

具体的な思考から形式的な思考への移行に関する一考察  
—Jean Piaget の発生的認識論と吉川弘之の一般設計学との比較から—

The Process from the Concrete Operational Stage to the Formal Operational Stage: Based on a Comparison between Genetic Epistemology and General Design Theory

三島 瑞穂\*)  
Mizuho Mishima

**要旨:** 本論文は、論理的知能の発達過程に見られる具体的操作の段階から形式的操作の段階への移行を理解するために、設計論の発達心理学への応用を試みるのが第一の目的である。論理的知能の発達過程と設計の過程にはいくつかの大きな共通点と、それに応じた共通する問題がある。その一つに、これは理論上では区別されることは少ないが、設計論を実際の設計に応用するとき、または発達心理学を実際の子供の教育に活かそうとするときの問題においてみられるものである。発達では具体的なものを使って考えるだけの段階と頭の中だけで形式的にも考えることのできる段階があると考えられている。一方、設計には、物理的に存在する実体を用いて設計する場面と頭の中で仮想的に設計している場面が混在しており、設計者にとっては明らかに違いがあるが、表現上では区別されにくい。共通する問題は「具体的操作の段階と形式的操作の段階、実態をベースにした設計場面と仮想的な設計場面をそれぞれ、どのように区別し、関係性を理解するのか」である。発達心理学では、Piaget の発生的認識論の考え方を伝統的に引き継ぎ、感覚運動的活動から具体的思考へ、具体的思考から抽象的思考へと発達することが自然のこととして受け入れられている。しかし、これは本当に自明のことであろうか。

吉川の一般設計学は実体を用いた設計と抽象的な思考による設計を二種類の知識を数学的構造で表現する。またピアジェの発生的認識論は、具体的対象を用いた論理的思考と形式的な思考を数学的構造で表現する。これらの数学的構造を比較することと発生的認識論の二つの論理的思考の関係から、一般設計学の二つの知識の関係、つまり実体を用いた設計と抽象的な思考による設計の関係を考察する。結論は数学的構造自体にはあまり違いはなく、その数学的構造が満たすべきとされる命題が異なっていたということである。概念的には漠然としていた問題が数学を用いることで明確になった。また設計論を発達心理学に応用する糸口がつかめた。

**Key Words:** 論理的思考の発達、発生的認識論、一般設計学

### 1. Introduction

本論文では設計論の理論である一般設計学と発達心理学の理論である発生的認識論を比較している。本論文の目的は設計論を発達心理学に応用する

ことが目的である。発達心理学と設計、前者は未発達の子供の心を扱い、後者は工業的に人工物を扱い、似ても似つかぬ分野である。この二つを比較することは誰にとっても突拍子もないことと思われる。しかし設計には、発達でなければ比較で

\*) 宇部フロンティア大学人間社会学部福祉心理学科講師

きない要素がいくつかある。まず設計そのものは、仕様、図面、模型などと提示されるもの実際は、設計者の頭の中の人工物の存在を可能にする仮想的な何か、であって目的の人工物そのものや人工物の部分ではない。発達も同じく知的行為から色々な過程があると判断されるが、その知的行為を可能にする何かは心の中に構築されたものであって、心自体は表現できない。このように設計論と発達心理学はどちらも、人工物や知能の可能性を示す「仮想的な何か」について議論している。そのため、発達にも認知科学や心理学だけではなく物理的経験や社会的経験、環境など様々な発達要因を経ているから多くの立場からの議論が必要であり、設計を論じるためには工業的な側面だけではなく認知科学や心理学などの側面での議論が必要である。

そして設計論、発達心理学の様々な議論を、実際の設計や子供の心に触れるときに応用するとき、一つの問題が起こる。発達心理学も設計論でも理論上ではわざわざ区別することが少ない事に関する問題である。子供にとっては子供の知的行為が真に頭の中だけで抽象的な論理的思考を行えているのか、それとも具体的な対象を助けに思考しているのかによって、発達の度合いは異なる。また設計者にとっては、頭の中で仮想的な対象を扱っているのか、それとも既に実体について扱っているのかは全く異なる。問題は、この二つを理論上でどのようにして区別し、一人の子供の発達過程、一つの設計行為としてどのようにして関連付けることが出来るのか？ ということである。例えば発達心理学では個々の能力がそれぞれの発達過程を持つという領域固有性の考え方が生まれた。また Paul & Beitz の設計理論の中では設計段階を具体的な例と方法論を示している。

しかし具体的に事例を参照しなければ上の問題の解決への糸口を見つけることは無理であろうか？ ピアジェの発生的認識論もまた、論理的思考の発達について数学的表現を用いて議論しているが、やはりこの問題と深く関わっている。そして吉川の一般設計学は、抽象的な概念と数学的表現を用いているが、この理論の中で論じられていることはこの問題と深く関わっている。一般設計学では理想的知識と現実的知識という二つの知識が提示している。理想的知識は実体を用いた設計を論じるために用いられ、現実的知識は実体を介さず抽象的な概念のみによる設計を論じるために用いられる。この二つの知識は数学的構造で表現されている。また発生的認識論では具体的操作と形式的操作という二

つの論理的思考が提示されている。具体的操作は具体的な対象を媒介にした論理的思考を、形式的操作は具体的な対象を用いず頭の中だけの形式的な論理的思考を意味している。この二つの論理的思考もまた数学的構造で表現されている。

吉川がこの二つの関係については特に論じている文献は見つかっておらず、理論として逆理を含むのではないかと菊池、長坂によって指摘を受けている。またピアジェも二つの論理操作の出現を均衡化という概念で説明しているものの、不連続である論理的思考の間の移行を説明するには不十分であるとチョムスキーから批判を受けている。本論文はこの一般設計学の逆理、チョムスキーの均衡化概念に対する批判を否定するものではないが、特に二つの理論の数学的構造に着目、比較することによって二つの知識、二つの論理的思考の関係を見出すことが出来た。

まずどちらも違いは、具体的な実体を扱うかどうか、形式的なもしくは抽象的な思考によるものかどうかの違いである。また基本的な概念、数学的構造に関する命題は異なる一方で、用いられる数学的性質はどれも集合論に関係するもので本質的な違いはなく、むしろ連続的であるとみなすことができる。問題の結論を言うと吉川とピアジェは、集合や集合演算などの基本的な数学的性質を共通させることによって、二つの知識、二つの論理的思考の連続性を表している。このことは直感的にも理解できる。例えば頭の中で形式的に仮想のものを演算や分類を行うことと、実際に対象を用いて演算や分類を行うのは、記述してしまえば何も変わらなくなる。つまり数学は設計と発達の認知的な側面を理解するのになくてはならないものであった。

この結論を出すためには、具体的な対象を扱えるようになる段階と形式的な対象を扱えるようになる段階が時系列ではっきりと区別される発達過程を用いなければならなかった。設計では二つの場合は混在しているため理論上でその区別を表すことが難しく、実際に一般設計学では逆理とみなされている。以上より、設計と発達には共通する問題があり、発達心理学を用いることによって設計に関する問題を解決することが出来る可能性を示した。逆に、設計論における議論が発達心理学で論じられている問題を解決することもあるであろう。例えば発達心理学では、知能の発達が遺伝によるのか経験によるのかという論争があるが、設計論では設計の前提条件と設計過程との関係、等から同様の問題を明確な形で議論することが出来るであろう。これは

今後の課題である。

## 2. 発生的認識論

認知発達の基本理論、Jean. Piaget の「発生的認識論」を紹介する。ピアジェは発生的認識論の中で、認知発達の本質として発達段階説と均衡化概念を提唱した。ピアジェは、発達とは均衡化であると主張しています。均衡化は、普遍的で常に働く動的な発達の機能とみなしている。そして均衡化は同化と調節という子供と環境の間の生物学的な適応から生まれるものである。同化とは環境の中で出会った対象や状況を意識の中に組み込むという作用である。そして調節とは経験によって意識を修正する作用である。

ピアジェは乳児から思春期までの論理的思考の発達過程には、大きく4つの発達段階があると主張している。乳児期を感覚運動的段階、幼児期を前操作の段階、児童期を具体的操作の段階、少年期を形式的操作の段階という。それぞれ特徴的な思考の構造を持っている。

感覚運動的段階では記号を用いることができる。そして運動に分類や順序づけなどの論理的思考の兆しが見られる。次の前操作の段階では模倣遊びができる。この二つの段階ではものの保存や因果性の理解ができず逆の思考をできない。また概念も徐々にできてくるが、知覚を超えて論理の適用ができない。

次の具体的操作の段階で、保存性、因果性の理解をし、思考が可逆的になって論理的思考を獲得する。具体的操作とは具体的なものに対して知覚、運動を超えて論理的に働きかけることである。具体的操作は分類、系列化、対応付けなど、9種類ある。例えば、鳥類と哺乳類があってその上に脊椎動物という分類があるというような操作がこれに当たる。最後の形式的操作の段階で、具体的なものを超えて形式的な論理的操作ができるようになり、論理的操作と論理的操作の間に形式的な関係をもたせることで、より高度な論理的思考ができるようになる。例えば物理実験で、天秤ばかりをつりあわせるという課題で、棒の長さや錘の重さを同時に変化させる、というようなことができるようになる。棒の長さを調節する操作と錘の重さを調節する操作の間に形式的操作している、ということになる。

4つの段階の思考の違いを、坂道における台車の運動についての力学的法則の理解の違いで説明する。感覚運動期は、運動をなんども確かめる。前操

作期では、台車を静止させるための力のほうが上に押す力よりも大きいと誤解する。これは動いているのだから、落ちないと思ってしまう。具体的操作期になると、正しく理解できる。ただ、運動の仕方を変えて、さらに坂の角度も変えるとどうなるか、理解は形式的操作期まで待つ必要がある。

ピアジェはこの後半の操作が可能なのは、論理的思考を可能にする数学的構造が現れるからだと考えた。ピアジェは具体的操作と形式的操作の持つ構造を数学的に表現している。次にこの二つの論理操作の持つ構造について説明する。

具体的操作について説明する。具体的操作は、具体的なものにたいする論理的操作だが、ただ分類する、並べる、対応付けるということを目指しているのではない。分類した対象の集合や順序付けした対象の集合の上で、論理的な演算を行うことを意味している。前操作期ではこのような操作を可逆的にすることができず、また感覚に依存しすぎていて物理や数学の概念を理解することができない。具体的操作の段階では、対象を具体的操作するのに加えて、具体的操作によって得た対象の集合に対して、可逆性、同一操作性、・・・等の演算が行われている。その数学的構造はすべての種類の具体的操作に共通しており、群性体と呼ぶ。群性体の公理は次の通りである。

具体的操作したものの集合を、 $x, x', y, y'$  とする。

$$1. x+x' =y \quad 2. y-x' =x, y-x=x' \quad 3. (x+x') +y' =x+(x' +y') =z \quad 4. x+(-x)=0 \quad 5. x+x=x$$

ただし具体的操作は具体的なものに依存しているため、具体的操作の段階では、論理的思考は具体的な対象を媒介としている。この公理は具体的操作の仕方から共通して抽出できるものであるが、この公理を意識して用いている訳ではない。もしも意識して用いていけば、具体的なものから離れてより抽象的な思考ができていくはずである。

次に形式的操作について説明する。形式的操作でも具体的操作と同様に、数学的構造が抽出される。束と INRC 群という。形式的操作という論理的思考の具体的操作とは異なる大きな特徴は、形式を媒介して考える点である。操作の対象ではなく操作の形式、つまり形式的操作の構造の公理のレベルで考えている点である。具体的操作の構造は、分類の群性体、系列化の群性体等々、具体的操作の対象によって変化する。しかし形式的操作の数学的構造は、その対象の内容によらない。このことから形式的操作の対象は、命題で表現される。

形式的操作の構造、束は16の二項命題の集合で

ある。そして INRC 群の集合  $\{I, N, R, C\}$  は二項命題の関係であり、それぞれ二項命題を変化させない同一操作、元の操作を否定する逆換操作、元の操作を補い合う相補操作、相補操作の否定である相関操作の変換である。これは群の構造を持っていて、このような群表で表される。この群を、INRC 群と呼ぶ。次はこの INRC 群の公理である。

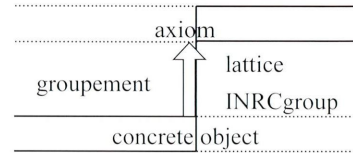
	I	N	R	C
I	I	N	R	C
N	N	I	C	R
R	R	C	I	N
C	C	R	N	I

INRC 群の表

次に具体的操作と形式的操作の違いを説明する。一般的に言えば論理的知能のレベルが異なっている。ピアジェは具体的操作で生じた論理的思考や物理的法則の理解における齟齬が心理学的な不均衡をもたらし、具体的操作の間で均衡化が起こって形式的操作が現れると概念的説明を行っている。しかしチョムスキーが批判したように均衡化という概念は仮想のものであり、また均衡化が一般的に連続的变化を示唆するものであるから、均衡化概念だけでは具体的操作と形式的操作の差異を説明することにはならない。ピアジェは具体的操作と形式的操作の違いを数学的構造、群性体、INRC 群、束を通して表現している。

群性体と INRC 群と束の構造が数学的に異なる、ということはない。まず3つの数学的構造、群性体、INRC 群、束の関係は何か？ すべて代数的構造であり本質的な違いは無く、群性体から INRC 群と束への移行は操作が豊かになったという連続的な移行とみるべきと思われる。

では具体的操作と形式的操作の決定的な違いは何か？ 具体的操作は具体的対象を媒介として対象のレベルで思考をしており、群性体の公理はそこから抽出される共通規則でしかない。一方、形式的操作は実際に INRC 群、束の公理のレベルでの思考をしている。つまり INRC 群、束の公理にあたる形式が形式的操作である。具体的操作と形式的操作、どちらの段階でも数学的構造とその公理が存在しているものの、どのようなレベルで思考しているかが異なる。ピアジェの批判はしても発達段階説を支持する発達心理学者が多いのは、この違いを見て取っているのだと思われる。



### 3. 吉川弘之の一般設計学

吉川弘之の一般設計学は、知識の記述をもとに議論を展開する。その概要は次のようなものである。まず用いられている概念の定義を説明する。一般設計学では具体的な個物や設計のモデルを用いず、基本的な概念のみを用いて議論する。

人間の知識は実体の認識によって得られるとする。知識の上での実体を実体概念と呼ぶ。さらに実体概念は、知能によって実体の機能や属性などの抽象的な特性と関連づけられ、その抽象的な特性を抽象概念と呼ぶ。抽象概念は実体概念の分類によって表現される。

実体概念は存在するもの、存在したものの、存在するであろうものを含むすべての実体に対応している。実体概念は特性によって分類可能なことから、実体概念集合として数学的に扱われる。実体概念集合のすべての元は抽象概念で厳密に表現可能であるとされる。実体概念集合を分類した実体概念集合の部分集合系を抽象概念集合とする。その特性によって抽象概念集合には、機能概念集合、属性概念集合、形態概念集合がある。これら設計の基本的な概念について3つの命題が与えられている。これらは一般設計学の公理系とされ、設計に関する一つの基本的な考え方を示している。

公理1 (認識公理).

実体は属性によって認識あるいは記述することが可能である

公理2 (存在物と概念との間の対応関係).

実体集合と実体概念集合は一対一に対応する

公理3 (概念に関する位相公理、または概念の操作公理).

抽象概念集合は実体概念集合の位相である

このように一般設計学における知識は、すべての実体を含んだ理想的な知識である。公理3のように、この実体概念と抽象概念は位相空間を構成すると捉え、実体概念集合が台集合、抽象概念集合がその位相である。

次にこの公理系の元での一般設計学における設

計についての考え方を説明する。一般設計学では設計仕様と設計解のみを表現している。設計仕様、すなわち要求の内容は機能概念、設計解の内容は属性概念で表される。そして設計仕様を機能概念空間、設計解を属性概念空間で表現している。そして「定義12 設計とは、抽象概念空間上に示された領域に対応する属性概念空間上の領域を指定することになる」と設計を定義する。

この公理の元での知識に含まれる実体概念は非常に理想的なものである。設計仕様として抽象概念空間を指定すると、ある実体概念に到達でき、その実体概念を分析することによってその属性概念を求めれば、設計解は得られるので、次のような定理が提示される。「定理5 理想的な知識での設計は、仕様を記述したときに完了する」

しかしそれでは設計が不必要ということになる。またこれは実際の設計とはかけ離れている。この公理のようなすべての実体概念を含む理想的な知識に対して、吉川は一般設計学の中で次に説明するような「現実的知識の元で行われる設計」を定義しなおした。

次に現実的知識の元での設計について説明する。現実的知識には、すべての実体に対応するような実体概念は存在せず、公理を否定した不完全性を導入した知識とされる。そして設計は「定理8 現実的知識では、機能概念集合系の元と属性概念集合系の元との間に、実体概念を媒介としない何らかの直接的な対応が見出されるとき、またそのときに限り設計が可能である」とする。

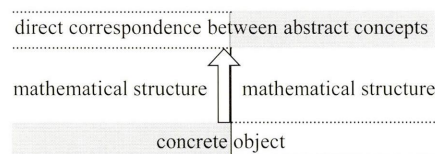
次に理想的な知識と現実的知識の違いを説明する。二つの知識の実体概念を媒介するか媒介しないかにある。例を示す。例えば、すべての実体が{椅子、縄、ボール}であるとする。理想的知識の場合、指定された機能が「上に座れる」だったとする。そうするとすべての実体の中では椅子が当てはまる。これでは属性を考えて設計をする必要がない。現実的知識の元では、「上に座れる」に対する属性を考える。例えば属性を、{座っていて楽しい、野外で座れる、座るとゆれる}などとすると、「ブランコ」ということになる。これは設計をしたということになる。

このように一般設計学では、理想的知識において設計は不必要であり、現実的知識では公理を無視することから、理論としてパラドックスがあるように見える。これを菊池と長坂は、「一般設計学の逆理」と呼んでいる。

しかし理想的知識における設計と現実的知識に

おける設計とを見ると大きな矛盾があるように思え、また位相空間と集合系とでは数学的に見ればまったく違うが、どちらも概念集合を用いていることには変わらない。一般設計学の公理系は実体概念を媒介することを意味するから、逆理とみなされているのは実は実体概念の有無の違いによるものといえる。

つまり理想的知識と現実的知識という逆理を示すような二つの設計の定義が同じ理論で、同じ抽象概念を前提に提示されるのは、同じ概念を用いた設計の多様性を意味している。それは同じ設計仕様、抽象概念を用いても、実体概念を媒介させて行うやり方もあれば、実体概念を媒介せずに抽象概念だけで設計をし、その次に実体を考える、というやり方もある、ということの意味している。これは実際の設計にあてはめると、実際のもののみながらの設計が求められるのか、それとも、実在するモノから離れた抽象的思考による新しい発想が求められるのか、の違いであると考えられる。



#### 4. 発生的認識論と一般設計学

次に二つの理論が同じ枠組みを持っていることを示す。発生的認識論と一般設計学は、どちらも知識や思考を数学的構造の上で表現している。そして発生的認識論の中には具体的操作と形式的操作の段階の違いという不連続性、一般設計学の中にも理想的知識と現実的知識の間の逆理がある。発達段階、逆理は、表現とその意味内容から見ると複雑で解消されていないように見える。しかし認知構造を示す数学的構造の上でその違いを捉えると、数学的構造を構成している要素、もしくは演算の大部分は連続している。そして違いは実体、具体的なものを媒介するのか、それともそれらを介さずに抽象概念もしくは形式のみを用いて設計、論理的思考を行うのか、という違いであった。ただ見かけと概念的な違いから逆理、不連続とみなされた。ただし発生的認識論の数学的構造の公理と一般設計学の公理系の間にはまったく関係が無い。むしろ数学的構造とその公理は、具体的操作の段階と形式的操作の段階、理想的知識と現実的知識に共通して存在している。認知構造は連続する数学的構造で表されて

いるが、それによる行為がどこで働くのか、どこで働かせることができるのかという違いである。従って発生的認識論と一般設計学は、認知的変化についての理論として同じ枠組みを持っているということができる。

## 5. 連続性と不連続性

以上のように連続性／不連続性の問題について、発生的認識論と一般設計学とは同じ枠組みで議論できることが分かる。発達と設計の認知的な過程の不連続性の問題は、一般的には別々に議論されている。しかし実際には、似た知識の元での異なる設計方法であったり、異なる対象、レベルでの思考であったり、実際には多様性と称すべきものである。そして逆に一般的には概念的に論じられ形式的にはばらばらに論じられてきた多様性が、発生的認識論と一般設計学の数学的表現を見ると、形式的に記述できることがわかった。発生的認識論と一般設計学の中での逆理と呼ばれていたもの、不連続な段階は数学を媒介として結びついたものであった。数学的構造には、用いられるいくつもの形式と、数学的構造が示唆する意味がある。その二つが、連続的な側面と不連続な側面を表したということになる。

## 6. 結論

我々は様々な側面からのアプローチで創造的行為を行っているが、なぜそれが可能なのか、またそのような状況をそのまま記述するのがなぜできないのかわかっていない。

それ以前に人間の意識がどのように成り立っているのかはまだわかっていない。一人の人間の意識が、どうやって思考をしながら設計する、またはどうやって複雑な物理法則を組み立てるのか、何もわかっていない。

認知的な過程の連続性と不連続性の二つの側面を担うものは、おそらく本来は人間の意識だと思われる。発生的認識論と一般設計学では人間の意識を記述する代わりに、数学を用いたものだと考えられる。

結論として、二つの理論で数学を用いているのは、単に曖昧な表現を避けて厳密な表現をするためではなく、認知発達や設計について議論するとき数学について言及することが不可欠ということがわかった。ばらばらにしかアプローチできなかった連

続的な認知過程と不連続な認知過程を、数学によって結びつけることができる。従って認知過程の連続性と不連続性の二つの側面を知るためには、数学について言及せざるを得ない。

実際の設計行為は、すでにある実体を元にする部分とまだ設計者の頭の中から出てきていない部分の両方がひとつの設計過程の中で混じっている。しかし理論の中では、別々に論じたものを現実のように合理的には結びつけることは難しい。一般設計学はこのような場合に対して、有効である。多様な設計の側面をそれぞれ作ってから後で結びつけるのではなく、最初から二つの側面を持った設計ができる方法を示唆している。抽象的な概念を用いながらも、実際の設計の場では実用的な働きを示すだろう。

## 参考文献

- 波多野完治, 江口恵子 (1965). 思考の論理モデル: 群性体, 群, 束, In: ピアジェの認識心理学, 波多野完治編, 国土社, 211.
- 波多野完治, 江口恵子 (1965). 思考の論理モデル: 群性体, 群, 束, In: ピアジェの認識心理学, 波多野完治編, 国土社.
- 菊池誠, 長坂一郎 (2004). 言語学の設計学への応用に関する研究 (第1報) —一般設計学の逆理と名詞句としての実体概念の形式化—, 精密工学会誌, 70, 3, 354.
- Kikuchi, M. and Nagasaka, I.(2003). "Situation Theoretic Analysis of Functions for a Formal Theory of Design", Proceedings of 14th International Conference on Engineering Design, No. 1448.
- Mizuho Mishima & Makoto Kikuchi(2006). General Design Theory and Genetic Epistemology, Proceedings of 15th International Conference on Engineering Design. 266-267
- Paul, G. and W. Beitz(1996). Engineering Design: A Systematic Approach. 2nd Ed. Trans. K. Wallace, et al. London: Springer-Verlag.
- Piaget, J. (1972). L'Épistémologie Générique, Press Universitaires de France. [邦訳] ピアジェ (滝沢武久訳): 発生的認識論, 白水社.
- Slater, A. and Bremner(2011). An Introduction to Developmental Psychology. BPS Blackwell.
- Sternberg, R. and Okagaki, L.(1989). Continuity and Discontinuity in Intellectual Development Are Not a Matter of 'Either-Or', Human Development, 32,158-

- 166.
- Tomiyama, T., and Yoshikawa, H. (1987). Extended General Design Theory. In Design Theory for CAD—Proceedings of the IFIP Working Group 5.2 Working Conference, eds. H. Yoshikawa and E. A. Warman, 95–124. Amsterdam: North-Holland.
- 吉川弘之 (1979). 一般設計学序説—一般設計学のための公理的方法—, 精密機械, 45, 8, 906.
- 吉川弘之 (1981). 一般設計過程, 精密機械, 47, 4, 405.
- Yoshikawa, H.(1981) and Warman, E.A. (eds.), North-Holland, 95-130.
- Yoshikawa, H.(1981) General Design Theory and a CAD system, In: Man-Machine Communication in CAD/CAM, Sata, T. And Warman, E. (eds.), North-Holland, 35-58