

2 自己創出系としての複雑系記述

複雑な機構としての複雑系を数学的に記述する方法は、広義の力学系である。しかし、後で述べるように、力学系は状態概念に基づいているために、問題となっていることには無関係な同期という作業を強要されてしまうという不便がある。この同期は便宜上のものと心得ていても、知らないうちに考え方にバイアスを与えずにはおかない。

以下、力学系に替わる数学的定式化の試みの一例として、オートポイエシス論をとりあげ、その構成素概念を「相互作用そのものとしてのプロセス」として記述し、産出機構にともなう閉域という概念を、演繹的ハイパーダイグラフの枠組を通して明確にする。

2.1 複雑系記述の基底概念

状態概念の不適切性 生物のような複雑なシステムについて論じるとき、数理科学のいままでの枠組が不適切となる場合が多い。従来の枠組では全体を収める形式化が前提とされているからである。有効性を失う概念の典型例が「状態」であり、最初に述べたように、それに基づく力学系・確率過程論の強力な豊かな枠組ですらその有効性の範囲は限られている³⁴。

細胞の物理化学的構造の記述とそれらの相互関係の記述によって生命系は原理的には完全に記述され、ただ、変数が多すぎるために実際にはそれらの現在値を観測することはできず状態は確定できない、だから力学系は有効ではない、と考えられている。しかし、状態概念の意義が疑問視される真の理由は観測不可能性にあるわけではない。生命系では各部分の具体的作動はその近くの部分の様子だけで決まること、また、ある中枢がすべての部分を支配しているわけではないということ、この2点が生命系記述に全域的状態概念を用いることは的外れであることを示している。

基底概念の局所性要請 いま述べたように、生き物の存在様式に合った記述法の基底概念は局所的なものであることが好ましい。「局所的」の意味は、直接的な相互作用がおよぶ範囲内、ということができる。した

³⁴[43] で、動的な系を記述する枠組みとして力学系・時系列・遷移系を比較吟味した

がって「直接的な相互作用」をまず指定することが生命系記述の出発点となる。

そこでまず、作用という概念の吟味から始めよう。

「作用」を作用主体および被作用対象から切り離して基礎概念として展開することは、はたして可能であろうか？これは本来動きのあることを凍結して対象としてとらえることを求めることになる。

作用の抽象的取り扱いの可能性 作用を受ける対象を捨象して作用について論ずることは数学では古くからなされている。特に変換群から「何の変換か」という点を捨象して群の概念が確立した時点で、作用を被作用対象から切り離し作用同志の合成（2つの作用を続けると新しい作用が合成される）という様相だけに基づいて実質的な研究が可能なのことがわかり、抽象代数学が発展した。さらに圏論の発達により変換（作用対象と作用結果が同一な作用）以外の一般的な作用についても被作用対象への言及は最小限にとどめて論ずることができるようになった。

作用の相互作用 作用どうしは合成という自然な相互作用を持つ。それにより作用の集まり自身が完結した世界を成す。さらに、この閉じた世界の中で作用は他の作用との関係で特徴付けられてしまう。このことは、作用がプリミティブな存在であって作用対象は作用から分化したものだ、という見方が可能なことを暗示している。³⁵

圏論は、他の作用との合成を通して作用の実質が決まるという側面を出発点として取り入れた枠組みである。圏論では、作用（射と呼ばれる）の「合成」は何か他のものから決まるのではなく我々が自由に設定できる。この設定は結合法則（3個以上の作用の合成はどのような順番に合成しても同じになる）に拘束されるが、その拘束は強いものではなく設定の仕方には大きな任意性が残されている。

³⁵作用が他の作用との関係で捕捉できることは圏論では米田の補題として明確に表現され、圏論の様々な場面で不可欠な役割を果たしている。

2.2 相互作用 (プロセス) 論の基本的様相

合成の規定が作用自身の規定に入っている数学的枠組はいろいろとあるので、作用概念のみに基づいて作用について議論することは可能である。そういう枠組で最も自然で深く研究されているものとしてラムダ算法がある。しかし、2つのラムダ項が相互作用するとき作用主体・被作用対象の役割が確定するので生命系での相互作用としてはラムダ算法は適切な描像を与えない。

生物ではふつうと思われる、作用主体と被作用対象とが区別できない相互作用という概念は数学的にどのように表現できるであろうか。

相互作用の相互作用 具体的な相互作用の様態は瞬間的なものから持続的なものまで様々である。その様態を捨象したときに残るものは複数の相互作用どうしの結合の変化のみといってよい。これは、いくつかの相互作用に対してそれらの連鎖および共同作用等の結果生じる変化を取り出したものである。その一例が前節で述べた作用の合成である。

ここで、相互作用の相互作用という不必要な言葉上の自己参照を一旦避けるために、上で相互作用と呼んでいたものをプロセスとよぶことにする。すなわちプロセスは具体的な相互作用を抽象化したものとする。

相互作用としてのプロセス概念 「プロセス」は広く用いられる言葉なのでどういう意味で用いるかを明確にしておく必要がある。

ここで使う「プロセス」の意味を適切に例示するものとしてはデーモンと呼ばれるプログラム(を実行させているもの)がある。デーモンはワークステーションのメモリーに常駐し絶えず活動していて他のプロセスとデータの様々なやりとりをするプロセスである。この場合そのプロセスはプロトコル(他のプロセスとのデータのやりとりの手順)によって規定される。

この意味で、プロセスを相互作用そのものと考えすることは唐突ではない。相互作用を相互作用概念だけで規定しようとするとき、相互作用が他の相互作用とどのように相互作用するかだけに基いて規定することになるが、これはプロセスをプロトコルによって規定するというプロセス理論の基本的な考えと同じ構造を

持っている。

以上の考察から、相互作用をプロセスと呼ぶことによって暗黙の内に新しい意味を導入してしまう恐れは余りないであろう。

プロセスのインタフェース プロセス同志の相互作用はなんらかの作用点を通してなされる。「作用点」は作用対象の名残りといえるが、その内容を捨象しその「タイプ」のみを問題とする。この作用点をインタフェースと呼ぼう。

各プロセスタイプはいくつかのインタフェースを持つ。インタフェース自身もいくつかのタイプにわかれる。インタフェースタイプは相補的な対をなし、プロセスどうしは相補的なタイプを持つインタフェースを通して相互作用し新たなプロセスを生じる。³⁶

2.3 相互作用に基づく複雑系論:自己創出系の吟味

相互作用を基礎概念として論じる数学的枠組は研究されており、それに基づいて生命系について論ずる可能性があることはわかった。しかしそれはどのような論じ方になるのであろうか?

このことを考察するときのヒントが自己創出系(オートポイエイス)の思想にある[31]。

自己創出機構の分析 自己創出で用いられる「産出」という概念は、「作用」とどのように関係するのであろうか?

自己創出の機構の特徴づけとして次がよく引用される。

オートポイエイス・システムとは、構成素が構成素を産出するという産出過程のネットワークとして、有機的に構成されたシステムである。このとき、構成素は次のような特徴を持つ、

(AP1) 構成素は変換(変形および破壊)と相互作用をつうじて自己を産出するプ

³⁶上記のような様相を捉える数学的な枠組としては、相互作用の幾何学、 算法、作用算法、作用網などがある。これらは数学的な深さがあり今後の発展が期待される。

プロセスのネットワークを絶えず再生産し実現する

(AP2) 構成素はネットワーク(システム)を空間に具体的な単位体として構成し、また空間内において構成素はネットワークが実現する位相的領域を特定することによってみずからが存在する [21]。

この規定であいまいな点は、「プロセスのネットワーク」という用語である。これは相互作用の場を与えるという意味があり二番目の「位相領域」という用語と切り離せない。これらの因子は数学的には冗長に見える。

まず自己創出機構の構成素の本質だけをとりだし次のように定式化してみよう。

構成素は、他の構成素と相互作用して変形・破壊・再構築される。そのような構成素の「集まり」が相互作用の進行によって維持される時、その集まりを自己創出系呼ぶ。

構成素の本質が他の構成素を産出する(構成する)ということそのものであるという(自己創出の機構の鍵となっている)様相の形式的表現を以下考察する。これは、自己創出機構の構想に出現する様々な選択肢からの適切な選択には必要な前提となると思われる。

まず注意すべき点は構成素自身がなんらかの複合体であると想定する必要があることだ。もしも構成素が分割不能なものであれば、その破壊・産出を一気に行わざるを得ないシステムの作用は魔術的な作用ということになる。別言すれば分割不能と想定した構成素の相互作用は観測者の立場から現象的に記述するしかなくなる。(これは自己創出系の意図、観測者を排除した生命理論を構築するという意図からすれば困ることである)

従って、構成素を何等かの形式によって表現する枠組においては、その形式は、どういう構成素とどういう状況でどのように作用するかについての条件や規定を含まなければならない。極端にいえばその表現形式が他の構成素との作用の指定そのものとなってもよい。

プロセスを構成素とするシステム 前節の議論を振り返るとプロセス(=相互作用)は、他のプロセスの相

互作用によって決められ、まさに自己創出系における構成素を特徴づける性質をそなえている。

ほかの構成素の分解・変形・再構成することが構成素の作用である、ということをも明示的に記述できる枠組は多くはないがある。ラムダ算に相当する表現力を持つプロセス理論(相互作用理論)としては、 π -計算 [28]、相互作用算 [29]、相互作用結合子 [24] などがある。

2.4 相互作用のきっかけ

前節では構成素をプロセスとして形式化した、すなわち他の構成素との相互作用における挙動によって構成素を規定した。それではこの構成素概念に基づいて自己創出系はどのように論じられるのか?すなわち構成素のどのような集まりをシステムと考え、それらの相互作用はどのような機構を通して発現するのか?これを以下考察しよう。

構成素の結合から派生するネットワーク 自己創出系における構成素同志の相互作用の仕方はセルオートマトンの場合とは異なり新たに規定する必要はなかった。相互作用の仕方こそが構成素自身を規定するものだったからである。しかし実際に相互作用が生じるには構成素同志の「出会い」「結合」とでも呼ぶべき契機が必要である。これを提供するものとしてネットワーク(自己創出システムの機構)は理解される。

構成素の形式化はこの契機の記述を許すようなものでなければならない。

相互作用の実現契機の記述 相互作用を実現させる契機として最も簡明なものは「出会い」である。相互作用可能な構成素同志が出会うことによりそれらが相互作用すると考える。

この考え方、ほとんど自明な考え方は様々に形式化される。その中でも次のようなものが典型である。あらゆる出会いのパターンを想定しその全体を状態空間と考える。そして、新たな出会いの発生を、単に非決定的な遷移可能性として、あるいは確率を付与して確率的な遷移として、表現する。もしもネットワークの性質を狭めたいときは可能な出会いのパターンに何等かの制約を要請する。

しかし、この結合パターンを状態空間とする遷移系や確率過程として自創系を考察することは数学的研究課題としては成立するが、複雑系を論じるときに適切な方向というわけではない。というのは全域状態というものを導入してしまうからである。

Chemical abstract machine [4] の枠組は出会いパターンの全体には明示的には言及せず枠組におけるプロセス集合の作動としてそれを取り入れる。すなわち、構成素の無構造な集合を考え、その中の勝手な2要素同志が相互作用する機会を与えられると想定する。こうすることによりネットワークの問題は構成素同志の相互作用の仕方に帰着される。

インタフェースの特異性と修飾 このようにネットワークの構造を明示的に記述せずにネットワークについて議論を進めることが可能である。この場合にはシステム作動の鍵となることは構成素はインタフェースを持つと想定する所であろう。このインタフェースの特異性を深めることにより出会いの恣意性(非決定性)による岐路はネットワークの骨格を変化させるほどのものではないように想定することができると予想される。

さらに、構成素のもつ複数インタフェースの修飾という概念を導入することにより、ほかの構成素との相互作用の特定度がさらに高まる³⁷。

前述の枠組に共通する特徴は、複数プロセスを相互作用可能な状況におくとき(これを並列合成するという)、複数インターフェースを通してプロセス間でさまざまな相互作用が生じそれぞれのプロセス自身が変形・消滅・生成されそれに伴いネットワーク構造自身が変化する、という様相が表現できることである。ここには相互作用の局所性・分散性・非決定性も自然に現れる。

2.5 統一体

自己創出論における統一体概念 自己創出系論における統一体という概念は「閉域」として比較的明確な内容を持つように見える。

従来のシステム論では統一体を成すことの定義は「全体の整合的な挙動」という概念に基づいているが、

³⁷線形論理の種々の論理演算はそういう修飾法を与えていると見なせる

「整合性」は観測者に強く依存している。それに対して自己創出系論では自己維持(循環)という概念により統一体を規定しているために観測者への依存性は少し減っている³⁸

もう少し形式的に統一体を述べることを試みてみよう。構成素のタイプ³⁹のいくつかの集まり T があって、そのいずれかのタイプを持つ実際の構成素達の集まりが様々な出会いを契機として起こる相互作用を通して存続するとき、これを統一体と呼ぶことにしよう。これは、タイプの集まりへの実際の統一体の影のようなものである。

その際、 T に属するタイプ(これを T -タイプと呼ぶ)を持つ構成素同志の相互作用から生じる構成素は T タイプを持つことが要請される。これがまさに「閉域」の定義といってよい。しかし、非 T タイプの構成素(外部)との相互作用があることは許容されるだけでなく、その非 T タイプの構成素がなければ存続できないような閉域も統一体と呼ばれることから除外されない。さらに、 T タイプの構成素と非 T タイプの構成素との相互作用の結果非 T タイプの構成素が生ずることがあってもよい。

この統一体概念は、「挙動の整合性」の場合とは異なり観測者とは独立に定義されている。構成素のタイプの集合 T を指定し T タイプを持つ構成素の集まりが存続するときはその T タイプの構成素の集まりが統一体をなすと呼ばれるが、これは T に関する強い制約であり、観測者が勝手に決めることができるものではない。

一般になんらかの相互作用による産出系があるとき様々な閉域が生じるが、その閉域の相互関係は大きな多様性をもっている。その様相は閉包作用素 = 閉集合族 束の一般論で明確に表現できる。これについては2.6節で簡単に説明する。

統一体分裂と合体 T タイプの構成素の集まりが2つの統一体をなすことも可能である。そのみでなく、

³⁸郡司によるオートボイエシス批判の一つは「循環」によって統一体をとらえようとするのは観測者を排除することにはならず、むしろ形式世界に生命を収めてしまうことになる、という点にある([9, 1994.9p154])

³⁹個々の構成素について述べることは構成素数が莫大であることから学問の言説となることはありえないが、各タイプの構成素の個数(濃度)を考えることは可能だ、それがペトリネット(線形論理)の枠組みとなる。

一つの統一体が構成素の相互作用の進行に伴い2つの統一体を成すに到ることも有り得る。細胞の分裂はその典型例である。

2つの統一体が同じ T タイプの構成素から成るものである場合は融合する可能性も常にある。なんらかの遮断によらない限りこの可能性はなくならないと思われるが、遮断という概念は「境界はシステム自身が区切る」というオートポイエシスの構想と相容れないように思われる。現実にも細胞は融合することがある。

遮断はシステムの作動の中で生じる動的な様相の一つである。これは構成素の結合の状況によって実現されていると考えることができるが、今後検討を要する困難な問題の一つである。

高階の自創系 / 相互浸透 細胞 / 多細胞生物、神経系 / 有機体、の関係を如何に語るかは自己創出系論の大きな岐路となる。たとえばマツラナ等は、前者を自己創出系の構造的結合として、後者は自己創出系の一部を基盤とする新たな構成素群が構成する自己創出系として、考える。さらに、有機体が神経系という自己創出系と構造的に結合することによって新たな相互作用のモードを獲得し、新たな構成素の役割を果たして更に高階の自己創出系が形成されるとマツラナ等は捉える。

ここに作用的閉域の階層性の概念が出てくるが、河本 [21] はこのような階層性を批判し相互浸透というルーマンの発想を整備している。

なお、自己創出系における認識等に相当する自己言及的な側面を持つ作動を論ずるには、神経系と生体の関係の場合のように、自立した自己創出系を成す部分とそれを含む自己創出系とが相互浸透しているといった設定が必要になると思われる。すなわち、自己言及は構成素と全体との関係という設定で語れる様相ではなく、少なくとも1階の自己創出系とそれを含む自己創出系との構造的結合の様相として語らなければならないと思われる。

しかしいずれも、これまで述べたプロセス = 構成素という形式化に基づいてどのように論ずればよいか、私には見通せない。

結び

後半で議論するように生命をオートポイエシス的なものであれ、何らかの形式的なシステムで捉えられるとすることは、内部観測の視点からすれば的外なものとなる。しかし生命理解を脇におけば、自己創出系論はシステム記述の新しい枠組を与えている点でも重要だ。プロセス = 構成素という自己創出系の定式化は計算科学における分散系研究と相接しており数学的にも深い理論へと発展する可能性をもったものといえよう。

2.6 演繹的有向ハイパーグラフ

ここでは「複数のものが共同して他のものを生成する」という言葉の使い方を明確にする簡単な数学的構造を説明したい ([14])。「影響を与える」、「情報を伝える」、「制御する」、「支配する」も同じ数学的構造に従う「文法」⁴⁰を持っている。

この構造は閉包作用素・演繹的有向ハイパーグラフ・束ラベル付き集合・Moore 族・単純推論系などの、様々な同値な定式化が可能である⁴¹[12]。

有向ハイパーグラフによる定式化では、要素間の相互関係は

$$(1) \quad a_1, a_2, \dots, a_n \rightarrow b$$

という記号に基づいて記述される。ここで、 a_1, \dots, a_n, b は、システムの構成素ないし構成素タイプをあらわし、上の記号を次のような関係の速記法と考える。

- 構成素 a_1, \dots, a_n は構成素 b を支配する。
- 分子 a_1, \dots, a_n は分子 b を生成する。
- イベント a_1, \dots, a_n が起こればイベント b が起こる。

⁴⁰ウイトゲンシュタインがしばしば使う意味での「文法」。いくつかの特定な言葉の群の「文法」を考えると、それらがどのように使われるかを意味的なものも含めて見つめるということである。たとえば、数学でいえば各々の公理系がいくつかの言葉の集まりに一つの文法を与えている、というような意味合で「文法」がつかわれている。

⁴¹*要素が競合する場合は、少し弱い構造(最大元のない束)を考えることになる。これも、生命系理解のためには基礎的な構造の一つである。

- イベント a_1, \dots, a_n がすべて起こらない限りイベント b は起こらない。
- 命題 a_1, \dots, a_n から命題 b が推論される。

上のような関係は演繹的有向ハイパーグラフとなる。

演繹的有向ハイパーグラフの定義 X をシステムの構成素の集まりとする。(1) のような関係のいくつかの集まりを有向ハイパーグラフと呼び、その要素である(1) のようなものをハイパー辺 (あるいは生成) と呼ぶ。 a_1, \dots, a_n と、 b を各々関係 (1) の仮定・結論とよぶ。(1) が有向ハイパーグラフ Γ の要素であるとき、 a_1, \dots, a_n は Γ の下で b を定める (あるいは生成する) ということにする。しばしば Γ への言及は省く。

たとえば図 3 の左を見て頂きたい。これは 3 つの頂点 a, b, c と 2 つのハイパー辺

$$\begin{aligned} b, c &\rightarrow a \\ a &\rightarrow b \end{aligned}$$

を含む有向ハイパーグラフである。この有向ハイパーグラフの下では、 b, c が a を生成するが、一方 a は b を生成する。従って、 c がいつもあるときは a, b は互いに他を生成することができる。

有向ハイパーグラフが次の条件を満たすとき、これを演繹的であるという。

- (H1) どの要素 a も自分自身を生成する。
- (H2) a_1, \dots, a_n が b を生成しているならば、どのタイプ a についても、 a, a_1, \dots, a_n は b を生成する。
- (H3) 推移性: Γ_i が b_i を生成し ($i = 1, \dots, n$)、さらに b_1, \dots, b_n が c を生成するならば、 $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n$ の全体から c が生成される。

以上の条件は “ \rightarrow ” の解釈として、上であげた例のどれであっても明らかに成り立っている。

閉包作用素 X 上に演繹的有向ハイパーグラフ \rightarrow の構造が与えられると、閉包作用素と呼ばれる操作 C がべき集合 $\text{pow}(X)$ に定義される:すなわち X に入っているタイプの集まり A から生成できるものを全部集めたものを CA と定める。すると明らかに

(C11) $A \subseteq CA$ (A のそれぞれのタイプは自分自身を生成できるから⁴²。)

(C12) $A \subseteq B \Rightarrow CA \subseteq CB$ (「材料が増えれば、作れるものも増える」)、

(C13) $CCA = CA$ (A から作れるものを全部集めたものを材料にしてできるものは A から直接作れる。)

が成り立つ。これらの条件を満たすような操作を閉包作用素と呼ぶ。これにさらに $C(A \cup B) = CA \cup CB$ という線形性の条件を追加すると X 上の位相構造となる。この場合は、材料を合わせてそこから生成されるものを考えても、どちらかの材料だけから生成できてしまうということになり、要するに A と B という材料の集まりを合わせても特に新しいことは何も起こらないという意味で「線形」である。しかし、一般に線形でない閉包作用素の方が多い⁴³。

Moore 族 閉作用素の固定点を閉集合と呼ぶ。材料の集まりが閉じていいるというのは、それから何も新しいタイプのものは作られないことをいう。

閉集合と閉集合の交わりは閉集合となることは明らかであろう。一般に集合の部分集合の集まり A が交わりで閉じているとき、つまり、その集まりに入っている 2 つの部分集合を勝手にとってもその共通部分はまた A に入っているとき、 A は Moore 族 (\cap 演算で閉じた集合族) という。上記の対応により閉作用素と Moore 族 とは 1 対 1 に対応することがわかる。

束 A は meet 束になっている。束の概念は数学のいたるところに出現するが、また、日常的な概念にいつも潜伏している身近な数学的構造である。この概念は便利なものなので少し詳しく説明しておこう。束の定義は

- 大小関係 \leq を持つ、ただし、数の大小関係と違って、勝手な 2 要素が比較できるとは限らない。しかし、 $a \leq b, b \leq c$ ならば $a \leq c$ は成り立ち、また $a \leq b, b \leq a$ ならば $a = b$ となる。

⁴²これは生成についていえば強すぎる条件である。

⁴³線形代数を学んだことがある読者ならば、線形空間の部分集合に対して、それが張る部分空間を対応させる操作を習ったと思うが、それが非線形な閉包作用素の典型例である。

- 最小元(どの元よりも小さい元)と最大元がある。
- どの2つの要素 a, b も上限 $a \vee b$ と下限 $a \wedge b$ を持つ。

上限 $a \vee b$ は次の性質を満たすもの

- a, b の両方よりも大きい。
- a, b の両方よりも大きい他の要素 c があればそれは、 $a \vee b$ よりも大きい。

である。大小関係を会社の上下関係として解釈すれば、2社員 a, b の共通の上司の中で、最も身近な上司が一人だけいる場合にその上司を2人の上限といい $a \vee b$ と書くことになる。もちろん、必ずしもそういう上司が唯一人であるとは限らないから、いつも上限があるわけではない。図2で、左の図では a, b の共通の上司は c, d, e だが、 c も d も a, b に最も近いものとなっているので上限である上司はいない。しかし、右では、共通の上司が e, c なので、最も近い上司 $e = a \vee b$ がいる。

同様に、2人の共通の部下の中で最も偉い部下がいる場合はその部下が下限であり $a \wedge b$ と書かれる。

束ラベル付き集合 V の各元に束 L の要素でラベルをつけると、束の要素 l ごとに、ラベルが l 以下の元を集めてくると部分集合 A_l が定まる。この全体は V 上の Moore 族となる。ラベルとして使われたものの全体が L を上限という作用で生成するようにすれば、束ラベル付き集合と Moore 族とは1対1に対応する。

たとえば、 V は国民の集合、 L は議員の集合とし、議員には順序関係が入っていて束となっているとする。各国民は一人の議員を支持しているとする。このとき、 A_l は議員 l またはその議員が長となっている派閥内議員のどれかを支持者する国民を集めたものである。従って、議員 l は自分の直接的支持者だけでなく自分の派閥内議員の支持者も動員できるということになる。

図3、4は、上の表し方を2つの演繹的有向ハイパーグラフについて表示したものである。図4は、 b または d に a が加われば全体が生成される。また $\{c, d, b\}$ は閉域であるが、外部のもの a と相互作用する有りさまが現れている。また a 自身は、自分だけでは $\{a, c\}$ という閉域しか生成しないが、他の助けがあれば全体を生成してしまう。

三タイプの構成素の生成関係の分類 X が3個の元しかない場合でも、 X 上の閉包作用素は、13個ある(図5)。これは当時学部4年生であった松尾和雅によって分類されたものである。これは、コヒーレンス(部分間の相互関係)の分類として見るほうが有益かもしれない。最上部はどの部分も独立に動いている状況で、最下部はすべてが相互ロックして挙動している状況(つまり a, b, c のいずれも全体を支配している状況)である。この下にはすべてが凍結して動かない状況もあるが省略してある。

四タイプ構成素の生成関係の変化の筋書 4タイプ構成素の生成関係は186種類ある[12]。この場合、各部分が独立している状況から、すべてが互いに決めてしまうコヒーレントな状況までの変化の筋書きは無数とあっていいほど多いが、各ステップでどのような変化が起こるかは樋口証によって明らかにされた[12]。その筋書きの一例を図6、7に挙げておこう[14]。