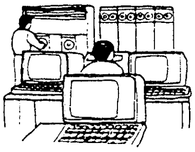
特別論説



情報処理最前線

トポソイドモデルの提案
—情報処理の新パラダイムを求めて[†]—

田 村 浩 一 郎[††]

1. はじめに

情報処理技術の発展の牽引力には二種類ある．1つは，他の技術とも共通することであるが，市場ニーズに直接応えるべく行われる技術開発であり，もう1つは，知能の外在化（道具化）を目指す情報処理技術に固有のものとして，その究極目標である人間の知能との対比によって，あるべき未来技術を見い出し，その実現を目指す研究である．あらためて歴史を辿るまでもなく後者が前者に多くの技術的新知見を供給してきたことは，明らかであろう．

すると，情報処理技術の進歩を根底において支えるのは，目標とする人間の知能をどう考えるかである．ところが，知能というのは，まさに見方次第でどうにでもなるものである．ある見方で見えるものを手本として情報処理技術の発展方向が決められているのである．

知能を生み出すものは，どんなメカニズムをとろうとも，複雑なシステムである．この複雑な構造と機能を持つ情報処理システムの構築法を建築にならってアーキテクチャと呼ぶ．これもまた，誰がどのように見るかによって大きく変わるものである．しかしながら，より抽象的に情報処理システムの基本構造を捕え比較することによって，それらに通底する基本的発想を明らかにすることができる．それは，しばしば技術者共同体によって，意識的，無意識的に共有され，情報処理システムアーキテクチャのパラダイムとされるものである．しかし，それはまた，上に述べたように，手本とする人間の知的活動の構造と機能をどのように見るのかという問題，すなわち，認識論，と深い水準で関係している．こうして，情報処理技術の発展の限界は，本質を追求するほどに実は《認識》という現象（活動）に対する《認識》の仕方に起因するといってよい．

そもそも情報処理におけるパラダイムとはどのようなものなのか，そして，どうあるべきなのか．この課題の追究は，現在直面している技術課題の本質を明らかにし，さらにそれを乗り越える道筋を示唆するものとなるであろう．達成度はともかく，本稿は少なくともそれを目指すものである．

2. 認知過程と関数と圏

人の認知過程を説明するには関数（写像）の概念がふさわしい．関数概念は，入力空間（定義域）の要素が出力空間（値域）の要素に変換される対応関係を示すものである．その対応を規則として与える場合には，入力空間における要素の位置を使用することが可能であると前提される．つまり，入力空間のすべての要素と与えられた要素との関係について，関数はいわば《知る立場》にあるものとして構成される[☆]．そして，出力値も，出力空間内に適切に《位置付ける》規則を与えることが可能であると前提されている．すなわち，関数は出力空間についても《知る》立場にある．これが関数に対する漠然とした概念であろう．関数は，入出力空間を合わせて1つの認知システムを形成するのである．この概念を抽象化し，精密化したのが圏理論である．

圏は対象 object と射 morphism および射の合成から構成される．圏であることの条件として，射を定めればその両端の対象（関数における定義域と値域に相当）が一意に定まる．射は，関数，作用，機能，推移，因果，依存，変換，対応，写像，射影，含意など様々な概念を抽象したものと考え

† Toposoid Model — A New Information Processing Paradigm — by Koichiro TAMURA (Electrotechnical Laboratory).

†† 電子技術総合研究所

☆もちろん部分関数はこのかぎりではない．

られる．そこに共通しているのは方向性の指定である．方向性はダイナミズムの本質である．なお，対象 A から対象 B への射の全体を通例にしたがって Hom（A,B）と書くことにする．

圏の概念を用いて認知過程モデルを再構成してみよう．もともと我々の認識論的立場は作用を第一義に置くものであり，我々の認識論を述べる体系として圏理論は極めて有効であると考えられる．

3. 基本モデル

原初的な分節は混沌（または空）☆の分節である．圏では射を与えると両端の対象が一意に定まるから，混沌は世界の推移を表す射の集合であると見るのがよいであろう．その全体を Hom（E,E）とする．混沌では考えられるあらゆる推移（あるいは作用）が未分化の状態にあるとする．ここには反照的対立もなく，ただ転変と漂う世界の状態の推移の集合だけである．その推移の 1 つを取り出すのが分節である．その図式を**図-1** に示す．矢印は，1 つの射を現わし，Hom（E,E）の一要素である．

図-1　混沌における推移

認知者が世界を認知するとき，すなわち，認識し，反応するとき，混沌を分節する．混沌に含まれる射を選択し（考察対象として分節し），分解する（複数の射の合成であると見なす）のである．我々が今，考察対象としている認知現象も現象であるから Hom（E,E）の一要素である．これを，環境 E と認知者 R の相互作用の合成であると見なす．すなわち，認知者を（圏用語での）対象 R, 環境を（同じく圏用語での）対象 E であるとすれば，Hom（E,R）の射と Hom（R,E）の射を合成したものが認識現象の 1 つを表すものとするのである．この関係を図式化すると**図-2** のようになる．ただし，$f \in$ Hom（R,E），$g \in$ Hom（E,R）とする．$f \circ g$ の全体は Hom（E,E）の部分集合になる．ここで "$\circ$" は射の合成を表す．

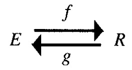


図-2　認知現象の分節

射 f は環境から認知者への働きかけであるから，これを情報作用と呼んでよいであろう．情報作用は環境の状態を認知者に伝える作用である．《情報》は，情報作用へのある入力（担体）とその出力（内容）の対である．認知者から環境への働きかけもまた，広い意味での情報作用といえるが，それには認知者の行動も含まれることになる．以降，認知者から見て前者を求心情報作用，後者を遠心情報作用と呼んで区別する．

このような射の概念で分節を解釈することには重要な意味がある．すなわち，環境も認知者も自存するものと認めず，単に射の両端にしかすぎないのである．もし，旧来の二元論的な感覚で分節を見るときのように，対象の自存性を暗黙の了解として議論をはじめるならば，環境と認知者の境界を定めるとか，あるいは，それぞれの輪郭を定めて両者を介在するものを見ようとすることになり，その結果，議論に破綻をきたす．特に，デカルトの二元論は，独立自存する認知者を《心》とし，心が身体を含む外部世界（これも独立自存すると見なされる環境）を認識するという構成をとる．すると，《知る世界》が忠実に《知られる世界》を映し出しているか否かの判断，すなわち両者の比較は誰がするのかという疑問が残され，結局《神》のような不可知な認識者が必要となる．我々の言葉で表現するならば，射が表す作用のどこまでを環境が行い，どこからが認知者が行うかを検討しても，所詮は辻褄があわなくなるのである．

4. 表 象 空 間

では，この構図で，《認知者》とは一体何を指すのであろうか．射を関数とすれば，f の値域であり，g の定義域であるから，認知者というよりも，その状態空間に相当すると考えることができよう．環境も同様であり，状況の空間であると見

☆ 分節と意味付けによる認識を経ないあるがままの世界は「混沌（荘子）」「空（仏教）」「カオス（ギリシア神話）」などと呼ばれる（[田村 94]）．いわゆるカオス理論の「カオス」はこのような本来の意味からはほど遠い．この語は，もともと，ガイア（大地）の大あくび（すなわち，のっぺらぼう）の意であったようである．同様に，混沌は「無秩序」ではなく，空は「無」ではない．

なせる．しかし，認知者側からの見え方は，作用 g を与えると反応 f を返すのが環境である☆．一方，環境から見れば，f と g の合成が認知者に見える．この視点から見れば，認知者は，ある状況をある状況に変えるものと見なされることになる．認知者の言明が認知者を表すものとすれば，まさに，状況を状況に変えるものであり，状況意味論［Barwise83］の基本的立場に対応するものとなる．このように，認知者も環境も，通常の物象化した（二元論的な）観念に基づいて見るならば，その輪郭は視点によって変わり，固定していないことになる．二元論的認識論はこのような問題を持っているが，この欠点を承知し，正しい理解を見失わないよう注意しながら，我々も時に便法としてそのような見方を利用することがある．

表象空間とは，以上のような意味での認知者の状態空間であるとする☆☆．こうして認知活動は状況空間と表象空間の相互作用を主体とすると考えることになる．

5. 情報作用

《情報作用》は再分節される．まず，（求心）情報作用を担体化作用と意味付け作用の2つの射の合成であると見なす．そして，担体化に付随する対象として環境と担体空間（担体で構成される空間）を考える．遠心情報作用も求心情報作用と逆方向で並行するものとして同様に考える．すると，**図-3** のような図式が考えられる．ここで，R' は担体空間，R は表象空間である．

ここで，再び，担体化や意味付けを誰が行うのかという疑問が生じるかもしれない．しかし，それは二元論的発想である．この図式では，認知者が行うものと見ることもできるし，環境が与えていると見ることもできる．しかし，どちらも（少なくとも我々のモデルにおいては）正しくない．

☆ ［Gibson79］はこの事情を環境に意味が存在するという表現で述べ，それを独特の用語である affordance と呼んでいる．認知者の「頭のなかに」意味があるとする従来の思い込み（パラダイム）に対する大胆な反論である．しかし，もちろん，「環境にのみ」意味があるとするのではない．二元論的パラダイムに対して警告しているのである．

☆☆ 「表象」representation という語はしばしば極めていい加減に使用されてきた．本来は，直感的に分かりやすい二元論的なモデルで言えば，「心に映ずる外界」というほどの意味であろうと筆者は解釈している．

図-3 認知現象における情報作用の分節

図-4 認知現象における連鎖

射はどちらの対象に属するものでもなく，反対に，どちらの対象も射に付随するものだからである．

ここで，担体空間における担体とは何であろうか．それ自体実は表象であり，担体空間は一種の表象空間である．したがって，担体化も情報作用の一種であると見なされ，担体化はさらに再帰的に限りなく分節されることになる．

圏の図式でこの性質を反映した認知現象をより精密に表すとすればどうなるであろうか．射 i を情報作用，i' を担体化とする．どちらも Hom（E, R）の要素である．また，意味付けの射を m とする．すると，

$i = m \circ i'$,

ただし，$i, i' \in I$,　$I \subseteq \mathrm{Hom}(E, R)$，

$m \in \mathrm{Hom}(R, R)$

となる．遠心情報作用についても同様である．これにより，**図-4** のような連鎖の図式が形成される．

このような分節は次のように考えても成り立つものである．すなわち，環境から表象空間への作用（変換，写像）とは，まず環境を認識する部分があり，次にその結果に従ってある出力を定めることであると考えるのである．このように考えた途端に，この作用を二分したことになる．表象空間から環境に向かう作用も同様である．人工知能でのプロダクションシステムで言うところの，ルールの認識部と行動部への分解である．作用（関数）というのは本来的にこのような入力機能と出力機能という二分化を秘めているのである．

この図式は豊富な内容をもち，様々な認識論的解釈ができる．まず，二元論的発想で認知者の輪郭をどう見るか．情報に内容を認める作用を認知者の行為であるとするならば，その輪郭は限りなく環境に近付くが，しかし，決して環境に達する

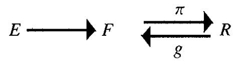


図-5 認知現象における調節機構

ことはない．また，あるところで認知者の輪郭を設定すると，その内側は表象空間の上でのやり取りであるから内部的推論である．輪郭の外側は認識または行為の作用となる．

このように，輪郭は観測の視点によって揺れ動き，内側と見なしていたものが外側，つまり対象化され，外側とされたものが内面化されるのである．たとえば，通常の意識では自分のものとされる手足が，意識を変えれば観察の対象になる．こうして，（より内側の）自分が自分を見つめる構成ができ上がる．しかし，認知者の輪郭をいくら狭めても残るものがある．認識論でしばしば指摘されているように，自己と環境とはまさに内と外，上と下のように，反照的ではあるが相対的な分節の結果であり，境界は見方によって揺れ動くのである．

さらに，認知者の輪郭を仮想的に定めても，その認知者に固有の表象空間は一義には定まらない．表象空間とは認知者内での推理連鎖（射の連鎖）における射の接続点にしかすぎないのである．

また，情報の双方向性も重要である．求心情報と遠心情報の密着した相互作用によって認知機能は成立するのである．

しかし，この構図ではフィードバックによる自己調節の機能の説明は困難である．たかだか環境の条件によってまえもって定められた規定にしたがって反応が変わるだけであるが，ものの見方が内部状態の変化や環境の変化によって変わるというありふれた認識現象を説明できない．

6. フィードバック作用

以上の認知構図をさらに拡張する．人間の認知は，様々な周期で絶えず自己調整を繰り返している．これらは皆，環境から表象空間への作用を変化させるものであると見なせる．すなわち，ある状況が入力されると，それがある一定の変換を受け，認知者の表象空間に位置付けられるが，その値が遠心的情報作用への入力となって調節機構を動かし，それが環境から認知者への作用を変化させるのである．ニューラルネットモデルにおける逆伝播誤差修正，パターン認識におけるパターン学習なども，このようなフィードバックによる調整機能の例である．また，最近ソフトウェア工学で有用性が高まっている自己反映機能 self reflection もここでいう自己調節機能の一種である．

この調節機能を説明するためには，関数空間の性質を持つ対象を我々の圏に含めなくてはならない．関数（作用）を変化させる（あるいは選択する）機構を説明しなければならないからである．圏理論では，関数空間に相当する対象を対象のベキ表現で示す．たとえば，状況空間（環境）から表象空間への関数の集合（関数空間）を想定したとき，それに相当する圏の対象を R^E と表す．この対象および関連する射が数学的空間のベキの性質を持つためには条件が必要であるが，それは満たされるものとする．ほかにもこれからの記述に必要な種類の対象が含まれるものとして，我々の圏は積閉包圏 Cartesian closed category であると仮定する☆．

この準備の上で，再度，求心的情報作用の分節を試みよう．すると**図-5** のような図式が考えられる．ここで F は $E \times R^E$ の部分対象であるとする．部分対象とは部分空間に対応するものである．圏が部分対象を持つには条件が必要であるが，その条件を満たすものは後述するトポスである．F が $E \times R^E$ そのものにならないのは，認知者の能力の限界，または，処理の効率化という積極的意味合いから制限されると考えられるからである．射 π は E の要素を R^E の要素である関数に適用する評価関数に相当する．

環境の状態，すなわち状況は，状況を表象に変換する関数（内在化関数）と対になって射 π に入力され，射 π により値が評価される．すると，その評価値が射 g によって変換されて R^E の要素である関数となる．こうして，内在化関数が調整さ

☆積閉包圏は，λ 計算型の関数計算と直観命題論理とを統合し，λ 計算＝証明過程であることを示すことのできる圏である［田村 82b］．このことは語られる認識論の水準を示唆するものと思われる．すなわち，ここで議論している関数は同時に推論でもあるが，命題推論の水準であり，一般の述語推論を表すことはできない．これについては後述する．

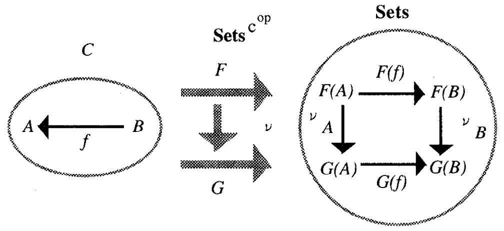


図-6 $\mathbf{Sets}^{C^{op}}$の対象（関手）と射（自然変換）

れるのである．

この図式を見直すと次のことが分かる．求心情報作用を分節する中央の対象 F とそれに付随する射 π とを合わせると，まさに情報認識機能の別な表現になっている．すなわち，環境の状態を表象に変換する機構を《対象化》し，《内部》に組み込んだものと見ることができる．認知過程の中間に部分認知機構を組み込み，それを射 g で制御する構図になっているのである．この構図もまた，この意味で再帰性を持っている．すなわち，部分認知機構も同様にその部分認知機構を持ち得るのである．

7. 圏と集合

これまでの議論では，簡単化のために圏の理論的検討をあまりせずに，認識論的な解釈を自由に施してきた．圏での議論は，ある対象の性質を他の対象との関係で規定し，あるいは性質を調べるという構成をとる．そこで，これまで行ってきた議論，特に，関数空間やその部分空間を対象と見なす議論等については，それを可能とする条件について吟味が必要なことは言うまでもない．しかもそれは，以下に述べるように，単に数学的な厳密さのための吟味に終わるのではなく，その議論の道具立て自体が豊かな記述能力を持ち，多くの分野の共通的な基礎を与えることになるのである．特に，情報科学の重要な概念である関数と論理との統合化された体系を与えてくれるものとなる．このことは，認識論を深める上でも貴重な示唆を与えてくれるものと思われる．以下の議論は主として［田村82］によっている．

先に述べたように，我々の認知モデルを構築するにはすでに積閉包圏の導入が必要になった．確かに，積閉包圏は，対象を集合，射を集合間の写像（関数）と見なせば，集合の集まりを抽象化したものであると見ることができる．事実，任意の集合を対象とし，集合間の写像を射とする圏 **Sets** はそのようにして積閉包圏となる．しかし，集合を論じるときに必ず生じる部分集合の全体，すなわちベキ集合の概念が積閉包圏には表れてこない．つまり，個々の集合の内部に自由に立ち入って論じることができない．そこで，このような概念を明確に導入する必要がある．そうしてできるのがトポスである．

トポスは正式には

積閉包圏

＋ 部分対象分類器 subobject classifier

として定義される．ここで，部分対象分類器とは部分対象を識別するための圏理論における一種の仕組みである．

詳しい説明は省くが，部分対象分類器は真理値関数とその値域の真理値集合に相当する．そして，**Sets** はトポスになるが，その部分対象分類器の真理値集合は2つの要素（真と偽）を持つ集合になる．これが古典論理の土台となる集合を特徴付けている．しかし，一般のトポスでは2値に限らない．

豊かな内容を持つ圏を構築するために集合論をモデルに様々な仕組みを追加してトポスができ上がる．するとトポスは集合の集まりの性質を持つのは当然として，集合には見られない興味深い性質を持つものになる．このようないわば **Sets** を超えるトポスの代表例として，任意の圏 C から圏 **Sets** への対応から作られる $\mathbf{Sets}^{C^{op}}$ がある．これは C の各対象に **Sets** の対象である集合を対応付ける対応（関手と呼ばれる）を対象とし，関手間の射を，圏 C での射を集合間でのある《自然な》変換に対応させる自然変換とする圏である．この圏は，トポスになる．関手は，圏 C の射（推移）を集合の写像（推移）に対応させるものであるから，《動く集合のプロセス》を示すと見ることもできよう．

大まかに言って，Kripke の可能世界 possible world を圏 C の対象と見なせば，関手で対応付けられる集合は可能世界を構成する要素の集合であるとも見なせよう．これを Kripke モデルと呼んでいる[Goldbratt79]．しかし，単純にそれだけではなく，$\mathbf{Sets}^{C^{op}}$ は，関数概念，部分集合概念，そして，集合の要素概念などを表す仕組みを持つ

$$
\begin{array}{ccccccc}
E(A) & \rightarrow & E(B) & \rightarrow & \cdots & \rightarrow \\
\nu_A \downarrow & & \nu_A \downarrow & & \cdots & \\
E(A) & \rightarrow & E(B) & \rightarrow & \cdots & \rightarrow
\end{array}
$$

図-7　環境の現象

ため，関数と関数についての論理とを意味付ける仕組みとなっている．すなわち，多種高階直観論理の意味論を与える空間となっていることが言える．そして，部分集合分類器での真理値はもはや二値ではなく，一般に無限となる．

8. トポス的認識論

想定する圏を $\mathbf{Sets}^{C^{op}}$ であるとして，我々の認知システムモデルを再解釈するとどうなるか．環境 E はあたかも圏 **Sets** の対象，つまり集合であるかのように見なした．しかし，この構成では要素間の対応付け（推移）が現象として与えられるだけである．もちろん，実際は，転変とうつろう実世界の変化にある種の法則性を見い出してそれを現象として認識するのである．ここで，環境 E を $\mathbf{Sets}^{C^{op}}$ の関手とすれば，E は圏 C にしたがって推移する状況系列を表し，環境 E から自身への射である自然変換の成分は状況系列間におけるなんらかの写像となる．すなわち，うつろいゆく状況間にある種の対応関係を認め，それを現象として分節し同定することが認識であるという我々の認識観により近いモデルを与えてくれるものであると言えよう．たとえば，「雨が降る」という現象を我々が認めるのは，「晴れている」というそれ自体無数に変化する状況列と「雨が降っている」という（これも無数に変化する）状況列とのなにかしらの対応関係として認識するからであろう．

9. 認 知 図 式

ここで，先のモデル作りに沿って，認知現象の分節を行う．射 $n : E \rightarrow E$ を2つの射 $f : E \rightarrow R$ と $h : R \rightarrow E$ との合成であるとする．

表象空間 R は，ここまでの構成においては環境 E とまったく同格な関手であり，対等である．ただ，認識論的に解釈すれば，万象を含む環境が変換 f によってより縮退されたものになると考えられる．たとえば，認知者から見て静止している物体は，時間要素を捨象して同一物と見なす，などである．この場合，環境の現象においては，個体は状態推移によって別なものと区別されるものであっても，表象空間 R においてはそれは異なる状態を持つ同一個体として表せられる，というモデルを作ることができる☆．このように，何を区別し，何を区別しないかという議論をこの理論的枠組みの中で行うことが可能である．

適応や学習など，認知における調節機能は《内在化作用》の変更（調節）によるとした．この内在化関数は，E から R への関数である．トポスは積閉包圏であるから関手間の関数関係が定義できる．

この関係は《外在化作用》についてもいえる．表象によって外在化関数 h が調節される．すなわち，調節作用により外在化関数空間のうちの1つの関数が選択される．この調節は，しかし，内在化作用に対する調節と異なり，予測的行動を行うアクションセットとでも呼ぶべきものである．

内在化関数がスキーマ理論で言う図式であるように，行動においてもパターン化された行動が考えられる．その1つが選択され，それにパラメータが与えられることによって具体的な行動が作られるのである．[Neisser76] は，「スキーマは計画であるのみならず，計画の実行者でもある．それは行動のパターンであることに加えて，行動に備わるパターンでもある.」とし，その証拠を心理学的にも生理学的にも認められるとしている．こうして，認知現象は**図-8** の図式になると考えられる．

外在化作用の結果が環境変化となり，それが内在化作用によって認められるから，循環作用を形成する．したがって，関数 $g1$ と関数 $g2$ とがフィードバックあるいはフィードフォワードのいずれとして働くのか，この図式からは必ずしも定まらない．関数 $g1$ は環境変化を《予測》して内在化関数 f を選択するかもしれないし，逆に関数 $g2$ は環境変化に遅れて（あるいは経験の蓄積による学習効果として）外在化関数 h を選択することもあるであろう．いずれにせよ，この図式では相互

☆ 同一個体とは何であるかという議論は，事物の《本質》とは何かという問題であり，プラトンのイデアを始め哲学の大問題なのである．我々の認識論的立場は，認知者の見方（すなわち，認知者と環境との相互作用で整合的に定まるもの）しだいであるということになる．

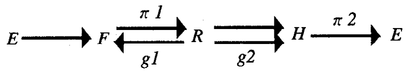


図-8 外在化作用を持つ認知図式

作用だけが規定され，時間関係が規定されていないことに注意が必要である．そして，それは認知現象の相互依存性を現しているとも言える．

背景となっている圏 C は環境と表象空間の両者の変化に共通するものである，物象的，二元論的な表現をすれば，環境と認知者に共通の場を提供するものであるといってもよい．この共有場は多くの場合時空間として想定することができる．

［Johnson87］は，身体的な構造がメンタルな認知構造を規定することを主張している．我々のモデルでこのことを表現するならば，内在化作用と外在化作用の対称性から外在化作用と類似の構造が内在化作用の構造に反映されるということになろう．そして，そこにおける調節作用こそが学習と適応のもととなるのである．

10. 開いたシステム

作用を実体とする圏論によって我々の認知モデルが一定の明確さをもって表現できることが分かった．しかし，同時にそのことによって生じる制約もある．数学的体系が必然的に内包するシステムとしての閉包性である．これまで議論してきたように，認知者は開いたシステムであることを大きな特徴としている．圏論による議論を踏まえた上で，この性質を取り入れたモデルの構築が必要である．ここではその議論を中心にして，さらに認知の構造を捕えるモデル化を進める．

内在化（外在化）関数を選択する調節／基準関数もまた環境に応じて変化する．ここに，通常の環境からの入力とは別の機能を認めざるを得ない．すなわち，認知システムが開いたシステムであることを意義付ける入力である．この機能は，高階直観論理モデルである $\mathbf{Sets}^{C^{op}}$ でも組み込むことはできない．数学の形式的体系では，議論の出発点から考えられる全てを対象にして初めて，数学的厳密さを持つ体系の構築が可能になる．しかし，そのような体系においては，考察対象を拡大するようなメタな調節を考慮する開いたシステムのモデル化はできない．

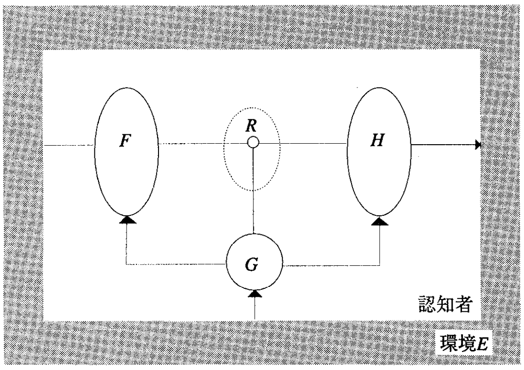


図-9 略図化した認知者と環境

そこで，以下は略図に頼ることにする．この議論を踏まえて図-8 を略図化したものが**図-9** である．ここで，G は調節関数空間であり，外部制御によりこの中から調節（基準）関数が選択される．また，従来どおり，F と H はそれぞれ内在化関数空間と外在化関数空間，R は表象空間である．

ただし，図-9 でこれまでの作用（射）主体の観点を変えていることに注意が必要である．我々の立場からすれば，本来は，環境も認知者もその輪郭は可変であり，特定できないものとした．しかし，この図では直観的に分かりやすい略図を作るため，輪郭を持つ個体の存在を第一義におく通常の物象化した認識観に合わせ，環境との相互作用を認知者の輪郭に入るものとしている．したがって，ここでの認知者とは関係を作る項の 1 つなのではなく，作用（射）である☆．そして，その境界は流動的である．また，第 2 に重要な変更として，調節関数の選択を外部（環境）からの入力によるものとした点である．これは認知者システムの開放性を表す．すなわち，調節関数 g は，環境からの特別な指示により選択され，選択された g は表象にしたがって内在化関数と外在化関数を変化させる．内在化関数空間 F は認知者が持つ環境モデル（内在化関数の族）を形成し，そして，外在化関数空間 H は認知者の行動（たとえば，計算）モデルを形成すると考えることができよう．これらの形成と作用の選択には，調節関数空間 G を通じての環境からのメタ指示が重要な要因となる．これが開いた認知システムの特徴である．

ここで，$E \to R$ および $R \to E$ の作用過程の構成を見ると，いずれも《外側》からの制御によっ

☆《認知者》というよりも，《認知射》というべきか．

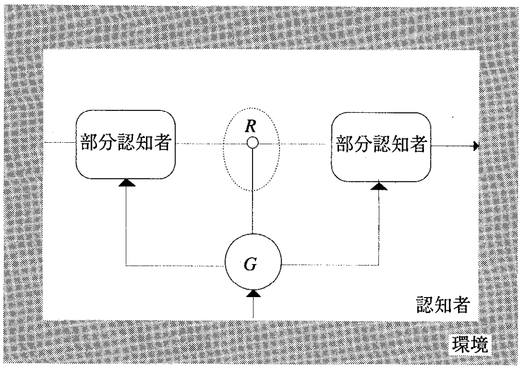


図-10 認知者内の部分認知者

て《外側》への反応を変える機構になっている．すると，この点に関しても我々の認知者モデルと相似であることが分かる．すなわち，認知者の中の認知者（部分認知者）を構成している．外側の認知者が内側の部分認知者を制御することによって，自らの機能を発揮していると考えることができる．このことを図解したものが**図-10**である．

部分認知者の内部にもその部分認知者を持ち得る．この再帰的構造を，ここで述べているような物象化したイメージで表現するならば，認知者は環境の内部にあり，その認知者もまた内側に部分認知者を含み，部分認知者にとっては認知者がその環境となる．こうして，この再帰性は，内側にも外側にも認知者構造の階層を伸ばして行くもとになる．

11. 部分認知者としての記憶

このモデルでは記憶をどのように解釈するべきであろうか．記憶もまた，ある入力に対する応答をするものであるから，作用の1つである．たとえば，コンピュータにおける記憶はアドレスが入力されるとそれに対応する値を返す．記憶の参照は，記憶作用（関数）に入力値を与え計算することである．すなわち，我々の言う部分認知者の1つとして考えることができる．記憶の更新は部分認知者に対する外側からのメタ調節である．

心理的な記憶はどう解釈できるだろうか．たとえば，「あれはどこに置いたのだろうか」とか「あの人に会ったのはいつだったろうか」という自問をひとはしばしば行い，自己の《記憶》に問い合わせる．この記憶とは，内側の自己を部分認知者という一種の環境（自己ではない他者）と見る視点から生じるものであると考えることができる．すなわち自己の部分の外在化である．このような心理的外在化は記憶に限らず，自己意識一般にともなう現象であろう．ひとは情報化作用の連鎖のほとんど任意の箇所に観測点を定めることができるのである．

12. 共同認知

環境と認知者（表象空間）は，我々のこれまでのモデルでは認知射（内在化作用と外在化作用）の両端に位置する項として同格であった．しかし，物象化された認知者モデルでは，環境は認知者の外側にあるとされた．このイメージは，複数の認知者の集団を考慮すると，より明らかになる．認知者が別な認知者と作用し合うときには環境を通じて行う．そしてある認知者が他の認知者を認める（表象する）のは環境の一部としてである．認知者が自分自身を認めるとき，それは特別な他者として認める☆ことであり，やはり，環境の一部と見なすことになる．我々のモデルでは，環境，および複数の認知者はいずれも圏 C で規定される共通の事象を背景に持つことに注意する必要がある．この構図を第三者（認識現象の観測者）から見たときは**図-11**のように表せるであろう．しかし，いずれの認知者にとっても環境とは（対自化された自分を含めた）他者をも含むのである．

この円陣上の相互作用が複数の認知者による共同作業を形成すると考えられる．しかし，上で述べたように，システムの開放性による外部からの作用を忘れてはならない．このことを考慮して共同作業の場を図解するならば**図-12**のようになろう．ここで，それぞれの認知者の作用を統合する射 i を導入している．また，各認知者は射であるから，必要に応じてそれぞれが直列に分解されることはいうまでもない．

それぞれの認知者から見れば，自分の外側は環境である．しかし，複数のそれらが1つの認知者のようになるためには出力の統合が必要である．各認知者にとってはそれは環境に属する作用であるが，それを切り出し，複数の認知者を結ぶものと見なすことも我々の分節による認識の結果である．このように見るならば，認知者の部分認知者への分節結果として共同認知を見ることができ

☆ ［廣松 82］でいう《所知としての能知》に相当しよう．

る．そこで重要な役割を果たすのが，これらの認知者の出力を統合する射 i である．射 i の入力端は，各認知射の出力空間の合成積であり，出力端は集団にとっての環境であり，その環境からフィードバック入力がもたらされ，各認知者に特殊入力される．こうして，共同認知ができ上がると考えられる．すなわちこの環境でのパラダイムが形成される．ここでのモデルは，したがって，自己調節によって形成されるパラダイムだけでなく，共同体としての共通の調節指示によって形成される種類のパラダイムをも視野に入れることになる．

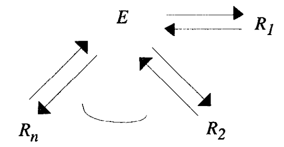


図-11 複数認知者による認知

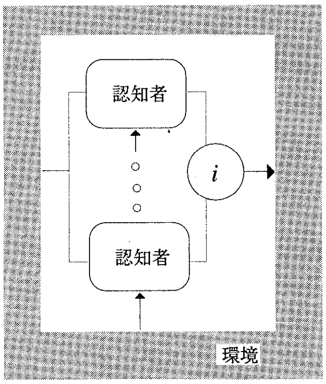


図-12 共同認知

13. トポソイドモデル

認知者の内部に部分認知者を想定できるとしたが，この部分認知者が複数の認知者からなる共同認知であると考えることができる．入力は複数の部分認知者に分担され，その処理が統合されて認知者の表象となるが，その表象は行動として外部に出力されるだけでなく，作用 g を通じて各部分認知者にフィードバックされ，その機能を調整する．この認知者自身がまた，環境によって調整を受けるのである．それを略図化したものを**図-13** に示す．このように，全体と相似の構造を部分に再帰的に持つと想定され，これが認知者という知的システムの重要な特徴の 1 つであると考えられる．しかもどの認知者も外側に環境を共有し，また，認知者と環境との共通の背景として圏 C で表される変化の規定があり，その共通基盤の上に作用が形成されるのである．これが我々が到達した認知システム，すなわち情報処理システムアーキテクチャの基本モデルである．

これまでの議論で見るように，このモデルは，人間の認知過程を含む情報処理システムを様々な側面から検討して得られた各種，各水準のパラダイムを総合し，それらの基底をなすと思われる共通機構を抽出したものである．したがって，各種の情報処理システムが持つ特徴を備えているため，このモデルを一言で表現することは難しい．しかし，トポスモデルに開放性を取り入れて作られたものであるから，あえてこのモデルをトポソイドモデル Toposoid model と呼ぶことにしよう．ここでいう開放性とは，単にシステムの開放性のみを指すのではなく，認知現象を考察する作業における分節に必然的にともなうところの認知システムの本質である相互依存性を含ませたい．認知システムの考察は，純粋に客観性を追求できる（というパラダイムに基づく）自然科学，あるいは自然科学に基づく多くの工学における考察とは，根本的に異なることに再度注意したい．考察者の持つ（意識的，無意識的）パラダイムと独立に認知システム（情報処理システム）を考察することは，いずれにせよできないのである．そして，トポソイドモデルを認知パラダイムとして主張することは当然ながらこのことを主張することになる．

14. 認知者と環境

二元論的物象的認識観は追求するほどに綻びの出るものであるが，現実に我々自身，皮膚を境とする肉体を持ち，さらに機械的なシステムを構築するには，物理的境界（輪郭）を持つ必要に迫られる．現在の情報処理システムでは，各種の作用はソフトウェアとして実現するが，それもモジュールとして輪郭を持つ体裁をとる．すると，作用を，何らかの輪郭を持つ《もの》として取り出さざるを得ない．実際，関数も，プログラムも，記

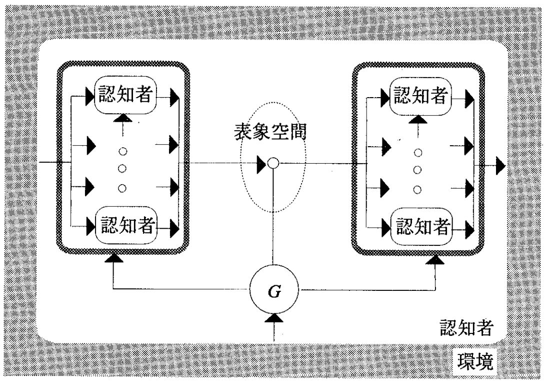


図-13　トポソイドモデル

述された途端にそれは両端の対象あるいはそれに連なる作用から切り離されたものと化すのである☆．本来無理があるのを承知で，トポソイドモデルによる認知者の図式も作用を切りとり，環境と分離する輪郭を描いている．

ここで，この不自然な切り出しにともなう注意をいくつか述べる必要がある．まず，この切り出しは任意の箇所で行えるものであって，必然性はないということである．内在化作用も外在化作用も，ほとんど任意の段階に分節することができるのである．そして，恣意的に「切り出した」認知者の先は環境に直結するものではない．これが，略図において環境にハッチを入れた理由である．すなわち，認知者の輪郭には任意性があり，そして，その輪郭を果てしなく広げても環境に（それが何であれ）達することはできない．つまり，認知者（という主体を認めるとして）への入力データを認知者が受けた途端にそれは情報内容をともなうものとなり，同時に，認知者が制御できる範囲には限りがあるということである．これも本来，両端の対象を含めた作用である射を，対象と純粋作用とで分離することは決してできないとする我々の認識観から出てくる帰結である．対象，あるいは作用だけを分離できることを暗黙の前提とする二元論的立場にはこの議論は生じないかわり，奇妙な不可知論や論理矛盾に落ち込むことは前に述べた．そこで，ある種の妥協として，むりやり切り出した認知者は，本来は環境と同格であるはずのものが，同格ではなく，認知者は環境には達しえず，環境を制御できないものであるということになる．しかし，環境に対して主体性がまったく持てないわけではなく，外在化作用が環境への影響力を保持している．環境の輪郭をいくら膨らませても，同じ理由から，認知者の外在化作用を完全に奪いさることはできない．これが，古来，相対主義的哲学に対する批判の根拠とされた主体性の喪失の問題に対する我々のパラダイムの解答である．

☆関数では定義域と値域として，また，プログラムでは入出力パラメータの型として両端の対象が明示的に指示されるが，しかし，これらの対象につながる作用とその先に連なる対象を無限に連鎖させる表現，あるいは実行システムは実際にはあり得ず，ある単位（モジュール）で境界を定めざるを得ない．

15. トポソイドモデルの特徴

ここで，これまでの議論を整理することを兼ねて，トポソイドモデル自体が持つ特徴とそれから導出される情報処理システムとしての性質を列挙しておこう（紙幅の制限のため，説明は省く）．

(1)　認知者と環境との相互依存性
(2)　自己調節とメタ調節
(3)　フラクタル構造
(4)　パラダイム階層
(5)　局所依存性と共有場
(6)　多重世界
(7)　能動的センス
(8)　多段的メタ調節と常時学習
(9)　部分認知者としての記憶
(10)　サブシステム間の協調動作

情報処理アーキテクチャにおけるトポソイドモデルの具体的意味と役割を知るには，表計算や，エキスパートシステム，ヒューマンインタフェースアーキテクチャなどの具体例と照合し，それらのシステムが持っている部分，あるいは欠如している部分を検証してみるのがよい．しかし，これもまた紙幅の都合で省略せざるを得ない．ご興味のある読者には是非この作業を試みることをお勧めしたい．

16. 最　後　に

情報処理技術においてパラダイム論は二重の意味で重要である．第一に，情報処理に限らず，工学研究者が自明とし，暗黙の了解としている技術の基礎的な枠組みとしてのパラダイムの変革こそが技術の発展の原動力となるからであり，第二に，情報処理技術の固有の問題として，人間の認知機

能の機械化を追及することから，認知機能におけるパラダイムの役割の明確化が必須だからである．

本稿では，現状の情報処理技術が直面している壁が，それがよって立つ認識論のパラダイムの構成に起因するとの立場から，情報処理的観点からの認識論の考察を行い，その考察をもとに新しい認知システムのモデルを提案し，それによって情報処理アーキテクチャのあるべき姿を再検討し，新展開のための指針となるべき原理を与えた．

参考文献

[Backus78] Backus, J. : Can Programming be Liberated from the Von Neumanstyle:? A Distributed Programming Concept, CACM , 21, 8 (1978).

[Barwise83] Barwise, J. and Perry, J. : Situations and Attitudes, A Bradford Book, MIT Press, Cambridge (1983).

[Casti89] Casti, J. L. : Paradigm Lost: Image of Man in The Mirror of Science, William Morrow, New York (1989).（佐々木光俊他訳「パラダイムの迷宮　科学の鏡に移る実像と虚像」, 白揚社，p.279 (1992)).

[Gibson79] Gibson, E. : The Ecological Aproach to Visual Perception, Houghton Mifflin, Boston (1979).

[Goldbratt79] Goldbratt, R. : Topoi: The Categorical Analysis of Logic, North-Holland, Holland (1979).

[Johnson87] Johnson, M. : The Body in The Mind The Bodily Basis of Meaning, Imagination, and Reason. (1987).（菅野盾樹　中村雅之訳「心のなかの身体想像力へのパラダイム転換」紀伊国屋書店 (1991).

[Neisser76] Neisser,U. : Cognition and Reality, Freeman, San Fransisco (1976).（古崎敬・村瀬旻訳「認識の構図」, サイエンス社 (1978)).

[田村 82] 田村他：論理と関数，情報処理，Vol.23, No.11, pp.1034-1048 (1982).

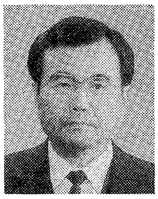
[田村 85] 田村浩一郎：「柔らかな論理」とは，柔らかな論理に関する調査研究，電子技術総合研究所調査報告第 211 号, pp.4-18 (1985).

[田村 92] 田村浩一郎：ヒューマンインタフェースと情報の構造，認知科学の発展，5, 日本認知科学会 (1992).

[田村 94] 田村浩一郎：混沌，カオス，そして空．人工知能学会誌，9, 3, p.333 (1994).

[廣松 82] 廣松渉：「存在と意味　一事的世界観の定礎―」, 岩波書店 (1982).

（平成 7 年 6 月 27 日受付）



田村浩一郎（正会員）

1940 年生．1963 年東京大学工学部応用物理学科卒業と同時に電気試験所（現，電子技術総合研究所）入所．以来，カリフォルニア大学バークレー校客員研究員を挟んで，同所に勤務．現在，同所長．この間，パターン認識，CAI, TSS, グラフアルゴリズム，論理プログラミング，分散並列処理アーキテクチャ，柔らかな論理，ヒューマンインタフェース，情報処理パラダイムなどの研究に従事．工学博士．