

# 実験的手法に基づく設計知識とその利用に関する分析\*

武田英明\*\*、富山哲男\*\*\*、吉川弘之†

Analysis of design knowledge and its utilization based on experimental method

Hideaki Takeda, Tetsuo Tomiyama and Hiroyuki Yoshikawa

In this paper, knowledge and its utilization in design processes are analyzed in two ways by using protocol data. First, we extract 134 pieces of knowledge that are directly appeared in the protocol data. We classify them into nine categories and discuss how they are used in design processes. Second, we assume that knowledge is represented by relationship of concepts, and extract concepts and relations of concepts from the protocol data. We interpret the extracted network of concepts by the connectionist approach. We can identify the important concepts and how their degrees of importance change during the design process by regarding the activations of nodes as the intensity of importance.

**Keywords:** design theory, design experiment, protocol analysis, knowledge, connectionist approach

## 1. 緒言

近年、設計においてエキスパートシステムなどの知識処理の利用に多くの関心が持たれるようになっていく(例えば大須賀<sup>1)</sup>)。設計には多くの知識が用いられており、知識処理技術の利用は設計作業の効率化、計算機支援に貢献するものと思われる。しかし、設計における知識あるいは知識利用がどのようなものであるかについてはこれまであまり議論が行なわれていない。そこで、本論文では設計実験<sup>2)</sup>で得られたプロトコルを元に設計における知識とその利用について分析を行なう。なお、本論文で用いた設計実験の名称、設定などは武田他<sup>2)</sup>で述べられているものである。

## 2. 実験による結果の分析

ここでは体重計の設計を課題とする実験(実験 II-B-1, 2)を対象として分析を行なった(武田他<sup>2)</sup>参照)。

この課題の主要な点は限られた空間にはいる変位を検出する機構の提案である。

### 2.1. 設計における問題解決に注目した分析

設計での問題解決過程は[問題提起]、[提案]、[展開]、[評価]、[決定]の5つの段階からなる設計サイクルによって行なっているとみることができる<sup>3)</sup>。すなわち、設計過程はこの設計サイクルの繰り返しで構成され、設計対象は順次詳細化されていく。各実験に関して発話データを文ごとに5つの段階に分類を行なった。各々の段階が発話が全体に占める割合を表1に示す。

ここから分かるように、提案段階に分類される発話が全体の5割弱を占め、2割程度を問題提起段階と評価段階が占める。展開段階は1割以下でしかない。ただし、各段階では発話のしやすさに差があり、注意が必要である。特に展開段階は発話が思考時間に比べ、少ない。この理由として、

1. 展開段階には作図作業が含まれるが、この間は被験者はほとんど発話を行なっていない。
2. 展開段階では結果のみが発話される場合が多い。これはここでの作業(例えば、部品の組合せ作業)は慣れている作業であり、このような慣れている作業は発話がなされづらい(武田他<sup>2)</sup>参照)。

\*原稿受付 平成 年 月 日。

\*\*正会員 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科(生駒市 高山町 8916-5)

\*\*\*正会員 東京大学工学部(東京都文京区本郷 7-3-1)

†正会員 東京大学(東京都文京区本郷 7-3-1)

Table 1: Classification of protocol

実験	問題提起	提案	展開	評価	決定
II-B-1(%)	17.4	53.5	7.4	20.7	8.3
II-B-2(%)	23.0	44.9	9.2	19.5	4.3
II-B-3(%)	24.0	43.1	3.5	18.3	10.0
合計(%)	21.1	47.6	6.7	19.6	7.6

発話	[減速が足りないならば，そこに ウォームを使おうか．それなら緩まないで固定する必要もない．]
抽出知識	ウォームを使うと緩まないで固定する必要がない

Fig. 1: Extraction of knowledge

が挙げられる．反対に問題提起段階や提案段階では比較的容易に発話を行なっているように観察された．

また3実験の違いをみると，実験II-B-2と実験II-B-3はほぼ同様のパターンであり，実験II-B-1と比較すると，問題提起段階が多く，提案段階が少ない．これには被験者の特性が関わっている．

すなわち，実験II-B-3は他の2実験と異なり被験者が学生である．残る2実験の被験者は技術者であるが，実験II-B-1の被験者は機械系の設計に携わった技術者が含まれており，実験II-B-2では含まれていない．また，実験II-B-2では結局設計は予定された時間以上かかり，途中で打ち切っている．以上のことから，問題提起段階が多く，提案段階が少ないという傾向は非専門的な被験者の特徴であり，より思考錯誤的に設計を行なった，あるいは設計の進行が遅いといったことを示しているものと考えられる．

## 2.2. 設計知識の収集と分類

まず，発話データから知識を収集し，分類を行なった．ここでは設計知識を[設計過程において，設計者の思考に直接影響を与えている記憶情報]と定義する．この定義に基づき実験II-Bの3実験の発話データから設計知識を抽出した．発話データとそこから抽出した知識の対応例を図1に，また抽出した知識の例を図2に示す．抽出した知識は実験II-B-1で74，実験II-B-2で29，実験II-B-3で31，合計134であった．

これらの知識を観察すると，多くはある概念から別の概念を導く関係とみることができる．設計者はその時点の設計途上の設計対象や要求仕様の中の概念に対して，持っている知識で適用可能なものを適用して，新しい概念を得ている．さらに，そこで用いられている概念を以下のように7つに大別することができる．  
(E) モノ 実体．現実にはその名前で指し示される．  
(F) 機能 注目しているモノが他のモノとの関係にお

知識の例	種類	出現場所
プーリー径はどんなに細くても10mmである	MA	展開
強度がないといけない所は板金でつくる	AE	提案
動滑車ではストロークが2倍になる	EF	展開
回転運動するものの動きを悪くするには，ワッシャを使って締めてやればい	FE	提案
部品数は減らした方がいい	P	提案
くり抜くと強度が落ちる	EA	評価
最小プーリー曲率は動的特性である	AA	展開
ウォームを使うと緩まないで固定する必要がなくなる	FE	提案
ビスの頭を出さないために樹脂をアンダーカットして引っかけることができる	TC	提案
普通の体重計の目盛りは実は360度も回っていない	EA	問題提起
自動組立では上からしか作業ができない	MA	提案

Fig. 2: Examples of extracted knowledge

いて持つ役割．

- (A) 属性 注目しているモノの形状，寸法等の性質．
- (T) 位相関係 モノとモノとの位相的な接続関係．「つながっている」など．
- (C) 接続方法 モノとモノとの接続方法．例「固定」．
- (M) 製作方法 モノの製作方法．
- (P) 設計方針 設計のノウハウなど．例「設計の順序」．
- (FE) 機能からそれを備えたモノを導出する知識
- (EF) モノからその機能を導出する知識
- (AE) 属性からそれを備えたモノを導出する知識
- (EA) モノからその属性を導出する知識
- (AA) 属性から他の属性を導出する知識
- (TC) モノとモノの位相的な接続関係からその接続方法を導出する知識
- (EM) モノからその製作方法を導出する知識
- (MA) モノの製作方法からその属性を導出する知識
- (P) 設計方針に関する知識

これらの9種類の知識を概念間の関係として図示すると図3のようになる．

## 2.3. 設計知識と設計過程の関係

まず設計サイクルの5段階と知識の関係について調べた．抽出した知識がどの段階で現れているかを表2に示す．なお決定段階は知識が出現しないので省いた．

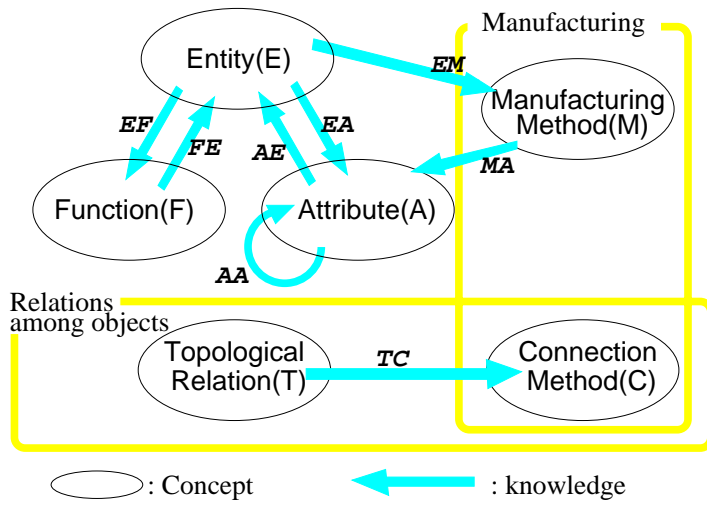


Fig. 3: Classification of knowledge

Table 2: Knowledge classification by design cycle

実験	問題提起	提案	展開	評価	合計
II-B-1	2	43	7	22	74
(割合 [%])	(2.7)	(58.1)	(9.5)	(29.7)	
II-B-2	5	20	0	4	29
(割合 [%])	(17.2)	(69.0)	(0.0)	(13.8)	
II-B-3	5	18	1	7	31
(割合 [%])	(16.1)	(58.1)	(3.2)	(22.6)	
合計	12	81	8	33	134
(割合 [%])	(9.0)	(60.4)	(6.0)	(24.6)	

ここから分かるのは、最も多いのは提案段階で約6割の知識が現れている。これは、提案段階での発話量(全体の5割弱)に比べても多い。2番目に多い評価段階は2割強で、発話量に対してやや多い。逆に問題提起段階は1割以下と発話量に対して少ない。展開段階は1割以下と発話量と変わらない。

また、実験間を比較すると、発話量の比較のときと同様に実験 II-B-2, 実験 II-B-3 は共通のパターンを示す。実験 II-B-1 は他の2実験に比べ多くの知識が現れた。特に提案, 評価段階での出現が著しい。実験 II-B-1 は他の2実験に比べより専門的・被験者であるので、これらの段階での知識利用が多いことがより専門的・被験者のパターンであると考えられる。逆にいえば、提案, 評価の段階で利用可能な知識を多く持つことがより専門的・被験者を可能にしている。

次に2.2項で分類した9種類の知識がどの段階で使われているかを調べた。3実験の合計を表3に示す。知識 FE(機能 モノ) や知識 TC(位相 接続) のように一つの段階にしか現れないものの他に、いくつかの段階で共通に用いられるものがあることがわかる。しかし同じ知識でも段階により働きが異なることがある。各段階での知識の働きについて調べると、知識の利

Table 3: Knowledge utilization in design processes

知識種類	問題提起	提案	展開	評価	合計
FE(機能 モノ)		<u>30</u>			30
EF(モノ 機能)	<u>5</u>	1	1	1	8
AE(属性 モノ)		1			1
EA(モノ 属性)	7	<u>15</u>		<u>16</u>	38
AA(属性 属性)		1	<u>3</u>		4
TC(位相 接続)		<u>24</u>			24
EM(モノ 製造)		1	<u>2</u>	<u>6</u>	9
MA(製造 属性)		<u>5</u>	<u>2</u>	<u>10</u>	17
P(設計方針)		3			3
合計	12	81	8	33	134
(割合 [%])	9.0	60.4	6.0	24.6	

時間	対象一般					関係 TC	製作関連	
	FE	EF	AE	EA	AA		EM	MA
0:00-0:20	5			7				
0:20-0:40			1	1			1	1
0:40-1:00		3		2		3		1
1:00-1:20	1			2		4	2	2
1:20-1:40	1			2	2	2	3	3
1:40-2:00								1
2:00-2:20						9		5
2:20-2:40	1					1		
2:40-3:00							1	2
3:00-3:20								
3:20-3:40				1		1		
3:40-4:00								
4:00-4:20								
4:20-4:40				1				
4:40-5:00								
合計	8	3	1	16	2	20	7	15

Fig. 4: Transition of knowledge appearance

用法は主に2種類に分けることができる。一つは知識は各段階での主な行為自身(例えば、提案段階ならば提案をすること)に使われる場合である。もう一つは主な行為を補助する場合に用いられる場合である。例えば提案段階では、知識 FE(機能 モノ) は機能が分かっているが具体的なイメージがないときにあるモノを提示するのに使われ、主な働きであるが、知識 EA(モノ 属性) はそのモノが持つ属性により提案を理由付けるときに使われ、補助的利用である。表3で、枠で囲まれた箇所は主な働きを、下線は補助的な働きを示す。これをみると、知識 EA や知識 MA のように同一の種類知識は、提案段階と展開・評価段階では利用の仕方が相補的(前者が主な働きならば後者が補助的、またはその逆)である傾向があることがわかる。

#### 2.4. 知識の利用と設計過程の関係

次に設計過程全体の中で知識がどういう場面で用いられているかを調べた。ここで挙げた概念のうち、[モノ], [機能], [属性], [位相関係] は対象のもつ性質一般に関する概念であり、[接続方法] と [製作方法] は対象の製作に関する概念である。また、対象自身に関

する概念([もの], [機能], [属性], [製作方法])か他者との関係において意味をもつ概念([位相関係], [接続方法])と分けることもできる(図3参照)。この分類を利用して、知識を対象一般(知識FE, EF, AE, EA, AA), 対象間の関係(知識TC), 製作関連(知識EM, MA)の3つに分類する。これらの知識が実験の始まりから終わりまでのどの時点で現れているかについて実験II-B-1に関して調べたものを図4に示す。

総数が多くないため明確ではないが、全体的な傾向としては、開始より3時間程度の間において表の左上から右下に分布している。これは、機能や属性といった対象一般から対象間の関係、そして製作関連といった順に進んでいることを示しており、一般に言われている設計方法論、設計手順と合致している。全般的な傾向としては上記の通りであるが、興味深いのは設計のごく初期の頃(開始後20分後)から製作に関する知識が参照されていることである。すわなち被験者は概念的な設計を行なっていると思われる設計の初期段階から単に対象自身のみについて考えているわけではなく、その製作法についても考えていることが分かる。

### 2.5. まとめ

本節では明示的に現れる知識について抽出を行ない、知識の種類とその利用方法について、いくつかの側面から分析を行った。ここからわかることは、(1)設計知識は表面上は種々の形をとるが、いくつかの概念間の関係としてみることができ、(2)その知識の形は利用される設計段階によって変化し、また使い方も異なること、(3)設計段階ごとの使われる知識に設計経験が反映されていること、などである。

## 3. 設計概念の構造の分析

前節では、発話データからの知識の抽出によって設計における知識構造について考察した。しかし、明示的に発話に現れたもののみを知識としたために、抽出された知識の数は少なく、発話データの一部しか利用できなかった。また分析方法としては知識の抽出や分類の際に分析者の判断に負う点が多かった点が問題であった。そこで、本節では設計における概念と概念間の関係を調べることで、設計における知識構造を分析する。具体的には、単語を概念として、文を単語間の関係とみなして概念間の関係に変換して分析を行なう。分析方法としては、発話から得られる概念間関係の集合(概念ネットワーク)をコネクショニスト的アプローチで分析する。ここでは、この方法により、設計過程

Table 4: Prepared relations between concepts

関係	意味
is-a	具体-抽象関係を示す
%is-a	もののひとつの状態を示す
inst	具体例、指示語で示されるものを示す
%inst	具体例のある状態を示す
has	図における全体-部分関係を示す

発話	[そやけどバネ縮んだら径変わるでしょ, 外径.]
概念間の関係	(縮む バネ) (縮む 縮んだバネ) (持つ 縮んだバネ 縮んだバネの外径) 背景的知识 (%is-a 縮んだバネ バネ) (is-a 外径 直径) (%is-a 縮んだバネの外径 バネの外径) (is-a バネの外径 外径) (持つ バネ バネの外径)

Fig. 5: Examples of extracted relations

中における概念の重要度を計算する。なお、対象にした実験は「飛ぶおもちゃ」を課題とした実験III-Bの2実験である(武田他<sup>2)</sup>参照)。この課題は一定の大きさ、電源でモータを用いて1分以内に飛び上がる機構を設計せよというものである。

### 3.1. 概念ネットワークの作成

ここでは、概念とは名詞あるいは動詞で表せるものとする。また概念間には関係があり、概念間の関係によって文の意味が表されるものとする。ただし、関係は動詞1つと名詞2つの3項関係に限定する。また、基本的な関係を示すために、is-a(具体-抽象関係)などいくつかの関係を予め用意した(表4参照)。また、文に直接現れていないものの、個々の文の理解に必要な関係(主にis-a関係など)は背景的知识として別に記述した。図5に変換例を示す。

このようにして発話を概念とその関係に変換すると、全体としては概念のネットワークとなる。各実験の概念のネットワークの規模は概念数で354と415、関係の数で619と1024(順に実験III-B-1とIII-B-2の値)であった。ただし、この変換に利用した発話は発話データ全体に対して順に22.3%と30.8%であった。

### 3.2. 概念の重要性の計算

半田ら<sup>4)</sup>は文章中における概念の重要性を調べる方法として、次のような方法を示した。まず概念の重要性を評価する基準として

- 重要な概念に近接した概念はやはり重要、
- 他の多くの概念と近接している概念ほど重要

を挙げた。このとき概念のネットワークにおいて、各ノードの活性度をコネクショニスト的アプローチによって伝搬させることにより、この2つの重要性の基準が満たすことができる。このとき、飽和状態に達したと

Table 5: List of the 20 highest nodes

順位	実験 III-B-1		実験 III-B-2	
	概念	活性値	概念	活性値
1	おもちゃ	2.240	レバー	3.198
2	ギア	2.008	スイッチ	2.761
3	モータ	1.932	おもちゃ	1.869
4	バネ	1.457	ギア	1.768
5	スピード	1.348	スイッチ・オン	1.712
6	ネジ	1.260	バネ	1.557
7	機械全体	1.243	支点	1.481
8	シャフト	1.220	スイッチ板	1.442
9	板	1.216	スイッチ・オフ	1.315
10	圧縮バネ	1.207	押しボタン	1.226
11	直径	1.203	カム	1.217
12	ラック	1.181	手	1.198
13	ラック & ピニオン	1.163	接点	1.187
14	支点	1.157	シリンダー	1.176
15	ウォーム & ホイール	1.152	モータ	1.154
16	カム	1.131	機構	1.153
17	初期状態のおもちゃ	1.114	切り欠けの部分	1.130
18	引っ張りバネ	1.104	押しした何か	1.129
19	スイッチ	1.095	一番長い部分	1.111
20	ストローク	1.089	エネルギー	1.090

きの活性度はそのノードを示している概念の重要度と見なすことができる。ここでいうコネクショニスト的アプローチ (例えば Rumelhart<sup>5)</sup>) とは、各ノードに活性値を与え、リンクで近接するノードへ、その活性値からある計算方法 (入出力関数) による値を伝搬させるというものである。

ノードの結合の仕方が線形である場合、行列計算で活性値を求められる。ノードが  $n$  あるとき、 $(i, j)$  成分がノード  $i$  とノード  $j$  の関係を示す  $n \times n$  行列  $A$ 、各成分がノードの時点  $t$  での活性値を示す  $n$  次元のベクトル  $X(t)$ 、各成分がノードへの定常入力を示す  $n$  次元のベクトル  $C$  を考える。  $X(0) = C$  を初期値として、

$$X(t+1) = AX(t) + C \quad (t = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

となる。  $X$  が収束する場合、収束値  $X_{inf}$  は、

$$X_{inf} = (I - A)^{-1}C \quad (2)$$

であるが、実際には  $A$  の成分は 0 が多いので、(2) 式ではなく、(1) 式を繰り返し計算することで比較的はやく収束し、値を求めることができる。

この方法に従い、設計過程における重要概念を計算する。ここでは、名詞に相当する概念をノードに、動詞に相当する概念をリンクと見なす。あるノード  $i$  からノード  $j$  へのリンク及びその逆方向のリンクの結び付きの強さは、動詞の種別を無視して、名詞  $i$  と名詞  $j$  を関係つける動詞の出現回数を、適当な定数で割った値である (収束を保証するため)。また自分自身へのリンクの値は 1 を先の定数で割った値である。概念ネットワークから行列  $A$  の値を定め、(1) 式を繰り返し計算を行なうプログラムを作成して、計算を行なった。

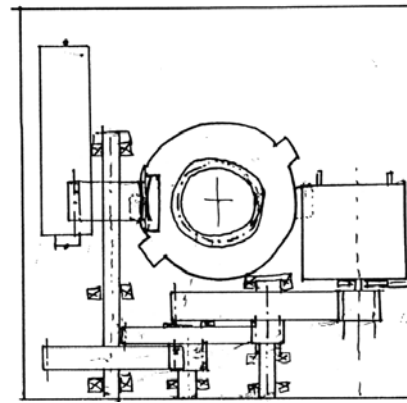


Fig. 6: The drawing in Experiment III-B-1

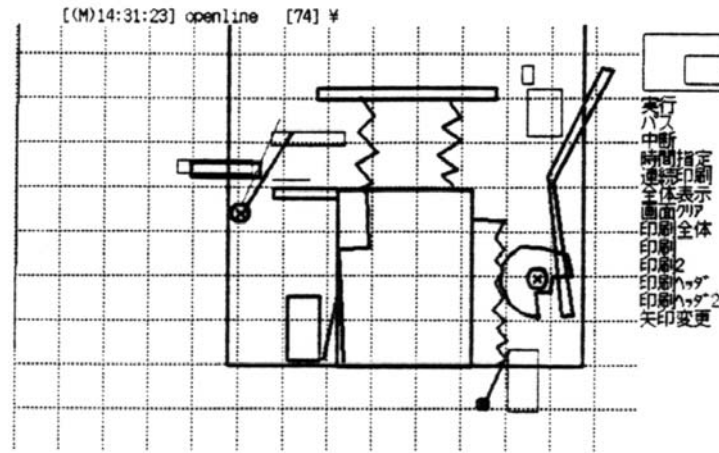


Fig. 7: The drawing in Experiment III-B-2

なお、各ノードへの定常入力 ( $C$  の各要素) は 1 を与えた (従って  $X(0)$  の要素も同一)。

### 3.3. 設計過程全体に対する考察

設計過程全体での主要な重要概念を調べるために、is-a関係の概念を同一化して計算を行なった。収束した活性値の上位 20 ノードを表 5 に示す。定常入力 1 を越える部分が活性値として意味を持っている。

2 実験の上位 20 にある概念で共通なものとしては、[おもちゃ]、[モータ]、[バネ]、[ギア]、[カム]、[支点]、[スイッチ] の 7 個があった。これらは、与えられた課題を解くのに必要な概念であったということが予想される。さらに観察すると、実験 III-B-1 では実験 III-B-2 より [モータ]、[ギア] が上位にあり、またそれらに関連する [スピード]、[シャフト] も同様である。実験 III-B-2 では実験 III-B-1 より [スイッチ] およびスイッチに関連するいくつかの概念が上位にある。

実際の設計過程と設計結果の観察からもこれらの概念は重要であると思われた。図 6 に実験 III-B-1 の図面 (手書き、立面図) を図 7 に実験 III-B-2 の図面 (側面図) を示す。実験 III-B-1 ではモータの回転数をギアにより減速する部分が詳細に検討されていた。1 分間にできるだけエネルギーを貯めようとしたためであ

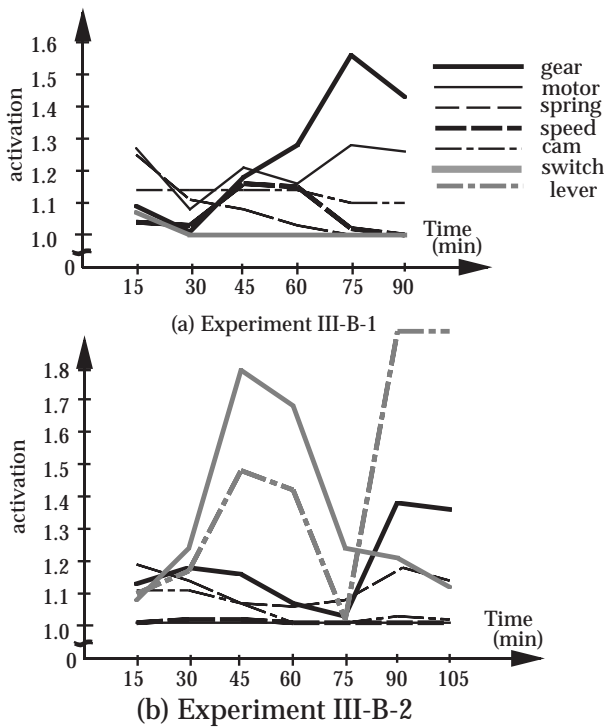


Fig. 8: Transition of the activation

る。実験 III-B-2 では、テコを用いたスイッチの部分  
が他の部分に比べて詳細に検討されていた。ここでは  
時間よりも繰り返し飛ぶという点についてより検討し  
て、それがスイッチの設計となっている。このように  
2 実験のそれぞれの重要と思える概念は活性化も高くな  
っている。したがって、ノードの活性化は重要度の  
度合を測る一つの尺度になっているといえる。

### 3.4. 概念ネットワークの時間的变化

次に設計過程を一定間隔で区切り、区間毎の各概念  
の収束値の変化を観察した。前項で調べた主要な概念  
の活性化値の変化を図 8 に示す。表 5 と同様 1 を越える  
分が各概念がどれだけ活性化されたかを示す。

各区間での活性化値の収束値が高い概念はそのときの  
重要な概念を示している。活性化値の最大を追って  
いくと、設計者の注視点の変化を知ることができる。  
実験 III-B-1 では初期には、[バネ] と [モータ] を中心  
に各種のものが考慮されているが、後期は [ギア] と [モ  
ータ] のみに集中していることがわかる。[スイッチ] は  
初期に現れるだけである。実験 III-B-2 では、中期で  
は [スイッチ] に集中しており、その後 [レバー] ([スイ  
ッチ] と [ギア] を結ぶ部品) と [ギア] に移っていることが  
分かる。[スイッチ] の活性化値が高い中期においては、  
[スイッチ] に関連する概念 (例えば特定のスイッチや  
その状態を示す概念) も同様に高い活性化値を持ってお  
り、この概念のネットワーク上で近傍にある概念を使っ  
て、設計を進めていることが分かる。次に [レバー] と

その近傍の概念 (例えば [機構] 等の概念やレバーの一  
部を指す図形) が高い活性化値を持っている。

### 3.5. まとめ

本節では発話データから抽出された概念ネットワー  
クをコネクショニスト的アプローチによって分析し、  
設計者の注視点の存在やその移動を観察した。設計過  
程では、その時々注視する概念を中心に設計を進め  
ている。今回の分析では、その範囲とは注目している  
点のネットワーク上で近い概念であり、その範囲にあ  
る概念間の関係が 2 節でみてきたような知識として、  
表面に現れてくるものと考えられる。設計者のもつ知  
識構造を概念ネットワークとみた場合、表層的な知識  
は、注視点の周囲にある部分ネットワークであるとい  
える。このため 2 節でみてきたように、場面場面によ  
り異なった形の関係になると考えられる。

## 4. 結言

本研究では、設計知識処理技術の基盤として、設計  
における知識について 2 つの方法で分析した。今回の  
分析からわかることは、設計における知識は、これま  
で知識工学やエキスパートシステムなどで扱われてき  
たものより、極めて柔軟な構造をもっているというこ  
とである。これがこれまでの設計向き知識ベースシス  
テムが限定された範囲でしか適用・利用可能でしかな  
かった原因と考えられる。例えば、利用の目的によっ  
て、知識は形や使い方が変化する。また、注視する点  
によって関係する知識の範囲は変化している。知識を  
単に固定的な構造ではなく、このような柔軟な構造と  
して実現することが、汎用的な設計のための知識ベ  
ースシステムを可能にすると考えられる。

## 参考文献

- 1) 大須賀節雄. 次世代 CAD/CAM のための知識処理の応用.  
マグロウヒルブック, (1985).
- 2) 武田英明, 濱田進, 富山哲男, 吉川弘之. 設計実験における  
実験方法の検討と作図過程の分析. 精密工学会誌, 58, 11,  
(1992), 1849.
- 3) 武田英明, 富山哲男, 吉川弘之. 知的 CAD 開発のための設  
計過程の分析と論理による形式化. 精密工学会誌, 57, 6,  
(1991), 1047.
- 4) 半田剣一, 石崎俊. 概念階層構造とコネクショニストア  
プローチによる重要概念の抽出. 情報処理学会第 36 回全国  
大会, (1988), 1685.
- 5) D.E. Rumelhart, J.L. McClelland, and PDP Research  
Group. *Parallel Distributed Processing*. The MIT Press,  
Cambridge, MA, (1986).