新進研究者 Research Notes

トポロジー的説明が抱える存在論的困難とそれを解決するための予備的考察

Ontological difficulties of topological explanation and preliminary thoughts for solving them

佐藤　聡太

Abstract

Topological explanation is considered a new type of scientific explanation, and its effectiveness has been recently argued for by some philosophers of science. But some argue that explanations that rely on mathematical facts, including topological explanations, cannot avoid ontological challenges. In this paper, we focus on Huneman's argument for topological explanation and examine whether what seems to be shortcomings of his theory could be solved by incorporating the notion of formal understanding proposed by Kuorikoski. We will also see how important the epistemological function of structural explanation is in scientific research.

(1) 研究テーマ

トポロジー的説明という概念は、Philippe Huneman（2010）が「メカニズム論的説明に代わって、生物学の研究におけるメインストリームになりつつある」と主張して以降、メカニズム論との対比という形でその特徴についての議論が行われ、これを擁護する哲学者からは「メカニズム論とは異なった様式で説明を与えるもの」であるとされている。

本研究においては、トポロジー的説明の持つ特徴を概観し、トポロジー的説明が乗り越えるべき課題について検討していく。また、この課題を解決する手法として、Kuorikoski（2021）の提案する形式的理解の概念を基に、トポロジー的説明を再構築することについて検討する。

(2) 研究の背景・先行研究

2-1　トポロジー的説明の概観

トポロジー的説明とはその名の通り、数学におけるトポロジー論とそれに

関連付けられるグラフ理論に立脚し、現象にトポロジー的性質を結び付けて説明を行う、という科学的説明の一種である。トポロジー的説明の基本的な概念を整理したのは Huneman で、彼は生態学の研究における実践例から、その特徴について考察している。ここでは、彼の 2010 年論文からその概要をつかんでおこう。なおここからはシステムを S、システムの特性や結果を X、空間 E にあるトポロジー的対象を S^r、あるトポロジー的説明を T^i とする。

彼が初めに注目したのは、生態系を構成する生物の相互関係についての研究の事例である。生態系の安定性と生物多様性についての研究において、ネットワークのトポロジー的性質に着目した説明がなされているというのだ。それらの研究の目的は、ある生態系（S）において、種間のネットワークである S^r を特定することにある。生態系における種間の関係にはさまざまなものがあるが（捕食者－被食者の関係、寄生者－宿主の関係など）、このような研究において重要なのは、ネットワークの大局的構造であって、相互作用の具体的な性質は、あまり重要ではないという。研究成果から例を引くと、生態系の大局的構造が、スモールワールド・ネットワークであるとき、2 つの種の間は常にいくつかのノードがあり、それの中の 1 つが削除されても、他のパスからつながっていられる。ゆえにこのような生態系（S）の持つ、スモールワールド・ネットワーク（S^r）であるという特性は、生態系が種の削除や侵略に耐性があることを説明する。このようなときに、生態系のネットワークの構造には注目するが、具体的にノード間のパスがどのような関係性であるかには、注目しないのだという。これが、トポロジー的説明の持つ非常に面白い特徴の 1 つである。トポロジー的説明は、現実の現象が持つ細かな具体性を捨象することを認め、トポロジー的性質が認められる部分に着目して説明を構成する。このような、ある意味「メタ的」な観点からの説明実践がトポロジー的説明である。この点については Huneman（2017）で面白いたとえ話をしている。「稜線上にある石が谷底に落ちることを説明するときに、その落下ルートを示す必要はあるか。」この問いに Huneman は、山と谷が持つ、位相空間における特性に言及するだけで十分ではないか、としている。このように具体的なメカニズムへの言及を回避することが出来るというのが、トポロジー的説明の特徴である。

さて、Huneman は 2010 年の論文の中で、メカニズム論的説明との差異を強調する主張を行っており、そこからもトポロジー的説明の特徴が見て取れる。それが、包括性である。一般に、現象に対する厳密性と包括性はトレードオフになるとされているが、トポロジー的説明は、包括性の高い説明を提

供する戦略であるといえる。先述のように、トポロジー的説明は大胆な捨象を積極的に行うことを動機づける。これが高い包括性を生んでいるのだ。Huneman（2010）は、遺伝学の分野における事例から、この点を強調している。

遺伝学において、ある遺伝的な攪乱が、どの範囲で、どの程度の影響を持つかということは、その種がどのくらいの遺伝的な頑健性を持っているかということにつながる。これについての説明には、伝統的な遺伝学に基づく説明と、ニュートラルスペースという概念に訴えるものがあるが、その両方においてメカニズム論的説明より包括的に物事を扱うことが出来るのが、トポロジー的説明であると Huneman は主張している。初めに伝統的な遺伝学アプローチの方から見ると、トポロジー的な同相の概念が役に立つという。DNA の塩基配列が複製され、分裂するときに、配列が変わることがある（減数分裂における組み換えの際は特に顕著だ）。このときに配列が変わっても、そこから合成されるタンパク質には影響がないケースや、よりマクロな代謝活動には影響しないケースがよくある。このような場合に、トポロジー的な同相が維持されていると、主張することが出来るという。次いでニュートラルスペースについて見てみよう。ある塩基配列をノードとして置き、そこから 1 回の突然変異で到達可能な配列を辺でつなぐ。そしてその変異した配列が、元の配列と表現型的にどの程度異なるかを評価する。これを繰り返すことで、どのくらいの変異に耐えられる配列であるかをグラフ論的に評価するのが、ニュートラルスペースの考え方である（注 1）。これはグラフに落とし込んで評価するもので、具体的なメカニズムに依拠するわけでもないから、トポロジー的説明と相性が良い。ここまで見てきた 2 つのケースどちらにおいても、トポロジー的説明はより包括的な説明を提供できる。これはメカニズム論的説明が、具体的な実体と活動に依拠することで、包括性を高めにくいことと対照的だ。

以上を踏まえて、トポロジー的説明の特徴を再整理する。まず 1 つ目の特徴は何よりも、位相空間上の概念に訴えて、現象を説明しようと試みている点である。2 つ目は、トポロジー的性質にかかわらない部分についての捨象を大胆に行うことである。3 つ目は捨象によって得られる包括性である。

2-2　トポロジー的説明の抱える課題とそれに対する擁護

数学的事実が現実世界の現象をどのように説明するのか、すなわち数学的事実に説明力はあるのか、という点は、トポロジー的説明の正当化において重要なテーマである。これを解決するための議論として Huneman（2017）

は、「構造的説明」という新しい概念をベースに数学的事実が説明可能性を有し、説明的でありうることを主張した。それによれば、数学が説明において果たす役割には、表象的な役割と、説明的な役割の 2 つがあるという。このうち表象的な役割についてはおいておき、説明的な役割について論じることで、数学的事実の説明力を擁護しようとこころみている（説明における数学的記述がすべて説明的であると主張するわけではない）。説明的な役割を果たす数学的事実について、具体的にどのような形で役割を果たすのかというと、説明的な役割を持つ数学的性質は、説明におけるメカニズムを制約するように働くというのである。Huneman は、数学的記述は何らかの数学的性質を示すとしたうえで、研究対象のシステムがその数学的性質を示すとき、メカニズムはその数学的性質を満たすように振る舞わなければならない。このような場合、メカニズムがどのような振る舞いをするかについての制約を説明するのが、数学的性質の役割になる。

ここで、正規分布についての彼の議論を少し見てみよう。中心極限定理によれば、リンデベルグ条件を満たす確率変数列は、正規分布に収束するという。ここで、ある現象についての観測値がリンデベルグ条件を満たしたとき、その観測値は標準正規分布に収束する。ここで彼が主張したいのは、科学者が検討するのはその観測値が正規分布になるメカニズムであって、それを逸脱しないように数学的性質が制約を与えるということである。このような場合、数学的性質が科学的説明の前提を構成し、メカニズムについても説明的に働く数学的事実に内包されて機能するため、数学的事実の説明力が認められると Huneman は主張する。またこれに関連して、Huneman は反事実条件についての主張も行っている。数学的事実が異なる世界を想定し、これについての推論を行うことで、反事実条件についての推論が行えるとしている。

(3) 筆者の主張

3-1 擁護への疑義

ここでは Kostić（2022）および、Kuorikoski（2021）を基に、Huneman の主張について検討する。Kostić は、トポロジー的説明を擁護する立場の哲学者であるが、Huneman の構造的説明では、トポロジー的説明を擁護できないと主張している。Kuorikoski は科学的説明について、推論主義の立場から論じている哲学者で、事実に依拠した説明の重要性を強調しており、数学的説明そのものについて否定的だ。

Kostić の主張する Huneman 説の欠点は 3 点にまとめられる。１つは、表象についての課題。Huneman の主張が、現実の現象と「距離をとっている」

ものであることはこれまで見てきた通りであるが、これが現実との関係性を不透明にしていると Kostić は主張する。２つ目は反事実条件についての課題。Huneman（2018）では、反事実条件について、数学的命題が真でないならば、システムは特定の性質 P を示さないだろう、という記述をしている。数学的命題が真でなかったとき、という状況を検討するというのは、非常に面倒な意味論的課題にぶつかる。数学的言明が偽である可能世界は、存在しえないためだ。３つ目は必然性についての課題である。Huneman の主張では数学的事実が、現象の説明を制約するという主張になっており、数学的事実が強力な必然性を有していることになる。これがトポロジー的説明の自由を束縛するという主張である。

さらに Kuorikoski（2022）の指摘する、数学的説明全般が抱える課題から Huneman の構造的説明を批判しよう。Kuorikoski によれば、存在的な従属関係に説明が依拠するとき、数学的説明は認められない。反事実条件についていえば、数学的反事実条件は従属関係を不透明にしてしまうから、存在的従属関係を破綻させてしまうので、説明として不適当になるという主張である。Huneman（2018）が、反事実条件に依拠した主張をしていることは上述のとおりであるから、この点について掘り下げて考えてみよう。Kuorikoski によれば、数学的構造に矛盾を挿入して反事実条件を論じるためには、挿入前後の数学的構造を何らかの形で関係づける必要があるが、これを正当化することは非常に難しいという。例えば、反事実条件推論における原因変数の「担い手」について考えてみよう。因果的な説明などでは、仮説的実験などを通して、同一の担い手についての反事実を研究可能である。それに対して、数学的対象は数学的に定義されただけの存在であるから、その定義を変更することは対象の同一性に大きな影響を与えてしまうという。つまり Huneman の説では、原因変数の担い手が現象と反事実条件で全く異なるという主張を回避できず、また Kostić も主張しているように、数学的命題が偽である可能世界を論じることは意味論的な困難を伴う。このように、数学的説明を反事実条件の観点から肯定しようとすることは、存在論的に重たい課題となる。

以上のようにトポロジーという概念に訴えた説明が説明力を持つことを擁護するためには、片付けるべき課題がのこっている。一方で、Huneman が主張した制約を与える数学的事実という概念は、科学的説明を科学者が形成していく際の思考として、つまり科学における表象や推論についての機能の説明として、ある程度は説得的であると言えそうだ。次のセクションでは、Kuorikoski の主張との整合性を持たせつつ、Huneman の主張の長所を引き

出す議論の可能性について探ってみる。

3-2　形式的理解と構造的説明の接点

形式的理解は、Kuorikoski（2021）が提案した概念で、科学的説明における数学的事実の扱いや、そのほかの表象技術についての達成を、科学的説明の文脈から取り扱うために導入されたものである。Huneman の主張を、この形式的理解の概念から解釈するのが、このセクションおよび次セクションでの目標となる。つまり数学的事実は、科学的説明の説明情報そのものにはかかわらないが表象や推論において役割をはたしているとしたい。初めに、この形式的理解という概念について概観しよう。

彼は説明的証明という概念から出発する。それによると、数学的実体の局所的に変更することができる特徴的な性質に言及する証明は、どのような性質が差異メーカーであるかを示すので、それによって説明的であり、反事実条件的推論を可能にするという。ここでの反事実条件的推論は、科学的説明においてのものとは異なっており、現実世界に対して存在的な従属関係を持っているわけではない。そのうえで、局所部分を変化させることが可能な数学的性質に依拠する証明は、類似する数学的構造に一般化可能で、説明的でない証明と比べて「深い」証明であるということが出来る。

以上のような、数学における説明を踏まえたうえで、Kuorikoski の提案する形式的理解とは、推論システムと表象システムについての理解として定義される。特に推論システムについての What-if 推論能力、例えば相対性理論において用いられる数学的理論がポアンカレ群でなく、ド・ジッター空間だったとき、推論の様子は変わっていたか、というような推論の存在を Kuorikoski は強調している。ここで重要なのは、この形式的理解は現象と関連付けられることはなく、あくまで現象の表象と推論にかかわるものであるという点である。Kuorikoski は先述の通り、数学的概念が経験的事象を説明することはあり得ないという強固な主張をしている。しかし彼は、数学的事実について科学的説明における一切の意義を認めないというわけではない。むしろ形式的理解という枠組みからは、積極的に肯定しようとしている。Kuorikoski は、数学は表象と推論において重要な働きを持つが、それは数学的実体に対する存在論的なコミットメントを伴うものではないとしており、数学は説明従属関係を明らかにするときに必要とされるが、存在論的従属関係に入り込むことはないと主張している。

3-3　Huneman の主張との融合可能性

Huneman のメカニズムの制約という考え方は、以上の Kuorikoski の形式的理解という考え方で補強できる可能性がある。この可能性について、最後に簡単に述べておきたい。Huneman の主張によれば、数学的性質はメカニズムに対して、性質に違反しないような振る舞いをすることを要求する。そして、数学的性質はメカニズムと影響しあったりするわけではないともしている。ここで、この数学的性質による制約が、メカニズムそのものを存在的に従属させて制約しているというよりは、メカニズムについての科学者が行う研究を制約するものとして再解釈できる可能性がある。

中心極限定理の例を使ってこの提案を例示すると以下のようになる。

ある現象についての観測値がリンデベルグ条件を満たすとき、その観測値は正規分布に収束する。この場合には、「科学者が検討するメカニズム」は正規分布に収束するという制約を満たすように振る舞うことが要求される。なぜならば制約に違反するメカニズムは、現象の観測値に存在的に従属しないためである。

この例では、観測値という現象の性質について、深い理解を提供するのが数学的性質の役割になっている。これはまさしく Kuorikoski の提案した形式的理解で、Huneman の主張する数学的性質による制約の機能が実践されている。そのうえで、制約に違反することが、数学的性質に違反するのではなく、数学的性質を通して理解された現象の性質に違反するという形に変更した。これによって存在的従属関係の要件に違反することなく、Huneman が提唱した数学の説明的役割を機能させることが出来る。

また、このようにして形式的理解の概念を基に構造的説明を検討することは Kostić による批判を回避することにもつながる。Kostić による批判は 3 点あったが、順にみていこう。1 点目の現実と数学的事象との関係性の不透明性については、数学的事実を説明を助ける役割に限定することによって、数学的事実を現実と関連付けないようになるため回避できる。説明においての中心的役割を果たすのは、経験的事実であるためだ。続いて数学的反事実条件について。これも、現象から切り離された数学的議論の中で行われるぶんには、存在論的課題を生じない。最後に残された、数学的事実の持つ必然性が強すぎるという課題も、数学の働きを「現象を解釈する枠組みを与える」と限定すれば、許容できるものにできる見込みがある。

一方で、Huneman や Kostić のようなトポロジー的説明の独自性を擁護する哲学者が、このような主張に賛成するのかといえば、そうではない可能性も高い。彼らは数学的性質が、現象の説明であることを擁護しているのであって、現象についての表象や推論を説明するものであることを望んでいるわ

けではないためだ。今回論じたのは、1つの可能性であり、トポロジー的説明の存在論的議論が成熟すれば、数学的性質のみに依拠した説明を擁護できる可能性はある。もっとも、その場合は数学的説明についての Kuorikoski 的懸念の払拭が必要であることは、言うまでもない。

(4) 今後の展望

本稿では、トポロジー的説明について概観したうえで、現実の現象を説明するための説明可能性に課題があることを指摘し、Kuorikoski の形式的理解の概念を踏まえて、その長所を生かすための可能性について論じた。トポロジー的説明が持つ長所は2章などで見てきた通りで、Huneman が主張した大胆な捨象や、広範な包括性などは、非常に目を引くものである。トポロジー的説明のもたらしたこの新しい視点は、構成論的に行われる理論形成やモデル形成における、科学者の認識論的活動についての枠組みとして有意義なものであると思う。そのうえで、現実の現象との関連付けにおける課題を、形式論的理解というアプローチで解決することが出来れば、その価値を大いに生かせるだろう。

今後の課題としては、本稿で述べたような「構造的説明が科学者の検討を手助けする」というケースを、具体的な事例を通して研究し、より実態に即したものにしていく必要があるだろう。また、科学的説明における「数学の形式的理解」説がどれほど哲学的批判に耐えられるかを、概念的分析、実践的分析の両面で今後さらに見極めていく必要がある。

(5) 注

注1：ニュートラルスペースは、RNA についてのニュートラルネットワークの議論から発展する形で行われているが、本稿では紙幅の都合上省略している。詳しくは Huneman（2010）を参照されたい。

(6) 参考文献

Huneman, P., 2010, “Topological Explanations and Robustness in Biological Sciences.”, *Synthese* 177 (2), 213–45.

Huneman, P., 2017, “Outlines of a Theory of Structural Explanations.”, *Philosophical Studies*, no. 1984, 1-38.

Huneman, P., 2018. “Realizability and the Varieties of Explanation.” *Studies in History and Philosophy of Science Part A 68 (April)*: 37–50.

Kostić, D., 2022, “Topological Explanations An Opinionated Appraisal”

Scientific Understanding and Representation, 261-279.
Kuorikoski, J., 2021, "There Are No Mathematical Explanations", *Philosophy of Science*, 88, 189-212.

（北海道大学）