

目次

序

第一章 自然認識に関する先行研究

第一節 認知心理学と自然認識に関する研究の動向

一、認知心理学と自然認識に関する研究の動向

二、認知心理学と自然認識

# ニューラルネットワークのモデルによる 生徒の自然認識に関する研究

第二章 自然認識における概念のモデル化

第一節 イメージ化、モデルの活用

一、イメージ化

二、モデルの活用

三、自然認識のモデル化

第三章 認知心理学と自然認識

第一節 知識の構造

一、知識の構造

二、形式論的知識と内容論的知識、概念的知識と力動的知識

三、概念的知識

四、形式論的知識と内容論的知識の関係

五、概念的知識と力動的知識

六、形式論的知識と内容論的知識の生成

七、概念的知識と力動的知識の生成

八、学習に対する考察

第四章 自然認識のモデル化

第一節 自然認識のモデル化

一、自然認識のモデル化

二、自然認識のモデル化

三、自然認識のモデル化

第五章 本研究の結論

第一節 本研究の結論

松原道男

# 目 次

序 論	1
第1章 自然認識に関する先行研究	
第1節 認知心理学と理科教育における構成主義の発展	3
1. 理科教育における相対主義的観点の必要性	
2. 相対主義と構成主義	
3. 認知心理学と理科教育における構成主義	
4. 初期の研究の理科教育に対する影響	
第2節 理科教育の構成主義的アプローチ	7
1. 学習者の具体的な自然認識の特性	
2. 理科学習における構成主義的アプローチ	
(1) イメージ化、モデルの利用	
(2) 知識の構造化	
(3) メタ認知的アプローチ	
(4) 構成主義の学習理論の相対性	
第3節 認知心理学的アプローチ	11
1. 知識をとらえる視点	
2. 形式的知識と具体的知識	
(1) 形式的知識と科学的思考・科学的概念との関係	
(2) 具体的知識	
(3) 具体的知識と形式的知識との関係	
3. 宣言的知識と手続き的知識	
(1) 宣言的知識と手続き的知識の意義	
(2) 宣言的知識と手続き的知識の相互作用	
(3) 学習に対する考察	
第4節 知識のモデル化	19
1. 具体的事象に関する知識のモデル	
2. 自然認識の全体的モデル	
3. 知識モデルの発展	
第2章 本研究の目的と方法	
第1節 先行研究の問題点	26



第2節	本研究の目的	27
第3節	本研究の方法	27
第3章	ニューラルネットワークによる分析理論	
第1節	脳の機能とモデル化	29
1.	脳の機能の分局化	
2.	人工知能のモデル	
第2節	ニューラルネットワークによる知識のモデル化	31
1.	ニューラルネットワークの定義	
2.	階層型ニューラルネットワークの基本構成	
(1)	基本構造	
(2)	学習方式	
(3)	その他の構造	
3.	ニューラルネットワークの情報処理の特性	
(1)	情報処理の特性	
(2)	脳の処理との比較	
4.	ニューラルネットワークによる情報処理の問題点	
(1)	発展過程にみられる問題点	
(2)	概念表現の問題点	
5.	ニューラルネットワークによる分析の方法	
第3節	知識モデルの分析による哲学的問題とその解決	39
第4章	ニューラルネットワークによる自然認識の調査	
第1節	調査の概要	41
第2節	岩石の分類に関する分析	42
1.	調査1の目的	
2.	調査1の方法	
(1)	調査方法	
(2)	調査対象および調査時期	
3.	調査1の結果	
4.	調査1のニューラルネットワークのモデルによる分析および考察	
(1)	モデルの作成方法	
(2)	作成したモデル	
(3)	モデルによる分析方法	
(4)	モデルによる分類の観点の分析結果	

(5) モデルによる学習変容の分析結果

(6) モデルからの考察

第3節 ふりこの周期の認識に関する分析

53

1. 調査2の目的
2. 調査2の方法
  - (1) 調査問題
  - (2) 調査対象および調査時期
3. 調査2の結果
4. 調査2のプロダクションシステムのモデルによる分析
  - (1) モデルの作成方法
  - (2) 作成したモデル
  - (3) モデルによる分析結果
5. 調査2のニューラルネットワークのモデルによる分析
  - (1) モデルの作成方法
  - (2) 作成したモデル
  - (3) モデルによる分析結果
6. 両モデルの比較
7. 調査3の目的
8. 調査3の方法
  - (1) 調査問題
  - (2) 調査対象および調査時期
9. 調査3の結果
10. 調査3のニューラルネットワークのモデルによる分析および考察
  - (1) モデルの作成方法
  - (2) モデルによる分析方法
  - (3) モデルによる分析結果
  - (4) モデルからの考察

第4節 てんびんの認識に関する分析

81

1. 調査4の目的
2. 調査4の方法
  - (1) 調査問題
  - (2) 調査対象および調査時期
3. 調査4の結果
  - (1) 問題の正答率
  - (2) 解答パターン

4. 調査4のニューラルネットワークのモデルによる分析および考察	
(1) モデルの作成方法	
(2) モデルによる分析方法	
(3) モデルによる分析結果	
(4) モデルからの考察	
第5節 相対運動の認識に関する分析	95
1. 調査5の目的	
2. 調査5の方法	
(1) 調査問題	
(2) 調査対象および調査時期	
3. 調査5の結果および考察	
(1) 各学年の正答率	
(2) 各問題の正答率	
(3) IRS分析法による理解の順序性	
4. 調査6の目的	
5. 調査6の方法	
(1) 調査問題	
(2) 調査対象および調査時期	
6. 調査6の結果	
7. 調査6のニューラルネットワークのモデルによる分析および考察	
(1) モデル作成の対象とした生徒	
(2) モデルの作成方法	
(3) モデルによる分析方法	
(4) モデルによる分析結果	
(5) モデルからの考察	
第6節 磁石にはたらく力の認識に関する分析	111
1. 調査7の目的	
2. プロダクションシステムのモデルによる分析	
(1) モデルの作成方法	
(2) 作成したモデル	
(3) モデルによる分析結果	
3. 調査7の方法	
(1) モデルによる検証の観点	
(2) 調査問題	
(3) 調査対象および調査時期	

#### 4. 調査7の結果および考察

##### (1) 調査7の結果

##### (2) モデルからの考察

### 第5章 総括と結論

第1節 調査のまとめ	125
------------	-----

第2節 先行研究との比較考察	128
----------------	-----

第3節 本研究の限界と今後の研究課題	130
--------------------	-----

参考文献	132
------	-----

謝 辞	142
-----	-----



## 序 論

学校教育において、たとえば、理科といった一教科の授業を設計し、実践することにおいても、理科カリキュラムの様々な要因がかかわってくる。その要因として大きくは、①学問の進展による伝達内容、②社会的要求、③人間の能力観の3つをあげることができる。①は、現代の科学の基本的内容を習得し文化の継承を行うことや、将来の科学者養成などに関する要因である。②は、社会が要求している内容で、時代的に異なってくる。たとえば、その時代で多くの科学者の養成が必要であるならば、①とかかわってくる。特に、現代においては、環境問題に対処していくための人材育成などが考えられる。③については、人間形成として、科学的な見方や考え方の育成ということになる。これも社会的要求として人間形成の明確な姿や方向性があれば、②とかかわってくる。したがって、それぞれの要因は、お互いが関連しあっているといえる。

授業は、このような様々な要因の中で行われるため、授業に関する研究が、科学的に分析できないのではないかといった問題が生じてくる。学校教育の研究を行う教科教育学が、学問として成立するのかといった問題も、このようなことが原因の一つとして考えられる。

以上のことから、教科教育学として理科教育学を考えていくためには、どのような要因を考慮した文脈の中で論じているのかを明確にしなければならないといえる。本研究では、③の人間の能力観の中でも、学習者の自然認識に焦点をあてている。その理由として、①の科学の内容の伝達においても、科学のめざましい発展により、科学そのものが静的な知識でなく、新しいものを生み出す動的なものとしてとらえられるようになってきていることがあげられる。そして、この動的な創造性はどのように伝達できるのか、人間の能力論なしには考えることができなくなってきている。また、②の社会的要求についても、環境問題を始め社会的要求においては、これまでの単なる知識の蓄積ではなく、自然に対する意味づけや創造的な知識の構成が必要になってきている。このようなことから、③の人間の能力観に焦点をあてて研究を進めることにした。

現代、人間の思考や知識、理解といったものは、認知心理学や、脳科学、情報科学の発展によって明らかにされつつある。理科においては、特に構成主義の立場から、具体的な自然事象に対する学習者の認識が研究されてきている。その結果、具体的学習内容によって、自然事象に対する認識の仕方や、理解の仕方に違いがあることが明らかにされてきている。

そのため、ある程度、共通にとらえられてきた学習者の自然認識の発達、具



体的内容によって変わってくるといった相対的な考え方に変わってきており、学習者の内的な構成や具体的学習内容に応じた学習方法の提唱が行われてきている。このような自然認識についての研究は、具体的な授業設計に役立ってきている。そして、学習者の内的な構成をモデル的に表現することによって、より内的な構成が詳細に分析されてきている。このモデル的表現は、自然科学の発展が、理論やモデルの提唱によって発展してきたように、今後も重要なアプローチになるといえる。また、学習者の自然認識の特徴をそのまま記述的に表現しただけでは、その表現が煩雑化する。そのため、モデルによる表現によって、それらの特徴をまとめることができるという利点もあげられる。

これらのことから、本研究では、学習者の自然認識について、特に、知識モデルの立場から分析することを考えた。しかし、従来の知識モデルによる分析方法では、人間の単線型の処理しか分析できていないという問題点があげられる。そこで、本研究では、並列型の処理であるニューラルネットワークによる知識モデルの分析方法の提案を行い、その方法を用いて自然認識の全体的処理の特徴について明らかにすることを考えた。

以上のことから、本研究では次のような論の構成を行った。まず、第1章では、自然認識に関する先行研究について述べ、従来の自然認識の分析方法や自然認識の特徴について明らかになった点について示した。第2章では先行研究の問題点と本研究の目的、方法を示した。第3章では、新たな知識モデルであるニューラルネットワークを用いた自然認識の分析理論の解説を行った。第4章では自然認識の実態調査をもとに、ニューラルネットワークによる知識モデルの構築と分析法、および生徒の全体的処理の特徴を明らかにした。そして、第5章では、調査のまとめと先行研究との比較考察、今後の研究課題を示した。

# 第1章 自然認識に関する先行研究

## 第1節 認知心理学と理科教育における構成主義の発展

### 1. 理科教育における相対主義的観点の必要性

学習者の自然認識をどういう観点からとらえていくかは、理科教育の基盤となる自然科学をどうとらえるかということにも関係してくる。それは、学習における学習者の見方や考え方の変容の方向性は、教師のもつ自然科学の見方や考え方に基づくところが大きいからである。

自然科学は、経験科学として位置づけられ、「経験科学における命題は、われわれが経験する事実と照合されなければならない、そして経験的証拠によってそれ相対に支持されるときにのみ受け入れられる」<sup>(1)</sup>。自然科学の発展にともない、多くの事実が明らかにされてきたが、自然科学そのものが、帰納的な事実の蓄積といった考え方は、一般的に否定されている。また、「事物・現象から、帰納法によって、一般的に導き出されたものをすぐに結論とするのではなく、それを仮説として設定する。その仮説を前提として、演繹法によって個別事象に対する結論を導き、これを実験によって確かめる」という仮説演繹法も、一部では否定されている。それは、解釈の際に、認識する側の既にもっている理論による影響を考慮することによる。

情報収集において、観察する事象は、だれがみても同じものであり、客観的であるように思われる。しかし、個人がもつ理論によって、解釈が大きく違ってくることが考えられる。このことについて、ハンソン (Hanson, N. R.)<sup>(2)</sup> は、観察は単純に見ているのではなく、既にその個人のもつ理論が負荷されるといった、理論負荷性の問題を詳しく分析している。

また、クーン (Kuhn, T. S.)<sup>(3)</sup> やファイヤアーベント (Feyerabend, P. K.)<sup>(4)</sup> などの指摘のように、今まで持っている理論に合わないようなことが生じても、既にもつ理論を変えない場合が多く、実験事実によって仮説の取捨や理論の変更は、科学史の中では行われぬ場合が多い。

たとえば、燃焼に関するフロギストンの考え方を例にあげることができる。燃焼について、酸素と結合するといった考えが定着する前に、木などが燃焼するのは、木の中にあるフロギストン (燃素) が逃げ出す現象としてとらえられていた。そして、燃焼後、残るのがその抜け殻である灰であると考えられていた。これに対して、金属の灰化では、もとの重さより重くなることが示された。この事実は、



フロギストンの考えを否定するものと考えられるが、これに対する一つの説明として、負のフロギストンという考え方をもち込んでいる。負のフロギストンとは、重さが負であり、つまり、それが物質の中にあることによって、その物質を軽くしているというものである。これが、燃焼によって逃げ出すことによって、もとより重くなるという説明を行い、フロギストンの考え方を保った<sup>(5)</sup>。

以上のように、「科学的」であるということは、ある理論枠においてのみ成立し、どの理論枠がより適切であるかはいえないことになる。このような科学観は、「相対主義」とよばれている。このような相対主義の立場は、科学観だけでなく、学習論にもかかわってくる。つまり、相対主義の観点に基づいて、理科教育をとらえると次のことが考えられる。

相対主義的な立場では、どの理論枠がより適切であるかは、一方の理論枠の中だけからではいえないことになる。このような立場に立つと、学習者の理論枠より教師の理論枠の方が適切であるとは、一概にいえないことになる。教師の理論枠は、そのよりどころとする学問、理科でいえば現代の自然科学を基準にすることによってのみ適切であるといえるにすぎない。そして、学習者側の理論枠は、観点を換えれば尊重すべき一つの理論枠としてとらえられる。

村上<sup>(6)</sup>は、「教育において、専門家養成のために一步一步教程を進み、『・・・外的』というものを排除しているのは、当該の時代状況の中では、『専門家』としての水準に到達させる最も能率的な手続きかも知れないが、新しいものを生み出す転換のダイナミズムのルートを殺している」としている。つまり、教師においては科学外的と思えるような学習者の理論枠を考慮して、授業を考えていかなければ、本当の学習が成立しないことを主張している。

## 2. 相対主義と構成主義

相対主義の立場に立つと、学習者の理論枠を尊重し、それを学習の中でも考慮することを考える。そして、学習者の認知構造を詳細に調べて理解していくことを考える。現代の構成主義のアプローチは、このような相対主義的な流れをくんでいるものと考えられる<sup>(7)</sup>。

また、相対主義的な立場から考えると、自然科学の発展過程において、その理論変換が困難であったのと同様、学習者の理論変換も困難であることが予想される。そのため、学習方法においては、学習者の理論変換を何らかの工夫によって行うことを考える。さらに、学習内容については、学習内容を絶対的にとらえるのではなく、その内容は理論枠によって大きく変わりうるということが考慮される。そのため、各内容の理解だけでなく、たとえば、「自然科学とは」といったような、



学習内容の基盤となる枠組みに対する価値論が問題にされる。つまり、学習内容の理解だけでなくその考え方についての理解が重視される。

相対主義的な理科教育観は、現代化運動において見る事ができた<sup>(8)</sup><sup>(9)</sup>。米国カリキュラムにおけるPSSCにおいては、今学習している内容が絶対的なものではなく発展していくことが強調され、学習内容だけでなくそれを理解するための探究の過程が重視された。また、プロジェクト物理（PP）では、科学史の内容が重視され、各時代における考え方とその変容を学習していくことが試みられた<sup>(10)</sup>。

現代化における相対主義の考え方は、自然科学の発展の方に目が向けられ、学習内容が構成されたものといえる。現代においては、相対主義の考え方は、学習者の認知構造にも当てはめられ、構成主義の考え方が行われるようになった。つまり、現代化における相対主義の考え方は、教師の理論枠を中心としたものであり、学習者の理論枠の考慮が十分ではなかったと思われる。

### 3. 認知心理学と理科教育における構成主義

構成主義においては、学習者の内的な活動を問題にする。この内的な活動の分析は、1920年から1950年の30年間、行動主義の影響の中で、実験的な分析が困難であり、あいまいであるということから、研究が下火になっていた<sup>(11)</sup>。しかし、現代においては、認知心理学や認知科学といった研究において、内的な活動を対象にいろいろなモデルが提唱され、再びクローズアップされてきている。

たとえば、ナイサー（Neiser, U.）は、既に獲得した知識枠によって知覚活動が方向付けられ、ある情報が選択的に受け入れられるとした。そして、探索活動を通して、抽出された情報はもとの知識枠を修正し、修正された知識枠は次の探索を方向付け、さらに多くの情報を受け入れる準備を整えるといった循環が行われるとしている<sup>(12)</sup>。ナイサーの見解は、認知心理学の発展の基礎を作り上げたといえる。

また、認知心理学は、従来の心理学と違い、自然や言語<sup>(13)</sup>、生活要素など、具体的な事象の認識を対象としたところに特徴がみられる。そして、これらの研究の影響を受け、具体的な事象の中でも自然認識に焦点をあてた研究として、理科における構成主義の研究があげられる。これらの研究の発展によって、理科学習心理学といった分野が開拓されつつあり、その立場からより具体的な理科授業設計について論じられるようになってきている。

理科学習における構成主義は、認知心理学を基礎においているため、両者の区



別は厳密にはできないが、理科教育における構成主義の研究には独自の部分もみられる<sup>(14)</sup>。そこで、本研究においては、認知心理学の研究を基礎にした研究を認知心理学、あるいは認知心理学的アプローチとし、より具体的な自然認識に焦点をあてて、理科学習に大きな示唆を与えている研究を理科学習における構成主義的アプローチとし、便宜的に区別して考察を行った。

#### 4. 初期の研究の理科教育に対する影響

認知心理学的アプローチや理科学習における構成主義的アプローチは、ここ数十年において発展してきたが、研究の初期においては、その区分は明確にはできない。ここでは、初期の研究で理科教育に影響を与えた研究者についてみていくことにする。学習者のもつ理論枠を考慮する立場で理科教育に影響を与えた研究者として、まず、ピアジェ (Piaget, J.) をあげることができる。ピアジェの発生的認識論は、人間の発達段階の順序性を環境や対象要因によらない発生的な立場からとらえたところに特徴があり、特に論理的発達段階を明らかにしている<sup>(15)</sup><sup>(16)</sup>。そのため、学習においてピアジェ理論を適用した場合には、学習内容によらず、発達段階に応じて学習を行うことや、発達段階を待って学習を行うといった立場がとられる。そして、学習内容の論理性が注目され、学習内容の文脈を考慮することはあまり行われない。ピアジェ自身も後に、内容による論理的発達段階のずれを指摘しているが<sup>(17)</sup>、認知心理学の発展により、認識における文脈依存性は、当然の問題として考慮されるようになってきた。

また、発見学習の提唱によって理科の学習に影響を与えたブルナー (Bruner, J. S.) は、直観性の重視、感覚→映像→記号といった認識の段階、学習内容の構造の分析といったところにその特徴がみられる<sup>(18)</sup><sup>(19)</sup>。ブルナーは、ピアジェに比べ学習内容の文脈を考慮していると考えられ、内容構造を工夫すれば、年少の学習者にも学習が可能であるといった提唱も行った。しかし、文脈によって、実際に認識が容易になることはあるが、ブルナーの内容構造の分析は、学習者の認識の実態を十分に明らかにして考えられたものでなかったために、学習に困難な面が生じたといえる。

また、先行オーガナイザーによる学習を提案したオーズベル (Ausubel, D.) は、学習者のもつ認知枠による認識の重要性を指摘した。いわゆる理論負荷性の問題を学習方法のなかに取り入れ、構成主義的な立場に立って学習を考えたといえる<sup>(20)</sup>。彼の提唱した先行オーガナイザーについては、ノバック (Novak, J. D.) によって理科学習における効果が示されている<sup>(21)</sup><sup>(22)</sup>。その他、いくつかの先行オーガナイザーの形式も示されている<sup>(23)</sup><sup>(24)</sup>。しかし、学習内容の文脈によ



て先行オーガナイザーは異なってくると考えられ、どのようなものが先行オーガナイザーであるかといった先行オーガナイザーの定義が不明確な部分もある。そのため、理論としての価値はあっても、実践においては不十分な部分があったといえる。

以上のように、理科教育に影響を与えた先駆的な3人の研究者をあげたが、各理論とも具体的な認識の実態を、人間の内的な側面から考察している。そして、少なからずこれらの理論は、現代の理科教育にも影響を与えている。しかし、学習者の認識は具体的内容に依存しているため、より具体的内容に基づいた学習者の認識の実態を明らかにしなければ、十分に理論を適用することができなかったところに、これらの理論の限界があったと思われる。

## 第2節 理科教育の構成主義的アプローチ

### 1. 学習者の具体的な自然認識の特性

理科教育における構成主義の研究では、認知心理学の影響を受け、自然認識を対象に、学習者の内的な構成が明らかにされている。特に、自然認識の調査として多いのは物理的な領域であるが<sup>(25)</sup>、代表的な研究にクレメント (Clement, J.) の研究があげられる。クレメントは、投げあげられた物体にはたらく力について、多くの学習者が運動方向に力がはたらくと考えることを明らかにしている。また、物体に力が加えられた後は、その力が徐々に消耗していくといった考え方をすることも明らかにしている<sup>(26)(27)</sup>。これらの考え方は、アリストテレスにおける物体の運動の解釈と類似している。このような歴史的に見られる考え方と学習者の考え方の類似点は、歴史的な科学の理論転換と学習者の理論転換とをアナロジー的にとらえられることを示唆するものである。その他、運動に関しては、マクロスキー (McCloskey, M.)<sup>(28)</sup>、ハロウン (Halloun, I. A.)<sup>(29)(30)</sup> などの研究があげられる。また、電流については、コーエン (Cohen, R.)<sup>(31)</sup>、гентナー (Gentner, D.)<sup>(32)</sup> などの研究があげられる。

さらに、オズボーン (Osborne, R.)<sup>(33)</sup>、ドライバー (Driver, R.)<sup>(34)</sup>、ホワイト (White, R. T.)<sup>(35)</sup> などの研究においては、様々な自然事象についての子どもの自然認識が分析されており、子ども自身が、概念フレームワークあるいはオルタナティブフレームワークなどと定義される、意味をもった知識構成を行っていることが明らかにされている<sup>(36)</sup>。たとえば光においては、子どものもつオルタナティブフレームワークについて、ドライバー等は、次のような特徴を明らか

にしている<sup>(37)</sup>。

・光の所在：光は光源そのものである。あるいは、光は光源の結果、状態である。同じ子どもでも状況に応じて使い分けたり、同じ子どもが同じ現象で考え方を換えたりする場合がある。光は減らすことができ、消失することができ、逆に増やすこともできる。光が見られない事実と、光が止まるという考え方を結び付ける。光は紙の上ではとどまるが、鏡は光を反射する（光は強い光を意味する。光が知覚するのに十分なくらい強くないと、全く存在しない）。

・光の伝播：空間における光の運動は、非常に大きな距離の場合だけに限られている。

・光と物体の相互作用：虫メガネは光をより大きくする。虫メガネの後ろの方が、より多くの光がある。虫メガネの前後で、同じくらいの光線があるが後ろの方がより強い。

・視覚：光は物質を見るために必要であるが、必ずしも目には届いていると考えない。ほとんどの子どもは、目と物質の間に媒介をもたらしていない。光を視覚にとって必要な要素と考えるが、光は物体を照らすのに役立つだけか、物体と観察者を取り巻く昼光を構成するものである。

以上のような研究から、理科教育における構成主義の研究では、子どもの自然認識について、一般的に次のような特徴がみられると考えている<sup>(38)</sup>。

①学習者は、これから学習することに対して、知らないのではなく日常的な経験を通して学習者なりの考え方をもっている。

②その考え方は、学習者なりに筋の通ったものが多いが、科学的には誤っている場合がある。

③その科学的に誤った考え方は、学習によってもなかなか変更されにくい。

## 2. 理科学習における構成主義的アプローチ

### (1) イメージ化、モデルの利用

これまでの理科学習においては、たとえば、発達段階を待てばある程度学習が可能になるという立場がとられてきた。また、プロセス・スキルのように仮説をたて、それを実験し、データを解釈する中で、その仮説が正しいかどうかを検証していけば、新しく知識を構成できるというような立場がとられてきた。これに対して、構成主義においては、子どもは、自らの仮説が否定されたとしても新たにそれに対する正当化を行い、自分の考え方を保とうとすることを考える。また、ピアジェ理論とは違い、内容によっては子どもの考え方を生かせば学習が成立することを考える。



したがって、構成主義の立場に立つと、学習者の既存の見方や考え方がこれから学習することに対する見方や考え方と異なる場合、それをどう変容させるかが問題となる。既にもつものを生かしていく方法、それを否定して新しく構築する方法などいろいろな方法があげられる<sup>(39)</sup>。構成主義の考え方に立つと、単に正しいことを記憶するといったことを考えるのではなく、知識構造そのものを変容させることを考える。知識構造の変容の一つとして、具体的事象のイメージ化を工夫することがあげられる。

まず、イメージ化には、モデルを用いる方法があげられる。たとえば、電流回路を認識するためのモデルとして、гентナー（Gentner, D.）の研究をあげることができる。гентナーは、学習者が一般的に、水流モデルと群移動モデルを形成して考えていることを明らかにするとともに、学習においてそのようなモデルを形成することによる認識の違いについて調べている<sup>(40)</sup>。水流モデルは、電流を貯水池やポンプなどから流れる水のように考えるものであり、群移動モデルは、電流を通路を競争する何かの群れのように考えるものである。

水流モデルでは、電池の直列・並列の結合状態を貯水器などの直列・並列の結合にたとえて類推しやすい。しかし、抵抗については、障害物のようにとらえられやすく、直列、並列に関係なく、抵抗が多いほど電流が弱くなると誤って考えられやすい。一方、群移動モデルは、電池の結合状態を示すのは難しいが、抵抗については、群れが通過する門のようにとられやすいため、抵抗の直列、並列の説明が容易となる。

この二つのモデルを用いて、実際に学習を行った結果、群移動モデルで学習した学習者は、期待した通り抵抗についての理解がよかった。一方、水流モデルで学習した学習者においては、電池の直列・並列の結合状態についての理解が、期待するほど効果のないものであった。これは、学習者が、直列と並列の貯水器の間で生じる水圧の違いについて理解していないことが、原因の一つとして考えられた。また、水の流れは、パイプの中を通過している間にしだいに弱くなると考えていることも明らかになった。

以上のように、モデルを用いることによって、学習効果が上がる場合があることがわかる。一方、考慮する必要のないモデルの属性を考えたり、考慮しなければならないモデルの特性に気づかなかったりすることもあり、モデルによる学習の扱いには留意を必要とすることが考えられる。

また、電池1個と豆電球1個をつないだ単一閉回路についてみられる児童・生徒の電流に関する考え方には、+極から-極に電流は流れるが、豆電球の+極側の電流の方が-極側の電流より強く、電流が豆電球で消費されるといった考え方が多い（電流消費説）。生徒にとっては、電流消費説の考え方は、豆電球やニク



ロム線などを用いると光や熱がでるため、何らかの消費があるということで、より普通に思えるようである。これは、生徒にとってものの保存という考え方ができるようになってきていることが、ある程度影響すると考えられる。そこで、回路を流れる電流の強さはどこも一定であるという学習においては、そのことを理解するためのモデルが提唱されている<sup>(41)</sup>。

このモデルでは、導線を列車のように連結したワゴンで表している。このワゴンの動きが電流となり、それを動かすものが電池と考える。また、豆電球やニクロム線は、ワゴンをとめようとする摩擦である。このように考えると、豆電球やニクロム線などの前後で電流の強さが変化しないことを説明できるとともに、電池の消耗についても説明できる。

その他、イメージ化については、モデルと同様、アナロジ的に表現していく方法もあげられる<sup>(42)</sup>。また、半具体半抽象の映像を用いることも考えられ、コンピュータグラフィックスを用いる方法がある<sup>(43)</sup><sup>(44)</sup>。たとえば、ディセッサ (Disessa, A. A.) は、コンピュータシミュレーションによって、物体にはたらく力と運動の関係について学習させ、その学習効果や問題点について明らかにしている<sup>(45)</sup>。また、遺伝などの掛け合わせについては、具体的には時間がかかったりするが、コンピュータシミュレーションによって時間を短縮することが可能になる<sup>(46)</sup>。

## (2) 知識の構造化

学習者の知識構造の変容については、形成される学習者の知識構造に着目し、学習者の知識構造が形成されやすいように、与える学習内容の構造を工夫することが考えられている。アイロン (Eylon, B.) 等<sup>(47)</sup> は、まず、人間の内的知識構成の特性が問題解決にどう影響するかを明らかにしている。学習内容が階層構造をもつものと単一構造をもつもので学習を行った結果、学習者は、階層構造をもつ内容の方がよく想起することができ、問題解決を行うことができた。特に、階層構造は、誤りを正したり、内容を想起したりすることを容易にすることが明らかになった。したがって、学習内容の構成においては、単に詳しい内容や慣習的な展開より、階層的な構造が必要であることが示唆される。

次に、アイロンは同じ情報に対して違った階層構造を与え、知識の構成と課題との相互関係を明らかにしている。その結果、単に情報を階層的にすれば十分というわけではなく、また、どれにでも通じるよい構成があるわけではないことを明らかにしている。そして、具体的課題に知識を適応させるようにする必要があることを指摘している。

学習内容の構造化は、古くはブルーナー<sup>(48)</sup>によって主張されたものであるが、

アイロンの場合、さらに学習者に形成される知識構造まで考慮して、実証的に研究を行ったものといえる。

### (3) メタ認知的アプローチ

さらに、学習者の知識構造の変容には、メタ認知的なアプローチがあげられる。たとえば、このアプローチとして、ノバック (Novak, J. D) 等の概念地図法があげられる<sup>(49)</sup><sup>(50)</sup>。この方法においては、学習者は、自分の考え方を概念地図に表現して明確にすることができるとともに、考え方の変更も自覚することができる。

### (4) 構成主義の学習理論の相対性

構成主義の学習理論においては、内容に依存して学習者の見方や考え方が違ってくるということが前提となっている。そのため、学習方法も学習内容に応じて変更することが考えられるようになってきている。モデルの使用やイメージ化、メタ認知的なアプローチを用いれば必ず学習効果をあげることができるわけではなく、その効果は学習内容に依存してくる。したがって、構成主義的な立場では、絶対的な学習方法があるのではなく、学習方法は、学習内容に応じて相対的に考えていく必要があるといえる。

## 第3節 認知心理学的アプローチ

### 1. 知識をとらえる視点

認知心理学の影響を受けた理科教育の研究は多岐にわたるが、内的な構成を知識や思考といった観点から研究したものが多くみられる<sup>(51)</sup><sup>(52)</sup>。そこで、ここでは、特に本研究の分析の視点となる知識構成の立場から、先行研究についてみていくことにする。知識構成に着目する場合、次のことが考えられる。理科の学習では、自然事象を対象とした問題解決活動を通して、自然についてのきまりや法則、理論を理解していくことを一つの目的としている。そこで、問題解決活動に注目すると、まず初めに学習者は、問題から得られる情報を既存の知識と照らし合わせながら、解答のためのプランニングを立てることから始める。このプランニングの時点において問題の解答ができなくなるのは、次のような場合が考えられる。一つは、もともと解答のための知識をもっていない場合であり、一つは、解答のための知識をもっているにもかかわらずそれを想起できない場合や、想起しても問題の解答に対応した知識構成を行うことができない場合である。



前者においては、その解答に必要な知識を学習していくことが必要となる。後者においては、既に経験したり、学習したりしたと考えられる知識が問題となっているため、知識構成のあり方を考えていくことが必要となる。このことは、適切な学習方法を考えることにも関係してくる。

問題に対する知識の想起について、安西は、知識の意味敏感性としてとらえている。外界の情報には知識に対して敏感に作用するものとそうでないものがあり、その違いは知識をその人がどのように構造化しているかに依存しているとしている<sup>(53)</sup>。

学習者の知識構成についての研究は、知識をどういった観点からとらえるかといったことによって、議論の焦点も異なってくる。その中で、まず、形式的知識と具体的知識といった観点での議論があげられる。これは、知識の抽象化のレベルの問題であると考えられる。そして、具体的知識は、文脈依存の問題とかかわってくる。

次に、知識のモデル化を考える場合には、宣言的知識と手続き的知識といった観点で議論が行われる。これは、知識が活用されたり、保存されたりするときの形式の区分である。そこで、以上のような2つの観点から知識構成についてみていくことにする。

## 2. 形式的知識と具体的知識

### (1) 形式的知識と科学的思考・科学的概念との関係

規範的なルールや基準に関する知識は、形式的知識とよばれる。形式的知識は、通常は論理的な思考を行うための知識と考えられる。論理的思考というと、一般にはピアジェの群、束構造による論理をいう場合が多い。

理科学習において、科学的な概念の理解に、論理的思考が重要な役割を果たすことは、多くの研究において示されている。特にピアジェの論理的思考の発達段階と科学的概念の形成に関する研究は、ローソン (Lawson, A. E.) が体系的に行っている。ローソンは、高校生を対象に、物理・化学・生物・地学のそれぞれの専攻科目に合わせて、その科目の具体的な問題と形式的問題を解答させるとともに、ピアジェの「重さの保存、体積の保存、変数の分離、てんびんのつり合い」の課題を解答させた。その結果、ピアジェ課題によって明らかになった具体的操作段階の生徒は、物理・化学・生物・地学の形式的概念が理解できていないことが明らかになった。一方、形式的操作段階の生徒は、具体的概念と形式的概念の両概念とも理解できることが明らかになった<sup>(54)</sup>。また、ローソンは、同様の研究によって、形式的思考が発達しなければ、DNAや遺伝、進化、理想気体、生態系など



の科学の理論的概念や原理について、意味のある理解ができないことを明らかにしている<sup>(55)</sup>。また、その他の研究結果から、論理的思考力と科学的概念の理解には深い関係があることが示されている<sup>(56) (57) (58) (59)</sup>。

日本においても、ピアジェの論理的発達段階と子どもの科学的思考との関係について大場が述べている<sup>(60) (61)</sup>。大場は、空間、時間、思考、抽象性、実証性など13の科学的思考力をあげ、ピアジェの発達段階に対応して、これらの科学的思考力が発達することを述べている。また、科学的概念について、ピアジェの論理的思考の段階との関連を扱った研究が多くみられる。ピアジェの保存課題を発展させたものとしては、山名<sup>(62)</sup>の研究があげられる。山名は、小学校低学年・中学年を対象に、粘土を変形させる課題において、重量の保存や体積の保存について、男女の違いや学年の特徴を明らかにしている。また、荻生田<sup>(63)</sup>は、これらを発展させ、重さと体積の分離について、小・中学生を対象に調査を行っている。その結果、同体積で重さが異なるものより、異なる大きさと異なる重さの方が、体積と重さの分離が困難であること、中学生においても水面上昇の原因を重さで説明する生徒がいることなどを明らかにしている。

また、森本<sup>(64)</sup>は、子どもの物質の分類について、①機能的分類、②形態的分类、③質的分类、④抽象的分类などのタイプがあることを明らかにし、ピアジェのいう一重分類の能力は、①、②が対応し、多重分類の能力は③、④が対応することを明らかにしている。

## (2) 具体的知識

科学的な概念と論理的思考との関係から、ピアジェ理論に基づいて、論理的な発達段階に対応して学習することの必要性が主張されている。これらに対して、具体的な知識からも、思考や概念についての研究が行われている。これについては、ピアジェ理論を反証する研究が多い。

佐伯は、ピアジェの三つ山問題において、身近な問題に内容を変更すると、幼児でも視点移動が可能であることを示した<sup>(65)</sup>。この三つ山問題は、三つの山のある視点から見せ、それとは違った位置から山を見た場合にどの様に見えるかを問うものである。ピアジェによる研究では、10才程度で正しく指摘できるようになるとしている。佐伯は、子どもに身近な「かごめかごめ」の遊びを用いて、同じ様な問題を、幼児においても正しく解答できることを明らかにした。

また、ローソンは、比例の思考を用いる課題で、「よく知っている内容－知らない内容」、「比例の思考の難しい内容－簡単な内容」を組み合わせた問題を作成し、9学年を対象に調査を行った。その結果、よく知っている内容の方が知らない内容より課題の達成度が高く、特に、これは、比例の思考の簡単な内容にお



いていえることが明らかになった。したがって、比例的思考の解答方略をもっていても、あまり知らない内容については適用できないことが考えられる。このことについてローソンは、よく知らない内容は変数間の関係についての知識が欠如していることをあげている<sup>(66)</sup>。

具体的内容によって、子どもの形式的知識の用い方に違いがみられることは、多くの研究において示されている。特に認知心理学の発展によって、具体的な日常生活における問題解決を対象に研究が行われ、形式的知識を用いる際に、具体的知識がかかわっていることが指摘されている。安西<sup>(67)</sup>は、問題解決における形式的知識と具体的知識の関係について次のように指摘している。

「教育では形式を教示しそれに従って考えさせ、具体例は形式獲得の練習問題として行わせる場合が多いが、形式的知識の上に形式的知識を積み重ねることになり、具体的で生き生きとした経験世界の実感が失われる。そうすると、なんでもない現実問題を解く場合、学習したはずの知識をまったく利用できないことになる。大学生で物理学の知識が、具体的な現象の理解に生かされていない例がある。我々の思考は形式と具体の行ったり来たりに本来の姿があり、具体から抽象へとか具体から形式へというのが発達や進歩の方向ではない。」

この指摘のように、具体的知識と形式的知識の相互作用、その構造化が重要になってくるといえる。

以上のことから、従来指摘されてきた発達段階に至らなくても、内容の工夫によって科学的概念の理解が可能になることが考えられる。ピアジェ理論では、速さは、時間や距離の認識ができ、さらに、その関係がわからないと理解できないということが主張された。たとえば、時間と距離の関係が理解できないと、時間に関係なく遠くまで運動したものを速いと考えたりする子どもがいる。しかし、森の研究<sup>(68)</sup>においては、速さというものは感覚的にもとらえられることから、窓からみえる運動している車の縞模様注目させることによって、幼児においても速さについて理解できることが実証されている。その他、子どもの具体的知識の特性については、既に第1章第2節において述べた通りである。

### (3) 具体的知識と形式的知識との関係

具体的知識と形式的知識との間には相互作用がはたらくことから、具体的内容の工夫によっては、論理的思考力を高めていけることが考えられる。ローソン<sup>(69)</sup>は、学習による論理的思考力の形成について調べている。これは、比例や確率、相関などの能力が、学校における学習によって、伸びるかどうかが調査を行ったものである。第6学年から第12学年を対象に、理科や数学において比例、確率、相関の論理を用いる内容を学習する学年においては、その能力が伸びるか調査を



行った結果、有意な伸びは認められなかった。このことから、学習において容易に論理的思考が形成されないことが明らかにされた。

一方、リン(Linn, M. C.)等<sup>(70)</sup>は、論理的な方略についての学習は、具体的内容の知識とうまく連結すればよいという仮説のもと、知識の適用のしかたを学習させることを考えた。高校生を対象に条件統一を例にあげ、実験群にはなぜ条件統一が必要かについての例を示した。その結果、知識の適用のしかたの学習は、有効であることを明らかにした。そして、論理的思考の方略は、一つのことを学習しても他の学習に応用できないことなどが指摘されているが、これは、論理的思考と科学的内容を結び付ける方法を教えられていないからであると結論づけた。

このことに関連して、チ(Chi, M. T. H.)<sup>(71)</sup>は、論理的思考力のように内容一般に通じる能力は、具体的な内容についての知識が徐々に一般化されて形成されるもので、学習において短期間に形成されるものではないとしている。

以上のような研究をまとめると次のようになる。

- ① 科学的概念の形成は、論理的思考力と関係が深い。
- ② 論理的思考力の適用は、具体的な知識によって影響を受ける。
- ③ 学習内容や学習方法の工夫によっては、論理的思考力の低い学習者でも科学的概念の理解が可能な場合がある。
- ④ 論理的思考力は、学習によって短期間では形成されない。
- ⑤ 論理的思考力の適用性は、具体的内容の構成をうまく行えば、学習によって増すことができる。

理科の学習においては、科学的概念の形成は、論理的思考力と関係が深く(①)、論理的思考力は学習によって短期間では形成されない(④)ことから、既に獲得された論理的思考力の適用性を増していく(⑤)ような学習が考えられる。この立場から、理科の学習では、子どもの論理的思考の発達段階が強調される。たとえば、この科学的概念は、この学年において学習を行うのが適切であるといった指摘が多くみられる。

一方、②や③のように、具体的知識と論理的思考力とは、相補的な関係があり、理科における問題解決を考えた場合、内容を子どもの具体的知識に基づいて構成すれば、論理的な操作が可能になることが考えられる。

### 3. 宣言的知識と手続き的知識

#### (1) 宣言的知識と手続き的知識の意義

宣言的知識、手続き的知識については、人間の思考を情報処理理論から見た場合に考えられる知識の形式である。これは、コンピュータなどを用いて情報処理

を行ったり、人間の思考のシミュレーションを行ったりする場合に必要になってくる。したがって、情報処理理論やコンピュータの根本的な処理形式が変化した場合には、この形式の区分は必要でなくなることも考えられる。

宣言的知識は、「～は～である」といった形式で表現される知識である。そして、「事実」の集合とそれを操作するための最小限の一般的手続きからなる。この表現形式の特徴としては、次のことがあげられる<sup>(72)</sup>。

- ①宣言的知識は、信念、立証性、真実性などをもなっている。
- ②宣言的知識は、知識を使う内容によって区別する必要がなく、また、新しく知識を付け加えたり、知識を独立させたりすることが容易にできる。

この表現形式は、実際の人間の知識活用において、一つの領域で学んだことを別の領域に応用したり、簡単に新しいことを学習したり、さらに古い知識を修正したりする活動を説明することができる。

次に、手続き的知識は、「～する場合には、次に～する」という手続きが中心となり、事実が手続きのなかに含まれる知識の形式である。この表現形式の特徴としては、次のことがあげられる。

- ③手続き的知識は、一般的には通用しない場合があるが、特定の場合に対してうまく行う方法を表現することができる。
- ④手続き的知識は、効率のよいシステムよりなり、直接その知識を用いて解くことができる。

この表現形式は、実際の人間の知識活用において、順をおって処理を行ったり、具体的文脈に大きく影響を受けることなどを説明することができる<sup>(73) (74)</sup>

人間の具体的な情報処理においては、このような知識の両側面があり、どちらか一方の形式で表現できるものではない。学習を考える場合には、これらの両側面について考える必要がある。宣言的知識の側面だけで知識が形成されたとすれば、具体的な問題においても高度な論理形式を用いて解くことになり、簡単な解答方法を用いることができなくなると考えられる。一方、手続き的な知識だけで形成されたとすれば、どうしてそのような方法を用いて解けばよいのかが理解できず、他への手続きの応用を考えることができなくなると考えられる。

学習においてはどのような知識形成を行えば良いかということになるが、その知識が場合によっては手続き的な知識になったり、場合によっては宣言的な知識になったりといった構造の柔軟性をもつことが必要であると考えられる。しかし、学習者においては、手続き的知識の側面の強いかたちで知識が保存されたり、宣言的知識の側面の強いかたちで知識が保存されたりしている場合が多いと考えられる。



## (2) 宣言的知識と手続き的知識の相互作用

以上のように、宣言的知識と手続き的知識は両方とも必要であり、どちらか一方だけでは問題解決が十分に行われない。たとえば、大学生においては、ニュートンの第2法則である  $F = m a$  についての知識をもち、さらにその意味についてもある程度解説できるが、具体的な力と運動についての問題になると解答できない場合が多い。これについては、この宣言的な知識が具体的問題解決において利用しにくい形で知識化されていることが考えられる。つまり、科学的な法則に関する宣言的知識をもっている、それを具体的な対象にあてはめる場合に、手続き的な知識に変換していく必要があり、そのような手続き的知識がともなっていないと解答が困難になるといえる。

たとえば、 $F = m a$  から、加速度の方向を判断することを考えると次のようになる。力をベクトル量ととらえると加速度もベクトル量であるから、「力の方向 = 加速度の方向」である。力の方向は、手で押す場合とか、ロケットの噴射とか考えられ、比較的知覚的にとらえることができる。一方、加速度については、単位時間の速度変化である。速度は、知覚的にはとらえやすいが、加速度は速度ベクトルの差になるため、物体が既に運動している場合は知覚しにくく、特に内的な操作を必要とすると考えられる。したがって、力を加えたときの運動の方向については、宣言的知識を手続き的知識にしていくことが複雑になると考えられる<sup>(75)</sup>。

手続きが繰り返されると特殊な場合の知識の宣言化が行われる。たとえば、等速円運動の加速度の方向は、円の中心に向かう向きという知識があげられる。この知識は、一般的な手続きを繰り返すことによって、手続き的知識が宣言化されたものと考えられる。ところが、本来、手続きを繰り返して成立する知識を学習において教師が一方的に与えると、その宣言的な知識のなかに一般的手続きが含まれなくなる。たとえば、 $F = m a$  とのつながりが薄くなる。そのため、曲線的な運動についてもこの知識を当てはめるような、知識の適応範囲を誤る場合がみられることがある。

以上のことから、学習者においては、抽象度の高い宣言的知識が、具体的な現象を説明するさいに手続き化されにくく、また、個別の事象にこの手続き化された知識が含まれないため、認識や問題解決を誤ることが考えられる。

本来、学習が成立したといえるのは、個別で具体的で状況依存的な手続き的知識がより抽象化され、一般化されたルールや原理の宣言的知識に変わり、それをもとにさらに今まで出会ったことのない状況での手続き的知識が生成される場合であると考えられる。このように手続き的知識から宣言的知識に変換していく場合には、いわゆる「頭の中にモデルができる」と考えられ、宣言的知識はイメー



ジ形成とのかかわりが大きい知識といえる。また、手続き的知識の正当性の認識や、手続き的知識の背後にあるその手続きの意味づけなども、宣言的知識と関係があり、興味や関心、目的や意味づけと関係する知識であると考えられる<sup>(76)</sup>。

ライフ (Reif, F.) は、このような宣言的知識と手続き的知識に関して体系的な研究を行い、知識構成のあり方について次のようなことを述べている<sup>(77)(78)</sup>。

- ・知識は容易に検証されたり、修正されたりできるように明白なものでなければならない。

- ・事実の確信を構成する宣言的知識は、宣言が正しいか誤りかを定めるために行うべきことを示す手続き的知識がともなわなければならない。

- ・知識は、想起したり、訂正したり、一貫性をもったり、推論をしたりすることが容易に確信できるように、筋道が通っていなければならない。

- ・知識活用においては、誤りや不足な点を防いだり、発見したり、診断したり、訂正したりする質的コントロール過程が必要である。

そして、ライフは、このような知識構成を行うためには、学習において次のような留意が必要であることを指摘している。

- ・概念についての記述的な知識とその概念を解釈する手続き的知識の両方を教えることによって、概念を確証する形式的知識を教える。

- ・解釈の手続きをいろいろな特殊なケースに応用させる。特に、典型的、あるいはよく起こしがちな誤りのケースを選んで行う。

- ・役立つ形に解釈を要約させ、また、特別で重要なケースにおいて翻訳的知識（形式的な宣言的知識を具体的な手続き的知識にする）を獲得させ、誤りに注意するようにする。

- ・概念の誤りを発見し、診断し正すようにする。

- ・翻訳的な知識について確信できるようにし、さらに効率的な概念の解釈ができるようにする。

### (3) 学習に対する考察

認知心理学および認知心理学的アプローチでは、論理的思考力の「高い学習者－低い学習者」、その問題に対する「熟達者－素人」というように、能力が明らかに違うと考えられる両者を比較することによって、知識をモデル的に示したり<sup>(79)(80)</sup>、コンピュータシミュレーションによって表現する方法がとられている。

これらの研究では、学習の工夫を行うより、学習によって何がどう変わるのかといった学習における変容の機構が明らかにされている<sup>(81)</sup>。

シーグラー (Siegler, R. S.) は、幼児や児童のてんびんの学習を通して、学習者の発達は、適切な経験→符号化の進歩→学習能力の進歩→知識の進歩という順序で起こるこ



とを明らかにしている<sup>(82)</sup>。ラムハート (Rumelhart, D. E.) らは、類推による学習および知識の変容について明らかにするとともに、付加、調節、再構造化といった学習における変容の様式について示している<sup>(83)(84)</sup>。安西は、自己学習型のプロダクションシステムの開発から、学習において知識を変容させる手続きについて明らかにしている<sup>(85)</sup>。また、ケイス (Case, R.) は、知識を活用するさいの作業記憶容量のモデルから、問題解決の能力をとらえている<sup>(86)</sup>。

## 第4節 知識のモデル化

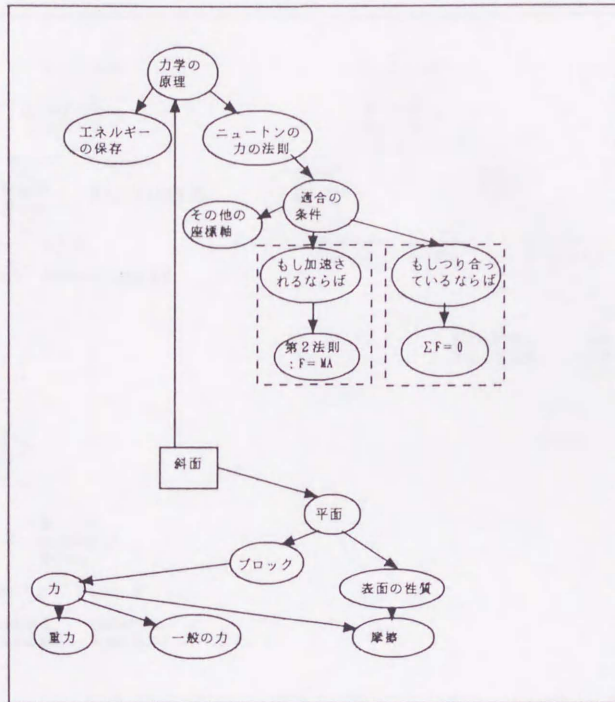
### 1. 具体的事象に関する知識のモデル

以上のような知識の特徴から、知識をモデル的に表現することを考えた場合に、いろいろなモデルを考えることができる。その中で、具体的知識と形式的知識は、知識の記述内容の違いによって表現される。たとえば、形式的知識は、規則や法則を示した公式や論理式として表現できるが、具体的知識は概念の属性等を含めた内容の記述で表現される。一方、宣言的知識、手続き的知識の表現は、大きく表現形式が異なってくる。

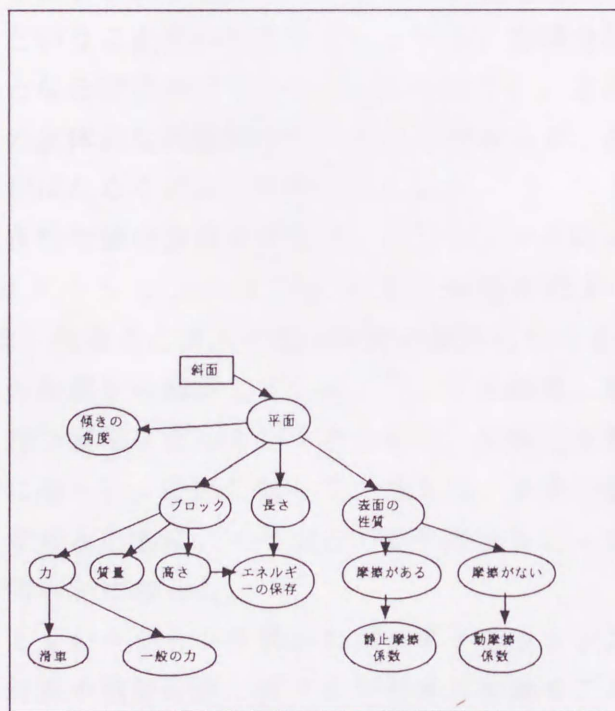
まず、宣言的知識を中心にした知識モデルについて、チ (Chi, M. T. H.)<sup>(87)</sup>の研究を例にあげることができる。チは、物理の問題に対する熟達者と素人の問題解決時のプロトコルを解析した結果、図1.4-1に示したような知識構造を明らかにした。素人の知識構造は、物理学の原理に関する宣言的な知識はもっているが、それを具体的に展開する手続き的知識がない。一方、熟達者の知識構造は、素人に比べ物理的な原理や法則に基づく解答手続きを頂点とした構造になっており、それに基づく解答手続きをもっている。

図1.4-1のような表現の仕方は、主に宣言的知識が中心となり、それに手続き的知識を示しているものである。具体的な問題に対して、どう宣言的知識や手続き的知識がはたらくかについてはわかりにくいですが、全体としてどのような知識を持ち、それがどう関連し合っているかについては、わかりやすい表現である。また、ノバック<sup>(88)</sup>の意味ネットワークの概念地図は、これと同じような表現形式のもので考えられる。同じく、シャンパイン (Champagne, A. B.)<sup>(89)(90)</sup>は、ミクロスキーマ、マクロスキーマなど、いろいろな概念レベルの表現を行っている。

一方、シーグラー (Siegler, R. S.)<sup>(91)</sup>は、学習者のもつルールという観点から、手続き的知識を中心に学習者の知識構造を明らかにしている。たとえば、「てんびん」の課題について、図1.4-2に示したような表現を行っている。図1.4



熟 達 者



素 人

図1.4-1 チ (Chi, M. T. H.) による知識の表現 (文献101より引用)



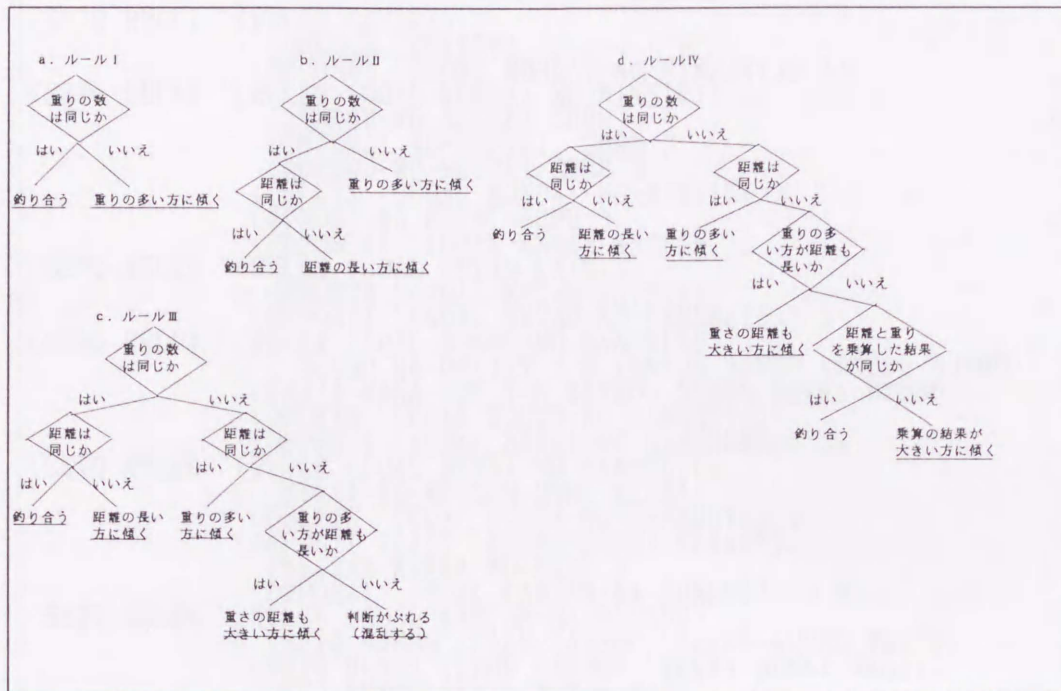


図1.4-2 シーグララーの「てんびん」課題におけるルールの表現（文献102より引用）

-2から明らかなように、手続き的表現は、具体的な問題解決において知識がどのようにはたらくかということがわかりやすい。一方、知識全体の構造や、その手続きを用いる根拠となる学習者の考え方はわかりにくい。また、知識表現が具体的にすぎるため、その具体的な問題解決にしかあてはまらず、類似の問題においてはどのように知識がはたらくのかがわかりにくい。

このような手続き的知識の表現を中心に、コンピュータによるシミュレーションを行うと、プロダクションシステムによる知識表現ができる。ラルキン（Larkin, J. H.）は、熟達者と素人の物理問題の解答における解答手続きをプロダクションシステムの作成から解析している<sup>(92)</sup>。その結果、熟達者は、既知の変量から前向きに未知の変量を求めていくとともに、全体的な解答手続きをもっていることが明らかになった。それに対して、素人は、未知の解答から既知の変量へと後向きに解答するとともに、一つひとつの手続きを行っていくという特徴をもっていることが明らかになった。

コンピュータシミュレーションを用いたプロダクションシステムについては、正司らも、分数の計算や電流回路に関する学習者の知識モデルを作成している。そして、学習者の誤った解答が、誤った手続き的知識によることや、手続き的知識の欠損によることを明らかにしている<sup>(93)</sup>。この研究のプロダクションシステムの一部を図1.4-3に示す。このようなプロダクションシステムのモデルにおいて

```

(SETQ RULE1 '(RULE1 (START)
-> (DELETE '(START))
      (DEPOSIT '(GOAL MONDAI-NO-NINSIKI))) )
(SETQ RULE2 '(RULE2 (GOAL MONDAI-NO-NINSIKI)
->(ZENKOU-WO-SETTEI-SURU)
      (ENZANSI-WO-SETTEI -SURU )
      (KOUKOU-WO-SETTEI-SURU )
      (DELETE '(GOAL MONDAI-NO-NINBIKI))
      (MONDAI-WO-PRINT-SURU )
      (DEPOSIT '(GOAL ENZAN-KAISIH ) ) )
(SETQ RULE3 '(RULE3 (GOAL ENZAN-KAISIH)
-> (DELETE '(GOAL ENZAN-KAISIH))
      (DEPOSIT '(GOAL BUNBO-NO-SANSHUTU))) )
(SETQ RULF4 '(RULE4 (GOAL BUNBO-NO-SANSHUTU)
-> ( BUNBO-HA-ONAJI? Y-N ZENKOU-BUNBO KOUKOU-BUNBO)
      (ONAJI-NARA-SET Y-N ZENKOU-BUNBO KEKKA-BUNBO)
      (DELETE '(GOAL BUNRO-NO-SANSHUTU))
      (DEPOSIT '(GOAL BNNSI-NO-SANSHUTU))) )
(SETQ RULE5 '(RULE5 (GOAL BUNSI-NO-SANSHUTU)
-> (BUNSI-WO-KEISAN-SURU KEKKA)
      (DELETE '(GOAL BUNSI-NO-SANSHUTU)) )
      (DEPOSIT (LIST 'KEKKA-BUNSI KEKKA))
      (KEISAN-KEKKA-WO-KARU )
      (DEPOSIT '(GOAL KANTAN-NA-BUNSUU))) ) )
(SETQ RULE6 '(RULE6 (GOAL KANTAN-NA-BUNSUU)
-> (SETQ BUNBO (CADR (ASSOC 'KEKKA-BUNBO WMS)))
      (SETQ BUNSI (CADR (ASSOC 'KEKKA-BUNSI WMS)))
      (SETQ SOSUULIST '(2 3 5 7))
      (LOOP ((EQUAL BUNBO 0)
            (DEPOSIT '(YARUBUN NO)))
            ((NULL SOSUULIST)
            (DEPOSIT '(YARUBUN NO)))
            (SETQ SOSUU (CAR SOSUULIST))
            ((AND (ZEROP (REM BUNBO SOSUU))
                  (ZEROP (REM BUNSI SOSUU)))
            (DEPOSIT '(YAKUBUN YES))
            (DEPOSIT (LIST 'KOUYAKUSUU SOSUU)))
            (SETQ SOSUULIST (CDR SOSUULIST)))
            (DELETE '(GOAL KANTAN-NA-BUNSUU))
            (DEPOSIT '(GOAL YAKUBUN))))))
(SETQ RULE7 '(RULE7 (GOAL YAKUBUN)
      (YAKUBUN YES)
-> (KOUYAKUSUU-DE-WARU)
      (KEISAN-KEKKA-WO-KAKU )
      (DELETE '(YAKUBUN YES))
      (DELETE '(GOAL YAKUBUN)) )
      (DEPOSIT '(GOAL KANTAN-NA-BUNSUU))) ) )
(SETQ RULE8 '(RULE8 (GOAL YAKUBUN)
      (YAKUBUN NO)
-> (DELETE '(GOAL YAKUBUN))
      (DEPOSIT '(GOAL STOP))) ) )
(SETQ RULE9 '(RULE9 (GOAL STOP)
-> (HALT) ) )

```

説明：DEPOSIT 'A:Aを作業記憶に書き込む  
DELETE 'A : 作業記憶からAを消去する  
SETQ A B : AにBの値をセットする  
LOOP (~~~) : ~~~を繰り返す  
ASSOC 'A WMS : 作業記憶から先頭にAがついているリストを取り出す

図1.4-3 プロダクションシステムによる知識構造のモデル例

(文献(93)より引用)



は、どの手続きがあるかないか、また誤っているかどうかで具体的な学習者の反応を説明できる。しかし、手続き的知識が中心であり、どのように知識が用いられるかについてはプログラムの解読を必要とし、一見してわかりにくい。また、手続きでは表現できないような学習者の直観的な判断は、モデル化しにくいことがあげられる。

以上のように、知識をモデル化する場合、宣言的な部分に着目するか、手続き的な部分に着目するかによって、その表現形式が大きく異なり、一長一短あることがわかる。これに対し、両者の折衷的なモデルとして、フレーム型のモデルがあげられる。フレーム型では、知識の属性が下位構造としてあり、その属性を呼び出す手続きが存在する。フレーム型のモデルは、オブジェクト指向などの言語によってデータ検索などに応用されてきており、人間のデータ検索機能に類似した表現が可能である<sup>(94)</sup>。また、安西<sup>(95)</sup>は、手続き的知識と宣言的知識を合わせたモデル表現の工夫を行っている。このように、知識表現は、人間の知識のある側面しか表現していないため、表現しようとする側面に応じて適切なモデルを選ぶ必要がある。

以上のような知識モデルによって、学習者の内的な構成がより明確に表現されてきている。特に、コンピュータシミュレーションによる知識モデルは、プロダクションシステムを用いて、手続き的知識を中心に表現したものが多い。

## 2. 自然認識の全体的モデル

自然認識の全体的なモデルは、認知心理学の研究において明らかにされてきた長期記憶－短期記憶といった記憶形式から、モデル化されたものがあげられる<sup>(96)</sup>。細かくは、認知心理学で明らかにされた内容によって違いがあるが、たとえば、オズボーン (Osborne, R. A.) 等は、図1.4-4に示したようなモデルを示し、学習について考察を行っている<sup>(97)</sup><sup>(98)</sup>。

## 3. 知識モデルの発展

以上、述べてきた知識モデルは、一般的に用いられている単線型処理のコンピュータ理論によるモデルである。したがって、知識処理は、逐次処理型である。人間の場合、論理的処理を行う場合は、一定のルールで単線的に処理されていくと考えられるが、具体的な内容については、様々な要因が総合的に並列に処理される場合があると考えられる。この2つの処理の側面を、ブルース (Bruce, 1979) は、具体的に意味をもつものと、記号的な形式といった2つの並行処理過程とし

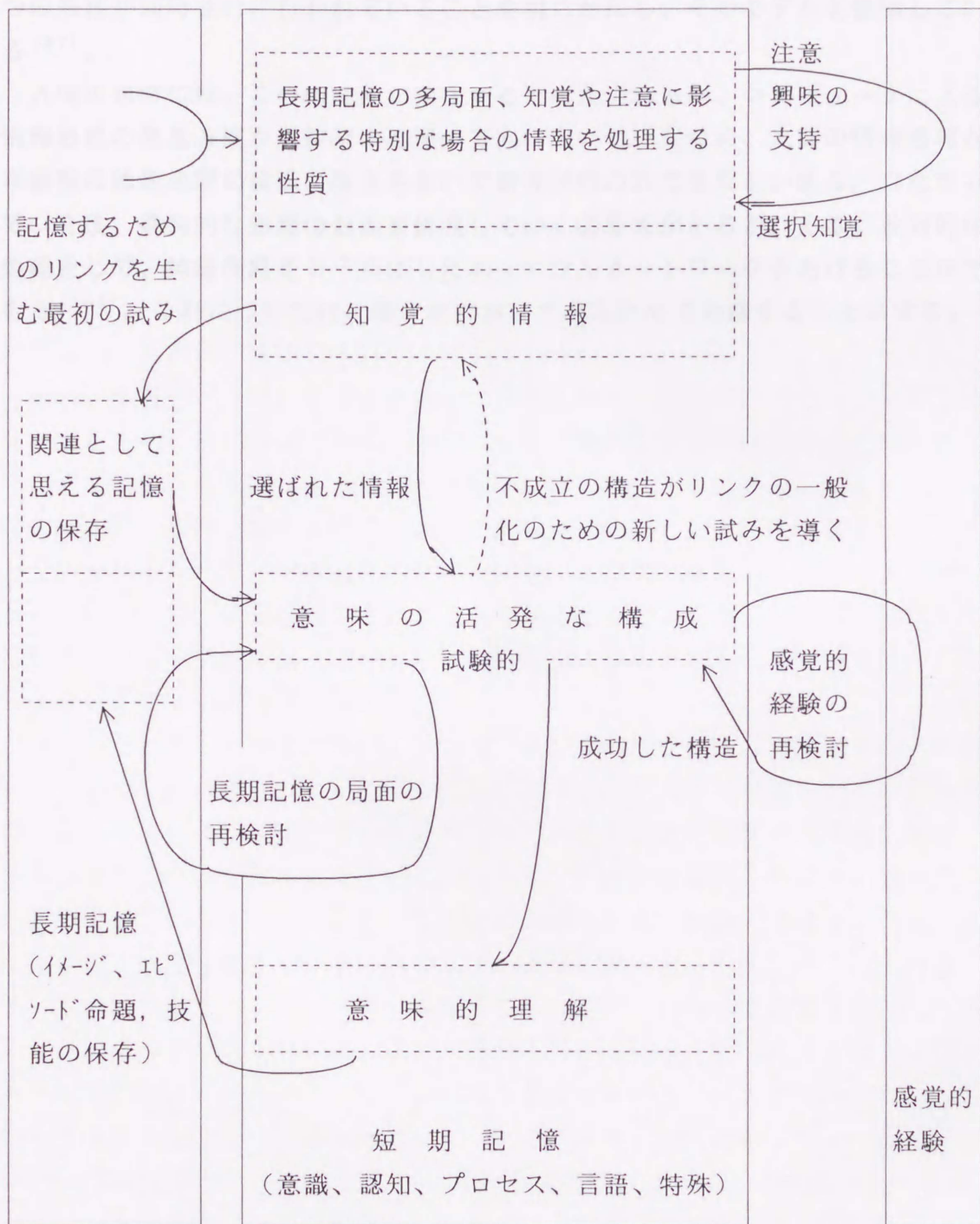


図1.4-4 一般学習モデルの意味的表現 (文献(97))



てとらえている。そして、人の顔の認知を対象に、記号的処理と意味的処理の2つの処理が同時並行に行われていることを明らかにし、そのモデルを提唱している<sup>(97)</sup>。

人間の思考には、この両側面が存在すると考えられるが、コンピュータによる情報処理の発展方向が単線型の処理の方向に向いていたため、人間の情報処理も単線型の論理処理の側面に重きをおいて研究が行われてきたといえる。したがって、今後、並列的な処理の側面を研究していく必要があるといえる。並列的な処理として、神経回路をモデルにしたニューラルネットワークをあげることができる<sup>(100)</sup>。これについては、第3章においてあらためて考察することにする。

## 第2章 本研究の目的と方法

### 第1節 先行研究の問題点

第1章で明らかにしたように、理科における構成主義の研究や認知心理学的アプローチによって、学習者の自然認識の実態が明らかにされてきている。そのような研究の中で、学習者の知識をモデル的に表現する方法は、より内的な構成を明確にするための有効な手段となっている。そして、これらの自然認識の詳細な解明は、具体的な授業設計に役立ってきている。

また、知識モデルは、学習者の内的な表現を明確にするだけでなく、次のような利点がある。自然に対する具体的で日常的な認識が詳細に記述されればされるほど、学習方法もそれに応じて様々なものが提唱されてきている。場合によっては、具体的な自然認識の特徴についての記述が煩雑化し、方法論への展開がかえって困難になったり、その具体的な事象に対する認識が成立さえすればよいというような方向で、研究が進められたりする場合もある。このような問題に対して、知識モデルによる分析は、煩雑化した自然認識の特徴をある側面からまとめていくことに有効であると考えられる。

以上のことから、本研究では、学習者の自然認識について、知識モデルから解明していくことに着目した。しかし、自然認識の研究による知識分析は、情報処理的観点からいえば、現代科学技術の主流である単線型の情報処理理論に基づいており、これは直列型の処理である。これに対し、自然認識の中には、複線型の全体的処理があると考えられる。たとえば植物や岩石を分類する場合や電流回路全体の様子を定性的に把握する場合などに顕著にみられる処理である。これは、並列型の処理と考えられ、情報処理理論においては、神経回路をモデルにしたニューラルネットワークの研究によって発展してきている。初期のローゼンブラット (Rosenblatt) のパーセプトロンに始まり、ホップフィールド (Hopfield, J) のモデル、ラムハート (Rumelhart, D. E.) のPDP (Parallel Distributed Processing)モデル、甘利による神経系の数理展開、その他、多数のニューラルネットワークの形態と理論が提唱されてきている。これらの理論は、工学的に利用されており、視覚や聴覚などの情報処理やパターン処理などに用いられてきている。詳しくは第3章において述べる。

一方、理科教育において並列型の全体的処理の研究は、直観的思考や拡散的思考という言葉でその重要性が指摘されてきた。しかし、この処理の側面は、時間的に短い処理で行われるとともに、学習者の発言や記述からの分析が難しく、実



証的研究はほとんどされておらず未開拓である。以上のことから、本研究では、並列処理型のニューラルネットワークの研究の視点に立ち、生徒の自然認識を解明しようとした。

## 第2節 本研究の目的

本研究では、第一に、生徒の自然認識における全体的処理が解明できるニューラルネットワークのモデルを構築することを目的とした。図2.2-1に示したような入力層、中間層、出力層の3つの層からなるモデルを基本として考え、いくつかの自然事象を対象にそのモデルを構築することを目的とした。第二に、この構築されたモデルから、生徒の全体的処理を分析する方法を考案することを目的とした。第三に、構築したモデルから、具体的な自然事象に対する生徒の全体的処理の特徴を明らかにすることを目的とした。本研究では、次の3つの点から全体的処理の特徴とその変容を明らかにした。①全体的処理が比較的必要となる自然認識での全体的処理の特徴、②単線型の処理が比較的必要となる自然認識での全体的処理の特徴、③学習における全体的処理の変容。その際、必要に応じて単線型の知識モデルも作成し、ニューラルネットワークのモデルと比較、考察した。

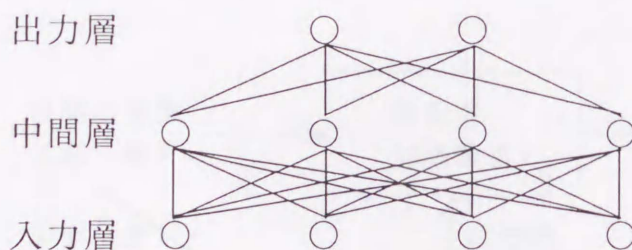


図2.2-1 ニューラルネットワークの構造

## 第3節 本研究の方法

知識モデルの構築、および知識モデルによる分析は、基本的に次のようなことを考える。まず、調査対象の教材に合わせて、基本的なニューラルネットワークの構造を決定する。次に、生徒の全体的処理を明らかにするため、質問紙法や面接法を用いて生徒に課題を与え解答させる。そして、図2.3-1に示した手順で、上記の知識モデルを用いて生徒の課題と解答をコンピュータに入力し(①)、ニュー

ーラルネットワークによるシミュレーションを作成する(②)。そのシミュレーションで表現されたニューラルネットワークのデータを抽出し、その結果をもとに生徒の全体的処理を類推する(③)。その際、対象となる自然事象によって、自然認識の全体的処理が異なるため、その対象に応じたニューラルネットワークの知識モデルを構築し、それぞれの全体的処理の特徴とその変容について分析する。

知識モデルの作成において、本研究では、ニューラルネットワークの中でも、工学的研究で実績のあるものを考え、階層型のニューラルネットワーク、その中でもラメハートのPDPモデルに基づいて、知識モデルを構築することを考えた(第3章参照)。このモデルでは、言語処理や連想記憶などの実践例が示されているが、本研究ではこのモデルを自然認識の分析として応用するものである。作成にあたってはコンピュータソフトとして、CRC社の「RHINE」を用いた。

比較のために用いる従来の単線型の知識モデルは、既に述べたラルキンや正司らの研究を参考に、プロダクションシステムによるモデルを考えた。このモデルでは、手続き的知識を中心に、部分的に宣言的知識を考える。各学習者の自然認識や問題に対する解答結果の違いは、この手続き的知識が異なる場合や宣言的知識が異なる場合があると考えられる。作成にあたってはコンピュータソフトとして、ICL社の「IC-LISP」を用いた。

なお、本研究の調査分析における基本的な統計処理は、「SPSS 6.1.3」 for Windows」を用いた。

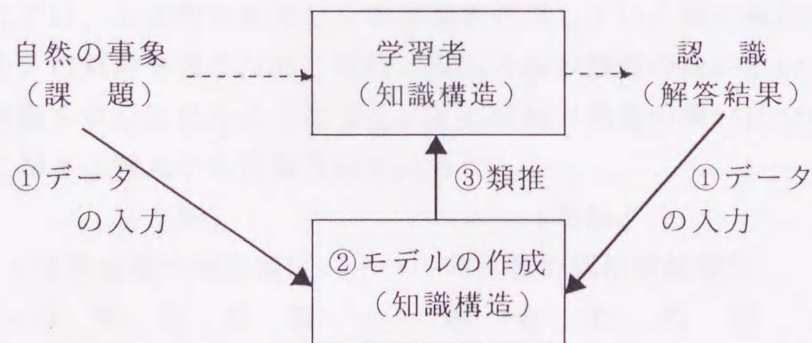


図2.3-1 モデル作成の観点



# 第3章 ニューラルネットワーク による分析理論

## 第1節 脳の機能とモデル化

### 1. 脳の機能の分局化

知識や思考は、脳の機能である。そこで、本研究において、自然認識をニューラルネットワークなどによる並列型の処理の側面からとらえることについて、その意義を脳の構造と機能からみていくことにする。

脳の構造的な側面は解剖学によって、機能的側面は神経を中心とした生理学によって解明されてきたといえるが<sup>(1)</sup>、心理的な機構は、さらに、臨床的研究や生理心理学の研究などにより明らかにされてきたといえる。

脳の構造と機能で、認識に関連することとしては、各感覚器から入ってきた情報が、海馬などを通して大脳皮質に至るとともに、大脳皮質から情報が末梢神経の方に向けて送られる相互作用をあげることができる。これは、脳の縦的な情報処理の側面である。一方、大脳皮質には、感覚、運動、視覚、言語といった処理の分局化がみられる。大きくは、左右の脳の機能の違いが指摘されている。このような機能の違いは、脳の横的な情報処理の側面である。

本研究では、具体的な感覚からの情報を処理していく脳の縦的な処理も考慮するが、全体的処理を扱うため、特に、左右の脳の機能の違いといった脳の横的な処理の側面を中心に扱うことになる。左右の脳の機能の違いについては、次に示すように様々な観点から指摘されている<sup>(2)</sup>。

〔左脳〕		〔右脳〕
・言語的認知機能優位	←→	非言語的認知機能優位
・分析的処理	←→	統合的処理
・系列的処理	←→	並列的処理
・分析的処理	←→	全体的処理
・関係的処理	←→	全体的処理

脳の機能の分局化は、事故などによる脳の損傷からしだいに解明されてきたが、健常人の脳においては、左右の脳の機能が相互作用しているため、分局化については明確にわからないとともに、個人差があるために解明が困難である。研究としては、片脳の麻酔による研究が行われているが、これは短時間の脳の処理過程

を対象にしたものである。短時間の処理過程の研究では、利島<sup>(3)</sup>の研究があげられ、瞬間提示によって左右の脳の機能の違いについて明らかにしている。また、ある程度の時間的推移から脳の処理をみていく方法として、柏原<sup>(4)</sup>は、脳波から研究を行っている。

以上のような研究から脳の機能の分局化については、徐々に明らかにされているが、十分に解明されているとはいえない。そのため、脳の機能の分局化の観点にたった教育論も様々であるといえる。たとえば、アンダーソン (Anderson, O. R) は、子どもが一般的にもつ「力を加えた方向に運動する」「力が残る」といった概念フレームワークが生じる原因を、脳生理から説明するとともに、学習においてこれらの概念が変容しにくいことについて論じている<sup>(5)</sup>。これは、理科学習における構成主義的な解釈を脳生理学の立場から行ったものである。

さらに、クック (Cook, N. D.) は、大脳の左右の機能の差について位置抑制モデルを提唱している<sup>(6)</sup>。たとえば、右の脳で判断しても言語化する際は、左の脳の介在を受けるため、直観的な判断を行っても論理が後から付与されることを指摘している。また、ハッシュベアー (Hashweh, M.) も、学習者の認識の研究について、発言におけるプロトコルの分析だけでは、省略されている部分の多いことを問題にしている<sup>(7)</sup>。

脳の構造と機能については、まだ不明な点が多いが、次のことが推測される。文脈依存性については、主に右の脳が重要な役割を果たしていると考えられ、言語を含む論理的処理については左の脳が主に行っていると考えられる。お互いの脳は相互作用をし、どちらが常に優位というわけではなく、その対象によって優位性は異なってくる。しかし、問題解決において、解答理由の説明を口頭で行わせたり、記述させたりすると、左の脳で処理された結果が主に表現される。これは、右の脳で処理されたとしても、その処理された結果を言語化するためには、左の脳で処理される必要があるからである。そのため、右の脳で処理された内容については、他の方法によって明らかにしていく必要があり、これまでの学習者の問題解決については、言語化された結果に着目しているので、問題があると考えられる。

以上のことから、学習者の反応について、左の脳の論理的処理と右の脳の全体的処理を両観点からとらえていく必要があると考えられる。

## 2. 人工知能のモデル

人工知能の研究においては、人間に役立つ情報処理の機能をもつものが研究されてきたが、人間そのものがどのような処理を行っているかを調べるのがその



研究を進める一つの方法として考えられ、脳のメカニズムをモデル化する研究が進められてきている。つまり、人間の思考に近いものを作成するにあたって、人間がどのように知識を獲得し、保存し、用いるかといった研究が行われてきている<sup>(8)</sup>。甘利は、そのような情報处理的な立場から理論を構築し、実際に人間の神経が処理する数理モデルを考察している<sup>(9)</sup>。

このように、人工知能における脳の処理の問題は、現代においては、脳神経科学、情報工学、数理科学、認知科学といった各分野からのアプローチがあり、総合的な研究分野になってきている<sup>(10)</sup>。したがって、人工知能に関する研究は、単に機械的側面が研究されてきたのではなく、人間の知識や思考といった問題を扱ってきているため、教育において大きな示唆を与えるものとなってきている。

## 第2節 ニューラルネットワークによる知識のモデル化

### 1. ニューラルネットワークの定義

本研究では、単線型の処理についてはプロダクションシステムを用い、全体的処理についてはニューラルネットワークを用いる。プロダクションシステムについては、これまでの研究でも数例みられ、第1章第4節において示した通りである。そこで、ここでは、特に、本研究独自の分析理論である、全体的処理をニューラルネットワークによって表現する方法と、その理論について明らかにすることにする。

ニューラルネットワークは、高度の並列分散型の情報処理であるが、このような情報処理の研究は、各方面の研究者によって行われ、いろいろな定義が行われている。「コネクショニズム」は、主に認知科学の分野で使われている。「MPP (Massively Paralell Processing)」「超並列」は、並列計算機アーキテクチャ研究者がよく用いる。「PDP(Paralell Distributed Processing)」は、ラムハート (Rumelhart, D. E.) を中心とする認知科学者、計算機科学者、神経生理学者、数学者のグループが用いている。そして、「ニューラルネットワーク」は、神経回路網のモデルについて考察を行ってきた研究者が用いている。各研究において用いられている言語は、多少ニュアンスの違いがあるが、その理論はほとんど共通しているといえる<sup>(11)</sup>。

本研究においては、神経回路網のモデルに立脚し「ニューラルネットワーク」という言葉を用いることにするが、コネクショニズムやPDP、その他の言葉で定義された研究成果も含めて考察を行っている。

ニューラルネットワークを用いて、情報処理を行うコンピュータをニューロコンピュータとよんでいる。ニューロコンピュータとは、「脳の基本素子ニューロン（Neuron：神経細胞）や、それらが結合したニューラルネットワーク（Neural Network：神経回路網）の構造や情報処理メカニズムにヒントを得て、脳のもつすぐれた情報処理能力の、人工的実現を目指すコンピュータ」である<sup>(12)</sup>。

ニューラルネットワークは、各研究によって様々な形態のものが提唱されているが、大きくは相互結合型ネットワークと階層型ネットワークの二つのタイプに分けることができる。タイプによって、得意とする情報処理には違いがあり、対象とする情報の特性、および期待する情報処理に合わせて選択していく必要がある。相互結合型のネットワークでは、ネットワーク全体の内部状態をある表現に設定し、それを初期状態としてネットワークを動作させ、ネットワークが安定な平衡状態に達したときにとっている状態（ネットワーク全体の内部状態）を処理結果と見なす。階層型のネットワークでは、ネットワークの一部を入力部／出力部として、入力部の内部状態を適当に設定してネットワークを動作させ、出力部からの出力を結果とする<sup>(13)</sup>。

本研究で用いるモデルは、ラメハートのPDPモデルに基づいたもので、階層型のネットワークである。

## 2. 階層型ニューラルネットワークの基本構成

### (1) 基本構造

先に述べたように階層型のネットワークにおいても、いろいろな形態のものがあるが、ここでは、本研究で用いるPDPモデルについて解説する。この基本的な構造は、図3.2-1に示したように、入力層、中間層、出力層の3層よりなる。各層には神経細胞にたとえられるいくつかの細胞（図3.2-1の○番号）が存在する。細胞は、隣接する層の細胞のみが連結している。入力層の細胞から入力したデータは、各細胞の連結部分を通り出力層に向かって送られる。その際、各細胞から出力した数値に荷重がかかるようになっており、その荷重は、各細胞の各連結部分で値が異なる。この荷重を調整することにより、情報が処理される。

たとえば、図3.2-1に示した入力層の細胞①から細胞④の出力値を、 $X_1 \sim X_4$ とすると、中間層の細胞⑤へは、 $X_1 \sim X_4$ のそれぞれに $W_1 \sim W_4$ の荷重がかかり、合計の入力値 $X$ は、

$$X = W_1 \cdot X_1 + W_2 \cdot X_2 + W_3 \cdot X_3 + W_4 \cdot X_4$$

となる。他の中間層の細胞（⑥～⑧）にも、 $X_1 \sim X_4$ に中間層の細胞⑤とは違った荷重がかかり情報が送られる。1つの細胞において合計された入力値（ $X$ ）は、



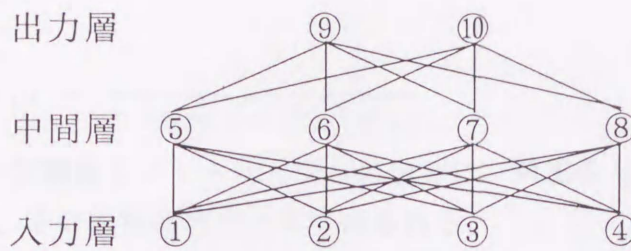


図3.2-1 ニューラルネットワークの構造

その細胞から出力される。その出力値（ $S$ ）は、次式のシグモイド関数で示される。

$$S = 1 / (1 + \text{EXP}(- (X - \theta) / T))$$

ここで、「 $\theta$ 」はしきい値とよばれ、各細胞固有の定数である。また、「 $T$ 」は温度とよばれ、全細胞共通の定数である。この式から明らかなように、1つの細胞に集まった数値の和が小さければ小さいほど0に近い値が出力され、大きければ大きいほど1に近い値が出力される。中間層の細胞から出力層の細胞への荷重も同様である。一般的に中間層の細胞数を増やすことにより、より複雑な情報処理を行うことができる。

ニューラルネットワークでは、入力値はシグモイド関数に限らず、直線的なものや離散的なものもある。シグモイド関数は、微分可能な点から用いられている。一般的に中間層の細胞を増やしたり、中間層の数を増やしたりすることによって、より複雑な情報処理を行うことができると考えられている。しかし、そうすると一方では、適切な荷重を決定するために、それだけ多くの時間が必要になるといったマイナス面がでてくる。本研究では、モデルの構築と分析を容易にするため、中間層は1層にしてモデルを作成した。

## (2) 学習方式

ニューラルネットワークにおける情報処理は、荷重をいかに設定していくかということが重要となる。階層型のネットワークでは、入力データに対して、期待する出力値（教師信号）を考える。出力値が教師信号と一致するようにするために、バックプロパゲーションという方法を用い、次のような処理を行う。ここでは、温度（ $T$ ）を1として考える。

$x_i$  : 細胞  $i$  に入力する値

$f_i(x_i)$  : 細胞  $i$  から出力する値

$\theta$  : しきい値

$$f_i(x_i) = \frac{1}{1 + \exp(-x_i + \theta_i)}$$

$x_i$ は、各細胞  $j$  ( $1 \sim n$ ) からの出力に、荷重を与えたものの総和である。したがって、その総和は次のように示される。

$$x_i = \sum_{j=1}^n W_{ji} \times x_j$$

バックプロパゲーションにおいては、最後の出力層の出力  $O_i$ 、教師信号  $t_i$  から、

$$\delta_i = t_i - O_i$$

を求める。

この  $\delta_i$  を入力として、逆向きにシナプス結合の荷重  $W_{ji}$  を求める。その際、荷重の変化を次の式で行う

$$\Delta_p W_{ji} = \varepsilon \delta_{pj} \cdot O_{pi}$$

( $p$  は入力パターン)

つまり、 $W_{ji}$  は、 $i$  層の出力に  $O_i$  と  $j$  層の出力 ( $O_j$ ) と教師信号 ( $t_j$ ) の差  $\delta_j$  の積に比例して変化させる。修正した  $W_{ji}$  をもとに  $\delta_j$  を入力信号として  $i$  層の  $\delta_i$  を求める。以下繰り返して荷重を修正する。

以上のようにバックプロパゲーションでは、出力層から入力層に向かって誤差を逆に伝搬させるものであるが、この学習方式の違いによっても、ニューラルネットワークにはいろいろな種類のものが存在する。

### (3) その他の構造

階層型のニューラルネットワークには、その他、次のようなものがあげられる<sup>(14)(15)</sup>。

- ①パーセプトロン：3層構造であるが、中間層と出力層の間の荷重しか変化しない。したがって、線形分離可能なパターンしか分類できない。線形分離可能とは、1本の線を引くことでパターンのクラスを2つに分けられることをいう。
- ②アダリン構造：入力ユニット(複数)と出力ユニット1つ。ユニットは、2値で+1あるいは-1の値をとる。学習規則は、Widrow-Hoffの学習等、その他、多数の変種がある。
- ③マダリン構造：入力層、アダリン層、マダリンユニット(1つ)で、アダリン層の出力に対して多数決の規則を適用する。出力は+1か-1、学習は、特に誤ったものについて、その総和が0に最も近いユニットに対して調整が行われる。
- ④ネオコグニトロン：細胞の反応は2値でなく連続値をとる。学習原理は、「最



大値検出型仮説」を用いる。局所的に最大出力を呈する細胞が強化されるもので、強化の規則は、その最大出力細胞の入力値が0でないものの結合係数を、入力値に比例した量だけ増強するものである。抑制細胞（負の結合をもつ）を導入している。可塑的な結合係数をもつ層（S層）の後に、これと固定結線をもつ補助的な層（C層）をもつ。S層からC層につながる固定結線は、S層のある部分の素子（一定の領域がある）と結ばれ、そのうち一つが発火すればC層も発火する。このことにより、パターンの位置のずれに許容性をもっている。

その他、階層型のニューラルネットワークでは、順伝搬、側抑制を用いた構造のものをあげることができる。

相互結合型には、ホップフィールドネットワークがあげられる。これは、一度に一つのユニットの更新手続きが行われる。その更新においては、一つずつユニットをランダムに選択し、すべてのユニットの平均更新率が同じになるようにする。この非同期更新は生物学的現実とかなり一致している。

このモデルの荷重の変動を確率論的に改良したものに、ボルツマンマシンがあげられる。入力信号や出力信号は「0、1」の2値の離散モデルを用い、入力値、荷重、しきい値からニューロンの入力の総和を求め、その入力から出力が1になる確率の関数が用いられる<sup>(16)</sup>。

### 3. ニューラルネットワークの情報処理の特性

#### (1) 情報処理の特性

ニューラルネットワークによる情報処理は、並列的なパターン処理である。そのため、入力パターンに対応した出力パターンの生成を行うパターンマッピング、情報の一部から全体を求めるパターン完全化、情報の分類を行うパターン分類等において、優れた処理を行うことができる。ニューラルネットワークによる情報処理の特性は、それを用いたコンピュータであるニューロコンピュータの特性から指摘できる。従来のノイマン型のコンピュータと比較すると、次のようなことが指摘できる<sup>(17)</sup>。

#### 〔ニューロコンピュータ〕

- ・アナログ的な処理
- ・ノンアルゴリズムック
- ・訓練（学習）
- ・記憶要素と処理要素は同一
- ・多数過程を同時に追求
- ・非論理操作
- ・適応あるいは学習
- ・変換あるいは、競合などを遂行して回答を求める

#### 〔ノイマン型コンピュータ〕

- ・デジタル的な処理
- ・アルゴリズムック
- ・命令群を用いたプログラム
- ・記憶要素と処理要素は分離
- ・一時に一個の過程を追求
- ・高次の論理操作
- ・アルゴリズムによるパラメータ修正のみ
- ・論理型トリー構造に従って回答を求める
- ・計算処理手順をあらかじめ明確にする

・パターン変換で処理

・高速のパターン認識

・不完全なデータに基づく知識処理

・手順を構成する変数のすべてにデータを与える

以上をまとめると、一般的にニューラルネットワークでは、①処理が速い、②解釈の途中で弱い矛盾が現れたり、入力にあいまいなことがあったりしてもそれが致命症にならず、なんとかうまくやりくりして解釈を実行する。③通常多数の安定平衡状態を持ち、多義的な状況に対応できる。

一方、問題点は、①解釈の場をどのようにして設定するか、機構が判然としない、②安定平衡状態が多数できると深い入り組んだ論理が解けないことが考えられる<sup>(18)</sup>。

## (2) 脳の処理との比較

ニューラルネットワークは、人間の脳をそのままモデルにしているわけではないが、人間の脳の神経をモデルにしていることから、そのモデルは、従来のノイマン型のコンピュータよりも人間の情報処理に近いといえる。ノイマン型のコンピュータでは、論理的な演算は速いが、パターン処理には時間がかかる場合が多い。人間の情報処理は、パターンなどの処理は速いが、論理的な処理には時間がかかる場合が多い。また、パターン完全化のように、ニューラルネットワークでは、情報が欠損していたり論理的飛躍があったりしても、うまく処理していける柔軟性をもっており、これも人間の情報処理と類似している点である。

人間の情報処理は、意識上のマクロレベルでは直列逐次的に推移し、一方、意識しにくいミクロレベルではニューラルネットワークの並列分散力学に支えられているという考え方もある<sup>(19)(20)</sup>。

## 4. ニューラルネットワークによる情報処理の問題点

### (1) 発展過程にみられる問題点

ニューラルネットワークの問題点は、その発展過程において解決されてきた問題を見ていくと理解しやすい。

ニューラルネットワークには、既に述べたように細かくは様々な形式のものが存在する。その発展の初期においては、マッカロックとピッツ (McCulloch & Pitts) がニューロンの信号伝達を定義したところから始まったと考えてよい。神経回路網が特に注目されたのは、ローゼンブラット (Rosenblatt) が3層構造のニューラルネットワークのパーセプトロンを提唱したことによる<sup>(21)</sup>。このパ



パーセプトロンは、小脳に同じような機能がみられたことから注目された。その構造は三層であるが、荷重の調節が中間層と出力層の間でしか行われないうものであった。この処理は、下図のような線形分離不可能な反応を処理できないという問題点が指摘されたため、その理論は下火となった<sup>(22)</sup>。

入力	→	出力
1 1		0
1 0		1
0 1		1
0 0		0

再びニューラルネットワークが注目され始めたのは、相互結合型のホップフィールドモデルによって、従来短時間では処理が難しいとされた巡回セールスマン問題の処理が行われてからである。また、パーセプトロンの問題点に対して、多層のニューラルネットワークによる解決が行われた。そこでは、ニューロンの学習方法が工夫され、特に、ラメハート等<sup>(23)</sup>のPDPモデルによるバックプロパゲーションによって、ある程度の解決を見ることができた。また、日本においては、甘利<sup>(24)</sup>が神経系の数理を展開し、類似のシステムを提唱している。現代においては、既に述べたように、ニューラルネットワークのいろいろな形式や学習理論が提唱されている。そして、より高度な情報処理を、自己学習によって行うといった工学的な方向で研究が進められ、その特徴と限界が明らかにされてきている。

そして、ニューラルネットワークは、感覚器の情報処理を説明するのに有効であるという主張もある。側抑制モデルによって、マッハ効果などの人間の錯視の仕組みがモデル的に説明されている<sup>(25)</sup>。

ニューラルネットワークにおいて常に問題になるのは、解の極小値に陥ったときの問題である。本来求めようとする解に対して、いくつかの近似解が存在するが、ニューラルネットワークの学習方式では、その近似解に陥ったときにどう抜け出していくかということが問題となる。ラメハートにおけるバックプロパゲーションにおいてもこのことは当てはまるが、システムとしては、比較的うまく作動することが明らかにされている。また、相互結合型のボルツマンマシンでは、ゆっくり全体のエネルギーを下げていくことで、極小値に陥ることを避けている。

以上のように、ニューラルネットワークでは、極小値の問題が存在するが、経験的にはうまく処理されることが明らかにされている。

## (2) 概念表現の問題点

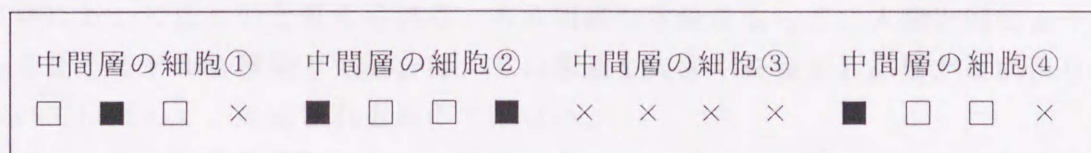
は、システムの挙動に関する説明が得られない。また、記号表現をもたないため、P & Qというノード（分岐の節）をつくっても、そのノードは、ノードPやノードQと全く独立して並列的な要素を表現するだけで、PはP & Qの部分であるといった性質は自動的に生じてこないといった問題点があげられる<sup>(26)</sup>。そのため、ニューラルネットワークのモデルで、学習者と同じようにふるまうモデルを構築しても、そのモデルが学習者の情報処理のどのような特徴を示しているか、分析の視点とその理論を明確にしておく必要がある。

## 5. ニューラルネットワークによる分析の方法

以上のことから、ニューラルネットワークのモデルによって、学習者のどのような処理が分析できるかということを示す必要がある。ニューラルネットワークは、データ処理が分散しているため、処理全体を問題にするのではなく、分析が可能な処理の特徴に着目する必要がある。本研究では、ニューラルネットワークの情報処理の特徴は、各細胞の荷重であると考えた。そこで、ニューラルネットワークによるモデルから、全体的処理の特徴を分析する方法として、次の3つの方法を考えた。

第1に、ある細胞への荷重が分散していれば、その細胞はある状態において活性化し、その細胞に対応した条件や内容に重きがおかれることがわかる。そこで、各細胞への荷重の標準偏差を求め分析することを考えた。

第2に、ニューラルネットワークの中間層は、入力データから必要な情報を抽出して、出力層が計算しやすい形で表現する「特徴検出器」の役割をもっていることが明らかにされている<sup>(27)</sup><sup>(28)</sup>。そこで、入力層の細胞から中間層の細胞への荷重を興奮性（+1.0以上）と抑制性（-1.0以下）のパターン（特徴検出パターン）で示し、入力データをどうパターン的にとらえているか分析することを考えた。たとえば、入力層の細胞が4つ、中間層の細胞が4つという場合、学習において形成されたネットワークの荷重について、次の図3.2-2のように示されるとする。この場合、中間層の細胞①と細胞②では、それぞれ入力層からの細胞の信号



「■」荷重が-1.0以下 「□」荷重が1.0以上 「×」荷重が-1.0より大、1.0より小

図3.2-2 入力層と中間層の細胞どうしの連結の特徴



を違った特徴としてとらえていることがわかる。このように、中間層を特徴検出器という立場から分析することを考えた。

第3に、出力層の細胞が複数の場合、中間層から出力層への荷重の類似性を数量化理論第IV類を用いて分析することにより、出力層の細胞に対応している観点や内容間の類似性を明らかにすることを考えた。

以上の分析法の問題点として、バックプロパゲーションにおいては、どのようなシステムが形成されているかは明らかでない部分がある<sup>(29)</sup>。また、特徴検出は、人にとって明らかに正しいと思われるような仕方では組織化しない場合があるということがあげられる<sup>(30)</sup>。そこで、特徴検出については、明らかに説明に不合理が生じないものを対象にし、これまでの先行研究で明らかにされている学習者の自然認識の特徴との比較から、検証していく必要があるといえる。

### 第3節 知識モデルの分析による哲学的問題とその解決

プロダクションシステムおよびニューラルネットワークによる知識モデルについて、人間のようふるまうようなモデルが作られても、それが人間の行っている処理と等価であるかどうかは大きな問題となる。それは、入出力だけの一致としてみるか、モデルの計算過程も心理的過程と等価と見なすかという問題である。入出力だけの一致を考えた場合は、他のいくつかの過程があってもよいことになる<sup>(31)</sup>。

これまでに単線型の処理によって作成されたモデルに対しては、対象となる問題解決が一般的でなく特別なものであるという指摘もある。そして、人間の実際の処理に対応させるには、モデルをそのつど部分的に修正する必要があり、アドホックな説明が多く、科学的でありうるのかという指摘がある<sup>(32)</sup>。

本研究では、知識モデルによる内的な構成の解明は、相対主義的な考え方に立つ限りにおいては、可能であると考えられる。人間の知識をモデルで示すことができるかどうかは、ある意味では、現代の自然科学が正しいかどうかということに類似している。大きく理論の転換が必要でない限りにおいては、現代の科学はある文脈において正しいと考えられる。ある明確な理論をもって、人間と同じようにふるまうモデルを構築した場合は、その理論を大きく転換する必要がない限りにおいては正しく、否定されるものではない。

現代の自然科学と違い、人間の複雑な内的な構成を対象にするため、考えられるモデルは数多く存在するとともに、自然科学に比べ確かにアドホックな説明が多くなる可能性がある。しかし、一定の理論から正しいとする観点に立てば、知

識モデルによる分析も科学になりえると考えられる。このことについて、安西は、次のようなことを指摘している<sup>(33)</sup>。

「認識という現象を観察し、そこからモデルを構成し、そのモデルによって新たな現象を説明する経験科学としての理解が必要である。科学史および一部の科学社会学が示唆してきたように、あるモデルが別のモデルにとって代わられるのは、前者に欠陥や反証が見いだされることによるとは限らない。知識モデルによる分析は、相対的認識観を念頭においている。相対的対応主義のダイナミズムに支えられた「具体的な」モデルを積み重ねていくこと、それが、知識モデルの分析法のこれからのひとつの方向だと考えられる。重要なのは、特定の認識現象について特定のモデルを構成し、その結果を蓄積していくことであると考えられる。」

The diagram is a large rectangular box containing several rows of text. The text is very faint and mostly illegible, but it appears to be organized into a structured format, possibly a table or a flowchart. There are several distinct sections or rows of text, each starting with a bullet point or a small heading. The overall appearance is that of a complex conceptual model or a classification system, but the specific details are too light to transcribe accurately.



## 第4章 ニューラルネットワークによる 自然認識の調査

### 第1節 調査の概要

ニューラルネットワークの知識モデルの構築と分析法、およびその方法を用いた生徒の全体的処理の分析について、次の教材をとりあげることにした。まず、全体的処理が比較的必要となる自然認識として、「岩石の分類」の教材をとりあげた。また、単線型の処理が比較的必要となる自然認識として、「てんびん」と「相対運動」の教材をとりあげた。そして、学習における全体的処理の変容については、「岩石の分類」と「ふりこの周期」の教材をとりあげた。プロダクションシステムによる分析の特徴については、「磁石にはたらく力」の教材を別にとりあげた。

調査対象は、主に中学生を対象としたが、比較のために必要に応じて大学生も対象とした。調査の概要は、図4.1-1に示した通りである。

全体的処理が比較的必要となる教材
〔教材〕岩石の分類 ・調査1：ニューラルネットワークを用いた全体的処理の分析、および学習による変容の分析
〔教材〕ふりこの周期 ・調査2：ニューラルネットワークとプロダクションシステムを用いた認識の分析 ・調査3：ニューラルネットワークを用いた全体的処理の学習による変容の分析
単線型の処理が比較的必要となる教材
〔教材〕てんびん ・調査4：ニューラルネットワークを用いた全体的処理の分析 〔教材〕相対運動 ・調査5：相対運動の認識の分析 ・調査6：ニューラルネットワークを用いた全体的処理の分析
プロダクションシステムによる分析
〔教材〕磁石にはたらく力 ・調査7：プロダクションシステムを用いた単線型の処理の分析

図4.1-1 調査の概要

## 第2節 岩石の分類に関する分析

### 1. 調査1の目的

本調査においては、岩石の分類の教材を対象に、モデルの構築と分析法、および生徒の全体的処理の特徴を明らかにすることを目的とした。また、学習における全体的処理の変容について明らかにすることを目的とした。

岩石の認識に関するこれまでの研究は、一つひとつの岩石の特徴をあげさせ、どのような観点で岩石をとらえているかを明らかにした研究<sup>(1)</sup><sup>(2)</sup>があげられる。また、その他の分類能力や観察能力に関する研究においても、どのような観点をを用いるかが明らかにされたものが多い<sup>(3)</sup><sup>(4)</sup>。したがって、個人において用いる各観点の関係や、複数の観点の用いられ方については明らかにされておらず、全体的処理としては十分に分析されていないといえる。

### 2. 調査1の方法

#### (1) 調査方法

実際の分類を行う学習においては、一つひとつの対象について特徴をあげるより、複数の対象を比較してその特徴について学習することが多いのではないかと思われる。そこで、本調査では、いくつかの岩石を比較させ、その特徴について指摘させることを考えた。さらに、全体的処理の学習における変容について分析するため、岩石の学習前後における観点の変容についても調べることにした。

調査は、具体的に提示された複数の岩石について、視覚的な特徴から共通点と差異点を指摘させるもので、一人ひとり面接法により行った。分類においては手触り等の特徴も考えられるが、今回は視覚的な特徴に限定した。対象とした岩石は、中学校において学習する火成岩、

- ① R1：安山岩
- ② R2：玄武岩
- ③ R3：花こう岩
- ④ R4：はんれい岩
- ⑤ R5：閃緑岩
- ⑥ R6：流紋岩

の6つである。どの岩石も7×8cm程度の市販されているもので、一面だけが磨いてある。各岩石には、上記の順に番号をつけた。この番号は、実験者側の分類の意図が入らないようにランダムにつけたものである。



調査は、まず、岩石の共通点について、見た感じ同じような特徴をもつものを任意の数抽出させ、同じように思った特徴について述べさせた。このことを同じような特徴があるだけ繰り返した。その際、同じ岩石を何度使ってもよいこととし、また、岩石は触ったり、裏にしたりして、どこを見てもよいこととしたが、同じような特徴は見ただけの特徴で答えるようにさせた。

次に、岩石の差異点について、各岩石一つずつ、他の5つの岩石と違って、その岩石にしかない特徴をあげさせた。特徴がない場合は、「ない」と答えるようにさせた。

## (2) 調査対象および調査時期

調査は、石川県内のA中学校、第3学年20人（男子10人、女子10人）、金沢大学教育学部で理科に関する教室所属の第3学年の学生20人（男子：6人、女子14人）、比較のために専門家として、大学で火成岩を専門にしている教官1人を対象に行った。

中学生を対象にした調査については、学習の前後の2回行った。岩石についての学習は、1991年の12月から1992年の1月にかけて行い、学習前の調査は1991年6月、学習後の調査は1992年2月に行った。なお、学習後の調査においては、男子1人欠席のため、19人を対象にした。大学生および専門家の調査は、1991年6月～9月に行った。

## 3. 調査1の結果

各個人の反応から、岩石の分類の観点は、従来の研究<sup>(5)</sup>も参考にして、学習前、学習後とも、次の10に区分することができた。Aの記号で示されたA1～A4は、岩石の全体的な観点をもとにした特徴であり、Bの記号で示されたBとB1～B5は、造岩鉱物といった岩石の部分的な観点をもとにした特徴である。B1～B5はBの「造岩鉱物の存在」が前提となっているので、B1～B5は、Bの下位の 카테고리として考えられるため、Bに番号を付与して表すことにした。

- ① A1：岩石全体の形
- ② A2：岩石全体の色
- ③ A3：岩石の表面の様子
- ④ A4：岩石の見かけの硬さ
- ⑤ B：造岩鉱物の存在（存在のみ）
- ⑥ B1：造岩鉱物の色
- ⑦ B2：造岩鉱物の大小

⑧ B3：造岩鉱物の光沢

⑨ B4：造岩鉱物の形

⑩ B5：造岩鉱物の量

全体的な傾向を明らかにするため、岩石の共通点、差異点について、少なくとも1回、その観点をういた生徒の割合を示したのが表4.2-1である。また、専門家については、その観点をういた場合を「○」で示した。

表4.2-1より、まず、学習前の中学生においては、共通点、差異点とも、A2：岩石全体の色、A3：表面の様子を観点を比較的多くの生徒が使い、さらに、共通点においては、B：造岩鉱物の存在などの観点を比較的多くの生徒が用いている。

大学生は、共通点、差異点とも、A2：岩石全体の色、B2：造岩鉱物の大小の観点を比較的多くの学生が用いており、差異点については、さらに、B1：造岩鉱物の色、B5：造岩鉱物の量の観点を比較的多くの学生が用いている。

専門家は、共通点、差異点とも、A2：岩石全体の色、B1：造岩鉱物の色、B2：造岩鉱物の大小、B4：造岩鉱物の形の観点をういるが、差異点については、さらに、A3：表面の様子、B5：造岩鉱物の量の観点も用いている。専門家は、もっとも科学的な分類の方法を用いており、教科書と同じ方法で分類を行っていた。したがって、今回の調査は一人だけであるが、一般的に専門家は共通して同じ観点をういて分類を行うと考えられた。

表4.2-1より、専門家と学習前の中学生を比べると、専門家は造岩鉱物についての観点を多く用いており、特に、造岩鉱物の形や量についての観点は、中学生は用いていないが専門家は用いている。大学生は、中学生に比べ専門家の用いる観点の方に似ており、専門家の用いるような造岩鉱物に関する観点を多く用いているが、専門家のようにB4の造岩鉱物の形の観点をういる学生は少ない。

表4.2-1 分類の観点をういた人数の割合（％）（○は専門家が用いる観点）

		A1	A2	A3	A4	B	B1	B2	B3	B4	B5
共通点	中学生・学習前	30	50	45	0	65	35	5	0	0	0
	中学生・学習後	5	47	11	0	42	53	63	0	0	37
	大学生	20	90	20	0	5	35	70	25	5	5
	専門家		○				○	○		○	
差異点	中学生・学習前	45	70	50	15	25	25	35	10	0	0
	中学生・学習後	26	79	26	5	5	53	37	21	0	37
	大学生	40	80	25	0	30	60	55	15	5	40
	専門家		○	○			○	○		○	○



中学生の学習後は、全体的傾向として、共通点、差異点とも、A1：岩石全体の形、A3：岩石の表面の様子を指摘する生徒が少なくなり、B1：造岩鉱物の色、B2：造岩鉱物の大小、B5：造岩鉱物の量を指摘する生徒が多くなっている。そのため、大学生の反応と類似してきている。

中学生において、共通点の指摘回数は、岩石を1つのグループに分けてその共通点について述べた場合を1回とすると、一人あたり、最小は1回、最大は9回、平均は3.0回であった。差異点については、1つの岩石について差異点があるとしてその特徴について述べた場合を1回とすると、一人あたり、最小は0回、最大は6回、平均は3.4回であった。大学生においては、共通点の指摘回数は、一人あたり、最小は3回、最大は12回、平均は4.8回であった。差異点については、一人あたり、最小は1回、最大は6回、平均は4.1回であった。専門家は、共通点の指摘回数は5回であった。また、差異点の指摘回数は6回であった。

#### 4. 調査1のニューラルネットワークのモデルによる分析および考察

##### (1) モデルの作成方法

モデルは、6つの岩石を入力層の細胞に対応させ、分類の観点を出力層の細胞に対応させることによって作成した。つまり、入力層の細胞数は6つ、出力層の細胞数は10とした。中間層の細胞については、各生徒の指摘を処理する数として、4つ程度あればモデル作成が可能であることから、原則として4つにすることによって、各調査対象者のモデルを作成することができた。したがって、モデルは、図4.2-1に示したような構造になり、6つの岩石に対して、各生徒や専門家がどのような観点をを用いて岩石の特徴をとらえるかを表現したものとなった。

モデルへのデータの入力は、入力層の細胞6つに岩石のR1～R6を対応させ、あ

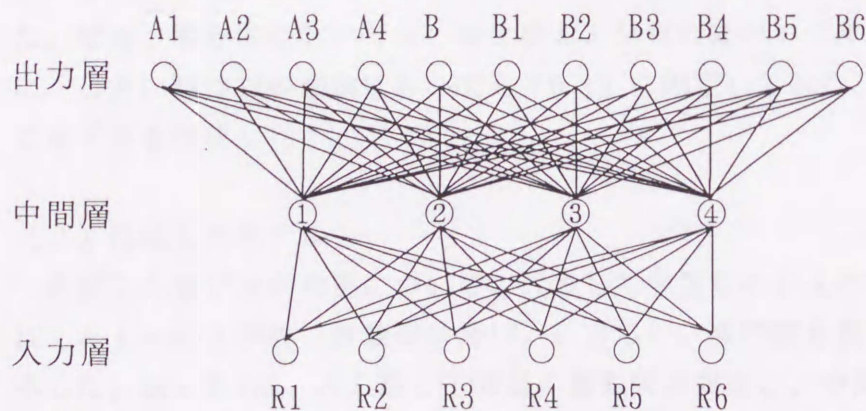


図4.2-1 ニューラルネットワークの構造

る観点から同じような特徴があるとした岩石について、その岩石に対応した細胞には数値「1」を、他の細胞には「0」を同時に入力するようにした。そして、出力については、10の出力層の細胞を分類の観点A1～B5に対応させ、先ほど入力した岩石について、特徴の指摘のあった観点の細胞（複数の場合もある）から数値「1」が出力され、他からは「0」が出力されるようにした。

また、R1～R6の各岩石について、その岩石にしかない特徴については、たとえばR1の岩石の場合、それに対応した入力層の細胞だけ「1」、他を「0」とし、生徒が指摘したその岩石にしかない特徴の観点に対応した細胞だけから「1」が出力され、他からは「0」が出力されるようにした。特徴がないと指摘した場合は、どの細胞からも「0」が出力されるようにした。

たとえば、ある生徒が、岩石R1とR3を抽出し、観点A2とBから共通点を述べた場合、入力は、R1からR6の順に、

(1 0 1 0 0 0)

出力はA1からB5の順に、

(0 1 0 0 1 0 0 0 0 0)

とした。

他の岩石と比べ、岩石R2しかない特徴を観点B1から述べた場合、入力は、R1からR6の順に、

(0 1 0 0 0 0)

出力はA1からB5の順に、

(0 0 0 0 0 1 0 0 0 0)

というように、入力とそれに対応する出力のデータのペアとして示される。

ある生徒が、岩石の共通点について4組の指摘をした場合、差異点については、「ある」、「なし」を含めて6つの指摘があるため、計10の入出力のデータのペアが作成できる。この10のどのペアも成立するように、各細胞の荷重を変化させた。なお、本分析においては、各生徒および専門家のモデルを比較しやすいように、しきい値はどの細胞においても「0.1」に固定しており、荷重だけを変更させてモデルを作成した。

## (2) 作成したモデル

作成したモデルの荷重について、代表して学習前の1人の中学生（被験者番号19）と1人の大学生（被験者番号17）、さらに、専門家を例にあげて、表4.2-2に示した。表4.2-2は、入力層と中間層の細胞間の荷重と、中間層と出力層の細胞間の荷重について示している。

各個人においては、10の観点をばらばらに用いることも考えられるが、造岩鉱



表4.2-2 中間層と出力層の細胞間の荷重

中学生・学習前・被験番号19	出力層の細胞 (分類の観点)	A1	A2	A3	A4	B	B1	B2	B3	B4	B5
	中細 ①	-1.358	-4.529	1.733	-1.277	2.389	-6.618	-1.188	-1.342	-1.402	-1.305
	間胞 ②	-0.796	3.671	3.522	-1.04	-6.188	-5.078	-0.91	-0.878	-0.715	-0.744
	層 ③	-1.376	-2.954	-3.618	-1.513	2.108	2.156	-1.154	-1.527	-1.417	-1.325
	の ④	-1.446	0.768	-4.631	-1.109	-6.671	1.559	-1.695	-1.275	-1.509	-1.542
	標準偏差	0.301	3.696	3.988	0.211	5.015	4.500	0.330	0.273	0.367	0.341
中間層の細胞	①	②	③	④							
入力岩 R1	0.867	0.052	0.906	1.121							
層 R2	1.68	-4.941	2.421	2.3							
の石 R3	-3.775	2.465	-0.084	2.159							
細胞 R4	0.645	-0.709	0.903	1.123							
R5	1.185	-0.123	0.734	1.331							
R6	2.434	2.254	0.271	-3.319							
大学生・被験番号17	出力層の細胞 (分類の観点)	A1	A2	A3	A4	B	B1	B2	B3	B4	B5
	中細 ①	-1.289	-3.753	-1.137	-1.249	-5.639	-1.395	1.8	-1.297	-1.176	-1.213
	間胞 ②	-0.803	4.851	-1.017	-1.09	-6.69	-0.791	-5.416	-0.874	4.282	-0.79
	層 ③	-1.214	-3.766	-1.18	-1.335	9.867	-1.12	-7.178	-1.325	0.016	-1.14
	の ④	-1.475	1.412	-1.453	-1.173	-4.878	-1.511	1.59	-1.343	-6.399	-1.577
	標準偏差	0.285	4.219	0.184	0.105	7.837	0.321	4.671	0.225	4.395	0.323
中間層の細胞	①	②	③	④							
入力岩 R1	0.345	1.992	-3.748	2.091							
層 R2	2.689	-4.022	1.571	2.787							
の石 R3	1.79	-1.878	0.679	1.032							
細胞 R4	2.674	2.442	2.653	-3.314							
R5	2.004	-3.269	0.845	1.488							
R6	-3.978	1.639	1.089	2.729							
専門家	出力層の細胞 (分類の観点)	A1	A2	A3	A4	B	B1	B2	B3	B4	B5
	中細 ①	-1.548	3.232	2.548	-1.265	-1.347	3.237	14.097	-1.216	-4.954	7.406
	間胞 ②	-2.613	-8.923	-10.849	-2.516	-2.603	-8.932	0.929	-2.507	-9.561	-6.661
	層 ③	-1.553	4.148	-0.177	-1.629	-1.591	4.145	-9.719	-1.642	9.874	-3.424
	の ④	-1.000	13.652	0.402	-1.242	-1.066	13.671	11.804	-1.265	5.369	13.393
	標準偏差	0.584	8.015	5.198	0.516	0.580	8.025	9.489	0.517	7.780	8.087
中間層の細胞	①	②	③	④							
入力岩 R1	-6.886	8.420	5.704	2.660							
層 R2	3.046	-0.250	5.962	-1.262							
の石 R3	-5.687	2.455	-1.014	1.050							
細胞 R4	-5.307	0.982	-2.256	0.677							
R5	2.797	-0.124	0.540	-2.466							
R6	5.361	-3.193	4.945	-7.149							

物の大小や形、量の観点を組み合わせた観点から、岩石をとらえることも考えられる。ニューラルネットワークのモデルでは、そのような観点をどのように組み合わせ、全体的に用いているかを表現している。

というのは、既に述べたように、ニューラルネットワークにおける情報処理では、入力された情報がいったん分散し、中間層で組み合わせ、再び分散して出力層で組み合わせるといように、情報が並列的に処理されるからである。特に、この情報の組み合わせは、中間層によって行われる。そして、中間層から出力層への荷重については、出力層の細胞の一つひとつが分類の観点に対応している。そこで、本調査では、学習者の観点の特徴について分析することを考え、特に、中間層から出力層への荷重について着目し、分析を行うことにした。

### (3) モデルによる分析方法

作成したニューラルネットワークのモデルにおいて、中間層の細胞から出力層の細胞への荷重に注目すると、その出力細胞に対応する観点をほとんど用いない場合は、その観点における中間層からの4つの荷重値は、一定の値となる。逆にその観点をよく用いる場合は、値が分散する。このことをもとに、各観点の4つの荷重の標準偏差を求め、標準偏差が大きい場合は、その観点はよく用いられると考え、0に近い場合はその観点はほとんど用いられないと考えた。

また、観点が同時に用いられたり、用いられなかったりする場合は、荷重が類似してくることが考えられる。そこで、各観点の4つの荷重を4次元の座標にプロットすることを考え、各観点間の距離（ユークリッド距離）を求め、その距離が小さいほど、観点の用いられ方の類似性が高いと判断して、数量化理論第IV類による分析を行うことを考えた。

### (4) モデルによる分類の観点の分析結果

#### A. 荷重の標準偏差による分析

表4.2-2より、各モデルの荷重の標準偏差から次のことが指摘できる。中学生A（被験者番号19）の荷重の標準偏差を見ると、観点A1、A4、B2、B3、B4、B5は1.0より小さく、ほとんど用いない観点であり、A2、A3、B、B1は1.0以上で、よく用いる観点であるといえる。同様に、大学生（被験者番号17）については、A1、A3、A4、B1、B3、B5はほとんど用いない観点であり、A2、B、B2、B4はよく用いる観点である。専門家については、A1、A4、B、B3はほとんど用いない観点であり、A2、A3、B1、B2、B4、B5はよく用いる観点であるといえる。

#### B. 数量化理論第IV類による分析

数量化理論第IV類の分析によって2次元までの数値をとり、1次元の数値をX



軸に、2次元の数値をY軸にとり、中学生、大学生、専門家の観点の類似性を散布図に示し、分析を行った。その結果、中学生、大学生、専門家の観点の用い方の特徴を次の4つに分類することができた。そして、その人数を示したのが表4.2-3である。また、この4つの分類について、散布図の例を示したのが、図4.2-2aから図4.2-2eである。

- ・ P 1 : 複数の観点を同時に用いず、各観点をそれぞれ独立させて用いる (図表では「なし」と略す)。
- ・ P 2 : 岩石全体に関する複数の観点を同時に用いる (図表では「全体」と略す)
- ・ P 3 : 造岩鉱物に関する複数の観点を同時に用いる (図表では「鉱物」と略す)、特に、B1:造岩鉱物の色、B5:造岩鉱物の量を同時に用いる場合が多い。
- ・ P 4 : 岩石全体に関する観点と造岩鉱物に関する観点を同時に用いる (図表では「全体・鉱物」と略す)。

表4.2-3 観点の用い方の分類 (単位:人)

	中学生 (学習前)	中学生 (学習後)	大学生	専門家
P1:なし	15	9	9	
P2:全体	5	1	3 <sup>*1</sup>	
P3:鉱物	0	8	4	
P4:全体・鉱物	0	1	5	○ <sup>*2</sup>

\*1:大学生のP2の1人は、P3の特徴もあるため、両方にカウントしている。

\*2:専門家はP4に入るが、中学生、大学生のものとは大きく異なる。

P 1 は、図4.2-2aで示した例のように、各観点が独立しており、それぞれの観点を独立して用いる特徴がみられるものである。P 2 は、図4.2-2bに示した例のように、岩石全体に関する複数の観点を同時に用いる特徴がみられるものである。図4.2-2bの例では、A1:岩石全体の形、A4:岩石の見かけの硬さの観点を同時に用いている。P 3 は、図4.2-2cに示した例のように、造岩鉱物に関する複数の観点を同時に用いる特徴がみられるものである。図4.2-2cの例では、B1:造岩鉱物の色、B5:造岩鉱物の量の観点を同時に用いている。P 4 は、図4.2-2dに示した例のように、岩石全体の観点と造岩鉱物の観点を同時に用いる特徴がみられるものである。図4.2-2dの例では、A2:岩石全体の色、B4:造岩鉱物の形の観点を同時に用いている。

表4.2-3より、学習前の中学生と学習後の中学生の間で、観点の用い方に違いがあるかどうか  $\chi^2$  検定を行った結果、有意差が認められた ( $\chi^2=13.15, df=3, p<0.$

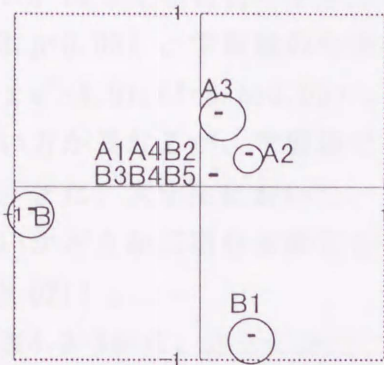


図4.2-2a 観点の使い方P 1 (なし) の例  
中学生・被験者番号19(学習前)

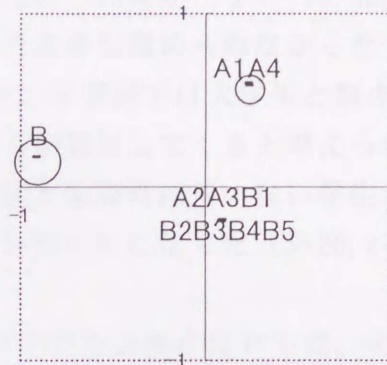


図4.2-2b 観点の使い方P 2 (全体) の例  
中学生・被験者番号15(学習前)

※「○」の大きさは、標準偏差の大きさを相対的に示している(以下同じ)

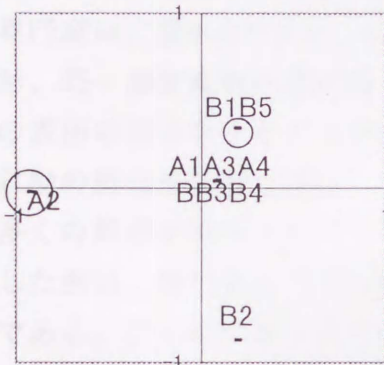


図4.2-2c 観点の使い方P 3 (鉱物) の例  
中学生・被験者番号19(学習後)

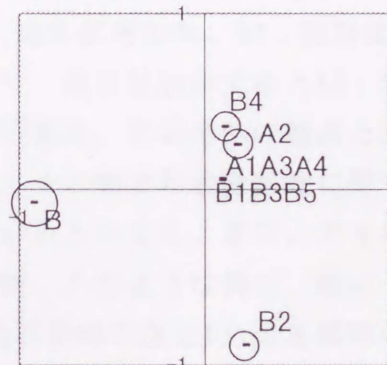


図4.2-2d 観点の使い方P 4 (全体・鉱物) の例  
大学生・被験者番号17

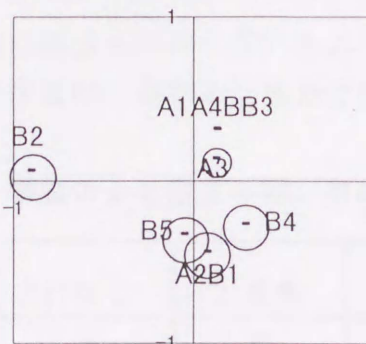


図4.2-2e 専門家の観点の使い方



05)。同じく学習前の中学生と大学生間で有意差が認められたが ( $\chi^2=10.98, df=3, p<0.05$ )、学習後の中学生と大学生の間では、有意差は認められなかった ( $\chi^2=4.91, df=3, p>0.05$ )。したがって、中学生は、学習前では大学生と観点の使い方が異なるが、学習後では大学生と観点の使い方が類似してくると考えられる。また、大学生において、岩石全体と造岩鉱物の観点を同時に用いない学生が多いかどうか二項分布検定を行った結果、多いことが明らかになった ( $N=20, x=5, p=0.021$ )。

表4.2-3から、さらに細かくみていくと、学習前の中学生の多くはP1で、それぞれの観点を独立して用いている。複数の観点をを用いる場合でも、P2の岩石全体に関する観点をを用いている。学習後は、半数ほどの生徒が、同じくP1のそれぞれの観点を独立して用いているが、残りの半数近くの生徒は、P3の造岩鉱物に関する複数の観点を同時に用いている。大学生の半数は、P1のそれぞれの観点を独立して用いているが、残りの半数は、P2、P3、P4に分かれている。

専門家は、図4.4-eより、A2：岩石全体の色、B1：造岩鉱物の色、B4：造岩鉱物の形、B5：造岩鉱物の量の観点をほぼ同時に用い、B2：造岩鉱物の大小とA3：岩石の表面の様子をそれとは独立して用いている。専門家は、岩石全体の観点と造岩鉱物の観点を同時に用い、P4にあてはまるが、P4の例より造岩鉱物に関する多くの観点を同時に用いており、大きく異なっているといえる。また、P4に示した例は、専門家にやや類似しているものであるが、このような例は、他に一人である。P4に分類されるその他の3人は、A1：岩石全体の形とB1：造岩鉱物の色というように、科学的な見方とは違った観点を同時に用いている。

#### (5) モデルによる学習変容の分析結果

中学生の用いる観点の変容について、表4.2-4に示した。学習前では、各観点を独立して用いている生徒が多かったが、学習後は造岩鉱物に関する複数の観点を同時に用いるように変容する生徒がやや多いといえる。専門家のように、岩石全体の観点と造岩鉱物の観点を同時に用いるように変容する生徒は少なく、一人である。しかし、この生徒は、科学的な見方とは対応しておらず、A1：岩石全体の

表4.2-4 学習による観点の使い方の変容 (単位：人)

学習前 \ 学習後	P1:なし	P2:全体	P3:鉱物	P4:全体・鉱物
P1:なし	8	0	6	1
P2:全体	1	1	2	0

形とB3:造岩鉱物の光沢の観点をほぼ同時に用いており、専門家の観点の用い方とは大きく異なっている。したがって、専門家のように、岩石全体の観点と造岩鉱物の観点を同時に用いるような変容は、ほとんどないといえる。

#### (6) モデルからの考察

以上をまとめると次のようになる。学習前の中学生においては、岩石全体の観点をし、しかも各観点を独立させて用いる生徒が多い。大学生は、岩石全体の複数の観点を同時に、あるいは造岩鉱物の複数の観点を同時に用いる学生が多いが、岩石全体の観点と造岩鉱物の観点を同時に用いる学生は少ない。学習後の中学生は大学生と類似してくる。一方、専門家は、岩石全体の観点と造岩鉱物の観点を同時に用いており、学習後の中学生や大学生とは異なる。



### 第3節 ふりこの周期の認識に関する分析

#### 1. 調査2の目的

本調査では、ふりこの教材を対象に、モデルの構築と分析法、および生徒の全体的処理の特徴を明らかにすることを目的とした。その際、単線型の処理との比較を行うことを考え、同じ問題解決においてニューラルネットワークとプロダクションシステムによる知識モデルを作成し、比較することにした。

#### 2. 調査2の方法

##### (1) 調査問題

調査は、図4.3-1に示したように、問1～問7の7問よりなるふりこの周期に関する質問紙を用いて、面接法により行った。問1～問3は、①おもりの重さ、②糸の長さ、③ふれ幅の3つの条件のうち、1つの条件を変えた場合の周期について問う問題である。問4～問7は、3つの条件のうち2つの条件を変えた場合の周期について問う問題である。

問1～問3では、周期に関係する条件を「おもりの重さ」、「糸の長さ」、「ふれ幅」のどれと考えているかを明らかにする。問4～問7では、その条件についての知識をどう適用しているか、また、条件が複数であると考えている場合、その条件をどう組み合わせてとらえるかを明らかにする。

ふりこの周期については、ピアジェの発達段階の研究<sup>(6)</sup>があげられるが、条件は1つのみを変えたものが多い。本調査で条件を2つ変えているのは、複数の条件を変えた場合、論理的処理だけでなく全体的処理から判断することが多くなり、本研究の目的である全体的処理の特徴について、明らかにするのに適当であると考えたからである。

調査では、問1から問3を一つの質問紙に、また、問4～問7を一つの質問紙にした。そして、まず、問1～問3の質問紙を提示し、適切と思う選択肢を選ばせるとともに、その選択肢を選んだ理由について説明させた。次に、その質問紙をふせ、問4から問7の質問紙を提示し、同じように選択肢を選択させその理由について説明させた。この調査における生徒のプロトコルは、VTRに記録して分析を行った。

##### (2) 調査対象および調査時期

調査は、1990年9月に金沢大学附属中学校、第1学年17人（男子6人、女子11人）を対象に行った。ふりこについては、未学習の生徒である。

下のそれぞれの問題には、AとBのふりこが示してあります。AとBの1往復する時間を比較するとどうなりますか。次の答の中から適切なもの一つを選び記号に○をつけて下さい。

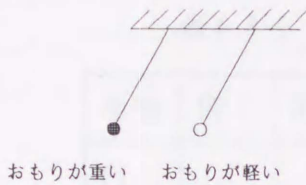
〔答〕1往復するのに、

- ア. Aの方が長い時間かかる
- イ. Bの方が長い時間かかる
- ウ. A、B同じ時間かかる

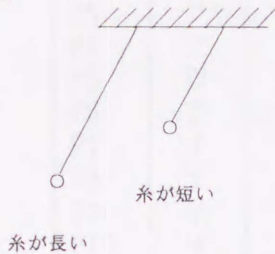
- エ. 場合によって、Aの方が時間がかかる場合やBの方が時間がかかる場合がある

※以下解答欄省略

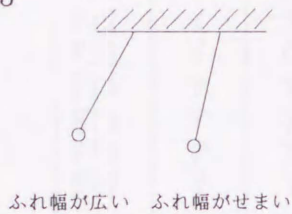
問1



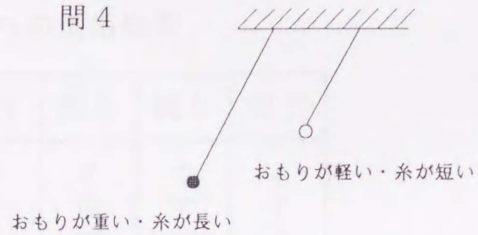
問2



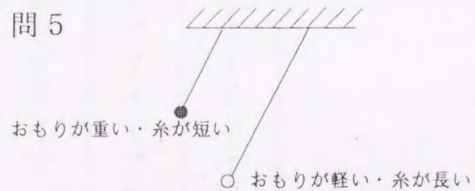
問3



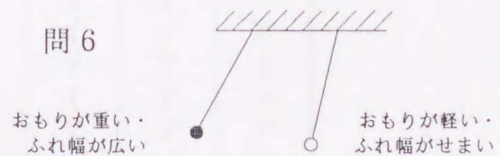
問4



問5



問6



問7

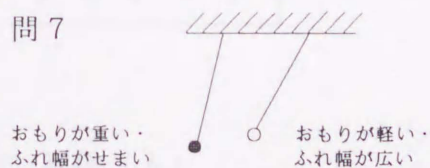


図4.3-1 ふりこの周期に関する調査問題（調査2）

### 3. 調査2の結果

各生徒の選択肢への反応を示したのが表4.3-1である。7問すべてにおいて回答が同じ生徒はいなかった。選択肢ごとの反応度数を示したのが表4.3-2である。表4.3-2の問1～問3の選択肢の反応から、問1～問3の間で正答者数に差があるか



どうか $\chi^2$ 検定を行った。その結果、問1と問2 ( $\chi^2=17.18$ ,  $df=1$ ,  $p<0.05$ )、問2と問3 ( $\chi^2=11.76$ ,  $df=1$ ,  $p<0.05$ )の間に有意差が認められた。このことから、糸の長さの条件については、重さやふれ幅の条件に比べて、正答する生徒が多いといえる。さらに細かくみていくと、問1より、おもりの重さについては、おもりの重い方が時間がかかると考える場合と、時間がかからないと考える場合と半々であり、考え方が分かれる。また、ふれ幅については、ふれ幅が広いほど時間がかかると考える生徒が比較的多い。

表4.3-1 生徒の選択肢への反応結果

生徒	問1	問2	問3	問4	問5	問6	問7
F1	イ	ウ	ア	イ	イ	ウ	イ
F2	ア	ア	アイ	ア	イウ	ウア	イ
F3	ア	アウ	アイウ	ア	ア	ア	ア
F4	ア	ア	ア	ア	アウ	ア	ア
F5	ア	ア	ア	ア	ア	ア	ア
F6	ウ	ア	ア	ア	ア	ア	ア
F7	ア	ア	ア	ア	ア	ア	ア
F8	ア	ア	ア	ア	ア	ア	ア
F9	ア	ア	ア	ア	ア	ア	ア
F10	ア	ア	ア	ア	ア	ア	ア
F11	ア	ア	ア	ア	ア	ア	ア
F12	ア	ア	ア	ア	ア	ア	ア
F13	ア	ア	ア	ア	ア	ア	ア
F14	ア	ア	ア	ア	ア	ア	ア
F15	ア	ア	ア	ア	ア	ア	ア
F16	ア	ア	ア	ア	ア	ア	ア
F17	イ	ア	ア	ア	ア	ア	ア

表4.3-2 選択肢への反応度数：単位（人）

（下線は正しい選択肢）

選択肢	問1	問2	問3	問4	問5	問6	問7
ア	8	<u>14</u>	10	<u>10</u>	4	8	4
イ	8	0	4	5	<u>10</u>	7	10
ウ	<u>1</u>	3	<u>3</u>	2	3	<u>2</u>	<u>3</u>
エ	0	0	0	0	0	0	0

#### 4. 調査2のプロダクションシステムのモデルによる分析

##### (1) モデルの作成方法

プロダクションシステムによるモデルは、調査を行った生徒の反応を表現できるように、問1～問7の問題の表現を行い、その問題の入力に対応して、生徒が解答した結果と同じような結果が出せるものを作成する。その際、生徒によって解答結果が異なるため、モデルの中で異なる部分が生じることになる。

問題の表現は、対象が変化しても類似した問題に適用できる一般的な表現を考えた。まず、対象のふりこを区別するために、「A」、「B」などの記号を用いて名前をつけ区別を行った。これは問題文中に用いられているような適当な記号を用いる。次に、ふりこの状態について「( )」でくくり、ふりこの名前の右に示した。この状態については、まず、ふりこに関する条件について、糸の長さは「NAGASA」、おもりの重さは「OMOSA」、ふれ幅は「HABA」という記号を用いた。また、両ふりこを比較して大きい方を「DAI」、小さい方を「SYOU」、同じである場合は「ONAJI」または記載しないこととし、「( )」でくくり記載した条件の右に示すことにした。

以上のことを基本にして、図4.3-1に示した問1の問題を記述すると次のように表現できる。

・問1：((A (NAGASA(ONAJI) OMOSA(DAI) HABA(ONAJI)))(B (NAGASA(ONAJI) OMOSA(SYOU) HABA(ONAJI))))、または((A(OMOSA(DAI)))(B(OMOSA (SYOU))))

答えは、「～の方が時間がかかる」、「～と～は同じ時間である」などと示すことを考えた。たとえば、「Aの方が時間がかかる」といった表現を考えた。

##### (2) 作成したモデル

モデルでは、問題の入力に対し、答えが出力できるような手続き的知識と宣言的知識（データの知識）を考えた。その際、各問題で異なる知識を使用するのではなく、一定の知識をもって解答を行うといった観点から、なるべく問題一般に通じた知識を考えることにした。

その結果、図4.3-2に示したモデルを作成することができた。モデルは、「DE」で定義され、図4.3-2の3行目に「DE P1」で示されたように、大きくP1～P6の6つの手続き的知識よりなる。また、手続き的知識の中にはP2-1（10行目）のように下位手続きを含むものもある。このP1～P6の手続き的知識と、データとしての宣言的知識などの意味については、図4.3-3に示した。

特に、問4～問7については、ふりこの条件の2つが異なる。そのため、各条件において周期が長くなると考えるふりこが違う場合、たとえばおもりで考える



とふりこ A の周期が長い、糸の長さで考えるとふりこ B の方が周期が長い、というような場合の処理を考える手続き P6 を考えた。これは、ほとんどの生徒は、2 つ以上の条件が周期に関係すると考えているために導入した手続きである。

解答結果および解答理由から、モデルにおいては周期が長くなると考える条件に関する宣言的知識の違いと、条件が複数考えられる場合、その条件の優位関係を判断する宣言的知識を考えた。

まず、周期が長くなると考える条件に関する宣言的知識は、図 4.3-2 の 71 行に示したように「((OMOSA DAI)(NAGASA DAI)(HABA SYOU))」という表現を行った。これは、おもりの重さを「OMOSA」、糸の長さを「NAGASA」、ふれ幅を「HABA」と表現し、その条件の大きい方が周期が長くなると考える場合を「DAI」、条件の小さい方が周期が長くなると考える場合を「SYOU」、関係がないと考える場合は記述しない、という表現を行った。したがって、「((OMOSA DAI)(NAGASA DAI)(HABA SYOU))」は、重さが大きい方、糸の長さの長い方、ふれ幅の小さい方が周期が長くなると考える場合の知識表現を示す。

一方、これらの条件が複数あげられる場合、その条件の優位関係に関する宣言的知識は、図 4.3-2 の 73 行に示したように「(OMOSA > NAGASA = HABA)」という表現をとった。この例では、重さを一番に優先する条件と考え、次に長さ、幅はどちらも同じ程度で考えるというものである。そして、図 4.3-3 に示したように、本調査で行ったふりこの周期に関する問題解決においては、6 つの基本的な手続きが必要であると考えられる。これらの手続きに関しては、条件に対する注目と条件の比較といった基本的なものであり、特に公式を使ったりするようなものでないため、ほとんどの生徒が持っている手続きであると考えられる。このことから、手続きが欠損していたり、余分な手続きが付加したりして解答が異なるということはほとんど考えられず、各生徒の解答の違いは、以上の 2 つの宣言的知識によるものと考えた。したがって、モデルの 70 行から 73 行に示された条件についての知識と条件の優位関係についての知識は、仮に当てはめたものであり、この部分は個人によって違ってくると考えた。

以上のことから、この 2 つの宣言的知識に着目し、各生徒の選択肢への反応および解答理由から、両知識をどのように考えれば生徒の反応と同じになるのかを示したのが図 4.3-4 である。F1 ~ F17 は各生徒に対応し、最後の F0 は、全問正答する場合の宣言的知識を示したもので、対応する生徒はいない。

生徒においては、両知識が常に一定でない場合があり、たとえばある問題で、「おもりの重い方が往復に時間がかかる」といった理由を述べながら、他の問題においては「おもりの軽い方が往復に時間がかかる」と述べるように、理由に一貫性のない場合がある。そこで、生徒の持っている知識はある程度一定であると

```

1 (DE FURI (X) (P1 X) (P2-1 ZOKUSEI1 ZOKUSEI2)
2 (P3 KANKEI) (P4 SYUKI-KANKEI) (P5 KEKKA))

3 (DE P1 (X) (COND ((NULL X) (SETQ TAISYOU1 (REVERSE TAISYOU1))
4 (SETQ ZOKUSEI1 (CAR (REVERSE TAISYOU2)))
5 (SETQ ZOKUSEI2 (CADR (REVERSE TAISYOU2))))
6 ((AND (NOT (NULL (CADR X))) (LISTP (CADR X)))
7 (SETQ TAISYOU1 (CONS (CAR X) TAISYOU1))
8 (SETQ TAISYOU2 (CONS (CADR X) TAISYOU2))
9 (P1 (CDDR X))) (T (P1 (CDR X)))))

10 (DE P2-1 (X Y) (P2-2 (CDR X) Y) (COND ((NULL Y)
11 (SETQ KANKEI (REVERSE KANKEI)))
12 ((AND (NOT (NULL (CADR Y))) (LISTP (CADR Y))
13 (EQUAL (CAR X) (CAR Y))) (SETQ KANKEI (CONS (CONS
14 (CAR X) (LIST (CADR X) (CADR Y))) KANKEI))
15 (P2-1 X (CDDR Y))) (T (P2-1 X (CDR Y)))))

16 (DE P2-2 (X Y) (COND ((NULL X) ((AND (NOT (NULL
17 (CADR X))) (LISTP (CADR X)) (EQUAL (CAR X) (CAR Y)))
18 (SETQ KANKEI (CONS (CONS (CAR X) (LIST (CADR X)
19 (CADR Y))) KANKEI)) (P2-2 (CDDR X) Y))
20 (T (P2-2 (CDR X) Y)))))

21 (DE P3 (X) (COND ((NULL X) (SETQ SYUKI-KANKEI
22 (REVERSE SYUKI-KANKEI))) (EQUAL (CAADAR X)
23 (CADR (ASSOC (CAAR X) SYUKI-NAGAI)))
24 (SETQ SYUKI-KANKEI (CONS (LIST (CAAR X)
25 (CAR TAISYOU1)) SYUKI-KANKEI)) (P3 (CDR X)))
26 ((EQUAL (CAR (CADDAR X)) (CADR (ASSOC (CAAR X)
27 SYUKI-NAGAI))) (SETQ SYUKI-KANKEI (CONS (LIST
28 (CAAR X) (CADR TAISYOU1)) SYUKI-KANKEI))
29 (P3 (CDR X))) (T (P3 (CDR X)))))

30 (DE P4 (X) (COND ((NULL X) (SETQ KEKKA
31 (REVERSE KEKKA)) (SETQ JOKEN (REVERSE JOKEN)))
32 (T (SETQ KEKKA (CONS (CAR (INTERSECTION TAISYOU1
33 (CAR X))) KEKKA)) (SETQ JOKEN (CONS (CAAR X) JOKEN))
34 (P4 (CDR X)))))

35 (DE P5 (X) (COND ((NULL X) (LIST (CAR TAISYOU1) 'と
36 (CADR TAISYOU1) 'は同じ時間である)) (NULL
37 (CDR JOKEN)) (LIST (CAR KEKKA) 'の方が時間がかかる))

38 ((EQUAL (CAR KEKKA) (CADR KEKKA)) (LIST (CAR KEKKA)
39 'の方が時間がかかる))
40 (T (SETQ ZEN-JOKEN (INTERSECTION YUI-JOKEN
41 ' (OMOSA NAGASA HABA)))
42 (SETQ DAI-SYOU (INTERSECTION YUI-JOKEN '( < > ))
43 (SETQ KIGOU (INTERSECTION YUI-JOKEN '( = < > , )))
44 (P6 ZEN-JOKEN KIGOU )))

45 (DE P6 (X Y) (P6-1 X Y) (P6-2 X) (P6-3) (P6-4))

46 (DE P6-1 (X Y) (COND ((NULL (CDR X)) ((NULL Y)
47 (T (SETQ KANKEI2 (CONS (LIST (LIST (CAR X) (CADR X))
48 (CAR Y)) KANKEI2)) (P6-1 (CDR X) (CDR Y)))))

49 (DE P6-2 (X) (COND ((AND (NOT (OR (EQUAL DAI-SYOU
50 '( < > )) (EQUAL DAI-SYOU '( > < ))))
51 (NOT (NULL DAI-SYOU))) (SETQ KANKEI2 (CONS (LIST (CONS 5 2 (CAR X)
52 (LAST X)) (CAR DAI-SYOU)) KANKEI2)))
53 ((EQUAL KIGOU '( = )) (SETQ KANKEI2 (CONS (LIST
54 (CONS (CAR X) (LAST X)) (CAR KIGOU)) KANKEI2))))))

55 (DE P6-3 () (COND ((NOT (NULL (LAST (ASSOC JOKEN
56 KANKEI2)))) (SETQ KIGOU2 (LAST (ASSOC JOKEN
57 KANKEI2)))) (T (SETQ KIGOU2 (LAST (ASSOC (REVERSE
58 JOKEN) KANKEI2))))))

```



```

5 9 (SETQ KEKKA (REVERSE KEKKA))))))
6 0 (DE P6-4 () (COND ((EQUAL KIGOU2 '(=))
6 1 (LIST (CAR KEKKA) 'と (CADR KEKKA)
6 2 'は同じ時間かかる))(EQUAL KIGOU2 '(>))
6 3 (LIST (CAR KEKKA) 'の方が時間がかかる))
6 4 ((EQUAL KIGOU2 '(<))
6 5 (LIST (CADR KEKKA) 'の方が時間がかかる))))))

6 6 (SETQ TAISYOU1 ()) (SETQ TAISYOU2 ())
6 7 (SETQ KANKEI ()) (SETQ SYUKI-KANKEI ())
6 8 (SETQ KEKKA ()) (SETQ JOKEN ())
6 9 (SETQ KANKEI2 ())

7 0 (SETQ SYUKI-NAGAI '
7 1 ((OMOSA DAI)(NAGASA DAI)(HABA SYOU)))

7 2 (SETQ YUI-JOKEN '
7 3 (OMOSA > NAGASA = HABA))

```

図4.3-2 プロダクションシステムによるモデル

知識（行）	知 識 の 内 容
P1(3-9)	両ふりこの名前、糸の長さ、おもりの重さ、ふれ幅などのふりこの状態について記憶を行う。
P2(10-20)	両ふりこの状態について、条件の大小を対比して記憶する。
P3(21-29)	周期が長くなると考えられる条件をデータ（70～71行）から検索し、周期が長くなる条件とそのふりこの名前を対にして記憶する。
P4(30-34)	各条件において、周期が長くなると考えられるふりこの名前をあげる。
P5(35-44)	P4においてあげられたふりこの名前が、各条件において同一ならば、そのふりこの名前を答として出力する。同一でない場合は、次の手続きに移る。
P6(45-65)	どの条件を優位に考えて判断するかデータ（72～73行）を検索し、優位な条件の方のふりこの名前を出力する。条件に優位性がない場合は、同じ周期になると出力する。
その他 (1-2) (66-69) (70-71) (72-73)	P1～P6の手続きの全体の制御 作業記憶領域の確保 周期が長くなると考えられる条件の宣言的知識 条件の優位関係についての宣言的知識

図4.3-3 モデルにおける各知識の内容

学習者	問	周期の条件に関する知識	条件の優位関係の知識	補 足
F 1	1	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > HABA , NAGASA	
	2	((OW OSA SYO U)_____ (HABA DA I))	*OW OSA > HABA , NAGASA	
	3	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > HABA , NAGASA	
	4	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > HABA , NAGASA	
	5	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > HABA , NAGASA	
	6	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	OW OSA = HABA , NAGASA	
	7	((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA SYO U))	*OW OSA > HABA , NAGASA	
F 2	1	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA > NAGASA = OWOSA	
	2	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA > NAGASA = OWOSA	
	3	((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA SYO U))	*HABA > NAGASA = OWOSA	
	4	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA > NAGASA = OWOSA	
	5	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA > NAGASA = OWOSA	
	6	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA > NAGASA = OWOSA	←直観
	7	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA > NAGASA = OWOSA	
F 3	1	*((OW OSA DA I))		
	2	*((OW OSA DA I))		
	3	*((OW OSA DA I))		
	4	*((OW OSA DA I))	不 要	
	5	*((OW OSA DA I))		
	6	((OW OSA DA I)(HABA DA I))		
	7	*((OW OSA DA I))		
F 4	1	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA = NAGASA = HABA	
	2	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA = NAGASA = HABA	
	3	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA = NAGASA = HABA	
	4	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA = NAGASA = HABA	
	5	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA = NAGASA = HABA	
	6	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA = NAGASA = HABA	
	7	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA = NAGASA = HABA	
F 5	1	(_____ (NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	
	2	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	
	3	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	
	4	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	
	5	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	
	6	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	
	7	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	
F 6	1	((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA SYO U))	*NAGASA > OWOSA > HABA	
	2	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA SYO U))	*NAGASA > OWOSA > HABA	
	3	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA SYO U))	*NAGASA > OWOSA > HABA	
	4	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA SYO U))	*NAGASA > OWOSA > HABA	
	5	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA SYO U))	*NAGASA > OWOSA > HABA	
	6	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA SYO U))	*NAGASA > OWOSA > HABA	
	7	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA SYO U))	*NAGASA > OWOSA > HABA	
F 7	1	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	
	2	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	
	3	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	
	4	((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	←あるいは、 (OW OSA SYO U)の また NAGASA > OW O SA , HABA でも可
	5	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	
	6	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	
	7	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*OW OSA > NAGASA , HABA	
F 8	1	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA > OW OSA > NAGASA	
	2	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA > OW OSA > NAGASA	
	3	((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)_____ )	*HABA > OW OSA > NAGASA	
	4	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA > OW OSA > NAGASA	
	5	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA > OW OSA > NAGASA	←直観
	6	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA > OW OSA > NAGASA	
	7	*((OW OSA DA I)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA > OW OSA > NAGASA	
F 9	1	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA , NAGASA > OWOSA	
	2	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA , NAGASA > OWOSA	
	3	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA , NAGASA > OWOSA	
	4	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA , NAGASA > OWOSA	
	5	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA , NAGASA > OWOSA	
	6	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA , NAGASA > OWOSA	
	7	*((OW OSA SYO U)(NAGASA DA I)(HABA DA I))	*HABA , NAGASA > OWOSA	



F 10	1	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+H A B A = N A G A S A = O M O S A	全問題において、 が長いほどふれ幅 広いと考える
	2	((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+H A B A = N A G A S A = O M O S A	
	3	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+H A B A = N A G A S A = O M O S A	
	4	((OM OSA SYO U)(N AGASA SYO U)(H A B A SYO U))	+H A B A = N A G A S A = O M O S A	
	5	((OM OSA SYO U)(N AGASA SYO U)(H A B A SYO U))	+H A B A = N A G A S A = O M O S A	
	6	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+H A B A = N A G A S A = O M O S A	
	7	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+H A B A = N A G A S A = O M O S A	
F 11	1	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+OM OSA > N A G A S A , H A B A	あるいは、 (OM OSA SYO U) の まま H A B A > OM O S ←、N A G A S A でも可
	2	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+OM OSA > N A G A S A , H A B A	
	3	((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+OM OSA > N A G A S A , H A B A	
	4	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+OM OSA > N A G A S A , H A B A	
	5	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+OM OSA > N A G A S A , H A B A	
	6	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+OM OSA > N A G A S A , H A B A	
	7	((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A SYO U))	+OM OSA > N A G A S A , H A B A	
F 12	1	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+H A B A > OM O S A = N A G A S A	←直観
	2	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+H A B A > OM O S A = N A G A S A	
	3	((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)_____)	+H A B A > OM O S A = N A G A S A	
	4	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+H A B A > OM O S A = N A G A S A	
	5	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+H A B A > OM O S A = N A G A S A	
	6	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+H A B A > OM O S A = N A G A S A	
	7	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+H A B A > OM O S A = N A G A S A	
F 13	1	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+H A B A = N A G A S A > OM O S A	直観で判断。 (H ABA DA I)のまま (OM OSA DA I)、 H ABA = N A G A S A ← OM O S A でも可
	2	((OM OSA SYO U)_____ (H ABA DA I))	+H A B A = N A G A S A > OM O S A	
	3	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+H A B A = N A G A S A > OM O S A	
	4	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+H A B A = N A G A S A > OM O S A	
	5	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+H A B A = N A G A S A > OM O S A	
	6	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+H A B A = N A G A S A > OM O S A	
	7	((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	H A B A = OM O S A , N A G A S A	
F 14	1	*((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
	2	*((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
	3	*((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
	4	*((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
	5	*((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
	6	*((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
	7	*((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
F 15	1	*((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A > N A G A S A > H A B A	
	2	*((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A > N A G A S A > H A B A	
	3	*((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A > N A G A S A > H A B A	
	4	*((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A > N A G A S A > H A B A	
	5	*((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A > N A G A S A > H A B A	
	6	((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A SYO U))	H A B A > OM O S A > N A G A S A	
	7	*((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A > N A G A S A > H A B A	
F 16	1	((OM OSA DA I)(N A G A S A DA I)(H A B A DA I))	+OM O S A = N A G A S A = H A B A	
	2	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+OM O S A = N A G A S A = H A B A	
	3	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+OM O S A = N A G A S A = H A B A	
	4	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+OM O S A = N A G A S A = H A B A	
	5	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+OM O S A = N A G A S A = H A B A	
	6	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+OM O S A = N A G A S A = H A B A	
	7	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA DA I))	+OM O S A = N A G A S A = H A B A	
F 17	1	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
	2	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
	3	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
	4	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
	5	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
	6	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
	7	*((OM OSA SYO U)(N AGASA DA I)(H ABA SYO U))	+OM O S A > N A G A S A , H A B A	
F 0	1	*((N A G A S A DA I))	不 要	
	2	*((N A G A S A DA I))		
	3	*((N A G A S A DA I))		
	4	*((N A G A S A DA I))		
	5	*((N A G A S A DA I))		
	6	*((N A G A S A DA I))		
	7	*((N A G A S A DA I))		

「\*」は基本型、「\_\_\_\_\_」は基本型の修正箇所、「←」は補足対象の問題)  
 図4.3-4 学習者の周期の条件に関する知識および条件の優位関係に関する知識

いった立場から、その生徒の基本型になっていると考えられる知識については「\*」を示し、問題によって変更している部分については下線を引いて図4.3-4に示した。

### (3) モデルによる分析結果

図4.3-4より、生徒F4、F9、F14、F17の4人(24%)は、各問題とも宣言的知識を一定にしたモデルで表現でき、問題によらず考え方が一定していることがわかる。その他の生徒においては、問題によって宣言的知識を変更しないと表現することができない。変更を必要とする生徒の数が多いかどうか二項分布検定を行った結果、変更を必要とする生徒が多いことが明らかになった( $N=17, x=4, p=0.025$ )。

図4.3-4の宣言的知識からは、各条件の考え方がわかり、たとえば、生徒F3は、ほとんど「おもりの重さ」のみで判断していることがわかる。また、生徒F4では、3つの条件とも均等に考慮していることがわかる。

そして、宣言的知識の変更が必要な生徒13人のうち、ふりこの周期の条件に関する宣言的知識については、最大で13人全員、最小で12人が変更が必要である。この最大と最小というように幅があるのは、条件の優位関係についての宣言的知識の変更によって、ふりこの周期の条件に関する宣言的知識の変更の必要性が変わるからである。同じく、条件の優位関係についての宣言的知識は、最大で5人、最小で3人の変更が必要である。このことから、宣言的知識の変更を必要とする生徒は、ふりこの周期の条件に関する宣言的知識の変更を必要とする場合が多いことが考えられる。そこで、ふりこの周期の条件に関する宣言的知識については最小の12人、条件の優位関係についての宣言的知識は、最大の5人をとって、 $\chi^2$ 検定を行った結果、有意差が認められた( $\chi^2=6.12, p<0.05$ )。

このことから、たとえば、おもりの重さを特に注目するというように、どの条件に特に着目するかは問題によってほとんど変わらないが、その条件が大の方が周期が長くなるか、小の方が周期が長くなるかといった周期の条件に関する知識は、問題によって変わりやすいと考えられる。つまり、条件に着目する視点のようなものは、問題によってもあまり変わらないことが考えられる。

以上の分析結果をまとめると、次のようになる。

①ある問題では、「おもりの重い方が往復に時間がかかる」といった理由を述べながら、他の問題においては「おもりの軽い方が往復に時間がかかる」と理由を述べるように、一貫した手続きでは、モデルが十分に作成できない。そのため、多くの生徒のモデルが、宣言的知識の一部を問題によって変更するようなモデルとなった。

②宣言的知識は、周期が長くなると考える条件に関する宣言的知識(たとえば、



おもりが重いと往復に時間がかかる)と、条件が複数考えられる場合にその条件の優位関係を判断する宣言的知識(たとえば、おもりの重さと糸の長さが違う場合、おもりの重さを優先的に考える)が考えられた。

③条件の優位関係についての宣言的知識よりも、条件に関する宣言的知識は、問題によって変更する必要があった。このことから、たとえば、特におもりの重さに注目するというように、どの条件に注目するかは問題によってほとんど変わらないが、その条件が大の方が周期が長くなるか、小の方が周期が長くなるかといった周期の条件に関する知識は、問題によって変わりやすいことが考えられた。

## 5. 調査2のニューラルネットワークのモデルによる分析

### (1) モデルの作成方法

次に、ニューラルネットワークによって、同じ調査結果をモデル化することにした。ニューラルネットワークの構造は、図4.3-5のような構造を考えた。入力層の細胞は、ふりこに関する条件に合わせて3つとした。中間層の細胞については、各条件についての考え方が7問の問題それぞれにおいて違った場合、最大7つの特徴検出が必要になると考えられるので、その処理数から7つとした。しかし、特徴検出が最大に必要なときは、演算的に収束しにくい場合があり、収束が困難な場合には9~10にして演算を行った。出力層の細胞は1つとした。これは、選択肢に合わせて3つにすることも考えられるが、複数の選択肢を選ぶわけではないこと、また、3つにした場合、中間層から出力層への荷重を比較する必要があるので、分析を容易にするために1つとした。

データは、おもりの重さ、糸の長さ、ふれ幅を入力層の①~③の細胞に対応させ、比較する2つのふりこのうち1つのふりこの方に注目して、そのふりこのおもりの重さが重ければ「1」、軽ければ「-1」、同じならば「0」というように入力した。糸の長さ、ふれ幅についても大であれば「1」、小であれば「-1」、同じならば「0」とした。

出力は、その注目したふりこの方が、往復に時間がかかると答えれば「1」、時間がかからないと答えれば「-1」、同じと答えれば「0」とした。以上のように、各問題のふりこについての入出力のデータを定めた。その際、1問につきどちらのふりこに注目してもよいように、両方のふりこをデータとした。たとえば、問1について、おもりの重いAの方が往復に時間がかかると解答していた場合、Aのふりこに注目した場合のデータ、

・入力「1 0 0」 → 出力「1」

Bのふりこに注目した場合のデータ、

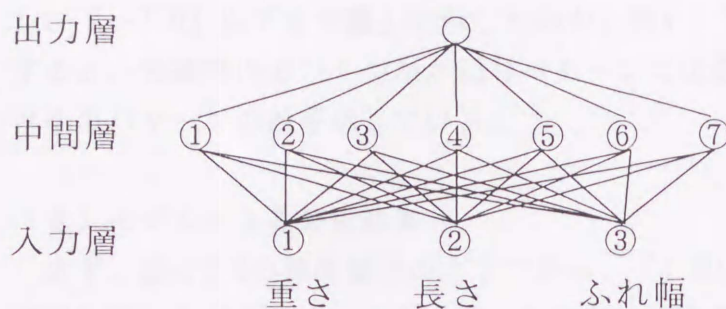


図4.3-5 ニューラルネットワークの構造

・入力「-1 0 0」 → 出力「-1」  
 の2つをデータとした。なお、両ふりこが同じ場合は、周期が同じになることを前提としているため、

・入力「0 0 0」 → 出力「0」  
 のデータも全生徒に含めた。

したがって、1個人について、計15の入出力のデータのペアが作成できる。この15のどのペアも成立するように、各細胞の荷重を変化させ知識モデルを作成した。最終的には、荷重の平均誤差が5%以下になるまで演算し、モデルを作成した。

## (2) 作成したモデル

モデルの入力層の細胞（ふりこの周期に関する条件）から、中間層の細胞への荷重と、中間層の細胞から出力層の細胞への荷重を、表4.3-3に示した。表4.3-3のF0は、正しい解答を行う場合の荷重であり、対応する生徒はいない。表4.3-3に示した荷重については、次のことが指摘できる。3つのふりこの条件のうち、周期を考える際に考慮しない条件については、それに対応した入力層の細胞から中間層の7つ（あるいは9～10）の細胞への荷重は、一定の値になってくる。一方、その条件を考慮する場合は、荷重はマイナスの値やプラスの値となり、値が分散する。このことをもとに、3つの条件それぞれについて、7つの荷重の標準偏差を求め、標準偏差が大きい場合は、周期を考える際にその条件を考慮すると考え、「0」に近い場合は、その条件をほとんど考慮しないと考えた。各条件の標準偏差について示したのが、表4.3-4である。そして、各標準偏差をグラフに示したのが図4.3-6である。

次に、中間層の特徴検出パターンについて、荷重が「+1.0」以上を「□」で示



し、「1.0」以下を「■」で示したのが、図4.3-7である。図4.3-7のように図示すると、特徴検出のいくつかが同じパターンになる場合があり、図4.3-7の「個数」はそのパターンの数を示している。

### (3) モデルによる分析結果

まず、図4.3-6の標準偏差のグラフから、「1.0」より小さい場合はその条件を考慮しないと考えると、たとえば、生徒F1は「糸の長さ」を周期にかかわる条件としてほとんど考慮せず、また、全問正答のシミュレーションF0は「おもりの重さ」と「ふれ幅」を条件としてほとんど考慮しないことがわかる。この条件の考慮について、図4.3-4のプロダクションシステムによるモデルと比較を行った。その結果、条件の考慮について、11人は一致していたが、6人は一致していなかった。また、標準偏差の区切り変更し、「0.8」より小さい場合、その条件を考慮しないと考えると、プロダクションシステムによるモデルの結果と一致する生徒は、14人、一致しない生徒は3人であった。プロダクションシステムによるモデルの結果と一致する人数が多いかどうか、二項分布検定を行った結果、標準偏差を「1.0」で区切った場合は、有意に多いとはいえず ( $N=17, x=6, p=0.166$ )、標準偏差を「0.8」で区切った場合は有意に多いことが明らかになった ( $N=17, x=4, p=0.006$ )。以上のように、標準偏差の区切り方にもよるが、条件の考慮については、プロダクションシステムのモデルとある程度の一致がみられると思われる。

次に、図4.3-7の特徴検出パターンからは次のことが指摘できる。「□」や「■」で示された条件は、解答の際に考慮することを示している。そして、いくつかの異なる特徴検出パターンがあるということは、問題によって、そのパターンで示された条件を考慮するように生徒のとらえ方が変わることを示している。たとえば、生徒F2については、回答において、問3の「ふれ幅」の条件が一つ違うとき、「ふれ幅が小さいほど周期が大である」といった反応をし、その他の問題では、「ふれ幅が大きいほど周期が大である」という相矛盾する反応を行っている。このような場合は特徴検出が多くなると考えられる。一方、全問正答のシミュレーションF0のように全問において糸の長さだけを考慮するように、条件に対する考え方が一定の場合は、「糸の長さ」だけが、「□」「■」で、特徴検出の数も少なくなっている。糸の長さについて、「□」と「■」が逆になった特徴検出が存在するのは、「糸が短ければ往復に時間がかからない」と「糸が長ければ往復に時間がかかる」といった、同じ意味の2つの考え方を本問題がもつためである。必ずしもこの対称構造は必要としないが、本問題の場合、対称性をもつほうがよりニューラルネットワークの構造としては安定するため、対称的な特徴検出パターンが生じる場合がある。

表4.3-3 ふりこの周期に関するニューラルネットワークの荷重

生徒	中間層	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	標準偏差
F 1	出力層	-2.482	-1.473	-1.480	1.193	6.055	0.078	-1.512				
	重さ	1.174	0.463	0.571	-1.042	-3.425	-0.240	0.554				1.442
	長さ	-0.110	-0.004	-0.410	-0.226	-0.168	0.013	-0.086				0.135
	ふれ幅	-1.118	-0.722	-0.559	0.173	-3.508	-0.601	-0.464				1.463
F 2	出力層	-4.801	14.337	-4.956	-7.145	-5.092	-2.909	7.549	-4.967	-6.054		
	重さ	1.838	9.832	2.135	-3.840	2.132	-1.567	-6.776	2.183	4.090		4.504
	長さ	-1.968	-0.498	-1.521	-2.862	-1.366	-2.215	-7.187	-1.417	-3.666		1.866
	ふれ幅	-2.252	-7.477	-3.314	-0.584	-3.858	-0.987	5.302	-3.562	1.092		3.382
F 3	出力層	-4.820	7.235	-2.377	-5.389	-1.433	-0.890	2.907				
	重さ	-1.176	2.098	0.305	-1.584	0.241	0.007	0.717				1.128
	長さ	-0.112	0.150	-0.219	0.469	-0.111	-0.089	-0.264				0.236
	ふれ幅	-0.112	0.073	-0.047	0.403	0.127	-0.151	0.014				0.172
F 4	出力層	-7.004	5.128	-5.315	-8.654	-3.650	-1.414	5.472				
	重さ	-1.157	0.873	-0.649	-1.426	-0.095	0.312	0.906				0.867
	長さ	-1.181	0.879	-0.762	-1.427	0.147	0.627	0.902				0.919
	ふれ幅	-1.179	0.799	-0.820	-1.419	-0.116	0.201	0.899				0.861
F 5	出力層	-11.314	-4.969	-5.043	-7.690	15.482	-0.429	-4.797				
	重さ	4.959	-2.117	4.425	-3.059	-14.547	0.256	-1.997				5.406
	長さ	5.705	-1.038	-5.435	-3.033	6.462	-2.152	-0.934				4.133
	ふれ幅	5.600	-0.996	-5.458	-2.891	6.422	-2.368	-0.879				4.107
F 6	出力層	-2.414	15.919	-2.220	-8.653	-2.283	-2.485	12.750	-2.553	-4.425	-3.654	
	重さ	-0.153	-3.924	-1.094	-2.837	-1.378	-0.311	-6.271	-0.463	3.057	-2.234	2.370
	長さ	-1.381	9.591	-3.179	0.745	-3.499	-1.217	-6.831	-0.878	-5.562	0.211	4.270
	ふれ幅	-1.570	-1.206	-1.204	-6.163	-1.181	-1.556	12.936	-1.753	-5.928	-2.243	4.980
F 7	出力層	-0.707	-4.220	4.284	-7.594	-2.943	-3.177	4.573				
	重さ	-0.974	1.264	-2.269	3.555	0.267	0.262	-2.540				1.960
	長さ	-0.135	-2.184	3.061	-4.498	-1.267	-1.500	3.247				2.588
	ふれ幅	-0.429	-0.701	0.907	-1.261	-0.774	-0.601	1.054				0.819
F 8	出力層	-2.833	1.362	-15.354	-8.852	-15.894	-5.559	-2.137	-6.794	-5.317	-2.251	
	重さ	1.028	0.572	-10.310	-6.113	4.483	4.998	0.242	-12.581	-3.733	-0.070	5.624
	長さ	-2.354	2.739	0.578	-14.662	-6.074	1.387	-2.298	3.207	-4.805	-2.249	5.007
	ふれ幅	-3.594	1.348	11.832	-15.365	-13.595	-1.718	-2.908	-8.261	-3.243	-2.379	7.266
F 9	出力層	-7.675	5.712	-7.002	-6.722	2.291	1.601	-0.604				
	重さ	1.060	-0.846	1.034	0.957	-0.747	-0.672	-0.514				0.853
	長さ	-2.220	1.863	-2.006	-1.770	0.823	0.724	0.437				1.525
	ふれ幅	-2.524	1.577	-2.220	-1.957	0.688	0.273	0.006				1.497



生徒 中間層 ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ 標準偏差

F10	出力層	2.300	6.699	7.445	4.550	5.993	-0.587	-13.197												
	重さ	0.926	4.687	1.286	1.545	-3.472	-2.780	9.557												4.110
	長さ	-1.749	-1.151	-1.430	-2.333	-2.248	2.542	-6.411												2.425
	ふれ幅	-2.218	-2.349	-1.899	-1.208	-0.971	0.806	0.043												1.096
F11	出力層	-8.231	7.140	-7.506	1.028	16.806	0.748	-6.508												
	重さ	-4.501	3.437	-3.274	-0.950	-11.130	-1.864	0.053												4.202
	長さ	6.151	-3.620	-1.886	-1.180	3.164	-0.906	-4.767												3.548
	ふれ幅	-0.917	-6.204	3.757	-2.025	7.641	-2.211	4.633												4.459
F12	出力層	-7.582	7.103	-4.399	-5.713	6.339	0.072	-2.760												
	重さ	4.945	-6.193	4.517	-5.030	5.827	-0.586	-3.839												4.744
	長さ	0.054	5.257	-5.795	-0.797	-1.875	-0.402	0.102												3.020
	ふれ幅	-8.924	-2.820	-3.179	-6.474	-2.753	-0.027	3.653												3.786
F13	出力層	-2.594	-4.487	-3.653	-6.806	-0.731	-6.183	11.098												
	重さ	0.103	-5.809	-2.966	-3.085	1.064	1.805	-7.751												3.316
	長さ	-4.260	1.546	-1.253	-1.556	-4.069	-9.450	-4.678												3.205
	ふれ幅	1.381	1.784	2.011	-4.870	0.610	5.815	11.567												4.675
F14	出力層	-6.855	6.750	-5.303	-7.887	-5.231	-3.824	4.017												
	重さ	-1.777	1.829	-1.186	-1.861	-1.183	-0.616	1.080												1.328
	長さ	-0.749	0.860	-0.809	-0.657	-0.770	-0.559	0.533												0.645
	ふれ幅	-0.830	0.677	-0.541	-0.715	-0.536	-0.678	0.548												0.584
F15	出力層	-9.491	12.095	-2.028	-7.894	-1.301	-2.105	-1.636												
	重さ	9.745	9.239	-0.172	-8.147	-0.419	-0.122	-0.323												5.773
	長さ	-4.296	3.619	-1.778	6.809	-0.902	-2.001	-1.592												3.554
	ふれ幅	-6.863	-15.847	-3.145	-5.071	-3.465	-3.091	-2.938												4.253
F16	出力層	-4.079	6.515	-11.627	-8.838	1.761	6.744	0.765	10.390	3.396	3.612									
	重さ	-5.107	-7.660	-3.929	7.392	-0.950	3.703	-1.651	-5.292	-2.119	2.284									4.383
	長さ	-2.748	4.875	-4.827	-7.158	-1.445	-5.680	-0.854	-5.727	-2.511	-3.118									3.257
	ふれ幅	-3.682	5.176	-4.202	-8.924	-1.095	-5.920	-0.690	-6.106	-1.753	-2.982									3.641
F17	出力層	0.518	2.951	-2.712	4.394	7.456	2.743	-5.918												
	重さ	0.201	-0.719	1.326	-1.859	-4.417	-0.645	2.886												2.156
	長さ	-0.781	0.335	-0.742	1.055	2.762	0.111	-1.408												1.296
	ふれ幅	-0.362	-0.954	0.514	-0.783	-1.562	-0.697	1.124												0.849
F0	出力層	-4.119	7.664	-4.020	-4.058	-0.889	0.459	0.076												
	重さ	0.110	0.170	0.090	0.234	-0.286	-0.320	-0.051	全問正答の場合											0.204
	長さ	-1.070	2.283	-1.007	-0.873	0.155	0.464	0.244	対応する生徒はいない											1.097
	ふれ幅	-0.171	-0.231	-0.163	0.005	-0.018	-0.290	-0.048												0.104

表4.3-4 荷重の標準偏差

生徒	重さ	長さ	ふれ幅
F1	1.442	0.135	1.463
F2	4.504	1.866	3.382
F3	1.128	0.236	0.172
F4	0.867	0.919	0.861
F5	5.406	4.133	4.107
F6	2.370	4.270	4.980
F7	1.960	2.598	0.819
F8	5.624	5.007	7.266
F9	0.853	1.525	1.497
F10	4.110	2.425	1.096
F11	4.202	3.548	4.459
F12	4.744	3.020	3.786
F13	3.316	3.205	4.675
F14	1.328	0.645	0.584
F15	5.773	3.554	4.253
F16	4.383	3.257	3.641
F17	2.156	1.296	0.849
F0	0.204	1.097	0.104

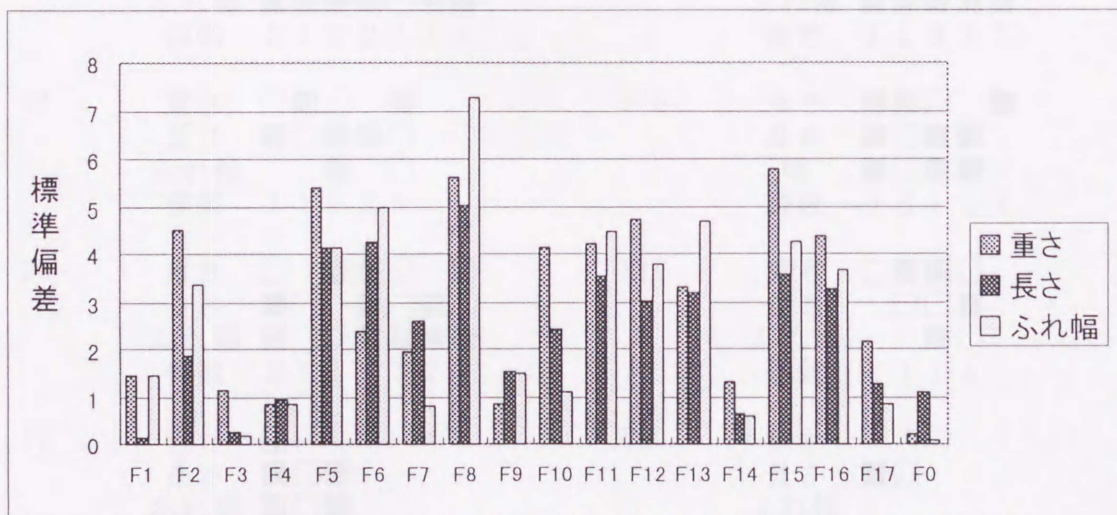


図4.3-6 荷重の標準偏差



生徒	特徴検出パターン	生徒	特徴検出パターン
F1	重さ □ ■ ■ ■ 長さ ふれ幅 ■ □ 個数 1 1 1	F10	重さ □ ■ ■ ■ □ 長さ ■ ■ ■ □ ■ ふれ幅 ■ ■ 個数 2 3 1 1 1
F2	重さ □ □ ■ ■ □ □ 長さ ■ ■ ■ ■ ■ ふれ幅 ■ ■ □ □ 個数 4 1 2 1 1	F11	重さ ■ □ ■ ■ ■ ■ 長さ □ ■ ■ ■ □ ■ ■ ふれ幅 ■ □ ■ □ ■ □ 個数 1 1 1 1 1 1 1
F3	重さ ■ □ 長さ ふれ幅 個数 2 1	F12	重さ □ ■ □ ■ □ □ 長さ □ ■ ふれ幅 ■ ■ ■ ■ ■ 個数 1 1 1 1 2
F4	重さ ■ 長さ ■ ふれ幅 ■ 個数 2	F13	重さ ■ ■ ■ □ □ 長さ ■ □ ■ ■ ■ ■ ふれ幅 □ □ □ ■ □ 個数 1 1 2 1 1 1
F5	重さ □ ■ □ ■ ■ ■ ■ 長さ □ ■ ■ ■ □ ■ ■ ふれ幅 □ ■ ■ □ ■ ■ 個数 1 1 1 1 1 1 1	F14	重さ ■ □ 長さ ふれ幅 個数 4 2
F6	重さ ■ ■ ■ ■ □ 長さ ■ □ ■ ■ ■ ■ ふれ幅 ■ ■ ■ ■ □ ■ ■ 個数 2 1 2 2 1 1 1	F15	重さ □ □ ■ 長さ ■ □ ■ □ ふれ幅 ■ ■ ■ ■ ■ 個数 1 1 3 1 1
F7	重さ □ ■ □ ■ 長さ ■ □ ■ ■ □ ふれ幅 ■ □ 個数 1 1 1 2 1	F16	重さ ■ ■ □ ■ 長さ ■ □ ■ ■ 幅 ■ □ ■ ■ 個数 4 3 1 1 1
F8	重さ □ ■ ■ □ ■ 長さ ■ □ ■ □ ■ □ ふれ幅 ■ □ □ ■ ■ ■ ■ 個数 2 1 1 2 1 2 1	F17	重さ □ ■ ■ □ 長さ □ □ ■ ふれ幅 ■ □ 個数 1 1 1 1
F9	重さ □ 長さ ■ □ ■ ふれ幅 ■ □ ■ 個数 2 1 1	F0	重さ 長さ ■ □ ふれ幅 個数 2 1

「■」は、荷重が-1.0以下 「□」は、荷重が1.0以上、「個数」は、そのパターン数

図4.3-7 ふりこの周期に関する特徴検出パターン

以上のように、条件に対する考え方が問題を通して一定の場合、特徴検出パターン数が少なくなることが考えられる。そこで、その検証を行った。F4、F9、F14、F17の4人の生徒は、問題を通して条件に対する考え方が一定している。まず、条件に対する考え方が一定の場合、特徴検出の数が2程度と考えられるので、数のランクを①2以下、②その倍の4以下、③4より大、の3つのランクに分けた。そして、問題を通して条件に対する考え方が一定している4人の生徒と、一定していない14人の生徒に分けて、各ランクの度数を示したのが表4.3-5である。表4.3-5より、条件に対する考え方の違いによって、特徴検出の数に違いがあるかどうか $\chi^2$ 検定を行った結果、有意差が認められた( $\chi^2=10.29, df=2, p<0.05$ )。このことから、表4.3-5を詳しくみると、条件に対する考え方が問題を通して一定の場合、特徴検出パターン数が少なくなるといえる。そして、全体的には特徴検出の数の多い生徒が多く、プロダクションシステムの分析と同様、問題によって、条件に対する考え方が変わる生徒が多いことがわかる。

表4.3-5 条件に対する考え方と特徴検出の数のクロス表(単位:人)

特徴検出の数 条件に対する考え方	2以下	2より大きく 4以下	4より大	計
問題によらず一定	2	2	0	4
問題によって変化	1	1	12	14

以上の結果をまとめると、次のようになる。

- ①ふりこの条件に対する生徒の考え方については、ニューラルネットワークによる全体的な処理の分析とプロダクションシステムの分析との間に、ある程度の一致をみることができた。
- ②プロダクションシステムの分析では、モデルの一部を変更する必要があることから、単線型の処理を行っている生徒は少ないと考えられた。ニューラルネットワークの特徴検出パターンの分析結果からは、ほとんどの生徒は、特徴検出パターンが多く、ほとんどの生徒が複数の条件を同時にとらえる全体的処理を行っているが、その全体的処理が問いによって変わることが考えられた。

## 6. 両モデルの比較



プロダクションシステムおよびニューラルネットワークのモデルによる分析の結果、両モデルから指摘できる生徒の条件のとらえ方についてはある程度一致するものであり、相矛盾するような結果は認められなかった。プロダクションシステムの場合、生徒の考慮するふりこの条件について、その関係を簡単な記号や式でわかりやすく表現できる（宣言的知識の部分）。しかし、生徒は、問題によっては、一つの形式で表せるような反応を行っているわけではなく、複雑な反応を行っていることが明らかになった。そのため、宣言的知識、あるいは手続き的知識に例外を含んだ表現が必要となる。この例外については、宣言的知識や手続き的知識を複雑にしていくことによって、なくしていくことも考えられるが、あまり複雑になるとモデルを通して知識の解明が難しくなるとともに、実際にそのような知識活用を生徒自身が行っているとは考えにくくなるといえる。

一方、ニューラルネットワークにおいては、例外なく生徒の反応を表現できる。しかし、モデルは、各条件が複雑に絡んだものであるため、全体の特徴はつかみにくく、特徴検出パターンのように、ある程度集約したものを分析の対象にしなければ、条件の関係について把握しにくいといった問題がある。

以上のような両モデルの差異は、ニューラルネットワークのモデルの方では、プロダクションシステムと違って、最終的な判断が各条件に対する部分的な判断の総和ではなく、お互いが相互関係にあって影響を及ぼすことを考えるところにある。たとえば、糸の長さが長ければ周期が長くなるという判断は、おもりの重さや幅の条件という文脈の中で判断される。プロダクションシステムにおいても、その関係を表現していくことは可能であるが、各場合の手続きを表現していくことが必要となり、かなり複雑となる。

生徒の判断は、文脈依存の場合が多く、同じ様な論理を用いる場合においても、文脈においてその論理を用いることができたり、できなかつたりすることが指摘されている。このような文脈依存のような場合に、ニューラルネットワークの方が、表現が容易になると思われる。

## 7. 調査3の目的

本調査では、ふりこの教材を対象に、学習における全体的処理の変容について、ニューラルネットワークによるモデルから明らかにすることを目的とした。

ふりこの周期についての学習は、村井<sup>(7)</sup>が、吸収型マルコフモデルを修正したモデルを提唱し、学習過程を分析した結果、「被験者の認識過程は作業仮説をたてながら進んでいく。そしてその場合、正しい作業仮説を得る確率は試行を重ねるにつれて、ある段階で飛躍的にのびる」という結論を得ている。

この研究においては、問題の正誤をもとに分析を行っているが、本調査では、さらに、ニューラルネットワークの特徴検出の特性から、解答パターン全体をもとに、学習者のふりこの周期の条件に対する全体的処理の変容について、注目することにした。

## 8. 調査3の方法

### (1) 調査問題

調査は、調査2を参考に対象者数を増やすため、面接法ではなく質問紙を用いて行うことを考えた。そこで、図4.3-8に示したように、問題数を増やして問1～問9の9問よりなる質問紙を作成した。問1～問3は、①おもりの重さ、②糸の長さ、③ふれ幅の3つの条件のうち、1つの条件を変えた場合の周期について問う問題である。問4～問9は、3つの条件のうち2つの条件を変えた場合の周期について問う問題である。具体的には、基本となる「ふりこA」と、問1から問9に示した「ふりこB1」から「ふりこB9」のどちらが往復に時間がかかるか、あるいは同じかについて、正しい選択肢を1つ選ばせるものである。

選択肢に「その他」を入れることも考えられるが、調査2では、ほとんどの生徒が「その他」を選択していないこと、また、ニューラルネットワークのモデルの構造をできるだけ簡単にして、分析を容易にするため、「その他」の選択肢は設けなかった。

調査は、次に示したような順序で、実験1～実験3の教師による3回の演示実験を通して学習させながら、同じ質問紙に4回答えさせる方法を用いた。質問紙は、そのつど回収した。

- ①質問紙の解答
- ②実験1：おもりの重さが違う場合
- ③質問紙の解答（①と同じ）
- ④実験2：糸の長さが違う場合
- ⑤質問紙の解答（①と同じ）
- ⑥実験3：ふれ幅が違う場合
- ⑦質問紙の解答（①と同じ）

実験1～実験3は、問1～問3の問題に対応している。具体的には、実験1は、基本となるふりこ、おもりを重くしたふりこの2つを準備し、支柱の長いスタンド台を用いて、教師が2つのふりこを同時に揺らす方法を用いた。実験2、実験3も同様にして、基本のふりこに対して、糸の長さを長くしたふりこや、ふれ幅を大きくしたふりこを同時に揺らして、その条件が周期に関係するかどうかを



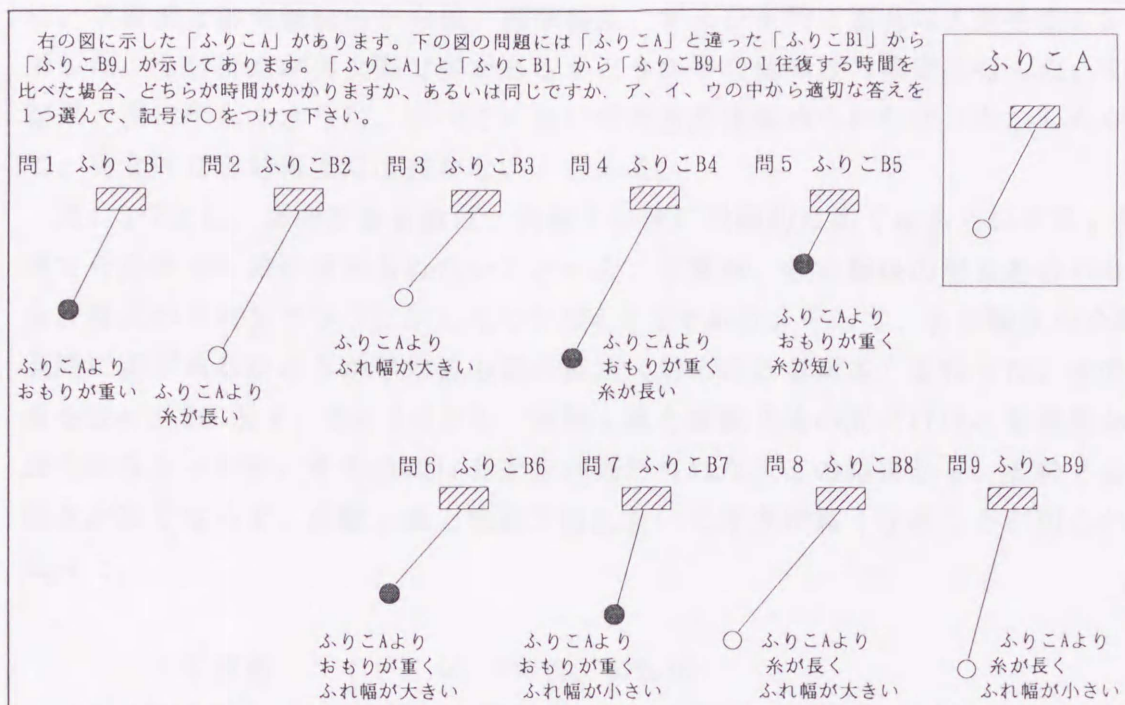


図4.3-8 ふりこの周期に関する調査問題（調査3）

示した。各実験の提示回数は、生徒が納得するまでで、3～4回である。①～⑦までの調査に所用した時間は、30分であった。

各実験の後では、生徒のつぶやきが聞こえた。たとえば、実験1の後では「同じだ」とか、実験2の後では、「糸の長さが長い方が遅い」などである。教師は、そのつぶやきにこたえるように、「同じだね」とか「糸の長い方が遅いね」と確認するように対応を行った。

## （2）調査対象および調査時期

調査対象は、金沢市内の公立A中学校第2学年1クラス、男子16人、女子18人、計34人であり、調査時期は、1992年5月である。

## 9. 調査3の結果

4回行った調査における各問題の正答率を表4.3-6に示した。表4.3-6から、各実験は問1から問3に対応しているため、各実験後は、それに対応した問題の正答率は91%～100%となっている。したがって、実験によって各条件の周期に対する影響の有無は、理解できたものと考えられる。

次に、9問の問題の各1問を1点として、9点満点で得点化を行った。男女別に、学習前と各実験後の平均値、標準偏差、および全問正答者の人数を表4.3-7に示した。合計得点が男女間で差があるかどうか平均値の差の検定を行った。その結果、次に示したように、すべてにおいて有意差は認められなかった。したがって、男女間で合計得点には差がないといえる。

表4.3-7より、全問正答者数は、実験3の後に飛躍的に多くなるといえる。男女間で合計得点に差が認められないことから、学習前、各実験後の男女を合わせた合計得点の平均をグラフに示したのが図4.3-9である。そして、各実験後の合計得点間に差があるかどうか平均値の差の検定（対応のある標本）を行った。その結果を表4.3-8に示す。表4.3-8より、実験1後と実験2後の間だけは、有意差が認められなかったが、その他には有意差が認められた。この結果から、実験2後は得点が高くなり、実験1後と実験3後において得点が高くなることが明らかになった。

- ・ 学習前 :  $t = 1.46$ ,  $df=32$ ,  $p>0.05$
- ・ 実験1後 :  $t = 0.18$ ,  $df=32$ ,  $p>0.05$
- ・ 実験2後 :  $t = 0.53$ ,  $df=32$ ,  $p>0.05$
- ・ 実験3後 :  $t = 0.60$ ,  $df=32$ ,  $p>0.05$

表4.3-6 問題の正答率（％）

	学習前	実験1後	実験2後	実験3後
問1	6	100	100	100
問2	68	71	91	97
問3	15	26	18	100
問4	65	71	82	82
問5	74	76	88	79
問6	26	32	26	97
問7	18	29	21	91
問8	74	71	76	76
問9	6	9	15	62



表4.3-7 合計得点の平均および全問正答者の人数

		学習前	実験1後	実験2後	実験3後
男子	平均	3.2	4.9	5.3	7.7
	標準偏差	1.3	1.7	1.2	1.7
女子	平均	3.8	4.8	5.1	8.0
	標準偏差	1.1	1.5	1.0	1.2
全体	平均	3.5	4.9	5.2	7.9
	標準偏差	1.2	1.6	1.1	1.5
全問正答者	男子	0人	0人	1人	9人
	女子	0人	0人	0人	9人
	全体	0人	0人	1人	18人

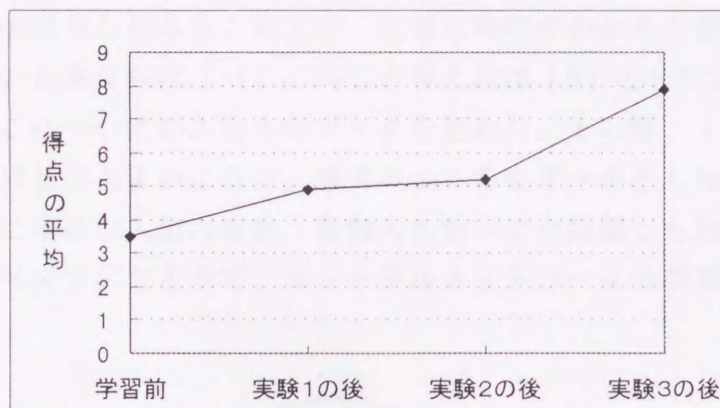


図4.3-9 合計得点の平均

表4.3-8 学習前、各実験の間の平均値の差の検定結果

\*  $P < 0.05$

	実験1後	実験2後	実験3後
学習前	4.04*	5.87*	11.76*
実験1後		1.01	9.59*
実験2後			7.49*

## 10. 調査3のニューラルネットワークのモデルによる分析および考察

### (1) モデルの作成方法

モデルは、図4.3-10に示したような階層型のニューラルネットワークによって、各質問紙の反応ごとに作成し、生徒一人につき4つのモデルを作成した。ニューラルネットワークの各層の細胞数は、調査2のときと同様に考えた。つまり、入力層の細胞は、ふりこに関する条件に合わせて3つとした。中間層の細胞については、各条件についての考え方が9問の問題それぞれにおいて違った場合、最大9つの特徴検出が必要になると考えられるので、その処理数から9つとした。しかし、収束が困難な場合には12にして演算を行った。出力層の細胞は1つとした。

データは、調査2のときと同様、おもりの重さ、糸の長さ、ふれ幅を入力層の①～③の細胞に対応させ、比較する2つのふりこのうち1つのふりこの方に注目して、そのふりこのおもりの重さが重ければ「1」、軽ければ「-1」、同じならば「0」というように入力した。糸の長さ、ふれ幅についても大であれば「1」、小であれば「-1」、同じならば「0」とした。

出力は、その注目したふりこの方が、往復に時間がかかると答えれば「1」、時間がかからないと答えれば「-1」、同じと答えれば「0」とした。以上の要領で、各問題のふりこについての入出力のデータを定めた。その際、1問につきどちらのふりこに注目してもよいように、両方のふりこをデータとした。

以上のように定めた入出力値が、各個人において全問題とも対応するように、平均誤差が5%以下になるまで、ニューラルネットワークの荷重を変化させた。

出力層

中間層

入力層

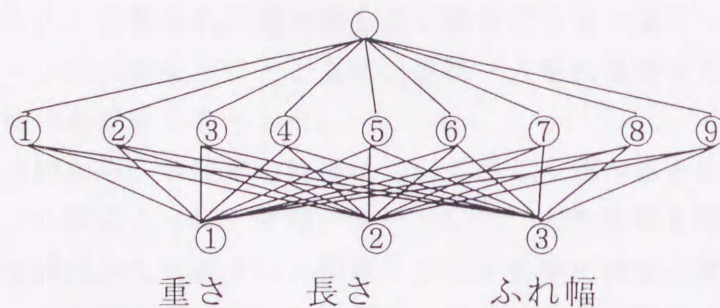


図4.3-10 ニューラルネットワークの構造

### (2) モデルによる分析方法

調査2と同様、中間層の9つの細胞の一つひとつは、特徴検出器であることに注目した。そこで、入力層の細胞から中間層の各細胞における3つの荷重について、荷重が「+1.0」以上の場合は興奮性の信号を受け、「-1.0」以下の場合



抑制性の信号を受け、さらに、「 $-1.0 \sim +1.0$ 」の間の値はほとんど信号を受けないと考えた。

### (3) モデルによる分析結果

各生徒の特徴検出パターンの変容を分析した結果、次のような変容パターンに分けることができた。変容パターンは、大きくは、学習後に全問正答になる変容パターンAと、学習後に誤答を含む変容パターンBの2つに分けられる。さらに、変容パターンAはA1～A3の3つに、変容パターンBはB1～B3の3つに分けることができる。図4.3-11は、各変容パターンについて、生徒1人を代表させて示したものである。各変容パターンの特徴は、次に示す通りである。

- ・A1：実験に対応して、条件を考慮するようになる。つまり、実験1の後には、おもりの重さを周期の条件として考慮しなくなり、実験2の後には糸の長さを周期の条件として考慮し、実験3の後にはふれ幅を周期の条件として考慮しなくなる。
- ・A2：実験と対応しないところで条件の考慮の仕方が変化し、最終的には糸の長さだけを考慮するようになる。
- ・A3：3条件とも考慮し続け、実験3が終了してから糸の長さだけを考慮するようになる。
- ・B1：実験の途中考慮する条件が変わるが、最終的に3条件とも考慮する。
- ・B2：実験を行っても、一貫して3条件とも考慮する。
- ・B3：実験の途中考慮する条件が変わるが、最終的に2条件を考慮する。

特徴検出パターンは、中間層の細胞を12にした場合でも、いくつかは同じ特徴検出を示すため、予想された通り最も多い場合でも9つであった。図4.3-11には、各変容パターンの人数を示すとともに、生徒一人を代表させて結果を示した。また、その生徒の合計得点を示した。

図4.3-11の例から、各変容の特徴について詳しく述べると次のようになる。図4.3-11に示した例のように、変容パターンA1は、どの生徒も実験1の後に特徴検出パターンの数はかなり減少し、問題によらず条件に対する考え方が一定になってきている。その後もパターン数は少ないままである。変容パターンA2は、図4.3-11に示した例のように、たとえば、実験1の後に特徴検出パターンの数が減少し、実験2の後に増加し、実験3の後に再び減少するというように、どの生徒も、途中、特徴検出パターンの数の目立った増減がみられ、最終的にはパターン数は少なくなる。変容パターンA3は、たとえば、実験1の後やや増加し、実験2の後やや減少するというように、どの生徒も、途中、特徴検出パターンの数の増減が多少みられるが、最後の実験3において著しく減少する。最終的に誤答を含む変

変容パターン			学習前	実験 1 の後	実験 2 の後	実験 3 の後
A 1	3 人	重さ 長さ ふれ幅 個数 得点	■□ ■■ □■■■■■ ■□■□ ■ 1 1 1 1 3 1 1 3	□ □ 1 5	□ □ 1 5	■□ 3 3 9
A 2	10 人	重さ 長さ ふれ幅 個数 得点	■□■■■ □□■■■ ■ ■■□■■■ 3 1 1 1 1 2 1	■□ 5 1 5	□■■■■□ ■□□ □ ■■■■■ 2 2 1 3 1 5	■□ 3 3 9
A 3	5 人	重さ 長さ ふれ幅 個数 得点	□■■■ ■ ■□■■■ ■■□ 1 1 2 1 1 3	□■■■■□ □□■■■ □ ■ □■■■■ 2 1 1 1 2 1 1 6	■□■■■ □□□ ■ ■■□□ 1 1 3 1 2 5	■□ 3 3 9
B 1	7 人	重さ 長さ ふれ幅 個数 得点	■□ □ ■ ■□■■■□ □■■■■□■ 1 1 2 2 1 1 1 3	□ □ 1 5	□ ■■■■ ■ □□□ ■ □□ 1 2 1 1 1 1 3	■□□ □■ ■ ■■ □■■■■■ ■ 3 1 1 1 1 1 1 4
B 2	7 人	重さ 長さ ふれ幅 個数 得点	■■□■ ■■ ■□■ □□□ ■■■■■□□ 2 3 1 1 2 1 1 1 5	■□□■ □□□□□ ■■■■■ 4 1 1 2 1 5	■ ■□ ■□ ■□□ □■ ■□■■■□ 5 2 1 1 1 1 1 5	■■■■■ ■■■■□ ■□ ■ 4 1 3 1 5
B 3	2 人	重さ 長さ ふれ幅 個数 得点	□■ ■ ■ □■■□□ 2 2 1 1 1 6	■■■■■ ■ ■■■□ ■ ■■■□ 3 1 1 2 1 4	□ □ 1 5	■□ □■■□ 1 1 3 4 8

「■」は、荷重が-1.0以下、「□」は、荷重が1.0以上、

「個数」は、そのパターン数、「得点」は、合計得点

図4. 3-11 各変容パターンにおける特徴検出パターンの例



容パターンBの中で、変容パターンB1とB3は、途中、特徴検出パターンの数の大きな減少がみられるが、たいていの生徒は、最終的なパターン数はやや多い。B3に示した例は、合計得点を含めて考えると、最終的に1問だけ、ふれ幅が周期に関係すると考慮して誤ったと考えられる。B2については、途中、パターン数の増減が多少みられる程度であり、最終的にはパターン数はやや多い。

全生徒において、特徴検出パターンの数が、実験ごとに減少する傾向にある生徒は4人、実験ごとに増加する傾向にある生徒は1人、減少したり増加したりする生徒は26人、ほとんど変わらない生徒は3人であった。以上のことから、特徴検出パターンの数が一定の方向で減少するというより、実験を通して減少したり増加したりして変容する生徒が多いことがわかる。

そして、全問正答者になる生徒もA1のように、実験に対応して変容する生徒は3人、実験に対応していない生徒（A2、A3）は15人である。変容が実験に対応していない生徒が多いかどうか二項分布検定を行った結果、変容が実験に対応していない生徒が多いことが明らかになった（ $N=18$ ,  $x=3$ ,  $p=0.004$ ）。

#### （4）モデルからの考察

今回の調査では、3つの条件についての実験が終わる実験3の後に、飛躍的に全問正答者数が増加するのは当然といえる結果である。つまり、村井<sup>(8)</sup>の研究にもみられるように、ある段階で、飛躍的に全問正答する生徒が増えている。また、同じく村井が指摘している「被験者の認識過程は作業仮説をたてながら進んでいく」ことについては、次のことを考える必要がある。作業仮説というと一般的に論理的ステップをふみながら、といった印象が強い。しかし、本研究の結果では、特徴検出パターンの数の増減から、各実験後において、問題によらず条件の考え方が一定である場合もあるが、問題によって条件の考え方が異なる場合が多い。このことから、作業仮説を立てているとしても、その仮説が論理的というより、全体的なものであり、部分的には論理的矛盾があるようなものも多いと考えられる。

以上のように、実験を通じた学習過程においては、変容パターンA1で示された生徒のように、各実験に対応して論理的手順で知識が変容する生徒は少ない。一方、その他の変容パターンのように、各実験に対応せず、しかも、問題によって考え方が一定していないような知識変容を示す生徒が多い。そして、変容パターンA2、A3のように、各条件についての実験をすべて行い、各条件の結果がすべて明らかになってから、全実験に対応した問題一般に通じる考え方をするようになり、最終的に全問正答になるといった生徒が多いように思われる。つまり、いくつかの実験を通じた知識の変容には、各実験に対応した変容もみられるが、全実

験を通した大きな変容があるといえる。

以上のことから、全体的処理の変容は、各実験結果に対応して逐次変容するというより、すべての実験結果が明らかになると大きく変容し、全問正答になる生徒が飛躍的に増えることが明らかになり、全体的にある程度まとまった情報によって科学的な自然認識に変容することが考えられる。

## 7. 調査4の結果

### 7.1 調査問題

調査は、第一学年一学期理科実験で、理科1年「たねとつぼみ」の授業の学習後に行われ、てんぷんが解する性質を調べた。理科2年「たねとつぼみ」の授業でも、てんぷんが「互に溶けあう」「おにほく」、「つぼみ合す」などの実験を通して、たねとつぼみの性質を調べた。それぞれの授業で、たねとつぼみの性質を調べた。第一学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第二学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第三学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第四学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第五学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第六学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第七学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第八学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第九学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第十学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第十一学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第十二学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第十三学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第十四学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第十五学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第十六学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第十七学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第十八学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第十九学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第二十学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第二十一学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第二十二学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第二十三学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第二十四学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第二十五学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第二十六学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第二十七学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第二十八学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第二十九学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第三十学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第三十一学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第三十二学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第三十三学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第三十四学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第三十五学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第三十六学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第三十七学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第三十八学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第三十九学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第四十学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第四十一学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第四十二学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第四十三学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第四十四学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第四十五学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第四十六学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第四十七学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第四十八学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第四十九学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第五十学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第五十一学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第五十二学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第五十三学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第五十四学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第五十五学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第五十六学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第五十七学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第五十八学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第五十九学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第六十学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第六十一学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第六十二学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第六十三学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第六十四学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第六十五学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第六十六学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第六十七学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第六十八学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第六十九学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第七十学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第七十一学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第七十二学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第七十三学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第七十四学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第七十五学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第七十六学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第七十七学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第七十八学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第七十九学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第八十学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第八十一学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第八十二学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第八十三学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第八十四学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第八十五学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第八十六学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第八十七学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第八十八学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第八十九学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第九十学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第九十一学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第九十二学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第九十三学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第九十四学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第九十五学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第九十六学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第九十七学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第九十八学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第九十九学年は、たねとつぼみの性質を調べた。第一百学年は、たねとつぼみの性質を調べた。

表4-1-1 調査問題の形式

問題	形式	タイプ
問題1	図	図
問題2	図	図
問題3	図	図
問題4	図	図
問題5	図	図
問題6	図	図
問題7	図	図
問題8	図	図
問題9	図	図
問題10	図	図
問題11	図	図
問題12	図	図
問題13	図	図
問題14	図	図
問題15	図	図
問題16	図	図
問題17	図	図
問題18	図	図
問題19	図	図
問題20	図	図
問題21	図	図
問題22	図	図
問題23	図	図
問題24	図	図
問題25	図	図
問題26	図	図
問題27	図	図
問題28	図	図
問題29	図	図
問題30	図	図
問題31	図	図
問題32	図	図
問題33	図	図
問題34	図	図
問題35	図	図
問題36	図	図
問題37	図	図
問題38	図	図
問題39	図	図
問題40	図	図
問題41	図	図
問題42	図	図
問題43	図	図
問題44	図	図
問題45	図	図
問題46	図	図
問題47	図	図
問題48	図	図
問題49	図	図
問題50	図	図
問題51	図	図
問題52	図	図
問題53	図	図
問題54	図	図
問題55	図	図
問題56	図	図
問題57	図	図
問題58	図	図
問題59	図	図
問題60	図	図
問題61	図	図
問題62	図	図
問題63	図	図
問題64	図	図
問題65	図	図
問題66	図	図
問題67	図	図
問題68	図	図
問題69	図	図
問題70	図	図
問題71	図	図
問題72	図	図
問題73	図	図
問題74	図	図
問題75	図	図
問題76	図	図
問題77	図	図
問題78	図	図
問題79	図	図
問題80	図	図
問題81	図	図
問題82	図	図
問題83	図	図
問題84	図	図
問題85	図	図
問題86	図	図
問題87	図	図
問題88	図	図
問題89	図	図
問題90	図	図
問題91	図	図
問題92	図	図
問題93	図	図
問題94	図	図
問題95	図	図
問題96	図	図
問題97	図	図
問題98	図	図
問題99	図	図
問題100	図	図



## 第4節 てんびんの認識に関する分析

### 1. 調査4の目的

本調査では、てんびん教材を対象に、モデルの構築と分析法、および生徒の全体的処理の特徴を明らかにすることを目的とした。てんびん課題はプロダクションシステムで表現できる単線型の処理で解答を行うのが一般的であるが、それができない生徒の全体的処理に注目した。てんびん課題の単線型の処理については、既に、シーグラー (Siegler, R. S.)<sup>(9)</sup> が、手続き的知識から明らかにしている。

### 2. 調査4の方法

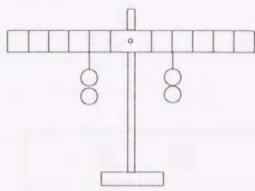
#### (1) 調査問題

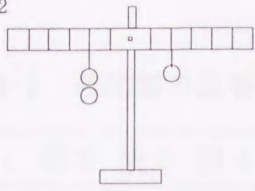
調査は、シーグラーの研究を参考に、図4.4-1に示した問1～問8の8問よりなるてんびんに関する質問紙を用いた。各問題とも、てんびんが「左に傾く」、「右に傾く」、「つり合う」の3つの選択肢の中から答えを一つ選ぶものである。それぞれの問題の形式は表4.4-1のようになっている。問1～問3は左右のおもりの重さ、あるいはうでの長さの少なくとも一つが同じである。問4、問7は、おもりの重さとうでの長さの大である方が、左右のどちらか一方であり、おもりの重さとうでの長さのどちらに注目しても、正しい選択肢を選べる比較的やさしい問題である。問5、問6、問8は、おもりの重さとうでの長さの大である方が、左右に分かれた問題であり、モーメントの考え方を必要とする比較的難しい問題である。

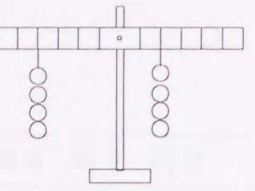
表4.4-1 調査問題の形式

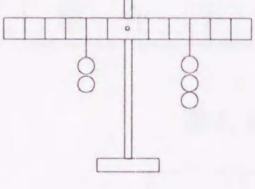
問題	おもり	うで
問1	同	同
問2	左大	同
問3	同	左大
問4	右大	右大
問5	左大	右大
問6	右大	左大
問7	左大	左大
問8	右大	左大

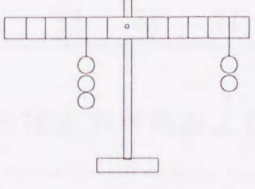
次の問1～問8のてんびんは、左右のどちらに傾きますか、あるいは、つり合いますか。ア～ウの中から答を一つ選び、記号に○をつけてください。

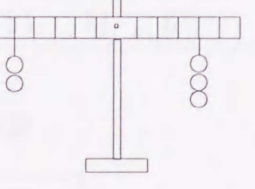
問1 

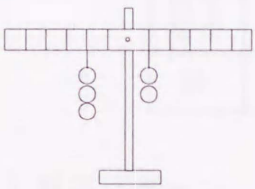
問2 

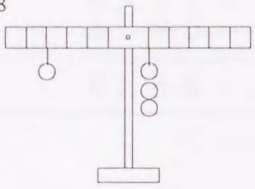
問3 

問4 

問5 

問6 

問7 

問8 

[答え]  
 ア. 右に傾く  
 イ. 左に傾く  
 ウ. つり合う  
 ※ 各問題とも選択肢は同じ

図4.4-1 調査問題（調査4）

おもりの重さとうでの長さは、問題を通して左右とも最大が4、最小が1となるように最大値と最小値を決めた。これは、ニューラルネットワークのモデルにおいて、おもりの重さとうでの長さの考慮の仕方を比較するため、数値の最大値と最小値を同じにしておく方が、荷重の比較や特徴検出パターンの分析が容易になると考えたからである。

## （2）調査対象および調査時期

調査は、1993年5月に石川県内の公立A中学校、第1学年2クラス、男子40人、女子35人、計75人を対象に行った。

## 3. 調査4の結果

### （1）問題の正答率

表4.4-2に各問題の正答率を示した。全問正答者は、27人（36%）であった。また、各問題を1点として合計8点満点で得点化を行った。表4.4-3に合計得点の



平均および標準偏差を示した。男女の間で、合計得点に差があるかどうか、平均値の差の検定を行った。その結果、有意差は認められなかった ( $t=0.624$ ,  $df=73$ ,  $p>0.05$ )

表4.4-2 各問題の正答率

問 題	問 1	問 2	問 3	問 4	問 5	問 6	問 7	問 8
正答者数 (人)	74	66	67	68	64	38	61	48
割 合 (%)	99	88	89	91	85	51	81	64

表4.4-3 合計得点の平均および標準偏差

	度 数	平 均	標 準 偏 差
男子	40	6.37	1.52
女子	35	6.60	1.67
計	75	6.48	1.60

## (2) 解答パターン

### A. シーグラのルール評価

シーグラの分析では、学習者の単線型の処理は、ルール I からルール IV のルールに分けられ、この順番にルールが発展するとしている。その分析を本調査にあてはめると、解答パターンは次のようになる。

- ・ルール I : おもりのみ考慮  
問 1 → 問 8 の選択肢「ウウアアアア」・・・・・・・・・・・・・・・・ 1 パターン
  - ・ルール II : おもりが同数ならうでの長さも考慮  
問 1 → 問 8 の選択肢「ウアアアア」・・・・・・・・・・・・・・・・ 1 パターン
  - ・ルール III : おもりの重さが大である方と、うでの長さが大である方が左右に分かれると葛藤  
問 1 → 問 8 の選択肢「ウアア\*\*ア」 (\*はどの選択肢でも可) ・・ 27 パターン
  - ・ルール IV : モーメントを考慮 (全問正答)  
問 1 → 問 8 の選択肢「ウアアアアウ」・・・・・・・・・・・・・・・・ 1 パターン
- 以上のようにルール III については、本調査ではうでの長さとおもりの重さの葛藤問題が 3 問あるため、27 通りのパターンが考えられる。また、ルール I、ルール II、ルール IV については、それぞれ 1 パターンである。

### B. 解答パターンの分析結果

8つの問題の選択肢への反応パターンを、シーグラーによる方法で分析した結果、次のようになった。

- ・ルールⅠ・・・0人
- ・ルールⅡ・・・0人
- ・ルールⅢ・・・28人（37%）
- ・ルールⅣ・・・27人（36%）
- ・その他・・・20人（27%）

以上のようにルールが特定できる反応パターンについては、生徒はルールⅢ以上を用いていることがわかった。ルールⅢは、27パターンのうち10パターンがみられた。ルールを特定できない生徒は、20人（27%）であった。ルールを特定できる生徒の人数と、特定できない生徒の人数の間に差があるかどうか、 $\chi^2$ 検定を行った結果、有意差が認められた（ $\chi^2=16.35$ ,  $df=1$ ,  $p<0.05$ ）。したがって、ルールを特定できる生徒の人数と、特定できない生徒の人数に差が認められ、ルールを用いた単線型の論理的処理を行っている生徒が多いことが明らかになった。

#### 4. 調査4のニューラルネットワークのモデルによる分析および考察

##### （1）モデルの作成方法

モデルは、図4.4-2に示したようなニューラルネットワークの構造によって作成した。本調査では、各層の細胞数について、次のように定めた。入力層の細胞は、てんびんの左右のおもりの重さとうでの長さの条件に合わせて4つ、中間層の細胞は原則として2つ、出力層の細胞は1つとした。中間層の細胞については、後述するように、全問正答の場合に特徴検出パターンが明確な対称構造となるため、そのパターンに合わせて2つとした。しかし、生徒の反応によっては演算的に収束しにくい場合があり、収束が困難な場合には中間層の細胞を増やして演算を行

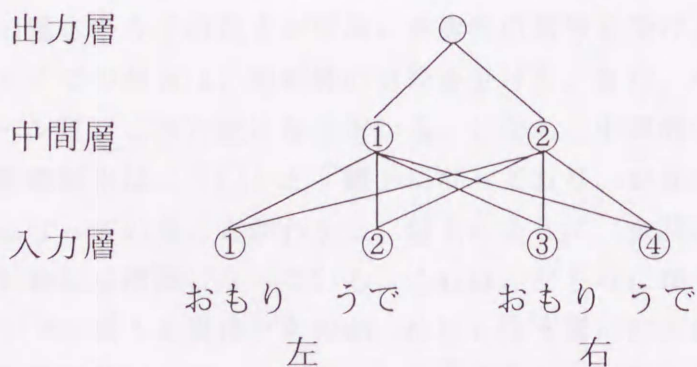


図4.4-2 ニューラルネットワークの構造



った。

データは、図4.4-2のように、左右のおもりの重さとうでの長さを①～④の4つの入力細胞に対応させ、各問題のおもりの重さとうでの長さの数値を入力した。出力は、各入力に対応させて、生徒が左に傾くとすれば「-1」、右に傾くとすれば「1」、つり合うとすれば「0」とした。たとえば、問1について、ある生徒Aが「つり合う」とした場合、

・入力「2 1 2 1」 → 出力「0」（問1の場合）

をデータとした。同様に問2から問8についても生徒Aの解答を「入力値-出力値」に対応させた。

以上のように対応させた8つの「入力値-出力値」が、その生徒においてすべて成立するように、平均誤差が5%以下になるまで、ニューラルネットワークの荷重を変化させた。

## （2）モデルによる分析方法

まず、シーグラのルールに対応させてモデルを作成した。全問正答（シーグラのルールⅣ）の場合の解答パターンからモデルを作成し、その荷重を表4.4-4に示した。荷重は、入力層と中間層の細胞間の荷重と、中間層と出力層の細胞間の荷重を示している。次に、中間層の2つの細胞の一つひとつは、特徴検出器であることに注目し、入力層の細胞から中間層の各細胞における4つの荷重について、荷重が「+1.0」以上の場合は興奮性の信号を受け、「-1.0」以下の場合には抑制性の信号を受け、さらに、「-1.0～+1.0」の間の値はほとんど信号を受けないと考えた。この点からルールⅣの荷重を図に示したのが、図4.4-3である。図4.4-3の「□」は荷重が「+1.0」以上、「■」は「-1.0」以下を示している。

図4.4-3の特徴検出パターンについて、中間層の細胞①の特徴検出パターンをみると次のことが指摘できる。まず、4つの条件とも「□」か「■」であり、4条件とも考慮していることがわかる。中間層の細胞①の特徴検出パターンは、右のおもりの重さとうでの長さが同時に興奮性の信号を受け、一方、左のおもりの重さとうでの長さは、抑制性の信号を受け、また、中間層の細胞②の特徴検出パターンは、これと逆になっている。しかも、中間層の細胞①と細胞②の出力層への特徴検出は、「□」と「■」になっており、お互いの細胞の情報が拮抗するようになっていることがわかる。以上のように、全問正答者の特徴検出パターンは、対称的な構造になっている。これは、どちらに傾くかは、左右のおもりの重さとうでの長さを掛けたものが、拮抗し合う形になるので、ニューラルネットワークの特徴検出パターンが拮抗し合うような形になると考えられる。

次に、シーグラのルールⅠ、ルールⅡの解答パターンをモデル化すると、図

表4.4-4 ルールIV（全問正答）の場合のモデルの荷重

	中間層	
	①	②
出力層	6.391	-8.283
入力層		
①左おもり	-3.175	4.278
②左うで	-3.140	4.075
③右おもり	2.716	-4.489
④右うで	5.166	-4.952

	中間層	
	①	②
出力層	□	■
入力層		
①左おもり	■	□
②左うで	■	□
③右おもり	□	■
④右うで	□	■

「■」は、荷重が-1.0以下、「□」は、荷重が1.0以上

図4.4-3 ルールIV（全問正答）の特徴検出パターン

	中層層	
	①	②
出力層	□	■
入力層		
①左おもり	■	□
②左うで		
③右おもり	□	■
④右うで		

「■」は、荷重が-1.0以下、「□」は、荷重が1.0以上

図4.4-4 ルールI、ルールIIの特徴検出パターン



4.4-4に示した特徴検出パターンを得ることができた。つまり、左右のおもりの重さのみ特徴検出がみられ、おもりの重さだけ考慮する特徴をみることができた。このように、特徴検出パターンからは、ルールⅠとルールⅡは同じになり、お互いの区別は困難である。

ルールⅢについては、27の解答パターンについてモデルを作成し、特徴検出パターンを分析した結果、大きくはP1~P4の4つのパターンに分類することができた。P4は、さらに、P4aとP4bに分けることができた。それぞれの特徴検出パターンの例を図4.4-5に示すとともに、その詳細とパターン数を以下に示した。

- ・ P1：全問正答とほぼ同じパターン・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13パターン
  - ・ P2：全問正答とほぼ同じパターンであるがやや異なる・・・・・・・・ 3パターン
  - ・ P3：重さと距離のまとまりが一部見られる・・・・・・・・・・・・・・ 7パターン
  - ・ P4：条件の正しいとらえ方がほとんどみられない・・・・・・・・・・ 4パターン
- |   |  |
|---|--|
| { | P4a：4つの条件が打ち消し合う・・・・・・・・・・ 1パターン<br>P4b：おもりの重さのみ注目・・・・・・・・・・・・ 3パターン |
|---|--|

P1は、図4.4-3に示した全問正答の特徴検出パターンと同じであり、てんびんの条件について正しいとらえ方がみられるパターンである。P2については、中間層の2つのうち一つは、てんびんについての正しいとらえ方が見られるが、もう一つの方にそのとらえ方と一部異なるような特徴が見られる。したがって、てんびんの条件についてのほぼ正しいとらえ方をしているが、問題によって、やや誤ったとらえ方をしているパターンである。P3については、中間層の2つの特徴検出パターンのうち、少なくとも一つがおもりの重さとうでの長さが同じ特徴検出（図4.4-6の例の場合中間層①が「■」）になっている。したがって、左あるいは右のおもりの重さとうでの長さにまとまりがみられるが、モーメント的なとらえ方はみられないパターンである。

次に、P4については、モーメント的なとらえ方がほとんどみられないものであるが、細かくは次のような特徴がみられる。P4aは、中間層の特徴検出パターンの2つがほぼ同じであるにもかかわらず、出力層の特徴検出が「□」と「■」で拮抗関係にあり、中間層からの情報を打ち消し合っている。この特徴検出パターンは、おもりの重さやうでの長さの微妙な値によって解答がいろいろ変化すると考えられ、問題によって条件のとらえ方が大きく変わる特徴をもつと考えられる。P4bは、主に特徴検出がおもりの重さにみられるパターンであり、図4.4-4のルールⅠ、ルールⅡと同じである。

以上のように、P1が全問正答の特徴検出パターンと同じで、P4の方になるにつれて、それが変化している。シーグラの分析では同じルールであるが、ニューラルネットワークではいろいろなパターンがでてくる。これは、シーグラの考

え方では、「重さ－距離」の葛藤問題では、ランダムにこたえるという考えで分析を行うが、ニューラルネットワークでは、学習者の解答が何らかの意味ある反応を行っているとして、解答全体のパターンを分析するからである。したがって、特徴検出パターンは、シーグラーのルールⅠやルールⅡに近い特徴検出パターン（P4b）から、シーグラーのルールⅣに近い特徴検出パターン（P1）まで生じると考えられる。しかし、シーグラーのルールⅢはルールⅡがルールⅣへと発展するときの過渡的な段階であり、特徴検出パターンもその間のパターンとしてあらわれており、お互いの分析には大きな矛盾点はないと思われる。

P1	中間層 ① ②	P4a	中間層 ① ②
	出力層 □ ■		出力層 □ ■
-----		-----	
	①左おもり ■ □		①左おもり □ □
	②左うで ■ □		②左うで ■ ■
	③右おもり □ ■		③右おもり □ ■
	④右うで □ ■		④右うで ■ ■
P2	中間層 ① ②	P4b	中間層 ① ②
	出力層 □ ■		出力層 □ ■
-----		-----	
	①左おもり ■ □		①左おもり ■ □
	②左うで ■ □		②左うで ■ □
	③右おもり □ ■		③右おもり □ ■
	④右うで □ □		④右うで □ □
P3	中間層 ① ②		
	出力層 □ ■		
-----		-----	
	①左おもり ■ □		
	②左うで ■ □		
	③右おもり □ ■		
	④右うで □ □		

「■」は、荷重が-1.0以下、「□」は、荷重が1.0以上

図4.4-5 ルールⅢの特徴検出パターン



### (3) モデルによる分析結果

75人の生徒のうち、解答パターンは31みられた。解答パターンが同じならば、ニューラルネットワークのモデルも同じになる。そこで、この31の解答パターンについてモデルを作成し、入力層と中間層の細胞間の荷重、中間層と出力層の細胞間の荷重を表4.4-5に示した。表4.4-5をもとに、各生徒の特徴検出パターンを求めた。この生徒の特徴検出パターンを、図4.4-5に示したP1～P4の観点から分類した。その結果を、ある生徒の特徴検出パターンを例にあげて、図4.4-6に示した。図4.4-6に示したように、条件の正しいとらえ方ができないP4の生徒の中に、さらにP4c、P4dに分類できるパターンがみられた。P4cは、左のおもりと右のおもりの特徴検出が互いに拮抗関係にあり、また、左のうでと右のうでの特徴検出が拮抗関係にある。しかし、たとえば、腕の長さが長いほど傾きにくいというように、モーメントの考え方と逆になっているパターンである。P4dは、特徴検出にまとまりがみられず、問題によって条件のとらえ方が大きく変化するパターンである。それぞれの特徴検出パターンの生徒の人数は、表4.4-6に示した通りである。

次に、P1～P4の生徒の合計得点について示したのが表4.4-7ある。表4.4-7より、P1からP4にかけて合計得点が低くなる傾向にあるが、同じ合計得点でもパターンが違うものがある。8点の全問正答者がP1であるのは当然であるが、合計得点が5点や6点でもP1に属する生徒が何人かいることがわかる。これは、ニューラルネットワークの分析では、答えが誤っていても考え方が全体的に正答の場合と類似していれば、そのような特徴検出パターンになるためである。つまり、全問正答するためには、左のおもりの重さとうでの長さの掛け算、右のおもりの重さとうでの長さの掛け算というような公式の理解が必要と考えられるが、そのような論理的操作が十分でなくても、全体的にそれに近い条件に対するとらえ方ができているならば、特徴検出パターンが全問正答に類似してくる。

次に、シーグラーのルールとP1～P4のパターンを対応させたのが表4.4-8である。シーグラーのルールⅣとルールⅢの解答パターンは、ほとんどがP1になっていることがわかる。また、シーグラーの分析では分類できない反応については、ニューラルネットワークでは、P2～P4に分類される。

### (4) モデルからの考察

以上の結果から、てんびんの教材では、上位の論理的なルールをもって解答する生徒が多く、単線型の処理で表現できる処理を行っていると考えられる。一方、単線型の処理をしていない27%の生徒については、P1の条件に対しての正しいとらえ方はみられないが、P2までの生徒は20%、P3までの生徒は50%である。したがって、単線型の処理をしていない27%の生徒でも、4つの条件に対するとらえ方

表4.4-5 てんびんに関するニューラルネットワークの荷重

行' A番号	中間層	①	②	③	④	標準偏差
B 1	出力層	6.481	-7.775			
	入 左おもり	4.982	-4.234			4.608
	力 左うで	0.778	-1.294			1.036
	層 右おもり	-5.200	4.394			4.797
	右うで	0.810	-0.396			0.603
B 2	出力層	7.644	7.738	6.273	-11.317	
	入 左おもり	5.292	-6.062	-1.199	-0.845	4.028
	力 左うで	-11.251	-0.330	-2.519	-6.901	4.195
	層 右おもり	2.580	1.394	-4.073	3.470	2.968
	右うで	7.374	-4.515	2.752	0.541	4.277
B 3	出力層	8.952	7.373			
	入 左おもり	-4.037	-7.895			1.924
	力 左うで	-6.712	0.050			3.381
	層 右おもり	-3.431	1.389			2.410
	右うで	8.423	-2.901			5.662
B 4	出力層	9.847	-4.478			
	入 左おもり	-0.926	4.268			2.597
	力 左うで	-3.621	-1.256			1.183
	層 右おもり	-2.188	-1.835			0.176
	右うで	5.310	0.874			2.218
B 5	出力層	13.600	-4.092			
	入 左おもり	-13.178	0.071			6.625
	力 左うで	-2.273	-1.491			0.391
	層 右おもり	-0.936	-0.569			0.183
	右うで	3.045	-1.138			2.091
B 6	出力層	5.689	-5.363			
	入 左おもり	4.163	-3.007			3.585
	力 左うで	-0.167	0.094			0.131
	層 右おもり	-4.261	2.949			3.605
	右うで	0.448	0.050			0.200
B 7	出力層	6.973	-6.591			
	入 左おもり	-4.962	3.731			4.347
	力 左うで	-2.216	2.060			2.138
	層 右おもり	4.052	-3.022			3.537
	右うで	3.652	-2.669			3.161
B 8	出力層	6.391	-8.283			
	入 左おもり	-3.175	4.278			3.727
	力 左うで	-3.140	4.075			3.608
	層 右おもり	2.716	-4.489			3.603
	右うで	5.166	-4.952			5.059
B 9	出力層	-0.273	4.979	-8.506	8.037	
	入 左おもり	-1.641	1.305	-3.269	-7.507	3.185
	力 左うで	-0.899	0.316	0.818	-3.708	1.754
	層 右おもり	-0.797	-5.192	-5.821	3.089	3.606
	右うで	0.377	-2.959	2.042	8.716	4.252
B 10	出力層	-10.496	-13.056	-26.112	13.312	
	入 左おもり	5.120	22.528	-6.144	11.264	10.367
	力 左うで	13.312	-10.497	-18.456	8.728	13.680
	層 右おもり	6.144	-29.184	18.844	-29.440	21.412
	右うで	-3.840	31.744	-4.096	7.680	14.580
B 11	出力層	10.665	-9.526			
	入 左おもり	-8.997	6.129			7.563
	力 左うで	-7.085	5.837			6.461
	層 右おもり	7.798	-6.220			7.009
	右うで	6.155	-4.358			5.256
B 12	出力層	9.222	-5.229			
	入 左おもり	-2.426	5.455			3.941
	力 左うで	-5.520	1.831			3.676
	層 右おもり	2.004	-5.156			3.580
	右うで	5.248	0.878			2.135
B 13	出力層	10.406	-6.165			
	入 左おもり	-6.969	3.047			5.008
	力 左うで	-6.966	2.799			4.883
	層 右おもり	9.661	-3.862			6.762
	右うで	5.441	-2.594			4.018
B 14	出力層	6.334	-6.112			
	入 左おもり	-2.086	4.023			3.055
	力 左うで	-3.773	2.203			2.988
	層 右おもり	2.411	-3.448			2.930
	右うで	3.033	-3.115			3.074
B 15	出力層	1.903	-8.888	4.032	6.149	
	入 左おもり	-0.152	-4.043	3.375	-6.850	3.872
	力 左うで	-2.562	2.056	-0.130	-2.393	1.887
	層 右おもり	-1.467	-6.160	-7.782	2.851	4.164
	右うで	2.401	2.141	1.011	5.210	1.546
B 16	出力層	4.864	-8.097			
	入 左おもり	0.939	7.931			3.496
	力 左うで	-2.345	0.566			1.456
	層 右おもり	-2.550	-7.121			2.285
	右うで	6.310	0.476			2.917



行 A 番号 中間層 ① ② ③ ④ 標準偏差

B17	出力層	5.551	-5.649			
入	左おもり	-3.083	4.573		3.828	
力	左うで	-1.622	0.770		1.186	
層	右おもり	2.763	-3.539		3.151	
	右うで	0.237	-0.265		0.251	

B18	出力層	4.971	-7.179			
入	左おもり	-2.958	5.030		3.894	
力	左うで	-3.608	3.887		3.798	
層	右おもり	3.121	-3.150		3.136	
	右うで	2.248	-2.868		2.558	

B19	出力層	7.201	-6.204			
入	左おもり	-4.362	3.581		3.877	
力	左うで	-3.116	2.238		2.678	
層	右おもり	4.964	-3.021		3.893	
	右うで	0.368	-3.881		2.175	

B20	出力層	5.421	-5.857			
入	左おもり	-1.433	5.288		3.366	
力	左うで	-4.457	1.039		2.748	
層	右おもり	0.953	-4.157		2.555	
	右うで	0.730	-3.311		2.020	

B21	出力層	-8.026	-9.112			
入	左おもり	-1.555	-3.716		1.081	
力	左うで	-5.808	1.970		3.889	
層	右おもり	9.807	-9.167		9.537	
	右うで	-0.360	0.208		0.284	

B22	出力層	9.087	4.388			
入	左おもり	-14.995	2.270		8.633	
力	左うで	-1.724	-2.324		0.300	
層	右おもり	2.325	-1.630		1.978	
	右うで	11.908	-8.837		10.373	

B23	出力層	10.142	-8.391			
入	左おもり	-1.526	0.481		1.004	
力	左うで	2.650	8.727		3.039	
層	右おもり	1.007	1.907		0.450	
	右うで	-7.701	-9.424		0.861	

B24	出力層	3.845	-4.819	-8.913	6.821	
入	左おもり	-0.290	5.087	-3.167	1.835	3.015
力	左うで	-6.208	-2.066	1.205	-0.775	2.715
層	右おもり	-3.535	-0.989	-7.144	-3.681	2.189
	右うで	5.347	-3.388	1.813	-0.565	3.206

行 A 番号 中間層 ① ② ③ ④ 標準偏差

B25	出力層	3.556	-9.606			
入	左おもり	-1.057	3.943		2.500	
力	左うで	0.884	5.062		2.034	
層	右おもり	-1.508	-6.205		2.349	
	右うで	1.127	-6.438		3.783	

B26	出力層	5.918	-10.462			
入	左おもり	-9.923	0.480		5.202	
力	左うで	-0.300	10.135		5.218	
層	右おもり	2.277	-11.663		6.970	
	右うで	7.180	-0.833		4.062	

B27	出力層	-6.411	9.528	-6.611	-11.220	
入	左おもり	-4.566	-0.037	-4.662	0.467	2.421
力	左うで	-0.803	-1.775	-0.811	-3.173	0.969
層	右おもり	0.136	-3.606	0.070	-8.076	3.366
	右うで	-3.823	3.009	-3.915	5.978	4.311

B28	出力層	5.487	-6.672			
入	左おもり	-7.654	-1.367		3.143	
力	左うで	-0.391	-2.009		0.809	
層	右おもり	4.209	-3.948		4.079	
	右うで	1.887	3.365		0.739	

B29	出力層	8.074	-5.648			
入	左おもり	-5.866	2.833		4.349	
力	左うで	5.400	-3.420		4.410	
層	右おもり	4.961	-2.011		3.486	
	右うで	-1.124	1.186		1.155	

B30	出力層	8.154	-4.055			
入	左おもり	-10.825	-8.289		1.268	
力	左うで	-2.691	1.775		2.233	
層	右おもり	6.493	8.323		0.915	
	右うで	5.700	0.473		2.614	

B31	出力層	2.993	-10.743	2.918	8.073	
入	左おもり	-3.043	-0.523	-2.872	-5.587	1.782
力	左うで	-0.133	4.185	0.169	3.191	1.871
層	右おもり	-0.970	2.848	-1.063	4.981	2.578
	右うで	-1.025	-9.847	-1.182	-5.004	3.585

P1	中間層 ① ②	P4a	中間層 ① ②
	出力層 □ ■		出力層 □ ■
	①左おもり ■ □		①左おもり ■ □
	②左うで ■ □		②左うで □ □
	③右おもり □ ■		③右おもり □ □
	④右うで □ ■		④右うで ■ ■
P2	中間層 ① ②	P4b	中間層 ① ②
	出力層 □ ■		出力層 □ ■
	①左おもり □ □		①左おもり □ ■
	②左うで ■ □		②左うで □ □
	③右おもり □ ■		③右おもり ■ □
	④右うで □ ■		④右うで □ □
P3	中間層 ① ②	P4c	中間層 ① ②
	出力層 □ ■		出力層 □
	①左おもり ■ □		①左おもり ■ □
	②左うで □ □		②左うで □ ■
	③右おもり □ ■		③右おもり □ ■
	④右うで □ □		④右うで ■ □
		P4d	中間層 ①②③④
			出力層 □□□■
			①左おもり □■ ■
			②左うで ■ ■ ■
			③右おもり □□ ■ □
			④右うで □ □

「■」は、荷重が-1.0以下、「□」は、荷重が1.0以上

図4.4-6 特徴検出パターンの分類



表4.4-6 各特徴検出パターンの人数

特徴検出パターンの分類	人数	割合(%)
P1：全問正答とほぼ同じパターン	53	71
P2：全問正答とほぼ同じパターンであるがやや異なる	4	5
P3：重さと距離のまとまりが一部見られる	7	9
P4：条件の正しいとらえ方がほとんどみられない	11	15
P4の詳細		割合(%)
P4a：4つの条件が打ち消し合う	2	3
P4b：おもりの重さのみ注目	2	3
P4c：左と右のおもりの間、左と右のうでの間に拮抗関係	4	5
P4d：まとまりがない	3	4

表4.4-7 特徴検出パターンと合計得点との関係

パターン	合計得点									計 (人)
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
P1						1	15	10	27	53
P2						1	1	2		4
P3		1			2	3	1			7
P4			2	1	2	2	3	1		11
P4a					1		1			2
P4b			1				1			2
P4c				1		1	2			4
P4d			1		1	1				3

表4.4-8 特徴検出パターンとルールとの関係

パターン	ルール					計 (人)
	I	II	III	IV	他	
P1			26	27	0	53
P2					4	4
P3			1		6	7
P4			1		10	11
P4a					2	2
P4b			1		1	2
P4c					4	4
P4d					3	3

の比較的正しい全体的処理の特徴検出パターンをもつ生徒が、約半数いることが明らかになった。

## 7. 調査の目的

本稿においては、算数学習における問題解決の手続きが必要とされているが、その手順が十分に定まらぬと考えられる算数的な問題解決の過程を把握し、その過程の理解と分析は、本人や生徒の学習過程の理解を明らかにすることを目指すとした。そこで、本論文では、まず、算数の問題解決の過程の理解を明らかにすることを目的とした。

子どもの算数的な問題解決の過程は、「ア」から「エ」までの4段階に分けて、その過程の理解と分析を目的とする。ここでは、算数の問題解決の過程を、その過程全体として「ア」から「エ」までの4段階に分けて理解し、その過程の理解と分析を目的とする。また、その過程の理解と分析の過程において、算式的表現の理解にわたる場合が観察されることを見逃さずに行っている。その際、算式的表現の理解は、「ア」から「エ」までの4段階に分けて、その過程の理解と分析を目的とする。また、その過程の理解と分析の過程において、算式的表現の理解にわたる場合が観察されることを見逃さずに行っている。

算数問題に直面するこの段階では、算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。また、算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。また、算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。また、算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。

一方、算数問題に直面するこの段階では、算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。また、算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。また、算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。また、算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。

## 8. 調査の目的

### (1) 調査の目的

調査は、2014年11月に算数問題解決を、算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。また、算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。また、算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。

・タイプ1（問題1）……算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。

・タイプ2（問題2）……算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。

・タイプ3（問題3）……算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。

・タイプ4（問題4）……算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。

・タイプ5（問題5）……算式・図形・表・グラフなど、算式・図形にわたる現象が観察される。



## 第5節 相対運動の認識に関する分析

### 1. 調査5の目的

本節においては、単線型の一定の論理的手続きが必要とされながらも、その処理が十分にできないと考えられる数量的な相対運動の教材を対象に、モデルの構築と分析法、および生徒の全体的処理の特徴を明らかにすることを目的とした。そこで、本調査では、まず、生徒の相対運動の認識の実態を明らかにすることにした。

子どもの相対的な認識の実態については、ピアジェが「三つ山問題」において、位置の相対的概念に関する研究を行っている。ここでは、視点の差異を弁別し、それが全体としてまとまりをもつ必要があることが述べられている<sup>(10)</sup>。また、2つの運動の相対的距離の課題において、形式的操作の段階にならないと解答が困難であることが報告されている<sup>(11)</sup>。その他、相対的な認識においては、ピアジェが指摘するように、視点の移動が重要な要因になることを指摘した研究が多い<sup>(12)</sup>。

視点移動に関するこれまでの研究では、回転・対称概念・方向概念などの、静止点間における視点移動の研究が行われ、生徒の回転・対象概念に関する認識が低いこと<sup>(13)</sup>、空間認識において、左右方向に関する認識が低いこと<sup>(14)</sup>、などが報告されている。

一方、相対運動している物体間の認識に関する研究は、あまり行われていない。そこで、本調査においては、まず、中学生を対象に、相対運動の中でも特に未学習の平行運動を取り上げ、平行運動の理解の実態を特に理解の順序性から明らかにすることにした。

### 2. 調査5の方法

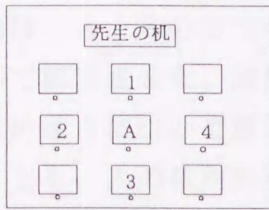
#### (1) 調査問題

調査は、図4.5-1に示す質問紙調査で、問題1から問題11の11問よりなる。各問題は大きく、タイプ1からタイプ5の5つに分けることができる。

- ・タイプ1（問題1）……………2つの静止点
- ・タイプ2（問題2）……………静止点と人の移動
- ・タイプ3（問題3～問題6）………静止点と運動系における人の移動
- ・タイプ4（問題7～問題9）………2つの運動系
- ・タイプ5（問題10～問題11）………異なる運動系で人の移動

【問題1】

問1 先生からみてA君の左は、何番目の人ですか。



【問題2】 A君は止まっています。B君は2m/秒の速さで方向1の方へ歩いています。



問1 B君からA君を見る(B君を基準にとると)A君はどちらの方向に動いて見えますか。

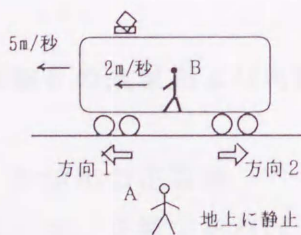
- ア〜カの記号でえらんでください。
- ア. 方向1の方へ動いて見える。
  - イ. 方向2の方へ動いて見える。
  - ウ. 方向1の方へ動いてから、方向2の方へ動いて見える。
  - エ. 方向2の方へ動いてから、方向1の方へ動いて見える。
  - オ. 方向1の方へ行ったり、方向2の方へ行ったりして動いて見える。

問2 B君からA君を見ると、A君の速さは何m/秒に見えますか。

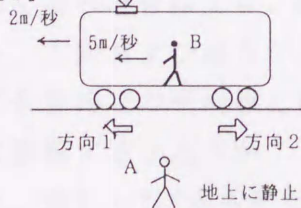
式 答 m/秒

※以下、問題3からは、問題2の質問形式と同じで、B→Aの方方向についても問う。

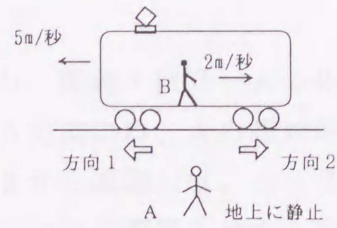
【問題3】



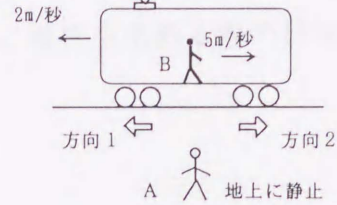
【問題4】



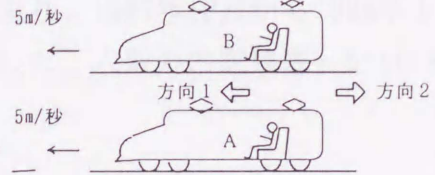
【問題5】



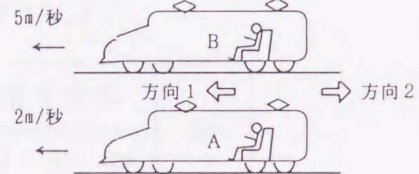
【問題6】



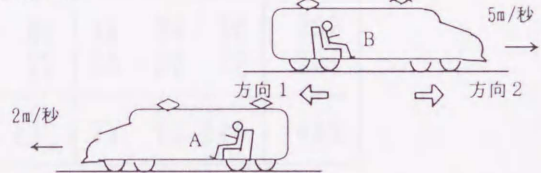
【問題7】



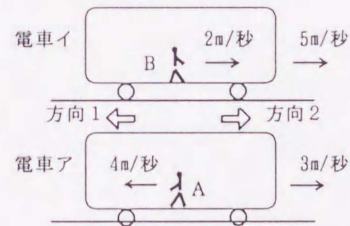
【問題8】



【問題9】



【問題10】



【問題11】

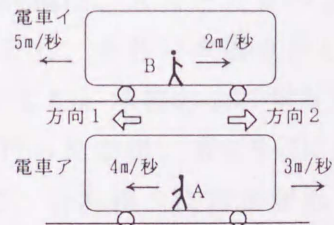


図4.5-1 相対運動の認識に関する調査問題 (調査5)



この中で、タイプ1は、左右の方向概念を問う問題で、タイプ2からタイプ5は、平行運動の問題である。

各問題は、A、Bの2つの視点が設定されており、問題1はB→Aの相対的方向について解答させた。問題2については、B→A方向のみ、人の相対的運動方向と相対的速さについて解答させた。また、問題3から問題11は、A→BとB→Aの両方とも、人の相対的運動方向と相対的速さについて解答させた。なお、問題2から問題11においては、考え方を知るために、速さを求める際の計算式を記述させた。

## (2) 調査対象および調査時期

調査対象は、中学校第1学年から第3学年であり、1987年12月から1988年1月にかけて、石川県内の2つの公立中学校で実施した。人数の内訳は表4.5-1に示す通りである。

表4.5-1 調査対象（単位：人）

中学校	第1学年			第2学年			第3学年			計
	男	女	計	男	女	計	男	女	計	
A校	37	37	74	44	38	82	42	34	76	232
B校	37	45	82	40	37	77	35	37	72	231
計	64	82	156	84	75	159	77	71	148	463

## 3. 調査5の結果および考察

### (1) 各学年の正答率

問題1は、正解であれば1点、問題2は、人Bの視点から方向と速さの両方とも正解である場合は1点、問題3から問題11の各問題は、人Aと人Bの2つの視点とも、方向および速さが正解である場合を1点とし、合計11点満点とした。学年別の合計得点の平均値と標準偏差を表4.5-2に示した。学校および学年が、合計得点に影響するかどうか、2元配置の分散分析を行った結果、表4.5-3に示す結果を得た。表4.5-3に示されたように、学年によって、合計得点に差が認められ、また、学校によって合計得点に差が認められた。

表4.5-2 合計得点の平均値と標準偏差

	第1学年		第2学年		第3学年	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
A校	4.91	2.96	5.56	3.19	8.17	3.13
B校	3.96	3.06	4.94	3.28	5.97	3.81

表4.5-3 分散分析表（調査5） \*\*p<0.01

	SS	df	MS	F
学校	182.05	1	1820.5	17.29**
学年	550.52	2	275.26	26.14**
学校×学年	52.42	2	25.21	2.49
残差	4812.82	457	10.5	
全体	5614.0	462		

(2) 各問題の正答率

各問題ごとに正答者の割合について示したのが、図4.5-2aと図4.5-2bである。図4.5-2aと図4.5-2bより、各校とも問題における正答率は同じような傾向がみられる。つまり、各学年とも、問題1、問題2、問題7は、他の問題に比べ正答率が比較的高く、問題5、問題10、問題11は他の問題に比べ正答率が比較的低い。このように、問題1、問題2のようにどちらかが運動しておらず、運動しているものも一つだけの場合、また、問題7のように運動していても、同じ方向と速さで運動をしている場合は正答率が高い傾向にある。

一方、問題5のように、人間は方向1の方に運動しているが、見かけ上は方向2の方に動いて見えるように、人間の実際の運動方向と見かけ上の運動方向の異なる場合、タイプ5の問題10、問題11のように、異なる運動系で人が移動するといった運動が複雑な場合は、正答率が比較的低いといえる。



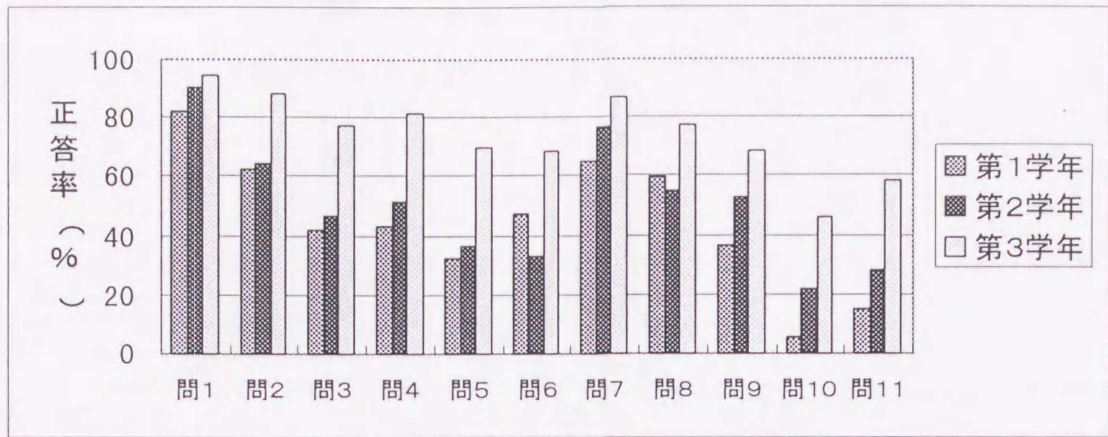


図4.5-2a A校の正答率

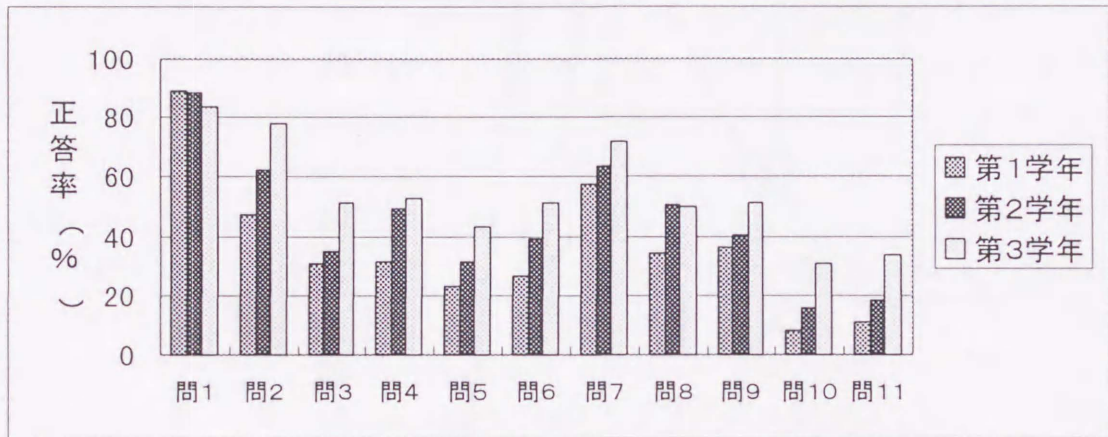


図4.5-2b B校の正答率

### (3) IRS分析法による理解の順序性

一般的な理解の順序性を明らかにするため、A校とB校のデータをあわせ、竹谷<sup>(15)</sup>の研究をもとに、各生徒の問題の正誤パターンからIRS分析を行った。順序性係数が0.5以上のものが関連性があるとして、有向グラフに示したのが図4.5-3である。なお、図4.5-3は、矢印が煩雑にならないように、等価ブロックをとり入れた簡易型のIRSグラフで示している。このIRSグラフは、グラフのY軸の下の方ほど正答率が高く、矢印の根元の問題の理解が基礎になって、矢印の先の問題が理解できることを意味する。このことから、次のことが指摘できる。

まず、全体的な理解の順序性は、問題2の「地上の静止点からの単純な人の運動」の理解や、問題7、問題8の「人は静止して運動系が同じ方向に動く運動」の理解が基礎となって、「地上の静止点から運動系の人移動（問題3、問題4）」の理解や、「人は静止して運動系が逆に動く運動（問題9）」の理解ができるようになると思われる。また、それらが基礎になって、「異なる運動系で人の移

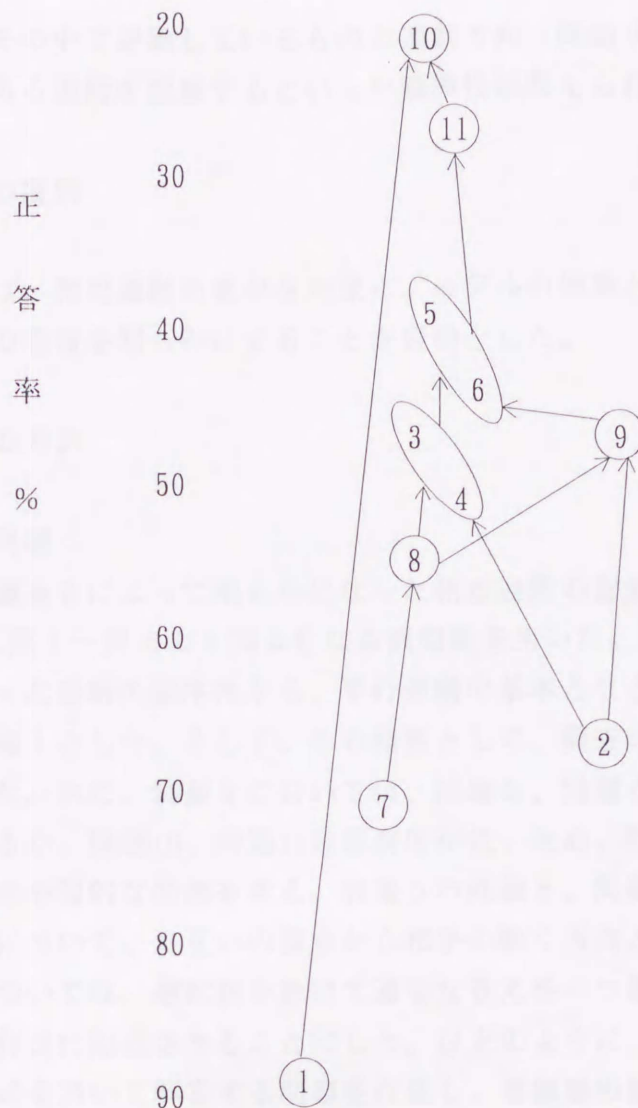


図4.5-3 IRS分析による理解の順序性（図の数値は問題番号を示す）

動（問題10、問題11）」の理解ができるようになると考えられる。一方、問題1のように静止点間における左右の相対的方向の理解は、問題7や問題8のように基礎的な相対的運動の理解とは異なる系列になっており、基本的な相対運動の理解と直接的な関係は小さいように思われる。

次に、理解の順序性を細かくみていくと、特に、問題8から問題9、また、問題3と問題4から問題5、問題6への理解の順序性が認められる。このことから、相対運動において、運動している系とその中で運動しているものの運動方向が、同じ方向である運動（問題8、問題3、問題4）の理解が基礎となって、運動し



ている系とその中で運動しているものの運動方向（問題9、問題5、問題6）が、逆の方向である運動を理解するといった順序性が考えられる。

#### 4. 調査6の目的

本調査では、相対運動の教材を対象に、モデルの構築と分析法、および生徒の全体的処理の特徴を明らかにすることを目的とした。

#### 5. 調査6の方法

##### (1) 調査問題

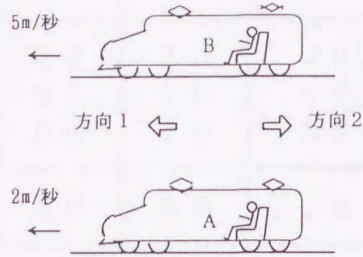
調査は、調査5によって明らかになった相対運動の認識の特徴をもとに、図4.5-4に示した問1～問4の4問よりなる質問紙を用いた。問題は、まず、調査5で明らかになった理解の順序性から、平行運動の基本となる問題として問題8をとりあげ、問題1とした。そして、その発展として、調査5の問題9をとりあげ、問題2とした。次に、調査5においては、問題5、問題6から、問題10、問題11へと発展するが、問題10、問題11は理解度が低いため、問題5、問題6と問題10、問題11の間の中間的な問題を考え、調査6の問題3、問題4とした。各問題とも、人Aと人Bについて、お互いの視点から相手の動く方向と速さを求めるものである。方向については、選択肢を設けて適切な答えを一つ選ばせ、速さについては、式と答えを自由に記述させることにした。以上のように、生徒の理解の順序性をもとに、数式を用いて解答する問題を作成し、単線型の論理的処理で解答する問題を作成した。

その際、人と乗り物の動きの最大値が、人Aは「方向1が4 (m/s)、方向2が3 (m/s)」、人Bは「方向1が5 (m/s)、方向2が2 (m/s)」、乗り物Aは「方向1が5 (m/s)、方向2が2 (m/s)」、乗り物Bは「方向1が5 (m/s)、方向2が2 (m/s)」というように、方向1と方向2の速度の差の最大幅が7 (m/s)になるようにした。これは、ニューラルネットワークのモデル作成において、人の動きと乗り物の動きの考慮の仕方を比較するため、数値の最大の幅を同じにする方が、荷重の比較や特徴検出パターンの分析が容易であると考えたからである。

##### (2) 調査対象および調査時期

調査は、1993年5月に、金沢大学教育学部附属中学校、第1学年～第3学年の119人を対象に行った。各学年の生徒数は表4.5-4に示す通りである。

【問題1】並行して、同じ向きに（方向1）に走っている電車が2つあります。それぞれの電車にA君、Bさんが乗り込みました。A君の電車は2m/秒で、Bさんの電車は5m/秒で走っています。



〔問1〕A君からBさんを見ると、Bさんはどちらの方向に動いて見えますか。

- ア. 方向1の方へ動いて見える。
- イ. 方向2の方へ動いて見える。
- ウ. 方向1の方へ動いてから、方向2の方へ動いて見える。
- エ. 方向2の方へ動いてから、方向1の方へ動いて見える。
- オ. 方向1の方へ行ったり、方向2の方へ行ったりして動いて見える。
- カ. その他

〔問2〕A君からBさんを見ると、Bさんは何m/秒に見えますか。 式 答え

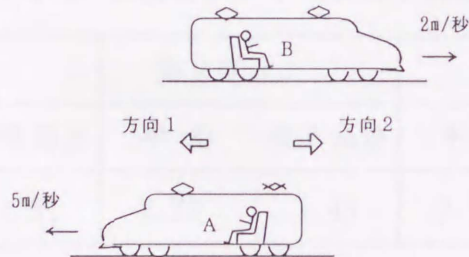
〔問3〕BさんからA君を見ると、A君はどちらの方向に動いて見えますか。

- ア. 方向1の方へ動いて見える。
- イ. 方向2の方へ動いて見える。
- ウ. 方向1の方へ動いてから、方向2の方へ動いて見える。
- エ. 方向2の方へ動いてから、方向1の方へ動いて見える。
- オ. 方向1の方へ行ったり、方向2の方へ行ったりして動いて見える。
- カ. その他

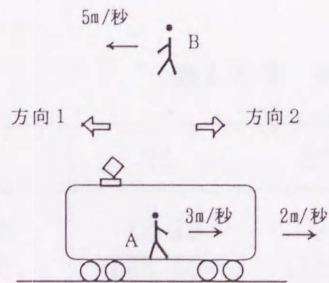
〔問4〕BさんからA君を見ると、A君は何m/秒に見えますか。 式 答え

※以下問題文省略

【問題2】



【問題3】



【問題4】

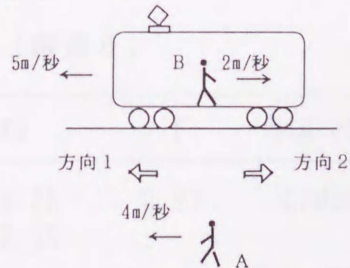


図4.5-4 相対運動の認識に関する調査問題（調査6）



表4.5-4 調査対象（人）

学年	男子	女子	計
1	20	20	40
2	20	20	40
3	20	19	39
計	60	59	119

## 6. 調査6の結果

各問題において、人Aと人Bから見たお互いの方向と速さの両方が正答である場合を1点とし、4点満点で得点化を行った。各学年の合計得点の平均値と標準偏差を表4.5-5に示した。学年が、合計得点に影響するかどうか、分散分析を行った結果、表4.5-6に示す結果を得た。表4.5-7に示されたように、学年によって、合計得点に差は認められなかった。

表4.5-5 合計得点の平均と標準偏差

第1学年		第2学年		第3学年	
平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
1.93	1.51	2.70	1.45	2.23	1.27

表4.5-6 分散分析表（調査6）

	SS	df	MS	F	Sig of F
学年	12.19	2	275.26	2.97	0.055
残差	238.10	116	2.05		
全体	250.29	118	2.12		

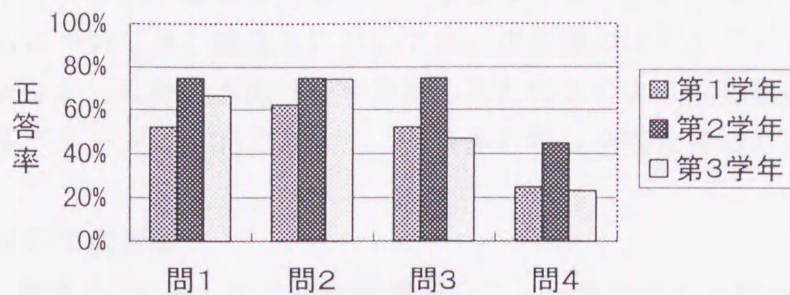


図4.5-5 調査6の正答率

各問題における正答率を図4.5-5に示した。各学年とも問4については、比較的正答率が低い傾向にあった。全問正答者は、31人（26%）であった。速さについての式と答え、さらに、方向についての解答を分析した。その結果、全問正答以外では、視点Aと視点Bとの速さが違ったり、問題によって解答手続きが異なったりしていた。また、問題によって、方向の選択肢について、「ア」の方向1と「イ」の方向2以外の選択肢、たとえば、「ウ」の方向1に動いてから、方向2に動くという選択肢を選ぶ生徒が比較的多かった。4問のうち1問でも「ア」と「イ」以外の選択肢を選んだ生徒は、47人（39%）であった。以上のような解答手続きの分析から、全問正答以外では、単線型の論理的手続きを用いている生徒はいないと考えられた。単線型の論理的手続きを用いている生徒（全問正答者）の人数と、単線型の論理的手続きを用いていない生徒の人数の間に差があるかどうか、 $\chi^2$ 検定を行った結果、有意差が認められた（ $\chi^2=27.30$ ,  $df=1$ ,  $p<0.05$ ）。したがって、単線型の論理的手続きを用いている生徒が少ないことが明らかになった。

## 7. 調査6のニューラルネットワークのモデルによる分析および考察

### （1）モデル作成の対象とした生徒

図4.5-4の問題における方向の選択肢について、4問のうち1問でも「ア」、「イ」以外の選択肢を選んだ47人の生徒については、今回はモデル作成から除外した。これは、「ア」の方向1と「イ」の方向2以外を選択した場合、たとえば、「ウ」の方向1に動いてから、方向2に動くという場合に、方向1のときの速さと方向2のときの速さが違うと考えている生徒もいると思われたからである。つまり、そこでの生徒の考え方が、今回の調査では不明確であるため、モデルを作成しても、不正確になると考えたからである。そこで、119人中、72人（6



1%：第1学年19人・第2学年26人・第3学年27人)をモデル作成の対象とした。これについては、調査5においては、選択肢の「ア」「イ」以外を選択した生徒は少なかったが、今回はやや多かったためこのような処置をした。72人の生徒の解答パターンは、35であった。一番多いのは全問正答の31人であった。

## (2) モデルの作成方法

モデルは、図4.5-6に示したような階層型のニューラルネットワークによって作成した。入力層の細胞は、人Aと人Aの乗り物(乗り物A)、人Bと人Bの乗り物(乗り物B)の4つの条件に合わせて4つ、中間層の細胞は原則として2つ、出力層の細胞は、人Aから見た人Bの動き(人Aの視点)と人Bから見た人Aの動き(人Bの視点)の2つとした。中間層の細胞については、後述するように、全問正答の場合、「人A・乗り物A」と「人B・乗り物B」の間が、拮抗関係として特徴検出パターンにあらわれるため、そのパターンに合わせて2つとした。しかし、生徒の反応によっては演算的に収束しにくい場合があり、収束が困難な場合には中間層の細胞を増やして演算を行った。

入力のデータは、人Aと乗り物A、人Bと乗り物Bをそれぞれ①～④の細胞に対応させた。そして、方向1をマイナス、方向2をプラスとし、各問題で示された速さを入力した。出力のデータは、出力層の細胞①を人Aの視点、細胞②を人Bの視点に対応させ、方向1をマイナス、方向2をプラスとして、生徒が答えた速さを対応させた。

たとえば、問題1について、ある生徒が人Aから見た人Bの動きが方向1で速さが3m/秒、人Bから見た人Aの動きが方向2で速さが3m/秒、という解答を行った場合、

・入力「0 -2 0 -5」 → 出力「-3 3」

をデータとした。同様に問2から問4についても生徒Aの解答を対応させた。

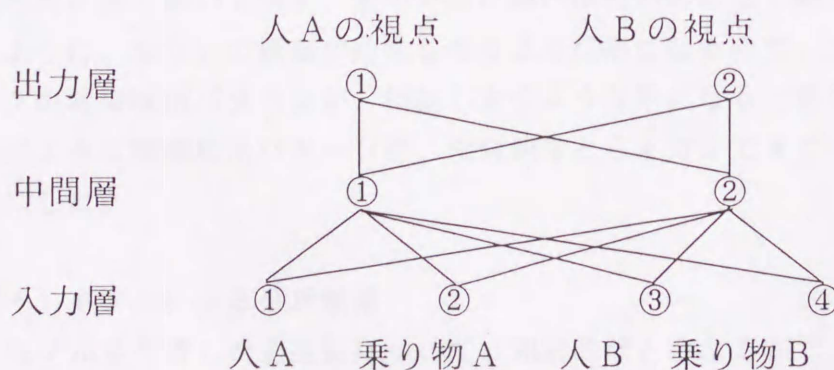


図4.5-6 ニューラルネットワークの構造

以上のように対応させた4つの「入力値－出力値」が、その生徒においてすべて成立するように、平均誤差が5%以下になるまで、ニューラルネットワークの荷重を変化させた。

### (3) モデルによる分析方法

モデルは、解答パターンが同じであるならば、同じになるので、35の解答パターンについてモデルを作成した。表4.5-7に、作成したモデルの荷重を示した。荷重は、入力層と中間層の細胞間の荷重と、中間層と出力層の細胞間の荷重を示している。次に、中間層の2つの細胞の一つひとつは、特徴検出器であることに注目し、入力層の細胞から中間層の各細胞における4つの荷重について、荷重が「+1.0」以上の場合は興奮性の信号を受け、「-1.0」以下の場合には抑制性の信号を受け、さらに、「-1.0～+1.0」の間の値はほとんど信号を受けないと考えた。この点から、特に、全問正答である生徒（モデル番号S1）の特徴検出パターンを示したのが、図4.5-7である。図4.5-7の「□」は荷重が「+1.0」以上、「■」は「-1.0」以下を示している。この特徴検出パターンについて、中間層の細胞①の特徴検出パターンをみると次のことが指摘できる。まず、4つの条件とも「□」か「■」であり、4条件とも考慮していることがわかる。また、人Aと乗り物Aは「■」であり、同時に抑制性の信号を受けるが、一方、人Bと乗り物Bは「□」であり、同時に興奮性の信号を受ける。これは、「人A、乗り物A」と「人B、乗り物B」のお互いの条件が拮抗し合うことを示している。また、中間層の細胞②の特徴検出パターンは、これとちょうど逆になっており、しかも、中間層の細胞①と細胞②の出力層への特徴検出は、「□」と「■」が逆になっており、やはりお互いの細胞の情報が拮抗するようになっており、以上のように、全問正答者の特徴検出パターンは、対称的な構造になっていることがわかる。

これは、たとえば、人Aと乗り物Aが、人Bと乗り物Bと同じ方向に動けば、相対的に遅く動いて見え、逆の方向に動けば相対的に速く動くように見えるというように、お互いの速度が拮抗し合うような形になるので、ニューラルネットワークの特徴検出パターンが、拮抗し合うような形になると考えられる。そこで、このような特徴検出パターンを、相対的なとらえ方ができているものと見なすことにした。

### (4) モデルによる分析結果

モデルを作成した全生徒について、相対的なとらえ方ができているかどうかから、特徴検出パターンを分析した結果、図4.5-8に示したようにP1～P4のパターンに大きく分類することができた。図4.5-8に示したP1～P4は、ある生徒の



表4.5-7 相対運動に関するニューラルネットワークの荷重

モデル番号	中間層	①	②	③
S 1	出力層	①人Aの視点	3.890	3.305
		②人Bの視点	-3.743	-3.483
	中間層	①人A	-1.030	1.756
		②乗り物A	-2.772	1.148
		③人B	1.403	-2.482
	④乗り物B	1.916	-1.074	
S10	出力層	①人Aの視点	3.999	-3.323
		②人Bの視点	-3.866	3.451
	中間層	①人A	0.662	0.166
		②乗り物A	-4.218	2.386
		③人B	1.683	-1.251
	④乗り物B	2.115	-0.640	
S 2	出力層	①人Aの視点	4.242	-3.015
		②人Bの視点	-4.105	3.155
	中間層	①人A	-2.696	2.100
		②乗り物A	-2.064	0.975
		③人B	2.938	-1.870
	④乗り物B	1.682	-1.287	
S11	出力層	①人Aの視点	3.983	-3.379
		②人Bの視点	-3.822	3.587
	中間層	①人A	-0.145	1.022
		②乗り物A	-3.457	1.528
		③人B	1.213	-2.057
	④乗り物B	1.921	-0.844	
S 3	出力層	①人Aの視点	6.688	-4.261
		②人Bの視点	-3.099	3.524
	中間層	①人A	-2.272	1.259
		②乗り物A	-2.327	1.499
		③人B	2.498	-1.681
	④乗り物B	1.816	-1.582	
S12	出力層	①人Aの視点	4.244	-3.020
		②人Bの視点	-4.055	3.166
	中間層	①人A	-3.960	3.351
		②乗り物A	-0.501	0.197
		③人B	2.536	-1.730
	④乗り物B	0.580	-0.666	
S 4	出力層	①人Aの視点	4.223	-3.166
		②人Bの視点	-4.073	3.318
	中間層	①人A	-3.038	2.789
		②乗り物A	-1.410	1.489
		③人B	3.029	-2.510
	④乗り物B	1.579	-1.334	
S13	出力層	①人Aの視点	3.874	-3.326
		②人Bの視点	-3.722	3.490
	中間層	①人A	0.565	1.320
		②乗り物A	-3.584	0.925
		③人B	1.579	-3.640
	④乗り物B	0.871	-0.023	
S 5	出力層	①人Aの視点	3.930	-3.250
		②人Bの視点	-3.815	3.404
	中間層	①人A	-1.170	1.753
		②乗り物A	-2.327	1.364
		③人B	1.549	-2.052
	④乗り物B	1.907	-1.356	
S14	出力層	①人Aの視点	4.189	-3.307
		②人Bの視点	-3.763	3.361
	中間層	①人A	-1.298	1.827
		②乗り物A	-2.637	1.127
		③人B	1.605	-2.412
	④乗り物B	1.878	-1.180	
S 6	出力層	①人Aの視点	3.991	-3.564
		②人Bの視点	-3.885	3.606
	中間層	①人A	-0.762	1.582
		②乗り物A	-2.863	1.112
		③人B	1.227	-2.955
	④乗り物B	1.772	-0.834	
S15	出力層	①人Aの視点	-0.705	-3.639
		②人Bの視点	0.577	3.801
	中間層	①人A	-1.053	-2.910
		②乗り物A	-0.430	2.576
		③人B	-0.044	0.213
	④乗り物B	-0.920	-1.613	
			1.717	-4.659
			1.505	0.548
S 7	出力層	①人Aの視点	3.868	-3.368
		②人Bの視点	-3.876	3.541
	中間層	①人A	-0.628	1.291
		②乗り物A	-2.389	1.669
		③人B	1.248	-2.315
	④乗り物B	1.852	-1.063	
S16	出力層	①人Aの視点	3.971	-3.386
		②人Bの視点	-3.857	3.608
	中間層	①人A	-0.479	1.051
		②乗り物A	-3.182	1.608
		③人B	1.289	-2.082
	④乗り物B	1.834	-0.874	
S 8	出力層	①人Aの視点	3.940	-3.337
		②人Bの視点	-3.808	3.501
	中間層	①人A	-0.800	1.652
		②乗り物A	-2.875	1.287
		③人B	1.215	-2.449
	④乗り物B	1.898	-1.091	
S17	出力層	①人Aの視点	4.212	-3.288
		②人Bの視点	4.088	3.423
	中間層	①人A	-4.271	3.744
		②乗り物A	-0.176	0.485
		③人B	2.276	-1.892
	④乗り物B	0.016	-1.655	
S 9	出力層	①人Aの視点	4.066	-3.406
		②人Bの視点	-3.809	3.506
	中間層	①人A	-0.854	1.581
		②乗り物A	-2.819	1.338
		③人B	1.301	-2.367
	④乗り物B	1.875	-1.125	
S18	出力層	①人Aの視点	4.133	-2.845
		②人Bの視点	-4.137	4.031
	中間層	①人A	-0.824	1.451
		②乗り物A	-3.232	1.533
		③人B	1.138	-1.985
	④乗り物B	2.011	-1.063	

モデル番号	中間層	①	②	③	
S19	出力層	①人Aの視点	3.970	-3.267	
		②人Bの視点	-3.807	3.409	
中間層		①人A	-0.792	1.341	
		②乗り物A	-3.064	1.574	
		③人B	1.357	-1.846	
		④乗り物B	1.950	-1.198	

S20	出力層	①人Aの視点	-0.190	-3.952	3.341
		②人Bの視点	0.159	3.793	-3.474
中間層		①人A	-0.769	-3.186	1.434
		②乗り物A	-0.649	2.333	-4.560
		③人B	-0.363	0.481	1.454
		④乗り物B	-0.656	-1.958	0.522

S21	出力層	①人Aの視点	-6.920	0.137	8.412
		②人Bの視点	7.693	-0.890	-1.672
中間層		①人A	6.072	-0.576	2.824
		②乗り物A	-4.865	-1.363	-6.717
		③人B	-0.217	-0.908	2.998
		④乗り物B	-3.283	-0.883	0.580

S22	出力層	①人Aの視点	-3.608	-1.487	4.058
		②人Bの視点	-0.019	4.369	-3.136
中間層		①人A	0.532	-3.142	0.883
		②乗り物A	1.771	1.317	-3.798
		③人B	-1.106	0.770	1.150
		④乗り物B	-0.791	-2.155	1.384

S23	出力層	①人Aの視点	4.526	-3.422	
		②人Bの視点	-4.020	3.016	
中間層		①人A	-3.411	2.690	
		②乗り物A	-1.810	1.032	
		③人B	2.889	-2.107	
		④乗り物B	2.044	-1.588	

S24	出力層	①人Aの視点	4.150	-3.046	
		②人Bの視点	-4.009	3.220	
中間層		①人A	-2.865	2.441	
		②乗り物A	-1.896	1.036	
		③人B	2.706	-1.993	
		④乗り物B	1.903	-1.543	

S25	出力層	①人Aの視点	6.512	-2.764	
		②人Bの視点	0.138	5.730	
中間層		①人A	-3.512	0.446	
		②乗り物A	-1.790	-0.386	
		③人B	0.459	-5.278	
		④乗り物B	3.456	3.903	

S26	出力層	①人Aの視点	6.180	-0.878	
		②人Bの視点	-7.308	8.436	
中間層		①人A	-4.281	1.462	
		②乗り物A	-0.294	3.457	
		③人B	2.403	0.234	
		④乗り物B	0.090	-4.431	

S27	出力層	①人Aの視点	5.388	-5.258	
		②人Bの視点	-3.434	3.068	
中間層		①人A	-1.226	1.733	
		②乗り物A	-2.905	1.229	
		③人B	1.426	-2.283	
		④乗り物B	2.014	-1.428	

モデル番号	中間層	①	②	③	
S28	出力層	①人Aの視点	3.712	-6.791	
		②人Bの視点	5.670	4.215	
中間層		①人A	-1.727	1.127	
		②乗り物A	-2.039	2.694	
		③人B	2.908	-0.266	
		④乗り物B	1.522	-2.701	

S29	出力層	①人Aの視点	4.163	-2.492	
		②人Bの視点	-6.436	3.786	
中間層		①人A	-2.092	2.218	
		②乗り物A	-2.653	1.528	
		③人B	1.885	-1.634	
		④乗り物B	2.171	-1.941	

S30	出力層	①人Aの視点	-2.124	-2.233	4.912
		②人Bの視点	-3.721	3.952	-2.628
中間層		①人A	-2.000	2.387	-1.582
		②乗り物A	0.316	2.093	-2.767
		③人B	1.852	-0.774	0.268
		④乗り物B	-0.647	-2.484	2.589

S31	出力層	①人Aの視点	3.752	-2.747	
		②人Bの視点	-4.727	4.935	
中間層		①人A	-1.063	1.958	
		②乗り物A	-2.950	1.319	
		③人B	1.523	-2.217	
		④乗り物B	1.925	-1.294	

S32	出力層	①人Aの視点	4.626	-2.913	
		②人Bの視点	-4.149	4.141	
中間層		①人A	-4.300	4.079	
		②乗り物A	-0.772	0.014	
		③人B	2.515	-1.631	
		④乗り物B	1.423	-0.649	

S33	出力層	①人Aの視点	4.997	-4.704	
		②人Bの視点	-3.644	6.021	
中間層		①人A	-2.238	2.387	
		②乗り物A	-1.689	1.694	
		③人B	1.209	-0.682	
		④乗り物B	2.712	-2.858	

S34	出力層	①人Aの視点	-2.810	-0.062	5.568
		②人Bの視点	-2.952	6.051	-0.330
中間層		①人A	5.360	-5.146	-4.330
		②乗り物A	-0.004	1.242	-0.198
		③人B	-1.312	0.508	2.764
		④乗り物B	-2.617	4.828	-0.064

S35	出力層	①人Aの視点	-7.310	3.369	
		②人Bの視点	-3.850	3.791	
中間層		①人A	4.014	-0.472	
		②乗り物A	-4.353	2.869	
		③人B	0.472	-0.027	
		④乗り物B	1.185	-1.219	



		中層層	
		①	②
出力層	①人A視点	□	■
	②人B視点	■	□
入力層	①人A	■	□
	②乗り物A	■	□
	③人B	□	■
	④乗り物B	□	■

「■」は、荷重が-1.0以下、「□」は、荷重が1.0以上

図4.5-7 全問正答の特徴検出パターン

特徴検出パターンを例にあげて示している。

P 1 : 全問正答のように、人Aと乗り物A、人Bと乗り物Bがそれぞれ組になり、お互いが拮抗するようなパターン。

P 2 : 全問正答とほぼ同じパターンであるがやや異なる。

P 3 : 人Aと乗り物A、あるいは人Bと乗り物Bのまとまりが一部見られる。

P 4 : 条件の正しいとらえ方がほとんどみられない。

以上のようにP 1からP 4にかけて、相対的なとらえ方が徐々にできなくなっていくように分類できた。

次に、P 1～P 4の人数を示したのが、表4.5-8である。表4.5-8では、全問正答の場合のP 1の人数と、全問正答でないP 1の人数を分けて示すとともに、モデル化しなかった人数も示した。

表4.5-8から、全問正答者数の31人以外にも、P 1の特徴検出の生徒が12人みられる。また、P 2のように、全問正答に近いとらえ方を行っている生徒もいることがわかる。全問正答以外の生徒で、P 1からP 2までの生徒は20%、P 1からP 3までの生徒は28%と、全問正答でなくても全体的処理においては、条件のとらえ方が比較的正しい生徒がいることが明らかになった。

#### (5) モデルからの考察

以上のように、相対運動に関する問題では、単線型の論理手続きを用いている生徒は少ないと考えられる。そして、全問正答でない74%の生徒においても、4つの条件に対するとらえ方の比較的正しい全体的処理の特徴検出パターンをもつ生徒が、約3割いることが明らかになった。

P1	中間層 ① ②	①人A視点 <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	②人B視点 <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	P3	中間層 ① ②	①人A視点 <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	②人B視点 <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	①人A <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	②乗り物A <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	③人B <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>		④乗り物B <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	①人A <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	②乗り物A <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
P2	中間層 ① ②	①人A視点 <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	②人B視点 <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	P4	中間層 ① ②	①人A視点 <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	②人B視点 <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	①人A <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	②乗り物A <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	③人B <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>		④乗り物B <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	①人A <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	②乗り物A <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>

「■」は、荷重が-1.0以下、「□」は、荷重が1.0以上

図4.5-8 特徴検出パターンの分類

表4.5-8 特徴検出パターンの度数

特徴検出パターン	人数(人)	割合(%)
P1 (全問正答)	31	26
P1 (全問正答でない)	12	10
P2	13	11
P3	8	7
P4	8	7
モデル化なし	47	39



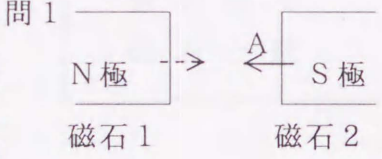
## 第6節 磁石にはたらく力の認識に関する分析

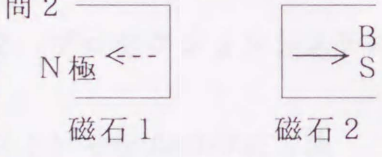
### 1. 調査7の目的

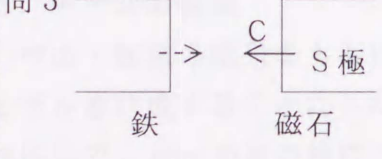
本調査では、単線型の処理の分析を改めて示すことにより、ニューラルネットワークの分析法の特徴をより明確に位置づけることを目的とした。調査においては、「磁石にはたらく力」の教材をとりあげることにした。

「磁石にはたらく力」などの物体にはたらく力については、運動物体では、運動方向に力が働いていると判断する生徒が多く<sup>(16)</sup><sup>(17)</sup>、静止物体では、何から何にはたらく力か理解できない生徒が多い<sup>(18)</sup>。また、中山・猿田の研究<sup>(19)</sup>では、静止物体において、図示された矢印が何から何に作用する力を表しているか判断しようとするとき、特に引力の場合に認識が困難であることが明らかにされている。さらに、中山・松原は、図4.6-1に示すような質問紙調査を行い、高校生や大学生が次の4つのルールを用いて、解答を行っていることを明らかにしている<sup>(20)</sup>。

下のそれぞれの図の矢印は物体にはたらく力を表している。A~Dで表される矢印が「何から何にはたらく力」を表しているか、空白の中に物体名を入れて答えよ。

問1  ・ Aは  から  にはたらく力である。

問2  ・ Bは  から  にはたらく力である。

問3  ・ Cは  から  にはたらく力である。

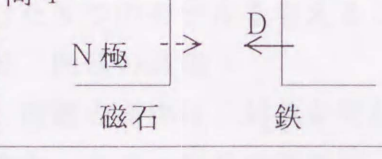
問4  ・ Dは  から  にはたらく力である。

図4.6-1 磁石にはたらく力に関する調査問題

ルールA：力を表した矢印を正しく解釈するルール。

ルールB：矢印の根元の方の物体から、矢印の先端の方の物体に力がはたらくといった、誤った記号的処理を行うルール。

ルールC：矢印の根元のところにある物体から矢印の示す向きに力がはたらくといった、誤った記号処理を行うルール。

ルールX：磁石には力が内在しており、力が内在している物体から他の物体に力がはたらくといった、誤った意味的処理を行うルール。このルールは物体が等価な場合（磁石どうし）に適用すると、どちらから力がはたらくか判断できず、物体が不等価な場合に限り有効であると考えられる。

以上のルールは、2つの物体が磁石同士、磁石と鉄の関係によって、いくつかの組み合わせが生じ、その組み合わせは表4.6-1の通りである。

本調査では、この中山・松原の研究をもとに、プロダクションシステムを用いてルールの細かい手続きを明らかにすることを目的とした。

表4.6-1 ルールの組み合わせ（A～Xの記号は、各ルールを示す）

物体 \ ルール	A	B	C	A X	B X	C X
磁石同士	A	B	C	A	B	C
磁石と鉄	A	B	C	X	X	X

## 2. プロダクションシステムのモデルによる分析

### （1）モデルの作成方法

#### A. モデルの種類

中山・松原の結果をもとに、プロダクションシステムによって、学習者の知識モデルを作成することにした。モデルは、表4.6-1に示したルールの組み合わせに対応して、ルール名の前に「MAG」を付与した、「MAG-A」から「MAG-CX」と名付けた6つのモデルを考えることにした。

#### B. 問題の表現

問題の表現は、対象が変化しても類似した問題に適用できる一般的な表現を考えた。まず、物体の表現は、「JISYAKU-N」、「JISYAKU-S」、「JISYAKU」、「TETSU」のように行った。次に、問題においては物体名が同じになる場合があり、



その区別のためのラベル名を「( )」でくくり、物体名のすぐ右に示し、「JISYAKU-N(1)、JISYAKU-N(2)」のように表現することにした。このラベル名は区別のためのものであり、適当な記号を用いたのでよい。

力の表現は、図4.6-1の問題のように両物体に示す場合もあり、問題で問われている矢印がどちらの矢印か区別して表現する必要がある。そこで、問題で問われている矢印の方を「<=、=>」で示し、その他の矢印を「<-、->」で示すことにした。この「<-、->」の矢印は示しても示さなくてもよい。矢印は示されている物体の右に示し、各記号はスペースをおいて表現を行った。以上のことを基準にして、図4.6-1に示した問1～問4の問題を記述すると、次のように表現できる。

- ・問1：「JISYAKU-N -> JISYAKU-S <=」
- ・問2：「JISYAKU-N(1) <- JISYAKU-N(2) =>」
- ・問3：「TETSU -> JISYAKU-S <=」 または 「TETSU -> JISYAKU <=」
- ・問4：「JISYAKU-N -> TETSU <=」 または 「JISYAKU -> TETSU <=」

以上のような表現は、離れた2物体間にはたらく力についての一般的な記述であると考えられる。たとえば、地球から月にはたらく力は、「CHIKYU -> TSUKI <=」などと表現することができる。

コンピュータによる具体的な入力は、全問正答するモデル「MAG-A」を例にして問1の場合を示すと次のようになる。

(MAG-A '(JISYAKU-N -> JISYAKU-S <=))

#### C. 答えの表現

答えは、最終的には「～から～にはたらく力」と示し、「～」に物体名が入るように考えた。また、矢印が示されていない場合や物体名が不明な場合は、それに応じた出力が行えるようにした。具体的な出力は、モデル「MAG-A」を例にして問1の場合を示すと次のようになる。

「JISYAKU-N から JISYAKU-S にはたらく力」

#### D. 手続きの表現

「B. 問題の表現」で示した問題の入力に対し、「C. 答えの表現」で示した答えが出力できるように各モデルの手続きを考えた。その際、一つのモデルにおいて、各問題で異なる手続きを使用するのではなく、学習者は一定の手続きをもって解答を行うといった観点から、問題一般に通じた手続きを考えるようにした。

#### (2) 作成したモデル

実際に作成したモデルは、全問正答を行うモデル「MAG-A」を中心に、図4.6-2に示した。各モデルの違いは、下線を引いて示している。各モデルは、おもにP1～P7の7つの手続きよりなると考えられる。それぞれの手続きやデータ（宣言的

知識)の意味は、図4.6-3に示した。なお、図4.6-2のモデルの中で「P2-1、P2-2」と表現された手続きのように、P1~P7の手続きの中には、下位手続きがいくつか含まれる場合がある。また、図4.6-3に示した手続きは、次のようなステップにまとめられる。

①P1、P2：対象についての記憶を行う。ここでは、物体名や矢印の示され方などを記憶する。

②P3、P4：データからの検索を行う。ここでは、物体にはたらく力がどのようなものであるか、既に記憶しているデータから検索を行う。

③P5、P6：矢印の向きからの力の解釈と、検索されたデータからの力の解釈との比較を行う。

④P7：総合評価を行う。

図4.6-2に示したように、全問正答するモデル「MAG-A」と誤った解答を行う「MAG-B」、「MAG-C」は、矢印の解釈に関する手続きが異なる。特に「MAG-B」では、矢印の示された物体などの認識を行う手続き(手続きP2)と、引力、斥力の判断と矢印の向きの判断から両物体にはたらく力の関係を判断する手続き(手続きP5)が異なる。「MAG-C」では、おもにP5の手続きが異なり、正しい解答を行う手続きに対して矢印の向きの解釈が全く逆になっている。

また、ルールX(磁石には力が内在しており、力が内在している物体から他の物体に力がはたらく)を用いる「MAG-AX」、「MAG-BX」、「MAG-CX」のモデルは、物体間にはたらく力の関係についてのデータが「MAG-A」と異なる。たとえば、「磁石-鉄」では、「(磁石が)引く-(鉄が)引かれる」の関係だけで、「(磁石が)引かれる-(鉄が)引く」の関係が欠損し、作用反作用の関係としてデータが存在しない。また、このデータが存在しないために、それを補正する手続きが手続きP6に付加されているといった点が、モデル「MAG-A」と異なる。

### (3) モデルによる分析結果

モデルから次の4つの点が指摘できる。一つめは、「ルールX」を含まないモデル「MAG-A」、「MAG-B」、「MAG-C」においては、力の関係についてのデータを検索し処理していくP3~P6の手続きを省略しても、P7(総合評価を行う手続き)における判断が可能になることがあげられる。つまり、両物体にはたらく力について考えることなく、矢印の向きだけを考慮して解答する可能性があることが考えられる。

二つめは、問われている矢印の力の作用反作用の関係を検索(手続きP4)しなくても、結果を出せることがあげられる。つまり、力を相互作用と考えなくても解答が可能である。モデルにおいては、手続きP4によって、2物体から物体間にはたらく力の作用反作用の関係、たとえば「磁石N-磁石S」では、「(磁石N



モデル MAG-A

```

1 (DE MAG-A (X) (P1 X)(P2-1 BUTTA1)(P2-2 BUTTA11)(P3-1 BUTTA12 INRYOKUGUN)(P3-2 BUTTA12 SEKIRYOKUGUN)(P4-1
2 BUTTA12)(P4-2 BUTTA12 SAYOU)(P5 BUTTA11)(P6-1 SAYOU-KANKEI1)(P7))

3 (DE P1 (X) (COND ((NULL X) (SETQ BUTTA11 (REVERSE BUTTA11))(SETQ BUTTA12 (REVERSE BUTTA12))(SETQ BUTTA1
4 (REVERSE BUTTA1))(SETQ YA (REVERSE YA)))(AND (NOT (NULL (CADR X))) (LISTP (CADR X)))(SETQ BUTTA11 (CONS (CONS
5 (CAR X) (LIST (CADR X))) BUTTA11))(SETQ BUTTA12 (CONS (CAR X) BUTTA12))(SETQ BUTTA1 (CONS (CONS (CAR X) (LIST
6 (CADR X)) BUTTA1))(PI (CDR X)))(OR (EQUAL (CAR X) '=) (EQUAL (CAR X) '<->)) (SETQ YA (CONS (CAR X) YA)))(PI
7 (CDR X)))(OR (EQUAL (CAR X) '=) (EQUAL (CAR X) '<->)) (SETQ BUTTA1 (CONS (CAR X) BUTTA1))(SETQ YA2 (CONS (CAR X)
8 YA2))(SETQ YA (CONS (CAR X) YA))(PI (CDR X)))(T (SETQ BUTTA12 (CONS (CAR X) BUTTA12))(SETQ BUTTA11 (CONS (CAR
9 X) BUTTA11))(SETQ BUTTA1 (CONS (CAR X) BUTTA1))(PI (CDR X))))

10 (DE P2-1 (X) (COND ((NULL (CDR X)) VEC) ((OR (EQUAL (CADR X) '=) (EQUAL (CADR X) '<->)) (SETQ VEC (CAR X)))(T
11 (P2-1 (CDR X))))

12 (DE P2-2 (X) (COND ((NULL X) (SETQ NOVEC (CAR NOVEC)))(EQUAL (CAR X) VEC)(P2-2 (CDR X)))(T (SETQ NOVEC (CONS
13 (CAR X) NOVEC)) (P2-2 (CDR X))))

14 (DE P3-1 (X Y) (COND ((NULL Y) CHIKARA) ((OR (EQUAL X (CAR Y)) (EQUAL (REVERSE X) (CAR Y)))(SETQ CHIKARA
15 'INRYOKU))(T (P3-1 X (CDR Y))))

16 (DE P3-2 (X Y) (COND ((NULL Y) CHIKARA) ((OR (EQUAL X (CAR Y)) (EQUAL (REVERSE X) (CAR Y)))(SETQ CHIKARA
17 'SEKIRYOKU))(T (P3-2 X (CDR Y))))

18 (DE P4-1 (X) (SETQ SAYOU (CADR (ASSOC X KANKEI1)))(COND ((NULL SAYOU) (SETQ SAYOU (MAPCAR 'REVERSE (CADR (ASSOC
19 (REVERSE X) KANKEI1))))))

20 (DE P4-2 (X Y) (COND ((NULL Y) Y)(T (SETQ SAYOU-KANKEI1 (CONS (LIST (LIST (CAR X) (CAR Y)))(LIST (CADR X)
21 (CADR Y))) SAYOU-KANKEI1))(P4-2 X (CDR Y))))

22 (DE P5 (X) (COND ((OR (AND (EQUAL CHIKARA 'INRYOKU) (EQUAL VEC (CAR X)) (OR (EQUAL YA '=) (EQUAL YA '<->))))
23 (AND (EQUAL CHIKARA 'INRYOKU) (EQUAL NOVEC (CAR X)) (OR (EQUAL YA '<=>) (EQUAL YA '<->)))) (SETQ SAYOU-KANKEI2
24 (LIST (LIST (COND ((LISTP VEC) (CAR VEC))(T VEC)) '引かれる) (LIST (COND ((LISTP NOVEC) (CAR NOVEC))(T NOVEC))
25 '引<) ((OR (AND (EQUAL CHIKARA 'SEKIRYOKU) (EQUAL VEC (CAR X)) (OR (EQUAL YA '<=>) (EQUAL YA '<->)))) (AND
26 (EQUAL CHIKARA 'SEKIRYOKU) (EQUAL NOVEC (CAR X)) (OR (EQUAL YA '=) (EQUAL YA '<->)))) (SETQ SAYOU-KANKEI2
27 (LIST (LIST (COND ((LISTP VEC) (CAR VEC))(T VEC)) '押される) (LIST (COND ((LISTP NOVEC) (CAR NOVEC))(T NOVEC))
28 '押す)))(T (SETQ HYOUKA 'WRONG1))))

29 (DE P6-1 (X) (COND ((EQUAL HYOUKA 'WRONG1) HYOUKA) ((NULL X) (SETQ HYOUKA 'WRONG2)) ((OR (EQUAL SAYOU-KANKEI2 (CAR
30 X)) (EQUAL SAYOU-KANKEI2 (REVERSE (CAR X)))(SETQ HYOUKA 'CORRECT))(T (P6-1 (CDR X))))

31 (DE P7 () (COND ((= (LENGTH YA2) 0) '解答する力が示されていません)((= (LENGTH YA2) 1) '解答する力が複数示されて
32 います)(OR (EQUAL NOVEC NIL) (EQUAL VEC NIL)) '物体名を区別して示して下さい)((EQUAL CHIKARA NIL) '物体に働く力が
33 わからず解答できません)((EQUAL HYOUKA 'WRONG1) '物体間に示された磁気的な力は働きません)((EQUAL HYOUKA 'WRONG2)
34 'わかりません)((EQUAL HYOUKA 'CORRECT) (LIST NOVEC 'から VEC 'に働く力)))

35 (SETQ BUTTA1 ()) (SETQ BUTTA11 ()) (SETQ BUTTA12 ()) (SETQ YA ()) (SETQ YA2 ()) (SETQ VEC ()) (SETQ NOVEC ())

```

<p>3 6 (SETQ CHIKARA ()) (SETQ SAYOU-KANKEI1 ()) (SETQ HYOUKA ())</p> <p>3 7 (SETQ INRYOKUGUN '((JISYAKU-N JISYAKU-S) (JISYAKU-N TETSU) (JISYAKU-S TETSU) (JISYAKU TETSU)))</p> <p>3 8 (SETQ SEKIRYOKUGUN '((JISYAKU-N JISYAKU-N) (JISYAKU-S JISYAKU-S)))</p> <p>3 9 (SETQ KANKEI1 '((JISYAKU-N JISYAKU-S) ((引く 引かれる) (引かれる 引く))) ((JISYAKU-N TETSU) ((引く 引かれる) (引かれ  4 0 る 引く))) ((JISYAKU-S TETSU) ((引く 引かれる) (引かれる 引く))) ((JISYAKU TETSU) ((引く 引かれる) (引かれる 引く)))</p> <p>4 1 ((JISYAKU-N JISYAKU-N) ((押す 押される) (押される 押す))) ((JISYAKU-S JISYAKU-S) ((押す 押される) (押される 押す))  4 2 ))</p>
<p>モデル M A G - B (モデルMAG-Aに対し下線部が異なる)</p>
<p>1 0 (DE P2-1 (X) (COND ((NULL X) (SETQ MUKI NIL)) ((EQUAL (CAR X) '=&gt;) (SETQ MUKI 'JUN)) ((EQUAL (CAR X) '&lt;=&gt;) (SETQ MUKI  1 1 'GYAKU)) (T (P2-1 (CDR X))))))</p> <p>1 2 (DE P2-2 (X) (COND ((EQUAL MUKI NIL) MUKI) ((EQUAL MUKI 'JUN) (SETQ VEC (CAR X))) ((EQUAL MUKI 'GYAKU) (SETQ VEC  1 3 (CADR X))) (SETQ NOVEC (CAR (DELETE VEC X))))))</p> <p>2 4 (LIST (LIST (COND ((LISTP VEC) (CAR VEC)) (T VEC)) '引く) (LIST (COND ((LISTP NOVEC) (CAR NOVEC)) (T NOVEC))  2 5 '引かれる))) ((OR (AND (EQUAL CHIKARA 'SEKIRYOKU) (EQUAL NOVEC (CAR X)) (OR (EQUAL YA '&lt;=&gt;) (EQUAL YA '&lt;=&gt;-&gt;))))  2 6 (AND (EQUAL CHIKARA 'SEKIRYOKU) (EQUAL VEC (CAR X)) (OR (EQUAL YA '&lt;=&gt;) (EQUAL YA '&lt;=&gt;-&gt;)))) (SETQ SAYOU-KANKEI2  2 7 (LIST (LIST (COND ((LISTP VEC) (CAR VEC)) (T VEC)) '押す) (LIST (COND ((LISTP NOVEC) (CAR NOVEC)) (T NOVEC))  2 8 '押される))) (T (SETQ HYOUKA 'WRONG1))))))</p>
<p>モデル M A G - C (モデルMAG-Aに対し下線部が異なる)</p>
<p>2 4 (LIST (LIST (COND ((LISTP VEC) (CAR VEC)) (T VEC)) '引く) (LIST (COND ((LISTP NOVEC) (CAR NOVEC)) (T NOVEC))  2 5 '引かれる))) ((OR (AND (EQUAL CHIKARA 'SEKIRYOKU) (EQUAL VEC (CAR X)) (OR (EQUAL YA '&lt;=&gt;) (EQUAL YA '&lt;=&gt;-&gt;))))  2 6 (AND (EQUAL CHIKARA 'SEKIRYOKU) (EQUAL NOVEC (CAR X)) (OR (EQUAL YA '&lt;=&gt;) (EQUAL YA '&lt;=&gt;-&gt;)))) (SETQ SAYOU-KANKEI2  2 7 (LIST (LIST (COND ((LISTP VEC) (CAR VEC)) (T VEC)) '押す) (LIST (COND ((LISTP NOVEC) (CAR NOVEC)) (T NOVEC))  2 8 '押される))) (T (SETQ HYOUKA 'WRONG1))))))</p> <p>3 4 'わかりません) ((EQUAL HYOUKA 'CORRECT) (LIST VEC 'から NOVEC 'に働く力))))))</p>
<p>モデル - A X、- B X、- C X (各モデル-A、-B、-Cに対しさらに下線部が異なる)</p>
<p>2 9 (DE P6-1 (X) (COND ((EQUAL HYOUKA 'WRONG1) HYOUKA) ((NULL X) (P6-2 SAYOU-KANKEI2)) ((OR (EQUAL SAYOU-KANKEI2 (CAR  3 0 以降に次の手続きが加わる  ( (DE P6-2 (X) (SETQ SAYOU-KANKEI2 (LIST (LIST (CADR X) (CADR X)) (LIST (CAAR X) (CADR X)))) (SETQ CC VEC) (SETQ  VEC NOVEC) (SETQ NOVEC CC) (P6-3 SAYOU-KANKEI1)) (DE P6-3 (X) (COND ((NULL X) HYOUKA 'WRONG2) ((OR (EQUAL  SAYOU-KANKEI2 (CAR X)) (EQUAL SAYOU-KANKEI2 (REVERSE (CAR X)))) (SETQ HYOUKA 'CORRECT)) (T (P6-3 (CDR X))))))</p> <p>3 9 (SETQ KANKEI1 '((JISYAKU-N JISYAKU-S) ((引く 引かれる) (引かれる 引く))) ((JISYAKU-N TETSU) ((引く 引かれる)  4 0 )) ((JISYAKU-S TETSU) ((引く 引かれる) )) ((JISYAKU TETSU) ((引く 引かれる) ))</p>

図4.6-2 プロダクションシステムによる「磁石にはたらく力」のモデル



手続き (行)	手 続 き の 内 容
P1 (3~9)	対象を捉え、物体名や矢印についての記憶を行う。その際、物体を区別するためのラベル名を認識して、物体名と区別して記憶する。
P2 (10~13)	P1で記憶した物体名や矢印をもとに、矢印（問題で問われている方）の示された物体名と示されていない物体名について分けて記憶を行う。「MAG-B、MAG-BX」のモデルにおいては、矢印の根元の方の物体名（問1では磁石2、問2では磁石1）と先端の方の物体名（問1では磁石1、問2では磁石2）について分けて記憶を行う。
P3 (14~17)	P1で記憶した2つの物体名をもとに、両物体間にはたらく力が引力か斥力かデータの中から検索し判断を行う。なお、データは、「INRYOKUGUN、SEKIRYOKUGUN」（37~38行）で定義されている。
P4 (18~21)	P1で記憶した2物体名から、物体間にはたらく力の関係についてデータ（「引く-引かれる」、「押す-押される」など）を検索して判断する。「MAG-AX、MAG-BX、MAG-CX」のモデルにおいては、「磁石-鉄」の力の関係が「引く-引かれる」の関係だけで、「引かれる-引く」といった作用反作用の相互作用の関係としてデータが存在していない。なお、データは、「KANKEI」（39~42行）で定義されている。
P5 (22~28)	P3で判断した引力、斥力などの物体間にはたらく力と、物体に示された矢印の向きから、物体にはたらく具体的な力の関係（～が引く、～が引かれる、～が押す、～が押されるなど）を判断する。
P6 (29~30)	P5において矢印の向きから判断した物体にはたらく力の関係と、P4においてデータから判断した力の関係が矛盾していないかどうか評価を行う。「MAG-AX、MAG-BX、MAG-CX」のモデルにおいては、矛盾を生じたときに、データからの判断を優先させ、矢印の向きからの解釈を逆転（例えば「引く-引かれる」関係を「引かれる-引く」関係に逆転）させて判断を行う。
P7 (31~34)	P1~P6において明らかになったことをもとに、総合的な判断を行う。P1において、問われている矢印が示されていない場合や複数示されている場合の評価。P2において、物体名が区別されていない場合の評価。P3において、物体間にはたらく力（引力、斥力）がデータにない場合の評価。P5において、示された矢印の向きと両物体間にはたらく力（引力、斥力）が矛盾する場合の評価。P6において、P4の物体間にはたらく力の関係の判断とP5の力の関係の判断が一致しない場合の評価。以上のことに問題がない場合の物体間にはたらく力についての評価。
その他 (1~2) (35~36) (37~38) (39~42)	手続きP1~P7の全体制御。 作業記憶領域の確保。 引力あるいは斥力の関係にある物体に関するデータ（宣言的知識）。 物体間にはたらく力の関係についてのデータ（宣言的知識）。

図4.6-3 モデルにおける各手続きやデータ（宣言的知識）の意味

が) 引く - (磁石 S が) 引かれる」と「(磁石 N が) 引かれる - (磁石 S が) 引く」の関係が検索されるようになっている。

三つめは、モデルでは、ルール X を用いる場合、P5、P6 の手続きにおいて、矢印の向きからの力の解釈と検索されたデータからの力の解釈を比較するが、この両者が一致しないためデータからの力の解釈を優先することがあげられる。そのため、途中でデータの内容を優先する補正した手続きが必要となるが、学習者が実際にこのような補正した手続きを用いているかどうか不明である。

四つめは、「矢印のある物体の方から力がはたらく」といった誤った解答の場合においても、モデルでは「引く力」や「押す力」といった表現を行っているが、それが適切かどうかということがあげられる。矢印の向きから考えて、学習者は、「向かっていく力、離れていく力」といった考え方をしている可能性が考えられる。

### 3. 調査 7 の方法

#### (1) モデルによる検証の観点

以上のモデルにおいて指摘されたことから、次の点を明らかにする必要があると考えられる。

調査項目①：データを検索し処理していく手続き P3～P6 を省略して、解答を行っている場合があるかどうか。

調査項目②：力を作用反作用の相互作用としてとらえているかどうか。

調査項目③：ルール X (磁石には力が内在しており、力が内在している物体から他の物体に力がはたらく) を用いる場合、既存の知識を優先させるような補正した手続き (手続き P6 を補正) を用いているかどうか。

調査項目④：矢印のある物体の方から力がはたらくと考える場合、「引く力」や「押す力」などと考えているかどうか。

そこで、調査 7 においては、以上のことについて個別に面接することによって明らかにすることを目的とした。

#### (2) 調査問題

調査 7 においては、これまでに行ってきた図 4.6-1 の問題を解答させた後に、次の Q1～Q5 の質問を面接法により行った。

Q1：問 1～問 4 についての解答理由。

Q2：問 1～問 4 の矢印の意味について、図 4.6-4 に示した選択肢の選択。

Q3：問 1～問 4 を解答する際に、引く力、反発する力を考える必要性。



Q4：問1～問4を解答する際に、両物体が引き合ったり、反発し合ったりすることを考える必要性。

Q5：問3、問4について、鉄が力をおよぼすことがあるかどうかの可能性。

Q2以外は口頭で質問し、Q2については図4.6-4に示した選択肢を提示して、適切と考えられるものを選択させた。

調査項目①については、Q1、Q3をもとに問1～問4を解答する際に、引く力や反発する力を考慮する必要があったかどうかから評価を行った。

調査項目②については、Q1、Q4をもとに問1～問4を解答する際に、2物体のお互いが引き合うこと、あるいは、お互いが反発し合うことを考慮する必要があったかどうかから評価を行った。

調査項目③については、特にQ1とQ5をもとに、Q2～Q4も参考にして、ルールX（磁石には力が内在しており、力が内在している物体から他の物体に力がはたらく）を用いる場合、問3、問4の矢印の解釈が他の問題の解釈と異なることについて、特別な理由付けを行っているかどうかから評価を行った。

調査項目④についてはQ2をもとに、選択肢より矢印のある物体の方から力がはたらくと考える場合、「引く力」や「押す力」などと考えているかどうかから評価を行った。

問1の矢印は、

- ① 磁石1が磁石2を引く力                      ② 磁石2が磁石1を引く力
- ③ 磁石2が磁石1に向かっていこうとする力
- ④ 磁石2が磁石1を押す力                      ⑤ その他

問2の矢印は、

- ① 磁石1が磁石2を押す力                      ② 磁石2が磁石1を押す力
- ③ 磁石2が磁石1から離れていこうとする力
- ④ 磁石2が磁石1を引く力                      ⑤ その他

問3の矢印は、

- ① 鉄が磁石を引く力                              ② 磁石が鉄を引く力
- ③ 磁石が鉄に向かっていこうとする力
- ④ 磁石が鉄を押す力                              ⑤ その他

問4の矢印は、

- ① 磁石が鉄を引く力                              ② 鉄が磁石を引く力
- ③ 鉄が磁石に向かっていこうとする力
- ④ 鉄が磁石を押す力                              ⑤ その他

図4.6-4 矢印の示す力の意味についての選択肢問題

### (3) 調査対象および調査時期

調査は、金沢大学教育学部3年生24人(男子:11人、女子:13人)、4年生16人(男子:7人、女子:9人)、計40人を対象に、1990年5月～7月に実施した。

## 4. 調査7の結果および考察

### (1) 調査7の結果

#### A. 全体的傾向

Q1からQ5の各質問に対する調査結果を表4.6-2に示した。Q2については、学生が選択した選択肢の番号を示し、Q3～Q5については、引力、斥力、相互作用について考慮している場合、また、鉄が力をおよぼすと考えている場合を「○」とし、それ以外を「×」とした。Q1の各問題についての解答理由については省略した。

まず、図4.6-1の調査問題の解答結果から、6つのルールのうち5つのルールが認められた。調査対象となった学生で、これらのルールに該当する学生は、40人中37人(93%)と高く、中山・松原が明らかにしたルールを用いて解答を行っていると考えられる。

表4.6-2のQ3より、全問を通して、引く力、反発する力を考慮している生徒は、28人(70%)、ある問題において考慮している生徒は10人(25%)、全問を通して考慮していない生徒は2人(5%)であった。したがって、ほとんどの生徒が、いずれかの問題において、引く力、反発する力を考慮しているといえる。次に、Q4の問1、問2から、磁石同士の場合、相互作用を両問とも考慮する生徒は29人(73%)、どちらか1問において考慮する生徒は6人(15%)、両問とも考慮しない生徒は5人(13%)であった。一方、磁石と鉄の問3、問4において、相互作用を両問とも考慮する生徒は5人(13%)、どちらか1問において考慮する生徒は2人(5%)、両問とも考慮しない生徒は33人(83%)であった。両問とも相互作用について考慮しない人数について、磁石同士と鉄-磁石の間で人数に差があるかどうか、 $\chi^2$ 検定を行った結果、有意差が認められた( $\chi^2=36.54$ ,  $df=1$ ,  $p<0.05$ )。したがって、磁石同士より、鉄-磁石の場合は、相互作用について考慮していない生徒が多いといえる。

#### B. ルールAの学生

全問正答であるルールAの学生の中には、表4.6-2のQ3、Q4の結果から、モデル「MAG-A」で示された力の関係についてのデータを検索し処理していくP3～P6の手続きが省略され、矢印の記号的処理だけで判断している学生がいる(学習者番号15～17、計3人)。これらの学生は、「矢印の方に力がはたらく」、「N極から力がはたらく」と考えるもので、引く力や反発する力が物体間にはたらくことを



表4.6-2 質問に対する反応結果

ルール	学習者番号	Q 2 選択肢問 題の反応				Q 3 引力、斥 力の考慮				Q 4 相互作用 の考慮				Q 5 鉄が力 をおよ ぼす
		問 1	問 2	問 3	問 4	問 1	問 2	問 3	問 4	問 1	問 2	問 3	問 4	
A (43%)	1	1	1	1	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	2	1	1	1	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3	1	1	1	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	4	1	2	1	1	○	○	○	○	×	○	○	○	○
	5	1	1	1	1	○	×	○	×	○	×	×	×	○
	6	1	1	1	1	○	○	○	○	○	×	×	×	○
	7	1	1	1	1	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	8	1	1	1	1	○	○	○	○	○	○	○	×	×
	9	1	1	3	1	○	○	×	○	○	○	×	×	×
	10	3	3	2	1	○	○	○	○	○	○	×	×	×
	11	3	3	3	3	○	○	○	○	○	○	×	×	×
	12	1	3	3	1	○	○	○	○	○	○	×	×	×
	13	1	3	2	1	○	○	○	○	○	○	×	×	×
	14	3	3	3	3	○	○	○	○	○	○	○	×	×
	15	1	1	1	1	○	×	×	×	×	×	×	×	○
	16	1	1	1	1	×	×	×	×	×	×	×	×	○
	17	5	5	5	5	×	×	×	×	×	×	×	×	×
A X (23%)	18	1	1	2	1	○	○	○	○	×	○	×	×	×
	19	1	1	2	1	○	○	○	○	×	○	×	×	×
	20	1	1	2	1	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	21	1	1	2	1	○	○	○	○	×	○	×	×	×
	22	1	1	2	1	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	23	1	1	3	1	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	24	1	1	3	1	×	×	○	○	×	×	×	×	×
	25	1	1	3	1	○	○	×	×	○	×	×	×	×
	26	1	1	5	1	○	○	×	○	○	×	×	×	×
B (10%)	27	3	1	2	1	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	28	3	5	2	3	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	29	5	3	2	5	○	○	○	×	○	×	×	×	×
	30	3	3	2	3	×	×	○	×	×	×	×	×	×
B X (13%)	31	2	1	2	1	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	32	2	1	2	1	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	33	2	1	2	1	×	○	○	○	○	×	×	×	×
	34	2	3	2	1	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	35	3	1	3	1	○	○	○	○	○	×	×	×	×
C (5%)	36	3	3	2	3	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	37	3	3	3	3	○	○	○	○	×	○	×	×	○
その他 (8%)	38	1	1	2	3	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	39	2	1	1	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	40	2	1	2	1	○	○	○	×	○	×	×	×	×
記号の意味		数字は選 択肢番 号				「○」は考慮、「×」は考慮 しない								

ほとんど考慮していない学生である。

また、Q2の問1、問2の結果より、力を示した矢印の意味については、「向かっていく力」や「離れていく力」と考える学生がいる（学習者番号4, 9～14, 計7人）。これは、「～から～にはたらく力」といった図4.6-1の自由記述の答えと一致しないが、物体に力が内在して矢印の方向に動くといった考え方が学生にあり、選択肢で示されるとそのような内容を選択してしまうことが考えられる。

また、Q4の結果より、引き合うとか、反発し合うといった作用反作用の相互作用について考慮せず解答を行っている学生がいる（学習者番号4～14、計11人）。つまり、手続きP4において検索される2物体間にはたらく力の関係についてのデータが、作用反作用の相互作用でないことが考えられる。また、問3、問4では、答えを記述させた場合は、「鉄から磁石にはたらく力」と正答しているにもかかわらず、口頭で「鉄が力をおよぼすことがあるか」と質問（Q5）した場合は、「ない」と答える学生（学習者番号6～14、17、計10人）が多い。この矛盾について指摘すると、「わからない」、「磁石が引いている」といった説明を行っている。

これは、物体間にはたらく力に関する既存の知識（手続きP4で処理）より、矢印の方向からの解釈（手続きP5で処理）を優先していることが考えられる。そこで、「MAG-A」の手続きP7（総合評価）において、既存の知識より、矢印の方向からの解釈を優先するように、手続きが次のように変更した学生がいると考えられる。

・変更前：33～34行 ((EQUAL HYOUKA 'WRONG2) 'わかりません)((EQUAL HYOUKA 'CORRECT)

・変更後：(OR(EQUAL HYOUKA 'WRONG2)(EQUAL HYOUKA 'CORRECT))

以上のように、全問正答する学生において、モデル「MAG-A」で示される学生（学習者番号1～3、計3人）に加え、①モデル「MAG-A」で示される手続きが省略されている学生（学習者番号15～17、計3人）、②作用反作用の相互作用を考慮せず解答を行っている学生（学習者番号4～14、計11人）、③②の中で磁石と鉄においては、矢印の方向からの解釈を優先する手続きを使用する学生（学習者番号6～14、計9人）がいることがわかり、「MAG-A」の手続きを变形した3つの解答手続きがあることが考えられる。学生は、以上のようにモデル「MAG-A」で示された手続きを省略したり、变形したりする学生の方が多く、答えは正しくても様々な解答手続きを用いていることが考えられる。

### C. ルールBの学生

ルールBの学生は、Q2の問1、問2の結果から、力を「向かっていこうとする力」、「離れていこうとする力」と解釈している。また、問3では、「磁石が鉄



を引く力」と考えている。このような解釈は、物体に力が内在して矢印の方向に動くといった考え方に基づくものと思われる。また、力の関係についてのデータを検索し処理していく手続きP3～P6が省略され、矢印の記号的処理だけで判断していると考えられる学生（学習者番号30）がいる。

#### D. ルールCの学生

ルールCの学生は、Q2の問1、問2の結果から、力を「向かっていこうとする力」、「離れていこうとする力」と解釈している。矢印が出ている方から力がはたらく、あるいは矢印のある方が力をもっていると解釈して解答を行っている。

#### E. ルールA X、B Xの学生

ルールA Xの学生は、Q4の結果から、問3、問4においては相互作用を考えず、磁石だけが力をもつといった解釈を行っている。Q2の選択肢問題の問1、問2、問4においては正しい選択肢を選択しているが、問3では力を示した矢印の意味を、「磁石が鉄を引く力」や「磁石が向かっていく力」と解釈している。前述したように問3では、ルールXの適用によって他の問題で用いた手続きを補正（手続きP6を補正）して用いる必要があるが、特にQ1やQ5の質問に対する結果から、この手続きの変更に対して疑問を感じる学生はなく、「磁石が力をもつ」といった知識を優先して解答を行っている。

次に、ルールB Xの学生は、Q2の選択肢の結果より、「引く力」、「押す力」と解釈する学生が比較的多い。問4では、ルールXの適用によって他の問題で用いた手続きを補正（手続きP6を補正）して用いる必要があるが、特にQ1やQ5の質問に対する結果から、この手続きの変更に対して疑問を感じる学生はなく、選択肢においても全員が「磁石が鉄を引く力」としており、「磁石が力をもつ」といった知識を優先して解答を行っている。

以上のようにルールXを用いる場合、問3あるいは問4において、手続きを変更することについては疑問を感じることなく、既存の知識を優先して判断している。したがって、モデルで考えたP6の手続きにおいて補正した手続きを用いているというより、P5とP6の手続き（矢印の意味の解釈と検索されたデータの解釈の比較検討を行う手続き）を省略し、手続きP4によって検索した物体間にはたらく力に関するデータから、直接解答していると思われる。つまり、P5、P6の手続きを省略し、P1～P4、P7の手続きで判断していることが考えられる。このことについて、P5、P6を省略してモデルでシミュレーションを行った結果、シミュレーションは可能であることがわかった。

#### F. その他の学生

ルールの不明な学生（学習者番号38～40）は、ルールAとルールCを混同して用いたり、問題によっては磁力線を考慮したりするなど、各問題において考え方

の違う手続きを用いている。

## (2) モデルからの考察

以上の結果から、実際の学生の解答手続きは、プロダクションシステムのモデルで示された手続きが省略されたり、変形されたりしている場合があることが明らかになった。また、各ルールの学生に共通して、力を作用反作用の相互作用としてとらえていない場合が多いとともに、「引く力、押す力」というより、「向かっていく力、離れていく力」と考える場合があり、学生には力の内在といった考え方が強くあるものと思われる。したがって、各モデルで示した物体間にはたらく力に関するデータ（図4.6-2の39～42行で表現）は典型的なものであり、実際の学生の物体間にはたらく力の関係についての知識は、構造上は他の知識と複雑な関係を形成しているものと思われ、今後さらに詳しく調べていく必要があるといえる。

以上のように、先行研究を含めプロダクションシステムによる知識モデルは、知識の欠損部分などを明らかにするのに有効であり、意味解釈や記号的解釈など、知識の内容を明らかにするのに有効なモデルであると考えられる。



## 第5章 総括と結論

### 第1節 調査のまとめ

本研究の目的であるニューラルネットワークによる知識モデルの構築については、次のようなことを行った。まず、ニューラルネットワークのモデルは、入力層、中間層、出力層の3層構造をすべてのモデルの基本構造とした。

岩石の分類に関する教材では、具体的に提示した安山岩、玄武岩、花こう岩、はんれい岩、閃緑岩、流紋岩の6つの火成岩を入力層の6つの細胞に対応させ、調査から明らかになった分類の観点である岩石全体の形、色、表面の様子、硬さ、造岩鉱物の有無、色、大きさ、光沢、形、量の10の観点を出力層の10の細胞に対応させ、モデルを構築した。その際、中間層の細胞については、各調査対象者の指摘を処理する数から4つとした。

ふりこの周期に関する教材では、入力層の細胞はふりこのおもりの重さ、糸の長さ、ふれ幅の3つの条件に合わせて3つ、中間層の細胞は解答に必要な処理数から7つ、出力層の細胞はどちらの周期が長いかに合わせて1つとして、モデルを構築した。

てんびんの教材では、入力層の細胞は、てんびんの左右のおもりの重さとうでの長さの条件に合わせて4つ、中間層の細胞は全問正答の場合、「左のうでの長さ・左のおもりの重さ」と「右のうでの長さ・右のおもりの重さ」との関係が、拮抗関係として特徴検出パターンにあらわれることから、それと比較するために2つ、出力層の細胞はどちらに傾くかに合わせて1つとして、モデルを構築した。

相対運動の教材では、入力層の細胞は、人A、人Bとそれぞれの乗り物の条件に合わせて4つ、中間層の細胞は全問正答の場合、「人A・その乗り物」と「人B・その乗り物」との関係が、拮抗関係として特徴検出パターンにあらわれることから、それと比較するために2つ、出力層の細胞は、人Aと人Bから見たそれぞれの相手の動きに合わせて2つとして、モデルを構築した。

以上のように、モデルの構築においては、課題で示された自然事象の要因や条件を入力層に、生徒の解答などの反応を出力層に対応させることによって、自然認識を解明できる知識モデルを作成した。また、中間層の細胞数は、解答に必要な処理数に対応させるが、特徴検出パターンを全問正答のような典型的なものと比較する場合には、その数を典型的なパターンに合わせて定めることも考えられた。

次に、ニューラルネットワークの知識モデルによる全体的処理の分析法につい



ては、次のようなことを考案した。

岩石の分類に関する教材では、10の分類の観点のうちどの観点をよく用いるかについて、中間層の4つの細胞から分類の観点に対応した出力層の各細胞への荷重の標準偏差を求め、標準偏差が大きい場合は、その観点がよく用いられると考えた。また、どの複数の観点を同時によく用いるかについて、中間層の各細胞から出力層の各細胞への荷重間の距離（ユークリッド距離）を求め、数量化理論第IV類による分析を行い、類似性が高いほど同時に用いられやすい観点であると考えた。

ふりこの周期に関する教材では、おもりの重さ、糸の長さ、ふれ幅の3つのふりこの条件のうち、どの条件を考慮するかについて、条件に対応した入力層の3つの細胞から中間層の各細胞への荷重の標準偏差を求め、標準偏差が大きい場合は、その条件をよく考慮していると考えた。また、各条件をどのようなパターンでとらえているかについて、中間層の特徴検出パターンを分析することを考えた。学習における全体的処理の変容についても、各条件をどのようなパターンでとらえているかについて、中間層の特徴検出パターンを分析することを考えた。

てんびんの教材では、左右のおもりの重さとうでの長さの関係をどうとらえているか、中間層の特徴検出パターンを分析した。特に、全問正答の場合、「左のうでの長さ・左のおもりの重さ」と「右のうでの長さ・右のおもりの重さ」との関係が、拮抗関係として特徴検出パターンにあらわれることから、その特徴検出パターンと比較することを考えた。

相対運動の教材では、人Aと人Aの乗り物（乗り物A）と人Bと人Bの乗り物（乗り物B）の関係をどうとらえているか、中間層の特徴検出パターンを分析した。特に、全問正答の場合、「人A・乗り物A」と「人B・乗り物B」の間が、拮抗関係として特徴検出パターンにあらわれるため、その特徴検出パターンと比較することを考えた。

以上のように、モデルの分析においては、対象となる自然事象やそのとらえ方に応じて、中間層の特徴検出パターン、荷重の標準偏差、数量化理論第IV類による類似度などを分析し、全体的処理の分析法を考案した。

次に、本研究の分析で明らかになった全体的処理の特徴については、次のようにまとめることができる。

岩石の分類の教材では、中学校第3学年20人、大学生20人、火成岩を専門にしている大学の教官1人を対象に行った。具体的に提示した安山岩、玄武岩、花こう岩、はんれい岩、閃緑岩、流紋岩の6つの火成岩について、視覚的な特徴から共通点と差異点を指摘させる面接法を用いた。中学生については、岩石の学習の前後に同じ調査を行った。専門家は、もっとも科学的な分類の方法を用いており、



教科書と同じ方法で分類を行っていた。したがって、今回の調査は一人だけであるが、一般的に専門家は共通して同じ観点をを用いて分類を行うと考えられた。調査結果から、分類の観点を岩石全体の形、色、表面の様子、硬さ、造岩鉱物の有無、色、大きさ、光沢、形、量の10に区分することができた。

ニューラルネットワークのモデルによる分析の結果、分類の観点の用い方をP1からP4の4つに分類することができた。学習前の中学生においては、岩石全体の観点をを用い、しかも各観点を同時でなくそれぞれ独立させて用いる（P1）生徒が有意に多かった。大学生は、岩石全体の複数の観点を同時（P2）に、あるいは造岩鉱物の複数の観点を同時（P3）に用いており、岩石全体の観点と造岩鉱物の観点を同時に用いる学生は有意に少なかった。学習後の中学生は大学生と類似し、両者に有意差は認められなかった。専門家は、岩石全体の観点と造岩鉱物の観点を同時に用いており（P4）、学習後の中学生や大学生とは異なっていた。

以上のことから、学習前の中学生においては、各観点を独立させて用いており、複数の観点を同時に用いる全体的処理は十分に行われていないことが明らかになった。学習後は、岩石全体、あるいは造岩鉱物の複数の観点を同時に用い、大学生と同じような全体的処理が行われるようになるが、岩石全体と造岩鉱物の観点を同時に用いる専門家の全体的処理とは異なることが明らかになった。

ふりこの周期に関する教材では、まず、中学校第1学年17人を対象に面接法により行った。ニューラルネットワークのモデルによる分析の結果、ふりこのおもりの重さ、糸の長さ、ふれ幅の3つの条件を同時にとらえる全体的処理を行っているが、その全体的処理が問いによって変わる生徒が有意に多かった。次に、中学校第2学年34人を対象に、①おもりの重さ、②糸の長さ、③ふれ幅の3つの実験を行い、一つの実験が終了するごとに同じ質問紙に解答させる調査を行った。ニューラルネットワークのモデルによる分析の結果、3つの条件に対する全体的処理の変容パターンを6つに分類することができた。全体的処理の変容は、各実験結果に対応して逐次変容するというより、すべての実験結果が明らかになると大きく変容し、全問正答になる生徒が飛躍的に増えることが明らかになり、全体的にある程度まとまった情報によって科学的な自然認識に変容すると考えられた。

以上のことから、ふりこの教材では、同じ生徒においても、問いによって条件のとらえ方が変わる全体的処理を行っている生徒が多いこと、ふりこの学習における全体的処理の変容については、各実験結果に対応して逐次変容するというより、全体的にある程度まとまった情報によって変容し、科学的な知識になることが明らかになった。

てんびん教材では、中学校第1学年75人を対象にSieglerの研究に基づいた質問紙調査を行った。Sieglerの分析法を用いた結果、単線型の論理的な手続きで解答



している生徒は有意に多く73%で、問いによっては正答を含むが単線型の処理をしていない生徒は27%であった。ニューラルネットワークのモデルによる分析では、てんびんの左右のおもりの重さとうでの長さの4つの条件に対する各生徒の特徴検出パターンを、全問正答の特徴検出パターンと比較分析した。その結果、大きく4つのパターンに分類することができた。そして、単線型の処理をしていない27%の生徒でも、4つの条件に対するとらえ方の比較的正しい全体的処理の特徴検出パターンをもつ生徒が、約半数いることが明らかになった。

相対運動の教材では、中学校第1学年から第3学年の119人を対象に質問紙調査を行った。生徒の解答結果から、全問正答は26%の生徒であり、単線型の処理を行っている生徒は有意に少なかった。ニューラルネットワークのモデルによる分析では、人Aと人Bとそれぞれの乗り物の動く速度（方向と速さ）の4つの条件に対する各生徒の特徴検出パターンを、全問正答の特徴検出パターンと比較分析した。その結果、4つのパターンに分類することができた。そして、全問正答でない74%の生徒においても、4つの条件に対するとらえ方の比較的正しい全体的処理の特徴検出パターンをもつ生徒が、約3割いることが明らかになった。

以上のことから、てんびんや相対運動のように単線型の処理が必要となる教材では、単線型の処理ができない生徒の中には、全体的処理において、条件に対して比較的正しいとらえ方をしている生徒がいることが明らかになった。

## 第2節 先行研究との比較考察

以上のような結果をもとに、本研究を自然認識に関する先行研究と比較考察すると次のことが指摘できる。

生徒の自然認識に関する先行研究においては、すでに第1章で述べたが、ローソン（Lawson, A. E.）に代表されるように、ピアジェの論理的思考の発達段階の研究を発展させ、科学的概念の形成には論理的思考力が大きく関わっていることが明らかにされている。そして、論理的手続きを含む解答手続きは、ラルキン（Larkin, J. H.）の研究に代表されるように、熟達者は、既知の変量から前向きに未知の変量を求めていくとともに、全体的な解答手続きをもっているが、素人は、未知の解答から既知の変量へと後向きに解答するとともに、一つひとつの手続きを行っているといった違いが明らかにされている。

また、知識の階層構造については、チ（Chi, M. T. H.）に代表されるように、素人の知識構造は、科学的な原理に関する宣言的な知識はもっているが、それを具体的に展開する手続き的知識がないこと、一方、熟達者の知識構造は、素人に比



べ科学的な原理や法則に基づく解答手続きを頂点とした構造をもっており、それに基づく解答手続きをもっていることが明らかにされている。

以上のような自然認識の研究に基づく理科学習観では、問題解決においてより正答を導く論理的手続きや専門家に近い知識構造を形成するように、学習において記号や数式で表現できる逐次的な論理手続きが強調されるとともに、階層構造の上位にくる知識をきまりや法則として学習することが強調されている。そして、これらの知識観に基づく学習は、生徒のオルタナティブフレームワークの解明やそれに基づく学習方法、教材開発といったような研究を発展させ、理科の学習において一定の成果をもたらしたといえる。

これに対し、本研究では、自然認識においては全体的処理も重要であるという立場から、生徒の知識を並列型の全体的処理の観点から分析した。これまで、この観点からの分析がほとんどなかったのは、全体的処理は、言語的には表現しにくいいため、非科学的な判断のようにとらえられがちであったことがあげられる。本研究ではニューラルネットワークによる知識モデルから、その問題を克服し、全体的処理の特徴を明らかにした。

先行研究に対し、本研究のニューラルネットワークによる分析結果からは、次のことが指摘できる。岩石の分類などの自然事象の分類は、論理的処理では表現が複雑になる場合があり、生徒がどのような分類の観点をを用いるかを明らかにできる程度である。本研究では、複数の分類の観点を同時にどう用いているかといった、分類の観点の全体的な活用をとらえ、生徒の自然認識の実態を今までとは違った視点から分析し、明らかにした。このことから、それぞれの生徒の分類の観点にもとづく新しい学習方法を導くことができると思われる。たとえば、各観点を独立して用いるような生徒の場合には、各観点間の関係をとらえていけるようにし、それを同時に用いていくような指導を考えることができる。また、複数の観点を同時に用いている場合は、より科学的な分類に近づくように、分類に科学的な意味付けを行っていくことが考えられる。

次に、てんびんの教材では、全体的処理は逐次的な論理ステップによって変容するだけでなく、まとまった複数の全体的な情報によって変容することが明らかになった。一般的に、論理ステップに基づく理科の学習では、ある自然現象の要因がいくつか考えられる場合、各要因が原因になっているかどうか、一つ一つ実験を行い、そのつど結果を考察して進むことになる。しかし、本研究における結果からは、そのつど考察し結論を出すのではなく、各実験を総合した段階で考察していくことも、学習の方法として考えられることを示唆していると思われる。

てんびんや相対運動の教材では、その自然事象を科学的に説明するためには、きまりや法則をあらわした数式の理解といったことが必要になる。したがって、



それに基づく評価は、その数式を理解し適用できるかということが対象になる。一方、本研究の全体的処理の分析からは、論理的処理の分析では誤答としか評価できない生徒の解答の中には、科学的とらえ方に近いものが存在することを発見した。これは、条件の関係などは科学的に近いとらえ方をしているが、数式などの理解はできていない生徒がいることを示している。これらの生徒は、その自然事象を科学的なとらえ方でまったくとらえることができない生徒とは区別することができる。このことから、それぞれの生徒の条件のとらえ方に即して、新しい学習方法を導くことができると思われる。たとえば、正答ではないが全体的処理においては科学的なとらえ方ができている場合は、数式の適用を理解させていくような指導が考えられる。また、全体的処理においても科学的に正しいとらえ方ができない場合は、注目すべき条件や条件間関係といったことから指導していくことが考えられる。

以上のように、生徒の自然認識を全体的処理の観点から分析することによって、従来の論理的処理の観点だけではとらえられない生徒の自然認識をとらえることができ、それに応じた学習といったことを新たに考えていくことができるといえる。

以上のことから、先行研究に対し本研究の特徴は、自然認識を単線型の論理を一つ一つ積み上げていく観点からではなく、認識に必要な全情報から全体的総合的に判断していく観点から知識モデルを構築したこと、そのモデルから生徒の全体的処理を分析する方法を考案したこと、そして、そのモデルから生徒の全体的処理の特徴を明らかにしたことがあげられ、さらに、理科学習に対して、全体的処理といった新たな研究の観点を先導したことがあげられる。

### 第3節 本研究の限界と今後の研究課題

本研究の限界と今後の研究課題については、次のことが指摘できる。まず、本研究の分析法は、知識モデルによる分析という特徴から、生徒の知識を完全に表現したものではなく、類推したものである。そのため、論理的なモデルでも同様であるが、ニューラルネットワークによって人間のようにふるまうモデルが作られても、それが人間の行っている処理と完全に等価であるかどうかという問題が残り、本研究の分析の限界がある。このことについては、第3章第3節で安西の指摘を引用したように、「知識モデルによる分析は、『具体的な』モデルを積み重ねていくこと、それが、知識モデルの分析法のこれからのひとつの方向だと考えられる。重要なのは、特定の認識現象について特定のモデルを構成し、その結



果を蓄積していくこと」が必要であると考えられる。つまり、さらに多くの自然事象を対象にモデルを構築し、その分析結果を蓄積していくことが、本研究において重要になり、今後の研究課題となる。このことに対し、本分析法は、いろいろな自然認識に応用が可能であり、本研究による分析結果は、その他の自然認識を対象に検証を深めていくことができる。また、本研究においては、全体的処理の側面から学習変容についても分析を行ったが、実際の授業においては、いろいろな学習方法が複合して用いられるため、この学習の変容については、今後、いろいろな学習方法を対象に分析を深めていく必要があると思われる。

次に、本研究の分析は、自然認識を全体的処理の側面から明らかにしたものである。自然認識には、論理的処理の側面もあるため、本研究の分析結果だけをもとに自然認識や理科の学習を論じることはできない。それよりも、全体的処理と論理的処理の両処理が育成できるように考えていくことが必要になる。そこで、今後は、論理的処理と全体的処理のお互いの影響といった相互作用について分析することが、自然認識を育成する学習を考えるうえで重要になるとと思われる。

さらに、本研究の分析法の発展としては、次のことが指摘できる。ニューラルネットワークは、本研究で用いたモデル以外にも、その変形したものや違った構造のものがある。これらは、解明したい自然認識の側面に応じて用いればよいが、本研究で用いたモデルは基本的なものであり、本研究の方法はこの異なる構造のモデルにも応用して考えていくことができる。また、本分析では、ある自然事象の条件を一つの入力層の細胞に対応させたが、たとえば、自然対象を視覚的にドットに分割した表現にし、それを入力層の入力データにして、対象のどこに注目しているのかをより具体的に明らかにしていくことが考えられる。

## 参考文献

### 第1章

- (1) Hempel, G. C. 1976 自然科学の哲学, 培風館, pp. 1-3
- (2) Hanson, N. R., 村上陽一郎訳 1971 科学理論はいかにして生まれるか, 講談社
- (3) Kuhn, T. S., 中山茂訳 1971 科学革命の構造, みすず書房
- (4) Feyerabend, R. K., 村上陽一郎・渡辺博訳 1981 方法への挑戦, 新曜社
- (5) 村上陽一郎 1971 西欧近代科学, 新曜社, pp. 232-270
- (6) 村上陽一郎 1980 科学のダイナミックスー理論の新しいモデル, サイエンス社, pp. 169-180
- (7) Glynn, S. M., Yeany, R. H. & Britton, B. K., 武村重和監訳 1993 理科の学習心理学, 東洋館
- (8) Berger, C. F. 1979 What are the implications of paradigm-based research for science education research?, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 16, No. 6, 517-521
- (9) Peterson, R. W. 1979 The impact of paradigm-based research on classroom practice, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 16, No. 6, 523-533
- (10) 学校理科学研究会 1982 世界の理科教育, みずうみ書房, pp. 38-49
- (11) Denis, M., 寺内礼監訳 1989 イメージの心理学, 勁草書房
- (12) Neisser, U., 古崎敬・村瀬旻訳 1978 認知の構図, サイエンス社
- (13) Thelen, J. N. 1979 Just because kids can't read dosen't mean they can't learn! or every science and mathematics teacher is not a teacher of reading, *School Science and Mathematics*, 457-464
- (14) Duit, R. 1991 A students' conceptual frameworks: consequences for learning science, In Glynn, S. M., Yeany, R. H. & Britton, B. K. (Eds.), *The Psychology of Learning Science*, Lawrence Erlbaum Associates, 65-85
- (15) Piaget, J., Szeminska, B., 遠山啓・銀林浩・滝沢武久訳 1962 数の発達心理学, 国土社
- (16) Piaget, J., Inhelder, B., 滝沢武久・銀林浩訳 1965 量の発達心理学, 国土社
- (17) Piaget, J. 1972 Intellectual evolution from adolescence to



- adulthood, *Human Development*, Vol. 15, 1-12
- (18) Bruner, J. S., 鈴木祥蔵・佐藤三郎訳 1963 教育の過程, 岩波書店
- (19) Bruner, J. S., 岡本夏木他訳 1969 認識能力の成長上下, 明治図書
- (20) Ausubel, D. P., Novak, J. D. & Hanesian, H. 1978 *Educational Psychology, A cognitive view, 2nd ed.*, Holt Rinehart and Winston
- (21) Novak, J. D., Ring, D. G. & Tamir, P. 1971 Interpretation of research findings in terms of Ausubel's theory and implication for science education, *Science Education*, Vol. 55, No. 4, 483-526
- (22) Novak, J. D. 1979 The reception learning paradigm, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 16, No. 6, 481-488
- (23) Weisberg, J. S. 1970 The use of visual advance organizers for learning earth science concept, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 7, 161-165.
- (24) Moreira, M. A. & Santos, C. A. 1981 The influence of content organization on student's cognitive structure in thermodynamics, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 18, No. 6, 525-531.
- (25) Labudde, P., Reif, F. & Quinn, L. 1988 Facilitation of scientific concept learning by interpretation procedures and diagnosis, *International Journal of Science Education*, Vol. 10, No. 1, 81-98
- (26) Clement, J. 1982 A conceptual model discussed by Galileo and used intuitively by physics students, In Gentner, D. & Stevens, A. L. (Eds.), *Mental Models*, Lawrence Erlbaum Associates, 325-340
- (27) Clement, J. 1982 Students' preconceptions in introductory mechanics, *American Journal of Physics*, Vol. 50, No. 1, 66-71
- (28) McCloskey, M. 1982 Naive Theories of Motion, In Gentner, D. & Stevens, A. L. (Eds.), *Mental Models*, Lawrence Erlbaum Associates, 325-340
- (29) Halloun, I. A. & Hestenes, D. 1985 The initial knowledge state of college physics students, *American Journal of Physics*, Vol. 53, No. 11, 1043-1055
- (30) Halloun, I. A. & Hestenes, D. 1985 Common sense concepts about motion, *American Journal of Physics*, Vol. 53, No. 11, 1056-1065
- (31) Chohen, R., Eylon, B. & Ganiel, U. 1983 Potential difference and current in simple electric circuits: A study of student's conceots, *American Journal of Physics*, Vol. 51, No. 5, 407-412
- (32) Gentner, D. & Gentner, D. R. 1982 Flowing waters or teeming crowds:

- Mental models of electricity, In Gentner, D. & Stevens, A. L. (Eds.), *Mental Models*, Lawrence Erlbaum Associates, 99-129
- (33) Osborne, R. & Freyberg, P., 森本信也他訳 1988 子ども達はいかに科学理論を構成するかー理科の学習論ー, 東洋館
- (34) Driver, R. 編, 貫井正納他訳 1993 子ども達の自然理解と理科授業, 東洋館
- (35) White, R. T., 堀哲夫・森本信也他訳 1990 子ども達は理科をいかに学習し教師はいかに教えるか, 東洋館
- (36) Andersson, B. 1986 The experiential gestalt of causation: A common core to pupils preceptions in science, *European Journal of Science Education*, Vol. 8, No. 2, 155-171
- (37) Andersson, B. & Karrqvist, C. 1983 How swedish pupils, aged 12-15 years, understand light and its properties, *European Journal of Science Education*, Vol. 5, No. 4, 387-402
- (38) Gil-Perez, D. & Carrascosa, J. 1990 What to do about science "misconceptions", *Science Education*, Vol. 74, No. 5, 531-540
- (39) Dreyfus, A., Jungwirth, E. & Elovitch, R. 1990 Applying the "cognitive conflict" strategy for conceptual change-some implications, difficulties, and problems, *Science Education*, Vol. 74, No. 5, 555-569
- (40) (32)と同書
- (41) 村山功 1989 自然科学の理解, 鈴木宏昭他, 教科理解の認知心理学, 新曜社, pp. 99-151
- (42) Dreistadt, R. 1969 The use of analogies and incubation in obtaining insights in creative problem solving, *The Journal of Psychology*, Vol. 71, 159-175.
- (43) Rivers, R. H. & Vockell, E. 1987 Computer simulations to stimulate scientific problem solving, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 24, No. 5, 403-415
- (44) White, B. Y. 1984 Designing computer games to help physics students understand Newton's Laws of motion, *Cognition and Instruction*, Vol. 1, No. 1, 69-108
- (45) Disessa, A. A. 1987 The third revolution in computers and education, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 24, No. 4, 343-367
- (46) Simmons, P. E. 1991 Learning science in software microworlds, In Glynn, S. M., Yeany, R. H. & Britton, B. K. (Eds.), *The Psychology of Learning*



- Science, Lawrence Erlbaum Associates, 241-257
- (47) Eylon, B. & Reif, F. 1984 Effects of knowledge organization on task performance, *Cognition and Instruction*, Vol. 1, No. 1, 5-44
- (48) (18)と同書
- (49) Novak, J. D. 1980 Learning theory applied to the biology classroom, *The American Biology Teacher*, Vol. 42, No. 5, 281-285
- (50) Stewart, J., Kirk, J. V. & Rowell, R. 1979 Concept maps: A tool for use in biology teaching, *The American Biology Teacher*, Vol. 41, No. 3, 171-175
- (51) Ward, S. A. & Reed, L. J. 1983 *Knowledge Structure and Use: Implications for Synthesis and Interpretation*, Temple University Press
- (52) Astington, J. W., Harris, P. L. & Olson, D. R. 1988 *Developing Theories of Mind*, Cambridge University Press
- (53) 安西祐一郎 1986 知識と表象, 産業図書, pp. 162-165
- (54) Lawson, A. E. & Renner, J. W. 1975 Relationships of science subject matter and developmental levels of learners, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 12, No. 4, 347-358
- (55) Lawson, A. E. & Karplus, R. 1977 Should theoretical concepts be taught before formal operations?, *Science Education*, Vol. 61, No. 1, 123-125
- (56) Hudson, H. T. & Rottmann, R. M. 1981 Correlation between performance in physics and prior mathematics knowledge, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 18, No. 4, 291-294.
- (57) Saunders, W. L. & Jesunathadas, J. 1988 The effect of task content upon proportional reasoning, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 25, No. 1, 59-67
- (58) Staver, J. R. & Harty, H. 1979 Validation of an instrument and testing protocol for measuring the combinatorial analysis schema, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 16, No. 1, 53-59
- (59) Wollman, W. T. & Lawson, A. E. 1978 The influence of instruction on proportional reasoning in seventh graders, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 15, No. 3, 227-232
- (60) 大場景利 1969 科学的思考の養成に関する研究(第4報) — 児童の知能指数と科学的思考力構成要素の発達段階との関係について, 日本理科教育学会研究紀要, No. 10, 15-21

- (61) 大場景利 1970 科学的思考の養成に関する研究(第6報), 日本理科教育学会研究紀要, No. 11, 20-28
- (62) 山名修吉・隅水皇一郎 1970 小学生における物質保存, 質量保存、体積ならびに体積保存の概念の成立程度について, 日本理科教育学会研究紀要, No. 11, 15-21
- (63) 荻生田忠昭 1988 児童生徒における『重さ』と『体積』の分離について(続報), 日本理科教育学会研究紀要, Vol. 29, No. 1, 1-8
- (64) 森本信也 1979 児童・生徒の分類能力に関する考察—特に物質分類能力に関して—, 日本理科教育学会研究紀要, Vol. 20, No. 1, 43-50
- (65) 佐伯胖 1978 イメージ化による知識と学習, 東洋館, pp. 187-193
- (66) Lawson, A. E. 1985 A review of research on formal reasoning and science teaching, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 22, No. 7, 569-617
- (67) (53)と同書, pp. 104-111
- (68) 森一夫 1986 自然認識の発達と形成に関する教科教育学的研究, 風間書房, pp. 97-108
- (69) Lawson, A. E. & Bealer, J. M. 1984 The acquisition of basic quantitative reasoning skills during adolescence: Learning or development?, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 21, No. 4, 417-423
- (70) Linn, M. C., Clement, C., Pulos, S. & Sullivan, P. 1989 Scientific reasoning during adolescence: The influence of instruction in science knowledge and reasoning strategies, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 26, No. 2, 171-187
- (71) Chi, M. T. H. 1981 Knowledge development and memory performance, In Friedman, M. P., Das, J. P. & O'Connor, N. (Eds.), *Intelligence and Learning*, Plenum Press, 221-229
- (72) 佐伯胖 1982 学力と思考, 第一法規, pp. 76-81
- (73) Rumelhart, D. E. 1981 類推過程と手続き的知識表現(上), サイコロジー, pp. 65-69
- (74) Rumelhart, D. E. 1981 類推過程と手続き的知識表現(下), サイコロジー, pp. 58-63
- (75) Reif, F. 1987 Instructional design, cognition, and technology: Applications to the teaching of scientific concepts, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 24, No. 4, 309-324



- (76) (72)と同書, pp. 23-38
- (77) Reif, F. 1987 Interpretation of Scientific or mathematical concepts: Cognitive issues and instructional implications, *Cognitive Science*, Vol. 11, No. 4, 395-416
- (78) Reif, F. & Heller, J. I. 1982 Knowledge structure and problem solving in physics, *Educational Psychologist*, Vol. 17, No. 2, 102-127
- (79) Finegold, M. & Mass, R. 1985 Differences in the processes of solving physics problems between good physics problem solvers and poor physics problem solvers, *Research in Science & Technological Education*, Vol. 3, No. 1, 59-67
- (80) Heller, J. I. & Reif, F. 1984 Prescribing effective human problem-solving process: Problem description in physics, *Cognition and Instruction*, Vol. 1, No. 2, 177-216
- (81) Keil, F. 1981 *Children's thinking: What never develops?*, *Cognition*, Vol. 9, 159-166
- (82) Siegler, R. S. 1978 The origins of scientific reasoning. In Siegler, R. S. (Ed.), *Children's Thinking: What Develops?*, Lawrence Erlbaum Associates, 109-149
- (83) Rumelhart, D. E. & Norman, D. A. 1978 Accretion, tuning, and restructuring : Three modes of learning, In Cotton, J. W. & Klattzky, R. L. (Eds.), *Semantic Factors in Cognition*, Lawrence Erlbaum Associates, 37-53
- (84) Rumelhart, D. E. & Norman, D. A. 1981 Analogical processes in learning, In Anderson, J. R. (Ed.), *Cognitive Skills and Their Acquisition*, Lawrence Erlbaum Associate, 335-359
- (85) 安西祐一郎 1988 人間の知 辻井潤一・安西祐一郎, 機械の知人間の知, 東京大学出版会, pp. 152-168
- (86) Case, R. 1978 Intellectual development from birth to adulthood: A Neo-Piagetion interpretation, In Siegler, R. S. (Ed.), *Children's Thinking: What develops?*, Lawrence Erlbaum Associates, 37-70.
- (87) Chi, M. T. H, Feltovich, P. J. & Glaser, R. 1981 Categorization and representation of physics problems by experts and novices, *Cognitive Science*, Vol. 5, 121-152.
- (88) (49)と同書
- (89) Champagne, A. B. & Klopfer, L. E. 1982 A causal model of students'

- achievement in a college physics course, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 19, No. 4, 299-309
- (90) Champagne, A. B. 1983 Naive knowledge and science learning, *Research in Science & Technological Education*, Vol. 1, No. 2, 173-183
- (91) (82)と同書
- (92) Larkin, J. H. 1981 Enriching formal knowledge: A model for learning to solve textbook physics problems, In Anderson, J. R. (Ed.), *Cognitive Skills and Their Acquisition*, Lawrence Erlbaum Associates, 311-334
- (93) 正司和彦 1988 誤答の定性的分析, 教育情報科学研究会, 講座教育情報科学 1. 教育とシステム, 第一法規, pp. 221-245
- (94) 酒井博敬・堀内一 1988 オブジェクト指向入門, オーム社
- (95) Anzai, Y., Mitsuya, Y., Nakajima, S. & Ura, S. 1981 LPS: A rule-based, schema-oriented knowledge representation system, *Journal of Information Processing*, Vol. 4, No. 4, 177-185
- (96) Schank, R. C. 1980 Language and Memory, *Cognitive Science*, Vol. 4, 243-284.
- (97) Osborne, R. J. & Wittrock, M. C. 1983 Learning science: A generative process, *Science Education*, Vol. 67, No. 4, 489-508
- (98) Happs, J. C. 1985 Cognitive learning theory and classroom complexity, *Research in Science & Technological Education*, Vol. 3, No. 2, 159-174
- (99) Bruce, V. 1979 Searching for politicians: An information-processing approach to face recognition, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 31, 374-396
- (100) Shastri, L. 1988 A connectionist approach to knowledge representation and limited inference, *Cognitive Science*, Vol. 12, No. 3, 331-392
- (101) 波多野誼余夫編 1982 認知心理学講座 4 学習と発達, 東京大学出版会, pp. 146-147
- (102) 同上, p. 192

### 第3章

- (1) Bloom, F. E., Lazerson, A., Hofstadter, L. 1985 久保田競監訳 1987 脳の探検 (上) (下), 講談社



- (2) 柏原恵龍 1993 健常脳における言語及び非言語過程の分離に関する研究, 風間書房
- (3) 利島保 1990 認知の神経心理学, 福村出版
- (4) (2)と同書
- (5) Anderson, O. R. 1992 Some interrelationships between constructivist models of learning and current neurobiological theory, with implications for science education, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 29, No. 10, 1037-1058
- (6) Cook, N. D. 1986 久保田競他訳 1988 ブレインコード, 紀伊國屋書店
- (7) Hashweh, M. 1988 Descriptive studies of students' conceptions in science, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 25, No. 2, 121-134
- (8) 白鳥則郎・管原研次・木下哲男 1987 人工知能, 共立出版, pp. 30-48
- (9) 甘利俊一 1978 神経回路網の数理－脳の情報処理様式, 産業図書
- (10) 合原一幸 1988 ニューラルコンピュータ－脳と神経に学ぶ, 東京電気大学出版局
- (11) 麻生英樹 1988 ニューラルネットワーク情報処理, 産業図書, p. 3
- (12) (10)と同書, p. 1
- (13) (10)と同書, p. 5
- (14) Dayhoff, J. E. 1990 桂井浩訳 1992 ニューラルネットアーキテクチャ入門, 森北出版
- (15) 大須賀節雄・佐伯胖編 1987 知識の獲得と学習, オーム社, pp. 110-117
- (16) Ackley, D. H., Hinton, G. E. & Sejnowski, T. J. 1985 A learning algorithm for Boltzmann Machines, *Cognitive Science*, Vol. 9, 147-169
- (17) 菊池豊彦 1990 入門ニューロコンピュータ, オーム社, p. 6
- (18) 甘利俊一 1989 神経回路網モデルとコネクショニズム, 東京大学出版会, pp. 63-64
- (19) (17)と同書, p. 16
- (20) ニューロンネットグループ・桐谷滋 1989 入門と実習ニューロコンピュータ, 技術評論社, p. 13
- (21) 印東太郎 1969 講座心理学第15巻数理心理学, 東京大学出版会
- (22) 今井兼範 1990 ニューラルネットワーク－コレクション－, 共立出版
- (23) Rumelhart, D. E., et al. 1986 甘利俊一監訳 1988 PDPモデル, 産業図書, pp. 367-419
- (24) (9)と同書

- (25) (14)と同書
- (26) 往住彰文 1991 心の計算理論, 東京大学出版会, pp. 66-67
- (27) (18)と同書, p. 145
- (28) (14)と同書, pp. 83-98
- (29) (18)と同書, p. 149
- (30) (14)と同書, pp. 83-98
- (31) (26)と同書, pp. 73-74
- (32) Dreyfus, H. L., 黒崎政男・村若修訳 1992 コンピュータには何ができないか, 産業図書
- (33) 辻井潤一・安西祐一郎 1988 機械の知人間の知, 東京大学出版会, pp. 140-148

#### 第4章

- (1) 石川正・関利一郎 1981 岩石の観察能力に関する調査, 日本理科教育学会研究紀要, Vol. 22, No. 2, pp. 35-44
- (2) 加藤尚裕・荒井豊 1985 石・砂・土の観察能力の調査に関する一考察, 日本理科教育学会研究紀要, Vol. 26, No. 2, pp. 69-78
- (3) 森本信也 1979 児童・生徒の分類能力に関する考察—特に物質分類能力に関して—, 日本理科教育学会研究紀要, Vol. 20, No. 1, pp. 43-50
- (4) 高橋昭善 1979 観察能力の発達に関する一考察—アジサイの葉の観察を通して—, 日本理科教育学会研究紀要, Vol. 20, No. 1, pp. 1-8
- (5) (1)と同書
- (6) 滝沢武久 1982 認知の発達心理学, 白水社, pp. 83-90
- (7) 村井護晏 1975 自然認識の過程の数学モデル, 日本理科教育学会研究紀要, No. 16, pp. 17-26
- (8) 同上
- (9) Siegler, R. S. 1978 The origins of scientific reasoning, In Siegler, R. S., *Children's Thinking : What Develops?*, Lawrence Erlbaum Associates, pp. 109-149
- (10) 波多野完治 1986 ピアジェの認知心理学, 国土社, pp. 50-52
- (11) 同上, pp. 77-78
- (12) 宮崎清孝・上野直樹 1985 認知科学選書 1 視点, 東京大学出版会, pp. 75-99



- (13) 松森靖夫・関 利一郎 1981 児童・生徒の空間認識に関する考察－回転・対象概念を中心として－, 日本理科教育学会研究紀要, Vol. 21, No. 3, pp. 19-26
- (14) 松森靖夫・関 利一郎 1981 児童・生徒の空間認識に関する考察(Ⅱ)－方向概念を中心として－, 日本理科教育学会研究紀要, Vol. 22, No. 2, pp. 61-70
- (15) 竹谷誠 1991 新・テスト理論, 早稲田大学出版部, pp. 175-197
- (16) 吉本 市・柏木聞吉 1973 運動物体に働いている力についての誤解内容パターン, 物理教育, 第21巻, 第4号, pp. 248-255
- (17) Clement, J. 1982 A conceptual model discussed by Galileo and used intuitively by physics students, In Gentner, D. & Stevens, A. L. (Ed.), *Mental Models*, Lawrence Erlbaum Associates, pp. 325-340,
- (18) 和田敏明 1987 静力学で教えたいこと－あるテスト結果から－, 物理教育, 第35巻, 第1号, pp. 35-39
- (19) 中山 迅・猿田祐嗣 1987 学習者の『力』の理解に関する研究(1)－生徒のおかしやすい誤りの特徴－, 日本理科教育学会研究紀要, Vol. 28, No. 1, pp. 35-40
- (20) 中山迅・松原道男 1989 学習者の『力』の理解に関する研究(2)－誤りのルール化の試み－, 日本理科教育学会研究紀要, Vol. 30, No. 2, pp. 63-68

## 謝 辞

本論分の作成にあたっては、武村重和教授に終始懇篤な指導を賜ったことを深く感謝いたします。

また、宮崎大学教育学部の中山迅助教授には、研究に対する多くの助言を与えてくださったことに感謝したい。

さらに、本研究の調査については、石川県内の小学校、中学校の多くの先生の協力を得た。特に、石川県羽咋中学校の松山智明先生、金沢大学教育学部附属教育実践研究指導センターの研究プロジェクト、「中学校理科研究グループ」と「理科学習心理研究グループ」の先生方には、多大な協力をしていただいたことに感謝したい。