

博論要旨

タイトル：Model Relative Emergence in Physics

氏名：森田紘平

物理学の哲学における重要なテーマの一つが創発現象である。いわゆる物性物理学において、ミクロな構成要素の挙動によっては説明できない、マクロあるいはメゾスケールの現象が知られている。この創発という概念は科学哲学の文脈でも議論され、標準的には還元の失敗として特徴付けられている。一方で、物理学における創発の諸々の事例においては、還元が成功しているとされることも多い。本論は、現代物理学の創発の使用、および、これまでの科学哲学の蓄積を踏まえて、妥当な創発の定義とは何かという問いに取り組んだ。

まず、第2章において、伝統的な科学哲学における研究を整理し、さらに、物理学の哲学において創発であるとされる事例をモデルの役割という観点から分析することで、モデルに相対的な創発概念の定義を与えた。科学哲学における、創発と還元の代表的な定義は Nagel によって与えられている。彼の定義では、理論間還元をある二つの条件を満たす命題間の関係と定義し、創発をその定義を満たさない関係と定義される。科学理論一般に関する定義を提示した Nagel に対して、物理学の哲学者によって、より物理学の実践に即した還元と創発の定義を試みている。特に着目されたのは、数学的極限の重要性である。極限をもとにした創発・還元を定義することで、実際の物理学のより詳細な事例を適切に取り扱うことができる。この極限に基づく方針を含め、創発は伝統的に二つの概念によって定義されてきたと言える。第一が、新規性 (novelty) である。例えば、高いレベルの理論が、低いレベルの理論にはない性質を示した際に、新規性があると言える。第二が、自律性 (autonomy) である。高いレベルの理論は、低いレベル理論に対してなんらかの自律性があると言われている。このような理論間関係としての創発・還元を特徴付ける方針に対して、物理学の詳細な事例を反映した還元の定義を与えるためにはモデルを中心とした分析が重要であるという指摘がなされている。この発想をもとに Rosaler は、二つのモデルが示す挙動の間に近似的な対応関係があれば、それは還元的であると言えるという定義を提示した。これを「モデルに相対的な還元」と呼ぶこととすると、本論の目的は「モデルに相対的な創発」の定義を与えることにある。

定義を与えるにあたって、創発を伝統的に特徴付けてきた自律性と新規性という概念に着目した。物理学における事例の検討を通じて、モデル間の関係として創発の定義を与える際に、その事例についてすでにモデルの哲学の観点から行われた研究を応用した。本論で着目したくりこみ群 (RG) の事例はミニマルモデルと呼ばれる特徴的なモデルを導いていると指摘されている。このミニマルモデルの特徴を明らかにすることで、創発概念をモデル間の関係として定義した。ミニマルモデルの特徴は、系の詳細を無視することで多くの対象に共通する性質が説明できる点にある。多くの対象の性質を一度に説明することが可能であり、さらに、その際、ミクロな系の詳細は無関係であるという性質は自律性と呼べる。一方

で、多くの系に共通する性質を一度に説明することができるという性質は、然程、特徴的ではないように見える。例えば、生物統計学におけるロトカ=ヴォルテラモデルは様々な捕食者と被食者の関係を一度に説明することができるモデルである。つまり、一般的なロトカ=ヴォルテラモデルは、系の具体的な詳細とは無関係に、一般的な性質を示すことができる。その意味で、このモデルは具体的なモデルに対する自律性を持っていると言える。このようなモデルを一般化モデルと呼ぶこととした。ミニマルモデルには新規性があるが、一般化モデルには新規性がないと言える。つまり、個々の対象系のモデルが示す性質と同じ性質を一般化モデルは示し、その意味で新規性がない。しかし、低いレベルのモデルでは導くことができない性質をミニマル・モデルでは示すことが可能である。この意味で、低いレベルに対して新規性があると言える。このようなモデルの分類をもとに、モデル相対的な創発を特徴づける新規性と自律性を次のように定義する。

1. 新規性：ある対象系の高いレベルのモデルでは導出できるが、同じ対象系の低いレベルのモデルからは導出できないような性質が少なくとも一つ存在する。
2. 自律性：高いレベルのモデルの性質が、低いレベルのモデルの詳細とは無関係である。ここで、高いレベルのモデルとはミニマルモデルや一般化されたモデルのことを指し、低いレベルのモデルとは、具体的な対象系を表現するようなモデルを指している。

このように定義されたモデル相対的な創発を実際の事例に応用することで、その妥当性を検討した。第3章では量子論と古典論の關係に着目し、実際に、何が量子的領域から創発していると言えるのかを検討した。量子力学の哲学における典型的な課題として解釈問題があり、様々な解釈が知られている。それぞれの解釈は、量子力学と、古典力学ないし日常的経験の間の關係を埋めようとするものである。一方で、解釈とは独立に両領域の關係も検討されてきた。したがって、量子力学と古典力学の關係を解釈に関するものと、解釈とは独立な事例に分けて検討する必要がある。解釈とは独立な論点としては、量子論の中で生じる創発としてのエンタングルメントの事例、さらに量子力学と古典力学の關係については量子古典対応がある。典型的な量子力学と古典力学の対応を与える手法としてはエーレンフェストの定理がある。しかし、ある特定の状況でなければ、古典力学の性質を導くことができず、一般には古典的性質を導けない。また、その特定の条件下でもあくまで近似的に古典的であると見做すことができる性質が導けるに過ぎない。解釈に訴えずに、量子力学と古典力学を關係づけるもう一つの重要な手法はデコヒーレンスである。デコヒーレンスとは、対象系と、対象系を除く外部系（環境系）との相互作用によって、全体系としては干渉作用が消えるような現象を指す。これは、ある量子的性質が、マクロなレベルでは観測にかからないことを保証しているが、デコヒーレンスは古典的性質の創発を否定するものではない。デコヒーレンスが可能にするのは、マクロなレベルで量子現象が生じないことを正当化することであって、量子的な領域から古典的な性質を導くものではない。そのため、デコヒーレンスは古典的性質の創発を含意すると言える。デコヒーレンスのより現代的な形式としては、デコヒー

レンス・ヒストリーと呼ばれる方法論が知られている。確かに、デコヒーレンス・ヒストリーによって、準古典的性質は量子論の範疇から導くことができる。しかし、エーレンフェストの定理の事例と同様に、準古典的性質は、近似的な古典的性質に過ぎず、準古典的性質から古典的性質を導くことはできない。このことから、古典的領域は創発的であることを示した。

一方、量子力学の解釈も量子的領域と古典的領域との関係を与えようとするものである。量子力学の諸解釈は、観測問題を解決する立場と、問題そのものを解消する立場に分類できる。いわゆる、崩壊解釈と隠れた変数解釈が観測問題の解決を目指す立場である。本論では特に、崩壊解釈として GRW 理論、隠れた変数解釈として Bohm 力学を検討した。どちらの立場においても、経験的な予測と量子力学との対応関係を与えるために、local beables と呼ばれる対象を仮定する必要があることが指摘されてきた。さらに、より一貫した形而上学的描像を与えるために Primitive Ontology と呼ばれるこの世界の全ての対象の構成要素となるような存在がそれぞれの解釈に要請された。しかし、Primitive Ontology と呼ばれているような、極端な存在論的对象を仮定したとしても、古典力学の基礎方程式を、GRW 理論あるいは隠れた変数解釈から導くことはできない。このことから、これら二つの解釈において古典的領域は創発であると言える。一方で、観測問題を解消する立場の代表的なものは多世界解釈である。これは、この世界に実在するものは全て量子的なものであるとする立場である。しかし、量子的でないものが実在しないとするような立場ではなく、古典力学を含む我々の日常的な対象は副次的な実在であると考えられる。その際、多世界解釈で重要な概念となるのがデネット的パターンであり、諸科学にとって便利なものはパターンとしての実在するとされる。このアイデアを提示した Wallace は準古典的領域が創発的パターンであると主張し、準古典的領域が創発的パターンであるので、必然的に古典的領域もまた創発的パターンであると論じられる。しかし、準古典的領域は創発的パターンであるとは言えない。なぜなら、準古典性は量子開放系であれば十分に導出可能であり、創発の定義を満たさない。従って、そもそも準古典的領域は、量子論の範疇にあるというべきであり、創発でもパターンでもない。一方で、準古典的領域から古典的性質は導出できないことから、古典的領域は創発的である。このことから、多世界解釈においても古典的領域は創発であると言えるだろう。以上から、解釈に訴えたとしても、古典的領域は創発的であることを示した。

第 4 章では熱力学と統計力学の関係を検討した。特に熱力学的現象である相転移は、創発の典型的な事例であるとされてきた。統計力学において相転移現象を記述しようとする、この世界の系が有限であるにも関わらず、極限を取らなければならない。つまり、相転移は熱力学と統計力学の間の不連続性をあらわにしており、そのため創発の事例であるとされてきた。しかし、近年では、相転移を含む臨界現象についての理論的な理解が進展しており、その中でも RG によって、多様な相転移現象が説明されている。

この RG もまた、物理学における創発を含意していると主張されている。RG はある種の極限を念頭においていることから、創発的と論られている。しかし、極限が現れることが直ちに創発的であることは導けない。RG が創発を含意しているとするもう一つの根拠として、対象系を記述するモデルを粗視化するプロセスを RG が含んでいることが挙げられる。粗視化のプロセスは、あくまで記述の仕方を変更するものに過ぎないにも関わらず、このプロセスを経ることで元々の統計力学のモデルでは説明することができなかった経験的な事実を説明できる。しかし、粗視化のプロセスという点に着目するならば、RG を持ち出す事もなく、スケール理論に置いて十分に形式化されている。そこで本論ではスケール理論に着目し、多様な対象系の臨界現象を特徴付けている Rushbrooke 不等式の事例を検討した。熱力学では、不等式の形でしか導出できないが、数値計算や実際の実験から等式が成り立つことが知られていた。一方で、統計力学のミクロで詳細なモデルでは、この不等式を導出することができない。しかし、このミクロな統計力学的なモデルを粗視化することで、熱力学のモデルでは導けない Rushbrooke 等式を導くことが可能である。この粗視化のプロセスを形式化したものがスケージング理論と呼ばれる。この事例が示しているのは、粗視化後のモデルと熱力学のモデルの関係は創発ではないということである。なぜなら、等式から不等式を導出することが可能であるからである。しかし、この事例が創発ではないということではない。統計力学に着目すると、粗視化前のモデルと粗視化後のモデルがあり、両者の関係は創発であると言える。粗視化前のモデルでは導くことができない性質が、粗視化後のモデルでは導くことができるためである。そのため、全体としてミクロな統計力学とマクロな現象論的な熱力学の間は創発であることを示した。

以上、モデルに相対的な創発を定義した上で、量子力学と古典力学の関係、熱力学と統計力学の関係という二つの事例を検討した。これらの事例を通じて、本論で提示した創発の定式化の有用性を確認した。さらに、この事例の検討を通じて、明らかになったことは、創発か否かが問題となっているような事例では、創発は二項関係ではなく三項関係となっていることである。量子力学と古典力学の事例では、準古典的領域が本質的な役割を果たしている。同様に、統計力学のモデルと熱力学のモデルの事例では、粗視化された統計力学的なモデルが重要である。このようなモデルを中間的な intermediary モデルと呼ぶこととした。高レベルのモデルと低レベルのモデルを比較する際には、中間的なモデルが必要である。この中間的な領域にあるモデルの役割は非常に限定的で、この中間的な領域は上下の領域との関係を与えるためだけに提示されているに過ぎない。さらに、準古典的なモデルも粗視化後のモデルも、あくまで理論的な措定物に過ぎない。基礎的な領域について実在論的立場をとるならば、これらの中に位置するモデルの役割を検討する必要がある。このように、モデル相対的な創発の定義をもとに分析することで、定義の妥当性だけでなく、中間的な領域の重要性も明らかになった。