選択操作の繰返しにより，設計要求に対して類似度の低い個体が過度に淘汰されないように，最も適合度の高い個体の個体群に占める比率が淘汰パラメータ θ を越えた世代で選択の操作を終了する．このときの個体群 $\boldsymbol{C}_g^{[t]}$ を，設計要求 $\boldsymbol{r}^R$ に対する候補個体群 $\boldsymbol{C}_g^c$ とする．

3.5.2 候補個体群からの子個体生成としての候補生成

候補個体群 $\boldsymbol{C}_g^c$ $(= \{\boldsymbol{c}_{g1}^c, \ldots, \boldsymbol{c}_{gN}^c\})$ には，設計要求 $\boldsymbol{r}^R$ に対する適合度の大きな個体ほど多く存在するが，前節で導入した淘汰パラメータ θ を低く設定し，最も適合度の高い個体の個体群中における比率を低くしておくことで，適合度の小さな他の個体も存在するので個体形質の多様性は保たれていると考えられる．こ

こでは個体群から確率的に親個体を選びだし，一様交叉を基本とする交叉によって組合せ的に候補を生成する手法について述べる．

候補個体群 $\boldsymbol{C}_g^c$ から親染色体ペア $\boldsymbol{c}_i^c$, $\boldsymbol{c}_j^c$ をランダムに抽出し，それらの交叉の結果である子染色体 $\boldsymbol{c}$ として設計候補を生成する．交叉では，親染色体の遺伝子値を遺伝子座 ℓ ($\ell = 1, \ldots, L$) 毎に参照し，子染色体 $\boldsymbol{c}$ へ継承する．親染色体間で遺伝子が同形 ($c_{i\ell}^c = c_{j\ell}^c$) ならば，この値をそのまま子染色体に継承する ($c_\ell = c_{i\ell}^c = c_{j\ell}^c$)．また，異形 ($c_{i\ell}^c \neq c_{j\ell}^c$) の場合には，どちらの親から形質を継承するかの目安として，設計要求 $\boldsymbol{r}^R$ に対する候補個体群 $\boldsymbol{C}_g^c$ の最も標準的な性質を表わす優性形質 $\boldsymbol{c}^d$ ($= \{c_1^d \ldots c_L^d\}$) の遺伝子座 ℓ における遺伝子値 c_ℓ^d を参照し，これを子染色体に継承するものとする．ただし，遺伝子情報の継承に関する優性形質 $\boldsymbol{c}^d$ の遺伝子 c_ℓ^d の値は，候補個体群 $\boldsymbol{C}_g{}^c$ に含まれる N 個の個体 $\boldsymbol{c}_n$ ($= \{c_{n1}^c, \ldots, c_{nL}^c\}$) に関して，それぞれの遺伝子座 ℓ に関する最頻値 $c_\ell^d \equiv \mathrm{mode}(c^c{}_{1\ell}, \ldots, c^c{}_{N\ell})$ とする．図3.9は，子染色体への継承の例である．この例では，親個体 $\boldsymbol{c}_i^c$, $\boldsymbol{c}_j^c$ の先頭から4ビット ('1101')，9ビット目から11ビット目 ('101') および13ビット目 ('0') はそれぞれ一致するのでそのまま子個体 $\boldsymbol{c}$ へ継承されている．これに対して，5ビット目から8ビット目と12ビット目，14ビット目は親個体で異なる値をとっているので，優性形質 $\boldsymbol{c}^d$ からそれぞれ '1100', '0', '1' が子個体へ継承されてい

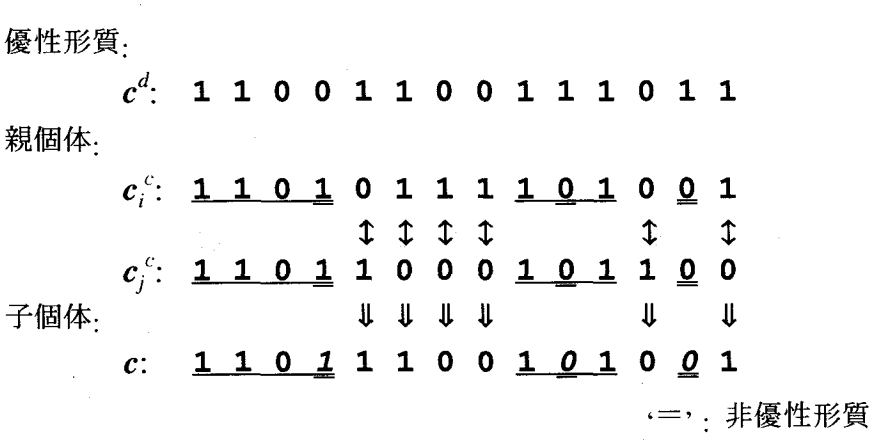


図3.9 交叉に基づく遺伝子情報の継承

る．子個体は，4ビット目，10ビット目，13ビット目において優性形質とは異なる遺伝子情報が継承されていることになる．

この候補生成の操作では，親染色体ペアは候補個体群から全くランダムに抽出しているので，事例群に多くみられる形質および現在の要求 $\boldsymbol{r}^R$ に適合する度合の高い形質を持つ染色体ほど選択される確率は高くなり，過去の設計事例群の特徴を反映する事例指向アプローチの基本的機能を持っている．一方で，少数にしか保持されていないような形質を持つ個体であっても，親のペアとして選ばれ得るので，それらの組合せ的な子個体生成によって，事例群における標準的な形質とは異なる劣性的な形質をも継承し得る候補生成が可能となる．したがって，本手法に基づく候補生成は過去の事例に必ずしも支配されない多様性を持つと考えられる．このことは，コンピュータによって取扱われる設計空間を過去の設計事例が表現する空間から組合せ的にひろげていることになる．

3.5.3 遺伝的操作に基づく候補生成の例

前節の例で得られた遺伝子的事例ベース $\boldsymbol{C}^b$ をもとに候補生成を行った例を示す．設計要求として，橋長が 160〜400(m)，最大支間長が 100〜200(m) の 3 支間単純支持の鋼製道路橋を考え，他の 2 つの設計要求，幅員，路面位置には特に指定はないとする．この設計要求 $\boldsymbol{r}^R$ の染色体表現は，$\boldsymbol{c}^R$ ='011***0101011**1100' となる．ただし，記号 '*' は 'not specified' を表す．設計要求の淘汰パラメータ $\theta = 0.1$ として，設計要求の染色体表現 $\boldsymbol{c}^R$ との類似の度合が最も高い個体が，個体群中に 10%以上を占めるときに操作を打ち切り，このときの第 27 世代の個体群 $\boldsymbol{C}_g^{[27]}$ を候補個体群 $\boldsymbol{C}_g^c$ とした．この個体群中には 99 の染色体パターンがみられ，そこでの優性形質 $\boldsymbol{c}^d$ は図 3.10(b) に示すようになった．この遺伝子型をそのまま発現させるならば単純支持のトラス橋構造物であり，ここで与えた事例群 $\boldsymbol{C}^c$，設計要求 $\boldsymbol{c}^R$ に対してもっとも妥当な形質を表わしていると考えられる．候補個体群 $\boldsymbol{C}_g^c$ にはトラス橋構造物のみならず，多くの形質が存在しているが，設計要求 $\boldsymbol{r}^R$ の，最大支間長が 100〜200(m)，単純支持けたという条件に不適であるけた橋構造 [日本鋼構造協会 (編) 1985] は存在していなかった．

このような候補個体群 C_g^c から親個体をランダムに選び，子個体を生成して候補生成を行う．交叉の操作に基づいて組合せ的に行った候補生成の例を図 3.10 に示す．図 3.10(a) は，5000 個体を設計要求 c^R との類似度の高いものから順に並べた場合に，それぞれ 3961 番目，4466 番目である少数個体 (適合度 $g_{3961} = g_{4466} = 0.47$) の例であり，確率は低いがこれらが親染色体ペアとして選ばれた場合を考える．それぞれ，3 支間連続支持上路ランガアーチ，2 支間単純支持下路 2 ヒンジアーチとして発現される染色体であるので，優性形質とは無関係にアーチ・リブが補剛要素として候補個体 c に発現される (図 3.10(c))．ただし，親染色体間で異なる値

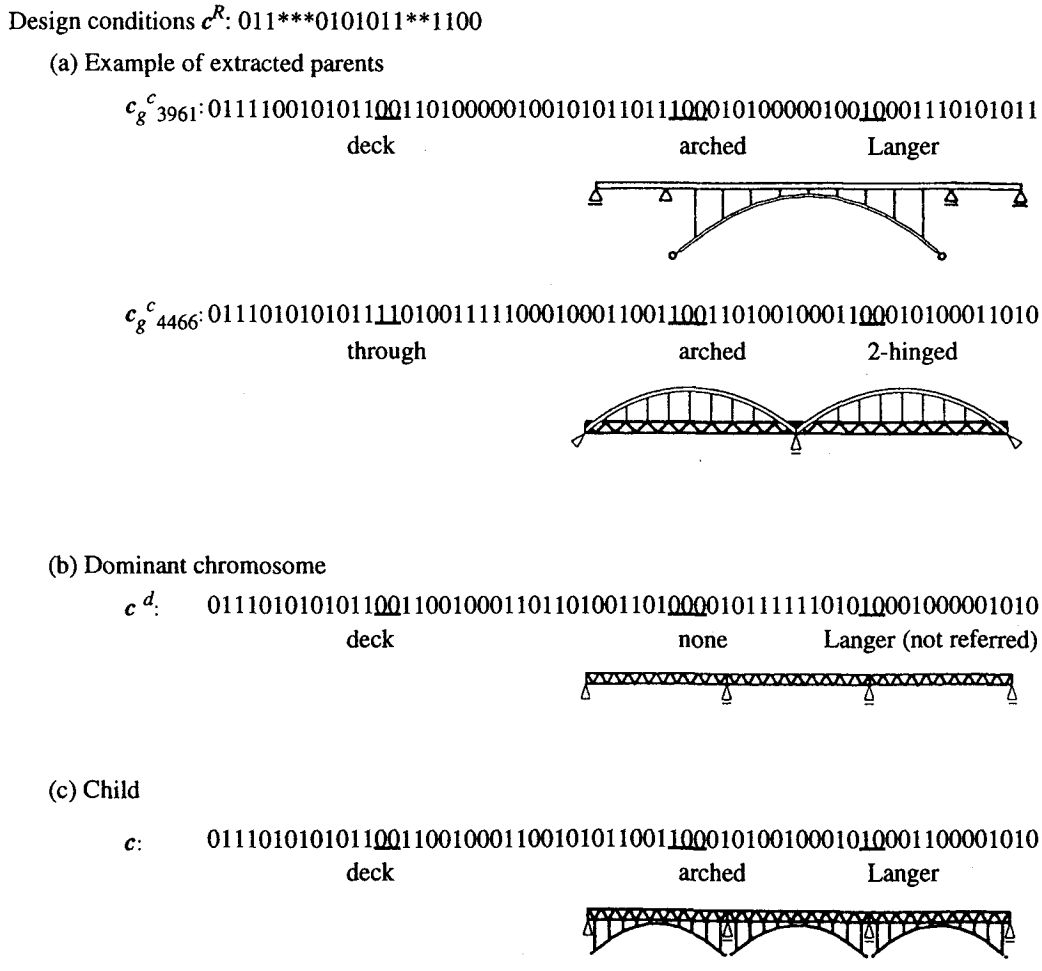


図 3.10 少数個体を親染色体ペアとする候補生成の例

をとる属性に関しては優性形質が参照され，たとえば，路面位置としては上路形式が候補個体に継承されている．すなわち，組合せ的な子個体生成の手順によって，候補個体群において優性ではない設計候補も生成可能で，過去の事例が必ずしも支配的とはならないことを示している．このようにして提示される設計候補の採否は設計者に委ねられ，設計者が設計解として採用するまで候補生成は反復される．この反復的な過程におけるシステムの多様な候補提示は，候補個体群の優性形質である過去の事例に照らして標準的な候補をはじめ，それにとらわれない幅広い設計候補の検討を設計者に示唆するものであり，設計の多様性を確保する意味で有効であると考えられる．

3.6 まとめ

設計実務の観察や設計活動の考察によって，設計支援では設計事例の利用が重要となることがわかる．ところが，概念設計の段階では設計の対象となる範囲は非常に広く，それらの表現に必要な枠組は明確には定められない．したがって，事例を利用する問題解決の基本的操作である事例の比較において，コンピュータ上に設計事例を表現する際に事例の見かけ上の属性値に基づくことは不適当である．また，設計事例を参照し設計候補を得るにあたって，事例に強く影響を受けることは狭い範囲の候補を表すに過ぎず，概念設計支援としては不十分となりがちである．

これらに対して，本章では構造物の概念設計段階における設計事例ベースの構築と候補生成に，遺伝的アルゴリズムの考え方の利用を考えた．設計事例，設計候補を遺伝的アルゴリズムにおける個体ととらえ，それらの属性値を，抽象的な染色体として保持されている遺伝子情報の表現型と考えた．概念設計において事例を用いる場合には，見かけ上の構造形態が異なっていても構造機能上の類似性を考慮することが必要であるので，構造形態の位相および設計変数空間の差異を，形質発現の支配遺伝子および発現に際して参照される遺伝子座の差異として表現した．これによって，固定長の記号列として表される染色体の単純なマッチングとして構造物間の類似度を定義でき，広い設計空間を取扱うことが可能となる．この設計対象物の表現は，固定的な枠組を越えることとなり，概念設計の段階で設計者に必要とされる問題領域を越えて事例を検索できる能力 [山口ら 1989] を扱うための一助となると考えられる．

次に，設計事例の収集にあたって，実際に実現，収集され得るものは可能な設計のサンプル集団に過ぎないことを考慮し，設計事例群の特徴として事例頻度に注目した頻度分布が類似の個体群を生成し，これを遺伝子的事例ベースとする枠組を提案した．この個体群ではサンプル集団である事例群の特徴を表すだけでなく，遺伝的操作によって組合せ的に多様な広い設計空間を表現していることを確認した．さらに，設計要求との類似度を個体適合度として，事例ベース個体群に

対する選択の操作を繰り返すことにより候補個体群を生成し，候補個体群からランダムに選び出した親個体の，過去の設計事例を反映する優性形質を参照した一様交叉の操作によって，候補個体を生成する手法を示した．これは，事例に基づく設計の基本的機能を持ちながらも，候補個体は確率的な組合せにより生成されるので，過去の設計事例に必ずしも支配されない多様な設計候補の生成が可能となることを示した．

これらの手法によって，設計空間が予め定義された閉じた世界であっても，遺伝的操作による組合せパターンとしての設計候補には，より広い性質を表現し得ることが分かる．このような遺伝子的事例ベースによる候補生成の多様性は，与えられた条件を満足する候補の設計者による幅広い検討が必要とされる概念設計では特に重要とされるものである．したがって提案した手法は，設計者の対話的なパートナーとしての設計アシスタントにおいて，事例に基づいた設計候補の取扱いのための一助として利用可能なものと考えられる．

付録：遺伝子的事例ベース生成に用いた設計事例

遺伝子的事例ベース C^b の生成例 (3.4.2項) で用いた設計事例群 $C^c = \{c_0^c, c_1^c, \ldots, c_{210}^c\}$ を，表 3.5–表 3.9に示す．

表 3.5 設計事例の遺伝子表現 (1)

事例	遺伝子型（'?' は事例に発現されていない属性に関する値）
c_0^c:	010???01010100010010010011?????00000??????????????????????????
c_1^c:	110???01110110010110011100 10?????00000??????????????????????????
c_2^c:	111???01010100010010001101 10?????00000??????????????????????????
c_3^c:	010???01010110011010011100 10?????00000??????????????????????????
c_4^c:	01111101010010011110011111 10?????01000??????????????????????????
c_5^c:	01101001010110011010011100 10?????00000??????????????????????????
c_6^c:	010???01010100011010011100 10?????00000??????????????????????????
c_7^c:	01111001010100011010011100 11?????00000??????????????????????????
c_8^c:	00000000010000011010000100 10?????01000??????????????????????????
c_9^c:	01101001010110011010011100 10?????00000??????????????????????????
c_{10}^c:	00001000100010000000011100 10?????11000??????????????????????????
c_{11}^c:	01101001010110011010011100 10?????01000??????????????????????????
c_{12}^c:	01101001010010011010001101 10?????01000??????????????????????????
c_{13}^c:	01101001010010011010001101 10?????01000??????????????????????????
c_{14}^c:	01010101010100011010 01?????????????00000??????????????????????????
c_{15}^c:	01001101010110010010011100 10?????00000??????????????????????????
c_{16}^c:	01101001110000010010001111 11?????00000??????????????????????????
c_{17}^c:	00101101010010011010001101 10?????00000??????????????????????????
c_{18}^c:	01101101010010011010001101 10?????00000??????????????????????????
c_{19}^c:	01111001010010001010001101 10?????00000??????????????????????????
c_{20}^c:	01111001010010011010001101 10?????00000??????????????????????????
c_{21}^c:	00000011010000000000010110 1?????01000??????????????????????????
c_{22}^c:	00000011010000000000011111 11?????01000??????????????????????????
c_{23}^c:	00000011010000000000011111 11?????01000??????????????????????????
c_{24}^c:	00000011010000000000010110 1?????01000??????????????????????????
c_{25}^c:	00000011010000000000011111 11?????01000??????????????????????????
c_{26}^c:	00000011010000000000011111 11?????01000??????????????????????????
c_{27}^c:	00000011010000000000011111 11?????00000??????????????????????????
c_{28}^c:	01001101010101111011011011100000 10??000??????????????????????????
c_{29}^c:	01100101010110011011011011110001 10??000??????????????????????????
c_{30}^c:	11100101011101111011111011101100 11??000??????????????????????????
c_{31}^c:	01001101010111010011001111110011 01??000??????????????????????????
c_{32}^c:	01000101010101111011111011110000 10??000??????????????????????????
c_{33}^c:	111???11011100110111101010101101 10??000??????????????????????????
c_{34}^c:	11001101010101111011011011100000 10??000??????????????????????????
c_{35}^c:	01101101010111000001001011010011 11??000??????????????????????????
c_{36}^c:	11111001011101111111111011110110 11??000??????????????????????????
c_{37}^c:	010???01010101111011011011110000 11??000??????????????????????????
c_{38}^c:	001???11010111100001111011110011 01??000??????????????????????????
c_{39}^c:	01101111010110011011011011110011 01??000??????????????????????????

表 3.6　設計事例の遺伝子表現 (2)

事例	遺伝子型（'?' は事例に発現されていない属性に関する値）
c^c_{40}:	111111010111010111110110111011001 1??000???????????????????????????
c^c_{41}:	111101110111001111111010111111001 1??000???????????????????????????
c^c_{42}:	010011010101001110111010111000001 0??000???????????????????????????
c^c_{43}:	010101100101110110110010110101111 1??000???????????????????????????
c^c_{44}:	010011010101011110110110111100001 0??000???????????????????????????
c^c_{45}:	011???010101100110110010110101010 1??000???????????????????????????
c^c_{46}:	010111100101010110110110110111011 0??000???????????????????????????
c^c_{47}:	010001010101011110110110111000001 0??000???????????????????????????
c^c_{48}:	010???010101011110110110111100011 0??000???????????????????????????
c^c_{49}:	010???010101011110110110111100001 0??000???????????????????????????
c^c_{50}:	010101100101110110110110110101111 1??000???????????????????????????
c^c_{51}:	011???010101111110111110111100001 0??000???????????????????????????
c^c_{52}:	011110010101100110110010110101010 1??000???????????????????????????
c^c_{53}:	010110010101100110110110110101011 1??000???????????????????????????
c^c_{54}:	011110010101100110110010110101010 1??000???????????????????????????
c^c_{55}:	011???010101100110110110111100001 0??000???????????????????????????
c^c_{56}:	011011010101110110110010110100111 0??000???????????????????????????
c^c_{57}:	011011010101110110110010110100110 1??000???????????????????????????
c^c_{58}:	011011110101111000011110111111010 0??000???????????????????????????
c^c_{59}:	011???010101100110110110111100001 0??000???????????????????????????
c^c_{60}:	011???100101110010110010110101110 1??000???????????????????????????
c^c_{61}:	111110010101011101111110111111001 0??000???????????????????????????
c^c_{62}:	111111010111011111111110111101100 1??000???????????????????????????
c^c_{63}:	110010010101000111110110111101101 0??000???????????????????????????
c^c_{64}:	011011010100100110110010110101010 1??000???????????????????????????
c^c_{65}:	011011010101100110110110111101011 1??000???????????????????????????
c^c_{66}:	011011010101100100110010110101010 1??000???????????????????????????
c^c_{67}:	000001110100100000010010110100110 1??000???????????????????????????
c^c_{68}:	000001010100100000010010110100110 1??000???????????????????????????
c^c_{69}:	011010011101100110110011111101101 0??000???????????????????????????
c^c_{70}:	001011010101100000010110111000111 0??000???????????????????????????
c^c_{71}:	000001010100111000011110100000110 1??000???????????????????????????
c^c_{72}:	001001010101111000011110100000111 0??000???????????????????????????
c^c_{73}:	000011010100111000011110100000111 1??000???????????????????????????
c^c_{74}:	001001010101111000011110100000111 0??000???????????????????????????
c^c_{75}:	000000010100100000010110111000111 1??000???????????????????????????
c^c_{76}:	000000111100000000010010110110111 1??000???????????????????????????
c^c_{77}:	011000111100000100010010110110110 1??000???????????????????????????
c^c_{78}:	000000111100011000010010110100110 1??000???????????????????????????
c^c_{79}:	000000111100011010010010110100110 1??000???????????????????????????
c^c_{80}:	110111010111011111111110111111001 0??000???????????????????????????
c^c_{81}:	110???010111010111111110111111011 1??000???????????????????????????
c^c_{82}:	110101010111011111111110111011001 0??000???????????????????????????
c^c_{83}:	010101100111001000000001001?????0110001?????0010001101010????
c^c_{84}:	011001010101100110100001001?????1110001?????0010000011011????
c^c_{85}:	011110010101000000000011011?????0110001?????1100010011011????
c^c_{86}:	011???010101001000000011011?????0110001?????1100000011011????
c^c_{87}:	011011010101000000000001001?????0110001?????1100010011011????
c^c_{88}:	011001010101000000000001001?????0110001?????0100011110010????
c^c_{89}:	011???010101000000000001001?????0110001?????1100010011011????

表 3.7 設計事例の遺伝子表現 (3)

事例	遺伝子型（'?' は事例に発現されていない属性に関する値）
c^c_{90}:	011111010100100110000011011 0??????0110001??????1110000010010????
c^c_{91}:	011110010101100000000001101 1??????0110011??????1010110011011????
c^c_{92}:	001110010101111000000001001 0??????0010000??????1100110011011????
c^c_{93}:	001001010101111000000001001 0??????0110001??????0100100000000????
c^c_{94}:	000000000100101110100001101 1??????0010001??????1101110010010????
c^c_{95}:	011011110101111111100001001 0??????0010001??????0110100001001????
c^c_{96}:	110111010111010110100001101 1??????0010001??????1010100000000????
c^c_{97}:	001001010100100110100011011 0??????0110001??????1110110011011????
c^c_{98}:	010011010101001110100000100 1??????0010001??????1111110001001????
c^c_{99}:	011101010101011000000001101 1??????0010001??????0101110011011????
c^c_{100}:	011111010101111111100001001 0??????0110001??????1010110111111????
c^c_{101}:	001011010100111111100001001 0??????0110001??????0100110010010????
c^c_{102}:	011???010101111010000001101 1???????10001??????0101110011011????
c^c_{103}:	011???010101010110100001101 1??????0010001??????1110110011011????
c^c_{104}:	000000000100111000000001101 1??????0010001??????0111110011011????
c^c_{105}:	011011011101100110100001101 1??????0010000??????1110100001001????
c^c_{106}:	011110010101010000000001101 1??????0010001??????1100110011001????
c^c_{107}:	001111010101110000000001101 1??????0010001??????1011110010010????
c^c_{108}:	011011010101011000000000100 1??????0010001??????0101110001001????
c^c_{109}:	011011010101111000000001101 1??????0010001??????1101110011011????
c^c_{110}:	011011010101111000000001101 1??????0010001??????0101110011011????
c^c_{111}:	011001010101011000000000100 1??????0010001??????0111110001001????
c^c_{112}:	011000001100101110100101100 1??????1010001??????1010110011011????
c^c_{113}:	011011010101000000000000100 1???????10001??????1110001010010????
c^c_{114}:	011011010001000110100001101 1???????10000??????0100010011011????
c^c_{115}:	011011010001100100100??????????????10000??????1010010010011????
c^c_{116}:	001001010000100110100001101 1??????0010000??????1010010010010????
c^c_{117}:	000011010100111000010011111 011111??10001??????0110100001001????
c^c_{118}:	001001110101111000000011011 0??????0110001??????0110100011011????
c^c_{119}:	001111010101111000000001101 1??????0110001??????0100100001001????
c^c_{120}:	000011110100111000000011011 0??????0110001??????0100100011011????
c^c_{121}:	000011110100111000000010010 0??????0110001??????0110100011011????
c^c_{122}:	001101010101111000000010010 0??????0110000??????0010100011001????
c^c_{123}:	011101010101011000000001101 1??????0110001??????0010100001001????
c^c_{124}:	001101010101111000000001101 1??????0110001??????0110100001001????
c^c_{125}:	001101010101111000000001101 1??????0110001??????0110100001001????
c^c_{126}:	000010010100111000000001101 1??????1110001??????0110100001001????
c^c_{127}:	000011110100111000000010010 0??????0110001??????0100110011011????
c^c_{128}:	001010010101111000000001101 1??????0110001??????0100110011011????
c^c_{129}:	000001010100100110100001101 1??????0110001??????0010110011011????
c^c_{130}:	010110010101000110100001101 1??????0101001001011??????????????11
c^c_{131}:	011010010101100110100001101 1??????0101001011011??????????????00
c^c_{132}:	000110010100100110100001101 1??????0001001001001??????????????00
c^c_{133}:	010101010101000110100001101 1??????0001001001011??????????????01
c^c_{134}:	010101010101000010100000100 1??????0001001010010??????????????01
c^c_{135}:	011101010101100110100001101 1??????0001000000110??????????????01
c^c_{136}:	011111010100100110100001101 1??????0001000000011??????????????00
c^c_{137}:	011101010101100100100000100 1??????00010?????111??????????????01
c^c_{138}:	110101010101000100100001101 1??????0001000000011??????????????01
c^c_{139}:	011101010101100010100001101 1??????0001000000110??????????????01

表 3.8　設計事例の遺伝子表現 (4)

事例	遺伝子型（'?' は事例に発現されていない属性に関する値）
c^c_{140}:	0101010101010001101000011011??????0001000000001?????????????????00
c^c_{141}:	0101010101010001101000011011??????0001000000011?????????????????11
c^c_{142}:	0111010101011000101000011011??????0101001010101?????????????????11
c^c_{143}:	0111010101011001101000010010??????0001000000010?????????????????01
c^c_{144}:	0101010101010001101000011011??????0001000000011?????????????????00
c^c_{145}:	1101010101010001001000001001??????0101001001111?????????????????01
c^c_{146}:	1101010101110001101000011011??????0001000000011?????????????????01
c^c_{147}:	0101010101010001101000001001??????0001000000001?????????????????00
c^c_{148}:	0110100101011001001000011011??????0001001001010?????????????????00
c^c_{149}:	0101110101010001101000011011??????0001000010110?????????????????00
c^c_{150}:	0110100101011001101000011011??????0001001001110?????????????????01
c^c_{151}:	0100100101010001101000011011??????0001001010111?????????????????01
c^c_{152}:	1111010101010001001000011011??????0001000000001?????????????????00
c^c_{153}:	0101010101010001001000011011??????0001000000111?????????????????01
c^c_{154}:	0101100101010001101000011011??????0001001010110?????????????????11
c^c_{155}:	0101010101010001001000011011??????0001000010110?????????????????01
c^c_{156}:	0110010101001000101000010010??????0001001011110?????????????????00
c^c_{157}:	0110010101011000101000010010??????0001000000010?????????????????01
c^c_{158}:	0110110101010001101000011011??????0101001011011?????????????????00
c^c_{159}:	0111100101010001101000011011??????0001000010011?????????????????01
c^c_{160}:	0111100101011001101000010010??????0001000000010?????????????????01
c^c_{161}:	0110110101011001101000011011??????0001000010010?????????????????00
c^c_{162}:	0110110101001001101000010010??????0001001001011?????????????????00
c^c_{163}:	0111110101011000101000011011??????0001001001010?????????????????01
c^c_{164}:	0101100101010001101000011011??????0001000000011?????????????????11
c^c_{165}:	0100110101010001001100010010010?????0100001011?????????????????00
c^c_{166}:	0111110111011000101000010010??????0001000010101?????????????????11
c^c_{167}:	0111110101011000101000011011??????0001000000111?????????????????01
c^c_{168}:	0101010111010001101000011011??????0001000010111?????????????????11
c^c_{169}:	1111010101110001101000000000??????0001001010110?????????????????11
c^c_{170}:	1101010101110001101000001001??????0001001010111?????????????????11
c^c_{171}:	1101010101110001101000001001??????0001001010111?????????????????11
c^c_{172}:	1100110111010001001000001001??????0001001110110?????????????????11
c^c_{173}:	0111110111011001001000011011??????0001000000101?????????????????11
c^c_{174}:	1111010101110101101100011011010011??0100111011?????????????????11
c^c_{175}:	1111100101110101101100010010001001??0100111011?????????????????11
c^c_{176}:	0111010101011000101000011011??????0001001010101?????????????????01
c^c_{177}:	0110100111011001101000011011??????0001001010110?????????????????11
c^c_{178}:	1101110110110001001000001001??????0001001010110?????????????????11
c^c_{179}:	1101111001110101101100110110011011??0100111011?????????????????11
c^c_{180}:	1101111001110101101100110110011011??0100111011?????????????????11
c^c_{181}:	0100110111010001101000????????????????0100111011?????????????????11
c^c_{182}:	1011010101101101100100001001011000??0010101101100000??????????01??
c^c_{183}:	1011010101101001100100001001011000??0010101101100010??????????01??
c^c_{184}:	1011110101101001100100011011011000??0010101100100000??????????01??
c^c_{185}:	1111010101101101100100001001010000??0010101101100000??????????01??
c^c_{186}:	1011110101101001001100011011011000??0010101101100010??????????01??
c^c_{187}:	1011110101101001100100001001011????0010101101100000??????????01??
c^c_{188}:	1111110101111001100000000000??????0000101011001000 1??????????01??
c^c_{189}:	1111100101111001100100011011011000??00101???0110000??????????01??

表 3.9 設計事例の遺伝子表現 (5)

事例	遺伝子型（'?' は事例に発現されていない属性に関する値）
c^c_{190}:	1111110101111101100100011011001000??001010110100010?????????01??
c^c_{191}:	1111110101110001100100011011011????001010110100000?????????01??
c^c_{192}:	1111010101101001100000000000??????000010101100100000?????????01??
c^c_{193}:	1111010101101001000000000000??????000010101101100001?????????00??
c^c_{194}:	111???010110100000000000000??????000010101101100000?????????00??
c^c_{195}:	1011110101101001100000000000??????000010101100100001?????????01??
c^c_{196}:	1111010101111001100100011011011000??001010110110000?????????01??
c^c_{197}:	1100110101010001001000000000??????010010101111000001?????????01??
c^c_{198}:	1111111001101101101100011011011000??001010110110000?????????01??
c^c_{199}:	1111111001111101101100011011011000??001010110110010?????????00??
c^c_{200}:	1111111001111101101100011011011000??001010110110000?????????01??
c^c_{201}:	1111100101110001100000??????????????000010101101100000?????????00??
c^c_{202}:	0100100101110001100100011011011000??001010110100000?????????01??
c^c_{203}:	1101010101110101100100011011011000??001010110100000?????????01??
c^c_{204}:	1011010101101001100100001001011000??001010110110010?????????01??
c^c_{205}:	0101110101010001101000011011??????000010001011011 01?????????11??
c^c_{206}:	0110000101010001100100011011001001??001010110110010?????????00??
c^c_{207}:	0010000101011010000100011011010010??001010110010000?????????00??
c^c_{208}:	0010010101011110000111110010011011??001010110010000?????????00??
c^c_{209}:	0111110101001111101001110010??????010010101101001 00?????????11??
c^c_{210}:	0000110111001001101000010010??????010010101101100 00?????????00??

第4章

概念設計の多様性の考慮

4.1 はじめに

設計の予備的段階である概念設計では，与えられる要求の多くは，設計解を一意に定める程に強いものではなく，通常複数の競合する設計候補が存在する．これに対する設計支援のひとつの考え方として，競合候補に対して設計評価を行い，それを示すことで設計者の意思決定の補助とすることが挙げられる [Maher 1987; 瀬口ら 1989]．しかしながら，概念設計では，第2章で取扱った感覚的デザイン性の評価にみられるように，設計評価基準が必ずしも客観的・定量的な陽な形式で示されているわけではない．したがって，設計者自身の価値観に基づく主観的判断が重要な役割を果たしており，設計支援システムが実行可能な客観的・定量的設計評価は絶対的なものとはなり得ない．すなわち，設計者自身が幅広い可能性を検討できるような，意思決定の主体を設計者におく枠組が必要となる．もちろん，設計対象物の物理的挙動に基づく設計評価など，客観的に評価可能なものについてはシステムが行えばよい．このような場合，設計支援システムに求められる機能として，設計知識や設計事例に基づく候補生成・評価機能に加え，多様な設計候補を設計者に示唆する機能が挙げられる [Chakrabarti and Thomas 1996; Dybara *et al.* 1996; Hauser and Scherer 1997]．設計者の創造的活動としての概念設計の支援にあたっては，後者の機能が大きな役割を果たすことはいうまでもない．

本章では，構造物の概念設計支援を例にとり，基本的には知識と事例とに基づき設計候補を生成するが，その対話的な提示に不確定性をもたせ，ゆらぎを導入することで多様な設計候補を設計者に示唆する設計支援の枠組を提案し，ケーススタディによりその有用性を検討する．まず知識ベース推論に基づく設計支援に

おいて，競合候補に対する設計評価を絶対的なものとみなさずに，確率的な指標として考える．システムは設計者に対して，評価値を反映する確率に基づいて選ばれた候補を提示する．このゆらぎによって，システムの行った設計評価の意味で最も優れた設計候補だけではなく，評価値が相対的に低い候補も提示可能としておくことで，設計者に多くの設計候補を示す枠組を検討する．また，知識ベース推論によって生成された競合候補に対して，第3章で提案した遺伝子的事例ベースを利用し，競合候補と事例ベース中に存在する個体との類似を参照する遺伝的操作によって候補提示を行う．交叉や突然変異などの遺伝的操作は，確率的なゆらぎを有する個体発生とみなせるものである．また設計候補と事例との類似は，前章で示したようにみかけ上大きく異なるような構造形態についても，構造機能性の類似を反映する遺伝子的表現を用いている．したがって，知識に基づく推論の流れのみからは見いだせないような多様な設計候補が提示可能となり，知識に基づく推論の本質的な決定性を緩和することが期待される．ここでは，橋梁構造物の2次元スケルトン設計を例としてとりあげ概念設計支援システムの構築を試み，ケーススタディによってこれらの候補提示の枠組を検討する．

4.2 概念設計における候補の多様性

設計問題は，設計対象を記述する設計項目の属性値を，与えられた設計要求を考慮しながら，仮定，評価，修正の反復により決定していく満足化の過程である [赤木 1988; Boyle 1989]．このときに，属性値には競合する複数の候補が存在することが一般的である．特に設計の上流過程である概念設計の段階では，候補が一意に定まることはまれであり，設計者が競合候補に対して様々な因子を考慮しながら選択を行う作業が主となる．橋梁構造物の概念設計を例にとれば，陽に与えられる設計仕様としては，橋梁の全長，全幅，支間長，地盤状態などが考えられる．このうちの支間長に対して適用される橋梁形式の候補は一般的に，図 4.1 に示されるものとなる [松本, 白石 1991]．たとえば，1000m を超えるような長大支間に対しては，つり橋形式の橋梁のみが適用可能となるが，数百 m の中程度の支間長に対する橋梁形式の候補は競合することになり，他の設計仕様を考慮したとしても橋梁形式は一意には定まらないことが多い．したがって，設計者は，陽に示されているとは限らない各橋梁形式の構造機能性や経済性，感覚的デザイン性などの因子を総合的に考慮して選択を行うこととなる．このような候補選択における設計者の意思決定の負担を軽減するにあたっては，システムが各競合候補に対して設計評価基準に基づいた設計評価を行うことが考えられる [Maher 1987; 瀬口ら 1989]．

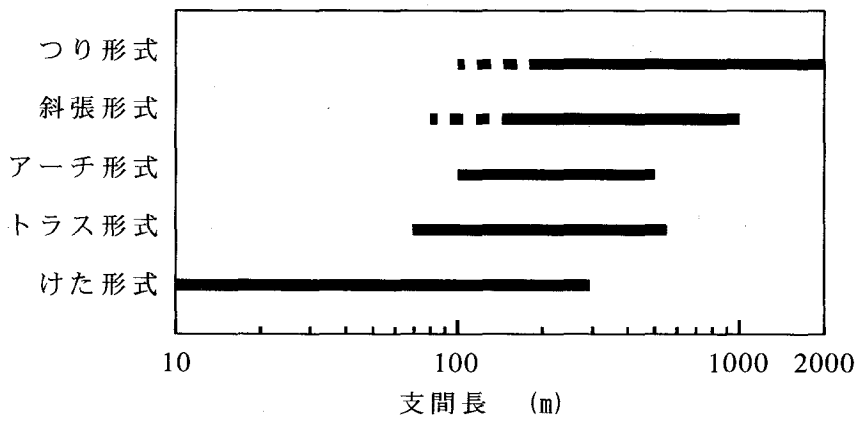


図 4.1 橋梁形式に対する適用支間長

設計候補の評価にあたっては，構造工学的な側面からの評価はもちろんのことであるが，感覚的側面からの設計者の主観的な評価もシステムに取込む必要があることを第2章で述べた．これらの評価は本質的に相反することもあるから，それらのトレードオフを考えるためには，設計者の十分に多様な設計候補の検討が必要となる．一方，コンピュータによって取扱われる設計空間は，人間の設計者が意識的・無意識的に考慮しているそれに比べて遙かに小さく，生成される設計解の多くは設計者にとって容易に予想され得る定型的な設計へと設計者を導きがちとなる．したがって概念設計過程の支援においては，システムが自動的なブラックボックスとして候補をしぼりこみ，設計を前向きに強く駆動することは，必ずしも好ましいことではなく [Gerratt Jr. 1998]，前章では，事例に基づき組合せ的に多様な設計候補を生成可能な枠組を示した．また，設計者の主体性を尊重することは当然であるが，設計者が自らの判断に固執することによって，候補から多様性が失われることのないように，競合している他の設計候補も設計者の考慮に上せるような柔軟性がシステムに対して求められる．

設計者の創造的活動としての側面から概念設計を見る場合，そのコンピュータによる支援にあたっては，設計者が行うべき判断の自動化よりも，設計者の刺激となる役割に重点がおかれるべきである [堀 1991] との指摘がある．このような考え方のもとに，意外性をもつ新規設計 [山本，藤本 1993] や，未知の知識による新たな設計 [池本ら 1996] などが提案されている．これらは，概念設計の過程においては，実現が可能かどうかは厳密には問わず，不確かな情報も含む多くの設計案を生成し，設計者に多くの情報判断・取捨選択の機会を与えることが重要 [Chakrabarti and Thomas 1996] との基本姿勢を持つものである．ただし，システムが全ての競合候補を提示し，設計者に全ての選択を委ねることは，競合候補の評価といった目安付けのもとにおいても煩雑な作業となり，設計者に過大な負担をかけることになる．したがって概念設計支援システムにおいては，設計候補の多様性の確保と，意思決定の煩雑さの解消とのバランスをとった候補提示が求められる機能となる．

4.3 知識ベース推論における候補提示のゆらぎ

第2章では，概念設計過程で生じる設計候補の競合に対してシステムが設計評価を行い，これを示すことで設計者の意思決定の補助とする枠組みを示した．しかしながら，概念設計の段階におけるこれらの評価値は，2.4節で述べたように，厳密な評価関数として表すことの困難なものであり，相対的な目安に過ぎない．ここでは，競合候補に対する評価を確率的なゆらぎを持つ候補提示に反映させることで設計者に多くの設計候補を示唆することを試みる．

4.3.1 候補評価の確率的表現

設計アシスタントシステムに求められる機能として，多様な候補生成の可能性を保ちつつ，競合候補に対する設計者の意思決定の煩雑さの解消が挙げられる．候補の競合に対しては，各候補に対する設計評価を候補の優先度として設計者に提示し，意思決定のための目安とすることが考えられる．感覚的な側面に代表されるように，概念設計過程における設計評価には明確な評価尺度は存在しない．また，設計者による各設計指標に対する重み付けも明確な論理のもとに行われるものではないので，優先度の値には相対的な目安としての緩い意味付けしかなく，あくまでも補助的な情報として考えねばならない．しかしながら，優先度を数値として直接的に設計者に示した場合には，設計者がその値を絶対的なものであると解釈してしまい，選択される候補が固定化される危険性がある．これは，得られる設計候補から多様性が失われることとなり，多様な候補の検討が必要とされる概念設計の段階では望ましいものではない．

ここでは，ルールに基づく推論で生じる複数の競合候補の提示において，組合わせ最適化問題に対するシミュレーティッドアニーリング法 [Kirkpatric and Gellat Jr. 1983] と同様の確率的アプローチをとる．候補に対する評価はシステムによる提示の頻度に確率的なゆらぎをもって反映され，設計者への提示は確定的とはならない．設計項目 X の属性値は，候補の提示と設計者による採否の意思決定により決定される．競合候補 $\boldsymbol{x}_n$ の生成とその評価 v_n は，2.4.3項と同様に行う．こ

のとき，N 個の競合候補 $\boldsymbol{x}_n$ $(n = 1, \cdots, N)$ それぞれの提示頻度 q_n を，各候補に対する優先度 v_n を反映するように

$$q_n = z(T)\exp\left(-\frac{1}{v_n T}\right) \qquad n = 1, \cdots, N \tag{4.1}$$

とする．ここで $z(T)$ は，$(q_1 + q_2 + \cdots + q_N) = 1$ となるように定める正規化係数，T は仮想的な温度パラメータである．式 (4.1) は，統計熱力学においてエネルギレベル k への遷移確率 p_k が，ボルツマン定数 k_B を用いてそのエネルギレベルの差 Δ_k の関数

$$p_k = z(T)\exp\left(-\frac{\Delta_k}{k_B T}\right) \tag{4.2}$$

で表されることに対応している．これは，温度パラメータ T が低く零に近いほどゆらぎがおさえられエネルギレベルが遷移しにくくなり，温度パラメータ T が高いほど遷移しやすいことを表している．

式 (4.1) では，候補の評価 v_n に対して提示頻度 q_n は単調増加となっているので，提示頻度には候補の評価が反映されていることになる．候補提示のゆらぎの程度の調節は，シミュレーティッドアニーリングにおいてゆらぎを制御する温度パラメータと同様に，T の設定により行う．温度パラメータを $T \to 0$ と設定すれば，候補提示のゆらぎが抑えられ，最大優先度 $v_{\max} = \max_n(v_n)$ を持つ候補 $\boldsymbol{x}_{\max}$ の相対的な提示頻度 $q_{\max}$ のみが 1，他の候補の提示頻度は 0 となり，設計者へは確定的に $\boldsymbol{x}_{\max}$ が提示されることになる．逆に $T \to \infty$ と十分に高く設定するならば，各候補の提示頻度は等しくなり $(q_n = 1/N)$，システムによる評価値 v_n が全く反映されないランダムな候補提示となる．

設計者は，設計支援過程において，システムの行う設計評価への信頼度のチューニングパラメータとして温度パラメータ T を設定できる．競合候補に対して行われるシステムの設計評価を信頼できると設計者が判断する場合には，温度パラメータ T に小さな値を設定することで候補提示のゆらぎの程度を抑える．逆にシ

ステムの設計評価を信頼できないと判断する場合には，温度パラメータ T に大きな値を設定することで候補提示を大きくゆらがせることにする．設計者に対する一度の提示において，システムは複数の競合候補 $\boldsymbol{x}_n$ のなかから式 (4.1) で求められる確率に従い選んだひとつの候補を提示する．この候補に対して設計者は，採用するか，不採用として他の候補を再提示させるかの意思決定を行う．システムの候補提示のゆらぎが小さければ相対的に優先度の高い候補が提示され，逆にゆらぎが大きければ，候補の優先度にかかわらず競合している全ての候補が同程度の頻度により提示されることになる．

ここで示した確率的な候補提示は，競合候補の選択に対する相対的な目安としての優先順位と，設計者のシステムに対する信頼度とを反映したものとなる．このようなゆらぎを含んだ候補提示手法は，一度に提示される候補数を一つに限ることで煩雑さを解消し，設計評価の反映をはかりながらも，設計者がシステムの行った評価値に必要以上にとらわれることなく，多くの設計候補を考慮に上せることを可能にすると考えられる．

4.3.2 候補提示のゆらぎを許容するシステム

アーチ橋構造物に対する感覚的要求を重視した設計支援 (2.5.3 節) において，競合候補に対する設計評価を確率的にとらえ (図 4.2)，ゆらぎを許容する候補提示について検討を行う．感覚的デザイン性の要求として「近代的かつ軽快」と「象徴的かつ力強い」を与え，構造機能性，経済性，感覚的デザイン性に関する評価値に対する重みを 1:1:10 とした場合の競合候補に対する評価を，アーチ形式とリブ形式の候補提示の段階についてそれぞれ表 4.1 と表 4.2 に再び示す．

2.5.3 節では，設計者は評価値の最も大きな第一候補を採用するとしていたが，たとえば,「象徴的かつ力強い」といった要求に対するアーチ形式の評価 (表 4.2(a)) では，固定アーチが絶対的に有利 (評価値 0.36) なものではなく，2 ヒンジ形式 (評価値 0.34) と同程度であり，むしろランガ形式 (評価値 0.05) のみが劣るといった評価となっている．また，リブ形式の候補に対する評価 (表 4.1(b), 表 4.2(b)) では，与えた 2 つの感覚的要求のどちらに対しても，ソリッドリブが第一候補となっているが，第一候補の卓越の様子は異なっている．そもそも，これらの評価値の差異が本質的なものなのか，システム内に用いられている知識・事例に依存する

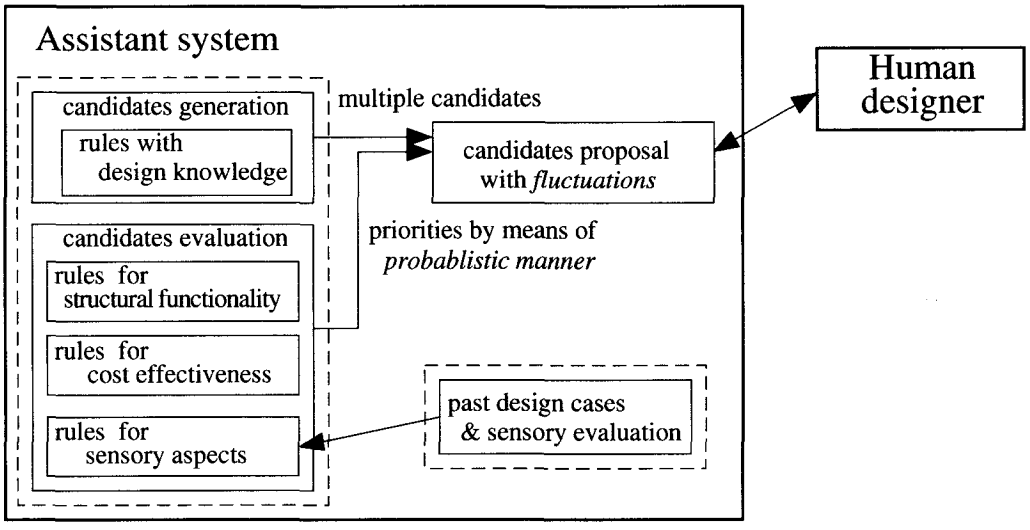


図 4.2 候補提示のゆらぎを許容する設計アシスタントシステム構成図

表 4.1 感覚的要求「近代的かつ軽快」に対する中間競合候補の評価
(表 2.7(b)(c) の再掲)

(a) アーチ形式の競合候補に対する評価

	アーチ形式に対する競合候補				
評価指標	ランガ	ローゼ	2 ヒンジ	固定	重み
構造機能性	0.12	0.37	0.21	0.29	1
経済性	0.15	0.29	0.27	0.27	1
デザイン性	0.14	0.38	0.23	0.25	10
優先度	0.13	0.37	0.23	0.26	–

既定設計項目：単純支持，支間長 140m

(b) リブ形式の競合候補に対する評価

	リブ形式に対する競合候補		
評価指標	ソリッド	ブレースト	重み
構造機能性	0.44	0.56	1
経済性	0.91	0.09	1
デザイン性	0.86	0.14	10
優先度	0.83	0.17	–

既定設計項目：単純支持，支間長 140m，ローゼ，けた高 2m

表 4.2 感覚的要求「象徴的かつ力強い」に対する中間競合候補の評価
(表 2.8(b)(c) の再掲)

(a) アーチ形式の競合候補に対する評価

	アーチ形式に対する競合候補				
評価指標	ランガ	ローゼ	2 ヒンジ	固定	重み
構造機能性	0.12	0.37	0.21	0.29	1
経済性	0.15	0.29	0.27	0.27	1
デザイン性	0.03	0.24	0.36	0.37	10
優先度	0.05	0.25	0.34	0.36	–

既定設計項目：単純支持，支間長 140m

(b) リブ形式の競合候補に対する評価

	リブ形式に対する競合候補		
評価指標	ソリッド	ブレースト	重み
構造機能性	0.44	0.56	1
経済性	0.91	0.09	1
デザイン性	0.49	0.51	10
優先度	0.52	0.48	–

既定設計項目：単純支持，支間長 140m，固定アーチ，けた高 1m

ものなのかなどの明確な意味付けは，概念設計の段階では存在しない．したがって，これらの数値を直接に設計者に提示することには，絶対的なものであると設計者に誤解されかねない危険性を伴う．ここに示した例のように，競合候補が数個ならば，全ての評価値を同時に提示しても，設計者による総合的判断は比較的容易であるが，多数の競合となるにしたがってその把握は困難となる．

前節に示したゆらぎを導入した候補提示により，間接的にこれらの競合候補の評価を反映した例を示す．ここでは，設計者による信頼度の設定として，温度パラメータ T を，0.1, 1, 10, 1000 と変化させた場合の候補提示の様子を調べる．たとえば，表 4.3(a) に示した感覚的要求「近代的かつ軽快」に対するアーチ形式の競合候補の評価では，ランガ，ローゼ，2 ヒンジ，固定形式がそれぞれ 0.13, 0.37, 0.23, 0.26 である．もし，設計者がシステムの行う評価に対して信頼をおくとして $T = 0.1$ と設定すれば，第一候補であるローゼ形式の提示される確率は 100%となり，設計者が再提示をシステムに求めたとしても確定的にローゼ形式のみが提示される．一方，信頼をおかないとして温度パラメータを上げていくならば，たとえば $T = 10$ においては，最も評価の低いランガ形式であっても 18%の提示頻度を確率的に持ち，提示頻度として評価値を反映しながらも提示される候補はゆ

表 4.3 感覚的要求「近代的かつ軽快」に対する候補提示のゆらぎ

(a) アーチ形式に関する提示頻度

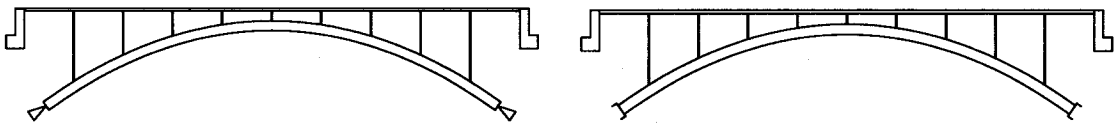
		提示頻度 q_n			
競合候補	評価値 v_n	$T = 0.1$	$T = 1$	$T = 10$	$T = 1000$
ランガ	0.13	0%	0%	18%	25%
ローゼ	0.37	100%	66%	30%	25%
2 ヒンジ	0.23	0%	13%	25%	25%
固定	0.26	0%	21%	27%	25%

(b) リブ形式に関する提示頻度 (アーチ形式：ローゼ)

		提示頻度 q_n			
競合候補	評価値 v_n	$T = 0.1$	$T = 1$	$T = 10$	$T = 1000$
ソリッド	0.83	100%	99%	61%	50%
ブレースト	0.17	0%	1%	39%	50%

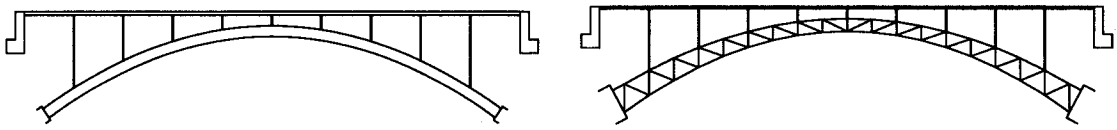
らぐことがわかる．また，$T = 1000$ と十分に大きくした場合には，評価値が候補提示には反映されずに，4 つの全ての競合候補に等しい提示頻度 25%が割当てられている．この状況では，設計者には競合候補の選択の意思決定を自らの判断のみで行うことが求められる．

「近代的かつ軽快」の要求に対して，アーチ形式に関しては 4 つの競合候補のうちローゼ形式 ($v_2 = 0.37$) が，リブ形式に関しては 2 つの競合候補のうちソリッドリブ形式 ($v_1 = 0.83$) が卓越している (表 4.3)．設計者が中程度の信頼をシステムにおくとし，$T = 1$ と設定した場合ゆらぎは抑えられ，設計者からの候補提示の要求に対して，ローゼ形式は約 2/3, ソリッドリブ形式はほぼ 100%の頻度で提示されることになる．一方で「象徴的かつ力強い」に対しては，同じ温度パラメータ $T = 1$ を与えた場合でも，2 ヒンジ形式と固定形式 (図 4.3)，ソリッドリブ形式とブレーストリブ形式 (図 4.4) は，同程度の頻度で提示されゆらぎを持っている (表 4.4)．このことは，設計者が同程度の信頼をシステムにおいたとしても，競合候補間の優劣の差の様子によってゆらぎの程度が変わることを示している．後者の場合では，2 つの競合候補，2 ヒンジ形式対固定形式，ソリッドリブ対ブレー



(a) 2 ヒンジ形式 (提示頻度 40%)　(b) 固定形式 (提示頻度 47%)

図 4.3 アーチ形式に対する候補提示のゆらぎ (「象徴的かつ力強い」，$T = 1$)



(a) ソリッドリブ (提示頻度 54%)　(b) ブレーストリブ (提示頻度 46%)

図 4.4 リブ形式に対する候補提示のゆらぎ (「象徴的かつ力強い」，$T = 1$)

表 4.4 感覚的要求「象徴的かつ力強い」に対する候補提示のゆらぎ

(a) アーチ形式に関する提示頻度

		提示頻度 q_n			
競合候補	評価値 v_n	$T=0.1$	$T=1$	$T=10$	$T=1000$
ランガ	0.05	0%	0%	6%	24%
ローゼ	0.25	0%	14%	29%	25%
2ヒンジ	0.34	16%	40%	32%	25%
固定	0.36	84%	47%	33%	25%

(b) リブ形式に関する提示頻度 (アーチ形式：固定)

		提示頻度 q_n			
競合候補	評価値 v_n	$T=0.1$	$T=1$	$T=10$	$T=1000$
ソリッド	0.52	82%	54%	50%	50%
ブレースト	0.48	18%	46%	50%	50%

ストリブの評価値に有意な差はなく，どちらの形式を採用したとしても，要求される感覚的デザイン性「象徴的かつ力強い」を反映できることが確率的に表現されている．すなわち，第一候補が絶対的ではないことを，設計者へ一つの候補を提示する際にほぼ等確率で行うことでシステムは間接的にこれらの評価を表している．

このように候補提示にゆらぎの概念を導入することによって，評価がもっとも大きな第一候補のみを提示することなく，他の競合候補も，評価値を反映した頻度により提示される可能性を持つ．また，このゆらぎの程度は，設計者の設定するシステムへの信頼度パラメータによって調整可能なものである．したがって，設計者がシステムによる評価値に囚われすぎることなく多くの候補を検討することにつながると考えられる．

4.4 設計者の意思決定のゆらぎ

4.4.1 遺伝子的手法による設計事例との類似に基づくゆらぎ

(1) 知識ベース推論の決定性とその緩和

前節では，知識ベース推論の枠組において，複数の競合候補の生成と，それらの設計者への提示にゆらぎを持たせることで，多様な候補を示すことを考えた．一般に知識ベース推論では，選択肢の生成とその選択の決定とによって推論過程を進めていく．したがって，その過程は木構造として表され，途中段階における属性値の決定は，以降の意思決定に本質的に支配的となるので，設計候補の多様性に対する足枷となる [Hartmann and Lehner 1992]．たとえば，橋梁構造物の設計では橋長などの設計仕様から，つり構造，斜張構造などの橋梁形式の決定がなされ [日本鋼構造協会 1995]，その橋梁形式のもとで以降の属性値を決定する木構造の過程となる (図 4.5)．したがって，特定の橋梁形式を用いるとして設計の方向がいったん定められたならば，他の橋梁形式による設計候補実現の可能性は無視されてしまうことになる．もちろん，推論に非決定性を持たせたバックトラックによる意思決定の後戻りも可能であるが，システムが推論の途中過程を全て記憶する必要があるので，多くの属性に対する推論が必要となる設計問題では，組合せ数の問題から現実的ではない．

ここではまず，候補生成の基本的枠組はこれまでと同様に，知識ベース推論を主要設計属性毎に段階的に区切り，競合候補の生成と，設計者による採否の決定を対話的に繰り返していくものとする．ただし，段階毎に知識ベース推論で得られる属性値をもとに，設計者が既に決定した属性値が異なっていても，過去に実現された設計事例から，類似なものは提示可能とする枠組を考える．設計対象物を属性値 $s_i (i = 1, \cdots, I_s)$ の集合 $\boldsymbol{s}$ として表し，全ての属性値が定められれば，一つの設計案が生成されたことになる．設計者はより少数の J_s 個 $(J_s < I_s)$ の注目属性 s_{I_J} $(\in \boldsymbol{s}, J = 1, \cdots, J_s)$ について直接に意思決定を行う．原問題はこれら注目属性毎の部分設計問題 P_J $(J = 1, \cdots, J_s)$ に分割される $(\boldsymbol{s} = \{\hat{\boldsymbol{s}}^{(r)}, \hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}, \ldots,$

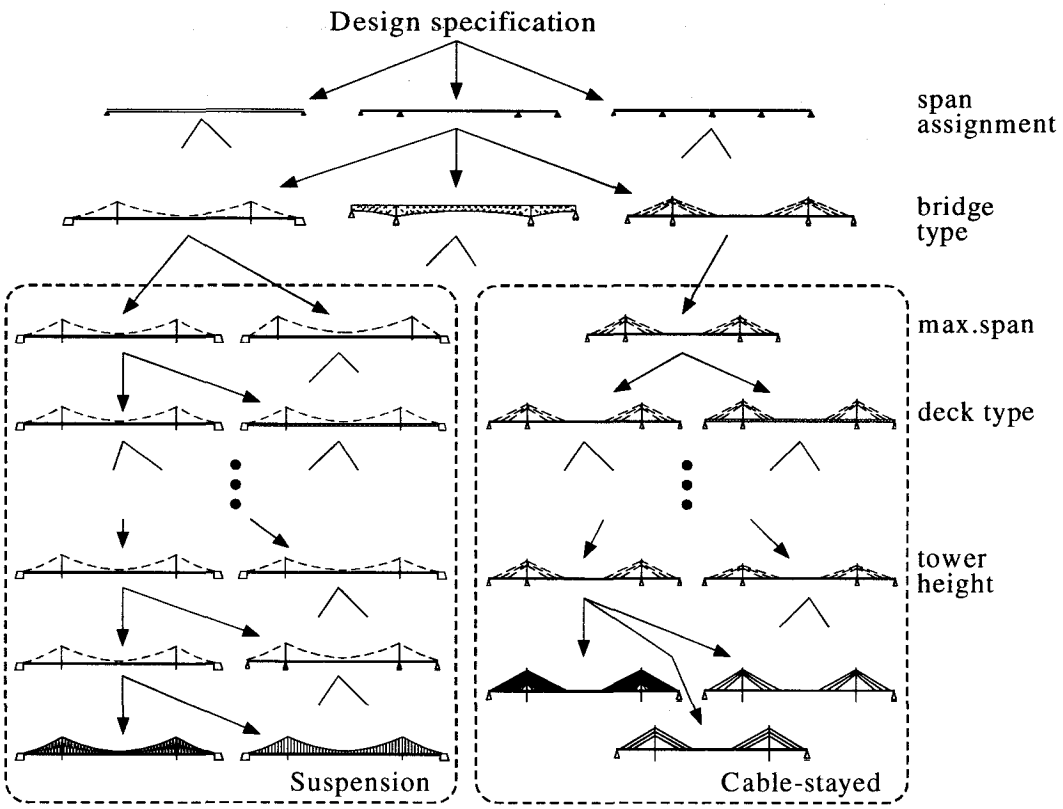


図 4.5 橋梁構造物の設計過程

$\hat{\boldsymbol{s}}^{(J_s)}\}$). ここで $\hat{\boldsymbol{s}}^{(r)}$ は設計要求を表す属性，上添字 (J) は部分問題 P_Jを表し，記号 ($\hat{}$) は部分属性であることを示している ($\hat{\boldsymbol{s}}^{(J)} \subset \boldsymbol{s}$). 部分属性 $\hat{\boldsymbol{s}}^{(J)}$ に含まれる属性 s_i は，上添字 (J) を用いて $s_i^{(J)}$ と表す ($\hat{\boldsymbol{s}}^{(J)} = \{s_i^{(J)}\}$). 第 J 番目の部分問題では，$J-1$ 番目までの段階で設計者によって属性値 s_i^* が定められており，問題 P_Jに属する $s_i^{(J)}$ の可能値は，属性値 s_i^* と設計要求の値 $s_i^{(r)}$ を基に知識ベース推論から求められる (図 4.6).

図 4.7は以下に示す決定木の飛移りを許容する候補提示の枠組の模式図である. 属性 $s_i^{(J)}$ の可能値 s_i は一般に複数存在し，これらの競合を設計者に提示し，設計者に採否の判断を委ねるアプローチをここでもとる. 図 4.7で淡色表示している部分は採用されなかった選択肢を表し，この選択肢以降の設計可能性は知識ベース推論の流れからは切捨てられることになる. この知識ベース推論の決定性は，設計候補の多様性の確保に対しては制約的にはたらくこととなるので，ここでは，

$$s = \{\underbrace{s_1^*,\ s_2^*}_{s_i^{(r)}},\ \underbrace{s_3^*,\ s_4^*,\ s_5^*}_{\substack{s_i^{(1)} \\ P_1}},\ \cdots,\ \underbrace{\cdot\cdot,\ s_{I_J}}_{\substack{s_i^{(J)} \\ P_J}},\ \cdots,\ \underbrace{\cdot\cdot,\ s_{I_s}}_{\substack{s_i^{(J_s)} \\ P_{J_s}}}\}$$

$$\begin{aligned} &if(s_i^{(r)} = s_i^*,\ s_i^{(j)} = s_i^*,\ j = 1, \ldots, J-1) \\ &then(s_i^{(J)} = s_i) \qquad\qquad J = 1, \ldots, J_s \end{aligned}$$

図 4.6 設計問題の分割

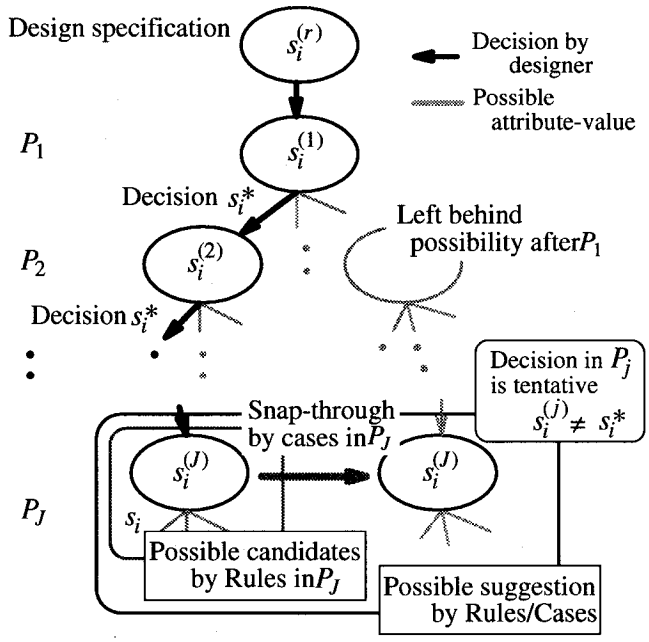


図 4.7 決定木の飛移りを許容する候補提示の枠組

提示され得る候補には，部分問題 P_J において，知識ベース推論で得られた属性値 $(s_i^{(r)}\,(= s_i^*),\ s_i^{(j)}\,(= s_i^*,\ j = 1, \ldots, J-1),\ s_i^{(J)}\,(= s_i))$ をもとに，過去に実現された設計事例から類似の属性値を持つものも提示可能としておく．したがって，設計者へ提示される設計候補には，設計者が既に決定した属性値 s_i^* が異なるものも含まれることになる．すなわち，部分問題 P_J までの知識ベース推論の流れにおいて，先行する属性値 s_i^* を定めた段階で切捨てられてしまった，その時点では見えない設計可能性も推論のバックトラックなしに提示可能となり，組合せ数の

爆発を起こすことなく知識ベース推論の決定性を緩和することが期待される．

このような候補提示のゆらぎは，知識に基づく推論にみられる論理の積み重ねの枠組を超え，人間の思考過程にみられる類推などの非論理的な思考 [Madanshetty 1995; Casakin and Goldschmidt 1999] を模擬し，設計支援システムに導入する試みである．もちろん，設計候補の類似性は，みかけ上だけではなく，機能面からも判断できなければならず [Hauser and Scherer 1997]，ここでは前章で示した，みかけ上大きく異なるような構造形態についても，構造機能性の類似を反映する遺伝子的表現に基づく遺伝子的事例ベースを利用するものとする．

(2) 個体集団による設計評価の表現

前章に示した手法で生成された遺伝子的事例ベース個体群を，複数の設計評価規準に対して規準毎に準備し，それらを単一の価値規準を持つ候補集団と呼ぶ．部分問題 P_J では属性 $s_i^{(J)}$ について，設計仕様を表す属性 $s_i^{(r)}$ と，部分問題 P_{J-1} までに決定された属性値 s_i^* とから知識ベース推論

$$\begin{array}{l} if(s_i^{(r)} = s_i^*,\ s_i^{(j)} = s_i^*,\ j = 1, \ldots, J-1) \\ then(s_i^{(J)} = s_i) \end{array} \tag{4.3}$$

がなされる．このとき，部分属性 $\hat{\boldsymbol{s}}_{(z)}^{(J)}$ に関して Z 個の競合値が可能となり，それぞれを識別番号 z を用いて $\hat{\boldsymbol{s}}_{(z)}^{(J)} = \{s_i^{(J)} = s_{i(z)}\}$ $(z = 1, \cdots, Z)$ と表す．この段階で表される競合候補 $\boldsymbol{s}_{(1)}, \cdots, \boldsymbol{s}_{(Z)}$ は，設計要求 $s_i^{(r)}$ と部分問題 P_1 から P_{J-1} までに決定した属性値 s_i^* からなる共通部分と，各々異なる競合 $\hat{\boldsymbol{s}}_{(z)}^{(J)}$ の部分，および未決定の属性 $s_i^{(j)}$ $(j = J+1, \cdots, J_s)$ によって表現される．

システムは，競合候補 $\boldsymbol{s}_{(z)}$ を K 個の価値規準 γ_k $(k = 1, \cdots, K)$ からそれぞれ評価し，これらを $v_{k(z)}$ と表す．価値基準ごとに準備した初期個体群 $\boldsymbol{C}_k^{[0]}$ に事例ベース個体群 $\boldsymbol{C}^b$ (個体数 N) を複写し，個々の個体に対する評価をもとに候補集団を生成していく．個体 $\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]} (\in \boldsymbol{C}_k^{[t]}, n = 1, \cdots, N)$ それぞれに対して，まず全ての競合候補 $\boldsymbol{s}_{(z)}$ $(z = 1, \cdots, Z)$ との類似を 3.3.1 節で定義した個体表現に基づ

く類似度 (式 (3.1)) を用いる．ただし，式 (3.1) における一致パターン長の強調パラメータ β は 2 とし，

$$\rho(\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}, \boldsymbol{c}_{(z)}) = \frac{1}{L^2}\sum_{k=1}^{K}{\lambda_k}^2, \qquad (\boldsymbol{c}_{(z)} \Rightarrow \boldsymbol{s}_{(z)}) \tag{4.4}$$

と求める．

個体 $\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}$ に最も類似している競合候補を $\boldsymbol{s}_{(z^*)}$ と表し (ただし $\rho(\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}, \boldsymbol{c}_{(z^*)}) = \max(\rho(\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}, \boldsymbol{c}_{(1)}), \cdots, \rho(\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}, \boldsymbol{c}_{(Z)}))$，その候補の価値規準 γ_k に対する評価 $v_{k(z^*)}$ を得る．個体群中の個体 $\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}$ の適合度は，最も類似の競合候補の設計評価値を用いて

$$g_n(\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}) = \rho(\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}, \boldsymbol{c}_{(z^*)})\, v_{k(z^*)} \tag{4.5}$$

として求める．類似度 $\rho(\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}, \boldsymbol{c}_{(z^*)})$ は，3.3 節に述べた遺伝子表現に基づいているので，見かけ上の構造形態だけではなく構造機能性からの類似も加味したものとなっている．

個体群 $\boldsymbol{C}_k^{[t]}$ では，3.4.1 節に示した事例ベースの形成と同様の遺伝的操作，一点交叉 (交叉率 q_c, $0 \le q_c \le 1$) とビット反転による突然変異 (突然変異率 q_m, $0 \le q_m \le 1$) を行う．次の世代へ生き残らせる個体は，個体適合度 g_n とその個体頻度をもとにした選択確率

$$x_n = \frac{g_n(\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]})}{p(\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}, \boldsymbol{C}_k^{[t]})^{1/R}} \tag{4.6}$$

によって決定される．ただしパラメータ R $(1 \le R \le \infty)$ は候補集団の生成に対する淘汰圧を表す．この世代交代は，集団中で最も高い適合度を持つ個体の占める比率が候補集団ごとに設定するしきい値 $\theta_k (0 < \theta_k < 1)$ を越える世代で打切り，このときの個体群 $\boldsymbol{C}_k^{[T]}$ を部分問題 P_J に関する候補集団 $\boldsymbol{C}_k^{(J)}$ とする．式 (4.5) から分かるように，この集団には価値規準 γ_k に対する評価の高い競合候補に類似の形質を持つ個体ほど存在している確率は高い．ただし，淘汰のしきい値 θ_k を

低く設定し，評価値の高い個体の存在確率を抑えておくことで過淘汰を避け，候補提示の際の多様性を保っておく．

(3) 事例との類似に基づく候補提示の飛移り

複数の設計評価基準に対して準備された候補集団 $\boldsymbol{C}_k^{(J)}$ は，候補の提示に関してそれぞれ適合度 F_k を持っている．候補を設計者に提示する候補集団は，適合度の相対値 $F_k/(F1 + F_2 + \cdots + F_K)$ を参照したルーレット選択によって決定され，その候補集団 $\boldsymbol{C}_k^c$ からは，ランダムに個体 $\boldsymbol{c}_k$ が抽出される．この個体から発現される候補構造属性 $\boldsymbol{s}$ $(\boldsymbol{c}_k \Rightarrow \boldsymbol{s})$ は，システムに構築している知識ベースによって実現可能かどうかが判定され，可能な場合のみに設計者に提示される (図 4.8).

候補構造属性 $\boldsymbol{s}$ が，競合候補 $\boldsymbol{s}_{(1)}, \cdots, \boldsymbol{s}_{(Z)}$ のいずれかに未決定属性を除いて一致する場合，それは知識ベース推論の過程により生成された属性を表すので実現可能であり設計者へ提示されることになる．一致しない場合はさらに，その構

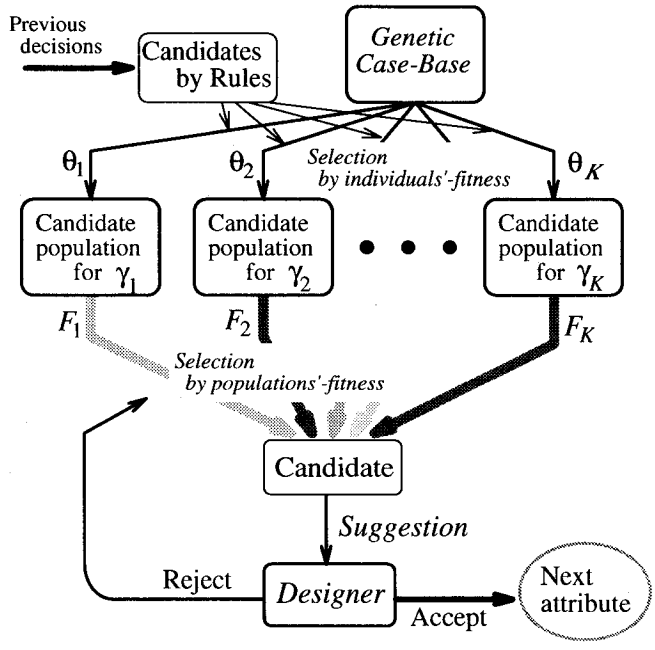


図 4.8 候補提示の流れ

造属性 $\boldsymbol{s}$ が構造形態として発現不可能，あるいは知識ベース推論の意味で実現不可能な時と，$\boldsymbol{s}$ を構成する属性値が知識ベース推論の意味で実現可能な時がある．前者の時には，候補集団のルーレット選択からやり直す．後者は，候補個体の持つ属性 $s_i^{(j)}$ $(j = 1, \cdots, J)$ の値が部分問題 P_J と同程度の段階，すなわち属性 $s_i^{(J)}$ と構造機能的に類似の属性 $s_i^{(J)'}(\approx s_i^{(J)})$ まで式 (4.3) が成立する時である．これは，先行する部分問題で設計者に決定された属性値 s_i^* が候補構造属性 $\boldsymbol{s}$ の値 $s_i^{(j)}$ と異なる段階において，知識ベース推論の流れから切捨てられた候補である．このような候補に対して，部分問題 P_{J-1} までに設計者が意思決定を行った属性と構造機能が類似の属性に関しては，その値 s_i^* をそのまま用いることで，切捨てた段階まで意思決定を遡ることなく設計過程が継続可能となる．この時，候補の実現可能性の判断は，意思決定過程を遡るバックトラックによる推論のやり直しと比べ，候補集団から選ばれたひとつの個体のみについて式 (4.3) を満たすかどうかを調べればよい．

実現可能な個体は，設計候補として設計者に提示し，その採否をたずねる．設計者が不採用とした場合には，その個体の属する候補集団の適合度 F_k を

$$F_k \leftarrow r_d F_k \quad (0 < r_d < 1) \tag{4.7}$$

のように減じ，提示を行う候補集団のルーレット選択からやり直す．これを設計者が候補を採用するまで繰返す．設計者によって候補個体が採用された候補集団の個体群では，その淘汰しきい値を

$$\theta_k \leftarrow w_a \theta_k \quad (w_a > 1) \tag{4.8}$$

と増やし，採用候補 $\boldsymbol{s}$ の部分問題 P_J に関する属性 $s_i^{(J)}$ の値を s_i^* とした後に，次の部分問題 P_{J+1} へと設計を進めていく．

この過程における候補集団 $\boldsymbol{C}_k$ は，設計対象物の属性を集団として確率的に表すものである．すなわち，設計の進捗による淘汰しきい値 θ_k の増加とともに，個

体形質の淘汰が進み，最終的な設計案の形成へと向かう．同時に，候補集団の適合度 F_k は，競合候補の設計者による採否の反復と共に調整されていく．これは設計候補提示における価値規準 γ_k に対する重みを表し，その集合 $\{F_1, \cdots, F_K\}$ には設計者の価値観が反映されていると考えられる．

候補提示において，その段階での競合候補とは一致しないが実現可能なケースは，そこまでの知識ベース推論による設計過程の流れとは沿わず，決定木の飛移りともみなせるものである．この飛移りは構造形態の遺伝子的表現による類似性をもとにしているので，位相の異なるような構造形態であっても，構造機能性からの類似は保っていると考えられる．このような候補提示の枠組は，先行する意思決定で選択肢を切捨ててしまうといった知識に基づく推論の決定性を緩和することとなり，設計者への多様な設計候補の提示が可能となると考えられる．

4.4.2 意思決定木の飛移りを許容するシステム

橋梁構造物の概念設計を例にとり，前節に述べた枠組を取り入れる設計支援システムの構築を試みる (図 4.9)．橋梁構造物の設計過程における知識ベース推論

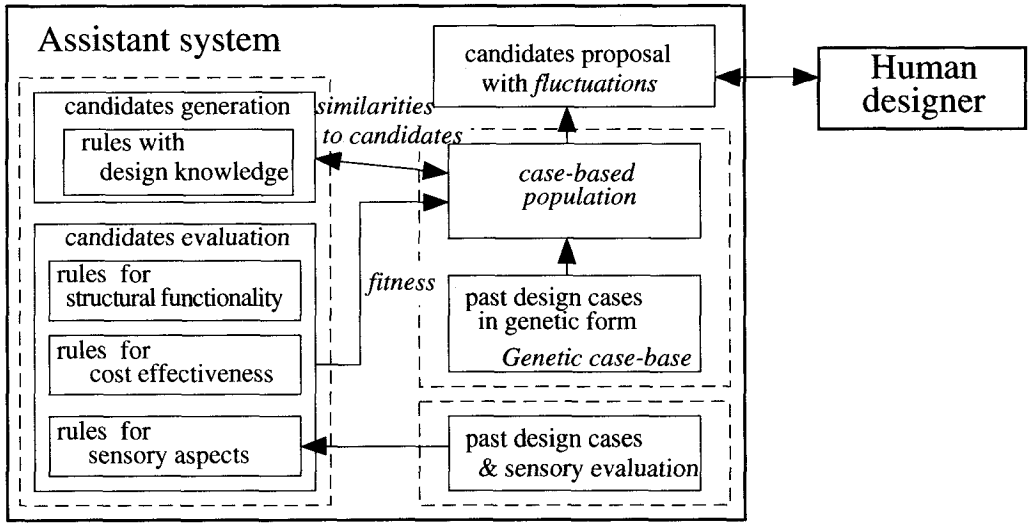


図 4.9 意思決定木の飛移りを許容する設計アシスタントシステム構成図

の基本的な流れを図 4.10 に示す．図中に太字で示した属性は，設計者が直接に意思決定を行う主要属性であり，これらに関する属性値の決定を部分問題 P_j とする．各部分問題において，システムは競合候補の提示を行い，設計者が採否の意思決定を行う．ただし，橋梁形式の決定後は設計過程が異なるので，部分問題 P_j には，それぞれの形式，アーチ，つり橋，斜張橋，トラスを識別するための括弧付きの上添字 (A), (S), (C), (T) を用いている．

候補生成の基本とする遺伝子的事例ベース C^b には，3.4.2 項で生成した個体

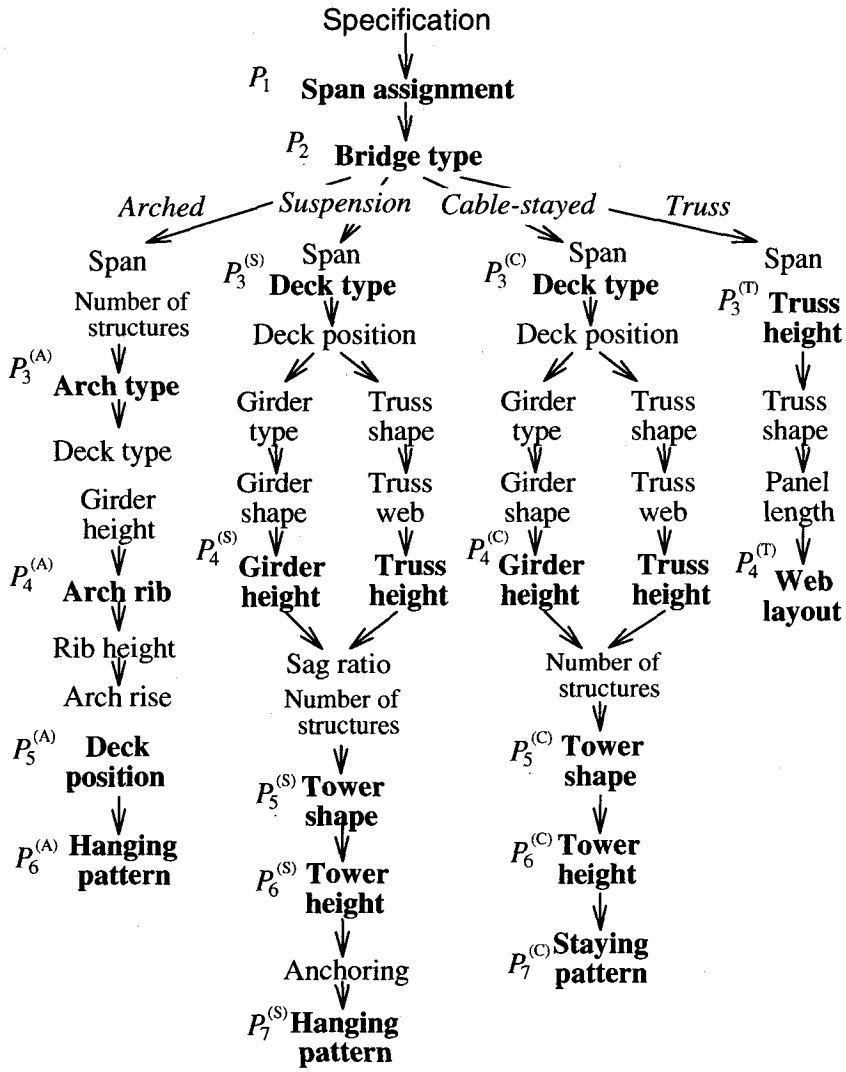


図 4.10 知識ベース推論による橋梁構造物の設計過程

群 $\boldsymbol{C}^{(16)}$ を用いる．これは，211 設計事例の事例値 (29 属性) を参照し，個体数 $N = 5000$，交叉率 $p_c = 0.8$，突然変異率 $p_m = 0.1$ として遺伝的操作を行い生成したものである．以下に，設計仕様として橋長 500m，幅員 20m，橋下障害幅 300m の鋼製道路橋 (図 4.11) を与えた場合のシステムの挙動を例示する．

(1) 競合候補の生成と個体群による設計評価の表現

最初の部分問題 P_1 は，支間長 (m)，支間数の決定であり，図 4.12に示すような 2 つの競合候補 $\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(1)}$={500, 1}，$\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(2)}$={300, 3} が知識ベース推論により得られる．これらの競合候補の遺伝子型 $\boldsymbol{c}^{(1)}_{(1)}$, $\boldsymbol{c}^{(1)}_{(2)}$では，設計仕様と部分問題 P_1 で決定される属性値に対応する 15 個の遺伝子座のみ値が定まっている．図中 '?' で表される未定の属性値をとる遺伝子座は，式 (4.4) で求められる類似度には寄与しな

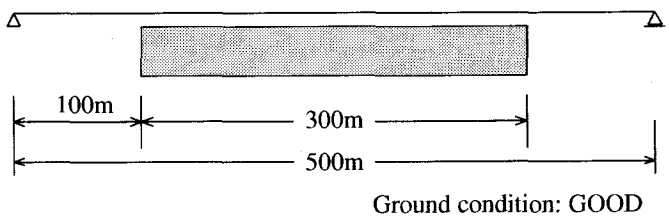
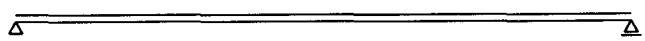
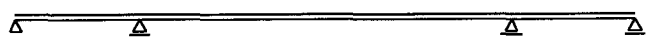


図 4.11 与えた設計仕様



遺伝子型 $\boldsymbol{c}^{(1)}_{(1)}$: 01011101011 10??00??

(a) 競合候補 $\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(1)}$ { 支間長: 500m, 1 支間 }



遺伝子型 $\boldsymbol{c}^{(1)}_{(2)}$: 01011101010 10??11??

(b) 競合候補 $\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(2)}$ { 支間長: 300m, 3 支間 }

図 4.12 支間割に関する部分問題 P_1 における競合候補

い．したがって個体群中の各個体は，候補個体中の未定の遺伝子座についてどちらの遺伝子値を持っていても，個体適合度に影響を受けないことになる．

遺伝的操作による集団形質の変化を調べるために，構造機能性の価値基準 γ_1 のみを考慮した場合を考える．競合候補の構造機能性に対する設計評価はそれぞれ $v_{1(1)} = 0.49$，$v_{1(2)} = 0.51$ である．淘汰しきい値 $\theta_1 = 0.1$，淘汰圧 $R = 1$，候補生成における交叉率 $q_c = 0.3$，突然変異率 $q_m = 0.05$ とした場合，最も高い適合度を持つ個体が $\theta_1 \times N = 500$ を超えたのが第 5 世代の個体群であったので，この個体群が候補集団となる．この候補集団 $\boldsymbol{C}_1^{(1)}$ には，競合候補 $\boldsymbol{s}_{(1)}^{(1)}$ に一致する個体が 13，$\boldsymbol{s}_{(2)}^{(1)}$ に一致する個体が 553 存在した．この結果より，式 (4.5) で定義された個体適合度を参照する遺伝的操作によって，個体分布にみられる集団形質に設計評価が反映されていることがわかる．ほぼ同程度の設計評価であるにもかかわらず，支間長 500m，1 支間を持つ $\boldsymbol{s}_{(1)}^{(1)}$ が少ないのは，遺伝子的事例ベースのもととなった収集事例における事例頻度の影響を受けているものと考えられる．

次に，遺伝子的事例ベースの多重的な事例特徴保持の観点から，ここで行った遺伝的操作が個体群の集団形質に与えた影響を調べる．図 4.13 は，次の部分問題 P_2 で生じ得る競合，すなわち，設計者が $\hat{\boldsymbol{s}}_{(1)}^{(1)}$ を採用した場合の橋梁形式に関する候補 (a)，および $\hat{\boldsymbol{s}}_{(2)}^{(1)}$ を採用した場合の 7 つの競合候補 (b)〜(h) を遺伝子表現とともに示している．図中，下線を付した遺伝子座は設計仕様と部分問題 P_1 で定められる属性値に関する遺伝子座である．最初の部分問題 P_1 に関する遺伝的操作を行ったのみの候補集団 $\boldsymbol{C}_1^{(1)}$ において，次の部分問題 P_2 で生じ得る競合候補 (a)〜(h) に一致するビットパターンを保持している遺伝子型を持つ個体の分布を調べると表 4.5 に示す結果となった．遺伝的操作を行う前の事例ベース個体群 $\boldsymbol{C}^b$ にはこのような個体はほとんど存在せず，(d) 支間長 300m の連続アーチ，(e) 支間長 300m の連続つり橋を表現する遺伝子型がそれぞれ 1 個体ずつ存在しただけであった．それにもかかわらず，部分問題 P_1 で対象とした 15 ビットのみが定まっている競合候補の遺伝子型 (図 4.12) を参照する遺伝的操作を行うだけで，次に扱われる未だ考慮の対象となっていない属性値まで一致している個体が発現され得ることが分かる．

<u>0101110101110</u>??<u>00</u>000????????????????100????????????????????????????

(a) $\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(1)}$ = { 支間長: 500m, 1 支間 }, $\hat{\boldsymbol{s}}^{(2)}_{(1)}$ = { 単純支持, アーチ形式 }

<u>0101110101010</u>??<u>11</u>00????????????????001????????????????????????????

(b) $\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(2)}$ = {300m, 3}, $\hat{\boldsymbol{s}}^{(2)}_{(1)}$ = { 単純, つり橋 }

<u>0101110101010</u>??<u>11</u>011????????????????000????????????????????????????

(c) $\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(2)}$ = {300m, 3}, $\hat{\boldsymbol{s}}^{(2)}_{(2)}$ = { 連続, トラス }

<u>0101110101010</u>??<u>11</u>010????????????????100????????????????????????????

(d) $\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(2)}$ = {300m, 3}, $\hat{\boldsymbol{s}}^{(2)}_{(3)}$ = { 連続, アーチ }

<u>0101110101010</u>??<u>11</u>01????????????????001????????????????????????????

(e) $\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(2)}$ = {300m, 3}, $\hat{\boldsymbol{s}}^{(2)}_{(4)}$ = { 連続, つり橋 }

<u>0101110101010</u>??<u>11</u>01????????????????010????????????????????????????

(f) $\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(2)}$ = {300m, 3}, $\hat{\boldsymbol{s}}^{(2)}_{(5)}$ = { 連続, 斜張 }

<u>0101110101010</u>??<u>11</u>111????????????????000????????????????????????????

(g) $\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(2)}$ = {300m, 3}, $\hat{\boldsymbol{s}}^{(2)}_{(6)}$ = { 片持ち, トラス }

<u>0101110101010</u>??<u>11</u>110????????????????100????????????????????????????

(h) $\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(2)}$ = {300m, 3}, $\hat{\boldsymbol{s}}^{(2)}_{(7)}$ = { 片持ち, アーチ }

図 4.13 部分問題 P_2 で生成され得る個体形質

表 4.5 候補集団における形質の分布

橋梁形式に関する競合候補 (P_2)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
支間長 (P_1) に関する候補集団 $\boldsymbol{C}^{(1)}_1$	3	3	8	75	50	72	0	19
事例ベース個体群 $\boldsymbol{C}^b$	0	0	0	1	1	0	0	0

この理由としては，たとえば橋長500m，幅員20m，橋下障害幅300m，鋼製道路橋，3支間，支間長300mを表現する遺伝子型 $\boldsymbol{c}^{(1)}_{(2)}$ の有意な15ビット '0101110101010??11' を参照した遺伝的操作の間に，これとは完全に一致しなくとも，ビットパターンに部分的にこの特徴を持つ個体との交叉などによって遺伝子的事例ベースに多重的に保持されていた事例の特徴が現れてくるためと考えられる．

(2) 遺伝的手法による候補提示

橋梁構造物の概念設計における価値基準に，構造機能性 (γ_1)，感覚的デザイン性 (γ_2)，経済性 (γ_3) を考え，それぞれの初期個体群には 3.4.2 項で得た遺伝子的事例ベース $\boldsymbol{C}^b$ を用いる．設計仕様は前節と同様とし，感覚的デザイン性の要求には「優美さ」を考える．各候補集団に対する適合度の初期値はそれぞれ等しく $F_1 = F_2 = F_3 = 1/3$，淘汰しきい値も同様に $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0.1$ とし中立の状態から設計支援を始める．設計者が候補を不採用としたときの候補集団適合度更新パラメータは $r_d = 0.8$，候補を採用するとしたときの淘汰しきい値更新パラメータは $w_a = 1.2$ とした．ここでは，式 (4.6) の淘汰圧パラメータ $R = \infty$ とし，個体の選択には個体適合度 g_n のみが考慮されるものとする．

設計者への提示候補は，候補集団の適合度 F_k を参照するルーレット選択によって確率的に選ばれた候補集団から全くランダムに抽出された個体としている．ここでは設計者の採否による候補集団適合度の変化の確認のために，本来の設計支援過程とは異なるが，選ばれた候補集団に最も多く存在する個体形質を提示候補とし，設計仕様に対する代表的な実事例と一致する場合には，設計者が採用，一致しなかった場合には不採用としたと仮定する．

図 4.14に示した下路式の 3 支間連続補剛けたを持つローゼアーチ橋は，与えた設計仕様に対する代表的な実事例の一形式であるので，これを参照しながら設計支援過程の検討を行う．スパン長 (m)，支間数に関する部分問題 P_1 において，知識ベース推論から 2 つの競合候補 $\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(1)} = \{500\text{m}, 1\text{ 支間}\}$，$\hat{\boldsymbol{s}}^{(1)}_{(2)} = \{300\text{m}, 3\text{ 支間}\}$ が得られる．設計評価はそれぞれ $\boldsymbol{v}_{(1)}=(v_{1(1)}, v_{2(1)}, v_{3(1)}) =(0.49, 0.40, 0.49)$,

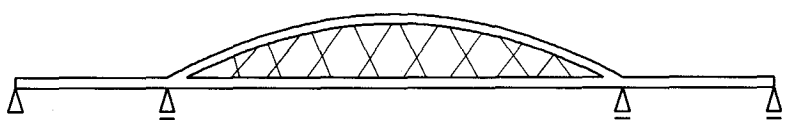


図 4.14 3 支間連続補剛けたローゼアーチ橋構造物

$\boldsymbol{v}_{(2)}$=(0.51, 0.60, 0.51) となった．評価値は $v_{k(1)}+v_{k(2)}+\cdots+v_{k(Z)}=1$ となる様に正規化している．各候補集団 $\boldsymbol{C}_1^{(1)}, \boldsymbol{C}_2^{(1)}, \boldsymbol{C}_3^{(1)}$ における個体分布は，表 4.6に示すように得られた．設計者へ候補を提示する候補集団は，適合度を参照するルーレット選択によって経済性 γ_3 に関する候補集団 $\boldsymbol{C}_3^{(1)}$ となり，この中に最も多く存在する形質 $\boldsymbol{s}_{(2)}$ が提示された．これは，図 4.14で示した実事例と一致するので，設計者により採用されるとした．

部分問題 P_1 において経済性 γ_3 に関する候補集団 $\boldsymbol{C}_3^{(1)}$ からの提示候補が採用されたので，次の橋梁形式，けた支持形式に関する部分問題 P_2 では，淘汰しきい値を $\theta_1=0.1, \theta_2=0.1, \theta_3=w_a\times 0.1=1.2\times 0.1$ として候補集団の生成と提示が行われた．知識ベース推論による競合候補 $\hat{\boldsymbol{s}}_{(1)}^{(2)}=\{$ 単純支持, つり橋形式 $\}$, $\hat{\boldsymbol{s}}_{(2)}^{(2)}=\{$ 連続支持, トラス形式 $\}$, $\hat{\boldsymbol{s}}_{(3)}^{(2)}=\{$ 連続支持, アーチ形式 $\}$, $\hat{\boldsymbol{s}}_{(4)}^{(2)}=\{$ 連続支持, つり橋形式 $\}$, $\hat{\boldsymbol{s}}_{(5)}^{(2)}=\{$ 連続支持, 斜張形式 $\}$, $\hat{\boldsymbol{s}}_{(6)}^{(2)}=\{$ 片持ち支持, トラス形式 $\}$, $\hat{\boldsymbol{s}}_{(7)}^{(2)}=\{$ 片持ち支持, アーチ形式 $\}$ を参照して生成された候補集団 $\boldsymbol{C}_1^{(1)}$, $\boldsymbol{C}_2^{(1)}, \boldsymbol{C}_3^{(1)}$ において，これらと一致する個体の分布は表 4.7に示すようになった．

個体適合度を参照する遺伝的操作は，淘汰しきい値 θ によって打切っているので，個体分布には候補に対する評価値 $\boldsymbol{v}_{(z)}$ の反映だけではなく，個体群のもととなった遺伝子的事例ベースでの事例頻度の反映が強くなっている．たとえば，構造機能性 γ_1 からの評価が最も大きな (0.19) トラス形式 $\hat{\boldsymbol{s}}_{(2)}^{(2)}$ と $\hat{\boldsymbol{s}}_{(6)}^{(2)}$ は，γ_1 に関する候補集団 $\boldsymbol{C}_1^{(2)}$ の中で最も多く存在する形質ではない．しかしながら，候補集団 $\boldsymbol{C}_1^{(2)}$ には，トラス橋構造として発現される $\boldsymbol{s}_{(2)}$ の形質を持つ個体が他の候

表 4.6 部分問題 P_1に対する候補集団

					in $\boldsymbol{C}_1^{(1)}$	in $\boldsymbol{C}_2^{(1)}$	in $\boldsymbol{C}_3^{(1)}$
	γ_1	γ_2	γ_3	θ_k	0.1	0.1	0.1
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(1)}^{(1)}$:	(0.49, 0.40, 0.49)				0	0	19
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(2)}^{(1)}$:	(0.51, 0.60, 0.51)				551	545	1214
				F_k	0.33	0.33	0.33

表 4.7 橋梁形式・けた支持形式 (P_2) に関する個体分布

	γ_1	γ_2	γ_3	θ_k	in $\boldsymbol{C}_1^{(2)}$ 0.1	in $\boldsymbol{C}_2^{(2)}$ 0.1	in $\boldsymbol{C}_3^{(2)}$ 0.12
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(1)}^{(2)}$:	(0.09,	0.25,	0.02)		2 (0.1%)	14 (2%)	48 (5%)
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(2)}^{(2)}$:	(<u>0.19</u>,	0.09,	0.18)		602 (39%)	77 (13%)	78 (8%)
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(3)}^{(2)}$:	(0.16,	0.12,	0.26)		<u>657 (43%)</u>	<u>211 (35%)</u>	244 (25%)
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(4)}^{(2)}$:	(0.11,	0.25,	0.02)		78 (5%)	124 (21%)	293 (30%)
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(5)}^{(2)}$:	(0.12,	0.08,	0.14)		125 (8%)	171 (29%)	<u>305 (31%)</u>
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(6)}^{(2)}$:	(<u>0.19</u>,	0.09,	0.18)		16 (1%)	0	0
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(7)}^{(2)}$:	(0.16,	0.12,	0.21)		65 (4%)	2 (0.3%)	15 (2%)
				F_k	0.33	0.33	0.33
					0.36	0.36	0.29

補集団に比べ多く存在していることなどから各候補集団の個体分布はそれぞれの価値規準によって特徴付けられていると考えられる．

候補集団の提示に関する適合度 $F_1 = F_2 = F_3 = 1/3$ を参照するルーレット選択によって，経済性に関する候補集団 $\boldsymbol{C}_3^{(2)}$ が選ばれ，その中から連続支持の斜張橋構造 ($\hat{\boldsymbol{s}}_{(5)}^{(2)}$) が提示されたが，これは図 4.14 とは一致しないので不採用とすると，$F_3 = r_d \times 0.33 = 0.8 \times 0.33$ となる．候補集団の適合度を $(F_1 + F_2 + F_3) = 1$ となるように正規化した後に，候補集団の選択が再び行われ，感覚的デザイン性に関する候補集団から連続支持のアーチ形式を示す候補 $\boldsymbol{s}_{(3)}$ が提示された．これを採用とすると，$\theta_2 = w_a \times 0.1 = 1.2 \times 0.1$ となる．以降の部分問題では，与えられた設計仕様とここまでの部分問題で決定された属性値，支間長=300m，3 支間，連続支持，アーチ形式をもとに知識ベース推論が行われる．

同様の遺伝的操作によって，アーチ形式 $P_3^{(A)}$ (表 4.8) については$\boldsymbol{C}_2^{(3)}$ から提示されたローゼ形式，けた形式 $P_4^{(A)}$ (表 4.9) については $\boldsymbol{C}_2^{(4)}$ から提示された充腹けたが採用された．アーチリブ形式 $P_5^{(A)}$ (表 4.10) では，$\boldsymbol{C}_2^{(5)}$ からソリッドリブ形式，路面位置 $P_6^{(A)}$ (表 4.11) では，$\boldsymbol{C}_2^{(6)}$ から下路，けた部のつり構造 $P_7^{(A)}$

表 4.8 アーチ形式 ($P_3^{(A)}$) に関する個体分布

	γ_1	γ_2	γ_3	θ_k	in $\boldsymbol{C}_1^{(3)}$ 0.1	in $\boldsymbol{C}_2^{(3)}$ 0.12	in $\boldsymbol{C}_3^{(3)}$ 0.12
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(1)}^{(3)}$:	(1.00, 1.00, 1.00)				638	702	652
				F_k	0.36	0.36	0.29

表 4.9 けた形式 ($P_4^{(A)}$) に関する個体分布

	γ_1	γ_2	γ_3	θ_k	in $\boldsymbol{C}_1^{(4)}$ 0.1	in $\boldsymbol{C}_2^{(4)}$ 0.144	in $\boldsymbol{C}_3^{(4)}$ 0.12
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(1)}^{(4)}$:	(1.00, 1.00, 1.00)				549	915	637
				F_k	0.36	0.36	0.29

表 4.10 アーチリブ形式 ($P_5^{(A)}$) に関する個体分布

	γ_1	γ_2	γ_3	θ_k	in $\boldsymbol{C}_1^{(5)}$ 0.1	in $\boldsymbol{C}_2^{(5)}$ 0.173	in $\boldsymbol{C}_3^{(5)}$ 0.12
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(1)}^{(5)}$:	(0.22, 0.44, 0.10)				80	364	81
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(2)}^{(5)}$:	(0.28, 0.06, 0.40)				596	1	2302
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(3)}^{(5)}$:	(0.22, 0.44, 0.10)				0	63	67
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(4)}^{(5)}$:	(0.28, 0.06, 0.40)				0	1	479
				F_k	0.36	0.36	0.29

(表 4.12) では，$\boldsymbol{C}_3^{(7)}$ から Nielsen 形式が提示されるまで候補集団の選択と候補提示を繰返した結果，最終的に淘汰しきい値は $\theta_1 = 0.1$, $\theta_2 = 0.25$, $\theta_3 = 0.12$，候補集団の適合度は $F_1 = 0.36$, $F_2 = 0.36$, $F_3 = 0.29$ であった．

これは，与えられた設計仕様に対して図 4.14に示したような設計案 (3 支間連続補剛けたローゼアーチ橋構造物) が提案されるにあたって，感覚的デザイン性 γ_2 に対する候補の検討が進み，かつ経済性 γ_3 は他の価値規準に比べやや考慮の度合が低いことを表しているものと考えられる．得られた淘汰しきい値と候補集

表 4.11 路面形式 ($P_6^{(A)}$) に関する個体分布

	γ_1 γ_2 γ_3	θ_k	in $\boldsymbol{C}_1^{(6)}$ 0.1	in $\boldsymbol{C}_2^{(6)}$ 0.207	in $\boldsymbol{C}_3^{(6)}$ 0.12
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(1)}^{(6)}$:	(0.08, 0.07, 0.06)		0	363	100
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(2)}^{(6)}$:	(0.08, 0.10, 0.09)		0	1145	617
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(3)}^{(6)}$:	(0.08, 0.07, 0.06)		0	5	0
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(4)}^{(6)}$:	(0.08, 0.10, 0.09)		0	15	20
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(5)}^{(6)}$:	(0.08, 0.07, 0.06)		0	2	2
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(6)}^{(6)}$:	(0.08, 0.10, 0.10)		0	13	3
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(7)}^{(6)}$:	(0.08, 0.07, 0.06)		0	7	0
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(8)}^{(6)}$:	(0.08, 0.10, 0.12)		0	13	0
		F_k	0.36	0.36	0.29

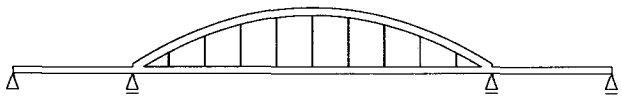
表 4.12 つり形式 ($P_7^{(A)}$) に関する個体分布

	γ_1 γ_2 γ_3	θ_k	in $\boldsymbol{C}_1^{(7)}$ 0.1	in $\boldsymbol{C}_2^{(7)}$ 0.249	in $\boldsymbol{C}_3^{(7)}$ 0.12
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(1)}^{(7)}$:	(0.41, 0.77, 0.47)		0	84	168
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(2)}^{(7)}$:	(0.59, 0.23, 0.53)		1	1463	599
		F_k	0.36	0.36	0.29

団の適合度は，設計者が陽にコントロールするものではなく，システムが設計者の支援を通して対話的に獲得するものであり，次の設計の際の初期値として用いることで，候補提示に設計者の価値観を反映することが可能となると考えられる．

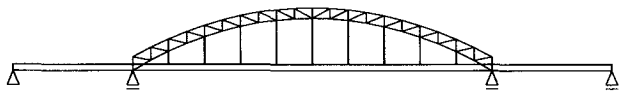
4.4.3 候補提示における飛移りの可能性の検討

前項の設計過程において，候補提示のゆらぎの様子を調べるために，アーチリブ形式に関する部分問題 $P_5^{(A)}$ を例にとる．設計仕様が与えられてからここまでの過程 $P_1 \sim P_4^{(A)}$ で，アーチ支間=300m, アーチ形式=ローゼ，けた形式=充腹けた，主構造数=2が仮定されており，それらのもとでなされる知識ベース推論からは図4.15に示すように，けた高には最大支間長の1/40と1/25，それぞれに対してはソリッドリブとブレーストリブの2つの競合候補が得られ，$\hat{\boldsymbol{s}}_{(1)}^{(5)} = \{1/40,$ solid$\}$，$\hat{\boldsymbol{s}}_{(2)}^{(5)} = \{1/40,$ braced$\}$，$\hat{\boldsymbol{s}}_{(3)}^{(5)} = \{1/25,$ solid$\}$，$\hat{\boldsymbol{s}}_{(4)}^{(5)} = \{1/25,$ braced$\}$ と表される．この段階での淘汰しきい値は $\theta_1 = 0.1, \theta_2 = 0.17, \theta_3 = 0.12$ であり，候補集団には表4.10に示す個体分布が見られた．



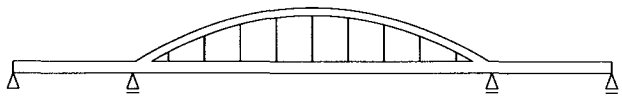
0101110101010??1101000010010????????10001??????????110???????????

(a) $\hat{\boldsymbol{s}}_{(1)}^{(5)}$ けた高1/40，ソリッドリブ



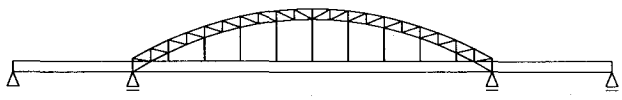
0101110101010??1101000010010????????10001??????????111???????????

(b) $\hat{\boldsymbol{s}}_{(2)}^{(5)}$ けた高1/40，ブレーストリブ



0101110101010??1101000110110????????10001??????????110???????????

(c) $\hat{\boldsymbol{s}}_{(3)}^{(5)}$ けた高1/25，ソリッドリブ



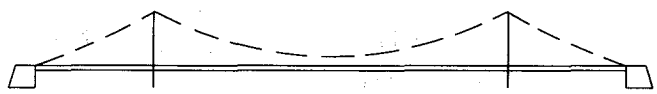
0101110101010??1101000110110????????10001??????????111???????????

(d) $\hat{\boldsymbol{s}}_{(4)}^{(5)}$ けた高1/25，ブレーストリブ

図4.15 アーチリブ形式に関する部分問題 $P_5^{(A)}$ での競合候補

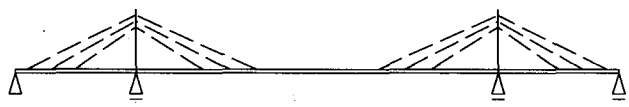
ここで，設計者が意思決定によって知識ベース推論の流れから切捨てた候補が再び提示される可能性について調べる．たとえば，他の橋梁形式をとる候補は部分問題 P_2 において決定した属性値が異なるので，通常の知識ベース推論の枠組で他の橋梁形式を検討する際には，分岐した部分問題 P_2 までさかのぼり推論をやり直すことになる．しかしながら，事例との類似に基づく候補提示の手法では，アーチ橋構造物の設計過程 $P_3^{(A)}$, $P_4^{(A)}$, $P_5^{(A)}$ で決定した属性値についても，主構造数，けた高，けた形式のように他の橋梁形式と共通または構造機能に類似性を持つ属性として表されているものは，その値をそのまま使うことが可能となる．

図 4.16(a)(b) に示した構造が発現される個体形質は，つり橋および斜張橋構造物のけた高の決定 ($P_4^{(S)}$, $P_4^{(C)}$) に至るまで知識ベース推論を満たしている．この段階において，たとえば (a) つり橋形式を表す遺伝子型では 29 ビットの遺伝子座で値が定まっていることになる．これと比較して，アーチリブ形式に関する競合候補のうちけた高 1/40 を持つ $\hat{\boldsymbol{s}}_{(1)}^{(5)}$, $\hat{\boldsymbol{s}}_{(2)}^{(5)}$ の遺伝子型は 27 ビットが一致している (図 4.16(a) 下線部) ので，遺伝子表現の上では非常に類似しているといえる．これらの遺伝子型を持つ個体は，実際に候補集団中に存在していることが確認され (表 4.13)，確率的に提示され得ることがわかる．図 4.17は，候補集団中に存在していたつり橋形式を持つ個体の例であり，図 4.16(a) に示した遺伝子型の 29 ビッ



0101110101010??1101000010010????????001????????????????????????????

(a) つり橋形式 (支間:300m)



0101110101010??1101000011011????????010????????????????????????????

(b) 斜張橋形式 (支間:300m)

図 4.16 アーチリブに関する候補提示の段階で提示され得る候補

表 4.13 アーチリブ形式に関する候補集団の個体分布

	γ_1 γ_2 γ_3	θ_k	in $\boldsymbol{C}_1^{(5)}$ 0.1	in $\boldsymbol{C}_2^{(5)}$ 0.17	in $\boldsymbol{C}_3^{(5)}$ 0.12
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(1)}^{(5)}$:	(0.22, 0.44, 0.10)		80	364	81
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(2)}^{(5)}$:	(0.28, 0.06, 0.40)		596	1	2302
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(3)}^{(5)}$:	(0.22, 0.44, 0.10)		0	63	67
$\hat{\boldsymbol{s}}_{(4)}^{(5)}$:	(0.28, 0.06, 0.40)		0	1	479
• 意思決定の後戻りを行わず提示可能な候補					
(a) つり橋形式			90	31	5
(b) 斜張橋形式			13	3	2
(c) トラスけたを持つつり橋形式			1	0	0
(d) トラス橋形式			7	0	0
		F_k	0.36	0.36	0.29

<u>0101110101010</u>00<u>1101000010010</u>1110110100<u>101</u>0110000100<u>10</u>111100101000 × 16 個体

<u>0101110101010</u>00<u>1101000010010</u>0010001000<u>101</u>0101010110<u>110</u>01001101010 × 8 個体

<u>0101110101010</u>00<u>1101000010010</u>0010110100<u>101</u>0101100101<u>111</u>00010101110 × 8 個体

<u>0101110101010</u>00<u>1101000010010</u>0010101100<u>101</u>0000011110<u>011</u>11001101010 × 6 個体

0101110101010001101000010010111011010010111001011011100010101110 × 4 個体

0101110101010001101000010010001011010010101011001011100010101001 × 4 個体

0101110101010001101000010010111110100101011000010010111100111010 × 4 個体

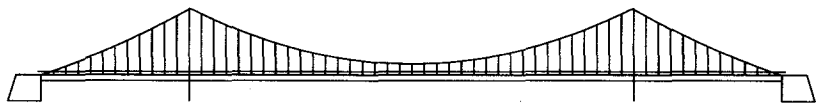
図 4.17 アーチリブ形式に関する候補集団に存在したつり橋形式 (支間長: 300m) を持つ個体 (計 90 個体，3 個体以下は省略)

トと完全に一致するが，下線部に示す遺伝子座の値はアーチリブ形式に関する部分問題 $P_5^{(A)}$ における競合候補の遺伝子型と一致しており ($P_5^{(A)}$ で参照される 34 ビット中，最も多いもので 32 ビットが一致) 類似度は高い．

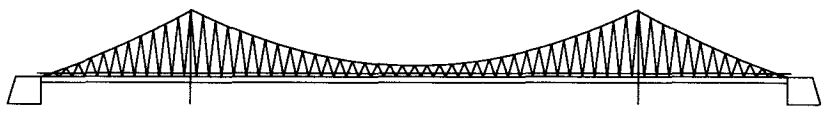
このような設計候補の提示は，意思決定過程を後戻りすることなく決定木を横に飛移るとみなせるものである．これらの飛移りとみなせる候補提示の後に設計を継続していくことで，与えられた設計仕様に対して可能な多様な設計候補の生

成が可能となる．たとえば，図 4.18は，アーチリブ形式に関する部分問題で提示された，支間 300m のつり橋形式を設計者が採用し，以降の意思決定を重ねた場合に生成された設計候補である．

また，構造機能性 γ_1 に関する候補集団 $\boldsymbol{C}_1^{(5)}$ に存在している，けた形式が異なるがここまでに決定した他の属性値が同様の個体形質 (図 4.19(a), (b), 表 4.13) も，橋梁形式の決定 P_2 まで意思決定過程を後戻りせずに提示可能であるので決定木の飛移りとみなせるものである．これらの (a) トラスけたを持つつり橋構造物や，(b) トラス橋構造物の存在は，橋梁形式の競合候補中でトラス形式が構造機能性

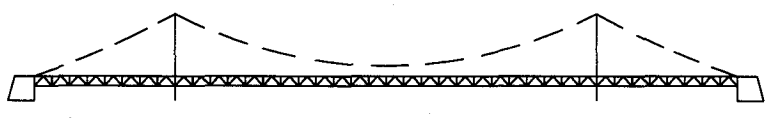


(a) 垂直つり形式



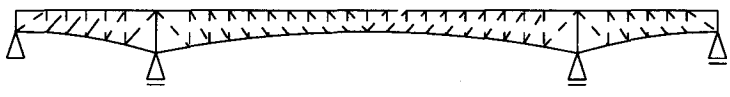
(b) 斜つり形式

図 4.18 つり橋形式を採用した場合に最終的に生成される設計候補



0101110101010??1101100010010????????001?????????????????????????????

(a) トラスけたを持つつり橋形式 (支間:300m)



0101110101010??1101101?????????????????000?????????????????????????????

(b) トラス橋形式 (支間:300m)

図 4.19 アーチリブに関する候補提示の段階で提示され得る候補 2

γ_1 に対する最大の評価値をとっていることが反映されていると考えられ，候補集団が各設計評価基準に特徴づけられていることがわかる．このような幅広い多くの候補の提示は，事例と個体形質の表現に冗長性を含む遺伝子的表現を導入したことで，見かけ上の位相が異なってもそれらの構造機能の類似性を測れることによるものと考えられる．

4.5 まとめ

概念設計段階における競合候補の評価は，第2章で取扱った感覚的デザイン性の評価にみられるように，設計評価基準が必ずしも客観的・定量的な陽な形式で示されているわけではない．したがって，設計者自身の主観的判断が重要な役割を果たしており，システムが実行可能な客観的・定量的設計評価は絶対的なものとはなり得ない．すなわち，設計者自身が幅広い可能性を検討できるような，意思決定の主体を設計者におく枠組が必要となる．しかしながら，知識ベース推論に基づく設計過程では，その決定性による競合候補の切捨てが制約となる．これに対して本章では，システムの設計評価によって生成候補の多様性を失わないように，確定的とはならないゆらぎを含む候補提示を行う枠組を示した．ここで示した枠組では，基本的には知識と事例とに基づき設計候補を生成・評価するが，その対話的な提示に不確定性をもたせ，ゆらぎを導入することで多様な設計候補を設計者に示唆する設計支援となる．

まず，知識ベース推論に基づく設計支援において，競合候補に対する設計評価を絶対的なものとみなさずに，確率的な指標として考えた．システムは設計者に対して，評価値を反映する確率に基づいて選ばれた候補を提示する．このゆらぎによって，システムの行った設計評価の意味で最も優れた設計候補だけではなく，評価値が相対的に低い候補も提示可能としておくことで，設計者に多様な設計候補を示唆することになると考えられる．また，第3章で提案した遺伝子的事例ベースを利用し，知識ベース推論によって競合候補の生成を行い，得られる候補と事例ベース中に存在する個体との類似を参照する遺伝的操作によって候補提示を行う枠組を示した．設計候補と事例との表現においては，みかけ上大きく異なるような構造形態についても，構造機能性の類似を反映する遺伝子的表現を用いている．したがって，知識に基づく推論の流れのみからは見いだせないような決定木の飛移りとみなせる多様な設計候補が提示可能となると考えられる．

これらのゆらぎを含んだ候補提示は，必ずしも設計者の負担の軽減となるものではないが，概念設計の支援では不確かな情報も含む多くの設計案を生成するこ

とによって設計者に多くの情報判断・取捨選択の機会を与えることが重要との認識に基づくものである．また，固定的な知識ベース推論に対する，組合せ的に設計候補の生成を行う事の可能な遺伝子的事例ベースの利用による候補提示のゆらぎの導入は，設計者が意識下に考慮している設計候補と，その背後に潜在的に存在している多様な設計候補とを設計者の考慮に上せる事となる．本章で示した多様な候補の提示は，創造的行為における人間の発散的思考における論理の飛躍や，一見異なっているものに潜んでいる類似性を判断する能力 [野口 1994]，問題領域を越えて事例を検索できる能力 [山口ら 1989] の取扱いとも関連するものである．このような候補提示の枠組によって，柔軟な設計支援が可能となると考えられ，単独の設計者が経験し得る設計過程よりも多くの仮想的経験を与えることで設計者の能力を向上させる効果 [Maher 1987; Chakrabarti *et al.* 1996; Soufi and Edmonds 1996] も期待される．この枠組は設計者主導の設計アシスタントシステムの補助的な機能の一つとして有効であると考えられる．

第5章

個別設計者を考慮する設計支援

5.1 はじめに

概念設計では，感覚的な要求など設計者の主観的な規準も重要な要因であり，設計者はこれに基づき経験的・試行錯誤的な満足化を行っている．すなわち，設計者自身による主観的意思決定が重要な役割を果たしている [山岡, 西田 1996]．また，この過程は，設計者が新たな事実や手順を知ることによって以前とは異なる意思決定を行う，といった進化的な動的過程 [Gorti *et al.* 1996] である．したがって，概念設計支援システムによる設計候補の評価，提示には，個別の設計者に動的に適応していく機能 [Garrett Jr. 1998] が求められる．ただし，システムの持つ価値観を設計者に過剰に適応させてしまうことは，固定的な候補提示をもたらすこととなり，最終的に生成される設計候補の多様性を奪う危険性をもたらす．

本章では，設計者への設計候補の提示と設計者の意思決定によって設計過程を進捗していく設計者主導のアシスタントシステムを基本とし，設計支援の積重ねとに応じて，候補提示の傾向を個々の設計者に適応していく枠組を提案し，ケーススタディによりその有用性を検討する．アシスタントシステムは，それぞれが独自の価値規準のもとに設計候補の評価とその表現を行う複数の候補評価エージェントを持つ．エージェントはシステムの持つ価値観によって選ばれ，それの推薦する候補が設計者に提示され，設計者はこれに対して採否の意思決定を行う．アシスタントシステムはこの結果をもとに自らの価値観を更新することで，その設計者への個性化を図る．ただし，エージェントによる候補評価の表現，候補提示を遺伝的操作によって確率的に行うことで，個別の設計者に個性化されながらも多様な候補提示を可能とすることを考慮しておく．システムの構築例には橋梁構

造物の概念設計をとりあげ，ケーススタディによって提案する手法の有効性を検討する．

5.2 概念設計における設計者の主観的価値観

設計過程では一般に，実現可能な設計候補の生成と，通常競合するこれらの候補の評価に基づく選択とにより一つの設計案が作られていく．ここで取扱う構造物の概念設計における可能設計候補の生成にあたっては，第3章に述べたように，幾何的形状だけでなく，位相も設計対象となるので，考慮すべき設計空間は広大なものとなる．また設計候補の評価にあたっては，第2章に述べたように，コストなどの定量的評価の可能なもののほか，感覚的デザイン性などのように設計者の主観的な規準に基づく定性的なものも重要な要因となっており [高梨 1991; Reich 1993]，多様な尺度からの総合的評価にならざるを得ない．このような状況では，設計者による経験的・試行錯誤的な満足化が行われており [Thurston 1991; 赤木 1991]，定型的な設計過程ではなく，設計者個人による意思決定が重要な役割を果たす非定型な側面が顕著となる．したがって，コンピュータによる概念設計支援の位置づけとしては，設計自動化システムとしてではなく，意思決定のための設計アシスタントとして，多くの情報判断・取捨選択の機会を与えることで設計者の活動を触発する役割 [Dreyfus 1979; 堀 1991; Chakrabarti and Thomas 1996] が妥当と考えられる．本論文においても，第2章から第4章に柔軟な候補提示を可能とする概念設計支援システムの枠組を提出してきた．これらは，概念設計支援システムに柔軟性を持たせるものであった．一方，概念設計の過程は，設計者が新たな事実や手順を知ることによって以前と異なる意思決定を行ったり [Alcántara 1991]，より良い設計を目指して進化していく動的な過程 [Gorti *et al.* 1996] であり，設計者自身も固定的な論理には則っていない．たとえば，同じ設計者であっても経験の積重ねによって，以前とは異なる意思決定を行うことが観察され [Atman *et al.* 1999]，概念設計支援システムには，個別の設計者に動的に適応していく機能 [Hauser and Scherer 1997; Garrett Jr. 1998] が求められる．ただし，システムの持つ価値観を設計者に過剰に適応させてしまうことは，固定的な候補提示をもたらし，最終的に生成される設計候補の多様性を先見的に奪うことになる．この

事は，設計者にとって容易に予想のつき得る狭い領域からの設計候補のみが提示されることとなり概念設計支援としては好ましいものではない．

設計過程において個別の設計者が行っている具体的な意思決定は，その設計論理を明らかにするための鍵となる．したがって，設計アシスタントシステムには，候補生成・提示と設計者による意思決定との反復からなる設計支援過程において，提示候補に対する設計者の意思決定の傾向を観察し，以降の候補提示へ反映する機能を持たせる．ただし，設計者の個性に依拠し過ぎる危険性に対しては，前章に示したようにシステムの候補提示にゆらぎを持たせ，設計者が持つ価値観からはずれるようなものも提示可能としておくことが有効であると考えられる．このゆらぎは，設計者に対して視点の切替えともいうべき効果をもたらし，設計者に新規な候補の検討を促す意味でも重要となる．すなわち，設計アシスタントシステムには，大域的には個別の設計者に適応的であるが，局所的には，候補提示のゆらぎによって多様な候補の検討を設計者の考慮に上せる機能が求められる．

このような設計支援の枠組による設計者とアシスタントシステムの対話の反復により，システムは設計者の個性を自らの候補提示に取込んでいくと共に，設計者は設計候補の取捨を通じて，漠然と持っていた自らの選好を明確にしていくことが可能となる (図 5.1)．すなわち，ここで示す個性化は，アシスタントシステムのそれであると同時に設計者のそれであるともいえ，設計者自身の動的な特性を考慮した概念設計支援の枠組である．

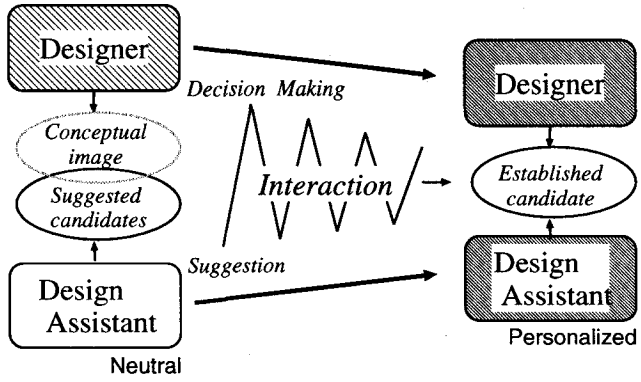


図 5.1 概念設計における個性化の模式図

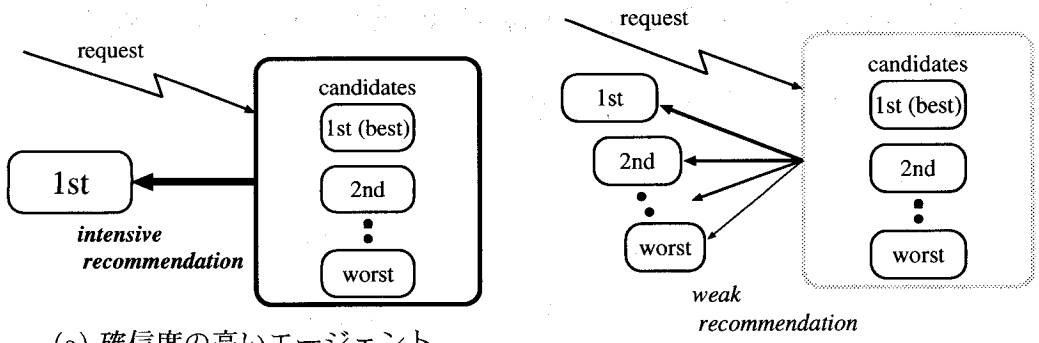
5.3 設計者との対話による設計支援システムの個性化

5.3.1 多価値規準からの候補評価

設計対象物は属性値 s_i $(i = 1, \cdots, I_s)$ の集合 $\boldsymbol{s}$ として表され，全ての値が決定されると，一つの設計案が定まる．提案する概念設計アシスタントシステムでは，設計対象物の J_s $(J_s < I_s)$ 個の主要属性毎に設計過程を区切り，段階的に設計候補の生成・提示を行い，設計者による採否の意思決定を促す．各段階を部分問題 P_J $(J = 1, \cdots, J_s)$ と呼び，部分問題 P_J では，P_{J-1} までに設計者によって定められた属性値と設計要求との関連を満たす属性値全てを，ルールベース推論によって生成し，これらを設計候補とする．

設計過程では機能，コスト，デザイン性など複数の価値規準 $\{\gamma_1, \gamma_2, \cdots, \gamma_K\}$ が考えられる．第2章では，これらの複数の価値規準からの評価値を重み付け平均により総合評価としていたが，設計者自身に重みの設定を行わせる事は，システムの価値観を設計者の価値観に過剰に適応させることになり不適当となる．ここでは，競合候補に対して単一の価値規準 γ_k から設計評価を行う候補評価エージェント A_k を考え，これを各々の価値規準に対して準備する $(A_k, k = 1, \cdots, K)$．各部分問題において，それぞれのエージェントは自らの評価のみによって競合候補を序列付ける．アシスタントシステムから設計者に推薦される候補は，エージェントによる評価値に基づき選ばれるが，その度合は評価値に確率的に比例する．すなわち，評価の大きなものほど推薦されやすいといった応答となる．ただし，確信度 θ_k と呼ぶパラメータによってエージェントの応答が調節され，確信度の高い場合には，γ_k からの評価の意味で第一候補が強く推薦され，逆に低い場合には評価値の低い競合候補も推薦される確率が高くなる (図 5.2)．

設計者へ候補の提示を行うエージェント A_{k^*} は，各エージェント A_k の持つ候補提示適合度 F_k をもとに確率的に選択され，その推薦する候補が提示される．この候補に対して設計者が意思決定を行い，採用とした場合にはその候補を推薦したエージェント A_{k^*} は確信度 θ_{k^*} を大きくし，次の部分問題へと設計が進捗する．不採用とした場合には，そのエージェントの候補提示適合度 F_{k^*} を減じた後，



(a) 確信度の高いエージェント

(b) 確信度の低いエージェント

図 5.2 エージェントによる候補の推薦

エージェント選択に戻り，再び候補提示を行う．エージェントの評価確信度 $\{\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_K\}$ および候補提示適合度 $\{F_1, F_2, \cdots, F_K\}$ は，設計の進捗と共に変動していく．

評価確信度や候補提示適合度には，設計者が行った意思決定の際にみられる価値観が反映されているので，これを以降の設計支援に用いることで，個々の設計者への個性化がなされる．また，エージェントの選択およびエージェントからの候補の推薦は確率的なものであるので，設計者の意思決定の負担を直ちに軽減するというわけではないが，採用・不採用の意思決定を重ねることで設計者は自分が漠然と持っている意図，すなわち設計者に内在する個性を明確化することも期待できる．

5.3.2 複数エージェントによる個性の表現

部分問題 P_J でルールベース推論によって得られる Z 個の競合候補を，識別番号 z を用いて部分属性値集合 $\boldsymbol{s}_{(z)}^{(J)}$ $(z = 1, \cdots, Z)$ と表す．競合候補 $\boldsymbol{s}_{(z)}^{(J)}$ を，エージェント A_k の価値規準 γ_k から評価した値を，$v_{k(z)}$ と表す．まず最初の部分問題 P_1 において，候補評価エージェント A_k は過去の設計事例を個体群として保持している遺伝子的事例ベースを初期個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(1)[0]}$ $(=\{\boldsymbol{c}_{1k}^{[0]}, \cdots, \boldsymbol{c}_{Nk}^{[0]}\})$ として用いる．これは個体群中の頻度が過去に実現された設計事例の実績を反映しているものである．エージェントは個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(J)[t]}$ に対して交叉・突然変異の遺伝的操作を行い，

自らの設計評価を反映する増殖・淘汰を行う．個体群の上添字 (J) は部分問題を，$[t]$ は遺伝的操作における世代を示している．個体 $\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}$ $(\in \boldsymbol{C}_k^{(J)[t]})$ の適合度 g_n には，ルールベースから生成された競合候補のうち最も類似度の大きい $\boldsymbol{s}_{(z^*)}^{(J)}$ に注目し，それとの類似度 $\rho(\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}, \boldsymbol{c}_{(z^*)}^{(J)})$ と，エージェント A_k からの評価 $v_{k(z^*)}$ との積

$$\begin{aligned} g_n(\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}) &= \rho(\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}, \boldsymbol{c}_{(z^*)}^{(J)})\, v_{k(z^*)} \\ z^* &= \arg\max_z \rho(\boldsymbol{c}_{nk}^{[t]}, \boldsymbol{c}_{(z)}) \end{aligned} \tag{5.1}$$

を用いる．なお $\boldsymbol{c}_{(z^*)}^{(J)}$ は $\boldsymbol{s}_{(z^*)}^{(J)}$ の遺伝子型である．

個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(J)[t]}$ では，交叉率 q_c の一点交叉，突然変異率 q_m の突然変異の遺伝的操作がなされ，次の世代 $[t+1]$ へ生き残る個体は，個体適合度 g_n の比 $g_n/(g_1+\cdots+g_N)$ を選択確率としたルーレット選択により決定される．これらの操作は，集団中で最も高い適合度を持つ個体の頻度が，しきい値 $\theta_k(0<\theta_k<1)$ を越える世代で打切るものとし，このときの個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(J)[T]}$ を部分問題 P_J に関する候補評価個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(J)}$ とする．形成された個体群では，価値規準 γ_k に対する評価の高い競合候補に類似の個体ほど頻度が高くなり，エージェント A_k からの評価が，個体分布として表現されている．ただし，淘汰しきい値 θ_k は，5.3.1 項に述べたエージェントの確信度に相当し，これが高ければ個体群中の頻度分布に偏りを生じ，低ければ偏りは小さい．

5.3.3 候補評価の遺伝子的表現

構造物の概念設計の段階では，位相と幾何とが同時に設計変数となり，位相が異なる場合にはその属性空間は大きく異なる．ここでも，第 3 章に述べた機能的類似性を考慮した設計対象物の遺伝子的表現によって染色体として統一的に取扱う．また，設計対象物の属性を表す染色体から構成される個体群を作り，ある属性を持つ設計対象物の評価を，その属性を持つ個体の群中の頻度として集団的に表現する．

設計対象物の属性値集合 $\boldsymbol{s}=\{s_1, \cdots, s_{I_s}\}$ の大きさは，設計対象物のとる位相によって異なる．ここでは位相的特徴も属性として含め，$\boldsymbol{s}$ が固定長 L のビット

列として表される染色体 $\boldsymbol{c} = \{c_1 \ldots c_L\}$ $(c_\ell \in \{0,1\})$ の表現型であると考える．位相の差異は，$\boldsymbol{c}$ に含まれる発現支配遺伝子の値によって，表現型に発現される部分と発現されない部分とが変化することで表現する．また，位相が異なる場合であっても機能に対する寄与が類似の属性は，同じ遺伝子座から発現されるものとする．

個体群中の頻度を求める際には，属性値が完全に一致する個体の数ではなく，類似の個体が個体群中に存在する比率を用いる．このとき位相の異なる設計対象物では，比較すべき属性が必ずしも一対一に対応しないので，個体間の類似度には，3.3.1 項と同様に染色体間のビットパターンの一致，すなわち，それぞれの染色体表現 $\boldsymbol{c}_i$, $\boldsymbol{c}_j$ にみられる一致パターンのそれぞれの長さに注目し，個体表現に基づく類似度 $\rho(\boldsymbol{c}_i, \boldsymbol{c}_j, \beta)$ (式 (3.1)) を用いる．ただし，一致パターン長の強調パラメータ β は 2 とし，以降類似度 $\rho(\boldsymbol{c}_i, \boldsymbol{c}_j)$ と引数 β を略して記す．ある設計対象物 $\boldsymbol{s}$ の個体群中 $\boldsymbol{C}$ $(= \{\boldsymbol{c}_1, \cdots, \boldsymbol{c}_N\})$ における頻度も同様に，$\boldsymbol{s}$ の遺伝子型 $\boldsymbol{c}$ と群中の染色体 $\boldsymbol{c}_i$ $(i = 1, \cdots, N)$ との類似度の個体群全体における総和 (式 (3.2)) を用いる．それぞれのエージェント A_k は，個体群 $\boldsymbol{C}_k$ を持ち，自身の持つ価値規準 γ_k からの評価を個体頻度として表現する．

5.3.4 対話による主観的価値観の獲得と候補提示への反映

図 5.3 にアシスタントシステムと設計者の対話の積重ねによる主観的価値観の獲得の流れを示す．部分問題 P_J においてアシスタントシステムは，全てのエージェント A_k を対象に，それぞれが持つ候補提示に関する適合度 F_k の比 $F_k/(F_1+\cdots+F_K)$ を選択確率とするルーレット選択により，設計者に候補を提示するエージェントを選ぶ．選ばれたエージェント A_{k^*} は自分の持つ候補評価個体群 $\boldsymbol{C}_{k^*}^{(J)}$ から，ランダムに一つの個体 $\boldsymbol{c}_{k^*}$ を抽出し，その表現型を候補として設計者に提示する．

設計者が提示候補を不採用とした場合，その個体を推薦したエージェントの候補提示に関する適合度を F_{k^*} から $r_d F_{k^*}$ へと適合度更新係数 r_d $(0 < r_d < 1)$ を用いて減じる．その後，エージェントのルーレット選択からやり直すことで，エー

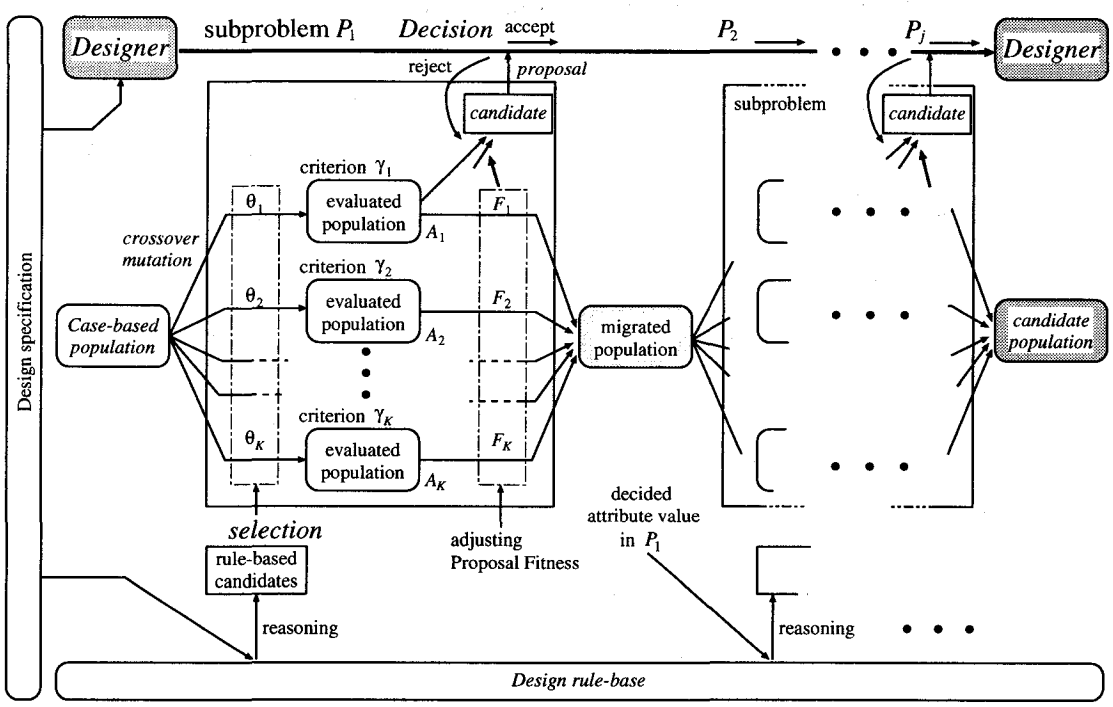


図 5.3 複数エージェントによる候補生成の模式図

ジェント A_{k^*} が選択される確率は小さくなる．設計者が提示候補を採用する場合，この部分問題 P_J に属する設計対象物の属性 $s_i^{(J)}$ の値を採用された競合候補の値に確定し，次の部分問題 P_{J+1} へと設計を進める．

部分問題 P_{J+1} における各エージェントの初期個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(J+1)[0]}$ には，P_J で各エージェント A_k $(k = 1, \cdots, K)$ が生成した候補評価個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(J)}$ から $F_\kappa/(F_1 + \cdots + F_K) \times N$ 個体ずつランダムに選び，ひとつの個体群 $\boldsymbol{C}_m^{(J)}$ に移住させたものを用いる．この個体群には，複数の価値規準から選ばれてきた候補が存在するので，部分問題 P_{J+1} で候補提示に至るまでの交叉等の遺伝的操作において，複数の価値規準に対する良さを持つ個体の生成が期待できる．また，部分問題 P_J で候補を提示し採用されたエージェントは，以降の部分問題での確信を深めるために，候補評価個体群生成における淘汰しきい値をθ_{k^*}から $w_a\theta_{k^*}$ $(w_a > 1)$ へと増やす．

5.4 設計者別の構造物の概念設計支援

橋梁構造物の2次元スケルトン設計を例にとり概念設計アシスタントシステムを構築する．競合候補の評価における価値規準には，構造機能性 (γ_1)，感覚的デザイン性 (γ_2)，経済性 (γ_3) を考え，3つのエージェント A_1, A_2, A_3 を準備する．また，競合候補の生成およびそれらの評価に用いるルールには，橋梁構造物の設計に関する文献を参照し整理したものを用いる (図5.4).

5.4.1 設計支援過程におけるエージェント個体群の推移

設計仕様として橋長500m，幅員20m，橋下障害幅300mの鋼製道路橋を与える場合 (図5.5) を例に設計支援の様子を示す．また，感覚的デザイン性 (γ_2) の要求としては「優美さ」を考え，競合候補の評価には第2章に示した設計事例の感覚的評価に基づく手法を用いる．遺伝子的事例ベース $\boldsymbol{C}_k^{(1)[0]}$ には，設計事例集より収集した211の設計事例を参照し3.4.2項で生成した個体群 (個体数5000，個体長65ビット) を用いた．なお，各エージェントが持つ個体群のサイズも5000としている．

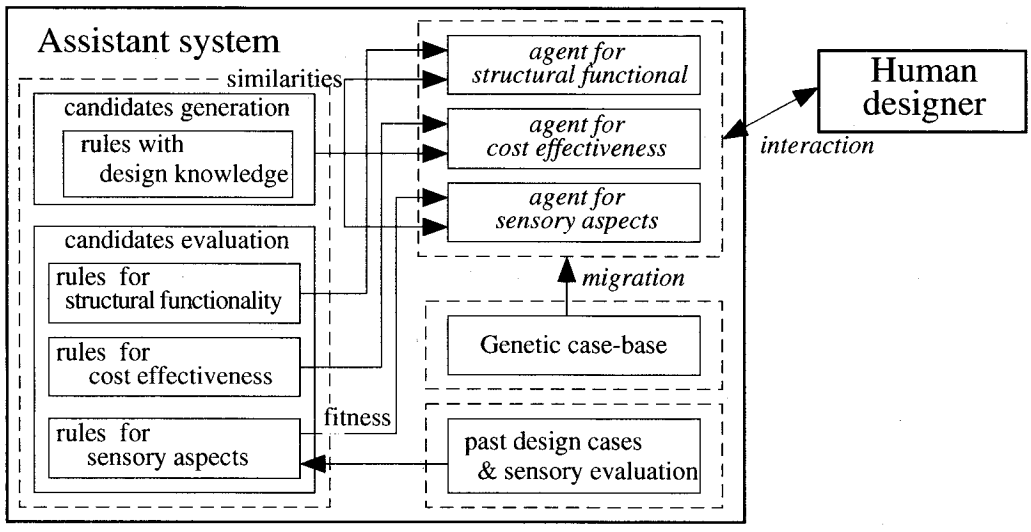


図5.4 個別設計者を考慮する設計アシスタントシステム構成図

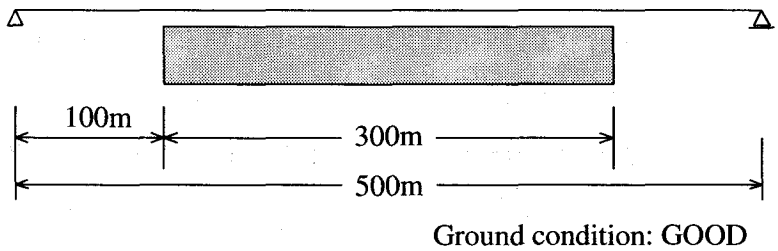


図 5.5 与えた設計仕様

エージェントによる候補評価個体群の生成における遺伝的操作のパラメータは，交叉率 $q_c = 0.3$，突然変異率 $q_m = 0.05$ とした．各エージェントが持つパラメータの初期値としては中立なものを考え，候補提示適合度には $F_1 = F_2 = F_3 = 1/3$，淘汰しきい値には $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0.1$ とそれぞれ等しい値を与えた．設計者が候補を不採用としたときの適合度更新係数は $r_d = 0.8$，候補を採用するとしたときの淘汰しきい値更新係数は $w_a = 1.2$ とし一定とする．競合候補の提示にあたっては，ルールに基づき生成された候補のみからとし，ここでは 4.4 節に示した決定木の飛移りは行われないものとした．

P.140〜P.147にわたって示している図 5.6〜図 5.12は，ある設計者 I に対するアシスタント I の設計支援過程において，競合候補 $\boldsymbol{s}_{(z)}^{(J)}$ とその評価 $\boldsymbol{v}_{(z)}$，および個体群に含まれる各個体の評価値空間 (v_1, v_2, v_3) での分布を，支間割に関する部分問題 P_1 からアーチ橋構造物のつり形式に関する部分問題 P_7 について示したものである．図中 (1) では，設計者により採用された候補が，アシスタント I からの何回目の提示でどのエージェント A_k から推薦されたかを付記している．また，それぞれの競合候補について，移住個体群 $\boldsymbol{C}_m^{(J)}$ に存在している個体数を示している．これは，その時点におけるエージェント適合度 F_k，淘汰しきい値 θ_k のもとでのアシスタントシステムによる競合候補の評価を表すものである．図中 (2) に示した個体分布のうち，左側がそれぞれの部分問題 P_J における初期個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(J)[0]}$，右側が設計者の採用の意思決定がなされた後に生成される移住個体群 $\boldsymbol{C}_m^{(J)}$ での分布である．部分問題 P_J における $\boldsymbol{C}_m^{(J)}$ と P_{J+1} における $\boldsymbol{C}_k^{(J+1)[0]}$ とは同じ個

体群であるが，個体の評価は，それぞれの部分問題において，その部分問題に属する属性値のみから行うので，部分問題毎に評価値空間上の分布は異なる．

支間割に関する部分問題 P_1 (図 5.6) では，設計仕様より競合候補 $\boldsymbol{s}_{(1)}^{(1)}$ (3 支間，支間長 300m), $\boldsymbol{s}_{(2)}^{(1)}$ (1 支間，支間長 500m) がルールに基づき生成・評価されている．各エージェントは遺伝子的事例ベース個体群から，それぞれの淘汰しきい値 $\theta_1 = 0.1, \theta_2 = 0.1, \theta_3 = 0.1$ のもとに 5.3.2 項に述べた遺伝的操作を行い候補評価個体群を形成する．ここでは，2 つの競合候補の評価がほぼ同程度であるのに対して，個体分布としてみた場合には $\boldsymbol{s}_{(1)}^{(1)}$ を持つ個体が多く存在していることが分かる．これは，与えられた設計仕様に対して実設計事例では 3 支間で支持する形式が多いことを反映していると考えられる．設計者への提示では，候補提示適合度 $F_1 = F_2 = F_3 = 1/3$ のもとで，1 度目に経済性 (γ_3) に関するエージェント A_3 が選択され，それの持つ候補評価集団から $\boldsymbol{s}_{(1)}^{(1)}$ の形質を持つ個体がランダムに選

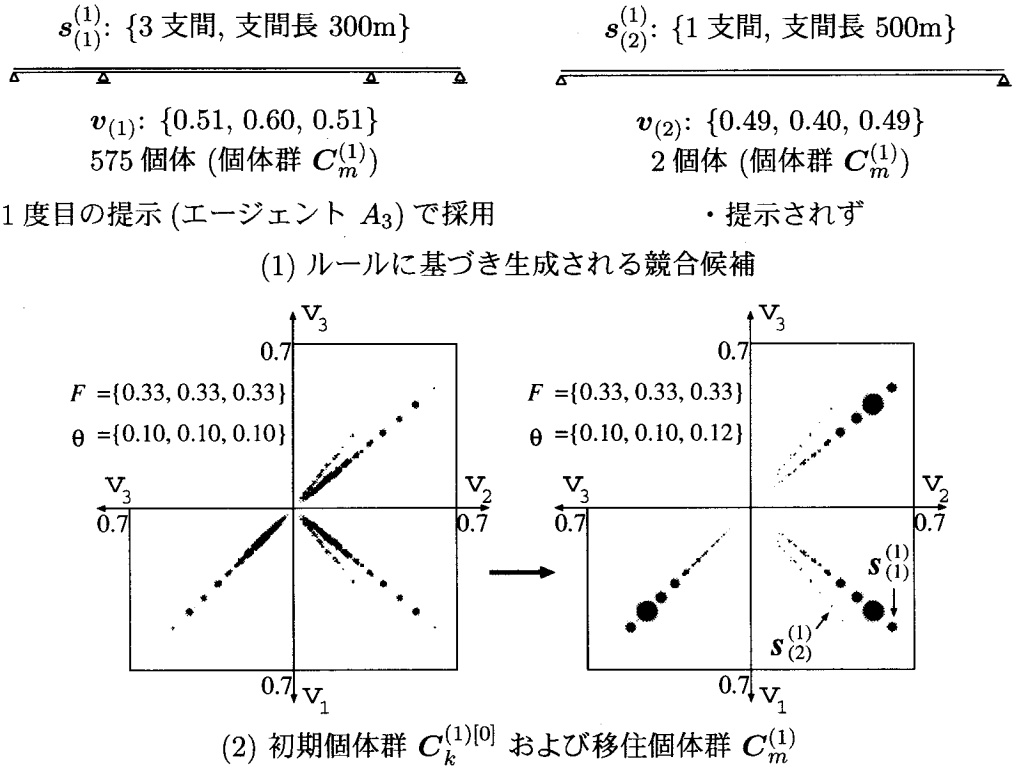


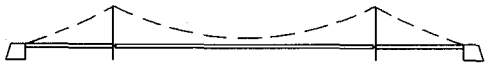
図 5.6 支間割に関する部分問題 P_1 における個体分布 (アシスタント I)

ばれた後に提示された．これを設計者は採用としたので，エージェント A_3 に対する淘汰しきい値 θ_3 を w_a 倍し，$\theta = \{0.1, 0.1, 0.12\}$ として次の橋梁形式に関する部分問題 P_2 へと設計が進捗された．このとき，P_2 の初期個体群となる移住個体群 $\boldsymbol{C}_m^{(1)}$ へは，各エージェントからそれぞれの候補提示適合度 F_k に比例した 1666, 1667, 1667 個体がランダムに選ばれ，移住させられた．

橋梁形式に関する部分問題 P_2 (図 5.7) では，P_1 で生成された移住個体群 $\boldsymbol{C}_m^{(1)}$ が初期個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(2)[0]}$ となる．橋梁形式に関して，設計仕様と P_1 で決定された属性値を満たす競合候補はルールより図 5.7(1) に示す 7 通りの形式が得られた．各エージェントは初期個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(2)[0]}$ から，それぞれの淘汰しきい値 $\theta_1 = 0.1$, $\theta_2 = 0.1$, $\theta_3 = 0.12$ のもとに候補評価個体群を形成する．設計者へは，1 度目に構造機能性 (γ_1) に関するエージェント A_1 が選択され，$\boldsymbol{s}_{(2)}^{(2)}$ (連続支持，トラス形式) の候補が提示されたが，設計者に不採用とされた．エージェント A_1 の候補提示適合度 F_1 が r_d 倍され，$F_1 = 0.27$, $F_2 = 0.33$, $F_3 = 0.33$ を総和が 1 になるように正規化した $F_1 = 0.29$, $F_2 = 0.36$, $F_3 = 0.36$ が次のエージェント選択の際の候補提示適合度となる．2 度目の候補提示では，感覚的デザイン性 (γ_2) に関するエージェント A_2 から $\boldsymbol{s}_{(3)}^{(2)}$ (連続支持，アーチ形式) の候補が選択され，設計者はこれを採用とした．したがって，エージェント A_2 に対する淘汰しきい値 θ_2 が増加され，$\theta = \{0.10, 0.12, 0.12\}$ として次のアーチ支間長に関する部分問題 P_3 へと設計が進捗される．移住個体群 $\boldsymbol{C}_m^{(2)}$ へはそれぞれのエージェントが持つ個体群より，候補提示適合度に比例した 1428, 1786, 1786 個体ずつ移住させられた．

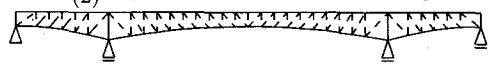
アーチ支間長，アーチ形式に関する部分問題 P_3, P_4 (図 5.8, 5.9) では，ルールベース推論からはそれぞれ一つの競合候補，$\boldsymbol{s}_{(1)}^{(3)}$ (アーチ支間長 300m), $\boldsymbol{s}_{(1)}^{(4)}$ (ローゼ形式) のみが生成された．部分問題 P_3 では，エージェント A_2 から $\boldsymbol{s}_{(1)}^{(3)}$ が提示され採用となり，淘汰しきい値は $\theta = \{0.10, 0.14, 0.12\}$ となる．移住個体群 $\boldsymbol{C}_m^{(3)}$ へは，候補提示適合度に比例した 1428, 1786, 1786 個体ずつ移住させられた．部分問題 P_4 では，エージェント A_1 から $\boldsymbol{s}_{(1)}^{(4)}$ が提示され，$\theta = \{0.12, 0.14, 0.12\}$ となり，移住個体群 $\boldsymbol{C}_m^{(4)}$ へは，候補提示適合度に比例した 1428, 1786, 1786 個体ずつ移住させられた．

$s^{(2)}_{(1)}$: { 単純支持, つり橋形式 }



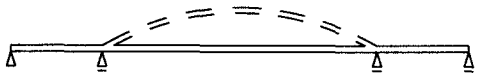
$v_{(1)}$: {0.09, 0.25, 0.02}
24 個体 (個体群 $C^{(2)}_m$)
・提示されず

$s^{(2)}_{(2)}$: { 連続支持, トラス形式 }



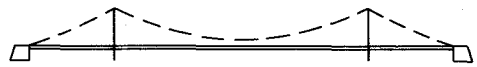
$v_{(2)}$: {0.19, 0.09, 0.18}
155 個体 (個体群 $C^{(2)}_m$)
・1 度目の提示 (A_1) で不採用

$s^{(2)}_{(3)}$: { 連続支持, アーチ形式 }



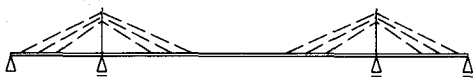
$v_{(3)}$: {0.16, 0.12, 0.26}
440 個体 (個体群 $C^{(2)}_m$)
・2 度目の提示 (A_2) で採用

$s^{(2)}_{(4)}$: { 連続支持, つり形式 }



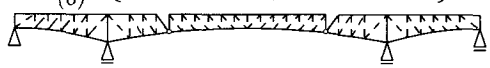
$v_{(4)}$: {0.11, 0.25, 0.02}
172 個体 (個体群 $C^{(2)}_m$)
・提示されず

$s^{(2)}_{(5)}$: { 連続支持, 斜張形式 }



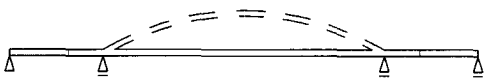
$v_{(5)}$: {0.12, 0.08, 0.14}
82 個体 (個体群 $C^{(2)}_m$)
・提示されず

$s^{(2)}_{(6)}$: { 片持ち支持, トラス形式 }



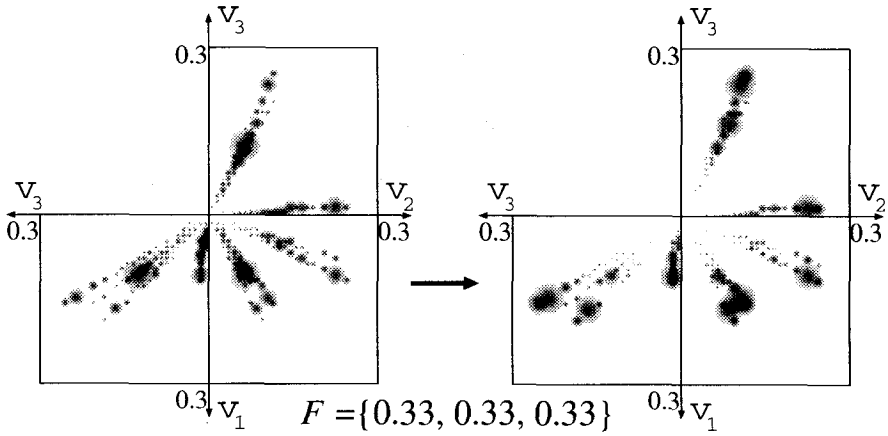
$v_{(6)}$: {0.19, 0.09, 0.18}
0 個体 (個体群 $C^{(2)}_m$)
・提示されず

$s^{(2)}_{(7)}$: { 片持ち支持, アーチ形式 }



$v_{(7)}$: {0.16, 0.12, 0.21}
30 個体 (個体群 $C^{(2)}_m$)
・提示されず

(1) ルールに基づき生成される競合候補

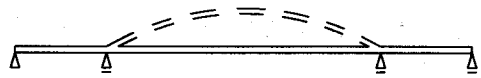


F ={0.33, 0.33, 0.33}
θ ={0.10, 0.10, 0.12}

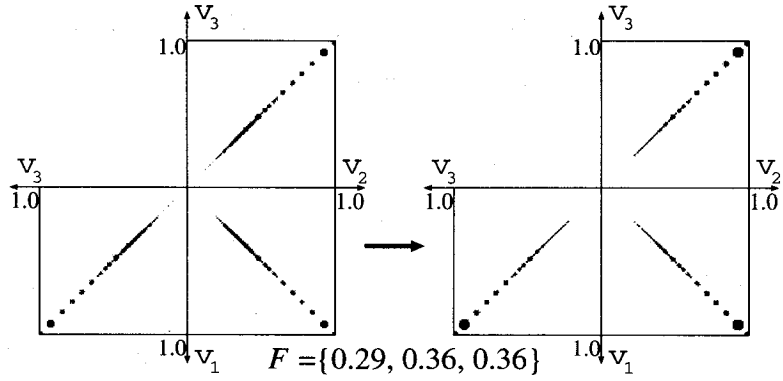
(2) 初期個体群 $C^{(2)[0]}_k$ および移住個体群 $C^{(2)}_m$

図 5.7 橋梁形式に関する部分問題 P_2 における個体分布 (アシスタント I)

$s^{(3)}_{(1)}$: { アーチ支間長 300m}



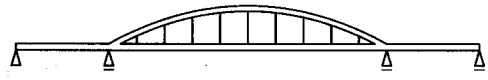
$v_{(1)}$: {1.00, 1.00, 1.00}
728 個体 (個体群 $C^{(3)}_m$)
・1 度目の提示 (A_2) で採用
(1) ルールに基づき生成される競合候補



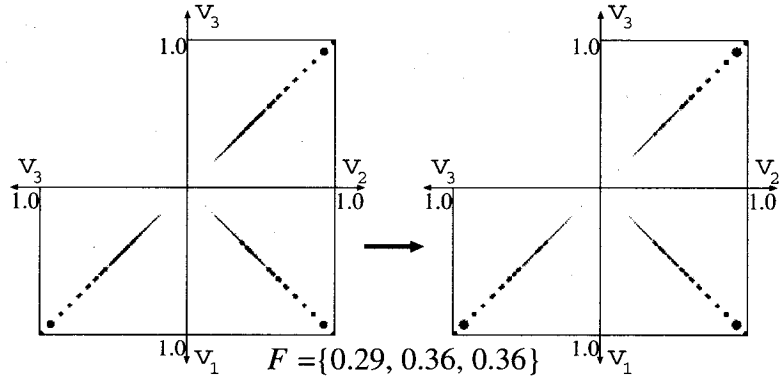
F ={0.29, 0.36, 0.36}
θ ={0.10, 0.12, 0.12}
(2) 初期個体群 $C^{(3)[0]}_k$ および移住個体群 $C^{(3)}_m$

図 5.8 アーチ支間長に関する部分問題 P_3 における個体分布 (アシスタント I)

$s^{(4)}_{(1)}$: { ローゼ形式 }



$v_{(1)}$: {1.00, 1.00, 1.00}
774 個体 (個体群 $C^{(4)}_m$)
・1 度目の提示 (A_1) で採用
(1) ルールに基づき生成される競合候補



F ={0.29, 0.36, 0.36}
θ ={0.10, 0.14, 0.12}
(2) 初期個体群 $C^{(4)[0]}_k$ および移住個体群 $C^{(4)}_m$

図 5.9 アーチ形式に関する部分問題 P_4 における個体分布 (アシスタント I)

リブ形式に関する部分問題 P_5 (図5.10) では，けた高とリブ形式に関する決定が行われる．ここまでに決定された属性値を満たす競合候補は，ルールより図5.10(1) に示す4通りとなる．これらの評価は，感覚的デザイン性に関してはソリッドリブを持つ候補 $\boldsymbol{s}^{(5)}_{(1)}$, $\boldsymbol{s}^{(5)}_{(3)}$ が優れ，構造機能性，経済性に関してはブレーストリブを持つ候補 $\boldsymbol{s}^{(5)}_{(2)}$, $\boldsymbol{s}^{(5)}_{(4)}$ が優れている．各エージェントは淘汰しきい値 $\theta_1 = 0.12$, $\theta_2 = 0.14$, $\theta_3 = 0.12$ のもとに候補評価個体群を形成する．候補提示の経過は，1回目にエージェント A_1 から $\boldsymbol{s}^{(5)}_{(2)}$ (けた高 1/40, ブレーストリブ) が不採用となっ

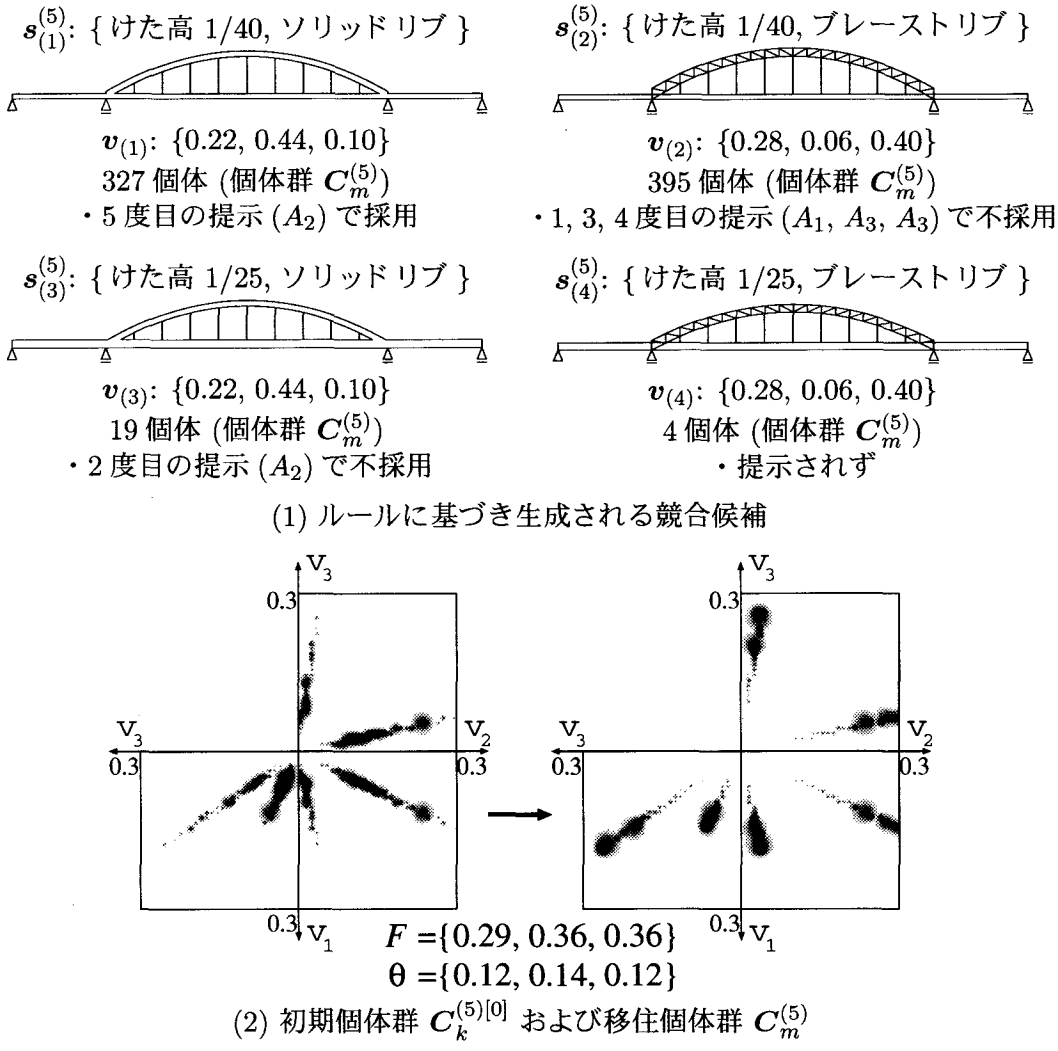


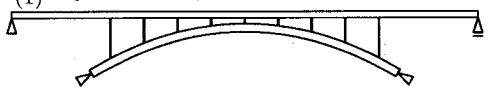
図5.10 リブ形式に関する部分問題 P_5 における個体分布 (アシスタント I)

た．正規化後の候補提示適合度 $F = \{0.24, 0.38, 0.38\}$ を用いた 2 回目の候補提示では A_2 から $\boldsymbol{s}_{(3)}^{(5)}$ (けた高 1/25, ソリッドリブ) が提示されたが不採用となった．3 回目，4 回目の候補提示ではそれぞれ $F = \{0.26, 0.33, 0.41\}$ として選ばれた A_3 からの $\boldsymbol{s}_{(2)}^{(5)}$，$F = \{0.29, 0.36, 0.36\}$ として選ばれた A_1 からの $\boldsymbol{s}_{(2)}^{(5)}$ が不採用となった．候補淘汰適合度が $F = \{0.24, 0.38, 0.38\}$ となった 5 回目の候補提示では，エージェント A_2 から $\boldsymbol{s}_{(1)}^{(5)}$ (けた高 1/40, ソリッドリブ) が提示され設計者はこれを採用とした．その結果，淘汰しきい値 $\theta = \{0.12, 0.17, 0.12\}$ となり，次の路面形式に関する部分問題 P_6 へと設計が進捗される．移住個体群 $\boldsymbol{C}_m^{(5)}$ へはそれぞれのエージェントが持つ個体群より，候補提示適合度に比例した 1212, 1894, 1894 個体ずつ移住させられた．

路面形式に関する部分問題 P_6 (図 5.11) では，ライズ，リブ高，路面形式の決定が行われる．ここまでに決定された属性値を満たす競合候補は，ルールより図 5.11(1) に示す 8 通りである．これらの評価は，構造機能性ではいずれの候補も変らず，感覚的デザイン性に関しては下路形式の候補 $\boldsymbol{s}_{(2)}^{(6)}$, $\boldsymbol{s}_{(4)}^{(6)}$, $\boldsymbol{s}_{(6)}^{(6)}$, $\boldsymbol{s}_{(8)}^{(6)}$ が優れ，経済性に関しては下路形式でリブ高の大きな候補 $\boldsymbol{s}_{(6)}^{(6)}$, $\boldsymbol{s}_{(8)}^{(6)}$ が優れている．各エージェントは淘汰しきい値 $\theta_1 = 0.12$, $\theta_2 = 0.17$, $\theta_3 = 0.12$ のもとに候補評価個体群を形成する．候補提示の経過は，1 回目にエージェント A_3 から $\boldsymbol{s}_{(8)}^{(6)}$ (ライズ 1/8, リブ高 1/25, 下路形式) が不採用となった．正規化後の候補提示適合度 $F = \{0.26, 0.41, 0.33\}$ を用いた 2 回目の候補提示では A_3 から $\boldsymbol{s}_{(6)}^{(6)}$ (ライズ 1/7, リブ高 1/25, 下路形式) が提示されたが不採用となった．3 回目の候補提示では，$F = \{0.28, 0.44, 0.28\}$ として選ばれたエージェント A_2 から $\boldsymbol{s}_{(2)}^{(6)}$ (ライズ 1/7, リブ高 1/45, 下路形式) が提示され，設計者はこれを採用とした．その結果，淘汰しきい値 $\theta = \{0.12, 0.21, 0.12\}$ となり，次のつり形式に関する部分問題 P_7 へと設計が進捗される．移住個体群 $\boldsymbol{C}_m^{(6)}$ へはそれぞれのエージェントが持つ個体群より，候補提示適合度に比例した 1403, 2193, 1404 個体ずつ移住させられた．

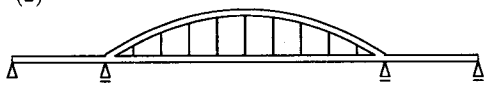
アーチ橋に対する最後の部分問題 P_7 では，ルールに基づき生成された競合候補は図 5.12(1) に示す 2 通りである．これらの評価は，垂直つり形式 $\boldsymbol{s}_{(1)}^{(7)}$ は感覚的デザイン性 γ_2 に優れ，斜つり形式 $\boldsymbol{s}_{(2)}^{(7)}$ は構造機能性 γ_1，経済性 γ_3 に優れる

$s^{(6)}_{(1)}$: { ライズ 1/7, リブ高 1/45, 上路 }



$v_{(1)}$: {0.13, 0.11, 0.10}
52 個体 (個体群 $C^{(6)}_m$)
・提示されず

$s^{(6)}_{(2)}$: { ライズ 1/7, リブ高 1/45, 下路 }

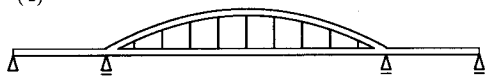


$v_{(2)}$: {0.13, 0.14, 0.14}
185 個体 (個体群 $C^{(6)}_m$)
・3 度目の提示 (A_2) で採用

$s^{(6)}_{(3)}$: { ライズ 1/8, リブ高 1/45, 上路 }

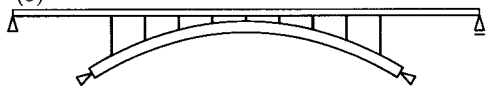
$v_{(3)}$: {0.13, 0.11, 0.10}
0 個体 (個体群 $C^{(6)}_m$)
・提示されず

$s^{(6)}_{(4)}$: { ライズ 1/8, リブ高 1/45, 下路 }



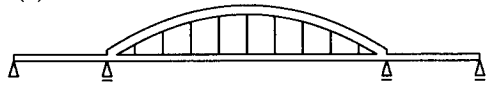
$v_{(4)}$: {0.13, 0.14, 0.14}
38 個体 (個体群 $C^{(6)}_m$)
・提示されず

$s^{(6)}_{(5)}$: { ライズ 1/7, リブ高 1/25, 上路 }



$v_{(5)}$: {0.13, 0.11, 0.10}
0 個体 (個体群 $C^{(6)}_m$)
・提示されず

$s^{(6)}_{(6)}$: { ライズ 1/7, リブ高 1/25, 下路 }

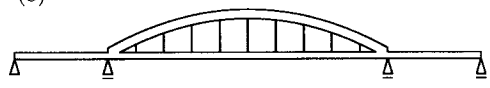


$v_{(6)}$: {0.13, 0.14, 0.16}
102 個体 (個体群 $C^{(6)}_m$)
・2 度目の提示 (A_3) で不採用

$s^{(6)}_{(7)}$: { ライズ 1/8, リブ高 1/25, 上路 }

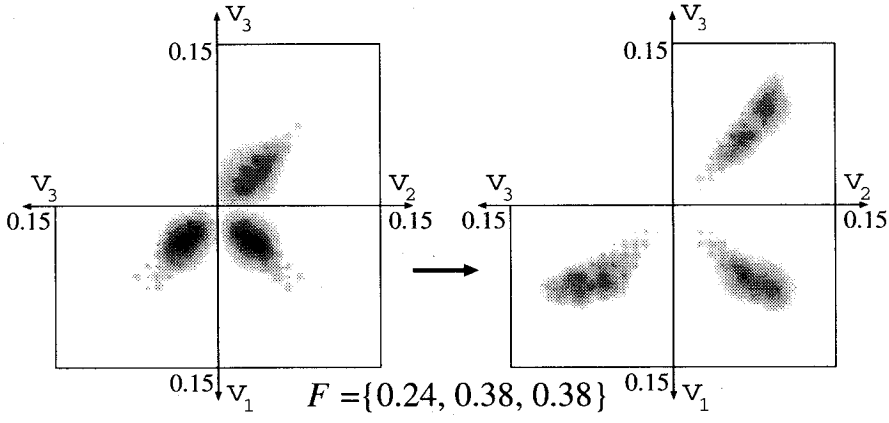
$v_{(7)}$: {0.13, 0.11, 0.10}
0 個体 (個体群 $C^{(6)}_m$)
・提示されず

$s^{(6)}_{(8)}$: { ライズ 1/8, リブ高 1/25, 下路 }



$v_{(8)}$: {0.13, 0.14, 0.18}
35 個体 (個体群 $C^{(6)}_m$)
・1 度目の提示 (A_3) で不採用

(1) ルールに基づき生成される競合候補



F ={0.24, 0.38, 0.38}
θ ={0.12, 0.17, 0.12}

(2) 初期個体群 $C^{(6)[0]}_k$ および移住個体群 $C^{(6)}_m$

図 5.11 路面形式に関する部分問題 P_6 における個体分布 (アシスタント I)

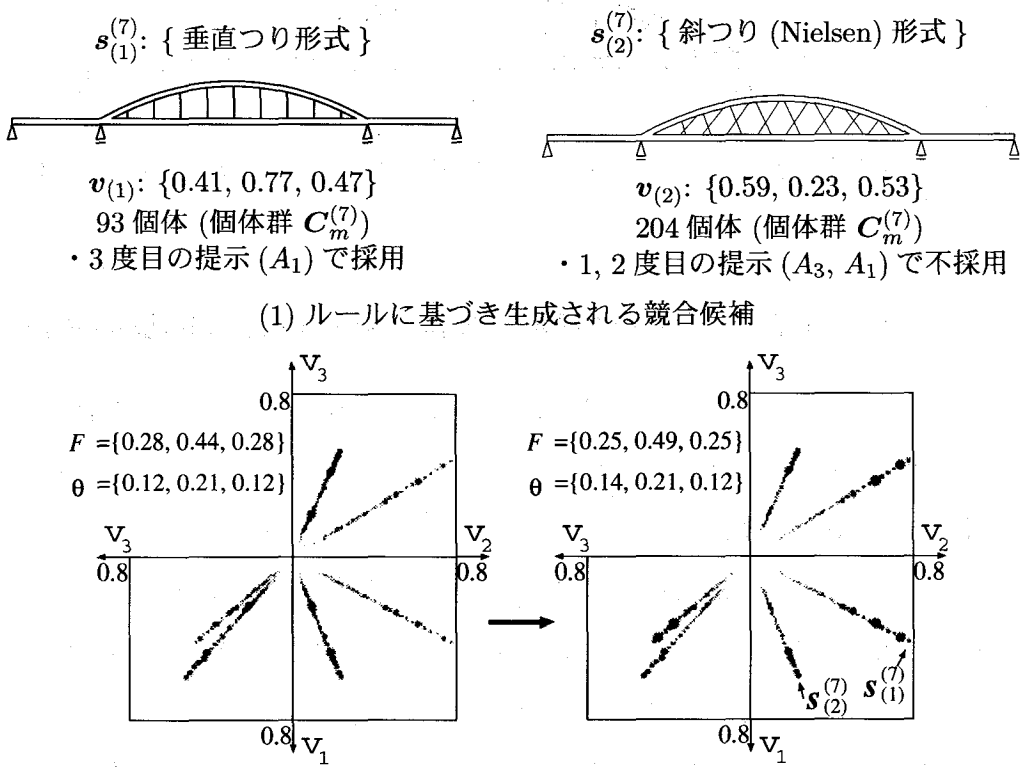


図 5.12 つり形式に関する部分問題 P_7 における個体分布 (アシスタント I)

となっている．各エージェントは淘汰しきい値 $\theta_1 = 0.12, \theta_2 = 0.21, \theta_3 = 0.12$ のもとに候補評価個体群を形成する．1 回目，2 回目にはそれぞれエージェント A_3, A_1 から斜つり形式が提示されたが，設計者によって不採用となった．3 回目の候補提示では，候補提示適合度 $F = \{0.25, 0.49, 0.25\}$ のもとでエージェント A_1 から $s_{(1)}^{(7)}$ が提示され設計者に採用とされた．この結果，図 5.13 に示す下路 3 支間ローゼアーチ橋が設計候補として生成され，設計過程が完了する．このとき候補提示適合度 $F = \{0.25, 0.49, 0.25\}$，淘汰しきい値 $\theta = \{0.14, 0.21, 0.12\}$ であった．これらの値からは，設計者 I は，感覚的デザイン性を考慮するエージェント A_2 から推薦される候補をよく採用したこと，他のエージェント A_1, A_3 が推薦した候補は不採用となったことが多かったことがわかり，その価値観は，感覚的デザイン性 γ_2 を重視していたことが推察される．

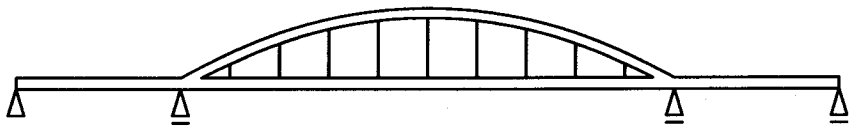


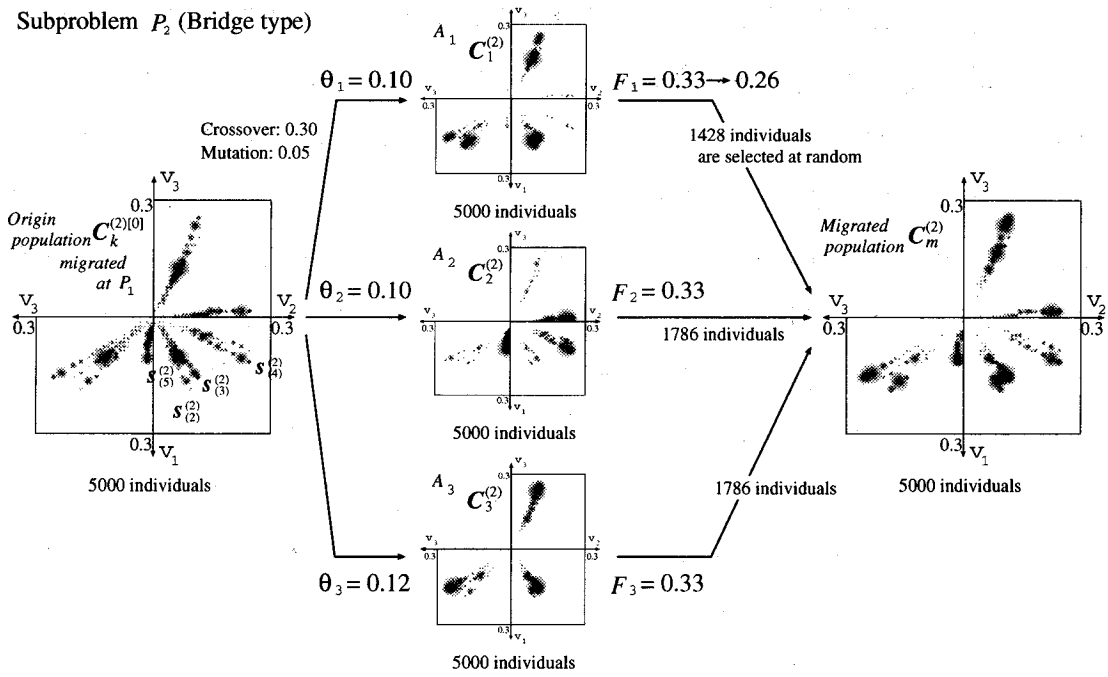
図 5.13 設計者 I とアシスタント I により生成された設計候補 (下路 3 支間ローゼアーチ)

5.4.2 エージェントによる候補評価個体群と移住個体群の生成

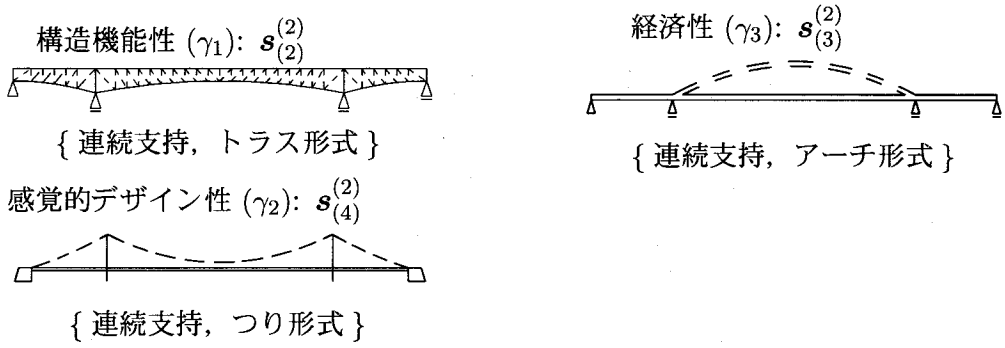
各部分問題では，エージェント毎に候補評価個体群を生成し，設計者による採否の意思決定の後，移住個体群を作る．ここでは，前節に示した過程における橋梁形式に関する部分問題 P_2 を例に，エージェント A_1 ($\theta_1 = 0.10$), A_2 ($\theta_2 = 0.10$), A_3 ($\theta_3 = 0.12$) により形成された候補評価個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(2)}$ の個体分布 (図 5.14)，候補評価個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(2)}$ 中でルールベースにより生成された競合候補と一致している個体数 (表 5.1) を示す．たとえば，感覚的デザイン性に関する評価の最も大きなつり形式 $\boldsymbol{s}_{(4)}^{(2)}$ ($v_{2(4)} = 0.25$) を表す個体は，エージェント A_2 の持つ個体群 $\boldsymbol{C}_2^{(2)}$ では 513 個体と最も多く存在している (表 5.1)．個体分布を図 5.14(a) で見ると，A_2 の持つ個体群では個体分布が v_2 の大きな側に偏っている．逆に，A_1 と A_3 の持

表 5.1 部分問題 P_2 におけるエージェント候補評価個体群の個体分布

競合候補: $(v_{k(z)})$	淘汰しきい値 γ_1 γ_2 γ_3	$\theta_1 = 0.10$ A_1 ($\boldsymbol{C}_1^{(2)}$)	$\theta_2 = 0.10$ A_2 ($\boldsymbol{C}_2^{(2)}$)	$\theta_3 = 0.12$ A_3 ($\boldsymbol{C}_3^{(2)}$)
$\boldsymbol{s}_{(1)}^{(2)}$:	(0.08, 0.25, 0.02)	2	53	0
$\boldsymbol{s}_{(2)}^{(2)}$:	(0.19, 0.09, 0.18)	515	4	40
$\boldsymbol{s}_{(3)}^{(2)}$:	(0.16, 0.12, 0.26)	632	47	704
$\boldsymbol{s}_{(4)}^{(2)}$:	(0.11, 0.25, 0.02)	29	513	0
$\boldsymbol{s}_{(5)}^{(2)}$:	(0.12, 0.08, 0.14)	108	17	118
$\boldsymbol{s}_{(6)}^{(2)}$:	(0.19, 0.09, 0.18)	0	0	0
$\boldsymbol{s}_{(7)}^{(2)}$:	(0.16, 0.12, 0.21)	58	8	41



(a) 初期個体群，エージェント候補評価個体群，および移住個体群



(b) ルールベース推論による代表的競合候補

図 5.14 エージェント毎の候補評価と移住個体群の形成 (P_2)

つ個体群では，つり形式 $s_{(4)}^{(2)}$ を表す個体が非常に少なく，A_1 では構造機能性の評価の高い $s_{(2)}^{(2)}$, $s_{(3)}^{(2)}$ へ，A_3 では経済性の評価の高い $s_{(3)}^{(2)}$ へそれぞれ分布が偏っている．これらよりエージェントの持つ個体群は，課せられた価値規準によって分布の様子が異なり，この個体分布がエージェントによる評価を表現していることが分かる．

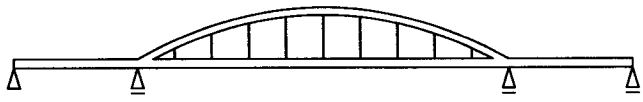
ここでのケーススタディでは，アシスタントIが，エージェント適合度 $F = \{0.33,$

0.33, 0.33} のもとでエージェント A_1 を確率的に選択し，1回目には，トラス橋構造 $\boldsymbol{s}_{(2)}^{(2)}$ を設計者に提示した．設計者Iがこれを採用しなかったので，$F_1 = 0.33 \times 0.8 = 0.26$ と更新し，再びルーレット選択が行われ，エージェント A_2 が選ばれた．このエージェントからはアーチ橋構造 $\boldsymbol{s}_{(3)}^{(2)}$ が提示され，設計者が採用したので，次の部分問題へと設計が進捗し，移住個体群 $\boldsymbol{C}_m^{(2)}$ が構成された．すなわち，更新後のエージェント適合度 $F = \{0.26, 0.33, 0.33\}$ を正規化した $F = \{0.29, 0.36, 0.36\}$ の比に応じ，A_1 から 1428 個体，A_2 から 1786 個体，A_3 から 1786 個体をそれぞれランダムに選び出し，ひとつの個体群を構成することで作られる．次の部分問題 P_3 では，各エージェントの初期個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(3)[0]}$ として $\boldsymbol{C}_m^{(2)}$ が用いられ，以降の設計過程は設計者が採用したアーチ橋構造のもとで進められていく．この移住個体群では，競合候補に一致する個体数は，$\boldsymbol{s}_{(1)}$: 24, $\boldsymbol{s}_{(2)}$: 155, $\boldsymbol{s}_{(3)}$: 440, $\boldsymbol{s}_{(4)}$: 172, $\boldsymbol{s}_{(5)}$: 82, $\boldsymbol{s}_{(6)}$: 0, $\boldsymbol{s}_{(7)}$: 30 であり，設計は設計者が採用したアーチ橋構造のもとで進められるが，個体群の中には他の橋梁形式を持つ個体も存在している．

5.4.3 遺伝的操作による潜在的な候補生成

エージェントの候補評価個体群中の個体形質の推移について，遺伝子的事例ベースから最終的な候補生成を行う部分問題 P_7 まで，感覚的デザイン性に関するエージェント A_2 を例にとり示す．ここでは個体群の個体の形質を，設計者Iとアシスタント I により最終的に生成された 3 支間下路ローゼアーチの遺伝子型 (図 5.15) との類似度を，5.3.3節と同様に式 (3.1) の β を 2 とした $\rho(\boldsymbol{c}_i, \boldsymbol{c}_j)$ により調べる．

部分問題 P_1 における競合候補の遺伝子型は設計仕様を表す共通な 10 ビット '0101110101' と，競合部分 $\boldsymbol{s}_{(1)}^{(1)} = \{3$ 支間，支間長 300m$\}$ および $\boldsymbol{s}_{(2)}^{(1)} = \{1$ 支間，



'0101110101010111101000010010********10001******0100110010010*****'

図 5.15 最終的に生成された設計候補 3 支間下路ローゼアーチの遺伝子型

支間長 500m} を表す 5 ビット (それぞれ '010 11', '110 00'), 未定の 50 ビット ('*' で表記) で表され, それぞれ図 5.16(a), (b) に示すビット列となる. エージェントによる候補評価個体群への遺伝的操作では, 0 か 1 の値が定められている有意なビットのみを参照して個体適合度を求めるので, P_1 での淘汰では, 15 ビットからなるパターンとの類似度の高い個体ほど多く生き残ることになる. 一方, 類似度を調べる際に参照した最終的に生成された 3 支間下路ローゼアーチの遺伝子型は, 図 5.15 に示したビット列であり有意なビット数は 46 である. エージェントによる個体群の形成では, 15 ビットのみに注目しているので, この部分が競合候補に完全に一致している場合, 類似度は 0.11 ($= (15/46)^2$) である. しかしながら, 個体群中には図 5.16(c) に示すような 36 ビットが一致し (下線部), 類似度 0.40 となる個体が複数みられる. これらの個体形質は遺伝子的事例ベース $\boldsymbol{C}^{(1)[0]}$ には含まれていなかった事から, 部分問題 P_1 でのエージェントの遺伝的操作により生成されたものである. 図 5.17 は, 各部分問題 $P_1 \sim P_7$ において, 各個体と参照候補 (図 5.15) との類似度 ρ を横軸, 個体数を縦軸に表示したものである. この図からは, それぞれの部分問題において決定する属性値よりも多くの属性値について最終的に生成された設計候補と同様の属性値を持つ個体が存在することが分かる. たとえば, 図 5.17(b) では既に部分問題 P_1 終了時に, ここで決定した

'0101110101010**11**********'

(a) 部分問題 P_1 での競合候補 $\boldsymbol{s}^{(1)}_{(1)}$: {3 支間, 支間長 300m} の遺伝子型

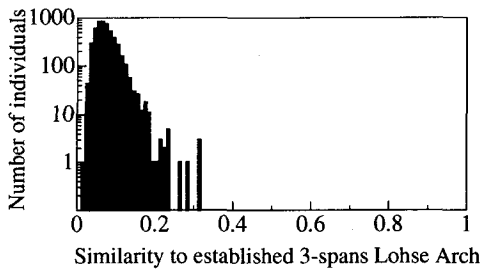
'0101110101110**00**********'

(b) 部分問題 P_1 での競合候補 $\boldsymbol{s}^{(1)}_{(2)}$: {1 支間, 支間長 500m} の遺伝子型

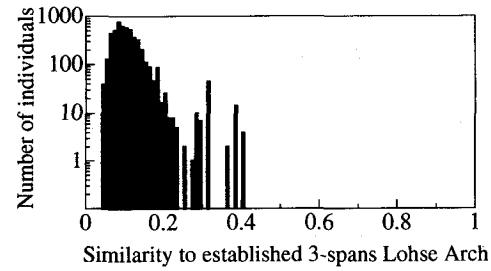
'<u>0101110101010111101000011</u><u>01</u>1101110000<u>10</u>0001101<u>000</u>0001<u>1001</u>011110'

(c) 部分問題 P_1 で形成された候補評価個体群中で最終生成候補に最も類似の個体

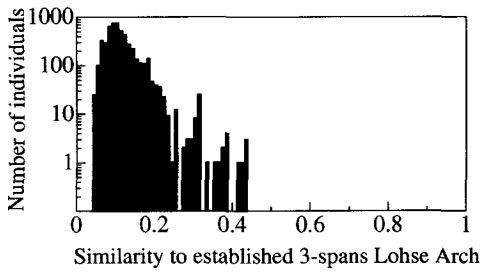
図 5.16 部分問題 P_1 での遺伝的操作に用いられた遺伝子型と参照遺伝子型



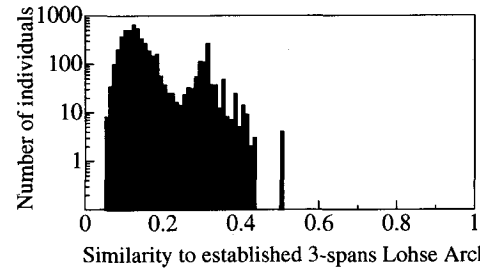
(a) 遺伝子的事例ベース $\boldsymbol{C}^{(1)[0]}$



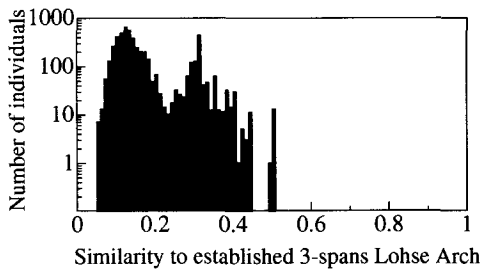
(b) 部分問題 P_1 後の個体群 $\boldsymbol{C}_2^{(1)}$



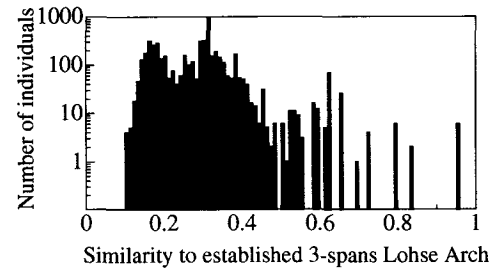
(c) 部分問題 P_2 後の個体群 $\boldsymbol{C}_2^{(2)}$



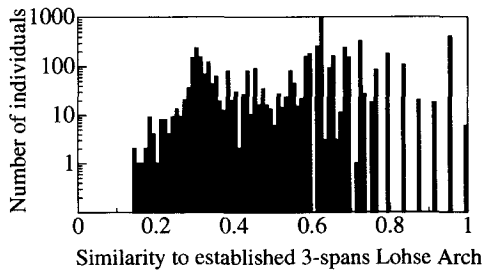
(d) 部分問題 P_3 後の個体群 $\boldsymbol{C}_2^{(3)}$



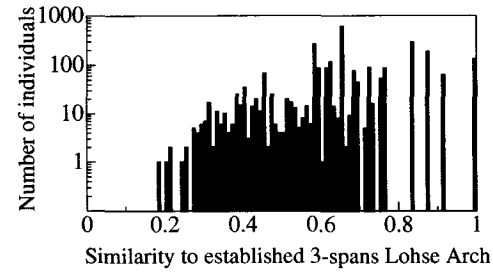
(e) 部分問題 P_4 後の個体群 $\boldsymbol{C}_2^{(4)}$



(f) 部分問題 P_5 後の個体群 $\boldsymbol{C}_2^{(5)}$



(g) 部分問題 P_6 後の個体群 $\boldsymbol{C}_2^{(6)}$

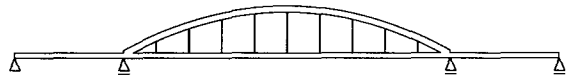


(h) 部分問題 P_7 後の個体群 $\boldsymbol{C}_2^{(7)}$

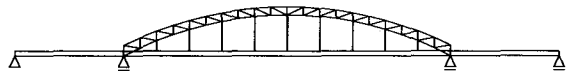
図 5.17 エージェント A_2 の持つ候補評価個体群中の個体形質の推移

{3 支間，スパン 300m} だけでなく以降の段階で考慮する属性値も類似の個体が存在している．

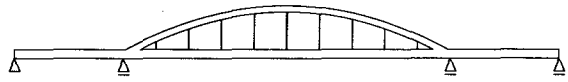
同様に，他の部分問題においても，後に決定する属性について値が定まる現象が見られ，けた形式を決定する部分問題 P_5 では，ルールに基づく競合候補の遺伝子型の有意なビット数が 34 (図 5.18(a) ～(d)) であるのに対して，候補評価個体群では，最終的に生成された 3 支間下路ローゼアーチの遺伝子型に 45 ビットが一致する個体 (図 5.18(e)，類似度 0.96) が 6 個体みられた．また P_6 終了時 (図 5.17(g)) には既に最終的に生成された設計候補と完全に一致しているものが現われていることが分かる．



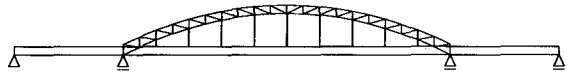
'0101110101010**1101000010010********10001**********110***********'
(a) 部分問題 P_5 での競合候補 $\boldsymbol{s}^{(5)}_{(1)}$: { けた高 1/40，ソリッドリブ } の遺伝子型



'0101110101010**1101000010010********10001**********111***********'
(b) 部分問題 P_5 での競合候補 $\boldsymbol{s}^{(5)}_{(2)}$: { けた高 1/40，ブレーストリブ } の遺伝子型



'0101110101010**1101000110110********10001**********110***********'
(c) 部分問題 P_5 での競合候補 $\boldsymbol{s}^{(5)}_{(3)}$: { けた高 1/25，ソリッドリブ } の遺伝子型



'0101110101010**1101000110110********10001**********111***********'
(d) 部分問題 P_5 での競合候補 $\boldsymbol{s}^{(5)}_{(4)}$: { けた高 1/25，ブレーストリブ } の遺伝子型

'<u>010111010101011110100001001</u>00000101<u>01000</u>1000000<u>01001100</u>0<u>0101</u>1001'
(e) 部分問題 P_5 で形成された候補評価個体群中で最終生成候補に最も類似の個体

図 5.18 部分問題 P_5 での遺伝的操作に用いられた遺伝子型と参照遺伝子型

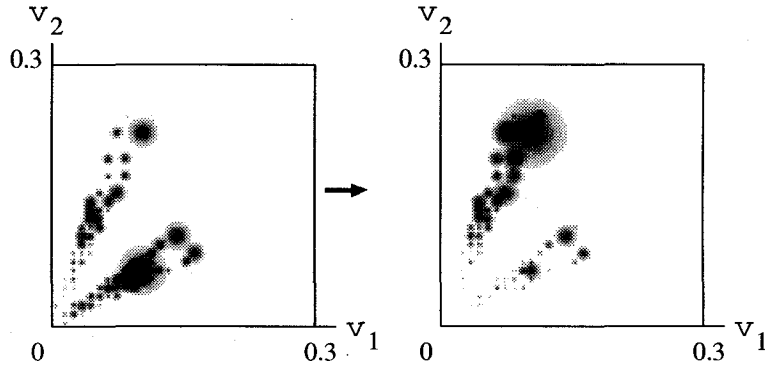
ここで示した候補評価個体群の形成における遺伝的操作は，陽には，その部分問題までに決定された一部のビットパターンのみを参照し，その部分に一致する個体を多く生き残らせていく操作である．しかし潜在的には，個体に多重的に含まれる事例特徴を組合せ的に引出し，個体群としてもっと広い範囲の設計を行っていることになる．すなわち，設計問題は部分問題毎に区切っており，意思決定の焦点をその部分問題に属する属性値に絞っているようにみえるが，エージェントは個体群を用いて全体の流れとして設計過程を表していることになる．このことは，人間の設計者が，たとえば設計仕様などの部分的な情報のみから，無意識的な事例解の検索によって，設計対象物の漠然とした全体像を思い浮かべられるような直感的能力 [Ramirez 1996] に対応するものである．

5.4.4 獲得した個性を用いる設計支援

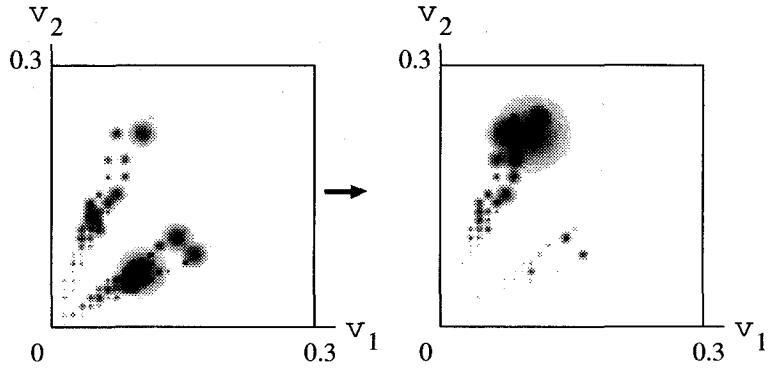
(1) エージェント確信度の増加

設計者 I への 1 回目の支援 (5.4.1 項) で得られたパラメータ $F = \{0.25, 0.49, 0.25\}$, $\theta = \{0.14, 0.21, 0.12\}$ を初期値として 2 回目の設計支援を行う．一回目の設計支援で淘汰しきい値がもっとも大きくなったエージェント A_2 について，橋梁形式に関する部分問題 P_2 での個体群の個体分布を図 5.19 に示す．ただし，これらの初期個体群 (図中左側) は，それぞれの部分問題 P_1 での淘汰が異なるので，同じものではない．

1 回目では淘汰しきい値 $\theta_2 = 0.10$ と小さかったために，候補に対する評価が小さなものも個体群に存在している．ルールベースにより生成された設計候補を



(a) 1 回目の設計支援 (淘汰しきい値 $\theta_2 = 0.10$)



(b) 2 回目の設計支援 (淘汰しきい値 $\theta_2 = 0.21$)

図 5.19 エージェント A_2 による候補評価個体群 (P_2)

表す個体のうち，感覚的デザイン性からの評価 v_2 の最も大きな $\boldsymbol{s}_{(1)}$ と $\boldsymbol{s}_{(4)}$ を表す個体は計 566 個体であり 88%を占めていた．2 回目の支援では，淘汰しきい値 $\theta_2 = 0.21$ となることで，96%(1105 個体) を占めるようになっている．これは，淘汰しきい値の増加によって，個体分布の偏りが自らの候補評価に沿って増加しており，エージェントの自分の評価に対する確信度の表現 (5.3.1 項) を集団として行っていることが分かる．

(2) 異なる設計者に対する設計支援の例

これまでとは異なる設計者 II を考え，アシスタント II による設計支援の例をみる．アシスタントの初期パラメータには，アシスタント I の場合と同様に中立な値を用いたが，図 5.20 に示すような 3 支間プラットトラスが最終的な設計候補として生成された時点では $F = \{0.41, 0.33, 0.26\}$，$\theta = \{0.21, 0.12, 0.10\}$ となっていた．

ここで，設計者 I と設計者 II に対して，アシスタント I と II がそれぞれ 1 回目の支援で得られた F_k, θ_k を用いて新たに設計支援を行う場合を，これら 2 つのの設計において大きな差異が生じた橋梁形式に関する部分問題 P_2 での候補提示の様子をみる．図 5.21 はそれぞれの個体群中で提示され得る候補の個体分布を示し，表 5.2 は設計者 I, II がそれぞれアーチ形式 $\boldsymbol{s}^{(2)}_{(3)}$，トラス形式 $\boldsymbol{s}^{(2)}_{(2)}$ を採用した後の移住個体群における個体数の比率を示したものである．これらを比較すると，アシスタント I では，感覚的デザイン性の評価 v_2 の大きな個体が多く，アシスタント II では，構造機能性の評価 v_1 の大きな個体が多く分布するような個体群と

表 5.2 2 度目の設計支援における部分問題 P_2 での個体分布

競合候補	$\boldsymbol{s}^{(2)}_{(1)}$	$\boldsymbol{s}^{(2)}_{(2)}$	$\boldsymbol{s}^{(2)}_{(3)}$	$\boldsymbol{s}^{(2)}_{(4)}$	$\boldsymbol{s}^{(2)}_{(5)}$	$\boldsymbol{s}^{(2)}_{(6)}$	$\boldsymbol{s}^{(2)}_{(7)}$
アシスタント I	6%	18%	29%	35%	6%	0.8%	5%
アシスタント II	3%	40%	33%	14%	6%	1%	2%

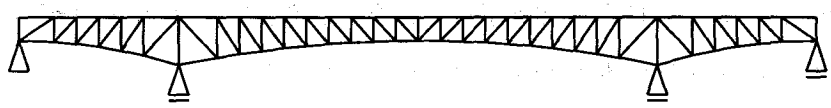
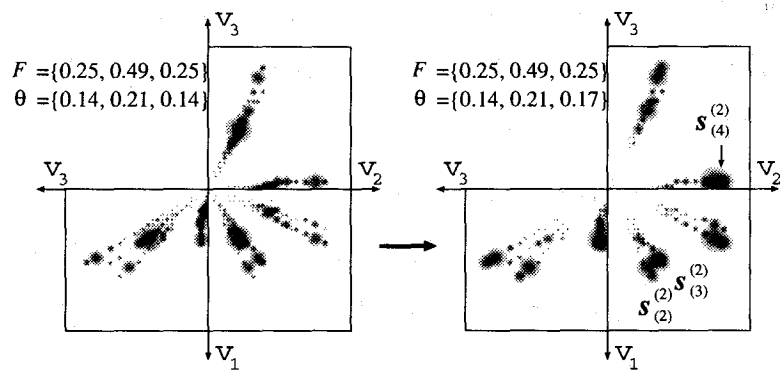
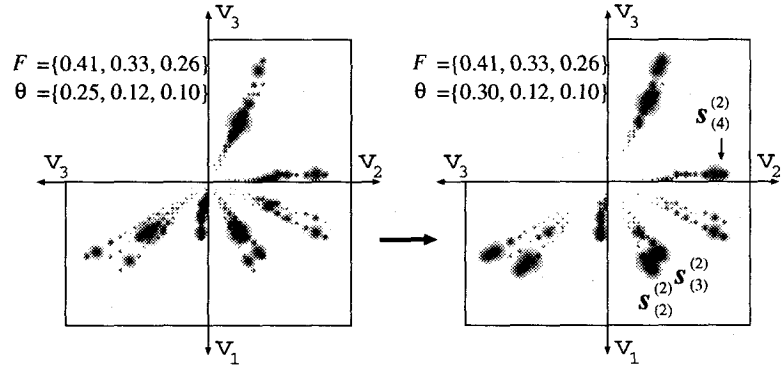


図 5.20 設計者 II とアシスタント II により生成された設計候補 (3 支間プラットトラス)



(a) アシスタント I　　初期個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(2)[0]}$ および移住個体群 $\boldsymbol{C}_m^{(2)}$



(b) アシスタント II　　初期個体群$\boldsymbol{C}_k^{(2)[0]}$ および移住個体群 $\boldsymbol{C}_m^{(2)}$

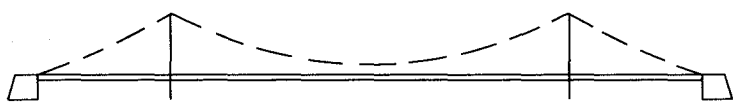
図 5.21 2 度目の設計支援における候補個体群 (P_2)

なっている．すなわち，それぞれの設計者が 1 回目の支援で見せた選好に沿う提示がなされていることが分かる．ただし，感覚的デザイン性「優美さ」を重視すると考えられる設計者 I を支援するアシスタント I では，エージェント A_2 の候補提示適合度 F_2 が高く候補提示へ関与する割合が大きいので，つり形式 $\boldsymbol{s}_{(4)}^{(2)}$ の個体頻度も 35%と大きい．ただし，確率的にはアーチ形式 $\boldsymbol{s}_{(3)}^{(2)}$ の個体頻度 29%と

ほぼ同程度である．これらの候補提示の傾向の差異は，それぞれが支援の対象とした設計者への個性化が進んだとみなせるものである．

候補提示は，アシスタントシステムによる確率的なエージェントの選択，エージェントによる確率的な提示によって行われるので，部分問題 P_2 では図5.13，5.20に示したアーチ形式やトラス形式だけでなく，図5.14(b)に示すつり形式 ($\boldsymbol{s}^{(2)}_{(4)}$) や他の競合候補も設計者に示され得る．1回目の設計支援で得られた適合度，淘汰しきい値を初期パラメータとして，アシスタントIに対して $F = \{0.25, 0.49, 0.25\}$, $\theta = \{0.14, 0.21, 0.12\}$，アシスタントIIに対して $F = \{0.41, 0.33, 0.26\}$, $\theta = \{0.21, 0.12, 0.10\}$ を用いた2回目の設計支援では，設計者Iへは3回目にエージェント A_2 から，設計者IIへは6回目にエージェント A_2 からつり形式 $\boldsymbol{s}^{(2)}_{(4)}$ が提示されていた．設計者I, IIがこれを採用した場合には，次の部分問題 P_3 はつり橋けた形式の決定となる．このとき，ルールベースからは図5.22に示す充腹けた，トラスけたの2つの競合候補が生成され，これらを参照する候補評価個体群の形成がなされる．

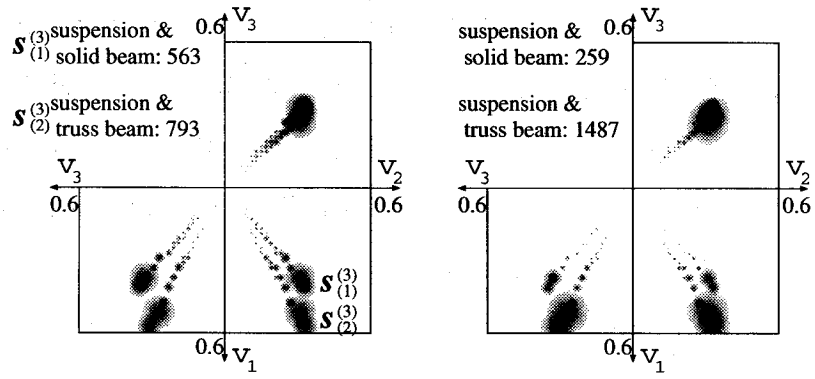
ここで，アシスタントI, IIのそれぞれ3つのエージェントの持つ個体群(図5.23)をみると，A_1 の生成する候補評価個体群では，競合候補の評価値 $v_{1(1)} = 0.42$, $v_{1(2)} = 0.58$ に対して，評価値の高いトラスけた $\boldsymbol{s}^{(3)}_{(2)}$(図5.22(b)) を持つ個体の方が，どちらのアシスタントにおいても多い．しかしながら，個体分布の様子は異



(a) 充腹けた: $\boldsymbol{s}^{(3)}_{(1)}$, $\boldsymbol{v}_{(1)} = (0.42, 0.50, 0.54)$

(b) トラスけた: $\boldsymbol{s}^{(3)}_{(2)}$, $\boldsymbol{v}_{(2)} = (0.58, 0.50, 0.46)$

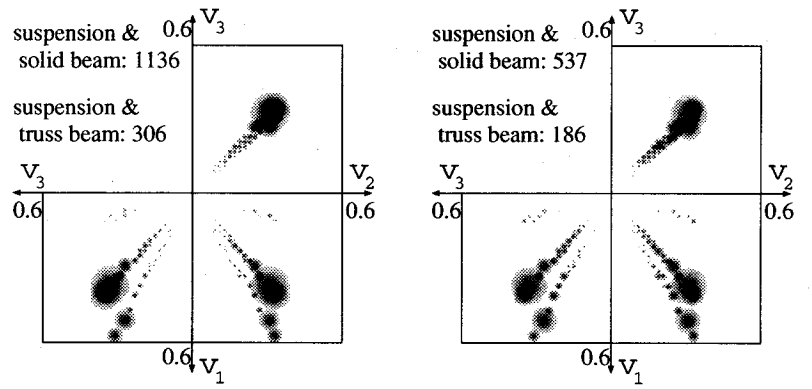
図5.22 つり橋構造物けた形式 (P_3) に関する競合候補



$\theta_1 = 0.14$ $\theta_1 = 0.25$

アシスタント I アシスタント II

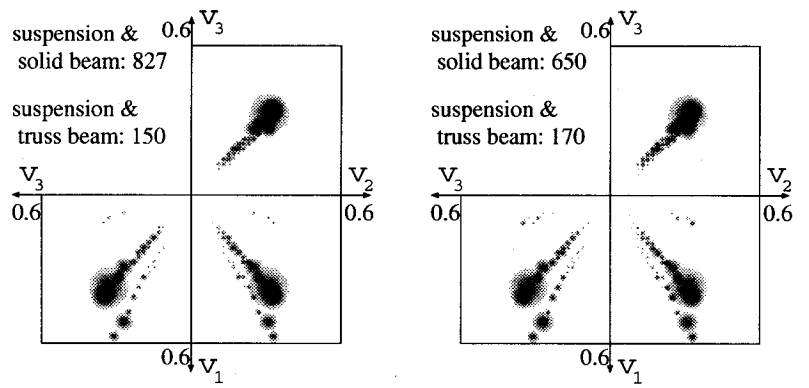
(a) エージェント A_1: $\boldsymbol{C}_1^{(3)}$



$\theta_2 = 0.25$ $\theta_2 = 0.14$

アシスタント I アシスタント II

(b) エージェント A_2: $\boldsymbol{C}_2^{(3)}$



$\theta_3 = 0.14$ $\theta_3 = 0.10$

アシスタント I アシスタント II

(c) エージェント A_3: $\boldsymbol{C}_3^{(3)}$

図 5.23 部分問題 P_3(つり橋構造物のけた形式) における候補評価個体群 $\boldsymbol{C}_1^{(3)}$

なり，エージェント A_1 の持つ個体群をみた場合では，アシスタント I ではトラスけたを持つ個体数が 793(図 5.23(a) 左) と，競合候補に一致する個体中の 58%であるのに対して，アシスタント II では，85%(1487 個体)(図 5.23(a) 右) を占めている．これは，1 回目の支援においてトラス橋構造物を設計した設計者 II を支援するアシスタント II では，エージェント A_1 の淘汰しきい値が $\theta_1 = 0.25$ と高く，構造機能性の評価 v_1 の優劣を強く反映する挙動を示すためと考えられる．一方，1 回目の設計支援においてアーチ橋構造を選択した設計者 I に対するアシスタント I では，A_1 が推薦した候補の採用が少なかったため，A_1 の確信度が 0.14 と低く評価値がさほど反映されていないためである．このことからも，エージェントの行う候補評価の表現は，その部分問題における評価値 $\boldsymbol{v}$ だけでなく，設計者への支援過程の流れに沿って形成されたものであることが分かる．

アシスタント I, II からの候補提示頻度を，それぞれのエージェントの持つ個体群 $\boldsymbol{C}_k^{(3)}$ にみられる個体数に P_3 の最初の提示に関する適合度 F_k を重みとした重み付け平均でもとめると表 5.3 のようになる．たとえば，感覚的デザイン性 (γ_2) を重視すると考えられる設計者 I に対しては，つり橋けた形式についてアシスタント II は，感覚的デザイン性の評価はほぼ同じであっても充腹けたを多く提示する．逆に，構造機能性 (γ_1) を重視すると考えられる設計者 II が橋梁形式の決定時 P_2 に，アシスタント II の提示する候補のうちでは少数なつり形式を選択しても，次の部分問題では，アシスタント II は構造機能性に有利なトラスけたを多く提示することで，設計者の選好を現していることが分かる．これは，1 回目の設計支援でアシスタントが獲得した個性が，アシスタントにとって初めての候補提示となるつり橋構造物のけた形式決定においても反映され得ることを表している．また，

表 5.3 つり橋構造物けた形式 (P_3) に関する候補提示の頻度

	$\boldsymbol{s}_{(1)}^{(3)}$: 充腹けた $\boldsymbol{v}_{(1)}$:(0.42, 0.50, 0.54)	$\boldsymbol{s}_{(2)}^{(3)}$: トラスけた $\boldsymbol{v}_{(2)}$:(0.58, 0.50, 0.46)
アシスタント I	906 (71%)	377 (29%)
アシスタント II	486 (46%)	572 (54%)

この候補 (図 5.22(b)) はつり形式によって設計者 II が考慮していなかった「優美さ」を表現しながらも，トラスけたで構造機能性を持たせるものであり，設計者に対する新たな候補の示唆といえるものである．ここで提案した枠組では，設計支援システムは確率的な候補提示によって設計者に多様な候補を検討させながらも，設計過程は大域的には設計者の選好に沿う方向性を保っていることが分かる．

5.5 まとめ

設計者の主観的価値観，すなわち個性が大きな役割を果たす概念設計において，個別の設計者への個性化を図る設計アシスタントシステムの枠組を示した．ここでは，アシスタントシステムを，遺伝子的事例ベースを利用し，それぞれが独自の価値規準のもとに競合候補の評価を行う複数のエージェントによって構成した．エージェントはシステムの持つ価値観によって選ばれ，それの推薦する候補が設計者に提示され，設計者はこれに対して採否の意思決定を行う．アシスタントシステムは，この結果をもとに自らの価値観を更新していくことで，設計者への個性化を図る．ただし，個別の設計者へ依拠しすぎることは概念設計の多様性を先見的に切捨ててしまうこととなるので，遺伝的操作による候補提示のゆらぎを導入した．

橋梁構造物の2次元スケルトン設計を例にとり構築した概念設計アシスタントシステムにより，異なる価値観を持っている設計者に対するそれぞれへの支援を検討した．エージェントの持つ個体群の遺伝的パラメータがそれぞれの設計者の意思決定の観察によって調節され，競合候補の推薦に関する確信度を表現可能なことと，複数のエージェントによって設計者の選好が表現される適応的な候補提示となることが確認された．エージェントの，自身の持つ価値規準からの競合候補の評価は，それらの推薦の度合いを遺伝的操作により生成した遺伝子的事例ベースとして表現している．部分問題に分割された設計過程において，個体群として構成されている遺伝子的事例ベースは，遺伝的操作の直接の対象としている部分問題での設計評価だけでなく，全体的な過程にわたって潜在的に評価を反映していることが確認された．このような，個体群によって設計候補評価を表現する大域的な流れとしての広い範囲の設計空間の取扱いが可能な機能は，概念設計の過程において，たとえば設計仕様などの限られた部分的な設計情報のみから，無意識的な事例解等の検索によって仕様をほとんど満たす設計解を得るといった設計者の直感的能力 [Ramirez 1996] に対応するものである．本章で示した枠組によって，個別の設計者へ適応しながらも多様な設計候補の示唆が可能となると考えら

れ，ここで提案した手法は，設計アシスタントシステムの補助的な機能の一つとして有効であると考えられる．

第6章

結　　論

概念設計をコンピュータにより支援するには，工学理論などの客観的に支持され得る理論的側面に加え，美観等の感覚的側面に代表される設計者個別の主観的価値観の考慮が不可欠となる．このような状況においては，これまでに採用されてきた設計事例が有用なソースとなりうる．しかしながら，事例を個別的にとらえた固定的な設計対象物の表現は，設計候補に求められる多様性を取扱うためには制約的にはたらくことになる．また，概念設計支援においては，実現が可能かどうかは厳密には問わず，不確かな情報も含む多くの設計案を生成し，設計者に多くの情報判断・取捨選択の機会を与える役割がコンピュータに求められる．すなわち，設計過程をブラックボックスとしてコントロールする設計システムではなく，人間の設計者の対話的なパートナーとしてふるまい，意思決定の主体を設計者におく設計アシスタントの枠組を設計支援システムはとらねばならない．本論文では，例として橋梁構造物の2次元スケルトン設計をとりあげ，設計者を主体とし多くの意思決定の機会を与える設計アシスタントシステムを基本的枠組とした，事例に基づく概念設計支援システムについて検討を行った．

構造物の感覚的デザイン性などの主観的にしか取扱えない側面を取扱うために第2章では設計事例に対する感覚的評価を利用した設計支援の枠組を示した．まず，過去の設計事例に対する感覚的評価の取扱いについて述べ，構造形態と感覚的評価との関連を事例知識として整理するための手法を提案した．次に，客観的な構造工学理論などに基づく知識ベース推論により競合候補を生成し，それらに対して感覚的側面に関する評価を事例知識によって行う構造・感性設計支援を示した．アーチ橋構造物を例にとるケーススタディによって，システムの候補提示に設計者の選好を反映できること，および感覚的デザイン性からの要求を反映す

る設計候補の提示が行われることを確認し，提案した事例に基づく手法が利用可能なことを示した．

事例に基づく設計支援において，収集される設計事例は概念設計にみられる多様な設計可能性に比して少数のサンプル集団に過ぎないことを考慮した第3章では，設計対象物を遺伝子的に表現することで広い設計空間を表す枠組を示した．まず，設計対象物とする構造物の表現を考察し，見かけ上の構造形態を属性ととらえて扱うのではなく，遺伝的アルゴリズムにおける表現型ととらえる手法を提案した．橋梁構造物を例にとったケーススタディでは，構造機能が類似の属性を同じ遺伝子座から発現されるとすることで，構造形態が一見異なる事例に対しても類似度を測ることが可能となる事を確認した．この事によって，設計事例表現の固定的な枠組を越えた広い設計空間の取扱いが可能となり，概念設計の段階で設計者に必要とされる問題領域を越えて多様な事例を検索する能力を補助することが可能となると考えられる．次に，設計事例群の特徴として事例頻度に注目し，個体群中の頻度分布を事例群に類似とする遺伝子的事例ベースの構築を試みた．事例ベース個体群に含まれる個体には設計事例の特徴が多重的に保持されており，サンプル集団である事例群の特徴を表すだけでなく，組合せ的な遺伝的操作によって多様な広い設計空間を表現していることを確認した．ここで提案した手法は，事例に基づく設計の基本的機能を持ちながらも，組合せ的に設計候補を生成することとなるので，過去の設計事例に必ずしも支配されない多様な設計候補の提示を可能とする．

設計候補の多様性の設計者への提示をとりあげた第4章では，知識ベース推論における候補提示のゆらぎと設計者の意思決定過程のゆらぎについて考察を行った．概念設計における競合候補の評価は，感覚的側面からの評価をはじめ事例に基づくことが主となるので定量的に行うことが困難となる．ここでは，まず競合候補の評価値を相対的な指標ととらえ，設計者への候補提示に確率的に反映させる手法を提案した．アーチ橋構造物を例にとったケーススタディでは，評価値の低い候補であっても設計者に提示され得る事を確認した．また，第3章に示した遺伝子的事例ベース個体群を利用し，知識ベース推論過程にみられる中間設計候

補と事例個体との類似に基づく設計候補提示の枠組を提案した．設計候補と事例との表現には，構造機能性の類似を反映する遺伝子的表現を用いているので，知識に基づく推論の流れのみからは見いだせないような候補の提示も可能となることを確認した．ここで示したゆらぎを含む候補提示は，必ずしも設計者の負担の軽減となるものではないが，概念設計では，不確かな情報も含む多くの設計案を先見的に切捨てることなく，設計者に多くの情報判断・取捨選択の機会を与えることが重要との認識に基づくものである．

設計者の主観的意思決定と動的側面に注目した第5章では，それぞれが独自の価値規準のもとに競合候補の評価を行う複数のエージェントによって設計アシスタントシステムを構成することで，設計者個別の価値観を考慮する設計支援の枠組を示した．設計過程においてシステムは，提示候補に対する設計者の採否の意思決定に基づき自らの価値観を更新することで，候補提示の傾向を個別の設計者に適応していく．価値観の異なる設計者を想定した設計支援のケーススタディでは，設計者個別の選好が現われる候補提示が確認された．また，各エージェントの候補推薦は，第4章と同様に遺伝子的事例ベースとして表わされた個体群をもとに，大域的過程のなかで設計評価を表現しているので，システムにとって初めての状況においても妥当な候補評価が可能となることが分った．ここで示した手法によって，個別設計者への適応的な機能を持つことで設計者の負担を軽減し，遺伝的操作による手法を基本とした候補提示によって，組合せ的に多様な可能性を設計者へ示唆する事が可能となると考えられる．

以上の結果より，本論文で提案した事例に基づく概念設計支援システムの考え方が，概念設計支援において必要とされる，美観等の感覚的側面の取扱い，広い設計空間における多様な設計候補の取扱い，設計者に対する多様な設計候補の示唆，設計者個別の主観的価値観の取扱いに対して有効性を持つことが確認された．ここで示した設計者指向の支援のあり方とそれを支える手法は，人間の発想を含む創造的活動に対するコンピュータ利用の可能性を探るための一段階をなすものである．

参考文献

Adeli, H. and Balasubramanyam, K. V., 1988, "A Knowledge-Based System for Design of Bridge Trusses," *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.2, No.1, pp.1–20.

Adeli, H. and Paek, Y. J., 1986, "Computer-Aided Analysis of Structures in INTERLISP Environment," *Computers and Structures*, Vol.23, No.3, pp.393–407.

Adelson, B., 1989, "Cognitive Research: Uncovering How Designers Design; Cognitive Modeling: Explaining and Predicting How Designers Design," *Research in Engineering Design*, Vol.1, No.1, pp.35–42.

赤木 新介, 藤田 喜久雄, 1988, "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—," 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.54, No.505, pp.2300–2305.

赤木 新介, 藤田 喜久雄, 1990, 設計エキスパートシステムの基礎と応用, p.7, コロナ社.

赤木 新介, 1991, 設計工学 (上) 3 章 概念設計, pp.60〜138, コロナ社.

Alcántara, R. B., 1991, "Representing the Engineering Design Process: Two Hypotheses," *Computer Aided Design*, Vol.23, No.9, pp.595–613.

Anumba, C. J. and Watson, A. S., 1992, "An Innovative Approach Towards Designer-Oriented CAD Systems," *The Structural Engineer*, Vol.70, No.9, pp.160–169.

荒井 栄司, 赤阪 英和, 若松 栄史, 白瀬 敬一, 1998, "CAD における設計意図モデルと修正設計への適用," 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.64, No.627, pp.4492–4497.

荒川 雅生, 萩原 一郎, 山川 宏, 1998, "複数の許容設計解を得るための採餌適応戦略遺伝的アルゴリズム," 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.64, No.622, pp.2155–2161.

有本 卓, 1976, 情報理論, p.39, 共立出版.

Atman, C. J., Chimka, J. R., Bursic, K. M., and Nachtmann, H. L., 1999, "A Comparison of Freshman and Senior Engineering Design Processes," *Design Studies*, Vol.20, No.2, pp.131–152.

Bahler, D., Dupont, C., and Bowen, J., 1995, "Mixed Quantitative/Qualitative Method for Evaluating Compromise Solutions to Conflicts in Collaborative Design," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.9, No.4, pp.325–336.

Bardasz, T., 1992, "Summary of Work in Case-Based Reasoning for Design," *Workshop Note of AID' 92, Second International Conference on Artificial Intelligence in Design*, pp.14–16.

Bardasz, T. and Zeid, I., 1993, "DEJAVU: Case-Based Reasoning for Mechanical Design," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.7, No.2, pp.111–124.

Bennett, D., 1996, *The Architecture of Bridge Design, Introduction*, p.8, Thomas Telford.

Bennett, J. S. and Engelmore, R. S., 1979, "SACON: A Knowledge-Based Consultant for Structural Analysis," *Proceedings of the Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence* (*IJCAI79*), pp.47–49.

Boyle, J. M., 1989, "Interactive Engineering Systems Design: A Study for Artificial Intelligence Applications," *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol.4, No.2, pp.58–69.

Cagan, J. and Agogino, A. M., 1991, "Inducing Constraint Activity in Innovative Design," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.5, No.1, pp.47–61.

Casakin, H. and Goldschmidt, G, 1999, "Expertise and The Use of Visual Analogy: Implications for Design Education," *Design Studies*, Vol.20, No.2, pp.153–176.

Chakrabarti, A. and Thomas P. B., 1996, "An Approach to Functional Synthesis of Mechanical Design Concepts: Theory, Applications, and Emerging Research Issues," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.10, No.4, pp.313–331.

Coyne, R. and Snodgrass, A., 1993, "Rescuing CAD from Rationalism," *Design Studies*, Vol.14, No.2, pp.100–123.

Cross, N., 1993, "Science and Design Methodology: A Review," *Research in Engineering Design*, Vol.5, No.2, pp.63–69.

Davis, W. H. (赤木 昭夫訳), 1990, *Peirce's Epistemology* (パースの認識論), 産業図書.

Dixon, J. R. and Simmons, M. K., 1983, "Computers That Design: Expert Systems for Mechanical Engineers," *Computers in Mechanical Engineering*, Vol.2, No.3, pp.10–18.

Dixon, J. R., 1987, "On Research Methodology Towards a Scientific Theory of Engineering Design," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.1, No.3, pp.145–157.

Domeshek, E. A., 1992, "Using Cases for Design Aiding," *Workshop Note of AID '92, Second International Conference on Artificial Intelligence in Design*, pp.24–26,

Domeshek, E. A. and Kolodner, J. L., 1993, "Using The Points of Large Cases," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.7, No.2, pp.87–96.

Dreyfus, H. L., 1979, (黒崎 政男, 村若 修訳 1992), *What Computers Can't Do* (コンピュータには何ができないか), p.512, 産業図書.

Duffy, A., 1986, "Bibliography —Artificial Intelligence in Design," *International Journal for Artificial Intelligence in Engineering*, Vol.2, No.3, p.173–179.

Dybara, T., Tecuci, G., and Rezazad, H., 1996, "The Shared Expertise Model for Teaching Interactive Design Assistants," *Engineering Application of Artificial Intelligence*, Vol.9, No.6, pp.611–626.

Elliot, W. S., 1989, "Computer-Aided Mechanical Engineering: 1958–1988," *Computer-Aided Design*, Vol.21, No.5, pp.275–288.

Ferguson, E. S., 1992, (藤原 良樹, 砂田 久吉訳 1995), *Engineering and The Mind's Eye* (技術屋の心眼, 第 1 章 工学における設計の特質), pp.13–58, 平凡社.

Finger, S. and Dixon, J. R., 1989, "A Review of Research in Mechanical Engineering Design. Part I: Descriptive, Prescriptive, and Computer-Based Models of Design Process," *Research in Engineering Design*, Vol.1, No.2, pp.51–67.

Garcia, A. C. B. and Howard, H. C., 1992, "Acquiring Design Knowledge through Design Justification," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.6, No.1, pp.59–71.

Garrett Jr., J. H., 1998, "The Computer-Aided Engineer: Prospects and Risks," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.12, No.1, pp.61–64.

Gero, J. S., 1996, "Special Issue: Artificial Intelligence in Computer-Aided Design: Progress and Prognosis," *Computer Aided Design*, Vol.28, No.3, pp.153–154.

Goel, V., 1994, "A Comparison of Design and Nondesign Problem Spaces," *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol.9, No.1, pp.53–72.

Goldberg, D. E., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison–Wesley.

Golding, A. R. and Rosenbloom, P. S., 1991, "Improving Rule-Based Systems through Case-Based Reasoning," *Proceedings of AAAI-91*, pp.22–27.

Gorti, S. R. and Sriram, R. D., 1996, "From Symbol to Form: A Framework for Conceptual Design," *Computer Aided Design*, Vol.28, No.11, pp.853–870.

Haftka, R. T., 1985, *Elements of Structural Optimization*, Martinus Nijhoff.

Hajela, P. and Lin, C.-Y., 1992, "Genetic Search Strategies in Multicriterion Optimal Design," *Structural Optimization*, Vol.4, No.2, pp.99–107.

Hartmann, D. and Lehner, K., 1992, "Non-Numerical Modeling Technique in Structural Optimization," *Structural Optimization*, Vol.4, No.3–4, pp.172–178.

長谷川 明, 1996, "構造形態と人間感覚に関する考察," 土木学会 構造工学論文集, Vol.42A, pp.463–470.

Hauser, M. and Scherer, R. J., 1997, "Application of Intelligent CAD Paradigms to Preliminary Structural Design," *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol.11, No.3, pp.217–229.

林 知己夫, 駒沢 勉, 1983, 数量化理論とデータ処理, 朝倉.

平井 敦, 1967, 鋼橋 III, 技報堂.

北郷 薫, 1972, 設計工学基礎, p.18, 丸善.

堀 浩一, 1991, "設計と AI のかかわりの広がりと変化," 日本機械学会誌, Vol.94, No.877, pp.1010–1014.

Howard, H. C., Wang, J., Daube, F., and Rafiq, T., 1989, "Applying Design-Dependent Knowledge in Structural Engineering Design," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.3, No.2, pp.111–123.

Hua, K., Schmitt, G., and Faltings, B., 1992, "What Can Case-Based Design Do?" *Workshop Note of AID '92, Second International Conference on Artificial Intelligence in Design*, pp.44–53.

池田 尚治 (編), 1992~1994, 橋梁と基礎, Vol.26, No.1 ~ Vol.28, No.1, 建設図書.

池上 高志, 1993, "遺伝的アルゴリズムと創発的進化," 計測と制御, Vol.32, No.1, pp.63–68.

池本 文典, 川上 浩司, 小西 忠孝, 1996, "新規設計における解候補の創出プロセスモデル," 計測自動制御学会論文集, Vol.32, No.10, pp.1447–1453.

伊東 孝, 1986, 東京の橋, p.98, 鹿島出版会.

伊藤 学, 1991, "橋と景観・その概況," *JSSC* (特集 鋼橋と景観), No.2, pp.2–5.

岩田 一明監修（大阪科学技術センター CIM 研究会編）, 1987, コンピュータ設計・製図 I —CAD/CAM の基礎—, 共立出版.

神藤 富雄, 1992, "設計と感性工学 (自動車開発を事例として)," 日本機械学会 部門・関西支部第 11 回講習会 設計のためのニューテクノロジー 教材, pp.59–67.

Joshi, S. P., Umaretiya, J. R., and Joshi, S. B., 1991, "Decision-Making in Preliminary Engineering Design," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.5, No.1, pp.21–30.

日本道路協会編, 1977, 橋の美 道路橋景観便覧, 丸善.

日本道路協会編, 1990, 道路橋年報 (昭和 61・62 年度版), 丸善.

土木学会 構造工学委員会編, 1982, 美しい橋のデザインマニュアル, 土木学会.

日本鋼構造協会編, 1985, 鋼橋計画マニュアル, 日本鋼構造協会.

鴨野 一夫, 1992, "あやとりはし," 橋梁と基礎, Vol.26, No.8, p.176.

関西道路研究会 道路橋調査研究委員会編, 1991, 人道橋の景観設計 その機能と美しさ, 鹿島出版会.

Kawaguchi, A., Motoda, H., and Mizoguchi, R., 1991, "Interview-Based Knowledge Acquisition Using Dynamic Analysis," *IEEE Expert*, Vol.6, No.5, pp.47–60.

Kincaid, R. K., 1992, "Minimizing Distorsion and Internal Forces in Truss Structures via Simulated Annealing," *Structural Optimization*, Vol.4, No.1, pp.55–61.

Kirkpatrick, S., Gellat, Jr., M., 1983, "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, Vol.220, No.4589, pp.671–680.

Kirsch, U., 1993, *Structural Optimizations, Fundamentals and Applications*, Springer-Verlag.

岸 義樹, 1992, "設計における思考支援システムの研究 —Prologによる置換操作基礎モデル—," 精密工学会誌, Vol.58, No.5, pp.803–810.

小林 重信, 1993, "特集にあたって (特集 遺伝的アルゴリズム)," オペレーションズ・リサーチ, Vol.38, No.7, pp.328–329.

Kolodner, J. L., 1992, "CBR for Design," *Workshop Note of AID '92, Second International Conference on Artificial Intelligence in Design*, pp.54–56.

Kolodner, J. L. and Wills, L. M., 1996, "Powers of Observation in Creative Design," *Design Studies*, Vol.17, No.4, pp.385–416.

近藤 邦雄, 1989, "デザインと人間の感性," 精密工学会誌, Vol.55, No.10, pp.1735–1740.

小西 一郎 (編), 1977, 鋼橋 設計編 I, II, 丸善.

Lakmazaheri, S. and Rasdorf, W. J., 1989, "Constraint Logic Programming for The Analysis and Partial Synthesis of Truss Structures," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.3, No.3, pp.157–173.

Leelawat, C., Niiro, T., and Kuribayashi, E., 1990, "Application of Expert System in Bridge Superstructure Selections," *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, Vol.7, No.1, pp.37–45.

Leonhardt, F., 1982, (田村 幸久監訳 1998), BRÜCKEN/BRIDGES, p.9, メイセイ出版.

Levitt, R. E., 1998, "Toward Analysis Tools for The Engineering Process," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.12, No.1, pp.13–28.

Lottaz, C., Stalker, R., and Smith, I., 1998, "Constraint Solving and Preference Activation for Interactive Design," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.12, No.1, pp.77–78.

Madanshetty, S. I., 1995, "Cognitive Basis for Conceptual Design," *Research in Engineering Design*, Vol.7, No.4, pp.232–240.

Maher, M. L., 1987, "Expert Systems for Structural Design," *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.1, No.4, pp.270–283.

Maher, M. L. and Zhang, D. M., 1993, "CADSYN: A Case-Based Design Process Model," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.7, No.2, pp.97–110.

Maher, M. L., Gomez, S., and Garza, A., 1997, "Case-Based Reasoning in Design," *IEEE Expert —Intelligent Systems and Their Applications*, Vol.12, No.2, pp.34–41.

Mark, W. S. and Simpson, R. L., 1991, "Knowledge-Based Systems: An Overview," *IEEE Expert*, Vol.6, No.3, pp.12–17.

松田 聡浩, 吉村 忍, 矢川 元基, 平田 隆教, 西岡 正夫, 1998, "ニューラルネットワークによる感性情報の定量化と満足化設計法," 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.64, No.619, pp.1004–1012.

松本 勝, 白石 成人, 1991, "風工学的観点からのアプローチ," *JSSC* (特集 鋼橋と景観), No.2, pp.16–25.

McLaughlin, S. and Gero, J. S., 1987, "Acquiring Expert Knowledge from Characterized Designs," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.1, No.2, pp.73–87.

三木 光範, 杉山 吉彦, 内田 雄治, 1991, "オブジェクト指向によるはりの変形解析," 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.57, No.541, pp.212–217.

溝口 理一郎, 1991, "設計問題の知識工学的考察," 機械の研究, Vol.43, No.1, pp.1–7.

Moore, C. J., Miles, J. C., and Rees, D. W. G., 1997, "Decision Support for Conceptual Bridge Design," *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol.11, No.3, pp.259–272.

森 典彦, 1991, デザイン工学 —ソフトシステムの設計計画—, 朝倉書店.

Morse, D. V. and Hendrickson, C., 1990, "A Communication Model to Aid Knowledge-Based Design Systems," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.4, No.2, pp.99–115.

村瀬 邦茂, 大久保 守, 仲田 勝彦, 1992, "唐木田大橋の計画・設計," 橋梁と基礎, Vol.26, No.11, pp.2–8.

長町 三生, 1988, "感性の評価と情緒工学," 日本機械学会誌, Vol.91, No.838, pp.955–961.

長町 三生, 1989, 感性工学 感性をデザインに活かすテクノロジー, 海文堂.

永田 努, 畑村 洋太郎, 1993, "設計者の思考過程を支援する設計データベースの構成," 日本機械学会 第 71 期全国大会 講演論文集 (Vol. F), No.930–63, pp.166–168.

Nagy, R. L., Ulman, D. G., and Dietterich, T. G., 1992, "A Data Representation for Collaborative Mechanical Design," *Research in Engineering Design*, Vol.3, No.4, pp.232-243.

仲 義輝, 小野里 雅彦, 住岡 晋一郎, 岩田 一明, 1997, "設計・生産における組織的業務遂行に関する構造のモデリング," 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.63, No.616, pp.4417–4423.

中島 尚正 (日本機械学会編), 1993, "知的機械システムと人工物工学 (付記)," 形態とデザイン, pp.267–271, 培風館.

中沢 弘, 松永 久, 清水 良樹, 1999, "人間の設計過程のモデル化に関する研究 (第1報, 優れた設計者の設計過程の分析)," 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.65, No.631, pp.1266–1272.

成岡 昌夫, 伊藤 鉱一, (小西 一郎編), 1976, 鋼橋 設計編 II, 4 章, 丸善.

成田 信之, 藤野 陽三, 宮田 利雄, 長井 正嗣, 1992, "斜張橋国際セミナー報告, 橋梁と基礎, Vol.26, No.6, pp.24–28.

成瀬 勝武, 鈴木 俊男, 1981, 橋梁工学 (鋼橋編), 森北.

Navinchandra, D., Sycara, K. P. and Narasimhan, S., 1991, "A Transformational Approach to Case-Based Synthesis," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.5, No.1, pp.31–45.

Nishido, T., Maeda, K., and Nomura, K., 1990, "Study on Practical Expert System for Selecting The Types of River-Crossing Bridges," *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, Vol.7, No.1, pp.239–250.

西川 禕一, 玉置 久, 1993, "遺伝的アルゴリズムと最適化," オペレーションズ・リサーチ, Vol.38, No.7, pp.347–351.

野口 尚孝, 1994, "クロス推論モデルを用いた工業デザイン発想支援システムの試み," 精密工学会誌, Vol.60, No.2, pp.285–290.

尾形 説, 1992, "知識エンジニアにおける知識獲得の実際," 情報処理, Vol.33, No.6, pp.620–622.

大木 直人, 田代 秀夫, 亀倉 龍, 横山 光男, 松下 温, 1992, "個人の主観の相違を考慮したファジイデータベースの提案," 情報処理学会研究報告 人工知能, Vol.92, No.70, pp.21–29.

奥田 建三, 山崎 勝弘, 1990, "事例ベース形推論とその応用例," 情報処理, Vol.31, No.2, pp.244–254.

折原 良平, 1993, "発想支援システムの動向," 情報処理, Vol.34, No.1, pp.81–87.

Paek, Y. J. and Adeli, H., 1988, "Representation of Structural Design Knowledge in a Symbolic Language," *Journal of Computers in Civil Engineering*, Vol.2, No.4, pp.346–364.

Petrie, C. J., Webster, T. A., and Cutkosky, M. R., 1995, "Using Pareto Optimality to Coordinate Distributed Agents," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.9, No.4, pp.269–281.

Poon, J. and Maher, M. L., 1997, "Co-evolution and Emergence in Design," *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol.11, No.3, pp.319–327.

Prasad, N. M. V., Lander, S. E. and Lesser, V. R., 1996, "The Role of Learning in Systems of Reusable Heterogeneous Design Agents," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.10, No.2, pp.163–165.

Perkins, D. N., 1994, "Creativity: Beyond the Darwinian Paradigm," *Dimensions of Creativity, Chap.5*, (Boden, M. A. (ed.)), pp.119–142, MIT Press.

Pu, P. and Reschberger, M., 1991, "Assembly Sequence Planning Using Case-Based Reasoning Techniques," *Knowledge-Based Systems*, Vol.4, No.3, pp.123–130.

Pu, P., 1993, "Introduction: Issues in Case-Based Design Systems," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.7, No.2, pp.79–85.

Ramirez, M. R., 1996, "Engineering Vision: Considerations in a Meaningful Approach to Conceptual Design," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.10, No.3, pp.199–214.

Reich, Y., 1993, "A Model of Aesthetic Judgment in Design," *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol.8, No.2, pp.141–153.

Reich, Y. and Fenves, S. J., 1989, "The Potential of Machine Learning Techniques for Expert Systems," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.3, No.3, pp.175–193.

Rodgers, P. A. and Huxor, A. P., 1998, "The Role of Artificial Intelligence as 'Text' within Design," *Design Studies*, Vol.19, No.2, pp.143–160.

Sabouni, A. R. and Al-Mourad, O. M., 1997, "Quantitative Knowledge Based Approach for Preliminary Design of Tall Buildings," *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol.11, No.2, pp.143–154.

佐伯 彰一編, 1989, 図解 橋梁用語事典, 山海堂.

Salgado, N. K., Aliabadi, M. H., and Callan, R. E., 1997, "Rule Inferencing and Object Orientation for Boundary Elements Mesh Design," *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol.11, No.2, pp.183–190.

下郷 太郎, 1988, "「感性と機械」小特集号発刊に際して," 日本機械学会誌, Vol.91, No.838, p.931.

Schlaich, J., 1992, "Can Conceptual Design Be Taught?" *The Structural Engineer*, Vol.70, No.9, pp.171–172.

Schnier, T. and Gero, J.S., 1996, "Learning Representation for Creative Design Using Evolution," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.10, No.2, pp.175–177.

瀬口 靖幸, 尾田 十八, 室津 義定, 1987, 機械設計工学 2 [システムと設計], p.2, 培風館.

瀬口 靖幸, 田中 正夫, 山口 拓則, 1989, "骨組構造物の概念設計支援の一つの試み (複数候補生成に基づく知識工学的アプローチ)," 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.55, No.520, pp.2533–2537.

関口 利昭, 寺田 和己, 椛木 洋子, 1994, "新湘南バイパス (II 期) 平塚地区高架橋のデザイン," 橋梁と基礎, Vol.28, No.7, pp.7–11.

Smithers, T. and Troxell, W., 1990, "Design is Intelligent Behaviour, But What's The Formalism?" *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.4, No.2, pp.89–98.

Soo, V.-W. and Wang, T.-C., 1992, "Integration of Qualitative and Quantitative Reasoning in Iterative Parametric Mechanical Design," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.6, No.2, pp.95–109.

Soufi, B. and Edmonds, E., 1996, "The Cognitive Basis of Emergence: Implications for Design Support," *Design Studies*, Vol.17, No.4, pp.451–463.

Spangler, W.E., 1991, "The Role of Artificial Intelligence in Understanding the Strategic Decision-Making Process," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol.3, No.2, pp.149–159.

Sriram, D., 1986, "DESTINY: A Model for Integrated Structural Design," *Artificial Intelligence*, Vol.1, No.2, pp.109–116.

Stefik, M., 1981, "Planning with Constraints (MOLGEN: Part 1)," *Artificial Intelligence*, No.16, pp.111–140.

Subrahmanian, E., Konda, S. L., Levy, S. N., Reich, Y., Westberg, A. W., and Monarch, I., 1994, "Equations aren't Enough: Informal Modeling in Design," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol.7, No.4, pp.257–274.

多田 幸生, 1994a, "設計への最適化手法の応用 (1)," 機械の研究, Vol.46, No.7, pp.717–721.

多田 幸生, 1994b, "設計への最適化手法の応用 (2)," 機械の研究, Vol.46, No.8, pp.858–862.

鷹合 基行, 武田 英明, 西田 豊明, 1997, "設計者のための統合的支援環境: Designers Amplifier," 日本機械学会 第7回設計工学・システム部門講演会講演論文集, No.97–69, pp.111–114.

高梨 隆雄, 1989, "感性のメカニズム," 精密工学会誌, Vol.55, No.4, pp.649–650.

高梨 隆雄, 1991, "設計美学に基づく機械設計方法," 日本機械学会 第69回全国大会講演会資料集 (Vol.D), No.910-62, pp.173–181.

高梨 隆雄, 1997, "美的設計方法論," 第15回設計シンポジウム講演論文集, pp.38–43.

田浦 俊春, 1997, "プロセス指向エンジニアリング技法の提唱," 第15回設計シンポジウム講演論文集, pp.33–37.

Takeda, H., Veerkamp, P., Tomiyama, T., and Yoshikawa, H., 1990, "Modeling Design Processes," *AI Magazine*, Vol.11, No.4, pp.37–48.

寺野 隆雄, 1994, "事例ベース推論と知的支援の研究動向," RC112 次世代計算力学システムに関する研究分科会 研究成果報告書, pp.332–342.

Thurston, D. L., 1991, "A Formal Method for Subjective Design Evaluation with Multiple Attributes," *Research in Engineering Design*, Vol.3, No.3, pp.105–122.

辻野 克彦, 西田 正吾, 1995, "知識獲得と機械学習の統合," システム/制御/情報, Vol.39, No.4, pp.159-166.

上田 完次, 1993, "知能化生産システム —知識型知能化から創発型知能化へ," 精密工学会誌, Vol.59, No.11, pp.1755–1760.

上田 完次, 1995, "人工物と生物指向パラダイム," 精密工学会誌, Vol.61, No.4, pp.493–496.

Ulrich, K. T. and Seering, W. P., 1989, "Synthesis of Schematic Descriptions in Mechanical Engineering," *Research in Engineering Design*, Vol.1, No.1, p.3–18.

Verstijnen, I. M. and Hennessey, J. M., 1998, "Sketching and Creative Discovery," *Design Studies*, Vol.19, No.4, pp.519–546.

Visser, W., 1996, "Two Functions of Analogical Reasoning in Design: A Cognitive-Psychology Approach," *Design Studies*, Vol.17, No.4, pp.417–434.

Wang, W. and Gero, J. S., 1997, "Sequence-Based Prediction in Conceptual Design of Bridges," *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.11, No.1, pp.37–43.

鷲津 久一郎, 宮本 博, 山田 嘉昭, 山本 善之, 川井 忠彦, 1981, 有限要素法ハンドブック 基礎編, 培風館.

Welch, R. V. and Dixon, J. R., 1994, "Guiding Conceptual Design Through Behavioral Reasoning," *Research in Engineering Design*, Vol.6, No.3, pp.169–188.

柳生 孝昭, 1995, "人工物工学の課題 —設計論と abduction を中心に—," 精密工学会誌, Vol.61, No.4, pp.497–500.

山口 智治, 白石 圭子, 小野 典彦, 翁長 健治, 1989, "プランニング過程の類似性に着目した類推的問題解決," 情報処理学会研究報告 知識工学と人工知能, Vol.89, No.22, pp.69–75.

山川 宏, 1994, 最適化デザイン (計算力学と CAE シリーズ 9), 培風館.

山本 秀彦, 藤本 英雄, 1993, "生産システム設計支援システムにおける知識獲得 (工作機械に関する知識ベース獲得)," 日本機械学会 第 71 期全国大会 講演論文集 (Vol. F), No.930–63, pp.134–136.

山中 俊治, 1994a, "人工物工学と設計の美学 —アブダクション, プレゼンテーションと美的感覚の関わり—," 日本機械学会誌, Vol.97, No.908, pp.575–578.

山中 俊治, 1994b, "デザインの工学における心と感性," 計測と制御, Vol.33, No.3, pp.186–191.

山岡 孝行, 西田 正吾, 1996, "設計意図を考慮にいれた事例ベース設計支援," 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J79–A, No.2, pp.175–186.

山岡 俊樹, 1996, “エルゴノミクスと感性設計,” 日本機械学会誌, Vol.99, No.928, pp.199–202.

横井 俊夫, 相場 亮, 1989, “制約ロジック・プログラミング —知識処理への新しいパラダイム—,” 情報処理, Vol.30, No.1, pp.29–38.

吉川 弘之, 1979, “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.

Zienkiewicz, O. C. and Morgan, K., 1982, *Finite Elements and Approximation*, John Wiley & Sons.

関連論文

学術雑誌論文

1. 田中 正夫，平 俊男，(1994)，構造物の概念設計支援のための事例の感覚的評価と候補生成，日本機械学会論文集 (C 編)，第 60 巻，第 570 号，pp.519–524.

   (同上英文) Tanaka, M. and Hira, T., (1996), "Sensory Evaluation of Past Design Cases and Design Candidates for Conceptual Structural Design," *JSME International Journal*, Vol.39, No.3, Ser.C, pp.645–651.

2. 田中 正夫，平 俊男，(1995)，構造物の概念設計における遺伝子的事例ベース，システム制御情報学会論文誌，第 8 巻，第 9 号，pp.458–465.

3. 平 俊男，田中 正夫，(1996)，遺伝的手続きによるゆらぎを導入した知識／事例に基づく構造物概念設計アシスタント，日本機械学会論文集 (C 編)，第 62 巻，第 601 号，pp.519–524.

4. 平 俊男，田中 正夫，(1998)，設計者の個性を考慮する構造物の概念設計支援，日本機械学会論文集 (C 編)，第 64 巻，第 621 号，pp.1618–1625.

   (同上英文) Hira, T. and Tanaka, M., (1999), "Personalized Assistant for Conceptual Structural Design," *JSME International Journal*, Vol.42, No.2, Ser.C, pp.435–444.

国際会議論文

1. Tanaka, M., Hira, T., and Yamaguchi, T., (1993), "Expert System for Structural Design Based on Rule/Case-Based Reasonings," *Computational Mechanics from Concepts to Computations: Proceedings of The Second Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics*: Sydney, Valliappan, S., Palmano, V.A., and Tin-Loi, F. (eds), Balkema, Rotterdam, pp.991–996.

2. Tanaka, M. and Hira, T., (1994), "Genetic Case-Base for Conceptual Structural Design", *Proceedings of Japan-U.S.A Symposium on Flexible Automation*: Kobe, Volume III, ISCIE, pp.1337–1340.

3. Hira, T. and Tanaka, M., (1996), "Candidates Generation for Conceptual Structural Design Assistant through Genetic Operations Based on Design Rules and Cases," *Proceedings of Japan-U.S.A Symposium on Flexible Automation*: Boston, Stelson, K. and Oba, F. (eds), ASME, pp.641-644.

4. Hira, T. and Tanaka, M., (1997), "Personalization of Conceptual Structural Design Assistant through Genetic Operations," *Proceedings of The International Symposium on Optimization and Innovative Design 97*: Tokyo, Yamakawa, H., Yoshimura, M., Morishita, S., and Arakawa, M. (eds), JSME, CD-ROM proceedings ♯141.

学術講演論文

1. 田中 正夫，平 俊男，(1992)，構造物の概念設計における事例知識の利用，第41回応用力学連合講演会 講演予稿集，pp.39–40.

2. 田中 正夫，平 俊男，(1992)，構造物の概念設計における感覚的側面を含む事例知識の利用，日本機械学会関西支部 第67期定時総会講演会 講演論文集，No.924–1，pp.94–96.

3. 田中 正夫，平 俊男，(1992)，構造物の概念設計における感覚的評価:事例知識の設計支援への利用，日本機械学会 機械力学・計測制御講演論文集 (Vol.A)，No.920–55, pp.411–414.

4. 田中 正夫，平 俊男，(1992)，構造物の概念設計アシスタント (事例知識に基づく主観的意志決定の支援)，日本機械学会 第2回設計工学・システム部門講演会 講演論文集，No.920–103，pp.136–140.

5. 田中 正夫，平 俊男，(1993)，設計における感覚的因子と候補生成のゆらぎ，第16回NCP研究会・機械の強度と形態研究懇話会 (日本機械学会関西支部) シンポジウム論文集，pp.91–92.

6. 田中 正夫，平 俊男，(1993)，設計事例の感覚的・主観的評価と構造物の概念設計アシスタントにおける候補生成，日本機械学会関西支部 第68期定時総会講演会 講演論文集，No.934–3，pp.56–58.

7. 田中 正夫，平 俊男，(1993)，設計候補生成における遺伝アルゴリズム的ゆらぎの利用 (構造物の概念設計を例として)，日本機械学会 第3回設計工学・システム部門講演会 講演論文集，No.930–27，pp.52–53.

8. 田中 正夫，平 俊男，(1993)，遺伝子的構造設計事例ベース，日本機械学会 平成5年度材料力学部門講演会 講演論文集，No.930–73，pp.713–714.

9. 田中 正夫，平 俊男，(1993)，設計事例ベースの遺伝子的表現，第17回NCP研究会・機械の強度と形態研究懇話会 (日本機械学会関西支部) シンポジウム論文集，pp.61–62.

10. 田中 正夫，平 俊男，(1994)，遺伝子的事例ベースによる構造物の概念設計候補生成，日本機械学会関西支部 第 69 期定時総会講演会 講演論文集，No.944–3，pp.10–12.

11. 田中 正夫，平 俊男，(1994)，設計事例に基づく候補生成：遺伝的操作によるアルゴリズムの提案，日本機械学会 第 4 回設計工学・システム部門講演会 講演論文集，No.940–22，pp.415–419.

12. 田中 正夫，平 俊男，(1994)，知識/事例に基づく設計支援 (遺伝的手続きによる候補生成)，第 18 回 NCP 研究会・機械の強度と形態研究懇話会 (日本機械学会関西支部) シンポジウム論文集，pp.9–12.

13. 平 俊男，田中 正夫，(1995)，多価値規準を考慮する集団に基づく設計候補生成とそのゆらぎ (構造物を例として)，日本機械学会関西支部 第 70 期定時総会講演会 講演論文集，No.954–1，pp.25–27.

14. 田中 正夫，平 俊男，(1995)，創発と設計，日本機械学会関西支部 第 70 期定時総会講演会 フォーラム・ワークショップ資料集，pp.124–125.

15. 平 俊男，田中 正夫，(1995)，合議を模した複数エージェントによる設計支援システム (遺伝的アルゴリズム利用の提案)，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，No.95–24，pp.311–312.

16. 平 俊男，田中 正夫，(1996)，設計者の個性を考慮する構造物の概念設計アシスタント (主観的価値観の獲得)，日本機械学会 第 73 期通常総会講演会講演論文集，No.96–1，pp.219–220.

17. 平 俊男，田中 正夫，(1996)，遺伝的手続きによる概念設計アシスタントの個性化，日本機械学会 第 6 回設計工学・システム部門講演会講演論文集，No.96–45, pp.250–252.

18. 平 俊男，名古 朋子，田中 正夫，(1997)，構造形態イメージより想起される感覚的印象に関する考察 (構造物の概念設計を例として)，日本機械学会 第 7 回設計工学・システム部門講演会, No.97-69, pp.64–66.

19. 平 俊男，田中 正夫，(1997)，概念設計における視覚的思考に関する一考察，NCP 研究会・機械の強度と形態研究懇話会 (日本機械学会関西支部) 第 21 回シンポジウム論文集, pp.75–76.

謝　辞

本研究を進めるにあたり多大なご指導と終始懇切なご鞭撻を賜った大阪大学大学院基礎工学研究科 田中正夫教授に，深甚なる謝意を心から申し上げる．また，本論文をまとめるに際し，有益なご教示とご指導を賜った大阪大学大学院基礎工学研究科 小倉敬二教授，小坂田宏造教授ならびに宮崎文夫教授に，感謝の意を申し上げる．

奈良工業高等専門学校において本研究を進めるにあたって，常に懇切なるご指導と暖かなご配慮を賜った機械工学科 関口秀夫教授，小畠耕二教授をはじめとする機械工学科の教官，技官の方々，ならびに福岡秀和校長に深く感謝申し上げる．

大阪大学在学中から，終始暖かいご教示と激励をいただいた山口拓則氏 (現 (株) 神戸製鋼所)，花原和之氏 (現 神戸大学工学部) をはじめとする諸先輩方，よき同輩であった岡田健一氏 (現 (株) 島津製作所) に感謝を申し上げる．また，研究に協力いただいた川口 淳氏 (現 住友重機械工業 (株)) をはじめとする大阪大学田中研究室の諸氏には，在学中はもちろん，現在に至るまで様々な面からの支援をいただいた．さらに，奈良工業高等専門学校においても学生諸君から多くの励ましを得た．記して謝意を表する．

本研究は，故瀬口靖幸 元大阪大学基礎工学部教授のご指導に端を発している．学部ならびに著者の 1990 年 4 月の研究室配属から先生が急逝された 1990 年 6 月末まで，短期間ではあるが様々な事を通じて多くの薫陶を受けた事を，稿を終えるにあたり改めて感じている．その事をここに記して深く感謝するとともにご冥福をお祈りする．

最後に，若輩者である著者を支えていただいた，著者の周囲のすべての方々に心からの感謝を申し上げたい．

平成 11 年 12 月