

学位論文題名

Internal logic viewed from observation space:
Theory and a case study

(観測空間から見た内部論理－理論と事例研究)

学位論文内容の要旨

この研究は、動物における具体的な神経認知実験の帰結を記述する適切な枠組みを見出すことを目指して行われたものである。動物を使った神経認知実験は、近年動物の高次の脳機能の解明を目指し研究を展開しつつある。しかし実験者がより高次の脳機能の解明に挑むようになるとともに、実験が実際に何を解明したことになるのかについての合意を得ることもより困難なものとなる。このことから、神経認知実験の実験結果を記述するための共通の基盤となる枠組みの必要性が増してきている。この研究では、現在実際に行われている特定の動物の神経認知実験に対して観測データの記述と分析の形式的枠組みとなるもののひとつを事例研究として具体的に提示する。この枠組みによって、枠組みが与える前提の元での実験内容の解釈について整理するとともに、その解釈の元での特定の認知心理学的仮説を検討する。このような枠組みは実験の前提の一部をより明示的なものとする。このことによって、この枠組みが前提の再検討による枠組み自体の修正をもたらす、神経認知実験における実験パラダイムと概念との発展に寄与しうる適切な言語となる可能性についても検討する。

ほとんどの場合、動物を用いた神経認知実験では、制御された感覚入力刺激に少数の有限の区分が与えられる。これにより、その区分された感覚刺激と神経活動のような観測データとの関係として観測対象は記述される。さらにこの関係としては、多くの場合、区分された感覚刺激に関して観測対象が統計的に有意な差をもたらすか否かが検討されている。このような神経認知実験において対象の観測データ（例えば神経細胞の平均発火頻度）は、最も一般的な場合、区分された感覚刺激の有限集合上の同値関係を与えるとみなすことができる。すなわちこの場合の観測データは、この同値関係により表される同値類内の刺激に対しては同じ反応をするように感覚刺激区分の集合を分割するものとして表されている。感覚刺激の区分と観測対象となったデータの区分の両者に設けられた前提が正しいものである限りにおいて、これは観測対象が感覚刺激から受け取る情報と捉えることができる。さらに異なる神経細胞の活動のように、複数の観測対象のデータが比較されるときには、もととなる共通の感覚入力刺激区分の集合 U 上の同値関係間の関係が問われることとなる。同値関係 $D_1, D_2 \subseteq U \times U$ に refinement による順序 $D_1 \leq D_2$ iff $\forall a, b \in U. aD_1b \Rightarrow aD_2b$ を与えることによって U 上の同値関係の全体は分割束と呼ばれる束をつくる。実験報告の統計的処理においてすべての入力刺激が比較されるのでない場合には、観測対象が作る構造は用いられた統計的処理に応じて分割束とは異なる束と成りうる。この構造は、上の情報の解釈のもとでは情報の流れを規定するものとして理解できる。例えば大まかには、直列的に情報が受け渡されるならば、各観測対象と対応する区分は束上をより大きな要素へと登り、情報が並列的に統合されるならばこれは束上の meet の要素を与えることに対応する。

この単純で自然な枠組みを実際の神経認知実験に適用し解釈した。本論文で取り上げた坂

上ら (1999; 2001) によるマカクザルを用いた実験では、色・形・動きのように複数の属性を持つ視覚刺激が与えられ、動物は各属性別に訓練された反応を別の刺激に従って切り換えることが求められた。同時に前頭前野の神経細胞活動が記録され、細胞は刺激による反応の違いの統計的検定をもとにして幾種類かの細胞のグループへと分類された。この実験に上記の枠組みを適用したとき、実験の統計処理による可能な区分の全体はあるプール束をなす。このプール束上で刺激から求められた行動を導く情報の流れの無数の可能性のうち、視覚刺激から行動への写像の合成写像への分解の方法の違いとして導かれる 2 つの可能性を対立する仮説として取り上げ検討した。これら 2 つの分解の違いは、動物による刺激の行動的意味への変換過程と、適切な刺激属性の射影すなわち選択過程との適用順序の違いに対応する。これらは、いくつかの仮定のもとで選択的注意に関する古くからの認知心理学上の問題である early selection と late selection の問題とみなせる。これらの可能性それぞれが感覚刺激上に導く区分と、坂上らにより報告された細胞群が導く区分とを比較した。1999 年の坂上らの実験においては、刺激から行動的意味への変換過程は単射として表されるものであり、この過程によって束の要素として表される刺激の区分に変化はもたらされないため、これらの仮説の検証には寄与しない。2001 年の実験では、単射でない変換過程を用いた実験が行われ、ここでは変換過程が属性の選択過程よりも先に行われる late selection と整合的な結果が示された。しかしこの場合でも、選択過程では視覚情報の処理経路として広く知られている腹側経路と背側経路の分離に関連してより複雑な多段階の選択過程が行われていることが示唆される。

本論文では、一般に、特定の神経認知実験が与えられたとき、観測者がその観測結果について記述しうるものを要素とする集合に適切な数学的構造を与えたものを観測空間と呼んだ。このように観測空間を定式化することは、その定式化自体について検討することを容易にすることによって、実験に含まれる前提をより明示的で形式的なものにする。例えば、行動主義心理学における刺激反応関係の記述と同様に、上記の実験の枠組みにおいては、観測空間を構成する集合は必然的に感覚刺激をもととしていることが明らかである。また、観測空間の集合は観測者が与える恣意的な区分の体系にも依存している。これは、観測者が観測対象の系内部で行われているものとして記述するものと観測者が与えた区分の体系とが安易に分離できないことを明示している。このような明示化によって、本論文の枠組みは実験解釈の可能性を適切に比較し解析する手段に道を開くとともに、脳の高次機能の解明に迫る新たな実験を提案するために寄与することが期待できる。

新たな実験を提案するにあたっては、異なる観測空間とその間の関係について定式化することが必要となる。事例研究で検討された実験では、観測空間は同値関係の束として表されたが、観測空間の集合に位相のような異なる構造を適切に導入する手段と、対応する実験の拡張とを検討することは、このような新しい実験の提案に役立つであろう。さらに、異なる数学的構造を持つ観測空間の関係を記述しうるような理論を構築することも必要である。また、真に脳の高次機能を解明し、対象の真の理解へと結びつけるためには、科学論上の概念との対応を図ることによって、観測者についての考察を無視し得ない複雑系一般の問題との関連を検討することも必要である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 津 田 一 郎

副 査 教 授 由 利 美智子

副 査 教 授 辻 下 徹

(立命館大学理工学研究科)

学 位 論 文 題 名

Internal logic viewed from observation space: Theory and a case study

(観測空間から見た内部論理－理論と事例研究)

博士学位論文審査等の結果について（報告）

近年、脳神経科学における測定技術の進歩には目を見張るものがあり、それによって、脳のさまざまな場所の神経活動と脳の高次機能との間の相関が議論の対象になってきた。しかしながら、いかなる測定技術をもってしても脳神経活動と認知、行動との間の一对一の対応を同定することは不可能であることは脳神経活動の複雑で多様な時空間パターン生成を見れば明らかであろう。このような状況においても尚脳神経活動と認知、行動との間に一定の相関が存在することが認められてきたが、この相関の信頼性、理論的限界は議論の対象になっていなかった。

著者は実験で得られる神経活動と認知や行動との間の対応関係が存在すると仮定した場合にその関係の構造を明らかにし、神経活動から得られる機能に関する解釈には理論的な限界があることを明らかにした。本論文は認知神経科学実験の定式化に関するものであり、動物の脳を対象に行なわれている認知課題遂行下における脳神経細胞の可能な活動状態を束によって分類したものである。その結果、著者は従来知られていなかった動物の選択的注意と神経活動の相関を導くことができた。内容を具体的にするために、著者はサルで行われた典型的な認知神経実験を取り上げ、実験を束によって精密に解析し、それを一般化することに成功した。脳内

の注意機構に主に三種類があることが理論から導かれたが、これは認知科学において知られているものと一致した。並列的な注意機構、分散的な注意機構、選択的な注意機構である。これらに応じて、刺激空間の分類方法が明らかにされ、束の構造の上に表現することができた。また、それぞれについて対応する高階関数が特定された。さらに、実験で発見された特別な条件下で刺激に反応する細胞の構造がグラフで表現され、理論的に得られた可能な細胞の特徴と比較された。その結果、実験で発見された細胞の間に細胞構築上の関係があることが解析されるとともにその関係が特定された。さらに、新しい細胞が存在することが予測された。実際そのような細胞はその後の実験によって存在することが確認されている。

これを要するに、著者は、高等動物の脳の神経活動と認知、行動のあいだの関係について束による分類と高階関数の特定を行うことで脳神経系の実験結果の解釈の数学的定式化と解釈の理論限界に関して新知見を得たものであり、脳神経科学を一つの典型的な対象分野とする複雑系一般に対する数学的な研究に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。